



高等院校网络教育系列教材

机电传动控制

吴清 刘小成 夏春明 编著

华东理工大学出版社

EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

$$\begin{aligned} i_{20} &= \frac{U_1}{Z_1} \cos \phi = \frac{U_1}{Z_1} \cos \phi \\ i_{20} &= \frac{U_1}{Z_1} \cos \phi = \frac{U_1}{Z_1} \cos \phi \\ i_{20} &= \frac{U_1}{Z_1} \cos \phi = \frac{U_1}{Z_1} \cos \phi \end{aligned}$$

10101011
01001

责任编辑：周 萍

责任校对：张 波

ISBN 978-7-5628-2977-5




9 787562 829775 >

定价：39.50元

高等院校网络教育系列教材

机电传动控制

吴清 刘小成 夏春明 编著

 华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS



图书在版编目(CIP)数据

机电传动控制/吴清,刘小成,夏春明编著.

—上海:华东理工大学出版社,2011.2

(高等院校网络教育系列教材)

ISBN 978-7-5628-2977-5

I. ①机... II. ①吴... ②刘... ③夏... III. ①电力传动
控制设备-高等学校-教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 004679 号

高等院校网络教育系列教材

机电传动控制

编 著 / 吴 清 刘小成 夏春明

责任编辑 / 周 萍

责任校对 / 张 波

出版发行 / 华东理工大学出版社

社 址:上海市梅陇路 130 号,200237

电 话:(021)64250306(营销部)

传 真:(021)64252707

网 址:press.ecust.edu.cn

印 刷 / 上海展强印刷有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 16.25

字 数 / 390 千字

版 次 / 2011 年 2 月第 1 版

印 次 / 2011 年 2 月第 1 次

印 数 / 1—2000 册

书 号 / ISBN 978-7-5628-2977-5/TH·83

定 价 / 39.50 元

(本书如有印装质量问题,请到出版社营销部调换。)



前 言

“机电传动控制”课程是机械设计制造及其自动化专业的一门必修专业基础课,是机电一体化人才所需电气知识结构的基础。由于电力传动控制装置和机械设备是一个不可分割的整体,所以本课程以电动机、控制元件及控制系统为主线,详细介绍了机电传动的基础知识、电动机特性、常规控制元件、典型控制线路及现代机械设备中所需要的先进控制技术,如可编程控制器(PLC)、变频器和组态软件技术。

本书内容根据学科的发展及其内在规律,把机电一体化技术所需的强电控制知识都集中在本书中,避免了不必要的重复,加强了系统性,而且理论联系实际,突出实用,使读者对机电一体化产品中电控技术的强电控制部分有更全面、系统的了解和掌握。在每章结尾都有思考题和习题,并在书的附录部分给出了部分习题答案和提示,便于读者自学。

本书共分十个章节。

第1章 概述,介绍了机电传动系统的发展。

第2章 机电传动分析的基础知识,将本书中用到的基础知识汇总,读者可以根据自己的基础情况学习对应的内容,为后续章节的学习打下基础。

第3章 直流电机,介绍了直流电机的工作原理、机械特性、启动、调速和制动。

第4章 交流电机,介绍了交流电机的工作原理、机械特性、启动、调速和制动。

第5章 继电器—接触器控制系统,介绍了常用电器和各典型控制线路。

第6章 电动机和低压电器的选择。

第7章 可编程序控制器(PLC),重点介绍了S7-200的原理和使用。

第8章 变频器,介绍了变频器的工作原理及使用。

第9章 触摸屏及组态软件。

第10章 控制电机,介绍了目前常用的各种控制电机。

在本书的编写过程中,借鉴了许多现行教材的宝贵经验,在此谨向这些作者表示诚挚的感谢。在本书的资料收集整理过程中,曹炜、曹默、罗巍巍、马畅、沈天柱、尚文、张滨、朱佳华给予了很大的帮助,在此表示感谢。由于编者水平有限,书中错误或不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编者

2010年9月

目 录

第1章 概 述	1
1.1 机电传动的目的和任务	1
1.2 机电传动及其控制系统的发展概况	1
1.3 课程的性质和任务	3
1.4 课程的内容安排	3
第2章 机电传动分析的基础知识	4
2.1 电机中的基本电磁知识	4
2.1.1 磁场和磁路分析中常用物理量	4
2.1.2 磁路的概念	6
2.1.3 电磁基本定律	6
2.1.4 功率因数的提高	10
2.1.5 导磁材料及其特性	10
2.1.6 电路与磁路的区别	11
2.2 控制系统的基本知识	12
2.2.1 系统及控制系统	12
2.2.2 控制系统的分类	12
2.3 机电传动系统的动力学基础	13
2.3.1 直线运动	13
2.3.2 旋转运动	15
2.3.3 机电传动系统的运动方程式	17
2.3.4 转矩、转动惯量和飞轮转矩的折算	19
2.3.5 电动机所需输出功率的计算基础	21
2.4 生产机械的机械特性	25
2.4.1 恒转矩型机械特性	25
2.4.2 离心式通风机型机械特性	25
2.4.3 直线型机械特性	25
2.4.4 恒功率型机械特性	26
2.5 机电传动系统稳定运行的条件	26
2.6 机电传动系统的过渡过程	27
2.6.1 机电传动系统中的惯性	28
2.6.2 机电传动系统的过渡过程时间	28
2.6.3 加快过渡过程的方法	29

思考题与习题	29
第3章 直流电机	31
3.1 直流电机的工作原理和基本结构	31
3.1.1 直流电机的工作原理	31
3.1.2 直流电机的基本结构	32
3.1.3 直流电机的励磁方式	34
3.2 直流发电机	35
3.2.1 他励直流发电机	35
3.2.2 并励直流发电机	36
3.2.3 复励直流发电机	38
3.3 直流电动机	39
3.3.1 他励和并励直流电动机	39
3.3.2 串励直流电动机	39
3.3.3 复励直流电动机	40
3.4 直流电动机的机械特性	41
3.4.1 直流他励电动机的固有机械特性	42
3.4.2 直流他励电动机的人为机械特性	43
3.5 直流他励电动机的启动	44
3.6 直流他励电动机的调速	45
3.6.1 改变电枢回路电阻的调速特性	46
3.6.2 改变电枢回路电压的调速特性	46
3.6.3 改变励磁磁通的调速特性	47
3.7 直流他励电动机的制动	49
3.7.1 能耗制动	49
3.7.2 反馈制动	51
3.7.3 反接制动	52
思考题与习题	54
第4章 交流电机	55
4.1 三相异步电动机的结构和工作原理	55
4.1.1 三相异步电动机的结构	55
4.1.2 三相异步电动机的工作原理	58
4.2 三相异步电动机的定子电路和转子电路	62
4.2.1 定子电路	62
4.2.2 转子电路	63
4.3 三相异步电动机的转矩与机械特性	64
4.3.1 三相异步电动机的电磁转矩	64
4.3.2 三相异步电动机的机械特性	65

4.4 三相异步电动机的工作特性	68
4.4.1 转速特性	68
4.4.2 定子电流特性	68
4.4.3 功率因素特性	68
4.4.4 电磁转矩特性	69
4.4.5 效率特性	69
4.5 三相异步电动机的启动特性	69
4.5.1 鼠笼式异步电动机的启动方法	70
4.5.2 线绕式异步电动机的启动方法	72
4.6 三相异步电动机的调速特性	73
4.6.1 调压调速	73
4.6.2 转子电路串电阻调速	73
4.6.3 变极对数调速	73
4.6.4 变频调速	74
4.7 三相异步电动机的制动特性	75
4.7.1 反接制动	75
4.7.2 回馈制动	76
4.7.3 能耗制动	77
4.8 单相异步电动机	78
4.8.1 单相异步电动机的结构和工作原理	78
4.8.2 单相异步电动机常用的启动方式	79
思考题与习题	80
第5章 继电器—接触器控制系统	82
5.1 常用低压电器	82
5.1.1 低压配电电器	82
5.1.2 低压控制电器	86
5.2 电气控制线路的绘制	95
5.2.1 常用电气图形符号和文字符号	95
5.2.2 电气原理图绘制及其原则	99
5.3 三相异步电动机的控制线路	100
5.3.1 三相异步电动机的启动控制线路	100
5.3.2 三相异步电机的正反转控制线路	104
5.3.3 三相异步电机的制动控制线路	105
5.4 三相异步电动机的调速及软启动	107
5.4.1 三相异步电动机调速控制	107
5.4.2 三相异步电动机软启动控制线路	110
5.5 常用控制线路	113
思考题与习题	114

第6章 电动机和低压电器的选择	116
6.1 电动机容量选择原则	116
6.2 不同工作方式下电动机容量选择	117
6.2.1 电动机负载基本恒定时电动机额定功率的选择	117
6.2.2 变动负载下电动机额定功率的选择	118
6.2.3 重复短时工作方式电动机额定功率的选择	121
6.3 电动机的种类、额定电压、额定转速及形式的选择	122
6.3.1 电动机种类的选择	122
6.3.2 电动机额定电压的选择	122
6.3.3 电动机额定转速的选择	123
6.3.4 电动机形式的选择	123
6.4 低压电器的选择	123
6.4.1 低压开关	123
6.4.2 熔断器	124
6.4.3 主令电器	125
6.4.4 接触器	126
6.4.5 继电器	127
思考题与习题	128
第7章 可编程序控制器(PLC)	129
7.1 PLC的基本结构和原理	129
7.1.1 PLC的基本结构	129
7.1.2 PLC的基本工作原理	131
7.2 PLC的性能指标	132
7.3 PLC的编程语言	134
7.4 西门子系列PLC	136
7.4.1 S7-200的模块组成	136
7.4.2 I/O地址的分配	141
7.4.3 S7-200基本指令系统	143
7.5 PLC控制系统设计的内容步骤	150
7.5.1 PLC应用系统设计的基本原则	150
7.5.2 系统设计和调试的主要步骤	151
7.6 PLC的硬件设置	153
7.6.1 PLC型号的选择	153
7.6.2 I/O模块的选择	154
7.6.3 输入/输出点的配置	157
7.7 PLC的软件设计	157
7.7.1 PLC应用系统的软件设计过程	157

7.7.2 常用的程序设计方法	158
思考题与习题	161
第8章 变频器	162
8.1 通用变频器的基本工作原理	162
8.1.1 基本控制方式	162
8.1.2 逆变的基本原理	163
8.1.3 逆变器	165
8.1.4 智能功率模块(IPM)	168
8.1.5 脉宽调制(PWM)型变频器	168
8.2 通用变频器的参数设置及功能选择	170
8.2.1 通用变频器的外部接口电路	170
8.2.2 主要控制功能	172
8.2.3 变频器的参数设定实例	174
8.3 变频器调速系统设计	175
8.3.1 转速控制的基本概念	175
8.3.2 开环转速控制	176
8.3.3 高精度速度控制的实现方法	176
8.4 变频器外围设施的选用及安装	176
8.4.1 变频器的外围设施的选用	176
8.4.2 变频器的安装	179
思考题与习题	181
第9章 触摸屏及组态软件	183
9.1 触摸屏	183
9.1.1 eView 触摸屏	183
9.1.2 制作一个简单的 EB 500 工程文件	185
9.2 组态软件	193
9.2.1 WinCC 组态软件	194
9.2.2 组态一个简单的 WinCC 项目	195
思考题与习题	205
第10章 控制电机	206
10.1 伺服电动机	206
10.1.1 直流伺服电动机	207
10.1.2 交流伺服电动机	208
10.1.3 交/直流伺服电动机的性能比较	210
10.2 力矩电动机	211
10.2.1 永磁式直流力矩电动机的结构特性	211

10.2.2 直流力矩电动机的特点	212
10.3 微型同步电动机	212
10.3.1 永磁式微型同步电动机	212
10.3.2 反应式微型同步电动机	213
10.3.3 磁滞式微型同步电动机	214
10.4 测速发电机	215
10.4.1 直流测速发电机	216
10.4.2 交流(感应)测速发电机	217
10.5 自整角机	218
10.5.1 控制式自整角机	218
10.5.2 力矩式自整角接收机	220
10.5.3 控制式自整角变压器	221
10.5.4 控制式差动发送机	221
10.5.5 自整角机的选择和使用	222
10.6 直线电动机	222
10.7 步进电动机	225
10.7.1 步进电动机的结构与工作原理	226
10.7.2 小步距角步进电动机	228
10.7.3 步进电动机的分类	229
10.7.4 步进电动机的运行特性及影响因素	230
10.7.5 步进电动机的主要性能指标和应用	234
10.7.6 步进电动机的开、闭环控制	235
思考题与习题	238
附录 思考题与习题部分答案	239
参考文献	246



第 1 章 概 述

本章作为本书的入门引导,介绍机电传动与控制系统的的历史、基本含义、有关概念和基本要求。

1.1 机电传动的目的和任务

机电传动(又称电力传动或电力拖动)就是指以电动机为原动机驱动生产机械的系统总称,它的目的是将电能转变为机械能,实现生产机械的启动、停止以及速度调节,完成各种生产工艺过程要求,保证生产过程的正常进行。

在现代工业中,为了实现生产过程自动化的要求,机电传动不仅包括拖动生产机械的电动机,而且包含控制电动机的一整套控制系统。所以,现代机电传动是和由各种控制元件组成的自动控制系统紧密地联系在一起的,这也是本书取名为《机电传动控制》的原因。

按照现代化生产的要求,机电传动控制系统所要完成的任务,从广义上讲,就是要使生产机械设备、生产线、车间,甚至整个工厂都实现自动化。从狭义上讲,则专指控制电动机驱动生产机械,实现生产产品数量的增加、质量的提高、生产成本的降低、工人劳动条件的改善以及能量的合理利用。

1.2 机电传动及其控制系统的发展概况

机电传动及其控制系统总是随着社会生产的发展而发展的。单就机电传动而言,它的发展大体上经历了成组拖动、单电动机拖动和多电动机拖动三个阶段。(1)成组拖动,就是指一台电动机拖动一根天轴,然后再由天轴通过皮带轮和皮带分别拖动各生产机械,这种拖动方式生产效率低、劳动条件差,一旦电动机发生故障,将造成成组的生产机械停车;(2)单电动机拖动,就是用一台电动机拖动一台生产机械,它虽较成组拖动前进了一步,但当一台生产机械的运动部件较多时,机械传动机构仍十分复杂;(3)多电动机拖动,即一台生产机械的每一个运动部件分别由一台专门的电动机拖动,这种拖动方式不仅大大简化了生产机械的传动机构,而且控制灵活,为生产机械的自动化提供了有利的条件,所以,现代化机电传动基本上均采用这种拖动形式。

原始的机械设备由工作机构、传动机构和原动机组成,控制方式由工作机构和传动机构的机械配合实现。随着以电气元件为主的自动控制系统的广泛应用,设备的性能不断提高,使工作机构、传动机构的结构大为简化。主要由继电器、接触器、按钮、开关等元件组成的机械设备的电气控制系统称为继电器接触器控制系统。其主要控制对象是三相交流异步电动机,

对电动机的启动、制动、反转和调速等进行控制。这种控制所用的电器一般不是“接通”就是“断开”的，控制是断续的。所以，从控制性质上看，这种继电器—接触器控制属于断续控制或开关控制。因其简单、易掌握、价格低、易维修，许多通用机械设备至今仍采用这种控制系统。但是，它也存在功耗大、体积大、控制方式完全固定和不灵活的缺点。

开关控制不能满足对调速性能要求较高的生产机械，因此出现了直流发电机—电动机调速系统。直流电动机具有启动转矩大、容易进行无级调速的特点。但它需要直流电源，直流电源是由一台交流电动机拖动一台直流发电机提供的。这种直流发电机—电动机调速系统中的电压和电流可以连续变化，属于连续控制。目前龙门刨床、轧钢机和造纸机等仍在应用这种控制方式。但是，这种方式存在所用电机数量多、占地面积大、噪声大和效率低等缺点。20世纪60年代后出现了晶闸管电动机自动调速系统，这种系统中的直流电源由晶闸管组成的可控整流电路提供，具有体积小、重量轻、效率高和控制灵敏等优点，所以得到了普遍应用。

20世纪80年代以后，由于半导体技术的应用与发展，使得交流电动机调速系统有了突破性进展。交流调速有许多优点，单机容量和转速可大大高于直流电动机，交流电动机无电刷与换向器，易于维护，可靠性高，能用于带有腐蚀性、易爆性、含尘气体等特殊环境中。与直流电动机相比，交流电动机还具有体积小、重量轻、制造简单、坚固耐用等优点。交流调速已突破关键性技术，从实用阶段进入了扩大应用、系列化的新阶段。以笼型交流伺服电动机为对象的矢量控制技术是近年来新兴的控制技术，它能使交流调速具有直流调速的优越调速性能。交流变频调速器、矢量控制伺服单元及交流伺服电动机已日益广泛地应用于工业中。

为了适应工业自动化和生产过程变动节奏加快的要求，电气控制逐步采用顺序控制技术。所谓顺序控制，就是对机械设备的动作和生产过程按预先规定的逻辑顺序自动进行的一种控制。20世纪60年代末发展起来的实现顺序控制的一种通用的电气控制装置称为顺序控制器（也称程序控制器），一般具有逻辑运算、顺序操作、定时、计数、程序转移、程序分支和程序循环等功能，有的还具有算术运算和数值比较等功能。它不仅用于单机控制，而且用于多机群控和生产线的自动控制等。其主要特点是：编制程序和改变程序方便，通用性和灵活性强，原理简单易懂，工作比较稳定可靠，使用和维修方便，装置体积小，设计和制造周期短，用它可代替大量的继电器。在机床行业，顺序控制器广泛用于单机、组合机床和自动生产线的控制。

近年来，可编程控制器（PLC）在工业过程自动化系统中的应用日益广泛。可编程控制器从问世起就是以最基层、第一线的工业自动化环境及任务为前提的。它可用梯形图编程，具有硬件结构简单、安装维修方便、抗强电磁干扰、工作可靠等优点，工程技术人员能很快地熟悉它、使用它。可编程控制器是一种数字运算操作的电子系统，是专门为在工业环境下应用而设计的。它采用一类可编程的存储器，用来存储执行逻辑运算、顺序控制、定时和算术运算等面向用户的指令，并通过数字式或者模拟式的输入和输出，控制各种类型的机械或生产过程。可编程控制器及其有关外部设备，都按易于工业控制系统连成一体，又易于扩充功能的原则设计。近年来，PLC的一个发展方向是微型、简易、价廉，以图占领一向以继电器系统为主流的（如一般机床、包装机、传输带等）控制领域；另一发展方向是向大型高性能方面延伸。

上述各种控制系统均为电气控制系统。近些年来,在软件方面,许多工业部门都采用了组态软件,组态软件是数据采集监控系统 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition)的软件平台工具,是工业应用软件的一个组成部分。它具有丰富的设置项目,使用方式灵活,功能强大。通过组态软件由上位机程序监控 PLC,然后由 PLC 控制现场的变频器和电动机或直接用组态软件控制现场的变频器和电动机系统。随着组态软件自身以及控制系统的发展,监控组态软件部分地与硬件发生分离,为自动化软件的发展提供了充分发挥作用的舞台。

1.3 课程的性质和任务

机电一体化产品质量和技术水平的高低,已是当今世界衡量一个国家实力和国际地位的重要标志。实现产品的高质量和技术的高水平,其关键是机电一体化技术人才的培养。本课程把驱动电机、控制电机、继电器—接触器控制、可编程序控制器、变频器、组态软件等强电控制的内容,根据学科的发展与其内在规律,以伺服驱动系统为主导,以控制为线索,将元器件与伺服控制系统科学、有机地结合起来,把机电一体化技术所需的强电控制知识都集中在本书中,避免了不必要的重复,加强了系统性,而且理论联系实际,使读者对机电一体化产品中电控技术的强电控制部分有全面、系统的了解和掌握。

1.4 课程的内容安排

全书共分 10 章。第 1 章为概述。第 2 章为基础知识。第 3、第 4 章分别介绍了直流电动机和交流电动机的工作原理及其特性。由于继电器—接触器控制系统,目前还广泛应用于生产实际中,它仍然起着重要的作用,故第 5 章介绍了继电器—接触器控制系统中用到的常用电器和基本控制线路,以及典型的应用实例等。第 6 章介绍了电动机和低压电器的选择。顺序控制器早已应用在自动化的生产中,随着微型计算机的出现和迅速发展,可编程序控制器正在取代传统的顺序控制器,故第 7 章介绍了可编程控制器。变频器的使用越来越普遍;第 8 章介绍了变频器的原理和使用。第 9 章介绍了触摸屏和组态软件,适应目前触摸屏和组态软件的普及应用。随着机电传动控制系统的发展,控制电机作为一种重要的检测、控制元件,被使用得愈来愈多,故第 10 章介绍了各类常用控制电机的结构特点、工作原理、性能和应用。

本教材是按课程学时数为 40~60 编写的。除了课堂讲授的基本内容之外,有一些内容可在教师启发下由学生自学完成,其中第 10 章可以作为选学内容,这部分内容可由教师根据需要在教学中灵活掌握。本书各章后面附有思考题和习题,书末附有部分思考题和习题的答案或提示,适于读者自学。

第 2 章 机电传动分析的基础知识

电机的工作原理都是建立在电磁感应定律、电磁力定律、安培环路定律和电路定律等基本定律之上。电机又往往是用来驱动负载的,掌握机电传动系统的运动方程式及其相关计算和多轴拖动系统中转矩折算的基本原则和方法,了解几种典型生产机械的负载特性,掌握机电传动系统稳定运行的条件并学会用它来分析系统的稳定平衡点,是必须先要掌握的基本知识。如果这些基本知识已经掌握,可跳过本章。

本章将对以上基本知识作集中介绍,作为后续内容的基本知识的铺垫。

2.1 电机中的基本电磁知识

电机是一种基于电磁感应原理和电磁力定律而实现机电能量转换的机械装置,发电机将机械能转换成电能,电动机将电能转换成机械能。但无论是发电机还是电动机,其工作原理都是建立在电磁感应定律、全电流定律、电路定律和电磁力定律等基础之上的。

2.1.1 磁场和磁路分析中常用物理量

描述磁场的物理量主要有磁感应强度(或磁通密度) B 、磁场强度 H 、磁通 Φ 、磁动势 F 、磁阻 R_m 、磁导 Λ_m 、磁链 ψ 等,下面逐一介绍。

1. 磁感应强度(或磁通密度) B

载流导体周围存在着磁场,描述磁场强弱和方向的物理量是磁感应强度 B , B 是矢量。为了形象地描绘磁场,常采用磁力线。磁力线是闭合的曲线,在磁铁外部由 N 极指向 S 极;在磁铁内部,由 S 极指向 N 极。图 2-1 画出了用磁力线表示的载流长导线、线圈和螺线管周围的磁场分布情况。

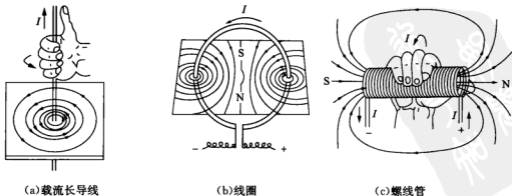


图 2-1 用磁力线表示的载流体周围的磁场分布

磁力线的方向与产生它的电流方向符合右手螺旋定则,如图 2-2 所示。磁感应强度也称为磁通密度,单位为 T(特)。

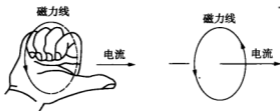


图 2-2 磁力线与电流的右手螺旋关系

2. 磁场强度 H

表征磁场性质的另一个基本物理量是磁场强度 H , H 是矢量,其单位为 A/m。它与磁感应强度 B 的关系为

$$H = B/\mu \quad (2-1)$$

式中, μ 为介质的磁导率。电机中所用的介质,主要是铁磁材料和非导磁材料。空气、铜、铝和绝缘材料等为非导磁材料,它们的磁导率可认为等于真空的磁导率 μ_0 , $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。铁磁材料的磁导率远大于真空的磁导率,如铸钢的磁导率 μ 约为 μ_0 的 1 000 倍,各种硅钢片的磁导率 μ 约为 μ_0 的 6 000~7 000 倍。

3. 磁通 Φ

穿过某一截面(面积为 A)的磁感应强度 B 的总量称为磁通,用符号 Φ 表示,即

$$\Phi = \int_A B \cdot dA \quad (2-2)$$

在均匀磁场中,如果截面 A 与 B 垂直,如图 2-3 所示,则磁通 Φ 和磁感应强度 B 之间的数值关系为

$$\Phi = BA \text{ 或 } B = \Phi/A \quad (2-3)$$

因此, B 又是单位面积上的磁通,称为磁通密度,简称为磁密。在国际单位制中,磁通 Φ 的单位为 Wb(韦伯),磁通密度的单位为 T, $1\text{T} = 1\text{Wb/m}^2$ 。

4. 磁动势 F

线圈中通以电流就会产生磁场,若线圈的匝数为 N ,电流为 I ,则线圈所产生的磁动势 F 为

$$F = NI \quad (2-4)$$

磁动势是产生磁通的“动力”,单位为 A(安)。

5. 磁阻 R_m

磁阻类似于电路中的电阻,表示磁路对磁通所起的阻碍作用。在磁路中取一段由磁导率为 μ 的材料构成的均匀磁路,其横截面面积为 A ,长度为 L ,如图 2-4 所示,则该段磁路的磁阻 R_m 为

$$R_m = L / (\mu A) \quad (2-5)$$

磁阻 R_m 的单位为 $H^{-1}(1/\text{亨})$ 。

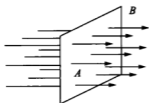


图 2-3 均匀磁场中的磁通

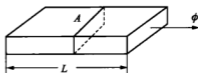


图 2-4 磁路段

6. 磁导 Δ_m

磁阻的倒数称为磁导,用 Δ_m 表示,即

$$\Delta_m = 1/R_m = \mu A/L \quad (2-6)$$

磁导的单位为 H(亨)。

7. 磁链 ψ

线圈的匝数 N 与通过线圈的磁通 Φ 的乘积,称为磁链,用 ψ 表示,即

$$\psi = N\Phi \quad (2-7)$$

8. 边缘效应

当磁路中存在气隙,磁通经过气隙时,将由气隙段向外扩散,这种现象称为边缘效应。

2.1.2 磁路的概念

磁通所通过的路径称为磁路。图 2-5 表示了几种常见的磁路,其中图 2-5(a)为接触器磁路,图 2-5(b)为继电器磁路,图 2-5(c)为永磁电磁仪表的磁路,图 2-5(d)为变压器磁路,图 2-5(e)为四极直流电机的磁路。

2.1.3 电磁基本定律

1. 安培环路定律

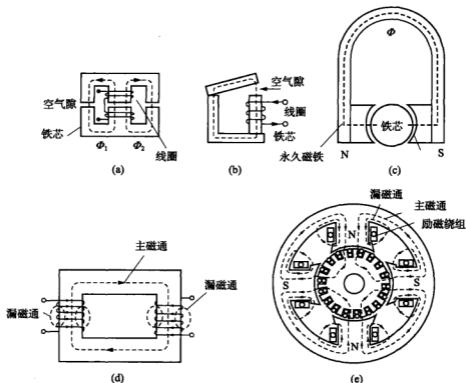
也称为全电流定律。设空间有 N 根载流导体,环绕载流导体任取一磁通的闭合回路,如图 2-6 所示。令 H 表示沿着回路上各点切线方向的磁场强度,则全电流定律的积分形式可表示为

$$\oint H dl = NI = \sum I \quad (2-8)$$

式中, N 为磁通回路包围的导体总数; I 为每一根导体中的电流; NI 为该回路所包围的总电流(代数),也就是作用在该磁路上的总磁动势,简称为磁势。

其中电流的正负号这样来确定,凡导体电流的方向与积分路径的方向符合右手螺旋关系,则电流为正,反之为负。

同时还可以得到磁场强度沿闭合回路的积分,其结果与积分路径无关,即



(a)接触器磁路；(b)继电器磁路；(c)永磁电磁仪表的磁路；(d)变压器磁路；(e)四极直流电机磁路

图 2-5 几种常见的磁路

$$\int Hdl = \int Hdl' = NI \quad (2-9)$$

全电流定律在电机中应用很广，它是电机磁路计算的基础。

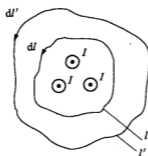


图 2-6 安培环路定律

2. 磁路欧姆定律

假定有一个无分支铁芯磁路，如图 2-7 所示，铁芯上绕有 N 匝线圈，其中的电流为 I ，铁芯截面积为 A ，磁路的平均长度为 L ，材料的磁导率为 μ 。若忽略漏磁通，并认为各截面积上的磁通密度均匀且垂直于各截面，则可得

$$NI = BL/\mu = \Phi L/(\mu A) \text{ 或 } F = \Phi R_m \quad (2-10)$$

式(2-10)表明,作用在磁路上的磁动势,等于磁路内的磁通乘以磁阻。此关系与电路中的欧姆定律在形式上很相似,因此式(2-10)亦称为磁路的欧姆定律。这里,磁路的磁动势 F 被比拟为电路的电动势 E ,磁通 Φ 被比拟为电流 I ,磁阻 R_m 被比拟为电阻 R ,如图 2-7(b)所示。

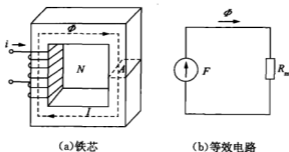


图 2-7 无分支铁芯磁路

3. 电磁感应定律(法拉第定律)

随时间变化的磁场会产生感应电动势,此现象称为电磁感应。如图 2-8 所示,若线圈的匝数为 N ,所通过的磁通为 Φ ,当磁通 Φ 随时间变化时,线圈内将产生感应电动势 e , e 的大小与 N 和磁通的变化率 $d\Phi/dt$ 成正比, e 的实际方向由楞次定律判定如下:在图 2-8(a)中,当 Φ 增加时,感应电动势的方向为阻止磁通变化的方向,于是 e 的实际方向由 X 指向 A ;当 Φ 减小时,的实际方向由 A 指向 X 。

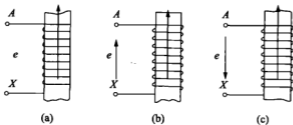


图 2-8 交变磁通及其载流线圈中的感应电动势

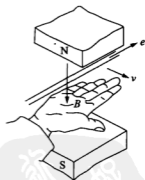


图 2-9 右手定则

感应电动势 e 的数学表达式与 e 的正方向的规定有关:

若规定 e 的正方向从 X 指向 A ,如图 2-8(b)所示,并认为 $e = Nd\Phi/dt$,则当 Φ 增加, $d\Phi/dt > 0$ 时, e 的实际方向与规定的正方向相同;当 Φ 减小, $d\Phi/dt < 0$ 时, e 的实际方向与规定的正方向相反。可见,两种情况下由 $d\Phi/dt$ 所确定的实际方向与由楞次定律确定的实际方向相一致,于是 e 的数学表达式可写成

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2-11)$$

若规定 e 的正方向从 A 指向 X , 如图 2-8(c) 所示, 并认为 $e = Nd\Phi/dt$, 则当 Φ 增加, $d\Phi/dt > 0$ 时, 表示 e 的实际方向与规定的正方向相同, 从 A 指向 X , 这与由楞次定律所确定的实际方向不符; 当 Φ 减小, $d\Phi/dt < 0$ 时 e 的实际方向与规定的正方向相反, 由 X 指向 A , 这亦与由楞次定律所确定的实际方向不符。于是 e 的数学表达式不能写成 $e = Nd\Phi/dt$, 而应写成

$$e = -Nd\Phi/dt \quad (2-12)$$

同一物理现象, 在不同的正方向规定下, 数学表达式的符号不同, 但本质相同。两种表达式都说明电动势 e 的大小与 $Nd\Phi/dt$ 成正比, 电动势 e 的方向为阻碍磁通变化的方向。在电机和变压器的分析中, 常采用第二种规定。

另外, 长度为 L 的直导线在均匀磁场中运动时, 若导线切割磁力线的速度为 v , 导线所在处的磁感应强度为 B , 当导线、磁感应强度 B 、导线的运动速度 v 三者互相垂直时, 导线中感应电动势为

$$e = BLv \quad (2-13)$$

感应电动势 e 的方向用右手定则来确定, 即把右手伸开, 大拇指与其他四指成 90° , 如图 2-9 所示, 让磁力线指向手心, 大拇指指向导线运动方向, 则四指所指方向就是导线中感应电动势 e 的方向。

4. 电路定律

(1) 欧姆定律: 一段电路上的电压降 U , 等于流过该电路的电流 I 与电路电阻 R 的乘积, 即

$$U = RI \quad (2-14)$$

(2) 基尔霍夫第一定律(电流定律): 在电路中任一节点上, 电流的代数和恒等于零, 即

$$\sum I = 0 \quad (2-15)$$

基尔霍夫第二定律(电压定律): 在电路中, 对任一回路, 沿回路环绕一周, 回路内所有电动势的代数和应当等于所有电压降的代数和, 即

$$\sum E = \sum U \quad (2-16)$$

5. 电磁力定律

载流导体在磁场中受到力的作用, 该力称为电磁力。在均匀磁场中, 若载流导体与磁感应强度 B 方向垂直, 导线长度为 L , 流过的电流为 I , 则载流导体所受到的电磁力为

$$f = BLI \quad (2-17)$$

电磁力 f 的方向可用左手定则来确定。即把左手伸开, 大拇指与其他四指成 90° , 如图 2-10 所示, 让磁力线指向手心, 四指指向导体中电流的方向, 则大拇指指向就是导线所受电磁力的方向。

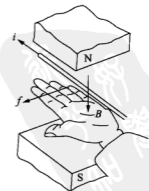


图 2-10 确定受力的左手定则

6. 能量守恒定律

电机是机电能量转换的装置,在能量转换过程中,电机自身消耗的功率称为损耗。稳态运行时,输入功率 P_1 应当等于输出功率 P_2 与所有损耗之和 $\sum P$,即

$$P_1 = P_2 + \sum P \quad (2-18)$$

式(2-18)是建立电机功率方程式的依据。

2.1.4 功率因数的提高

在一定的电压和电流的情况下,电路获得的平均功率取决于电压和电流的有效值以及功率因数 $\cos\varphi$ 的大小,而 $\cos\varphi$ 的大小只决定于负载本身的性质。一般的用电设备,如感应电动机、感应炉、日光灯等都属于电感性负载,因而电路的功率因数往往都比较低,都需要提高功率因数。

1. 提高功率因数的意义

1) 提高供电设备利用率

例如,有一台 $U_n = 230\text{V}$ 、 $I_n = 217\text{A}$ 的变压器向一组负载供电,如果负载总平均功率 $P = 25\text{kW}$, $\cos\varphi = 0.5$,那么,变压器输出的电流 $I = P/U \cos\varphi = 25 \times 1000 / (230 \times 0.5) = 217\text{A}$

此时 $I = I_n$,变压器已经满载,不可能再向其他负载供电。若将功率因数提高到 $\cos\varphi = 0.85$ 时,这台变压器供给该负载同样的功率时,输出电流

$$I = P/U \cos\varphi = 25 \times 1000 / (230 \times 0.85) = 128\text{A}$$

这个电流比变压器的额定电流小得多,该变压器还有能力对其他负载供电,这就提高了变压器的利用率。

2) 减少线路上功率损耗和压降

$$\Delta P = I^2 r = \left(\frac{P}{U \cos\varphi} \right)^2 r \quad (2-19)$$

在供电方面,由于供电设备绕组和输电线上都具有一定的电阻,设等值电阻为 r ,则其功率损失即发电机的电压 U 和输出功率 P 为一定时,功率损失与负载功率因数的平方成反比,这样,功率因数愈高,线路上的电流愈小,所损失的功率也就愈小,从而提高了输电效率。反之,功率因数很低,由于伴随有较大的无功功率往返于电源与负载之间,则在同一电压下要输送同样大小的平均功率,就必须供给较大的电流,这样会增大线路上的功率损耗和电压降。

2. 提高功率因数的方法

功率因数低的根本原因,在于供电系统中存在大量的电感性负载。减少无功功率的方法很多,最常用的方法是在感性负载两端并联大小适当的电容器,利用电感元件和电容元件无功功率互补的性质,来提高功率因数。

2.1.5 导磁材料及其特性

各种电机都是通过磁感应作用而实现能量转换的,磁场是它的媒介。

铁磁材料之所以具有高导磁性能,在于其内部存在着强烈磁化了的自发磁化单元,称为磁畴。在正常情况下,磁畴是杂乱无章地排列着,因而对外不显示磁性。但在外磁场的作用下,磁畴沿着外磁场的方向作出有规则的排列,从而形成了一个附加磁场叠加在外磁场上。由于铁磁材料的每个磁畴原来都是强烈磁化了的,具有较强的磁场。因此,它们所产生的附加磁场的强度,要比非铁磁物质在统一外磁场下所产生的磁场强得多。所以,铁磁物质的导磁系数比非铁磁物质的大得多。

在非铁磁材料中,磁感应强度 $B = \mu_0 H$ 与磁场强度 H 成正比,它们之间呈线性关系。铁磁材料 B 与 H 之间是一种非线性关系,即 $B = f(H)$ 是一条曲线,称为磁化曲线,如图 2-11 所示。在磁化曲线的开始阶段(Oa 段),由于外磁场较强,随着 H 的增加, B 迅速增加。在 bc 段,外磁场进一步加强时,磁畴大都已转到与外磁场一致的方向,这时它们所产生的附加磁场已接近最大值,即使 H 再增大, B 的增加也很有限。这种现象称为磁饱和现象。

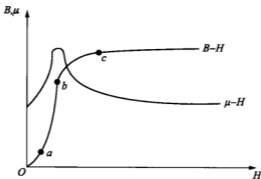


图 2-11 铁磁材料的磁化曲线

铁磁材料中的磁畴,在外磁场作用下进行排列时,彼此之间产生“摩擦”。由于这种“摩擦”的存在,当外磁场停止作用后,磁畴与外磁场方向一致的排列,被部分地保留下来,从而形成了磁滞现象和剩磁。由于存在磁滞现象,所以铁磁材料的磁化过程是不可逆的。铁磁材料在交变磁场的作用下反复磁化时,磁畴之间不断地发生摩擦,必然消耗一定的能量,产生损耗。这种损耗称为磁滞损耗。试验表明,在交变磁化时,铁磁材料的磁滞损耗与磁通的交变频率成正比。

2.1.6 电路与磁路的区别

- (1) 电路中可以有电动势而无电流,磁路中有磁动势必然有磁通。
- (2) 电路中有电流就有功率损耗,而直流磁路中无损耗。
- (3) 电路中电流在导体中流过,而磁路中除主磁通外,还有漏磁通。
- (4) 电路中导体的电导率在一定温度下是恒定不变的,而铁芯磁路中的磁导率随磁感应强度 B 的变化而变化,磁路越饱和,磁阻越大。

2.2 控制系统的基本知识

2.2.1 系统及控制系统

系统是由相互制约的各个部分组成的具有一定功能的整体。在机电传动与控制中,将与控制设备的运动、动作等参数有关的部分组成的具有控制功能的整体称为系统。用控制信号(输入量)通过系统诸环节控制被控变量(输出量),使其按规定的方式和要求变化的系统称为控制系统。

2.2.2 控制系统的分类

控制系统的分类方式很多,但机械设备的控制系统常按系统的组成原理,分为开环控制系统、半闭环控制系统和闭环控制系统。

输出量只受输入量控制的系统称为开环控制系统。在任何开环控制系统中,系统的输出量都不与设定输入量进行比较。对应于每个设定输入端,都有一个相应的固定工作状态与之相对应,系统中没有反馈回路(反馈是把一个系统的输出量不断直接或间接变换后,全部或部分地返回到输入端,再输入到系统中去的过程)。当控制系统出现扰动时,输出量便会出现偏差,因此开环控制系统缺乏精确性和适应性。但它是最简单经济的一类控制系统,一般使用在对精度要求不高的机械设备中(如旧机床的改造)。开环控制系统组成框图如图 2-12 所示。



图 2-12 开环控制系统框图

输出量同时受输入量和输出量控制,即输出量对系统有控制作用,这种存在反馈回路的系统称为闭环控制系统。现有的全功能型 CNC 机器人和 CNC 机床的坐标驱动系统等都属于闭环控制系统。但是在 CNC 机床的坐标驱动系统中,只有以坐标位置量为直接输出量,即在工作台上安装光栅等位移测量元件作为反馈元件的系统才称为闭环系统。那些以交、直流伺服电动机的角位移作为输出量,用光栅作为反馈元件的系统则称为半闭环系统。目前使用中的 CNC 机床绝大多数均为半闭环控制系统。采用半闭环控制系统的优点在于没有将伺服电动机与工作台之间的传动机构和在工作台本身包括在控制系统内,系统易调整、稳定性好且整体造价低。闭环系统框图如图 2-13、图 2-14 所示。数控机床半闭环控制系统框图如图 2-15 所示。

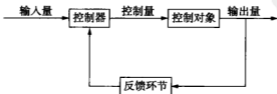


图 2-13 闭环控制系统框图

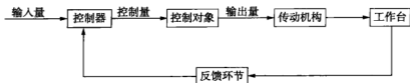


图 2-14 数控机床全闭环控制系统框图



图 2-15 数控机床半闭环控制系统框图

2.3 机电传动系统的动力学基础

机电传动系统是一个由电动机拖动，并通过传动机构带动生产机械运转的机电运动的动力学整体。尽管电动机种类繁多、特性各异，生产机械的负载性质也各种各样，但从动力学的角度来分析，都应服从动力学的统一规律，所以，本节首先介绍电力传动计算的基础知识，然后分析机电传动系统的运动方程式，进而分析机电传动系统稳定运行的条件。

2.3.1 直线运动

1. 距离、速度、加速度、力和质量

当物体作直线运动时，假定其移动距离为 $s(\text{m})$ ，速度为 $v(\text{m/s})$ ，加速度为 $a(\text{m/s}^2)$ ，且均为时间 $t(\text{s})$ 的函数，那么这些量相互之间有下述关系：

速度与距离的关系为

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (2-20)$$

加速度与速度及距离的关系为

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} \quad (2-21)$$

匀速运动时的距离与速度的关系为

$$s = s_0 + v_1 t \quad (2-22)$$

式中， s_0 表示初始位置； v_1 表示速度，为常数。

匀加速运动时的速度、加速度与距离的关系为

$$v = v_0 + a_1 t \quad (2-23)$$

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a_1 t^2 \quad (2-24)$$

式中, v_0 表示初速度; a_1 表示加速度, 为常数。

如果物体的质量为 $M(\text{kg})$, 加速度为 $a(\text{m/s}^2)$, 力为 $F(\text{N})$, 则力与加速度及质量的关系(运动方程式)为

$$F = Ma = M \frac{dv}{dt} = M \frac{d^2 s}{dt^2} \quad (2-25)$$

式(2-25)表明, 力与加速度成正比, 其比例系数为质量, 它表示获得加速度的难易, 亦即惯性的大小。

工程上常将作用于 1kg 质量物体的地球引力作为力的单位, 用 kgf 表示。 kgf 与国际单位的力的单位牛顿(N)之间的关系为

$$1\text{kgf} = 9.8\text{N} \quad (2-26)$$

2. 质量和重量

地球对质量 $M(\text{kg})$ 的物体的引力 $G(\text{N})$ 可表示为

$$G = Mg \quad (2-27)$$

式中, g 是地球对所有物体的引力(重力)所产生的加速度, 重力加速度的国际标准值为

$$g = 9.80665\text{m/s}^2 \quad (2-28)$$

通常, 取 $g = 9.8\text{m/s}^2$ 进行计算。

3. 直线运动的功、功率、动能

当力 $F(\text{N})$ 作用于物体, 并使该物体在力的方向上移动 $s(\text{m})$ 时所做的功

$$W = \int_0^s F ds \quad (2-29)$$

力为常数时所做的功

$$W = FS \quad (2-30)$$

做功快慢的程度, 即单位时间所做的功称为功率, 可表示为

$$P = \frac{dW}{dt} = F \frac{ds}{dt} = Fv \quad (2-31)$$

质量为 $M(\text{kg})$ 的物体以速度 $v(\text{m/s})$ 运动时, 该物体所具有的动能

$$A = \frac{1}{2} Mv^2 \quad (2-32)$$

能量的单位与功的单位相同。也就是说, 为了使物体的速度由零上升到 v , 需要对物体做大小等于 A 的功; 另一方面, 具有动能为 A 的物体在停止之前, 只具有大小为 A 的做功能力。

2.3.2 旋转运动

1. 转矩、角速度

电动机带动物体旋转的能力用转矩表示。如图 2-16 所示,在电动机轴上安装一根杠杆,并在杆端固定一弹簧秤,通电后力就作用于秤,秤可以指示出多少牛顿的力。秤的读数(力的单位)与杠杆的长度(长度的单位)的乘积,就是转矩,即

$$\tau = Fr \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (2-33)$$

如果按弹簧秤的刻度(kg)来读力 F ,转矩 τ 的单位就是 $\text{kgf} \cdot \text{m}$ 。 $\text{N} \cdot \text{m}$ 与 $\text{kgf} \cdot \text{m}$ 的关系为

$$1 \text{kgf} \cdot \text{m} = 9.8 \text{N} \cdot \text{m} \quad (2-34)$$

当电磁力作用在电动机的转子上,会产生使转轴旋转的转矩,即电磁转矩。角速度与角度的关系为

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (2-35)$$

角加速度与角速度及角度的关系为

$$a_{\omega} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2-36)$$

匀角速度运动时,角速度与角度的关系为

$$\theta = \theta_0 + \omega_1 t \quad (2-37)$$

式中, θ_0 表示初始角度; ω_1 表示角速度,为常数。

匀角加速度运动时的角加速度、角速度与角度的关系为

$$\omega = \omega_0 + a_{\omega} t \quad (2-38)$$

$$\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} a_{\omega} t^2 \quad (2-39)$$

2. 转动惯量、飞轮矩 GD^2 和运动方程

如图 2-17 所示,在距旋转轴 $r(\text{m})$ 处有一质量为 m (kg) 的质点,在绕轴旋转时的速度与角速度、加速度与角加速度的关系为

$$\begin{cases} v = r\omega \\ a = ra \end{cases} \quad (2-40)$$

因此,再由式(2-33)得

$$\tau = mr^2 a_{\omega} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (2-41)$$

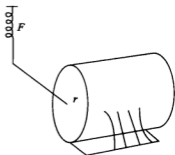


图 2-16 测量电动机的转矩

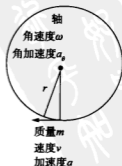


图 2-17 旋转时的速度与角速度

若让力 F 及加速度 a 分别与转矩 τ 及角加速度 a_θ 相对应,显然, mr^2 与质量 M 相对应。若旋转体旋转的转矩为 T ,是作用于旋转体各质点的转矩之总和,即

$$T = \sum \tau = a_\theta \sum mr^2 \quad (2-42)$$

将式(2-42)中构成该旋转体各质点的质量与各自至旋转轴距离平方的乘积 mr^2 的总和称为转动惯量

$$J = \sum mr^2 = MR^2 \quad (2-43)$$

式中, $M = \sum m$ 表示旋转体的总质量; R 表示等值距离。 R 的含义是,当把物体的总质量集中在距旋转轴的距离为 R 时的转动惯量等于该旋转体具有的转动惯量。等值距离又称作旋转半径。

于是,与直线运动相对应,旋转运动的运动方程式(转矩与角加速度及转动惯量之间的关系)为

$$T = J a_\theta = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2-44)$$

直线运动与旋转运动各量的对应关系见表 2-1。

表 2-1 计量单位对照表

直线运动	旋转运动
力 $F(\text{N}), F'(\text{kgf})$	转矩 $T(\text{N} \cdot \text{m}), T'(\text{kgf} \cdot \text{m})$
质量 $M(\text{kg})$	转动惯量 $J(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
加速度 $a(\text{m}/\text{s}^2)$	角加速度 $a_\theta(\text{rad}/\text{s}^2)$
速度 $v(\text{m}/\text{s})$	角速度 $\omega(\text{rad}/\text{s})$
距离 $s(\text{m})$	角度 $\theta(\text{rad})$

工程中通常不用转动惯量的旋转半径,而用对应 4 倍转动惯量时的旋转直径,称作飞轮矩,用 GD^2 表示,则

$$GD^2 = 4J(\text{kg} \cdot \text{m}^2) \quad (2-45)$$

计算复杂形状旋转体的 GD^2 时,需要把整体分成能简单计算的小块,求出每一块的 GD^2 ,再求和。

在工程计算时,有时使用转动惯量的标么值进行分析计算。转动惯量标么值

$$H = 2\pi^3 f \frac{GD^2}{S_N} \left(\frac{n}{60}\right)^2 \quad (2-46)$$

式中 S_N 为电机的视在功率,VA; f 为电机的电源频率,Hz; n 为电机转速,r/min。转动惯量标么值表示的是电机加速转矩的标么值为 1 时,电机由转速为零加速到额定转速时所需时间。

3. 旋转运动的功、功率和动能

若转矩为 $T(\text{N} \cdot \text{m})$,角度为 $\theta(\text{rad})$,则旋转运动所做的功为

$$W = T\theta \quad (2-47)$$

功率表达式为

$$P = \frac{dW}{dt} = T\omega \quad (2-48)$$

式中, T 、 ω 的单位分别为 $\text{N} \cdot \text{m}$ 、 rad/s 。

通常使用电动机每分钟的转数 $n(\text{r/min})$ 表示角速度。 n 与 ω 的关系为

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2-49)$$

由此, 旋转运动的功率

$$P = \frac{2\pi}{60} Tn = 0.1047 Tn \quad (2-50)$$

当转矩 T' ($\text{kgf} \cdot \text{m}$) 表示时, 旋转运动的功率

$$P = \frac{2\pi}{60} g T' n = 1.027 T' n \quad (2-51)$$

转动惯量为 $J(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ 的物体以速度 $\omega(\text{rad/s})$ 旋转时的动能表达式

$$A = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (2-52)$$

若用飞轮矩 $GD^2(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ 代替转动惯量, 并用转速 $n(\text{r/min})$ 代替角速度, 则旋转运动的动能

$$A = \frac{GD^2}{2 \times 4} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 = \frac{GD^2 n^2}{730} \quad (2-53)$$

当转速由 $n_1(\text{r/min})$ 变化到 $n_2(\text{r/min})$ 时, 动能的变化为

$$\Delta A = \frac{GD^2}{730} (n_1^2 - n_2^2) \quad (2-54)$$

当转速下降时, 有 ΔA 的能量从旋转体释放出去; 转速上升时, 旋转体从外界得到 ΔA 的能量并积蓄起来。此时, 吞吐能量的速度即功率

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{GD^2}{365} n \frac{dn}{dt} \quad (2-55)$$

2.3.3 机电传动系统的运动方程式

图 2-18 所示为一单轴机电传动系统, 它是由电动机 M 产生转矩, 用来克服负载转矩, 以带动生产机械运动, 当这两个转矩平衡时, 传动系统维持恒速转动, 转速 n 或角速度 ω 不变, 加速度 dn/dt 或角加速度 $d\omega/dt$ 等于零, 即 $T_M = T_L$ 时, $n = \text{常数}$, $dn/dt = 0$, 或 $\omega = \text{常数}$, $d\omega/dt = 0$, 这种运动状态称为静态(相对静止状态)或稳态(稳定运转状态)。当 $T_M \neq T_L$ 时, 速度(n 或是 ω)就要变化, 产生加速或减速, 速度变化的大小与传动系统的转动惯量 J 有关, 把上述的这些关系用方程式表示, 就是单轴机电传动系统的运动方程式

$$T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2-56)$$

式中, T_M 为电动机产生的转矩; T_L 为单轴传动系统的负载转矩; J 为单轴传动系统的转动惯量; ω 为单轴传动系统的角速度; t 为时间。

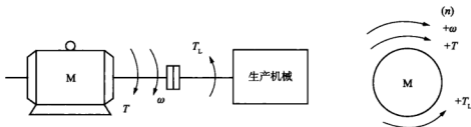


图 2-18 单轴拖动系统

在实际工程计算中,往往用转速 n 代替角速度 ω ,用飞轮惯量(也称飞轮转矩)代替转动惯量 J ,由于 $J = m\rho^2 = mD^2/4$,其中, ρ 和 D 定义为惯性半径和惯性直径,而质量 m 和重力 G 的关系是 $G = mg$, g 为重力加速度,所以, J 与 GD^2 的关系是

$$\{J\}_{\text{kg} \cdot \text{m}^2} = \frac{1}{4} \{m\}_{\text{kg}} \{D^2\}_{\text{m}^2} = \frac{1}{4} \frac{\{G\}_{\text{N}}}{\{g\}_{\text{m/s}^2}} \{D^2\}_{\text{m}^2} = \frac{1}{4} \{GD^2\}_{\text{N} \cdot \text{m}^2} / \{g\}_{\text{m/s}^2} \quad (2-57)$$

$$\text{或} \quad \{GD^2\}_{\text{N} \cdot \text{m}^2} = 4 \{g\}_{\text{m/s}^2} \{J\}_{\text{kg} \cdot \text{m}^2} \quad (2-58)$$

$$\text{且} \quad \{\omega\}_{\text{rad/s}} = \frac{2\pi}{60} \{n\}_{\text{r/min}} \quad (2-59)$$

将式(2-58)和(2-59)代入式(2-56)就可得运动方程的实用形式

$$\{T_M\}_{\text{N} \cdot \text{m}} - \{T_L\}_{\text{N} \cdot \text{m}} = \frac{\{GD^2\}_{\text{N} \cdot \text{m}^2}}{375} \frac{d\{n\}_{\text{r/min}}}{d\{t\}_{\text{s}}} \quad (2-60)$$

式中,常数 375 包含着 $g = 9.81 \text{m/s}^2$,故它有加速度的量纲, GD^2 是个整体物理量,运动方程式是研究机电传动系统最基本的方程式,它决定着系统运动的特征。当 $T_M > T_L$ 时,加速度 $a = dn/dt$ 为正,传动系统为加速运动;当 $T_M < T_L$ 时, $a = dn/dt$ 为负,系统为减速运动。系统处于加速或减速的运动状态为动态。处于动态时,系统中必然存在一个动态转矩

$$\{T_d\}_{\text{N} \cdot \text{m}} = \frac{\{GD^2\}_{\text{N} \cdot \text{m}^2}}{375} \frac{d\{n\}_{\text{r/min}}}{d\{t\}_{\text{s}}} \quad (2-61)$$

它使系统的运动状态发生变化。这样,运动方程式(2-56)或式(2-60)也可以写成转矩平衡方程式

$$T_M - T_L = T_d \quad (2-62)$$

$$\text{或} \quad T_M = T_L + T_d \quad (2-63)$$

就是说,电动机所产生的转矩在任何情况下,总是由轴上的负载转矩(即静态转矩)和动态转矩之和所平衡。

当 $T_M = T_L$ 时, $T_d = 0$,表示没有动态转矩,系统恒速运转,即系统处于稳态,稳态时,电

动机发出转矩的大小,仅由电动机所带的负载(生产机械)所决定。

值得指出的是图2-19(a)中关于转矩正方向的约定:由于传动系统有各种运动状态,相应的运动方程式中的转速和转矩就有不同的符号。因为,电动机和生产机械以共同的转速旋转,所以,一般以转动方向为参考来确定转矩的正负。设电动机某一转动方向的转速 n 为正,则约定电动机转矩 T_M 与 n 一致的方向为正,负载转矩 T_L 与 n 相反的方向为正。根据上述约定就可以从转矩与转速的符号上判定 T_M 与 T_L 的性质:若 T_M 与 n 符号相同(同为正或同为负),则 T_M 表示的作用方向与 n 相同, T_M 为拖动转矩;若 T_M 与 n 符号相反,则表示 T_M 的作用方向与 n 相反, T_M 为制动转矩。而若 T_L 与 n 符号相同,则表示 T_L 的作用方向与 n 相反, T_L 为制动转矩;若 T_L 与 n 符号相反,则表示 T_L 的作用方向与 n 相同, T_L 为拖动转矩。

启动时:如图2-19(a)所示,电动机拖动重物上升, T_M 与 n 正方向一致, T_M 取正号; T_L 与 n 方向相反, T_L 亦取正号。这时的运动方程式为

$$\{T_M\}_{N \cdot m} - \{T_L\}_{N \cdot m} = \frac{\{GD^2\}_{N \cdot m^2}}{375} \frac{d\{n\}_{r/min}}{d\{t\}_s} \quad (2-64)$$

要能提升重物,必存在 $T_M > T_L$,即动态转矩 $T_d = T_M - T_L$ 和加速度 $a = dn/dt$ 均为正,系统加速运行。

制动时:如图2-19(b)所示,仍是提升过程, n 为正,只是此时要电动机制止系统运动,所以, T_M 与 T_L 方向相反, T_M 取负号,而重物产生的转矩总是向下,和启动过程一样, T_L 取正号,这时运动方程式为

$$-\{T_M\}_{N \cdot m} - \{T_L\}_{N \cdot m} = \frac{\{GD^2\}_{N \cdot m^2}}{375} \frac{d\{n\}_{r/min}}{d\{t\}_s} \quad (2-65)$$

可见,此时动态转矩和加速度都是负值,它使重物减速上升,直到停止。制动过程中,系统中动能产生的动态转矩由电动机的制动转矩和负载转矩所平衡。

2.3.4 转矩、转动惯量和飞轮转矩的折算

上节所介绍的是单轴拖动系统的运动方程式,但实际的拖动系统一般是多轴拖动系统,如图2-20所示。在这种情况下,为了列出这个系统的运动方程,必须先将各转动部分的转矩和转动惯量或直线运动部分的质量都折算到某一根轴上,一般折算到电动机轴上,即折算成图2-18所示的最简单的典型单轴系统,折算时的基本原则是折算前的多轴系统同折算后的单轴系统,在能量关系上或功率关系上保持不变。下面介绍折算方法。

1. 负载转矩的折算

负载转矩是静态转矩,可根据静态时功率守恒原则进行折算。

对于旋转运动,如图2-20(a)所示,当系统匀速运动时,生产机械的负载功率为

$$P'_L = T'_L \omega_n \quad (2-66)$$

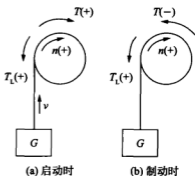


图2-19 转矩方向的约定

式中, T_L 和 ω_L 生产机械的负载转矩和旋转角速度。

设 T_L 折算到电动机轴上的负载转矩为 T'_L , 则电动机轴上的负载功率为

$$P_M = T_M \omega_M \quad (2-67)$$

式中, ω_M 为电动机转轴的角速度。

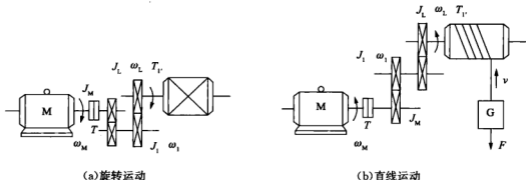


图 2-20 多轴拖动系统

考虑到传动机构在传递功率的过程中有损耗, 这个损耗可以用传动效率来表示, 即

$$\eta'_c = \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} = \frac{P'_L}{P_M} = \frac{T'_L \omega_L}{T_M \omega_M} \quad (2-68)$$

于是可得折算到电动机轴上的负载转矩

$$T_L = \frac{T_L \omega_L}{\eta_c \omega_M} = \frac{T'_L}{\eta_c j} \quad (2-69)$$

式中, η_c 为电动机拖动产生机械运动时的传动效率; $j = \omega_M / \omega_L$ 为传动机构的速比。

对于直线运动, 如图 2-20(b) 所示的卷扬机构就是一例。若生产机械直线运动部件的负载力为 F , 运动速度为 v , 则所需的机械功率为

$$P'_L = Fv \quad (2-70)$$

它反映在电动机轴上的机械功率为

$$P_M = T_L \omega_M \quad (2-71)$$

式中, T_L 为在电动机轴上产生的负载转矩。

如果是电动机拖动生产机械旋转或移动, 则传动机构中的损耗应由电动机承担, 根据功率平衡关系就有 $T_L \omega_M = Fv / \eta_c$ 。

将 $\{\omega\}_{m/s} = \frac{2\pi}{60} \{n\}_{r/min}$ 代入上式可得

$$\{T_L\}_{N \cdot m} = 9.55 \{F\}_N \{v\}_{m/s} / (\eta_c \{n_M\}_{r/min}) \quad (2-72)$$

式中, n_M 为电动机轴的转速。

如果是生产机械拖动电动机旋转, 例如, 卷扬机构下放重物时, 电动机处于制动状态, 这种情况下传动机构中的损耗则由生产机械的负载来承担, 于是有

$$T_{L\omega M} = Fv/\eta'_c \quad (2-73)$$

式中, η'_c 为生产机械拖动电动机运动时的传动效率。

2. 转动惯量和飞轮转矩的折算

由于转动惯量和飞轮转矩与运动系统的动能有关,因此,可根据动能守恒原则进行折算。对于旋转运动,如图 2-20(b)所示的拖动系统,折算到电动机轴上的总转动惯量为

$$J_z = J_M + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{j_L^2} \quad (2-74)$$

式中, J_M 、 J_1 、 J_L 为电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的转动惯量; $j_1 = \omega_M/\omega_1$ 为电动机轴与中间传动轴之间的速比; $j_L = \omega_M/\omega_L$ 为电动机轴与生产机械轴之间的速比; ω_M 、 ω_1 、 ω_L 分别为电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的角速度。折算到电动机轴上的总飞轮转矩为

$$GD_z^2 = GD_M^2 + \frac{GD_1^2}{j_1^2} + \frac{GD_L^2}{j_L^2} \quad (2-75)$$

式中, GD_M^2 、 GD_1^2 、 GD_L^2 分别为电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的飞轮转矩。

当速比 j 较大时,中间传动机构的转动惯量 J_1 或飞轮转矩 GD_1^2 ,在折算后占整个系统的比重不大,实际工程中为了计算方便起见,多用适当加大电动机轴上的转动惯量 J_M 或飞轮转矩 GD_M^2 的方法,来忽略中间传动机构的转动惯量 J_1 或飞轮转矩 GD_1^2 的影响,于是有

$$J_z = \delta J_M + \frac{J_L}{j_L^2} \quad (2-76)$$

$$\text{或} \quad GD_z^2 = \delta GD_M^2 + \frac{GD_L^2}{j_L^2} \quad (2-77)$$

一般 $\delta = 1.1 \sim 1.25$ 。

对于直线运动[如图 2-20(a)所示的拖动系统],设直线运动部件的质量为 m ,折算到电动机轴上的总转动惯量或总飞轮转矩分别为

$$J_z = J_M + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{j_L^2} + m \frac{v^2}{\omega_M^2} \quad (2-78)$$

$$\text{或} \quad \{GD_z^2\}_{Nm^2} = \{GD_M^2\}_{Nm^2} + \frac{\{GD_1^2\}_{Nm^2}}{j_1^2} + \frac{\{GD_L^2\}_{Nm^2}}{j_L^2} + 365 \frac{\{G\}_N \{v^2\}_{(m/s)^2}}{\{n_M^2\}_{(r/min)^2}} \quad (2-79)$$

依照上述方法,就可把具有中间传动机构带有旋转运动部件或直线运动部件的多轴拖动系统,折算成等效的单轴拖动系统,将所求得的 T_L 、 GD_z^2 代入式(2-79)就可得到多轴拖动系统的运动方程式

$$\{T_M\}_{N \cdot m} - \{T_L\}_{N \cdot m} = \frac{\{GD_z^2\}_{N \cdot m^2} d \{n_M\}_{r/min}}{375 d \{t\}_s} \quad (2-80)$$

以此来研究机电传动系统的运动规律。

2.3.5 电动机所需输出功率的计算基础

本节介绍一些有关的基础知识。

1. 由力和速度确定输出功率

克服 $F(\text{N})$ 的力,并使物体以速度为 $v(\text{m/s})$ 运动所需功率 P ,即

$$P = Fv(\text{W}) \quad (2-81)$$

有相当多的负载可以用式(2-81)去计算功率。考虑到从负载实际做功部分到电动机之间,总有动力传递装置,要产生功率损耗,因此,电动机的输出功率必须比负载的实际有效功率大。假定机械效率为 η (效率通常用百分值表示,为使公式简单起见,假定 η 表示的值是小数),则负载轴输入功率 P_L (力的单位为 N ,速度的单位为 m/s) 为

$$P_L = \frac{Fv}{\eta}(\text{W}) \quad (2-82)$$

若用 $F'(\text{kgf})$ 表示力,用 $v'(\text{m/min})$ 表示速度,则负载轴输入功率

$$P_L = \frac{9.8F'v'}{\eta} = \frac{F'v'}{6.12\eta}(\text{W}) = \frac{F'v'}{6120\eta}(\text{kW}) \quad (2-83)$$

电动机的额定输出功率要比 P_L 留有 10%~20% 的余量。

(1) 垂直提升功率

卷扬机、起重机、绞车等的速度的单位常用 m/min 表示。根据式(2-83),以速度 $v'(\text{m/min})$ 提升重量为 $M(\text{kg})$ 的物品所需功率

$$P_L = \frac{Mv'}{6.12\eta}(\text{W}) = \frac{Mv'}{6120\eta}(\text{kW}) \quad (2-84)$$

η 通常为 0.8 左右。

(2) 水平行走功率

如图 2-21 所示,负载克服阻力在水平方向移动,假定移动部分的重量为 $M(\text{kg})$ 、速度为 $v'(\text{m/min})$ 、行走阻力系数为 λ (每千克质量的阻力,用表示 kgf/kg),于是行走所需力为 $\lambda M(\text{kgf})$,由式(2-81)得到水平行走功率

$$P_L = \frac{9.8\lambda M \frac{v'}{60}}{\eta} = \frac{\lambda M v'}{6.12\eta}(\text{W}) = \frac{\lambda M v'}{6120\eta}(\text{kW}) \quad (2-85)$$

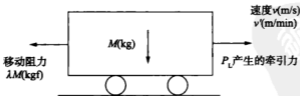


图 2-21 水平行走

当车轮在轨道上或平整路面上行走时 λ 值为 0.01~0.03,当车轮在砂石路面这类不平整的道路上行走时 λ 值为 0.1~0.2,效率值为 0.7~0.9。

(3) 在倾斜面上行驶的功率

如图 2-22 所示,使质量为 $M(\text{kg})$ 的物体在斜面上以速度 $v(\text{m/s})$ 或 $v'(\text{m/min})$ 行驶

时,要按图中所示将力分解成两个分力。由此得在斜面上行驶的功率

$$\begin{aligned}
 P_L &= \frac{9.8(M\sin\alpha + \lambda M\cos\alpha)v}{\eta_L} (\text{W}) \\
 &= \frac{(M\sin\alpha + \lambda M\cos\alpha)v'}{6.12\eta_L} (\text{W})
 \end{aligned} \quad (2-86)$$

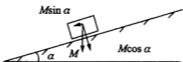


图 2-22 在斜面上行驶的物体

2. 由转矩和角速度确定输出功率

在式(2-71)中加入效率即可得到克服阻力矩 $T(\text{N} \cdot \text{m})$ 或 $T'(\text{kgf} \cdot \text{m})$ 并以角速度 $\omega(\text{rad/s})$ 或 $n(\text{r/min})$ 旋转时所需的功率。转矩单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$, 角速度单位为 rad/s , 电动机轴功率为

$$P_L = \frac{T\omega}{\eta_L} (\text{W}) \quad (2-87)$$

转矩单位为 $\text{kgf} \cdot \text{m}$, 转速单位为 r/min 时, 电动机轴功率为

$$P_L = \frac{1.027T'n}{\eta_L} (\text{W}) = \frac{1.027T'n}{\eta_L} \times 10^{-3} (\text{kW}) \quad (2-88)$$

如图 2-23(a) 所示, 在半径为 $r(\text{m})$ 的圆周切线方向上作用大小为 $F(\text{N})$ 或 $F'(\text{kgf})$ 的力, 并以 $\omega(\text{rad/s})$ 或 $n(\text{r/min})$ 旋转时的功率用式(2-89)计算:

$$P_L = \frac{Fr\omega}{\eta_L} (\text{W}) = 1.027 \frac{F'r\omega}{\eta_L} (\text{W}) \quad (2-89)$$

在生产机械中, F 相当于切削力。

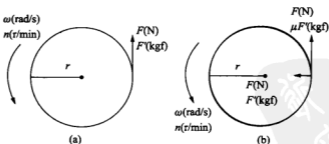


图 2-23 旋转物体的作用力

如图 2-23(b) 所示, 若摩擦系数为 μ , 反抗由垂直于圆周的力 $F(\text{N})$ 或 $F'(\text{kgf})$ 所产生的摩擦力, 并以角速度 $\omega(\text{rad/s})$ 或 $n(\text{r/min})$ 旋转时的功率可由式(2-90)计算:

$$P_L = \frac{\mu Fr\omega}{\eta_L} (\text{W}) = 1.027 \frac{F'r\omega}{\eta_L} (\text{W}) \quad (2-90)$$

