

工程机械机电一体化

GONGCHENG JIXIE JIDIANYETIHUA

焦生杰等 编著

人民交通出版社



工程机械机电液一体化

Gongcheng Jixie JiDianYe Yitihua

焦生杰等 编著

人民交通出版社
·北京·

内 容 提 要

本书主要包括工程机械机电液一体化的基本概念与体系,工程机械机电液一体化系统中的数学模型,常用检测元件,单片机控制系统与接口技术,可编程逻辑控制器(PLC)以及机电液一体化技术在工程机械中的典型应用实例等。

本书可作为工程机械类本科生及研究生的机械电子专业课教材,同时也可供从事机电液一体化系统设计、研究人员以及高速公路现代机械化施工与管理人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程机械机电液一体化/焦生杰等编著. —北京:人民
交通出版社, 2000. 11
ISBN 7-114-03795-3

I. 工… II. 焦… III. 工程机械—机电一体化
IV. TU6

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第57218号

工程机械机电液一体化

焦生杰等 编著

版式设计: 刘晓方 责任校对: 张捷 责任印制: 杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号 010 64216602)

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 14 字数: 344千

2000年11月 第1版

2000年11月 第1版 第1次印刷 总第1次印刷

印数: 0001—3500册 定价: 28.00元

ISBN 7-114-03795-3

TU·00071

前 言

机电液一体化技术是机械技术、液压技术和微电子技术的有机结合,它是在融合了机械、液压、电子、计算机、传感器、自动控制等多学科技术的基础上发展起来的一门新兴学科。随着我国公路建设事业的迅猛发展,机电液一体化技术迅速地应用于公路工程机械的各个方面,促进了工程机械行业的变革,成为工程机械行业的主流发展方向。

本书是为工程机械机电一体化专业而编写的教材,同时也可作为工程机械设计、制造与机械化施工与管理等专业本科生、研究生及有关技术人员的参考书。本书是机械学、电子技术、液压传动、控制工程、测试技术等课程的后续课程。因此,本书在内容安排上既注意了基础理论、基本概念的阐述,又充分考虑了机电液一体化技术在工程机械中的实际应用,尤其是电液技术在工程机械中的应用,以培养该专业学生的实践能力。

本书共六章,其中第一章、第二章、第六章中第四、五、六节由焦生杰编写,第三章由吕彭民编写,第四章由王海英编写,第五章由郑录社编写,第六章中第一节由司癸卯编写,第六章中第二节由姚怀新编写,第六章第三节由张奕和焦生杰共同编写,全书由焦生杰统稿。

由于编者水平有限,书中谬错之处诚望读者批评指正。

编 者

二〇〇〇年八月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 工程机械机电液一体化的产生与发展.....	1
第二节 工程机械机电液一体化系统的组成.....	3
第三节 工程机械机电液一体化典型技术及系统.....	6
第二章 机电液系统数学模型	13
第一节 数学模型的基本概念	13
第二节 机械传动系统数学模型	17
第三节 电路系统数学模型	21
第四节 液压系统数学模型	33
第五节 电液伺服系统数学模型	46
第三章 工程机械常用检测元件	50
第一节 位移传感器	50
第二节 速度、加速度传感器.....	60
第三节 力、扭矩和压力传感器.....	63
第四节 温度传感器	72
第五节 位置传感器	77
第六节 传感器前级信号处理	80
第四章 单片机控制系统与接口技术	85
第一节 单片机工作原理	85
第二节 单片机接口技术.....	101
第三节 单片机控制系统.....	135
第四节 沥青混凝土搅拌设备微机控制系统.....	139
第五章 可编程控制器(PLC)	149
第一节 可编程控制器的组成和工作原理.....	149
第二节 PLC控制器的基本指令	154
第三节 PLC编程技术	161
第四节 应用实例.....	169
第六章 机电液一体化技术在工程机械中的应用	172
第一节 电液转向控制系统.....	172
第二节 稳定土拌和机电液系统.....	175
第三节 自动找平系统.....	183

第四节	工程机械自动换挡系统	191
第五节	无级变速控制系统	201
第六节	液压挖掘机控制系统	208
参考文献	215

第一章 绪 论

第一节 工程机械机电液一体化的产生与发展

现代科学技术的发展,极大地推动了不同学科的相互交叉与渗透,导致了几乎所有工程领域的技术革命与改造,纵向分化、横向综合已成为当代科学技术发展的重要特点。在机械工程领域,由于微电子技术的飞速发展及其向机械工业的渗透所形成的机电一体化,使机械工业的技术结构、产品结构、功能与构成、生产方式及管理體系均发生了巨大的变化,使工业生产由“机械电气化”迈入了以“机电一体化”为特征的发展阶段。

“机电一体化”源于“Mechatronics”,是一个新兴的边缘学科,国内外都处于发展阶段,它代表着机械工业技术革命的前沿方向。

进入 20 世纪 60 年代以来,一大批逐步形成的高技术群体,如微电子技术、信息技术、自动化技术、生物技术、新材料技术、新能源技术、空间技术、海洋开发技术、激光与红外技术、光纤通信技术等等,已经且继续向家用电器、办公自动化系统、机械制造工艺设备、汽车、筑路机械、现代化武器装备的各个领域渗透,以空前的规模向现实生产迅速转化。

机械电子技术的基础是精密机械技术与微电子技术。由于微电子技术的发展,才使机械、电子和信息一体化成为可能。自美国 INTEL 公司 1971 年推出四位通用微处理器起至今,已经过四代:1971~1972 年,4 位微机、8 位微机;1973~1977 年,8 位中档微机;1978~1981 年,16 位高档微机;1981 年后,32 位高档微机;目前进入了第五代计算机研究。微处理器与半导体存储器的高集成化、高性能、高可靠性和低价格使其应用范围大大扩大,体积小而价廉的微型机可作为机械系统的一部分。

机电一体化产生和发展的根本原因在于社会的发展和科学技术的进步。系统工程、控制论和信息论是机电一体化的理论基础,也是机电一体化技术的方法论。微电子技术的发展,半导体大规模集成电路制造技术的进步,则为机电一体化技术奠定了物质基础。

机电一体化的发展趋势可以概括为以下三个方面。性能上向高精度、高效率、高性能、智能化的方向发展;功能上向小型化、轻型化、多功能方向发展;层次上向系统化、复合集成化的方向发展。机电一体化技术的研究与应用强调技术的融合与学科交叉。机电一体化技术依赖于相关技术的发展,同时也促进了相关技术的发展。

工程机械机电液一体化技术仍然属于机电一体化的内容。由于液压与液力传动技术在工程机械技术构成中所占的比重越来越大,为突出这一特点,人们又将工程机械机电一体化称之为工程机械机电液一体化。

在这一领域内,紧紧围绕着两个方面的内容进行研究:一是以简化驾驶员操作,提高车辆的动力性、经济性以及作业效率,节省能源等为目的机械、电子、液压融合技术。如自动换挡系统、挖掘机多动作复合功能系统等;二是以提高作业质量为目的机电液一体化控制技术,如摊铺机、平地机自动找平和恒速控制系统,振动压路机“软”起振与停振系统,振动块旋转方向与

行驶方向一致的控制系统等。电液控制技术兼备了电子和液压技术的双重优势,形成了具有强大竞争力的自身技术特点,为各种工程机械自动控制提供了一种新手段。机电液一体化技术的发展使传统的液压系统和元件发生了实质性的变化,是工程机械发展的一种必然趋势。

纵观工程机械的发展,在技术上大致经历了三次革命。第一次是柴油机的出现,使工程机械有了较理想的动力装置。第二次是液压技术的广泛应用,使工程机械的传动装置、工作装置更趋合理。工程机械作业形式多种多样,工作装置的种类繁多,要求实现各种各样的复杂运动。一个动力装置要驱动多种装置,而且传动距离往往比较长,20世纪50年代出现了液体传动,为工程机械提供了良好的传动装置。液压传动结构紧凑,布置简单方便,易实现各种运动形式的转换,能满足复杂的作业要求,具有许多优良传动性能,如传动平稳,自动防止过载,易实现无级变速,操纵简单轻便,控制性能好等。由于工程机械找到了理想的传动装置,推动了工程机械的飞速发展,迎来了工程机械的多样化时代,出现了形形色色完成各种施工作业的工程机械。

第三次是电子技术,尤其是计算机技术的广泛应用,使工程机械有了较为完善的控制系统。要使工程机械高效节能,就要对发动机和传动系统进行控制,合理分配功率,使其处于最佳工况;为了减轻驾驶员劳动强度和改善操纵性能,需要采用自动控制,实现工程机械自动化;要完成高技能的作业,就需要智能化;为了提高安全性,需要安全控制,进行运行状态监视,故障自动报警;随着建设领域的扩展,为了避免人员无法及不易接近的场所和作业环境十分恶劣的地方去作业,需要采用远距离操纵和无人驾驶技术。这一切都说明了工程机械当前的主要问题是操纵和控制。工程机械不能停留在人工操纵阶段,靠人的感觉、经验和技能来操纵机械将大大影响工程机械技术的发展,也不能使人从繁重、复杂的操纵劳动中解放出来。因此,近年来工程机械的发展主要是操纵和控制机构的改进。例如,动力装置方面:柴油机已采用微机控制电子喷射和电子调速器;挖掘机、推土机和装载机都采用了发动机工况控制,根据作业工况通过电子控制,使发动机输出不同的功率。传动装置方面:如装载机变速器采用了电操纵、微机控制自动换挡和换挡品质控制等。工作装置方面:推土机、平地机刀板自动调节,铣刨机和摊铺机自动找平,挖掘机轨迹控制、自动掘削等。液压系统方面:节能控制,全功率控制,泵、阀和马达联合控制等。操纵系统方面:从先导操纵到先导比例操纵,最近正在向电操纵杆方向发展。推土机、装载机等操纵杆数正在减少,操纵功率大大下降,操纵越来越方便。有的装载机转向操纵已从方向盘改为操纵杆式转向。

当前工程机械的先进技术大部分集中在操纵与控制上。要解决控制问题,只从机械和液压角度来考虑很难使产品有质的飞跃,必须引入具有良好控制性能和信息处理能力的电子技术、传感器技术和电液转换技术等。电子控制和信息处理技术已成为现代工程机械不可缺少的一部分。

自80年代以来,国内外工程机械技术水平有了较大的发展,总趋势有:

1. 向节能、高效、可靠和环保型发展。发展节能型产品是工程机械发展的主攻方向之一。一些节能新技术、新方法正被推广应用。例如:为了降低发动机能耗,广泛采用负荷反馈电子控制装置,使发动机处于最佳功率和耗油状态,以大大降低能耗。通过有效利用液压传动和电子控制,实现输出功率和能耗的最佳匹配。结构改进和性能指标的提高也是措施之一。如机器上安装电子监控系统、紧急制动系统等,增加机器使用寿命。在制造质量方面追求高可靠性,大型工程机械第一次大修间隔期提高到了1.5~2.0万h。

2. 机、电、液一体化高新技术获得越来越广泛的应用。在工程机械上继续推广应用大规模

集成电路、微处理器和微型计算机,以及电子监控技术,并获得更广泛的应用。与此同时,液压传动技术获得普及,新一代的液压元件作为工程机械的重要配套元器件有了新的突破。与微电子技术结合,最大限度地提高功能利用率,除传动系统外,还用于电液伺服自动控制系统。高温、高寒等特殊环境使用的液压装置开始得到发展。电子—液压集成控制将成为现阶段研究与应用的热点,它包括各功能部件的分立自动控制(如工作装置控制、转向及操纵控制、动力传动控制、液压系统控制等)、各功能部件间分立集成联合控制(如负荷控制、动力控制等)及整机电子—液压集成控制。其特点:使系统可靠性有很大提高;使系统的功能得到扩展;为系统的维护和现代化管理奠定基础。对于在恶劣环境下连续长时间工作的机器,在尽可能保证控制功能的前提下,减少线束、液压管路的数量和长度成为解决可靠性的首要任务。电子—液压集成控制的调整单元是根据通用标准来设计的,电控中心的微处理器中可存储多套功能控制方案,以适应不同结构功能的控制要求。电子—液压集成控制可以对整机各功能部件的主要参数进行实时监控,且本身具备自适应能力与故障诊断能力,使机器的维护十分方便,借助于通讯接口可以和工程管理系统进行数据交流,便于现代化管理,减少机器的自身损耗,延长机器的使用寿命,提高生产率。

3. 向大型化和微型化发展。发达国家工程机械都有较完善的系列产品,并不断向大型化和微型化发展,使工程机械产品系列更加完善,制造工艺水平进一步提高。目前,世界最大的德国利勃海尔挖掘机,整机质量 680t,斗容量达 35m³;而最小的单斗挖掘机整机质量不到 1t,斗容仅 0.05m³。日本的小型挖掘机可更换 100 多种工作装置。

4. 先进的配套动力技术。称为第二代冷却技术的“气对气中冷”系统已经在欧洲和日本的柴油机上广泛应用。这种方法比“水套中冷”法提高效率 5%。

5. 大型工程机械都安装了倾翻保护结构和重物坠落保护结构。起重机安装了吊臂接近高压线的报警装置;驾驶室的舒适性和操作性,采用了隔音、防震、带有空调设备的密封式。

6. 虚拟现实(VR)技术的研究与应用。虚拟现实(VR——Virtual Reality)是一种探讨如何实现人与机器之间理想交互方式的技术。而人与计算机之间的交互是人机交互的手段。利用虚拟现实技术,计算机可以产生一个三维的、基于感知信息的临场反应,并为用户的行为所控制。虚拟现实技术将使计算机图形接口的视窗消失,用户可以进入到计算机生成的环境中去与机器进行直观自然的交互。实现逼真的遥控现场效果,达到任意复杂环境下的可视控制与操作。

新一代工程机械不仅需要各功能部件的自动控制,而且需要整个机械的自动控制,更进一步的需要机械能够实现以智能控制为基础的总体综合控制,以期达到人机的合理配置与交流。适合这种控制需求的技术已经出现,在装载机上已得到了应用,并获得广泛的重视。

第二节 工程机械机电液一体化系统的组成

一、工程机械机电液一体化系统的基本要素

工程机械机电液一体化技术有其自身的特点,其结构形式虽然千变万化,但离不开转向、行驶驱动、工作装置三个基本部分。由于具体机器的施工作业对象不同,工作装置千差万别,变化也最大。一般工程机械机电液一体化系统构成的基本要素与一般的机电液一体化系统构成的基本要素相同,它包括机械本体、动力部分、检测部分、执行机构、控制器、接口等。而工程机械动力驱动与控制的核心是液压、电子集成系统。这些基本要素的关系及功

能如图1-1所示。

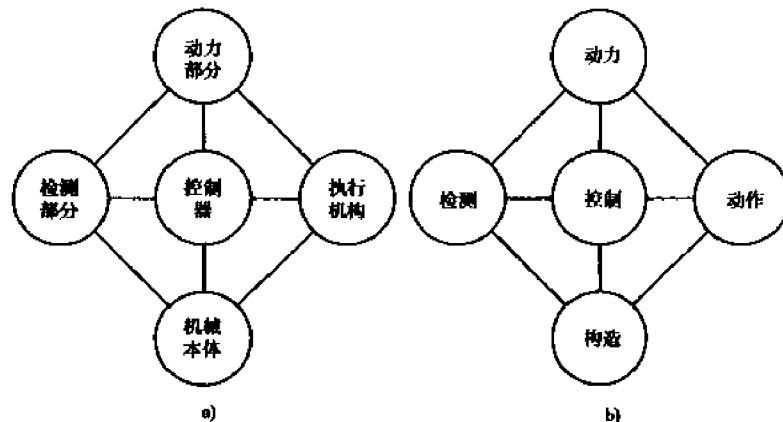


图 1-1 机电液一体化系统的要素及功能

a)机电液一体化系统的要素;b)机电液一体化系统的功能

1. 机械本体

机械本体包括机械传动装置和机械结构装置。机械本体的主要功能是使构造系统的各子系统、零部件按照一定的空间和时间关系装置在一定的位置上,并保持特定的关系。为了充分发挥机电液一体化的优点,必须使机械本体部分具有较高的强度、轻量化和高可靠性。过去的机械均以钢铁为基础材料,要实现机械本体的高性能,除了采用钢铁材料以外,还必须采用复合材料或非金属材料。机械传动装置要求有高刚度、低惯量、较高的谐振频率和适当的阻尼性能,从而对机械系统的结构形式、制造材料、零件形状等方面都相应提出了特定的要求。机械结构是机电液一体化系统的机体。机械的各组成要素均以机体为骨架进行合理布局,有机结合成一整体,这不仅是系统内部结构的设计问题,而且也包括外部造型的设计问题。要求系统整体布局合理,使液压管路、接头、控制线束尽可能地减少,使用、操作方便,造型美观。

2. 动力部分

按照系统控制要求,为系统提供能量和动力使系统正常运行。用尽可能小的动力输入获得尽可能大的功能输出,是机电液一体化产品的显著特征之一。

驱动部分在控制信息作用下,提供动力,驱动各执行机构完成各种动作和功能。机电液一体化系统一方面要求驱动的高效率和快速响应特性,同时要求对外部环境的适应性和可靠性。由于电子与液压技术的高度发展,高性能电子液压比例驱动和电子液压伺服驱动已大量应用于工程机械系统。

3. 检测部分

检测部分功能主要是对系统运行中所需要的本身和外界环境的各种参数及状态进行检测,变成可识别信号,传输到信息处理单元,经过分析、处理后产生相应的控制信息。其功能一般由专门的传感器和仪器仪表完成。

4. 执行机构

执行机构的功能应是根据控制信息和指令完成所要求的动作。执行机构是运动部件,它将输入的各种形式的能量转换为机械能。工程机械上常用的液压式执行部件主要是液压缸和液压马达。

5. 控制器

控制器是机电液一体化系统的核心部分。它将来自各传感器的检测信息和外部输入命令进行集中、储存、分析、加工,根据信息处理结果,按照一定的程序和节奏发出相应的指令控制整个系统有目的地运行。一般由计算机、可编程程序控制器(PLC)、数控装置以及逻辑电路、A/D(模/数)与D/A(数/模)转换、I/O(输入/输出)接口和计算机外部设备等组成。

6. 接口

机电液一体化系统由许多要素或子系统构成,各子系统之间必须能顺利进行物质、能量和信息的传递与交换,为此各要素或各子系统相接处必须具备一定的联系环节,两个部件间的连接就可称为接口,其基本功能主要有三个。一是交换,需要进行信息交换,传输的环节之间,由于信号的模式不同(如数字量与模拟量、串行码与并行码、连续脉冲与序列脉冲等等),无法直接实现信息或能量的交流,通过接口完成信号或能量的统一。二是放大,在两个信号强度相差悬殊的环节间,经接口放大,达到能量的匹配。三是传递,变换和放大后的信号在环节间能可靠、快速、准确地交换,且必须遵循协调一致的时序、信号格式和逻辑规范。接口具有保证信息传递的逻辑控制功能,使信息按规定模式进行传递。接口的作用使各要素或子系统联接成为一个有机整体,使各个功能环节有目的地协调一致运动。

二、控制系统的分类

在工程机械领域中,机电液一体化系统以机器为控制对象,以电子液压装置或计算机为控制器,受控的物理量通常是机械的位移、速度、加速度、力(或力矩)、功率、液压系统的压力、流量等,其控制系统的种类很多,可从不同角度按照不同的分类方法进行分类。

1. 按照系统输入信号的变化规律可分为定值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

定值控制系统:定值控制系统也叫自动调整系统,控制系统的基本任务是在存在扰动的情况下,将实际输出量保持在某一期望的数值上。

随动控制系统:这种控制系统的特点是系统的输出以一定的精度复现系统的输入信号。

程序控制系统:在有两个以上执行机构的系统中,使各步动作的控制信号按预定程序指挥执行机构依次动作。

2. 按照系统输出量的形式可以分为位置控制、速度控制、加速度控制、力(或力矩)控制等。

3. 按照控制对输出量作用可分为闭环控制系统和开环控制系统。

闭环控制系统:凡系统输出量对控制作用有直接影响的系统叫闭环系统。闭环控制系统也叫反馈控制系统,具有抑制系统内部和外部各种干扰对系统输出影响的能力。

开环控制系统:系统的被控制量只能受控于控制量,而对控制量不能反施任何影响的系统称为开环控制系统。由于被控制量不影响系统的控制作用,所以对于干扰造成的误差,开环系统不具备修正的能力。

4. 按照控制信号的变量形式可分为模拟控制系统和数字控制系统。

三、工程机械机电液一体化的相关技术

系统论、信息论、控制论无疑是机电液一体化技术的理论基础,是机电液一体化技术的方法论,而微电子技术、传感器技术、液压与液力传动技术则是工程机械机电液一体化的技术基础。发展机电液一体化技术而面临的相关技术有检测传感器技术、信息处理技术、比例与伺服技术、自动控制技术、接口技术及系统总体技术等。

1. 检测传感技术

传感器技术是机电液一体化的第一关键性技术。它是工程机械施工作业过程中的视觉与感觉系统。传感器技术自身就是一门多学科、知识密集的应用技术。传感原理、传感材料及加工制造装配技术是传感器开发的三个重要方面。作为一个独立器件,传感器的发展正进入集成化、智能化研究阶段。

2. 信息处理技术

信息处理技术包括信息的输入、识别、变换、运算、存储及输出技术。信号的处理是否及时、准确,直接影响产品的质量和效率。

信息处理的硬件设备主要有输入/输出设备、显示器、磁盘、计算机、可编程序控制器及数控装置等。

3. 自动控制技术

所谓自动控制,就是在没有人直接参与的情况下,通过控制器使被控对象或过程自动地按照预定的规律运行。在机电一体化技术中,诸如高精度定位控制、速度控制、自适应控制、自诊断、校正、补偿、再现、检索等自动控制技术皆是重要的关键技术。现代控制理论的工程化与实用化以及优化控制模型的建立、复杂控制系统的模拟仿真、自诊断监控技术及容错技术等都是有待进一步开发研究的课题。

4. 比例与伺服驱动技术

工程机械上的比例与伺服驱动技术主要是指执行系统与机构中的技术问题。执行机构主要包括电磁铁、液压泵、液压马达、液压缸、气缸等。执行机构的性能、精度、响应速度及可靠性对机电液一体化产品的性能与质量同样具有至关重要的影响。

5. 接口技术

机电液一体化系统是机械、电子和信息等性能各异的技术融为一体的综合系统,其构成要素或子系统之间的接口极其重要。从系统外部看,输入/输出是系统与人、环境或其它系统之间的接口;从系统内部看,是通过许多接口将各组成要素的输入/输出联系成一体的系统。因此,各要素及各子系统之间的接口性能就成为综合系统性能好坏的决定性因素。

6. 系统总体技术

系统总体技术就是从整体目标出发,用系统的观点和方法,把机械与电子的功能在结构上有机地一体化的技术。即使各构成要素的功能、精度、性能都很好,但若整体系统不能很好协调,系统照样难以正常运行而不能发挥其应有的效能。

为了开发出具有较强竞争能力的工程机械机电液一体化产品,系统总体设计除考虑优化设计外,还包括可靠性设计、标准化设计、系列化设计以及造型设计。

第三节 工程机械机电液一体化典型技术及系统

工程机械机电液一体化技术发展的最终目标就是简化操作与维修,提高机器的动力性和经济性,提高机器的作业效率和作业质量,最终实现机器的智能化与无人化。

工程机械机电液一体化典型技术及系统举例如下:

一、多马达合成变速器行驶传动

图 1-2 是一应用于大功率轮胎式装载机的液压传动系统简图。它用一个可编程的微机控制,完成全部操纵和控制任务,负责变速器的管理,使机器在整个变矩范围内几乎是无级、无牵

引力中断的连续运转;极限负载调节功能(CLR)避免柴油机过载和熄火;借助于传感器可连续监视传动路线上各种不同的元件、部件的工作状态;通过一个串行接口可在一定范围内改变预定参数,以便使轮胎式装载机的行驶性能按照设计、制造者的要求而改变或进行调整;通过静压与多马达合成变速器的结合,传动控制范围扩大到简单控制范围的 20 倍以上;换挡过程的转速同步通过液压马达排量的电动比例调节来实现,也就是说液压马达的调节是由电子储存的特性曲线完成的;在换挡过程中,升挡的加速阶段和降挡的制动阶段充分利用变速的重叠区域,以使滞退和工作状况通过选择不同的换挡点使机器达到一个最佳的行驶状态。实际上微控器可以预给任一条特性曲线,以达到明显改善柴油机功率利用率、降低噪声及废气排放的效果。

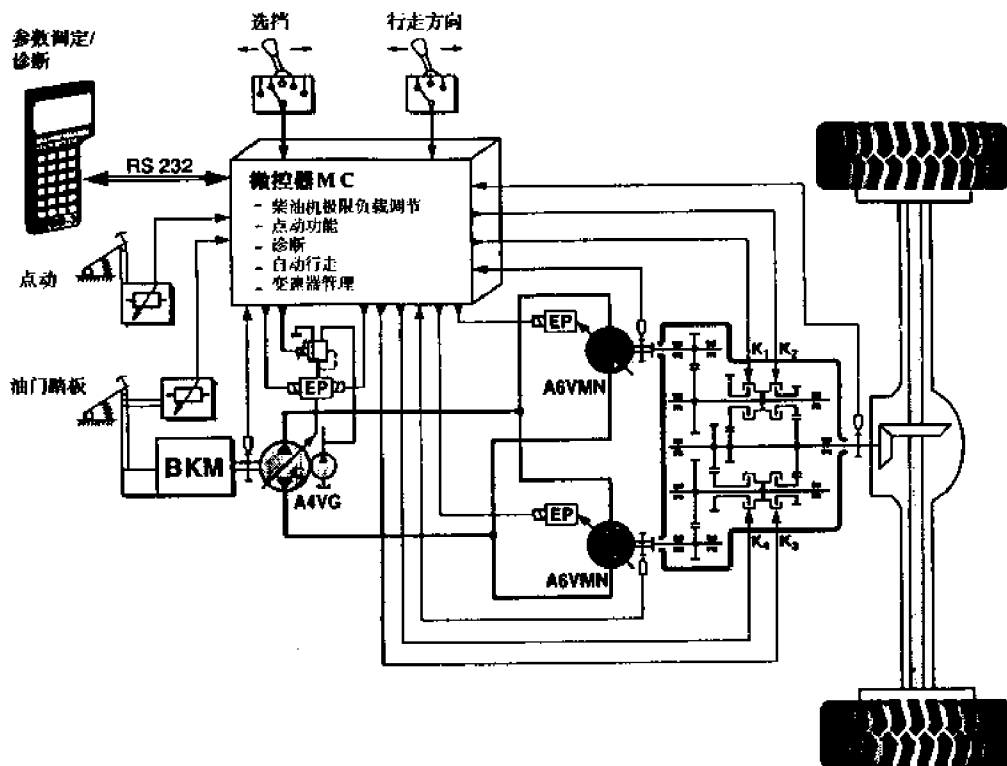


图 1-2 多马达合成变速器行驶传动简图

二、液压传动系统软件的应用

行驶车辆中的微控器老型号用“黑匣子”定义,一方面由于它的壳体是黑色的,另一方面由于它的内部流程无法表达,只能看到输出对输入的反应。而现代微控器 MC 软件是在 PC 机上以汇编程序和高级 C 语言编制之后,进行编译并“烧制”在储存组件 EPROM 上,形成了一定的应用范围。其行走机械传动的基本功能程序模块组成如图 1-3 所示。

1. 车辆行驶:MC 通过一个电位器测得喷油泵杠杆的位置,根据这一输入信号相应的特性曲线来控制液压泵和液压马达的摆角,并利用时间斜坡函数在油门发生突变时,编程一个协调的加速行为和制动行为。

2. 驱动转速恒定预给:通过一套调节系统预给驱动马达一个转速,同时利用已储存的特性曲线控制液压泵和马达。这一点在摊铺机和振动压路机行驶控制中尤为重要,它是机器保障作业质量的关键技术之一。

软件功能模块	应用									
	公共事业车辆	林业机械	扫雪机	叉车	轮胎式装载机	挖掘装载机	履带式装载机和平地机	沥青路面摊铺机	行走式装载机	挖掘机
(1) 车辆行走	●	●		●	●	●	●	●	●	○
(2) 驱动转速 恒定预给	○	●	●				○	●	●	●
(3) 恒速传动 CSD	○		●	●			○		●	
(4) 液压静压制动	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
(5) 逆转转	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
(6) 点动	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
(7) 极限负载调节 GLR	●	●	●	●	●	●	●		●	●
(8) 牵引力限制	○	●			●	●				
(9) 取决于转速的牵引力 FDZ					●	●				
(10) 变速器换挡 SGM	○				●	○			●	
(11) 同步双回路传动							●	●		
(12) 传动转差率调节 ASR									●	
(13) 安全监控							●	●	●	
(14) 参数化、诊断和 学习功能	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
软件产品	FGR	FGR	FGR	FGR	FGR	FGR	FZA	FZA	ASR	GLB

○ = 可选

图 1-3 传动系统程序模块的应用

3. 恒速传动(CSD):在恒速行驶精度要求不高的情况下,利用软件而不需附加测速传感器实现恒速传动,即液压泵调节相应于油门一定的位置。

4. 静液压制动:当油门预给一个降低行驶速度的信号时,通过一个时间斜坡函数使液压马达的摆角增大和液压泵摆角减小,同时限制液压马达最高转速。

5. 逆转转:在任意速度时可改变行驶方向。

6. 点动:通过脚踏油门、制动脚踏板或者调节按钮电位器可以将最大行驶速度降到零,一方面使低速时获得大的驱动功率,另一方面低速时的高分辨率使全部行驶油门范围内都能达到灵活控制的目的。

7. 极限负载调节(GLR):由微控器 MC 预给的行驶速度和行驶阻力有时需要一个大的驱动功率,将使驱动马达过载,发动机熄火。MC 中的软件极限负载调节使任何一种行驶状态下都能防止上述现象发生。根据驱动马达喷油泵电位器的输入信号来确定给定转速的特性曲线。当识别出给定转速低于测得的柴油机实际转速时,液压泵的摆角减小,液压马达的摆角增大。通过优化这个极限负载调节的 PID 调节参数将达到一个稳定的调节状态,保证在极限负载调节时的最佳牵引力状态。

8. 牵引力限制:当机械工作在地面变化的情况下,限制驱动轮牵引力就很有意义了。为此目的,借助于压力传感器通过一个梭阀能够获取液压变速器中的高压。软件调节计算将测得的实际值与驾驶员调定的给定值进行比较。在超出给定值时将通过调节系统压力,限制牵引力。

9. 取决于转速的牵引力(FDZ):需要驾驶员有针对性地影响牵引力大小时,行走传动控制由一个取决于转速的牵引力限制(DA)(称作截止曲线),通过微控器中的软件限制牵引力的大小。

10. 换挡变速器管理(SGM):过去在模拟技术中开发的用于负载换挡变速器控制的 LSG 回路,现已转移到 MC 技术和相应的软件上。充分利用液压变速器压力特性,使得行走传动中在有负载时无冲击和可靠地机械换挡成为可能。同时,由 MC 和软件组成的其它系统方案也可用于行走传动的同步变速器和合流变速器。

11. 同步双回路传动:在履带车辆中应用的行走传动是建立在双液压变速器基础之上的。这种双回路传动的重要功能有:

(1) 直线行走:作为车辆精确直线行走的条件是,测量两个传动边的液压马达转速,并且在闭式回路中通过泵和马达的摆角调节来进行控制。

(2) 转向:转向信号是通过不同的发生器元件的电位器传递给微控器,这些元件如:方向盘、手柄或者双调节杆。相应于转向的预给,液压变速器外转弯变速比被增大而内转弯的变速比则被减少,以产生不同的履带速度。特殊情况实现原地转向。

12. 传动转差率调节(ASR):为了避免液压多马达行走传动驱动轮打滑,研制了专门的调节方法。可编程传动转差率调节的原理主要是基于被驱动轮的转速持续被测量和比较。当识别出打滑现象时,通过减少所涉及的液压马达的摆角来减小驱动转矩,同时限制马达的最高转速。

13. 安全监控:当微控器的元件出现故障或者外围设备传感器和调节元件损坏时,可能会出现危及安全的情况。例如,在双回路履带传动中,一个传动边出现故障,将导致车辆不能转向。因此,对电位器和调节电磁铁都进行实时电缆断裂和短路监控。在出现错误时,微控器获取一个开关信息,由此,它启动专门的错误例行程序。附加的还将在软件中进行可靠性检查。

14. 参数化:一般说来,应用者不能进入应用软件。因此,可以通过接口和操作器将软件参数针对具体应用进行匹配。

图 1-4 为叉车行走传动带有微控器 MC 和软件 FGR 的应用示例。其主要特点是驱动马达的转速调节借助于力士乐调节系统 MHCSP 和微控器 MC;中速驱动马达时具有较高的行驶速度;具有极限负载调节功能;在叉车提升变幅过程中行驶时,采用恒速传动 CSD,使行驶速度保

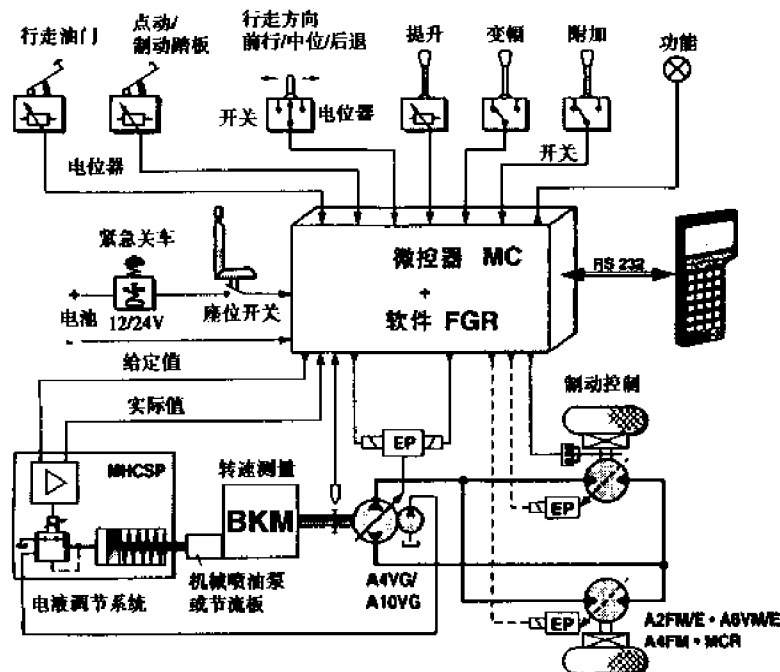


图 1-4 带有微控器 MC 和软件 FGR 的叉车行驶传动

持恒定。

三、大型履带式摊铺机传动与控制

图 1-5 为大型履带式摊铺机带有电子调节控制的传动系统简图。该系统是由布根豪斯—海卓玛蒂克(力士乐子公司)研制的。这套电子系统由一个微控器 MC 和一套行驶程序 FZA (用于双回路或多回路传动的软件),以及所需的传感器和给定值预给器组成。它除具有行驶传动控制外,还提供螺旋分料器、振动器、振捣器等传动的转速控制。

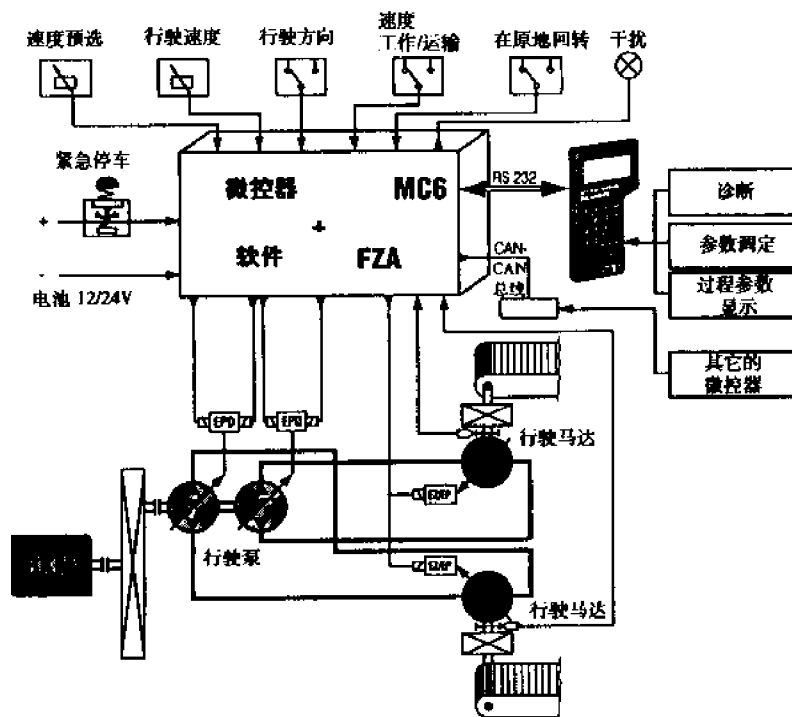


图 1-5 大型履带式摊铺机传动与控制

四、电子管理式装载机

图 1-6 是用于液压闭式回路的电子管理式装载机,该系统的特点不仅是驱动液压系统的管理,而且是和传动方案连接在一起,信息是作为输入参数由软件来处理的。输入的参数有行驶踏板的位置、制动踏板的位置、行驶方向开关的位置、驱动马达转速的给定和实际测量的转速,以及其它特殊功能的开关信号。通过微处理器计算的信号参数作为输出信号传递给比例电磁铁来操作变量泵的 EP 比例电磁铁和变量马达的 EP 比例电磁铁。制动控制和恒速传动控制也可以集成在内。

五、导向钻孔机

特殊导向钻孔机被越来越多的用于铺设穿过公路、河底或者其它障碍物底下的管路或电缆。钻孔的程序包括三个步骤:首先将旋转式钻头通过压力和旋转推入地下,以形成一个导向孔。这类导向孔最长 1.8km,最大拉力达 3 000kN,最大直径 1.4m,利用计算机辅助磁场测量系统可以准确地控制钻孔过程;第二步扩孔和清洗。将一根粗管作为导向杆从对面拉过来进行

扩孔,同时使用水泥浆作为清洗剂,使用越来越粗的管子将这一过程反复进行,直到所需的孔径,最后将生产管拉入安置固定在硬化的水泥浆中,其液压电子控制系统如图 1-7 所示。

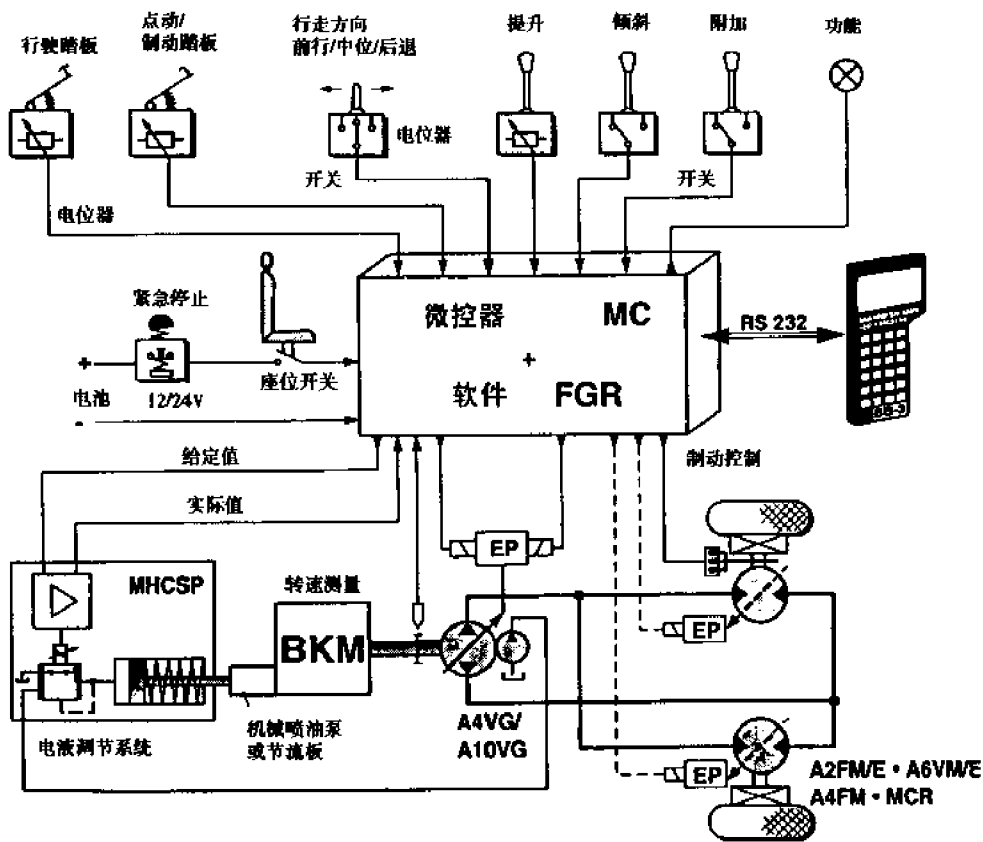


图 1-6 电子管理式装载机

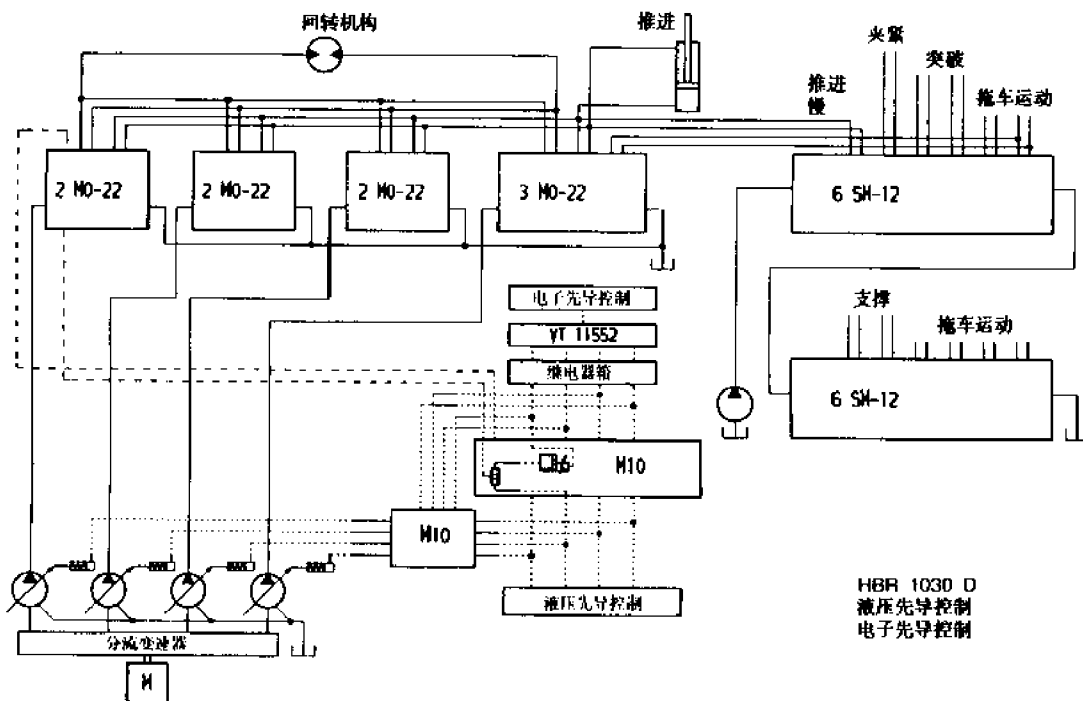


图 1-7 特殊导向钻机 HBR1030D 液压电子系统

先导控制系统可选择电子先导控制,也可选择液压先导控制。放大器 VT1152 和继电器箱控制先导控制板 M10 的控制压力,进而控制泵的流量。四台液压泵和四个控制箱 MO-22 是按先后顺序动作来驱动回转和推进装置的。两个液压缸完成钻孔的推进动作。所有辅助功能,如钻杆夹紧,收集装置的操作、支撑以及拖车运动都由控制箱 SM12 电液操纵完成的。

第二章 机电液系统数学模型

工程机械广泛采用机电液系统,不同的研究对象有不同的模型。本章重点讨论机电液系统动力学模型的建立,涉及到机械传动系统、电路网络、控制电机、液压系统等。建模的方法主要采用分析建模法,所有模型均建立在相应的物理定律基础上。

第一节 数学模型的基本概念

要对机电液系统性能作出定量分析,首先必须建立系统的数学模型。那么,什么是系统的数学模型呢?笼统地说,系统中输入、输出及各变量之间的相互关系,它们所遵循的一组数学方程式就是系统的数学模型。通常各变量均为时间的函数,它们之间的数学关系,要用一组微分方程来表示。要对系统进行分析,实质上就是对表征这个系统的数学方程式求解。由此可见,一个系统数学模型的建立,是能够正确地分析这个系统的最重要的前提。

一、传递函数的概念

对于线性连续系统,描述其动态特性的数学模型为一组线性微分方程。为了计算和分析系统特性,通常采用的方法是将线性微分方程进行拉普拉斯变换(简称拉氏变换),使微分方程变为代数方程。

系统的传递函数定义为:当初始条件为零时,输出、输入及各阶导数为零,此时系统输出量与输入量的拉氏变换之比,称为系统的传递函数。设某一系统,输入量用 $r(t)$ 表示,输出量用 $c(t)$ 表示,系统微分方程的一般形式为:

$$\begin{aligned} & a_0 \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_{n-1} \frac{dc(t)}{dt} + a_n c(t) \\ & = b_0 \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_{m-1} \frac{dr(t)}{dt} + b_m r(t) \end{aligned} \quad (2-1)$$

若系统初始条件全部为 0,即:

$$\begin{aligned} r(0) = 0, r'(0) = 0 \cdots \cdots r^{m-1}(0) = 0 \\ c(0) = 0, c'(0) = 0 \cdots \cdots c^{n-1}(0) = 0 \end{aligned}$$

则对式(2-1)等号两端分别进行拉氏变换有:

$$a_0 s^n C(s) + a_1 s^{n-1} C(s) + \cdots + a_n C(s) = b_0 s^m R(s) + b_1 s^{m-1} R(s) + \cdots + b_m R(s)$$

故输出量 $c(t)$ 与输入量 $r(t)$ 之间的传递函数为:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + b_2 s^{m-2} + \cdots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \cdots + a_n} \quad (2-2)$$

式中 s 拉氏算子。由上式可见,系统传递函数 $G(s)$ 依赖于系统的微分方程,它与系统微分方程是相互对应的。因此,系统的微分方程和传递函数都可以作为系统的数学模型。通过反拉氏变换,可以由传递函数求出微分方程的解:

由于 $G(s) = C(s)/R(s)$
 所以 $C(s) = G(s) \cdot R(s)$ (2-3)
 时域解为 $c(t) = L^{-1}[C(s)] = L^{-1}[G(s) \cdot R(s)]$ (2-4)

二、方框图

实际系统的数学模型往往是非常复杂的,为了简单、明确地表示系统中各变量之间的相互关系,常常采用方框图的表示方法。

1. 方框图单元

(1)基本单元 图 2-1 为方框图的基本单元。图中, $r(t)$ 为输入信号,它是时间的函数, $R(s)$ 为其拉氏变换, $c(t)$ 为输出信号, $C(s)$ 为其拉氏变换。用方框来表示输入与输出的传递函数,有

$$C(s) = R(s) \cdot G(s)$$

(2)相加(减)点 图 2-2 为方框图的正相加(减)点。其含义为: $Z_3(s) = Z_1(s) \pm Z_2(s)$ 。箭头顶端正负号表示此信号的正负。

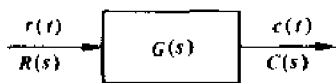


图 2-1 方框图基本单元

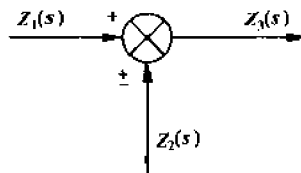


图 2-2 相加、减点

2. 方框图的联结

系统中各环节的方框图之间的联结可以归纳为以下几种:

(1)串联 若环节 1 输出恰为环节 2 的输入,则称环节 1 与环节 2 串联,如图 2-3a)所示。

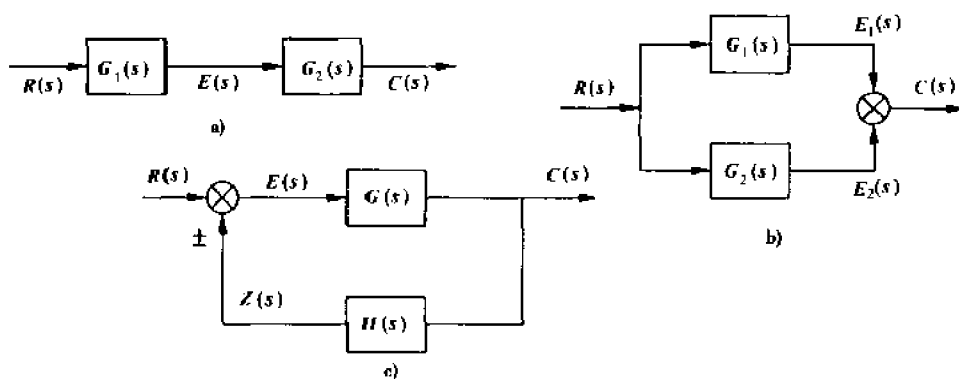


图 2-3 方框图的联结
 a) 串联; b) 并联; c) 反馈

由于

$$G_1(s) = E(s)/R(s)$$

$$G_2(s) = C(s)/E(s)$$

故总传递函数为

$$G(s) = C(s)/R(s) \quad (2-5)$$

(2) 并联 几个环节输入相同,输出相加,则称这几个环节并联,如图 2-3b)所示。这时

$$G_1(s) = E_1(s)/R(s)$$

$$G_2(s) = E_2(s)/R(s)$$

故总传递函数

$$G(s) = C(s)/R(s) = E_1(s)/R(s) + E_2(s)/R(s) = G_1(s) + G_2(s) \quad (2-6)$$

(3) 反馈联结 系统某环节的输量全部或部分地通过返回的传递函数送到输入端,又重新送入到系统称为反馈。反馈有正反馈和负反馈,若反馈量与输入量相加则称为正反馈;若反馈量与输入量相减则称为负反馈。如图 2-3c)所示。带有反馈的系统被称为闭环系统。定义 $G(s)$ 为前向传递函数。 $H(s)$ 为反馈传递函数;一个闭环系统的总传递函数被称为闭环传递函数。用 $G_B(s)$ 表示,即:

$$G_B(s) = C(s)/R(s)$$

由图可知

$$C(s) = E(s) \cdot G(s)$$

$$E(s) = R(s) \pm Z_1(s) = R(s) \pm C(s) \cdot H(s)$$

故

$$C(s) = R(s) \cdot G(s) \pm C(s) \cdot H(s) \cdot G(s)$$

$$C(s) = R(s) \frac{G(s)}{1 \mp G(s)H(s)}$$

$$G_B(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 \mp G(s)H(s)} \quad (2-7)$$

式中,正反馈时取“-”,负反馈时取“+”。

3. 方框图简化

图 2-4 给出了各种方框图等效变换的规则,应用这些规则,可以对一个复杂的方框图进行简化。

序号	原方框图	等效方框图
1		
2		
3		
4		

图 2-4

序号	原方框图	等效方框图
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		

图 2-4 方框图等效变换规则

第二节 机械传动系统数学模型

一、移动系统数学模型

组成移动系统的基本元件是质量、阻尼和弹簧。三种机械元件的物理模型见图 2-5。由图可得质量的数学模型为

$$F(t) = m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \quad (2-8)$$

式中： $F(t)$ ——外力；
 $x(t)$ ——位移；
 m ——质量。

阻尼器的数学模型为

$$F(t) = C \left[\frac{dx_1(t)}{dt} - \frac{dx_2(t)}{dt} \right] \quad (2-9)$$

式中： C ——粘性阻尼系数。

弹簧的数学模型为

$$F(t) = K [x_1(t) - x_2(t)] \quad (2-10)$$

式中： K ——弹簧刚度。

下面举例说明平移系统的建模方法。

图 2-6 为车辆隔振装置的力学模型。

根据牛顿第二定律,系统运动方程为

$$m \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = F(t) - Kx(t) - C \frac{dx(t)}{dt} \quad (2-11)$$

式中： m ——质量；

C ——阻尼系数；

K ——弹簧刚度。

对式(2-11)进行拉氏变换,得系统传递函数

$$\frac{X(S)}{F(S)} = \frac{1}{ms^2 + Cs + K} \quad (2-12)$$

根据式(2-12)可画出系统传递函数方框图(见图 2-7)。

图 2-8 为车辆振动系统的简化模型。根据牛顿定理,可建立系统运动方程。

车体振动方程为

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = - C \left(\frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) - K_1(x_1 - x_2) \quad (2-13)$$

式中： m_1 ——车体质量；

x_1 ——车体位移；

C ——减振器阻尼系数；

K_1 ——弹簧刚度。

车轮振动方程为

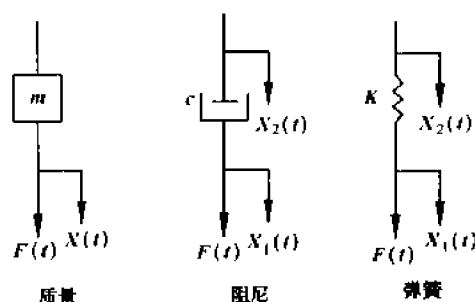


图 2-5 机械直线移动元件

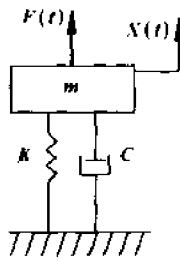


图 2-6 车辆隔振装置

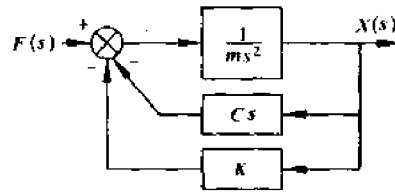


图 2-7 隔振装置传递函数方框图

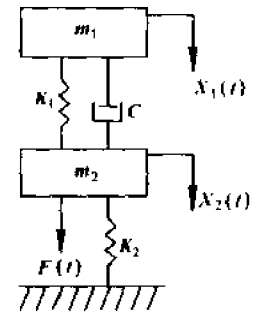


图 2-8 车辆振动系统简化模型

$$m_2 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = F(t) - C \left(\frac{dx_2}{dt} - \frac{dx_1}{dt} \right) - K_1 (x_2 - x_1) - K_2 x_2 \quad (2-14)$$

式中： m_2 ——车轮质量；
 x_2 ——车轮位移；
 K_2 ——轮胎刚度。

对式(2-13)和式(2-14)进行拉氏变换,可得

$$m_1 s^2 X_1(s) = -Cs[X_1(s) - X_2(s)] - K_1[X_1(s) - X_2(s)] \quad (2-15)$$

$$m_2 s^2 X_2(s) = F(s) - Cs[X_2(s) - X_1(s)] - K_1[X_2(s) - X_1(s)] - K_2 X_2(s) \quad (2-16)$$

由式(2-15)和式(2-16)可画出系统传递函数方框图,如图 2-9a)所示。根据图 2-4 方框图等效变换规则,图 2-9a)可简化为图 2-9b)。由图 2-9b)可进一步简化为图 2-9c)。

根据图 2-4 的等效变换规则,图 2-9c)中 $G_1(s)$ 和 $G_2(s)$ 可由下式计算:

$$G_1(s) = 1/(m_2 s + K_2) \quad (2-17)$$

$$G_2(s) = \frac{cs + K_1}{m_1 s^2 + Cs + K_1} \quad (2-18)$$

由图 2-9c)可得

$$[F(s) - m_1 s^2 X_1(s)] G_1(s) = X_2(s) \quad (2-19)$$

$$X_2(s) G_2(s) = X_1(s) \quad (2-20)$$

联立求解式(2-19)和(2-20),可得出以作用力 $F(s)$ 为输入,分别以 $X_1(s)$ 和 $X_2(s)$ 为输出位移的传递函数为:

$$\begin{aligned} \frac{X_1(s)}{F(s)} &= \frac{G_1(s) G_2(s)}{1 + m_1 s^2 G_1(s) G_2(s)} \\ &= \frac{Cs + K_1}{m_1 m_2 s^4 + (m_1 + m_2) Cs^3 + (m_1 K_1 + m_1 K_2 + m_2 K_1) s^2 + CK_2 + sK_1 K_2} \end{aligned} \quad (2-21)$$

$$\begin{aligned} \frac{X_2(s)}{F(s)} &= \frac{G_1(s)}{1 + G_1(s) G_2(s) m_1 s^2} \\ &= \frac{m_1 s^2 + Cs + K_1}{m_1 m_2 s^4 + (m_1 + m_2) Cs^3 + (m_1 K_1 + m_1 K_2 + m_2 K_1) s^2 + CK_2 s + K_1 K_2} \end{aligned} \quad (2-22)$$

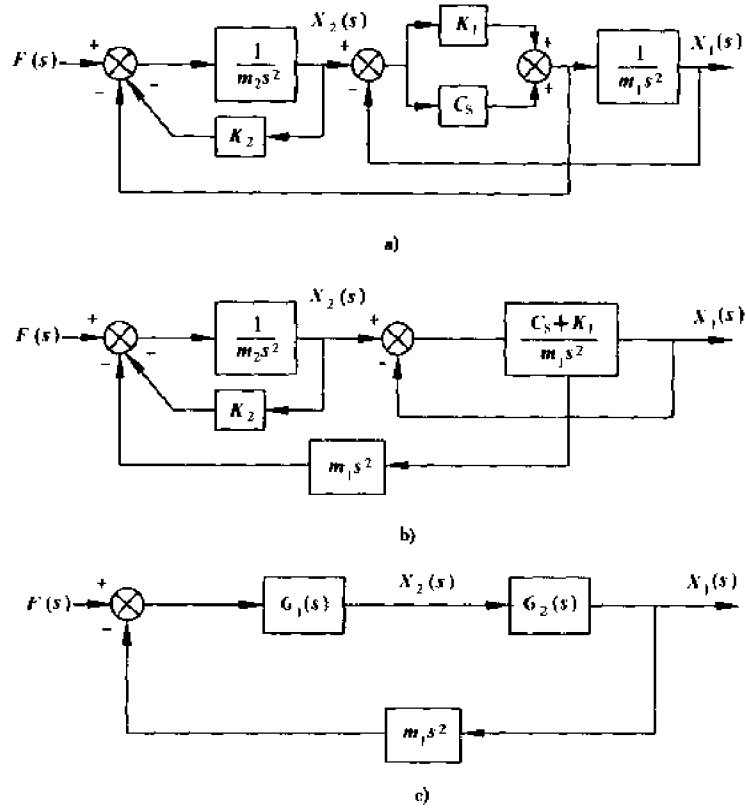


图 2-9 车辆振动传递函数系统方框图

a) 系统方框图; b) 方框图化简; c) 化简后的方框图

式(2-21)和式(2-22)完全描述了该系统的动力特性,只要给定车辆振动系统的有关参数,就可由上式讨论其振动特性。

二、转动系统数学模型

转动惯量、阻尼器和弹簧是转动系统的三个基本元件。图 2-10 是三个元件的物理模型。由图可得到转动惯量的数学模型为

$$M(t) = J \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} \quad (2-23)$$

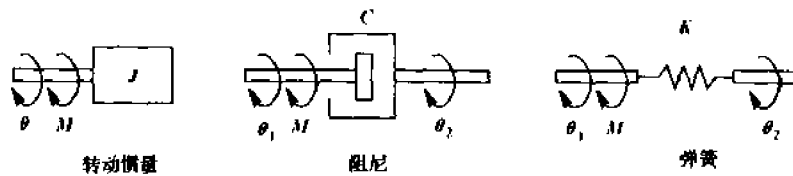


图 2-10 机械转动元件

式中: $M(t)$ ——外力矩;

J ——转动惯量;

θ ——转角。

粘滞阻尼器的数学模型为

$$M(t) = C \left[\frac{d\theta_1(t)}{dt} - \frac{d\theta_2(t)}{dt} \right] \quad (2-24)$$

式中：C——粘性转动阻尼系数。

弹簧的数学模型为

$$M(t) = K[\theta_1(t) - \theta_2(t)] \quad (2-25)$$

式中：K——扭转弹簧刚度。

下面举例说明机械转动系统模型的建立方法。

图 2-11 为发动机驱动装置示意图。根据力矩平衡方程,发动机输出轴振动方程为

$$J_m \frac{d^2 \theta_i}{dt^2} = M(t) - C \left(\frac{d\theta_i}{dt} - \frac{d\theta_0}{dt} \right) - K(\theta_i - \theta_0) \quad (2-26)$$

式中： J_m ——发动机轴转动惯量；

θ_i ——发动机轴转角；

θ_0 ——负载转角；

M ——发动机输出力矩；

C ——发动机输出轴与负载之间的扭
转阻尼系数；

K ——发动机输出轴与负载之间的扭转弹簧刚度。

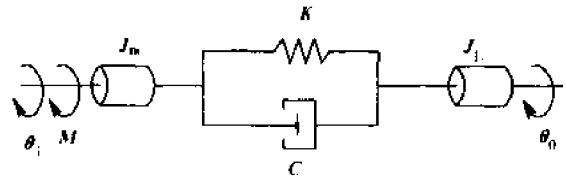


图 2-11 发动机驱动系统力学模型

负载振动方程为

$$J_l \frac{d^2 \theta_0}{dt^2} = -C \left(\frac{d\theta_0}{dt} - \frac{d\theta_i}{dt} \right) - K(\theta_0 - \theta_i) \quad (2-27)$$

式中： J_l ——发动机输出轴与负载之间的转动惯量。

对上两式取拉氏变换得

$$J_m s^2 \theta_i(s) = M(s) - (Cs + K)[\theta_i(s) - \theta_0(s)] \quad (2-28)$$

$$J_l s^2 \theta_0(s) = (Cs + K)[\theta_i(s) - \theta_0(s)] \quad (2-29)$$

根据式(2-28)和式(2-29)可画出系统方框图如图 2-12a)所示,并依次简化为图 2-12b)和图 2-12c)。

根据图 2-4 的等效变换规则可知

$$G(s) = \frac{(Cs + K)/J_m s^2}{1 + (Cs + K)/J_m s^2} = \frac{Cs + K}{J_m s^2 + Cs + K} \quad (2-30)$$

由图 2-12c)可得：

$$[M(s) - J_m s^2 \theta_0(s)] \cdot G(s)/J_l s^2 = \theta_0(s)$$

即：

$$\frac{G(s)}{J_l s^2} \cdot M(s) = \left[1 + \frac{J_m s^2 G(s)}{J_l s^2} \right] \theta_0(s) \quad (2-31)$$

将式(2-30)代入式(2-31)可得：

$$\frac{Cs + K}{J_l s^2 (J_m s^2 + Cs + K)} \cdot M(s) = \left[1 + \frac{J_m s^2 (Cs + K)}{J_l s^2 (J_m s^2 + Cs + K)} \right] \theta_0(s)$$

由上式可求得系统的传递函数为

$$\frac{\theta_0(s)}{M(s)} = \frac{Cs + K}{(J_l + J_m) s^2 [J_l J_m s^2 / (J_l + J_m) + Cs + K]} \quad (2-32)$$

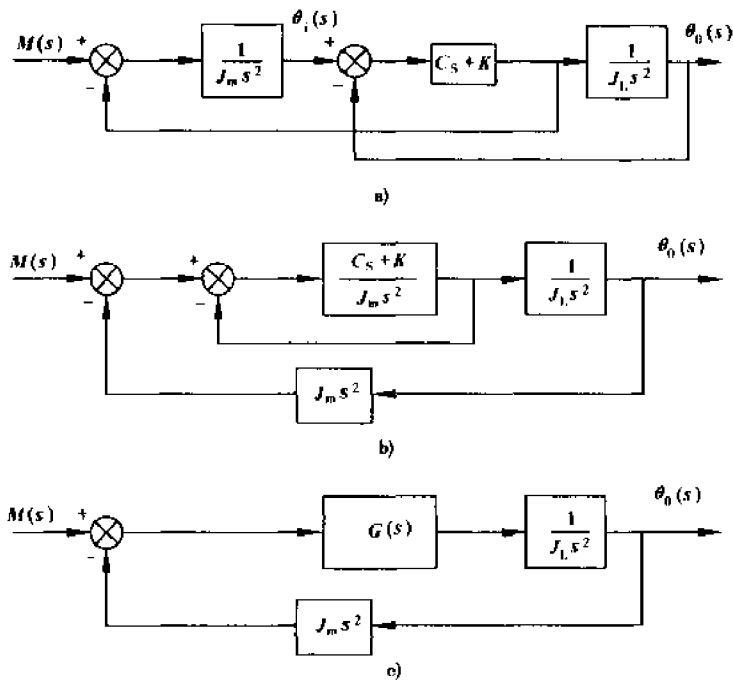


图 2-12 发动机驱动系统方框图
 a) 系统方框图; b) 方框图化简; c) 化简后的方框图

第三节 电路系统数学模型

一、电路网络数学模型

电路网络是建立电路系统数学模型的基础,电路网络包括无源电路网络和有源电路网络两部分。建立电路网络动态模型依据的是电工学方面的物理定律。电路系统与机械系统所讨论的微分方程形式完全相同,为了分析方便,常使用复阻抗的概念来建立电路系统模型,这时电阻用 R 表示,电感用 Ls 表示,而电容用 $1/Cs$ 表示,这样可以用算子为 s 的代数方程直接代替复杂的微分方程。从而方便地得到电路系统的传递函数。

这里先介绍电路网络动态结构图的基本概念。

对于图 2-13 所示的 RC 网络,利用动态结构图能形象直观地表明输入信号在系统或元件中的传递过程。因此,用动态结构图求传递函数显得简单、方便。

由图 2-13 可知,RC 网络的微分方程组为

$$\begin{aligned} u_i - u_0 &= Ri \\ u_0 &= \frac{1}{C} \int_0^t i dt \end{aligned}$$

将上式进行拉氏变换可得

$$U_i(s) - U_0(s) = RI(s) \quad (2-33)$$

$$U_0(s) = I(s)/Cs \quad (2-34)$$

式(2-33)可写成

$$[U_i(s) - U_0(s)]/R = I(s) \quad (2-35)$$

(2-35)式的方框图见图 2-14,式(2-34)的方框图见图 2-15。

将图 2-14 和图 2-15 合并可得 RC 网络的动态结构图(见图 2-16),由图 2-16 可得:

$$[U_i(s) - U_0(s)]/RCs = U_0(s)$$

故 RC 网络的传递函数为

$$\frac{U_0(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (2-36)$$

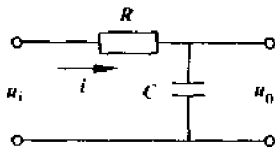


图 2-13 RC 网络

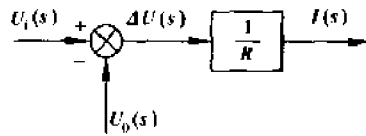


图 2-14 式(2-35)图形

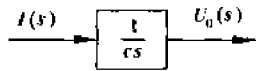


图 2-15 式(2-34)图形

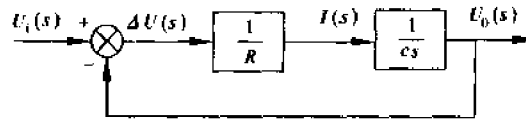


图 2-16 RC 网络动态结构图

对于图 2-17 所示的 RCL 网络,由克希霍夫定律及电工学基本知识可得:

$$\begin{cases} u_i - L \frac{di}{dt} - Ri = u_0 \\ u_0 = \frac{1}{C} \int_0^t i dt \end{cases}$$

对于以上二式两边分别进行拉氏变换有

$$U_i(s) = LsI(s) + RI(s) + U_0(s) \quad (2-37)$$

$$U_0(s) = I(s)/Cs \quad (2-38)$$

由上式建立的 RCL 网络动态结构图见图 2-18,由图 2-18 可求出 RCL 网络的传递函数为

$$\frac{U_0(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} \quad (2-39)$$

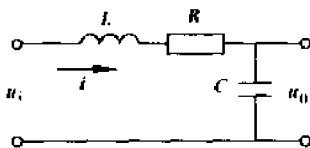


图 2-17 RCL 网络

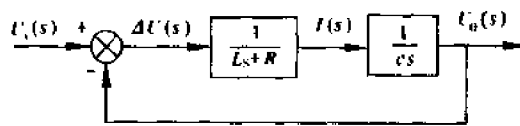


图 2-18 RCL 网络动态结构图

下面介绍用复阻抗概念直接建立电路网络数学模型。

对于图 2-19a)所示的 RC 无源网络,利用复阻抗的概念可直接写出以下关系式

$$I_1 = (U_i - U_0)/R_1$$

$$I_2 = Cs(U_i - U_0)$$

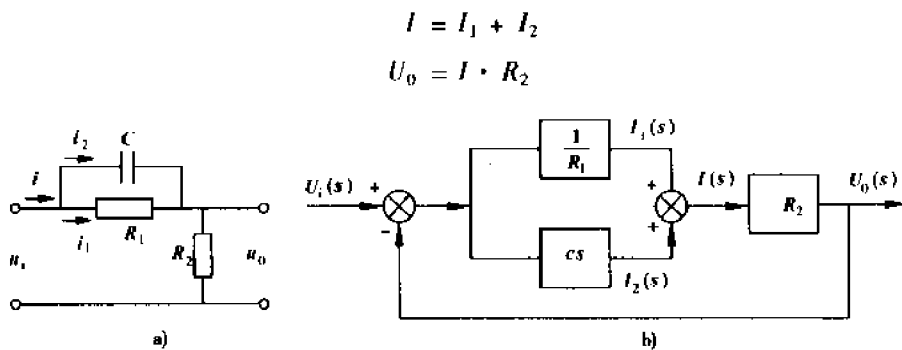


图 2-19 RC 无源网络及动态结构图

a) RC 无源网络; b) 动态结构图

根据以上关系式可建立 RC 无源网络动态结构图如图 2-19b) 所示。根据图 2-4 方框图等效变换规则, 由图 2-19b) 可得出

$$[U_i(s) - U_0(s)](1/R_1 + Cs)R_2 = U_0(s)$$

将上式整理可得系统传递函数为

$$\frac{U_0(s)}{U_i(s)} = \frac{(Cs + 1/R_1)R_2}{1 + (Cs + 1/R_1)R_2} = \frac{R_1 R_2 Cs + R_2}{R_1 R_2 Cs + R_1 + R_2} \quad (2-40)$$

由上例可以看出, 采用复阻抗概念求传递函数较传统方法更加简单, 对于只要求传递函数的无源网络, 也不必画出动态结构图。由于无源电路网络只由电阻、电容、电感等元件组合而成, 因此, 对于串联, 复阻抗等于各串联复阻抗之和; 对于并联, 复阻抗的倒数等于各并联复阻抗的倒数之和。通过这样的简化, 利用复阻抗分压, 往往就可以直接求出多数无源网络的传递函数。

运算放大器由于其开环放大倍数大、输入阻抗高、价格低, 在实际中获得了越来越广泛的应用。由运算放大器组成的有源网络, 由于各运算放大器输入阻抗很高, 运算放大器相互联结时, 可以忽略负载效应。系统数学模型可通过分别求取各运算放大器的数学模型得到, 这样可大大简化建立模型的步骤。各个运算放大器的传递函数一般可通过反馈复阻抗对输入复阻抗之比求得。

图 2-20 为运算放大器工作原理图。由于运算放大器的开环增益非常大, 输入阻抗也非常大, 所以可把 A 点看成“虚地”, 即 $U_A \approx 0$, 同时, $i_2 \approx 0$ 。

由 $i_1 \approx -i_f$ 可得:

$$\frac{u_1}{Z_0} = -\frac{u_0}{Z_f}$$

对上式两边进行拉氏变换, 整理可得运算放大器的传递函数为

$$\frac{U_0(s)}{U_i(s)} = -\frac{Z_f(s)}{Z_0(s)} \quad (2-41)$$

式中: $Z_f(s)$ 和 $Z_0(s)$ ——复阻抗。

由式(2-41)可见, 若系统选择不同的输入电路阻抗 Z_0 的反馈回路阻抗 Z_f , 就可组成各种不同的传递函数。利用运算放大器这一特性, 可以做出各种模拟电路和调节器的传递函数。

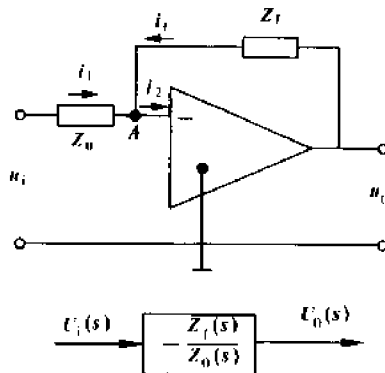


图 2-20 运算放大器

图 2-21 为比例—积分(PI)调节器结构图,采用复阻抗概念,由图可直接求出传递函数

$$\begin{aligned} \frac{U_0(s)}{U_i(s)} &= -\frac{Z_f(s)}{Z_0(s)} = -\frac{R_1 + 1/C_1 s}{R_0} \\ &= -\frac{R_1}{R_0} \cdot \frac{R_1 C_1 s + 1}{R_1 C_1 s} \end{aligned} \quad (2-42)$$

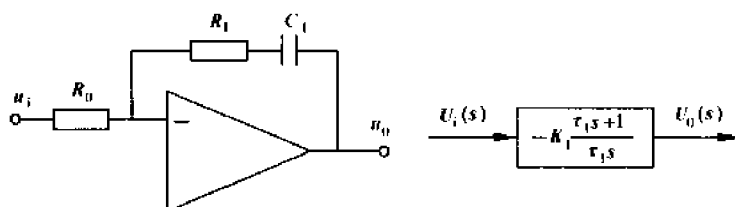


图 2-21 比例—积分调节器

令: $K_1 = R_1/R_0$; $\tau_1 = R_1 C_1$, 则 PI 调节器的传递函数可写为:

$$\frac{U_0(s)}{U_i(s)} = -K_1 \cdot \frac{\tau_1 s + 1}{\tau_1 s} \quad (2-43)$$

图 2-22 为比例—微分(PD)调节器的结构图。同理,可求出其传递函数为

$$\frac{U_0(s)}{U_i(s)} = -\frac{Z_f}{Z_0} = -\frac{R_1}{R_0/(R_0 C_0 s + 1)} = -\frac{R_1}{R_0} (R_0 C_0 s + 1) \quad (2-44)$$

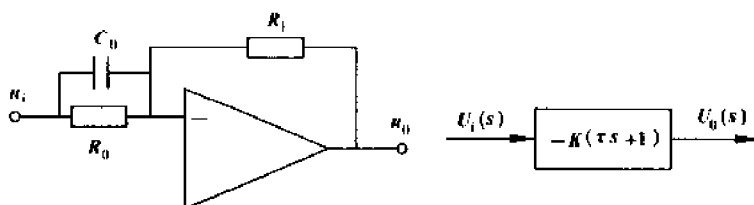


图 2-22 比例—微分调节器

二、控制电机数学模型

电机是机电液控制系统中重要的动力元件之一,在数学建模时既要考虑电机内部的电磁相互作用,又要考虑电机带有负载的情况。电机分直流电机和交流电机两大类,直流电机的控制技术已经比较成熟,交流电机的控制技术近年来发展很快。

1. 电枢控制式直流电动机

图 2-23 是电枢控制式直流电动机的原理图。对于电枢回路,有下述关系:

$$e_i(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_m(t) \quad (2-45)$$

式中: $e_i(t)$ ——电机电枢输入电压;

$R_a(t)$ ——电枢绕组电阻;

$i_a(t)$ ——电枢绕组电流;

L_a ——电枢绕组电感;

$e_m(t)$ ——电机感应电动势。

电机转矩 $M(t)$ 与电枢电流 $i_a(t)$ 成正比,设电机力矩常数为 K_T ,则有

$$M(t) = K_T i_a(t) \quad (2-46)$$

电机感应电动势与角速度成正比, 设反电动势常数为, K_e 则有

$$e_m(t) = K_e \frac{d\theta_0(t)}{dt} \quad (2-47)$$

式中: $\theta_0(t)$ ——为电机输出转角。

根据力的平衡原理, 有

$$M(t) = J \frac{d^2\theta_0(t)}{dt^2} + c \frac{d\theta_0(t)}{dt} \quad (2-48)$$

式中: J ——电机及负载折算到电机轴上的转动惯量;

c ——电机及负载折算到电机轴上的阻尼系数。

将式(2-45)~(2-48)联立, 可消去中间变量可得

$$L_a J \ddot{\theta}_0(t) + (L_a c + R_a J) \dot{\theta}_0(t) + (R_a c + K_T K_e) \theta_0(t) = K_T e_i(t) \quad (2-49)$$

对上式取拉氏变换可得系统传递函数

$$\frac{\theta_0(s)}{E_i(s)} = \frac{K_T}{s [L_a J s^2 + (L_a c + R_a J) s + (R_a c + K_T K_e)]} \quad (2-50)$$

由于 L_a 通常较小, 故上式可近似简化为

$$\frac{\theta_0(s)}{E_i(s)} = \frac{\frac{K_T}{R_a c + K_T K_e}}{s \left(\frac{R_a J}{R_a c + K_T K_e} s + 1 \right)} = \frac{K_m}{s (T_m s + 1)} \quad (2-51)$$

式中: $T_m = \frac{R_a J}{R_a c + K_T K_e}$ 为电动机的机电时间常数;

$K_m = \frac{K_T}{R_a c + K_T K_e}$ 为电动机的增益常数。

若忽略阻尼系数 c 的影响时, 则传递函数可进一步简化为

$$\frac{\theta_0(s)}{E_i(s)} = \frac{1/K_e}{s \left(\frac{R_a J}{K_T K_e} s + 1 \right)} = \frac{K_m}{s (T_m s + 1)} \quad (2-52)$$

式中: $K_m = \frac{1}{K_e}$; $T_m = \frac{R_a J}{K_T K_e}$

2. 磁场控制式直流电动机

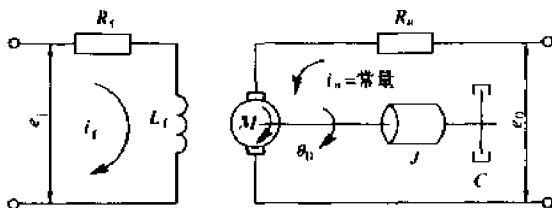


图 2-24 磁场控制式直流电动机

R_f ——励磁绕组电阻。

图 2-24 是磁场控制式直流电动机原理图。

对于输入回路有

$$e_i(t) = L_f \frac{di_f(t)}{dt} + R_f i_f(t) \quad (2-53)$$

式中: $e_i(t)$ ——励磁绕组输入电压;

$L_f(t)$ ——励磁绕组电感;

$i_f(t)$ ——励磁绕组电流;

由于电动机转矩 $M(t)$ 与电枢电流 i_a 和气隙磁通的乘积成正比, i_a 为常量, 而磁通与励磁

电流成正比,故转矩 $M(t)$ 与激磁电流 $i_f(t)$ 成正比。所以有

$$M(t) = K_T i_f(t) \quad (2-54)$$

式中: K_T ——电机力矩常数。

根据力的平衡方程有

$$M(t) = J\ddot{\theta}_0(t) + c\dot{\theta}_0(t) \quad (2-55)$$

将式(2-54)、(2-55)、(2-56)联立,消去中间变量,拉氏变换后得系统传递函数为

$$\frac{\theta_0(s)}{E_i(s)} = \frac{K_T/R_f c}{s \left(\frac{L_f}{R_f} s + 1 \right) \left(\frac{J}{c} s + 1 \right)} \quad (2-56)$$

通常,由于 $L_f/R_f \ll J/c$,因此传递函数可简化为

$$\frac{\theta_0(s)}{E_i(s)} = \frac{K_T/R_f c}{s(Js/c + 1)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (2-57)$$

式中: $K_m = K_T/R_f c$; $T_m = J/c$ 。

3. 两相伺服交流电动机

图 2-25 是两相伺服交流电动机原理图。

两相伺服交流电动机的转矩 $M(t)$ 是电机轴转速和控制电压的二元函数,其特性曲线如图 2-26 所示。线性化后可近似表示为

$$M(t) = -K_n \dot{\theta}_0(t) + K_c e_i(t) \quad (2-58)$$

式中: K_n, K_c ——均为大于零的常数;

$\dot{\theta}_0(t)$ ——电机轴输出转角;

$e_i(t)$ ——输入控制电压。

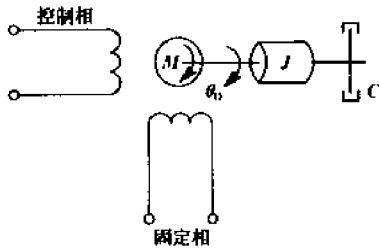


图 2-25 两相伺服交流电动机

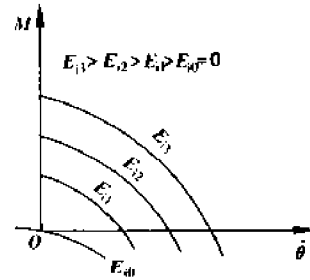


图 2-26 交流电机转矩—转速特性

根据牛顿定律,电机轴的动力学方程为

$$M(t) = J\ddot{\theta}_0(t) + c\dot{\theta}_0(t) \quad (2-59)$$

式中: J ——转动惯量;

c ——阻尼系数。

将式(2-58)、(2-59)联立,消去中间变量,拉氏变换后可得系统传递函数为

$$\frac{\theta_0(s)}{E_i(s)} = \frac{K_c/(c + K_n)}{s[J s/(c + K_n) + 1]} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (2-60)$$

式中: $K_m = K_c/(c + K_n)$ 为电动机的增益常数;

$T_m = J/(c + K_n)$ 为电动机的时间常数。

4. 直流发电机

图 2-27 是直流发电机的原理图。对于输入回路,根据基尔霍夫定律有

$$e_i(t) = R_f i_f(t) + L_f \frac{di_f(t)}{dt} \quad (2-61)$$

式中: $e_i(t)$ ——输入电压;

R_f ——电阻;

$i_f(t)$ ——输入回路电流;

L_f ——电感量。

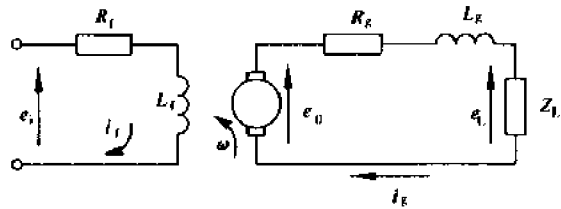


图 2-27 直流发电机原理图

当发电机的转轴恒速转动时,发电机输出电压 $e_0(t)$ 与控制电流 $i_f(t)$ 成正比,即

$$e_0(t) = K_g i_f(t) \quad (2-62)$$

式中: K_g ——常数。

将式(2-62)代入式(2-63),经过拉氏变换后可得系统传递函数

$$\frac{\theta_0(s)}{E_i(s)} = \frac{K_g/R_f}{L_f s/R_f + 1} = \frac{K_m}{T_m s + 1} \quad (2-63)$$

式中: $K_m = K_g/R_f$; $T_m = L_f/R_f$ 。

5. 直流发电机—直流电动机机组

图 2-28 是直流发电机—直流电动机机组原理图。图中左边为直流发电机,右边为电枢控制式直流电动机,因此,系统总的数学模型可看作为由两部分组成,传递函数为式(2-50)和式(2-63)的乘积,即

$$\frac{\theta_0(s)}{E_i(s)} = \frac{\theta_0(s)}{E_g(s)} \cdot \frac{E_g(s)}{E_i(s)} = \frac{K_T K_g}{s \{ (L_g + L_a) J s^2 + [(L_g + L_a) C + (R_g + R_a) J] s + [(R_g + R_a) C + K_T K_e] \} (L_f s + R_f)} \quad (2-64)$$

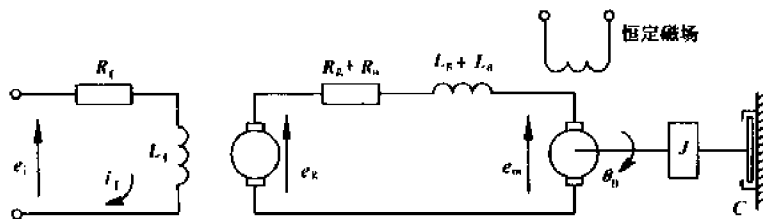


图 2-28 直流发电机—直流电动机机组

式中: K_T ——电动机力矩常数;

K_e ——电动机反电势常数;

K_g ——发电机系数;

R_g, R_n, R_f ——电阻;

L_g, L_n, L_f ——电感;

J ——转动惯量;

C ——阻尼系数。

三、机电一体化系统数学模型

数控伺服系统是非常典型的机电一体控制系统,这里以数控位移伺服系统为例,介绍机电一体化控制系统的数学模型。数控伺服系统的原理图如图 2-29 所示。这个系统由伺服电机、机械传动,反馈传感器及放大器等几个典型环节组成。下面先分析典型环节的数学模型,然后再得到整个系统的数学模型。

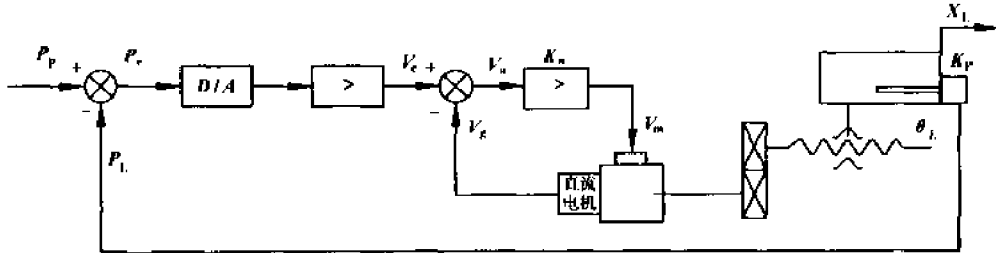


图 2-29 数控位移伺服系统

1. 直流伺服电机

图 2-30 为直流伺服电机原理图。

根据克希霍夫定律有

$$L_m \cdot \frac{di_m}{dt} + R_m \cdot i_m + V_b = V_m \quad (2-65)$$

- 式中: L_m ——电机绕组电感;
 i_m ——电机绕组电流;
 R_m ——电机绕组电阻;
 V_b ——电机反电势;
 V_m ——电机输入电压。

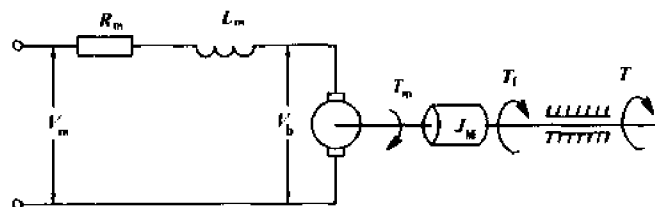


图 2-30 直流伺服电机原理图

其中,反电势 V_b 与电机的角速度 $\frac{d\theta}{dt}$ 成正比,即

$$V_b = k_v \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (2-66)$$

式中: k_v ——比例系数。

电机输出扭矩 T_m 与电机电流 i_m 成正比,即

$$T_m = k \cdot i_m \quad (2-67)$$

式中: k ——比例系数。

设摩擦转矩为粘性摩擦,阻尼系数为 k_f ,则摩擦转矩 T_f 为

$$T_f = k_f \cdot \frac{d\theta_m}{dt} \quad (2-68)$$

电机转矩平衡方程为

$$T_m - T_f - T = J_m \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2-69)$$

