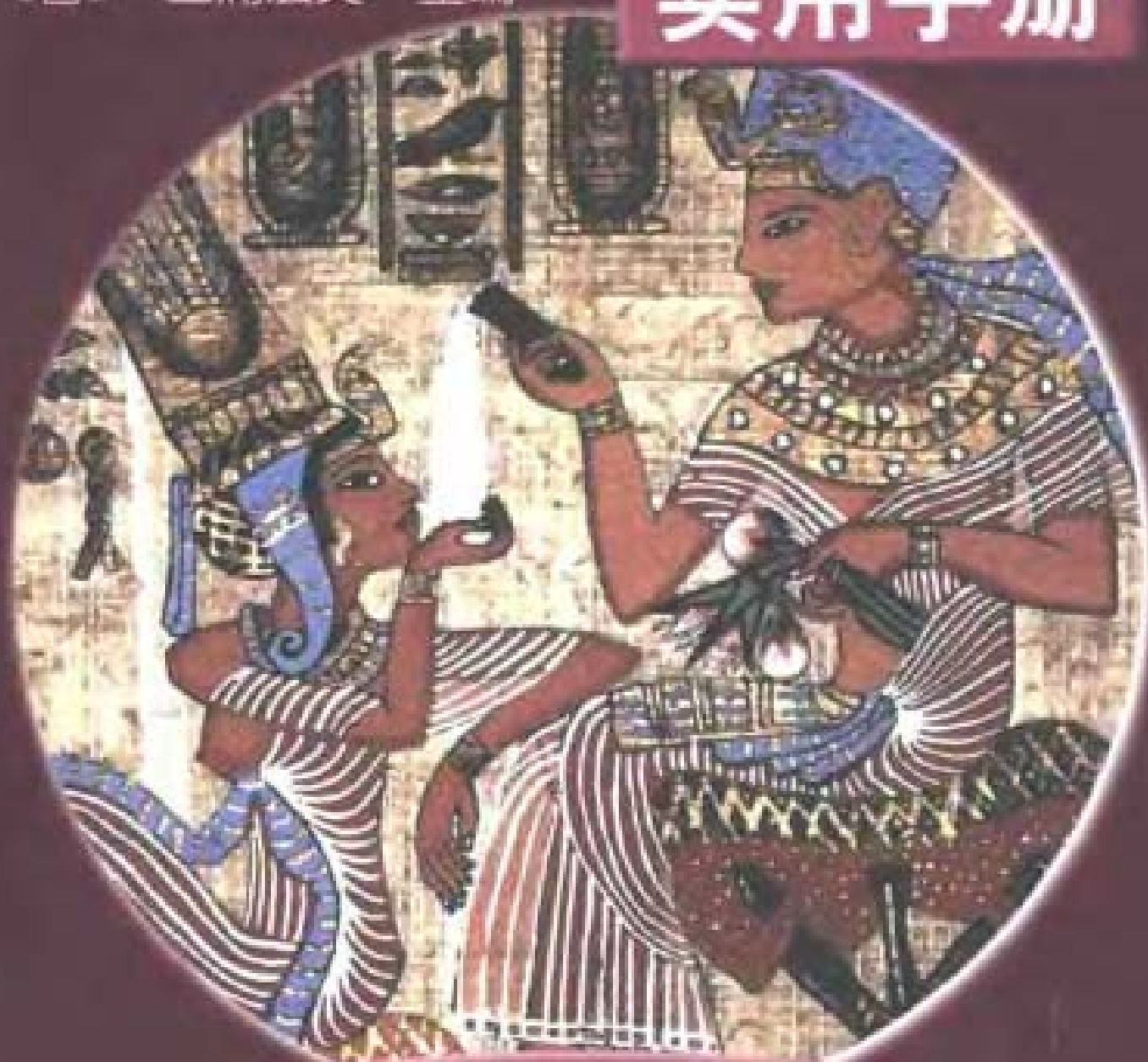


OHM handbook 3

# 机电一体化

〔日〕 三浦宏文 主编

实用手册



科学出版社 OHM社

(TN-0335-0101)

责任编辑 赵丽艳 樊友民

责任制作 魏 谨

封面设计 李 祥

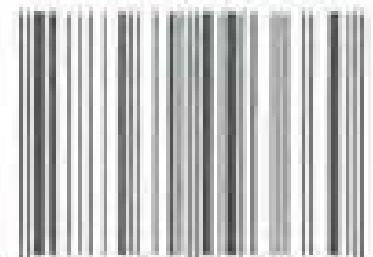
## OEM Handbook

### 丛书特点

- ★ **方便选择学习** 各章内容相对独立, 可根据需要选择学习
- ★ **提高学习效率** 模块式的编写方式, 有利于提高学习效率
- ★ **满足不同要求** 系统性强, 从基础知识到实际应用
- ★ **即查即用** 涵盖应用基础、应用知识及国外语专业介绍实用知识
- ★ **易掌握重点名词** 重点名词标注在正文右侧, 便于查阅, 书末给出索引
- ★ **便于学习** 丰富、清晰的图表, 快速理解相关内容
- ★ **知识面广** 涵盖工程领域各方面, 既有基础知识, 也有先进技术指示



ISBN 7-03-009366-6



9 787030 093660 >

ISBN 7-03-009366-6/TN · 335

定 价：38.00 元

TH-39

11

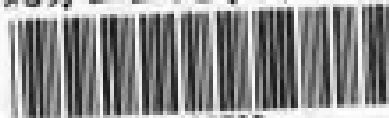
OHM *handbook* 3

# 机电一体化

实用手册

〔日〕三浦宏文 主编  
赵文珍 王益全 译  
刘本伟 杨晓晖

北方工业大学图书馆



00490738

科学出版社 OHM社

2001

H1D41/11

**图字:01-2000-3669 号**

Original Japanese edition

Handybook Mechatronics

by Hirofumi Miura et al.

Copyright © 1996 by Hirofumi Miura

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese language edition is co-published by Ohmsha, Ltd. and Science Press.

Copyright © 2001

All rights reserved.

本书中文版版权为科学出版社和 OHM 社所共有

**ハンディブック メカトロニクス**  
三浦宏文 オーム社 1998年第1版第4刷

**图书在版编目(CIP)数据**

机电一体化实用手册/[日]三浦宏文主编;赵文珍等译. -北京:科学出版社,2001  
(OHM hand book 3)

ISBN 7-03-009366-6

I. 机… II. ①三… ②赵… III. 机电一体化 IV. TH39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 25728 号

北京东方科龙电脑图文制作有限公司 制作

**科学出版社 OHM 社 出版**

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2001 年 8 月第 一 版 开本: A5(890 × 1240)

2001 年 8 月第一次印刷 印张: 15 3/4

印数: 1—5 000 字数: 473 000

**定 价: 38.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

# 译者前言

机电一体化是涉及机械、电气、电子、控制工程、信息和计算机技术等学科的综合性学科,是工业技术的重要发展方向。许多领域通过应用机电一体化技术,取得了技术和产品更新的显著成果。21世纪的青年学生将更加热衷于机电一体化技术的学习和研究。

《机电一体化》(实用手册版)一书面向机电一体化的初学者和具有中等技术水平的读者,全面叙述了机电一体化的相关技术和应用实例,是一本较好的教学参考书和从事机电一体化工作实践的工具书。本书的主要特点是内容丰富、循序渐进、叙述精练、图文并茂、易读易学,书中引用的大量实例紧密结合实际,具有很高的参考价值。

翻译分工具体如下:赵文珍翻译第1章、第2章;王益权翻译第5章、第7章、第8章、第9章;刘本伟翻译第4章、第6章;杨晓晖翻译第3章、第10章。译稿全部由赵文珍统一校订。为了保持原文的风格,译文中直接采用了原文的图表和版式。在翻译过程中,对原文中的个别错误进行了修正,对第10章的一些与机电一体化学习无关的内容作了必要的删节。由于译者的水平有限,时间仓促,译文中难免存在不足和纰漏,敬请广大读者批评指正。

## 主编的话

作为一名研究人员,我一直在思考着如何能够使只不过是一种机器的机器人具有人类的思维能力,并以此为目标进行研究开发。但是,所开发的机器人最多只能模仿人的动作,距离能够独立思维和动作还相差甚远。

如果机器人能够与生物很相似,就可以认为是智能化的机器人。利用高性能的计算机软件虽然可以实现巧妙的运动,但这种方法受到计算机本身能力的限制。这一障碍得到突破时,就会出现能够像昆虫那样运动灵活、充满生命活力的机器人。现在,正是这种想要制造出具有生命活力的机器人的愿望在推动着我的研究工作。

我将来的梦想就是制造出像昆虫那样,具有十万个脑细胞,能够运动自如的机器人。

虽然无法预测将来的技术会发展到什么程度,但可以确切地说,技术的发展是靠梦想来推动的,梦想实现的程度越高,社会发展就越快。在设想未来的世界和日本时,多一些对科学技术的梦想是非常重要的。

机电一体化及其应用技术,是精密机械方面的机构学与电子技术相融合的产物,在计算机控制技术的带动下,各种各样的梦想逐渐变成了现实。

在日本,照相机技术和机器人技术处于世界领先地位,今后还期待着从融入网络技术的多媒体技术到宇宙技术等各个方面出现更多的新的梦想和故事。

在这本以手册形式出版的书中,为了启发这些梦想,认真收集和整理了从基础知识到实际应用的内容,并进行了解释。

希望将在21世纪展翅翱翔的青年读者们,能够通过本书学好机电一体化的基础知识,反复学习,深入理解,为将来的发展奠定基础。

三浦宏文

# 有关本书

ADVICE

## / 本书的构成 /

(1) 全书由 10 章 124 节构成。各节内容相对独立,均可独立作为手册使用。因此,不管从哪一节开始阅读都能很好地理解。

(2) 各节按【要点】、【解释】的顺序通俗易懂地讲解,必要之处还设置了【相关知识】。

**【要点】** 在每一节的前头,对该节题目的结论进行概要的叙述。

**【解释】** 设置了一系列醒目的小标题(带有●记号的标题),对【要点】的内容进行详细的说明。

**【相关知识】** 对与本节题目相关的事项和关键词作扼要的说明。

(3) 为了在短时间内了解每一节的内容,只要读懂【要点】,就可以迅速理解该节的知识。

## / 图、表的使用方法 /

(1) 为有助于理解内容,书中安排了约 500 张照片、图及表。在照片和图中适当地加了简单易懂的说明。

(2) 若技术人员熟练地掌握了书中引用的图例,则在阅读资料时就会发现它能起到很大作用。

## / 关键词的查询 /

(1) 文中的重要名词,用黑体字书写在每页的左侧。

(2) 重要名词以索引的形式列在书末,因此本书可当作工具书灵活使用。

## / 选择性标题与本书所附资料 /

(1) 与各节题目相适应,有选择性地设置了下列项目:

- 【例题】** 为了帮助理解,设置了易懂的例题。
- 【应用基础】** 介绍有关实际应用的有用信息。
- 【应用知识】** 拓宽知识面,介绍培养应用能力的內容。
- 【必备知识】** 介绍重要公式、术语及基本的思考方法等。
- 【选修知识】** 介绍便于默记并灵活应用的内容。
- 【研究课题】** 展望将要发展的新技术等。
- 【篇外话】** 介绍有兴趣的相关话题或尖端技术话题。

(2) 在本书的正文前后给出了机电一体化全貌的图和表。因此,本书各章节题目处在怎样的位置就变得一目了然了。

## / 机器人竞赛 /

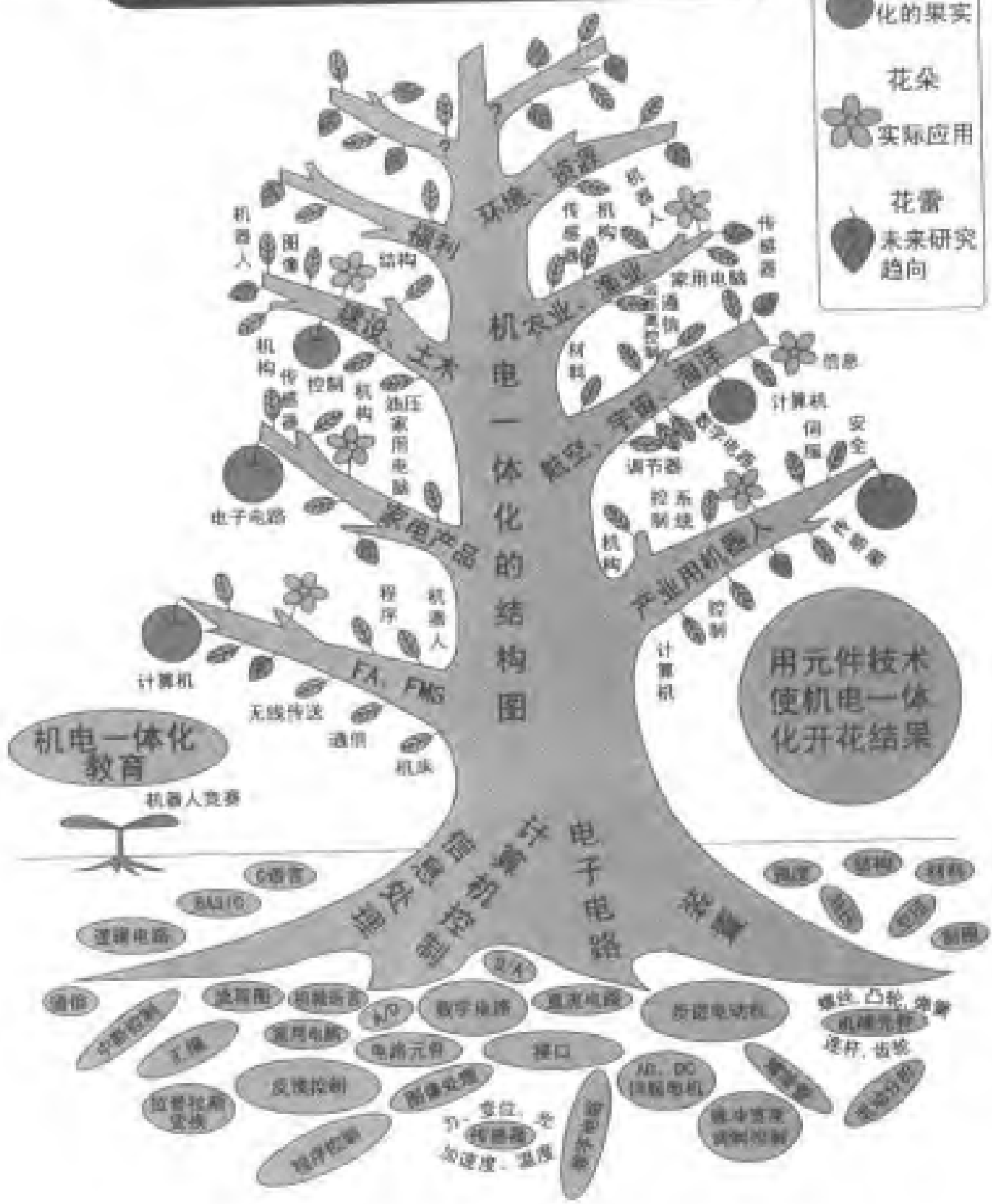
(1) 为了引起读者对机电一体化技术的亲切感和兴趣,本书的第10章按职业中专、专科、高等职业专科的顺序,介绍了参加“机器人竞赛大会”的获奖学校的经验和体会。

(2) 希望全国的同龄学生能够关心并积极参加所在学校和地区举办的竞赛。



# 机电一体化在经济、生活中的作用 产品的精度化、高性能化

-  果实  
机电一体化果实
-  花朵  
实际应用
-  花蕾  
未来研究趋向



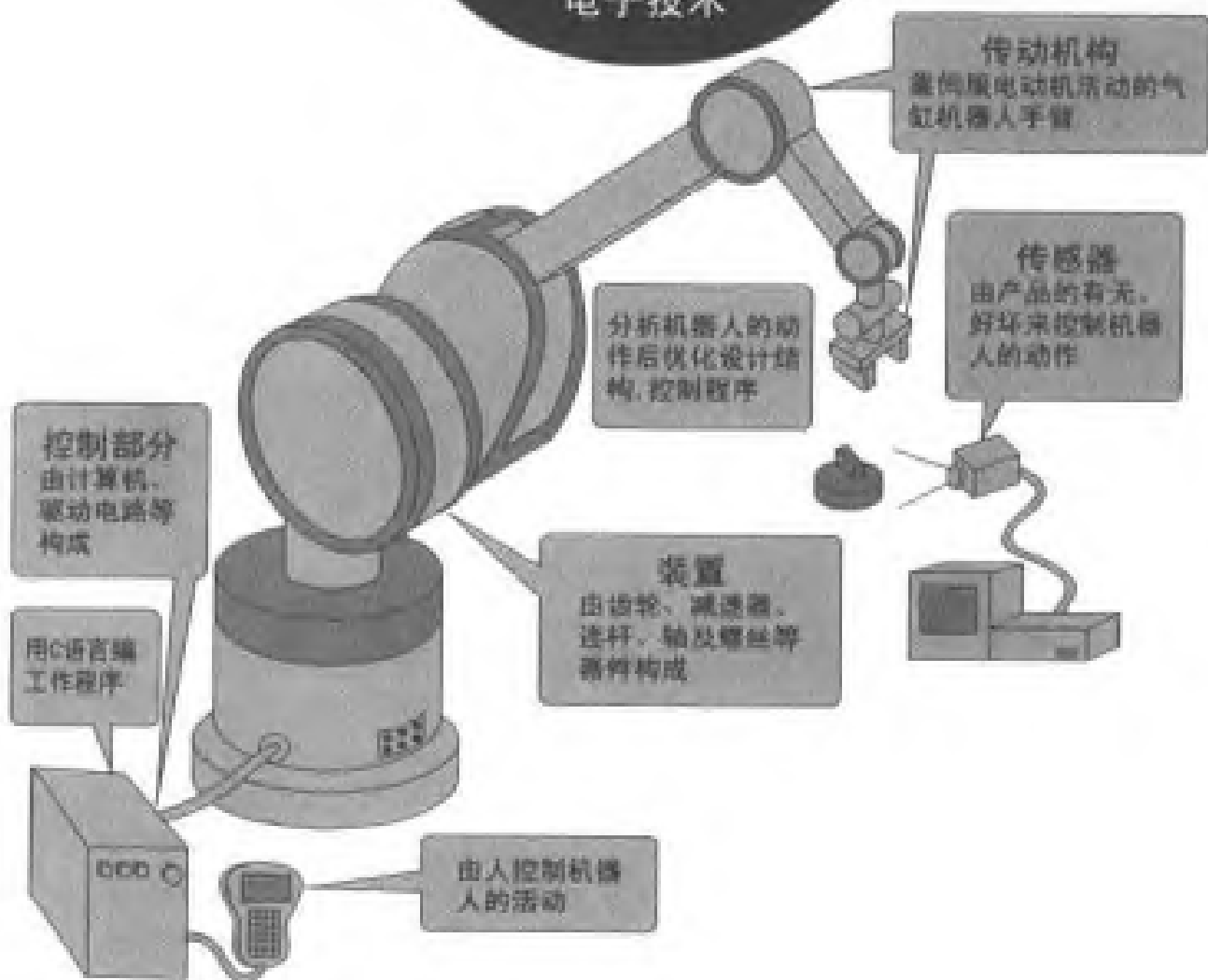
# 机电一体化在机器人中的应用

计算机控制

机电一体化

机械学

电子技术





## 内 容 简 介

本书为OHM实用手册系列之一。该系列共五册，分别对各学科基础理论知识、典型应用及最新发展动态进行归纳，配以简明准确的讲解。其内容简洁、精练，重点突出，把握整体，阐明概念，为现场工程技术人员提供必要的知识支持，应用范围广，参考价值高，是一套很有特色的工具书。

本书内容主要包括机电一体化的基础知识、机械零件与机构、传感器技术、执行装置技术、计算机技术、机械电子系统控制，以及机器人技术、机电一体化实践、机器人竞赛等。并在每页左侧列出本页的专业术语，便于读者检索查阅。

本书主要读者对象为喜爱机电一体化科学、有兴趣探索奇妙的机电一体化世界，并有志于从事机电一体化技术、科研工作的青年读者。对于目前活跃在生产第一线的技术人员，也不失为一本极有实用价值的工具书。

HD41/11

## 译者简介

### 赵文珍

1982年 沈阳机电学院机械系机械制造专业毕业

1984年 沈阳机电学院机械系机械制造专业硕士毕业

1987年~1988年

日本横浜国立大学工学部生产工学科访问学者

现在 沈阳工业大学机械工程学院教授

### 王益全

1969年 哈尔滨工业大学电机专业毕业

现在 沈阳工业大学电气工程学院教授

### 刘本伟

1984年 沈阳机电学院半导体专业毕业

1987年 沈阳工业大学电子仪器专业硕士毕业

现在 沈阳工业大学电子信息与工程学院讲师

### 杨晓晖

1983年 沈阳机电学院铸造专业毕业

现在 沈阳工业大学机械工程学院讲师



北京东方科龙图文制作有限公司 制作

[www.okbook.com.cn](http://www.okbook.com.cn)

# 目 录

## 第 1 章 机电一体化

1 什么是机电一体化 .....	2
2 机电一体化的作用 .....	3
3 机电一体化系统 .....	5
4 机电一体化的相关技术 .....	7
5 机电一体化技术的展望 .....	10

## 第 2 章 机电一体化化的基础知识

1 机械基础 .....	14
2 力、功和功率 .....	16
3 材料力学基础 .....	20
4 机械零件基础 .....	28
5 机械制图基础 .....	31
6 反馈控制与顺序控制 .....	39
7 反馈控制系统的构成 .....	41
8 反馈控制系统的特性 .....	44
9 顺序控制基础 .....	47
10 直流电路基础 .....	49

11	磁场与电场基础	52
12	电路元件的功能	57
13	逻辑电路的结构	65
14	计算机基础	72
15	程序流程图的绘制	74
16	硬件基础知识	77
17	软件基础知识	79
18	ROM 的固化过程	82

### 第 3 章 机械零件与机构

1	机械运动及坐标系	86
2	螺纹的原理与应用	89
3	弹簧及其作用	95
4	轴和轴承及其工作原理	97
5	联轴器及其用途	104
6	制动器及其用途	106
7	齿轮原理及其分类	108
8	齿轮机构	112
9	柔性传动机构	115
10	连杆机构的相关技术	119
11	凸轮机构的相关技术	123

### 第 4 章 传感器技术

1	力传感器	128
---	------	-----

2	位移传感器	132
3	位置传感器	136
4	速度传感器	141
5	加速度传感器	146
6	距离传感器	150
7	光敏传感器	154
8	磁敏传感器	158
9	温度传感器	162
10	湿度传感器	166
11	气敏传感器	168
12	化学传感器	170
13	语音识别	172
14	智能传感器	174

## 第5章 执行装置技术

1	什么是执行装置	178
2	什么是步进电机	180
3	步进电机的励磁方式	182
4	步进电机驱动电路	184
5	步进电机控制电路举例	187
6	采用步进电机专用 IC 芯片的控制电路举例	189
7	什么是直流电机	194
8	直流电机的起-停控制	196
9	直流电机的线性控制与 PWM 控制	199
10	直流电机的线性控制电路举例	201

11	直流电机的 PWM 控制电路举例	203
12	直流电机的正转、反转控制电路	206
13	螺线管的控制电路	211
14	交流伺服驱动	213
15	什么是液压执行装置	215
16	液压执行装置的工作原理	217
17	液压伺服系统	222
18	什么是气动执行装置	225
19	气动执行装置的工作原理	227
20	气动执行装置的控制	233

## 第 6 章 计算机技术

1	计算机控制	240
2	计算机的基本结构	242
3	中央处理单元(CPU)的功能及结构	244
4	存储器的种类及功能	249
5	输出口的功能	253
6	输入口的功能	255
7	输出接口电路的功能	257
8	输入接口电路的功能	260
9	动态显示的工作原理	263
10	矩阵式输入	265
11	D/A 转换器的种类及工作原理	267
12	A/D 转换器的种类及工作原理	270
13	中断处理的工作原理	275
14	中断方式输出	278



15	中断方式输入 .....	280
16	高级中断技术——并行处理 .....	282
17	程序语言的种类及特点 .....	285

## 第 7 章 机械电子系统控制

1	什么是系统模型 .....	288
2	拉普拉斯变换 .....	290
3	传递函数及其响应 .....	293
4	方框图 .....	296
5	稳态误差 .....	298
6	稳定性 .....	302
7	直流伺服电机 .....	307
8	液压伺服马达的模型 .....	311
9	顺序控制原理 .....	315
10	顺序控制中的逻辑电路 .....	318
11	逻辑电路的简化 .....	320
12	顺序控制举例 .....	322

## 第 8 章 机器人技术

1	机器人的种类与结构 .....	328
2	机器人的结构分析 .....	333
3	机器人的正运动分析 .....	338
4	机器人的逆运动分析 .....	342
5	机器人的驱动方式及控制 .....	346

6	机器人的操作	350
7	机器人的接口	355
8	机器人与视觉传感器	360
9	机器人与安全管理	366
10	未来的机器人	370

## 第9章 机电一体化化的实践

1	X-Y 工作台的制作	378
2	娱乐机器人的行走机构及其控制	382
3	娱乐机器人的上身结构与控制	388
4	双臂型装配机器人的开发举例	394
5	机电一体化教育系统	399
6	基于视觉传感器的产品检验	407
7	三指机器人手爪的结构与控制	413
8	CD 唱机的机电一体化技术	418
9	清扫作业的机器人	423

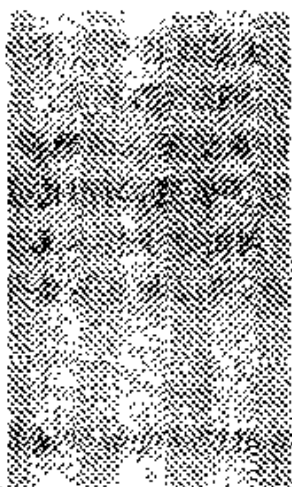
## 第10章 应用实例“机器人竞赛大会”

1	“相扑机器人”竞赛大会	430
2	“轨迹机器人”竞赛大会	436
3	机器人竞赛:职业中专篇①	439
4	机器人竞赛:职业中专篇②	443
5	机器人竞赛:职业中专篇③	447
6	机器人竞赛:专科篇①	452
7	机器人竞赛:专科篇②	457

8 机器人竞赛会:高等职业专科篇 .....	460
参考文献 .....	463
索引 .....	465

# 第1章

# 机电一体化



- 责任编委  
渡边嘉二郎
- 执 笔  
渡边嘉二郎

本章概述机电一体化，各节分别介绍机电一体化的定义、机电一体化的作用、成熟的机电一体化系统，以及机电一体化的基础知识和未来展望等内容，还将介绍一些相关知识、应用实例、简单例题等。

此外，还希望读者通过本章的学习，能够理解机电一体化与其它自动机械有什么关系，模仿和吸取了其中的哪些东西。

由于本章介绍的是关于机电一体化的基础知识，所以希望能够反复学习，在学习以后各章之后再返回来谈一遍，可以进一步加深理解。

# 1 什么是机电一体化

## □ 要 点

机电一体化就是“利用电子、信息(包括传感器、控制、计算机等)技术使机械柔性化和智能化”的技术。

## □ 解 释

机械  
电子

### ● 术语的来源

“机电一体化”(mechatronics)一词起源于日本,是由机械和电子的两个英语单词(mechanism)和(electronics)合成的一个新的专用名词。

### ● 目 标

顾名思义,机电一体化技术的目标就是将机械技术与电子技术相结合,充分发挥各自的长处,弥补各项技术的不足。

检测 控制

机械的强度较高,输出功率大,可以承受较大的载荷,但实现微小运动和复杂运动比较困难。而在电子领域,利用传感器和计算机可以实现复杂的检测和控制,但只利用电子技术无法实现重载运动。将机械技术与电子技术相结合,可以在重载条件下实现微小运动和复杂运动。

### ● 机械的柔性化和智能化

柔性化  
智能化

机械的柔性化和智能化指的是要使机械既能够像动物那样灵活动作,也能够像人类那样会思考判断。

### ● 机电一体化的例子

机电一体化产品中一定有运动机械,并且采用了电子技术使运动机械实现柔性化和智能化。机器人、微机控制型缝纫机、自动对焦照相机、自动对焦防颤型摄像机等都是机电一体化产品的例子。装有微型计算机的电视机和电饭煲等因为其工作原理在本质上是无运动的,所以不属于机电一体化产品。

## □ 相关知识

### ● 控制工程学

控制工程学及控制技术与机电一体化技术的目标是一致的,机电一体化是只研究与机械运动相关的控制技术,而控制工程研究的是更一般的控制技术,包括流体的流动、温度、压力等物理量的控制。

## 2 机电一体化中的作用



### 要点

采用机电一体化技术可以使产品达到如下效果:

- ① 使产品具有原来所不具备的功能。
- ② 产品的柔性(flexibility)增强。
- ③ 操作性能改善。
- ④ 容易满足多样性的需求。
- ⑤ 扩大设计的灵活性。
- ⑥ 生产工艺性改善。
- ⑦ 使产品的体积小、重量轻。
- ⑧ 减少产品的零部件数。
- ⑨ 可靠性提高。
- ⑩ 质量提高。
- ⑪ 节能省力。
- ⑫ 成本降低。



### 解释

传感器  
计算机  
控制信号  
执行装置  
软件

#### ● 开发机电一体化系统的特点

机电一体化技术的本质是将电子技术引入机械控制中,也就是“利用传感器检测机械运动,将检测信息输入计算机,计算得到能够实现预期运动的控制信号,由此来控制执行装置”,其中最关键的是“计算得到能够实现预期运动的控制信号”。这项工作就是开发计算机软件。软件开发就是研究计算机程序的内容,并通过键盘将程序输入计算机,不需要用螺栓和螺母来重新组装机械,只用电烙铁焊接电子线路或者修改程序就可灵活地改变机械的运动。在计算机上,利用适当的软件进行控制,无论如何复杂的运动都可以实现。正是因为机电一体化技术的这种性质,才使其能够产生上述的效果。

#### ● 新功能的扩展与柔性的增强

采用机电一体化技术的最大作用是:

- ① 扩展新功能。
- ② 增强柔性。

所产生的其它效果都是来源于这两种根本作用。



### 相关知识

#### ● 产品的定货制与机电一体化

产品的定货制(按照用户个人的特殊需求来制造和提供产品)

是一种更高级的产品供货方式。为了满足这种供货方式必须采取多品种小批量的生产方式。原来的大批量生产方式无法适应定货制的产品生产。机电一体化技术是生产定货产品的关键技术。

### ● 自动化的作用

机电一体化技术是自动化技术之一。自动化可以分为：

①过程自动化(PA,即处理流体、电气等连续体的系统的自动化)。

②机械自动化(MA,或称为工厂自动化,即对螺钉、螺母、电阻器、电容器等固体进行操作的系统的自动化)。

③办公自动化(OA,即对办公信息进行处理的地系统的自动化)。这些都是以实现自动化为目的。

机电一体化技术的主要目标是实现机械自动化(MA)。过程自动化(PA)处理的是连续体,通过阀门的开关就能够使系统运行,比较容易实现自动化。而要对固体进行操作的系统的自动化,必须对每个物体分别进行控制,所以技术上的困难较多。

过程自动化  
连续体  
机械自动化  
固体  
办公自动化  
信息

### ■ 例 题

□ 为什么微机控制型缝纫机是一个机电一体化的例子?

答

缝纫机是一种缝布的机器,在机器针上下运动的过程中将布缝到一起。通过机器针沿水平方向移动,可以实现多种缝纫方法。以前的缝纫机使用凸轮来控制水平方向上的运动。在微机控制型缝纫机上,将凸轮的信息存储在计算机中,由此来完成凸轮同样的工作。由于采用了计算机,就不需要一个一个地更换凸轮,可以在缝纫过程中利用软件来实现缝纫方法的变化,具有较高的柔性和智能性。

□ 为什么机电一体化系统具有柔性而又设计灵活?

答

在机电一体化系统开发的特点中可以找到这方面的答案。机电一体化系统开发的主要内容是计算机软件的开发。软件的开发需要的时间比较短,改变软件也比较容易。通过程序控制可以实现各种复杂的运动。所以系统具有很强的柔性,设计也比较灵活。

## 3 机电一体化系统

### 要 点

如图 1.1 所示,机电一体化系统与灵活性和智能性最强的人体相对应,由如下 5 个要素构成:

- ① 机械装置:能够实现某种运动的机构(相当于人类的骨骼)。
- ② 执行装置:驱动机械装置运动的部分(相当于人类的肌肉)。
- ③ 能源:为执行装置提供能量的部分(相当于人类的内脏)。
- ④ 传感器:检测机械运动的传感器(相当于人类的五官)。
- ⑤ 计算机:运动控制的计算和判断部分(相当于人类的神经和大脑)。

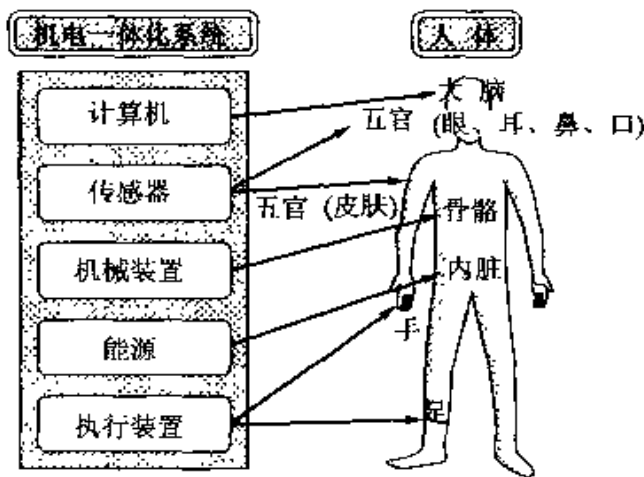


图 1.1 构成机电一体化系统的要素

### 解 释

#### ● 典型的机电一体化系统——机器人

机器人是典型的机电一体化产品。下面以图 1.2 所示的机器人为例来分析机器人的系统构成。

① 机械装置 机器人的手指、手臂、手臂的连接部分和机座等是使机器人能够运动的机械结构。

② 执行装置 驱动机座上的机体、手臂、手指等运动的电机和电磁铁等。

③ 能源 驱动电机的电源和驱动液压系统、气压系统的液压源和气压源。

④ 传感器 检测旋转角度和摆动角度的旋转编码器和旋转变压器等,用于监视机器人的运动。

电机

电磁铁

电源

液压源

气压源

旋转角度

摆动角度



计算机 根据来自旋转编码器或测速发电机的信号,判断机器人的当前状态,并计算和判断要达到所希望的状态或者移动到某一目标应该如何动作。

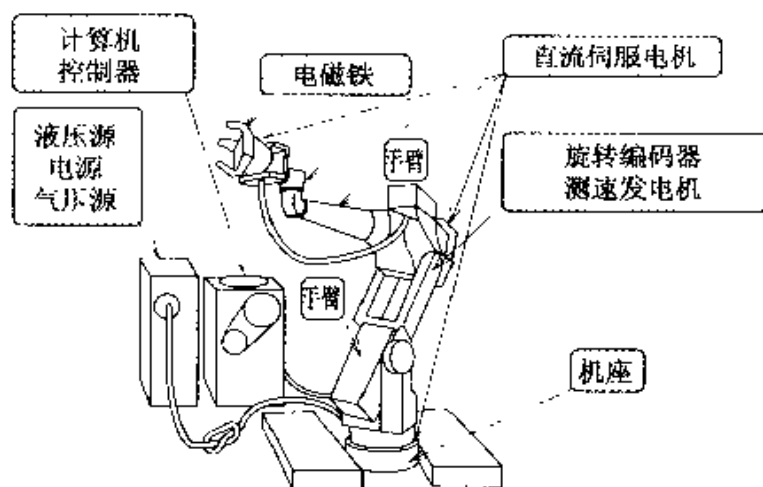


图 1.2 作为机电一体化系统典型例子的机器人

### ● 其它机电一体化系统

机器人是实现人类一部分技能的机械,很容易由上述 5 个要素与人体相对应。对于其它的机电一体化系统,如微机控制型缝纫机、自动变焦照相机、自动变焦防颤型摄像机等,只要存在机械运动就必然也包含这 5 个要素。

## □ 相关知识 ● 机电一体化系统的组成

在机电一体化系统中,上述 5 个要素构成了“计算机 → 执行装置(能源) → 机械装置 → 传感器 → 计算机”的信号闭环回路(closed loop)。这种信号流系统称为反馈系统。

有的机电一体化系统是由“控制器(控制专用计算机) → 执行装置(能源) → 机械装置 → 传感器 → 控制器”形成闭环控制,也有的机电一体化系统采用由高位计算机给出控制器指令的半闭环(semi-closed)控制方式,还有的机电一体化系统是由“计算机 → 执行装置(能源) → 机械装置 → 传感器”形成开环(open)控制系统。

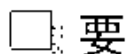
闭环

反馈系统

半闭环

开环

## 4 机电一体化相关技术



要

点

机电一体化系统由机械装置、执行装置、能源、传感器、计算机 5 个要素构成,机电一体化相关技术就是与这 5 个要素相关的硬件及软件(控制)技术。



解

释

### ● 机械技术

机械技术就是关于机械的机构以及利用这些机构传递运动的技术。下面以机器人为例进行分析。如图 1.3 所示,多关节机器人的手臂就是要实现人类手臂的同样功能。机器人就是将实现人类的腰、肩、大臂、小臂、手腕、手以及手指的运动的机械组合起来,构造能够传递像人类一样运动的机械。机械技术就是实现这种运动机构的技术。

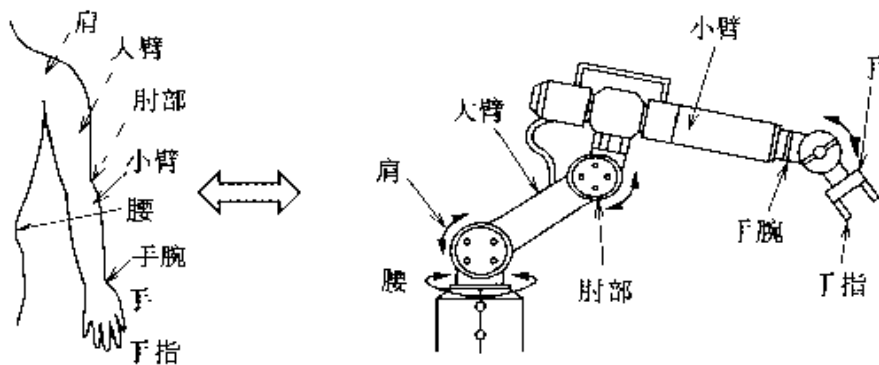


图 1.3 人的胳膊与多关节机器人构造对比

### ● 执行装置技术

动力源

电动机

要使机构运动,必须有动力源。这种动力源就是执行装置。执行装置有利用电能的电动机(包括直流电机、交流电机、步进电机和直线电机等)以及利用液压能量和气压能量的液压驱动装置和气动装置等。

电力电子

随着电力电子技术的发展,驱动电机的电力控制系统的体积越来越小,控制也越来越方便,对直流电机和交流电机都能够简单地实现高精度控制。可实现高速高精度控制是电机的一个重要特点。

气动执行装置利用工厂内的气源,是一种结构简单、使用方便的执行装置。要用这种执行装置实现高精度控制比较困难,但适用于对较轻的物体进行推拉等简单操作。

液压站

液压执行装置在修路工地上可以经常见到,推土机上驱动动力铲的装置就是液压执行装置,在机器人的手臂驱动装置中也经常采用。虽然需要液压站系统,但可以由简单的结构实现大功率驱动。

### ● 传感器技术

传感器按测试原理和被检测的物理量可以分为许多种。机械运动量主要有位移、速度、加速度、力、角度、角速度、角加速度、距离等,这些物理量可以转换成两极板间的电容量、应变引起的电阻变化、磁场强度与磁场频率变化、光与光的传播、声音的传播、Coriolis 力等其它物理量,最终转换成电压或者频率信号

分辨率 精度

传感器的主要指标是分辨率和精度,同时还要求在任何环境下都能够可靠的工作。

### ● 计算机技术

模拟信号

由传感器检测的机械运动信号一般都转换成与机械运动成比例的连续电压信号,这种连续信号称为模拟信号。模拟信号无法直接输入计算机。计算机内部能够处理的信号是数字信号,来自传感器的模拟信号必须经过 A/D(模拟/数字)转换器转换成数字信号才能够输入计算机。另一方面,要将计算机内的信号转换成模拟信号时,必须采用 D/A(数字/模拟)转换器。图 1.4 所示的是计算机与传感器和执行装置的连接框图。

A/D 转换器

数字信号

D/A 转换器

程序语言

在计算机内部,以传感器信号为基础,采用计算机语言来编制处理程序。计算机的通用程序语言有汇编语言和编译语言(例如 C 语言等),在机器人和数控机床上一般采用专用的程序语言。

### ● 控制技术

上述 4 个要素主要是关于硬件方面的技术,而控制技术可以说主要是软件方面的技术。但控制技术不是计算机语言及其管理方面的技术,而是考虑如何根据传感器信号使执行装置和机械装置很好的运动,并编制出能够实现这种目标的计算机程序的技术。

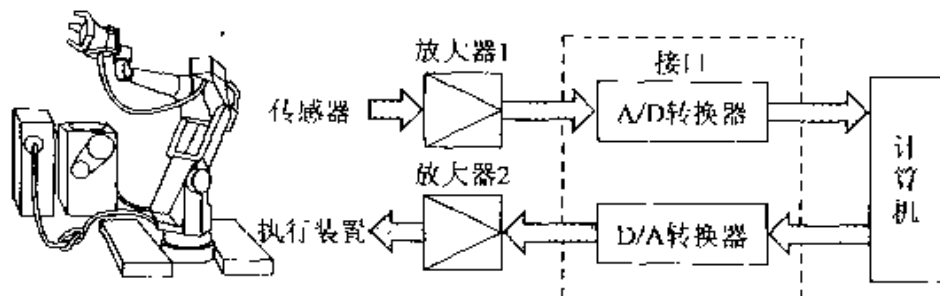


图 1.4 计算机与传感器和执行装置的连接

控制方法可以分为如下两大类:

- ① 顺序控制 通过开关或继电器触点的接通和断开来控制执行装置的启动或停止,从而对系统依次进行控制的方式。
- ② 反馈控制 被控制量为位移、速度等连续变化的物理量,在控制过程中不断调整被控制量使之达到设定值的控制方式。

## □ 相关知识 ● 与机电一体化相关的学科

支撑机电一体化技术的学科有如下几个方面:

- ① 机械工程学科 机械原理(机械运动学)、力学、机械零件
- ② 检测与控制学科 传感器、执行装置、控制理论、数字控制。
- ③ 电子信息学科 电子电路、信息处理、计算机编程。

## ■ 例 题

试说明机电一体化系统的组成。

**答**

机电一体化系统由第 1.3 节图 1.1 所示的 5 个要素组成。按系统信号回路形式可将机电一体化系统分为闭环、半闭环和开环三种类型。

## ■ 选修知识 闭环方式与半闭环方式

闭环方式和半闭环方式的机电一体化系统的机械运动精度高,抗外部干扰能力强,但运动速度较慢。而开环方式的机电一体化系统具有与闭环系统和半闭环系统恰好相反的特点,这种系统可以实现快速的机械运动,但精度较低,抗外界干扰能力较差。

## 5 机电一体化技术的展望

**要 点** 在 21 世纪,机电一体化技术将得到更大的发展。传感器的性能将进一步提高,对传感器信号的处理和判断的智能化程度将达到更高的水平,出现更高灵活性和自适应性的机电一体化系统。

**解 释** ● **传感器性能的提高**

高性能传感器应具有如下性能之一。

① **高精度传感器** 自身的检测精度高,对温度变化不敏感,抗噪声干扰。

智能化处理

② **智能传感器** 在传感器内部装有微型计算机,可以进行智能化处理。

组合传感器

③ **组合传感器** 将几个传感器组合成一体,形成能够检测单个传感器无法检测的高性能信息的传感器系统。

● **高智能化处理**

人工智能

高智能化处理就是像人的大脑一样,能够在一些基本知识的基础上对其进行合理的组合和判断。能够进行这种处理的软件称为人工智能软件。智能化处理过程就是将基本知识以知识库的形式存储在计算机的存储器中,自动提取与某一知识关联的知识数据,再将这些知识进行合理的推理组合。研究智能化处理的学科称为智能工程学。

智能工程学

● **自适应性**

机械在启动以后,不需要人的干预,能够自动的完成指定的各项任务,并且在整个过程中能够自动适应所处的状态和环境的变化。机械一边适应各种变化一边作出新的判断,决定进一步的动作。

自适应移动机器人

例如,自适应移动机器人通过自己的眼睛来观察所处的状态和环境,自动寻找目标路线,并沿着路线移动。

● **微型机械**

随着微细加工技术的发展,也出现了超小型的机械结构。例如,1mm 大小的电动机就是其中的一个例子。在必须进行微小运动的工作中,就需要利用这种超小型的机械来开发机电一体化系统。

## □ 相关知识 ● 移动机器人智能移动的实例

图 1.5 所示的是一个移动机器人的例子。在这个系统中包括传感器、移动机构、决策路径的计算机、移动控制器等部分,构成了完整的机电一体化系统。这种机器人被设计成智能型机器人,其中在计算机内部实现的知识库、路径规划、导向指令、移动导向等路径决策处理部分占了整个系统的一大半。

21 世纪的机电一体化系统将向这种“头脑发达”的方向发展。

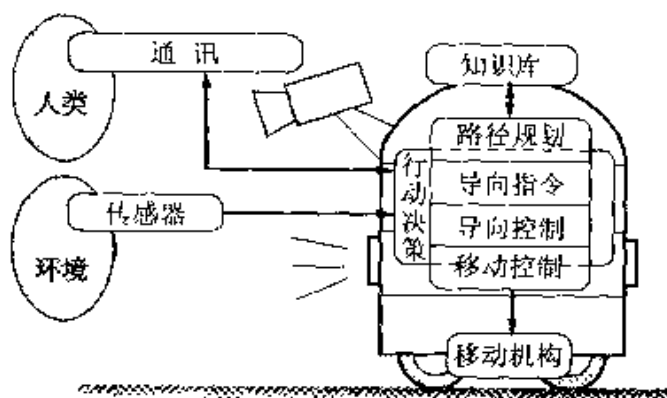


图 1.5 移动机器人的智能化行动决策

## ■ 例 题

要使机械具有自适应性,机电一体化系统的 5 个要素中的各要素必须具有何种功能?

答

在自适应方面最先遇到的问题就是如何能够掌握周围状态和环境的变化。要了解环境的变化,就需要传感器。而且了解环境需要考虑多种因素,所以只用一个传感器往往无法正确检测环境变化,必须用多个传感器从多方位进行检测,互相配合,并将各传感器的信号进行综合才能够获得确切的环境变化信息。这样,就要用到传感器组合技术

在适应环境的同时还要控制机械运动,因此必须有能够完成高智能化处理的计算机及其软件。这就需要有按人工智能原理设计的、能够代替人类进行思考的计算机系统。

1

1  
1  
1  
1

## 第2章

# 机电一体化 的基础知识



要学习机电一体化,必须全面学习机械、控制、电器、电子、信息处理等各方面技术。采取螺旋式分阶段提高的方式,平衡掌握各方面的知识,是学好机电一体化的有效途径。本章将引导读者进入第一个阶段。

本章内容分为“机械基础”、“控制基础”、“电气、电子基础”和“信息处理基础”四部分。为了能够使读者学好机电一体化的基础知识,选择了必要的最低限度的题目来进行解释说明。

为了能够很好地理解第3章以后的内容,读者应该熟练自己没有掌握的内容。在以后学习中如果遇到难以理解的内容,读者可以返回来重新学习本章的相关内容。

### ● 责任编委

久慈矩夫

### ● 执 笔

二浦正彦(1~5)

木村久幸(6~9,  
14~16)

大垣 博(10~13,  
17,18)



# 1 机械基础

## 要 点

机械就是将具有一定强度的物体组合起来,接受外界提供的能量,实现确定的相对运动,从而完成某些有效工作的装置。

机械由以下四个部分组成:

[1] 输入部分(原动机):接受能量、物质、信息的部分。

[2] 转换、传动部分(传动机):将接受的能量、物质、信息等传递给其它机械或者转换成其它形式的部分。

[3] 输出部分(工作机):直接完成指定工作的部分。

[4] 安装固定部分(机架):使机械上的各个部分保持确定位置的部分。

## 解 释

### ● 运动副

机械、仪器等都是由许多构件组成,各构件互相接触并相对运动。这种构件的组合称为运动副。

如图 2.1 所示,运动副可分为相对直线运动的移动副、相对转动的转动副和相对螺旋运动(在旋转运动的同时作直线运动)的螺旋副。

移动副  
转动副  
螺旋副

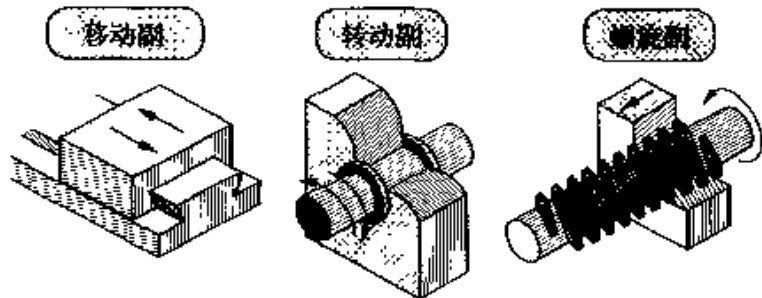


图 2.1 几种运动副的例子

### ● 机 构

机械由各种运动副组成,由此来依次传递运动。

以运动传递或运动变换为目的,由若干个运动副组成的具有确定运动的系统称为机构(mechanism)。

图 2.2 所示的是几种机构的例子。

### ● 通用机械零件

机械由许多零件组成,在这些零件中,螺栓、螺母、轴、齿轮、弹

簧等零件在各种机械中几乎都会用到,这种零件统称为通用机械零件(machine element)。

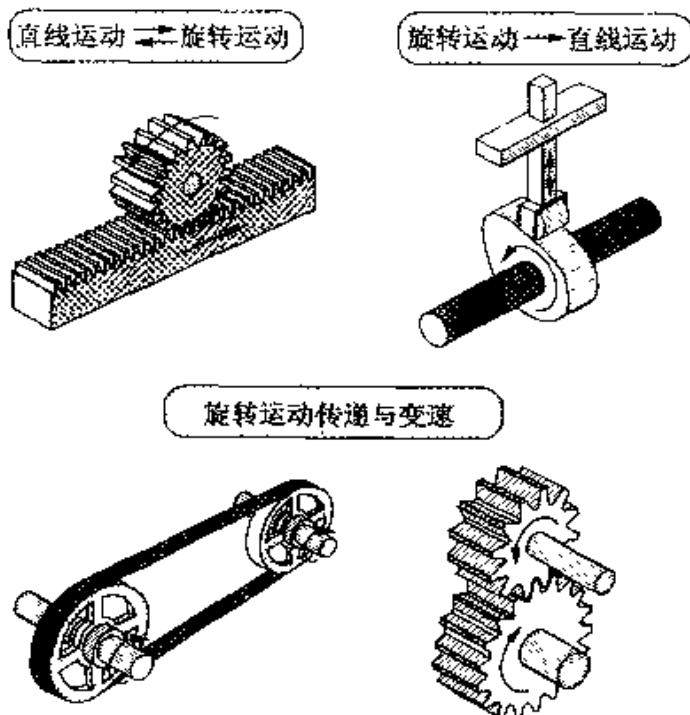


图 2.2 运动变换与传动机构的例子

### 相关知识 ● 通用机械零件的标准化

在各种机械上都要使用通用零件,所以实现标准化对于应用十分方便。在日本有日本工业标准(JIS),在国际上有国际标准化组织(ISO)制定的国际标准。

通用机械零件已经实现了标准化,在设计中积极采用标准件对于提高效率降低成本是非常重要的。

对于没有实现标准化的零件,要按照强度和刚度来确定尺寸。在确定尺寸值时,也应该尽量采用标准尺寸系列。

### 选修知识 容易与“机械”混淆的“工具”和“仪器”

工具(tool)虽然各部分都是由具有一定强度的物体组成,但各部分之间没有必要的相对运动(如锤子、锉刀等)。

仪器(instrument)虽然各部分之间有相对运动,但对外部不输出有用功(如测试仪器等)。

## 2 力、功和功率

### 要点

如图 2.3 所示,表示力时必须表示出力的大小、方向和作用点三个因素,这三个因素称为力的三要素。

在力的基础知识中,最重要的是力的合成与分解、力矩、力的平衡、功和功率等方面内容。

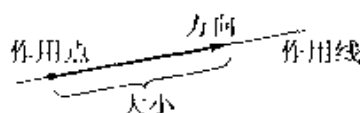


图 2.3 力的三要素

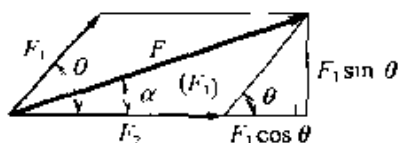
### 解释

#### 释 ● 作用于一点上的力的合成与分解

二力的合成 (composition) (见图 2.4)

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1 \cdot F_2 \cos \theta}$$

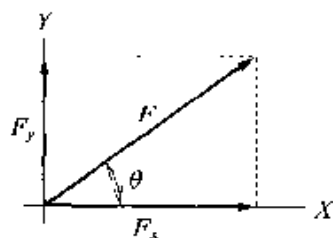
$$\tan \alpha = \frac{F_1 \sin \theta}{F_2 + F_1 \cos \theta}$$



$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1 \cdot F_2 \cos \theta}$$

$$\tan \alpha = \frac{F_1 \sin \theta}{F_2 + F_1 \cos \theta}, \quad \alpha = \tan^{-1} \left( \frac{F_1 \sin \theta}{F_2 + F_1 \cos \theta} \right)$$

图 2.4 二力的合成



#### 力的分解 (decomposition)

将力  $F$  分解成互相垂直的两个力  $F_x$  和  $F_y$  时,可以用下面的式子计算(见图 2.5):

$$F_x = F \cos \theta$$

$$F_y = F \sin \theta$$

$$\text{水平分力 } F_x = F \cos \theta$$

$$\text{垂直分力 } F_y = F \sin \theta$$

图 2.5 力向两垂直方向分解 多个力的合成

X 轴方向上的合力  $F_x = X_1 + X_2 + \dots$

$$= F_1 \cos \theta_1 + F_2 \cos \theta_2 + \dots$$

$$Y \text{ 轴方向上的合力 } F_y = Y_1 + Y_2 + \dots \\ = F_1 \sin \theta_1 + F_2 \sin \theta_2 + \dots$$

合力  $F$  的大小和方向可由下面的式子求得(见图 2.6):

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ \tan \alpha = \frac{F_y}{F_x}$$

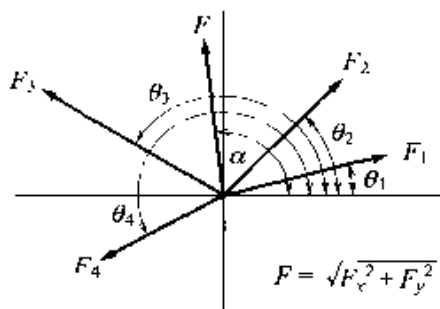


图 2.6 多个力的合成

### ● 力 矩

力矩(moment of force) $M$  用力的大小  $F$  和从回转中心到力作用线之间的垂直距离  $r$  的乘积  $F \cdot r$  来表示。当一个物体受到多个力的作用时,作用在物体上的总力矩等于各个力的力矩之和。

### ● 力的平衡

当作用在物体上的各个力  $F_1, F_2, \dots$  达到平衡时,若将各力分解成  $X$  轴方向上的分力  $X_1, X_2, \dots$  和  $Y$  轴方向上的分力  $Y_1, Y_2, \dots$ , 则下面的式子成立:

$$X \text{ 轴方向上的合力 } F_x = X_1 + X_2 + \dots = 0$$

$$Y \text{ 轴方向上的合力 } F_y = Y_1 + Y_2 + \dots = 0$$

$$\text{合力矩} \quad M = M_1 + M_2 + \dots = 0$$

### ● 重 心

如图 2.7 所示,若设物体各部分的重量为  $w_1, w_2, \dots$ , 各部分的重力作用点坐标为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots$ , 则物体的重心(center of gravity) $G$  的坐标  $(x, y)$  可以用下面的式子求得:

$$W = w_1 + w_2 + \dots$$

$$x = \frac{w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots}{W}$$

$$y = \frac{w_1 y_1 + w_2 y_2 + \dots}{W}$$

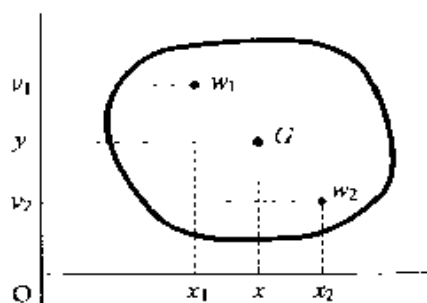


图 2.7 重心的位置

### ● 功

力  $F$  所做的功 (work)  $A$  用力的大小  $F$  与物体沿着力的作用方向移动的距离  $S$  的乘积  $F \cdot S$  来表示。当力的方向与物体移动方向之间成  $\theta$  角时,位移方向上的分力为做功的力,这时

$$A = (F \cos \theta) \cdot S = FS \cos \theta$$

### ● 功率

单位时间内所做的功叫做功率 (power)。若在  $t$  时间内连续做功为  $A$ , 则功率  $P$  可以用下面的式子来表示:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{F \cdot S}{t} = F \cdot \frac{S}{t} = F \cdot v$$

### ● 滑 轮

滑轮 (pulley) 分为定滑轮 (fixed pulley) 和动滑轮 (movable pulley) 两种。使用定滑轮时,力的大小与载荷大小相同,力的作用方向发生变化,可以使力施加在容易实现的方向上。使用动滑轮可以使作用力减小为载荷的一半。

定滑轮  
动滑轮

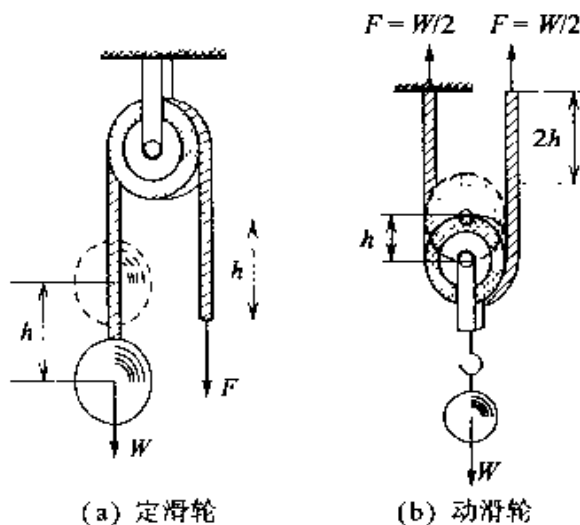


图 2.8 定滑轮与动滑轮

## 相关知识 ● 力 偶

大小相等、方向相反、作用线互相平行(间隔为  $d$ ) 的一对力叫做力偶(couple)。力偶的合力  $R$  为 0, 力矩  $M$  为  $F \cdot d$ , 力偶的作用是使物体产生旋转运动。

### 例 题

在图 2.9 所示的滑轮组中, 若  $W = 160 \text{ [N]}$ , 那么绳索的拉力  $F$  应为多大?

**答**

因为滑轮组的动滑轮数  $n$  为 2, 所以

$$F = \frac{W}{2^n} \quad n = 2$$

因此

$$F = \frac{160}{2^2} = \frac{160}{4} = 40 \text{ [N]}$$

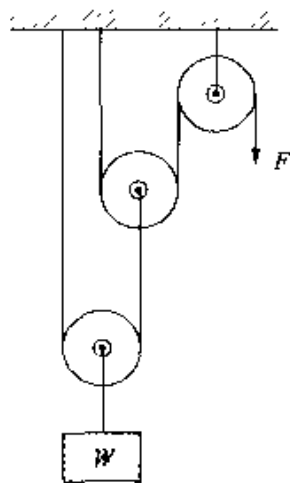


图 2.9 动滑轮

### 3 材料力学基础

#### 要点

当物体受到外部载荷作用时,它就会产生内部应力(stress)和应变(strain)。载荷的类型不同,所产生的应力的类型也不相同。构成物体的材料具有应力、应变和膨胀系数等特有的机械性能。在实际应用中,必须根据具体的使用条件来进行强度设计。

#### 解释

拉伸载荷  
压缩载荷  
剪切载荷  
静载荷  
动载荷

#### 释 ● 载荷的种类

载荷的种类如图 2.10 所示,按载荷的性质可以分为拉伸载荷、压缩载荷和剪切载荷。

按载荷的变化速度可以分为静载荷和动载荷。其中动载荷又可以分为如下两种:

① 交变载荷 载荷的大小按周期性变化。可进一步分为作用力只有拉伸或者只有压缩的单向交变载荷,以及拉伸和压缩交替作用的双向交变载荷。

② 冲击载荷 在较短的时间内施加的冲击性载荷。

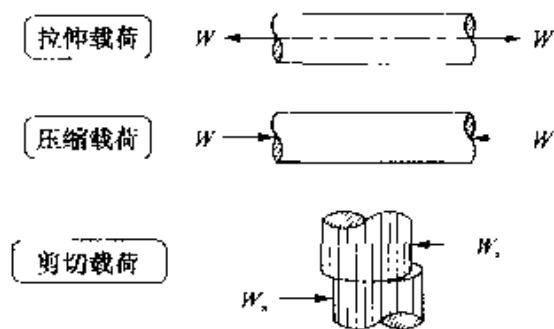


图 2.10 载荷的种类

#### ● 应力

应力分为由拉伸载荷引起的拉应力、由压缩载荷引起的压应力和由剪切载荷引起的剪应力。拉应力和压应力都产生在横截面的法线方向上,这种应力通常称为正应力  $\sigma$  (normal stress); 而剪应力产生在横截面的切线方向上,通常称为切应力  $\tau$  (tangential stress)。

$$\text{正应力 } \sigma = \frac{W}{A} \quad \text{切应力 } \tau = \frac{W_s}{A}$$

其中,  $W$  为拉伸(或压缩)载荷,  $W_s$  为剪切载荷,  $A$  为横截面面积。

正应力  
切应力

## 应变

## ● 应变

单位长度材料的变形量称为应变量,简称应变。

**轴向应变  $\epsilon$**  如图 2.11 所示,材料在轴向载荷的作用下产生的轴向变形量  $\lambda$  与材料的原有轴向长度  $l$  的比值称为应变  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{\lambda}{l}$$

**剪应变  $\gamma$**  如图 2.12 所示,在距离为  $l$  的两个平行平面内的剪切力  $W_s$  的作用下产生很小的剪切变形时,剪切变形量  $\lambda$  与距离  $l$  的比值称为剪应变  $\gamma$ ,对应的剪切变形角  $\phi$  称为剪切角。

$$\gamma = \frac{\lambda}{l} = \tan\phi \approx \phi$$

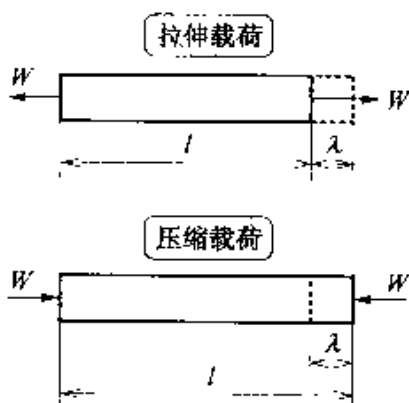


图 2.11 轴向载荷

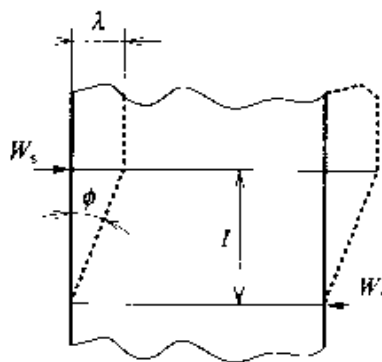


图 2.12 剪切载荷

**横向应变  $\epsilon_1$**  如图 2.13 所示,材料在轴向载荷的作用下产生轴向拉伸或压缩变形的同时,在垂直于轴线方向将产生相应的缩小或延伸变形。设横向变形量为  $\delta$ ,横截面的直径为  $d$ ,则二者的比值  $\epsilon_1$  称为横向应变:

$$\epsilon_1 = \frac{\delta}{d}$$

## ● 应力与应变的关系

**载荷-拉伸变形曲线** 通过拉伸实验可以得到载荷-拉伸变形曲线。根据载荷-拉伸变形曲线,将载荷转换成应力、将拉伸变形转换成应变就可以得到如图 2.14 所示的应力-应变曲线。在应力较小时,应力与应变成正比。在应力-应变曲线上,应力与应变保持一定比值不变的极限点所对应的应力值称为比例极限(limit of proportionality)。

材料在卸载后能够恢复到原始状态,不产生残留永久变形的

应力-应变曲线

比例极限



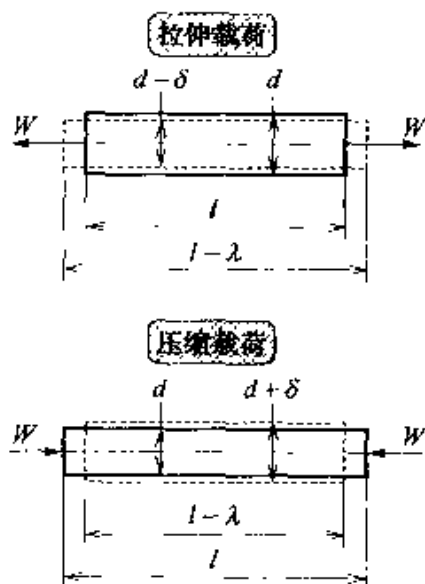


图 2.13 横向应变

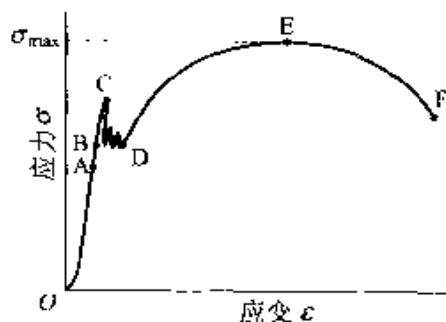


图 2.14 应力-应变曲线

弹性极限

极限点 B 所对应的应力值称为弹性极限 (limit of elasticity)。

极限强度

在应力-应变曲线上, E 点的应力达到最大值  $\sigma_{\max}$ , 该极限应力值称为极限强度 (ultimate strength)。

**弹性系数** 在弹性变形区内, 应力与应变的比值一定, 该比值称为弹性系数 (或弹性模量)

应力/应变 = 常量 (弹性系数)

① **轴向弹性系数 E** 在拉伸实验中的弹性范围内, 轴向应力与轴向应变之间存在一定的比例关系, 其比例常数称为轴向弹性系数 (modulus of longitudinal elasticity) E:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{Wl}{A\lambda}$$

② **剪切弹性系数 G** 弹性范围内, 剪应力  $\tau$  与剪应变  $\gamma$  之间也存在一定的比例关系, 其比值称为剪切弹性系数 (modulus of transverse elasticity) G:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{Wl}{A\lambda} = \frac{W}{A\phi}, \quad \phi = \frac{W}{AG}$$

### ● 热应力

若有一金属棒原始长度为  $l$ , 两端处于自由状态, 其热膨胀系数为  $\alpha$ , 当温度由  $t$  上升至  $t'$  时, 金属棒的长度延长至  $l'$ , 延长量为  $\lambda$ , 则存在如下关系式:

$$\lambda = l' - l = \alpha(t' - t)l$$

但是, 若金属棒的两端固定, 不能自由伸长, 当温度由  $t$  上升至  $t'$  时, 就相当于材料的长度由  $l'$  被压缩至  $l$ , 压缩量为  $\lambda$ , 此时的应变可以由下面的式子计算:

$$\epsilon = \frac{\lambda}{l'} \approx \frac{\lambda}{l} = \frac{\alpha(t' - t)l}{l} = \alpha(t' - t)$$

$$\sigma = E\epsilon = E\alpha(t' - t)$$

### ● S-N 曲线

疲劳破坏

在某一应力范围内, 材料经过反复加载后, 最后达到破坏。这种破坏称为疲劳破坏, 通常用图 2.15 所示的 S-N 曲线来表示材料的这种性能。从图 2.15 中可以看出, 材料所受的应力越大, 达到疲劳破坏时所经历的交变载荷次数就越少。图中的直线部分表明, 当应力值在直线以下时, 无论经历多少次交变载荷的作用, 材料都不会发生破坏, 这种极限应力称为疲劳极限。疲劳极限是材料的强度指标之一。

疲劳极限

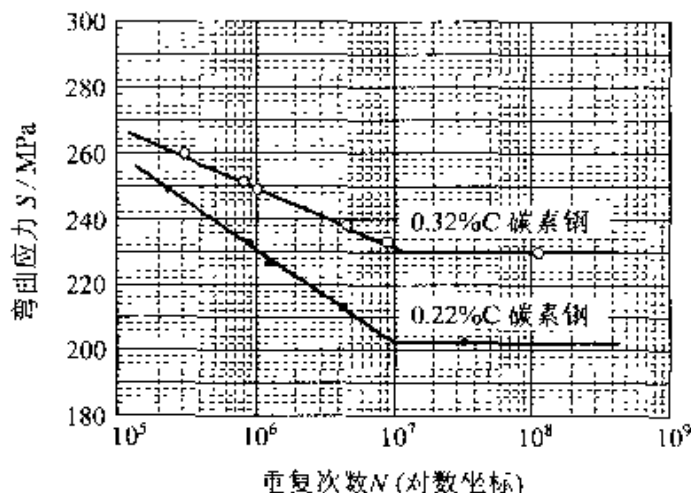


图 2.15 S-N 曲线

### ● 应力集中

横截面形状不变的材料受到拉伸或压缩时, 在截面的各部分

上所产生的应力都相等。但是,在截面形状发生急剧变化的点上,所产生的应力就会大于截面上的平均应力,如图 2.16 所示, $x-x$  截面上的局部最大应力  $\sigma_{\max}$  大于载荷除以截面积所得到的平均应力  $\sigma_n$ 。

由于截面形状的变化,导致截面上局部应力增大的现象称为应力集中(stress concentration)。因为应力集中点上容易发生疲劳破坏,所以应该特别重视。

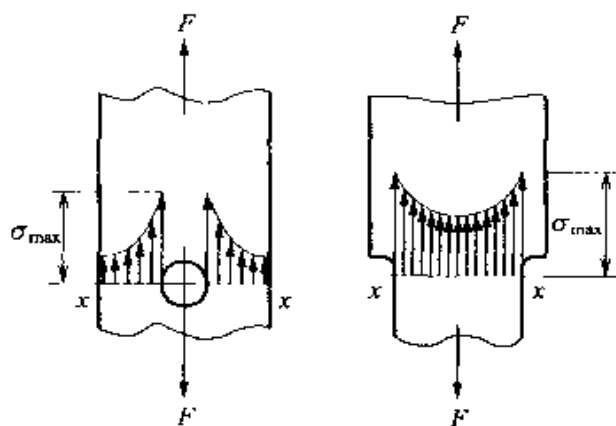


图 2.16 应力集中

### ● 安全系数

材料的极限强度  $\sigma_{\max}$  与许用应力  $\sigma_n$  的比值称为安全系数 (factor of safety)  $S$ :

$$S = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}, \quad \text{所以} \quad \sigma_n = \frac{\sigma_{\max}}{S}$$

### ● 蠕变

在图 2.14 中所示的应力-应变曲线上,  $C \sim D$  点之间应力不变,只有应变增大,这种现象称为屈服,此时的应力值称为屈服点 (yield point)。

对于钢等一些金属材料,在高温状态下受到载荷作用时,即使所受的应力低于材料的屈服点,经过一定时间也会产生永久性应变,这种现象称为蠕变 (creep)。

### ● 梁

梁的种类 梁的种类可分为图 2.17 所示的悬臂梁、简支梁、双端固定梁和连续梁等。

屈服点

悬臂梁

简支梁

双端固定梁

连续梁

集中载荷梁  
分布载荷梁

此外,按梁的载荷形式还可以分为如图 2.18 所示的集中载荷梁和分布载荷梁。

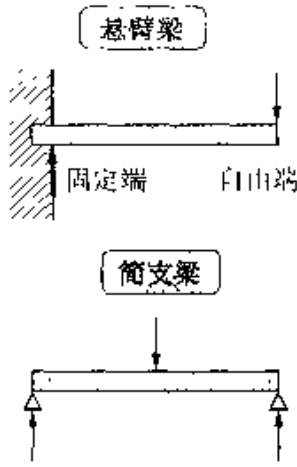


图 2.17 梁的种类

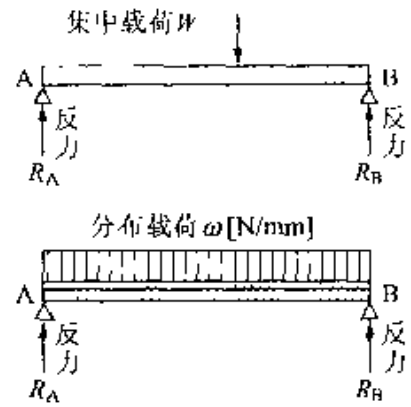


图 2.18 载荷的种类

梁的剪切力与弯矩 梁的剪切力与弯矩如图 2.19 和图 2.20 所示。

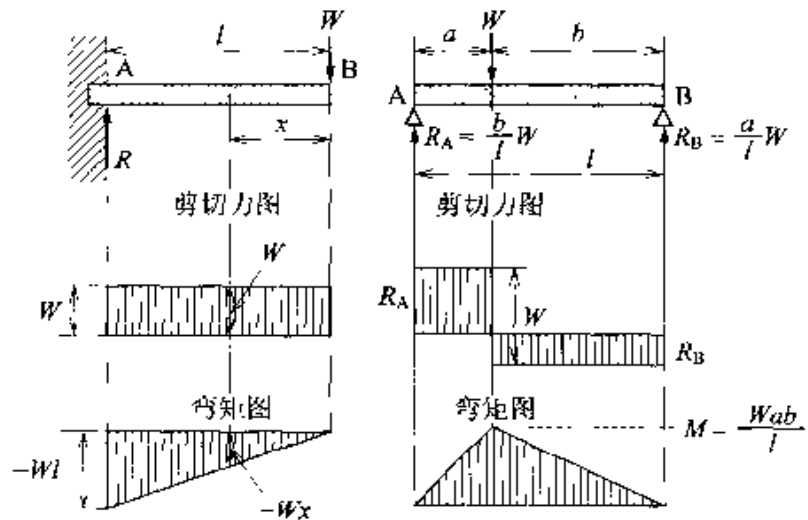


图 2.19 集中载荷

### ● 轴的扭转

扭转  
轴

在力偶的作用下,细棒发生绕轴线扭转变形的过程称为扭转 (torsion),受扭转作用的细棒称为轴 (shaft)。

扭矩 转矩  
扭转角

当长度为  $l$ 、直径为  $d$  的轴一端固定、另一端受到力矩  $T$  的作用时,就会发生扭转变形,达到平衡时的扭转变形角度为  $\theta$ 。这时轴所受的力矩称为扭矩或转矩 (torque),所产生的扭转变形角  $\theta$  称为扭转角 (见图 2.21)。

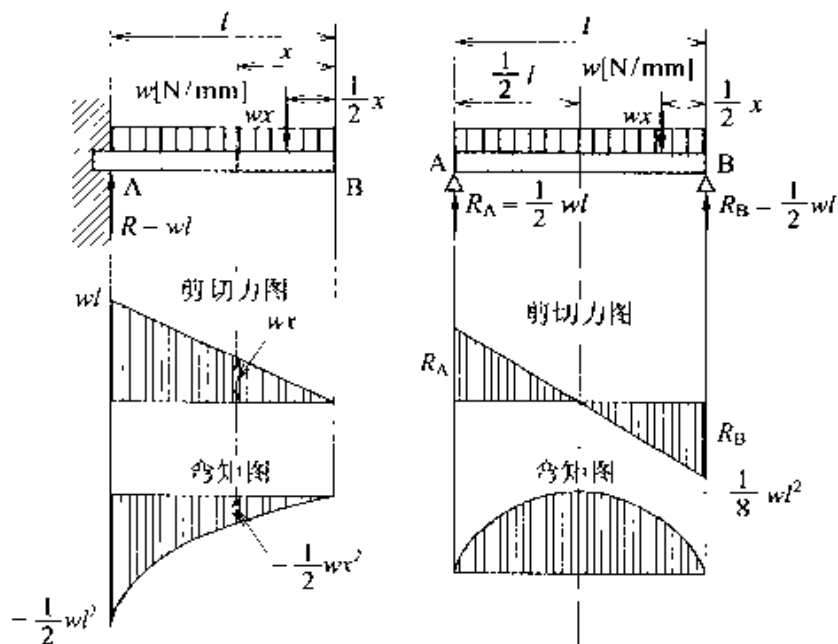


图 2.20 均匀分布载荷

若剪切角为  $\phi$ 、剪应变为  $\gamma$ 、剪切弹性系数为  $G$ ,则剪应力  $\tau$  可由下面的式子求得:

$$\gamma = \tan \phi = \frac{\frac{d}{2} \cdot \Delta \theta}{\Delta r} = \frac{\frac{d}{2} \cdot \theta}{l} = \frac{d\theta}{2l}$$

$$\tau = G\gamma = G \frac{d\theta}{2l}$$

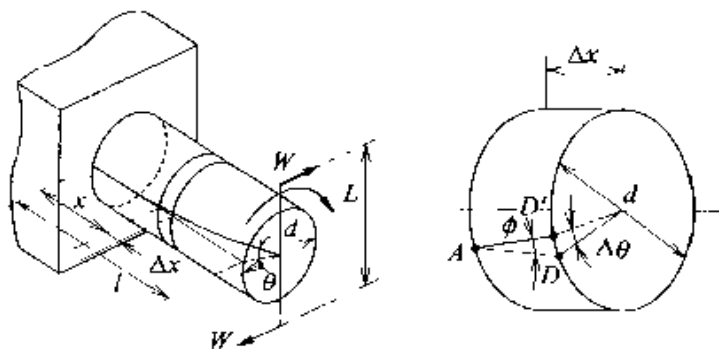


图 2.21 轴的扭转

### 例 题

试绘制图 2.22 所示简支梁的剪力图和弯矩图。

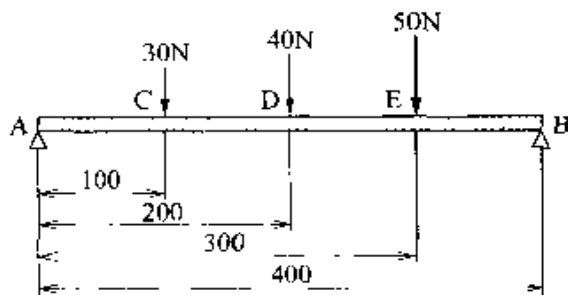


图 2.22

答]

因为绕 A 点的弯矩为

$$R_B = (30 \times 100 + 40 \times 200 + 50 \times 300) \div 400 = 65 \text{ [N]}$$

$$R_A + R_B = 30 + 40 + 50 = 120$$

所以

$$R_A = 120 - R_B = 120 - 65 = 55 \text{ [N]}$$

各点上的弯矩为

$$M_C = R_A \times 100 = 5\,500 \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

$$M_D = R_A \times 200 - 30 \times 100 = 8\,000 \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

$$M_E = R_B \times 100 = 6\,500 \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

弯矩图如图 2.23 所示。

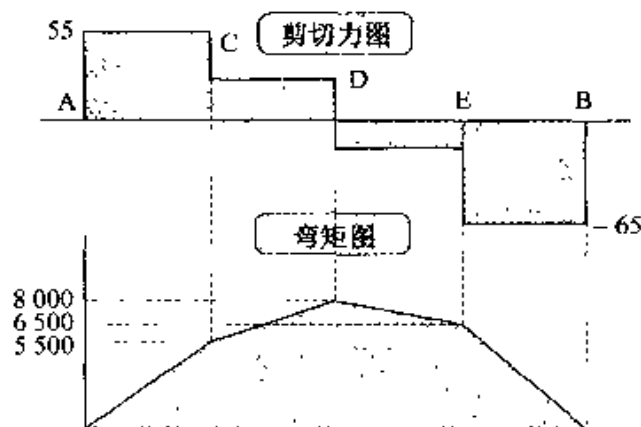


图 2.23

## 4 机械零件基础

### □ 要 点

机械零件可以按其用途分类为下:

- ① 连接件:螺栓、螺母、铆钉等。
- ② 轴用件:轴、联轴器、轴承、键等。
- ③ 传动件:齿轮、V型皮带、链、凸轮。
- ④ 制动件与缓冲件:制动器、弹簧。
- ⑤ 管件:管、管接头、阀等。

### □ 解 释

直接接触

#### ● 齿 轮

齿轮传动是通过轮齿之间的相互啮合实现直接接触的传动方法。这种传动方法的传动比精确、传递功率大(见第3章3.7和3.8节)。

#### ● 带传动

摩擦力

带传动方法适用于主动轴和从动轴之间距离较大的场合,传动平稳,振动噪声小。但是,带传动方法利用摩擦力来传递力矩,容易产生打滑现象,不能精确传递运动(见第3章3.8节)。

#### ● 链传动

滚子链

链传动与带传动在传递运动方面很相似,但由于不是利用摩擦力传递运动,所以传动效率较高。不过,这种传动方法容易产生振动和噪声,所以不适用于高速传动。链传动是将链轮安装于传动轴上,通过绕在链轮上的链来传递运动。链条由内链节和外链节相互连接构成,其中滚子链应用较多。

#### ● 离合器

摩擦离合器  
同步离合器  
电磁离合器

在要求被动轴能够实现断续运动时,需要采用离合器。离合器可分为摩擦离合器(圆盘离合器、圆锥离合器)、同步离合器(牙嵌式离合器)、电磁离合器(磁性离合器)等。

#### ● 制动器

摩擦制动器

制动器是将机械的运动部件动能转换成热能加以消耗,从而使机械降速或者停止的装置(见第3章3.6节)。

最常用的制动器是摩擦制动器。摩擦制动器的制动力除了来源于人力以外,还可以来源于流体压力和电磁力等。

#### ● 构 件

运动链

在机械中为了实现一定的运动,用各种运动副连接各运动部分所构成的系统称为运动链(chain)。运动链中由零件组成的各

平面凸轮  
空间凸轮

个刚性系统分别称为构件(或称为杆,link)(见第3章3.10节)。

### ● 凸 轮

凸轮机构是一种利用凸轮的特殊轮廓,周期性地传递复杂运动的机构。凸轮可以大致分为平面凸轮和空间凸轮两大类(见第3章3.11节)。

### ● 弹 簧

弹簧是一种利用材料的弹性变形实现如下功能的零件(见第3章3.3节):

- ① 吸收能量,起到缓冲、防振作用。
- ② 利用弹簧的变形量与载荷大小成正比的性质进行力的测量。
- ③ 利用弹簧变形的储能性质,来缓慢释放能量。
- ④ 利用弹簧的弹性实现复位等。

## □ 相关知识 ● 行星齿轮机构

如图2.24所示,将齿轮A、齿轮B和系杆R安装在轴上,如果让齿轮A固定,系杆R绕轴 $O_1$ 旋转,那么,齿轮B将在绕轴 $O_2$ 自转的同时,还要绕轴 $O_1$ 公转。这种机构称为行星齿轮机构(planetary gear),常用于减速装置中。

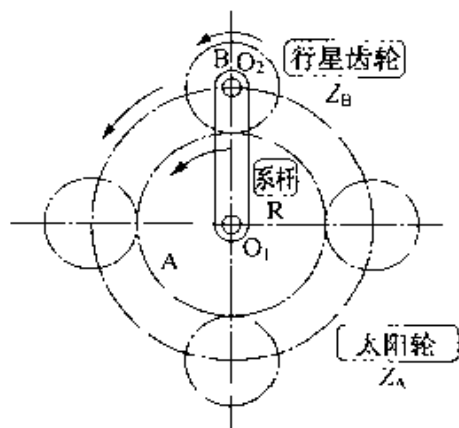


图 2.24 行星齿轮装置

令图2.24中齿轮A和齿轮B的齿数分别为 $Z_A = 80$ ,  $Z_B = 20$ ,逆时针旋转为(-),顺时针旋转为(+),则可以做如下分析:

- ① 首先,令齿轮A、齿轮B和系杆R固连,同时绕轴 $O_1$ 旋转1周;
- ② 然后令系杆R固定,齿轮A旋转1周。因为齿轮A和



齿轮 B 为外啮合, 所以齿轮 B 与齿轮 A 的旋转方向相反, 其转数为

$$(-1) \times \left( -\frac{80}{20} \right) = +4$$

[3] 这时齿轮 A、齿轮 B 和系杆 R 的正号(+)转数应为 [1]、[2] 两次旋转运动的转数之和, 齿轮 B 的转数为  $+1+4 = +5$  (见表 2.1)。

表 2.1 正向转数计算表

	R	A	B
(1) 全固定	+1	+1	+1
(2) 系杆固定	0	1	+4
(3) 正向转数	+1	0	+5

### 例 题

在图 2.25 所示的轮系中, 各齿轮的齿数分别为  $Z_1 = 20$ ,  $Z_2 = 50$ ,  $Z_3 = 18$ ,  $Z_4 = 45$ 。若齿轮 I 的转速为  $1200 \text{ r/min}$ , 试求齿轮 IV 的转速。

答

定轴轮系的传动比  $i = \frac{\text{从动齿轮齿数之积}}{\text{主动齿轮齿数之积}}$

$$i = \frac{Z_2 \cdot Z_4}{Z_1 \cdot Z_3} = \frac{50 \times 45}{20 \times 18}$$

$$\therefore 6.25 = \frac{n_1}{n_3} = \frac{1200}{n_3}$$

所以,  $n_3 = \frac{1200}{6.25} = 192 \text{ [r/min]}$

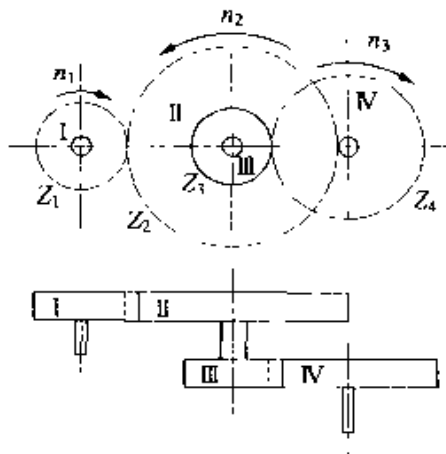


图 2.25 轮系

## 5 机械制图基础

### □ 要 点



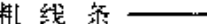



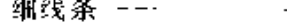
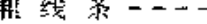
机械制图必须执行根据日本工业标准(Japanese Industrial Standards, 简称 JIS) 中的制图总则(JIS Z 8310) 制定的机械制图标准(JIS B 0001)[译者注:在我国也要执行国家制图标准(GB)], 制图标准规定了机械制图的图样表示方法和尺寸标注方法。

近来,利用计算机的数据存储、计算和绘图功能来提高设计效率的 CAD(Computer Aided Design) 系统的应用越来越广。

### □ 解 释 ● 线条的种类

机械制图中常用的线条种类如表 2.2 所示,按形状可分为实线、虚线、点画线、双点画线等;按线条的粗细可分为粗线条、细线条和特粗线条;按表 2.3 所示的线条用途可分为轮廓线、隐藏线、中心线、尺寸线、尺寸界限、引出线、剖切线、断面线、假象线和剖面线等。

表 2.2 线条的种类

实线	细线条		点画线	细线条	
	粗线条			粗线条	
	特粗线条				
虚线	细线条		双点画线	细线条	
	粗线条				


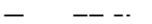

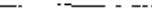

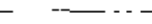
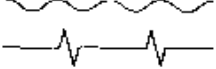




### ● 视 图

将物体的形状表达在纸面上的方法有正投影法(或称平行投影法)、轴测投影法、斜测投影法和透视法等。

**正投影法** 正投影法是利用平行光线将物体投影到投影面上进行表达的方法,从物体的一个方向投影得到物体的一个视图,而从物体的正面、上方和左侧分别投影可以得到三个视图,这种投影方法称为三视图法。机械制图中规定采用三视图法来表达图样。当物体的某一局部采用三视图表达难以理解时,可以用箭头和符号来表达投影关系。从物体的正面、上方和左侧投影得到的三个视图分别称为主视图、俯视图和左视图。

三视图法  
主视图  
俯视图  
左视图

表 2.3 线条的种类及用途

按用途命名	线条的种类		线条的用途
外形线	粗实线		用于表示被观测物体可见部分的形状
尺寸线	细实线		用于尺标注
尺寸界线			用于标注尺寸时从图形上引出的界线
引出线			用于从图形上引出标记或符号的位置
剖面界线			用于表示图形上剖面旋转 90°后的位置
中心线			用于图形中心线的简化表示
液面线 <sup>1)</sup>			用于表示水面、油面等液面位置
隐藏线	细虚线及粗虚线		用于表示观测物不可见部分的形状
中心线	细点画线		(1) 用于表示图形的中心线
基准线			(2) 用于表示中心移动时的中心轨迹
节线			用于表示确定图形位置的基准
特殊指定线	粗点画线		用于对需要特殊加工部分的特殊要求事项的适用范围标记
假想线 <sup>2)</sup>	细双点画线		(1) 用于表示作为参考的相邻物体
重心线			(2) 用于表示刀具、夹具的参考位置
断面线	不规则的波浪细实线及折线		(3) 用于表示可移部分在移动中的特殊位置和极限位置
剖切线	细点画线, 在端部和转向处加粗 <sup>3)</sup>		(4) 用于表示加工前或者加工后的形状
剖面线	规则排列的细实线		(5) 用于表示重复之处
特殊用途的线	细实线		(6) 用于表示图中断面的部位
	特粗实线		用于表示剖面上重心连线
			用于表示物体截断或者切除一部分后的断面界线
			在画剖面图时, 用于在能够反映剖切位置的视图内表达剖切位置
			用于表示图形中指定部分与其它部分的区别, 比如表示剖视图中的剖切面
			(1) 用于表示外形线及隐藏线的延长
			(2) 用于表示平面
			(3) 用于表示位置
			用单线表示厚度很薄的物体

1) ISO 128 (Technical drawing General principles of presentation)中没有规定。

2) 假想线表示的图形按照投影法原则是不存在的, 它用于表示为了便于理解时所画出的图形, 或者是为了帮助对功能和工作原理的理解而画出的辅助图形。

3) 在不会产生与其它用途混淆时, 端部和转向处可以不必加粗。

〔备注〕 细线条、粗线条及特粗线条的宽度比例为 1:2:4。

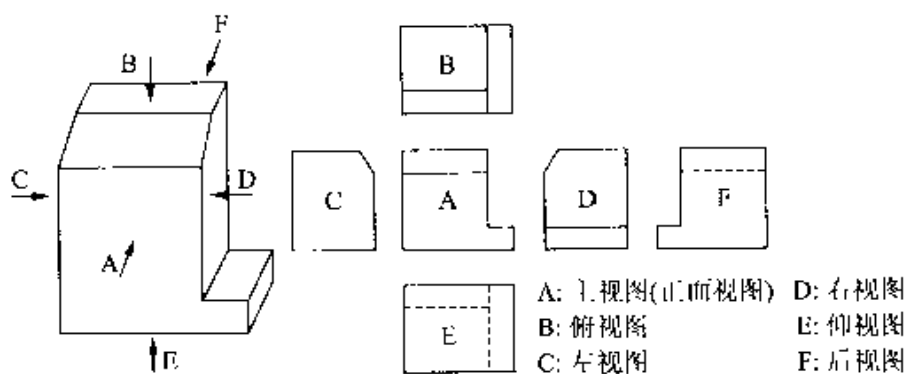


图 2.26 三视图表达方法

图 2.26 所示的是正投影法的各个视图及其投影方向<sup>1)</sup>。

**轴测投影法** 轴测投影法是利用一个投影图来表达物体的立体形状的方法,这种投影图立体感强,使识图者容易理解物体的形状。

图 2.27 所示的是正等轴测图,图 2.28 所示的是二等角轴测图,图 2.29 所示的是不等角轴测图。

正等轴测图

二等角轴测图

不等角轴测图

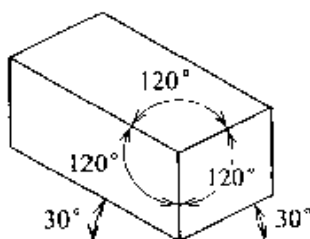


图 2.27 正等轴测图

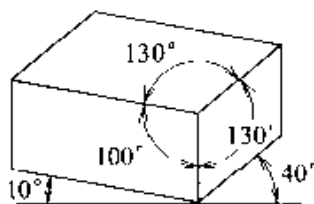


图 2.28 二等角轴测图

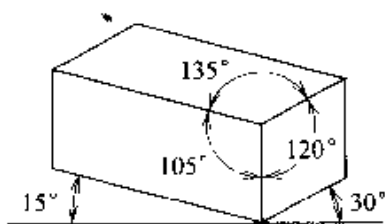


图 2.29 不等角轴测图

**斜二测投影法** 令  $X$ 、 $Z$  轴互相垂直,只有  $Y$  轴倾斜所画出的投影图称为斜二测图,这种投影方法称为斜二测投影法。斜二测投影法与轴测投影法同样具有图立体感强、容易理解的特点。

1) 我国的国标规定各视图的位置应画在投影方向的对面,即俯视图在下,左视图在右,而图 2.26 中所示的位置恰好相反,请读者注意。——译者注

**透视法** 透视法是具有距离感的图形表达方法。在机械制图中几乎不采用透视法,但在土木建筑等领域的图纸中经常采用。

### ● 机械加工图

能够完整表达工件的形状、尺寸、加工方法、表面粗糙度等机械加工所需要的工程信息的图纸称为**机械加工图**。

在机械加工图中,以最能够表达零件形状的投影方向的视图为主视图,对于俯视图和侧视图等辅助视图,只需要画出其中必要的视图即可,有的视图可以省略。在机械加工图中应尽量不使用虚线来表达形状。

**主视图的确定方法** 主视图的确定应该从工件的加工过程来考虑,比如,对于车削加工的工件,应使其中心线处于水平位置,加工的重点部位应该向右画;对于刨削加工的工件,应使其中尺寸较大的方向位于水平位置,主要加工面应在主视图中表达等等。

**辅助视图(俯视图、侧视图等)的确定方法** 辅助视图包括左视图、右视图、俯视图和仰视图等,在能够准确表达工件的工程信息的情况下,辅助视图的数量越少越好。

**剖视图表示方法** 当从工件的外边无法看到其内部形状时,可以假想用剖切面剖开工件,移去剖切面和观察者之间的部分,将其余部分向投影面投影,这样就可以清楚地表达工件的内部形状,这种投影图称为**剖视图**。

原则上剖切面应该通过工件的基本中心线,如果不通过工件的基本中心线,应该用剖面符号来表示剖切位置。

对于轴、销、螺栓、螺母、垫圈、螺钉、紧定螺钉、铆钉、键、加强筋、车体的框架、齿轮的轮齿等,当沿其轴向剖切时,原则上不剖切这些零件,必要时可以采用局部剖视的方法来表达。

### ● 尺寸标注方法

尺寸标注不仅表示工件的大小,同时还给出了所需要的精度、加工方法和加工顺序等生产工程信息。

**比例** 所画出的图样的尺寸与实际物体的尺寸之比称为图样的比例(scale)。

机械制图中的图样尺寸分为实际尺寸、放大尺寸和缩小尺寸三种,表 2.4 中给出了 24 种标准规定的比例。无论在放大还是缩小尺寸的图样中,标注的尺寸必须是工件的实际尺寸。

标准图面尺寸及图面的边框尺寸如表 2.5 所示。

表 2.4 制图的标准比例

比例的种类	系列	比例
缩小尺寸	1	1:2 1:5 1:10 1:20 1:50 1:100 1:200
	2	1: $\sqrt{2}$ 1:2.5 1: $2\sqrt{2}$ 1:3 1:4 1: $5\sqrt{2}$ 1:25 1:250
实际尺寸		1:1
放大尺寸	1	2:1 5:1 10:1 20:1 50:1
	2	$\sqrt{2}$ :1 2.5 $\sqrt{2}$ :1 100:1

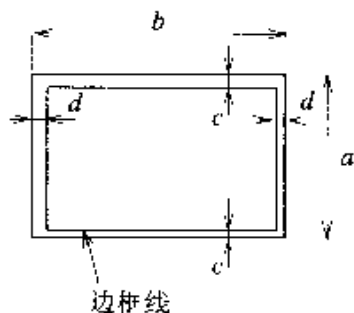
注:应优先使用 1 系列中的比例。

表 2.5 图纸尺寸的种类及边框尺寸

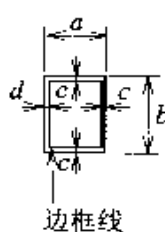
单位 [mm]

A 系列尺寸					延长尺寸				
名称	尺寸 $a \times b$	$c$ (最小)	$d$ (最小)		名称	尺寸 $a \times b$	$c$ (最小)	$d$ (最小)	
			不装订时	装订时				不装订时	装订时
		—	—	—	A0×2	1 189×1 682	20	20	25
A0	841×1 189	20	20		A1×3	841×1 783			
A1	594×841					A2×3			
		10	10		A2×4	594×1 682			
A2	420×594					A3×3	420×891		
						A3×4	420×1 189		
A3	297×420					A4×3	297×630		
					A4×4	297×841			
A4	210×297				A4×5	297×1 051			

长边左右放置的情况



短边左右放置的情况



注:为了便于图纸的装订折叠, $d$ 的部分应位于标题栏的左侧。

度( $^{\circ}$ )  
分(')  
秒(")

**标注尺寸的单位** 标准规定机械制图的标注尺寸以毫米(mm)为单位,在图样上不标注尺寸单位;角度一般以度为单位,必要时标注度( $^{\circ}$ )、分(')、秒(")。

**尺寸标注方法** 在尺寸线的两端用箭头等表示尺寸界线,在标注尺寸数字的地方,尺寸线不中断,而且应尽量避免尺寸线相交。尺寸界线一般应与尺寸线垂直,在无法以垂直尺寸界线标注时,可以用倾斜的平行尺寸界线引出。

在标注长度尺寸时,水平尺寸线上的尺寸数值应该标注在尺寸线的上方,垂直尺寸线上的尺寸数值应该标注在尺寸线的左侧。标注角度值的数字方向以过角度顶点的水平线为基准,标注数字的位置在水平线上方时应向外标注;标注数字的位置在水平线下方时应向内标注。

**表示形状的尺寸符号** 为了更清楚地表达工件的形状,简化图样,常采用表 2.6 所示的表示形状的尺寸符号。在使用这些符号时,必须写在尺寸数字之前,符号的大小与尺寸数字的大小相同。但在使用圆弧长度符号时,应将符号注在尺寸数字的上方。

表 2.6 标注尺寸的符号

符号	名称	符号的意义	符号	名称	符号的意义
$\phi$	[fa:]斐	直径	SR	[es a:]爱斯阿	球面半径
[ ]	正方形	正方形的边	C	[si:]斯依	45°倒角
R	[a:]阿	半径	t	[ti:]替	板的厚度
S $\phi$	[es fai]爱斯斐	球面直径	⌒	圆弧	圆弧长度

### ● 尺寸公差

在加工零件时,不可能完全准确地达到一个规定尺寸,必然存在一定的加工误差。因此,必须根据工件的使用要求,以基本尺寸为基准,规定允许的加工误差范围。在允许误差范围内的最大尺寸称为上限尺寸,最小尺寸称为下限尺寸。上限尺寸与下限尺寸之差称为尺寸公差(tolerance of size)。

在 JIS 标准中,按公差的大小将加工精度分为 IT1~IT18 等 18 个精度等级,这些精度等级的尺寸公差称为基本公差,其中对于孔的 IT6~IT10 和对于轴的 IT5~IT9 是常用配合的基本公差。

### ● 配合

轴与孔之间的嵌入关系称为配合(fit)。如图 2.30 所示,由于孔与轴的尺寸大小不同,可能出现间隙或过盈,存在间隙的配合称

上限尺寸  
下限尺寸  
尺寸公差  
基本公差

间隙  
过盈

间隙配合  
过盈配合

为间隙配合,存在过盈量的配合称为过盈配合。

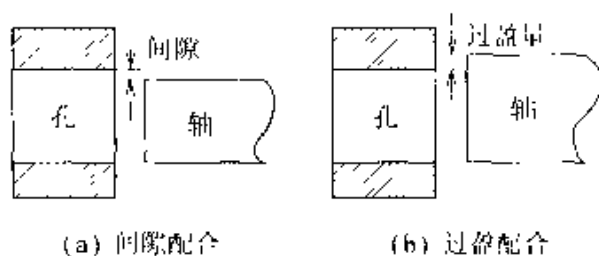


图 2.30 配合

### ● CAD 简介

**CAD 系统简介** 如图 2.31 所示,CAD(Computer Aided Design)系统,由数据处理设备(计算机)与外围设备组成的硬件(hardware)和进行设计与绘图所需要的软件(software)构成。

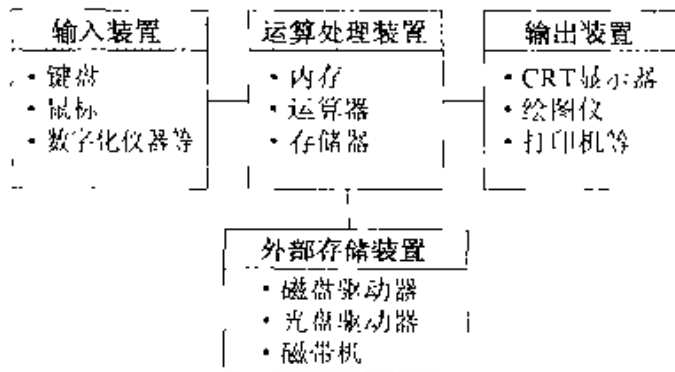


图 2.31 CAD 系统的硬件

**CAD 系统的应用** 在使用 CAD 系统进行设计时,计算机先根据设计者输入的信息,在其内部建立起设计对象的模型,然后再按照所建立的模型进行计算和图形处理,还可以对各部件的相互干涉和加工刀具的运动轨迹进行模拟仿真检查,并将结果在显示装置上以 2 维或 3 维图形形式输出。

利用 CAD 系统得到的数据,可以模拟加工时刀具的运动,在对模拟结果进行分析的基础上,可以自动生成数控机床的控制数据。这种设计制造一体化的系统称为 CAD/CAM(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing)。将 CAD 系统的设计信息直接用于制造可以使从设计到制造的整个过程更加合理,效率更高,大幅度缩短产品的设计生产周期。

CAD/CAM



CAD 制图有如下优点：

- ① 可以缩短绘图时间。
- ② 绘图精度高、图面质量好。
- ③ 在制图过程中修改方便，灵活性强。
- ④ 图纸的存储和检索效率高。
- ⑤ 容易实现图纸的再利用，促进图纸设计的标准化。

## 6 反馈控制与顺序控制

### □ 要 点

对某一控制对象的位移、速度等连续变化的物理量实现保持或趋近一定值(目标值)的控制称为反馈控制。而对多个操作依次自动实现启动、停止的控制称为顺序控制。

### □ 解 释

#### ● 术语说明

英文的反馈一词 **feedback** 中的前缀 **feed** 的意思是“提供食物,供给燃料等”,将 **feed** 与 **back** 连起来就是反向提供信号、信息的意思,是控制领域的专用术语。

英文中 **sequence** 一词是顺序的意思,在纸牌游戏中,连续发出一套牌叫做 **sequence**。当控制过程为按顺序连续控制时,就称为顺序控制。

#### ● 控制的概念

以自动洗衣机为例,向洗衣机的水桶内注水的过程只是整个顺序控制过程的一个步骤,首先要给出**启动指令**,然后要判断是否满足“水桶内无水”、“排水阀已关闭”等条件,当条件满足时,打开进水阀,开始注水。当检测到满水位信号时,发出注水的**停止信号**(关闭进水阀),同时发出搅拌轮旋转的**启动信号**,使搅拌轮电机开关接通。在发出电机启动信号的同时,还要发出计时器的置位信号,由计时器的计时终了信号切断电机开关。

而在“漂洗”时,洗衣机要一边流水一边搅拌,必须保持一定的水位。对于一般的洗衣机来说,只要水位没有从洗衣机中溢出就可以,所以采用**溢流**的方法来维持水位,但是在对水位要求十分严格的场合,就需要采用反馈控制。

因为采用反馈控制要对连续量进行控制,所以需要能够确定从桶底到上面任何位置的水位**传感器**,水阀也必须是能够调节流量的**流量控制阀**。根据当前水位与设定值之差来控制进水流量就可以使水位保持不变。

当改变水位的设定值、发出从原来平衡状态的水位向新水位变化的指令时,就要调节流量,使水位迅速达到新的平衡状态;当水位由于某种外界原因(也称为**干扰**)突然发生变化时也要调节流量,使水位返回到原来位置,这些控制过程都是反馈控制。

#### ● 反馈控制的作用

反馈控制的目的是使被控制量保持一定值,按控制目的可以

启动指令

停止信号  
启动信号

溢流

传感器  
流量控制阀  
当前水位  
设定值

干扰

将反馈控制分为定值控制和跟踪控制两类。

**定值控制** 控制目标值保持不变的反馈控制称为定值控制,在生产实际中常见的液位、流量、温度、压力、浓度等控制过程都属于定值控制。

**跟踪控制** 随着时间的变化,控制目标值也发生变化的反馈控制称为跟踪控制。在跟踪控制中,目标值为不规则变化的称为随动控制,目标值的变化规律事先已经确定的称为程序控制。为了与其它类型控制相区别,通常将对物体的位置、角度等进行随动控制的系统称为伺服系统。

### ● 顺序控制的作用

在顺序控制中,已经事先确定了应该控制的顺序,一旦达到了某一状态值就认为该时刻、该阶段的控制结束,开始进入下一个控制阶段的控制。在达到某一状态值、发出控制结束信号之后,就不可再进行修正,转入下一个控制阶段。譬如,在进行移动控制时,只需控制其是否达到某一控制点,而不必连续控制其正确的位移量。这一点是顺序控制与反馈控制的最大区别。

在顺序控制过程中,是采用开关、阀门等对执行装置和其它设备依次进行启动、停止控制的,所以在某一顺序控制阶段中,也可以采用反馈控制来实现混合控制。以自动加工机床为例,更换刀具采用顺序控制,而实际加工过程则利用伺服装置实现位置控制。加工结束后,再返回到顺序控制的程序,完成退刀、取出工件、安装新的毛坯等操作。

在控制精度要求较低的工艺过程中,可以完全采用顺序控制,而在精度要求较高的环节上可以插入反馈控制,使两者有机的结合起来,分别起到各自的作用。

随动控制  
程序控制  
伺服系统

状态值  
控制结束  
结束信号

## ■ 选修知识 检测与控制

在考虑控制问题时,必须清楚地认识到检测技术与控制技术之间的密切关系。

检测就是将物理现象或物理量以定量的形式表达出来,检测结果可以用于控制过程。

控制就是为了达到某种目标,进行必要的操作的过程。控制对象不同,与检测方法、检测精度等密切相关的控制系统也大不相同。

## 7 反馈控制系统的构成

### 要点

在反馈控制系统中,由检测控制结果的检测装置和将检测结果与设定值进行比较的比较器构成一个反馈环节,通过反馈环节使控制系统实现了封闭的控制回路,所以这种反馈控制也称为闭环控制。

### 解释

设定值  
比较器  
偏差  
误差信号  
控制器  
执行装置  
被控制对象  
检测装置

#### ● 反馈控制系统框图

如图 2.32 所示,当通过指令信号给出设定值时,在比较器求出设定值与当前值的差(偏差)作为误差信号,在控制器作出误差修正,产生执行控制量。将这种控制量输入到执行装置就可以产生对被控制对象的控制输出。被控制对象当前值的变化直接由检测装置检测出来,反馈到比较器上。

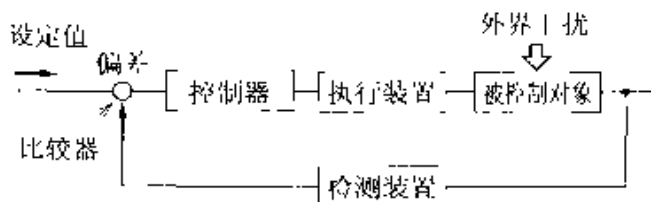


图 2.32 反馈控制系统框图

#### ● 电动伺服装置的构成

指令值  
驱动器

图 2.33 所示的是由伺服电机和进给丝杠组成位置控制机构的实例。首先,将位移量作为指令值给出,在控制器中产生作为执行控制量的速度指令。驱动器接受速度指令后,经电力放大供给伺服电机能量,驱动电机开始旋转,通过与电机相连的进给丝杠带动工作台开始移动。在工作台移动的过程中,安装在工作台上的位移传感器就可以检测出工作台的移动位置,并反馈到比较器。比较器不断向控制器输出误差信号,直至指令值与移动位置之差减小到 0 为止。当然,如果工作台的位置超过了指令位置,就要产生反方向的速度指令来进行校正。

位移传感器  
比较器  
误差信号

要检测工作台的坐标值,必须采用位移传感器,一般可以采用电感式传感器或磁栅尺等传感器。但在比较简单的机构中,常在进给丝杠上安装脉冲编码器,通过检测脉冲来实现反馈。这时的控制量不是工作台的位移,而是电机的旋转角度。这是一种十分

脉冲编码器

适用的控制方式。

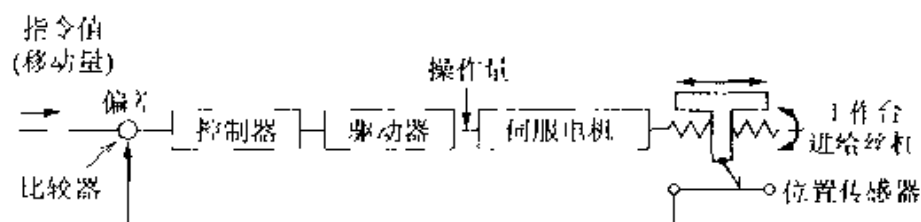


图 2.33 电动伺服机构的构成

### ● 油压伺服装置的构成

仿形加工装置  
椭圆凸轮  
活塞  
引导阀  
阀芯  
阀座  
液压油  
工作油缸

图 2.34 所示的是采用液压伺服控制的仿形加工装置，图中的椭圆凸轮处于平均半径的位置，下面的驱动油缸内的活塞也处于中间位置。

让凸轮开始旋转，凸轮的长径部分使引导阀的阀杆 B 向左移动，阀芯  $S_1$  相对阀座  $A_1$  的位置发生偏离，液压油流入工作油缸的左腔  $C_1$ 。由于该系统的工作油缸的活塞杆是固定的，所以工作油缸向左移动。此时，由于工作油缸和引导阀为整体结构，所以引导阀也跟着向左移动，结果使阀座  $A_1$  与阀芯  $S_1$  之间的间隙变小，这恰好符合反馈控制原理。当间隙变为 0 时，工作油缸也停止移动。

当凸轮转到短径位置时，阀杆 B 在弹簧的作用下向右移动。 $S_2$  与  $A_2$  之间的间隙增大液压油流入工作油缸的右腔  $C_2$ ，刀具也向右移动。

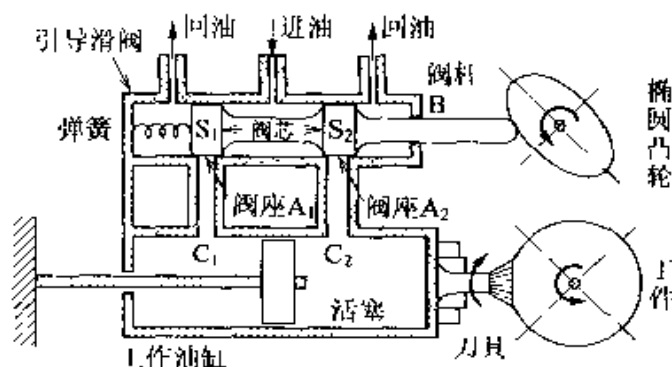


图 2.34 液压仿形切削装置

指令值

在这种机构中，指令值（即设定值）就是由凸轮确定的引导阀中阀芯的移动量，控制的结果就是刀具相对工件的左右移动量。

反馈量

引导阀的运动为反馈量，阀座  $A_1$ 、 $A_2$  相对阀芯  $S_1$ 、 $S_2$  的偏移相当

比较器  
控制量

于比较器。控制量也就是通过阀间隙流入油缸腔内的液压油量。该系统的检测装置、比较器、控制器和驱动器全部为一体化结构。

此外应该说明,该装置的反馈量为1:1设计的,刀具的移动量与指令值相同。



## 相关知识

### ● 模糊控制

模糊控制是近些年发展起来的控制技术之一。严格地说,模糊控制属于反馈控制的一种方法。模糊控制就是将具有控制对象一定性质的样本集合作为模糊集合,利用模糊理论推理,并进行定量化(含有一定的模糊成分)计算,最后求得最佳控制量的控制方法。

### ● robust 控制

在一般的反馈控制系统中,如果控制系统的特性发生变化,就可能产生较大的偏差甚至突然失控等现象。

robust 控制是使控制系统即使特性稍有变化时,也不会改变控制性能的一种控制方法,具有较强的矫顽能力。

一般是在设计系统之前,通过试验掌握控制对象的特性可能有多大程度的特性变化,设计时使系统能够在特性发生变化时有针对性地采取对策。

### ● 现代控制理论

反馈控制理论以线性系统为前提,无法对非线性系统和多变量系统进行控制,常称为古典控制理论。

但是,对于相当多数的非线性系统,在较窄的变化范围内都可以认为是符合线性关系的,大多数情况下都可以采用近似的线性模型实现反馈控制。

现代控制理论是对系统的可控性和稳定性进行分析,从而设计最佳控制系统的方法。利用状态变量来表示控制变量,通过评价函数来求得最佳控制。

线性系统  
非线性系统  
多变量系统  
古典控制理论

状态变量  
评价函数

## 8 反馈控制系统的特性

**要 点** 性能优良的控制系统的标志是能够“精确、快速、稳定”地逼近控制目标值。

**解 释** ● 响应与特性

设定值 干扰

由于反馈控制系统的输入信号只有设定值和外界的干扰两种,所以,可以仅针对这两种信号来分析系统的特性与响应。

过渡响应

稳态响应

图 2.35 所示为某一系统当目标值突然发生变化时的输出响应曲线。其中左半部分表示的是过渡状态的过渡响应,右半部分表示的是稳定状态下系统达到平衡时的稳态响应。因为从系统的过渡响应和稳态响应分别可以得到过渡特性和稳态特性,因此在控制领域认为响应和特性具有同样的意义。

动特性

静特性

系统的特性按时间过程进行划分,可以分为动特性和静特性,稳态特性就是静特性,而过渡特性属于动特性。在动特性中,除了过渡特性以外,还包括频率响应特性,实际上是一种相似的特性。

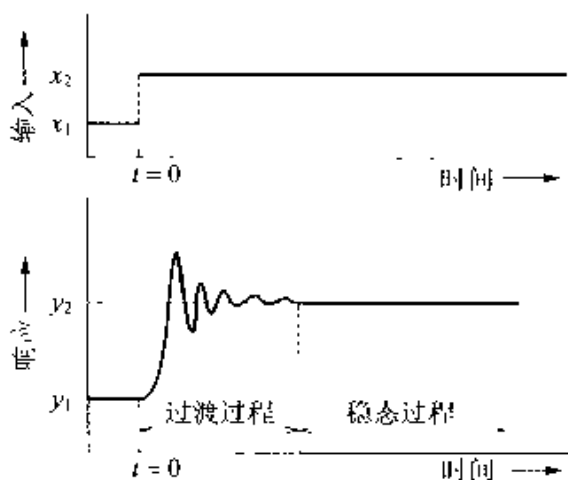


图 2.35 控制系统的响应

● 稳态特性

稳态偏差

静误差

传递函数

控制系统最终达到的控制值(也称为最终稳态值)与设定值之差称为稳态偏差或者静误差。稳态偏差越小,系统控制精度越高。实际系统的稳态偏差值可以利用传递函数求得。

阶跃响应  
过渡响应  
一阶延迟

### ● 过渡特性

如图 2.35 所示,控制系统在阶跃型输入信号作用下所得到的输出特性曲线称为阶跃响应或者过渡响应。对于系统的过渡响应,决定性的评价指标是响应速度的快慢

如果控制系统是由若干个积分环节和一阶延迟环节组成的,那么这些独立环节的过渡响应综合起来将影响整个控制系统的过渡响应。因此,对于整个控制系统,要改善其过渡响应特性,必须知道各个环节的过渡响应特性。实际应用的反馈控制系统几乎都是二阶以上的高阶延迟控制系统。

二阶延迟

图 2.36 所示的是某一二阶延迟系统的过渡响应的例子。图中曲线的上升阶段反映系统的响应速度。过冲量称为系统的动态误差,它是系统调节强度的标志。调节时间当然也是系统响应速度的指标,同时还是系统稳定性的标志,因为即使上升速度很快,过冲量很小,但若振荡的衰减特性很差,那么系统的调节时间也会很长。

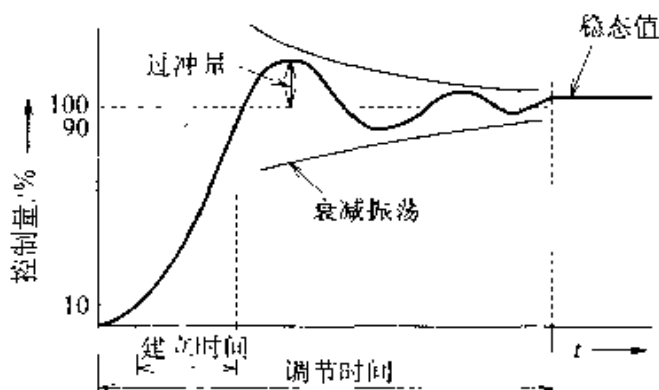


图 2.36 二阶延迟系统的过渡响应

### ● 稳定性

稳定性可分为过渡特性中的稳定性和频率响应特性中的稳定性来分析。在过渡响应中,调节时间的长短是稳定性的标志,因为调节强度决定了有无过冲量,以及由于过冲而导致的振荡是收敛性的还是发散性的,这些是稳定和不稳定的界限。

### ● 频率响应

除了从过渡特性来研究系统的稳定性以外,频率响应特性也是判别系统稳定性的一种方法。频率响应就是当给系统输入不同频率的正弦波形的输入信号时,检测到的系统输出振幅的稳态响



- 奈奎斯特稳定性判断法 应和输出相位的滞后量,由此可判断系统的跟踪特性,它是控制系统的控制精度和稳定性的标志。
- 伯德线图稳定性评价法 利用频率响应判断系统稳定性的方法有奈奎斯特(Nyquist)稳定性判断法和伯德(Bode)线图稳定性评价法等。

## 相关知识 ● 响应与特性

### CNC 机床

#### 加工中心机床

内部装有计算机、灵活性很强的数控(Numerical Control, NC)机床称为 CNC(Computerized Numerical Control)机床,还有的 NC 机床称为加工中心(Machining Center, MC)机床。在这些数控机床床上,可以从设计制图到生成 NC 数据代码,完全利用计算机辅助系统(CAD/CAM)来完成,可以加工出形状复杂、精度很高的工件。

CNC 机床是利用机电一体化技术的典型产品。

## 选修知识 反馈控制理论的产生

1915年,美国架起了从纽约到旧金山的电话线,也就是说,从大西洋到太平洋首次接通了电话线。当时为了解决由于衰减而导致信号/噪声(S/N)比下降的问题,建立了6个中继站。对这些中继站的放大器,当然希望其噪音和失真都要很小。

1927年,贝尔研究所的 H. S. 布莱克(Black)发明了反馈放大器。这种放大器是将输出信号负反馈到输入信号中,存在一定的不稳定性。后来,AT&T 的工程师 H. 奈奎斯特从理论上(数学上)解释了存在这种不稳定性的原因。他利用复变函数论的理论进行推导,1932年发表了题为“反馈放大器的稳定性问题”的论文。该篇论文是针对放大器的频率特性来进行稳定性判别的纯理论研究,但后来开始用于放大器的设计中,发展成实用的控制理论。这种奈奎斯特稳定性理论,至今仍是古典控制理论的核心。

后来,贝尔研究所的 H. W. 伯德继承并发展了反馈控制理论,提出了伯德线图。随着第二次世界大战的爆发,反馈控制理论被用于火炮、雷达等军备的伺服装置中。第二次世界大战之后,麻省理工学院(MIT)成为此项研究的中心。

# 9 顺序控制基础

**要 点** 顺序控制的实质,是对“顺序”及“时间”进行控制。

**解 释** ● 顺序控制系统的结构

图 2.37 为顺序控制系统的结构框图。在这里,系统所发出的指令几乎都是启动某项作业的命令。命令处理装置按预先规定的指令执行顺序向各执行装置发出相应的控制命令后,执行装置控制各执行机构实现具体的 ON、OFF 操作,从而使被控对象发生某种状态变化。

二值信号

图 2.37 中的检测部分用于输出执行机构是否达到预想状态的二值信号。这些二值信号通常表示作业是否结束、移动的位置或定时时间是否到达等指示性信息。

在顺序控制系统中,几乎所有的指令都是通过按键输入的,命令处理装置的输出一般多于一个。当有多个输出时,就需要产生输出信号的组合。而这种组合在逻辑上是预先设定好的,属于命令处理的一部分。

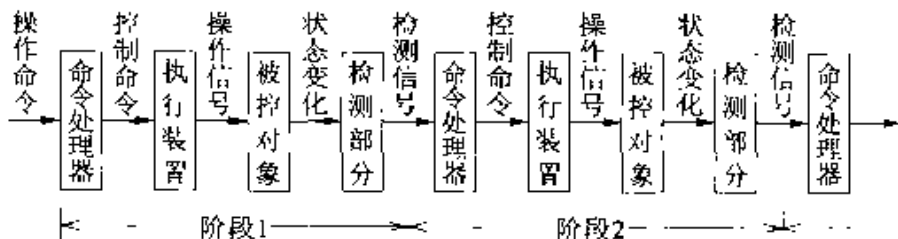


图 2.37 顺序控制系统的结构框图

● 组合逻辑

在顺序控制系统中,控制指令通常都是指示某项作业的开始信号,由此产生各阶段的开始信号和作业的结束信号。因此,需要复杂的组合逻辑,才能实现上述功能。

在具体的电路中,AND、OR、NOT、NAND、NOR 等是基本逻辑单元,通常利用定时器将这些基本逻辑单元进行组合,构成有时间顺序的逻辑电路。

由输入信号得到所需要的输出信号,关键是如何组合各逻辑

布尔代数

单元。为了能够使用最少的逻辑单元构成电路,常常需要利用布尔代数将逻辑表达式进行某些变换和化简处理。

### ● 时序逻辑

时序逻辑就是通过事先确定的控制顺序程序,将各阶段的控制顺序固定下来。整个顺序控制程序从开始到结束,并不要求各个阶段都是单线顺序控制,可以根据条件设定几个分支,构成多条路径的控制方式。

时序图

时序逻辑当然要明确地表示出控制顺序在时间上的前后关系。为了使各阶段的前后关系更简洁、准确,通常使用时序图来描述。

### ● 条件控制

根据事先规定好的条件进行逻辑判断,确定顺序控制的执行流向。为了能够实现时间上的前后关系判断和互锁等安全保护措施,希望能够预先设定好条件控制。在具体的电路中,通常由复杂的逻辑电路、锁存器等具有记忆功能的单元电路来实现条件的逻辑判断。

### ● 时间控制

定时器  
时间控制

在顺序控制系统中,一旦将控制权交给执行装置后,检测装置只能够检测操作的结束状态,不能检测这段时间内的中间状态。为此,还需要定时器来进行辅助的时间控制,对执行机构超时执行等情况进行处理。

## □ 相关知识

### ● 可编程控制器

PC

将需要用继电器构成顺序控制的电路用具有继电器功能的逻辑单元替代,这种计算机化的器件称为可编程控制器(Programmable Controller, PC)。其中也有些 PC 产品就直接称为顺序控制器。

一般的顺序控制系统是由图 2.38 所示的梯形图表示,PC 也是按同样的方式表示顺序控制电路。但是,在一般的顺序控制系统中要使用螺丝刀对开关端子和继电器励磁线圈等进行配线,而在可编程序控制器上只要按照控制顺序进行编程即可。

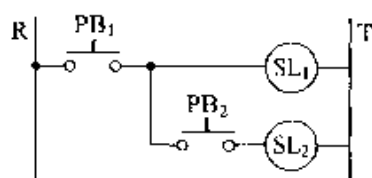
集电极输入  
SSR 输出  
TTL 输出

图 2.38 梯形图示例

初期的 PC 只有开关输入、继电器输出这一种形式。现在则可以选择集电极输入、SSR 输出、TTL 输出等多种形式,而且有内含逻辑单元数从几十个到几千个的多种型号。

电气电子基础知识

## 10 直流电路基础

### □ 要 点

直流电路是电路的基础,在直流电路中产生的各种现象,都是有关电的最基本、最重要的现象。

在定量求解直流电路中的电压和电流关系时,对于简单电路可以使用欧姆定律,而对于复杂电路则应该使用基尔霍夫定律(Kirchhoff's law)。

### □ 解 释 ● 欧姆定律

如图 2.39 所示,“如果在电阻的两端加一电压,则流过该电阻的电流大小与所加的电压成正比,与电阻的阻值成反比”,这一规律称为欧姆定律(Ohm's law),可由下式表示:

$$I = \frac{E}{R}$$

式中,电压  $E$  的单位为[V](伏[特]),电流  $I$  的单位为[A](安[培]),电阻  $R$  的单位为 $\Omega$ (欧[姆])。

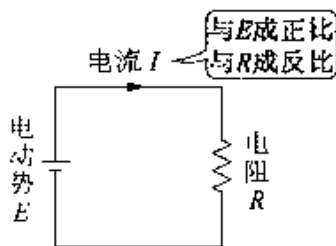


图 2.39 欧姆定律

电压降

此外,当电阻  $R$  上流过电流  $I$  时,会在电阻的两端产生  $R \times I$  [V] 的电位差,这个电位差也称电阻产生的电压降。

### ● 基尔霍夫定律

在基尔霍夫定律中,有关于电流的定律(第一定律)及关于电压的定律(第二定律)。

**基尔霍夫第一定律** 基尔霍夫第一定律表达为“在电路网络中任一节点上,流入节点的电流之和与流出该节点的电流之和相等”。如图 2.40 所示,若流入节点的电流为  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ ,流出节点的电流为  $I_4$ 、 $I_5$ ,则有如下的等式:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5$$

**基尔霍夫第二定律** 基尔霍夫第二定律表达为“电路网络中

任一闭合回路上沿一定方向的电动势之和与电压降之和相等”。

在图 2.41 所示的电路中,假设两个相邻节点之间的电流分别为  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ ,按 a、b、c、d、e、f、a 的顺序绕闭合回路一周,则电动势之和为  $E_1 - (-E_2)$ (当绕行方向与电动势或电流方向相同时取“+”值,否则取“-”值)。回路中的电压降之和为  $R_1 I_1 + (-R_2 \cdot I_2)$ ,由于电动势之和与电压降之和相等,因此可得

$$E_1 - E_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2$$

电动势是将电位升高,电压降是将电位降低,因此该定律可作如下比喻:“从某一点出发,翻越几座山返回出发点时,攀登的高度与下降的高度是相等的”。

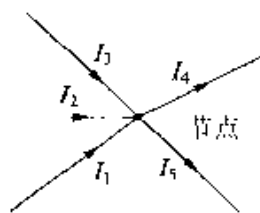


图 2.40 基尔霍夫第一定律

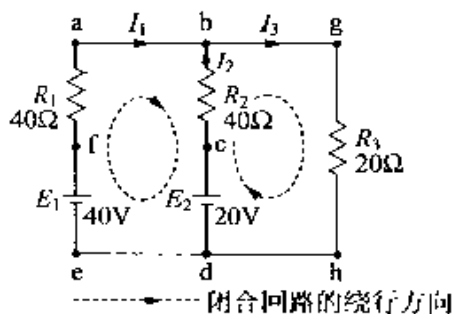


图 2.41 比较复杂的电路

## 例 题

参考图 2.41 回答下列问题。

- ① 列写出关于节点 b 的基尔霍夫第一定律方程式。
- ② 利用基尔霍夫第二定律,列出闭合回路 a-b-c-d-e-f-a 及 b-g-h-d-c-b 的方程式。
- ③ 根据①、②的结果,求解流过回路的电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 。

**答**

①

$$I_1 + I_2 = I_3 \quad (2.1)$$

② 按顺时针方向绕闭合回路 a-b-c-d-e-f-a 一周,电压降之和为  $R_1 I_1 - R_2 I_2$ ,电动势之和为  $E_1 - E_2$ ,因两式相等,由此可得

$$40I_1 - 40I_2 = 40 - 20 \quad (2.2)$$

按同样方法,可得出有关闭合回路 b-g-h-d-c-b 的方程式

$$40I_2 - 20I_3 = 20 \quad (2.3)$$

③ 将由基尔霍夫第一、第二定律所得的表达式(2.1)、(2.2)、(2.3)联立,可得如下联立方程组[式(2.2)、(2.3)的两边同时除以 20 得到]:

$$I_1 + I_2 = I_3$$

$$2I_1 - 2I_2 = 1$$

$$2I_1 + I_3 = 1$$

解这个方程组可得  $I_1 = 0.625\text{A}$ ,  $I_2 = 0.125\text{A}$ ,  $I_3 = 0.75\text{A}$ , 由于所得结果中没有负号, 所以, 假设的电流方向与实际方向一致。

### 选修知识 色环电阻

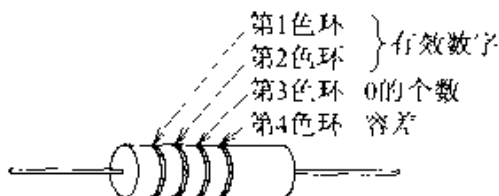
在表示固定电阻的阻值时, 常采用色环来表示, 即用色环替代数字来表示电阻的阻值及容差。

普通电阻如图 2.42 所示, 用 4 条色环表示其阻值及容差。前 3 条色环用来表示阻值, 剩下的一条色环用来表示容差。在图 2.42 中, 还列出了色环颜色与所代表数字的对应关系。

例如, 若某电阻的色环为红、橙、黄、红, 则它所表示的数字为 2342, 而第 3 位是表示指数的, 由此可知该电阻的阻值为

$$23 \times 10^4 = 230[\text{k}\Omega] \pm 2\%$$

高精度电阻是用 5 条色环表示的, 其中前 4 条用于表示阻值。



颜色	阻值			容差/%
	第1色环	第2色环	第3色环	第4色环
5色码	第1色环	第3色环	第4色环	第5色环
黑	0		0	
棕	1		1	±1
红	2		2	±2
橙	3		3	
黄	4		4	
绿	5		5	±0.5
蓝	6		6	+0.25
紫	7		7	±0.1
灰	8		8	
白	9		9	
金			$10^{-1}$	±5
银			$10^{-2}$	±10
无色				±20

图 2.42 电阻的色环编码

## 11 磁场与电场基础

### □ 要 点

磁场与电场的关系极为密切,将机械能转换成电能的发电机和将电能转换成机械能的电动机就是利用磁场与电场的相互关系的典型例子。

反映这一关系的主要内容有库仑定律、右手螺旋定则、弗莱明左手、右手定则。

### □ 解 释 ● 库仑定律

磁极

法国科学家库仑(Coulomb)首先发现了在两个磁极间相互作用力的大小关系,即“两个磁极之间产生的相互作用力,与两个磁极的强度之积成正比、与两个磁极间的距离平方成反比”。这一定律称为关于磁场的库仑定律(Coulomb's law)。磁极的强度单位为[Wb](韦[伯])。

磁极的强度

假设在图 2.13 中,两个磁极的强度分别为  $m_1$  [Wb]、 $m_2$  [Wb],两个磁极的距离为  $r$  [m],则在两个磁极间产生的力  $F$  [N]可以由下式得出:

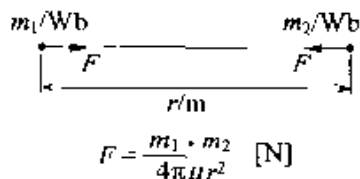
$$F = k \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad [\text{N}]$$

磁导率

在这里,  $k$  为比例常数,  $k = 1/(4 \cdot \pi \cdot \mu)$ ,  $\mu$  是一个常数,称为磁导率,因介质不同而异,单位为 [H/m]。真空中的磁导率用  $\mu_0$  表示,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  [H/m]。磁导率是一个表示磁场(磁力线)穿过该物质难易程度的量。在真空中或空气中,可得

$$F = 6.33 \times 10^4 \times \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad [\text{N}]$$

磁极有正(N极)或负(S极)两种取值,上式的运算的结果带有符号;正表示磁极间为排斥力;负则表示磁极间为吸引力。



$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{4\pi\mu r^2} \quad [\text{N}]$$

图 2.43 库仑定律

● 右手螺旋定则

如图 2.44 所示,“若电流方向与右旋螺钉的前进方向相同,则电流所产生的磁场方向就与螺钉前进时的旋转方向相同”。这定则称为安培右手螺旋定则(Ampere's right-hand screw rule)。

电流与磁场具有密切的因果关系,右手螺旋定则扼要地说明了电流产生的磁场及方向。无论流过电流的导体是直线的还是曲线的,所产生的磁场都是以导体为中心的同轴圆。

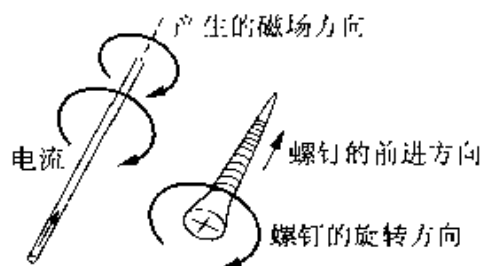


图 2.44 右手螺旋定则

● 弗莱明左手定则

磁力

弗莱明左手定则(Fleming's left-hand rule)指出了磁场对其中流过电流的导体会产生力(磁力)的作用,电能可以转化成机械能。

如图 2.45 所示,“令左手的食指、中指、拇指互成直角,若中指指向电流的方向,食指指向磁场的方向,则拇指指向的就是磁场对导体施加的磁力方向”。

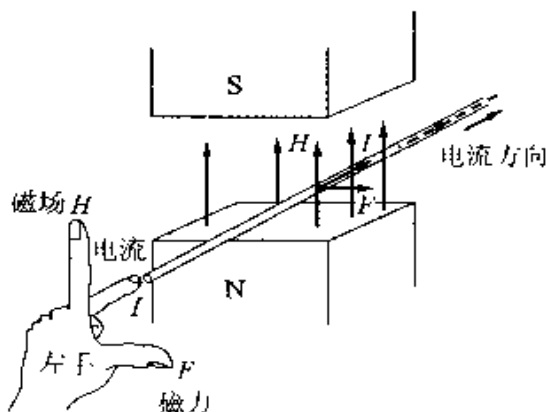


图 2.45 弗莱明左手定则



在这一方向上产生磁力的原因如图 2.46 所示,若将外部磁场与电流产生的磁场分解,就会很容易得到解释。图 2.46(a)所示为由磁极产生的均匀分布的外磁场,图 2.46(b)所示为电流产生的环形磁场。如图 2.46(c)所示,将这两个磁场叠加在一起时,导体左侧的磁场因同相而相互增强,导体右侧的磁场因反向而相互减弱,因此导体将被磁通密度大的一方推向右侧(拇指方向)。电动机的原理可以用弗莱明左手定则来解释。



图 2.46 导体上产生磁力的原因

### ● 弗莱明右手定则

弗莱明右手定则(Fleming's right-hand rule)说明了由机械能转化为电能的原理。它阐述了放置在磁场中的导体,当从外部给它施加一个力并使之运动时,在该导体上会产生一个有方向性的电动势。

如图 2.47 所示,弗莱明右手定则可以表述为“令右手的食指、中指、拇指互成直角,若拇指指向导体的运动方向,食指指向磁场方向,则中指指向的就是导体中产生的电动势方向”。

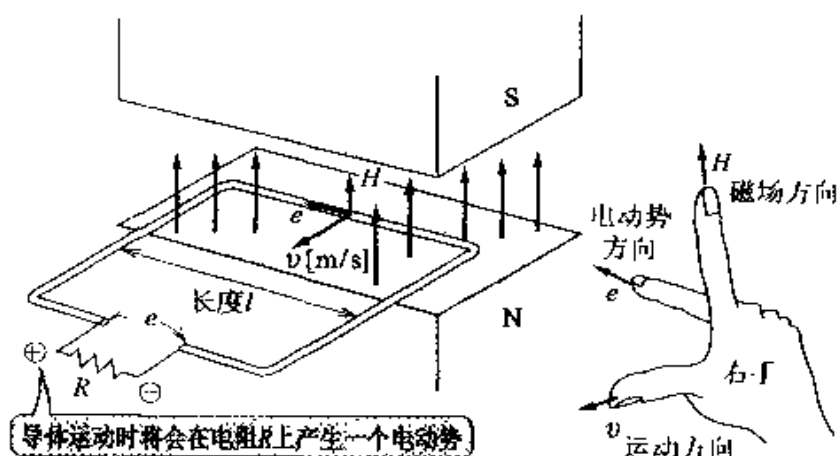


图 2.47 弗莱明右手定则

电动势的大小,与导体横向切割(成直角)的磁力线数(磁通密度)成正比。如图 2.47 所示,假设长度为  $l$  [m] 的导体在磁通密度为  $B$  [T](特斯拉)的均匀磁场中横向切割磁力线,当该导体的移动速度为  $v$  [m/s] 时,在该导体两端产生的电动势  $e$  [V] 为

$$e = B \cdot l \cdot v \cdot \sin\theta \text{ [V]}$$

式中的  $\theta$  是磁场与运动方向所成的角度,当运动方向与磁场方向不成直角时,在直角方向上的速度分量为  $v \cdot \sin\theta$

● 电容器

在两片相向的金属板间夹入一绝缘体,并将两金属板分别与电池的正、负电极相连,由于静电感应,会在正极一侧的金属板上聚集正电荷,在负极一侧的金属板上聚集负电荷(电荷存贮效应)。此时,金属板上所存贮的电荷量就称为电容量(或简称电容),这种器件称为电容器(capacitor)。电容量与电容器的物理结构及材质有关。如图 2.48 所示,假设金属板面积为  $A$  [m<sup>2</sup>],金属板的间距为  $d$  [m],则电容量(电容) $C$  可由下式求出:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \text{ [F]}$$

在实际使用时,由于 [F] 这种单位太大,常采用其辅助单位 [ $\mu$ F](微法)或 [pF](皮法)。

$\epsilon$  为极板间所夹绝缘体的电导率,是一个因介质不同而异的常量,单位为 [F/m]。真空中的电导率为  $\epsilon = 8.85 \times 10^{-12}$  [F/m]。

静电容量  $C$  与存贮电荷  $Q$  及外加电压  $V$  之间的关系可由  $Q = CV$  [C] 表示。由此可以看出,电容量  $C$  表示在每 1V 电压作用下电容器所能存贮的电荷量。

静电感应  
电荷存贮效应  
电容量

电导率

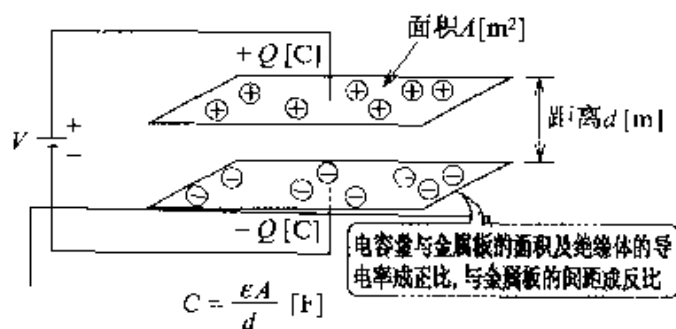


图 2.48 电容器的工作原理

● 电容量的表示方法

同电阻一样,电容的电容量也用 3 位数字表示。最初 2 位为

有效数字,第3位表示其后0的个数。

当电容为大容量的电解电容时,使用 $[\mu\text{F}]$ 为单位,当电容量为小容量的聚乙烯或树脂电容时,使用 $[\text{pF}]$ 为单位。数字后面的英文字母B~N表示0.1~1.30%的容差量。例如,103G的聚乙烯电容,其容量可按下式求得:

$$10 \times 10^3 = 10000[\text{pF}] = 0.01 [\mu\text{F}]$$

### ● 电容器的串联和并联

当两个以上电容按图 2.49(a)的形式串联时,其等效电容量为“各电容倒数之和的倒数”,可按下式求出:

$$C_s = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}} \quad [\text{F}]$$

当两个以上电容按图 2.49(b)的形式并联时,其等效电容量为“各电容的算术之和”,可按下式求出:

$$C_p = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

由表达式可以看出,求电容串、并联的等效电容的表达式正好与电阻的相反。

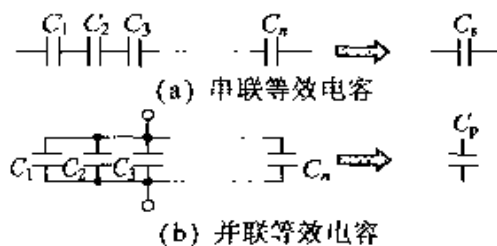


图 2.49 电容的串、并联等效电容

### 例 题

例 1 假设在磁通密度为 1T 的均匀磁场中放置一长度为 100m 的导体,当该导体与磁场方向成  $30^\circ$  夹角、以 100m/s 的速度移动时,求在该导体上产生的电动势。

答

将  $B = 1\text{T}$ 、 $l = 0.1\text{m}$ 、 $v = 100\text{m/s}$ 、 $\theta = 30^\circ$  代入电动势的公式中,可得如下结果:

$$e = B \cdot l \cdot v \cdot \sin\theta$$

$$1 \times 0.1 \times 100 \times \sin 30^\circ = 5[\text{V}]$$

例 2 假设将平板电容器的面积增至 2 倍,极板的间距减至一半,那么新电容器的电容量为原电容器的多少倍?