当轴由轴承支撑而旋转时,若轴承支撑的重量为 $M(\text{kg})$,轴承的直径为 $d(\text{m})$,转速为 $n(\text{r}/\text{min})$,轴承的摩擦系数为 μ ,则克服轴承损耗使轴旋转所需功率可由式(2-91)计算:

$$P_b = 1.027\mu M \frac{d}{2} n (\text{W}) \quad (2-91)$$

不同种类轴承的摩擦系数列于表 2-2。

表 2-2 轴承的摩擦系数

轴承种类	摩擦系数 μ
单列深槽球轴承	0.001 2~0.001 5
滚柱轴承	0.001 2~0.001 5
滑动轴承(油润滑)	0.025
无油轴承	0.05

3. 输送流体的功率

把质量为 $M(\text{kg})$ 的流体升高 $h(\text{m})$ 所要做的功为 Mgh 。由式(1-12)可得在 $t(\text{s})$ 时间内要做完这些功,其功率应为

$$P = \frac{Mgh}{t} (\text{W}) \quad (2-92)$$

利用这种方法可以计算泵、送风机等流体输送机械的功率。

(1) 泵

泵的性能用流量 $Q(\text{m}^3/\text{min})$ 与扬程 $H(\text{m})$ 来表示。它的含义是将 $Q(\text{m}^3)$ 即 $Q \times 10^3$ (kg) 的水用 60s 时间升高 $H(\text{m})$, 于是,得泵所需轴功率

$$P_L = 9.8Q \times 10^3 \frac{H}{60\eta} = \frac{QH}{6.12\eta} \times 10^3 (\text{W}) = \frac{QH}{6.12\eta} (\text{kW}) \quad (2-93)$$

泵的效率与流量有关,分别为:流量 $10\text{L}/\text{min}$ 的泵为 30%, $0.1 \sim 0.5\text{m}^3/\text{min}$ 的泵为 40%~60%, $1 \sim 5\text{m}^3/\text{min}$ 的泵为 50%~70%。

若泵不是输送水,则式(2-93)还要乘以流体的密度 ρ 。

(2) 送风机

送风机的性能用风量 $Q(\text{m}^3/\text{min})$ 和风压 $p_r(\text{mmH}_2\text{O})$ 表示。假定气体密度为 ρ , 在 60s 时间内将质量为 $\rho Q \times 10^3$ (kg) 的气体提升 $\frac{p_r \times 10^{-3}}{\rho}$ (m), 则送风机所需轴功率为

$$P_L = \frac{Q p_r}{6.12\eta} (\text{W}) = \frac{Q p_r}{6.120\eta} (\text{kW}) \quad (2-94)$$

送风机的效率为 45%~55%。

4. 动力传动装置的效率

生产机械中包含有许多动力传动装置,生产机械的效率已经考虑了这些传统装置的损耗。但是,若在生产机械输入轴与电动机轴之间还装有皮带、齿轮等传动装置,则还要考虑这部分传动装置的效率。一级传动装置的效率(用小数值表示)列于表 2-3。

表 2-3 传动装置的效率

传动装置种类	效率
齿轮(一级)	0.93~0.96
蜗轮蜗杆(一级)	0.85~0.90
皮带(一级)	0.9~0.97

2.4 生产机械的机械特性

同一转轴上负载转矩和转速之间的函数关系,称为生产机械的机械特性。

2.4.1 恒转矩型机械特性

此类机械的特点是负载转矩为常数。属于这一类的生产机械有提升机构、提升机的行走机构、皮带输送机以及金属切削机床等。

依据负载转矩与运动方向的关系,可以将恒转矩型的负载转矩分为反抗转矩和位能转矩。

反抗转矩也称摩擦转矩,是因摩擦、非弹性体的压缩、拉伸与扭转等作用所产生的负载转矩。反抗转矩的方向恒与运动方向相反,运动方向发生改变时,负载转矩的方向也会随着改变,因而它总是阻碍运动的。

位能转矩与摩擦转矩不同,它是由物体的重力和弹性体的压缩、拉伸与扭转等作用所产生的负载转矩。位能转矩的作用方向恒定,与运动方向无关,它在某方向阻碍运动,而在相反方向便促进运动。

2.4.2 离心式通风机型机械特性

这一类型的机械是按离心力原理工作的,如离心式鼓风机、水泵等,它们的负载转矩 T_L 与 n 的平方成正比,即 $T_L = Cn^2$, C 为常数,如图 2-24 所示。

2.4.3 直线型机械特性

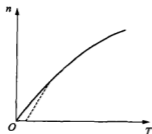


图 2-24 离心式通风机型机械特性

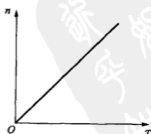


图 2-25 直线型机械特性

这一类机械的负载转矩 T_L 是随 n 的增加成正比地增大,即 $T_L = Cn$, C 为常数,如图

2-25所示。实验室中作模拟负载用的他励直流发电机,当励磁电流和电枢电阻固定不变时,其电磁转矩与转速即成正比。

2.4.4 恒功率型机械特性

此类机械的负载转矩 T_L 与转速 n 成反比,即 $T_L = K/n$, 或 $K = T_L n \propto P$ 常数,如图 2-26 所示。

除了上述几种类型的生产机械外,还有一些生产机械具有各自的转矩特性,如带曲柄连杆机构的生产机械,它们的负载转矩是随转角而变化的,而球磨机、碎石机等生产机械,其负载转矩则随时间作无规律的随机变化,等等。

还应指出,实际负载可能是单一类型的,也可能是几种典型的综合,例如,实际通风机除了主要是通风机性质的负载特性外,轴上还有一定的摩擦转矩 T_0 ,所以,实际通风机的机械特性应为 $T_L = T_0 + Cn^2$,如图 2-24 中的虚线所示。

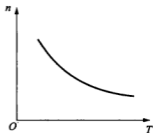


图 2-26 恒功率型机械特性

2.5 机电传动系统稳定运行的条件

机电传动系统里,电动机与生产机械连成一体,为了使系统运行合理,就要使电动机的机械特性与生产机械的机械特性尽量相配合。特性配合好的最基本的要求是系统要能稳定运行。

机电传动系统的稳定运行包含两重含义:一是系统应能以一定速度匀速运转,二是系统受某种外部干扰作用(如电压波动、负载转矩波动等)而使运行速度稍有变化时,应保证在干扰消除后系统能恢复到原来的运行速度。

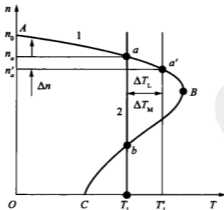


图 2-27 机电传动系统运行特性图

为保证系统匀速运转,必要条件是电动机轴上的拖动转矩 T_M 和折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 大小相等,方向相反,相互平衡。从图 2-27 的 $T-n$ 坐标平面上看,这意味着

电动机的机械特性曲线 $n=f(T_M)$ 和生产机械的机械特性曲线 $n=f(T_L)$ 必须有交点。

但是机械特性曲线存在交点只是保证系统稳定运行的必要条件,还不是充分条件,实际上只有 a 点才是系统的稳定平衡点,因为在系统出现干扰时,例如负载转矩突然增加了 ΔT_L ,则 T_L 变为 T'_L ,这时,电动机来不及反应,仍工作在原来的 a 点,其转矩为 T_M ,于是 $T_M < T'_L$,由拖动系统运动方程可知,系统要减速,即 n 要下降到 $n'_a = n_a - \Delta n$,从电动机机械特性的 AB 段可看出,电动机转矩 T_M 将增大为 $T'_M = T_M + \Delta T_M$,电动机的工作点转移到 a' 点。当干扰消除 ($\Delta T_L = 0$) 后,必有 $T'_M > T_L$ 迫使电动机加速,转速 n 上升,而 T_M 又要随 n 的上升而减小,直到 $\Delta n = 0$, $T_M = T_L$,系统重新回到原来的运行点 a ;反之, b 点不是系统的稳定平衡点。

从以上分析可以总结出机电传动系统稳定运行的必要充分条件是:

(1) 电动机的机械特性曲线 $n=f(T_M)$ 和生产机械的特性曲线 $n=f(T_L)$ 有交点(即拖动系统的平衡点);

(2) 当转速大于平衡点所对应的转速时, $T_M < T_L$,即若干扰使转速上升,当干扰消除后应有 $T_M - T_L < 0$;而当转速小于平衡点所对应的转速时, $T_M > T_L$,即若干扰使转速下降,当干扰消除后应有 $T_M - T_L > 0$ 。

只有满足上述两个条件的平衡点,才是拖动系统的稳定平衡点,即只有这样的特性配合,系统在受到外界干扰后,才具有恢复到原平衡状态的能力而进入稳定运行。

例如,当异步电动机拖动直流他励发电机工作时,具有图 2-28 的特性时, b 点便不符合稳定运行条件,因此,在此情况下, b 点是不稳定平衡点。

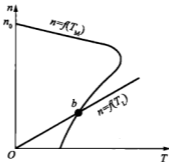


图 2-28 异步电动机拖动直流他励发电机工作时的特性

2.6 机电传动系统的过渡过程

当机电传动系统中电动机的电磁转矩或负载转矩发生变化时,系统就要从一个稳定的运转状态变化到另一个稳定的运转状态,这个变化过程称为过渡过程。电动机在启动、制动、反转、调速或负载突变等情况下,都将经历过渡过程。

2.6.1 机电传动系统中的惯性

机电传动系统之所以产生过渡过程,是因为存在下列各种惯性。

- (1) 机械惯性反映在转动惯量和飞轮转矩上,即转速 n 不能突变。
- (2) 电磁惯性反映在电感上,即电枢电流和励磁磁通不能突变。
- (3) 热惯性反映在温度上,即温度不能突变。

在整个机电过渡过程中,这三种惯性在系统中虽然会互相影响,如电动机发热时,电阻会变化,从而引起电流和磁通的变化。但是由于热惯性较大,温度变化较慢,一般可不予考虑;在有些情况下,电动机中不串接电感,电磁惯性影响也不大。因此,机电传动系统中只需考虑机械惯性,即在过渡过程中只有转速是不能突变的,而电枢电流和转矩都可以突变。

以系统的启动过程为例,系统的变化规律可通过下列三个式子来表示,即

$$n = n_s + (n_0 - n_s)e^{-t/\tau_m} \quad (2-95)$$

$$I_a = I_L + (I_0 - I_L)e^{-t/\tau_m} \quad (2-96)$$

$$T = T_L + (T_0 - T_L)e^{-t/\tau_m} \quad (2-97)$$

式中, n_s 和 T_L 分别为系统稳定运行 (T_L 为恒定值) 时的稳态转速、电枢电流和电磁转矩; n_0 、 I_0 和 T_0 分别为系统启动 ($n=0$) 时的转速、电枢电流和电磁转矩; τ_m 为机电时间常数,定义为

$$\tau_m = \frac{GD^2 R}{375 K_e K_m \Phi_N} \quad (2-98)$$

式中, R 为电枢回路的总电阻; Φ_N 为电枢回路的总磁通量; K_e 为电势常数,与电机结构有关; K_m 为转矩常数,也与电机结构有关。

可见,转速、电枢电流、转矩都是按指数规律变化的。而机电时间常数与转动惯量、电阻及磁通等物理量有关。

2.6.2 机电传动系统的过渡过程时间

将运动方程式 $T - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$ 写成 $d(t) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{T - T_L}$, 并对其两边积分, 可得过渡过程时间 t 的表达式为

$$t = \int \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{T - T_L} = \int \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{T_D} \quad (2-99)$$

如果从起始转速 n_1 到稳定转速 n_s 的过渡过程中, 始终保持动态转矩了 T_D 不变, 则系统为匀加速或匀减速运动, 则过渡过程时间 t 为

$$t = \int \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{T_D} = \frac{GD^2}{375 T_D} (n_s - n_1) \quad (2-100)$$

由式(2-99)可知, 机电传动系统的过渡过程时间 t 与飞轮转矩 GD^2 和动态转矩 T_D 有关。

2.6.3 加快过渡过程的方法

从式(2-98)和式(2-100)可以看出,机电传动系统的过渡过程时间 t 与机电时间常数 τ_m 有关。 τ_m 越大,过渡过程进行得越慢; τ_m 越小,过渡过程进行得越快。所以,为加快系统的过渡过程,缩短过渡过程时间,应设法减小机电时间常数 τ_m 。由于机电传动系统的过渡过程时间与系统的飞轮转矩和速度变化成正比,而与动态转矩成反比。所以,要有效地缩短过渡过程时间,应设法减少飞轮转矩 GD_2^2 和加大动态转矩 T_D 。

1. 减少飞轮转矩 GD_2^2

系统的飞轮转矩 GD_2^2 中大部分是电动机转子的 GD_2^2 ,因此,减小电动机的转子就成了加快过渡过程的重要措施。例如,龙门刨床的刨台采用两台电动机同轴运行就是此目的;有的采用小惯量直流电动机,即 GD_2^2 小,过渡过程时间少,提高了系统的快速响应能力。

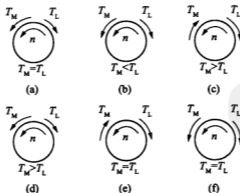
2. 加大动态转矩 T_D

从电动机方面考虑,采用大惯量直流电动机,即 GD_2^2 越大,最大转矩 T_{max} 越大,因此动态转矩 T_D 也就越大, $T_D = T_{max} - T_L$ 。

从控制方面考虑,动态转矩越大,系统的加速度也越大,过渡过程的时间就越短。因此可以在控制系统中要求系统在过渡过程中获得最佳的转矩波形(或电流波形),使得电动机发出最大的电磁转矩,以使电动机在最短的时间内达到所需要的转速。

思考题与习题

1. 说明机电传动系统运动方程式中的拖动转矩、静态转矩和动态转矩的概念。
2. 从运动方程式怎样看出系统是处于加速的、减速的、稳定的和静止的各种工作状态?
3. 试列出以下几种情况下(系统的运动方程式,并说明系统的运行状态是加速、减速还是匀速?(图中箭头方向表示转矩的实际作用方向)



4. 多轴拖动系统为什么要折算成单轴拖动系统? 转矩折算为什么依据折算前后功率不变的原则? 转动惯量折算为什么依据折算前后动能不变的原则?
5. 为什么低速轴转矩大? 高速轴转矩小?

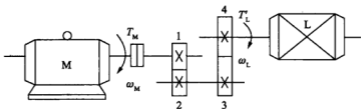
6. 为什么机电传动系统中低速轴的 GD^2 比高速轴的 GD^2 大得多?

7. 在下图中, 已知 $Z_2/Z_1=3, Z_4/Z_3=5$, 减速机构的效率为 0.92, 各齿轮的飞轮惯量分别为 $GD_1^2=29.4\text{N}\cdot\text{m}^2, GD_2^2=78.4\text{N}\cdot\text{m}^2, GD_3^2=49\text{N}\cdot\text{m}^2, GD_4^2=196\text{N}\cdot\text{m}^2$

电动机的飞轮惯量 $GD_M^2=294\text{N}\cdot\text{m}^2$

负载的飞轮惯量 $GD_L^2=450.8\text{N}\cdot\text{m}^2$

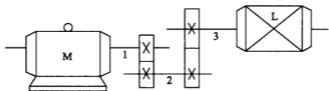
负载转矩 $T'_L=470.4\text{N}\cdot\text{m}^2$



试求: (1) 折算到电动机轴上的负载转矩; (2) 折算到电动机轴上的飞轮惯量。

8. 在下图中, 已知每根轴的飞轮惯量和转速分别为 $GD_1^2=78.4\text{N}\cdot\text{m}^2, n_1=2500\text{r}/\text{min}; GD_2^2=245\text{N}\cdot\text{m}^2, n_2=1000\text{r}/\text{min}; GD_3^2=735\text{N}\cdot\text{m}^2, n_3=500\text{r}/\text{min}$; 负载转矩 $98\text{N}\cdot\text{m}^2$, 电动机拖动转矩为 $29.4\text{N}\cdot\text{m}^2$, 电动机拖动生产机械的效率为 0.9。

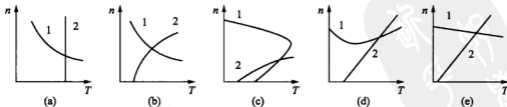
试求: (1) 生产机械轴的加速度; (2) 为使生产机械有 $3(\text{r}/\text{min})/\text{s}$ 的加速度, 要装飞轮惯量 $GD^2=612.5\text{N}\cdot\text{m}^2$ 的飞轮, 问此飞轮应装在哪根轴上。



9. 一般生产机械按其运动受阻力的性质来分可有哪几种类型的负载?

10. 反抗静态转矩与位能静态转矩有何区别, 各有什么特点?

11. 下图曲线 1 和 2 分别为电动机和负载的机械特性, 试判断哪些是系统的稳定平衡点, 哪些不是。



第 3 章 直流电机

电动机可分为交流电动机和直流电动机两大类。直流电动机将直流电能转换为机械能。由于它具有良好的调速性能和激活转矩大等优点,广泛用于对调速要求较高、正反转和启动制动频繁或多单元同步协调运转的生产设备。

3.1 直流电机的工作原理和基本结构

3.1.1 直流电机的工作原理

1. 直流发电机的工作原理

图 3-1 所示是一个简单的直流发电机模型。它的两个磁极(N 极和 S 极)在空间固定不动。两磁极之间有一个铁质的圆柱体(称为电枢铁芯)。电枢铁芯与磁极之间的间隙称为气隙。两根导体 ab 和 cd 连成一个线圈,并嵌置在电枢铁芯表面上,通常称为电枢绕组。线圈的首、末端分别连接到两个圆弧形的铜片(称为换向片)上。换向片固定在转轴上,换向片之间以及换向片与转轴之间都是互相绝缘的。电机的转动部分称为电枢。为了把电枢绕组和外电路接通,装了两个在空间固定不动的电刷 A 和 B 。当电枢转动时,电刷 A 只能与转到上面的一片换向片接触,而电刷 B 只能与转到下面的一片换向片接触。

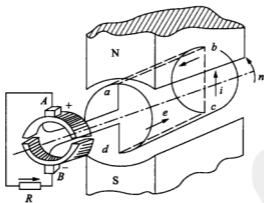


图 3-1 直流发电机工作原理图

假设电机的电枢由一个原动机拖动,以恒定转速逆时针方向转动。根据法拉第电磁感应定律可知,每一根导体中将感生电势,其方向可用右手定则确定。在图 3-1 所示位置时, ab 导体处于 N 极下,电势方向由 b 到 a ,而 cd 导体处于 S 极下,电势方向由 d 到 c 。从整个线圈来看,导体 ab 与 cd 的电势方向恰好是相加的,并经由电刷 A 和 B 输出给负载。很明显,电刷 A 具有正极性,电刷 B 具有负极性。

当电枢以恒定转速旋转时,导体 ab (或 cd)将轮流在 N 极下及 S 极下切割磁力线,所以导体 ab 及 cd 中感应电势是交变电势。但由于电刷 A 只与处于 N 极下的导体相接触,当 ab 导体处在 N 极下时,电势方向由 b 到 a ,引到电刷 A 上时,电刷 A 的极性为“+”。当 cd 导体转到 N 极下时,电刷 A 则与 cd 导体相接触,电势方向由 c 到 d ,引到电刷 A 上时,其极性仍为“+”。由此可见,电刷 A 的极性永远为“+”,电刷 B 的极性永远为“-”,故 A、B 电刷间的电势为直流电势。

由此可见,当电枢在原动机的驱动下以恒定速度运转时,线圈中感应的交变电势,通过换向片和电刷的整流作用变成直流电势。

2. 直流电动机的工作原理

图 3-2 所示为直流电动机工作原理模型。电机部分与发电机相同,只是把外电路中的负载电阻换成直流电源,电枢不是由原动机驱动,而是连接一个机械负载。在电刷 A、B 两端接上直流电源 U ,电刷 A 接至电源的正极,电刷 B 接至电源的负极。则线圈中有电流流过,其方向如图 3-2 中箭头所示。可以知道,位于磁场中的载流导体必将受到电磁力的作用,至于电磁力的方向可用左手定则确定。这一电磁力形成了作用于电枢铁芯的电磁转矩。由图 3-2 可见,转矩的方向是逆时针的。电动机的电枢在此转矩的作用下,将逆时针方向旋转,从而拖动与电机轴相联的负载机械运转,成为一台直流电动机。

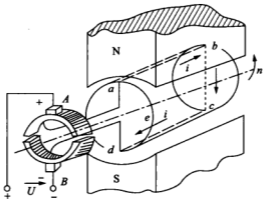


图 3-2 直流电动机工作原理图

3. 直流电机的可逆性

上述对发电机和电动机的基本原理的分析中,从工作原理图(图 3-1、图 3-2)上可以看出,其电机内部的结构完全一样。也就是说,对于同一台直流电机,在原动机拖动下,输出直电能供给外部电路负载,完成了将轴上的输入机械能转换为电能输出的过程,成为一台发电机。如果在电机的电刷上接上直流电源,在电枢中将产生电流,从而产生电磁转矩,带动负载机械运转,完成了将输入的电能转换为机械能的过程,成为了一台电动机。这就是说,同一台直流电机在某种外界条件下作为发电机运行,而在另一种外界条件下可作为电动机运行。

3.1.2 直流电机的基本结构

直流电机根据用途不同和功率不同,其结构形式也各有不同。因此,在生产、生活现实

中使用着各种结构形式的直流电机。但不管其结构形式如何变化,从原理上讲它都是由一些基本部件组成。图3-3和图3-4分别为直流电机的结构示意图和剖面示意图。

总体上说,直流电机由定子(固定部分)和转子(转动部分)两大部分所组成。定子的作用是用来产生磁场和作电机本身的机械支撑。它包括主磁极、换向极、机座、端盖、轴承等,静止的电刷装置也固定在定子上。转子上用来感应电势和通过电流从而实现能量转换的部分称为电枢,它包括电枢铁芯和电枢绕组。电枢铁芯固定在转轴上,转轴两端分别装有换向器和风扇等。由于习惯,人们常将直流电机的转子称为电枢。

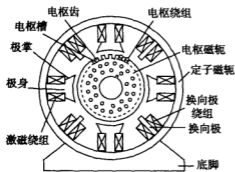


图3-3 直流电机结构示意图

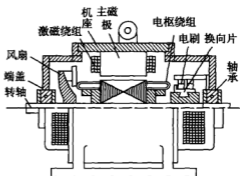


图3-4 直流电机剖面示意图

下面对直流电机的主磁极、机座、电枢铁芯和电枢绕组、换向器和电刷装置等主要部件作简要介绍。

1. 主磁极

主磁极用以生产气隙磁场,以便电枢绕组在此磁场中转动而感应电势。

2. 机座

机座的主体部分作为磁极间磁的通路,这部分称为磁轭。机座同时又用来固定主磁极、换向极和端盖,并接地脚把电机固定在安装电机的基础上。

3. 电枢铁芯和电枢绕组

电枢铁芯用作电机磁的通路及嵌置电枢绕组。为了减少涡流损耗,电枢铁芯一般用0.5mm或0.35mm厚的涂有绝缘漆的硅钢片叠压而成。每片冲片上冲有嵌放绕组的矩形槽或梨形槽,如图3-5所示。对于容量较大的电机,为了加强冷却,把电枢铁芯沿轴向分成数段,段与段之间空出8~10mm作为径向通风道。

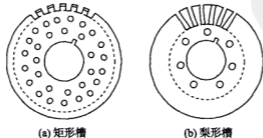


图3-5 直流电机电枢铁芯

4. 换向器和电刷装置

换向器的作用对发电机而言,是将电枢绕组内感应的交流电势转换成电刷间的直流电势。对电动机而言,则是将从电源输入的直流电流转换成电枢绕组内的交变电流,并保证每个磁极下电枢导体内电流的方向不变,以产生方向不变的电磁转矩。图 3-6 所示为常用的结构形式。

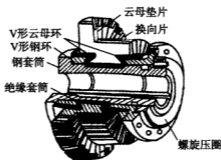


图 3-6 直流电机的换向器

电刷的作用有两个,其一是把转动的电枢与外电路相连接,使电流经电刷流入电枢或从电枢流出;其二是它与换向器配合而获得直流电压。

5. 换向极

换向极是用来改善换向的,其结构也由铁芯和套在上面的绕组构成,类似于主磁极。由于电枢电流的存在,它也会在电机气隙中产生磁场,此磁场的方向与主磁场方向相互垂直,使得电机气隙合成磁场发生畸变,从而使换向器上片间电压分布不均,造成换向困难。换向极的作用就是消除电枢磁场的影响,其绕组与电枢绕组相串联,工作时其产生的磁场与电枢产生的磁场大小相等、方向相反,从而起到消除或削弱电枢反向的作用。

3.1.3 直流电机的励磁方式

一般来讲,直流电机可按结构、用途、容量大小等分类。但从运行的观点来看,按励磁方式分类更有意义。因为除了少数微型电机的磁极是永久磁铁外,绝大多数电机的磁场都是在磁极绕组中通入直流电流而建立的。因此通常都是按励磁绕组的连接方式(即按励磁方式)对直流电机进行分类。

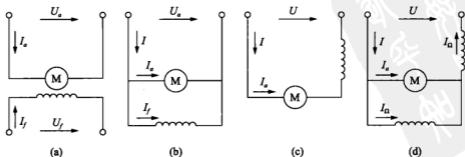


图 3-7 直流电机的励磁方式

直流电机按其励磁绕组与电枢绕组连接方式的不同,分为他励、并励、串励和复励四种,如图3-7所示。四种电机在能量转换的电磁过程方面,本质上没有什么区别,但运行特性却有明显的差别。

图3-7(a)为他励直流电机,其特点是励磁绕组接在独立的励磁电源上,而与电枢绕组无关。图3-7(b)为并励直流电机,其特点是励磁绕组与电枢绕组并联。这两种励磁绕组的匝数较多,导线较细。图3-7(c)为串励直流电机,其特点是励磁绕组与电枢绕组串联,电枢电流就是励磁电流,励磁绕组匝数少、导线较粗。图3-7(d)为复励直流电机,其特点是在主磁极上装有两套励磁绕组,一套与电枢绕组并联是并励绕组,另一套与电枢绕组串联是串励绕组。两套励磁绕组产生的磁势方向相同时称为积复励,若方向相反则称为差复励。工业应用中常用积复励。

励磁绕组所消耗的功率为电机额定功率的1%~3%,并励或他励绕组中的电流一般为额定电流的1%~5%。

3.2 直流发电机

3.2.1 他励直流发电机

1. 基本方程式

他励发电机的原理电路图如图3-8所示。图中, R 是负载电阻, I 是负载电流, R'_f 是励磁调节电阻, R_a 是电枢电阻, I_a 是电枢电流, E 和 U 分别为发电机的电动势和端电压。

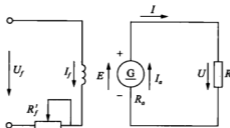


图3-8 他励直流发电机原理电路图

他励发电机中,电压和电流的关系为

$$U = E - I_a R_a \text{ 或 } I_a = (E - U) / R_a \quad (3-1)$$

$$I_a = I = U / R \quad (3-2)$$

当发电机空载时, $I_a = 0$,发电机的电动势等于其空载端电压 U_0 ,即

$$U_0 = E = K_f \Phi n$$

磁通 Φ 的大小决定于励磁电流 I_f ,而 I_f 是可以改变电阻 R'_f 来调节的。

2. 特性曲线

在发电机空载及转速为常数(额定值)的条件下,表示端电压 U 与励磁电流 I_f 之间关系

的曲线称为空载特性曲线, $U=f(I_f)$, 如图 3-9(a) 所示。空载时端电压 U 等于电动势 E , 因为 E 正比于 Φ , 而 $\Phi=f(I_f)$ 是一条磁化曲线, 所以, 空载特性曲线与磁化曲线相似。

空载特性曲线是发电机的基本运行特性之一, 它表明可利用改变励磁电流的方法来获得所需的电压。通常发电机的工作点都在中段弯曲部分, 即磁场接近饱和处。

保持发电机的转速 n 为额定值, 调节励磁电流以获得所需的空载电压 U_0 , 然后接上负载, 当增加负载时, 发电机的端电压逐渐下降。在发电机的转速 n 和励磁电流为 I_f 常数的条件下, 表示发电机端电压 U 与负载电流 I 之间关系的曲线称为外特性曲线, $U=f(I_a)$, 如图 3-9(b) 所示。

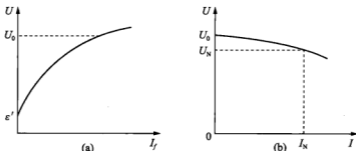


图 3-9 他励发电机空载特性及外特性

由式(3-1)可知, 当他励发电机的负载电流增加时, 电枢电压降 $I_a R_a$ 增加, 端电压 U 就下降。图 3-9(b) 中, U_N 和 I_N 是发电机电压和电流的额定值。在他励发电机中, 从空载到满载(额定负载)电压的变化率为

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_N}{U_N} \times 100\%$$

经计算得, 电压变化率为 5%~10%, 如欲保持端电压不变, 必须相应增加励磁电流。

3.2.2 并励直流发电机

并励发电机的主极励磁绕组与电枢绕组并联, 并励发电机的原理电路如图 3-10 所示。

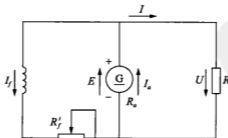


图 3-10 并励发电机原理电路图

它的特点是励磁电流不需要其他的直流电源供给, 而是取自发电机本身, 所以又称为“自励发电机”。并励发电机的电压与电流间的关系可用下列各式表示

$$U = E - I_a R_a \text{ 或 } I_a = (E - U) / R_a \quad (3-3)$$

$$I = U / R \quad (3-4)$$

$$I_f = U / R_f \quad (3-5)$$

并励发电机和他励发电机的励磁方法不同,所以,两者电压的建立也不同,他励发电机电压的建立是容易理解的。并励发电机在自励过程中,空载端电压 U_0 和励磁电流 I_f 的关系曲线 $U_0 = f(I_f)$ 可以认为就是发电机的空载特性曲线,如图 3-11 所示。严格地讲,此时的电枢电流并不等于零,而是等于 I_f 。

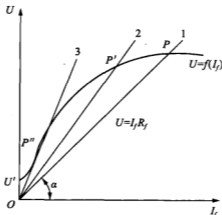


图 3-11 并励发电机电压的建立

励磁回路的电阻为 $R_f = r_a + r_p$, 其中 r_a 为并励绕组的电阻, r_p 为励磁回路的调节电阻。当电阻 R_f 保持不变时,励磁电流 I_f 通过励磁回路时的电阻压降 $I_f R_f$ 便与 I_f 成正比。因此, $I_f R_f$ 与 I_f 的关系可用图 3-11 中的直线 \overline{OP} 来表示。由于直线 \overline{OP} 的斜率 $\tan \alpha = \frac{I_f R_f}{I_f} = R_f$, 即等于励磁回路的电阻, 故称此直线为励磁回路的电阻线, 简称为磁场电阻线。下面即可利用空载特性曲线和磁场电阻线来说明并励发电机的自励过程。

由于电机磁路中总有一定的剩磁, 当发电机由原动机拖动至额定转速时, 发电机两端将发出一个数值不大的剩磁电压。而励磁绕组又是接到电枢两端的, 于是在剩磁电压的作用下, 励磁绕组中将流过一个不大的电流, 并产生一个不大的励磁磁势。如果励磁绕组接法正确, 即这个励磁磁势的方向和电机剩磁磁势的方向相同, 从而使电机内的磁通和由它产生的电枢端电压有所增加。在此较高端电压的作用下, 励磁电流又进一步加大, 导致磁通的进一步增加, 继而电枢端电压又进一步加大。如此反复作用下去, 发电机的端电压便自动建立起来。这就是发电机的自励过程。

在自励过程中, 发电机的电压是否会无限制地增长下去呢? 从图 3-11 可以清楚地看出, 当发电机的电压上升到 P 点所对应的电压时, 它恰好等于励磁电流 I_f 通过励磁回路所需的电阻压降 $I_f R_f$ 。因此电枢电压和励磁电流都不会再增加, 自励过程达到了稳定状态。

如果励磁绕组接到电枢的极性与上述情况相反, 使得剩磁电压所产生的励磁电流所建

立的磁势方向与剩磁方向相反,那么不但不能提高电机的磁通,相反地把剩磁磁通也抵消了。结果电枢端电压将比未接上励磁绕组的剩磁电压还要低,励磁电流不可能增大,电枢电压便不能建立起来,即电机不能自励。

综上所述,并励发电机的自励条件可归纳如下:

① 电机必须有剩磁。实践中如果发现电机失去剩磁或者剩磁太弱,可用临时的外部直流电源如蓄电池等,给励磁绕组通一下电流,即“充磁”,使电机剩磁得到恢复。

② 励磁绕组的接线与电枢旋转方向必须正确配合,以使励磁电流产生的磁场方向与剩磁方向一致。实践中若发现励磁绕组接入后,电枢电压不但 not 升高,反而降低了,那就说明励磁绕组的接法不正确。这时只要把励磁绕组接到电枢的两根引线对调一下,即可改正过来。

③ 励磁回路的电阻应小于与电机运行转速相对应的临界电阻。必须明确,发电机的转速不同时,空载特性不同。因此,对应于不同的转速便有不同的临界电阻。如果发电机的转速太低,使得与此转速相应的临界电阻值过低,甚至在极端情况下,励磁绕组本身的电阻即已超过所对应的临界电阻值,电机是不可能自励的。这时唯一的补救办法是提高电机转速,从而提高其临界电阻值。

并励发电机的外特性曲线与他励发电机的外特性曲线基本上是一样的,但由于前者励磁电路的电压就是电枢的端电压,其值随负载增大而减小。因此,励磁电流也随负载的增大而减小,这样发电机的端电压将下降得更多一些。

3.2.3 复励直流发电机

如果在发电机磁极上除绕上并励绕组外,再绕一个与电枢串联的串励绕组,就成为了复励发电机,其原理电路图如图 3-12 所示。在复励发电机的这两个励磁绕组中通入电流后,它们产生的磁场的方向总是同向的。

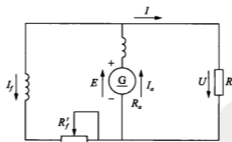


图 3-12 复励发电机原理电路图

在并励发电机中,其端电压随着负载电流的增大而下降。但在复励发电机中,当负载电流增大时,串励绕组能自动增加磁通,以补偿端电压的下降。所以,在复励发电机的正常运行范围内,其端电压变化不大,这是它的优点。

3.3 直流电动机

根据电动机励磁方式的不同,直流电动机有他励、并励、串励、复励和永磁等形式。他励电动机的励磁绕组和电枢绕组分别由两个独立的电源供电。下面简要讨论这几种类型的电动机的特性。

3.3.1 他励和并励直流电动机

他励电动机的励磁绕组和电枢绕组分别由两个独立的电源供电,其原理电路如图 3-13(a)所示。并励电动机的励磁绕组是和电枢绕组并联后由同一个直流电源供电,其原理电路如图 3-13(b)所示,这时电源提供的电流 I 等于电枢电流 I_a 和励磁电流 I_f 之和。

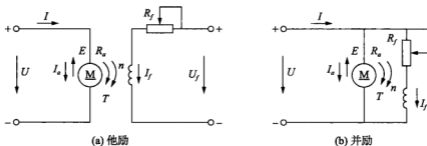


图 3-13 他励和并励直流电动机原理电路图

由图 3-13 所示的原理电路图可知,电枢回路中的电压平衡方程为

$$U = E + I_a R_a \quad (3-6)$$

以 $E = K_f \Phi n$ 代入式(3-6)得到

$$n = \frac{U}{K_f \Phi} - \frac{R_a}{K_f \Phi} I_a \quad (3-7)$$

式(3-7)称为直流电动机的机械特性方程,再以 $I_a = T / (K_f \Phi)$ 代入,得到直流电动机机械特性方程的一般表达式

$$n = \frac{U}{K_f \Phi} - \frac{R_a}{K_f K_f \Phi^2} T = n_0 - \Delta n \quad (3-8)$$

他励电动机和并励电动机有着相同的运行特性,他励电动机适合于调压调速工作场合的应用,而并励电动机适用于恒压工作场合。

3.3.2 串励直流电动机

串励电动机的励磁绕组与电枢串联,其原理电路如图 3-14(a)所示。所以励磁电流 I_f 就是电枢电流 I_a ,这个电流一般比较大,所以励磁绕组导线粗、匝数少,它的电阻也较小。由于 $I_f = I_a$,因而,电动机的每极磁通 Φ 是电枢电流函数,当然也是电动机转矩的函数,它是随

负载变化而变化的。所以,它的机械特性 $n=f(T)$ 与他励电动机的大不一样,若近似地绘出其曲线时,可以将曲线分作两段来考虑。

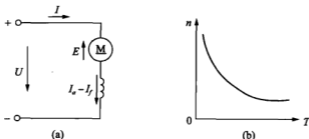


图 3-14 串励直流电动机

第一段,在电动机负载较轻、电枢电流(励磁电流)较小时,电动机磁路的饱和程度不高,因此,可以近似认为每极磁通 Φ 和电枢电流 I_a 成正比,即 $\Phi=C_1 I_a$, C_1 为比例常数,并且

$$T=K_t \Phi I_a = K_t \Phi^2 / C_1 \quad \text{或} \quad \Phi = \sqrt{CT/K_t} \quad (3-9)$$

将式(3-9)带入式(3-8)得

$$n = \frac{U_n}{K_e \sqrt{CT/K_t}} - \frac{R_a}{K_e C_1} = \frac{U_n}{C_1 \sqrt{T}} - \frac{R_a}{C_2} \quad (3-10)$$

式中, $C_1=K_e \sqrt{CT/K_t}$ 和 $C_2=K_e C_1$

式(3-10)表明,机械特性曲线具有双曲线的形状, n 轴是它的一条渐近线,理想空载转速 n_0 趋近于无穷大。

第二段,在电动机负载较重,电枢电流较大时,磁路趋于饱和,可以近似地认为 $\Phi=$ 常数,由式(3-8)知,此时机械特性曲线的形状近似于一条直线。

两段特性曲线组合在一起,就构成了串励电动机完整的机械特性曲线,如图 3-14(b)所示。

串励电动机也可反向运转,但不能用改变电源极性的方法,因这时电枢电流 I_a 与磁通 Φ 同时反向,使电磁转矩 T 依然保持原来的方向,但电动机不可能反转。改变电枢或励磁绕组的接线极性可使其反转,反转时机械特性形状与正转时相同,但位于第三象限。

必须强调指出,对于串励电动机当电枢电流趋近于零时,磁通 Φ 也趋近于零,从式(3-8)可以看出,这时的转速将趋近于无穷大。虽然在 $I_a \approx 0$ 时,磁路中存在着剩磁,其值很小,转速仍将很高,以至出现所谓的“飞车”事故。所以,通常规定串励电动机不允许在空载或轻载(小于额定负载的 15%~20%)下运行,也不允许用皮带等容易发生断裂或滑脱的传动机构,而应采用齿轮或直接采用联轴器进行耦合。

3.3.3 复励直流电动机

这种直流电动机的主磁极上装有两个励磁绕组,一个与电枢绕组串联,另一个与电枢绕组并联,其原理电路图如图 3-15(a)所示。工业上常用的是积复励电动机,即并励绕组和串励绕组所产生的磁通方向一致。复励电动机同时具有他励电动机和串励电动机的性质,故

复励电动机的机械特性介于它们两者之间,如图3-15(b)所示。复励电动机的机械特性曲线的形状依串励磁通所占的比重不同而不同,串励磁通所占比重大时机械特性较软,一般串励磁通在额定负载时约占全部磁通的30%左右。复励电动机的机械特性有确定的理想空载转速 n_0 ,因为当 $I_a=0$,虽然串励磁通 $\Phi_s=0$,但仍有一定的并励磁通 Φ_a 的缘故。

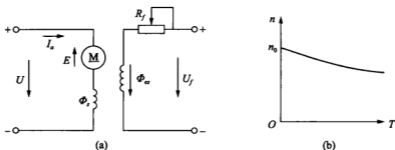


图3-15 复励直流电动机

3.4 直流电动机的机械特性

由于他励电动机和复励电动机在传动控制系统中最为常用,所以下面主要以他励直流电动机为例介绍直流电动机运行特性。

根据式(3-8)可以得到直流他励电动机的机械特性曲线,如图3-16所示。电机正向运行时曲线在第一象限,反向运行时转矩和转速都反向,所以曲线在第三象限。

由于电动机的励磁方式不同,磁通 Φ 随 I_a 和 T 变化的规律也不同,所以在不同励磁方式下,式(3-8)所表示的机械特性形状就有差异。对他励与并励而言,当 U_f 与 U 同属一个电源,且不考虑供电电源的内阻时,这两种电动机励磁电流 I_f (或磁通 Φ)的大小均与电枢电流无关,因此,它们的机械特性是一样的。

式(3-8)中,当 $T=0$ 时的转速 $n_0=U/(K_s\Phi)$ 称为理想空载转速。实际上,电动机总存在空载制动转矩,靠电动机本身的作用是不可能使其转速上升到 n_0 的,“理想”的含义就在这里。

从图3-16中可以看出,当负载转矩变化了 ΔT 时,转速也变化了 Δn 。这说明负载的波动会引起转速的变化,特性曲线越平直,转速的变动就越小。为了衡量机械特性的平直程度,引入机械特性硬度的概念,记做 β ,定义为

$$\beta = \frac{dT}{dn} = \frac{\Delta T}{\Delta n} \times 100\% \quad (3-11)$$

转矩变化 dT 与所引起的转速变化 dn 的比值,即为机械特性硬度,根据 β 值的不同,可将电动机的机械特性分为三类:①绝对硬特性($\beta \rightarrow \infty$),如交流同步电动机的机械特性;②硬特性($\beta > 10$),如直流他励电动机的机械特性,交流异步电动机机械特性的上半部;③软特性($\beta < 10$),如直流串励电动机和直流复励电动机的机械特性。

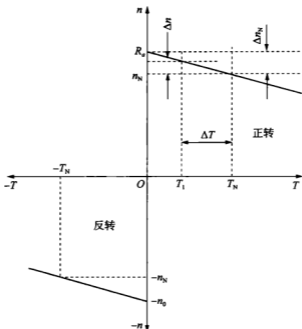


图 3-16 他励直流电动机机械特性

3.4.1 直流他励电动机的固有机械特性

电动机的机械特性有固有特性和人为特性之分。固有特性又称为自然特性，它是指在额定条件下的 $n=f(T)$ ，对于直流他励电动机，就是在额定电压 U_N 和额定磁通 Φ_N 下，电枢电路内不外接任何电阻时的 $n=f(T)$ 。直流他励电动机的固有特性可以根据电动机的铭牌数据来绘制。由式(3-8)知，当 $U=U_N$ ， $\Phi=\Phi_N$ 时，且 K_e 、 K_t 、 R_a 都为自然数， $n=f(T)$ 是一条直线。只要确定其中的两个点就能画出这条直线，一般就用理想空载点 $(0, n_0)$ 和额定运行点 (T_N, n_N) 近似地作出直线。通常在电动机铭牌上给出了额定功率 P_N 、额定电压 U_N 、额定电流 I_N 等，由这些已知数据就可求出 R_a 、 $K_e\Phi_N$ 、 n_0 、 T_N 。其计算步骤如下：

(1) 计算电枢电阻 R_a ：通常电动机在额定负载下的铜耗 $I_a^2 R_a$ 约占总损耗 $\sum \Delta P_N$ 的 50%~75%。因为

$$\sum \Delta P_N = \text{输入功率} - \text{输出功率} = U_N I_N - P_N = U_N I_N - \eta_N U_N I_N = (1 - \eta_N) U_N I_N$$

即

$$I_a^2 R_a = (0.50 \sim 0.75) (1 - \eta_N) U_N I_N$$

式中， $\eta_N = P_N / (U_N I_N)$ 是额定运行条件下电动机的效率，且此时 $I_a = I_N$ ，故得

$$R_a = (0.50 \sim 0.75) \left(1 - \frac{P_N}{U_N I_N} \right) \frac{U_N}{I_N} \quad (3-12)$$

(2) 求 $K_e\Phi_N$ ：额定运行条件下得反电势 $E_N = K_e\Phi_N n_N = U_N - I_N R_a$ ，故

$$K_e \Phi_N = (U_N - I_N R_a) / n_N \quad (3-13)$$

(3) 求理想空载转速

$$n_0 = U_N / (K_e \Phi_N)$$

(4) 求额定转矩

$$\{T_N\}_{N \cdot m} = \frac{\{P_N\}_w}{\{\omega\}_{\text{rad/s}}} = 9.55 \frac{\{P_N\}_w}{\{n_N\}_{\text{r/min}}} \quad (3-14)$$

3.4.2 直流他励电动机的人为机械特性

在式(3-8)中,人为地改变其中的可变参数,就可以改变电机的机械特性,这样得到的机械特性称为人为机械特性。分别改变供电电压 U 、励磁磁通 Φ 、电枢电路内电阻时就可以得到三种不同的机械特性。下面分别介绍这三种人为机械特性。

1. 电枢回路中串电阻时的人为机械特性

当 $U=U_N, \Phi=\Phi_N$ 时,电枢回路中串接附加电阻 R_{ad} ,若以 $R_{ad}+R_a$ 代替式(3-8)中的 R_a ,就可以得到电枢回路中串接附加电阻的人为机械特性方程式,即

$$n = \frac{U_N}{K_e \Phi_N} - \frac{R_{ad} + R_a}{K_e K_f \Phi_N^2} T \quad (3-15)$$

与固有机特性方程式(3-8)比较可看出,当 U 和 Φ 都是额定值时,两者的理想空载转速 n_0 是相同的,而速降 Δn 却变大了,即特性变软。 R_{ad} 越大,特性越软,在不同的 R_{ad} 值时,可得到一族由同一点 $(0, n_0)$ 出发的人为特性曲线,如图 3-17 所示。

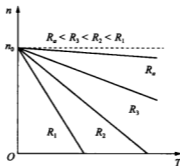


图 3-17 电枢回路中串电阻时的人为机械特性

2. 改变电枢电压 U 时的人为机械特性

当 $\Phi=\Phi_N, R_{ad}=0$, 而改变电枢电压 $U (U \neq U_N)$ 时,由式(3-8)可见,此时理想空载转速 $n_0 = U_N / (K_e \Phi_N)$ 要随 U 的变化而变化,但转速降 Δn 不变,所以,在不同的电枢电压 U 时,可得一族平行于固有特性曲线的人为特性曲线,如图 3-18 所示。由于电动机绝缘耐压强度的限制,电枢电压只允许在其额定值以下调节,所以,不同 U 值时的人为机械特性曲线均在固有特性曲线之下。

3. 改变磁通时的人为机械特性

当 $U=U_N, R_{ad}=0$, 而改变磁通 Φ 时,由式(3-8)可见,理想空载转速 $n_0 = U_N / (K_e \Phi_N)$ 和

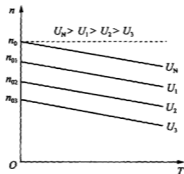


图 3-18 改变电枢电压时的人为机械特性

转速降 $\Delta n = R_a T / (K_e K_\phi^2)$ 都要随磁通 Φ 的改变而变化, 由于励磁线圈发热和电动机磁饱和的限制, 电动机的励磁电流和它对应的磁通 Φ 只能在低于其额定值的范围内调节。由此, 就可得不同磁通 Φ 值下的人为特性曲线, 如图 3-19 所示。

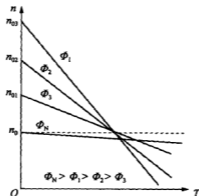


图 3-19 改变磁通时的人为机械特性

当磁通过分割弱后, 如果负载转矩不变, 将使电动机电流大大增加而严重过载。另外, 当磁通为零时, 从理论上说, 电动机转速趋于无穷大, 实际上励磁电流为零时, 电动机尚有剩磁, 这时转速虽不趋于无穷大, 但会升到机械强度不允许的数值, 通常称为“飞车”。因此, 直流他励电动机启动前必须先加励磁电流, 在使用中, 一般都设有“失磁”保护。

3.5 直流他励电动机的启动

给电动机施加电能, 使其从静止状态开始运转, 达到某一转速稳定运行的过程称为启动过程。对直流电动机而言, 由式(3-6)知, 电动机在未启动之前, $n=0, E=0$, 而 R_a 很小, 所以, 如果将电动机直接接入额定电压时, 则启动电流将很大, 为

$$I_{st} = U_N / R_a \quad (3-16)$$

一般情况下能达到其额定电流的10~20倍。这样大的启动电流不仅使电动机在换向过程中产生危险的火花,烧坏整流子,过大的电枢电流产生过大的电动应力,可能引起绕组的损坏,而且产生与启动电流成正比的启动转矩,会在机械系统和传动机构中产生过大的动态转矩冲击,使机械传动部件损坏。对供电电网来说,过大的启动电流将使保护装置动作,电源跳闸造成事故,或者引起电网电压的下降,影响其他负载的正常运行。因此,直流电动机是不允许直接启动的,即在启动时必须设法限制电枢电流。

限制直流电动机的启动电流,一般有两种方法:一是降压启动,即在启动瞬间,降低供电电源电压,随着转速 n 的升高,反电动势 E 升高,再逐步提高供电电压,最后达到额定电压 U_N 时,电动机达到所要求的转速。直流发电机—电动机组和晶闸管整流装置—电动机组等就是采用这种降压方式启动的。

二是在电枢回路内串接外加电阻启动,此时启动电流 $I_a = U_N / (R_a + R_x)$ 将受到外加启动电阻 R_x 的限制,随着电机转速 n 的升高,反电动势 E 增大,再切除外加电阻,电动机达到所要求的转速。

如果只有一段启动电阻,若启动后将启动电阻一下全部切除,由于在切除电阻的瞬间,机械惯性的作用使电动机的转速不能突变,在此瞬间维持 n 不变,此时冲击电流仍然会很大,为了避免这种情况,通常采用逐级切除启动电阻的方法来启动。如图3-20所示为具有三段启动电阻的原理线路和启动特性, T_1 、 T_2 分别称为尖峰(最大)转矩和换接(最小)转矩,启动过程中,接触器 KM_1 、 KM_2 、 KM_3 依次将外接电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 短接,其启动特性如图3-20(b)所示, n 和 T 沿着箭头方向在各条特性曲线上变化。

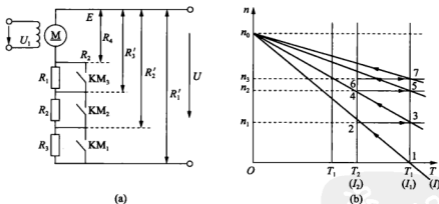


图3-20 他励电动机电枢回路串电阻启动

3.6 直流他励电动机的调速

电动机的调速就是在一定的负载条件下,人为地改变电动机的电路参数,以改变电动机的稳定转速。从3.4节所述人为机械特性上可以看到,当负载一定时,人为地改变电动机的机械特性,转速也就跟着作相应的变化。这种转速的变化是人为改变(或调节)电枢电路的

电阻造成的,故称作调速或速度调节。

从直流他励电动机人为机械特性方程式

$$n = \frac{U_N}{K_e \Phi_N} - \frac{R_{af} + R_a}{K_e K_a \Phi_N^2} T \quad (3-17)$$

可知,改变串入电枢回路的电阻 R_{af} ,电枢供电电压 U 或主磁通 Φ 都可以得到不同的人为机械特性,从而在负载不变时可以改变电动机的转速,以达到速度调节的要求,故直流电动机调速的方法有三种:(1) 改变电枢电路外串接电阻;(2) 改变电动机电枢供电电压;(3) 改变电动机主磁通。

3.6.1 改变电枢回路电阻的调速特性

在图 3-20(a)所示直流电动机电枢回路串电阻后,可以得到人为的机械特性,并可用此法进行启动控制。同样用这个方法也可以进行调速。图 3-21 所示为串电阻调速特性,从特性可看出,在一定的负载转矩 T_L 下,串入不同的电阻

可得到不同的转速,如在电阻分别为 R'_a 、 R'_3 、 R'_2 、 R'_1 的情况下,可以得到对应于 A、C、D 和 E 点的转速 n_A 、 n_C 、 n_D 和 n_E 。在不考虑电枢电路的电感时,电动机调速时的机电过程(如降低转速)见图 3-21 中 A—B—C 的箭头方向所示,即从稳定转速 n_A 调至新的稳定转速 n_C 。

电枢回路串电阻的人为机械特性,是一组通过理想空载点 n_0 的直线,串入的调速电阻越大,人为机械特性越软。在低速运行时,不大的负载变动就会引起较大的转速变化,即调速的稳定性较差。

特别注意:启动电阻不能当作调速电阻用,否则将烧坏。

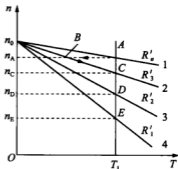


图 3-21 电枢回路串电阻调速

3.6.2 改变电枢回路电压的调速特性

改变电枢供电电压 U 可得到人为机械特性,如图 3-22 所示,从特性可以看出,在一定负载转矩 T_L 下,加上不同的电压 $U_N, U_1, U_2, U_3, \dots$,可以得到不同的转速 $n_a, n_b, n_c, n_d, \dots$,即改变电枢电压可以达到调速的目的。

这种调速方法的特点为:①当电源电压连续变化时,转速可以平滑无极调节,一般只能在额定转速以下调节;②特性互相平行,机械特性硬度不变,调速的稳定性高,调速范围较大;③调速时,电动机转矩不变,属于恒转矩调速,适合于对恒转矩型负载进行调速;④可以靠调节电枢电压来启动电机,而不再需要其他启动设备。

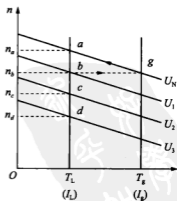


图 3-22 降低电源电压调速

3.6.3 改变励磁磁通的调速特性

改变电动机主磁通 Φ 的机械特性如图 3-23 所示,从特性可以看出,在一定的负载功率 P_L 下,不同的主磁通 $\Phi_N, \Phi_1, \Phi_2, \dots$,可以得到不同的转速 n_a, n_b, n_c, \dots ,即改变主磁通 Φ 可以达到调速的目的。

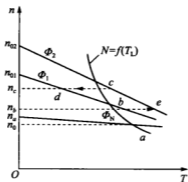


图 3-23 减弱励磁调速

这种调速方法的特点为:①可以平滑无级调速,但只能弱磁调速,即在额定转速以上调节;②调速特性较软,且受电动机换向条件等的限制;③调速时维持电枢电压和电枢电流不变,即功率不变,属于恒功率调速。

例:某他励直流电动机,额定功率为 P_N 为 22kW,额定电压 U_N 为 220V,额定电流 I_N 为 115A,额定转速 n_N 为 1 500r/min,电枢回路总电阻 R_a 为 0.1 Ω ,忽略空载转矩 T_0 ,电动机带额定负载运行时,要求把转速降到 1 000r/min,计算:

- (1) 采用电枢串电阻调速需串入的电阻值。
- (2) 采用降低电源电压调速需把电源电压降到多少?
- (3) 上述两种调速情况下,电动机的输入功率与输出功率(输入功率不计励磁回路之功率)。
- (4) 若采用弱磁升速调速,要求负载转矩 T_L 为 0.6 T_N ,转速 n 升到 2 000r/min,此时磁通 Φ 应该降到额定值的多少倍?

解:(1) 先计算 $K_a\Phi_N$

$$K_a\Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 115 \times 0.1}{1500} = 0.139 \text{ (V/(r/min))}$$

理想空载转速

$$n_0 = \frac{U_N}{K_a\Phi_N} = \frac{220}{0.139} = 1582.7 \text{ (r/min)}$$

额定转速下降

$$\Delta n_N = n_0 - n_N = 1582.7 - 1500 = 82.7 \text{ (r/min)}$$

电枢串电阻后转速下降

$$\Delta n = n_0 - n = 1\,582.7 - 1\,000 = 582.7 (\text{r/min})$$

电枢串电阻 R , 则有

$$\frac{R_a + R}{R_a} = \frac{\Delta n}{\Delta n_N}$$

$$R = \frac{\Delta n}{\Delta n_N} R_a - R_a = 0.1 \times \left(\frac{582.7}{82.7} - 1 \right) = 0.605 (\Omega)$$

(2) 降低电源电压后的理想空载转速

$$n_{01} = n + \Delta n_N = 1\,000 + 82.7 = 1\,082.7 (\text{r/min})$$

降低后的电源电压为 U_1 , 则

$$\frac{U_1}{U_N} = \frac{n_{01}}{n_0}$$

$$U_1 = \frac{n_{01}}{n_0} U_N = \frac{1\,082.7}{1\,582.7} \times 220 = 150.5 (\text{V})$$

(3) 电动机降速后, 电动机输出转矩

$$T_2 = 9\,550 \frac{P_N}{n_N} = 9\,550 \times \frac{22}{1\,500} = 140.1 (\text{N} \cdot \text{m})$$

输出功率

$$P_2 = T_2 \Omega = T_2 \frac{2\pi}{60} n = 140.1 \times \frac{2\pi}{60} \times 1\,000 = 14\,670 (\text{W})$$

电枢串电阻降速时, 输入功率

$$P_1 = U_N I_N = 220 \times 115 = 25\,300 (\text{W})$$

降低电源电压降速时, 输入功率

$$P_1 = U_1 I_N = 150.5 \times 115 = 17\,308 (\text{W})$$

(4) 转矩为 $0.6T_N$, 转速为 $2\,000 \text{r/min}$, 电动机额定电磁转矩为

$$T_N = 9.55 K_e \Phi_N I_N = 9.55 \times 0.139 \times 115 = 152.66 (\text{N} \cdot \text{m})$$

把调速后的转矩与转速等有关数值代入他励直流电动机机械特性方程中, 得到

$$n = \frac{U_N}{K_e \Phi} - \frac{R_a}{9.55 (K_e \Phi)^2} T$$

$$2\,000 = \frac{220}{K_e \Phi} - \frac{0.1}{9.55 (K_e \Phi)^2} \times 0.6 \times 152.66$$

解后得到两个结果

$$K_e \Phi = 0.1054 (\text{V}/(\text{r/min})) \text{ 和 } 0.0045 (\text{V}/(\text{r/min}))$$

$K_e \Phi = 0.0045 (\text{V}/(\text{r/min}))$ 时, 磁通减少太多了, 这样小的磁通产生 $0.6T_N$ 的电磁转矩, 所

需要的电枢电流 I_a 太大,远远超过 I_N ,因此不能调到如此低的磁通,应该取 $K_a\Phi=0.1054$ ($V/(r/min)$)。

磁通减少到额定磁通 Φ_N 的数值为

$$\frac{\Phi}{\Phi_N} = \frac{K_a\Phi}{K_a\Phi_N} = \frac{0.1054}{0.139} = 0.758$$

3.7 直流他励电动机的制动

在生产实践中,电动机拖动的机电系统有启动的要求,也就必然有停止的要求,有的系统还可能有频繁启停的要求。启动是从静止加速到某一稳定转速,而制动则是从某一稳定转速开始减速到某一较低的转速或停止,或是限制位能负载下降速度的一种运转状态。

就能量转换的观点而言,电动机有两种运转状态,即电动状态和制动状态。电动状态是电动机最基本的工作状态,其特点是电动机所发出的转矩 T 的方向与转速 n 的方向相同,如图 3-24(a)所示,当起重机提升重物时,电动机将电源输入的电能转换成机械能,使重物 G 以速度 v 上升;但电动机也可工作在其发出的转矩 T 与转速 n 方向相反的状态,如图 3-24(b)所示,这就是电动机的制动状态。电动机的制动状态主要有两种形式:

一是位能性负载,为限制位能负载的运动速度,电动机的转速不变,以保重物的匀速下降,这属于稳定的制动状态。

二是在降速或停车制动过程中,电动机的转速是变化的,则属于过渡的制动状态。

两种制动状态的区别在于转速是否发生变化,它们的共同点是,电动机发出的转矩 T 与转速 n 方向相反,电动机工作在发电机运行状态,电动机吸收或消耗机械能(位能或动能),并将其转化为电能反馈回电网或消耗在电枢电路的电阻中。

根据直流他励电动机处于制动状态时的外部条件和能量传递情况,它的制动状态分为能耗制动、反馈制动、反接制动三种形式。

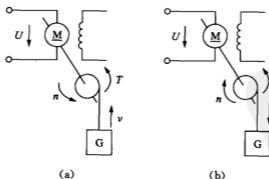


图 3-24 直流电动机的电动与制动运行

3.7.1 能耗制动

电动机在电动状态运行时,若把外施电枢电压 U 突然降为零,而将电枢串接一个附加电

阻 R_{ad} 短接起来,便能得到能耗制动的状态,如图 3-25(a)所示。这时由工作机械的机械能带动电动机发电,使传动系统储存的机械能转变成电能通过电阻(电枢电阻 R_a 和附加制动电阻 R_{ad})转化成热量消耗掉,故称之为“能耗”制动。

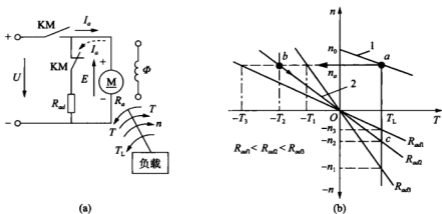


图 3-25 直流电动机的能耗制动运行

由图 3-25(a)可看出,电压 $U=0$,电势 E 、电流 I_a 仍为电动状态下假定的正方向,故能耗制动状态下的电势平衡方程式为

$$E = -I_a (R_a + R_{ad}) \quad (3-18)$$

因 $E = K_e \Phi n$, $I_a = T / (K_t \Phi)$, 故

$$n = -\frac{R_a + R_{ad}}{K_e K_t \Phi^2} T \quad (3-19)$$

其机械特性曲线见图 3-25(b)中的直线 2,它是通过原点,且位于第二象限和第四象限的一根直线。

如果电动机带动的是反抗性负载,它只具有惯性能量(动能),能耗制动的作用是消耗掉传动系统存储的动能,使电动机迅速停车。其制动过程如图 3-25 所示,设电动机原来运行在 a 点,转速为 n_0 ,刚开始时 n_0 不变,但特性从曲线 1 变为曲线 2,工作点由 a 点转到 b 点,这时电动机的转矩 T 为负值(因此时在电动势 E 的作用下,电枢电流 I_a 反向),是制动转矩。在制动转矩和负载转矩共同作用下,拖动系统迅速减速。电动机工作点沿特性曲线 2 上的箭头方向变化,随着转速 n 的迅速下降,制动转矩也迅速减小,直至 $n=0$ 时,电动机产生的制动转矩也下降到零,制动作用自行结束。这种制动方式的优点之一就是拖动系统能可靠停车。

如果是位能负载,则在制动到 $n=0$ 时,重物还将拖着电动机反转,使电动向下降的方向加速,即电动机进入第四象限的能耗制动状态,随着转速的升高,电势 E 增加,电流和制动转矩也增加,系统的状态由能耗制动特性曲线 2 的 O 点向 c 点移动,当 $T=T_L$ 时,系统进入稳定平衡状态。电动机以 $-n_2$ 转速使重物匀速下降。采用能耗制动下放重物的主要优点是能够可靠稳定地控制下降速度。

能耗制动通常应用于拖动系统需要迅速而准确地停车及卷扬机类负载恒速下放重物的

场合。改变制动电阻 R_w 的大小,可得到不同斜率的特性,如图 3-25(b)所示在一定负载转矩 T_L 作用下,不同大小的 R_w ,便有不同的稳定转速。

3.7.2 反馈制动

电动机为正常接法时,在外部条件作用下电动机的实际转速 n 大于其理想空载转速 n_0 ,此时,电动机即运行于反馈制动状态。如电车走平路时,电动机工作在电动状态,电磁转矩 T 克服摩擦性负载转矩 T_f ,并以 n_0 转速稳定在 a 点工作,如图 3-26(a)所示。当电车上坡时,电车位能负载转矩 T_p 使电车加速,转速 n 增加,越过 n_0 继续加速,使 $n > n_0$,感应电势 E 大于电源电压 U ,故电机中电流 I_a 的方向便与电动状态相反,转矩的方向也由于电流方向的改变而与电动状态相反,直到 $T_p = T + T_f$ 时,电动机以 n_b 的稳定转速控制电车上坡,实际上这时是电车的位能转矩带动电动机发电。把机械能转变成电能,向电源馈送,故称反馈制动,也称再生制动或发电制动。

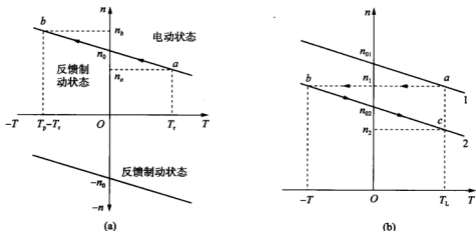


图 3-26 直流电动机的反馈制动运行

在反馈制动状态下电动机的机械特性表达式仍是式(3-8)。所不同的是 T 改变了符号(T 为负值),而理想空载转速和特性的斜率均与电动状态下的一致,这说明电动机正转时,反馈制动状态下的机械特性是第一象限中电动状态下的机械特性在第二象限内的延伸。

在电动机电枢电压突然降低使电动机转速降低的过程中,也会出现反馈制动状态,例如,原来电压为 U_1 ,相应的机械特性为图 3-26(b)中的直线 1,在某一负载下以 n_1 运行在电动状态,当电枢电压由 U_1 突降为 U_2 时,对应的理想空载转速为 n_{02} ,机械特性变为直线 2。但由于电动机转速和由它所决定的电枢电势不能突变,若不考虑电枢电感的作用,则电枢电流

$$I_a = \frac{U_1 - E}{R_a + R_w} \Rightarrow I_b = \frac{U_2 - E}{R_a + R_w} \quad (3-20)$$

当 $n_{02} < n_1$, 即 $U_2 < E$ 时,则电流 I_b 为负值并产生制动转矩,即电压 U 突降的瞬间,系统的状态在第二象限中的 b 点,从 b 点到 n_{02} 这段特性上,电动机进行反馈制动,转速逐步降低,转速下降至 $n = n_{02}$ 时, $E = U_2$,电动机的制动电流和由它建立的制动转矩下降为零,反馈制

动过程结束。此后,在负载转矩 T_L 的作用下转速进一步降低,电磁转矩又变为正值,电动机又重新运行于第一象限的电动状态,直至达到点 c 时, $T = T_L$,电动机又以 n_2 的转速在电动状态下稳运行。

同样,电动机在弱磁状态用增加磁通 Φ 的方法来降速时,也能产生反馈制动过程,以实现迅速降速的目的。

3.7.3 反接制动

他励直流电动机的电枢电压 U 或者电枢电动势 E 中的任何一个在外部条件作用下改变了方向,即两者由方向相反变为方向一致时,电动机即运行于反接制动状态。把改变电枢电压 U 的方向所产生的反接制动称为电源反接制动;而把改变电枢电动势 E 的方向所产生的反接制动称为倒拉反接制动。

1. 电源反接制动

如图 3-27 所示,若电动机原运行在正向电动状态,电动机电枢电压 U 的极性为图 3-27(a)中的虚线所示,此时电动机稳速运行在第一象限中特性曲线 1 的 a 点,转速为 n_0 。若电枢电压 U 的极性突然反接,如图 3-27(a)之实线所示时,此时电势平衡方程式为

$$E = -U - I_a(R_a + R_{ad}) \quad (3-21)$$

注意,电势 E 、电枢电流 I_a 的方向为电动状态下假定的正方向。以 $E = K_e \Phi n$, $I_a = T / (K_t \Phi)$ 代入式(3-21),便可得到电源反接制动状态的机械特性表达式

$$n = \frac{-U}{K_e \Phi} - \frac{R_a + R_{ad}}{K_e K_t \Phi^2} T \quad (3-22)$$

可见,当理想空载转速 n_0 变为 $-n_0 = -U / (K_e \Phi)$ 时,电动机的机械特性曲线为图 3-27(b)中的直线 2,其反接制动特性曲线在第二象限。

由于在电源极性反接的瞬间,电动机的转速和它所决定的电枢电势不能突变,若不考虑电枢电感的作用,此时系统的状态由直线 1 的 a 点变到直线 2 的 b 点,电动机发出与转速 n 方向相反的转矩 T (即 T 为负值),它与负载转矩共同作用,使电动机转速迅速下降,制动转矩将随 n 的下降而减小,系统状态沿直线 2 自 b 点向 c 点移动。当 n 下降到零时,反接制动过程结束。这时若电枢还不从电源拉开,电动机将反向启动,并将在 d 点(为反抗转矩时)或 f 点(位能转矩时)建立系统的稳定平衡点。

注意,由于在反接制动期间,电枢电势 E 和电源电压 U 是串联相加的,因此,为了限制电枢电流 I_a ,电动机的电枢电路中必须串接足够大的限流电阻 R_{ad} 。

电源反接制动一般应用在生产机械要求迅速减速、停车和反向的场合以及要求经常正反转的机械上。

2. 倒拉反接制动

如图 3-28 所示,在进行倒拉反接制动以前,设电动机处于正向电动状态,以 n_0 转速稳定运转,提升重物。若欲放下重物,则需在电枢电路内串入附加电阻 R_{ad} ,这时电动机的运行状态将由自然特性曲线 1 的 a 点过渡到人为特性曲线 2 的 c 点,电动机转矩 T 远小于负载转矩 T_L ,因此,传动系统转速下降(提升重物上升的速度减慢),即沿着特性曲线 2 向下移动。由于转速下降,电势 E 减小,电枢电流增大,则电动机转矩 T 相应增大,但仍比负载转