式中: T 为负载转矩, J_m 为电机转动惯量。

将式(2-66)代入式(2-65),将式(2-67),(2-68)代入式(2-69)可得:

$$\begin{cases} L_m \cdot \frac{di_m}{dt} + R_m \cdot i_m + k_v \cdot \frac{d\theta_m}{dt} = V_m & (2-70) \\ J_m \cdot \frac{d^2\theta_m}{dt^2} + k_f \frac{d\theta_m}{dt} = k \cdot i_m - T & (2-71) \end{cases}$$

负载力矩 T 由电机所驱动负载决定:

$$T = T_L / i \quad (2-72)$$

式中: i ——齿轮传动比;

T_L ——丝杠轴驱动力矩, T_L 可由下式计算:

$$T_L = k_L \left(\frac{1}{i} \theta_m - \frac{2\pi}{L} x_L \right) \quad (2-73)$$

k_L ——丝杠轴等效刚度;

L ——丝杠导程;

x_L ——工作台位移。

将式(2-72)、(2-73)代入式(2-71),并对式(2-70)、(2-71)进行拉氏变换,有

$$V_m(s) = L_m(s)I_m(s) + R_m I_m(s) + k_v s \theta_m(s) \quad (2-74)$$

$$k I_m(s) = J_m s^2 \theta_m(s) + f_m s \theta_m(s) + \frac{k_L}{i^2} \theta_m(s) - \frac{k_L 2\pi}{i \cdot L} x_L(s) \quad (2-75)$$

由式(2-74)可得

$$I_m(s) = \frac{V_m(s) - k_v s \theta_m(s)}{L_m s + R_m} \quad (2-76)$$

由式(2-75)得

$$s \theta_m(s) = \frac{k I_m(s) - \frac{k_L}{i} \left[\frac{\theta_m(s)}{i} - \frac{2\pi}{L} Z_L(s) \right]}{J_m s + f_m} \quad (2-77)$$

2. 机械传动链

机械传动链如图 2-31 所示,它由齿轮传动和丝杠螺母传动组成。

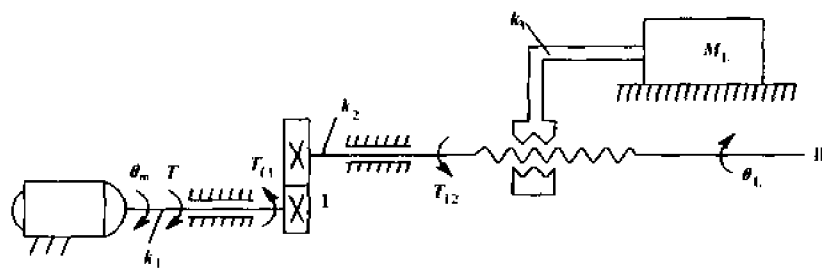


图 2-31 机械传动链

这里引入等效刚度的概念。等效刚度就是仅对其中一个轴列出力矩平衡方程式,而将其余各轴的刚性都折合到这根轴的刚性系数上来计算。例如,对图示的传动链,仅对丝杠轴列出力矩平衡方程,这时,丝杠轴的等效刚度为

$$K_L = \frac{1}{\frac{1}{k_1 i^2} + \frac{1}{k_3 \cdot (L/2\pi)^2} + 1/k_2} \quad (2-78)$$

式中: i ——齿轮传动比, $i = Z_2/Z_1$;

k_1, k_2 ——分别为轴 I 和轴 II 的扭转刚度;

k_3 ——工作台推杆刚度;

L ——丝杠导程。

同理可给出等效转动惯量

$$J_L = J_1 i^2 + J_2 + M \cdot (1/2\pi)^2 \quad (2-79)$$

式中: J_1, J_2 ——分别为轴 I、轴 II 的转动惯量;

M ——工作台质量;

J_L ——轴 I 和轴 II 的等效转动惯量;

等效阻尼系数为

$$f_L = f_1 i^2 + f_2 + f_3 (1/2\pi)^2 \quad (2-80)$$

式中: f_1, f_2 ——分别为轴 I、轴 II 的粘性摩擦系数;

f_3 ——工作台移动时的粘性摩擦系数。

轴 II 的力矩平衡方程如下

$$T = J_L \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} + f_L \frac{d\theta_L}{dt} \quad (2-81)$$

式中

$$T = k_L (\theta_m / i - \theta_L) \quad (2-82)$$

又因

$$x_L = \frac{\theta_L}{2\pi} \cdot L \quad (2-83)$$

将式(2-83)代入式(2-82),再将(2-82)代入式(2-81)可得:

$$k_L \theta_m = J_L \frac{2\pi i d^2 x_L}{L dt^2} + f_L \frac{2\pi i dx_L}{L dt} + k_L \cdot \frac{2\pi i}{L} x_L \quad (2-84)$$

对(2-84)式的拉氏变换可得以 θ_m 为输入,以 x_L 为输出的系统传递函数为:

$$G(s) = \frac{Z_L(s)}{\theta_m(s)} = \frac{L}{2\pi i} \frac{k_L}{J_L s^2 + f_L s + k_L} \quad (2-85)$$

式中, $Z_L(s)$ 为 x_L 的拉氏变换。

故系统输出为:

$$Z_L(s) = \theta_m(s) \cdot \frac{L}{2\pi i} \frac{k_L / J_L}{s^2 + f_L s / J_L + k_L / J_L} \quad (2-86)$$

由原理图 2-30 还可得到:

$$V_m(s) = [V_c(s) - V_r(s)] \cdot k_a \quad (2-87)$$

$$V_c(s) = [P_p(s) - P_l(s)] \cdot k_t \quad (2-88)$$

$$V_r(s) = k_f \cdot s \theta_m(s) \quad (2-89)$$

$$P_l(s) = k_p \cdot Z_L(s) \quad (2-90)$$

由公式(2-76)~(2-90),即可给出数控伺服系统的方框图,如图 2-32a)所示。

为了对以上系统方框图进行简化,设

$$G_1 = \frac{k}{L_m s + R_m} \quad (2-91)$$

$$G_2 = \frac{1}{J_m s + f_m} \quad (2-92)$$

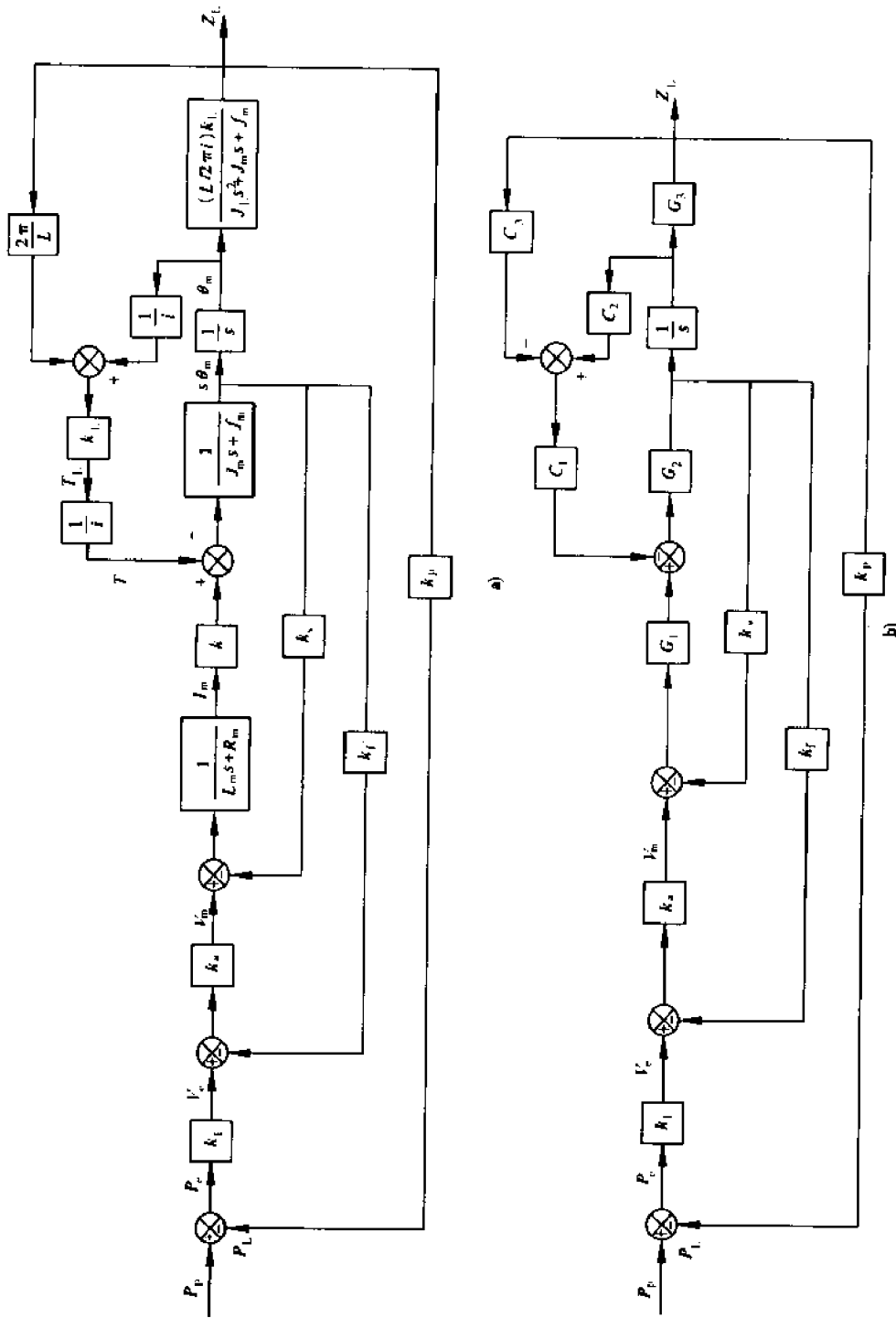


图 2-32 数控伺服系统
a) 系统方框图; b) 简化方框图

$$G_3 = \frac{c_2}{c_3} \cdot \frac{k_L}{J_L s^2 + f_L s + k_1} \quad (2-93)$$

式中

$$c_2 = 1/i$$

$$c_3 = 2\pi/L$$

并令

$$c_1 = k_L/i$$

图 2-33a) 可以简化成图 2-33b) 的形式。根据图 2-4 的等效变换规则, 对以上框图进行逐步

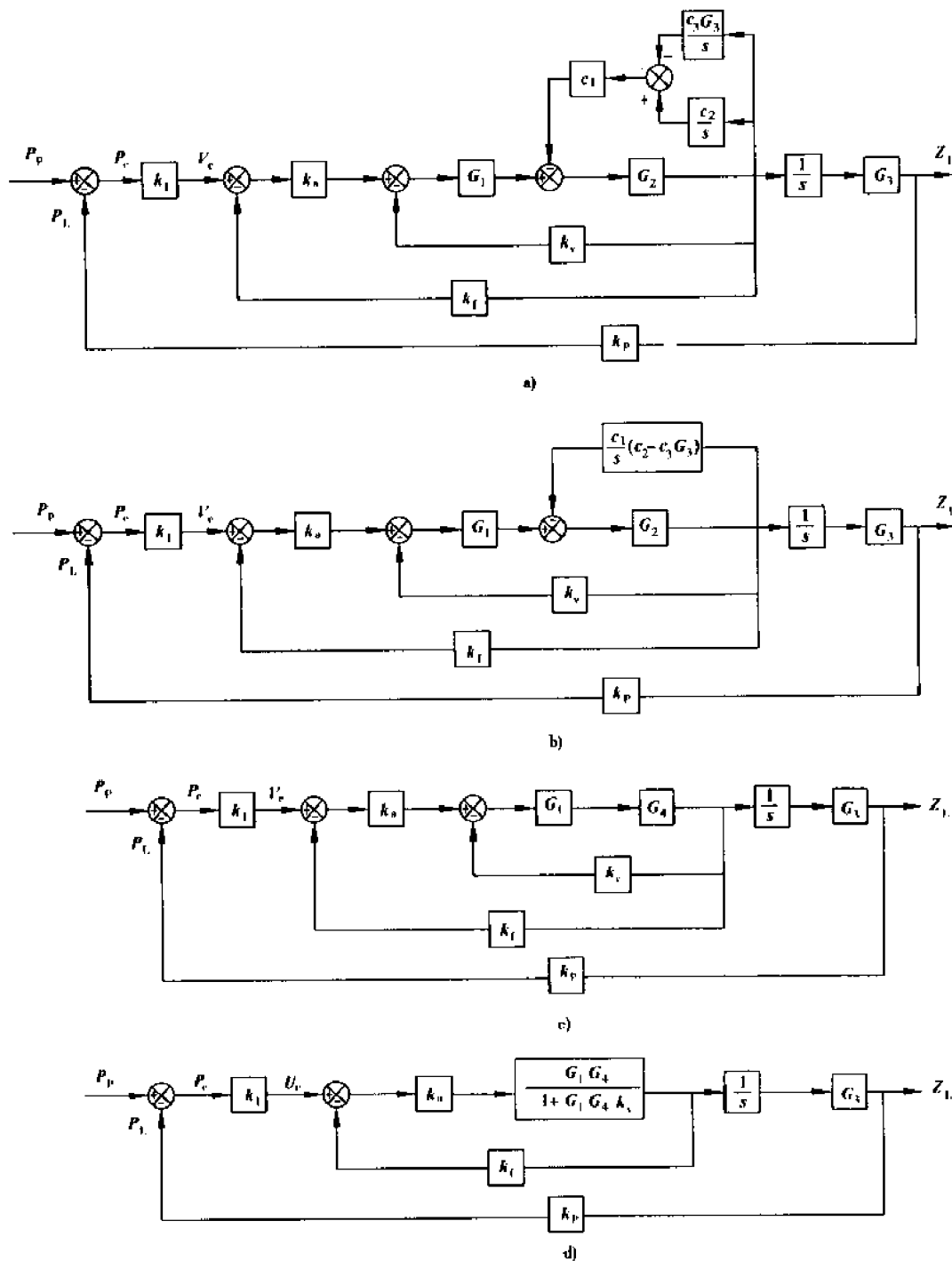


图 2-33 数控伺服系统框图简化过程

简化,图 2-34 给出了简化过程。图中

$$G_4 = \frac{G_2}{1 + G_2 \cdot \frac{c_1}{s}(c_2 - c_3 C_3)} \quad (2-94)$$

由系统方框图可以推得,该系统是一个高阶系统,它的闭环传递函数的分母上 s 的阶数高达 6 阶。在工程实际中,常忽略某些次要因素,从而使系统模型简化。在本系统中,当负载较小时,可以认为 $J_1 \approx 0$,从而有 $G_1 = k/R_m$ 。这样,图 2-33 框图中

$$\frac{G_1 G_4}{1 + G_1 G_4 k_v} = \frac{\frac{k}{R_m} \cdot G_2}{1 + \frac{k}{R_m} \cdot G_2 \cdot k_v} = \frac{k'_1}{s + k'_2} \quad (2-95)$$

式中

$$k'_1 = k/R_m J_m$$

$$k'_2 = \frac{f_m + k \cdot k_v/R_m}{J_m}$$

令

$$k'_3 = c_2/c_3$$

则可得到图 2-34 所示的方框图。由方框图可得数控伺服系统的闭环传递函数

$$G_B(s) = \frac{k_1 k_a k'_1 k'_3}{s^2 + (k_2 + k'_1 k_f) s + k_1 k_a k'_1 k'_3 k_p} \quad (2-96)$$

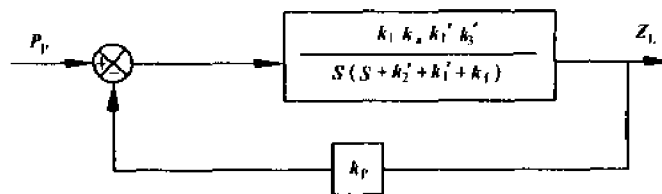


图 2-34 数控伺服系统简化框图

第四节 液压系统数学模型

液压系统广泛应用于工程机械中。它是机电液一体化系统的主要组成部分,液压驱动机构由液压功率放大元件、液压执行元件和负载组成,是液压伺服系统中进行动态分析的核心。液压驱动机构分为阀控系统和泵控系统两大类。阀控系统以液压伺服阀为功率放大元件。泵控系统则以液压伺服泵为功率放大元件。另外,根据执行元件的不同,液压驱动机构又分为阀控缸、阀控马达、泵控缸和泵控马达等几种类型。下面分别对其数学模型的建立进行讨论。

一、阀控缸系统数学模型

1. 阀控缸系统的静态特性

(1) 速度特性

速度特性是指空载情况下,滑阀位移与液压缸输出速度之间的函数关系。

图 2-35 是一个阀控系统的原理图,滑阀输出流量可用下式计算:

$$Q = a W x \sqrt{\frac{1}{\rho}(p_c - p_1)} \quad (2-97)$$

式中: a ——流量系数;

W ——阀套的窗口宽度；
 ρ ——油液密度；
 P_s ——供油压力；
 P_l ——油缸的负载压差。
 x ——滑阀的开度。

$$x = x_v - \Delta x \quad (2-98)$$

其中： x_v ——滑阀位移；
 Δx ——滑阀的重叠量。

根据油液流量连续性原理可知

$$Q = Q_c + Q_M = cP_l + A_v \quad (2-99)$$

式中： Q_c ——油缸的泄漏流量；
 Q_M ——油缸运动所需流量；
 c ——油缸的泄漏系数；
 A ——活塞的有效面积；
 v ——活塞的速度。

空载情况下负载压差 P_l 用来克服活塞和缸体的摩擦力，所以

$$P_l = R_T/A \quad (2-100)$$

式中： R_T ——活塞和油缸之间的摩擦力。

将(2-98)、(2-99)、(2-100)代入式(2-97)，可得阀控缸的速度特性方程

$$v = \frac{1}{A} \alpha W (x_v - \Delta x) \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(P_s - \frac{R_T}{A} \right)} - c \frac{R_T}{A^2} \quad (2-101)$$

阀控缸的速度特性曲线见图 2-36，速度增益

$$K = \frac{dv}{dx_v} = \frac{1}{A} \alpha W \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(P_s - \frac{R_T}{A} \right)} \quad (2-102)$$

$v = 0$ 时，滑阀的最大位移称为阀控缸的死区，故由式(2-101)可得死区长度为

$$x_v = \Delta x_v = \Delta x + \frac{cR_T}{A\alpha W \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(P_s - \frac{R_T}{A} \right)}} \quad (2-103)$$

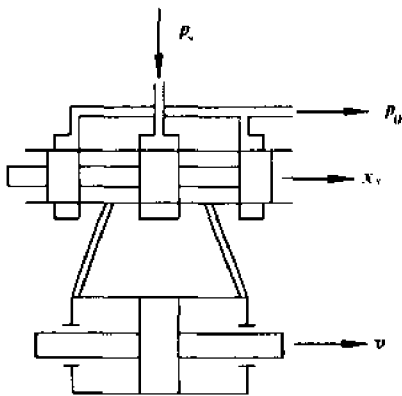


图 2-35 阀控液缸原理图

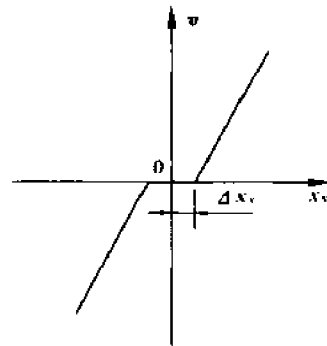


图 2-36 阀控液缸的速度特性

由式(2-102)和式(2-103)可确定阀控缸的两个重要参数:速度放大系数和死区长度。

(2)机械特性

机械特性是指滑阀位移一定时,活塞输出速度同负载力之间的关系。

这时负载压差 P_1 要克服的载荷为 P_T 和外载荷 P 的两部分组成。故

$$P_1 = (R_T + P)/A \quad (2-104)$$

所以活塞的运行速度为

$$v = \frac{1}{A} \alpha W(x_v - \Delta x) \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(P_s - \frac{R_T + P}{A} \right) - c \frac{R_T + P}{A^2}} \quad (2-105)$$

式(2-105)为阀控缸的机械特性方程,在不同的位移 x_v 下的特性曲线如图 2-37 所示,它全面地反映了阀控缸的静态特性。阀控缸的机械特性也称为负载特性。

(3)伺服阀控制油缸的速度特性与机械特性

电液伺服控制系统被广泛使用在大型工程机械上,与普通阀控缸系统不同的是,对于电液伺服阀控制的油缸系统,其速度特性是指在空载时,油缸输出速度同伺服输入电流之间的关系。由于电磁迟滞效应的影响,其速度特性呈回线形状,如图 2-38 所示。由于表征速度特性的参数很难用理论方法求得,为了估算增益的大小,通常用电液伺服阀的平均流量放大倍数作为伺服阀的放大倍数。即

$$K_Q = Q_H / i_H \quad (2-106)$$

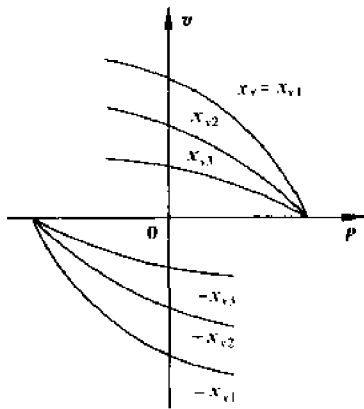


图 2-37 阀控缸的机械特性

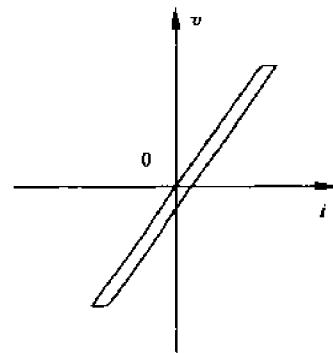


图 2-38 伺服阀控制缸的速度特性

式中: Q_H ——电液伺服阀的额定(空载)流量;

i_H ——电液伺服阀的额定输入电流。

这样,伺服阀控制液压缸的速度放大系数可用下式近似计算

$$K = K_Q / A \quad (2-107)$$

要求得真正的增益值,只有通过测试速度特性回线才能获得。

同样,伺服阀控制液压缸系统的机械特性与普通阀控缸系统的机械特性有所不同,它是指伺服阀输入电流一定时,活塞输出速度同负载力之间的关系

$$v = f(P) |_{i = \text{常数}} \quad (2-108)$$

其机械特性曲线与图 2-37 类似。

2. 阀控缸的传递函数

下面分三种情况来讨论阀控缸系统的传递函数。

(1) 只有惯性负载的情况

当阀控缸只有惯性负载作用时,如图 2-39 所示。

① 滑阀的流量方程

设滑阀位移为 x_v , 经滑阀流入活塞左腔的流量为 Q_1 , 活塞右腔经滑阀回油箱的流量为 Q_2 , 故系统平均流量为

$$Q_1 = (Q_1 + Q_2)/2 \quad (2-109)$$

滑阀输出的平均流量,经线性化后得

$$Q_1 = K_q x_v - K_c p_1 \quad (2-110)$$

式中: K_q ——流量放大系数;

K_c ——压力流量放大系数。

② 液流连续性方程

由液流连续性方程可得

$$Q_1 = Q_M + Q_l + Q_{c1} \quad (2-111)$$

式中: Q_M ——使活塞运动所需流量;

Q_l ——泄漏流量;

Q_{c1} ——压缩流量。

Q_M 可由下式求得

$$Q_M = A \frac{dy}{dt} \quad (2-112)$$

式中: y ——活塞的位移;

A ——活塞的面积。

泄漏流量包括内漏和外漏两部分。内漏是指油液由左腔通过活塞和缸体之间的间隙流入右腔,它与油缸左右腔压差成正比。外漏则是液流通过活塞杆流到缸体以外的油液。主要由油压腔油压决定,所以

$$Q_l = c_e p_1 + c_i (p_1 - p_2) \quad (2-113)$$

式中: c_e ——外漏损系数;

c_i ——内漏损系数。

油液的压缩量可由下式计算

$$\Delta V_1 = \frac{V_1}{\beta} p_1 \quad (2-114)$$

式中: β ——油液和管壁的等效容积弹性模数,一般取 $\beta = 7 \times 10^8 \text{N/m}^2$;

V_1 ——压力为 p_1 的一侧管路上油液的容积。

故压缩流量为

$$Q_{c1} = \frac{V_1}{\beta} \frac{dp_1}{dt} \quad (2-115)$$

将式(2-112)~(2-115)代入式(2-111),得

$$Q_1 = A \frac{dy}{dt} + c_e p_1 + c_i (p_1 - p_2) + \frac{V_1}{\beta} \frac{dp_1}{dt} \quad (2-116)$$

同理

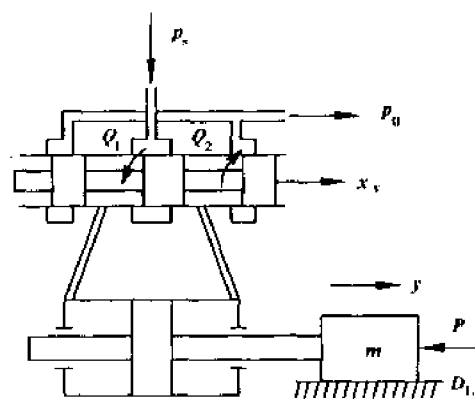


图 2-39 带惯性负载的阀控缸系统

$$Q_2 = A \frac{dy}{dt} - c_e p_2 + c_i(p_1 - p_2) - \frac{V_2}{\beta} \frac{dp_2}{dt} \quad (2-117)$$

式中: V_2 ——压力为 p_2 的一侧管路上油液的容积。

式(2-117)中压缩流量为负的原因是:当活塞在运动过程中一侧管路的压力增大,必然另一侧管路的压力会减小,所以当 $\frac{dp_1}{dt}$ 为正时, $\frac{dp_2}{dt}$ 必为负。故式(2-117)中压缩性流量为负。

所以系统平均流量为

$$Q_1 = A \frac{dy}{dt} + \frac{1}{2\beta} \left(V_1 \frac{dp_1}{dt} - V_2 \frac{dp_2}{dt} \right) + c_i(p_1 - p_2) + \frac{1}{2} c_e(p_1 - p_2) \quad (2-118)$$

式(2-118)可用以下方法进行简化,当活塞处在中间位置时,即 $V_1 = V_2 = V_t/2$, V_t 为油缸两侧管路和油腔的总容积。则有

$$Q_1 = A \frac{dy}{dt} + \frac{V_t}{4\beta} \frac{dp_l}{dt} + c_l p_l \quad (2-119)$$

式中: p_l ——负载压差, $p_l = p_1 - p_2$;

c_l ——总漏损系数, $c_l = c_i + c_e/2$ 。

式(2-119)称为液压缸的液流连续性方程。

③活塞的力平衡方程

由牛顿定理可得

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + D_l \frac{dy}{dt} + P = p_l A \quad (2-120)$$

式中: m ——负载的质量;

D_l ——负载的粘性阻尼系数;

P ——负载力。

将式(2-110)、式(2-119)和式(2-120)称为阀控缸的三个基本方程。对基本方程进行拉氏变换可得

$$\begin{cases} Q_l = K_q X_v - K_c P_l & (2-121) \\ Q_l = A s Y + \frac{V_t}{4\beta} s P_l + c_l P_l & (2-122) \\ P_l A = m s^2 Y + D_l s Y + P & (2-123) \end{cases}$$

联解这三个方程,消去中间变量 Q_l 和 P_l 可得:

$$\begin{aligned} \frac{K_q}{A} X_v &= \frac{1}{A^2} \left(\frac{V_t}{4\beta} s + K_{cr} \right) P \\ &+ s \left[\frac{U_l m}{4\beta A^2} s + \left(\frac{K_{ce} m}{A^2} s^2 + \frac{V_t D_l}{4\beta A^2} \right) s + 1 + \frac{K_{ce} D_l}{A^2} \right] Y \end{aligned}$$

式中: $K_{ce} = c_l + K_{cr}$, K_{cr} 为系统压力-流量系数。

令:

$$\begin{aligned} \omega_h &= \sqrt{\frac{4\beta A^2}{V_t m}} \\ \xi_h &= \frac{K_{ce}}{A} \sqrt{\frac{\beta m}{V_t}} + \frac{D_l}{4A} \sqrt{\frac{V_t}{\beta m}} \end{aligned}$$

当 D_l 较小时, $\frac{K_{ce} D_l}{A^2} \ll 1$, 故有

$$Y = \frac{\frac{K_q}{A} x_v - \frac{K_{ce}}{A^2} \left(1 + \frac{V_l}{4\beta K_{ce}} s \right) P}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (2-124)$$

由式(2-124)可画出系统方框图如图 2-40 所示。

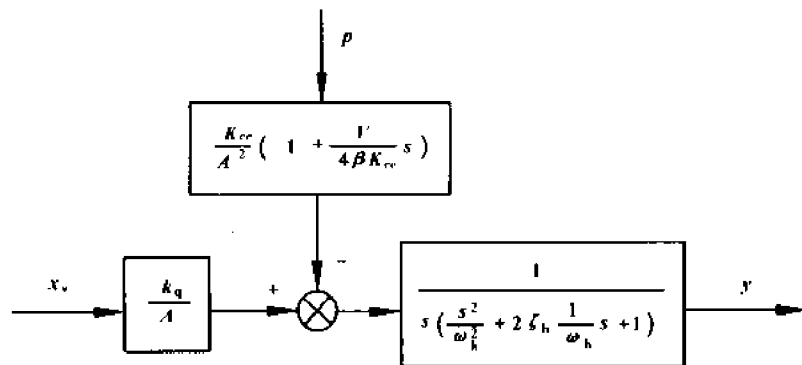


图 2-40 带惯性负载时阀控缸的方框图

令 $P=0$, 由方框图可得到滑阀位移 x_v 与活塞位置 y 之间的传递函数

$$\frac{Y(s)}{X_v(s)} = - \frac{K_q/A}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h \frac{1}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (2-125)$$

令 $x_v=0$, 由方框图可得到负载扰动 P 与活塞位置 y 之间的传递函数

$$\frac{Y(s)}{P(s)} = - \frac{\frac{K_{ce}}{A^2} \left(1 + \frac{V_l}{4\beta K_{ce}} s \right)}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h \frac{1}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (2-126)$$

(2)同时带有惯性负载和弹性负载的情况

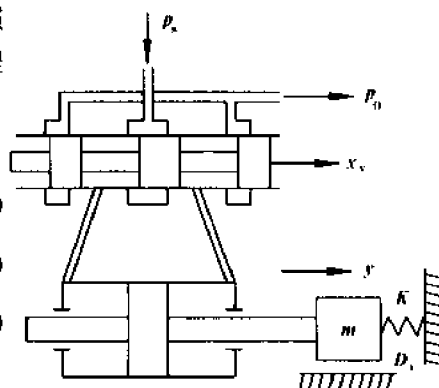
同时带有惯性负载和弹性负载的阀控缸系统如图 2-41 所示。

此时三个基本方程中, 只是活塞的力平衡方程中纯惯性负载改为弹性负载与惯性负载之和即可。故基本方程的拉氏变换为

$$\begin{cases} Q_l = K_q X_v - K_c P_l & (2-127) \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q_l = A s Y + \frac{V_l}{4\beta} s P_l + c_l P_l & (2-128) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_l A = m s^2 Y + D_l s Y + K Y + P & (2-129) \end{cases}$$



式中: K ——弹性负载的弹簧刚度。

同理, 联解这三个方程, 消去中间变量, 忽略 $D_c K_{ce}/A^2$ 项, 有

图 2-41 同时带有惯性负载和弹性负载时的阀控缸

$$Y = \frac{\frac{K_q}{A}X_v - \frac{K_{ce}}{A^2}\left(1 + \frac{1}{\omega_1 s}\right)P}{\omega_2\left(\frac{1}{\omega_r} s + 1\right)\left(\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + 2\xi_0 \frac{1}{\omega_0} s + 1\right)} \quad (2-130)$$

式中

$$\omega_0 = \omega_h \sqrt{1 + \frac{KV_1}{4\beta A^2}} \quad (2-131)$$

$$\omega_r = \frac{K_{ce}}{A^2} \left/ \left(\frac{1}{K} + \frac{V_1}{4\beta A^2} \right) \right. \quad (2-132)$$

$$\omega_1 = 4\beta K_{ce} / V_1 \quad (2-133)$$

$$\omega_2 = KK_{ce} / A^2 \quad (2-134)$$

$$\xi_0 = \frac{K_{ce}}{A} \left(1 + \frac{KV_1}{4\beta A^2}\right)^{-3/2} \cdot \left(\frac{\beta m}{V_1}\right)^{1/2} + \frac{D_l}{4A} \left(1 + \frac{KV_1}{4\beta A^2}\right)^{-1/2} \left(\frac{V_1}{\beta m}\right)^{1/2} \quad (2-135)$$

由式(2-130)可画出驱动系统的方框图如图 2-42 所示。

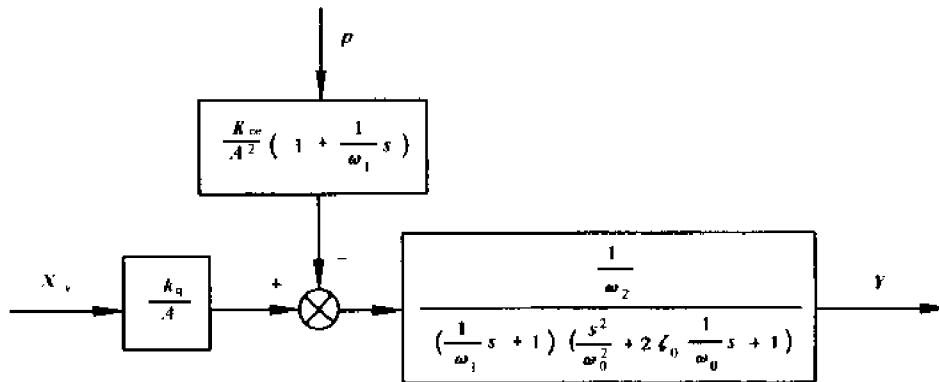


图 2-42 同时带有惯性负载和弹性负载时阀控缸的方框图

令 $P=0$, 由方框图可得滑阀位移 x_v 与活塞位置 y 之间的传递函数

$$\frac{Y(s)}{X_v(s)} = \frac{K_q/A\omega_2}{\left(\frac{1}{\omega_r} s + 1\right)\left(\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + 2\xi_0 \frac{1}{\omega_0} s + 1\right)} \quad (2-136)$$

令 $X_v=0$, 由方框图可得负载 P 与活塞位置 y 之间的传递函数

$$\frac{Y(s)}{P(s)} = \frac{\frac{1}{\omega_2} \cdot \frac{K_{ce}}{A^2} \left(1 + \frac{1}{\omega_0 s}\right)}{\left(\frac{1}{\omega_r} s + 1\right)\left(\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + 2\xi_0 \frac{1}{\omega_0} s + 1\right)} \quad (2-137)$$

(3) 电液伺服阀控油缸

电液伺服阀控制的油缸系统如图 2-43 所示。其动力学方程推导与普通阀控缸系统完全相同, 三个基本方程中只需将表 2-1 中参数做对应替换外, 其余完全相同。

表中 K_Q 、 K_c 、 i 分别为电液伺服阀控油缸的流量系数、压力流量系数和输入电流。

由式(2-124)可知,系统输入与输出关系式为 电液伺服阀控油缸与普通阀控油缸系统参数对应表

$$Y = \frac{\frac{K_Q}{A}i - \frac{K_{ce}}{A^2}\left(1 + \frac{V_t}{4\beta K_{ce}}s\right)P}{s\left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h \frac{1}{\omega_h}s + 1\right)} \quad (2-138)$$

表 2-1

普通阀控油缸	伺服阀控制的油缸
K_q	K_Q
K_b	K_c
x_e	i

由式(2-138)可得系统框图 2-44。

令 $P = 0$,由方框图可知,伺服阀输入电流 i 与活塞位置 y 之间的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{I(s)} = \frac{K_Q/A}{s\left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h \frac{1}{\omega_h}s + 1\right)} \quad (2-139)$$

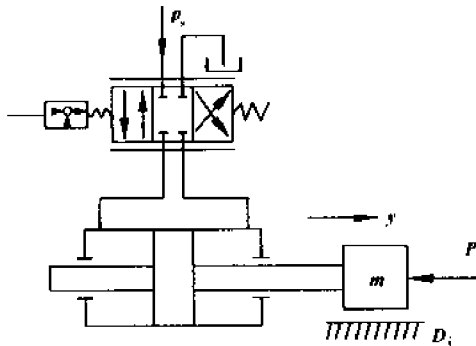


图 2-43 电液伺服阀控制的油缸

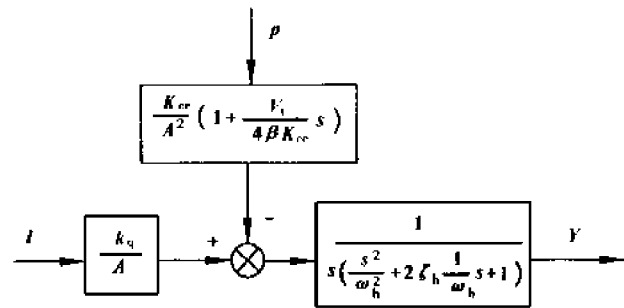


图 2-44 电液伺服阀控制的油缸系统方框图

令 $i = 0$,由方框图可得外载 P 与活塞位置 y 之间的传递函数为

$$\frac{Y(s)}{P(s)} = -\frac{\frac{K_{ce}}{A^2}\left(1 + \frac{V_t}{4\beta K_{ce}}s\right)}{s\left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h \frac{1}{\omega_h}s + 1\right)} \quad (2-140)$$

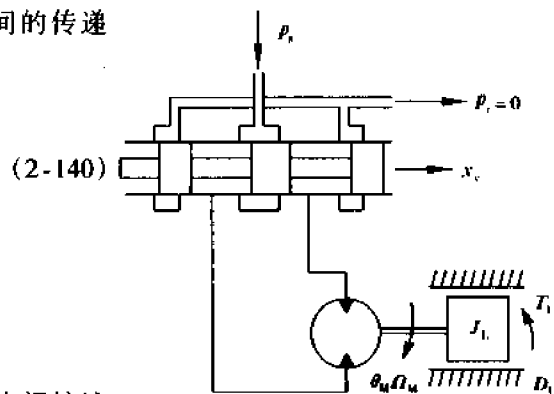


图 2-45 阀控马达

二、阀控马达系统数学模型

1. 阀控马达系统的静态特性

阀控马达系统的原理如图 2-45 所示。只要将阀控液压缸的参数(表 2-2)替换为阀控马达系统的对应参数,便可由阀控缸系统的速度特性和机械特性公式得到阀控马达的静态特性。

阀控液压缸与阀控马达系统参数对应表

表 2-2

阀控缸	阀控马达	阀控缸	阀控马达
c	Ω_M	R_T	T_l
A	q_v	p	T_c

表中 Ω_M 、 q_v 、 T_l 、 T_c 分别代表液压马达的角速度、每弧度排量、启动摩擦力矩和负载力矩。

2. 阀控马达的动态特性

将阀控缸系统的参数替换成阀控马达系统的对应参数(表 2-3),便可得到阀控马达系统的三个基本方程和传递函数

阀控缸与阀控马达系统参数对应关系

表 2-3

阀 控 缸	阀 控 马 达	阀 控 缸	阀 控 马 达
y	θ_M	M	J_l
A	q_r	c_l	c_M
P	T_l		

表中 θ_M 、 J_l 、 T_l 和 c_M 分别代表液压马达的输出转角,负载惯量、负载力矩和泄漏系数。

(1) 纯惯性负载情况

三个基本方程为

$$\begin{cases} Q_l = K_q X_v - K_c P_l & (2-141) \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q_l = q_r \frac{d\theta_M}{dt} + \frac{V_l}{4\beta} \frac{dP_l}{dt} + c_M P_l & (2-142) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_l q_r = J_l \frac{d^2\theta_M}{dt^2} + D_l \frac{d\theta_M}{dt} + T_l & (2-143) \end{cases}$$

通过拉氏变换可得系统输入与输出关系为

$$\theta_M(s) = \frac{\frac{K_q}{q_r} X_v - \frac{K_{cc}}{q_r^2} \left(1 + \frac{V_l}{4\beta K_{cc}} s\right) T_l}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h \frac{1}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (2-144)$$

式中

$$\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta q_r}{V_l J_l}} \quad (2-145)$$

$$\xi_h = \frac{K_{cc}}{q_r} \sqrt{\frac{\beta J_l}{V_l}} + \frac{D_l}{4q_r} \sqrt{\frac{V_l}{\beta J_l}} \quad (2-146)$$

$$K_{cc} = K_c + c_M \quad (2-147)$$

由式(2-144)可得系统方框图 2-46。由方框图可得系统传递函数为

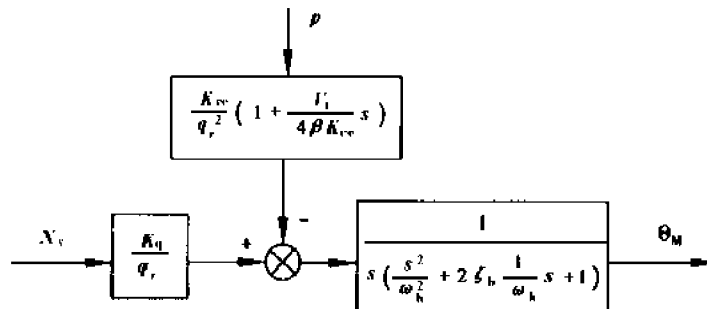


图 2-46 阀控马达方框图

$$\frac{\theta_M(s)}{X_v(s)} = \frac{K_q/q_r}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h \frac{1}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (2-148)$$

$$\frac{\theta_M(s)}{T_l(s)} = -\frac{\frac{K_{ce}}{q_r^2} \left(1 + \frac{V_l}{4\beta K_{ve}} s\right)}{s \left(s^2/\omega_h^2 + 2\xi_h \frac{1}{\omega_h} s + 1\right)} \quad (2-149)$$

$$\theta_M(s) = \frac{\frac{K_{v1}}{q_r} X_v - \frac{1}{q_r} \left(K_{ve} + \frac{V_l}{4\beta} s\right) T_l}{\omega_2 \left(\frac{1}{\omega_r} s + 1\right) \left(\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + 2\xi_0 \frac{1}{\omega_0} s + 1\right)} \quad (2-150)$$

式中

$$\omega_0 = \omega_h \sqrt{1 + \frac{KV_l}{4\beta q_r^2}} \quad (2-151)$$

$$\omega_r = \frac{K_{ce}/q_r^2}{\frac{1}{K} + \frac{V_l}{4\beta q_r^2}} \quad (2-152)$$

$$\omega_1 = 4\beta K_{ve}/V_l \quad (2-153)$$

$$\omega_2 = KK_{ve}/V_l \quad (2-154)$$

$$\xi_0 = \frac{K_{ce}}{q_r} \left(1 + \frac{KV_l}{4\beta q_r^2}\right)^{-3/2} \cdot \left(\frac{\beta J_l}{V_l}\right)^{1/2} + \frac{D_1}{4q_r} \left(1 + \frac{KV_l}{4\beta q_r^2}\right)^{-1/2} \times \left(\frac{V_l}{\beta J_l}\right)^{1/2} \quad (2-155)$$

$$\frac{\theta_M(s)}{X_v(s)} = \frac{K_q/q_r \omega_2}{\left(\frac{1}{\omega_r} s + 1\right) \left(\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + 2\xi_0 \frac{1}{\omega_0} s + 1\right)} \quad (2-156)$$

$$\frac{\theta_M(s)}{T_v(s)} = -\frac{\frac{1}{\omega_2} \frac{K_{ce}}{q_r^2} \left(1 + \frac{1}{\omega_1} s\right)}{\left(\frac{1}{\omega_r} s + 1\right) \left(\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + 2\xi_0 \frac{1}{\omega_0} s + 1\right)} \quad (2-157)$$

(2) 电液伺服阀控液压马达

参考电液伺服缸系统可得该系统动态特性和传递函数分别为

$$\theta_M(s) = \frac{\frac{K_Q}{q_r} I - \frac{K_{ce}}{q_r^2} \left(1 + \frac{V_l}{4\beta K_{ve}} s\right) T_l}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h \frac{1}{\omega_h} s + 1\right)} \quad (2-158)$$

$$\frac{\theta_M(s)}{I(s)} = \frac{K_Q/q_r}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h \frac{1}{\omega_h} s + 1\right)} \quad (2-159)$$

$$\frac{\theta_M(s)}{P(s)} = \frac{\frac{K_{ve}}{q_r^2} \left(1 + \frac{V_l}{4\beta K_{ve}} s\right)}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h \frac{1}{\omega_h} s + 1\right)} \quad (2-160)$$

三、泵控液压马达系统数学模型

1. 泵控液压马达系统的静态特性

(1)机械特性

图 2-47 为一泵控马达系统原理图。所谓系统的机械特性是指伺服泵输入斜盘的倾角一定时,液压马达输出角速度同负载转矩之间的关系,即

$$\Omega_M = f(T_l)$$

伺服泵的实际输出流量可由下式计算

$$Q_H = Q_0 - Q_c - Q_n \quad (2-161)$$

式中: Q_H ——伺服泵的实际输出流量;

Q_0 ——泵的理论输出流量, Q_0 可由下式计算:

$$Q_0 = K_H \alpha \quad (2-162)$$

式中: α ——泵斜盘倾角;

K_H ——泵的增益。

Q_c ——伺服泵的泄漏流量, Q_c 由下式求得:

$$Q_c = c_H \Delta p_H \quad (2-163)$$

式中: c_H ——伺服泵的泄漏系数;

Δp_H ——靠近泵的进、出口之间的压差。

Q_n ——因原动机转速下降引起的流量损失。

$$Q_n = f(\Delta p_H, \alpha)$$

当三相电动机在额定工作范围内工作时,可近似地认为 Q_n 与负载压差成正比,即

$$Q_n = f(\Delta p_H, \alpha) \approx c_0 \Delta p_H \quad (2-164)$$

式中: c_0 ——与原动机转差率有关的系数。

将式(2-162)、式(2-163)和式(2-164)代入式(2-161),得

$$Q_H = K_H \alpha - c_H \Delta p_H - c_0 \Delta p_H \quad (2-165)$$

由于马达同样存在泄漏,所以液压马达的输入流量 Q 可由下式计算

$$Q = Q_c' + Q_M = c_M \Delta p_M + \frac{\Omega_M}{K_D} = c_M \Delta p_M + q_r \Omega_M \quad (2-166)$$

式中: Q_c' ——马达的泄漏流量;

Q_M ——马达的理论流量;

c_M ——马达的泄漏系数;

Δp_M ——马达进、出口之间的压差;

Ω_M ——马达的输出速度;

K_D ——马达的增益, K_D 可由下式求得

$$K_D = 1/q_r \quad (2-167)$$

式中: q_r ——马达每弧度的排量。

由于泵的实际输出流量等于马达的输入流量,故有

$$K_H \alpha - c_H \Delta p_H - c_0 \Delta p_H = c_M \Delta p_H + q_r \Omega_M \quad (2-168)$$

而且

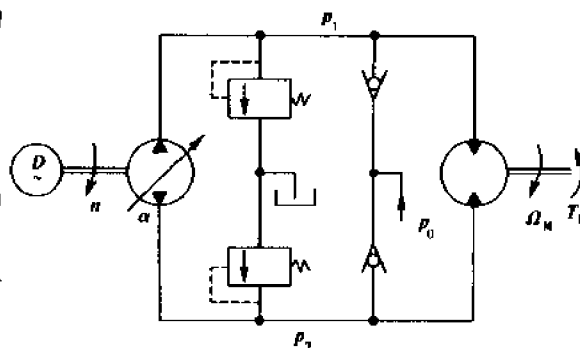


图 2-47 泵控马达的原理图

$$\Delta p_H = \Delta p_M + \Delta p_T \quad (2-169)$$

式中： Δp_T ——泵和马达之间管路压力损失。当管路中的液流为层流时有

$$\Delta p_T = K_H \alpha / G_{TP} \quad (2-170)$$

式中： G_{TP} ——管路的液导。

而马达进、出口端的压差为

$$\Delta p_M = \Delta p_K + \Delta p \quad (2-171)$$

式中： Δp_K ——马达通道的流动损失；

Δp ——负载压差。

假设通过马达通道的液流为紊流，则

$$\Delta p_K = (K_H \alpha / G_K)^2 \quad (2-172)$$

式中： G_K ——马达通道的液导；

Δp 可由下式计算：

$$\Delta p = \frac{T_l}{K_M} + \frac{D_M \Omega_M}{K_M} \quad (2-173)$$

式中： T_l ——负载力矩；

D_M ——马达和负载的粘性阻尼系数；

K_M ——马达的力矩系数， K_M 为：

$$K_M = q_r \quad (2-174)$$

将式(2-169)~式(2-174)代入式(2-168)后可解出

$$\begin{aligned} \Omega_M = K_D K_H \alpha \left[1 - \frac{c_H}{G_{TP}} - \frac{c_0}{G_{TP}} - (c_M + c_H + c_0) \frac{K_H \alpha}{G_K^2} - \frac{K_D (c_H + c_0 + c_M) D_M \Omega_M}{K_D K_H \alpha K_M} \right] \\ - K_D \frac{T_l}{K_M} (c_H + c_0 + c_M) \end{aligned} \quad (2-175)$$

由于

$$\frac{K_D (c_H + c_0 + c_M)}{K_D K_H \alpha} \cdot \frac{D_M \Omega_M}{K_M} \approx \frac{K_D (c_H + c_0 + c_M)}{K_M} D_M$$

故有

$$\begin{aligned} \Omega_M = K_D K_H \alpha \left[1 - \frac{c_H}{G_{TP}} - \frac{c_0}{G_{TP}} - (c_M + c_H + c_0) \frac{K_H \alpha}{G_K^2} - \frac{K_D (c_M + c_H + c_0)}{K_M} D_M \right] \\ - K_D \frac{T_l}{K_M} (c_M + c_H + c_0) \end{aligned} \quad (2-176)$$

式(2-176)为泵控马达的机械特性方程，由式(2-176)表示的机械特性曲线见图 2-48。

在进行动态分析时，可取机械特性的斜率来计算系统的等效泄漏系数，这时

$$c = \left| \frac{d\Omega_M}{dT_l} \right| q_r^2 \quad (2-177)$$

其中， $\left| \frac{d\Omega_M}{dT_l} \right|$ 是机械特性的斜率。

(2)速度特性

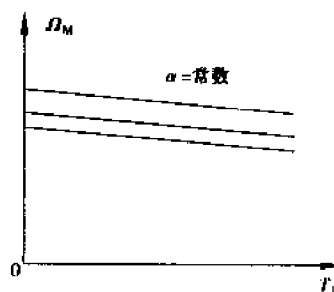


图 2-48 泵控马达的机械特性

速度特性是指在空载情况下,液压马达的输出速度与液压伺服泵输入倾斜角之间的关系。速度特性可由(2-176)式引伸而来,当泵和马达之间管道很短,且马达通道阻力很小时有

$$d_k = 1 - \frac{C_{11}}{G_{TP}} - (C_m + C_H + C_0) \frac{K_H \alpha}{G_k^2} - \frac{K_P(C_m + C_H + C_0)}{K_m} D_m \approx 1$$

泵控马达的速度增量, $K_\Omega = K_D K_H d_k \approx K_D K_H$

对于速度特性,令负载力矩 T_L 等于马达的起动摩擦力矩 T_1 ,同时考虑伺服泵的死区 $\Delta\alpha$,这样便可得到泵控马达的速度特性方程

$$\Omega_M = K_\Omega(\alpha \pm \Delta\alpha) - K_D \frac{T_1}{K_M}(c_H + c_0 + c_M) \quad (2-178)$$

令 $\Omega_M = 0$,伺服泵斜盘倾角最大时为泵控马达的死区,即

$$\Delta\alpha' = \Delta\alpha + \frac{D}{K_\Omega} \frac{t}{K_M}(c_m + c_0 + c_M) \quad (2-179)$$

泵控马达系统的速度特性曲线如图 2-49 所示。

2. 泵控马达系统的动态特性

带有惯性负载的泵控马达系统如图 2-50 所示。伺服泵输出流量与斜盘倾角成正比,

$$Q_0 = K_H \alpha \quad (2-180)$$

式中: K_H ——液压伺服泵的流量增益。

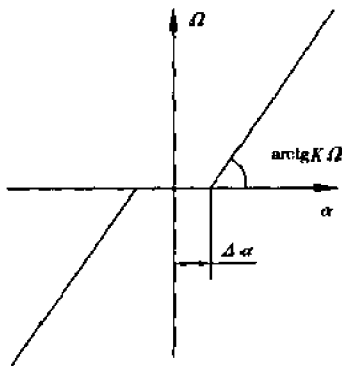


图 2-49 泵控马达的速度特性

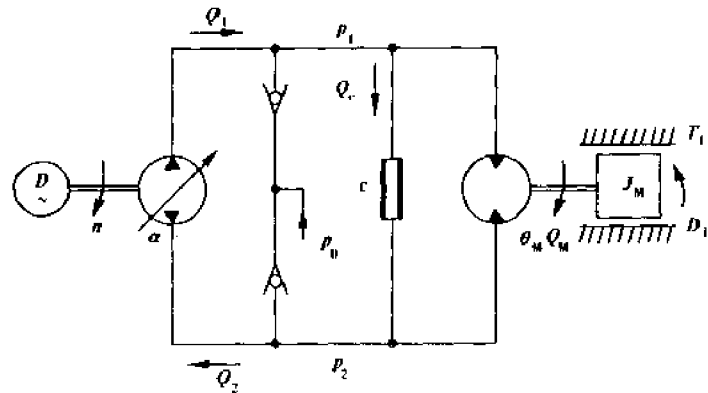


图 2-50 带惯性负载的泵控马达

当 $\alpha \neq 0$ 时,一侧管路处于压力状态,另一侧管路保持在补油压力上。因此,斜盘摆动或者负载变化时,只有一侧管路的压力是变化的。这时伺服泵输出流量为

$$\begin{aligned} Q_0 &= \frac{V}{\beta} \frac{dp_1}{dt} + Q_c + Q_M \\ &= \frac{V}{\beta} \frac{dp_1}{dt} + cp_1 + q_r \frac{d\theta_M}{dt} \end{aligned} \quad (2-181)$$

式中: Q_c ——泵控马达的泄漏流量;

Q_M ——马达转动所消耗的流量;

V ——泵控马达一侧管路的容积;

c ——泵控马达的等效漏损系数。

由牛顿定理可得液压马达的力矩平衡方程为

$$q_r p_1 = J_M \frac{d^2\theta_M}{dt^2} + D \frac{d\theta_M}{dt} + T_1 \quad (2-182)$$

式(2-180)、式(2-181)和式(2-182)为泵控马达系统的三个基本方程,对其进行拉氏变换,就可求得泵控马达系统的动力响应方程和传递函数动力响应方程(拉氏变换形式)为

$$\begin{aligned} \theta_M(s) &= \frac{\frac{K_H q_r}{q_r^2 + cD_1} \alpha - \frac{c}{q_r^2 + cD_1} \left(\frac{V}{\beta c} s + 1 \right) T_1}{s \left[\frac{V}{\beta} \cdot \frac{J_1}{q_r^2 + cD_1} s^2 + \left(\frac{cJ_1}{q_r} + \frac{V D_1}{\beta q_r} \right) \frac{q_r}{q_r^2 + cD_1} s + 1 \right]} \\ &\approx \frac{\frac{K_H}{q_r} \alpha - \frac{1}{q_r} \left(c + \frac{V}{\beta} s \right) T_1}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h \frac{1}{\omega_h} s + 1 \right)} \end{aligned} \quad (2-183)$$

式中: ω_h ——泵控马达无阻尼液压固有频率;

ξ_h ——泵控马达的液压阻尼比。

$$\begin{aligned} \omega_h &= \sqrt{\frac{\beta q_r^2}{V J_1}} \\ \xi_h &= \frac{c}{2q_r} \sqrt{\frac{\beta J_1}{V}} + \frac{D_1}{2q_r} \sqrt{\frac{V}{\beta J_2}} \end{aligned}$$

由式(2-183)可画出泵控马达系统的方框图如图 2-51 所示。

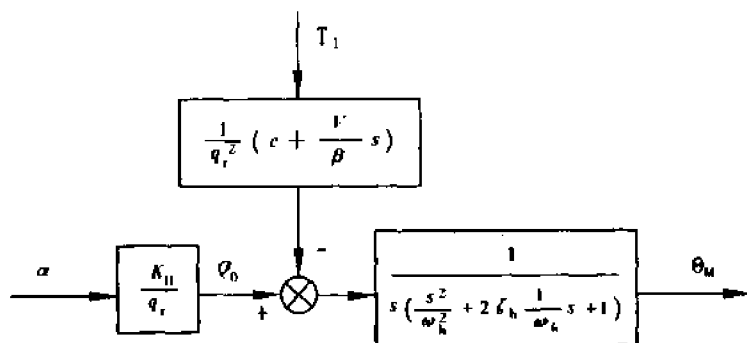


图 2-51 泵控马达的方框图

由方框图可得系统的传递函数为

$$\frac{\theta_M(s)}{\alpha(s)} = \frac{K_H/q_r}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h \frac{1}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (2-184)$$

$$\frac{\theta_M(s)}{T_1(s)} = - \frac{\frac{c}{q_r} \left(1 + \frac{V}{\beta c} s \right)}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\xi_h \frac{1}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (2-185)$$

第五节 电液伺服系统数学模型

电液伺服是一种电控系统与液压执行机构的组合体。这种系统的特点是速度快,功率大。因此,电液伺服系统广泛使用在各种大型工程机械中。

电液伺服系统的基本原理如图 2-52 所示,将输入指令电压 u_i 与反馈测量传感器提供的

反馈电压 u_f 相比较,误差值经伺服放大器放大后,转换为伺服阀的控制电流。伺服阀的阀芯位移与控制电流 i 成正比,以控制阀开口的方向和大小,从而控制进入液压油缸的油流方向和大小,推动活塞与负载一起向减小误差的方向移动。这样,便构成了电液伺服反馈控制系统。

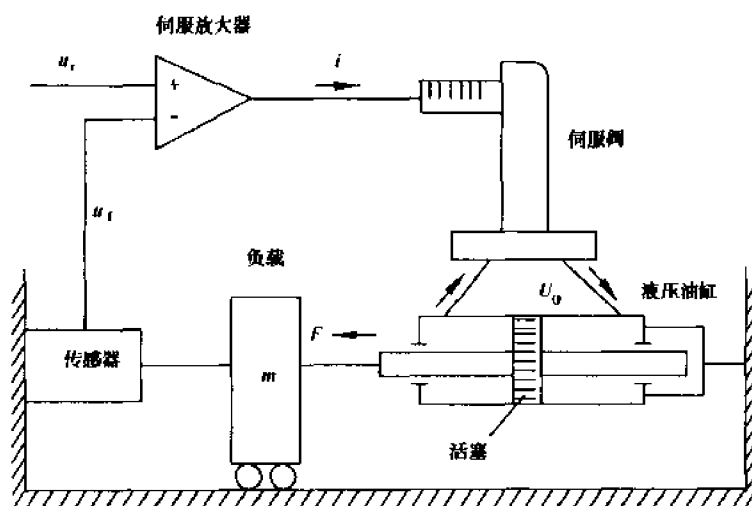


图 2-52 电液伺服系统原理图

流量控制伺服阀的典型特性如图 2-53 所示。在平衡位置附近 ($i = 0, \Delta P = 0, q = 0$), 可得到线性化方程

$$q = K_1 i - K_2 \Delta p \quad (2-186)$$

式中: q ——流入油缸的油液流量(L/min);

i ——直流力矩马达电枢电流(mA);

Δp ——活塞左右两边的油压差(Pa);

K_1, K_2 ——系数。

根据流量连续性原理, q 由以下三部组成

$$q = q_0 + q_L + q_c \quad (2-187)$$

式中: q_0 ——推动活塞移动的有效流量;

q_L ——通过活塞与内壁之间的缝隙而泄漏的流量;

q_c ——油缸及管道内的油液(包括混入的空气在内)的可压缩性而需要增加的流量。

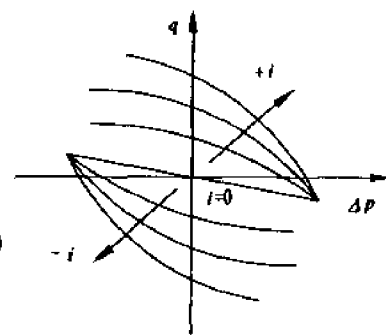


图 2-53 伺服阀静特性

$$q_0 = A \cdot \frac{du}{dt} \quad (2-188)$$

式中: y ——活塞位移;

A ——活塞的有效面积(扣除了活塞杆)。

$$q_L = L \cdot \Delta p \quad (2-189)$$

式中: L ——泄漏系数。

$$q_c = \frac{V}{4\beta} \cdot \frac{d\Delta p}{dt} \quad (2-190)$$

式中: $V = V_1 + V_2$, 为液压缸的等效压缩体积;

β ——系统有效容积弹性模量。

将式(2-188)~(2-190)代入式(2-187)可得

$$q = A \frac{dy}{dt} + L\Delta p + \frac{V}{4\beta} \cdot \frac{d\Delta p}{dt} \quad (2-191)$$

将式(2-186)代入式(2-191)可得

$$A \frac{dy}{dt} + L\Delta p + \frac{V}{4\beta} \cdot \frac{d\Delta p}{dt} = K_1 i - K_2 \Delta p \quad (2-192)$$

由牛顿定律可得活塞的受力平衡方程为:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + f \frac{dy}{dt} + Ky = A\Delta p - f_d \quad (2-193)$$

式中: m ——活塞及活塞杆质量;

f ——阻尼系数;

K ——弹簧刚度;

f_d ——外载。

对式(2-192)、(2-193)取拉氏变换得:

$$\left(\frac{V}{4\beta}s + L + K_2 \right) \Delta P(s) = K_1 I(s) - AsY(s)$$

$$(ms^2 + fs + K)Y(s) = A\Delta P(s) - F_d(s)$$

联立求解上面二式、消去中间变量 $\Delta p(s)$ 可得:

$$Y(s) = \frac{K_1 AI(s) - \left(\frac{V}{4\beta}s + L + K_2 \right) F_d(s)}{\frac{mV}{4\beta}s^3 + \left[\frac{fV}{4\beta} + m(L + K_2) \right] s^2 + \left[\frac{KV}{4\beta} + m(L + K_2)A^2 \right] s + K(L + K_2)} \quad (2-194)$$

由式(2-194)可得系统方框图如图 2-54 所示。

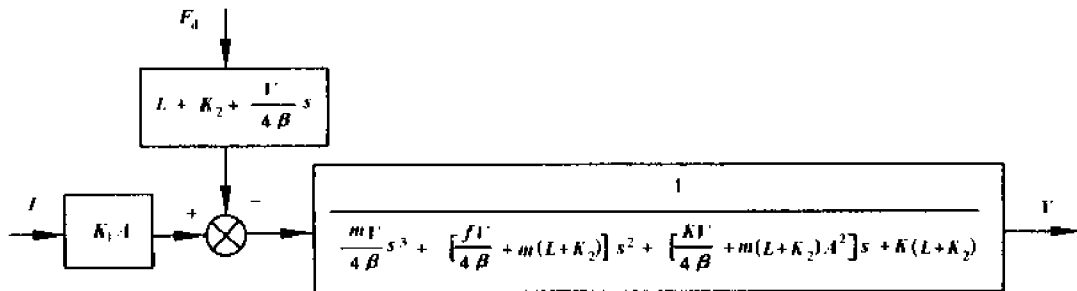


图 2-54 阀控油缸系统方框图

下面讨论反馈测量传感器的问题。不同系统应选择不同类型的传感器。但不管是速度传感器、位移传感器或力传感器,其分析方法是相同的,只是受控的物理变量不同。这里以位置伺服系统为例,此时,液压执行装置的输入量为电流 i ,输出量为位移 Y ,若负载为纯质量块 m (即 $f=0, k=0$)。于是,式(2-194)可简化为

$$R(s) = \frac{\frac{K_1}{A}\omega_n I(s) - \frac{1}{m}(s + 2\xi\omega_n)F_d(s)}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (2-195)$$

式中: $\omega_n = A\sqrt{\frac{4\beta}{mV}}$; $\xi = \frac{L + K_2}{2A}\sqrt{\frac{4\beta m}{V}}$ 。

若令 K_0 和 K_f 分别表示伺服放大器和位置反馈测量传感器的增益, 则电液位置伺服系统传统的传递函数方框图如图 2-55 所示。由方框图可得系统闭环传递函数为

$$\frac{Y(s)}{U_r(s)} = \frac{K_0 K_1 \omega_n^2 / A}{s^3 + 2\xi\omega_n s^2 + \omega_n^2 s + K_f K_0 K_1 \omega_n^2 / A} \quad (2-196)$$

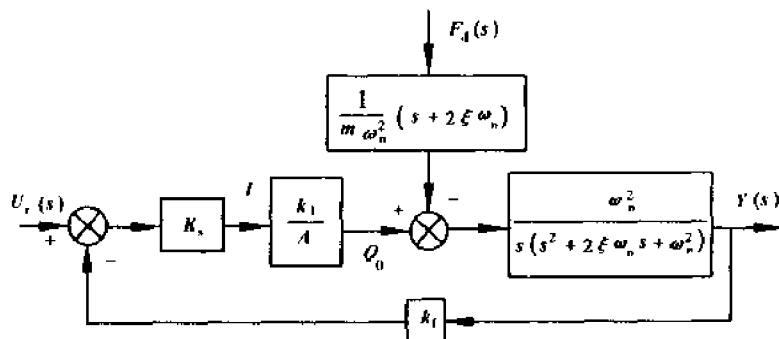


图 2-55 阀控马达方框图

第三章 工程机械常用检测元件

在工程机械机电液一体化系统中有各种不同的物理量(如位移、压力、温度、速度等)需要控制和监测。传感器则是控制系统的一个环节,承担着信号的转换任务,如将位移、力、应变、温度等被测的物理量转换成与之对应的、容易传输和处理的电信号。由于工作原理、测量方法和被测对象不同,传感器的分类方法亦不相同。本章重点介绍工程机械机电液一体化系统中常用传感器的基本工作原理、结构、性能以及传感器接口技术。

第一节 位移传感器

位移测量是线位移测量和角位移测量的总称。直线位移传感器主要有:电感传感器、差动变压器传感器、电容传感器、感应同步器和光栅传感器。角位移传感器主要有:电容传感器、旋转变压器和光电编码盘等。

一、电感式传感器

电感式传感器是基于电磁感应原理,将被测非电量转换为电感量变化的一种结构型传感器。按其转换方式的不同,可分为自感型、互感型两大类。

1. 自感型电感式传感器

自感式传感器是一种改变自感系数的传感器,其结构如图 3-1 所示,主要由线圈、铁芯和活动衔铁组成。在铁芯和活动衔铁之间保持一定的空气隙 δ ,被测位移构件与活动衔铁相连,当被测构件产生位移时,活动衔铁随着移动,空气隙 δ 发生变化,引起磁阻变化,从而使线圈的电感值发生变化。当线圈通以激励电流时,其自感 L 与磁路的总磁阻 R_m 有关,即

$$L = W^2 / R_m \quad (3-1)$$

式中: W ——线圈匝数;

R_m ——总磁阻。

如果空气隙 δ 较小,而且不考虑磁路的损失,则总磁阻为

$$R_m = \frac{l}{\mu A} + \frac{2\delta}{\mu_0 A_0} \quad (3-2)$$

式中: l ——铁芯导磁长度(m);

μ ——铁芯导磁率(H/m);

A ——铁芯导磁截面积(m^2), $A = a \times b$;

δ ——空气隙(m), $\delta = \delta_0 \pm \Delta\delta$;

μ_0 ——空气磁导率(H/m), $\mu_0 = 2\pi \times 10^{-7}$;

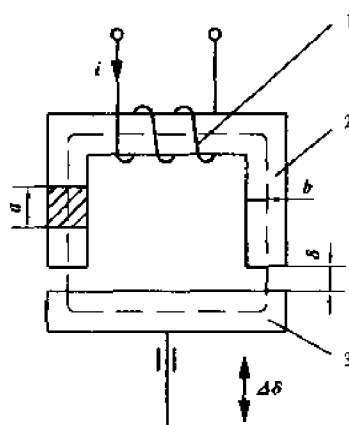


图 3-1 自感式电感传感器原理图
1-线圈;2-铁芯;3-衔铁

A_0 ——空气隙导磁截面积(m^2)。

由于铁芯的磁阻与空气隙的磁阻相比很小,计算时铁芯的磁阻可以忽略不计,故

$$R_m \approx \frac{2\delta}{\mu_0 A_0} \quad (3-3)$$

将式(3-3)代入式(3-1),得

$$L = \frac{W^2 \mu_0 A_0}{2\delta} \quad (3-4)$$

式(3-4)表明,自感 L 与空气隙 δ 的大小成反比,与空气隙导磁截面积 A_0 成正比。当固定 A_0 不变,改变 δ 时, L 与 δ 成非线性关系,此时传感器的灵敏度

$$S = \frac{dL}{d\delta} = -\frac{W^2 \mu_0 A_0}{2\delta^2} \quad (3-5)$$

由式(3-5)得知,传感器的灵敏度与空气隙 δ 的平方成反比, δ 愈小,灵敏度愈高。由于 S 不是常数,故会出现非线性误差。为了减小非线性误差,通常规定传感器应在较小间隙的变化范围内工作。在实际应用中,可取 $\Delta\delta/\delta_0 \leq 0.1$ 。这种传感器适用于较小位移的测量,一般为 $0.001 \sim 1\text{mm}$ 。此外,这类传感器还常采用差动式接法。图 3-2 为差动型磁阻式传感器,它由两个相同的线圈、铁芯及活动衔铁组成。当活动衔铁接于中间位置(位移为零)时,两线圈的自感 L 相等,输出为零。当衔铁有位移 $\Delta\delta$ 时,两个线圈的间隙为 $\delta_0 + \Delta\delta$ 、 $\delta_0 - \Delta\delta$,这表明一个线圈自感增加,而另一个线圈自感减小,将两个线圈接入电桥的相邻臂时,其输出的灵敏度可提高一倍,并改善了线性特性,消除了外界干扰。

可变磁阻式传感器还可做成改变空气隙导磁截面积的形式,当固定 δ ,改变空气隙导磁截面积 A_0 时,自感 L 与 A_0 呈线性关系。

在可变磁阻螺管线圈中插入一个活动衔铁,当活动衔铁在线圈中运动时,磁阻将变化,导致自感 L 的变化,如图 3-3 所示。这种传感器结构简单,制造容易,但是其灵敏度较低,适合于测量比较大的位移量。

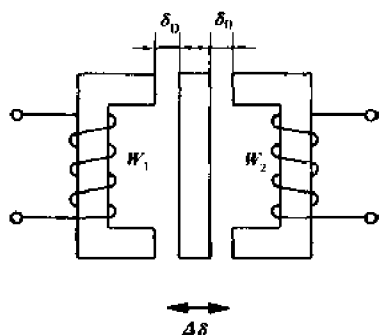


图 3-2 差动式自感传感器

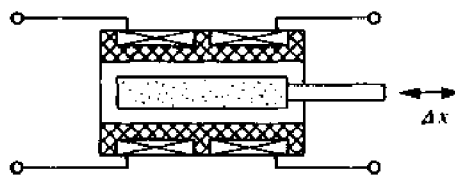


图 3-3 螺管线圈式自感传感器

2. 互感型差动变压器式电感传感器

互感型电感传感器是利用互感 M 的变化来反映被测量的变化。这种传感器实质是一个变压器。当变压器初级线圈输入稳定交流电压后,次级线圈便产生感应电压输出,该电压随被测量的变化而变化。

差动变压器式电感传感器是常用的互感型传感器,其结构形式有多种,以螺管形应用较为普遍,其结构及工作原理如图 3-4a)、b) 所示。传感器主要由线圈、铁芯和活动衔铁三个部分组成。线圈包括一个初级线圈和两个反接的次级线圈,当初级线圈输入交流激励电压时,次级线

圈将产生感应电动势 e_1 和 e_2 。由于两个次级线圈极性反接,因此传感器的输出电压为两者之差,即 $e_y = e_1 - e_2$ 。活动衔铁能改变线圈之间的耦合程度。输出 e_y 的大小随活动衔铁的位置而变。当活动衔铁的位置居中时,即 $e_1 = e_2, e_y = 0$;当活动衔铁向上移时,即 $e_1 > e_2, e_y > 0$;当活动衔铁向下移时,即 $e_1 < e_2, e_y < 0$ 。活动衔铁的位置往复变化,其输出电压 e_y 也随之变化,输出特性如图 3-4c)所示。

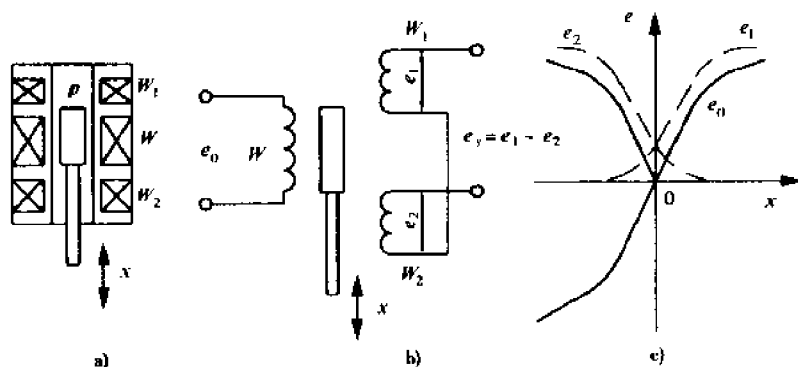


图 3-4 差动变压器式电感传感器

a)、b)工作原理;c)输出特性

差动变压器式传感器输出的电压是交流电压,如用交流电压表指示,则输出值只能反应铁芯位移的大小,而不能反应移动的极性。其次,交流电压输出存在一定的零点残余电压,零点残余电压是由于两个次级线圈的结构不对称,以及初级线圈铜损电阻、铁磁材质不均匀、线圈间分布电容等原因所形成。所以,即使活动衔铁位于中间位置时,输出也不为零。鉴于这些原因,差动变压器的后接电路应采用既能反应铁芯位移极性,又能补偿零点残余电压的差动直流输出电路。

差动变压器传感器具有精度高(达 $0.1\mu\text{m}$ 量级),线圈变化范围大(可扩大到 $\pm 100\text{mm}$,即:视结构而定),结构简单,稳定性好等优点,被广泛应用于直线位移、振动等参数的测量。

二、电容式传感器

电容式传感器是以各种类型的电容器作为传感元件,将被测物理量转换为电容量变化的装置。

从物理学得知,由两个平行板组成的电容器的电容量为

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{\delta} (F) \quad (3-6)$$

式中: ϵ ——极板间介质的相对介电系数,空气中 $\epsilon = 1$;

ϵ_0 ——真空中介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} (\text{F/m})$;

δ ——极板间距离(m);

A ——两极板相互覆盖面积(m^2)。

式(3-6)表明,当被测量使 δ 、 A 或 ϵ 发生变化时,都会引起电容 C 的变化。若仅改变其中某一个参数,则可以建立起该参数和电容量变化之间的对应关系,因而电容式传感器分为极距变化型、面积变化型和介质变化型三类,如图 3-5 所示。前两种都可用作位移传感器。

1. 极距变化型

极距变化型电容传感器的灵敏度为

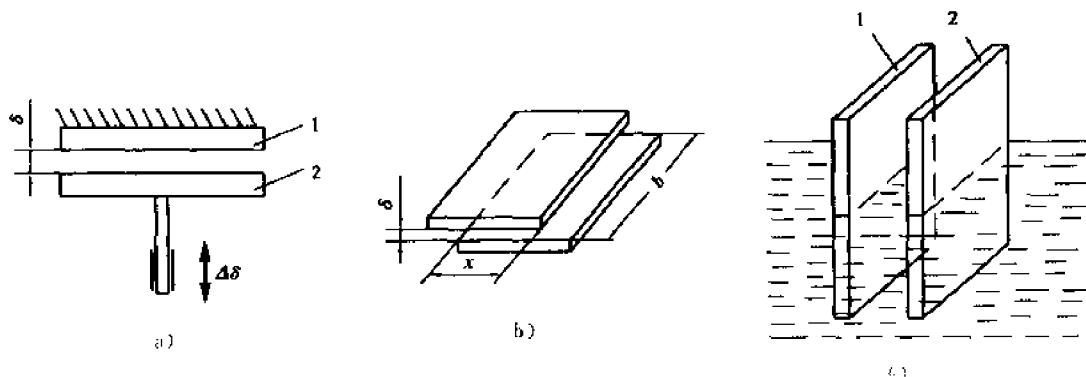


图 3-5 电容式传感器
a) 极距变化型; b) 面积变化型; c) 介电常数变化型
1, 2-极板

$$S = \frac{dC}{d\delta} = -\frac{\epsilon A}{\delta^2} \quad (3-7)$$

即灵敏度 S 与极距 δ 的平方成反比。为了提高灵敏度 S , 应减小初始间隙 δ_0 , 但 δ_0 过小时, 一方面使测量范围减小, 另一方面容易使电容击穿, 一般 δ_0 控制在 $0.1 \sim 1\text{mm}$ 左右。由于两极板间电容 C 与极距 δ 成反比, 所以输出与输入呈非线性关系, 如图 3-6 所示。为了减小非线性误差, 应限制间隙的变化范围 $\Delta\delta$, 使极距在初始间隙 δ_0 附近很小的范围内变化, 一般 $\Delta\delta = (0.01 \sim 0.1)\delta_0$ 。

2. 面积变化型

图 3-5b) 所示的面积变化型电容传感器的电容 $C = \delta bx / \delta$, 灵敏度为

$$S = \frac{dC}{dx} = \frac{\delta b}{\delta} = \text{常数} \quad (3-8)$$

即输出与输入呈线性关系。增加极板长度 b 和减小极距 δ 可以提高灵敏度。

这两种传感器可以进行动态非接触测量, 对被测系统影响小。极距变化型电容传感器灵敏度高, 但非线性大, 故常用于微小位移测量。面积变化型电容传感器是一种线性传感器, 可以测量较大的直线位移和角度位移, 但灵敏度较低。

介电常数变化型电容传感器是在两极板间加上介质构成的。由于各种介质的介电常数不同, 当极板间的介电常数变化时电容量随之改变。工程机械中常用于检测容器中液面的高度、水泥混凝土拌和楼水泥仓贮料高度等。

电容传感器电容值一般变化很微小, 必须借助测量电路将其转换成电压、电流或频率, 进行显示、记录或传输。

电容传感器的测量电路有电桥电路、调频电路、差动脉冲宽度调制电路和运算放大器式电路等。

三、光栅数字式传感器

光栅是一种把位移变换成数字量的位移—数字转换装置。它主要用于高精度直线位移和角位移的数字检测系统。

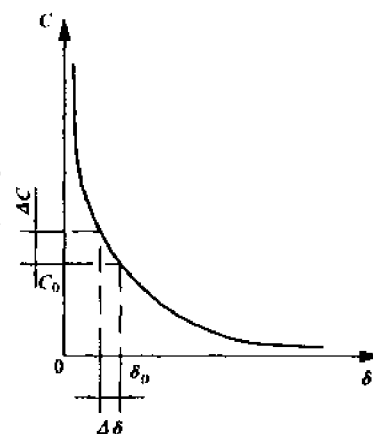


图 3-6 $C-\delta$ 特性曲线

光栅是在透明的玻璃板上,均匀地刻出许多明暗相间的条纹,或在金属镜面上均匀地刻划出许多间隔相等的条纹,通常线条的间隙和宽度是相等的。以透光的玻璃为载体的称为透射光栅,不透光的金属为载体的称为反射光栅;根据外形光栅可分为直线光栅和圆光栅。

测量装置中是用一个长光栅和一个短光栅组成光栅副来进行测量。长的光栅称为标尺光栅,短的光栅称为指示光栅。一般标尺光栅和指示光栅的刻线密度是相同的,两刻线之间的距离 W 称栅距。刻线密度一般每毫米刻线数为 25、50、100、250 条等。

把指示光栅平行靠近标尺光栅,并使二者的刻线相互倾斜一个很小的角度 θ ,则当平行光垂直照射光栅时,在光栅的另一面就会出现若干条与刻线垂直的、明暗相间的粗大条纹,如图 3-7a)所示。这种粗大的明暗条纹称为莫尔条纹。

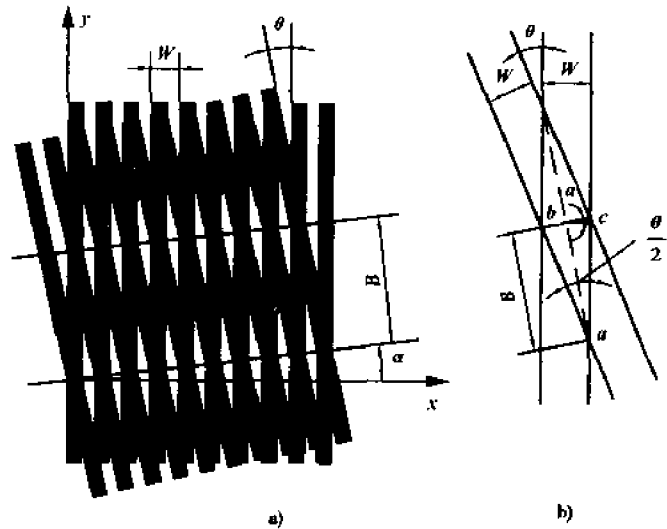


图 3-7 莫尔条纹

莫尔条纹具有位移放大作用。由图 3-7b)可知,莫尔条纹间距 B 、倾斜角 θ 和栅距 W 的关系(当 θ 很小时)为

$$B = ab = \frac{bc}{\sin(\theta/2)} \approx \frac{W}{\theta} \quad (3-9)$$

式中 θ 的单位为 rad, B 、 W 的单位为 mm。

当两块光栅沿刻线垂直的方向作相对运动时,莫尔条纹沿着夹角 θ 平分线的方向移动。当光栅作相反方向移动时,莫尔条纹的移动方向也随着改变。

光栅每移动过一个栅距,莫尔条纹移过一个条纹间距。当夹角 θ 很小时,从式(3-9)可以看出条纹间距 B 将变得非常大,这表明莫尔条纹具有放大作用,可以将微小的位移进行放大,通过测量移过的莫尔条纹的数目,就可以测量出光栅的位移量。通过测量莫尔条纹移过的距离,就可以测量出小于光栅栅距的微位移量。

在实际应用中,被测物体的移动方向往往不是固定的。无论主光栅向前或向后移动,在一固定点观察时,莫尔条纹都是作明暗交替变化。因此,只根据一条莫尔条纹信号,无法辨别光栅移动的方向,也就不能正确测量往复移动时的位移。为了辨向,需要两个有一定相位差的莫尔条纹信号。

图 3-8 为辨向的工作原理和它的逻辑电路。在相隔 $1/4$ 条纹间距的位置上安放两上光电扫描装置,得到了两个相位差 90° 的电信号 u_{01} 和 u_{02} ,经过整形后得到两个方波信号 u'_{01} 和 u'_{02} 。从图中波形的对应关系可以看出,在光栅作 A 方向移动时, u'_{01} 经微分电路后产生的脉冲(如图中实线所示)正好发生在 u'_{02} 的“1”电平时,从而经与门 Y_1 输出一个计数脉冲。而 u'_{01} 经反相微分后产生的脉冲(如图中虚线所示)则与 u'_{02} 的“0”电平相遇,与门 Y_2 被阻塞,没有脉冲输出。当光栅作 A 方向移动时, u'_{01} 的微分脉冲发生在 u'_{02} 为“0”电平时,故与门 Y_1 无脉冲输出;而 u'_{01} 反相微分所产生的脉冲则发生在 u'_{02} 的“1”电平时,与门 Y_2 输出一个计数脉冲。因此,由 u'_{02} 的电平状态作为与门的控制信号,来控制 u'_{01} 所产生的脉冲输出,就可以根

据运动的方向正确地给出加计数脉冲或减计数脉冲。图 3-9 为其测量电路框图。

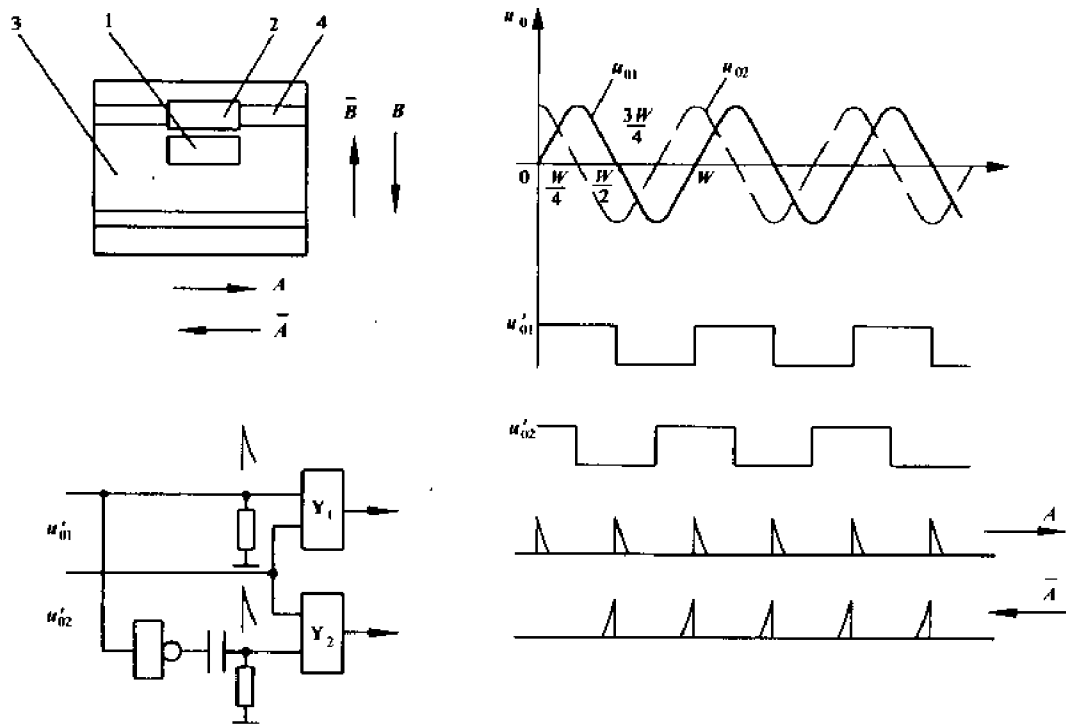


图 3-8 辨向逻辑工作原理

1、2-光电元件；3-指示光栅；4-莫尔条纹； $A(\bar{A})$ —光栅移动方向； $B(\bar{B})$ —对应 $A(\bar{A})$ 的莫尔条纹移动方向