答

因电容器的电容量与极板的面积成正比,与极板间的间距成反比,故面积增至 2 倍、间距减至一半时,新电容器的电容量为原电容器的 4 倍。

# 12 电路元件的功能

## 要 点

在机电一体化领域广泛应用晶体管、数字 IC(集成电路)以及各种传感器等半导体器件。这些半导体器件(或设备)都是由 n 型半导体或 p 型半导体构成的。

在由晶体管集成的数字 IC 中,有 TTL 及 CMOS 两类。其中,74 系列是现在使用最多的一种。

## 解 释

### ● 半导体

导电性能介于导体与绝缘体之间的物质称为半导体(semiconductor)。当外部条件(温度或纯度)发生变化时,其导电率将会发生很大的变化,温度系数为负值是半导体的一个特点。

纯度非常高(99.999999999%(小数点后 9 个 9))的精制 4 价硅与锗材料称为本征半导体。在本征半导体中,只要加入极少量的不纯物质,其半导体的性质就会发生很大的变化。例如,向本征半导体中掺入 5 价的其它物质(如磷元素等)后,电子将成为该物质电流的主要载流子(多子),这样的半导体称为 n 型半导体;如果向本征半导体中掺入 3 价的其它物质(如硼元素等),则空缺的电子(空穴)将成为该物质的主要载流子,这样的半导体称为 p 型半导体。

### ● 二极管

将 p 型半导体与 n 型半导体按点或面的方式相接,所形成的半导体结构称为 pn 结,如图 2.50 所示。将 pn 结的 p 型半导体与 n 型半导体分别接上电极构成的元件称为 pn 结二极管。p 型半导体所接的电极称为阳极(A),n 型半导体所接的电极成为阴极(K)。

若从外部给这个 pn 结型二极管加上一个电压,则这个二极管具有只能从阳极到阴极允许电流流过的单向导电性。这一现象称为二极管的整流效应。

导电率

温度系数

本征半导体

n 型半导体

p 型半导体

pn 结

阳极

阴极

整流效应

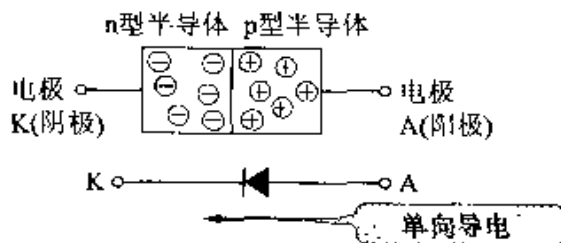


图 2.50 二极管的工作原理及符号

正向连接  
反向连接

如图 2.51(a)所示,在将二极管与外加电源连接时,如果电源的“+”极与 p 型半导体相接、“-”极与 n 型半导体相接,则称为二极管的正向连接;反之,称为反向连接。图 2.51(b)中给出了在两种连接方式下二极管的两端电压与流过二极管电流大小之间的特性关系。

从图 2.51(b)中可以看出,在正向连接并且外加电压很低时,二极管中几乎没有电流流过;而当外加电压超过某一数值时,流过二极管的电流将急剧增加。电流急剧增加时的外加电压几乎是固定不变,对于硅二极管为 0.6V,对于锗二极管为 0.2V。

齐纳现象  
击穿现象

在反向连接时,反向电压增至很大,二极管中仍几乎没有反向电流流过;然而,当反向电压超过某一数值时,反向电流将急剧增大,这种现象称为齐纳(Zener)现象或击穿现象。此时,若将反向电压降低至原来大小,击穿现象将会消失。

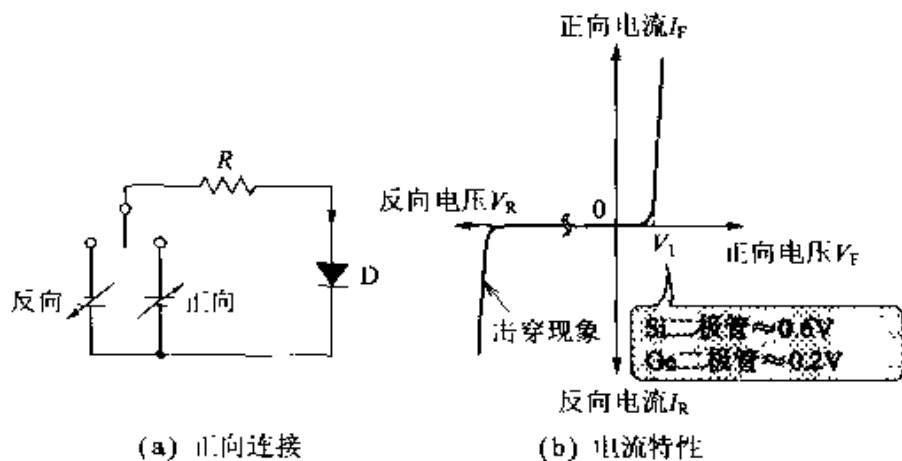


图 2.51 二极管的静态特性

### ● 晶体管

晶体管

两侧用同一种类型的半导体(如 p 型半导体或 n 型半导体)、中间用另一种类型的半导体(如 n 型半导体或 p 型半导体)形成“三明治”结构,并且从每一层都引出一个电极,如此构成的器件称为晶体三极管(或简称晶体管,transistor)。

基极  
集电极  
发射极

因中间所夹半导体类型的不同,晶体三极管分为 npn 型及 pnp 型两种,图 2.52 给出了这两种类型晶体三极管的符号。这些符号清楚地表示出晶体三极管的结构及电流的方向。3 个电极(管脚)分别称为基极(B)、集电极(C)、发射极(E),发射极上的箭头表示电流方向。

$h_{FE}$   
直流电流增益

对于 npn 型晶体管,发射极上的箭头向外,表明该晶体管正常工作时,基极电流  $I_B$  与集电极电流  $I_C$  在发射极会合后,形成的发射极电流  $I_E$  由发射极流出(此时,  $I_C$  比  $I_B$  大数十至数百倍,其比值  $h_{FE}$  称为直流电流增益) 箭头方向表示会合后的电流方向,如图 2.53 所示。

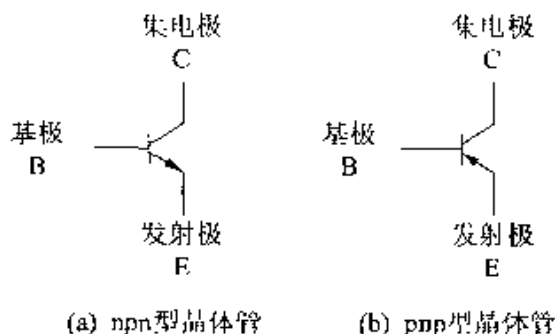


图 2.52 npn 型晶体管与 pnp 型晶体管

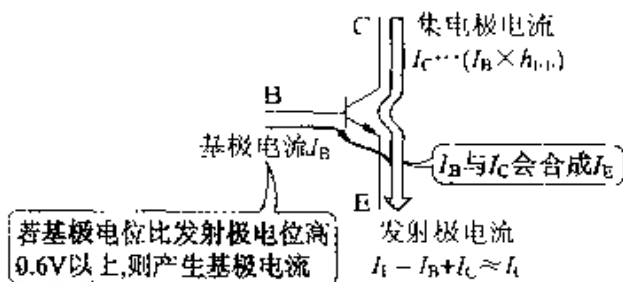


图 2.53 晶体管的工作电流

pnp 型晶体管的电流方向与 npn 型晶体管相反,虽然,发射极电流分流成集电极电流及基极电流,但是,  $I_B + I_C = I_E$  的关系仍然不变。图 2.51 所示为利用晶体管的开关特性用小电流晶体管驱动交流负载电源 (ON、OFF(电力控制)电路)的示例

开关特性

关于晶体管的开关特性,有如下几个方面:

① 当基极电位比发射极电位高大约 0.6V 以上时,就会产生基极电流。此时,集电极与发射极之间的电阻几乎为 0,从集电极到发射极之间有一个为基极电流  $h_{FE}$  倍的大电流流过。晶体管的这种状态称为 ON 状态,相当于机械开关的闭合状态,如图 2.53 (a)所示。

② 当基极电位比发射极电位高但在 0.6V 以下时,集电极与发射极之间的电阻近似为无穷大,晶体管不会产生基极电流,也

不会产生发射极电流。此状态称为 OFF 状态,相当于机械开关的断开状态,如图 2.55(b)所示。

必须牢固掌握晶体管的开关特性,即当晶体管处于 ON 状态时,发射极与集电极之间的电压几乎为 0;当晶体管处于 OFF 状态时,发射极与集电极之间的电压几乎为电源电压。

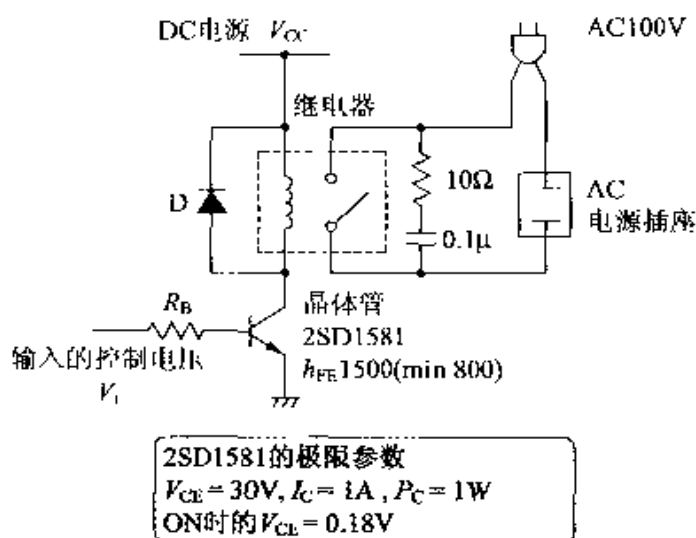


图 2.54 晶体管开关控制电路

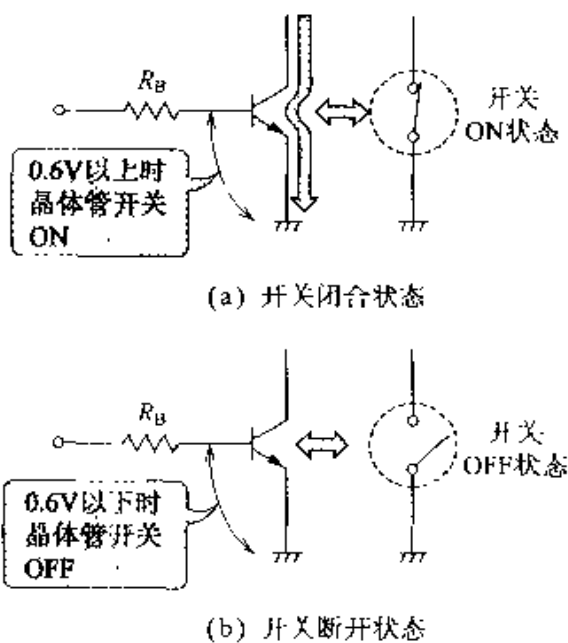


图 2.55 晶体管开关的 ON 与 OFF

## 大功率达林顿 晶体管

当电路中需要开关更大的电流时,可以采用电力电子线路中常用的大功率达林顿(Darlington)晶体管。

### ● IC

## 集成电路

IC是**集成电路**(Integrated Circuit)的英文缩写。它是在硅晶片上利用精密照相技术及精密加工技术,将数量巨大的晶体管集成在一起构成的器件。根据集成度的不同,可将IC按图2.56所示的方法进行分类。

集成电路(IC)的类别	内含元件数(按晶体管计算)
SSI (Small Scale IC)	100以下
MSI (Medium Scale IC)	100 ~ 1 000
LSI (Large Scale IC)	1 000 ~ 100 000
VLSI (Very LSI)	10万 ~ 1 000万
ULSI (Ultra LSI)	1 000万以上

图 2.56 按集成度分类

## 双极型 单极型

按用途的不同,可以将IC大体划分为模拟IC与数字IC。此外,按数字IC的制造方法及结构的不同,又可以将其分为**双极型**(bipolar)与**单极型**(unipolar)两类。双极型与单极型IC还可以细分为多种。在机电一体化领域中,使用最多的是双极型的**TTL**(Transistor Transistor Logic)及单极型的**CMOS**(Complementary Metal Oxide Semiconductor)IC。

## CMOS

## TTL74系列

TTL的历史较长,特别是在通用的**TTL74**系列逻辑IC中,有门电路、触发器、计数器、寄存器、运算电路等许多品种,应用十分广泛,现在已成为一种标准。CMOS的历史比TTL要短,但由于它的耗电极少、结构简单易于集成。早期CMOS电路的工作速度低于同类TTL电路,由于工艺的改进,现已达到与TTL并驾齐驱的程度,在数字IC产品中现已占有很大的比例。

图2.57所示为部分数字IC的外形封装及名称。其中的各端子(引脚)分别用于连接电源、输入信号、输出信号以及控制信号等。如图2.58所示,数字IC的各引脚都带有序号。

在应用最广的TTL74系列逻辑电路中,接电源的两个引脚位于芯片的对角线上。右下角的引脚为地,左上角的引脚(最大序号的引脚)为电源+,其它引脚都是信号引脚。图2.59所示为集成有4路双输入与非门(NAND)的高速CMOS芯片74HC00的管脚图。



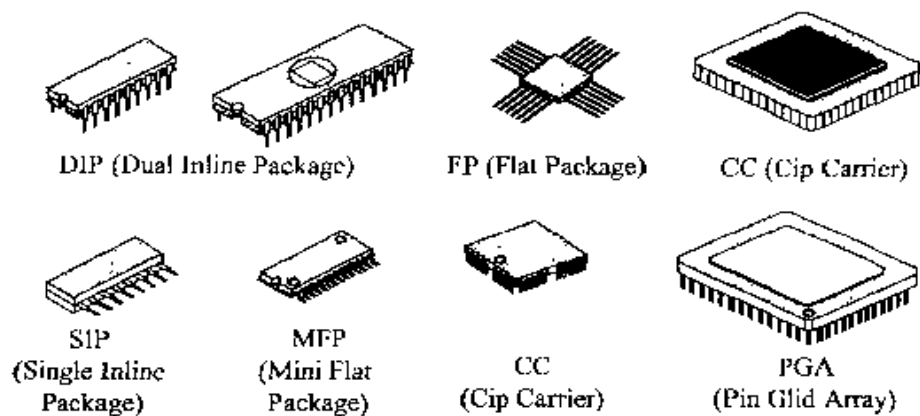


图 2.57 数字 IC 的外形封装及名称

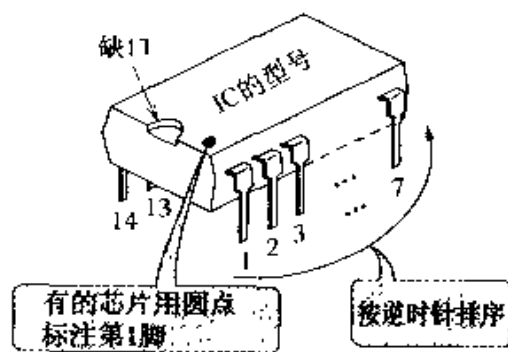


图 2.58 IC 管脚序号(14 脚的芯片)

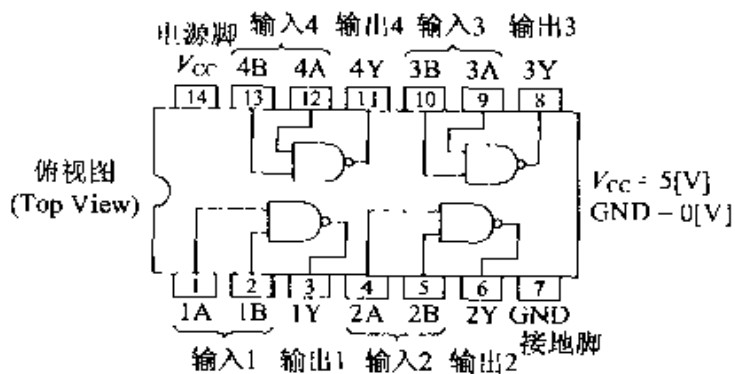


图 2.59 74HC00 的管脚图

## 相关知识 ● 达林顿三极管

如图 2.60 所示,将两个晶体管组合封装在一起构成电流增益非常大的晶体管称为达林顿三极管。用于电力电子线路的达林顿三极管的  $h_{FE}$  可达 2000 左右;用于小信号放大达林顿三极管的  $h_{FE}$

则高达 10000 左右,因此用这类晶体管能够比较容易地实现对大电流的控制。

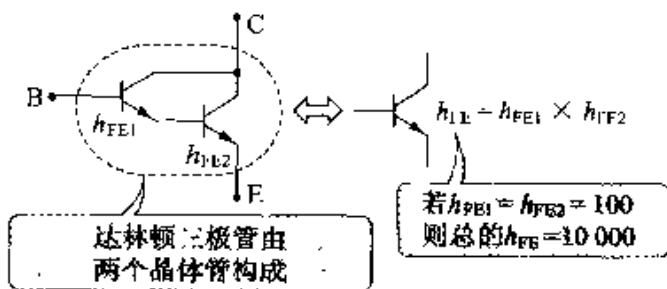


图 2.60 达林顿三极管

● 双极型与单极型

双极结构

单极结构

双极型晶体管是指同晶体三极管一样是由 n 型半导体和 p 型半导体两种不同半导体材料构成的双极结构,而单极型晶体管是指只利用一种半导体(n 型半导体或者 p 型半导体)构成的场效应晶体管(FET)或 MOS 型 IC 的单极结构。

■ 例 题

假设在图 2.54 所示的晶体管开关电路中,继电器线圈的额定工作电流为 200mA,开关的动作电压  $V_i$  为 4V,求该电路中的基极电阻  $R_B$ 。晶体管的额定参数如图 2.61 所示。

答

在控制电压  $V_i$  的作用下,晶体管处于 ON 状态时的集电极电流  $I_c$  为 200mA,假设晶体管的  $h_{FE}$  取最小值 800,则此时的基极电流可以按下式求出:

$$I_B = \frac{2I_c}{h_{FE}} = \frac{400}{800} = 0.5 \text{ [mA]}$$

从图 2.61 可知,当  $V_i$  为 4V 时  $I_B$  为 0.5mA,由于晶体管工作时基极电位为 0.6V 即可,因此基极电阻的大小可由下式求出:

$$R_B = \frac{V_i - V_B}{I_B} = \frac{4 - 0.6}{0.5} = 6.8 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

在选取晶体管时,可选工作电流及工作电压都为额定值 2 倍的产品

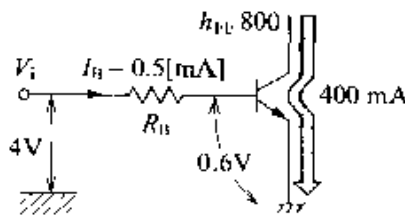


图 2.61 晶体管开关 ON 状态时的电压

■ 应用基础 晶体管的命名方法

晶体管的命名方法都是根据国际标准(EIA/JEDEC)按图 2.62 的方式命名的。

双极型	2SA	pnp 型高频晶体管
	2SB	pnp 型低频晶体管
	2SC	npn 型高频晶体管
	2SD	npn 型低频晶体管
单极型	2SJ	p 沟道场效应晶体管
	2SK	n 沟道场效应晶体管

图 2.62 晶体管的命名方法

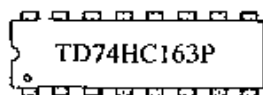
在个别产品的名称中,有时省略了前面的 2S 符号。

### IC 的命名方法

数字 IC 的型号都是以白色文字印刷在 IC 芯片的上面。数字 IC 芯片的命名方法是按国际标准,采用图 2.63 所示的 5 部分连续字符构成。从左向右这些字符分别表示:

- ① 生产厂家代码 如 TD(东芝)、HD(日立)、MN(松下)、UPD(NEC)等。
- ② 温度范围代码 54(军用:  $55 \sim +125^{\circ}\text{C}$ )、74(商用:  $40 \sim +85^{\circ}\text{C}$ )。
- ③ 类型代码 LS(TTL Lowpower Schottkyye)、F (TTL. Fast)、AS(TTL Advanced Schottkyye)、HC (CMOS High Speed)、AC(CMOS Advanced CMOS)等。
- ④ 型号代码 由 2 位或者 3 位数字构成,型号码相同的产品具有相同的功能。
- ⑤ 封装材料代码 P 为塑料封装、C 为陶瓷封装。

①	②	③	④	⑤
TD	74	HC	163	P



以 TD74HC163P 为例

图 2.63 IC 的命名方法

# 13 逻辑电路的结构

## 要 点

控制技术在很大程度上是通过以计算机为核心的数字技术完成的。计算机内部采用二进制数或二进制码表示信息,用电压的高低或者有无表示逻辑“0”和“1”,通过逻辑电路实现一些复杂的处理。

在构成逻辑电路的最基本单元电路中,有 AND 电路、OR 电路和 NOT 电路三种,无论多么复杂的逻辑电路,都可由这三种电路的组合来实现。另外,在分析逻辑电路功能或设计逻辑电路时,还经常会用到真值表及布尔代数。

## 解 释

### ● 二进制数

每位仅由两种数码构成的数称为二进制数。

通常使用的十进制数,每位都是由 0、1、2、3、…、9 这 10 种数码构成的。在十进制数中,如果某一位是 9,再加 1 后就会返回到 0,同时使上一位加 1 而产生进位。十进制数中的每一位都遵守这种规则,因此,用十进制数可以表示任何大小的数。

二进制数为逢二进一,计数方法如图 2.64 所示。

通常,对于每位都是由  $r$  种数码表示的一个  $r$  进制数

$$N = d_{n-1}d_{n-2} \dots d_1d_0d_{-1}d_{-2} \dots$$

可以将其展开成形式

$$N = d_{n-1} \times r^{n-1} + d_{n-2} \times r^{n-2} + d_{n-3} \times r^{n-3} + \dots \\ + d_0 \times r^0 + d_{-1} \times r^{-1} + d_{-2} \times r^{-2} + \dots$$

其中,  $d_1, d_2, \dots$  表示对应位上的数,  $r$  称为基数,  $r$  的幂称为该位的权。例如,十进制数的基数为 10, 365 可以表示成

$$365 = 3 \times 10^2 + 6 \times 10^1 + 5 \times 10^0 \\ = 3 \times 100 + 6 \times 10 + 5 \times 1$$

二进制数的基数为 2。因此, 101110 可以表示成

$$101110 = 1 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 \\ = 32 + 8 + 4 + 2 \\ = 46$$

对于二进制数,第 0 位开始,各位的权是按 1、2、4、8、… 的方式增加。图 2.65 中给出了二进制数部分位的权。根据上面的结果可知,二进制数 101110 是表示十进制数的 46。我们将二进制数中的一个位称为位,8 个位构成一个字节,16 个位构成一个字。

权

位  
字节  
字

十进制数	二进制数	十六进制数
0	0	0
1	1	1
2	10	2
3	11	3
4	100	4
5	101	5
6	110	6
7	111	7
8	1000	8
9	1001	9
10	1010	A
11	1011	B
12	1100	C
13	1101	D
14	1110	E
15	1111	F
16	10000	10
17	10001	11

图 2.64 数的表示方法

位	权	
	指数形式	十进制形式
∴	∴	∴
6位	$2^5$	32
5位	$2^4$	16
4位	$2^3$	8
3位	$2^2$	4
2位	$2^1$	2
1位	$2^0$	1
小数点	,	,
1位	$2^{-1}$	0.5
2位	$2^{-2}$	0.25
3位	$2^{-3}$	0.125
4位	$2^{-4}$	0.062 5
5位	$2^{-5}$	0.031 25
∴	∴	∴

图 2.65 二进制数的位与权

### ● 十六进制数

十六进制数是每位由 16 种数码表示的。由于没有 16 种独立的数码,因此,通常采取 0~9 沿用阿拉伯数字、10~15 采用英文字母 A~F 来对应表示。由于十六进制的基数为 16,因此,各位的权是 16 的对应次幂。

例如,十六进制数 3BD 可以表示为

$$\begin{aligned}
 3BD &= 3 \times 16^2 + B \times 16^1 + D \times 16^0 \\
 &= 3 \times 256 + 11 \times 16 + 13 \times 1 \\
 &= 768 + 176 + 13 \\
 &= 957
 \end{aligned}$$

由结果可知,它表示十进制数的 957。从图 2.64 还可以看出,采用十六进制可用最少的位数描述一个数据,而一位十六进制数正好对应四位二进制数,因此,当需要用多位二进制数或二进制码描述数据时,采用十六进制替代能简化描述。

为了区分二进制、十进制、十六进制数时,可以使用如下的标记:

二进制数:  $(1101)_2$ ,  $(1101100)_B$ ,  $101011_{(2)}$ ,  $101011_{(10)}$  等

十进制数:  $(486)_{10}$ ,  $(7536)_D$ ,  $1953_{(10)}$ ,  $2000_{(10)}$  等

十六进制数:  $(1AB)_{16}$ ,  $(7BC)_{16}$ ,  $FFF_{(16)}$ ,  $ABCD_{(16)}$  等

## ● 基本逻辑电路

在基本逻辑电路中,除 AND、OR、NOT 电路之外,还有 NAND、NOR、EX OR(Exclusive OR)等多种逻辑电路。

逻辑“与”电路

**AND 电路** AND 电路称为逻辑“与”电路,也称与门。当所有输入都为 1 时,输出才为 1。图 2.65(a)给出一个输入为 A、B,输出为 Y 的双输入 AND 电路的逻辑符号。由于这种符号原于美军标准(MIL 标准)的,因此也称 MIL 符号,是在很多领域普遍使用的逻辑电路符号。

MIL 标准

逻辑“或”电路

**OR 电路** OR 电路称为逻辑“或”电路,也称或门。只要输入中有一个为 1,输出就为 1。图 2.66(b)给出一个双输入 OR 电路的 MIL 符号。

反相器

**NOT 电路** NOT 电路称为反相器,也称非门,是将输入反相后输出。图 2.66(c)给出了 NOT 电路的逻辑符号,用三角形加小圆圈表示。这个小圆圈称为倒相,也称状态描述符。在 MIL 符号中,常用于表示低(Low)使能。

非门

倒相

状态描述符

在实际电路中,除 AND、OR、NOT 外,还常使用由这三种电路组合而成的 NAND 电路及 NOR 电路。仅用 NAND 电路或 NOR 电路中的任何一种电路,就可以构造出 AND、OR、NOT 的等效电路。从防止噪声干扰的角度考虑,在实际电路中应多采用低使能的电路。

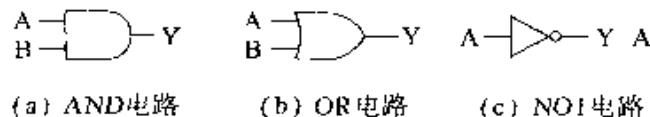


图 2.66 基本逻辑电路

**NAND 电路** NAND 电路是在 AND 电路输出端加上一个 NOT 电路构成的。其工作原理是:“仅当输入全部为 1 时,输出才为 0”。原本应按图 2.67(a)方式表示,但由于经常使用, MIL 符号将其简化为在 AND 输出端加一个小圆圈,如图 2.67(b)所示。

**NOR 电路** NOR 电路是在 OR 电路输出端加一个 NOT 电路构成的。其工作原理是:“当输入中有一个为 1,输出就为 0。”MIL 符号也将其简化为在 OR 输出端加一个小圆圈,如图 2.67(c)所示。

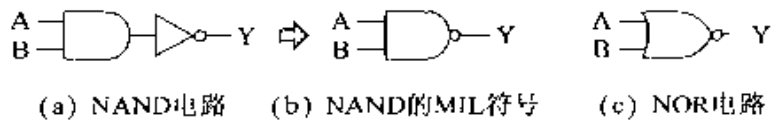


图 2.67 NAND 电路与 NOR 电路

### ● 真值表

有时仅由逻辑电路图很难看出输入输出间的逻辑关系。此时,可以将所有可能的输入状态(0或1)与对应的输出状态列成个表(输出状态的0或1取值也称真值),通过此表,输入输出的关系可一目了然,此表称为真值表(truth table)。

在图 2.68(a)中,列出了双输入 AND 电路及双输入 OR 电路的真值表,在图 2.68(b)中,列出了 NOT 电路的真值表。此外,在图 2.69 中还给出了一个 3 输入变量真值表的例子。

输入		输出	
A	B	AND电路	OR电路
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	1

输入A	输出Y
0	1
1	0

(a) 双输入AND电路与双输入OR电路 (b) NOT电路

图 2.68 基本逻辑电路的真值表

输入			中间结果				输出
A	B	C	BC	A+BC	AB	AB+C	$Y=(A+BC) \cdot (AB+C)$
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	1	0
0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	0	1	1
1	0	0	0	1	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	1
1	1	0	0	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1

图 2.69 3 变量真值表示例

### ● 逻辑表达式(布尔代数)

逻辑表达式是采用表达式形式来表示逻辑电路输入与输出关系的方式。基本运算电路中的双输入 AND 电路、双输入 OR 电路及 NOT 电路可用如下的表达式来表示:

AND 电路的逻辑表达式:  $Y = A \cdot B$  (读成 A 与 B)

OR 电路的逻辑表达式:  $Y = A + B$  (读成 A 或 B)

NOT 电路的逻辑表达式:  $Y = \bar{A}$  (读成 A 的非)

逻辑代数  
布尔代数  
公理  
定理

用代数式的形式表达逻辑运算的数学分支,称为逻辑代数或布尔代数。在逻辑代数的运算中,可以根据公理以及由公理推导出的定理来进行,在下面列出的公理及定理中,(a)与(b)是相互对应的。

#### 公理

公理 1 (a)若  $A \neq 0$ , 则  $A^{-1}$  (b)若  $A \neq 1$ , 则  $A = 0$

公理 2 (a) $0 \cdot 0 = 0$  (b) $1 + 1 = 1$

公理 3 (a) $1 \cdot 1 = 1$  (b) $0 + 0 = 0$

公理 4 (a) $0 \cdot 1 = 1 \cdot 0 = 0$  (b) $1 \cdot 0 = 0 + 1 = 1$

公理 5 (a) $1 = 0$  (b) $0 = 1$

#### 定理

定理 1 (a) $A \cdot B = B \cdot A$  (b) $A + B = B + A$  交换率

定理 2 (a) $(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$  (b) $(A + B) + C = A + (B + C)$  结合率

定理 3 (a) $(A + B) \cdot (A + C) = A + B \cdot C$  (b) $AB + AC = A(B + C)$  分配率

定理 4 (a) $A \cdot 0 = 0$  (b) $A + 1 = 1$

定理 5 (a) $A \cdot 1 = A$  (b) $A + 0 = A$

定理 6 (a) $A \cdot A = 0$  (b) $A + A = 1$  互补率

定理 7 (a) $A \cdot A = A$  (b) $A + A = A$  重叠率

定理 8 (a) $A \cdot (A + B) = A$  (b) $A + AB = A$  吸收率

定理 9 (a) $\overline{\overline{A}} = A$  双重否定

定理 10 (a) $\overline{A \cdot B} = \overline{A} + \overline{B}$  (b) $\overline{(A + B)} = \overline{A} \cdot \overline{B}$  摩根定理

真值表  
文氏图

这些定理可由公理进行证明,也可用真值表或文氏图(卡诺图)得到同样的证明。

### □ 相关知识 ● 由十进制数转换成二进制数及十六进制数

可按图 2.70 所示的顺序,将十进制数转换成二进制数及十六



进制数。

十进制 → 二进制

$$\begin{array}{r}
 372_{(10)} \\
 2 \overline{) 372} \quad \dots \text{余数} \\
 \underline{2) 186} \quad \dots 0 \text{ (最低位)} \\
 \underline{2) 93} \quad \dots 0 \\
 \underline{2) 46} \quad \dots 1 \\
 \underline{2) 23} \quad \dots 0 \\
 \underline{2) 11} \quad \dots 1 \\
 \underline{2) 5} \quad \dots 1 \\
 \underline{2) 2} \quad \dots 1 \\
 \underline{2) 1} \quad \dots 0 \\
 0 \quad \dots 1 \text{ (最高位)}
 \end{array}$$

$$372_{(10)} = 101110100_{(2)}$$

十进制 → 十六进制

$$\begin{array}{r}
 372_{(10)} \\
 16 \overline{) 372} \quad \dots \text{余数} \\
 \underline{16) 23} \quad \dots 4 \text{ (最低位)} \\
 \underline{16) 1} \quad \dots 7 \quad \uparrow \\
 0 \quad \dots 1 \text{ (最高位)}
 \end{array}$$

$$372_{(10)} = 174_{(16)}$$

(a) 整数部分

十进制小数 → 二进制小数

$$0.71875_{(10)}$$

$$\begin{array}{l}
 0.71875 \times 2 = \textcircled{1}.4375 \dots 1 \text{ (小数第1位)} \\
 0.4375 \times 2 = \textcircled{0}.875 \quad \dots 0 \\
 0.875 \times 2 = \textcircled{1}.75 \quad \dots 1 \\
 0.75 \times 2 = \textcircled{1}.5 \quad \dots 1 \\
 0.5 \times 2 = \textcircled{1}.0 \quad \dots 1
 \end{array}$$

为0时结束

$$0.71875_{(10)} = 0.10111_{(2)}$$

十进制小数 → 十六进制小数

$$0.71875_{(10)}$$

$$\begin{array}{l}
 0.71875 \times 16 = \textcircled{11}.5 \dots 11(B) \text{ (小数第1位)} \\
 0.5 \times 16 = \textcircled{8}.0
 \end{array}$$

为0时结束

$$0.71875_{(10)} = 0.38_{(16)}$$

(b) 小数部分

图 2.70 由十进制数转换成二进制和十六进制数的方法

## 例 题

[1] 画出逻辑表达式  $Y = A \cdot (BC + CA)$  所对应的逻辑电路图并填写对应的真值表。

**答]**

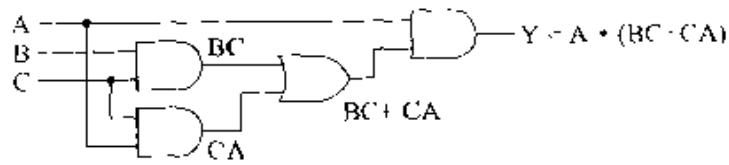
表达式是由三个 AND 与一个 OR 构成的。注意到逻辑运算的优先顺序为：非、()、·、+，于是就可以得出图 2.71(a) 所示的电路。

由于输入是三个变量，因此，求出 8 种 0、1 输入所对应的输出真值，就可得出图 2.71(b) 所示的真值表。

[2] 用真值表证明定理 3 的(b)式。

**答]**

若能证明表达式的左右两边，对应三个输入变量 A、B、C 的所有输入，都能得到相同的真值就可得证，其结果如图 2.72 所示。



(a) 逻辑电路图

输入			中间步骤			输出
A	B	C	BC	CA	BC+CA	$Y = A(BC+CA)$
0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	1	0
1	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	1	1	1
1	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1

(b) 真值表

图 2.71  $Y = A \cdot (BC + CA)$  的逻辑电路图与真值表

输入			左边			右边	
A	B	C	$A \cdot B$	$A \cdot C$	$AB+AC$	$B+C$	$A \cdot (B+C)$
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	1	0
0	1	0	0	0	0	1	0
0	1	1	0	0	0	1	0
1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	1	1	1	1
1	1	0	1	0	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1

图 2.72 用真值表证明  $AB+AC = A(B+C)$

## 14 计算机基础

### 1.1 要点

计算机是一种按用户要求对各种数据进行整理、检索、处理等操作的装置。为了使计算机能有效地工作,计算机主机(硬件)及驱动其工作的程序(软件)紧密结合,缺一不可。

在计算机家族中,从通用的大型计算机到单片型计算机种类繁多,用途各异,运算速度和存储容量等性能也各不相同。

### 1.2 解释 ● 计算机的组成

为了实现其功能,计算机由图 2.73 所示的五个基本功能部件构成。

① 输入设备 具有读取有确切含义数据的功能。

② 存储器 具有数据存储、写入、读出等功能,分为安装在计算机内部的主存储器(内存)和连接在主机外部的存储器(外存)。

③ 运算器 具有将存储的数据进行计算、处理、判断等功能。

④ 输出设备 具有将处理后的数据进行打印、显示或者向外部存储器等设备输出控制信号等功能。

⑤ 控制器 具有控制各设备间数据交换等功能。

在上述的各功能部件中,控制器和运算器相互协调进行工作,属于计算机的核心部分,被称为中央处理单元(CPU; Central Processing Unit)。

中央处理单元  
CPU

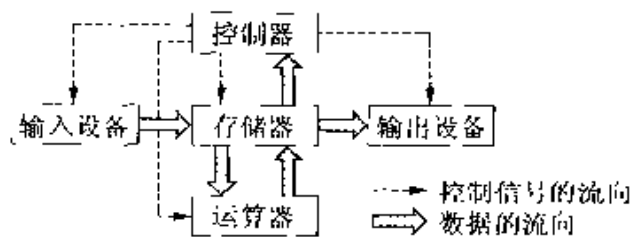


图 2.73 计算机的五个功能部件

### ● 计算机的应用

计算机的应用范围极其广泛,从我们身边的家电产品到报刊编辑、天气预报、医疗器械、办公设备、各种工厂的自动化设备等,其应用遍及各个领域。

### ● 对机械设备的控制

模拟量  
数字量

我们日常接触的时间、温度、压力、亮度等很多物理信号都是连续变化的量,称之为**模拟量**;而计算机所能处理的信号是像人脉搏一样不连续变化的量,称之为**数字量**。

A/D 转换  
D/A 转换

为了能在同一系统中处理这两类不同性质的信号,就需要对这些信号进行相互变换,即进行**A/D 转换**(模拟量→数字量)或**D/A 转换**(数字量→模拟量)。

接口电路

此外,为了使计算机能与外部设备相连,还需要有另一种部件来完成上述信号的相互转换,并对信号的电压差异以及信号的传输时序差异等等进行调整,使数据能在计算机与外部设备之间顺畅地传输。这种功能部件称为**接口电路**(interface)。

计算机产生的数字信号不能直接驱动机械设备工作。为了能对机械设备进行控制,还必须要有能够交换控制信号的接口电路、驱动执行装置的驱动电路以及电源电路。

闭环控制  
开环控制

在对机械设备进行控制时,可以采用通过不断比较来自传感器的外部数据和控制目标动作的数据,从而对输出数据进行修正的**闭环控制方法**;也可以采用仅按工作顺序输出动作所需数据的**开环控制方法**。

## □ 相关知识

FMS

### ● 无人工厂

FMS(Flexible Manufacturing System)是用于生产多品种小批量产品的一种生产系统。它将生产系统软件化,不需要人去直接干预与零件加工、搬运等机械设备,靠计算机控制实现生产的全自动化。

机器人  
加工中心  
数控机床

支撑 FMS 生产系统的加工机械,是代表机电一体化技术的机器人、加工中心(MC: Machining Center)、数控(NC: Numerical Control)机床等机械。通过运用 CAD/CAM 等计算机辅助的设计/生产系统,将这些机械组成生产线,实现工厂的自动化。

# 15 程序流程图的绘制

**要 点** 编写程序的第一步是绘制程序流程图

**解 释** ● 流程图与算法

为解决某一问题而采取的处理方法与步骤称为算法(algorithm)。将算法用图形表达出来就是流程图(flowchart)。

按照流程图,编写程序可以防止发生逻辑错误,也便于他人读懂自己所编写的程序。

● 流程图符号

在日本标准 JIS X 0121“信息处理流程图”中,规定了 26 种符号。在图 2.74 中,列出了部分常用符号,其中经常使用的几种符号如下。

信息处理流程图

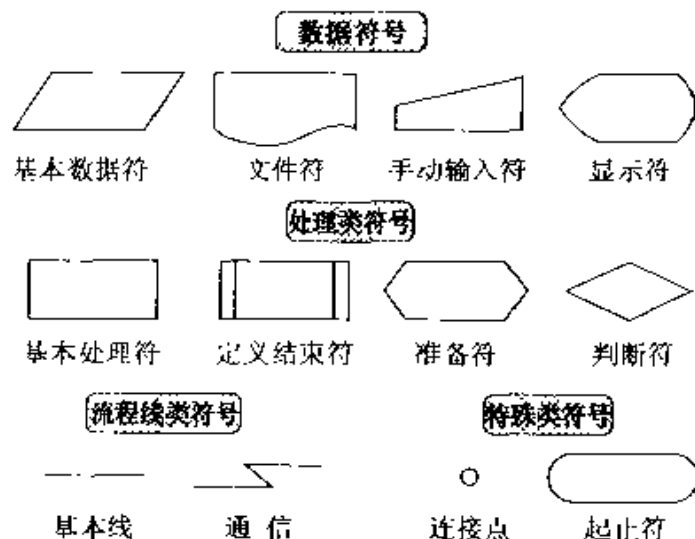


图 2.74 信息处理流程图符号

手动输入  
文件  
显示

① 数据符号 通常作为输入输出符号使用。当需要特殊指定输入输出方法时,可以分别使用手动输入(从键盘输入等)、文件(送打印)、显示(送 CRT 等)等特殊符号。此外,还有表示内部存储器、外部存储设备、读卡机、穿孔纸带等符号。

② 处理(process)符号 用于表示从四则运算到数据传送等几乎所有处理操作,但准备、判断等需要使用特殊符号。

③ 准备符号 用于设定初始值的存储位置。

④ 判断符号 是一种特殊处理符号,是当需要根据某种条件进行判断并对程序进行分支处理时所使用的符号。

⑤ 流程线 表示各符号间的执行顺序。为清楚起见,常在流程线上加一个表示顺序方向的箭头。

⑥ 连接点 非必须使用的符号,当流程图跨越两张纸时,用于表示来源及去处的衔接点。

⑦ 起止(terminal)符号 用于表示程序的开始、结束及停止等。

### ● 绘制流程图的原则

原则上规定流程图从左至右、从上到下按流动方向绘制。当流程方向与原则约定方向相反时,应尽量用箭头表示。如条件分支那样,当从一个流程图符号上引出 2 个以上出口时,应分别标清条件符号

### ● 流程图的类型

开始  
结束

**顺序型** 如图 2.75 所示,程序从“开始”到“结束”,是一项处理结束后再进行下一项处理的单线式逐次处理方式,是一种基本程序类型。

**分支型** 表示的是一种如图 2.76 所示的程序结构。比较变量 A 与 B,若 B 大则打印 B 值后结束;否则,将 A 值送显示器显示后结束。它是对某一条件进行判断,并根据判断结果进行不同的处理。判断时,可以用大小或者真伪关系为条件。若出口有两个,则称之为单分支;若出口有多个,就称之为多分支。此外,判断的条件不仅可以采用  $B > A$  的形式,还允许采用  $10 \leq B \leq 20$  这种复合型条件。

重复处理  
循环处理

**循环型** 如图 2.77 所示,是一种将分支出口中的一个返回至原流程线某处的结构,称为**重复处理**或**循环处理**。循环处理的基本模式为,当满足

- ① 循环固定次数
- ② 运算结果符合要求
- ③ 数据输入结束

等规定的条件时,则退出循环。在图 2.77 中,规定输入为 0 时,则退出循环。

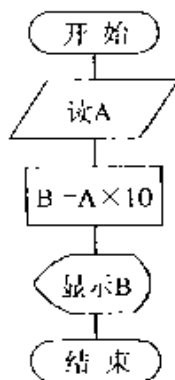


图 2.75 顺序型

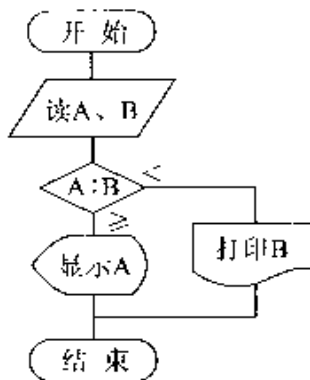


图 2.76 分支型

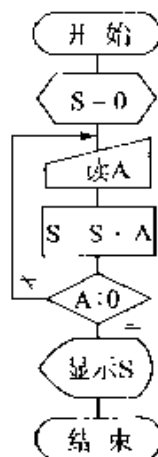


图 2.77 循环型

## 相关知识 ● 算法

算法一词源于9世纪阿拉伯数学家阿·佛利兹密(Al-Khwarizmi)的名字。

计划  
编码  
编程

在处理某一问题时,可以将处理过程分为计划过程及编码过程(用编程语言进行描述),这两种过程合在一起称为编程(programming)。在编程过程中,算法的作用极为重要。

## 挑战题 用流程图描述下列问题:

**【例题1】** 明天早晨去棒球场参加棒球比赛。

- ① 早晨起床后,若下雨就去看电影。
- ② 若天晴,就去棒球场。
- ③ 若场地潮湿不能比赛,就去打保龄球。
- ④ 若场地能用,就进行比赛。

**【例题2】** 给家人买感冒药服用。

- ① 确定患者年龄,成人服4片。
- ② 6岁以下患者,不予服用。
- ③ 14岁以下患者,服4分之1片。
- ④ 18岁以下患者,服半片。
- ⑤ 70岁以上患者,也服半片。
- ⑥ 一日服3次,持续2天

# 16 硬件基础知识

## □ 要 点

为了将计算机与外部设备连接起来并使数据能在两者之间顺利地传输,需要使用接口电路。

## □ 解 释

### ● 接口的概念

接口(interface)一词是指中间面或“交界处”的意思,最初用于物理和化学等领域,指“两种不同相的接触面”。在计算机中,该词泛指设备间的连接电路。

设备间的连接  
电路

计算机及外围设备都有各自固有的信号形态、独立的电学参数,如果不将这些各不相同的信号进行匹配、变换,就不能实现信号在不同设备间的传输,完成这项工作的器件就称为接口电路。

### ● 处理器的工作原理

CPU 驱动外围设备的工作过程大致如下。

数据总线  
地址总线  
控制总线  
公共电路  
缓存器

CPU 具有数据总线、地址总线和控制总线 3 种公共电路(称为总线)。下面,以 CPU 向外部设备传送数据为例,说明其工作过程。首先,CPU 为指定接收数据的外部设备,先将该设备的地址送入地址总线,打开外设专用的输入输出口的门电路。然后,CPU 再将缓存器中的数据送入数据总线上,同时将控制信号也送至控制总线上。

控制信号  
时钟

在输出设备这边,CPU 传来的地址数据已将该外设的门电路打开,通过 CPU 的输出信号、控制总线上的控制信号以及时钟信号,由外设按规定的时序,将数据总线上的数据读入,并在每次读取结束时,向 CPU 回送接收结束信号。

### ● 接口电路的构成

**逻辑运算电路** 为了能够完成所有信号的正负逻辑变换并实现时序匹配,逻辑运算电路中使用了很多的逻辑电路,至少有 NAND、NOR、NOT、OR、AND 等逻辑电路。

总线驱动器  
使能信号

**缓冲驱动器及控制门电路** 计算机与外部设备相连时,外设是连接在开放的地址总线与数据总线上的。当总线上连接的设备很多时,总线上的信号将会发生畸变。因此,为增强其信号,在总线与外设之间通常加有缓冲驱动器(buffer)。缓冲驱动器并不进行信号的逻辑处理,仅用于增强信号或者用于需要电绝缘的地方。若使用三态型总线驱动器作缓冲驱动器,通过对使能(enable)信号的控制,可以很方便地将外部设备同计算机的总线断开,令其处于



带控制门的缓冲驱动器

悬空状态。这种缓冲驱动器称为带控制门(control gate)的缓冲驱动器。

D 触发器

**锁存器** 为了能够保存瞬态数据,需要使用锁存器(latched circuit)将数据锁存起来。通常锁存器是由 D 触发器构成的。

**译码器** 能从地址信号和数据信号中选取某个特定成分的电路称为译码器(decoder)。具体地讲,当需要根据地址数据选取特定的输入输出时,就必须使用译码器。

**触发器** 输入端每加一个脉冲信号,输出状态就会发生翻转的电路称为触发器(flip-flop)。在触发器中,有 JK 触发器、主从触发器等多种类型。

### ● 典型外围 LSI

控制字寄存器  
控制字

**8255** 是英特尔公司为 8 位微处理器 8086 研制开发的专用可编程接口电路(programmable peripheral interface),是一种使用最多的并行输入、并行输出的 LSI。8255 为 40 脚封装,单一 +5V 电源供电,具有 3 个 8 位的输入输出口的芯片。通过向控制字寄存器写入控制字(一般是以 4 位为单位)就可以设定各个口的输入输出工作方式。

减法计数器

**8253** 是由英特尔公司为 8086 系列开发的 26 脚可编程定时器(programmable interval timer)。它具有二个 16 位计数器,通过设置其工作模式,使其能实现内部触发单脉冲计数器、外部触发单脉冲计数器、脉冲输出的分频计数器、矩形波输出的分频计数器、内部触发脉冲输出的单脉冲计数器、外部触发脉冲输出的单脉冲计数器等 5 种工作方式。其中二个计数器都是减法计数器,通过 8255 的输入口读取计数结束信号,就可将其用于控制电路中。

## 11 相关知识 ● 固化软件

写入 ROM 或 CD ROM 中的程序称为**固化软件**(firmware),固化软件是介于软件与硬件之间的介质。

严格地讲,固化软件是指固化有机器语言的宏程序和一部分操作系统(OS)的程序。

# 17 软件基础知识

## □ 要 点

计算机在具有了执行元件与电子元件及驱动这些元件工作的程序(软件)之后,才真正成为一个系统。程序所描述的是计算机运行处理的顺序。操作系统及应用软件都是一些大规模的程序。

## □ 解 释

### ● 程序语言

描述程序用的人工语言称为**程序语言**(programming language)。在程序语言中,有机器能够直接理解的机器语言以及便于人们理解的符号化语言,它们分别称为**汇编语言**(assembly language)及**高级语言**。

### ● 机器语言

是计算机能够直接理解并执行的由“0”和“1”组合来描述程序的语言。

### ● 汇编语言

#### 助记符

是一种用人们易记的相关符号(助记符)、替换机器语言中各指令构成的一种程序语言。例如,用 ADD 表示加法(ADDITION)指令、用 JMP 表示跳转(JUMP)指令,与机器语言相比,采用汇编语言编写程序,能大大提高编程效率。将用助记符描述的程序转换成机器语言程序的程序称为**汇编程序**(Assembler)。转换前的程序称为**源程序**,转换后的程序称为**目标程序**,转换过程如图 2.78 所示。

#### 汇编程序 目标程序

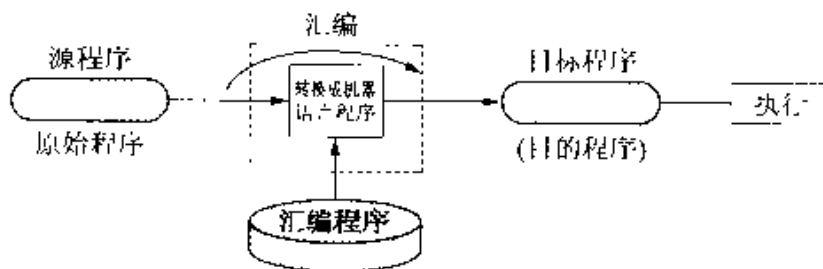


图 2.78 汇编语言的执行过程

指令的助记符表示方法因 CPU 的不同而异,因此同一程序在其它的 CPU 上就可能无法执行。因此,汇编语言程序的可移植性较差。

FORTRAN  
COBOL  
BASIC  
C 语言

### ● 高级语言

用人们日常生活中使用的语言来描述程序的语言称为高级语言。典型的高级语言有:用于科学计算的 FORTRAN 语言,用于办公处理并具有较长历史的 COBOL 语言,人们熟知的面向初学者的会话型 BASIC 语言,以及通用的 C 语言等多种。高级语言的转换和执行过程如图 2.79 所示。

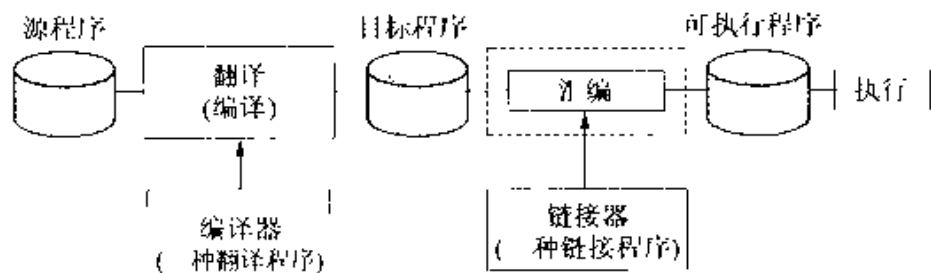


图 2.79 高级语言的执行过程

操作系统

### ● 操作系统(OS)的概念

OS 是英文 Operating System 的缩写,操作系统也称为基本软件。在计算机系统中,OS 是一种最接近硬件的软件,由它管理组成系统的所有设备,使系统能够高效、顺畅地进行处理。

操作系统能够对键盘、显示器、存储器及输入输出设备进行控制和管理,具有分配系统资源、进程表、文件管理等功能。在我们熟悉的 OS 中,有 UNIX、MS DOS、Windows 等等。

应用软件

### ● 典型应用软件

为文字处理、表格计算等特定用途而开发的程序称为应用软件,自由软件、市场出售的专用软件都属于这种。可以分为如下几类:

- ① 字处理 用于编写文稿,如 WPS、Word 等,种类很多。
- ② 表格计算 用于统计分析 & 分类计算,如 Lotus123、Excel 等。
- ③ 数据库 用于数据检索 & 分类,如 桐、The CARD 等。
- ④ DTP 用于电子出版,以 Aldus Page Maker 最为著名。
- ⑤ CAD 用于制图的软件,如 Auto CAD、CANDY 等。
- ⑥ CG 用于计算机图形处理,如 3DPress、花子等。
- ⑦ 编程语言 & 开发工具 各种编程语言 & 支持程序。

此外,还有音乐作曲软件、音乐演奏用的程序 & 仿真软件、

财务软件、微机通信软件以及各种实用程序等等。

### ● 编辑器的概念

具有从计算机终端将程序及文档按文本形式进行录入,并能对这些文本文件进行添加、删除、修改、拷贝、移动等编辑操作,形成可输出文档功能的程序称为**编辑器**(editor)。编辑器能在分析行文语法结构的同时将录入的内容制成程序用的文本文件,是程序开发中的一种强有力工具。

### ● 软件开发工具介绍

用不同的编程语言进行程序开发时,需要有相应的软件工具,这类软件工具有如下几种。

① **文件管理软件** 是一种能对已编写文件进行管理的软件,除能完成对文件的拷贝、移动、删除之外,还具有创建目录及按目录显示文件、优化文件配置等功能。典型的有自由软件中的FD等。

② **编辑器** 当用汇编语言或C语言进行程序编程和软件开发时,需要有丰富的编辑功能、宏功能和用户选择功能编辑器。VZ编辑器、MIFES等是这类软件中的常用软件。

③ **交叉汇编程序** 在开发汇编语言的程序时,常常在与被开发对象具有不同CPU的计算机上进行,这时必须使用能将所编程序转换成被开发CPU机器语言的一种程序;这种程序称为交叉汇编程序。例如,在16位微机上开发8位CPU程序时,采用的Z80汇编语言程序就是一种交叉汇编程序。

## □ 相关知识

### ● C语言

C语言是美国贝尔实验室在开发UNIX操作系统时,由丹尼斯·M·瑞奇(Denis M Ritchie)与肯·汤卜森(Ken Thompson)开发的一种编程语言。C语言有以下几个特征:

① 具有很多接近机器语言的指令,可实现高效的小循环描述。

② 所用语言简洁。

③ 程序以小函数为基本模式。

④ 加强了编译程序的优化,实际执行速度快。

⑤ 符合ANSI(美国国家标准协会)标准,在源程序级的可移植性好。

## 18 ROM 的固化过程

**要 点** 最近,在开发特定用途的程序时,利用计算机开发系统,可以轻易地完成从源程序的编写、机器语言转换、调试,到将程序写入 ROM 中等一系列工作。

**解 释** ● ROM 的固化过程

当需要将单板机或自制的 CPU 板装入机器设备,并用自己开发的程序使设备自动运行或对机器进行控制时,通常都是先将程序写入控制板的 ROM(只读存储器)中再进行使用。

ROM

只读存储器

修改

调试

将控制程序写入 ROM,用它来控制被控设备,很少能够一次就得到满意的结果。通常,需要对程序中的设计错误、思路错误、数据的录入错误等进行修改和调试(debug)。经多次反复调试后,才能将无误的程序写入 ROM 中。

图 2.80 中列出了这一过程。如果靠手工操作进行程序调试,将会花费大量的人力及时间。由个人电脑构成的开发系统能够替代手工完成这些工作,它具有如下功能:

- ① 它的编辑器具有可以编写源程序的功能。
- ② 具有对源程序进行交叉汇编或交叉编译的功能。
- ③ 具有软件仿真的功能。
- ④ 具有调试的功能。

因此,不用驱动实际的机器,也可以通过计算机开发系统营造出同样的环境,进行软件仿真。

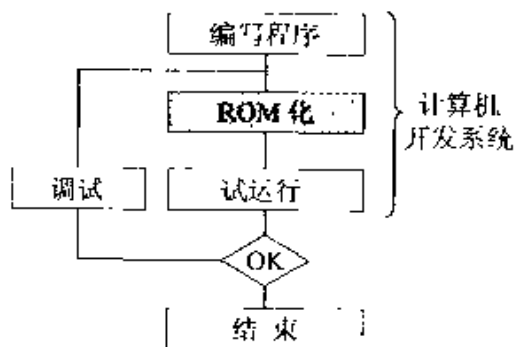


图 2.80 ROM 的固化过程

### ● 程序开发系统

在图 2.81 中,列出了利用个人电脑的开发系统固化 ROM 的几种方法。

## ROM 写入器

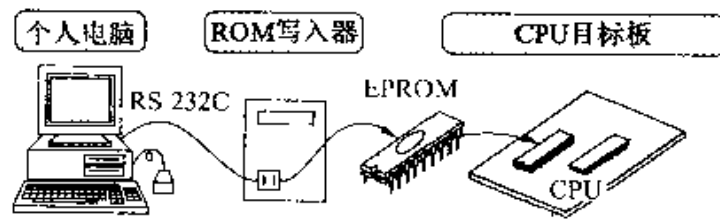
图 2.81(a)所示的方法,是将几乎所有的工作都在计算机上完成。从编写源程序到调试程序,都在计算机上进行。最后,将调试成功的程序经 RS232C 电缆传送到 ROM 写入器中,将目标程序写入 ROM。

## 在线仿真器

图 2.81(b)所示的方法,是采用微机 ICE(在线仿真器;In Circuit Emulator)进行程序开发。ICE 通过电缆连接到目标 CPU 的插座上,ICE 就相当 CPU 一样,可以执行目标程序的指令并向被控机器的各电路发出指令。由于 ICE 可以在源程序的水平上设置断点,并且具有丰富的跟踪等功能,因此,被认为是一种最有效的开发工具。

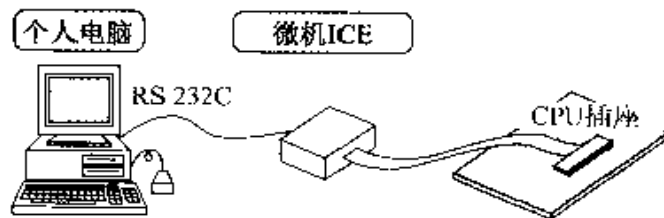
图 2.81(c)所示的方法,是将开发系统与目标设备的 ROM 相连,在微机编写好的目标程序,就像装载在目标板的 ROM 中一样,由目标板上的 CPU 执行。

由微机开发系统经 RS232C 传送的目标程序文件,大多都是采用英特尔完整格式。

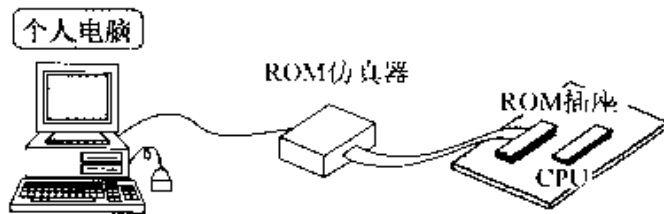


- 源程序编辑器
- 软件仿真器
- 试调器

(a) 在个人电脑上固化ROM



(b) 用微机ICE固化ROM



(c) 用ROM仿真器固化ROM

图 2.81 ROM 固化的方法

## □ 相关知识 ● 英特尔完整格式

是将机器语言文件用 ASCII 文字序列描述的文本文件,每个记录(一行)由图 2.82 所示的 6 部分组成。

图中的序号表示:①起始标记,②字节计数器,③起始地址,④记录类型(数据:00,扩展地址:02),⑤16 进制数据,⑥校验和。

数据、地址、校验和都是用 ASCII 码来表示 16 进制数。校验和是将数据类型中的数据进行 8 位累加并取反后的结果值,它与数据累加的结果和之和正好为 0。

图 2.83 是将实际英特尔完整格式文件用文本形式输出的例子。

英特尔完整  
格式文件

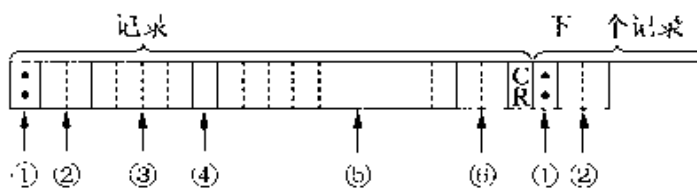


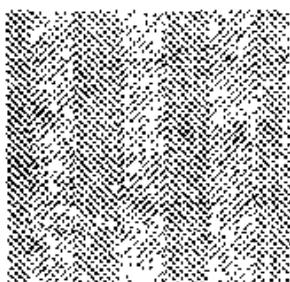
图 2.82 英特尔完整格式

```
TYPE IFTST2 MAS
:10010000:3E80D32F3E00D32D3E55D32CF5CD1A01:82
:10011000:DB1FCB7FC0F12FC30A010100600B78B:58
:10012000:20FBC96420021801210000856F7ED300:E6
:10013000:78D3003E00D300C911C3A21B7AB32002:BA
:01014000:C9F5
:00000001:FF
```

图 2.83 文本格式输出的英特尔格式文件

## 第3章

# 机械零件 与机构



- 责任编委  
矢吹隆一郎
- 执 笔  
岩崎利信(1~5)  
津野章久(6~11)

机器人是典型的机电一体化产品。如第一章所述，如果把机器人比作人体，那么机构就相当于人体的骨骼。

本章以机器人的机构为核心，从基础技术到实际应用进行详细地介绍。机械零件中的联轴器在机器人上很少使用，本章中只作简单介绍。在机器人上几乎没有使用离合器的例子，所以在这里不作介绍。

本章的重点是关于机器人的设计与制造方面的内容，也可以作为学习机电一体化的一般知识。在各节中提出了学习要点、概述内容和相关知识等项目，便于读者的阅读。读者通过学习本章的内容，利用一般的设备就有可能自己设计和制造机器人。



# 1 机械运动及坐标系

## □ 要 点

机器人的机构是一种具体的机电一体化的机构。将机器人按机构分类,可分为以下四种:

- ① 直角坐标系机器人,
- ② 圆柱坐标系机器人,
- ③ 极坐标系机器人,
- ④ 多关节机器人。

工业机器人的普及非常迅速,为其标准化的一个方面,所采用的符号也已经实现了标准化(如表 3.1 所示)。

表 3.1 表示机器人运动功能的符号(JIS B 0138 1980)

名 称	符号(运动方向)	名 称	符号(运动方向)
直线运动(1)		摆动(1)	
直线运动(2)		摆动(2)	
旋转			

## □ 解 释

### ● 直角坐标系机器人

#### 直线运动

所有运动都是由直线运动机构实现的机器人称为直角坐标系机器人(如图 3.1 所示)。所谓直线运动就是伸缩运动,由 X-Y-Z 三个坐标方向上的移动来确定机器人的位置,动作范围由各直线运动范围决定。其特点是结构简单、控制方便。

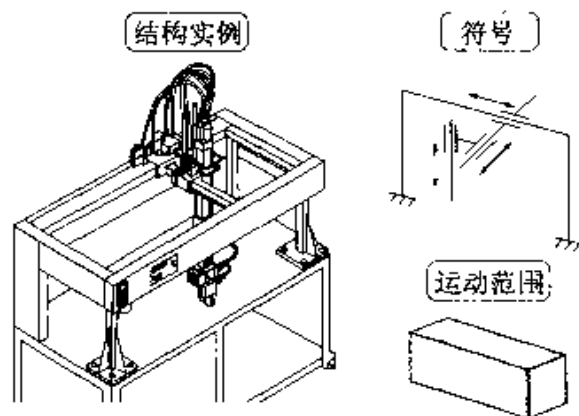


图 3.1 直角坐标系机器人

### ● 圆柱坐标系机器人

旋转运动

由一个旋转运动和两个方向上直线运动(铅垂方向和水平方向)的三种运动机构组合而成的机器人称为圆柱坐标系机器人(如图 3.2 所示)。旋转运动是指构件的轴线固定绕自身轴线旋转的运动。圆柱坐标系机器人的动作范围比直角坐标系机器人的大,但因为臂杆的自重可能会产生运动误差。

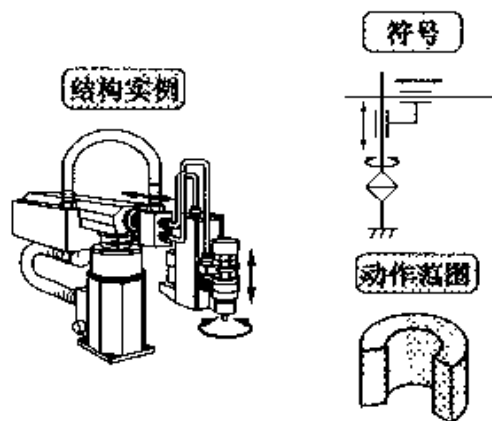


图 3.2 圆柱坐标系机器人

### ● 极坐标系机器人

摆动

由旋转、摆动和直线运动三种运动机构组合而成的机器人称为极坐标系机器人(如图 3.3 所示)。摆动是指构件的轴线绕另一轴线回转的运动。极坐标系机器人的特点是节省空间。

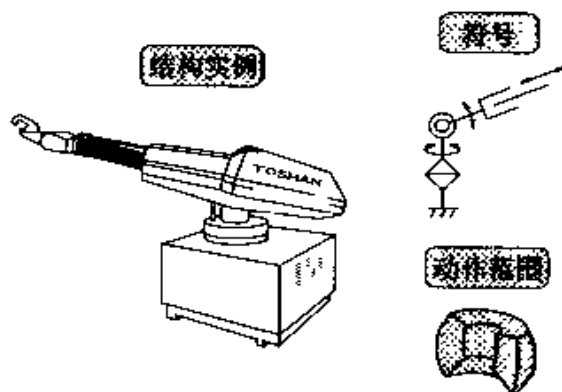


图 3.3 极坐标系机器人

### ● 多关节机器人

由多个旋转和摆动机构组合成的机器人称为多关节机器人

(如图 3.4 所示)。摆动方向可分为铅垂方向和水平方向。由于存在摆动误差,所以多关节机器人的运动精度较低,但这种机器人的动作最接近人的动作,适用于喷漆、装配、焊接等项作业。

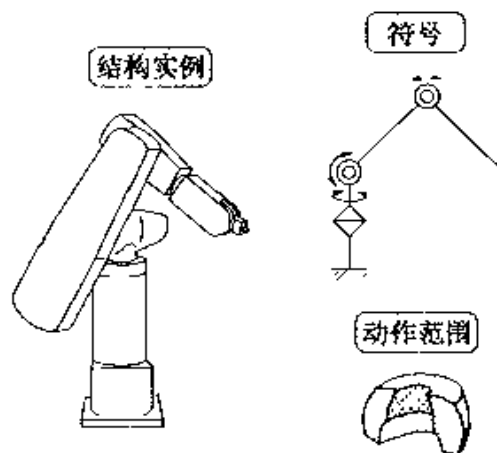


图 3.4 多关节机器人

## □ 相关知识 ● 极坐标

在以  $O$  为原点的直角坐标系中,从任意点  $P$  向  $xy$  平面作垂线  $PM$ ,设  $OP = r$ ,  $\angle xOM = \varphi$ ,  $\angle zOP = \theta$ ,则  $P$  的位置由  $r, \varphi, \theta$  决定, $r, \varphi, \theta$  称为点  $P$  的极坐标,用  $P(r, \varphi, \theta)$  表示(如图 3.5 所示)。

如果点  $P$  的极坐标为  $(r, \varphi, \theta)$ ,直角坐标为  $(x, y, z)$ ,则

$$x = r \sin \theta \cos \varphi$$

$$y = r \sin \theta \sin \varphi$$

$$z = r \cos \theta$$

各坐标之间的关系为

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

$$\tan \varphi = \frac{y}{x}, \quad \tan \theta = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}$$

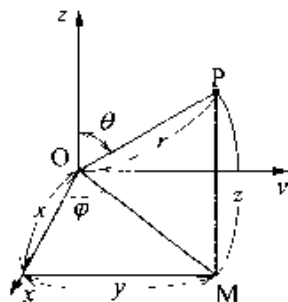


图 3.5 极坐标

## 2 螺纹的原理与应用

### □ 要点

螺纹必须是内螺纹和外螺纹成对使用才能够实现功能,通过内外螺纹的相互滑动接触能够起到拧紧或传递运动的作用。螺纹按其断面形状可分为三角形螺纹、梯形螺纹和圆形螺纹等。

### □ 解释 ● 螺旋线

将直角三角形 ABC 按图 3.6 所示的方法卷在圆柱上,直角三角形的斜边 AC 在圆柱上形成的曲线称为螺旋线,斜边的倾斜角  $\theta$  称为螺旋升角。螺旋线是螺纹的基本曲线,螺纹按螺旋线卷绕的方向可分为右旋螺纹、左旋螺纹。一条螺旋线的螺纹称为单头螺纹,两条以上螺旋线的螺纹分别称为双头螺纹、三头螺纹等,统称为多头螺纹。在圆柱轴线方向测量的螺旋线之间的距离称为螺距,螺纹旋转一周沿轴向移动的距离称为导程。

螺旋升角

多头螺纹  
螺距  
导程

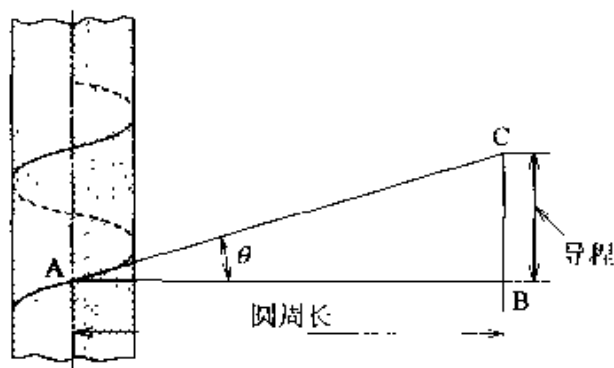


图 3.6 螺旋线

### ● 斜面原理

如图 3.7 所示,螺纹的工作原理可以认为与放在斜面上的物体沿斜面被上下推动时的作用相同。

**拧紧螺纹时的受力分析** 拧紧螺纹时的受力状态就相当于在图 3.7 所示的斜面上,用水平方向的力  $F$  推动负载  $W$  向上移动时的受力状态。下面介绍水平力  $F$  的求法

如图 3.8 所示,分别将  $W$  和  $F$  分解为平行斜面和垂直斜面的两个方向上的分力,其中,垂直斜面方向的合力为  $(F\sin\theta + W\cos\theta)$ 。如果斜面的摩擦系数为  $\mu$ ,则摩擦力  $f = \mu(F\sin\theta + W\cos\theta)$ 。

摩擦力

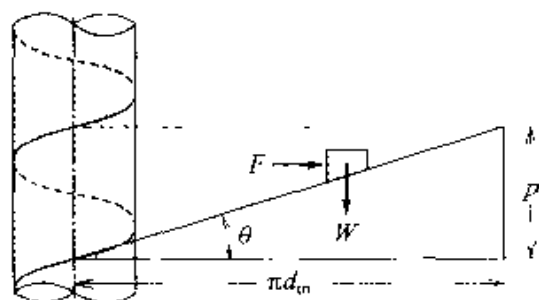


图 3.7 斜面原理

考虑到力在斜面方向的平衡关系,可得

$$F \cos \theta = f + W \sin \theta = \mu (F \sin \theta + W \cos \theta) + W \sin \theta$$

所以

$$F \cos \theta - \mu F \sin \theta = W \sin \theta + \mu W \cos \theta$$

$$F (\cos \theta - \mu \sin \theta) = W (\sin \theta + \mu \cos \theta)$$

$$F = W \frac{\sin \theta + \mu \cos \theta}{\cos \theta - \mu \sin \theta} = W \frac{\tan \theta + \mu}{1 - \mu \tan \theta}$$

设摩擦角为  $\phi$ , 则

$$\mu = \tan \phi$$

于是可以得到

$$F = W \frac{\tan \theta + \tan \phi}{1 - \tan \phi \tan \theta} = W \tan(\phi + \theta)$$

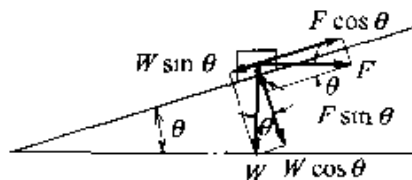


图 3.8 拧紧螺纹时的受力分析

**松开螺纹时的受力分析** 松开螺纹时的受力状态就相当于在图 3.9 所示的斜面 I, 用水平方向的力  $F'$  推动负载  $W$  向下移动时的受力状态, 力  $F'$  的求法与  $F$  的求法相同, 于是可以得到

$$F' = \frac{\tan \phi - \tan \theta}{1 + \tan \phi \tan \theta} W \tan(\phi - \theta)$$

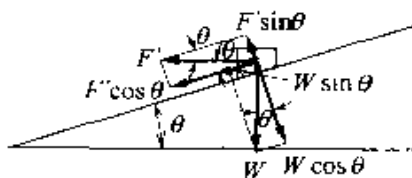


图 3.9 松开螺纹时的受力分析

● 拧螺纹时的力矩

如图 3.10 所示,  $d$  为螺栓的有效直径,  $F$  为拧紧力,  $F_1$  为作用在扳手上的力,  $L$  为扳手的长度, 假设力  $F$  作用在螺栓的有效直径  $d$  上, 则用扳手拧螺母时所需要的力矩  $M$  为

$$M = F_1 \times L$$

$$= F \frac{d}{2} = \frac{d}{2} W \tan(\phi + \theta)$$

故作用在扳手上的力  $F_1$  为

$$F_1 = \frac{dW}{2L} \tan(\phi + \theta)$$

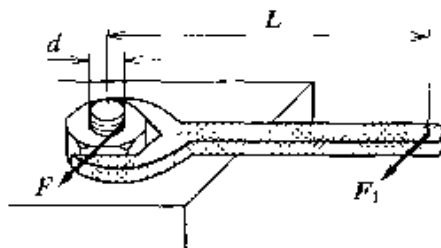
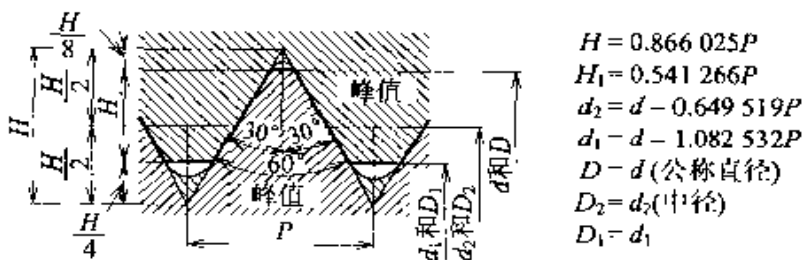


图 3.10 用扳手拧紧螺母时所需要的力

● 公制普通螺纹

公制普通螺纹应用最广, 常作为连接螺纹使用。表 3.2 所示为公制普通螺纹的基本尺寸。

表 3.2 公制普通螺纹的基本尺寸



- $H = 0.866025P$
- $H_1 = 0.541266P$
- $d_2 = d - 0.649519P$
- $d_1 = d - 1.082532P$
- $D = d$  (公称直径)
- $D_2 = d_2$  (中径)
- $D_1 = d_1$

粗实线表示标准齿形

续表 3.2

螺纹的公称尺寸/mm			螺距 $P$ /mm	接触高度 $H_1$ /mm	内螺纹/mm			
					大径 $D$	中径 $D_2$	小径 $D_1$	
第 1 系列	第 2 系列	第 3 系列			外螺纹/mm			
						大径 $d$	中径 $d_2$	小径 $d_1$
M3 M4	M3.5		0.5	0.271	3.000	2.675	2.159	
			0.6	0.325	3.500	3.110	2.850	
			0.7	0.379	4.000	3.545	3.242	
M5 M6	M4.5		0.75	0.406	4.500	4.013	3.688	
			0.8	0.433	5.000	4.480	4.134	
			1	0.541	6.000	5.350	4.917	
M8		M7	1	0.541	7.000	6.350	5.917	
			1.25	0.577	8.000	7.188	6.647	
		M9	1.25	0.677	9.000	8.188	7.647	
M10 M12		M11	1.5	0.812	10.000	9.026	8.376	
			1.5	0.812	11.000	10.026	9.376	
			1.75	0.947	12.000	10.863	10.106	
M16	M14		2	1.083	14.000	12.701	11.835	
			2	1.083	16.000	14.701	13.835	
	M18		2.5	1.353	18.000	16.376	15.294	
M20 M24	M22		2.5	1.353	20.000	18.376	17.294	
			2.5	1.353	22.000	20.376	19.294	
			3	1.624	24.000	22.051	20.752	
M30	M27		3	1.624	27.000	25.051	23.752	
			3.5	1.894	30.000	27.727	26.211	
	M33		3.5	1.894	33.000	30.727	29.211	
M36 M42	M39		4	2.165	36.000	33.402	31.670	
			4	2.165	39.000	36.402	34.670	
			4.5	2.436	42.000	39.077	37.129	
M48	M45		4.5	2.436	45.000	42.077	40.129	
			5	2.706	48.000	44.452	42.587	
	M52		5	2.706	52.000	48.452	46.587	
M56 M64	M60		5.5	2.977	56.000	52.428	50.016	
			5.5	2.977	60.000	56.428	54.016	
M64 M68	M68		6	3.218	64.000	60.103	57.505	
			6	3.218	68.000	64.103	61.505	

注:螺纹的公称尺寸应优先选用第 1 系列,必要时按第 2 系列,第 3 系列顺序选择。

(选自 JIS B 0205-1982)

● 螺纹的应用

**双向螺旋** 如图 3.11 所示,在螺杆或中空的螺母两端分别制成左旋螺纹和右旋螺纹,将螺杆或螺母向一个方向转动时,两端将同时缩进或者同时伸出,这种机构称为双向螺旋机构。由于双向螺旋机构的结构简单,所以在机械手上应用很多。

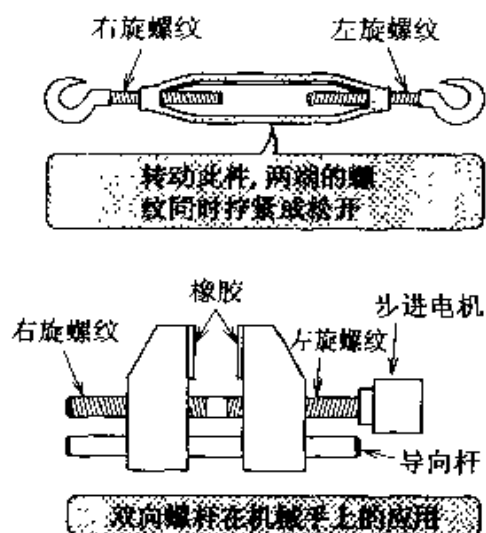


图 3.11 双向螺旋

**建筑用长螺杆** 最近出现了大规模的郊外建筑器材商店,那里出售的建筑用长螺杆非常便宜,甚至有表 3.2 第 1 系列中长度达 300~1000mm 的螺杆。将其应用于简单的机器人上,可以组成大移动量的机构,非常方便(见图 3.12)。

**滚珠丝杠** 将螺纹的轴截面形状设计成圆弧形,在螺母和螺杆之间的螺旋沟槽中放入一排滚动轴承用的小钢球就构成了滚珠丝杠。钢球从螺母一端排出,通过螺母中的孔道返回螺母另一端的沟槽中。由于滚珠丝杠的摩擦力小,所以常作为直线运动的驱动丝杠使用(图 3.13)。

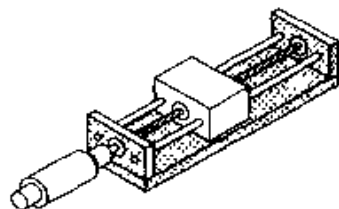


图 3.12 建筑用的长螺杆



图3.13 滚珠丝杠

**导轨一体型滚珠丝杠** 在机器人中将支承和连接运动部分的



零件称为联接件,连接滑动部件的称为滑动联接件,连接旋转运动部件的称为联轴器。滑动联接件由直线运动的滑板和为其导向的导轨组成。导轨—球型滚珠丝杠就是滑动联接件的一个例子。

### □ 相关知识 ● 三角函数的公式:加法定理

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin\alpha\cos\beta \pm \cos\alpha\sin\beta$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos\alpha\cos\beta \mp \sin\alpha\sin\beta$$

$$\tan(\alpha \pm \beta) = \frac{\tan\alpha \pm \tan\beta}{1 \mp \tan\alpha\tan\beta}$$

## 3 弹簧及其作用

### □ 要点

一般的机械零部件所使用的材料都存在一定的弹性,弹簧就是根据应用场合和目的不同将弹性材料制成适当形状来充分利用其弹性的特殊零件。弹簧作为重要的机械零件,应用范围很广,当然在机器人的机械中也大量使用

### □ 解释

应力-应变曲线  
虎克定律

弹簧  
弹簧力

#### ● 应力与应变

从第2章2.3节所述的应力-应变曲线上可以看出,当应力较小时,应变与应力成正比,这一规律称为虎克(Hooke)定律。在不超过弹性极限的范围内,材料上的应力消除时,应变也随之消除,物体将恢复到原来的形状。

从广义上讲,所有以材料的弹性作为使用功能的机械零件都可称为弹簧。由弹簧的弹性产生的力(即弹性力)称为弹簧力。

#### ● 虎克定律

若将弹簧的一端固定拉住另一端使其从自由长度伸长 $x$ ,则所需要的拉力为 $F(x)$ (图3.14)。若在弹簧的末端悬挂一重物,那么伸长了 $x$ 的弹簧就会对重物作用一个反力 $-F(x)$ 。当弹簧的变形长度相对于其自由长度为足够小时, $F(x)$ 与 $x$ 成正比。即

$$F(x) = kx$$

这种关系就是虎克定律。其中的比例系数 $k$ 称为弹簧常数或弹簧刚度。

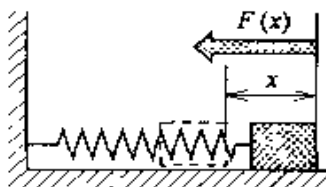


图 3.14 虎克定律

### □ 相关知识

#### ● 快速夹紧

分析机器人上利用弹簧的情况可以发现,利用弹簧最多的部位是其手部。从安全的观点出发,可将机器人的手爪设计成用弹簧力夹紧物体的结构,与一般的概念相反,执行装置只是起到将手爪张开的作用。这样,在紧急停电或因故障断电时,可以防止被抓起的物体意外下落而造成事故(图3.15)。

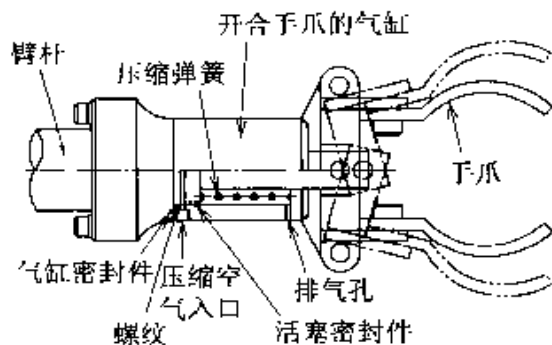


图 3.15 利用弹簧力的快速夹紧机构

### ● 步进电机

大多数的机器人都使用步进电机。但是，在步进电机驱动的机器人上，当驱动电源断开时，步进电机将处于自由转动状态，机器人的臂部就会在重力作用下向下摆动，有时会破坏限位开关等物。为了防止这种情况的发生，可以采用如图 3.16 所示的结构，在臂部齿轮上安装一个螺旋弹簧来平衡臂部的重力。

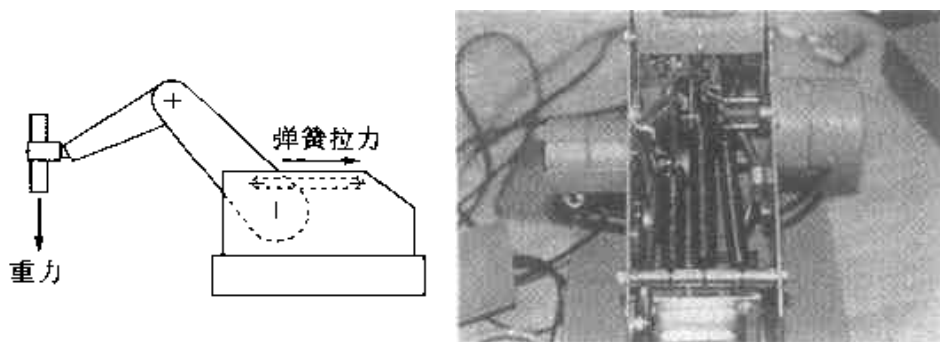


图 3.16 安装在机器人肩部齿轮上的弹簧

### ■ 选修知识 可靠性设计

在设计中，从安全的角度出发，应考虑到即使机构部件的一部分产生疲劳裂纹等问题，也不会导致整体上的致命破坏，这种设计方法称为可靠性设计。

实际上，可采用多个构件分担负载或双重机构等措施。但无论如何，都必须以采取适当的检修措施，及时发现和维修缺陷，这样才能够真正保证安全。

随着断裂力学的发展，目前已经能够精确预测出允许裂纹的大小，并且采用制定检查时间表的容许损伤设计法。最初，这种设计方法是在飞机设计中首先使用的，现在已应用到汽车和机器人的设计上。1985 年的日航飞机事故，就被认为是由于可靠性设计的失误而造成的。

## 4 轴和轴承及其工作原理

### □ 要 点

在机械中,必须使用各种轴类零件来传递动力和运动。为了支承轴类零件并使所传递的运动可靠,必须使用轴承和键。

本节将介绍轴的应力分析、功率传递以及轴承的种类等方面内容。

### □ 解 释 ● 轴的应力分析

设  $T$  为扭矩,  $M$  为弯矩,  $\tau$  为外缘处扭转剪应力,  $\sigma_b$  为外缘处弯曲应力,  $d$  为实心轴的直径,  $d_1$ 、 $d_2$  分别为空心轴的内径和外径,  $n = d_1/d_2$  为空心轴的内径与外径之比, 则轴的应力分析如下:

#### 扭转应力及弯曲应力

##### ① 实心轴

$$\tau = 16T/\pi d^3 \approx 5.1T/d^3$$

$$\sigma_b = 32M/\pi d^3 \approx 10.2M/d^3$$

##### ② 空心轴

$$\tau = 16Td_2/\pi(d_2^4 - d_1^4) \approx 5.1T/(1-n^4)d_2^3$$

$$\sigma_b = 32Md_2/\pi(d_2^4 - d_1^4) \approx 10.2M/(1-n^4)d_2^3$$

**轴的扭转与弯曲组合应力** 若设  $\tau_{\max}$  为最大剪应力,  $\sigma_{\max}$  为最大主应力, 则

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= (1/2) \sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2} \\ &= \{16/\pi(1-n^4)d_2^3\} \sqrt{M^2 + T^2} \\ &\approx 5.1T_e/(1-n^4)d_2^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\max} &= (1/2)\sigma_b + (1/2)\sqrt{\sigma_b^2 + 4\tau^2} \\ &= \{16/\pi(1-n^4)d_2^3\} (M + \sqrt{M^2 + T^2}) \\ &\approx 10.2M_e/(1-n^4)d_2^3 \end{aligned}$$

其中对于实心轴  $d_2 = d, n = 0$ 。此外,  $T_e = \sqrt{M^2 + T^2}$  称为当量扭矩,  $M_e = (1/2)(M + \sqrt{M^2 + T^2})$  称为当量弯矩。

**扭矩、弯矩和轴向力组合作用时轴上的应力分析** 设  $P$  为轴向力,  $\sigma_a = 4P/\pi(1-n^4)d_2^2$  为轴向应力, 则

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= (1/2) \sqrt{(\sigma_b + \sigma_a)^2 + 4\tau^2} \\ &= \{16/\pi(1-n^4)d_2^3\} \sqrt{\{M + Pd_2(1+n^2)/8\}^2 + T^2} \\ &\approx 5.1T_e/(1-n^4)d_2^3 \end{aligned}$$

$$\sigma_{\max} = \{16/\pi(1-n^4)d_2^3\} [\{M + Pd_2(1+n^2)/8\} + \sqrt{\{M + Pd_2(1+n^2)/8\}^2 + T^2}]$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{\{M + Pd_2(1 - n^2)/8\}^2 + T^2} \\ & \approx 10.2M_e/(1 - n^2)d_e^3 \end{aligned}$$

这时当量扭矩和当量弯矩分别为

$$\begin{aligned} T_e &= \sqrt{\{M + Pd_2(1 - n^2)/8\}^2 + T^2} \\ M_e &= (1/2) \{M + Pd_2(1 - n^2)/8\} \\ & \quad - \sqrt{\{M + Pd_2(1 - n^2)/8\}^2 + T^2} \end{aligned}$$

其中对于实心轴,  $d_2 = d, n = 0$ 。当外力  $P$  为拉力时,  $\tau_{\max}, \sigma_{\max}$  分别为轴弯曲时受拉一侧的应力值; 当  $P$  为压力时,  $\tau_{\max}, \sigma_{\max}$  分别为轴弯曲时受压一侧的应力值。

### ● 功率的传递

#### 轴 扭矩

下面分析作用于轴上的功率与扭矩之间的关系。如图 3.17 所示, 设轴在扭矩  $T$  [ $\text{N} \cdot \text{mm}$ ] 的作用下, 以角速度  $\omega$  [ $\text{rad/s}$ ] 旋转, 其中轴的直径为  $d$  [ $\text{mm}$ ], 旋转角度为  $\theta$  [ $\text{rad}$ ], 圆周的切向力为  $F$  [ $\text{N}$ ], 则轴从点  $a$  转到点  $b$  所作的功  $A$  [ $\text{J}$ ] 为

$$A = F \times \overline{ab} = F \frac{d}{2} \theta = T\theta \text{ [N} \cdot \text{mm]} = \frac{T\theta}{1\,000} \text{ [J]}$$

若从点  $a$  到点  $b$  的时间为  $t$  [ $\text{s}$ ], 转速为  $n$  [ $\text{rpm}$ ], 则

$$\omega = \frac{\theta}{t} = \frac{2\pi n}{60} \text{ [rad/s]} \quad \theta = \frac{2\pi n t}{60}$$

轴上传递的功率  $P$  [ $\text{W}$ ] 为

$$\begin{aligned} P &= \frac{A}{t} = \frac{T\theta}{1\,000t} = T \frac{2\pi n}{1\,000 \times 60} \\ & \approx 1.047 \times 10^{-4} T n \text{ [W]} \end{aligned}$$



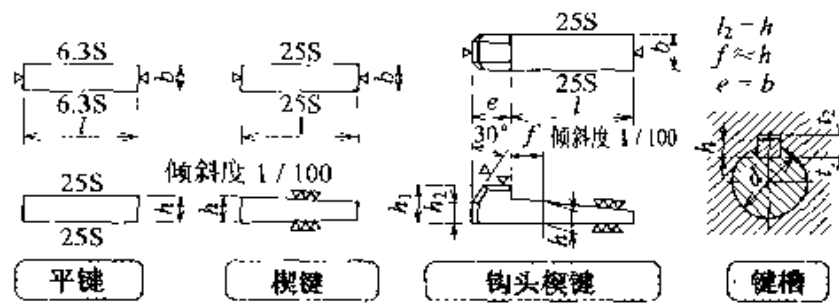
图 3.17 功率和力矩

### ● 键

#### 普通平键 键槽

键用于联轴器、齿轮等与轴的连接。键的种类如图 3.18 所示, 普通平键和键槽的形状及尺寸如表 3.3 所示。

表 3.3 镶嵌键及键槽的形状、尺寸



键的公称 尺寸 $b \times h$	$h$ 的基本尺寸		$l$ <sup>1)</sup>	$l_1$ 的 基本尺寸	$l_2$ 的基本尺寸			备注  适用的 轴径 $d$ <sup>2)</sup>
	平键 导向键	楔键			平键	导向键	楔键	
2×2	2		6~20	1.2	1.0		0.5	6~8
3×3	3		6~36	1.8	1.4		0.9	8~10
4×4	4		8~45	2.5	1.8		1.2	10~12
5×5	5		10~56	3.0	2.3		1.7	12~17
6×6	6		14~70	3.5	2.8		2.2	17~22
(7×7)	7	7.2	16~80	4.0	3.0	3.5	3.0	20~25
8×7	7		18~90	4.0	3.3		2.4	22~30
10×8	8		22~110	5.0	3.3		2.4	30~38
12×8	8		28~110	5.0	3.3		2.4	38~44
14×9	9		36~160	5.5	3.8		2.9	41~50
(15×10)	10	10.2	40~180	5.0	5.0	5.5	5.0	50~55
16×10	10		45~180	6.0	4.3		3.4	50~58
18×11	11		50~200	7.0	4.4		3.4	58~65
20×12	12		56~220	7.5	4.9		3.9	65~75
22×14	14		63~250	9.0	5.4		4.4	75~85
(24×16)	16	16.2	70~280	8.0	8.0	8.5	8.0	80~90
25×14	14		70~280	9.0	5.4		4.4	85~95
28×16	16		80~320	10.0	6.4		5.4	95~110
32×18	18		90~360	11.0	7.4		6.4	110~130

注：除了表中的规格以外，标准中规定了公称尺寸至  $b \times h = 100 \times 50$ ，其中括号内的尺寸尽量不用。

- 1)  $l$  值按表的范围从以下尺寸系列中选择：6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 32, 36, 40, 45, 50, 56, 63, 70, 80, 90, 100, 110, 125, 140, 160, 180, 200, 220, 250, 280, 320, 360, 400。
- 2) 备注中列出的适用轴径只是用于选择一般用途的键，选用键时，最好是按轴所受的力矩来选择键的尺寸及材料。另外键的材料抗拉强度原则上要在 600MPa 以上。

(选自 JIS B 1301 1976, JIS B1303 1976)

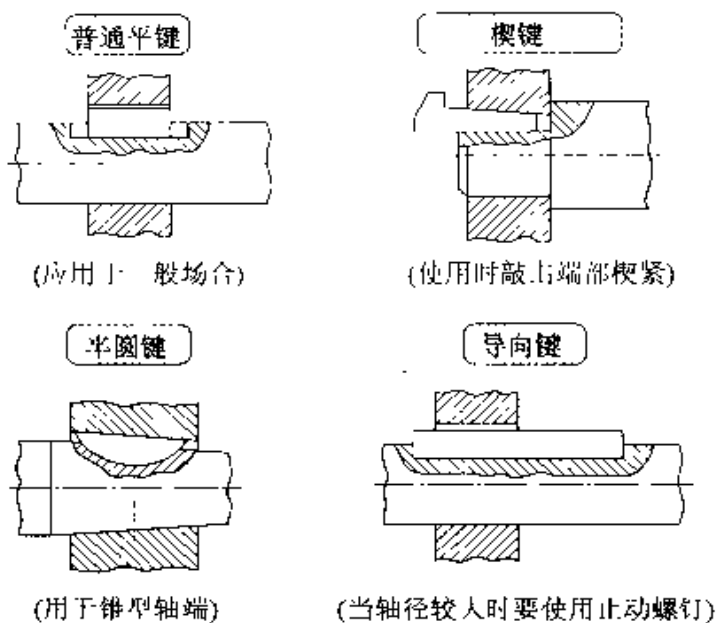


图 3.18 键的种类

### ● 轴 承

轴承用于旋转轴的支承,是使轴能够准确、平滑旋转的机械零件。轴上安装轴承的部分称为轴颈。

轴颈

### ● 向心轴承与推力轴承(承受轴向载荷的轴承)

向心轴承 承受径向载荷的轴承称为向心轴承(图 3.19)。

推力轴承 承受轴向载荷的轴承称为推力轴承(图 3.20)。

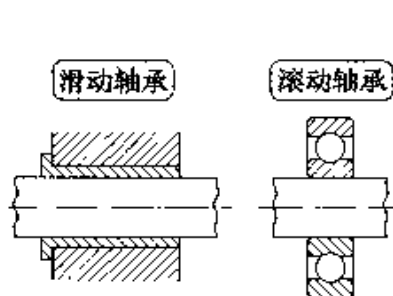


图 3.19 向心轴承

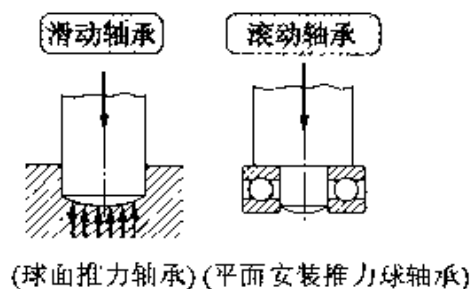


图 3.20 推力轴承

### ● 滑动轴承与滚动轴承

滑动轴承 轴承与轴颈之间为滑动接触的轴承称为滑动轴承,图 3.21 所示为滑动轴承中的向心轴承。若使铸铁制成的轴承座与轴颈直接接触,摩擦面将发生磨损,所以轴承接触面上要安装轴瓦,轴瓦的材料一般为锡青铜、黄铜、铜铝合金等。此外,也用白

轴瓦

合金、铅青铜轴承合金等质地较软的材料作为铸铁、青铜等材料的轴瓦里衬。

### 轴承游隙

滑动向心轴承的内径与轴颈的直径差称为轴承游隙,轴承游隙对油膜的形成有很大影响。

### 轴承游隙比

轴承游隙与轴颈的直径之比称为轴承游隙比,普通轴承的游隙比为 0.01 左右。如图 3.22 所示,若轴承的内径为  $D$ ,轴颈的直径为  $d$ ,则轴承游隙为  $D-d$ ,而轴承的游隙比为  $(D-d)/d$ 。

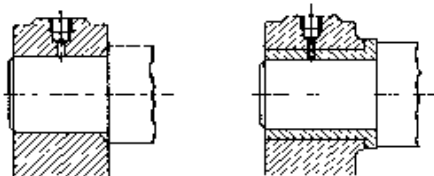


图 3.21 滑动轴承(向心轴承)

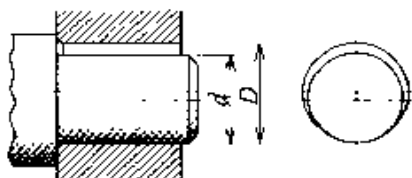


图 3.22 轴承游隙

**滑动轴承的润滑方法** 使用滑动轴承时,在轴承与轴颈的间隙中必须不断地供给润滑脂或润滑油进行润滑,图 3.23 所示为润滑方法的图例。

① **手动润滑方法** 由人工使用注油器适时地进行手动加油的润滑方法。

② **油线滴油润滑方法** 使用油杯通过线绳随时滴油的润滑方法。

③ **飞溅润滑方法** 使油箱内的润滑油飞溅到轴承上来进行润滑的方法。

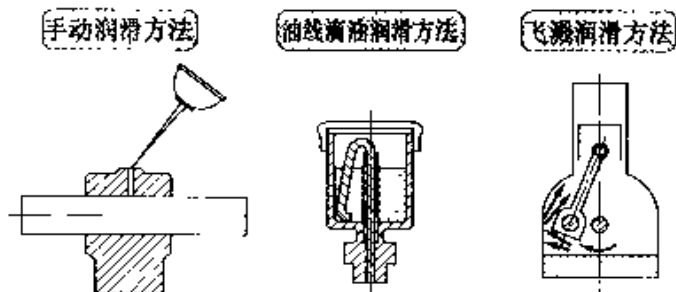


图 3.23 润滑方法

[引自塚田忠夫等主编 新机械设计 I(实教出版社)]



**滚动轴承** 在轴承与轴颈之间加入滚珠或滚柱等滚动体,实现滚动接触的轴承叫滚动轴承,其种类如图 3.24 所示。



图 3.24 滚动轴承的种类

① **向心球轴承** 可同时承受径向载荷和较小的轴向载荷,在一般场合使用较多。

② **角接触球轴承** 可同时承受径向载荷和一个方向的轴向载荷。

③ **自动调心球面球轴承** 外环的内表面为球面,在转动中即使轴心稍有倾斜也能自动调整,使之正常转动。

④ **圆锥滚子轴承** 可承受较大的径向载荷和轴向载荷。

⑤ **滚针轴承** 使用多个较细小的滚针作为滚动体,可以减小轴承的外径尺寸。

**滚动轴承的润滑方法** 滚动轴承的润滑应该考虑滚动接触的滑动摩擦部分、保持架与滚动体(滚珠、滚子)之间的摩擦部分的润滑及轴承内部的防锈问题。润滑方法有如下几种:

① **润滑脂润滑** 采用向轴承内注入润滑脂的方法进行润滑。

② **油浴润滑** 将轴承的部分滚动体浸在润滑油中进行润滑。

③ **喷射润滑** 用喷嘴向轴承内喷入压力润滑油的润滑方法。

## 新技术 双列组合圆锥滚子轴承

**双列组合圆锥滚子轴承**是在轴承的内环与外环之间将滚子排列成相互垂直的两列构成结构紧凑的轴承(如图 3.25 所示)。这种轴承的滚动面为线接触,因此轴承产生的弹性变形极小,而且一个轴承可以同时承受径向载荷、轴向载荷及力矩载荷等各方向的载荷。因为这种轴承的结构紧凑,刚度和旋转精度都很高,所以在工业机器人上广泛使用。ISO 中已经规定了这种轴承的标准系列,但尚未列入 JIS 标准。



图 3.25 双列组合圆锥滚子轴承

### 研究课题 间隙与预载荷

齿侧间隙是为了使齿轮能够正常旋转,在互相啮合的轮齿之间留有的间隙。对于机械的整体来说,各运动副间的运动间隙也是不可缺少的,这种间隙一直被认为是不可避免的不利因素。

为了解决间隙问题,在球轴承和滚珠丝杠上采用了美国艾克赛勒公司提出的加预载荷的工艺方法。实现这种工艺的最简单方法就是将轴承的外环沿圆周方向切分成两部分,在装配时施加一定的预压力,使滚动体与轴承的内外环之间在无间隙的条件下平滑地运动。采用这种球轴承和滚珠丝杠可以使机床和机器人的定位精度得到大幅度提高。

### 例题

设某轴所传递的功率为 20kW,转速为 100r/min,求该轴所受的转矩。

答

转矩  $T$  可以用下面的式子求得:

$$T = \frac{1\,000 \times 60}{2\pi n} P = \frac{1\,000 \times 60}{2\pi \times 100} \times 20 \times 10^3 = 191 \times 10^4 \text{ [N} \cdot \text{mm]}$$

## 5 联轴器及其用途

**要 点** 将两旋转轴直接连接起来,并起到互相传递力矩作用的机械零件称为联轴器。在机器人上使用联轴器的例子很少,仅在具有变速机构的电机与增速器或减速器的连接时使用。

联轴器可分为刚性联轴器、弹性联轴器和万向联轴器三类。

**解 释** ● 刚性联轴器

凸缘式刚性联轴器

在两轴的轴线能够保证一致的条件下所使用的联轴器称为刚性联轴器,这种联轴器能够传递较大的功率。图 3.26 所示为凸缘式刚性联轴器,这种联轴器的结构是先将两个法兰盘分别固定在两个轴端上,再用螺栓将两个法兰盘连接在一起形成固定的连接方式来传递扭矩。

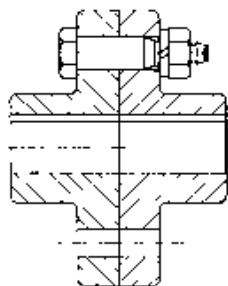


图 3.26 凸缘式刚性联轴器

● 弹性联轴器

凸缘式弹性联轴器

当两轴的轴线对中调整比较困难时,可以采用弹性联轴器连接。图 3.27 为凸缘式弹性联轴器,其结构与凸缘式刚性联轴器相似,但其中一个法兰盘的螺栓孔中装有弹性套筒,可以起到调整中心的作用,图 3.28 所示为弹性联轴器连接电机与减速器的实例。

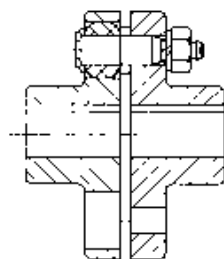


图 3.27 凸缘式弹性联轴器



图 3.28 弹性联轴器的应用实例

### ● 万向联轴器

当被连接的两轴相交成一定角度时,可以使用万向联轴器来传递运动和功率。图 3.29 所示的机构在汽车和机床上经常使用,输入轴旋转时,经一个十字形的旋转体带动中间轴旋转,中间轴再经过另一个十字形的旋转体驱动输出轴旋转。图 3.30 为万向联轴器的应用实例。

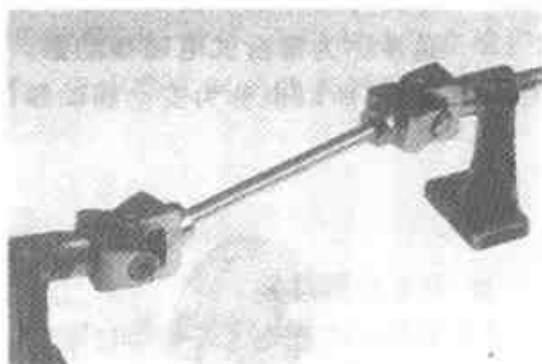
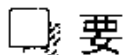


图 3.29 万向联轴器



图 3.30 万向联轴器的应用实例

## 6 制动器及其用途



### 要点

制动器是将机械运动部分的能量变为热能吸收,从而使运动的机械速度降低或者停止的装置,大致可分为机械制动器和电气制动器两类。

在机器人机构中,一般在如下情况使用制动器:

- ① 特殊情况下的瞬时停止和需要采取安全措施。
- ② 停电时,防止运动部分下滑而破坏其它装置。



### 解释

#### ● 机械制动器

机械制动器有螺旋式自动加载制动器、盘式制动器、闸瓦式制动器和电磁制动器等,其中最典型的是电磁制动器。

在机器人的驱动系统中常使用伺服电机,由伺服电机本身的特性决定了电磁制动器是不可缺少的。从原理上讲,这种制动器就是用弹簧力制动的盘形制动器,当有励磁电流通过线圈时制动器打开,不起制动作用。而当电源断开时,线圈中无励磁电流,在弹簧力的作用下使制动器闭合而处于制动状态。因此这种制动器通常称为常合式电磁制动器。又因为这种制动器常用于安全制动场合,所以也称为安全制动器(如图 3.31 所示)。

电磁制动器

常合式电磁制  
动器  
安全制动器

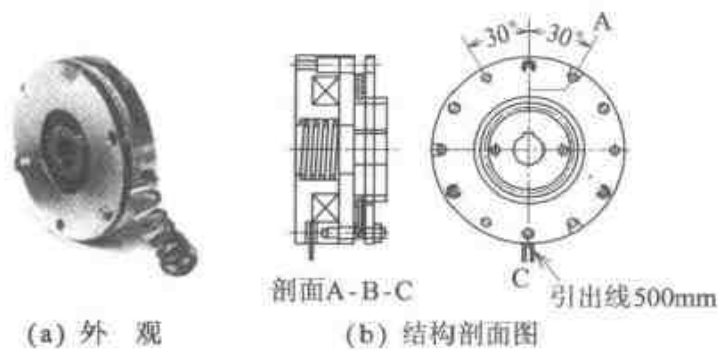


图 3.31 常合式电磁制动器

#### ● 电气制动器(动力制动器)

电动机是将电能转换为旋转机械能的装置,反之它也将旋转机械能转变为电能的发电功能。换言之,伺服电机是一种能量转换装置,可将电能转换成机械能,同时也能够实现其相反过程来达到制动的目的。但对于直流电机、同步电机和感应电机等各

种不同的电机,必须分别采用适当的制动电路。

## !!! 相关知识 ● 使用制动器时的注意事项

在机器人搬运物体的搬运能力方面,搬运比是评价机器人性能的重要指标。其中

搬运比

臂杆的重量

可搬运重量

$$\text{搬运比} = \frac{\text{臂杆的重量}}{\text{可搬运重量}}$$

当然搬运比的值越小越好,目前把搬运比能否超过 10 作为判断机器人性能优劣的基本条件之一。

在机器人上安装机械制动器会使重量增加,应尽量避免。采用电气制动器,可不增加驱动系统的重量又具有制动功能,这是非常理想的,但电气制动器不能达到完全停止的制动效果,需要保持静止状态时必须采用机械制动器

## 应用基础 ● 内涨式制动器的维护问题

内涨式制动器如图 3.32 所示。这种制动器是主要用于汽车等机械的制动装置,它具有能够对连续负载实现平稳制动的特点,其优缺点如下:

(1) 优点 与盘形制动器相比,有制造成本低、低速制动力大等特点。

(2) 缺点 由于散热问题而不易连续使用。此外,盘形制动器在维护时只需更换摩擦片的衬垫即可恢复原有的制动性能,而内涨式制动器不但制动轮磨损,还存在摩擦面曲率变化的问题。

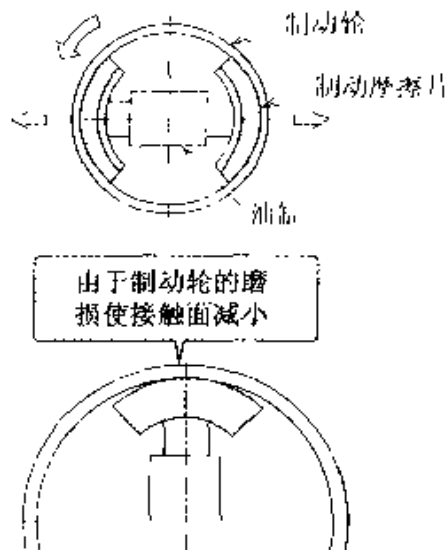


图 3.32 内涨式制动器结构

## 7 齿轮原理及其分类

**要 点** 因为机器人需要完成各种必要的运动,所以传递来自驱动装置能量(力和速度)的传动机构就十分重要。齿轮副是其中最重要的传动机构之一。

**解 释** ● 齿轮的分类

齿轮是在圆盘形毛坯上规则地加工出齿形而制成的零件。齿轮传动是将齿轮安装在轴上使两齿轮的轮齿直接接触来传递转矩的传动方式,按传动形式分类如图 3.33 所示。

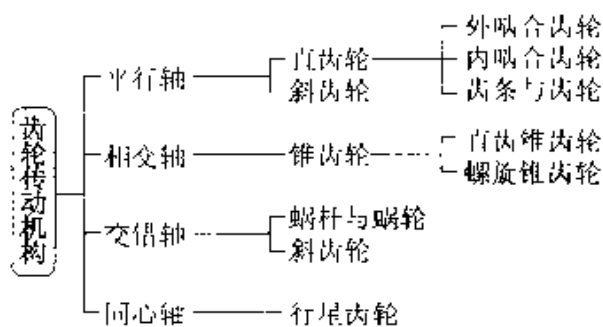


图 3.33 齿轮的种类

图 3.34 所示为齿轮各部分的名称。

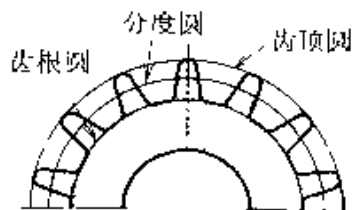


图 3.34 齿轮各部分的名称

① 直齿轮 不存在轴向力,容易制造(图 3.35)。

② 斜齿轮 与直齿相比强度高,噪声小。因为会产生轴向力,设计轴承时应该注意(图 3.36)。

③ 内齿轮 在内圆柱的表面上加工轮齿,可得到紧凑结构(图 3.37)。

④ 齿条与齿轮传动 可将旋转运动变成直线运动(图 3.38)。

⑤ 直齿锥齿轮 能够实现两相交轴之间的传动(图 3.39)。

⑥ 螺旋锥齿轮 将锥齿轮的轮齿加工成螺旋齿,强度高,传动平稳(图 3.40)。

⑦ 交错轴斜齿轮 两斜齿轮的轴线交错安装的齿轮副(图 3.41)。

⑧ 蜗杆与蜗轮 蜗杆(形状与螺杆相同)和蜗轮(相当于齿轮)的轴线正交安装,减速比大,但不能实现由输出轴到输入轴的逆向传动(图 3.42)。

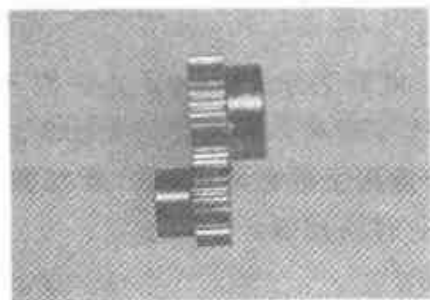


图 3.35 直齿轮

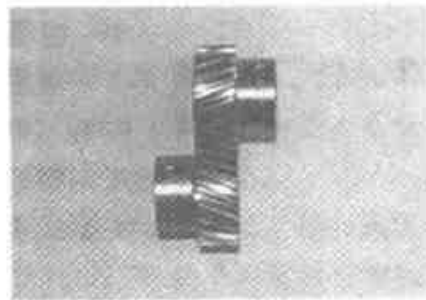


图 3.36 斜齿轮

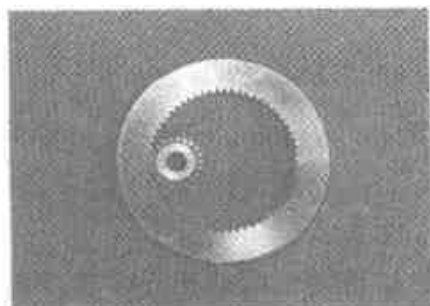


图 3.37 内齿轮

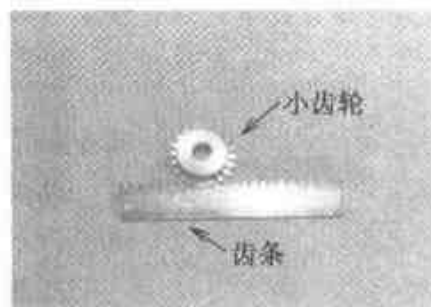


图 3.38 齿条与齿轮

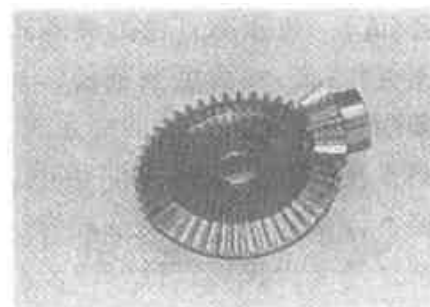


图 3.39 直齿锥齿轮

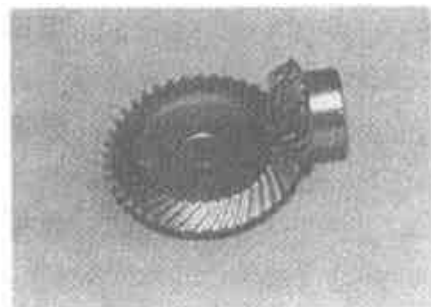


图 3.40 螺旋齿锥齿轮



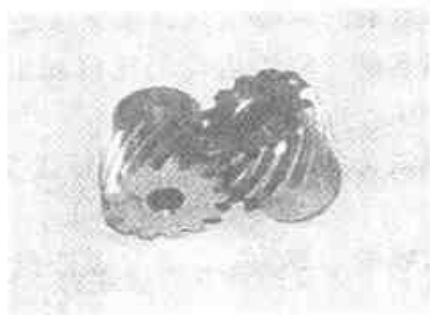


图 3.41 交错轴斜齿轮

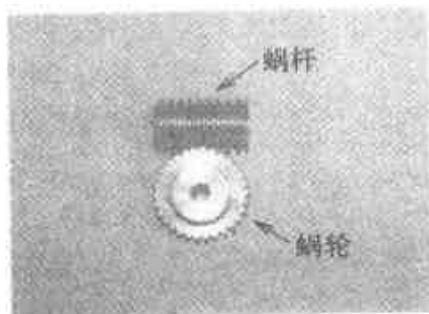


图 3.42 蜗杆与蜗轮

### ● 齿轮原理

**模数( $m$ )** 模数表示轮齿的大小。对于相同直径的齿轮,若模数不同就不能互相啮合。模数较大的齿轮,齿形也比较大。JIS规定模数为“分度圆上的齿距(周节)除以圆周率的值”,若用下列关系式表达就更容易理解:

$$m = \frac{d}{z}$$

其中, $m$ 为模数, $d$ 为分度圆直径, $z$ 为齿数。

**中心距( $a$ )** 中心距是两互相啮合齿轮的节圆半径之和。实际上,由模数和齿数来计算中心距比较方便,其关系式为

$$a = \frac{m}{2}(z_1 + z_2)$$

其中, $a$ 为中心距, $m$ 为模数, $z_1$ 和 $z_2$ 分别为两个齿轮的齿数。

此外,在模数和齿数不变时,可以采用变位齿轮来改变中心距。

**减速比** 齿轮传动的减速比等于被动齿轮的齿数与主动齿轮的齿数之比。中心距不变,若减速比增大,则模数变小。小齿轮的最少齿数是有界限(不同压力角的齿轮略有不同)的,所以选择时必须注意。

**齿顶圆直径( $d_k$ )** 齿顶圆直径的关系式为

$$\text{齿顶圆直径}(d_k) = \text{分度圆直径}(d) + 2 \times \text{模数}(m)$$

**分度圆直径( $d$ )** 分度圆直径的关系式为

$$\text{分度圆直径}(d) = \text{模数}(m) \times \text{齿数}(z)$$

**齿根圆直径** 齿根圆直径的关系式为

$$\text{齿根圆直径} \leq \text{齿顶圆直径}(d_k) - 2 \times 2.25 \times \text{模数}(m)$$

### □ 相关知识 ● 渐开线

如图3.43所示,将绕到圆柱上的线绳拉直展开时,将线端的

轨迹称为渐开线。除了钟表上使用的小齿轮为摆线齿形外，一般齿轮的齿形曲线均为渐开线。

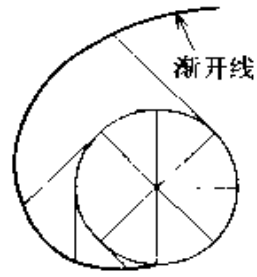


图 3.43 渐开线

## 8 齿轮机构

### □ 要 点

在设计机器人时,必须尽量降低重量,特别是驱动系统的重量直接影响到可搬运的重量减轻,必须特别注意。虽然可以实现直接驱动方式,但采用高速伺服电机与减速器组合的形式也较多。因此对机器人来说,减速器是其中非常关键的部件。

### □ 解 释

#### ● 减速器

所谓减速器就是使速度(或转速)降低的机械,也可认为是力(或力矩)放大机。

与减速器相连的电机的输出功率为转速与转矩之积。功率一定时,如果转速  $N$  降低,则输出转矩增加。其关系可按下式计算:

$$P = \frac{\tau \cdot N}{97.5} \text{ [W]}$$

其中,  $P$  为电机的输出功率[W],  $\tau$  为转矩[kgf·cm],  $N$  为转速[r/min]。

#### ● 典型的减速机构

**直齿圆柱齿轮减速机构** 这种减速机构能够在减速的同时传递较大的力矩,在机器人上用得非常多。但这种减速机构不适用于大减速比的情况。

图 3.44 为在多关节机器人的回转工作台上使用的直齿圆柱齿轮减速机构。直齿圆柱齿轮传动没有轴向力,机构设计和齿轮的加工都比较容易,但存在齿侧间隙,定位时要特别注意。图 3.45 是用于多关节机器人臂部驱动的直接圆柱齿轮减速机构。

直齿圆柱齿轮  
减速机构  
齿侧间隙



图 3.44 转台

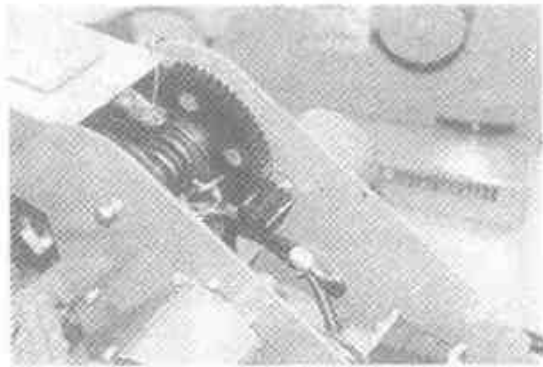


图 3.45 臂部的驱动机构

## 自锁功能

**蜗杆蜗轮机构** 图 3.46 为用于机器人臂部的蜗杆蜗轮机构。这种机构具有自锁功能,没有制动器也能保持位置不变。因输入轴与输出轴交错布置,所以只适用于这种形式臂部机构的驱动。图 3.47 为机器人的整体结构图。



图 3.46 在多关节机器人中的应用

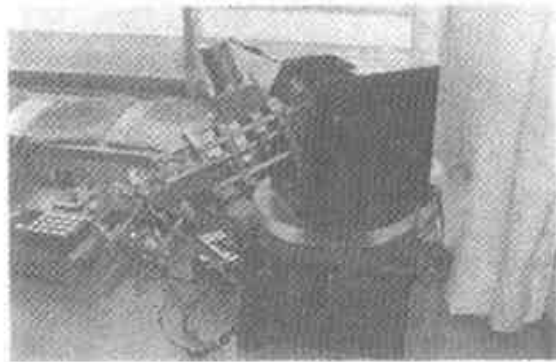


图 3.47 多关节机器人的全貌图

**齿轮齿条直线运动机构** 使用小齿轮与齿条可将旋转运动变为直线运动。它适用于需要将电机等的旋转运动转换为直线运动机构的场合。

图 3.48 为多关节机器人的手爪张开和抓紧机构的实例。机械手由气缸驱动,气缸的直线运动直接驱动机械手的一个爪向前或者向后运动,经过齿条与小齿轮来带动另一个爪指向前或者向后运动。

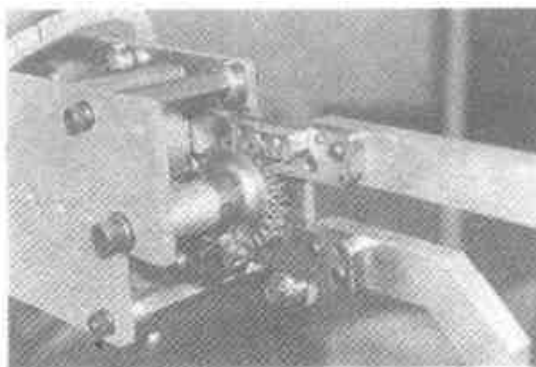


图 3.48 多关节机器人的手部

**使用锥齿轮的多关节机器人的内部构造** 当输入轴与输出轴相交时可采用锥齿轮传动。图 3.49 为多关节机器人的关节部

分使用锥齿轮传动的例子。为了布置电机方便，一般都使旋转轴垂直相交。

图 3.50 也是同样的例子，在这个机构中不但两轴为垂直相交，而且机构自身的角度也可改变。

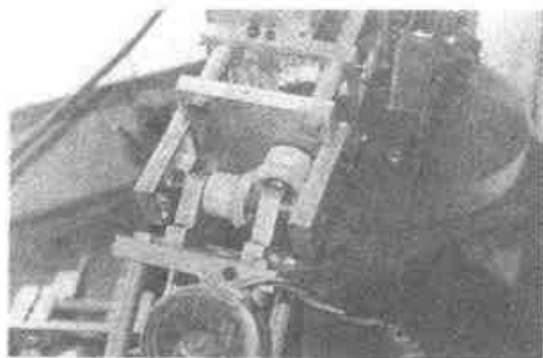


图 3.49 机械手的关节部分

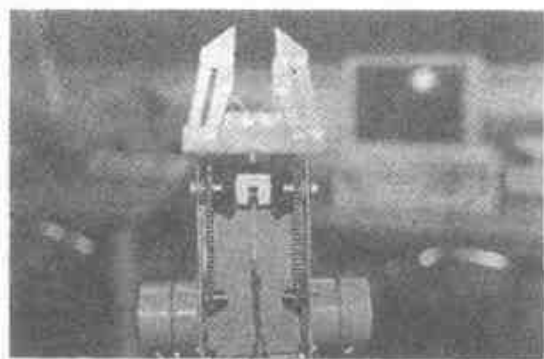


图 3.50 机械手的回转部分

### 选修知识 谐波减速机构

如图 3.51 所示，谐波减速机构由固定的内齿圈(A)、波发生器(B)、柔性外齿圈(C) (可弹性变形)三个基本零件构成，其特点为：

- ① 减速比大。
- ② 齿侧间隙小。
- ③ 不存在质量偏心。
- ④ 结构紧凑，重量轻。

目前，大多数机器人都采用了这种谐波减速器。

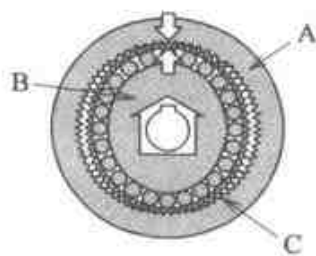


图 3.51 谐波减速器的结构

## 9 柔性传动机构

**要 点** 要在两轴之间传递旋转运动和力矩,可以采用在两轴上分别安装皮带轮,并在带轮上环绕皮带的传动方法。这种传动方法称为柔性传动,特别适合轴间距较大的运动传递。

**解 释** ● 柔性传动的分类  
按传动中是否存在相对滑动现象可将柔性传动大致分为如图 3.52 所示的几种类型。

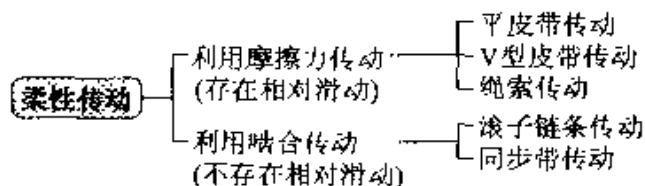


图 3.52 柔性传动的分类

### 定位精度

机器人对定位精度要求很高,传动过程中存在相对滑动是致命的缺陷,因此机器人中不能采用由摩擦力实现传动的机构。实际应用中,几乎不使用图 3.52 中所列的前三种存在相对滑移的传动方式。但在机器人竞赛中的搬运机器人上,为了简化结构,降低费用,并且能够自己制作,有的采用了绳索传动方式,但在设计中必须很好地解决相对滑动问题。

### 滚子链 同步带传动

当两轴间距离较大、不能使用齿轮传动时,可以采用滚子链或同步带传动。在采用链传动时,必须考虑松弛和润滑问题。而在采用同步带传动时,带轮制造比较复杂,但完全采用了单元化结构,不需要带的张紧和注油等维护工作,因此,最近在机器人上使用得越来越多。

表 3.4 为滚子链的种类,表 3.5 为同步带的种类。

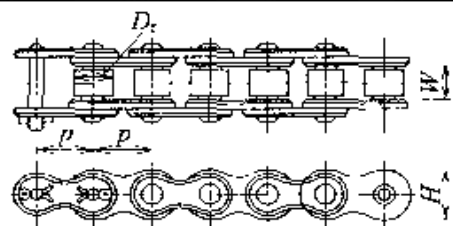
### ● 绳索传动

### 起重机

绳索传动常用于在起重机(图 3.53)、电梯、索道等设备。绳索与齿轮和链传动相比价格便宜,适用于在较长的区间内传递力矩。

起重机利用滚筒卷取绳索,经过滑轮 1 传动。滑轮 2 的作用是使重物的运动距离为绳索卷取长度的一半,而提升力为绳索拉力的二倍。向绳索传递动力的滑轮构造(图 3.54)与支承和导向

表 3.4 滚子链的种类



需要传递的力矩较大时，  
将其排成几列用长销穿过，  
这种链条称为多列滚子链

单位[mm]

公称序号	节距	滚子外径 (最大)	滚子链节 槽宽 (最小)	滚子链 节板高度 (最大)	断裂载荷 (最小) /kN
	$P$	$D_r$	$W$	$H$	
35	9.525	5.08	4.68	9.0	7.845
10	12.70	7.05	7.85	12.0	13.925
50	15.875	10.16	9.40	15.0	21.673
60	19.05	11.91	12.57	18.1	31.381
80	25.40	17.88	15.75	21.1	50.408
100	31.75	19.95	18.90	30.1	86.789
120	38.10	22.23	25.22	35.2	125.525
140	44.45	25.40	25.22	42.2	170.636
160	50.80	28.58	31.55	48.2	22.611
200	63.50	39.68	37.85	60.3	317.155

注：表示这时的  $D_r$  为衬套的外径(引自 JIS B 1801 1980)。

表 3.5 同步带的种类

符 号	种 类				XH	XXH
	(MXL)	XL	L	H		
$P$ [mm]	2.032	5.080	9.525	12.700	22.225	31.705
$2\beta$ [°]	40	50	40	40	40	40
$S$ [mm]	1.14	2.57	4.65	6.12	12.57	19.05
$ht$ [mm]	0.51	1.27	1.91	2.29	6.35	9.53
$hs$ [mm]	1.1	2.3	3.6	4.3	11.2	15.7
$rr$ [mm]	0.13	0.38	0.15	1.02	1.57	2.29
$ra$ [ $\mu$ m]	0.13	0.38	0.15	1.02	1.19	1.52

注：引自 JIS K 6372, 其中 MXL 型尚未列入 JIS, 正在准备之中。

滑轮的结构(图 3.55)不同, 向绳索传递动力的滑轮的导向槽截面形状为三角形, 利用内侧夹紧力来产生较大的摩擦力

多关节机器人

图 3.56 所示为应用绳索传动方式实现多关节机器人的手爪张开与抓紧动作的机构。为了减轻机器人臂部前端的重量,将电机等驱动部分设计在主体的一边。而在臂杆中的长距离驱动则采用钢丝绳来实现,图 3.57 所示为其驱动部分。

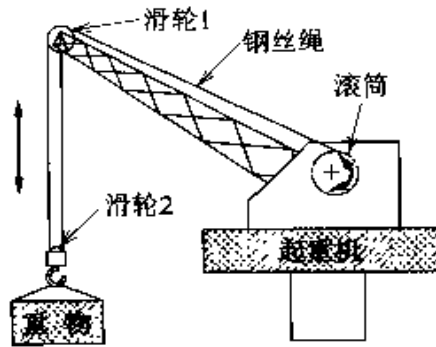


图 3.53 起重机

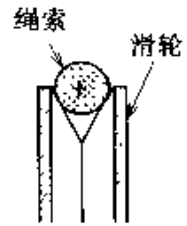


图 3.54 驱动滑轮

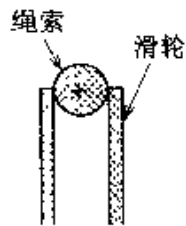


图 3.55 普通滑轮

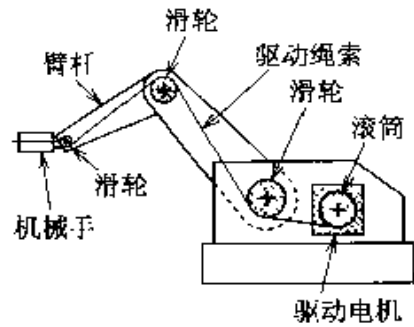


图 3.56 采用绳索传动的机械手驱动机构

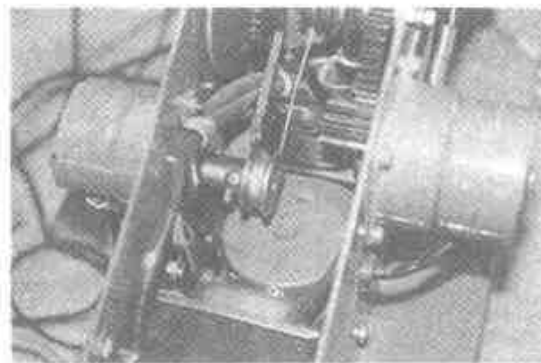


图 3.57 柔性传动的驱动部分



张紧

### ● 滚子链(臂杆的内部结构)

滚子链与齿轮相比主要用于低速大转矩的传动,可以实现像同步带那样的同步运转。因为采用金属结构,所以寿命较长。适用于像多关节机器人那样,希望将驱动系统尽可能安装在主体上的传动机构。它与同步带相比价格便宜,可布置在较小的空间内,但在长距离传动时会产生松弛现象,必须采用张紧机构。

图 3.58 为链传动机构在多关节机器人上的应用实例。

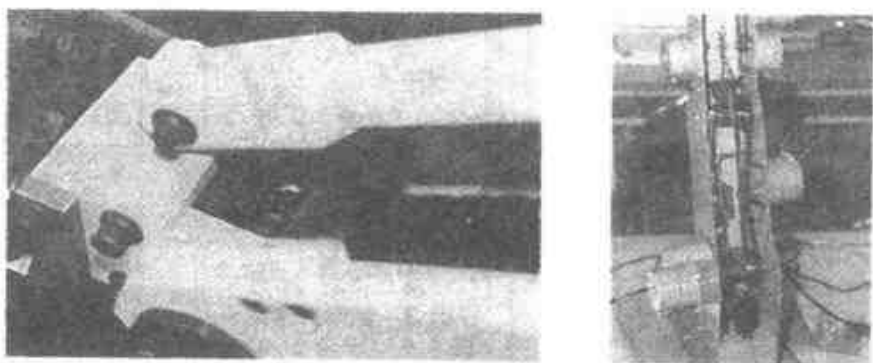


图 3.58 在多关节机器人中的应用实例

### ● 同步带

同步带传动机构是在皮带的内侧和带轮外圆周上加工出与齿轮相似的齿形,完全由齿形的啮合来传动,能够实现同步运转。这与 V 型皮带传动相比,不需要皮带的张紧机构;与齿轮传动相比,具有噪声小、不需要润滑,适用于轴间距较大的轻载传动。同步带的材质可以采用橡胶等各种材料。但同步带传动机构与 V 型带轮传动机构相比造价要高 15~20 倍。图 3.59 所示为多关节机器人的驱动部分使用同步带传动机构的实例。

V 型皮带

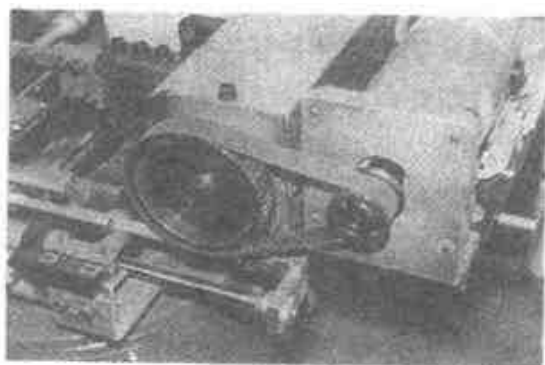


图 3.59 同步带

# 10 连杆机构的相关技术

## □ 要点

用销轴等零件将细长的杆件连接起来组成的机构称为连杆机构。杆与杆之间构成转动副或者滑动副，其中作旋转运动的杆称为曲柄，而只能在一定角度范围内作往复摆动的杆称为摇杆。

图 3.60 所示为由转动副构成的连杆机构。

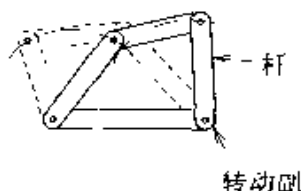


图 3.60 连杆机构的例子

## □ 解释

主动件  
从动件

### ● 连杆机构的工作原理

传递运动的机构有许多种，在这些机构中，带动其它部分运动的零件叫做主动件，最后实现必要运动的零件叫做从动件。根据主动件与从动件之间的关系可以将传动方式分为直接传动与间接传动两类。

#### ● 直接传动

主动件与从动件之间通过直接接触来传递运动的机构称为直接传动机构。如图 3.61 所示，主动件凸轮 A 旋转推动从动件阀杆 B 往复运动，这种机构就是一种直接传动机构。齿轮、摩擦轮、凸轮等传动机构均为直接传动机构。

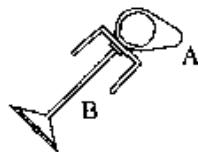


图 3.61 直接传动的例子

#### ● 间接传动

如图 3.62 所示，由四根杆件组成的机构称为四连杆机构。

主动件 A 与从动件 C 分离，主动件 A 的运动先传给杆件 B，再由杆件 B 将运动传给从动件 C，这样的运动形式称为间接传动。

连杆  
中间件  
机架

运动传递的中介杆件 B 称为连杆(中间件),固连于静止坐标系的固定件称为机架。

中间件不单指像连杆这样的刚性构件,也包括像皮带那样的柔性件和压力油那样的流体等。

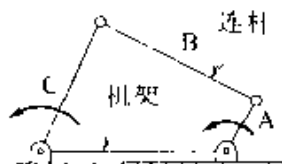


图 3.62 四连杆机构

### ● 四连杆机构

杆件按使用方法可分为曲柄和摇杆。机架和连接件暂且不论,根据主动件和从动件的使用方法,可将四连杆机构按曲柄和摇杆的组合形式分为三种基本机构。

**曲柄摇杆机构** 如图 3.63 所示,以杆 A 为机架,杆 C 为连杆,那么短杆 D 就成为可回转的曲柄,而长杆 B 则成为进行往复摆动的摇杆。杆 B 和杆 D 都可以作为主动件或者从动件

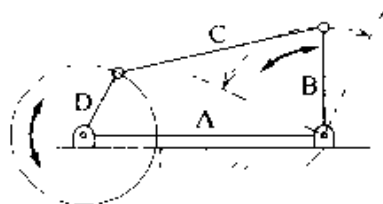


图 3.63 曲柄摇杆机构

**双曲柄机构** 如图 3.64 所示,若将短杆 A 固定, C 为连杆,则杆 B 和杆 D 均可作为曲柄使用。这时如果主动件为匀速回转,则从动件为非匀速回转。

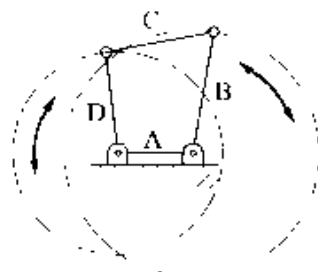


图 3.64 双曲柄机构

**双摇杆机构** 如图 3.65 所示,若以杆 A 为机架,C 为连杆,那么 B、D 两杆均可作为摆杆使用。它应用于铲土机、水平牵引式起重机等例子很多,可以说是一种最典型的连杆机构。

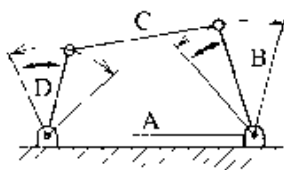


图 3.65 双摇杆机构

● 其它类型的连杆机构及应用实例

滑块机构

**曲柄滑块机构** 曲柄与滑块机构组合起来能够将旋转运动变为直线运动(或将直线运动变为旋转运动)。一般驱动机器人臂部运动的伺服装置都是电动机,所以经常需要将旋转运动变成直线运动。图 3.66 所示为一曲柄滑块机构。

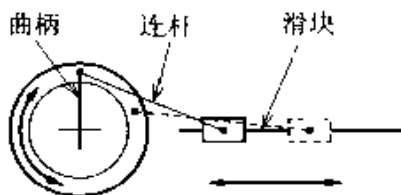


图 3.66 曲柄滑块机构

连杆机构

**曲拐** 曲拐机构是连杆机构的一种应用,很早以前就开始在曲柄夹紧机构和冲压机构上使用。这种机构的往复运动范围大,并能够产生较大的压力。图 3.67 所示为曲拐机构在机械手夹紧部分的应用。

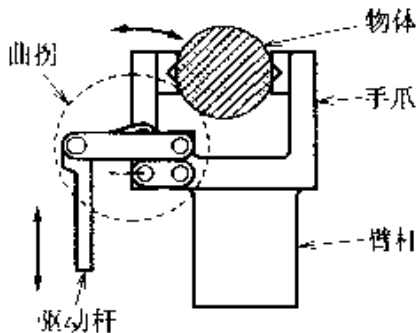


图 3.67 曲拐机构(机械手)

**平行四连杆机构** 在多关节机器人臂部使用平行四连杆机构是为了始终保持臂部的方向不变(如图 3.68 所示)。

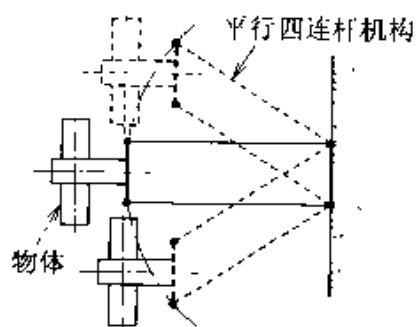


图 3.68 平行四连杆机构

图 3.69 所示为多关节机器人臂部使用的平行四连杆机构,这样的机构可使机器人的手部始终保持水平方向上。



图 3.69 机械手的平行四连杆机构

图 3.70 和图 3.71 所示为多关节机器人臂部使用的平行曲柄机构,使手爪的前端能够平行运动。



图 3.70 机械手张开状态

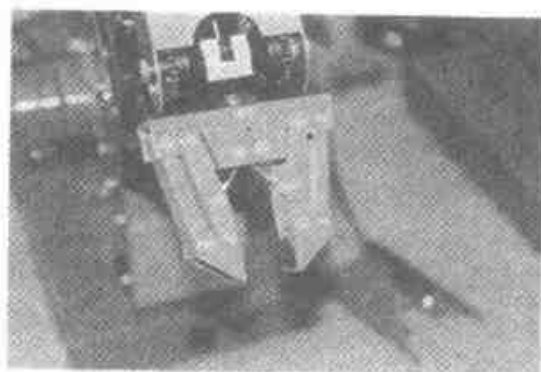


图 3.71 机械手夹紧状态

# 11 凸轮机构的相关技术

## 要 点

根据从动件所要实现的运动将主动件设计成特殊形状,通过直接接触来传递运动的机构称为凸轮机构。其中制成特殊形状的主动件称为凸轮,从动件称为凸轮推杆。

## 解 释 ● 凸 轮

凸轮机构是将旋转运动转变为比较短的直线往复运动的机构。采用曲柄滑块机构所获得的直线运动速度呈正弦曲线规律,为不等速直线运动。采用凸轮机构可以获得匀速直线运动,也能够获得匀速运动与不等速运动组合的复杂运动规律。图 3.72 所示为实现直线匀速运动的心形凸轮的曲线图。

曲柄滑块机构

心形凸轮

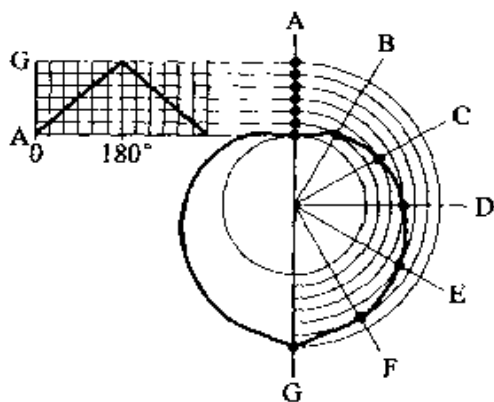


图 3.72 心形凸轮

## ● 凸轮的种类

如图 3.73 所示,凸轮可按接触部位的运动形式分为平面运动的平面凸轮(plane cam)和空间运动的空间凸轮(solid cam 或 spatial cam)。