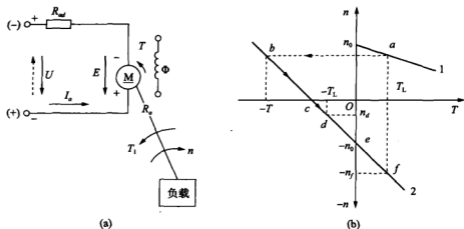


图 3-27 直流电动机的电源反接制动运行

矩 T_L 小, 所以系统速度继续下降, 即重物提升速度越来越慢。当电动机转矩 T 沿特性曲 2 下降到点 d 时, 电动机转速为零, 即重物停止上升, 电动机反电势也为零, 但电枢在外加电压 U 的作用下仍有很大的电流, 此电流产生堵转转矩 T_n , 由于此时 T_n 仍小于 T_L , 故 T_L 拖动电动机的电枢开始反方向旋转, 即重物开始下降, 电动机工作状态进入第四象限。这时电势 E 的方向也反过来, E 和 U 同方向, 所以, 电流增大, 随着转速在反方向增大, 电势 E 增大, 电流和转矩也增大, 直到转矩 $T = T_L$ 的 b 点, 转速不再增加而以稳定的 n_0 速度下放重物。由于这时重物是靠位能负载转矩 T_L 的作用下放, 而电动机转矩 T 是反对重物下放的, 故这时电动机起制动作用, 这种工作状态称为倒拉反接制动或电势反接制动状态。

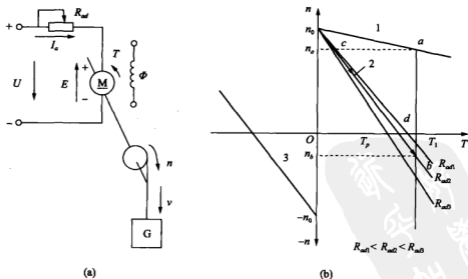


图 3-28 直流电动机的倒拉反接制动运行

由于图 3-28(a) 中电压 U 、电势 E 、电流 I_a 都是电动状态下假定的正方向, 所以, 倒拉反

接制动状态下的电势平衡方程式、机械特性在形式上均与电动状态下的相同。若电动机反向运转在电动状态,则倒拉反接制动状态下的机械特性曲线就是第三象限中电动状态下的机械特性曲线在第二象限的延伸,如图 3-28(b)曲线 3 所示。

思考题与习题

1. 换向器在直流发电机和直流电动机中起什么作用?
2. 主磁通既键链着电枢绕组,又键链着励磁绕组,为什么只在电枢绕组里产生感应电动势?
3. 为什么直流电机的转子要用表面有绝缘层的硅钢片叠压而成?
4. 并励直流发电机正转时可以自励,反转时能否自励?为什么?
5. 一台他励直流电动机所拖动的负载转矩常数,当电枢电压或电枢附加电阻改变时能否改变其稳定运行状态下电枢电流的大小?为什么?这时拖动系统中哪些量必然要发生变化?
6. 一台他励直流电动机在稳态下运行时,电枢反电势,如负载转矩,外加电压和电枢电路中的电阻均不变,如减弱励磁使转速上升到新的稳态值后,电枢反电势将如何变化?是大于、小于还是等于?
7. 一台直流他励电动机,其额定数据为: $P_N = 17\text{kW}$, $U_N = 220\text{V}$, $I_N = 91\text{A}$, $n_N = 1500\text{r/min}$, $R_a = 0.22\Omega$ 。
求: (1) 直接启动时的启动电流 I_{st} 为多少?
(2) 如果要使启动电流不超过额定电流的两倍,求启动电阻为多少?
(3) 如果采用降压启动,启动电流不超过额定电流的两倍,电源的电压应为多少?
8. 一台 Z2-51 型他励电动机,已知额定功率为 $P_N = 5.5\text{kW}$,额定电压 $U_N = 220\text{V}$,额定电流为 $I_N = 31\text{A}$,额定转速 $n_N = 1500\text{r/min}$,若忽略损耗,认为额定运行时的电磁转矩近似等于额定输出转矩,试绘出这台电动机的近似的固有机械特性。
9. 他励直流电动机启动过程中有哪些要求?如何实现?
10. 直流他励电动机启动时,为什么一定要先把励磁电流加上?若忘了先合励磁绕组的电源开关就把电枢电源接通,这时会产生什么现象(试从两种情况加以分析)?当电动机运行在额定转速下,若突然将励磁绕组断开,此时又将出现什么情况?
11. 直流串励电动机能否空载运行?为什么?
12. 直流电动机用电枢电路串电阻的办法启动时,为什么要逐渐切除启动电阻?如果切除太快,会带来什么后果?
13. 他励直流电动机有哪些方法进行调速?其特点是什么?
14. 直流电动机的电动与制动两种运行状态的根本区别是什么?
15. 他励直流电动机有哪几种制动方法?其机械特性如何?试比较各种制动方法的优缺点。

第 4 章 交流电机

交流电动机是将交流电能转换为机械能的最通用的重要旋转设备。交流电动机分为异步电动机和同步电动机。异步电动机按定子绕组的相数分,有单相异步电动机和三相异步电动机。由于异步电动机结构简单、维护容易、运行可靠、制造成本较低,具有较好的稳态和动态特征,而且交流电源的获得方便易行。因此,交流异步电动机是工业及民用中使用得最为广泛的一种电动机。

本章主要介绍三相异步电动机的工作原理、启动、制动、调速的特性和方法。要求在了解三相异步电动机结构及工作原理的基础上,熟悉三相异步电动机的机械特性,掌握三相异步电动机的启动、调速和制动的方法及应用场合;同时了解单相异步电动机的工作原理及特性。

4.1 三相异步电动机的结构和工作原理

4.1.1 三相异步电动机的结构

三相异步电动机的基本结构均可分为定子和转子两大部分。

1. 三相异步电动机的定子部分

三相异步电动机的定子由定子铁芯、定子绕组与机座三部分组成。

(1) 定子铁芯

定子铁芯一般由 0.5mm 厚的硅钢片叠压而成,是一个筒形的铁芯,固定于机座上。硅钢片内圆冲有凹槽,槽中安放定子绕组,如图 4-1 所示。

(2) 定子绕组

定子绕组嵌放在定子铁芯的内圆凹槽内。由三个完全相同的绕组 AX、BY、CY 组成,对外一般有六个出线端(U₁、U₂、V₁、V₂、W₁、W₂),接于机座外部的接线盒内。

(3) 机座

机座用于固定及支承定子铁芯和定子绕组,并通过两侧的端盖和轴承来支承转子。

2. 三相异步电动机的转子部分

三相异步电动机的转子由转子铁芯、转子绕组和转轴三部分组成。

(1) 转子铁芯

如图 4-2、图 4-3 所示,转子铁芯压装在转轴上,转子铁芯也是电动机磁路的一部分,转子铁芯、气隙与定子铁芯构成电动机的完整磁路。

(2) 转子绕组

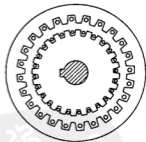


图 4-1 定子和转子的钢片

三相异步电动机的转子绕组按照结构形式分为鼠笼式转子绕组和线绕式转子绕组两种。

鼠笼式转子绕组是在转子铁芯槽里插入铜条,再将全部铜条两端焊在两个铜端环上,形成一个自身闭合的多相对称短路绕组,如图 4-2 所示。整个转子绕组犹如一个“笼子”,小型鼠笼式转子绕组多用铝离心浇铸而成。

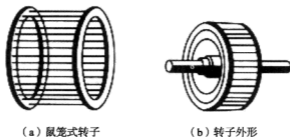


图 4-2 鼠笼式转子

线绕式转子绕组一般是连接成星形的三相绕组,绕线式转子通过轴上的滑环和电刷引出,这样可以把外接电阻或其他装置串联到转子回路里,目的是实现调速。图 4-3 所示为三相线绕式异步电动机的转子外形,图 4-4 所示为三相线绕式异步电动机的转子接线。

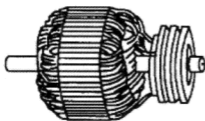


图 4-3 三相线绕式异步电动机转子外观

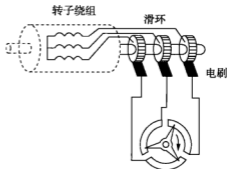


图 4-4 绕线转子的接线

3. 定子绕组的接线方式

三相异步电动机定子绕组的首端和末端通常都接在电动机接线盒内的接线柱上,一般按图 4-5 所示的方法排列,这样很方便地就可以接成星形(图 4-6)或三角形(图 4-7)。

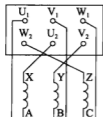


图 4-5 出线端排列

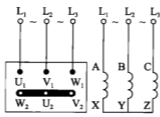


图 4-6 定子星形接法

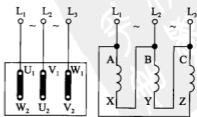


图 4-7 定子三角形接法

定子三相绕组的连接方式(星形,也常用Y形或 Δ 形表示)的选择,首先要视电动机铭牌上标注的额定接法(Y形或 Δ 形)而定;另外,还要视电源的线电压和电动机的额定电压而定,线电压和任意两始端(两火线间)的电压;相电压和每相始端与末端间(火线与中线)的电压。

通常我国4kW以上电动机的铭牌上标有符号: Δ 接法,额定电压380V,即用在电源电压380V的电网环境中定子绕组应接成 Δ 形。4kW及以下电动机的铭牌上标有符号: Δ /Y接法,额定电压220/380V,前者表示定子绕组的接法,后者表示对应于不同接法时应加的额定线电压值,即用在电源电压为380V的电网环境中定子绕组应接成Y形,用在电源电压为220V的电网环境中定子绕组应接成 Δ 形。

4. 三相异步电动机的铭牌数据

铭牌是电动机的“身份证”,认识和了解电动机铭牌中有关技术参数的作用和意义,可以帮助我们正确地选择、使用和维护电动机。图4-8是我国使用最多的Y系列三相感应电动机铭牌的一个实例。

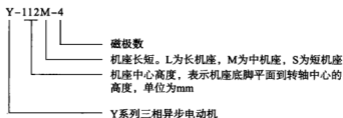


图4-8 Y系列三相感应电动机铭牌

对电动机铭牌上型号的释义如图4-9所示。

商标	三相感应电动机	
型号: Y-112M-4	出厂编号: $\times\times\times\times$	接线方法: Δ
功率: 4.0kW	电压: 380V	电源: 8.7A
频率: 50Hz	转速: 1440r/min	噪声值: 74dB(A)
工作制: SI	绝缘等级: B	防护等级: IP44
质量: 49kg	标准编号: ZBK22007-88	出厂日期:
厂家名称		

图4-9 异步电动机型号

- (1) 额定功率 P_N : 指电动机在额定运行时轴上输出的机械轴端输出功率, 单位为 kW。
- (2) 额定电压 U_N : 指额定运行状态下加在定子绕组上的线电压, 单位为 V。
- (3) 额定电流 I_N : 指电动机在定子绕组上加额定电压, 轴上输出额定功率时的线电流, 单位为 A。
- (4) 额定频率 f_N : 我国规定工业用电的频率是 50Hz, 国外有些国家采用 60Hz。
- (5) 额定转速 n_N : 指电动机定子加额定频率的额定电压, 且轴端输出额定功率时电动机的转速, 单位为 r/min。可以根据额定转速与额定频率计算出电动机的极数 p 和额定转差

率 s_{N0} 。

(6) 噪声值:指电动机在运行时的最大噪声。一般电动机功率越大,磁极数越少,额定转速越高,噪声越大。

(7) 工作制:指电动机允许工作的方式,共有 S1~S10 十种工作制。

(8) 绝缘等级:与电动机内部的绝缘材料有关,也与电动机允许工作的最高温度有关,共分 A, E, D, F, H 五种等级。

(9) 连接方法:有图 4-6 和图 4-7 所示的 Y/ Δ 两种方式。请注意有些电动机只能固定用一种接法,有些电动机可以两种接法切换工作。要注意工作电压,防止错误接线烧坏电动机。高压大、中型容量的异步电动机定子绕组常采用 Y 形接线,只需 3 根引出线。对中、小容量低压异步电动机,通常把定子三相绕组的 6 根出线头都引出来,根据需要可接成 Y 形或 Δ 形。

(10) 防护等级:IP 为防护代号,第一位数字(0~6)规定了电动机防护体的等级标准;第二位数字(0~8)规定了电动机防水的等级标准。如 IP00 为无防护。数字越大,防护等级越高。

(11) 其他:对于绕线转子电动机,还必须标明转子绕组接法、转子额定电动势及转子额定电流。有些还标明了电动机的转子电阻,有些特殊电动机还标明了冷却方式等。

4.1.2 三相异步电动机的工作原理

三相异步电动机的工作原理和其他类型的电动机是一样的,都是利用磁场与转子导体中的电流相互作用产生电磁力,进而输出电磁转矩的原理而工作的。所不同的是,在三相异步电动机中,其磁场是由定子绕组内三相电流所产生的合成磁场,且磁场是以电动机转轴为中心在空间旋转,称为旋转磁场。

1. 旋转磁场

(1) 旋转磁场的产生

三相异步电动机的定子绕组中的每一相结构相同,彼此独立。为了分析简便,假设每相绕组只有一个线匝,6 条边分别均匀嵌放在定子内圆周的 6 个槽之中,如图 4-10(a)所示,图中 A、B、C 和 X、Y、Z 分别代表各相绕组的首端与末端。三相绕组在空间彼此相隔 $2\pi/3$ 。

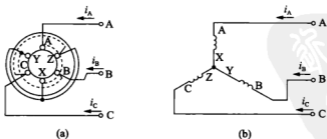


图 4-10 定子三相绕组

三相绕组的连接可以为三角形或星形。以星形连接为例来进行分析,即将 X、Y、Z 三个末端连在一起,A、B、C 接至三相对称交流电源,如图 4-10(b)所示。

定子绕组中,流过电流的正方向规定为由各相绕组的首端到末端,并取流过A相绕组的电流 i_A 作为参考正弦量,即 i_A 的初相位为零,则各相电流的瞬时值可表示为

$$i_A = I_m \sin \omega t \quad (4-1)$$

$$i_B = I_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (4-2)$$

$$i_C = I_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (4-3)$$

图 4-11 所示为三相电流随时间变化的曲线。

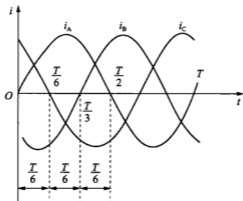


图 4-11 三相电源的电流波形图

图 4-12 显示了不同时刻磁场在定子内部的空间分布情况。

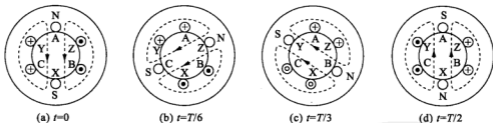


图 4-12 两极旋转磁场

由图 4-12 可知,三相定子绕组分别通入三相交流电流 i_A, i_B, i_C , 就能产生一个随时间变化沿电动机转轴不断旋转的磁场。

(2) 旋转磁场的旋转方向

当通入 A-B-C 三相绕组中的三相电流相序也为 A-B-C, 如图 4-13(a) 中所示旋转磁场的旋转方向也是沿 A-B-C 方向, 即沿顺时针方向旋转。所以, 旋转磁场的旋转方向与三相电流的相序一致。

如果将三相定子绕组的三相电源的任意两根对调, 假设将 B、C 两根线对调, 如图 4-13(b) 所示, 即通入三相绕组中的三相电流相序变为 A-C-B, 如图 4-14 中所示。旋转磁场

的旋转方向也将变为沿逆时针方向旋转。同样,分析将 A、B 两根线对调或将 A、C 两根线对调,也可得出相同的结果。

由此可得出结论:要改变旋转磁场的旋转方向,只要把定子绕组接到电源的三根导线中的任意两根对调即可。

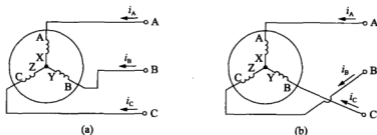


图 4-13 两相改变绕组中的电流相序

(3) 旋转磁场的旋转速度

在讨论旋转磁场时,三相异步电动机三相定子绕组每相只有一个线圈,三相绕组的首端之间在空间上相差 $2\pi/3$,所产生的旋转磁场具有一对磁极(磁极对数用 p 表示)即 $p=1$ 。可看出,当电流变化一个周期(变化 360° 电角度),旋转磁场在空间也旋转了一转(转了 2π 机械角度),若电流的频率为 f ,旋转磁场每分钟将旋转 $60f$ 转,旋转磁场的转速称为同步转速,以 n_0 表示,即

$$n_0 = 60f \quad (4-4)$$

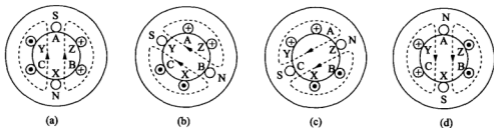


图 4-14 反向旋转的两极旋转磁场

如果把定子铁芯的槽数增加 1 倍(12 个槽),制成如图 4-15 所示的三相绕组,其中,每相绕组由两个串联的线圈组成,即 A 相绕组为 A-X 与 A'-X' 串联, B 相绕组为 B-Y 与 B'-Y' 串联, C 相绕组为 C-Z 与 C'-Z' 串联,每相绕组有 4 条有效边,嵌放在定子铁芯的 4 个槽内,嵌放时应使三相绕组所对应的首端与首端之间或末端与末端之间在空间相差 $\pi/3$ 。

再将这三相绕组通入对称三相电流(图 4-11),由分析可知,则会产生具有两对磁极的旋转磁场($p=2$)。从图 4-16 可以看出,对应于不同时刻,旋转磁场在空间处于不同位置,这时电流变化半个周期,旋转磁场在空间只转过了 $\pi/2$,即 $1/4$ 转。电流变化两个周期,旋转磁场在空间才能旋转 1 转。

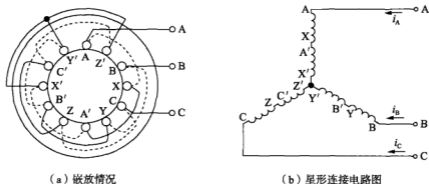


图 4-15 三相绕组电路图

由此可见,当定子绕组的绕线的绕制结构决定了旋转磁场具有两对磁极($p=2$)时,旋转磁场的转速仅为一对磁极时的一半,即 $\frac{60f}{2}$ r/min转。依此类推,当有 p 对磁极时,其转速为

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (4-5)$$

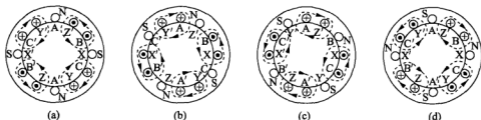


图 4-16 四极旋转磁场

所以,旋转磁场的旋转速度(同步转速) n_0 与定子绕组电流的频率成正比,而与旋转磁场的磁极对数成反比。我国交流电标准频率(电流频率)为50Hz,因此,当 $p=1,2,3,4,5$ 时,同步转速分别为3 000r/min、1 500r/min、1 000r/min、750r/min、600r/min。

2. 三相异步电动机的工作原理

三相异步电动机的工作原理,是基于定子旋转磁场和转子电流(转子绕组内的电流)的相互作用。

如图4-17所示,当三相异步电动机的三相定子绕组接到三相电源上时,绕组内将通过对称三相电流,并在空间产生以电动机转轴为中心的旋转磁场。图中假设旋转磁场的极对数 $p=1$,且假设旋转磁场以同步转速 n_0 顺时针方向旋转。当旋转磁场旋转时,转子绕组的导体切割旋转磁场的磁通将产生感应电势 e_2 ,由于旋转磁场向顺时针方向旋转,则相当于转子导体向逆时针方向旋转切割磁通,根据右手定则,在N极下转子

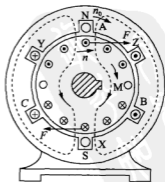


图 4-17 三相异步电动机工作原理图

导体中感应电势的方向由内指向外,而在S极下转子导体中感应电势方向则由外指向内。

由于电势 e_2 的存在,且转子导体自成闭环回路,转子绕组中将产生转子电流 i_2 。转子电流与旋转磁场相互作用产生电磁力 F ,其方向由左手定则确定,如图 4-17 所示(假设 i_2 和 e_2 同相),该力在转子的轴上形成电磁转矩,且转矩的作用方向与旋转磁场的旋转方向相同,转子受此转矩作用,便沿旋转磁场的旋转方向旋转起来。但是,转子的旋转速度 n (电动机的转速)恒比旋转磁场的旋转速度 n_0 小,因为如果两种转速相等,转子和旋转磁场就没有相对运动,转子导体内的感应电势、电流和电磁转矩都将不存在,转子将不会继续旋转。

因此,转子的转速和旋转磁场的转速之间要有差值,正因如此,这种电动机称为异步电动机。在异步电动机中常用转差率 s 表示转子的转速 n 与旋转磁场的转速 n_0 相差的程度,即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (4-6)$$

转差率 s 是分析异步电动机运行情况的主要参数。通常异步电动机在额定负载时, n 接近于 n_0 ,转差率 s 很小,约为 0.015~0.060。

综上所述可知,三相异步电动机的工作原理为:①三相定子绕组中通入对称三相电流产生旋转磁场;②转子导体切割旋转磁场产生感应电动势和电流;③转子上载流导体在磁场中受电磁力的作用,从而形成电磁转矩,进而驱动电动机的转子旋转。

4.2 三相异步电动机的定子电路和转子电路

当定子绕组接上三相电源电压(相电压为 u_1)时,则有三相电流通过(相电流为 i_1),定子三相电流产生旋转磁场,其磁力线通过定子、气隙和转子铁芯而闭合,这种磁场在定子每相绕组和转子每相绕组中分别感应出电动势 e_1 和 e_2 。这种电磁关系同三相变压器类似,定子绕组相当于变压器的原绕组,转子绕组(一般是短接的)相当于副绕组。定子和转子每相绕组的匝数分别为 N_1 和 N_2 。

4.2.1 定子电路

1. 定子每相绕组的感应电动势 E_1

旋转磁场的磁感应强度沿气隙的分布是接近于正弦规律分布的,因此,当其旋转时,通过定子每相绕组的磁通也是随时间按正弦规律变化的,定子每相绕组中产生的感应电动势为 $e = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$ 是正弦量,其有效值为

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{d1} \Phi \quad (4-7)$$

式中, f_1 为定子感应电动势的频率; k_{d1} 为定子绕组系数; Φ 为气隙每极磁通量。

定子电流除产生旋转磁通(主磁通)外,还产生漏磁通(很小),仅在定子绕组上产生漏磁电动势,进而起电抗压降的作用。其压降与电动势 E_1 比较起来,常可忽略,于是 $U_1 \approx E_1$ 。

2. 感应电动势的频率 f_1

因为极对数为 p 的旋转磁场每转一周,则穿过定子绕组的磁通按正弦规律交变 p 次,而

旋转磁场和定子间的相对转速为 n_0 , 所以定子电流的频率为

$$f_1 = \frac{pm_0}{60} \quad (4-8)$$

4.2.2 转子电路

1. 转子感应电动势 E_2

定子接上电源后, 旋转磁场在转子绕组中产生感应电动势, 从而产生转子电流。转子感应电动势就是转子电路的电源, 其表达式为 $e_2 = -N_2 \frac{d\varphi}{dt}$, 其有效值为

$$E_2 = 4.44f_2 N_2 k_{ap2} \Phi \quad (4-9)$$

式中, f_2 为转子电动势; N_2 或转子电流 i_2 的频率; k_{ap2} 为转子绕组系数。

2. 转子电动势的频率 f_2

因为旋转磁场和转子间的相对转速为 $(n_0 - n)$, 转子绕组切割主磁通在转子回路中每秒交变的次数, 即转子感应电动势的频率为

$$f_2 = \frac{p(n_0 - n)}{60} = \frac{n_0 - n}{n_0} \frac{pm_0}{60} = sf_1 \quad (4-10)$$

可见转子频率 f_2 与转差率 s 有关, 也就是与转速 n 有关。

3. 转子绕组的漏感抗 X_2

转子的感应电动势产生转子电流, 而转子电流也会产生漏磁通, 漏磁通会在转子每相绕组中产生漏感抗, 从而在转子每相绕组中产生漏磁电动势。其表达式为 $e_{L2} = -L_{L2} \frac{di_2}{dt}$ 。因此, 对于转子每相电路, 转子感应电动势的表达式为

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 R_2 + (-\dot{E}_{L2}) = \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_2 \quad (4-11)$$

式中, R_2 和 X_2 为转子每相绕组的电阻和漏磁感抗。

由于感抗与转子频率成正比, 漏磁感抗 X_2 的表达式为

$$X_2 = 2\pi f_2 L_{L2} = 2\pi s f_1 L_{L2} \quad (4-12)$$

式中, L_{L2} 为转子绕组的漏电感。

在 $n=0$, 即 $s=1$ 时, 转子感抗为

$$X_{20} = 2\pi f_1 L_{L2} \quad (4-13)$$

这时, 转子感抗最大。

由式(4-12)和式(4-13)得出

$$X_2 = sX_{20} \quad (4-14)$$

可见转子感抗 X_2 与转差率 s 有关。

转子每相绕组的阻抗为 $Z_2 = R_2 + jX_2 = R_2 + jsX_{20}$

4. 转子绕组的电流 I_2

转子绕组正常运行时处于短路状态,转子电流的表达式为

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (4-15)$$

可见转子电流 I_2 也与转差率有关。当 s 增大,即转速 n 降低时,转子与旋转磁场间的相对转速 $(n_0 - n)$ 增加,转子导体被磁力线切割的速度提高,于是 E_2 增加, I_2 也增加。当 $s=0$,即 $(n_0 - n)=0$ 时, $I_2=0$;当 s 很小时, R_2 远大于 sX_{20} , $I_2 \approx \frac{sE_{20}}{R_2}$,即与 s 近似地成正比;当 s 接近 1 时, sX_{20} 远大于 R_2 , $I_2 \approx \frac{E_{20}}{R_2} = \text{常数}$ 。

5. 转子电路的功率因数

由于转子有漏磁通,相应的感抗为 X_2 ,因此, X_2 使 I_2 滞后 E_2 一定角度,因此转子电路的功率因数为

$$\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (4-16)$$

可见,功率因数也与转差率 s 有关。当转速很高, s 很小时, R_2 远大于 sX_{20} , $\cos\varphi_2 \approx 1$,当转速降低, s 增大时, X_2 也增大,于是 $\cos\varphi_2$ 减小,当 s 接近 1 时, $\cos\varphi_2 \approx \frac{R_2}{(sX_{20})}$ 。

由上式可知,转子电路的各个物理量,如电动势、电流、频率、感抗及功率因数等都与转差率有关,因此转差率是异步电动机的一个重要参数。

4.3 三相异步电动机的转矩与机械特性

电动机作为一种将电能转化为机械能的装置,电磁转矩和转速是电动机的重要物理量,而三相异步电动机的电磁转矩与哪些因素有关,三相异步电动机的电磁转矩和转速的相互关系(机械特性)又是怎样的呢?

4.3.1 三相异步电动机的电磁转矩

三相异步电动机的电磁转矩是由旋转磁场的每极磁通 Φ 与转子电流 I_2 相互作用而产生的,它与 Φ 和 I_2 的乘积成正比,此外,它还与转子电路的功率因数 $\cos\varphi_2$ 有关,从能量的观点来分析,与有功功率成正比的转矩只取决于转子电流 I_2 的有功分量 $I_2 \cos\varphi_2$ 。故三相异步电动机的电磁转矩为

$$T = K_t \Phi I_2 \cos\varphi_2 \quad (4-17)$$

式中, K_t 为仅与电动机结构有关的常数。

将式(4-9)代入式(4-15)得

$$I_2 = \frac{s(4.44f_1 N_2 \Phi)}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{20})^2}} \quad (4-18)$$

再将式(4-18)和式(4-16)代入式(4-17),则得出转矩的表达式为

$$T = K \frac{sR_2 U_1^2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} = K \frac{sR_2 U^2}{R_2^2 + (sX_{20})^2} \quad (4-19)$$

式中, K 为与电动机结构参数、电源频率有关的一个常数, $K \propto 1/f_1$; U_1 、 U 分别为定子绕组相电压、电源相电压; R_2 为转子每相绕组的电阻; X_{20} 为电动机静止 ($n=0$) 时转子每相绕组的感抗。

式(4-19)表示当电源电压 U_1 、电源频率 f_1 及转子电阻 R_2 为一定值时,异步电动机的电磁转矩 T 随转差率 s 的变化规律即 $T-s$ 曲线。

4.3.2 三相异步电动机的机械特性

由于 $n=(1-s)n_0$,则由 $T-s$ 曲线就可得出 $n-T$ 曲线,也就是三相异步电动机的机械特性 $n=f(T)$ 。与直流电动机不同的是,异步电动机的机械特性不是线性关系,而是曲线关系。

三相异步电动机的机械特性分为固有机械特性和人为机械特性。

1. 固有机械特性

三相异步电动机固有机械特性是指电动机在额定电压和额定频率下,按照规定的接线方式,定子和转子电路中不串联任何电阻或电抗时的机械特性,称为自然机械特性,根据式(4-19)和式(4-6)可得到三相异步电动机的固有机械特性曲线。图4-18所示为异步电动机处于第一象限电动运行状态时的固有机械特性曲线。曲线中有四个特殊点值得关注,这四个特殊点基本确定了机械特性曲线的形状。

1) 理想空载转速点(也称同步转速点)

$T=0, n=n_0$ 时的工作点称为电动机的理想空载点,此时 $s=0$, 转子电流 $I_2=0$, 电动机此时不进行能量的转换。显然,如果没有外界转矩的作用,异步电动机本身不可能达到该点。

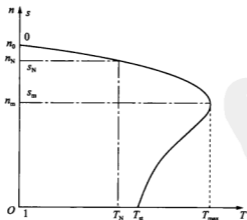


图 4-18 三相异步电动机的固有机械特性

2) 额定运行点

$T=T_N, n=n_N$ 的点称为电动机的额定工作点, 此时 $s=s_N, I_1=I_N$, 额定运行点的转差率很小, 电动机的额定转速 n_N 略小于同步转速 n_0 , 同时说明固有机械特性额定运行点附近的近似线性段硬度较大。机械特性曲线上的额定转矩是指电动机的额定电磁转矩, 如忽略损耗, 也可近似认为是电动机的额定输出转矩。因此额定转矩和额定转差率的计算式为

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N} \quad (4-20)$$

$$s_N = \frac{n_0 - n_N}{n_0} \quad (4-21)$$

式中, P_N 为电动机的额定功率; n_N 为电动机的额定转速, 一般 $n_N = (0.94 \sim 0.985)n_0$; s_N 为电动机的额定转差率, 一般 $s_N = 0.06 \sim 0.015$; T_N 为电动机的额定转矩。

3) 临界工作点(也称最大转矩点)

$T=T_{\max}, n=n_m (s=s_m)$ 的点称为临界工作点, 是特性曲线中线性段与非线性段的分界点。一般情况下, 电动机在线性段工作是稳定的, 电动机在非线性段工作是不稳定的, 故分界点称为临界工作点。在此点电动机能提供最大转矩, 故又称为最大转矩点。欲求转矩的最大值, 可由式(4-19)令 $dT/ds = 0$, 而得临界转差率

$$s_m = \frac{R_2}{X_{20}} \quad (4-22)$$

再将 s_m 代入式(4-19), 可得

$$T_{\max} = K \frac{U^2}{2X_{20}} \quad (4-23)$$

从式(4-22)和式(4-23)可看出: 最大转矩 T_{\max} 的大小与定子每相绕组上所加电压 U 的平方成正比, 这说明最大转矩 T_{\max} 对电源电压的波动很敏感。最大转矩 T_{\max} 的大小反映了异步电动机的过载能力。异步电动机在运行中经常会遇到短时冲击负载, 如果冲击负载转矩小于最大电磁转矩, 电动机仍然能够运行, 而电动机短时过载也不会引起剧烈发热。

通常把固有机械特性上最大电磁转矩与额定转矩之比称为电动机的过载能力系数

$$\lambda_m = \frac{T_{\max}}{T_N} \quad (4-24)$$

它表征了电动机能够承受冲击负载的能力大小, 是电动机的又一个重要运行参数。

4) 启动工作点

将 $n=0, T=T_{st}$ 的点称为启动工作点, 此时 $s=1$, 电动机的电磁转矩为启动转矩 T_{st} 。将 $s=1$ 代入式(4-19)可得

$$T_{st} = K \frac{R_2 U^2}{R_2^2 + X_{20}^2} \quad (4-25)$$

可见, 异步电动机的启动转矩 T_{st} 与电源电压 U 、转子回路的 R_2 及 X_{20} 有关; 启动转矩与定子每相绕组上的电压 U 的平方成正比, 电压 U 时的下降启动转矩会明显减小; 在一定的范围内, 当转子电阻适当增大时, 启动转矩会增大; 而若增大转子电抗则会使启动转矩大为减小。启动时只有启动转矩 T_{st} 大于负载转矩 T_L 电动机才能启动。

通常把在固有机械特性上启动转矩与额定转矩之比 $\lambda_{st} = T_{st}/T_N$ 称为电动机的启动能力系数,它是衡量异步电动机启动能力的一个重要数据,可在电动机的常用数据中查得。一般启动能力系数为 1.0~1.2。确定了以上四点,三相异步电动机的固有机械特性曲线就可大致绘出。

将式(4-21)到式(4-24)代入到式(4-19),可以得到如下表达式

$$T = \frac{2T_{\max}}{\frac{s_m}{s} + \frac{s}{s_m}} \quad (4-26)$$

该式又叫式(4-19)的实用表达式。

2. 人为机械特性

由式(4-19)知,人为地改变电动机的参数或外加电源电压、电源频率,异步电动机的机械特性将发生变化,这时得到的机械特性称为异步电动机的人为机械特性。通过改变定子电压 U 、定子电源频率 f 、定子电路串入电阻或电抗、转子电路串入电阻或电抗等,都可得到异步电动机的人为机械特性。

在异步电动机启动、调速和制动等过程中常用的人为机械特性如下:

1) 降低电动机定子电压时的人为机械特性

只降低电动机的定子电压而电动机的其他参数不变,这时得到电动机的人为机械特性如图 4-19 所示,与电动机的固有机械特性分析比较可看出:(1)电动机的理想空载转速 n_0 和临界转差率 s_m 与电动机定子电压 U 的变化无关;(2)降低电动机的定子电压后,电动机的启动转矩了 T_{st} 和最大转矩 T_{\max} 均与电压降低倍数成平方关系下降。

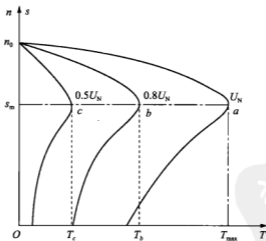


图 4-19 改变电源电压时的人为机械特性

所以,异步电动机定子电压越低,人为机械特性曲线越往左移。电压下降,在负载转矩不变的条件下,将使电动机转速下降,转差率 s 增大,电流增加,引起电动机发热甚至烧坏。这就是为什么异步电动机在电网电压下降时会过热的原因。

2) 改变定子电源频率的人为机械特性

由于 $U_1 \approx E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{d1} \Phi$, 当 f_1 减小时, 磁通将增大(而电动机的额定磁通一般接近饱和), 会导致电流急剧增加, 电动机就会过热, 进而大大缩短电动机的使用寿命。因此, 在改变频率 f_1 的同时, 电源电压也要作相应的变化, 使 $U/f = \text{常数}$, 这在实质上是使电动机气隙磁通保持不变。由于 $U/f = \text{常数}$, 就存在有 n_0 正比于 f , s_m 正比于 $1/f$, T_{st} 正比于 $1/f$ 和 T_{max} 不变的关系, 即随着频率的降低, 理想空载转速 n_0 要减小, 临界转差率要增大, 启动转矩要增大, 而最大转矩基本维持不变。

3) 转子电路串电阻时的人为机械特性

对于线绕式异步电动机, 如果保持其他条件不变, 仅在转子回路中串接三相对称电阻, 所得到的人为机械特性即为异步电动机转子电路串电阻时的人为机械特性。当转子回路中串接三相对称电阻时, 其特点为: (1) 同步转速 n_0 保持不变, 最大转矩 T_{max} 保持不变, 而临界转差率 s_m 随着转子回路总电阻的增大而成正比地增大; (2) 随着转子回路串入电阻, 启动转矩 T_{st} 也随之增大, 但串入的电阻不应过大, 若串入的电阻过大使 $s_m > 1$ 时, 启动转矩 T_{st} 反而会降低。

4.4 三相异步电动机的工作特性

异步电动机的工作特性是指当外加电源电压和电源频率为常数时, 异步电动机的转速、转矩、定子绕组电流、定子功率因数及效率与该电动机输出功率的关系曲线。这些曲线可用实验方法测得。从异步电动机的工作特性曲线可以判断它的工作性能好坏, 从而达到正确选用电动机、满足不同工作要求的目的。异步电动机的不同工作特性曲线示于图 4-20 中。

4.4.1 转速特性

异步电动机的转速在电机正常运行的范围内随负载的变化不大, 所以转速特性 $n = f(P_2)$ 曲线是一条略微下倾的近似直线。如果略去电动机的机械损耗, 则输出功率

$$P_2 \approx T \frac{2\pi n}{60} \quad (4-27)$$

$$T \approx \frac{30}{\pi n} P_2 \quad (4-28)$$

式中, P_2 的单位为 kW; n 的单位为 r/min; T 的单位为 N·m。

4.4.2 定子电流特性

定子电流特性 $I_1 = f(P_2)$, 随着负载增加, 转速下降, 转子电流增大, 定子电流也随着增大, 定子电流几乎随 P_2 按比例增加, 如图 4-20 所示。

4.4.3 功率因素特性

功率因数特性是 $\cos\varphi_1 = f(P_2)$ 。异步电动机在空载时功率因素很低。随着负载增加, 开始时 $\cos\varphi_1$ 增加较快, 通常在额定负载时达最大值。当负载再增加时, 由于转差率增大,

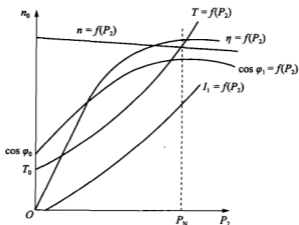


图 4-20 三相异步电动机的工作特性

使转子漏感抗变大,因而使 $\cos\varphi$ 反而降低,转子电流的无功分量增加,因而定子电流的无功分量随之增加,使电动机定子功率因数又重新开始下降,如图 4-20 所示。

4.4.4 电磁转矩特性

电磁转矩特性是 $T=f(P_2)$ 。由于电动机在正常运行范围内,转矩 $n=f(P_2)$ 曲线变化不大,近似为直线,故 $T=f(P_2)$ 也近似为一直线。由于 $T=T_2+T_0$,在转速不变的情况下, T_0 为一常数,所以 T 是 T_2 的基础上叠加 T_0 ,因此,异步电动机的转矩特性是一条不通过原点的近似直线,如图 4-20 所示。

4.4.5 效率特性

效率特性是 $\eta=f(p_2)$ 。电动机的效率随着负载的增大,开始时增加较快,通常也在额定负载时达到最大值。此后,随 P_2 的增加效率反而略有下降。因为效率达最大值后,如果负载继续增大,由于定、转子铜损耗增加很快,效率反而降低。对于中、小型异步电动机,最大效率通常出现在 $0.7\sim 1.0P_N$ 范围内。一般说来,电动机的容量越大,效率越高。

4.5 三相异步电动机的启动特性

电动机的启动是指电动机接通电源后,由静止状态加速到稳定运行状态的过程。异步电动机对启动的要求有:(1)要求异步电动机有足够大的启动转矩;(2)在满足生产机械能启动的情况下,启动电流越小越好;(3)启动过程中,电动机的平滑性越好,对生产机械的冲击就越小;启动设备可靠性越高,电路越简单,操作维护就越方便。

但是,异步电动机启动的瞬间,由于转子的转速为零,在转子绕组中感应出很大的转子电势和转子电流,从而引起很大的定子电流,一般启动电流 I_m 可达额定电流 I_N 的 $4\sim 7$ 倍;而启动时由于转子功率因数 $\cos\varphi_2$ 很低,启动转矩却不大,一般 $T_H=(0.8\sim 1.5)T_N$ 。解决

这些矛盾,其核心问题就是减小启动电流和增大启动转矩。

由于异步电动机中鼠笼式和线绕式的转子结构有差异,两者的启动方法也不同。

4.5.1 鼠笼式异步电动机的启动方法

鼠笼式异步电动机的启动方法有直接启动和降压启动。

1. 直接启动

直接启动又称全压启动(见图4-21),就是将电动机的定子绕组接在额定电压下启动。

鼠笼式异步电动机在出厂时通常允许在额定电流工况下直接启动,这一点与直流电动机是完全不同的。在实际中鼠笼式异步电动机能否直接启动,主要依据电源及生产机械对电动机启动的要求。

有独立变压器供电(变压器供动力用电)的情况下,若电动机启动频繁,则电动机功率小于变压器容量的20%时允许直接启动;若电动机不经常启动,电动机功率小于变压器容量的30%时允许直接启动。

如果没有独立的变压器供电的情况下,电动机启动比较频繁,则常按经验公式来估算,满足下列关系则可直接启动。

$$\frac{\text{启动电流 } I_{st}}{\text{额定电流 } I_N} \leq \frac{3}{4} + \frac{\text{电源总容量}}{4 \times \text{电动机功率}} \quad (4-29)$$

如果是变压器—电动机组供电方式,则允许全压启动的笼式电动机功率为不大于变压器额定容量的80%;如果电源为小容量的发电机组,则每1kVA发电机容量允许全压启动的笼式电动机功率为(0.1~0.12)kW。

2. 定子回路串对称三相电阻或电抗器降压启动

定子回路串对称三相电阻或电抗器降压启动效果是一样的,都是通过电阻或电抗器的分压来降低电动机定子绕组电压的,进而减小启动电流。但大型电动机串电阻启动能耗太大,多采用串电抗器进行降压启动。采用电阻或电抗器降压启动时,若电压下降到额定电压的 K 倍($K < 1$),则启动电流也下降到直接启动电流的 K 倍,但启动转矩却下降到直接启动转矩的 K^2 倍。这表明串电阻或电抗器降压启动虽然降低了启动电流,但同时启动转矩也大为降低。因此串电阻或电抗器降压启动方法只适用于电动机轻载启动。

3. Y-Δ 降压启动

对于电动机正常运行时定子绕组接成三角形的鼠笼式异步电动机,在启动时将定子绕组接成星形,定子每相绕组上的电压为正常运行时定子每相绕组上的电压的0.58倍,起到了降压的作用;待转速上升到一定程度后再将定子绕组接成三角形,电动机启动过程完成而转入正常运行。设 U_1 为电源线电压, I_{stY} 及 $I_{st\Delta}$ 为定子绕组分别接成星形及三角形的启动电流(线电流), Z 为电动机在启动时每相绕组的等效阻抗。当定子绕组接成星形时,定子每相

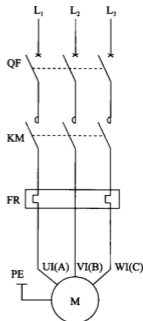


图 4-21 鼠笼式异步电动机直接启动时的主电路图

绕组上的电压为 $U_1/\sqrt{3}$ ，定子绕组接成三角形时，定子每相绕组上电压为 U_1 ，所以 $I_{stY} = I_{st\Delta}/3$ ， $T_{stY} = T_{st\Delta}/3$ ，即定子接成星形降压启动时的启动电流等于接成三角形直接启动时启动电流的 $1/3$ ，而且定子接成星形时的启动转矩也只有接成三角形直接启动时启动转矩的 $1/3$ 。

Y- Δ 降压启动的优点是设备简单、经济、启动电流小；缺点是启动转矩小，且启动电压不能调节，故只适用于生产机械为空载或轻载启动的场合，并只适用于正常运行时定子绕组额定接法为 Δ 接法的异步电动机。

4. 自耦变压器降压启动

自耦变压器降压启动是通过将自耦变压器加到定子绕组上启动电压降低，以降低电动机的启动电流。启动时电源接自耦变压器原边，副边接电动机的定子绕组；启动结束后电源直接接在电动机的定子绕组上，如图 4-22 所示。

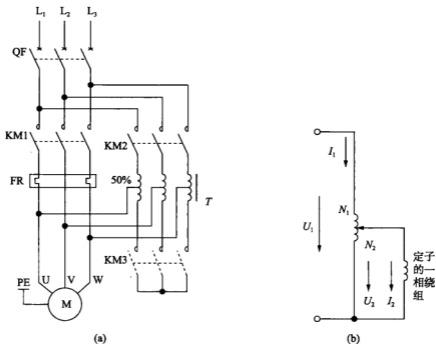


图 4-22 自耦变压器降压启动

由于启动转矩与定子绕组电压的平方成正比，因此自耦变压器降压启动时的启动转矩也是全压启动时的 K^2 倍。

5. 软启动

软启动是一种近年来发展起来用于控制鼠笼式异步电动机的全新启动方式。软启动装置是一种集电动机软启动、软停车、轻载节能和多种保护功能于一体的新颖电动机启动控制装置，通过控制三相并联晶闸管的导通角，使被控电动机的输入电压按不同的要求而变化，就可实现不同功能的启动方式。由于电动机启动时电压和电流都可以从零连续调节，对电网电压无浪涌冲击，电压波动小，而电动机的转矩亦连续变化，对电动机及机械设备的机械冲击也几乎为零。

4.5.2 线绕式异步电动机的启动方法

线绕式异步电动机启动时能在转子回路中串电阻或频敏变阻器,因此具有较大的启动转矩和较小的启动电流,即具有较好的启动特性。

1. 逐级切除启动电阻法

线绕式异步电动机转子回路中串电阻启动时,为了减小在整个启动过程中启动电流的冲击,同时又为了保证在整个启动过程中电动机能提供较大的启动转矩,一般采用分级切除启动电阻的方法。线绕式异步电动机转子回路中串电阻的主电路接线如图 4-23(a)所示。

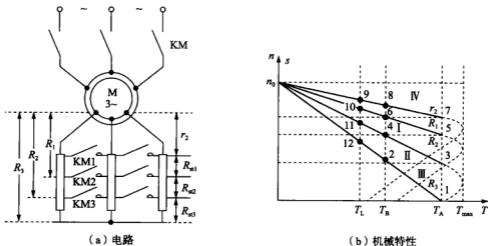


图 4-23 转子逐级切除启动电阻时的电路及机械特性

2. 转子回路串频敏变阻器启动法

采用逐级切除启动电阻法来启动线绕式异步电动机,可以增大启动转矩,减小启动电流。若要减小启动电流及启动转矩在启动过程中的切换冲击,使启动过程平稳,就得增加切换级数,这会导致启动设备及控制更复杂。为了克服这一缺点,对于容量较大的线绕式异步电动机,常采用频敏变阻器来代替启动电阻,这样可自动切除启动电阻,又不需要控制电器。

频敏变阻器接入转子电路中时,其等效为一个电阻 R 和一个电抗 X 串联。

频敏变阻器的主要优点是:具有自动平滑调节启动电流和启动转矩的良好启动特性,且结构简单,运行可靠。

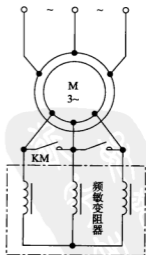


图 4-24 频敏电阻器的接线图

4.6 三相异步电动机的调速特性

三相异步电动机的调速方法主要有调压调速、转子电路串电阻调速、变极对数调速及变频调速等。

4.6.1 调压调速

改变电源电压时的人为机械特性如图 4-25 所示。当电动机定子电压降低时,电动机的最大转矩 T_{\max} 减小,而同步转速 n_0 和临界转差率 s_m 不变。对于通风机型负载(图 4-25 中特性曲线 2),电动机在全段机械特性上都能稳定运行,在不同的电压下有不同的稳定工作点为 d 、 e 、 f ,且调速范围较大。对于恒转矩负载(图 4-25 中特性曲线 1),电动机只能在机械特性的线性端($0 < s < s_m$)稳定运行,在不同的电压下有不同的稳定工作点为 a 、 b 、 c ,但调速范围很小。

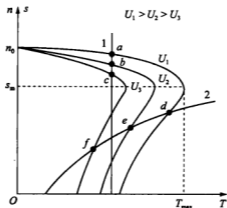


图 4-25 调压调速时的机械特性

4.6.2 转子电路串电阻调速

这种调速方法只适用于线绕式异步电动机,见图 4-23。从图中可看出,转子电路串不同的电阻,其 n_0 和 T_{\max} 不变,但 s_m 随外加电阻的增大而增大。对于恒转矩负载 T_L ,在不同的外加电阻下与电动机机械特性的交点不同,即可得到不同的稳定工作点。随着外加电阻的增大,电动机的转速逐渐降低。

转子电路串电阻调速简单可靠,但它是有级调速,不能实现连续平滑调速,是一种不经济的调速方法。所以,这种调速方法大多用在重复短期运转且对调速性能要求不高的生产机械中,如在起重运输设备中应用非常广泛。

4.6.3 变极对数调速

在生产中有大量的生产机械,它们并不需要连续平滑调速,只需要几种特定的转速就可以了,而且对启动性能没有高的要求,一般只在空载或轻载下启动,在这种情况下选用变极对数调速比较合理。由于只能按极对数的倍数改变转速,不可能做到无级调速。

改变极对数时一般采用 Y/YY 或 Δ /YY 连接方式,如图 4-26 所示。采用变极调速时,由于变极前后电动机的相电压不变,可以证明, Y/YY 变极调速基本上属于恒转矩调速方式;采用 Δ /YY 变极调速时,为了充分利用电动机,使每个半相绕组都流过额定电流,可以证明, Δ /YY 变极调速基本上属于恒功率调速方式。

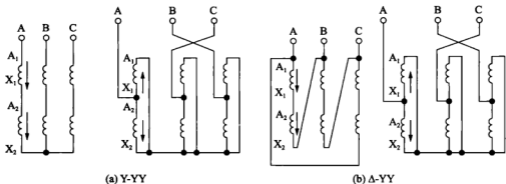


图 4-26 极对数变换

多速电动机启动时宜先接成低速,然后再换接为高速,这样可获得较大的启动转矩。

4.6.4 变频调速

从人为改变电源频率时的异步电动机机械特性可以看出,若连续地调节定子电源的频率,即可实现连续地改变电动机的转速,这就是变频调速。变频调速是当今交流电动机调速的主流技术。变频调速既可以在额定频率 f_N 以下进行,也可以在额定频率 f_N 以上进行。

1. 在额定频率 f_N 以下的变频调速

在额定频率 f_N 以下调速时,根据式(4-7)可知,为了不使气隙磁通饱和,必须同时降低电源电压,即保持电动机 U_1/f_1 不变,这时电动机的机械特性见图 4-27。这种变频调速的特点为:(1)随着频率的下降,电动机的启动转矩增大,即变频调速增大了电动机的启动能力;(2)电动机的最大转矩即过载能力不变;(3)电动机主工作段的硬度不变;(4)可以证明, U_1/f_1 为常数的变频调速属恒转矩的调速方式。

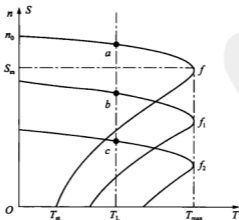


图 4-27 额定频率 f_N 以下变频调速的机械特性

2. 在额定频率 f_N 以上的变频调速

三相异步电动机在额定频率 f_N 以上实现变频调速时,由于电动机的定子电压 U_1 不能超过电动机的额定电压 U_N ,由式(4-7)可知,电压不变频率上升时磁通必将下降,因此额定频率 f_N 以上的变频调速是一种弱磁性质的调速,这时电动机的机械特性如图 4-28 所示。这种变频调速属于恒功率的调速方式。变频调速器的工作原理详见第 8 章。

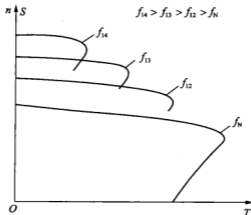


图 4-28 额定频率 f_N 以上变频调速的机械特性

4.7 三相异步电动机的制动特性

异步电动机电气制动的方式同直流电动机一样,也可分为反接制动、回馈制动和能耗制动三种。

4.7.1 反接制动

1. 电源反接制动

异步电动机处于正常运行状态时,突然改变定子绕组三相电源的相序(电源反接)改变了旋转磁场的方向,从而使转子绕组中感应电势、电流和电磁转矩都改变了方向,因机械惯性,转子转向未变,电磁转矩与转子的旋转方向相反,电动机处于制动状态。这种制动称为电源反接制动,其机械特性如图 4-29 所示。

电源反接时会在转子回路中感应出很大的电流,为了限制转子电流,对鼠笼式异步电动机可在定子电路中串接电阻。对线绕式异步电动机可在转子电路中串接电阻,限制电流的同时增大制动转矩,机械特性如图 4-29 中的曲线 3,制动开始时运行点由点 a 移至点 d ,制动时沿特性曲线减速至点 e 制动结束, $n=0$,停车并切断电源。

2. 倒拉反接制动

当线绕式异步电动机拖动位能性负载提升重物时,若在电动机的转子回路中串入很大的电阻,就会出现倒拉反接制动,其机械特性如图 4-30 所示。

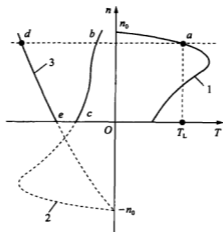


图 4-29 电源反接时反接制动的机械特性

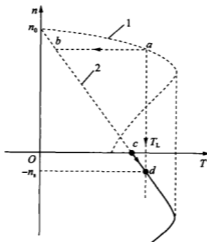


图 4-30 倒拉反接制动时的机械特性

4.7.2 回馈制动

在有些情况下,异步电动机的转速高于它的同步速度,即 $n > n_0$, $s < 0$, 转子导体切割旋转磁场的方向与电动状态时相反,转子电流的方向也发生了变化,电动机的转矩变为 0。转速方向相反,电动机处于制动状态,这种制动称为回馈制动。这时电动机处于发电机运行状态,把系统的机械能转化为电能,一部分消耗在转子回路的电阻上,剩余的大部分电能则回馈回电网。回馈制动一般出现在以下两种情况。

1. 重物下放时的回馈制动

起重机械在向下放重物时,电动机反转(在第三象限),如图 4-31 所示。重物开始下放时,电动机工作在反转电动状态,电动机的电磁转矩和负载转矩均与转速方向相同,均为拖

动转矩,系统在电磁转矩和负载转矩的共同作用下,重物快速下降。当电机的实际转速超过同步转速后,转子电流的方向也发生了变化,电磁转矩方向也发生了变化,成为制动转矩。当 $T=T_L$ 时,达到稳定状态,重物以一个较高的转速均匀下降。

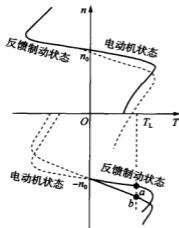


图 4-31 重物下放时回馈制动机械特性

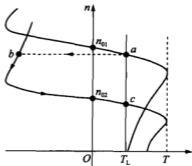


图 4-32 变极调速时回馈制动机械特性

2. 调速过程中的回馈制动

电动机在变极调速或变频调速过程中,极对数突然增多或供电频率突然降低,使同步转速 n_0 突然降低时也会出现回馈制动状态。图 4-32 所示为某双速鼠笼式异步电动机,高速运行时为 4 极,同步转速为 n_{01} ;低速运行时为 8 极,同步转速为 n_{02} 。当电动机由高速挡切换到低速挡时,由于转速不能突变,在降速开始,电动机运行到同步转速为 n_{02} 的机械特性点 b ,此时电动机的转速高于同步转速 n_{02} ,转子所产生的电磁转矩变为与转速相反,为制动转矩,运行在第二象限。电动机电磁转矩和负载转矩一起使电动机降速,在降速过程中,电动机将运行系统中的动能转换成电能反馈到电网,直至转速降低至同步转速 n_{02} ,电动机的回馈制动结束。当电动机在高速挡所储存的动能消耗完后,电动机就进入电动状态,进入第一象限,直到电动机的电磁转矩又重新与负载转矩相平衡,电动机稳定运行在点 c 。

4.7.3 能耗制动

异步电动机在运行时,此时将定子绕组从三相交流电源上断开,将其中两相绕组接到直流电源上,就构成了能耗制动,如图 4-33(a)所示。

当定子绕组通入直流电源时,在电动机中将产生一个固定磁场。转子因机械惯性继续旋转时,转子导体切割固定磁场产生感应电流,进而产生电磁转矩。该转矩与转子实际旋转方向相反,为制动转矩。在电动机的电磁制动转矩及负载转矩的作用下,电动机的转速迅速降低,转子的机械能转换为电能,消耗在转子回路的电阻上,所以称为能耗制动。不过当电动机停止后不应再接通直流电源,因为那样将会烧坏定子绕组(定子绕组中的反电势消失)。另外,制动的后阶段,随着转速的降低,转子中的电流逐渐降低,能耗制动转矩也迅速减小,所以,制动较平稳,但制动的快速性则比反接制动差。当然,可以用改变定

子励磁电流 I_f 或转子电路串入电阻(线绕式异步电动机)的大小来增大制动转矩,从而调节制动过程的快慢。

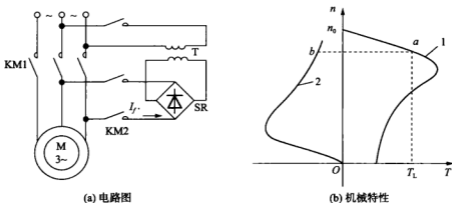


图 4-33 异步电动机能耗制动时的电路图及机械特性

4.8 单相异步电动机

单相异步电动机是用单相交流电源供电的异步电动机。它具有结构简单、成本低廉、噪声小和维护方便等优点。由于只需要单相电源供电,而单相电源较易取得,所以使用非常方便,广泛应用于工业和民用生活等各个领域,尤其以家用电器、电动工具和医疗器械等使用居多。单相异步电动机在容量同等的情况下,比三相异步电动机体积大,且运行性能较差,因此通常应用在小容量的拖动系统中,功率一般在 1kW 以下。

4.8.1 单相异步电动机的结构和工作原理

1. 单相异步电动机的结构

单相异步电动机的转子通常做成笼式结构,定子的铁芯也是由硅钢片叠压而成,定子铁芯内装有定子工作绕组。单相异步电动机的运行原理与三相异步电动机类似,定子绕组产生磁场,进而在转子导体中产生感应电动势和电流,产生电磁转矩。但单相异步电动机的定子绕组是单相绕组,而单相绕组通以单相交流电流时产生的磁场是脉动的,并不旋转,因此单相异步电动机在通电后没有启动转矩。为了解决启动问题及改善运行性能,单相异步电动机还要加装启动绕组。

2. 单相异步电动机的工作原理

如果单相异步电动机定子上仅有一个单相工作绕组,则转子在通电前是静止的,通电后仍将静止不动。但是如果靠外力拨动转子使其转动,电动机便顺着拨动方向转动起来,最后转速达到一定值稳定运行。可见单相异步电动机没有启动能力,靠外力施加的启动转矩启动后,就能够稳定运行。

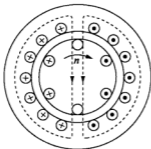


图 4-34 单相异步电动机单相绕组时的磁场分布图

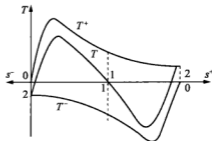


图 4-35 单相异步电动机单相绕组的机械特性

图 4-34 所示为单相异步电动机定子上仅有一个单相工作绕组时的磁场分布图。这时的磁场是一个强弱按正弦规律变化的脉动磁场。这个脉动磁场在一个周期内当电流的方向变化时,磁极跳变 180° ,但并不旋转。而这个脉动的磁场可以分解成两个转速相等、方向相反的圆形旋转磁场,这两个旋转磁场感应强度的大小相等。如果脉动磁场变化一个周期,分解成的两个旋转磁场正好向相反的方向各转一周。在这两个旋转磁场的作用下,转子绕组中产生感应电流并形成电磁转矩,即正向电磁转矩 T^+ 和反向电磁转矩 T^- ,而正向电磁转矩 T^+ 和反向电磁转矩 T^- 的合成转矩,即为单相异步电动机的电磁转矩, s 为转差率。图 4-35 所示为单相异步电动机正向电磁转矩 T^+ 、反向电磁转矩 T^- 及合成转矩 T 随 s 变化的机械特性曲线图。从特性曲线图可得出以下三个结论:

(1) 当转速 $n=0$ ($s=1$) 时,电磁转矩为零,即启动转矩为零。因为转子停转时,即使定子绕组通入单相交流电,对应的电磁转矩 $T=T^++T^-=0$,故单相异步电动机不能自行启动,必须采用其他启动措施进行启动。

(2) 当电动机开始转动后,电磁转矩的方向与转动方向有关, $n>0$ 时 $T>0$, $n<0$ 时 $T<0$,因而这时电动机的电磁转矩为推动转矩,可以拖动负载运行。

(3) 由于同时存在正、反向电磁转矩,将使电动机总转矩减小,最大转矩也减小。因此单相异步电动机过载能力降低,即输出功率较小,效率较低,运行性能下降。

为了解决单相异步电动机的启动问题,在定子中加入了启动绕组,启动绕组与主绕组在空间上相差 $\pi/2$ 。

4.8.2 单相异步电动机常用的启动方式

1. 电容分相式异步电动机

电容分相式异步电动机的接线原理图如图 4-36 所示。从图中可知,定子上有两个绕组 AX 和 BY,AX 为运行绕组(或工作绕组),BY 为启动绕组,它们都被嵌入定子铁芯中,两绕组的轴线在空间上互相垂直。在启动绕组 BY 电路中串有电容 C,选择适当参数使该绕组中的电流 i_B 在相位上超前 AX 绕组中的电流 i_A $\frac{\pi}{2}$ 。产生一个旋转磁场,使其自行启动。电动机启动后,当转速达到额定值附近时,借助离心力的作用,将 QC 打开,此后电动机就成为单相运行了。

电容分相式单相异步电动机欲反转运行,可掉换电容器 C 的串联位置来实现,即通过控制开关使电容 C 从启动绕组接入运行绕组,AX 变为电流超前的绕组,BY 变为电流滞后的绕组,而旋转磁场是由电流超前的绕组转向电流滞后的绕组,这样就可改变旋转磁场的方向,从而实现电动机的反转。

2. 罩极式单相异步电动机

罩极式电动机的结构如图 4-37 所示,在磁极一侧开一小槽,用短路环绕组罩住磁极的一部分。磁极的磁通 Φ 分为两部分,即 Φ_1 与 Φ_2 。当整个磁极上的主绕组通电时,在磁极中产生主磁通,当磁通变化时,由于电磁感应作用,在短路环绕组中产生感应电流,其感应电流滞后电源电流 $\pi/2$ 、感应电流产生的磁通在相位上也滞后于主磁通,这种在空间上相差一定角度,在时间上又有一定相位差的两部分磁通就能合成一个旋转磁场,即产生一个从未罩部分向被罩部分移动的磁场,从而在转子上产生一个启动转矩,使转子转动。

在罩极式单相异步电动机中,由于 Φ_1 永远超前 Φ_2 ,因此电动机的旋转方向总是由磁极的未罩部分向被罩部分,即使改变电源的接法,也不能改变电动机的转向。

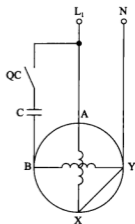


图 4-36 电容分相式异步电动机的接线图

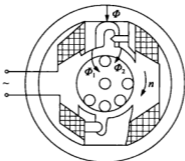


图 4-37 罩极式单相异步电动机结构

思考题与习题

1. 将三相异步电动机接三相电源的三根引线中的两根对调,电动机为什么会反转?
2. 有一台四极三相异步电动机,电源电压的频率为,满载时电动机的转差率为 0.02,求电动机的同步转速、转子转速和转子电流频率。
3. 什么是三相异步电动机的固有机械特性和人为机械特性? 试用公式说明。
4. 当三相异步电动机的负载增加时,此时电动机的定子电流、转子电流及转速有无变化? 如何变化?
5. 三相异步电动机带动一定的负载运行时,若电源电压降低了,此时电动机的转矩、电流及转速有无变化? 如何变化?

6. 三相异步电动机正在运行时,转子突然被卡住,这时电动机的电流会如何变化?对电动机有何影响?

7. 三相异步电动机断了一根电源线后,为什么不能启动?而在运行时断了一线,为什么仍能继续转动?这两种情况对电动机产生什么影响?

8. 详细说出三相异步电动机的各种调速方法的优缺点。

9. 为什么绕线式异步电动机在转子串电阻启动时,启动电流减少而启动转矩反而增大?

10. 有一台三相异步电动机,未采用调速措施已知参数如下:

$$P_N = 3\text{kW}, U_N = 220/380\text{V}, I_N = 11/7.2\text{A}, I_{st}/I_N = 7.0,$$

$$n_N = 960\text{r/min}, T_{\max}/T_N = 2.0, T_{st}/T_N = 2, \cos\varphi_N = 0.76$$

求:(1) 电网频率 50Hz, 电源线电压 220V, 采用何种接法? (Δ 形还是 Y形) 转差率 s_N 为多少?

(2) 额定转矩 T_N 为多少? 最大转矩 T_{\max} 为多少? 启动电流 I_{st} 为多少?