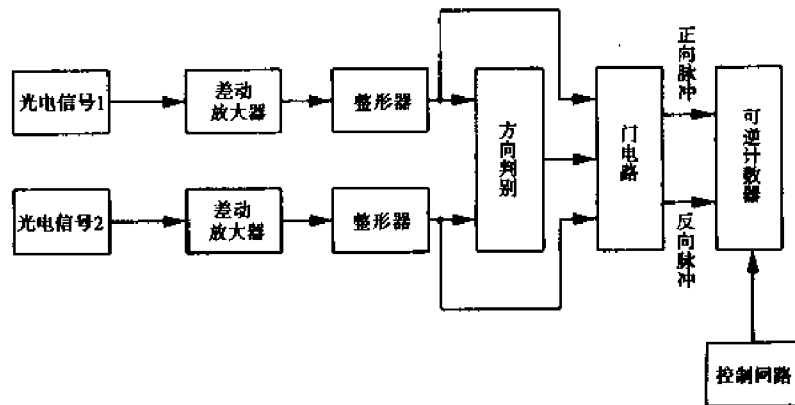


图 3-9 光栅测量电路方框图

四、感应同步器

感应同步器是一种利用电磁感应原理制造的位移—数字检测装置，按用途可分为直线感应同步器和圆感应同步器，前者用于直线位移测量，后者用于角位移测量。直线感应同步器由定尺和滑尺组成，如图 3-10 所示，圆感应同步器由转子和定子组成，如图 3-11 所示。定尺和转子是连续绕组，滑尺和定子是分段绕组，二者分别又

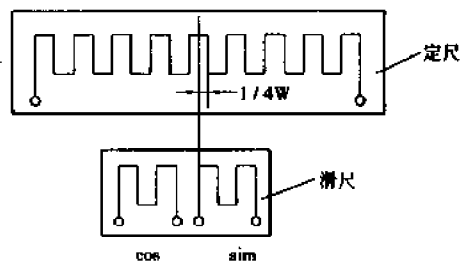


图 3-10 直线感应同步器绕组图形

称正、余弦绕组,使用时两部分绕组缺一不可。

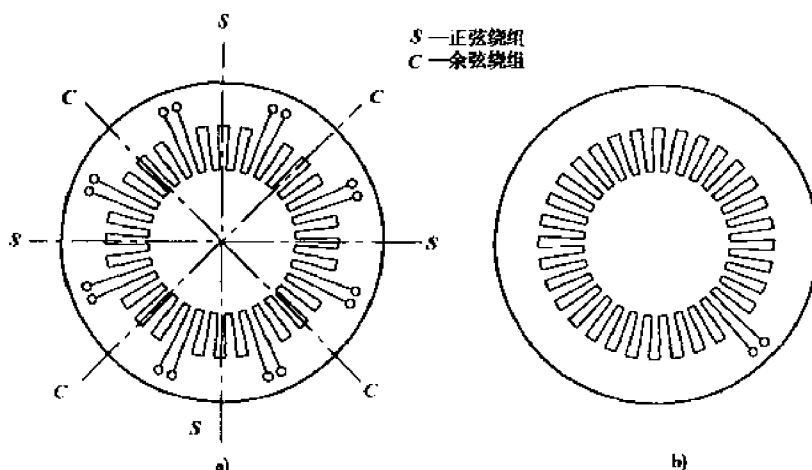


图 3-11 圆盘式感应同步器绕组图形
a) 定子; b) 转子

感应同步器的输出信号是一个能反映其定尺与滑尺相对位移的交变电势,因而对输出信号的处理其本质归结为对交变电势的检测。滑尺的正弦和余弦两个绕组在位置上相差 90° 电角度,即 $1/4$ 周期。当它们同时被激励时,定尺输出的感应电势是正、余弦绕组所产生的感应电势之和,根据滑尺两绕组激励方式的不同,其输出信号的处理方式可分为鉴相型和鉴幅型。

1. 鉴相型

鉴相型就是根据感应电势的相位来鉴别位移量。

如果将滑尺的正弦和余弦绕组分别供给幅值、频率均相等,但相位相差 90° 的激励电压,即 $V_s = V_m \sin \omega t$, $V_c = V_m \cos \omega t$ 时,则定尺上的绕组由于电磁感应作用产生与激励电压同频率的交变感应电势。

图 3-12 说明了感应电势幅值与定尺和滑尺相对位置的关系。如果只对余弦绕组 S 加交流激励电压 V_s ,则绕组 S 中有电流通过,因而在绕组 S 周围产生交变磁场。在图中 A 位置,定尺和滑尺绕组 S 完全重合,此时磁通交链最多,因而感应电势幅值最大。在图中 B 位置,定尺绕组交链的磁通相互抵消,因而感应电势幅值为零。滑尺继续滑动的情况见图中 C 、 D 、 E 位置。可以看出,滑尺在定尺上滑动一个节距,定尺绕组感应电势变化了一个周期,即

$$e_s = kV_s \cos \theta \quad (3-10)$$

式中: k ——滑尺和定尺的电磁耦合系数;

θ ——滑尺和定尺相对位移的折算角。

若绕组的节距为 W ,相对位移为 l ,则

$$\theta = \frac{l}{W} 360^\circ \quad (3-11)$$

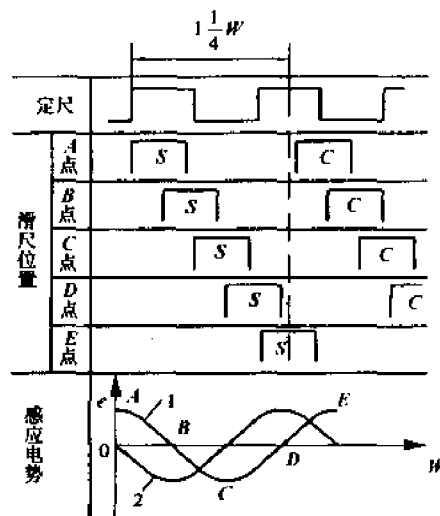


图 3-12 感应电势与两绕组相对位置关系

1-由 S 激励的感应电势曲线;

2-由 C 激励的感应电势曲线

同样,当仅对正弦绕组 C 施加交流激磁电压 V_c 时,定尺绕组感应电势为

$$\epsilon_c = -KV_c \sin\theta \quad (3-12)$$

对滑尺上两个绕组同时加激磁电压,则定尺绕组上所感应的总电势为

$$\begin{aligned} e &= \epsilon_s + \epsilon_c = KV_s \cos\theta - KV_c \sin\theta = KV_m \sin\omega t \cos\theta - KV_m \cos\omega t \sin\theta \\ &= KV_m \sin(\omega t - \theta) \end{aligned} \quad (3-13)$$

从上式可以看出,感应同步器把滑尺相对定尺的位移 l 的变化转成感应电势相角 θ 的变化。因此,只要测得相角 θ ,就可以知道滑尺的相对位移 l :

$$l = \frac{\theta}{360^\circ} W \quad (3-14)$$

鉴相型测量系统如图 3-13 所示。

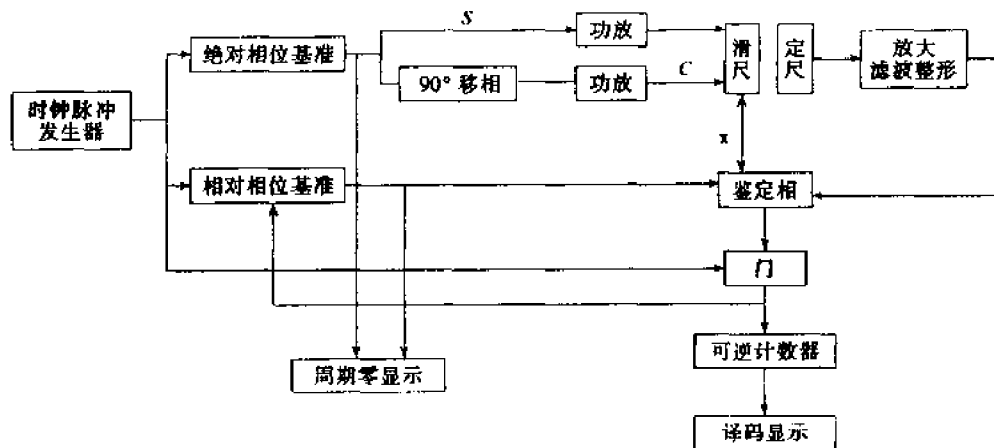


图 3-13 鉴相型感应同步器测量系统方框图

2. 鉴幅型

鉴幅型是根据感应电势的幅值变化来检测位移量的一种工作方式。在滑尺的两个绕组上施加频率和相位均相同,但幅值不同的交流激磁电压 V_s 和 V_c 。

$$V_s = V_m \sin\theta_1 \sin\omega t \quad (3-15)$$

$$V_c = V_m \cos\theta_1 \sin\omega t \quad (3-16)$$

式中: θ_1 ——指令位移角。

设此时滑尺绕组与定尺绕组的相对位移角为 θ ,则定尺绕组上的感应电势为

$$\begin{aligned} e &= KV_s \cos\theta - KV_c \sin\theta = KV_m (\sin\theta_1 \cos\theta - \cos\theta_1 \sin\theta) \sin\omega t \\ &= KV_m \sin(\theta_1 - \theta) \sin\omega t \end{aligned} \quad (3-17)$$

上式把感应同步器的位移与感应电势幅值 $KV_m \sin(\theta_1 - \theta)$ 联系起来,当 $\theta = \theta_1$ 时, $e = 0$ 。这就是鉴幅测量方式的基本原理。测量系统如图 3-14 所示。

五、角数字编码器

编码器是把角位移或直线位移转换成电信号的一种装置。前者称码盘,后者称码尺。

按照读出方式编码器可分为接触式和非接触式两种。接触式采用电刷输出,以电刷接触导电区或绝缘区来表示代码的状态是“1”还是“0”;非接触式的接收敏感元件是光敏元件或磁敏元件,采用光敏元件时以透光区和不透光区表示代码的状态是“1”还是“0”,而磁敏元件是用磁化区和非磁化区表示“1”或“0”。

按照工作原理编码器可分为增量式和绝对式两类。增量式编码器是将位移转换成周期性变化的电信号,再把这个电信号转变成计数脉冲,用脉冲的个数表示位移的大小。绝对式编码器的每一个位置对应一个确定的数字码,因此它的示值只与测量的起始和终止位置有关,而与测量的中间过程无关。

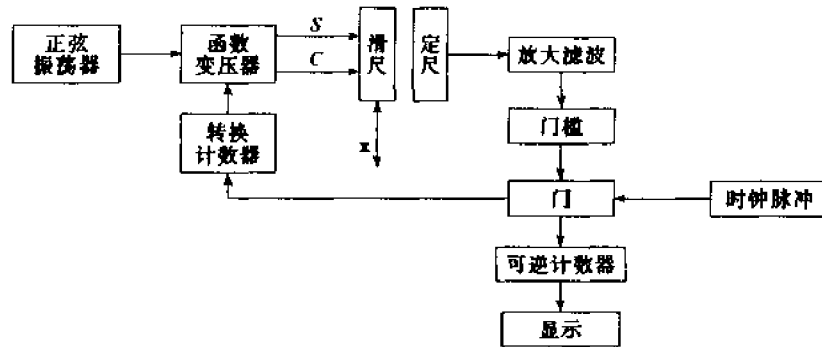


图 3-14 鉴幅型感应同步器测量系统框图

1. 增量式码盘

增量型回转编码原理如图 3-15 所示。这种码盘有两个通道 A 与 B(即两组透光和不透光部分),其相位差 90°,相对于一定的转角得到一个脉冲,将脉冲信号送入计数器,则计数器的计数值就反映了码盘转过的角度。

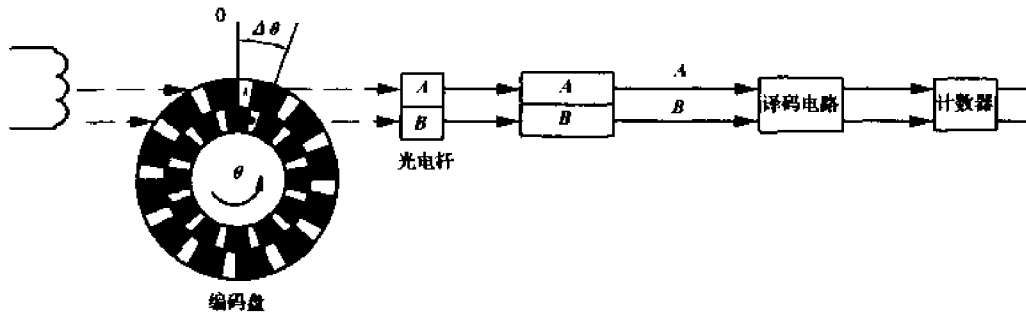


图 3-15 增量型回转编码器码盘

测量角位移时,单位脉冲对应的角度为

$$\Delta\theta = 360^\circ / m \quad (3-18)$$

式中: m ——码盘的孔数。增加孔数 m 可以提高测量精度。

若 n 表示计数脉冲,则角位移的大小为

$$\alpha = n \cdot \Delta\theta = \frac{360^\circ}{m} n \quad (3-19)$$

为了判别旋转方向,采用两套光电转换装置。一套用来计数,另一套用来辨向,两路输出信号相差 1/4 周期,使两个光电元件的输出信号在相位上相差 90°,作为细分和辨向的基础。为了提供角位移的基准点,在内码道内边再设置一个基准码道,它只有一个孔,其输出脉冲用来使计数器归零或作为每移动过 360°时的计数值。

增量式码盘制造简单,可按需要设置零位。但测量结果与中间过程有关,抗振、抗干扰能力差,测量速度受到限制。

2. 绝对式码盘

(1) 二进制码盘

图 3-16 为一个接触式四位二进制码盘,涂黑部分为导电区,空白部分为绝缘区,所有导电部分连在一起,接高电位。每一同心圆区域为一个码道,每一个码道上都有一个电刷,电刷经电阻接地,4 个电刷沿一固定的径向安装,电刷在导电区为“1”,在绝缘区为“0”,外圈为低位,内圈为高位。若采用 n 位码盘,则能分辨的角度为

$$\Delta\theta = \frac{360^\circ}{2^n} \quad (3-20)$$

位数 n 越大,分辨力越高,测量越精确。当码盘与轴一起转动时,电刷上将出现相应的电位,对应一定的数码。

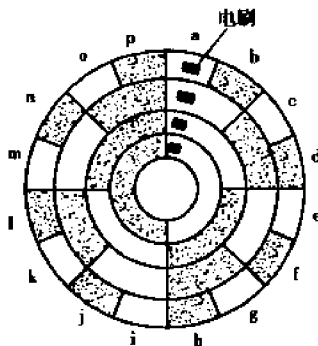


图 3-16 接触式四位二进制码盘

码盘的精度主要取决于码盘本身的制造精度和安装精度,任何装配误差都会引起计数误差,从而使码盘的实际输出精度低于码道数目给出的精度。由图 3-17 可以看出,当码盘由 h(0111)向 i(1000)过渡时,此时 4 个码道的电刷需要同时变位。如果由于电刷位置安装不准或码盘制作不精确,任何一个码道的电刷超前或滞后,都会使读数产生很大误差。例如本应为 i(1000),由于最高位电刷滞后,则输出数据为 a(0000),这种误差一般称为“非单值性误差”,应避免发生。但码盘的制作和安装又不可避免会有公差,为了消除非单值性误差,通常采用双电刷读数或采用循环码编码。

(2) 循环码盘

采用双电刷码盘虽然可以消除非单值性误差,但它需要一个附加的外部逻辑电路,同时使电刷个数增加一倍。当位数很多时,会使结构复杂化。并且电刷与码盘的接触磨擦,影响它的使用寿命,运动时电刷的跳动限制了它的最高转动速度和在振动条件下工作。因此,为了克服上述缺点一般采用循环码盘。

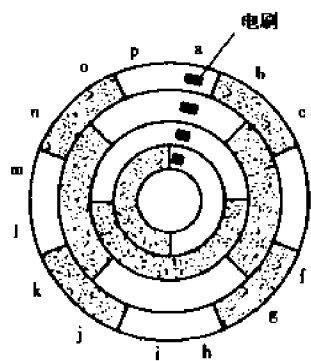


图 3-17 四位循环码盘

循环码的特点是从任何数转变到相邻数时只有一位发生变化,其编码方法与二进制不同。利用循环码的这一特点编制的码盘如图 3-17 所示。由图看出,当读数变化时只有一位数发生变化。例如电刷在 h 和 i 的交界面上,当读 h 时,若最高位超前,则读出的是 i, h 和 i 之间只相差一个单位值。这样即使码盘制作、安装不准,产生的误差也不会超过一个最低单位数,与二进制码盘相比制造和安装就要简单得多了。

循环码是一种无权码,因而不能直接输入计算机进行运算,直接显示也不符合日常习惯,因此还必须把它转换成二进制码。循环码转换成二进制码的一般关系式为:

$$\left. \begin{aligned} C_n &= R_n \\ C_i &= R_i \oplus C_{i+1} \end{aligned} \right\} \quad (3-21)$$

式中: \oplus ——不进位相加;

C_n, R_n ——二进制、循环码的最高位。

上式表明,由循环码变成二进制码 C 时,最高位不变,此后从高位开始依次求出其余各位,即本位循环码 R_i 与已经求得的相邻高位二进制码 C_{i+1} 做不进位相加,结果就是本位二进制码 C_i 。

实际应用中,大多采用循环码非接触式的光电码盘。因为这种码盘无磨损,寿命长,精度

高,测量结果与中间过程无关,所以允许被测对象以很高的速度工作,抗振、抗干扰能力强。

第二节 速度、加速度传感器

一、速度传感器

1. 测速发电机

测速发电机分交流和直流两大类,而交流测速发电机又有同步、异步之分。在机电一体化控制系统中常用的是交流异步测速发电机和直流测速发电机,下面分别加以介绍。

交流测速发电机(图 3-18)定子由两组在空间相互成 90° 角安置的绕组所构成,其中一个为励磁绕组,另一个为输出绕组,转子则为杯型结构。

当在励磁绕组上施加恒定的单相交流电压时,则从输出绕组中便会输出与转速大小成正比的交流电压信号,其值与电机中的合成磁通、输出绕组的线圈匝数、励磁电压的频率有关。

直流测速发电机(如图 3-19 所示),它由一个绕制电枢和一个带有一组整流电刷的永久磁铁定子组成。图中只表示了一个电枢绕组,实际上却有许多个。当电枢通过由永久磁铁产生的磁场时,电枢的旋转在电枢绕组里产生感应电压。输出电压可达 $20\text{mV}/(\text{r}/\text{min})$ 。直流输出电压正比于电枢的旋转速度。如果电枢速度为 ω ,测速发电机的增益为 K_1 ,那么直流输出电压 u_0 是:

$$u_0 = K_1 \omega \quad (3-22)$$

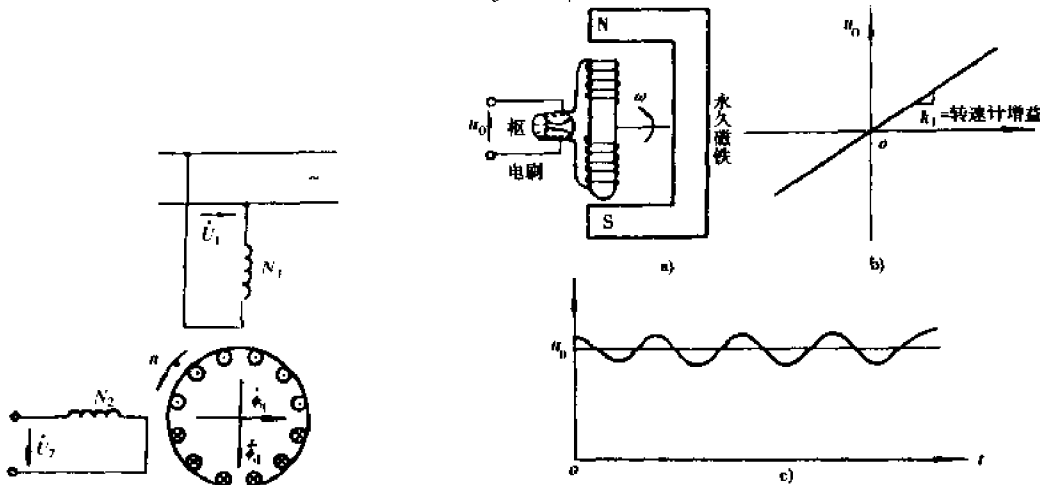


图 3-18 交流测速发电机结构原理图

图 3-19 直流转速计

电枢上电刷绕组的存在,引起一个小的交流电压叠加在发电机的直线输出电压 u_0 上,波动的大小可能达到直流电压的 5%,它的频率正比于旋转速度。对于低速和位置伺服系统,因为波动频率低且在伺服系统频带宽内,这种波动影响不大。

为了提高检测灵敏度,通常将测速发电机直接联接在电机轴上。有的 DC 和 AC 伺服电机本身就配置了测速发电机和回转编码器。

2. 直线式速度传感器

直线式速度传感器由移动磁铁和两个固定线圈构成,如图 3-20 所示。两个线圈串联反接,所以由磁铁感应的电压在磁铁的中部位置是相加而不是相减。移动磁铁速度传感器的位移通常是 5mm。磁铁可以直接安放在移动的机械部件上,不需要线路连接。在输入到控制微机

前需将电压 u_0 经 A/D 转换。

3. 光电式转速传感器

光电式转速传感器是由装在被测轴(或与被测轴相连接的输入轴)上的带缝隙圆盘、光源、光电器件和指示缝隙盘组成,如图 3-21 所示。光源发生的光通过缝隙圆盘和指示缝隙照射到光电器件上。当缝隙圆盘随被测轴转动时,由于圆盘上的缝隙间距与指示缝隙的间距相同,因此圆盘每转一周,光电器件输出与圆盘缝隙数相等的电脉冲,根据测量时间 t 内的脉冲数 N ,则可测出转速为

$$n = \frac{60N}{Zt} \quad (3-23)$$

式中: Z ——圆盘上的缝隙数;

n ——转速(r/min);

t ——测量时间(s)。

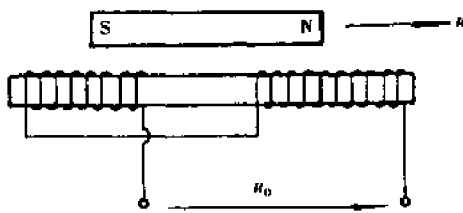


图 3-20 磁铁移动式速度传感器

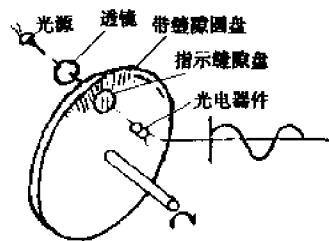


图 3-21 光电式转速传感器的结构原理图

一般取 $Zt = 60 \times 10^m$ ($m = 0, 1, 2, \dots$), 利用两组缝隙间距 W 相同, 位置相差 $(i/2 + 1/4)W$ (i 为正整数) 的指示缝隙和两个光电器件, 则可辨别出圆盘的旋转方向。

二、加速度传感器

作为加速度检测元件的加速度传感器有多种形式, 它们的工作原理都是利用惯性质量受加速度所产生的惯性力而造成的各种物理效应, 进一步转化成电量, 间接度量被测加速度。最常用的有应变式、压电式、电磁感应式等。

1. 应变式加速度传感器

电阻应变式加速度计原理结构如图 3-22 所示。它由重块、悬臂梁、应变片和阻尼液体等构成。当有加速度时, 重块受力, 悬臂梁弯曲, 按梁上固定的应变片之变形便可测出力的大小, 在已知质量的情况下即可算出被测加速度。壳体内灌满的粘性液体作为阻尼之用。这一系统的固有频率可以做得很低。

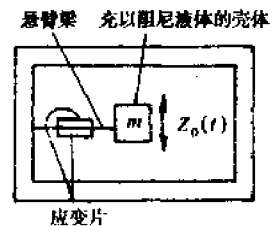


图 3-22 应变式加速度传感器

2. 压电式加速度传感器

(1) 结构与原理

图 3-23 是几种压电式加速度传感器的结构图。图中 P 是压电片, 通常也是两片并联使用, M 是质量块, S 是压紧用簧片。使用时, 将此传感器底面固结在被测物体上, 当被测物体具有一加速度 a 时, 传感器外壳 B 与被测物体同时以此加速度运动, 此时内部的质量块产生一个与被测加速度方向相反的惯性力, 其大小为 ma , 这一惯性力作用在电压片上, 使之产生变形, 而在压电片表面产生电荷。电荷量与所受惯性力成正比, 也就与相应的加速度成正比。所以可以认为这种传感器本质上也是力的测量。图中的 a)、b)、c) 为利用纵向或横向压电效

应而制作的结构;d)、e)是利用切向压电效应制作的传感器结构。剪切式压电传感器能消除横向加速度造成的干扰,是近年来发展起来的。图中 d)是环形剪切式;e)是三角切剪式,三片压电片和三个惯性质量均对称安装,使其总的输出对横向加速度干扰极不敏感。

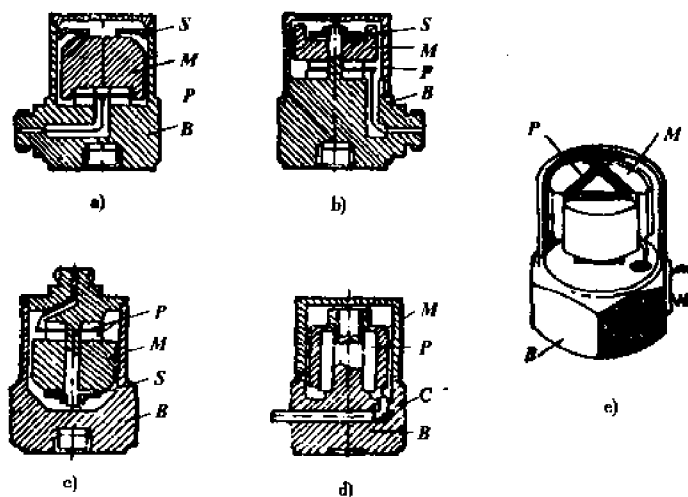


图 3-23 压电式加速度传感器

(2) 电荷的测量

压电晶体在受力变形后所产生的电荷量是极其微弱的,压电片本身的内阻很大,压电片所能输出的功率极为微弱,所以对后续放大电路有特殊的要求,主要是两个方面的要求,一是高灵敏度;二是高输入阻抗。只有满足这些要求,才能把微弱的电荷信号测量出来。所采用的形式有下列两种。

电压放大器:图 3-24 是电压放大器的等效原理电路。压电晶体片在实际使用时为了有效地集中电荷,在其工作表面上镀复以薄金属层。这样压电晶体片在接入电路后,既是一个电荷源(q),又是一个小电容器(C_a),由压电片至放大器之间的输出引线,由于两引线间存在着寄生电容(C_c),所以也在微弱电荷测量中起作用,须预考虑入等效电路,后续放大器由其输入端看过去可等效为一总的等效电容(C_i)和等效电阻(R_i)。

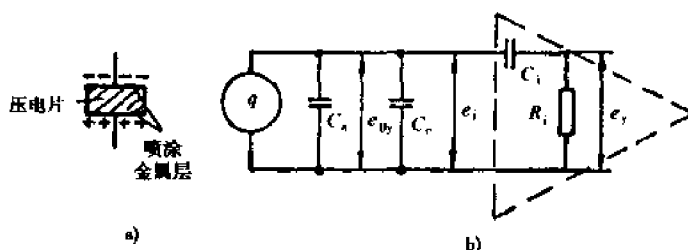


图 3-24 电压放大器

压电片在未接入电路前,如果在它两表面上存在电荷量 q ,则其两极板上的电位差为

$$e_{0y} = \frac{q}{C_a} \quad (3-24)$$

在接入后续电路后,放大器的输入电压为

$$e_i = \frac{q(C_a + C_c + C_i)}{(C_a + C_c)C_i} \quad (3-25)$$

后续放大器如果是线性放大的话,那么最终输出

$$\begin{aligned} e_y &= Ke_i \\ &= K \cdot \frac{q(C_a + C_c + C_i)}{(C_a + C_c)C_i} \end{aligned} \quad (3-26)$$

由上式可知,经放大后其电压输出一方面与输入电荷成正比,另一方面还与各部分的电容有关。公式中所含的电容中压电晶体与后续放大器的等效电容通常是不会变化的;而引出电缆线的电容是会随其长度和形状而变化的,这会给测量带来不稳定的因素;在作振动测试中如电缆随着被测物体一起振动还会引起噪声干扰。因此要使电缆长度保持不变。

电荷放大器:为解决电压放大器中寄生电容的影响,使输出电压仅取决于电荷。所以就出现了电荷放大器,其引入线路的等效电路如图 3-25a)所示,其主要的变化之处就是在放大器输入端增加一个带有反馈电容 C_f 的运算放大器。为简化起见,先将三个电容 C_a 、 C_c 和 C_i 按串并联计算折算成一个电容 C_0 ,则

$$C_0 = \frac{(C_a + C_c) C_i}{C_a + C_c + C_i} \quad (3-27)$$

这样电路可进一步简化成图 b)的形式,电荷 q 分布在 C_0 和 C_f 两个电容上,关系如下:

$$q = e_{in} C_0 + C_f (e_{in} - e_y) \quad (3-28)$$

因 e_{in} 对运算放大器作反相端输入,故

$$\frac{e_y}{e_{in}} = -K \quad (3-29)$$

式中 K 为运算放大器的增益。

将(3-29)式代入(3-28)式作简化后得

$$e_y = \frac{Kq}{C_0 - C_f(1+K)} \quad (3-30)$$

由于 K 值极大,所以 $1+K \approx K$,又 $C_f(1+K) \gg C_0$,就可以将 C_0 略去得

$$e_y \approx \frac{Kq}{-C_f K} = -\frac{q}{C_f} \quad (3-31)$$

这样,输出电压与电荷成正比。若在制作线路时使 C_f 成为一非常稳定的数值,那么输出电压就唯一地取决于电荷量 q 了。

电压放大器与电荷放大器在实际工作中均有采用,这主要是它们各有自己的优点。电荷放大器屏除了其它因素,特别是电缆电容的影响,所以输出稳定准确。不过它的线路比较复杂,价格较高;电压放大器虽受其它因素影响大,然而其线路较简单,价格较低,在一些要求不高的测量中选用。

第三节 力、扭矩和压力传感器

力、压力和扭矩是很常用的机械参量,得到了广泛的应用。按其工作原理可分为弹性式、电阻应变式、位移式和相位差式等,在以上测量方式中,电阻应变式传感器用得最为广泛。下面着重介绍常用的电阻应变式传感器。

电阻应变片式力、压力和扭矩传感器的工作原理是利用弹性敏感器元件将被测力、压力或

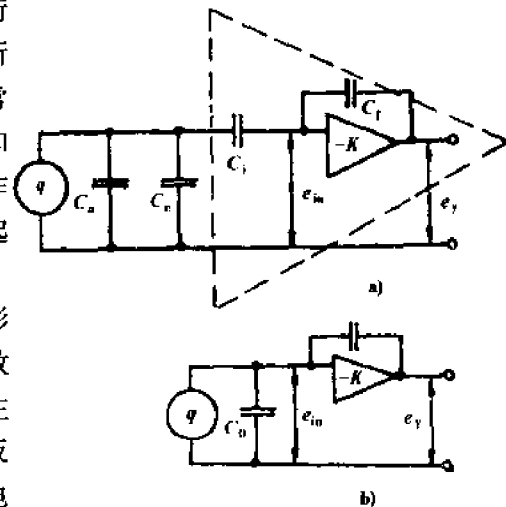


图 3-25 电荷放大器

扭矩转换为应变、位移等,然后通过粘贴在其表面的电阻应变片换成电阻值的变化,经过转换电路输出电压或电流信号。

一、力传感器

电阻应变式测力传感器是目前使用最广泛的一种测力传感器。它不仅灵敏度高,而且可用以测量力的瞬时值,另外,还可应用合理布置应变片的位置及接桥方式消除分力的相互干扰,从而使其结构简化。近年来,由于半导体应变片的出现,使灵敏度可以提高到 150~200,这样测力传感器的刚度就可大大地提高。如果设计得当,其固有频率可达数千赫,而最大负荷时的变形只有零点几微米。

电阻应变式测力传感器视弹性元件结构形式的不同,可分为柱式、环式、梁式等数种,如图 3-26 所示。柱式弹性元件的特点是结构简单,承载能力大,最大可达 10^7N ;截面形状有方形、圆形和空心等,其中空心截面的弹性元件(筒式)抗偏心和侧向力的能力强。环式弹性元件刚度大,固有频率高,沿环周应力分布变化大,且有正有负,便于接成差动电桥,提高灵敏度,一般可用于测量 10^5N 以上的大载荷。梁式弹性元件结构简单,加工容易,应变片粘贴方便,灵敏度高,故适用于测量小载荷($1\sim 10^3\text{N}$ 左右)。

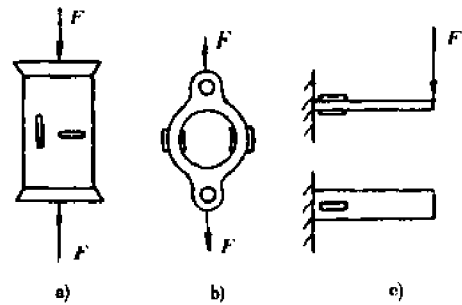


图 3-26 弹性元件结构形式
a)柱式;b)环式;c)梁式

1. 柱式力传感器

柱式力传感器分圆筒形和柱形两种,其结构是在圆筒或圆柱上按一定方式贴上应变片,如图 3-26a)。实心圆柱可以承受较大的载荷,但灵敏度较低,为了提高灵敏度,特别是在小集中应力测量时常用空心圆筒。

若在弹性元件上施加一压缩力 P ,则筒形弹性元件的轴向应变 ϵ_1 为

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma}{E} = \frac{P}{EA} \quad (3-32)$$

测量时,在轴向布置一个或几个应变片,在圆周方向布置同样数目的应变片,两者感受的是极性相反的应变,从而构成了差动对。测量电路采用全桥接线,即可排除非轴向载荷的干扰。

柱式力传感器主要用来测量拉力和压力(荷重)。采用柱式结构的传感器其测量范围从几千牛顿到几兆牛顿,精度可达 $\pm(0.3\% \sim 0.5\%)$,其中高精度的拉压力传感器精度可达 0.1%。图 3-27 为一空心柱式传感器结构图。被测力通过压头 1 直接作用在粘贴有电阻应变片的弹性体 7 上,使弹性元件产生形变,粘贴在其上的电阻应变片 6 阻值发生相应的变化,致使电桥失去平衡,电桥输出与被测力成正比的信号。

2. 环式力传感器

环式弹性元件的结构见图 3-26b)。环式弹性元件受力后产生弯曲变形,根据变形情况画出弯矩图(图 3-28)。当弹性元件的材料和结构尺寸确定后,弯矩 M 和应变 ϵ 成正比,弯矩最大的地方应变最大。由弯矩图可知,在外力作用下环上各点应力差别较大。在径向力 F_r 的作用下, A 、 B 、 C 、 D 处应变最大,与作用力 F_r 的夹角 φ 处(图 3-28 的 Q 点)的应变为零,该点称为应变节点。角度 φ 的大小和圆环厚度与平均半径之比 h/r 有关,当比值 $h/r = 0.4$ 时, φ 为 45° 。如果将圆环的下端固定,在上部施加水平力 F_h , A 点不能转动只能平移,则应变节点处于 A 、 B 、 C 、 D 点,而 Q 点应变最大。因此测量径向力 F_r 和水平力 F_h 时,应变片的粘贴位

置是不同的;另外,由于环的内外表面产生的应变极性相反,在连接电桥时必须注意。

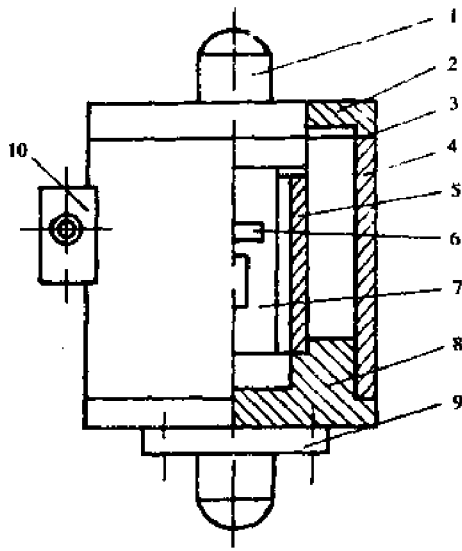


图 3-27 柱式测力传感器的结构图

1-压头;2-上盖;3-膜片;4-外套;5-过载保护套;6-电阻应变片;7-弹性体;8-底座;9-下压头;10-接线盒

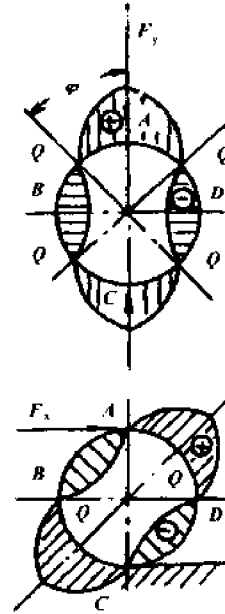


图 3-28 环的弯矩图

图 3-29 为环式测力传感器的结构图。这种结构的传感器精度高,稳定性好,可拉压两用,其载荷范围可由几百牛顿到零点几兆牛顿,精度为 0.05%。但这种传感器使用时上下受力必须是线接触,如果是面接触,将产生非线性误差。

3. 梁式力传感器

梁式弹性元件的结构有两种,一种是等截面梁,一种是等强度梁,如图 3-30 所示。

等截面梁就是梁的横截面处处相等的悬臂梁,设梁的宽度为 b ,长度为 l ,厚度为 h 。当载荷 F 作用在自由端时,梁产生弯曲变形,梁的固定端的应变最大,因此贴片应靠近固定端,贴片处的应变为

$$\epsilon = \frac{6Fl_0}{bh^2E} \quad (3-33)$$

等强度梁是一种特殊形式的悬臂梁,其特点是截面沿梁长度方向按一定规律变化。设梁的固定端宽度为 b_0 ,自由端宽度为 b ,长度为 l ,厚度为 h ,当载荷 F 作用在自由端时,距作用力任何距离的截面上应变相等。因此在长度方向上贴片的位置要求不严格,其应变值为

$$\epsilon = \frac{6Fl}{b_0h^2E} \quad (3-34)$$

图 3-31 所示为一梁式测力传感器的结构图。这种传感器具有结构简单,加工容易,应变片粘贴精度高,稳定性好等特点,并具有极强的过载保护能力,适用于测量 $5 \times 10^3 \text{N}$ 以下的载荷。

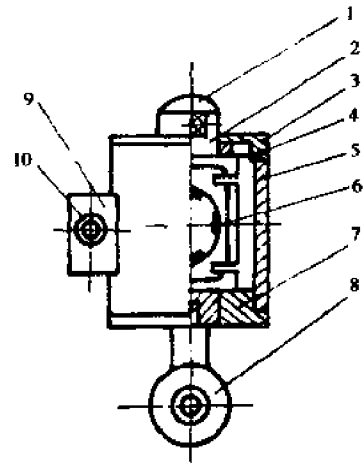


图 3-29 环式测力传感器结构图

1-压头;2-弹性体;3-保护盖;4-膜片;5-外套;6-电阻应变片;7-底座;8-拉环;9-接线盒;10-电缆

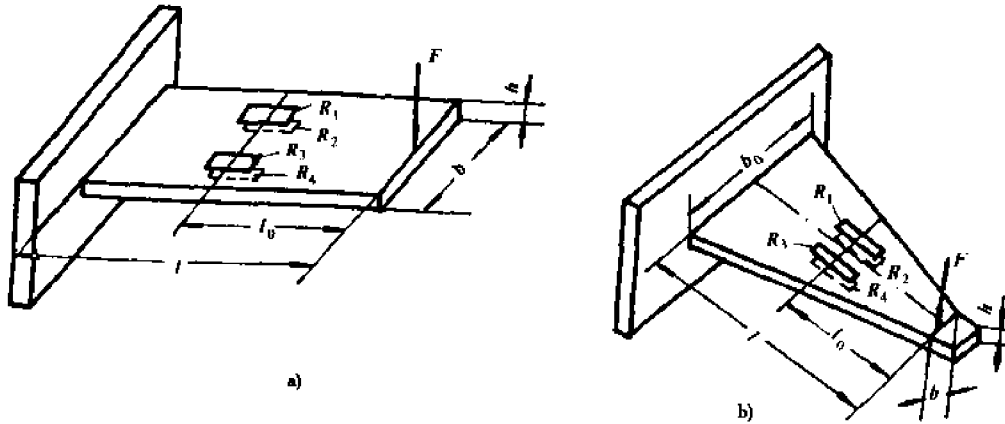


图 3-30 梁式弹性元件结构图
a)等截面梁;b)等强度梁

4. 剪切轮辐式力传感器

这种传感器的基本原理是将载荷传递到一个轮辐式的弹性元件上,通过测量轮辐上的剪应力来间接测量载荷。它的优点是精度高,滞后小,重复性好,线性好,抗偏心载荷和侧向力的能力强,结构紧凑,外形尺寸小,重量轻,输出灵敏度高,因此得到越来越广泛的应用。

如图 3-32 所示为剪切轮辐式传感器结构示意图。4 根轮辐上承受的剪力等于载荷 F 的 $1/4$,对于矩形截面的轮辐,剪应力 τ 呈抛物线形分布,在中性面上剪应力最大,其值为与中性面成 45° 方向的正应力 σ_{45° ,即

$$\sigma_{45^\circ} = \tau_{\max} = \frac{3F}{8bh} \quad (3-35)$$

式中: b, h ——轮辐截面的宽和高,一般 $h = (2.5 \sim 3)b$ 。

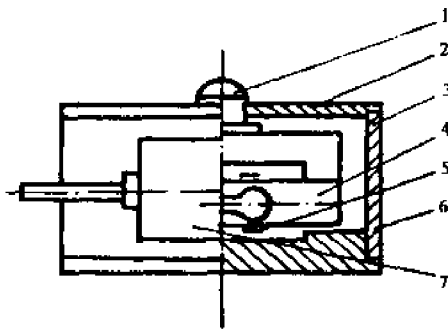


图 3-31 梁式侧力传感器结构图

1-压头;2-上盖;3-外壳;4-弹性体;5-电阻应变片;
6-底座;7-接线盒

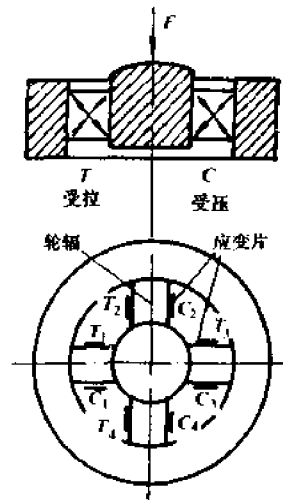


图 3-32 剪切轮辐式传感器结构示意图

由受力情况可知,应变片应粘贴在各轮辐侧面中间与中性轴线成 45° 的方向上(在正负 45° 方向,受力性质不同,分别受拉、压应力)。为了消除偏心载荷对输出的影响,相对轮辐的两个受拉应变片串联组成一个桥臂,两个受压应变片串联组成相邻的另一个桥臂,从而提高了灵敏度。

5. 应变片的合理布置和桥路连接

电阻应变式测力传感器是利用应变片作为变换器来测量弹性元件的变形量从而确定载荷的大小的,因此应变片粘贴位置是否合理、接桥方式是否恰当等都是影响能否获得预期测量结果的关键。

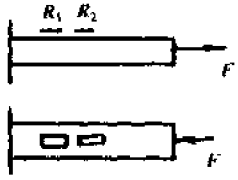
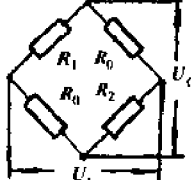
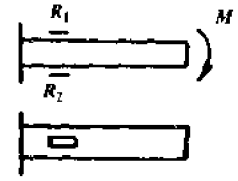
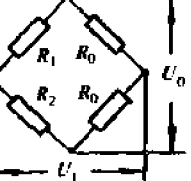
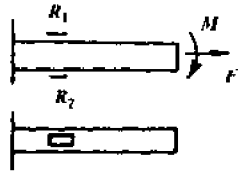
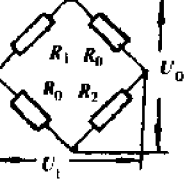
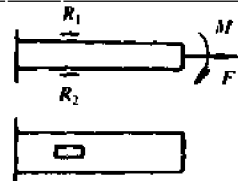
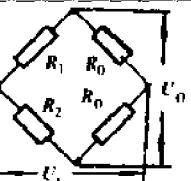
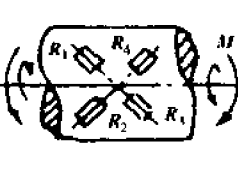
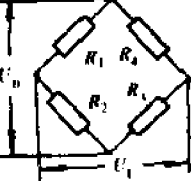
根据弹性元件受力后应力应变的分析,应变片的布置和测量电桥的连接应遵循以下原则:

- (1) 应变片应布置在弹性元件具有正负极性的应变区;
- (2) 根据弹性元件受力后应力分布情况,应变片应布置在弹性元件产生应力最大的位置,同时应注意使该处不受非待测力的干扰影响,这一点称为“机械补偿原理”。
- (3) 根据电桥和差特性,选择恰当的接桥方式,使电桥输出值最大,又能排除非待测力的影响和能进行温度补偿,且输出是与应变成正比的单值函数关系。习惯上把这种能排除干扰的作用称为“电补偿原理”。

表 3-1 给出常用测量电桥的连接方式。

常用测量电桥连接方式

表 3-1

受力情况	测试项目	应变片的布置	电桥简图	接桥方式	输出电压 U_0	桥臂系数	温度补偿
简单拉压	(a) 拉或压			半桥联接	$\frac{2\Delta R}{4R}U_i$	2	不能
纯弯曲	(b) 弯曲			半桥联接	$\frac{2\Delta R}{4R}U_i$	2	能
拉伸弯曲联合作用	(c) 测拉伸			半桥联接	$\frac{2\Delta R}{4R}U_i$	2	不能
	(d) 测弯曲			半桥联接	$\frac{2\Delta R}{4R}U_i$	2	能
扭矩弯曲联合作用	(e) 测扭矩			全桥联接	$\frac{4\Delta R}{4R}U_i$	4	能

当构件只受拉伸或压缩力时,应变片的位置可以用表 3-1 中(a)所示的方法,也可采用单臂联接,即 R_1 为工作片, R_2 为补偿片(此时 R_1 与 R_2 为邻边接法)。

当构件受纯弯曲时,应变片的布置则要使两个应变片的极性相反,用邻边接法,如表 3-1 中(b)所示,否则不能测到最大输出值。

当弹性元件同时作用着拉力和弯矩时,为了测出拉力,排除弯矩的干扰,应将上、下相对布置的两应变片接在电桥的相对两臂,如表 3-1 中(c)所示。如果要测量弯矩时,则应变片在电桥中应接在电桥的相邻两臂上,如表 3-1 中(d)所示,这样即可排除相互之间干扰的影响。

二、扭矩传感器

1. 应变式扭矩传感器

由材料力学得知,一根圆轴在扭矩 M_n 作用下,表面剪应力

$$\tau = M_n / W_n \quad (3-36)$$

式中: W_n ——圆轴抗扭断面模量。对于实心轴, $W_n = \pi d^3 / 16$; 对于空心轴, $W_n = \pi (D_0^3 - d_0^3) / 16$ 。其中 d ——实心轴直径; D_0 ——空心轴外径; d_0 ——空心轴内径; $d = d_0 / D_0$ 。

在弹性范围内,剪应变

$$\gamma = \tau / G = M_n / G W_n \quad (3-37)$$

式中: G ——剪切弹性模量。

在测量扭矩时,应变片可直接贴在传动轴上,也可贴在专用的轴上,但都需要解决下列两个问题。

(1) 应变片的贴片位置及方向

剪应变是角应变,应变片不能直接测得剪应变。但是当我们在轴的某一点上沿轴线成 45° 和 135° 的方向贴片,可以通过这两方向上测得的应变值算得剪应变值

$$\gamma = \epsilon_{45} - \epsilon_{135} \quad (3-38)$$

式中: ϵ_{45} ——沿轴线 45° 贴片测得的应变值;

ϵ_{135} ——沿轴线 135° 贴片测得的应变值。

当这两个应变片分别接在电桥相邻的两个桥臂中,从电桥的加减特性可知,应变仪的读数就是剪应变值,再根据标定曲线就可换算得扭矩值。

为了提高测量的灵敏度,并消除其它力学参数的影响,通常在传动轴上选取适当的截面,在截面的圆周方向每隔 90° 布置一个应变片。其贴片方向仍沿与轴线成 45° 和 135° 的方向,并将它们接成全桥的测量形式,参见表 3-1(e)。

(2) 扭矩信号的传输

目前常见的扭矩信号传输方式如下:

扭矩信号传输装置分类	有线传输	接触式	电刷—滑环集流装置
			水银集流装置
	无线传输	非接触式—感应式集流装置	遥测装置

电刷—滑环集流装置结构简单,坚固耐用,维修方便,但是它的接触电阻易受振动影响而波动,影响到测量精度。

水银集流装置的优点是接触电阻稳定,噪声小;但其制造精度高,密封要好。水银在高温

下工作时易蒸发逸出,对人体有毒害,因而使用受到限制。

感应集流装置的优点是无接触电阻的影响,体积小,惯性小,其缺点为易受外电磁场的干扰。

随着无线电发射技术和接收技术在测试中的应用,近年来愈来愈多地利用近程遥测装置进行扭矩测量。被测轴上固定信号发射装置,应变片接到发射装置上,应变信号通过发射装置的天线发射出去,由接收装置接收、放大并显示。

2. 相位差式扭矩传感器

从材料力学可知,相距 L 的两个断面之间产生相对扭转角 θ ,其值为

$$\theta = JM_n / GJ_n \quad (3-39)$$

式中: J_n ——断面极惯性矩。对于实心圆轴, $J_n = \pi d^4 / 32$; 对于空心圆轴, $J_n = \pi (D_0^4 - d_0^4) / 32$ 。

在扭矩 M_n 的作用下,轴上间隔一定距离的两个断面之间将产生一个相对转角 θ ,如果在两个断面上各安装一个机电信号变换器,则两个信号变换产生的电信号之间有一个相位差 $\Delta\varphi$,由于 θ 角成正比于扭矩 M_n ,相位差 $\Delta\varphi$ 又成正比于 θ ,因而相位差也正比于扭矩 M_n 。测出相位差后,根据标定就可以获得扭矩值。

3. 钢弦式扭矩传感器

一根张紧的钢弦,其固有频率为

$$f_0 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{\rho_l}} \quad (3-40)$$

式中: l ——钢弦的有效长度;

ρ_l ——钢弦的线性密度;

T ——钢弦的张力。

当张力增加 ΔT 时,钢弦的频率为

$$f_1 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T + \Delta T}{\rho_l}} = f_0 \left(1 + \frac{\Delta p}{p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3-41)$$

将上式按级数展开,且 $\Delta T / T \ll 1$ 时,略去 $\Delta T / T$ 的高次方得

$$\Delta f = f_1 - f_0 \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta T}{T} f_0 \quad (3-42)$$

该式说明,当初始的张力一定时,钢弦的频率变化量与张力增量 ΔT 近似地成正比。钢弦式测力传感器就是利用钢弦的这种性质将力转换成钢弦的固有频率的变化而测量之。

三、电阻应变式压力传感器

压力传感器主要用来测量气体和流体的压力,视其弹性元件的结构有筒式、膜片式、组合式等多种形式。

1. 筒式压力传感器

如图 3-33 所示,其中 a) 为结构示意图, b) 为筒式弹性元件,它是一个具有盲孔的薄臂圆筒,当其内部受流体或气体压力时,筒体发生变形。工作应变片 R_1 、 R_3 沿圆周方向粘贴在空心筒壁上,补偿应变片 R_2 、 R_4 粘贴在盲孔实体部分,并接成全桥。当应变筒内臂感受压力 p 时,筒外臂的周向应变为

对厚壁筒

$$\epsilon_t = \frac{(2 - \mu) d^2}{(D^2 - d^2) E} \cdot p \quad (3-43)$$

对薄壁筒 $\left(\frac{D-d}{D+d} < \frac{1}{40}\right)$

$$\epsilon_t = \frac{(2 - \mu) d}{2(D - d) E} \cdot p \quad (3-44)$$

式中: p ——压力;

D 、 d ——筒体的外径和内径;

E 、 μ ——筒体材料的弹性模量和泊松比。

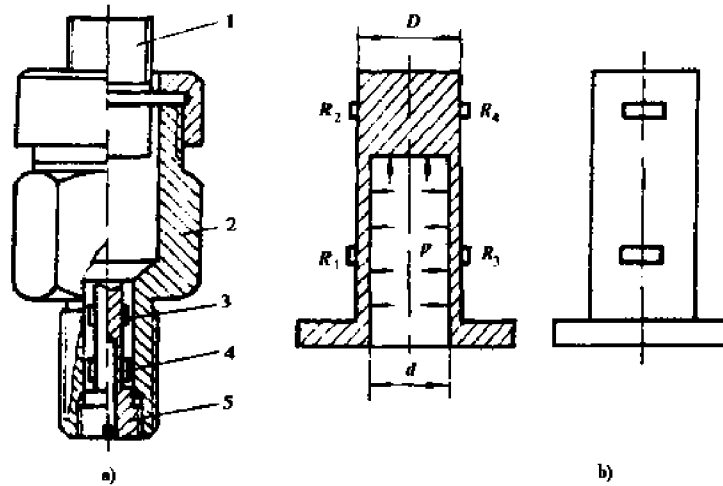


图 3-33 筒式压力传感器

a) 结构示意图; b) 筒式弹性元件

1-插座; 2-基体; 3-补偿应变片; 4-工作应变片; 5-应变筒

这种压力传感器结构简单, 制造方便, 常用于较大压力测量。BPR-10 型压力传感器采用这种结构, 可测量 (98 ~ 490) MPa 的压力, 非线性、滞后误差都很小, 输出灵敏度高。

2. 膜片式压力传感器

膜片式压力传感器结构示意图和膜片上的应力分布如图 3-34 所示。当膜片承受气体或流体压力 p 而变形时, 膜片上各点的径向应变 ϵ_r 和切向应变 ϵ_t 分别为

$$\epsilon_r = \frac{3p}{8h^2 E} (1 - \mu^2) (r^2 - 3x^2) \quad (3-45)$$

$$\epsilon_t = \frac{3p}{8h^2 E} (1 - \mu^2) (r^2 - x^2) \quad (3-46)$$

式中: r 、 h ——膜片的半径和厚度;

μ 、 E ——膜片材料的泊松比和弹性模量;

x ——膜片中心到应变片测点的距离。

从以上公式可以看出:

(1) $x = 0$ 时, 在膜片中心位置处的应变为

$$\epsilon_{\max} = \epsilon_{t\max} = \frac{3p}{8h^2 E} (1 - \mu^2) r^2$$

(2) $x = r$ 时, 在膜片边缘处的应变为

$$\epsilon_t = 0$$

$$\epsilon_{\min} = -\frac{3p}{4h^2 E}(1-\mu^2)r^2, \text{即边缘处的径向应变比中心处大1倍。}$$

(3) $x = r/\sqrt{3} = 0.58r$ 时, $\epsilon_r = 0$ 。

由应力分布规律可找到贴片方法:由于剪应变均为正,且中间最大;径向应变沿半径分布,有正有负,在中心处与剪应变相等,而在边缘处最大,为中心处的两倍;在 $x = r/\sqrt{3}$ 处 ϵ_r 为零,因此贴片时应避开 $\epsilon_r = 0$ 处。一般可在中心处沿切向贴一片,在边缘处沿径向贴一片,组成半桥接法,也可用4个应变片组成全桥以提高灵敏度并进行温度补偿,由电桥的输出可以反映压力的大小。现在已有专门用于膜片式传感器的箔式应变花,它周边的辐射状敏感栅感受很大的负应变 ϵ_r ,中间圆弧状敏感栅反映较大的正应变 ϵ_t ,两者组成半桥或全桥。

应当指出,这种膜片式弹性元件的非线性有时比较严重,即应变值与压力不完全成比例。研究发现,当载荷因数 W 满足下式时

$$W = \frac{p}{E} \left(\frac{r}{h} \right)^4 \leq 3.5 \quad (3-47)$$

非线性小于3%,即选择 r/h 应满足下式

$$\frac{r}{h} \leq \left(\frac{r}{h} \right)_{w=3.5} = \sqrt[4]{3.5 \frac{E}{p}} \quad (3-48)$$

3. 组合式压力传感器

为了避免有害介质对应变片的影响,应变片可以不直接粘贴在压力感受元件上,而是由传力元件将感压元件的位移传递到贴有应变片的其他弹性元件(如悬臂梁或简支梁)上,构成组合式压力传感器。压力感受元件有膜片、波纹管、波纹膜片、弹簧管等;也可以用薄臂圆筒代替传力元件和悬臂梁以提高刚度。如BPR-2和BPR-3型压力传感器采用膜片-圆筒式结构。各种组合式压力传感器构造示意图3-35。

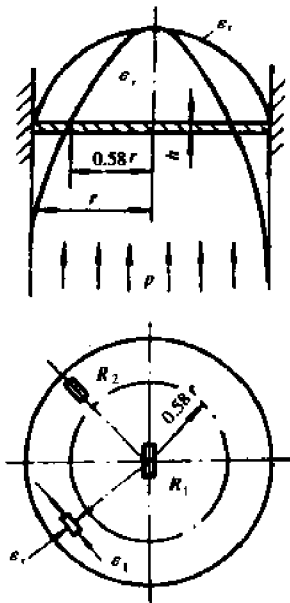


图 3-34 膜片式压力传感器

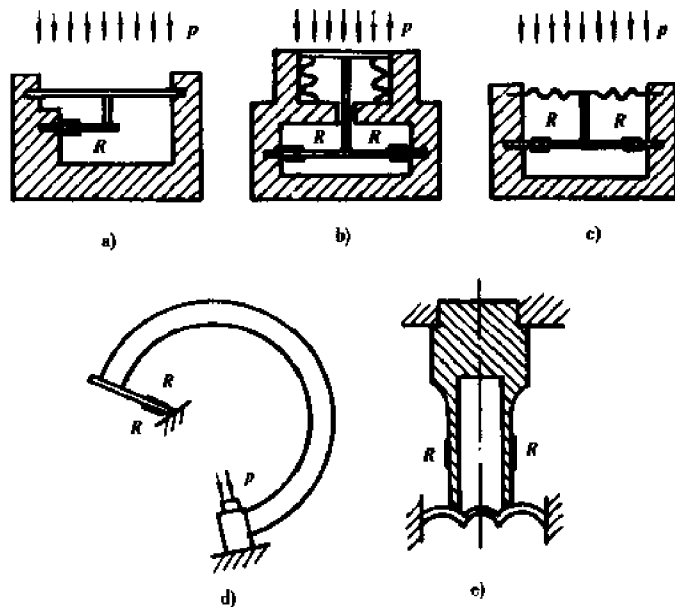


图 3-35 各种组合式压力传感器构造示意图

a)膜片;b)波纹管;c)波纹膜片;d)弹簧管;e)膜片-圆筒式

第四节 温度传感器

机械电子系统中温度控制十分重要,温度传感器包括电阻式温度传感器、电势式温度传感器和半导体温度传感器等。此外还有热敏电容式、石英测温、超声测温和色调测温等传感器。

一、电阻式温度传感器

电阻式温度计一般由金属导体构成,它的电阻随温度下降而升高;一般使用铜和铂。铂电阻的温度测量范围在 $-200 \sim 500^{\circ}\text{C}$,误差小,性能好。由于铂电阻的阻值较低,一般为 $50 \sim 100\Omega$,使用时应考虑连线的电阻值,否则会造成较大误差。一般情况下,温度计将在两极温度下 T_{\max} 和 T_{\min} 之间工作,这时的电阻分别为 R_{\min} 和 R_{\max} ,那么电阻 R 和温度 T 呈线性关系:

$$R(T) = R_{\min} + (T - T_{\min}) \left(\frac{R_{\max} - R_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \right) \quad (3-49)$$

通常选择 0°C 和 100°C 为校正温度,如果选 $T_{\min} = 0^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} = 100^{\circ}\text{C}$,那么有:

$$R(T) = R(0^{\circ}\text{C}) + KT \quad (3-50)$$

其中 $K = \frac{R(100^{\circ}) - R(0^{\circ})}{100^{\circ}} (\Omega/^{\circ}\text{C})$ 。

图 3-36 为惠斯登电桥检测温度原理,电阻变化可能在 $40\Omega/100^{\circ}\text{C}$ 和 $100\Omega/0^{\circ}\text{C}$ 范围内。惠斯登电桥的一个臂为电阻式温度计,电桥的电压 u_0 就是由电阻式温度计测量温度的函数。

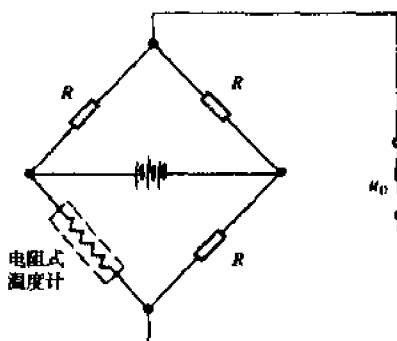


图 3-36 带有电阻式温度计的惠斯登电桥

二、半导体温度传感器

它是应用半导体的 PN 结的正向压降随温度变化的原理制成的,又称热敏电阻。

1. 热敏电阻的分类

热敏电阻是由一些金属氧化物,如锰、钴、镍、铁、铜等的氧化物,按照不同比例的配方,经高温烧结而成的。由于采用的是陶瓷制造工艺做成的具有半导体特性的电阻体,故这种热敏电阻也称为半导体热敏电阻。其结构形式有片状、杆状、珠状和薄膜状等,如图 3-37 所示。

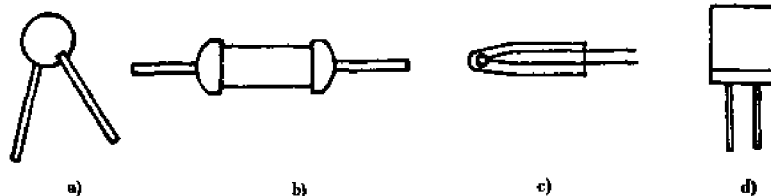


图 3-37 热敏电阻的结构形状

a) 片状; b) 杆状; c) 珠状; d) 薄膜状

一般热敏电阻比热电阻具有更大的电阻温度系数。热敏电阻有正温度系数(PTC)、负温度系数(NTC)和临界温度系数(CTR)三种,特性曲线如图 3-38 所示。

由图 3-38 可以看出,负温度系数热敏电阻(NTC)的电阻随温度增加而下降,色标标记为绿

色;临界温度系数热敏电阻(CTR)的阻值随温度增加而急剧下降,色标标记为白色;正温度系数热敏电阻(PTC)的阻值随温度增加而增大,色标标记为红色。PTC热敏电阻又可分为缓变型和开关型(PTC-S)。

2. 热敏电阻的基本特性

(1) 电阻-温度特性

热敏电阻的电阻值与温度不是线性关系,在不太宽的温度范围内,正、负温度系数热敏电阻的电阻与温度的关系可用以下公式表示

$$R_T = R_0 e^{A(T-T_0)} \quad (3-51)$$

$$R_T = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_0}\right)} \quad (3-52)$$

式中: R_T ——温度为 T (K)时的电阻值;

R_0 ——温度为 T_0 (K)时的电阻值;

A 、 B ——热敏电阻的材料常数。

热敏电阻的电阻温度系数 α_T 是指温度变化 1°C 时电阻值的相对变化量,即

$$\alpha_T = \frac{1}{R_T} \frac{dR_T}{dT}$$

正、负温度系数热敏电阻的电阻温度系数分别为

$$\alpha_T = A \quad (3-53)$$

$$\alpha_T = -\frac{B}{T^2} \quad (3-54)$$

由式(3-53)可知,正温度系数热敏电阻的电阻温度系数等于它的材料常数 A 。在工作温度范围内, α_T 不是一个严格的常数,随温度的不同略有变化,材料不同,其温度系数可以有较大差别。缓变型正温度系数热敏电阻的 α_T 值为 $0.5\% \sim 10\%$,开关型正温度系数热敏电阻的 α_T 可达 60% 或更高。

由式(3-54)可知,负温度系数热敏电阻的电阻温度系数 α_T 在工作温度范围内随温度增加迅速减小。因为 α_T 与温度 T 的平方成反比,所以灵敏度很高,在温度检测中负温度系数热敏电阻用得较广泛。

(2) 伏-安特性

图 3-39 为负温度系数热敏电阻的伏-安特性。由图可知,当通过的电流较小 ($< I_s$) 时,元件消耗的功率很小,温升可以忽略不计,热敏电阻的端电压与通过热敏电阻的电流保持线性关系,遵循欧姆定律,这一区域称为线性区。随着电流增加,功率消耗相应增大,温升增大,电阻值 R_T 增加放慢,曲线呈非线性。当电流达到 I_m 时,电压升到最大值,若继续增加电流, R_T 急剧下降,温升增加更快, R_T 的降低超过了电流 I 增加的程度,电压随电流的增加而下降,这一区域称为负阻区。

图 3-40 为正温度系数热敏电阻的伏-安特性。与负温度系数热敏电阻一样,曲线的起始段 Oa 为直线,这是由于此时通过热敏电阻的电流很小,由功率耗散引起热敏电阻的温升可以忽略不计。当耗散功率继续增加时,热敏电阻温度超过了环境温度,引起电阻值增大,曲线开

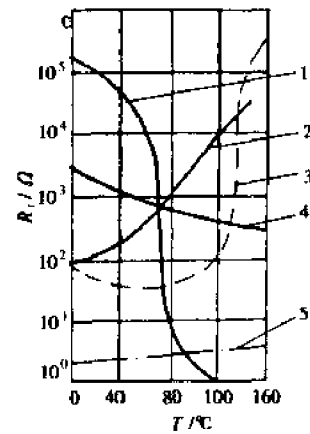


图 3-38 几种热敏电阻的典型电阻-温度特性

1-临界温度系数;2-缓变型正温度系数;3-开关型正温度系数;4-缓变型负温度系数;5-铂丝

始弯曲,当电压增至 U_m 时,对应的电流为最大电流 I_m 。如果电压继续增加,由于温升引起电阻值的增加超过电压增加的速度,电流反而减小,曲线斜率由正变负。

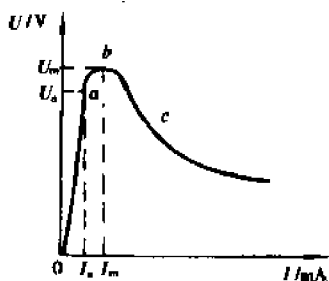


图 3-39 负温度系数热敏电阻的伏-安特性曲线

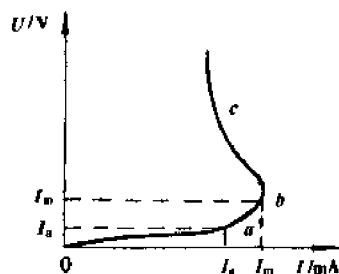


图 3-40 正温度系数热敏电阻的伏-安特性曲线

热敏电阻的伏-安特性曲线,是表征其工作状态的一个重要特性。它有助于正确选择热敏电阻的最佳工作范围。一般来说,当工作在线性区时,用于测温、控制温度和进行温度补偿;当工作在负阻区时,用于测量流量、真空度和流速等。

几种常用热敏电阻的型号及主要参数如表 3-2 和表 3-3 所示。

常用热敏电阻型号及主要参数

表 3-2

型号	主要用途	标称阻值 (kΩ)	材料常数 (K)	额定功率 (W)	时间常数 (s)	电阻温度系数 (1/°C)	工作温度 (°C)	外形
MF 11	温补,测温	0.01 ~ 15	1 982 ~ 3 600	0.25	≤ 60	$-(2.23 \times 10^{-2} \sim 4.09 \times 10^{-2})$	-40 ~ +85	片状
MZ 11	温补	0.056 ~ 100		0.25	≤ 50	$1 \times 10^{-2} \sim 8 \times 10^{-2}$	-55 ~ +125	片状
MF 15	测温	10 ~ 100	3 520 ~ 5 170	0.5	≤ 30	$-(3.95 \times 10^{-2} \sim 5.80 \times 10^{-2})$	-55 ~ +125	杆状
MZ 15	温补,测温	0.01 ~ 1		0.25	≤ 40	$0.7 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-2}$	-55 ~ +125	片状
RRC5-2	测温,控温	4.7 ~ 22	4 000	0.25	≤ 30	$-(4 \times 10^{-2} \sim \pm 1 \times 10^{-2})$	-55 ~ +125	杆状
RRC9-2	测温,控温	7.5 ~ 15		0.25	≤ 15	$-(0.9 \times 10^{-2} \sim 5.6 \times 10^{-2})$	-55 ~ +125	薄膜

稳压用负温度系数热敏电阻型号及主要参数

表 3-3

型号	主要用途	标称电压 (V)	标称工作电流 (mA)	稳压范围 (V)	时间常数 (s)	工作电流范围 (mA)	电压波动 (V)	工作温度 (°C)	外形
MF21	稳压,稳幅	2	0.5	1.6 ~ 3	≤ 35	0.2 ~ 2	≤ 0.4, 0.6	-10 ~ +70	珠状,杆状玻璃密封
MF22	稳压,稳幅	2	2	1.6 ~ 3	≤ 45	0.4 ~ 6	≤ 0.4	-10 ~ +70	珠状,杆状玻璃密封
RRW1-4	稳压	6	2	4.2 ~ 7.8	≤ 45	0.4 ~ 0.6	1.2	-10 ~ +70	珠状

3. 热敏电阻的应用

热敏电阻的电阻温度系数较大,所以灵敏度高;尺寸小,响应速度快;电阻值范围大,在 0.1 ~ 100kΩ 之间可任意选择,使用方便。但电阻-温度特性为非线性,互换性差,测温范围小,一般在 -50 ~ 200°C。

热敏电阻应用很广,可用在温度测量、温度控制、温度补偿、稳压稳幅、火灾报警、过负荷保护等方面。

三、热电偶传感器

它是利用塞贝克效应(塞贝克效应指在两种不同金属的连接点上加热时,会产生电动势,其大小与加热温度成正比)制成的温度传感器,又称电势式温度传感器。有铂—铂铑合金型(R型)、铬—铝型(K型)、铬—康铜型(E型)、铜—康铜型(T型)、铁—康铜型(J型)等。

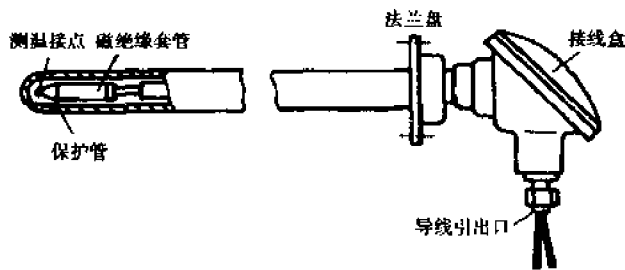


图 3-41 工业用普通热电偶

1. 热电偶的结构

热电偶的结构形式因用途不同而异。普通热电偶由于使用条件基本相似,所以已做成标准形式,如图 3-41 所示。它主要由热电极、绝缘套管、保护管和接线盒等组成。也有做成细长形可以弯曲的铠装热电偶等形式。

根据热电偶的工作原理,虽然任意两种导体都可以组成热电偶,但在实用

中为了工作可靠和具有足够的灵敏度及精度,并不是所有导体都适合作热电偶的。

表 3-4 列出了常用热电偶金属及温度测量范围。

热电偶温度范围

表 3-4

金 属	温 度 范 围
铜/康铜(Cu / Cu - Ni)	- 250 ~ + 400℃, - 400 ~ 75℃
铁/康铜(Fe / Cu - Ni)	- 200 ~ 850℃, - 350 ~ 160℃
镍铬/康铜(Ni - Cr / Cu - Ni)	- 200 ~ 850℃, - 350 ~ 160℃
镍铬/镍铝(Ni - Cr / Ni - Al)	- 200 ~ 1100℃, - 350 ~ 200℃
铂/铂铑(Pt / Pt - Rh)	0 ~ 1400℃, 50 ~ 260℃

2. 热电势的测量

图 3-42 为 R 型和 K 型热电偶的温度特性。使用热电偶时需用补偿导线。在高温中为防止腐蚀和氧化,应把热电偶置于保护管中。

图 3-43 为铜—康铜热电偶。接点温度函数的电压为:

$$u = K_1(T_h - T_c) + K_2(T_h^2 - T_c^2) \quad (3-55)$$

式中: T_h ——热接点的绝对温度;

T_c ——冷接点的绝对温度;

K_1, K_2 ——由金属材料决定的常数。

进行温度测量时,通常将一个接点保持在一定的参考温度下,所以电压将仅仅是另一个接点温度的函数。例如冷接点可以浸入冰和水的混合液中,溶化的冰产生一个零度参考温度。参考温度也可由仪表提供,用仪表维持一个正确的可调温度环境,如图 3-43 所示。冷接点放入这个环境里,一般比室温稍高,产生的电压是热接点温度的函数,通过 A/D 转换器进行采样。一个关于接点温度 T_h 和电压的函数关系可以储存在软件或硬件

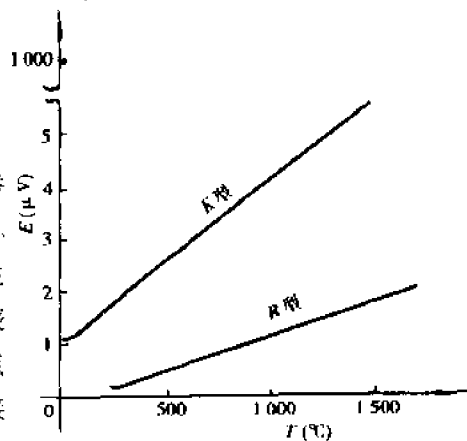


图 3-42 R 型、K 型热电偶的温度特性

里。可用数字形式测出温度,精度可达 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 。

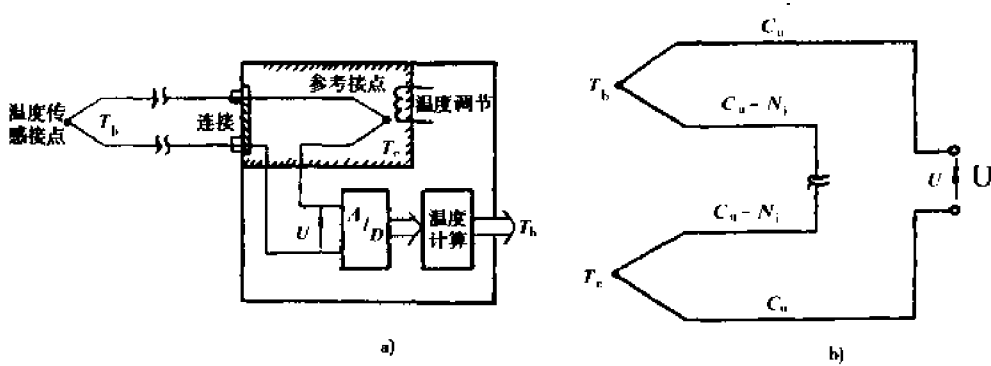


图 3-43 热电偶与使用装置

a) 使用热电偶温度传感装置; b) 铜-康铜热电偶

一般动圈式仪表、电位差计用于静态测量,自动电子电位差计,数字式测温仪用于动态测量(即温度变化较快时)。

3. 热电偶的冷端温度补偿

利用热电偶测量,实际上是用热电势的大小表示被测温度的高低,而热电势不仅与热端温度有关,而且与冷端温度有关。为了使热电势仅是热端温度的单值函数,必须使冷端温度保持不变。但实际应用中冷端离热源很近,易受测量对象和环境温度波动的影响,使冷端温度难以保持恒定不变。为此可采用下述措施消除冷端温度波动的影响。

(1) 冷端恒温法

恒温法就是把热电偶的冷端置于某种温度不变的装置中。将冷端放在冰和水混合的容器中,保持冷端为 0°C 不变。这种方法精度高,但在工程中应用很不方便,一般用于实验室。

(2) 补偿导线法

为了使冷端远离热源,免受热源的影响,就需要加长热电偶使冷端处于恒温或温度变化很小的地方。但热电偶做得过长时不但安装不便,而且若用贵金属制成,费用也太高。因此可以采用一种专门用来加长热电偶的补偿导线来加长热电偶。补偿导线在规定温度范围内的热电性能应和相配的热电偶的热电性能一致或相近。

工业上制成了专用的补偿导线,并以不同的颜色加以区别,使用时必须注意:

不同的补偿导线只能与相应型号的热电偶配用。

正负极性不能接错,否则反会增大误差。

热电偶与补偿导线两个连接点的温度必须相等,且不得超过规定的温度范围,一般为 $0\sim 100^\circ\text{C}$ 。

(3) 补偿电桥法

在热电偶测量回路中串接一个不平衡直流电桥,利用不平衡电桥产生的电势自动补偿热电偶冷端温度波动所产生的热电势变化量,这个直流电桥称为冷端温度补偿器。

补偿电桥的工作原理如图 3-44 所示。电桥的输出端与热电偶串联,并将热电偶的冷端与电桥置于同一温度场中,桥臂电阻 R_{11} 是由电阻温度系数较大

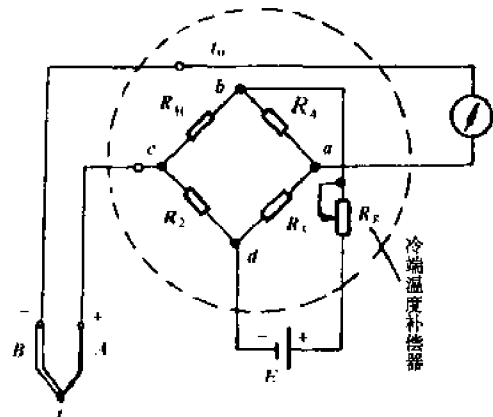


图 3-44 补偿电桥线路

的铜线或镍线绕成,其余桥臂电阻均由电阻温度系数很小的锰铜线绕成,认为它们的阻值不随温度变化。设计电桥时一般选择 20℃ 为电桥平衡温度,此时 a 、 c 两点电位相等,电桥输出电压为零。当温度不等于 20℃ 时,热电偶由于冷端温度变化使热电偶的输出电势产生的变化量若为 ΔE ,此时由于 R_{11} 阻值变化使 a 、 c 两点的电位不等,电桥的输出电压不为零,自动给出一个补偿电势 $\Delta E'$ 。因为 $\Delta E'$ 和 ΔE 大小相等、方向相反,这样便达到自动补偿目的。

第五节 位置传感器

位置传感器是检测被测对象是否已到某一位置,因此,它只需要产生能反映某种状态的开关量就可以了。位置传感器分接触式和非接触式两种。所谓接触式传感就是能获取两个物体是否已接触的信息的一种传感器;而非接触式传感器是用来判别在某一范围内是否有某一物体的一种传感器。

一、接触式位置传感器

这类传感器由微动开关之类的触点器件构成,它分以下两种。

1. 由微动开关制成的位置传感器

它用于检测物体位置,有如图 3-45 所示的几种构造和分布形式。

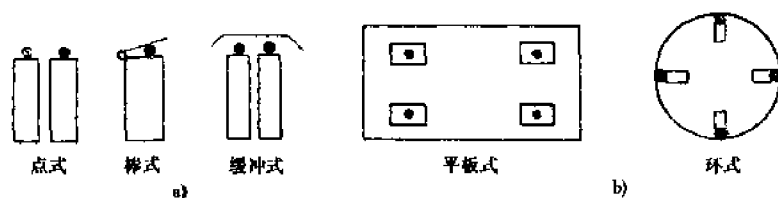


图 3-45 微动开关制成的位置传感器
a) 构造; b) 分布形式

2. 二维矩阵式配置的位置传感器

如图 3-46 所示,它一般用于机器人手掌内侧。在手掌内侧常安装有多个二维触觉传感器,用以检测自身与某一物体的接触位置,被握物体的中心位置和倾斜度,甚至还可识别物体的大小和形状。

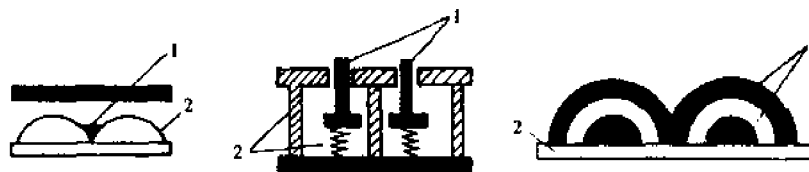


图 3-46 二维矩阵式配置的位置传感器
1-柔软电极; 2-柔软绝缘体

二、非接触式位置传感器

非接触式位置传感器按其工作原理主要有电磁式、光电式、静电容式、气压式、超声波式等,这里主要介绍光电式位置传感器。

1. 光位置传感器

半导体光位置传感器是一种对其感光面上入射光位置敏感的器件,当光线在器件感光面上的位置不同时输出的电流不同。

光位置传感器的结构原理如图 3-47 所示。它是一个具有均匀电阻薄层的平面型 PN 结光电二极管。当光线照射到光电二极管的某一位置 C 时,结区的光电子向 N 层运动,空穴向 P 层运动,到达 P 层的空穴分成两部分,一部分沿表面电阻 R_A 流向 A 端,形成光电流 I_A ;另一部分空穴沿表面电阻 R_B 流向 B 端,形成光电流 I_B 。当电阻层均匀分布时

$$R_A/R_B = x/(L-x)$$

而

$$I_B/I_A = R_A/R_B$$

则

$$x = \frac{I_B}{I_A + I_B} L \quad (3-56)$$

故只要测出 I_A 和 I_B 就可求出光线照射的位置。

光位置传感器的基本被测量是位置,但也可以测量位移、距离、振动、运动轨迹等参数,常用于机械加工的定位装置,也可作为机器人的眼睛,控制机器人的手臂运动。

2. 光电开关式位置传感器

这种传感器又称光学斩波器,它是将红外发光元件和光电元件组装在一起,典型的光电开关结构如图 3-48 所示。图 3-48a)是一种透射式的光电开关,两管之间有一间隙,发光元件和接收元件的光轴是重合的。当被测物体位于或通过间隙时,遮断光路,输出端产生电平变化,起到检测的作用。图 3-48b)是一种反射式的光电开关,它的发光元件和接收元件的光轴在同一平面上且以某一角度相交,交点一般即为待检物的所在处。当有物体经过时,接收元件可接收到从物体表面反射的光,使输出产生电平变化。

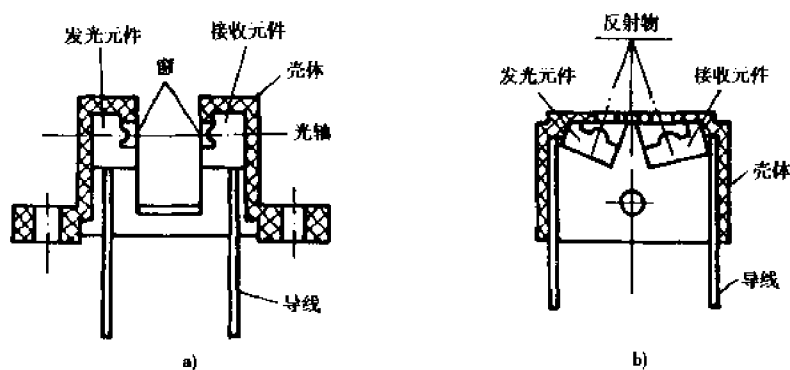


图 3-48 光电开关结构原理

a)透射式光电开关;b)反射式光电开关

用光电开关检测物体时,一般只要求其输出信号有“高一低”电平之分即可,图 3-49 为应用电路。在工程机械领域内主要用于自动换挡、电子控制液压力换挡及振动压路机行驶与起振系统自适应控制等。

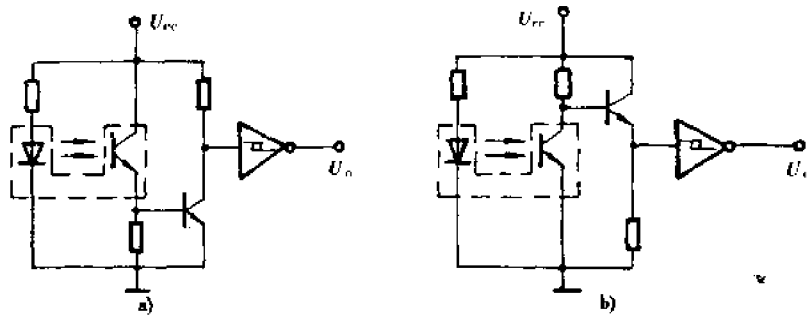


图 3-49 光电开关的应用电路

光电开关的特点是小型、高速、非接触,而且与 TTL、MOS 等电路相匹配,使用方便。

3. 光电耦合器

光电耦合器是由一个发光元件和一个光电元件共同封装在一个外壳内组成的复合型转换元件。它能够以光为媒介耦合与传递电信号,也能够隔离(绝缘)开电路的输入与输出端。因此又称为光电隔离器。

光电耦合器有金属封装和塑料封装两种结构形式,如图 3-50 所示。发光部分一般采用砷化镓红外发光二极管,由于受光器件不同,因而产生了不同类型的光电耦合器,如图 3-51 所示。