平面凸轮  
空间凸轮



图 3.73 凸轮的分类

① **盘形凸轮** 在平面凸轮中,应用最广的是具有特殊轮廓形状的回转盘形凸轮(图 3.74)。

② **移动凸轮** 作往复直线运动的凸轮(图 3.75)。

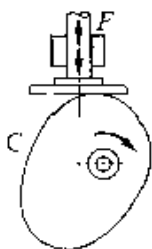


图 3.74 盘形凸轮

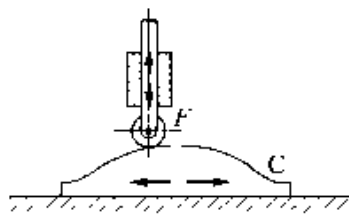


图 3.75 移动凸轮

③ **框形封闭凸轮** 将凸轮整体装入从动件的框形结构中,形成几何封闭的精确传递运动的凸轮称为确动凸轮,框形封闭凸轮是其中的一种(图 3.76)。

④ **逆向凸轮** 从动件制成特殊形状的凸轮机构(图 3.77)。

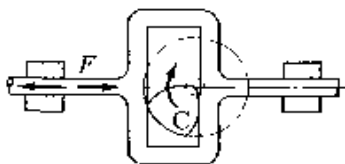


图 3.76 框形封闭凸轮

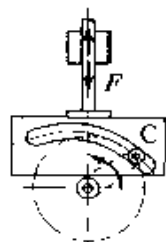


图 3.77 逆向凸轮

⑤ **回转体凸轮** 在圆柱、圆锥或球面等回转体的表面上加工出具有特殊曲线规律的沟槽,将从动件嵌入沟槽内,通过主动件的旋转来传递运动的凸轮机构称为回转体凸轮机构,其中的主动件称为回转体凸轮(图 3.78)。

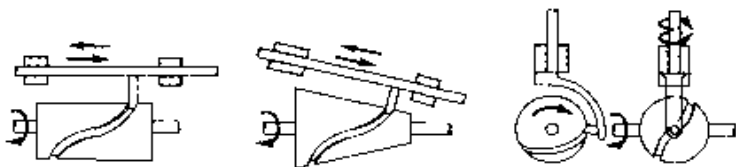


图 3.78 回转体凸轮

⑥ 端面凸轮 是在轴的端面上加工出特殊轮廓而制成的凸轮(图 3.79)。

⑦ 斜盘凸轮 为使从动件实现简谐振动的凸轮(图 3.80)。

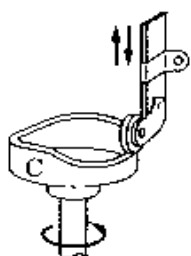


图 3.79 端面凸轮

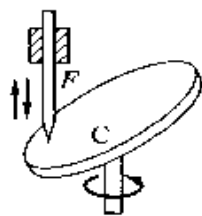


图 3.80 斜盘凸轮

### ● 凸轮机构在机器人上的应用

设计凸轮比较简单,只要设计出凸轮的曲线图就基本完成了,但凸轮曲面的加工却比较复杂。因此,近年来在各种机械中使用电气装置、液压和气动装置,或选择其它的机构来实现复杂运动的比较多,而尽量不使用凸轮机构,在机器人的设计中也是如此。

图 3.81 所示为机械手上使用心形凸轮的应用实例。

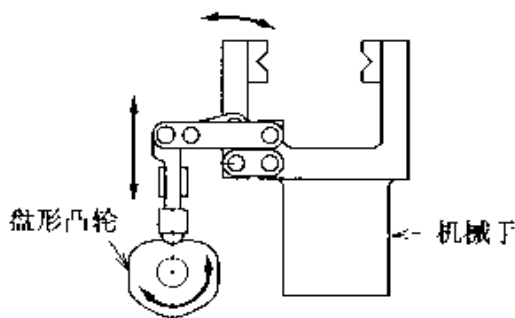


图 3.81 机械手的驱动

### ■ 实用知识 ■ 使凸轮机构能够平滑传动的滚子

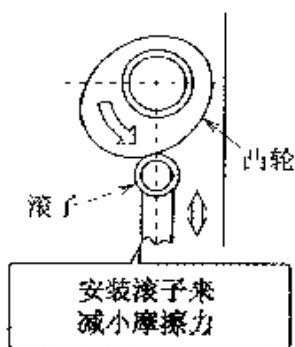


图 3.82 凸轮与滚子

在工业机械的各种机构中,用伺服电机驱动已逐渐成为主流。但在像发动机等运动规律固定的高速驱动机构中,还仍然要采用凸轮机构。

本来凸轮表面的接触为滑动副,要使用润滑油对其进行润滑。由于凸轮接触面磨损等原因,需要对凸轮机构定期进行维护。若在从动件与凸轮接触的部位安装上滚子,形成滚动摩擦结构就可以解决这种磨损问题(图 3.82)。





## 第4章

# 传感器技术

传感器技术是机电一体化领域中的重要技术之一。要进行某种控制，就离不开传感器。

有了较好的传感器，如果不会很好地运用，还是达不到预期的控制效果。未来的机电一体化产品，要求能够完成高精度、高速度的控制，为了实现这一点，高性能的传感器及高超的传感器应用技术必不可少。

现在，人们正在开发能够检测各种物理量的传感器，并实现标准化产品。

在本章中，我们将根据机电一体化领域检测项目的需要，对各种传感器进行分类，并举一些具体事例进行说明。

- 责任编辑  
小岛昭雄
- 执 笔  
增田彦四郎(1~4)  
小堀 隆(5~8)  
小岛昭雄(9~14)

# 1 力传感器

**要 点** 力传感器(force sensor)是一种能够检测张力、拉力、重量、压力、扭矩、材料内部应力和应变等力学量的传感器。  
在力传感器中,有金属应变片、测力计、压力传感器等多种类型。

**解 释** ● 金属应变片

应变

金属受到拉伸作用时,在长度方向发生伸长变形的同时会在径向发生收缩变形。金属的伸长量与原来长度之比称为应变。利用金属应变量与其电阻变化量成正比的原理制成的器件称为金属应变片(strain gage)。一般的金属应变片如图 4.1 所示,是在用苯酚、环氧树脂等材料绝缘浸泡过的玻璃基板上,黏贴直径为 0.025mm 左右的金属丝或金属箔制成的。

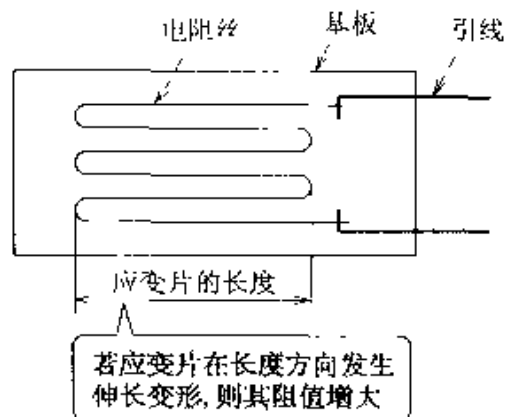


图 4.1 电阻丝式金属应变片

**惠斯登桥电路**

金属应变片是一种采用惠斯登电桥(wheatstone bridge)的电路,将应力、张力等力学量转换成电量,再将输出的微弱电压信号放大后进行检测的器件。(参见图 4.2)

在图 4.2 所示的电路中,假设  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ,当惠斯登电桥处于平衡状态时,电路的输出电压  $e = 0$ 。但是,当有一个金属应变片受力产生应变时,其阻值变为  $R_1 + \Delta R_1$ ,则输出电压  $e$  可由下式得出:

$$e = \frac{E}{4} \times \frac{\Delta R_1}{R_2}$$

假设该金属应变片产生的应变为  $\epsilon_1$ ,则上式将变为

$$e = \frac{E}{4} K \epsilon$$

## 应变系数

式中,  $k$  称为应变系数 (gage factor), 表示金属应变片的电阻应变灵敏度。

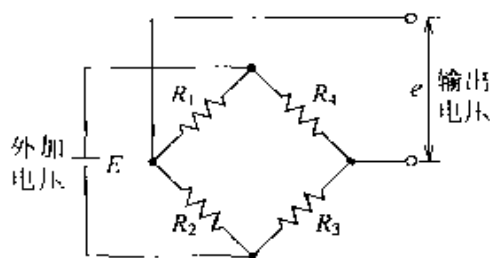


图 4.2 惠斯登电桥

利用惠斯登电桥构成力学量传感器时,可以采用电桥的一边为一片金属应变片,其它为固定电阻的方法,也可以采用在电桥上用 2 片或 4 片金属应变片组成的桥路结构,以此提高传感器的测量精度(参见图 4.3)。采用 2 片金属应变片组成检测电路时,由于有 2 片金属应变片产生应变,因此可以得到单片应变片电路的两倍输出电压。采用 4 片金属应变片组成检测电路时,则可以得到 4 倍于单片应变片电路的输出电压。此外,有的检测电路还采用具有温度补偿功能的金属应变片替换固定电阻,以此提高电路的测量精度。

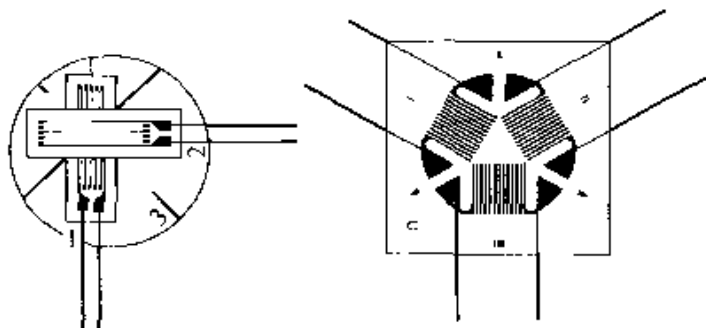


图 4.3 组合式应变片

一般金属应变片的阻值通常为  $120\Omega$ , 当需要检测微弱应变时,可采用  $10k\Omega$  的金属应变片。

### ● 测力计

#### 测力计

用于测量张力、拉力、重量等力学量的专用传感器称为测力计 (load cell)。其中,有的测力计采用黏贴多个金属应变片的结构,也有的采用半导体应变片作为转换元件,其结构如图 1.4 所示,它

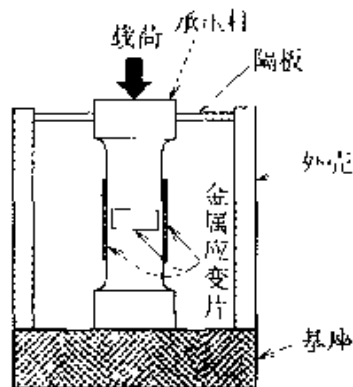
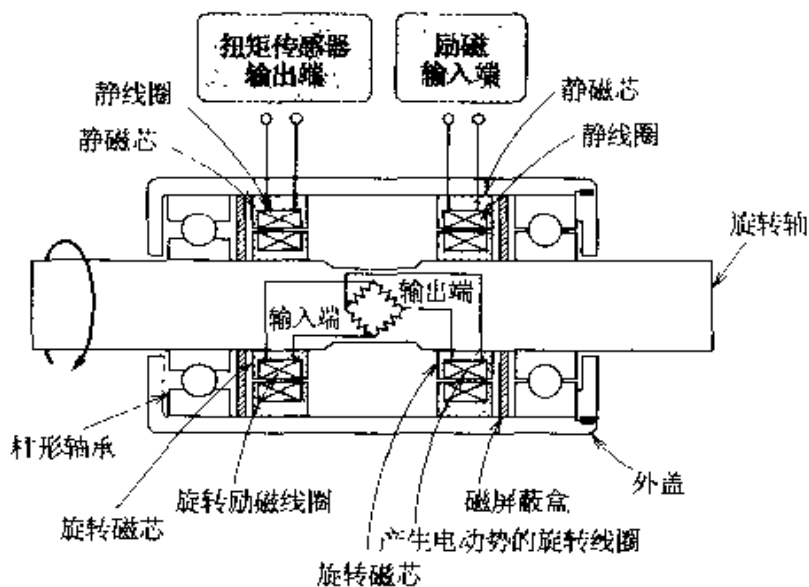


图 4.4 测力计的结构(压力计)

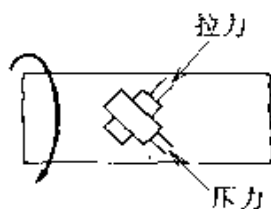
而且,还应综合考虑是否有冲击载荷、测量精度要求、支撑点的个数、使用环境温度等诸多条件,这一点非常重要。

通过轴的扭转变形检测施加在物体上扭矩的测力计称为**扭矩传感器**,分为接触式和非接触式两类。在非接触式扭矩传感器中,又分为**磁偏式**及**相位差式**两种。图4.5所示为非接触式扭矩传感

扭矩传感器  
接触式  
非接触式  
磁偏式  
相位差式



(a) 结构



(b) 因扭曲在应变片上产生的力

图 4.5 扭矩传感器

器。它在与轴心线成  $45^\circ$  角的方向上,黏贴了两个正交的应变片,由它们将轴上产生的拉伸或压缩应变转换成电信号输出。采用这种结构的传感器,可以得到 2 倍于单片应变片结构的输出。

扭矩传感器的规格有  $0.2\text{N}\cdot\text{m}\sim 10\text{kN}\cdot\text{m}$  多种型号。

### ● 半导体压力传感器

半导体晶体受到一个外力作用时,因半导体的压阻效应,其内部电阻将会发生很大的变化。利用半导体这种特性制成的检测压力的传感器称为半导体压力传感器 (semiconductor pressure sensor)。

半导体压力传感器的结构如图 4.6 所示。在制造时,先将硅单晶基板的中央部分腐蚀成薄膜状的硅杯 (diaphragm),再用 IC 的扩散工艺制成由 4 个半导体应变片构成的惠斯登电桥,以此构成检测压力的传感器。

被测对象为空气、 $\text{CO}_2$ 、He、Ne、Ar、硅酮油等物质时,可以采用硅杯直接承压的测量方式;被测对象为水、海水、氟里昂、汽油、 $\text{SO}_2$  等物质时,可以将硅杯通过玻璃贴在不锈钢的背面构成保护罩,通过保护罩承压。

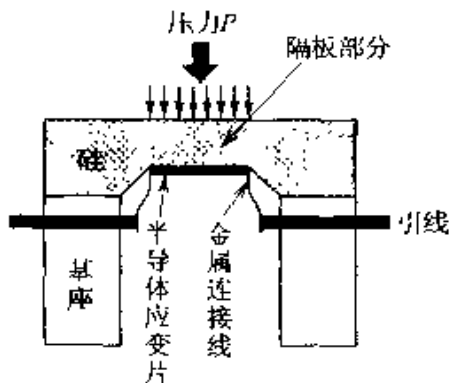


图 4.6 半导体压力元件

压阻效应  
半导体压力  
传感器

硅杯



### 相关知识

#### ● 压力

表压  
绝对压

压力的表示方法有以大气压为基准的表压以及以真空为基准的绝对压两种。当被测压力的表压值低于大气压时,采用负压进行表示。



### 必备知识



#### 压阻效应

晶体受到一个外部压力时,晶体内部会产生应变,其能带结构将发生改变,载流子(空穴或电子)的运动状态也将随之发生变化,由此引起该晶体的阻抗变化,这种现象称为压阻效应 (piezo resistance effect)。

## 2 位移传感器

**要 点** 位移传感器(displacement sensor)是一种用于检测物体位置(长度、距离)及转动角度等物理量的传感器。

在常用的位移传感器中,有可变电位器、差动变压器、光电角度传感器、半导体角度传感器等多种类型。

**解 释** ● 可变电位器

可变电位器  
电阻材料  
滑块

图 4.7 为一个圆形可变电位器的示意图。在图 4.7 中,当转动滑块沿圆周状的电阻材料滑动时,输出电阻与滑块在电阻材料间的转动角度成正比。给电阻体施加一个固定的电压时,由滑块位置分压的输出电压,可由电阻材料的总电阻与滑块至固定端的电阻之比求得:

$$E_{OUT} = E_{IN} \times \left( \frac{R_0}{R_A} \right)$$

式中, $E_{OUT}$ 为输出电压(V), $E_{IN}$ 为外加固定电压(V), $R_A$ 为材料的总电阻( $\Omega$ ), $R_0$ 为固定端至滑块间的电阻( $\Omega$ )。

假设可变电位器的最大转动角度为 $\theta_f$ ,滑块的当前角度(位移量)为 $\theta$ ,则输出电压 $E_{OUT}$ ,可由下式求出:

$$E_{OUT} = E_{IN} \frac{\theta}{\theta_f} (0 \leq \theta \leq \theta_f)$$

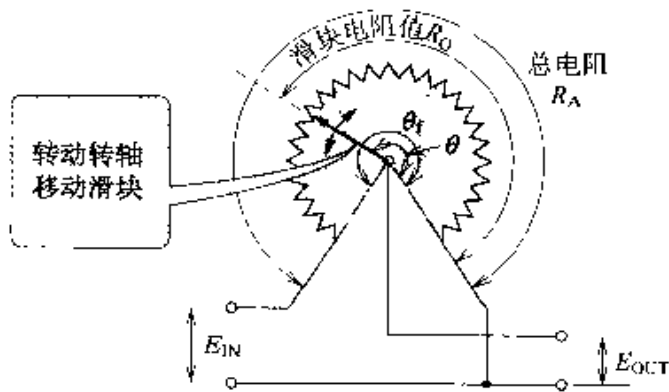


图 4.7 电位器结构图

**线绕型** 若可变电位器采用图 4.8 所示的线绕型结构,则分辨率将会呈离散式变化。

按结构的不同,可变电位器可分为单圈型( $120^\circ$ 、 $340^\circ$ )及图 4.9

多圈型

所示的多圈型(1800°、3600°)两种。

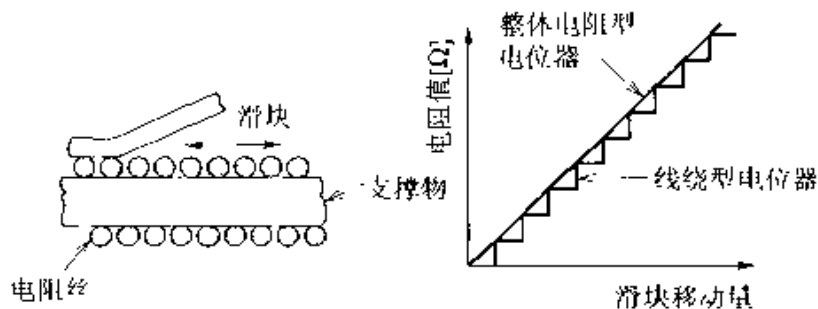


图 4.8 线绕电位器的分辨率

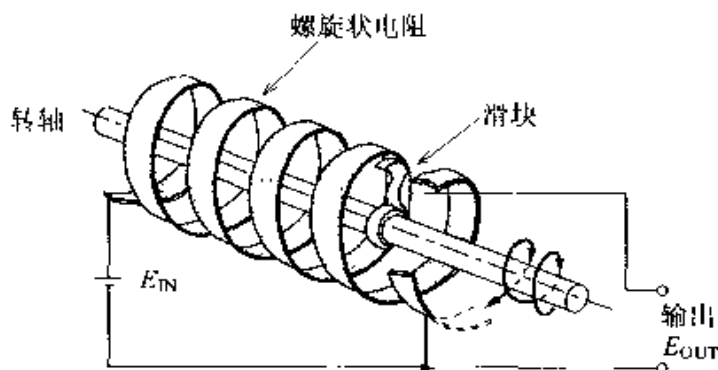


图 4.9 多圈电位器的工作原理图

金属电阻丝

炭膜

导电塑料

陶瓷电阻

高输入阻抗的

差动放大器

在可变电位器中,电阻材料可以采用金属电阻丝、炭膜、导电塑料、陶瓷电阻等材料。根据不同的用途可变电位器分为多种规格,阻值也从  $100\Omega$  至  $100k\Omega$ ,有多种规格。

因为可调电位器的阻值相对较大,因此在精度要求较高的检测、控制电路中,常常需要采用高输入阻抗的差动放大器进行阻抗变换。

### ● 差动变压器 (differential transformer)

差动变压器的结构及原理如图 4.10 所示。给初级线圈施加一个交流电压时,铁芯中的磁通量将会随之发生变化,通过电磁感应,在次级线圈中将会产生一个与磁通量成正比的感应电动势。利用这一原理,若在初级线圈上加一个稳定的励磁交流电压,则会在次级线圈上产生一个与铁芯位置成正比的感应电压。将这个电压整流成直流信号后取出,则可制成能检测铁芯前端位移量的传感器。

差动变压器的检测范围通常在  $5\text{mm}$  至  $200\text{mm}$  左右,也有的



差动变压器只能检测±1mm范围内的位移量。

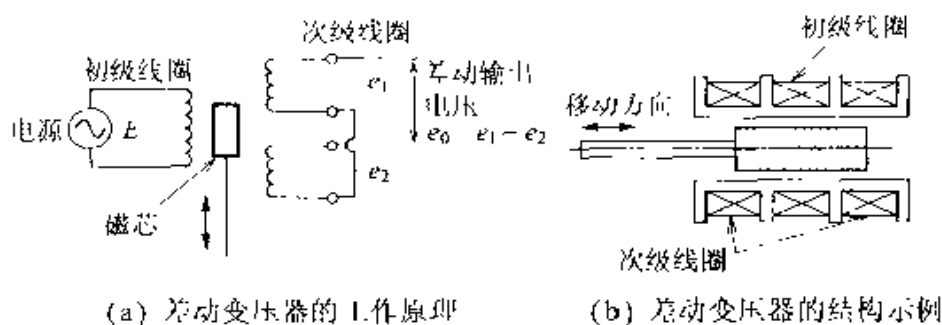


图 4.10 差动变压器

此外,差动变压器的灵敏度一般为每毫米位移能输出 80~300mV 电压。由于它的信号电平高、输出阻抗低,因此具有很强的抗干扰能力。而且,若采用在初级线圈两侧反向缠绕次级线圈的结构,还可以根据输出电压的“+”、“-”,轻易地判别出物体的位移方向。

为了抑制励磁电源造成初级线圈发热,此类传感器多在 1~5V、20mA 以内的条件下使用。

### ● 光电式角度传感器

光电式角度传感器的工作原理如图 4.11 所示。它的转动盘上带有螺旋状的栅缝,当转盘转动时,发光元件发射的光能按转动盘的转动角度,照射到半导体位置检测元件的相应位置上,将轴的旋转角度变换成对应的电压信号,通过放大电路就可以检测出物体的旋转角度。

发光元件  
半导体位置  
检测元件

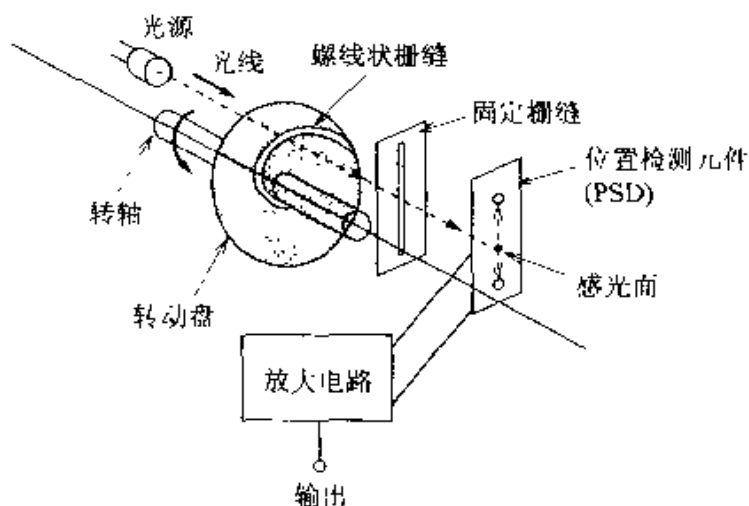


图 4.11 光电式角度传感器的结构

此类传感器的最大转动角有  $120^\circ$ 、 $340^\circ$ ，电源电压为  $100\text{V}$  或  $10\sim 12\text{V}$ ，输出电压为  $0.5\sim 4.5\text{V}$ ，分辨率较高。此外，其机械特性为扭矩小于  $0.245\text{mN}\cdot\text{m}$ ，最高转速可达  $200\text{r}/\text{min}$ 。应用领域与可变电位器相同，也是作为一种角度传感器用于检测各种机器轴的旋转角度。

### ● 半导体角度传感器

半导体磁阻  
磁性齿轮

以半导体材料制成的半导体磁阻为感应器件，当磁性齿轮转动时，由于外部磁场的强弱变化引起元件的阻抗发生改变，使其输出的正弦曲线发生变化。若将该输出电压中仅有的一小段直线部分取出，就可以准确地检测出轴的转动角度。此外，采用这种传感器时，通过对输出脉冲的计数，还可检测出轴的旋转角度及旋转的转数。这种传感器的结构如图 4.12 所示。

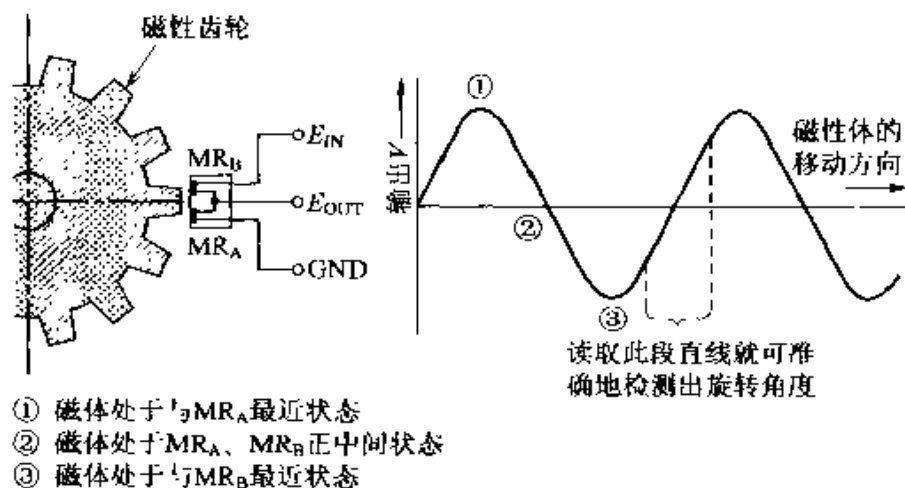


图 4.12 半导体角度传感器

在半导体角度传感器中，电源电压有  $5\text{V}$ 、 $6\text{V}$ 、 $8\text{V}$  多种规格，转动角度可以自由设定。此外，在机械特性上，它的扭矩比较小，一般小于  $0.1\text{mN}\cdot\text{m}$ ，使用温度范围为  $-10\sim +80^\circ\text{C}$ ，常作为角度及位置的检测传感器，用于加工机床 (FA、OA) 的测量仪器或建筑机械等设备中。

在此类传感器中，根据传感器中采用半导体磁阻数目的不同，输出电压可以分为 2 相、4 相等多种类型。这种传感器可以用来完成转向控制与高精度的位置控制。

转向控制  
位置控制

### 相关知识

#### ● 分辨率

分辨率是指传感器可以检测出的最小变化量。例如，有一块可以检测百分之一秒的秒表，则它的分辨率就为  $1/100$  秒。

## 3 位置传感器

**要 点** 将用于检测物体有无或对物体的位置以及形状进行识别、判断的传感器称为位置传感器(position sensor)。

在位置传感器中,有限位开关、接近开关、固体图像传感器等多种类型传感器

**解 释** ● 限位开关

执行机构

如图 4.13 所示,在限位开关(limit switch)的内部通常都具有可以检测是否有物体与其发生接触的机械式的执行机构(activator) 当移动的物体碰撞到执行机构时,凸轮发生转动将使凸轮槽内的弹子落下,从而触动微动开关实现电路的接通或断开,由此可以检测出机床或机器人等移动物体的位置。

限位开关的内部为小间隙的触点结构,由凸轮槽和弹子的相互关系保证了微动开关的位移量不会发生超程现象

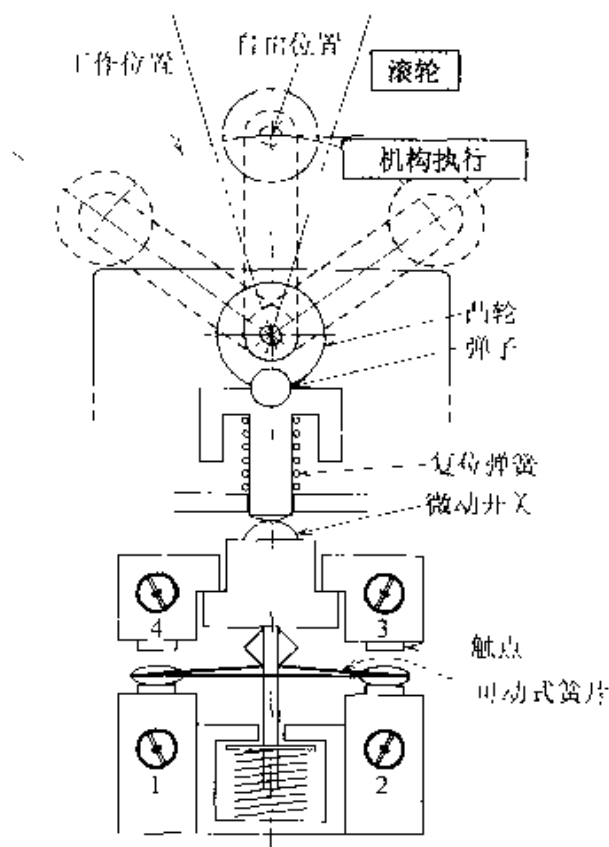


图 4.13 限位开关

撞针式  
摆杆式  
折页式

在执行机构中,有按直线上下运动的撞针式、作摆线运动的摆杆式以及带有滚轮的折页式等多种类型,可根据需要加以选择。执行机构的主要种类如图 4.14 所示。

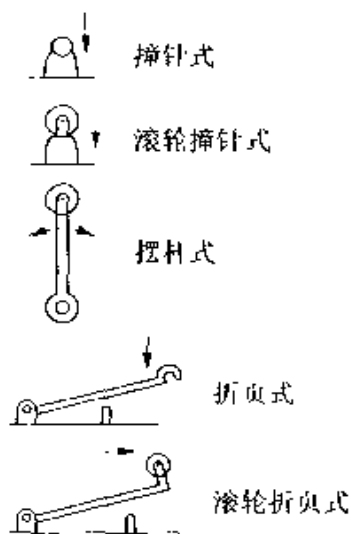


图 4.14 主要执行机构的类型

执行机构可在 4.5~7N 力的作用下产生动作,执行机构从自由位置至极限位置的动作范围称为限位开关的行程。撞针式限位开关的行程为 1~2mm,摆杆式限位开关的行程为 60°。

根据应用环境的需要,有些产品将限位开关密封于金属或树脂盒内制成防水、耐油或防尘结构。在限位开关中有 15A-AC125V、6A-AC250V、3A-AC500V、5A-DC24V、0.8A-1XC125V 等多种规格。

有的限位开关中还装有霍尔 IC 芯片,构成能防误碰、具有去抖功能的无触点型限位开关。

### ● 接近开关 (proximity switch)

在非接触式位置检测传感器中,有高频振荡式、磁感应式、电容感应式、超声波式、电波发射式、气动式、光电式、光纤式等多种接近开关。

电容感应式

电容感应式 (electrostatic capacity type) 接近开关对金属和非金属的被测物都能检测。它的工作原理是当有物体接近时,因静电感应使传感器中单极电容的电容值发生变化,从而使传感器内部的振荡电路起振或者停振,利用振荡信号的大小或可以判断是否有物体接近 (参见图 4.15)。

在此类传感器中,电容  $C[F]$  可由下式求出:

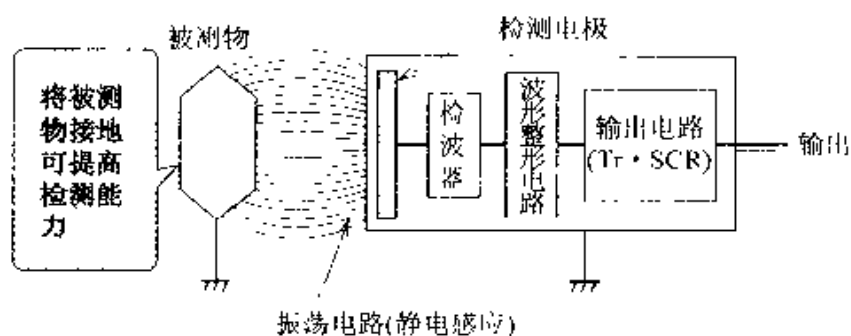


图 4.15 电容型接近开关的检测原理

$$C = 8.854 \times 10^{-12} \times \epsilon_r \cdot \frac{A}{l}$$

式中,  $8.854 \times 10^{-12}$  为真空的电导率 [F/m],  $\epsilon_r$  为导体的相对电导率,  $A$  为电极的面积 [ $\text{m}^2$ ],  $l$  为接近距离 [m]。

因此, 只要检测出与电容量成正比的电压值, 就可以求出被测物体的距离。

$$l = K \cdot \frac{8.854 \times 10^{-12} \times \epsilon_r \cdot A}{E}$$

式中,  $K$  为转换灵敏度,  $E$  为输出电压 [V]。

图 4.16 为用晶体管构成的电容感应式接近开关的电路原理图。

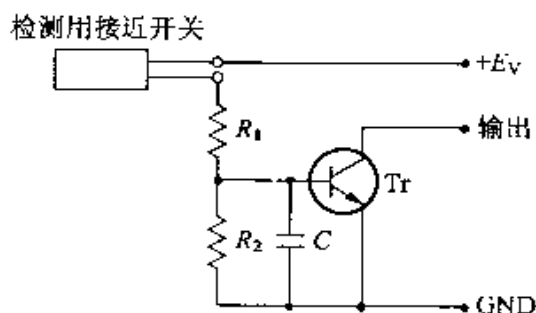


图 4.16 接近开关的应用电路

### 电容感应式 接近开关

在电容感应式接近开关中, 即有为了防止在发生电器故障时产生电火花引燃易燃性气体的低压 (8V) 小电流 (5~6.5mA) 的直流电流变化型接近开关, 也有 12V 直流电压输出型、24V 直流开关输出型以及 100~200V 交流开关输出型等多种类型。此类传感器的检测距离也有 6~10mm、3~25mm 等多种规格。在外形封装上, 此类传感器多采用圆柱形或棱柱形。

摄像管

固体传感器

### ● 固体图像传感器

在图像传感器(image sensor)中,有摄像管及固体传感器两种。

固体图像传感器是将几微米左右的光电转换器件排列成线状或面状结构,按时间顺序将各单元产生的光电荷作为图像信息取出的一种位置传感器。

CCD

CCD(charger cougled device)型固体图像传感器,是一种通过给传感器阵列施加移位脉冲,从而实现信号电荷传递的半导体器件。其基本结构如图 4.17 所示。

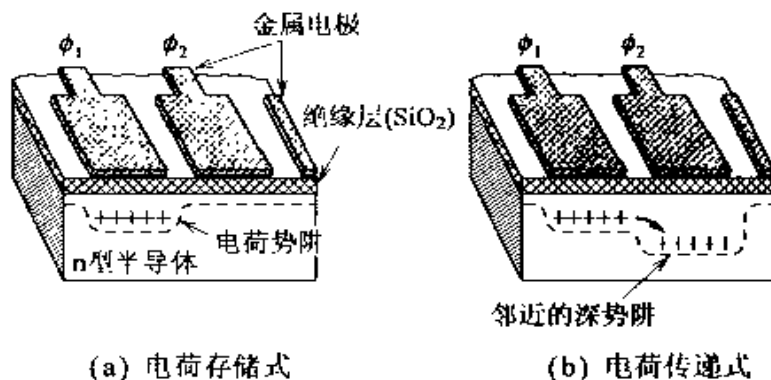


图 4.17 CCD 的工作原理

CCD 是在半导体表面敷设的薄绝缘层上排列多个 MOS 结构构成的一种传感器。其工作原理是:当给某一金属栅极加一电压时,则在该栅极下将形成电荷势阱,势阱中贮存的电荷量与外部光照有关,光照越强电荷越多。当给邻近的栅极施加一个更大的电压时,由于该栅极上的电位越高其下的势阱就越深,通过在各栅极上施加不同的栅极电压,就可以使贮存在势阱中的电荷向邻近的势阱中移动,由此完成信号电荷的顺序传递。

### □ 相关知识 ● 抖动

机械式开关在进行开、闭(ON、OFF)[图 4.18(a)]的极短时间( $10\mu\text{s}\sim 10\text{ms}$ )内,会产生不应有的触点振动现象[图 4.18(b)],这种现象称为触点的抖动(chattering)。它是引起计数式电路误动作的原因之一。图 4.18(c)所示为一种去抖电路。

去抖电路

### ■ 应用知识 ■ 视觉识别装置

它是一种接收由 CCD 摄像头拍摄下的物体形态的图像信号,根据设定的条件(位

置、大小、形状、个数、有无等坐标信号)对图像进行判定、识别等处理的一种设备。图 4.19 所示为一个应用示例,它是采用 CCD 摄像头构成一个检验系统,用该系统检查高速传送的 IC 芯片上是否存在型号字符的印刷错误(位置错误,字体清淡等)。

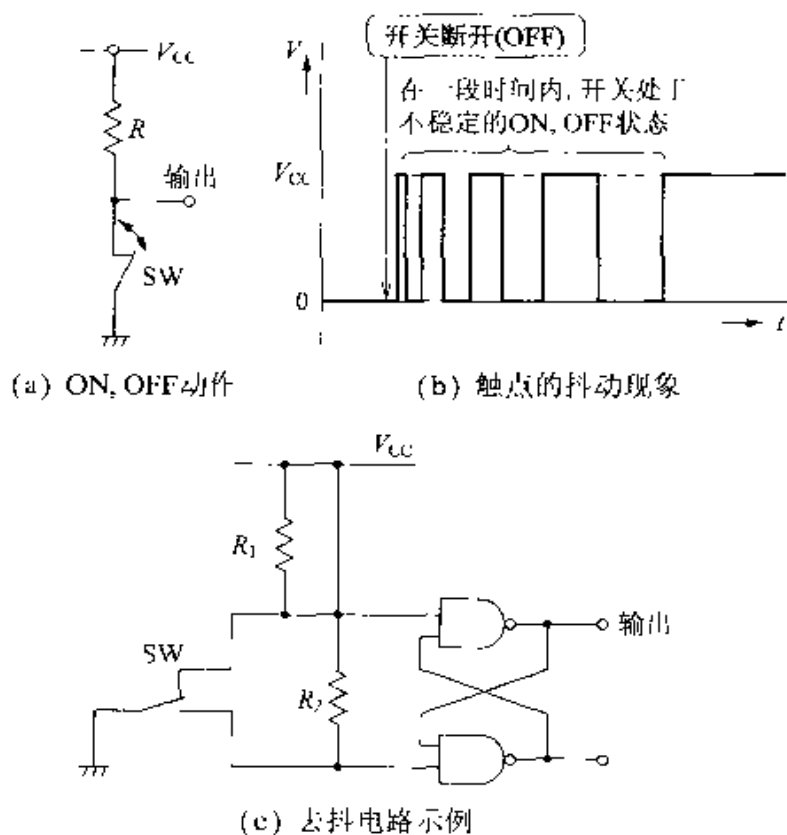


图 4.18 抖动现象及去抖电路

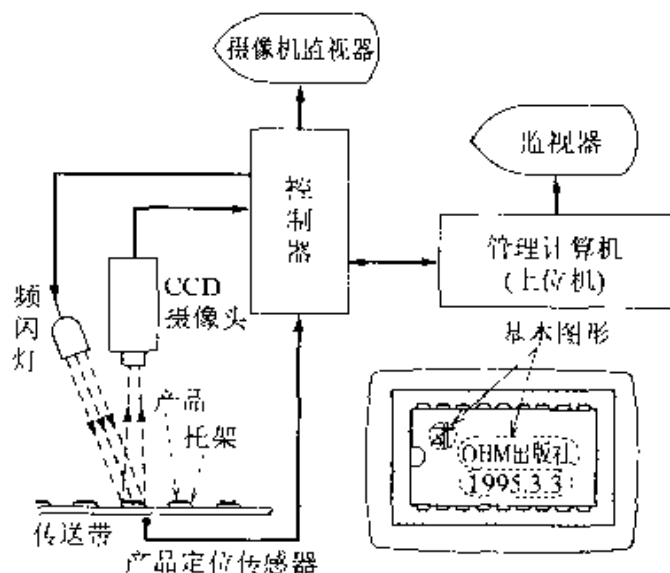


图 4.19 视觉识别装置

## 4 速度传感器

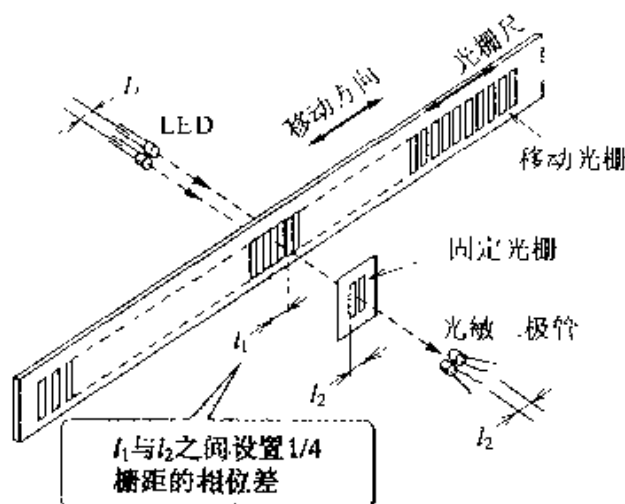
**要 点** 用于检测物体运动快慢或流体流动快慢等运动量的传感器称为速度传感器。在速度传感器中,有光栅尺、转动式编码器、压电振动式陀螺传感器、电磁式流速传感器等多种类型。

**解 释** ● 光栅尺

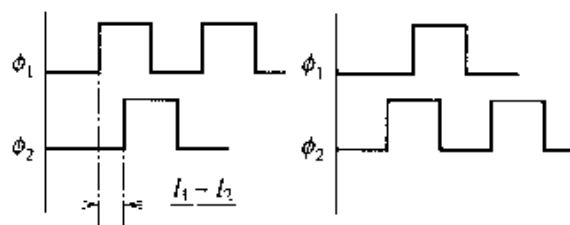
光栅尺(linear encoder)是一种用于检测沿光栅尺运动物体的速度或移动距离的传感器。它以发光二极管为光源,通过在光栅尺上按固定间隔排列的栅缝,断续地将光照射到对面的光敏二极管上,再通过对光敏二极管接收的脉冲信号进行计数,来检测物体的移动距离。

**增量方式**

用光栅尺检测物体的运动速度时,常常采用增量方式,通过在固定时间内对光敏二极管接收的脉冲进行计数来测量物体运动的速度。在图 4.20 所示的光栅尺中,通过在固定栅板上配置 2 个能



(a) 移动量的检测



(b) 移动方向的检测

图 4.20 光栅尺



产生四分之一间距相位差的栅缝,可以得到两相脉冲输出信号,通过对其相位差的检测,还能判断物体的移动方向。

### ● 旋转编码器 (latary encodor)

#### 光电旋转 编码器

在检测转数或转速的数字式传感器中,有光电旋转编码器

光电旋转编码器同光栅尺一样,都是通过检测脉冲信号来检测速度。旋转编码器通过转动圆形光栅盘来检测轴的转数或转速。

按结构的不同,可以将旋转式编码器分为增量型及绝对型两种。

**增量型 (incrmental type)** 编码器的结构如图 4.21 所示。当动光栅盘与固定接收光栅板之间有光透过时,两处栅缝可产生  $1/4$  间距的相位差,通过两相输出可以判定旋转的正反方向。此外,为了使动光栅盘在转动一周时能发出一个归零信号,动光栅盘上还刻有零点栅缝,通过它可以检测机器的原点,并对检测电路的计数累计误差进行修正。

由于增量式旋转编码器是通过脉冲计数来检测轴的旋转角度,因此能对旋转量作无限制地计数,这是此类传感器的一大特点。

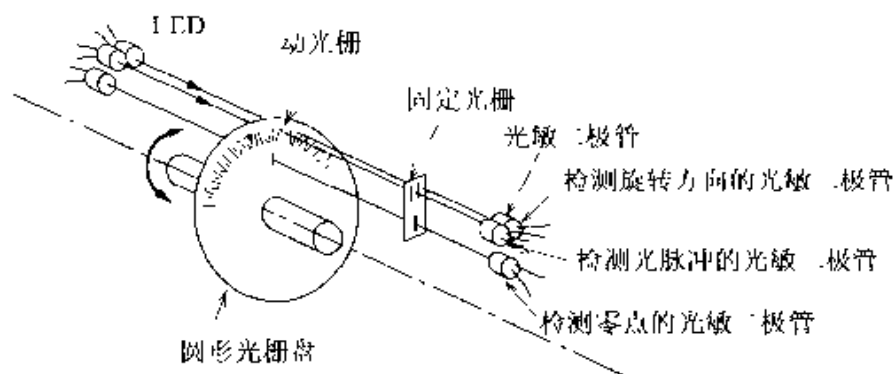


图 4.21 增量型编码器

#### 绝对型

**绝对型 (absolute type)** 并如图 4.22 所示,编码器是将光栅盘按分辨率的位数划分成一系列同心圆,并将各同心圆的圆周按 2、4、8、16 的方式进行等分(构成编码盘),此类传感器中都会配有与同心圆数相等的发光二极管及光敏二极管,其输出为脉冲式编码信号。无论编码盘是否转动,它都会并行输出动光栅盘当前角度所对应的绝对位置的编码信号。

这类编码器都具有与分辨率位数相等的数字输出信号线。

在增量型编码器中,电源电压为 DC5~30V、分辨率最高可达 10~5000 脉冲/圈;在绝对型编码器中,电源电压 DC10~26V、分辨率最高可达 1024 个脉冲/圈(10 位编码)。

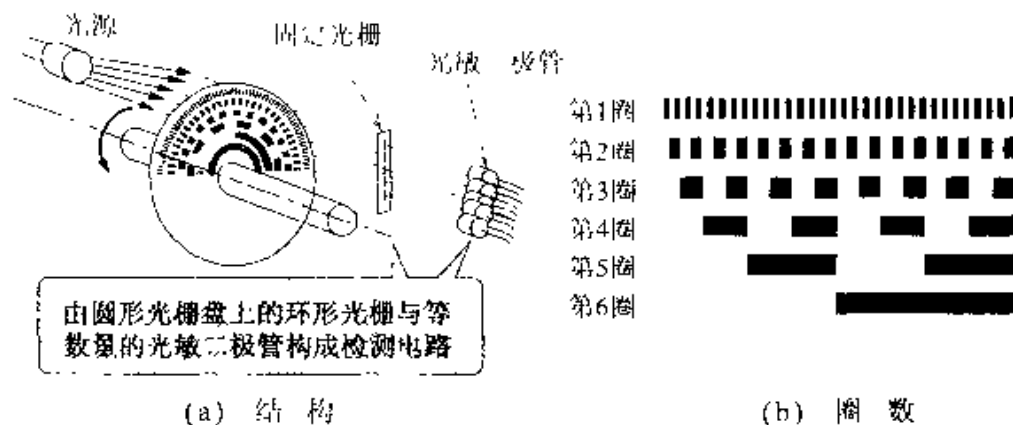


图 4.22 绝对型旋转编码器

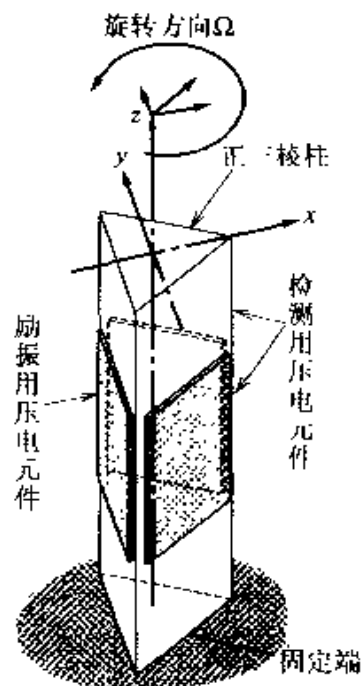
### ● 压电振动式陀螺传感器

振动式  
恒弹性金属  
镍铬合金  
压电陶瓷片

陀螺传感器(gyroscope sensor)可以分为振动式和气动式两种。

图 4.23 所示为压电振动式陀螺传感器的结构图。它是在恒弹性金属镍铬合金(elinvar)制成的正三角形柱体表面黏贴有压电陶瓷片,通过检测转动物体的向心力(哥里奥利力)来检测物体的转动,它将正三角形柱体产生的振动变换成与音叉振动频率相等的振动弯矩,由此将转动的角速度变换成电压的变化量输出。

当它不转动时,由发振侧压电元件产生的振动,与其它两面压电元件产生的振动振幅相等;当它转动时,正三角形柱体由于受到应变,压电元件输出的振幅会产生差值。将此差值进行放大检波,就可以得到图 4.24 所示的输出电压。



这种传感器的最高检测能力能达  $\pm 90\text{DEG/SEC}$ 、电源电压为  $8\sim 13.5\text{V}$ ,输出电压为  $20\text{mV/DEG/SEC}$ 。

压电振动式陀螺传感器常用于控制移动物体的姿态、方位及转动速度,在汽车、船舶、飞机、机器人的定位及姿态控制等方面会

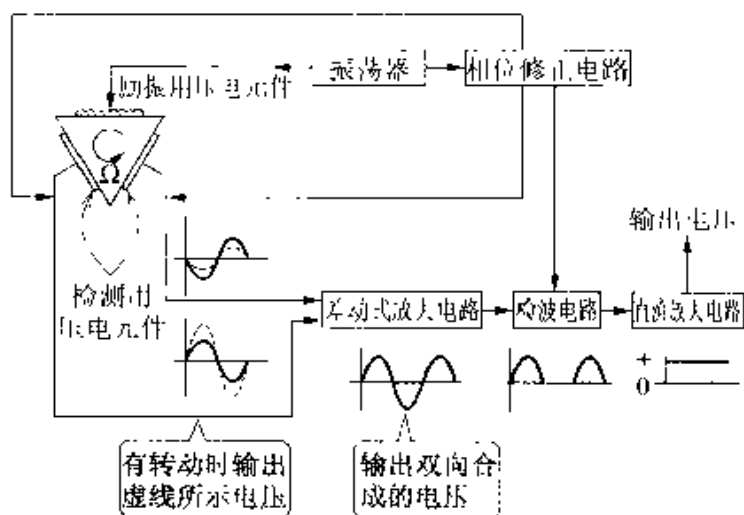


图 4.24 转速的检测原理

经常采用它。

### ● 电磁式流速传感器

#### 电磁感应

导体在磁场中与磁力线成直角运动时,该导体上将产生一个感应电动势并有电流流过。若利用这种电磁感应效应,在流过导电性流体管道的垂直方向上加一个外部磁场,则通过检测安装在管道上两个电极的电位差,就可以测量出该导电性流体的流速。采用这一原理制成为测量流体流速的传感器称为电磁式流速传感器(electromagnetic induction type sensor) 其工作原理如图 4.25 所示。

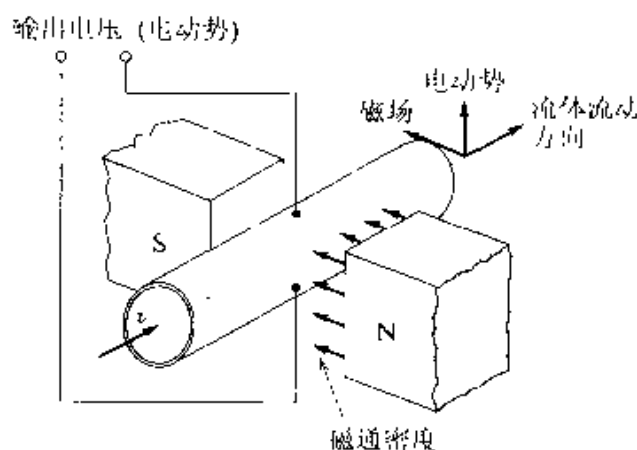


图 4.25 电磁式流速传感器的工作原理

这种传感器的特点是不会妨碍流体的流动、不会造成流体的能量损耗。

## 1.1 相关知识 ● 皮托管

很早以前,人们就开始使用皮托管(pitot tube)作为一种检测流体流速的传感器。如图 4.26 所示,根据管端部压力  $P$  与管侧壁孔压  $P_0$ ,由下式求出流体的流速:

$$v = \frac{2(P - P_0)}{\rho}$$

式中,  $v$  为流体的流速,  $P$  为动压+静压(总压),  $P_0$  为静压,  $\rho$  为流体密度。

流速传感器

皮托管是一种高可靠性的流速传感器,现在的飞机上还在使用。

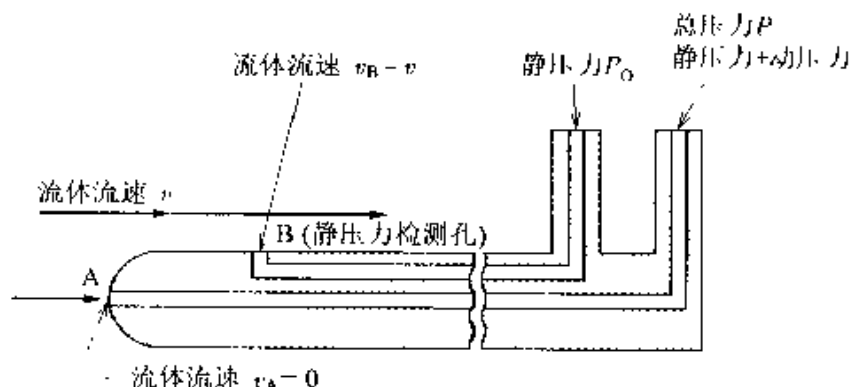


图 4.26 皮托管

## 应用知识 采用旋转式编码器进行转速控制

在用机床进行金属材料加工时,需要根据加工要求确定机床的转数及进刀速度。在这种转速控制中,通过连结在伺服电机转子轴上的旋转式编码器,取出表示转速的输出脉冲,将该脉冲的频率信号转换成直流电压后,在比较器中与设定值进行比较,再输出其差值信号。采用这种方法对电机进行控制,就可以使其转速一直保持稳定。其工作原理如图 4.27 所示。

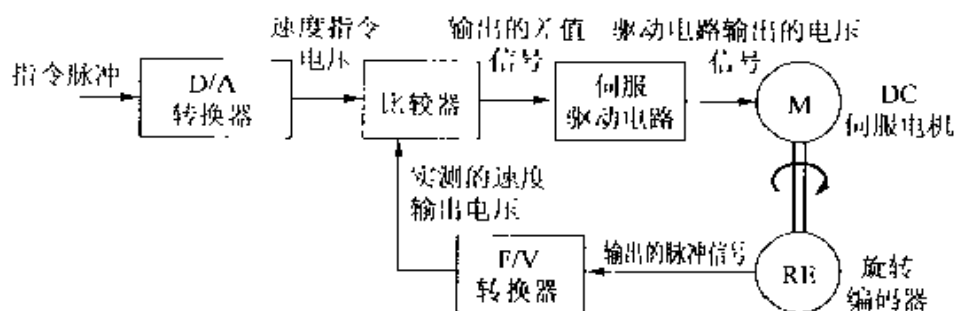


图 4.27 采用旋转编码器进行电机转速控制的系统框图

## 5 加速度传感器

### 要点

加速度传感器是一种将其与被测对象接触或者将传感器安装在被测对象上以测量物体加速度的传感器。它广泛应用于振动或动态力的测量及控制等领域。

在使用时,应根据被测对象加速度的大小、频率范围等多种条件选择合适的传感器。

### 解释 ● 基础理论

加速度传感器是由弹簧系统支撑惯性质量构成所谓的“地震仪”的结构。其基本结构如图 4.28 所示,运动方程式如下:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x = \frac{d^2y}{dt^2}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = (2\pi f_n)^2$$

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

式中,  $\omega_n$  为共振频率,  $\xi$  为阻尼系数。

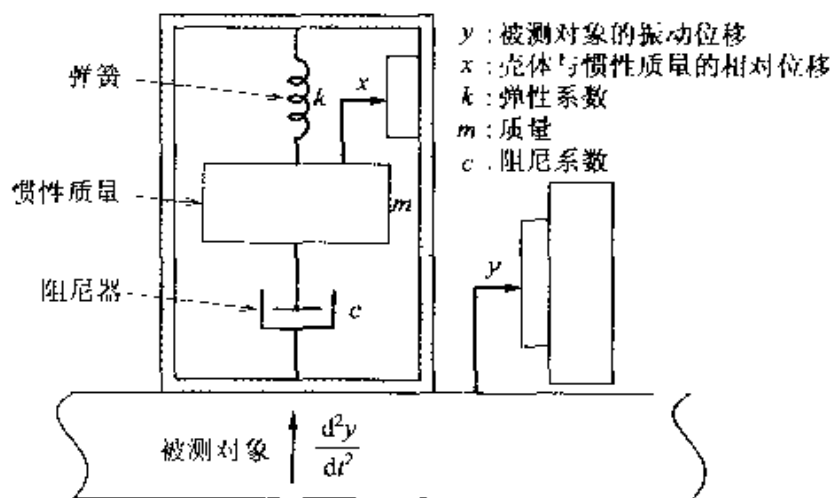


图 4.28 地震仪结构

当被测对象的频率比检测仪的共振频率  $\omega_n$  小很多时,壳体与惯性质量的相对位移  $x$  与被测对象的加速度成正比;当被测对象的频率比检测仪的共振频率  $\omega_n$  大很多时,壳体与惯性质量的相对位移  $x$  与被测对象的位移成正比。振动传感器就是根据这种原理

制成的一种传感器。

### ● 电容式加速度传感器

振子 电容

它是一种利用振子作为电容的一个电极制成的传感器,其基本结构如图 4.29 所示。

静态加速度  
动态加速度

因电容的极板间距是随惯性质量的相对运动而变化,因此传感器中的电容也将随之变化。这种传感器具有体积小、重量轻的特点,可以测量从静态加速度至几百赫兹的动态加速度。

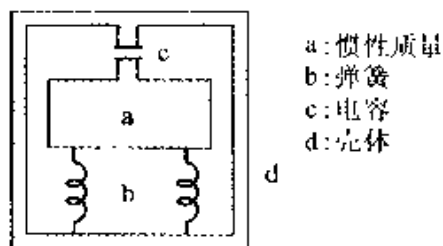


图 4.29 电容式加速度传感器的结构

### ● 金属应变片式加速度传感器

振子  
金属应变片

它是一种在振子上安装了金属应变片构成惠斯登电桥制成的传感器,其基本结构如图 4.30 所示。

金属应变片能够将振子弯曲产生的应变变量,以阻抗变化的形式输出。这种传感器具有体积小、重量轻、可测量静态加速度等特点,但因灵敏度较低,近来已很少使用。

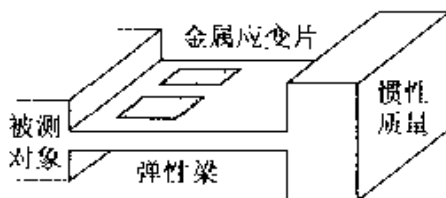


图 4.30 金属应变片式加速度传感器的结构

### ● 半导体应变片式加速度传感器

压阻效应

其基本原理与金属应变片式基本相同,它是利用半导体材料的压阻效应,采用半导体应变片替代金属应变片制成的一种传感器。半导体应变片式加速度传感器的灵敏度比较高,正在取代金属应变片式传感器,广泛普及应用于各个领域。由于其灵敏度随绝对温度的升高几乎成正比地减小,因此在使用此类传感器时需要采取温度补偿措施。

## ● 压电式加速度传感器

### 压电材料

压电材料受压产生应变时,会在该材料上产生与应变量成正比的电荷,这种现象称为压电效应。根据压电效应原理制成的加速度传感器称为压电式加速度传感器。这是一种应用领域最为广泛的加速度传感器,它的测量范围及频率响应范围都很宽,并且具有体积小、重量轻的特点,但由于这种传感器是以高阻电荷方式输出,因此在使用时需按图 4.31 所示,在输出端接入电荷放大器。

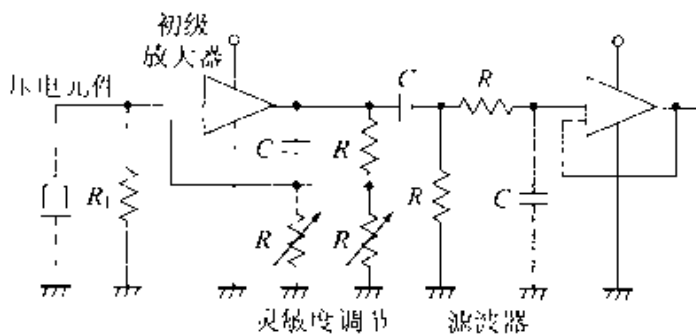


图 4.31 电荷放大器

## □ 相关知识 ● 加速度传感器的使用注意事项

**质量附加效应** 在使用加速度传感器时,由于被测对象上附加了传感器(质量附加),因此实际的共振频率将会减小,而且还会出现衰减增加现象;当被测物体的质量较轻、振动频率较高时,上述问题将会成为影响测量精度的主要问题。

**接触共振问题** 由于被测对象与传感器间处于接触状态,因此传感器的频率响应特性将会受到影响,特别是在高频情况下影响显著。若安装方法不当,就不能很好发挥传感器的特点。

由此可知,在实际应用时,采用的加速度传感器质量应远远小于被测对象。

## ■ 应用知识

**地震传感器** 液化气公司从防灾的角度采用 SI (spectral intensity) 值来把握地震的大小。SI 值是将“地震对一般建筑物造成多大的摇摆”进行数字量化,通过对地动加速度的实时检测,计算得出的一种数据。以往使用的机械式、电气式传感器存在体积大、价格昂贵等缺点。现在使用的压电式二维加速度传感器,体积只有以往地震传感器的 1/300 左右,价格也在其 1/4 以下。压电式三维加速度传感器的断面结构如图 4.32 所示。在这种传感器中采用一个元件几乎可以独立测量三维加速度,这是因为它采用了特殊的电极结构以及获取各电极间电位差的方法非常巧妙。

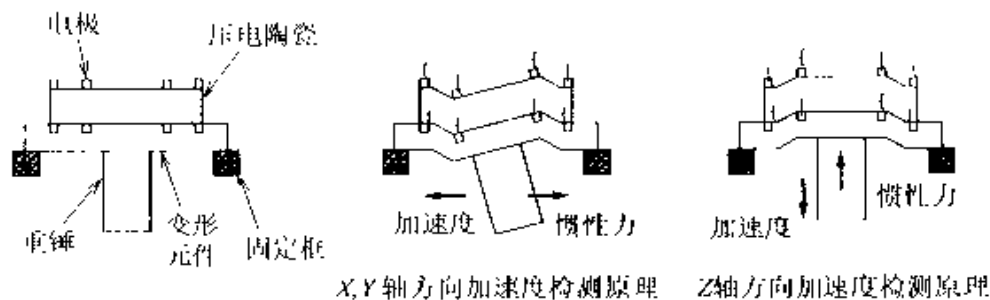


图 4.32 压电式三维加速度传感器的断面结构图

**安全气囊** 作为汽车的一种安全装置,现在的汽车上都安装了安全气囊。当遇到前后方向碰撞时,它能起到保护驾驶员的作用。如图 4.33 所示,它在汽车前副梁左右两边,各安装一个能够检测前方碰撞的加速度传感器,在液压支架底座连结桥洞的前空内,也安装有两个同样的传感器。前副梁上的传感器一般设置成当受到 12.3G 以上的碰撞时能自动打开气囊开关。12.3G 以上的碰撞,相当于汽车以 16km/h 的速度,与前面障碍物相撞时产生的冲击。此外,室内传感器被设置成当从正面受到 2.3G 以上的冲击时,能自动打开气囊开关。

汽车中使用的加速度传感器,因厂家、车型的不同,分为机械式与电子式两种。

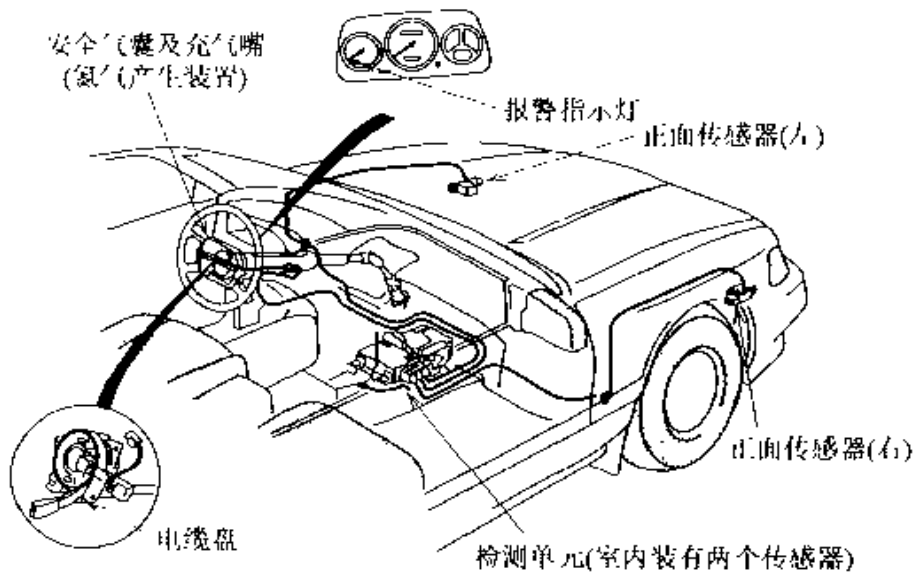


图 4.33 安全气囊的结构

**选修知识** 加速度的单位

- ① 国际单位(SI):  $m/s^2$
- ② SI 以外的单位:用于地球物理学中表示重力加速度的单位为伽(Gal)  $10^{-1} [m/s^2]$ ;通常表示重力加速度的  $g = 9.8065 [m/s^2]$



## 6 距离传感器

**要点** 在 FA (Factory Automation) 等领域,常采用距离传感器进行控制与检查。此外,在照相机等光学仪器中,也会利用距离传感器作自动对焦 (AF (Auto Focus)) 的位置检测传感器。

**解释** ● 超声波距离传感器

压电效应

超声波距离传感器由发射器和接收器构成。几乎所有超声波式距离传感器的发射器和接收器都是利用压电效应制成的。

压电逆效应

其中,发射器是利用给压电晶体加一个外加电场时晶片将产生应变(压电逆效应)这一原理制成的。接收器的原理是:当给晶片加一个外力使其变形时,在晶体的两面会产生与应变量相当的电荷(压电正效应),若应变方向相反则产生电荷的极性反向。图 4.34 为一个共振频率在 40kHz 附近的发射接收器结构图。

压电正效应

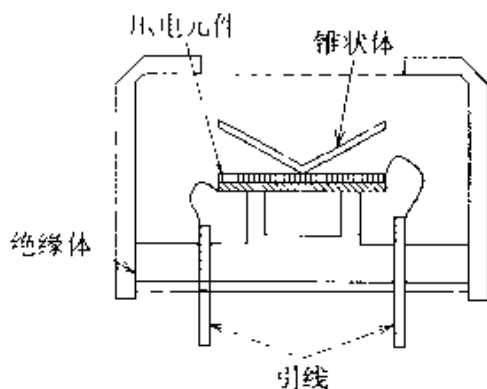


图 4.34 超声波发射、接收器

脉冲回波式  
FM-CW 式

超声波距离传感器的检测方式有脉冲回波式(图 4.35)以及 FM-CW(频率调制、连续波)式(图 4.36)两种。

在脉冲回波式中,先将超声波用脉冲调制后发射,根据经被测物体反射回来的回波延迟时间  $\Delta t$ ,计算出被测物体的距离  $R$ 。假设空气中的声速为  $V$ ,由下式可求出被测物体与传感器间的距离  $R$ :

$$R = V \times \Delta t / 2 \quad [\text{m}] \quad (4.1)$$

如果空气温度为  $T$  (°C),则声速可由下式求出,即

$$V = 331.5 + 0.607T \quad [\text{m/s}] \quad (4.2)$$

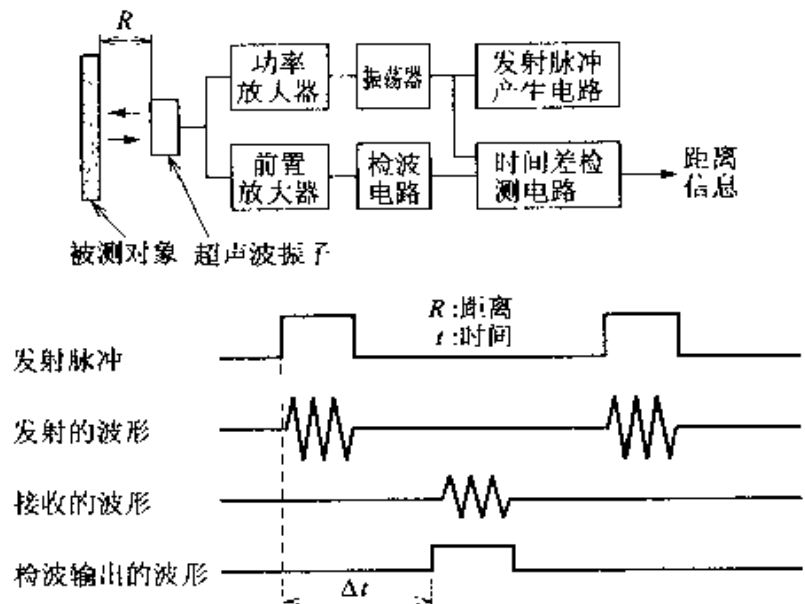


图 4.35 脉冲回波式的检测原理

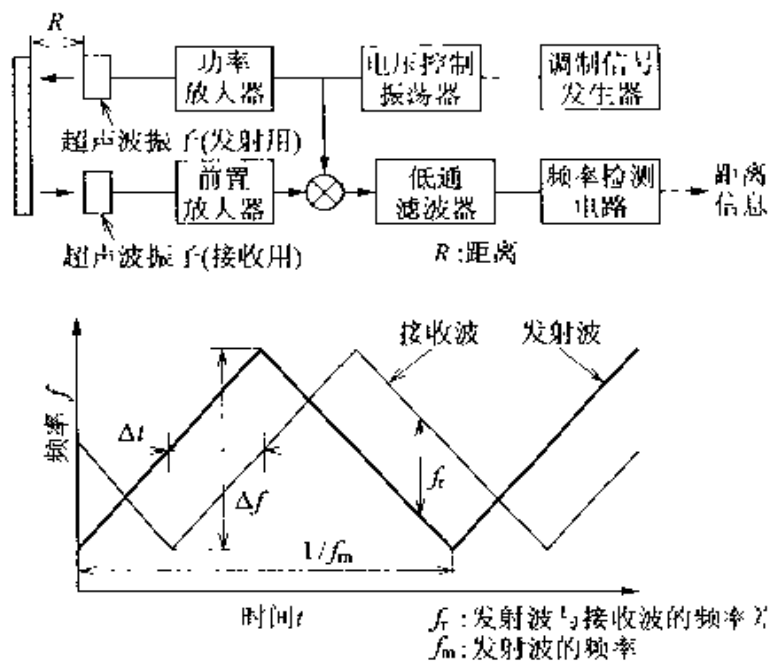


图 4.36 FM-CW 式的测距原理

FM CW 方式是采用连续波对超声波信号进行调制。将由被测物体反射延迟  $\Delta t$  时间后得到的接收波信号与发射波信号相乘，仅取出其中的低频信号，就可以得到与距离  $R$  成正比的差频  $f$  信号。假设调制信号的频率为  $f_m$ ，调制频率的带宽为  $\Delta f$ ，由(4.3)

式可以求出被测物体的距离  $R$ , 即

$$R = f_c V \cdot 1/f_m \Delta f \quad [\text{m}] \quad (4.3)$$

### ● 光学距离传感器

泛光元件

光学距离传感器的工作原理如图 4.37 所示。由泛光元件(半导体激光或 LED)发射的光,经透镜聚焦后照射到被测物体的表面上。由被测物体表面反射的光,由采光镜接收并在 PSD(位置检测器件)上成像,成像的位置因被测物体的位置不同而异。PSD 上的成像位置不同,会导致其两个输出端的输出电流比发生变化。这种传感器的结构如图 4.38 所示。

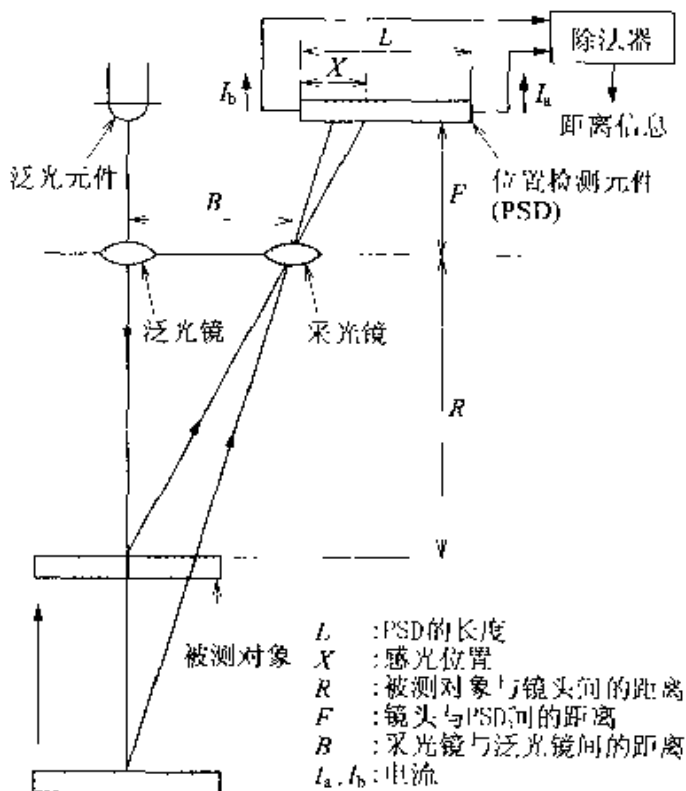


图 4.37 光学距离传感器的工作原理

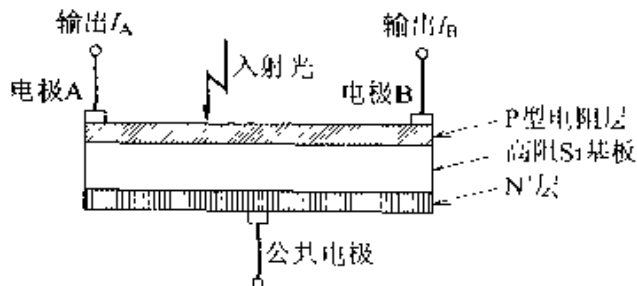


图 4.38 PSD(位置检测元件)的结构

假设 PSD 的长度为  $L$ , 成像位置与  $I_b$  输出端的距离为  $X$ , 则  $I_a$  与  $I_b$  比值可由下式求出:

$$I_a : I_b = X : (L - X) \quad (4.4)$$

若发光镜与接收镜的间距为  $B$ , 接收镜与 PSD 的间距为  $F$ , 则被测物体的距离  $R$  可由 (4.5) 式求出, 通过除法器求出电流比  $I_a / I_b$ , 即可得出被测物体的距离  $R$ , 即

$$R = \left( 1 + \frac{I_a}{I_b} \right) \frac{BF}{L} \text{ [m]} \quad (4.5)$$

### ● 涡流式距离传感器

涡流式距离传感器是利用线圈和电容构成的检测头产生高频磁场, 当被测物体接近检测头时, 就会在被测物体上产生涡流, 由于这个涡流的磁场效应, 检测头的线圈阻抗将发生变化, 由此可以测量被测物体的距离。

## □ 相关知识 ● 距离传感器的选择标准

超声波距离传感器、光学距离传感器和涡流式距离传感器各有优缺点。在使用时, 必须根据被测物体、所需精度以及使用环境等条件, 选择适当的传感器。

**超声波传感器与光学传感器的比较** 比较超声波式传感器与光学式传感器时, 要了解超声波式的测量范围宽但分辨率低, 而光学式的测量范围窄但分辨率高。两者的响应速度都在毫秒级同属高速型传感器。

在使用时需要注意: 超声波式传感器不受被测物体的透明度、颜色以及电导率的影响, 但它不适用于测量海绵或棉织物等吸音材料; 而光学传感器会因被测物体的颜色不同而产生测量误差, 若以白色为基准, 对黑色表面的测量误差将达到最大。

**涡流式传感器的特点** 涡流式传感器的环境适应性好、响应特性及精度都很出色, 但只能检测金属物体。相对于其它距离传感器能检测几十至几百毫米的检测范围, 涡流式传感器的检测范围比较窄, 检测范围只能在 10mm 以内。此外, 它对微小物体的检测也比较困难。

## 7 光敏传感器

### 要点

光敏传感器是一种能将光信号转换成电信号的传感器。光敏传感器的应用范围很广,像照相机的曝光器、遥控器的接收器、CD唱机的拾音器、光通信等等各领域都采用了光敏传感器。可以预计,今后它的应用范围还会进一步拓宽。

### 解释

#### ● 光敏传感器的种类

光敏传感器可以分成两大类:一类是将光直接转换成电信号的光电效应型光敏传感器;另一类是先将光转换成热量,然后再由热量转换成电信号的热转换型光敏传感器。通常,光电效应型的光敏传感器使用较多。

#### 热转换型

在光电效应型的光敏传感器中,根据工作原理的不同还可以再进一步分为光电子释放型、光电导型以及光生伏特型三种。

#### ● 光电子释放型传感器

#### 光电子

光照射到此类传感器时,传感器上产生的光电子会释放到真空或空气中。某些材料对可见光的释放率很大,利用这种材料制成的感光面称为光电面。在利用上述现象制成的光检测或光计量器件中,最典型的有光电管及光电倍增管。光电倍增管是通过在光电面上释放出的光电子进行二次放大制成的一种光敏传感器,它能测量光电管检测不出的微弱光信号,其放大率一般在  $10^3 \sim 10^7$  左右。

#### 光电面

#### 光电管

#### 光电倍增管

#### ● 光电导型传感器

#### 光电导效应

#### 光电导型传感器

光电导效应,是指因光的照射会使固体内产生自由电子与空穴对,从而使其电导率发生变化的一种现象。通过求出光电导效应引起元件电极间的阻抗变化来检测光强的器件称为光电导型传感器。在这种传感器中,最常使用的、对可见光比较敏感的材料有硫化镉 CdS 及砷化镉 CdSe。无论采用哪一种材料,这种传感器都是在陶瓷等基片上采用粉末烧结工艺制成的,因具有体积小、重量轻、价格低廉等特点,因此广泛用于曝光器、路灯的自动开关控制器、光控继电器等方面。由于光电导型传感器的响应速度比较慢,因此这类传感器不适于检测快速变化的光信号。其结构如图 1.39 所示。

#### 自动开关控制器

#### 光控继电器

有些物质对于红外线的电导率很大,典型的有水银、镉、碲镉化汞 HgCdTe 等。其中, HgCdTe 器件对波长为  $10\mu\text{m}$  附近的红

红外分光计  
热成像

外线具有很高的灵敏度,因此常作为红外分光计或热成像(红外线分布图像)的感光器使用。

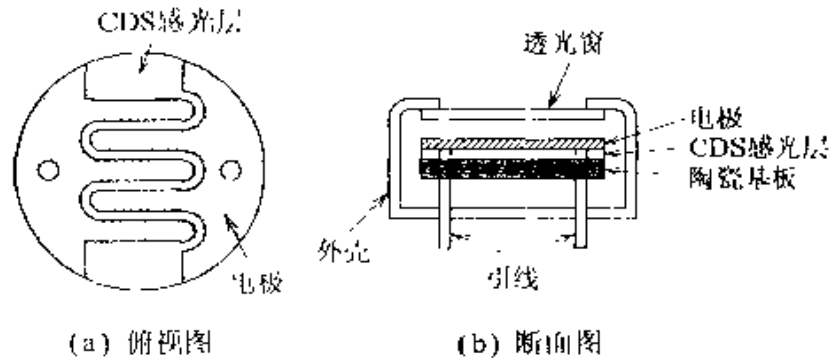


图 4.39 CDS 的结构

### ◎ 光生伏特型传感器

采用半导体晶体制成的 pn 结受到光照时,会在 pn 结上产生一个电动势,这种现象称为光生伏特效应。

光电池

光生伏特型传感器,按给 pn 结施加的反向偏压不同,可以分为三种类型,即不加反向偏压的光电池、施加的反向偏压低于 pn 结击穿电压的光敏二极管以及施加的反向偏压几乎与 pn 结击穿电压相等的雪崩式光敏二极管。

雪崩式光敏  
二极管

**光敏二极管** 图 4.40(b)所示为 pn 结的电压-电流特性。当外部电压  $V_0 = 0$  时,若有光照射到 pn 结上,就会在 pn 结上产生与入射光强成正比的反向光电流  $I_{ph}$ 。如果这个光电流流过外部电路,就会在负载  $R_L$  的两端产生电压  $V$ ,而这个电压又将使光敏二极管正偏,从而使光敏二极管中流过一个正向电流  $I_F$ ,因此流过外部电路的电流  $I_L$  为这两个电流之差,即  $I_L = I_{ph} - I_F$  (式中的电流方向不同)。当负载电阻  $R$  极小、器件的两个输出端之间近乎短路时,由于电压  $V$  极小,因此  $I_L \approx I_{ph}$ ,即当入射光量很少、负载电阻也很小时,光电流及光生电动势都与入射光强成正比。图 4.40(a)所示为光敏二极管的结构。

由于光敏二极管能在无外电源的条件下工作,因此作为一种简易设备的光敏传感器,广泛用于各种领域。

雪崩效应

**雪崩式光敏二极管** 给 pn 结加一个几十伏至 200V 左右的反相偏压时,该 pn 结就会产生光电流的放大作用。这种现象称为雪崩效应,利用雪崩效应制成的光敏器件,能得到远远大于光敏二极管的光电流。因雪崩式光敏二极管的响应速度快、S/N 高,因此在大容量光通信系统中常常采用它作为感光元件。

光通信系统

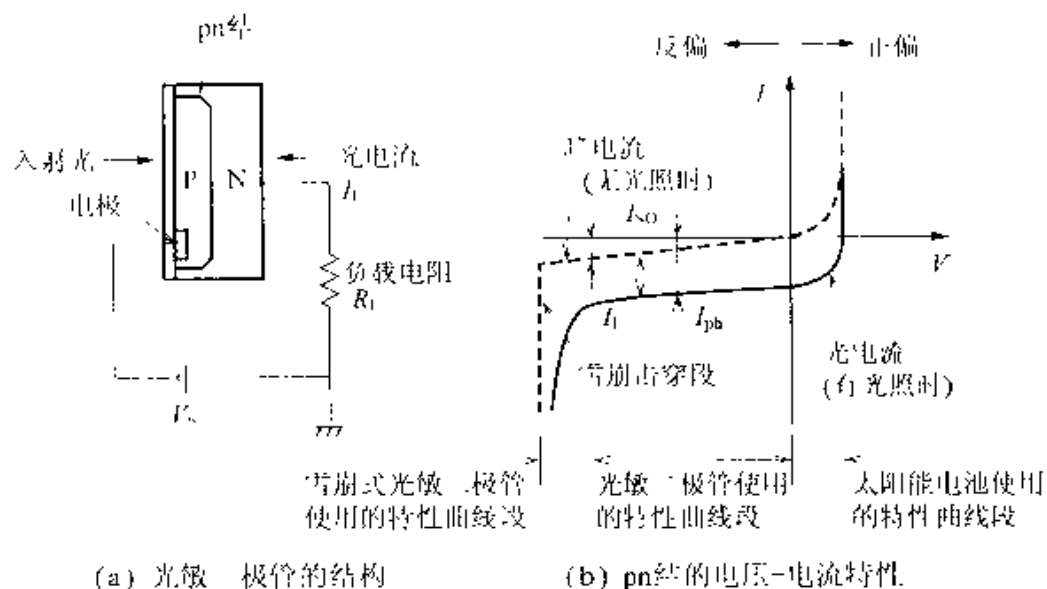


图 4.40 光敏二极管的结构与电压-电流特性曲线

**光敏三极管** 在制造 npn 型或 pnp 型半导体晶体管的过程中, 若将基极开放作为感光面制成同光敏二极管一样的两端器件, 这种器件就称为光敏三极管。

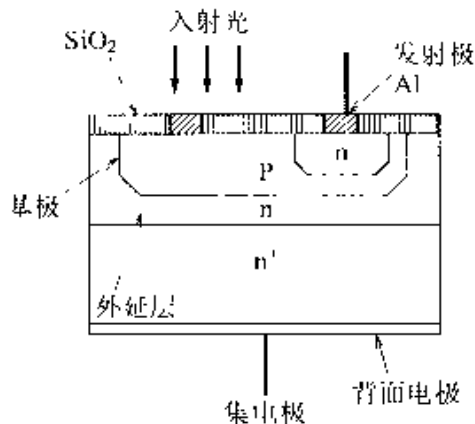


图 4.41 光敏三极管的结构

由于光敏三极管内部具有电流放大作用, 因此它的灵敏度也为普通光敏二极管的数倍以上。虽然它的响应速度比雪崩式光敏二极管要慢, 但因不需要很高的驱动电压, 因此更适于一般性的应用。其基本结构如图 4.41 所示。

## □ 相关知识 ● 光波波长及光敏传感器的应用范围

图 4.42 所示为光波波长及相应光敏传感器的应用范围。

## ■ 应用知识 ● 红外线传感器

图 1.13 是一种将红外发光二极管与光敏三极管封装在一起构成的红外线传感器示意图。通过调整发光强度、传感器与被测对象间的距离以及感光起始电平等, 就可以用它进行各种非接触式的测量与控制。在这类传感器中, 有些传感器为了防止自然光及噪声等因素造成的误动作, 在发光侧还配备了光信号调制电路。其基本电路结构如

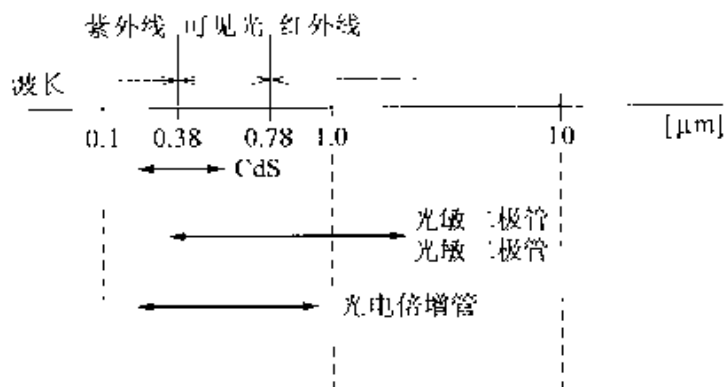


图 4.42 光波波长及相应光敏传感器的应用范围

图 4.11 所示。

**红外线遥控器** 在电视等家用电器中,广泛采用红外线遥控器,其基本原理与红外线光敏传感器相同。为了能用同样波长的红外线实现对同类型多种装置的控制,在它的发射器与接收器中,分别采用了配套的专用编码器及解码器,以防止因其它同类设备造成的信号混淆或因噪声干扰等引起的误动作。

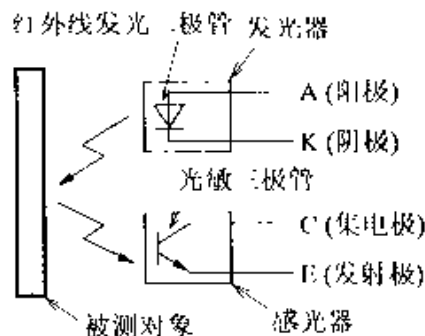


图 4.43 红外线光敏传感器的结构(反射式)

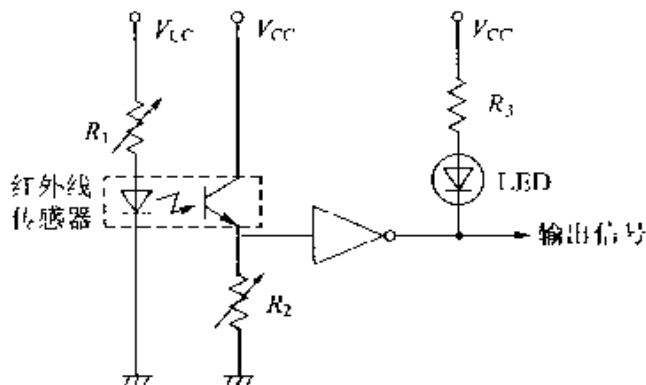


图 4.44 红外线传感器的应用电路图



## 8 磁敏传感器

### □ 要 点

磁敏传感器原本是用来测量磁场的,但现在更多的是用于检测物体的位置及转动,它常用于检测电流或对开关类等其它物理量的测量及控制。

在磁敏传感器中,主要有半导体霍尔元件、半导体磁敏电阻、磁性体磁敏电阻、电磁感应式磁敏传感器等4种器件。对于特殊用途,可以采用光纤磁敏传感器。

### □ 解 释

#### ● 半导体霍尔元件

半导体磁敏传感器的基本工作原理是霍尔效应。当半导体中流过一个电流时,若在与该电流垂直的方向上外加一个磁场,则在与电流及磁场分别成直角的方向上会产生一个电压。这种现象称为霍尔效应。

霍尔效应产生的电压与磁场强度成正比。为减小元件的输出阻抗,使其易于与外电路实现阻抗匹配,半导体霍尔元件多数都采用十字型结构,如图4.45所示。霍尔元件多采用碲化铟(InSb)以及硅(Si)等半导体材料制成。由于材料本身对弱磁场的灵敏度较低,因此,在使用时要加入数特[斯拉]的偏置磁场使器件处于强磁场的范围内工作,从而可以检测微弱的磁场变化。

半导体磁敏  
传感器

霍尔效应

碲化铟  
硅

半导体材料

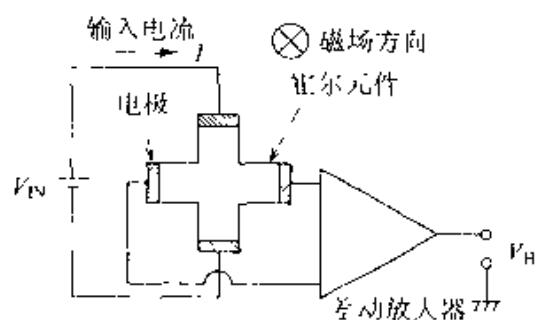


图 4.45 半导体霍尔元件的结构

#### ● 半导体磁敏电阻

半导体磁敏电阻是一种利用磁场造成的电流偏转使元件阻抗增加这种特点制成的双端磁敏传感器。同霍尔器件不同,这种器件采用缩短电流电极间距离的结构来提高其磁灵敏度。

如图4.46所示,半导体磁敏电阻采用在半导体中埋入多根个

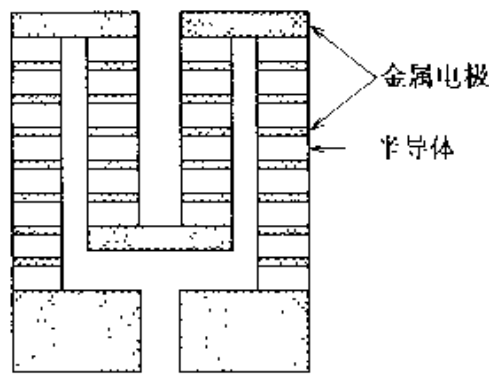


图 4.46 半导体磁敏电阻的结构(蛇形元件)

属电极的方法,将多个磁敏电阻串联起来以提高其阻值。

### ● 磁性体磁敏电阻

磁敏元件

磁性体磁敏电阻是一种利用强磁性材料的磁场异向性制成的磁敏元件。如图 4.47 所示,若在强磁体薄膜易磁化轴的垂直方向上加一个外部磁场,则由于材料内部的磁偏转会使元件内部电阻发生变化。为了提高元件的输出幅值,磁性体磁敏电阻在结构上采用坡莫合金等强磁材料薄膜以增大阻抗。与半导体磁敏电阻相比,这种传感器对弱磁场灵敏度相对较高,但它的线形范围比较小。

坡莫合金

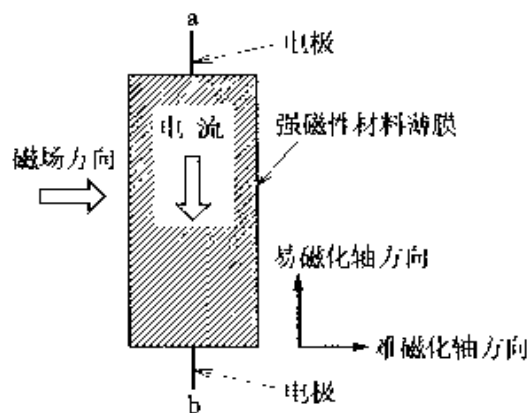


图 4.47 磁性体磁敏电阻的结构

### ● 电磁感应型磁敏传感器

线圈型磁头

拾音线圈

法拉第电磁

感应定律

在典型的电磁感应型磁敏传感器中,有线圈型磁头及拾音线圈等。这种传感器的灵敏度很高、机械性能好,属通用型磁敏传感器。若线圈内的磁通量发生变化,在线圈的两端就会产生感应电动势。这是一种利用法拉第电磁感应定律制成的传感器。图 4.48

## 高磁导率轭铁

所示为线圈型磁头。由于这种传感器采用高磁导率轭铁聚集磁力线,因此它只能检测交流磁场,不能检测直流磁场。

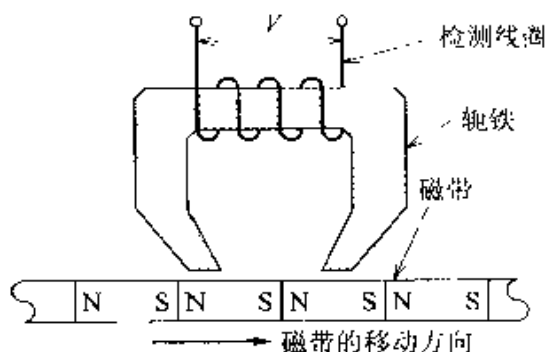


图 4.48 电磁感应型磁敏传感器

### ● 光纤型磁敏传感器

亚砷化锌  
光学材料  
法拉第磁光  
效应

如图 4.49 所示,若用光纤将光导入到亚砷化锌(ZnSe)等光学材料(法拉第磁光效应器件)中,并在与光平行的方向上加一个外部磁场,则根据法拉第磁光效应,输出光的偏光面将会发生偏转。利用这种偏转角度与磁场强度有关的特点,可以对磁场强度进行测量。因为这种传感器能够做到完全电绝缘,因此在测量时完全不会受电磁感应的影晌,这是此类传感器的一大优点。

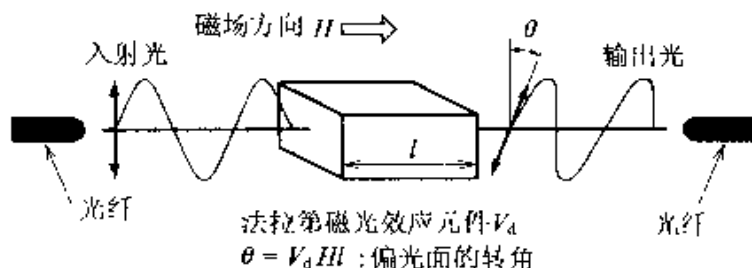


图 4.49 光纤型磁敏传感器的结构

## 应用知识 磁敏传感器的应用

由于磁敏传感器具有体积小、重量轻的特点,因此在很多方面都有应用。

(1) 电流计 图 4.50 所示为卡形电流计,它将导线电流产生的磁场引入到高磁导率的磁路中,通过磁路中插入的霍尔元件对该磁场进行检测,以此测量导线上的电流。这种电流计的测量范围很宽,可以测量从直流到高频的电流。

(2) 磁感应开关 它是一种通过改变磁敏传感器与磁体间的距离,实现开关开、闭的非接触型开关。由于无摩擦,因此具有寿命长、可靠性高等特点。

③ 磁敏电位器 可分为用于测量磁敏电阻与磁铁间直线位移的直线式磁敏电位器和转动式磁敏电位器两种。

④ 霍尔电机 它是一种采用检测位置的霍尔元件制成的一种无刷电机,因其有一个元件可控制两组晶体管的优点而倍受青睐,是当今无刷电机中使用最多的一种电机。因为无电刷,因此具有体积小以及无噪音等优异的特点,广泛用于盒式录音机、VTR、FDI)等需要进行转动控制的精密机械中,其结构如图 4.51 所示。

⑤ 纸币及预付卡识别设备 在对纸币或支票等含有磁性油墨印刷的文字或符号产生的磁场形状进行识别时,通常采用高灵敏度的单晶 InSb 半导体磁敏电阻等器件作为检测传感器。它广泛应用于自动售货机、自动售票机、纸币兑换机及各种预付卡式设备中。

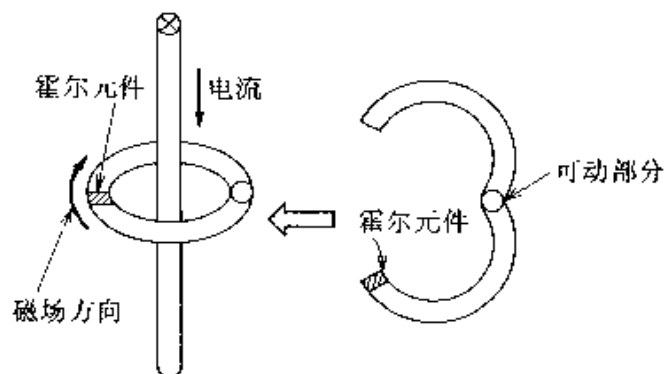


图 4.50 卡形电流计的结构

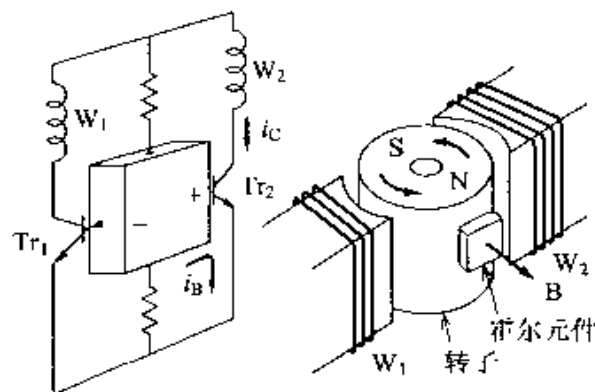


图 4.51 霍尔电机的结构

## 9 温度传感器

**要 点** 温度传感器是一种能将温度转换成电信号的传感器。在温度传感器中有双金属传感器、热敏电阻、热电偶、金属测温电阻、IC 温度传感器、红外线温度传感器等多种类型。

**解 释** ● 热敏电阻

热敏电阻(thermistor)是一种当温度变化时电阻的阻值能呈现敏感变化的元件,一般是由锰、镍、钴、铁、铜等金属氧化物烧结而成。

根据温度特性的不同,可将热敏电阻分为随温度升高其阻抗下降的 NTC 型热敏电阻(negative temperature coefficient thermistor)、当温度超过某一温度后其阻抗急剧增加的 PTC 型热敏电阻(positive temperature coefficient thermistor)和当温度超过某一温度后其阻抗急剧减小的 CTR 型热敏电阻(critical temperature resistor thermistor)三种类型。在温度测量方面,多数采用 NTC 型热敏电阻。这三种热敏电阻的温度特性曲线,如图 4.52 所示。

NTC 型热敏电阻  
PTC 型热敏电阻  
CTR 型热敏电阻

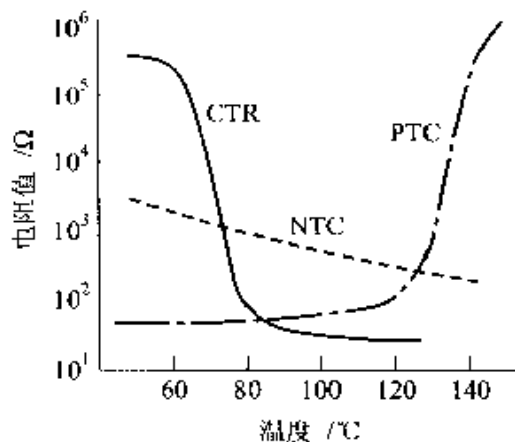


图 4.52 NTC、CTR、PTC 热敏电阻的温度特性曲线

**球形**  
**圆形**  
**条形**

按形状的不同热敏电阻可以分为球形、圆形、条形三种,每种类型都有多种规格。在 JIS 的 JIS C 1611 项中,对可互换的热敏电阻都有标准规定。

热敏电阻的连接方法如图 4.53 所示,其使用温度为  $-50 \sim +350^{\circ}\text{C}$ 。在由阻值求解被测物体的温度时,需要根据热敏电阻的温度特性曲线进行对数运算。若将表示阻抗变化的电压变化信号

进行 A/D 转换后,由微机完成这种数据处理,就会使温度的计算变得非常简单。其计算公式如下:

$$T = \frac{1}{\frac{\log_e \frac{R}{R_0}}{B} + \frac{1}{T_0}}$$

式中,  $T$  为被测温度,  $R$  为被测温度下的阻值,  $T_0$  为基准温度,  $R_0$  为基准温度下的阻值,  $B$  为热敏常数,  $\log_e$  为自然对数。

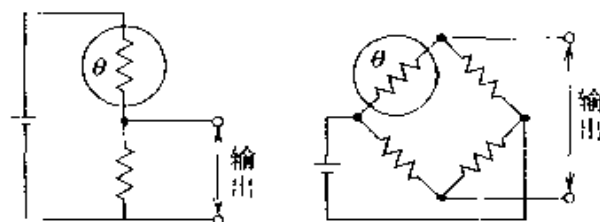


图 4.53 热敏电阻的连接示例

### ● 金属测温电阻

#### 铂测温电阻

一般的金属,随温度升高其阻值将成正比地增加。利用这种特性,可以制成金属测温电阻。在 JIS 的 JIS C1604 项中有对铂测温电阻的标准规定。因为白金测温电阻的特性十分稳定,因此广泛应用于工业中的高精度测温。按使用温度范围的不同,铂测温电阻可以分为低温型( $-200 \sim +100^\circ\text{C}$ )、中温型( $0 \sim +350^\circ\text{C}$ )、高温型( $0 \sim +650^\circ\text{C}$ )三种。图 4.54 所示为铠装白金测温电阻的结构图。

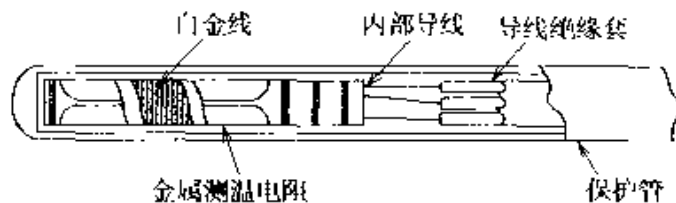


图 4.54 铠装白金测温电阻的结构图

### ● 热电耦

#### 塞贝克效应 热电动势

如图 4.55 所示,将两种不同金属的两端相接构成闭合回路,当这两个连接点的温度不同(有一个温差)时,会在该回路中产生一个电动势而流过一个电流。这种现象称为塞贝克效应(Seebeck effect),所产生的电动势称为热电动势(thermoelectromotive force)。

热电流  
热电偶

流过的电流称为热电流(thermoelectromotiv current), 热电偶(thermo couple)就是一种利用塞贝克效应制成的温度传感器。

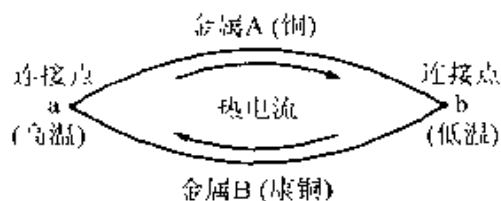


图 4.55 热电动势的产生原理图

若按图 4.56 所示用电压表测量热电偶的热电动势, 就能求出连接点的温差, 由此可以计算出被测物体的温度。然而, 当冷接点为非 0℃ 的常温时, 如果不对热电偶进行温度补偿, 就不能得到正确的测量结果。热电偶的测温范围为 -200~+2100℃ 左右, 因能测量高温, 因此广泛用于工业测温。在 IIS 的 JIS C 1602 项中有标准规定, 因材料不同热电偶被分为 B、R、S、E、J、T 几种类型。此外, 由于热电偶的热电动势很小, 因此在将热电偶产生的信号输入给微机处理前还需要对该信号进行放大处理。图 4.57 为一个铠装热电偶传感器的结构图。

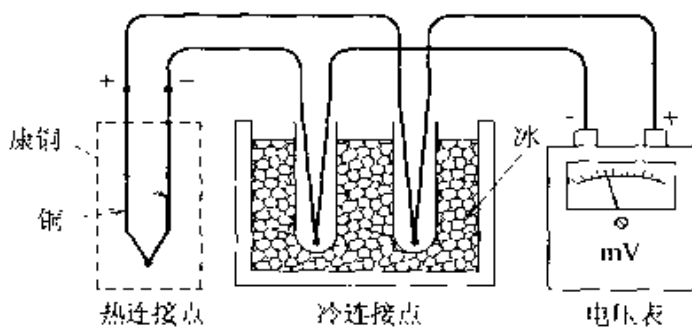


图 4.56 热电偶的工作原理

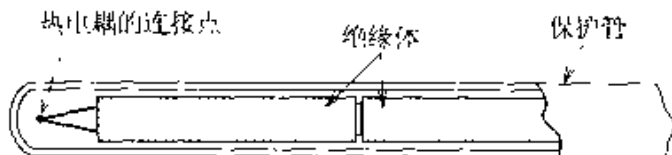


图 4.57 铠装热电偶的结构图

### ● IC 温度传感器

二极管的正向偏压阈值及晶体管基极与发射极间的正向偏压

阈值都具有温度敏感特性。利用这种特性,可以将二极管或晶体管以及能对其输出电压进行线性补偿的电路集成在一个芯片上制成 IC 温度传感器。因其具有体积小、线性好等特点,因此,它是一种使用方便的温度传感器。在这种传感器中,有温度系数为  $8.0\text{mV}/\text{K}$ 、测温范围为  $-40\sim+100^\circ\text{C}$  的 S-8100B 芯片及输出电压为  $0\text{mV}+10.0\text{mV}/^\circ\text{C}$ ,测温范围为  $2\sim150^\circ\text{C}$  的 LM35DZ 芯片等多种产品。图 4.58 为一个采用 IC 温度传感器测温并进行 A/D 转换的示例。

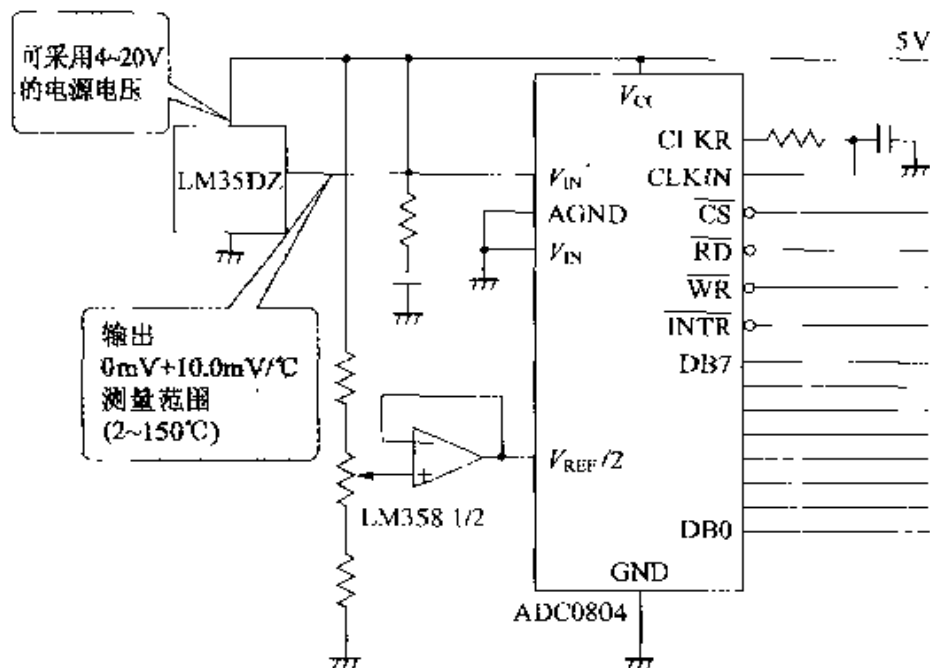


图 4.58 IC 温度传感器的 A/D 转换示例

### ● 红外线温度传感器

只要不处于绝对零度,任何物体都会向外部发射以红外线为主的热辐射。能捕捉这种能量实现测温的传感器称为红外线温度传感器。由于采用这种传感器能实现传感器与被测物体的非接触测量,因此这种传感器多用于测量高温或者测量运动物体的温度。这种传感器大致可以分为热能型与量子型两类,热能型中的热电型传感器因性能价格比高应用得比较多。

热能型  
量子型  
热电型

### ☞ 相关知识 ● 温度单位

绝对温度  
摄氏温度

在温度单位中,有热力学单位 K(绝对温度)及日常生活中使用的  $^\circ\text{C}$ (摄氏温度)。 $0^\circ\text{C}$  等于  $273.15\text{K}$ 。



# 10 湿度传感器

## 主要点

湿度传感器有如下几种类型:

- ① 用毛发、尼龙片等材料制成的机械式湿度传感器。
  - ② 利用蒸发导致湿球温度下降的原理制成的干湿球式湿度传感器。
  - ③ 利用因湿度不同导致阻抗或电容变化的原理制成的湿度传感器。
  - ④ 利用因空气中绝对湿度不同导致热传导率变化的原理制成的湿度传感器。
  - ⑤ 利用因空气中含水量不同导致红外线及微波衰减程度发生变化的原理制成的湿度传感器。
- 在机电一体化领域,通常选用容易实现电量转换的湿度传感器。

## 解释 ● 绝对湿度

相对湿度

湿度有绝对湿度及相对湿度两种表示方法。绝对湿度是用  $1\text{m}^3$  空气中所含水蒸汽的重量来表示湿度。假设标准大气压为  $P_0$  [Pa]、水蒸汽压为  $e$  [Pa]、温度为  $t$  [°C], 则绝对湿度  $H$  [ $\text{g}/\text{m}^3$ ] 可由下式求出:

$$H = \frac{804}{1 + 0.00366t} \cdot \frac{e}{P_0} \quad [\text{g}/\text{m}^3]$$

绝对湿度传感器是一种利用热敏电阻在干燥空气与潮湿空气中热传导率的差异实现湿度测量的传感器,其结构如图 4.59 所示。

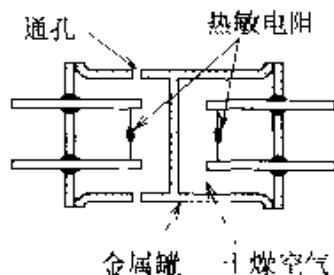


图 4.59 热敏电阻式绝对湿度传感器结构图

## ● 相对湿度

相对湿度是采用气体中的水蒸汽压与该气体在同一温度下的饱和蒸汽压力之比来表示湿度。假设气体中的水蒸汽压为  $e$ 、该气体在同一温度下的饱和蒸汽压为  $P_s$ , 则相对湿度可由下式求出:

$$H_R = \frac{e}{P_s} \times 100 \quad [\%RH]$$

陶瓷吸湿材料  
高分子薄膜  
吸湿材料

在相对湿度传感器中,有采用陶瓷吸湿材料制成的阻抗变换型、采用高分子薄膜吸湿材料制成的阻抗变换型以及电容变换型等多种类型的湿度传感器。在日常生活中使用的湿度是指相对湿

度,通常说的湿度也大多指相对湿度。

通常,阻抗变换型湿度传感器的感湿特性,会随相对湿度的变化阻抗呈指数式变化,同时它还会受温度变化的影响。因此,在实际应用时,需要对测量数据进行对数变换(压缩),并对传感器进行温度补偿。最近出现了兼有温度补偿及对测量数据进行对数变换功能的组合型湿度传感器。

### 相对湿度 阻抗变换式湿度传感器

图 4.60 所示为相对湿度-阻抗变换式湿度传感器的外形图,图 4.61 所示为其特性曲线,图 4.62 所示为采用这种传感器构成的相对湿度测量电路。

## 相关知识 ● 相对湿度的单位(RH)

在相对湿度单位中使用(%RH)符号,%后面的 RH 表示相对湿度(relative humidity)。

## 应用知识 湿度传感器的应用

湿度传感器多用于楼宇空调、家用空调、加湿器、除湿器、干燥器、微波炉,以及需要对湿度进行控制的工厂中。



图 4.60 相对湿度 阻抗转换型湿度传感器

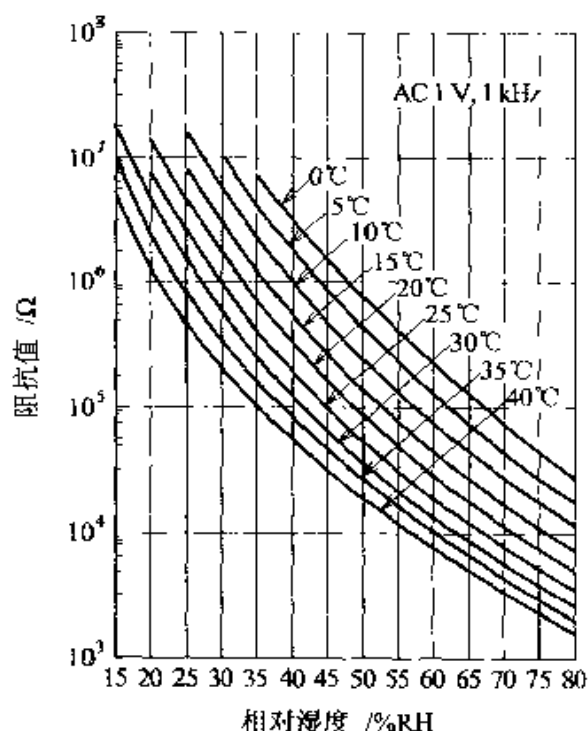


图 4.61 相对湿度 阻抗转换型相对湿度传感器的感湿特性曲线



图 4.62 相对湿度-阻抗转换型湿度传感器的结构框图

# 11 气敏传感器

**要 点** 气体的种类有很多,检测及测量的方法也多种多样。需要检测、测量的气体主要有易燃性气体、氧气、有毒气体等。

**解 释** ● **接触燃烧式气敏传感器**

接触燃烧式气敏传感器是一种用于检测易燃性气体的传感器,它利用易燃性气体在与氧气发生反应时产生的反应热加热金属,再通过捕捉金属因受热引起的阻值变化来测量气体浓度。如图 4.63 所示,这种传感器采用铂等材料作触媒,使被测气体更易于与氧发生反应,触媒是在加热及测量用的铂线圈周围掺入氧化铝等载体烧结构成的承载式结构。

气体浓度  
铂  
氧化铝

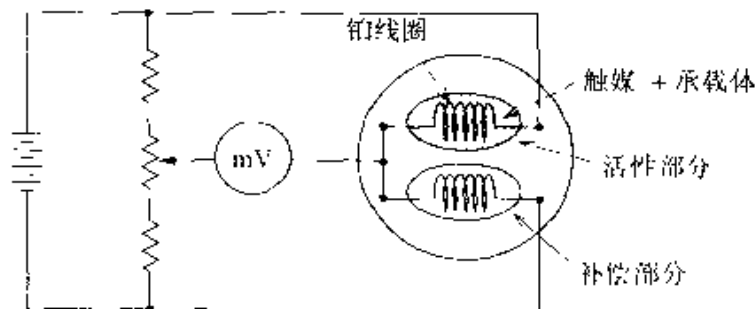


图 4.63 接触燃烧式气敏传感器及检测电路示例

● **固体电解质氧气传感器**

固体电解质氧气传感器是一种采用电极夹住稳定的多孔氧化锆作固体电解质构成的气体传感器。在高温状态下,两个电极间存在氧气压差时,会使电极发生化学反应产生一个电动势。若已知一侧的氧气压力,根据产生的电动势,就可以计算出另一侧的氧气压力,进而检测出氧气浓度。图 4.64 所示为汽车空燃比控制用氧气传感器的原理图。

氧气压力  
氧气浓度  
空燃比控制用  
氧气传感器

● **半导体气敏传感器**

在半导体气敏传感器中,多数是采用金属氧化物半导体材料,通过测量因其表面吸附气体导致材料电导率的变化,以此检测气体的浓度。通常的半导体气敏传感器可以与多种气体发生反应,因此可以对多种气体进行检测;但这种半导体气敏传感器并不适于检测某种特定的气体。若在元件制造时适当控制烧结温度、向

电导率

半导体内掺入添加物以及改变使用时的加热温度等,多种方法组合,就可以制成能够检测特定气体的半导体气敏传感器。其结构如图 4.65 所示。

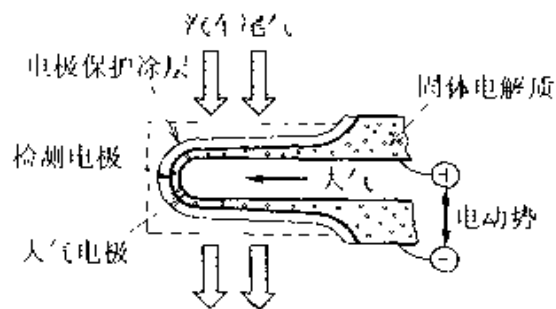


图 4.64 空燃比控制用氧气传感器的原理图



图 4.65 半导体气敏传感器的结构示例

## 相关知识 ● 气敏传感器的检测方式

气敏传感器的检测方式有热传导式、固定电位电解式、源电池式等多种。在表示气体浓度时,经常使用 ppm(parts per million) 这种符号,它表示 100 万分之 1(气体容积比)。

## 应用知识 气敏传感器的应用

接触燃烧式气敏传感器及半导体气敏传感器,主要用于气体泄漏报警器。此外,如图 4.66 所示,固体电解质氧气传感器则多用于汽车发动机的空燃比(发动机吸入的混合气体中“空气/燃料”的重量比)控制。空燃比控制是为净化汽车尾气使三元触媒发挥最佳净化性能,使之趋近理论值的一种反馈式控制。

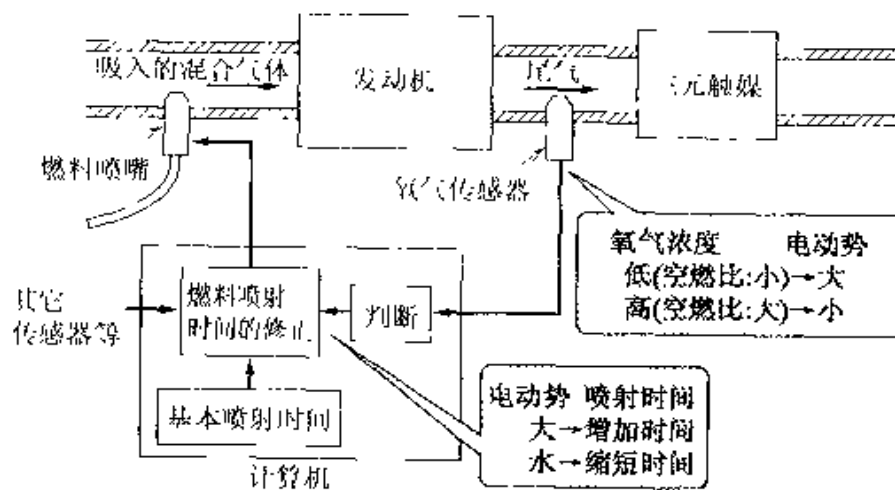


图 4.66 空燃比控制系统

## 12 化学传感器

### 要 点

化学传感器是一种用于识别特定化学物质,并将其含量或浓度转换成电信号的传感器。化学传感器中有离子敏传感器、生物敏传感器等多种。

### 解 释

#### ● 离子敏传感器

#### 离子选择电极

离子敏传感器分离子选择电极以及离子敏场效应晶体管两种。在常用的离子敏传感器中,最典型的是 pH 玻璃电极。

#### pH 玻璃电极

如图 4.67 所示,pH 玻璃电极是由端部的 pH 感应膜(玻璃膜)、内部溶液和内部电极构成。

在测量时,如图 4.68 所示,将 pH 玻璃电极与比较电极插入被测溶液中,在两个电极间会产生与被测溶液 pH 值相应的电动势,通过测量这个电动势就可以得出被测溶液的 pH 值。为了便于操作,有些 pH 玻璃电极将内部电极与比较电极作成一体,还有的将温度补偿电极也作成一体构成复合型电极。pH 玻璃电极在 JIS Z 8850 项中有标准规定。

离子敏场效应晶体管(Ion Sensitive Field Effect Transistor, ISFET)是一种在场效应晶体管绝缘栅膜上形成离子感应膜制成的传感器。它的感测原理上与离子选择电极相同,但由于采用半导体技术可以制成超小型的传感器,因此可以预料这种传感器将来会用于各种领域。

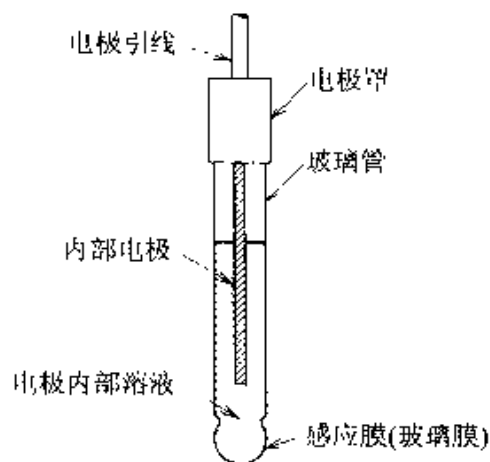


图 4.67 pH 玻璃电极

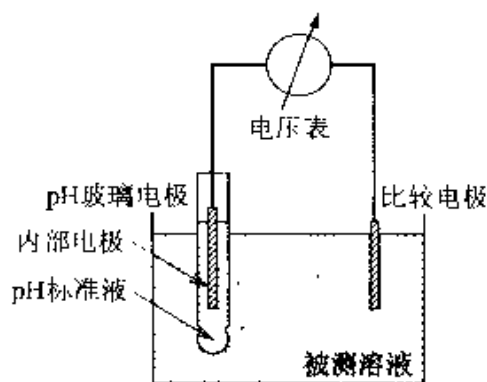


图 4.68 pH 值检测原理

## 生物酶传感器

生物酶电极

免疫传感器

微生物传感器

气味传感器

味觉传感器

## ● 生物酶传感器

如图 4.69 所示,生物酶传感器是一种利用某些生物分子的特定分子识别能力,将待分析分子的含量转换成其它物理量后进行测量的传感器。通过组合采用具有识别特定分子能力的不同生物分子作敏感材料以及不同的信号转换方法,可以制成能检测各种特定分子的传感器。在采用生物酶作敏感材料制成的生物酶传感器中,生物酶电极已可以测量氨基酸、糖、核酸等多种物质。

此外,利用抗体及微生物作敏感材料制成的免疫传感器以及微生物传感器也在研究开发之中。

除此之外,作为一种化学传感器,为能检测识别起来很复杂且困难的气味及味觉,气味传感器及味觉传感器也在研究开发之中。

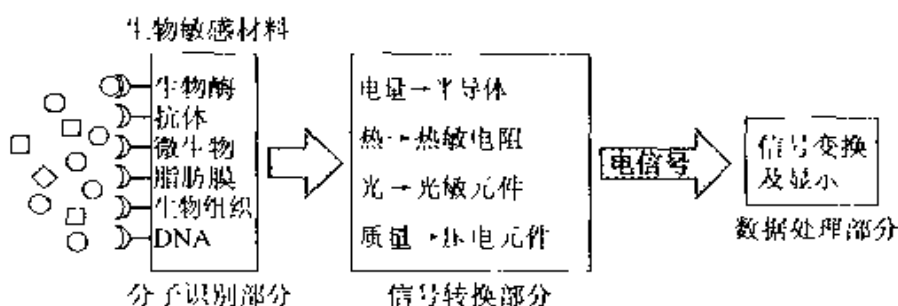


图 4.69 生物酶传感器

## □ 相关知识 ● 氢离子浓度指标(pH 值)

pH 值是一种表示液体中氢离子浓度的指标,通常用来表示溶液的酸碱程度。

pH 值不满 7 时溶液为酸性、等于 7 时溶液为中性、在 7~14 之间时溶液为碱性。

## ■ 应用知识 化学传感器的应用

在化学、生物酶产业的工艺管理及血液的 pH 值测量、锅炉与环境水监测等方面,经常采用 pH 玻璃电极,在食盐浓度计量及体液电解质分析等方面,经常采用钠玻璃电极。此外,生物传感器在临床检查、食品发酵业的工艺管理等方面也都有应用。

## 13 语音识别

### □ 要 点

在机电一体化领域中,语音识别技术是当今备受瞩目的技术之一。若能通过语音识别技术实现用声音完成各种控制,则可以大大解放出来,可以使他们在做其它工作的同时完成各种控制,数据输入也会变得非常简单。除此之外,通过语音识别技术,就可能实现真正意义上的人与计算机以及机器人的对话。

### □ 解 释 ● 语音识别的方法

若能正确识别构成语音的各个音节,就可以识别任何语句。然而,在日常生活中人们说话的语音相当复杂,明确区别说话中的各个音节十分困难,当人们快速说话时,各个音节之间是处于另外音节的状态。现在,语音识别的基本方法是先将各标准的单词音波形存储起来,再将待识别(输入)的语音波形与已存储的波形进行选配识别。这种识别方式,称为单词音波形选配方式。其处理过程如图 4.70 所示。

#### 单词音波形选配方式

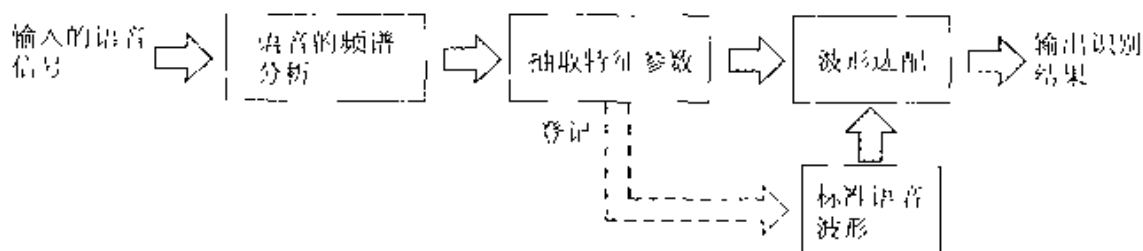


图 4.70 语音识别的基本结构框图

### ● 语音波形

#### 特定说话人方式

#### 非特定说话人方式

在识别输入的语音时,可以分为特定说话人方式及非特定说话人方式。特定说话人方式的识别率比较高。为了便于存储标准语音波形及选配语音波形,需要对输入的语音波形频带进行适当的分割,将每个采样周期内各频带的语音特征能量抽取出来,如图 4.71 所示。语音波形的选配方式有多种,但由于说话人的说话速度不能一直保持一致,因此,在与标准语音波形进行选配比较时,需要将输入的语音数据按时间轴作扩展或压缩处理。这种操作可通过计算各波形间的距离(表示相似程度)实现,称其为 DP(动态编程)选配,是语音识别中的基本选配方法。它是从多个与标准语

#### DP(动态编程)选配

音波形比较的计算结果中,选择波形间距离最小的作为识别结果。在这一过程中,需要进行大量的数据运算。随着LSI技术的进步,现在,几乎所有的语音识别电路都是由一片或几片专用的LSI构成。为了能更快、更准确地识别连续语音,在硬件上采用能实现高速数字信号处理的DSP(数字信号处理器)芯片、在软件上对选配算法进行改进以及采用其它的语音识别方式等方法都在研究开发之中。

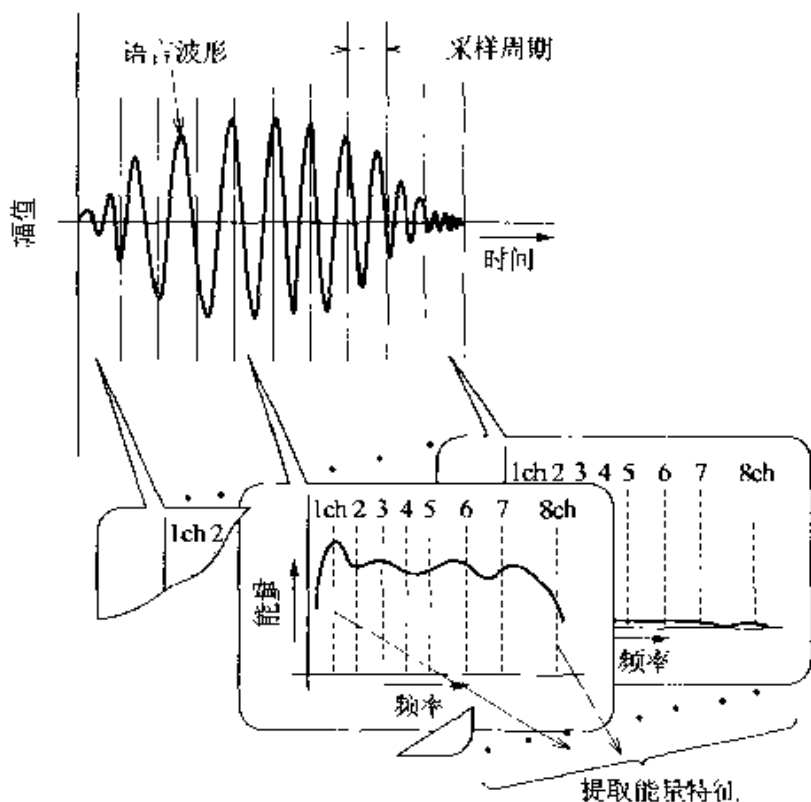


图 4.71 语音分析与特征的提取

## □ 相关知识 ● 语音合成

现在关于语音的研究,不仅在语音识别方面而且在语音合成方面也取得了相当的进展,运用语音合成技术的各种设备已进入到我们的日常生活中。随着近年来个人电脑多媒体化的深入,与声音相关的设备及软件也被大量地引入,已出现了很多利用这些系统进行语音识别及语音合成用的软件,利用这些软件,可以轻松地实现语音控制(语音识别)和文本数据的语音输出(语音合成)等。



## 14 智能传感器

**要 点** 能将来自传感器的信息,送到处理器进行分析、处理的过程称为传感器的智能化。智能化的传感器也称为智能传感器或智能传感器。

**解 释** ● 智能传感器

现在,传感器的发展异常迅速,已经研究或开发出了多种性能优异的传感器。然而,对于要求更高的检测与识别,不仅要求传感器的灵敏度高,还要求传感器自身要具有一定的信息处理能力。

信息处理

集散化处理

自动校正

自动补偿功能

如图 4.72 所示,若将一个或多个传感器通过采用内嵌微处理器等措施实现集散化处理,就能够大幅度地提高信息处理的速度和可靠性。因此,现代的传感器自身应具有自动校正、自动补偿功能,使传感器对环境变化具有适应、判断的能力,通过传感器对自身的数据处理(剔除异常或例外值),仅输出有用的信息。这样,通过快速分析来自多个此类传感器的信息,就会使一些高级的识别、判断成为可能。

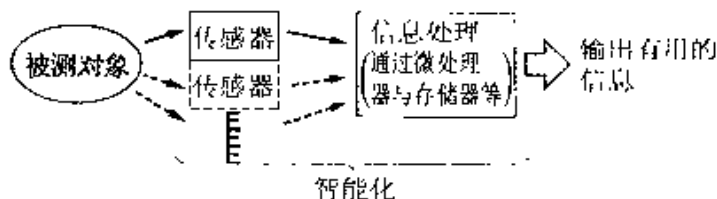


图 4.72 传感器的智能化

● 仿生传感器

人类五官

人类五官的功能非常出色,每种感官都具有相当的识别能力。因此,在传感器领域中,也在大力推进模仿人类五官功能的传感器的研究与开发。

嗅觉功能

在气味的检测和识别方面,如果分析一下人类的嗅觉功能,就会知道人类是通过嗅觉细胞吸附气味分子,将化学刺激转换成电信号来感知气味。通常,在嗅觉细胞中,多数细胞能对多种气味进行反应,仅能对一种气味进行反应的细胞很少。一般认为,人类对于某一气味的嗅觉,是通过并行感受多个嗅觉细胞不同的反应强度,综合各细胞输出波形进行识别。在模仿人类的这种嗅觉原理制成

嗅觉传感器  
智能化气敏  
传感器  
半导体气敏  
传感器  
视觉  
图像信息  
智能传感器

的嗅觉传感器中,智能化气敏传感器的开发获得了很大的进展。

如图 4.73 所示,利用由两种响应特性不同的器件构成的这种半导体气敏传感器,在某种程度上已能对芳香剂、咖啡、烟草、氨等进行识别。此外,通过对六种半导体气敏传感器数据的综合分析,将各传感器的数据按图 4.74 所示进行图形化处理,根据图形的形状,可以轻易地区分气味的好坏。

在视觉方面也是一样,人们正在考虑采用与人眼原理相同、能将大量的图像信息压缩成有用信息后输出的传感器、连同所用的微处理器一起制成一种视觉智能传感器。

仿人类其它感官的传感器也不是单纯的传感器,同样都是通过几个传感器组合并对这些传感器的信息进行可靠处理,才可能实现识别。因此,对于高级检测和识别处理,智能传感器是有效并且必须的。

关于人类的感官器官,还有相当部分的机理没有搞清楚。可以肯定,随着这方面研究的深入,对传感器技术的进步将会作出巨大贡献。此外,随着对人类所不具有的感知功能及检测方法研究的深入,还会有很多其它方式的智能化传感器出现。

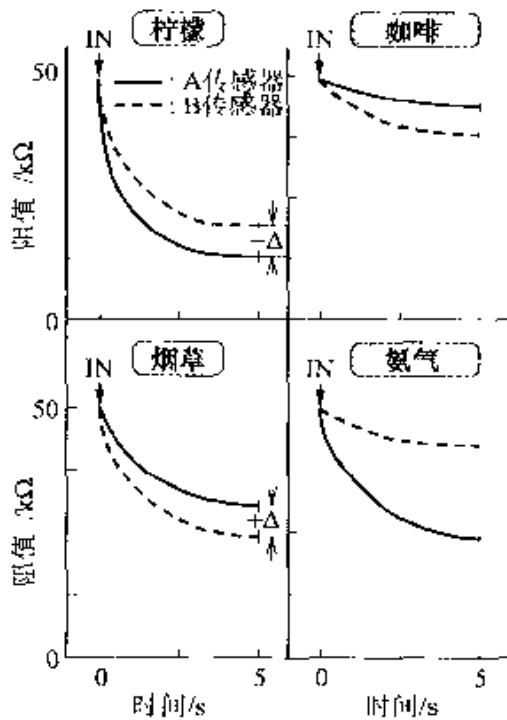


图 4.73 两种不同传感器对不同物质的输出阻值变化图

(引自《传感器技术》, Vol. 14, No. 3, p. 71 (1993) 野村健秋)

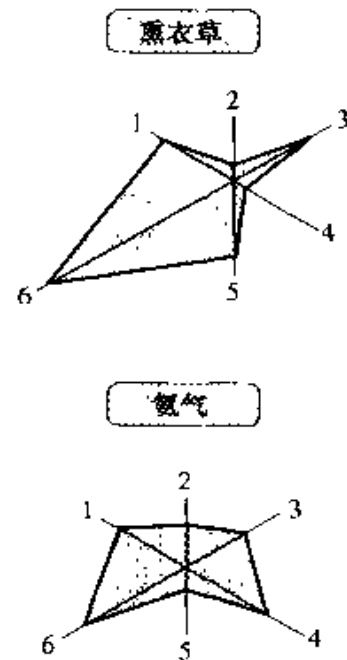


图 4.74 由半导体气敏传感器检测出的物质气味形状图

(引自《日经产业新闻》,平成5年4月7日)

1  
2  
3  
4

## 第5章

# 执行装置 技术

机电一体化产品是使用微型计算机控制的智能化机械。诸如物体搬运、紧固螺栓之类的工作最终都将由智能化机械来完成。用来承担动力和运动转换的装置称为执行装置。

传动装置的种类很多,有大功率传动装置、快速运动的传动装置和能够进行精确控制的传动装置等等。

本章将就电动机、液压和气动等执行装置的结构、工作原理及其特性等加以讨论。书中引用了很多实际电路和插图,对一些重要的名词术语以黑体字的形式加以标注,有利于读者进一步深入研究。

◎ 责任编辑

樱川 诚

中川信明

◎ 执 笔

浅野辉一(1~14)

中川信明(15~20)

# 1 什么是执行装置

## 要 点

所谓执行装置(actuator),是指把从动力源获得的能量变换成机械能使机械工作的一种装置,相当于人体的肌肉部分。

常用的装置有以电动机为代表的电动执行装置和以液压、气动为代表的机械式执行装置。

## 解 释

### ● 机电一体化技术与执行装置

所谓执行装置,就是把从电源、液压、气压等动力源获得的能量变换成旋转运动或者直线运动的机械能,同时产生使机械工作的力的一种装置。现代计算机技术、电子技术和伺服装置的组合,使机械系统的高精度、快速控制成为可能,其中最具有代表性的是机器人和数控机床。

### ● 执行装置的种类

根据控制对象的不同,执行装置可以分为很多种。机电一体化技术中常用的有以下几种:

**电动机** 电动机常简称为电机。分作旋转运动的旋转电机和作直线运动的直线电机。

电机的种类很多,如图 5.1 所示。机电一体化技术常用的电机有直流电机、交流电机和步进电机等。

伺服装置

直线电机

直流电机

交流电机

步进电机

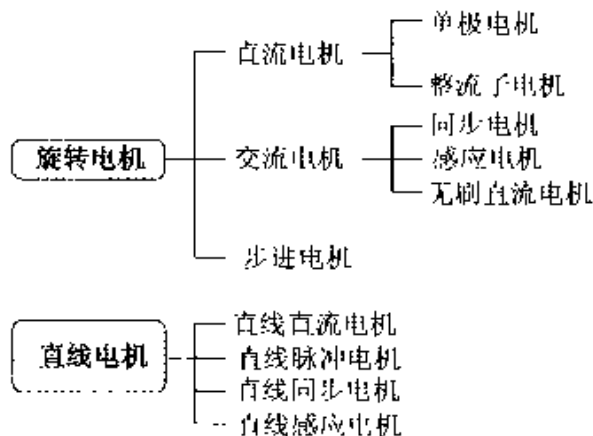


图 5.1 电动执行装置的种类

**螺线管(solenoid)** 在线圈中放入可动铁心,当线圈中流过电流时,可动铁心受力移动,构成直线运动型传动装置。由于在结构上螺线管的可动铁心只能获得微小的行程,适用于小型、快速响应

行程

交流螺线管  
直流螺线管

的场合,因此广泛应用于液压系统和气动系统的电磁阀控制和汽车燃料喷射阀的控制等。因所用电源的不同可分为 AC(交流)螺线管和 DC(直流)螺线管两种。

**液压执行装置** 液压执行装置是一种以液压作为动力源的执行装置,有液压缸和液压马达等,是一种体积小、输出功率大的执行装置。

**气动执行装置** 气动执行装置是一种以压缩空气作为动力源的执行装置,有气缸和气压马达等,是一种体积小、重量轻的执行装置。

## □ 相关知识 ● 伺服装置

为了与单纯动力输出的执行装置相区别,控制用的执行装置一般称为伺服装置。与动力用执行装置相比较,伺服装置设计时应特别着重以下功能:

- ① 转速、转矩调节范围宽。
- ② 能承受频繁的加速、减速运行和正转-反转运行。
- ③ 具有快速响应特性。

## ■ 选修知识 ■ 电动推杆(cylinder)

电动推杆的形状与液压缸或气压缸的形状相同,是采用电动机和减速器来实现直线运动的执行装置。由于电气传动不需要压缩机和贮气罐等附加设备,并且具有优良的推力和速度控制性能,因此在很多场合下,用电动推杆来代替传统的液压、气压执行装置。在以下场合可以考虑应用电动推杆:

- ① 代替气缸、液压缸:电动化、节省空间、费用低。
- ② 代替螺线管:轻量化、节省空间、费用低。
- ③ 通用机械:机器人、家电产品、运输机械、控制机械。
- ④ 相扑机器人的手臂伸缩用的执行机构等。

## ■ 研究课题 ■ 执行装置展望

近年来,根据新的驱动原理开发出一系列新型执行装置。其中有代表性的是静电执行装置(electrostatic actuator)、形状记忆合金执行装置(shape memory alloy actuator)、压电执行装置(piezo electric actuator)等。在执行装置方面,这些新型执行装置将得到广泛的应用。

## 2 什么是步进电机

### □ 要 点

步进电机 (stepping motor) 是一种将输入脉冲信号转换成相应角位移的旋转电机, 可以实现高精度的角度控制。由于可以用数字信号直接控制, 因此很容易与微型计算机相联接, 是位置控制中不可缺少的执行装置。

### □ 解 释

#### ● 步进电机的特征

反馈控制

表 5.1 中给出了步进电机的特征。这种电机的最大优点是不需要反馈控制。由于可以用数字信号直接控制, 因此很容易与微型计算机相联接。

表 5.1 步进电机的特征

优 点	缺 点
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 不需要反馈控制, 电路简单</li> <li>• 容易与微型计算机联接</li> <li>• 停止时有保持转矩</li> <li>• 维护方便</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 效率低</li> <li>• 容易引起失步</li> <li>• 有时发生振荡现象</li> </ul>

#### ● 步进电机的工作原理与分类

根据产生转矩的方式不同, 步进电机可分为 VR 型、PM 型和 HB(混合)型等几种。图 5.2 所示的是各种步进电机的分类与结构。

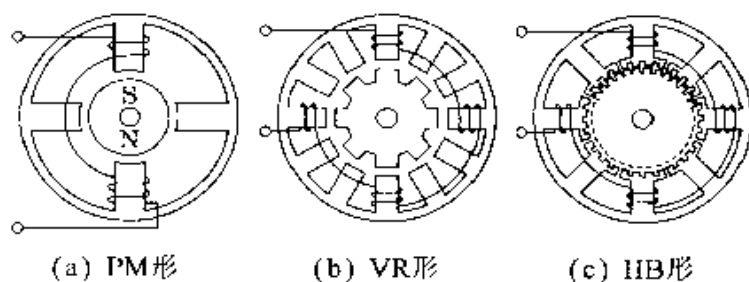


图 5.2 步进电机的结构与分类

**PM(permanent magnet)型** 转子为圆筒形永磁钢, 定子位于转子的外侧。定子线圈中流过电流时产生定子磁场。定子和转子

磁场间相互作用产生吸引力或排斥力使转子旋转。步距角为  $90^\circ$  或  $45^\circ$ 。

**VR(variable reluctance)型** 转子由齿轮状的低碳钢构成。转子将转向使通电相定子磁场的磁阻为最小的位置。通常使用的步距角为  $0.9^\circ$ 、 $1.8^\circ$  及  $3.6^\circ$  等。