(3) 写出该电动机转矩 T 与转速 S 的具体关系式。当负载转矩是恒转矩为 $0.9T_N$ 时, 列出求此时电动机稳定转速 n' 的有关计算式(不用算结果)。

11. 一台三相异步电动机其技术数据如下:

$$P_N = 3\text{kW}, U_N = 220/380\text{V}, I_N = 11.18/6.47\text{A}, I_{st}/I_N = 7.0,$$

$$n_N = 1430\text{r/min}, T_{\max}/T_N = 2.0, T_{st}/T_N = 1.8, \cos\varphi_N = 0.84$$

求:(1) 同步转速;(2) 几对磁极;(3) 电源线电压 380V, 定子如何接成?(4) 满载时转差率;(5) 满载时电动机的额定转矩;(6) 直接启动时的启动转矩;(7) 最大转矩;(8) 直接启动时启动电流;(9) 满载时输入功率、视在功率;(10) 满载时电动机总损耗。

12. 一台三相异步电动机其技术数据如下, 求其机械特性。

$$P_N = 10\text{kW}, U_N = 380\text{V}, I_N = 20\text{A}, I_{st}/I_N = 7.0,$$

$$n_N = 1450\text{r/min}, T_{\max}/T_N = 2.0, T_{st}/T_N = 1.4, \cos\varphi_N = 0.87$$



第 5 章 继电器—接触器控制系统

继电器—接触器控制系统是应用最早的电气控制系统,它是由主令电器、接触器、继电器等组成的控制系统,具有结构简单、容易掌握、维修方便、价格低廉等优点,多年来在各种生产机械的电气控制领域中获得广泛的应用。

5.1 常用低压电器

低压电器是在电压为交流 1 200V、直流 1 500V 以下的电路中起通断、保护、控制、调节以及转换作用的电器。根据在电路中所处的地位和作用,低压电器可归纳分为两大类:一类为低压控制电器,用于各种控制电路和控制系统中。能够根据外界信号手动或自动地接通、断开电路,以实现电路或被控对象的控制。主要有接触器、继电器、主令电器、电动机启动器等。另一类为低压配电电器,用于低压配电系统中分配和保护,主要有刀开关、自动空气开关和熔断器等。

低压电器按动作方式的不同可分为自动电器和非自动电器。自动电器具有电磁铁等动力机构,在完成电路接通和断开操作时,依靠外部指令和信号或其本身参数的变化而自动地进行工作,如接触器、继电器、电磁阀等。非自动电器主要依靠人力或其他外力直接操作来完成电路切换等动作,如按钮开关、行程开关、转换开关、刀开关等。此外,按有无触点可分为有触点电器、无触点电器以及混合式电器;按所应用的系统可分为电力系统用电器、电力拖动自动控制系统用电器、通信系统用电器;按应用场合可分为一般工业用电器、特殊工矿用电器、航空用电器、船舶用电器、建筑用电器、农用电器等。以工矿企业的配电电路为例,电能从供电变压器到最终用电负载的分配过程的典型电路如图 5-1 所示。其中,供电变压器至中央配电盘母线这一区间的电路称为主电路;中央配电盘母线至动力配电盘这一区间的电路称为分支电路;动力配电盘至负载(一般为电动机)这一区间的电路称为馈电电路。

从图 5-1 中各种电器的作用来看,低压电器主要用作配电电路和用电设备的保护和控制。如当电动机 M1 的接线端发生短路时,要依靠熔断器 FU2 进行保护。即当馈电电路 1 的 K3 点发生短路时,应使熔断器 FU2 动作,QF1、QF2 及 QF3 不动作;若分支电路 1 的 K2 点发生短路,应使 QF2 动作,QF1 不动作,以保证对分支电路 2 的正常供电。即当电路发生故障时,离故障点最近的保护电器动作,切除故障,同时保持配电系统其他部分的正常供电,以缩小停电范围。这种保护措施称为选择性保护,能满足这一要求的电器称为具有选择性保护特性的电器。

5.1.1 低压配电电器

低压配电电器主要有开关电器、熔断器和低压断路器等。对低压配电电器的要求是当

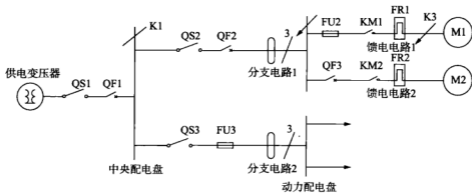


图 5-1 工矿企业典型配电电路图

系统中发生故障时动作准确、工作可靠，并有足够的热稳定性和动稳定性。

1. 开关电器

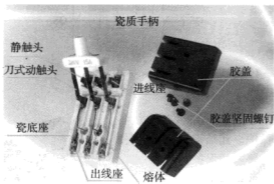
开关电器广泛应用于配电线路作电源的隔离、通断控制以及电源与负载的保护。常用开关电器有以下几种类型：

1) 刀开关

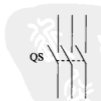
刀开关又称闸刀开关，它是一种手动控制器，结构最简单、一般用于不经常操作的低压电路中用作接通或切断电源或用来将电路与电源隔离，有时也用来直接控制小容量电动机的启动、停止和正、反转。

(1) 刀开关的结构

开启式负荷开关又名胶盖刀开关，图形和文字符号如图 5-2(b)所示。它由刀开关和熔断器组合而成，包含有瓷底座、静触头、触刀、瓷柄、熔体和胶盖等，如图 5-2(a)所示。



(a) 刀开关结构图



(b) 刀开关符号

图 5-2 刀开关

(2) 有关刀开关的技术参数

① 额定电压：指在规定条件下，保护电器正常工作的电压值。

② 额定电流:指在规定条件下,保证电器正常工作的电流值。

③ 通断能力:指在规定条件下,能在额定电压下接通和分断的电流值。

④ 动稳定电流:指在规定的使用和性能条件下,开关电路在闭合位置上所能承受的电流峰值。

⑤ 热稳定电流:指在规定的使用和性能条件下,开关电路在指定的短时间内,于闭合位置上所能承载的电流。

⑥ 机械寿命:指开关电器在需要修理或更换机械零件前所能承受的无载操作次数。刀开关为不频繁操作电器,其机械寿命一般为 5 000~10 000 次。

⑦ 电寿命:指在规定的正常工作条件下,开关电器不需修理或更换零件的情况下,带负载操作次数。刀开关的电寿命一般为 500~1 000 次。

2) 转换开关

转换开关又称组合开关,一般用于电器设备中非频繁地通断电路、换接电源和负载、测量三相电压以及直接控制小容量感应电动机的运行状态。

转换开关由动触头(动触片)、静触头(静触片)、转轴、手柄、定位机构及外壳等部分组成。其动静触头分别叠装于数层绝缘壳内,结构示意图如图 5-3 所示。当转动手柄时,每层的动触片随方形转轴一起转动。

转换开关有单极、双极和多极之分。其表示方法类似于万能转换开关。转换开关的产品符号和文字符号如图 5-4 所示。

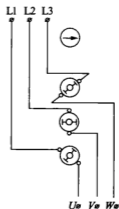


图 5-3 转换开关结构示意图



图 5-4 转换开关的产品图和符号

2. 熔断器

熔断器广泛应用于低压配电系统、控制系统及用电设备中,作为线路和设备的短路和过载保护。其结构简单,价格便宜,使用方便,控制有效,是应用最为普遍的保护器件之一。

熔断器主要由熔体和安装熔体的绝缘管或绝缘座等组成。其外形如图 5-5 所示。

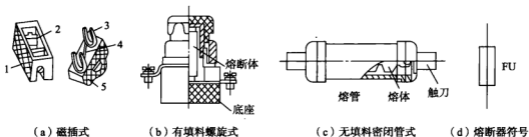
从结构型式上分,熔断器有插入式、无填料密闭管式、有填料封闭管式及螺旋式。从用途上分,熔断器有一般工业用熔断器、半导体保护用快速熔断器和特殊熔断器(如自复式熔断器)。

1) 熔断器的结构及工作原理



图 5-5 熔断器

熔断器主要由熔体、熔管、填料、盖板、接线端、指示器和底座等部分组成。熔体由易熔金属材料铝、锡、锌、银、铜及其合金制成,通常制成丝状或片状。



1—瓷底座;2—静触头;3—动触头;4—熔体;5—瓷插件

图 5-6 熔断器的外形图

2) 熔断器的特性

电流流过熔体时产生的热能与电流的二次方和电流通过的时间成正比,因此电流越大,熔体熔断的时间越短。熔体熔断电流值与熔断时间的关系称为熔断器的保护特性,也称伏安特性,可用图 5-7 所示的熔断器保护特性曲线表示。图中 t 表示熔断时间, I 表示流过熔断器的电流。除保护特性外,熔断器的其他主要技术参数还有:

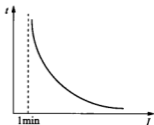


图 5-7 熔断器的伏安特性曲线

① 额定电压指熔断器分断后能长期承受的电压。

② 额定电流指熔断器在长期工作时,各部件温升不超过规定值时所能承载的电流。

③ 额定分断能力指在规定的使用条件(线路电压、功率因数或时间常数)下,熔断器所能分断的预期电流(对交流而言为有效值)。

④ 截断电流特性指在规定的使用条件下,截断电流与预期电流的关系特性。在交流情况下,截断电流是指任何非对称情况下熔断器所能达到的电流最大值。在直流情况下,截断电流是指在规定的的时间常数下熔断器所能达到的电流最大值。

⑤ 焦耳积分 I^2t ,指被熔断器所保护的电路中的 1Ω 电阻上所释放的焦耳能。它分为弧前和熔断两种情况。

3. 低压断路器

低压断路器也称自动空气开关,是在低压配电网络中用来非配电能以及按规定条件对低压配电电路、电动机或其他用电设备实行通断操作并起保护作用的开关电器,是低压配电系统的主要电器元件之一。当在电路内出现过载、短路、对地漏电或欠电压等非正常条件时,低压断路器能自动分断电路。其产品图和符号如图 5-8 所示。

图 5-9 所示是低压断路器的工作原理示意图。在正常情况下,依靠操作手柄或电动操作机构使主触头 1 闭合,并由自由脱扣机构 2 将其锁定在合闸位置。当电路发生故障时,自由脱扣机构在有关脱扣器的操作下动作,使脱扣脱开,主触头在释放弹簧 8 的作用下打开,从而切断主电路,保护电路及电路中的电气设备。

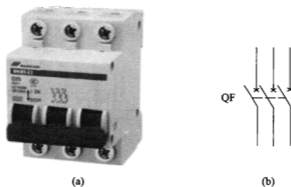
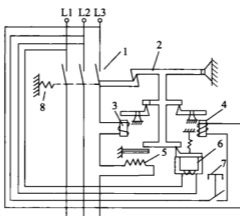


图 5-8 低压断路器产品图和符号



1—主触头；2—自由脱扣机构；3—过电流脱扣器；4—分励脱扣器；
5—热脱扣器；6—欠电压脱扣器；7—启动按钮；8—释放弹簧

图 5-9 低压断路器工作原理示意图

自动空气开关具有多种保护功能(短路、过载、欠电压保护等),动作值可调,分断能力高,操作安全方便,所以应用十分广泛。

5.1.2 低压控制电器

低压控制电器应能接通与分断过载电流,但不能分断短路电流。低压控制电器包括主令电器、接触器、控制继电器、启动器、变阻器、操作电磁铁等,主要用于电器传动系统或其他各种控制电路中,要求操作频率高、使用寿命长、工作可靠、维修方便的场合。本节主要介绍主令电器、接触器和控制继电器。

1. 主令电器

主令电器是用来闭合和断开控制电路,用以控制电路中电动机的启动、停止、制动以调速等。主令电器可直接作用于控制电路,也可以通过电磁式继电器间接作用于控制电路。在控制电路中,由于它是一种专门发布命令的电器,故称为主令电器。主令电器不允许通断主电路。

主令电器应用十分广泛,种类也繁多,常用的有控制按钮、行程开关、转换开关等。

1) 控制按钮

控制按钮简称按钮,是一种结构简单、使用广泛的具有储能弹簧复位的手动主令电器。它是一种结构简单、种类繁多、在低压控制电路中应用最广泛的一种电器,主要用于给出控制信号或电器联锁线路。其结构示意图如图 5-10 所示,符号图如图 5-11 所示。

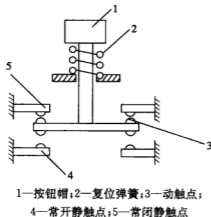


图 5-10 控制按钮结构示意图

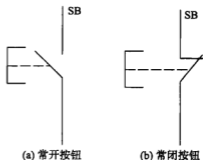


图 5-11 控制按钮符号图

2) 行程开关

行程开关是依照生产机械的工作位置发出命令的信号电器。它将机械信号转变为电信号,以控制机械的运行方向或行程的长短。若将行程开关安装于生产机械行程终点处,以限制其行程,则称为限位开关或终点开关。图 5-12 和图 5-13 分别为直动式行程开关和滚轮式行程开关的结构示意图。

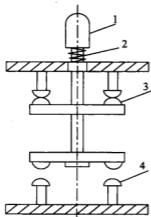


图 5-12 直动式行程开关结构示意图

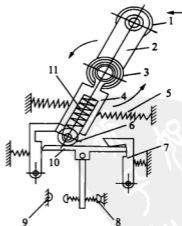


图 5-13 滚轮式行程开关结构示意图

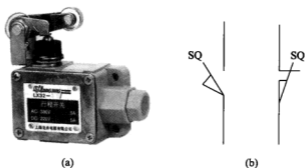


图 5-14 行程开关产品图和符号

3) 万能转换开关

万能转换开关是由多组相同结构的触点组件叠装而成的多回路控制电器。它主要用于电气控制电路的转换、配电设备的远距离控制、电器测量仪表的转换和微电动机的控制，也可用于小功率鼠笼型异步电动机的启动、换向和变速。由于它能够控制多个回路，适应复杂线路的要求，故有“万能转换开关”之称。其结构原理如图 5-15 所示。

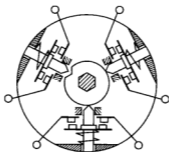


图 5-15 万能转换开关机构原理图

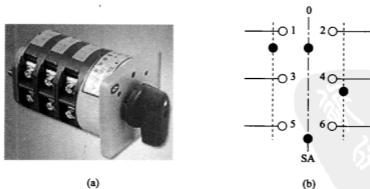


图 5-16 万能转换开关产品图和符号

万能转换开关的触点在电路图中的图形符号如图 5-16 所示。由于万能开关的分合状态是与操作手柄的位置有关的，所以在电路图中除画出触点图形符号之外，还应有操作手柄

位置与触点分合状态的表示方法。用虚线表示操作手柄的位置,用油污“●”符号表示触点的闭合和打开状态,比如,在触点图形符号下方的虚线位置画“●”,则表示当操作手柄处于该位置时,该触点是处于闭合状态;若在虚线位置上未画出“●”时,则表示该触点是处于打开状态。

2. 接触器

接触器是一种用来自动接通或断开大电流电路的电器。它可以频繁地接通或分断交直流电路,并可实现远距离控制。其主要控制对象是电动机,也可用于电热设备、电焊机、电容器组等其他负载。它还具有低电压释放保护功能。接触器具有控制容量大、过载能力强、寿命长、设备简单经济等特点,是电力拖动中使用最广泛的电器元件。

按照所控制电路的种类,接触器可分为交流接触器和直流接触器两大类。

1) 交流接触器

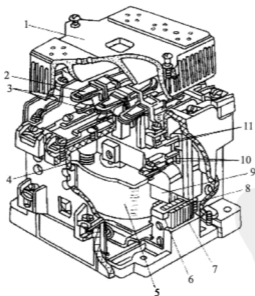
图 5-17 为交流接触器的外形与结构示意图。交流接触器由以下四部分组成:

① 电磁机构。由线圈、动铁心(衔铁)和静铁心组成,其作用是将电磁能转换成机械能,产生电磁吸力带动触点动作。

② 触点系统。包括主触点和辅助触点。主触点用于通断主电路,通常为三对常开触点。辅助触点用于控制电路,起电气联锁作用,故又称联锁触点。

③ 灭弧装置。容量在 10A 以上的接触器都有灭弧装置,对于小容量的接触器,常采用双断口触点灭弧、电动力灭弧、相间弧板隔弧及陶土灭弧罩灭弧。

④ 其他部件。包括反作用弹簧、缓冲弹簧、触点压力弹簧、传动机构及外壳等。



1—灭弧罩;2—触头压力弹簧片;3—主触头;4—反作用弹簧;5—线圈;6—短路环;
7—静铁心;8—弹簧;9—动铁心;10—辅助常开触点;11—辅助常闭触点

图 5-17 CJ10-20 型交流接触器

电磁式接触器的工作原理如下:线圈通电后,在铁心中产生磁通及电磁吸力。此电磁吸

力克服弹簧反力使得衔铁吸合,带动触点机构动作,常闭触点打开,常开触点闭合。线圈失电或线圈两端电压显著降低时,电磁吸力小于弹簧反力,使得衔铁释放,触点机构复位。其图形符号如图 5-18 所示。

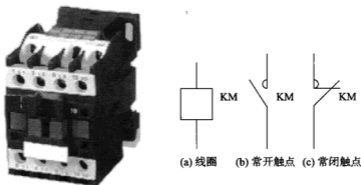


图 5-18 接触器的产品图和图形符号

2) 直流接触器

直流接触器的结构和工作原理基本与交流接触器相同,在结构上也是由电磁机构、触头系统和灭弧装置等部分组成。但直流接触器的主触头用来通断直流主电路,接触器的铁心中不会产生涡流和磁滞损耗,不会发热,因此其铁心结构、线圈形状、出头形状与数量、灭弧方式等与交流接触器的结构略有不同。

3. 继电器

继电器主要用于控制与保护电路,可进行信号转换。继电器具有输入电路(又称感应元件)和输出电路(又称执行元件),当感应元件中的输入量(如电流、电压、温度、压力等)变化到某一定值时继电器动作,执行元件便接通和断开控制回路。

控制继电器种类繁多,常用的有电流继电器、电压继电器、中间继电器、时间继电器、热继电器以及温度、压力、计数、频率继电器等。

电压、电流继电器和中间继电器属于电磁式继电器。其结构、工作原理与接触器相似,由电磁系统、触头系统和释放弹簧等组成。由于继电器用于控制电路,流过触头的电流小,故不需要灭弧装置。

电磁式继电器的图形和文字符号如图 5-19 所示。

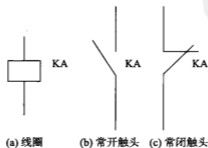


图 5-19 电磁式继电器图形符号

1) 电流继电器

根据输入(线圈)电流大小而动作的继电器称为电流继电器,按用途不同还可分为过电流继电器和欠电流继电器。其图形和文字符号如图 5-20 所示。过电流继电器的任务是当电路发生短路及过流时立即将电路切断。当过流继电器线圈通过的电流小于整定电流时,继电器不动作;只有超过整定电流时,继电器才动作。欠电流继电器的任务是当电路电流过低时立即将电路切断。当欠电流继电器线圈通过的电流大于或等于整定电流时,继电器吸合;只有电流低于整定电流时,继电器才释放。欠电流继电器一般是自动复位的。

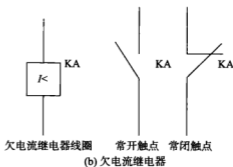
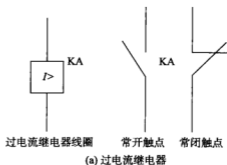
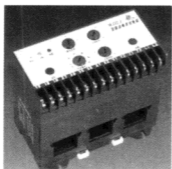


图 5-20 电流继电器产品外形和符号图

2) 电压继电器

电压继电器是根据输入电压大小而动作的继电器。按用途不同还可分为过电压继电器、欠电压继电器和零电压继电器。前两种继电器的图形和文字符号如图 5-21 所示。过电压继电器是当电压大于其过电压整定值时动作的电压继电器。主要用于对电路或设备作过电压保护。欠电压继电器是当电压小于其电压整定值时动作的电压继电器。主要用于对电路或设备作欠电压保护。零电压继电器是欠电压继电器的一种特殊形式,是当继电器的端电压降至零或接近消失时才动作的电压继电器。

3) 中间继电器

中间继电器实质上是电压继电器的一种,它的触点数多,触点电流容量大,动作灵敏。中间继电器的主要用途是当其他继电器的触点数或触点容量不够时,可借助中间继电器来扩大它们的触点数或触点容量,从而起到中间转换的作用。中间继电器的结构及工作原理

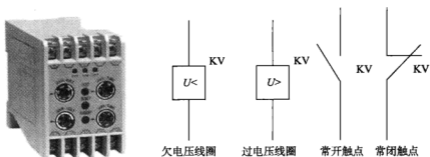


图 5-21 电压继电器

与接触器基本相同,因而中间继电器又称为接触器式继电器。但中间继电器的触头对数多,且没有主辅之分,各对触头允许通过的电流大小相同,多数为 5A。因此,对于工作电流小于 5A 的电气控制电路,可用中间继电器代替接触器实施控制。

常用的中间继电器有 JZ7 系列。以 JZ7-92 为例,有 9 对常开触头,2 对常闭触头。

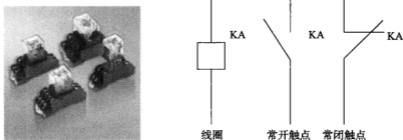


图 5-22 中间继电器结构图、图形符号

4) 时间继电器

时间继电器是一种用来实现触点延时接通或断开的控制电器,按其动作原理与结构不同,可分为空气阻尼式、电动式、电子式等多种类型。

(1) 空气阻尼式时间继电器

它由电磁机构、工作触头及气室三部分组成,其延时是靠空气的阻尼作用来实现的。按其控制原理分为通电延时和断电延时两种类型。如图 5-24 所示为 JS-7A 型空气阻尼式时间继电器的工作原理图。

通电延时型时间继电器电磁铁线圈 1 通电后,将衔铁 3 吸合,于是活塞杆 6 与衔铁间出现一个空隙。当与活塞杆 6 相连的活塞 12 在弹簧 8 作用下由下向上移动时,在橡皮膜 10 上面形成空气稀薄的空间(气室),空气由进气孔 14 逐渐进入气室,活塞 12 因受到空气的阻力不能迅速上升。当升到到一定位置时,杠杆 7 使延时触头 15 动作(常开触点闭合,常闭触点断开)。线圈断电时,弹簧 8 使衔铁

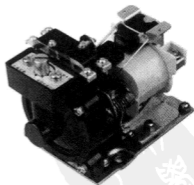
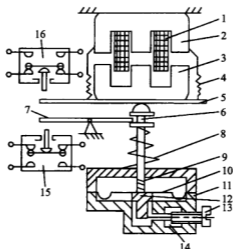


图 5-23 时间继电器

和活塞等复位,空气经橡皮膜与活塞杆6之间推开的气隙迅速排出,触点瞬时复位。断电延时型时间继电器与通电延时型时间继电器的原理与结构均相同,只是将其电磁机构翻转180°安装。



1—线圈;2—静铁芯;3—衔铁;4—反力弹簧;5—推板;6—活塞杆;7—杠杆;
8—塔形弹簧;9—弱弹簧;10—橡皮膜;11—空气室壁;12—活塞;13—调节螺钉;
14—进气孔;15—微动开关(延时);16—微动开关(不延时)

图 5-24 通电延时继电器工作原理图

(2) 电子式时间继电器

早期时间继电器多是阻容式的,近期开发的产品多为数字式,又称计数式时间继电器,由脉冲发生器、计数器、数字显示器、放大器以及执行机构组成,具有延长时间长、调节方便、精度高等优点,有的还带有数字显示。电子式时间继电器应用很广,可取代阻容式、空气式、电动式等类型的时间继电器。

时间继电器的图形和符号如图 5-25 所示。

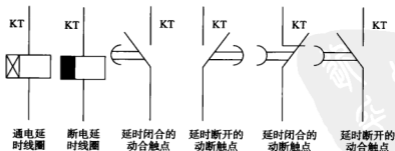


图 5-25 时间继电器的图形符号

5) 热继电器

热继电器室专门用来对连续运行的电动机进行过载及断相保护,以防止电动机过热而

烧毁的保护电器,如图 5-26 所示。

常用的热继电器有由两个热元件组成的两相结构和由三个热元件组成的三相结构两种形式。两相结构的热继电器主要由加热元件、主双金属片动作机构、触点系统、电流整定装置、复位机构和温度补偿元件等组成,如图 5-27 所示。

① 热元件:是热继电器接收过载信号的部分,它由双金属片及绕在双金属片外面的绝缘电阻丝组成。当电流通过热元件时,对双金属片进行加热,双金属片受热弯曲。

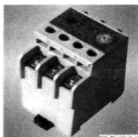
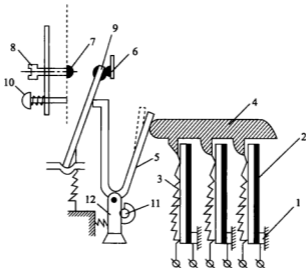


图 5-26 热继电器



1—双金属片固定件;2—双金属片;3—热元件;4—导板;5—补偿双金属片;
6、7、9—触点;8—复位调节螺钉;10—复位按钮;11—调节旋钮;12—支撑件

图 5-27 热继电器结构图

② 触点系统:一般配有一组切换触点,可形成一个动合触点和一个动断触点。

③ 动作机构:由导板、补偿双金属片、推杆、杠杆及拉簧等组成。

④ 复位按钮:热继电器动作后的复位有手动复位和自动复位两种,手动复位的功能由双金属片冷却自动完成,但需要一定时间。

⑤ 整定电流装置:由旋钮和偏心轮组成,用来调节整定电流的数值。热继电器的整定电流是指热继电器长期不动作的最大电流值,超过此值就要动作。

图 5-28 所示为热继电器的图形符号。

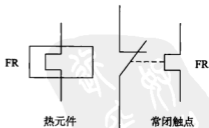


图 5-28 热继电器图形符号图

5.2 电气控制线路的绘制

电气控制线路是用导线将电机、继电器、接触器等电气元件按一定的要求和方法连接起来,并能实现某种控制功能的线路。绘制电气控制线路图必须清楚地表达生产设备电气控制系统的结构、原理等设计意图,并且以便于进行电气元件的安装、调整、使用和维修为原则。它有三种形式:电气原理图、电气元件布置图、电气安装接线图。

电气原理图是为了便于阅读和分析控制电路的各种功能,用各种符号、电气连接联系起来描绘全部或部分电气设备工作原理的电路图。绘制电气原理图应按 GB/T 4728—1984《电气图常用图形符号》、GB 5226—1985《机床电气设备通用技术条件》、GB/T 7159—1987《电气技术中的文字符号制定通则》、GB/T 6988—1986《电气制图》等规定的标准绘制。

5.2.1 常用电气图形符号和文字符号

在绘制电气线路图时,电气元件的图形符号和文字符号必须符合国家标准的规定。表 5-1 为电气图形符号表,表 5-2 所示为电气设备常用基本文字符号。

表 5-1 常用电气图形、文字符号

名称	图形符号	文字符号	名称	图形符号	文字符号
三极开关		QS	线圈		K KM
自动空气开关		QF	动合主触头		
行程开关		SQ	动断主触头		
			动合辅助触头		
			动断辅助触头		

名称	图形符号	文字符号	名称	图形符号	文字符号	
行程开关 复合触头		SQ	通电 延时 线圈		KT	
电阻器	或	R	断电 延时 线圈			
电位器		RP	动合 延时 闭合 触头			
中间 继电器 线圈		K	动断 延时 打开 触头			
电 压 继电器 线圈		KV	动断 延时 闭合 触头			
继电 器 电 流 继电器 线圈		KA	动断 延时 打开 触头			
动合触头		相应继电器 器符号	速度 继电器	动合 触头		
动断触头			动断 触头			
启动		SB	接 近 开 关	动合 触头		
停止				动断 触头		

续表

名称		图形符号	文字符号	名称	图形符号	文字符号	
按钮	复合		SB	转换开关		SA	
	熔断器		FU	电磁铁		YA	
蜂鸣器		H	信号灯		HL		
电动机	三相鼠笼式异步		M	三相自耦变压器		T TA	
	三相绕线式异步			电流互感器			
	串励直流			三极管	PNP型		V
	并励直流				NPN型		
	他励直流			晶闸管			
	复励直流			二极管			


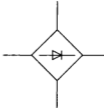
名称	图形符号	文字符号	名称	图形符号	文字符号
电源变压器		T TC	桥式整流装置		VC

表 5-2 电气设备常用基本文字符号

名称	基本文字符号		名称	基本文字符号	
	单字母	双字母		单字母	双字母
晶体管放大器	A	AD	刀开关	Q	QK
集成电路放大器	A	AJ	断路器	Q	QF
抽屉柜	A		隔离开关	Q	QS
光电池	B		电阻器	R	
电容器	C		变阻器	R	
熔断器	F		电位器	R	RP
热继电器	F	FU	制动电阻器	R	RB
发电机	G	FR	频敏变阻器	R	RF
直流发电机	G		控制开关	S	SA
交流发电机	G	GD	行程开关	S	SQ
同步发电机	G	GA	按钮开关	S	SB
异步发电机	G	GS	变压器	T	
蓄电池	G	GB	自耦变压器	T	TA
指示灯	H	HL	电流互感器	T	TA
继电器	K		电压互感器	T	TV
电压继电器	K	KV	电源变压器	T	TC
电流继电器	K	KA	电力变压器	T	TM
时间继电器	K	KT	变频器	U	
压力继电器	K	KP	晶体管	V	
信号继电器	K	KS	二极管	V	
接触器	K	KM	晶闸管	V	
电感器	L		绕组	W	
电抗器	L		定子绕组	W	WS
电动机	M		转子绕组	W	WR
直流电动机	M	MD	励磁绕组	W	WE

续表

名称	基本文字符号		名称	基本文字符号	
	单字母	双字母		单字母	双字母
交流电动机	M	MA	控制绕组	W	WC
同步电动机	M	MS	气阀	Y	
异步电动机	M	MA	电磁阀	Y	YV
笼型电动机	M	MC	电磁铁	Y	YA
电流表	P	PA	制动电磁铁	Y	YB
电压表	P	PV	电磁离合器	Y	YC

5.2.2 电气原理图绘制及其原则

电气原理图是根据电路工作原理绘制而成的,它采用规定的图形符号和文字符号,具有结构简单、层次分明、便于研究和分析电路的工作原理等优点,在电气设计和现场维护中都得到了广泛的应用。下面以图5-29所示机床电气原理图为例,介绍绘制电气原理图时应遵循的基本原则:

① 原理图一般分为主电路、控制电路、信号电路、照明电路及保护电路等。主电路(动力电路)指从电源到电动机大电流通过的电路,其中电源电路用水平线绘制,受电动力设备(电动机)及其保护电器支路应垂直于电源电路画出。

② 控制电路、照明电路、信号电路及保护电路等应垂直地绘于两条水平电源线之间,耗能元件(如线圈、电磁铁、信号灯等)的一端应直接连接在接地的水平电源线上,控制触头连接在上方水平线与耗能元件之间。

③ 无论主电路或辅助电路,各元件一般应按动作顺序从上到下,从左到右依次排列。

④ 原理图中,各电气元件和部件在控制线路中的位置,应根据便于阅读的原则安排。同一电气元件的各个部件可以不画在一起。

⑤ 原理图中有直接电联系的交叉导线连接点用实心圆点表示;可拆接或测试点用空心圆点表示;无直接电联系的交叉点则不画圆点。

⑥ 对非电气控制和人工操作的电器,必须在原理图上用相应的图形符号表示其操作方式及工作状态。由同一机构操作的所有触头应用机械连杆符号表示其联动关系,各个触头的运动方向和状态,必须与操作件的动作方向和位置协调一致。

⑦ 对与电气控制有关的机、液、气等装置,应用符号绘出简图,以表示其关系。图幅分区后,相当于在图上建立了一个坐标。具体使用时,对水平布置的电路,一般只需标明行的标记;对垂直布置的电路,一般只需标明列的标记;复杂的电路需标明组合标记。

元件的相关触头位置的索引用图号、页次和区号组合,如图5-30所示。继电器和接触器的触头位置采用附图的方式表示,附图刻画在电路图中相应线圈的下方,此时,可只标出触头的位置索引。若画出在电路图其他地方,则必须注明是哪个线圈的附图,幅图上的触头表示方法如图5-31所示。

技术数据的标注,电气元件的数据和型号一般用小号字体标注在电器代号的下面,如图5-29中导线截面积的标注等。

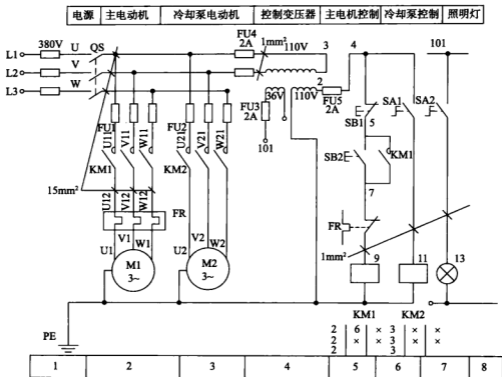


图 5-29 机床电气原理图

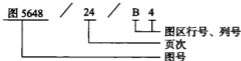


图 5-30 图号、页次和区号组合

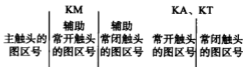


图 5-31 触点位置索引图

5.3 三相异步电动机的控制线路

电力拖动控制线路通畅都是由若干单一功能的基本线路组合而成。人们在长期生产时间中已将这些功能块线路精炼成最基本的控制单元，供线路设计选用和组合。熟练掌握这些单元线路的组成、工作原理将对电气控制线路的阅读分析和控制线路设计提供很大帮助。

5.3.1 三相异步电动机的启动控制线路

三相笼型异步电动机具有结构简单、坚固耐用、价格便宜、维修方便等优点，在各类机床中得到广泛地应用。它的启动控制方式有直接启动和降压启动两种。

1. 直接启动的控制电路

直接启动又称全压启动，它是通过开关和接触器将额定电压直接加在电动机的定子绕

组上,使电动机转动。该启动方法的优点是所需设备少、线路简单,缺点是启动电流大。

(1) 单向全电压启动控制电路

电动机容量在 10kW 以下者,一般采用全电压直接启动方式来启动,如图 5-32(a)所示。

图 5-32(b)是采用接触器直接启动的电动机单向全压启动控制电路,主电路由刀开关 QS、熔断器 FU、接触器 KM 的主触头、热继电器 FR 的热元件与电动机 M 组成。

控制电路由启动按钮 SB2、停止按钮 SB1、接触器 KM 的线圈及常开辅助触头、热继电器 FR 的常闭触头和熔断器 FU2 组成。

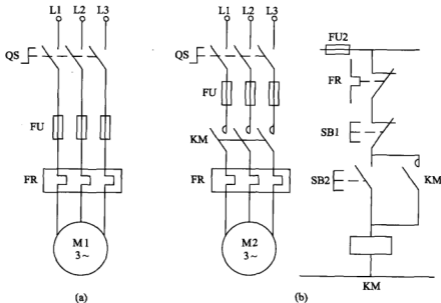


图 5-32 单向全电压启动控制线路

电路的工作原理:

合上电源开关 QS,引入电源,按下启动按钮 SB2,KM 线圈通电,常开主触头闭合,电动机接通电源启动。同时,与启动按钮并联的接触器常开辅助触头也闭合,当松开 SB2 时,KM 线圈通过其本身常开辅助触头继续保持通电,从而保证了电动机连续运转。

电路保护环节:

① 短路保护。由熔断器 FU1、FU2 分别实现主电路和控制电路的短路保护。为扩大保护范围,在电路中熔断器应安装在靠近电源端,通常安装在电源开关下面。

② 过载保护。由于熔断器具有时限保护特性和分散性,难以实现电动机的长期过载保护,为此采用热继电器 FR 实现电动机的长期过载保护。当电动机长期过载时,串接在电动机定子电路中的双金属片因过热变形,致使其串接在控制电路中的热继电器 FR 常闭触头打开,切断 KM 线圈电路,电动机停止运转,实现过载保护。

③ 欠压和失压保护。当电源电压由于某种原因严重欠压或失压时,接触器电磁吸力急剧下降或消失,衔铁释放,常开触头与自锁触头断开,电动机停止运转。而当电源电压恢复正常时,电动机不会自行启动运转,以避免事故发生。

(2) 点动控制

所谓点动,即按下按钮时电动机运转工作,手松开按钮时电动机停止工作。点动控制多用于机床刀架,横梁、立柱等快速移动和机床对刀等场合。图 5-33 列出了实现点动控制的

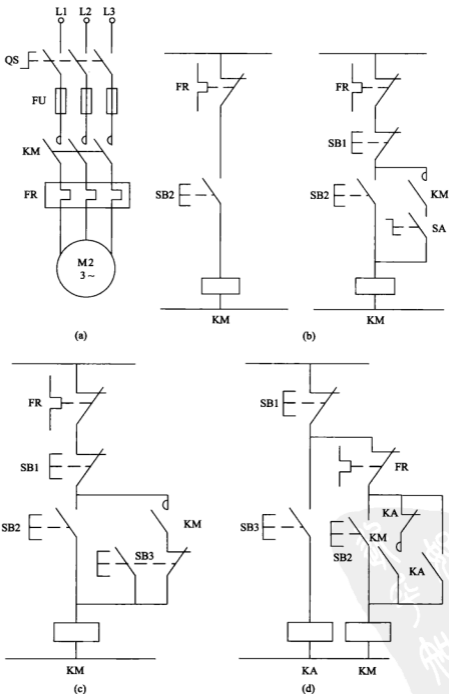


图 5-33 实现点动的几种控制电路

几种常见控制线路。图 5-33(a) 是基本的点动控制电路。图 5-33(b) 是带手动开关 SA 的点动控制电路, 打开 SA 自锁触头断开, 可实现点动控制。合上 SA 实现连续控制。图 5-33(c) 增加了一个点动用的复合按钮 SB3, 点动时利用其常闭触头断开接触器 KM 的自锁触头, 实现点动控制。连续控制时, 可按启动按钮 SB2。图 5-33(d) 是用中间继电器实现点动的控制线路, 点动时按 SB3, 中间继电器 KA 的常闭触头断开接触器 KM 的自锁触头, KA 的常开触头使 KM 通电, 电动机实现点动控制运行。连续控制时, 按 SB2 即可。

(3) 多点控制

大型机床为了操作方便, 常常要求在两个或两个以上的地点都能进行操作。实现多点控制的控制电路如图 5-34(a) 所示, 即在各操作地点各安装一套按钮, SB2 接线的具体要求是各按钮的常开触头并联连接, 常闭触头串联连接。

多人操作的大型冲压设备, 为了保证操作安全, 要求几个操作者都发出主令信号(如按下启动按钮)后, 设备才能执行冲压动作。此时应将启动按钮的常开触头串联, 如图 5-34(b) 所示。

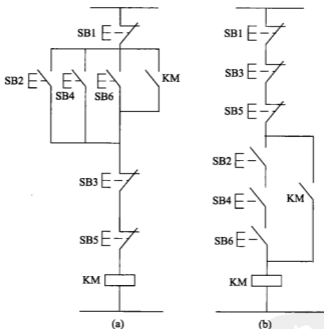


图 5-34 多点控制线路

2. 降压启动控制电路

(1) 定子串接电阻降压启动控制电路

降压启动, 就是启动时降低加在电动机定子绕组上的电压, 当电动机启动到接近额定转速时, 再将电压恢复到额定值。对容量较大(大于 10 kW)的笼型异步电动机, 一般都采用降压启动的方式启动。机床中最常见的降压启动有定子串接电阻降压启动和星形—三角形降压启动两种方式。

在定子绕组回路中串接电阻 R 使电动机定子绕组电压降低, 启动结束后再将电阻短接,

使电动机在额定电压下正常运行。这种启动方式由于不受电动机接线形式的限制,设备简单,因而在机床控制电路中被经常使用。

(2) 星形—三角形降压启动控制电路

图 5-36 所示是星形—三角形降压启动控制电路。电动机启动结束,由时间继电器自动切换成三角形接法。

电动机正常运行时,定子绕组接成三角形,此时每相绕组所承受的电压为电源的线电压。启动时接成星形,每相绕组所承受的电压为电源的相电压,启动结束时再自动切换成三角形运行。

凡是正常运行时定子绕组接成三角形的笼型异步电动机,均可采用星形—三角形的降压启动方法来限制启动电流。我国新设计的 Y 系列异步电动机,4kW 以上均为三角形接法。

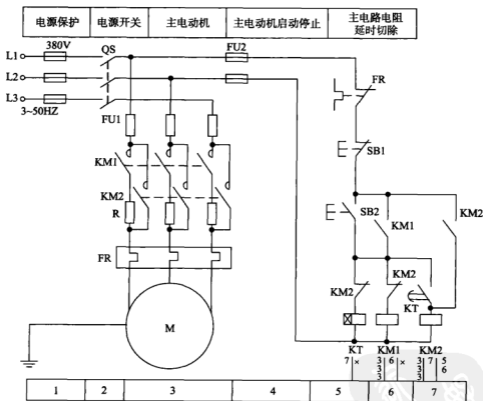


图 5-35 定子串接电阻降压启动控制电路

5.3.2 三相异步电机的正反转控制线路

机床的工作部件常需要作两个相反方向的运动,大都靠电动机正反转来实现。实现电动机正反转的原理很简单,只需改变电动机三相电源的相序,就可改变电动机的转向。图 5-37 所示为两个按钮分别控制两个接触器来改变电动机相序,实现电动机正反转的控制电路。在图 5-37(a)中 SB1、SB2 分别为正、反转控制按钮,SB3 为停止按钮。常闭触头 KM1、

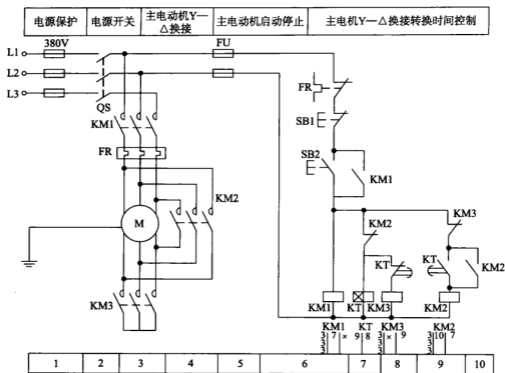


图 5-36 时间继电器的自动切换星形—三角形降压启动控制电路

KM2 为互锁触头,以避免 SB1、SB2 同时按下可能造成的短路事故。该电路在电动机换向时,需先按停止按钮 SB3 才能反方向启动。故常称为“正停反”控制线路,频繁换向时,操作不方便。

若采用图 5-37(b)所示的电路,即用复合按钮代替单触头按钮,便可实现不用停止按钮过渡而反转。该电路由于能使电动机在运转时按反转启动按钮直接换向,常称为“正反—停”控制电路。这种正反转控制电路仅适用于小容量电动机,且拖动的机械装置转动惯量又较小的场合。

5.3.3 三相异步电机的制动控制线路

电气制动是使电动机产生一个与转子原来转动方向相反的力矩来实现制动。常用的电气制动方式有能耗制动和反接制动。

(1) 能耗制动控制电路

图 5-38 为能耗制动的控制电路。其中图 5-38(a)是用复合按钮手动控制的能耗制动的控制电路。当按下停止按钮 SB1 时, KM1 接触器断电,使电动机切除三相交流电源,接入直流电源,电动机能耗制动。当转速为零时,松开 SB1 按钮, KM2 断电,电动机脱离直流电源,制动过程结束。

图 5-38(b)是用时间继电器自动完成制动结束时切除直流电,使操作简便的电路图。在该控制电路中,当按下 SB1 时, KM1 断电, KM2 得电自锁, KT 得电,电动机能耗制动。制动后 KT 延时时间到后,其延时触头 KT 断开, KM2 断电,电动机脱离直流电源制动过程结束。

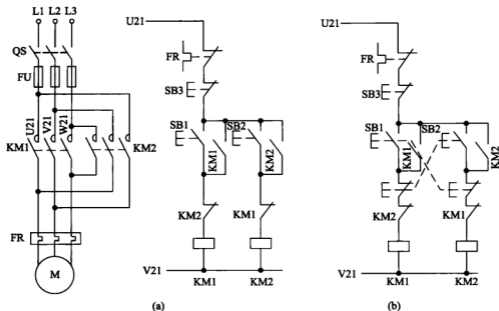


图 5-37 电动机正反转电路

能耗制动比较缓和、平稳、准确、功耗小,但在低速时制动不十分迅速。适用于电动机容量不太大,要求制动平稳和起制动频繁的场所。但必须配置一套整流设备。

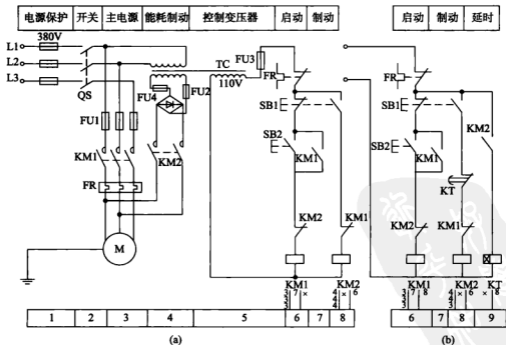


图 5-38 能耗制动控制电路

(2) 反接制动控制电路

图 5-39 是电动机单向反接制动控制电路。当电动机正常运转时,速度继电器 KS 的常开触头是闭合的,但 SB1、KM2 两触头是断开的,所以 KM2 线圈未得电。当按下停止按钮 SB2 时,其常闭触头 SB2 断开使 KM1 断电,其常开触头 SB2 闭合使 KM2 得电自锁,电动机串电阻反接制动。当制动到电动机转子转速低于 100r/min 时,速度继电器 KS 触头断开, KM2 断电,使电动机脱离电源,制动过程结束。

反接制动时,由于旋转磁场的相对速度很大,定子电流也很大,因此制动迅速。但制动时冲击大。对传动部件有害,能量消耗也大。通常仅适用于不经常启动和制动 10kW 以下的小容量电动机。为了减小冲击电流,通常在主回路中串入电阻 R 来限制反接制动的电流。

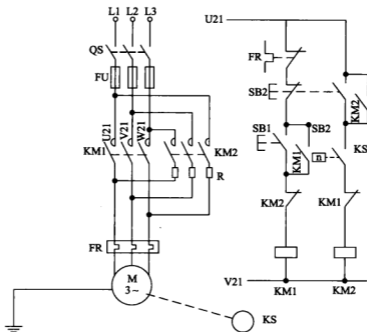


图 5-39 反接制动控制电路

5.4 三相异步电动机的调速及软启动

5.4.1 三相异步电动机调速控制

异步电动机调速常用来改善机床的调速性能和简化机械变速的装置。根据异步电动机转子转速公式

$$n = \frac{(1-s) \times 60 \times f}{P} \quad (5-1)$$

式中, s 为转差率; f 为电源频率; P 为定子极对数。

由上式可知,三相异步电动机的调速可通过改变定子电压频率 f 、定子极对数 P 和转差

率 s 来实现。具体归纳为变极调速、变频调速、调压调速、转子串电阻调速、串级调速和电磁调速等调速方法。

(1) 变极调速

鼠笼式异步电动机常用的变极调速方法有两种,一种是改变定子绕组的接法,即变更定子绕组每相的电流方向;另一种是在定子上设置具有不同极对数的两套互相独立的绕组,又使每套绕组具有变更电流方向的能力。变极调速是有级调速,速度变换是阶跃式的。

① 双速电动机 双速电动机 Δ/YY 接法的三相定子绕组接线变换如图 5-40 所示,电机极数为 4 极/2 极。 Δ/YY 接线属于恒功率调速。图 5-41 为双速电动机调速控制线路图。

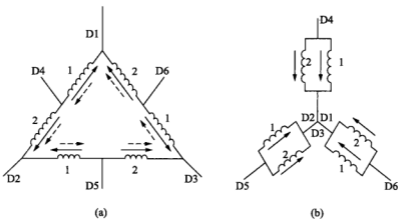


图 5-40 双速电动机 Δ/YY 三相定子绕组接线

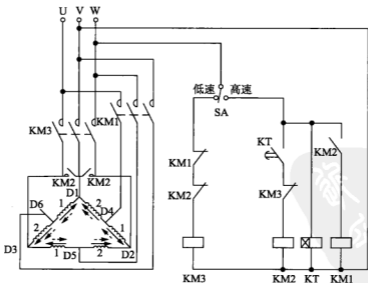


图 5-41 双速电动机调速控制线路

双速电动机 Y/YY 接法的接线变换如图 5-42,电机极数 4 极/2 极,对应电动机的低速和高速。它属于恒转矩调速。

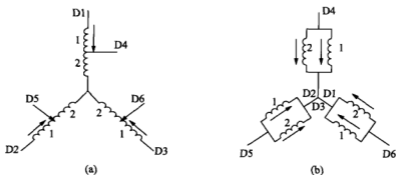


图 5-42 双速电动机 Y/YY 三相定子绕组接线图

② 三速异步电动机一般三速电动机的定子绕组具有两套绕组,其中一套绕组连接成 Δ/YY ,另一套绕组连接成 Y,如图 5-43(a)所示。

假设将 D1、D2、D3 接电源时,电动机具有 8 个极;将 D4、D5、D6 接电源而 D1、D2、D3 互相短接时,电动机具有 4 个极。如图 5-43(b),将 D7、D8、D9 接线端接电源时,电动机为 6 个极。故将不同的端头接向电源,电动机便有 8、6、4 三种级别磁极的转速,对应的转速由低速变为高速。当只有单独一套绕组工作时(D7、D8、D9 接电源),由于另一套 Δ/YY 接法的绕组仍置身于旋转磁场中,在其 Δ 接线的线圈中肯定要流过环流电流。为避免环流产生,一般设计将绕组接成开口的三角形,如图 5-43(c)所示。

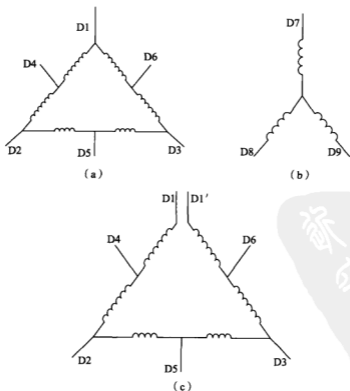


图 5-43 三速电动机的定子绕组

(2) 变频调速

由式(5-1)可见,变频调速就是改变异步电动机的供电频率,利用电动机的同步转速随频率变化的特性进行调速。在交流异步电动机的诸多调速方法中,变频调速的性能最好,调速范围大,稳定性好,运行效率高。采用通用变频器对鼠笼式异步电动机进行调速控制,由于使用方便、可靠性高并且经济效益显著,所以逐步得到推广应用。详细见第8章。

(3) 变转差率调速

变转差率调速包括调压调速、转子串电阻调速、串级调速和电磁调速等调速方法。

调压调速是异步电机调速系统中比较简便的一种,就是改变定子外加电压来改变电机在一定输出转矩下的转速。调压调速目前主要通过调整晶闸管的触发角来改变异步电动机端电压进行调速。这种调速方式仅用于小容量电动机。

转子串电阻调速是在绕线式异步电动机转子外电路上接可变电阻,通过对可变电阻的调节来改变电动机机械特性斜率实现调速。电机转速可以有级调速,也可以无级调速,其结构简单、价格便宜,但转差功率损耗在电阻上,效率随转差率增加等比下降,故这种方法目前一般不被采用。

电磁转差离合器调速是在鼠笼式异步电动机和负载之间串接电磁转差离合器(电磁耦合器),通过调节电磁转差离合器的励磁来改变转差率进行调速。这种调速系统结构适用于调速性能要求不高的小容量传动控制场合。

串级调速就是在绕线式异步电动机的转子侧引入控制变量,如附加电动势来改变电动机的转速进行调速。基本原理是在绕线转子异步电动机转子侧通过二极管或晶闸管整流桥,将转差频率交流电变为直流电,再经可控逆变器获得可调的直流电压作为调速所需的附加直流电动势,将转差功率变换为机械能加以利用或使其反馈回电源而进行调速。

5.4.2 三相异步电动机软启动控制线路

传统的异步电动机启动方式具有控制线路简单的特点,但是启动转矩固定不可调,启动过程中存在较大的冲击电流,使所拖动负载受到较大的机械冲击;易受电网电压波动的影响,一旦电网电压出现波动,会造成启动困难甚至使电动机堵转。停机时均为瞬时停电,同样会造成剧烈的电压波动和较大的机械冲击。采用软启动方式启动电动机可以克服上述缺点。

1. 软启动控制器及其工作原理

软启动器(Soft Starter)是一种集电机软启动、软停车、轻载节能和多种保护功能于一体的新颖电机控制装置。软启动的核心部件是软启动控制器,由功率半导体器件和其他电子元器件组成。其主要结构是一组串接于电源与被控电动机之间的三相反并联晶闸管及其电子控制电路,通过控制三相反并联晶闸管,使被控电动机的输入电压按不同的要求而变化,从而实现不同的启动功能。启动时,电机的端电压从零开始按预设函数关系逐渐上升,直至达到满足启动转矩而使电动机顺利启动,再使电动机以全电压正常运行。

(1) 软启动控制器的工作特性

异步电动机在软启动过程中,软启动控制器通过控制加到电动机上的平均电压来控制启动电流和启动转矩,启动转矩和转速均逐渐增加,因此避免了冲击启动。一般来说,软启动控制器可以通过设定得到不同的启动特性,以满足不同的负载特性要求。

(2) 斜坡恒流升压启动

斜坡恒流升压启动曲线如图 5-44(a) 所示,在电动机启动的初始阶段,启动电流逐渐增加,当电流达到预先设定的限流值后保持恒定,直至启动完毕。在启动过程中,电流上升的变化速率可以根据电动机负载进行调整和设定。这种启动方式的斜坡陡,电流上升速率大,启动转矩大,启动时间短。当负载较轻或空载启动时,所需启动转矩较低,应使斜坡缓和一些,当电流达到预先设定的限流值后,再迅速增加转矩,完成启动过程。

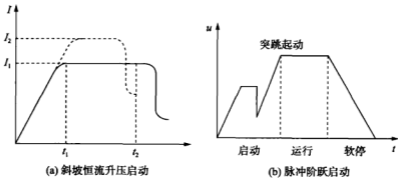


图 5-44 软启动器控制器启动特性

(3) 脉冲阶跃启动

脉冲阶跃启动特性曲线如图 5-44(b) 所示,在启动刚开始的极短时间内,启动电流放大,经过一段时间后回落,然后再按原设定值呈线性上升,并进入恒流启动状态,这种启动方式适用于重载并需要克服较大静摩擦的启动场合。

(4) 减速软停控制

减速软停控制是当电动机需要停机时,不是立即切断电动机电源,而是使电动机的端电压逐渐降低而切断电源的。这一过程持续时间较长,故称为软停控制。根据实际需要,停车时间可在 0~120s 范围内调整。减速软停控制曲线如图 5-44(b) 所示。

(5) 节能特性

软启动控制器可以根据电动机功率因数的高低,自动判断电动机的负载率,当电动机处于空载或低负载状态时,可以改变输入电动机的功率,从而达到节能的目的。

(6) 制动特性

当电动机需要快速停机时,软启动控制器具有能耗制动功能,即当接到制动命令时,软启动控制器通过改变晶闸管的触发方式,使交流电转变为直流电,然后在切断主电路后,立即将直流电压加到电动机定子绕组上,利用转子感应电流与静止磁场的作用达到制动的目的。

2. 软启动控制线路

(1) 软启软停控制线路

某些负载,如水泵、风机等,往往要求软启动、软停车,可以在软启动控制器两端并联接触器 KM。启动时,首先断开 KM 主触头,再由软启动控制器启动电动机;待软启动结束后,KM 主触头闭合,将电动机直接接至三相电源,电动机投入全压运行。在需要停车时,先将 KM 分断,再由软启动器对电动机进行软停车。软启软停控制线路的主电路部分如图 5-45 所示。

该线路的特点是软启动控制器仅在启动和停车时工作,延长了其使用寿命;一旦软启动器发生故障,可由旁路接触器 KM 作为应急后备来控制电动机的启停。

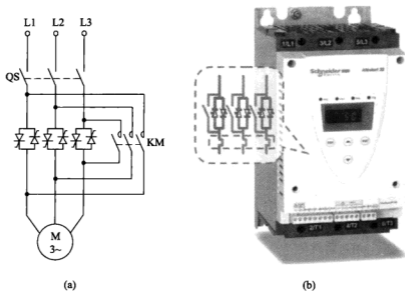


图 5-45 软启软停控制线路

(2) 单台软启动控制器启动多台电动机

如果有多台电动机需要启动,在资金允许的条件下,最好是每一台电动机都单独安装一台软启动控制器,这样既方便控制,又能充分发挥软启动控制器的故障检测功能。但是为了节省资金投入,也可以用一台软启动控制器对多台电动机进行控制,控制主电路如图 5-46 所示,在该控制线路中,两台电动机不能同时启停,只能一台台分别启停。

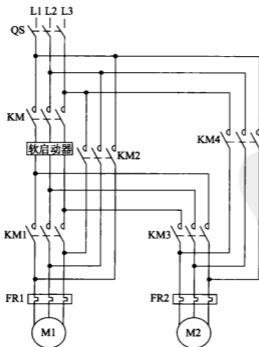


图 5-46 一台软启动控制器控制两台电动机控制线路

5.5 常用控制线路

1. 既能点动控制又能连续控制的控制线路

在生产中,某些生产机械应既能进行点动调整,又能连续运行,如机床在调整完毕后需要进行连续切削加工。这就要求电动机既能够实现点动控制,又能实现连续控制。控制线路如图 5-47 所示。

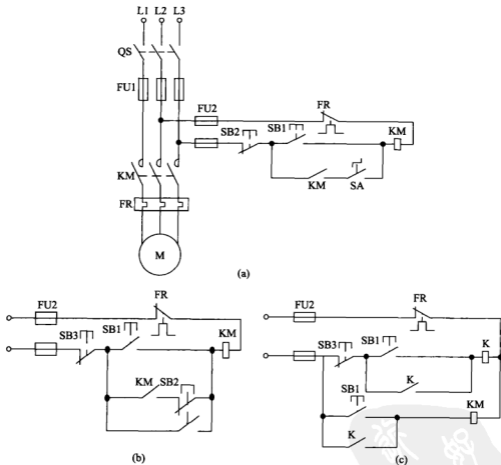


图 5-47 既能点动又能连续控制的控制线路

2. 自动循环控制线路

在生产实践中,有些机械设备需要做自动往复循环运动,如机床工作台的前进—后退。自动循环控制通常是采用行程开关,按行程控制原则来实现的,控制线路如图 5-48(a)所示。行程开关 SQ1—SQ4 按工艺要求安装在床身上,如图 5-48(b)所示。

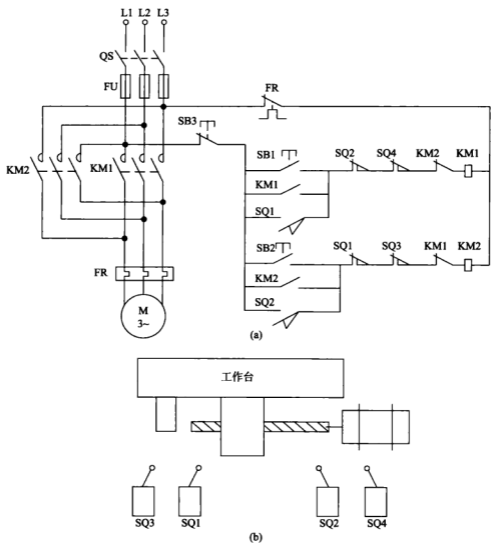


图 5-48 自动循环控制线路

思考题与习题

1. 中间继电器与接触器有什么区别？
2. 既然在电动机控制主电路中装有熔断器，为什么还要装热继电器？
3. 能否用过电流继电器取代热继电器进行过载保护？为什么？
4. 电动机启动电流远大于热继电器整定电流，启动时热继电器会不会动作，为什么？如何防止可能发生的误动作？
5. 电气原理图图区划分和区号检索有什么规定？对线路分析有什么帮助？

6. 画出星形—三角形换接启动控制线路,并说明该线路的优缺点及适用的场合。
7. 何谓反接制动、能耗制动?各有什么特点?控制线路各有什么要求?
8. 有一台4级带式运输机,分别由M1—M4 4台小功率交流电动机拖动,启动时要求按M1—M4顺序依次间隔启动。停车时按相反顺序依次间隔停车。试设计电气控制线路,并设置必要的电气保护。
9. 某码头有一台装卸小车由一台小功率三相笼型异步电动机拖动,其动作顺序与控制的要求是:
 - (1) 小车由原位启动前进到1位自动停留 t_1 (s)时间,装第一种料。
 - (2) 1位装料完毕,自动返回原位,并停留 t_2 (s)时间,卸第一种料。
 - (3) 卸料完毕,自动前进经1位不停留直到2位停 t_3 (s)时间装第二种料。
 - (4) 2位装料完毕,自动返回至原位,停留 t_4 (s)时间卸第二种料。
 - (5) 至此一个循环结束。此后按上述过程自动循环,直至完成装卸任务,例如循环 n 次后自动停机。若中途按下停止按钮,则待本循环结束后停止运行。
 试设计电气控制原理线路,并设置必要的电气保护。
10. 某机床由两台三相笼型异步电动机M1、M2拖动,其控制要求是
 - (1) M1功率较大,要求采用星形—三角形换接启动,停车带有能耗制动。
 - (2) M1与M2的启/停控制顺序是:先开M1,经1min后方允许M2启动,停车顺序相反,只有在M2停车后才允许M1停车。
 - (3) M1、M3的启停控制均可以两处操作。
 试设计电气控制原理线路,并设置必要的电气保护。
11. 设计一个三相交流异步电动机自耦变压器降压启动控制电路。
12. 设计一个他励(包括并励)直流电动机的控制电路,要求实现电枢回路串电阻的启动与调速。
13. 设计一个他励(包括并励)直流电动机的控制电路,要求实现能耗制动的正反转控制。



第 6 章 电动机和低压电器的选择

6.1 电动机容量选择原则

电动机在能量转换过程中,必然会产生损耗,如铜损耗、铁损耗、机械损耗等,这些损耗都以热能的形式表现出来,除了一部分热能散发到周围介质中去以外,其余部分则使电动机的温度升高。一台电动机在运行中损耗功率的大小可表示为

$$\Delta P = P_1 - P_2 = P_2 \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \quad (6-1)$$

式中, P_1 为电动机的输入功率; P_2 为电动机的输出功率; η 为电动机的运行效率。
损耗功率也可表示为

$$\Delta P = P_0 - P_{Cu} = P_{Cu}(\alpha + 1) = I_L r(\alpha + 1) \quad (6-2)$$

式中, P_0 为空载损耗; P_{Cu} 为铜耗; $\alpha = P_0 / P_{Cu}$; I_L 为电动机负载电流; r 为电动机电枢绕组的等效电阻。

单位时间内产生的热量为

$$Q = 1.005 \Delta P \quad (6-3)$$

由此可看出:损耗功率与电动机运行中的输出功率和工作电流 I_L 的平方成正比,而热量与 ΔP 成正比。说明损耗是使电动机温度上升的主要原因。一定的输出功率对应一个最高温度。而在选择电动机额定功率时,这个最高温度应受到电动机绝缘材料允许的最高温度的限制。如果电动机的温度过高,其绝缘寿命就要缩短。这表明,保证运行中电动机绝缘的最高温度不超过允许的最高工作温度 θ , 即 $\theta \leq \theta_r$ 是保证电动机长期安全运行的必要条件。

由于不同地区,电动机工作的环境温度各不相同。为了统一起见,国家电工标准规定空气温度或冷却介质温度为 $+40^\circ\text{C}$, 而用相对 $+40^\circ\text{C}$ 的温度的升高值来衡量电动机的发热情况,即用温升值来表示。如果用 θ 表示实际温度,而 θ_0 表示空气或冷却介质温度,则温升 $\tau = \theta - \theta_0$ 。改用温升后,选择电动机额定功率的基本依据为

$$\tau_{\max} \leq \tau_r \quad (6-4)$$

式中, $\tau_{\max} = \theta_{\max} - \theta_0$, 为电动机运行中的最高温升; $\tau_r = \theta_r - \theta_0$, 为电动机绝缘材料所允许的最高温升。例如:若电动机的实际温度为 100°C , 其温升应为 60°C 。

从上面分析可知:对电动机额定功率的选择,可以通过校验电动机运行时温度或温升是否接近允许值来进行。若温度过高,说明所选择的电动机长期过载运行,其使用寿命将受影响;若温度过低,说明所选择的电动机长期轻载运行,这时不仅电动机的各部分材料没有得

到充分利用,还会限制生产机械的输出功率,对于交流电动机其功率因数将降低。不同绝缘材料的允许温度是不一样的,按照允许温度的高低,电动机常用的绝缘材料分为 A, E, B, F, H 五种,按环境温度+40℃计算,这五种绝缘材料及允许的最高温度和允许的最高温升如表 6-1 所示。

表 6-1 绝缘材料允许最高温度和最高温升

等级	绝缘材料	允许最高温度/℃	允许最高温升/℃
A	经过处理的棉、丝、纸版、木材等,普通绝缘漆	105	65
E	环氧树脂、聚酯薄膜、青壳纸、三醋酸纤维薄膜,高强度绝缘漆	120	80
B	用提高了耐热性能的有机漆作黏合剂的云母、石棉和玻璃纤维组合物	130	90
F	用耐热优良的环氧树脂黏合或浸渍的云母、石棉和玻璃纤维组合物	155	115
H	用硅有机树脂黏合或浸渍的云母、石棉和玻璃纤维组合物,硅有机橡胶	180	140

6.2 不同工作方式下电动机容量选择

不同工作方式下电动机容量的确定,通常分三步进行:第一步,计算生产机械负载功率 P_L ;第二步,根据第一步结果,预选电动机,其额定功率 $P_N \leq P_L$,尽量接近 P_L ;第三步,校核预选电动机的发热、过载能力及启动能力,直至合适为止。

由于电动机的热惯性很大,在较短时间内,电动机承受高于铭牌若干倍的负载功率,仍可保证 $\tau_{\max} \leq \tau_1$,这时限制电动机额定功率大小的主要因素,不是发热,而是电动机的过载能力,即所预选的电动机的最大转矩 T_{\max} (对异步电动机而言)或最大电流 I_m (对直流电动机而言),必须大于运行中可能出现的最大负载转矩 $T_{L\max}$ 或最大负载电流 I_{Lm} 。

对于异步电动机: $T_{L\max} \leq T_{\max} = \lambda_m T_N$ 。考虑电网电压向下波动 10%, $T_{L\max} \leq 0.9 T_{\max}$ 。对于直流电动机: $I_{Lm} \leq I_m = \lambda_1 I_N$ 。式中, λ_m 为异步电动机的转矩过载倍数,即电动机的过载能力系数; λ_1 为直流电动机电流过载倍数。具体数值可以从产品目录中查出。

启动能力校验,主要是针对鼠笼式异步电动机而言。由于鼠笼式异步电动机的启动转矩一般比较小,所以为使电动机可靠启动,必须保证启动时, $T_L \leq \lambda_{st} T_N$; 而 $\lambda_{st} = T_{st}/T_N$ 为鼠笼式转子异步电动机的启动转矩倍数,具体数据也可以从产品目录中查到。

校核电动机的发热是电动机容量选择中最重要的,故以介绍发热校验方法为主。

6.2.1 电动机负载基本恒定时电动机额定功率的选择

在指定的工作时间 t_p 内,负载的大小恒定或基本不变的情况下,电动机额定功率的选择是假设在标准环境温度+40℃及额定散热条件下,而且是在电动机不调速的前提下进行的。

1. 连续工作方式

计算出负载功率 P_L 后,发热校验合格的条件为: $P_N \geq P_L$ 。按照这个简单的结论选择电

动机的额定功率 P_N , 就能保证 $\tau_{\max} \leq \tau_r$, 则发热校验合格。

2. 短时工作方式

(1) 短时工作方式电动机的选用

从发热的观点出发, 选择电动机功率时, 可根据生产机械的功率、工作时间及转速要求, 从产品目录中直接选用不同规格的电动机, 选择的条件是 $P_N \geq P_L$ 。

但根据实际的工艺要求, 电动机的工作时间不一定总是符合标准工作时间, 这时必须由实际工作时间 t_p 计算出的所需功率大小 P_p , 折算成标准工作时间 t_s 下的功率 P_s , 才能确定预选电动机的发热是否在允许的范围内。折算的公式是

$$P_s \approx P_p \sqrt{\frac{t_p}{t_s}} \quad (6-5)$$

注意: 式中 t_p 应尽量与 t_s 接近。若满足 $P_N \geq P_s$, 则发热校验通过。

(2) 用作短时工作方式的连续工作方式电动机的选用

由于连续工作方式的电动机种类、型号比专为短时服务的电动机多, 故在短时工作方式时, 根据需要也可选用连续工作方式的电动机为其服务。但由于工作时间较短, 为使电动机能充分利用, 应该使它在短时工作结束时, 电动机的最高温升正好接近于所选电动机绝缘所允许的最高温升。很显然, 这时连续工作方式的电动机应过载运行。

由于电动机的热惯性比较大, 故在为短时负载服务时, 只要电动机过载能力能满足, 一般来讲发热校验基本能通过。所以连续工作方式的电动机为短时工作方式服务时, 首先应核校过载能力, 这可使计算变得简单。

按过载倍数确定电动机额定功率的公式为

$$P_N \geq \frac{P_L}{\lambda} \quad (6-6)$$

式中, λ 为过载倍数, 对于直流电动机 $\lambda = \lambda_2$; 对于异步机 $\lambda = \lambda_m$ 。但是异步电动机一定要考虑电网电压的波动, 一般取 $\lambda = 0.9\lambda_m$ 。

3. 电动机额定功率的修正

电动机铭牌上的额定功率是在环境温度为 $+40^\circ\text{C}$ 的情况下定义的, 在环境温度长期偏离 $+40^\circ\text{C}$ 较远时, 为使电动机得到充分利用, 一般要对输出功率进行修正。已知环境温度为 $+40^\circ\text{C}$ 时, 电动机允许最高温升为 τ_{\max} , 额定功率为 P_N ; 环境温度为 $\theta^\circ\text{C}$ 时, 电动机允许温升变为 $(40 - \theta) + \tau_{\max}$ 。根据等效发热原理, 其电动机允许输出的功率变为

$$P_L \approx P_N \sqrt{1 + \frac{40 - \theta}{\tau_{\max}} (\alpha + 1)} \quad (6-7)$$

式中, α 为额定情况下定耗与变耗的比值, 对于一般直流电动机, $\alpha = 1 \sim 1.5$; 对于一般鼠笼式异步电动机, $\alpha = 0.5 \sim 0.7$; 对于小型绕线式异步电动机, $\alpha = 0.45 \sim 0.6$ 。

只要满足 $P \geq P_L$, 发热校验就可通过。

6.2.2 变动负载下电动机额定功率的选择

当电动机工作期间负载非恒定时, 它的输出功率是不断变化的, 其发热和温升也在波

动,但经过一段时间后,温升可达到一种稳定的波动。这时对应的最高温升需在绝缘的允许范围内。对该情况下电动机容量的选择,无论为何种工作方式,首先都要根据等效发热的原理,将变化的负载等效为一个不变的负载,而后再进行发热校验。因此,仅以连续工作方式为例来推导对应的等效公式,其结论对其他两种工作方式也适合。

1. 电动机额定功率的选择

连续工作方式下负载周期性变化时,电动机额定功率根据如下方法选择。

首先根据生产工艺过程,做出折算到电动机轴上的生产机械的负载图,如图6-1所示即 $P_L=f(t)$ 或 $T_L=f(t)$ 。利用负载图可求出负载的平均功率 \bar{P} 或平均转矩 \bar{T} ,即

$$\bar{P} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (6-8)$$

或

$$\bar{T} = \frac{T_1 t_1 + T_2 t_2 + \dots + T_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (6-9)$$

然后按下述经验公式预选一台电动机,其额定容量可选为

$$P_N = (1.1 \sim 1.6) \bar{P} \quad (6-10)$$

或

$$P_N = (1.1 \sim 1.6) \frac{\bar{T}_{\text{允许}}}{9.550} \quad (6-11)$$

预选好电动机后,可进行发热校验,或过载能力、启动能力的校验。

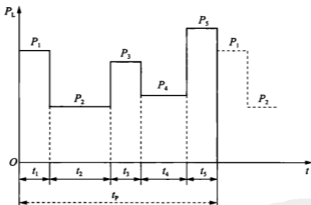


图 6-1 长时变化负载图

发热校验采用等效发热的原则。首先将变化的负载电流或负载功率变为不变的电流 I_{eq} 或功率 P_{eq} , 两者产生的热量相等。若满足 $P_{\text{eq}} \leq P_N$ 或 $I_{\text{eq}} \leq I_N$, 则预选成功, 否则重新再选。