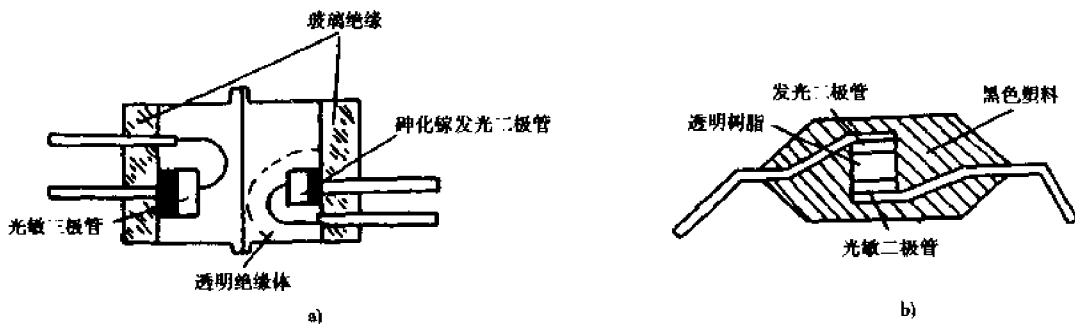


图 3-50 光电耦合器的结构

a) 金属封装; b) 塑料封装

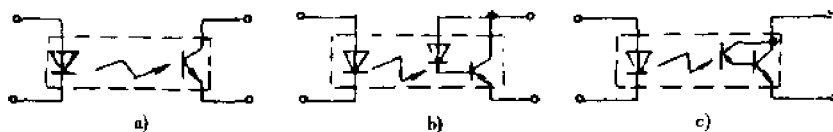


图 3-51 光电耦合器的组合形式

光电耦合器的一个重要特性参数是 CTR , 称为电流传输比。它是指输出管的工作电压为规定值时, 输出电流 I_c 和发光二极管正向电流 I_F 之比, 用%表示。图 3-51 中, a) 的 $CTR \leq 3\%$; b) 的 CTR 可达 150% ; c) 达林顿型可达 $100\% \sim 1000\%$ 。该值越大, 传输效率越高。

光电耦合器可以实现电隔离, 在电气上实现绝缘耦合, 因而提高了系统的抗干扰能力, 避免了直接耦合造成前、后级之间反馈所产生的影响; 由于它具有单向信号传输功能, 因而有脉冲转换和直流电平转换特性, 因此适用于数字逻辑中开关信号的传输和在逻辑电路中作为隔离器件及不同逻辑电路间的接口。

例一 可控硅触发电路。图 3-52 为用光电耦合器代替脉冲变压器的触发电路。当有脉

冲信号输入时,光电耦合器的发光二极管导通,通过光电耦合,由输出端控制可控硅触发,使负载电路和控制电路有良好的隔离。

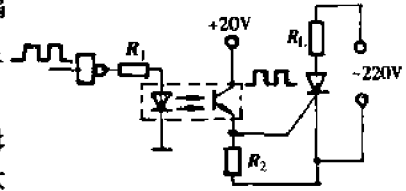


图 3-52 光电耦合器可控硅触发电路

例二 开关电路和逻辑电路接口。在开关电路和逻辑电路中往往要求输出与输入之间有良好的电隔离,实现不同电源系统之间的绝缘耦合。这对一般电子器件很难做到,但用光电耦合器却很容易实现。图 3-53 和图 3-54 分别为光电耦合器固体开关电路和光电耦合器逻辑电路。

其中图 3-53a)为常断开关在输入脉冲作用下导通的电路;图 3-53b)为常通开关在输入脉冲作用下断开的电路。光电耦合器比机械触点具有高速性和可靠性的双重优点。

图 3-54a)是用光电耦合器构成的“与门”电路,两只光电三极管相互串联,实现 $P = A \cdot B$ 逻辑“与”的关系;图 3-54b)是“或门”电路,两只光电三极管并联,实现 $P = A + B$ 的逻辑关系。

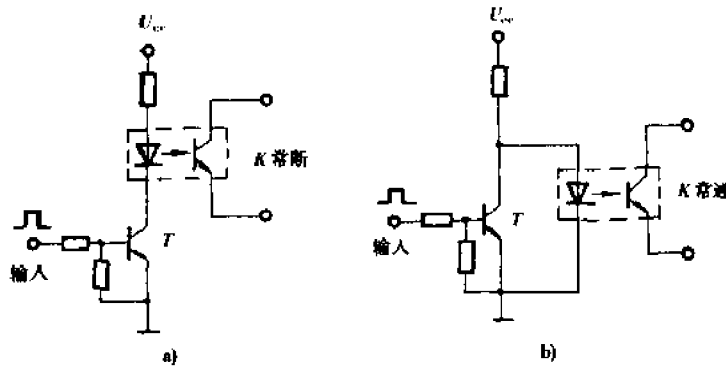


图 3-53 光电耦合器固体开关电路

a)常断开关;b)常通开关

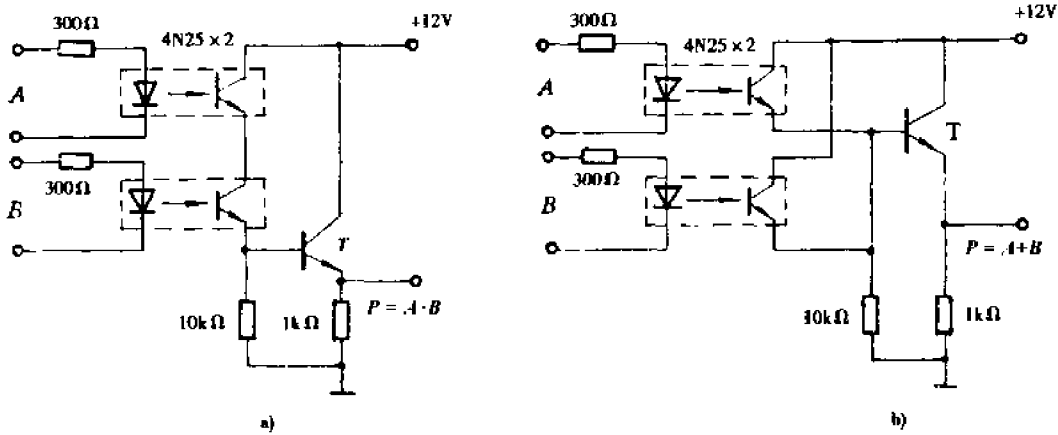


图 3-54 光电耦合器逻辑电路

a)与门;b)或门

第六节 传感器前级信号处理

传感器所感知、检测、转换和传递的信息表现形式为不同的电信号。传感器输出电信号的

参量形式可分为电压输出、电流输出和频率输出。其中以电压输出型为最多,在电流输出和频率输出传感器当中,除了少数直接利用其电流或频率输出信号外,大多数是分别配以电流—电压变换器或频率—电压变换器,从而将它们转换成电压输出型传感器。因此,本节介绍电压输出型传感器的接口电路和模拟信号的处理。

一、测量放大器

图 3-55 为三个运放组成的测量放大器,差动输入端 V_1 和 V_2 分别是两个运算放大器(A_1 、 A_2)的同相输入端,因此输入阻抗很高。采用对称电路结构,而且被测信号直接加入到输入端上,从而保证了较强的抑制共模信号的能力。 A_3 实际上是一差动跟随器,其增益近似为 1。测量放大器的放大倍数由下式确定:

$$A_v = \frac{V_o}{V_2 - V_1} \quad (3-57)$$

$$A_v = \frac{R_f}{R} \left(1 + \frac{R_{f1} + R_{f2}}{R_w} \right) \quad (3-58)$$

这种电路,只要运放 A_1 和 A_2 性能对称(主要输入阻抗和电压增益对称),其漂移将大大减小,具有高输入阻抗和高共模抑制比,适用于测量远距离传输来的信号。 R_w 是用来调整放大倍数的外接电阻,最好用多圈电位器。

AD522 主要可用于恶劣环境下要求进行高精度数据采集的场合,由于 AD522 具有低电压漂移: $2\mu\text{V}/\text{C}$; 低非线性: 0.005% ($G = 100$); 高共模抑制比: $> 110\text{dB}$ ($G = 1000$); 低噪声: $1.5\mu\text{V}$ ($P - P$) ($0.1 \sim 100\text{Hz}$); 低失调电压: $100\mu\text{V}$ 等特点,因而可用于许多 12 位数据采集系统中。图 3-56 为 AD522 典型接法。AD522 主要特点是设有数据防护端,用于提高交流输入时的共模抑制比。

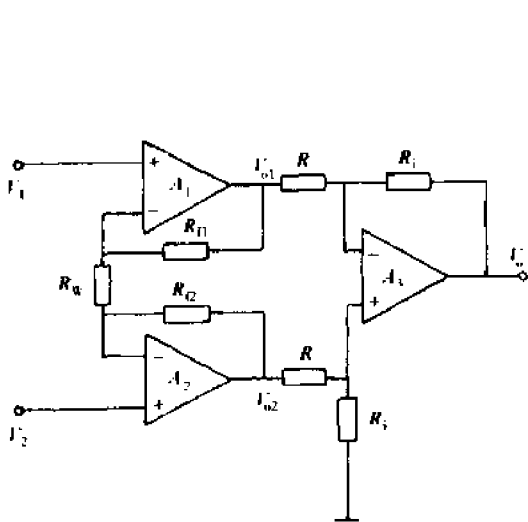


图 3-55 测量放大器原理图

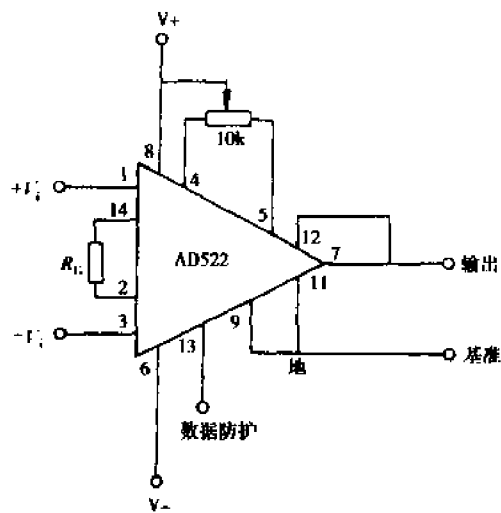


图 3-56 AD522 典型接法

二、程控增益放大器

经过处理的模拟信号,在送入计算机进行处理前,必须进行量化,即进行模拟—数字变换,变换后的数字信号才能为计算机接收和处理。

当模拟信号送到模数变换器时,为减少转换误差,一般希望送来的模拟信号尽可能大,如采用 A/D 变换器进行模数转换时,在 A/D 输入的允许范围内,希望输入的模拟信号尽可能达到最大值;然而,当被测参量变化范围较大时,经传感器转换后的模拟小信号变化也较大,在这种情况下,如果单纯只使用一个放大倍数的放大器,就无法满足上述要求;在进行小信号转换时,可能会引入较大的误差。为解决这个问题,工程上常采用通过改变放大器增益的方法,来实现不同幅度信号的放大。在计算机自动测控系统,往往不希望,有时也不可能利用手动办法来实现增益变换,而希望利用计算机采用软件控制的办法来实现增益的自动变换,具有这种功能的放大器就叫程控增益放大器(图 3-57)。

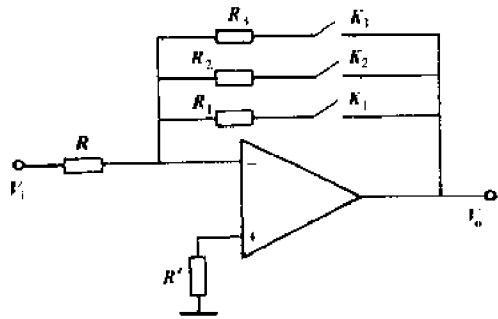


图 3-57 程控增益放大器原理图

图 3-58 即为利用改变反馈电阻的办法来实现量程变换的可变换增益放大器电路。当开关 K_1 闭合,而其余两个开关断开时,其放大倍数为

$$A_{vf} = - R_1 / R \quad (3-59)$$

而当 K_2 闭合, K_1 和 K_3 断开时,放大倍数为

$$A_{vf} = - R_2 / R \quad (3-60)$$

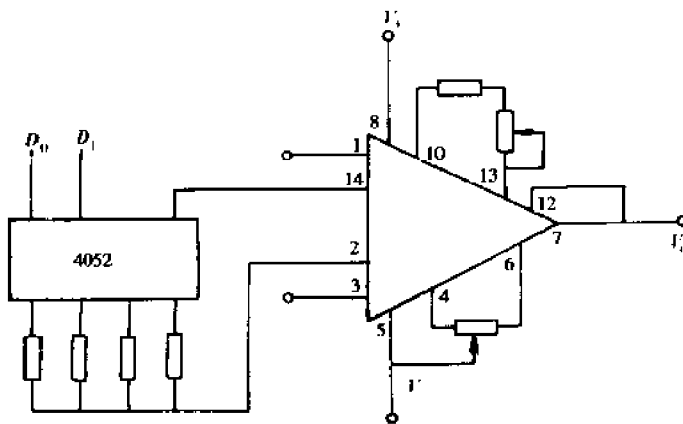


图 3-58 AD521 构成的程控增益放大器

选择不同的开关闭合,即可实现增益的变换,如果利用软件对开关闭合情况进行选择,即可实现程控增益变换。

利用程控增益放大器与 A/D 转换器组合,配合一定的软件,容易实现输出信号的增益控制或量程变换,间接地提高输入信号的分辨率。图 3-58 为利用 AD521 测量放大器与模拟开关结合组成的程控增益放大器,通过改变其外接电阻 R_c 的办法来实现增益控制。

三、信息传输中的抗干扰措施

1. 隔离放大器

在有强电或强电磁干扰的环境中,为了防止电网电压等对测量回路的损坏,其信号输入通道采用隔离技术,能完成这种任务,具有这种功能的放大器称为隔离放大器。

目前,隔离放大器中采用的耦合方式主要有两种:变压器耦合和光电耦合。利用变压器耦合实现载波调制,通常具有较高的线性度和隔离性能,但是带宽一般在 1kHz 以下。利用光电耦合方式实现载波调制,可获得 10kHz 带宽,但其隔离性能不如变压器耦合。上述两种方法均需对差动输入级提供隔离电源,以便达到预定的隔离性能。

图 3-59 为 284 型隔离放大器电路结构图。为提高微电流和低频信号的测量精度,减小漂移,其电路采用调制式放大,其内部分为输入、输出和电源三个彼此相互隔离的部分,并由低泄漏高频载波变压器耦合在一起。通过变压器的耦合,将电源电压送入输入电路并将信号从输

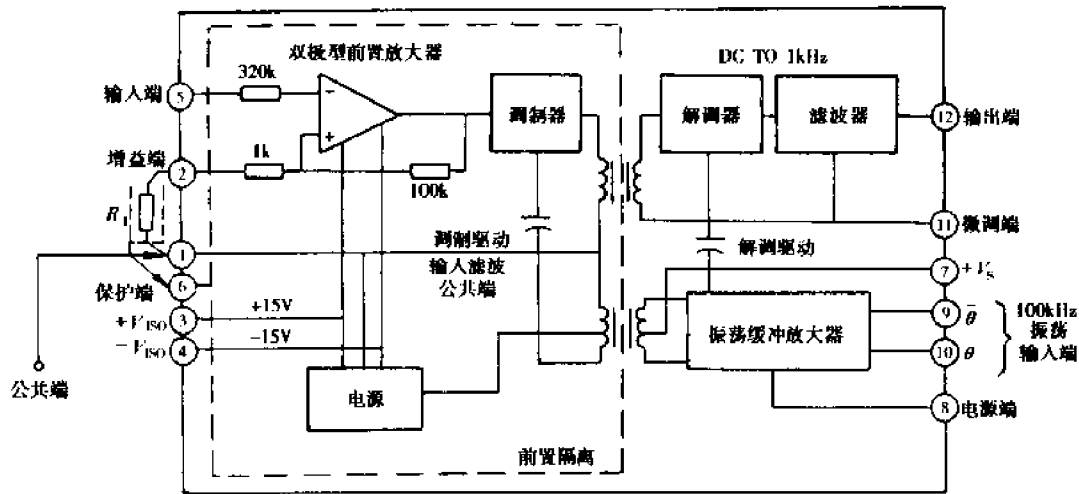


图 3-59 284 型隔离放大器电路结构图

入电路送出。输入部分包括双极型前置放大器、调制器；输出部分包括解调器和滤波器，一般在滤波器后还有缓冲放大器。

2. 滤波

滤波器是一种只允许某一频带信号通过的电路，常用 R 、 L 、 C 等元件组成各种滤波器，如低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器、等阻滤波器等。图 3-60 是几种基本的低通滤波器。

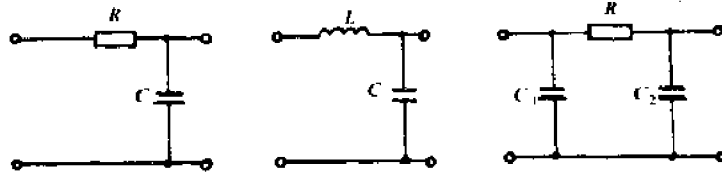


图 3-60 基本的低通滤波器

如果将图中的 R 、 L 与 C 换位，就得到高通滤波器。当有用信号与干扰信号处于不同频段时，在带有干扰信号的输入端设置一个滤波器，就可除去部分干扰信号。

在模拟传输的通道中，一般有用信号的频率比干扰信号的频率低，因此通常设置低通滤波器，以抑制高频干扰信号。图 3-61 是模拟传输通道中设置的典型低通滤波器的示意图。滤波器的频率特性与 R 、 C 的取值有关，另外它的滤波效果与干扰信号的

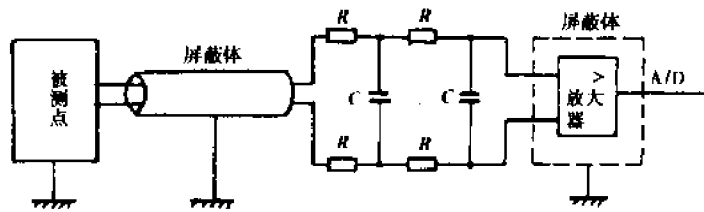


图 3-61 模拟传输通道中的滤波器

频率有关，但是在一般情况下，干扰信号是随机的和复杂的，很难确切知道它的频率范围。选取 R 、 C 以保证滤除主要干扰信号为原则，一般 $R = 30 \sim 300\Omega$ ， $C = 30 \sim 50\mu\text{F}$ 。

3. 屏蔽

屏蔽是模拟传输中抑制干扰的重要手段，屏蔽的意义既包含了屏蔽干扰源，又包含了屏蔽接收体。屏蔽设施的实现，可以利用铜或铝等低阻材料或者用磁性材料做成的容器将需要屏蔽的部分包起来，以防电或磁的相互感应。

一般情况下，模拟传输信号的幅值较低，需要用放大器，而放大器的灵敏度高，容易受到干

扰,因此放大器的屏蔽是抗干扰的重要措施。放大器的屏蔽方法就是用一个金属外壳将放大器包起来并且接地,如图 3-61 所示。由于放大器一边与传感器相连,另一边与 A/D 相接,因此在对放大器屏蔽时,必须注意:

(1)严格按照屏蔽原则,把放大器的屏蔽罩和屏蔽线的屏蔽层接到被屏蔽放大器的零电位上。

(2)一个被金属罩屏蔽起来的放大装置的外引线,必须采用屏蔽线,其屏蔽层可以认为是屏蔽罩的外延。因为屏蔽体必须处于零电位,而且由引入线送进放大器的信号常常是以外部的某点为参考点,所以屏蔽电位被确定在这个外部参考点的电位上,如图 3-62 所示。 U_s 是一个一端接大地的信号源,因此,这个包括信号线的屏蔽层在内的外延屏蔽体的接地,就必须接在大地上,接地的位置应遵循放大器的屏蔽层应该在信号与地连接处接地。

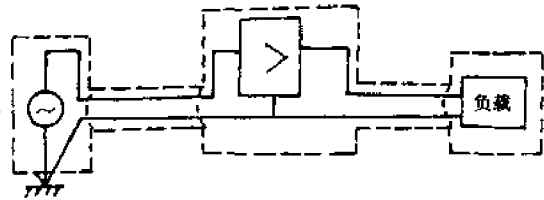


图 3-62 外延屏蔽壳的接地

(3)如果一个放大器的输入引线特别长($\geq 10\text{m}$),或采用了多级放大器,就必须将它们分段屏蔽,然后把各个屏蔽段都接到零参考电位上去。

第四章 单片机控制系统与接口技术

单片微型计算机简称单片机,又称为微控制器,是微型计算机的一个重要分支。单片机是70年代发展起来的一种大规模集成电路芯片,是集CPU、RAM、ROM、I/O接口和中断系统于同一硅片上的器件。80年代以来,随着单片机的迅速发展,已经逐渐成为工厂自动化和各控制领域支柱产品之一。

本章将论述MCS-51单片机的组成、原理、指令系统,介绍其系统扩展、接口技术,最后介绍其在沥青混凝土拌和设备中的应用。

第一节 单片机工作原理

单片机是把微型计算机主要部分都集成在一个芯片上的单片微型计算机。由于它的结构与指令功能都是按照工业控制要求设计的,故又叫单片微控制器。国外曾经一度把它称作单片微型计算机。本节介绍应用较广泛的MCS-51系列单片机工作原理。

一、MCS-51系列单片机的基本组成

MCS-51是Intel公司生产的一个单片机系列名称。该公司继1976年推出MCS-48系列8位单片机之后,又于1980年推出MCS-51系列高档8位单片机。属于这一系列的单片机芯片有8051、8031、8751、80C51BH、80C31BH等等,它们的基本组成、基本性能和指令系统都是相同的。

MCS-51系列单片机的基本结构框图如图4-1所示。

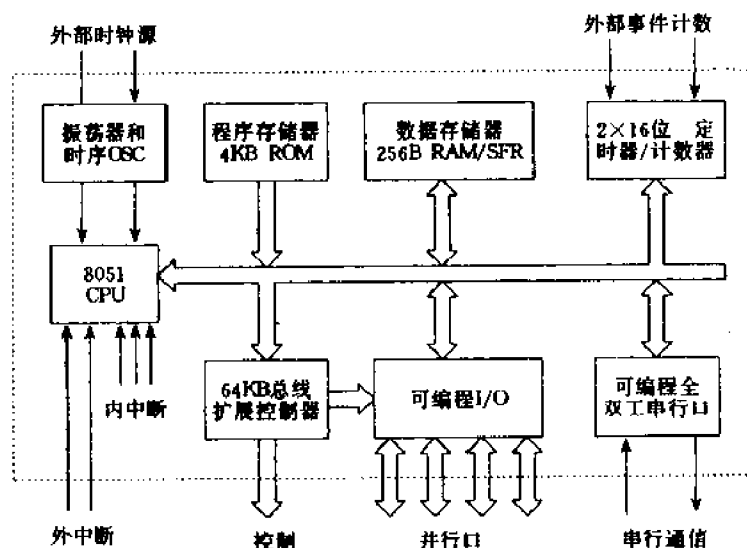


图 4-1 8051 单片机结构框图

每个单片机包括:

1. 一个 8 位的微处理器(CPU)。
 2. 片内数据存储器 RAM(128B/256B),用以存放可以读/写的数,如运算的中间结果、最终结果以及欲显示的数据等。
 3. 片内程序存储器 ROM/EPROM(4KB/8KB),用以存放程序、一些原始数据和表格。但也有一些单片机内部不带 ROM/EPROM,如 80231、8031、80C31 等。
 4. 四个 8 位并行 I/O 接口 $P_0 \sim P_3$,每个口即可以用作输入,也可以用作输出。
 5. 两个定时器/计数器,每个定时器/计数器都可以设置成计数方式,用以对外部事件进行计数,也可以设置成定时方式。
 6. 五个中断源的中断控制系统。
 7. 一个全双工 URAT(通用异步接收发送器)的串行 I/O 口,用于实现单片机之间或单片机与微机之间的串行通信。
 8. 片内振荡和时钟产生电路。最高允许振荡频率为 12MHz。
- 以上各部分通过内部数据总线相连。
- MCS—51 系列单片机各品种的性能如表 4-1 所示。

MCS—51 系列单片机性能表

表 4-1

ROM 形式			片内 ROM (B)	片内 RAM (B)	寻址范围 (B)	I/O			中断源 (个)
片内 ROM	片内 EPROM	外 接 EPROM				计数器 (个)	并行口 (个)	串行口 (个)	
8051	8751	8031	4K	128	$2 \times 64K$	$2 \times 16b$	$4 \times 8b$	1	5
80C51	87C51	80C31	4K	128	$2 \times 64K$	$2 \times 16b$	$4 \times 8b$	1	5
8052	8752	8032	8K	128	$2 \times 64K$	$2 \times 16b$	$4 \times 8b$	1	6
80C52	87C52	80C32	8K	128	$2 \times 64K$	$2 \times 16b$	$4 \times 8b$	2	15

由表 4-1 可知,8051 片内除具有 CPU 外,还包括 ROM、RAM、4 个 8 位的 I/O 口和 2 个 16 位的定时器/计数器。它的功能很强,但由于 8051 片内为掩膜 ROM,内部程序不能改写,不便于实验和开发。若要使用,需在片外扩展可改写的 EPROM。

8751 具有片内 EPROM,是真正的单片机,但价格较贵,用得较少。

8031 片内没有 EPROM,但它的市场价格很低,且只需在片外扩展一片 EPROM 就可以构成 8751,所以使用非常广泛。目前使用 MCS—51 开发产品时,绝大多数用 8031。

二、MCS—51 单片机管脚及总线结构

1. 管脚功能

MCS—51 单片机为 40 引脚芯片如图 4-2 所示。按其引脚功能可分为三部分:

(1) 电源及时钟引脚 V_{CC} 、 V_{SS} 、XTAL1、XTAL2

V_{CC} ——电源端,为 +5V。

V_{SS} ——接地端。

XTAL₁——接外部晶体的一个引脚。在片内它是振荡电路反向放大器的输入端。在采用外部时钟时,该引脚必须接地。

XTAL₂——接外部晶体的另一个引脚。在片内它是振荡电路反向放大器的输出端,振荡电路的频率就是晶体固有频率。若需采用外部时钟电路时,该引脚输入外部时钟脉冲。

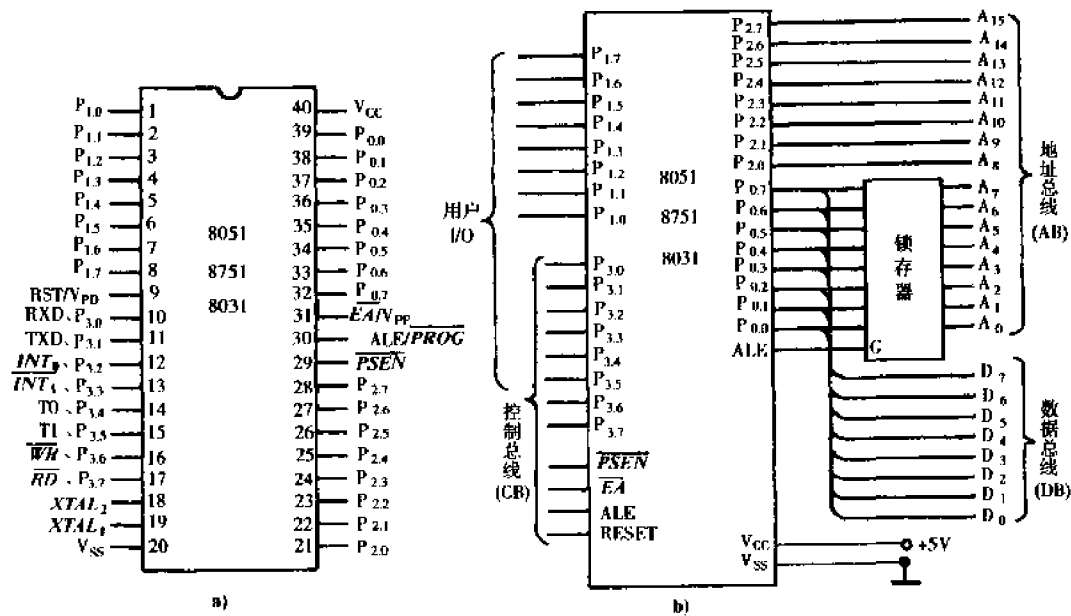


图 4-2 MCS-51 单片机引脚及总线结构

a) 引脚图; b) 引脚功能分类

(2) 控制或与其它复用引脚 \overline{PSEN} 、 $\overline{ALE/PROG}$ 、 $\overline{EA/V_{PP}}$ 、 $\overline{RST/V_{PD}}$

\overline{PSEN} ——外部程序存储器的读选通信号。在访问外部程序存储器时,此端定时输出负脉冲作为读外部程序存储器的选通信号。

$\overline{ALE/PROG}$ ——地址锁存允许信号。当访问外部存储器时,ALE 的输出用于锁存地址的低 8 位。对于 EPROM 型单片机,在 EPROM 编程期间,此引脚用于输入编程脉冲(\overline{PROG})。

$\overline{EA/V_{PP}}$ ——外部程序存储器地址允许输入端/固化编程电压输入端。 $\overline{EA/V_{PP}} = 1$ 时,访问内部程序存储器,但在 PC(程序计数器)值超过 0FFFH(8051/8751/80C51)或 1FFFH(对 8052)时,将自动转向执行外部程序存储器内的程序。当 $\overline{EA/V_{PP}} = 0$ 时,则只访问外部程序存储器,不管是否有内部程序存储器。

$\overline{RST/V_{PD}}$ ——复位信号输入端/备用电源输入端。

(3) 输入/输出口 P₀、P₁、P₂、P₃

P₀ 口(P_{0.0} ~ P_{0.7})是三态双向口,通称数据总线口。因为只有该口能直接用于对外部存储器的读/写操作。P₀ 口还用于输出外部存储器的低 8 位地址。由于是分时的输出,故应在外部加锁存器将此地址数据锁存,地址锁存信号用 ALE。

P₁ 口(P_{1.0} ~ P_{1.7})是专门供用户使用的输入/输出口,是准双向口。

P₂ 口(P_{2.0} ~ P_{2.7})是供系统扩展时作高 8 位地址线用。如果没有系统扩展,例如使用 8051/8751 单片机不扩展外部存储器时,P₂ 口也可以作为用户输入/输出口线使用。P₂ 口也是准双向口。

P₃ 口(P_{3.0} ~ P_{3.7})是双功能口,该口的每一位均可独立地定义为第一输入/输出口功能和第二输入/输出口功能。作为第一功能使用时,口的结构操作与 P₁ 口相同。表 4-2 中表示了 P₃ 口的第二功能。

P₃ 口的第二功能

表 4-2

接 口	第二功能标记	第 二 功 能	接 口	第二功能标记	第 二 功 能
P _{3,0}	RXD	串行输入口	P _{3,4}	T0	定时/计数器 0 外部输入
P _{3,1}	TXD	串行输出口	P _{3,5}	T1	定时/计数器 1 外部输入
P _{3,2}	$\overline{INT_0}$	外部中断 0 输入	P _{3,6}	\overline{WR}	外部数据存储器写选通
P _{3,3}	$\overline{INT_1}$	外部中断 1 输入	P _{3,7}	\overline{RD}	外部数据存储器读选通

输入/输出口的应用特性为:

① I/O 口线都不能用作用户 I/O 口线。除 8051/8751 外真正可完全为用户使用的 I/O 口线只有 P1 口,以及作为多功能使用时的 P₃ 口。

② I/O 的驱动能力。P₀ 口可驱动 8 个 TTL 门电路;P₁、P₂、P₃ 则只能驱动 4 个 TTL 门。

③ P₃ 口是双重功能口。

2. 三总线结构

MCS—51 单片机的管脚除了电源、复位、时钟接入、用户 I/O 口、部分 P₃ 口外,其余管脚都是为实现系统扩展而设置的。这些管脚构成了三总线形式,即:

(1) 地址总线 (AB)。地址总线宽度为 16 位,因此,其外部存储器直接地址范围为 64K 字节。16 位地址总线由 P₀ 口经地址锁存器提供低 8 位地址 (A₀ ~ A₇);P₂ 口直接提供高 8 位地址 (A₈ ~ A₁₅)。

(2) 数据总线 (DB)。数据总线宽度为 8 位,由 P₀ 口提供。

(3) 控制总线 (CB)。由部分 P₃ 口的第二功能状态和 4 根独立控制线 RESET、 \overline{EA} 、ALE、 \overline{PSEN} 组成。

三、MCS—51 单片机内部结构

MCS—51 单片机内部结构如图 4-3 所示。可将其分为 CPU、存储器、I/O 端口、定时器/计数器和中断系统等五部分。

1. 中央处理单元 (CPU)

CPU 是单片机的核心,由运算器、控制器和专用寄存器组三部分电路组成。

(1) 运算器 包括一个可进行 8 位算术运算和逻辑运算的 ALU、8 位暂存器 1、暂存器 2、8 位累加器 ACC、寄存器 B 和程序状态寄存器 PSW 等。

算术逻辑部件 ALU 既可以进行加、减、乘、除四则运算,也可以进行与、或、非、异或等逻辑运算,还具有数据传送、移位、判断和程序转移等功能。

(2) 控制器 控制器包括程序计数器 PC、指令寄存器 IR、指令译码器 ID、振荡器及定时电路等。

指令寄存器用于存放从程序存储器中取出的指令码。

振荡器和定时电路用于对 IR 中指令码译码,并在 OSC 配合下产生指令的时序脉冲,以完成相应指令的执行。OSC 是控制器的核心,能为控制器提供时钟脉冲。

(3) 专用寄存器组 专用寄存器组主要用来指示当前要执行指令的内存地址、存放操作数和指令执行后的状态等。专用寄存器组主要包括程序计数器 PC、累加器 A、程序状态寄存器 PSW、堆栈指针 SP、数据指针 DPTR 和通用寄存器 B 等。

① 程序计数器 PC (Program Counter): 程序计数器是一个二进制 16 位的程序地址寄存器,专

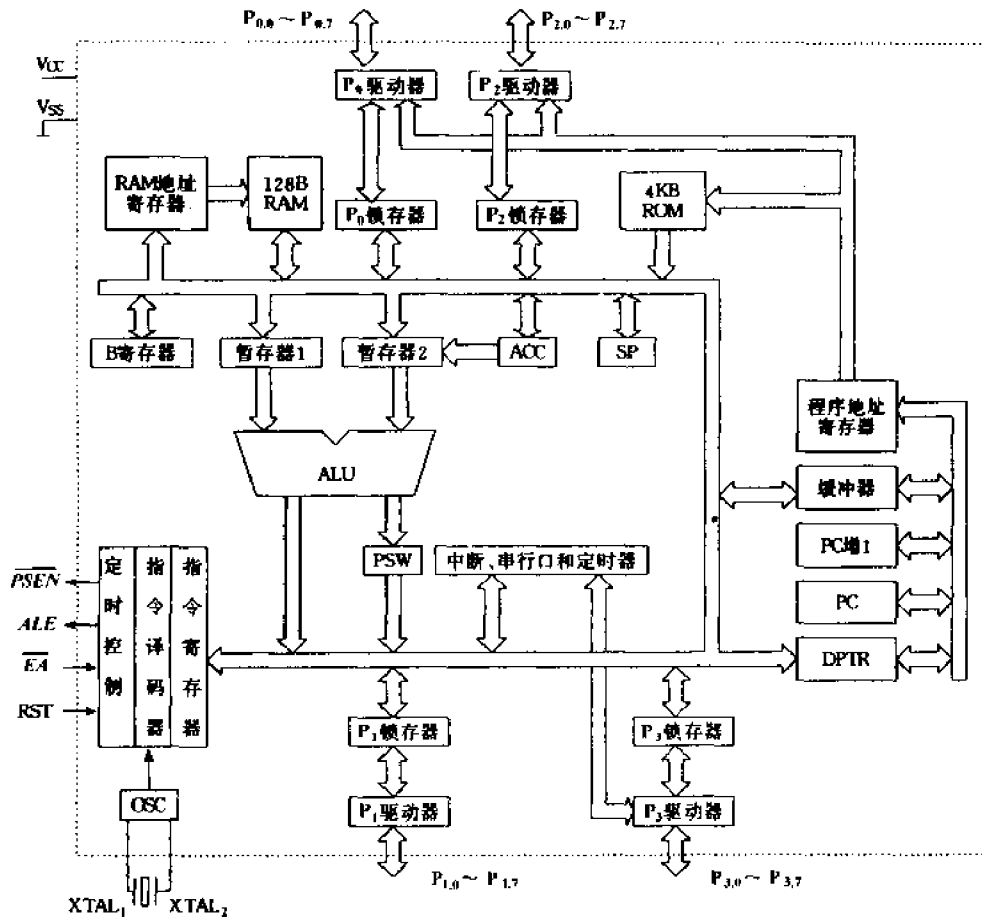


图 4-3 MCS—51 单片机内部结构

门用来存放下一条需要执行指令的内存地址,能自动加 1。

②累加器 A (Accumulator):累加器 A 又记作 ACC,是一个具有特殊用途的二进制 8 位寄存器,专门用来存放操作数或运算结果。

③通用寄存器 B (General Purpose Register):通用寄存器 B 是专门为乘法和除法设置的寄存器,也是二进制 8 位寄存器。该寄存器在乘法和除法前,用来存放乘数和除数,在乘法和除法后,用来存放乘积的高 8 位或除法的余数。

④程序状态寄存器 PSW (Program Status Word):PSW 是一个 8 位标志寄存器,用来存放指令执行后的有关状态。PSW 中的各位通常是在指令执行过程中自动形成的,但也可以由用户根据需要采用传送指令加以改变。它的各标志位定义如下:

PSW ₇	PSW ₆	PSW ₅	PSW ₄	PSW ₃	PSW ₂	PSW ₁	PSW ₀
Cy	AC	F ₀	RS ₁	RS ₀	OV	-	P

进位标志位 Cy ——用于表示加减过程中累加器最高位有无进位或借位。若有,则 Cy = 1; 否则 Cy = 0。

辅助进位位 AC ——用于表示加减运算时低四位有无向高四位进位或借位。若有,则 AC = 1; 否则 AC = 0。

用户标志位 F₀ ——用户可以根据自己的需要对此位赋予一定的含义。

寄存器选择位 RS_1 和 RS_0 ——8051 共有 8 个 8 位寄存器,分别命名为 $R_0 \sim R_7$ 。用户可以用软件改变它们的组合值,切换当前选用的工作寄存器组。其组合关系如表 4-3 所示。

RS_1, RS_0 的组合关系

表 4-3

RS_1	RS_0	寄存器组	片内 RAM 地址	RS_1	RS_0	寄存器组	片内 RAM 地址
0	0	第 0 组	00H ~ 07H	1	0	第 2 组	10H ~ 17H
0	1	第 1 组	08H ~ 0FH	1	1	第 3 组	18H ~ 1FH

溢出标志位 OV ——指示运算过程中是否发生了溢出,机器在执行指令过程中自动形成。

奇偶标志位——用于指示运算结果中 1 的个数的奇偶性。若 $P=1$,则为奇数,否则 $P=0$ 。

⑤堆栈指针 SP (Stack Pointer): SP 是一个 8 位寄存器,能自动加 1 或减 1,专门用来存放堆栈的栈顶地址。所谓堆栈,是指片内 RAM 中专门开辟出来的一个区域,用于存放数据。在堆栈中,数据的存取是以“先进后出”的原则。使用堆栈之前,先给 SP 赋值,规定栈的起始位置。 SP 指针是一个双向计数器,进栈时, SP 内容自动增加,出栈时自动减 1。

⑥数据指针 $DPTR$ (Data Pointer): $DPTR$ 是一个 16 位的寄存器,其高位字节寄存器用 DPH 表示,低位字节寄存器用 DPL 来表示。可以用来存放片内 ROM 的地址,也可以用来存放片外 RAM 和片外 ROM 的地址。

CPU 的时序如图 4-4 所示。每个机器周期(12 个振荡周期)由六个状态周期组成,而每个状态周期由两个时相 P_1, P_2 组成,所以一个机器周期可依次表示为 $S_1P_1, S_1P_2, S_2P_1, S_2P_2, \dots, S_6P_1, S_6P_2$ 。一般情况下算术逻辑操作发生在时相 P_1 期间,而内部寄存器之间的传送发生在时相 P_2 期间,图中标明的内部状态和时相表明了 CPU 指令取出和执行的时序。这些内部时钟信号无法从外部观察,故用 $XTAL_2$ 振荡信号作参考,而 ALE 可作为外部工作状态指示信号用。

对于单周期指令,读入指令寄存器时,从 S_1P_2 开始执行命令。如果他为双字节指令,则在同一机器周期的 S_4 读入第二字节,如果它为单字节指令,则在 S_4 周期读入的指令操作码无效,而且程序计数器不加 1。在任何情况下,到达 S_6P_2 时结束指令操作。图 4-4 中(A)、(B)分别为单字节单周期和双字节单周期指令的时序。MCS-51 单片机一般情况下,双字节指令都在一个机器周期内执行完,对于双周期指令,不论是单字节还是双字节都是在第一个机器周期内读完操作数,如图 4-4 中(C)(D)所示。

2. 存储器

单片机的存储器有程序存储器(ROM)与数据存储器(RAM),在使用上是严格区分的。程序存储器存放程序指令及常数、表格等;数据存储器则存放缓冲数据。

(1) 程序存储器结构及运行操作

程序存储器结构如图 4-5a)所示。可直接寻址范围为 64K 字节。对于片内有 ROM/EPROM 的单片机 8051/8751,当管脚 $\overline{EA}=1$,低 4K 地址(0000H ~ 0FFFH)指向片内; $\overline{EA}=0$ 时,则向片外。对于片内无 ROM/EPROM 的单片机 8031 构成应用系统时,必须使 $\overline{EA}=0$ 。

程序存储器的操作完全由程序计数器(PC)控制。PC 值指向程序指令操作码单元,则程序执行该操作指令;PC 值指向常数、表格单元,则实现取数、查表操作。因此,程序存储器的操作为程序运行与查表操作两类。

①程序运行控制操作:程序运行控制有复位控制、中断控制和转移控制。

复位控制与中断控制有相应的硬件结构,其程序入口地址是固定的,如表 4-4 所示。转移控制由转移指令给定,有条件转移指令与无条件转移指令,请参照指令系统表。

复位、中断入口地址

表 4-4

操 作	入 口 地 址	操 作	入 口 地 址
复 位	0000H	外部中断 INT ₁	0013H
外部中断 INT ₀	0003H	定时器中断 T ₁	001BH
定时器中断 T ₀	000BH	串行口中断	0023H

②查表操作:MCS—51 指令系统提供了两条查表指令(MOVC),其寻址方式是采用基址加偏址的间接寻址方式。

MOVC A, @A + DPTR 该指令是把 A 作为一个无符号偏址数据加到 DPTR 上,把所得的地址内容送到累加器 A 中,DPTR 作为一个 16 位的基址寄存器,执行完指令后,DPTR 的内容不变。

MOVC A, @A + PC 该指令是以 PC 作为基址寄存器,A 作为偏址数据,相加后所得数据作为地址,取出该地址内容送入累加器 A 中,该指令执行完以后 PC 值不变,仍指向下一条指令。

(2)数据存储器结构及运行操作

数据存储器结构如图 4-5b)所示。数据存储器的片内外地址重叠。但由于片内外数据存储器使用不同的指令(MOV 与 MOVX),故地址重叠不会造成操作混乱。

程序存储器的片内数据存储器与工作寄存器统一编址。

①片内数据存储器的结构及操作:片内数据存储器结构如图 4-6 所示。由工作寄存器、位寻址区、数据缓冲区组成,堆栈可在 07H 以上不使用的连续单元任意设置。片内数据存储器的复位状态及操作方法如表 4-5。片内存储器中任一单元都可以作为直接地址(direct)或间接地址(@R_i, i = 0, 1)的内容与累加器(A)、立即数进行图 4-7 所示的操作。片内数据存储器的间接寻址是通过工作寄存器 R₀、R₁ 进行的,标记为 @R_i。

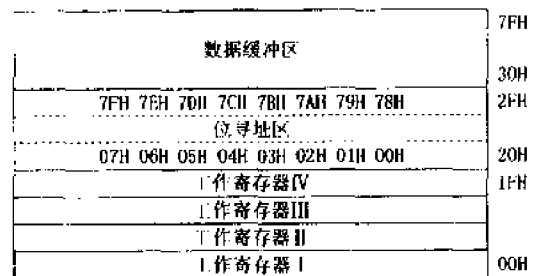


图 4-6 MCS—51 单片机片内数据存储器的结构

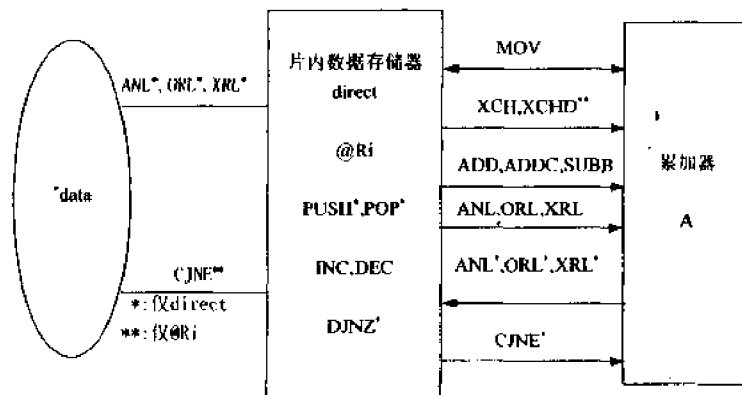


图 4-7 片内数据存储器的操作图示

片内数据存储器的复位状态及操作

表 4-5

功能单元	地址	复位状态	操作方法
工作寄存器	00H~1FH	指向I组	PSW.4, PSW.3 置位选择
堆栈	07H~	栈底为07H	SP 赋值
位寻址区	20H~2FH	随机	置位与清零
数据缓冲区	30H~7FH	随机	可直接与累加器进行传送、运算、转移等操作

②片外数据存储器的操作:片外数据存储器的最低位的128个地址单元与片内数据存储器地址重叠,并且与I/O(输入/输出)口统一编址。片外数据存储器只有间接传送指令MOVX一种操作方式。其地址指针可用DPTR或Ri,其指令如下:

MOVX @DPTR, A 和 MOVX A, @DPTR

MOVX @Ri, A 和 MOVX A, @Ri

使用Ri作地址指针时,高8位由传送指令给P₂赋值而定,低8位即为@Ri。

3. 输入/输出(I/O口)

(1) I/O口的内部结构

I/O口的每一位结构如图4-8所示,每一位均由有锁存器、输出驱动器和输入缓冲器组成。图中的上拉电阻实际上是由场效应管构成的,并不是线性电阻。

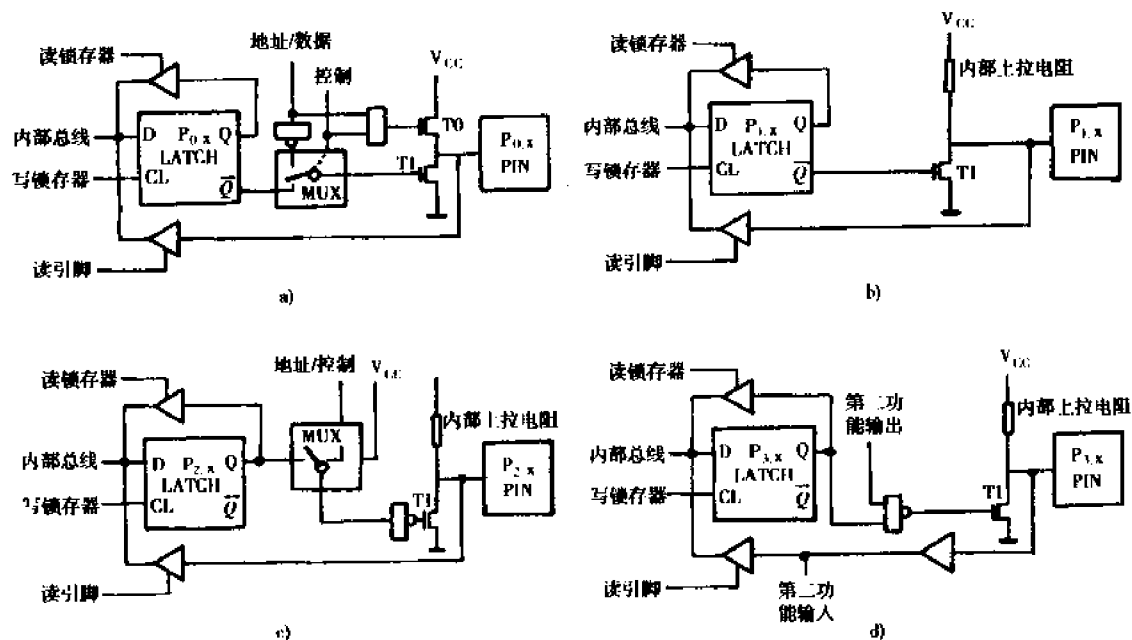


图 4-8 I/O口一位锁存器和缓冲器结构

a) P₀口的一位结构;b) P₁口的一位结构;c) P₂口的一位结构;d) P₃口的一位结构

P₀口和P₂口在对外部存储器进行读/写时要进行地址/数据的切换,故在P₀、P₂口的结构中设有多路转换器,分别切换到地址/数据和内部地址总线上,如图4-8a)、c)所示。多路转换器的切换由内部控制信号控制。

P₃口作为第一功能使用时,第二功能输出控制线应为高电平,如图4-8d)所示。这时,与非门的输出取决于口锁存器状态,P₃口的结构、操作与P₁口相同。P₃口作第二功能使用时,相应的口锁存器必须为1状态,此时,与非门的输出状态由第二功能输出控制线的状态确定,

反映了第二功能输出电平状态。

P_1 、 P_2 、 P_3 口均有内部上拉电阻,如图 4-8b)、c)、d)所示。当它们用作输入方式时,各口对应的锁存器必须先置 1,由此关断输出驱动器(场效应管)。这时 P_1 、 P_2 、 P_3 口相应引脚内部的上拉电阻可将电平上拉成高电平,然后进行输入操作;当输入为低电平时,它能拉低为低电平输入。

P_0 口与其它 I/O 口不同,内部没有上拉电阻。图中驱动器上方的场效应管仅用于外部存储器读/写时,作为地址/数据线用。其它情况下,场效应管被开路,因而 P_0 口具有开漏输出。如果再给锁存器置入“1”状态,使输出的两个场效应管均关断,使引脚处于“浮空”,成为高阻状态。

由于 P_1 、 P_2 、 P_3 口内部均有固定的上拉电阻,故皆为准双向口。在作输入时,可用一般方法由任何一种 TTL 或 MOS 电路所驱动。

(2) I/O 口的读—修改—写操作

由图 4-8 可见,每个输入/输出口具有两种读入方法,即读锁存器和读引脚,并有相应的指令。读锁存器指令都是从锁存器中读取数据,进行处理,并保证处理后的数据重新写入锁存器中,这类指令成为读——修改——写指令。

在 ANL、ORL、XRL;JBC;CPL;INC、DEC;DJNZ;MOV;CLR;SETB 等指令中,当目的操作数为某一 I/O 口或 I/O 的某一位时,这些指令均为读—修改—写指令。读引脚指令一般都是以 I/O 端口为源操作数的指令,执行读引脚指令时,打开三态门,输入口状态。例如,读 P_1 口的输入状态时,读引脚指令为:MOV A, P_1 。

根据 I/O 口的结构,及 CPU 的控制,当执行读引脚操作后,口锁存器状态与引脚状态应相同;但当给口锁存器写入某一状态后,响应的口引脚是否呈现锁存器状态与外电路的连接有关。例如,用 I/O 口线驱动三极管时,该口线拉锁存器写入“1”后使三极管导通,而三极管一旦导通后,基极电平为“0”。如果该口线无读引脚操作时,口锁存器与引脚状态不一致。

(3) I/O 口的写操作及负载能力

执行改变锁存器数据的指令时,在该指令的最后一个时钟周期里将数据写入锁存器。然而输出缓冲器仅仅在每个状态周期的相位 1 (P_1) 期间采样口锁存器,因而锁存器中的新数据在下一个状态周期的相位 1 出现之前是不会出现在输出线上的。

P_1 、 P_2 、 P_3 口的输出缓冲器可驱动四个 LSTTL 电路。对于上述 HMOS 芯片单片机的输入/输出口,在正常情况下,可任意由 TTL 或 NMOS 电路驱动。HMOS 及 CHMOS 型单片机的输入/输出口由集电极开路或漏极开路的输出来驱动时,不必加上拉电阻。

P_0 口输出缓冲器能驱动 8 个 LSTTL 电路,驱动 MOS 电路需外接上拉电阻,但 P_0 口用作地址/数据总线时,可直接驱动 MOS 的输入而不必加上拉电阻。

4. 复位状态及复位电路

单片机的复位都是靠外部电路实现,在时钟电路工作后,只要 RESET 引脚上出现 10ms 以上的高电平时,单片机便实现状态复位。

(1) 寄存器的复位状态

单片机在 RESET 引脚有效电平控制下,程序计数器(PC)和特殊功能寄存器的复位状态如表 4-6 所示。单片机的复位状态不影响片内 RAM 状态,只要在引脚端保持高电平,单片机将先后复位。在复位有效期间,ALE、 \overline{PSEN} 输出高电平。

(2)单片机的复位工作状态

寄存器的复位状态

表 4-6

寄存器	复位状态	寄存器	复位状态	寄存器	复位状态	寄存器	复位状态
PC	0000H	TMOD	00H	DPTR	0000H	TL1	00H
ACC	00H	TCON	00H	P ₀ - P ₃	FFH	SCON	00H
B	00H	TH0	00H	IP	(×××0000)	SBUF	(××××××××)
PSW	00H	TLO	00H	IE	(0×××000)	PCON	(0×××000)
SP	07H	TH1	00H				

(A, B, DPTR 等)的内容作为操作数。例如:MOV A, R₀; R₀ ← A

(2)直接寻址 在指令中直接给出操作数所在存储单元的地址,称为直接寻址方式。此时,指令中的操作数部分是操作数所在地址。例如:MOV A, 3AH; (3AH) → A

(3)立即数寻址 指令操作码后面紧跟的是一字节或两字节操作数,用“#”表示,以区别直接地址。例如:MOV A, # 3A; 3AH → A

MOV DPTR, # 2000H; 2000H → DPTR

(4)寄存器间接寻址 操作数的地址事先放在某个寄存器中,寄存器间接寻址是把指定寄存器的内容作为地址,由该地址所指定的单元内容作为操作数。例如:MOV A, @R₀; (R₀) → A 若 R₀ 中的内容为 65H,此命令将片内 RAM65H 单元的内容送入 A 中。

(5)变址寻址(基址寄存器 + 变址寄存器间接寻址) 变址寻址是以某个寄存器的内容为基地址,然后在这个基地址的基础上加上地址偏移量形成真正的操作数地址。例如:MOVC A, @A + DPTR; ((A) + (DPTR)) → A 若 DPTR = 02F1H, A = 11H, 则此指令将程序存储器 02F1H + 11H = 0302H 中的内容送入 A 中。

(6)相对寻址 相对寻址只出现在相对转移指令中。相对转移指令执行时,是以当前的 PC 值加上指令中规定的偏移量 rel 而形成实际的转移地址。一般将相对转移指令操作码所在的地址成为源地址,转移后的地址称为目的地址。于是有:

$$\text{目的地址} = \text{源地址} + 2(\text{相对转移指令字节数}) + \text{rel}$$

例如:JC rel; 设 rel = 75H, Cy = 1, PC = 1000H, 则转移的目的地址为 1000H + 75H + 2H = 1077H。

(7)位寻址 采用位寻址方式的指令的操作数将是 8 位二进制数中的某一位。指令中给出的是位地址,即片内 RAM 某一单元中的一位。位地址在指令中用 bit 表示。例如:CLR bit

3. 指令系统

8051 指令系统由 111 条指令组成。如表 4-7、表 4-8、表 4-9、表 4-10、表 4-11 所示。这些指令分为五大类:数据传送指令(28 条)、算术运算指令(24 条)、逻辑运算及移位指令(25 条)、控制转移指令(17 条)、位操作指令或布尔操作指令(17 条)。在此不对每一条指令进行详细介绍,只列出指令一览表。

MCS—51 指令系统所用符号及含义:

addr11	11 位地址
addr16	16 位地址
bit	位地址
rel	相对偏移量,为 8 位有符号数(补码形式)
direct	直接地址单元(RAM, SFR, I/O)
# data	立即数
Rn	工作寄存器 R ₀ ~ R ₇
A	累加器
Ri	i = 0 或 1, 数据指针 R ₀ 或 R ₁
X	片内 RAM 中的直接地址或寄存器
@	间接寻址方式中,表示间址寄存器的符号
(x)	在直接寻址方式中,表示直接地址 X 中的内容;在间接寻址方式中,表示间址寄存器 X 指出的地址单元的内容

- 数据传送方向
- ∧ 逻辑“与”
- ∨ 逻辑“或”
- ✓ 对标志位产生影响
- × 不影响标志位

数据传送指令

表 4-7

助 记 符	功 能	对标志位的影响				字 节 数
		P	OV	AC	Cy	
MOV A, Rn	Rn → A	✓	×	×	×	1
MOV A, direct	(direct) → A	✓	×	×	×	2
MOV A, @Ri	(Ri) → A	✓	×	×	×	1
MOV A, # data	data → A	✓	×	×	×	2
MOV Rn, A	A → Rn	×	×	×	×	1
MOV Rn, direct	(direct) → Rn	×	×	×	×	2
MOV Rn, # data	data → Rn	×	×	×	×	2
MOV direct, A	A → (direct)	×	×	×	×	2
MOV direct, Rn	Rn → (direct)	×	×	×	×	2
MOV direct1, direct2	(direct2) → (direct1)	×	×	×	×	3
MOV direct, @Ri	(Ri) → (direct)	×	×	×	×	2
MOV direct, # data	data → (direct)	×	×	×	×	3
MOV @Ri, A	A → (Ri)	×	×	×	×	1
MOV @Ri, direct	(direct) → (Ri)	×	×	×	×	2
MOV @Ri, # data	data → (Ri)	×	×	×	×	2
MOV DPTR, # data16	data16 → DPTR	×	×	×	×	3
MOVC A, @A + DPTR	(A + DPTR) → A	✓	×	×	×	1
MOVC A, @A + PC	PC + 1 → PC, (A + PC) → A	✓	×	×	×	1
MOVB A, @Ri	(Ri) → A	✓	×	×	×	1
MOVB A, @DPTR	(DPTR) → A	✓	×	×	×	1
MOVB @Ri, A	A → (Ri)	×	×	×	×	1
MOVB @DPTR, A	A → (DPTR)	×	×	×	×	1
PUSH direct	SP + 1 → SP, (direct) → (SP)	×	×	×	×	2
POP direct	(SP) → (direct), SP - 1 → SP	×	×	×	×	2
XCH A, Rn	A ↔ Rn	✓	×	×	×	1
XCH A, direct	A ↔ (direct)	✓	×	×	×	2
XCH A, @Ri	A ↔ (Ri)	✓	×	×	×	1
XCHD A, @Ri	A ₀ - A ₁ ↔ (Ri) ₀₋₁	✓	×	×	×	1

算术运算指令

表 4-8

助 记 符	功 能	对标志位的影响				字 节 数
		P	OV	AC	Cy	
ADD A, Rn	$A + Rn \rightarrow A$	√	√	√	√	1
ADD A, direct	$A + (\text{direct}) \rightarrow A$	√	√	√	√	2
ADD A, @Ri	$A + (Ri) \rightarrow A$	√	√	√	√	1
ADD A, # data	$A + \text{data} \rightarrow A$	√	√	√	√	2
ADDC A, Rn	$A + Rn + Cy \rightarrow A$	√	√	√	√	1
ADDC A, direct	$A + (\text{direct}) + Cy \rightarrow A$	√	√	√	√	2
ADDC A, @Ri	$A + (Ri) + Cy \rightarrow A$	√	√	√	√	1
ADDC A, # data	$A + \text{data} + Cy \rightarrow A$	√	√	√	√	2
SUBB A, Rn	$A - Rn - Cy \rightarrow A$	√	√	√	√	1
SUBB A, direct	$A - (\text{direct}) - Cy \rightarrow A$	√	√	√	√	2
SUBB A, @Ri	$A - (Ri) - Cy \rightarrow A$	√	√	√	√	1
SUBB A, # data	$A - \text{data} - Cy \rightarrow A$	√	√	√	√	2
INC	$A + 1 \rightarrow A$	√	×	×	×	1
INC Rn	$Rn + 1 \rightarrow Rn$	×	×	×	×	1
INC direct	$(\text{direct}) + 1 \rightarrow (\text{direct})$	×	×	×	×	2
INC @Ri	$(Ri) + 1 \rightarrow (Ri)$	×	×	×	×	1
INC DPTR	$DPTR + 1 \rightarrow DPTR$	×	×	×	×	1
DEC A	$A - 1 \rightarrow A$	√	×	×	×	1
DEC Rn	$Rn - 1 \rightarrow Rn$	×	×	×	×	1
DEC direct	$(\text{direct}) - 1 \rightarrow (\text{direct})$	×	×	×	×	2
DEC @Ri	$(Ri) - 1 \rightarrow (Ri)$	×	×	×	×	1
MUL AB	$A \cdot B \rightarrow AB$	√	√	×	0	1
DIV AB	$A/B \rightarrow AB$	√	√	×	0	1
DAA	对 A 进行十进制调整	√	×	√	√	1

逻辑运算指令

表 4-9

助 记 符	功 能	对标志位的影响				字 节 数
		P	OV	AC	Cy	
ANL A, Rn	$A \wedge Rn \rightarrow A$	√	×	×	×	1
ANL A, direct	$A \wedge (\text{direct}) \rightarrow A$	√	×	×	×	2
ANL A, @Ri	$A \wedge (Ri) \rightarrow A$	√	×	×	×	1
ANL A, # data	$A \wedge \text{data} \rightarrow A$	√	×	×	×	2
ANL direct, A	$(\text{direct}) \wedge A \rightarrow (\text{direct})$	×	×	×	×	2
ANL direct, # data	$(\text{direct}) \wedge \text{data} \rightarrow (\text{direct})$	×	×	×	×	3
ORL A, Rn	$A \vee Rn \rightarrow A$	√	×	×	×	1
ORL A, direct	$A \vee (\text{direct}) \rightarrow A$	√	×	×	×	2

续上表

助 记 符	功 能	对标志位的影响				字 节 数
		P	OV	AC	Cy	
ORL A, @Ri	$A \vee (Ri) \rightarrow A$	✓	×	×	×	1
ORL A, # data	$A \vee \text{data} \rightarrow A$	✓	×	×	×	2
ORL direct, A	$(\text{direct}) \vee A \rightarrow (\text{direct})$	×	×	×	×	2
ORL direct, # data	$(\text{direct}) \vee \text{data} \rightarrow (\text{direct})$	×	×	×	×	3
XRL A, Rn	$A \text{ 异或 } Rn \rightarrow A$	✓	×	×	×	1
XRL A, direct	$A \text{ 异或 } (\text{direct}) \rightarrow A$	✓	×	×	×	2
XRL A, @Ri	$A \text{ 异或 } (Ri) \rightarrow A$	✓	×	×	×	1
XRL A, # data	$A \text{ 异或 } \text{data} \rightarrow A$	✓	×	×	×	2
XRL direct, A	$(\text{direct}) \text{ 异或 } A \rightarrow (\text{direct})$	×	×	×	×	2
XRL direct, # data	$(\text{direct}) \text{ 异或 } \text{data} \rightarrow (\text{direct})$	×	×	×	×	3
CLR A	$0 \rightarrow A$	✓	×	×	×	1
CPL A	$A \text{ "非"} \rightarrow A$	×	×	×	×	1
RL A	$A \text{ 循环左移一位}$	×	×	×	×	1
RLC A	$A \text{ 带进位循环左移一位}$	✓	×	×	✓	1
RR A	$A \text{ 循环右移一位}$	×	×	×	×	1
RRC A	$A \text{ 带进位循环右移一位}$	✓	×	×	✓	1
SWAP A	$A \text{ 半字节交换}$	×	×	×	×	1

位 操 作 指 令

表 4-10

助 记 符	功 能	对标志位的影响				字 节 数
		P	OV	AC	Cy	
CLR C	$0 \rightarrow Cy$	×	×	×	✓	1
CLR bit	$0 \rightarrow \text{bit}$	×	×	×		2
SETB C	$1 \rightarrow Cy$	×	×	×	✓	1
SETB bit	$1 \rightarrow \text{bit}$	×	×	×		2
CPL C	$Cy \text{ 取 "非" 送 } Cy$	×	×	×	✓	1
CPL bit	$\text{bit} \text{ 取 "非" 送 } \text{bit}$	×	×	×		2
ANL C, bit	$Cy \text{ 与 } \text{bit} \text{ 相 "与" 送 } Cy$	×	×	×	✓	2
ANL C, /bit	$Cy \text{ 与 } \text{bit} \text{ 的 "非" 相 "与" 送 } Cy$	×	×	×	✓	2
ORL C, bit	$Cy \text{ 与 } \text{bit} \text{ 相 "或" 送 } Cy$	×	×	×	✓	2
ORL C, /bit	$Cy \text{ 与 } \text{bit} \text{ 的 "非" 相 "或" 送 } Cy$	×	×	×	✓	2
MOV C, bit	$\text{bit} \rightarrow Cy$	×	×	×	✓	2
MOV bit, C	$Cy \rightarrow \text{bit}$	×	×	×	×	2

控制转移指令

表 4-11

助 记 符	功 能	对标志位的影响				字 节 数
		P	OV	AC	Cy	
ACALL addr11	PC + 2 → PC, SP + 1 → SP, PCL → (SP), SP + 1 → SP, PCH → (SP), addr11 → PC ₁₀₋₀	×	×	×	×	2
LCALL addr16	PC + 3 → PC, SP + 1 → SP, PCL → (SP), SP + 1 → SP, PCH → (SP), addr16 → PC	×	×	×	×	3
RET	(SP) → PCH, SP - 1 → SP, (SP) → PCL, SP - 1 → SP	×	×	×	×	1
RETI	(SP) → PCH, SP - 1 → SP, (SP) → PCL, SP - 1 → SP, 从中断返回	×	×	×	×	1
AJMP addr11	PC + 2 → PC, addr11 → PC ₁₀₋₀	×	×	×	×	2
LJMP addr16	addr16 → PC	×	×	×	×	3
SJMP rel	PC + 2 → PC, PC + rel → PC	×	×	×	×	2
JMP @A + DPTR	(A + DPTR) → PC	×	×	×	×	1
JZ rel	PC + 2 → PC, 若 A = 0, 则 PC + rel → PC	×	×	×	×	2
JNZ rel	PC + 2 → PC, 若 A ≠ 0, 则 PC + rel → PC	×	×	×	×	2
JC rel	PC + 2 → PC, 若 Cy = 1, 则 PC + rel → PC	×	×	×	×	2
JNC rel	PC + 2 → PC, 若 Cy = 0, 则 PC + rel → PC	×	×	×	×	2
JB bit rel	PC + 3 → PC, 若 bit = 1, 则 PC + rel → PC	×	×	×	×	3
JNB bit rel	PC + 3 → PC, 若 bit = 0, 则 PC + rel → PC	×	×	×	×	3
JBC bit rel	PC + 3 → PC, 若 bit = 1, 则 0 → bit, PC + rel → PC	×	×	×	×	3
CJNE A, direct, rel	PC + 3 → PC, 若 A ≠ (direct), 则 PC + rel → PC, 若 A < (direct), 则 1 → Cy	×	×	×	×	3
CJNE A, # DATA, rel	PC + 3 → PC, 若 A ≠ data, 则 PC + rel → PC, 若 A < data, 则 1 → Cy	×	×	×	√	3

续上表

助 记 符	功 能	对标志位的影响			Cy	字节数
		P	OV	AC		
CJNE Rn, #data, rel	PC + 3 → PC, 若 Rn ≠ data, 则 PC + rel → PC, 若 Rn < data, 则 1 → Cy	×	×	×	√	3
CJNE @Ri, #data, rel	PC + 3 → PC, 若 (Ri) ≠ data, 则 PC + rel → PC, 若 (Ri) < data, 则 1 → Cy	×	×	×	√	3
DJNZ Rn, rel	Rn - 1 → Rn, PC + 2 → PC, 若 Rn ≠ 0, 则 PC + rel → PC	×	×	×	√	2
DJNZ direct, rel	PC + 2 → PC, (direct) - 1 → (direct), 若 (direct) ≠ 0, 则 PC + rel → PC	×	×	×	×	3
NOP	空操作	×	×	×	×	1

第二节 单片机接口技术

一、单片机系统扩展及接口技术

单片机的芯片内集成了计算机的基本功能部件,但片内 ROM、RAM 的容量,并行输入/输出端口,定时器及中断源等内部资源都还是有限的。根据实际需要,必须进行一些功能扩展。

由 MCS-51 系列单片机的结构可知,虽然芯片内部有 4 个 8 位输入/输出端口,但对于众多的外部设备(如键盘、显示器、开关、D/A、A/D 以及执行机构等)是远不够用的,这时就需要扩展 I/O 口线。另外,要把快速的单片机与慢速的外部设备(如打印机)很好地匹配起来,就需要在单片机与外部设备之间建立一缓冲桥梁。这种使单片机与外部设备交换信息的桥梁就叫做接口。

MCS-51 系列单片机扩展的内容主要有总线、程序存储器、数据存储器、输入/输出扩展等。8031 的系统扩展及接口结构如图 4-9 所示。

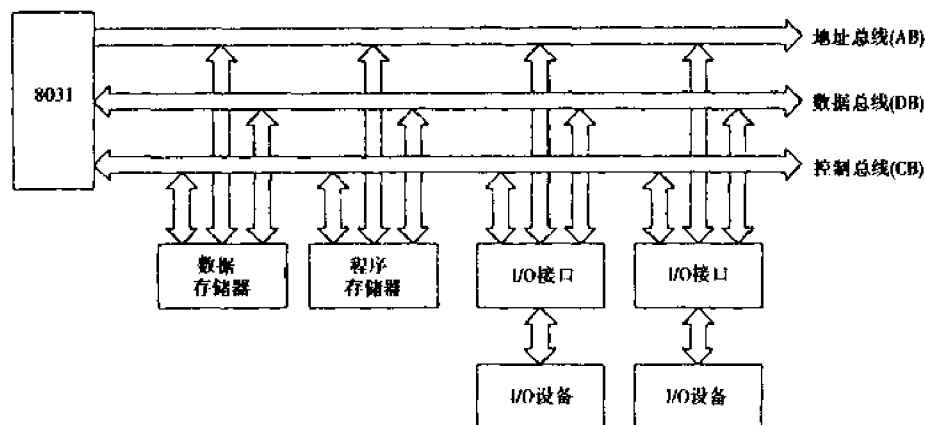


图 4-9 8031 系列系统扩展及接口结构

1. 总线的扩展

通常情况下, CPU 外部都有单独的地址总线、数据总线和控制总线, 而 MCS-51 单片机的数据线和地址线是复用的, 而且由 I/O 口线兼用。为了将它们分离出来, 需要在单片机外部增加地址锁存器, 从而构成与一般 CPU 相类似的片外三总线, 即: AB、CB、DB。其扩展连接方法如图 4-2b) 所示。

2. 程序存储器扩展

程序存储器的扩展, 对于片内无 ROM 的单片机是不可少的工作, 程序存储器扩展的容量随应用系统的要求可随意设置。当片内容量不够用时, 需要扩充外部程序存储器, 而且片内、片外的空间统一进行编址。

(1) 程序存储器扩展性能

①程序存储器有单独的地址编号(0000H ~ FFFFH), 虽然与数据存储器地址重叠, 但不会被占用; 使用单独的控制信号和指令, 程序存储器的指令、数据读取控制不用数据存储器 \overline{RD} 控制和 MOVX 指令, 而是由 \overline{PSEN} 控制, 读取数据用 MOVX 查表指令。

②随着大规模集成电路的发展, 程序存储器的容量越来越大, 所使用的芯片数量越来越少, 因此它的地址选择多半采用线选法, 而不用地址译码法。

③程序存储器与数据存储器共用地址总线与数据总线。

(2) 外部程序存储器的操作时序

MCS-51 单片机访问外部程序存储器时, 所使用的控制信号有:

ALE: 低 8 位地址锁存控制;

\overline{PSEN} : 外部程序存储器“读取”控制。

\overline{EA} : 片内、片外程序存储器访问控制。 $\overline{EA} = 1$ 时, 访问片内程序存储器; 当 $\overline{EA} = 0$ 时, 访问片外程序存储器。

访问外部程序存储器的时序如图 4-10 所示。由于在单片机中程序存储器与数据存储器是严格分开的, 因此, 程序存储器的操作时序分为两种情况: 不执行 MOVX 指令的时序和执行 MOVX 指令的时序。

当应用系统中无片外 ROM 时, 不执行 MOVX 指令, 如图 4-10a) 所示。 P_0 口作为地址线, 专门用于输出指向程序存储器的低 8 位地址 PCL。 P_2 口专门用于输出程序存储器的高 8 位地址 PCH。 P_2 口具有输出锁存功能, P_0 口除了输出地址数据外, 还要输入指令, 故要用 ALE 来锁存 P_0 口输出的地址数据 PCL, 在每个机器周期中允许地址锁存器两次有效, 在下降沿时锁存出现在 P_0 口上的低 8 位地址 PCL。同时 \overline{PSEN} 也是每个机器周期中两次有效, 用于选通外部程序存储器, 使指令读入片内。

当应用系统中接有外部数据存储器, 在执行 MOVX 指令时, 其操作时序如图 4-10b) 所示。在指令输入以前, P_2 口、 P_0 口输出的地址 PCH、PCL 指向程序存储器。在指令输入并判定是 MOVX 指令后, 在该机器周期 S_5 状态中 ALE 锁存的 P_0 口的地址数据则不是程序存储器的低 8 位, 而是数据存储器的地址。若执行的是“MOVX A, @DPTR/MOVX @DPTR, A 指令, 则此地址就是 DPL(数据指针的低 8 位), 同时, 在 P_2 口上出现的是 DPH(数据指针的高 8 位)。若执行是 MOVX A, @Ri/MOVX @Ri, A 指令时, 则此地址就是 Ri 内容, 而 P_2 口提供的是指向数据存储器高 8 位的 P_2 口内锁存器的内容, 实际上就是下条指令的高 8 位地址。在同一机器周期中将不再出现 \overline{PSEN} 有效取指信号, 下一个机器周期中 ALE 的有效锁存信号也不复出现, 而当 $\overline{RD}/\overline{WR}$ 有效时, P_0 口将读/写数据存储器中数据。

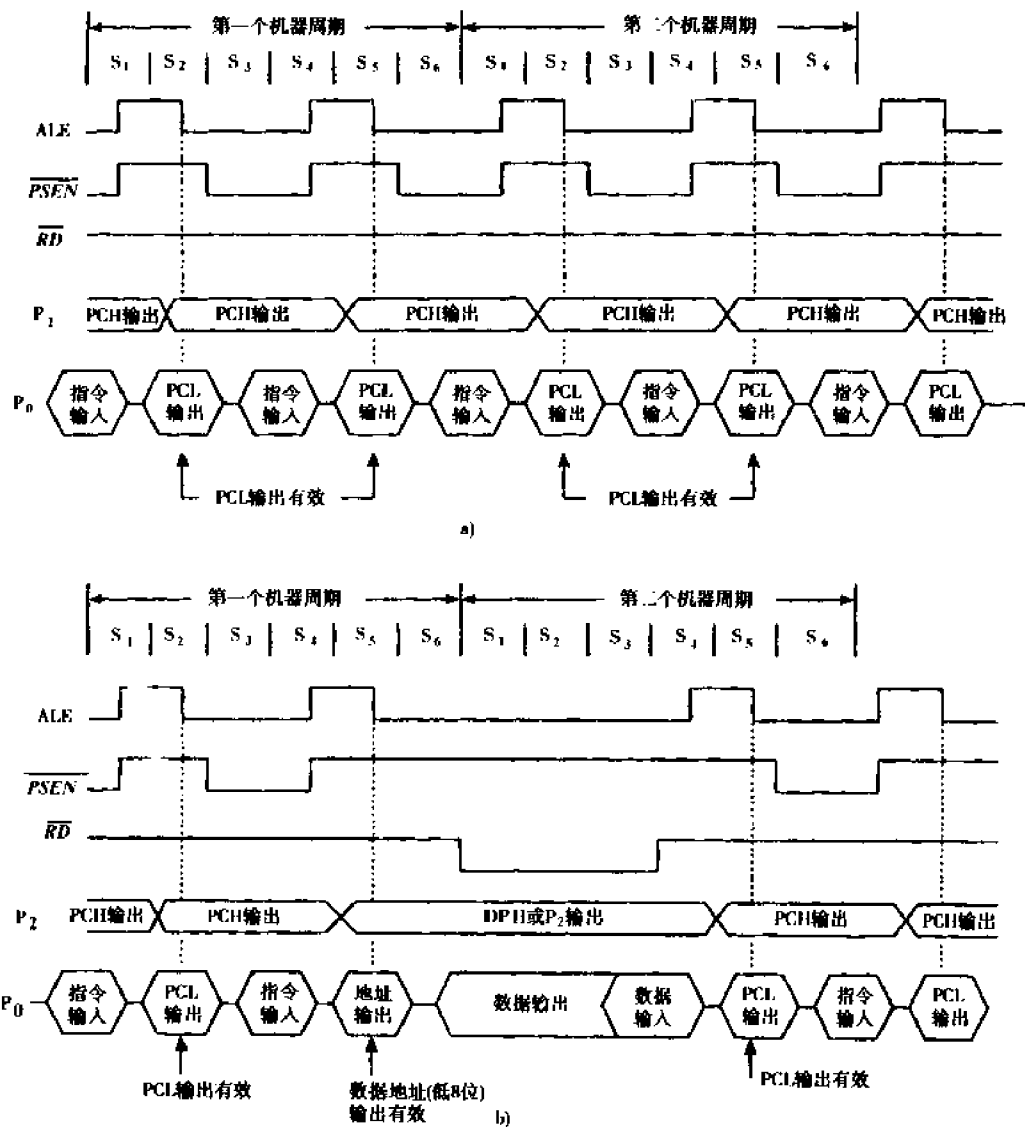


图 4-10 外部程序存储器的操作时序

a) 不执行 MOVX 指令时; b) 执行 MOVX 指令时

(3) EPROM 的基本扩展电路

用紫外线擦除可编程只读存储器 EPROM 作为单片机外部程序存储器是最为常用的程序存储器扩展方法。MCS-51 单片机应用系统中使用最多的 EPROM 程序存储器是 Intel 公司的典型系列芯片 2716(2K × 8)、2732A(4K × 8)、2764(8K × 8)、27128(16K × 8)、27256(32K × 8)、27512(64K × 8)等。程序存储器扩展时,除 EPROM 芯片外,还必须有地址锁存器芯片。

图 4-11 为 EPROM 程序存储器基本扩展电路。程序存储器扩展时,一般扩展容量不大于 256 字节,因此,EPROM 片内地址除由 P₀ 口经锁存器提供低 8 位地址线外,还需由 P₂ 口提供若干地址线。EPROM 所需地址线数决定于 EPROM 容量,EPROM 为 2K 字节时地址线为 11 根(2K = 2¹¹),4K 字节时地址线为 12 根(4K = 2¹²),依次类推。所需要的高 8 位地址线由 P₂ 口提供。

如果系统中只扩展一片 EPROM 时,无须片选控制,EPROM 片选端 \overline{CE} 接地即可。如图 4-11a) 中所示, A_n 为最高地址位,扩展 2K 时, A_n = A¹¹。如果扩展两片 EPROM 时,使用 P₂ 口的

剩余口线直接接到一片 EPROM(1)的片选端 \overline{CE} , 经过反相器后再接到另一片 EPROM(2)的片选端 \overline{CE} 上, 如图中 4-11b) 所示。

3. 数据存储器的扩展

在单片机应用系统中, 作为数据存储器使用的有静态读/写存储器 RAM、动态读/写存储器 DRAM 和 IRAM 以及 EEPROM 等。

(1) 数据存储器扩展性能

① 数据存储器与程序存储器地址重叠编号 (0000H ~ FFFFH), 使用不同的控制信号和指令。

② 由于数据存储器与程序存储器地址完全重叠, 故两者的地址总线 (无论是片内还是片选端线) 和数据总线可完全并联使用。但数据存储器只使用 \overline{WR} 、 \overline{RD} 控制线而不用 \overline{PSEN} 。

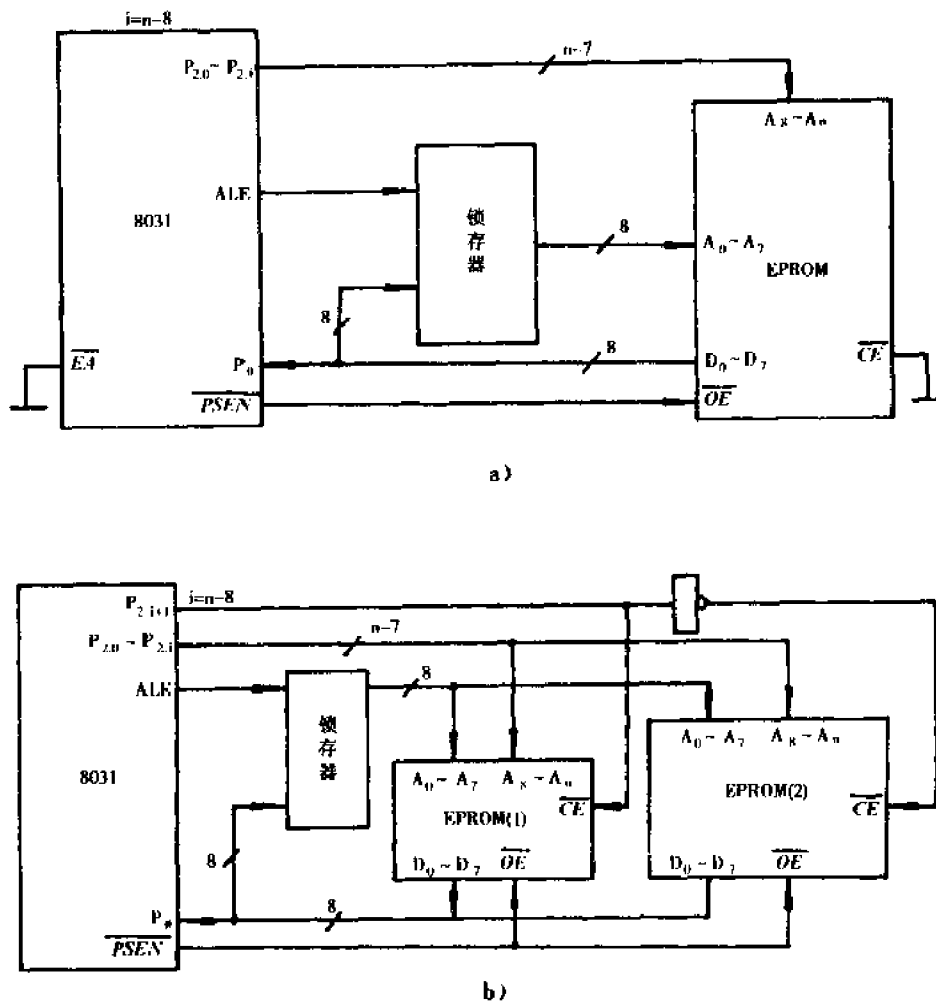


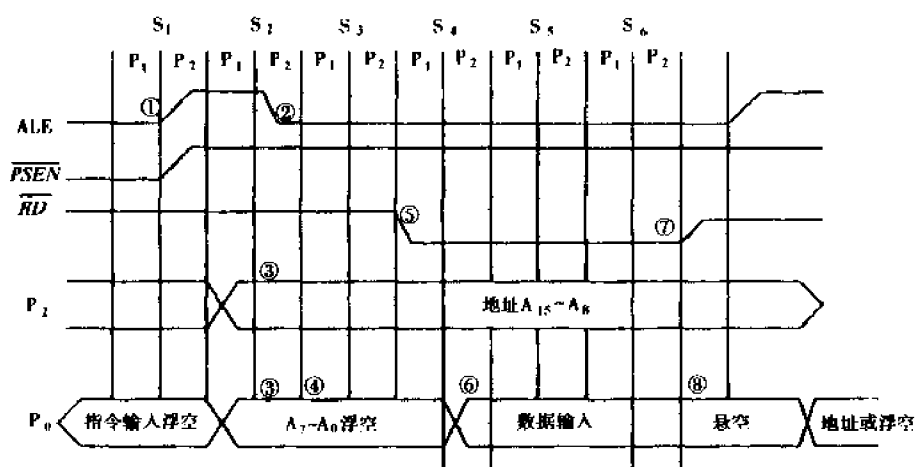
图 4-11 EPROM 程序存储器基本扩展电路

a) 扩展一片 EPROM; b) 扩展二片 EPROM

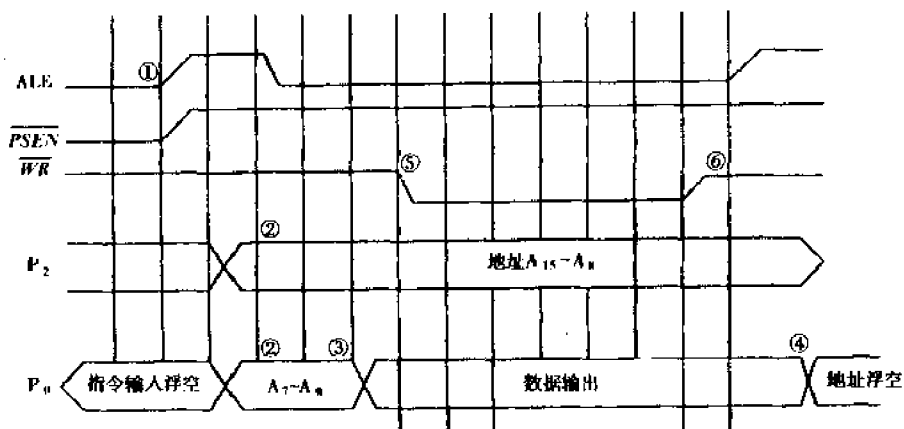
(2) 外部数据存储器的操作时序

外部数据存储器的操作时序包括从 RAM 中读和写两种操作时序。这时所用的控制信号有: \overline{ALE} ——低 8 位地址锁存信号; \overline{RD} ——读信号; \overline{WR} ——写信号。

图 4-12 是外部数据存储器的读/写操作时序。



a)



b)

图 4-12 8051 访问外部数据存储器操作时序图

a) 数据存储器读周期; b) 数据存储器写周期

①读片外 RAM 操作时序

8051 单片机若外扩一片 RAM, 应将其 \overline{WR} 引脚与 RAM 芯片的 \overline{WE} 引脚连接, \overline{RD} 引脚与芯片 \overline{OE} 引脚连接。ALE 信号锁存低 8 位地址, 以便读片外 RAM 中的数据。读片外 RAM 的时序如图 4-12a) 所示。

在第一个机器周期的 S_1 状态, ALE 信号由低变高①, 读入 RAM 周期开始。在 S_2 状态, CPU 把低 8 位地址送到 P_0 口总线上, 把高 8 位地址送 P_2 口(在执行“MOVX A, @DPTR”指令阶段才送高 8 位;若是“MOVX A, @Ri”则不送高 8 位)。