**HB(hybrid)型** 是 VR 型和 PM 型的复合型步进电机,能获得与 VR 型相同的很小的步距角。因具有较大转矩而得到广泛应用。

### ● 步进电机的转矩特性

步进电机的脉冲频率与其产生的转矩之间的关系称为步进电机的转矩特性,如图 5.3 所示。牵入(pull-in torque)转矩也称为启动转矩,是使处于静止状态的步进电机突然启动,并能够以一定转速旋转的负载转矩限值。牵入转矩以内的区域称为自启动区域。

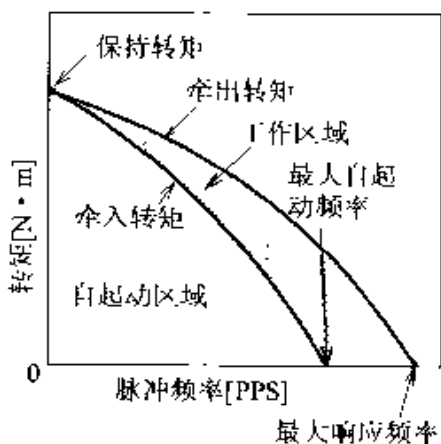


图 5.3 步进电机的转矩特性

自启动区域以外,当保持输入脉冲的频率一定而逐渐增大负载转矩时,或保持负载转矩一定而使输入脉冲的频率逐渐提高时,能够跟踪负载的转矩限值称为牵出转矩(pull-out torque)。另外,步进电机停止时的转矩称为保持转矩(holding torque),是步进电机所能产生的最大转矩。

脉冲频率

牵入转矩

负载转矩

自启动区域

牵出转矩

保持转矩

### □ 相关知识 ● 步进电机的名称

步进电机

脉冲电机

由于步进电机按照输入的脉冲信号步进式运动,故称为步进电机,也可称为脉冲电机。



### 3 步进电机的励磁方式

**□ 要点** 4相步进电机的励磁方式有单相励磁、双相励磁和单-双相励磁等三种。不同励磁方式步进电机的特性也各不相同,应根据控制对象适当选择不同励磁方式的电机。为了使各种励磁方式简单化,通常使用专用集成电路(IC)来控制。

**□ 解释** ● 步进电机的励磁方式

步进电机的励磁方式有单相励磁、双相励磁和单-双相励磁等三种,如图5.4所示。下面以4相步进电机(具有 $\phi_1 \sim \phi_4$ 相定子线圈的电机)为例,来讨论励磁方式。

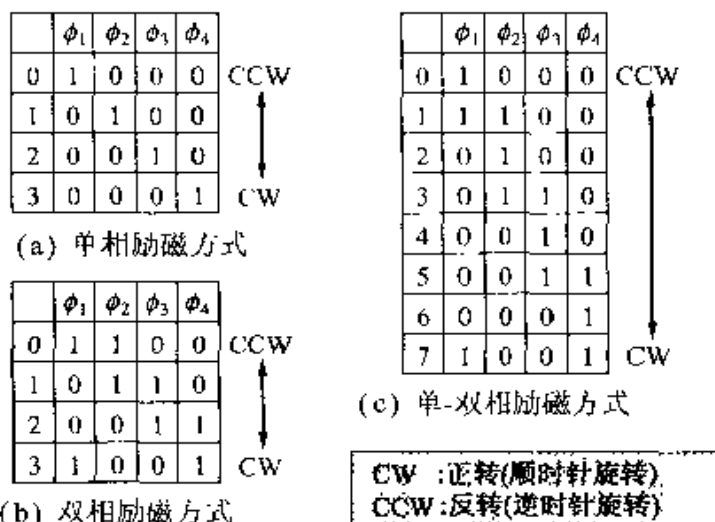


图 5.4 4相步进电机的励磁方式

角度精度  
衰减振荡  
丢步

**单相励磁方式** 如图5.4(a)所示,这是一种通常在定子线圈一相中流有电流的方式,因此,每一步相对应的角度精度高,消耗的电流较小。但是,旋转时有较大的衰减振荡,容易引起“丢步”。

**双相励磁方式** 如图5.4(b)所示。这种励磁方式通常是两相线圈中通有电流,其输出转矩约为单相励磁时的两倍,并且衰减振荡小,可以有宽范围的脉冲频率响应,广泛应用于一般性的场合。

**单-双相励磁方式** 如图5.4(c)所示,是一种单相励磁和双相励磁交互切换的励磁方式。由于步距角为单相励磁和双相励磁的 $1/2$ ,因此可以用于进行微细的位置控制。

● 程序设计实例

图 5.5 所示的是一个从 I/O 接口对步进电机进行直接控制的电路。这是一个采用双相励磁方式驱动步进电机的控制电路。

图 5.6 示出了一个双相励磁方式的控制程序例子。

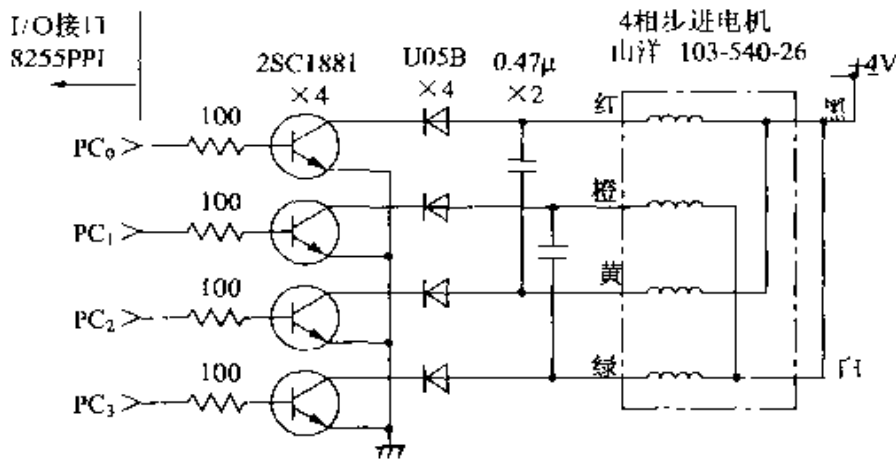


图 5.5 由 I/O 接口直接控制步进电机的电路

```

loop:  ld    b, 00110011B,    :双相励磁模式
      ld    hl, 4000h      :步距时间
      ld    a, b
      out  (PORT_C), a    :向I/O接口输出
timer: dec  hl            :步距时间定时器
      ld    a, h
      cp   l
      jr   nz, timer
      rrc  b              :反转时为rla
      jr   loop          :循环
    
```

图 5.6 双相励磁方式的程序举例

☞ 相关知识 ● 产生励磁脉冲 IC 芯片的使用

利用软件产生励磁脉冲使步进电机旋转时,微型计算机的负担较大。为此,脉冲的自动分配、励磁脉冲产生等可以使用专用 IC 来完成(参见 5.6 节)。

## 4 步进电机驱动电路

**要 点** 根据电流在线圈中流动的方向,步进电机的驱动电路可分为单极型驱动方式和双极型驱动方式两类。单极型驱动方式为标准驱动方式,电路构成较为简单;双极型驱动方式与单极型驱动方式相比较,可以产生2倍的转矩,但驱动电路比较复杂。应根据控制对象的不同,适当选择不同的驱动方式。

**解 释** ● 步进电机驱动电路的构成方法

以图 5.7 所示的 4 相步进电机为例,考察一下驱动电路的构成方法。步进电机驱动电路的构成是由电机的相数来决定的。与步进电机的型式(PM 型、VR 型、HB 型等)无关。定子线圈产生正转磁场或者反转磁场的方式有两种,一种为单极型(uni-polar)驱动方式,另一种为双极型(bi-polar)驱动方式。

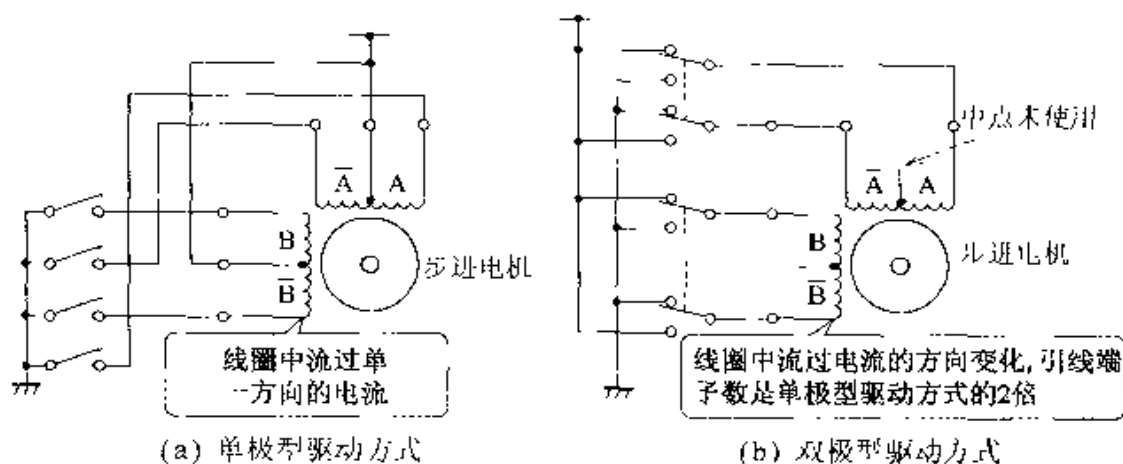


图 5.7 步进电机的驱动方式

### 1. 单极型驱动方式

单极型驱动方式如图 5.7(a)所示。定子线圈中流过电流进行磁场切换时,线圈的中点与两端点之间,无论哪一边都只流过一个方向的电流。

### 2. 双极型驱动方式

双极型驱动方式如图 5.7(b)所示。定子线圈的中点不接线。定子线圈中流过电流进行磁场切换时,线圈两端所加电压作正、负切换,从而使线圈中电流方向改变。与单极型驱动方式相比较,可

以产生 2 倍的转矩,电机效率较高。但是正如图中所示的那样,引线端子数是单极型驱动方式的 2 倍,电路较为复杂。

● 步进电机驱动用开关电路实例

大功率晶体管  
功率 MOSFET

为了把励磁信号变换成步进电机中随信号变化的励磁电流,要使用大功率晶体管或功率 MOSFET 作为切换开关。

图 5.8 所示为使用大功率晶体管的单极型驱动方式的电路例子。图 5.9 所示为双极型驱动方式的电路例子。

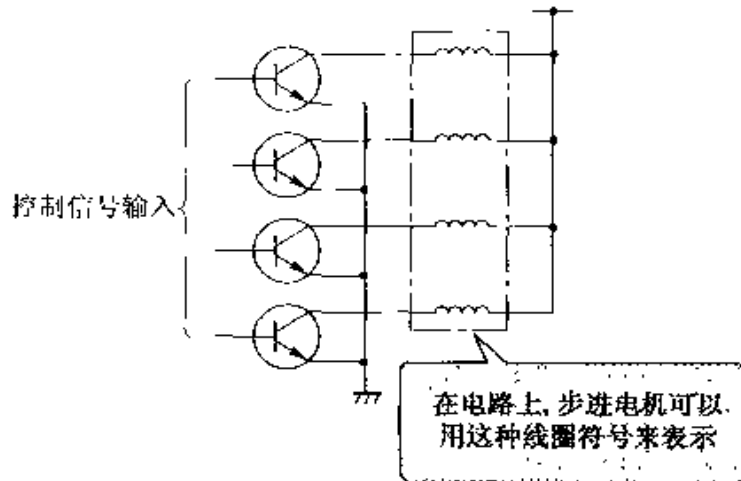


图 5.8 使用晶体管极管的单极型驱动电路

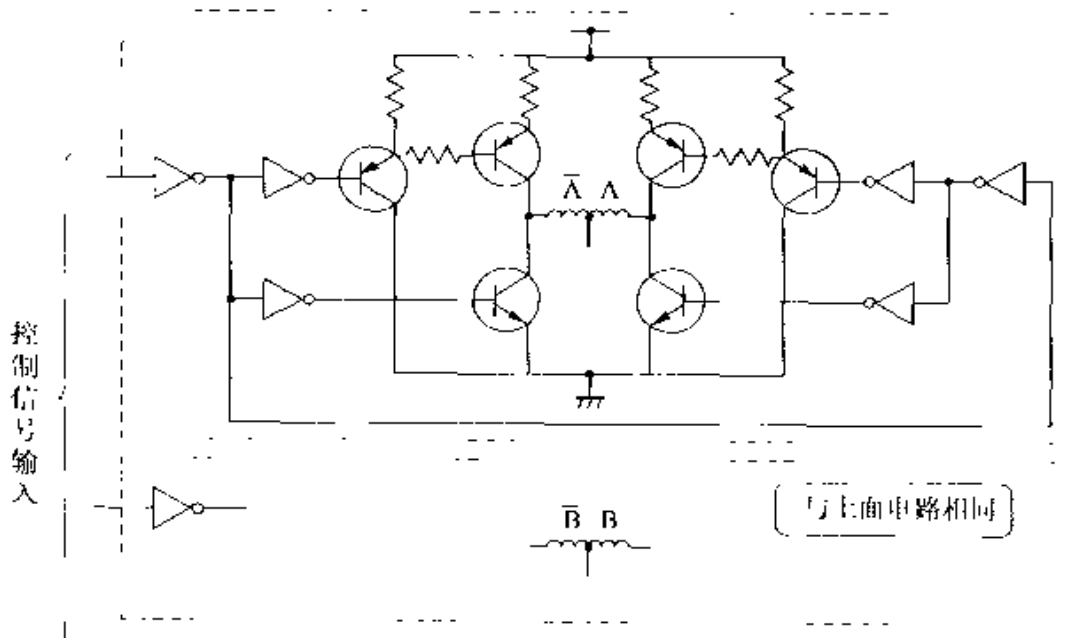


图 5.9 使用晶体管极管的双极型驱动电路

## □ 相关知识 ● 用步进电机获得大输出转矩的方法

为了获得大输出转矩,可以采用 PM 型步进电机及双向驱动和双相励磁方式等。即使不像直流电机那样采用齿轮减速装置,也能直接获得大输出转矩。

### ● 大功率 MOSFET

目前,在市场上很容易买到用 4V 信号驱动大功率 MOSFET,因此与微型计算机及其接口电路的连接也变得很简单。另外,从效率上看,与大功率晶体管相比较,使用功率 MOSFET 也是有利的。

## ■ 选修知识 使用步进电机的相扑机器人(自适应型)

与直流电机相比较,步进电机的效率较低,但是借助于计算机可以对步进电机简便地进行位置和速度控制。把步进电机应用于学习型微机控制机器人时是很理想的,可以期望学习效果将很快提高。作为例子,来看一下步进电机在相扑机器人中的应用。

由于步进电机在低转速时的转矩较大,可以应用于相扑机器人的脚轮驱动。采用直流电机驱动时,必须使用齿轮减速箱,而脚轮与步进电机轴可以直接连接,使结构、制作较为简单。

将四台软磁盘驱动器用的步进电机用于四轮驱动机器人效果最好。为了获得较大的转矩,可采用双向驱动电路和双相励磁方式等。

采用直流电机时,为了使转速下降,需要减小电机的电流,这时电机的转矩变小,而步进电机在低速时转矩大。当相扑对战双方处于互相推的状态时,脚轮不转动,也可以产生很大的转矩。这一点与直流电机采用减速齿轮来获得大转矩的效果是一样的。

目前,在重量相同的情况下,由于步进电机的功率尚不及直流电机,因此采用步进电机的相扑机器人尚无晋级横纲的机会,适合于作为相扑机器人入门之用。

## 5 步进电机控制电路举例

**□ 要点** 为了理解步进电机的基本工作原理,先不使用微型计算机而采用通用逻辑电路来构成控制电路。这个电路在试验电路板上构成,并用示波器来观察波形,以便提高学习效果。

**□ 解释** ● 步进电机驱动电路的构成

为了理解步进电机的动作,在不使用微型计算机的情况下,看一下电机的正、反转控制和转速控制的实验电路。

一般说来,步进电机的驱动电路如图 5.10 所示。信号发生电路可以采用单独的振荡器,也可使用微型计算机。脉冲分配电路则是把来自信号发生电路的驱动脉冲自动地按照 4 相步进电机的励磁模式进行分配的电路。功率放大器一般由大功率晶体管或功率 MOSFET 构成,用来提供电机线圈中所需的电流。

脉冲分配电路

励磁模式

功率放大器

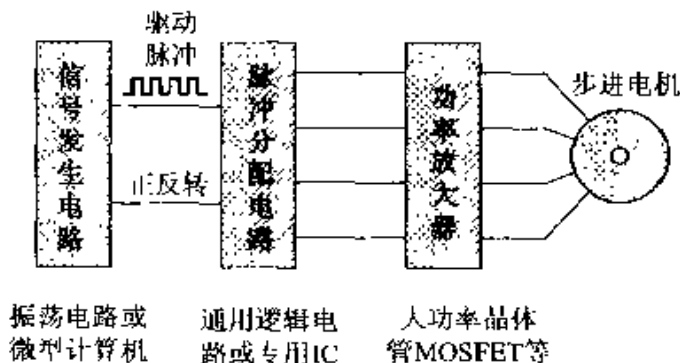


图 5.10 步进电机驱动电路的构成

● 使用通用集成逻辑电路的步进电机驱动电路举例

通用集成逻辑  
电路

图 5.11 所示为采用通用集成逻辑电路的步进电机驱动电路。下面考察一下它的工作原理。

单稳态触发器  
多谐振荡器

由振荡器构成信号发生电路 决定步进电机转速的驱动脉冲由函数发生器产生后,加到图 5.11 所示的“驱动脉冲输入”端。也可以采用 555 定时器等专用集成电路构成振荡器。555 定时器可以方便地接成单稳态触发器和多谐振荡器等状态。常用于脉冲波形的产生、变换、测量与控制。这里用作多谐振荡器,利用电位器来改变振荡频率从而调节步进电机的转速。除 555 定时器之外,

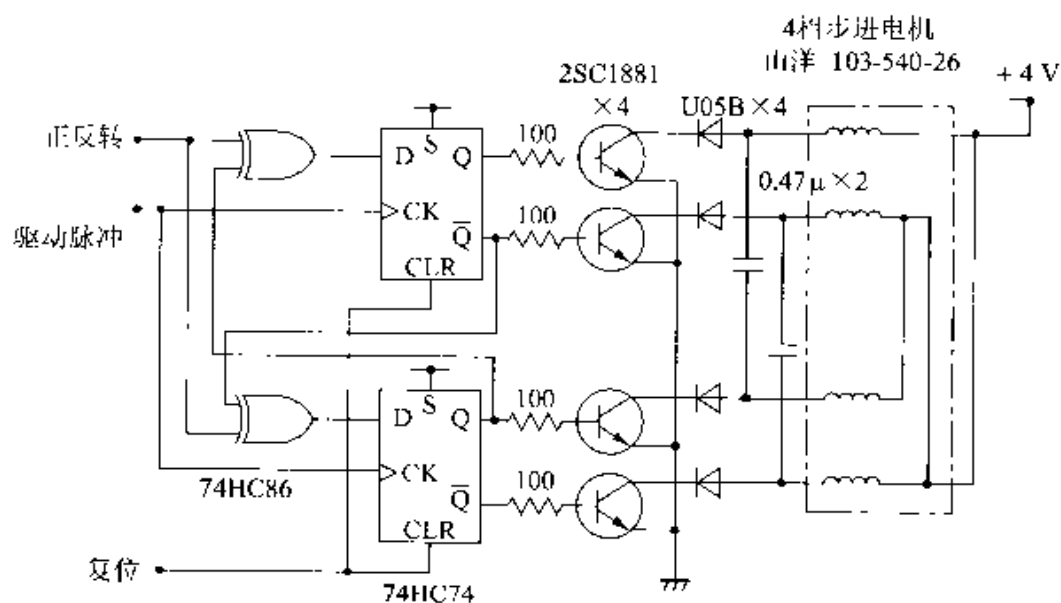


图 5.11 由通用逻辑 IC 构成的步进电机驱动电路

也可以使用通用集成逻辑电路来构成振荡电路。

**脉冲分配电路** 由“异-或”门 74HC86 以及 D 触发器 74HC74 构成。当正、反转输入端子为“1”时电机正转，为“0”时电机反转。由加到驱动脉冲输入端子上的脉冲来控制电机的转速。

**功率放大器** 以大功率晶体管 2SC1881 为中心构成。图 5.11 中电容器和二极管的作用是，当大功率晶体管关断时，为了抑制电机线圈的反电动势，电容器和二极管作为电气阻尼器而工作，从而抑制电机的振荡，同时实现快速响应。

## □ 相关知识 ● 微型计算机与步进电机的接口

使用微型计算机可以产生柔性信号，从而能够对机械系统实行柔性控制。在使用微型计算机时，一般通过并行接口电路或定时器计数器电路与脉冲分配电路连接。当计算机的 CPU 采用 Z80 时，并行接口电路 LSI 常使用 8255PPI 或 Z80PIO；定时器/计数器 LSI 常使用 8253PIT 或 Z80CTC 等。目前广泛使用的是内部设置上述接口电路的单片微型计算机。

并行接口电路  
定时器/计数器 LSI

## 6 采用步进电机专用 IC 芯片的控制电路举例

**□ 要 点** 用微型计算机对步进电机进行控制时,使用专用 IC 芯片产生励磁模式可以减轻微型计算机的负担。在高速运转时,步进电机采用外部串联电阻法或定电流法驱动。特别是定电流法,因运行效率高而应用较多。常用的还有专用集成 PWM 斩波驱动器等。

**□ 解 释** ● 采用专用生成励磁模式 IC 芯片的控制电路

生成励磁模式  
IC 芯片  
中断控制技术

如 5.3 节所述,由 I/O 接口对步进电机进行直接控制时,电路结构简单,但增加了计算机 CPU 的负担是其不足之处。这对来自传感器的输入信号和电机的输出信号较多的系统,或者要求快速响应的系统就有很大问题。这时,采用步进电机专用的生成励磁模式 IC 芯片与计算机中断控制技术相结合,CPU 可以获得有效的利用。

图 5.12 所示为由生成励磁模式 IC-PMM8713(山洋电气)构成的控制电路实例。电路为单极性驱动方式。这种 IC 芯片输入为 2 进制信号,输出为励磁时序脉冲,具有驱动三相或四相步进电机的功能。

图 5.12 中来自微型计算机的两个信号(正、反转信号和驱动脉冲信号)通过 I/O 接口送入 IC 的 U/D 端和  $C_k$  端。 $E_A$ 、 $E_B$  为励磁时序、脉冲的切换端子,由模拟开关按动作真值表所示的规律切换励磁脉冲。图中的两个开关是这种切换用模拟开关的示意图。实际上,在与微型计算机组合控制时,两个端子是固定使用的。接于复位端子的滤波电路是为了保证 IC 可靠复位而设置的。

使用该控制电路的 4 相步进电机的额定电压为 4V,额定相电流为 0.6A、步距角为  $1.8^\circ$ 。应用于 XY 绘图仪及软磁盘驱动器等。

达林顿连接

大功率晶体管 2SC1881 的内部为达林顿连接,可以使用到 3A 输出电流。用于步进电机驱动时,应适当选择达林顿晶体管的组合。另外,与电机线圈串联的二极管与相间电容器构成电气阻尼器,用于吸收步进电机的振荡并获得快速响应特性。

相间电容器  
电气阻尼器

图 5.13 所示为由 TD62803P(东芝)构成的控制电路例子。这种 IC 芯片可以为 3 相或 4 相步进电机提供励磁模式发生功能。另外在芯片内部设置了最大输出为 400mA 的功率放大电路,使控制电路变得简单,对于低功率步进电机使用起来非常方便。用来控制额定电压为 5V、额定相电流 80mA、步距角为  $18^\circ$  的 PM 型 4 相步进电机,常应用于仪器配套用小型打印机等场合。



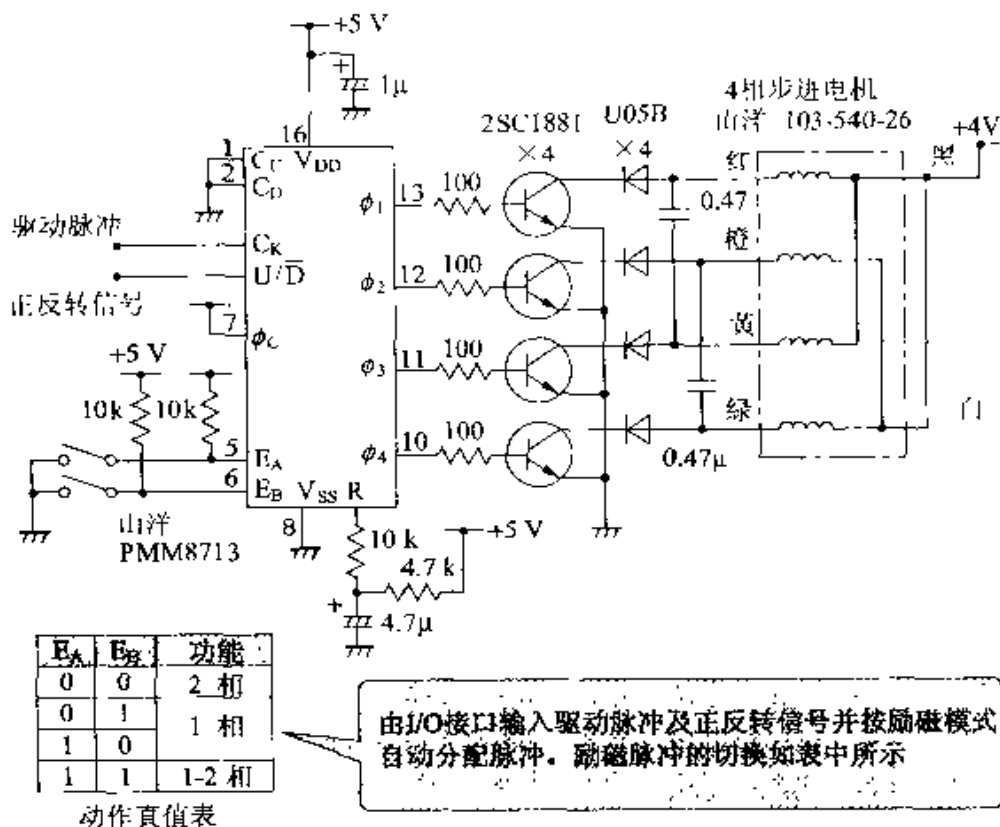


图 5.12 由发生励磁模式 IC 构成的控制电路例(1)

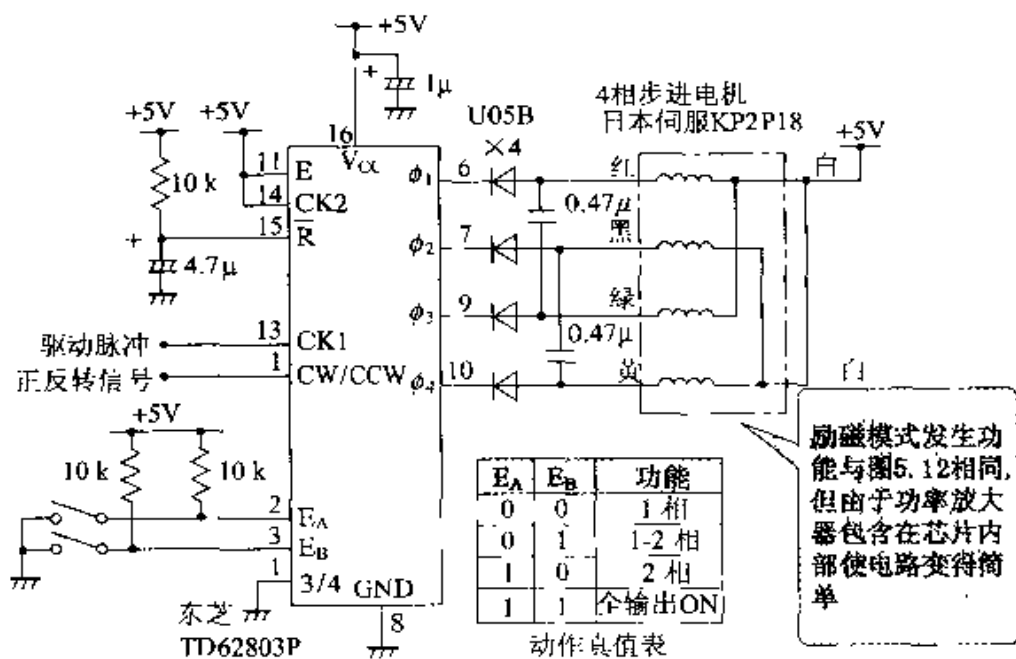


图 5.13 由发生励磁模式 IC 构成的控制电路例(2)

输出选通功能

图 5.13 中,端子“3/4”为 3 相和 4 相步进电机切换用的输入端子,出厂时固定在 4 相步进电机的位置上。应该指出的是,由动作真值表可知,输入端子  $E_A$ 、 $E_B$  均为“1”时,电机处于全输出 ON 的测试状态,这是需要注意的。输入端子 E 为输出选通功能端,图中固定为“1”,但是,由于端子 E 是通过 I/O 接口由微型计算机来控制,当步进电机停止时,也可以做到无电流流过。

阻抗

### ● 步进电机的高速运行

为了使步进电机高速运行,需要提高脉冲频率,然而随着脉冲频率的升高,电机线圈的阻抗也随之增大,使线圈中的电流减小,同时电机转矩也将减小。因此,步进电机本来是一种不适合高速运行的电机。要从控制电路上来改善这一缺点,有以下几种方法。

**外部串联电阻法** 这种方法如图 5.14 所示。在电机线圈回路插入串联电阻,并使用比步进电机额定电压高出数倍的电源电压,电机高速运转时,通常可以控制电机的电流值不变,在简单的电路中,可以用来提高电机的转速。然而电机低速运行时,电阻上的能量损耗很大,使电源的效率降低是这种方法的缺点。一般说来,选用的外部串联电阻值为步进电机线圈电阻的 2~3 倍时较为适宜。

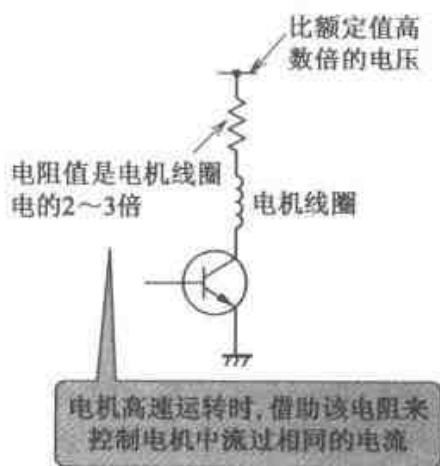


图 5.14 外部串联电阻法

**定电流法** 定电流法是一种电机电流恒值负反馈控制的方法,如图 5.15 所示。使用比电机额定电压高出数倍的电源电压,将电机线圈中流过的电流信号与给定电压信号进行比较,来控制高速运转时电机线圈电流恒定不变。为了检测线圈电流,在线圈回路串联一个很小的电阻(1Ω 左右),这个小电阻对电路的影响可

以忽略不计。定电流法不仅可以提高电机转速,还能够改善电源的效率,节能效果明显,不存在外部串联电阻法的能量损耗问题。这种控制方式的步进电机驱动电路比较复杂,但是利用专用的定电流斩波驱动 IC 可以简单地构成定电流法控制电路。

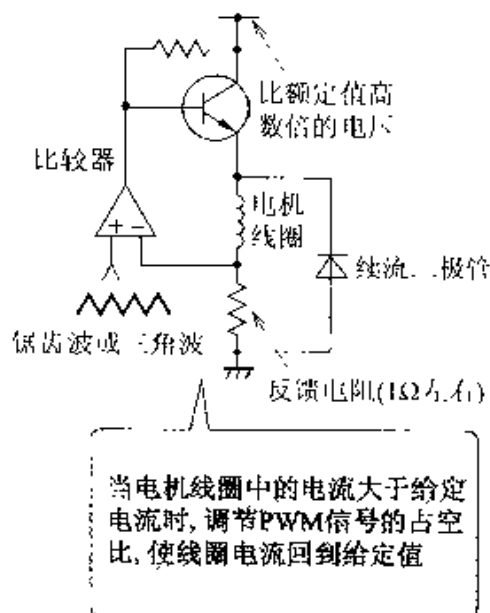


图 5.15 PWM 方式的定电流法

### ● 由 PWM 方式定电流斩波驱动 IC 构成的高速运行电路

图 5.16 所示为由 PWM 方式定电流斩波驱动 IC SLA7020M (三原电气)构成的控制电路例。电路为单极型驱动方式,功率放大器采用功率 MOSFET。由于功率较小时电路的发热较少,因此可以把电路置于一个 IC 芯片中。对于 4 相步进电机两相励磁方式采用图 5.16 所示电路驱动,当脉冲频率达到  $10^4$  脉冲数/s (pulse/second) 以上时,仍然可以高速运行。

图 5.17 中所示为由 TA8435H (东芝)构成的控制电路例子。这种 IC 同样是采用了 PWM 方式的定电流斩波驱动电路,用于步进电机双极型驱动方式,芯片内具有励磁模式发生功能。除具有单相、双相、单-双相励磁模式外,还具有微动驱动功能(32 倍细分),可使系统的位置精度进一步提高。

微动驱动功能

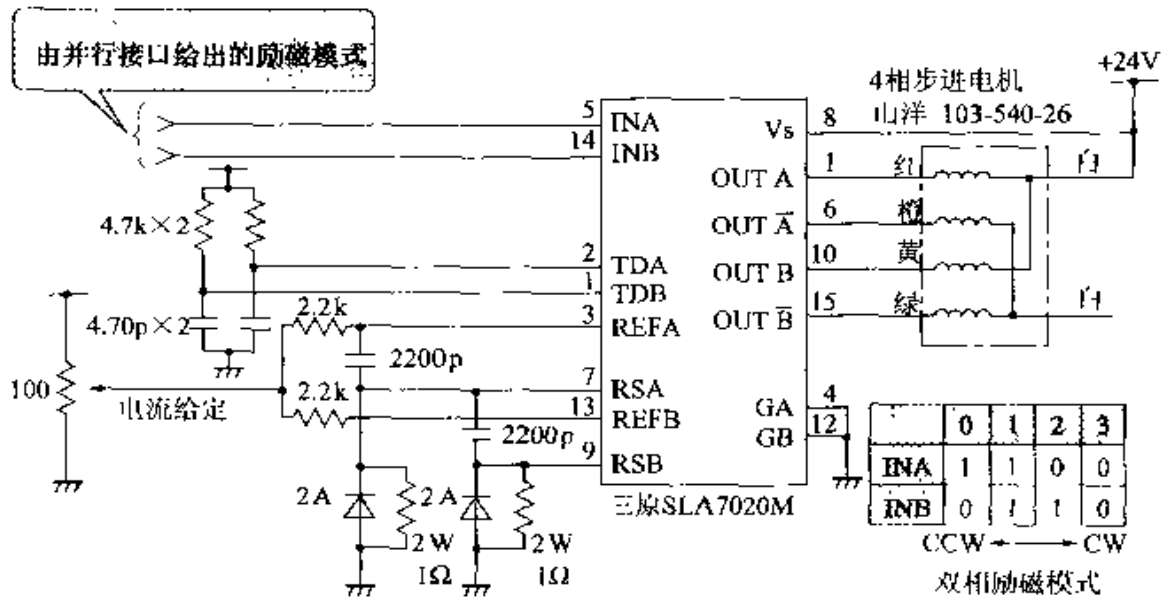


图 5.16 PWM 定电流方式的高速运转控制电路(单极型驱动)

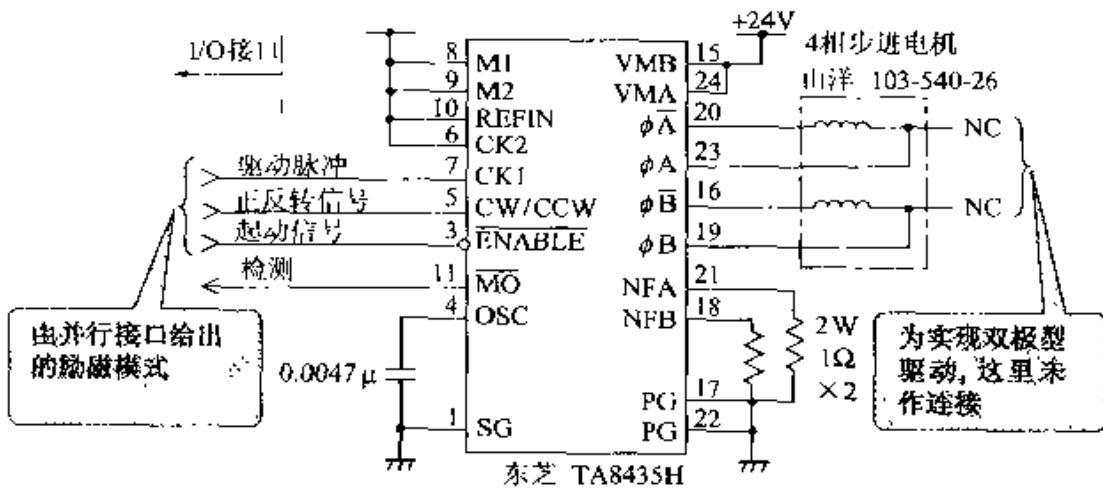


图 5.17 PWM 定电流方式的高速运转控制电路(双极型驱动)

## 7 什么是直流电机

### □ 要 点

使用直流电源的电机叫做直流电机。因此,只要把直流电机的端子接到直流电源上就可以简单地使其运转。直流电机是一种具有优良控制特性的电机。为了能够掌握直流电机的使用方法,首先必须很好地掌握其基本特性( $T-I$ 、 $T-N$  特性曲线)。

### □ 解 释

#### ● 直流电机的结构及其工作原理

图 5.18 所示为直流电机的结构与图示符号。可以看出,直流电机由永磁钢构成的定子、绕有线圈的转子以及换向器和电刷等构成。当电流通过电刷和换向器流过线圈时产生转子磁场,这时转子成为一个电磁铁,在转子与定子之间产生吸引力或排斥力使转子旋转。由电刷和换向器来切换电流方向,使电机按同一方向旋转从而带动负载作功。

定子 转子  
电刷  
换向器

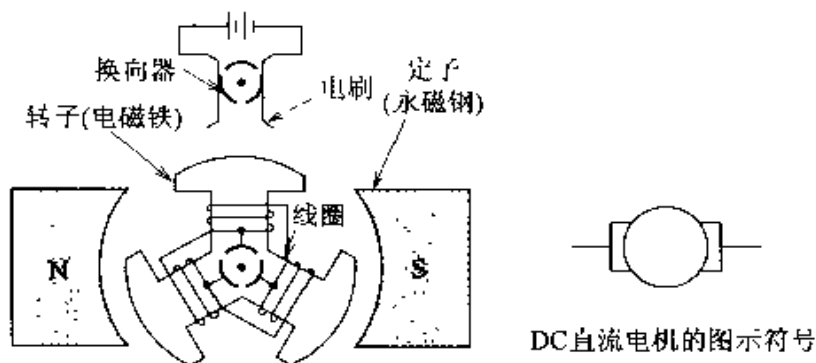


图 5.18 直流电机的结构与图示符号

#### ● 直流电机的特征

作为控制用电机,直流电机具有起动力矩大、体积小、重量轻、转矩和转速容易控制以及效率高等十分优良的特性。但是,由于有电刷和换向器,其寿命、噪声等方面存在不足。为了克服这一缺点,开发研制了无刷直流电机。在进行位置控制和速度控制时,需要使用转速传感器,实现位置、速度负反馈闭环控制方式。

#### ● 直流电机的基本特性( $T-I$ 、 $T-N$ 特性曲线)

图 5.19 所示为直流电机的基本特性。图中给出了转速  $N$  与转矩  $T$  之间的关系曲线,和电流  $I$  与转矩  $T$  之间的关系曲线,这两条特性曲线绘在一个图上。图 5.20 为直流(DC)电机的等效电路。

起动力矩  
位置控制  
速度控制  
转速传感器  
闭环控制方式

直流(DC)电机的等效电路

反电动势

由图可知,直流电机产生的转矩与电机电流成比例。当电机转速为零时电流为最大值,同时产生最大转矩(起动转矩)。随着转速的升高,线圈的反电动势增大,电流逐渐减小,转矩也就随之变小。

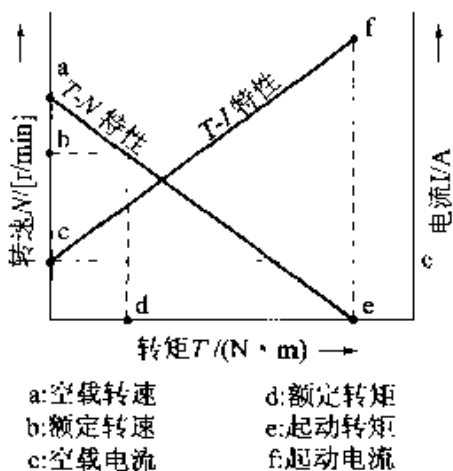


图 5.19 直流电机的基本特性

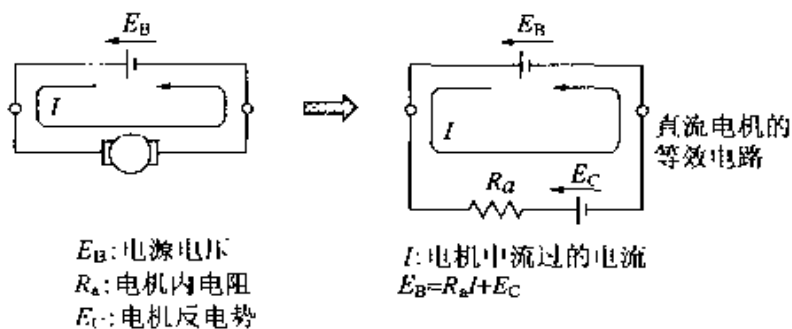


图 5.20 直流电机的等效电路

相关知识 ● 无刷直流电机

霍尔元件

直流电机的换向器部分可以用霍尔元件和半导体开关元件来代替(5.11节中将说明使用方法)。

## 8 直流电机的起-停控制

**□ 要点** 所谓起-停(ON-OFF)控制,简单地讲就是使电机运行或停止的控制方法,是一种较简单的控制方法。然而在家电产品及FA线路中却被大量应用。一般情况下,可采用继电器来实现直流电机的ON-OFF控制,此外也经常采用晶体管、FET、光电MOS继电器等无触点开关元件。

**□ 解释** ● ON-OFF 控制

FA 线路

可编程控制器

ON-OFF 控制不是去进行速度控制或位置控制,而是简单地使电机运行或停止的控制方法。用于FA线路等场合时,常使用可编程控制器对电机的旋转或停止进行控制。ON-OFF控制中经常使用的是继电器。但是由于存在机械触点,要想免维护是不可能的。因此,大功率晶体管、功率MOSFET以及光电MOS继电器等无触点开关的应用正在逐渐增多。

● 使用继电器的直流电机 ON-OFF 控制

绝缘

目前,直流电机的ON-OFF控制仍广泛使用继电器。采用继电器控制时,控制电路与电机主电路可以完全绝缘,所以不容易受到噪声信号的影响,即使电机主电路发生故障,控制电路也不会受到损坏。但是,由于使用机械触点,必须注意继电器的使用寿命问题。图5.21所示为使用继电器的直流电机ON-OFF控制电路。

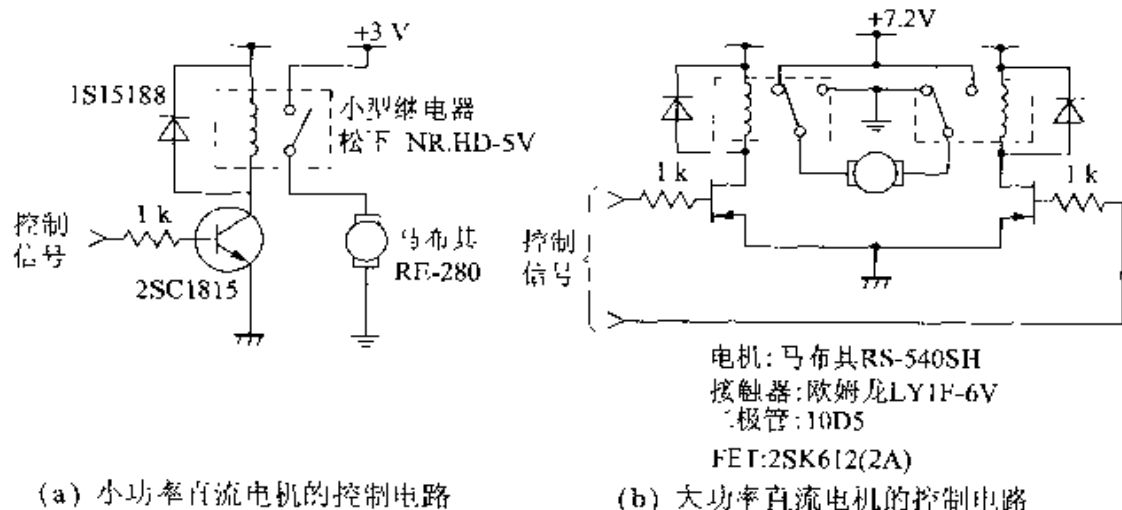


图 5.21 使用继电器的直流电机 ON-OFF 控制电路例

小型继电器

图 5.21(a)为使用小型继电器的小功率直流电机控制电路。运行时继电器触点闭合,停止时触点断开。图中的二极管是必需的,这是因为当继电器触点断开时,线圈产生的反电动势可能损坏三极管,设置该二极管就可以起到保护三极管的作用。图 5.21(b)为使用接触器的大功率直流电机控制电路。可以用来控制电机的正转、反转、断电和能耗制动等四种状态。

接触器

能耗制动

● 使用大功率晶体管的直流电机 ON-OFF 控制

晶体管在作为开关元件使用时,有电压驱动和电流驱动两种驱动方法,如图 5.22 所示。

射极跟随器电路

① 电压驱动电路 由于电压驱动电路是一个射极跟随器(共集电极)电路,其输出阻抗小,对电机特性误差的影响也小,这是电压驱动电路的优点。但是,由于晶体管的饱和损耗较大,与电流驱动相比,电压驱动的效率较低。

共发射极电路

② 电流驱动电路 由于电流驱动电路为共发射极电路,功率增益大,因此效率较高。但是,容易影响到电机特性的误差及晶体管放大倍数。这一点是应该注意的。图 5.23 所示为使用大功率晶体管的直流电机 ON-OFF 控制电路的例子。

大功率晶体管

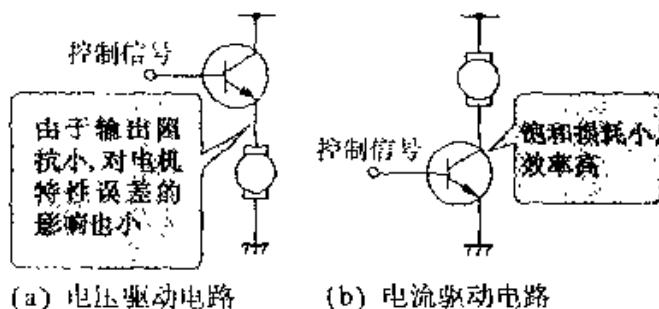


图 5.22 晶体管的电压驱动与电流驱动

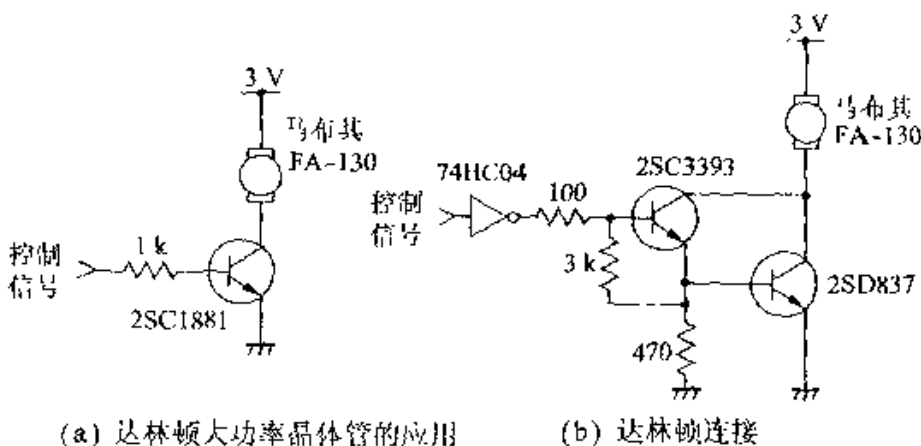


图 5.23 大功率晶体管的直流电机 ON-OFF 控制电路



## □ 相关知识 ● 光电 MOS 继电器

光电 MOS 继电器是一种光电耦合器与功率 MOSFET 组合起来的半导体继电器。这种开关元件把继电器的绝缘性和半导体开关的免维护性集于一体。

## ▣ 选修知识

### 相扑机器人真空装置的 ON-OFF 控制

相扑机器人是由机械、计算机和控制系统融合到一起的一种机器人,是学习机电一体化技术时最为合适的对象。最近,相扑机器人的技术水平显著提高,在赛场上,能够贴住对手并将其制服的相扑机器人逐渐多起来。

能够贴住对手的吸引型相扑机器人中常利用以下几种结构:

① 汽车的车内用吸尘器(DC12V) 为插头式连接,电源电压为12V。

② 家庭用充电式小型吸尘器(充电式) 为充电式结构,电源电压为4V。

上述结构的吸尘器可以很便宜地从DIY商店中买到,拆开后,可以取出必要的部分(吸引风扇和电机部分)直接使用。

使用接触器的驱动电路与5.13节中介绍的螺线管驱动电路相同。使用功率MOSFET时,通常工作电流为10A左右,功率放大器和电机将会发热,因此应有必要的降温措施。铝是热的良导体,散热效果良好。通常可以将MOSFET器件和电机直接装配到机器人本体(通常为铝合金材料)上。

另外,使用功率MOSFET不仅能实现ON-OFF控制,而且可以实行PWM控制,因此也可以实现风扇电机的电流控制。

## 9 直流电机的线性控制与 PWM 控制

**要 点** 直流电机转速控制方法主要有线性控制方式和 PWM 控制方式。小功率电机平滑控制时常使用线性控制方式,大功率电机高效控制时,则使用 PWM 控制。

**解 释** ● 直流电机的转速、转矩控制

为了改变直流电机的转速和转矩,可以采取以下不同的控制方法:

① 作电机转速调节时 → 可改变电源电压。

② 作电机转矩调节时 → 可改变电枢电流。

实际上,作上述调节时,电压和电流是同时变化的,因此电机的转速和转矩也在同时变化。例如,充电式电动扳手使用了直流电机,在转速变化时,紧固力矩也会同时发生变化。因此,在直流电机转速、转矩控制时,一般均采用改变输入电压的方法。改变输入电压时,大体上有线性控制方式和 PWM 控制方式两种。

线性控制方式  
电阻控制方式

**线性控制方式** 线性控制方式的原理如图 5.24 所示。线性控制方式也可称为电阻控制方式。在电机与电源之间插入晶体管,这个晶体管相当于一个可变电阻器,也就相当于控制了加于电机上的电压,从而改变电机的转速和转矩。晶体管工作于不饱和区,基本上与低频功率放大器的电路结构相同。

不饱和区

由于直流电机线性控制方式不改变电流的波形,因此对电刷、换向器的换向作用影响很小,可以做到转速的平滑调节。但是晶

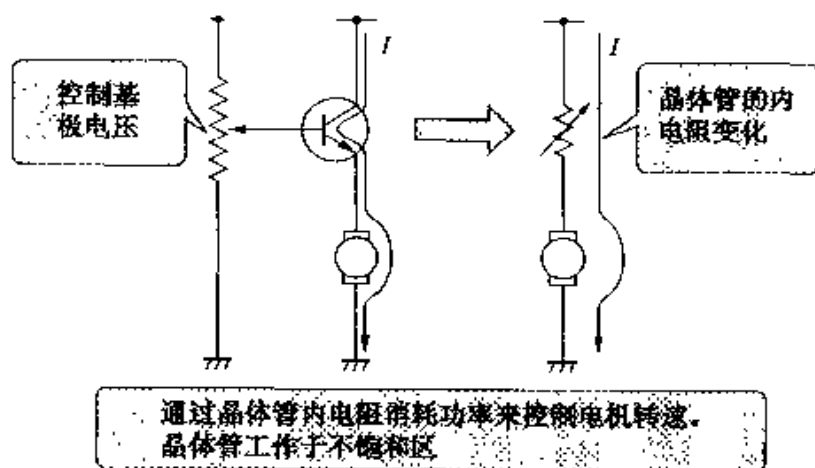


图 5.24 线性控制方式的原理

功率损耗

焦耳热

体三极管产生的功率损耗将变成焦耳热而消耗掉,使得线性控制方式的效率很低,是一种不经济的控制方法。可用于额定功率为数瓦的小电机的控制电路。

占空比

饱和状态

**PWM 控制方式** PWM(pulse width modulation)控制方式的原理如图 5.25 所示。PWM 控制是脉冲控制方式的一种。晶体三极管作为一个开关,使加到电机上的电压的 ON 与 OFF 的时间比(占空比,duty ratio)发生变化,从而控制电机电压的平均值。由于三极管工作于饱和状态,几乎不消耗功率,因此 PWM 控制方式具有良好的经济性。但由于电机供电电压处于开关状态,因此会导致噪声、振动以及电刷、换向器损伤等问题出现;这些问题从控制技术上已经逐步得到解决。PWM 控制方式已经成为现代直流电机控制技术的上流。

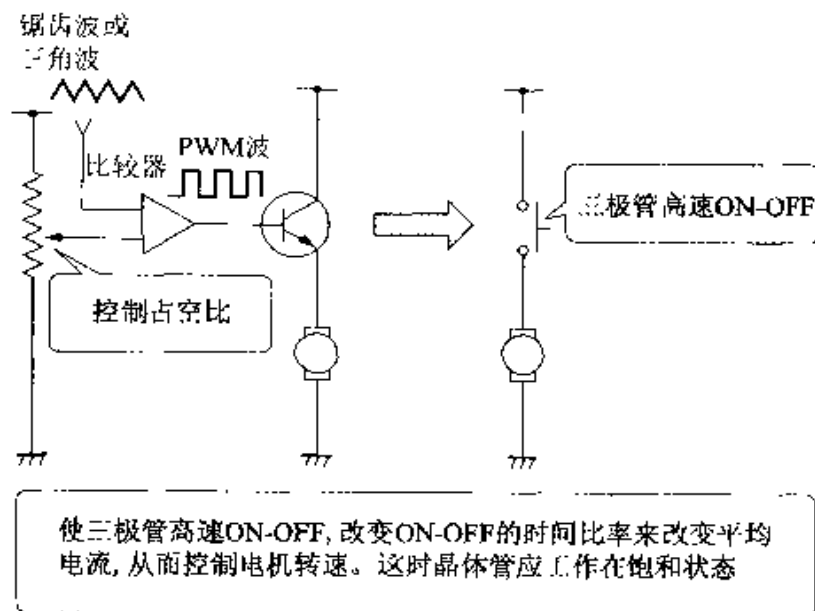


图 5.25 PWM 控制方式

## □ 相关知识 ● PWM 控制的开关频率

提高开关频率可以减小噪声,并实现电机的高速、高精度驱动。晶体三极管的开关频率在 1~10kHz 范围内,而使用 FET 或 IGBT 时,开关频率可提高到数十千赫。

# 10 直流电机的线性控制电路举例

## 要 点

采用直流电机线性控制电路,由于电机运转时的电流波形不变,因此对电刷、换向器的影响很小,可以做到平滑运转。实用上,为了增加直流电机的转速稳定性,多采用闭环控制方式。

## 解 释

### ● 线性控制时的转速稳定性

转速传感器  
闭环控制方式

采用直流电机线性控制方式时,为了使电机平滑运转,常使用转速传感器构成闭环控制方式来保持电机转速的稳定。由于线性控制电路的晶体三极管工作于线性段,效率很低,因此主要用于额定功率为数瓦的小电机控制。

图 5.26 所示的是几种线性控制的直流电机转速稳定电路。

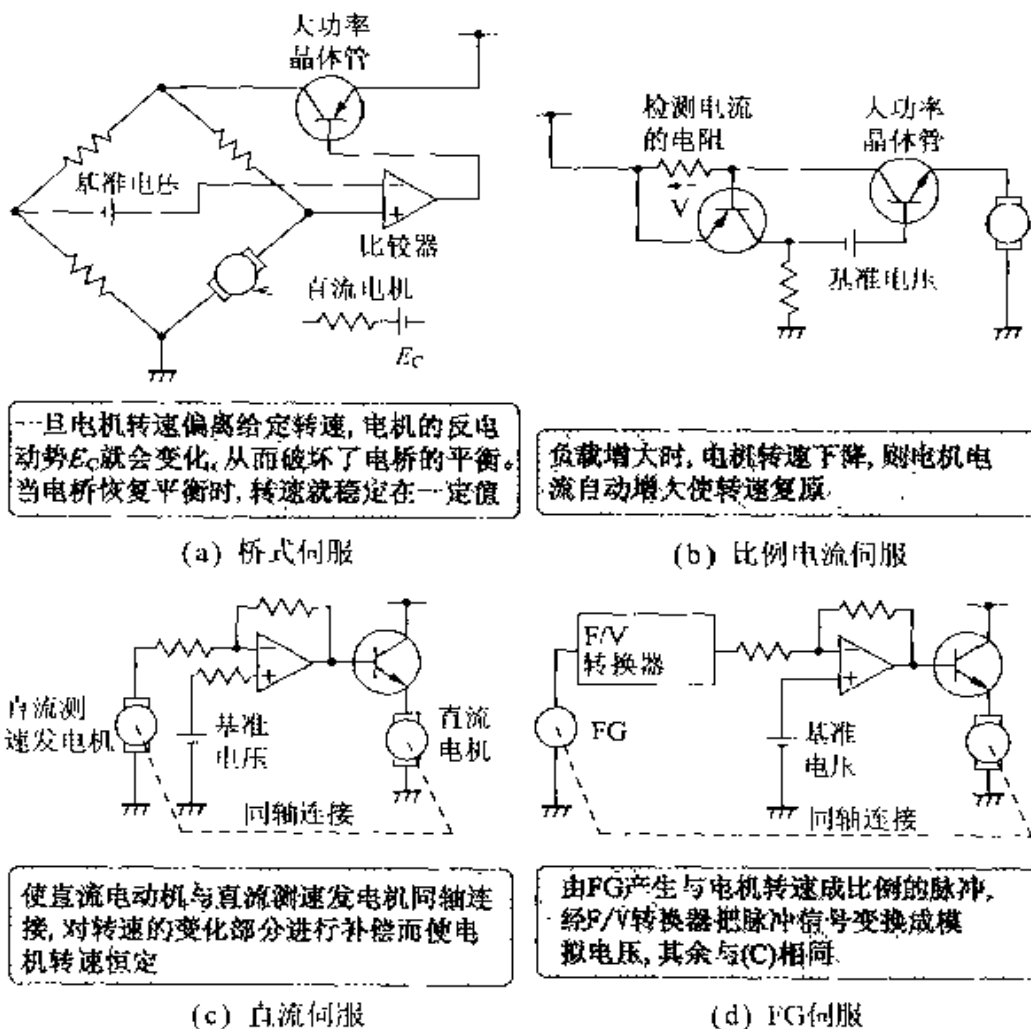


图 5.26 线性控制的直流电机转速稳定电路

根据转速检测方法的不同,反馈控制电路可作如下分类:

① 桥式伺服控制 检测直流电机旋转时产生的反电动势(与转速成比例)

② 比例电流伺服控制 由电阻检测直流电机的电流值。

③ 直流伺服控制 检测直流测速发电机(基本构造与直流电机相同)输出的与转速成比例的电压。

④ FG 伺服控制 由 FG(frequency generator)(频率发生器)或旋转编码器(rotary encoder)检测频率(与电机转速成比例)。

①和②不需要特别的转速传感器,主要用于纸带记录仪等低频仪器。③和④大多用于对转速稳定性要求很高的机器人和数控机床等机械系统的控制。

### ● 直流伺服电路举例

图 5.27 所示为一个直流伺服电路例子。图中使用了直流电机(马布其 RE280)来代替直流测速发电机。采用运算放大器构成比较电路,对设定电压与来自直流测速发电机的反馈电压进行比较。实验时,用示波器观察直流测速发电机的输出电压波形,同时需要调节滤波器的时间常数

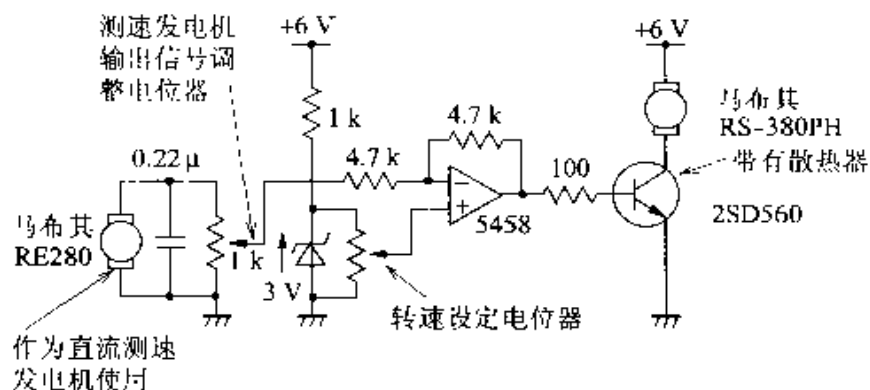


图 5.27 直流伺服电路例

## □ 相关知识 ● 旋转编码器

### 转速传感器

发光二极管和光电三极管组合起来就构成了一个转速传感器。由于其输出为数字信号,不仅可以很容易地测得转速,而且也可以很容易地测得旋转角位移(位置信息),适用于速度控制和位置控制同时进行的场合。

# 11 直流电机的 PWM 控制电路举例

## 主要点

当需要对电机转速进行控制同时又要求正、反转运行时,常采用 PWM 控制。由于 PWM 控制需要高速开关,常使用功率 MOSFET 作全桥连接。PWM 控制电路比较复杂,目前用于小型电机的控制电路已集成到一个专用 IC 芯片中,市场上很容易买到,因此使用起来十分便利。

## 解释 ● 直流电机 PWM 控制的原理

直流电机的 PWM 控制原理如图 5.28 所示。图 5.28(a)为利用 PWM 发生器来调节电机转速的方法,PWM 波形的占空比由输入的模拟电压控制。图 5.28(b)中,由微型计算机的 I/O 接口直接产生 PWM 信号,用该信号来驱动大功率晶体管的开关,从而控制直流电机的转速。在任何情况下,都需要设置续流二极管,以便在晶体管 OFF 期间电机电流能够继续流通而使电机平滑地旋转。PWM 控制时电机中将流过的平均电流与 PWM 波形的占空比成比例[如图 5.28(c)所示],改变占空比就可以控制电机的转速。

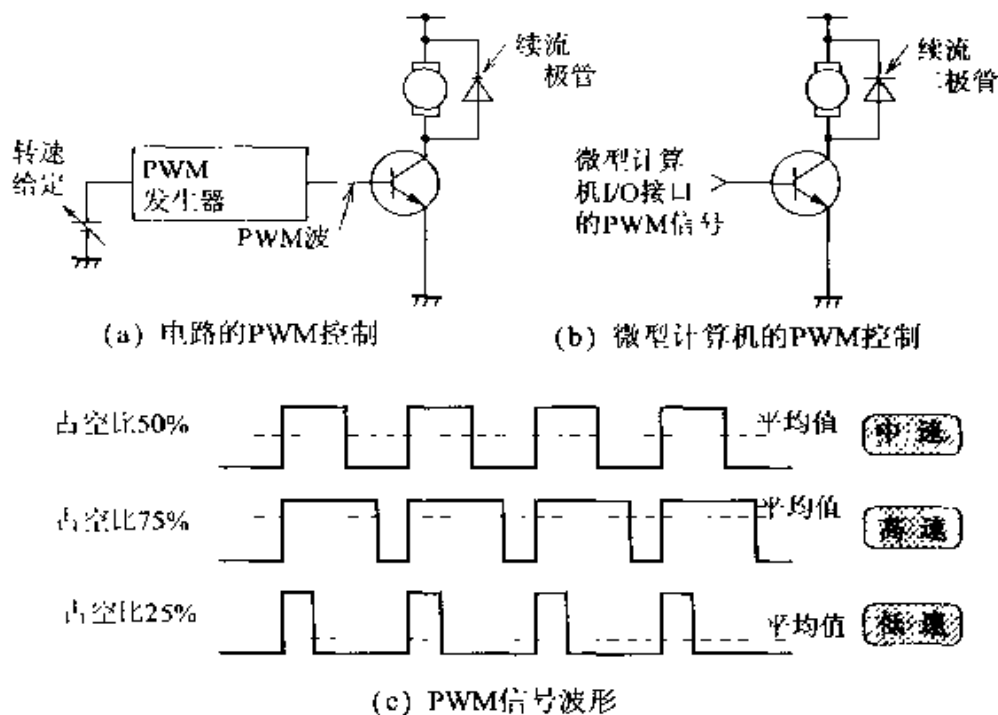


图 5.28 PWM 控制的原理

### ● 直流电机的 PWM 控制电路举例

#### PWM 发生器

图 5.28 所示为由 PWM 发生器产生 PWM 波来控制直流电机正、反转和转速一种电路,其中直流电动机为 CYLINOID,用来代替液压油缸。机电一体化技术中,电机的控制很少使用图 5.28 所示的单方向控制,一般情况下都是如图 5.29 所示,正、反转控制与转速控制。PWM 发生器中,由控制三极管 1S1588 的 ON 和 OFF 的时间来产生 PWM 信号,调节可变电阻器可以改变 PWM 信号的占空比。当占空比为 50% 时,电机停止,占空比接近 0% 时在 CW 方向高速运行,占空比接近 100% 时在 CCW 方向高速运行。

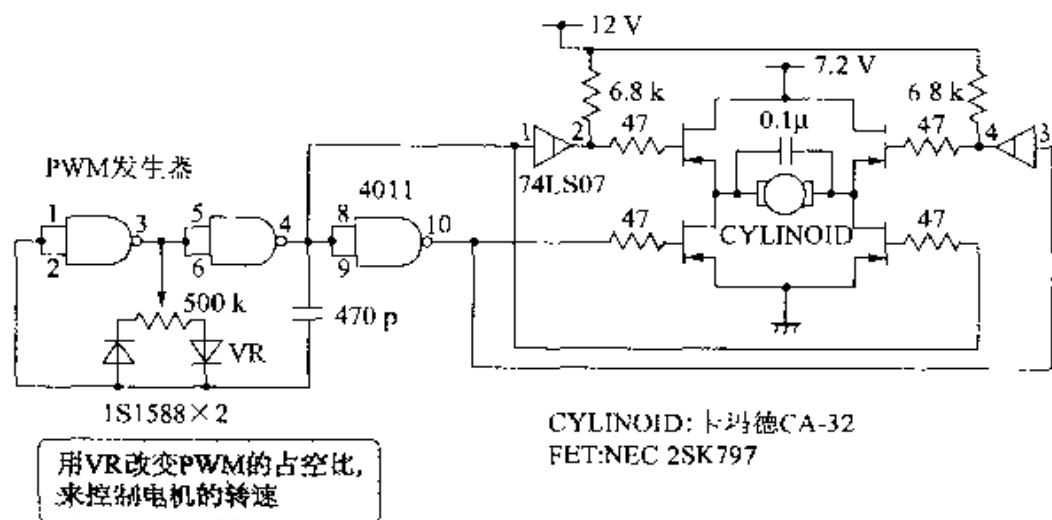


图 5.29 PWM 控制电路(1)

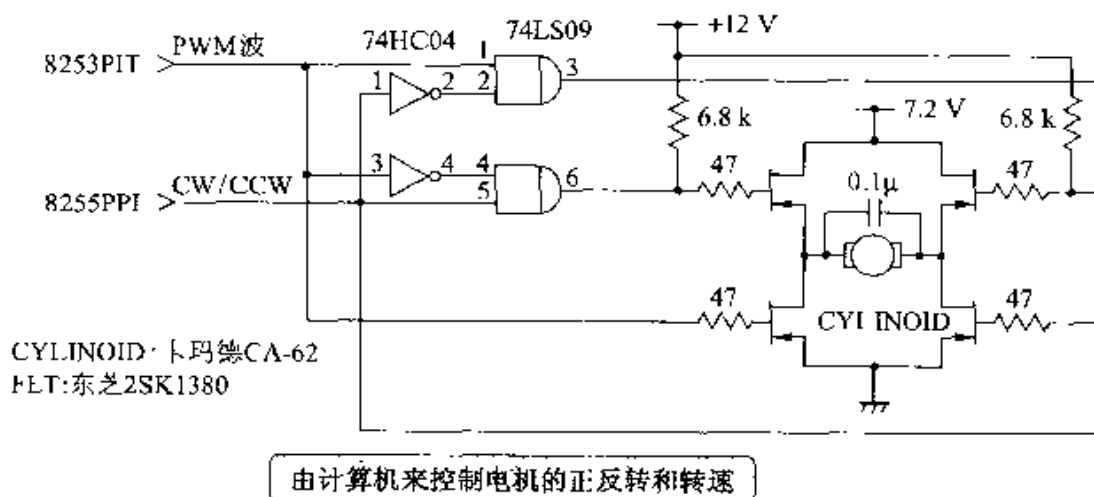


图 5.30 PWM 控制电路(2)

### 计数器/定时器用 LSI

图 5.30 为一种可同时实现直流电机正、反转控制和转速控制的电路。电路中同样采用了 CYLINOID, 该控制电路要与微型计算机组合起来使用。8253PIT 为计数器/定时器用 LSI(大规模集成电路), 具有按程序自动产生 PWM 信号的功能, 因而不会增加 CPU 的负担, 在机电一体化技术中是一个宝贵的接口电路。

图 5.31 为一个电流约 1A 的小型直流电机正、反转和转速控制电路, 也是一种与微型计算机组合起来的控制电路。在图 5.29 和图 5.30 所示的分离式电路中, 必须有脉冲分配电路和高速开关的偏置电路, 而图 5.31(2) 中的 TA8440H 可以把上述功能集中于一个 IC 芯片中, 使用起来十分方便。

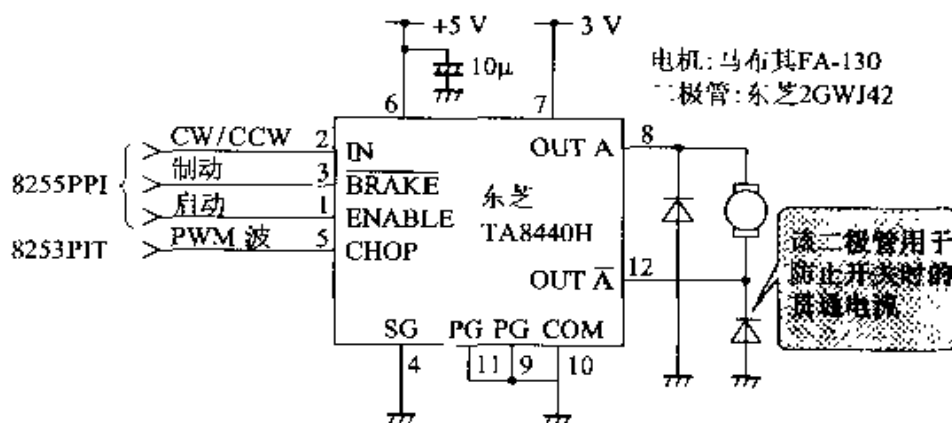


图 5.31 PWM 控制电路(3)

## 相关知识 ● 8253PIT

### 大规模集成接口电路

8253PIT 作为由微型计算机控制的 PWM 控制电路使用起来十分方便, 是一种高性能的大规模集成接口电路。在 3 个通道中设置了 16 位计数器。由于 3 个通道彼此独立, 根据电路的结构可以用于三台直流电机的 PWM 控制。

### ● 直流电机的 PWM 开关频率

在工业用直流伺服控制的场合, PWM 开关频率的范围一般为数千赫~20kHz。频率高低的选择应以开关器件的噪声小为原则。由于马布其公司生产的 RS540 系列直流电机的响应较差, 不适合用于过高频率下的开关状态, 一般在数百至一千赫较为适宜。

### ● 单片微型计算机的应用

把 PWM 控制电路与微型计算机组合起来用于机械系统控制时, 若采用具有 PWM 信号产生功能的单片微型计算机, 可以简化电路结构。



## 12 直流电机的正转、反转控制电路

### □ 要 点

在进行点位控制时,电机的正、反转控制技术是不可缺少的。直流电机具有良好的控制性能,也容易实现正、反转控制。直流电机的正、反转控制电路有单电源方式和双电源方式两种。目前,用于点位控制时,常用的是 PWM 开关型单电源方式的正、反转控制电路。

### □ 解 释 ● 正、反转控制电路的构成

直流电机

电机的正、反转电路对于点位控制来说是十分必要的,而由于直流电机的控制性能优越,特别适合用于点位控制。为了实现直流电机的正、反转运行,只需要改变电机电源电压的极性。为此,有双电源方式和单电源方式两种,下面分别加以介绍。

半桥方式  
互补型晶体三  
极管

**双电源方式** 如图 5.32 所示,用于切换电机电压极性的两只晶体三极管分别为 npn 型( $Q_1$ )和 pnp 型( $Q_2$ )。这种切换方式也称为半桥方式。为使正、反转动作特性在电气上完全相同,采用了互补型晶体三极管。

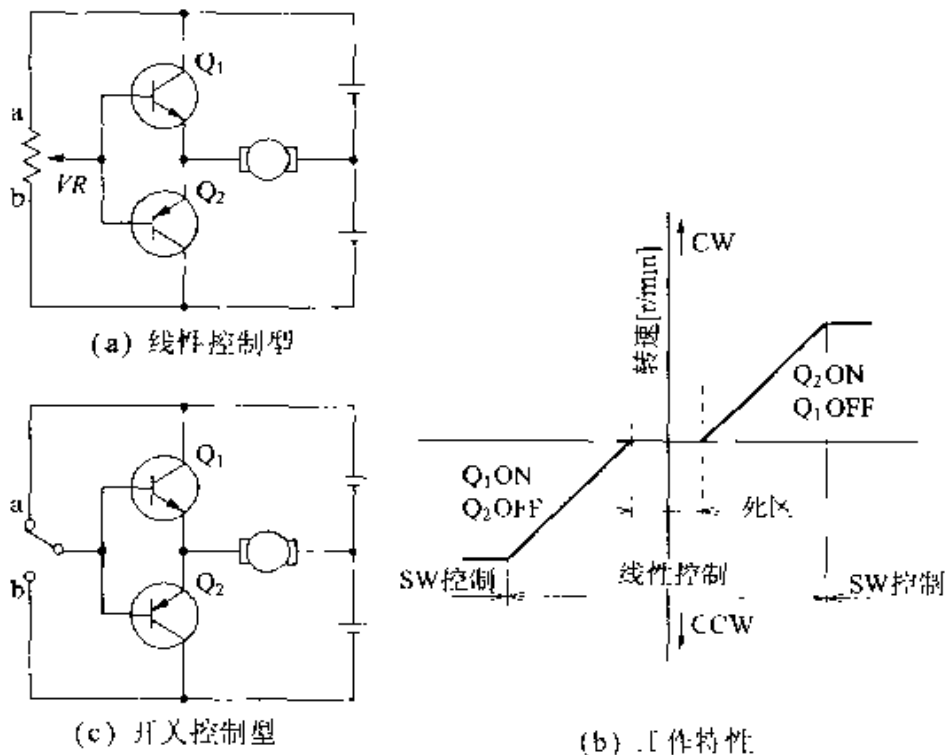


图 5.32 双电源方式的正反转电路

线性控制型  
线性段

图 5.32(a)为线性控制型正反转控制电路。由于晶体三极管  $Q_1$  和  $Q_2$  工作在线性段,当调节可变电阻 VR 时,正的或负的模拟电压使晶体三极管的基极电位增减,就可以使电机在正、反转动作的同时实现转速控制。图 5.32(b)所示为线性控制型正、反转控制电路的工作特性。首先,VR 在偏向 a 的方向时,晶体三极管  $Q_1$  导通,电机正方向(CW)旋转。而 VR 在偏向 b 的方向时,晶体三极管  $Q_2$  导通,电机反向(CCW)旋转。VR 位于 ab 的中点时, $Q_1$ 、 $Q_2$  均关断,这时电机停止运行。如图 5.32(b)所示,在 VR 的中点附近,电机不工作的区域称为死区。由于线性控制方式时晶体三极管工作在线性段,因此工作效率较低,主要适用于小型电机控制。

死区

开关控制型  
饱和段

图 5.32(c)所示的电路称为开关控制型正、反转控制电路。在这个电路中,使晶体三极管工作于特性的饱和段,即作为开关来工作,可以用作电机的正、反转控制,工作效率较高。但该电路不能实现转速控制。

全桥方式  
H 桥方式

**单电源方式** 如图 5.33 所示,采用四只晶体三极管来切换电机端电压的极性。单电源方式又称为全桥方式或 H 桥方式。在图 5.33(b)中,电机正转时晶体三极管  $Q_1$  和  $Q_4$  导通,反转时  $Q_2$  和  $Q_3$  导通,两种情况下,加于电机的电压极性相反。当四个晶体三极管全部关断时,电机停转(自由状态)。若使  $Q_1$  与  $Q_3$  关断而  $Q_2$  与  $Q_4$  同时导通时,电机处于短路制动状态,将瞬时停止转动。

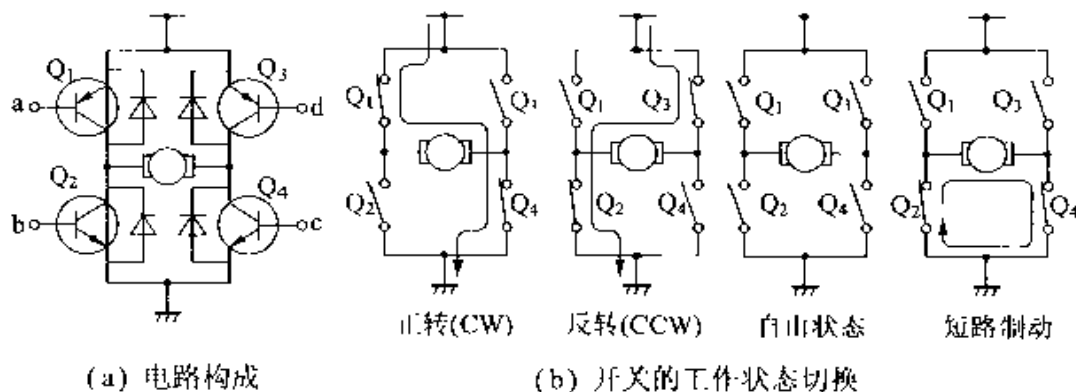


图 5.33 单电源方式的正、反转电路

短路制动

单电源方式一般应用于数字控制。这种电路与微型计算机组合起来可实现电机转速的开关控制(PWM 控制)和短路制动。由于开关控制的工作效率很高,因此可以用于大功率电机的控制。

● 双电源方式的正、反转电路举例

图 5.34 为使用晶体三极管的双电源方式正、反转控制的实用

### 驱动级三极管 达林顿方式

电路。大功率晶体管 2SD880 和 2SB834 为互补型晶体三极管,它们与驱动级三极管 2SC1815 和 2SA1015 连接成达林顿方式,以增大其电流放大倍数。

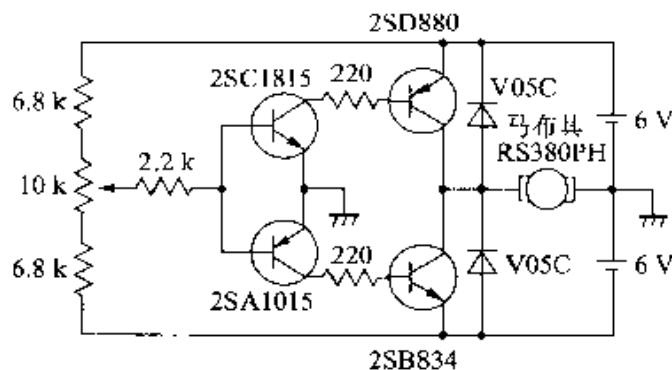


图 5.34 双电源方式的实用电路实例

### 分压器

图 5.35 所示为一种使用伺服放大器的双电源式位置伺服控制电路。用可变电阻器作为分压器,使电阻值与旋转角度成比例变化。当可变电阻器与电机轴的旋转连动时,就可以确定转子旋转位置。当电机旋转到位置指令 VR 所指定的位置时,伺服放大器的输入电压为零,电机停止转动。由于伺服放大器的输入阻抗非常大,采用这种分压器最为合适。

### 输入阻抗

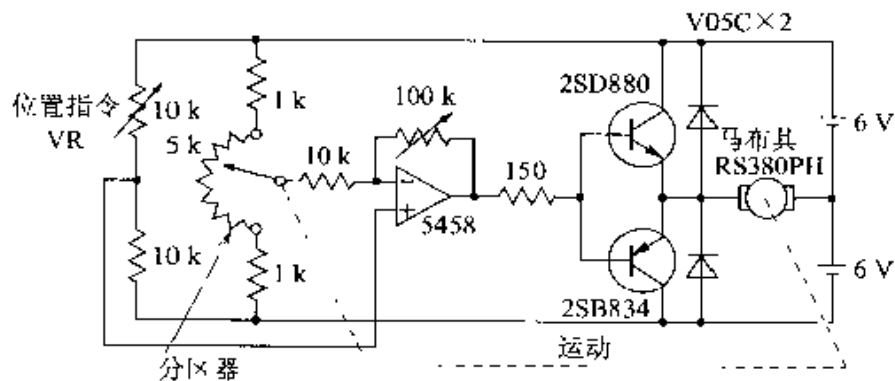


图 5.35 位置伺服控制(双电源方式)

### ● 单电源方式的正、反转控制电路举例

图 5.36 所示为一种使用功率 MOSFET 的单电源方式正、反转控制电路。该电路由微型计算机控制,与无线电设备中使用的功率放大器具有大致相同的性能。图中所示的功率 MOSFET 可

高位开关  
寄生二极管  
外接续流  
二极管

以用逻辑电平直接驱动,也可以与微型计算机的接口电路 LSI 直接连接。为了使高位开关(上侧的 MOSFET)完全饱和,需要由 74LS06 来提高电平。由于功率 MOSFET 内部的漏极和源极之间设置了寄生二极管,因此不需要外接续流二极管,电路比较简单。

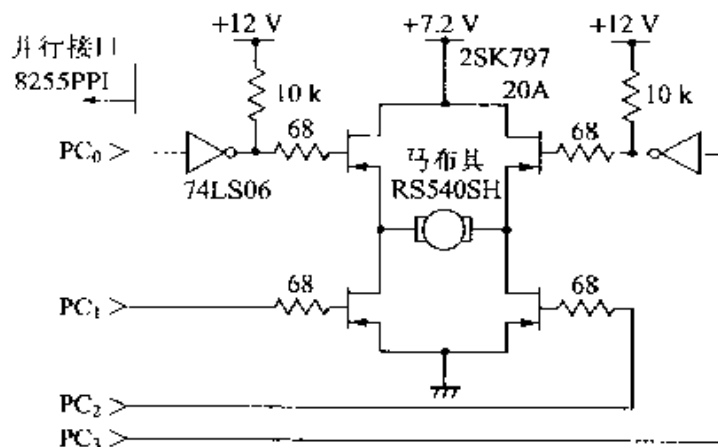


图 5.36 单电源方式的实用电路(1)

光电耦合器

图 5.37 所示为一种使用了光电耦合器和功率 MOSFET 的单电源方式正、反转控制电路。为了防止直流电机产生的噪声影响到逻辑电路一侧,采用了光电耦合器。在机电一体化技术中,光电耦合电路是重要的接口电路。从 I/O 接口输入的信号由 74HC00 和 74HC08 进行分配。与此同时可以控制上下相对的两个晶体管同时导通,又可以防止上下同侧的晶体管同时导通,以避免电源短

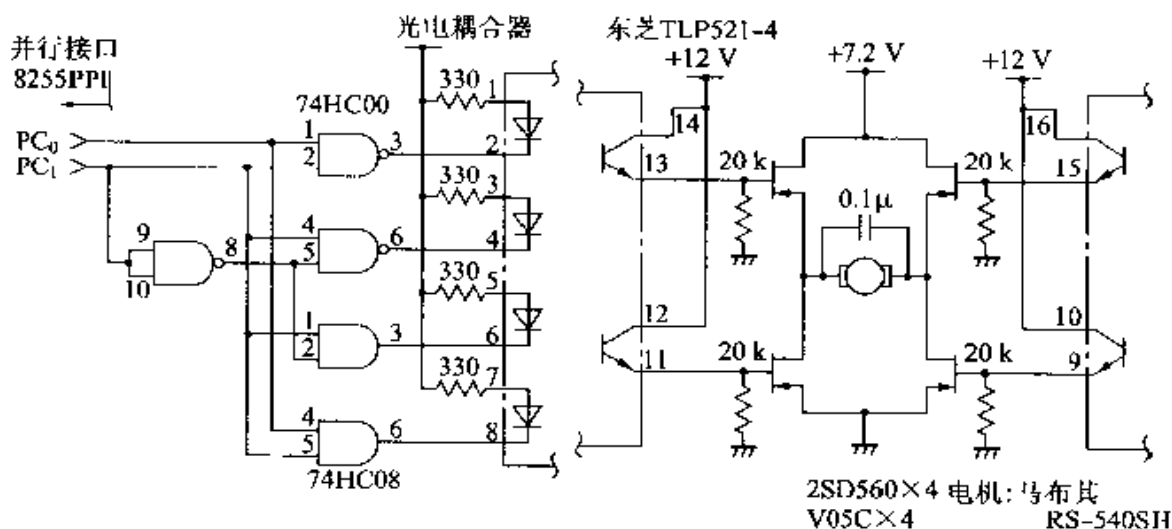


图 5.37 单电源方式的实用电路(2)

路。根据从并行接口 8255PPI 的 PC<sub>1</sub> 端输入的驱动脉冲和从 PC<sub>2</sub> 端输入的正、反转信号,可以进行正转、反转及自由状态等一种运行状态的控制。如果 PC<sub>1</sub> 端输入的是 PWM 信号,还可以对电机的转速进行控制。

图 5.38 所示为一种采用正、反转控制专用 IC 的电路。这种 IC 可以用一片芯片同时控制两台直流电机,运行功能表中给出了可以实现的正转、反转、自由状态以及制动等四种功能。控制电流最大为 1A。由于把小型直流电机的控制电路集成于一块 IC 中,因此使用起来十分便利。

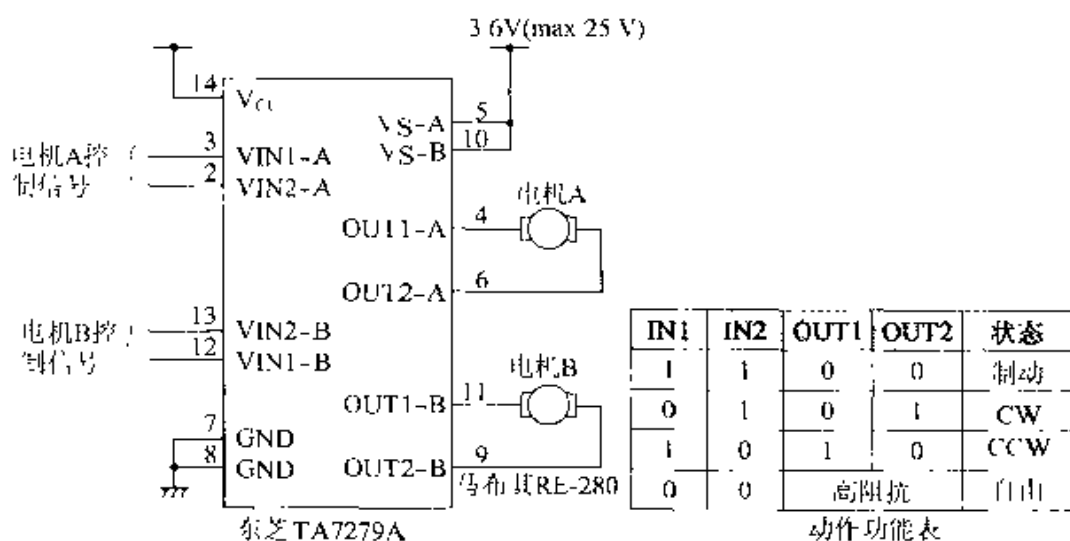


图 5.38 使用专用 IC 的实用电路例

下面以相扑机器人为例来讨论上述电机控制电路的应用。对于相扑机器人来说,必须有前进、后退、回转及制动等动作,因此最适合于对直流电机控制电路的学习。

对于重视速度和转矩的小型相扑机器人,选用功率较大的 RS510 系列直流电机比较适宜。大功率晶体三极管或功率 MOSFET 一般接成图 5.36 和图 5.37 所示的单电源方式桥式电路。由于电机的电流较小,可使用专用 IC。此外,大功率半导体器件必须加装散热器。

# 13 螺线管的控制电路

要

点

所谓螺线管是使可动铁芯在电磁线圈中作直线运动的一种执行装置。作为一种微动执行装置,在机电一体化技术中是不可缺少的,一般可分为 AC(交流)型和 DC(直流)型两类。

解

释

## ● 螺线管的工作原理

螺线管也称为电磁铁,是一种电磁铁式的执行装置。螺线管从电源吸收电能并对线圈励磁,使可动铁芯受力并转换成微小的直线运动。利用简单的电路就可以控制这种微小的直线运动。由于螺线管的响应速度快,大多应用于液压、气压系统的电磁阀及各种小型机械的直线运动机构中。

在顺序控制中,表示螺线管的符号为 SOL。螺线管的结构与工作原理如图 5.39 所示。可动铁芯的直线位移量称为行程。

电磁铁

电磁阀

直线运动机构

行程

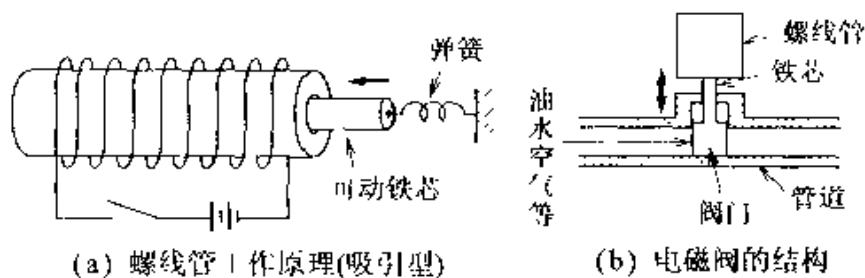


图 5.39 螺线管的原理与结构

## ● 螺线管的分类

根据工作电源的不同,螺线管可分为以下两类:

① AC(交流)螺线管 响应速度快(1~5ms)容量较大,常用于 ON-OFF 控制。

② DC(直流)螺线管 与 AC 螺线管相比 DC 螺线管的响应速度较慢,但可以实现铁芯位置的模拟控制,体积小重量轻。

根据可动部分的结构,螺线管又可分为以下三类:

① 推进(push)型 工作时将可动铁芯推出。

② 吸引(pull)型 工作时将可动铁芯吸入。

③ 推进-吸引(push-pull)型 工作时可动铁芯在螺线管内可实现推出或吸入两种动作。

## ● 螺线管的吸引力特性

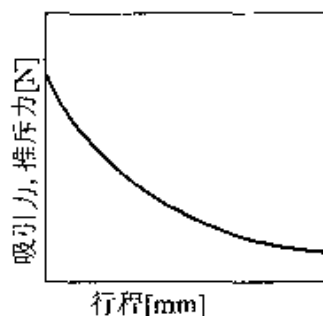
图 5.40 所示为螺线管的吸引力与行程之间的关系曲线。由

铁芯位置

吸引力

排斥力

于吸引力(或排斥力)与行程的平方成比例的关系,所以螺线管不能用于行程较长的场合。



吸引力或排斥力与行程的平方成比例

图 5.40 螺线管的吸引力特性

### ● 螺线管的驱动电路举例

图 5.41 所示是一种直流(DC)螺线管的驱动电路例子。图中续流二极管的作用足,当晶体三极管关断时,将线圈的反电动势短路,从而对晶体三极管起到保护作用。

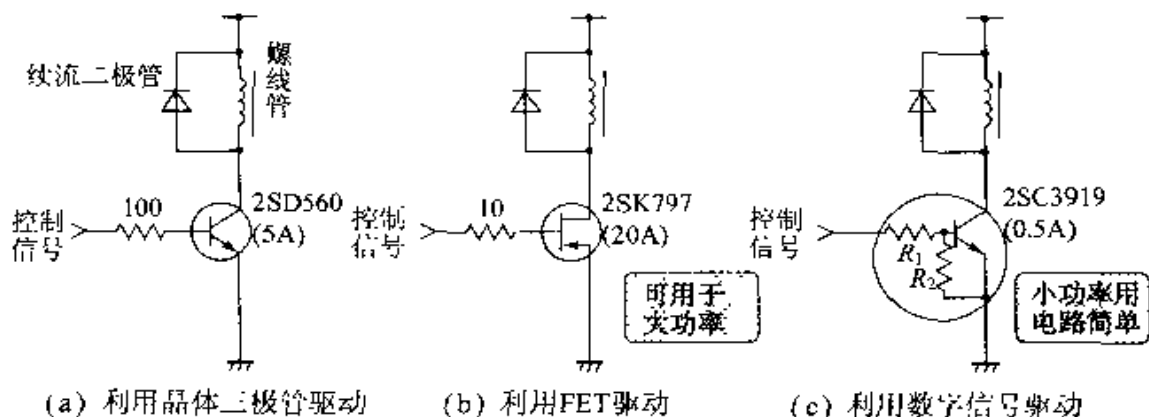


图 5.41 直流螺线管的驱动电路

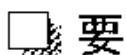
## □ 相关知识 ● 旋转螺线管

作微小旋转运动的螺线管,其旋转角度固定,但可获得很大的力矩。旋转螺线管的工作原理与普通螺线管相同。

### ● 其它用于微小驱动的执行装置

音圈电机(voice coil motor)、力矩电机(torque motor)、压电执行装置(piezo electric actuator)等作为用于微小驱动的执行装置正在逐渐得到实际应用。

# 14 交流伺服驱动



要

点

交流伺服电机的最大优点是免维护。特别是无刷直流电机，继承了有刷直流电机优良的控制性能，在机电一体化中是一种最为理想的电机。



解

释

## ● 免维护的 AC 伺服电机

工业机器人和数控机床中使用的伺服电机，传统上一一直采用直流(DC)伺服电机，目前正逐渐被交流(AC)伺服电机所取代。交流伺服电机中没有直流伺服电机的机械接触部分(电刷、换向器)，因此可以实现免维护。

机械接触部分

## ● 交流伺服电机的种类

典型的 AC 伺服电机有以下三种，其结构如图 5.42 所示。

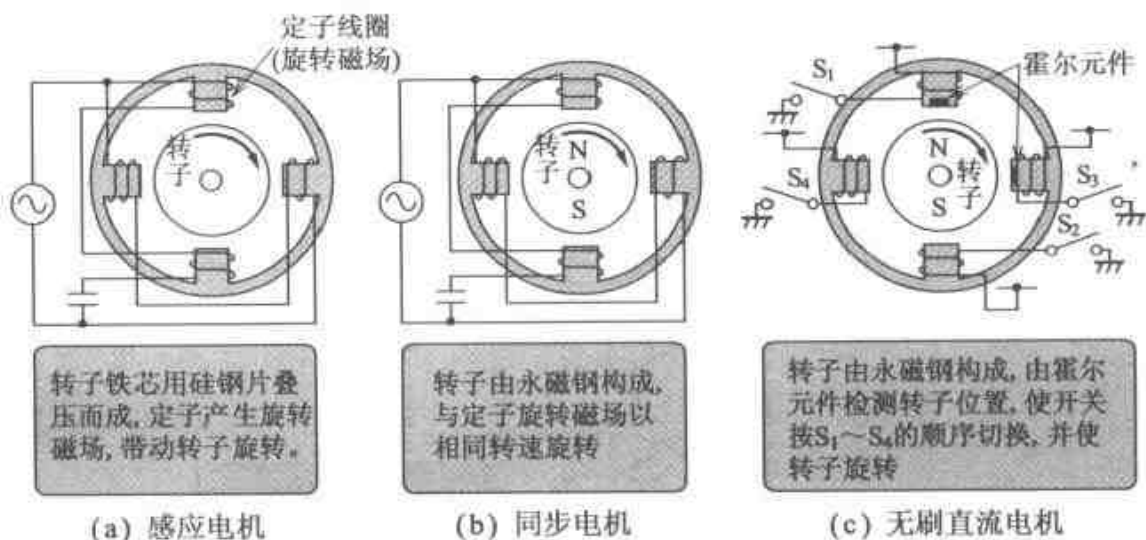


图 5.42 AC 伺服电机的种类与结构

惯性

**感应电机(induction motor)** 感应电机的定子和转子均由铁芯线圈构成，可分为单相电机或三相电机。转子铁芯用硅钢片叠压而成，由定子产生的旋转磁场带动转子旋转。定子线圈称为一次线圈，转子线圈称为二次线圈。由于转子的重量轻、惯性小，因此响应速度非常快，主要应用于中等功率以上的伺服系统。

**同步电机(synchronous motor)** 同步电机的转子由永久磁钢构成磁极，定子与感应电机一样由铁芯线圈构成，可分为单相同步电机和三相同步电机两种。这种永磁同步电机可以做得很小，因



此响应速度很快,主要应用于中功率以下的工业机器人和数控机床等伺服系统。

**无刷直流电机 (brushless DC motor)** 直流电机的控制性能优良,但由于存在机械接触部分(电刷、换向器),影响了直流电机的使用寿命,同时也存在噪声等问题。无刷直流电机如图 5.42(c)所示,由霍尔元件或旋转编码器等构成的位置传感器和逆变器(inverter)取代了直流电机的电刷和换向器部分。无刷直流电机具有与普通直流电机相同的特性,并且不需要维护,噪声小。由于转子的转动惯性很小,所以快速响应性能好。转子磁极采用永久磁钢,没有励磁损耗,提高了电机的效率,可用于电子电路的冷却轴流风扇电机、防爆电机以及各种伺服系统。

霍尔元件  
旋转编码器  
逆变器

### ● 无刷直流电机的控制电路举例

图 5.43 所示为一种无刷直流电机的控制电路,由霍尔元件和晶体三极管构成了逆变器电路。

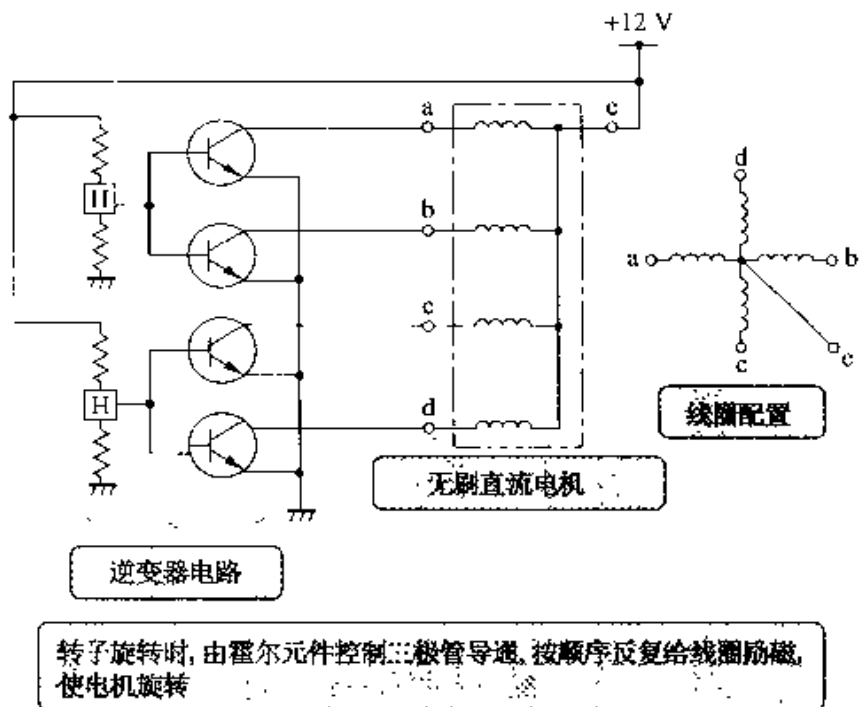


图 5.43 无刷直流电机的控制电路

### □ 相关知识 ● 逆变器

DC/AC 变换器  
整流器  
AC/AC 变换器

逆变器(inverter)的原意为 DC/AC 变换器。一般情况下,逆变器与整流器(AC/DC 变换器)组合起来构成 AC/AC 变频器(工频电源频率变换电路),或者是在 AC 伺服电机调速电路中使用。

# 15 什么是液压执行装置

**要 点** 所谓液压执行装置,就是把液压能量转换成直线、旋转或摆动运动的机械能,从而带动机械做功的装置。

**解 释** ● **液压执行装置的使用特点**

液压执行装置的使用特点如下:

- ① 由于工作压力高,所以装置可以实现小型化。
- ② 由于以油为工作介质,所以装置的润滑性和防锈性能好。
- ③ 通过控制流量,可以很容易地改变速度。
- ④ 利用换向控制,可以很容易地变换运动方向。
- ⑤ 通过压力控制,可以实现力的无级控制。

● **种 类**

液压执行装置主要有以下几类:把液压能量转换成直线运动的液压缸(如图 5.44 所示);把液压能量转换成连续旋转运动的液压马达(如图 5.45 所示)和把液压能量转换成摆动运动的摆动马达等。

液压缸  
液压马达  
摆动马达



图 5.44 液压缸



图 5.45 液压马达

● **主要用途**

液压执行装置广泛应用于机床、成形机械、机器人、工程车辆、露天游乐场、建筑机械以及农业机械等。

**相关知识** ● **帕斯卡原理**

帕斯卡原理如图 5.46 所示。加于密闭容器内液体任一部分的压强将按照其原来的大小由液体向各个方向传递,压力垂直作用于容器的表面上。

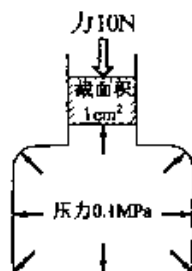


图 5.46 帕斯卡原理

### 例 题

图 5.47 中,在直径为 10cm 的小活塞上施加 200N 的力  $F_1$ ,这时直径为 25cm 的大活塞上的作用力  $F_2$  是多少? 当小活塞向下移动 5cm 时,问大活塞向上移动多少厘米?

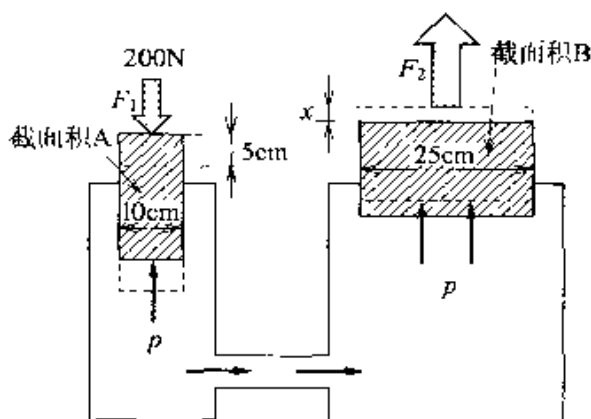


图 5.47

答

根据帕斯卡原理,作用在小活塞上的压强为

$$p = \frac{F_1}{A}$$

将有同样大小的压强作用到大活塞上,即

$$\frac{F_1}{A} = \frac{F_2}{B}$$

则作用于大活塞上的作用力  $F_2$  为

$$F_2 = \frac{F_1 B}{A} = \frac{200 \times \frac{\pi}{4} \times 25^2}{\frac{\pi}{4} \times 10^2} = 1250 \text{ [N]}$$

当小活塞移动距离  $l=5\text{cm}$  时,大活塞的移动量  $x$  为

$$x = \frac{A \cdot l}{B} = \frac{\frac{\pi}{4} \times 10^2 \times 5}{\frac{\pi}{4} \times 25^2} = 0.8 \text{ [cm]}$$

### 选修知识 关于液压的 JIS 标准

在 JIS 中,关于液压的术语和图形符号制定了如下两个标准,目前已颁布执行:

① JIS B 0125-1984《液压与气动图形符号》

② JIS B 0142-1984《液压与气动名词术语》

# 16 液压执行装置的工作原理

## □ 要 点

若以驱动机械为主要对象实现液压系统的控制,被控机械的功能和控制方法,可以分为若干种。

按液压执行装置的运动分类有:

① 向液压缸内供给压力油,使活塞往复运动,通过活塞杆将活塞上的力传到外部,作为执行装置的输出。

② 向机体的油腔内供给压缩油,推动叶轮旋转而实现旋转运动的执行装置。

## □ 解 释

### ● 液压执行装置的特点

液压执行装置的主要特点是能够将液体能量简便地转换为运动的机械能,输出功率大也是液压执行装置的重要特点。

液压执行装置的应用范围很广。因为液压系统的操作简单,所以人们针对各种负荷条件在机械和油路等方面都做了大量的研究开发工作,使液压执行装置在很多工业领域中获得了广泛应用。

### ● 液压装置的构成

如图 5.48 所示,液压系统的工作过程就是将从液压泵获得压力能量的工作油输入液压缸或液压马达,从而把液压能量转换成机械能来驱动机械做功。液压传动装置的构成如下:

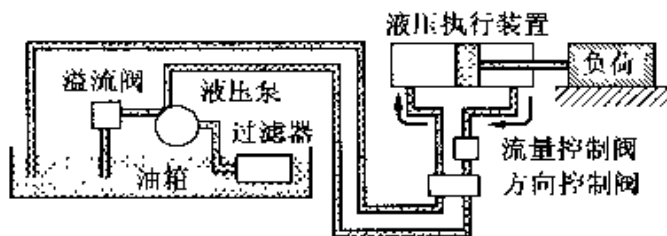


图 5.48 液压系统的构成

- ① 液压源 油箱、油泵、驱动电机、发动机。
- ② 控制阀 压力控制阀、方向控制阀、流量控制阀。
- ③ 液压执行装置 液压缸、液压马达、摆动液压马达。
- ④ 附属设备 管件、仪表、冷却器等。
- ⑤ 其它设备

### ● 液压的基本使用方法

图 5.48 所示为液压应用的基本回路,是一个简单的液压系统

的例子。此外,还有许多种液压元件,为了满足一定的控制要求,实际应用时可根据情况利用这些元件对上述系统进行适当配置。

### ● 液压缸的工作原理

液压缸(图 5.49 所示)是一种把表现为压力和流量的液压能量转换成直线运动能量的装置。根据其结构和功能,可以分成很多种类型。

液压缸由缸体及在缸体内滑动的活塞和活塞杆等构成,其工作原理如下:

① 高压油从 A 口进入缸体内并推动活塞,排油侧的油通过 B 口排出,这样在活塞上产生压力差,使活塞向前移动。

② 反之,如果从 B 口供油,从 A 口排油,则活塞将向后移动。

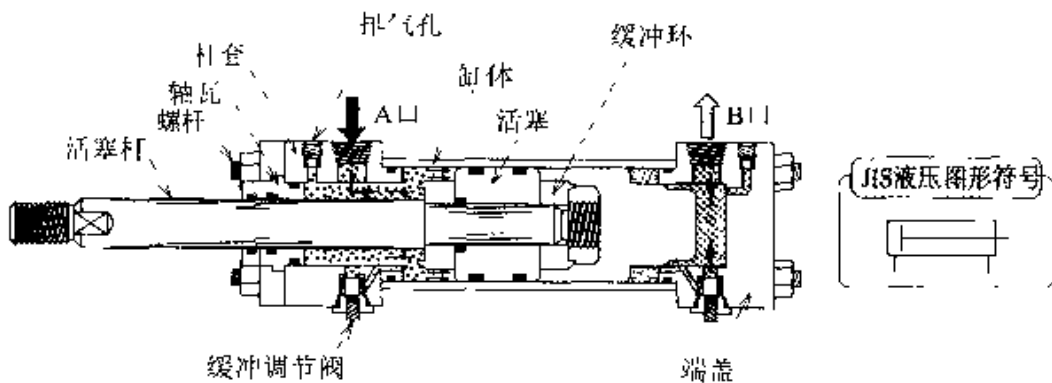


图 5.49 液压缸

### ● 液压马达的工作原理

液压马达是一种把表现为压力和流量的液压能量转换成表现为旋转运动和转矩的机械能量的装置。当液压马达的容量一定时,其转速由流量来决定,而转矩由压力来决定。液压马达有活塞式(图 5.50)和叶片式(图 5.51)等类型。径向活塞式液压马达的工作原理如下:

① 各活塞和曲轴通过连杆连接起来,与曲轴联接的旋转阀门把从 A 口进入的压力油依次供给各个活塞。

② 受液压驱动的活塞推动曲轴产生力矩。

③ 另一侧的 B 口为排油口。

④ 如果从 B 口供油,则液压马达反向旋转,此时 A 口变为排油口。

### ● 摆动式液压马达的工作原理

摆动式液压马达(图 5.52)是一种输出轴旋转角度受到限制

活塞式  
叶片式  
径向活塞式

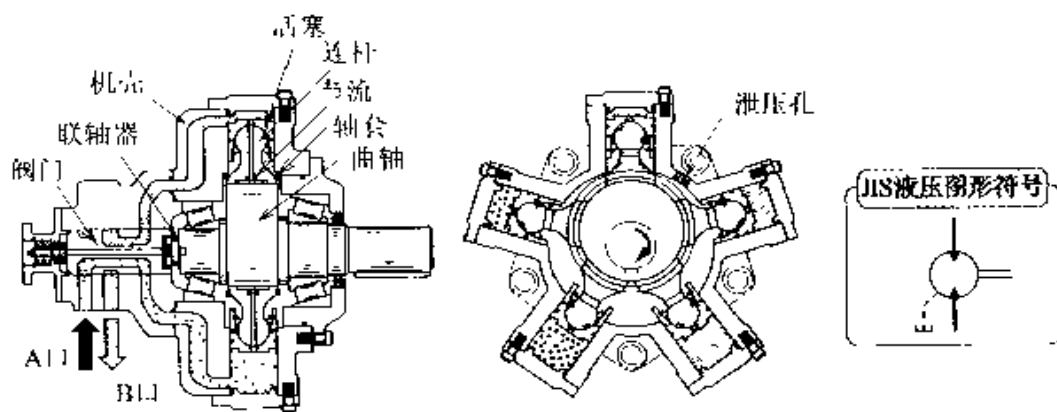


图 5.50 液压马达(径向活塞式)

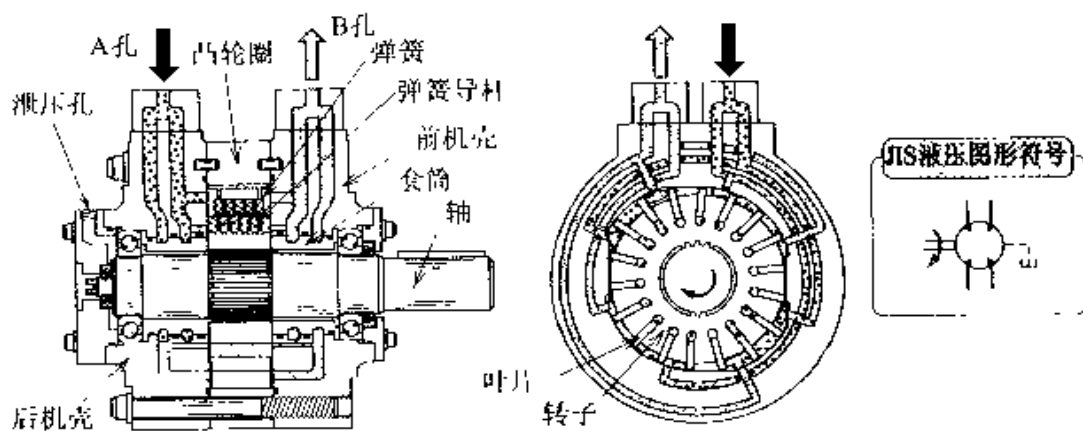


图 5.51 液压马达(叶片式)

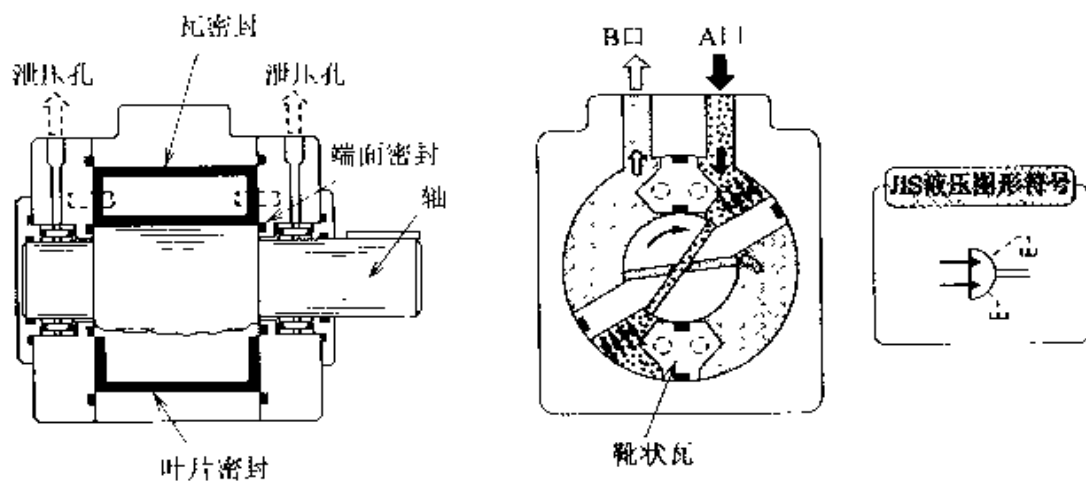


图 5.52 摆动式液压马达

的液压马达。摆动型液压马达由两个在机壳内滑动的叶片、与叶片固联的轴以及两块靴状瓦等构成,其工作原理如下:

① 当从 A 口供油时,通过转轴上的通路也同时向另一侧的室内供油。

② 排油腔内的油由 B 口排出,这时马达向顺时针方向旋转。

③ 当叶片碰到制动器时,马达停止转动。

④ 当从 B 口供油时, A 口为排油口,马达则逆时针旋转。

## □ 相关知识 ● 如何用液压缸获得更大的推力

为了在液压缸中获得更大的推力,可以采用增大缸体的面积,提高压力等多种方法。要提高速度则必须增大流量,而要获得大流量就必须使用大型液压泵和阀门等。因此,可以采用减小液压缸的面积而提高压力的方法。

## ■ 例 题

液压缸如图 5.53 所示,若工作油的流量  $Q_1$ 、 $Q_2$  均为  $1000\text{cm}^3/\text{s}$ ,活塞杆伸出的速度为多少? 活塞杆的缩回速度为多少?

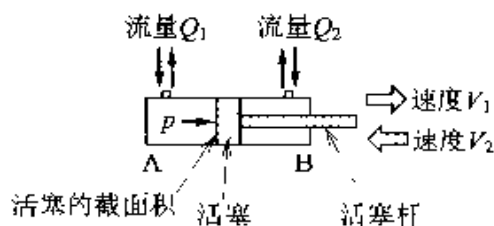


图 5.53 液压缸

答]

液压缸的速度 =  $\frac{\text{流入油量}}{\text{缸体的截面积}}$

活塞杆的伸出速度为

$$V_1 = \frac{Q_1}{A} = \frac{Q_1}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{1000}{\frac{\pi}{4} \times 4^2} = 79.6 \text{ [cm/s]}$$

活塞杆的缩回速度为

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{Q_2}{B} = \frac{Q_2}{\frac{\pi}{4} \times (D^2 - d^2)} = \frac{1000}{\frac{\pi}{4} \times (4^2 - 1.6^2)} \\ &= 94.8 \text{ [cm/s]} \end{aligned}$$

### 应用知识 住宅用电梯

近年来,住宅中应用的控制机械愈来愈多。由于住宅空间的增大、人口老龄化以及身体残疾等原因都会造成上下楼梯的不便,为此,住宅中也需要电梯。图 5.54 为一种以液压系统为驱动源的家用电梯。

### 研究课题 虚拟现实

具有虚拟现实感(假想现实感)的机械和装置在各领域受到了广泛关注。在各地的游乐场和主题公园的游艺机械上,设置能够虚拟体验的装置受到了游客的普遍欢迎。这些游览车和摇摆椅型、摇摆床型的虚拟体验装置(图 5.55)中也使用了液压执行装置。



图 5.54 家庭电梯用液压系统

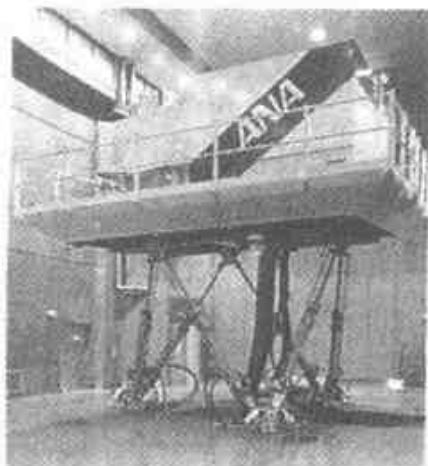


图 5.55 摇床型虚拟体验装置



## 17 液压伺服系统

### □ 要 点

液压伺服系统在飞机、船舶、军工等领域的应用由来已久。近年来,作为一种性的技术已广泛应用于工业机器人、主轴旋转控制、机床工作台进给以及各种试验装置等。

### □ 解 释

#### ● 伺服系统

反馈

伺服系统就是以机械的位置作为被控量,能跟随设定值的任意变化的自动控制系统。一般说来伺服系统是一个反馈闭环系统,把控制动作的结果与目标值相比较,并通过调节使二者趋于一致。根据输出位置的检测方法和系统内的放大、传递及输出形式等,伺服系统有很多种类型。

液体压力  
流量

一般情况下,由数毫瓦的微弱电气输入信号可以控制 20~30MPa 的液体压力和 4000L/min 的流量。

液压伺服系统的基本结构如图 5.36 所示。由液压马达、液压缸等执行装置和伺服阀门、位置传感器、伺服放大器等基本环节构成。

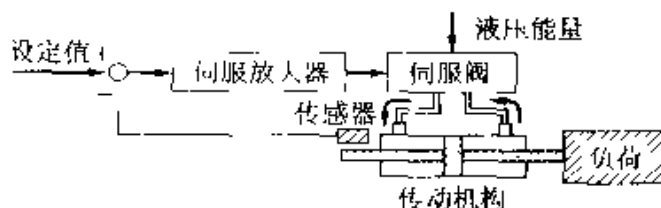


图 5.56 伺服系统的构成

#### ● 伺服阀的结构

力矩马达由上、下磁极、磁铁、线圈以及衔铁、喷嘴、挡板、控制弹簧等构成,如图 5.57 所示。图中加有喷嘴挡板的部分称为油压放大器。伺服阀的动作原理如下:

力矩马达

① 产生的力矩与线圈电流成比例,使衔铁发生如图 5.58 所示的位移。

② 由喷嘴、挡板机构将力矩马达变换的机械位移转换、放大成液压力。

③ 由喷嘴、挡板机构变换后的液压力传导到阀芯两端,根据这个液压力的变化阀芯发生位移,控制图 5.59 中的各油口的开闭。

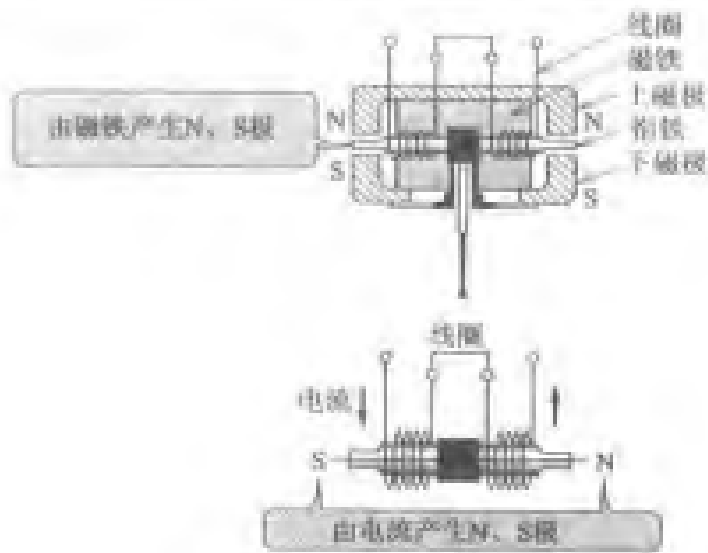


图 5.57 力矩马达的结构

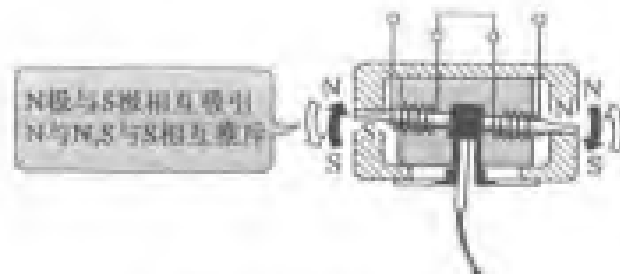


图 5.58 衔铁的动作

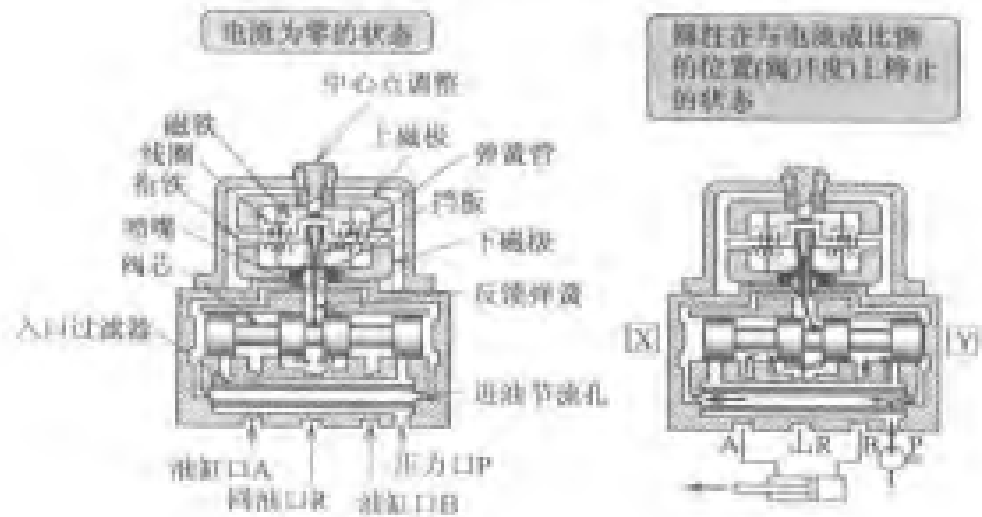


图 5.59 伺服阀的状态

## 相关知识 ● 波浪发生装置及其控制

波浪发生装置是一种在室内的水池或水路中产生与自然海域相似波浪的装置。这种装置可用于波浪对船体姿势的影响、排水状态、沙滩海岸的地形变化等方面的实验研究。由液压伺服驱动方式构成的不规则波浪发生装置如图 5.60 所示。

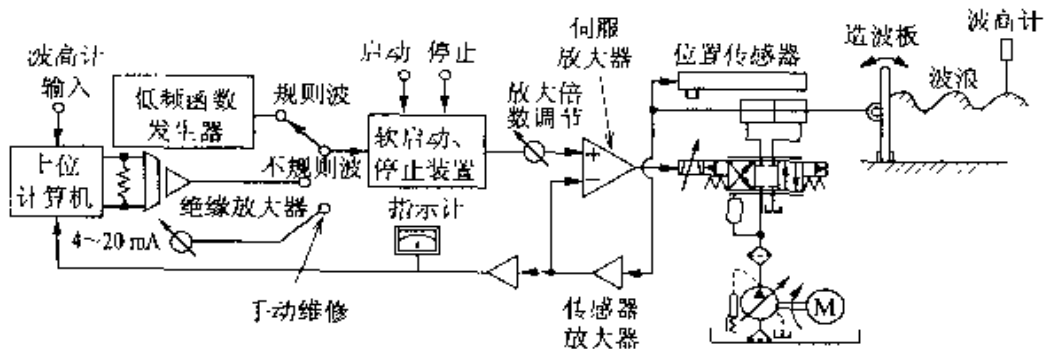


图 5.60 波浪发生装置控制举例

由液压泵供油使液压缸往复运动，驱动造波板并产生波浪。该装置采用反馈控制、利用伺服机构获得快速响应特性。

有些情况下不必使用复杂的伺服机构，可以采用较简单的驱动装置。例如“波浪游泳池”等也使用了液压执行装置。

## 应用知识 薄板的形状控制

压力传感器可以把压力变换成与之成比例的电压或电流信号输出。图 5.61 为一个压延轧辊凸面压力控制装置的示例。

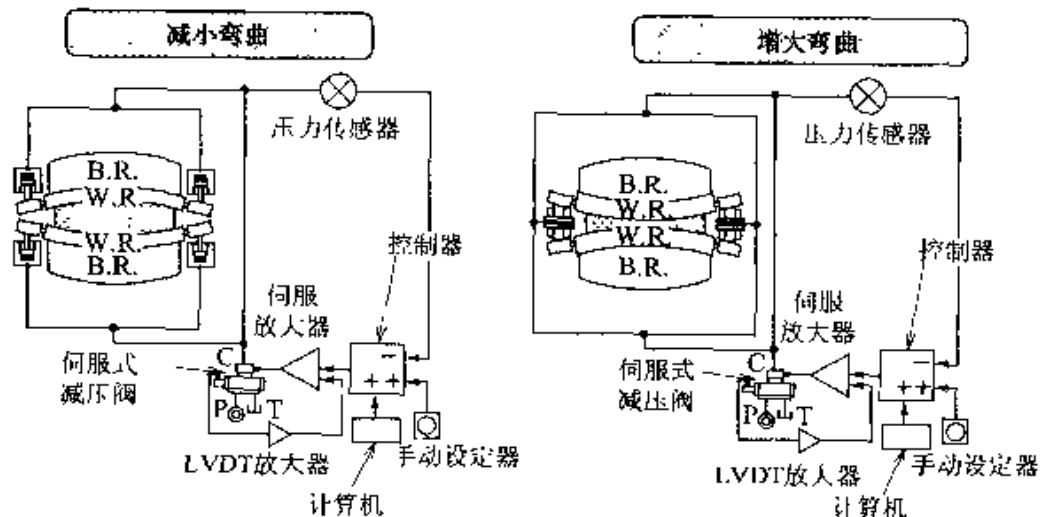
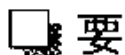


图 5.61 压延薄板的形状控制

# 18 什么是气动执行装置



要

点

所谓气动执行装置是指把压缩空气的能量转换成直线、旋转或摆动等运动来驱动机械做功的装置。



解

释

## ● 气动执行装置的特点

气动执行装置的特点如下:

- ① 地球上有限的清洁、安全的空气可供使用。
- ② 气动执行装置具有结构简单、体积小、价格便宜等特点。
- ③ 对使用环境无特殊要求。
- ④ 保养、维护简单。
- ⑤ 力和运动转换简单,容易构成系统。

## ● 种 类

在气动执行装置中,有把压缩空气的能量转换成直线运动的气缸(图 5.62),转换成旋转运动的气动马达和转换成摆动运动的摆动式气动执行装置(如图 5.63 所示)等。

气缸

气动马达

摆动式气动执

行装置

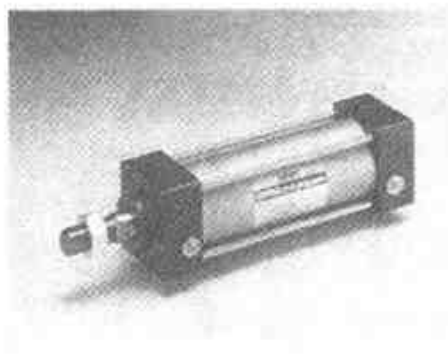


图 5.62 气 缸



图 5.63 摆动式气动执行装置

## ● 主要用途

气动执行装置广泛应用于各种工业机械、车辆、汽车、机器人、气动工具以及测量仪器等领域。



相关知识

## ● 净化室

在电子工业、精密机械工业、药品和食品制造等领域,要求清洁度较高的工作环境。

在这些制造领域,大气中悬浮着的无数尘埃将对产品的合格

率和可靠性产生很大的影响,因此要求有高清洁度的净化室。

## 应用知识 5.2.1 表压与绝对压力

压力测量时一般以大气压作为基准,以大气压作为 0 点测定的压力称为“表压”。以完全没有压力的真空状态作为 0 点测定的压力称为“绝对压力”(如图 5.64 所示)。

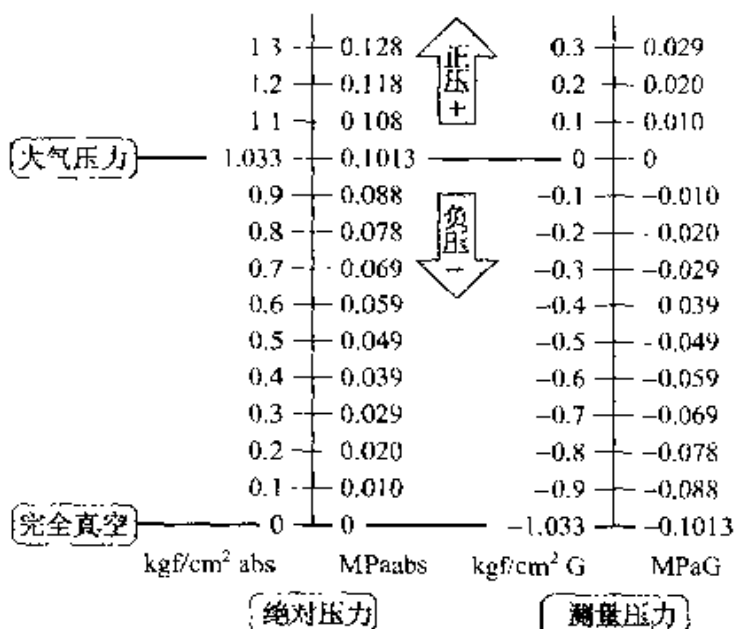


图 5.64 绝对压力与测量压力

## 例题 5.2.1

表压为 0.3MPa 时,其绝对压力为多少?

答

因绝对压力=测量压力+大气压力,所以

$$0.3 + 0.1013 = 0.4013 \text{ (MPa)}$$

## 选修知识 5.2.2 压缩空气的高压化趋势

压缩空气的压力可以分成低压(1MPa 以下)、中压(1~3MPa)和高压(3~5MPa)等。目前,正在研究开发 15~20MPa 空气压力装置的实用技术。

由于压缩空气的气源压力提高,可以减小执行装置的体积和重量,并使其成本降低,然而高压下的安全对策是压缩机等方面技术所面临的研究课题。

# 19 气动执行装置的工作原理

## □ 要 点

气动执行装置的工作原理有如下两种方式：

① 供给气缸内压缩空气，使活塞往复运动，由活塞杆将动力传出，带动机械做功。

② 向机体的封闭腔内供给压缩空气，带动叶轮旋转，从而获得旋转运动。

## □ 解 释

### ● 特 点

气动执行装置的优点是能够把压缩空气的能量简便地转换成机械运动。其缺点是难以进行精确的速度控制和位置控制，并且容易受负载变化的影响。

气动执行装置的操作方法简单，人们在其结构和回路上不断改进以适应各种负载条件并获得了较为广泛的应用。

### ● 气 缸

所谓气缸，就是向缸体内供给压缩空气，使活塞往复运动，由活塞杆将动力传出，带动机械做功。它可分为单动式和复动式两种。

**单向驱动气缸** 单向驱动气缸由在缸体内滑动的活塞和活塞杆构成。其工作原理如图 5.65 所示。

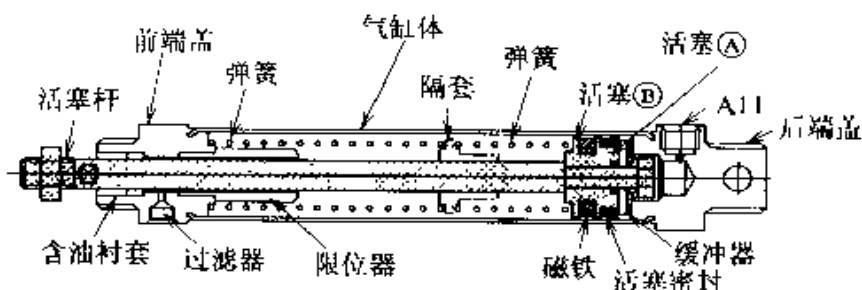


图 5.65 单向驱动气缸

① 从 A 口供给压缩空气，推动活塞前进。在活塞杆上产生推力。

② 依靠内部安装的弹簧力使活塞返回。

**双向驱动气缸** 双向驱动气缸由气缸体和在气缸内滑动的活塞及活塞杆构成。其工作原理如图 5.66 所示。

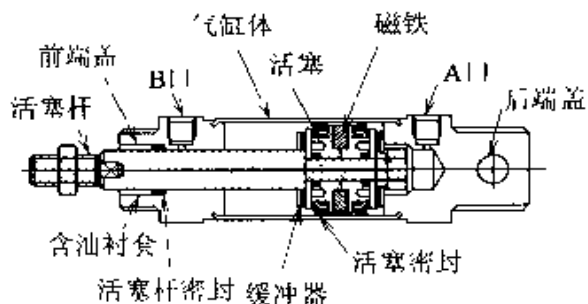


图 5.66 双向驱动气缸

① 从 A 口供给压缩空气,推动活塞,排气室的压缩空气从 B 口排出,在活塞杆上产生推力,使活塞前进。

② 若从 B 口供给压缩空气,从 A 口排出空气,则使活塞向后移动。

### ● 气动马达

气动马达是指供给压缩空气后可以获得连续旋转运动的装置。它有活塞式(如图 5.67 所示)和叶片式(如图 5.68 所示)等几种型式。径向活塞式气动马达的工作原理如下:

① 各活塞与曲轴由连杆连接,与转轴为一体的旋转阀门把从 A 口进的压缩空气依次供给各活塞。

② 受压缩空气驱动的活塞推动曲轴产生旋转力矩。

③ 另一侧的 B 口作为排气口。

④ 若从 B 口供给压缩空气,则气动马达反向旋转,此时 A 口变为排气口。

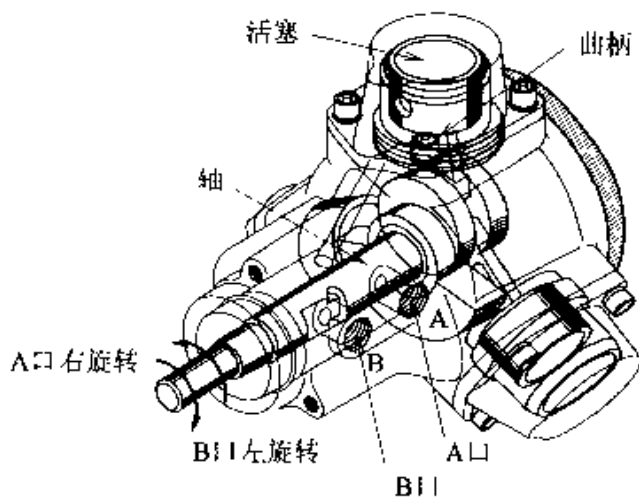


图 5.67 径向活塞式气动马达

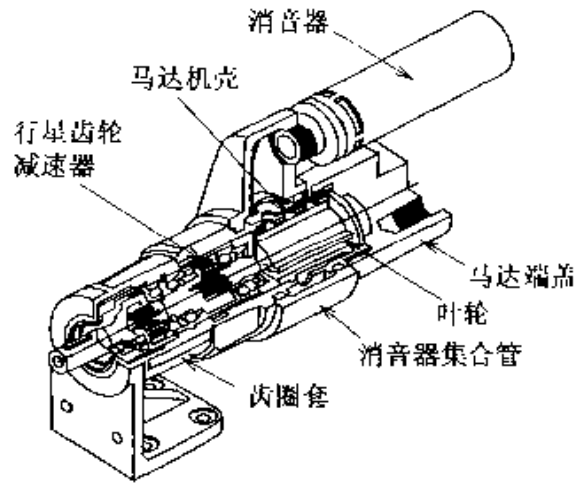


图 5.68 叶片式气动马达

● 摆动式气动执行装置

摆动式气动执行装置一般以小于  $360^\circ$  的角度摆动。根据其结构的不同它可分为叶片式(图 5.69)和齿条齿轮副式(图 5.70)等。

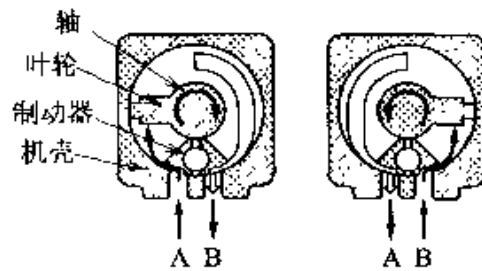


图 5.69 摆动气动执行装置(叶片式)

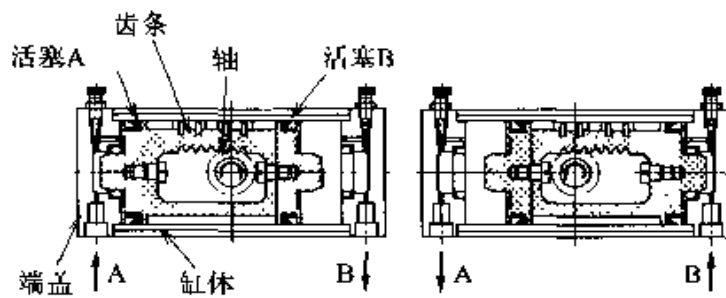


图 5.70 摆动气动执行装置(齿条齿轮副式)

**单叶片式** 单叶片型摆动气动执行装置由在机壳内侧滑动的叶片和与叶轮相联的轴、以及限位器等构成。其工作原理如下：



- ① 从 A 口供给压缩空气,推动叶片并在轴上产生力矩。
- ② 排气室的压缩空气从 B 口排出,转轴向顺时针方向旋转。
- ③ 叶轮碰到限位器后停止。
- ④ 若从 B 口供给压缩空气,则马达向逆时针方向旋转。

**齿条齿轮式** 齿条齿轮式摆动气动执行装置由气缸、在缸体内滑动的两个活塞、位于两活塞之间的齿条以及转轴等构成。其工作原理如下:

- ① 从 A 口供给压缩空气,推动活塞 A,通过齿条齿轮副在齿轮轴上产生力矩。
- ② 排气室的压缩空气通过 B 口排出,转轴向顺时针方向旋转。
- ③ 当活塞 B 碰到端盖停止时,转轴也停止转动。
- ④ 若从 B 口供给压缩空气,则转轴向逆时针方向转动。

## 相关知识 ● 节省配线与组件化

提高系统的性能时,系统的配线、配管量将随之增加,成本也会大幅度增大。在配管工程中,采用单接式软管等技术可以缩短工时,变更容易,节省配线。

由于执行装置、气动元件的组件化(图 5.71),即缩短了系统的制造工期,也节省了设备所占的空间。

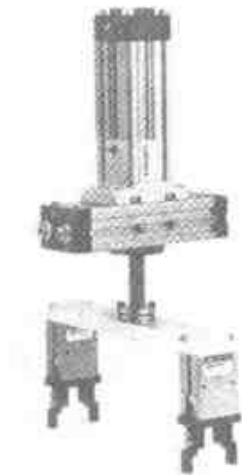


图 5.71 气动执行装置的组件化实例

## 例 题

① 在直径为 20mm 的气缸中,压缩空气的压力为 0.5MPa 问气缸的理论输出推力  $F[N]$  为多少? 已知活塞杆的直径  $d$  为 8mm。

答]

直径为 20mm 的气缸, 其 A 侧的截面积  $A$  [mm<sup>2</sup>] 为

$$A = \frac{\pi}{4} D^2$$

气缸 B 侧的截面积  $B$  [mm<sup>2</sup>] 为

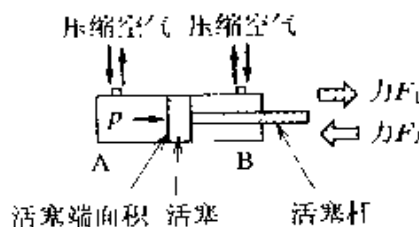
$$B = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

活塞杆前进时, 推出侧的输出推力  $F_1$  为

$$F_1 = p \times A = 0.5 \times \frac{\pi}{4} \times 20^2 = 157 \text{ [N]}$$

活塞杆后退时, 推回侧的输出推力  $F_2$  为

$$F_2 = p \times B = 0.5 \times \frac{\pi}{4} \times (20^2 - 8^2) = 132 \text{ [N]}$$



#### 气缸直径的选择方法

取  $D$  为气缸直径 [mm],  $p$  为工作压力 [MPa],  $F$  为气缸输出推力 [N],  $\eta$  为气缸效率 (通常为 80%)。

气缸的理论出力  $F$  [N] 为

$$F = A p$$

气缸的实际出力  $F'$  [N] 为

$$F' = \eta A p = \eta \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \cdot p$$

气缸的直径  $D$  [mm] 为

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot \eta \cdot p} \times F'}$$

② 当工作压力为 0.5MPa 时, 若所需输出推力为 500N, 问气缸的直径应取为多少? 设气缸的效率为 80%。

答]

气缸的直径  $D$  可由下式计算:

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi \cdot 0.5 \cdot 0.8} \times 500} = 39.9 \text{ [mm]}$$

取气缸直径为 40mm。

**选修知识** 执行装置常用名词术语

- [1] **标准状态** 温度为 20℃、绝对压力为 760mmHg(0.101MPa)、相对湿度为 65% 的空气的状态。
- [2] **空气量** 单位时间内流过的压缩空气换算到标准状态下的空气体积。
- [3] **空气消耗量** 气动装置或系统在某一条件下所消耗的压缩空气量,换算到标准状态下的单位时间的空气消耗量。
- [4] **分离水** 在气压器装置或管路内处于流动状态或沉淀状态的水或者油水混合液。
- [5] **残压** 切断压力供给后管路系统或装置内残存的不希望有的压力。
- [6] **背压** 作用于管路的排气侧或压力工作面的对面的压力。
- [7] **响应时间** 从阀门或管路中施加输入信号起至达到输出规定值为止的时间。
- [8] **气缸的输出力** 由活塞杆传递的机械力。
- [9] **一次侧压力** 装置输入侧的压力。
- [10] **二次侧压力** 装置输出侧的压力。
- [11] **配管连接口径** 装置上用于管路连接的接口的直径。

## 20 气动执行装置的控制

**要 点** 气动执行装置的控制是以驱动装置的控制为主的气动系统的控制,按被控驱动装置的功能和控制方法可分成多种控制方式。

**解 释** ● **气动装置的构成**

把在空气压缩机中获得压力能量的压缩空气输入气缸或气动马达等装置,这种压缩空气的能量就可以转换成机械功。

气动装置中使用的设备主要有以下几种:

[1] **驱动装置(执行装置)** 利用空气压力的能量作机械功的装置,有气缸、气动马达、摆动式气动执行装置等。

[2] **控制装置(空气阀门)** 控制压缩空气流动的方向、流量和压力变化的装置,有电磁阀、手动阀门和执行器驱动的自动阀门等。

[3] **空气质量调整装置(F. R. L 组件)** 用于压缩空气状态的适应性调整,有过滤器、调节器、润滑器等。

[4] **辅助装置(附件)** 为了保证设备使用方便和系统的安全而设置的附件,包括传感器、开关、减震器、液压制动缸、接头、仪器仪表等。

[5] **真空发生装置** 利用空气的流动来产生真空的装置,有真空泵、喷射泵等。

[6] **气压发生装置** 将空气压缩从而产生压缩空气的装置,有空气压缩机、贮气罐、冷却器等。

[7] **其它辅助装置**

### ● 装置的选用

使用气动装置组成气动系统时,应将 F. R. L 装置、气阀、调整器、气缸等组合起来。然而上述各种装置有多种型号和尺寸,选择其中最为合适的型号和规格来构成系统是十分重要的。

### ● 气动系统的基本组合形式

图 5.72 所示为一般的气动装置的例子。为适应工作的需要,还可以构成多种组合形式。

### ● 流量控制

利用空气压力时,必须对空气的流量进行控制。流量控制阀安装在气动回路中,用于对气缸的活塞速度进行控制,并实现对气动回路中气压信号的滞后控制。流量控制的方法有以下几种:

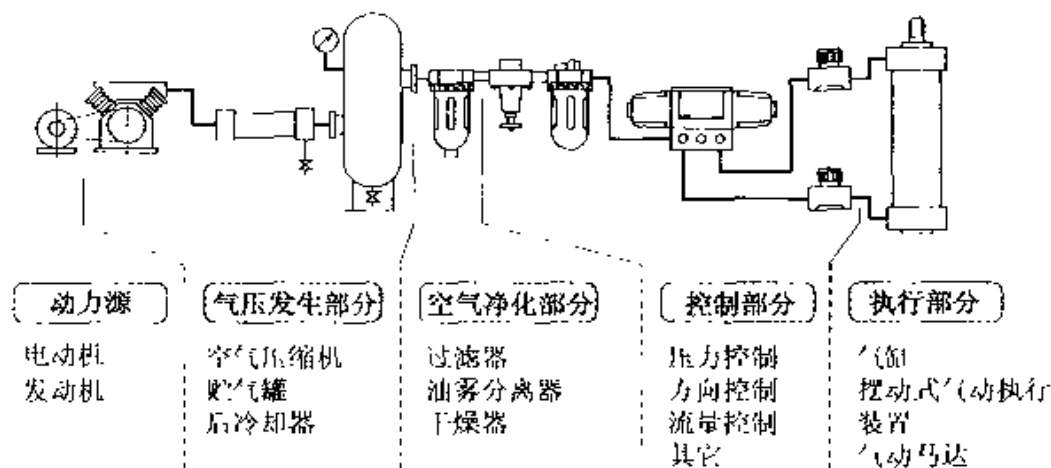


图 5.72 一般气动装置组合的例子

- ① 固定节流 使流量为一定值。
- ② 节流阀、速度控制阀 手动流量调节。
- ③ 缓冲阀 由机械自动调节流量

## □ 相关知识 ● 调速阀

调速阀的结构如图 5.73 所示,将节流阀与单向阀合为一体,用于气动系统中执行装置的速度控制。通过调节位于阀芯上的螺丝来调节阀门的开度从而调节流量。

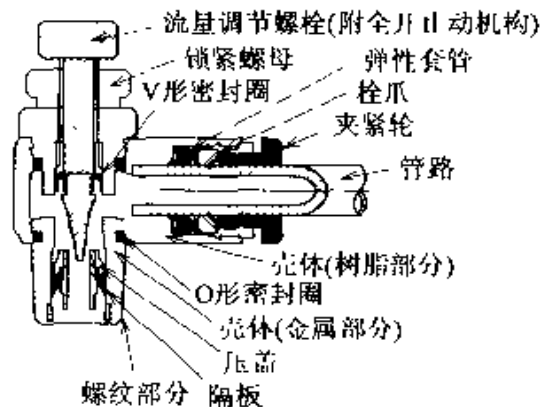


图 5.73 调速阀

## ● 比例控制阀

比例控制阀分为流量比例控制阀和压力比例控制阀。这种控制阀是可以实现流量、压力无级变化的电磁阀。图 5.74 所示为一种 PWM 方式的压力比例控制方法。

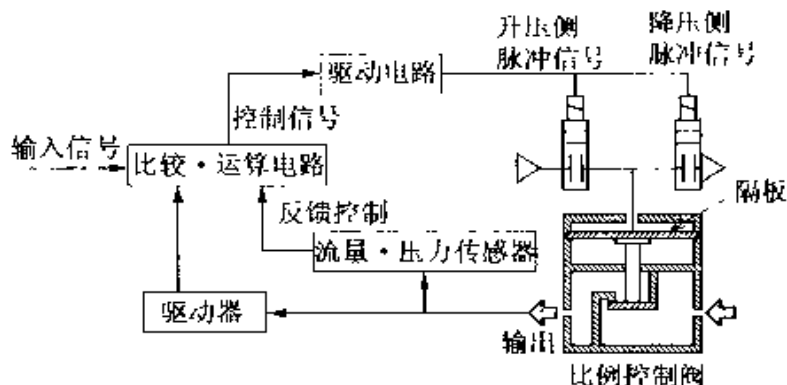


图 5.74 PWM 方式比例控制阀

### ■ 必备知识 空气消耗量

在选择空气压缩机时,必须求出气缸的空气消耗量与从阀门到气缸的管路部分的空气消耗量之和。若考虑到各部分空气的损失,全部空气消耗量应为上述计算值的1.5倍左右。

### ■ 例 题

使直径为40mm、行程为50mm的气缸在0.5MPa的空气压力下每分钟往复10次,问气缸的空气消耗量为多少?