不能用等效转矩法的情况, 均不能用等效功率法。另外, 等效功率法也不能用于调速系统的发热校验。但若机械特性较好, 则可认为空载转速与额定转速相等, 这时负载变化, 可用等效功率法进行发热校验。

2. 应用等效法时几种特殊情况的处理

(1) 直流他励电动机弱磁调速

如果有一幅他励电动机的负载图 $T=f(t)$, 其中有若干段为弱磁调速, 原则上讲, 不能用等效转矩法进行发热校验。在工程上, 为了简化计算, 往往采用修正的方法, 使等效转矩法仍能沿用。

修正的原则: 把弱磁段的转速在发热相等的原则下, 向着额定磁通折算, 便可认为整个工作周期内均为恒磁通运行。现假设在负载图上的第 i 段为弱磁调速, 在发热相等的原则下, 电枢电流保持不变, 则折算后的磁通为额定值, 对应转矩为

$$T'_i = \frac{\Phi}{\Phi_i} T_i \quad (6-12)$$

一般在弱磁调速时, 保持电源电压不变, 由 $U \approx E = C_e \Phi_n$, 得到 $\Phi \propto \frac{1}{n}$, 式(6-12)可改写为

$$T'_i = \frac{n_i}{n_N} T_i \quad (6-13)$$

将修正后的值代入等效转矩法对应的公式 $T_{eq} = \sqrt{\frac{\sum T_i^2 t_i}{\sum t_i}}$ 中, 即可进行发热校验。

(2) 转速低于额定转速

在负载功率图上, 若有几段为调速段, 不满足 $P \propto T$ 关系, 为了继续使用等效功率法进行发热校验, 也可在等效发热的原则下进行修正。若在第 i 段上, 转速低于额定转速, 则对额定转速进行修正时, 要使发热相等, 只有修正前后电流不变, 即对应转矩不变, 这 $P \propto n$, 则有

$$P'_i = \frac{n_N}{n_i} P \quad (6-14)$$

将修正后的值代入等效功率法对应的公式 $P_{eq} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 t_i}{\sum t_i}}$ 中, 即可进行发热校验。

(3) 负载图中某段负载不为常数时等效值求法

在各等效法中, 对应时间内的电流、转矩或功率是不变的。但在实际中, 对应启动、制动段的电流、转矩或功率是变化的, 在用等效法时, 必须将对应的电流、转矩或功率进行修正, 其原则是用一个不变的量代替变化的量, 使二者发热相等, 然后将修正后的值代入等效法中进行发热校验。要满足等效发热的原则, 这个不变量应是变化量的均方根值。现以 $I=f(t)$ 为例, 如图 6-2 所示。其中第一段和第三段电流随时间按线性变化, 因此, 第一段的直线方程为

$$I_1 = \frac{I_2}{t_1} t \quad (0 < t < t_1) \quad (6-15)$$

其均方根值为

$$I'_1 = \sqrt{\frac{\int_0^{t_1} I_1^2 dt}{t_1}} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_1} \left(\frac{I_2}{t_1}\right)^2 t^2 dt}{t_1}} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_2 \quad (6-16)$$

最终,可以推出等效电流为

$$I_d = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{\sum_{i=1}^n t_i}} \quad (6-17)$$

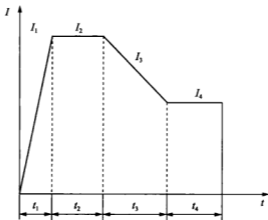


图 6-2 各段不全为直线的负载图

6.2.3 重复短时工作方式电动机额定功率的选择

重复短时工作方式下,每周期中都有启动、运行、制动和停歇各阶段,因此,专为该工作方式服务的电动机在结构上也有与此相适应的特点:机械强度高,转子细长,飞轮惯性小,启动和过载能力强,绝缘材料等级高等。因此,一般不选用其他工作方式的电动机。

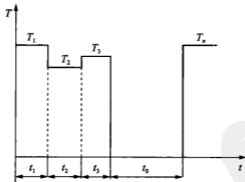


图 6-3 重复短时工作制电动机的负载图

如图 6-3 所示的为重复短时工作方式下电动机的负载图。首先求出一个周期内等效转矩与负载持续率 α_z ,

$$T_{eq} = \sqrt{\frac{T_1^2 t_1 + T_2^2 t_2 + \dots + T_n^2 t_n}{\sum_{i=1}^n t_i}} \quad (6-18)$$

$$z_c = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0} \times 100\% \quad (6-19)$$

对于自扇冷却式,考虑启、制动与停车时,电动机散热条件恶化,为使计算数值更接近电动机发热的实际情况,常对负载持续率进行修正。

$$z_c = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{\alpha t_1 + \alpha t_2 + \alpha t_3 + \alpha t_0} \times 100\% \quad (6-20)$$

如果 z_c 等于或接近标准负载持续率的数值,则选择与 z_c 相近的电动机,并使 $T_n \geq T_{eq}$,发热校验即能通过。如果 z_c 与标准值相差较多,则应把实际负载持续率 z_{cp} 下的功率 P_{eq} 换算成标准负载持续率 z_c 下的功率 P ,换算的原则也是损耗相等,在对应负载持续率下发热相等,又因 $(t_s/t_p) = (z_c/z_{cp})$,所以有

$$P \approx P_{eq} \sqrt{\frac{z_{cp}}{z_c}} \quad (6-21)$$

使之满足 $P_n \geq P$,发热校验通过。

关于重复短时工作方式电动机额定功率的选择,还需说明几点:

- (1) 如果负载持续率 $z_c \leq 10\%$,按短时工作方式处理;
- (2) 如果负载持续率 $z_c \geq 70\%$,按连续工作方式处理;
- (3) 如果 $z_{cp} < z_c$,则 $P_{eq} > P$,需校验电动机的过载能力和鼠笼式异步电动机的启动能力。

6.3 电动机的种类、额定电压、额定转速及形式的选择

一般来讲,电动机的选择除额定功率的选择外,还有电动机种类、形式、电压和转速的选择。

6.3.1 电动机种类的选择

为生产机械选择电动机的种类,首先应该满足生产机械对电动机启动、调速性能和制动的要求,在此前提下考虑经济性。交流电动机比直流电动机结构简单、运行可靠、维护方便、价格便宜。在这些方面,鼠笼式异步电动机就更为优越。所以,在满足工艺要求的前提下,应尽量选用交流电动机。但是,从我国目前情况看,在对调速性能要求高,且要求快速、平滑启动、制动时,可选用直流电动机。近年来,交流调速系统中的串级调速、变频调速发展很快,尤其是变频调速,具有能和直流调速系统相媲美的调速性能。

6.3.2 电动机额定电压的选择

依据电源情况和控制装置的要求选择电动机的额定电压。交流电动机的电压是依据电网电压来设计的,有 220/380V,380V,380/660V,3 000V,6 000V,10 000V 几种供选用。直流电动机的额定电压有 110V,220V,330V,440V 和 660V 等,还有专门为单相整流电源设计的 160V 直流电动机以供选用。

6.3.3 电动机额定转速的选择

额定功率相同的电动机,转速高、体积小、造价低,一般地说 GD^2 也越小。但转速越高的电动机,拖动系统传动机构将越复杂,成本又将提高。另外,电动机 GD^2 和转速将影响电动机过渡过程时间的长短和过渡过程中能量损耗的大小。电动机的转速与 GD^2 的乘积越小,过渡过程越快,能量损失越小。因此,电动机额定转速的选择需根据生产机械具体情况,综合考虑上面各种因素来确定。

6.3.4 电动机形式的选择

电动机的结构形式有卧式和立式两种,一般情况选用卧式。电动机的防护形式有:①开启式,其价格便宜,散热好,但外部液、固、气三态物质均可进入电动机内部,只适用于清洁又干燥的环境中;②防护式,可防止 45° 倾斜落体进入电动机中,多用于干燥、少灰尘、无腐蚀、无爆炸性气体的场合中。这种电机散热条件好,应用很广;③封闭式,电动机外部的液体或气体绝对不能进入电动机内,如潜水电机等;④防爆式,应用于有爆炸危险的环境中,如有瓦斯的井下或油池附近等特殊环境中应选用特殊电动机。

6.4 低压电器的选择

低压电器是指交流电压在 1 000V 以下、直流电压在 1 200 V 以下的电气线路中起保护、控制或调节等作用的电气元件。

低压电器的种类繁多,但就其控制对象不同,低压电器分为配电电器和控制电器两大类。低压配电电器主要用于低压配电系统和动力回路,具有工作可靠、热稳定性好和电动力稳定性好、能承受一定电动力作用等优点。常用配电电器包括刀开关、转换开关、熔断器、低压断路器等。低压控制电器主要用于电力传输系统中,具有工作准确可靠、操作效率高、寿命长、体积小等优点。常用的低压控制电器包括接触器、继电器、启动器、主令电器、控制器、电阻器、变阻器、电磁铁等。

6.4.1 低压开关

低压开关主要作隔离、转换及接通和分断电路用,多数用作机床电路的电源开关和局部照明电路的控制开关,有时也可用来直接控制小容量电动机的启动、停止和正、反转。低压开关一般为非自动切换电器,常用的主要类型有刀开关、组合开关和低压断路器。

(1) 刀开关

刀开关的额定电压应等于或大于电路额定电压,其额定电流应等于或稍大于电路工作电流。若用刀开关来控制电动机,则必须考虑电动机的启动电流比较大,应选用额定电流大一级的刀开关。此外刀开关的通断能力、动稳定电流之和、热稳定电流值等均应符合电路的要求。刀开关的型号含义如图 6-4 所示。

常用的 HK2 系列塑壳刀开关的技术数据如表 6-2 所示。

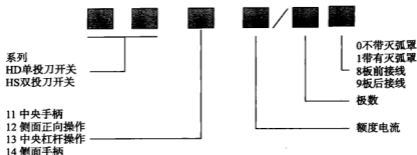


图 6-4 刀开关的型号含义

表 6-2 HK2 系列塑壳刀开关的技术数据

额定电压 /V	额定电流 /A	极数	熔体极限分断 能力/A	控制最大电动 机功率/kW	机械寿命 /次	电寿命 /次
200	10	2	500	1.1	10 000	2 000
	15		500	1.5		
	30		1 000	3.0		
330	15	3	500	2.2	10 000	2 000
	30		1 000	4.0		
	60		1 500	5.5		

(2) 组合开关

组合开关又称转换开关,它体积小,触点对数多,接线方式灵活,操作方便,常用于交流 50Hz、380V 以下及直流 220V 以下的电气线路中,供手动不频繁的接通和断开电路、换接电源和负载以及控制 5kW 以下小容量异步电动机的启动、停止和正反转。组合开关选用时主要考虑使用场合、额定电压、额定电流、安装方式、外形尺寸与定位尺寸。

(3) 低压断路器

低压断路器简称断路器,是低压配电网络和电力拖动系统中常用的一种配电电器。

在选用低压断路器时应满足:

- ① 断路器的额定工作电压和额定工作电流应分别不低于电路额定电压和计算电流;
- ② 热脱扣器的整定电流应与所控制电机的额定电流或负载额定电流一致;
- ③ 断路器的瞬时或短延时脱扣器整定电流应大于负载电路尖峰电流。对于电动机保护电路,当动作时间大于 0.02s 时,可按不低于 1.35 倍启动电流的原则确定;当动作时间小于 0.02s 时,则应增加为不低于启动电流的 1.7~2 倍。

6.4.2 熔断器

熔断器是低压配电网络和电力拖动系统中主要用作短路保护的电器。使用时串联在被保护的电路中,当电路发生短路故障,通过熔断器的电流达到或超过某一规定值时,以其自身产生的热量使熔丝熔断,从而自动分断电路,起到保护作用。它具有结构简单、价格便宜、动作可靠、使用维护方便等优点,因此得到广泛应用。

熔断器的主要技术参数有：额定电压、额定电流、分断能力和时间—电流特性。额定电压是指保证熔断器能长期正常工作的电压。额定电流是指保证熔断器长期正常工作的电流。分断能力是由熔断器各部分长期工作的允许温升决定的。

选用时主要考虑以下几方面因素：

① 熔断器类型。应根据线路要求、使用场合、安装条件和各类熔断器的适用范围来确定。

② 熔断器额定电压。应大于或等于线路的工作电压。

③ 熔体的额定电流。与负载的大小及性质有关，有三种选择方法：

一是对于阻性负载的短路电流保护应使熔断器的熔体电流等于或略大于电路的工作电流。

二是对于电动机负载，应考虑冲击电流的影响，应按下式计算：

单台电动机：

$$\begin{aligned} I_{fu} &\geq (1.5 - 2.5) I_N \\ I_C &= P_N \times 103 / KU_N \end{aligned} \quad (6-22)$$

式中， I_N 为电动机的额定电流。

多台电动机：

$$I_{fu} \geq (1.5 - 2.5) I_{N_{\max}} + \sum I_N \quad (6-23)$$

式中， $I_{N_{\max}}$ 为容量最大的一台电动机的额定电流； $\sum I_N$ 为其他电动机额定电流的总和。

三是在电容器设备中，电容器电流是经常变化的，因此在这种设备中熔断器只作为短路保护。一般情况，熔体的额定电流应大于电容器额定电流的 1.6 倍。

④ 额定分断能力。必须大于电路中可能出现的最大故障电流。

⑤ 选择性保护特性在电路系统中，电器之间的选择性保护特性非常重要，它能将故障产生的影响限制在最小范围内，即要求电路中某一支路发生短路或过载故障时，只有距离故障点最近的熔断器动作，而主回路的熔断器或断路器不动作，这种合理的选配称为选择性配合。根据系统的具体条件可分为熔断器之间上一级和下一级的选择性配合以及断路器与熔断器的选择性配合等。

6.4.3 主令电器

主令电器是在自动控制系统中发出指令或信号的操纵电器。常见主令电器有按钮开关、位置开关等。

(1) 按钮开关

按钮开关(简称按钮)是一种用人的手指或手掌所施加的力来实现操作的，并具有储能(弹簧)复位的一种控制开关。按钮的触点允许通过的电流较小，一般不超过 5 A，因此一般情况下它不直接控制主电路的通断，而是在控制电路中发出指令或信号去控制接触器、继电器等电器，再由它们去控制主电路的通断、功能转换或电气连锁。按钮一般由按钮帽、复位弹簧、桥式触头的动触点、静触点、支柱连杆及外壳等部分组成。

控制按钮可以做成单式(一个按钮)、复式(两个按钮)和三联式(三个按钮)的形式。为便于识别各个按钮的作用,避免误操作,通常在按钮上作出不同标志或涂以不同颜色,一般红色表示停止按钮,绿色或黑色表示启动按钮。根据工作状态指示和工作情况要求,选择按钮或指示灯的颜色,例如:启动按钮可选用白、灰或黑色,优先选用白色,也允许选用绿色;急停按钮应选用红色;停止按钮可选用黑、灰或白色,优先用黑色,也允许选用红色。



图 6-5 按钮开关

控制按钮在结构上有按钮式、紧急式、钥匙式、旋钮式和保护式五种,可根据使用场合和具体用途来选用。若将按钮的触头封闭于防爆装置中,还可构成防爆型按钮,适用于有爆炸危险、有轻微腐蚀性气体或蒸气的环境以及雨、雪和滴水的场合。

(2) 位置开关

位置开关又称行程开关或限位开关。行程开关种类很多,按其结构可分为直动式、滚轮式和微动式三种。它的动作原理与按钮相同。但它的缺点是触头分合速度取决于生产机械的移动速度,当移动速度低于 0.4m/min 时,触头分断太慢,易受电弧烧损。因此,应采用带有盘形弹簧机构瞬时动作的滚轮式行程开关。

6.4.4 接触器

接触器是电力拖动和自动控制系统中应用最普遍的一种电器。它作为执行元件,可以远距离频繁地自动控制电动机的启动、运转和停止,具有控制容量大,工作可靠,操作频率高(每小时可以带电操作 1 200 次),使用寿命长等优点,因而在电力拖动系统中得到了广泛的应用。

交流接触器按主触点通过的电流种类,分为交流接触器和直流接触器两种。接触器的选用包括:

① 类型的选择。根据所控制的电动机或负载电流类型来选择接触器类型,交流负载应采用交流接触器,直流负载应采用直流接触器。

② 主触点额定电压和额定电流的选择。接触器主触点的额定电压应大于或等于负载电路的额定电压;主触点的额定电流应大于负载电路的额定电流,或者根据经验公式计算

$$I_C = P_N \times 103 / K U_N \quad (\text{适用于 CJ0、CJ10 系列}) \quad (6-24)$$

式中, K 为经验系数,一般取 $1 \sim 1.4$; P_N 为电动机额定功率, kW ; U_N 为电动机额定电

压, V ; I_C 为接触器主触头电流, A 。

如果接触器控制的电动机启动、制动或正反转较频繁, 则一般将接触器主触头的额定电流降一级使用。

③ 线圈电压的选择。接触器线圈的额定电压不一定等于主触头的额定电压, 从设备安全角度考虑, 线圈电压可选得低一些; 但当控制线路简单, 线圈功率较小时, 为了节省变压器, 可选 220V 或 380V。

④ 接触器操作频率的选择。操作频率是指接触器每小时通断的次数。当通断电流较大及通断频率过高时, 会引起触头过热, 甚至熔焊。操作频率超过规定值, 则应选用比额定电流大一级的接触器。

⑤ 触点数量及触点类型的选择。通常接触器的触点数量应满足控制支路数的要求, 触点类型应满足控制线路的功能要求。

6.4.5 继电器

常见的继电器有热继电器、中间继电器、电流继电器、电压继电器、时间继电器、速度继电器、压力继电器等。

(1) 交直流电磁继电器的选用

相对直流电磁继电器几乎所有的交流继电器都存在因衔铁的颤动而引起的交流声。当继电器线圈上的电压(或电流)未达到规定的动作值时, 衔铁颤动会引起触点的抖动, 若触点接通浪涌电流负载, 则颤动引起的电弧就有可能使触点熔化或熔接。

(2) 继电器动作电压的选用

继电器工作时, 线圈应施加额定工作电压(电流), 而不是吸动电压(电流), 从而使继电器线圈电压(或电流)在电源电压(或电流)波动或继电器的使用环境存在机械振动冲击或环境温度升高时, 有一个可靠工作的保险余量。吸动电压(或电流)仅是制造厂约束继电器灵敏度并对其判断考核的参数。继电器的释放电压不一定越大越好。继电器释放时, 若电路中的漏电流太大, 继电器将不能可靠释放。

(3) 继电器负载能力的选用及失效分析

继电器在使用时会是以下几种负载:

① 白炽灯负载。由于白炽灯内钨丝的低态电阻非常小, 故接通瞬间的浪涌电流高达稳态电流的 15 倍。如此大的浪涌电流会使触点迅速熔蚀, 甚至产生熔焊失效。

② 容性负载。容性电路的充电电流, 短路放电电流起始时很大。充电或短路放电时, 触点可能因充电电流太大而产生严重烧蚀或熔焊失效。在使用时, 如能根据电容量的大小, 适当串联限流电阻即可消除这一危害。

③ 电动机负载。电动机静止时输入阻抗非常小, 因此刚刚启动时, 浪涌电流非常大。由于电机负载大小的不同, 它的启动时间有可能很短, 也可能很长, 因而启动浪涌电流也持续同样长的时间。另外用继电器触点作为电动机启闭开关, 关断时继电器必须承受电动机绕组的高感应反电压冲击产生的电弧作用, 因此触点组间的绝缘抗电水平与承受过负载的能力都必须有充分的富余量。

④ 电感器。螺线圈、接触器线圈、扼流圈、电磁铁线圈负载这些负载属于强感性负载。用继电器触点作为此类负载断续自动开关, 当继电器关断时, 线圈中所储存的能量必须通过

断开触点间的电弧释放消耗,往往会导致触头烧蚀,熔焊或绝缘零部件失效等故障。在刚刚接通这些负载时,由于输入阻抗低,如同电动机负载一样,也会产生强大的浪涌电流。

⑤ 直流负载。直流负载比交流负载更难断开,交流电压自动过零时会自动灭弧。直流电压产生电弧并持续不熄直到电弧被拉长(触点间隙增大)而不能自持为止。电弧的能量会使触点产生严重腐蚀、金属转移、飞溅等损伤。

⑥ 交流负载。继电器触点交流额定值仅在规定的频率下适用。不同频率条件下,继电器的切换能力是不同的。在切换不同步的单相交流负载时,会存在相位差,所以应选择触点额定电压为负载电压 2 倍,额定电流为负载电流 4 倍的产品。

⑦ 低电平负载机电流负载。在这一负载作用下,因环境污染,制造过程中的污染而吸附在触点表面上的有机物将进一步聚合,由于负载电平太小而不能击穿有机物或氧化膜,而引起接触电阻增大或不稳定,甚至导致开路失效。

思考题与习题

1. 电动机的三种工作制是如何划分的,不同工作制下的电机容量如何选择?
2. 电动机在使用过程中,电流、功率、温升能否超过额定值?为什么?
3. 在不同的工作情况下,电机选择应注意哪些事项?
4. 什么是低压电器?低压熔断器熔体如何选择?
5. 接触器选用原则有哪些?
6. 继电器负载类型有哪些?



第 7 章 可编程序控制器(PLC)

可编程控制器(Programmable Controller)简称 PC。个人计算机(Personal Computer)也称 PC,为了避免混淆,人们将最初用于逻辑控制的可编程控制器叫做 PLC(Programmable logic Controller)。本书也采用 PLC 作为可编程控制器的简称。

7.1 PLC 的基本结构和原理

PLC 自问世以来,发展极为迅速,世界各国一些著名的电气工厂几乎都在生产 PLC 装置,例如德国的西门子、美国的 AB 和 GE、日本的三菱和欧姆龙等。虽然各种 PLC 的生产厂家各有不同,但是 PLC 的基本结构和原理基本相同。

7.1.1 PLC 的基本结构

PLC 种类繁多,本节以小型 PLC 为例介绍 PLC 的结构组成以及各部分的功能。PLC 的基本结构如图 7-1 所示。

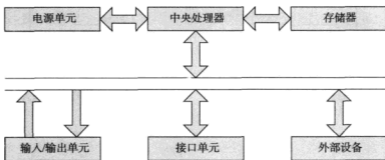


图 7-1 PLC 的基本结构

1. 中央处理器(CPU)

CPU 是计算机的核心,因此它也是 PLC 的核心。它按照系统赋予的功能完成以下主要任务。

- (1) 接收与存储用户由编程器键入的用户程序和数据。
- (2) 检查编程过程中的语法错误,诊断电源及 PLC 内部的工作故障。
- (3) 用扫描方式工作,接收来自现场的输入信号,并输入到输入映像寄存器和数据存储寄存器中。

(4) 在进入运行方式后,从存储器中逐条读取并执行用户程序所规定的逻辑运算、算术运算及数据处理等操作。

(5) 根据运算结果,更新有关标志位的状态,刷新输出映像寄存器的内容,再经输出部件实现输出控制、打印制表或数据通信等功能。

2. 存储器

存储器是具有记忆功能的半导体集成电路,用于存放系统程序、用户程序、逻辑变量和其他信息。系统程序是控制和完成 PLC 多种功能的程序,由生产厂家编写。用户程序是根据生产过程和工艺要求设计的控制程序,由用户编写。

PLC 中常用的存储器有只读存储器(ROM)、随机存储器(RAM)和 EPROM。

3. 输入/输出单元(I/O 单元)

实际生产过程中的信号电平是多种多样的,外部执行机构所需的电平也是千差万别的,而 PLC 的 CPU 所处理的信号只能是标准电平,正是通过输入/输出单元实现了这些信号电平的转换。I/O 单元实际上是 PLC 与被控对象间传递输入/输出信号的接口部件。

(1) 输入接口单元

输入接口单元是 PLC 接收控制现场信息的输入通道。输入接口由光电耦合、输入电路和微处理器输入接口电路组成。一种是直流输入电路,包括光电耦合输入和传感器耦合输入两种,如图 7-2 所示。另一种是交流输入电路,如图 7-3 所示。

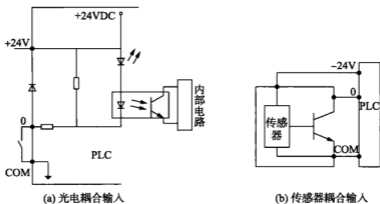


图 7-2 直流输入电路

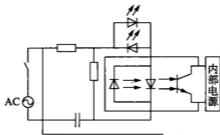


图 7-3 交流输入电路

(2) 输出接口单元

输出接口单元接收主机的输出信息,并进行功率放大和隔离,然后通过输出接线端子向现场输出相应的控制信号。输出接口电路一般由输出接口和隔离电路、功率放大电路组成。

PLC的输出接口单元有三种形式,即继电器输出、晶体管输出和晶闸管(双向可控硅)输出,如图7-4所示。

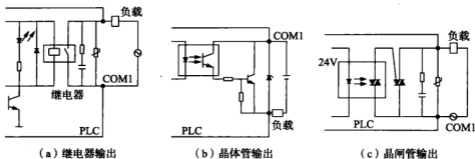


图7-4 输出接口单元

4. 接口单元

接口单元一般包括智能 I/O 接口、扩展接口和通信接口。

智能 I/O 接口是为了适应和满足更加复杂控制功能的需要而出现的。各种不同功能的智能 I/O 接口一般都有独立的微处理器和控制软件,可以独立工作以便减少 CPU 模块的压力。常见的有快速 PID 调节器的闭环控制接口模板,满足位置控制需要的位置闭环控制接口模板。用户可以根据控制系统的特殊要求,选择相应的智能 I/O 接口。

扩展接口有两个含义:一是单纯的 I/O(数字量 I/O 或模拟量 I/O)扩展接口,用于扩展输入/输出点数;二是指 CPU 模块的扩充,它是在原系统中只有一块 CPU 模块而无法满足系统工作要求时使用的。

5. 电源单元

电源单元是将交流电压信号转换成 CPU、存储器及 I/O 单元工作所需要的直流电源。由于 PLC 要用于工业现场的自动控制中,直接受工业干扰的影响,为保证 PLC 内主机可靠工作,电源单元对供电电源采用了较多的滤波环节,对过电压和欠电压都有一定的保护作用。另外采用了较多的屏蔽措施来防止工业环境中的空间电磁干扰。常用的电源电路有串联稳压电路、开关式稳压电路和设有变压器的逆变式电路。供电电源的电压等级常见的有交流(AC)100V、200V,直流(DC)100V、48V、24V 等。

6. 编程器

编程器是 PLC 最重要的外部设备。利用编程器将用户程序送入 PLC 的存储器中,还可以用编程器检查和修改程序,以及监视 PLC 的工作状态。现在普遍采用微机加接口作为编程器使用。

7.1.2 PLC 的基本工作原理

PLC 有两种基本的工作状态,即运行(RUN)状态与停止(STOP)状态(在部分 PLC 中还存在 TEAM 状态)。在运行状态,PLC 通过反映控制要求的用户程序来实现控制功能。为了使 PLC 的输出能及时地响应随时可能变化的输入信号,用户程序不是只执行一次,而是反复不断地重复执行,直至 PLC 停机或切换到 STOP 工作状态。

小型 PLC 的工作过程有两个显著特点:一个是周期性顺序扫描,另一个是集中批处理。

周期性顺序扫描是 PLC 特有的工作方式, PLC 在运行过程中, 总是处于不断循环的顺序扫描过程中。由于 PLC 的 I/O 点数较多, 采用集中批处理的方法, 可以简化操作过程, 便于控制, 提高系统的可靠性。PLC 的另一个主要特点就是对输入采样、执行用户程序、输出刷新实施集中批处理。这同样是为了提高系统的可靠性。

当 PLC 启动后, 先进行初始化操作, 包括对工作内存的初始化、复位所有的定时器、将输入/输出继电器清零, 检查 I/O 单元连接是否完好, 如有异常则发出报警信号。初始化后, PLC 就进入周期扫描过程。小型 PLC 的工作流程如图 7-5 所示。

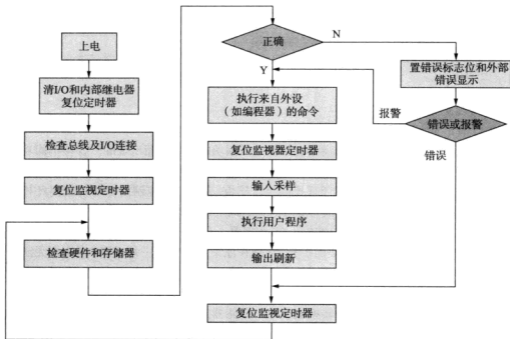


图 7-5 小型 PLC 的工作流程

根据图 7-5 所示, 可将 PLC 的工作过程(周期扫描过程)分为 4 个阶段。即公共处理扫描阶段、输入采样扫描阶段、执行用户程序扫描阶段和输出刷新扫描阶段。后 3 个处理过程如图 7-6 所示。

7.2 PLC 的性能指标

一台 PLC 性能的优劣只有结合各项指标, 才能真正地做出评价与衡量。下面介绍 PLC 的几项主要的性能指标。

1. 存储容量

PLC 内存包含用户存储器和系统存储器两大部分。用户存储器主要用来存储用户程序。系统存储器是与 CPU 配置在一起的。用户存储器的大小与可存储的用户程序量有关, 它决定了用户所编程序的长短, 内存大, 可存储的程序量就大, 因此可以完成更复杂的控制。

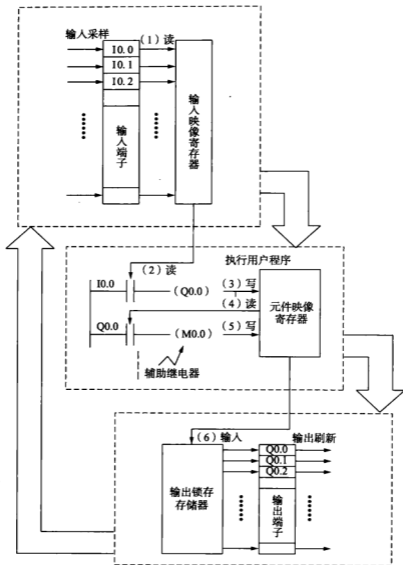


图 7-6 PLC 的三个批处理过程

2. I/O 点数

I/O 点数指的是所能支持的最多可访问的 I/O 端子数,一般大于 PLC 面板上的 I/O 端子的个数。I/O 点数越多,外部可连接的 I/O 器件就越多,控制规模就越大。它是衡量 PLC 性能的重要指标之一。

3. 扫描速度

扫描速度是指 PLC 执行程序的快慢,是一个重要的性能指标,体现了计算机控制取代继电器控制的吻合程度。从自动控制的观点来看,它决定了系统的实时性和稳定性。

4. 指令的多少

它是衡量 PLC 能力强弱的指标,决定了 PLC 的处理能力、控制能力的强弱,限制了计算

机发挥运算功能及完成复杂控制的能力。

5. 内部寄存器的配置和容量

它直接对用户编制程序提供支持,对 PLC 指令的执行速度及可完成的功能提供直接的支持。

7.3 PLC 的编程语言

根据国际电工委员会制定的工业控制编程语言标准(IEC61131-3),PLC 编程语言有 5 种形式:(1)梯形图语言(Ladder Diagram,LAD);(2)语句表语言(Statement List,STL);(3)功能块图语言(Function Block Diagram,FBD);(4)顺序功能图语言(Sequential Function Chart,SFC);(5)结构化文本语言(Structured Text,ST)。不同编程语言编写的程序一般可以相互转换,不同的语言形式可以表达相同的逻辑关系。

1. 梯形图语言

梯形图语言(LAD)是 PLC 程序设计中常用的编程语言,它是与继电器线路类似的一种编程语言。由于电气设计人员对继电器控制较为熟悉,因此,梯形图语言得到了广泛的欢迎和应用。它是一种图形语言,沿用传统控制图中的继电器触点、线圈、串联等术语和一些图形符号。左右的竖线称为左右母线,右边的母线经常省去。

图 7-7 是典型的交流异步电动机直接起动控制电路图,图 7-8 是采用 PLC 控制的梯形图程序。

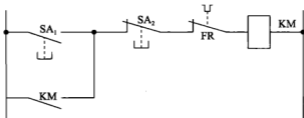


图 7-7 电动机直接启动控制电路图

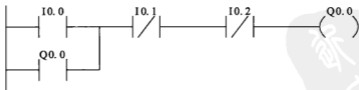


图 7-8 PLC 的梯形图程序

2. 语句表语言

语句表语言(STL)是与汇编语言类似的一种助记符编程语言,与汇编语言一样由操作码和操作数组成。在无计算机的情况下,适合采用 PLC 手持编程器对用户程序进行编制。同时,语句表语言与梯形图语言一一对应,在 PLC 编程软件下一般可以相互转换。图 7-9 就是与图 7-8 所示的 PLC 梯形图对应的指令表。

3. 功能块图语言

功能块图语言(FBD)是与数字逻辑电路类似的一种 PLC 编程语言。功能块图使用类似于布尔代数的图形逻辑符号来表示逻辑控制,一些复杂的功能用指令框表示,适合于有数字电路基础的编程人员使用。功能块图用类似于与门、或门的框图来表示逻辑运算关系,方框的左侧为逻辑运算的输入变量,右侧为输出变量,输入、输出端的小圆圈表示“非”运算,方框用“导线”连在一起,信号自左向右。采用功能块图的形式来表示模块所具有的功能,不同的功能模块有不同的功能。

图 7-10 是对应图 6-7 所示的电动机直接启动的功能块图编程语言的表达方式。

LD	I0.0
O	Q0.0
AN	I0.1
AN	I0.2
=	Q0.0

图 7-9 PLC 的语句表程序

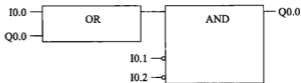


图 7-10 功能块图

4. 顺序功能图语言

顺序功能图语言(SFC)是为了满足顺序逻辑控制而设计的编程语言。编程时将顺序流程动作的过程分成步和转换条件,根据转移条件对控制系统的功能流程顺序进行分配,一步一步地按照顺序动作。每一步代表一个控制功能任务,用方框表示。在方框内含有用于完成相应控制功能任务的梯形图逻辑。这种编程语言使程序结构清晰,易于阅读及维护,大大减轻编程的工作量,缩短编程和调试时间,可用于系统规模较大,程序关系较复杂的场合。图 7-11 是一个简单的顺序功能图语言的示意图。

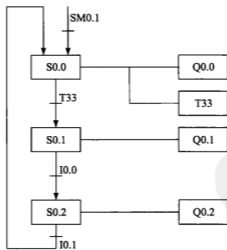


图 7-11 顺序功能图语言的示意图

5. 结构化文本语言

结构化文本语言(ST)是用结构化的描述文本来描述程序的一种编程语言。它是类似于高级语言的一种编程语言,常采用结构化文本来描述控制系统中各个变量的关系,主要用于其他编程语言较难实现的用户程序编制。

大多数 PLC 制造商采用的结构化文本语言与 BASIC 语言、PASCAL 语言或 C 语言等高级语言相类似,但为了应用方便,在语句的表达方法及语句的种类等方面都进行了简化。

7.4 西门子系列 PLC

SIMATIC S7 系列的 PLC 是德国 SIEMENS 公司 1996 年推出的产品,包括小型 PLC S7-200、中型 PLC S7-300 和大型 PLC S7-400。S7-200 系列 PLC 是西门子推出的整体式小型可编程控制器,开始的产品称为 CPU21X,其后的改进型称为 CPU22X,21X 及 22X,各有 4、5 个型号。由于其结构紧凑,功能强,并具有很高的性能价格比,在中小规模控制系统中应用广泛。一台 S7-200 小型 PLC 的主要组成部分包括一个单独的 S7-200 CPU,还可带有各种各样可选择的扩展模块。

SIMATIC S7-200 系列 PLC 适用于各行各业、各种场合中的检测、监测及控制的自动化。S7-200 系列的强大功能使其无论在独立运行中还是相联成网络,皆能实现复杂控制功能。

7.4.1 S7-200 的模块组成

PLC 的大多数产品采用先进的模块化结构,大致可以分为主控模块、电源模块、扩展存储模块、开关量模块、模拟量模块、温度模块、高速计数模块、位置控制模块、通信模块等。在进行系统配置时,只需根据用户的实际需要选取所需的模块进行组合,便可实现用户的要求。

1. 主控模块

主控模块就是人们通常所说的 CPU 模块,在 PLC 控制系统中,主控模块是系统中最重要的模块,PLC 程序的输入、运行和输出都离不开该模块。

S7-200 CPU 模块将一个微处理器、一个集成电源和数字量 I/O 点集成在一个紧凑的封装中,从而形成了一个功能强大的微型 PLC,参见图 7-12。

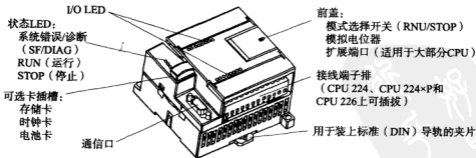


图 7-12 S7-200 CPU 模块

S7-22X 系列 PLC 有 5 种 CPU 模块,CPU 模块共有的技术指标和各 CPU 模块特有的技术指标分别见表 7-1 和表 7-2。表 7-3、表 7-4 和表 7-5 分别为电源、数字量输出和数字量输入的技术指标。

表 7-1 S7-200 CPU 模块共同的技术指标

用户存储器类型	EEPROM
最大数字量 I/O 映像区	128 点入, 128 点出
最大模拟量 I/O 映像区	32 点入, 32 点出
内部标志位(M 寄存器)	256 位
掉电永久保存	112 位
超级电容或电池保存	256 位
定时器总数	256 个
1ms 定时器	4 个
10ms 定时器	16 个
100ms 定时器	256 个
计数器总数(超级电容或电池保存)	256 个
布尔量运算执行速度	0.37 μ s/指令
字传送指令执行速度	34 μ s/指令
定时器/计数器执行速度	50~60 μ s/指令
单精度数学运算执行速度	46 μ s/指令
实数运算执行速度	100~400 μ s/指令
顺序控制继电器	256 点
定时中断	2 个, 1ms 分辨率
硬件输入边沿中断	4 个
可选滤波时间输入	7 个, 0.2~12.8ms

表 7-2 S7-200 CPU 模块的主要技术指标

特 性	CPU221	CPU222	CPU224	CPU224XP	CPU226
外形尺寸/mm	90×80×62	90×80×62	120.5×80×62	120.5×80×62	190×80×62
用户程序大小可以在运行模式下编辑	4096	4096	8192	12288	16384
非运行模式下编辑	4096	4096	12288	16384	24576
数据存储区	2048	2048	8192	10240	10240
掉电保持时间/h	50	50	100	100	100
本机数字量 I/O	6 入/4 出	8 入/6 出	14 入/10 出	24 入/10 出	24 入/16 出
本机模拟量 I/O	无	无	无	2 入/1 出	无
数字量 I/O 映像区	256(128 入/128 出)				
模拟量 I/O 映像区	无	16 入/16 出	32 入/32 出		
扩展模块数量	—	2 个	7 个		

特性	CPU221	CPU222	CPU224	CPU224XP	CPU226
高速脉冲输出	2个(20kHz)	2个(20kHz)	2个(20kHz)	2个(10kHz)	2个(20kHz)
高速计数器	4个		6个 (每个30kHz)	6个	6个
单相	4个30kHz		6个30kHz	4个30kHz或 2个200kHz	6个30kHz
双相	2个20kHz		4个20kHz	3个30kHz或 1个200kHz	2个20kHz
模拟量调节电位器	1个,8位分辨率		2个,8位分辨率		
脉冲捕捉	6	8	14		24
实时时钟	有(时钟卡)	有(时钟卡)	有	有	有
RS-485通信口	1	1	1	2	2
DC 24V电源CPU 输入电流/最大负载	80mA/450mA	86mA/500mA	110mA/700mA	120mA/900mA	150mA/1050mA
AC 240V电源CPU 输入电流/最大负载	15mA/60mA	20mA/70mA	30mA/100mA	35mA/100mA	40mA/160mA

注:CPU224~CPU226的7个扩展模块中,最多只能有2个智能扩展模块EM227。

表 7-3 电源的技术指标

特性	24V电源	AC电源
电源电压允许范围/V	20.4~28.8	85~264V,47~63Hz
冲击电流/A	10(28.8V)	20,254
隔离(输入电源到逻辑电路)	不隔离	耐压1500V
断开电源后的保持时间/ms	10(24V)	80(240V)
DC 24V传感器电源输出	不隔离	不隔离
电压范围/V	15.4~28.8	20.4~28.8
纹波噪声	来自输入电源	峰-峰值<1V
电源的内部熔断器(用户不能更换)	3A,250V,慢速熔断	2A,250V,慢速熔断

表 7-4 S7-200 数字量输出技术指标

特性	DC 24V 输出 (不包括 CPU224XP)	DC 24V 输出 (CPU224XP)	继电器型输出
输出电压额定值	DC 24V	DC 24V	DC 24V 或 AC 250V
输出电压允许范围	DC 20.4~28.8V	DC 20.4~28.8V(Q0.0~Q0.4) DC 5~28.8V(Q0.0~Q0.4)	DC 5~30V, AC 5~250V

续表

特 性	DC 24V 输出 (不包括 CPU224XP)	DC 24V 输出 (CPU224XP)	继电器型输出
输出逻辑 1 信号的电压	最小电流, DC 20V	L+减 0.4V, 最大电流	—
逻辑 0 信号	DC 0.1V(10k Ω 负载时)	DC 0.1V, 10k Ω 负载	—
逻辑 1 信号最大电流	0.75A(电阻负载)	0.75A(电阻负载)	2A(电阻负载)
逻辑 0 信号最大电流	10 μ A	10 μ A	—
灯负载	5W	5W	DC 30W/AC 200W
接通状态电阻	0.3 Ω , 最大 0.6 Ω	0.3 Ω , 最大 0.6 Ω	新品最大 0.002 Ω
浪涌电流	最大 8A(100ms)	最大 8A(100ms)	触点闭合时 7A
每个公共端的额定电流	6A	3.75A	10A
光隔离	AC 500V(1min)	AC 500V(1min)	—
隔离电阻	—	—	新品最小 100M Ω
电阻(逻辑到接点)	—	—	AC 1 500V(1min)
感性嵌位电压	L+减 DC 48V (1W 功耗)	—	—
从关断到接通最大延时	Q0.0 和 Q0.1 为 2 μ s, 其他为 15 μ s	Q0.0 和 Q0.1 为 0.5 μ s, 其他为 15 μ s	—
从接通到关断最大延时	Q0.0 和 Q0.1 为 10 μ s, 其他为 130 μ s	Q0.0 和 Q0.1 为 1.5 μ s, 其他为 130 μ s	—
切换最大延时	—	—	10ms
非屏蔽电缆长度	150m	—	—
屏蔽电缆长度	500m	—	—
DC 5V 电能消耗	50mA	50mA	40mA
从 L+ 端的电能消耗	—	—	接通时每点 9mA
L+ 线圈电压范围	—	—	DC 20.4~28.8V
继电器输出开关延时	—	—	最大 10ms
触点机械寿命	—	—	10 000 000 次, 无负载
额定负载时触点寿命	—	—	100 000 次, 额定负载

用户数据存储单元可永久保存,或用超级电容器和电池保持。超级电容器充电 20min,可充 60% 的电量。可选的存储器可永久保存程序、数据和组态信息,可选的电池卡保存数据的时间典型值为 200 天。

DC 输出型有高速脉冲输出,边沿中断为 4 个上升沿或 4 个下降沿。

S7-200 的 DC 输出型电路用场效应晶体管(MOSFET)作为功率放大元件,继电器输出型用继电器触点控制外部负载。

表 7-5 S7-200 数字量输入技术指标

项 目	DC 24V(不包括 CPU224XP)	DC 24V 输入(CPU224XP)
输入类型	漏型/源型(IEC 类型 1)	漏型/源型(IEC 类型 1, I0.3~I0.5 除外)
输入电压额定值	DC 24V(典型值 4mA)	
输入电压浪涌值	35V/0.5s	
"1"信号(最小)	DC 15V, 2.5mA	10.3~10.5 为 DC 4V, 8mA; 其他为 DC 15V, 2.5mA
"0"信号(最大)	DC 5V, 1mA	10.3~10.5 为 DC 1V, 1mA; 其他为 DC 5V, 1mA
输入延迟	0.2~12.8ms 可选择	
连接 2 线式接近开关的允许漏电流	最大 1mA	
光隔离	AC 500V, 1min	
高速计数器输入	逻辑 1 电平 DC 15~30V; 单相 20kHz, 两相 10kHz; DC 15~26V; 单相 36kHz, 两相 20kHz	
CPU224XP 的 HSC4 和 HSC5	逻辑 1 电平 >DC 4V 时, 单相 200kHz, 两相 100kHz	
电缆长度	非屏蔽 300m, 屏蔽电缆 500m, HSC50m	

2. 数字量 I/O 模块

用户选用具有不同 I/O 点数的数字量扩展模块, 可以满足不同的控制需要, 节约投资费用。系统规模扩大后, 增加 I/O 点数也很方便。用户可选用 8 点、16 点和 32 点的数字量输入/输出模块(见表 7-6), 除 CPU221 外, 其他 CPU 模块均可配接多个扩展模块, 连接时 CPU 模块放在最左侧, 扩展模块用扁平电缆与左侧的模块相连。

表 7-6 数字量扩展模块

型 号	各组输入点数	各组输出点数
EM221 DC 24V 输入	4, 4	—
EM221 AC 230V 输入	8 点相互独立	—
EM222 DC 24V 输出 5A	—	4 点相互独立
EM222 继电器输出 10A	—	4 点相互独立
EM222 AC 230V 输出	—	8 点相互独立
EM222 8 点 DC 24V 输出		4, 4
EM222 8 点继电器输出		4, 4
EM223 DC 24V 数字量 4 输入/4 输出	4	4
EM223 DC 24V 数字量 4 输入/4 继电器输出	4	4
EM223 DC 24V 数字量 8 输入/8 输出	4, 4	4, 4
EM223 DC 24V 数字量 8 输入/8 继电器输出	4, 4	4, 4
EM223 DC 24V 数字量 16 输入/16 继电器输出	8, 8	4, 4, 8
EM223 DC 24V 数字量 16 输入/16 输出	8, 8	4, 4, 4, 8

3. 模拟量 I/O 模块

S7-200 有三种模拟量扩展模块(见表 7-7)。其中, A/D、D/A 转换器的位数均为 12 位。模拟量输入、输出有多种量程供用户选用, 如 DC 0~10V、0~5V、0~1 V、0~500mV、0~50mA、0~100mV、±10V、±5V、±2.5V、±1V、±500mV、±250mV、±100mV、±50mV、±25mV 和 0~20mA 等。量程用模块上的 DIP 开关来设置。

表 7-7 模拟量扩展模块技术数据

模块	EM231	EM232	EM235
点数	4 路模拟量输入	2 路模拟量输出	4 路输入, 1 路输出

4. 智能模块

(1) 热电偶、热电阻扩展模块

EM231 热电偶、热电阻模块具有冷端补偿电路, 如果环境温度迅速变化, 则会产生额外的误差, 建议将热电偶和热电阻模块安装在环境温度稳定的地方。热电偶输入的电位范围为 ±80mV, 模块输出 15 位加符号位的二进制数。EM231 热电偶模块可用于 J、K、E、N、S、T 和 R 型热电偶, 用户用模块下方的 DIP 开关来选择热电偶的类型。

(2) 通信模块

S7-200 系统提供几种通信模块, 以适应不同的通信方案。①EM277: PROFIBUS-DP 从站通信模块, 同时也支持 MPI 从站通信; ②EM241: 调制解调器 (Modem) 通信模块; ③CP243-1: 工业以太网通信模块; ④CP243-1 IT: 工业以太网通信模块, 同时支持 Web/E-mail 等 IT 应用功能; ⑤CP243-2: AS-Interface 主站模块, 可连接最多 62 个 AS-Interface 从站。

(3) 位控模块

EM253 定位处理模块, 支持开环速度和定位控制。一般用于控制步进电动机控制器和伺服电动机控制器。支持 RS-422/RS-485 差动输出和漏极开路输出。每个模块可以控制一个轴, 使用多个模块的情况下仍不能进行复杂的插补计算。

7.4.2 I/O 地址的分配

CPU22X 系列的每种主机都有一定的本机 I/O 点, 本机 I/O 地址是固定的。可以用扩展 I/O 模块来增加 I/O 点数, 扩展模块安装在 CPU 模块右侧, 每个扩展模块的组态地址编号取决于各模块的类型和该模块在 I/O 链中所处的位置。CPU 分配给数字量 I/O 模块的地址以字节(8 位)为单位, 其中未用的位不会分配给 I/O 链中的后续模块。输出模块保留字节中未用的位, 可以像内部存储器一样使用。对于输入模块, 每次更新输入时都将输入字节中未用的位清零, 因此不能将它们用作内部存储器标志位。模拟量扩展模块以 2 点(4 字节)递增的方式来分配地址。

1. 数字量 I/O 编址

对 I/O 地址进行编址的目的是便于 CPU 可以唯一识别每一个 I/O 点。S7-200 数字量的地址是由区域标识符(用字母 I 表示输入, 用字母 Q 表示输出)、字节地址(字节号)和位地址(位号)所组成的, 在字节地址和位地址之间用点分隔。例如, 地址 I3.4, 它的含义解释如图 7-13 所示, 表示在输入映像存储区的第 3 个字节中的第 4 位。

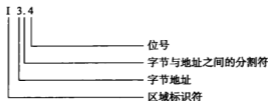


图 7-13 数字量 I/O 编址举例

2. 模拟量 I/O 编址

在读写模拟量模块时,模拟量 I/O 是以字(16 位)为单位的。模拟量输入相当于读操作,模拟量输出相当于写操作。模拟量的 I/O 操作是以端口地址来进行的。模拟量端口地址是由区域标识符(AI 或 AQ)、数据长度(W)以及字节地址(0~30 之间的十进制数)组成。

模拟量端口地址从 0 开始按偶数编址。例如,AIW0、AIW2、AIW4 等。在读写时要注意不能同时对一个端口进行读和写。模拟端口地址举例如图 7-14 所示。

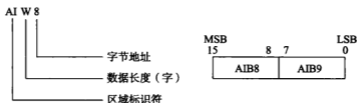


图 7-14 模拟量 I/O 编程举例

3. 扩展模块编址

S7-200 允许通过在 CPU 模块的右侧连接 I/O 模块来增加 I/O 端口,从而形成了所谓的 I/O 链。

例如,某一控制系统选用 CPU224,系统所需的输入输出点数为:24 个数字量输入点、20 个数字量输出点、6 个模拟量输入点和 2 个模拟量输出点。本系统可有多种不同模块的选取组合,并且各模块在 I/O 链中的位置排列方式也可能有多种,图 7-15 所示为其中的一个模块连接形式。表 7-8 为其对应的模块的编址情况。

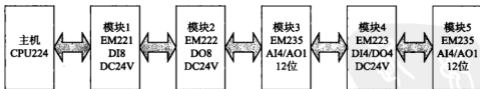


图 7-15 模块连接方式

表 7-8 各模块编址

主机 I/O	模块 1 I/O	模块 2 I/O	模块 3 I/O	模块 4 I/O	模块 5 I/O
IO. 0 Q0. 0	I2. 0	Q2. 0	AIW0 AQW0	I3. 0 Q3. 0	AIW8 AQW4
IO. 1 Q0. 1	I2. 1	Q2. 1	AIW2	I3. 1 Q3. 1	AIW10
IO. 2 Q0. 2	I2. 2	Q2. 2	AIW4	I3. 2 Q3. 2	AIW12

续表

主机 I/O	模块 1 I/O	模块 2 I/O	模块 3 I/O	模块 4 I/O	模块 5 I/O
I0.3 Q0.3	I2.3	Q2.3	AIW6	I3.3 Q3.3	AIW14
I0.4 Q0.4	I2.4	Q2.4			
I0.5 Q0.5	I2.5	Q2.5			
I0.6 Q0.6	I2.6	Q2.6			
I0.7 Q0.7	I2.7	Q2.7			
IL.0-IL.5					
QI.0-QI.1					

7.4.3 S7-200 基本指令系统

1. 指令的基本格式及操作数表示方法

SIMATIC S7 的指令通常由助记符和操作数两部分组成,其格式如下

助记符 操作数

PLC 的这种指令表示方法与计算机的汇编语言的表示方法十分相似,与计算机不同的是在 PLC 中还采用另一种表示指令的方法,即梯形图。它用十分形象的梯形图符号来表明该指令将要完成的操作,并在梯形图符号之上(或之中)注以必要的参数,以表明该指令要对什么样的操作数进行操作。例如,指令 LD I0.0 用梯形图可表示为



指令 NOT 用梯形图可表示为



SIMATIC PLC 中,操作数通常可以由操作数标识符和操作数标识参数这两部分组成

标识符 标识参数

标识符指出了该操作数存放在存储器的哪个区域及操作数的位数。标识参数则进一步指明了操作数所在的存储区的具体位置。

通常标识符又可由两部分组成

区域标识符 操作数(长度 字节/字/双字)

其中,区域标识符可以表示为 I;输入过程映像存储区;Q;输出过程映像存储区;S;顺序控制继电器存储区;L;局部变量存储区;T;定时器存储区;AI;模拟量输入;AQ;模拟量输出;AC;累加器;SM;特殊存储区;HC;高速计数器;M;位存储区;C;计数器存储区;V;变量存储区。

操作数长度可以表示为 X;位;B;字节;W;字;D;双字。

SIMATIC S7 PLC 采用上述的方法,就可以对任一存储区域(V、I、Q、M、S、L、SM 等)中的数据以位、字节、字、双字来进行存取。例如按照位存取的操作数,如图 7-16 所示。

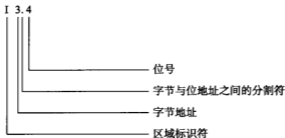


图 7-16 按位存取的示意图

其中，“I”表示输入过程映像存储区，操作数是按位进行存取的，其所在地址在输入映像存储区的第 3 个字节中的第 4 位。

按照字节存取的操作数如图 7-17 所示。

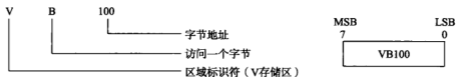


图 7-17 按字节存取的示意图

按照字存取的操作数如图 7-18 所示。

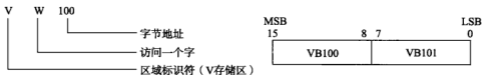


图 7-18 按字存取的示意图

按照双字存取的操作数如图 7-19 所示。

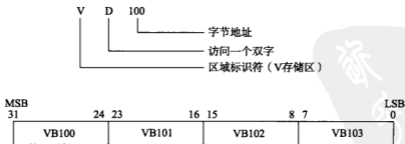


图 7-19 按双字存取的示意图

2. 基本位逻辑指令

触点及线圈是梯形图最基本的元素，从元件角度出发，触点及线圈是元件的组成部分，

线圈得电则该元件的常开触点闭合,常闭触点断开;反之,线圈失电则常开触点恢复断开,常闭触点恢复接通。从梯形图的结构来看,触点是线圈的工作条件,线圈的动作是触点运算的结果。触点指令包括标准触点、立即触点、取反指令及正、负跳变指令,由于触点分常开及常闭两种类型,以上提及的指令又可分为针对常开触点的指令和针对常闭触点的指令。由于触点在梯形图中的位置及与其他触点间的连接关系,触点指令又有触点并联及触点串联两种区别。

立即触点是针对快速输入需要而设立的。立即触点指令的操作数是输入口。立即触点可以不受扫描周期的影响,及时地反映输入状态的变化。

取反指令可改变能流输入的状态,也就是说,当到达取反指令的能流为1时,经过取反指令后能流为0;当到达取反指令的能流为0时,经过取反指令后能流为1。

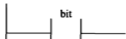
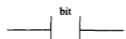
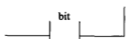
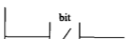
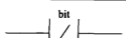
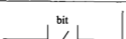
正跳变指令(EU)可用来检测由0到1的正跳变,负跳变指令(DU)可用来检测由1到0的负跳变,正、负跳变允许能流通过一个扫描周期。

表7-9列出了触点指令的类型、梯形图符号及使用说明。

线圈指令含线圈输出指令、立即输出指令及置位(复位)、立即置位(复位)指令等。线圈指令与置位指令的区别在于当线圈的工作条件满足时,线圈有输出,当条件失去时,线圈输出停止。而置位具有保持功能,在某扫描周期中置位发生后,不经复位指令处理,输出将保持不变。

立即置位及立即复位可不受扫描周期的影响,将输出继电器立即置位或复位。表7-10列出了线圈指令的类型、梯形图符号及使用说明。

表 7-9 触点指令

指 令	梯形图符号	数据类型	操作数	指令功能
标准触点 常开	LD 	BOOL	I、Q、V、M、SM、S、T、C、L	常开触点与左侧母线相连接
	A 			常开触点与其他程序段相串联
	O 			常开触点与其他程序段相并联
标准触点 常闭	LDN 			常闭触点与左侧母线相连接
	AN 			常闭触点与其他程序段相串联
	ON 			常闭触点与其他程序段相并联

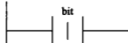

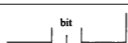
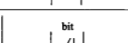
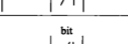
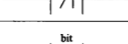
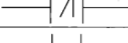
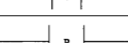
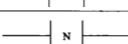



指令		梯形图符号	数据类型	操作数	指令功能
立即触点	常开	LDI 	BOOL	I	常开立即触点与左侧母线相连接
		AI 			常开立即触点与其他程序段相串联
		OI 			常开立即触点与其他程序段相并联
	常闭	LDNI 			常闭立即触点与左侧母线相连接
		ANI 			常闭立即触点与其他程序段相串联
		ONI 			常闭立即触点与其他程序段相并联
取反	NOT 	BOOL	无	改变能流输入的状态	
正负跳变	正 EU 	BOOL	无	检测到一次正跳变, 能流接通一个扫描周期	
	负 ED 		无	检测到一次负跳变, 能流接通一个扫描周期	

表 7-10 线圈输出指令

指令	梯形图符号	数据类型	操作数	指令功能
输出 =		BOOL	I、Q、V、M、SM、S、T、C、L	将新值写入输出点的过程映像寄存器中
立即输出 =1		BOOL	Q	新值同时写到物理输出点和相应的过程映像寄存器中
置位与复位 S		Bit; BOOL N; BYTE	Bit: I、Q、V、M、SM、S、T、C、L N: IB、QB、VB、MB、SMB、SB、LB、AC、* VD、* LD、* AC、常数	将从指定地址开始的 N 个点置位

续表

指令	梯形图符号	数据类型	操作数	指令功能
置位与复位		Bit; BOOL N; BYTE	Bit: I、Q、V、M、SM、S、T、C、L N: IB、QB、VB、MB、SMB、SB、LB、AC、* VD、* LD、* AC、常数	将从指定地址开始的N个点复位
立即置位与立即复位		Bit; BOOL N; BYTE	Bit: I、Q、V、M、SM、S、T、C、L N: IB、QB、VB、MB、SMB、SB、LB、AC、* VD、* LD、* AC、常数	立即将从指定地址开始的N个点置位
		Bit; BOOL N; BYTE	Bit: I、Q、V、M、SM、S、T、C、L N: IB、QB、VB、MB、SMB、SB、LB、AC、* VD、* LD、* AC、常数	立即将从指定地址开始的N个点复位

图7-20给出了触点指令的应用举例。

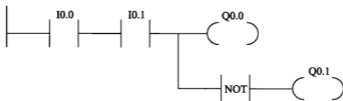


图7-20 触点指令的应用举例

要想激活Q0.0,常开触点I0.0和I0.1必须为接通(闭合)。NOT指令作为一个反向器使用。在RUN模式下,Q0.0和Q0.1具有相反的逻辑状态。

3. 定时器指令

S7-200系列PLC具有接通延时定时器(TON)、有记忆的接通延时定时器(TONR)及断开延时定时器(TOF)三类。相关指令在梯形图中的符号及操作数类型见表7-11。

表7-11 定时器指令

定时器类型	接通延时定时器	有记忆的接通延时定时器	断开延时定时器
指令表达方式	 TON TXX,PT	 TONR TXX,PT	 TOF TXX,PT

定时器类型	接通延时定时器		有记忆的接通延时定时器	断开延时定时器
	操作数的范围及类型	操作数	类别	范围
TXX		WORD	常数(T0~T255)	
IN		BOOL	I、Q、V、M、SM、S、T、C、L、能流	
PT		INT	IW、QW、VW、MW、SMW、SW、LW、T、C、AC、AIW、*VD、*LD、*AC、常数	

每个定时器均有一个 16bit 的当前值寄存器及一个 1bit 的状态位; T-bit(反映其触点状态)。接通延时定时器和有记忆的接通延时定时器在使能输入 IN 接通时计时, 当定时器的当前值大于等于 PT 端的预设值时, 该定时器位被置位。当使能输入 IN 断开时, 接通延时定时器的当前值置 0, 而对于有记忆的接通延时定时器, 其当前值保持不变。因而可以用有记忆接通定时器累计输入信号(IN 端)的接通时间, 其当前值的复位则需用复位指令。当达到预设时间后, 接通延时定时器和有记忆的接通延时定时器继续计时, 直到最大值 32767。

断开延时定时器用于在使能输入 IN 端断开后延时一段时间断开输出。当使能输入 IN 端接通时, 定时器立即接通, 并把当前值设为 0。当输入断开时, 从输入信号接通到断开的负跳变启动计时。当达到预设时间值 PT 时, 定时器断开, 并且停止当前值计时。当输入断开的的时间小于预设值时, 定时器保持接通。

表 7-12 所示为接通延时定时器指令的梯形图及语句表, 图 7-21 是该指令的时序图, 图中定时器 T37 当 I0.0 接通时开始计时, 计时到设定值 1s 时状态位置 1, 其常开触点接通, 驱动 Q0.0 有输出; 其后当前值仍增加, 但不影响状态位。当 I0.0 断开时, T37 复位, 当前值清零, 状态位也清零, 即恢复到原始状态。若 I0.0 接通时间未到设定值就断开, 则 T37 跟随复位, Q0.0 不会有输出。

表 7-12 接通延时定时器指令的梯形图及语句表

梯 形 图	说 明	语句表程序
	I0.0 ON 时 100ms 定时器 T37 在(10× 100ms=1s)后到时 I0.0 ON, T37 使能 I0.0 OFF, 禁止并复 位 T37	<pre> 网络 1 LD I0.0 TON T37, +10 </pre>
	定时器 T37 控 制 Q0.0	<pre> 网络 2 LD T37 =Q0.0 </pre>

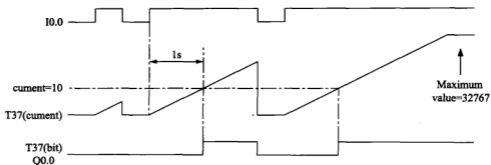


图 7-21 接通延时定时器指令的时序图

4. 计数器指令

S7-200 PLC 有加(增)计数器、减计数器及加/减计数器三类计数器指令。加计数指令(CTU)在每一个 CU 输入状态从低到高时增计数。当计数器当前值大于等于预置值 PV 时,计数器位 C 置位。当复位端 R 接通或执行复位指令后,计数器复位。当达到最大值 32767 后,计数器停止计数。

计数器的 STL、LAD 形式如表 7-13 所示。

表 7-13 计数器指令

计数器指令类型	加计数器指令		减计数器指令		加减计数器指令	
指令的表达形式	CTU CXX,PT 		CTD CXX,PT 		CTUD CXX,PT 	
操作数的范围及类型	输入/输出	类型	操作数			
	CXX	WORD	常数(C0~C255)			
	CU,CD,LD,R	BOOL	I、Q、V、M、SM、S、T、C、L、能流			
	PT	INT	IW、QW、VW、MW、SMW、SW、LW、T、C、AC、AIW、*VD、*LD、*AC、常数			

计数器减计数指令的应用举例见表 7-14 和图 7-22。增/减计数器的计数范围为 $-32768 \sim 32768$, 当达到最大值 32768 时,再来一个加计数脉冲,则当前值转为 -32768 。同样达到最小值 -32768 时,再来一个减计数脉冲,则当前值转为最大值 32768。

表 7-14 计数器减计数指令的应用举例

梯 形 图	说 明	语句表程序
	<p>当 I0.0 断开时,减计数器 C1 的当前值从 3 变到 0; I0.0 的上升沿使 C1 的当前值递减。I0.1 接通时装载预置值 3</p>	<p>网络 1 LD I0.1 CTU C1,3</p>
	<p>当计数器 C1 的当前值=0 时,C1 接通</p>	<p>网络 2 LD C1 =Q0.0</p>

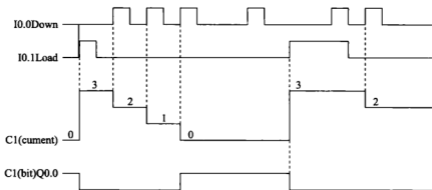


图 7-22 减计数器指令时序图

7.5 PLC 控制系统设计的内容步骤

7.5.1 PLC 应用系统设计的基本原则

PLC 是一种计算机化的高科技产品,相对于继电器而言其价格相对较高。因此,如果被控系统很简单,I/O 点数很少,或者 I/O 点数虽然多,但是控制要求并不复杂,就可以考虑继电器控制的方法,而没有必要使用 PLC。通常在下列情况下,可以考虑使用 PLC:

(1) 系统的开关量 I/O 点数很多,控制要求复杂。如果用继电器控制,需要大量的中间继电器、时间继电器、计数器等器件。

(2) 系统对可靠性的要求比较高,继电器控制不能满足要求。

(3) 由于生产工艺流程或产品的变化,需要经常改变系统的控制关系,或者需要经常修改多项控制参数。

(4) 可以用一台 PLC 控制多台设备的系统。

7.5.2 系统设计和调试的主要步骤

在现代化的工业生产设备中,有大量的数字量及模拟量的控制装置,例如电动机的启停,电磁阀的开闭,产品的计数,温度、压力、流量的设定与控制等。PLC 是解决工业现场中这些自动控制问题的最有效的工具之一。PLC 应用系统设计与调试的主要步骤如图 7-23 所示。

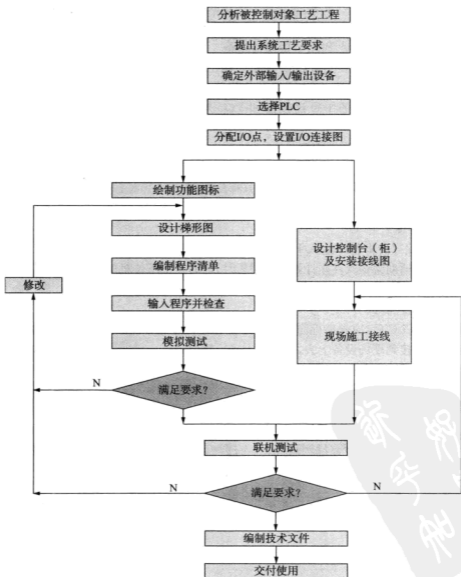


图 7-23 PLC 应用系统设计与调试的主要步骤

(1) 深入了解和分析被控对象的工艺过程和控制要求

系统的设计应首先详细分析被控对象的工艺过程及工作特点,了解被控对象机、电、液之间的配合,然后提出被控对象对 PLC 控制系统的控制要求,确定控制方案,拟定设计任务书。

(2) 确定 I/O 设备

根据系统的控制要求,确定系统所需的全部输入设备(如按钮、位置开关、转换开关及各种传感器等)和输出设备(如接触器、电磁阀、信号指示灯及其他执行器等),从而确定与 PLC 有关的输入/输出设备,以确定 PLC 的 I/O 点数。

(3) 选择合适的 PLC 类型

根据已确定的用户 I/O 设备,统计所需的输入信号和输出信号的点数,选择合适的 PLC 类型,包括机型的选择、容量的选择、I/O 模块的选择及电源模块的选择等。

(4) 分配 I/O 点并设计 PLC 外围硬件线路

分配 I/O 点;画出 PLC 的 I/O 点与输入/输出设备的连接图或对应关系表。

设计 PLC 外围硬件线路;画出系统其他部分的电气线路图,包括主电路和未进入 PLC 的控制电路等。由 PLC 的 I/O 连接图和 PLC 外围电气线路图组成应用系统的电气原理图。

(5) 设计应用系统梯形图程序

根据工作功能图表或状态流程图等设计出梯形图即编程。这一步是整个应用系统设计的核心工作,也是比较困难的一步,要设计好梯形图,首先要熟悉控制要求,同时还要有一定的电气设计的实践经验。

(6) 将程序输入 PLC

使用简易编程器将程序输入 PLC 时,需要先将梯形图转换成指令助记符,以便输入。当使用 PLC 的辅助编程软件在计算机上编程时,可通过上下位机的连接电缆将程序下载到 PLC 中去。

(7) 进行软件测试

程序输入 PLC 后,应先进行测试。因为在程序设计过程中,难免会有疏漏的地方。因此在将 PLC 连接到现场设备上之前,必须进行软件测试,以排除程序中的错误,同时也为整体调试打好基础,缩短整体调试的周期。