ALE 的下降沿②用来把低 8 位地址信息锁存到外部锁存器 74LS373 内③。而高 8 位地址信息一直锁存在 P_2 口锁存器中。

在 S_3 状态, P_0 口总线变成高阻悬浮状态④。在 S_4 状态, \overline{RD} 信号变为有效⑤(是在执行“MOVX A, @DPTR”后使 \overline{RD} 信号有效), \overline{RD} 信号使得被寻址的片外 RAM 略过片刻后把数据送上 P_0 口总线⑥, 当 \overline{RD} 回到高电平后⑦, P_0 总线变为悬浮状态。至此, 读片外 RAM 周期结束。

②写片外 RAM 操作时序

向片外 RAM 写(存)数据, 是 8051 执行“MOVX @DPTR, A”指令后产生的动作。这条指令

执行后,在 8051 的 \overline{WR} 引脚上产生 \overline{WR} 信号有效电平,此信号使 RAM 的 \overline{WE} 端被选通。写片外 RAM 的时序如图 4-12b) 所示。开始的过程与读过程类似,但写的过程是 CPU 主动把数据送上 P_0 口总线③。此间, P_0 总线上不会出现高阻悬浮现象。在 S_4 状态,写控制信号 \overline{WR} 有效,选通片外 RAM,稍过片刻, P_0 上的数据就写到 RAM 内了。

(3) 静态数据存储器扩展

最常用的静态数据存储器 RAM 芯片有 6116(2K×8)和 6224(8K×8)两种。静态数据存储器扩展电路与程序存储器扩展电路相似,所用的地址线、数字线完全相同,读、写控制线用 \overline{WR} 、 \overline{RD} 。图 4-13 为扩展单片 6116 时的电路图。

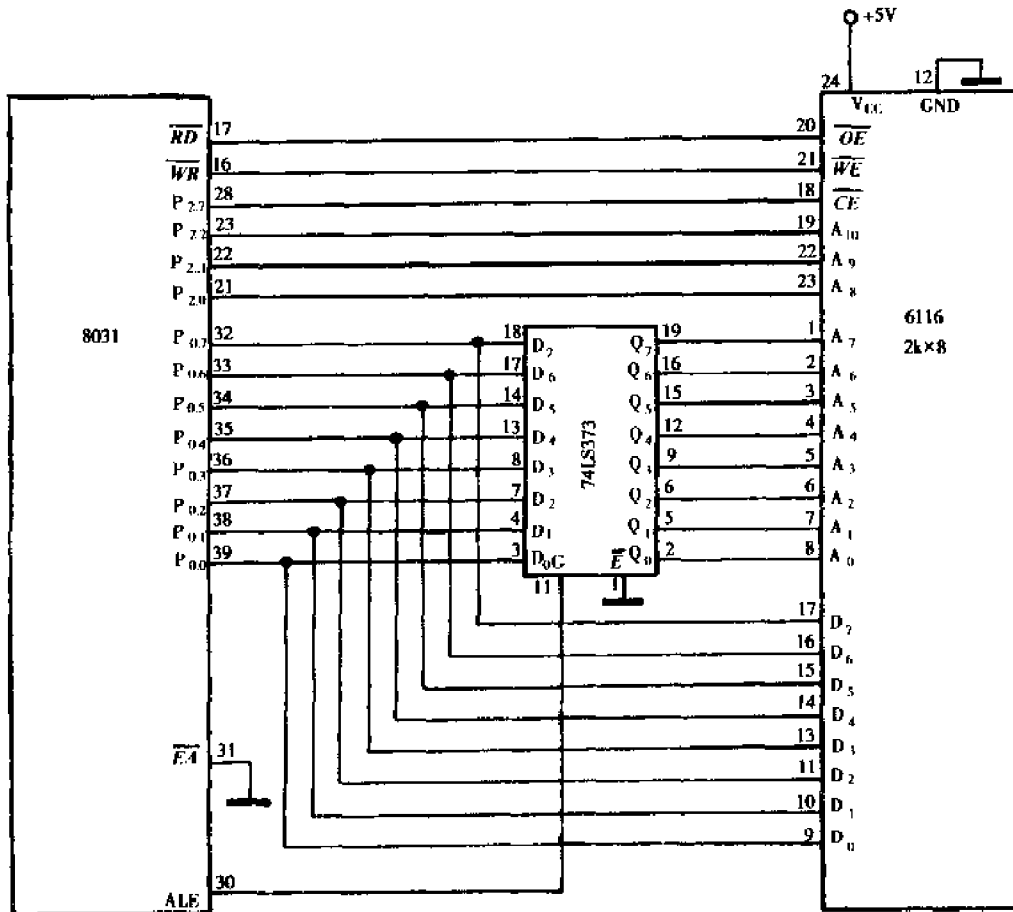


图 4-13 扩展单片 6116 数据存储器

(4) 作为数据存储器 EEPROM 的扩展

电擦除可编程只读存储器 EEPROM 在单片机应用系统中既可作为程序存储器,又可作为数据存储器。将 EEPROM 作为数据存储器时,既可直接将它作为片外数据存储器扩展,也可以作为一般外围设备电路扩展。

① 并行 EEPROM 的扩展电路

图 4-14 为并行 EEPROM 的数据存储器扩展示意图。图中并行 EEPROM 2816A 可按照典型的数据存储器扩展电路连接方式,如 2816A(1)芯片。也可作为外设电路,通过扩展输入/输出 口 8255 连接,如 2816A(2)。

② 串行 EEPROM 的扩展电路

图 4-15 为 8031 扩展 59308 的电路。59308 是 NCR 公司生产的串行 EEPROM。

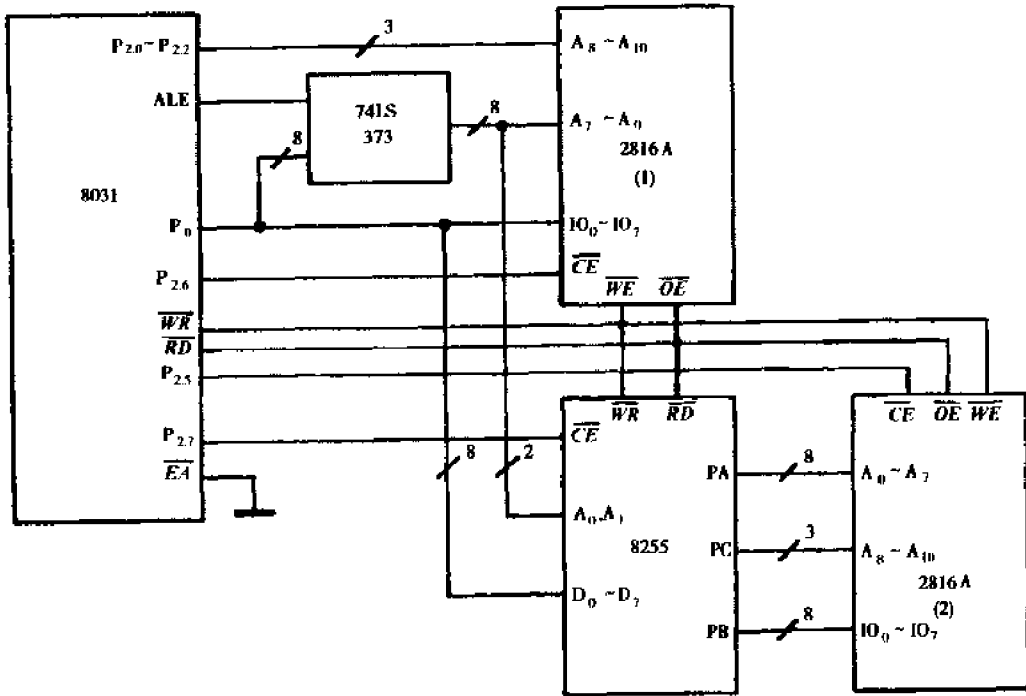


图 4-14 并行 EEPROM 的数据存储器扩展示意图

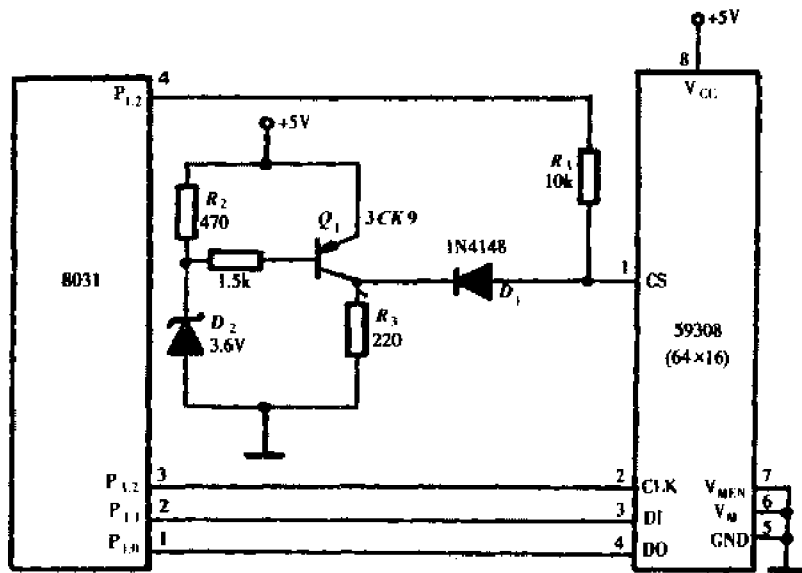


图 4-15 扩展串行 EEPROM59308 电路

4. I/O 的扩展

MCS-51 单片机虽有四个 8 位并行 I/O 口,但这些 I/O 口并不能完全提供给用户使用。因此,在大部分的 MCS-51 单片机应用系统设计中都不可避免地要进行 I/O 口的扩展。

(1) I/O 扩展常用芯片

I/O 口扩展用芯片主要有通用 I/O 芯片和 TTL、CMOS 锁存器、缓冲器电路芯片两大类。

通用 I/O 口扩展芯片主要有 Intel 公司的 8255(3×8 位)、8155(2×8 位+6 位,14 位定时/计数器)、8243(4×4 位);Zilog 公司的 PIO(2×8 位)等。

采用 TTL 电路或 CMOS 电路锁存器、三态门电路作为 I/O 口扩展芯片,也是单片机应用系统中经常采用的方法。可以作为 I/O 扩展芯片使用的 74LS TTL 芯片有 73LS373、377、244、74LS273、367 等。

在 MCS-51 单片机中,还可以利用串行 I/O 口来扩展数量较多的并行输入或输出口。这种扩展方法所使用的移位寄存器芯片有扩展输出口的 74LS164 和扩展输入口的 74LS165。

(2) I/O 口扩展方法

根据扩展数据线的联接方式,I/O 口扩展方式可分为总线扩展方式、串行口扩展方式和 I/O 口扩展方式。

①总线扩展方式。扩展的并行口 I/O 芯片,其并行数据输入线取自 MCS-51 单片机的 P₀ 口。这种扩展方法只分时占用 P₀ 口,并不影响 P₀ 口与其它扩展芯片的连接操作。在 MCS-51 应用系统的 I/O 口扩展中这种扩展方法被广泛采用。使用的扩展芯片主要是通用 I/O 扩展芯片和 TTL/CMOS 锁存器、三态门电路芯片。

②串行口扩展方式。这是 MCS-51 单片机串行口在方式 0 工作状态下所提供的 I/O 口扩展功能。串行口方式 0 为移位寄存器工作方式,因此接上串入并出的移位寄存器 74LS164 时,可以扩展并行输出口,而接上并入串出移位寄存器 74LS165 时,则可扩展并行输入口。

③单片机片内 I/O 口的扩展方式。扩展芯片输入/输出的数据线不通过 P₀ 口而是通过其它片内 I/O 口。此种扩展方法占用 MCS-51 单片机的片内 I/O 口资源,因而很少使用。

(3) 8155 可编程并行 I/O 扩展接口

8155 芯片内具有 256 个字节 RAM、2 个 8 位、1 个 6 位的可编程 I/O 口和 1 个 14 位计数器,与 MCS-51 单片机接口简单,是单片机应用系统中广泛使用的芯片。

① 8155 的结构及引脚

8155 的逻辑结构如图 4-16 所示。

AD₀ ~ AD₇——地址数据总线,单片机和 8155 之间的地址、数据、命令、状态信息都是通过这个总线口传送。

ALE——地址锁存信号输入线。在 ALE 的下降沿将单片机 P₀ 口输出的低 8 位地址信息以及 \overline{CE} 、 $\overline{IO/\overline{M}}$ 的状态都锁存到 8155 内部寄存器。因此,单片机 P₀ 口输出的低 8 位地址信号不须外接锁存器。

$\overline{IO/\overline{M}}$ ——RAM/I/O 口选择线。当 $\overline{IO/\overline{M}} = 0$ 时,单片机选择 8155 的 RAM 读/写。AD₀ ~ AD₇ 上地址为 8155 中 RAM 单元地址;当 $\overline{IO/\overline{M}} = 1$ 时,单片机选择 8155 的 I/O 口,AD₀ ~ AD₇ 上地址为 I/O 口地址。

\overline{CE} ——片选信号。

\overline{RD} 、 \overline{WR} ——读、写控制输入线。

② 8155 的 RAM 和 I/O 口地址编码

8155 在单片机应用系统中是按外部数据存储器统一编址的,为 16 位地址数据,其高 8 位由片选线而提供,而低 8 位地址为片内地址。当 $\overline{IO/\overline{M}} = 0$ 时,单片机对 8155 RAM 读/写,RAM 低 8 位编址为 00H ~ FFH;当 $\overline{IO/\overline{M}} = 1$,单片机对 8155 中的 I/O 进行读/写时,8155 内部 I/O 口及定时器的低 8 位编址如表 4-12 所示。

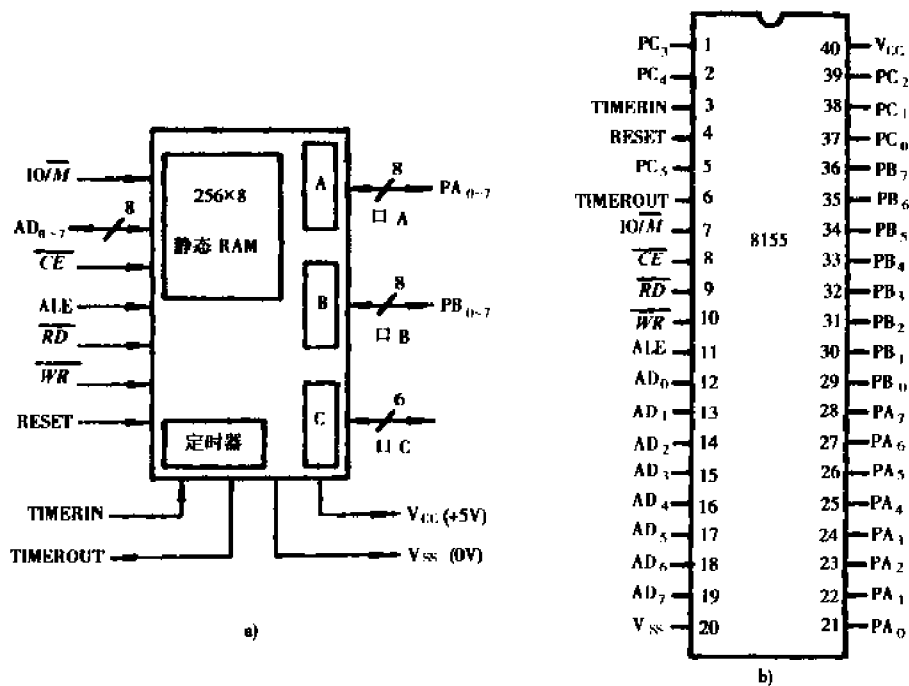


图 4-16 8155 的逻辑结构及引脚

a) 逻辑结构; b) 引脚图

8155 I/O 口地址分配

表 4-12

A ₇	A ₆	A ₅	A ₄	A ₃	A ₂	A ₁	A ₀	端 口
x	x	x	x	x	0	0	0	命令状态寄存器
x	x	x	x	x	0	0	1	PA 口
x	x	x	x	x	0	1	0	PB 口
x	x	x	x	x	0	1	1	PC 口
x	x	x	x	x	1	0	0	定时器低 8 位
x	x	x	x	x	1	0	1	定时器高 8 位

③8155 命令寄存器及状态寄存器

8155 命令寄存器共有 8 位,用于设定 8155 的工作方式以及实现对中断和定时器/计数器的控制。命令寄存器只能写入不能读出。其格式如图 4-17 所示。

8155 状态寄存器也是一个 8 位寄存器。8155 的状态寄存器供单片机查询用,状态存储器 and 命令寄存器共一个地址,只能读出不能写入。因此,可以认为 8155 的 00H 口是命令/状态寄存器,对其写入时作为命令寄存器,写入的是命令;而对其读出时,作为状态寄存器,读出的是当前 I/O 口和定时器的状态。

8155 状态寄存器格式如图 4-18 所示。它们表示了 I/O 作为选通输入/输出的状态以及定

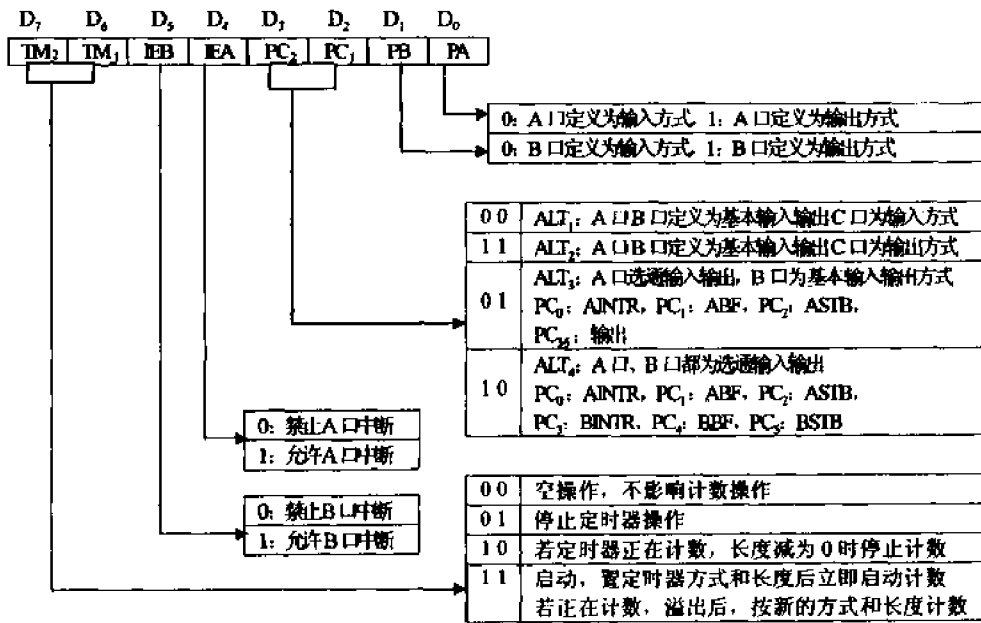


图 4-17 8155 命令寄存器格式

时器工作状态。

④8155 的工作方式与基本操作

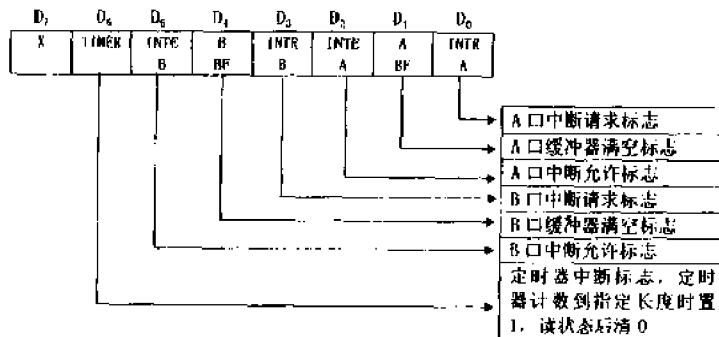


图 4-18 8155 状态寄存器格式

存储器方式:8155 的存储器方式用于对片内 256 字节 RAM 单元进行读写。在这种工作方式时将 8155 的 IO/\overline{M} 引脚置低电平, 这时 8155 只能作片外数据存储器 RAM 使用。

I/O 方式:8155 工作于 I/O 方式时, IO/\overline{M} 引脚必须置高电平, 这时 PA、PB、PC 口的口地址的低 8 位分别为 01H、02H、03H(设地址无关位为 0 时)。8155 的 I/O 工作方式选择是通过 8155 命令寄存器设定命令控制字来实现的。8155 的 I/O 方式又可分为基本 I/O 方式和选通 I/O 方式。8155 的 A 口、B 口可工作于基本 I/O 方式或选通方式, C 口既可作为输入输出, 也可以作为 A 口、B 口选通方式工作时的状态控制信号线。

基本 I/O 工作方式 当 8155 编程为 ALT₁、ALT₂ 时, A、B、C 口均为基本输入输出方式, 而用 D₀、D₁ 位选定 A、B 口为输出还是输入工作方式。在基本 I/O 工作方式下 8155 的输入输出逻辑结构、基本输入、输出时序如图 4-19 所示。

选通 I/O 工作方式 当 8155 被编程为 ALT₃ 时, A 口定义为选通 I/O, B 口定义为基本 I/O; 编程为 ALT₄ 时, A、B 口均定义为选通 I/O 工作方式。ALT₄ 的逻辑组态及选通输入/输出

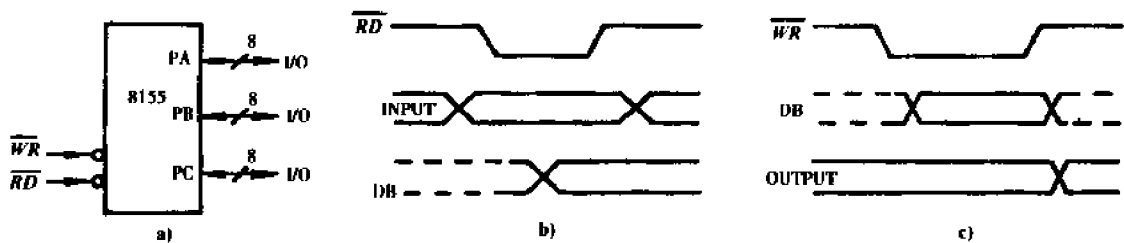


图 4-19 8155 基本输入/输出工作方式逻辑结构及时序
a) 逻辑结构; b) 基本输入时序; c) 基本输出时序

时序如图 4-20 所示。

INTR 为中断请求输出线,作为单片机的外部中断源,高电平有效。当 8155 的 A 口(或 B 口)缓冲器接收到设备打入的数据或设备从缓冲器中取定数据时,中断请求线 INTR 升高(仅当命令寄存器相应中断允许位为 1 时),向单片机请求中断,单片机对 8155 的相应 I/O 口进行一次读/写操作,INTR 变为低电平。

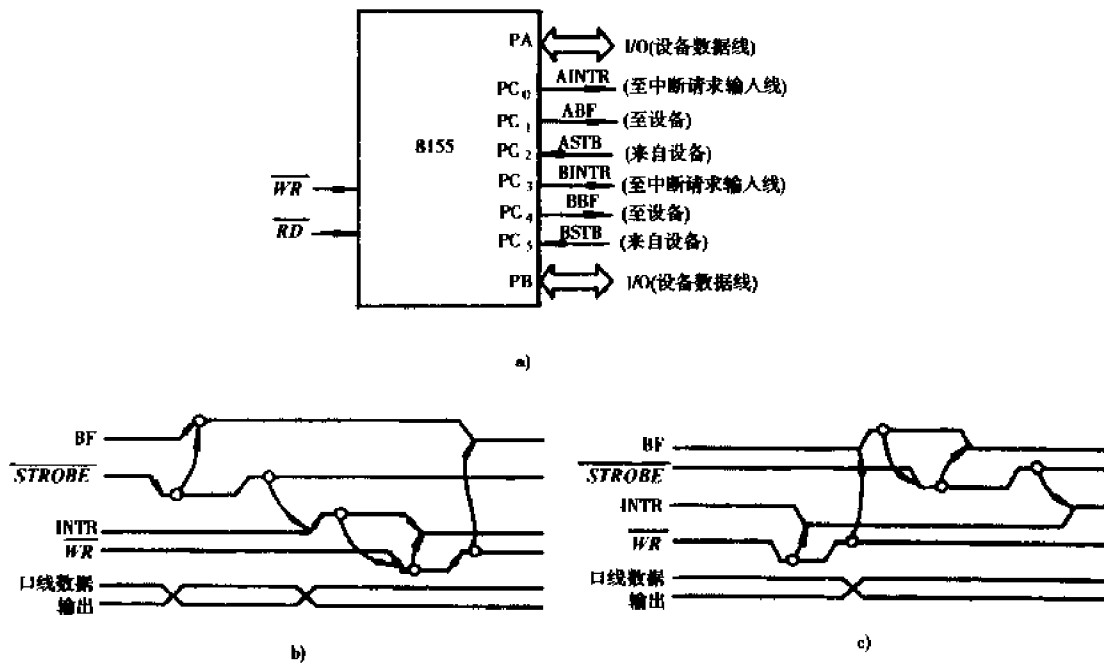


图 4-20 8155 选通输入/输出逻辑结构及时序
a) 选通输入/输出逻辑; b) 选通输入时序; c) 选通输出时序

BF 为缓冲器状态标志输出线。缓冲器有数据时 BF 为高电平,否则为低电平。

\overline{STB} (STROBE)为设备选通信号输入线,低电平有效。

定时器扩展方式:8155 可以为 CPU 提供一个 14 位的定时器/计数器。

定时器的方式选择,8155 片内有一个 14 位减法计数器,可对输入脉冲进行减法计数。外部有两个定时器引脚端 TIN、TOUT。TIN 为定时器时钟输入,由外部输入时钟脉冲;TOUT 为定时器输出,输出各种信号脉冲波形。定时器的低 8 位、高 6 位计数器和定时输出方式由 04H、05H 口寄存器确定,其格式如图 4-21 所示。

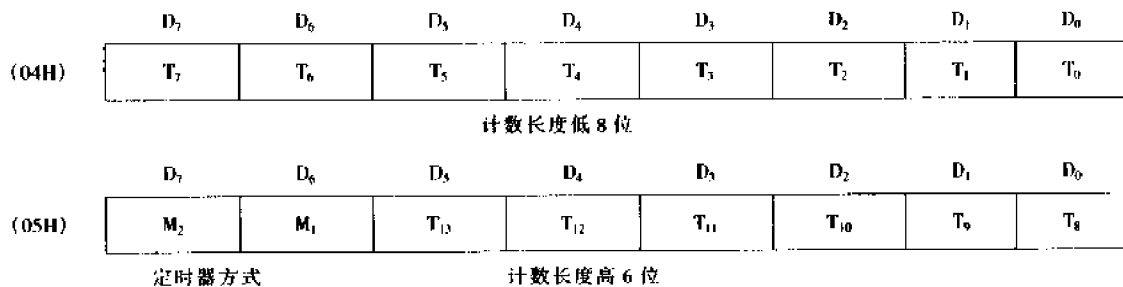


图 4-21 8155 定时器格式

定时器的 14 位计数器由 04H(低 8 位)和 05H 的 D₀ ~ D₅(高 6 位)组成。定时器输出有四种波形可由定时器方式编程选择。8155 定时器方式及相应的输出波形如图 4-22 所示。



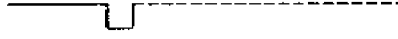

M ₂	M ₁	方 式	定时器输出波形
0	0	单方式	
0	1	连续方波	
1	0	单脉冲	
1	1	连续脉冲	

图 4-22 8155 定时器方式及输出波形

定时器的编程 对定时器进行编程时,首先将计数常数及定时器方式送入定时器口(定时器低 8 位及定时器高 6 位,定时器方式 M)04H 及 05H。计数常数在 0002H ~ 3FFFH 之间选择。计数器的启动和停止计数由命令寄存器(00H)的最高两位控制。TM₂、TM₁ 对定时器的控制如下:

TM ₂	TM ₁	
0	1	空操作,不影响计数器操作。
0	1	停止计数器计数,当定时器无启动时,则无操作。
1	0	计数器计满后立即停止计数,若定时器没启动,则无操作。
1	1	启动。当计数器未计数时,装入计数常数后立即开始计数;若正在计数,则待计数器溢出后按新工作方式和计数常数开始计数。

任何时候都可以置定时器的长度和工作方式,然后必须将启动命令写入命令寄存器(00H),即使计数器已经计数,在写入启动命令后仍可改变定时器的工作方式。如果写入定时器的计数常数为奇数,方波输出不对称。

(4) MCS-51 单片机与 8155 的接口

MCS-51 单片机可以直接和 8155 连接,可以为系统增加 256 个字节片外 RAM,22 位 I/O 口线及一个 14 位定时器。8031 和 8155 的连接方法如图 4-23 所示。

P₀ 口输出的低 8 位直接与 8155 的 AD₀ ~ AD₇ 相连,既作低 8 位地址线总线又作数据总线,地址锁存直接用 ALE 在 8155 中锁存。高 8 位地址由 \overline{CE} 及 $\overline{IO/\overline{M}}$ 的地址控制线决定,因此在图中连接状态下的地址编号为:

RAM 字节地址: 7E00H ~ 7EFFH

I/O 口地址:

命令/状态口	7F00H
PA 口	7F01H
PB 口	7F02H
PC 口	7F03H

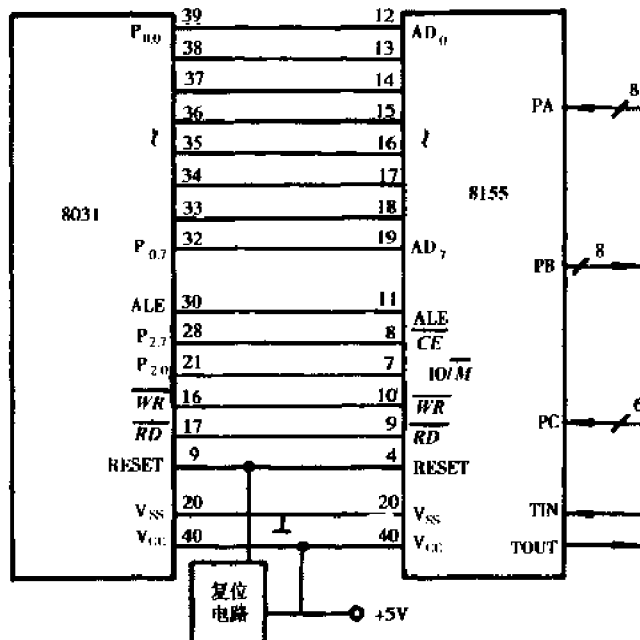


图 4-23 8155 和 8031 的连接方法

定时器低 8 位	7F04H
定时器高 8 位	7F05H

例如:对 8155 中 RAM 的 5FH 单元中送入 32H 立即数,其操作程序如下:

```

MOV     A, # 32H      ; 立即数只能通过累加器 A 传送到外部 RAM 中
MOV     DPTR, # 7E5FH ; 指向 8155 中 5FH 单元
MOVX    @DPTR, A     ; 32H 数送入 8155 中 5FH 单元

```

例如:使 8155 用作 I/O 口和定时器工作方式, A 口定义为基本输入方式, B 口定义为基本输出方式,定时器作为方波发生器,对输入脉冲进行 24 分频(8155 中定时器最高计数频率为 4MHz),则 8155 的操作如下:

```

MOV     DPTR, # 7F04H ; 指向定时器低 8 位
MOV     A, # 18H      ; 计数常数 0018H = 24
MOVX    @DPTR, A     ; 计数常数低 8 位装入
INC     DPTR          ; 指向定时器高 8 位
MOV     A, # 40H(01000000B) ; 设定定时器方式为连续方波输出
MOVX    @DPTR, A     ; 定时器高 8 位装入
MOVX    DPTR, # 7F00H ; 指向命令/状态口
MOV     A, C2H(11000010B) ; 命令控制字设定 A 口为基本输入方式。B 口
                          ; 为基本输出方式,并启动定时器。

```

二、人机通道配置及接口技术

单片机应用系统中,通常都需要进行人机对话。它包括人对应用系统的状态干预、数据输入以及应用系统向人报告运行状态、运行结果等。对于各种类型的单片机应用系统,其人机通道配置的集合如图 4-24 所示。

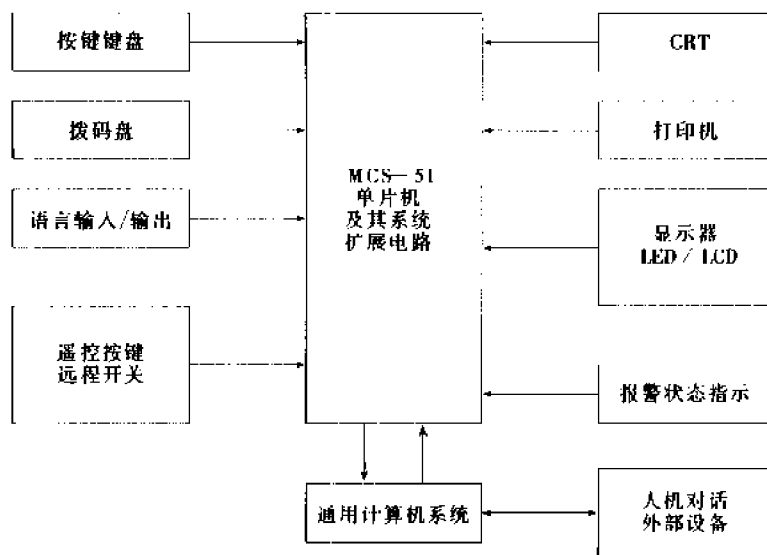


图 4-24 人机通道配置集合

1. 按键、键盘及接口

在单片机应用系统中为了控制系统的工作状态,以及向系统中输入数据,应用系统应设有按键或键盘。例如复位用复位键,功能转化用的功能键以及数据输入用的数字键盘等。

(1) 按键原理

按键是一种常开型按钮开关,如图 4-25 所示。常态时,按键的二个触点处于断开状态,按下键时它们才闭合。键盘分编码键盘和非编码键盘。键盘上闭合键的识别由专用的硬件译码器实现,并产生键编号或键值的这种键盘称为编码键盘,如 BCD 码键盘、ASCII 码键盘等;靠软件识别的称为非编码键盘。在单片机组成的测控系统及智能化仪器中,用得最多的是非编码键盘。这里着重讨论非编码键盘的原理、接口技术和程序设计。

由于机械触点的弹性作用,一个按键开关在闭合时不会马上稳定地接通,断开时也不会一下子断开。因而在闭合及断开的瞬间均伴随有一连串的抖动,如图 4-26 所示。抖动时间长短由按键的机械特性决定,一般为 5~10ms。键抖动会引起一次按键被误读多次。为了确保 CPU 对键的一次闭合仅作一次处理,必须去除键抖动。在键闭合稳定时读取键的状态,并且必须判别到键释放稳定后再作处理。按键的抖动,可用硬件或软件两种方法消除。通常,在键数较少时可用硬件方法消除键抖动。如果按键较多,常用软件方法去抖动,即检测出键闭合后执行一个延时程序,产生 5~10ms 的延时,让前沿抖动消失后再一次检测键的状态,如果仍保持闭合状态电平,则确认为真正有键按下。当检测到按键释放后,也要给 5~10ms 的延时,待后沿抖动消失后才能转入该键的处理程序。

(2) 键盘结构

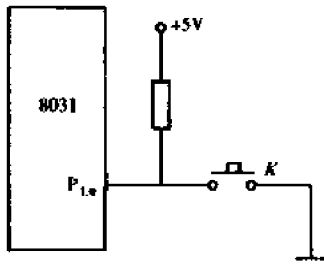


图 4-25 按键电路

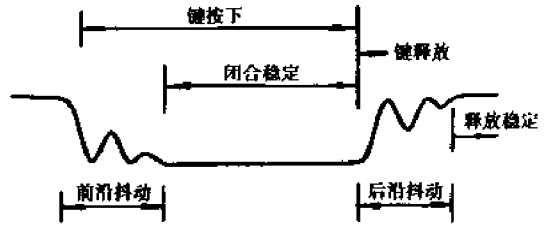


图 4-26 按键时的抖动

键盘是一组按键的集合。可以分为独立连接式和行列式(矩阵式)两类,每一类按其译码方法不同都可分为编码及非编码两种类型。

① 独立式非编码键盘接口及处理程序

独立式按键是指直接用 I/O 口线构成的单个按键电路。每个独立式按键单独占有一根 I/O 口线,每根 I/O 口线上的按键工作状态不会影响其它 I/O 口线的工作状态。图 4-27 是最简单的键盘结构,该电路为查询方式电路。

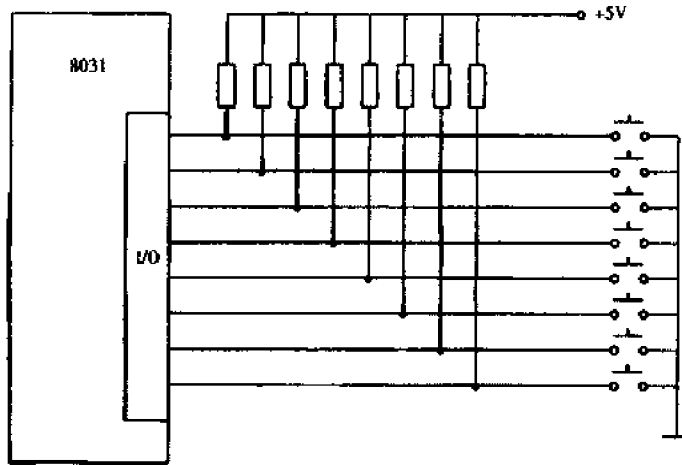


图 4-27 独立式非编码按键电路

当任何一个键按下时,与之相连的输入数据线即被置 0(低电平),而平时该线为 1(高电平)。要判别是否有键按下,用单片机的位处理指令十分方便。

图 4-27 所示查询方式键盘的处理程序中没有使用散转指令,并且省略了软件去抖动措施,只包括键查询、键功能程序转移。 $P_{0F} \sim P_{7F}$ 为功能程序入口地址标号,其地址间隔应能容纳 JMP 指令字节; $PROM_0 \sim PROM_7$ 分别为每个按键的功能程序。

程序清单(设 I/O 为 P_1 口):

```

START:  MOV     A, #0FFH    ; 输入时先置 P1 口为全 1
        MOV     P1, A
        MOV     A, P1      ; 键状态输入
        JNB    ACC.0, P0F  ; 0 号键按下转 P0F 标号地址
        JNB    ACC.1, P1F  ; 1 号键按下转 P1F 标号地址
        JNB    ACC.2, P2F  ; 2 号键按下转 P2F 标号地址
    
```

JNB	ACC.3, P3F	: 3号键按下转 P _{3F} 标号地址
JNB	ACC.4, P4F	: 4号键按下转 P _{4F} 标号地址
JNB	ACC.5, P5F	: 5号键按下转 P _{5F} 标号地址
JNB	ACC.6, P6F	: 6号键按下转 P _{6F} 标号地址。
JNB	ACC.7 P7F	: 7号键按下转 P _{7F} 标号地址。
JMP	START	: 无键按下返回,
POF:	LJMP	PROM0
PIF:	LJMP	PROM1
P7F:	LJMP	PROM7

} ;入口地址表

PROM0:	...	: 0号键功能程序
	JMP	START
PROM1:	...	: 0号键执行完返回
	JMP	START
PROM7:	...	
	JMP	START

由程序可以看出,各按键由软件设置了优先级,优先级顺序依次为0~7。

② 行列式键盘接口及工作原理

为了减少键盘与单片机接口时所占用的I/O线的数目,在键数较多时,通常都将键盘排列成行列矩阵形式,如图4-28所示。每一水平线(行线)与垂直线(列线)的交叉处不相通,而是通过一个按键来连通。利用这种行列矩阵结构只需N条行线和M条列线,即可组成具有N×M个按键的键盘。键盘处理程序首先执行等待按键并确认有无键按下的程序段,程序框图如图4-29所示。当确认有按键按下后,再识别哪一个按键被按下。对键的识别通常有两种方法:一种是常用的逐行(或列)扫描查询法;另一种是速度较快的线反转法。

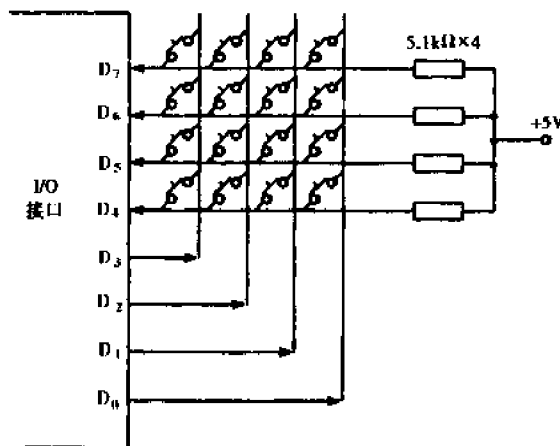


图4-28 行列式键盘原理图

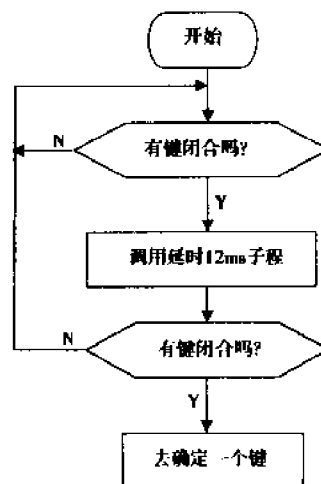


图4-29 判别有无键按下

以图4-28所示的4×4键盘为例,介绍行(或列)扫描法的工作原理。

首先判别键盘中是否有键按下,由单片机I/O口向键盘列线送入(输出)全扫描字,然后从行

线读入(输入)行线状态来判断。方法是:向列线(图中垂直线)输出全扫描字 00H,把列线的所有 I/O 口线均置为低电平,然后将行线的电平状态读入累加器 A 中。如果有按键按下,总会有一根行线电平被拉至低电平,从而使行输入不全为 1。

判断键盘中哪一个键被按下是通过将列线逐列置低电平后,检查行输入状态实现的。方法是:依次给列线送低电平,然后查所有行线状态,如果全为 1,则所按下的不在此列;如果不全为 1,则所按下的键必在此列,而且是在与零电平行线相交的交点上的那个键。

键盘上的每个键都有一个键值。键值赋值的最直接办法是将行、列线按二进制顺序排列,当某一键按下时,键盘扫描程序执行到给该列置零电平,若读出各行状态为非全 1,这时的行、列数据组合成键值。如图 4-28 中键盘键值从左至右、从上至下依次是 77,7B,7D,7E;B7,BB,BD,BE;…;E7,EB,ED,EE。这种负逻辑表示往往不够直观,因而采取行、列线加反相器或软件求反的方法把键盘改成正逻辑。这时,键值依次为 88,84,82,81;48,44,42,41;…;18,14,12,11。

(3) 单片机对非编码键盘扫描的控制方式

单片机对非编码键盘扫描的控制有以下三种方式供选择。用户可根据应用系统中 CPU 的“忙”、“闲”情况以及所需按键数目的多少来选择工作方式。

① 程序控制扫描方式,即查询方式。

② 定时扫描方式,利用单片机内部定时器产生中断(例如 10ms),CPU 响应中断后对键盘扫描一次。定时扫描方式的硬件电路与程序扫描方式相同。

③ 中断扫描方式,引起外部中断(INT0 或 INT1)后,CPU 响应中断,对键盘进行扫描。

2. 显示及显示器接口

单片机应用系统中使用的显示器主要有 LED(发光二极管显示器)和 LCD(液晶显示器)两种类型。

(1) LED 显示及显示器接口

① LED 显示器结构与原理

LED 显示块是由发光二极管显示字段的显示器件。在单片机应用系统中通常使用的是七段 LED。这种显示块有共阴极与共阳极两种。共阴极 LED 显示块的发光二极管阴极共地。当某个发光二极管的阳极为高电平时,发光二极管点亮;共阳极 LED 显示块的发光二极管阳极并接。通常的七段 LED 显示块中有 8 个发光二极管,也有人叫做 8 段显示器。其中 7 个发光二极管构成七笔字形“8”。一个发光二极管构成小数点。

7 段显示块与单片机接口非常容易。只要将一个 8 位并行输出口与显示块的发光二极管引脚相连即可。8 位并行输出口输出不同的字节数据即可获得不同的数字或字符,如表 4-13。通常将控制发光二极管的 8 位字节数据称为段选码。共阳极与共阴极的段选码互为补数。

② LED 显示器与显示方式

在单片机应用系统中使用 LED 显示块构成 N 位 LED 显示器。图 4-30 是 N 位 LED 显示器的构成原理图。N 位 LED 显示器有 N 根位选线和 $S \times N$ 根段选线。根据显示方式不同,位选线与段选线的连接方法不同。段选线控制字符选择,位选线控制显示位的亮、暗。

LED 显示器有静态显示与动态显示两种方式。LED 显示器工作在静态显示方式下,共阴极或共阳极连接在一起接地或 +5V;每位的段选线(a~dp)与一个 8 位并行口相连。这种电路每一位可独立显示,只要在该位的段选线上保持段选码电子,该位就能保持相应的显示字符。

由于每一位由一个 8 位输出口控制段选码,故在同一时间里每一位显示的字符可以各不相同。 N 位静态显示器要求有 $N \times 8$ 根 I/O 口线,占用 I/O 资源较多。故在位数较多时往往采用动态显示方式。

共阴极 7 段 LED 显示字型编码表

表 4-13

显示字符	共阴极段选码	显示字符	共阴极段选码	显示字符	共阴极段选码	显示字符	共阴极段选码
0	3FH	B	7CH	6	7DH	U	3EH
1	06H	C	39H	7	07H	R	31H
2	5BH	D	5EH	8	7FH	Y	6EH
3	4FH	E	79H	9	6FH	8	FFH
4	66H	F	71H	A	77H	“灭”(黑)	00H
5	6DH	P	73H				

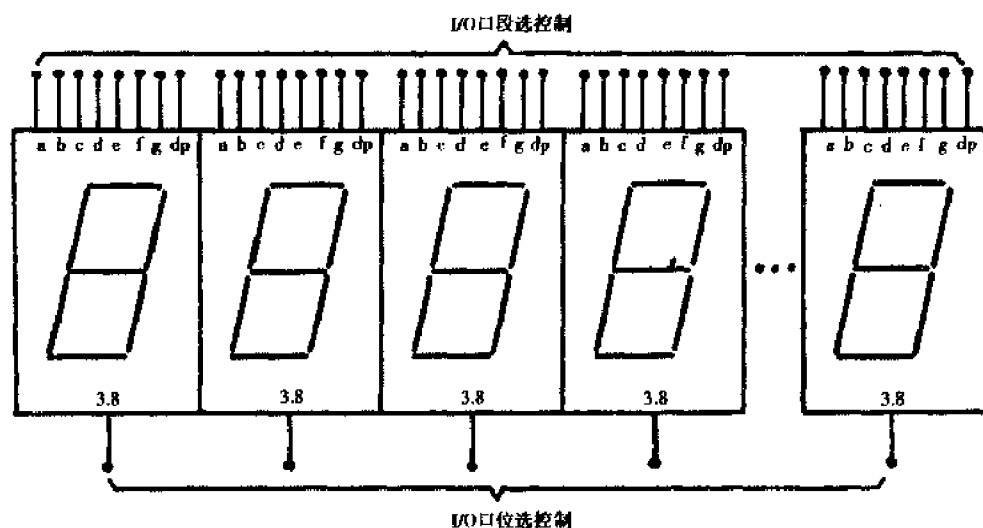


图 4-30 N 位 LED 显示器

动态显示方式就是将所有位的段选线并联在一起,由一个 8 位 I/O 口控制,而共阴极点或共阳极点分别由相应的 I/O 口线控制。8 位 LED 动态显示电路只需要两个 8 位 I/O 口。其中一个控制段选码,另一个控制位选。由于所有位的段选码皆由一个 I/O 控制,因此,在每个瞬间,8 位 LED 只可能显示相同的字符。要想每位显示不同的字符,必须采用扫描显示方式。即在每一瞬间只使某一位显示相应字符。在此瞬间,段选控制 I/O 口输出相应字符段选码,位选控制 I/O 口在该显示位送入选通电平(共阴极送低电平、共阳极送高电平)以保证该位显示相应字符。如此轮流,使每位显示该位应显示字符,并保持延时一段时间,以造成视觉暂留效果。

③ LED 显示器接口实例

图 4-31 为 8031 通过 8155 扩展 I/O 控制的 8 位 LED 动态显示接口。图中 PB 口输出段选码,PA 口输出位选码取决于显示器位数。BIC-8718 为 8 位集成驱动芯片。

设 8031 片内 RAM 的 78H~7FH 单元为显示缓冲区,依次(从低位到高位)存放 8 个要显示的数据。以分离的 BCD 码形式存放。

程序清单:

```
DIS:MOV A, #0000111B          ;8155 初始化
```

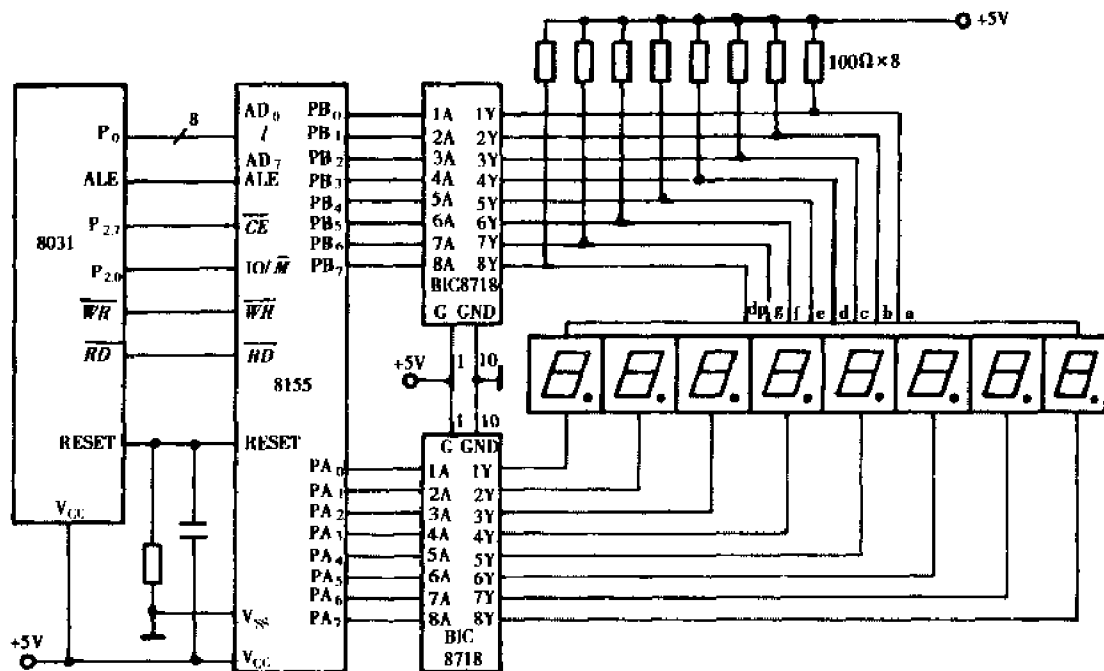



图 4-31 8031 通过 8155 扩展 I/O 控制的 8 位 LED 动态显示器

```

MOV DPTR, # 7F00H
MOVX @DPTR, A
MOV R0, # 78H           ; 动态显示初始化, 存缓冲区地址
MOV R3, # 7FH          ; 存首位位选字
MOV A, R3
LDO: MOV DPTR, # 7F01H ; 指定 PA 口
    MOV @DPTR, A      ; 送位选字入 PA 口
    INC DPTR          ; 指向 PB 口
    MOV A, @R0        ; 查段选码
    ADD A, # 0DH      ; # 0DH 为从查表指令下一个机器码至段选表首的偏移量
    MOVC A, @A + PC
    MOV @DPTR, A      ; 段选码送 PB 口
    ACALL DLI         ; 延时 1 ms
    INC R0            ; 指向显示缓冲区下一单元
    MOV A, R3
    JNB ACC.0, LD1    ; 判断 8 位显示完?
    RR A              ; 未显示完, 变为下一位位选字
    MOV R3, A
    AJMP LDO          ; 转显示下一位
LD1: RET
DSEG: DB 3FH, 06H, 5BH, 4FH, 66H, 6DH, 7DH, 07H, 7FH, 6FH, 77H, 7CH, 39H, 5EH, 79H,
      71H

```

“0” “1” “2” “3” “4” “5” “6” “7” “8” “9” “A” “B” “C” “D” “E” “F”

DL1: MOV R7, # 02H ;延时子程序

DL: MOV R6, # 0FFH

DL6: DJNZ R6, DL6

DJNZ R7, DL

RET

(2) 液晶显示器(LCD)及显示器接口

液晶显示是一种极低功耗的显示器件。在袖珍式仪表或低功耗应用系统中使用较多。

① LCD 基本结构及工作原理

LCD 的结构如图 4-32。

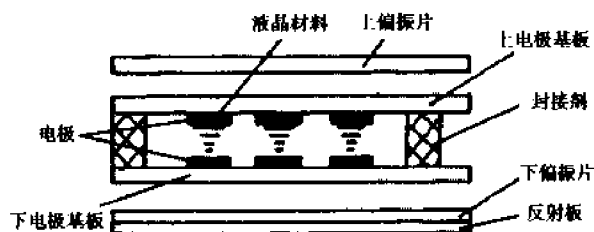


图 4-32 液晶显示器基本结构

在上、下玻璃电极之间封入向列型液晶材料，液晶分子平行排列，上、下扭曲

90°，外部入射光线通过上偏振片后形成偏振光，该偏振光通过平行排列的液晶材料后被旋转 90°，再通过与上偏振片垂直的下偏振片，被反射板反射回来，呈透明状态；当上、下电极加上一定的电压后，电极部分的液晶分子转成垂直排列，失去旋光性，从上偏振片入射的偏振光不被旋转，光无法通过下偏振片返回，因而呈黑色。根据需要，将电极做成各种文字、数字、图形。就可以获得各种状态显示。

② LCD 接口实例

图 4-33 为 6 位液晶静态显示电路。LCD 采用 6 位显示屏，型号为 6500。背极 BP 由 4047 构成的振荡电路提供方波信号。4056 为 BCD7 段译码/驱动器，6 个 4056 由 4514 构成的 3~8

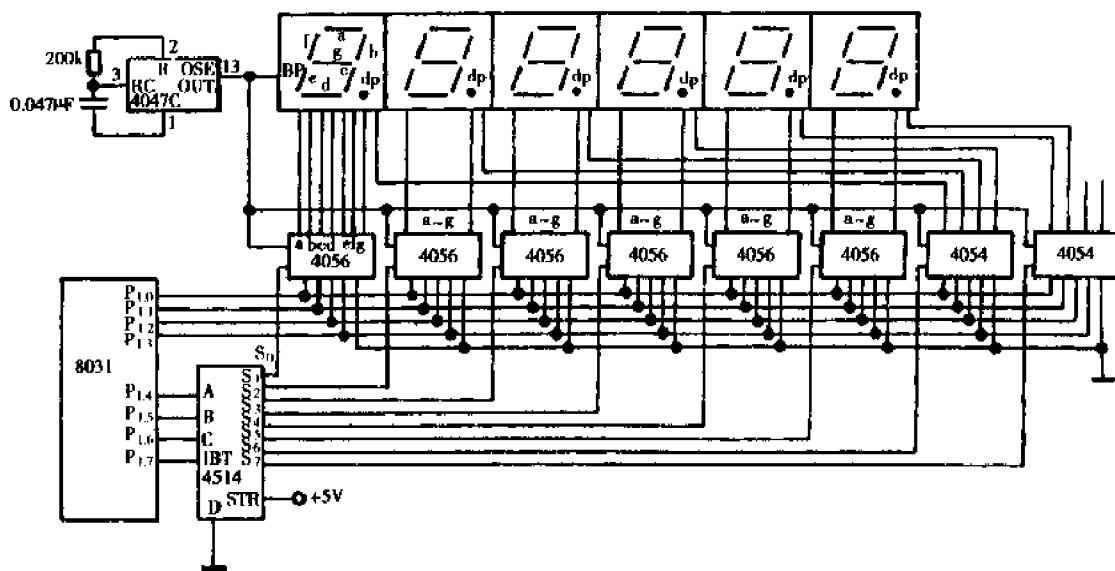


图 4-33 六位液晶显示器静态显示电路

译码器轮流选通。4514 为 4~16 译码器，高电平输出有效，将 D 端接地。P1.4、P1.5、P1.6 分别与 A、B、C 相连，形成 3~8 译码。P1.7 与 INHIBIT(23 脚)输出允许端相连，以控制有效输出。4554 为 4 位液晶显示驱动器，四进四出，作为小数点驱动，需要两片 4054。由于 4056、4054 都具有

锁存功能,故该显示电路可实现静态显示。4514 输出的高电子选通信号控制 4056、4054 进行数据锁存。它们所需要的方波信号由 4047 振荡电路提供,图中使用了 8031 的 P₁ 口,也可以改用扩展 I/O 口。要改为 8 位显示只要增加两片 4056,选用 8 位 LCD 显示屏,4514 改为 4~16 译码接法即可。为了与液晶显示的低功耗相适应,电路中皆选用 CMOS 器件。

设显示缓冲区为 8031 片内 RAM 的 22H~27H 6 个单元依次放置 6 位分离的 BCD 码。

其显示程序为:

```

DISP:MOV    RO, # 22H    ;初始化,缓冲单元首址→RO
        MOV    R3, # 00H    ;初位选
        MOV    R4, # 06H    ;六位显示
DISP:MOV    A, R3        ;位选有效位转为高 4 位并入 R2 保存
        SWAP   A
        MOV    R2, A
        MOV    A, @R0
        ORL   A, R2        ;接成 P1 口输出 BCD 码及控制位
        ORL   A, # 80H
        MOV    P1, A
        ANL   P1, # 7FH    ;屏蔽 P17 位
        ORL   P1, # 80H;
        INC   R3            ;指向下一位送显示数
        INC   RO            ;指向下一个显示缓冲单元
        DJNZ  R4 DISP1
        RET
    
```

如果需要显示小数点,要给 4054 送小数点选择控制。例如要显示第三位小数时,加入下列程序段:

```

MOV    A, # 62H ;高位 6 选中 S6,低位 2 为 0010 驱动第三位小数。
ORL    A, # 80H
MOV    P1, A
ANL    P1, # 7FH
ORL    P1, # 80H
    
```

3. 打印机接口

单片机应用系统中,为了打印数据、表格、曲线等,常常要使用微型打印机。目前,常使用的微型打印机有 GPI6、TP_μP-16A、TP_μP-40A 和 LASER-PP40 描绘器等。

TP_μP-40A 微型打印机与计算机应用系统通过机匣后部的接插件及 20 芯扁平电缆相连,打印机接插件引脚信号如图 4-34 所示。其引脚说明如下:

DR₀~DB₇——数据线。由计算机送给打印机。

\overline{STB} (STROBE)——数据选通信号。在该信号的上升沿,数据线上的 8 位并行数据送入打印机内部锁存器。

BUSY——打印机“忙”状态信号,高电平有效。有效时表示打印机正在打印数据,此时,计算机不得使用 STB 信号向打印机输出新的数据。可用作中断请求信号,也可供 CPU 查询。

\overline{ACK} (ACKNOWLEDGE)——打印机的应答信号。此信号有效(低电平)时,表明打印机已

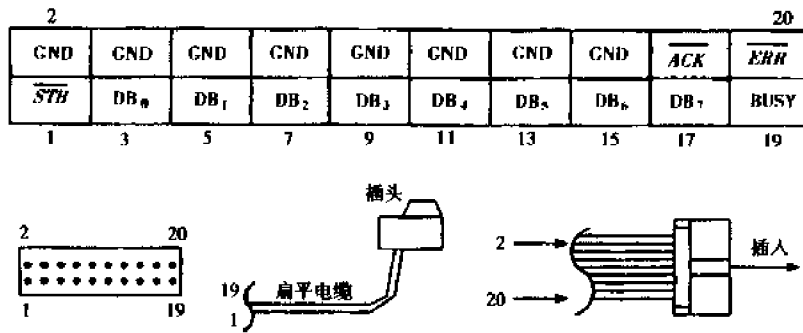


图 4-34 TP₁P-40A 插脚安排(打印机背视图)

取走数据线上的数据。

\overline{ERR} (ERROR)——出错信号。当送入打印机的命令格式有错时,打印机立即打印出一行出错信息,以提示操作者注意。在打印机打印出错信息之前,该信号线出现一个负脉冲,脉冲宽度为 30ms。

图 4-35 是 8031 通过 8155 与打印机连接电路。

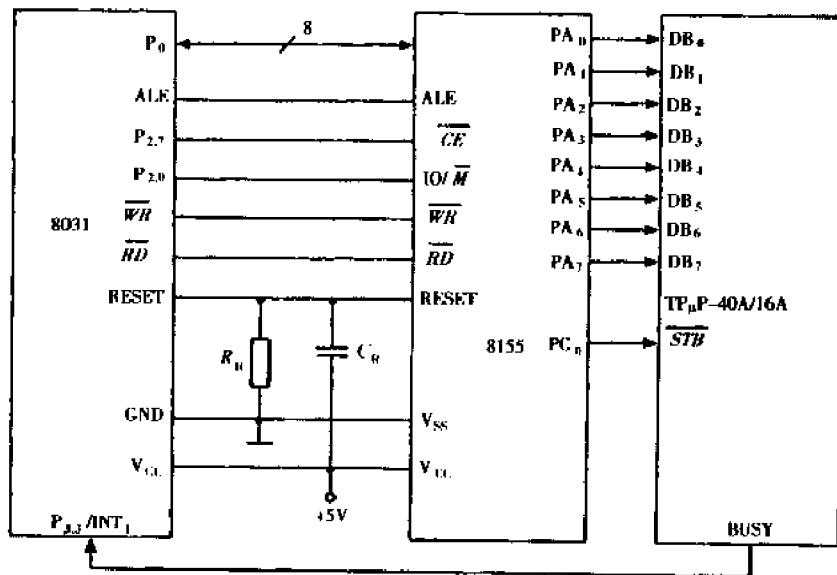


图 4-35 TP₁P-40A/16A 与 8031 扩展 I/O 口的接口电路

三、前向通道及 A/D 接口技术

当将单片机用作测、控系统时,系统中总要有被测信号输入通道,以便计算机拾取必要的输入信息。这个通道就是前向通道。在测控系统中,被测对象的状态参数常常是一些非电物理量,如温度、压力、载荷、位移等,而计算机是一个数字电路系统,只有利用传感器将非电物理量转换成电信号才能完成测量和控制任务。因此,在前向通道中,传感器及其相关转换电路占有重要地位。

A/D 转换器是前向通道的一个重要组成部分。A/D 转换器能把输入模拟电压或电流变成与它成正比的数字量,即能把被控对象的各种模拟信息变成计算机可以识别的数字信息。

A/D 转换芯片种类繁多,但按其变换原理分类,主要有逐次逼近式、双积分式、量化反馈式和并行式 A/D 转换器。逐次逼近型 A/D 转换器,在精度、速度和价格上都适中,是最常用的 A/D 转换器件。下面介绍逐次逼近型 A/D 转换器 ADC0809 及其接口

1. ADC0809 A/D 转换器内部结构

ADC0809 是 CMOS 工艺、采用逐次逼近法的 8 位 A/D 转换芯片,28 引脚双列直插式封装,片内除 A/D 转换部分外还有多路模拟开关部分。ADC0809 的姊妹芯片是 ADC0808,它们可以相互代换。

图 4-36 为 ADC0809 的引脚图及内部逻辑结构图。它由 8 路模拟开关、8 位 A/D 转换器、三态输出锁存器以及地址锁存译码器等组成。

引脚功能说明如下:

$IN_0 \sim IN_7$ ——8 个输入通道的模拟输入端。

$D_0(2^{-8}) \sim D_7(2^{-1})$ ——8 位数字量输出端。

START——启动信号,加上正脉冲后,A/D 转换开始进行。

ALE——地址锁存信号。由低至高电平时把三位地址信号送入地址锁存器,并经译码器得到地址输出,以选择相应的模拟输入通道。

EOC——转换结束信号,是芯片的输出信号。转换开始后,EOC 信号变低;转换结束时,EOC 返回高电平。

OE——输出允许控制端。

CLK——时钟信号。最高允许值为 640 kHz。

$V_{REF(+)}$ 和 $V_{REF(-)}$ ——A/D 转换器的参考电压。

V_{cc} ——电源电压。可以是 +5 ~ +15V。

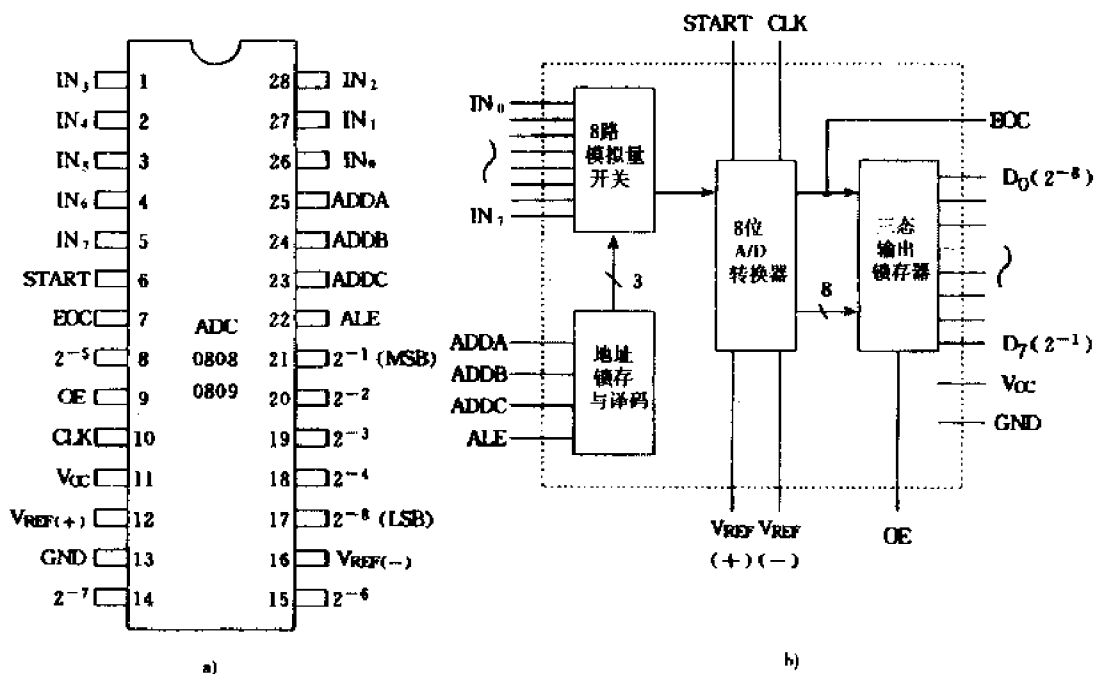


图 4-36 ADC0809 结构

a) ADC0809 引脚; b) ADC0809 内部逻辑结构

请中断。在中断服务程序中,“MOV A, @DPTR”指令产生 \overline{RD} 信号,使 \overline{OE} 端有效,打开输出锁存器三态门,8位数据便读入到CPU中。

ADC0809的时钟取自8031的ALE经二分频后的信号(接CLK端)。当A/D转换完毕,8031读取转换后的数字量时,需使用“MOVX A, @DPTR”指令。

四、后向通道及D/A接口技术

在单片机控制系统中,单片机总要对被控对象实现控制操作,因此,系统中需要有后向通道。后向通道是计算机实现控制运算处理后,对被控对象的输出通道接口。它输出伺服驱动控制信号,而伺服驱动系统中的状态反馈信号通常是作为检测信号输入前向通道。

单片机在完成控制处理后,总是以数字信号通过I/O口或数据总线送给控制对象。这些数字信号形态主要有开关量、二进制数字量和频率量,可直接用于开关量、数字量系统及频率调制系统,但对于一些模拟量控制系统,则应通过D/A转换变换成模拟量控制信号。

D/A转换器是后向通道的一个重要组成部分。D/A转换器是一种能把数字量转换成模拟量的电子器件。它可以直接从MCS-51输入数字量,并转换成模拟量而推动执行机构工作,以控制被控实体的工作过程。DAC0832是D/A转换器的典型芯片。其姊妹芯片还有DAC0830和DAC0831,都是8位芯片,可以相互代换。

1. DAC0832转换器内部结构

DAC0832是采用CMOS工艺制造的8位D/A转换器,其引脚图和逻辑框图如图4-38所示。DAC0832主要由两个8位寄存器和一个8位D/A转换器组成。使用两个寄存器(输入寄存器和DAC寄存器)的好处是,能简化某些应用中的硬件接口电路设计。

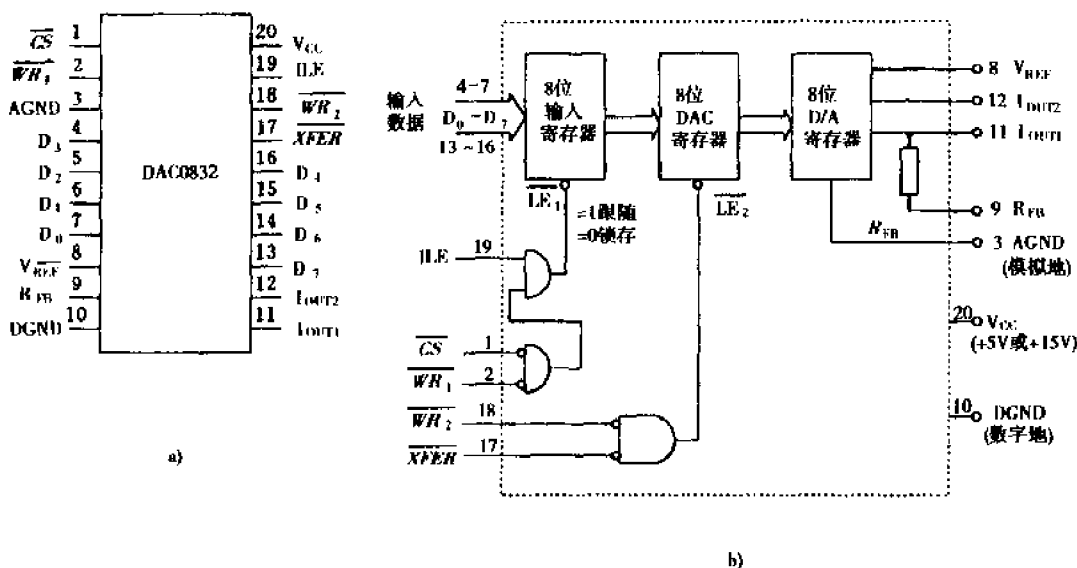


图 4-38 DAC0832 结构

a) DAC0832 引脚图; b) DAC0832 框图

图中, \overline{LE}_1 、 \overline{LE}_2 是寄存命令。当 $\overline{LE}_1 = 1$ 时, 输入寄存器的输出随输入变化; $\overline{LE}_1 = 0$ 时, 数据锁存在寄存器中, 不再随数据总线上的数据变化而变化。ILE 为高电平, \overline{CS} 与 \overline{WR}_1 同时为低时, 使得 $\overline{LE}_1 = 1$; 当 \overline{WR}_1 变高时, 8 位输入寄存器便将输入数据锁存。XFER 与 \overline{WR}_2 同时为低, 使得 $\overline{LE}_2 = 1$, 8 位 DAC 寄存器的输出随寄存器的输入变化。 \overline{WR}_2 上升沿将输入寄存器的信息锁

存在 DAC 寄存器中。图中的 R_{FB} 是片内电阻, 为外部运算放大器提供反馈电阻, 用以提供适当的输出电压; V_{REF} 端由外部电路提供 +10V 到 -10V 的参考电源; I_{OUT1} 与 I_{OUT2} 是两个电流输出端。

欲将数字量 $D_0 \sim D_7$ 转换为模拟量, 只要使 $\overline{WR}_2 = 0, \overline{XFER} = 0$, DAC 寄存器为不锁存状态, 即 $ILE = 1, \overline{CS}$ 和 \overline{WR}_1 端接负脉冲信号即可完成一次转换; 或者 $\overline{WR}_1 = 0, \overline{CS} = 0, ILE = 1$, 输入寄存器为不锁存状态, 而 \overline{WR}_2 和 \overline{XFER} 端接负脉冲信号, 可达到同样目的。

该 D/A 转换器为 20 脚双列直插式封装, 各引脚含义如下:

$D_0 \sim D_7$ ——数字量数据输入线。

ILE ——数据锁存允许信号, 高电平有效。

\overline{CS} ——输入寄存器选择信号, 低电平有效。

\overline{WR}_1 ——输入寄存器的“写”选通信号, 低电平有效。由控制逻辑可以看出, 片内输入寄存器的锁存信号 $\overline{LE}_1 = (\overline{CS} + \overline{WR}_1) \cdot ILE$ 。当 $\overline{LE}_1 = 1$ 时, 输入锁存器状态随数据输入线状态变化; 而 $\overline{LE}_1 = 0$ 时, 则锁存输入数据。

\overline{XFER} ——数据转移控制信号线, 低电平有效;

\overline{WR}_2 ——DAC 寄存器的“写”选通信号。DAC 寄存器的锁存信号 $\overline{LE}_2 = \overline{WR}_2 + \overline{XFER}$ 。当 $\overline{LE}_2 = 1$ 时, DAC 寄存器的输出随输入状态变化; $\overline{LE}_2 = 0$ 时, 锁存输入状态。

V_{REF} ——基准电压输入线。

R_{FB} ——反馈信号输入线, 芯片内已有反馈电阻。

I_{OUT1} 和 I_{OUT2} ——电流输出线。 I_{OUT1} 与 I_{OUT2} 的和为常数, I_{OUT1} 随 DAC 寄存器的内容线性化。一般在单极性输出时, I_{OUT1} 接地; 在双极性输出时接运放。

V_{cc} ——工作电源, $DGND$ ——数字地, $AGND$ ——模拟信号地。

2. D/A 转换器与 8031 接口

图 4-39 为 DAC0832 与 8031 直通式工作方式的连接方法。

当某一根地线或地址译码器的输出线使 DAC0832 \overline{CS} 引脚有效(低电平)或 \overline{CS} 与 \overline{WR}_1 直接接地时, 数据线上的数据字节直通 D/A 转换器转换并输出。

应用系统中, 在只有一路模拟量输出或几路模拟量不需要同时输出的场合, 应采用单缓冲方式。在这种方式下, 将二级寄存器的控制信号并接, 输入数据在控制信号作用下, 直接输入 DAC 寄存器中。图 4-40 为单缓冲方式 DAC0832 与 8031 的连接方法。

下面几个程序将在运放输出端 V_{OUT} 产生程控波形。

(1) 产生锯齿波的程序:

助记符

```
MOV DPTR, #2FFFH
```

说明

; 设置 D/A 口地址

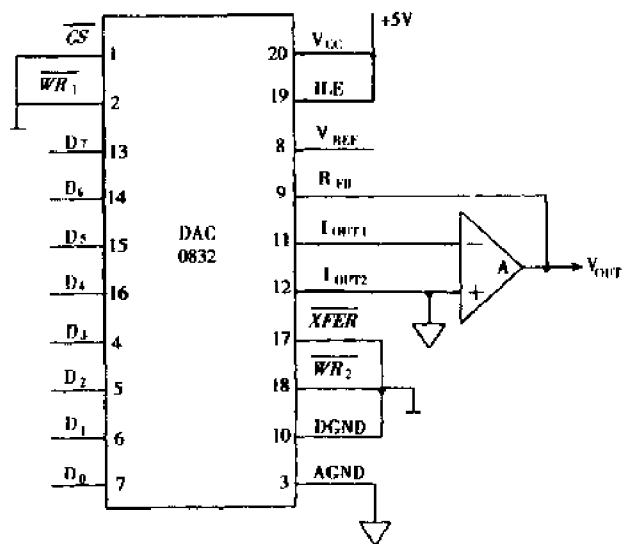


图 4-39 DAC0832 电压输出电路

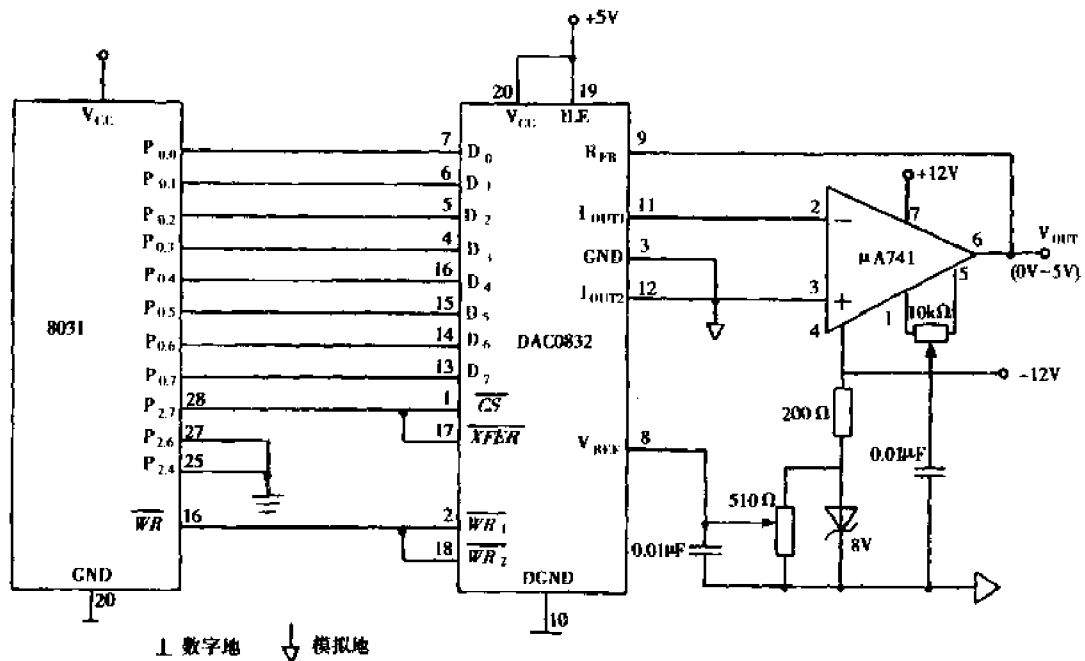


图 4-40 一路 D/A 输出连线图(单路模拟量输出)

```

MOV A, # 00H           ;输入数字量 00H 到 A(初值为 00H)
MOVX @DPTR, A         ;输出对应于 A 内容的模拟量
INC A                  ;修改 A 的内容(原来值加 1)
AJMP $2005H           ;$2005H 表示地址 2005H

```

(2)产生方波的程序:

```

MOV DPTR, # 2FFFH     ;设置 D/A 口地址
MOV A, # FFH          ;给 A 送最大值
MOVX @DPTR, A         ;D/A 输出相应模拟量
ACALL $2700H          ;延时
MOV A, # 00H          ;给 A 送最小值
MOVX @DPTR, A         ;D/A 输出相应模拟量
ACALL $2700H          ;延时
AJMP $2003H           ;返回循环

```

五、8251 串行口及串行通信技术

1. 串行通信基础知识

(1)数据通信及其方式

在实际工作中,CPU 与外部设备之间常常要进行信息交换,计算机之间也往往要交换信息,所有这些信息交换均称为通信。通信方式有两种,即并行通信和串行通信。

并行通信是指数据的各位同时进行传送(发送或接收)的通信方式。其优点是传送速度快;缺点是传送线的条数较多。图 4-41a)为 8051 单片机与外设间 8 位数据并行通信的连接方法。

串行通信指数据是一位一位按顺序传送的通信方式。它的优点是只需一对传输线(利用

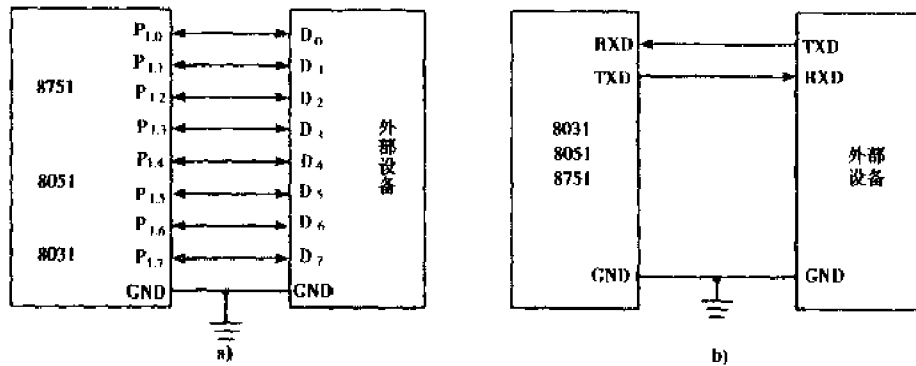


图 4-41 两种通信方式连接

a) 并行通信; b) 串行通信

电话线就可作为传输线),其传送成本低,特别适用于远距离通信;其缺点是传送速度较低。图 4-41b)所示为串行通信方式的连接方法。

串行通信的传送方式通常有三种:一种为单工方式;另一种是半双工方式;第三种传送方式是全双工方式。

(2) 异步通信和同步通信

串行通信有两种基本通信方式,即异步通信和同步通信。

① 异步通信

在异步通信中,数据是一帧一帧(包括一个字符代码或一字节数据)传送的,每一帧的数据格式如图 4-42 所示。

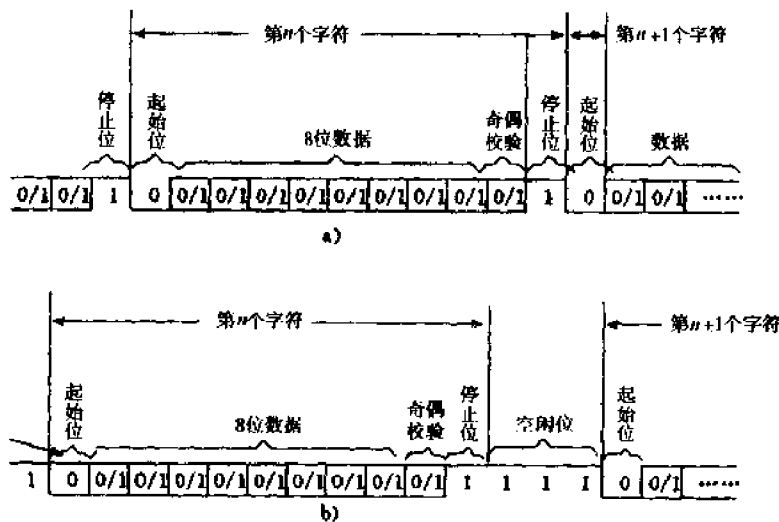


图 4-42 异步通信的一帧数据格式

a) 一个字符紧接一个字符的传送情况; b) 两个字符间有空闲位传送情况

在帧格式中,一个字符由四个部分组成:起始位、数据位、奇偶校验位和停止位。首先是一个起始位(0),然后是 5~8 位数据(规定低位在前,高位在后),接下来是奇偶校验位(可省略),最后是停止位(1)。起始位(0)信号只占用一位,用来通知接收设备一个待接收的字符开始到达。线路上在不传送字符时应保持为 1。接收端不断检测线路的状态,若连续为 1 以后又测到一个 0,就知道发来一个新字符,应马上准备接收。字符的起始位还被用作同步接收端的时

钟,以保证以后的接收能正确进行。

起始位后面紧接着是数据位,它可以是5位($D_0 \sim D_4$)、6位、7位或8位($D_0 \sim D_7$)。

奇偶校验(D_8)只占一位,但在字符中也可以规定不用奇偶校验位,则这一位就可省去。也可用这一位(I/O)来确定这一帧中的字符所代表信息的性质(地址/数据等)。

停止位用来表征字符的结束,它一定是高电位(逻辑1)。停止位可以是1位、1.5位或2位。接收端收到停止位后,知道上一字符已传送完毕,同时,也为接收下一个字符作好准备——只要再接收到0,就是新的字符的起始位。若停止位以后不是紧接着传送下一个字符,则使线路电平保持为高电平(逻辑1)。图4-42a)表示一个字符紧接一个字符传送的情况,上一个字符的停止位和下一个字符的起始位是紧邻的;图4-42b)则是两个字符间有空闲位的情况,空闲位为1,线路处于等待状态。

②同步通信

同步通信中,在数据开始传送前用同步字符来指示(常约定1~2个),并由时钟来实现发送端和接收端同步,即检测到规定的同步字符后,下面就连续按顺序传送数据,直到通信告一段落。同步传送时,字将与字符之间没有间隙,也不用起始位和停止位,仅在数据块开始时用同步字符 SYNC 来指示,其数据格式如图4-43所示;

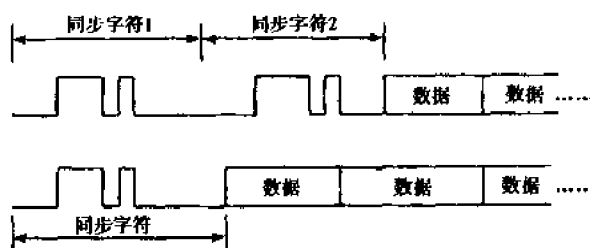


图 4-43 同步传送的数据格式

同步字符的插入可以是单同步字符方式或双同步字符方式,然后是连续的数据块。同步字符可以由用户约定,当然也可以采用 ASCII 码中规定的 SYNC 代码,即 16H。按同步方式通信时,先发送同步字符。接收方检测到同步字符后,即准备接收数据。在同步传送时,要求用时钟来实现发送端与接收端之间的同步。为了保证接收正确无误,发送方除了传送数据外,还要同时传送时钟信号。

③波特率(Band rate)

波特率,即数据传送速率,表示每秒传送二进制代码的位数,它的单位是 b/s。波特率对于 CPU 与外界的通信是很重要的。假设数据传送速率是 120 字符/s,而每个字符格式包含 10 个代码位(1个起始位、1个终止位、8个数据位)。这时,传送的波特率为:

$$10\text{b/字符} \times 120 \text{字符/s} = 1200 \text{ b/s}$$

异步通信的传送速率在 50 ~ 19 200b/s 之间,常用于计算机到终端机和打印机之间的通信、直通电报以及无线电通信的数据发送等。

2.8251 串行口及其接口电路

Intel 8251 是一种通用的同步/异步接收/发送器(USART),它的工作方式可以通过编程设定。8251 能够以同步或异步串行通信方式工作,能自动完成帧格式。