**答]**

空气消耗量  $Q$  可用下式求出:

$$Q = \frac{\pi}{4} D^2 \times L \times 2 \times n \times \frac{p + 0.101}{0.101} \times 10^{-6}$$

式中,  $D$  为气缸直径[mm],  $L$  为气缸的行程[mm],  $p$  为缸内空气压力[MPa],  $Q$  为气缸的空气消耗量[L/min],  $n$  为气缸每分钟往复次数[次/min]。

根据上式求得空气消耗量为

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\pi}{4} 40^2 \times 50 \times 2 \times 10 \times \frac{0.5 + 0.101}{0.101} \times 10^{-6} \\ &= 7.48 \text{ [L/min]} \end{aligned}$$

### ■ 应用基础 真空吸盘的结构

在洗手间或厨房中使用一种橡胶制的垫子,往墙壁或其它平面上按压就吸附在上面。这是由于橡胶垫内的空气被压出而处于真空状态,橡胶垫的外侧大气压与内侧真空的压差产生很强吸附力。将这种原理应用于装卸、搬运作业(图 5.75)时,可以减轻劳动强度并实现自动化。

### ■ 选修知识 气动执行装置的应用举例

**自动窗帘** 自动窗帘采用无杆气缸直接拉引窗帘实现开、闭。图 5.76 为在仓库、

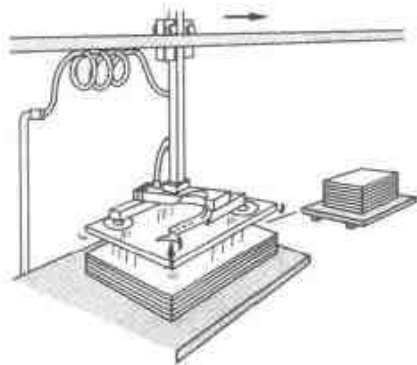


图 5.75 真空吸盘的应用例子

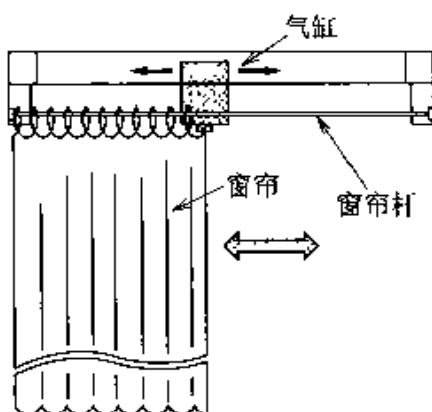


图 5.76 自动窗帘示意图

工厂中应用的例子。

由双杆气缸构成的气动手 使用尼龙皮带和双杆气缸(图 5.77)构成的气动手如图 5.78 所示。即使工件的形状或位置存在偏差,气动手也能灵活适应。把工件放置在尼龙皮带和 V 形块之间,由双杆气缸推动 V 形块前进,并将工件推至尼龙皮带而夹紧。

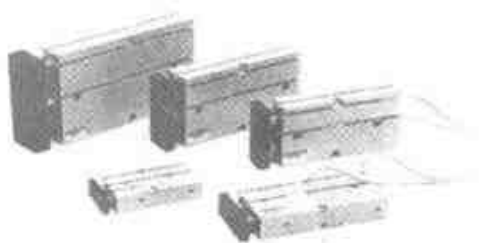


图 5.77 双杆气缸

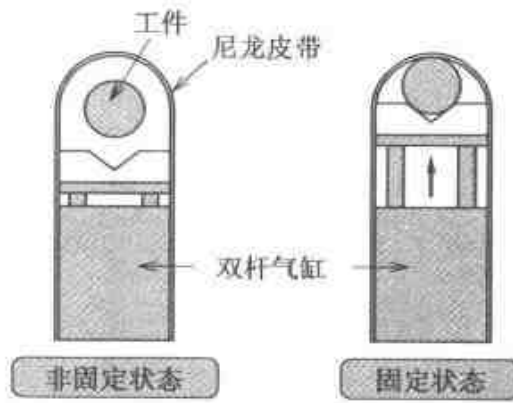


图 5.78 使用双杆气缸的气动手

**机械手** 图 5.80 所示为使用双杆气缸和气动夹具(图 5.79)构成简单机械手的应用实例。图 5.81 所示为复动式气动夹具的结构。

**电车门的开闭** 电车中使用了很多气动装置,车门的开闭就是其中一种。这是一种气缸与杠杆或曲柄的组合机构。

**气动执行装置的其它应用举例** 图 5.82 和图 5.83 介绍了两个这方面的例子。

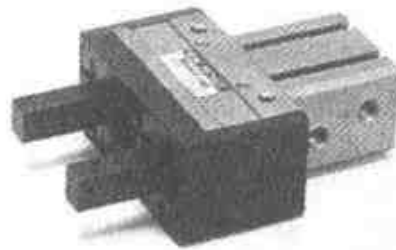


图 5.79 气动夹具

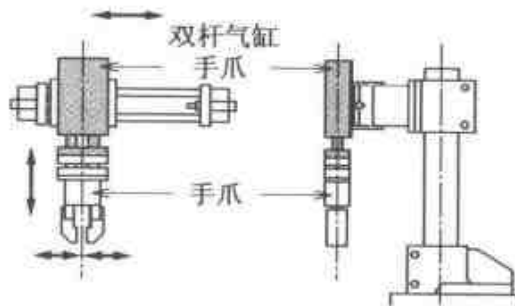
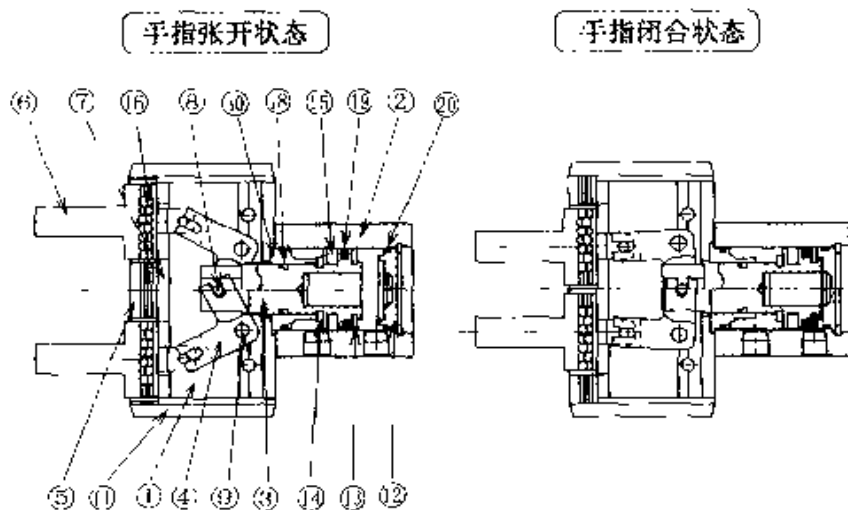


图 5.80 机械手





序号	零件名称	序号	零件名称
1	机身A	11	机壳
2	机身B	12	端盖
3	活塞	13	风门
4	杠杆	14	顶风门
5	导轨	15	磁块
6	手爪	16	滚柱
7	导轨座	17	C形挡圈
8	中心销	18	活塞杆密封圈
9	杠杆销	19	活塞密封圈
10	衬套	20	密封圈

图 5.81 气动夹具的结构

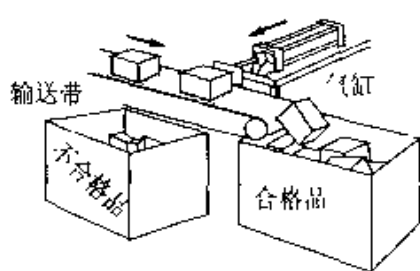


图 5.82 物品的分检

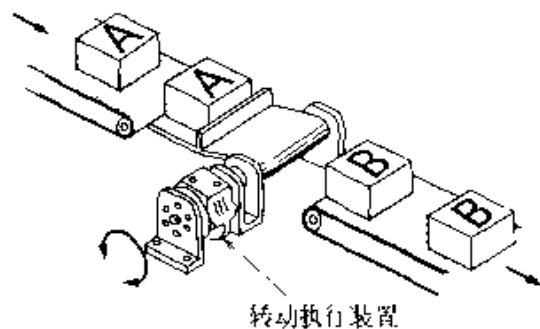


图 5.83 输送线上的翻转装置

## 第6章

# 计算机技术

计算机的种类很多,从能够超高速处理数据的超级计算机,到可以嵌入到全自动洗衣机等家用电器中的单片计算机应有尽有。尽管这些计算机在性能上有大囊之别,但在工作原理上却并没有本质性的不同。

在机电一体化产品中,计算机的作用极其重要,它相当于人的大脑,是产品的控制中枢。在这一章里,我们将学习计算机的一些相关技术。

本章将介绍计算机的CPU、存储器、I/O接口等各基本组成部分,以及连接微机与控制电路的接口电路、D/A转换器、A/D转换器等。此外,这一章还将涉及中断处理技术,在实际的系统中,常常采用这种处理技术,对某些突发事件采取紧急停车等应急措施,以避免发生危险。

- 责任编辑  
樱井 诚
- 执 笔  
金野雅彦

# 1 计算机控制

**□ 要点** 若将一个机电一体化系统比做人体,那么,传感器就相当于这个系统的眼睛和耳朵等感官部分,而执行装置就相当这个系统的手和脚等动作(肌肉)部分。

在这类系统中,计算机(computer)是相当于人的大脑部分,它能对来自传感器的信号进行处理,并根据处理结果控制执行装置。

**□ 解释** ● 固定布线式逻辑控制与软件式逻辑控制

硬件逻辑控制

在对机器进行控制时,如果采用专用的硬件设备进行,我们就称这种控制方式为固定布线式逻辑控制(wired logic),也称为硬件逻辑控制。

与此相反,在一些采用计算机进行控制的通用控制设备中,控制方法及设备工作顺序都是以程序的形式描述的,这种控制方式称为软件式逻辑控制(software logic)。图 5.1 列出了各种控制方式的特点。下面对这两种控制方式进行详细的说明。

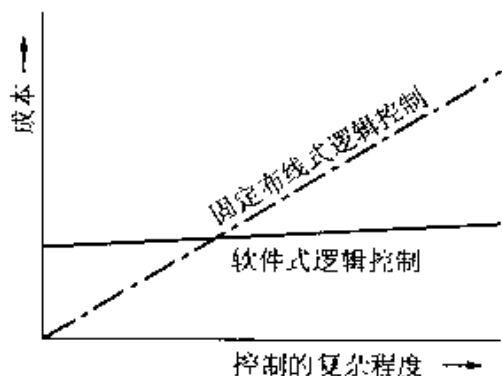


图 6.1 两种控制方式的特点

● 固定布线式逻辑控制

大批量生产

继电器顺序控制是最典型的固定布线式逻辑控制。对于功能单一(或者固定不变)的控制处理以及大批量生产的机器,采用硬件式逻辑控制将有利于降低系统成本。

● 软件式逻辑控制

在软件式逻辑控制中,机器的基本结构不受控制的复杂程度影响,因此当系统需要更改样式或改进性能时,采用软件式逻辑控制方式可以在不改变机器基本结构的前提下,比较容易地实现系

统的变更。

### 多品种小批量 生产

在多品种小批量生产的控制类产品(系统)中,采用这种控制方式具有极大的优越性,而且通过精心设计程序还可以提高产品的可靠性。因此,在很多机器中普遍采用计算机进行控制。

## 相关知识 ● 可编程控制器

目前常用的可编程控制器(programmable controller)的内部一般都带有微型计算机。

## ● FA 与计算机技术

由于计算机技术及网络技术的飞速发展,我们不仅可以对各种单台机器进行复杂的控制,甚至还可以如图 6.2 所示,构成能对整个综合型系统(包括订货、生产、发货)进行统一管理的 FA(factory automation)系统。

FA

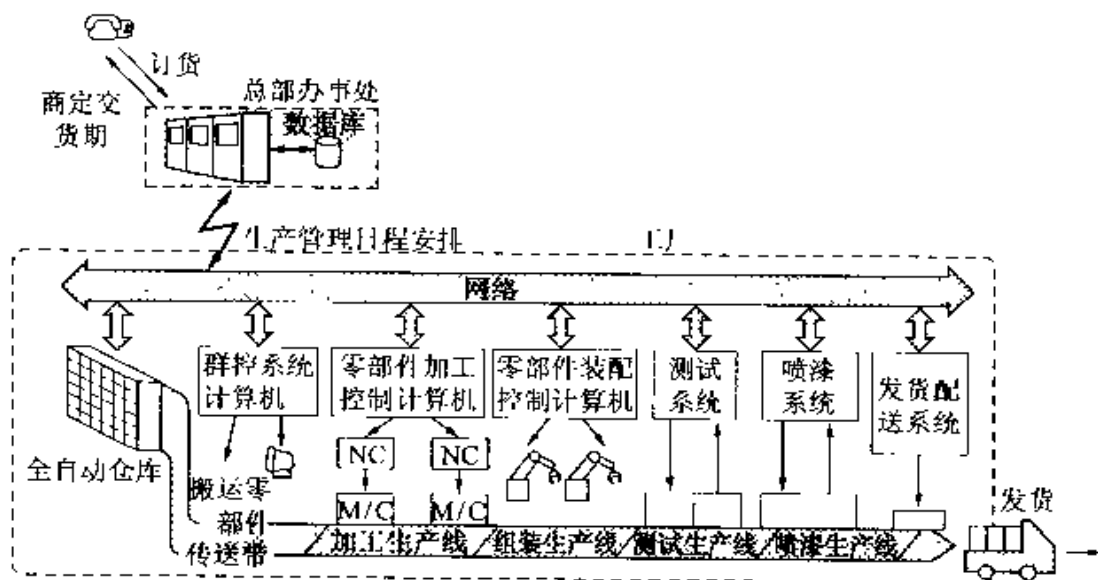


图 6.2 全自动化工厂(FA系统)

## 选修知识 网络模型

虽然顺序控制用的程序同计算机其它程序一样,也可以用流程图来描述,但在实际的控制系统中,常常需要根据多个传感器信号并行完成多种控制。

对于此类复杂的控制,若采用流程图来描述,就会显得过于复杂。因此,对于这种情况的程序,一般都是采用梯形图(ladder diagram)附加逻辑网(petri net)等网络模型来描述。

## 2 计算机的基本结构

**要点** 除非特别声明,现在的计算机通常都是指能将信息进行数字化处理,并按预先编好的程序依次执行相应操作的程序控制式计算机。这种计算机是由输入设备、输出设备、存储器、运算器、控制器这五个部分构成的。

### □ 解释 ● 计算机的基本结构

如图 6.3 所示,计算机是由输入设备、输出设备、存储器、运算器、控制器这五个部分构成。当计算机工作时,要先将已预先调入存储器中的程序,逐条读出各条指令,按照这些指令的要求,由控制器控制输入设备、运算器、输出设备等相关部件执行相应的操作,通过执行程序中的各条指令完成程序所要实现的功能。在上述各部分中,运算器和控制器合在一起统称为 CPU (central processing unit, 中央处理单元), 存储器、输入设备、输出设备等其它部分都要通过总线 (bus, 公共信号线), 并行连接到 CPU 上。其连接方式如图 6.4 所示。

CPU

中央处理单元

总线

公共信号线

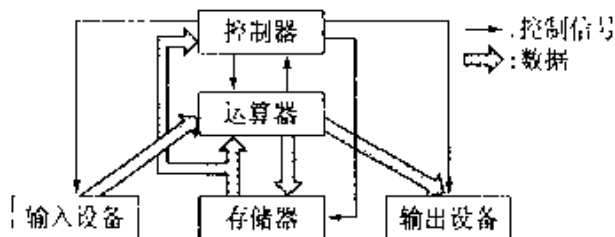


图 6.3 计算机的五大组成部分

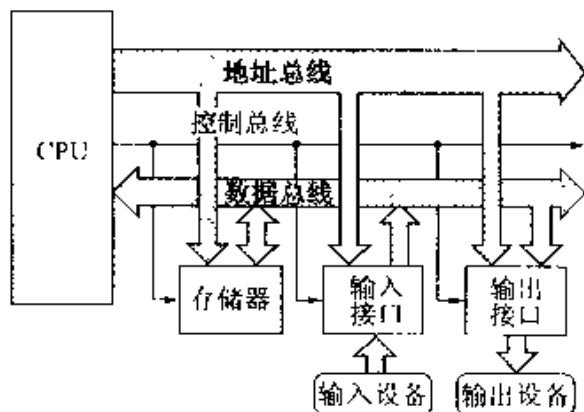


图 6.4 计算机总线与各部分的连接方式

### ● 地址总线

地址总线(address bus)是由 CPU 输出的一组信号线。这组信号线用来指定存放在存储器内的数据或程序的存放位置(单元地址),或者从多个输入输出设备中指定某个特定设备的位置(端口地址)。例如,若某台计算机有 16 根地址线,它就可以指定  $2^{16}$  种(65536 种)地址,即可以区分 65536 个不同的存储单元或输入输出设备。

### ● 数据总线

数据总线(data bus)是当 CPU 与存储器或者与输入输出设备进行数据交换时,用于实际传输数据的一组信号线。这组信号线的多少(根数),决定了该计算机一次所能处理的数据量(精度)。不同的计算机,其数据总线的宽度(信号线的根数)可能不同。常见的计算机数据线宽度有 4、8、16、32 等多种。不言而喻,计算机的数据线越宽,它一次能处理的数据量就越多,但相应的电路结构就会越复杂、成本也就越高。

### ● 控制总线

用来指示地址总线上的信号是表示存储器地址还是表示输入输出设备地址,或者用来指示数据总线上的数据传送方向和传输时序的信号线,这统称为控制总线(control bus)。

## □ 相关知识

### LSI

### ● 微型计算机

在计算机的五个组成部分中,如果 CPU 是仅由一片 LSI (Large Scale Integration)构成的,这种计算机就称为微型计算机(micro computer)。

在微型计算机家族中,除通用的个人电脑外,还有一种是用来嵌入到机器中完成各种控制功能的控制用微型计算机。

一般来说,控制用微型计算机的数据总线宽度都比较窄,因此它能一次处理的数据量也比较少。但在这种微型计算机 CPU 芯片的内部一般除了集成有 CPU 电路之外,通常还会集成有一部分存储器及一些输入输出等其它电路。

### ● 位与字节

在进行数据处理时,数据的最小单位是用一根信号线就可以表示的数据,它只有“0”、“1”两种状态。我们将这个最小的数据单位定义为位(bit),将由 8 个位所组成的数据定义为一个字节(byte)。一个字节可以表示  $2^8$  (256)种不同的数据。

### 3 中央处理单元(CPU)的功能及结构

**要 点** 在组成计算机的五个基本部分中,能够进行运算、对其它部分的操作实施控制并且实际执行命令的部分是中央处理单元(CPU)。

当计算机运行时,CPU首先从存储器中将指令取出(取指),然后对取出的指令进行解释(译码),再按该指令的要求执行相应的操作(执行),通过重复这一过程来实现程序的功能。

#### 解 释 ● 微型计算机的功能(Z80)及内部结构

下面以8位微型计算机Z80为例,介绍CPU的功能及其工作原理。

#### 管脚图

作为一种通用型的微型计算机,Z80的应用领域很广,其管脚图如图6.5所示。在表6.1中列出了主要信号线的功能,其内部结构框图如图6.5所示。

A <sub>11</sub>	1	40	A <sub>10</sub>
A <sub>12</sub>	2	39	A <sub>9</sub>
A <sub>13</sub>	3	38	A <sub>8</sub>
A <sub>14</sub>	4	37	A <sub>7</sub>
A <sub>15</sub>	5	36	A <sub>6</sub>
CLK	6	35	A <sub>5</sub>
D <sub>4</sub>	7	34	A <sub>4</sub>
D <sub>3</sub>	8	33	A <sub>3</sub>
D <sub>5</sub>	9	32	A <sub>2</sub>
D <sub>6</sub>	10	31	A <sub>1</sub>
V <sub>CC</sub>	11	30	A <sub>0</sub>
D <sub>2</sub>	12	29	V <sub>SS</sub> (GND)
D <sub>7</sub>	13	28	RFSH
D <sub>0</sub>	14	27	M <sub>I</sub>
D <sub>1</sub>	15	26	RESET
INT	16	25	BUSREQ
NMI	17	24	WAIT
HALT	18	23	BUSACK
MREQ	19	22	WR
IORQ	20	21	RD

图 6.5 Z80CPU 的管脚图

#### ● 微型计算机(Z80)的工作过程

Z80CPU的工作过程,由如下的五种基本操作通过不同形式的组合(构成不同的指令)而成:

#### 操作码

□ 指令(操作码,operation code)的读取(取指,fetch)。

操作数

- ② 运算数据(操作数;operand)的读取(取操作数)。
- ③ 将运算结果等数据写入存储器中。
- ④ 从输入口读取数据。
- ⑤ 将数据写入输出口。

机器周期

我们将这些操作称为机器周期(machine cycle)。当 CPU 执行某条指令时,在执行完第④步操作取指周期后,将根据该条指令的要求,接着执行相应的其它机器周期。各机器周期都是严格按照输入给 CPU 的时钟信号,在规定的时间内完成的。在上述的各种机器周期中,信号线的对应状态(时序图)如图 6.7 所示。

表 6.1 Z80CPU 主要信号线的功能

管脚名称	管脚数	输入/输出	功 能
$V_{CC}$	1	电源	+5V(5V 单一电源工作)
$V_{SS}$	1	地	0V
CLK	1	输入	单相时钟信号(Z80 内部按此时钟进行工作)
RESET	1	输入	复位信号,用于初始化 CPU
$A_{15} \sim A_0$	16	三态输出	16 位地址线 指定要访问的存储单元或输入输出口
$D_7 \sim D_0$	8	三态输入 输出	8 位双向数据总线
$\overline{MREQ}$	1	三态输出	存储器请求信号(表明地址线上的数据为要访问的存储单元地址)
$\overline{IORQ}$	1	三态输出	输入输出请求信号(表明地址线上的数据为要访问的输入输出口的地址)
$\overline{RD}$	1	三态输出	读信号,表明 CPU 正在从存储器或外围 LSI 中输入数据
$\overline{WR}$	1	三态输出	写信号,表明 CPU 正在向外围 LSI 中写入数据



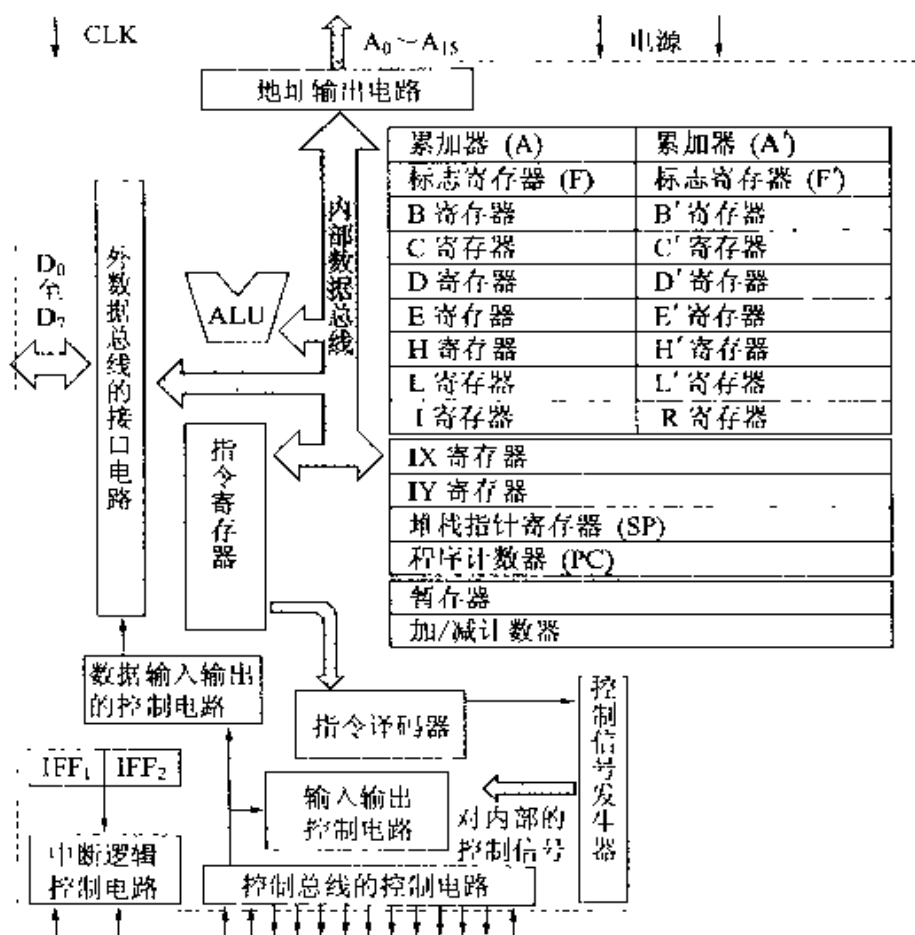


图 6.6 Z80CPU 的内部结构框图

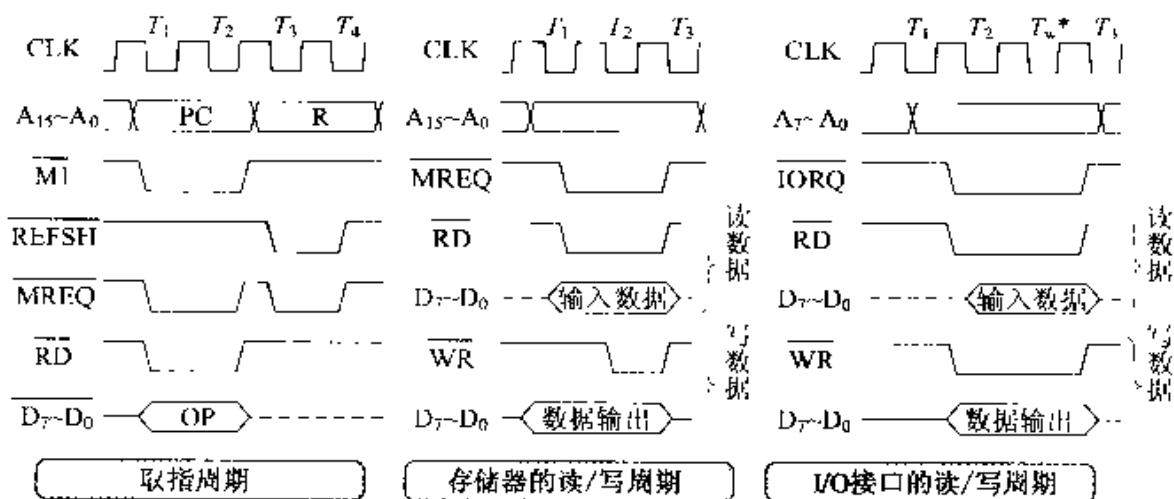


图 6.7 Z80CPU 的各种机器周期

## □ 相关知识 ● 外围 LSI

### 系列 LSI

当需要用微型计算机组成系统时,可以直接采用 LSI 化的通用外围 IC(Integrated circuit)构成输入输出接口等外围电路。采用这种方法,可以简化系统设计。以某种型号 CPU 为核心生产的、便于构成系统的一类 LSI 称为系列 LSI。表 6.2 中列出了典型微型计算机(CPU)的种类及其系列 LSI。

表 6.2 典型的系列 LSI

系列 功能	CPU		
	Z80	8085	6809
并行 I/O 接口	Z80PIO	8255(PPI)	6821(PIA)
串行 I/O 接口	Z80PSI	8251(USART)	6850(ACIA)
定时/计数器	Z80CTC	8253(PIT)	6840(PTM)

PIO: Programmable Input Output controller

PPI: Programmable Peripheral Interface

PIA: Programmable Interface Adapter

SIO: Serial Input Output controller

USART: Universal Synchronous Receiver Transmitter

ACIA: Asynchronous Communication Interface Adapter

CTC: Counter Timer Circuit

PIT: Programmable Interval Timer

PTM: Programmable Timer Module

## ■ 选修知识 ■ 微型计算机的种类

在微型计算机家族中,除了我们所熟悉的个人电脑、游戏机及文字处理机等常见的微型计算机之外,还有嵌入到家用电器或汽车等内部、通常见不到的各种微型计算机。这种嵌入在产品内的微型计算机,一般不是用来进行计算,而是用来进行控制。

通常,为了能将微型计算机嵌入机器内部,我们常常选用字长较短的机种,而字长较长的机种则多用于个人电脑等通用计算机中。

此外,嵌入机器内部的微型计算机,有很多都是采用将 CPU、存储器、输入口、输出口全部集成在一个芯片上的单片式微型计算机(简称单片机)。

此外,也可以按照计算机的指令系统,对微型计算机进行分类。人们熟悉的 68 系列或 80 系列微型计算机(指微处理器——译者注),就是按计算机的指令系统进行划分的。在这些指令系统中,都有很多能够完成复杂操作的指令,其中有一些指令的处理过程是通过内部微程序实现的。这种微处理器称为 CISC(complex instruction set computer)。相反,近来用于工作站等领域的微处理器被称为 RISC(reduced instruction set

computer)。在它的指令系统中,仅具有能完成简单操作的指令,其处理过程是通过硬件逻辑而不是通过微程序实现的。由于这类微处理器大都采用流水线机制,所以它可以以更高的速度进行数据处理。

## 4 存储器的种类及功能

### 要点

在存储器中,既有位于CPU内部、用于暂时保存少量数据的寄存器(register),也有位于主板上、用于存储CPU正在执行的程序及其所需数据的主存储器(main storage)。此外,还有位于主机外部、可在需要时与主存储器进行数据交换的外部(辅助)存储器(external storage)。通常所说的存储器是指主存储器,一般是采用高速、大容量而且价格比较低廉的IC存储器。

### 解释

#### ● 存储器的基本结构

图6.8所示的是一个普通存储器的结构框图,它是由存储体和控制电路组成的。其中,存储体是由很多能够保存固定长度数据的存储单元构成。在使用时,可以在外部通过地址线,先对这些存储单元进行选择,再通过缓冲器(buffer circuit)从外部读取指定存储体中的数据,或者将数据写入指定的存储体中。此时,控制信号线上的信号,用来指示当前操作是读取操作还是写入操作,即指示数据总线上的数据流向。

缓冲器

控制信号线

随机存取存储器

存取时序图

图6.9所示为常用作计算机主存储器使用的随机存取存储器(random access memory)的存取时序图。

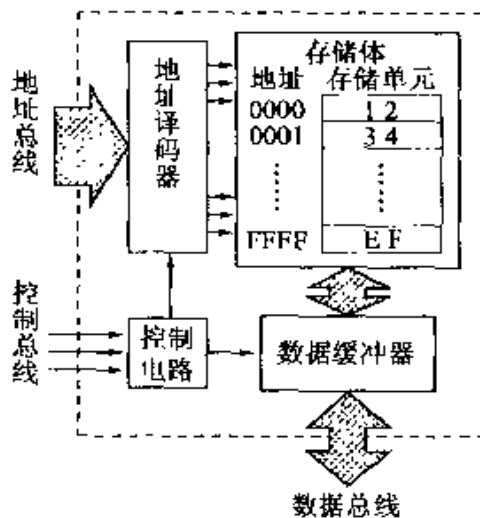


图 6.8 存储器的结构框图

#### ● IC 存储器的种类

目前主要 IC 存储器的种类如图 6.10 所示,大体上可将 IC 存

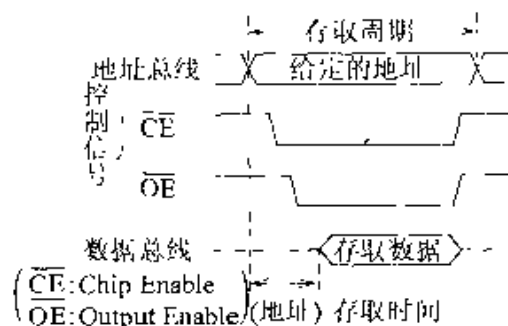


图 6.9 RAM 的存取时序图

存储器分为两类：一类是用于存放程序或数据等固定内容(不变)的 ROM(read only memory)，另一类是用于存放可在需要时能随机改写其中内容的 RAM(random access memory)。

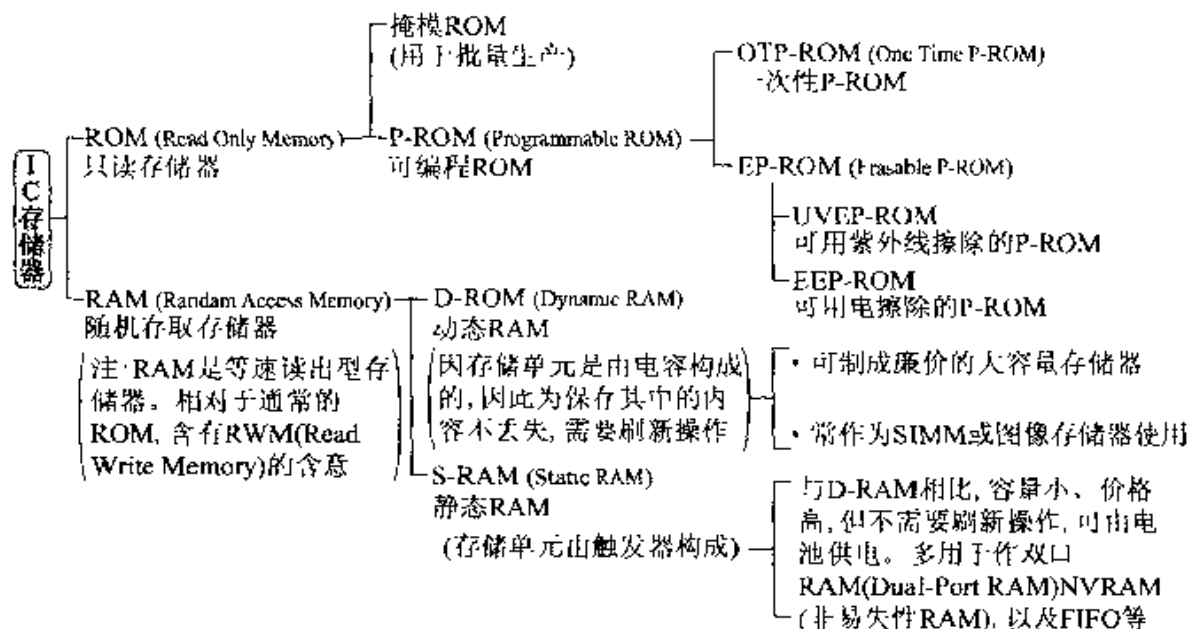


图 6.10 主要 IC 存储器的种类及特点

### 掩模 ROM PROM

对于 ROM, 还可以进一步细分为用于大批量生产的掩模 ROM, 以及可由用户用 ROM 写入器进行数据写入的 PROM(programmable ROM)。

### SRAM DRAM

对于 RAM, 也可以将其细分为不需要为被保存的数据进行特殊操作的静态 RAM(SRAM; static RAM), 以及需要为所保存的数据进行定期刷新操作的动态 RAM(DRAM; dynamic RAM)。SRAM 比 DRAM 速度快且用法简单, 但由于受集成度的限制, 其容量要比 DRAM 小。然而, 由于用 CMOS 工艺制

非易失性  
RAM

成的 SRAM 耗电量非常小,若使用电池作后备电源,就可以在停电时也能保持其中的数据不丢失。因此,可以用它作非易失性 RAM 使用。

## 相关知识 ● 存取时间

存取时间  
存取周期

在对存储器进行数据存取操作时,从 CPU 开始向存储器发出存取操作信号到数据存取操作结束,需要花费一定的时间。通常将从发出存取操作信号到可以开始传送数据的这段时间间隔称为存取时间(access time)。将从本次存取操作开始到可以进行下一次存取操作的时间间隔称为存取周期(cycle time)。

## ● 高速缓存器

计算机中 CPU 的运行速度很高,而一般存储器的速度比较低。若为了适应 CPU 的高速操作,将系统中的主存储器全部采用价格很高的高速存储器,则整个系统的成本就会大幅度增加。因此,通常采用速度不是很高但价格低廉的存储器作主存储器,同时再配置些容量虽小但速度很高的存储器作高速缓存器(cache memory),并将主存储器中 CPU 正在存取的数据及其附近的一个数据块同时存入高速缓存器中。这样,CPU 就不需要直接与低速的主存储器交换数据而是从高速缓存器中存取数据,从而可以使 CPU 实现高速的数据存取。

## ● 虚拟存储器

虚拟存储器是指通过程序使 CPU 能够使用比实际配置的主存储器容量更大存储空间的一种方法。虚拟存储是通过存储器管理单元(MMU, memory management unit)和操作系统(OS, operating system)来实现的。MMU 能将程序中使用的虚拟存储空间中的逻辑地址转换成在实际主存储器空间中存在的物理地址。假如,在这一转换过程中,转换后的物理地址不在实际的主存储器中,MMU 就会将控制权交给 OS,由 OS 将所需数据从磁盘中读入到物理存储器中来,并利用 MMU 的功能分配一块主存储器空间作为虚拟存储器空间。在进行上述的地址转换过程中,可采用按不同程序功能(指令部分和数据部分)分配不定长块空间的段方式,或采用与程序的功能无关、分配定长块空间的页方式。大多数 CPU 在进行地址转换时,都会兼用段方式和页方式。

段方式  
页方式

## ● 分区存储器

虚拟存储器是通程序使 CPU 能够使用比实际配置的主存储器容量更大存储空间的一种方法。相反,对于像 8 位 CPU 这种

能作虚拟存储空间较小的 CPU,可以采用实际安装比欲虚拟存储空间还大的物理存储空间来实现大容量的数据存取。这种方式称为分区存储器方式。在分区存储器方式中,分区寄存器将替代 MMU 完成相应的地址转换。

#### 分区寄存器

# 5 输出口的功能

## □ 要点

CPU 通过总线(bus)与输入输出设备及存储器相连,系统中的很多其它设备都要通过总线,按照 CPU 规定的时序分时地与 CPU 进行指令或数据的传输。因此,输出设备不能直接与总线相连并占用总线。

输出口(output port)就是在总线与输出设备之间进行数据交换的数据中转站。

## □ 解释

### ● 输出口的地位

通常计算机与输出设备之间是按图 6.11 所示的方式相连。从 CPU 输出的数据,要通过总线经输出口传送至输出接口电路。接口电路将 CPU 传送来的数据信号进行电平转换等处理后,再通过驱动电路驱动执行装置等设备来完成相应的动作。

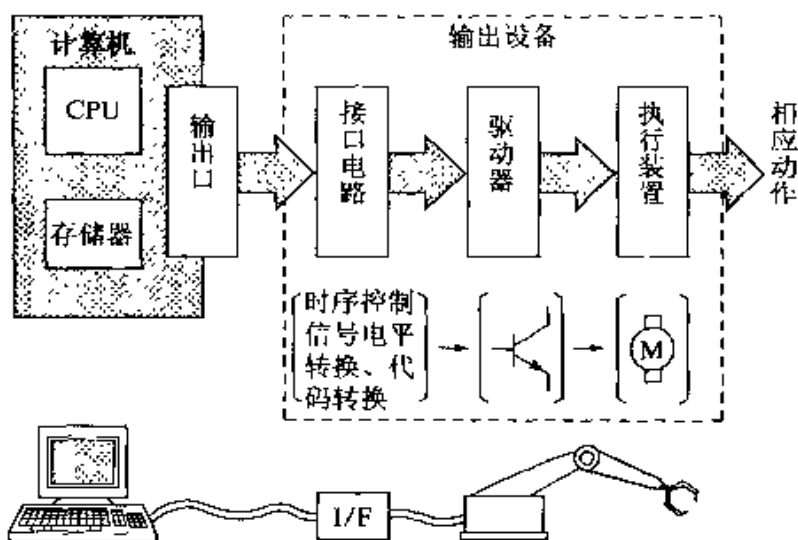


图 6.11 输出口与输出设备

### ● 输出口的功能

CPU 输出的所有数据,都要通过数据总线输出。而来自存储器的数据以及 CPU 与其它设备间交换的输入输出数据,也要通过这条数据总线分时地进行传输。输出口的功能,就是从数据总线上选择 CPU 输出给本口的数据取出,并传送给对应设备(如接口电路等)。



## 时钟信号

此外,如图 6.12 所示,CPU 通过数据总线输出的数据,都要严格地按照 CPU 时钟(clock)信号的节拍进行传输,并且此过程与所连设备无关,因此输出数据具有瞬间消失的特点。为了能将这个数据可靠地传送到外部设备,输出口应具有保持功能,如图 6.13 所示,需要在写信号的上升沿将数据总线上的数据锁存(保持不变)。

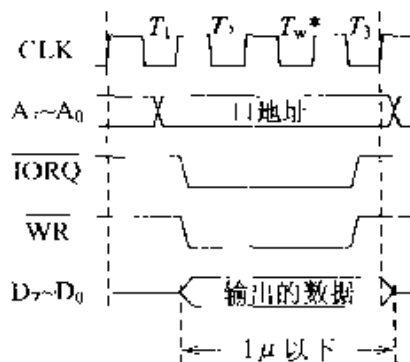


图 6.12 Z80CPU 的数据输出时序图

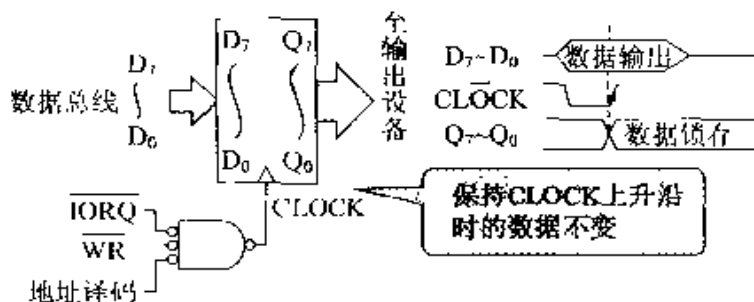


图 6.13 输出口的工作原理

## □ 相关知识 ● 握手信号式输入输出

当输出口与实际的输出设备进行数据传输时,必须遵守输出设备与输出口之间的数据传输规则(协议)。通常,在组成实际电路时,除数据线外还要采用几根控制信号线,用它们将输出口与实际的输出设备连接起来。通过这些信号线使 CPU 与外设能互相了解对方的状态,在确认对方可以接收数据后,再进行数据传输。这种传输数据的方式称为握手信号式(hand shaking)输入输出。

## ● 并行输入输出 LSI

在组成实际的输入输出口电路时,一般很少采用图 6.13 所示的 TTL(transistor transistor logic)电路。为简化输入输出口与微型计算机的连接,通常采用具有所需功能的专用外围芯片(LSI)。在这些外围 LSI 中,很多芯片具有握手信号式数据传输的功能。

## TTL 电路

# 6 输入口的功能

## □ 要 点

CPU 通过总线与输入输出设备以及存储器相连。系统中的很多其它设备都要通过总线按照 CPU 的时序分时地与 CPU 进行指令或数据的传输。因此,输入设备不能直接与总线相连并占用总线。

输入口(input port)就是在总线和输入设备之间进行数据交换时的数据中转站。

## □ 解 释

### ● 输入口的地位

计算机与输入设备之间的连接方式如图 6.14 所示。来自传感器等输入设备的信号,经过接口电路转换成计算机可以处理的数字信号后,再由输入口经总线传送给 CPU。

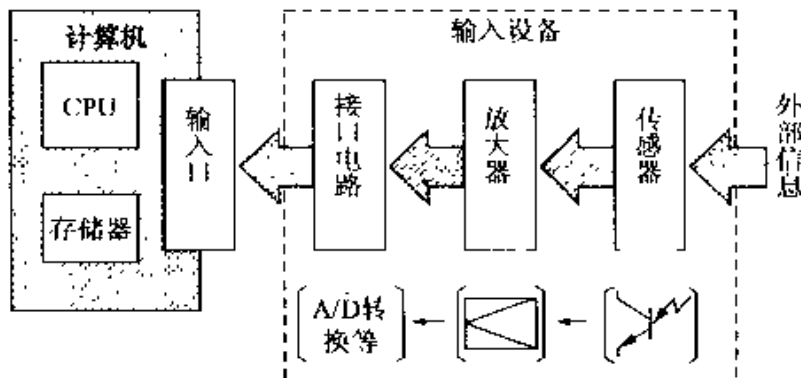


图 6.14 输入口与输入设备

### ● 输入口的功能

来自输入设备的数据,要通过数据总线传送给 CPU。而 CPU 与存储器以及其它设备间传输的输入输出数据,也要通过这条数据总线分时地进行传输。因此,输入口的功能就是在只有 CPU 命令该输入口进行数据输入时,才将来自外设的数据传送到数据总线上。为了保证这一过程能够按图 6.15 所示的时序进行,可以采用图 6.16(a)所示的方法,在两者之间加一个三态门。然而,由于 CPU 发出输入数据指令的时刻与输入设备的状态不一定完全对应,因此,如果来自输入设备的数据具有瞬间消失特点,就需要按图 6.16(b)所示,先将外设送来的数据在输入口内进行锁存(latch),等到 CPU 命令输入时再将该数据送到数据总线上传输给 CPU。

三态门

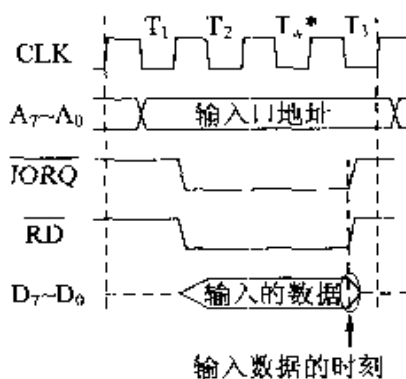
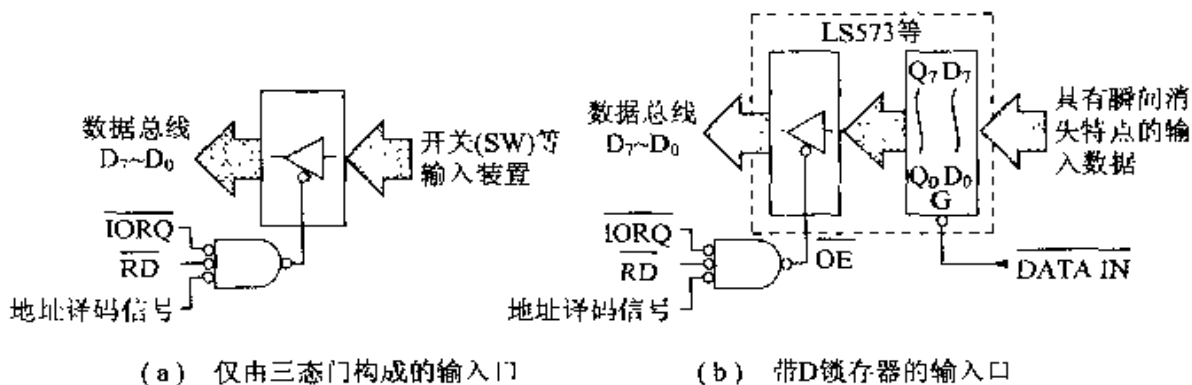


图 6.15 Z80CPU 的数据输入时序图



(a) 仅由三态门构成的输入口

(b) 带D锁存器的输入口

图 6.16 输入口的工作原理

## 选修知识

### “口”字的来历

在输入口、输出口中使用的“口”字，源于英语的“port”一词。在英语中，port 一词含有可以进出、停靠船舶的港口之意。当微型计算机与外部设备之间进行数据传输时，数据的进出过程与船进出港口的过程相似。因此，将微型计算机中接收数据的入口处称为输入口，将微型计算机中输出数据的出口处称为输出口。

### 三态门

所谓的三态门，是指可以输出三种状态的门电路。当门电路的输出具有

- ① 高电平状态(H;输出为高电平)
- ② 低电平状态(L;输出为低电平)

③ 基本没有电流流过的高阻状态这三种状态时，这种门电路就称为三态门。高阻状态又称为悬浮(floating)状态。

## 7 输出接口电路的功能

**□ 要点** 从计算机输出的数据,要经过输出口传输给输出设备,但在输出口与实际的输出设备之间一般需要进行信号电平转换,并需要对输出数据的传输时序进行控制。能够使被传输的数据实现这种在电气上、时间上相互匹配的电路称为接口电路。它不仅需要有实际的硬件电路,还需要有相应的软件来配合,能够完成这种功能的程序称为接口程序。

**□ 解释** ● TTL 电路的输出电平

通常,微型计算机输出口的信号电平为 TTL 电平。TTL 的输出电平规定:输出低电平 L ( $V_{OL}$ ) 为 0.4V 以下,输出高电平 H ( $V_{OH}$ ) 为 2.4V 以上。

表 6.3 中给出了 CMOS 型 Z80PIO 的电气参数。从表中可以看出,当输出拉电流达到 1.6mA 时,其高电平输出 H 仍可以保证高于 2.4V;而当输入灌电流达到 2.0mA 时,其低电平输出 L 仍然可以保证低于 0.4V。

表 6.3 Z80PIO(CMOS 型)的直流特性

符 号	测试项目	测试条件	最小值	标准值	最大值	单 位
$V_{ILC}$	输入时钟的低电平电压		0.3	-	0.6	V
$V_{IHC}$	输入时钟的高电平电压		$V_{CC} - 0.6$	-	$V_{CC} + 0.3$	V
$V_{IL}$	输入信号的低电平电压(除 CLK 外)		-0.5		0.8	V
$V_{IH}$	输入信号的高电平电压(除 CLK 外)		2.2		$V_{CC}$	V
$V_{OL}$	输出信号的低电平电压	$I_{OL} = 2.0\text{mA}$			0.4	V
$V_{OH1}$	输出信号的高电平电压(1)	$I_{OH} = -1.6\text{mA}$	2.4	-		V
$V_{OH2}$	输出信号的高电平电压(2)	$I_{OH} = 250\mu\text{A}$	$V_{CC}$	-		V
$I_{IL}$	输入漏电流	$V_{SS} \leq V_{IN} \leq V_{CC}$	-	-	$\pm 10$	$\mu\text{A}$
$I_{LO}$	高阻态时三态门的输出电流	$V_{SS} + 0.4 \leq V_{OUT} \leq V_{CC}$	-	-	$\pm 10$	$\mu\text{A}$

续表 6.3

符号	测试项目	测试条件	最小值	标准值	最大值	单位
$I_{OH}$	达林顿驱动电流	$V_{OH} = 1.5V$ $R_{EXT} = 1.1k\Omega$	1.5	-	5.0	mA
$I_{CC1}$	电源电流(工作时)	$V_{CC} = 5V$ $V_{IH} = V_{IH}$	AP/ AT	2	5	mA
		$-V_{CC} = 0.2V$ $V_{IL} = V_{IL}$ $-0.2V$	AP-6/ AM 6/ AT 6	3	8	

(摘自东芝 TLCSZ80.85 手册(1988))

$T_{OPR} = 40 \sim 85^{\circ}C$ ,  $V_{CC} = 5V \pm 10\%$ ,  $V_{SS} = 0V$

### LED 的驱动电路

#### LED

当需要用计算机的输出点亮 LED(light emitting diode)时,人们首先会想到采用图 6.17(a)所示的电路。然而,采用该电路时 LED 一般不会发光,即使发光也非常暗。通常,要令 LED 发光,需要使其正向导通电流达到 10mA,而此时的正向导通电压约为 2.0V。也就是说,若令 LED 发光,就需要给它提供 10mA 的电流和 2.0V 以上的电压。

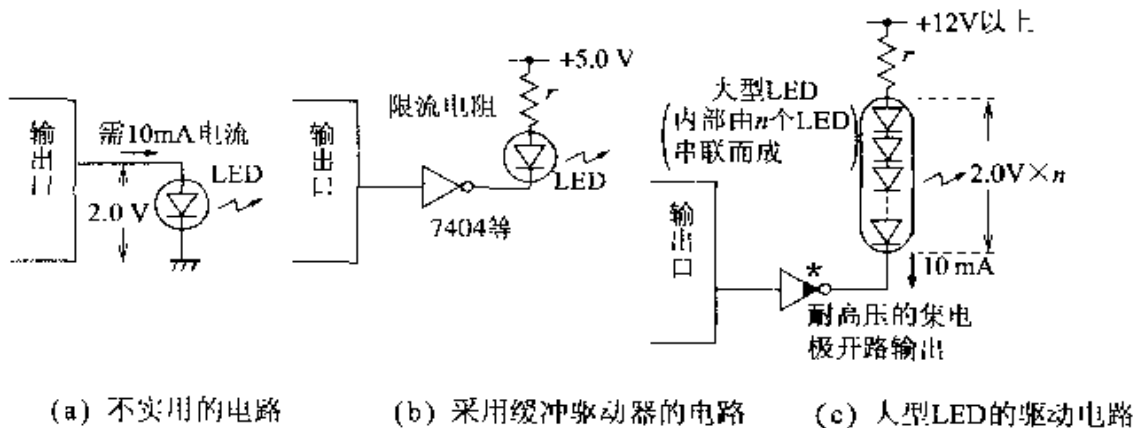


图 6.17 LED 的驱动电路

因此,在实际的电路中,通常采用图 6.17(b)所示的电路,在计算机输出口与 LED 之间加入一个缓冲驱动器。从表 6.4 中所给的电气参数中可以看出,由于缓冲驱动器 7404,在输出低电平时的灌电流( $I_{OL}$ )要比输出高电平时的拉电流( $I_{OH}$ )大很多,因此,

## 大型 LED

可以按图 6.17(b)所示的方法组成驱动电路。此外,若采用集电极开路输出型的缓冲驱动器(如 7406)构成如图 6.17(c)所示的电路,还可以驱动大型 LED。

## ● 七段 LED 的显示

当使用七段 LED 进行显示时,可以采用图 6.18(a)所示的方式,将数据从输出口经缓冲驱动器(如 74LS541 等)直接接至七段 LED 的各个段上,也可以采用图 6.18(b)所示的方式,将输出的数据经译码器(74246 等)译码后再接至各个 LED 上。当采用图 6.18(a)所示的方式时,输出的数据需要通过程序进行代码转换,完成这种代码转换的程序称为接口程序。

## 接口程序

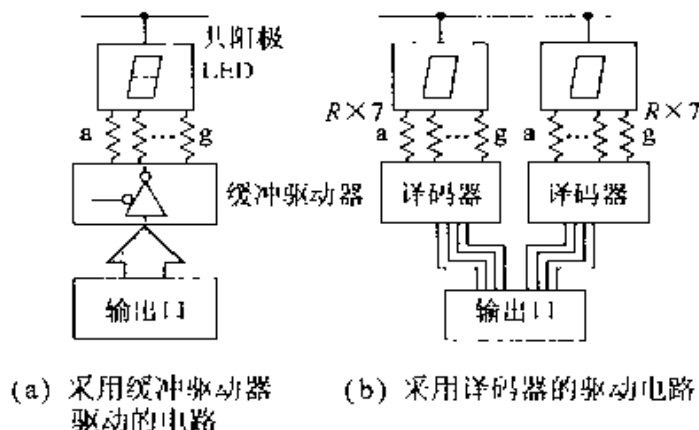


图 6.18 七段数码管的驱动电路

## □ 相关知识 ● 达林顿驱动电流

## 达林顿三极管

在表 6.3 中给出的达林顿驱动电流( $I_{OH0}$ ),是指为了用输出口驱动达林顿三极管(Darlington transistor)直接控制强电设备时,引脚允许流入的灌电流。

## 硅三极管

如图 6.19 所示,为了使达林顿三极管导通(ON),需要在它的基极与发射极之间加一个约为一般硅三极管(silicon transistor)导通电压( $V_{BEON}$  约 0.7V)两倍的电压。因此,表 6.3 中给出的数值,表示当输出为达林顿三极管导通所需的 1.5V 电压时,允许流入的基极电流

表 6.4 7404 的电气参数

输出电流特性 (总输出)	$I_H \rightarrow 0.4\text{mA}$
	$I_L \rightarrow 16\text{mA}$



图 6.19 达林顿三极管

## 8 输入接口电路的功能

### 要 点

从输入设备输入的数据要通过输入口传送给计算机。在这一过程中,需要对输入设备与输入口之间传输的信号进行电平转换,并需要对数据传输的时序进行控制。能够使被传输的信号实现这种在电气上、时间上相互匹配的电路称为接口电路。除了硬件电路之外,接口电路还需要有称为接口程序的相应软件来配合。

### 解 释

#### ● TTL 电路的输入电平

多数计算机的输入电平都规定为 TTL 电平。TTL 的输入电平规定:输入低电平  $L(V_{OL})$  为 0.8V 以下,输入高电平  $H(V_{OH})$  为 2.0V 以上。

从 COMS 型 Z80PIO 的电气参数表(第 6.7 节中的表 6.3)中可以看出,它的  $V_{OH}$  要比 TTL 输入电平高出 10% 左右,因此,可以认为它的输入电平就是 TTL 的输入电平。

#### ● 简单的开关输入电路

图 6.20(a)所示为一个最简单开关输入电路。图中上拉电阻 (pull-up resistor) 的作用是当开关在处于 OFF 状态时能将 II 电平传送给输入缓冲器或输入口。

上拉电阻的阻值越小,当开关处于断开状态(OFF)时,被传输的 II 电平值就越高,但同时,当开关处于闭合状态(ON)时,流过开关触点的电流就会越大。因此,当采用这种电路时,上拉电阻的阻值,应在全面考虑开关的触点电流和整个电路的功耗电流后再确定。

#### ● 开关的去抖

当电路中使用带机械触点的开关时,在开关进行开、闭的瞬间,由于开关簧片的反弹(bounce)会导致输出信号的抖动(chattering),即开关或继电器的触点在开、闭操作的瞬间,因机械振动会导致输出信号产生不规则的波动。

在图 6.20(a)所示的电路中,由于开关的抖动会使输入信号变成图 6.20(b)所示的波形。如果 CPU 在读取开关状态信号时正好发生开关抖动,就可能导致数据的读取错误。

因此,需要采用如图 6.21 所示的电路,去除这种开关的抖动现象。

TTL 电平

上拉电阻

触点电流  
功耗电流

反弹

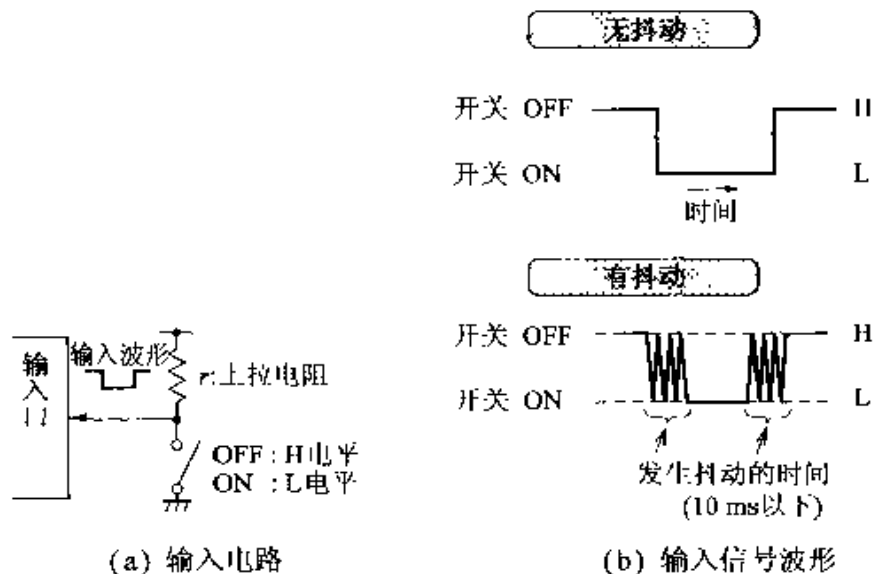


图 6.20 简单的开关输入电路

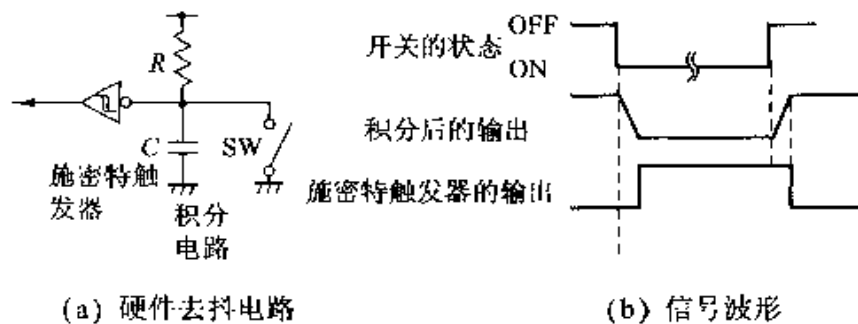


图 6.21 硬件去抖电路及工作原理

此外,若按照图 6.22 所示的方法,通过程序对输入的开关信号进行处理,也能够去除图 6.20 电路中因开关抖动引起的读取错误。这种方法也称软件去抖。

● 去抖电路

积分电路

在图 6.21 所示的硬件去抖电路中,电阻  $R$  与电容  $C$  构成了一个积分电路。这个电路的功能是:当开关(SW)执行 ON、OFF 操作时,由于积分电路的存在,使得频率很高的抖动信号不会在输出端反映出来。

施密特电路

从图 6.21(b)可以看出,经过积分电路处理后的开关输出信号,H、L 的过渡状态将会变得比较平缓。若将这种比较圆滑的波形经过施密特电路整形处理后再传送给计算机,就可以得到标准的矩形信号。



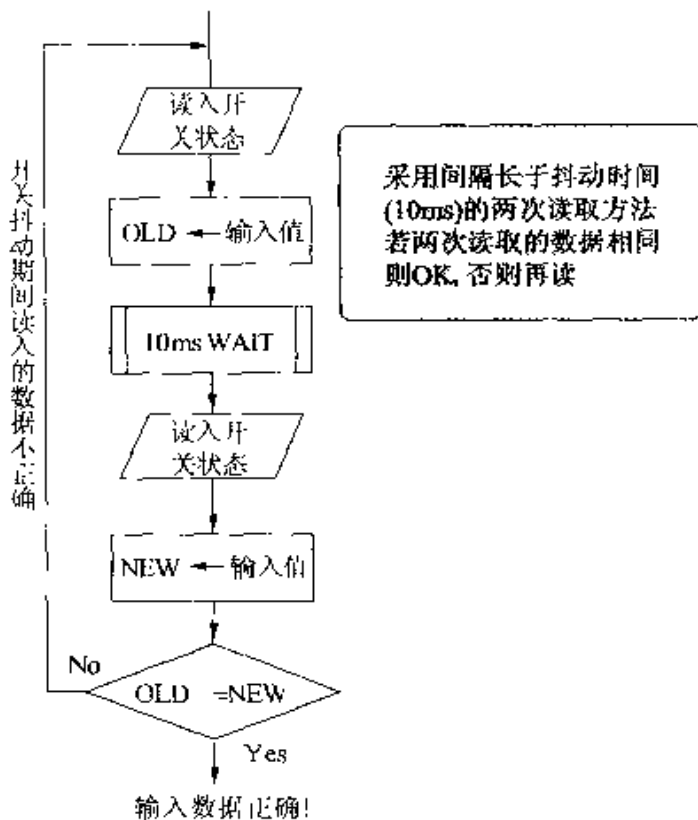


图 6.22 软件去抖的流程图

## 相关知识 ● 输入信号的隔离

当信号传输距离很长,开关电路与计算机必须分别使用不同的电源供电时,或者整个电路虽然采用同一电源供电,但由于电源线上存在很强的干扰(噪声),可能导致被传输的信号发生畸变时,可以采用如图 6.23 所示的电路,通过光耦(photo coupler)对输入信号进行隔离(isolation)。

光耦

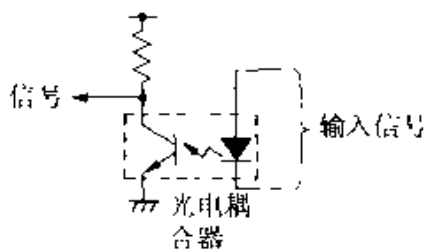


图 6.23 信号隔离电路

## 9 动态显示的工作原理

### □ 要点

当需要使用多位七段数码管或者是将多个LED排列成矩阵式点阵进行显示时,如果系统中具有与LED个数相等的输出口,当然可以实现这种显示。但是,若采用这种显示方法,显示一位包括小数点在内的七段数码管,就需要一个8位的输出口,若要显示的位数很多时,需要的输出口会更多,这是很不经济的。通常,仅用两个输出口就可以完成这种显示。用其中一个口的输出来指定要显示的数码管,用另一个口输出该数码管要显示的数据。

### □ 解释 ● 动态显示的例子

图6.24所示为一个用8位七段数码管构成的显示电路。在这个电路中,B口输出的数据,用来指定8个数码管(LED1到LED8)中的一个导通,A口则输出该数码管要显示的图形数据。从LED1到LED8重复执行这样的显示操作,就可以将8位要显示的数据全部显示出来。

当以很高的速度重复进行这种操作时(1秒钟内重复50遍以上),由于人眼睛的视觉残留效应,就会使人感觉这8个数码管似乎是同时点亮。在实际应用中,为了避免由于荧光灯等干涉效应造成的显示闪烁现象,需要让这种显示在1秒钟内重复上百次。

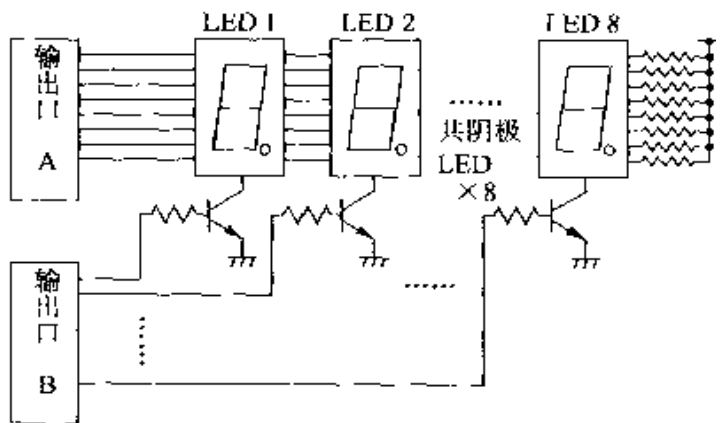


图 6.24 多位七段数码管的动态显示电路图

### ● 采用动态显示需要注意的问题

当采用图6.24所示的电路进行动态显示时,各数码管的点亮时间是全部数码管都点亮一遍时间的 $1/8$ ,因此亮度也就是同时

点亮 8 个数码管时的  $1/8$ 。为此,若通常点亮数码管中每段 LED 要用 10mA 电流,那么采用动态方式进行显示时,就需要使流过数码管每段 LED 的电流达到 80mA,而且为了使各数码管能够稳定地显示,还必须不断地执行显示程序。

为了方便用户搭建动态显示电路,器件厂家生产了多种用硬件实现数码管动态显示的 LSI 芯片。

## 相关知识

### ● 暗电流

当开、关闭白炽灯时,由于其结构上的原因,灯丝会在开关开、闭的瞬间流过一个很大的电流(冲击电流)。因此,对于动态显示这种高速重复 ON、OFF 的操作,灯丝会很快烧断的。为了解决这一问题,可以令灯丝在不发光时也不完全处于 OFF 状态,而是还流过一定的电流,只是这个电流不足以使其发光,这种电流就称为暗电流(dark current)。采用暗电流方式,即使采用白炽灯也可以实现动态显示。

冲击电流

### ● 其它显示器件或设备

**CRT 显示器** CRT 显示器与电视机显示器的显示原理相同,都是在 CRT(cathode ray tube)管面上显示图形和文字。在 CRT 中,电子束需要扫描整个管面。当电子束扫描到管面上需要显示的位置时,有选择地使其发光,就可以在管面上形成图形或文字。由于管面是用荧光粉发光的,具有发光残留时间,因此若能在 1s 钟内扫描 60 帧左右的画面就可以得到稳定的显示。然而,在这种显示过程中需要传输大量的显示数据,为了减少 CPU 传输这些数据所占用的时间,通常将要显示的数据预先存放到 VRAM(video RAM)中,再由一个 LSI 化的专用芯片 CRTIC(CRT controller)控制这些数据的输出。

电视机显示器

LCD

**LCD** LCD(liquid crystal display)就是液晶显示器。它是利用给液晶施加不同电压时液晶的相位方向将发生改变(透光与不透光)这一原理制成的一种显示器件。它与七段数码管或点阵式显示器相同,都是采用动态扫描方式进行显示,基本结构也与 CRT 相似,可以用来替代 CRT 显示器。在显示时,要将显示数据以比 CRT 扫描频率更高的频率重复输出,并且,这种数据输出是由专用的 LCDC(LCD controller)来控制完成的。为了提高 LCD 的响应速度,目前广泛采用各液晶点都配有三极管的 TFT(薄膜晶体管;thin film transistor)LCD。

LCDC

# 10 矩阵式输入

□ 要

点

当需要从键盘之类具有很多开关的外设向计算机输入数据时,如果系统中具有与开关个数相同的输入口,自然可以实现这种数据输入。然而,若采用上述方法从64键的键盘中输入数据时,就需要有8个8位的输入口,这样会大大降低输入口的利用效率。对于这种情况,通常可以采用两个口,将开关在两个口之间排列成矩阵(matrix)状,用一个口作输出,用输出的数据扫描(scan)一组按键;用另一个口作输入,读取该组按键的状态。

□ 解

释

## ● 矩阵式输入的例子

— 列按键

图6.25所示为一个64键的键盘电路图。在这个电路中,A口输出的数据用来选择一列按键(图中的一个纵向列);从B口读入的数据则表示该列按键的状态。例如,若A口输出只有第7位A<sub>7</sub>为L、其它位为H的数据时,就可以选择最左边的一列按键,此时,从B口读入的数据就表示该列按键的状态。

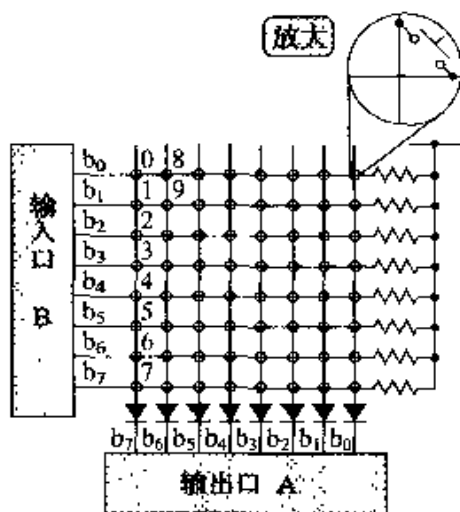


图 6.25 64 键的键盘电路

若此时从 B 口读入的数据中没有为 L 电平的数据位,就说明 0~7 号键中没有键按下。若此时 A 口输出的是第 6 位为 L、其它位为 H 的数据,那么,当从 B 口读入的数据中,若第 1 位为 L、其它位都为 H 时,就可以断定第 9 号键被按下。

### ● 矩阵式输入应注意的问题

从图 6.25 中可以看出,在 A 口各输出引脚上都接有一个二极管,这是为防止键盘同一行按键中有多个键同时按下时输出口的输出状态发生冲突。

按键开关

例如,当 0 号和 8 号按键开关同时按下时,在扫描 0~7 号键时,从 A 口输出的数据就应该是第 7 位为 L,其它位都为 H。假如没有二极管,当 0 号和 8 号键同时按下时,A 口第 7 位与第 6 位的输出就将发生短路。尽管此时 A 口第 7 位应输出 L、第 6 位应输出 H,但由于输出短路,使得这两位的输出状态不定。若在电路中加入二极管,则当第 6 位输出为 H 时,与其相接的二极管会因反偏而截止,因此不会对第 7 位的输出造成影响。

在实际的电路中,仅采取上述措施,还不能完全解决多个按键同时按下所带来的问题。例如,即使采用图 6.25 所示的电路,若 0 号键、8 号键、还有 9 号键同时按下,为扫描 0~7 号键,A 口的输出应该是第 7 位为 L,其它位为 H,而此时从 B 口读入的数据中,第 0 位、第 1 位都为 L,这样就会造成 0 键、1 键都被按下的错误判断。为了防止这种误判,可以采用图 6.26 所示的方法,在每个按键上都接一个二极管。采用这种方法会使键盘成本增加,考虑到三个以上按键同时按下的概率很小,因此在很多情况下都会省去图 6.26 中的二极管。

但系统的设计者对这类问题必须做到心中有数,否则就会导致意想不到的失败。

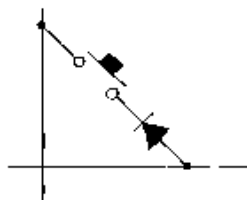


图 6.26 防误判电路

## □ 相关知识 ● 编码键盘 LSI

ASCII 码

有一类 LSI 芯片,采用硬件方式扫描矩阵式排列的键盘,当键盘中有键按下时,它能输出该键所对应的代码(如 ASCII 码等)。现在,在很多数字控制(NC: numerical control)的仪表的面板上都采用了这种 LSI 芯片。在此类 LSI 芯片中,有些除了具有键盘扫描功能外,还具有驱动七段数码管进行动态显示的功能。

# 11 D/A 转换器的种类及工作原理

## □ 要点

计算机输出的信号都是数字信号,而被控的输出设备中有很多是需要用模拟信号加以控制的。因此,掌握将数字信号转换成模拟信号的 D/A 转换技术非常重要。实现 D/A 转换的方法有很多,在实际应用中,应根据转换精度及转换时间的要求加以选择。

## □ 解释

### ● D/A 转换器的种类

在表 6.5 中,列出了典型 D/A 转换器的种类及其特点。

表 6.5 D/A 转换器的种类及特点

名称	加权电阻型	T 型	脉冲调制型	频率调制型	加权恒流型
建立时间	中	短	长	长	短
分辨率	低	中	中	低	高
结构	简单	简单	稍微复杂	稍微复杂	略微复杂

### ● D/A 转换器的工作原理

实现 D/A 转换的方法有很多。在此,将介绍电路结构比较简单的加权电阻型和 T 型(R-2R 梯形)D/A 转换器的基本电路及其工作原理。

#### 恒流开关型

**加权电阻型** 加权电阻型 D/A 转换器的基本电路,如图 6.27 所示。在该电路中,各电阻的阻值按 2 的指数增加,它将恒压源的电压作为输入数据,加在这些电阻上,因此也称它为恒流开关型 D/A 转换器。从图中可以看出,这种 D/A 转换器是由各位都带有固定系数的模拟加法器构成。采用这种方式,容易制成高速型 D/A 转换器,但必须配备与转换位数相同种类的高精度电阻。这种电路的数据建立时间(从转换开始至输出模拟电压达到容许范围的时间)并不是很短。

#### 数据建立时间

#### 阻抗变换

**T 型(R-2R 梯形)** T 型 D/A 转换器的基本电路,如图 6.28 所示。在该电路中,电阻的种类只有两种且与转换位数无关。图中的 OP(运算放大器)的作用是电压跟随器,用来防止负载发生变化时转换器的输出随之变化,可起到阻抗变换作用。

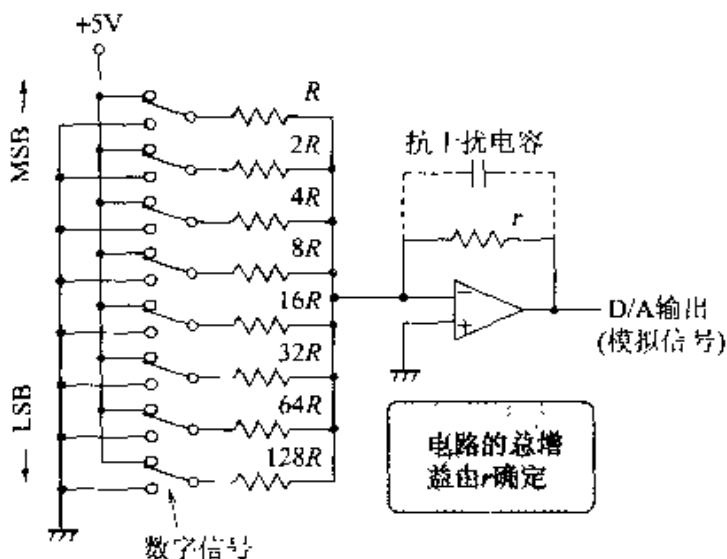


图 6.27 加权电阻型 D/A 转换器

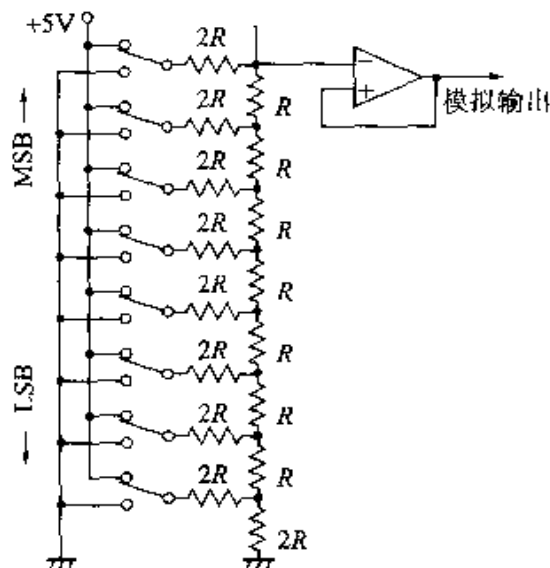


图 6.28 R-2RT 型 D/A 转换器

### 相关知识 ● 模拟开关

从上面的基本电路图中可以看出,输入 D/A 转换器的数字信号,必须是 0V 或者是  $V_{CC}$  (5.0V) 的电平信号。而一般数字 IC 的输出电压并不能满足这种要求。因此,在进行 D/A 转换时,必须采用可由数字信号控制开关状态 (ON、OFF) 的模拟开关,将各位数据所对应的 0V 或者  $V_{CC}$  的信号电平输入给 D/A 转换器。若 D/A 转换器的输入阻抗相对 CMOS 的输出阻抗比较高时,可利用

CMOS 电路输出电压接近  $0V$  或  $V_{cc}$  的这一特点,直接将 CPU 输出口(指 CMOS 缓冲器)接到 D/A 转换器的输入端。采用这种方式时,无论是加权电阻型 D/A 转换器还是 T 型 D/A 转换器,其内部电阻  $R$  的取值必须保证在  $100k\Omega$  以上。

### ● 输出滤波器

若将表示声音等等的数字信号经 D/A 转换器直接输出时,如图 6.29 所示,其输出波形将是阶梯状的,其中会含有很多不应有的高次谐波。当需要消除这些高次谐波时,需要在 D/A 转换器的输出端加一个罗伯斯滤波器(低通滤波器),滤除这些高次谐波。

罗伯斯滤波器  
低通滤波器

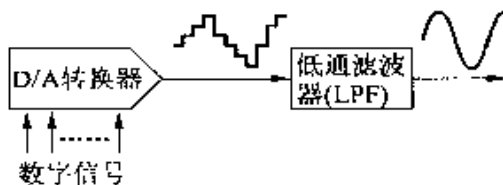


图 6.29 D/A 转换器输出的高次谐波噪声

## 选修知识

### MSB 与 LSB

在用一字节表示 8 个开关 ON、OFF 状态(0 或 1)的数据中,其中的最高位称为 MSB(most significant bit)、最低位称为 LSB(least significant bit)。

### RAMDAC

在彩色 CRT 显示器特别是在低档的显示设备中,常常采用称为 RAMDAC 或者带彩色模版的视频 DAC 输出色彩数据。

它将 VRAM 中的数字信号转换成模拟信号后输出给显示器,其内部含有一个称为彩色模版的色彩表,参照这个表就可以确定 VRAM 中要显示内容的颜色。通过更改彩色模版中的定义,可以令 VRAM 中色彩数据与要显示颜色的对应关系发生变化。利用这种功能,可以使用较少的 RAM 显示较多种颜色。例如,利用 16 色的视频 DAC 可以显示 4096 色。但是,应该注意的是采用这种方式能同时显示的颜色数是固定不变的。

此外,在采用 LCD 进行显示时,为了使 CPU 输出的数字信号能够直接输出给 LCD,一般不再需要进行 D/A 转换,因此,通常的 LCDC 内部都具有相当于彩色模版的功能。



## 12 A/D 转换器的种类及工作原理

### □ 要 点

计算机只能处理数字信号,而从传感器等外部设备输入的信号一般都是模拟信号。将这种模拟信号转换成计算机能处理的数字信号的器件称为 A/D 转换器。实现 A/D 转换的方法有很多,在实际应用中,应根据转换精度及转换时间的要求加以选择。

### □ 解 释 ● A/D 转换器的种类

在表 6.6 中列出了典型 A/D 转换器的种类及特点。

表 6.6 A/D 转换器的种类

参数	双重积分型	逐次比较型	跟踪比较型	并行比较型
特点	利用电容充放电原理,通过测量(计数)放电时间来测量模拟量,多用于高分辨率产品	内部具有 D/A 转换器,分辨率中等的产品居多	与逐次比较型的结构相似,但内部不是采用逐次比较寄存器而是采用加、减计数器	内部具有与分辨率个数相同的比较器,转换速度快,但分辨率较低
转换速度	低速	中高速	中低速	高速

### ● A/D 转换器的工作原理

几乎所有 A/D 转换器都是由图 6.30 所示结构框图构成的,其工作原理是:首先将寄存器中设定的数值进行 D/A 转换,再将其输出的模拟量与待转换的输入模拟量在比较器中进行比较。若 D/A 转换器的输出比输入模拟量小,就增加寄存器中的数值;若 D/A 转换器的输出比输入模拟量大,就减小寄存器中的数值。重复上述处理,最终在寄存器中得到的数据,就是转换后的对应数字量。

**双重积分型** 图 6.30(a)所示为双重积分型 A/D 转换器的框图。其转换原理是:先将开关  $S_1$  置于 ON 状态、 $S_2$  置于 OFF 状态,将输入的模拟电压  $V_i$  按固定时间进行积分,然后,再将开关  $S_1$  置于 OFF、 $S_2$  置于 ON,对刚刚得到的积分输出电压按基准电压  $-V_r$  进行反向积分。这样,令积分器输出回零时的时间间隔就会与输入电压  $V_i$  成正比,若将这段时间用时钟脉冲(clock pulse)进行

比较器

时钟脉冲

计数,就可以得到相应的数字量。这一原理如图 6.30(b)所示,从原理上来讲,采用这种转换方式,转换精度非常高,但转换速度比较慢。

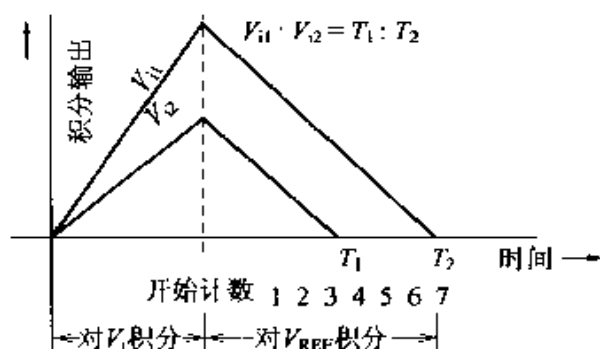
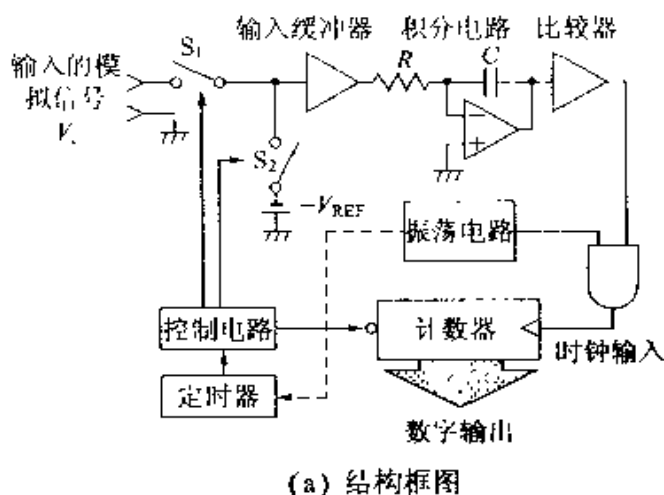


图 6.30 双重积分型 A/D 转换器

### 逐次比较寄存器

**逐次比较型** 图 6.31(a)所示为逐次比较型 A/D 转换器的结构框图。其转换原理是:首先,将逐次比较寄存器(SAR; successive approximation register)中的最高位(MSB)置为 H,其余位置为 L,令 D/A 转换器的输出值为满量程的 1/2,并将这一结果与输入的模拟电压进行比较。若输入模拟电压比 D/A 转换器的输出电压高,就保持逐次比较寄存器最高位的 H 不变;若输入的模拟电压比 D/A 转换器的输出电压低,就将逐次比较寄存器的最高位置为 L。然后,再将逐次比较寄存器的 1/4 位置为 H,重复上面的比较过程,直至逐次比较寄存器的最低位也进行了同样的处理。最后,在逐次比较寄存器中得到的数据就是转换后的数字量。这种方式的转换时间与待转换电压无关,逐次比较寄存器的每一位

都经过处理后转换就可结束。由于采用这种转换方式的电路易于 IC 化,因此很多中速、高精度、廉价的集成 A/D 转换器都采用这种转换方式。

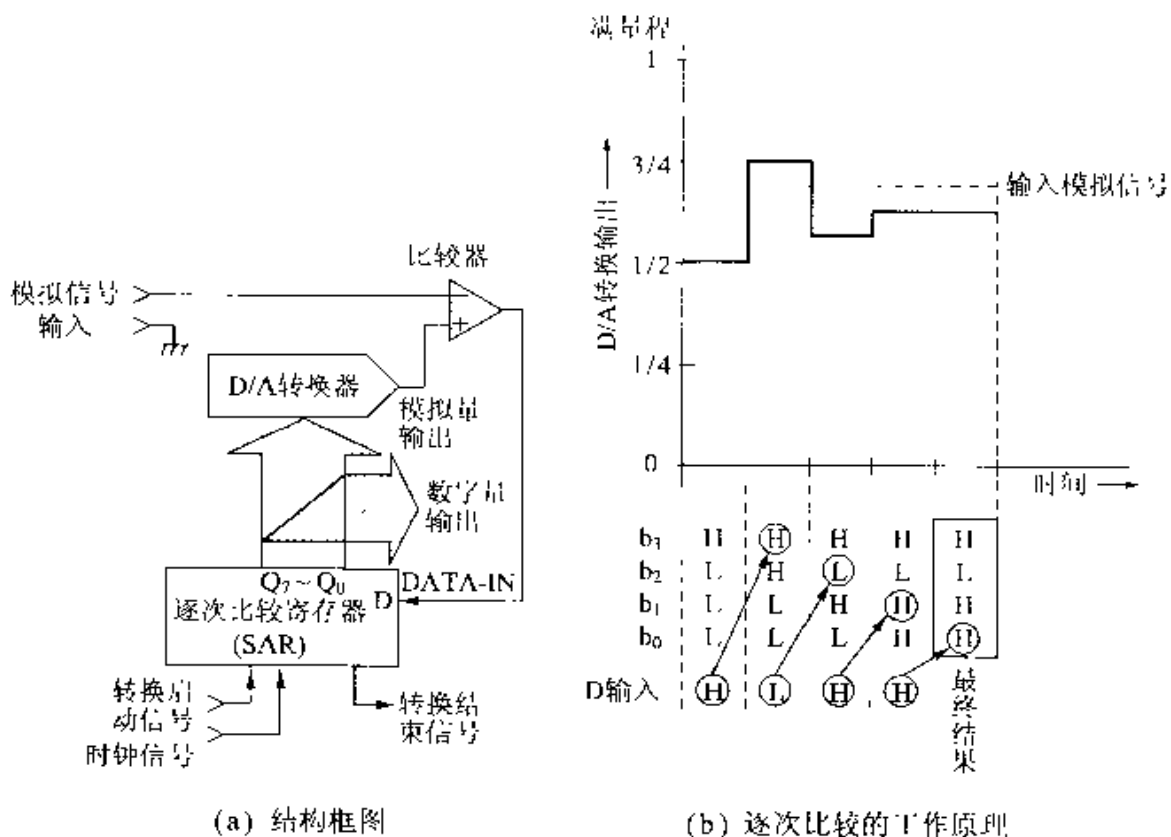


图 6.31 逐次比较型 A/D 转换器

**跟踪比较型** 图 6.32(a)所示为跟踪比较型 A/D 转换器的结构框图。从图中可以看出,它与图 6.31 所示的逐次比较型结构十分相似,不同之处是跟踪比较型 A/D 转换器中的寄存器是采用加/减(up/down)计数器。它可以通过计数器中数值的自我加减,一直跟踪输入的模拟信号电压,因此采用这种 A/D 转换器可以得到图 6.32(b)所示的连续转换结果。然而,由于这种计数器只能按 1 进行增减,因此,如图 6.32(b)所示,它可以跟踪模拟信号的频率范围是有限的。

**并行比较型** 图 6.33 所示为并行比较型 A/D 转换器的结构框图。从图中可以看出,在这种 A/D 转换器的输入端并联有若干个比较器,比较器的个数与该转换器的分辨率相等。如果是 8 位 A/D 转换器,就需要并接上  $2^8$  个比较器,它们将转换器的满量程电压进行 256 等分,并将这些电压作为各比较器的基准电压,从而

## 编码器

一次性地完成 A/D 转换。从比较器输出的 256 个数字信号,经编码器编码后就得到 8 位的转换结果。采用这种方式制成的转换器,要想提高其分辨率,比较器的数目就会成指数倍地增加。因此,这类转换器的分辨率一般不会做得很高,但由于其转换速度最快,所以在图像处理等领域中会经常采用。

## 图像处理

## 相关知识 ● 采样保持器

除跟踪比较型、并行比较型的 A/D 转换器之外,其余类型的 A/D 转换器,在进行 A/D 转换的过程中,若输入的模拟信号发生变化,就不能得到正确的转换结果。为此,需要在转换器前面加上一个采样保持器(sample and hold),使 A/D 转换器在进行转换的

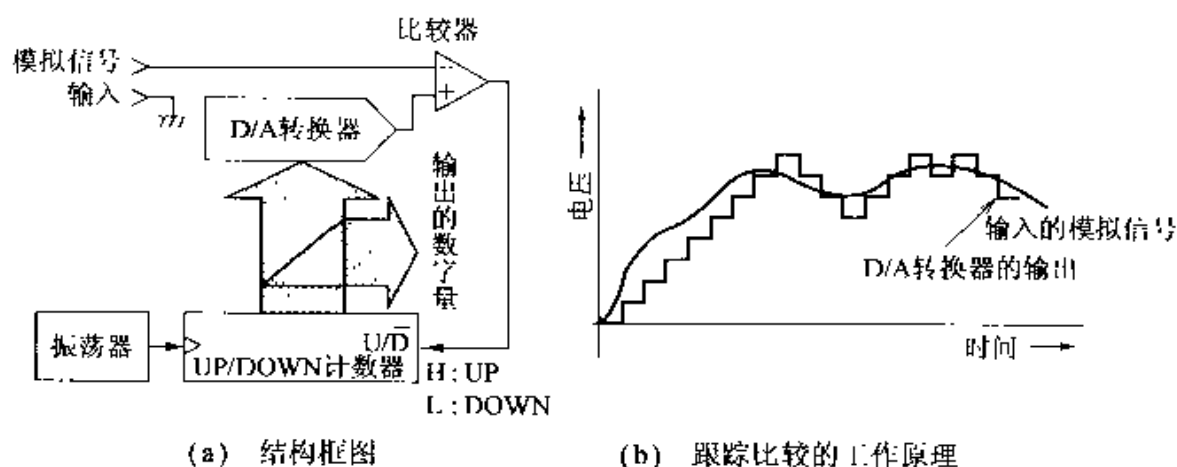


图 6.32 跟踪比较型的 D/A 转换器

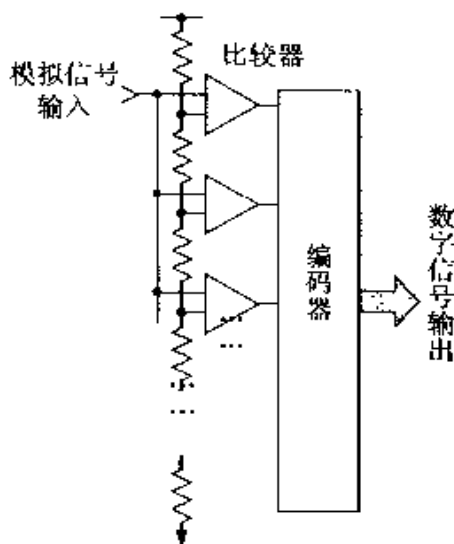


图 6.33 并行比较型 A/D 转换器

过程中,能够保持待转换的模拟信号不变。

### ● 采样定理

当输入信号为变化的信号时,采样频率必须达到输入信号频率的 2 倍以上,否则将会丢失输入信号的频率成分,这个定理称为采样定理(sampling theorem)。若输入信号的频率高于采样频率,则采样输出信号的频率将是这两个频率之差,如图 6.34 所示。若输入信号的频率略低于采样频率,则采样输出信号的频率将被这个差频所调制。上述这些非输入信号频率的信号称为折叠噪声(aliasing noise)或差频噪声。

折叠噪声  
差频噪声

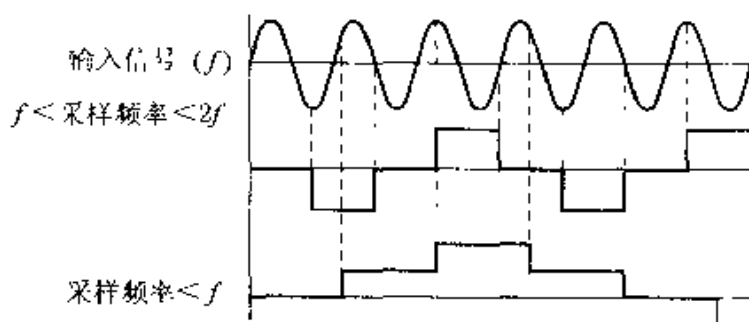


图 6.34 折叠噪声

### ● 输入滤波器

对变化的信号进行 A/D 转换时,为消除折叠干扰,必须防止频率高于采样频率 1/2 的信号进入采样电路的输入端。因此,要在采样电路的前面加上一个截止频率小于 1/2 采样频率的罗伯斯滤波器。

罗伯斯滤波器

由于使用这种滤波器的目的是为了消除折叠噪声,所以也称之为抗折叠滤波器(anti-aliasing)。

## ■ 选修知识 ADPCM

在 CD 等数字音频设备中,普遍采用一种称为 ADPCM(adaptive differential pulse code modulation)的高效压缩方式,对声音信号进行数字压缩处理。

CD 采用 44.1kHz 的采样频率,用 16 位数字对音频信号进行量化。若将这种量化后的数据直接按 PCM 方式存储,就会产生每分钟高达 11M 字节的数据。为了减少数据的存储量,可以采用只存储单位时间内数据变化量的方法,这种数据处理方法称为 ADPCM 压缩。

在数字音频类设备中,由于采用了 ADPCM 压缩技术,因此可以用较小的信息量得到较大的动态范围音频效果。

# 13 中断处理的工作原理

## 要 点

CPU 具有响应外部设备请求,中断(暂时停止)正在执行的程序,先去执行为该外设服务程序的中断(interruption)处理功能。这种中断处理功能常用于对电源异常等系统特殊情况采取紧急处理,也可用于进行高效率的数据输入输出处理。

计算机在执行完相应的中断服务程序之后,会自动返回并继续执行被中断的程序。

## 解 释

### ● 中断的种类

一般来说,CPU 都具有两种中断请求输入信号线。一种是由指令使其无效的中断请求线,另一种是不能通过指令使其无效的中断请求线。前者称为可屏蔽中断请求线 INT(INTERRUPT),后者称为非屏蔽中断请求线 NMI(non maskable interrupt)。在实际应用中,INT 线多用于接收外围设备的服务请求,以便能高效地进行数据的输入输出处理;NMI 线则常用于监测电源掉电等系统异常之类需要最优先处理的场合。

### ● 中断处理的过程

当中断未被禁止时,CPU 在执行完每一条指令时都要检测系统中是否有中断请求。若有中断请求,CPU 就会暂时中断正在执行的程序先进行中断处理。若在执行中断处理的过程中,将被中断程序所需要的寄存器中的内容及标志(flag)信息丢失,那么当 CPU 执行完中断处理后,就不能正确地返回到被中断的程序中继续执行。因此,在执行中断服务之前,要将这些信息存放到堆栈中保存,当 CPU 执行完中断服务程序后,先将这些信息从堆栈中恢复出来,再返回到被中断的程序中继续执行,这一过程如图 6.35 所示。

### ● 中断处理的优先顺序及中断嵌套

通常,可以向计算机提出中断请求的设备(中断源)不止一个,CPU 仅接收到中断请求信号,还无法断定应该执行哪个服务程序。因此,CPU 在接收中断请求信号后,需要输出中断响应信号,中断源收到这个响应信号后,再向 CPU 输出要指定处理的向量(vector)和命令,CPU 根据这些信息执行相应的服务程序。但是,在上面的过程中,如果有多个中断源同时提出请求,CPU 就需要确定首先接受哪个请求。为此,需要给每个中断源赋予一个优先

可屏蔽中断请求线  
非屏蔽中断请求线

寄存器  
标志信息  
堆栈

中断响应信号  
向量  
命令

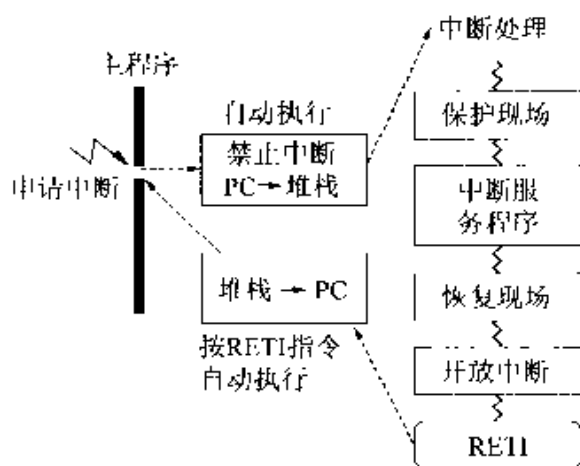


图 6.35 中断处理的流程

级。此外,CPU 在执行中断服务程序的过程中,不会接收比已接受请求优先级还低的中断请求;但是,若是比已接受请求优先级高的请求,则 CPU 就会暂时停止(中断)正在处理的中断服务程序,去响应这个更高级的中断请求。这后一种情况称为中断嵌套。中断嵌套的处理过程如图 6.36 所示。

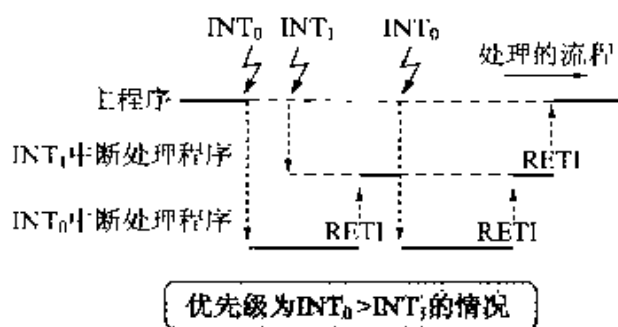


图 6.36 中断嵌套的处理过程

## □ 相关知识 ● 优先级编码器 (priority encoder)

用于确定中断优先级的编码器,称为优先级编码器。

## ● 内部中断

内部中断也称为软件中断,是一种由 CPU 内部原因引发的中断。引发内部中断的原因有:运算结果溢出、除数为 0、以及执行系统的功能调用指令 (supervisor call instruction) 等等。与此相反,由中断请求线引发的中断称为外部中断。

## 定时器

## ● 定时器中断

由定时器每隔固定时间引发的中断称为定时器中断。利用这种中断可以实现高效率的数据输入输出处理及多任务(multi task)处理。

## ● 标志(flag)

标志是用于表示数据是否可以传送以及数据传输准备是否就绪等指示性信息。在进行数据运算和比较时,也常通过一些标志来检查运算结果是否为负或被比较的两个数是否相同等等。

## ● 堆 栈

堆栈是按先入后出原则存取数据、具有特殊结构的存储器。其中的数据存储过程与我们在货栈里存取货物的过程相同,最先存入的货物要等到最后才能取出。所以,我们将具有这种特点的存储器结构称为堆栈(stack)。

## ● 输入缓存

如果每当输入设备中产生新的数据时,就立即以中断方式通知CPU,CPU在中断服务程序中读取这些数据,这样就可以确保数据能可靠输入。然而,输入设备中产生数据的时刻,往往与程序中需对这些数据进行处理时刻无关。因此,当外部设备产生新数据时,可以先将这些数据保存到输入缓存器中,待程序需要时再由CPU进行处理。

## ● FIFO 缓冲器

## 先入先出

用于保存输入数据的缓存器,必须能够按照数据输入时的顺序将数据输出。为了实现这种数据的先入先出(FIFO: first in first out)功能,可以采用环形缓冲器或者专用的存储器来实现。

## ● 向量中断

向量中断是一种功能非常强的中断处理方式。当控制系统中有多个中断源时,采用向量中断的处理方式,能够使程序迅速转至对应服务程序的入口处。这种方式的处理方法是:事先将各个中断源所对应处理程序的入口地址存入向量表中,当有中断请求时,CPU利用中断源同时返回的中断向量号,通过中断向量表就可确定该中断服务程序的入口地址。



## 14 中断方式输出

**要 点** 当 CPU 向输出设备输出数据时,并不仅仅是简单地向外设中输出数据即可,而是要在输出数据之前,先确定输出设备可以接收这些数据后再进行数据传输。对于与 CPU 非同步工作的输出设备,利用中断使其与 CPU 同步,就可以实现高效的数据输出处理。

**解 释** ● 非中断方式的数据输出

当不采用中断方式进行数据输出时,如图 6.37 所示,需要通过程序来查询输出设备的接收准备是否就绪。通常,输出设备的处理速度要比 CPU 的处理速度慢很多。因此,采用这种方式进行数据输出时,CPU 的大部分时间都要耗费在这种状态查询(busy-check)上。如果能将输出设备的接收准备就绪信息作为中断申请信号,通过中断请求线通知 CPU,就可以使 CPU 节省状态查询时间来进行其它处理。

输出设备

状态查询

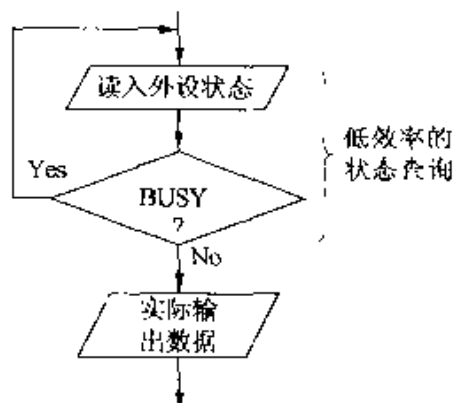


图 6.37 非中断方式的数据输出

● 中断方式的数据输出

中断方式的数据输出处理过程由两个处理部分组成。图 6.38(a)为输出请求管理部分(开中断部分),由程序设置允许相关外设接收准备就绪后向 CPU 申请中断;图 6.38(b)为中断处理部分,由它来实际执行数据的输出处理。采用这种处理方式,输出设备在数据接收准备就绪时,就可以通过中断请求线直接通知 CPU,从而实现高效的数据输出。

中断请求线

在图 6.39 中,分别给出了采用非中断方式及中断方式进行数据输出处理的流程图。

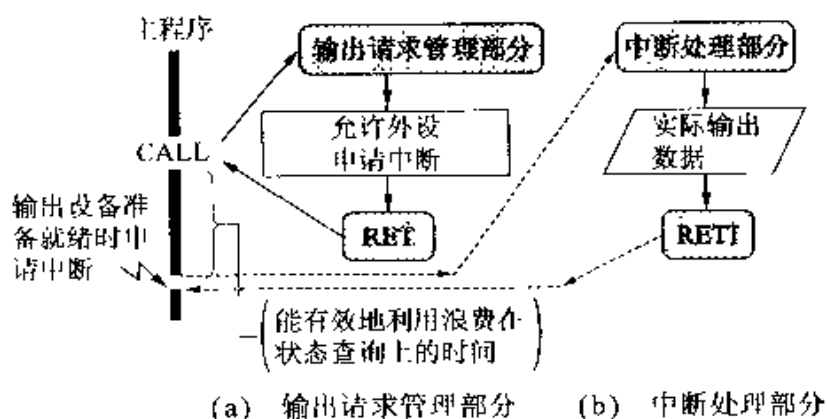


图 6.38 中断方式的数据输出

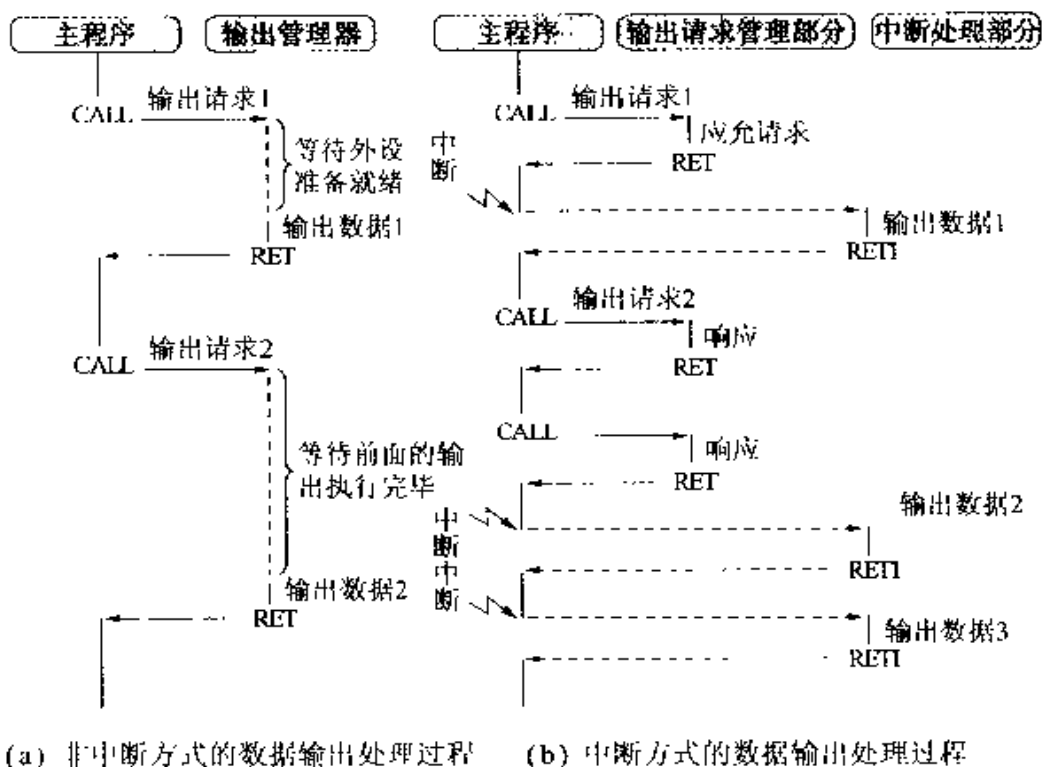


图 6.39 数据输出的处理过程

□ 相关知识 ● 假脱机 (spooling)

当计算机向打印机之类处理速度较慢的输出设备中连续输出数据时,若采用中断方式输出,就可以使计算机看起来是在打印的同时还在进行其它处理。

假脱机打印  
后台处理  
前台处理

这种打印方式称为假脱机打印 (printer spooling),其中打印处理称为后台处理,同时进行的其它处理则称为前台处理。

# 15 中断方式输入

**要 点** 通常,输入设备产生新数据的时刻,与 CPU 需要对该数据进行处理的时刻并不一致。利用中断功能,可以使这种非同步产生的新数据能可靠地输入给计算机。

**解 释** ● 非中断方式的数据输入

输入处理子程序

在输入数据时,若不采用中断方式的数据输入处理,就必须如图 6.40(a)所示,经常执行数据输入处理子程序,否则就可能发生图 6.40(b)所示的丢失输入数据现象;然而,频繁地执行数据输入处理子程序,又会降低 CPU 对数据输入以外事件的处理效率,参见图 6.40(c)。

中断请求线

若将输入设备中产生新数据的信息作为中断申请信号,通过中断请求线通知 CPU,就可以实现高效率的数据输入处理。

● 中断方式的数据输入

中断请求

中断方式的数据输入过程由两个处理部分组成,如图 6.41 所示。当输入设备中产生新数据时,可以通过中断请求通知 CPU,

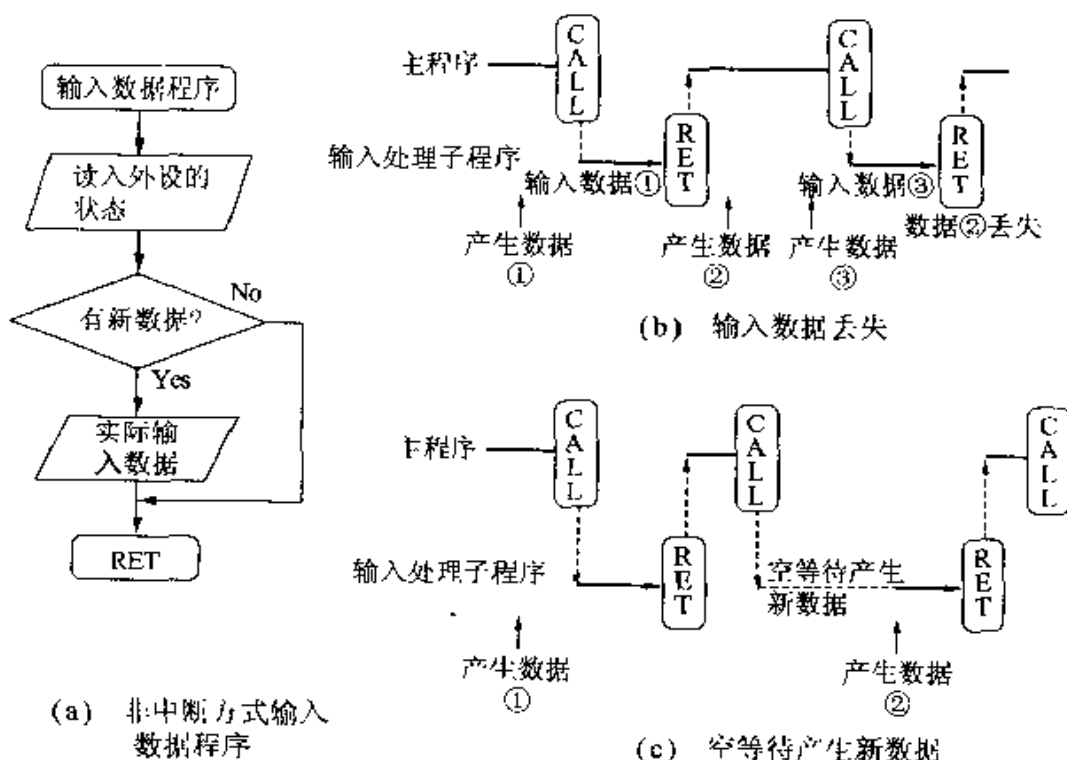
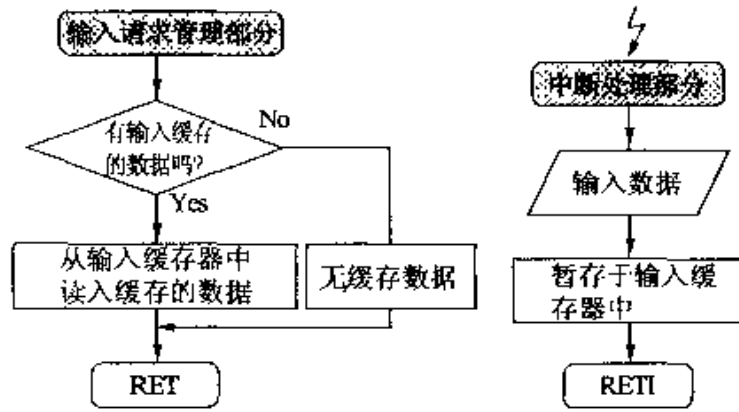


图 6.40 非中断方式数据输入处理的效果

CPU 接受中断申请后,在相应的中断服务程序(子程序)中进行数据的输入处理[图 6.41(b)],并将该数据存放到输入缓存器中。当应用程序中需要这些输入数据时,再由图 6.41(a)所示的子程序将存放在输入缓存器中的数据取出。中断方式的数据输入处理过程如图 6.42 所示。



(a) 输入请求管理部分 (b) 中断处理部分

图 6.41 中断方式的数据输入处理

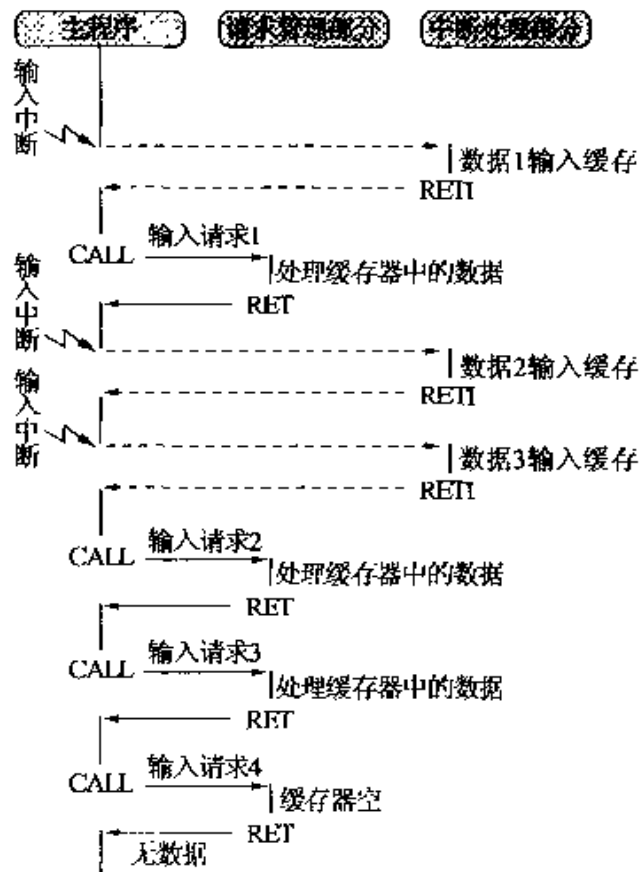


图 6.42 中断方式数据输入处理

## 16 高级中断技术——并行处理

**要 点** 多任务(multitask)处理是指CPU并行执行多个任务的处理方式,这种处理方式也称并行处理。在机电一体化系统中,常常需要计算机能同时对多个设备进行控制,对于这种情况必须采用并行处理技术。并行处理技术可应用高级的中断处理技术实现。

### 解 释 ● 并行处理技术

中断处理技术  
等待时间

尽管称为并行处理,但如果只有一个CPU,那么在某一时刻显然也只能执行一个程序。并行处理是利用中断处理技术,将某个处理中耗费在与输入输出相关的等待时间用于实际执行其它任务。若能将要处理的内容划分成多个任务,给每个任务分配一个很短的时间片,通过切换时间片就可以一点点地执行这些任务。这样,从宏观上看,就好像计算机在同时执行多个处理一样。

### ● 并行处理程序

在仅对A、B两个设备进行循环处理时,最简单的方法就是采用如图6.43(a)所示的方式。但是,若设备A的速度非常慢,耗费在输入输出处理的时间很多,那么对设备A的处理将成为整个处理程序的瓶颈,由此可能会造成对设备B的处理不及时。

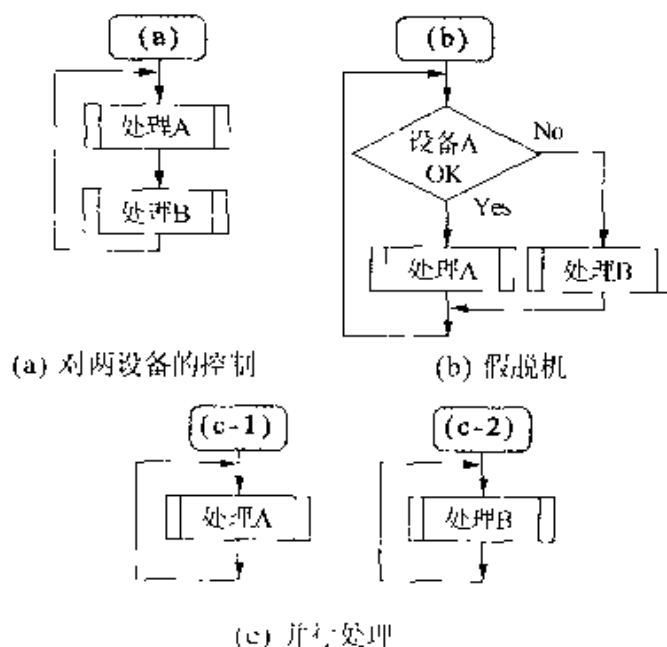


图 6.43 假脱机与并行处理

假脱机

因此,若将处理方法改为图 6.43(b)所示的方式,就可以在对设备 A 的处理过程中对设备 B 进行优先处理。从表面上看这种处理方式似乎是在对设备 B 处理的同时也在对设备 A 进行处理。这种处理方式称为假脱机。若在并行处理中能像图 6.43(c)那样,将要处理的问题划分成多个任务,并编写出相应的处理程序,就可以达到好像有多个 CPU 在分别执行各自任务的处理效果。

状态

### ● 任务状态(task status)

在监管多任务并行处理的任务监视器中,至少将要处理的每个任务化分成可执行状态(READY)、输入输出结束后的等待状态(WAIT)以及正在执行状态(RUN)这三种状态(三态)。

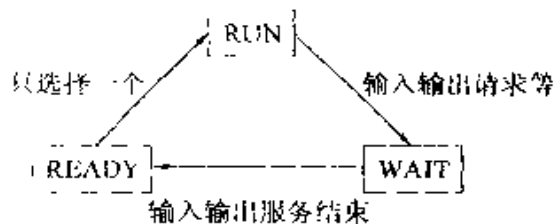


图 6.44 任务状态的转换过程

### ● 进 程

当需要同时进行几种处理时,操作系统中的任务监视器会根据优先级等条件从多个处于 READY 状态的任务中选择一个将其置为 RUN 状态。处于 RUN 状态的任务,又会通过该任务提出的输入输出请求而变成 WAIT 状态。处于 WAIT 状态的任务在前面提出的输入输出等请求被中断响应,并在执行完该响应的那一刻又被置为 READY 状态。这样,一个任务的状态在通过提出输入输出请求以及在执行完该请求所要求的输入输出处理那一刻而发生变化。这项工作是由任务监视器中的进程表(一种调度管理程序)来完成,它会根据优先级等多种条件,从处于 READY 状态的多个任务中,选择一个置为 RUN 状态,并由此开始进入执行该任务的执行过程,这一过程称为一个进程。

进程表

图 6.44 给出了任务状态的转换过程。图 6.45 给出了进程表的定位和处理流程。

## □ 相关知识 ● 任 务

在 UNIX 等操作系统(OS)中,将并行处理程序的基本单位定义为过程。过程是包含存储及输入输出文件等资源在内的一种单

位。与此相反,从 CPU 角度来看处理的基本单位称为任务。CPU 以任务为单位来分配时间,一个过程中包含多个任务。

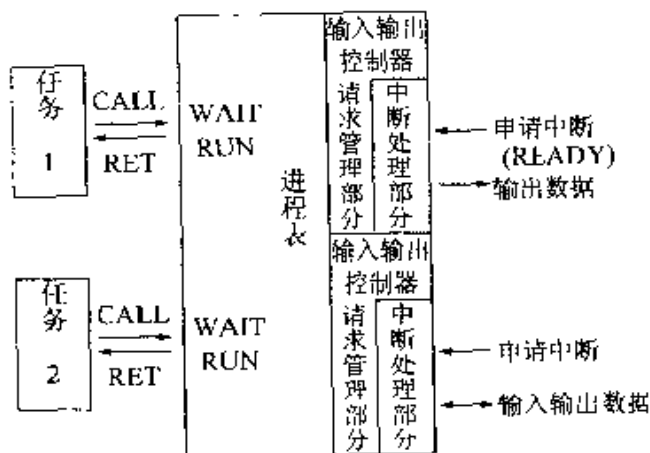


图 6.45 进程表及处理流程

### ● TCB

在进程表中为管理各任务状态以及再次执行任务时所需全部信息而建立的数据结构,称为任务控制模块(TCB: task control block)。

### ■ 研究课题 优先方式

并行处理其实是一种非优先方式的多任务进程。它是 Windows 3.1 等操作系统(OS)具有的多任务处理功能。在这类操作系统(OS)中,只要正在执行中的任务不将控制权交还给操作系统,就永远不能执行其它的任务。因此,能利用定时器中断每隔一定时间强行切换执行中的任务,才是优先方式的多任务处理操作系统。Windows NT 与 UNIX、OS/2 等操作系统是真正的优先方式操作系统。

对于控制领域等需要响应速度很高(实时响应)的情况,常需要放弃正在执行中的任务或者不等定时器中断到来,通过外部中断等事件就能启动进程表的进程,这种处理方式称为事件驱动方式。

# 17 程序语言的种类及特点

## □ 要 点

用于描述计算机程序的人工语言称为程序语言。计算机能够直接识别并执行的语言是每位仅由0或1组成的机器语言。

要直接用这种机械语言来描述程序几乎是不可能的。因此,人们采用容易理解的符号及语法来描述程序,并让计算机自己通过一种翻译程序,将用这种语言编写的程序翻译成相应的机器语言程序。这种翻译程序称为编译程序,被翻译前的程序语言称为高级语言。

## □ 解 释

### ● 汇编语言与高级语言

汇编语言采用与机器语言一一对应的符号指令(助记符:mnemonic)及若干条伪指令来描述程序。这种符号指令因机种的不同而异。因此,在使用这类语言编程时要注意计算机的体系结构和对应的指令系统。但用FORTRAN、COBOL等高级语言编写的程序与机种及体系结构无关,使用这种语言可以完成很抽象的程序描述。

高级语言

一般来说,在编写高速处理或应变能力强的程序时应该采用汇编语言;而在编写复杂计算或需要进行大量数据处理的程序时应该采用高级语言。能够正确区分使用这两种语言非常重要。C语言虽然也属于高级语言,但由于可用来编写出像汇编语言一样应具有变能力很强的程序,所以应用范围很广。

### ● 编译程序与解释程序

计算机不能直接执行用高级语言编写的源程序。执行这类程序的方法有编译(compiler)方式和解释(interpreter)方式两种。编译方式是先将用高级语言编写的源程序一次性地转换成对应的机器语言程序(目标程序),然后,再由计算机执行这个转换后的目标程序。解释方式是将用高级语言编写的源程序按语句逐行地边解释边执行。

解释程序

与编译方式相比,用解释方式编写的程序比较容易调试。为此,在教学和制作样品时常采用解释方式。然而,由于在执行这类程序时需要解释程序,执行起来速度也比较慢,因此,现场程序一般都是采用编译方式编写的。



面向过程的语言

报表程序生成器

LISP

面向目标的

程序语言

### ● 面向过程的语言与非面向过程的语言

FORTRAN 及 COBOL 等高级语言都是面向过程的语言。面向过程的语言,可以说是按程序描述的顺序进行处理的语言。

还有另外一类语言,它实际的执行顺序未必与程序的描述顺序一致,与面向过程的语言相对应的这种语言称为非面向过程的语言。

在非面向过程的语言中,有按菜单进行处理的报表程序生成器(RPG: report program generator)、表格处理语言中的 LISP 语言、其它在人工智能领域使用的语言以及面向目标的程序语言等等。

## □ 相关知识

### ● 面向目标的程序语言

它是一种不仅将控制结构(过程)、还在处理过程中使用的数据也作为一种目标进行处理的语言。采用这种语言,可以完成很抽象描述的编程。

### ● 4GL(第4代语言:forth generation language)

是一种为程序开发者及终端用户开发的,以不仅能开发程序、还含有维护管理等功能,以提高效率为目的的编程语言。

### ● 典型的高级语言

以下列出了主要高级语言的种类及用途。

**BASIC**:面向初学者的会话式语言。

**FORTRAN**:用于科学计算的高级语言。

**PASCAL**:用于教学的高级语言。

**COBOL**:用于办公处理的高级语言。

**ALGOL**:用于科技计算的高级语言。

**PL/1**:通用高级语言。

**Ada**:嵌入式计算系统用的描述语言。

**C**:UNIX 系统用的描述语言。

**LISP**:用于人工智能的语言。

**PROLOG**:谓词逻辑型语言。

**FORTH**:面向控制器开发的语言。

维护管理  
提高效率

## 第7章

# 机械电子 系统控制

在支持机电一体化的重要控制技术中，主要有反馈控制和顺序控制。

关于反馈控制，本章中将学习其数学基础的拉普拉斯变换和传递函数、方框图以及控制系统的特性等内容，将以机电一体化中常用的直流伺服系统和液压伺服系统等反馈控制系统为例加以说明。

关于顺序控制，本章将从顺序控制单元电路以及逻辑电路的基本理论出发，学习顺序控制在电动机控制和机器人控制中的应用方法。

其中包括了有一定难度的数学知识，要通过反复阅读来掌握这些内容，这一点十分重要。

- 责任编辑  
渡边嘉一郎
- 执 笔  
岩月仁见

# 1 什么是系统模型

## □ 要 点

所谓系统模型,就是“以能够适应系统控制目标的输入量和输出量为参数,对以物理实体形式存在的控制对象作出的数学形式描述”。这种数学形式的描述通常以微分方程的形式来表达。

## □ 解 释

### ● 建立控制对象模型的意义

在对某物理实体的控制要求有较高精度的场合,如果输出量偏离目标值,一般情况下要立即相应地调节输入量,以消除偏差。为此,首先对控制目的在数量上应该有一个明确的把握,也就是说,必须首先对控制对象进行数学建模。从物理实体的数学描述出发,就可以应用工程上的设计方法进行控制系统的设计。

建模

### ● 系统模型的方框图

要简化系统模型,可以采用图 7.1 所示的具有输入和输出的方框图。以电动机的转速控制为例,可以取电机的输入为外加电源电压,输出则为角速度。在进行位置控制时,可以选择电机的旋转角度作为输出。这样一来,由于控制目的不同,对应的输入、输出量就会不同,即使是同一个控制对象,最终的数学模型也将不同。

外加电源电压  
角速度  
位置控制  
电机旋转角度

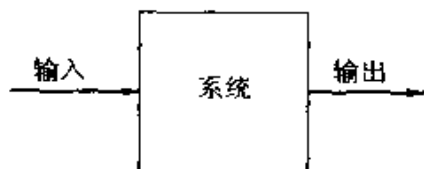


图 7.1 系统的方框图

### ● 多输入多输出系统

机器人控制器是典型的机电一体化系统,在进行机器人手臂的位置和姿势控制时,为了使各关节的传动机构动作,需要多个转矩输入,并且要以六维变量描述的手臂位置和姿势作为输出。因此,一般情况下,系统的输入量和输出量均多于 1,称这种系统为多输入多输出系统。在图 7.1 所示的例子中,电机只有一个输入量和 1 个输出量,这样的系统称为单输入单输出系统。

机器人控制器  
位置姿势  
多输入多输出  
系统  
单输入单输出  
系统

### ● 简单的建模举例

下面导出图 7.2 所示保温壶的数学模型。控制加热器开关的

通、断,使保温壶内的温度保持一定,就可以达到保温的目的。选择加热器的热量  $Q(t)$  [W] 作为输入,以保温壶内的温度  $T(t)$  [°C] 作为输出。由于从保温壶向外部空气散发出去的热量  $\Delta Q(t)$  与壶内温度  $T(t)$  和外部气温  $O(t)$  之差成比例,即

$$\Delta Q(t) = K[O(t) - T(t)]$$

因此,水中积蓄的全部热量为从加热器注入的热量与外部空气散发热量之差,即

$$Q(t) - \Delta Q(t) = Q(t) - K[O(t) - T(t)]$$

而水中积蓄的热量与壶内温度的变化率成比例。经过以上讨论,保温壶的数学模型可用以下 1 阶微分方程式表示:

$$C \frac{dT(t)}{dt} = Q(t) - K[O(t) - T(t)]$$

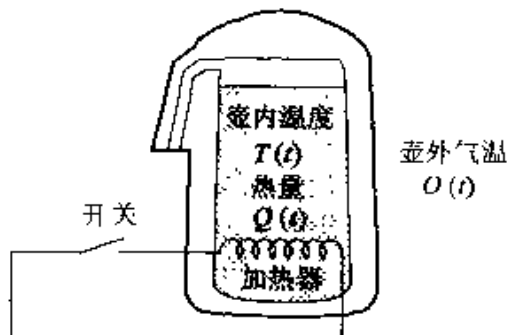


图 7.2 保温壶的模型

## 相关知识 ● 系统标定

### 未知参数

即使已经得到了控制对象的数学模型,也必须具体确定微分方程式中所包含的系数(参数),否则无法对系统进行分析。这样的未知参数可以根据产品的样品取得,但大多数情况下必须由控制系统的设计者求出。即使根据产品的样品得到了系统参数,但由于制品品质的分散性,所得到的参数也往往是不正确的。因此,在很多场合,控制系统设计者必须以不同产品为控制对象,对各种输入反复进行响应实验,根据实验所得的数据来最后确定未知参数。用实验的方法来确定参数时,为了使其与真值的误差尽可能小,应适当选择输入量及数据的处理方法。上述确定未知参数的过程称为系统标定。

## 2 拉普拉斯变换

**□ 要 点** 拉普拉斯变换就是把在时域内所描述的微分方程式(以时间  $t$  作为自变量)变换为复频域内的代数方程式(以复频率  $s$  作为自变量),从而使求解过程简化的一种数学方法。

**□ 解 释** ● 拉普拉斯变换的意义

微分方程式

如果已经得到了控制对象的数学模型,通过对该微分方程式的求解,可以了解系统对各种输入的响应。进行系统分析时,采用拉普拉斯变换比较方便。采用拉普拉斯变换方法求解微分方程式时,不受初始值、输入函数以及微分方程阶数等限制,通常可以按照一定步骤以统一的形式求解。通过拉普拉斯变换能够把含有微分和积分的微分方程式变换成关于拉普拉斯算子  $s$  的代数方程式,因此不必进行微分和积分运算,只须进行加、减、乘、除运算就可很容易地求得方程式的解,这是拉普拉斯变换的主要优点。另外,对于工程问题的求解,可以从重要的频域观点出发来进行系统分析,这是其又一个优点。

拉普拉斯算子  
代数方程式

● 拉普拉斯变换的定义

对于给定的函数  $f(t)$ ,其拉普拉斯变换  $F(s)$ 由下式定义:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (7.1)$$

拉普拉斯变换表

各种函数的拉普拉斯变换已经汇总成拉普拉斯变换表,实际应用时,不必对式(7.1)所示的积分求解。反之,从拉普拉斯变换  $F(s)$ 求取对应的时间函数  $f(t)$ 时,可将  $F(s)$ 作部分分式展开,经适当变形后查取拉普拉斯变换表,就可以求得对应的时间函数。这种反变换称为拉普拉斯逆变换。

拉普拉斯逆变换  
拉普拉斯变换对

一些主要函数的拉普拉斯变换对如表 7.1 所示。

● 采用拉普拉斯变换方法解微分方程式的简单例子

设系统的数学模型为如下一阶微分方程式:

$$\frac{dy(t)}{dt} + ay(t) = u(t) \quad (7.2)$$

其中,输入函数  $u(t)$ 为

$$u(t) = 1 \quad (t > 0) \quad (7.3)$$

由表 7.1 所示的拉普拉斯变换表可以查得式(7.2)的拉普拉斯变换为

表 7.1 拉普拉斯变换表

$f(t)$	$F(s)$
$\delta'(t)$	1
1	$\frac{1}{s}$
$t$	$\frac{1}{s^2}$
$t^n$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
$e^{-at}$	$\frac{1}{s+a}$
$t^n e^{-at}$	$\frac{1}{(s+a)^{n+1}}$
$t^n e^{-at}$	$\frac{n!}{(s+a)^{n+1}}$
$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$\sin(\omega t + \varphi)$	$\frac{s \sin \varphi + \omega \cos \varphi}{s^2 + \omega^2}$
$\cos(\omega t + \varphi)$	$\frac{s \cos \varphi - \omega \sin \varphi}{s^2 + \omega^2}$
$e^{-at} \sin \omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$
$e^{-at} \cos \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$
$\frac{df(t)}{dt}$	$sF(s) - f(0)$
$\frac{d^2 f(t)}{dt^2}$	$s^2 F(s) - sf(0) - f'(0)$
$\frac{d^n f(t)}{dt^n}$	$s^n F(s) - s^{n-1} f(0) - s^{n-2} f'(0) - \dots - s f^{(n-2)}(0) - f^{(n-1)}(0)$
$\int_0^t f(\tau) d\tau$	$\frac{1}{s} F(s)$

注：当  $t < 0$  时表中的时间函数为 0，即函数随时间的变化从  $t = 0$  开始。

$$sY(s) - y(0) + aY(s) = U(s) = \frac{1}{s} \quad (7.4)$$

由式(7.4)求解输出函数  $Y(s)$ , 并对式中的第二项作部分分式展开, 可得

$$Y(s) = \frac{y(0)}{s+a} + \frac{1}{s(s+a)} - \frac{y(0)}{s+a} + \frac{1}{a} \left( \frac{1}{s} - \frac{1}{s+a} \right) \quad (7.5)$$

由表 7.1 所示的拉普拉斯变换表, 选择与式(7.5)中各项对应的时间函数, 可得

$$y(t) = y(0)e^{-at} + \frac{1}{a}(1 - e^{-at}) \left[ \frac{1}{a} + \left[ y(0) - \frac{1}{a} \right] e^{-at} \right] \quad (7.6)$$

如果初始值  $y(0)$  已知, 就可以得到系统输出函数  $y(t)$ 。

## 相关知识 ● 线性

所谓线性就是对应输入  $u_1(t)$  和  $u_2(t)$ , 系统的输出分别为  $y_1(t)$  和  $y_2(t)$ , 选择任意常数  $a, b$ , 当以  $au_1(t) + bu_2(t)$  作为输入时, 得到的系统输出为  $ay_1(t) + by_2(t)$ 。系统的这种性质称为线性, 也称为叠加原理。

### 叠加原理

## ● 时不变性

微分方程的系数所具有的不随时间的改变而变化的性质(稳态特性)称为时不变性, 定常线性微分方程即常系数线性微分方程。如果所加的输入相同, 则时不变性保证了可以得到与时刻无关的相同的系统响应。

## ● 因果性

从物理意义上来说, 输入施加前其响应就开始的系统是不存在的, 系统的这种性质称为因果性。能够通过拉普拉斯变换解析的系统, 必须全部满足上述的线性、定常性以及因果性。

## ● 非线性

不满足线性关系的系统称为非线性系统。严格地说, 世界上所有系统都是非线性的, 然而在实用范围内, 有很多场合可以当作理想线性系统处理。从系统的结构上和原理上来说, 非线性系统也是大量存在的。例如, 具有旋转型关节的机器人机械手的姿势, 即关节角和角速度等, 它们之间的关系是用三角函数联系起来的, 本质上是一个非线性系统。

## 3 传递函数及其响应

### 要 点

系统输出函数  $y(t)$  的拉普拉斯变换  $Y(s)$  与输入函数  $u(t)$  的拉普拉斯变换  $U(s)$  之比称为系统的传递函数。传递函数可以简洁、完整地表达系统输入函数与输出函数之间的关系。

### 解 释

稳态线性系统

#### ● 传递函数的意义

稳态线性系统的响应可以采用解析法分析,通过求解相应的微分方程式求得输出函数,若输入函数或初始条件不同,系统响应也将不同。然而系统的输入输出特性却与系统的输入及初始值无关,是系统所固有的特性。系统的这种与输入形式无关的本质属性应该通过某种形式表现出来,而传递函数就是一种常用的表述形式。

#### ● 传递函数的定义

一般说来,对于用  $n$  阶微分方程式表示的系统,在零初始条件下,采用拉普拉斯变换,将输入输出函数  $u(t)$  和  $y(t)$  变换成  $U(s)$  和  $Y(s)$ ,则  $n$  阶微分方程式可变换为

$$\begin{aligned} s^n Y(s) + a_1 s^{n-1} Y(s) + \cdots + a_n Y(s) \\ = b_0 s^m U(s) + b_1 s^{m-1} U(s) + \cdots + b_m U(s) \end{aligned} \quad (7.7)$$

输出函数的拉普拉斯变换  $Y(s)$  与输入函数的拉普拉斯变换  $U(s)$  之比  $G(s)$  为:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \cdots + b_m}{s^n + a_1 s^{n-1} + \cdots + a_n} \quad (7.8)$$