(8) 应用系统整体调试

在 PLC 软硬件设计和控制柜及现场施工完成后,就可以进行整个系统的联机调试,如果控制系统是由几个部分组成的,则应先进行局部调试,然后再进行整体调试;如果控制程序的步骤较多,则可先进行分段调试,然后再连接起来总调。调试中发现的问题,要逐一排除,直至调试成功。

(9) 编制技术文件

系统技术文件包括说明书、电气原理图、电气控制装置图、电气元件明细表、PLC 梯形图。

7.6 PLC 的硬件设置

7.6.1 PLC 型号的选择

目前,国内外众多的生产厂家提供了多种功能各异的 PLC 产品,应用中应该全面权衡利弊、合理地选择机型才能达到经济实用的目的。一般选择机型要以满足系统功能需要为宗旨,不要盲目贪大求全,以免造成投资和设备资源的浪费。机型的选择可从以下几个方面来考虑。

1. 对输入/输出点的选择

盲目选择点数多的机型会造成一定浪费。所以要先弄清楚控制系统的 I/O 总点数,再按实际所需总点数的 15%~20% 留出备用量(为系统的改造等留有余地)后确定所需 PLC 的点数。

2. 对存储容量的选择

对存储容量用户只能作粗略的估算。在仅对开关量进行控制的系统中,可以用输入总点数乘 10 字/点+输出总点数乘 5 字/点来估算;计数器/定时器按(3~5)字/个估算;有运算处理时按(5~10)字/点估算;在有模拟量输入/输出的系统中,可以按每输入(或输出)一路模拟量约需(80~100)字左右的存储容量来估算;有通信处理时按每个接口 200 字以上的数量粗略估算。最后,一般按估算容量的 50%~100% 留有裕量。对缺乏经验的设计者,选择容量时留有的裕量应大些。

3. 对 I/O 响应时间的选择

PLC 的 I/O 响应时间包括输入电路延迟、输出电路延迟和扫描工作方式引起的时间延迟(一般在 2~3 个扫描周期)等。对开关量控制的系统,PLC 和 I/O 响应时间一般都能满足实际工程的要求,可不必考虑 I/O 响应问题。但对模拟量控制的系统,特别是闭环系统就要考虑这个问题。

4. 根据输出负载的特点选型

不同的负载对 PLC 的输出方式有不同的要求。例如,频繁通断的感性负载,应选择晶体管或晶闸管输出型,而不应选用继电器输出型。但继电器输出型的 PLC 有许多优点,如导通压降小,有隔离作用,价格相对较便宜,承受瞬时过电压和过电流的能力较强,负载电压灵活(可交流、可直流)且电压等级范围大等。所以动作不频繁的交流、直流负载可以选择继电器输出型的 PLC。

5. 控制功能的选择

包括运算功能、控制功能、通信功能、编程功能、诊断功能和处理速度等特性的选择。

6. 机型的选择

(1) PLC 的类型

PLC 按结构分为整体型和模块型两类,按应用环境分为现场安装和控制室安装两类;按 CPU 字长分为 1bit、4bit、8bit、16bit、32bit、64bit 等。从应用角度出发,通常可按控制功能或输入/输出点数选型。

整体型 PLC 的 I/O 点数固定,因此用户选择的余地较小,常用于小型控制系统;模块型 PLC 提供多种 I/O 卡件或插卡,因此用户可较合理地选择和配置控制系统的 I/O 点数,功能扩展方便灵活,一般用于大中型控制系统。

(2) 输入/输出模块的选择

输入/输出模块的选择应考虑与应用要求的统一。可根据应用要求,合理选用智能型输入/输出模块,以便提高控制水平和降低应用成本。同时考虑是否需要扩展机架或远程 I/O 机架等。

(3) 电源的选择

PLC 的供电电源,除了要根据产品说明书的要求进行设计和选用外,一般 PLC 的供电电源应设计选用 220V AC 电源,与国内电网电压一致。重要的应用场合,应采用不间断电源或稳压电源供电。

(4) 存储器的选择

由于计算机集成芯片技术的发展,存储器的价格已下降,因此,为保证应用项目的正常运转,PLC 的存储器容量一般按 256 个 I/O 点至少选 8KB 存储器选择。控制功能复杂时,应选择容量更大、档次更高的存储器。

7.6.2 I/O 模块的选择

I/O 模块是 PLC 的 CPU 与现场用户设备进行联系的桥梁。PLC 通过其 I/O 接口模块检测被控对象的各种参数,并以这些现场数据作为控制器对被控对象进行控制的信息。同时,控制器通过 I/O 模块将控制器的处理结果送给被控对象,以驱动各种执行机构实现控制功能。

一般来说,I/O 模块的价格占 PLC 价格的一半以上。PLC 的 I/O 模块有开关量 I/O 模块、模拟量 I/O 模块及各种特殊功能模块等。不同的 I/O 模块,其电路及功能也不同,直接影响 PLC 的应用范围和价格,应当根据实际需要加以选择。

1. 开关量 I/O 模块的选择

(1) 开关量输入模块的选择

开关量输入模块用来接收现场输入设备的开关信号,将信号转换为 PLC 内部接受的低电压信号,并实现 PLC 内、外信号的电气隔离。选择时主要应考虑以下几个方面:

① 输入信号的类型及电压等级。开关量输入模块有直流输入、交流输入、交流/直流输入三种类型,主要根据现场输入信号以及周围环境等因素进行模块选择。直流输入模块的延迟时间较短,还可以直接与接近开关、光开关等电子输入设备连接;交流输入模块可靠性好,能够在有油雾、粉尘的恶劣环境下使用。

开关量输入模块输入信号的电压等级有:DC 5V、12V、24V、48V、60V 等;AC 110V、220V 等。选择时主要根据现场输入设备与输入模块之间的距离来考虑。一般 5V、12V、24V 用于传输距离较近的场所,如 5V 输入模块最远不得超过 10m。距离较远的应选用输入电压等级较高的模块。

② 输入接线方式。开关量输入模块主要有汇点式和分组式两种接线方式,如图 7-24 所示。

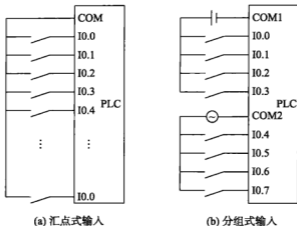


图 7-24 开关量输入模块的接线方式

汇点式的开关量输入模块所有输入点共用一个公共端(COM);而分组式的开关量输入模块是将输入点分成若干组,每一组(几个输入点)有一个公共端,各组之间是分隔的。分组式的开关量输入模块价格较汇点式的高,如果输入信号之间不需要分隔,一般选用汇点式的。

③ 注意同时接通的输入点数量。对于选用高密度的输入模块(如 32 点、48 点等),应考虑该模块同时接通的点数一般不要超过输入点数的 60%。

④ 输入门槛电平。为了提高系统的可靠性,必须考虑输入门槛电平的大小。门槛电平越高,抗干扰能力越强,传输距离也越远。

(2) 开关量输出模块的选择

开关量输出模块是将 PLC 内部低电压信号转换成驱动外部输出设备的开关信号,并实现 PLC 内外信号的电气隔离。选择时主要考虑以下几个方面:

① 输出方式。开关量输出模块有继电器输出、晶闸管输出和晶体管输出三种方式。继电器输出的价格便宜,既可以用于驱动交流负载,又可用于驱动直流负载,而且适用的电压范围较宽、导通压降小,同时承受瞬时过电压和过电流的能力较强,但其属于有触点元件,动作速度较慢(驱动感性负载时,触点动作频率不得超过 1Hz)、寿命较短、可靠性较差,只能适用于不频繁通断的场合。

对于频繁通断的负载,应该选用晶闸管输出或晶体管输出,它们属于无触点元件。但晶闸管输出只能用于交流负载,而晶体管输出只能用于直流负载。

② 输出接线方式。开关量输出模块主要有分组式和分隔式两种接线方式,如图 7-25 所示。

分组式输出是几个输出点为一组,一组有一个公共端,各组之间是分隔的,可分别用于驱动不同电源的外部输出设备;分隔式输出是每一个输出点有一个公共端,各输出点之间相互隔离。选择时主要根据 PLC 输出设备的电源类型和电压等级来确定。一般整体式 PLC 既有分组式输出,也有分隔式输出。

③ 驱动能力。开关量输出模块的输出电流(驱动能力)必须大于 PLC 外接输出设备的额定电流。用户应根据实际输出设备的电流大小来选择输出模块的输出电流。如果实际输出设备的电流较大,输出模块无法直接驱动,可增加中间放大环节。

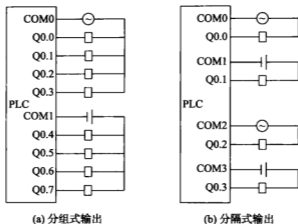


图 7-25 开关量输出模块的接线方式

④ 注意同时接通的输出点数量。选择开关量输出模块时,还应考虑能同时接通的输出点数量。同时接通输出设备的累计电流值必须小于公共端所允许通过的电流值,如一个 220V/2A 的 8 点输出模块,每个输出点可承受 2A 的电流,但输出公共端允许通过的电流并不是 16A(8×2A),通常要比此值小得多。一般来讲,同时接通的点数不要超出同一公共端输出点数的 60%。

⑤ 输出的最大电流与负载类型、环境温度等因素有关。开关量输出模块的技术指标与不同的负载类型密切相关,特别是输出的最大电流。另外,晶闸管的最大输出电流随环境温度升高会降低,在实际使用中也应注意。

2. 模拟量 I/O 模块的选择

模拟量 I/O 模块的主要功能是数据转换,并与 PLC 内部总线相连,同时为了安全也有电气隔离功能。模拟量输入(A/D)模块是将现场由传感器检测而产生的连续的模拟量信号转换成 PLC 内部可接受的数字量;模拟量输出(D/A)模块是将 PLC 内部的数字量转换为模拟量信号输出。

典型模拟量 I/O 模块的量程为 $-10\sim+10\text{V}$ 、 $0\sim+10\text{V}$ 、 $4\sim20\text{mA}$ 等,可根据实际需要选用,同时还应考虑其转换时间和转换精度等因素。

一些 PLC 制造厂家还提供特殊模拟量输入模块,可用来直接接收低电平信号(如 RTD、热电偶等信号)。

3. 特殊功能模块的选择

随着 PLC 的发展,各个生产厂家都在大力开发各种智能 I/O 模块。智能 I/O 模块不同于一般的 I/O 模块,它自身带有微处理芯片、系统程序、存储器等。智能接口模块通过系统总线与 CPU 模块相连,并在 CPU 模块的协调管理下独立进行工作,提高了处理速度,便于应用。同时智能 I/O 模块自身也是一个完整的微处理器系统,它大大增强了 PLC 的能力。一般的智能 I/O 模块包括通信处理模块、高速计数模块、带有 PID 调节的模拟量控制模块、中断控制模块、数字位置译码模块、阀门控制模块、ASCII/Basic 模块等。值得指出的是智能 I/O 模块价格都比较昂贵,而有些功能采用一般 I/O 模块通过增大软件的工作量也可实现,因此应根据实际情况决定取舍。

4. 其他外设的选择

(1) 编程器的选择

S7-200 的编程软件:STEP7—Micro/WIN。该编程软件可以方便、快捷地在 Windows 环境下对 PLC 进行编程、调试、监控。可以说,S7-200 可以完美地满足各种小规模控制系统的要求。

(2) 存储器的选择

为了防止由于干扰或锂电池电压不足等原因破坏 RAM 中的用户程序,可选用 EEPROM 存储器,通过它将用户程序固化在 EEPROM 中。有些 PLC 或其编程器本身就具有 EEPROM 存储的功能。

7.6.3 输入/输出点的配置

一般输入点和输入信号、输出点和输出控制是一一对应的。分配好后,按系统配置的通道与触点号,分配给每一个输入信号和输出信号,即进行编号。在个别情况下,也有两个信号用一个输入点的,那样就应在接入输入点前,按逻辑关系接好线(如两个触点先串联或并联),然后再接到输入点。

(1) 确定 I/O 通道范围

不同型号的 PLC,其输入/输出通道的范围是不一样的,应根据所选 PLC 型号来确定,绝不可“张冠李戴”。

(2) 内部辅助继电器

内部辅助继电器不对外输出,不能直接连接外部器件,而是在控制其他继电器、定时器/计数器时作数据存储或数据处理用。从功能上讲,内部辅助继电器相当于传统电控柜中的中间继电器。

(3) 数据存储器

在数据存储、数据转换以及数据运算等场合,经常需要处理以通道为单位的数据,此时应用数据存储器是很方便的。数据存储器中的内容,即使在 PLC 断电、运行开始或停止时也能保持不变。数据存储器也应根据程序设计的需要来合理安排,详细列出各数据存储器通道在程序中的用途,以避免重复使用。

7.7 PLC 的软件设计

7.7.1 PLC 应用系统的软件设计过程

PLC 应用系统的软件设计过程如图 7-26 所示。主要包括:(1)制定运行方案;(2)画控制流程图;(3)制定抗干扰措施;(4)编写程序;(5)软件测试。

程序测试时应重点注意的问题有:(1)程序能否按设计要求运行;(2)各种必要的功能是否具备;(3)发生意外事故时能否作出正确的响应;(4)对现场干扰等环境因素的适应能力如何。

经过测试、排错和修改后,证明程序基本正确,可到控制现场试运行来进一步查看系统

的整体效果。经过一段时间试运行,证明系统性能稳定,工作可靠并已达到设计要求,就可以把程序固化到 EPROM 或 EEPROM 芯片中,正式投入运行了。

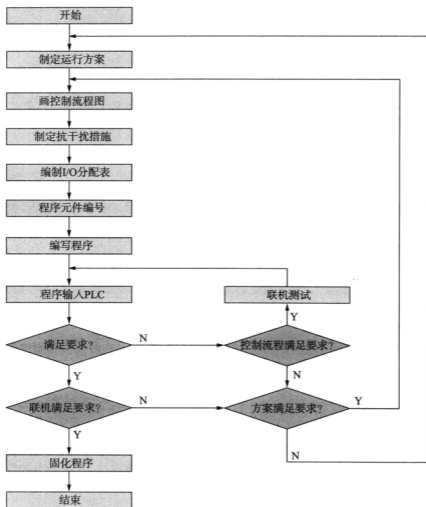


图 7-26 PLC 应用系统的软件设计过程

7.7.2 常用的程序设计方法

作为专门为工业控制而开发的自控装置,PLC 的主要使用者是工厂的电气技术人员,考虑到他们的传统习惯以利于使用和推广普及,PLC 通常不采用微机的编程语言,而采用梯形图语言、指令助记符语言、控制系统流程图语言、布尔代数语言等。在这些语言中,尤以梯形图、指令助记符语言最为常用。

梯形图与电器控制系统的电路图很相似,具有直观易懂的优点,很容易被工厂电气人员掌握,特别适合于开关量逻辑控制。梯形图常被称为电路或程序,梯形图的设计称为编程。

(1) 基本概念

① 软继电器:PLC 梯形图中的某些编程元件沿用了继电器这一名称,如输入继电器、输

出继电器、内部辅助继电器等,但是它们不是真实的物理继电器,而是一些存储单元(软继电器),每一个软继电器都与 PLC 存储器中映像寄存器中的一个存储单元相对应。

② 母线:梯形图两侧的垂直公共线称为母线(Bus Bar)。

③ 能流(Power Flow):“能流”是一种假想的“概念电流”或“能量流”。“能流”只能从左右流动,这与执行用户程序时的逻辑运算顺序是一致的。在图 7-27 中,把左边的母线假设为电源“火线”,而把右边的母线(如虚线所示)假想为电源“零线”。如果有“能流”从左至右流向线圈,则线圈被激励。如果没有“能流”,则线圈不被激励。

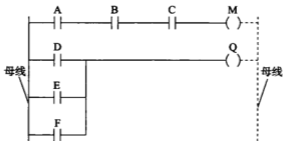


图 7-27 典型的梯形图

要强调的是,引入“能流”的概念仅仅是用于告诉人们如何来理解梯形图各输出点的动作,实际上并不存在这种“能流”。

④ 梯形图的逻辑解算:根据梯形图中各触点的状态和逻辑关系,求出与图中各线圈对应的编程元件的状态,称为梯形图的逻辑解算。梯形图中逻辑解算是按从左至右、从上到下的顺序进行的。

(2) 梯形图的结构规则

梯形图作为一种编程语言,绘制时应有一定的规则。在编辑梯形图时,要注意以下几点:

① 梯形图的各支路,要以左母线为起点,从左向右分行绘出。每一行的前部是触点群组成的“工作条件”,最右边是线圈或功能框表达的“工作结果”。一行绘制结束,依次自上而下再绘下一行。

② 触点应画在水平线上,不能画在垂直分支线上。如图 7-28(a)中触点 3 被画在垂直线上,这样就很难正确识别它与其他触点的关系。因此,应根据自左至右、自上而下的原则画成如图 7-28(b)所示的形式。

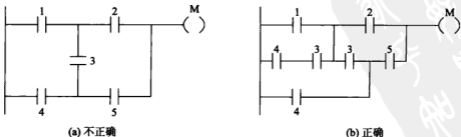


图 7-28 梯形图绘制举例

③ 不包含触点的分支应放在垂直方向,不可放在水平位置,以便于识别触点的组合和对输出线圈的控制路径,如图 7-29 所示。

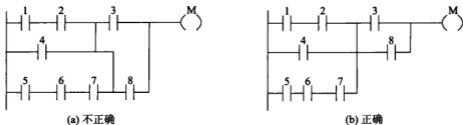


图 7-29 梯形图绘制举例

④ 在有几个串联回路并联时,应将触点最多的那个串联回路放在梯形图的最上面。在有几个并联回路串联时,在不改变系统控制性能的前提下,应将触点最多的并联回路放在梯形图的最左边。这样,才能使编制的程序简洁明了,如图 7-30 所示。

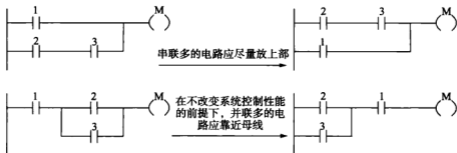


图 7-30 梯形图绘制说明

另外,在设计梯形图时输入继电器的触点状态最好按输入设备全部为常开进行设计,这样不容易出错。建议用户尽可能用输入设备的常开触点与 PLC 输入端连接,如果某些信号只能用常闭输入,可先按输入设备为常开来设计,然后将梯形图中对应的输入继电器触点取反(常开改成常闭、常闭改成常开)。

(3) 语句表的编辑规则

有许多场合需要由绘制好的梯形图列写语句表。这时,要根据梯形图上的符号及符号间的位置关系正确地选取指令并注意正确的表达顺序。

① 列写指令的顺序务必按照从左到右、自上而下的原则进行。图 7-31(a)中梯形图在列写语句表时的编程顺序如图 7-31(b)所示。

② 在处理比较复杂的触点结构时,如触点块的串联、并联或堆栈相关指令,语句表的表达顺序为:先写出参与因素的内容,再表达参与因素间的关系。图 7-31(b)中步骤③及⑧对应的指令为 OLD 及 ALD,在编写时不可遗漏。

(4) 双线圈输出问题

在梯形图中,线圈前面的触点代表输出的条件,线圈代表输出。在同一程序中,某个线圈的输出条件可以非常复杂,但却应是唯一且集中表达的。由 PLC 的操作系统引出的梯形图编绘法则规定,某个线圈在梯形图中只能出现一次,如果多次出现,则称为双线圈输出。且认定,程序中存在双线圈输出时,前面的输出无效,最后一次输出才是有效的。本事件的特例是:同一程序的两个绝不会同时执行的程序段中可以有相同的输出线圈。

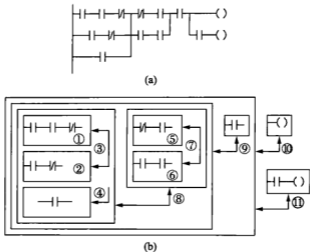


图 7-31 由梯形图列写语句表的顺序

思考题与习题

1. PLC 的基本结构包含哪些单元?
2. PLC 中的 CPU 起到什么功能?
3. 存储器分为哪几种,各有什么特点?
4. PLC 的工作过程分为哪几个阶段,各阶段的作用是什么?
5. 从哪些方面能反映 PLC 的性能?
6. PLC 的编程语言有几种?
7. 请简述 PLC 的模块组成,模块相互之间如何联接?
8. 西门子 S7-200 PLC 分别有几个定时器、计数器、中断、数字量 I/O 以及模拟 I/O?
9. 模拟量 I/O 模块有什么作用,其输出输入是如何对应的?
10. 在 SIMATIC S7 的指令的区域标识符中 AC、AQ、T 分别表示什么?
11. 基本的触点指令包括了哪些? 请画出它们的梯形图符号。
12. 在 SIMATIC S7 的指令中定时器分为哪几种,各自怎么使用?
13. 在 SIMATIC S7 的指令中计数器分为哪几种,各自怎么使用?
14. 在怎样的工业控制要求中需要采用 PLC,当采用 PLC 时其设计步骤有哪些?
15. PLC 软件设计中语句表编写的规则有哪些?
16. 选用 S7-200 PLC 设计实现三相交流异步电动机的启动、停止和正反转。要求编制输入/输出分配表并绘制梯形图。
17. 选用 S7-200 PLC 设计实现交通灯的逻辑控制。延时和显示时间选定在 0~130s 之内。要求编制输入/输出分配表并绘制梯形图。

第 8 章 变 频 器

经过大约 30 年的发展,目前交流调速电气传动已经上升为电气调速传动的主流。在电气调速传动领域内,由直流电动机占统治地位的局面已经受到了猛烈的冲击。

目前人们所说的交流调速传动,主要是指采用电子式电力变换器对交流电动机的变频调速传动。除变频以外的另一些简单的调速方案,例如变极调速、定子调压调速、转差离合器调速等,虽然仍在特定场合有一定的应用,但由于其性能较差,终将会被变频调速所取代。

交流调速传动控制技术之所以发展得如此迅速,和一些关键性技术的突破性相关,如电力电子器件(包括半控型和全控型器件)的制造技术、基于电力电厂电路的电力变换技术、交流电机的矢量变换控制技术、PWM(Pulse Width Modulation)技术以及以微型计算机和大规模集成电路为基础的全数字化控制技术等。

交流电动机大多数调速方案的基本原理很早以前就已经确立了。仅是由于电力变换技术和控制手段的制约,有的被限制在实验室中,有的虽付诸实用也因稳定性、可靠性及维护等方面的某些不足,在当时历史条件下使用范围受到一定的限制。20 世纪 60 年代中期,普通晶闸管、小功率晶体管的实用化,使交流电动机变频调速也进入了实用化。采用晶闸管的同步电动机自控式变频调速系统,采用电压型或电流型晶闸管变频器的笼型异步电动机调速系统(包括变频方案的绕线转子异步电动机的串级调速系统)等先后实现,使变频调速开始成为交流调速的主流。此后的 20 多年中,电力电子技术和微电子技术以惊人的速度向前发展,变频调速传动技术也随之取得了日新月异的进步。

8.1 通用变频器的基本工作原理

8.1.1 基本控制方式

改变异步电动机的供电频率 f_1 , 可以改变其同步转速 n , 实现电动机的调速运行。但是由电机理论可知,三相异步电动机每相定子绕组电动势有效值为

$$E_1 = 4.44k_{r1}f_1N_1\Phi_M \quad (8-1)$$

式中, E_1 为每相定子绕组在气隙磁场中感应的电动势有效值, V ; f_1 为定子频率, Hz ; N_1 为定子每相绕组的有效匝数; k_{r1} 为与绕组有关的结构常数; Φ_M 为每极气隙磁通量, Wb 。

由式(8-1)可知,如果定子每相绕组的电动势有效值 E_1 不变,而单纯改变定子的频率时会出现两种情况:① 如果 f_1 大于电动机的额定频率 f_N , 则气隙磁通 Φ_M 就会小于额定气隙磁通,结果电动机的铁芯得不到充分利用,造成浪费;② 如果 f_1 小于电动机的额定频率,气隙磁通 Φ_M 就会大于额定气隙磁通,结果电动机的铁芯出现过饱和,电动机处于过励磁状态,

励磁电流过大,使电动机功率因数和效率下降,严重时会使绕组过热而烧坏电动机。

因此,要实现变频调速,在不损坏电动机的情况下充分利用铁芯,应使每极气隙磁通 Φ_M 保持额定值不变,即 $E_1/f_1 = \text{常数}$ 。

1. 基频以下的恒磁通变频调速

由式(8-1)可知:要保持磁通量 Φ_M 不变,当频率 f_1 从额定值 f_{1N} 向下调时,必须降低 E_1 才能使 $E_1/f_1 = \text{常数}$,即采用电动势与频率之比为常数的控制方式。但绕组中的感应电动势 E_1 不易直接控制,当电动势的值较高时,定子的漏阻抗压降相对比较小,可忽略不计,可以认为电动机的输入电压 $U_1 = E_1$,这样就可以达到通过控制 U_1 来达到控制 E_1 的目的;当频率较低时, U_1 和 E_1 都变小,定子漏阻抗压降(主要是定子电阻压降)不能再忽略,这种情况下,可人为地适当提高定子电压以补偿定子漏阻抗压降的影响,使气隙磁通基本保持不变。这种基频以下的恒磁通变频调速属于恒转矩调速方式。

2. 基频以上的弱磁通变频调速

在基频以上调速时,频率可以从电动机额定频率 f_{1N} 向上增加,但电压 U_1 受额定电压 U_{1N} 的限制不能再升高,只能保持 $U_1 = U_{1N}$ 不变。由式(8-1)可知,这样必然会使气隙磁通随着 f_1 的上升而减小,相当于直流电动机的弱磁调速情况,属于近似的恒功率调速方式。

由上面的讨论可知,异步电动机变频调速的基本控制方式如图 8-1 所示。因此,异步电动机变频调速时必须按照一定的规律同时改变其定子电压和频率,即必须通过变频装置获得电压、频率均可调节的供电电源,实现所谓的 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)调速控制。如何实现变频又变压呢?这就是逆变器所要完成的任务。

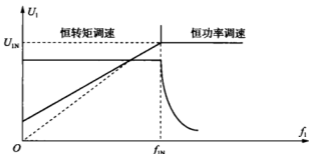


图 8-1 基本控制方式

8.1.2 逆变的基本原理

逆变器是将整流器输出的直流电转换为频率和电压都可调的交流电的装置,其逆变原理如下。

1. 单相逆变

首先通过单相逆变桥的工作情况来看一下直流电是如何“逆变”成交流电的。单相逆变桥的构成如图 8-2(a)所示,图中将 4 个开关器件(V1~V4)接成桥形电路,两端加直流电压 U_d 。负载 Z_L 接至两“桥臂”的中点 a 与 b 之间,现在来看看负载 Z_L 上是怎样得到交变电压和电流的。

如图 8-2(b)中所示的电压波形图:

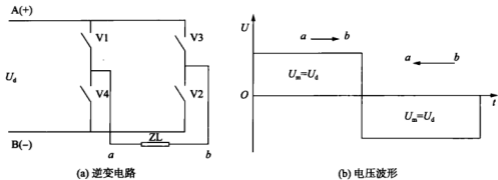


图 8-2 单相逆变桥

(1) 前半周期。令 V1、V2 导通，V3、V4 截止，则负载 ZL 上所得的电压为 a“+”、b“-”，设这时的电压为“+”。

(2) 后半周期。令 V1、V2 截止，V3、V4 导通，则负载 ZL 上所得的电压为 a“-”、b“+”，电压的方向与前半周期相反，为“-”。

上述两种状态如能不断地反复交替进行，则负载 ZL 上所得到的便是交变电压，这就是把直流电“逆变”成交流电的工作过程。

2. 三相逆变

三相逆变桥的工作过程与单相逆变桥相同，只要注意三相之间互隔 $T/3$ (T 是周期) 就可以了，即 V 相比 U 相滞后 $T/3$ ，W 相又比 V 相滞后 $T/3$ ，如图 8-3 所示。

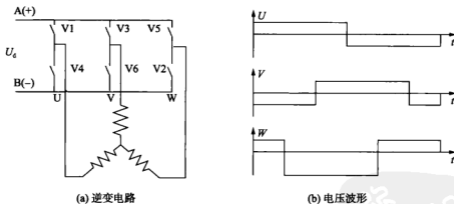


图 8-3 三相逆变桥

总之，所谓“逆变”过程，就是若干个开关器件长时间不停息地交替导通和关断的过程。

3. 逆变器件必须满足的条件

由前述可知，逆变桥是实现变频的关键部分，三相逆变桥由 6 个开关器件构成。在这里，并不是所有的开关器件都可以构成逆变桥的，因为，构成逆变桥的开关器件必须满足以下要求：

(1) 能承受足够高的电压。我国三相交流电的线电压为 380V，经三相全波整流后的直流电压为 537V。所以，开关器件能够承受的电压必须超过 537V。

(2) 能承受足够大的电流。电动机的额定容量大至成百上千千瓦,额定电流则高达数千安,因此,逆变管允许通过的电流至少应超过电动机电流的幅值。

(3) 允许长时间频繁地接通和关断,这是由逆变电路的工作过程所决定的。

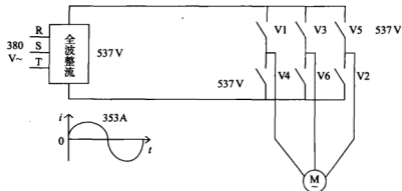


图 8-4 逆变管承受电压和电流

8.1.3 逆变器

逆变器是变频器的的重要组成部分,按直流电源的性质可分为电压型逆变器、电流型逆变器;按输出电压调节方式可分为脉冲幅值调制 PAM、脉冲宽度调制 PWM 和正弦脉宽调制 SPWM。

1. 电压型

典型的电压型逆变器的结构形式如图 8-5 所示,其中用于逆变器晶闸管的换相电路未画出。图中逆变器的每个导电臂均由一个可控开关器件和一个不可控器件(二极管)反并联组成。晶闸管 VT1~VT6 为主开关器件,VD1~VD6 为回馈二极管。

该电路的特点是,中间直流环节的储能元件采用大电容,负载的无功功率将由它来缓冲。由于大电容的作用,主电路直流电压 E_d 比较平稳,电动机端的电压为方波或阶梯波。直流电源内阻比较小,相当于电压源,故称为电压源型逆变器或电压型逆变器。

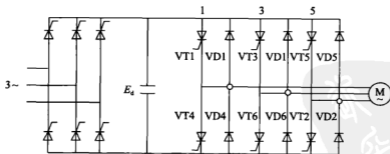


图 8-5 电压型逆变器的主电路

2. 电流型

典型的电流型逆变器的主电路结构如图 8-6 所示。其特点是中间直流环节采用大电感作为储能环节,无功功率将由该电感来缓冲。由于电感的作用,直流电流 I_d 趋于平稳,电动机的电流波形为方波或阶梯波,电压波形接近于正弦波。直流电源的内阻较大,近似于电流源,

故称为电流型逆变器。这种电流型逆变器,其晶闸管在每周期内工作 120° ,属于 120° 导电型。

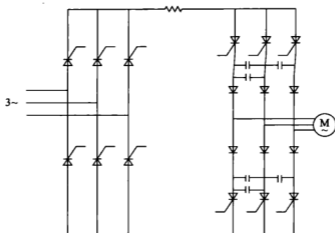


图 8-6 电流型逆变器的主电路

3. 脉幅调制(PAM)

脉冲幅度调节方式(Pulse Amplitude Modulation, PAM),简称脉幅调制。就是在整流电路部分对输出电压或电流的幅值进行控制,在逆变电路部分对输出频率进行控制的方式,逆变电路中换流器件的开关频率即为变频器的输出频率。脉幅调制是在频率下降的同时,使直流电压也随着下降,逆变后交流电压的幅值也一起下降,其一相的电压波形如图 8-7 所示。图 8-7(a)为频率较高时的电压波形,周期小而幅值较高;图 8-7(b)为频率较低时的电压波形,周期大而幅值较低。这种方法的特点是,变频器在改变输出频率的同时也改变了电压的幅值。

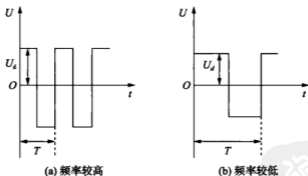


图 8-7 脉幅调制时的一相电压波形

4. 脉宽调制(PWM)

脉冲宽度调制方式(Pulse Width Modulation, PWM),简称脉宽调制。是在逆变电路部分同时对输出电压或电流的幅值和频率进行控制的控制方式。在这种控制方式中,以较高频率对逆变电路的半导体开关器件进行开闭控制,通过改变输出脉冲的宽度来达到控制电压或电流的目的。即通过调节脉冲宽度和各脉冲间的“占空比”来调节逆变后输出电压的平均值,如图 8-8 所示。PWM 的优点是不必控制直流侧,因而大大简化了电路,但是,电流的谐波分量很大。

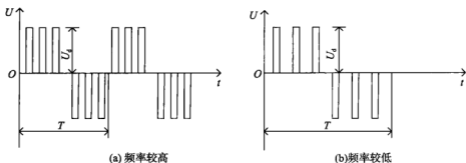


图 8-8 脉宽调制的输出电压波形

5. 正弦脉宽调制 (SPWM)

在脉宽调制中,如果脉冲宽度和占空比的大小按正弦规律分布,则输出电流的波形接近于正弦波,这就是正弦脉宽调制 (SPWM),如图 8-9 所示。这种方式大大减少了负载电流中的高次谐波。当正弦值较大时,脉冲宽度和占空比都大;而当正弦值较小时,脉冲宽度和占空比都小。那么如何产生 SPWM 脉冲? 其基本方法是各脉冲的上升沿与下降沿由正弦波和三角波的交点来决定,具体方法又分两种:① 单极性调制。特点是在每半个周期内,三角波的极性是单方向的,所得到的脉冲系列的极性是单方向的,如图 8-10 所示;② 双极性调制。实际变频器中,更多地使用双极性调制方式,其特点是:三角波和所得到的相电压脉冲系列都是双极性的,但线电压脉冲系列却是单极性的。

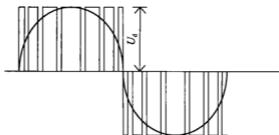


图 8-9 正弦脉宽调制的电压波形

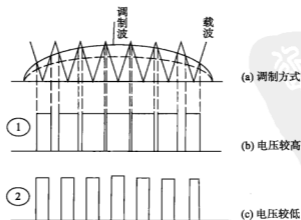


图 8-10 单极性调制方式

在具体电路中,各开关器件的工作情况如图 8-11 所示,图 8-11(a)和(b)为双极性调制波,图 8-11(c)则画出了各开关管控制极所得到的控制脉冲。由图可以看出,双极性脉冲系列的上半部分是桥臂上面管子的控制脉冲,而下半部分则是桥臂下面管子的控制脉冲。其工作特点是:每个桥臂的上下两管总是处于不断地交替导通的状态。

SPWM 的显著优点是:由于电动机的绕组是电感性的,因此,尽管电压是由一系列的矩形脉冲构成的,但导入电动机的电流却和正弦波十分接近。

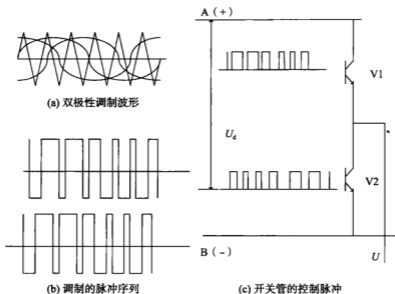


图 8-11 开关器件的工作情况

8.1.4 智能功率模块(IPM)

智能功率模块(Intelligent Power Module, IPM)是先进的混合集成电力电子器件,由高速、低耗的 IGBT 芯片和优化的门极驱动及保护电路构成。由于采用了有电流传感功能的 IGBT 芯片,从而实现高效的过电流保护和短路保护。智能功率模块具有的优点有:(1) 开关速度快,驱动电流小,控制驱动更简单;(2) 内含电流传感器,可以高效、迅速地检测出过电流和短路电流,能对功率芯片给予足够的保护,故障率大大降低;(3) 由于在器件内部电源电路和驱动电路的配线设计上做到了优化,所以由浪涌电压、门极振荡、噪声引起的干扰等问题能有效得到控制;(4) 保护功能较为丰富,如电流保护、电压保护、温度保护一应俱全,随着技术的进步,保护功能将进一步得到完善;(5) 由于采用 IPM 后的开关电源容量、驱动容量的减小和器件的节省及综合性能的提高等因素,使得 IPM 的性价比已高过 IGBT, IPM 的售价已逐渐接近 IGBT,有很好的经济性。

8.1.5 脉宽调制(PWM)型变频器

PWM 变频器的主电路如图 8-12 所示。由图可知,PWM 逆变器的主电路就是基本逆变电路。

1. 交—直部分

(1) 整流二极管 VD1~VD6。由 VD1~VD6 组成三相整流桥,将三相交流电转换为直流电。若电源的线电压为 U_L ,则三相全波整流后平均直流电压为 $U_d = 1.35U_L$ 。若三相交流电源的线电压为 380V,则全波整流后的平均电压为 $U_d = 1.35 \times 380V = 513V$ 。

(2) 滤波电容器 C_F 。滤波电容器 C_F 的功能是消除整流后的电压纹波;当负载变化时,使直流电压保持平稳。

(3) 电阻 R_L 与开关 S_L 。变频器刚合上电源的瞬间,滤波电容器 C_F 的充电电流很大,过大的冲击电流将可能损坏三相整流桥的二极管。为了保护整流桥,在变频器刚接通电源时,电路中串入限流电阻 R ,将电容器 C_F 的充电电流限制在允许范围以内。开关 S_L 的功能是当 C_F 充电到一定程度时 S_L 接通,将 R_L 短路。在许多新系列的变频器里, S_L 已由晶闸管代替,如图 8-12 虚线所示。

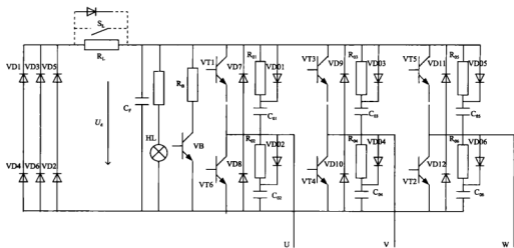


图 8-12 PWM 变频器的主电路

(4) 电源指示 H_L 。 H_L 有两个功能,一是表示电源是否接通;二是在变频器切断电源后,反映滤波电容器 C_F 的电荷是否已经释放完毕。

2. 直—交部分

(1) 逆变三极管 VT1~VT6。逆变管是变频器实现变频的具体执行元件,是变频器的核心部分。图 8-12 中由 VT1~VT6 组成逆变桥,将 VD1~VD6 整流所得的直流电再转换为频率可调的交流电。

(2) 续流二极管 VD7~VD12。续流二极管的主要功能有:① 电动机是电感性负载,其电流具有无功分量,VD7~VD12 为无功电流返回直流电源时提供通道;② 当频率下降,电动机处于再生制动状态时,再生电流将通过 VD7~VD12 返回直流电路;③ 在 VT1~VT6 进行逆变的基本工作过程中,同一桥臂的两个逆变管不停地交替导通和截止,在这交替导通和截止的过程中,需要 VD7~VD12 提供通路。

(3) 缓冲电路。缓冲电路由 $C_{01} \sim C_{06}$ 、 $R_{01} \sim R_{06}$ 与 VD01~VD06 组成。

3. 制动电阻和制动单元

(1) 制动电阻 R_B 。电动机在工作频率下降过程中,将处于再生制动状态,拖动系统的动

能将要反馈到直流电路中,使直流电压 U_d 不断上升,甚至可能达到危险的地步。因此,在电路中接入制动电阻 R_B ,用来消耗这部分能量使 U_d 保持在允许范围内。

(2) 制动单元 V_B 。由大功率晶体管 GTR 及其驱动电路构成制动单元 V_B 。其功能是为放电电流 I_B 流经 R_B 提供通路。

8.2 通用变频器的参数设置及功能选择

目前,新型的通用变频器已经采用微处理器进行全数字化控制,硬件电路相对简化,各种功能主要靠软件来完成,由于软件的灵活性,数字控制方式可以完成模拟控制方式难以完成的功能。通用变频器的主要功能是通过外部接口电路及数字操作面板来设定的。图 8-13 为小容量通用变频器的外形结构示意图。

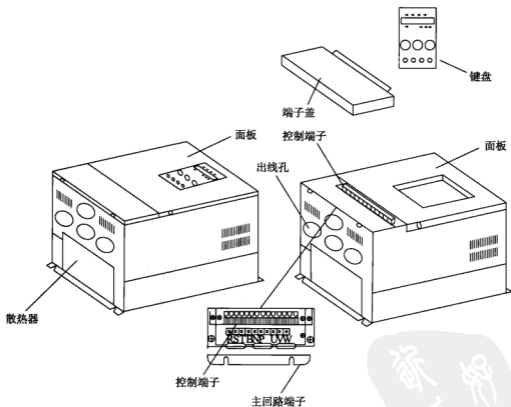


图 8-13 小容量通用变频器的外形结构示意图

8.2.1 通用变频器的外部接口电路

通用变频器的外部接口的主要作用是使用户能够根据系统的不同需要进行各种功能组态与操作,并与其他电路一起构成自动控制系统。通用变频器的外部接口电路通常包括逻辑控制指令电路、频率指令输入输出电路、过程参数监测信号电路、通信接口电路和数字信

号输入输出电路等。不同品牌通用变频器的外部接口电路的配置是各不相同的,但各控制端的功能可任意设定进行组态是共同的特点。有些通用变频器的外部接口是可编程的,通过编程来定义接口功能。随着通用变频器的发展,其外部接口电路的功能也越来越丰富,最常见的通用变频器外部接口电路,如图 8-14 所示。

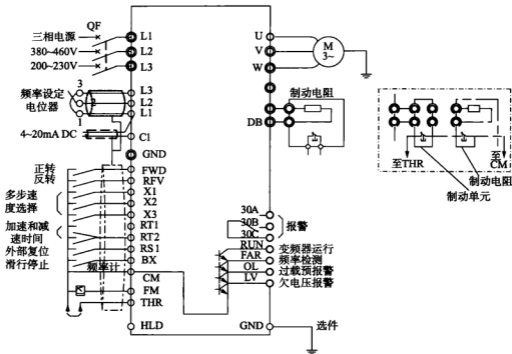


图 8-14 通用变频器外部接口电路

由图 8-14 可见,外部信号接口主要包括:

(1) 多功能输入和输出接口。新型通用变频器中具有多种输入端子和输出接点,多数是可编程自定义的,因此也称为多功能输入端子和输出接点。外接输入控制信号可以是开关量信号、数字量信号和模拟量信号等,在通用变频器内,外接控制信号是由光耦合器接收和传送的,可以根据需要设定并改变这些端子和接点的功能。

(2) 多功能模拟量输入输出接口。通用变频器的模拟量输入信号通常是过程工艺参数,如温度、压力、流量、位置等,信号种类有 $0\sim 10V$ 、 $0\sim 20mA$ 、 $4\sim 20mA$ 等标准信号。模拟量输出信号主要包括输出电流、电压、转矩检测、输出频率检测、反馈量监测等。多功能模拟输入输出信号接点的作用就是可以将上述模拟量输入信号输入到通用变频器中,作为运行指令,并利用模拟量输出信号监视通用变频器的工作状态。

(3) 数字输入输出接口。通用变频器的数字输入输出接口主要用于多端频率设定、外部报警、报警复位以及连接可编程序控制器(PLC)等数字设备。通用变频器可以根据 PLC 输出的数字信号指令运行,而数字输出接口的作用则主要是通过脉冲计数器给出通用变频器的输出频率监视信号等。

(4) 通信接口。通用变频器一般都具有 RS232 或 RS485 串行通信接口。通过通信接口

可与计算机连接、通过计算机用户程序调试和运行通用变频器,也可以通过现场总线、工业控制计算机或 PLC 进行网络通信,并按照工业控制计算机或 PLC 的指令完成所需的功能。

(5) 扩展功能卡。通用变频器厂商一般都备有作为选件的各种扩展功能卡。以供用户通过选件扩展所需要的功能。如扩展 I/O 卡、各种现场总线通信卡实现网络通信,如 Profibus-DP、DeviceNet、CC-Link、Modbus、Ethernet、AS-i 等。

(6) 通用变频器的电源电路。通用变频器的电源电路包括主控制板电源、驱动电路电源和外控电源。外控电源是为外接控制电路提供的稳定直流电源。

(7) 数字操作显示面板。数字操作显示面板的作用主要是给用户提供一个良好的人机界面,使通用变频器的操作和故障检测等工作变得更加简单,新型通用变频器的数字操作面板所具有的功能也越来越丰富,用户可以利用数字操作面板对系统进行参数设定、运行操作、监测运行状态、通过显示故障内容查找故障发生原因等。

8.2.2 主要控制功能

一般通用变频器必须具有以下基本功能:

(1) 转矩提升(补偿)功能。通用变频器一般都具有自动/手动转矩提升或转矩补偿功能,有的通用变频器也称为自动电压调整功能。通用变频器的 U/f 特性决定了电动机启动或低速运行时输出转矩的大小,是通用变频器中诸多功能中最重要的功能特性之一。为了在电动机低速运行时对其输出转矩进行补偿,在通用变频器中采取了在低频区域提高 U/f 值的方法,这种方法称为通用变频器的转矩补偿功能。所谓自动转矩补偿功能指的是通用变频器在电动机加速、减速和正常运行的所有区域中,可以根据负载情况自动调节 U/f 值,对电动机的输出转矩进行必要的补偿。几乎所有的通用变频器都有转矩补偿功能,并具有共同的特点,但在具体细节上还是有一定的区别。

(2) 防失速功能。通用变频器的防失速功能包括加速过程中的防失速功能,恒速运行过程中的防失速功能和减速过程中的防失速功能三种。通用变频器具有上述防失速功能,可以充分发挥通用变频器的驱动能力和运行安全。

(3) 转矩限定功能。通用变频器的转矩限定功能可以对电动机的输出转矩极限值进行设定,使得当电动机的输出转矩达到该设定值时,通用变频器停止工作并给出报警信号。

(4) 无速度传感器控制功能。无速度传感器控制功能的作用是在不加速度传感器的情况下,提高通用变频器的速度控制精度和动态速度响应。具有该功能时,通用变频器是通过检测电动机电流而得到负载转矩,并根据负载转矩进行必要的转差补偿,从而得到提高速度控制精度和动态响应的目的。

(5) 减少机械振动、降低冲击的功能。为了在启动、运行和减速等过程中减低冲击、减少噪声和机械振动、保护机械设备的目的,通用变频器设置了包括选择 S 形加减速模式、停止方式选择、载波频率调节、瞬时过电流限制和设定跳越频率等功能,用户可以根据实际情况选定其中一项或多项进行调节。

(6) 瞬时停电再启动功能。通用变频器的瞬时停电再启动功能的作用是当保护功能起作用后或发生电网瞬时停电变频器停止输出,当电源恢复时,通用变频器可以按照设定自动跟踪转速再启动,通过自寻速功能对电动机速度进行检测,输出与电动机速度相当的频率,使电动机平稳无冲击的启动,直至电动机恢复原有状态。

(7) 外部信号启、停控制。通用变频器通常都具有通道外部信号对变频器进行启停控制功能,包括外部信号运行控制和外部异常停止信号控制。当被驱动机械设备出现异常时,也可以利用外部异常停止信号使通用变频器停止工作,在这种情况下可以将电动机设定为以不同频率减速停止的停止模式等。另外,在通用变频器中通常有2线控制方式、3线控制方式及PLC控制功能。

(8) 频率设定功能。通用变频器和频率设定有关的功能主要有:①多段转速设定功能。多段转速设定功能是为了使电动机能够以预定的速度按一定的程序运行;②频率上下限设定功能。频率上下限设定功能是为了限制电动机的转速,从而满足设备运行控制的目的;③频率跳跃功能。通过跳跃频率的设定,使变频器不能输出与负载机械设备共振的频率值,从而避开共振频率;④加减速时间设定功能。通用变频器的加速、减速时间是基本功能,设定的加速、减速时间必须与负载的加减速特性相匹配,并应防止失速现象发生;⑤禁止加减速功能。为了提高通用变频器的可靠性,在加减速过程中保持转矩不变,可以通过外部信号使起动频率或停止频率在上升/下降过程中,保持短暂时间不变;⑥S形加减速功能。S形加减速功能的作用是当被驱动的负载较重、需要缓慢起停运行时,使通用变频器按照S形曲线比较平滑地起动或停止运行;⑦模糊加减速功能。传统的通用变频器在设定加减速时间时,常常需要反复多次试运行才能确定下来,所设定的加减速时间往往不够准确。新型通用变频器具有采用模糊控制原理的模糊加减速功能。按照模糊逻辑控制加减速,以充分利用通用变频器的容量为基础,决定加减速时间,从而实现在通用变频器容量允许范围内缩短加减速时间的目标。

(9) PID控制功能。PID控制功能是一种对生产过程参数进行比例、积分、微分控制的方法,其原理与通用的PID调节器一样,可以通过控制对象的传感器检测被控制量。

(10) 与保护有关的功能。新型通用变频器的保护功能越来越多,在诸多的保护功能中,有些保护功能是通过变频器内部软件和硬件直接完成的,而另外一些保护功能则与通用变频器的外部工作环境密切相关,它们需要和外部信号配合完成,或者需要用户根据系统要求对其动作条件进行设定。

(11) 与运行方式有关的功能。与运行方式有关的功能包括:①直流制动功能。该功能的作用是在不使用机械制动器和制动电阻的条件下,使电动机制动。制动时,通用变频器给电动机加上直流电压,使电动机绕组中流过直流电流,从而使电动机进入直流制动状态,达到直流制动的目的;②自寻速跟踪功能。具有这种自寻速跟踪功能的通用变频器可以在没有速度传感器的情况下,在电动机进入自由运行状态时自动寻找电动机的实际转速。并根据电动机转速自动进行加速,直至电动机转速达到所需转速,而无需等到电动机停止后再启动;③载波频率调整。新型通用变频器多采用正弦脉宽调制(SPWM),载波频率可调范围一般为(1~16)kHz,若通用变频器输出频率与载波频率同步称之为同步SPWM,否则称之为异步SPWM。同步SPWM在载波频率切换点会产生冲击,不适合精密调速。而异步SPWM可实现全程平滑调速。载波频率的高低决定了通用变频器输出电压(电流)PWM脉冲数的多少;④频率偏置、频率到达输出功能。频率偏置功能即对应于最小控制信号的频率值。频率到达输出功能是在变频器输出频率达到设定值时发出的信号,它是利用频率到达输出端子实现的。可利用频率到达输出端子发出本机启动完成信号,利用该信号控制其他设备自动启动等。

(12) 自动节能功能。自动节能功能的基本原理是当异步电动机在某一频率下工作时,总存在着一个最小电流或功率工作点,该工作点可以通过改变异步电动机的相电压进行搜索,异步电动机在该工作点运行时效率最高,故最节能。

(13) 参数自动检测功能。通用变频器的矢量控制方式是依赖于异步电动机的参数模型——参数自动检测功能,即通用变频器通过执行目标子程序来控制通用变频器输出电压、电流测试信号,然后经过对采样数据进行计算,求出电动机参数值。参数自动检测功能包括参数自设定和参数自校正两种方式。

(14) 通信功能。通用变频器的通信功能主要有三种方式:① 带有显示器和键盘的控制面板,其中显示器用于监视通用变频器的运行状态和故障诊断,键盘则用于操作通用变频器和参数设定,是通用变频器本身的基本通信方式;② 通过模拟和数字输入、输出端子实现通信;③ 串行通信接口,主要有 RS485/RS422/RS232 串行通信接口方式,多数采用 RS485,并使用生产厂商自己特定的通信协议,可根据需要选用现场总线通信卡选件实现网络通信。

(15) 参数锁定功能。通用变频器的参数锁定功能用于在设置完参数后,通过设置禁止改写参数功能,防止无授权者修改所设置的参数。参数设置锁定功能一般有 4 种密码设置、3 级权限功能,包括设置密码、解除密码、用户密码、管理员密码等。普通权限是可对由管理员规定的参数项进行修改的权限,仅可对部分参数进行修改,主要用于操作者对一些运行参数的修改;最高权限可修改全部的参数项,以及设置普通权限的参数权限。

(16) 特殊功能。不同品牌的变频器还有一些特有功能,如矢量控制通用变频器的滑差补偿功能、点动运行功能、多重设置功能等,可注意不同品牌通用变频器的产品说明书。

8.2.3 变频器的参数设定实例

在参数设置中首先应将通用变频器的输出电压设为额定电压,如 380V,然后设置最高频率和上下限频率,除恒功率特性负载外,上限频率设为 50Hz;对风机泵类负载,若没有频率切换要求,最高频率和上限频率应设得低一些,如 45Hz,否则应设为 50Hz;下限频率应设在 15~20Hz。然后设定端子功能、控制方式、加减速时间、过电流保护特性、运行模式等。对电源电压偏低的地方,可根据具体情况考虑是否将欠电压保护功能取消。设置完参数,应设置参数设置锁定功能。禁止改写参数,以防止误操作。以下介绍几种功能的设定方法。

1. 控制方式的设定

矢量控制方式通用变频器通常还具有 U/f 控制方式等,其出厂设置一般都是 U/f 控制方式,在需要进行矢量控制方式运行时,必须专门设置才能进入矢量控制方式运行。在完成上述设置后,变频器自动进入矢量控制方式。其他品牌的变频器应参照其使用说明书的操作要求进行。

2. 加减速时间的确定

加减速时间应根据电动机的容量及负载特性确定。正确设定加减速时间对于通用变频器及整个系统的安全运行至关重要。合理的加减速时间应是在加速过程中,电动机电流不超过变频器的过载极限值的最小时间,通常是 150% 要 1min。如果加速时出现变频器过电流或过载保护动作,应该增大加速时间,直到不动作为止,一般将该时间再增大 5%~10% 较为合适;在减速过程中,不因电动机再生能量引起变频器直流回路过电压,对 380V 级的通用变频器直流回路电压瞬间不应超过 760V,当变频器因减速而过电压保护动作时,应该增大

减速时间直到不动作为止。考虑到过快增减速时间所产生的过电压会危及变频器的安全,一般应先留有余地,先设置的时间长一些,由大到小地来确定减速时间,同加速过程一样,一般将该时间再增大5%~10%较为合适。

3. 运行模式的设定

通用变频器的运行模式根据品牌的不同有多种,而且它的参数也很多,必须根据实际情况和控制要求选取一种适合的运行模式,恰当地设定参数,否则难以达到预期目的。尽管不同品牌的通用变频器各有差别,但它们的控制方式却是大同小异。根据信号是取自通用变频器的外部还是内部,可分为三种运行模式:① E模式,信号都取自通用变频器外部;② PU模式,信号都取自通用变频器本身;③ PU+E模式,信号既有通用变频器外部的,又有通用变频器本身的。

4. 恢复出厂数据

通用变频器在调试期间,往往会出现由于操作不当等原因偶尔发生功能数据码紊乱、监控完全失常、显示杂乱无章等现象。遇到这种情况,可先恢复出厂数据,然后再重新设置参数。

8.3 变频器调速系统设计

一般而言,变频调速系统的转速设计需要考虑负载特性、速度特性、转矩特性、工艺特性、电磁兼容特性等几个方面。

8.3.1 转速控制的基本概念

变频调速系统一般都是针对电力拖动而言,主要是由变频器、电动机和工作机械等装置组成的机电系统。

1. 速度控制范围和精度

根据具体的工艺条件和机械设备,在以转速为控制对象的变频调速系统中,必须选择速度控制范围符合要求的变频器以及变频器的控制方式。

速度控制范围有以下几种表示方式,如用转速范围表示或用变速比率表示,前者如175~1750r/min,后者如1:10。

2. 避开特定的不安全速度

电动机转动时,转矩的脉动频率与负载和电动机构成的系统固有振动频率一致时,会发生系统共振,共振状态的出现将破坏传动系统的正常运转,甚至将造成破坏性系统损坏。电动机拖动系统工作时,往往在转速进入某一个或几个小区段时,出现上述非正常的共振情况,为了保证变频调速系统的正常工作,必须设置相关的跳跃频率。

3. 低速情况的考虑

由于电动机在自冷方式情况下(采用普通电动机),转速下降会使电动机冷却能力降低,因此对于转矩按平方关系降低的负载的设备如离心风机和离心泵,当其对于低速运行无要求时可以设置一个最低运行频率。正常运行时负载在最低频率与最高频率之间变化,当长时间位于最低频率时,则可以考虑采用变频器特有的休眠唤醒功能,尤其对于空调风机和供水

泵在夜间小(或零)流量工作时,休眠唤醒功能不仅考虑了低速冷却效果,还能充分节能。

对恒转矩负载,如果需要在全频段范围(零达到最高速)内运行的,就必须考虑低速冷却方式,必要时采用变频专用电动机;如果只需要在一个相对较窄的频率范围内运行时,则可以设置最低运行频率,避免在零速和最低频率内长时间运行,否则低速区的电动机冷却能力将大大低于运转生热能力(电动机功耗引起),将导致电动机损坏或故障。当然,在低速区的短时运行都是允许的,如零速起动加速阶段和低速点动功能。

在电动机低速运行时,还必须考虑轴承的润滑效果。例如,滚动轴承和强制进油的滑动轴承,在低速运行时,而且在自给油限度以下时,应采用其他强给油方式。

8.3.2 开环转速控制

如果没有将电动机实际转速的测量值转换成电信号回馈给变频器的输入部分,则转速的控制没有构成一个完整的环,是开环运行。对不要求快速响应的传动系统,常用开环控制。

8.3.3 高精度速度控制的实现方法

高精度的速度控制常应用在对速度有高精度和稳定性要求的场合,如造纸机的传动,精度控制在 $0.01\% \sim 0.05\%$ 之间,其他如胶卷和钢铁生产线也要求 $0.02\% \sim 0.1\%$ 之间。精度通常是以标称频率或标称转速为基准,用误差百分比表示出来的。图8-15所示为可以实现高精度控制的速度闭环控制系统。

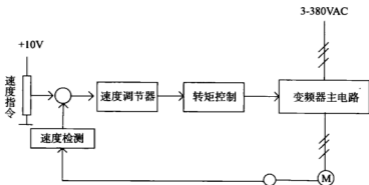


图 8-15 实现高精度控制的速度闭环控制系统

为了保证系统的高速度精度,应充分考虑变频器的几种误差:速度给定误差、速度反馈误差、速度控制器误差以及定常偏差。

8.4 变频器外围设施的选用及安装

8.4.1 变频器的外围设施的选用

变频器的运行离不开某些外围设备,它们通常都是选购件。选用外围设备的目的有:①提高变频器的某种性能;②变频器和电动机的保护;③减小变频器对其他设备的影响等。

1. 变频器外围设备的种类与用途

变频器的外围设备如图 8-16 所示,主要包括六个部分。



图 8-16 变频器的外围设备

(1) 电源变压器:电源变压器用于将高压电源变换到通用变频器所需的电压等级,例如 200V 量级或 400V 量级等。变频器的输入电流含有一定量的高次谐波,使电源的功率因数降低,若再考虑变频器的运行效率,则

$$\text{变压器的容量} = \frac{\text{变频器的输出功率}}{\text{变频器的功率因素} \times \text{变频器的效率}} \quad (8-2)$$

其中,变频器功率因数在有输入交流电抗器 1ACL 时取 0.8~0.85,无输入电抗器 1ACL 时则取 0.6~0.8。变频器效率可取 0.95,变频器输出功率应为所接电动机的总功率。变频器生产厂家所推荐的变压器容量的参考值,常取变频器容量的 130% 左右。

(2) 电源侧断路器 QF:用于电源回路的开闭,并且在出现过流或短路事故时自动切断电源,以防事故扩大。如果需要进行接地保护,也可以采用漏电保护式断路器。使用变频器无例外地都应采用 QF。

(3) 电磁接触器 1KM:用于电源的开闭,在变频器保护功能起作用时切断电源。对于电网停电后的复电,可以防止自动再投入以保护设备的安全及人身安全。电磁接触器 2KM 和 3KM:用于变频器和工频电网之间的切换运行。在这种方式下 2KM 是必不可少的,它和 3KM 之间的连锁可以防止变频器的输出端接到工频电网上。一旦出现变频器输出端误接到工频电网的情况,将损坏变频器。如果不需要变频器—工频电网的切换功能,可以不要 2KM。注意,有些机种要求 2KM 只能在电动机和变频器停机状态下进行通断。

(4) 无线电噪声滤波器 FIL:用于限制变频器因高次谐波对外界的干扰,可酌情选用。

(5) 交流电抗器 1ACL 和 2ACL:1ACL 用于抑制变频器输入侧的谐波电流,改善功率因数。选用与否视电源变压器与变频器容量的匹配情况及电网电压允许的畸变程度而定。一般情况以采用为好;2ACL 用于改善变频器输出电流的波形,减低电动机的噪声。

(6) 制动电阻单元 R:用于吸收电动机再生制动的再生电能,可以缩短大惯量负载的自由停车时间。还可以在位能负载下放时,实现再生运行。

2. 制动电阻的计算

在异步电动机因设定频率突降而减速时,如果轴转速高于由频率所决定的同步转速,则异步电动机处于再生发电运行状态。利用制动电阻可以耗散这部分能量,使电动机的制动能力提高。制动电阻的选择,包括制动电阻的阻值及容量的计算,可按如下步骤进行。

(1) 制动转矩的计算:制动转矩 T_B (N·m) 可由下式算出

$$T_B = \frac{GD_M^2 + G_x D_L^2 (n_1 - n_2)}{375 t_s} - T_L \quad (8-3)$$

式中, GD_M^2 为电动机的 GD^2 , N·m²; $G_x D_L^2$ 为负载折算到电动机轴上的 GD^2 , N·m²; T_L

为负载转矩, $N \cdot m$; n_1 为开始减速时的速度, r/min ; n_2 为减速后速度, r/min ; t_s 为减速时间, s 。

(2) 制动电阻阻值的计算: 在附加制动电阻进行制动的情况下, 电动机内部的有功损耗部分, 折合成制动转矩, 大约为电动机额定转矩的 20%。考虑到这一点, 可用式(8-4)计算制动电阻的值

$$R_B = \frac{U_C^2}{0.1047(T_B - 0.2T_M)n_1} \quad (8-4)$$

式中, U_C 为滞留回路电压, V ; t_s 为制动转矩, $N \cdot m$; T_M 为电动机额定转矩, $N \cdot m$; n_1 为开始减速时的速度, r/min 。

如果系统所需制动转矩 $T_B < 0.2T_M$, 即制动转矩在额定转矩的 20% 以下时, 则不需要另外的制动电阻, 仅电动机内部的有功损耗的作用, 就可使中间直流回路电压限制在过压保护的動作水平以下。

由制动晶体管 and 制动电阻构成的放电回路中, 其中大电流受制动晶体管的最大允许电流的限制。制动电阻的最小允许值

$$R_{\min} = \frac{U_C}{I_C} \quad (8-5)$$

式中, U_C 为直流回路电压。

因此, 选用的制动电阻 R_B 应按以下关系来决定。

$$R_{\min} < R_B < R_{B0} \quad (8-6)$$

变频器的制动电阻的最小允许值视其容量不同而不同。表 8-1 所示为单台制动单元所允许的最小制动电阻。如果需要可以采用多台制动单元并联。

表 8-1 允许的最小制动电阻(例)

电压/V	电动机功率/kW	变频器的形式 (VS-616G3)	制动单元的形式 (大容量时采用)	允许的最小制动 电阻 R_{\min}/Ω
200	0.4	0P4		48
	0.75	0P7		48
	2.2	2P2		16
	3.7	3P7		16
	5.5	5P5		9.6
	7.5	7P5		9.6
	11-30	011-022		6.4
400	0.4	0P4		96
	0.75	0P7		96
	2.2	2P2		64
	3.7	3P7		32
	5.5	5P5		32
	7.5	7P5		32
	11	011		20
	15	015		20
	18.5-45	018-045		12.8

(3) 制动时平均消耗功率的计算: 由于制动中电动机自身损耗的功率相当于 20% 额定值的制动转矩, 因此制动电阻器上消耗的平均功率 P_m (kW) 可以按式 (8-7) 计算

$$P_m = 0.1047(T_B - 0.2T_M) \frac{n_1 + n_2}{2} \times 10^{-3} \quad (8-7)$$

电阻器额定功率的计算视电动机是否重复减速而定。如图 8-17(a) 所示, 当重复减速时, $D = t_s/T$; 如图 8-17(b) 所示, 当非重复减速时, 制动电阻的间歇时间 $(T - t_s) > 600$ 。

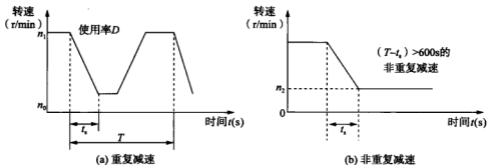


图 8-17 减速模式

根据电动机运行的模式, 可以确定制动时的平均消耗功率和电阻器的允许功率增加系数, 据此可以求出制动电阻器的额定功率

$$P_r = \frac{P_m}{m} \text{ (kW)} \quad (8-8)$$

根据得到的 R_m 和 P_r 值, 就可在市面上选择符合要求的标准电阻器。

8.4.2 变频器的安装

在各种工厂和设备采用变频器—异步电动机传动时, 电源侧和电动机侧的电路中同时将产生高次谐波。对于因高次谐波引起的静电、电磁干扰, 在变频器的装设上要考虑各种因素。

另外, 为了确保变频器的稳定运转, 计划装设时, 对设置变频器场所的温度、湿度、灰尘和振动等设置环境也必须进行考虑。

1. 安装环境

为了变频器能稳定地工作, 发挥其所具有的功能, 必须确保设置环境能充分满足变频器对所规定环境的允许值。

(1) 设置场所。装设变频器的注意事项和关于场所的条件为: ① 结构房或电气室应无湿气、无水浸的顾虑; ② 无爆炸性、燃烧性或腐蚀性气体和液体, 粉尘少; ③ 装置容易搬入; ④ 维修、检查容易进行; ⑤ 应备有通风口或换气装置, 以排出变频器产生的热量; ⑥ 可以将易受变频器产生的高次谐波和无线电干扰影响的装置分离安装。

(2) 使用条件, 长期维持变频器可靠运行的条件有: ① 周围温度, 变频器运行中周围温度的允许值多为 $-10 \sim 50$ 度。② 周围湿度, 周围湿度过高, 有电气绝缘降低和金属部分的腐蚀问题。另一方面, 周围湿度显著降低则容易产生绝缘破坏。因此, 湿度保持为 $40\% \sim$

90%为宜。③ 周围气体,在室内安装时,周围不可有腐蚀性或燃烧性气体。具有腐蚀性气体时,金属部分产生腐蚀,不能长期维持变频器的性能。有爆炸性或燃烧性气体时,变频器内产生火花的继电器扣接触器以及在高温下使用的电阻器等成为发火源,可能引发火灾或爆炸。另外,若设置场所许多的粉尘和油雾,在变频器内附着、堆积将导致绝缘降低。强迫冷却方式的变频器由于过滤器堵塞将引起变频器内温度异常上升,这些情况都应该避免。因海拔高度,设置场所一般在1000m以下,超高则气压降低,容易产生绝缘破坏,对于进口变频器,可以认为:绝缘耐压以1000m为基准,在1500m降低5%,在3000m降低20%。此外,海拔越高,冷却效果下降越多,必须注意温升,按照日本的相关规定,电流定额在1500m开始,每超过100m,允许温升就下降1%。⑤ 振动,设置场所的振动加速度应限制在0.5g以内,振动超过允许值时,会使变频器的紧固件松动,继电器接触器等的触点部件误动作,可能导致不稳定运行。比较安全的方法是对振动场所进行测量。测出振幅与频率,然后按式(8-9)求出振动加速度

$$G=2\pi f \times \frac{A}{9\ 800} \quad (8-9)$$

式中, G 为振动加速度, g ; f 为振动频率,Hz; A 为振动的振幅,mm。

如果在振动加速度 G 超过允许值处安装变频器,应该采取防护措施,比如采用防振橡胶等,或者更换设置场所。另外,在有振动的场所设置变频器,必须定期进行检查和加固。

2. 安装空间

变频器应垂直安装。若倒置或水平安装,则会产生过热现象。为便于变频器散热,安装时要使其距离其他设备、墙壁或电路管道有足够的距离,如图8-18所示。变频器工作时其散热片的温度可达约90℃,故安装底板必须为耐热材料。

很多生产现场将变频器安装于电气控制柜之内,这时应该注意发热与散热问题。变频器的最高允许温度为 $T_1=50^\circ\text{C}$,如果电气柜的周围温度 $T_a=40^\circ\text{C}(\text{max})$,则必须使柜内温升在 $T_1-T_a=10^\circ\text{C}$ 以下。

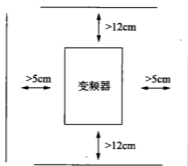


图8-18 变频器的安装空间

(1) 电气柜如果不采用强制换气时变频器发出的热量,经过电气柜内部的空气,由柜表面自然散热,这时,散热所需要的电气柜有效表面积 A 用下式计算

$$A = \frac{Q}{h(T_1 - T_a)} = \frac{Q}{50} \quad (8-10)$$

式中, Q 为电气柜发热量, 即电气柜内所有设备的发热量, W ; h 为传热系数(散热系数), $kW/cm^2 \cdot K$; A 为电器柜有效散热面积, 要去掉靠近地面、墙壁之面与并列柜时的并排柜面等的不能散热面积以及其他影响散热的面积, m^2 ; T_s 为电气柜的表面温度, $^{\circ}C$; T_o 为周围温度, $^{\circ}C$, 一般最高是 $40^{\circ}C$ 。