8251 具有独立的接收器和发送器。因此,它能够以单工、半双工或全双工的方式进行通信。并且提供一些基本控制信号,可以方便地和调制解调器连接。

(1)8251 的结构和引脚特性

8251 的内部逻辑结构如图 4-44 所示。它由五个主要部分,即 I/O 缓冲器、读/写控制逻辑、接收器、发送器、调制解调控制器组成。

①I/O 缓冲器

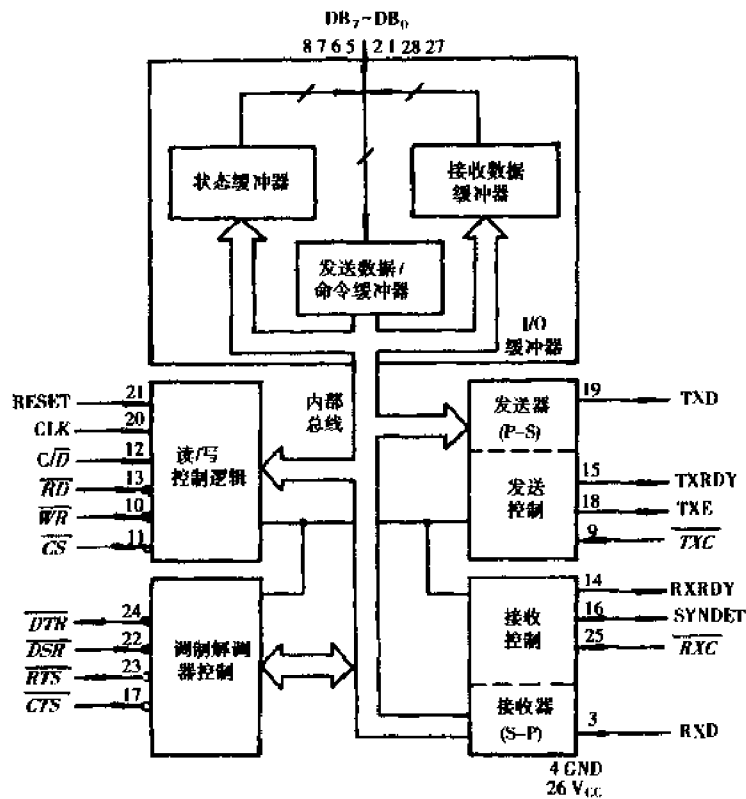


图 4.44 8251 逻辑结构框图

I/O 缓冲器用来和 CPU 的数据总线相连。8251 有三个缓冲器。其中：状态缓冲器用来寄存 8251 内部的工作状态，供 CPU 查询测试；接收数据缓冲器用来存放接收器已经装配完毕的字符，准备送给 CPU；发送数据/命令缓冲器用来寄存 CPU 送入 8251 的数据或命令，此缓冲器是发送数据和命令的共同寄存器，但必须分时使用。

② 读/写控制逻辑

读写控制逻辑与 CPU 的控制总线的控制信号相连，对数据在内部总线上的传送方向进行控制。与 CPU 有关的控制信号如下：

CLK(时钟信号)：为 8251 的定时信号。CLK 时钟频率在同步方式时，至少应为发送时钟和接收时钟的 30 倍；而在异步方式时，则至少应为输入时钟的 4.5 倍。

RESET(复位)：高电平时，8251 被复位，返回空闲状态，并保持到重新被初始化为止。

\overline{CS} (片选)：当 $\overline{CS} = 0$ 时，允许 CPU 对 8251 进行读/写。

C/\overline{D} (控制/数据)：CPU 进行读操作时，若 $C/\overline{D} = 1$ ，表示要读取状态字；若 $C/\overline{D} = 0$ ，表示要读取接收数据。CPU 进行写操作时，若 $C/\overline{D} = 1$ ，表示写入命令；若 $C/\overline{D} = 0$ ，表示写入数据。

\overline{RD} (读信号)：当 $\overline{RD} = 0$ 时，CPU 对 8251 进行读操作。

\overline{WR} (写信号)：当 $\overline{WR} = 0$ 时，CPU 对 8251 进行写操作。

CPU 对 8251 有关操作见表 4-15。

③ 接收器

接收器从 RXD 引脚接收串行数据，按指定的方式把它变成并行数据。在异步方式中，当接收器接收到启动位之后，8251 便记录下数据、奇偶位和停止位，接着将数据通过内部总线送入接收数据缓冲器。RXRDY 用来表明一个字节已准备好。

CPU 对 8251 的控制操作

表 4-15

\overline{CS}	C/\overline{D}	\overline{RD}	\overline{WR}	控制操作	\overline{CS}	C/\overline{D}	\overline{RD}	\overline{WR}	控制操作
0	0	0	1	CPU 从 8251 读数据	0	1	1	0	CPU 写指令至 8251
0	1	0	1	CPU 从 8251 读状态字	1	x	x	x	8251 未选中, 不操作
0	0	1	0	CPU 写数据至 8251					

在同步方式中, 8251 首先进行同步字(SYN)搜索, 在 RXD 线上, 以一次一位方式移动数据。在接收到每一位后, 接收寄存器就和存放 SYN 字符的寄存器(SYN 字符由程序装入)进行比较。若结果不等, 移入另一位再比较, 若比较结果相等时, 结束搜索, 并使 SYND_{ET} = 1 表示它已达到同步。接着就是记录数据, 并将数据送入接收数据缓冲器。若程序设定 8251 接受外同步, 则 SYND_{ET} 引线用来接收外同步输入。接收器有关引线说明如下:

RXD(接收数据线):接收器从该引线接收串行输入数据, 并装配成并行形式的字符。RXD 输入的高电平代表逻辑 1。

RXR_{DY}(接收器准备好):接收器的状态标志线。当 RXRDY = 1 时, 表明接收器已经从 RXD 端接收到一个字符, 并准备好将它送给 CPU。RXRDY 的确立还受到命令字中的 RXE 所控制。只有当 RXE = 1(接收开放)时, 接收器接收到字符后, RXRDY 才能置 1, 否则, 即使接收到字符, RXRDY 也不能置 1。

SYND_{ET}(同步检出):该线仅用于同步方式, 既可以作为输入线, 也可作为输出线。当采用内同步方式时, SYND_{ET} 是输出线, 当 SYND_{ET} = 1, 表明接收器已获得同步, 并开始装配字符。CPU 读状态字时, 使 SYND_{ET} 复位。当采用外同步时, SYND_{ET} 作为输入线。外同步信号的正跳变输入将使 8251 在紧跟着的 RXC 时钟的负跳变沿处开始装配字符。SYND_{ET} 输入的高电平至少应保持一个 RXC 周期。

RXC(接收时钟):它为 8251 的接收器提供接收时钟信号, 用以控制 8251 接收数据的速率。在同步方式中, RXC 等于波特率, 并由调制解调器提供。在异步方式中, RXC 可以是波特率, 也可以是波特率的 16 或 64 倍。

①发送器

发送器从 CPU 接收并行数据, 加上适当的成帧信号, 再将其变换成串行数据从 TXD 引线发送出去。在异步方式中, 发送器总要加上启动位, 并根据程序的设定, 再加上奇偶校验位和停止位。在同步方式中, 发送器最先发送的是同步(SYN)字符, 随后发送的数据不加任何成帧信号。如果在发送过程中, CPU 没有及时供给新的字符, 就不断发送 SYN 字符, 两个字符之间不得有间隔。发送器有关的引线说明如下:

TXD(发送数据):CPU 送入 8251 的数据从该引线以串行形式发送出去。

TXRDY(发送器准备好):发送状态标志。当 TXRDY = 1 时, 表明 8251 已准备好接收来自 CPU 的数据或命令。TXRDY 既可作为状态信号供 CPU 查询, 也可以作为发送器的中断请求信号。但是, 状态字中的 TXRDY 位和 TXRDY 引线信号不同, 前者在发送数据/命令缓冲器空闲时就置位, 而 TXRDY 引线信号必须在缓冲器空, 且命令字中的 TXEN = 1(允许发送), 调制解调器中又送来批准送数信号($\overline{CTS} = 0$)时, 才会输出高电平。当 CPU 给 8251 写入发送数据时, TXRDY 复位。

TXE(发送器空闲):当 TXE = 1 时, 表明发送器中的并串变换器处于空闲状态。在同步方式中, 如果 CPU 不及时装入新的字符, TXE 就变成高电平, 并把 SYN 字符装入发送器, 填充发送中出现的间隔。

TXC(发送时钟):该时钟信号控制发送字符的速率。TXC 和波特率的关系同 RXC。

⑤调制解调控制器

调制解调控制器提供四种通用的控制信号,即 \overline{DTR} 、 \overline{DSR} 、 \overline{RTS} 、 \overline{CTS} ,用来实现和调制解调器(Modem)的连接。其含义如下:

\overline{DTR} (数据终端准备好):该引线信号可以由 8251 命令字的第 1 位(D_1)来控制。当命令字 D_1 置 1 时, $\overline{DTR} = 0$ 有效,向调制解调器表示数据终端已准备好。

\overline{DSR} (数据设备准备好):当数据设备(调制解调器)使 $\overline{DSR} = 0$ 有效时,表示数据设备已准备好。该输入信号作为状态字的第 7 位(D_7)存入状态字寄存器,供 CPU 查询,用于检查数据设备状态。

\overline{RTS} (请求送数):输出线,低电平有效,该引线信号由 8251 命令字的第 5 位(D_5)来控制。当命令字 D_5 置 1 时, $\overline{RTS} = 0$ 有效,请求调制解调器作好发送准备(建立载波)。

\overline{CTS} (批准送数):该输入信号通常是调制解调器对正面信号的应答,该信号有效时,表明调制解调器已作好发送数据的准备,批准 8251 发送数据。8251 只有收到这个信号后,才有可能使引线信号 $TXRDY = 1$ 。当然使 $TXRDY = 1$ 的条件除 $\overline{CTS} = 0$ 外,还必须使命令字的 $TXEN = 1$,且发送数据缓冲器空。

(2)8251 工作方式的建立

8251 的工作方式由程序设定。在数据发送和接收之前,必须由 CPU 将一组控制字装入 8251。控制字必须紧跟复位信号之后装入。控制字分成两种格式,即方式控制指令格式和命令指令格式。因此,8251 的工作方式的建立也分两步进行。

方式控制指令格式如 4-45 所示。在完成 SYN 字符装入或在完成异步方式指令装入以后,接着必须装入命令指令。命令指令格式如图 4-46 所示。命令指令控制 8251 按指令所规定方式进行操作。

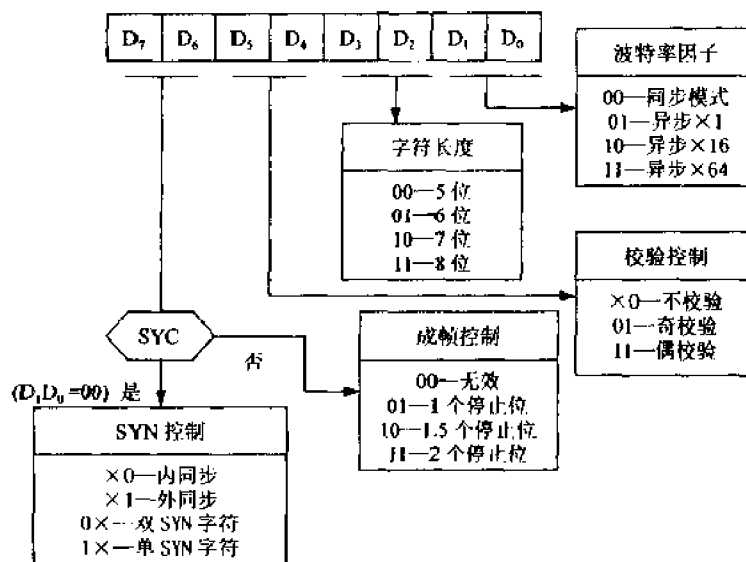


图 4-45 方式控制指令格式

8251 的方式控制指令和命令指令本身并没有特征标志,8251 只能根据它们送入的顺序来识别,因此,8251 初始化程序必须严格按一定的先后顺序进行编排。8251 初始化程序框图如图 4-47 所示。

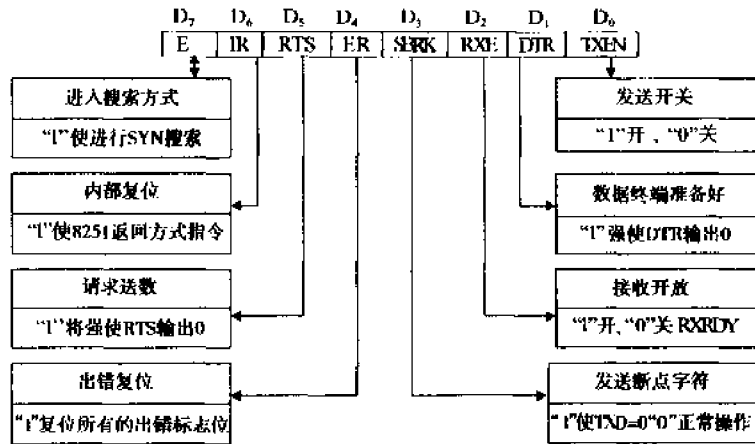


图 4-46 命令指令格式

(3) 状态寄存器

状态寄存器用来寄存 8251 的工作状态信息。状态寄存器的内容可以由 CPU 读取, 状态字的格式如下:

D ₇	D ₆	D ₅	D ₄	D ₃	D ₂	D ₁	D ₀
DSR	SYNDET	FE	OE	PE	TXE	RXRDY	TXRDY

FE(成帧出错):当 FE = 1 时, 表示异步方式工作中, 接收器不能检测到有效的停止位。它由命令指令中的 ER 位复位, FE 并不禁止 8251 操作。

OE(溢出错误):当 OE = 1 时, 表示接收器已准备好一个字符, 但 CPU 未读走前一个字符, 因此造成字符丢失。OE 不禁止 8251 操作, 只是丢失字符, 它由命令指令中的 ER 位复位。

PE(校验出错):当检出校验错误时, PE 置位。它不禁止 8251 操作。PE 由命令指令中的 ER 复位。

DSR(调制解调器准备好):数据装置送来的状态信号。

TXRDY(发送准备好):当发送数据缓冲器空时, TXRDY = 1。

SYNDET, TXD, RXRDY 与引线的功能定义相同。

3. 8251 与 MCS-51 单片机的接口方法

8031 用于构成主从式多机系统时, 主机 8031 一方面和从机通信, 另一方面还要和终端机(或主机系统)通信。因此, 常常扩展一片 8251 增加一个串行通道。图 4-48 为 8031 扩展一片 8251 的接口电路。

图 4-48 中 8031 单片机的时钟为 7.372 8MHz, 由 ALE、WR、RD 组合后产生 1.228 8MHz 的脉冲信号, 该信号作为 8251 的 CLK 时钟信号, 同时, 经 64 分频后作为

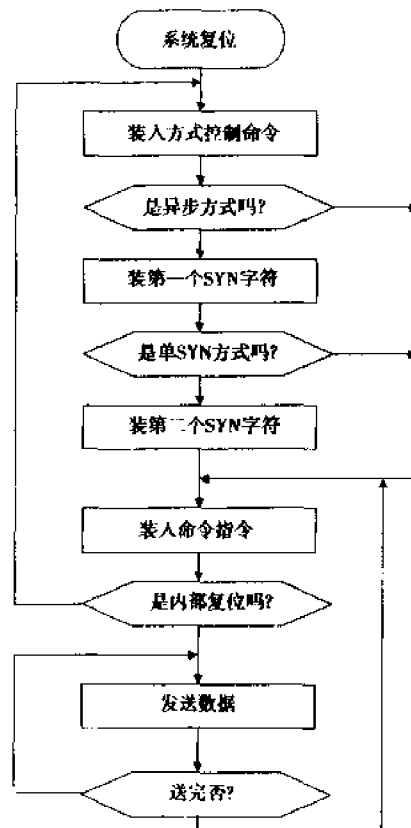


图 4-47 8251 初始化程序框图

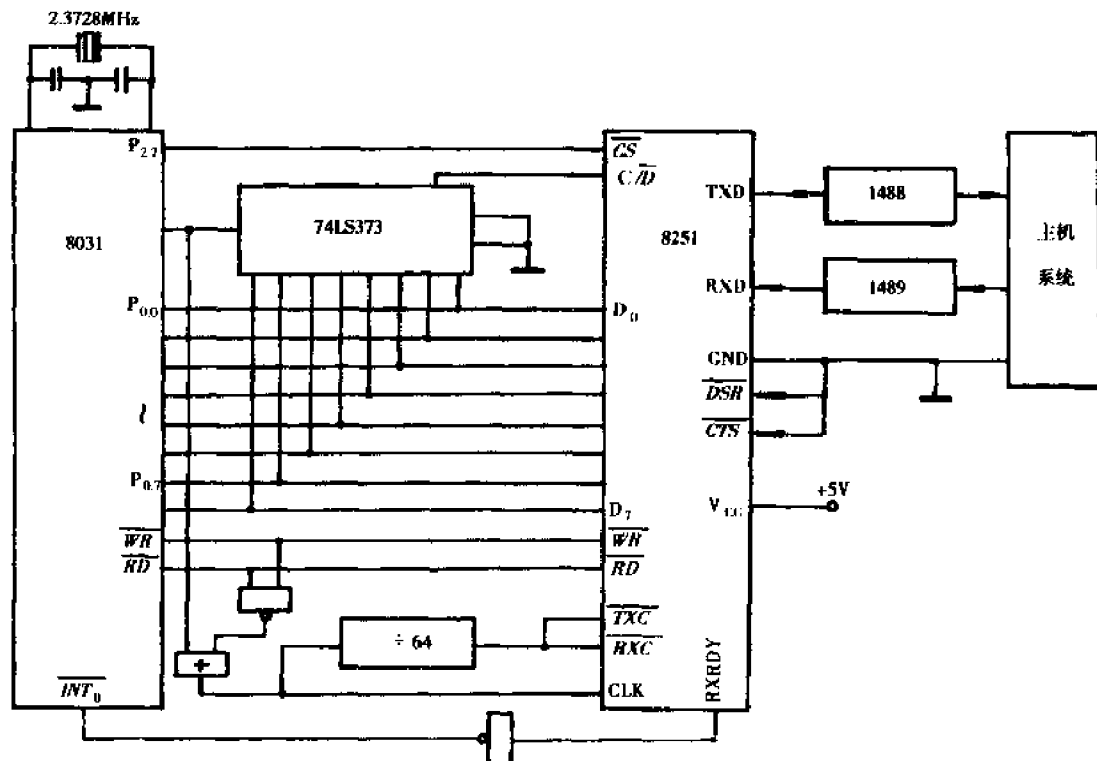


图 4-48 8031 扩展一块 8251 的接口电路

8251 的接收发送时钟。8251 的 $\overline{C/D}$ 接地线 A_0 ，片选线 \overline{CS} 接 $P_{2.7}$ ，这样，8251 的控制字和状态字寄存器地址为 7FFFH，数据缓冲地址为 7FFEh。8251 与终端(或主机系统)通信可采用简单的 RS232C 异步通信方式，由于 8251 输出输入为 TTL 电平，而主机接口为 RS232C 电平(+12V 为 0，-12V 为 1)，故 8251 和主机之间接有电平转换器 1488、1489。

下面是该接口的 8251 初始化和中断服务程序。若 8251 的通信采取异步方式，波特率为 1200，字符长度为 8 位，奇校验，2 位停止位。其方式控制字为 DEH，命令指令为 15H。

8251 的初始化程序如下：

START: MOV DPTR, # 7FFFH ; 依次送入方式控制字和命令指令

```

MOV A, # 0DEH
MOVX @DPTR, A
MOV A, # 15H
MOVX @DPTR, A

```

中断服务程序：

```

PINT0: PUSH A
      PUSH PSW
      PUSH DPH
      PUSH DPL
      MOV DPTR, # 7FFFH
      MOVX A, @DPTR
      RRC A

```



```

JC SISP ;为 TXRDY, 转发送处理
RRC A
JC RISP ;为 RXRDY, 转接收处理
PINT10:POP DPL
      POP DPH
      POP PSW
      POP ACC
      RETI
SISP: ...
      ...
      AJMP PINT10
RISP: ...
      ...
      AJMP PINT10

```

第三节 单片机控制系统

一、单片机控制系统基本结构

典型的单片机控制系统如图 4-49 所示。单片机完成比较运算、控制等功能。由于单片机的输入和输出信号都是数字信号,而反馈测量元件输出多数为模拟信号,执行机构多数也只能接收模拟信号,因此需要使用将模拟信号转换为数字信号的 A/D 转换器(输入电路),以及将数字信号转换为模拟信号的 D/A 转换器(输出电路)。

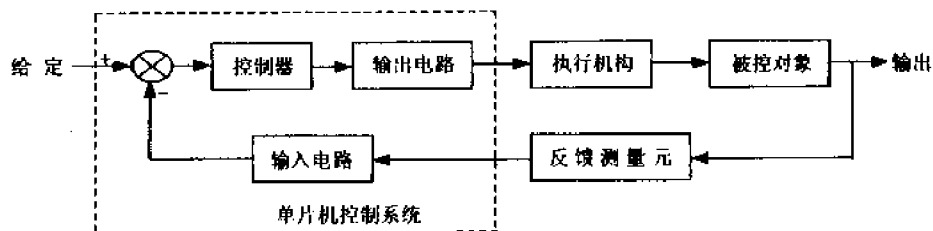


图 4-49 单片机控制系统基本框图

单片机控制系统的控制过程可归纳为以下三个步骤:

1. 实时数据采集:即对系统输出(被控参数)的瞬时值进行检测,并输入到单片机中。
2. 实时决策:对实时的给定值与被控参数的数据按一定的控制规律,进行运算和推理,决定控制过程。
3. 实时控制:根据决策,实时地向执行机构发出控制信号。

上述过程中的实时概念,是指信号的输入、运算和输出都要在一定的时间内完成。上述过程不断重复执行,使整个系统能按一定的静态和动态指标进行工作,这就是单片机控制系统的最基本的功能。

二、单片机控制系统的组成

单片机控制系统的组成如图 4-50 所示。单片机控制系统由单片机和控制对象两大部分组成。控制对象的被测参数经传感器、变送器,转换成标准信号,再经多路开关送至 A/D 转换器进行模拟/数字转换,转换后的数字量经接口送入单片机。单片机对数据进行处理和计算,然后经模拟量或开关量输出通道输出,对被测参数进行控制。

1. 单片机 它是整个控制系统的指挥部。它可接收从操作台来的命令,对系统的各参数进行巡回检测,执行数据处理、计算和逻辑判断、报警处理等,并根据计算的结果通过接口发出输出命令。它是组成控制系统的主要部分。

2. 接口与输入/输出通道 它是单片机与被控对象进行信息交换的纽带。单片机输入数据或向外发命令是通过接口及输入输出通道进行的。

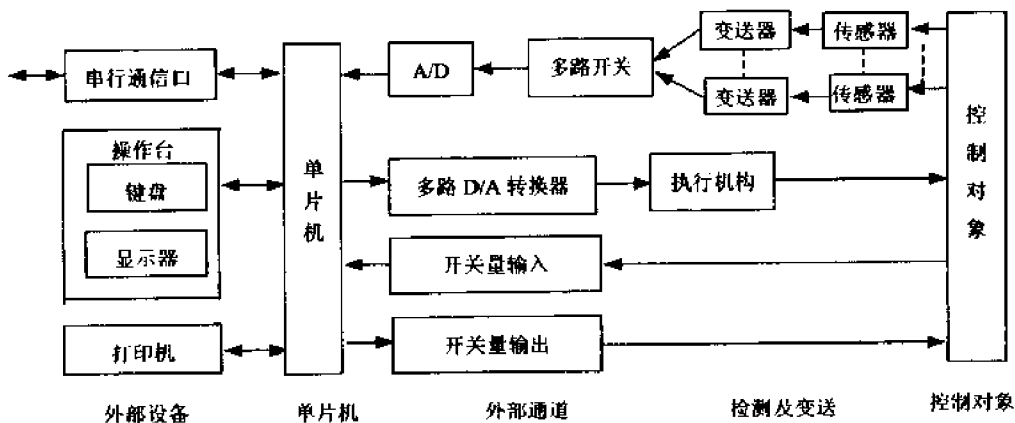


图 4.50 单片机控制系统的组成

3. 外部设备 是人机对话的联系纽带。通过它可发出各种操作命令,显示控制系统的工作状态和数据,并可输入各种数据。

4. 传感器和执行机构 单片机控制系统需要使用各种传感器把各种被测参数转变为电量信号,再转换成统一电平(如 0~5V)送到单片机中。同时,需要使用各种执行机构,按单片机的输出去控制对象。常用的执行机构有电动、液压和气动等各种控制形式。

三、单片机控制系统的分类

1. 按控制规律分类

(1) 程序控制 在某些生产过程中要求被控量按预先规定好的时间函数变化。这种按规律进行控制称为程序控制。

(2) 顺序控制 顺序控制是指以预先规定好的时间或条件为依据,按预先规定好的动作顺序对某项工作进行控制。

(3) 数值控制 数值控制是按预先规定的要求和轨迹,控制一个或数个被控对象,使被控点按预定的轨迹运动。数值控制技术应用于对加工设备(例如电火花加工)、测量设备和绘图设备等的控制。

由上述可见,程序控制、顺序控制和数值控制都是开环控制,但三者又有不同点:程序控制是以时间为条件进行控制;顺序控制不仅可以以时间为条件,还可以某些物理量为条件进行控

制;数值控制则要求被控点按某一轨迹运动。

(4)数字 PID 控制 这种控制系统按 PID 规律进行控制,是一种闭环控制系统。

(5)串级数字控制系统 这是一种双闭环控制系统,分内环和外环两个闭环回路。

(6)前馈控制 在反馈控制系统中,对象受干扰(扰动)后,必须在被控参数出现偏差后,调节器才对被控参数进行调节以补偿干扰对被控参数的影响。因而控制作用总是落后于干扰的作用。与反馈控制不同,前馈调节器就直接根据测得的干扰大小和方向按一定规律去控制,补偿干扰对被控参数的影响,而不是等被控参数发生变化后才去控制。因而是一种超前控制。

(7)选择性控制 选择性控制就是生产过程处于不同状态时采用不同的控制规律。这使整个系统安全且性能良好。

(8)最优控制 最优控制也称为最佳控制。最优控制是指在一定的约束条件下,使某一性能最优的控制。实现最优控制需要存储大量信息,需要快速进行大量运算,一般需要高档单片机。

(9)自适应控制 自适应控制也称适应控制,是最优控制的一个重要分支。自适应控制是当对象参数发生变化后,使系统仍工作在最优状态的控制。

2.按单片机参与控制的方式分类

(1)操作指导控制系统 所谓操作指导是指单片机的输出不直接用来控制生产对象,而只是对系统过程参数进行收集,加工处理,然后输出数据。操作人员根据这些数据进行必要的操作。其组成见图 4-51。

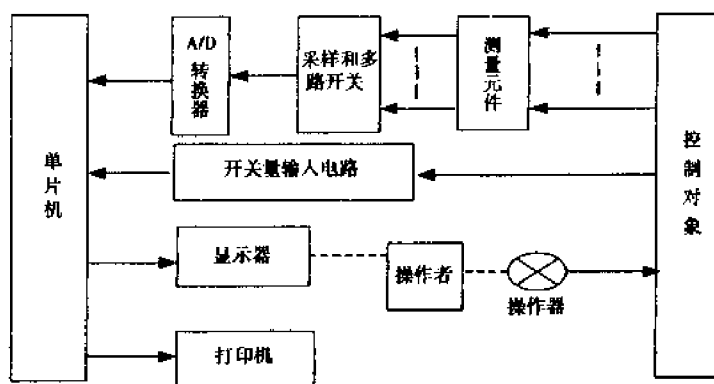


图 4-51 操作指导控制系统原理图

在这种系统中,每隔一段时间单片机进行一次采样,经 A/D 转换后送入单片机进行加工处理,然后进行报警、显示,并可定时存储或打印采集的数据。操作人员根据报警或显示的数据进行必要的操作,包括修改设定值。

该系统的优点是比较简单,且安全可靠。它常用于数据检测处理及试验新的数学模型和调试新的控制程序。缺点是要由人工操作,速度受到限制。

(2)直接数字控制系统(DDC) 直接数字控制(Direct Digit Control)系统简称为 DDC 系统,是用单片机对被控参数进行检测,再根据设定值和控制算法进行运算,然后输出到执行机构对生产过程进行控制,使被控参数稳定在给定值上。在 DDC 控制系统里,单片机不仅对数据进行采集,还通过输出通道直接对生产过程进行控制,因此称为直接数字控制系统。图 4-50 的控制系统就是直接数字控制系统。

(3) 监督控制系统(SCC)

监督控制系统(Supervisory Computer Control)简称 SCC 系统,它是比 DDC 系统更高一级的系统。在 DDC 系统中,是用单片机代替模拟调节器进行控制的。而在 SCC 系统中,则是由单片机测量被控参数,按照描述生产过程的数学模型,计算出最佳给定值送给模拟调节器或者 DDC 单片机,最后由模拟调节器或 DDC 单片机控制生产过程,从而使生产过程处于最优工作状态。SCC 系统较 DDC 系统更接近生产变化实际情况,它不仅可以进行给定值控制,还可以进行顺序控制、最优控制及自适应控制等, SCC 系统就其结构来讲,可分为 SCC + 模拟调节器和 SCC + DDC 控制系统两类。

① SCC + 模拟调节器控制系统 该系统原理如图 4-52 所示。

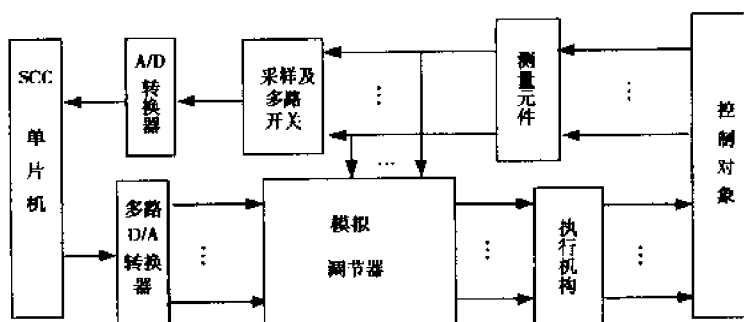


图 4-52 SCC + 模拟调节器控制系统原理图

在此系统中,SCC 单片机收集被测参数及管理命令,然后按照一定的数学模型计算后,输出给定值到模拟调节器。模拟调节器按给定值和检测值的偏差进行计算后,输出到控制执行机构,以达到调节生产过程的目的。这样,系统可根据生产情况的变化,不断地改变给定值,以实现最优控制。

② SCC + DDC 控制系统 该系统原理图如图 4-53 所示。

本系统为两级控制系统。一级为监督级 SCC,其作用与 SCC + 模拟调节器中的 SCC 在监督控制系统中的 SCC 一样,用来计算最佳给定值。直接数字控制器(DDC)用来把给定值与测量值进行比较,并进行数字控制计算,然后控制执行机构进行调节。与 SCC + 模拟调节器系统相比,其控制规律可以改变,使用更灵活,同时由于 DDC 本身具有 A/D 测量电路,它可直接把测量得到的数字量传送到 SCC,而 SCC 可把给定值的数字量直接发送给 DDC。

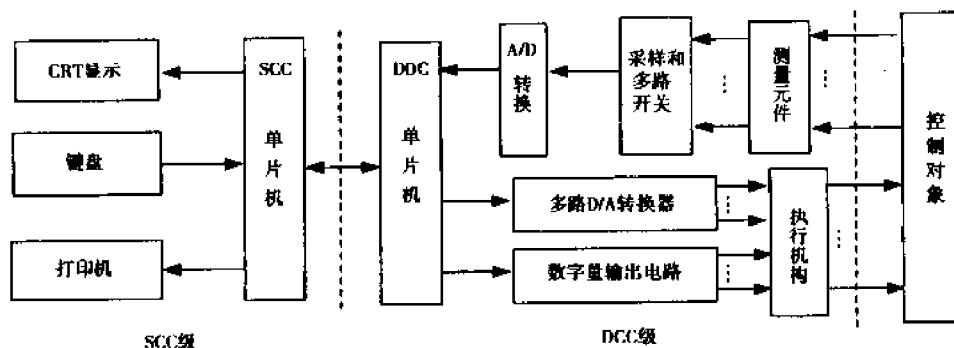


图 4-53 SCC + DDC 控制系统原理图

SCC 系统比 DDC 系统更接近于生产的实际情况,并且可构成多级控制系统。但是,由于生产过程的复杂性,其数学模型的建立比较复杂,所以该系统实现起来比较困难。

(4) 分级控制系统

生产过程中既存在控制问题,也存在大量的管理问题。廉价而功能完善的单片机的出现,允许多台微型机分别承担部分任务,组成分布式控制系统。这种系统使控制功能分散,用多台单片机分别执行不同的控制功能,用 PC 机等微型计算机完成上级控制和管理功能。它具有使用灵活方便、可靠性高、功能强等特点。图 4-54 所示的分级控制系统是一种四级分布式系统。

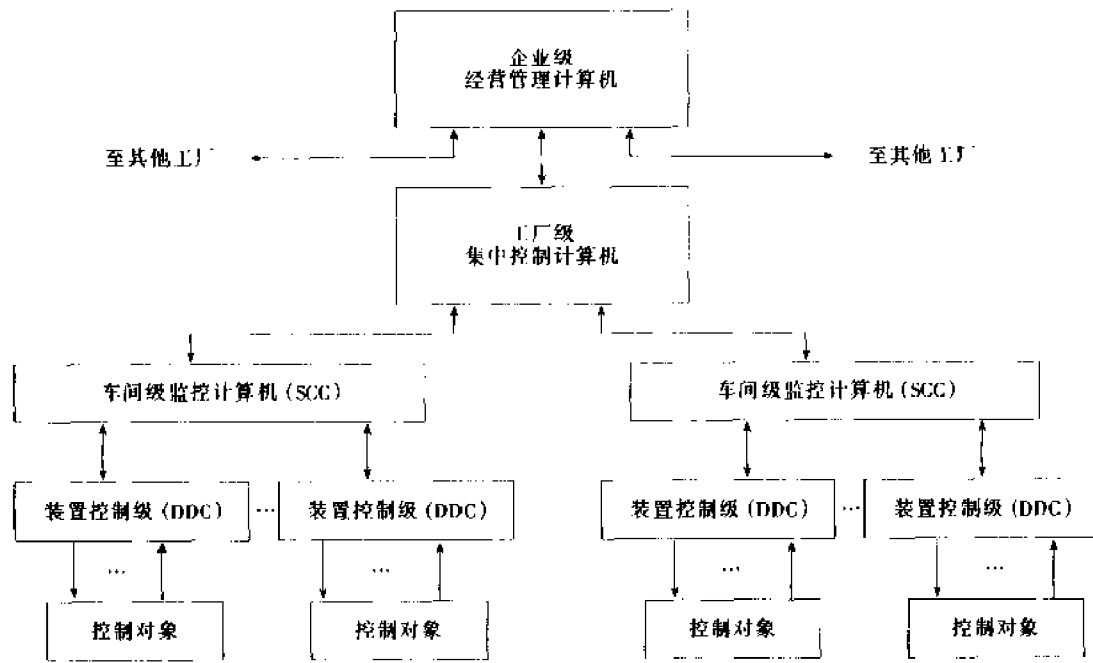


图 4-54 分级控制系统

第四节 沥青混凝土搅拌设备微机控制系统

一、沥青混凝土搅拌设备简介

沥青混凝土是在不同粒度的碎(砾)石、砂子和石粉等矿料中加入沥青,经过搅拌而成的沥青混合料。碎(砾)石是沥青混合料的骨架,统称为骨料。砂子用来增加矿料与沥青的粘结面积。石粉作为填充料与沥青共同形成一种糊状粘结物,填充于骨料之间,增加砂石料的粘结强度,从而提高沥青混凝土上的强度。生产沥青混凝土的机械设备统称为沥青混凝土搅拌设备。

传统的沥青混凝土搅拌设备分为连续式和间歇式两种,两者的组成部分基本相似,只是搅拌器的结构以及石粉与沥青的供给形式有所区别。本节以传统间歇式沥青混凝土搅拌设备为例。图 4-55 为其结构原理示意图。它由冷骨料的定量供给和输送装置、石粉供给装置、沥青供给装置、干燥滚筒、热骨料提升装置、热骨料称量装置、搅拌器、除尘装置等主要部分组

成。

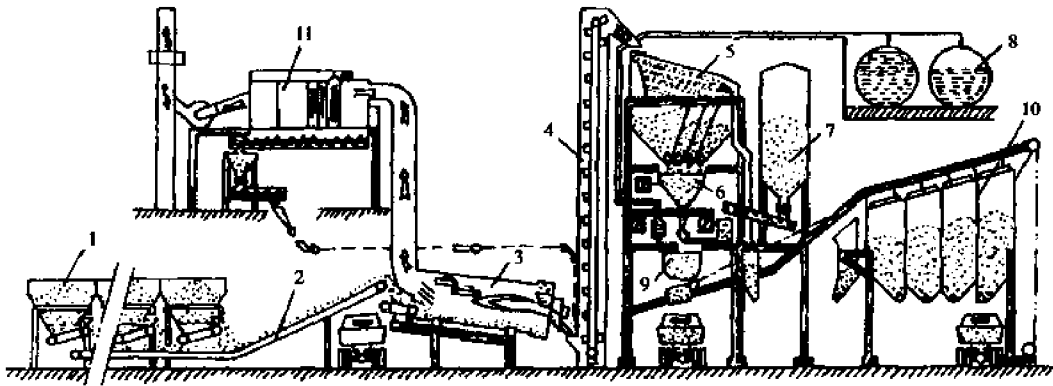


图 4-55 传统间歇式沥青混凝土搅拌设备基本结构示意图

1-冷骨料定量给料装置;2-冷骨料输送机;3-干燥滚筒;4-热骨料提升机;5-热骨料筛分机和热骨料储斗;6-热骨料计量装置;7-石粉储仓和定量供给装置;8-沥青保温罐和定量供给装置;9-搅拌器;10-混合料成品储仓;11-除尘装置

沥青混凝土搅拌设备的工艺流程如下:

1.不同规格的冷砂石料分别储入各自的料斗→冷骨料定量给料装置对各料按容积进行粗配→冷骨料输送机 2 传输→干燥滚筒 3 烘干加热(喷燃器的火焰逆流烘干加热到足够温度)→热骨料提升机 4 转输→热骨料筛分机 5 筛分→热骨料储入各自的临时料斗(以上过程为连续进行)→热骨料计量装置 6 精确称量→搅拌器 9 搅拌;

2.石粉→石粉储仓 7→石粉称量装置→搅拌器 9 搅拌;

3.沥青(流体)→沥青保温罐 8→沥青称量装置→搅拌器 9 搅拌;搅拌好的混合料成品直接运往工地或由成品料斗送入混合料成品储仓 10。

4.干燥滚筒 3 与热骨料筛分机等所产生的粉尘→除尘装置 11 将粉尘分离出来→石粉定量给料装置 7 回收再用。

为了保证沥青混凝土搅拌设备按要求的工艺流程运行及得到高质量的沥青混凝土拌和料,无论搅拌设备的结构形式如何,都采用了电子监测和自动控制系统。有由多台电子秤组成的称量系统实现骨料、石粉和沥青等成分的精确配比;干燥滚筒出料温度的自控系统;沥青加热的导热油自控系统等。控制形式有继电器控制式、程序控制式、可编程控制器(PLC)式、单片机和微机控制型式及几种控制式并存的混合控制型式。

二、沥青混凝土拌和设备为微机控制系统

1. 概述

沥青混凝土计算机控制系统是沥青混凝土搅拌设备的核心控制设备,用以实现拌和设备生产过程的自动控制、主要工作环节的安全检测及生产管理等。

此控制系统可采用分布式控制系统组成方案,分别对拌和设备的生产过程进行控制。其控制系统构成框图如图 4-56 所示。其控制微机采用单片机,提高了整个系统的安全性,其管理计算机可以使用“Microsoft Windows”工作平台上的管理软件,用于生产过程监视、工作参数设置、故障报警等功能,可以完成生产数据存储、车辆管理、打印等。

2. 控制系统的主要功能及特点

本控制系统对搅拌设备的工作状态和生产过程按照给定的工作程序进行控制,控制操作系统采用双屏界面显示,能动态反映工作流程,并能够以全自动、半自动、手动干预三种工作方式进行操作,其基本功能如下:

(1)配料搅拌控制管理部分

①控制操作系统界面显示,主要工作流程显示,能对设备的生产能力进行设定。

②能进行配料比例设定、存储;冲量修正值设定;可在计算机屏幕实时显示各种料称量值及配给值。

③搅拌工作周期及时间的设定;自动控制搅拌过程。

④骨料配料、粉料配料、沥青配料的自动控制;配料精度是搅拌设备的主要技术指标之一,为了保证配料误差在允许范围之内,可在软件设计上采用自适应控制算法,确保配料精度。

⑤热料料位的检测,热骨料料位异常时提示并报警。

⑥若系统运行中出现故障,及时报警并提示故障信息。

⑦有关资料统计与存储,各种配比存储以及票据打印。

(2)温度控制部分

①设定并显示控制系统各部分温度值,包括成品料温度、沥青温度、干燥筒出料槽骨料温度、热料储仓内的料温等。

②相关温度检测与显示。

③燃烧器工作温度设定(骨料加热温度的设定);燃烧器初始油门开度,火焰状态等参数显示与控制。

④干燥筒内静压检测与控制。

⑤对袋式除尘器滤清前后烟气压差的检测与控制。

⑥冷骨料供料系统变频调速控制,能对多斗分储的冷骨料采用变频调速来调节冷骨料供应量。供料系统工作异常能适时处理并给出报警信号。

⑦低温结露、超高温及压差异常时自动报警。

⑧热骨料料位异常时提示并报警。

⑨其系统设计特点为:

称重传感器信号采用 V/F 变换。变送器把模拟信号转换为数字信号(脉冲)进行传送。避免了传感器输出的毫伏(mv)级模拟信号在长距离传送中干扰对其产生的影响。

温度测量使用温度传感器,通过 A/D 转换,将温度信号转变为数字信号。

采用工业控制计算机,开关量输入、输出板,D/A 板等采用标准的工控产品,从硬件上为系统安全可靠运行提供保证。

开关量输入、输出采用光电隔离措施,阻止外界干扰信号串入计算机控制系统。

冷骨料供料采用变频调速控制,保证了冷骨料供料量的连续可调。

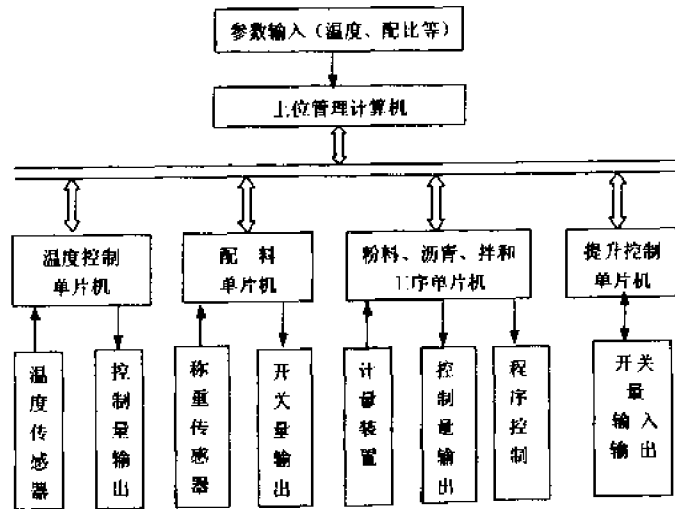


图 4-56 控制系统原理图

控制程序设计采用了软件容错措施。

配料计量过程具有自适应能力。沥青配给量可实时依据配比及骨料、粉料的实际称量值进行修正,保证系统满足较高的配比要求。

界面显示,可直观形象地反映搅拌设备的主要工作流程及参数。

系统设计考虑到功能扩展的可能要求,必要时可增加袋式除尘器控制。

三、冷骨料配料及温度检测控制系统

1. 冷骨料供给控制

骨料供给系统用于对所需各种规格的砂石料进行定容配给,以便把不同规格的砂石料按一定的比例供给干燥滚筒,使再筛分后各热骨料储仓的储料得到平衡。所以,它对混合料成品质量的影响很大,初次配比应力求尽可能准确。

冷骨料计量供给系统是连续作业式的,它由料斗、可调速的皮带给料器、电磁振动器和皮带输送机等组成。图 4-57 为骨料供给系统结构原理示意图。它是由皮带给料器 3 按一定比例(粗级配)将料送到集料皮带机 4 上,再由集料皮带机输送到倾斜皮带机 5 上,倾斜皮带机把料送入烘干滚筒。在储料仓仓壁上装一个电磁振动器,通过振动器振动来帮助将粘料和结料顺利卸出。皮带给料器由直流调速电机拖动,直流调速电机的速度决定骨料粗级配。调速电机速度的稳定性直接影响着骨料粗级配的精度。

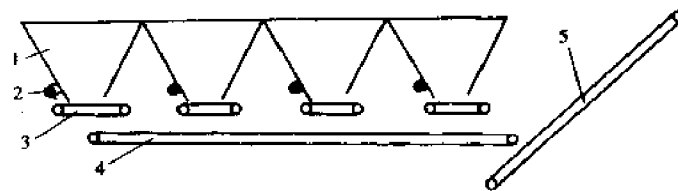


图 4-57 骨料供给系统结构原理示意图

1-料斗;2-电磁振动器;3-皮带给料器;4-集料皮带机;5-倾斜皮带机

调速电机速度的控制采用变频调速控制,可以设定或调整变频器输出频率,以便设定或调整冷骨料供给量。在生产过程中若出现某种型号的集料缺料或溢料,应加大或减小其对应变频器的输出频率。

2. 温度检测控制

用于对沥青温度、压力与压差、燃烧器和引风机进行设定、监测及状态显示,可以对风门进行开大或关小操作并显示其开度状态。在生产沥青混凝土混合料时,必须把骨料烘干并加热到所需要的工作温度,这个工作由燃烧器来完成。

目前在干燥滚筒上所用的燃烧器大多为喷气式,简称喷燃器。其特点:自动调节燃油、空气比率,燃烧火焰稳定、可调;电点火可在控制室内进行遥控点火;具有火焰监测系统 and 鼓风监测系统,能随时了解燃烧状态。

喷燃器的温度自动控制系统图如图 4-58 所示。它由温度和状态检测装置、控制器和燃油空气比率控制系统等部分组成。

控制器根据检测信号驱动步进电机,燃油空气比例控制系统由步进电机带动四连杆机构,使燃油和空气按固定比例平稳增减,从而调节出料温度。根据控制器的不同可分为传统温度自动控制系统和单片机温度自动控制系统。

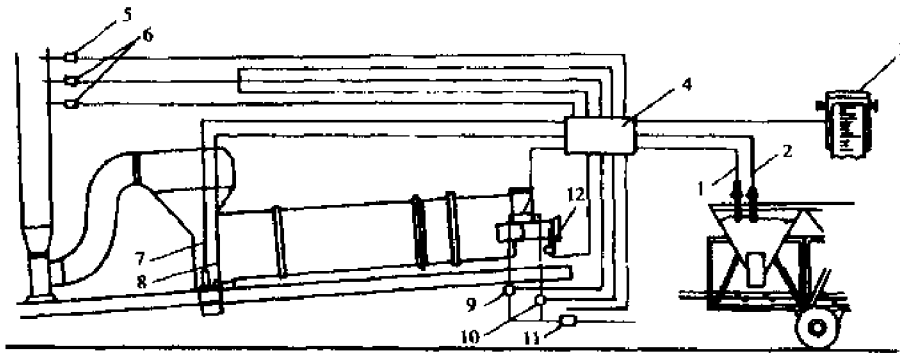


图 4-58 Parker 公司滚筒式搅拌设备喷燃器温度控制系统图
 1-含水量探头;2-测温计;3-记录显示器;4-控制器或微机;5-烟气测温器;6-烟气分析仪;7-出料含水量探头;8-出料测温器;9-燃油供给压力计;10-回油压力计;11-燃油泵;12-空气流量计

喷燃器的温度自动控制系统包括燃烧器的点火控制和燃烧器的火焰调节(即出料温度控制)两部分内容。传统温度自动控制系统中燃烧器的点火控制采用步进程序控制原理,配以程序紊乱检测和程序止步检测装置,一旦发现错误信号,迅速报警,使程序关掉已开启的点火部件而回到等待状态,传统的自动调温系统的组成原理如图 4-59 所示。其控制流程图如图 4-60 所示。系统中选用热电偶或红外测温仪作为温度检测装置。在实际工作中,烘干筒进料口料温随时间有微小变化,出料口料温也将随时间有微小变化,那么自动调温系统在正常工作时将一直处于微调温的动平衡状态。

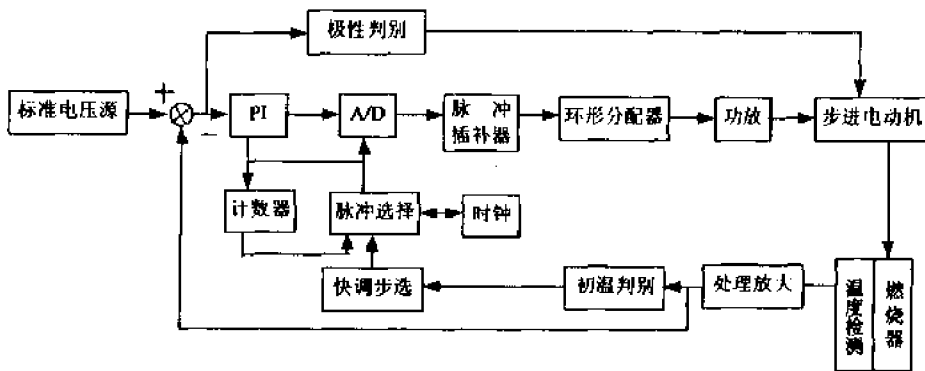


图 4-59 自动调温系统框图

由于砂石料的储存设施为露天堆料场,其含水量的变化范围较大,而沥青混凝土搅拌设备对出料温度的稳定性要求较高,所以对温度自动控制系统就提出了更高的要求,不但要求其有快速的响应特性,而且要求出料温度恒温稳定,用传统的温控系统就很难完成。所以从 80 年代初开始,各搅拌设备生产厂家对其设备的温控基本上都采用了单片机或微机温度自动控制系统,图 4-61 为微机温度自动控制系统框图。

该系统由红外温度测量单元、热电阻温度计、燃烧流量计、风油门控制器(简称风油器)、火焰探测器和控制计算机组成。

热电阻温度计和红外温度测量单元测量烘干滚筒出料口处的料温,尾气温度计测量排烟道处的温度,这些温度信号经过一定的运算处理,得到温度调节信号,根据温度目标信号与温度调节信号之间的差异,决定风油门开度的变化,从而及时改变搅拌设备出料口的温度,燃烧器的温控过程流程图,如图 4-62 所示。

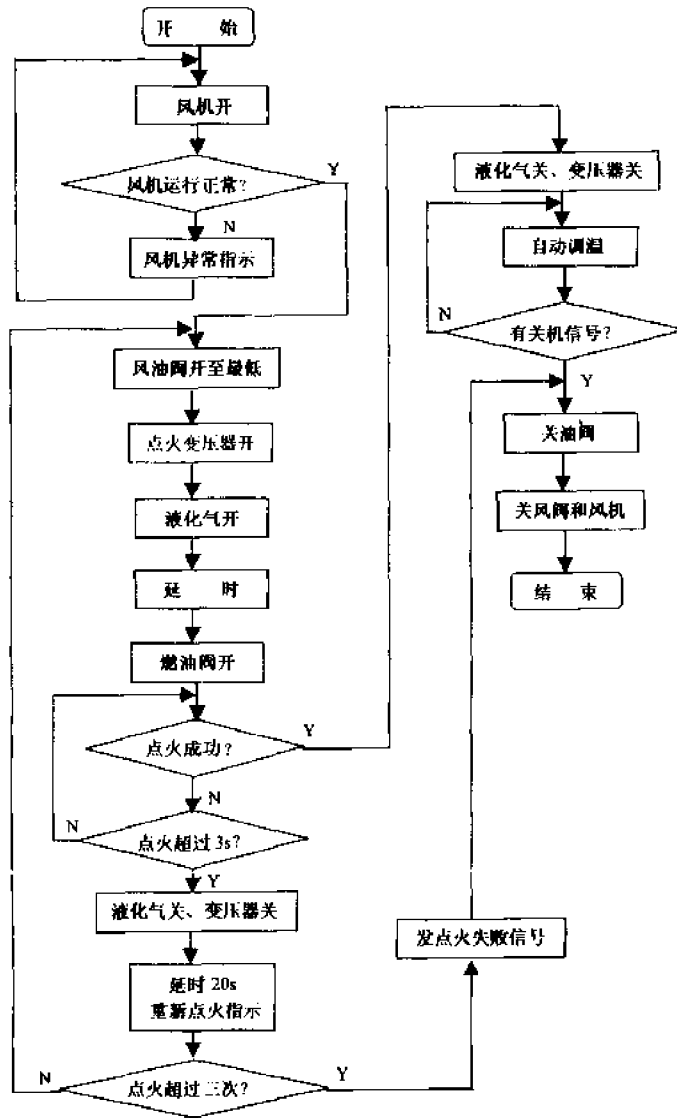


图 4-60 燃烧器控制过程流程图

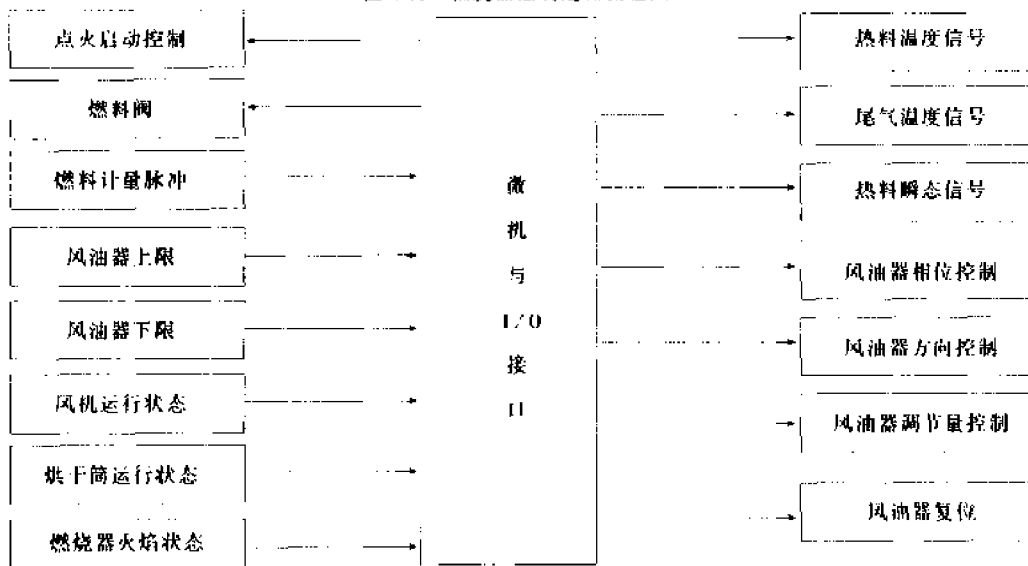


图 4-61 微机温度自动控制系统框图

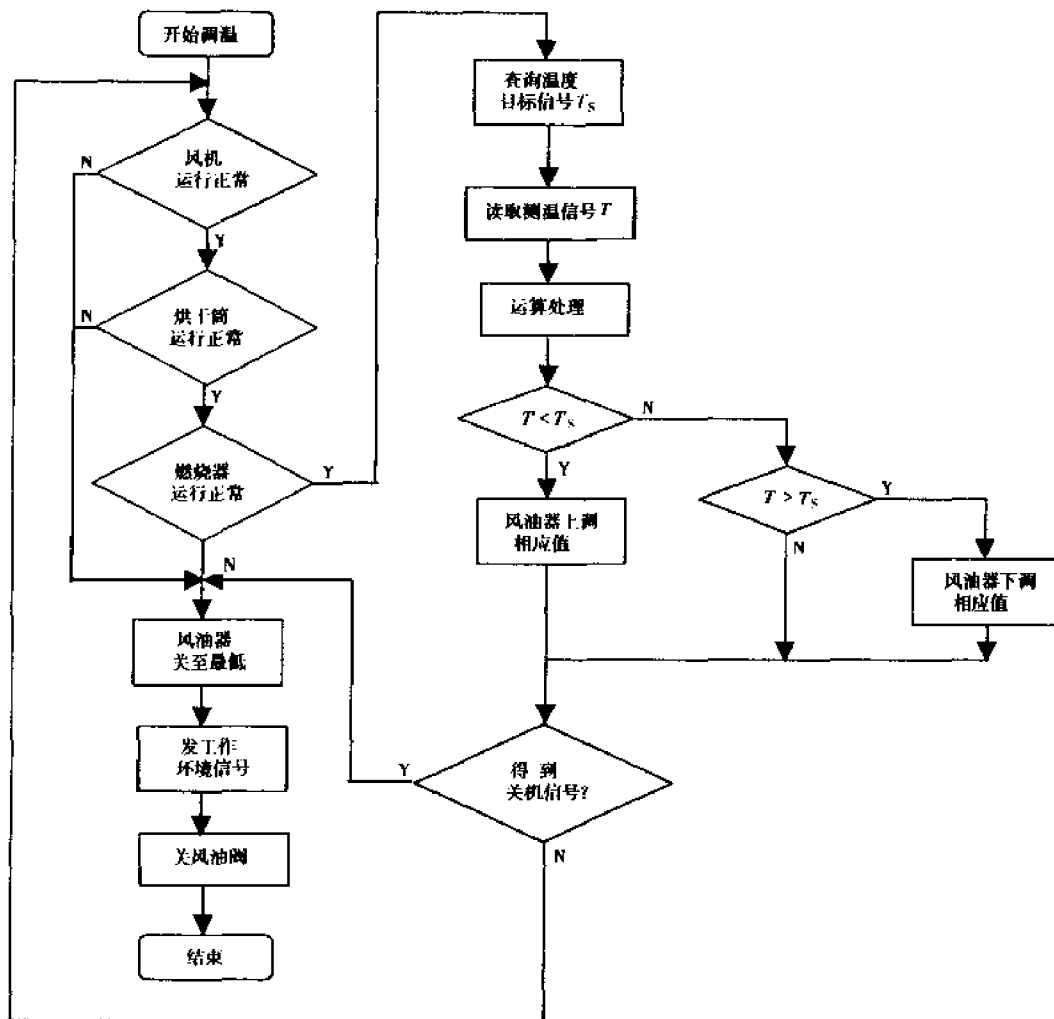


图 4-62 温控过程流程图

四、配料搅拌控制系统

该系统可以完成对生产过程中热骨料的配料及搅拌工作的控制,通过软件设计的方法可以设置主要工作参数,可以控制检测与显示有动作机构的工作状态,可以设置配料参数,在不正常工作情况下可报警。

1. 热骨料称量控制系统

骨料系统结构如图 4-63 所示。粗级配的冷骨料经烘干滚筒加热后,由提升机输送于振动筛,振动筛将热骨料混合料筛分为不同粒径的四种料,分别储存在各自的热料仓中。热料仓底部各有一个放料弧门,由气缸控制其关闭。四个料仓的骨料依次放入称量斗中进行称量,称量完毕后放料门将骨料分两次放入搅拌锅中。

称量斗中有块隔板,一边放石料,一边放砂料,放料时先放石料,后放砂料。放料门由两个对接的气缸控制,当一气缸杆伸出时,放料门开至一半,石料放出;当另外一个气缸杆也伸出时,放料门完全打开,砂料放出。

热骨料称量采用四只传感器并联使用。四种热骨料依次在称斗中进行累计称量,因此,第一次称量时,表头上的读数为第一种料的质量;第二次称量时,表头上的读数为第一种料和第二种料的合计质量;其余类推。

图 4-64 料称量控制系统原理框图。它由微计算机称量传感器及以下变速器、料位探测器及其适调放大器、开关量输出驱动放大器及其控制元件组成。

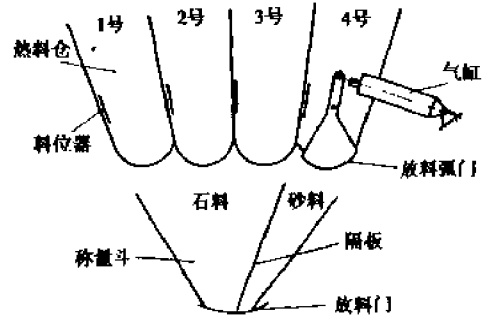


图 4-63 骨料称量系统结构示意图

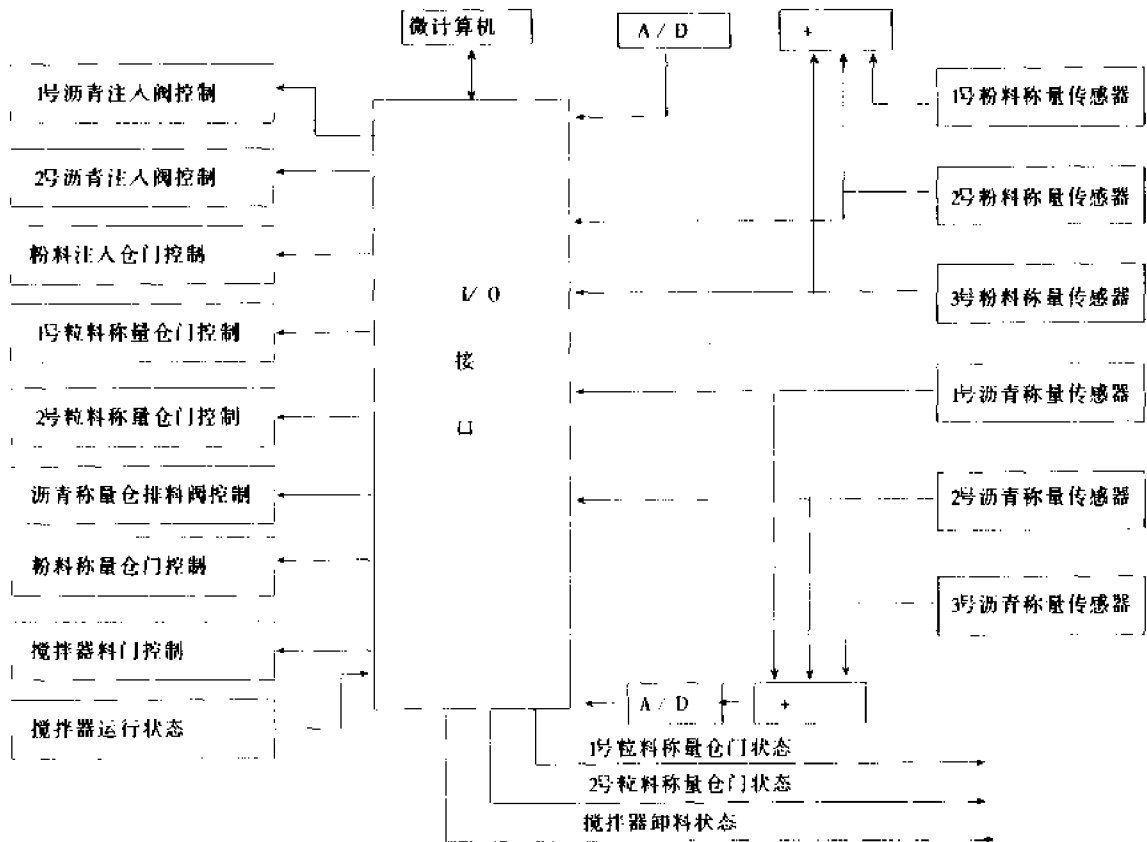


图 4-64 微机热骨料称量控制系统原理图

图 4-65 为热骨料称量控制系统工作流程图。

2. 沥青粉料称量和搅拌工序控制系统

沥青称量时,沥青通过两个沥青注入阀注入沥青称量斗。当沥青称量开始时,1号沥青注入阀工作,由于1号沥青注入阀比2号沥青注入阀的通路要大得多,所以,沥青称量开始时,沥青快速注入沥青称量斗,此称为沥青的粗称。当称量斗内沥青质量达到设定值的85%时,1号沥青注入阀关闭,2号沥青注入阀打开,沥青缓慢注入称量斗,此即为沥青的精称。当沥青的质量达到设定值时,关闭2号沥青注入阀,停止沥青的注入,完成一次沥青的精称。采用沥青粗称和精称的目的是在保证沥青称量的速度的前提下,尽可能避免沥青超称。

当骨料称量斗放料门第二个动作开始的同时,即开始放砂料的同时,称量斗内称量好的沥青通过沥青计量仓排料阀被放入搅拌器内,进行拌和。

图 4-66 示出了沥青称量控制系统流程图。

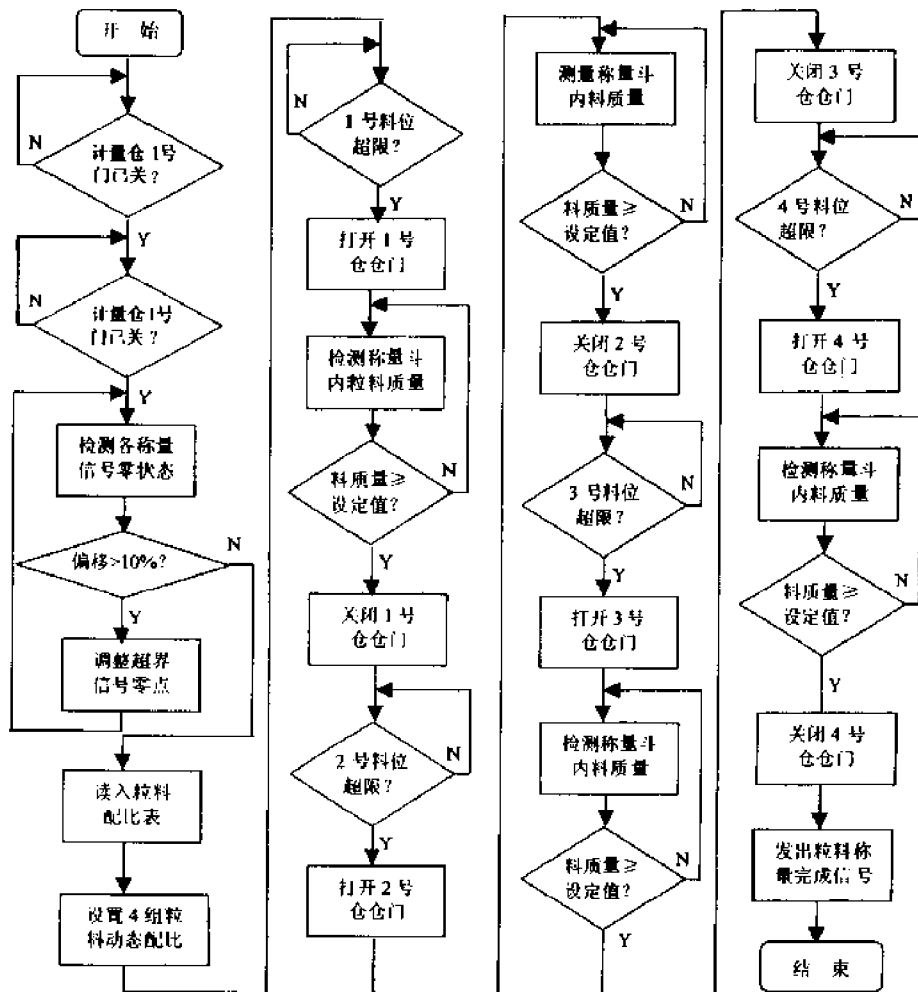


图 4-65 热骨料称量控制系统流程图

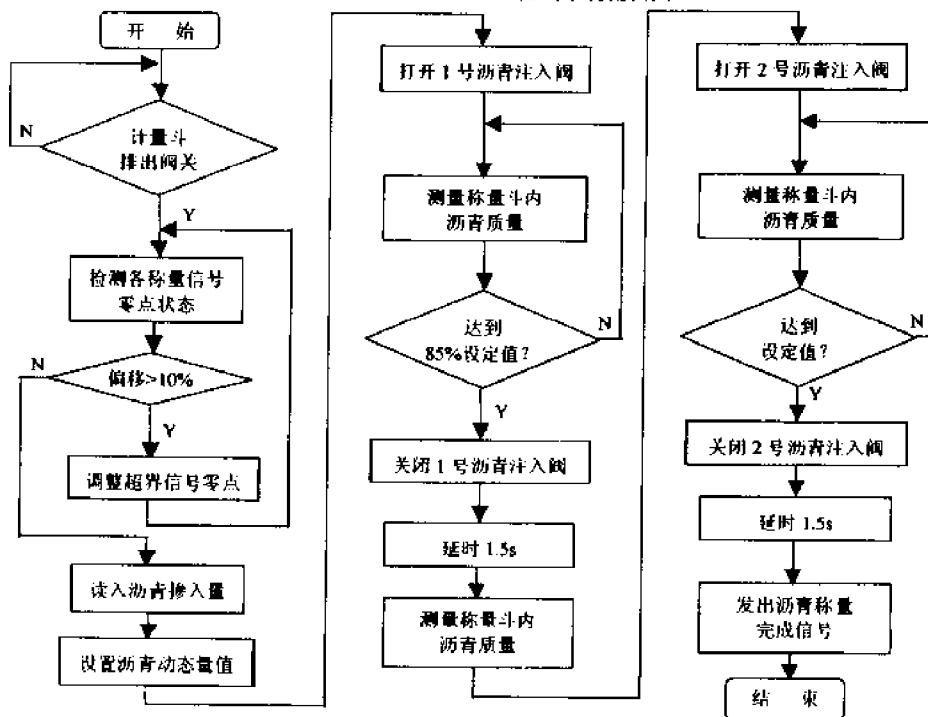


图 4-66 沥青称量控制流程图

粉料的供给是通过一个连锁控制的粉料螺旋给料机和粉料注入仓门提供的。当开始粉料称量时,粉料螺旋输送电机启动,螺旋开始转动,通过同时开启的粉料注入仓门将粉料送入粉料称量斗。称量斗称量仓斗内粉料质量,当粉料质量达到预先设定的要求值时,螺旋输送机 and 粉料注入仓门同时关闭,停止向粉料称量斗里送粉,完成一次粉料称量,等待卸料。当粉料称量斗门控制电磁阀动作时,使粉料称量斗门控制气缸作,打开粉料称量斗门,向搅拌器内放粉料。

沥青、粉料称量和搅拌工序的微机控制系统框图如图 4-67 所示。

搅拌工序控制流程图如图 4-68 所示。

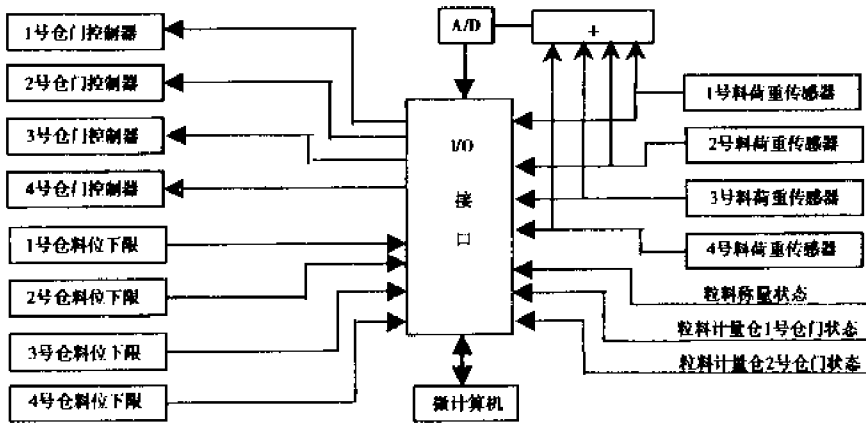


图 4-67 沥青、粉料称量和搅拌工序微机控制系统框图

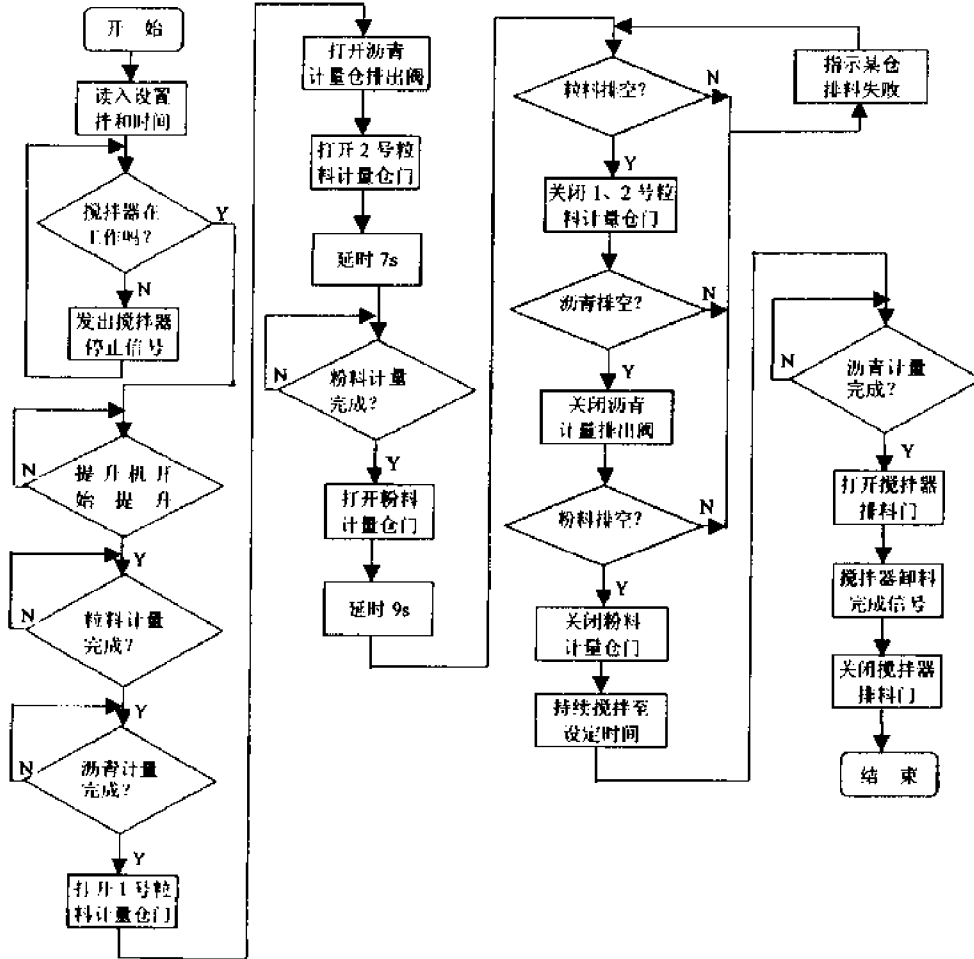


图 4-68 搅拌工序控制流程图

第五章 可编程控制器(PLC)

第一节 可编程控制器的组成和工作原理

一、概述

可编程控制器(Programmable controller,简称 PLC 或 PC)是以微处理器为基础,综合了计算机技术和自动控制技术而开发的新一代工业控制器产品。它具有面向用户的编程语言,是一个完整的、通用型的工业控制装置,已被广泛应用到机械、冶金、化工、煤炭、轻纺等各个领域,不仅极大地提高了劳动生产率和自动化程度,而且推动了工业技术革命的进程。

随着科学技术的不断发展,可编程控制器技术日趋完善,其功能越来越强。它不仅可以代替继电器控制系统,使硬件软化,提高系统的可靠性和柔性,还具有运算、计数、计时、调节、连网等许多功能。可编程控制器与计算机系统也不尽相同,它省去了一些函数运算功能,却大大增强了逻辑运算和控制功能,其中包括步进顺序控制、限时控制、条件控制、计数控制等等,而且逻辑电路简单,指令系统大大简化,程序编制方法容易掌握,程序结构简单直观。它还配有可靠的输入输出接口电路,可直接用于控制对象及外围设备,使用极其方便,即使在很恶劣的工业环境中,仍能保持安全可靠运行。

总之,可编程控制器与传统的继电器控制系统或其它过程控制系统相比具有如下特点:

(1) 功能完善。

它具有数字量和模拟量输入、输出,逻辑运算和算术运算,具有计数、计时、顺序控制、功率驱动、PID 调节、过程调节、通讯联网、人机对话、自检、记录、打印等功能,使被控设备的机能有了新的发展。

(2) 硬件过程的可靠性高,环境适用性好。

可编程控制器采用了大规模集成电路和微机技术,外部连线少,可靠性高。其设计时就考虑了坚固、可靠和抗干扰能力。这就给工业现场大量使用可编程控制器提供了方便。

(3) 改变控制功能容易。

在生产工艺流程发生改变或生产线的机械设备更新之后,在 I/O 点数、功能和容量满足的条件下,不必改变可编程控制器的设备硬件,只需改变 I/O 接线和改变程序就可满足要求,因此在工业自动化系统中被广泛使用。

(4) PLC 编程简单。

它采用了面向操作者的语言编程,如继电器梯形图、逻辑功能图语句等。用户无需了解复杂的计算机知识就可以使用和编程。

(5) 可编程控制器结构紧凑,体积小,性能价格比高,省电。

根据输入、输出的点数和功能对 PLC 进行分类,可分为小型、中型、大型三大类。如表 5-1 所示。

PLC 性能比较表

表 5-1

性能 \ 机型	小型 PLC	中型 PLC	大型 PLC
I/O 能力	128 点以下	128 ~ 512 点	512 ~ 8192 点
CPU	8 位处理器	8 位字处理器和位处理器	16 位字、位浮点处理器
存储器	2 ~ 4KB	4 ~ 16KB	16 ~ 64KB
机功能	逻辑运算和控制计数、计时、步控适用开关量控制	逻辑、数值运算和控制计数、计时、步控适用开关、模拟量控制和通讯联网	逻辑、数值运算和控制计数、计时、步控适用开关、模拟量控制和远程 I/O、网络通讯

二、可编程控制器的系统组成

可编程控制器的结构框图和计算机是一样的,都由中央处理器(CPU)、存储器和输入/输出接口等构成。因此,从硬件结构来说,可编程控制器实际上就是计算机,图 5-1 是可编程控制器硬件系统的简化图。

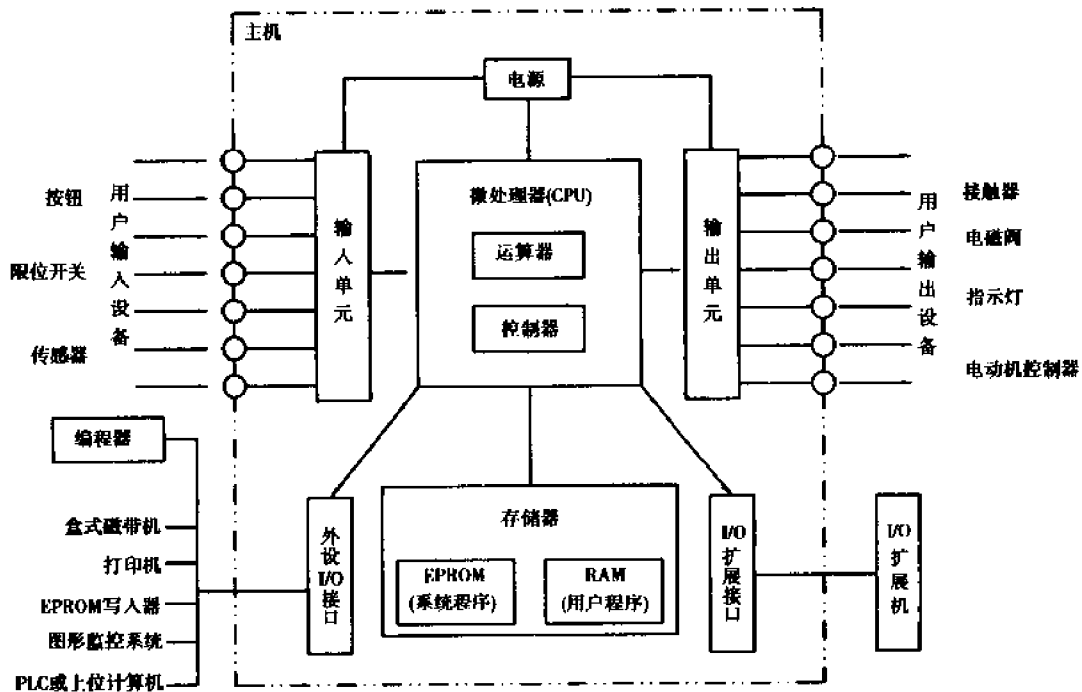


图 5-1 可编程控制器硬件系统简化图

1. 中央控制器 CPU

CPU 是可编程控制器的核心部件之一,由大规模或超大规模的集成电路微处理器芯片构成。常用的有 Intel8080、8086、8088、Motorola6800、68000、Z-80、Z-8000 以及单片机或位片式微处理器等。CPU 是整个可编程控制器的核心,起着总指挥的作用。它的功能是:

- (1) 将现场信号输入可编程控制器中存储起来;
- (2) 按存放的先后顺序取出用户指令,进行编译;
- (3) 完成用户指令规定的各种操作;
- (4) 将结果送到输出端;
- (5) 执行系统诊断程序;

(6) 与外部设备或计算机通讯等。

2. 存储器

可编程控制器的存储系统包括两个虚拟存储器:第一个称系统存储器,第二个称应用存储器,如图 5-2 所示。系统存储器包括永久存储器,并视为 PLC 系统的一部分,这些监控程序控制所有系统活动,如控制程序执行、与外设通讯及其它。系统存储器部分是 PLC 用于存放指令(软件)如继电器指令、块转移、算术指令等内容,这部分存储器是用户不能访问的。应用存储器为用户输入的应用控制程序提供存贮区,PLC 应用存储区包括几个部分,每一部分都有特定的功能和用途。

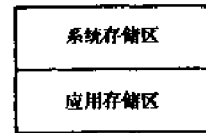


图 5-2 PLC 存储系统简单块图

3. 输入单元

输入单元有交流输入和直流输入两种:

交流输入单元基本电路如图 5-3 所示。交流输入信号通过整流桥变成直流信号,再经过限流滤波后加到光电耦合器件上,最后经接口电路送到 CPU。图中发光二极管作为输入信号指示用, R_1 、 C_1 作为抗干扰的阻容吸收电路。输入电压有交流 24V、100 ~ 130V、200 ~ 240V 三种,输入阻抗 2 ~ 20k Ω 。

直流输入基本电路如图 5-4 所示。直流输入信号经光电耦合器件和接口电路送 CPU。发光二极管作输入信号指示。电阻和电容起限流和抗干扰作用。直流输入电压为 24V,输入阻抗为 2k Ω 。

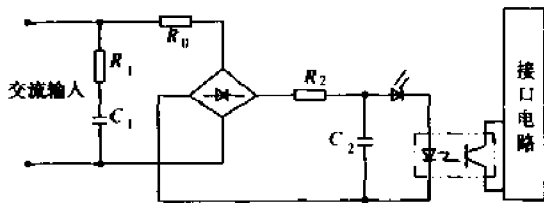


图 5-3 交流输入电路

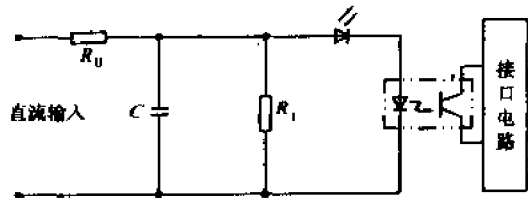


图 5-4 直流输入电路

4. 输出单元

输出单元有继电器触点输出,晶体管输出,可控硅输出三种形式,如图 5-5 所示。图中发光二极管作为输出指示用。对于继电器输出,其负载可以是交流负载(交流 220V,2A),也可用于直流负载(直流 24V,2A)。晶体管输出只用于直流负载(直流 24V,2A)。双向可控硅输出用于交流负载(交流 110V,2A;220V,2A)。

5. 逻辑部件单元

逻辑部件是指由各种继电器及其触点组成的,能实现一定逻辑功能的控制电路。提供的继电器逻辑有逻辑与、或、非等,用来处理各种继电器的连接。可见,PLC 中所说的继电器只是一个逻辑概念,通常称为“软继电器”,常把 PLC 内部存储单元的两种状态“0”、“1”,看作是继电器触点的“ON”(接通)、“OFF”(断开)。这种“软继电器”与通常的实际继电器相比有许多特点:无触点,速度快,有无数多个且容量不限的常开和常闭触点供程序应用,体积小,功耗低,寿命长。

(1) 输入继电器输入单元的一个接点相当于一个输入继电器,它用来接收外部传感器或开关发来的信号。可提供许多常开常闭触点供编程时使用(实质上是调用该元件的状态)。编程时应注意,输入继电器只能由外部信号驱动,不能由程序中指令驱动,其触点也不能直接输出

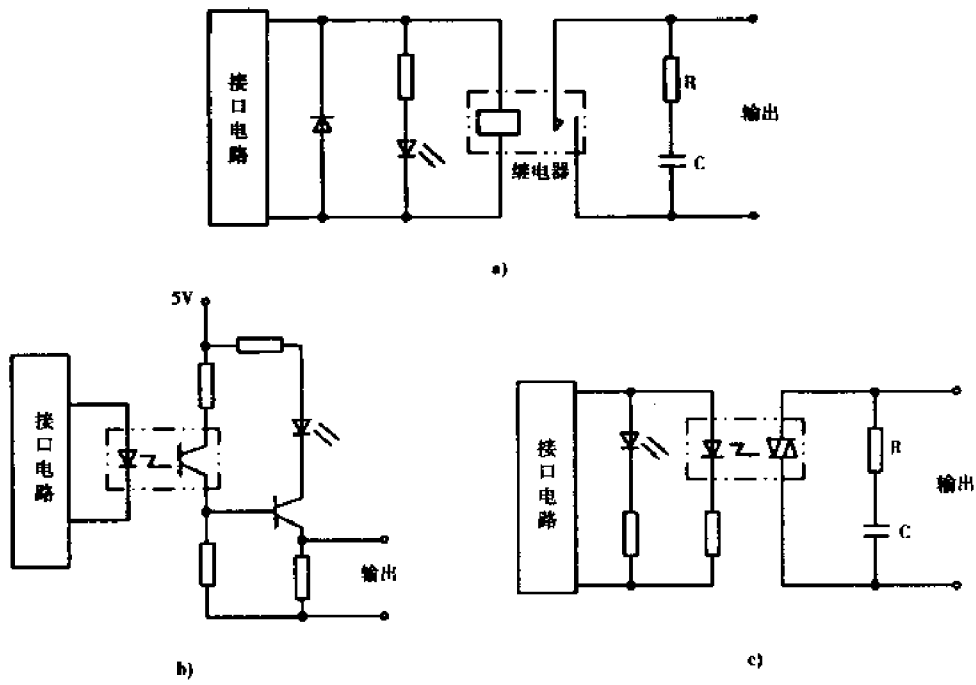


图 5-5 三种输出电路形式

a)继电器触点输出;b)晶体管输出;c)双向可控硅输出

带动负载。图 5-6 为输入继电器的等效电路图。在 PLC 内部有许多输入继电器,为了准确使用,给每个继电器都分配一个地址(编号为:X001 至 X016)。

(2)输出继电器输出单元的一个接点相当于一个输出继电器,它的作用是将 CPU 发出的控制信号传送给外部负载(具有一定的负载能力),外部信号无法驱动,只能由指令驱动。它有继电器输出、晶体管输出和可控硅输出形式。(编号为:Y025 至 Y032)。图 5-7 为输出继电器与外部负载的连接图。