$G(s)$  就称为系统的传递函数。由式(7.8)可知,传递函数与系统输入形式及初始值无关,而完全取决于系统自身的结构与参数,反映了系统的固有特性。因此,传递函数为  $G(s)$  的系统可以用图7.3所示的方框图表示。

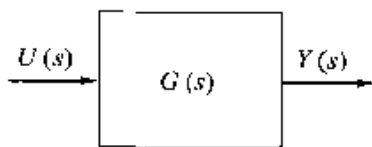


图 7.3 系统的方框图

#### ● 一阶延迟系统

对于第7.2节例举的用一阶微分方程所描述的系统,若在零



初始条件下  $y(0) = 0$ , 其方程式可改写成

$$sY(s) + aY(s) = U(s) \quad (7.9)$$

该系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s + a} \quad (7.10)$$

具有式(7.10)所示传递函数的系统称为一阶延迟系统。当  $a > 0$  时, 一阶延迟系统对应单位阶跃输入的响应如图 7.4 所示。

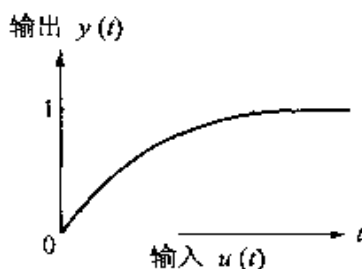


图 7.4 一阶延迟系统的响应

### ● 二阶延迟系统

系统的微分方程式为

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_2 y(t) = u(t) \quad (7.11)$$

在零初始条件下,  $y(0) = y'(0) = 0$ , 取上式的拉普拉斯变换, 得

$$s^2 Y(s) + a_1 s Y(s) + a_2 Y(s) = U(s) \quad (7.12)$$

则系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s^2 + a_1 s + a_2} \quad (7.13)$$

具有式(7.13)所示传递函数的系统称为二阶延迟系统。一般情况下, 式(7.13)的分母多项式的根为复数, 当这个复数的实部为负数时, 对应单位阶跃输入的系统响应如图 7.5 所示。

分母多项式

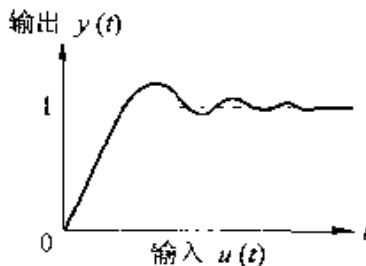


图 7.5 二阶延迟系统的响应

## □ 相关知识 ● 极点与零点

传递函数的分母多项式与分子多项式的根分别称为极点和零点,极点和零点对系统分析十分重要。设极点为  $p_i (i=1,2,\dots,n)$ 、零点为  $z_i (i=1,2,\dots,m)$ ,将分母和分子的多项式因式分解,则传递函数可表示为

$$G(s) = \frac{b_0(s-z_1)(s-z_2)\cdots(s-z_m)}{(s-p_1)(s-p_2)\cdots(s-p_n)} \quad (7.14)$$

传递函数的极点与系统的稳定性条件有密切关系,这一问题将在第7.6节讲述。令传递函数的分母多项式等于零,即

$$s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \cdots + a_1s + a_0 = 0 \quad (7.15)$$

式(7.15)称为系统的特征方程,特征方程的根称为特征根。显然特征根与极点是一致的。

特征方程

## ● 频率传递函数

传递函数  $G(s)$  中的自变量复频率  $s$  实际上是不存在的。然而,当取这个复频率为一个纯虚数,即取  $s=j\omega$  并代入传递函数时,可得  $G(j\omega)$ ,其中的  $\omega$  是作为实际量的角频率存在的,称函数  $G(j\omega)$  为频率传递函数。一般说来,频率传递函数  $G(j\omega)$  是一个复数函数,可以表示为

$$\begin{aligned} G(j\omega) &= R(\omega) + jX(\omega) \\ &= |G(j\omega)| e^{j\phi(\omega)} = |G(j\omega)| \angle \phi(\omega) \end{aligned} \quad (7.16)$$

其中

$$|G(j\omega)| = \sqrt{R^2(\omega) + X^2(\omega)} \quad (7.17)$$

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \frac{X(\omega)}{R(\omega)} \quad (7.18)$$

输入输出振幅比

绝对值  $|G(j\omega)|$  表示,当输入信号为正弦波,其角频率为  $\omega$  时,输出信号与输入信号的振幅之比(系统增益),相位角  $\phi(\omega)$  表示输入信号与输出信号之间的相位差。也就是说,频率传递函数  $G(j\omega)$  表征了系统的频率响应。

输入输出相位差  
频率响应

以角频率  $\omega$  [rad/s] 为横轴,以增益  $20\lg |G(j\omega)|$  [dB] 和相位差  $\phi(\omega)$  [deg] 为纵轴绘制的曲线称为伯德线图。

伯德线图

根据增益和相位绘制的曲线在视觉上清晰易懂,这种曲线图有奈奎斯特线图(矢量轨迹)和幅-相特性图等。利用这些曲线图,可以进行基于频率特性的控制系统设计。

奈奎斯特线图  
矢量轨迹  
幅-相特性图

## 4 方框图

**□ 要点** 将系统或其中各部分用传递函数描述的单元方框来表示,按信号的流向用箭头连接而成的图形称为方框图。框图可以把系统的构成和信号的流向直观而简洁地表现出来。

**□ 解释** ● 反馈控制

一般说来,反馈控制的框图可用图 7.6 表示。图中, $G(s)$ 、 $C(s)$ 、 $H(s)$ 分别为被控对象、控制器和反馈环节的传递函数。与图中的  $R(s)$ 、 $E(s)$ 、 $U(s)$ 、 $Y(s)$ 对应的  $r(t)$ 、 $e(t)$ 、 $u(t)$ 和  $y(t)$ 分别称为设定值、偏差、控制量和被控量。特别应该指出,偏差  $e(t)$ 可以表示成

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

控制环节以目标值与实际被控量之差作为输入,并产生与这一差值相对应的控制量,从而对被控对象实施控制。

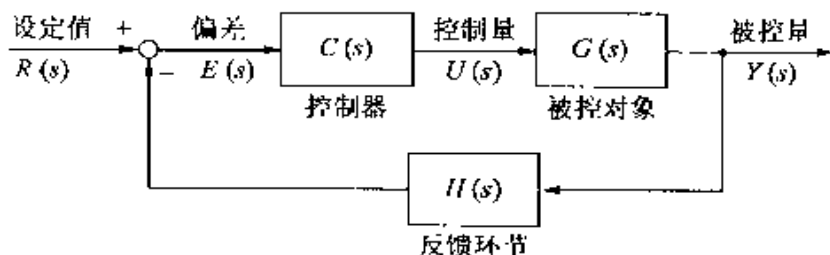


图 7.6 反馈控制的框图

### ● 方框图的意义

一个控制系统可以按照功能的不同分解成若干环节。每个环节分别用一个方框表示,各环节的输入、输出信号的流向用箭头表示并把各环节方框连接起来。即使是一个复杂系统,也可以利用方框图描述成简洁而容易理解的形式。一般说来,每个方框图中应写入与输入和初始值无关的传递函数。另外,系统方框图中,各方框的传递函数应按一定的规则进行合并,所传递的信号也不是时间的函数,而是经拉普拉斯变换后的复频率  $s$  的函数。

### ● 方框图中的基本符号

由图 7.6 可知,方框图中的基本符号主要有单元方框、求和点和分路点等三种,如图 7.7 所示。

被控对象  
控制器  
反馈环节  
设定值  
偏差  
控制量  
被控量

单元方框  
求和点  
分路点

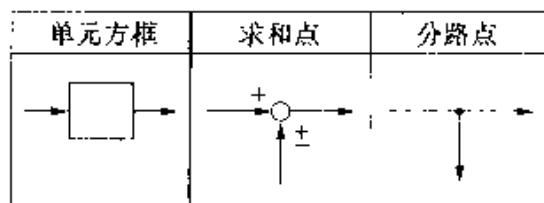


图 7.7 方框图的基本符号

### ● 方框图的简化

图 7.6 中,每一部分都用一个方框来表示。然而实际上每一部分都可能进一步分解成多个环节而构成一个复杂的系统。对于一个可以分解成很多环节并且信号流向复杂的系统来说,其方框图应尽可能用简单的形式来表示,这样可以简化系统的分析和设计。为此,可以利用图 7.8 所示的等效变换方法对系统方框图进行简化。图 7.8 中,方框串联和方框并联的等效变换比较简单,对于反馈的等效变换可证明如下。设变换前  $G_1(s)$  的输入为  $E(s)$ , 则

$$Y(s) = G_1(s)E(s)$$

$$E(s) = U(s) \pm G_2(s)Y(s)$$

两式联立,消去  $E(s)$ ,并解出  $Y(s)$ ,得

$$Y(s) = \frac{G_1(s)}{1 \pm G_1(s)G_2(s)}$$

可以看出,这一结果与图 7.8 中变换后的传递函数是一致的

方框串联  
方框并联  
反馈变换

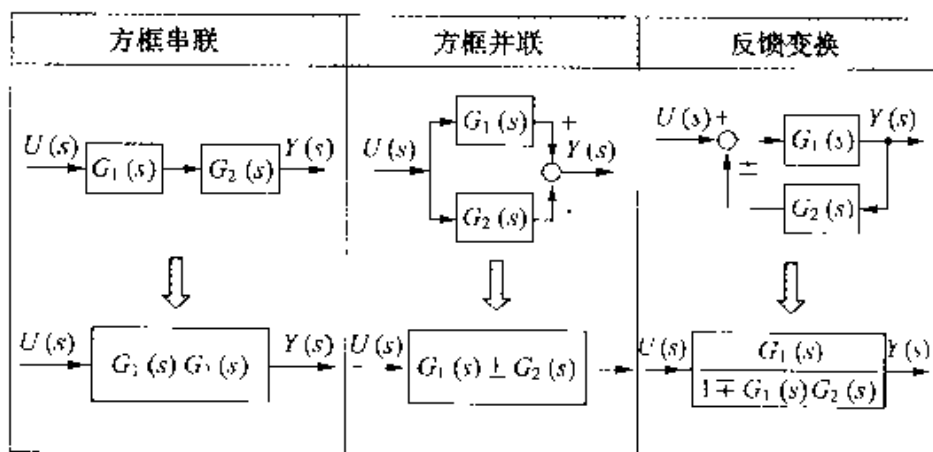


图 7.8 方框图的简化

## 5 稳态误差

**□ 要点** 所谓稳态误差是指从给出设定值时起,经过充分长的时间后,设定值与被控量之间的偏差。

**□ 解释** ● **稳态误差的意义**

反馈控制系统中,当设定值变化或受到外部干扰时,被控量也会随之变化。理想情况下,从上述原因引起的被控量变化开始,经过一定时间后,被控量与设定值将趋于一致。然而一般情况下,控制系统无论采用何种设计方法,经过充分长的时间后,目标值与被控量之间都将残留一定的偏差,这种偏差称为稳态误差。把稳态误差抑制到何种程度是系统设计的重要指标之一。

● **稳态误差的定义**

所谓稳态误差是指经过充分长的时间后,设定值与被控量之差。在时域中可表示成下式:

时域

$$e = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} [r(t) - y(t)] \quad (7.19)$$

● **终值定理**

很多情况下,需要在频域下分析系统的特性,因此也希望在频域内描述稳态误差。为此可以使用如下的终值定理。

若时间函数  $f(t)$  的拉普拉斯变换为  $F(s)$ , 则下式成立:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sF(s) \quad (7.20)$$

根据终值定理,在频域内,式(7.19)可改写为

$$e = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s[R(s) - Y(s)] \quad (7.21)$$

● **稳态误差举例**

下面求取图 7.9 所示的一阶延迟反馈控制系统的稳态误差。应用第 7.4 节中图 7.8 所示的方框串联和反馈的方框图简化方法,可以把图 7.9 简化成图 7.10。图 7.10 所示的从设定值  $R(s)$  到被控量  $Y(s)$  的传递函数可以表示成

方框图简化

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K}{s+1}}{1 + \frac{K}{s+1}} = \frac{s+1}{s+1+K} \quad (7.22)$$

因此,偏差  $E(s)$  为

$$E(s) = R(s) - Y(s)$$

$$\begin{aligned}
 &= \left(1 - \frac{K}{s+1+K}\right)R(s) \\
 &= \frac{s+1}{s+1+K}R(s) \quad (7.23)
 \end{aligned}$$

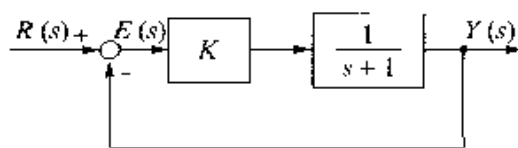


图 7.9 反馈控制系统举例

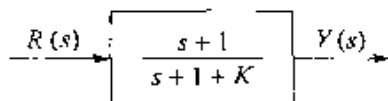


图 7.10 图 7.9 的简化

以设定值  $R(s)$  (单位阶跃函数的拉普拉斯变换为  $1/s$ ) 作为系统输入, 根据终值定理, 系统的稳态误差为

$$\begin{aligned}
 \epsilon &= \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{s+1}{s+1+K} \cdot \frac{1}{s} \\
 &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s+1}{s+1+K} = \frac{1}{1+K} \quad (7.24)
 \end{aligned}$$

从式(7.24)可知, 由于  $K > 0$ , 即使经过充分长的时间, 图 7.9 所示反馈控制系统的目标值与被控量也并不一致, 即系统总存在稳态误差  $1/(1+K)$ 。

### ● 提高反馈系统增益来改善稳态误差

由于图 7.9 所示反馈控制系统的稳态误差为  $1/(1+K)$ , 因此, 增大增益  $K$  就可以减小系统的稳态误差。

### ● 积分环节 $1/s$

以输入  $u(t)$  的积分作为输出  $y(t)$  的系统可以表示成

$$y(t) = \int_0^t u(\tau) d\tau \quad (7.25)$$

应用第 7.2 节介绍的方法, 取式(7.25)的拉普拉斯变换可得

$$Y(s) = \frac{1}{s} U(s) \quad (7.26)$$

因此, 积分环节的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s} \quad (7.27)$$

积分环节的方框图如图 7.11 所示:

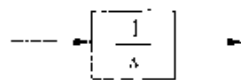


图 7.11 积分环节的方框图

### ● 利用积分环节改善稳态误差

在图 7.12 所示的反馈系统中,插入传递函数为  $1/s$  的积分环节。根据终值定理,系统的稳态误差可用下式求得:

$$\begin{aligned} e &= \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{s(s+1)}{s(s+1)+K} \cdot \frac{1}{s} \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s(s+1)}{s(s+1)+K} = 0 \end{aligned} \quad (7.28)$$

可以看出,插入积分环节后,即使不增大系统增益,稳态误差也可变为零。

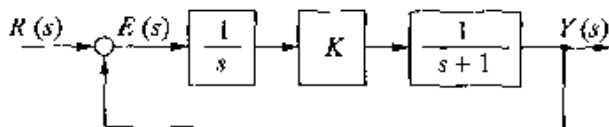


图 7.12 插入积分环节后的反馈控制系统

## □ 相关知识 ● 快速响应特性

稳态误差只是反映了经过充分长时间后被控量与设定值的偏差。除稳态误差外,设定值与被控量的偏差以怎样的速度减小也是评价系统性能的重要指标之一。这一指标反映了系统的快速响应能力,称为系统的快速响应特性。

### ● 比例环节

以输入  $u(t)$  的常数倍作为输出  $y(t)$  的系统可表示为

$$y(t) = Ku(t) \quad (7.29)$$

式(7.29)的拉普拉斯变换为

$$Y(s) = KU(s) \quad (7.30)$$

因此,按比例关系工作的系统的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = K \quad (7.31)$$

传递函数为式(7.31)的环节称为比例环节。

### ● 微分环节

以输入  $u(t)$  的微分作为输出  $y(t)$  的系统可表示为

$$y(t) = \frac{d}{dt}u(t) \quad (7.32)$$

应用第 7.2 节的拉普拉斯变换,式(7.32)可变换为

$$Y(s) = sU(s) \quad (7.33)$$

因此,按微分关系工作的系统的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = s \quad (7.34)$$

传递函数为式(5.34)形式的环节称为微分环节。

### ● PID 反馈控制

将比例环节、微分环节和积分环节组合起来所构成的反馈控制系统称为 **PID 反馈控制系统**。PID 反馈控制系统的应用十分广泛。由于可以分别调整各环节的增益,因此采用 PID 反馈控制时,对于复杂系统的分析、设计十分方便。



## 6 稳定性

**要 点** 稳定性是指当系统中加入能量有限的输入时,保证系统不发散的—种性质。稳定性要求是任何一个控制系统设计时必须满足的首要条件。

**解 释** ● 稳定性的定义

当系统的输入  $u(t)$  满足有界条件

$$|u(t)| < \infty \quad (0 \leq t < \infty) \quad (7.35)$$

时,如果该系统的输出  $y(t)$  亦满足条件

$$\int_0^{\infty} |y(t)| dt < \infty \quad (7.36)$$

则称该系统是有界输入 输出且稳定的。

● 单位脉冲函数的定义

满足式(7.35)的有界条件的输入量有无限多种,为了判别系统的稳定性,如果有这样一种函数,它能够代表一切输入量,则会给系统分析带来极大的方便。那么是否存在这样一种函数呢?下面来考察满足下式的一个特殊函数:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad \delta(t) = \begin{cases} \infty (t = 0) \\ 0 (t \neq 0) \end{cases} \quad (7.37)$$

式中的函数  $\delta(t)$  称为单位脉冲函数。可以看出,单位脉冲函数的面积为1、宽度为0,但在  $t=0$  的时刻产生无穷大幅值的脉冲。单位脉冲函数可用图 7.13 所示的箭头来表示。

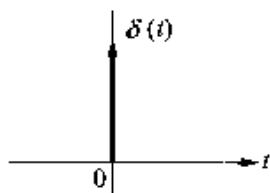


图 7.13 单位脉冲函数

● 单位脉冲函数的性质

对应任意函数  $f(t)$ ,单位脉冲函数具有如下性质:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t) dt = f(0) \quad (7.38)$$

即单位脉冲函数能够将函数  $f(t)$  在  $t=0$  时的值“筛出”。因此其

拉普拉斯变换可由下式给出:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) e^{-st} dt = e^{-s \cdot 0} = 1 \quad (7.39)$$

另外,对于图 7.14 所示的  $t = \tau$  时的单位脉冲函数  $\delta(t - \tau)$ ,可以看出,下式成立:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - \tau) f(t) dt = f(\tau) \quad (7.40)$$

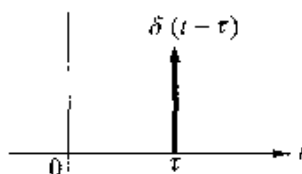


图 7.14 单位脉冲函数的偏移

### ● 脉冲响应

单位脉冲

由式(7.40)可知,单位脉冲函数可以把一个函数在任意瞬间的值“筛”出来。换言之,一个任意函数  $f(t)$  就是通过积分,把单位脉冲累积起来的函数。因此,如果单位脉冲函数的响应是已知的,根据叠加原理,则对应任意函数的响应就是各瞬间的累积响应。这样一来,可以得出以下结论:如果系统对应单位脉冲函数输入的响应是不发散的,则系统是稳定的。实际上,以  $g(t)$  记为系统的脉冲响应时,则下式成立:

叠加原理

$$\int_0^{\infty} |g(t)| dt < \infty \quad (7.41)$$

可以证明,式(7.41)即为系统稳定的充分必要条件。系统对应单位脉冲函数的响应称为脉冲响应。由式(7.39)可知,对于传递函数为  $G(s)$  的系统,其脉冲响应的拉普拉斯变换为

$$Y(s) = G(s)U(s) = G(s) \cdot 1 = G(s) \quad (7.42)$$

也就是说系统脉冲响应的拉普拉斯变换等于系统的传递函数。

### ● 传递函数的极点与系统的稳定性

对于二阶延迟系统,假设其传递函数的分母多项式具有两个不同的复数根  $p_1 = \sigma - j\omega$  和  $p_2 = \sigma + j\omega$ ,则传递函数  $G(s)$  可写成

$$G(s) = \frac{1}{(s - p_1)(s - p_2)} \quad (7.43)$$

或

$$G(s) = \frac{1}{(s - \sigma)^2 + \omega^2} = \frac{1}{\omega} \frac{\omega}{(s - \sigma)^2 + \omega^2} \quad (7.44)$$

利用第 7.2 节的拉普拉斯变换表,可以得到二阶延迟系统在时域

内的脉冲响应为

$$g(t) = \frac{1}{\omega} e^{\sigma t} \sin \omega t \quad (7.15)$$

由式(7.15)可知,如果分母多项式的两个根(即极点)的实部 $\sigma$ 全部为负数时,系统的脉冲响应在 $t \rightarrow \infty$ 时收敛,则系统是稳定的。

一般说来,当传递函数的全部极点具有负的实部时,就可以保证系统是稳定的。

### ● 赫尔维茨稳定判别

如果传递函数的极点可求,则系统的稳定性就是可知的。但是当系统的阶数较高即传递函数的分母多项式为高次多项式时,特征方程式的求解将会遇到很大困难。然而,如果只需要了解系统是否稳定,则不必直接求取各个极点,而仅仅根据分母多项式的系数就可以进行稳定性判别。赫尔维茨稳定性判别就是常用的系统稳定性判别方法之

### ● 稳定条件

满足特征方程式

$$s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0 \quad (7.16)$$

的全部特征根具有负实部的充分必要条件如下:

- (I) 系数 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 全部存在并全部为正;
- (II) 以下行列式全部为正;

$$D_1 = a_1, D_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 \\ 1 & a_1 \end{vmatrix}, D_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ 1 & a_1 & a_2 \\ 0 & a_1 & a_1 \end{vmatrix}, \dots, \\ D_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & \dots & a_{n-1} \\ 1 & a_1 & a_2 & \dots & a_{n-2} \\ 0 & a_1 & a_2 & \dots & a_{n-3} \\ 0 & 1 & a_2 & \dots & a_{n-4} \\ 0 & 0 & a_2 & \dots & a_{n-5} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_n \end{vmatrix} \quad (7.17)$$

基于上述条件进行系统稳定性判别的方法称为赫尔维茨稳定判别法。

### ● 稳定判别举例

下面来讨论图 7.15 所示反馈控制系统的稳定性。首先把方框图按第 7.4 节的方法进行简化,简化后该控制系统从设定值到被控量的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K}{s^3 + 4s^2 + 5s + K} \quad (7.48)$$

其特征方程为

$$s^3 + 4s^2 + 5s + K = 0 \quad (7.49)$$

可以看出, 如果  $K > 0$ , 则稳定条件①得到满足。

对于稳定条件②有

$$D_1 = 4 > 0, D_2 = \begin{vmatrix} 4 & K \\ 1 & 5 \end{vmatrix} = 20 - K > 0$$

$$D_3 = \begin{vmatrix} 4 & K & 0 \\ 1 & 5 & 0 \\ 0 & 4 & K \end{vmatrix} = K(20 - K) > 0 \quad (7.50)$$

可以看出, 当  $K < 20$  时, 稳定条件②得到满足。因此当  $0 < K < 20$  时, 该控制系统是稳定的, 同时也就意味着一旦增益  $K$  过大, 系统将变得不稳定。

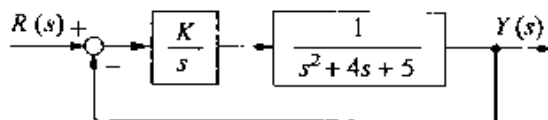


图 7.15 反馈控制系统

## 相关知识 ● 劳斯稳定判别

劳斯稳定条件

劳斯的稳定条件与用于赫尔维茨稳定判别的稳定条件及其数学描述完全等价。也就是说, 劳斯的稳定条件仍然是利用特征方程式的系数来进行系统的稳定判别。基于劳斯稳定条件来进行系统稳定判别的方法称为劳斯稳定判别法。

## ● 奈奎斯特稳定判别

频率特性

与劳斯稳定判别法和赫尔维茨稳定判别法不同, 奈奎斯特稳定判别法是一种基于系统频率特性、能够在视觉上直观把握的稳定性判别方法。在图 7.16 中, 当控制系统所加输入信号为正弦波时, 在某一特定角频率下, 具有传递函数为  $G(s)$  的系统响应将是一个与输入信号反相的正弦波。严密地说, 必将存在这样一个角频率  $\omega$ , 使系统开环传递函数的频率响应  $C(j\omega)G(j\omega)$  的相位差为  $180^\circ$ 。因此, 如果这时的系统增益大于 1, 会使求和点的正弦波逐渐增大, 使系统成为不稳定的。奈奎斯特稳定判别法就是基于上述事实来进行系统的稳定性判别。

开环传递函数

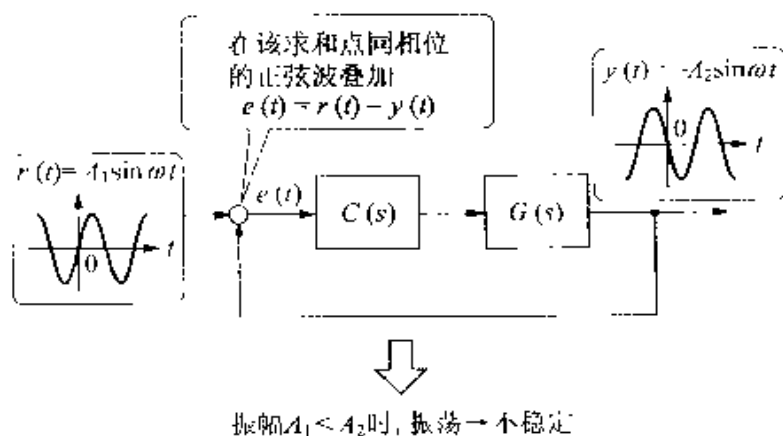


图 7.16 奈奎斯特稳定判别的概念

### ● 增益裕量与相位裕量

稳定度

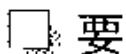
由对奈奎斯特稳定性判别法的介绍可知, 对应于使输入与输出信号的相位差成为  $180^\circ$  的角频率  $\omega_c$ , 当开环传递函数的输入-输出增益  $\rho = |C(j\omega)G(j\omega)|$  小于 1 时, 系统的稳定度增加。因此, 可以用该增益的倒数  $1/\rho$  来作为衡量系统稳定性的指标。这个指标表明了与增益相关的稳定性裕量, 故称为增益裕量。

稳定性裕量

对应于增益为 1 时的角频率  $\omega_c$ , 如果使输入-输出的相位差  $\phi(\omega_c)$  尽可能远离  $180^\circ$ , 则系统的稳定性也将增强。因此也可以用  $\phi(\omega_c)$  与  $\pi$  之差来作为衡量稳定性的指标, 这个量称为相位裕量。这个角频率  $\omega_c$  称为增益交叉频率。

增益交叉频率

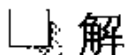
## 7 直流伺服电机



要

点

直流伺服电机具有使用简单、控制特性优良等优点,在机电一体化技术中,直流伺服电机作为基本执行装置获得了最为广泛的应用。本节介绍直流伺服电机的数学模型。



解

释

### ● 直流伺服电机的结构

直流伺服电机的简化结构原理图如图 7.17 所示。通过电刷和换向器,给电枢提供同一方向的输入电流。定子磁极采用永磁钢。通过改变电枢电压来控制电机的速度。

电枢电压

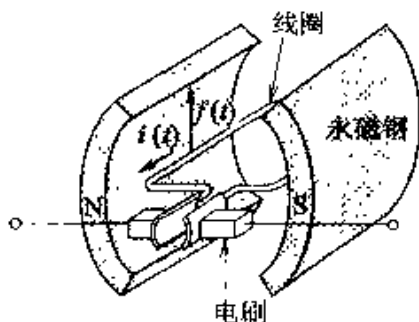


图 7.17 直流伺服电机的结构

### ● 弗莱明左手定则

导出直流伺服电机的数学模型时,需要应用弗莱明左手定则和右手定则。弗莱明左手定则如图 7.18 所示,左手的食指指向磁场的方向,中指指向电流的方向,则大拇指所指的方向即为产生电磁力的方向。设电流为  $i(t)$  [A],磁通密度为  $B$  [T],则电磁力  $f(t)$  [N]由下式确定:

磁通密度

$$f(t) = BLi(t) \quad (7.51)$$

式中,  $L$  [m]为线圈的有效长度。

### ● 弗莱明右手定则

弗莱明右手定则如图 7.19 所示。右手的食指指向磁场的方向,大拇指指向线圈运动的方向,则中指所指的方向即为感生电动势的方向。设线圈运动的线速度为  $v(t)$  [m/s]、磁通密度为  $B$  [T],则感应电动势  $e(t)$  [V]由下式确定:

$$e(t) = Bl \cdot v(t) \quad (7.52)$$

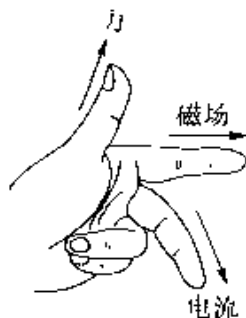


图 7.18 弗莱明左手定则

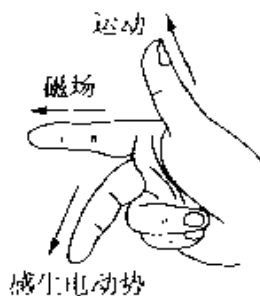


图 7.19 弗莱明右手定则

### ● 转矩常数

电机的转矩  $\tau(t)$  [N·m] 等于电磁力  $f(t)$  [N] 与电机转子半径  $r$  [m] 的乘积, 即

$$\tau(t) = r f(t) \quad (7.53)$$

将式(7.51)代入式(7.53), 可得

$$\tau(t) = r B L i(t) = K_t i(t) \quad (7.54)$$

可以看出, 电机转矩与电枢电流成比例, 式(7.54)中的比例系数  $K_t = r B L$  [N·m·A<sup>-1</sup>] 称为转矩常数。

转矩常数

### ● 反电动势常数

电机的旋转角速度  $\omega(t) = \dot{\theta}(t)$  [rad/s] 与线圈旋转线速度  $v(t)$  [m/s] 的关系为

$$\omega(t) = \frac{v(t)}{r} \quad (7.55)$$

将式(7.55)代入式(7.52), 可得

$$e(t) = r B L \omega(t) = K_e \omega(t) \quad (7.56)$$

可以看出, 电枢反电动势与电枢旋转角速度成比例。式(7.56)中的比例系数  $K_e = r B L$  [Vs/rad] 称为电动势常数。比较  $K_e$  和  $K_t$  可知, 二者是完全相同的两个常数, 即  $K = K_e = K_t$ 。

电动势常数

### ● 电枢回路的微分方程

直流伺服电机的电枢回路可以表示成图 7.20 所示的等效电路, 该电路的电压方程式为

$$e_m(t) = L_m \frac{di(t)}{dt} + R_m i(t) + e(t) \quad (7.57)$$

式中,  $R_m$  [Ω] 为电枢回路电阻,  $L_m$  [H] 为电枢绕组电感。一般情况下, 与其它参数相比电感  $L_m$  很小, 因此式(7.57)中的第一项往往可以忽略不计。

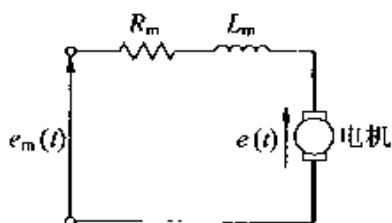


图 7.20 直流伺服电机的等效电路

### ● 转矩与负载的关系

转矩与负载的关系可表示为

$$\tau(t) = J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + \tau_l \quad (7.58)$$

惯性矩

负载转矩

式中,  $J_m$  [kgm<sup>2</sup>] 为电机的惯性矩,  $\tau_l$  为负载转矩。

### ● 直流伺服电机的数学模型

在初始值为零的情况下, 取式 (7.54)、(7.56)、(7.57) 和 (7.58) 的拉普拉斯变换, 可得式 (7.59)~(7.62):

$$T(s) = K_t I(s) \quad (7.59)$$

$$E(s) = K_e \Omega(s) \quad (7.60)$$

$$E_m(s) = L_m s I(s) + R_m I(s) + E(s) \quad (7.61)$$

$$T(s) = J_m s \Omega(s) + T_l(s) \quad (7.62)$$

### ● 速度控制时的数学模型

设电机空载运行, 即  $T_l(s) = 0$ , 以电枢电压  $e_m(t)$  作为输入, 以转速  $\omega(t)$  作为输出, 根据式 (7.59)~(7.62), 电机速度控制时的传递函数  $G_\omega(s)$  为

$$G_\omega(s) = \frac{\Omega(s)}{E_m(s)} = \frac{1}{K_e \left( \frac{L_m J_m}{K_e K_t} s^2 + \frac{R_m J_m}{K_e K_t} s + 1 \right)} \quad (7.63)$$

令

$$T_m = \frac{R_m J_m}{K_e K_t}, T_e = \frac{L_m}{R_m} \quad (7.64)$$

则式 (7.63) 可变形为

$$G_\omega(s) = \frac{1}{K_e (T_m T_e s^2 + T_m s + 1)} \quad (7.65)$$

当  $L_m$  很小而忽略不计时, 上式可近似写成

$$G_\omega(s) \approx \frac{1}{K_e (T_m s + 1)(T_e s + 1)} \quad (7.66)$$

机械时间常数

电气时间常数

式中的  $T_m$  称为机械时间常数,  $T_e$  称为电气时间常数。

### ● 位置控制时的数学模型

以电枢电压  $e_m(t)$  作为输入, 以角度  $\theta(t)$  作为输出, 电机位置



控制时的传递函数  $G_n(s)$  为

$$G_n(s) = \frac{\theta(s)}{E_m(s)} = \frac{1}{s(T_n T_e s^2 + T_m s + 1)} K_e \quad (7.67)$$

式中  $\theta(s) = \frac{1}{s} \Omega(s)$  (7.68)

式(7.67)所示数学模型用方框图描述时,如图 7.21 所示。

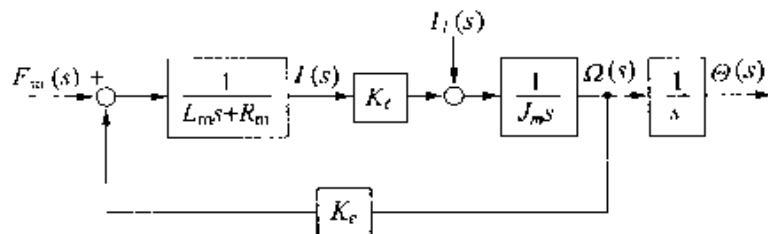


图 7.21 直流伺服电机的方框图

## ┌ 相关知识 ● 交流伺服电机

除直流伺服电机以外,还有交流伺服电机。由于交流伺服电机没有电刷,也避免了因电刷与换向器接触引起的损耗,与直流伺服电机相比,电机的使用寿命较长。然而在交流伺服电机中,必须用电了电路构成电子换向器(指无刷直流电机),结构比较复杂,这是交流伺服电机的缺点。

电子换向器

# 8 液压伺服马达的模型

□ 要

点

对液压伺服马达的控制进行分析、设计时,与直流伺服电机一样也要建立模型,所以,必须首先导出其数学模型。

□ 解

释

### ● 伺服阀的结构

用手动控制液压装置来改变压力和流量,是不能实现系统自动化的。在自动控制时,需要一种从电信号到液压的变换元件,伺服阀就是这种元件。

伺服阀主要由力矩马达、喷嘴挡板阀以及圆柱滑阀等部分组成,如图 7.22 所示。

第 5 章的第 5.17 节,已经对伺服阀的工作原理作了说明,本节将导出其数学模型。

力矩马达  
喷嘴挡板阀  
圆柱滑阀

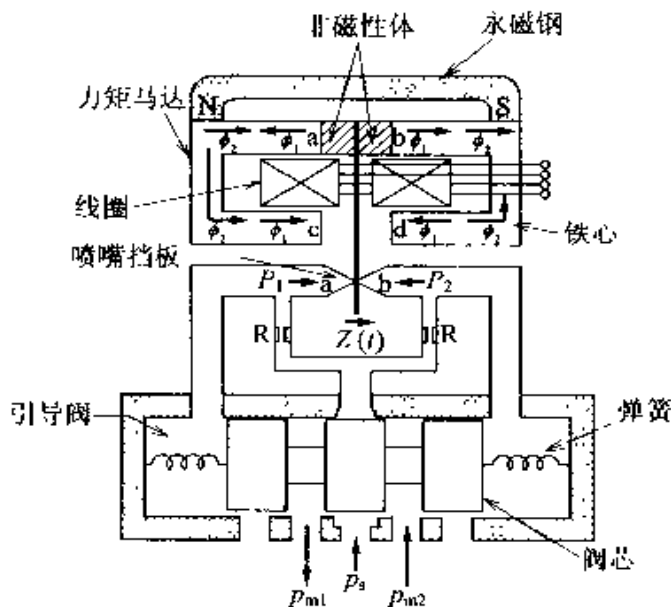


图 7.22 伺服阀的结构

### ● 力矩马达

力矩马达的结构如图 7.22 所示。由永磁钢和轭铁构成磁路,产生沿  $N \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow S$  方向和  $N \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow S$  方向通过的磁通  $\phi_1$ 。在力矩马达内部安装有线圈。当电流  $i(t) [A]$  流过线圈时,产生沿  $a \rightarrow d$  方向和  $b \rightarrow c$  方向的磁通  $\phi_2$ 。因此,在  $d$  点  $\phi_1$  与  $\phi_2$  为差动关系;在  $c$  点  $\phi_1$  与  $\phi_2$  为和动关系。如果线圈电流反向,则  $d$  点与  $c$

点上二磁通的关系也相反。

挡板

当挡板偏离中间位置而被拉向磁通较大的一方时,挡板所受的力  $f(t)$  [N] 为

$$f(t) = KNi(t) \quad (7.69)$$

式中,  $K$  是一个正的常数,  $N$  为线圈匝数。

### ● 喷嘴挡板阀

节流孔

喷嘴挡板阀的结构如图 7.22 所示。液压源供给的压力  $P_s$  [Pa] 通过节流孔加到喷嘴 a、b, 挡板与喷嘴的间隙愈大, 挡板愈远离喷嘴顶端, 则喷嘴的阻力就愈小。

设挡板顶端的位移为  $z(t)$  [m], 线圈电流为零时, 挡板与喷嘴的间隙为  $Z$  [m], 这时的流体阻力为  $R$ 。设节流孔的阻力也为  $R$ , 则 a、b 喷嘴的阻力  $R_a$  和  $R_b$  分别近似为

$$R_a = \frac{ZR}{Z+z(t)}, R_b = \frac{ZR}{Z-z(t)} \quad (7.70)$$

因此, 输出口 1 的压力  $p_1(t)$  和输出口 2 的压力  $p_2(t)$  分别为

$$p_1(t) = \frac{Z}{2Z+z(t)} p_s, p_2(t) = \frac{Z}{2Z-z(t)} p_s \quad (7.71)$$

两端的压力差  $p_d(t)$  为

$$p_d(t) = p_1(t) - p_2(t) = \frac{-2Zz(t)}{4Z^2 - z^2(t)} P_s \approx \frac{z(t)}{2Z} p_s \quad (7.72)$$

式中最后一步简化时, 近似认为  $z \gg z(t)$ 。

质量-摩擦-弹簧系统

实际上, 挡板是一个质量-摩擦-弹簧系统。设其质量为  $M_t$  [kg], 粘性摩擦系数为  $D_t$  [Ns/m], 弹性系数为  $k_t$  [N/m], 在与式 7.69 所示的电磁力  $f(t)$  平衡时, 可表示为

$$f(t) = M_t \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + D_t \frac{dz(t)}{dt} + k_t z(t) \quad (7.73)$$

取式(7.73)、(7.69)和(7.72)的拉普拉斯变换并加以整理, 以线圈输入电流  $I(s)$  作为输入量, 以压力差  $p_d(s)$  作为输出量时, 喷嘴挡板阀的传递函数为

$$G_t(s) = \frac{P_d(s)}{I(s)} = \frac{1}{2Z} \cdot \frac{KNp_s}{M_t s^2 + D_t s + k_t} \quad (7.74)$$

### ● 圆柱滑阀

在图 7.22 中, 设阀芯的位移为  $x(t)$  [m], 质量为  $M_s$  [kg], 粘性摩擦系数为  $D_s$ , 弹簧的弹性常数为  $k_s$ , 侧面的截面积为  $A$  [m<sup>2</sup>], 则如下关系成立:

$$A p_d(t) = M_s \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + D_s \frac{dx(t)}{dt} + k_s x(t) \quad (7.75)$$

以压力差  $P_d(t)$  作为输入量, 以圆柱位移  $x(t)$  作为输出量, 则圆柱

滑阀的传递函数为

$$G_v(s) = \frac{X(s)}{P_d(s)} = \frac{\Lambda}{M_v s^2 + D_v s + k_v} \quad (7.76)$$

● 伺服阀的传递函数

由式(7.74)和(7.76)可知,以线圈电流  $I(s)$  作为输入量,以阀柱滑动位移  $X(s)$  作为输出量时,伺服阀的传递函数为

$$G(s) = G_v(s)G_f(s) = \frac{X(s)}{I(s)} = \frac{1}{2Z} \cdot \frac{\Lambda K N p_s}{(M_f s^2 + D_f s + k_f)(M_v s^2 + D_v s + k_v)} \quad (7.77)$$

固有振荡频率

可以看出,整个伺服阀表现为一个四阶系统。由于挡板的固有振荡频率远大于圆柱滑动频率,因此挡板的振荡可忽略不计,这样伺服阀可近似为一个二阶系统,其传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{2Z} \cdot \frac{\Lambda K N p_s}{M_s s^2 + D_s s + k_s} \quad (7.78)$$

● 液压伺服机构

轴向活塞马达  
活塞泵 缸体

由于把液压能量转换成旋转能量的执行装置的不同,各种液压伺服机构也存在着很大差异。其中具有代表性的是轴向活塞马达,如图 7.23 所示。由于活塞泵的缸体相对中心轴倾斜,活塞将推动倾斜板旋转,流入马达的流量  $q(t)$  将随倾斜角相应变化。设液压马达转过单位弧度的流量为  $D[\text{m}^3/\text{rad}]$ ,则旋转角速度  $\omega(t)$  与流量  $q(t)$  的关系为

$$q(t) = D \frac{d\theta(t)}{dt} = D\omega(t) \quad (7.79)$$

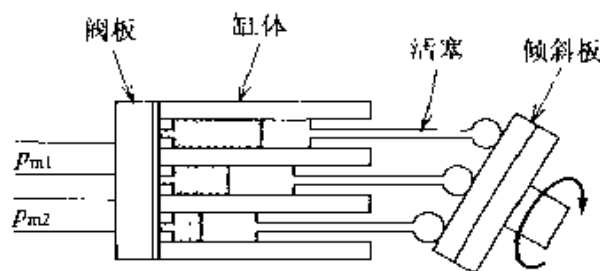


图 7.23 轴向活塞马达的结构

● 液压马达系统

图 7.23 所示的轴向活塞马达的引导阀中,近似有如下关系:

$$p_m(t) = p_{m1}(t) \quad p_{mv}(t) = g \cdot x(t) - r q(t) \quad (7.80)$$

其中,  $K$  为压力放大系数,  $r$  为气缸的内部阻力。

液压马达受负载作用时, 系统的数学模型可表示为

$$D_m(t) = J_m \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + B_m \frac{d\theta(t)}{dt} + \tau_l(t) \quad (7.81)$$

为了使系统的分析计算简化, 认为系统管路无泄漏、无压缩。当系统空载, 即  $\tau_l(t) = 0$  时, 以活塞的位移  $x(t)$  作为输入量, 以液压马达的旋转角  $\theta(t)$  作为输出量, 取式(7.79)、(7.80)和(7.81)的拉普拉斯变换并整理, 可以得到液压马达系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{\Theta(s)}{X(s)} = \frac{gD}{s(J_m s + B_m + rD^2)} \quad (7.82)$$

## □: 相关知识 ● 液压伺服机构

在液压伺服机构中, 除轴向活塞马达以外, 还有由液压驱动齿轮旋转的液压齿轮马达, 采用椭圆形凸轮圈的叶片马达等。

齿轮马达

## ● 射流管伺服

把电气信号转换成液压信号的元件中, 除伺服阀以外, 还有使用可动线圈的射流管伺服装置。射流管伺服主要用于输入信号变化较缓慢的场合。

叶片马达

# 9 顺序控制原理

## □ 要 点

顺序控制是指按照预先确定的顺序使控制过程的各步骤依次进行的一种控制。

## □ 解 释

开关 继电器  
时间继电器

手动操作

恢复型主令开关  
保持型主令开关

### ● 用于顺序控制的电器

顺序控制时,需要使用很多种类的电器,主要有各种开关、继电器和时间继电器等。

### ● 手动操作开关

手动操作开关可以分为恢复型主令开关和保持型主令开关两种。前者仅仅在施加手动操作时触点的开闭状态才会发生变化,即只有在操作时,触点才处于开断状态或闭合状态,如图 7.24 所示。而对于保持型主令开关来说,一般进行操作后到反方向操作之前触点将始终保持断开或闭合的状态,如图 7.25 所示。

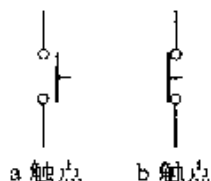


图 7.24 恢复型开关的图形符号



图 7.25 保持型开关的图形符号

### ● 检测开关

检测开关用于位置、位移、速度、压力和温度等的检测。例如位置检测中广泛使用微动开关等。图 7.26 所示为检测开关的一般图形符号。

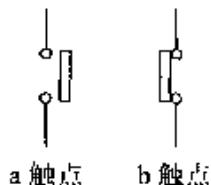


图 7.26 检测开关的图形符号

### ● 控制用继电器(有触点继电器)

控制用继电器是一种中继元件,在输入电气信号的 ON OFF

动作控制下产生出新的电气信号的 ON-OFF 动作,从而把小功率的 ON-OFF 动作转换成大功率的 ON-OFF 动作。控制用继电器一般按照输入反转、多信号输出、延时输出等功能进行分类。

### ● 恢复型继电器

由励磁线圈的励磁和消磁来完成触点的 ON-OFF 动作,这种 ON-OFF 动作功能与手动的恢复型主令开关是类似的。恢复型继电器只有在电磁线圈励磁的情况下动作,一旦消磁则立即恢复到原来的状态。与恢复型主令开关一样,继电器动作时触点处于断开状态或闭合状态。图 7.27 所示为电磁线圈与 a 触点和 b 触点的组合所使用的图形符号。

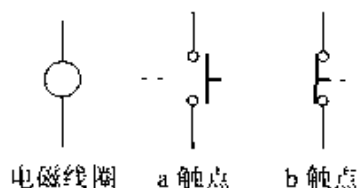


图 7.27 恢复型继电器的图形符号

### ● 保持型继电器

与手动保持型主令开关的动作一样,保持型继电器的动作是依靠励磁线圈和消磁线圈来完成的。一旦励磁线圈动作,其动作状态一直保持到消磁线圈动作前。图 7.28 所示为动作用电磁线圈、恢复用电磁线圈及其触点组合所使用的图形符号。

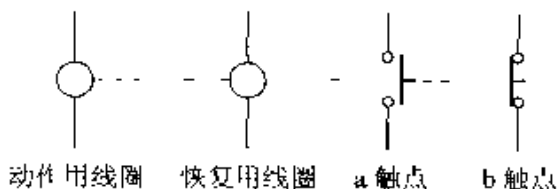


图 7.28 保持型继电器的图形符号

### ● 时间继电器(定时器)

时间继电器可以起到定时器的作用,即从动作条件具备起到输出触点开闭为止产生时间上的延迟。根据对图 7.29 所示时间继电器的 a 触点与 b 触点的开断或闭合的时间延迟,可构成四种组合方式。时间继电器的图形符号如图 7.29 所示。

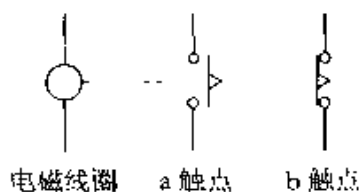


图 7.29 时间继电器的图形符号

## 有触点继电器

## ● 无触点继电器

前面所述的电磁继电器具有机械上的可动触点,称为有触点继电器。而无触点继电器是使用晶体二极管和晶体三极管等电子开关在无机触点的情况下来完成继电动作。由于没有机械上的可动触点,无触点继电器具有使用寿命长、可靠性高、响应速度快以及可以把复杂电路小型化等一系列优点。

## □ 相关知识

## ● 过载保护继电器

当电路中的负载电流超过某一定值并维持一定时间后,继电器的触点因过载而开闭,这种继电器称为过载继电器。一般使用热过载继电器。热过载继电器主要由用于开闭触点的双金属片构成,构成双金属片的两种金属具有不同的热膨胀系数。当负载电流流过并超过额定值时,由于电阻发热体,双金属片发生弯曲变形并使触点开闭。

## 双金属片

## 电阻发热体

## ● 步进继电器

在脉冲电流的作用下,多个触点依次切换的继电器称为步进继电器。有一个脉冲输入时,继电器触点切换一次(一步),因此可以根据脉冲数选择对应的触点。

## ● 反馈控制与顺序控制

在使用多台机器人来制造产品时,希望每台机器人各自分担一部分工作来提高生产效率。这时,对于每一台机器人采用反馈控制方式来完成位置控制或力的控制。而对于整个机器人群体,首先应确定遵循一定顺序的作业流程,即采用顺序控制进行各个机器人的启动、制动控制。因此,为了实现复杂制造过程的自动化,必须实行反馈控制与顺序控制的组合控制。



## 10 顺序控制中的逻辑电路

**□ 要点** 顺序控制中的逻辑电路是指把 ON/OFF 控制变换成  $\alpha$  值电平信号, 并进行逻辑运算的电路。

**□ 解释** ● **ON-OFF 控制与逻辑运算**

顺序控制基本上由 ON/OFF 动作构成。因此, 如果把 ON 和 OFF 变换成 0 和 1, 就可以用逻辑运算来描述顺序控制。这里的 0 和 1 与计算机内部使用的基本逻辑单位的 0 和 1 是完全一样的。

● **基于继电器的逻辑运算基本单元**

逻辑“与”  
逻辑“或”  
逻辑“非”

一般说来, 在进行逻辑运算时, 顺序控制可以由逻辑“与”、逻辑“或”以及逻辑“非”等三种基本逻辑单元构成(参照第 3 章第 3.13 节)

● **逻辑“与”(AND)的实现**

“与”电路

用继电器来实现“与”电路时, 如图 7.30 所示。由图中可知, 只有开关 A 与开关 B 同时 ON 时, 继电器线圈才得电, 触点 X 才接通。这样两个开关串联就构成了“与”(AND)电路。

● **逻辑“或”(OR)的实现**

“或”电路

用继电器来实现“或”电路时, 如图 7.31 所示。由图中可知,

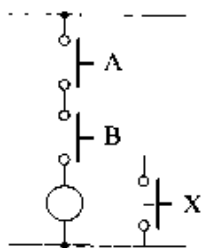


图 7.30 实现逻辑“与”的继电器

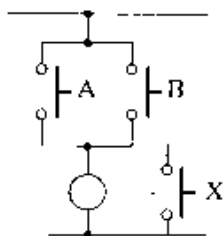


图 7.31 实现逻辑“或”的继电器

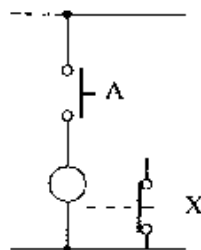


图 7.32 实现逻辑“非”的继电器

如果开关 A 和开关 B 中的任何一个开关处于 ON 状态,继电器线圈就会得电,则 X 触点就会接通。因此,两个开关并联就实现了逻辑“或”(OR)电路。

● 逻辑“非”(NOT)的实现

“非”电路

用继电器实现“非”电路时,如图 7.32 所示。

● 逻辑“与非”(NAND)的实现

“与非”电路

用继电器实现“与非”电路时,如图 7.33 所示。由图中可知,如果开关 A 与 B 中任何一个 OFF 时,线圈将失电,则 X 触点接通;如果开关 A 与开关 B 同时为 ON 状态时,线圈得电,则 X 触点断开,这样就实现了逻辑“与非”电路。

● 逻辑“或非”(NOR)的实现

“或非”电路

用继电器实现“或非”电路时,如图 7.34 所示。由图中可知,如果开关 A 与开关 B 同时为 OFF,线圈将失电,则 X 触点接通;开关 A 或 B 中有一个为 ON 状态,则 X 触点断开。可见该电路实现了“或非”逻辑。

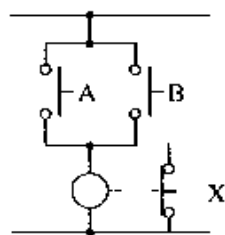
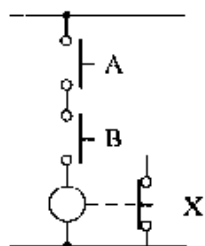


图 7.33 实现逻辑“与非”的继电器    图 7.34 实现逻辑“或非”的继电器

相关知识

● 触发器电路与顺序电路

计数器型触发器电路

实现保持型继电器功能的无触点继电器电路称为计数器型触发器电路,这种电路每给一个输入脉冲,其输出就交替翻转一次。将触发器与通常的逻辑电路组合起来,由原输入和现输入共同决定其输出状态,这种电路称为时序电路。用这种时序电路可以构成计数器和移位寄存器等。

计数器移位寄存器

## 11 逻辑电路的简化

**□ 要点** 逻辑电路是一种用 2 值信号“0”和“1”进行逻辑运算的电路，其中的“0”和“1”是基本逻辑单位。

**□ 解释** ● **逻辑代数**

逻辑“与”、逻辑“或”和逻辑“非”三种基本逻辑单元的组合，可以实现任何复杂的逻辑运算。当给出了某一真值表时，要实现这一真值表并非只有一种基本逻辑单元的组合方式，要想使其复杂，无论怎样复杂都是可能的。

为了简化装置和降低成本，总希望使用尽可能少的元件来构成电路。因此，需要运用逻辑运算法则，进行逻辑关系式的变换。

这种运用逻辑运算法则所进行的逻辑变换称为逻辑代数。逻辑代数与通常的代数运算不同，由于不存在基本逻辑单位“0”和“1”以外的数，所以如第 2 章第 2.13 节所述的那样，其运算法则简单易懂。

● **逻辑关系式的简化**

可以利用第 2 章第 2.13 节所介绍的法则进行逻辑关系式的简化。例如，对如下逻辑式进行简化：

$$X = A \cdot B \cdot C + A \cdot \bar{B} \cdot C + A \cdot B \cdot C + A \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} \quad (7.83)$$

首先，根据分配律，式(7.83)右边可变形为

$$X = A \cdot B \cdot (C + \bar{C}) + (A + A) \cdot B \cdot C \quad (7.84)$$

其次，根据互补律，可最后简化为

$$X = A \cdot \bar{B} + B \cdot C \quad (7.85)$$

● **逻辑电路的实现**

为了实现式(7.83)，需要 8 个逻辑“与”电路和 3 个逻辑“或”电路。而要实现同样的逻辑运算，根据式(7.85)就只需要图 7.35 所示的 2 个逻辑“与”电路和 1 个逻辑“或”电路就可以实现。这就

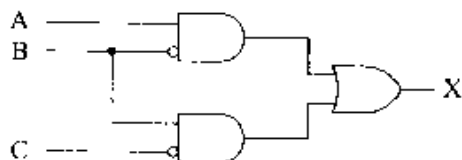


图 7.35 简化后的逻辑电路

是说,有时利用逻辑式的简化,可以大幅度减少电路中所用元件数和配线量。

## 相关知识 ● 卡诺图

所谓卡诺图就是把对应于逻辑变量组合的运算结果填入一个方格矩阵中,这样容易把握逻辑式的特征,使逻辑式的化简过程简单、直观。但是,若变量数很多时,卡诺图将变得很庞大,失去了简单、直观的优点,因此在化简复杂逻辑式时很少应用。

## 例 题

简化以下逻辑式并绘出所得简化逻辑式的逻辑电路:

$$[1] X = A \cdot B \cdot C + A \cdot \bar{B} \cdot C + A \cdot B \cdot \bar{C}$$

$$[2] X = A \cdot B \cdot C + A \cdot B \cdot \bar{C} + \bar{A} \cdot B \cdot C + \bar{A} \cdot \bar{B} \cdot C$$

答

$$[1] X = A \cdot B \cdot C + A \cdot \bar{B} \cdot C + A \cdot B \cdot \bar{C}$$

$$= A \cdot B \cdot C + A \cdot B \cdot C + A \cdot B \cdot \bar{C} + A \cdot B \cdot C \quad (\text{根据重叠律})$$

$$= A \cdot (B + \bar{B})C + A \cdot B \cdot (C + \bar{C}) \quad (\text{根据分配律})$$

$$= A \cdot C + A \cdot B \quad (\text{根据互补律})$$

$$= A \cdot (B + C) \quad (\text{根据分配律})$$

实现上式的逻辑电路如图 7.36 所示。

$$[2] X = A \cdot B \cdot C + A \cdot B \cdot \bar{C} + \bar{A} \cdot B \cdot C + A \cdot \bar{B} \cdot C$$

$$= (A \cdot B \cdot C + A \cdot B \cdot \bar{C}) + (\bar{A} \cdot B \cdot C + A \cdot \bar{B} \cdot C) \quad (\text{根据重叠律})$$

$$= A \cdot B \cdot (C + \bar{C}) + A \cdot \bar{B} \cdot C + (\bar{A} + A) \cdot B \cdot C \quad (\text{根据分配律})$$

$$= A \cdot B + \bar{A} \cdot B \cdot C + \bar{B} \cdot C \quad (\text{根据互补律})$$

实现上式的逻辑电路如图 7.37 所示。

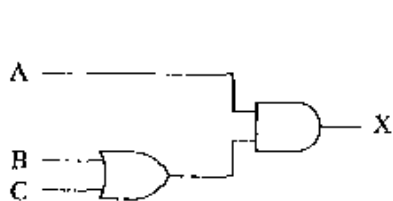


图 7.36 实现例题[1]的简化逻辑电路

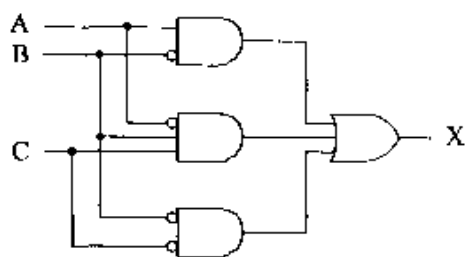


图 7.37 实现例题[2]的简化逻辑电路

## 12 顺序控制举例

### □ 要 点

顺序控制的应用十分广泛。从大的方面来说,在发电系统、工厂的流水作业自动化系统等复杂系统中普通应用了顺序控制;从小的方面来说,在全自动洗衣机、电饭锅等家用电器中也使用了顺序控制方法。

### □ 解 释

恢复型开关  
恢复型继电器

#### ● 从两个地点用继电器对一台电动机进行控制

从两个地点对一台电动机进行控制时,可以用 2 个双联恢复型开关和一个恢复型继电器来实现,如图 7.38 所示。图中  $A_1 B_1$  为一个双联开关,  $A_2 B_2$  为另一个双联开关。当按下开关  $A_1$  或  $A_2$  时,继电器的电磁线圈得电,触点 X 闭合,电动机接通电源;当按下开关  $B_1$  或  $B_2$  时,继电器线圈电路被切断,触点 X 开断,电动机供电停止。

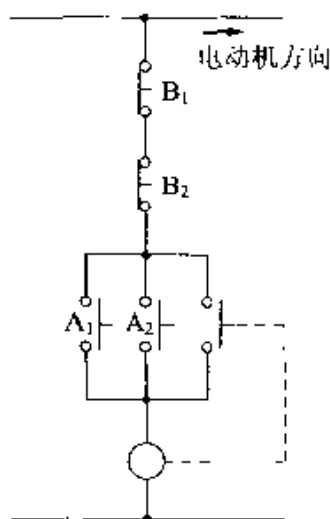


图 7.38 从两个地点控制一台电动机的继电器电路

#### ● 在机器人装配操作中的应用

考察一下把图 7.39 所示的三个梯形积木块搭成金字塔形,由机器人来完成这一简单的装配操作。假定梯形块随意放在图 7.40 所示的传送带上,与传送带一起移动。当某一个梯形块到达 A 点时,由摄像机负责识别。

机器人要不断检查装配中的金字塔的状态,如果所需的梯形块随传送带到达 A 点时,就及时抓起,并进行金字塔装配操作。

金字塔装配完成后,由传送带 2 送出。在完成摄像机的识别和梯形状块的堆砌、取下动作时,由于传送带的移动十分缓慢,即使不进行停止、运行控制,上述工作也不会受到影响。



图 7.39 搭成金字塔

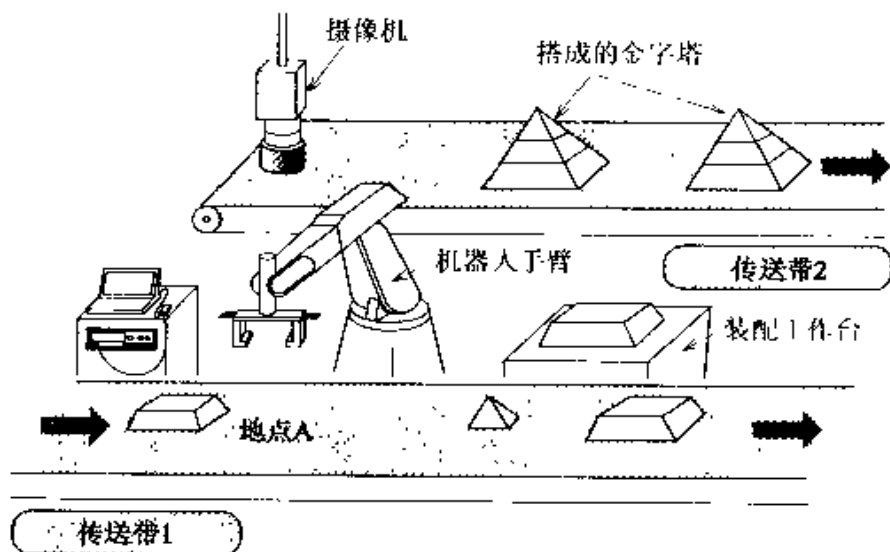


图 7.40 机器人手臂的装配操作

### ● 关于输入与状态的分析

现将机器人正常工作所需的输入与状态的信息整理如下。

首先,由安装在地点 A 上部的摄像机来识别位于传送带上的梯形状的种类。由于梯形状的种类有三种,加上无梯形状的情况,应该识别以下四种输入。

输入①:无梯形状(0,2 进制数为 00)

输入②:梯形状 1(1,2 进制数为 01)

输入③:梯形状 2(2,2 进制数为 10)

输入④:梯形状 3(3,2 进制数为 11)

还需要进一步了解在装配工作台上的梯形状块的装配情况以及金字塔完成到何种程度。为此可以得到下列四种状态

状态①:无梯形块(0,2进制数为00)

状态②:只有梯形块1(1,2进制数为01)

状态③:梯形块1与2(2,2进制数为10)

状态④:金字塔完成(3,2进制数为11)

### ● 机器人动作分析

下面就机器人的动作加以整理。为了简单起见,对三种梯形块的抓起动作不加区别,而全部使用同样的指令来完成。这样,可以认为有以下两种动作:

动作①:从传送带1抓起梯形块,放置到装配工作台上或正在装配中的金字塔上。

动作②:将装配完成的金字塔从装配工作台上抓起,送到传送带2上。

不进行这两种动作时,机器人处于预先确定的静止状态。

### ● 机器人的动作

机器人的动作①和动作②取决于机器人的输入与状态,可以分别根据表7.2和表7.3所示的真值表来进行选择。表中用来表示机器人输入与状态的2进制数的上位数和下位数分别用(A, B)、(C, D)这四个逻辑变量给出。根据传送带1上的梯形块

表 7.2 决定动作①的真值表

A	B	C	D	X <sub>1</sub>	
0	0	0	0	0	
0	0	0	1	0	
0	0	1	0	0	
0	0	1	1	0	
0	1	0	0	1	← 工作台上:没有 传送带上:梯形块
0	1	0	1	0	
0	1	1	0	0	
0	1	1	1	0	
1	0	0	0	0	← 工作台上:梯形块1 传送带上:梯形块2
1	0	0	1	1	
1	0	1	0	0	
1	0	1	1	0	
1	1	0	0	0	
1	1	0	1	0	
1	1	1	0	1	← 工作台上:梯形块2 传送带上:梯形块3
1	1	1	1	0	

和装配工作台上的金字塔的状态来决定是否进行动作①。当装配工作台上的金字塔装配完成时,则进行动作②。

表 7.3 决定动作②的真值表

C	D	X <sub>2</sub>
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

● 电路的实现

用逻辑关系式来描述表 7.2 所示的真值表时,如下式所示:

$$X_1 = A \cdot B \cdot C \cdot D + A \cdot B \cdot C \cdot \bar{D} + A \cdot B \cdot \bar{C} \cdot D$$

因此,决定是否进行动作①的电路如图 7.41 所示。

表 7.3 所示的真值表可用逻辑关系式描述为

$$X_2 = C \cdot D$$

因此,可以用图 7.42 所示的电路来实现动作②。

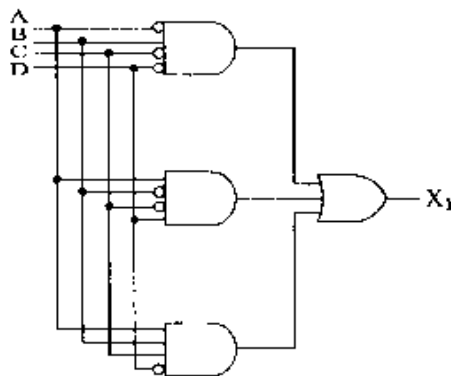


图 7.41 决定动作①的逻辑电路



图 7.42 决定动作②的逻辑电路





## 第8章

# 机器人技术

日本具有享誉世界的机器人技术，素有“机器人王国”之称。在未来的发展中，机器人技术被人们寄予厚望。

目前，工业机器人已经进入实用化阶段，工业机器人包含了机电一体化技术中的全部要素。然而完整地介绍有关机器人设计技术的资料却为数很少。

本章将以可用于工业和学习的多用机器人“move master”为例，具体介绍机器人设计技术。

为了加深对机器人技术应用的理解，还将介绍有关结构设计技术、控制技术、外部设备与视觉传感器的连接技术以及在生产现场使用时的安全技术等。

### ● 责任编辑

久慈俊夫

### ● 执 笔

森 俊二(1)

伊藤敦之(2~4,8)

今泉武男(5~7,8)

久慈俊夫(10)

# 1 机器人的种类与结构

## □ 要 点

机器人技术是一种综合性的机电一体化技术,包括传动机构、伺服控制、数据处理、人机对话以及与机器人工作性质对应的控制功能等。目前使用的工业机器人从机械结构上看可分为以下四种类型:

- ① 直角坐标系机器人。
- ② 圆柱坐标系机器人。
- ③ 水平多关节机器人。
- ④ 垂直多关节机器人。

## □ 解 释

### ● 机器人的历史

用人体型自动机械来代替人工作始终是人类的一个梦想。自古以来人们就以极大的兴趣研究机器人,例如中世纪时的时钟机构中的八音盒、人型自动装置等。20世纪70年代微型计算机的发明,使计算机技术、伺服技术与机械技术这三种技术有可能融为一体。80年代,日本的汽车工业、电机制造业等领域大量地采用了工业机器人。

### ● “工业机器人”一词的来源

捷克剧作家卡里洛·奇别克的剧本《罗萨姆万能机器人制造公司》(Rossum's Universal Robots, 1920)中首先使用了“机器人”一词,意思是“人造的人”。

### ● 工业机器人的出现

① 1960年,美国报纸《美国金属市场》(American Metal Market)中使用了工业机器人一词。

② 1954年,“工业机器人”的概念在乔治·C·德沃尔(美国)申请的专利“Programmed Article Transfer”(1961年注册)上提出。

③ 1962年,美国 UNIMATION 公司和 AMF 公司分别推出了实用机型“UNIMATE”和“VERSTRAN”。

④ 1967年,为了解决劳动力短缺问题,日本汽车制造业引进了美国的实用化机械手。

⑤ 20世纪70年代,以美国为中心进行了手、眼结合的机械手系统和装配自动化系统的研究,机器人技术发展到了多关节机器人的计算机控制技术阶段。

⑥ 1975年石油危机后,日本的机器人产业界将快速发展的

人型自动装置  
计算机 伺服  
机械

人造的人

工业机器人

多关节机器人

微型计算机应用于机器人控制,实现了多关节工业机器人控制的低成本化。

② 1975年起,日本的汽车制造业为使产品多样化以及弥补劳动力的不足,大量引进了电弧焊接机器人和点焊机器人。在电机制造业中,也大量引进了水平多关节机器人(SCARA; selective compliance assembly robot arm)用于装配生产线。可以说,1980年是机器人普及之年。

水平多关节机器人

### ● 工业机器人的定义

根据“工业机器人名词术语”(JISB0134 1993),工业机器人的定义为“具有自动控制的操作功能和移动功能,能够按照程序实施各种作业的用于工业的机械”。该定义有如下意义:

自动控制  
操作功能  
移动功能

① 所谓“自动控制的操作功能”是指在自动控制下完成操作的功能。

② “移动功能”可以是步行、无轨道、有轨道等各种形态。

③ 所谓“能够按照程序实施”是指操作能够程序化(programmable),如果变更程序则可以进行其它种操作。

相关的国际标准有 ISO 8373“Terminology”。

### ● 机器人的构成

一般情况下,按照旋转轴或直线运动轴的配置对机器人的结构进行分类。下面就不同结构的机器人的特点和用途加以说明(图中的符号请参照第3章第3.1节)。

旋转轴  
直线运动轴

**直角坐标系机器人** 直角坐标系机器人具有相互正交的一根或两根直线运动轴结构(图8.1)。

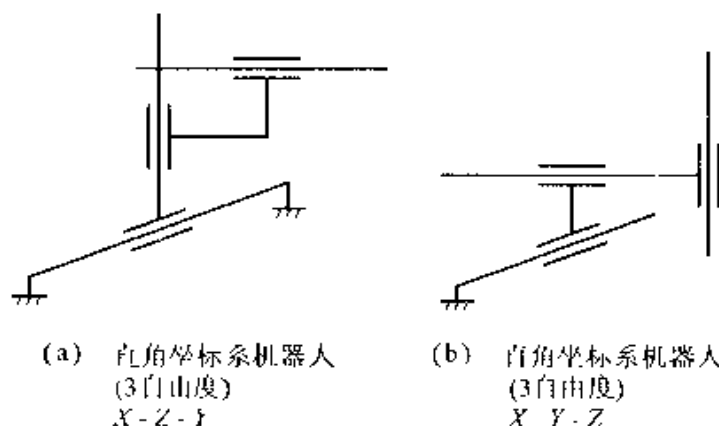


图 8.1 直角坐标系机器人的机械构成

直角坐标系机器人的优点是结构简单、精度高,缺点是在同样

的动作范围内,机器人的占地面积大,设备的空间因数较差。主要用于印刷电路基板的元件插入、紧固螺丝等

**圆柱坐标系机器人** 从结构上来说,圆柱坐标系机器人配置有在某一平面上旋转的旋转轴、在旋转平面垂直方向上的直线轴和前后方向直线轴(图 8.2)。

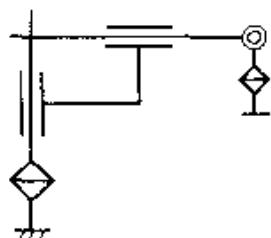


图 8.2 圆柱坐标系机器人的机械构成

其优点是结构简单、刚性好,其缺点是在机器人动作范围内,必须有前后方向轴线的后退空间,因此空间利用较差。主要用于重物的装卸等。

**水平多关节机器人** 在日本,水平多关节机器人是一种提倡推广的机器人。这种机器人在结构上具有串联配置的二个能够在水平面内旋转的手臂(图 8.3)。

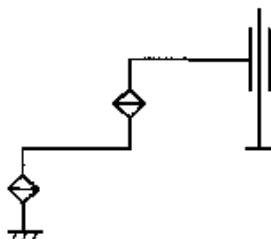


图 8.3 水平多关节机器人的机械构成

水平多关节机器人的优点是在垂直方向上的刚性好,是一种用来代替专用装配机械的常用自动化机械。其自由度可以根据用途选择 2~4 个自由度,常用于 VTR、盒式录音机等装配流水线上,称为 SCARA。

## SCARA

### 垂直多关节机器人

**垂直多关节机器人** 垂直多关节机器人模拟了人类的手臂功能。由垂直于地面的腰部旋转轴(相当于大臂旋转的肩部旋转轴)带动小臂旋转的肘部旋转轴以及小臂前端的手腕等构成(图 8.4)。手腕通常由 2~3 个自由度构成。

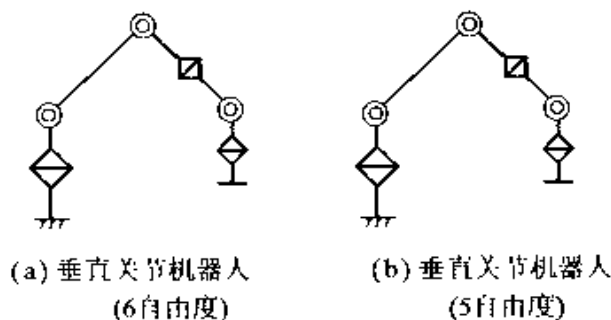


图 8.4 垂直多关节机器人的机械构成

垂直多关节机器人的优点是可以自由地实现三维空间的各种姿势,可以生成各种复杂形状的轨迹。相对机器人的安装面积,其动作范围很宽。其缺点是结构刚度较低,动作的绝对位置精度较低。它广泛应用于代替人完成装配作业、货物搬运、电弧焊接、喷涂、点焊接等场合。

## 相关知识 ● JIS 的控制分类

日本国家标准 JIS 中的机器人控制的分类为顺序控制机器人、机械手机器人、数字控制机器人、智能机器人、感觉控制机器人、自适应控制机器人、学习控制机器人以及远距离操纵机器人等。

## ● JIS 的机械结构型式分类

JIS 标准中机器人按机械结构型式分类为直角坐标机器人、圆柱坐标机器人、极坐标机器人、多关节机器人、标量机器人、雷达天线机器人、振子机器人等。

## 应用基础 机器人的机械结构

从机器人的机械结构来讲,由旋转机构(枢轴)、直线机构(导轨)和臂杆等构成。机械结构的图示方法在《工业机器人图示符号》(JIS B0138-1980)中作了规定。

## 必备知识 自由度

自由度(degrees of freedom)是为确定机器人动作位置所需要的独立变量的数目。例如在平面内作业时有 4 个自由度,在三维空间内作业时则有 6 个自由度,其中有 3 个移动自由度,另外 3 个是转动自由度。

## 研究课题

[1] 1993 年,斯皮尔伯格导演的电影《侏罗纪公园》中的机器人“RV-M2”,在恐龙解

化系统中出演了处理卵的角色。

② 据说人类的手臂有 27 个自由度,读者可用自己的身体来确认一下。

## 具体实例

图 8.5~8.8 示出了各种机器人的实例。



图 8.5 6 自由度垂直多关节机器人“RV-E2”



图 8.6 5 自由度垂直多关节机器人“RV-M2”

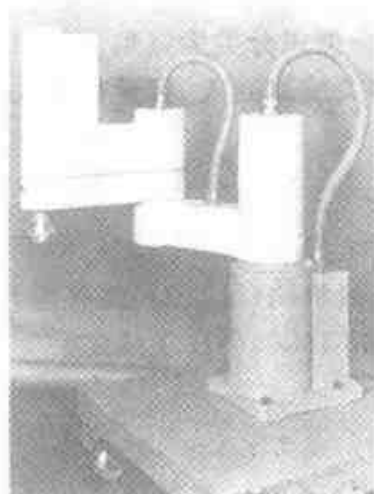


图 8.7 4 自由度水平关节机器人“RH P33”

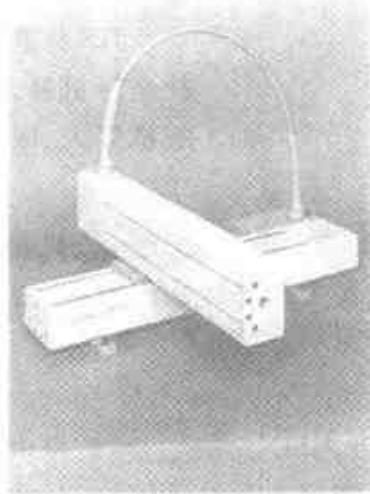


图 8.8 3 自由度直角坐标机器人“RS-M2”

## 2 机器人的结构分析

**要 点** 在机器人进行作业时,需要让机器人的各个膀臂动作,使手爪向作业位置移动。为此,必须了解膀臂的关节角度与手爪位置的几何学关系,这种关系称为运动学。

**解 释** ● 位置与姿势

为了进行机器人的解析,首先需要对空间的位置与姿势加以定义。

位置就是从某基准坐标系所看到的位置矢量 $(x, y, z)$ 。进行机器人分析时,仅仅有位置矢量是不够的。人类抓持物体时,需要考虑对应不同物体时的抓持方向(从上面抓持还是从横向抓持等)。同样,对机器人来说,也必须明确指示机器人的手爪应从哪一个方向去抓持目标。一般说来,与位置一样,手爪的任意方向,也就是姿势可以用三要素 $(\alpha, \beta, \gamma)$ 的形式来表示。

基准坐标系  
目标坐标系

图 8.9 所示为位置与姿势的概念。在基准坐标系  $O_1 X_1 Y_1 Z_1$  中有一个目标坐标系  $O_2 X_2 Y_2 Z_2$ 。用基准坐标系来表示目标坐标系时,若从基准坐标系的原点  $O_1$  指向目标坐标系的原点  $O_2$  的矢量为 $(x, y, z)$ ,如果任意旋转  $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ ,则用 $(\alpha, \beta, \gamma)$ 来表示姿势与用  $O_2 X_2 Y_2 Z_2$  来表示姿势二者是一致的。

pose

在机器人中,用位置矢量 $(x, y, z)$ 加上表示姿势的三要素 $(\alpha, \beta, \gamma)$ 来表示位置和姿势。这是一个六维信息,为了与一般概念的“点”与“位置”加以区别,称之为 pose。

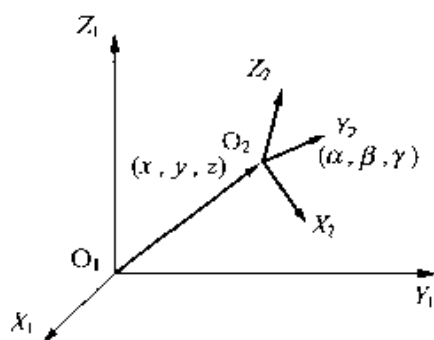


图 8.9 位置与姿势的表示方法

### ● 机器人的坐标系

表示机器人的位置与姿势时,需要定义一个作为基准的坐标



系。为了表示机器人的动作,可以定义如图 8.10 所示的坐标系。

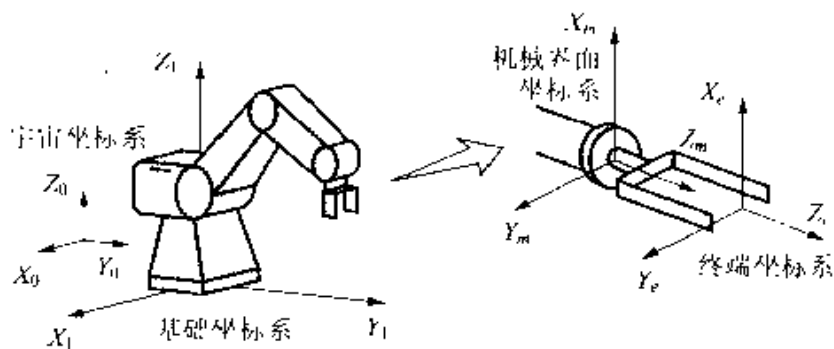


图 8.10 机器人的坐标系

① 宇宙坐标系 这种坐标系与机器人无直接关系,可以以地面或作业平面为基准来设定坐标系。坐标原点和坐标轴由使用者决定。

② 基准坐标系 以机器人的基座底面为基准设定的坐标系,也称为机器人坐标系。坐标原点由机器人制造者决定。

③ 机械界面坐标系 设定于作为手爪安装面的机械界面的坐标系,坐标原点为机械界面的中心点。

④ 终端坐标系 设定于机器人手爪或手爪终端的坐标系。所谓手爪就是安装于机械界面的工具,因此也称为工具坐标系。

以上述坐标系为基础来表示机器人的位置和姿势。一般情况下,以宇宙坐标系作为基准坐标系来考虑终端坐标系的位置姿势。而多数情况下,宇宙坐标系与基础坐标系是同一坐标系

### ● 正运动学与逆运动学

图 8.11 示出了与 5 轴多关节机器人对应的结构图。为了从几何上分析机器人的结构,可以用图 8.11(b)来表示。用这个图来进行各轴的关节角度( $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ )与机器人的末端(机械界面或手爪端)的位置姿势( $X, Y, Z, \alpha, \beta$ )之间关系的研究称为机器人运动学。从关节角度出发来求取末端的位置姿势称为正运动学;从末端位置姿势出发来求取关节角度称为逆运动学(图 8.12)。

### ● 水平多关节机器人的正运动学

图 8.13 所示为 3 轴水平多关节机器人的结构图及关节角的定义。图中的坐标系为基础坐标系。机器人由沿水平方向的二个旋转轴和垂直方向的直线运动轴等三个轴构成。在水平方向的二个轴中,基础侧的为第一轴,末端侧的为第二轴,第一轴长度为

$L_1$ , 第二轴长度为  $L_2$ 。关节角度  $\theta_1$  为从 X 轴到第一轴的水平夹角, 关节角  $\theta_2$  为从第一轴的延长线到第二轴的夹角, 均取逆时针方向为关节角度的正方向。Z 轴为垂直方向的移动量, 取机器人的基座底面为原点 O, 向上的方向为正方向。根据图 8.13 可以导出用关节角  $(\theta_1, \theta_2, Z)$  表示的求取末端位置的公式。

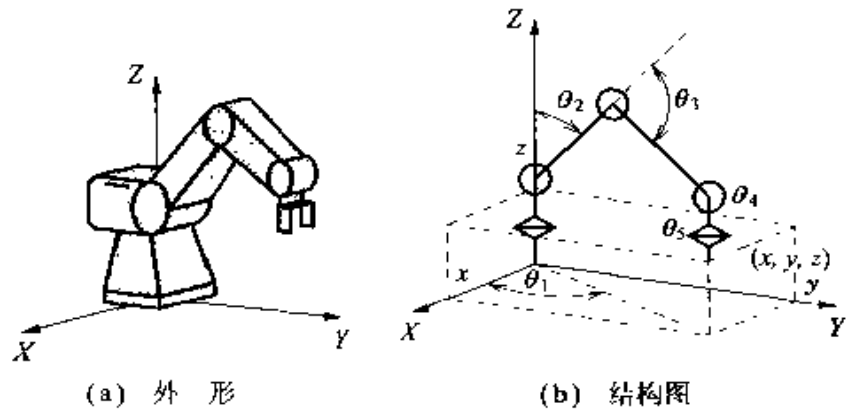


图 8.11 垂直多关节机器人



图 8.12 正运动学与逆运动学

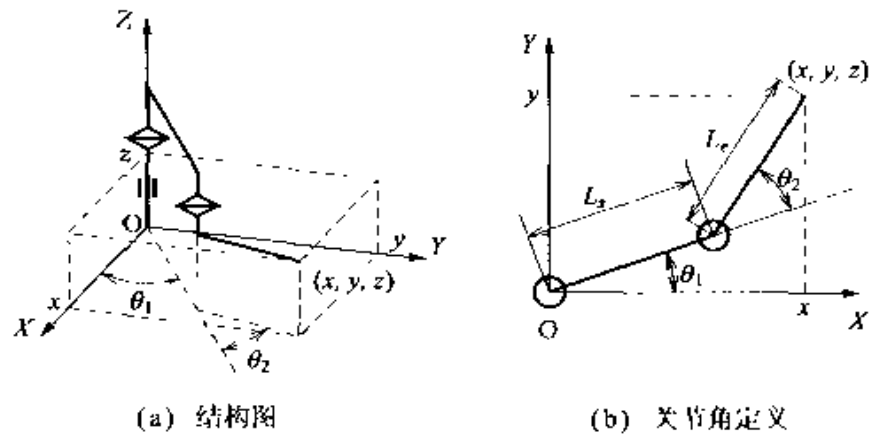


图 8.13 水平多关节机器人

从机器人的上面看下去如图 8.13(b) 所示。末端(手爪端)位

置  $(x, y, z)$  中的  $(x, y)$  可表示为

$$x = L_1 \cdot \cos\theta_1 + L_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (8.1)$$

$$y = L_1 \cdot \sin\theta_1 + L_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (8.2)$$

由于  $Z$  轴为直线运动轴, 因此可直接表示成

$$z = Z \quad (8.3)$$

### ● 水平多关节机器人的逆运动学

图 8.14 所示为机器人的末端(手爪端)与关节角的关系, 由图中可知, 对应末端位置  $P$ , 机器人的手臂形状有两种, 一种是用实线表示的  $OEP$ , 另一种是用虚线表示的  $OE'P$ 。为了区别这两种形状, 可以和人类的手臂作一下对比, 则把  $OEP$  称为右手(right), 把  $OE'P$  称为左手(left)。这样一来, 就存在与末端位置相对应的多个关节角组合。注意到这一点, 对于三轴水平多关节机器人, 就可以导出用机器人末端位置  $(x, y, z)$  表示的求取关节角  $(\theta_1, \theta_2, Z)$  的公式

右手  
左手

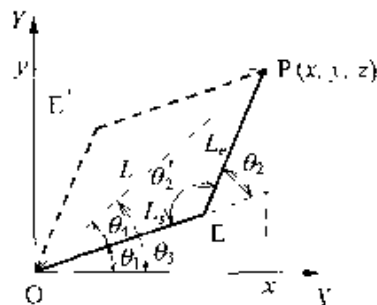


图 8.14 末端位置与关节角的关系

首先考虑关节角  $\theta_2$ 。在  $\triangle OEP$  中,  $\angle OEP = \theta'_2 = \pi - \theta_2$ , 应用余弦定理, 则

$$2 \cdot OE \cdot EP \cdot \cos\theta'_2 = OE^2 + EP^2 - OP^2$$

$$2 \cdot L_1 \cdot L_2 \cdot \cos\theta'_2 = L_1^2 + L_2^2 - (x'^2 + y'^2)$$

所以 
$$\cos\theta'_2 = \frac{L_1^2 + L_2^2 - (x'^2 + y'^2)}{2L_1L_2}$$

$$\theta'_2 = \cos^{-1} \left( \frac{L_1^2 + L_2^2 - (x'^2 + y'^2)}{2L_1L_2} \right) \quad (8.4)$$

$$\theta_2 = \pi - \theta'_2 \quad (8.5)$$

这里还必须考虑前面所述的区别于右手和左手的两组解。由图 8.14 可知, 右手时  $\theta_2 > 0$ , 而左手时  $\theta_2 < 0$ , 因此用式(8.4)和式(8.5)求得的  $\theta_2$  的取值范围为  $0 < \theta_2 < \pi$ , 而左手的  $\theta_2$  应为负值。

关节角  $\theta_1$  可作如下考虑。由图 8.14 可知

$$\theta_1 = \theta_1' + \theta_2 \quad (8.6)$$

其中  $\theta_1' = \tan^{-1} \left( \frac{y}{x} \right)$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left( \frac{L_0^2 + (x^2 + y^2) - L_c^2}{2L_0(x^2 + y^2)} \right)$$

由于 Z 轴为主动轴, 因此仍有  $x=Z$ 。

### 研究课题 R<sup>3</sup> 开始了人类梦想的机器人计划

所谓 R<sup>3</sup>, 它是 Realtime Remote Robotics (R<sup>3</sup>: 实时反应远程控制机器人技术) 的略语, 是机器人技术与网络技术以及控制技术等融为一体的综合科学技术。目前, 以日本通产省为中心, 由产、官、学的知名专家组成了项目攻关组, 已经开始了 R<sup>3</sup> 技术的研究。

R<sup>3</sup> 技术的潜在力在于, 人们期待着将创出一个机器人产业, 这一产业将凌驾于作为当今产业支柱的汽车工业之上, 而成为 21 世纪的一个巨大产业。

目前, 正在研究服务于社会生活和市民生活的与人类共存型机器人, 这类机器人将用于灾害救助、警备保安、宇宙作业、远程医疗(图 8.15), 以及高龄人和伤残人参与社会和住宅会议系统等。

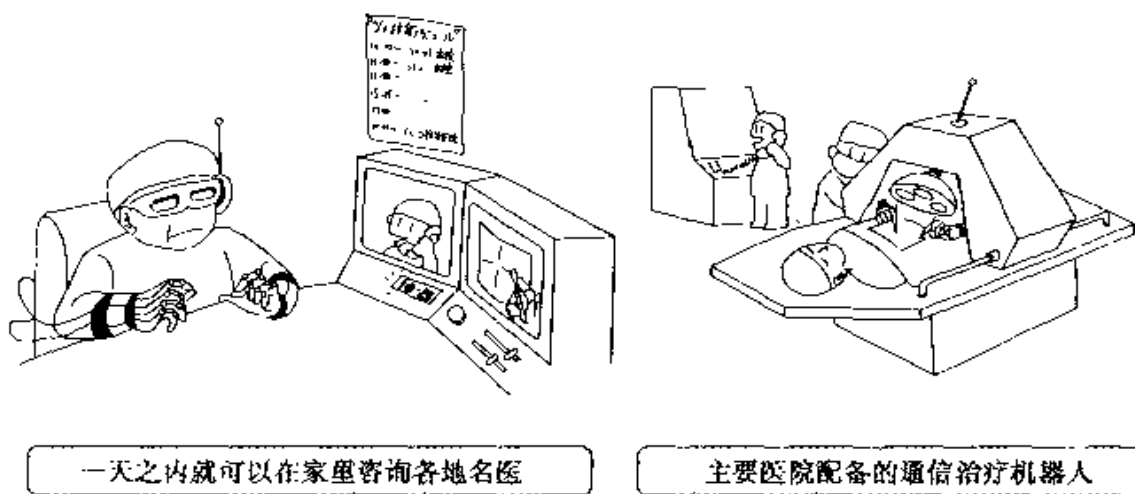


图 8.15 远程医疗 R<sup>3</sup> 系统(国际机器人·FA 技术中心提供)

### 3 机器人的正运动分析

**要 点** 作为实际的机器人,以三菱电机制造的“RV-M2”(5轴垂直多关节机器人)为例,根据8.2节的分析,介绍有关运动学的分析方法,同时给出其基本公式。

**解 释** ● 机器人的各轴及关节角

图8.16所示为5轴垂直多关节机器人的外观形状,图8.17所示为该机器人的各关节角的定义

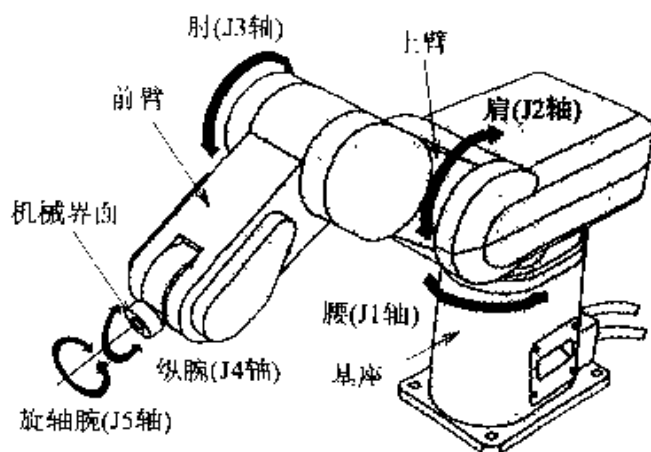


图 8.16 “RV-M2”外观与各轴名称

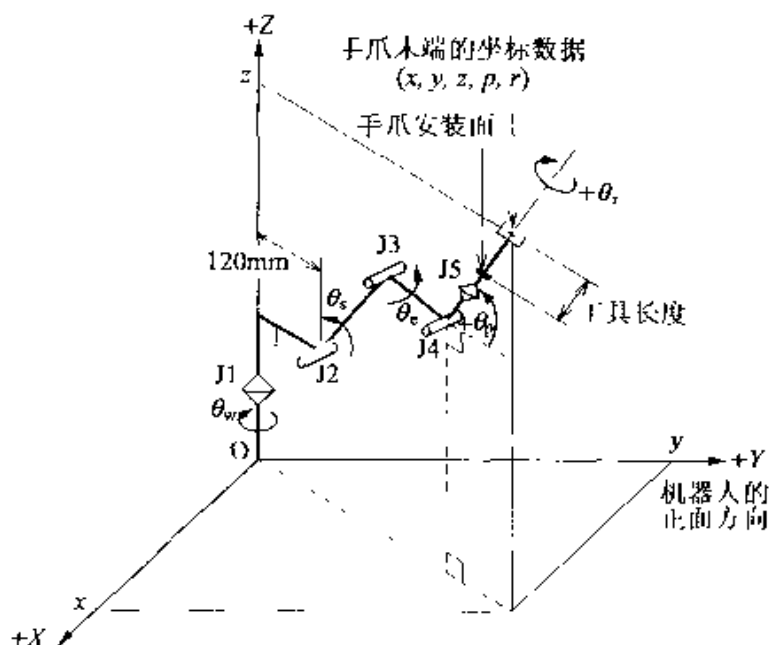


图 8.17 关节角定义

各关节的旋转部分,从基座起依次表示为J1、J2、J3、J4、J5,分别称为腰轴、肩轴、肘轴、腕纵轴和腕转轴等。各关节角定义如下:

- [1] 腰轴  $\theta_w$ , 从Y轴算起的水平角度,取顺时针方向为正。
- [2] 肩轴  $\theta_s$ , 从水平面算起的仰角,取向上为正。
- [3] 肘轴  $\theta_e$ , 从水平面算起的仰角,取向上为正。
- [4] 腕纵轴  $\theta_p$ , 从水平面算起的仰角,取向上为正。
- [5] 腕转轴  $\theta_r$ , 为与腕纵轴的相对角度,从轴外端看以顺时针方向为正。

### ● 机器人手爪终端的位置姿势

终端坐标系

考虑一下作为机器人的末端的终端坐标系的原点(手爪终端)。手爪终端的位置姿势用 $(x, y, z, p, r)$ 表示。其中, $(x, y, z)$ 为手爪终端的位置坐标, $(p, r)$ 为手爪的姿势, $p$ 为相对X-Y平面的手的倾角(仰角), $r$ 为手的扭转角度。

### ● 正运动学

下面从机器人的关节角度 $(\theta_w, \theta_s, \theta_e, \theta_p, \theta_r)$ 出发,求取手爪终端的位置姿势 $(x, y, z, p, r)$ 。图8.18为从机器人侧面看过去的情况,图8.19为从机器人上面看下去的情况。其中 $Z_h$ 、 $L_h$ 、 $L_s$ 、 $L_e$ 和 $L_w$ 为各臂的长度, $L_r$ 为从机械界面到手爪终端的长度。

机械界面

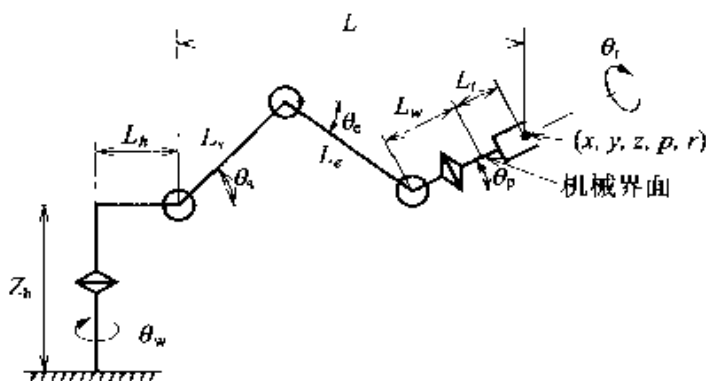


图 8.18 关节侧视图

从肩轴到手爪终端向XY平面投影的长度 $L$ 为

$$L = L_s \cdot \cos\theta_e + L_r \cdot \cos\theta_e + (L_w + L_r) \cos\theta_p$$

因此, $x, y, z$ 分别为

$$x = (L_h + L) \sin\theta_w$$

$$y = (L_h + L) \cos\theta_w$$

$$z = (Z_h + L_s \cdot \sin\theta_s + L_e \cdot \sin\theta_e + (L_w + L_r) \sin\theta_p)$$

由姿势角 $p, r$ 的定义,它们分别为

$$p = \theta_0$$

$$r = q.$$

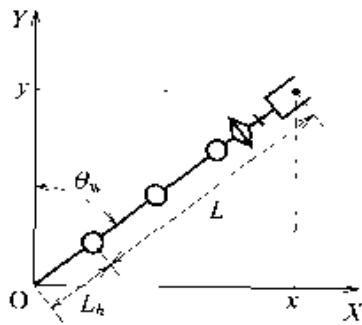


图 8.19 机器人俯视图

## □ 相关知识 ● 姿势的表现方法

在姿势的三自由度表现形式中,有几种标记方法,目前尚无统一规定,可根据机器人类型的不同加以选择。

### 宇宙坐标系

**欧拉角** 图 8.20 示出了欧拉角标记的几何学意义。图中的  $X_0$ 、 $Y_0$ 、 $Z_0$  坐标轴为姿势表现的基准坐标系,例如宇宙坐标系。用坐标轴  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  表示的坐标系是设定于手爪末端的坐标系。所谓表现的姿势,就是无论基准坐标系按怎样的顺序运动,都应表现为与目标坐标系的一致性。所谓坐标系的运动是指以坐标系的哪个轴作为基准时,坐标系就围绕该轴旋转相应的角度。

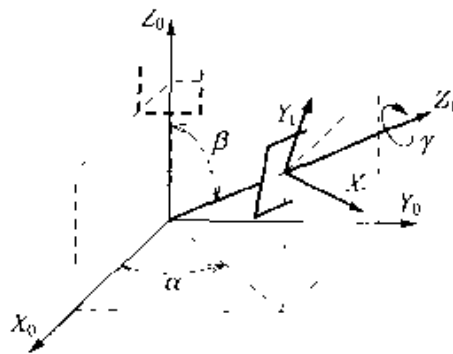


图 8.20 姿势的考虑方法(欧拉角)

下面看一下  $Z$  轴的情况。首先考虑一下  $Z$  轴对  $Z_0$  轴的一致性。若使基准坐标系绕  $Z_0$  轴旋转  $\alpha$  角(即  $X_0$  轴、 $Y_0$  轴绕

## 欧拉角标记

$Z_0$  轴旋转  $\alpha$  角), 然后上述旋转后的新坐标系  $Y_0$  轴再旋转  $\beta$  角, 则  $Z_0$  轴的方向就与  $Z_1$  轴的方向一致了。但是, 现在仅仅是  $Z_0$  轴与  $Z_1$  轴的方向一致, 而  $X$  轴和  $Y$  轴尚未一致。为此可再度把新坐标系绕  $Z_0$  轴旋转  $\gamma$  角, 使  $X_1$  轴与  $X_0$  轴、 $Y_0$  轴与  $Y_1$  轴一致。这样就实现了基准坐标系与目标坐标系的一致性调节。

如上所述, 将直角坐标系绕  $Z$  轴旋转  $\alpha$  角, 然后, 新坐标系绕  $Y$  轴旋转  $\beta$  角, 最后新坐标系再绕  $Z$  轴旋转  $\gamma$  角, 从而获得既定姿势的方法称为欧拉角标记。应该注意, 上述  $Z$  轴  $\rightarrow Y$  轴  $\rightarrow Z$  轴的旋转顺序不可变更。

## 滚、颠、偏

滚、颠、偏 滚、颠、偏的称谓是从浮在水面的船的动作而来。围绕船的行进方向轴的旋转为“滚”, 围绕船弦方向轴旋转为“颠”, 围绕桅杆方向的旋转为“偏”。这三个旋转轴是相互正交的。显然, 和欧拉角一样有一个旋转顺序问题, 由  $X$  轴  $\rightarrow Y$  轴  $\rightarrow Z$  轴的旋转顺序可以得到所预定的姿势。

手腕关节角 从依存于机器人机构的角度来说, 不能直接套用姿势的定义, 而实用上却常常利用姿势的概念去解决问题。为了表示位置姿势, 必须使用六维数据, 这在第 8.2 节中已经作了说明。换言之, 要取得任意的位罝姿势, 必须是一个 6 自由度的机器人。一般说来, 5 自由度以下的机器人不能取得用  $(\alpha, \beta, \gamma)$  表示的位置姿势, 而  $(\alpha, \beta, \gamma)$  的表现也与实际不相符。为要表示 5 自由度以下机器人的姿势, 作为另一种方法, 常采用调节影响姿势的关节角来实现。

## 腕纵角

## 腕转角

作为实例提出的 move master “RV M2”为 5 轴机器人, 使用腕纵角和腕转角来表现手腕的姿势, 就是采用了调节腕部关节角的方法



## 4 机器人的逆运动分析

### 要 点

正运动学比较简单,计算也比较容易,而逆运动学一般较难,计算也比较复杂。机器人的构造分析,也存在无法求解的情况。

本书以可分析求解的5轴垂直多关节机器人 move master “RV M2”为题标,介绍逆运动学的分析顺序及其基本公式。

### 解 释

#### ● 逆运动学

机器人各关节及其关节角的定义与第8.3节相同。

图8.21所示为机器人的侧视图。设手爪终端的位置姿势为 $(r, y, z, \beta, r)$ ,腕中心的位置为 $(x_1, y_1, z_1)$ ,肩中心的位置为 $(x_2, y_2, z_2)$

① 求取 $\theta_p, \theta_r$ 。

根据末端姿势的定义,有

$$\theta_p = \beta \quad (8.7)$$

$$\theta_r = r \quad (8.8)$$

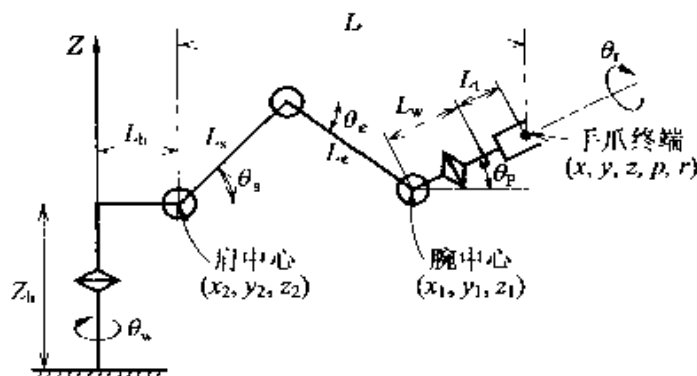


图 8.21 关节侧视图

② 求取 $\theta_w$ 。

图8.22所示为机器人的手腕部分。图8.22(a)为从机器人上面看下去的情况,图8.22(b)为从机器人侧面看过去的情况。由图8.22(a)可得

$$\theta_w = \tan^{-1} \left( \frac{x}{y} \right) \quad (8.9)$$

③ 求取 $\theta_e, \theta_s$ 。

作为求取 $\theta_e$ 和 $\theta_s$ 之前的准备,首先来求取腕中心的位置 $(x_1,$

$y_1, z_1$ )。图 8.22 的  $L_1$  为从腕中心到手爪终端部分在  $XY$  平面的投影长度, 即

$$L_1 = (L_w + L_t) \cos \theta_p \quad (8.10)$$

由图 8.22 可得

$$x_1 = x - L_1 \cdot \sin \theta_w \quad (8.11)$$

$$y_1 = y - L_1 \cdot \cos \theta_w \quad (8.12)$$

$$z_1 = z - (L_w + L_t) \sin \theta_w \quad (8.13)$$

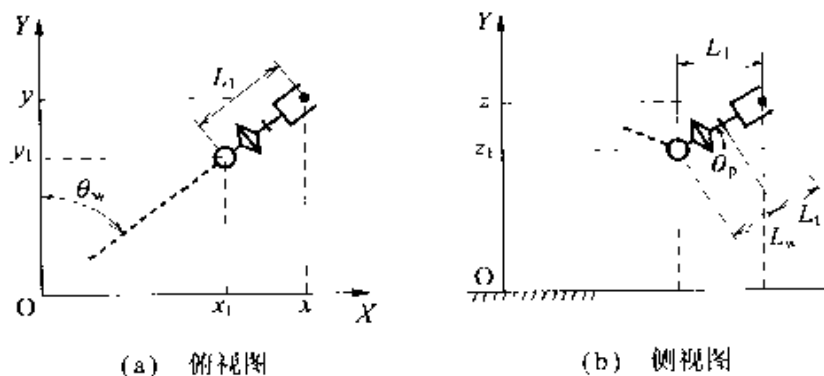


图 8.22 机器人的腕部

然后求取肩中心的位置  $(x_2, y_2, z_2)$ , 图 8.23 示出了肩·肘轴的侧视图, 图中符号与第 8.2 节所用符号相同。这样肩中心的位置为

$$x_2 = L_h \cdot \sin \theta_a \quad (8.14)$$

$$y_2 = L_h \cdot \cos \theta_a \quad (8.15)$$

$$z_2 = Z_h \quad (8.16)$$

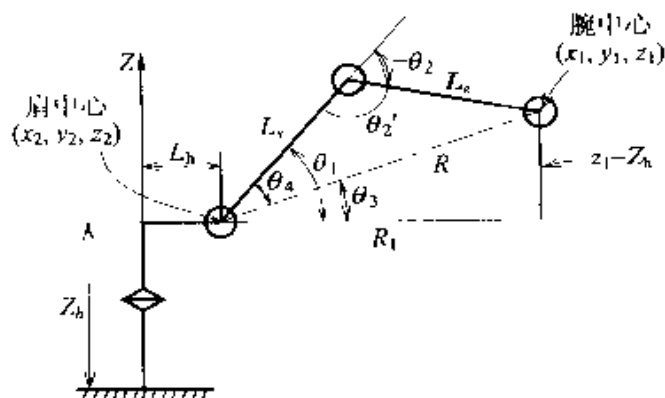


图 8.23 肩·肘轴的侧视图

求取肩轴和肘轴关节角  $\theta_1, \theta_2$  时, 如果以肩中心作为原点, 把肩轴和肘轴看作是一个两轴机器人, 则可用第 8.2 节的水平关节型机器人同样的考虑方法来求解, 即  $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为

$$\theta_1 = \theta_1' \quad (8.17)$$

$$\theta_2 = \theta_1' + \theta_2' \quad (8.18)$$

其中  $\theta_1', \theta_2'$  为

$$\theta_1' = \pi - \theta_2' \quad (8.19)$$

$$\theta_1' = \theta_2' - \theta_1 \quad (8.20)$$

从肩中心到腕中心在 XY 平面的投影长度  $R_1$  为

$$R_1 = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \quad (8.21)$$

从肩中心到腕中心的距离  $R$  为

$$R = \sqrt{R_1^2 + (z_1 - z_0)^2} \quad (8.22)$$

根据余弦定理可以求得以下各角度

$$\cos \theta_2' = \frac{L_2^2 + L_3^2 - R^2}{2L_2L_3} \quad (8.23)$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{z_1 - z_0}{R_1} \right) \quad (8.24)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left( \frac{L_2^2 + R^2 - L_3^2}{2L_2R} \right) \quad (8.25)$$

将式(8.23)~(8.25)代入式(8.17)~(8.20), 即可求出  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。

第 8.2 节定义的右手、左手的概念在这里也同样会遇到。如图 8.24 所示的那样, 对应同一个腕中心, 存在用实线表示的姿势和用虚线表示的肩-肘轴的姿势。这两种形态与人类的肘部形态对比, 可以区别为肘部向上侧弯曲和肘部向下侧弯曲。实线的姿势称为上侧(above)。虚线的姿势称为下侧(below)。

上侧 下侧

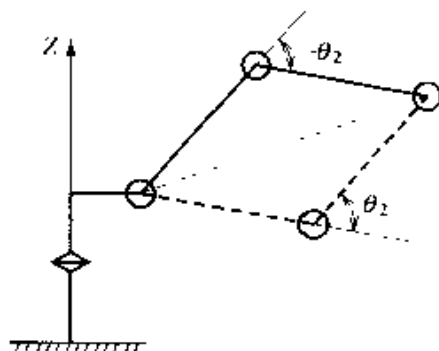


图 8.24 肩-肘轴的姿势

由图 8.24 可知,下侧时  $\theta > 0$ ,上侧时  $\theta < 0$ 。由式(8.25)求得的下侧时关节角  $\theta$  的范围为  $0 \leq \theta < \pi$ ,而上侧时关节角的  $\theta$  应为负值。

至此,从手爪终端位置姿势  $(x, y, z, p, r)$  出发,已经可以求出机器人的各关节角度  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5)$ 。

### ● 插 补

根据机器人的正运动学和逆运动学,已经可以求出其关节角与末端位置的关系。这样就可能将机器人的手爪向指定的位置姿势移动。但是,在机器人控制时,只有这些是不够的,还必须使机器人的手爪按指定的轨迹(直线、圆弧等)从当前的位置移动到目标位置,这种控制称为插补控制。

图 8.25 所示为直线插补的考虑方法。现在,机器人的手爪终端在图 8.25 的  $P_1$  点,考虑一下让手爪终端沿从  $P_1$  到  $P_2$  的直线以速度  $F$  [m/s] 移动的情况。把直线  $P_1P_2$  用  $\Delta P$  分割,手爪终端从  $P_1$  向  $P_2$  移动时,每次移动  $\Delta P$ ,就可以描绘出一条直线。

### 插补控制 直线插补

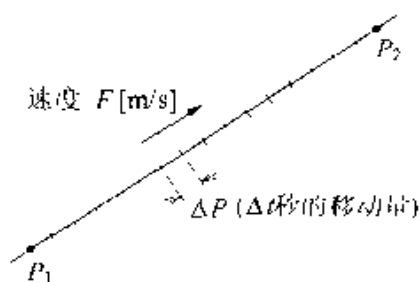


图 8.25 直线插补的考虑方法

### 采样时间

$\Delta P$  的大小依赖于伺服控制的采样时间  $\Delta t$  (一定),可由下式给出:

$$\Delta P = \frac{|P_2 - P_1|}{|P_2 - P_1|} \cdot F \cdot \Delta t \quad (8.26)$$

其中,  $P_1, P_2$  为位置矢量,  $|P_2 - P_1|$  为  $P_1$  到  $P_2$  点间的距离。使用上述的  $\Delta P$ ,则直线插补可用下式描述:

$$P = P_1 + \Delta P$$

式中,  $P$  为机器人的现在位置,  $P$  为  $\Delta t$  时间后的位置。

这样一来,对应于微小时间  $\Delta t$  的位置,用逆运动学求出机器人的各关节角度,就可以实现对机器人的“令手爪终端描绘直线轨迹”的控制。

## 5 机器人的驱动方式及控制

**要 点** 机器人的驱动方式一般采用电动机的电气式伺服系统。机器人伺服系统的特征在于,每个电机构成独立的控制回路,而机器人的所有手臂又统一地进行动作,实行以正-逆运动分析为基础的计算机控制。

**解 释** ● 伺服系统

反馈控制  
驱动装置

伺服电机

所谓伺服系统,是指以位置或角度等机械量作为被控量的一种反馈控制系统。机器人的驱动控制就是以这种伺服系统为基础,其控制对象可以是电气式、液压式和气动式驱动装置。从机器人的易保养性、经济性和小型化等方面来考虑,目前机器人大多采用电气式驱动装置,即伺服电机。

### ● 伺服系统的方框图

图 8.26 所示为一个有代表性的伺服系统的方框图。这里以电机的旋转角度(位置)作为最终的被控量。为了提高系统的稳定性和快速响应性,除位置环之外,系统还设置了速度负反馈和电流负反馈两个闭环。

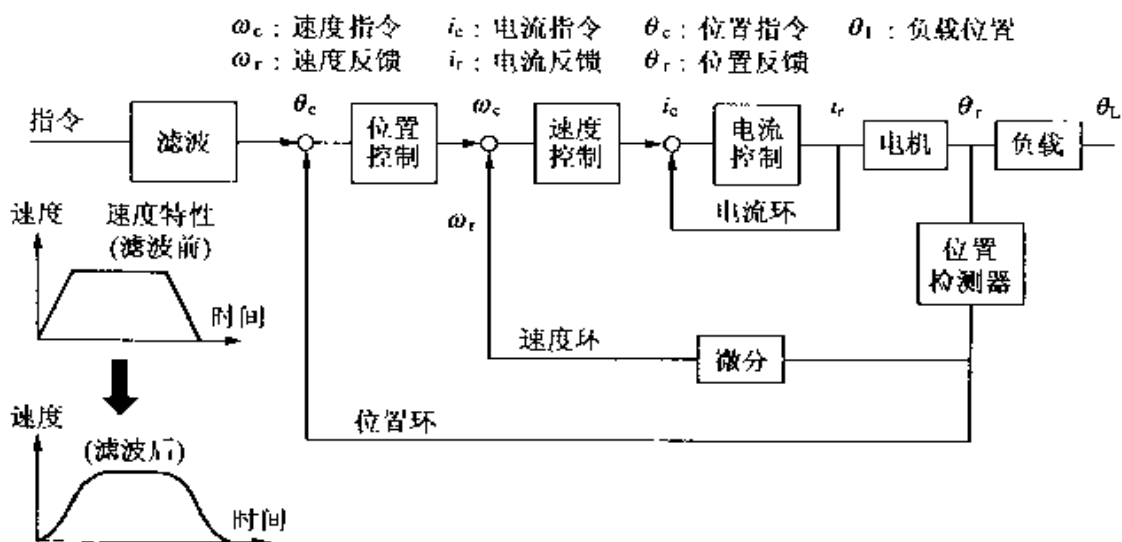


图 8.26 伺服系统的方框图

① 滤波部分 为了把上位指令值细分,通过滤波使指令曲线成为与负载对应的平滑变化的指令。一般情况下,滤波部分采用

## 二阶延迟环节

## 二阶延迟环节。

## PID 方式

[2] 位置控制器 以滤波环节输出的位置指令值与位置检测器送出的位置反馈信号为基础来进行位置控制。在运算方式上采用 PID(比例+时间积分+时间微分)方式。(下面的[3]、[4]部分也采用同样的方式)

[3] 速度控制器 以位置控制器送出的速度指令值与位置检测器送出并经时间微分后的速度信号为基础来进行速度控制。

[4] 电流控制器 以速度控制器送出的电流指令值与电机电流的反馈信号为基础来进行电流控制。

## ● 伺服系统中的计算机系统

## 软件伺服

图 8.27 所示为 move master“RV M2”机器人的计算机控制系统的构成。在这里,由接受来自主 CPU(8 位)指令的伺服 CPU(16 位)构成了软件伺服。

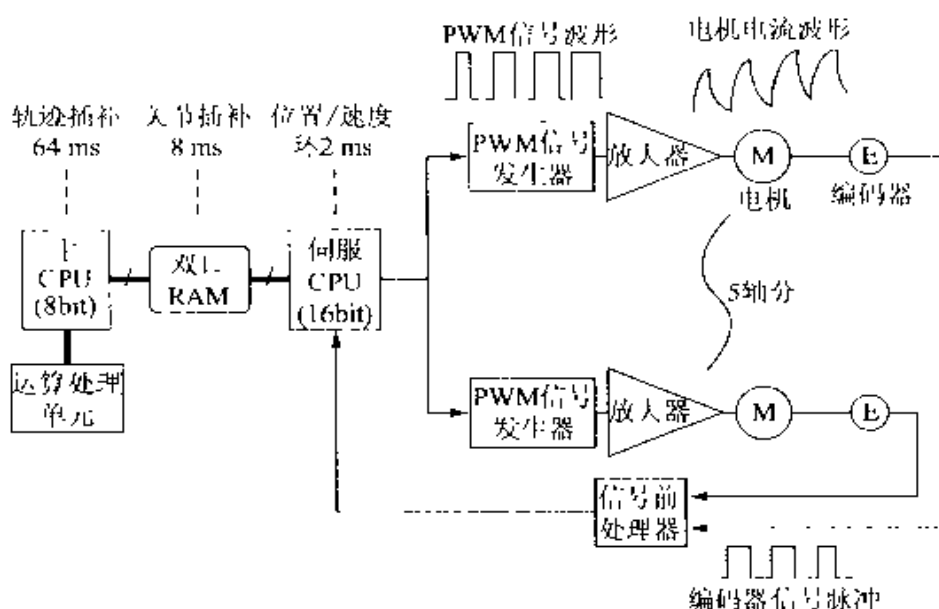


图 8.27 计算机控制系统构成(以“RV M2”为例)

**主 CPU** 由主 CPU 进行机器人的逆运动解析,用运算处理单元对逆运动解析结果作附加处理,即把直角坐标系中的轨迹数据变换成每 64ms 的关节坐标系数据。此后,主 CPU 进一步求得每 8ms 的各关节移动指令脉冲,并存放后面的双口 RAM 中。

**双口 RAM** 双口 RAM 是把主 CPU 产生的移动脉冲过渡到伺服 CPU 的存储器(RAM)。除指令值以外,还可以通过该存储器把各种信息参量传递给伺服 CPU。反之,双口 RAM 还具有把

伺服 CPU 的数据信息传递给主 CPU 的功能。这种双口 RAM 是用同一个存储器可以从两个 I/O 口分别存取信息,广泛应用于构成多 CPU 系统。

### 多 CPU 系统

### 位置环 速度环

**伺服 CPU** 伺服 CPU 首先把从双口 RAM 送来的 8ms 间隔的各关节移动指令脉冲分割成每 2ms 的指令,并进行平滑处理,然后进行 3 个轴的位置环及速度环的运算处理,其运算结果用来设定后面的 PWM 信号发生器。另外伺服 CPU 还要经常监视运算结果和反馈信号等,当发生异常情况时产生报警信号以保护系统。

### 脉冲宽度调制

**PWM 信号发生器** PWM 信号发生器从伺服 CPU 接受指令并产生脉冲宽度调制(PWM; Pulse Width Modulation)信号。若这种 PWM 信号的频率在声频范围内,则电机运行时会产生令人不适的噪声,因此总希望把 PWM 信号频率设定在声频以上。

### MOSFET IGBT

**伺服放大器** 伺服放大器是由 PWM 信号来驱动电机工作的大功率开关电路,通常采用大功率晶体管作为开关元件。近年来,由于前面所述的 PWM 信号的高频化和驱动电路的简化,采用功率 MOSFET 和 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)的场合逐渐增加。

### 直流电机 交流电机

**电机** 驱动机器人手臂移动的力矩是由电机产生的。电机人体上可分为直流电机和交流电机两类(“RV-M?”使用了直流电机),近年来,为了避免直流电机的换向器(电刷)带来的麻烦,已经倾向于使用交流电机。用于机器人的电机所应满足的条件如下:

- ① 能承受频繁加减速时的瞬时负载(额定值的 3~4 倍)。
- ② 电机的惯性小,具有快速响应特性。
- ③ 转矩脉动小、摩擦损耗小、电机效率较高。
- ④ 体积小、重量轻、高出力。
- ⑤ 具有足够长的使用寿命。

### 相对型 绝对型

**编码器** 编码器用来检测电机的旋转角度并生成反馈信号,分为只输出相对旋转量的相对型编码器和输出绝对旋转量的绝对型编码器。对于前者,每当电源投入时,都必须作机械系统的原点设定操作,而后者与旋转量存储电路组合起来,可以免除原点设定操作。

### ● 伺服系统的软件

如前所述,伺服 CPU 每 2ms 进行一次各轴(5 个轴)的位置环和速度环的运算处理。具体情况如图 8.28 所示的那样,每隔 400 $\mu$ s 对伺服 CPU 发出中断信号并依次作各轴的运算处理。首先,对第一轴的伺服处理实施后,要对其后 2ms 间的 PWM 信号的

占空比数据  
反向接地处理

占空比数据(CON-OFF 脉冲的比率)进行设定,然后根据需要进行反向接地处理(与主 CPU 之间的信号传送等)。上述情况应全部在  $400\mu\text{s}$  以内处理完毕,然后,同样依次对其余各轴进行处理。

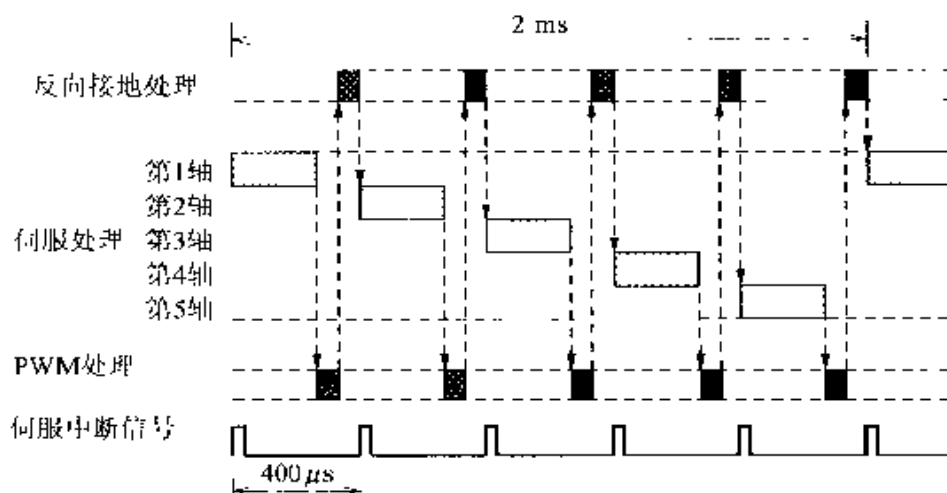


图 8.28 伺服中断处理

## □ 相关知识 ● 软件伺服

由计算机构成的伺服系统中,除功率部分以外全部实现了软件化处理,不再需要昂贵的 D/A 转换器和模拟比较电路,可以大幅度削减部件的数量和调试工作量。同时,可以很容易地通过调整参数来改变系统的控制特性,有可能实现高性能控制。

## ■ 应用知识 机器人的位置环路增益

机器人的位置环路增益一般为  $20\sim 30\text{rad/s}$ 。这里由于机器人的手臂为柔性连接,其固有振动频率被抑制到  $10\sim 15\text{Hz}$  左右。一般情况下,当固有振动频率为  $f$  时,从系统稳定性的观点来考虑,位置环路增益  $K_p$  的上限值由下式确定:

$$K_p \leq 2\pi \cdot f / (2\sim 3)$$



## 6 机器人的操作

### 要 点

进行机器人示教操作也好,用机器人语言作程序设计也好,都只是把人类头脑中想要描绘的动作传授给机器人的一种手段。也就是说,示教操作和程序设计开创了人类利用机器人的窗口。

### 解 释

机器人手臂  
控制器  
示教盒  
电动手  
个人电脑

#### ● 系统的基本构成

图 8.29 所示为 move master“RV-M2”机器人的构成。其基本构成为机器人手臂和控制手臂动作的控制器(这里称为驱动单元)。它主要包括进行位置示教的示教盒、抓持工件的电动手、进行程序设计的个人电脑等。

下面就“move master”的系统构成说明如下:

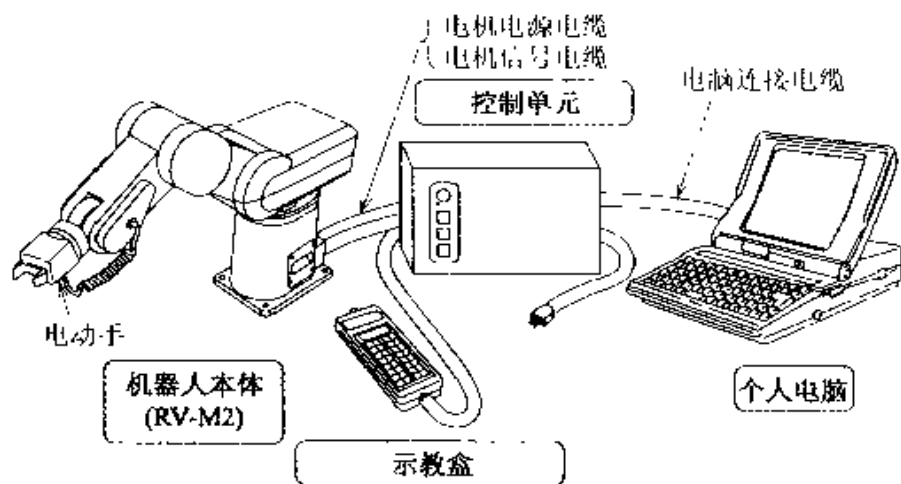


图 8.29 机器人的构成(以“RV-M2”为例)

**由个人电脑指挥的系统** “move master”与个人电脑用信号电缆连接,“move master”根据个人电脑发出的指令来进行动作。这些指令是给“move master”设计的专用指令,由个人电脑逐一发出,“move master”按指令动作。这里,个人电脑是系统的中心(头脑),机器人作为与电脑连接的周边装置在电脑指挥下进行动作(图 8.30)。

**由驱动单元指挥的系统** “move master”与个人电脑的连接只是初始程序制订与传输时的连接,机器人的实际动作是根据驱动单元内的程序来进行的。这种情况下的个人电脑只是一个程序编辑装置,而驱动单元成为系统的中心,与其它周边装置的信息通

I/O 接口

信全部通过驱动单元的 I/O 接口来进行(图 8.31)。

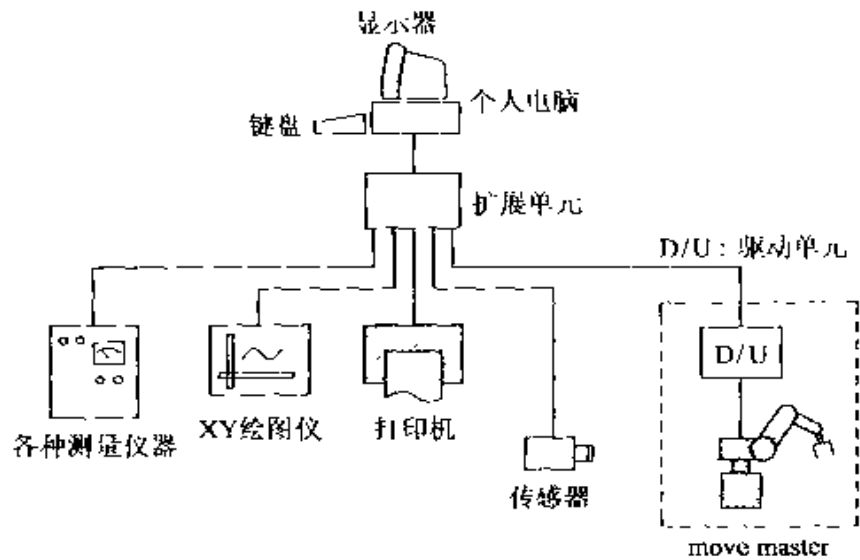


图 8.30 由个人电脑指挥的系统

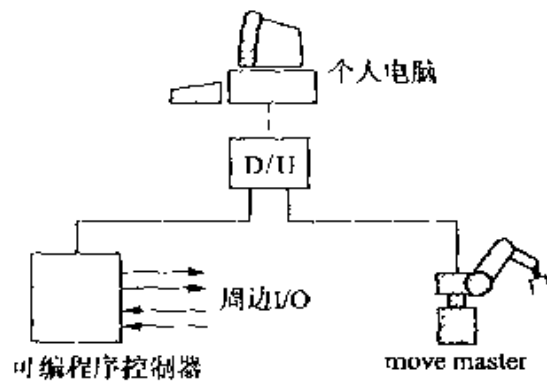


图 8.31 由驱动单元指挥的系统

● 示教操作

所谓“示教”，是指对于作业顺序、作业姿势和抓持工件的位置等动作对机器人进行的现场教学。这种示教操作由示教盒来完成。但是在“RV-M2”中，作业顺序的示教由个人电脑来进行，而作业的位置和姿势是用示教盒来完成的。

示教操作的大概顺序介绍如下：

关节坐标系微动  
直角坐标系微动

① 微动操作 微动操作是指用示教盒的键操作使机器人的末端作业点(手爪终端)向目标位置移动的操作。根据移动时作为基准的坐标系的不同,可分关节坐标系微动、直角坐标系微动和设

## 工具坐标系微动

置在手爪终端的工具坐标系微动等

2. 位置示教 将机器人的手爪终端移动到目标位置后,将该位置作为任意序号点存储下来。下面给出键操作过程:

- (a) 按下 PS(position set)键(位置置位)。
- (b) 输入要记录的序号(例如“5”号)。
- (c) 按下 ENT(Enter)键。

然后,对应所需位置重复步骤①和②的操作。

③. 位置确认 位置确认是指确认示教后的位置是否已经正确登记并顺次移动到该位置。下面为键操作过程:

- (a) 按下 MOV 键。
- (b) 输入要确认的位置序号(例如“3”号)。
- (c) 按下 ENT(Enter)键(开始向位置 3 移动)。

### ● “move master”指令的程序设计

#### move master 指令

记述“RV-M2”的动作时,使用了被称为 **move master** 指令的语言体系(符号体系)。为“RV-M2”准备的指令有 70 种以上,这些指令按功能可作如下分类:

① 位置、动作控制 包括位置的登记与运算,关节与直线的插补动作以及速度的设定等与机器人的动作相关连的指令。

② 程序控制 包括循环回路、条件分枝、子程序、信号中断等与程序控制相关连的指令。

③ 手爪控制 与电动手爪或气动手爪控制相关连的指令。在电动手爪的场合,阶段性地设定抓持力也是可能的。

④ 输入、输出控制 与外部输入输出接口的信号传输相关连的指令。可以作二进制位或并行处理。

⑤ 与 RS232C 的通讯联络 利用 RS232C 接口在个人电脑上,读出机器人的各种资料的指令。这些资料包括位置数据、程序资料、计数器资料、外部输入资料、工具资料、错误状态等。

下面说明上述指令的使用方法。上述指令系统与普通个人电脑中的 BASIC 语言相似,有在每行指令前不设置行序号而直接执行的所谓“直接模式”和按行序号来连续记述指令并构成整个程序的所谓“顺序模式”两种模式。例如,对于表示关节移动的指令“MO”(move)可以写成:

- ① 按直接模式 “MO1”(即移动到位置序号 1)。
- ② 按程序模式 “10MO1”(程序中 10 行为 MO1)。

#### 直接模式

#### 顺序模式

#### 抓起放置

图 8.32 示出了称为“抓起放置”的实际作业时,工件移动换位作业的程序例。

程序例

```

PD 10,0,0,20,0,0 :在位置1的上方移动距离(Z=20[mm])用直
(X,Y,Z,P,R)      接模式设定为位置10
PD 20,0,0,30,0,0 :在位置2的上方移动距离(Z=30[mm])用直
(X,Y,Z,P,R)      接模式设定为位置20
30 SP 17          :初始速度设定
40 MA 1,10,O     :启动手臂将手爪移动到1件上方(位置1的上方
                  20[mm])
50 MO 1,O        :去抓工件(移动到位置1)
60 GC            :闭合手爪并抓持1件
70 MA 1,10,C    :抓持工件向上移动(位置1的上方20mm)
80 MA 2,20,C    :移动至放置工件的位置上方(位置2的上方
                  30mm)
90 MO 2,C        :放置工件(移动至位置2)
100 GO           :放开手爪离开工件
110 MA 2,20,O   :放开后的手爪向上方移动(位置2的上方
                  30mm)
120 GT 40       :重新返回原位(返回到40行)
    
```

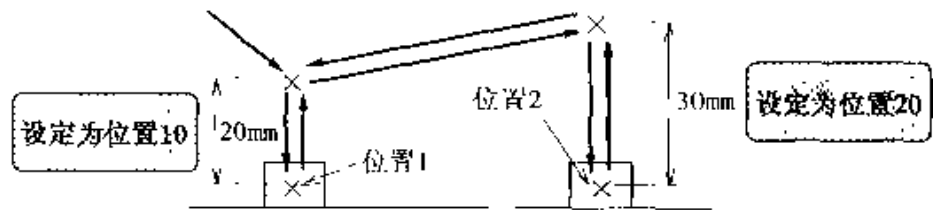


图 8.32 移动与位置作业

● 程序的运行操作

状态迁移图

程序的基本操作如图 8.33 的状态迁移图所示。作“start”(开始)操作,使机器人从“待机”状态进入到“运行”状态。当必要的作业结束后,机器人自动“end”而返回“待机”状态。

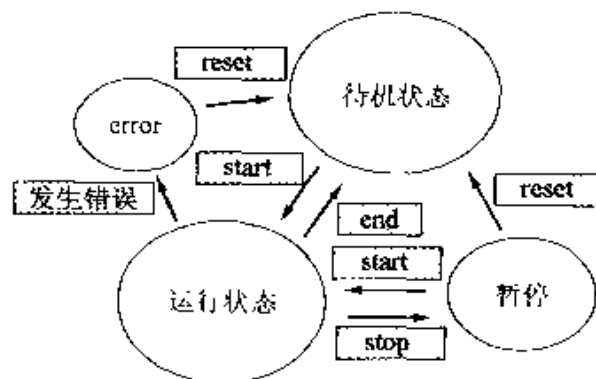


图 8.33 “RV M2”的状态迁移

机器人处于“运行”状态时,若进行“stop”操作,则机器人进入

“暂停”状态,若是“发生错误”的情况,则进入“error”(错误)状态。机器人处于“暂停”状态时,选择“start”操作则可重新继续运行,选择“reset”操作则系统中断并返回待机状态。

## 」 相关知识 ● 用户语言与中间语言

SLIM

一般用户使用的机器人语言称为“用户语言”,日本工业标准(JIS)中也以 SLIM(standard language for industrial manipulator)《工业机器人——程序语言 SLIM》(JIS B 8439-1991)加以标准化。另一方面,还要把用户语言变换成在机器人控制器内部使用的语言,后者称为“中间语言”,其标准制定工作正在进行中。

## ■ 研究课题 (1) 离线程序设计与仿真器

目前,机器人的程序设计及其示教作业已经开始采用在计算机上进行离线编程的方式。

离线程序设计需要预先已知作业环境的配置资料和零件的 CAD 资料,这些资料与仿真功能相结合,就可以在显示器上事先确认机器人的运动状态。

然后把确认后的程序软件拷贝到现场机器人的电脑中。这时由于机器人总要存在机械上的误差,因此需要进行现场误差校正。为此,需要使用各种传感器仔细地进行位置校正。

## 7 机器人的接口

### □ 要 点

机器人控制器除对机器人的手臂进行控制之外,还配备有各种接口,以便与各周边设备,如个人电脑、可编程序控制器等进行信息传输。为了掌握机器人的使用方法,正确理解这些接口电路十分重要。

本节将以 move master“RV-M2”为例加以说明。

### □ 解 释 ● 总线接口

总线接口与打印机的接口规格一样。打印机的接口一般是通用的,数据为8位并行传输,传输距离限1.1~2m。由于是并行传输,数据传送时间很短,不需要特别设定,使用起来比较简单。“move master”一侧有相当于打印机的接口。数据传输只从个人电脑向机器人的方面单向操作。在 BASIC 中,使用“LPRINT”语句记述如下:

```
10 LPRINT“MO1”(MO1 直接实行)
```

表 8.1 示出了该接口的信号名及其功能,图 8.34 所示为接口的时序图。在这里所使用的 STB、BUSY、ACK 信号的数据传输称为人工搜索方式,广泛应用于一般的数据传输。

人工搜索方式

表 8.1 总线的信号名称及其功能

信号名	输入输出	功 能
DB0~7 (数据位)	输入	从个人电脑输出的8位并行数据信号
STB (选 通)	输入	从个人电脑输入数据的定时脉冲信号,L 状态的 低电平时输入
BUSY (忙 碌)	输出	驱动单元可以数据输入时为 L 状态,不可以输 入时为 H 状态并通知给个人电脑
ACK (肯 定)	输出	驱动单元数据输入结束后,输出 L 状态的脉冲 (脉冲宽度 2~3s)
GND (总 计)		对于上述信号线的总计

### ● RS232C 接口

本来,RS232C 是为利用电话线进行数据通信的装置而开发的接口电路,现在已广泛应用于计算机与周边装置之间的串行数据传输。

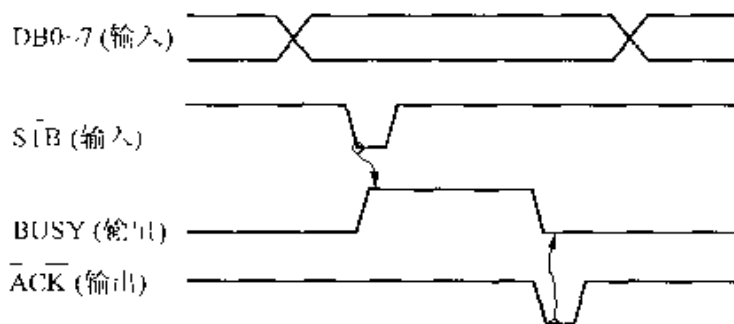


图 8.34 总线的时序图

#### 传输速度

由于是串行接口,当设定较低的传输速度(波特率)时,与总线相比信号传输需要较长时间。在各使用机器之间需要合并各种设定。由于可以双方向通信,因此可以从个人电脑读取机器人侧的内部数据。RS232C 的信号传输距离可以较长,约为 3~15m。

BASIC 中使用的“PRINT #”指令可记述如下:

10 PRINT #1,“MOI”(MOI 直接实行)

表 8.2 示出了 RS232C 接口的信号名称及其功能

表 8.2 RS232C 的信号名称及其功能

信号名称	输入输出	功 能
FG		机架接地。连接了驱动单元的 FG 端子
SD(TXD)	输出	从驱动单元到个人电脑的发送用信号
RD(RXD)	输入	从个人电脑到驱动单元的接收用信号
RS(RTS)	输出	对于个人电脑数据的发送要求信号
CS(CTS)	输入	对驱动单元数据的发送许可信号
DR(DSR)	输入	个人电脑的发送、接收准备完毕信号
SG	-	对信号线的总计
ER(DTR)	输出	驱动单元的发送、接收准备完毕信号

● 并行 I/O 接口

输入输出电路的构成 在生产线上使用机器人时,机器人需要在与周边装置协调的情况下进行作业。

图 8.35 为一个输入输出电路与周边设备连接的例子,输入输出电路分别由 16 点的电路构成,为了避免受外部的电气噪声影响,电路内部全部由光电耦合器进行电气上的隔离。

光电耦合器

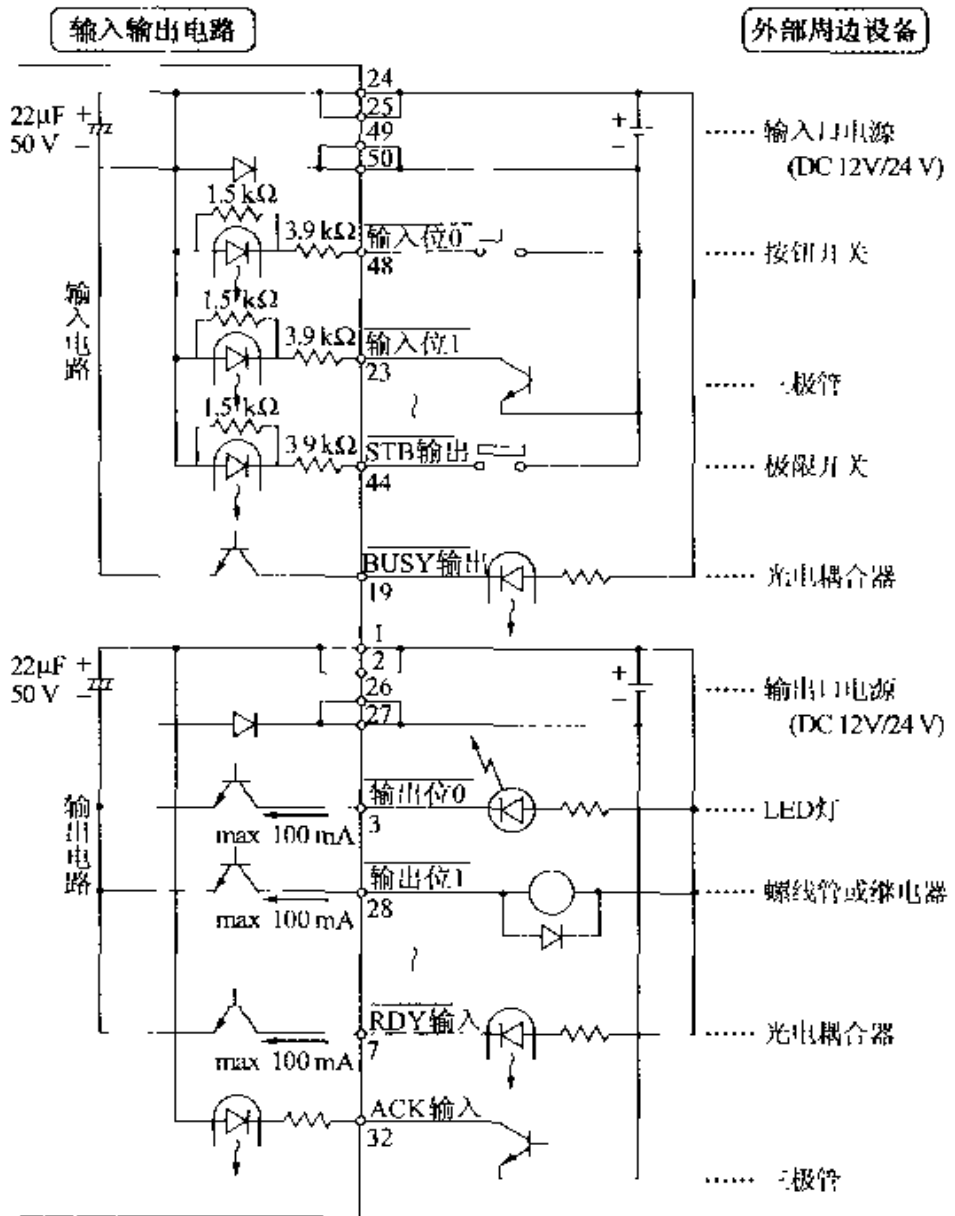


图 8.35 输入输出电路的连接举例

作为输入设备,有按钮开关和限位开关等无电压触点或者晶



体二极管的集电极开路电路等与接口连接。另一方面,作为输出设备,有选定为按要求电压动作的 LED 指示器、继电器和螺线管等与接口连接。需要指出的是,在输出电路中,每一点的输出电流是有一定限制的,因此必须注意负载的选择以及防止发生负载短路。

**输入输出相关命令** 为了控制输入输出信号,为“move master”准备了几个与输入输出相关的命令。下面介绍这几个命令。

① **ID(Input Direct)(直接输入)。**

**【功能】** 从输入接口输入 16 位并行数据。

**【形式】** ID

**【说明】** 输入 16 位并行数据、存放在内部寄存器,供以后的比较、运算、条件转移等场合时使用。

② **TB(Test Bit)(测试位)。**

**【功能】** 以内部寄存器的位状态为基础进行条件转移。

**【形式】** TB+(或-) <位序号>, <行序号>

例:TB+15,1050(+表示 ON 时,-表示 OFF 时)