依照公式, 如果要求输出功率 $22kW$, 电源电压 $200V$ 的变频器柜。设其发热量为 $1kW$, 则变频器柜的面积 A 为 $20m^2$, 或需要宽为 $4m$ 、高为 $2m$ 、厚为 $1m$ 的电气柜, 可见只靠电气柜自然散热进行设计, 其结构尺寸将大得惊人。

(2) 设置换气扇、采用强制换气时在电气柜内产生的热量, 虽然也可由自然对流从盘面散热, 但是, 采用换气扇的散热效果则更佳, 这是自然对流散热无法比拟的。

必要的换气流量 P 用下列公式计算

$$P = \frac{Q \times 10^{-3}}{\rho c (T_o - T_s)} \quad (8-11)$$

式中, Q 为电气柜内总发热量, W ; ρ 为空气密度, $\rho = 1.057kg/m^3$ ($50^{\circ}C$); c 为空气的比热容, $c = 1.0kJ/(kg \cdot K)$; P 为流量, m^3/s ; T_o 为排气口的空气温度, $^{\circ}C$, $T_o = 50^{\circ}C$; T_s 为周围温度(在给气口的空气温度), $^{\circ}C$, $T_s = 40^{\circ}C$ 。

也就是说, 当 $1kW$ 的热要散掉时, 需要 $0.1m^3/s$ ($6m^3/min$) 的换气扇。式(8-11)可用于计算选择风扇容量, 例如, 用于 $22kW$ 变频器的电气柜, 假设散热量为 $1MJ$, 考虑到 20% 的余量, 估算, 换气能力为 $7.2m^3/min$ 的风扇, 则其存放柜的尺寸为高 $1.6m$ 、宽 $0.6m$ 、厚 $0.6m$ 。

使用强迫换气时, 应注意的要点有: ① 使电气柜强制换气时, 随着从外部吸入的空气, 也会同时吸入尘埃, 所以在吸入口设有空气过滤器; ② 需要在邻近并排安装两台或多台变频器时, 必须按图 8-19 所示留有足够距离。

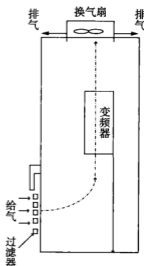


图 8-19 电气柜强制换气安装图

思考题与习题

- 正弦波脉冲宽度调制英文缩写是()。
 - PWM
 - PAM
 - SPWM
 - SPAM
- 对电动机从基本频率向上的变频调速属于()调速。
 - 恒功率
 - 恒转矩
 - 恒磁通
 - 恒转差率
- 下列哪种制动方式不适用于变频调速系统()。
 - 直流制动
 - 回馈制动
 - 反接制动
 - 能耗制动
- 三相异步电动机的转速除了与电源频率、转差率有关, 还与()有关系。
 - 磁极数
 - 磁极对数
 - 磁感应强度
 - 磁场强度
- 目前, 在中小型变频器中普遍采用的电力电子器件是()。
 - SCR
 - GTO
 - MOSFET
 - IGBT

6. 变频器的调压调频过程是通过控制()进行的。
A. 载波 B. 调制波 C. 输入电压 D. 输入电流
7. 变频器安装场所周围振动加速度应小于()g。
A. 1 B. 0.5 C. 0.6 D. 0.8
8. 变频器种类很多,按滤波方式可分为电压型和()型。
A. 电流 B. 电阻 C. 电感 D. 电容
9. 在 U/f 控制方式下,当输出频率比较低时,会出现输出转矩不足的情况,要求变频器具有()功能。
A. 频率偏置 B. 转差补偿 C. 转矩补偿 D. 段速控制
10. 变频器的节能运行方式只能用于()控制方式。
A. U/f 开环 B. 矢量 C. 直接转矩 D. CVCF



第 9 章 触摸屏及组态软件

9.1 触摸屏

随着工业自动化的发展,基于 PLC、单片机和 PC 机的自动化系统与自动化设备越来越普及,几乎遍布所有自动化领域,与之相应的人机交互系统也应运而生,并得到同步发展,液晶显示工业触摸屏是人机交互系统中一颗耀眼的明星。高可靠、长寿命、高性能使触摸屏越来越受到自动化系统集成商、自动化设备制造商的青睐。

触摸屏,是个可接收触头等输入讯号的感应式液晶显示装置,当接触了屏幕上的图形按钮时,屏幕上的触觉反馈系统可根据预先编程的程序驱动各种连接装置,可用于取代机械式的按钮面板,并借由液晶显示画面制造出生动的影音效果。触摸屏的主要功能就是取代传统的控制面板和显示仪表,通过控制单元(如 PLC)通信,实现人与控制系统的信息交换,更方便地实现对整个系统的操作和监视。

9.1.1 eView 触摸屏

1. eView 触摸屏的使用

目前的工业触摸屏有很多种,例如西门子、AB、施耐德、三菱和欧姆龙等公司均有它们的人机界面系列产品。这里以台湾威纶公司 eView 触摸屏来介绍触摸屏的使用。

eView 触摸屏是台湾威纶公司人机界面的核心产品,是工业触摸屏领域的代表,它能够理想、生动地显示 PLC、单片机、PC 机上的数据信息,并直接支持市面上大多数的 PLC 产品,功能强大,使用方便。其 MT500 系列触摸屏采用 Intel Strong ARM RISC 32 位 133 MHz 处理器,具有更敏捷的反应与更好的性能价格比,编辑工具软件 EasyBuilder 500 功能强大,是专业触摸屏人机界面的优秀代表。

eView 产品中包含了免费的 EasyBuilder 组态软件。该软件操作非常简单,用户可以在最短的时间内设计好自己的操作程序。

eView 可以直接连接市场上绝大多数主流 PLC,根据 PLC 的不同可以在 EasyBuilder 中选择不同的 PLC 协议类型。当下载设计好的工程软件到触摸屏中时,EasyBuilder 软件将同时自动下载正确的 PLC 驱动,eView 控制面板使用动态数据访问方式来管理 PLC 数据,系统自动收集当前窗口所有连续的 PLC 寄存器地址来优化 PLC 通信,这样可以减少响应时间,提高通信效率及画面数据更新速度。

EasyBuilder 是一种友好的用户界面、最简单的操作方式,基于 WINDOWS 的 eView 组态软件。通过使用图 9-1 工具箱,设计触摸屏的显示屏幕简单到只需要 3 步:①从工具箱中选择元件图标,在图标上按下鼠标左键;②在接着弹出的对话框中选择该元件要显示的图

形和文字;③把该元件放置在屏幕上理想位置即可。



图 9-1 工具箱

同时,EasyBuilder 也提供了一套画图工具,用户通过它可以设计出任意的图形。该套画图工具如图 9-2 所示;当选择一个画图元件并按下鼠标左键,将弹出一个绘图属性框。在这里可以设置所绘图形的属性,比如线(或边框)颜色、线(或边框)粗细、填充颜色、模板样式和模板颜色等,设置好所需要的属性后,就可以直接使用鼠标在屏幕上绘制图形了。EasyBuilder 可以显示任何 256 色位图图形。用户需要做的只是引入该位图到 EasyBuilder 位图库中,然后就可以通过该位图库直接使用该位图了。而且还可以在 EasyBuilder 屏幕上任意修改位图的大小。此外,群组功能允许把多个基本的元件和图形组合在一起作为新的单独群组元件使用。

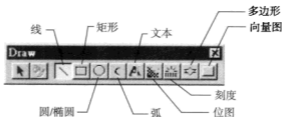


图 9-2 画图工具

2. EasyBuilder 500 的安装

(1) 软件来源

可由随机光盘获取,有特殊需求也可进入威纶公司网站 <http://www.weintek.com> 获取所有可用版本软件(包括中文简体、繁体及英文版)及最新软件更新档案。

(2) 计算机硬件要求(建议配置)

CPU: INTEL Pentium II 以上等级

内存: 64MB 以上

硬盘: 2.5GB 以上,最少留有 10MB 以上的磁盘空间。

软驱: 3.5 寸软盘驱动器一个

光驱: 4 倍速以上光驱一个

显示器: 支持解析度 800×600 以上的彩色显示器

鼠标键盘: 一个

RS-232 COM 口: 至少保留一个,以备触摸屏在[在线模拟]/[工程下载]/[工程上传]时使用。

打印机: 一台

(3) 操作系统

Windows 95/Windows 98/Windows NT/Windows 2000/Windows Me/Windows XP

均可。

9.1.2 制作一个简单的 EB 500 工程文件

“使用简便”是 EasyBuilder 500(EB 500)组态软件的最大优点。在这里演示制作一个只包含一个开关控制元件工程的过程文件,来说明 EB 500 的工程简单制作方法。

1) 第一步

首先,创建一个新的空白的工程。

(1) 安装好 EB 500 软件后,如图 9-3 所示,在[开始]中选择[程序]/[EasyBuilder]/[EasyBuilder 500]。

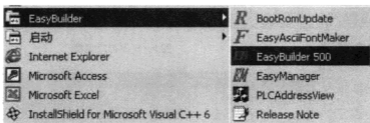


图 9-3 开始菜单

(2) 如果是第一次进入系统或者上次进入系统时最后一次打开的是一个空白的工程文件,将弹出如图 9-4 所示的对话框



图 9-4 型号选择

选择要使用的触摸屏类型,按下[确认]即可进入 EB 500 编辑画面,否则,将进入 EB 500 组态软件的编辑界面,打开的是最近一次打开的工程文件界面。

选择菜单[文件]/[新建]来新建一个工程文件,如图 9-5 所示,将首先弹出触摸屏类型选择对话框。在这里选择[MT510S/MT508S 640×480],按下[确认]即可。

(3) 创建好新工程后,选择菜单[文件]/[保存]可保存工程文件。如图 9-6 所示,保存工程文件名为 a. epj。

(4) 如图 9-7 和图 9-8 所示,选择菜单[工具]/[编译],这时将弹出编译工程对话框,按下[编译]按钮,编译完毕后关闭编译对话框。

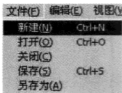


图 9-5 新建菜单



图 9-6 保存对话框

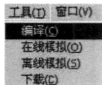


图 9-7 编译操作

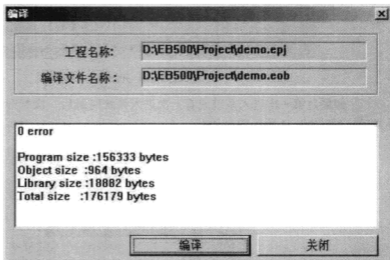


图 9-8 编译结果

(5) 选择菜单[工具]/[离线模拟]。这时可以看到刚刚创建的新空白工程文件中的模拟图了,如图 9-9 和图 9-10 所示。

如图 9-10 可见,该工程文件没有任何元件,并不能执行任何操作。在当前屏幕上单击鼠标右键选择[Exit]或者直接按下空格键可以退出模拟程序。

2) 创建一个开关元件

(1) 首先选择菜单[编辑]/[系统参数],弹出系统参数设置对话框,如图 9-11 所示。

选择 PLC 的类型为 MITSUBISHI FXOn/FX2,[人机类型]选择所使用的相应的触摸屏类型,其他设置如图 9-11 所示。

(2) 选择菜单[元件]/[位状态切换开关]或者按下对应图标,如图 9-12 所示。这时将弹出位状态切换开关属性对话框。按照图 9-13 所示进行设置。

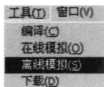


图 9-9 高线模拟菜单



图 9-10 空白模拟界面

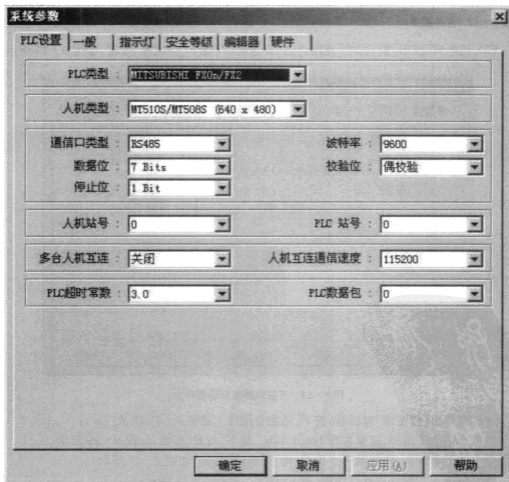


图 9-11 系统参数

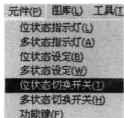


图 9-12 元件菜单

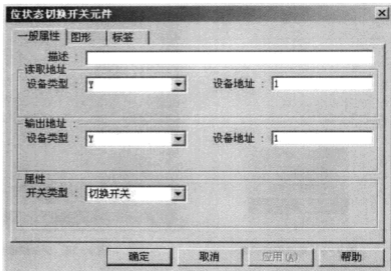


图 9-13 开关属性界面

(3) 切换到[图形]页,选中[使用位图]复选框,并按下[位图库]按钮,如图 9-14 所示。

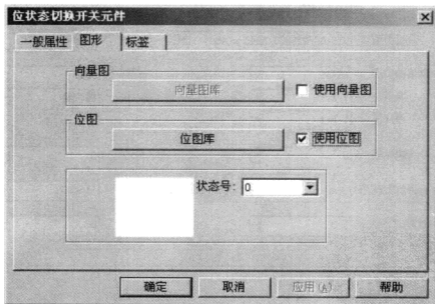


图 9-14 开关属性图形设置界面

这时将弹出[位图库]对话框,按下[添加位图库],如图 9-15 所示。

选择合适的位图库,这里选择 bmp1. blb。按下[打开]按钮,如图 9-16 所示。

弹出如下对话框,选择第一个位图,按下[确认]按钮,如图 9-17 所示。

这时将返回到图形选择对话框,按下[确定],如图 9-18 所示。

在屏幕上按下鼠标左键,把元件放置在如图 9-19 所示的位置。

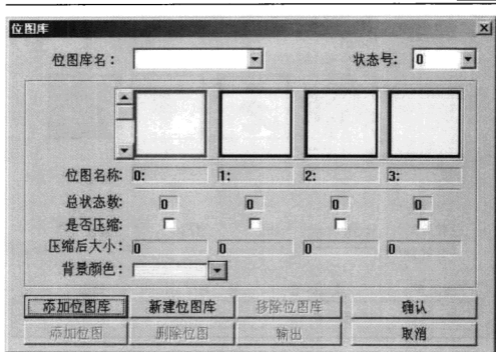


图 9-15 位图库

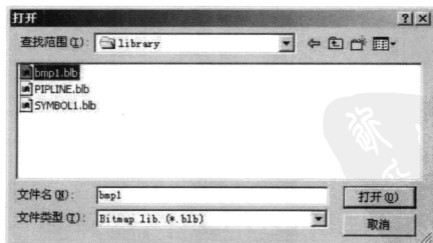


图 9-16 打开对话框

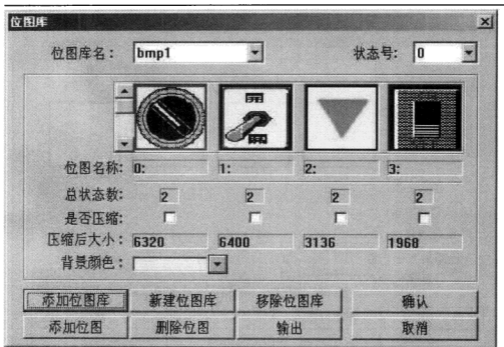


图 9-17 位图选择后显示结果

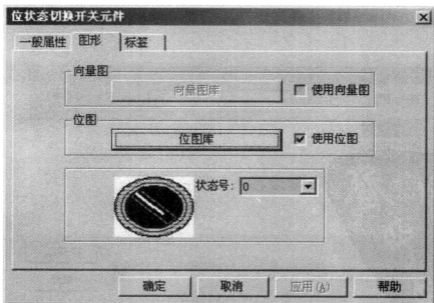


图 9-18 位图选择后显示

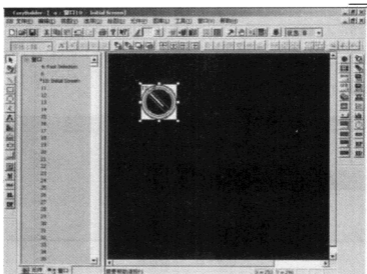


图 9-19 开关添加后结果

(4) 选择菜单[文件]/[保存],接着选择菜单[工具]/[编译]。

(5) 选择菜单[工具]/[离线模拟]。如图 9-20 所示,可以看到设置的开关,在点击它时将可以来回切换状态,和真正的开关一模一样!

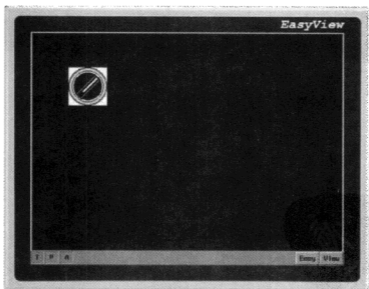


图 9-20 模拟运行结果

(6) 如果手中有 MT5-PC 电缆线的话(也可以自己制作该电缆线,其接线方式请参照对应产品手册的相关部分内容),请把 MT5-PC 电缆线的 PLC 端连接到 PLC(必须根据使用的 PLC 使用不同的转接线),把 MT5-PC 电缆线的 HMI 端连接到触摸屏的 PLC[RS485]通信口,PC 端连接到计算机的 COM 接口(如果 PLC 是 RS-232 接线方式,那么请把 PLC 连接到

触摸屏的 PLC-232 通信口,接线方式必须参照对应的产品手册内容)。

(7) 选择菜单[工具]/[在线模拟],这时在计算机屏幕上用鼠标触控该开关,将发现已经可以控制 PLC 对应的输出口了,可以让该 PLC 的这个输出口的开关状态来回切换了。

(8) 选择菜单[工具]/[下载],如图 9-21 所示。

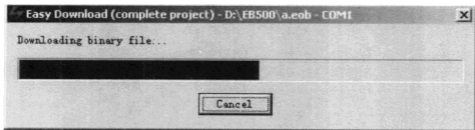


图 9-21 下载过程

(9) 下载完毕,把触摸屏重新复位,这时在触摸屏上将可以通过手指来触控这个开关。此时,开关的制作就完成了。

作者根据 EB 500 的提供的功能,开发了一个和一台 S7-300 的 PLC 组成的急冷监控系统,操作非常方便。开发界面如图 9-22 所示,实际运行界面如图 9-23 所示。



图 9-22 编写界面

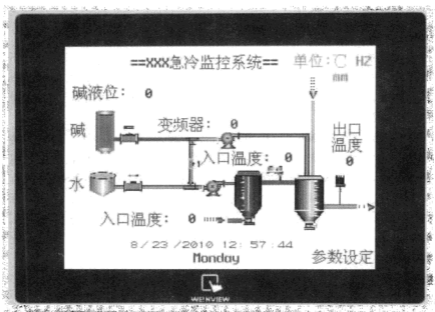


图 9-23 实际运行界面

9.2 组态软件

组态(Configuration),是应用软件中提供的工具、方法,完成工程中某一具体任务的过程。组态软件是数据采集监控系统(Supervisory Control and Data Acquisition,SCADA)的软件平台工具,是工业应用软件的一个组成部分。它具有丰富的设置项目,使用方式灵活,功能强大。组态软件由早先单一的人机界面向数据处理机方向发展,管理的数据量越来越大。随着组态软件自身以及控制系统的发展,监控组态软件部分地与硬件发生分离,为自动化软件的发展提供了充分发挥作用的舞台。OPC(OLE for Process Control)的出现,以及现场总线尤其是工业以太网的快速发展,大大简化了异种设备间互联,降低了开发 I/O 设备驱动软件的工作量。I/O 驱动软件也逐渐向标准化的方向发展。

目前所有组态软件都能实现类似的功能:①几乎所有运行于 32 位 Windows 平台的组态软件都采用类似资源浏览器的窗口结构,并对工业控制系统中的各种资源(设备、标签量、画面等)进行配置和编辑;②处理数据报警及系统报警;③提供多种数据驱动程序;④各类报表的生成和打印输出;⑤使用脚本语言提供二次开发的功能;⑥存储历史数据并支持历史数据的查询等。

目前国产的比较出名的产品有组态王、MCGS、力控等。国外的产品有美国 Wonderware 公司的 InTouch、美国 Intellution 公司的 FIX、德国西门子公司的 WinCC 等。本节将以德国西门子公司的 WinCC 为例来介绍组态的使用。

9.2.1 WinCC 组态软件

1. WinCC 简介

西门子视窗控制中心 SIMATIC WinCC(Windows Control Center)是 HMI/SCADA 软件中的后起之秀,1996 年进入世界工控组态软件市场,当年就被美国 Control Engineering 杂志评为最佳软件,以最短的时间发展成第三个在世界范围内成功的 SCADA 系统,而在欧洲,它无可争议地成为第一。

WinCC V6.0 采用标准 Microsoft SQL Server 2000(WinCC V6.0 以前版本采用 Sybase)数据库进行生产数据的归档,同时具有浏览器功能,可使经理、厂长在办公室内看到生产流程的动态画面,从而更好地调度指挥生产,是工业企业中 MES 和 ERP 系统首选的生产实时数据平台软件。作为 SIMATIC 全集成自动化系统的重要组成部分,WinCC 确保与 SIMATIC S5, S7 和 505 系列的 PLC 连接的方便和通讯的高效;WinCC 与 STEP7 编程软件的紧密结合缩短了项目开发的周期。此外,WinCC 还有对 SIMATIC PLC 进行系统诊断的选项,给硬件维护提供了方便。

2. 性能特点

WinCC 具有以下性能特点:

(1) 创新软件技术的使用。西门子公司与 Microsoft 公司的密切合作保证了用户获得不断创新的技术。

(2) 包括所有 SCADA 功能在内的客户机/服务器系统。即使最基本的 WinCC 系统仍能够提供生成复杂可视化任务的组件和函数,并且生成画面、脚本、报警、趋势和报表的编辑器也是最基本的系统组件。

(3) 可灵活裁剪,由简单任务扩展到复杂任务。WinCC 是一个模块化的自动化组件,既可以灵活地进行扩展,从简单的工程到复杂的多用户应用,又可以应用到工业和机械制造工艺的多服务器分布式系统中。

(4) 众多的选件和附加件扩展了基本功能。已开发的、应用范围广泛的、不同的 WinCC 选件和附加件,均基于开放式编程接口,覆盖了不同工业分支的需求。

(5) 使用 Microsoft SQL Server 2000 作为其组态数据和归档数据的存储数据库,可以使用 ODBC, DAO, OLE-DB, WinCC OLE-DB 和 ADO 数据库方便地访问归档数据。

(6) 强大的标准接口(如 OLE, ActiveX 和 OPC)。WinCC 提供了 OLE, DDE, ActiveX, OPC 服务器和客户机等接口或控件,可以很方便地与其他应用程序交换数据。

(7) 使用方便的脚本语言。WinCC 可编写 ANSI-C 和 Visual Basic 脚本程序。

(8) 开放 API 编程接口可以访问 WinCC 的模块。所有的 WinCC 模块都有一个开放的 C 编程接口(C-API),这意味着可以在用户程序中集成 WinCC 的部分功能。

(9) 具有向导的简易(在线)组态。WinCC 提供了大量的向导来简化组态工作。在调试阶段还可进行在线修改。

(10) 可选择语言的组态软件和在线语言切换。WinCC 软件是基于多语言设计的。这意味着可以在英语、德语、法语以及其他众多的亚洲语言之间进行选择,也可以在系统运行时选择所需要的语言。

(11) 提供所有主要 PLC 系统的通讯通道。作为标准,WinCC 支持所有连接 SIMATIC

S5/S7/505 控制器的通讯通道,还包括 PROFIBUS DP, DDE 和 OPC 等非特定控制器的通讯通道。此外,更广泛的通讯通道可以由选件和附加件提供。

(12) 与基于 PC 的控制器 SIMATIC WinAC 紧密接口,软/插槽式 PLC 和操作、监控系统在一台 PC 机上相结合无疑是一个面向未来的概念。在此前提下,WinCC 和 WinAC 实现了西门子基于 PC 的、强大的自动化解决方案。

(13) 全集成自动化 TIA(Totally Integrated Automation)的部件。TIA 集成了西门子的各种产品包括 WinCC。WinCC 是工程控制的窗口,是 TIA 的中心部件。TIA 意味着在组态、编程、数据存储和通讯等方面的一致性。

(14) SIMATIC PCS7 过程控制系统中的 SCADA 部件,如 SIMATIC PCS7 是 TIA 中的过程控制系统;PCS7 是结合了基于控制器的制造业自动化优点和基于 PC 的过程工业自动化优点的过程处理系统(PCS)。基于控制器的 PCS7 对过程可视化使用标准的 SIMATIC 部件。WinCC 作为 PCS7 的操作员站。

(15) 符合 FDA 21 CFR Part 11 的要求。

(16) 集成到管理系统中。标准接口使 SIMATIC WinCC 成为在全公司范围 IT 环境下的一个完整部件。这超越了自动控制过程,将范围扩展到工厂监控级,为公司管理 MES(制造执行系统)和 ERP(企业资源管理)提供管理数据。

9.2.2 组态一个简单的 WinCC 项目

本节介绍 WinCC 的基本组件,并通过一个简单的例子来说明如何建立和编辑 WinCC 项目。

WinCC 的基本组件是组态软件和运行软件。WinCC 项目管理器是组态软件的核心,对整个工程项目的数据组态和设置进行全面的的管理。开发和组态一个项目时,使用 WinCC 项目管理器中的各个编辑器建立项目使用的不同元件。

使用 WinCC 的运行软件,操作人员可监控生产过程。使用 WinCC 来开发和组态一个项目的步骤主要包括:①启动 WinCC;②建立一个项目;③选择及安装通讯驱动程序;④定义变量;⑤建立和编辑过程画面;⑥指定运行 WinCC 系统的属性;⑦激活 WinCC 画面;⑧使用变量模拟器测试过程画面。

1. 启动 WinCC

选择[开始]/[SIMATIC]/[WinCC]/[WinCC V6.0 ASIA]菜单项,如图 9-24 所示。

2. 建立一个项目

第一次运行 WinCC 时,出现一个对话框,选择建立新项目的类型包括 3 种:单用户项目、多用户项目和客户机项目。

如果希望编辑和修改已有项目,可选择[打开已存在的项目]。

建立单用户项目 gaoantun2_1 的步骤为:

(1) 选择[单用户项目],并单击[确定]按钮。

(2) 在[新项目]对话框中输入“gaoantun2_1”作为项目名,并为项目选择一个项目路径。如有必要可以对项目路径重新命名。否则,将以项目名作为路径中最后一层文件夹的名字。本次关闭 WinCC 前所打开的项目,在下次启动 WinCC 时将自动打开。如果本次关闭 WinCC 前项目是激活的,则下次启动 WinCC 时也将自动激活所打开的项目。

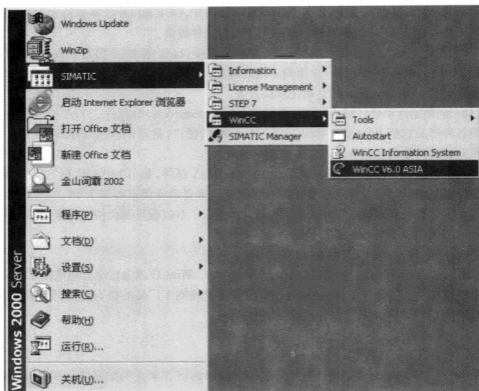


图 9-24 WinCC 启动菜单

(3) 打开 WinCC 资源管理器如图 9-25 所示,实际窗口内容根据配置情况有细微差别。窗口的左边为浏览窗口,包括所有已安装的组件。有子文件夹的组件在其前面标有符号“+”,单击此符号可显示此组件下的子文件夹。窗口右边显示左边组件或文件夹所对应的元件。



图 9-25 WinCC 资源管理器

(4) 在导航窗口中单击[计算机]图标,在右边窗口中将显示与用户的计算机名一样的计算机服务器。右击此计算机,在快捷菜单中选择[属性]菜单项,在随后打开的对话框中可设置 WinCC 运行时的属性,如设置运行系统的启动组件和使用的语言等。

3. 选择及安装通讯驱动程序

若要使用 WinCC 来访问自动化系统(PLC)的当前过程值,则在 WinCC 与自动化系统间必须组态一个通讯连接。通讯将由称作通道的专门的通讯驱动程序来控制。WinCC 有针对自动化系统 SIMATIC S5/S7/505 的专用通道以及与制造商无关的通道,例如 PROFIBUS-DP 和 OPC。

(1) 添加一个通讯驱动程序,右击浏览窗口中的[变量管理],在快捷菜单中选择[添加新的驱动程序]菜单项,如图 9-26 所示。



图 9-26 添加新的驱动程序

(2) 在[添加新的驱动程序]对话框中,选择一个驱动程序,如[SIMATIC S7 Protocol Suite.chn],并单击[打开]按钮,所选择的驱动程序将显示在变量管理的子目录下。

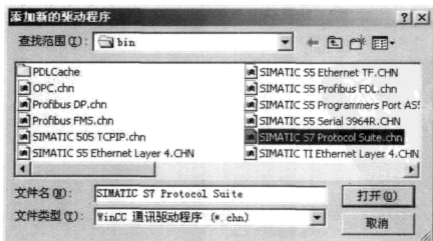


图 9-27 驱动选择对话框

(3) 单击所显示的驱动程序前面的“+”，将显示当前驱动程序所有可用的通道单元，见图 9-28。

(4) 右击[TCP/IP]通道单元，在快捷菜单中选择[新驱动程序的连接]菜单项，见图 9-29。在随后打开的如图 9-30 所示的[连接属性]对话框中输入“S7-300”作为逻辑连接名，单击[确定]按钮，单击右边的属性可以修改对应 IP 地址信息，见图 9-31。

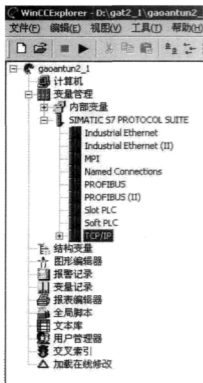


图 9-28 当前驱动所有可用通道单元

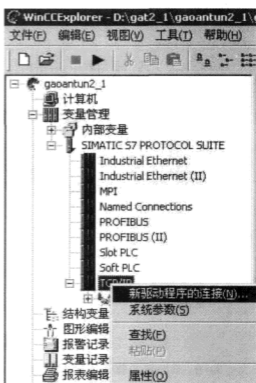


图 9-29 新驱动程序的连接

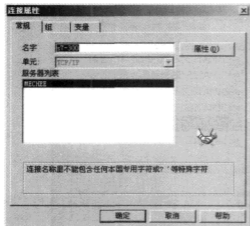


图 9-30 连接属性

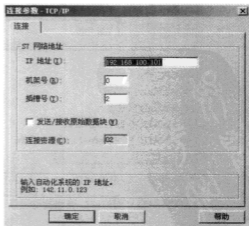


图 9-31 IP 地址的设定和修改

4. 定义变量

1) 建立内部变量

(1) 如果 WinCC 资源管理器[变量管理]节点还没有展开,可双击“变量管理”子目录。

(2) 右击[内部变量]图标,在快捷菜单中选择[新建变量]菜单项。

(3) 在[变量属性]对话框中,可修改变量命名,默认为 NewTag。在数据类型列表框中,可选择对应数据类型,单击[确定]按钮,如图 9-32 所示。所建立的所有变量显示在 WinCC 项目管理器的右边窗口中。

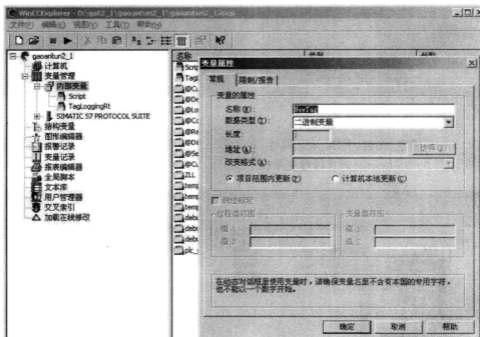


图 9-32 建立内部变量

如需要创建其他的内部变量,可重复上述操作,还可以对变量进行复制、剪切、粘贴等操作,快速建立多个变量。

2) 建立过程变量

(1) 在建立过程变量前,必须先安装一个通讯驱动程序和建立一个逻辑连接。在前面已建立了一个命名 S7-300 的逻辑连接。

(2) 单击[变量管理]/SIMATIC S7 PROTOCOL SUITE/(TCP/IP 前面的“+”),展开各自节点,右击出现的节点 S7-300,在快捷菜单中选择[新建变量]菜单项,出现如图 9-33 所示的变量属性。

(3) 在[变量属性]对话框中设置变量命名,并选择数据类型。同时必须给过程变量分配一个在 PLC 中的对应地址,地址类型与通讯对象相关。单击地址域旁边的[选择]按钮,打开[地址属性]对话框,如图 9-34 所示。

(4) 在过程变量的[地址属性]对话框中,选择数据列表框中过程变量所对应的存储区域。地址列表框和编辑框用于选择详细地址信息。

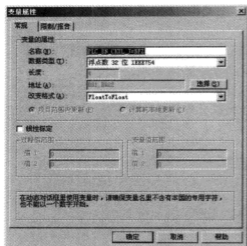


图 9-33 过程变量属性

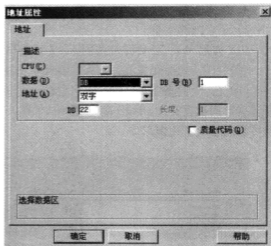


图 9-34 地址属性

(5) 单击[确定]按钮,关闭[地址属性]对话框。单击[确定]按钮,关闭[变量属性]对话框,得到如图 9-35 所示的所有过程变量。

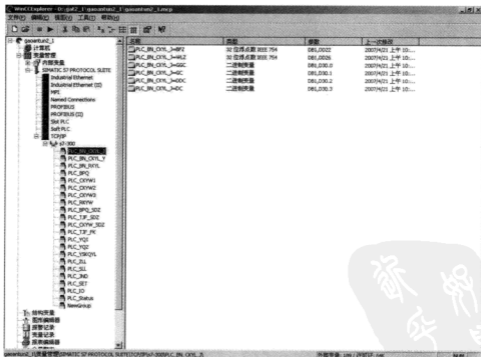


图 9-35 所有过程变量

5. 建立和编辑过程画面

在组态期间,图形系统用于创建在运行系统中显示过程的画面。图形编辑器是图形系

统的组态软件,是用于创建过程画面的编辑器。

(1) 右击 WinCC 资源管理器的图形编辑器,从快捷菜单中选择[新建画面]菜单项,将创建一个名为“NewPd14. pdl”的画面,并显示在 WinCC 资源管理器的右边窗口中,如图 9-36 和图 9-37 所示。

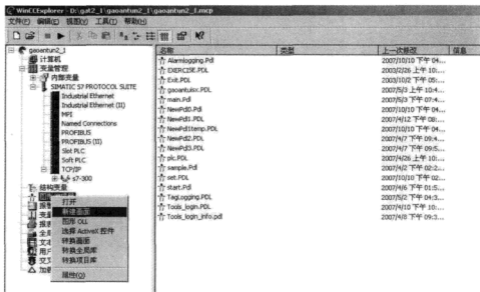


图 9-36 新建画面

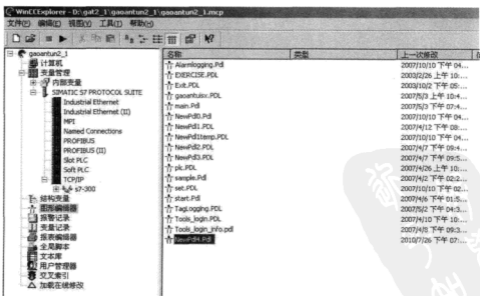


图 9-37 新建画面结果

(2) 双击 NewPd14. pdl,进入编辑界面,如图 9-38 所示。

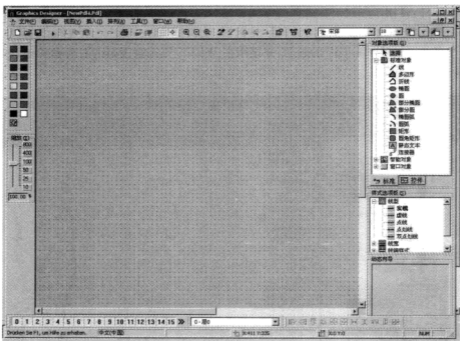


图 9-38 画面编辑界面

(3) 在该界面可以添加所需要图元和各种对象。比如添加一个按钮对象,并命名为“主界面”,见图 9-39。

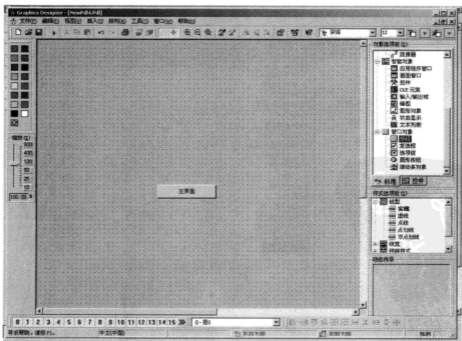


图 9-39 添加按钮对象

(4) 双击对应对象,可添加鼠标动作,如图9-40所示。

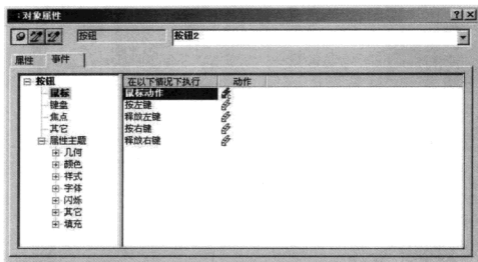



图9-40 添加鼠标动作

再双击对应动作处,允许用户用C语言编写对应动作。对应C脚本的代码如图9-41所示。




图9-41 编辑动作

(5) 采用同样的方法,可以将用户需要的所用图元和对应脚本完成,最后将该界面保存为“gaoantuisx.pdl”,最后界面如图9-42所示。

(6) 单击工具栏上的图标,保存画面,并将图形编辑器最小化。至此,画面组态完成。

6. 指定运行 WinCC 系统的属性

(1) 单击 WinCC 项目管理器浏览窗口上的图标。

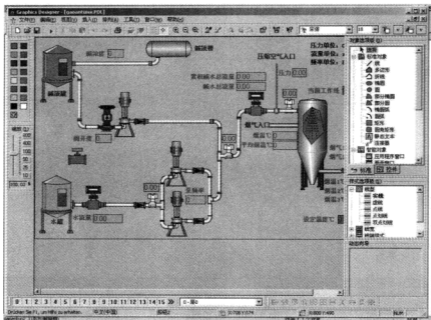


图 9-42 编辑完的画图

(2) 在右边窗口中, 右击以你计算机名字命名的服务器。从快捷菜单中选择[属性]菜单项, 打开[计算机属性]对话框, 选择[图形运行系统]选项卡, 设置项目运行时的外观。这些属性值将影响项目在运行时的外观。

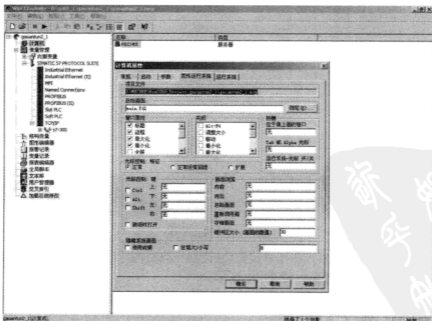



图 9-43 计算机属性

7. 激活 WinCC 画面

选择 WinCC 资源管理器主菜单[文件]/[激活],也可直接单击工具栏上的图标,即可运行工程。

思考题与习题

1. 触摸屏的主要功能是什么?
2. 什么是组态? 组态的功能有哪些?
3. WinCC 的性能特点有哪些?



第 10 章 控制电机

随着自动控制系统和计算装置的不断发展,在普通电机的基础上产生出多种具有特殊性能的小功率电机。它们在自动控制系统和计算装置中分别作为执行元件、检测元件和计算元件,这类电机统称为控制电机。

控制电机和普通电机并没有本质上的差别,都是基于电磁感应原理进行工作,只是结构的不同使它们有不同的运行特点。根据用途,普通电机的设计着重于启动和运行状态等力能指标的要求,而控制电机的设计则着重于对旋转角的高精度检测与复现和快速响应等特性。控制电机的输出功率较小,一般从数百毫瓦到数百瓦;系列产品的外径一般为 12.5~130mm;质量从数十克到数千克。但是在大功率的自动控制系统中,有些控制电机的输出功率可达数十千瓦,机壳外径可达数百毫米。

控制电机已经成为现代工业自动化系统、现代科学技术和现代军事装备中必不可少的重要元件。它的使用范围也非常广泛,例如:火炮和雷达的自动定位,舰船方向舵的自动操纵,飞机的自动驾驶,遥远目标位置的显示,机床加工过程的自动控制和自动显示,阀门的遥控,天文望远镜和大型绘图机的方向和运动控制,以及电子计算机、自动记录仪表、医疗设备、录音、录像、摄影等方面的自动控制系统。其性能好坏将直接影响到整个控制系统的 works 性能,如果控制电机的性能不佳或使用不当,整个控制系统的性能就难以提高。

现代自动控制系统对控制电机除了要求其体积小、重量轻、耗电少外,还要求具有的特点有:①高可靠性;②高精度;③快速响应。

本章主要介绍伺服电动机、力矩电动机、微型同步电动机、测速发电机、自整角机、直线电动机和步进电动机等控制电机的基本原理、基本特性和使用方法。要求了解控制电机的基本结构和特点,掌握各种控制电机的工作原理、主要运行特性和应用。

10.1 伺服电动机

伺服电动机也称执行电动机,在控制系统中用作执行元件,其功能是将电信号转换为轴上的角位移或角速度输出,以带动控制对象。通过改变控制电压的大小和极性,就可以控制伺服电动机的启动、停止、转速和转向。

伺服电动机分为直流伺服电动机和交流伺服电动机,其中直流伺服电动机又有普通直流伺服电动机、低惯量直流伺服电动机、直流力矩电动机等几种,交流伺服电动机有两相感应伺服电动机、三相感应伺服电动机、无刷永磁伺服电动机等。

机电传动控制系统对伺服电动机的基本要求有:①调速范围宽。伺服电动机的转速应能跟随控制电压在较大的范围内实现连续调节;②快速响应。要有较大的堵转转矩和较小的转动惯量,能实现迅速启动、停转;③机械特性和调节特性应呈线性;④无“自转”现象,能

够有效进行控制；⑤控制功率小、重量轻、体积小，过载能力强，可靠性好。

10.1.1 直流伺服电动机

直流伺服电动机的基本结构和工作原理与普通直流他励电动机相同，通常分为电磁式、永磁式两种类型。

1. 控制方式

根据直流他励电动机的机械特性[式(3-8)]可知，改变控制电压 U_s 或改变磁通 Φ ，都可以控制直流伺服电动机的转速和转向，对应的控制方式有电枢控制和磁场控制两种。

1) 电枢控制

负载转矩和励磁磁通均保持不变，仅改变电枢绕组控制电压的方法称为电枢控制。由于电枢控制具有响应迅速、机械特性硬、调速特性线性度好的优点，在实际生产中大都采用电枢控制方式。对于永磁式伺服电动机，只能采取电枢控制的方式。

2) 磁场控制

如果负载转矩和电枢绕组电压保持不变，仅改变励磁回路的电压，当升高励磁电压时，励磁电流增加，主磁通增加，电动机转速就降低；反之，转速升高。尽管磁场控制也可达到控制转速和转向的目的，但励磁电流和主磁通之间是非线性关系，且随着励磁电压的减小其机械特性变软，调节特性也是非线性的，所以应用较少。

2. 运行特性

直流伺服电动机的运行特性包括机械特性和调节特性。这里仅介绍电枢控制直流伺服电动机的运行特性。

1) 机械特性

直流伺服电动机的机械特性与他励直流电动机的机械特性相同，为

$$n = \frac{U_s}{K_s \Phi} - \frac{R}{K_s K_r \Phi^2} T \quad (10-1)$$

如图 10-1 所示的直流伺服电动机机械特性为一组相互平行的曲线。当控制电压 $U_s = 0$ 时，电动机立即停止，因此，无自转现象。

2) 调节特性

调节特性是指负载转矩不变时，电动机转速与电枢电压之间的函数关系，由式(10-1)，有

$$n = \frac{U_s}{K_s \Phi} - \frac{R}{K_s K_r \Phi^2} T = k_1 U_s - A \quad (10-2)$$

式中， $k_1 = \frac{1}{K_s \Phi}$ ，为特性曲线的斜率； $A = \frac{RT}{K_s K_r \Phi^2}$ ，为由负载阻转矩决定的常数。

根据式(10-2)作出如图 10-2 所示的调节特性曲线，可知调节特性为一条上升的直线。 U_{s0} 是电动机处在待动而又未动的临界状态时的控制电压，称为始动电压。根据式(10-2)可

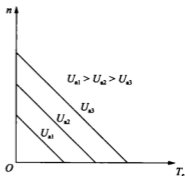


图 10-1 直流伺服电动机的机械特性

知,当 $n=0$ 时, U_{ω} 正比于 T , 即负载转矩越大, 始动电压越高。而且在控制电压从零到 U_{ω} 的一段范围内, 电动机不转动, 称为电动机的死区。

3. 直流伺服电动机特点

直流伺服电动机具有良好的线性调节特性及快速的时间响应, 机械特性较硬。但结构复杂, 电刷换向使速度受到限制, 有附加阻力, 甚至可能会出现低速运转不稳定的现象。

直流伺服电动机低速运转时, 由于电枢齿槽、电刷接触压降和电刷和换向器之间摩擦的影响, 转速会出现时快、时慢, 甚至暂时停一下的不均匀现象。低速运转的不稳定性可以通过增加稳速控制电路或使用直流力矩电动机加以解决。其特点和应用见表 10-1。

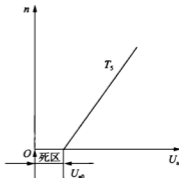


图 10-2 直流伺服电动机的调节特性曲线

表 10-1 直流伺服电动机的特点和应用范围

名称	励磁方式	产品型号	结构特点	性能特点	适用范围
一般直流伺服电动机	电磁或永磁	SZ 或 SY	与普通直流电机相同, 但电枢铁芯长度与直径之比大一些, 气隙较小	具有下垂的机械特性和线性调节特性, 对控制信号响应快速	一般直流伺服系统
无槽电枢直流伺服电动机	电磁或永磁	SWC	电枢铁芯为光滑圆柱体, 电枢绕组用环氧树脂粘在电枢铁芯表面, 气隙较大	具有一般直流伺服电动机的特点, 而且转动惯量和机电时间常数小, 换向良好	需要快速动作、功率较大的直流伺服系统
空心杯形电枢直流伺服电动机	永磁	SYK	电枢绕组用环氧树脂浇注成杯形, 置于内、外定子之间, 内、外定子分别用软磁材料和永磁材料做成	具有一般直流伺服电动机的特点外, 转动惯量和机电时间常数小, 低速运转平滑, 换向好	需要快速动作的直流伺服系统
印刷绕组直流伺服电动机	永磁	SN	在圆盘形绝缘薄板上印制裸露的绕组构成电枢, 磁极轴向安装	转动惯量小, 机电时间常数小, 低速运行性能好	低速和启动、反转频繁的控制系统
无刷直流伺服电动机	永磁	SN	由晶体管开关电路和位置传感器代替电刷和换向器, 转子用永久磁铁做成, 电枢绕组在定子上且做成多相式	既保持了一般直流伺服电动机的优点, 又克服了换向器和电刷带来的缺点。寿命长, 噪声低	要求噪声低、对无线电不产生干扰的控制系统

10.1.2 交流伺服电动机

交流伺服电动机通常是指应用比较普及的两相感应伺服电动机。根据伺服电动机的基本要求, 两相伺服电动机与普通感应电动机相比, 应具有转子电阻大和转动惯量小两个特点。

1. 两相交流(感应)伺服电动机的结构

两相交流伺服电动机的基本结构和工作原理与普通感应电动机相似。电机也由定子和转子两大部分构成,定子铁芯中分别安放两个相差 90° 的励磁绕组 WF 和控制绕组 WC,如图 10-3 所示。转子制成具有较小惯量的细长形,有鼠笼转子和杯形转子两种结构形式。

2. 两相交流伺服电动机的工作原理

两相交流伺服电动机的工作原理类似于单相异步电动机。为了控制方便,定子中的励磁绕组运行时接至电压为 U_f 的交流电源上,控制绕组施加与 U_f 同频率、大小或相位可调的控制电压 U_c ,通过 U_c 控制伺服电动机的启、停及运行转速的大小。与单相电容式异步电动机不同的是,这两个绕组通常是分别接在两个不同的交流电源(两者频率相同)上。

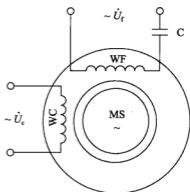


图 10-3 交流伺服电动机的接线图

由于励磁绕组电压 U_f 固定不变,而控制电压 U_c 是变化的,故通常情况下两相绕组中的电流不对称,电动机中的气隙磁场也不是圆形旋转磁场,而是椭圆形旋转磁场。

单相异步电动机在控制电压取消后,励磁电压单相供电使它继续转动,即存在自转现象,达不到控制的目的。如果使电动机转子导条具有较大电阻,不仅可以解决自转现象,还能扩大转速范围并使机械特性尽可能接近线性。转子具有不同电阻时,电动机的机械特性如图 10-4 所示,曲线 1、2、3、4 分别是转子电阻为 R_{r1} 、 R_{r2} 、 R_{r3} 、 R_{r4} 的机械特性, $R_{r1} > R_{r2} > R_{r3} > R_{r4}$ 。

随着转子电阻的增大,稳定运行的转速范围增加。若转子电阻足够大,可使 $s_m \geq 1$,如图 10-4 曲线 3、4 所示,在 $0 < s < 1$ 的范围内呈现出下垂的机械特性,相应地,电动机从零到同步转速的整个范围内均能稳定运转。此外,由图 10-4 还可以看到,随着转子电阻的增大,机械特性也更接近于线性关系。

如果转子电阻足够大,使正向旋转磁场产生最大转矩时对应的转差率 $s_m > 1$,则可使单相运行时电动机的合成电磁转矩 T_e 在电动机运行范围内均为负值,即 $T_e < 0$,如图 10-5 所示。这样,当控制电压消失后,由于电磁转矩为制动性转矩,使电动机迅速停止运转,克服了自转现象。停转所需要的时间,比两相电压 U_c 和 U_f 同时取消、单靠摩擦等制动方法所需的时间要少得多。这也是两相交流伺服电动机在工作时,励磁绕组始终接在电源上的原因。

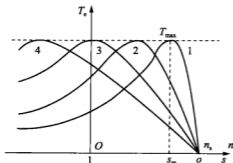


图 10-4 不同转子电阻时的机械特性

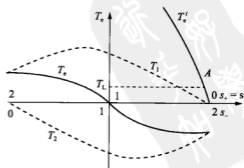


图 10-5 增大转子电阻时的特性曲线

由于增大转子电阻是克服两相感应伺服电动机自转现象的有效措施,所以目前两相交流伺服电动机的鼠笼导条,通常都是用高电阻材料(如黄铜、青铜等)制成,杯形转子的壁很薄,一般只有 $0.2\sim 0.8\text{mm}$,因而转子电阻较大,且惯量很小。

3. 控制方式

两相感应伺服电动机运行时,其励磁绕组接到电压为 U_l 的交流电源上,通过改变控制绕组电压 U_c 的大小或相位控制伺服电动机的启、停及运行转速。因此两相感应伺服电动机的控制方式有三种:幅值控制、相位控制、幅值—相位控制。

1) 幅值控制

采用幅值控制时,励磁绕组电压始终为额定励磁电压 U_N ,通过调节控制绕组电压的大小来改变电动机的转速,而控制电压与励磁电压之间的相位角始终保持 90° 。当控制电压取消时,电动机停转。

2) 相位控制

采用相位控制时,控制绕组和励磁绕组的电压大小均保持额定值不变,通过调节控制电压的相位,即改变控制电压与励磁电压之间的相位角 β ,实现对电动机的控制。当 $\beta=0^\circ$ 时,两相绕组产生的气隙合成磁场为脉动磁场,电动机停转。

3) 幅值—相位控制(电容控制)

将励磁绕组串联电容以后,接到交流电源上,而控制绕组电压的相位始终与电源相位相同,通过调节控制电压的幅值来改变电动机的转速。同时,由于转子绕组的耦合作用,励磁绕组电流会发生变化,使励磁绕组电压及串联电容上的电压也随之改变,因此,控制绕组电压和励磁绕组电压的大小及它们之间的相位角 β 都随之改变,故称幅值—相位控制,也称电容控制。

10.1.3 交/直流伺服电动机的性能比较

两相感应伺服电动机和直流伺服电动机均在自动控制系统中作为执行元件使用。实际应用时可根据不同的性能特点加以选用。

直流伺服电动机和交流伺服电动机被广泛应用于自动控制系统中,它们各有特点。就机械特性和调节特性来说,前者堵转转矩大,特性曲线线性度好,机械特性硬;后者特性曲线为非线性的,这将影响系统的动态精度。一般来说,特性的非线性度越大,系统的动态精度越低。

交流伺服电动机中负序磁场会产生制动转矩,使得电动机的损耗增大,电磁转矩减小。当输出功率相同时,交流伺服电动机的体积大、重量重、效率低,只适用于小功率系统,其输出功率 $0.1\sim 100\text{W}$,电源频率有 50Hz 、 400Hz 等几种,其中最常用的在 30W 以下。而对于功率较大的控制系统则普遍采用直流伺服电动机,输出功率为 $1\sim 600\text{W}$,但有的也可达数千瓦。

由于直流伺服电动机有电刷和换向器,因而结构复杂,制造麻烦,维护困难。换向器还能引起无线电干扰。而交流伺服电动机结构简单、运行可靠、维护方便。所以,在确定系统中采用何种电动机时,要综合考虑各种电动机的特点。

10.2 力矩电动机

在一些自动控制系统中,被控制对象的转速非常低,如果使用普通的伺服电动机,不仅需要使用比较复杂的减速装置,还可能出现低速运行不稳定,影响系统性能的提高。而具有转速低、转矩大,能够长期处在堵转状态或低速下运行,反应速度快,转矩和转速波动小,机械特性和调节特性线性度好等特性的力矩电动机,则较好地解决了这个问题。

力矩电动机根据电源分为交流和直流两大类。交流力矩电动机又分为异步电动机和同步电动机两种类型,虽然其结构简单、工作可靠,但在低速性能方面还有待进一步完善,目前使用较少。永磁式直流力矩电动机具有良好的低速平稳性和线性的机械特性及调节特性,故在生产中应用最广泛。

10.2.1 永磁式直流力矩电动机的结构特性

直流力矩电动机的工作原理和直流伺服电动机基本相同,但直流力矩电动机为了能在相同体积和电枢电压的前提下,产生较大的转矩及较低的转速,一般都做成扁平状,其结构如图10-6所示。

1. 输出转矩分析

对于直流力矩电动机,转子绕组中每根导体所受的电磁力应为

$$F = BI_a l \quad (10-3)$$

式中, B 为每个磁极下磁感应强度平均值; I_a 为电枢绕组导体上的电流; l 为导体的有效长度(电枢铁芯厚度)。

电磁转矩为

$$T = NF \frac{D}{2} = NBI_a l \frac{D}{2} = \frac{BI_a N}{2} D l \quad (10-4)$$

式中, N 为电枢绕组总导体数; D 为电枢铁芯直径。

式(10-4)表明了电磁转矩与电动机结构参数 l 、 D 的关系。首先,如果电动机体积为一定值,则电枢体积应保持不变,即 $\pi D^2 l$ 不变,当 D 增大时,铁芯长度 l 就应减小;其次,在相同电流 I_a 及相同用铜量的条件下,若电枢绕组的导线直径不变,则电枢绕组总导体数 N 应随 l 的减小而增加,以保持 Nl 不变。在满足上述条件时,式(10-4)中 $BI_a/2$ 近似为常数,故转矩 T 与直径 D 近似成正比关系。

2. 输出转速分析

转子导体在磁场中运动切割磁力线所产生的感应电势为

$$e_a = Blv \quad (10-5)$$

式中, v 为导体运动的线速度, $v = \frac{\pi D n}{60}$ 。

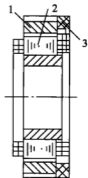


图10-6 直流力矩电动机结构
1—定子;2—电枢;3—刷架

设一对电刷之间的并联支路数为 2, 则一对电刷间, $N/2$ 根导体串联后总的感应电势为 E_a , 且在理想空载条件下, 外加电压 U_a 应与 E_a 相平衡, 所以

$$U_a = E_a = \frac{N}{2} Bl \frac{\pi D n_0}{60} = \frac{NBl\pi D n_0}{120}$$

$$\text{即} \quad n_0 = \frac{120}{\pi} \frac{U_a}{NBlD} \quad (10-6)$$

式(10-6)说明, 在仍保持 Nl 不变的情况下, 理想空载转速 n_0 和电枢铁芯直径 D 近似成反比关系, 电枢直径 D 越大, 电动机理想空载转速 n_0 就越低。

由以上分析可知, 在其他条件相同的情况下, 增大电动机直径, 减小轴向长度, 有利于增加电动机的转矩和降低空载转速, 故力矩电动机都做成扁平圆盘状结构。

10.2.2 直流力矩电动机的特点

在某些特殊场合中, 有时要求电动机不转, 转子在一段时间内保持静止的力矩, 这时电动机处于堵转状态。堵转电流很大, 所以一般电动机是不允许堵转的。在分析选用力矩电动机时应考虑几项指标: ①连续堵转电流: 在规定条件下, 直流力矩电动机允许连续堵转又不引起过热的最大电流; ②连续堵转转矩: 在规定条件下, 对直流力矩电动机施加连续堵转电流, 电动机连续堵转时产生的输出转矩; ③峰值(堵转)电流: 在规定条件下, 堵转不至引起直流力矩电动机损坏, 或性能不可恢复的最大电流; ④峰值(堵转)转矩: 在规定条件下, 对直流力矩电动机施加峰值堵转电流, 电动机堵转时产生的输出转矩。

力矩电动机在低速运行和堵转时过电流产生的热量较大, 因此, 通常在电动机的后端盖上装有独立的轴流或离心式风机作强迫通风冷却, 以保证力矩电动机能在低速或堵转下正常运行。在堵转情况下能产生足够大的力矩而不损坏, 加上它有精度高、反应速度快、线性度好等优点, 因此, 常用在低速、需要转矩调节和需要一定张力的随动系统中作为执行元件, 例如, 纺织成卷机、数控机床、天线的驱动, X-Y 记录仪及电焊枪的焊条传动等装置。

10.3 微型同步电动机

微型同步电动机与交流同步电动机一样, 转子转速恒为同步转速 n , 使用在转速要求恒定的装置中, 如电唱机、录音机、电视设备、电钟、时间机构、记录仪表装置、陀螺仪等。

微型同步电动机定子结构与异步电动机定子一样, 有单相的, 也有三相的, 定子绕组通电后建立气隙旋转磁通势。转子的极数与定子极数相同, 依据转子不同的类型, 微型同步电动机分成永磁式、反应式和磁滞式等。

10.3.1 永磁式微型同步电动机

永磁式微型同步电动机的转子是一个永久磁铁, N、S 极沿着圆周方向交替排列。当电动机运行时, 定子产生转速为 n 的旋转磁通势, 转子则以 n 转速随之同步旋转, 图 10-7 所示为永磁式微型同步电动机永磁转子。

转子永久磁铁磁力线与定子磁力线的夹角为 θ , 永磁式微型同步电动机电磁转矩大小与

$\sin\theta$ 成正比。当 $\theta=0^\circ$ 时, 电磁转矩 $T=0$; 当 $\theta=90^\circ$ 时, $T=T_{\max}$, $T-\theta$ 曲线为正弦曲线。

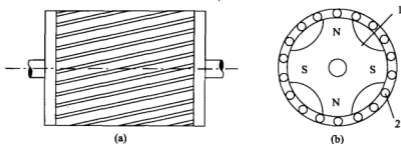


图 10-7 永磁式微型同步电动机转子

1—永久磁铁; 2—启动绕组

永磁式微型同步电动机采用异步启动, 即在转子上装上鼠笼启动绕组, 在启动过程中产生异步转矩启动。待到转子转速接近同步转速 n , 旋转磁通势与转子相对速度很小时, 转子被牵入同步, 转速升到 n 。在同步电动机运行时, 鼠笼绕组不再起作用。

10.3.2 反应式微型同步电动机

反应式微型同步电动机的转子由铁磁材料制成, 其纵轴与横轴方向的磁阻大小相差比较大, 纵轴方向的磁阻最小, 横轴方向的磁阻最大, 纵轴与横轴空间相差 90° 电角度。纵轴与定子磁极轴线夹角为 θ , 规定转子纵轴逆时针方向领先定子磁极轴线时, θ 为正。

转子处于磁场中, 其纵轴与横轴磁阻不对称时, 磁通必然要走磁阻最小的路径。图 10-8 所示为转子位置不同时磁通路径的几种情况。在磁场中, 转子受力。由于磁通的路径不同, 转子受力的大小与方向也都不同, 规定转矩的逆时针方向为正。

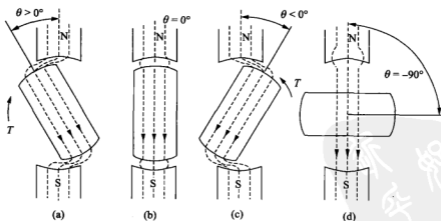


图 10-8 磁阻不对称时的反应转矩

分析磁场力的方向可以采用电磁场中法拉第力线的看法, 形象的比喻就是把每根磁力线都看成为被拉长的橡皮筋, 它有纵向收缩、横向扩张的趋势, 由此对磁场中的导体或铁磁体产生力的作用, 即磁场力。按照这个方法, 图 10-8(a) 中, $0^\circ < \theta < 90^\circ$, 定子与转子之间的

磁力线都有纵向收缩的趋势,因此磁力线连着的定子和转子沿着磁力线方向互相吸引,也就是转子受到电磁转矩的作用,方向为顺时针,按照正方向规定, $T < 0$ 。同理,图 10-8(b)中, $\theta = 0^\circ$,被磁力线连着的定子和转子互相吸引的电磁力方向在转子纵轴上,因此转矩 $T = 0$ 。不言而喻,图 10-8(c)中, $-90^\circ < \theta < 0^\circ$, $T > 0$ 。图 10-8(d)中, $\theta = -90^\circ$, $T = 0$ 。这种由于转子横、纵轴磁阻不对称而使转子在磁场中受到转矩的作用,该转矩称为反应转矩,或磁阻转矩。该转矩即为凸极同步电动机的凸极电磁转矩。

由于反应转矩的存在,定子磁通势若以同步转速 n 旋转时,转子也随之同步旋转。反应式微型同步电动机以 n 转速负载运行时,其 $T = T_L$,也就是说 θ 的大小由负载转矩 T_L 决定。

阻尼绕组,消除转子的振荡。图 10-9 所示为不同形式的转子冲片,冲片上的小圆孔内装鼠笼条。

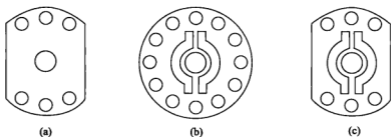


图 10-9 反应式微型同步电动机转子冲片

反应式微型同步电动机转子上也装有鼠笼绕组用来启动。

10.3.3 磁滞式微型同步电动机

磁滞式同步电动机转子由硬磁材料制造。硬磁材料的磁滞现象非常显著,其磁滞回线宽、剩磁与矫正力数值很大。铁磁材料在交变磁化时,磁滞现象表现为 B 滞后于 H 一个时间角,如图 10-10 所示。

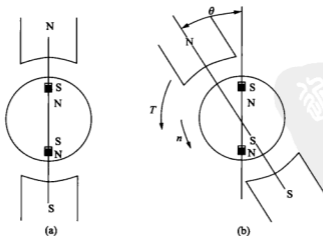


图 10-10 硬磁性材料转子磁化

磁滞式同步电动机转子,是处于旋转磁化状态,磁滞现象表现为铁磁材料的磁通势滞后于外磁通一个空间角,具体分析如下。

图 10-10 中电机转子是一个硬磁材料的实心转子,大小不变的定子磁通势在空间固定方向,转子处于恒定磁化状态。转子上的磁分子沿定子磁通势方向排列,转子总磁通势 F 与定子磁通 Φ 方向一致,转子受转矩 $T=0$ 。若定子磁通势逆时针方向在空间旋转,如图 10-10(b)所示,转子处于旋转磁化状态,其上的磁分子都不停地改变方向,以使其磁通势的方向与定子旋转磁通势的方向一致,但是磁分子旋转时彼此产生很大的摩擦力,使得它们不能及时跟上定子旋转磁通势的速度而始终落后一个空间角度 θ ,这就是转子磁通势 F 与定子磁通 Φ 的空间夹角,称作磁滞角。旋转磁化时由于磁滞角存在,转子转矩 $T_c \neq 0$,是逆时针方向,称为磁滞转矩。磁滞式同步电动机启动时,转子之所以能随定子旋转磁通势旋转并达到同步转速 n ,其原因就在于磁滞转矩的存在。磁滞式同步电动机中,磁滞角 θ_c 的大小只取决于硬磁材料的磁化特性,与旋转磁通势的转速无关。当 Φ 一定时(在 $0 \sim n$ 范围内) θ_c 与 T_c 都为常数。磁滞式同步电动机可以自行启动,而且转矩大,这是它的优点。磁滞式同步电动机转子多数采用环形硬磁材料,可用冲片叠压而成,也可用整块材料铸造而成,里面有套筒。套筒可由非磁性材料制成,转子磁路如图 10-11(a)所示;套筒也可由磁性材料制成,转子磁路如图 10-11(b)所示。

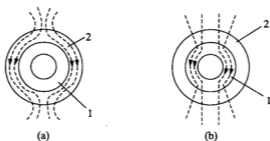


图 10-11 磁滞式电动机的转子

1—套筒;2—转子

功率较小的磁滞电动机,定子可以采用罩极结构,与罩极式单相异步电动机的定子一样。转子则可由硬材料的薄片组成,薄片的形状还可以是磁路不对称的,即有纵轴与横轴之分。这样运行时转矩既有磁滞转矩,又有反应转矩。

10.3.1 节所述的永磁式同步电动机启动时除用鼠笼绕组产生异步转矩以外,也可以采用转子上装上硬磁材料的圆环,既产生较大的启动转矩,又增加运行时的同步转矩。

10.4 测速发电机

测速发电机是一种把转子转速转换为电压信号的测量元件。按结构和工作原理的不同,测速发电机分为直流测速发电机、异步(感应)测速发电机和同步测速发电机,但后者用得极少。

为保证性能可靠,测速发电机的输出电动势应具有与转速成正比且比例系数要大、响应

迅速、无信号区小或剩余电压小、正转和反转时输出电压不对称度小、对温度敏感低等特点。此外,直流测速发电机的要求在一定转速下输出电压交流分量小,干扰小;交流测速发电机的要求在工作转速变化范围内输出电压相位变化小。

测速发电机广泛用于各种速度或位置控制系统。在自动控制系统中作为检测速度的元件,以调节电动机转速或通过反馈来提高系统稳定性和精度;在解算装置中可作为微分、积分元件,也可作为加速或延迟信号或用来测量各种运动机械在摆动或转动及直线运动时的速度。

10.4.1 直流测速发电机

按励磁方式不同,直流测速发电机可分为电磁式和永磁式两大类。其结构和工作原理与普通直流发电机基本相同。

1. 输出特性

输出特性是指输出电压 U_a 与输入转速 n 之间的函数关系。如图 10-12 所示,只要保持 Φ 、 R_a 、 R_L 不变, U_a 与 n 之间就成正比关系。当负载 R_L 变化时,将使输出特性斜率发生变化。改变转子转向, U_a 的极性也随之改变。

2. 直流测速发电机的误差及其减小方法

在实际运行中, U_a 与 n 之间并不能严格地保持正比关系,即存在误差。下面分析产生误差的主要原因和解决方法。

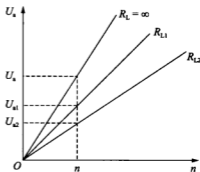


图 10-12 不同负载时的理想输出特性

(1) 电枢反应的影响。当发电机带上负载后,电枢中通过的电流 I_a 产生电枢磁场,使气隙中的合成磁场产生畸变,这种现象称为电枢反应。负载电阻越小或转速越高,电枢反应越显著。为了减小电枢反应对输出特性的影响,在直流测速发电机的技术条件中标有最高转速和最小负载电阻。