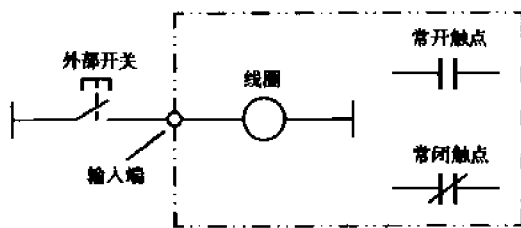


图 5-6 输入继电器的等效电路图

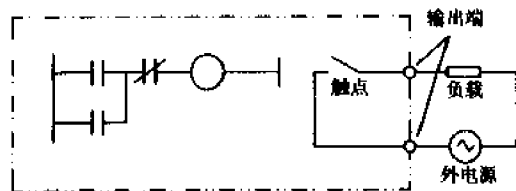


图 5-7 输出继电器与外部负载的连接图

(3)内置继电器(辅助继电器)这类继电器与外界没有联系,它只能由程序中的指令来驱动,也有常开和常闭触点,这些触点可在程序中供逻辑运算使用(编号为:M081 至 M224)。内置继电器可作为移位寄存器和步进控制器使用,也可作为定时器(编号为:T049 至 T072)和计数器(编号为:CNT073 至 CNT080)使用。

三、可编程控制器的工作原理

可编程控制器虽具有微机的许多特点,但它的工作方式却与微机有很大的不同。微机一

般采用等待命令的工作方式。如常见的键盘扫描方式或 I/O 扫描工作方式,有键按下或 I/O 动作,则转入相应的子程序。无键按下,则继续扫描。PLC 则采用循环扫描工作方式。在 PLC 中,用户程序预先按先后顺序存放在存储器中,如图 5-8 所示。

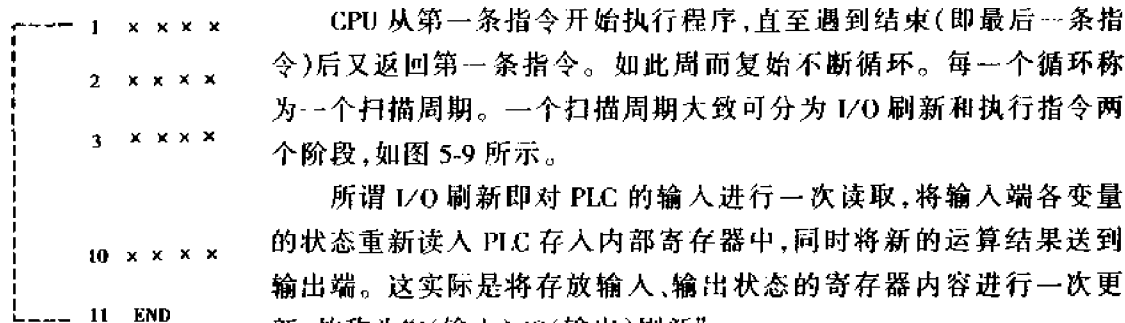


图 5-8 程序执行过程图

CPU 从第一条指令开始执行程序,直至遇到结束(即最后一条指令)后又返回第一条指令。如此周而复始不断循环。每一个循环称为一个扫描周期。一个扫描周期大致可分为 I/O 刷新和执行指令两个阶段,如图 5-9 所示。

所谓 I/O 刷新即对 PLC 的输入进行一次读取,将输入端各变量的状态重新读入 PLC 存入内部寄存器中,同时将新的运算结果送到输出端。这实际是将存放输入、输出状态的寄存器内容进行一次更新,故称为“I(输入)/O(输出)刷新”。

由此可见,若输入变量在 I/O 刷新期间发生状态变化,则本次扫描期间输出端也会相应地发生变化,或者说输出对输入产生了响应。反之,若在本次 I/O 刷新之后,输入

变量才发生变化,则本次扫描输出不变,即不响应,而要等到下一次扫描期间,输出才会响应输入。由于 PLC 采用循环扫描的工作方式,所以它的输出对输入的响应速度要受到扫描周期的影响。扫描周期的长短主要决定于下列几个因素:一是 CPU 执行指令的速度;二是每条指令占用的时间;三是指令条数的多少,即程序的长短。

对于慢速控制系统,响应速度常常是主要的,故这种工作方式不但没有坏处,反而可以增强系统抗干扰的能力。因为干扰常是脉冲的、短时的,而由于系统响应较慢,常常要几个扫描周期才响应一次,而多次扫描后,瞬间干扰所引起的误动作将会大大减少,故增加了抗干扰能力。

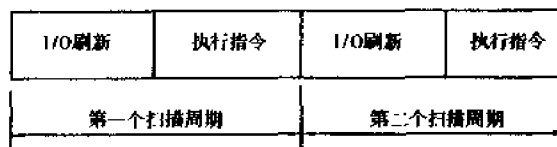


图 5-9 扫描周期图

但对控制时间要求较严格、响应速度要求较快的系统,这一问题就必须慎重考虑。应对响应时间做出精确的计算,精心编排程序,合理安排指令的顺序,以尽可能减少扫描周期造成的响应延时等不良影响。

总之,采用循环扫描的工作方式,是可编程控制器区别于微机和其它控制设备的最大特点,使用者应充分注意。

四、可编程控制器的基本技术性能及其选择

可编程控制器的基本技术性能有下列五个方面:

(1) 基本控制功能

完成顺序控制、定时、计数、逻辑运算和四则运算,这是 PLC 最基本的功能。根据控制系统的要求可选择 PLC 系统的功能。

(2) 存储器形式和容量

多数采用 CMOSRAM 存储器,有保护电源。也有采用可擦写的 EPROM 存储器。存储器的容量如表 5-1 所示。PLC 的容量一般不可扩充,选择时应根据应用程序的大小进行选择,并留有一定的裕量。

(3) 输入/输出(I/O)形式和点数

输入/输出一般都提供有交流 115V、220V 的电压输入/输出组件、直流 24V、48V 和 115V 以及 TTL 电平输入/输出组件,有的还提供继电器触点(常开和常闭)输出组件。输入/输出的点数划分见表 5-1。输入/输出的点数应根据被控对象的输入和输出的数量进行选择,并留有较大的裕量。

(4) 编程语言

最常用的是继电器梯形图编程方式,美国把它定为国家标准,国际电工委员会的标准草案中规定,除用梯形图编程方式外,还可采用功能块、指令表或布尔代数等编程语言。

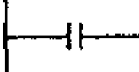
(5) 扫描时间

扫描时间是指 PLC 执行一次用户程序所用的时间。一般每条指令的执行时间大约为零点几个 μs 左右,1 000 条指令的执行时间大约为零点几个 ms 左右,中型和大型机的扫描时间还要快得多。

第二节 PLC 控制器的基本指令

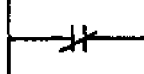
不同的 PLC 控制器,其指令的助记符不同,但指令的基本功能则大致相同。下面以 C 系列的 PLC 控制器为例,介绍 PLC 可编程序的基本指令。

1. 输入(装入 LOAD)指令

符号: LD 梯形图表示法: 

功能:梯形图(逻辑语句)母线的起始输入点,常开接点的母线接续命令。


特性及说明:表示新的逻辑语句由这里重新开始,再加上其它逻辑组合如 AND、OR 等控制语句组合而成一控制逻辑区域。

符号: LD NOT 梯形图表示法: 

功能:梯形图(逻辑语句)母线的起始输入点,常闭接点的母线接续命令。

特性及说明:当逻辑线由常闭接点开始,这表示新的逻辑语句由这里重新开始,再加上其它逻辑组合如 AND、OR 等控制语句组合而成一控制逻辑区域。

2. 输出(AUTOPUT)指令

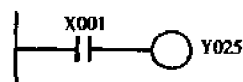
符号: LD OUT 梯形图表示法: 

功能:梯形图(逻辑语句)的输出接点驱动命令。

特性及说明:逻辑控制通过 OUT 输出接点与外界发生联系,输出接点可以是继电器,内置辅助继电器,保护继电器等。并联的 OUT 输出命令可连续使用多次。

举例

编 码 表		
地 址	指 令	内 容
0000	LD	001
0001	OUT	025

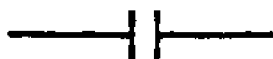


梯形图

3. 逻辑与(AND)指令

符号:AND

梯形图表示法:



功能:常开接点的串联接线命令。通过逻辑与功能和前面的逻辑连线,在电器接线上,接点串联在一起连接方式。

特性及说明:通过 AND 动作,串接的开关输入要同时动作才可控制输出动作。

符号: NOT

梯形图表示法:

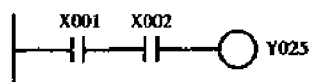


功能:梯形图的逻辑与非,常闭接点的串联接线命令。

特性及说明:通过 AND NOT 功能和前面的逻辑连线,在电器接线上,接点反向串连在一起的连接方式。

举例

编 码 表		
地 址	指 令	内 容
0003	LD	001
0004	AND	002
0005	OUT	025

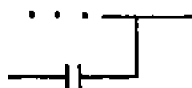


梯形图

4. 逻辑或(OR)指令

符号:OR

梯形图表示法:

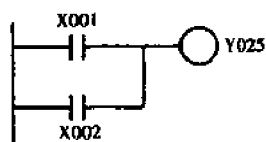


功能:常开接点的并联接线命令。通过逻辑或功能和前面的逻辑连线,在电器接线上,接点并联在一起连接方式。

特性及说明:通过 OR 动作,任何开关输入可控制动作输出。

举例

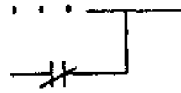
编 码 表		
地 址	指 令	内 容
0006	LD	001
0007	OR	002
0008	OUT	025



梯形图

符号:OR NOT

梯形图表示法:



功能:梯形图的或非,常闭接点的并联接线命令。

特性及说明:通过 OR NOT 功能和前面的逻辑连线,在电器接线上,接点反向并连在一起的连接方式。

5.与装入(AND LOAD)指令

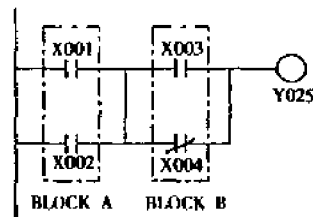
符号:AND LD

功能:两组逻辑区域串联的接线命令。A 及 B 逻辑区域的串联。

特性及说明:此逻辑控制命令使用在区域的相互连用上。

举例

编 码 表		
地 址	指 令	内 容
0000	LD	001
0001	OR	002
0002	LD	003
0003	OR NOT	004
0004	AND LD	
0005	OUT	025



梯形图

6.或装入(OR LOAD)指令

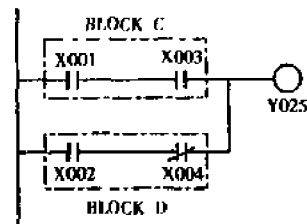
符号:OR LD

功能:两组逻辑区域并联的接线命令。C 及 D 逻辑区域的并联。

特性及说明:此逻辑控制命令使用在区域之间的相互连接上。

举例

编 码 表		
地 址	指 令	内 容
0000	LD	001
0001	AND	003
0002	LD	002
0003	AND NOT	004
0004	OR LD	
0005	OUT	025

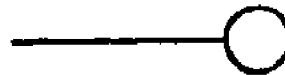


梯形图

7.定时器(TIMER)指令

符号:TJM

梯形图表示法:



功能:相当于一般通电延时时间继电器。

特性及说明:控制逻辑经过时间继电器作通电延时控制,其动作和一般时间继电器相同。预置时间 0 ~ 999.9s,时间继电器号码由 T050 开始到 T072 结束,不能与计数器相同号码使用。

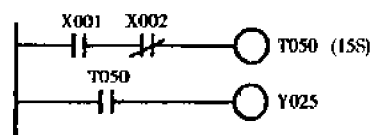
举例

编 码 表		
地 址	指 令	内 容
0000	LD	001
0001	AND NOT	002
0002	TIM	650 * 0150 **
0003	LD	050
0004	OUT	025

注：* 时间继电器号码

** 定时数值

定时时间 $150 \times 0.1s = 15s$



梯形图

8. 计数器(COUNTER)指令

符号: CNT

梯形图表示法:

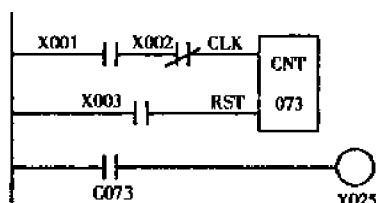


功能: 相当于一个计数器。其中: CLK 为计数信号输入命令, RST 为动作重置命令。

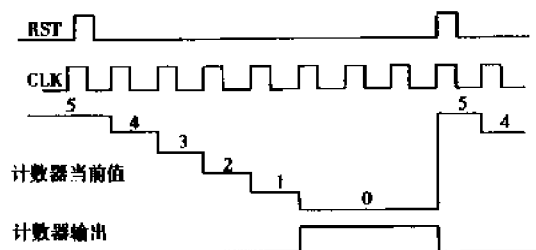
特性及说明: 控制逻辑经计数器作计数控制, 动作同一般计数器。预置数 0 ~ 9999。计数器在计数开始时, 当前值等于预置数。开始计数后, 计数器的当前值从预置数开始做减法计数。计数信号输入端每有一个从低到高的正跳变, 计数器的当前值则减去 1。当计数器的当前值减到 0000 时, 计数器便有控制输出。这种状态一直保持, 直到 RST 端有复位信号时, 计数器控制输出为 0, 又重新开始计数。计数器号码由 CNT073 开始到 CNT080 结束, 不能与时间继电器相同号码一起使用。计数输入可以是常开或常闭触点。

举例

编 码 表		
地 址	指 令	内 容
0000	LD	001
0001	AND NOT	002
0002	LD	003
0003	CNT	073 0005
0004	LD	073
0005	OUT	025



梯形图



计数器的计数波形图

9. 主控母线 (INTERLOCK) 指令

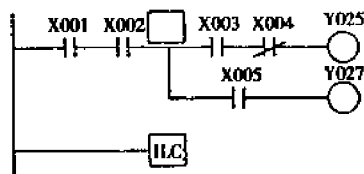
符号: IL, ILC

功能: 共通直列接点连接命令, 用于模拟假母线动作。

特性及说明:IL、ILC 命令配合使用,通过以上的控制语句,区域命令可变成多组输出动作。
以上命令主要用于多分支回路的动作。

举例

编 码 表		
地 址	指 令	内 容
0000	LD	001
0001	AND	002
0002	IL	
0003	LD	003
0004	AND NOT	004
0005	OUT	025
0006	LD	005
0007	OUT	027
0008	ILC	

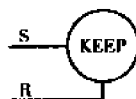


梯形图

10. 自锁(LATCHING RELAY)指令

符号: KEEP

梯形图表示法:



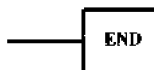
功能:自锁继电器。图中:S为动作保持输入端,R为动作解除输入端。

特点及说明:自锁继电器使用 S 命令后,线圈仍因自我保持而继续动作。使用 R 命令时,保持动作便被解除。

11. 结束(END)指令

符号:FUN(01)

梯形图表示法:



功能:控制结束语句,用于程序终结。

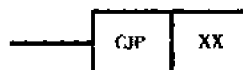
特性及说明:指示出程序最后结束的位置。可编程控制器虽然一直在重复输入处理、程序执行、输出处理,但在程序的最后加上 END 命令时,就不会再执行以下多余的程序。在调试过程中,在适当的区域间插入 END 命令,可依次扩大检查各区域的动作,此时前面的区域确定后,依次删除 END 命令。

注意:END 命令在程序中是必不可少的。

12. 条件跳转(CJP)指令

符号:FUN(02)

梯形图表示法:

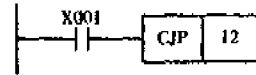


功能:用于程序分支跳转。本跳转命令跟 EJP 跳转完成控制命令配对使用。

特性及说明:本跳转命令用于跳过本段程序而不执行该段程序。当条件成立时,跳过 CJP 与 EJP 之间的程序块,而执行 EJP 后的程序,跳转时被跳过的程序块里的所有输出都保持跳转前的状态(不管其条件是否成立);当条件不成立时,则先执行 CJP 与 EJP 之间的程序块,再执行 EJP 后的程序。跳转处指定号码为 01 至 99,共 99 点。跳转指令可以多次嵌套。

举例

编 码 表		
地 址	指 令	内 容
0000	LD	001
0001	FUN(02)	12



梯形图

跳转完成(EJP)指令

符号:FUN(03)

梯形图表示法:



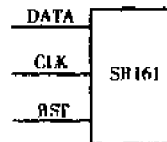
功能:控制程序跳转完成语句。用于程序跳转完成。本跳转完成命令跟 CJP 条件跳转控制命令配对使用。

特性及说明:用于终止跳转命令,使程序再执行下面接线的动作,要跟 CJP 条件配合使用,同时两者的号码要相同,否则便不能正确执行。两者指定号码为 01 至 99,共 99 点。

13. 移位寄存器(SHF)指令

符号:FUN(10)

梯形图表示法:



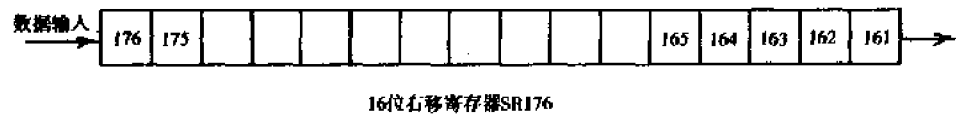
共四个双方向 16 位移位寄存器,可串连组成任意位的移位寄存器。

寄存器号码:161 177 193 209 四个左移寄存器

寄存器号码:176 192 208 224 四个右移寄存器

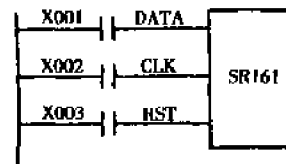
功能:用于程序作移位控制。

特点及说明:移位寄存器有“移位数据输入端”(DATA)、“移位脉冲输入端”(CLK)和复位端(RST)。当移位脉冲输入端有一个上升沿时,数据由移位数据输入端输入到最低位,同时移位寄存器内部各位数据依此从低位向高位移一位,第 176 位移出而消失。移位寄存器的各位可同时并行输出,所以移位寄存器是串行输入而并行输出数据的。移位寄存器是左移还是右移由移位寄存器的号码决定。复位端可使移位寄存器复位,即所有位都为零态。也可利用 SET 设定和 RST 复位指令任意改变其中某些位的状态。



举例

编 码 表		
地 址	指 令	内 容
0000	LD	001
0001	LD	002
0002	LD	003
0003	FUN(10)	161



梯形图

14. 设定(SET)指令

符号: FUN(11)

梯形图表示法:

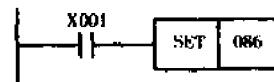


功能: 控制程序设定语句, 用于设定位。

特性及说明: 用于设置输出继电器、内置继电器及移位寄存器内部的位。当某位用 SET 指令设定后, 这一位也可由 RST 指令重置。

举例

编 码 表		
地 址	指 令	内 容
0000	LD	001
0001	FUN(11)	86



梯形图

15. 复位(RST)指令

符号: FUN(12)

梯形图表示法:



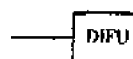
功能: 用于程序中某位的复位、重置。

特性及说明: 这条控制语句可用于输出继电器、内置继电器及移位寄存器的内部复位。当此位使用 SET 指令设定后, 可再用 RST 指令将此位重置。

16. 上升沿触发(DIFU)指令

符号: DIFU

梯形图表示法:

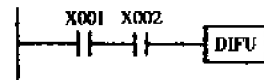


功能:上升沿单闪触发式动作输出。

特性及说明:利用上升边沿触发动作,可准确控制负载动作,避免误动作的发生,特别适合单次动作的输入控制。

举例

编 码 表		
地 址	指 令	内 容
0000	LD	001
0001	AND	002
0002	DIFU	001



梯形图

17. 下降沿触发(DIFD)指令

符号: DIFD

梯形图表示法:

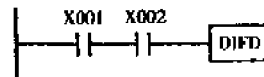


功能:下降沿单闪触发式动作输出。

特性及说明:利用下降边沿触发动作,可准确控制负载动作,避免误动作的发生,特别适合单次动作的输入控制。

举例

编 码 表		
地 址	指 令	内 容
0000	LD	001
0001	AND	002
0002	DIFD	001



梯形图

18. 清除记忆指令

符号:FUN(60)

功能:控制程序清除记忆语句,用于清除可编程序控制器的控制程序。

第三节 PLC 编程技术

PLC 工作主要靠运行程序。要想 PLC 充分发挥作用,除了正确选用 PLC 的型号、合适的检测和执行装置,合理规划系统结构之外,编制出一个高质量的可编程控制器工作程序也是非常重要的。

PLC 的编程有三种方法:经验法、解析法和图解法。图解法中的梯形图法是目前最常用的编程方法。下面主要介绍梯形图法编程的基本规则、技巧和应用实例。

一、编程的基本规则与技巧

掌握了通用性编程方式梯形图编程语言和 PLC 指令系统后,便可根据控制要求进行编程。为了使编程正确、快速和优化,必须掌握编程的基本规则和一些技巧。

1. 梯形图按自上而下,从左到右的顺序排列,每一行起于左母线,终于右母线。继电器线

圈与右母线直接连接,在右母线与线圈之间不能有其它元素,如图 5-10 所示。

2. 在一梯形图中同一编号的线圈如果使用两次或两次以上称为双线圈输出,一般情况下只能出现一次,因为双线圈输出容易引起操作错误。

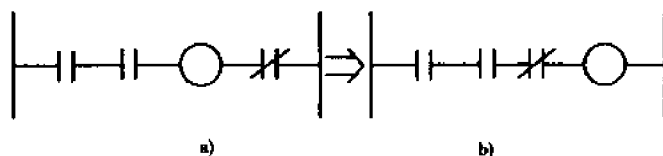


图 5-10 线圈置放的位置
a)线圈置放位置错误;b)线圈置放位置正确

3. 输入继电器、输出继电器、辅助继电器、定时器、计数器的触点可以多次使用,不受限制。

4. 输入继电器的线圈是由输入点上的外部输入信号控制驱动的,所以梯形图中输入继电器的触点用于表示对应点上的输入信号。

5. 把串联触点最多的支路编排在上方,如图 5-11a)所示,如果将串联触点多的支路安排在下面,如图 5-11b)所示,则需增加一条 OR LD 指令,显然这种编排不好。

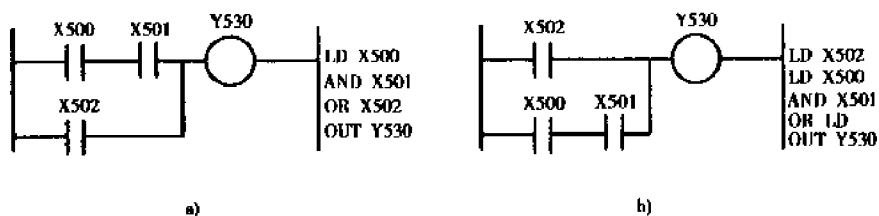


图 5-11 电路块并联的编排
a)编排好的电路;b)编排得不好的电路

6. 把触点最多的并联电路编排在最左边,如图 5-12a)所示,这比图 5-12b)的编排法可省去一条 AND LD 指令。

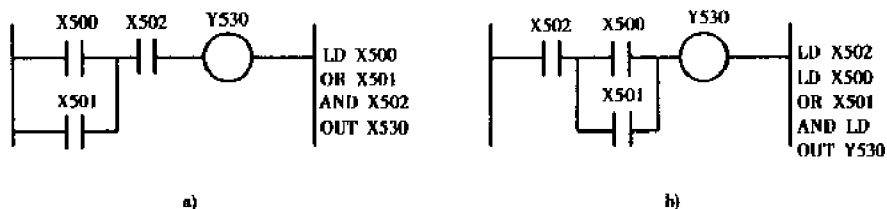


图 5-12 并联电路的串联编排
a)编排好的电路;b)编排得不好的电路

二、应用编程

1. 经验法编程

对于一些控制电路较简单、连锁关系较少,传统上已形成典型的控制方式的控制电路可采用经验法编程。这里以具有电气连锁的电动机正反转控制为例,说明经验法编程方法。具有电气连锁的电动机正反转控制电路电气原理如图 5-13a)所示。PLC 控制的输入输出接线图如图 5-13b)所示。梯形图如图 5-13c)所示。对应的指令程序如图 5-13d)所示。工作过程如下:

合上电源开关 QK,按下正向起动按钮 SB1,输入继电器 X401 的常开触点闭合,输出继电器 Y430 线圈得电并自锁,接触器 KM1 得电吸合,电动机正转。与此同时,Y430 的常闭触点断

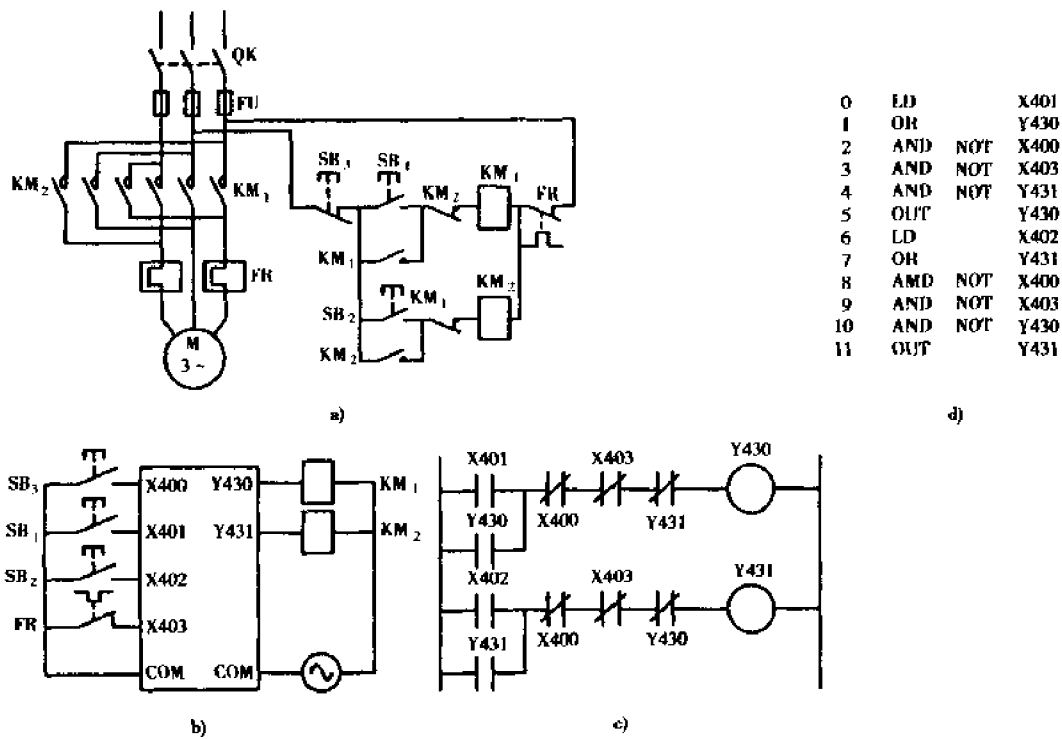


图 5-13 具有电气联锁的电动机正反转控制

a)继电器接触控制 ;b)PLC输入输出接线 ;c)梯形图 ;d)指令程序

开 Y431 的线圈, KM2 不能吸合, 实现电气互锁。按下反向起动按钮 SB2 时, X402 常开触点闭合, Y431 线圈接通, KM2 得电吸合, 电动机反转。与此同时, Y431 的常闭触点断开 Y430 的线圈, KM1 不能吸合, 实现了电气联锁。停机时按下按钮 SB3, X400 常闭触点断开; 过载时热继电器触点 FR 闭合, X403 的常闭触点断开, 这两种情况都使 Y430 或 Y431 线圈断开, 进而使 KM1 或 KM2 失电释放, 电动机停下来。

2. 图解法编程

要用继电器梯形图编制顺序控制需要有一定的经验, 并且所编的复杂程序也难于读懂。若采用状态转移图的图解法编程就很方便。状态转换图就是用状态描述工艺流程图。由于状态图直观地表示了工艺流程, 因此, 由状态转移图直接转换的步进梯形图具有简单直观的特点, 使顺序控制变得容易, 大大缩短了设计者的设计时间。下面以步进指令进行机械手控制为例, 说明图解法编程的主要过程。

1) 工作情况及控制要求

有一个机械手, 如图 5-14 所示, 其工作顺序是: 下降—夹紧工件—上升—右移—下降—松开工件—上升—左移回原位。

其负载及传感器情况见图 5-15。系统由液压驱动, 上下、左右工作由双向电磁阀控制, Y430 ON 下降, Y432 ON 上升。夹紧用单向阀控制, Y431 ON 夹紧, OFF 松开。

工作方式要求可手动与自动。工作方式选择开关及有关起停按钮如图 5-16。

手动方式应能:

- (1) 单一操作。可用相应按钮来接通或断开各负载。这种方式时为 X500 ON。
- (2) 返回原位。按下回原位按钮 X505, 机械手自动返回原位。这种方式时, X501 ON。

自动方式应能:

(1)连续工作。机械手处于原位,按下启动按钮(X506),机械手可连续循环工作。按下停车按钮(X507),机械手返原位后,停止工作。这种方式时,X504 ON。

(2)单周期工作。机械手在原位,按下启动按钮(X506),机械手启动,工作一个周期,最后又停在原位。在工作过程中,若按下停车按钮,则暂停工作。若再按启动按钮,可接着工作完一个周期。这种方式时,X503 ON。

(3)步进工作。每按一次启动按钮

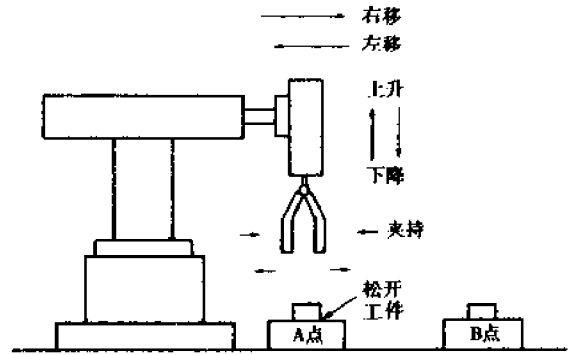


图 5-14 机械手工作示意图

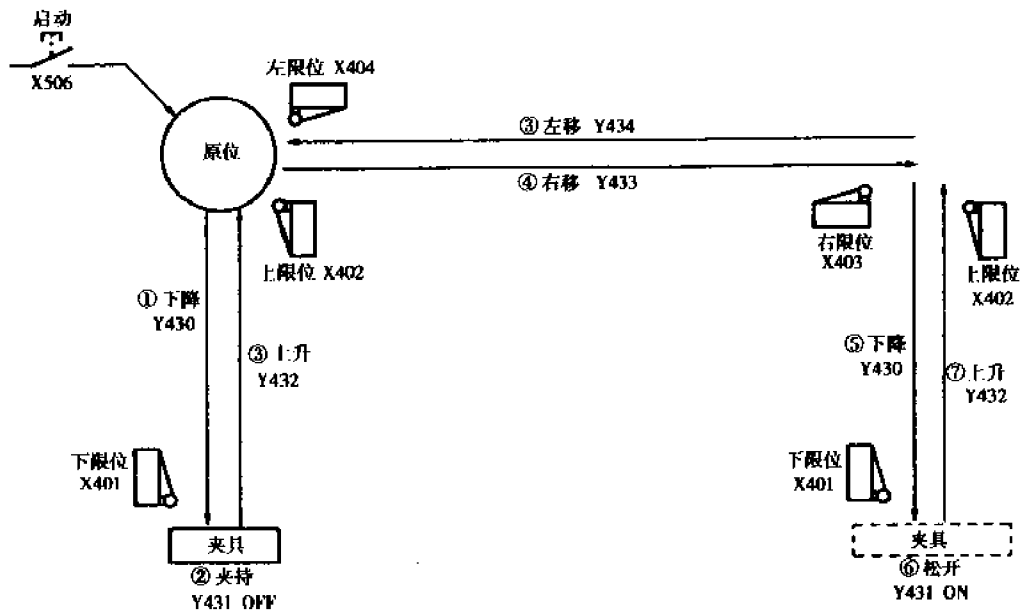


图 5-15 机械手负载及传感器情况

(X506),机械手执行一步动作。这种方式时,X503 ON。

2)总体安排

本控制电路虽有五种方式,但其中三种为自动方式,都与步进控制有关,可一起设计。这样仅考虑三种情况就可以了。这三种情况可用跳转指令予以区分。如图 5-17 所示,X500 ON,单一操作,X501 ON,返回原位;其它的为自动。

3)具体梯形图设计

单一操作、返回原位用的是普通的逻辑控制,其设计过程略,具体梯形图见总梯形图。

自动工作部分为步进控制,其梯形图依据状态转换图设计。

先画出自动工作流程图,依前面介绍的工作步骤可直接画出,见图 5-18。

在工作流程图的基础上,加上负载驱动情况,即可得出状态转换图,见图 5-19。

最后,再依状态转换图画步进梯形图,见图 5-20 中自动工作部分。

这几部分综合考虑,总的梯形图 5-20 所示。它由初始化、转换启动、转换禁止、单一操作、返回原位、自动工作等几部分组成。从转换禁止知,单一操作与返回原位时(X500、X501 ON),

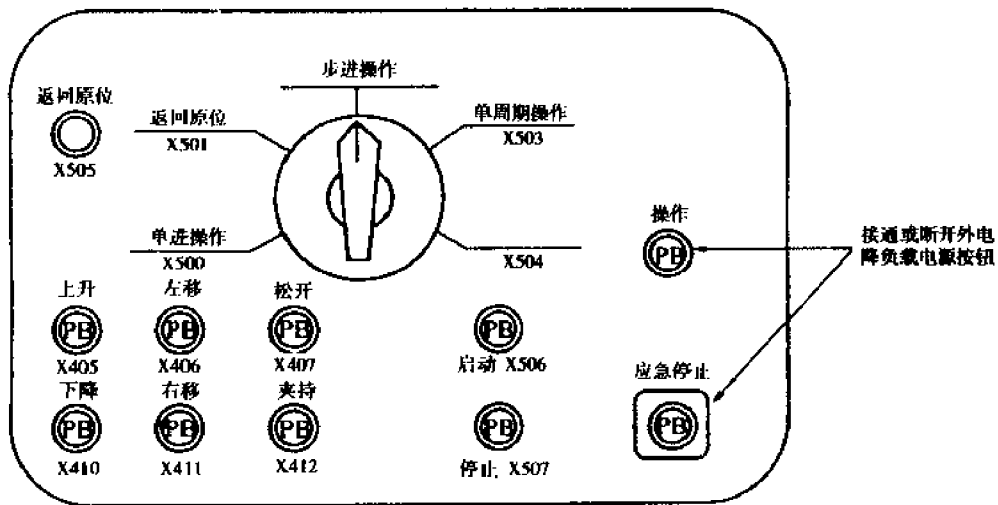


图 5-16 工作方式选择及有关的起停按钮

M574 始终 ON, 转换禁止。步进时, X502 ON, M574 只在启动时, OFF 一个扫描周期, 从而转换一步。之后, M574 又 ON, 转换又被禁止。再启动, 可前进一步。单一周期时 (503 ON), M574 OFF, 但按下停车按钮 (X507), 可使 M574 ON, 即停下原状态器工作状态。再启动后, 又可使 M574 OFF, 又可继续步进工作, 直到原位。

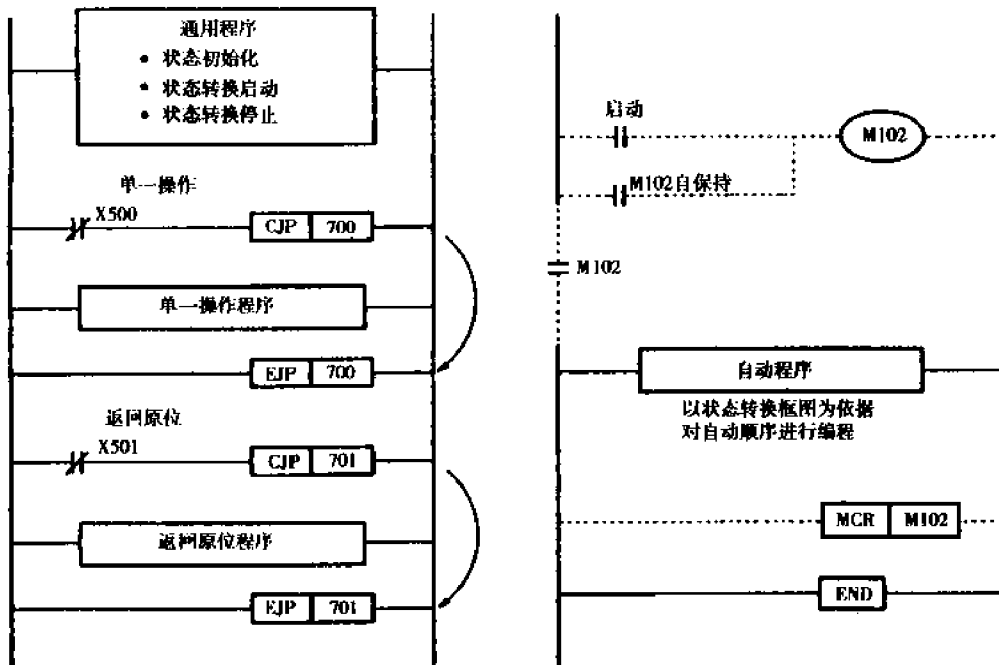


图 5-17 梯形框图

从转换启动电路也可看出把自动工作的连续工作与进步、单周期工作区别开了。前者可使 M575 自保持, 后者不自保持, 每次需启动。

单一操作及返回原位的电路较简单, 读者一看自明, 不多解释。

图 5-20 后为其对应的助记符程序。

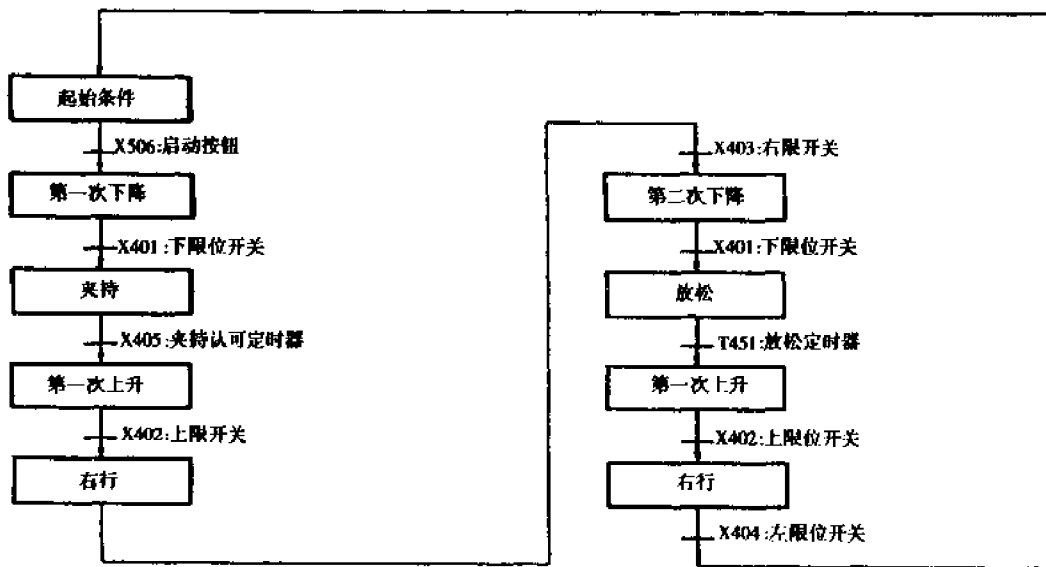


图 5-18 自动工作流程图

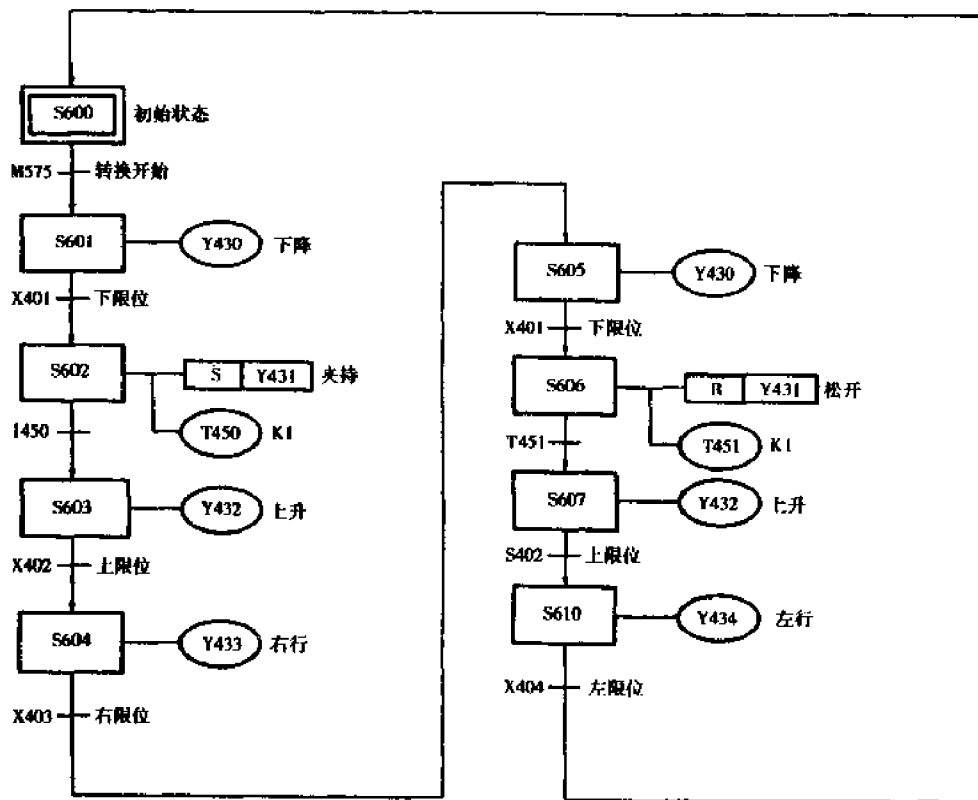


图 5-19 状态转换图

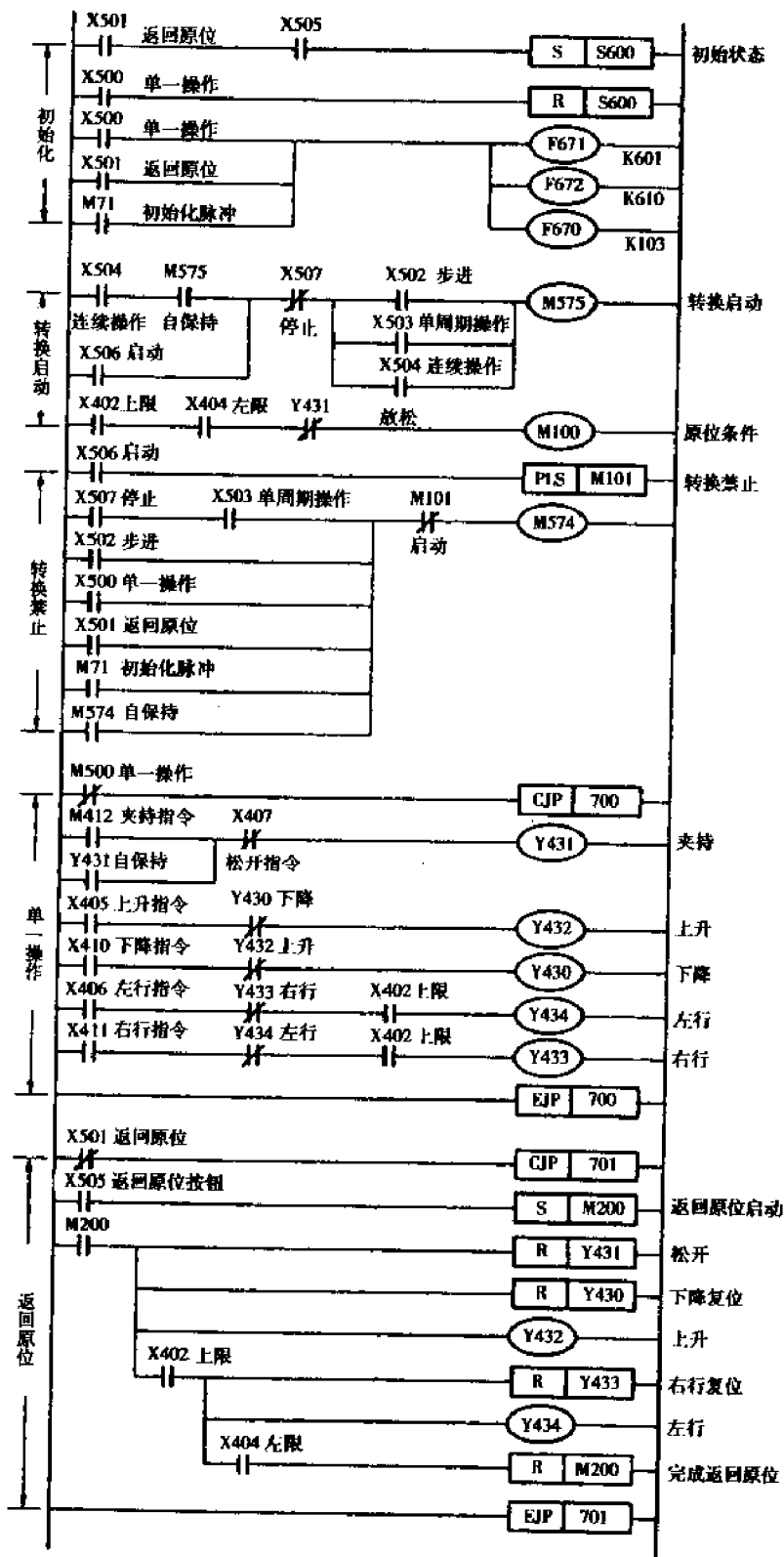


图 5-20

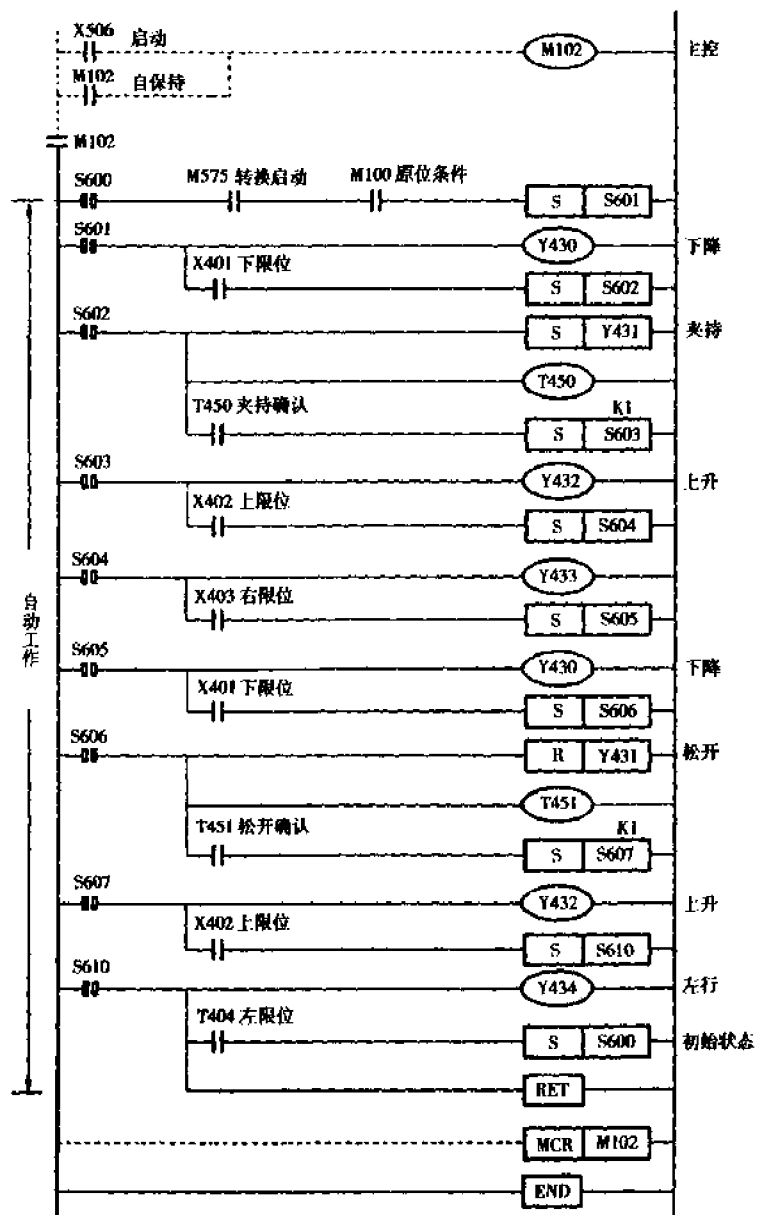


图 5-20 梯形图

0	LD	501	39	AND NOT	407	78	FUN(11)	601
1	AND	505	40	OUT	431	79	LD	601
2	FUN(11)	600	41	LD	405	80	OUT	430
3	LD	500	42	AND NOT	430	81	LD	401
4	FUN(12)	600	43	OUT	432	82	FUN(11)	602
5	LD	500	44	LD	410	83	LD	602
6	OR	501	45	AND NOT	432	84	FUN(11)	431
7	OR	71	46	OUT	430	85	OUT	450
8	OUT	671	47	LD	406	86	LD	450
9	OUT	672	48	AND NOT	433	87	FUN(11)	603
10	OUT	670	49	AND	402	88	LD	603
11	LD	504	50	OUT	434	89	OUT	432
12	AND	575	51	LD	411	90	LD	402
13	OR	506	52	AND NOT	434	91	FUN(11)	604
14	AND NOT	507	53	AND	402	92	LD	604
15	LD	502	54	OUT	433	93	OUT	433
16	OR	503	55	EJP	700	94	LD	403
17	OR	504	56	LD NOT	501	95	FUN(11)	605
18	AND LD		57	CJP	701	96	LD	605
19	OUT	575	58	LD	505	97	OUT	430
20	LD	402	59	FUN(11)	200	98	LD	401
21	AND	404	60	LD	200	99	FUN(11)	606
22	AND NOT	431	61	FUN(12)	431	100	LD	606
23	OUT	100	62	FUN(12)	430	101	FUN(12)	431
24	LD	506	63	OUT	432	102	OUT	451
25	DIFU	101	64	AND	402	103	LD	451
26	LD	507	65	FUN(12)	433	104	FUN(11)	607
27	AND	503	66	OUT	434	105	LD	607
28	OR	502	67	AND	404	106	OUT	432
29	OR	500	68	FUN(12)	200	107	LD	402
30	OR	501	69	EJP	701	108	FUN(11)	610
31	OR	71	70	LD	506	109	LD	610
32	OR	574	71	OR	102	110	OUT	434
33	AND NOT	101	72	OUT	102	111	LD	404
34	OUT	574	73	LD	102	112	FUN(11)	600
35	LD NOT	700	74	IL		113	HC	
36	CJP	412	75	LD	600	114	END	
37	LD	407	76	AND	575			
38	OR	431	77	AND	100			

此例若不用步进控制,也完全可以实现。但逻辑关系相当复杂,设计过程也要麻烦得多。而且,如果工作步骤改了,一切又得重新设计。而用这里介绍的步进控制,不仅设计简单,更改也很方便。

第四节 应用实例

一、PLC 在步进电机控制中的应用

利用 PLC 控制步进电机的启动、停止、正转和反转的接线图如图 5-21 所示。开关 SB1 为启动、停止开关,开关 SB2 为正转和反转控制开关。当 SB2 不接通时,步进电机反转。当 SB2 接通时,步进电机正转。

在图中,S254 为只有当 PLC 一开始工作时才产生一个 10ms 脉冲的继电器。SR161 为左移寄存器,SR192 为右移寄存器。控制梯形图和程序如图 5-22 所示。

二、水泥混凝土搅拌楼的 PLC 控制系统

图 5-23 所示为水泥混凝土搅拌楼的 PLC 控制系统的原理图。该系统主要包括四个配料称量控制器 CB920、单片机控制主板 CB3500、PLC 控制器及其与之适配的输出电路。

开始工作前,先从 CB3500 主控板的键盘输入该次生产混凝土的配方等有关数据。当有关数据输入完成并按启动按钮时, CB3500 向 PLC 发出启动命令, PLC 开始工作。PLC 首先分别开启 1、2、3、4 号骨料储料仓仓斗底门,使四种骨料依次在电子称斗 D 中进行累计称量。先放 1 号骨料,当 1 号骨料达到配方的要

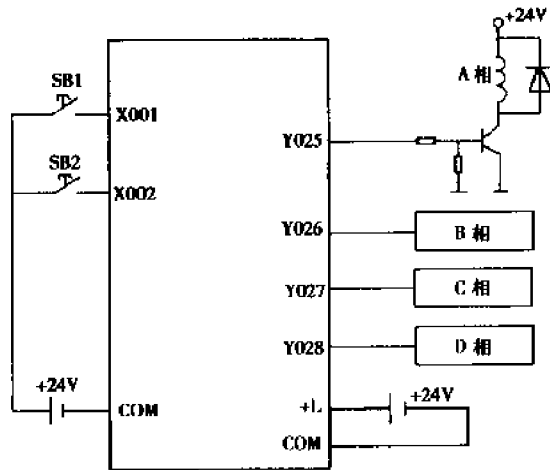


图 5-21 步进电机的起动、停止、正转和反转控制接线图

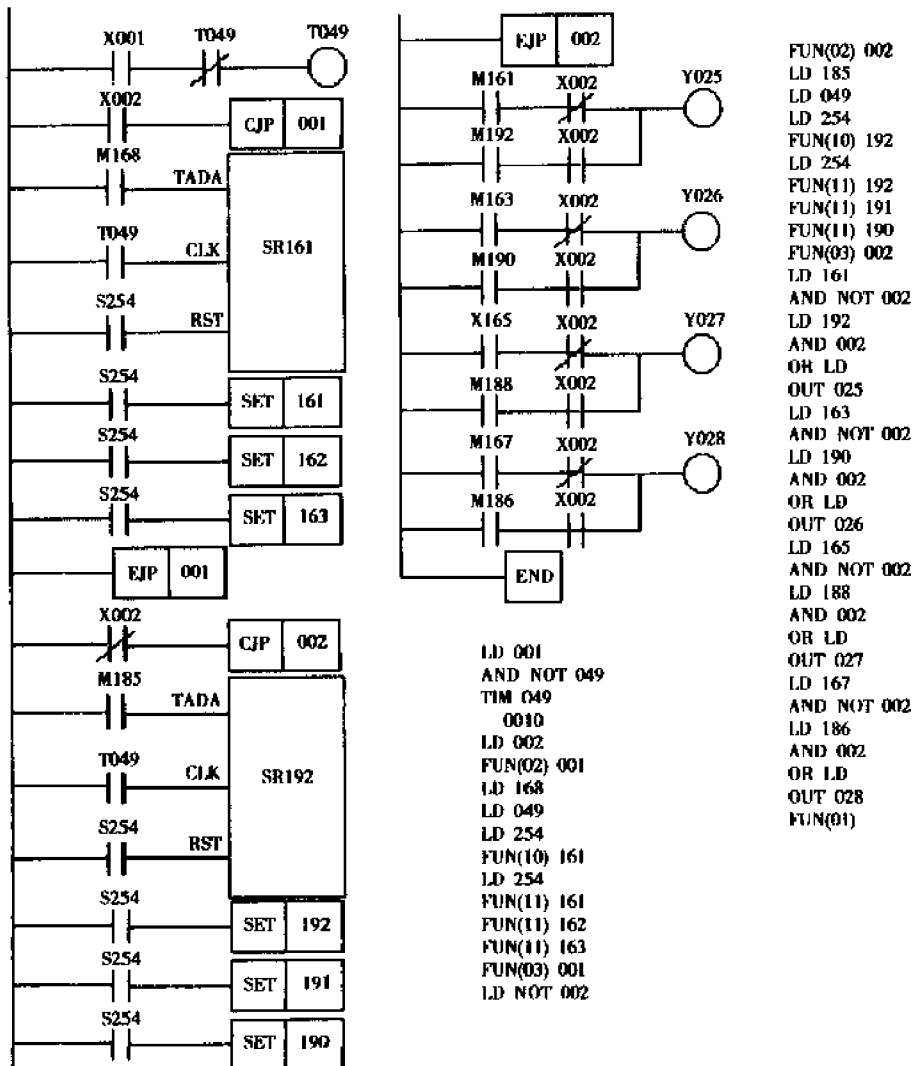


图 5-22 步进电机控制梯形图和程序

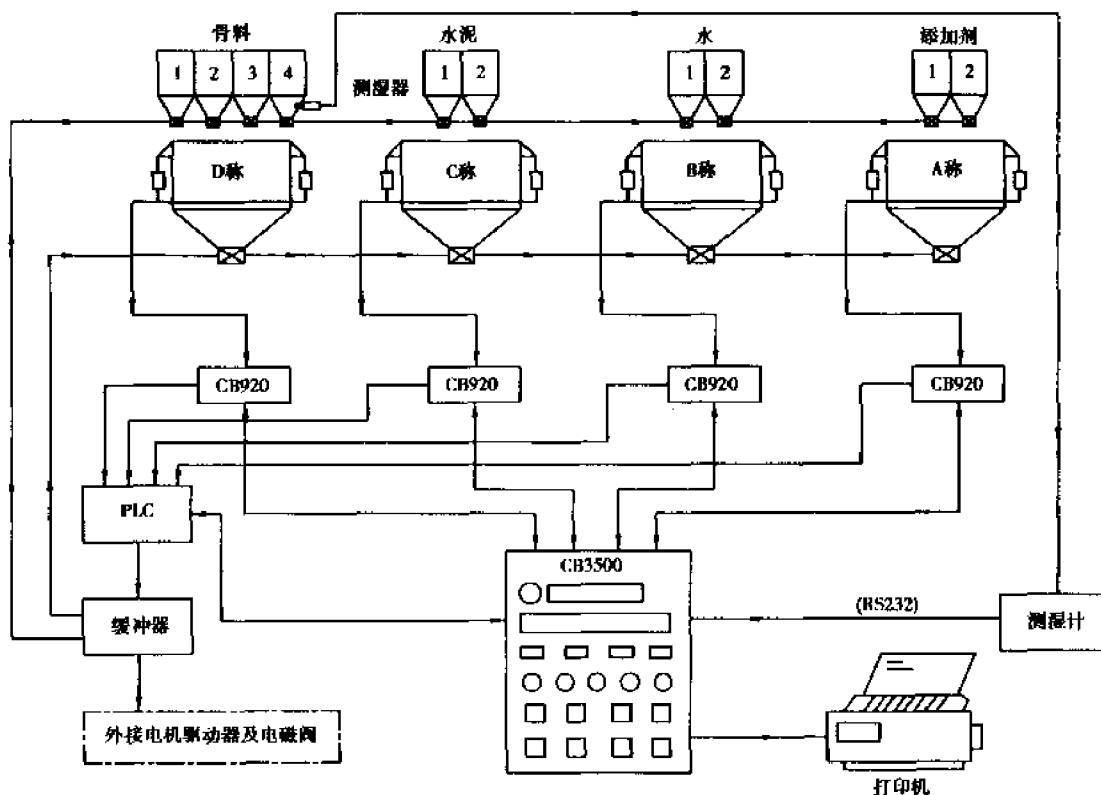


图 5-23 水泥混凝土搅拌楼的 PLC 控制系统原理图

求值时, CB920 发出信号并输入 PLC 中, PLC 输出信号先关闭 1 号骨料仓斗底门, 停止 1 号骨料的称量, 同时开始 2 号骨料的放料称量。当称斗中料的质量减去 1 号骨料的质量所得之值即 2 号骨料的净质量达到 2 号骨料的要求值时, 停止 2 号骨料的称量。依次类推, 直到称完所有的四种骨料。在称量骨料的同时, PLC 也给水泥称斗 C、水称量称斗 B、添加剂称量斗 A 放料, 进行这些料的称量。当各种料的质量达到配方设定值时, PLC 关闭对应的放料门, 停止该料的称量。在所有的料均已完成一次称量后, 进入放料搅拌过程。

在放料搅拌过程中, 称好的料分三批依次放入搅拌器中进行搅拌, 达到搅拌时间设定值时, PLC 发出信号关闭搅拌机, 并开始卸搅拌好的成品料。卸完成品料即完成一个工作循环, PLC 自动地又从程序的开始进行下一个工作循环, 如此一直重复下去, 直到关机。

在骨料仓底部装有湿度测量传感器, 湿度传感器检测出骨料的湿度, 并将此信号输入到 CB3500 主控板, CB3500 把湿度信号与配方中水的要求质量进行相应的运算, 去掉多余的水分, 使在骨料含水量变化的情况下, 混合料中水的含量严格符合配方的要求。

配料控制器 CB920 不仅可以把被称料的质量与配方要求的质量进行比较, 输出开关信号给 PLC, 而且还具有数字显示料质量和自动去皮功能。

CB3500 可以记忆各种物料的消耗量、每日每月生产量以及所用的配方, 并可通过打印机打印出各种报表。

第六章 机电液一体化技术在工程机械中的应用

第一节 电液转向控制系统

大部分工程机械由于自身结构复杂,加上施工场地及施工工艺要求,常采用全液压转向系统。常用的液压驱动转向形式有前轮转向、折腰转向及全轮转向三种典型形式。

液压前轮转向应用较多的是摆线马达转向装置(一般称之为 orbit 转向器)。其工作原理及结构可参见文献[23]。这种装置的优点很多,可选用现成的部件装配,不需要反馈连杆系统,铰接点少,操作轻便等,但这种转向装置工况比较单纯,弯道行使半径较大,不能适应某些特殊使用条件的要求(如场地作业空间小,要求作业机械平稳等)。因此这类转向只适用于转弯半径较大,行走速度不高的机械。

一、铰接式前轮转向

铰接式车架转向系统通常适用于铰接式装载机、铰接式振动压路机等工程机械中。图 6-1 为一装载机的电液控制转向系统原理图。

由铰接点铰接的前后车架上布置着一对转向油缸 6,活塞杆的运动方向由液动换向阀 10 控制,而液动阀的控制油流来自于左右对称的先导阀 4、5,先导阀的动作由转向控制机构 1 来操纵,先导控制油流来自于控制泵 7。在转向控制机构内布置着反馈用位置传感器 2,该传感器通过控制器 13 对电液比例阀 11 产生影响,从而改变转向主泵的排量,进而决定转向缸油流量的大小,最终决定铰接式车架的偏转角度。

二、整体式车架全轮转向电液控制系统

在整体式车架工程机械类型中,中置式大功率稳定土拌和机较为典型,因其工作装置布置在前后桥中间,而机身较长转向不灵活,因此必须采用全轮转向。图 6-2 是某种型号的稳定土拌和机电液转向系统布置及原理图。

从图中可以看出,该转向系统实际上是前轮转向系统和后轮转向系统两部分组成(参见文献[24])。前轮转向采用负荷感应式全液压机液伺服转向器,这是一个技术成熟、工作可靠的转向器。后轮转向采用电液位置模拟伺服转向系统。具体来讲,后轮转向系统伺服阀输入信号来自安装在前轮转向缸活塞杆上的位移传感器。后轮转向液压缸的位移量通过安装在后轮上的位移传感器将反馈信号送到比较器,从而对后轮偏转角进行精确定位控制。另外,通过状态转换开关,可以实现三种典型工况的转向,即 $k = -1$,小半径转向; $k = 0$,运输工况(前轮转向); $k = 1$,蟹行转向工况。图 6-3 为后轮电液转向控制系统原理及方框图。后轮转向系统实际上是一个电液位置伺服控制系统。

由系统方框图可以得出该转向系统的开环传递函数(对双杆转向液压缸):

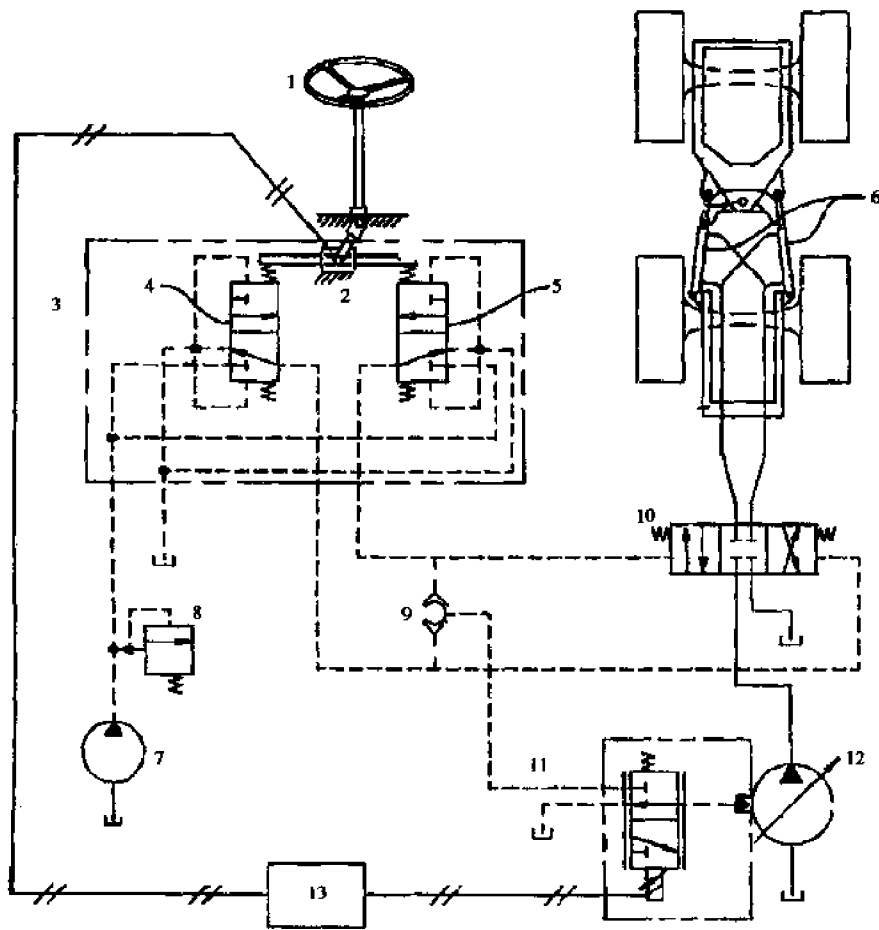


图 6-1 装载机铰接转向系统原理图

1-方向盘;2-位置传感器;3-先导控制阀组;4-先导阀;5-先导阀;6-转向缸;7-控制泵;8-溢流阀;9-泄流阀;10-液动阀;11-电液比例阀;12-转向泵;13-控制放大器

$$GH = \frac{K_a K_Q \omega_v(s) K_D K_H}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h s}{\omega_h} + 1 \right)}$$

式中: K_a ——放大器增益;

K_Q ——伺服阀流量增益:

$$K_Q = 35 \text{ cm}^2 / (\text{s} \cdot \text{mA})$$

K_D ——转向液压缸增益, $K_D = 1/A$;

K_H ——位置传感器增益, $K_H = V/L$;

$\omega_v(s)$ ——伺服阀传递函数,因响应频率高, $\omega_v(s) = 1$;

ω_h ——液压固有频率, $\omega_h = \sqrt{\frac{2\beta A^2}{m_0 V_0}}$;

ζ_h ——阻尼比,通常取 $\zeta_h = 0.2$;

β ——液压油的容积弹性模量;

A ——转向缸作用面积(cm^2);

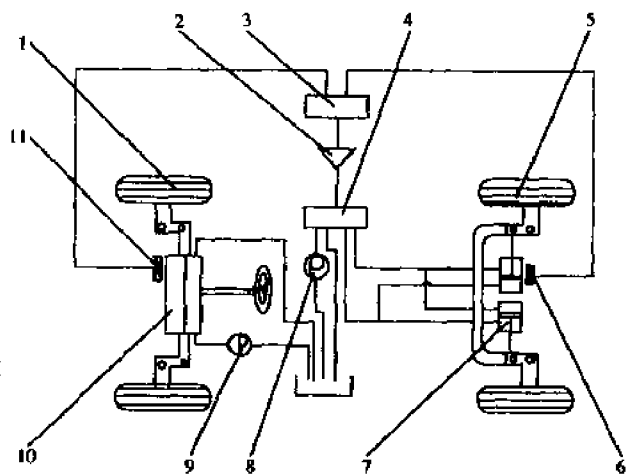


图 6-2 中置式拌和机新型全轮转向系统

1-前轮;2-功率放大器;3-信号比较器;4-电液伺服阀;5-后轮;6-后轮位移传感器;7-转向缸;8-后轮转向泵;9-前轮转向泵;10-orbit转向器;11-前轮位移传感器。

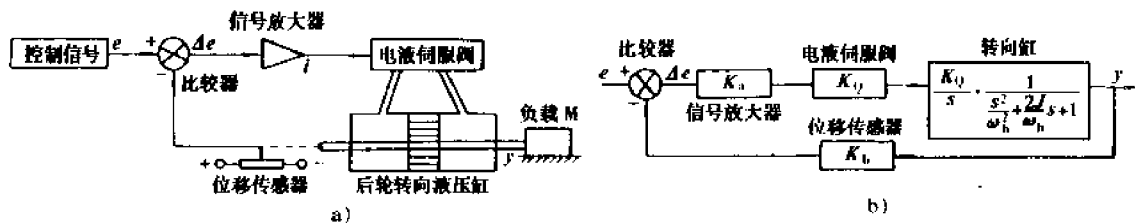


图 6-3 后轮电液转向系统原理及方框图
a) 系统原理图; b) 系统方框图

m_0 ——转向系统负荷质量, 模拟试验时可取 $m_0 = 880\text{kg}$;

V_0 ——转向缸与伺服阀油路初始容积 (cm^3);

L ——传感器位移量。

令 K_v 为开环放大系数, 则 $K_v = K_a K_Q K_b K_H$ 开环传递函数为:

$$GH = \frac{K_v}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\zeta_h s + 1 \right)}$$

将 $K_v = 13, \omega_h = 141.8$ 等有关参数代入得 $GH = \frac{13}{s \left(\frac{s^2}{141.8^2} + \frac{2 \times 0.2}{141.8} s + 1 \right)}$

由经典控制理论可知, 在液压系统中, ζ_h 值较小, 开环相角裕量很大, 一般只研究其幅频特性。其开环系统稳定性判据为:

$$K_v < 2\zeta_h \omega_h$$

由于开环系统稳定判断 $K_v = 13 < 2\zeta_h \omega_h = 2 \times 0.2 \times 141.8 = 56.72$ 成立, 且增益裕量 $K_g = 201g \frac{2\zeta_h \omega_h}{K_v} = 201g \frac{56.72}{13} = 22\text{dB}$ 。

从而可以判定该电液转向系统是稳定的, 转向系统设计可行。通过模拟试验也表明该转向系统除 1.5Hz 为该系统的共振区外, 其响应频率可达 8Hz 以上, 完全能满足全轮液压转向系统的要求。

这种新型转向系统构思新颖、工作可靠、经济合理, 能满足一般中置式拌和机及其它装备整体式车架的工程机械全轮转向系统的要求。

三、数字式电液伺服转向系统

数字式电液伺服控制转向液压系统构成如下:

该转向系统, 由一台计算机控制四轮的转向, 四个车轮独立支承, 分别驱动与转向, 常见的机型有 CMI - RS500、CMI - RS425 大功率中置式稳定土拌和机, 其工作系统如图 6-4 所示。

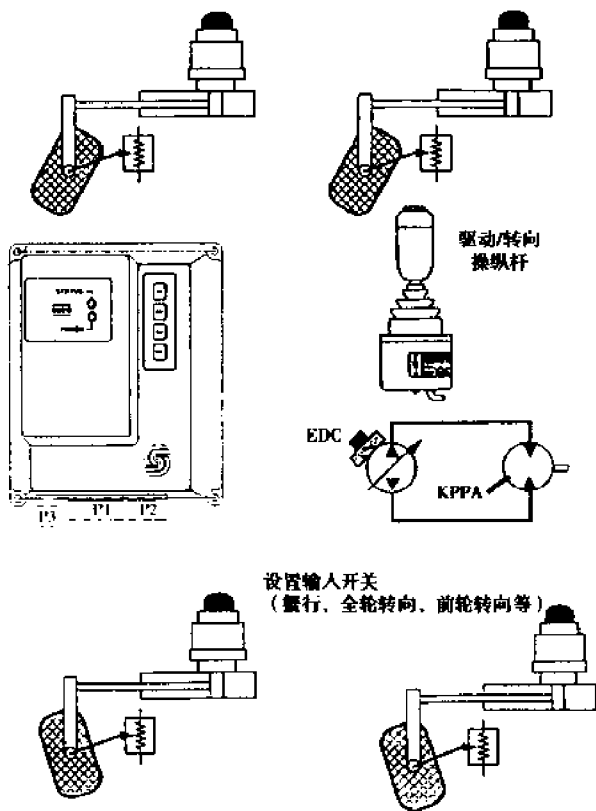


图 6-4 数字式转向系统示意图

1. 操纵系统

包括转向、转子举升尾门开闭。转子举升和尾门开闭仅在转子开始切土和结束切土时进行,拌和作业中不再动作;转向在拌和中也只是偶尔进行。测试表明:这部分功率约为3~5kW,约为总率的2%~3%。当配带液体料喷洒装置时另计,除去这部分消耗的功率称为净功率。

2. 行走和转子系统

由于土壤条件、拌和深度、运动状态经常变化,因此行走系统和转子系统功率比值也在不断变化。现场测试表明:正常运动状态下(行走速度 $v = 0.5 \sim 1.5 \text{ km/h}$, 转子圆周速度 $v_0 = 8 \sim 9 \text{ m/s}$), 反转时行走功率 P_x 约为净功率的15%~25%, 转子功率 P_n 为75%~85%; 而正转时行走功率 P_x 约5%~15%, 转子功率 P_n 为85%~95%。

尽管拌和机可以通过行走速度来调节外部载荷,使发动机动力始终与荷载匹配。但发动机功率的配置还是有一定要求的。配置太小,生产率太低;配置太大,则易于功率富余或因拌和作业速度太快而降低作业质量。稳定土拌和机转子的比功率按下式计算:

$$P_b = P_H \eta_z / (BH) \quad (6-1)$$

式中: P_b ——转子比功率(kW/m^2);

B ——拌和宽度(m);

H ——拌和深度(m);

P_H ——发动机额定功率(kW);

η_z ——整机传动效率,对反转转子估算式为

$$\eta_z = 0.2\eta_{1z} + 0.8\eta_{2z}$$

η_{1z} ——行走系统液压和机械传动总效率,取 $\eta_{1z} = 0.65$;

η_{2z} ——转子系统总传动效率,机械传动取 $\eta_{2z} = 0.8 \sim 0.85$, 液压传动取0.65。

统计结果表明:现代大功率稳定土拌和机为了提高作业生产率和机动性,对拌和转子(非铣削或其它转子), P_b 为 $180 \sim 200 \text{ kW/m}^2$ 。在这样大的比功率条件下,可以保证机器按 $V_0 = 8 \sim 9 \text{ m/s}$, $v = 0.5 \sim 1 \text{ km/h}$ 的运动状态在全拌深条件下工作。

比功率是一个十分重要的统计参数,设计时可以根据已定的发动机功率和比功率确定转子容量,亦可以根据已定的转子容量和比功率确定发动机功率,特别是可根据比功率值引伸出重量比、机动性等,对设计和选购机器都有着重要的指导作用。

二、拌和作业过程中的功率及载荷自动控制方式

拌和机作业过程中,当机器负荷增加,以致按给定运动参数无法工作时,可以通过适当地降低行走速度即减小进距以调节载荷,使机器始终在合理的负荷工况下工作。液压系统具有无级调速的特点且特性硬,因此对任何土壤状态、任一拌和深度总可以找到一个合适的行走速度与之适应。

所谓载荷调节及控制,就是有效地调整行走速度为需要值,使行走和转子两系统在合理的参数条件下工作,使发动机动力得到充分发挥而又不超载,同时保证了拌和质量。因此也可称为功率自动分配。

利用行走速度调节载荷时,转子圆周速度有两种情况:一是圆周速度保持不变,这一方法在硬土条件下利用较高的圆周速度和小进距有利于提高作业质量。此外这种方法只有单一调

节元件、实施方便、成本低廉。二是在高速行走速度的同时,相应改变圆周速度,以使机器有较高的功率利用率。这一方法多用于额定圆周速度较高行走速度偏低的情况,此时适当地降低圆周速度 v_0 对拌和质量影响不大,而功率利用率则显著提高。

首先讨论拌和机的运动参数(进距 S 、圆周速度 v_0)对作业质量的影响。

1. 进距 S 及作业质量控制

刀具的水平进距 S 为转子同一切削位置上相继切削的刀具轨迹 1 与 2 之间的水平距离(图 6-7),亦即转子在转过同一横断面上相邻刀具之间夹角,这一角度的时间 Δt 内转子轴线前进的水平距离。当转子上每排 Z 把刀时(不是每个刀盘上的刀数,而是同一切削位置上的刀数),进距为:

$$S = v\Delta t = v \cdot 2\pi / (Z\omega) = 2\pi R / (Z\lambda) \quad (6-2)$$

式中: S ——进距(m);

v ——行走速度(m/s);

ω ——转子角速度(s^{-1});

λ ——运动学参数, $\lambda = v_0/v$, $v_0 = \omega R$;

v_0 ——转子圆周速度(m/s);

R ——转子半径(m)。

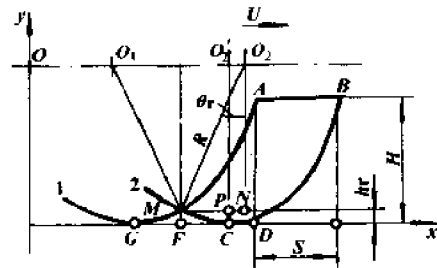


图 6-7 求刀具进距 S

因为在稳定运动时 λ 为常数,所以不论将刀具轨迹的那一点作为起点,其进距均为一常量 S 。刀具的进距是稳定土拌和机主要的工艺参数之一,它可决定被拌和土壤的破碎程度。

要考虑一种极限状态,即相邻轨迹不相交而是相切为分离的状态,此时:

$$S = (2R/\lambda)\arcsin(1/\lambda) \pm 2R\sqrt{1 - (1/\lambda^2)} - \pi R/\lambda \quad (6-3)$$

设计机器时,进距 S 应小于式(6-3)计算的极限值,否则将产生漏拌现象。

根据石灰土拌和过程所作试验绘制的满足上、下层平均不均匀度小于 10% 时圆周速度和进距可以选择的工作范围为一直线,称之为质量控制线,其方程为

$$V_0 = 3.6 + 290(S - 0.015) \quad (6-4)$$

除对拌和质量产生影响外,进距 S 还对功率消耗及生产率也产生影响。因而必须综合考虑才能选定。式(6-4)是针对一次拌和工艺而言,当发动机功率富余时,可以考虑增大进距 S 值以提高生产率,通过重复拌和来满足质量要求。

2. 电液控制方式——过程测控方式

这是一种在行走速度调速过程中转子圆周速度亦不断调整的一种全过程控制,适用于全液压稳定土拌和机。首先确定液压系统的匹配参数。取极限工况($v \rightarrow 0$, 行走功率 $P_s \rightarrow 0$)为转子液压泵和马达的匹配工况,此时发动机为额定工况,称之为转子全功率匹配。不考虑管路压力损失,操纵系统消耗功率按 3% 计,则有:

$$0.97P_H = (P'_2 - P_{20})Q'_2 / (60\eta\eta_2) = (P'_2 - P_{20})n'_0q_0 / (60\eta\eta_2\eta_{q0}) \quad (6-5)$$

式中: P_H ——发动机额定功率(kW);

P'_2 ——转子液压系统额定压力(MPa);

P'_{20} ——转子液压系统背压(MPa);

Q'_2 ——转子液压泵额定流量,即发动机额定转速、泵全排量流量(L/min);

- η ——分动箱传动效率,无分动箱时为 1;
- η_2 ——转子液压泵总效率;
- n'_0 ——转子马达额定使用转速(r/min);
- q_0 ——转子马达理论排量(L/r);
- η_{v0} ——转子马达容积效率。

根据上式即可确定转子泵与马达排量。

关于行走系统,其液压元件要兼顾拌和作业和运输作业两种工况,为了提高运输工况的行走能力,其参数往往根据需要功率较大的运输工况而不是拌和工况确定。

在行走系统和转子系统液压泵与马达之间管路中分别安装压力和流量传感器,连续检测两系统的工作压力和流量。设行走和转子系统压力和流量分别为 P_1, P_2 和 Q_1, Q_2 , 则两系统功率分别为:

$$P_x = (P_1 - P_{10}) Q_1 / (60 \eta_1 \eta) \quad (6-6)$$

$$P_n = (P_2 - P_{20}) Q_2 / (60 \eta_2 \eta) \quad (6-7)$$

- 式中: P_x ——行走系统功率(kW);
- P_n ——转子系统功率(kW);
- η_1 ——行走泵总效率;
- P_{10} ——行走系统背压(MPa)。

比较 $P_x + P_n$ 是否小于 $0.97 P_H$, 如小于则增大 Q_1 以提高行走速度 v , 使行走功率 P_x 特别是转子功率 P_n 增大, 重新比较 $P_x + P_n$ 是否小于 $0.97 P_H$, 直到相等为止, 控制发动机功率始终在额定工况附近工作。

如果土壤松散、拌和深度小, 则载荷调节是向提高行走速度的方向进行, 而转子圆周速度保持额定值 v'_0 不再增大。为了在满足动力合理分配的情况下还同时满足拌和质量要求, 每增加一次行走速度 v 值需按质量控制线方程检查进距 $S = 2\pi Rv / (Zv'_0)$ 是否超值。应控制进距 S 不大于质量控制线给定之值, 即行走速度 v 有一极值。如 v 已达极值仍然有 $P_x + P_n < 0.97 P_H$, 则表明在这种工作条件下机器能力过剩。要么继续增大 v 值以利用机器动力提高生产率, 利用复拌工艺满足拌和质量要求; 要么使机器在部分负荷条件下工作。反之, 如土壤坚硬、拌和深度大, 则控制是向降低行走速度的方向进行。如进距 S 在 30 ~ 40mm 之间, 则仅降低 v 而保持 v'_0 不变, 以保证拌和质量。如按 $v_0 = v'_0$ 不变计算的 S 值在 20 ~ 30mm 之间时 ($S = 2\pi Rv / (Zv'_0)$), 则 v_0 随 v 降低而同时降低, 其对应值为 $v_0 = 6 \sim 9\text{m/s}$, 使 S 实际值 ($S = 2\pi Rv / (Zv_0)$) 保持在 30mm 不变。 v 进一步降低, 则意味着土壤坚硬难以破碎或拌和深度大, 为确保拌和质量要求, v_0 保持于 6m/s 不再降低。

3. 转速控制方式 I

这种控制方式是借助于发动机转速的变化来控制行走泵和转子泵排量, 达到调整 v 和 v_0 之目的。下面介绍 DA 控制原理。

图 6-8 是 DA 控制工作原理图, 控制油来自补油

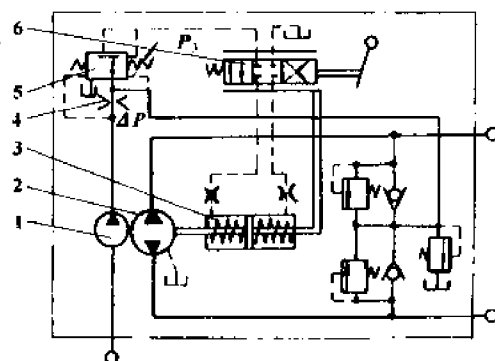


图 6-8 带有 DA 控制的手动变量泵工作原理图
1-补油泵; 2-主泵; 3-变量油缸; 4-节流孔; 5-调节阀;
6-手动变量阀

泵（或称增压泵），其流量与发动机转速成正比，进入调节阀后，经节流孔产生压降 ΔP ，此压降将调节阀的阀口打开，在操纵管路内建立起控制压力 P_3 ，经手动变量阀后推动变量油缸控制主泵排量。 P_3 又是调节阀的反馈压力，它将调节阀的阀口关闭。结果使主泵排量随发动机转速增减而增减。DA 控制方式可以在行走系统和转子系统同时采用，使行走和转子速度得到较好配合，发动机功率得到充分利用且满足拌和质量要求，然而控制方式较为复杂。这种行走系统采用 DA 控制的转速控制方式对转子系统采用机械传动的拌和机同样有效，只要转子系统有安全销保护避免产生意外突然超载即可。

4. 转速控制方式 II

这种控制方式的基本原理与上述 I 方式基本相同，都是以发动机转速为信号控制行走速度，达到调节载荷之目的。其区别仅在于方式 II 不是将发动机转速变化转换为变量泵伺服控制压力，而是将其转换为成比例的电压或电流，以此来控制电液比例泵的排量。

发动机皮带驱动的交流发电机转速在不计皮带打滑时与发动机转速以一定比例同步，取发电机一相正弦交流电作为控制信号，将其整形、计数，然后通过专门的放大和转换电路，输出与发动机转速成正比的电信号，将此电流信号作为行走系统电液比例泵的控制电流，即得到了与发动机转速同步的行走速度。

5. 压力补偿控制方式

这是一种目前使用较多的控制方式。其控制原理为：当负荷增加使转子系统工作压力（转子为液压传动）超过设定值 P'_2 时，行走泵压力补偿器（外控式）感受到这一压力值，切断伺服控制油源，泵的排量控制油缸在弹簧作用下自动回中，控制行走泵排量减小，达到降低工作负荷之目的（图 6-9）。转子负荷降低后，系统压力降低到 P'_2 以下，行走压力补偿器又停止工作，机器在这一新的工况下工作。

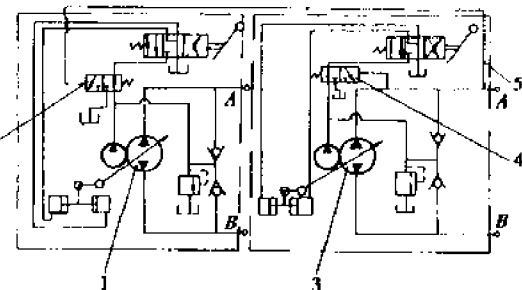


图 6-9 压力补偿控制原理图

1-行走泵；2-行走泵压力补偿器；3-转子泵；4-转子泵压力补偿器；5-控制油管

在正常的拌和条件下，由于行走泵压力补偿器总是预先动作，调节转子负荷不致太高，因而转子系统的压力补偿器并不起调节工作负荷的作用。它的工作过程及作用如下：如果转子碰到障碍物处于堵转状态时，尽管行走速度已经很低，转子负荷仍将迅速升高，当压力超过 P'_2 增大到 P''_2 时转子泵压力补偿器开始动作。当转子泵排量小到一定值时，则系统压力降低。当这一压力低于补偿器动作压力时，则补偿器停止工作。因此转子泵压力补偿器（内控式）的控制只能动态地维持转子泵在一个较小的排量状态，压力补偿器的作用最终减小了泵排量，即减小了溢流量，达到了降低系统发热之目的，同时因转子速度降低避免刀具因高速冲击而破坏。