**【说明】** 以 ID 取入内部寄存器的值为基准,条件成立时转移到指定行序号,条件不成立时执行下一行。

③ **OD(Output Direct)(直接输出)。**

**【功能】** 从输出接口输出 16 位并行数据。

**【形式】** OD&FEOD(FEOD 按 16 进制数的形式记述)

**【说明】** 周边设备同时复位或输出整数数据( -32768~32768)时使用。

④ **OB(Output Bit)(位输出)。**

**【功能】** 只在指定位时输出信号。

**【形式】** OB+15(+表示 ON 时,-表示 OFF 时)。

**【说明】** 控制以特定位连接的各周边设备时使用。未被指定的位不变化。

**输入输出程序举例** 使用上述输入输出命令的程序举例如下:

```
10 MO1      :移动至位置 1。
20 ID       :从输入接口取入数据(16 位)。
30 TB+3,50  :当输入数据的位 3ON 时,转移到行序号 50。
40 GT       :否则返回行序号 20。
50 OB 10    :使输出接口的位 10 OFF。
```

● **基于外部信号的程序运行**

在生产线上,由可编程序控制器控制机器人时,可以用设置的

专用信号线从外部进行控制。在这种信号线上,作为输入信号设置了 START(起动)、STOP(停止)、RESET(复位)等;作为输出信号,设置了 RUN(运行)、WAIT(暂停)、ERROR(错误)等。

时序图

图 8.36 所示为这些信号线的时序图。

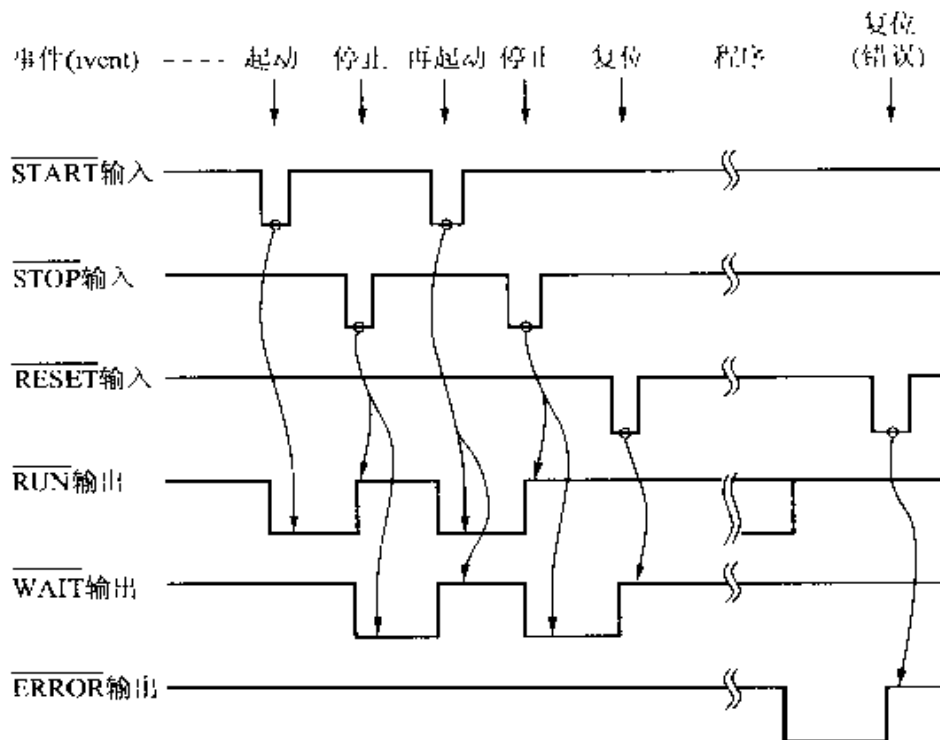


图 8.36 外部信号的时序图

## 应用基础 噪声对策

在机器人中,使用了各种各样的接口,为了提高可靠性,采用有效的噪声对策是十分必要的。其中有加强接地,电缆的屏蔽、噪声滤波等,对每个机器人应选择适当的噪声对策(以不发生噪声、不接受噪声、不传递噪声为原则)。

## 8 机器人与视觉传感器

### □ 要 点

工业机器人的优越之处在于可以重复进行预先确定的作业。但是,为了让机器人工作,必须对机器人的手足位置姿势和速度等进行检测与控制,还要对外部环境的变化进行相应的处理,因此机器人需要有与人类同样的感觉器官。

作为机器人的感觉器官之一的视觉传感器目前已经实用化,在机器人智能化过程中,传感器的智能化是必不可少的。

### □ 解 释 ● 系统构成

#### 视觉传感器

图 8.37 所示为 move master“RV-M2”与视觉传感器 IS 100 (示教用视觉传感器,三菱电机制造)连接后的系统构成图。除机器人之外,由视觉传感器本体、ITV 摄像机(CCD 黑白监视器摄像机)、摄像机控制器、单色监视器、个人电脑等构成最小视觉系统。为适应信息处理的需要,有时还设置多台摄像机。

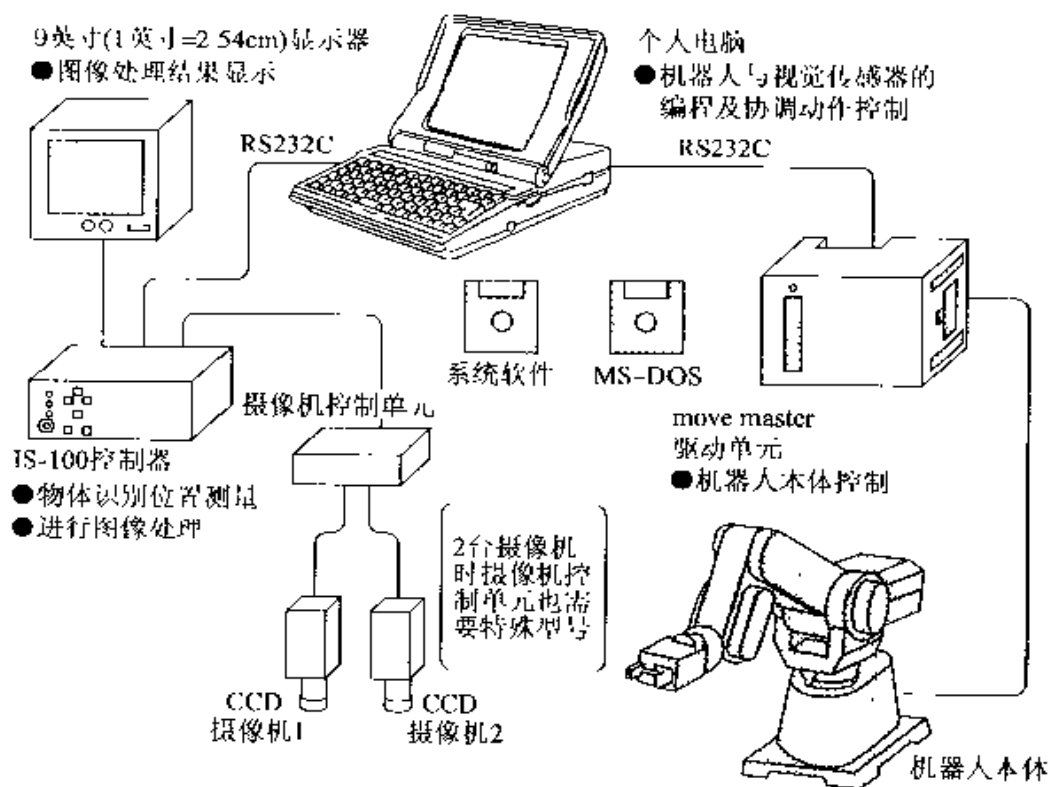


图 8.37 系统构成

机器人与视觉传感器之间设置了个人电脑,分别用 RS232C

串行通信

电缆相连接来发送和接受串行通信数据,同时负责传感器与机器人的协调动作控制。

● 什么是图像处理

机器人视觉赋予机器人以视觉功能。机器人视觉的输入信息几乎全部来自图像信号,这些图像需要机器人视觉的识别和处理。以下各项内容全部称为图像处理:

- 1) 图像的输入。
- 2) 图像的记录、积累和检索。
- 3) 图像的显示。
- 4) 图像的通信。
- 5) 图像的变换。
- 6) 图像的测试。
- 7) 图像的识别与判断。

其中,1)~4)是对图像整体的处理而对图像的内容不予加工。5)~7)是对图像的内容加工处理而获得种种结果。在工业中使用的视觉传感器特别追求后者的功能。

● 图像处理流程

图 8.38 所示为图像处理的基本流程,表 8.3 所示为由 IS-100 搭载的图像处理指令。下面就图像处理的各种处理功能加以说明。

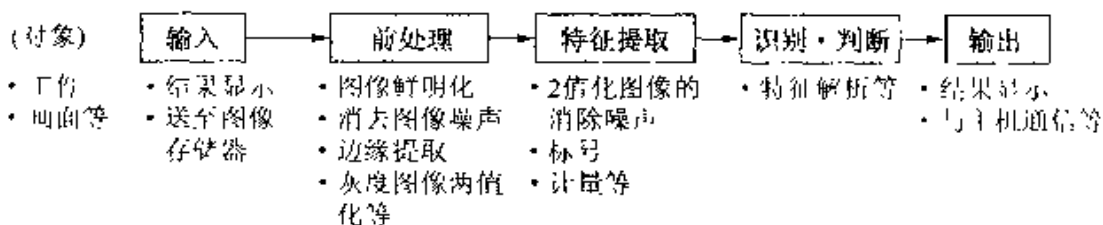


图 8.38 图像处理的基本流程

CCD 摄像机

**图像的输入** 把 CCD 摄像机摄入的图像存入灰度图像存储器。对于 64k 字节的存储器,1 帧图像用 256×256 个图元素(1 个图元素占用 1 个字节)来表现。在 1 字节中,能够表现 2<sup>8</sup> 种灰度对比关系,也就是说,每一个图元素可以用 256 种不同灰度来表现。

**图像的鲜明化** 用二维平面图像来识别二维立体物体时,图像中总会有与焦点不一致的部分。用这个图像来识别物体的全貌时,必须进行图像的鲜明化处理。对图像中模糊的部位应强调必

灰度图像强调  
处理  
灰度直方图

要的数据。这种对图像模糊部位的处理技术称为“灰度图像强调处理”。在机器人视觉图像处理时,一般用灰度直方图来表现图像中图元素的对比度。

表 8.3 IS-100 的功能与搭载指令一览

BASIC 功能	具有的与 BASIC 同样的功能
窗口设定	用<形在 0~255 的范围内任意设定
2 值化	固定 2 值化,自动 2 值化
空间滤波	中值(median)滤波,sobel 滤波,拉普拉斯算子滤波,用户定义的 3×3 滤波(最大可登记 5 种)
逻辑滤波	除去孤立点,膨胀处理,收缩处理
图像算术运算	图像加法运算 2 种,减法运算 2 种
图像逻辑运算	AND、OR、XOR、NOT 等 11 种
灰度变换	用户定义 LUT(Look Up Teble)设定的灰度变换(LUT 设定最大 4 种)
直方图处理	灰度直方图
几何学的特征提取	面积、外周长等 15 种
线性变换	仿射(affine)变换
定标	水平和垂直方向上每 100 图元素的长度运算
校准	传感器坐标系与机器人坐标系的对应装配
标号	给对应的图像加标号
图解功能	向灰度存储器与图解存储器上描图的功能
其它	图形、<形识别

**灰度图像的噪声消除** 噪声会使图像发生畸变,甚至使视觉信息丢失。消除噪声对于提高图像品质和图像识别具有非常重要的意义。消除噪声的方法主要有:使用平滑滤波器消除高频噪声使图像信息平滑的方法,以及采用对图像进行傅里叶变换的方法等,采用了由各图元素的近邻图元素(4 点、8 点)的信息来对该图元素进行补偿的方法,例如采用取灰度中间值的中值滤波器等。

**边缘提取** 边缘提取是一种强调图形轮廓的工作。对人类来说,轮廓是一个很普通的概念,但是对计算机来说却是一个困难的问题。轮廓提取有种种方法,基本方法是进行微分运算,包括采用

中值滤波器

Sobel 滤波器  
Prebit 滤波器  
Roberts 滤波器  
拉普拉斯滤波器

灰度的变化率(一阶微分)和灰度变化的变化率(二阶微分)两种情况。与噪声消除的情况相似,边缘提取时要使用借助于近邻图元素信息提取轮廓的滤波器,其中有利用了一阶微分的 Sobel 滤波器、Prebit 滤波器、Roberts 滤波器和利用了二阶微分的拉普拉斯滤波器等。

阈值

**灰度图像的二值化处理** 所谓二值化处理是指将灰度图像按规定的阈值分割为 0 和 1 的变换。灰度图像的二值化处理是为了便于计算机的图像信息处理。二值化的界线称为“阈值”。机器人正确地识别对象物时,阈值的设定很重要。阈值的设定方法有:用灰度直方图中各点的灰度作为阈值的方法(mode 法);当在对象物画面上灰度分布的比例已知时,以灰度分布的比例来设定阈值的方法(P-tile 法);此外还有差分直方图法以及动态阈值法等。

mode 法

P-tile 法

孤立点

**二值化图像的噪声消除** 把二值化后的所有图元素按孤立点、内部点和边界点进行分类。图元素为 1,而周围点的图元素全部为 0,或图元素为 0,而周围点的图元素全部为 1 的点称为孤立点,应该剔除。对于边界点的图元素还需进行膨胀处理(边界点每图元素的扩大处理)和收缩处理(边界点每图元素的缩小处理)。这两种处理组合起来,可以对图像的微小凸凹进行平滑处理,同时可以覆盖内部点中的微小孔穴。

膨胀处理

收缩处理

**标号** 从二值图像上可以看到一些图形块,给这些图形块配以识别序号称为标号。标号的方法如下:首先,以图形上的 1 点作为出发点并搜索出与之连接的近邻图元素。继续上述操作直至曲线闭合时结束追踪,把这个块作为第 1 号图形块。图形块配以标号后,就可以以该标号加以管理。

**计量** 图形的特征包括图形的面积、长度、孔穴数等。图形的面积可以用前面所述的确标号的同样方法求出。长度如何计量还是一个有待解决的问题。例如,外接长方形的边长、外接圆的直径、使物体的 2 次动量最小的轴方向长度及与其垂直方向的长度等,需要计量出能够识别物体的最佳尺寸。

## ● 与机器人的接口

机器人使用视觉传感器的目的有多种,例如当工件的位置不确定时,用视觉传感器检测工件的位置和倾斜度等,机器人依据该信息去抓持和移动工件,或者抓持工具进行加工。视觉传感器应与机器人的动作协调一致,为此需要作以下处理。

**定标与校准** 视觉传感器摄取的图像资料在传感器的内部坐标系下进行管理。然而传感器坐标系与机器人坐标系必须有严格的对应关系,即必须在传感器坐标系与机器人坐标系的协调配合

下来进行两者的作业。首先摄取长度已知的对象物的图像,求出画面上的每个图元素相当于对象物的尺寸(mm)。这个工作叫做定标(scaling),然后再进行校准(calibration)。所谓校准是指取作为基准的两个点,使画面上的坐标与机器人的坐标相互对应的操作。具体地说,就是求取用图 8.39 中  $P$  表示的位置数据( $X, Y, \theta$ )。

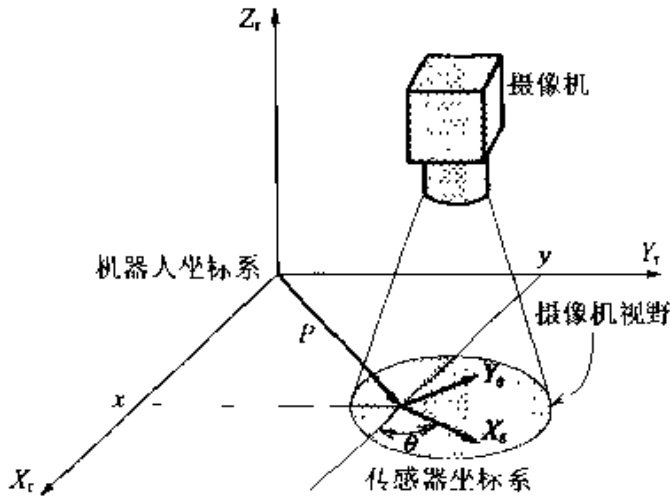


图 8.39 校准操作

**坐标变换** 所谓坐标变换是指把在传感器上计量的位于传感器坐标系上的物体的位置与倾斜角变换到机器人坐标系上。根据传送给机器人的上述信息,机器人就可以进行抓持工件等作业。在 IS-100 中,为进行这种从传感器坐标系到机器人坐标系的变换准备了专用指令“COORDI”。

图 8.40 所示为从图像输入到 2 值化、定标以及向机器人坐标的变换等,传感器侧的程序举例。

### ● 传感器的应用领域

在 FA(factory automation)系统中,视觉传感器在产品的加工、装配、检验、搬运、仓储等很多环节中得到应用。视觉传感器的作用主要有:工件的形状计量,形状异常的检测、焊接装配等质量是否良好的判定、确认工件的有无,工件的位置确定与位置判断,标记位置判别,零部件的分类与排列,制造序号读取,零部件计数,异物的混入及有无损伤判断等。

10	CLS:CLS MO@, CLS MI@	:灰度图像存储器的初始化
20	OPEN "COM1:" AS #1	:打开通信通道
30	DIM _SEN (3)	:配置变量数组(传感器坐标系用)
40	DIM _ROB (3)	:配置变量数组(机器人坐标系用)
50	DIM _GRV (2)	:配置变量数组(工件重心位置用)
60	DEFBIN NO@, M1.0@	:定义2值存储器
70	DEF CAMERA CAM#1, MO@, AS #2	:摄像机与图像存储器、信道序号的对应装配
80	CAMERA #2	:从摄像机读入图像,存入图像存储器
90	BINARY MO@, NO@	:2值化(自动2值化处理)
100	ISOLATED NO@, NO@, 4	:除去2值图像的孤立点 (在纵横4个方向上作图元素连接处理)
110	ERODE NO@, NO@, 8	:2值图像的收缩处理 (在纵横斜向的8个方向上作图元素连接处理)
120	DILATE NO@, NO@, 8	:2值图像的膨胀处理 (在纵横斜向的8个方向上作图元素连接处理)
130	LABEL NO@	:标号处理
140	GRAV NO@, 1, _GRV	:标号为NO 1的工件的重心位置计量 (X坐标存于_GRV(1)、Y坐标存于_GRV(2))
150	TH=AXIS (NO@, 1)	:求取标号为NO.1的工件的主轴方向
160	_SEN (1)=_GRV (1)	:把工件的重心位置X代入SEN(1)
170	_SEN (2)=_GRV (2)	:把工件的重心位置Y代入SEN(2)
180	_SEN (3)=TH	:把工件的倾斜角 $\theta$ 代入SEN(3)
190	COORDS _SEN, _ROB, CAM#2	:从传感器坐标系到机器人坐标系的变换
200	PRINT #1, _ROB (1), _ROB (2), _ROB (3)	:传送在机器人坐标系下的工件位置(X,Y, $\theta$ )
210	END	

图 8.40 视觉传感器的程序举例

## 相关知识 ● 灰度处理

### 灰度图像

到目前为止,在图像处理时,由于处理能力的问题,大多采用2值处理模式。然而,最近研制出了对灰度图像进行直接识别处理的传感器。“move master”机器人在图像摄录后,在进行机器人与图像灰度水平的图形协调时,可以直接进行对象物的检测、位置与倾斜角的计量等,具有不需设定阈值、抗干扰能力强、检测精度可达1个图元素的1/10等优点。

## 见多识广 机器人的名称由来

1920年捷克剧作家卡里洛·奇别克(Capek)创作的(罗萨姆万能机器人制造公司)中首先使用了“机器人”一词(参照第8.1节)。在捷克语中“Robota”的意思是“劳动”,“Robot”(机器人)一词就是由此演变而来的。

这个剧本中,没有人类情感和思想的被称为“机器人”的人造人出现了。剧中描绘了处于少数的人类支配着大量机器人的一个繁荣的社会。过分繁重的劳动使机器人产生了“反抗”的情感,最后终于引起暴乱,使人类遭受灭顶之灾。

这个剧目预见与评价了在机器文明到来之时人类与机器的关系。此后,机器人“Robot”一词就开始在世界上广泛使用起来。



## 9 机器人与安全管理

**□ 要点** 与一般的自动机械不同,机器人富有空间上的自由度,因此有着特殊的危险性。机器人的安全管理要点是:确保示教时的安全,设置运行安全栅以及对操作人员的培训等。

**□ 解释** ● 有关法令、规则

下面就机器人的有关法令、规则作简要介绍。

**劳动安全卫生法** 为了防止劳动事故,日本的劳动安全卫生法规定了企业家的责任和劳动者的义务等。其中第 59 条第 3 项规定:“企业主让劳动者从事危险或有害健康的工作时,必须进行有关安全方面的特别教育。”

**劳动安全卫生规则** 劳动安全卫生规则第 36 条对劳动安全卫生法第 59 条第 3 项中所指的从事危险有害工作时应如何作业作出了规定。其中第 31 号和第 32 号与机器人有关。第 31 号中说明了示教作业的有关规定,第 32 号中说明了检查作业的有关规定。另外在第 31 号中,该法令对“工业机器人”的概念作了定义。第 150 条中对使用工业机器人时企业主所应采取的有关安全卫生措施作出了规定。表 8.4 为劳动卫生安全规则中与机器人相关的规定事项。

工业机器人

表 8.4 劳动安全卫生规则概要

可动范围	作业状态	驱动源断开	措施	对应规定
外	自由运转时	不切断	运转开始的信号	104 条
			打开与设置围栏的处理	150 条之 4
内		切断 (含运转停止)	标识作业宗旨	150 条之 3
			不切断	制定作业规程
		直接停止运转的措施		150 条之 3
		标识作业宗旨		150 条之 3
	进行检查 等作业时	切断	实施特别教育	36 条 31 号
			作业开始前的检查	151 条
		不切断 不中止运行 而进行检查 作业的场合	运行停止	150 条之 5
			标识作业宗旨	150 条之 5
制定作业规程	150 条之 5			
	直接停止运转的措施	150 条之 5		
	标识作业宗旨	150 条之 5		
	实施特别教育 (清扫、给油作业除外)	36 条 32 号		

工业机器人使用中有关安全准则的技术指南。在技术指南中,对使用工业机器人时为防止与人直接接触而造成人身伤害,对工业机器人的选定、设置和使用等方面的有关注意事项作出了规定(劳动者技术指南公告第13号,昭和58年)。

工业用操作机器人的安全性(JISB8133-1993) 日本工业标准,是在工业机器人及机器人系统的设计、制作、编程、运行、使用、保养以及修理等环节从安全上全面考虑的指导性文件。

### ● 示教时的安全对策

接近工业机器人进行示教作业是使用机器人时最需要注意安全的作业。因此,在机器人可动范围内进行示教作业时,为了充分防止由于机器人意外动作引起的危险或者因误操作引起的危险,必须采取以下措施:

① 制定关于机器人操作方法及操作顺序的操作规程(电源投放、初期动作确认等)。

② 机器人作业时,设定控制器的速度在250mm/s以下。

③ 确定多个作业人员之间的联络方法(确定作业指挥者,口头或打手势联络的方法等)。

④ 规定发生异常时检查原因的程序及报告手续。

⑤ 规定从发生异常到恢复后再起动的程序。

⑥ 为了防止机器人意外动作或因误操作引起的危险,操作者可以在安全栅内操作急停开关。操作监护人员也可以在发生异常时直接停止机器人运行。

⑦ 为了防止操作者以外的人员起动机器人,应制定相应的规程,如起动表示等。

图8.41示出了示教作业中容易发生的与工件有关的干涉失误。图中(a)为关节插补时移动中的干涉;(b)为移动前位置序号设定失误引起的干涉;(c)为手爪夹钳的开闭设定失误引起的干涉。

### ● 运行时的安全对策

工业机器人运行时,机器人与操作者接触而对作业者构成威胁时,应采取设置安全栅或围栏等防范措施,把人与机器人隔离开。此外还需注意的事项列举如下:

① 确认在机器人的可动范围内无人。

② 与机器人相关的周边装置全部正常且无其它异常情况。

③ 机器人自动运行的起动操作必须在安全栅的外侧进行。

④ 应确认机器人运行时的离心力或急停时的冲击力或其它

原因等不会造成被抓持的工件或工具飞出而造成伤害。

⑤ 当某种异常征兆出现时,应直接停止机器人的运行并注意观察。再启动时,应注意检查程序上的步位和再启动位置而不应有任何异常。

图 8.42 示出了机器人动作的最大区域、限制区域、安全防护区域与安全栅的配置关系。这里最大区域是指包括安装于末端的手爪等在内的机器人的最大可能动作范围。限制区域是指由机械制动器对最大区域加以限制的区域。而安全防护区域则是指包括限制区域在内的由安全栅防护的区域。

最大区域  
限制区域  
安全防护区域  
安全栅

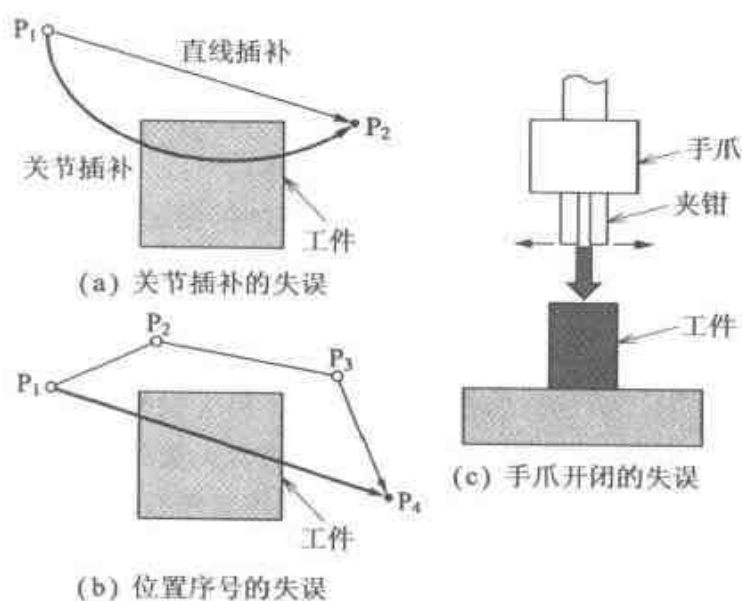


图 8.41 示教时的作业失误举例

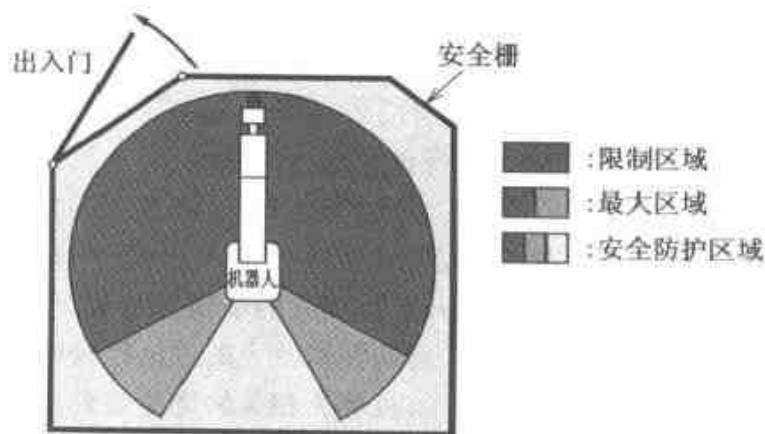


图 8.42 安全栅的设置

## 联锁机构

因此,在机器人自动运行时,绝对不应随意进入安全防护区域。安全栅的出入门上需要安装自动运行时不能开启的互锁机构,或者出入门开启时使机器人自动进入停止状态的**联锁机构**。

### ● 检查与维修时的安全对策

与不切断机器人的动力进行示教作业一样,接近机器人进行检查或维修作业也是一种危险的作业。因此在上述示教时的安全对策中,注意事项①~⑤在这里也同样适用。

## 储存能量

另外,检查和维修时,常常需要接触机器人的内部,由机器人内部储存能量(弹簧、电容、流体等)释放而产生的危险也必须给予足够的重视。检查和维修作业结束后进行试运行,伴随机器人起动的可能出现的危险也必须充分注意到。

### ● 特别教育

使用工业机器人的所有操作者,都应预先接受有关机器人的知识和正确的安全操作方法方面的教育,应具备必要的知识和技能。在劳动安全卫生规则中,规定企业主有义务对于机器人示教及检查等的操作人员实施**特别教育**。具体的教学计划要点在劳动者公告中作出了规定(安全卫生特别教育课程,昭和58年劳动者公告第49号)。

## □ 相关知识 ● 关于工业机器人的定义

工业机器人的定义是在劳动卫生安全规则中给出的。然而对于原动机额定功率小于80W的机器人却未作定义。因此,对于小型机器人,有时也可以不必作为法定工业机器人对待。

从对用户负责的角度说,设置急停开关等是最低限度的安全对策。

## 10 未来的机器人

### □ 要 点

在日本,机器人的生产台数、生产现场的使用台数以及机器人的出口台数均居世界第一,日本素有机器人王国之称。机器人有着十分广泛的应用前景,除制造业以外,人们正在积极研究开发适用于其它领域的机器人。能够在社会生活的各个领域使用机器人是人类的梦想,人们期待着这一天的到来。

### □ 解 释 ● 工业机器人的普及现状

截止 1995 年末,在日本国内机器人的使用台数已经超过 60 万台,大约占世界上机器人总数的 7 成,这就是日本被称为机器人王国的原因所在。作为机器人使用的背景可列举如下:

- ① 高度发展时期解决劳动力不足问题。
- ② 在汽车、电机制造企业中大量使用。
- ③ 由机器人代替人工作,使生产率提高。
- ④ 国家实施机器人普及政策等。

在引进机器人的产业中,电机制造业为最多,汽车及其相关产业次之。从用途上讲,有装配用、焊接用、塑料成型加工用等。从类型上来讲,有示教再现机器人、数字控制机器人、智能机器人等。从采用机器人的企业规模来看,机器人中大约 8 成为人企业所使用,因此有必要采取措施,以促进占企业数 99% 的国内中小企业广泛使用机器人。

### ● 工业机器人的应用动向

目前,在品种少、批量大并适合使用机器人的产品制造中,有相当一部分已经采用了机器人。今后,为了提高劳动生产率,还将继续大量采用机器人,以满足企业发展的需要。同时,有广泛应用前景的课题还有很多,例如多品种小批量的产品生产、替代熟练操作者、改善劳动环境以及非制造领域等都有着巨大的应用潜力。

现阶段的工业机器人的“通用性”尚不够充分,常常作为系统组合中的专用机械来完成专门的工作(图 8.43)。对于满足用户特殊需求的品种少、批量小的产品生产以及中小企业最为擅长的多品种小批量的产品生产中如何应用机器人,还有很多尚未解决的课题。

特别是“3 高”(高强度、高污染、高危险)作业的自动化需求中,尚有很多不易应付的情况。上述工程受到青年劳动者的绝对

示教再现机器人  
数字控制机器人  
智能机器人

多品种小批量  
生产  
替代熟练作业者  
改善劳动环境  
非制造领域

不足以及劳动力来而复去等问题的困扰,这些情况在未来的很长一段时间内将继续使国内制造业受到深刻的影响。

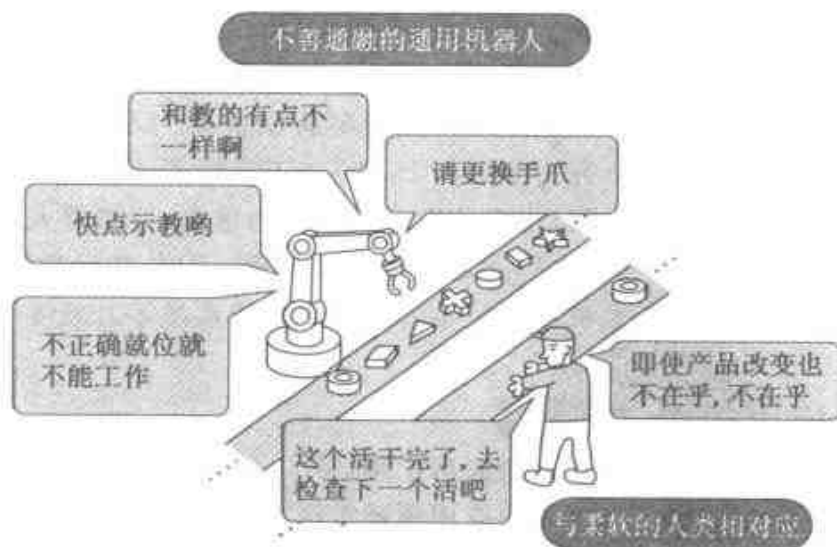


图 8.43 通用机器人与专用机器人

另一方面,在机器人的研究开发过程中,也希望在过去从未涉足的领域有所突破。例如,机器人在目前面临的世界性的老龄化社会的医疗、福利领域的应用(图 8.44),机器人在生产建设以及农业、林业、畜牧业、水产业等领域中的应用,在危险环境并且人类能力所不及的作业领域如宇宙、海洋、原子能、消防等领域的应用,在自动化程度较低的劳动力密集型企业如物资流通、煤气、电力企业的应用,在办公自动化和服务自动化领域以及面向一般人群的用于日常生活、家务劳动、休闲娱乐领域的应用等。

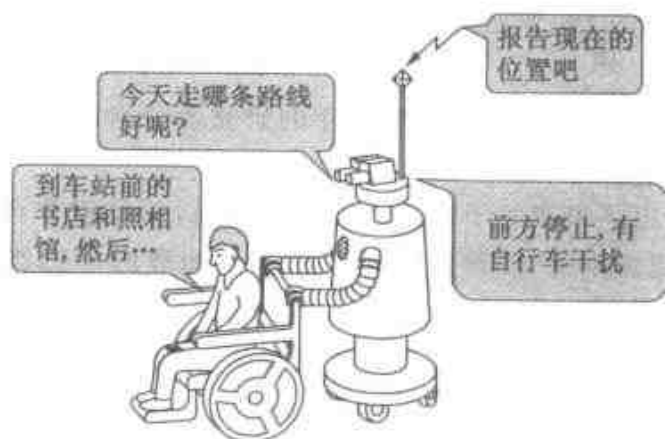


图 8.44 老年人护理机器人

这些应用领域是基于劳动力不足、改善作业环境、缩短劳动时间、高龄化和福利等社会需求方面的考虑。人们对机器人的期望值和实际需求今后必将逐年增加。

### ● 研究开发的动向

机器人的研究开发将进行以实用化为目标的工业机器人的研究以及以开发研制新型机器人及其相关技术作为对象的基础研究。今后的10年,在工业机器人领域,将以多品种、高速度、高精度、小型化以及大型化为重点,使机器人的基本功能和性能明显提高,以满足使用者的需求。但是在示教再现方式的操作方法以及机器人每单位重量的可持重量等方面将不会有太大的进展。

### 示教再现方式

## ■ 应用知识

### 在工业领域中机器人的应用扩展

工业领域中在机器人的应用领域扩展方面成果不断:

① 根据视觉传感器的信息来控制机器人的动作与姿势方面已经达到了实用化水平。然而,人类能够简单进行的各种零部件的识别问题,对机器人来说却是一个难题,目前尚未达到实用化阶段。

② 关于力的控制方面,力的柔性控制等成果在抓取柔性物件的作业中开始实用化。

③ 目前已经推出了两台机器人和双臂机器人协调动作的实例。

④ 在机器人实际应用的很多领域都获得了可喜的进展,例如室内装修工程用机器人、清扫机器人、壁面检查机器人、建筑和研磨用人工机械手、屏蔽施工法用预制件联接机器人、飞机清洗用机器人等。

### 在基础研究领域的应用

在基础研究领域,机器人加快了机械、电子、信息的一体化进程:

① 在移动机器人领域,可以回避移动障碍物的模糊控制和神经网络控制技术的应用;多足机器人中,对凸凹不平地面的积极适应和气压传动装置的应用等有了新的进展。

② 在机械手领域,柔性机械手的研究十分活跃,人们期待着宇宙机器人和机器人轻量化方面的成果。

③ 提出了很多关于传感器的研究课题,例如复数自律行走机器人的控制、实时处理机器人视觉系统、多种传感器信息统一处理的传感器综合系统、传感器的最优操作等。

④ 其它方面的研究也有望获得进展,如远程现场机器人、微型机器人、网络型机器人系统等。

各行业对机器人的需求情况如表 8.5 所示。可以看出,在机器人研究开发领域还有着相当广阔的空间。

表 8.5 各行业有代表性的尖端机器人技术

行 业	尖端机器人技术
食品	肉类脱骨加工系统、冷冻室内作业自动化
纤维	自动缝纫系统
木制品	木制品家具研磨自动化
造纸	优质纸出厂检查自动化
化学	工厂设备监视、保全自动化
石油	石油油罐清扫、检查、涂装自动化
陶器	烧制作业自动化
橡胶	粘接剂涂抹自动化
钢铁	分块延伸系统坯块流动作业自动化,转炉炉膛修补自动化
一般机械	汽轮机翼、金属成型研磨自动化,去飞边自动化,水切割自动化
电气、电子机械	真空半导体制造、材料制造等真空机器人 自律行走式室内搬送机器人 半导体加工用微型机器人 对应净化度等级为 1 的机器人
汽车	仪表装配自动化 装配与拆卸
机械信息产业	立体识别、线头清理机器人 自动仓库用自动整理机器人 工厂内的声音指示作业机器人 装配用超高速 DD 机器人、超精密位置控制机器人 移动物体的立体识别机器人、IMS(CIM) 激光机器人
(非制造业)	
畜产	剪羊毛机器人、挤奶机器人 畜舍清扫机器人
农林水产	果实收获机器人、种植、施肥作业机器人 农场育苗机器人 农药航空喷洒机器人 打枝、回伐、采伐作业自动化
建设/建筑	鱼肉解体、鱼类选别、装箱自动化 钢筋装配作业自动化,钢筋装配机器人 钢筋配料用机器人 耐火材料被覆吹拂机器人 混凝土浇灌机器人 混凝土地面磨光机器人 外境安装机器人

(日本机器人工业协会编,机器人手册,1995,12页)



行 业	尖端机器人技术
地质/土木	天花板、照明器具安装等室内安装机器人,吹窗机器人,混凝土外壁清洁、涂装机器人,混凝土壁切割机器人,大厦外壁诊断机器人,贴瓷砖机器人,室内清洁度检查机器人 钢筋混凝土建筑物老化诊断,桥梁涂装自动化 土质、地质调查自动化 小口径管、电缆地下敷设作业 隧道用混凝土吹拂机器人 隧道工程用弓形自动组装 混凝土块装配作业
海洋	地下建筑物解体机器人 海底调查(地质、地形)用机器人 探矿 海底建筑物建设、保全作业 向水下均匀投石的机器人
矿业 电力	探矿、采煤自动化 配电线带电作业 绝缘子清洁作业 变电所巡视机器人 输水管路检查机器人 火力发电回水管路检查、清扫机器人 输电线工程用铁塔升降机器人 原子反应堆核容器内部保养检查机器人 原子反应堆解体机器人 放射性废弃物处理
煤气、自来水	配管工程用机器人 地下管路检查、修理机器人 贮气罐检查、修补、涂装机器人
下水道 高楼维护、向导	清扫机器人 警卫、保养、消防 地板清洁 房间清洁检查 大厦向导服务
医疗	脑外科手术用知觉机器人 乳腺癌自动触诊机器人 内脏、血管检查手术,角膜移植手术微型机器人 细胞操作微型机器人
社会福利/老年福利 /残疾人福利	患者引导、病历卡、患者检验运送机器人 老年人自助机器人(洗澡、饮食等) 高龄者轻微作业、辅助移动机器人 残病人自助系统(盲人引导犬机器人,操纵机器人)

续表 8.5

行 业	尖端机器人技术
家务 防火	身体恢复支援系统
	动力义手、义足
	清扫、餐具清洁、警卫、病人自助
	防火(大厦、森林)、警卫(大厦)
	救助(火灾、地下埋设等)
宇宙	火灾时的避难引导作业
	海上漏油 防火
	宇航设备的装配、检查、维修
	卫星、航天飞机的自动回收作业
	宇宙工厂用作业机器人
	宇宙探查,资源采取

### 例 题

试举出两个机器人的新应用领域,并说明之。

**答**

#### ① 消防机器人。

消防作业是一种十分危险的作业,特别是高层建筑、地下街、化学工厂等场所还会有二次灾害的危险。为了救助生命和防止灾害的扩大,要求紧急快速救助和控制火势蔓延。因此,对消防机器人的要求是具有自律行走和壁面升降功能,可以迅速接近现场,发现并救助被困者,同时能够有效地控制火势。

消防机器人必须具有在火焰、高温、楼梯、房门、复杂的通道、管路以及有害气体等十分恶劣的环境下工作的能力。

#### ② 医疗用微型机器人。

医疗用微型机器人探针可以自律或者在外部引导下移动到人所不及的血管或体内的任意部位,完成检查、投药或实施切除手术等各种操作。

医疗用微型机器人使人体内任何部位的治疗成为可能。复杂的手术也由于仅仅是微型机器人的投入和回收而变得十分轻松。因可重复操作,提高了手术的治疗效果。对于患者和医疗有关人员来说也减轻了负担。

### 应用基础 净化环境机器人

日本的半导体保持了世界上最具有可靠性的高品质,其秘密之一就是采用了净化环境机器人。今后将更加需要这种机器人的帮助。

现在活跃着的净化机器人有：

- ① 硅片运送机器人。
- ② 净化环境测量机器人。
- ③ 净化环境内搬送用自律移动机器人等。

64Mbit 以上的大容量半导体存储器开发时，一个关键技术是如何刻划出  $0.25\mu\text{m}$  级的微细线宽的配线图案，在如此超微细的环境中，尘埃是一个大敌。为此要求具有净化度等级为 1 的超净化环境。对于净化环境的实现来说，人类是最大的尘埃源，因此十分需要机器人化和自动化。为了使代替人类作业的机器人不成为尘埃源，需要着重以下几点：

- ① 为防止由润滑材料产生的油烟和滑动部分产生摩擦粉末等造成污染，应妥善密封。
- ② 采用不产生灰尘的涂料进行喷涂。
- ③ 电缆和皮带部分密封，并用真空泵保持负压。

# 第9章

# 机电一体化 的实践

本章将介绍机械、电子技术和计算机控制技术的有机结合及其应用，以及机电一体化技术开发与产品开发过程，并以实例加以说明。

在机电一体化技术的实际应用中，五指机器人的开发、CD机伺服控制系统的开发等很有特点，是机电一体化技术的典型应用。没有机电一体化技术，娱乐机器人、清扫机器人、双臂机器人等就不能实现。

从本章各节的示例中可以看到，在机电一体化技术的应用领域，不仅仅是机械、电子、计算机控制等技术的简单结合，而是以上述技术的有机结合为核心技术的开发与应用。人们期待着机电一体化领域中的更加丰硕的成果。

● 责任编辑

久慈俊夫

● 执 笔

久慈俊夫(1,5,6)

横道正和(2)

小口京吾(3)

永松茂隆(4)

隈本 武(7)

中村(正)义(8)

久口弘志(9)

# 1 X-Y 工作台的制作

## □ 要 点

应用机电一体化技术时,需要学习的基本知识有机械零部件与驱动装置的选用、力学基础知识、位置控制与速度控制的基础知识、计算机及其接口、控制程序设计等。学习这些知识时,为了用较短的时间获得较好的效果,先来考虑一个容易直观理解的与 X-Y 坐标系相一致的 X-Y 工作台的制作。

X-Y 工作台是直角坐标系机器人制作的基础。

## □ 解 释 ● X-Y 工作台的机械部分

图 9.1 所示为 X-Y 工作台的一个坐标的基本结构,一个坐标的基本结构尺寸确定后,可以扩展到二个坐标和三个坐标。

该工作台具有结构简单、刚性好、成本低等特点,可应用于印刷电路的元件插入装配、元件的选择与放置和二维焊接等。

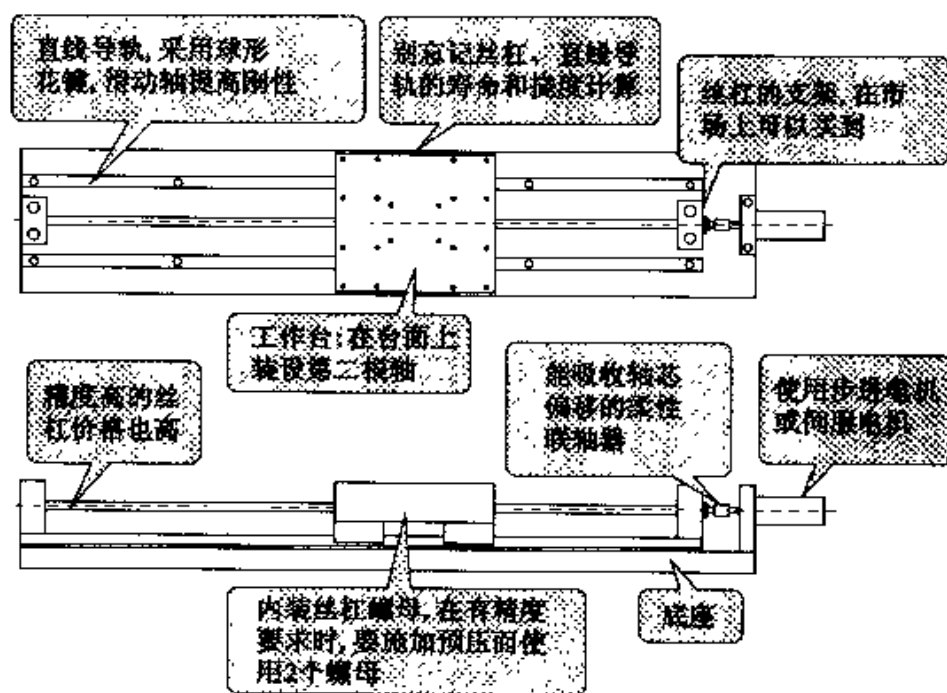


图 9.1 X-Y 工作台的基本结构

## ● X-Y 工作台的结构设计

### 双螺母结构 预载荷

位置精度的设计 在往复位置精度要求较高时,需选用高精度等级的丝杠,采用双螺母结构能够施加预载荷而消除传动系统

传动系统  
丝杆

的反向间隙。

设控制用电机每转所需指令脉冲数为  $P$  [pulse/r], 这时丝杠向前移动距离为  $l$  [mm], 则每个指令脉冲的移动量  $\delta$  [mm/pulse] 为

$$\delta = l/P \quad (9.1)$$

移动速度 设电机转速为  $R$  [r/min], 则工作台移动速度  $V_T$  [mm/s] 为

$$V_T = l \times R/60 \quad (9.2)$$

若指令脉冲的发送频率为  $V_p$  [pulse/s], 则式(9.2)可写作

$$V_T = \delta \times V_p \quad (9.3)$$

由式(9.3)可知, 若使工作台快速移动, 只要取较大的  $\delta$  值或  $V_p$  值即可。

但是, 当  $\delta$  取较大值时, 工作台的位置分辨率下降。需要实现高分辨、高速驱动时, 必须使  $V_p$  增大。一般说来, 脉冲发送器的频率可以达到很高, 但是电机控制器和电机本身的性能都有一定限度, 超过一定频率就很难保证正常工作。

### ● 控制电机的选择

电机驱动机械负载工作时所产生的转矩为

$$T = J \times \dot{\omega} + D \times \omega + T_L \quad [\text{kgf} \cdot \text{m}] \quad (9.4)$$

电机轴上的惯  
性矩  
摩擦负载转矩

式中,  $J$  为换算到电机轴上的惯性矩的总和,  $D$  为与角速度成比例的负载系数,  $T_L$  为摩擦负载转矩。

实用中, 由于第 2 项很小, 往往略去不计, 则式(9.4)也可写成

$$T = J \times \dot{\omega} + T_L \quad [\text{kgf} \cdot \text{m}] \quad (9.5)$$

式(9.5)的第 1 项与角加速度成正比。与机械惯性一样, 当工作台加速移动时, 需要驱动电机提供一个很大的加速转矩。但是, 当电机起动后以恒定转速运行时, 角加速度为零, 电机所需要的转矩就只有第 2 项的恒定负载转矩。因此, 选择电机时, 可以在式(9.5)上乘以一个裕量系数, 选择大于这一容量的电机即可。

若进行平滑加速和减速运行, 可以用较小的转矩驱动, 而要求频繁起动、制动或频繁正、反转运行时, 则需要较大转矩。

闭环控制

**X-Y 工作台的控制** 当工作台的移动需要较高精度时, 可以采用光电的或电磁的线性传感器来检测工作台的移动, 构成闭环控制系统。

开环控制

很多情况下, X-Y 工作台可以采用步进电机的开环控制或装有编码器的伺服电机的半闭环控制。

半闭环控制

无论哪一种情况, 由于相当下 1 个指令脉冲的移动量  $\delta$  [mm/pulse] 是已知的, 为了到达目标位置, 只要向电机控制器输

出所需的脉冲数就可以了。

### 加减速控制

在脉冲周期(或频率)增加或减小时,电机将处于启动、停止或者速度变化状态,为防止电机过载,脉冲的增减都应是平滑的。上述通过脉冲的增减使工作台加减速的控制称为加减速控制,通常采用梯形曲线或凸形曲线的加减速控制模式。

### 插补控制

另外,根据送到 X Y 两个坐标的脉冲比例的变化,工作台可以描绘出不同的移动曲线,例如直线、圆弧或花键曲线等,这种控制称为插补控制。

## 二 相关知识

### ● 惯性矩的定义

图 9.2 所示为惯性矩的定义。由图可知,微元的惯性矩就是从旋转中心到微元的距离的平方与微元质量的乘积,而整个旋转体的惯性矩则是组成旋转体的所有微元的惯性矩的总和。这一定义可用公式表示为

$$J = m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2 + \dots + m_i r_i^2 + \dots = \sum m_i r_i^2 \quad (9.6)$$

由式(9.6)可知,由于惯性矩与到旋转中心的距离的平方成正比,因此,对于控制性能优良的机械,设计时的零部件配置是非常重要的。

### 需要的驱动转矩

计算出由电机驱动的所有零部件的惯性矩及其总和后就可以按式(9.5)求得电机所需要的驱动转矩。

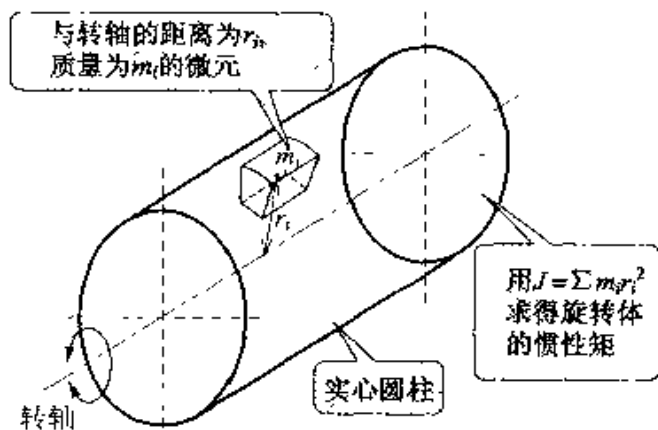


图 9.2 惯性矩的定义

## 应用基础

### 负载力矩的实测

由于加工、装配等原因,零部件的形状(重量)与设计值相比会有微小的差异,由于机械效率、摩擦系数的选取等原因,电机转矩与理论值相比也会存在偏差。因此,机械

的驱动转矩需要用试验的方法求取。一种实用的求取驱动转矩的方法如图 9.3 所示。

在机械的驱动轴上安装一个半径为  $r$  的皮带轮,将细铁丝卷绕在皮带轮上。细铁丝的一端固定在弹簧秤或测力计上并以一定速度平行牵引,测下开始移动时的力  $F_s$  和以一定速度移动时的力  $F_t$ ,则

静摩擦力矩:  $T_s = F_s r$

动摩擦力矩:  $T_t = F_t r$

利用以上两式就可以求出驱动机械所需的基本转矩。

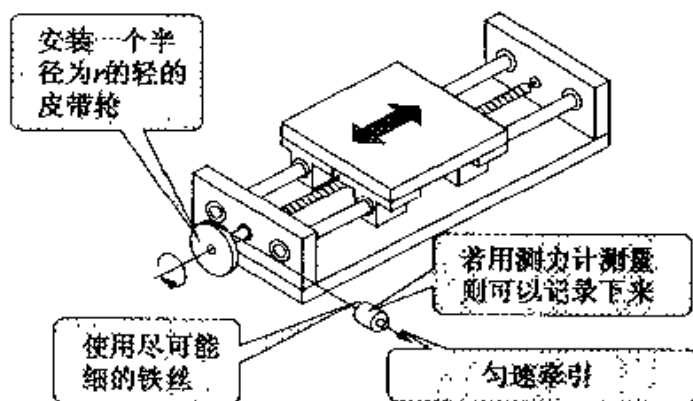


图 9.3 负载力矩的实测

### 应用知识 机床的 X-Y 工作台

将 X-Y 工作台机构应用到数控铣床、数控加工中心上,可以实现工件在平面上的二维移动。与直角坐标系机器人不同的是,在数控机床中应用时,X-Y 工作台需要很高的刚性,在控制上采用 NC 代码。

在 X-Y 工作台上再追加一个平行于旋转刀具轴的 Z 轴,利用个人电脑或 NC 控制器操作面板,则可以制成 XYZ 三轴联动的三维加工机床。

上述技术可用于木工机械等需要特殊运动而生产批量又较小的产品的开发。



## 2 娱乐机器人的行走机构及其控制

### □ 要 点

为了使机器人能够自律行走,需要以下两方面技术:

- ① 识别自身位置的技术。
- ② 向目标位置移动的行走机构。

### □ 解 释

娱乐机器人

#### ● 名词术语

① 娱乐机器人(Amusement Robot):供人娱乐的机器人。此外还有“工业机器人”等。

自律行走

② 自律行走:按自由路径移动的机器人,用某种方法自行检测自身位置,据此确定移动路径的一种行走方式。

#### ● 娱乐机器人的制作

平成5年,在长野县举办的信州博览会上,展出了可以作为人的朋友和进行表演的娱乐机器人“阿尔派机器娃”。这个机器人制作上有以下5点要求:

- ① 每次约15min的表演共进行1小时。
- ② 可以在舞台上自由移动旋转。
- ③ 能做出种种动作、姿势。
- ④ 会绕舌。
- ⑤ 表演和台词可以随演出情况自由变更。

#### ● 机器人的身体构成

机器人总体形象如图9.4所示,规格数据示于表9.1,控制系统方框图如图9.5所示。

表 9.1 机器人的规格

项 目	规 格
尺寸	1 523(H)×900(W)×900(D)[mm]
重量	120 kgf
连续动作时间	约 15min
电源	铅蓄电池 24V 16A·h(12V 8A·h×4)
电流	约 5A(静止时)
电机轴数	14轴(移动2、手臂4、肩2、头3、颈3)

机器人的控制部分能够理解人类编制的剧情文件,机器人根据适时输入上半身的控制部分(参照9.3节)和移动台车的控制部分的命令完成动作、进行表演。另外,可以用声音合成功能自由地讲台词。当然,若改变剧情文件,也完全可以作其它表演。



图 9.4 阿尔派机器人

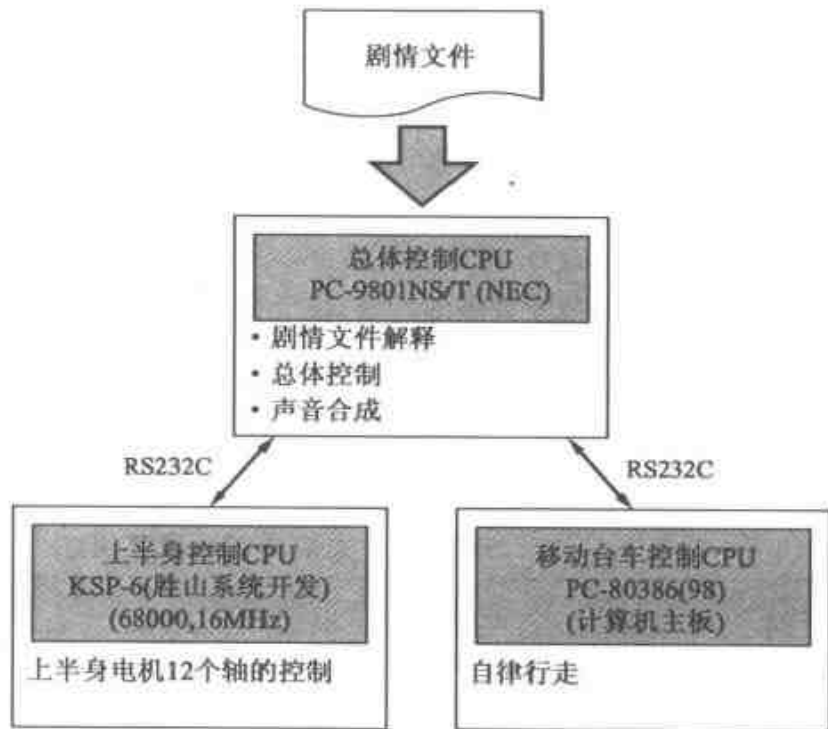


图 9.5 机器人总体控制系统方框图

### ● 用于自律行走的移动台车机构

**驱动方式** 行走机构如图 9.6 所示,车轮方式为左右驱动轮和前后脚轮构成的四车轮方式。左右驱动轮除负责前进、后退以外,当两个轮的转速不同时,还可以实现曲线行走和原地旋转。

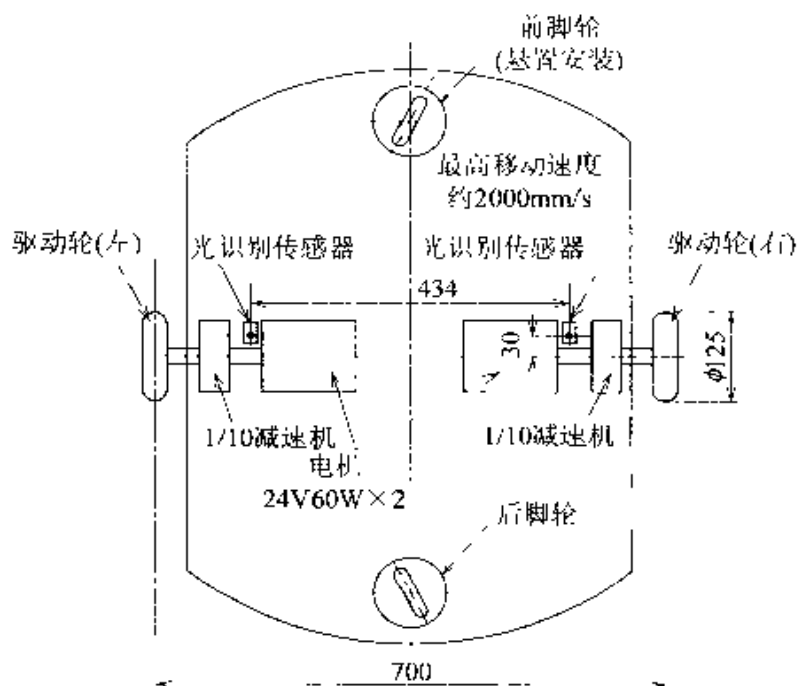


图 9.6 行走机构

**控制系统硬件** 图 9.7 所示为移动台车控制系统的硬件系统方框图。由 CPU 向两台伺服电机的控制器发出左右电机的转速命令,移动台车按命令进行移动。然而,即使电机转速最终达到了命令要求的转速,由于在移动途中左右轮旋转方式上的错误等原因,只依靠转速指令还不能准确确定移动后的位置。

**传感器** 移动台车部分的主要传感器及其用途如表 9.2 所示。

表 9.2 主要传感器及其用途

传感器	用途	安装位置	数量	规格(型号,制造厂)
旋转编码器	电机转角测量	驱动电机轴	2	500 p. rev
光识别传感器	路标图案检测	机器人底面	2	检测距离 30mm (E3C-VM35R;欧姆伦)
超声波测距传感器	障碍物检测	胸或者背	2	测量范围 0.26~10.7m (日本制造)
接近开关	容许范围以外的检测	机器人底面	4	检测距离 0~10mm (E2E X20MD;欧姆伦)
带状开关	冲突检测	裙子周围	1	指斥感觉 230g (I41 BPH;东京传感器)

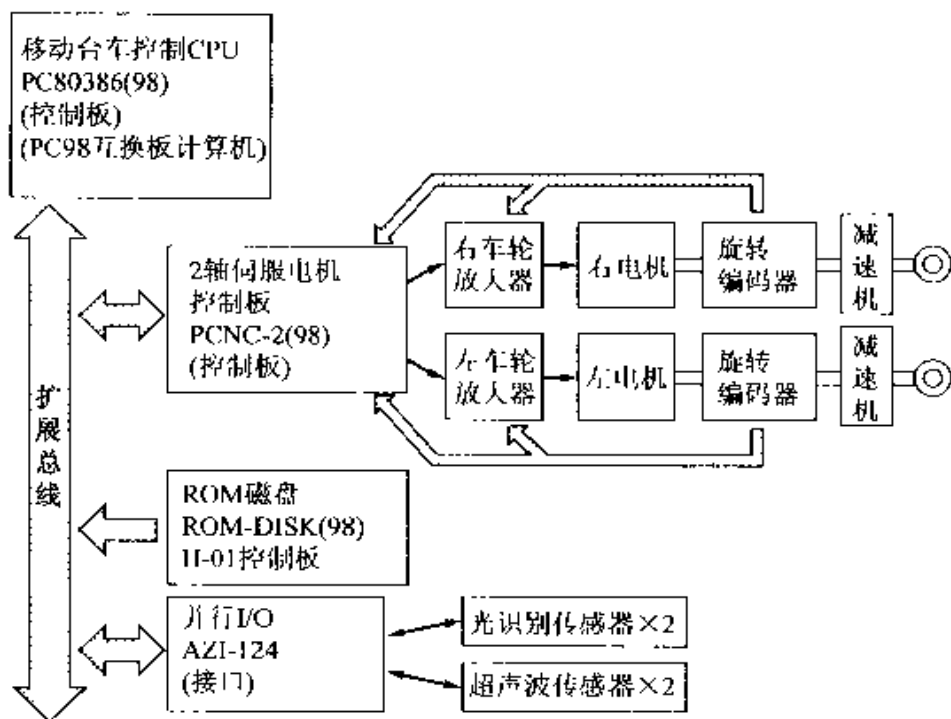


图 9.7 移动台车方框图

### ● 位置的识别与控制

**基于静计算的位置推定** 为了能够自律行走,机器人必须经常识别自己的位置与方向(位置方位)。机器人在平面上行走时,其位置可以用二维坐标 $(X, Y)$ 来表示,再考虑到机器人正前方向与 $X$ 轴之间的角度 $\theta$ ,则可以用 $(X, Y, \theta)$ 来表示机器人的位置方位。

在图 9.8 中,若已知机器人某时刻的位置方位为 $P_n$ ,根据微小时间后驱动轮的移动距离 $\Delta L$ 和 $\Delta R$ 可以计算出新的位置方位 $P_{n+1}$ 。以后各时刻的位置方位可依此类推。这种连续推断位置方位的方式称为静计算。“阿尔派机器娃”也采用了这种方式。两个车轮的移动距离可根据旋转编码器的输出求得。

**基于地图配合的位置校正** 显然位置方位推定依赖于机器人的内部传感器,但是由于误差的积累,实际位置方位与推定位置方位会不一致。因此,需要适时地观测外部环境,根据观测结果与机器人内部的地图,计算出现在的位置方位,这种方法称为地图配合。这里重要的是,观测到的点与地图上的点要有很好的对应关系。

对于“阿尔派机器娃”,在舞台上绘出图 9.9 所示的路标图案,用机器人底面的光识别传感器检测出机器人横切路标图案的瞬间,然后与机器人内部存储的地图图案进行比较,以校正推定位置。

光识别传感器

$$\Delta d = \frac{\Delta R + \Delta L}{2}$$

$$\Delta \theta = \frac{\Delta R - \Delta L}{T}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} X_{n+1} = X_n + \Delta d \cos(\theta_n + \Delta \theta) \\ Y_{n+1} = Y_n + \Delta d \sin(\theta_n + \Delta \theta) \\ \theta_{n+1} = \theta_n + \Delta \theta \end{cases}$$

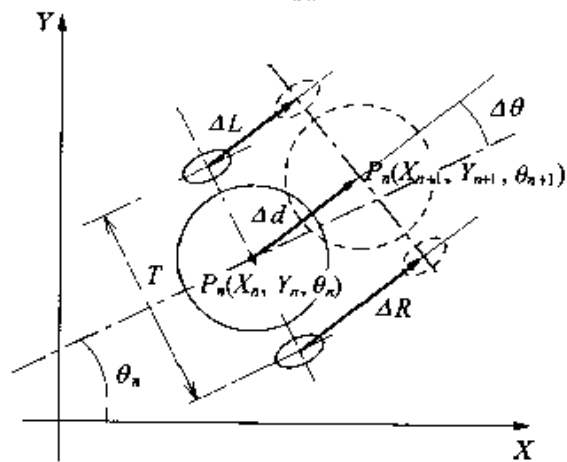


图 9.8 静计算原理

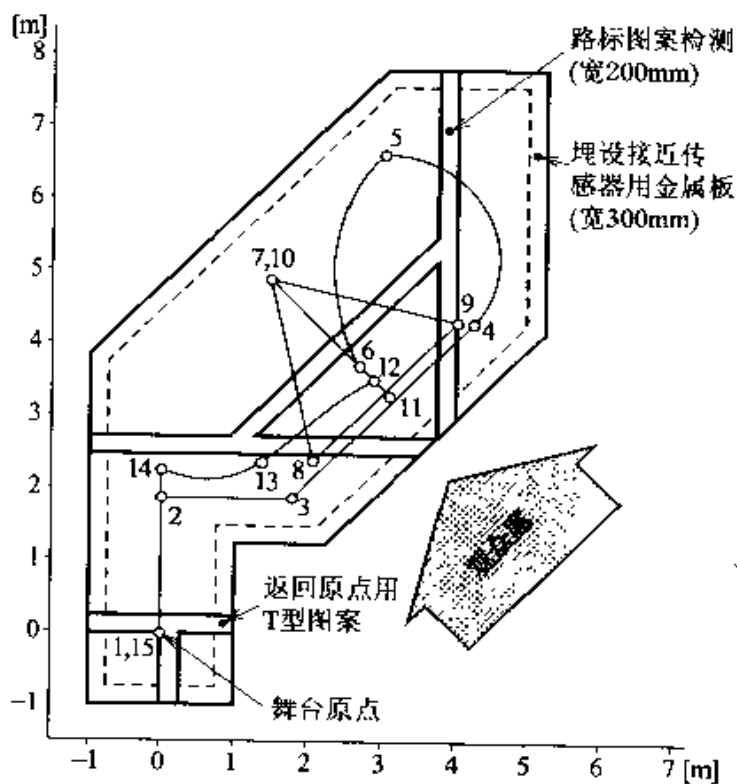


图 9.9 舞台及行车路径

### ● 初始位置的推断

“阿尔派机器娃”在初始状态下的位置方位(原点)设定后,在舞台的原点位置画出返回原点用 T 字形图案,用光识别传感器检测这一 T 字形图案,使机器人能够自动返回原点。依靠上述功能,不必人工参与,机器人就可以自动完成每次的表演。

### ● 机器人的安全对策

在机器人移动中遇到障碍物时,依靠设置在胸部的超声波距离传感器在距障碍物一定距离时立即停止。

另外,在舞台周围埋设了铁板,机器人中安装了检测铁板的接近传感器,当机器人移动表演并接近铁板时用总线逻辑使驱动电机停转。在裙子周围装设了接触传感器,接触传感器动作时使机器人停止移动,以防止机器人与障碍物发生碰撞。

### ● 机器人的动作状态

“阿尔派机器娃”共进行了 500 次实际表演,图 9.9 所示为实际演出时行走路线的一例。这个例子的行走路线是:机器人从舞台原点 1 出发,依次经过 2、3、…点,最后回到 15 点,即返回舞台原点。这时的机器人中心的移动距离约为 45m,左右驱动轮的持续行走距离约 110m,返回舞台原点时,15 点与 1 点之间的误差为几个厘米。

接近传感器  
总线逻辑  
接触传感器



## 相关知识

### ● 自动导航系统

把航空自动导航系统应用于汽车也是汽车自身位置识别的一种手段。这种位置识别方法分为以下两种方式:GPS(Global Positioning System)的卫星导航方式和静计算方式。这两种方式都需要由 CD-ROM 提供的精密地图及与之相关的实用化的高性能系统。

GPS

CD-ROM

## 应用基础 移动装置的开发成本

在开发移动机器人等完全独立型移动装置时,由于机器人的移动,无法及时看到错误调整后的显示以及机器人动作时的内部状态,或者机器人不能及时停止等原因,所以这种装置的开发存在与普通装置开发不同的特殊问题。

与上述情况相对应,需要首先创造开发环境,例如制作机器人动作模拟器、报警状态时的无线紧急停止以及机器人动作实验时需要确保的特殊空间等。进行创造环境所需的劳力和费用有时甚至要超过移动装置本身,在工程初期的成本估算时这些费用往往被遗漏,因此应给予足够的重视。

### 3 娱乐机器人的上身结构与控制

#### 要 点

#### 点

第9.2节介绍了娱乐机器人“阿尔派机器人”，对其上半身的要求是：首先要满足复杂的平滑运动的要求，然后是动作的准确性。

对装有多台电机的上半身进行控制时，需要考虑以下几点：

① 使用最少数量的电机来实现丰富表演动作的手臂和头的结构。

② 各部分的驱动器采用小型的容易控制的无线电控制模型用伺服电机。

③ 采用16位单片微型计算机来控制总共12台电机。

④ 对各台电机既能够独立控制又能同时控制的程序软件。

#### 解 释

#### 释

#### ● 使用最少数量的电机实现丰富的表演动作

人类可以在很多肌肉的协调动作下完成复杂的动作。要想把这些肌肉全部用电机置换，从机器人的体积和制作费用上考虑是不可能的。

“阿尔派机器人”的上半身总共使用了12台电机，使用的部位和功能如图9.10所示，可获得以下效果。表9.3示出了所用电机的特性。

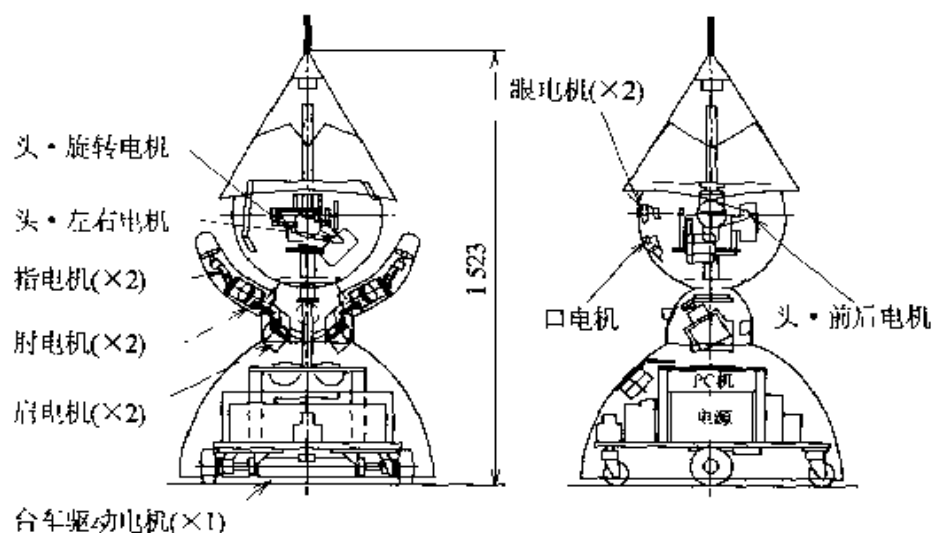


图 9.10 总体结构示意图

① 眼 在两个圆形的眼孔下放置一块带有瞳孔的板，以便这

块板独立地左右、上下移动时可以表现使眼色、眨眼睛、向上翻眼珠看人和闭眼睛等动作。

② 口 可以与合成声音信号同步开闭,实现自然的会话动作。

③ 头 可独立控制头部的前后左右倾斜和头部转动,再增加肯定、否定和疑问等基本动作,使机器人的头部能够朝向空间的任意方向,并做出各种动作。

表 9.3 电机的特性

电机名称	额定转矩	动作量	备注
眼上下	84 Ncm	130 mm	左右 2 个 用声音信号控制
口开闭	52 Ncm	20°	
头左右	196 Ncm	±15°	
头前后	196 Ncm	±15°	
头转动	196 Ncm	±60°	
肩前后	196 Ncm	±60°	左右 2 个
肘转动	235 Ncm	270°	左右 2 个
指开闭	19 Ncm	45°	左右 2 个

④ 臂 机器人的手臂是具有 120°固定角度的“<”字型的一体成型手臂。肩电机使手臂相对身体中心轴向内侧倾斜 32°,向前方倾斜 32°。随着肩部电机的转动,在上臂内部安装的肘电机一同旋转。依靠这种结构,可以用 2 台电机实现柔和丰富的体态表现。

### ● 采用无线电控制模型用伺服电机

工业用伺服电机具有准确和快速等优良的特性。然而对于娱乐机器人来说,对伺服电机的要求是体积小、重量轻和控制简单。“阿尔派机器娃”采用电池驱动,因此也要求伺服电机的电能消耗量要少。

#### 无线电控制模型

##### 用伺服电机

#### RC 伺服

“阿尔派机器娃”上半身的电机采用了图 9.11 所示的无线电控制模型用伺服电机(以下简称 RC 伺服),其主要特征如下:

① 体积小、重量轻、价格低,控制电路装在电机内部。

② 用脉冲宽度调制来进行位置(旋转角度)控制,因此只需要一根信号线。

③ 因用于第三产业,故大力矩的电机也可以买到。

④ 对电机动态特性和位置精度的要求不太高。

### ● 对 12 个电机同时控制的单片微型计算机

RC 伺服可以敏感地响应在  $1\mu\text{s}$  内的控制脉冲宽度的变化。



为了准确地产生这种脉冲,使用了具有定时器功能的单片微型计算机(表 9.4)。68301 是一种 MOTOROLA 公司生产的在 68000CPU 上追加了各种 I/O 接口的大规模集成电路(LSI),其中内部装有 3 个计时器,用于 RC 伺服控制信号的脉宽调制。

但是,如果原封不动地使用也只能提供 2 通道信号,为此设计了每隔一个脉冲 2 个计时器就切换一次,从而构成了可以同时控制 16 台电机的电路(图 9.12)。

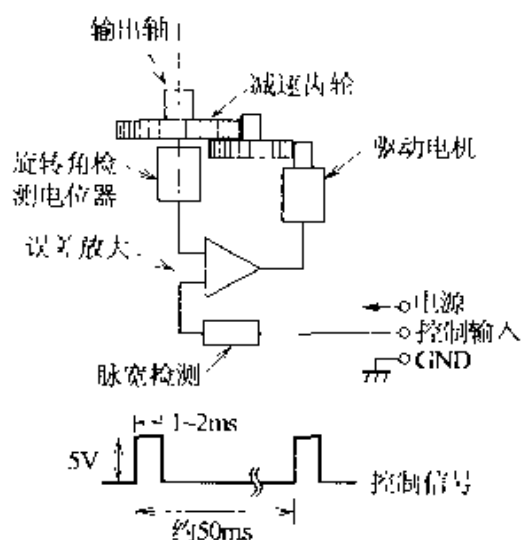


图 9.11 RC 伺服的结构与脉冲波形

表 9.4 使用的单片微型计算机的规格

项 目	内 容
名 称	KSB-6(胜山系统开发)
CPU	68301(MPU core 6811C000)
时钟	16MHz
RAM	256K
ROM	64K
串行接口	RS232C × 3 通道
并行接口	16bit
计时器	16bit × 3 通道
基板尺寸	101.6mm × 144.8mm
增 设	16bit DIP10 个作为通用部分

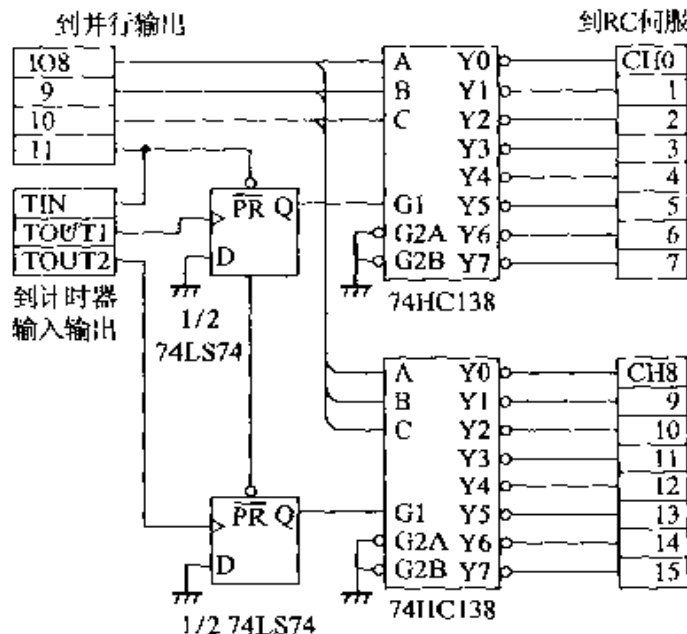


图 9.12 脉冲切换电路

### ● 独立或同时控制 12 台电机的控制系统软件

对于脉冲宽度,应考虑确定以下事项:

- ① 用脉冲宽度修正每台电机的装配误差。
- ② 旋转方向,例如抬起两肩时左右肩电机转向相反。
- ③ 设置每台电机的最大旋转角。保证身体的任何部位不会与其它部分发生冲突。

但是,一边不断地判断处理上述情况,一边又要指示机器人完成一连串的动作,这本身是一件非常困难的事情。因此,指令用以下所示的人类容易理解的形式给出,而每台电机的误差则由微型计算机来吸收:

- ① 机器人各部分的动作范围用  $\pm 100$  表示。
- ② 0 位置是机器人的中立点而不是电机的原点。
- ③ 取人类的自然方向(例如肩为向上)为  $+100$ 。
- ④ 动作的速度用移动到指令位置的时间来确定。

例如,右肩稍微抬起时,则发出“用 3 秒钟将左肩移动到 30% 的位置”的指令。这时,微型计算机首先计算出考虑到旋转方向和每个电机装配误差的相当于 30% 目标位置的脉冲宽度。然后计算出目标位置的脉冲宽度与目前状态的脉冲宽度之差,即 3 秒钟后到达目标位置所需改变的脉冲宽度。

控制系统软件的构成如图 9.13 所示。各部分的功能说明如下,

软件程序(包括中断处理)全部采用 C 语言编程:

① 通信部分 通信协议的管理。采用传送错误修正协议,确保了通信的可靠性。

② 指令解码 首先检查指令,只把有效指令变换成脉冲宽度。将解读结果追加于每一通道的动作排队的末尾。

③ 动作排队 采用如水管道一样的缓冲器,把来自解码部分的指令从管道的后端输入,从前端输入给脉冲发生部分,若写入超过取出则指令将储存在管道中,这样一来就有可能将多种动作事先写入。另外,由于读出,写入是在任意时刻进行的,只要解码部分与脉冲形成部分相互一致就可以执行动作。

④ 脉冲形成部分 若排队空缺,则取出队列前端的指令来控制脉冲宽度。对于排队空缺指令则维持目前的脉冲宽度。

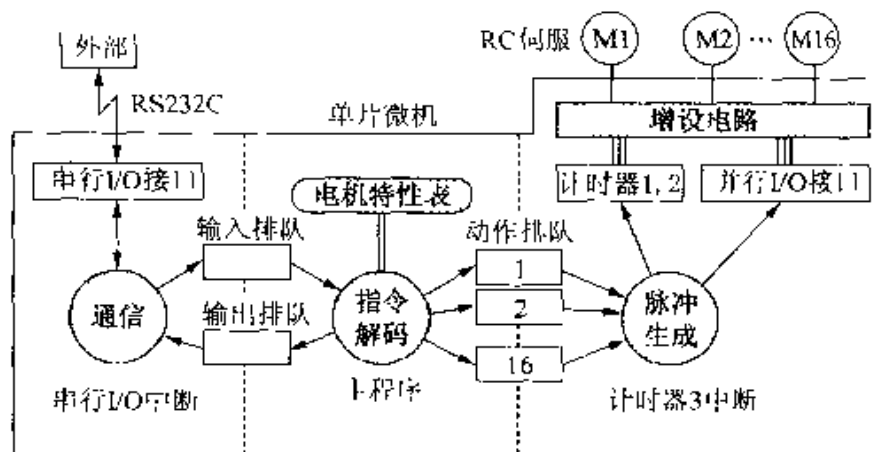


图 9.13 控制软件的结构

## □ 相关知识 ● 单片微型计算机的程序开发

由于单片微型计算机没有键盘和显示器,故应用程序要用 PC98 开发并经由 RS232C 传输给机器人。

### C 编译程序

#### GNU-C

C 编译程序采用美国的 FSF(Free Software Foundation)开发的 GNU-C。这种编译程序能够生成非常优秀的代码,由于是自由软件,因此可以很容易地从有关 C 语言的杂志附录或并行通信程序库等资料中获得。

## ■ 应用基础 · 电机噪声的对策

一般说来,电机在起动瞬间将有一个很大的起动电流流过。特别是伺服电机,需要频繁地起动和停止,这样一来,对于装有很多伺服电机的机器人来说,其电源线上将流

过复杂的脉冲状的大电流,因而将产生很大的噪声。

噪声对控制电路会造成有害的干扰,从保护控制电路的角度来说,在可能的范围内控制电路和主电路在电气上需要可靠绝缘。具体地说,排除二者之间的共地和控制信号的绝缘等措施是有效的。

例如,电池与控制电路连接,而电机又连接到控制电路上,这时电池与所连接电路之间的地线是控制电路和电机所共有的公共地线。这样连接时,电机产生的大电流将从公共地线上流过,使控制电路的电位受到电机电流的影响。如果把电机和控制电路的地线独立起来,分别连接到电源负端子附近的一点,则可以排除公共地线对控制电路造成的干扰。

另外,控制信号线与电机的上电路连接时,为防止电机驱动电流混入接地侧,可使用光电耦合器进行电气上的绝缘。一般说来,伺服电机的控制信号频率相当高,需要使用与控制信号频率相应的高频元件。

## 4 双臂型装配机器人的开发举例

**要 点** 汽车底盘和驱动系统组件要在自动化生产线上进行装配,因此开发了可以进行难度装配和两手装配的双臂型装配机器人,目前这种机器人已经实用化。

机器人适用于大批量生产线,而能否适用于多品种小批量生产线呢?双臂型装配机器人可以帮助人们实现这一想法。

### 解 释 ● 开发项目

装配自动化

本项目为汽车底盘和驱动系统组件的装配自动化系统,同时进行作业工程的摄像、摄影(过去手工操作)并进行作业分析。要求作业者(机器人)在短时间内用不间断的动作完成以下作业:

- ① 多种零部件装配。
- ② 以特定的方向和姿势进行不同形状的零部件装配。
- ③ 两手抓住或在两手抓住的同时进行装配。

难度装配作业

目前,在汽车自动化生产线上,只剩下上述难度装配作业的自动化问题尚未很好解决。采用传统方法进行装配时,工程量和装配设备的设计量十分繁重,不仅加重了设计人员的负担,也导致了自动化生产线的成本和生产准备时间的大幅度增加。

生产性  
通用性

综上所述,在沿袭了过去单元自动装配概念的同时,进行了具有①~③功能的柔性基础机械的开发。图 9.14 所示为以生产性和通用性兼备为目标的双臂机器人的开发。

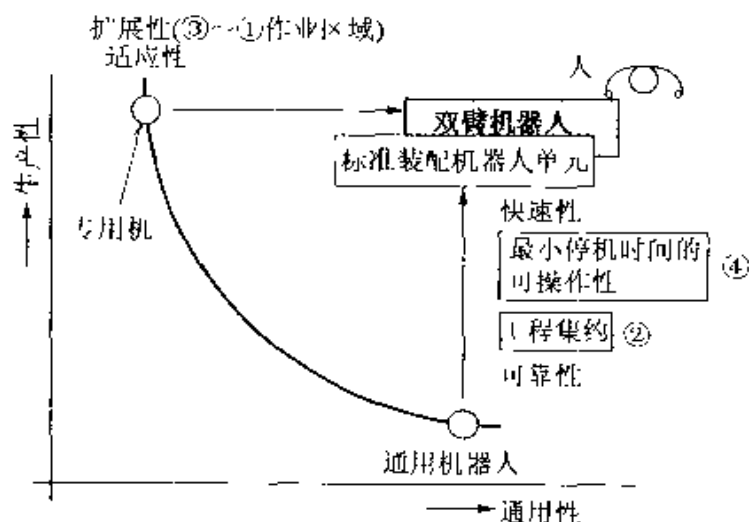


图 9.14 开发机器人的所处位置

## 差动斜齿轮装配

### ● 开发的目标

对于偏斜装配,特别是差动斜齿轮装配,是一种需要两只手完成的属于难度装配的工作,在多个零件同时装配时需要由熟练工人手工作业来完成。这种传统的装配方式难度很大。对于不应成为作业者孤岛的连续自动化生产线来说,有必要开发这种差动斜齿轮装配机器人。

### ● 对性能方面的要求

已经开发的双臂机器人如图 9.15 所示。

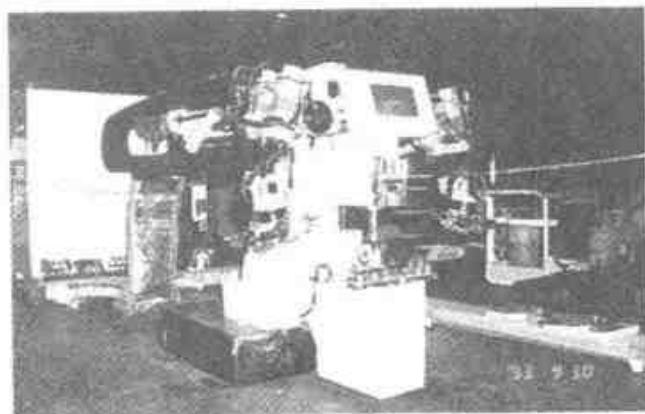


图 9.15 双臂机器人的外貌

## 标准装配机器人

### 暂停

要求所开发的机器人是一种能够胜任难度装配和两手装配、能够具有多类型装配的柔性和高速作业性的标准装配机器人。

同时,为减小装配生产线的占地面积,要求机器人占地面积较小,动作范围较宽,要求发生故障或暂停(工件或零件被卡住或者装配失误,可以在短时间内修复的设备停止)时能够确保最小停机时间下的视觉识别性、可接近性、易维护性和安全性等。

## 双臂机器人模型

### ● 开发的机器人的特征

**可以两手作业的双臂机械手结构** 起初,在传统使用的标准装配机器人的基础上发展起来的双臂机器人模型如图 9.16(a)所示。对该机器人手臂的动作范围和操作性等方面的研究表明,这种机械手存在着两臂相互之间限制了彼此的动作和不能确保足够的动作范围等弊端。

因此,绘出了接近于人类形态的双臂机器人形象草图[图 9.16(b)],重新确认了机器人手臂的结构,并绘制了基本设计图。该机器人所满足的全部项目如下:

- 两臂彼此之间的动作不受限制。

- ② 有足够的两手作业范围。
- ③ 两臂之间的相互干涉最小。
- ④ 不需要为了回避干涉而编制复杂的软件。
- ⑤ 作业人员可以接近作业点。
- ⑥ 暂停维护时安全、容易。

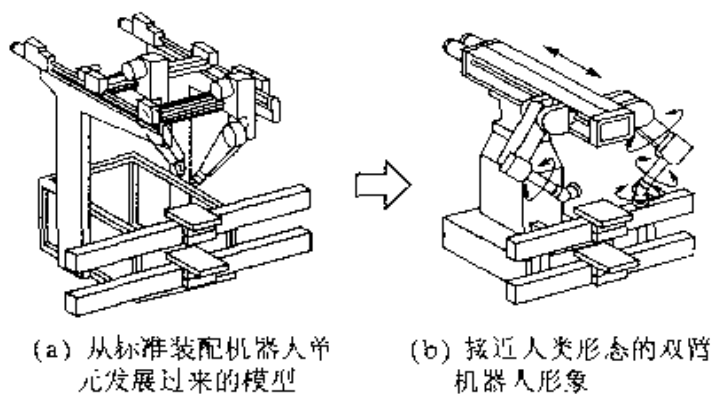


图 9.16 双臂机械手

**可以进行多种零部件装配的宽阔动作范围** 对于单轴移动、5轴旋转型机械手进行6轴同时控制时,可以确定3维空间的任意位置和姿势。

另外,偏心型手爪轴的动作范围宽,不必更换手爪就可以装配多种零部件。

**可以缩短装配生产线的狭小机器人宽度** 由于沿袭了传统的单元自动装配的概念,图9.16(b)所示的双臂机器人的动作范围如图9.17所示。

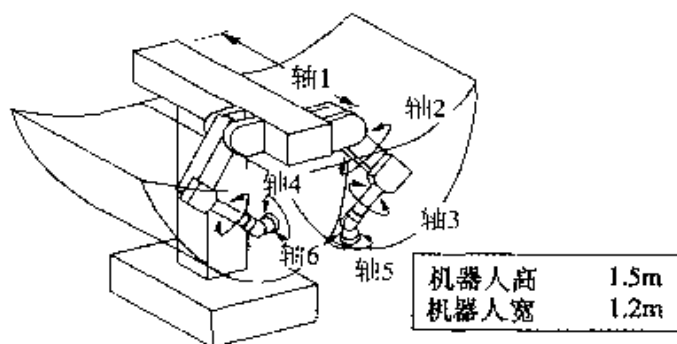


图 9.17 机器人的动作范围

- ⑦ 从机器人后侧供给零部件。

② 在机器人前方装配与搬送。

③ 多个机器人并列构成装配生产线时不会使人产生紧张感,具有能够缩短生产线又与人类尺寸相近的机器人尺寸。

**停机时间最小的人机对话接口** 机器人自动运行中发生报警或暂停时,与直角坐标系机器人相比,多关节机器人恢复运行所需的时间仍然是一个有待解决的课题。由于机器人的双臂结构,原点恢复时间和再起动机时间都有所增加。

因此,开发了作业人员不需要使用示教盒,而只用操作盘上的按钮使系统恢复的功能。

① **继续执行装配程序的功能** 为了使机器人在零部件装配位置附近的停止位置不发生干涉,恢复时使其自动返回到目标轨迹上的最近插补点。

② **装配路径逆行的返回功能** 若机器人在零部件装配位置附近的停止位置无人工干涉时,则自动沿装配路径返回到目标轨迹的最近插补点。

由于具备上述功能,使故障修复时间控制到约 1.2min,与直角坐标系机器人的故障修复时间相当。

③ **配备高性能操作盘** 由于设备采用了高技术,所以它给异常情况的原因检查和处理操作带来困难。为了解决这个问题,配备了高性能的操作盘,这种操作盘具备异常情况发生前后的信息保存与操作指导功能。

可编程序控制器、机器人控制器、图像处理控制器等各种控制装置与丰田汽车行驶中采用的 ME-NET 通信系统联络可以进行实时处理。

**机器人仿真系统的应用** 机器人的结构设计、应用设计和示教作业的各个步骤中应用了仿真系统,可以收到缩短设计审核时间、早期复核机器人周边设备设计等效果。应用这种机器人仿真系统可以使现场调试工时比常规方法减少 30%,因此设备的交付使用时间可以大大缩短。

### ● 差动器中差动齿轮装配举例

在实际装配前,需要确认盘齿轮、垫圈、小齿轮、球面垫圈和小齿轮轴等 9 个零件有无差错和欠缺。机器人可在 42s 内完成上述确认。图 9.18 所示为装配顺序。

这种装配工作的要求如下:

① 小齿轮和球面垫圈 2 组必须用两只手同时装配。

② 小齿轮和球面垫圈 2 组公转运动,在差动器机壳中装配时应防止球面垫圈错位。

## ME-NET 通信

小齿轮  
球面垫圈  
差动器机壳



③ 将小齿轮轴装入差动器机壳、2组小齿轮和球面垫圈中。

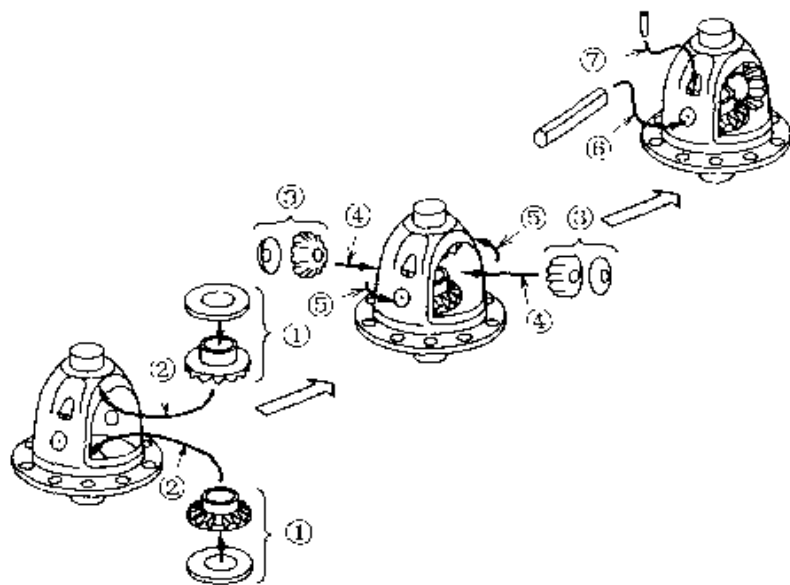


图 9.18 差动斜齿轮装配例

### 应用基础 “生产线不应成为作业者的孤岛”与“人性自动化”

所谓“生产线不应成为作业者的孤岛”，是指应回避以下几点：

- ① 作业者之间相互隔离，不能相互沟通和帮助。
- ② 需要作业者的工作分配发生变动时，作业者不能适应这种变动。

基于这种考虑，在引入自动化生产线时，应采用使作业者尽可能集中的车间布置。

另外，使自动机械区域与作业者活动区域分离，有助于提高工作效率和确保安全生产。

但是，对于上述自动化生产线来说，当发生异常情况或故障时必须能够自动停止。在丰田汽车公司，这种自动化称为“人性自动化”。一旦发生异常情况则自动机械会立即停止运行。同时报警器（异常显示器）报警，以便提醒作业人员。这样一来，缩短停止后的恢复时间就更为重要了。

## 5 机电一体化教育系统

### 要 点

机电一体化以机械、电子、计算机、信息技术为基础。要想学习这些技术,集“机电一体化技术”之大成,需要经过长期深入的研究过程。有些人在实际接触机器人之前,学习上遇到了挫折就停顿下来,而只停留在学习知识阶段。这种半途而废的情况是不可取的。

在应用机电一体化技术时,重要的是把这一技术灵活运用到产品和生产技术中去。无论哪一种情况,都要通过具体的机器开发和系统构建来培养自己掌握机电一体化技术的能力。本节将以机器人的实践为例,介绍运用生产设备教育系统、通过实践进行学习的方法。

### 解 释

#### ● 机电一体化教育系统的构成

由小型机器人和图像检查装置构成的机电一体化教育系统如图 9.19 所示,控制线连接方法如图 9.20 所示,系统的动作方框图显示于图 9.21。系统各部分的功能如下:

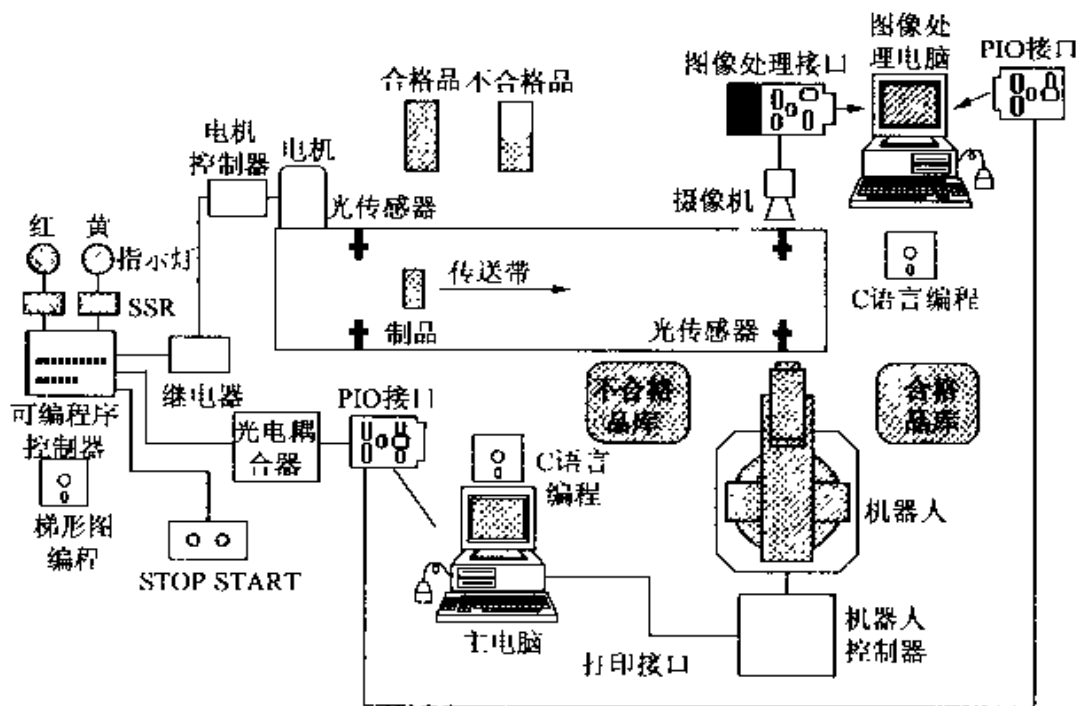


图 9.19 机电一体化教育系统的构成

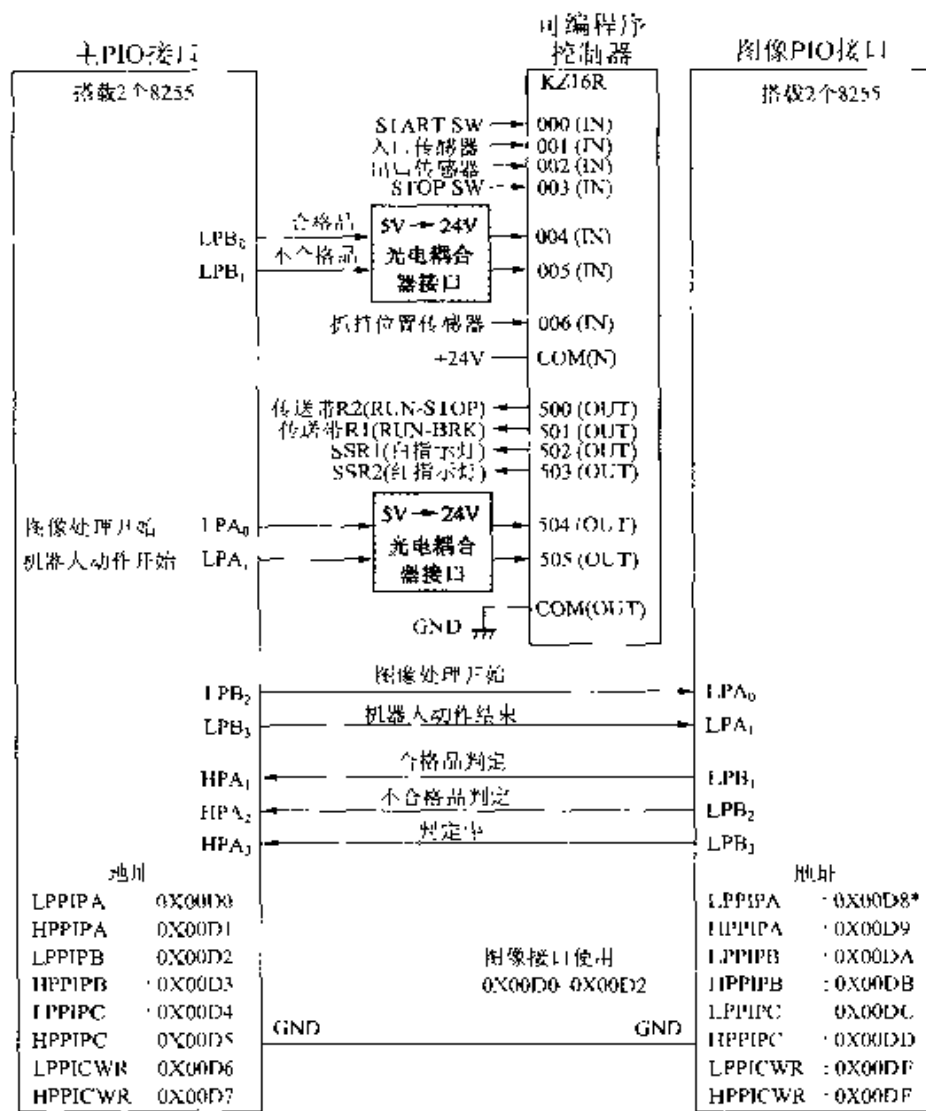


图 9.20 控制线连接图

- ① 主电脑 统一控制机器人、图像和传送带的各个控制器。
- ② 机器人 接受图像处理的检查结果,进行工作的分类处理。
- ③ 传送带 把前道工序送来的工件输送到检查部位。最好在途中设置加工设备。
- ④ 图像处理 检查工件是否合格。
- ⑤ 可编程序控制器(PLC) 传送带等周边机器的固定程序控制,以其它设备的控制器与动作确认信号的处理。

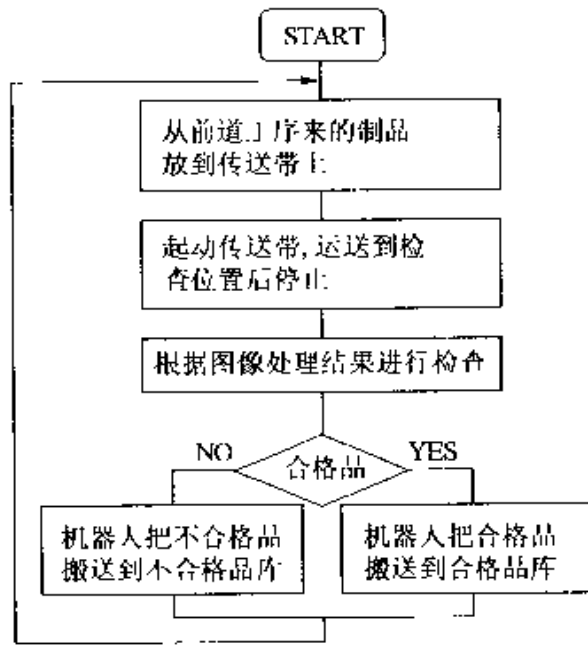


图 9.21 系统的动作框图

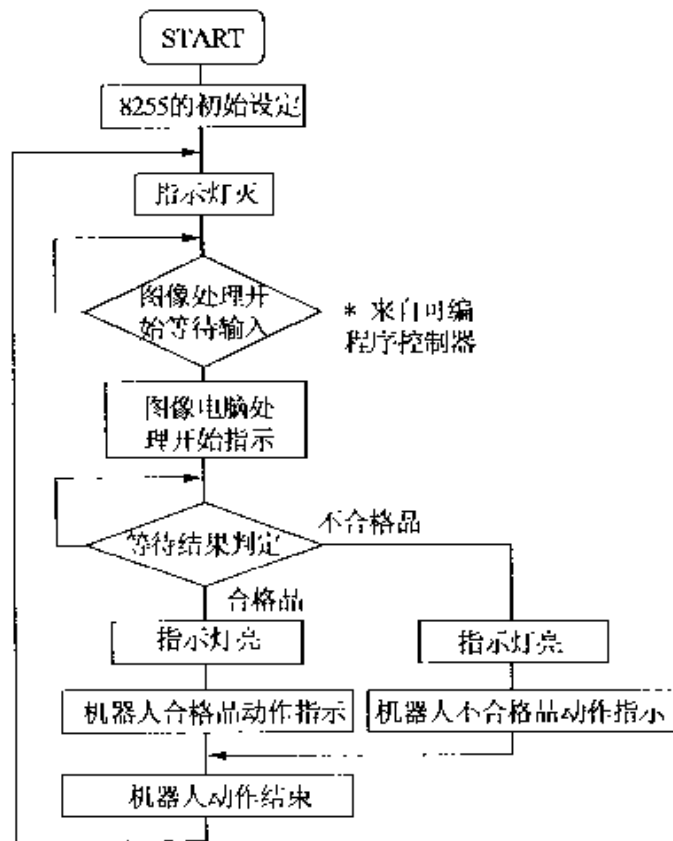


图 9.22 主控制电脑的程序流程图

综合控制系统  
传送带控制系统  
图像处理控制  
系统  
机器人控制系统

### ● 模块化功能

把构成系统的设备按功能进行模块化处理,则系统将变得容易理解。这个教育系统大体上可分为综合控制系统、传送带控制系统、图像处理控制系统和机器人控制系统等四大部分。每个模块的动作框图如图 9.22~9.24 所示。

### ● 必要的技术与学习目标

让这个系统实际运行所需要的技术和学习这些技术所应达到的水平如表 9.5 所示。

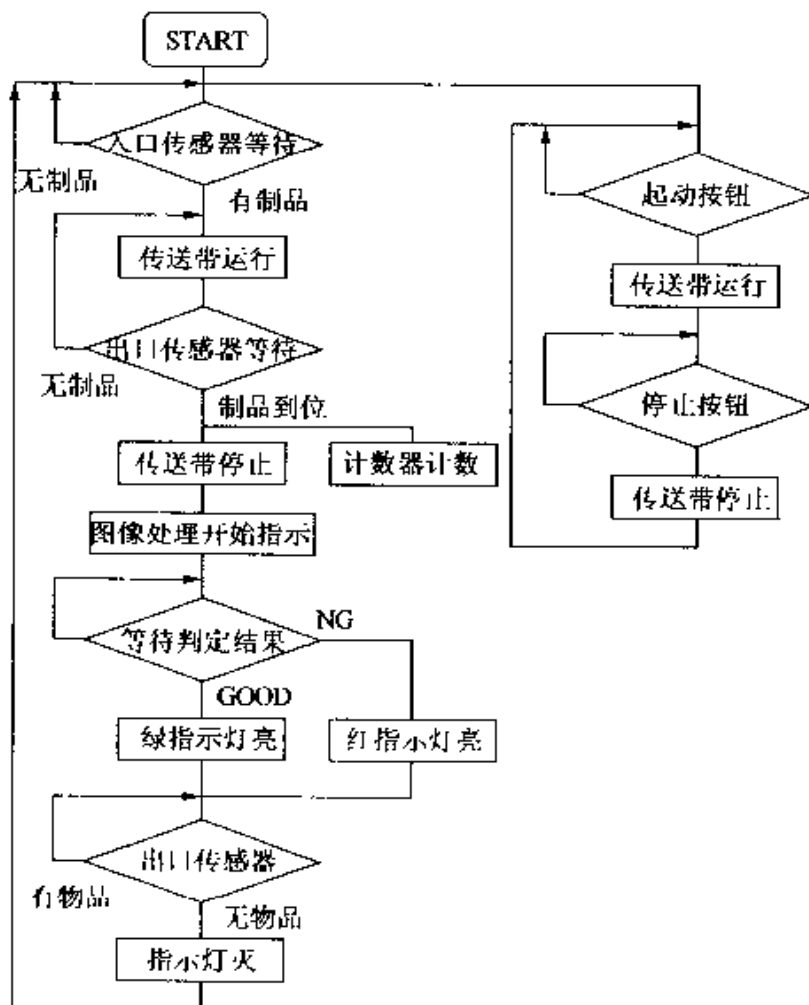


图 9.23 顺序控制流程图

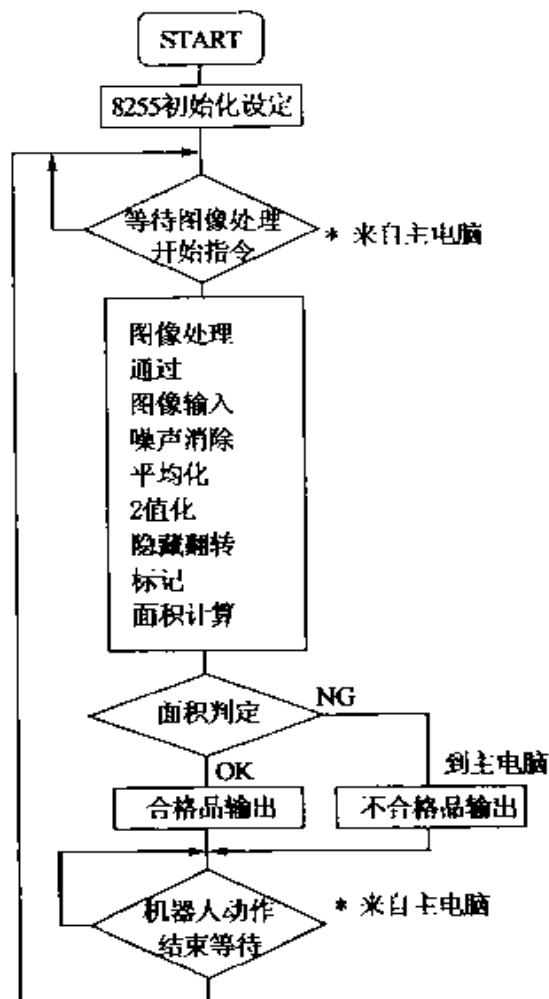


图 9.24 电脑图像处理的程序流程图

表 9.5 机电一体化系统中所需要的技术

所需技术	必要性	学习目标
C语言编程	从通用性的角度来看,可用于多种控制器的控制	基于数字输入输出的外部设备的控制。因文件的输入输出而引起的外部数据的保存和记录处理
数字信号的输入输出	机器人控制器、图像处理装置、可编程序控制器的动作控制、系统运行	个人电脑、PLC、各种控制器与PID接口的连接、能进行输入输出的编程

续表 9.5

所需技术	必要性	学习目标
可编程序控制器编程	搬运装置、专用自动机械控制、与其它控制器定时信号的输入输出	能把传感器与其它控制器连接到 PLC 的输入输出部分、能用梯形图方式或程序方式的编程工具来编制控制程序
传感器应用技术	工件的有无、指定位置停止、异常情况监视、尺寸测量、品种判别等均需使用传感器	具有所需功能的传感器选择及其与控制器的连接
机器人技术	对于生产设备自动化所用机器,要经常想到使用机器人	工业机器人的功能与性能、机器人的动作与处理功能设计、有关安全管理
周边设备应用技术	只有加工机械或机器人还不构成自动化设备,对于搬运、排列、洗别等系统的主机来说,必须设置必要的周边设备	传送带等搬运装置,批量送料器等排列供给装置,完成与控制器的连接
接口技术	从传感器等部件到装有计算机的高性能控制器,需要进行电气上的和软件上的无矛盾连接	从电阻、二极管、三极管、数字 IC 芯片等基本元件的功能来理解 RS232C 等接口的通信方法,能正确连接与编程
文件编制	构成机电一体化系统的设备涉及到很多制造商,又要有很多开发人员 除需要日常工作手册以外,还需要有维修保养手册和改良变更指南以及必要的图样和明细单	有关电路和程序等即使开发者以外的人读起来也能容易理解并迅速进行修改,设备和零件的安排要配备整齐、做到查阅方便

## □ 相关知识 ● 二值化处理与灰度处理

图元素

阈值

二值化处理

灰度处理

二值化处理与灰度处理就是使用图像处理装置,抽出物体的特征来进行判断和处理。在灰度图像处理时用摄像机输入的物体图像用  $512 \times 512$  个点(图元素)的集合来表现。当使用 8bit 存储器时,每一个点可以表示 0(黑)~255(白)级灰度。为了减少数据处理的信息量,采用了以某一个值(阈值)为界限,把图像数据划分为 0(黑)或 255(白)两类的方法,即二值化处理。这样,虽然数据处理速度提高了,但对象物的细微特征也将被忽视,可能会影响判断的正确率。为此,又采用了利用 0 与 255 的中间数据(灰度)进行灰度处理的方法。

## ■ 应用基础

### 可编程序控制器的输入输出电路

可编程序控制器(PLC)的输入电路举例如图 9.25 所示。PLC 的输入电路采用光电耦合器与外部电路隔离,可以根据连接的设备来选择电源极性。图 9.26 中用一个继电器输出电路的例子来说明在 PLC 内部的继电器触点开闭的情况。

### 切割空气时间的最小化

由机器人来移送工件时,需要对机器人进行工件处理地点与目标方位的最短路径示教。以机器人不抓持工件时的速度作为最高速度。机器人只切割空气(air cut)而作无用动作时对“生产时间”无贡献。正因为机器人不停地工作,所以即使每次的无用动作时间极短,累积无用时间也会很长。最短路径示教可以使机器人的无用动作时间达到最小。

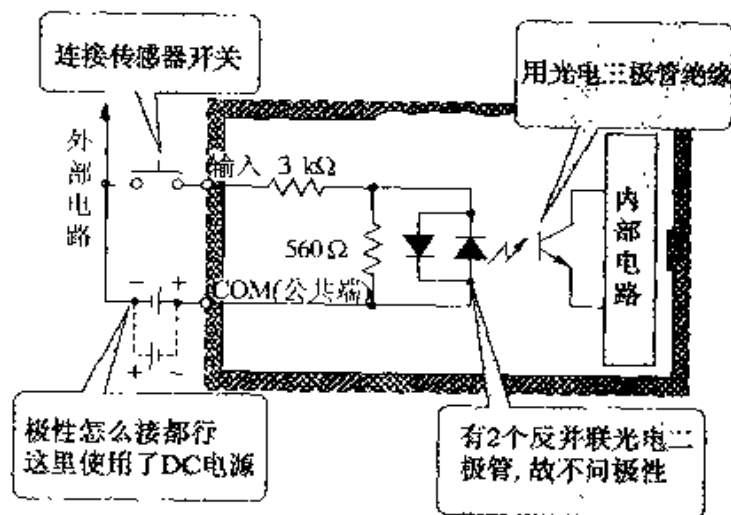


图 9.25 可编程序控制器的输入电路



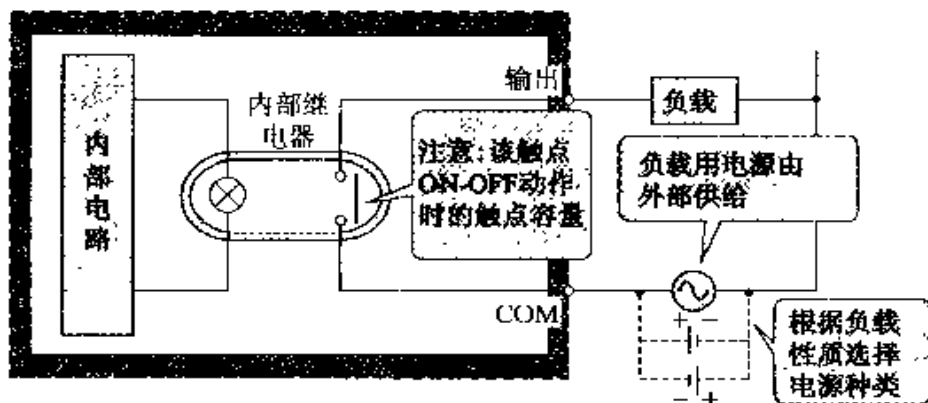


图 9.26 可编程序控制器的输出电路(以继电器输出为例)

## 应用知识

在 C 语言中, 一个字节数据输入和输出时, 使用 `inp()` 和 `outp()` 语句。采用 8255, 从 PA 口输入的数据原封不变地由 PB、PC 口输出时的 C 语言程序例如下:

```
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#define PA 0x00d0 /* PA 口地址 */
#define PB 0x00d2 /* PB 口地址 */
#define PC 0x00d4 /* PC 口地址 */
#define CWR 0x00d6 /* 控制字寄存器 */
#define SETIO 0x90 /* PA;in, PB,PC:out */
main()
{
    unsigned int data;
    outp(CWR,SETIO); /* 8255 ini set */
    data=inp(PA); /* 从 PA 口输入 */
    outp(PB,data); /* PB 口输出 */
    outp(PC,data); /* PC 口输出 */
}
```

## 6 基于视觉传感器的产品检验

### □ 要 点

人类利用从眼睛获得的信息,可以瞬间判断物体的形状、颜色、大小、重量、冷热、感触、粗糙度等。各种工业用传感器能够出色地检测各种事物和现象,而人类视觉的综合判断能力则远远优于任何传感器。但是,由目视来进行检验很容易引起疲劳,因此迫切需要实现检验自动化。

近年来,计算机的高速化和图像处理用LSI的应用,使得能以更快的速度处理来自CCD摄像机的信息,这一技术已经能够代替人的眼睛,并开始应用于产品的检验。同时,在智能机器人和自律机器人视觉方面的应用也正在进行深入的研究。

### □ 解 释 ● 视觉传感器的基本构成

图9.27所示为视觉传感器的基本构成。视觉传感器把摄像机摄入的图像变换成数字信号并存储在图像存储器中,对存储的数字图像信号进行各种运算处理,向周边设备输出比较结果和判断信号以及对象物的特殊数据。

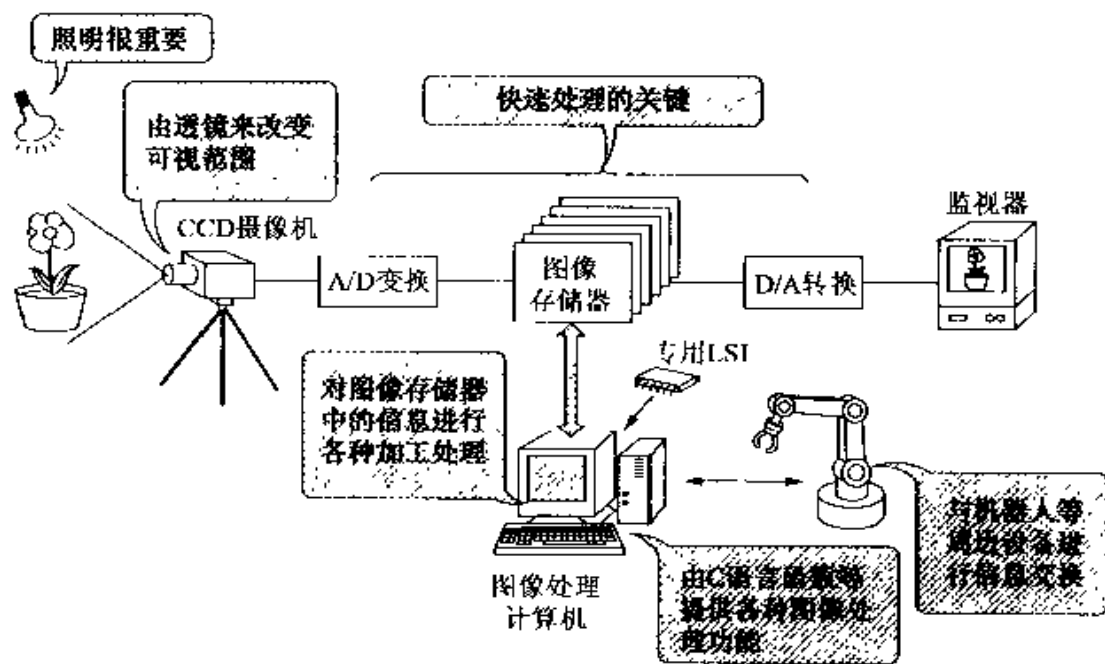


图 9.27 视觉传感器的基本构成

机器人和自动化装置从视觉传感器获得信息进行选择动作和

位置修正。可以通过变换不同倍率的透镜来改变视觉传感器的可视范围。

### ● 基于视觉传感器的检验装置的结构

图 9.28 所示为一个检查瓶子商标是否污损、折曲和有无异类瓶混入等项目的检验装置的结构。使用的视觉传感器为插件型，安装在电脑的扩展插槽上。与专用视觉传感装置相比，该视觉传感器的处理速度较慢，但基本处理功能不变。

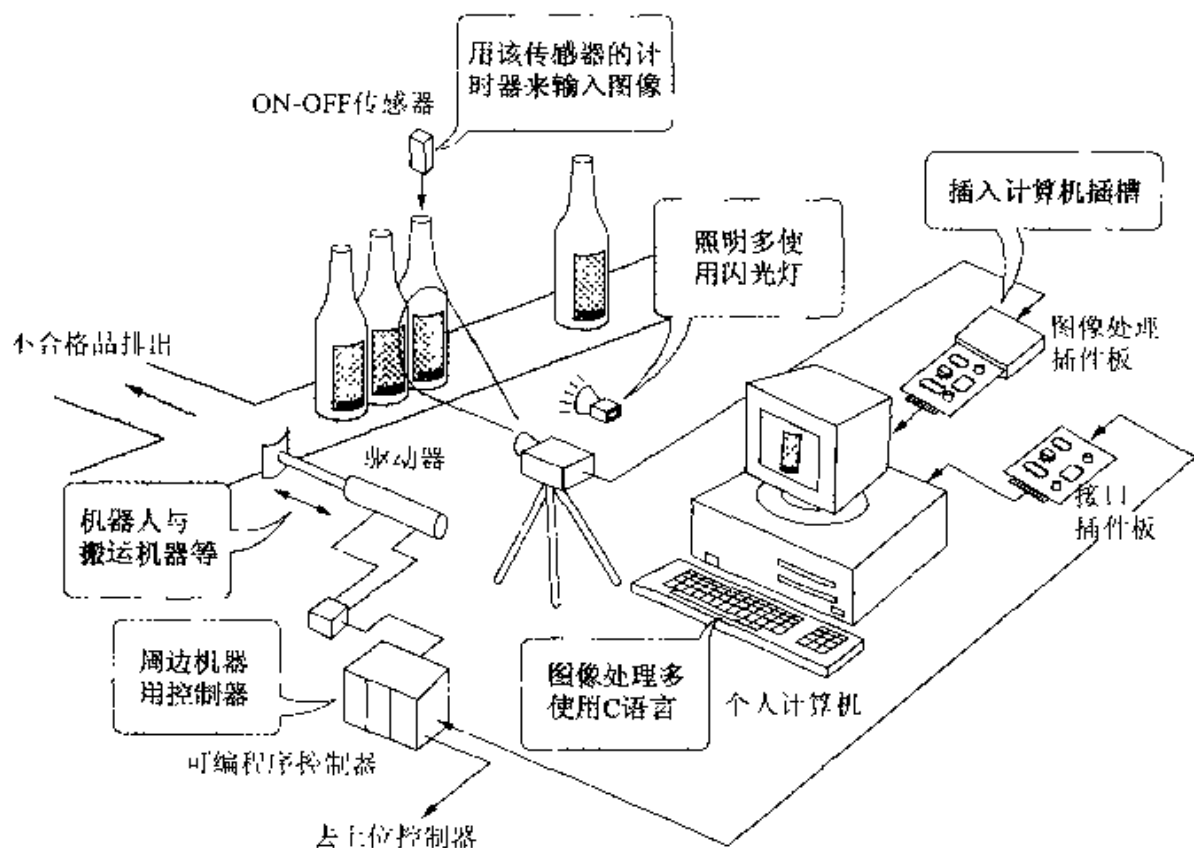


图 9.28 使用视觉传感器的检验装置

将该传感器引入检验装置，经过试运行证明是非常合适的。然而，人类可以简单判断的事情，使用传感器来代替时也只能做到人类的一成左右。

为了进行复杂的判断，需要进行各种复杂的图像处理。这些程序处理时间累积起来，有时会超过工程上所要求的时限，从而不能得到判断输出。

产品的损伤、变形、杂物的混入、颜色一致性、不均匀性、花纹等信息难以全部用摄像机获取，要想使这种检验适应综合性判断

照明

的要求,仍然是今后需要进一步研究的技术课题。特别是照明问题,是决定视觉传感器能否适用的一个重要因素,实际应用之前需要经过充分的试验验证。

● 视觉传感器的信息量

灰度为 256 级

视觉传感器的基本原理是把摄像机看到的对象物图像变换成数字信号并存储到图像存储器中,对这些数字信号进行分析处理并提取所需的信息,这就是视觉传感器的图像处理功能。在灰度为 256 级时,一帧图像为纵 512×横 512 个图元素,每个图元素需要 CCD 器件的 1 个字节,因此,图像存储器中存储的信息量为  $512 \times 512 \times 1$  字节(8bit) :  $1024 = 256\text{K}$  字节。对于彩色图像,每个图

CCD 器件

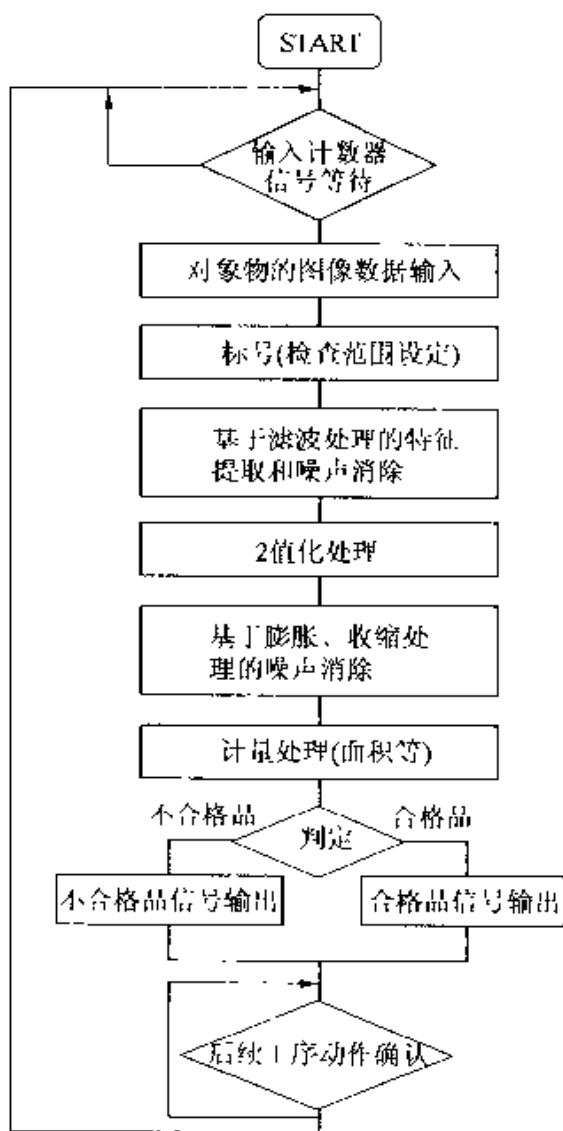


图 9.29 检查时的信号处理流程

表 9.6 有代表性的图像处理功能

输入、存储处理	
图像输入	把摄像机摄入的图像信息写入存储器
图像显示	把图像存储器的数据用监视器输出
掩蔽	把摄像机输入的图像限定范围并写入存储器
保存	把图像存储器数据输出到其它存储器或外存储器
读出	从其它存储器或外存储器读出数据并写到图像存储器
图像数据处理	
翻转	将输入的图像数据作黑白翻转
2 值化处理	把从 0(黑)到 255(白)的具有 256 级灰度的各图元素数据以某值(阈值)为界限,分离成 0 和 255。这是图像处理中最基本的处理,由于 2 值化使处理的信息量减少,提高了处理速度
各种滤波器	为了从图像数据提取对象物的特征,需要实施滤波处理,滤波处理具有使图像鲜明化和消除噪声的作用。除 Roberts、ABS、Median(中值)、Laplacian Smoothing(平滑)等滤波器外,还有很多种滤波方案,滤波器的选择及其组合方式应视处理对象的不同而不同
边缘提取	边缘提取的目的与滤波相同,是为了识别对象物的形状,而对其边缘特征进行的处理 有 Sobel、Roberts、微分处理、Laplacian、Prewitt 等多种方法
画面间的运算	在两个图像数据之间进行 AND、OR、XOR、ADD、SUB 等运算
膨胀、收缩	对 2 值图像数据进行相邻 4 个方向或 8 个方向的膨胀、收缩处理,以消除噪声
计量处理	
距离计量	计量指定 2 点间的图元素数(距离)
形状计量	面积、周长、重心、倾斜度等的计量
浓度测量	测量指定位置或纵、横 1 线上的浓度

分辨率

元素中 RGB(红、绿、蓝)3 种原色光各需要 1 个字节,使每帧图像的信息量增大 3 倍。在微妙的色调判断时,每个图元素颜色的对比分辨率(灰度等级)也需要大大提高,因此需要更大的存储量。

DSP

由于这些存储器中的信息需要进行运算处理并输出有关对象物的判断处理结果,因此运算处理的有关算法和 CPU 以及存储器的速度是非常重要的。为了提高处理速度,采用了 DSP 等快速数字信号处理硬件。

### ● 视觉传感器的信号处理功能

作对象物的检查判断时,为了提取必要的特征,对存储器中的图像信息进行的有代表性的处理工作如表 9.6 所示。

利用这些图像处理功能以及产品的面积值和重心等信息,判别产品是否合格的一个检查例子的处理流程如图 9.29 所示。

## 应用基础 图像处理装置的按价格分类

按价格对图像处理装置进行分类时,大致可分为表 9.7 所示的 3 类。更重要的是不应拘泥价格的限制而选择满足设计目的的产品。考虑到图像处理装置在实现多功能和高性能的同时,价格却在逐年降低,因此在使用上将更加广泛、灵活。

表 9.7 图像处理装置的价格与特征

价格(日元)	特 征
30~200	利用电脑扩展插槽的插件板型和限定检查功能的单功能型 插件板型面向学习用、研究用和试行用。单功能型则适用于限定了检查项目、处理速度又较慢的场合
200~700	这一类属于图像处理专用机型,是面向工程实际应用的处理装置。为检查项目提供各种处理功能,有多种型号可供选择,构成了视觉传感器。由于使用了专用硬件等,判断速度提高,判断速度可达 1s 以下。这类装置大多采用菜单形式使操作简单化
700~	这一类为通用型图像处理装置,面向研究、开发、测量等方向的应用。为图像处理提供所需要的各种处理功能,使用者可以用来构成自己的处理方法。使用了工作站等级的计算机

## 应用知识 基于视觉传感器的机器人的位置补偿

使用机器人进行零部件处理或装配作业时,一般情况下,零部件和被装配件的位置由机器人手爪的夹具位置来决定。

但是在实际工作中,当一条生产线用来生产多种产品时,即使产生少许的偏差,也会使工件与夹具的对应发生困难。

为了解决这一问题,根据视觉传感器摄录下来的图像,需要从零部件放置的位置和倾斜度等信息入手,对机器人当初的示教位置进行位置补偿。

视觉传感器就是机器人的眼睛,如果能研制出不需要示教的智能机器人,那么机器人活跃领域将大幅度拓宽。

## 7 三指机器人手爪的结构与控制

### 要 点

在实现机电一体化或机器人化时,常常需要对应考虑人类的动作,在人类作业中频繁进行的“抓持物体的作业(手工处理作业)”不可回避地要实现自动化和智能化。

具有人类手指功能的三指机器人的手指采用了滑轮-钢丝动力传递方式,由手爪机构和手爪控制系统构成。

### 解 释

直流伺服电机

#### ● 手爪机构

三指机器人手爪由形状和构造完全相同的3根手指构成,每根手指上有3个关节。各关节均采用直流伺服电机驱动,指尖的位置可以在上下、前后、左右的三维空间内移动。图9.30所示为这种机器人手爪的外观,其规格如表9.8所示。



图 9.30 三指机器人手爪的外观

动力传递机构

各关节的驱动器由装有测速发电机的直流伺服电机(额定功率13.6W,额定转矩22kgf·cm)和谐波传动齿轮构成。

使用电机作为手爪的驱动器时,在各关节处不能确保用来设置电机的足够空间。由于这种空间上的制约,一般把电机固定在绝对坐标系或手臂上,用驱动系统的中间媒体(钢丝等)来传递动力。目前这种结构已成为三指机器人手爪机构的主流。图9.30所示的三指机器人手爪,从电机到各关节的动力传递就是采用了这种钢丝结构。



蛇形管-钢丝绳  
动力传递方式  
滑轮-钢丝绳动  
力传递方式  
滞后作用的非  
线性特性

目前,从驱动器到各关节用钢丝绳传递动力的方法主要有两种,一种是蛇形管-钢丝绳动力传递方式,另一种是滑轮-钢丝绳动力传递方式。前者在动力传递路径上有较大自由度,传递机构简单,但是由于传递系统滞后作用的非线性特性等原因,系统动作的稳定性方面尚存在问题。后者的传递方式比较复杂,但考虑到控制系统的特性改善,这种方式是有利的。从对控制系统有利这一点来考虑,这里采用了滑轮-钢丝绳动力传递方式。

表 9.8 三指机器人手爪的规格

项 目	滑轮-钢丝绳动力传递方式机器人的手爪
指数	3 指
关节数	3 关节/指 × 3 指 = 9 关节
性能	关节角度、刚性等可以变化
驱动	用直流伺服电机驱动各指关节
控制	可以用手动控制或计算机控制
传感器	电位器(各关节):9 个 力矩传感器(各关节):9 个 测速发电机(各电机):9 个
控制装置	电机信号处理电路,测速发电机、电位器信号处理电路,力矩传感器放大电路,电源电路
主计算机	个人电脑(PC-H98s MODEL8)
接口板	A/D 扩展板:3 块 D/A 扩展板:1 块 (分解能力 12bit、16ch)
电机控制	直流伺服电机控制器:9 台

钢丝绳折返机构

**钢丝绳折返机构** 滑轮-钢丝绳动力传递方式的缺点是其动力传递机构比较复杂。因此,为了传递 3 维的钢丝绳折返动力,有必要对钢丝绳折返机构等问题加以讨论。钢丝绳折返机构可以考虑采用很多种方法,为了减小钢丝绳的摩擦损耗,这里设计出采用滑轮的方案。

图 9.31 所示为钢丝绳处理的折返机构。在这种机构中,让驱动中间关节或指尖关节的钢丝绳通过根部关节,在驱动根部关节的滑轮和同轴安装的中间关节滑轮上折返,然后由小滑轮折返 90°,并向各自关节传递动力。依靠这种机构,可以实现 3 维的动

力传递。

**电机配置** 电机的配置如图 9.32 所示。为了使手爪小型化,手指的中心轴方向与电机中心轴方向取同一方向,电机配置在手指的外部。因此 1 根手指上所需的 3 台电机可以全部配置在手指的下部,这样 1 根手指就可以构成 1 个单元。这样做的优点在于,当安装配置发生变化时,不用说使用 2 根手指的情况,即使追加手指单元,增加到 4 根手指以上的情况也可以实现。

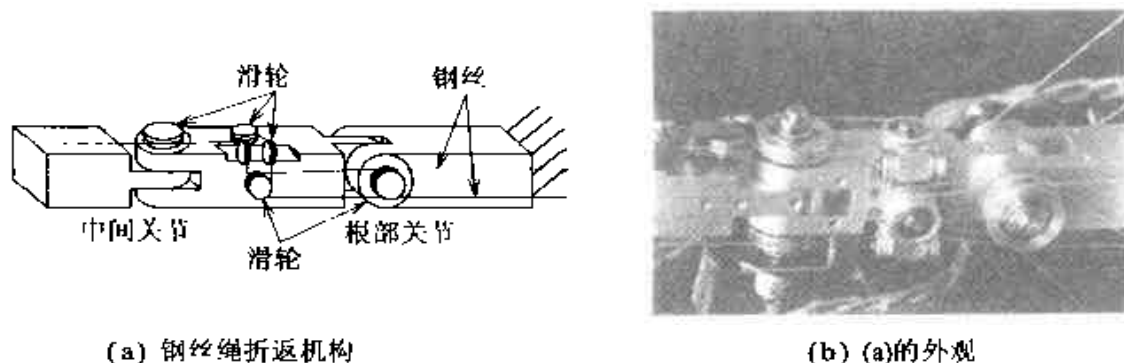


图 9.31 钢丝绳的处理

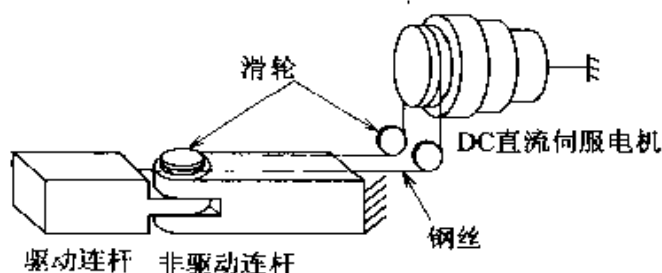


图 9.32 电机的配置

### ● 手指控制系统

手动控制方式  
计算机控制方式

三指机器人的手指特征与人的手指一样,各关节的角度及其刚性两个方面是可变的。通过切换设在每个手指上的操作开关,可以采用手动控制(manual)方式或计算机控制方式来进行手指的位置控制。图 9.33 为控制系统的简要原理图。

电位器  
力矩传感器

各关节上设置了位置检测用的电位器和力矩检测用的力矩传感器,分别用来检测关节角度和电机的力矩。考虑到因滑轮旋转而产生的噪声和摩擦等因素,力矩传感器一般设置在非驱动侧的连杆上,如图 9.34 所示。

图 9.35 所示为控制系统的方框图。关节角的目标值  $\theta_i$  与关

## 关节的响应

节角的实际值  $\theta$  相比较, 比较的偏差值乘以预先确定的关节刚度  $K$ , 就可以求得目标关节力矩  $\Delta\tau$ 。由于  $\Delta\tau$  作为关节力矩的目标值, 这样系统变成了通过改变关节角来控制关节力矩的关系, 即控制关节的响应。由于使用计算机 (CPU: Inter 80186 + 浮动小数点运算可编程传感器 80187) 进行目标关节转矩的计算, 因此关节响应控制可以通过软件来实现。

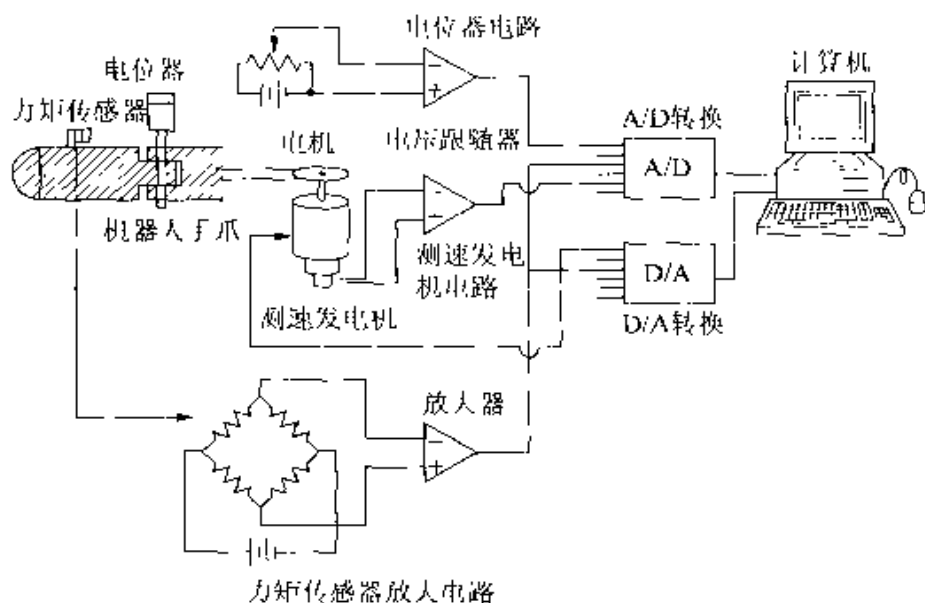


图 9.33 控制系统的简要原理图

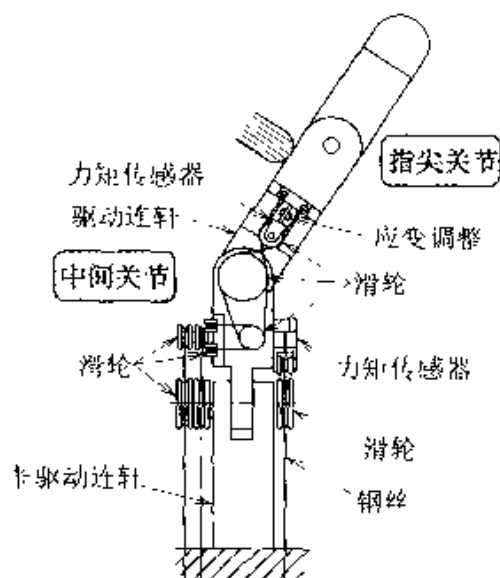


图 9.34 力矩传感器的设置

假想弹簧  
稳定抓持

下面简单介绍系统的工作情况。首先,当给一个手指的指尖加力时电位器信号和力矩传感器信号随着指尖力的变化而相应地发生变化。用计算机处理这些信号,把运算处理结果送至电机控制器,控制手指向“躲避力的方向”移动。这样一来,给人的感觉是关节好像变得柔软了。

在抓持对象物时,手指上好像设置了假想弹簧。用多手指抓持对象物时,借助各指关节的假想弹簧的弹性,可以做到多指的稳定抓持。

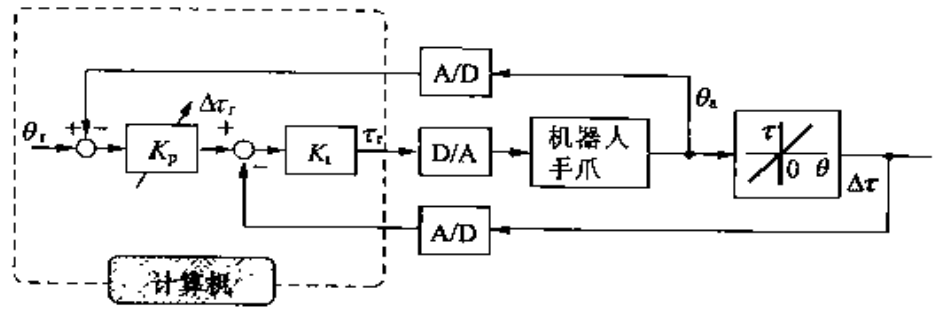


图 9.35 关节控制系统方框图

由于采用了上面所述的控制方法,即使是需要用很微小的力的变化来抓持物体时,也完全可以做到稳定抓持(图 9.36)。

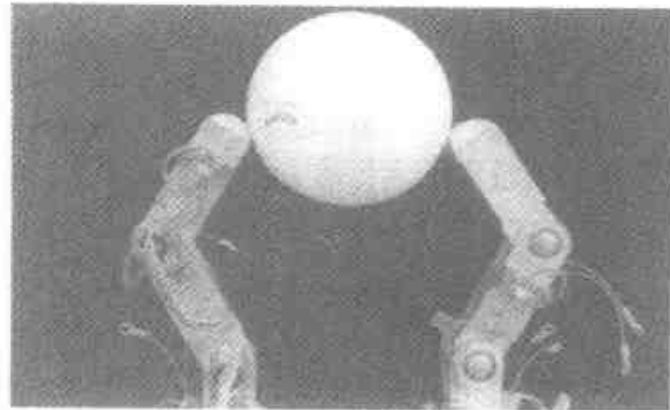


图 9.36 二指的稳定抓持

## 8 CD唱机的机电一体化技术

### 要点

CD唱机把激光盘(Compact Disc)上用螺旋状排列的沟槽(信息轨迹)记录的信息信号,用激光以非接触方式读取再现。为此,应用了聚焦伺服装置、跟踪伺服装置、主轴伺服装置等机电一体化技术。