(2) 延迟换向的影响。延迟换向是指换向元件中的总电动势 e_K 阻碍电流变化,使换向延迟的现象。由于换向元件被电刷短路, e_K 在换向元件中产生与其方向一致的附加电流 i_K , i_K 产生磁通 Φ_K , Φ_K 的存在使主磁通作用削弱。通常采用限制最高转速的措施来减小延迟换向去磁效应的影响。

(3) 温度的影响。在应用中,测速发电机本身会发热,而且环境温度也是变化的。导致励磁绕组电阻变化,将引起励磁电流和磁通的变化,造成线性误差。减少误差的方法是把励磁设计得足够饱和,或者在励磁回路串联阻值较大、温度系数很小的附加电阻。

(4) 纹波电动势的影响。直流测速发电机因换向片数有限,而电枢绕组电动势是每一支路中有限个元件感应电动势的叠加,因此输出电动势总是带有微弱的波动,这种微小的波动称为纹波,纹波造成了线性误差。减小该误差的方法是增加电机绕组匝数和相应的换向片数,并在输出电路中加入滤波电路。

(5) 电刷接触压降对输出特性的影响。电刷接触电压的影响导致输出特性存在不灵敏区,可采用接触电阻小的电刷。

3. 直流测速发电机的主要性能指标

直流测速发电机的性能指标是选择直流测速发电机的依据,主要有以下几项。

(1) 线性误差。在工作转速范围内,实际输出特性曲线与线性输出特性之间的最大差值与最高线性转速在线性特性曲线上对应的电压之比。

(2) 灵敏度。也称输出斜率,是指在额定励磁电压下,转速为 $1\ 000\text{r/min}$ 时所产生的输出电压。测速发电机作为阻尼元件使用时,灵敏度是其重要的性能指标。

(3) 最高线性工作转速和最小负载电阻。是保证测速发电机工作在允许的线性误差范围内的两个使用条件。

(4) 不灵敏区。由电刷接触压降 ΔU_b 而导致输出特性斜率显著下降(几乎为零)的转速范围。该性能指标在超低速控制系统中是重要的。

(5) 输出电压的不对称度。该指标是指在相同转速下,测速发电机正、反转时,输出电压绝对值之差与两者平均值之比。对要求正、反转的控制系统需考虑该指标。

(6) 纹波系数。是指测速发电机在一定转速下,输出电压中交流分量的有效值与直流分量之比。高精度速度伺服系统对该指标的要求较高。

10.4.2 交流(感应)测速发电机

交流测速发电机分为同步测速发电机和异步(感应)测速发电机两大类。而同步测速发电机定子输出绕组感应电动势的大小和频率都随转速 n 的变化而变化,不宜用于自动控制系统中。

1. 异步测速发电机的结构特点

异步(感应)测速发电机的定子上有两相正交绕组,其中一相接电源励磁,另一相则用作输出电压信号。转子有鼠笼式和非磁性空心杯式两种。

鼠笼式感应测速发电机结构简单,但性能较差;空心杯形转子感应测速发电机性能好,是目前应用最广泛的一种交流测速发电机。

2. 工作原理

当转子以转速 n 旋转时,转子导体切割励磁磁场产生旋转电动势,其大小为

$$E_r = 4.44f k_w N_s \Phi_m = 4.44k_w N_s \Phi_m \frac{p}{60} n = k_1 \Phi_m n \quad (10-7)$$

因导体的电阻较大,其漏电抗可以忽略,因而

$$U_2 \approx E_2 \propto \Phi_m \propto n$$

转子转速为 n 时, U_2 正比于 n 。输出电压的频率为励磁电源频率,有效值正比于转速。

3. 输出特性

(1) 电压幅值特性。指当励磁电压和频率为常数时,交流测速发电机输出电压 U_2 与转速 n 间的函数关系。理想状态下测速发电机的输出特性为过原点的一条直线,实际特性由于各绕组漏阻抗和磁通等都有一些变化,使输出电压的大小与转速不是严格的直线关系。

(2) 电压相位特性。指当励磁电压和频率为常数时,交流测速发电机输出电压与励磁电压之间的相位差与输入转速 n 间的函数关系。实际上,输出电压和励磁电压之间总是

存在着相位移,并且相位移的大小随着转速的改变而变化。

4. 主要技术指标及误差分析

(1) 线性误差及分析。严格来说,输出电压和转速之间不是直线关系,由非线性因素引起的误差称为非线性误差,并由下式决定,即

$$\delta_1 = \frac{\Delta U_{\max}}{U_{\max}} \times 100\% \quad (10-8)$$

式中: ΔU_{\max} 为实际输出特性和工程上选取的理想输出特性间输出电压的最大差值; U_{\max} 为对应最大转速 n_{\max} 的输出电压。

线性误差产生的原因主要有:励磁绕组的漏阻抗的影响;转子绕组漏抗引起的直轴去磁效应;交轴磁通在直轴上的去磁效应等。

(2) 相位误差及分析。相位误差是指交流测速发电机实际输出电压与励磁电压之间相位的变化量,它随转速的改变而变化。

相位误差产生的原因有:转子漏电抗相位角的影响,它的大小与转速无关;励磁绕组漏阻抗相位角的影响,它的大小与转速有关;在励磁绕组中串入适当的电容,调节电容的大小,使输出电压和励磁电压同相位。

(3) 剩余电压。指交流测速发电机在励磁绕组接额定励磁电压,转子静止时输出绕组中所产生的电压。它会使系统产生误动作而引起系统的误差。

(4) 输出斜率(灵敏度)。是在额定励磁电压下,转速为 1 000r/min 时测速发电机的输出电压。输出斜率越大,测速发电机的灵敏度就越高。

10.5 自整角机

自整角机是一种实现角度传输、变换和指示的元件。可以用于测量或控制远距离设备的角度位置,也可以在随动系统中用作机械设备之间的角度联动装置,使机械上互不相连的两根或两根以上转轴保持同步偏转或旋转。通常是两台或多台组合使用。

根据自整角机在系统中的作用,自整角机可分为控制式和力矩式两大类,前者主要用于随动系统,后者主要用于指示系统。根据相数不同,分为三相和单相自整角机,前者用于电—轴系统,后者用于角传递系统。下面主要介绍单相自整角机。

10.5.1 控制式自整角机

控制式自整角机的作用是将机械角位移变为电量。它由一个由变压器铁芯制成的定子和一个在定子内自由转动的转子组成。定子包括三相对称 120° 等距分布的磁极,磁极上绕着定子绕组。每个定子绕组的一端连接到一个公共点,形成 Y 型。各绕组的输出端用引线引出,分别标为 s_1 、 s_2 和 s_3 ,如图 10-13(a)所示,为了图示方便,一般用如图 10-13(b)所示的形式来表示。

转子上有一个绕组并有外部接头 Z_1 和 Z_2 。该接头通过滑环与转子连接使其能够不受限制地转动,为简化起见,图 10-13(b)上未画出该滑环。

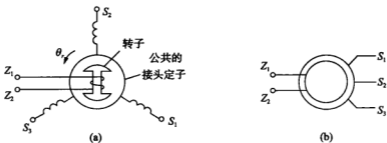


图 10-13 控制式自整角机发送机

转子绕组为初级绕组，通常按 50 Hz 或 400 Hz 的交流励磁电压。定子绕组为次级绕组。次级绕组中感应的电压取决于磁力线与线圈切割时的角度。当两组平行时为最大，而当两组组正交时为零。所以在任何一个绕组中感应的电压取决于转子相对于该绕组的位置。

一般转子的零位被定义为 s_2 绕组的磁极轴线与转子绕组磁极轴线处于一条直线时的位置。在这一角度下 s_2 中感应的电压为最大，而 s_1 和 s_3 中感应的电压较小。这时在 s_1 和 s_3 中的电压大小相等，而相位与 s_2 相差 120° 。为了方便起见，把和励磁电压同相的电压指定为正，而不同相的电压指定为负。

当转子离开零位时，在 s_2 绕组中的感应电压的计算公式为

$$E_{s_2} = KE_z \cos \theta_r \quad (10-9)$$

式中： E_{s_2} 为 s_2 绕组中感应电压的均方根值为转子励磁电压的均方根值； K 为根据转子与定子之间的匝数比和磁耦合得出的比例系数； θ_r 为逆时针方向测出的转子离开零位的转角。

这个感应电压如图 10-14(a) 所示。注意在 180° 时感应电压的大小与在 0° 时相同。但是励磁电压与感应电压之间的相位关系改变了 180° 。

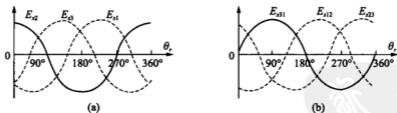


图 10-14 控制式自整角机发送机定子绕组中的感应电压与转子轴转角的函数关系

必须指出，图 10-14(a) 中的正弦波并不是通常意义上的交流电压。尽管在定子绕组中感应的电压是交流电压，曲线的幅值是转子转角的函数，但曲线的幅值所代表的是交流电压的均方根幅值。曲线的极性指示感应电压与励磁电压之间的相位关系。在另外两个定子绕组中的感应电压将按如下方程变化。

$$E_{s_3} = KE_z \cos(\theta_r - 120^\circ) \quad (10-10)$$

$$E_{s_1} = KE_z \cos(\theta_r + 120^\circ) \quad (10-11)$$

图 10-14(a)中的电压都是相对于定子的公共接点作出的。因为这个接点一般不用,故须考虑定子外部引出线之间成对取出的电压。对于任一个具体的转子转角,在两根定子引出线之间的电压可以通过测量图 10-14(a)中两条相应曲线之间的垂直距离求出。借助式(10-9)至式(10-11),可算出以下的引出线间的电压方程,即

$$E_{a31} = \sqrt{3}KE_z \sin\theta, \quad (10-12)$$

$$E_{a12} = \sqrt{3}KE_z \sin(\theta - 120^\circ) \quad (10-13)$$

$$E_{a23} = \sqrt{3}KE_z \sin(\theta + 120^\circ) \quad (10-14)$$

由图 10-14(b)可见,只要电机为两极电机,这三个线间电压与轴的转角是单值对应的,没有任何两个轴的转角位置上能使三个电压对应相等。所以自整角机大都采用两极结构。

10.5.2 力矩式自整角接收机

力矩式自整角接收机与控制式自整角发送机相反,是一种把电压变成位置的传感器。对于作用在该接收机各定子引线上的一组已知电压,将使它的转子转到相应的角度。其结构与发送机相似。图 10-15 所示为自整角发送机与自整角接收机相互连接的方法。两个装置的定子引线间是电联系,两个转子使用同一个励磁。如上所述这个励磁在各个定子绕组中感应出电压。当转子转角 θ_r 与 θ_s 相同时,在相应的一对定子引线之间感应出相等的电压,在任何一个装置中都没有定子电流流动。因为没有产生定子磁场,在定子和转子磁场之间没有相互作用,因而在转子上不产生力矩。

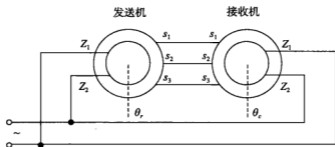


图 10-15 自整角发送机与自整角接收机组

如果自整角发送机的转子相对于自整角接收机的转子转动,在相应的定子绕组磁场中感应的电压就不相等。此电压差将引起两定子绕组之间流过电流。定子磁场与转子磁场相互作用的结果在转子上产生一个力矩。由于自整角发送机转子轴受到设定输入角的制约,而接收机的转子轴是自由转动的,因此,此力矩将驱动转子向着使两转子角位差为零的方向转动。随着两个转子角位移逐步接近一致,定子电流也逐步减小,此力矩逐步接近于零,使自整角接收机的转子轴停止在与发送机转子轴相一致的角位置上。这就是说自整角接收机再现或重复自整角发送机的转角。

自整角接收机一般都含有一定形式的机械阻尼和阻尼绕组,它使接收机转子逐渐接近正确位置。自整角发送机—接收机机组的使用局限于较低的负载力矩,其精度由接收机轴承的摩擦和负载来确定,常用于机械负载小的仪表指示系统。

10.5.3 控制式自整角变压器

控制式自整角变压器是专为随动系统中作为位置传感器和误差检测器而设计的,其结构与发送机或接收机的结构相似,其中定子是由三个相隔 120° 的 Y 形连接的绕组构成。而转子是圆柱形的,属于隐极结构,形成一个均匀的气隙而具有最小的激磁电流。另外,控制式自整角变压器具有较高的绕组阻抗,使其输入功率尽可能降低到实际需要的数值。

图 10-16 所示为控制式自整角发送机与控制式自整角变压器机组的连接方式。三个绕组的输入来自一个控制式发送机,以它作为控制式自整角变压器定子绕组的输入,由此引起的电流在控制式自整角变压器内产生了一个磁场。磁场的方向取决于定子绕组间电压的大小和相位,而它又取决于发送机转子的位置。第二种输入是作用于转子轴上的机械角度。转子绕组中的电感电压取决于转子所在位置被定子绕组磁场切割的线圈匝数。例如当转子绕组的轴线垂直于发送机轴位置指明的磁场矢量时,转子绕组的感应电压为零。因此控制式自整角变压器的零点或零位被定义为转子绕组输出电压为零位位置。

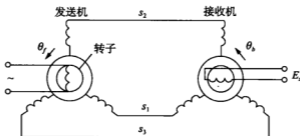


图 10-16 控制式自整角发送机—变压器机组

当自整角发送机—变压器机组处于协调位置($\theta_f = \theta_r$)时,控制变压器输出绕组的输出电压 E_r 为零。而当机组失调($\theta_f \neq \theta_r$)后,控制变压器便产生与失调角($\theta_f - \theta_r$)有关的输出电压 E_r 。因而,控制式自整角发送机—变压器机组两轴转角失调时,控制变压器便产生与失调角有关的输出电压,即

$$E_r = E_{\max} \sin(\theta_f - \theta_r) \quad (10-15)$$

式中, E_{\max} 为控制变压器转子的最大电压。

10.5.4 控制式差动发送机

控制式差动发送机的定子和转子都有三个相隔 120° 的绕组,如图 10-17 所示。这些绕组与自整角发送机的定子绕组相似。这种布局为该装置提供了两个输入:作用在定子绕组上的自整角发送机数据及作用在转子上的机械角度输入。正如控制式自整角变压器的情况一样,在转子绕组中的感应电压取决于转子相对于定子的方位。如果转子绕组与相应的定子绕组排成一条直线,感应的转子电压就会再现定子输入电压(假设匝数比为 1,符合一般实际情况),这种情况被定为差动发送机轴的 0° 。现在假设转子前进了 120° ,则感应的转子电压将等于把发送机转子反转 120° 而改变了定子的输入电压。由此可见,转动差动发送机的效果与自整角发送机轴在反方向转动同样大小的效果相同。所以差动发送机定子电压代表

了自整角发送机轴的转角与差动发送机轴的转角之差。

如果把差动发送机置于发送机与接收机之间如图 10-18 所示。则接收机的转角由以下方程给出,即 $\theta_c = \theta_f - \theta_d$, 其中: θ_f 和 θ_d 分别为自整角发送机和差动发送机的转角。

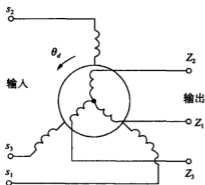


图 10-17 控制式差动发送机

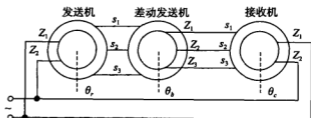


图 10-18 自整角发送机—差动发送机—接收机

如果把自整角发送机和差动发送机的接头 s_1 和 s_3 互换,则输出将是这两个输入角之和,即 $\theta_c = \theta_f + \theta_d$,当必须加入系统的输入角多于一个时,就要用到多于一个的差动发送机。

如图 10-17 和图 10-18 所示的自整角机机组都可以用于远程指示系统。自整角机也可与放大器和电动机一起组成伺服系统,精度比简单的自整角机机组高。

10.5.5 自整角机的选择和使用

力矩式和控制式自整角机各有不同的特点,选用时应根据电源情况、负载种类、精度要求、系统造价等方面综合考虑,具体包括:(1)控制式和力矩式自整角机的特点及适用的系统和负载;(2)自整角机的技术参数;(3)选用时应注意如下的事项。

①自整角机的励磁电压和频率必须与使用的电源符合。对尺寸小的自整角机,选电压低的比较可靠;对长传输线的自整角机,选用电压高的可降低线路压降的影响;要求体积小、性能好时,应选 400Hz 的自整角机;否则,采用工频电源,这样比较方便,不需要专用中频电源。

②相互连接使用的自整角机,其对接绕组的额定电压和频率必须相同。

③在电源容量允许的情况下,应选用输入阻抗较低的发送机,以获得较大的负载能力。

④选用自整角变压器和差动发送机时,应选输入阻抗较高的产品,以减轻发送机的负载。

⑤当自整角机在随动系统中用作测量差角时,在调整之前其发送机和变压器刻度盘上的读数通常需要进行调零。

⑥严格区分发送机和接收机,不能调换使用。

10.6 直线电动机

生产机械除绝大多数作旋转运动外,还需要作直线机械运动。直线异步电动机就是能

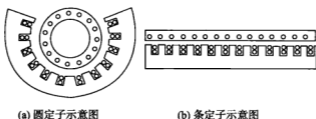
作直线运动的异步电动机。

直线电动机是在与旋转电动机相同的电磁理论基础之上,结合直线运动的特点发展起来的,可以看成由旋转电动机演变而来的一种电动机。因此,从理论上说,直流、异步和同步等几大类型的旋转电机都可以做成直线电动机,当然具体结构要结合应用情况来设计。

直线异步电动机也和旋转的异步电动机一样,具有结构简单、使用方便、运行可靠等优点。本节仅就该类电动机的工作原理、结构特点与使用场合作简单的介绍。

1. 工作原理

设想将一台笼型异步电动机沿其径向剖开,然后拉直便成为一台直线异步电动机,如图 10-19 所示。



(a) 圆定子示意图

(b) 条定子示意图

图 10-19 旋转异步电动机演变为直线异步电动机

当直线异步电动机的初级三相绕组中通入对称三相交流电流以后,就建立了三相合成磁动势,在合成磁动势作用下,和旋转的异步电动机一样,也产生气隙磁场。不同的是,这个气隙磁不是旋转的,而是按 A, B, C 相序沿直线移动的行波磁场,如图 10-20 所示。

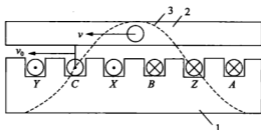


图 10-20 直线运动的异步电动机

1—初级;2—次级;3—行波磁场

显然,行波磁场的直线移动速度与旋转磁场在定子内圆表面上的线速度是一样的,即

$$v_0 = \frac{D_s}{2} \times \frac{2\pi n_0}{60} = \frac{D_s}{2} \times \frac{2\pi}{60} \times \frac{60 f_1}{p} = 2\tau f_1 \quad (10-16)$$

行波磁场切割拉直的转子,即所形成的次级导条,将在其中感应产生电动势及电流。根据电磁力定律,所有导条中的电流与气隙中的行波磁场相互作用,便产生电磁力。若初级固定,次级条铁将沿着移动磁场方向移动。设条铁线速度为 v ,则转差率

$$s = \frac{v_0 - v}{v_0} \quad (10-17)$$

正如在旋转电机中,改变极对数即可改变同步转速一样,在直线异步电动机中,改变极距 τ ,也可改变行波磁场的线速度 v_0 。由此可知,直线异步电动机的工作原理与旋转异步电动机并无本质上的差异,只是两种电动机的机械运动方式不同而已。

2. 结构形式及其特点

1) 结构形式

直线异步电动机有三种结构形式。

(1) 扁平形。由旋转异步电动机演变而来的直线异步电动机是扁平形的直线异步电动机,如图 10-19 所示。

(2) 管形。若将扁平形直线异步电动机的初级沿着与移动磁场方向平行的轴线卷成圆筒,便成为管形直线异步电动机,如图 10-21 所示。此时磁场沿圆筒的轴向移动。

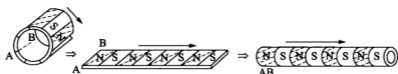


图 10-21 管形直线异步电动机

(3) 圆盘形。如将由扁平形直线异步电动机拉直的转子条铁,再改制成扁平的圆盘状,并能绕经过圆心的轴自由转动,而将拉直的定子装置在圆盘靠近外缘的平面上,使圆盘在切向电磁力的作用下作圆周运动,即为圆盘形直线异步电动机,如图 10-22 所示。

2) 结构特点

旋转电机的铁芯是圆环形的,磁路不存在始端和终端。直线电机的铁芯是平直的,且两端是断开的,如果将直线异步电动机的固定部件和移动部件做成一样长,如图 10-20 所示,因相对运动,移动部件则离开固定部件而远去,两者失去耦合作用,使移动部件停止运动。所以移动部件与固定部件长度不能相等。实际的直线异步电动机常把固定部件和移动部件做成长短不等,使长的部件有足够长度,保证在所需行程范围内,初级、次级有不变的耦合性。显然,采用长次级、短初级成本较低(因初级装设绕组),如图 10-23 所示。

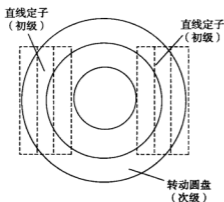


图 10-22 圆盘形直线异步电动机



图 10-23 长次级、短初级的形式

直线异步电动机与旋转异步电动机虽然有相似之处,但由于铁芯结构的差别,在一些电

磁基本现象上也有不同。直线异步电动机的初级铁芯是断开的,绕组在两端不连续。非铁磁物质的磁导率虽比铁磁物质的磁导率要小得多,但不能认为铁芯以外的空气中无磁场存在,而会产生所谓边缘效应。直线异步电动机仅有一个次级,当初级励磁产生行波磁场后,必然会出现纵向磁力,这是直线异步电动机在电磁本质上的一个特点。

3. 直线电机的特点及应用

与旋转电动机相比,直线电动机主要有以下特点。

(1) 由于不需要中间传动机构,使得系统本身的结构大为简化,重量和体积大大下降;同时,消除了中间环节所带来的各种定位误差,使定位精度提高,如果采用微机控制,还可以进一步提高整个系统的定位精度,使振动和噪声减小。

(2) 由于电动机子和定子始终保持一定的空气隙,表面不接触,消除了定、转子间的接触摩擦阻力,因而大大地提高了系统的灵敏度、快速性和随动性。电动机加速和减速的时间短,可实现快速启动和正反向运行。

(3) 普通旋转电动机由于受到离心力的作用,其圆周速度有所限制,而直线电动机运行时,其部件不受离心力的影响,因而它的直线速度可以不受限制。

(4) 由于散热面积大,容易冷却,直线电动机可以承受较高的电磁负荷,容量定额较高,对启动的限制小。

(5) 由于直线电动机结构简单,且它的初级铁芯在嵌线后可以用环氧树脂密封成一个整体,所以可以在一些特殊场合中应用,如可在潮湿环境甚至水中使用。

(6) 装配灵活性大,往往可将电动机的定子和转子分别与其他机体合成一体。

(7) 直线电动机和旋转电动机相比较,存在着效率和功率因数低、电源功率大及低速性能差等缺点。

目前,直线电动机已经得到了广泛应用。如:直线电动机驱动的传送机、起重机、冲压機、拉伸机、各种电动门窗、工厂行车、磁分选装置、玻璃搅拌机、拉伸机、计算机磁盘定位系统、自动绘图仪等,特别是在直线电动机驱动的磁悬浮列车、超高程电梯中也得到了应用。

10.7 步进电动机

步进电动机(Step Motor 或 Stepping Motor)是一种利用电磁感应原理,将电脉冲信号转换成直线或角位移的执行元件。每输入一个脉冲,电机就转过一个角度,运行一步。其运动形式是步进式的,故称为步进电动机。由于其输入的是脉冲电压,所以又称脉冲电动机或阶跃电动机。

步进电动机的工作机理是基于最基本的电磁铁作用,其原始模型起源于 1830~1860 年间。1870 年前后开始以控制为目的的尝试,应用于氩弧灯的电极输送机构中,这被认为是最初的步进电动机。此后,在电话自动交换机中广泛使用了步进电动机。不久又在缺乏交流电源的船舶和飞机等独立系统中广泛使用。

20 世纪 60 年代后期,在步进电动机本体方面随着永磁材料的发展,各种实用性步进电动机应运而生,而半导体技术的发展则推进了步进电动机在众多领域的应用,在近 40 年间,步进电动机迅速地发展并成熟起来。从发展趋向来讲,步进电动机已经能与直流电动机、异

步电动机以及同步电动机并列,从而成为电动机的一种基本类型。

步进电动机的运动是由一系列电脉冲控制,脉冲发生器所产生的电脉冲信号,通过环形分配器按一定的顺序加到电动机的各相绕组上。为了使电动机能够输出足够的功率,经过环形分配器产生的脉冲信号还需要进行功率放大。环形分配器、功率放大器以及其他辅助电路统称为步进电动机的驱动电源。步进电动机、驱动电源和控制器的构成了步进电动机传动控制系统,如图 10-24 所示。

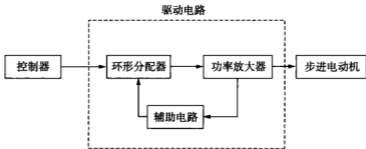


图 10-24 步进电动机传动控制系统框图

在负载能力范围内,步进电动机转子转动的速度正比于脉冲信号的频率,总位移量取决于总的脉冲数,使步进电动机具有控制特性好、误差不长期积累、步距值不受各种干扰因素的影响的优点。它作为伺服电动机应用于控制系统时,可以使系统简化、工作可靠,而且可以获得较高的控制精度。

步进电动机的主要缺点是效率低,高频时易出现失步现象,不适用于需高速运行的场合,并且需要专用的电脉冲信号,大负载惯量的能力不强,在运行中会出现共振和振荡问题。

10.7.1 步进电动机的结构与工作原理

步进电动机的结构分为定子和转子两大部分。定子由硅钢片叠加而成,绕有一定相数的控制绕组,由环形分配器送来的电脉冲对各相定子绕组轮流进行励磁。转子用硅钢片叠成或用软磁性材料做成凸极结构。转子本身没有励磁绕组的称为“反应式步进电动机”,用永久磁铁做转子的称为“永磁式步进电动机”。步进电动机的结构形式虽然繁多,但工作原理基本相同,下面仅以最常用的三相反应式步进电动机为例进行说明。

1. 结构特点

图 10-25 所示为一台三相反应式步进电动机的结构简图。其定子有六个磁极,每两个相对的磁极上绕有一相控制绕组,由外部脉冲信号对各相绕组轮流励磁。转子上有均布的四个凸齿。

2. 工作原理

1) 基本工作原理

步进电动机的工作原理,其实就是电磁铁的工作原理,如图 10-26 所示。该相绕组通电时,转子位置如图 10-26(a)

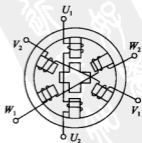


图 10-25 三相反应式步进电动机结构简图

所示,转子齿偏离定子齿一个角度。由于励磁磁通力图沿磁阻最小路径通过,因此对转子产生电磁吸力,迫使转子齿转动。当转子转到与定子齿对齐位置如图 10-26(b)所示时,因转子只受径向力而无切线力,故转矩为零,转子被锁定在这个位置上。由此可见,错齿是促使步进电动机旋转的根本原因。

对于三相反应式步进电动机,当 U 相通电, V 、 W 相不通电,如图 10-27(a)所示,1、3 齿与 U 相对齐,2、4 齿与 V 相错开 30° ;当 V 相通电, U 、 W 相不通电,转子顺时针转过 30° ,如图 10-27(b)所示,2、4 齿与 V 相对齐,1、3 齿与 W 相错开 30° ;当 W 相通电, U 、 V 相不通电,则转子再顺时针转过 30° ,如图 10-27(c)所示,1、3 齿与 W 相对齐。由此可见,当通电顺序为 $U \rightarrow V \rightarrow W \rightarrow U$ 时,转子便顺时针方向一步一步地转动。通电状态每换接一次,转子前进一步,对应的角度称为步距角(此例转子顺时针转过 30°)。电流换接三次,磁场旋转一周,转子前进一个齿距的位置,一个齿距所对应的角度称为齿距角(此例中齿距角为 90°)。当改变通电顺序时,将改变转子的转向,例如,通电顺序改为 $U \rightarrow W \rightarrow V \rightarrow U$,转子就逆时针转动。

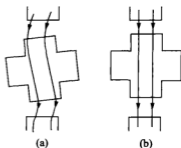


图 10-26 三相反应式步进电动机工作原理



图 10-27 单相通电方式时的转子位置

可见,步进电动机定子绕组的通电状态每改变一次,它的转子便转过一个确定的角度,即步进电动机的步距角,用 θ_s 表示。改变步进电动机定子绕组的通电顺序,转子的旋转方向随之改变。

2) 通电方式

步进电动机的转速既取决于控制绕组通电的频率,又取决于绕组通电方式。步进电动机的通电方式一般有单相轮流通电方式、双相轮流通电方式和单双相轮流通电方式三种。

(1) 单相轮流通电方式。“单”是指每次只有一相控制绕组通电。控制绕组每改变一次通电状态称为一拍。在单相轮流通电方式下,步进电动机的控制绕组在断电、通电的间断期间,转子磁极因“失磁”而不能保持原自行“锁定”的平衡位置,即所谓失去“自锁”能力,易出现失步现象;另外,由一相控制绕组断电至另一相控制绕组通电,转子则经历起动加速、减速至新的平衡位置的过程,转子在到达新的平衡位置时,会由于惯性而在平衡点附近产生振荡现象,故运行的稳定性差。

(2) 双相轮流通电方式。“双”是指每次有两相绕组通电。步进电动机每转步数亦为

mz 步。这种通电分配方式叫做 m 相双 m 拍。

(3) 单双相轮流通电方式。为上述两种通电方式的组合,这时步进电动机转一转所需步数为 $2mz$ 步。这种通电分配方式叫做 m 相 $2m$ 状态。如三相反应式步进电动机,单双相轮流通电方式为: $U \rightarrow UV \rightarrow V \rightarrow VW \rightarrow W \rightarrow WU \rightarrow U$,称为三相六拍通电,如图 10-28 所示。三相六拍通电方式的步距角减小一倍。

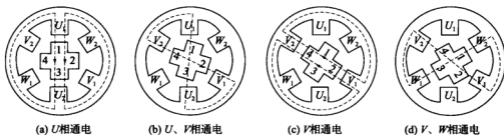


图 10-28 单相通电方式时的转子位置

三相单三拍运行或双三拍运行时的步距角都是 30° 。从图 10-28 可以看出,单相通电时转子齿与通电相对齐时处于稳定位置;双相通电时,转子稳定位置将会停留在通电的 (U 、 V) 两定子磁极对称的中心位置上。但以上这种结构形式的反应式步进电动机,它的步距角较大,即使是单双相轮流通电方式,其步距角为 15° ,难以满足一般系统精度的要求。所以,大多数采用定子磁极上带有小齿、转子齿数很多的反应式结构小步距角步进电动机。

10.7.2 小步距角步进电动机

实际的小步距角步进电动机如图 10-29 所示。它的定子内圆和转子外圆上均有齿和槽,而且定子和转子的齿宽和齿距相等。定子上有三对磁极,分别绕有三相绕组,定子极面小齿和转子上的小齿位置符合下列规律:当 U 相的定子齿和转子齿对齐时, V 相的定子齿应相对于转子齿顺时针方向错开 $1/3$ 齿距,而 W 相的定子齿又应相对于转子齿顺时针方向错开 $2/3$ 齿距。也就是说,当某一相磁极下定子与转子的齿相对时,下一相磁极下定子与转子齿的位置刚好错开 τ/m ,其中 τ 为齿距, m 为相数;再下一相磁极下定子与转子的齿则错开 $2\tau/m$;依此类推。当定子绕组按 $U-V-W$ 顺序轮流通电时,转子就顺时针方向一步步地移动,各相绕组轮流通电一次,转子就转过一个齿距。

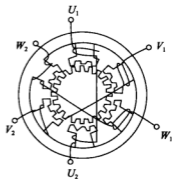


图 10-29 实际的三相反应式步进电动机结构简图

通过以上分析可知,转子的齿数不能任意选取。因为在同一相的几个磁极下,定转子齿应同时对齐或同时错开,才能使几个磁极的作用相加,产生足够的反应转矩,而定子圆周上属于同一相的极总是成对出现的,所以转子齿数应是偶数。另外,在不同相的磁极下,定转子相对位置应依次错开 $1/m$ 齿距,这样才能在连续改变通电状态下,获得连续不断的运动;否则,当某一相控制绕组通电时,转子齿都将处于磁路的磁阻最小位置上,各相绕组轮流通电时,转子将一直处于静止状态,电动机不能正常转动运行。为此,要求两相邻相磁极轴线

之间转子的齿数为整数加或减 $1/m$ 。

设转子的齿数为 z ，则齿距角为

$$\tau = \frac{360^\circ}{z} \quad (10-18)$$

因为每通电一次(运行一拍)，转子就走一步，故步距角为

$$\theta_b = \frac{\tau}{\text{拍数}} = \frac{360^\circ}{K m z} \quad (10-19)$$

式中， K 为状态系数。相邻两次通电相数一致时 $K=1$ ，如单、双三拍时；反之则 $K=2$ ，如三相六拍时。

若步进电动机的 $z=40$ ，三相单三拍或三相双三拍时，其步距角为

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{3 \times 40} = 3^\circ \quad (10-20)$$

若按三相六拍运行时，其步距角为

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{2 \times 3 \times 40} = 1.5^\circ \quad (10-21)$$

由此可见，增加步进电动机的定子相数和转子的齿数可以减小步距角，有利于提高控制精度。但相数越多，电源及电动机的结构越复杂，造价也越高。如果步进电动机定子各相绕组轮流通电的脉冲的频率为 f ，步距角 θ_b 的单位为 ($^\circ$)，则步进电动机的转速 (r/min) 为

$$n = \frac{\theta_b f}{360^\circ} \times 60 = \frac{K m z}{360^\circ} \times 60 = \frac{60}{K m z} f \quad (10-22)$$

可知，步进电动机定子绕组通电状态的改变速度越快，其转子旋转的速度越快，即通电状态的变化频率越高，转子的转速越高。

10.7.3 步进电动机的分类

步进电动机的分类方式很多，常见的分类方式有按步进电动机的工作原理、按输出力矩的大小以及按定子和转子的数量进行分类等。根据不同的分类方式，可将步进电动机分为多种类型，如表 10-2 所示。

表 10-2 步进电动机的分类

分类方式	具体类型	结构特点
按工作原理	反应式 (又称磁阻式)	转子无绕组，由被激励的定子绕组产生反应力矩实现步进运行，是我国步进电动机发展的主要类型 其主要特点是气隙小，步距角小，定位精度高，控制准确；但励磁电流较大，要求有较大的驱动电源功率，且电动机内部阻尼较小，当相数较小时，单步运行振荡时间较长或断电后无定位转矩，所以使用中需要自锁定位
	激励式	定、转子均有激励绕组(或转子用永久磁钢)，由电磁力矩实现步进运行。输出力矩大，但结构复杂，实际中较少应用

分类方式	具体类型	结构特点
按工作原理	永磁式	转子和定子的某一方具有永久磁钢, 另一方由软磁材料制成。绕组轮流通电, 建立的磁场与永久磁钢的恒定磁场相互作用产生转矩。 主要特点是步距角大, 一般 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 等, 控制精度不高; 控制功率较小, 效率高; 由于具有永久磁钢, 内部阻尼较大, 单步振荡时间较短, 断电后具有一定的定位自锁力矩
	混合式 (永磁感应式)	近似反应式和永磁式的结合体。与反应式的主要区别是转子上有磁钢, 反应式转子则无磁钢, 静态电流比永磁式大许多。 混合式步进电动机可以做成像反应式一样的小步距角, 又具有永磁式控制功率小的优点, 故具有驱动电流小、效率高、过载能力强、控制精度高等特点, 代表着步进电动机的最新发展, 是一种很有应用前景的步进电动机
按输出力矩大小	伺服式	输出力矩 $(1\% \sim 20\%) N \cdot m$, 只能驱动较小的负载, 要与液压扭矩放大器配合, 才能驱动机床工作台等较大的负载
	功率式	输出力矩在 $(5 \sim 50) N \cdot m$ 以上, 可以直接驱动机床工作台等较大的负载
按相数	三相, 四相, \dots, m 相	相数越多, 步距角越小, 相同工作频率下运行越平稳, 控制精度越高; 随着相数增多, 结构也越复杂, 成本越高
按各相绕组分布	径向分布式	电机各相按轴向一次排列, 转动惯量小, 快速性和稳定性好; 功率型步进电动机多为轴向式
	轴向分布式	

10.7.4 步进电动机的运行特性及影响因素

1. 步进电动机的运行特性

1) 矩角特性

矩角特性反映步进电动机电磁转矩 T 随偏转角 θ 的变化关系。步进电动机的一相或多相控制绕组通入直流电流, 且不改变它的通电状态, 这时转子将固定在某一平衡位置上保持不动, 称为静止状态(简称静态)。在空载情况下, 转子齿和通电相磁极上的小齿对齐, 这个位置称为步进电动机的初始平衡位置。静态时的反应转矩叫静转矩, 在理想空载时静转矩为零。当转子上有负载作用时, 转子齿就会偏离初始位置。由于磁力线有力图缩短的倾向, 从而产生电磁转矩, 直到这个转矩与负载转矩相平衡。转子齿偏离初始平衡位置的角度叫做偏转角 θ (空间角)。

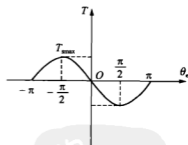


图 10-30 步进电动机的矩角特性

若用电角度 θ_e 表示偏转角, 则由于定子每相绕组通电循环一周(360° 电角度), 对应转子在空间转过一个齿距角($\tau = 360^\circ/z$ 空间角度), 故电角度是空间角度的 z 倍, 即 $\theta_e = z\theta$ 。静转矩与转子偏转角的关系称为矩角特性, 即 $T = f(\theta_e)$ 。可以证明, 此曲线可近似地用一条正弦曲线表示, 如图 10-30 所示。从图中看出, θ_e 达到 $\pm\pi/2$ 时, 即在定子齿与转子齿错过 $1/4$ 个齿距时, 转矩 T 达到最大值, 称为最大静转矩 T_{max} 。步进电动机的负载转矩必须小于最大静转矩, 否则, 根本带不动负载。为了能稳定运行, 负载转矩一般只能是最大静转矩的 $30\% \sim 50\%$ 左右。因此, 这一特性反映了步进电动机带负载的能力, 通常在技术数据中都有

说明,它是步进电动机最主要的性能指标之一。

2) 单步运行特性

加一个控制脉冲改变一次通电状态,步进电动机的这种工作状态称为单步运行。

(1) 稳定区

设初始时对应于步进电动机 U 相的矩角特性曲线如图 10-31 所示。在外力矩作用下步进电动机转子偏离一角度 θ_e (θ_e 为用电角度表示的定子齿轴线与转子齿轴线之夹角),只要满足 $-\pi < \theta_e < \pi$, 当外力矩消失后,在步进电动机自身的电磁力矩作用下转子仍能回到原平衡点 O , 因此将 $-\pi \sim \pi$ 区间称为步进电动机的静稳定区。若改变步进电动机通电状态,如 V 相通电,矩角特性向前移动一个距角 (θ_{be} 电角度)。如图 10-31 所示的曲线 V , 新的平衡点 O_1 , 对应的新稳定区为 $(-\pi + \theta_{be}) \sim (\pi + \theta_{be})$ 。在改变通电状态前或改变过程中,只要转子的步进角 θ_e 满足 $(-\pi + \theta_{be}) < \theta_e < (\pi + \theta_{be})$, 步进电动机转子就可趋向新的平衡点,称区间 $(-\pi + \theta_{be}) \sim (\pi + \theta_{be})$ 为动稳定区。

(2) 单步换相特性

如图 10-31 所示,改变通电状态,由 U 相转为 V 相,矩角特性便从 U 相平衡点 O 跃到 V 相矩角特性的 a 点,转子在正电磁力矩作用下加速地向新平衡点 O_1 转动。到达 O_1 时,由于转子积累的动能使其冲过平衡点继续转动,这时转子受到与转角相反方向的电磁力矩作用(负电磁力矩),试图将转子拉回到 O_1 点,转子开始减速为零。如此往复以新平衡点为基准作减幅振荡,如图 10-32 所示。图中 T 为周期, t_b 为步距角 θ_{be} 对应的衰减时间。

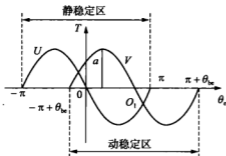


图 10-31 步进电动机稳定区

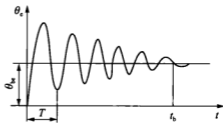


图 10-32 步进电动机单步运行转子衰减振荡

3) 连续脉冲运行特性

(1) 极低频条件下运行

若控制脉冲周期 T 大于转子单步运行振荡的衰减时间 t_b , 当第二次改变通电状态前(第二个脉冲到来前), 第一次改变通电状态使转子的运行已经结束的运行状态称为极低频运行。此时运行方式与单步运行方式相同, 转子的运行具有典型的步进特性, 如图 10-33 所示。在这种条件下, 运行的步进电动机多数处于欠阻尼状态, 不可避免地产生振荡, 但其振幅不会超过步距角 θ_{be} , 因此不会出现失步和越步现象。

(2) 低频条件下运行

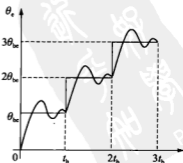


图 10-33 极低频运行规律

当控制脉冲的频率为 $\frac{1}{t_b} < f < 4f_0$ 时, 转子运行特点是前一个脉冲使转子产生的振荡还没衰减完, 第二个脉冲已经到来。转子所处的位置与脉冲频率有关, 该位置是第二个脉冲转子的起始位置。其中 f_0 为步进电动机阻尼固有频率。现以三相步进电动机为例, 对这种运行方式加以讨论。

① 如图 10-34 所示, 设初始时电动机处于稳定平衡点 O_0 。在控制脉冲作用下改变通电状态, V 相绕组通电, 矩角特性从 U 跃变到 V , 作用于转子的电磁力矩为 O_0S , 转子加速转动, 电磁力矩也随之从 S 点沿箭头方向向 O_1 点移动。若在下次改变通电状态前(第二个控制脉冲到来前)转子的转角较大, 已到达 b 点, 当第二次改变通电状态时矩角特性 V 相的 b 点跃变到 W 相的 c 点, 工作点处在动稳定区内, 在正电磁力矩 a_2c 的作用下, 转子在前一拍具有的角速度前提下, 转子的角位移在第二拍内比前一拍要大, 因此更接近新平衡点, 步进电动机便不失步地运转起来。

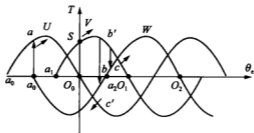


图 10-34 低频启动与失步的条件

② 当控制脉冲频率提高, 在第二拍脉冲到来时转子角位移较小, 移动到 b' 点。当第二次改变通电状态时矩角特性从 V 相的 b' 点跃变到 W 相的点, 工作点处在动稳定区以外, 转子在负电磁力矩作用下减速。若转子不能冲过 a_2 点进入动稳定区便回到前一个平衡点 a'_0 , 在第三拍脉冲到来时, 工作点跃到 U 相矩角特性曲线的 a 点, 在电磁力矩作用下又回到初始位置 O_0 点, 这样便失了三步。失步严重时转子便在一个位置上振荡。

(3) 脉冲频率 $f > 4f_0$ 条件下运行

当步进电动机处在高频状态下运行时, 在前一个脉冲作用下, 转子的振荡尚未到达第一个振荡的最大振幅, 第二个脉冲已经过来而又一次改变通电状态, 致使步进电动机的运行如同同步电动机连续、平稳地转动, 如图 10-35 所示。

随着脉冲频率的增高, 电动机的各种阻尼的增加, 使得转子跟不上矩角特性的移动速度, 转子位置与平衡点位置之差越来越大, 最终超出稳定区而失步。这也是最大运行频率不能继续提高的原因之一。

4) 加减速特性

加减速特性描述了步进电动机由静止到工作频率或由工作频率到静止的加减速过程中, 励磁绕组通电状态的变化频率 f 与时间 t 的关系。当要求步进电动机启动到大于启动频率的工作频率 f 时, 速度必须上升; 当从最高工作频率 f_{\max} 或高于启动频率的工作频率 f 停止时, 速度必须下降。步进电动机的加减速特性如图 10-36 所示。

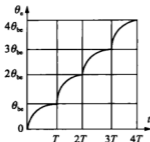


图 10-35 步进电动机高频运行转子运动规律

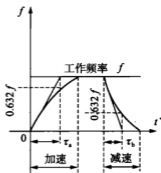


图 10-36 步进电动机加减速特性

2. 步进电动机运行特性的影响因素

相比于伺服电动机,步进电动机具有许多优、缺点,过载能力低是其最主要的缺点。有许多因素会影响步进电动机的运行性能。轻者会影响步进电动机的运行速度,严重者将造成步进电动机失步,达不到位置控制的目的。

1) 脉冲信号频率对步进电动机运行的影响

当脉冲信号频率很低时,控制脉冲以矩形波输入,电流波形比较接近于理想的矩形波,如图 10-37(a)所示。如果脉冲信号频率增高,由于电动机绕组的电感有阻止电流变化的作用,因此电流发生畸变,如图 10-37(b)所示。如果脉冲频率很高,则电流还来不及上升到稳定值 I 就开始下降,于是电流的幅值降低(由 I 降到 I'),如图 10-37(c)所示,因而产生的转矩减小致使带负载的能力下降。故频率过高会使步进电动机起动不了或运行时失步。

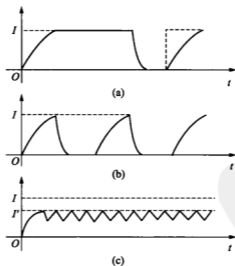


图 10-37 脉冲信号的畸变

(a) 频率很低时波形; (b) 频率增高时波形; (c) 频率很高时波形

当控制脉冲的频率等于或接近步进电动机的振荡频率 f_0 的 $1/K$ 时($K=1, 2, 3, \dots$), 电动机就会出现强烈振动, 甚至失步和无法工作。

2) 转子机械惯性对步进电动机运行的影响

从物理学可知,机械惯性对瞬时运动物体会发生作用,当步进电动机从静止到起步,由于转子部分的机械惯性的作用,转子一下子转不起来,因此,要落后于它应转过的角度。如果落后不太多,还会跟上来;如果落后太多,或者脉冲频率过高,电动机将会启动不起来。另外,即使电动机在运转,也不是每一步都迅速地停留在相应的位置,而是受机械惯性的作用,要经过几次振荡才停下来;如果这种情况严重,就可能引起失步。因此,步进电动机都采用阻尼方法,以消除(或减缓)步进电动机的振荡。随着转动惯量的增加,会引起机械阻尼作用的加强,摩擦力矩也会相应增大,转子就跟不上磁场变化的速度,最后将超出动稳定区而失步或产生振荡,从而限制连续运行的频率。

10.7.5 步进电动机的主要性能指标和应用

1. 步进电动机的主要性能指标

1) 步距角 θ_s

步距角是指每给一个电脉冲信号,电动机转子所应转过角度的理论值,它是步进电动机的主要性能指标之一。它的大小直接影响步进电动机的启动和运行频率,不同的应用场合,对步距角大小的要求不同。因此,在选择步进电动机的步距角时,若通电方式和系统的传动比已初步确定,则步距角应满足

$$\theta_s \leq i\theta_{\min} \quad (10-23)$$

式中, i 为传动比; θ_{\min} 为负载轴要求的最小位移增量(或称脉冲当量,即每一个脉冲所对应的负载轴的位移增量)。

2) 精度

步进电动机的精度有两种表示方法:一种用步距误差最大值来表示,另一种用步距累积误差最大值来表示。最大步距误差是指电动机旋转一转内相邻两步之间最大步距角和理想步距角的差值,用理想步距的百分数表示。最大累积误差是指任意位置开始经过任意步之后,角位移误差的最大值。

对于所选用的步进电动机,其步距精度为

$$\Delta\theta = i(\Delta\theta_L) \quad (10-24)$$

式中, $\Delta\theta_L$ 为负载轴上所允许的角度误差。

3) 静转矩

静转矩是指不改变控制绕组通电状态,即转子不转情况下的电磁转矩。它是绕组的电流及失调角(转子偏离空载时的初始稳定平衡位置的电角度)的函数。当绕组内的电流值不变时,静转矩与失调角的关系称为矩角特性。

负载转矩与最大静转矩的关系为

$$T_L = 0.3 \sim 0.5 T_{L\max} \quad (10-25)$$

为保证步进电动机在系统中正常工作,还必须满足

$$T_{st} > T_{L\max} \quad (10-26)$$

式中, T_{st} 为步进电动机起动转矩; T_{Lmax} 为步进电动机最大静负载转矩。

通常取

$$T_{st} = T_{Lmax} / (0.3 \sim 0.5) \quad (10-27)$$

以便有相当的力矩储备。

4) 响应频率

在某一频率范围, 步进电动机可以任意运行而不丢失一步, 这一最大频率称为响应频率。通常用起动频率 f_{st} 作为衡量的指标, 它是能不丢步启动的极限频率, 有时也叫做突跳频率或牵入频率。

5) 运行频率

运行频率是指频率连续上升时, 电动机能不失步运行的极限频率。它的值也与负载的大小有关。在相同负载情况下, 连续频率 f_c 的值远大于响应频率或启动频率 f_{st} 。

6) 启动矩频特性

在给定的驱动条件下, 负载惯量一定时, 启动频率与负载转矩之间的关系称为启动矩频特性。

7) 启动惯频特性

负载力矩一定时, 启动频率与负载惯量之间的关系称为启动惯频特性或牵入惯频特性。转动惯量越大, 转子速度的增加越慢, 启动频率也应越低。

8) 运行矩频特性

在负载惯量不变时, 运行频率与负载转矩之间的关系称为运行矩频特性。在连续运行状态下, 步进电动机的电磁力矩随频率的升高而急剧下降。

2. 步进电动机的应用注意事项

(1) 为使步进电动机正常运行(不失步, 不越步)、正常启动并满足对转速的要求, 必须保证步进电动机的输出转矩大于负载所需的转矩。所以应计算机械系统的负载转矩, 并使所选电动机的输出转矩有一定的余量, 以保证可靠运行。

(2) 应使步进电动机的步距角 θ_s 与机械负载相匹配, 以得到步进电动机所驱动部件需要的脉冲当量。

(3) 驱动电源的优劣对步进电动机控制系统的运行影响极大, 使用时要特别注意。

(4) 若所带负载转动惯量较大, 则应在低频下启动, 然后再上升到工作频率; 停车时也应从工作频率下降到适当频率再停车; 在工作过程中, 应尽量避免由于负载突变而引起的误差。

(5) 若在工作中发生失步现象, 首先应检查负载是否过大, 电源电压是否正常, 再检查驱动电源输出波形是否正常, 在处理问题时不应随意变换元件。

10.7.6 步进电动机的开、闭环控制

由于步进电动机能直接接收数字量信号, 所以被广泛应用于数字控制系统中。以步进电动机作为执行元件的控制系统, 包括开环和闭环两种形式。

1. 步进电动机的开环控制

步进电动机系统的主要特点是能实现精确位移、精确定位, 且无积累误差。若能准确控

制输入指令脉冲的数量或频率,就能够完成精确的位置或速度控制,无须系统的反馈,形成所谓的开环控制系统。

步进电动机的开环控制系统,由控制器(包括变频信号源)、脉冲分配器、驱动电路及步进电动机四部分组成,如图 10-38 所示。使用微机对步进电动机进行控制有串行和并行两种方式。

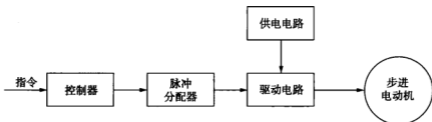


图 10-38 步进电动机开环控制原理框图

1) 串行控制

具有串行控制功能的单片机系统与步进电动机驱动电源之间具有较少的连线。这种系统中,驱动电源中必须含有环形分配器,其功能框图如图 10-39 所示。



图 10-39 串行控制功能框图

2) 并行控制

用微机系统的数条端口线直接去控制步进电动机各相驱动电路的方法称为并行控制。在驱动电源内,不包含环形分配器,其功能必须由微机系统完成。并行控制方案的功能框图如图 10-40 所示。



图 10-40 并行控制功能框图

3) 速度控制

控制步进电动机的运行速度,实际上就是控制系统发出脉冲的频率或者换相的周期。

系统可用两种方法来确定脉冲的周期：一种是软件延时，另一种是用定时器。软件延时的方法是通过调用延时子程序的方法实现的，它占用 CPU 时间；定时器方法是通过设置定时时间常数的方法来实现的。

开环控制系统的精度，主要取决于步距角的精度和负载状况。

开环控制常常采用加减速定位控制方式。如图 10-41 所示。为了实现加减速的最佳控制，往往是分段设计加速转矩和加速时间，采用微机控制来实现。

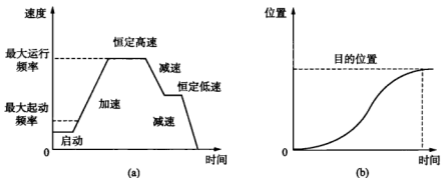


图 10-41 步进电动机的加减速定位控制

由于开环控制系统不需要反馈元件，结构比较简单，工作可靠，成本低，因而在数字控制系统中得到广泛的应用。

2. 步进电动机的闭环控制

对于高精度的控制系统，采用开环控制往往满足不了精度的要求。因此，必须在控制回路中增加反馈环节，构成闭环控制系统。

闭环控制是直接或间接地检测转子的位置和速度，然后通过反馈和适当的处理，自动给出驱动的脉冲串。采用闭环控制，不仅可以获得更加精确的位置控制和高得多、平稳得多的转速，而且可以在步进电动机的许多其他领域内获得更大的通用性。它与开环系统相比多了一个由位置传感器组成的反馈环节，如图 10-42 所示。

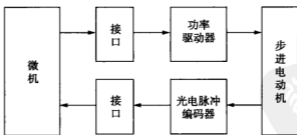


图 10-42 步进电动机闭环控制功能框图

闭环控制系统的精度与步进电动机有关，但主要取决于位置传感器的精度。在数字位置随动系统中，为了提高系统的工作速度和稳定性，还有速度反馈内环。

根据不同的使用要求，步进电动机的闭环控制也有不同的方案，主要有核步法、延迟时间法、带位置传感器的闭环控制系统等。

思考题与习题

1. 直流力矩电动机与一般直流电动机的主要不同点是什么？
2. 为什么直流力矩电动机一般都做成扁平状？
3. 各种微型同步电动机的转速与负载大小有关吗？
4. 反应式微型同步电动机的反应转矩是怎样产生的？一般异步电动机有无反应转矩？为什么？
5. 磁滞式同步电动机的磁滞转矩为什么在启动过程中始终为常数？
6. 磁滞式同步电动机的主要优点是什么？
7. 下列电动机中哪些应装鼠笼绕组？
 - 1) 普通永磁式同步电动机；
 - 2) 反应式微型同步电动机；
 - 3) 磁滞式同步电动机。
8. 如何改变永磁式同步电动机的转向？
9. 测速发电机在使用中的测速精度与哪些因素有关？
10. 步进电动机转速的高低与负载大小有关系吗？



附录 思考题与习题部分答案

第 2 章

7. 解: (1) 折算到电动机轴上的负载转矩

$$T_L = \frac{T'_L \omega_L}{\eta_e \omega_m} = T'_L \frac{Z_1 Z_3}{Z_2 Z_4} \frac{1}{\eta_e} = (470.4 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{5} \times \frac{1}{0.92}) = 34.1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2) 折算到电动机轴上的飞轮惯量

$$GD_2^2 = (GD_m^2 + GD_1^2) + (GD_2^2 + GD_3^2) \frac{1}{j_1^2} + (GD_4^2 + GD_5^2) \frac{1}{j_1^2} = 340 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

如用近似计算, 则

$$GD_2^2 = \delta GD_m^2 + GD_1^2 \frac{1}{j_1^2} = (1.15 \times 294 + \frac{450.8}{(3 \times 5)^2}) = 340.1 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

8. 解: (1) 电动机转矩折算到生产机械轴上的等效转矩为

$$T'_m = T_m j \eta_e = T_m \frac{n_1}{n_3} \eta_e = 29.4 \times \frac{2500}{500} \times 0.9 = 132.3 \text{ N} \cdot \text{m}$$

折算到生产机械轴上的总飞轮惯量为

$$\begin{aligned} GD_{21}^2 &= GD_1^2 \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^2 + GD_2^2 \left(\frac{n_2}{n_3}\right)^2 + GD_3^2 \\ &= \left[78.4 \times \left(\frac{2500}{500}\right)^2 + 245 \times \left(\frac{1000}{500}\right)^2 + 735\right] \text{ N} \cdot \text{m}^2 = 3675 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

生产机械轴的加速度为

$$\frac{dn_L}{dt} = \frac{T'_m - T'_L}{GD_{21}^2} = \frac{132.3 - 98}{3675} = 3.5 (\text{r/min}) \cdot \text{s}^{-1}$$

(2) 应装在生产机械轴上, 因为

$$\begin{aligned} GD_{22}^2 &= GD_1^2 \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^2 + GD_2^2 \left(\frac{n_2}{n_3}\right)^2 + GD_3^2 + GD^2 \\ &= \left[78.4 \times \left(\frac{2500}{500}\right)^2 + 245 \times \left(\frac{1000}{500}\right)^2 + 735 + 612.5\right] \text{ N} \cdot \text{m}^2 \\ &= 4287.5 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \\ \frac{dn_L}{dt} &= \frac{T'_m - T'_L}{GD_{22}^2} = \frac{132.3 - 98}{4287.5} = 3 (\text{r/min}) \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

第3章

7. 解: (1) 直接启动时的启动电流

$$I_{st} = \frac{U_N}{R_s} = \frac{220}{0.22} = 1\ 000\text{A}$$

$$(2) I'_{st} = \frac{U_N}{R_s + R_{ad}} = 2I_N$$

$$R_{ad} = \frac{U_N}{2I_N} - R_s = \left(\frac{220}{2 \times 91} - 0.22 \right) = 0.99\ \Omega$$

$$(3) I'_{st} = \frac{U}{R_s} = 2I_N$$

$$U = 2I_N R_s = 2 \times 91 \times 0.22 = 40\text{V}$$

8. 解:

提示: 只要给出理想空载点和额定运行点, 然后连一条直线。

(1) 电枢电阻

$$R_s = 0.5 \left(1 - \frac{P_N}{U_N I_N} \right) \frac{U_N}{I_N} = 0.5 \left(1 - \frac{5.5 \times 10^3}{220 \times 31} \right) \frac{220}{31} \Omega = 0.71\ \Omega$$

$$(2) K_e \varphi_N = \frac{U_N - I_N R_s}{n_N} = \frac{220 - 31 \times 0.71}{1\ 500} = 0.132\text{V/r} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$(3) n_0 = \frac{U_N}{K_e \varphi_N} = \frac{220}{0.132} \text{r/min} = 1\ 667\text{r/min}$$

$$(4) T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \frac{5.5 \times 10^3}{1\ 500} = 35\text{N} \cdot \text{m}$$

第4章

10. 解:

(1) Δ 接法 $n_0 = 1\ 000\text{r/min}$

$$S_n = 0.04$$

$$(2) T_n = 9.55 \times P_n / n_n = 9.55 \times 3\ 000 / 960 = 29.84\text{N} \cdot \text{m}$$

$$T_{\max} = 2.0 \times T_n = 2.0 \times 29.84 = 59.68\text{N} \cdot \text{m}$$

$$I_{st} = 6.5 \times I_N = 6.5 \times 11 = 71.5\text{A}$$

$$(3) \text{提示: } S_m = (\lambda_m + \lambda_m^2 - 1) S_n = 0.04(2 + 2^2 - 1) = 0.2$$

11. 解: (1) 同步转速。因为额定转速和同步转速接近, 而同步转速在 50Hz 下, 只能为 1 500r/min。

$$(2) p = \frac{60 f_1}{n_0} = \frac{60 \times 50}{1\ 500} = 2$$

(3) 星形接法。

(4) 满载时转差率

$$S_N = \frac{n_0 - n_N}{n_0} = \frac{1\,500 - 1\,430}{1\,500} = 0.0467$$

(5) 满载时电动机的额定转矩

$$T_N = 9\,550 \frac{P_N}{n_N} = 9\,550 \frac{3}{1\,430} \text{N} \cdot \text{m} = 20.04 \text{N} \cdot \text{m}$$

(6) 直接启动时的启动转矩

$$T_{st} = T_N \frac{T_{st}}{T_N} = 20.04 \times 1.8 \text{N} \cdot \text{m} = 36.07 \text{N} \cdot \text{m}$$

(7) 最大转矩

$$T_{st} = T_N \frac{T_{\max}}{T_N} = 20.04 \times 2 \text{N} \cdot \text{m} = 40.08 \text{N} \cdot \text{m}$$

(8) 直接启动时启动电流,星形连接

$$I_{st} = I_N \frac{I_{st}}{I_N} = 6.47 \times 7 \text{N} \cdot \text{m} = 45.29 \text{A}$$

(9) 满载时输入功率、视在功率

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi = 1.73 \times 380 \times 6.47 \times 0.84 \text{kW} = 3.58 \text{kW}$$

$$S = \sqrt{3} U_1 I_1 = 1.73 \times 380 \times 6.47 \text{kVA} = 4.26 \text{kVA}$$

(10) 满载时电动机总损耗

$$\Delta P = P_1 - P_N = (3.58 - 3) \text{kW} = 0.58 \text{kW}$$

12. 解: (1) 额定转矩

$$T_N = 9.55 \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \frac{10 \times 10^3}{1\,450} \text{N} \cdot \text{m} = 65.85 \text{N} \cdot \text{m}$$

$$T_{\max} = \lambda_m T_N = 2 \times 65.85 \text{N} \cdot \text{m} = 131.7 \text{N} \cdot \text{m}$$

(2) 同步转速 1 500 r/min

$$(3) S_N = \frac{n_0 - n_N}{n_0} = \frac{1\,500 - 1\,450}{1\,500} = 0.03$$

$$(4) S_N \text{ 和 } T_N \text{ 代入 } S_m = (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) S_N$$

$$\text{或 } S_m = 2\lambda_m S_N$$

$$\therefore S_N = (\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) S_N = (2 + \sqrt{2^2 - 1}) \times 0.03 = 0.112$$

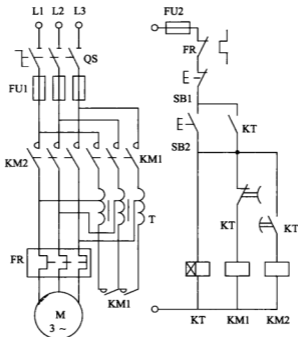
$$S_m = 2\lambda_m S_N = 2 \times 2 \times 0.03 = 0.12$$

$$\therefore T = \frac{2T_{\max}}{\frac{S}{S_m} + \frac{S_m}{S}} = \frac{263.4}{0.112 + \frac{0.12}{S}} \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{或 } T = \frac{2T_{\max}}{S_m} S = 2\,195 S \text{N} \cdot \text{m}$$

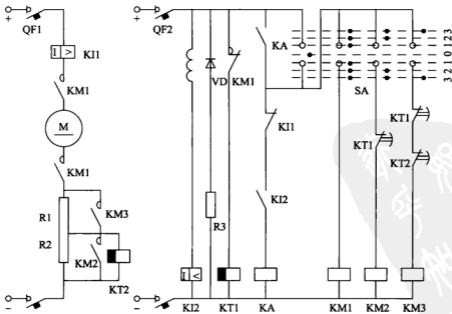
第 5 章

11. 参考图如下。

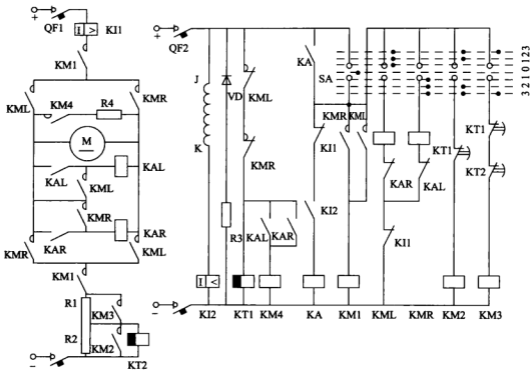


12. 参考图如下。

提示：将 SA 置“0”位，是启动前的准备阶段。



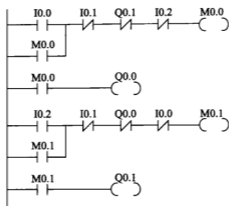
13. 提示:将 SA 置“0”位,是起动前的准备阶段。



第 7 章

16.

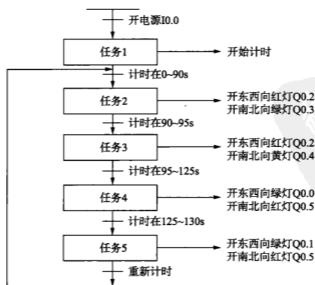
地址	说明	功能
二路数字输出		
Q0.0	继电器 K1	控制电动机的正转
Q0.1	继电器 K2	控制电动机的反转
三路数字输入		
I0.0	按钮	电动机的正转
I0.1	按钮	电动机的停止
I0.2	按钮	电动机的反转



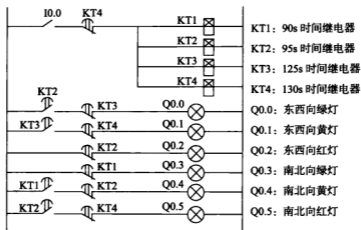
17.

地 址	说 明	功 能
六路数字输出		
Q0.0	绿灯	控制东西向的绿灯
Q0.1	黄灯	控制东西向的黄灯
Q0.2	红灯	控制东西向的红灯
Q0.3	绿灯	控制南北向的绿灯
Q0.4	黄灯	控制南北向的黄灯
Q0.5	红灯	控制南北向的红灯
一路数字输入		
I0.0	开关	电源开头

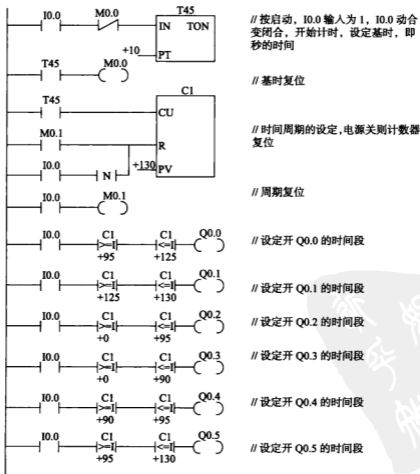
控制流程图：



逻辑控制图：



梯形图：



参考文献

- [1] 邓星钟. 机电传动控制. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [2] 邓星钟. 机电传动控制学习辅导与题解. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [3] 郝用兴, 苗满香, 罗小燕. 机电传动控制. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009.
- [4] 顾绳谷. 电机及拖动基础. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] 郁建平. 机电控制技术. 北京: 科学出版社, 2006.
- [6] 汤以范. 机电传动控制. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [7] 姚永刚. 机电传动与控制技术. 天津: 天津大学出版社, 2009.
- [8] 王益全. 电动机原理与实用技术. 北京: 科学出版社, 2005.
- [9] 黄立培. 电动机控制. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [10] 李承. 电路原理与电机控制. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [11] 何希才, 姜余祥. 电动机控制电路应用实例. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [12] 鲁远栋. 机床电气控制技术. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [13] 杨林建. 机床电气控制技术. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.
- [14] 赵永成, 王丰, 李明颖等. 机电传动控制. 北京: 中国计量出版社, 2007.
- [15] 李凤阁, 佟为明, 等. 电气控制与可编程序控制器应用技术. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [16] 方承远, 张振国. 工厂电气控制技术. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [17] 严盈富. 西门子 S7-200 PLC 入门. 北京: 人民邮电出版社, 2007.
- [18] 吉顺平, 孙承志, 路明, 等. 西门子 PLC 与工业网络技术. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [19] 张扬, 蔡春伟, 孙明健. S7-200 PLC 原理与应用系统设计. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [20] 孙承志, 徐智, 张家海, 等. 西门子 S7-200/300/400 PLC 基础与应用技术. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [21] 隋媛媛, 廉鸿帅, 迟军. 西门子系列 PLC 原理及应用. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [22] 史国生. 电气控制与可编程控制器技术. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [23] 程宪平. 机电传动与控制. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.
- [24] 廖兆荣. 机床电气自动控制. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [25] 阮友德. PLC、变频器、触摸屏综合应用实训. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [26] 吴忠智. 调速用变频器及配套设备选用指南. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [27] 刘美俊. 通用变频器应用技术. 福州: 福建科学技术出版社, 2004.
- [28] 薛迎成, 舒锋, 王瑞臣. 工业组态技术基础及应用. 北京: 中国电力出版社, 2009.

- [29] 李方圆. 触摸工程应用. 北京:电子工业出版社,2008.
- [30] 威纶科技股份有限公司. MT500 触摸屏硬件手册. 2004.
- [31] 威纶科技股份有限公司. EasyBuilder500 使用手册. 2004.
- [32] 张志义,孙蓓. 机电传动控制. 北京:机械工业出版社,2009.