### 解释 ● CD唱机的总体构成

CD唱机的总体构成如图9.37所示,主要由以下三部分构成:

#### 信息读取部分

CD盘旋转时,由于CD盘的倾斜和弯曲,会发生信息信号面的振动和由于旋转中心的偏移导致的信息轨迹沿半径方向上的摆动。为了不至于扰乱激光束在CD信息信号面上的聚焦,并进一步跟踪信息轨迹,需要控制光拾音器的驱动器,以光学的非接触方式读取信息信号。

#### 信号处理部分

控制主轴电机的转速,使信息信号的读取保持一定的速度,与此同时,把读取的信息信号解调,送至D/A转换器并输出音频信号。

聚焦  
跟踪  
光拾音器  
驱动器  
主轴电机

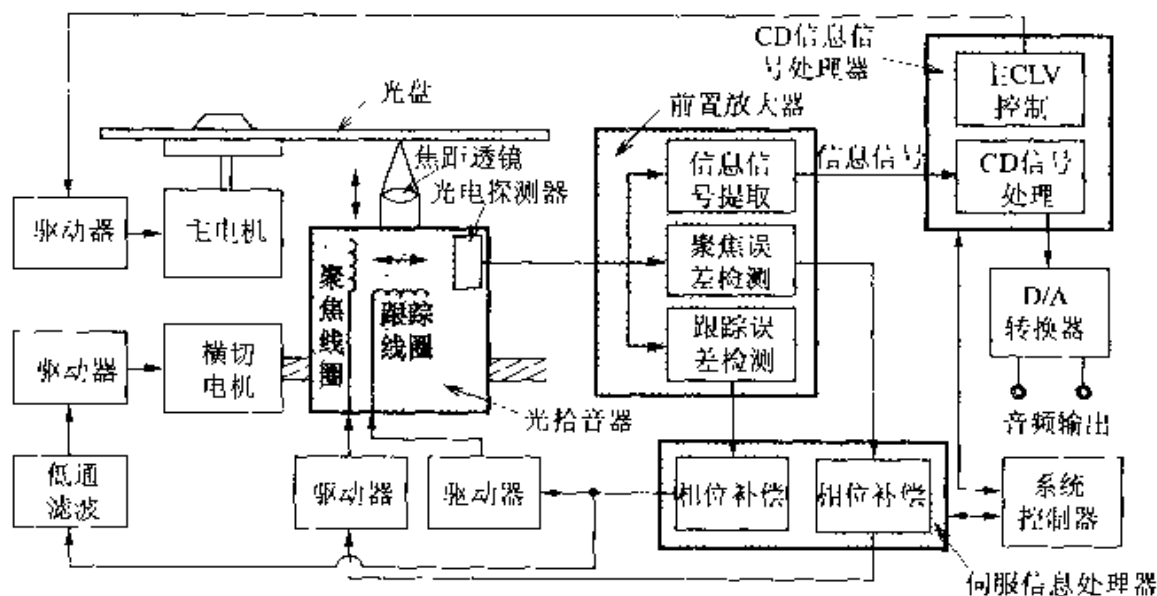


图 9.37 CD唱机的总体构成

### 系统控制部分

采用键盘输入,对 CD 唱机的开机、暂停、曲目选取等进行总体控制和显示。

### ● 聚焦伺服

在 CD 上,用信号面上沟槽内的凸部的有无及其长度来记录信息。凸部的大小为宽度约  $0.5\mu\text{m}$ 、长度约  $0.8\sim 3.6\mu\text{m}$ 。若光拾音器的光束点小于相应的焦点,则信息信号就不能读取。因此在设计时,焦点深度应控制在大约  $\pm 2\mu\text{m}$ 。另一方面,考虑到 CD 盘的弯曲和旋转机构的精度等原因,CD 盘的表面振动最大值约为  $0.8\text{mm}$ 。

#### 聚焦误差检测

从光拾音器投射到 CD 上的光束经 CD 信息信号面反射后,重新返回透镜。这时,如果光束的焦点位于反射面的后方,反射光如图 9.38(a)所示的那样是发散的;如果光束的焦点位于反射面的前方,则反射光如图 9.38(c)所示的那样是收敛的。利用这个差别可以用光学原理来检测聚焦误差。

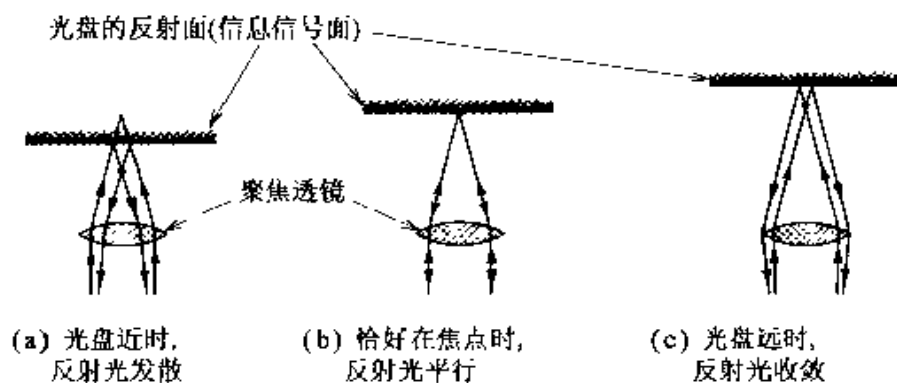


图 9.38 光盘的反射光

### 光电探测器

下面介绍一种有代表性的聚焦误差检测方法,如图 9.39 所示。把检测反射光的光电探测器分割成 4 份,在光电探测器的前面设置集光透镜与半圆透镜。当平行光入射时,光电探测器上的光束影像为圆形,聚焦误差为零[图 9.39(b)]。除此之外,还可以检测出对应于扩散光[图 9.39(a)]或收敛光[图 9.39(c)]时的聚焦误差。

**聚焦(跟踪)驱动器** 光拾音器内装有聚焦驱动器,驱动器驱动焦距透镜向焦点方向移动,使光束焦点能够跟踪 CD 的表面振动。4 钢丝驱动器如图 9.40 所示。在由磁铁和磁轭构成的磁路中,配置了载有焦距透镜的线轴,焦距透镜用 4 根钢丝支持。当线

轴上卷绕的线圈中有电流流过时,透镜则相应移动。该驱动器的特征如图 9.41 所示。可以看出,在焦距透镜方向与跟踪方向的移动可以同时进行。

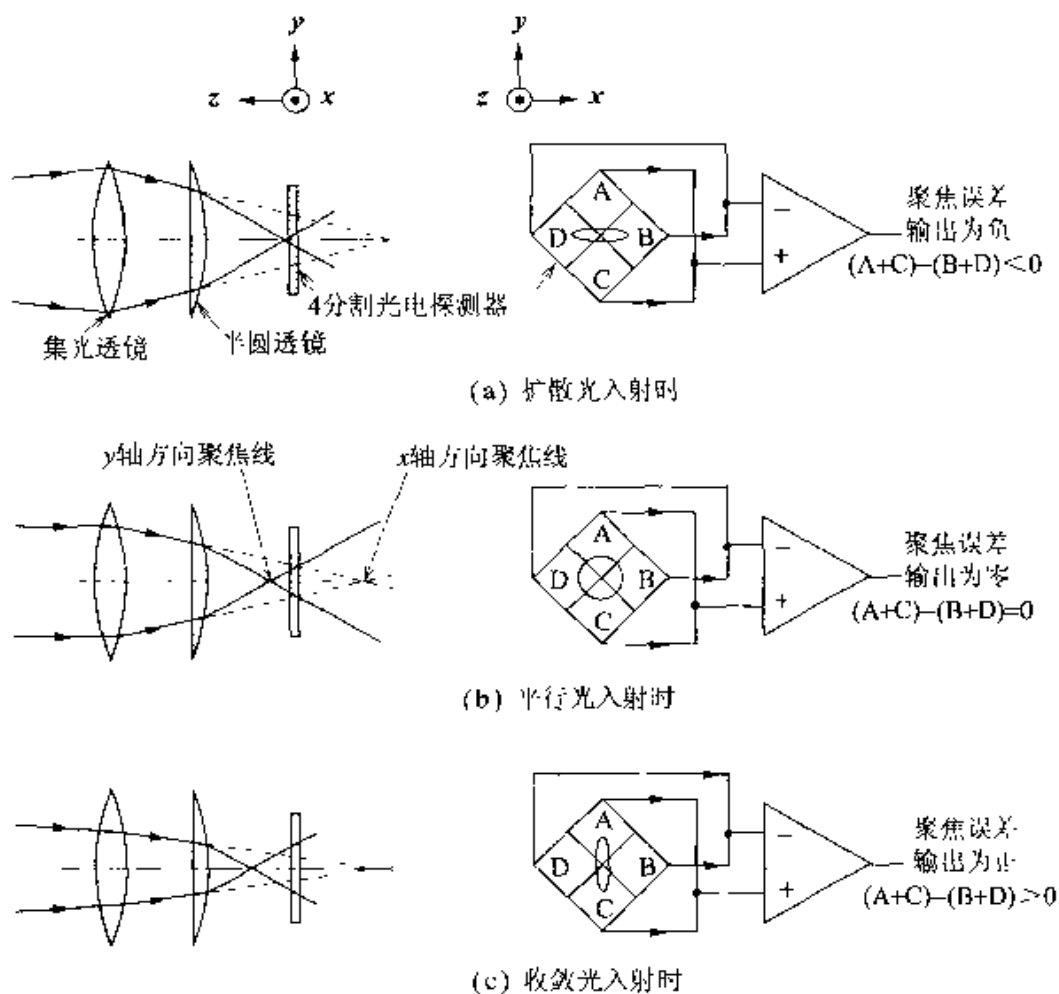


图 9.39 聚焦误差检测的非点收差法

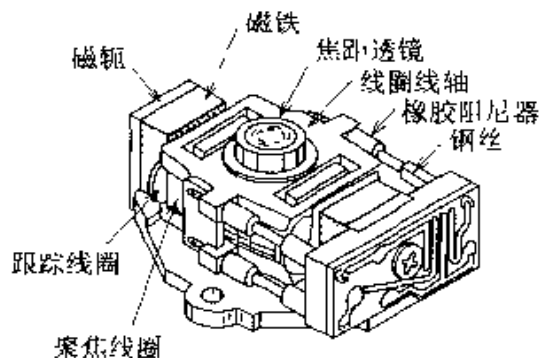


图 9.40 1 钢丝驱动器

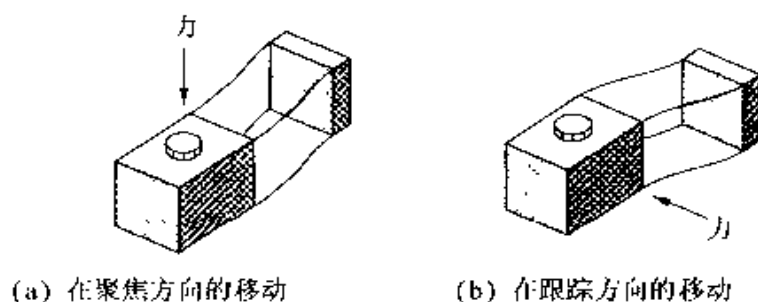


图 9.41 4 钢丝驱动器的动作原理

闭环控制系统  
相位补偿  
增益交点

**聚焦伺服环路的相位补偿与增益** 聚焦伺服环路(图 9.42)是一个实时处理的闭环控制系统。聚焦伺服驱动器可以看作一个 2 阶延迟环节,设置了相位补偿,以确保增益交点频率的相位裕量。

如前面所述,对于 CD 盘约 0.8mm 的表面振动,需要跟踪  $\pm 2\mu\text{m}$  的焦点深度,因此环路增益  $G$  为

$$G \approx 0.8[\text{mm}] / 2[\mu\text{m}] = 400[\text{倍}] \approx 52[\text{dB}]$$

限度

可以通过调节放大器的增益  $A$  来调节环路增益。实际上,环路增益的设定有一定限度,一般大多设定在约 60dB。

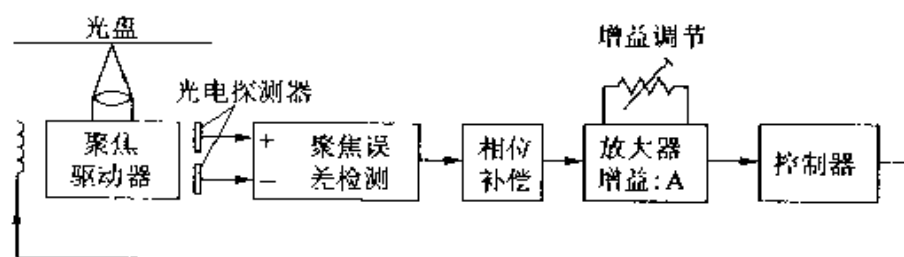


图 9.42 聚焦伺服环路的方框图

跟踪驱动器

**跟踪伺服** CD 信号面上的沟槽以螺旋状配置构成了信息轨迹。螺旋的螺距约为  $1.6\mu\text{m}$ ,信息轨迹(沟槽)的宽约为  $0.5\mu\text{m}$ ,光束点的直径约为  $1.0\mu\text{m}$ ,必须把跟踪误差控制在约  $\pm 0.2\mu\text{m}$  以内。然而,由于 CD 的偏心或主轴机构机械上的误差等原因,CD 的信号面将在轨迹方向发生最大约为  $\pm 140\mu\text{m}$  的摆动。如果把直径 12cm 的 CD 盘比作是直径 120m 的棒球场的话,就相当于要求正确地描绘出 0.5mm 的活心铅笔的铅芯以上 140cm 的振幅摆动的信息轨迹。为此设置了跟踪伺服装置。利用光盘的反射光检测出跟踪误差,使跟踪驱动器相应移动,从而使光束点能够跟踪信息轨迹。



### ● 横切伺服

由于信息轨迹为螺旋状,在再现时间内读取数据时是从内圈向外圈方向前进的。但是,由于跟踪驱动器的可动范围仅为 $\pm 0.8\text{mm}$ ,因此设置了使光拾音器整体在光盘半径方向上移动的横切机构。跟踪伺服和横切伺服各自分担了快速响应和大范围移动这两种伺服功能。

横切机构

### ● 主轴伺服

LP唱片是在角速度一定(CAV; Constant Angular Velocity)即转速一定的情况下来记录的。然而,对于CD来说,由于记录密度的提高,光盘是以线速度(CLV; Constant Linear Velocity)一定的情况下旋转、记录的。与用CAV记录时相比,得到约2倍的记录时间。因此可以用从CD读取的信息信号量来控制主轴的旋转。另外,在其管理上,由于采用了石英振子时钟,再现的音频信号的声音波动(由旋转不均匀等原因引起的频率异常)可以抑制到很小的程度。

角速度一定

CAV

线速度一定

CLV

## ■ 研究课题

### 数字伺服

CD唱机的机电一体化部分目前已进入了数字伺服化阶段。用前置放大器检测出的各误差信号经A/D转换后,由数字信息处理器进行处理,然后通过控制器来驱动传动机构或电机。

由于采用数字伺服,实现了增益的自动调节,提高了光拾音器等部件的误差稳定性和对于时间的稳定性。同时,可以大量削减用于相位补偿和增益调节的电阻、电容等元件。

### CD唱机的高集成化

数字伺服化使CD唱机电路几乎可以全部实现数字化。目前,CD唱机的基本电路可以仅仅由1片超级LSI数字芯片、前置放大器IC和控制器IC等三片IC芯片构成。

# 9 清扫作业的机器人

## 要 点

### 点

清洁舒适的旅行环境是铁路经营者的服务项目之一,维持和提高清扫质量是一个重要课题。人们对于车辆和火车站内清扫工作的印象是3K,即“费力”、“污秽”、“危险”。目前,人手不足和老龄化问题已使清扫工作面临困境。

以提高清扫服务质量、改善清扫作业环境为目的,开发研制了车辆清扫机器人和地面清扫机器人。

## 解 释

### 释 ● 车辆清扫机器人

由JR东日本公司开发了铁路车辆用自行式车内地板清扫机器人。机器人内部装有列车各区段的清扫作业轨迹模型,机器人可以一边检测清扫区段,一边进行清扫。图9.43示出了这种机器人的外观。表9.9示出了机器人的规格。

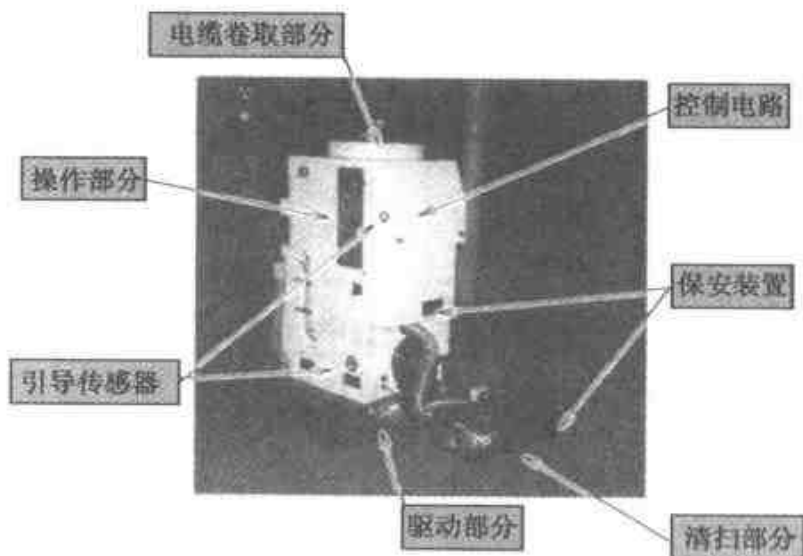


图 9.43 车内清扫机器人的外观

这种机器人采用了机电一体化技术,主要由以下七个部分构成(图9.44)。

[1] 控制部分 使用了16bit CPU,用来进行传感器信息输入、行走路径的运算、第一节车厢与中间车厢的判别、自律行走的引导控制、电缆卷取控制等。

距离传感器

[2] 引导传感器部分 引导传感器由测量机器人到车辆内壁

边界传感器  
操作面板  
操作开关

距离的距离传感器、识别被单和门的界限的边界传感器等构成。

④ 操作部分 由机器人运行方式设定、进行机器人运行状态监控的操作面板、手动行走时使用的操作开关等构成。

⑤ 清扫部分 由洗涤剂罐、污水桶、刷子、吸尘器、挤压器等构成。洗涤剂罐中有检测洗涤剂是否用完的传感器和控制洗涤剂滴下的驱动机构,还有检测污水桶是否注满的传感器。

⑥ 驱动部分 机器人具有左、右两个各自独立的驱动部分,分别由车轮、传动机构、电机以及控制器等构成。为了使机器人在未供给电源时也能移动,在传动机构与车轮之间装设了离合器。

⑦ 电缆卷取部分 使用电位器进行电缆卷筒位置检测和电缆张力检测。根据电缆的张力来控制直流伺服电机的转速,从而自动进行电源电缆的卷取或送出。

急停开关

障碍物传感器  
防止落下传感器  
接触检测防撞器  
报警装置

⑧ 保安装置 除设置了让机器人停止运行的手动急停开关之外,还设置了用于障碍物检测的障碍物传感器、防止机器人从车辆上掉下去的防止落下传感器、与障碍物接触时应立即停止的接触检测防撞器、发生异常情况时的报警装置等。

表 9.9 车内地板清扫机器人的主要规格

对应车型	通勤型电气列车(103 系列、201 系列、205 系列、209 系列)
清扫速度	3 段速度切换 · 高速:22m/min · 中速:20m/min · 低速:15m/min
清扫时间	15min 以内/每辆(中速时)
清扫种类	湿式清扫(洗涤剂喷撒、擦拭、挤干)
外形尺寸	520(W)×750(D)×1200(H)[mm]
重 量	90kg[干燥时]
电 源	AC110V,50/60Hz
行走部分	独立 2 轮 2 轴驱动
引导传感器	距离传感器、边缘传感器
保安装置	障碍物传感器、接触检测传感器
运行方式	自动清扫方式 手动清扫方式 行走方式

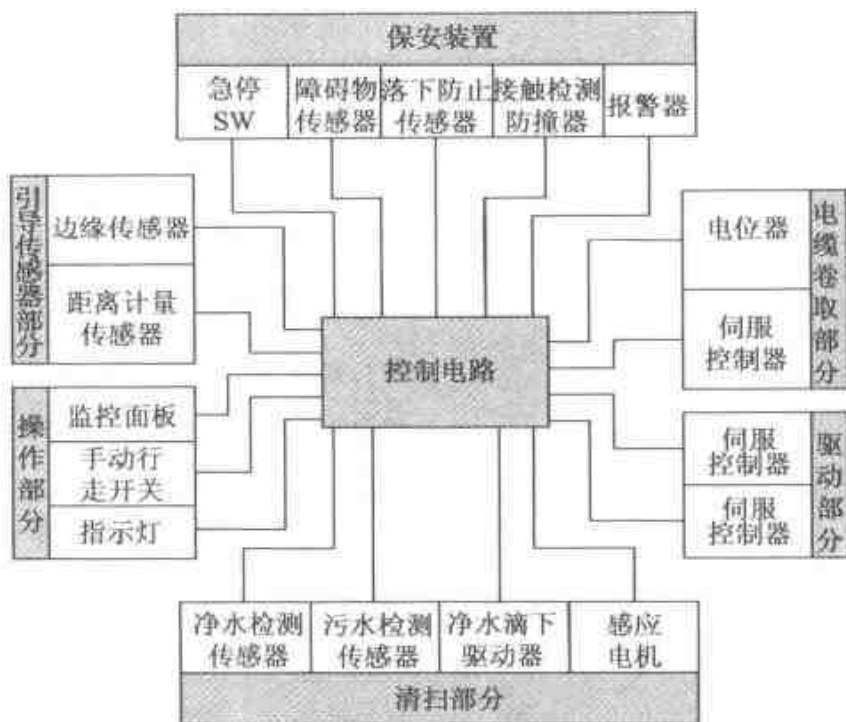


图 9.44 车内地板清扫机器人的系统构成

● 刷洗地面的清扫机器人

车站内的墙壁上和柱子的周围一般很少有污迹,但是由于灰尘的积存,中央部分地面上会经常残留污迹。

刷洗式清扫机器人主要用于地面中央部分的清扫。机器人在喷撒洗涤剂的同时,一边用旋转刷子刷洗地面,一边吸引回收污水。图 9.45 示出了这种清扫机器人的外观,表 9.10 示出了机器人的规格。



图 9.45 刷洗式地面清扫机器人

表 9.10 刷洗式机器人的规格

项 目		规 格
基本规格	长×宽×高	850mm×700mm×890mm (挤压部分宽 850mm)
	重量	210kgf*(机器人本体 175kgf*, 洗涤剂 35kgf*)
	电源	电池组 DC24V, 90Ah
清扫功能	清扫宽度	620mm
	清扫能力	1110m <sup>2</sup> /h(最大)
	水桶容量	35L (1 个水桶中, 净水和污水 2 室可变量)
	净水散水量	0~2L/min
自律行走	引导方式	采用光纤陀螺仪的自律行走方式
	行走速度	30m/min(最大)
	安全装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 旋律优美的音调</li> <li>• 行走指示灯</li> <li>• 非接触缓冲器</li> </ul> (光传感器和超声波传感器) <ul style="list-style-type: none"> <li>• 软防撞器</li> <li>• 急停按钮</li> </ul>

\* 1kgf=9.806 65N

在考虑行走控制时,采用了陀螺仪自动移动方式,使清扫机器人也能适应宽阔的站前广场的清扫需要。机器人自动清扫的方法具有以下两种模式:

① 区域设定模式 作业人员给机器人输入清扫区域的长度和宽度,使之在这个范围内清扫。

② 路线地图模式 机器人按地图规定的路线清扫。机器人的存储器内最多可以存储九个地图,此外还可以使用 IC 卡作为外部存储器。

## □ 相关知识 ● 自行式车内地板清扫机器人的路径控制方式

适用于自行式机器人的路径控制方式主要有:

① 检测沿所经路线预先设置的引导线来进行路径控制的方法。

② 按机器人内装有的作业范围地图和行走路径移动,移动误差根据外部传感器的检测信号加以补偿的方法。

③ 使用内部传感器在机器人内装的地图上识别位置,由外部传感器进行误差补偿的方法。

对于自行式车内地板清扫机器人,是以在铁路车辆这一特定场合下使用为前提。车厢内的清扫路径可以分为沿车厢壁、车门、拐弯部等区段,把行走路径的每一区段模型化,根据外部传感器的信息对各模型进行组合控制。这种控制方式的优点是不需要按每种车辆型式内装庞大的地图信息,只要内装基本的模型信息以及若干数值数据信息,就可以适应各种型式的车辆。系统的误差修正由外部传感器来完成。

另外,火车站用的地面清扫机器人采用内装地图,由内部传感器进行位置识别的常规控制方法。但是这种控制方法有其不足之处,即只能有特定的作业范围。因此,为了适应每次不同的作业范围,采用了以下控制方式:作业者指定作业范围的纵横长度,并依此作成围棋盘状的地图,机器人依靠内部传感器从端线开始行走,并依次填涂棋盘地图上的“目”。因此也称这种控制方式为填涂棋盘目方式。

### ● 新干线车体清洗机器人

新干线的车体清洗主要在夜间进行,每次由六台机器人来完成。这种清洗机器人为新开发的8轴垂直多关节结构,配有专用的自行台车。

清洗时,由设置在机器人端部洗涤剂喷嘴以 $5\text{kgf}/\text{cm}^2$ 的压力喷撒洗涤剂,净水用泵加压到 $150\text{kgf}/\text{cm}^2$ ,由净水喷嘴喷出(图9.46)。

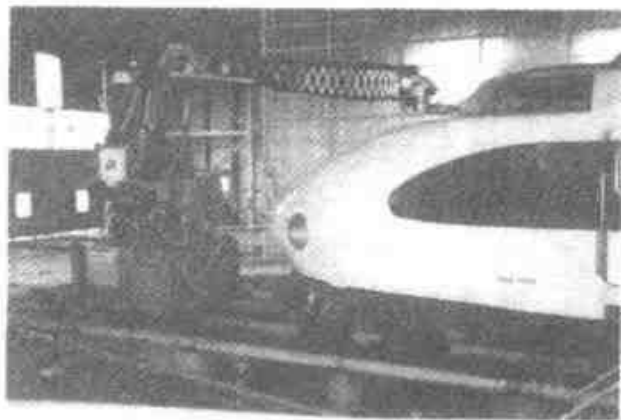


图 9.46 新干线车体清洗系统



## 第10章

# 应用实例 “机器人竞赛大会”

制造机器人和自动机需要机电一体化技术。

许多人从儿时起就喜爱机器人，盼望能有亲自制作的机会。现在，以高中生、专科生、大学生及社会各界人士为对象的机器人竞赛很多，全国各地都在举办各种机器人竞赛。本章将介绍8例由职业中专生、专科生和高等职业专科生参加的比赛实例。

如果您准备参加在本学校、本地区和工作单位举办的机器人比赛，一定非常关心全国同龄对手的情况，希望这些比赛实例能对读者有所帮助。

### ◆ 责任编辑

樱井 诚

中野信明

### ◆ 执 笔

森田克己(1)

丰田善敬(1)

小川阳康(2)

加藤吉郎(3)

芦野广巳(4)

小柳荣次(5)

松浦源太郎(6)

井端贤次(7)

中西佑二(8)

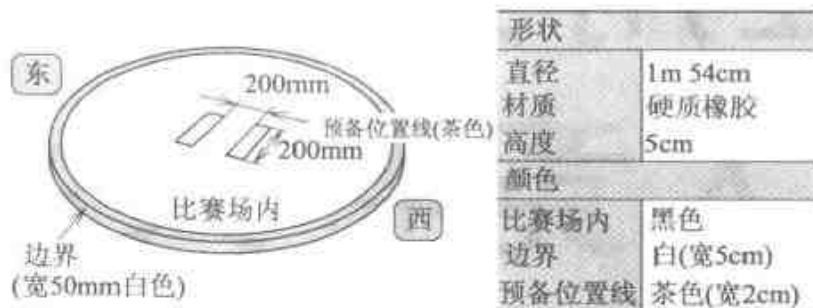


# 1 “相扑机器人”竞赛大会

## 竞赛内容

相扑机器人有智能型和遥控型两种类型。

比赛是在图 10.1 所规定的赛场中进行,规则是先将对方机器人推出赛场者为胜方(图 10.2 为比赛会场)。智能型和遥控型机器人均不得超出图 10.3 中规定的尺寸和重量。



在赛场的周围留有“余地”

图 10.1 相扑机器人比赛场简图



图 10.2 比赛场照片

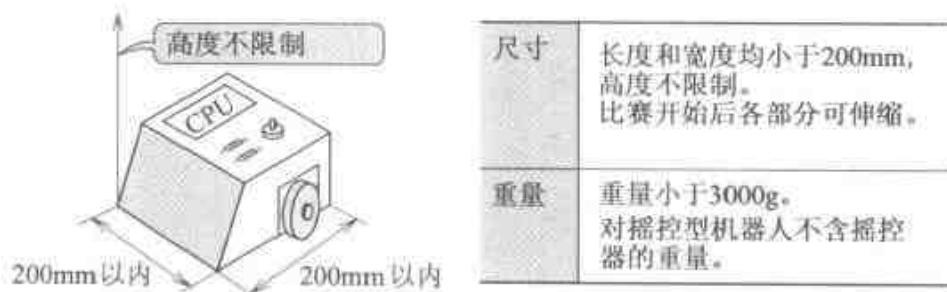


图 10.3 相扑机器人的规格

智能型机器人上装有计算机,其存储器中装入可根据赛场颜色、动作和应付对方机器人的动作程序。遥控型机器人则是由比赛者操纵遥控器控制机器人进行动作。

从预备摆架势动作信号起,5s后开始动作。无论哪种类型的机器人均以3min内的3个回合中2次领先者为胜。

## ■ 获胜的机器人

### ● 智能型相扑机器人的基本结构

智能型机器人的基本结构如图10.4所示,机器人的上部由单片机、程序存储器等电子元件组成,下部是驱动电机、电源等机构。

根据驱动电机的数量可分为2轮驱动和4轮驱动两种。由检测场地白线传感器反馈信息等来控制电机旋转方向使机器人运动。

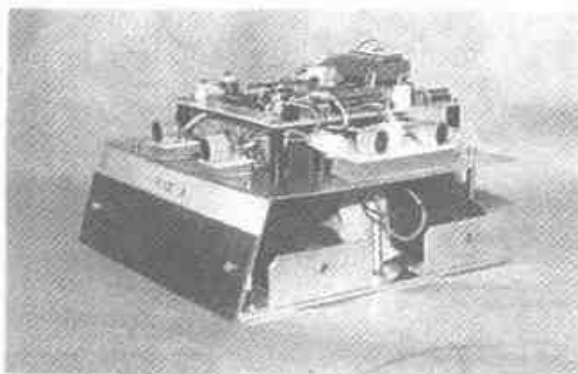


图 10.4 智能型相扑机器人

### ● 利用掌上电脑

许多职高学生购买掌上电脑来取代单片机作为控制计算机。由于受相扑机器人尺寸规定的限制,这时必须在掌上电脑的安装方法上下工夫,这里采用如图10.5所示的

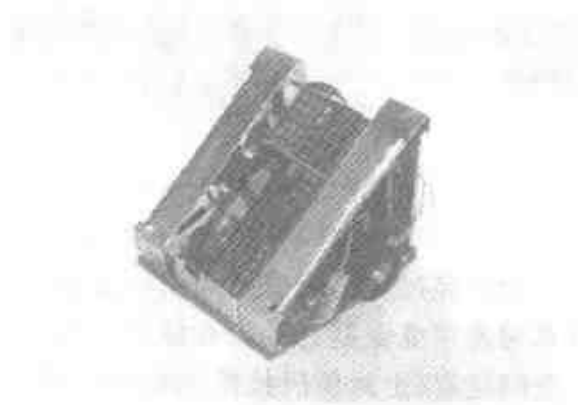


图 10.5 使用掌上电脑的智能型相扑机器人

倾斜安装方式。采用单片机控制必须使用机器语言编程,而采用掌上电脑控制用高级语言编程,具有很多的优点,比如可采用 BASIC 语言编制动作程序或用 C 语言编制比赛程序等。

### ● 遥控型相扑机器人

虽说遥控型机器人比赛时胜败的关键主要在于遥控器的操作性,但也不能忽视各种可削弱对手推力的方法。在图 10.6、10.7 中的机器人上设计了能削弱对手推力的可倒式托板。

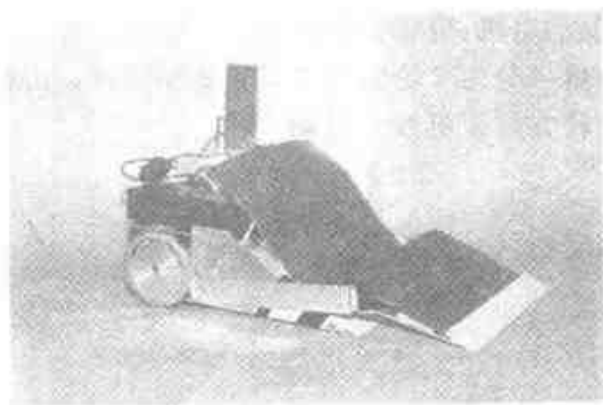


图 10.6 遥控型相扑机器人

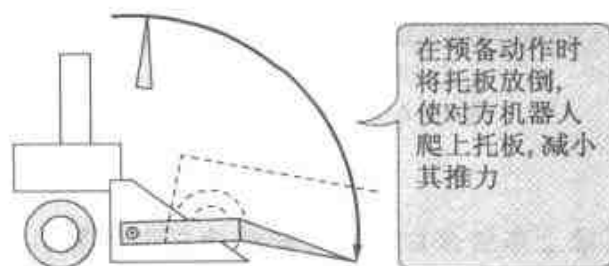


图 10.7 可倒式托板

## ■ 制作过程

### ● 课题研究的主题

在藏前工业中专,机械、电气、设备工业这三个专业的学生都将制作相扑机器人作为课题研究的主题,并且由学生自由选择制作智能型机器人或是遥控型机器人。

课题研究的目的是让学生经过自己的思考和努力去制作机器人,而制作相扑机器人就是适合课题研究型学习的主要课题之一。具体的目标是参加校内竞赛、东京市职业中专竞赛、地方竞赛、全国竞赛(由两国国技馆主办,汽车制造厂的员工、大学生、高职生、专科生、普通人等不得参加)。通过参加一年的比赛,学生要为实现每一阶段目标而努力,可收到激发其制作欲望的良好效果。

### ● 利用课后和暑假时间制作

“课题研究”时间为每周 2h, 单靠这点时间是很难完成的。因此, 主要是利用课后和暑假时间来制作, 为不断完善机器人而努力。机器人的方案是参考前几届全国竞赛的录像片、成绩好的学校资料, 由学生自己构思。目标是一人一台机器人, 但实际是分组制作的。

### ● 电器专业与机械专业的交流

具体制作时, 靠一、二年所学的知识远远不够, 还需学习与制作机器人有关的诸多知识。这就使得机械知识薄弱的电器专业与电气知识薄弱的机械专业的学生相互交流, 补充各自所缺少的知识。

表 10.1 为制作相扑机器人的年度计划。

表 10.1 制作相扑机器人的年度计划

学期	月	计划内容
I	4	查阅资料, 制定年计划
	5	制定方案, 设计、订购零件
	6	零件制作
	7	零件制作
	8	组装
II	9	调整, 参加关东地区大赛
	10	改进、调整, 参加市职业高中大会
	11	改进, 调整, 参加文化祭(校内大会)
	12	参加全日本相扑机器人东京大会
III	1	整理报告书, 校内发表

### ● 制作相扑机器人

参加相扑机器人竞赛, 与其它机器人的对抗, 是智慧和技术的较量。所以, 学生在课后和暑假期间主动到学校去制作强壮的机器人。通过竞赛, 增加了学生制作机器人的兴趣和积极性。

在相扑机器人的设计和制作上要借鉴成功的机器人。在赛场上看到的成功的机器人完善程度和可靠性都很高。仔细分析会发现其机械部分的精度和强度都很好, 能经受住对手的碰撞, 并且, 从电机到车轮的动力传递效率也很高。

智能型机器人因装有微机及各种传感器, 必须保证其在激烈的相互碰撞中能正常工作。还要格外注意电气线路不能出现断路和短路现象。遥控型机器人与智能型机器人相比, 零件数量少, 但电机、伺服机构、调速机构、车轮、电池的配置对胜负起很大作

用,所以要对其作合理配置。

在本校,机械专业的学生向电气专业的学习光传感器或超声波传感器控制电路的知识,电气专业的学生则向机械专业的学习如何使用各种机床加工高精度的底盘。当取得胜利时,学生的欢呼声至今仍留在脑海里。

## ■ 所应用的机电一体化技术

### ● 取胜的技术

相扑机器人取胜的先决条件:

① 离开摔跤场的白线不会发生控制程序的混乱。

② 与对手机器人对抗的驱动力足够大。

以上两点要同时具备。另外,最好能抓住对手的弱点,从侧面攻击。

### ● 基本电路图

智能型相扑机器人的基本回路如图 10.8 所示。

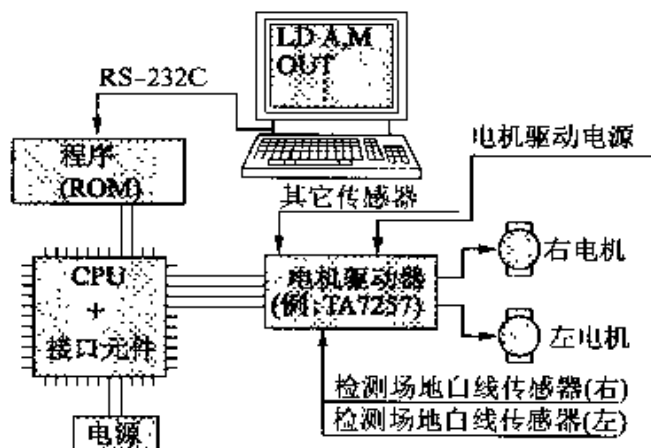


图 10.8 智能型相扑机器人的电路框图

### ● 传感器

场地白线传感器是用来探测场地上的白线,并反馈信号来控制电机反转的装置。在机器人前方配置两个传感器,按左、右或左右同时三种情况控制各自的电机反转,使机器人回到场地中央。其控制过程由机器人上装载的计算机程序来处理。

图 10.9 为一检测场地白线传感器的电路图。

### ● 驱动电机

驱动电机因受机器人重量不能大于 3kg 的限制,要选择适合于计算机控制的小型伺服电机或步进电机。2 轮驱动(前轮为钢制的球形轮)是在机器人的左右各配一个电机,为增大驱动力可采用 4 轮驱动。

将电机通过齿轮机构进行减速,从而获得所需要的机器人速度。机器人的推力与

速度的 2 次方成正比,但由于受探测场地白线传感器的限制,速度只能是 1m/s。

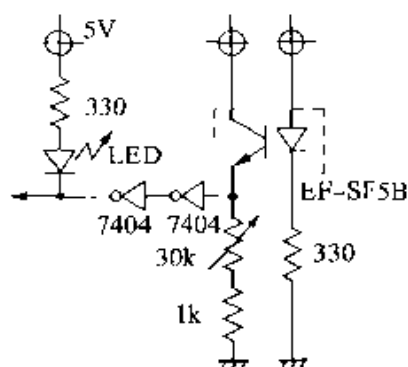


图 10.9 场地白线传感器的电路

### ● 减速机构

主要的减速机构有齿轮减速马达(即带有齿轮的电机)和采用大小圆锥齿轮的减速机构。使用齿轮减速马达时机器人的性能受到限制,但结构简单;而采用大小圆锥齿轮减速机构虽然轴承等零件的制作困难,但能得到理想的性能。

### ● 驱动放大器

电机驱动用放大器根据所用电机的规格选择。图 10.10 为驱动放大器(TA7257)的电机驱动电路。

利用 TA7257 很容易实现电机正反转控制,根据传感器的输入信号,通过信号组合还能使电机制动,是一种使用简单的相扑机器人电机驱动放大器。

### ● 车轮和托板

增大车轮与场地(橡胶制)地面间的摩擦力,可以增大驱动力,所以要正确选择车轮的材质。可以用市面所售的遥控车的车轮或在车削加工的车轮上粘上乒乓球拍用的橡胶等。另外,车轮表面的清洁度也会影响摩擦力,有效的方法是在比赛前用橡胶除尘器处理车轮表面。当两机器人正面遭遇时,如能从对手的下面插入就可削弱对手的驱动力。为此在机器人的正面安装了托板,材质为钢制电话卡等。

### ● 超声波传感器

使用超声波传感器的目的是准确捕捉到对手的位置,以便从其薄弱的侧面发动攻势。

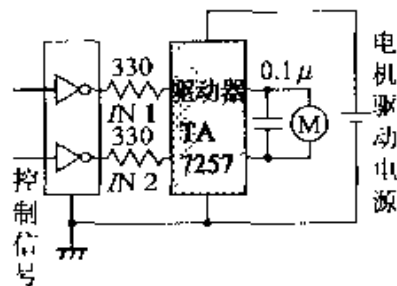


图 10.10 电机驱动电路

## 2 “轨迹机器人”竞赛大会

### ■ 竞赛内容

竞赛内容是机器人按地上(多为白色)贴着的黑色胶带走 8 字形线路的时间赛(图 10.11)。

竞赛规定:

① 竞赛规则 以 5min 行走的圈数计算。如完全脱离线路则视为偏离航线被淘汰。

② 制作规定 智能型,总长小于 400mm,宽度小于 250mm。微机和动力源不限。

③ 赛会简介 根据各校提出的各种方案,力求每年在技术上有所提高。以实地表演、比赛紧张、激烈为目的。

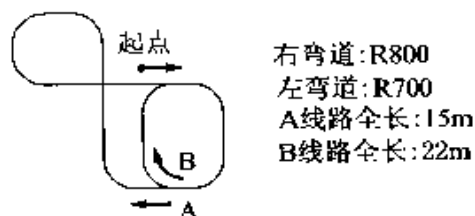


图 10.11 竞赛线路

### ■ 获胜的机器人

图 10.12~10.13 是狭山工业学校制作的机器人。

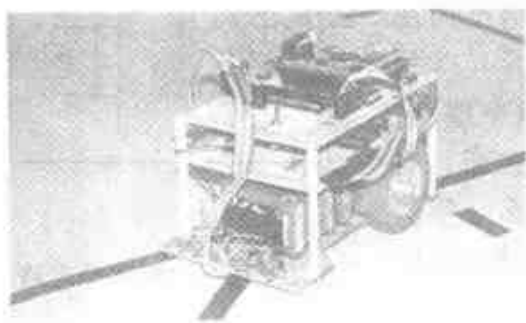


图 10.12 左右步进电机方式(转速差)  
(VCO 和简易计数器, B 线路优胜)



图 10.13 用步进电机和直齿轮控制  
(直流电机驱动行走: A 线路准优胜)

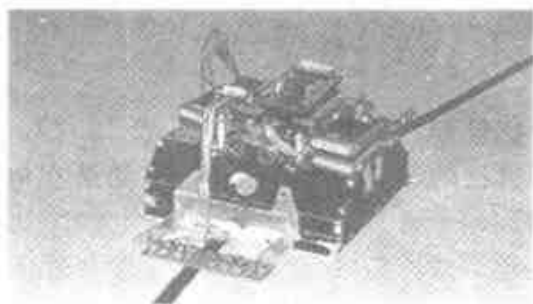


图 10.14 装有测线传感器的相扑机器人  
(左右直流电机采用 PWM 控制方式,  
A 线路第 3 名)

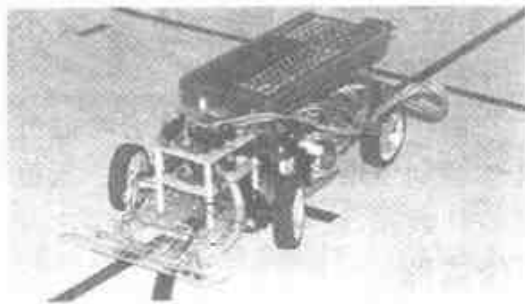


图 10.15 用摇控伺服机构控制转向  
(步进电机驱动行走,B 线路第 2 名)



图 10.16 用 CCD 摄像机导向  
(左右步进电机驱动行走)

## 制作过程

### ● 2~3 年完成

我们学校机器人的制作,无论哪种类型都是先将往届学生留下的机器人修改调整,进而改进,大约需要近 2~3 年的时间。一般为按队分工协作,也有自己独立完成的。

### ● 机械方面要重视可加工性

在机械方面,碳纤维增强塑料的加工是关键问题,考虑到强度可使用碳纤维强化玻璃或铝。轴承等零件的高精度可用数控机床加工。

### ● 电路的实用性和可靠性

制作黑线传感器、数模转换器、驱动器等电路时,参考原理相同的实例来试制实用而可靠的电路,需要反复试验,有时会花费很多时间。

### ● 独立编程

从使用屏蔽发光二极管闪亮移动开始练习编程,到基本行走的改进程序,将实践程序作为一个阶段性练习。这几年,能独立编制全部动作程序的学生倍受青睐,可以说已具备一定的开发能力。根据情况也有的学生使用以前的机身做热身练习。



## 所应用的机电一体化技术

### ● 综合研究

在制作机器人时,必须综合考虑机构、硬件、软件如何配置(图 10.17,表 10.2)。如果能够达到使用汇编语言的水平,就很容易发挥自己的特长。举一个例子,如果在电路中装有计数器,就可以使控制程序比以前短得多。

### ● 传感器

传感器是重要的元件,采用调制方式可以得到可靠的信号。狭山工业学校开发的 4 通道电路板使用了几年,但现在从市场上购买的 4 脚小 IC 芯片可得到同样的电路。为消除振动的影响,可采用软件对输入数据进行校验,经判断也能直行。高速行驶,也是将曲线分成切线方向的小盲线段移动,所以用一个传感器也能行走。实际上是根据线路曲线的情况和车的种类,在左右两侧各安装三个传感器,可有效地掌握曲率大小。

### ● 电机驱动

步进电机的最大弱点是高转速时很难得到所需的转矩。驱动电路有串联电阻方式、高压驱动方式及恒流斩波方式等。为了使性能提高,用存储式同步示波器来确认驱动脉冲,也可以使用在市场上购买的内置低耗场效应管的 IC。对于因电感负载而产生的噪声也要采取必要的措施。精确地控制直流电机加减速比较困难,但它在相扑型机器人中得以实现。



图 10.17 获胜机器人的构成

表 10.2 机器人的主要元器件

红外线传感器
CCD 摄像机
单板机
掌上电脑
步进电机
直流电机

# 3 机器人竞赛:职业中专篇①

## ——丰田杯创造大奖赛

### 竞赛内容

为了纪念丰田市建市 40 周年,从 1990 年开始召开“丰田杯创造大奖赛”,有中小学、家庭、普通三个赛组,工业中专生可参加普通赛组的比赛。每年的比赛题目不同,年度最佳奖的奖品是一台崭新的机器人,二等奖的奖金为 50 万日元。

图 10.18 为 1995 年普通赛组的赛台。比赛内容是在规定的时间(3min)内拾取放在规定位置的塑料球(直径 42mm,50 个),并将其放入赛台中间高度不同的 6 个丙烯材料的记分管中。记分管的投球点位置越高,投入得分越多。最后以总得分数和机器人作品的功能、技巧及娱乐性来决定胜负。规则要求机器人的长宽高均小于 600 mm,重量小于 7kg。

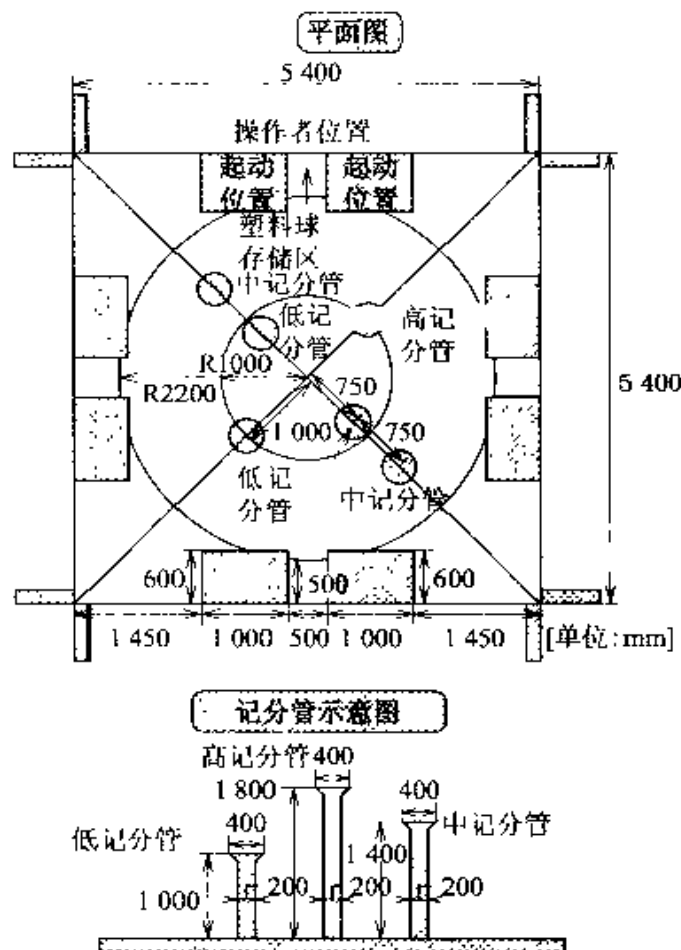


图 10.18 普通赛组的竞赛台

## ■ 获胜的机器人

我校参赛的机器人是机械电子专业制作的“攀登号”机器人,长宽高分别为 550 mm、550 mm 和 450 mm,使用了驱动电机(模型用)和齿轮箱各 13 个、车轮 15 个、定位用限位开关 4 个、搬运球用的传送带 2 条。机器人主体是用铝材和丙烯酸板制成。

机器人由搬运部分和攀登部分组成(图 10.19)。比赛时,机器人先将塑料球从储球区中取出,搬运到记分管处,然后攀登部分与主体分离,由 3 个驱动轮驱动爬到记分管顶部,将球放入。

图 10.20 是机器人比赛中的照片,图 10.21 所示为赛场实况。

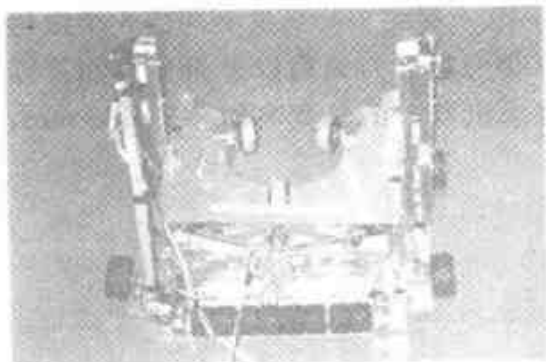


图 10.19 机器人“攀登号”



图 10.20 比赛中的“攀登号”机器人



图 10.21 竞赛会场实况

## ■ 制作过程

### ● 投球方法的研究

记分管的高度大约是机器人高度的 3 倍,因此在比赛中如何将球投入记分管是个难题。投球方法有以下三种:

- ① 直接将球投入。
- ② 爬上记分管将球放入。

引升到记分管高度再将球放入。

方法①和方法③分别要求较高的投球精度和重量轻、功能强的机构,相比之下方法②比较容易实现,所以采用了爬上记分管再将球放入的形式。

### ● 准备和制作

比赛时间为每年的3月下旬,所以要从第2学期就开始构思。机械部分和电气系统的设计、驱动电机的选择、材料的选用等计划和准备由学生与指导教师反复讨论确定,在设计和计划完成后马上着手制作。

制作是用课题研究学时及每天课后的2~3小时进行,参加比赛则是由4名2年级机械电子专业的学生和1名指导教师利用课余时间进行。制作的工具主要是在钳工实习阶段使用的工具。表10.3是学生制订的机器人制作计划。

表 10.3 制作日程表

日 程	制作内容
9月~10月	机器人整体方案图,机械部分,电气系统设计
10月~12月	攀登部分和电气部分的制作
12月~2月	搬运部分和电气部分的制作
2月~3月	试行走和比赛准备、调试

## ■ 所应用的机电一体化技术

在机器人制作中所涉及的机电一体化技术有如下五个方面。

### ● 电机和电池的选定

比赛规则限定了机器人的重量,并要求使用干电池(或充电电池)作为动力源。为了符合规则要求,在选择电机和电池时,决定选用 DAMIYA 公司生产的模型电机(5V),包括搬运驱动等共用了13部。所确定的电源电路如图10.22所示,并联使用两块镍镉电池组(7.2V)。因为要求输出电压为5V,所以使用了3端子稳压器来调整电压。

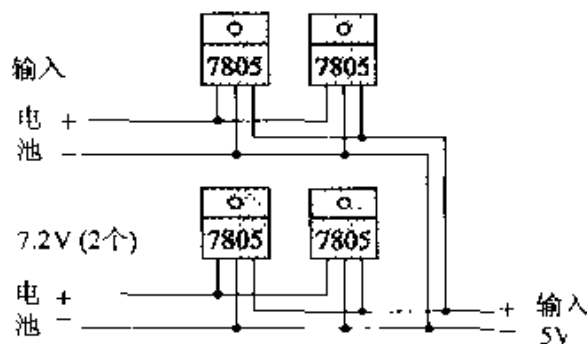


图 10.22 电源电路图

### ● 取球部分的结构及调整

为了能够又快又多地取球,在取球部分安装了8个轮子,组成旋转快速取球机构。调整球与轮子之间的摩擦力可改变取球的速度。图10.23是取球部分的照片。



图 10.23 取球机构

### ● 吐球部分的结构及调整

为了使球能够顺利地吐出,吐球部分采用了传送带机构,图 10.24 是吐球部分的照片。

### ● 减轻重量和防止打滑

对机构的不必要部分采用空心结构,可以减轻攀登部分的重量。攀登部分攀管上升时,为防止攀登轮与管壁间产生相对滑动,在轮的周边贴上两面胶带,利用其黏度防滑,如图 10.25 所示。

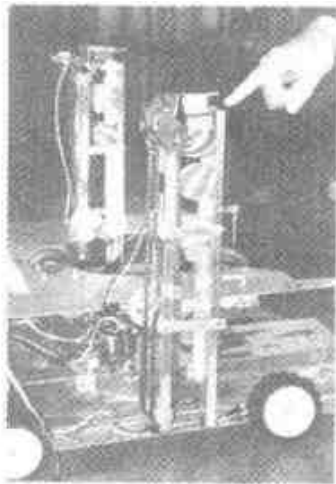


图 10.24 吐球机构

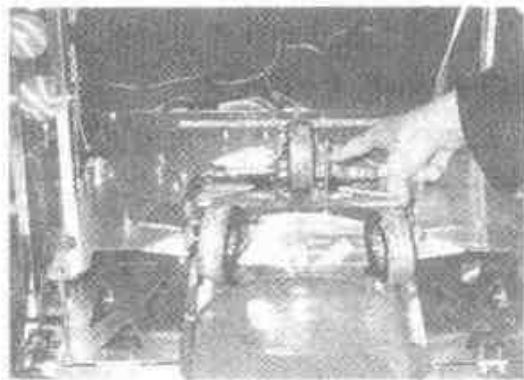


图 10.25 采取防滑措施的车轮

### ● 攀登过程中的姿势控制

为了防止攀登过程中出现前后倾斜或左右倾斜,可以通过调整 3 个攀登轮的驱动力来保持攀登部分水平上升。

# 4 机器人竞赛:职业中专篇②

## ——机构创意竞赛

### ■ 竞赛内容

本节介绍第4届机构创意竞赛(机器人装置竞赛大会)的比赛。竞赛的内容是由遥控操作的机器人将图10.26所示指定位置上的软网球放到图10.27所示的7根高度不同的目标柱上。按3min时间内所放的网球数量排名次,若数量相同,则以所用时间较短者为优胜。

比赛规则要求机器人的重量限制在4kg以内,尺寸不超过1m×1m。电池总数少于10个,总电压控制在15V以下。

场地尺寸4 500×6 300

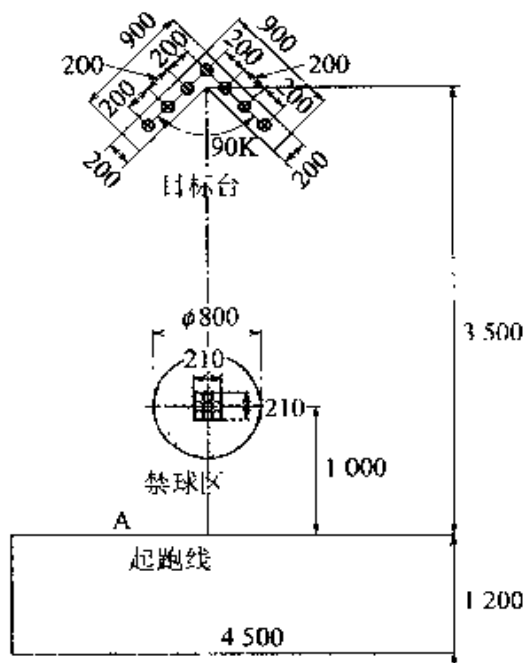


图 10.26 比赛场地的尺寸

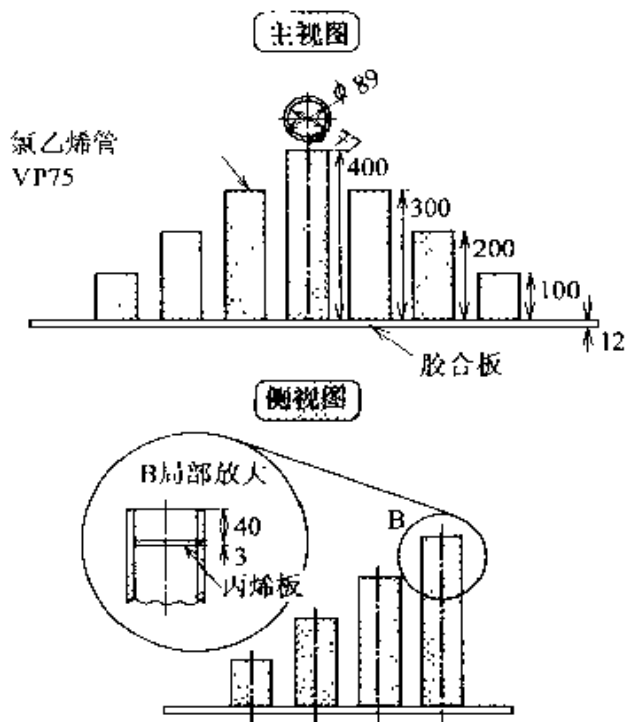


图 10.27 目标柱

### ■ 获胜的机器人

获胜的机器人取名为“杰克”,是采用吸球方式的小型机器人,如图10.28所示,由图10.29照片中的“JEY2”队的4名学生制作。

## 制作过程

### ● 遥控操作

比赛规定为遥控操作,前两届比赛学习微机控制的信息技术专业的学生不能参加。在女生的强烈要求下,从第3届开始她们也能参加比赛了。本届参赛的是2年级的女子队。

### ● 学习加工技术和工具的使用

制作机器人的目的之一是学习材料的加工技术及掌握必要工具的使用方法。另外,比赛中不仅重视速度,更重视设计思想,所以要尽量多利用成品零件来缩短制作时间。

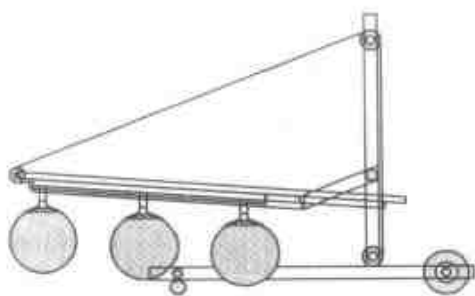


图 10.28 机器人“杰克”的侧视图



图 10.29 “JEY2”队员和机器人

### ● 设计方针

机器人的设计方针是结构简单,注重动作的可靠性。

参赛报名的截止日是比赛前六周,而且开始活动的时间是在毕业典礼之后。所以寒假的大部分时间都在研制机器人,能够进行实际操作是在比赛的前5天。

### ● 目标柱的制作

目标柱是由机械专业制作的,但在最后调试阶段由于目标柱的不足造成了很大影响。下一次参赛时,一开始就要自己作目标柱。在制作目标柱的过程中,既能够掌握比赛规则和方法,又可以熟悉加工技术和工具的使用方法,可谓一举两得。

### ● 机器人的零件和制作工具

制作费规定为2万日元以下,这就需要充分利用旧机器人的零件。新零件也要到附近的DIY(Do It Yourself)店或模型店购买。

使用的工具是用铝棒或丙烯酸板加工(切、钻孔、研磨)的,女生使用的不要过大。这次制作中使用了注射器和乙烯管,所以要准备几种黏结剂,在修理时还用到了快速黏结剂的剥离剂。

## ■ 所应用的机电一体化技术

### ● 注重简单的机构

因为软网球很软,不容易操作。学生们提出了投球等多种方法,但不能要求一年级学生使用太复杂的机构,选用最简单的机构是机械方面的第一目标。

### ● 气缸的研制

利用洗发液容器、吸盘、空气泵等对吸引网球的方法进行了多次实验。成品的空气泵虽然可靠,但因受重量限制不能采用。经过很长时间,最终选用注射器。结构是用注射器作为气缸,用电机来带动活塞,在吸管的前端安装吸盘来吸引网球。

### ● 关键的机械零件

最费心的也最重要的是机械零件(吸盘)。吸盘的大小由实验结果决定。如图10.30所示,每个软网球需要一个吸盘,吸球时固定不动,吸上后就要移动到目标柱的正上方。实现这一动作最初的方案是用窗帘轨道,但轨道倾斜时吸盘就会滑走,后来就改用动作可靠的钢丝(晒衣架用)。



图 10.30 吸球机构

### ● 机器人的特点

机器人的最大特点是吸球后能自动设置成符合目标柱要求的高度和间隔,如图10.31所示,其目的是简化操作和缩短移动时间。

### ● 电气方面采取的措施

从使用的可靠性考虑,尽量不使用滑轮。使用时,也要在结构上保证配线不会脱离滑轮,还要保证有足够的强度。为了减轻电气系统的重量,采取以下几方面措施:

[1] 同一个厂生产的电池重量也有差别,使用时要经过挑选。

[2] 因是遥控方式,每增加一个动作开关,其配线数量就要增加,所以必须采用配线较少的方法,如使用红外线遥控等。



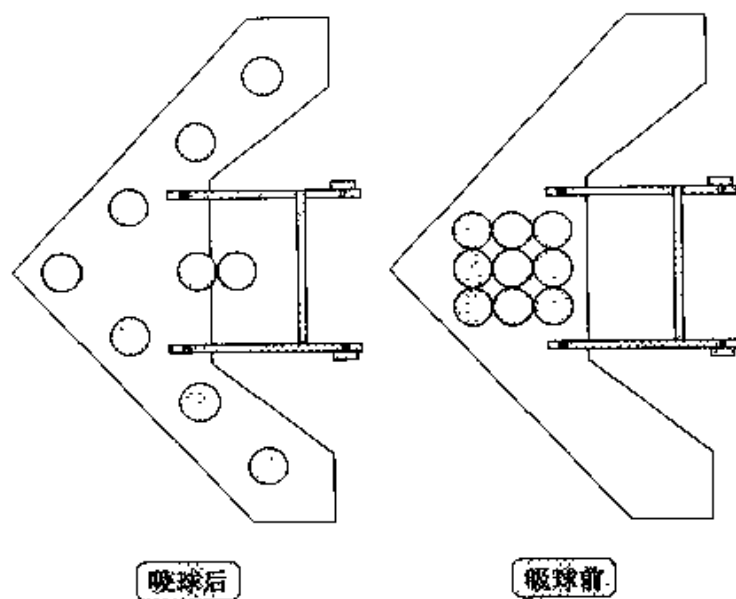


图 10.31 吸盘的自动设置方式

# 5 机器人竞赛:职业中专篇③

## ——全国高中生机器人大赛

### ■ 竞赛内容

此项比赛规定使用的机器人和场地如图 10.32 所示,比赛内容是将足球尽可能多的送入对方场地中,这是一项斗智斗勇的比赛。

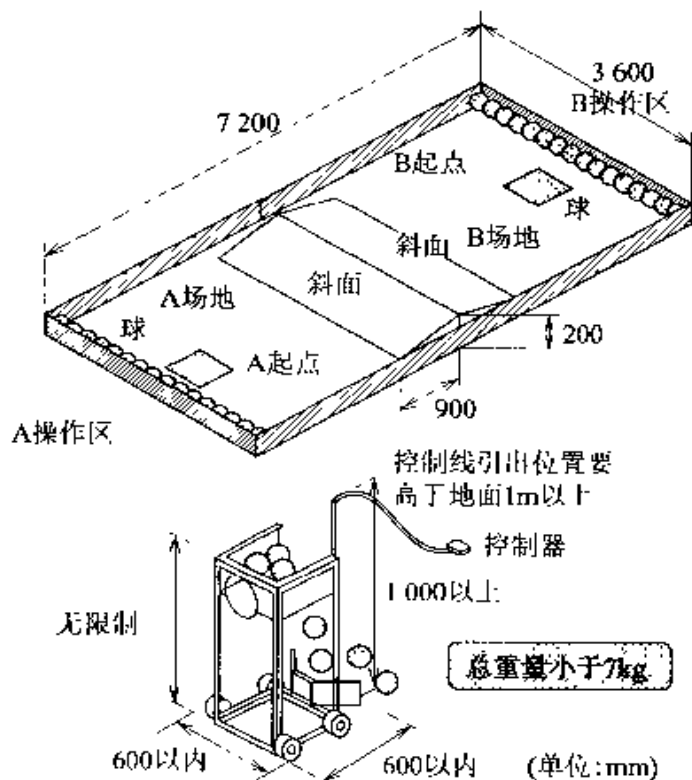


图 10.32 场地及机器人的规格

比赛时每个参赛队由 3 人组成,其中操作者一人。比赛时间为 3min,每个球记一分。比赛结束时,以自己场地内所剩下的球数少的一方为获胜者,若分数相同则延长比赛 1min。机器人必须越过一个坡坎才能到达对方场地,若碰到了对方机器人则被淘汰。图 10.33 为比赛实况照片。

### ■ 获胜的机器人

图 10.34 是本次比赛优胜者“机械研究部 A 队”的机器人照片。该机器人基本构造是采用 4 个电机的 4 轮驱动方式。为了简化结构,没有用转向机构,而是采用了左右轮速度差的动力轮转向方式。

该机器人采用了推土机推土的方法来送球。为了能够一次将更多的球推向对方的场地,机器人的两臂设计成能够左右伸开的结构,启动之前两臂藏在机器人的上方,伸开后两臂间的宽度为 110cm。比赛时,要能够从侧壁和角落处将球收集起来,所以要求机器人必须具有小回转半径的运动性能。为了使机器人具有能够推动大约 10 个球上坡的动力,要选用高效率的电机、摩擦损耗小的驱动系统、高精度的加工技术和维修方便的机构等。经过反复研制措施才制作出机构简单、动力大、速度快、容易控制、性能可靠的机器人作品。



图 10.33 全国高中生机器人竞赛大会实况



图 10.34 优胜者“机械研究 A 队”的机器人

## 制作过程

### ● 理解比赛规则

理解比赛规则对比赛机器人的设计非常重要,清楚地了解出题人的“目的和所设的圈套”就能够采取有效的对策。对于这种对战形式的比赛,还必须设想出对手攻击的可能方案,才能够有针对性地确定自己的防御对策和进攻计划。此外还必须综合考虑原材料的选用和加工技术的选择等多方面的问题。

### ● 小组活动环节

为了设计比赛机器人,组织了小组活动。最初的比赛规则学习会和场地的制作由小组全体人员参加。接着由小组的 16 名成员分别提出自己的设计方案和战术,经大家研讨后选出最佳的方案,因此该机器人是多数人集体合作的成果。

### ● 方案研究需要 3 个月

比赛方案和确定机器人的基本结构需要 3 个月左右的时间研讨。主体、驱动系统、控制器等的具体设计采用了 CAD 制图,连杆等部分的设计需要制作模型来检验动作的可行性。图 10.35 所示的机器人是一个失败的例子,该机器人采用的是向后投球的方案,实验中发生了故障,因为担心其可靠性而改变了方案。

### ● 全员合作

为了参加比赛,在赛前的 3 周内全体人员分工协力制作,每天 11 点多才回家,星期六还要通宵奋战,决不妥协。比赛的前一天,还在京都的旅馆里进行大幅度的改造,终

于制作出了令人满意的机器人。通过这些努力,也增强了学生们的自信心。

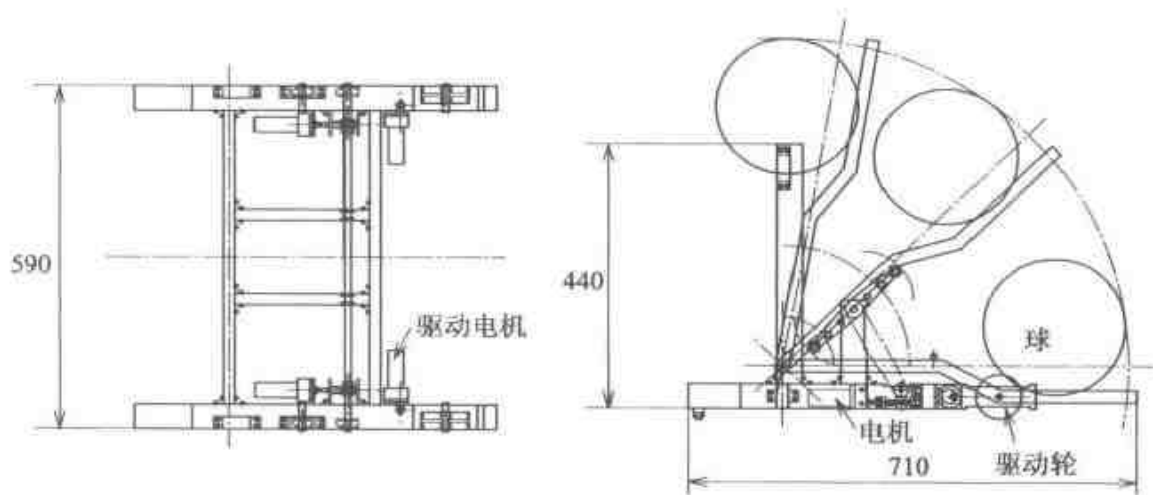


图 10.35 投球机器人

### ● 机械加工

在机械加工中,使用了车床、铣床、钻床等加工设备,必要时还使用加工中心。图 10.36 为学生在铣床上加工零件时的照片。

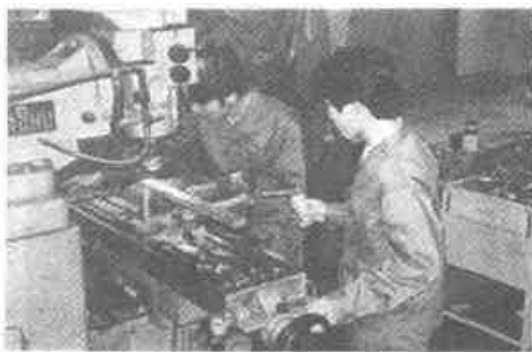


图 10.36 用铣床加工零件

## ■ 所应用的机电一体化技术 ■

### ● 直流继电器

这种比赛的机器人,不需要精确地控制位置和速度,所以采用继电器的 ON-OFF 来控制电机的正反转。为使继电器能够承受感抗型负载,选用了容量较大的直流继电器。使用的继电器控制器与机器人之间有 5~6m 的距离,所以要考虑电线的重量和动力损失。图 10.37 为继电器电路和控制开关。

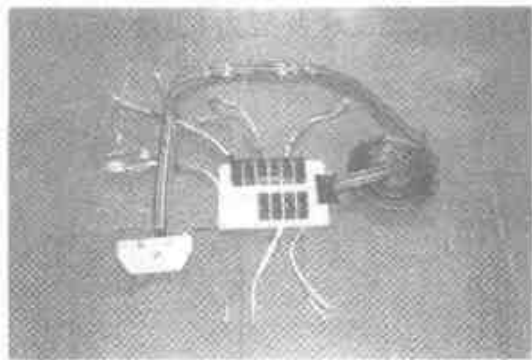


图 10.37 继电器和控制器

### ● 直流电机

电机使用的是瑞士通用电子公司的永磁电机。这种电机为无铁芯式直流电机，直径  $\phi 25\text{mm}$ ，长  $55\text{mm}$ ，重  $130\text{g}$ ，最高转速  $11000\text{r}/\text{min}$ ，额定电压  $18\text{V}$ ，额定功率  $20\text{W}$ 。锰干电池的内部电阻大，负载电流小，一般为  $100\text{mA}\sim 1\text{A}$ 。加负载时，因电压降较大，驱动普通电机不能输出足够的转矩。但这种永磁电机的效率可高达  $83\%$ ，用于电池驱动也能输出足够的转矩。而且这种永磁电机不像模型用的电机那样固定旋转方向，它可以正反转使用。

### ● 驱动系统

如图 10.38 所示，驱动系统采用与电机轴直连的齿轮箱（减速比为  $1/30$ ），二次减速采用同步带机构。电机轴没有直接与车轴相连，这一方面是因为悬臂梁不稳定，另一方面是因为机器人的重量为  $6\text{kg}$ ，在场地坡路的人口有  $12\text{mm}$  的落差，上坡和下坡时产生的冲击会对电机造成不良影响。



图 10.38 模块化的驱动系统

同步带使用的是椿本链条的 MXI 系列。使用同步带是因为它与梯形链、微型链相比有质量轻、传递效率高的特点。

该机器人的驱动系统的设计目标是免维护，所以皮带轮等没有采用锁定螺钉，而是全部采用弹簧销钉固定。同样道理，驱动系统上一律不使用螺母，而是在机架上用丝锥

直接攻丝,用内六角螺栓固定。这些都起到了节省维修时间,提高可靠性的作用。

### ● 机 架

机器人的机架使用厚度为 3.1mm 的方管和角钢,这是降低重量的有效方法,与较薄材料相比其结合处的强度和刚度较高,应变和变形很小,能防止连杆和回转部分的摩擦和卡死。

### ● 制作的基点是可靠性

参加机器人竞赛最令人感到遗憾的就是学生们花费了数月心血制作出的作品,因很小的故障而不能实现其功能导致中途退场。要避免这种事发生,制作机器人时就应该以可靠性为基点。

## 6 机器人竞赛: 专科篇 [1]

### ——全国专科生机器人大赛

#### ■ 竞赛内容

“全国专科生机器人大赛”是由财团法人专科学校教育振兴会、信息教育协会主办的,从平成4年(1992年)起每年召开一次。

第三届大会在科学技术馆举行,主题是“祭”。比赛也是围绕这一主题进行的,比赛方法有以下三种:

- ① 有线型机器人竞赛。
- ② 自律型机器人竞赛(硬件组)。
- ③ 智能型机器人竞赛(软件组)。

其中本校参加的是自律型机器人硬件竞赛。

以下是竞赛内容及规则:

- ① 在图 10.39 所示的约  $10^\circ$  斜坡上放置机器人。
- ② 机器人出发后可前进到光源前 80cm 处。
- ③ 在坡下并列放置 8 个目标灯,随机地点亮 15s。
- ④ 机器人由传感器探到光源后,向亮灯的线路上投网球(各目标灯在比赛中只亮一次)。
- ⑤ 在目标灯亮的时间内,投到线路上的球可以累计得分,所以如何能够又快又多地投球是取得胜利的关键。
- ⑥ 机器人规定为尺寸小于  $60\text{cm} \times 60\text{cm} \times 200\text{cm}$ ,重量小于 4kg。

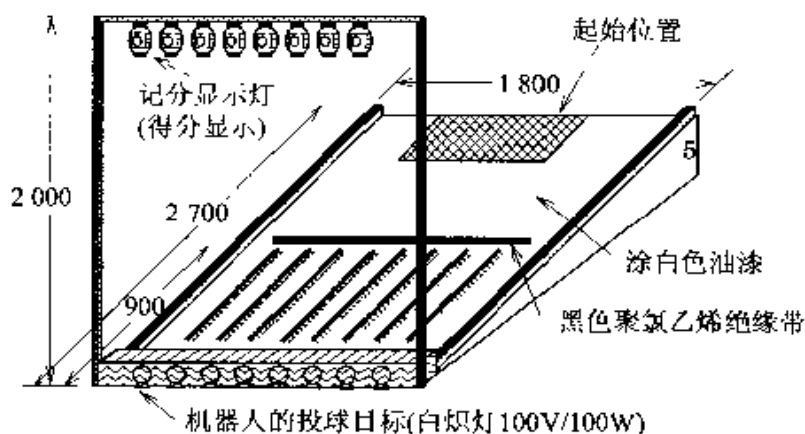


图 10.39 比赛简图

#### ■ 获胜的机器人

我们制作的机器人“NEEC-3”是由发现光源投球的车厢部分、装球用的储球器和兼

作车辆轨道的主体部分构成,如图 10.40 所示。因受尺寸规格限制,启动前主体部分的轨道要收起来,要将轨道两端折成  $90^\circ$  固定。按动启动按钮时,将其在线路上打开,如图 10.41 和图 10.42 所示。

储球器中能够储存 8 个网球。为了投球以后向车厢两端补球,安装了能够逐个送球的机构。

车厢部分由探知光源的传感器、检测当前所在线路的传感器、投球的斜坡、移动用的动力部分及控制用的微机台等组成。控制程序使用 C 语言编制。



图 10.40 获胜的机器人

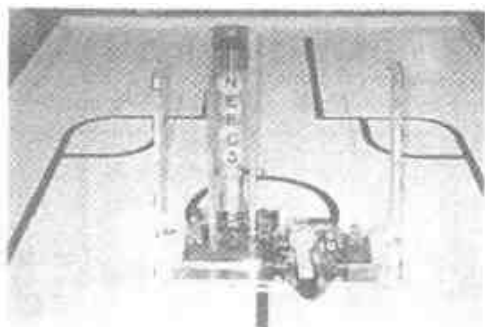


图 10.41 启动前轨道收起的状态

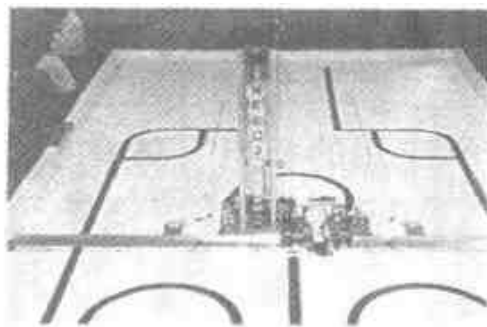


图 10.42 启动后轨道打开状态

## ■ 制作过程 ■

### ● 机器人的总体设计

制作时首先要进行机器人的总体设计。机器人要向有光源的线路投球,必须事先固定好 8 个球。但可以想象到,如果让带着 8 个球的机器人移动,就会因为球的重量而使机器人的移动和制动很不平稳。由此想到了另外一种方法,就是将 8 个球事先固定在各线路上方,并且都装上光源传感器和防止球掉出的闸门。这种方法可以不用微机控制,总体上的可动部分很少,不具备机器人的特点,因而没有采用。

### ● 1:1 模型的制作

制作模型的目的是要检验尺寸和平衡性,决定必要零件的配置及传感器的安装方



法,为此使用容易加工的木材来制作 1:1 模型。与此同时进行微机台的加工及控制电路的试制。此外还要制作比赛用具、与实际比赛相同尺寸的竞赛台以及微机控制的发光源等(图 10.43、10.44)。最后,将机器人放到竞赛台上实际演练,经过多次改进才能参加比赛。

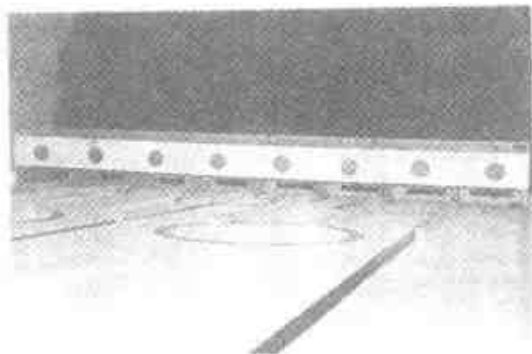


图 10.43 试制的光源



图 10.44 光源自动控制电路

### ● 制作进度与人数

参赛队由 4 名学生组成,3 人负责制作,1 人负责编程。比赛内容是在 5 月公布,6 月开始机器人的总体和系统设计,7 月进入制作阶段,9 月以后进行主体及程序的改进。

## ■ 所应用的机电一体化技术

### ● 光源传感器和定位传感器

图 10.45 为机器人的结构图。为使机器人能准确地移动到光源处,必须要有能够准确确定光源的传感器和确定停止位置的传感器。光源传感器是将两个传感器倾斜  $15^\circ$  平行放置,这种检测交点明亮度的方法不易受到来自光源后部光线的影响。

表 10.4 中介绍了机器人的规格参数。

此外,为了防止因为闪光灯等其它强光的干扰而引起误动作,还设置了检测并消除干扰的电路(图 10.46)。为了定位,设置了 4 个读取轨道边缘上通孔的传感器,其中 3 个用于识别位置,另一个用于确定位置(图 10.47)。

### ● 光敏传感器

要及时向亮灯线路投球,必须使车厢快速移动到该线路上。为此,在轨道里安装 4 个光敏传感器(图 10.48),实时检测光源信息,并以无线方式向车厢发射,这样可以使机器人快速移动到目标位置,不会作无用的运动。

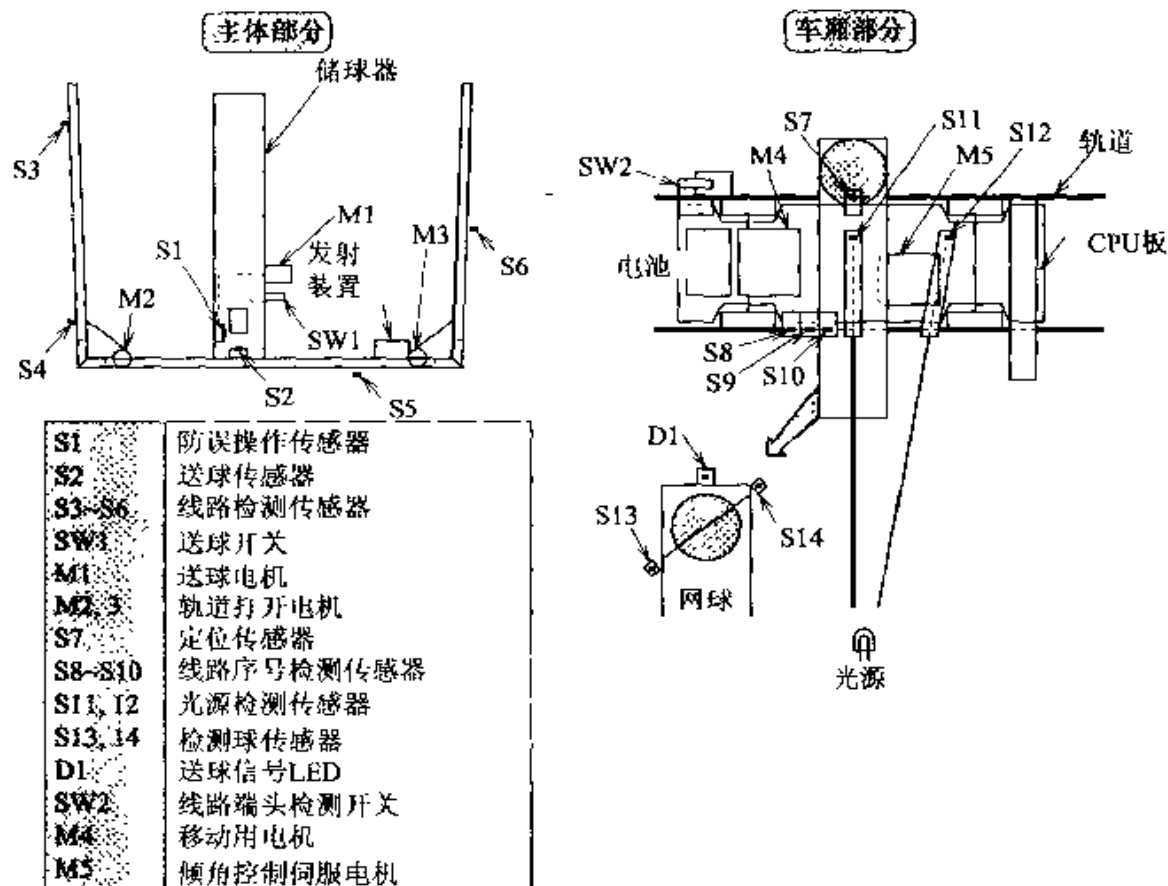


图 10.45 机器人结构简图

表 10.4 NEEC-3 的规格

主体部分	
光传感器	线路检测 5 个, 送球信号 1 个 干扰检测 1 个
机械传感器	送球部分 1 个
驱动电机	送球 1 个, 轨道打开 2 个
其它	数据发送 (150MHz 带 FM 调制 3bit) 电池 72V 600mA
车厢	
光传感器	光源检测 2 个, 定位 1 个 线路检测 3 个, 检测球 2 个
机械传感器	轨道端头检测 1 个
驱动电机	驱动 1 个, 角度控制伺服电机 1 个
其它	Z80 微机板 (RAM 32 KByte, ROM 32 KByte, C 语言编程) 数据接收器件 电池 7.2V 120mA(计算机用) 6V 250mA(动力用)

## ● 伺服电机

投球斜坡使用遥控的伺服电机来控制,由微机发出伺服信号。储球器上设置了能够逐个发球的机构,该机构使用了 DAMIYA 公司社产的行星齿轮箱,当检测到有一个球被送出后,就由微型开关控制电机停止(图 10.49、图 10.50)。因为储球器中储存了 8 个球,所以要格外注意送球机构零部件的强度。在实验中就因卡球和零件变形而多次造成损坏,在改进了结构和材质后,终于能够准确地完成动作。



图 10.46 闪光检测传感器

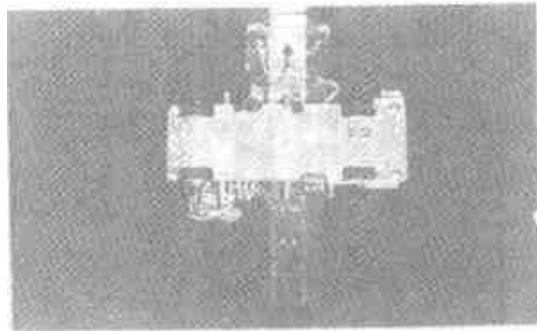


图 10.47 车厢部分(反面)



图 10.48 轨道部分(反面)



图 10.49 送球部分

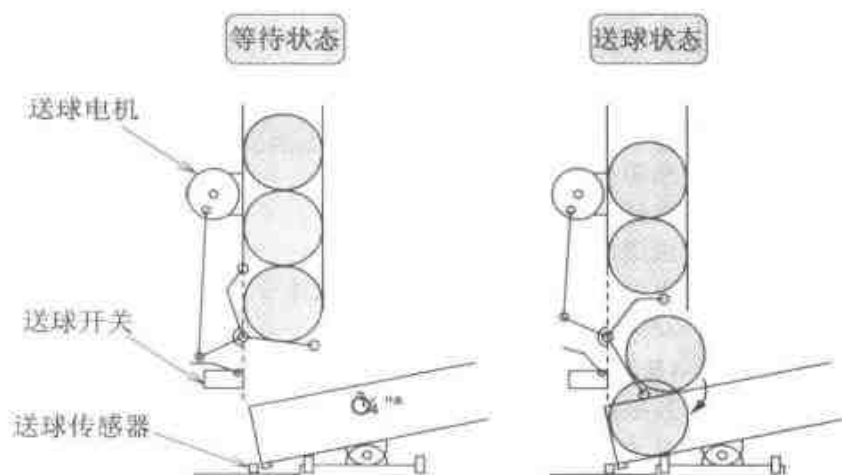


图 10.50 送球部分的连杆机构

# 7 机器人竞赛：专科篇 ②

## ——全国专科学校机器人竞赛会

### 竞赛内容

第二届“全国专科学校机器人竞赛会”的自律型机器人对抗赛按以下形式进行：

① 时间竞赛 从起始线出发，通过4号门和7号门返回到目标线，所用时间较短的队为优胜队。

② 对抗赛 在时间赛中取得名次的队有资格参加对抗赛。从左右两个起点，两台机器人同时出发，通过1号至10号的各个记分门，每通过一个记分门可得到一分，得分多者为胜。

在白色的场地上画有黑线，比赛时机器人可以按线行走，也可以不按线自由行走。对抗赛中，通过各记分门只能计分一次，所以速度快的机器人才能够获胜(图10.51)。机器人的尺寸规定在长200mm、宽200mm、高200mm的范围以内。

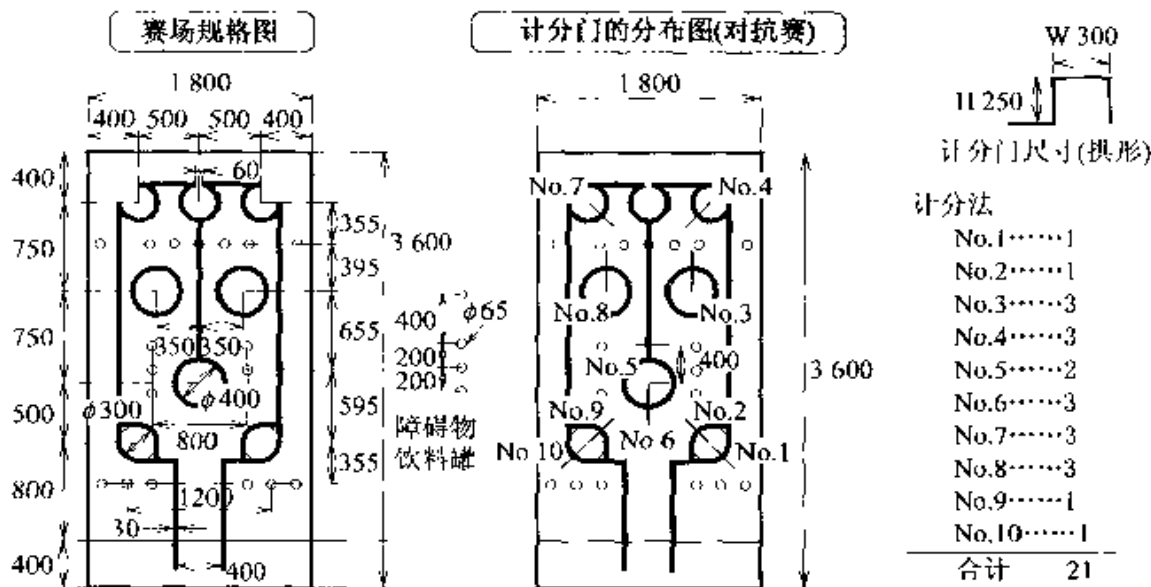


图 10.51 赛场规格及计分法(对抗赛)

### 获胜的机器人

这里介绍的是机械工学科机电一体化设计专业的2名二年级学生制作的“茄子号”机器人。该机器人的特点是具有两种行走方式：

- ① 通过光敏传感器检测来实现寻线行走的方式。
- ② 通过控制车轮的转角实现自律行走的方式。

此外，在机器人的前部保险杠上安装了接触传感器，用来检测碰撞情况并采取控制措施。车轮旋转角度的控制采用了直流电机和光电编码器。为了保证机器人的行走速

度,同时也为了学习更多的知识,没有采用商品化的旋转编码器和步进电机。正因为采用了直流电机驱动,才保证在时间赛中获得了第一名。图 10.52 是比赛会场上的照片。



图 10.52 获奖机器人及其制作者

## ■ 制作过程

### ● 处理速度与准确性的关系

从比赛内容来看,既要求有速度又要求准确性,但如何平衡两者关系是一个难题。按线行走准确性较高,但要花费较长的时间;自由行走距离最短,但如果不能对机器人准确定位,机器人就会无目标地乱窜。为机器人设计了两种行走方式,根据情况互相切换,提高了适应性。保险杠上安装接触传感器可在迷失方向时判断位置,也可以防止碰撞到对方机器人、障碍物或记分门。动力输出采用了前轮驱动方式,转向机构采用左右轮差动方式,有利于减小回转半径。

### ● 在校内赛中出线者才能参加全国大赛

从第一届全国大赛开始,本校就同步举行校内比赛,必须在校内比赛中出线,才能取得全国大赛的出场权。校内比赛在9月上旬的星期日举行,7月上旬开始机器人的制作,比赛前一天要彻夜调整准备。

## ■ 所应用的机电一体化技术

### ● 基本系统

在控制系统中,要控制车轮的旋转角度,因此必须对输出脉冲进行计数。在这里采用了 Z80 微型计算机,利用汇编语言编程(图 10.53)。

### ● 机构部分

机构部分如图 10.54 所示。

在机构设计中,要选择电机和减速装置。本机器人选用的电机和减速装置为:

电机:转矩为  $15.2\text{g}\cdot\text{cm}$ ,转速为  $8300\text{rpm}$ ;减速装置:减速比为  $1/64.8$ 。

这样的转矩在加速运行时也能够满足要求,行走速度可以达到  $396\text{mm/s}$ (修正直行误差时速度降低)。如果考虑定位的准确性,应选择更大的减速比。

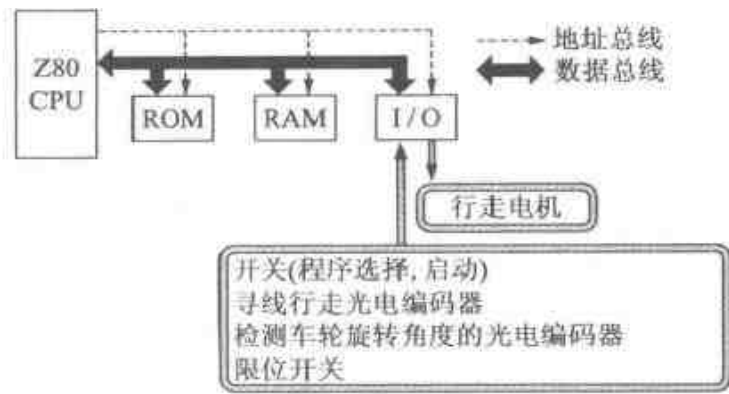


图 10.53 基本系统

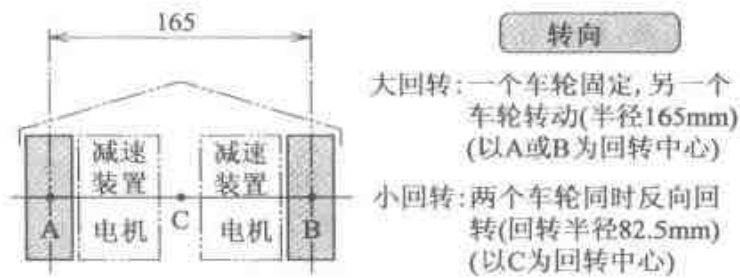


图 10.54 机构部分

### ● 车轮旋转角度的控制

在车轮上安装了 12 个遮光片,使其在光电开关中经过(图 10.55)。这样车轮旋转一周就可以发出 12 个脉冲,读取这些脉冲能够实现如下功能:

① 实现一个脉冲单位的定位(需要反馈控制) 车轮直径 60mm,则一个脉冲单位对应的直线距离为 15.7mm。

② 直行时可以保证直行精度 控制电机左右两轮的脉冲使之同步。

其中修正直行误差是通过使电机与电源接通或断开来控制的,因此会使行走速度下降。由脉冲进行定位控制时,在机器人接近目标之前需要采取减速停止控制(斩波控制),在停止的瞬间要作反转制动控制。此外,回避障碍物的功能是通过按线行走的功能和保险杠上安装接触传感器(微动开关)实现的。

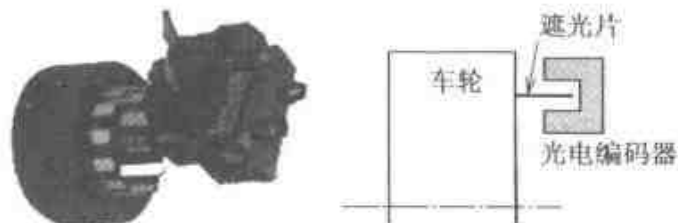


图 10.55 安装在车轮上的遮光片

## 8 机器人竞赛会：高等职业专科篇

### ——NHK 创新比赛·机器人大赛“RoBoCoN”

#### ■ 比赛内容

“NHK 创新比赛·机器人大赛”，通称“RoBoCoN”。1994 年高等职业专科组的题目是“空中飞碟”。比赛方法是使用遥控机器人将 30 枚飞盘（直径 235mm、重 110g）投入到 17 处记分桶内，计算所得分数决定胜负（限时 2min）。

机器人重量要小于 8kg，启动时的长宽高必须小于 1500mm×1500mm×3000mm。能源为 DC12V/60W（恒电压电源），双系统供电。

以在 2min 时间内记分桶的合计分数决定胜负，合计分数多的一方为胜。如果一个记分桶内投入了多个飞盘，则投在最上边的队获得该记分桶的分数。此外，若某队的机器人将飞盘投入 V 记分桶内，则该队获得该时间段的胜利。准备时间为 1min，在这段时间可将 5 枚飞盘安放在机器人上。

图 10.56 为比赛场地的简图。比赛场地上分别设有 A、B 两队的启动区和飞盘储存区。赛场划分成 A 区、B 区、自由区、禁止触地区和禁止进入区。

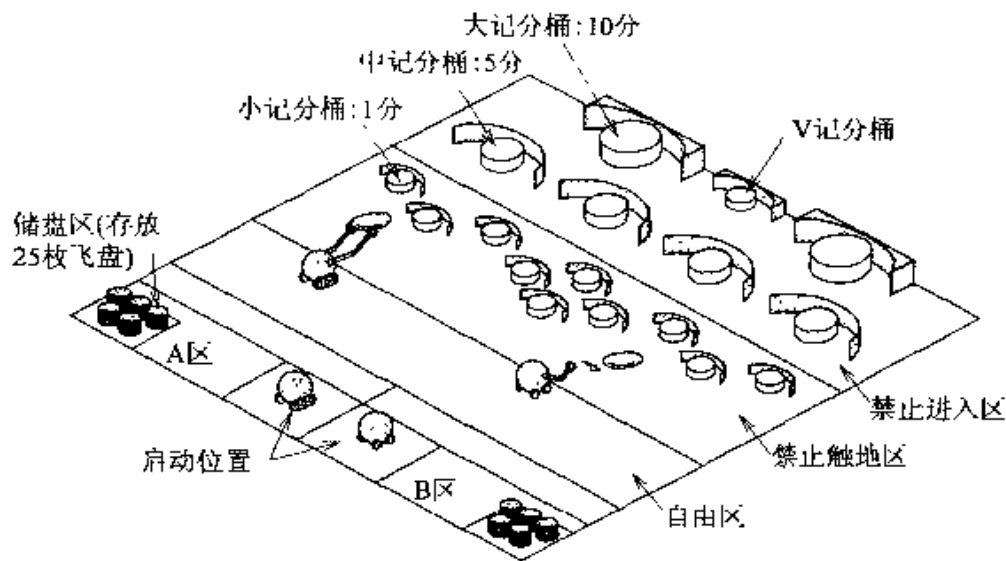


图 10.56 “空中飞碟”赛场简图

#### ■ 获胜的机器人

全国的高等职业专科学校有 62 所，每所学校可派两个队参加。都立高等职业专科学校出场的是“V 投门手号”和“品川丸'94 号”两台机器人。这两台都是射出式机器人。图 10.57 是“V 投门手号”机器人的照片，该机器人由可做 180° 回转的飞盘架、送出机构、杆式射出机构和行走机构组成。该机器人的特点是射出速度快，从离开飞盘架到

射出只需 2 秒,而且左右各有一个射出杆,无论是在 A 区还是 B 区都能投射。

图 10.58 是“品川丸'94 号”机器人的照片,该机器人由振动送盘机构、橡皮筋式射出机构、射出角调整机构及行走机构组成。该机器人的特点是外形美观。



图 10.57 机器人“V 投门手号”



图 10.58 机器人“品川丸'94 号”

## 制作过程

### ● 每年不同的比赛题目

“RoBoCoN”的题目是在每年的 5 月末开始征集方案,到 7 月上旬截止,7 月中旬由 NHK 发布获选的题目。因为每年的题目不同,不能直接利用往届的制作资料和技术,所以没有常胜队。1994 年的比赛题目是向记分桶内投飞盘。

### ● 以暑假制作为主

在制作时,首先要研究能够将飞盘准确地投射到目标记分桶内的机构,从多种方案中选出了两种射出式机构。因为要参加 10 月下旬的地区比赛和 11 月上旬的全国比赛,所以机器人的制作主要是利用 7、8 月的暑假期间来完成。从暑假开始的 7 月中旬到 8 月末,除了星期天几乎每天都在制作,比赛前的一段时间要进行修改和调试。每台机器人的制作费用必须控制在 8 万日元以内,到比赛时大约重新制作了 2~3 台机器人。

### ● 由 3 人来制作

每台机器人的制作者为 3 人,3 人共同设计、制作机构的各个部分和电气系统。集体合作得好、效率高才能够制作出好的作品。电机架、车轮、凸轮等零件的制作是在加工中心上通过编制加工程序来完成的。



## 所应用机电一体化技术

### ● 对机器人要求的条件

“RoBoCoN”一直将比赛时间限制在 2min 内,这就要求机器人的①速度快(功率大)、②动作准确、③结构简单、④符合比赛特点的结构。因此,必须利用机电一体化技术。

### ● 采用程序控制

为了能够简单地控制复杂的动作,“V 投门手号”和“品川丸’94 号”机器人都采用了由继电器、微动开关实现的程序控制。

经过反复研究,“V 投门手号”采用了图 10.59 所示的凸轮和小齿轮的射出机构。“品川丸’94 号”则采用了图 10.60 所示的由内齿轮橡皮筋卷取机构和棘爪机构组成的射出机构。



图 10.59 凸轮和小齿轮射出机构



图 10.60 内齿轮和棘爪射出机构

# 参考文献

## 1 章

- 精密工学会(編):精密工学シリーズメカトロニクス,オーム社(1989)  
メカトロニクス研究会(編):電子機械,コロナ社(1990)  
舟橋宏明(監修):電子機械,実教出版(1994)

## 3 章

- 秋山,大輪(編):機械技術者のためのロボットの設計と製作,オーム社(1986)  
倉西正嗣(監修):ハンディブック機械,オーム社(1965)  
塚田,舟橋(監修):新機械設計1,実教出版(1993)  
NSK総合カタログNo.111:ころがり軸受,日本精工(1968)  
日本トムソン:カタログ「IKOニードルベアリング」(1994)

## 4 章

- 共和電業(株):トルク変換器カタログ  
ティアック電子計測(株):技術資料集  
コパル電子(株):センサカタログ'94~'95  
(株)村田製作所:回転センサ(FRシリーズ)カタログ  
春田,鈴木,山添(編):センサ先端材料のやさしい知識,オーム社(1995)  
大坪,小島,角,早川,増田(著):標準電子基礎,オーム社(1993)  
日経メカニカル:センサガイド(1991.8.19)  
日経メカニカル(1995.1.9)  
谷口 修(著):標準機械工学講座,振動工学,コロナ社(1968)  
志水英二(編):マイコンセンサシステム入門,海文堂出版(1986)  
雨宮好文(著):図解メカトロニクス入門シリーズ センサ入門,オーム社(1983)  
市村金属(株):カタログ  
ナショナルセミコンダクタ:データブック  
高橋,森泉,相澤,ほか(編):センサの事典,朝倉書店(1991)  
加藤高広:湿度センサと駆動回路,トランジスタ技術,4月号(1986)  
セイコー(株)「開発部GSセンター」:データシート  
佐治,五十嵐:ニューセラミックス,Vol.1, No.1(1988)  
トヨタサービスFFIマニュアル(1980.5)  
上田,池田:音声認識とその活用技術,センサ・インターフェーシング, No.2, CQ出版社(1983)  
野村,皆川,吉田:センサ技術, Vol.12, No.3  
日経産業新聞(平成5年4月7日付)

## 5 章

油研工業(株):各種カタログ,資料  
 全日空(株):パンフレット「FLIGHT ACADEMY」  
 エヌエスディ(株):カタログ,仕様書  
 SMC(株):各種カタログ,資料  
 (株)コガネイ:カタログ,資料  
 太陽鉄工(株):カタログ,資料

## 6 章

東芝TLCS Z 80, 85データブック(1988)

## 8 章

日本ロボット工業会(編):ロボット・ハンドブック(1995)

## 10 章

第2回全国専門学校ロボット競技会資料(1993)

■今後,さらに学習を進めていくうえで,参考となる文献を以下に記します.

雨宮好文(監修):図解メカトロニクス入門シリーズ(全12冊),オーム社

「メカトロニクスの電気学入門」(1987)

「メカトロニクスの電子学入門」(1987)

「センサ入門」(1983)

「アクチュエータ入門」(1983)

「信号処理入門」(1987)

「インタフェースの電子回路入門」(1984)

「制御用マイコン入門」(1983)

「機械制御入門」(1988)

「電子機械制御入門」(1983)

「ロボット制御入門」(1983)

「デジタル制御入門」(1986)

「CAD/CAM/CAE入門」(1986)

江沢 正(著):電子機械制御,オーム社(1995)

川村貞夫(著):図解ロボット制御入門,オーム社(1995)

鈴木美朗志(著):絵ときポケコン制御実習,オーム社(1995)など.

# 索引

## 数字及英文字母词汇

- 1GL ..... 288
- 8253 ..... 78
- 8255PIT ..... 205
- 8255 ..... 78
- A/D转换 ..... 73
- A/D转换器 ..... 8
- AC/AC变换器 ..... 214
- AC伺服电机 ..... 213
- AC伺服电机调速电路 ..... 214
- Ada ..... 286
- ADPCM ..... 274
- AF ..... 150
- AND占路 ..... 67
- ASCII码 ..... 261
- BASIC ..... 80
- CAD/CAM ..... 87
- CAD ..... 80
- CAD系统 ..... 81
- CAV ..... 422
- CCD ..... 139
- CCD器件 ..... 403
- CCD摄像头 ..... 381
- CD-ROM ..... 387
- CG ..... 40
- CSC ..... 247
- CLV ..... 422
- CMCS ..... 61
- CNC机床 ..... 18
- CO-2OL ..... 80
- CPU ..... 72、242
- CRTO ..... 264
- CRT显示器 ..... 264
- CTR型热敏电阻 ..... 162
- C编译程序 ..... 392
- C语言 ..... 80
- D/A转换 ..... 73、267
- D/A转换器 ..... 8
- DC/AC变换器 ..... 214
- DC电机的等效电路 ..... 194
- DC螺旋管 ..... 211
- DP选配 ..... 172
- DRAM ..... 249
- DSP ..... 411
- DTP ..... 80
- D触发器 ..... 78
- ELI组合 ..... 233
- E/A线路 ..... 196
- FG伺服控制 ..... 202
- FIFO ..... 277
- FIFO缓冲器 ..... 277
- FMCM方式 ..... 180
- FMS ..... 73
- FORTRAN ..... 80
- GNU-C ..... 392
- GFS ..... 387
- GT ..... 59
- H桥方式 ..... 237
- I/O接口 ..... 361
- IC ..... 61
- IDL ..... 83
- IC存储器 ..... 243
- IC温度传感器 ..... 164
- IGBT ..... 343
- LCD ..... 264
- LCDC ..... 264
- LED ..... 258、263
- LSF ..... 286
- LS ..... 243

ME-NET 通信 .....	397	RISC .....	247
MIL 标准 .....	67	Roberts 滤波器 .....	363
mode 法 .....	363	RoBoCoN .....	460
move master 指令 .....	352	robust 控制 .....	43
NAND 电路 .....	67	ROM .....	82
NC .....	266	ROM 的固化过程 .....	82
NOR 电路 .....	67	SCARA .....	330
NOT 电路 .....	67	SI 值 .....	148
NTC 型热敏电阻 .....	162	S-N 曲线 .....	23
n 型半导体 .....	57	Sobel 滤波器 .....	363
OB .....	358	SRAM .....	251
OD .....	358	SSR 输出 .....	48
ON-OFF 控制 .....	196	T-1、T-N 特性曲线 .....	194
OR 电路 .....	67	TTL 74 系列 .....	61
OS .....	80	TTL 电平 .....	26、254
Pascal .....	286	TTL 输出 .....	48
PC .....	48	V 型皮带 .....	118
pH 玻璃电极 .....	170	X-Y 工作台 .....	378
PID 反馈控制 .....	304		
PID 方式 .....	347		
PL /1 .....	286		
pn 结 .....	57		
pose .....	333		
Prebit 滤波器 .....	363		
PROLOG .....	286		
PROM .....	249		
PTC 型热敏电阻 .....	162		
P-tile 法 .....	363		
PWM 方式定电流斩波驱动器 IC .....	192		
PWM 开关频率 .....	205		
PWM 控制方式 .....	200		
PWM 发生器 .....	204		
P 型半导体 .....	57		
R-2R 梯形 .....	267		
RAM .....	251、347		
RAMDAC .....	269		
RC 伺服 .....	389		
RH .....	166		

## 汉字词汇

### A

安全防护区域 .....	368
安全栅 .....	368
安全制动器 .....	108
按键式开关 .....	266
暗电流 .....	264

### B

摆动 .....	87
摆动角度 .....	5
摆动马达 .....	215
摆动式气动执行装置 .....	225、229
摆杆式执行机构 .....	137
搬运比 .....	107

- 办公自动化 ..... 4
- 半闭环 ..... 6
- 半闭环控制 ..... 379
- 半导体材料 ..... 158
- 半导体磁敏传感器 ..... 138
- 半导体磁阻 ..... 133
- 半导体气敏传感器 ..... 175
- 半导体位置检测元件 ..... 134
- 半导体压力传感器 ..... 131
- 半桥方式 ..... 208
- 饱和状态 ..... 203
- 保持型主令开关 ..... 315
- 保持转矩 ..... 161
- 报表程序生成器 ..... 286
- 报警装置 ..... 424
- 背 压 ..... 232
- 被控制对象 ..... 41
- 本征半导体 ..... 57
- 比较器 ..... 41、43、270
- 比例电流反馈控制 ..... 232
- 比例极限 ..... 21
- 比例控制阀 ..... 233
- 闭 环 ..... 6
- 闭环方式 ..... 9
- 闭环控制 ..... 73、379
- 闭环控制方式 ..... 194、231
- 臂杆的重量 ..... 107
- 边界传感器 ..... 423
- 边缘提取 ..... 362
- 编 程 ..... 76
- 编辑器 ..... 81
- 编 码 ..... 76
- 编码键盘、C1 ..... 266
- 编码器 ..... 273
- 标志信息 ..... 275
- 标准装配机器人 ..... 395
- 表压 ..... 131
- 并行比较型 A/D 转换器 ..... 272
- 并行处理 ..... 282
- 并行处理程序 ..... 282
- 并行处理技术 ..... 282
- 并行输入输出用 LS ..... 254
- 波痕发生装置 ..... 224
- 伯德线图稳定性评价法 ..... 46、295
- 铂 ..... 168
- 铂测漏电阻 ..... 163
- 不规则区 ..... 139
- 布尔代数 ..... 48、69
- 步进电机 ..... 131
- 步进电机驱动电路 ..... 184
- 步进电机驱动用开关电路 ..... 185
- 步进继电器 ..... 317
- C**
- 采样保持器 ..... 273
- 采样定理 ..... 274
- 采样时间 ..... 345
- 残压 ..... 232
- 操作功能 ..... 329
- 操作开关 ..... 423
- 操作码 ..... 244
- 操作面板 ..... 423
- 操作数 ..... 244
- 操作系统 ..... 80
- 测力计 ..... 129
- 差补控制 ..... 345、330
- 差动器机壳 ..... 397
- 差动斜齿轮装配 ..... 395
- 差频噪声 ..... 274
- 常合式电磁制动器 ..... 105
- 程序控制 ..... 40、352
- 程序语言 ..... 8、79
- 尺寸公差 ..... 36
- 齿轮马达 ..... 314
- 齿条齿轮式 ..... 230

- 重复处理 ..... 75  
 冲击电流 ..... 264  
 储存能量 ..... 369  
 触点电流 ..... 260  
 触发器 ..... 78  
 传递函数 ..... 44  
 传感器 ..... 3、39  
 传送带控制系统 ..... 402  
 传输速度 ..... 356  
 串行通信 ..... 361  
 垂直多关节机器人 ..... 330  
 磁导率 ..... 52  
 磁 极 ..... 52  
 磁 力 ..... 53  
 磁敏元件 ..... 159  
 磁偏式扭矩传感器 ..... 130  
 磁通密度 ..... 307  
 磁性齿轮 ..... 135  
 从动件 ..... 119  
 存取时间 ..... 251  
 存取时序图 ..... 249  
 存取周期 ..... 251
- D**
- 达林顿连接 ..... 189  
 达林顿三极管 ..... 259  
 大功率达林顿晶体管 ..... 61  
 大功率晶体管 ..... 187  
 大规模集成接口电路 ..... 205  
 大批量生产 ..... 240  
 大型 LED ..... 259  
 代数方程式 ..... 290  
 带控制门的缓冲驱动器 ..... 78  
 单词音波形选配方式 ..... 172  
 单极结构 ..... 63  
 单极型 ..... 61  
 单极型驱动方式 ..... 185  
 单输入单输出系统 ..... 288  
 单位脉冲 ..... 303  
 单位脉冲函数 ..... 302  
 单稳态触发器 ..... 187  
 单向驱动气缸 ..... 227  
 单元方框 ..... 296  
 当前水位 ..... 39  
 挡 板 ..... 312  
 导 程 ..... 89  
 导电塑料 ..... 133  
 导轨一体型滚珠丝杠 ..... 93  
 等待时间 ..... 282  
 低电平输出 L ..... 257  
 低通滤波电路 ..... 269  
 地震仪 ..... 146  
 地址总线 ..... 77  
 电磁阀 ..... 211  
 电磁感应 ..... 144  
 电磁离合器 ..... 28  
 电磁铁 ..... 5、211  
 电磁制动器 ..... 106  
 电导率 ..... 55、168  
 电动机 ..... 7  
 电动势常数 ..... 308  
 电动手 ..... 350  
 电 机 ..... 5  
 电机旋转角度 ..... 288  
 电力电子 ..... 7  
 电气时间常数 ..... 309  
 电气制动器 ..... 106  
 电气阻尼 ..... 189  
 电 容 ..... 147  
 电容感应式接近开关 ..... 138  
 电容量 ..... 55  
 电视机显视器 ..... 264  
 电枢电压 ..... 307  
 电 刷 ..... 194、307  
 电位器 ..... 415

电压降	49
电源	5
电子	2
电阻材料	132
电阻发热体	317
电阻控制方式	199
叠加原理	292、303
定 标	363
定电流法	191
定滑轮	18
定 理	69
定时器	48、277、316
定位精度	115
丢 步	182
动滑轮	18
动力传递机构	413
动力源	7
动力制动器	106
动态加速度	147
动特性	44
动载荷	20
动 作	324
抖 动	260
度( $^{\circ}$ )	36
短路制动	207
段方式	251
多CPU系统	348
多变量系统	43
多关节机器人	117、328
多品种小批量生产	241
多圈型可变电位器	133
多输入多输出系统	288
多头螺纹	89
多谐振荡器	187

## E

等角轴测图	33
-------	----

二极管	57
阶延迟	45
二进制	65
二值化处理	405
二值信号	47

## F

发光元件	134
发射极	58
阀 芯	42
阀 座	42
法拉第磁光效应	160
法拉第电磁感应定律	159
反 弹	260
反电动势	195
反 馈	222
反馈环节	296
反馈控制	180、296、346
反馈系统	6
反相器	67
反向连接	58
荧光元件	152
方框并联	297
方框串联	297
方框图	297
方框图简化	297
防止落下传感器	423
仿形加工装置	42
非接触式扭矩转换器	130
非特定说话人方式	172
非线性	292
非线性系统	43
非制造领域	370
分( $^{\circ}$ )	36
分辨率	8、409
分布载荷梁	25
分路点	296



- 分母多项式 ..... 294
- 分区存储器 ..... 252
- 分区寄存器 ..... 252
- 幅—相特性图 ..... 295
- 俯视图 ..... 31
- 负载转矩 ..... 181、309
- G**
- 改善劳动环境 ..... 370
- 干 扰 ..... 39、44
- 感应电机 ..... 213
- 橄榄网 ..... 241
- 刚性联轴器 ..... 104
- 缸 体 ..... 313
- 钢丝绳折返机构 ..... 414
- 高磁导率钕铁 ..... 160
- 高电平输出 H ..... 257
- 高分子薄膜吸湿材料 ..... 166
- 高级语言 ..... 285
- 高输入阻抗的差动放大器 ..... 133
- 高速缓存器 ..... 251
- 隔 离 ..... 262
- 个人电脑 ..... 245、350
- 跟 踪 ..... 418
- 跟踪比较型 A/D 转换器 ..... 272
- 跟踪驱动器 ..... 421
- 工业机器人 ..... 328、366
- 工作油缸 ..... 42
- 公共电路 ..... 77
- 公共信号线 ..... 242
- 公理 ..... 69
- 功耗电流 ..... 260
- 功率 MOSFET ..... 187
- 功率放大器 ..... 187
- 功率损耗 ..... 200
- 共发射极电路 ..... 197
- 孤立点 ..... 363
- 古典控制理论 ..... 43
- 固定布线式逻辑控制 ..... 240
- 固 体 ..... 4
- 固体传感器 ..... 139
- 固有频率 ..... 313
- 关节角度 ..... 334
- 关节的响应 ..... 416
- 关节坐标系微动 ..... 351
- 管脚图 ..... 244
- 惯 性 ..... 213
- 惯性矩 ..... 309
- 光电倍增管 ..... 154
- 光电池 ..... 155
- 光电导效应 ..... 154
- 光电导型传感器 ..... 154
- 光电管 ..... 154
- 光电面 ..... 154
- 光电耦合器 ..... 209、357
- 光电式旋转编码器 ..... 142
- 光电探测器 ..... 419
- 光电旋转编码器 ..... 142
- 光电子 ..... 154
- 光控制电器 ..... 154
- 光识别传感器 ..... 385
- 光拾音器 ..... 418
- 光通信系统 ..... 155
- 光学材料 ..... 160
- 硅 ..... 158
- 硅 杯 ..... 131
- 硅三极管 ..... 259
- 滚、颠、偏 ..... 341
- 滚动轴承 ..... 100、102
- 滚珠丝杠 ..... 93
- 滚子链 ..... 28、115
- 过程自动化 ..... 4
- 过滚响应 ..... 44、45
- 过 盈 ..... 36
- 过盈配合 ..... 37

- H**
- 恒弹性金属镍铬合金 ..... 143
- 横切机构 ..... 422
- 横切伺服 ..... 422
- 红外分光计 ..... 155
- 后台处理 ..... 279
- 虎克定律 ..... 95
- 互补型晶体三极管 ..... 206
- 滑块 ..... 132
- 滑块机构 ..... 121
- 滑轮—钢丝绳动力传递方式 ..... 414
- 图像处理控制系统 ..... 402
- 缓冲器 ..... 249
- 换向控制 ..... 215
- 换向器 ..... 194
- 灰度处理 ..... 365、405
- 灰度图像 ..... 365
- 灰度图像强调处理 ..... 362
- 灰度直方图 ..... 362
- 恢复型继电器 ..... 322
- 恢复型开关 ..... 322
- 恢复型主令开关 ..... 315
- 惠斯登桥电路 ..... 128
- 汇编器程序 ..... 79
- 汇编语言 ..... 285
- 活塞 ..... 42
- 活塞泵 ..... 319
- 霍尔效应 ..... 158
- 霍尔元件 ..... 195、214
- J**
- 击穿现象 ..... 58
- 机架 ..... 120
- 机器人 ..... 73
- 机器人控制器 ..... 288
- 机器人控制系统 ..... 402
- 机器人手臂 ..... 350
- 机器语言 ..... 79
- 机器周期 ..... 245
- 机械 ..... 328
- 机械界面 ..... 338
- 机械时间常数 ..... 309
- 机械手 ..... 237
- 机械制动器 ..... 106
- 机械自动化 ..... 4
- 积分电路 ..... 261
- 基本公差 ..... 36
- 基本逻辑电路 ..... 67
- 基极 ..... 58
- 基准坐标系 ..... 333
- 极限强度 ..... 22
- 极坐标系机器人 ..... 87
- 急停开关 ..... 423
- 集成电路 ..... 61
- 集电极 ..... 58
- 集电极输入 ..... 48
- 集散化处理 ..... 174
- 集中载荷梁 ..... 25
- 计划 ..... 76
- 计数器 ..... 319
- 计数器/定时器用 LSI ..... 205
- 计数器型触发器电路 ..... 319
- 计算机 ..... 3、328
- 计算机控制方式 ..... 415
- 继电器 ..... 315
- 寄存器 ..... 275
- 寄生二极管 ..... 208
- 加工中心机床 ..... 46
- 加减速控制 ..... 380
- 假脱机 ..... 279、283
- 假脱机打印 ..... 279
- 假像弹簧 ..... 417

间隙	36	净化室环境检测机器人	375
间隙配合	37	静电感应	55
筒支梁	24	静电式执行机构	179
减法式计数器	78	静态加速度	147
减速比	110	静特性	44
减速器	112	静误差	44
剪切载荷	20	静载荷	20
检测	2	距离传感器	423
检测装置	41	聚焦驱动器	419
建模	288	聚焦伺服	419
键	98	聚焦伺服环路	421
键槽	98	绝对温度	165
交流电机	178、348	绝对型旋转编码器	142
交流伺服电机	310	绝对压	131
焦尔热	200		
角度精度	182	<b>K</b>	
角速度	288	卡诺图	321
角速度一定	422	开关	315
阶跃响应	45	开关特性	59
接触传感器	387	开环	6
接触检测防撞器	423	开环控制	73、379
接触器	197	开始	75
接触式扭矩转换器	130	可搬运重量	107
接近传感器	387	可编程控制器	196、241
接口程序	259	可变电位器	132
接口电路	73	可靠性设计	96
节流孔	312	可屏蔽中断请求线	275
结束	75	空间凸轮	29、123
结束信号	40	空气消耗量	235
解释程序	285	空燃比控制用氧气传感器	168
金属电阻丝	133	控制	2
金属应变片	147	控制对象	41
进程	283	控制结束	40
进程表	283	控制量	43、296
晶体管	58	控制器	41、296、350
精度	8	控制系统硬件	384
净化室	225	控制信号	3、77
径向活塞式液压马达	218		

- |          |         |           |         |
|----------|---------|-----------|---------|
| 控制信号线    | 249     | 逻辑“或”电路   | 67      |
| 控制字      | 78      | 逻辑“与”     | 318     |
| 控制字寄存器   | 78      | 逻辑“与”电路   | 67      |
| 控制总线     | 77      | 逻辑代数      | 69      |
| 快速响应特性   | 303     | 逻辑电路      | 320     |
| <b>L</b> |         |           |         |
| 拉普拉斯变换   | 290     | 螺距        | 89      |
| 拉普拉斯变换表  | 290     | 螺旋副       | 14      |
| 拉普拉斯变换对  | 290     | 螺旋升角      | 89      |
| 拉普拉斯滤波器  | 363     | <b>M</b>  |         |
| 拉普拉斯逆变换  | 290     | 脉冲电机      | 181     |
| 拉普拉斯算子   | 290     | 脉冲分配电路    | 187、188 |
| 拉伸载荷     | 20      | 脉冲回波式     | 150     |
| 劳斯稳定判别法  | 305     | 脉冲频率      | 181     |
| 劳斯稳定条件   | 305     | 脉冲响应      | 303     |
| 离子选择电极   | 170     | 免疫传感器     | 171     |
| 力放大器     | 112     | 面向过程的语言   | 286     |
| 力矩       | 112     | 面向目标的程序语言 | 286     |
| 力矩传感器    | 415     | 秒(s)      | 36      |
| 力矩电机     | 222     | 命令        | 275     |
| 励磁模式     | 187     | 模拟开关      | 268     |
| 连杆       | 120     | 模拟量       | 73      |
| 连杆机构     | 121     | 模拟信号      | 8       |
| 连续梁      | 24      | 模数        | 110     |
| 连续体      | 4       | 摩擦负载转矩    | 379     |
| 联锁机构     | 369     | 摩擦离合器     | 28      |
| 链        | 28      | 摩擦刀       | 28      |
| 梁        | 24      | 摩擦制动器     | 28      |
| 双端固定梁    | 24      | 末端        | 340     |
| 量子型      | 165     | 目标程序      | 79      |
| 流量       | 222     | 目标坐标系     | 333     |
| 流量控制阀    | 39      | <b>N</b>  |         |
| 流速传感器    | 145     | 内部中断      | 276     |
| 罗伯斯滤波器   | 269、274 | 内激式制动器    | 107     |
| 逻辑“非”    | 318     | 奈奎斯特线图    | 295     |
| 逻辑“或”    | 318     |           |         |

奈奎斯特稳定性判断法 ..... 46  
 难度装配作业 ..... 394  
 能耗制动 ..... 197  
 逆运动学 ..... 334、342  
 扭矩 ..... 26  
 扭矩传感器 ..... 130  
 扭转 ..... 25  
 扭转角 ..... 26

**O**

欧拉角表记 ..... 341

**P**

喷嘴挡板 ..... 311  
 膨胀处理 ..... 363  
 疲劳极限 ..... 23  
 疲劳破坏 ..... 23  
 偏差 ..... 41、296  
 频率传递函数 ..... 295  
 频率特性 ..... 305  
 频率响应 ..... 295  
 平面凸轮 ..... 29、123  
 评价函数 ..... 43  
 屏蔽施工法用预制件联接机器人 ..... 372  
 坡莫合金 ..... 159

**Q**

七段 LED ..... 259  
 齐纳现象 ..... 58  
 起动指令 ..... 39  
 起动信号 ..... 39  
 起始转矩 ..... 194  
 起重机 ..... 115  
 气动夹具 ..... 237  
 气动马达 ..... 225、228

气动手 ..... 236  
 气动信号 ..... 39  
 气动执行装置 ..... 227、233  
 气动装置 ..... 233  
 气缸 ..... 257、313  
 气缸的输出力 ..... 232  
 气体浓度 ..... 168  
 气味传感器 ..... 171  
 气压发生装置 ..... 233  
 气压源 ..... 5  
 牵出转矩 ..... 181  
 牵入转矩 ..... 181  
 前台处理 ..... 279  
 桥式伺服控制 ..... 202  
 切割空气 ..... 405  
 切应力 ..... 20  
 清扫机器人 ..... 372  
 球面垫圈 ..... 397  
 屈服点 ..... 24  
 曲柄滑块机构 ..... 123  
 驱动单元 ..... 350  
 驱动级三极管 ..... 208  
 驱动器 ..... 41、48  
 驱动装置 ..... 346  
 去抖电路 ..... 139  
 全桥方式 ..... 207

**R**

热成像 ..... 152  
 热电动势 ..... 163  
 热电流 ..... 164  
 热电耦 ..... 164  
 热电型红外线温度传感器 ..... 165  
 热能型红外线温度传感器 ..... 165  
 热转换型光敏传感器 ..... 154  
 人工智能 ..... 10  
 人类五官 ..... 174

- 人造的人 ..... 328  
 任务 ..... 283  
 任务状态 ..... 283  
 柔性化 ..... 2  
 柔性机械手 ..... 372  
 柔性控制 ..... 372  
 软件 ..... 3  
 软件式逻辑控制 ..... 240  
 软件伺服 ..... 347
- S**
- 塞贝克效应 ..... 163  
 三视图法 ..... 31  
 三态门 ..... 255、256  
 上侧 ..... 344  
 上拉电阻 ..... 260  
 上限尺寸 ..... 36  
 蛇形管-钢丝绳动力传递方式 ..... 414  
 设定值 ..... 39、41、44  
 射极跟随器电路 ..... 197  
 射流管伺服 ..... 314  
 摄氏温度 ..... 166  
 摄像管 ..... 139  
 生物酶传感器 ..... 171  
 生物酶电极 ..... 171  
 施密特电路 ..... 260  
 湿度传感器 ..... 167  
 十六进制数 ..... 68  
 时不变性 ..... 292  
 时间继电器 ..... 315  
 时间控制 ..... 48  
 时序图 ..... 48、359  
 时域 ..... 298  
 时钟 ..... 77  
 时钟脉冲 ..... 270  
 实时处理机器人视觉系统 ..... 372  
 实时反应远程机器人控制技术 ..... 337  
 实时响应 ..... 284  
 拾音线圈 ..... 159  
 矢量轨迹 ..... 295  
 示教 ..... 351  
 示教操作 ..... 351  
 示教盒 ..... 350  
 示教再现机器人 ..... 370  
 视觉 ..... 175  
 视觉传感器 ..... 360  
 视频 DAC ..... 269  
 室内装修工程用机器人 ..... 372  
 收缩处理 ..... 363  
 手动操作 ..... 315  
 手动操作开关 ..... 315  
 手动控制方式 ..... 415  
 手动输入 ..... 74  
 手爪控制 ..... 352  
 手指控制系统 ..... 415  
 输出设备 ..... 278  
 输出选通功能 ..... 191  
 输入处理子程序 ..... 280  
 输入输出控制 ..... 352  
 输入输出相关命令 ..... 358  
 输入输出相位差 ..... 295  
 输入输出振幅比 ..... 295  
 输入阻抗 ..... 208  
 数据总线 ..... 77  
 数控机床 ..... 73  
 数字信号 ..... 8  
 数字量 ..... 73  
 衰减振荡 ..... 182  
 双臂机械手结构 ..... 395  
 双电源方式 ..... 206  
 双端固定梁 ..... 24  
 双杆气缸 ..... 236  
 双极结构 ..... 63  
 双极型 ..... 61  
 双极型驱动发式 ..... 184

双金属片 ..... 317

双口 RAM ..... 347

双列组合圆锥滚子轴承 ..... 102

双螺母结构 ..... 378

双向驱动气缸 ..... 227

双重积分型 A/D 转换器 ..... 270

水平多关节机器人 ..... 328

顺序电路 ..... 315

死 区 ..... 207

伺 服 ..... 328

伺服电机 ..... 346

伺服阀 ..... 222

伺服系统 ..... 40、220

伺服装置 ..... 177、178

速 度 ..... 112

速度环 ..... 348

速度控制 ..... 194

随动控制 ..... 40

随机存取存储器 ..... 249

锁存器 ..... 78

T

弹 簧 ..... 95

弹簧力 ..... 95

炭 膜 ..... 133

陶瓷电阻 ..... 133

陶瓷吸湿材料 ..... 166

特定说话人方式 ..... 172

特征方程 ..... 295

梯形图 ..... 241

铈化钼 ..... 158

条形热敏电阻 ..... 162

铁芯位置 ..... 211

停止信号 ..... 39

通用集成逻辑电路 ..... 187

通用性 ..... 394

同步带传动 ..... 115

同步电机 ..... 213

同步离合器 ..... 28

凸缘式弹性联轴器 ..... 104

凸缘式刚性联轴器 ..... 104

图像处理 ..... 273

图像信息 ..... 175

图元素 ..... 405

推 力 ..... 212

椭圆凸轮 ..... 42

W

外界传感器 ..... 424

外部串联电阻法 ..... 191

外加电源电压 ..... 288

万向联轴器 ..... 105

腕转轴 ..... 341

腕纵角 ..... 341

网络模型 ..... 241

微动驱动功能 ..... 192

微分方程式 ..... 290

微生物传感器 ..... 171

未知参数 ..... 289

味觉传感器 ..... 171

位移传感器 ..... 41

位置、动作控制 ..... 352

位置环 ..... 348

位置控制 ..... 135、194、288

位置确认 ..... 352

位置示教 ..... 352

位置姿势 ..... 288、334

味觉传感器 ..... 171

温度系数 ..... 57

文 件 ..... 74

稳 定 度 ..... 306

稳定判别 ..... 304

稳定条件 ..... 304

稳定裕量 ..... 306

- 稳定抓持 ..... 417
- 稳态误差 ..... 44
- 稳态响应 ..... 44
- 稳态线性系统 ..... 293
- 无触点继电器 ..... 254
- 无杆气缸 ..... 235
- 无刷直流电机 ..... 195、214
- 无线电控制模型用伺服电机 ..... 389
- 误差信号 ..... 41
- X**
- 系列 LSI ..... 247
- 系统整定 ..... 289
- 下 侧 ..... 344
- 下限尺寸 ..... 36
- 先入先出 ..... 277
- 显 示 ..... 74
- 线圈型磁头 ..... 159
- 线绕型可变电位器 ..... 132
- 线速度一定 ..... 422
- 线性控制方式 ..... 199
- 线性系统 ..... 43
- 限 度 ..... 421
- 限制区域 ..... 368
- 相对湿度 ..... 166
- 相对湿度-阻抗变换式湿度传感器 ..... 167
- 相间电容器 ..... 189
- 相位补偿 ..... 421
- 相位差式扭矩传感器 ..... 130
- 相位裕量 ..... 306
- 向 量 ..... 275
- 小齿轮 ..... 397
- 小型继电器 ..... 197
- 斜面原理 ..... 89
- 心形凸轮 ..... 123
- 信 息 ..... 4
- 信息处理 ..... 174
- 信息处理流程图 ..... 74
- 行 程 ..... 178、211
- 形状记忆合金执行装置 ..... 179
- 虚拟存储器 ..... 251
- 续流二极管 ..... 203、209
- 嗅觉传感器 ..... 175
- 嗅觉功能 ..... 174
- 悬臂梁 ..... 24
- 旋转编码器 ..... 202、214
- 旋转角度 ..... 5
- 旋转角速度 ..... 308
- 旋转轴 ..... 329
- 雪崩式光敏二极管 ..... 155
- 雪崩效应 ..... 155
- 循环处理 ..... 75
- Y**
- 压电材料 ..... 148
- 压电逆效应 ..... 150
- 压电陶瓷片 ..... 143
- 压电效应 ..... 150
- 压电正效应 ..... 150
- 压电执行装置 ..... 179
- 压力传感器 ..... 224
- 压力控制 ..... 215
- 压缩载荷 ..... 20
- 压阻效应 ..... 131、147
- 亚砷化锌 ..... 160
- 掩模 ROM ..... 250
- 阳 极 ..... 57
- 氧化铝 ..... 168
- 氧气浓度 ..... 168
- 氧气压力 ..... 168
- 叶片马达 ..... 314
- 叶片式液压马达 ..... 216
- 页方式 ..... 251
- 液晶显示器 ..... 264



- 液体压力 ..... 222
- 液压缸 ..... 220
- 液压马达 ..... 214
- 液压伺服机构 ..... 313、314
- 液压油 ..... 42
- 液压源 ..... 5
- 液压站 ..... 8
- 液压执行装置 ..... 179、215
- 液压装置 ..... 217
- 一阶延迟 ..... 45
- 一列按键 ..... 265
- 移动副 ..... 14
- 移动功能 ..... 329
- 移动机器人 ..... 11
- 移位寄存器 ..... 319
- 译码器 ..... 78
- 溢流 ..... 39
- 因果性 ..... 292
- 阴极 ..... 57
- 音圈电机 ..... 212
- 引导阀 ..... 42
- 应变 ..... 21、128
- 应变系数 ..... 129
- 应力-应变曲线 ..... 21、
- 应用软件 ..... 80
- 英特尔完整格式 ..... 84
- 硬件逻辑控制 ..... 240
- 优先级编码器 ..... 276
- 优先方式 ..... 284
- 有触点继电器 ..... 317
- 右手 ..... 336
- 娱乐机器人 ..... 382
- 宇宙坐标系 ..... 340
- 域值 ..... 450
- 圆形热敏电阻 ..... 162
- 圆柱滑阀 ..... 311、312
- 圆柱坐标系机器人 ..... 330
- 运动链 ..... 28
- 运算放大器 ..... 202
- Z**
- 在线仿真器 ..... 83
- 暂停 ..... 395
- 噪声对策 ..... 359
- 折页式执行机构 ..... 137
- 增量方式 ..... 141
- 增益交叉频率 ..... 306
- 增益交点 ..... 421
- 增益裕量 ..... 306
- 占空比 ..... 200、203
- 占空比数据 ..... 349
- 张紧 ..... 118
- 障碍物传感器 ..... 423
- 折叠噪声 ..... 274
- 折页式 ..... 137
- 振动传感器 ..... 146
- 振动式陀螺传感器 ..... 143
- 振子 ..... 147
- 整流效应 ..... 57
- 正等轴测图 ..... 33
- 正向连接 ..... 58
- 正应力 ..... 20
- 正运动学 ..... 334
- 指令值 ..... 41、42
- 执行装置 ..... 3、41
- 直齿圆柱齿轮减速机构 ..... 112
- 直角坐标系机器人 ..... 329
- 直角坐标系微动 ..... 351
- 直接接触 ..... 28
- 直接模式 ..... 352
- 直流测速发电机 ..... 202
- 直流电流增益 ..... 59
- 直流伺服电机 ..... 310
- 直线插补 ..... 345
- 直线电机 ..... 178、348

- 直线运动 ..... 86  
 直线运动轴 ..... 211、329  
 执行机构 ..... 136  
 只读存储器 ..... 82  
 质量 - 摩擦 - 弹簧系统 ..... 312  
 智能传感器 ..... 10、175  
 智能工程学 ..... 10  
 智能化 ..... 2  
 智能化气敏传感器 ..... 175  
 滞后作用的非线性特性 ..... 414  
 中断处理技术 ..... 282  
 中断控制技术 ..... 189  
 中断请求 ..... 280  
 中断请求线 ..... 278  
 中断响应信号 ..... 275  
 中间语言 ..... 354  
 中间件 ..... 120  
 中心距 ..... 110  
 中央处理单元 ..... 242  
 中值滤波器 ..... 362  
 终端坐标系 ..... 339  
 轴 ..... 25  
 轴承 ..... 100  
 轴承游隙 ..... 101  
 轴承游隙比 ..... 101  
 轴颈 ..... 100  
 轴瓦 ..... 100  
 逐次比较寄存器 ..... 271  
 逐次比较型 A/D 转换器 ..... 271  
 主动件 ..... 119  
 主视图 ..... 31  
 主轴电机 ..... 418  
 助记符 ..... 79  
 转动副 ..... 14  
 转矩 ..... 26、98  
 转矩常数 ..... 308  
 转速 ..... 112  
 转速传感器 ..... 194  
 转向控制 ..... 135  
 转子 ..... 194  
 装配自动化 ..... 394  
 状态 ..... 283  
 状态变量 ..... 43  
 状态查询 ..... 278  
 状态量 ..... 43  
 状态描述符 ..... 67  
 状态迁移图 ..... 353  
 状态值 ..... 40  
 撞针式执行机构 ..... 137  
 自动补偿功能 ..... 174  
 自动开关控制器 ..... 154  
 自动控制 ..... 329  
 自动校正 ..... 174  
 自律行走 ..... 382  
 自启动区域 ..... 181  
 自适应移动机器人 ..... 10  
 自锁功能 ..... 113  
 自由度 ..... 331  
 综合控制系统 ..... 402  
 总线 ..... 242  
 总线接口 ..... 355  
 总线逻辑 ..... 387  
 总线驱动器 ..... 77  
 阻抗 ..... 131  
 阻抗变换 ..... 267  
 组合传感器 ..... 10  
 最大区域 ..... 368  
 左视图 ..... 31  
 左手 ..... 336

# 机电一体化技术的诸多领域

## 机电一体化技术

操作工程

软件工程

控制工程

产业机械(机器人)

脉冲工程

电动机控制

微型计算机

测量工程

机械工作原理

数控编程

电子电路

电路

机械设计学

人机学

数字电路

传感工程

电磁学

程序设计

材料力学

系统工程

物理学

机械力学

机械制图  
设计制图

基础实验  
应用实验  
毕业设计  
工程英语

数学

工程数学

学科	课程名称	主要课程内容
机械学	物理学	普通物理、力学、振动、波动、声学、光学
	机械力学	力、静力学、动力学、力矩、摩擦、机械零件、转动、振动分析
	机械材料	合金、钢铁、热处理、防腐蚀与不锈钢、非金属材料、铸铁
	机械设计	材料强度、设计及计算、标准、公差与配合、连接件、螺栓、键、齿条、销、开口销、铆钉、轴、焊接、离合器、带、齿轮、制动器、弹簧
	机械加工	铸铁、塑性加工、焊接、机床、自动机床
	机械制图	三视图、手册应用方法、制图方法、
	设计制图	根据给定的条件进行机械部件设计,装配图、零件图设计
	工业机械	各种机床、生产机械、搬运机械(液压、气动执行装置)、机器人的种类与结构、驱动及控制、操作技术
电气学	数字电路	逻辑代数、组合电路、计数器、寄存器逻辑设计,数字集成电路
	传感器技术	各种传感器(温度、光、磁、压力、超声波、气体、化学、位置、加速度)、传感器电路
	电磁学	静电场、静电容、磁场、电磁力、电流与磁场
	电路	直流电路、交流电路、谐波电路、电磁感应、电力
	模拟电路	晶体管、放大器、振荡电路、电源电路、FET、OP 放大器
	测试技术	电磁检测、电子仪器、电量转换
	电机与控制	直流电机、交流伺服、步进电机、电磁铁控制电路
	硬件技术	微机系统设计、接口技术、I/O 接口、D/A 与 A/D 转换、中断处理
信息学科	微机原理	微机基本结构与原理、Z80MPU 的汇编语言
	程序设计	C 语言编程
	数控编程	NC 机床、加工中心等的数控编程
控制学	软件工程	系统设计、模块化编程
	系统工程	系统规划、优化方法、仿真与建模、可靠性
	控制工程	线性系统、传递函数、框图、过渡响应、频率响应、稳定性、反馈控制、顺序控制
人机工程	人机系统、人体构造与特征、人机界面与人体关系、显示器、操作器、可靠性、设计及形状、尺寸、重量、信息、速度和形式	