转子在堵转状态时，行走泵压力补偿器（外控式）将持续地感受到这一压力而使行走泵排量为零，机器停止前进。压力补偿器的工作仅受压力控制而与伺服变量手柄的位置无关。

压力补偿控制方式的匹配与设计时，对转子液压泵和马达同样实行全功率匹配，按式（6-5）确定转子泵的排量和额定工作压力 P'_2 ，而以发动机最大扭矩工况为转子系统溢流压力计算工况，即

$$P_{2m} = k_m P'_2 \quad (6-8)$$

式中： P_{2m} ——转子系统溢流压力；

k_m ——发动机扭矩储备系数。

行走泵压力补偿器动作压力为 P'_2 ，转子泵压力补偿器动作压力为 P''_2 ，其计算式为

$$P''_2 = (0.9 \sim 0.95) P_{2m} \quad (6-9)$$

式(6-9)是基于转子系统常用的先导式溢流阀的超调压力，一般为调定压力的 5% ~ 10% 而考虑的，即要求溢流阀刚刚开启时，转子泵压力补偿器开始动作， P''_2 值偏小时转子过早降速不能充分利用发动机非调速段扭矩， P''_2 值偏大时起不到减小溢流流量的作用。

行走泵压力补偿器的控制只能在伺服变量阀给定的速度以内进行，即速度只能调低而不能调高，最大速度是由伺服变量阀控制的。因此，在作业中变量手柄要放在比较合适的位置上，速度偏高则易使压力补偿器频繁动作；速度偏低，则不能满足负荷工作。合适的速度以补偿器偶尔产生动作为宜，此时发动机在额定负荷附近工作，机器有最好的动力性和经济性。

6. 手动伺服变量控制——固定功率分配方式

这是一种转子系统预先给定的功率比例确定参数，行走系统按照运输工况所需能力选择参数的传统控制方式。拌和作业中发生渐缓超载时，由驾驶员降低行走速度来调节；而发生突然超载来不及调节时，依靠转子系统安全溢流阀限制极限载荷。由于土壤状态的多变性，超载是经常发生的，为降低驾驶员的操作强度，提高机器抗超载的工作能力，往往使机器的动力参数匹配有较大裕量。

具体方法为：转子驱动元件在分配的功率范围内取极小值，即净功率的 75%（有时取 70%），这样机器在作业中，发动机多数情况为非满负荷工作，从而保证了发动机的正常运转。显然这种固定分配功率的匹配控制是以降低机器的动力性为代价的，尽管不十分科学，但由于设计简单、工作可靠、操作方便，目前在国内外的许多拌和机上仍在使用的这一方式。

三、液压系统

全液压稳定土拌和机液压系统由辅助系统、行走系统、转子系统三部分组成，分别介绍如下。

1. 辅助系统

辅助系统包括转向、转子举升、尾门开闭等，为齿轮泵和油缸组成的通用开式系统，其元件计算和选择原则如下：

(1) 转向系统

转向油缸的行程由转向梯形机构的结构尺寸确定，其油缸缸径和工作压力则根据拌和机静止时转向所需的推力计算。

转向阀排量由转向油缸完成一个工作行程所需的方向盘转数即转向阀转数确定。设转向阀排量为 q_E ，则：

$$q_E = \pi D_E^2 l_E / (4n) \quad (6-10)$$

式中： q_E ——转向阀排量 (mL/r)；

D_E ——转向油缸内径 (cm)；

l_E ——转向油缸行程 (cm)；

n ——转向油缸完成一个工作行程 (单向行程) 所需之转向阀转数，取 6 ~ 8。

转向所需液压油流量为

$$Q_E = q_E n_E / 10^3 \quad (6-11)$$

式中: Q_E ——转向所需油流量(L/min);

n_E ——转向阀转速,取 60~70r/min。

(2) 举升油路计算

举升油缸行程由转子工作机构图确定,其缸径和工作压力由举升工作装置之推力确定,工作装置下降切土工作依靠自重完成无须加压。举升工作装置时油缸大腔供油,所需油量为

$$Q_j = 60\pi D_j^2 l_j / (4 \times 1000 t_j) \quad (6-12)$$

式中: Q_j ——举升油流量(L/min);

D_j ——举升油缸内径(cm);

l_j ——举升油缸行程(cm);

t_j ——举升所需时间,取 8~10s。

尾门开闭油缸无特殊要求,故不赘述。在进行辅助液压系统设计时,一般为简化结构辅助系统多用单泵分流工作。分流方式有采用普通转向阀加稳流分流阀和采用负荷传感转向阀加优先阀两种。采用前种方式时当发动机额定转速时油泵流量应比转向和举升系统流量之和大 10%~20%;而采用后一方式时,由于转向和举升同时工作机会很少,因此油泵流量只要比转向和举升两系统油量大者大 20%~30%即可。

为了准确调节工作装置上升和下降速度以及尾门开闭速度,在举升和尾门开闭油路中应设置单向节流阀,此外还应设置液压锁以使油缸能定位工作。

2. 行走系统

行走马达的计算原则为:低速挡时马达最大扭矩所产生的切线牵引力应大于拌和机驱动轮附着力,即

$$M_{\text{sm}} \geq F_2 \varphi r_k / (i_1 \eta_3) \quad (6-13)$$

式中: M_{sm} ——行走马达最大压力(溢流压力)时产生的输出扭矩, N·m;

F_2 ——驱动轮在水平地面工作装置升起时的支反力, N;

φ ——附着系数,取 0.6~0.8;

r_k ——驱动轮动力半径(m);

i_1 ——一档时行走马达至驱动轮间总减速比;

η_3 ——马达至驱动轮间传动效率,估算时取 0.8。

根据 M_{sm} 和系统最高工作压力即可确定行走马达排量。行走泵一般与马达取同一系列、同一排量规格元件。该系统为典型的行走车辆闭式传动,采用液压泵和马达集成式结构。常用系统有德国 REXROTH 公司 A₄VC 系列斜盘式变量柱塞泵加 A₂F 系列斜轴式定量柱塞马达系统和美国 SUNDSTRAND 公司 20 或 90 系列斜盘式变量柱塞泵加该系列定量马达系统。

按式(6-13)计算所求行走液压系统功率远大于拌和时的匹配功率,这主要为了提高机器运输工况能力。在运输工况,转子系统不再工作。按式(6-13)所配置功率约为整机功率的 40%~60%。

3. 转子液压系统

该系统是拌和机液压系统设计的关键,象拌和机这样将 200 ~ 300kW 功率全部用液压元件且在 20 ~ 30MPa 高压下长时间传给转子工作的机器并不太多,因此在系统设计时必须周密考虑。

图 6-10 为典型的转子液压传动原理图。关于转子液压元件动力参数计算在前述有关部分已详述,这里仅介绍系统辅助元件的配置计算。

转子系统为闭式液压回路单向工作系统,其特点在于:拌和结束时转子提出地面因惯性会继续转动,此时液压变量泵已关闭,液压马达的泵油作用使闭式系统高、低压反向。尽管回油侧有马达补油溢流阀,但该阀流量较小,低压回油侧压力有可能升高到正常工作时的数倍。系统设计时必须考虑这一特点,各元件设计原则如下:

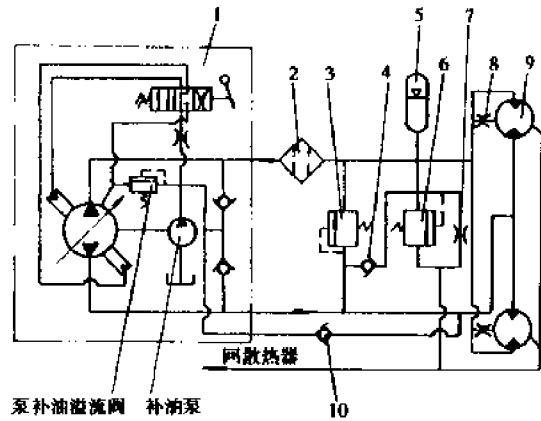


图 6-10 转子液压系统原理图

1-集成液压泵;2-回油细滤器;3-高压溢流阀;4、10-吸油单向阀;5-回油蓄能器;6-马达补油溢流阀;7、8-节流阀;9-转子液压马达

(1)回油细滤器过滤精度取 $5 \sim 10\mu\text{m}$,以过滤液压马达等元件工作中产生的颗粒磨料,确保大功率液压元件可靠工作。该滤油器耐压应为回油压力 p_{20} 的 2 ~ 3 倍以上,流量应为系统总流量的 1.5 倍以上。

(2)高压溢流阀溢流压力按全功率匹配时发动机最大扭矩工况计算。当变量泵带有压力—流量调节阀时溢流量可根据变量泵的流量调节特性适当减小,无压力—流量调节阀时按系统全流量确定。

(3)吸油单向阀为防止转子惯性转动时马达吸空背压腔(即正常工作时的高压腔)而补油,两单向阀总流量取补油泵流量即可。

(4)补油泵(或称为增压泵)补油流量约为主泵流量的 20% ~ 25%,这些油量用于补充液压变量泵与马达的容积损失和泵、马达补油溢流阀排泄油量。工作压力较高时,液压泵和马达容积损失各约为 8% ~ 10%,此时泵与马达补油溢流阀仅有少量油液排出。

马达补油溢流阀泄出必要的热油以冷却系统,其调节压力 p'_{20} 时流量压力特性一般取为:当压力为 p'_{20} 时流量为主系统流量的 3% ~ 4%。

(5)系统中 3 个节流阀压力流量特性可分别取为:压力为 p'_{20} 时流量为主系统流量的 1% ~ 2%。其中节流阀 7 组成一滤波油路,可以吸收消除回油路中的压力波动(由转子各刀具不连续入土产生的转速波动而引起),改善主泵的吸油条件。节流阀 8 为了增加马达的壳体冷却油量以降低使用温度而设置。

(6)回油侧设置蓄能器为了稳定背压,必要时可以补充油量以改善主泵的吸油条件,提高其使用寿命,其容量可根据通用设计原则确定。气囊式蓄能器的充气压力可取 p_{20} 的 60% 左右。

(7)关于行走和转子系统的高压胶管,由于液压油压力高,流量大,配置较难。一般设计手册提供的根据流量和流速计算管径的方法对拌和机这种大流量的行走机械很不适用,建议在拌和机液压系统(特别是转子系统)设计时取管道流速为:高压主管道 $6 \sim 9\text{m/s}$,吸油管道 $1.0 \sim 1.5\text{m/s}$,壳体泄油 $3 \sim 4\text{m/s}$ 。

高压主管道根据流速计算之内径选择胶管时耐压强度往往不够(同一层级的胶管内径越

大,耐压力越低),对此,建议用两根稍细管路合流方式解决。对 30MPa 级以上的管路,胶管接头建议用法兰形式或 A 型扣压形式,近年来国外引入的 H 型接头效果更好。

第三节 自动找平系统

一、概述

自动找平系统广泛应用于摊铺机、平地机、拉毛机、铣刨机等各种工程机械上。它可以大大地提高机械的作业质量和自动化程度,是现代工程机械实现机电液一体化的关键技术之一。

自动找平系统的控制对象是各种工程机械上的工作装置,如沥青摊铺机的熨平板、水泥摊铺机的机架、铣刨机的铣刨滚等等。这些工作装置均由液压缸来控制其升降的位移量,液压缸在电液转换元件的控制下,输出所需的运动和动力。电液转换元件是整个自动找平系统控制和动力传递的核心,它接收控制器所给的信号,并进行功率放大,转换成液压信号去控制液压缸的运动。控制器将指令信号与反馈信号进行比较和加工,并向电液转换元件发出指令。该系统的控制原理框图见图 6-11。

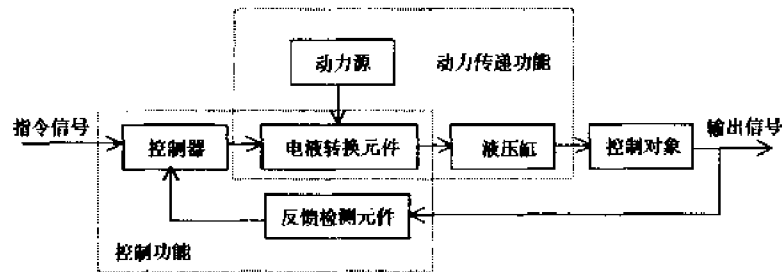


图 6-11 自动找平系统控制原理框图

由此可见该系统同时完成动力传递功能和控制功能。

根据该系统控制功能方框中所用具体硬件的不同,自动找平系统可分为以下几种:

1. 类型 1: 电液开关控制自动找平系统

在这种系统中反馈检测元件为开关型的传感器,电液转换元件为电磁换向阀,控制器由模拟电路构成,输出开关量控制电信号。

2. 类型 2: 电液伺服控制自动找平系统

在这种系统中反馈检测元件为可连续输出模拟量电信号的传感器,电液转换元件为电液伺服阀,控制器由模拟电子线路构成,可根据传感器检测到的误差信号输出连续变化的模拟量控制信号。

3. 类型 3: 数字式自动找平系统

该类型的系统与前两种系统的主要区别是控制器采用了数字电路或直接采用微机构成,可输出数字控制信号。反馈检测元件与控制器的接口采用 A/D 转换。电液转换元件可采用数字阀,电控制信号直接驱动,可将控制器输出的数字控制信号经 D/A 转换后驱动常规的电液伺服阀或电磁换向阀。

4. 类型 4: 全液压自动找平系统

在这种类型的系统中,找平系统的控制功能,由一个将反馈检测元件和机液伺服阀整合为

一体的全液压自动找平传感器来实现(如图 6-12 所示)。由全液压传感器检测误差信号,同时它也直接控制进入油缸的流量,控制油缸的升降,从而达到自动找平的目的。

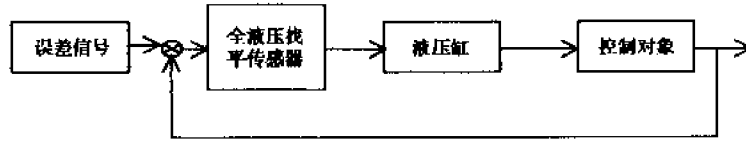


图 6-12 全液压自动找平系统框图

另外随着传感器技术的不断发展,自动找平系统中的反馈检测元件也由原来单一的接触式传感器发展为非接触式如激光传感器、声纳传感器等。

二、摊铺机自动找平系统

摊铺机是应用自动找平系统最多的工程机械之一。高等级的路面(包括机场跑道等)对其面层的平整度均要求较高,一般要求在 3m 直尺内不平整度小于 $\pm 3\text{mm}$ 。这就对铺筑高等级路面的摊铺机提出了较高的要求,要求摊铺机装备有较高精度和灵敏度,性能可靠的自动找平系统。

早期的沥青摊铺机并没有专门的自动找平装置,而是采用了浮动熨平板,使其具有一定的找平能力,它的工作原理如图 6-13 所示。

浮动熨平板的主要功能是将混合料刮平并予以压实,其自身亦有一定的找平能力。当工作角 α 为常值时,铺筑的路面厚度均匀、平整。当工作条件发生改变时,使 α 改变,此时熨平板在恢复平衡的过程中必然向上或向下运动,从而改变了摊铺厚度,摊铺后的摊铺层不平整度只有原路基的不平整度 $1/n$, ($n = \text{牵引大臂长度} / \text{熨平板长度}$)。由此可以看出不浮动熨平板的找平能力是有限的,而且影响因素较多,诸如行走速度,供料的充足与否,板前物料分布情况,路基的平整度,熨平板的受力,摊铺机本身的结构尺寸等等均对它的找平作用产生影响。因此必须采用一种自动找平装置,使摊铺机在作业行驶过程中自动找平,提高路面的平整度。

沥青摊铺机最常用的自动找平系统原理如图 6-14 所示。

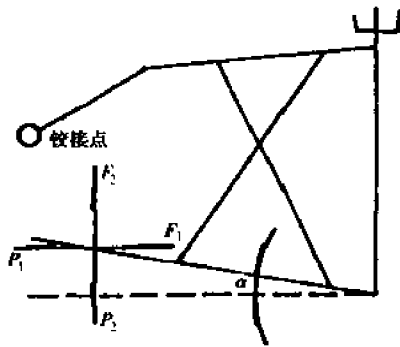


图 6-13 熨平板工作原理图

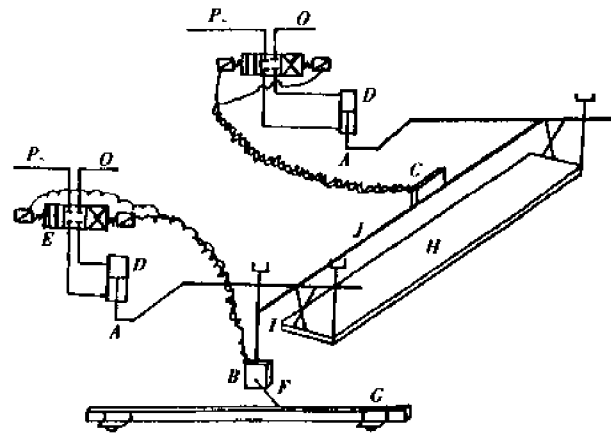


图 6-14 沥青摊铺机自动找平系统原理图

当路基不平(或其它因素影响)引起摊铺机上下波动从而使大臂牵引点 A 上下波动时,熨平板工作角亦发生相应的变化,此时纵向传感器检测出误差信号,经控制器处理后输出一电信号控制电磁阀,再由电磁阀控制液压缸动作,带动大臂牵引点运动,使摊铺高度维持在设定值,误差信号消失,液压缸的动作即结束。横向传感器用来检测熨平板横向角度的变化,并将该变化经控制器处理后输电信号按要求控制一侧的电磁阀,再由电磁阀控制液压缸的动作,从而改变同侧牵引点的位置,直到熨平板保持在设定的横坡位置。通过纵、横向找平传感器的作用使铺筑的路面达到设定的纵、横基准要求。

直到机架与基准的相对位置恢复。

三、自动找平液压系统原理

从液压系统的角度来看,不管哪种类型的自动找平系统均为开式并联阀控缸回路。所不同的只是有些采用换向阀,有些采用伺服阀。采用伺服阀的系统要比采用换向阀的系统具有更快的响应速度和更高动态品质与精度。

图 6-18 为沥青混凝土摊铺机自动找平典型液压系统原理图,图 6-19 为水泥混凝土摊铺机自动找平典型液压系统原理图。

四、电液调平控制原理

电液调平系统是一个机电一体化的闭环控制系统,它将摊铺机的倾斜角度通过传感器变为相应的电信号,再去控制液压电磁阀的开闭,液压电磁阀通过液压系统调节摊铺机倾斜角度,使摊铺机恢复到预先设计角度,并自动保持在这个角度上工作。

1. 调平系统的组成

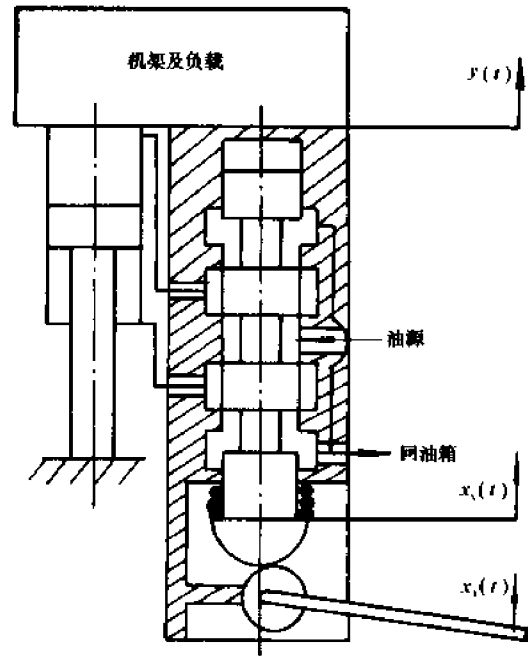


图 6-17 找平传感器及系统结构简图

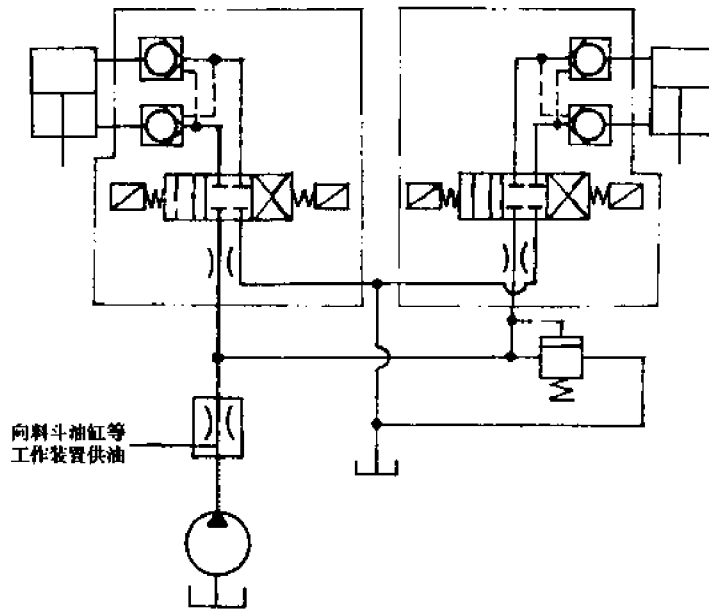


图 6-18 沥青混凝土摊铺机自动找平液压系统原理图

图 6-20 所示为调平系统的基本组成,其工作过程为:

由设定器输出一固定电压 U_1 (手动设定角度),其电压值相应代表一定的倾斜角度。假定车体此时不是在这个角度工作,那么传感器 2 的输出电压 U_2 值与 U_1 就有电压差,即 $U_2 - U_1 = \Delta U$,我们称为 ΔU 为误差电压。误差信号放大器 3 放大这个误差电压 ΔU ,并判定调节极性,

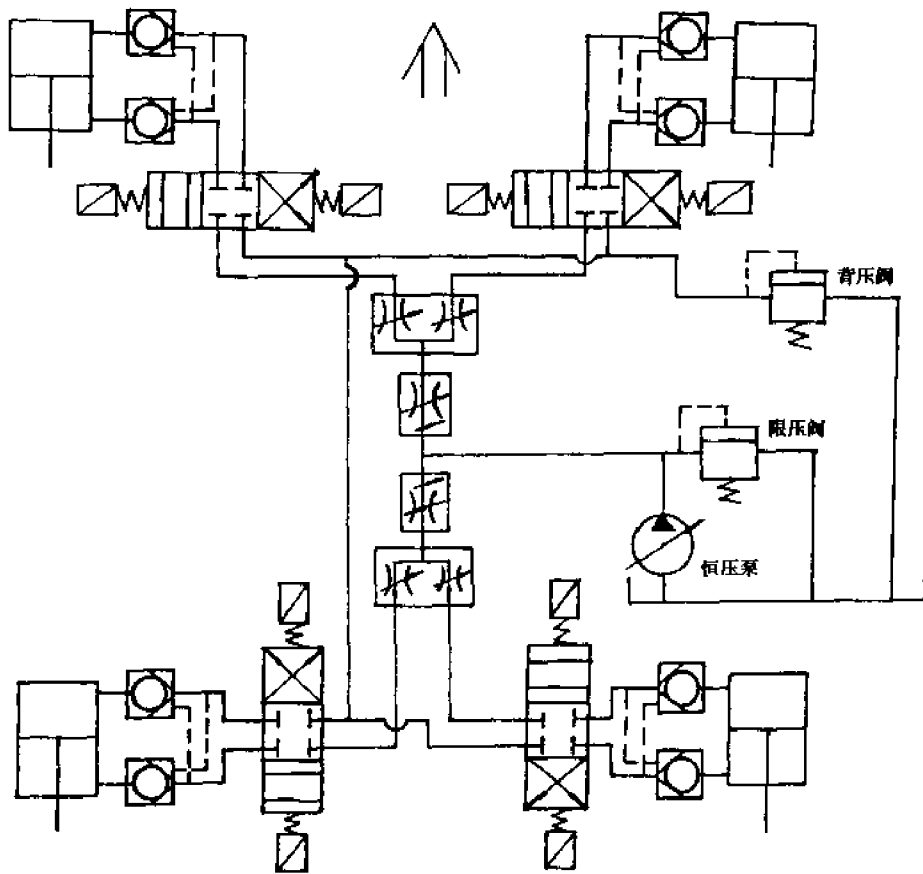


图 6-19 水泥混凝土摊铺机自动找平系统液压原理图

(即应该调节哪边的电磁阀工作),再将放大后的信号送给电压比较器 4。电压比较器将这个放大的连续误差电压信号 ΔU ,变为断续正脉冲电压信号,其脉冲的个数及宽度与误差电压 ΔU 成正比,然后将这些脉冲电压送到驱动电路 5,推动相应的液压电磁阀 6、7 工作。

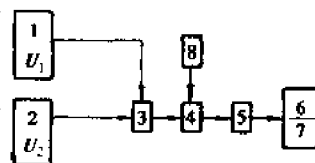


图 6-20 调平系统组成

1-手动设定器;2-传感器;3-误差信号放大器;4-电压比较器;5-驱动电路;6、7-液压电磁阀;8-锯齿波发生器

当液压电磁阀连续通断几次后,液压系统使摊铺机的倾斜角与设定值渐渐接近,此时传感器输出电压值 U_2 也渐渐接近设定器电压值 U_1 。最后,当 $U_2 = U_1$ 时,即误差信号放大器两端误差电压为零,电路处于平衡状态,调节工作停止。当车体再次偏离设定角度时,调节器又重复上述工作过程,从而达到自动保持设定角度的目的。

道路施工这个特定环境,决定了调平控制器工作在高温、高湿及振动的条件下,而控制系统对控制精度及稳定性又有较高的要求。我们希望控制系统总是在稳定的工作状态下,具有较高的控制质量,即调节时间短、超调量小、摆动次数少;为了保持系统精度,还要求系统有很高的放大倍数,然而提高放大倍数,又会造成系统的不稳定,或者调节过程中产生振荡,或者因温度变化而产生自身不稳定现象。因此,控制系统的精度与稳定性之间是一对矛盾。所以,实际电路中采取了许多方法保持控制系统的技术要求。

2. 调平控制器工作原理

调平控制器电路原理如图 6-21 所示。它由误差放大器、电压比较器、锯齿波发生器、驱动

电路等组成,现分别对各电路进行介绍。

(1)误差放大器工作原理

误差放大器的作用是对传感器送来的电压与设定角度电压的差值加以放大,并联判定极性(即应该调节哪边电磁阀工作)。

误差放大器由 IC₁ 和 IC₂ 及其周边元件组成,由图 6-21 可知,传感器送来的电压 U₂ 分别加到 IC₁ “+”端及 IC₂ “-”端;设定角度电压 U₁ 分别加到 IC₁ “-”端及 IC₂ “+”端。现在我们假设:设定角度电压不变, U₂ = U₁, U₂ < U₁, U₂ > U₁ 三种情况下电路的输出情况如下:

U₂ = U₁ 时, IC₁、IC₂ 各 “+” “-” 输入端电压相等,其输出 U₃ = U₄ = 0

U₂ < U₁ 时, IC₁ “+” 输入端电压低于 “-” 端, IC₂ “+” 端电压高于 “-” 端,所以 IC₁ 不输出电压, U₃ = 0; IC₂ 输出电压, U₄ > 0, 其电压大小与 U₂ - U₁ = ΔU 成正比。

U₂ > U₁ 时, IC₁ “+” 端电压高于 “-” 端, IC₂ “+” 端低于 “-” 端,所以 U₄ = 0; IC₁ 输出电压, U₃ > 0, 其电压大小与 U₂ - U₁ = ΔU 成正比。

从以上分析可知,无论 U₂ 电压怎样变化, IC₁、IC₂ 总是一个有输出,一个没有输出,这样起到了极性判别作用,即 U₂ 变小时, IC₂ 输出电压; U₂ 变大时, IC₁ 输出电压。

(2)电压比较器工作原理

电压比较器由 IC₃ 和 IC₄ 构成(图 6-21),其作用是将误差放大器送来的误差电压,转换为相应的方脉冲,来驱动电路控制电磁阀的开闭。也就是说,误差电压越大,电压比较器输出的脉冲数量越多,脉冲宽度越宽,表现在电磁阀上是:传感器倾斜度越大,电磁阀开通的次数就越多,每次开通时间就越长。

IC₃ 和 IC₄ 的 “+” 端分别接误差放大器两输出端, “-” 端连接在一起加入正锯齿波电压 U₇, 下面分析假定 U₄ = U₃ = 0; U₄ > 0, U₃ = 0; U₃ > 0, U₄ = 0 三种情况下的电压比较器输出,见图 6-22 所示。

U₄ = U₃ = 0 时,因 “+” 端电压为零,无论 U₇ > 0, 或 U₇ = 0, 两电压比较器均输出为零。

U₄ > 0, U₃ = 0 时, IC₄ “+” 端电压高于 “-” 端的锯齿电压 U₇, 由于运算放大器 IC₄ 工作在开环状态,其增益很大, IC₄ 进入饱和状态,输出电压接近电源电压,随着锯齿波电压 U₇ 不断升高,使 IC₄ “+”、“-” 两端电压差值不断减小,当 U₄ = U₇、U₇ > U₄ 时, IC₄ 输出又跳回零电位,如图 6-22 所示,电压波形可见电压比较器在输入端加有锯齿波电压及误差电压时,输出为正脉冲电压。

当 U₃ > 0, U₄ = 0 时, IC₃ 工作情况与 IC₄ 一样。

3. 比例调节原理

比例调节是整个控制器调节的基础,也是一个关键技术。控制器工作过程如图 6-23 所示。因电压比较器 IC₄、IC₃ 工作原理相同,故以电压比较器 IC₄ 加以说明。

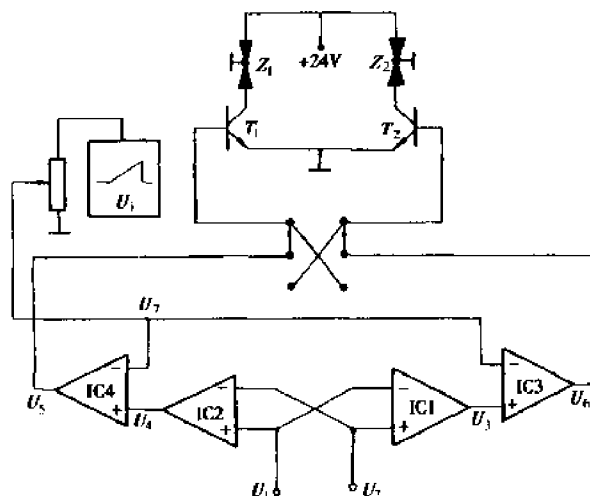


图 6-21 调平控制器原理

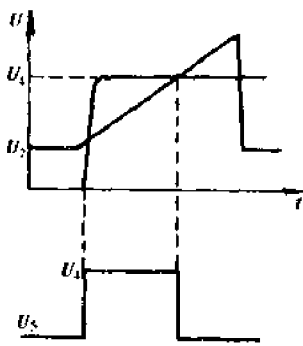


图 6-22 电压比较器工作过程

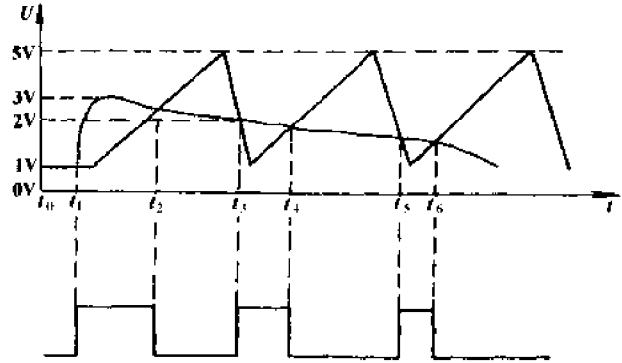


图 6-23 比例调节过程示意图

我们假设以下几个条件:

(1) 因传感器偏离某一设定角度时,经误差放大器输出电压 $U_4 = 3V$;

(2) 锯齿波电压 U_7 起始电压为 $1V$,最高电压为 $5V$;

(3) 将图 6-23 中 $t_0 \sim t_6$ 段分为 6 段: $t_0 \sim t_1, t_1 \sim t_2, t_2 \sim t_3, t_3 \sim t_4, t_4 \sim t_5, t_5 \sim t_6$ 。

$t_0 \sim t_1$ 时,因传感器没有偏离设定角度,传感器电压 U_2 与设定电压 U_1 没有差值,即 $U_2 - U_1 = 0$,此时 $U_4 = 0, U_5 = 1V$,由于 IC_4 “+”端为零,输出 U_5 也为零电位。

$t_1 \sim t_2$ 时,传感器偏离设定角度, $U_4 = 3V$,而这时 U_7 还为 $1V$, IC_4 输出 U_5 为高电位,随着 U_7 不断升高,并接近 $3V$ 时, IC_4 输出 U_5 又跳回零电位,形成了第一个调节脉冲。

$t_2 \sim t_3$ 时, IC_4 “+”端电压低于“-”端,输出 U_5 为零电位。

$t_3 \sim t_4$ 时,因第一个脉冲已使电磁阀开通调节了机器角度,使传感器偏离角度减小,但还有偏离,假定为 2° 。因此, U_4 也相应减小,假定为 $2V$,在 t_3 处锯齿波又回程, $U_7 = 1V$, IC_4 又输出高电位。随着 U_7 升高,接接近 $2V$ 时,即 t_4 处时, IC_4 输出 U_5 跳回零电位,又形成第二个调节脉冲,电磁阀再次开通调节机器角度,使传感器偏离设定角度进一步减小。总之,只要传感器还偏离设定角度, IC_4 就有脉冲输出,不断调节电磁阀开与闭动作,直至传感器渐渐回到设定角度为止,即 $U_2 = U_1, U_4 = 0$,调节停止,整个调节系统进入平衡状态。如果传感器又偏离设定角度,电路又重复上述调节过程,在实际电路中,锯齿波频率反映了每秒调节的次数。

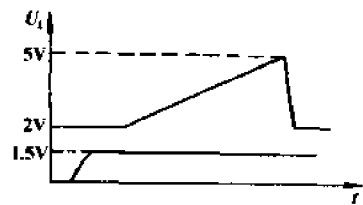
通过以上分析可以发现,调节脉冲个数及宽度与偏离设定角度成正比,即偏离角度越大,调节脉冲个数越多,宽度也越大。同时也可看出,每次调节过程中,脉冲宽度一个比一个窄,脉冲间距越来越大,这个特点反映在电磁阀表现为:每次调节开始时,电磁阀开通时间较长,随着传感器渐渐接近设定角度时,电磁阀开通时间越来越短,并且一次比一次间隔长。这样的调节方法可以保证快速平稳,又能保证调节精度,并防止过调而产生的振荡现象。这就是现代摊铺机上采用的脉宽比例调节技术。

4. 灵敏度调节原理

在控制器面板上有一个灵敏度调节旋钮,在电路上它是一个电位器。通过电位器调节锯齿波电压大小,即可达到调节灵敏度的目的。

如图 6-24 所示,假定锯齿波电压 U_7 起始电压为 $2V$,此时传感器偏离某一设定角度,经误差放大器输出电压 $U_4 = 1.5V$,电压比较器 IC_4 “+”端电压低于“-”端,输出为零,即不输出调节脉冲。可以看出,虽然传感器偏离设定角度,但调节电路不工作,这就是说,电路调节灵敏度很低。

在相同条件下,只改变锯齿波电压,使其加在 IC₄“-”端电压降低,同样传感偏离设定角度值不变,误差电压为 1.5V,但因此时锯齿波电压最低为 1V,IC₄“+”端电压高于“-”,有正脉冲输出,起调节作用。从以上分析看出,锯齿波电压越高,调节灵敏度越低;锯齿波电压越低,灵敏度越高。



5. 驱动电路

功率驱动电路是向电—机械转换装置提供足够大的驱动电流,同时对整个功率放大器来讲还必须有良好的稳态和动态特性。

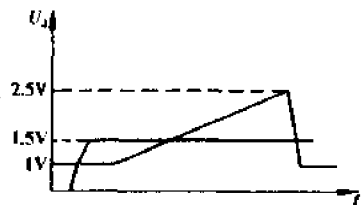


图 6-24 灵敏度调节原理

对于一般的电液比例控制系统,根据控制综合后的处理方式不同,功率放大器有模拟式和脉宽调制式(PWM)两种,结构框图分别见图 6-25、图 6-26 所示。模拟式放大器在各种信号相加后直接送功放管作电流放大,而后者在它们之间加入 PWM 环节。由于 PWM 信号中已包括了一定频率的脉动量,所以 PWM 式的功率放大器中无需另加颤振信号源。从内部工作情况来看,PWM 式的功放管工作在开关状态。开状态时,功放管的压降约等于零;关状态时,功放管电流约为零,因而功放管功耗大为降低,是一种节能电路。相反,模拟式功放级工作在功放管的线性区,在非额定工况下能耗较大,同时也使发热增加,温漂增大。但无论是模拟式功率放大器还是脉宽调制式功率放大器,其驱动电路是相同的。

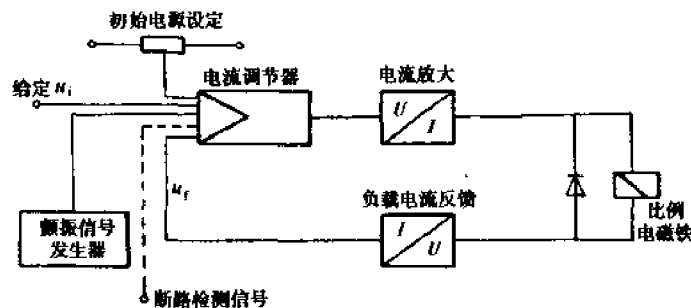


图 6-25 模拟功率放大器结构框图

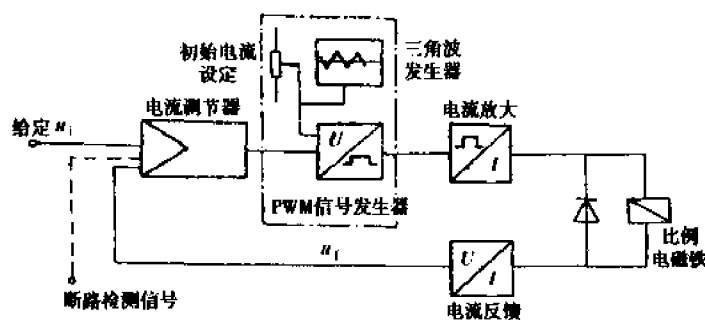


图 6-26 脉宽调制式功率放大器结构框图

图 6-27 为一具体的驱动电路,下面以该图为例简述电路工作过程。 K_1 闭合,加电接 B_1 、 B_2 的电磁阀哪一个导通,决定于 T_1 或 T_2 哪一个导通, T_1 、 T_2 的导通决定于误差放大器送来的信号。假定 K_2 处送来的信号进入左边电路,且运放 324 的“+”端输入电压大于“-”端电压,运放工作输出端提供 T_1 基极工作电流, T_1 导通,接 B_1 的电磁阀即开始工作;右边电路工

械(人工手动)换挡的准确程度取决于驾驶员的技术水平,往往不能准确地选择挡位,使得发动机功率得不到充分地利用,也影响了燃料经济性,特别是对某些机械。例如铲运机,为了充分利用发动机功率,挡位数已增至7~8个,人已很难正确来选择挡位了。机械换挡操作非常频繁,劳动强度大,而且在作业过程中换挡,不仅要行驶驾驶,还要操纵工作装置,分散了驾驶员的注意力,增加了行驶的不安全因素。例如:装载机进行V形作业时,每小时换挡操作近千次,平均3.6s一次。另外,人工手动换挡,换挡过程平稳性差,存在换挡冲击。当通过复杂的地面时,往往会因换挡不及时或换挡动力切断时间过长,造成机械停顿或发动机熄火,影响机械的通过性。

1. 自动换挡系统的形式

自动换挡系统根据其换挡信号的产生及控制换挡阀方式的不同,可分为液压式和电液式。液压式是将车辆的行驶速度 v 、油门开度 x 等行驶状况参数转换成油压信号 P ,由油压信号控制换挡阀完成自动换挡。电液式是将 v 、 x 等行驶状况参数转换成电信号后输入电子换挡控制器,由电子换挡控制器控制换挡阀而实现自动换挡。

与液压控制相比,电子控制具有以下优点:能全面地反映发动机工况、外负荷工况以及作业行驶工况,使换挡控制更为合理;电子控制精度高且很灵敏,能精确地进行换挡点的控制,获得最佳的动力性和经济性能;可以按不同的使用要求,实现多种换挡规律的控制。另外电子控制可针对每一具体换挡情况,进行换挡品质个别控制,使得换挡迅速又平稳;电子控制还能实现各种辅助功能,例如:自动故障诊断,防止意外挂高档和倒挡等等。电子控制技术还在进一步向智能化控制方向发展。

自动换挡系统也可根据自动换挡的范围,分为部分自动换挡(半自动换挡)和全自动换挡两种形式。部分自动换挡是指在常用的几个排挡范围内实现自动换挡,驾驶员只需在极少的几个换挡位置进行操作(一般高档实现自动换挡,低挡手动操作换挡),也可用选择器手柄选择自动换挡的换挡范围,限制最高车速。这种自动换挡系统形式较好,应用较广。全自动换挡是指在全部前进挡范围内实现自动换挡,驾驶员只需控制油门,便可控制车速。

自动换挡系统的发展目标与方向是简化驾驶换挡操作程序,减轻驾驶员的劳动强度,选择最佳的换挡时刻,以提高车辆的动力性、经济性和加速性等。

2. 自动换挡系统的要求

(1)操作变速杆应方便省力,操作次数少。

(2)驾驶员可以在自动换挡状况下人为干预换挡,以适应交通情况和地形条件。如车辆在泥泞的道路上处于打滑状态时,车轮的转速仍比较高,发动机输出的扭矩并不大,而自动换挡系统接收到的信号可能使挡位继续升高,这样显然不利于车辆摆脱困境。因此,自动换挡系统必须设置人为的干预换挡机构。

(3)升挡、降挡应顺序进行,以减少冲击及机件的损坏。

(4)应保证最佳的换挡时刻,以满足动力性及经济性的要求。

(5)当自动换挡系统发生故障时,应有安全挡位可进行应急行驶。

3. 自动换挡系统的控制内容

自动换挡变速器控制的主要内容有换挡规律的控制和换挡品质的控制。换挡规律是指各排挡间随工况参数在自动进行换挡的变化规律;换挡品质是指换挡过程的平稳性,常以冲击度来衡量。除此之外还有闭锁离合器控制和液力制动器控制等。

4. 自动换挡系统的基本组成

自动换挡系统有液压和电液式两种型式。下面以电液式自动换挡系统为例介绍其基本组成。

(1) 供油系统由油滤器、油泵、变矩器、减压阀、背压阀、锁止阀、顺序阀、冷却器等组成。

(2) 执行机构由制动器、离合器、闭锁离合器等组成。制动器和离合器不同组合的接合,可构成变速器的各前进挡和倒退挡。

(3) 换挡控制机构实际上是一个计算机控制的开关电路,它以速度传感器、油门开度电位计的电信号为依据,接受车辆的行驶状况参数,再根据变速选择器的电信号,自动计算合适的换挡时刻。在换挡时,向相应的电磁阀通电,使换挡阀动作而接通主压力油与执行油缸的油路,接合相应的挡位。为保证电磁阀和换挡阀正常工作,设有先导控制油路,形成电磁阀控制先导控制油路,先导控制油路再控制换挡阀的动作。变矩器上的闭锁离合器受电磁阀信号的控制。电磁阀控制的先导控制油路使闭锁阀动作,从而接通或切断压力油通往闭锁离合器的油路,使闭锁离合器闭锁或解锁。

(4) 信号转换系统。在电液式自动换挡系统中,速度传感器和油门开度电位计将车辆行驶状态参数转换成电信号送至计算机或电子控制机构,定位器和变速选择器也同样将相应的其它选择参数变为电信号输入。

换挡控制过程如图 6-28 所示。

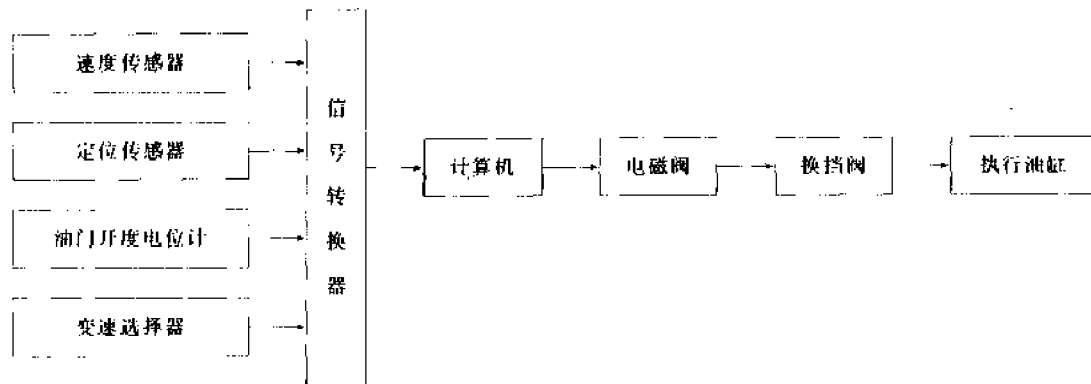


图 6-28 换挡控制简图

二、自动换挡变速器控制系统

自动换挡变速器控制系统的主要任务就是自动改变传动系的传动比,即根据外负荷的变化情况自动换挡。具体地讲,就是对变矩器的闭锁离合器、变速器等的控制。如日本川崎 KLD88ZII 型装载机、小松 WA 系列轮式装载机、瑞典 VOLVO - BM 型装载机、美国约翰迪尔公司的 JD862 型铲运机、卡特彼勒公司的 657E、651E 铲运机都采用了自动换挡变速器,它们的控制系统组成及工作原理都基本相同。

1. 系统的组成及功用

工程机械自动换挡系统一般采用双参数控制:油门开度 x 和车速 v ,或发动机转速 n_e 和车速 v 。因为双参数控制基本上表达了机械的工作情况,同时也反映了其实际作业性能。换挡规律通常按最佳牵引性能或最低油耗量予以确定。 x 和 v 直接反映了机械工作时动力和传动装置所处的状况,在不同油门开度下从各挡牵引特性曲线图上可看出牵引动力性能和燃油经济性能; n_e 和 v 间接反映了机械工作状况,因为 n_e 和 v 已知,则变矩器的速比 i 即可求

得,根据 i 和 n_e ,就可计算出发动机力矩 M_e ,从而求得了油门开度。用 n_e 和 v 双参数控制比用 x 和 v 来得方便,结构上易实现,因为油门开度传感器结构稍复杂些,而采用 n_e 和 v 双参数控制,就不需要油门传感器,检测 n_e 和 v 只需转速传感器,简单可靠。因此,不少装载机电子控制自动换挡变速器上都采用了 n_e 和 v 双参数控制。

一般自动换挡变速器控制系统的传递路线如图 6-29 所示。动力的传递路线由发动机到变矩器、变速器至终传动。控制系统包括速度传感器、定位传感器、变速控制器(内装计算机)、各电磁阀及执行元件。

变速控制器的功用:按照速度传感器信号和选择器设定的位置信号,自动设定最佳的动力变速挡位和变速时刻。

速度传感器及速度传感器控制器的功用:测试变速器输入轴(变矩器涡轮轴)的转速,将转速转换成电信号并加工放大,整形成约 12V 的矩形脉冲信号,然后送到变速控制器中。

根据速度传感器送来的脉冲信号及变速杆位置信号,微型计算机通过驱动电路驱动相应的变速器电磁阀,利用电磁阀控制先导控制油路,进而控制换挡阀进行换挡。

WS16S-2 铲运机变速选择器与控制器联合工作时,其手动操纵不同位置时车辆的行驶速度范围如表 6-1 所示。在表 6-1 中,R、N、3、2、1 分别为选择器操纵手柄的倒退、空挡、前进 3、前进 2、前进 1 位置。 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 、 F_6 、 F_7 、 F_8 为车辆的各个前进行驶速度挡位。

操作杆不同位置时行驶速度范围表

表 6-1

操纵杆位置	变 速 范 围								
	R	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8
R	○								
N									
3			○	○	○	○	○	○	○
2			○	○	○	○			
1		○							

选择器手柄在位置“3”上时,变速控制器根据速度传感器控制器传来的脉冲信号,自动选择 $F_2 \sim F_8$ 之间的最佳速度挡位。自动转换点如下所示:

变速器输入轴转速	转换形式
1 950 ± 50r/min	自动加速(升挡)
1 350 ± 50r/min	自动减速(降挡)
1 500 ± 50r/min	变矩器闭锁离合器闭锁
1 150 ± 50r/min	变矩器闭锁离合器解锁

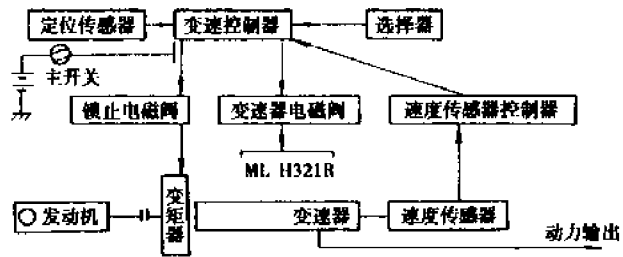


图 6-29 控制系统的传递路线

定位传感器的功用:它和踏板连接在一起,当踩下踏板时,定位传感器产生电信号并传至变速控制器,对正在接合的工作挡位进行限定。此时自动变速控制器不再进行自动变速控制。这种情况用于操作人员认为保持当前速度不变为好而踩下踏板的场合,如在松软地、上坡等状况时。

选择器的功用:手动操作的选择器手柄用来选定工作速度的范围,并将选定的工作速度范围信号送到变速控制器中。

2. 变速控制器

这里介绍一种在铲运机上使用的变速控制器,即 A·E·S·C 控制器。

图 6-30 为变速控制器组合体电路。

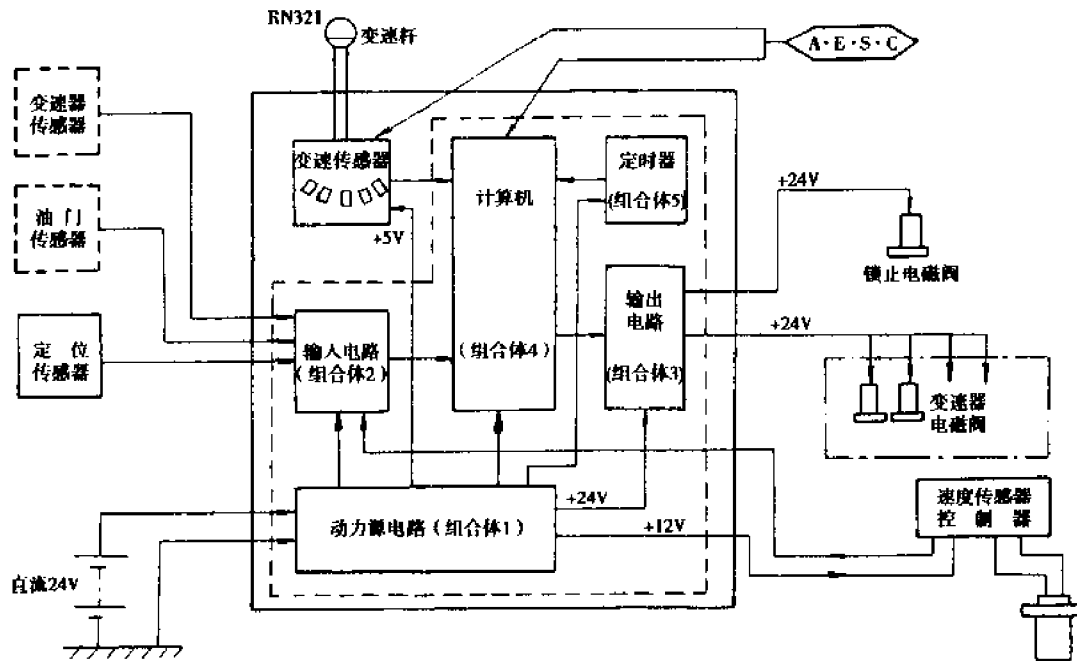


图 6-30 变速控制器组合体电路图

变速控制器组合体电路计算机印刷电路板组件和变速选择器印刷电路板两部分组成。

(1) 组合控制电路

组合体 1:产生 +5V、+12V、+24V 的直流稳压电源,并具有对电路中发生反常电压的探测和保护电路的作用。反常电压的探测和保护电路由 19~32V 的输入电压操作,超过这一范围时,电路断开,防止高低电压输入。

组合体 2:用来记录速度传感器控制器传来的信号,并区别定位传感器、油门传感器、变速器传感器等来自车辆的所有传感器信号,同时将信号送至计算机(组合体 4)中。

组合体 3:输出驱动电路,它按照计算机发出的命令,对变速器电磁阀及变矩器闭锁电磁阀进行动作控制。

组合体 4:是控制器的头脑,它包括一个中央处理机(CPU)、一个只读存储器(ROM,具有 24k 的信息组)和周边电路。单片微型计算机还包括一个随机存取存储器(RAM),振荡器电路和用于计算机工作时的其它电路。

组合体 5:工作电压 +5V,1MHz 的时钟,这个定时器在速度传感器脉冲计数中作标准计时

使用,同时用于变速时不可能计数的时间和闭锁延迟时间的控制。

(2)变速选择器控制电路

变速选择器结构和光学原理如图 6-31 和图 6-32 所示。

这个电路包括 5 个光电管,用于探测变速选择器手柄在 R、N、3、2、1 上的位置,它实际上是由发光二极管和光敏接受元件组成。

隔离屏,用于遮挡来自发光二极管的光束并把各光电管元件接通至杆的“接通”或“断开”位置。它与选择器手柄相连而一起动作。

当隔离屏没有隔断来自发光二极管的光源时(即选择器没有在“接通”的位置),光敏管接受来自发光二极管的光而导通,此时输出电平为零电平。若选择器手柄接通某位置,即隔离屏隔断来自发光二极管的光源,相应的光敏管截止,输出为高电平。如选择器的手柄在 R 位,则 R 位置的光敏管被隔离屏遮挡无法接收发光二极管发出的光束而截止。R 位的输出电平为 1,其余 N、3、2、1 位输出电平为 0。选择器手柄在 N、3、2、1 位置时同理。

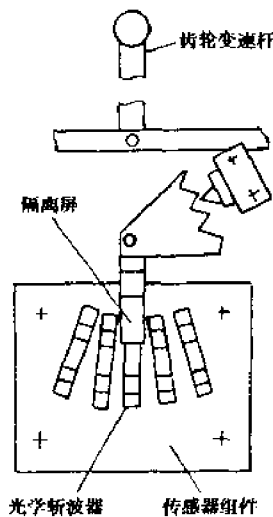


图 6-31 变速选择器结构

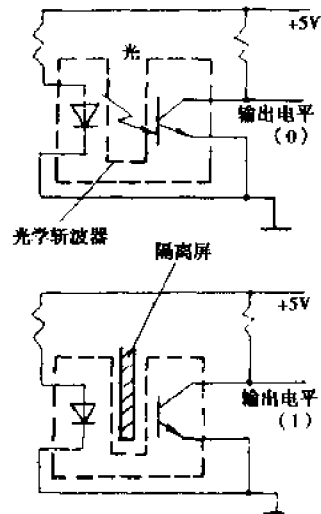


图 6-32 光学斩波器工作原理

三、自动换挡液压系统

工程机械自动换挡均采用液力传动的自动变速器。早期液力传动的液压换挡或自动换挡是液压控制的,随着电子技术的发展,出现了现代电控液压手动换挡系统和电子控制液压换挡的电液自动换挡系统。尽管应用了电子控制技术,液力传动动力换挡的基本部分仍是液压系统。我们仍以 WS16S-2 型铲运机自动换挡液压系统(如图 6-33 所示)为例,介绍其工作过程。

1. 供油系统

来自油泵的液压油,通过滤清器后分三路,再进入四个循环系统,即先导油路系统、液力变矩器循环系统、换挡主油路循环系统和闭锁离合器油路系统。

(1)先导油路循环系统

它是在压力油输入顺序阀 6 之前,把油导入变速控制阀(各电磁阀 D、H、L、3、2、1、R 及相应的滑阀)中。先导油路的压力控制为 800kPa(由定值减压阀 19 调定)。先导油路将压力为 800kPa 的压力油作用在各换挡滑阀上,以保证换挡阀工作圆滑、能平稳、快速地换挡。

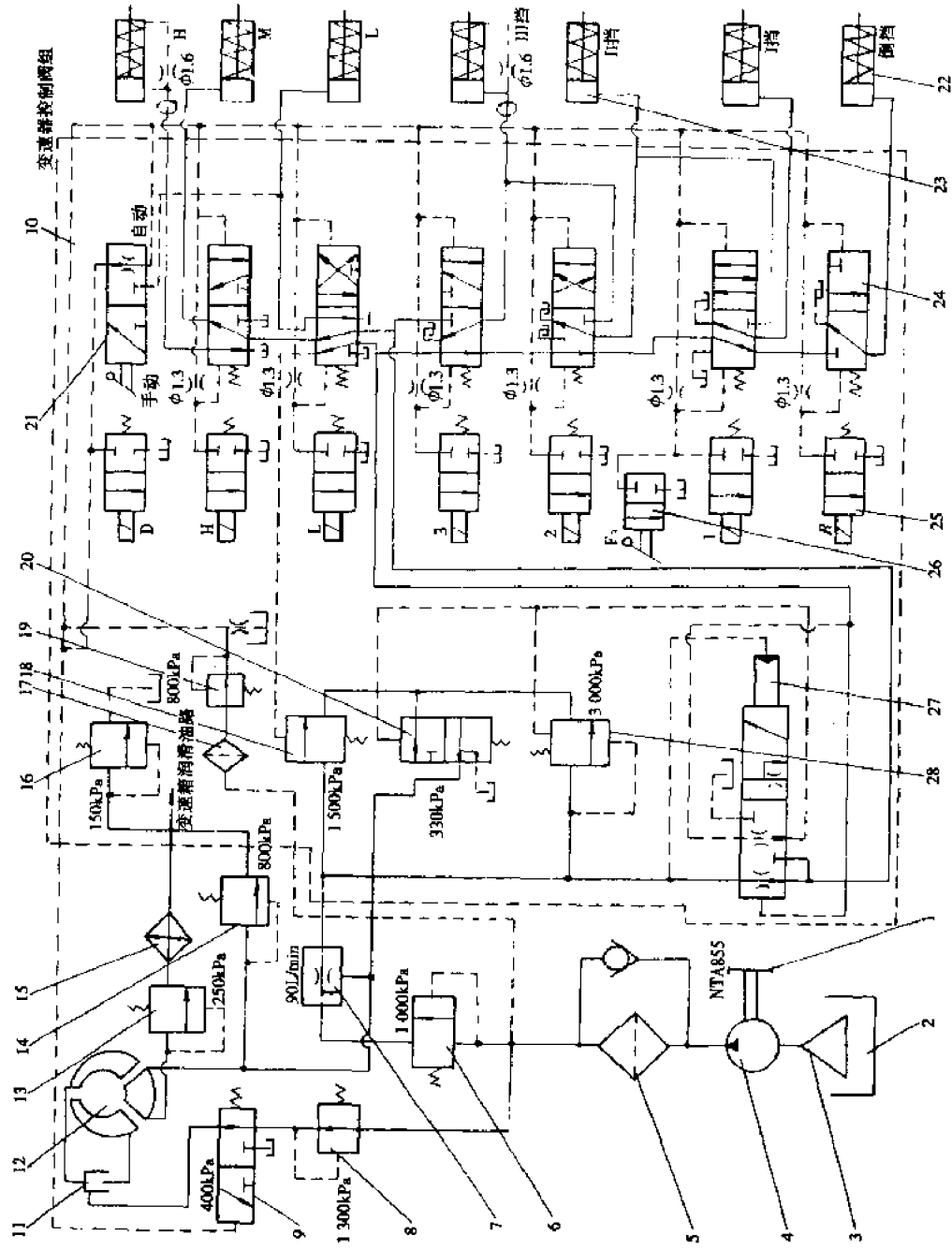


图 6-33 WS16S-2 型铲运机变矩器和变速器液压系统

1-驱动齿轮;2-油箱;3-吸油器;4-油泵;5、17-滤油器;6-顺序阀;7-溢流阀;8、13、14、18、19、28-减压阀;9-闭锁三位三通阀;10-变速箱控制阀组;11-闭锁离合器;12-液力变矩器;15-冷却器;16-溢流阀;20-快速回流阀;21-闭锁手动/自动阀;22-换档离合器;23-换档离合器;24-换档离合器;25-电液控制阀;26-换档离合器;27-先导减压阀;28-溢流阀

为了保证先导油路油压保持不变,即使主要循环管路的油压下降,在液压系统中采用压力顺序阀,主要循环系统中的油压力下降至 $1\ 000\text{kPa}$ 时,压力顺序阀切断流入主要循环系统的油路,即切断去变矩器和变速离合器的油路(图中顺序阀6的开启压力为 $1\ 000\text{kPa}$,进口压力控制)。油压下降至 $1\ 300\text{kPa}$ 时,切断去闭锁离合器的油路(定值减压阀8的开启压力为 $1\ 300\text{kPa}$,出口压力控制,一般进口压力大于 $1\ 300\text{kPa}$)。这样就保证了压力油先输入先导油路中去。因此,在先导油路减压阀19的出口处油压总是保持在 800kPa (进口压力可大于 800kPa)。

(2)换挡主油路

进入顺序阀的压力油,经过溢流调速阀7(流量为 $90\text{L}/\text{min}$)后,一部分经外控减压阀18(外控至 $1\ 500\text{kPa}$)或无载荷减压阀28(入口压力控制和外控,设定压力为 $3\ 000\text{kPa}$,与外控减压阀18在油路中并联)进入液力变矩器;另一部分则经先导加压调节阀进入换挡控制的换挡主油路。经过外控压力的调节,可以使主油压在 $F_3 \sim F_8$ 挡位时为 $1\ 500\text{kPa}$, R 、 F_1 、 F_2 挡位时为 $3\ 000\text{kPa}$,保证低速大扭矩时换挡离合器可靠地接合,高速小扭矩时减小传动系的功率损失。当变速器在 $F_3 \sim F_8$ 挡位时,油压小于等于 $1\ 500\text{kPa}$,或变速器在 R 、 F_1 、 F_2 挡位时,油压小于等于 $3\ 000\text{kPa}$,压力油优先直接通过先导加压调节阀27,然后进入换挡滑阀及相应离合器。

(3)变矩器油路

由外控减压阀18或无载荷减压阀28流出的压力油经快速回流阀20与溢流调速阀7溢流出来的油汇合进入变矩器。当变矩器入口处油压大于或等于 800kPa 时,减压阀14开启泄油。从变矩器出来的油经背压为 250kPa 的减压阀13(入口压力控制),进入冷却器15冷却,冷却后的油同减压阀14泄出来的油汇合后进入变速器润滑系统对变速器中的齿轮、轴承、离合器摩擦片等进行润滑;另一路是当去变速器润滑系统的油压超过 150kPa 时,经开启的溢流阀16(调定压力 150kPa)流回油箱。

(4)闭锁离合器油路

压力油在进入顺序阀6之前,根据需要可经定值减压阀8($1\ 300\text{kPa}$,出口压力控制)减压后,到外控闭锁阀9(外控压力为 400kPa),若闭锁阀为闭锁位(图中所示右位)时,减压后的压力油进入闭锁离合器。这里定值减压阀采用出口压力控制,是为了满足闭锁离合器的工作需要,做到结合平稳,且具有足够的压力,保证力矩可靠传递;同时分离彻底,防止离合器在半结合状态下工作。

2.电控液压系统及换挡执行机构

WS16S-2型铲运机电控液压系统为计算机控制的H、L、3、2、1、R及D电液控制阀组。电液控制阀控制先导油路中的压力油使换挡滑阀换位,主压力油进入换挡执行机构而接合相应的离合器。换挡执行机构为变速器中的5个制动器和2个离合器,它们均采用接合柔和的多片湿式离合器。

电液控制阀D控制的闭锁先导油路与其它每一个电液控制阀控制的换挡滑阀先导油路并联,只要在 $F_2 \sim F_8$ 挡位范围内自动换一次挡位,闭锁离合器在D电液控制阀的控制下则要各解锁、闭锁一次。

车辆在各速度下接通的电磁阀及相应的液压系统中控制的离合器及接合压力见表6-2。

各挡位接通的电磁阀、离合器表

表 6-2

速度级(变速)	控制中的离合器(MPa)							使用中的电磁阀(自动)							锁止离合器		变速器入口(MPa)
	R	1st	2nd	3rd	L	M	H	S		S1	S2	S3	SL	SH	自动	手动	
R	○3.0			○3				○						○			3.0
N						○1.5										○	1.5
F ₁		○3			○3					○				○			3.0
F ₂			○3		○3						○			○		○	3.0
F ₃		○1.5				○1.5				○						○	1.5
F ₄		○1.5					○1.5			○				○		○	1.5
F ₅			○1.5			○1.5				○				○		○	1.5
F ₆			○1.5				○1.5				○			○		○	1.5
F ₇				○1.5		○1.5						○				○	1.5
F ₈				○1.5			○1.5					○		○		○	-1.5

注: 标记“○”表示电磁阀是激磁的。

电磁阀与其控制的先导油路二位三通阀,合称电液控制阀。

3. 预防换挡系统中冲击的安全装置

在自动换挡过程中,我们希望平稳、无冲击。有多种控制平稳性的方法,其中有一种是重叠式,主要用于工程机械在低速大负荷工况下。在这种换挡方式中,离合器的分离与结合有一定的重叠时间,动力不中断,但在离合器中有瞬时的摩擦功率损失;还有一种是切断动力换挡式,这种方法主要用于工程机械高速小负荷工况下,在这种换挡方式中,动力中断时间短(一般为0.3~1s),没有摩擦功率损失。WS16S-2型自行式铲运机在铲土和卸土时负荷较大,用手动F₁挡工作;在运土过程中,负荷较小,需快速行驶,因而采用切断动力换挡式。

WS16S-2型铲运机设有专门的防换挡冲击装置,利用D电磁阀控制在换挡过程中先解锁,滞后0.6s再闭锁,使动力不能机械式传递到变速器输入轴(闭锁双动阀21在自动位。若在手动位,则动力机械式传递);先导加压调节阀27与快速回流阀20在换挡过程中联合动作,使流往变矩器的油液一部分直接回油箱,流往变矩器的油液压力下降,流量减少,使变矩器传递动力的能力下降;变速器的换挡方式是先将前一挡位的离合器脱开,然后接合新挡位的离合器;液力传动具有减振缓冲的作用。因此,可防止换挡过程中的冲击。

4. 换挡离合器油路的变压方式

R、F₁、F₂挡位时,变速器入口油压及离合器工作油压为3000kPa。

F₃、F₄、F₅、F₆、F₇、F₈和N挡位时,变速器入口油压及离合器工作油压为1500kPa。系统压力的建立与载荷有关,另一方面与系统的减压阀有关。WS16S-2型铲运机的变速压力控制有两路并联的减压控制油路:1500kPa外控减压阀18油路和3000kPa外控加进口油压控制的无载荷减压阀28油路。

车辆在R、F₁、F₂挡位工作时,L制动器必须接合,这样就使得流经L滑阀而去外控减压阀18的压力油路被切断,减压阀18油路不导通,此时只有无载荷减压阀起作用。这就限制了系统的工作压力为3000kPa,满足了低速大扭矩下传递动力时,离合器的接合压力应足够大的要求。

在 $F_3 \sim F_8$ 挡位范围内时,车辆是在高速小扭矩工况工作的。且 L 制动器在这几个挡位都不参与工作,控制 L 制动器的滑阀不动作;而流经 L 滑阀而去外控减压阀 18 的压力油路导通,使得外控减压阀 18 将换挡液压系统的主压力调节至 1500kPa 以内,这既满足了高速小扭矩工况下离合器接合的要求,又避免因油压过高造成液压系统功率的损失。

在 N 挡时,车辆在空挡,只有 M 制动接合,系统主压力同上所述,为 1500kPa 。M 制动器是一个常结合式离合器,即在空挡时它也是接合的,它在 F_3 、 F_5 、 F_7 挡位时也参与工作。

5. 应急行驶挡

F_3 速手动行驶是应急行驶挡位。在发生电气故障,所有电液控制阀停止工作时,用手动阀 26 将车辆行驶速度挂在 F_3 挡位,使车辆能返回场地或修理厂。此时 M 制动器接合,1st 制动器由手动阀控制接合。其换挡过程如下:

手动阀 26 用手动移到左位,换挡滑阀因压力差左移换至右位而接通去制动器 1st 的压力油路,1st 制动器接合(M 制动器常结合),实现变速器手动 F_3 挡位。

在手动 F_3 挡位应急行驶时,车辆既可在变矩工况下工作,也可在偶合工况下工作。闭锁双动阀 21 在右位(自动控制位)时,先导油压将闭锁阀 9 移至左位,闭锁离合器解锁,动力由发动机传递到变矩器,经变矩或偶合后传到变速器;当闭锁双动阀手动换至左位(手动位)时,先导油路被切断,闭锁双动阀出口至闭锁阀 9 之间的油泄回油箱,闭锁阀在弹簧力的作用下移至右位,闭锁油路接通,闭锁离合器接合,发动机的动力直接传递到变速器。因此,在应急行驶手动 F_3 挡位工作时,既可在高速小扭矩工况下行驶,也可在低速大扭矩工况下行驶。

6. 换挡时的油压特性

换挡时需接合的离合器的液压特性如图 6-35 所示。在此必须说明的是,图 3-33 中,离合器接合的限定压力由外控减压阀 18 或无载荷减压阀 28 确定。

由图 6-34 和图 6-35 我们可以看出,换挡离合器从脱开到限压接合一般需 $0.5 \sim 0.7\text{s}$,而经滞后 0.6s 解锁时间再开始闭锁的闭锁离合器完成一个解锁到限压闭锁过程需 $0.8 \sim 1.3\text{s}$,换

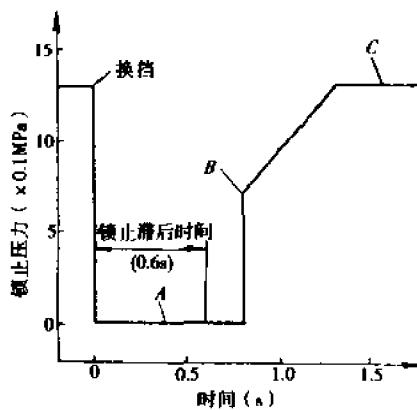


图 6-34 闭锁阀的液压特性

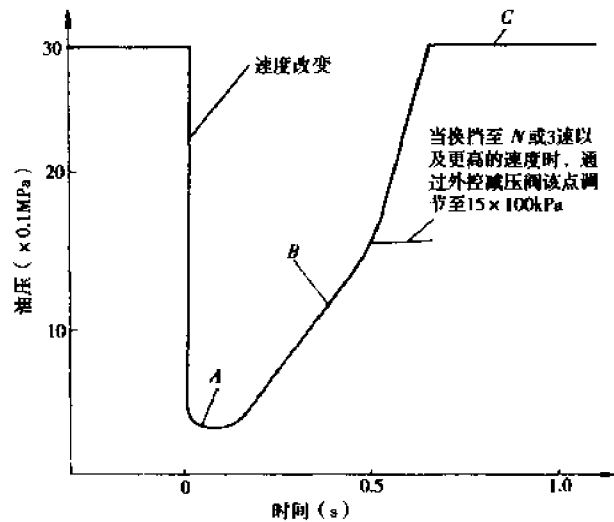


图 6-35 换挡时离合器中的油压特性

挡切断动力时间小于 0.7s 。在自动换挡过程中,发动机的动力经变矩器变矩能力下降传递、液力传递和直接传递的扭矩由小到大,接合压力也由小到大的工况下牢靠而且柔和地完成接合过程,避免了换挡冲击、峰值扭矩传递,提高了传动系的工作寿命和驾驶舒适性。

第五节 无级变速控制系统

无级变速已普遍用于全液压驱动行驶的车辆中,尤其是现代工程机械履带式行驶车辆,如ABC422 摊铺机、BEN7.16 履带式装载机、EX200 挖掘机、全液压自行式振动压路机等行驶系统均采用全液压驱动的电控液压泵—马达系统,实现无级变速。由于电气或电子技术在信号的检测、放大、处理和传输等方面比其它方式具有更明显的优势;在功率转换、放大单元和执行部件方面,液压元件又具有更多的优越性。因此,电液控制车辆的无级变速已成为现代机械乃至机械控制工程的一个重要的发展趋势。

一、无级变速传动系统组成

无级变速传动系统的动力传递路线为:发动机→液压泵→液压马达→轮边减速→驱动轮。由于液压泵、液压马达的数量和形式不同,传递路线也可分为以下型式。

一般轮胎式车辆采用第一种形式,履带式车辆采用第三种型式的较多。图 6-36 所示为履带式车辆行驶典型液压驱动回路。

1. 发动机→单→泵→单→马达→ $\left\{ \begin{array}{l} \rightarrow \text{左电磁离合器} \rightarrow \text{左驱动} \\ \rightarrow \text{右电磁离合器} \rightarrow \text{右驱动} \end{array} \right.$
2. 发动机→单→泵→ $\left\{ \begin{array}{l} \rightarrow \text{左马达} \rightarrow \text{左驱动} \\ \rightarrow \text{右马达} \rightarrow \text{右驱动} \end{array} \right.$
3. 发动机→ $\left\{ \begin{array}{l} \rightarrow \text{左泵} \rightarrow \text{左马达} \rightarrow \text{左驱动} \\ \rightarrow \text{右泵} \rightarrow \text{右马达} \rightarrow \text{右驱动} \end{array} \right.$

在图 6-36 所示的履带式车辆行驶液压驱动回路中,通常采用两套独立的行驶驱动液压回路。图示为单边驱动的一套独立回路,实际上两套回路是完全相同的,既可以联动,实现直行;又可分别动作,实现转向。液压马达输入轴装有制动器,可实现车辆的紧急制动。

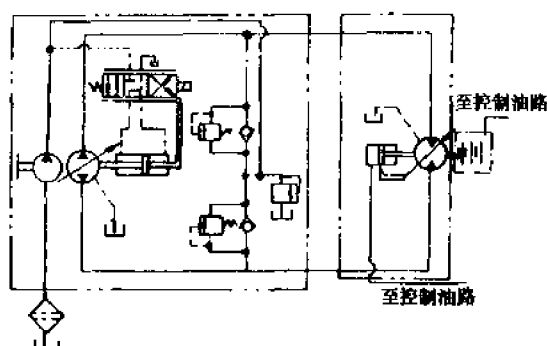


图 6-36 履带式车辆单边行驶液压驱动回路

二、速度控制方式

电控泵—马达速度控制系统可分以下三种控制方式。

1. 开环控制系统

如图 6-37 所示为变量泵由阀控液压缸组成的位置回路控制系统图。这种控制方式是通过改变变量泵的斜盘角来控制供给液压马达的流量,以此来调节液压马达转速。因为是开环控制,受负载和温度变化的影响较大。

2. 带位置环的闭环控制系统

如图 6-38 所示控制系统,是在开环速度控制的基础上,增加了速度传感器,将液压马达速度进行反馈,构成闭环控制系统。速度反馈信号与指令信号的差值经积分放大器加到变量伺服机构的输入端,使泵的流量向减小速度误差的方向变化。

这类系统的位置检测器多采用差动变压器式传感器,液压泵一般为轴向柱塞泵,变量伺服

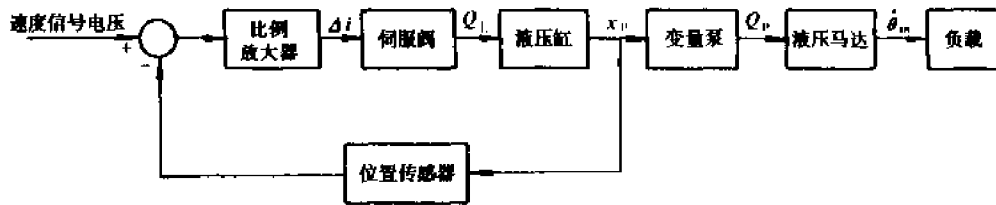


图 6-37 变量泵控制的速度控制系统

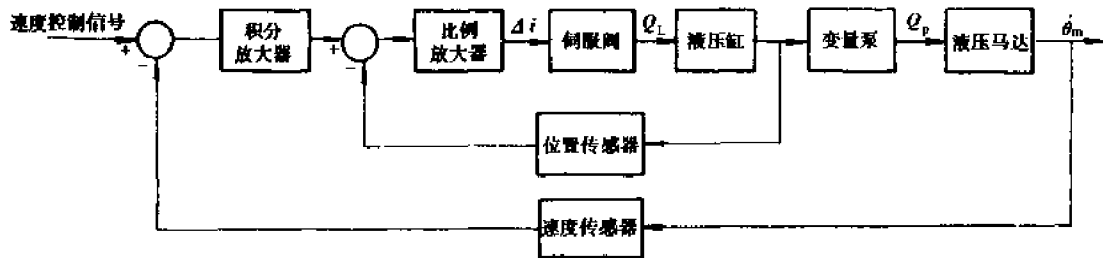


图 6-38 带位置环的闭环泵控液压马达速度系统

机构的液压缸、伺服阀和位置检测器组成一体,装在液压泵上,驱动液压马达通常是定量液压马达,在液压马达的输出轴上装置测速发电机。采用积分放大器是为了使开环系统具有积分特性。

3. 不带位置环的闭环控制系统

如果将泵变量机构的位置反馈通路去掉,可以得到图 6-39 所示的速度控制系统。

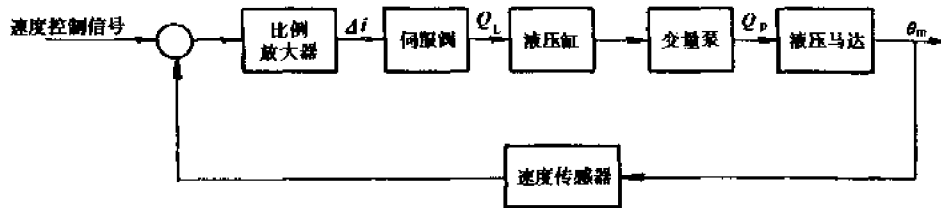


图 6-39 不带位置环的闭环泵控液压马达速度系统

三、行驶控制原理

作为电控泵—马达全液压驱动的车辆无级变速系统,其控制系统的基本功能有车辆的直线行驶、转向、前进、后退、制动以及制动过程中动力传递配合等。前进后退就是通过电路的逻辑判断决定哪个电磁阀工作;速度的控制是确定通入电磁阀工作电流的大小;转向则是两者综合控制的结果。图 6-40 为前进/后退、转向控制原理。

1. 前进/后退及行驶速度控制原理

图 6-40 中变速电位计滑头一端和操纵杆相连,一端和运算放大器 IC_1 的正向输入端相接。运算放大器另一端接 +12V 电压。这样电位计滑头在中间位置时, IC_1 不工作。当滑头向上移动,即前进时, IC_1 正向输入电压在 +12 ~ +24V 之间变化,只有 IC_1 正端输入电压大于负端输入电压时 IC_1 才工作,根据需要再经过 IC_2 放大,则可驱动后续工作电路。图中 T_1 和 T_2 分别控制的 EMV 为泵的前进、后退比例电磁阀。 IC_2 提供的电压大小由操纵杆的位置所决定, IC_2 输出端电压大小决定了提供给 T_1 基极电流的大小, T_1 基极电流越大,则 T_1 集电极至发射极的工作电流就越大,从而电磁阀工作电流也越大,使泵的排量增大,实现车辆增速。反之可实

现车辆的减速。

车辆后退行驶时,将变速电位计滑头向下移动,IC₁“+”向输入电压在+12~0V之间变化,而IC₃的“+”向输入电压为+12V,“-”向输入电压为+12~0V,此时IC₁不工作,IC₃工作。由比较放大器工作特性可知,前进一路工作时,后退一路必然锁止,反之亦然。在放大器后加一逻辑电路,其主要作用是在前进时,前进一路开关接通,后退一路断开。这样就实现了前进后退逻辑控制和行驶速度大小的控制。

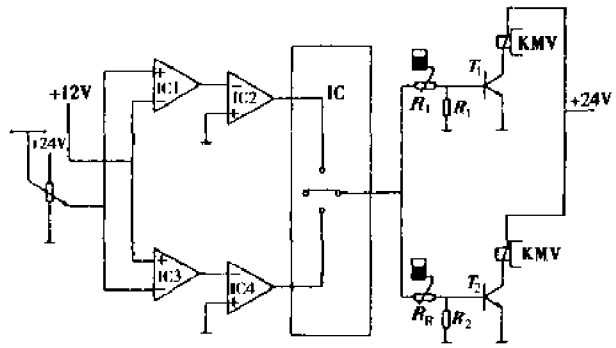


图 6-40 前进/后退转向控制原理图

图 6-40 中只接入了 2 个前进电磁阀,在振动压路机的控制中只有一个变量泵(2 个电磁阀),即可满足车辆前进/后退及行驶速度大小的控制;在履带式装载机和摊铺机双回路液压系统中是双泵双马达,需要控制四个电磁阀。只要在图 6-40 中的电路接入 2 个后退电磁阀即可。

2. 转向控制原理

履带式装载机和摊铺机转向是通过控制不同泵电磁阀工作来实现的,转向的快慢是通过电磁阀工作电流大小调节泵排量大小来实现的。如图 6-40 所示为前进转向时控制原理图。当机器在前进时,变速杆位置不变,电位计动触点取出的电压值不变,即前进速度一定。需要左转向时,踩下左踏板,带动左转向电位计 R_L 阻值增大,使三极管基极电流减小,从而减小相应电磁阀工作电流,使泵排量减小,速度降低,实现左转向,随着踏板的移动,电阻值增至使三极管基极电流为零,三极管处于截止状态,电磁阀工作电流为零,泵排量为零,左行驶速度为零。当需要右转向时,踩下右踏板,电路调节控制过程与左转向时相同。

后退转向调节过程与前进转向时相同,只是后续驱动电路接入后退控制电磁阀,它由 IC₃、IC₄、IC 实现逻辑控制。

3. 制动控制原理

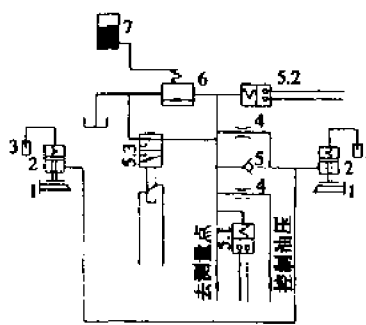


图 6-41 BEN7.16 制动原理图

1-驱动轮;2-制动油轮;3-油杯;4-节流孔;5-单向阀;5.1、5.2-压力开关;5.3-电磁阀;6-可调溢流阀;7-制动踏板

图 6-41 为 BEN7.16 履带式装载机制动控制系统原理图,其工作过程简述如下。

无论是紧急制动还是停车制动都是通过制动总成来完成的。由补油泵提供的压力油 1.8~2.0MPa 通过孔径 $\phi 1.5\text{mm}$ 的一个节流孔进入制动总成,以便补充制动元件释放的压力。

电磁阀 5.3 是由控制器控制的。当安全操作杆起作用时,意味着来自控制盒子的电流是切断的,机器停止(如图示位置)。即来自泵的控制油路经 $\phi 1.5\text{mm}$ 节流孔,经 5.3 电磁阀进入油箱。制动油缸在弹簧作用下向下移动。制动油缸油经 $\phi 1\text{mm}$ 节流孔,经 5.3 电磁阀泄油。同时由于压力油的释放,开关 5.1、5.2 也先后打开,使液压泵、马达停止工作。实现停车制动。

行驶过程中,制动踏板控制的可调减压溢流阀输入端油压力为 1.8~2.0MPa,当踩下踏板时,制动压力释放,使制动器工作。制动油缸中的油经 $\phi 1\text{mm}$ 节流孔,然后经可调溢流阀释放回油箱,制动缸在弹簧作用下移动产生制动。5.3 通电后阀芯动

作,切断泄油油路,来自泵的压力油通过单向阀直接进入制动油缸,解除制动,即5.3通电制动油缸中建立压力,制动解除;5.3断电,制动油缸中压力释放,使其产生制动。

两个压力开关5.1和5.2是为了在前进/倒退行驶速度控制过程中需要制动时,首先至少是同时切断泵上电磁阀工作电压,使泵排量为零,然后产生制动,或是在泵或马达出现故障时为了保护泵和马达而设置的。5.1开关的设置在这里有监测和控制两个作用,保证了在制动时切断传动系动力。5.2开关的设置使液压系统工作更为安全,即液压泵因故障不能使其排量为零时,液压马达会在5.2控制下调节其排量为最小,产生的附加扭矩也就最小,减少了传动系因附加扭矩过大而破坏的可能性。

从图6-41中我们可看出,系统控制油路中装有单向阀,它能够在解除制动的过程中,液压油顺利的流向制动缓解的方向,达到解除制动迅速、彻底、避免磨擦片过度磨损。相反在制动时,也就是制动压力释放时,单向阀关闭,此时释放的压力通过 $\phi 1\text{mm}$ 节流孔放泄,引起制动,达到制动平稳、无冲击的效果。目前在一些压路机、挖掘机、摊铺机的制动系统中,都采用了类似的电控液压制动型式。

四、控制系统的组成

基于对电控泵—马达车辆行驶控制系统的研究,无论是履带式装载机、摊铺机,还是振动压路机,其前进/后退及行驶速度大小的控制原理及转向(振动压路机例外)控制原理都是相同的,因此提出通用平台这一系统思想。

1. 基本要求

(1)同时能够满足履带式装载机、沥青混凝土摊铺机、振动压路机的使用;

(2)为满足要求(1),系统必须有原地转向功能;

(3)为满足不同车辆行驶作业工况下行驶条件的要求,系统应为闭环控制系统,即左右驱动轮必须装测速传感器,以保证作业工况时设定速度的恒定,同时也可以保证车辆的直线行驶性;

(4)为满足不同电磁阀技术要求,死区补偿电路和斜坡信号上升和下降时间、幅值大小应可调;

(5)采用脉宽比例(PWM)调节控制技术,不仅可以取消颤振信号,而且功率驱动电路的功率管工作处在饱和工况和截止工况,即功率管基本上用作一个通/断开关,并且以恒定的电压向电磁铁供给一系列的通/断脉冲,这些脉冲有固定的频率(一般取 1kHz),而信号值取决于每个“通”脉冲相对于“断”脉冲的持续时间(信号—控挡比)的变化。由于脉冲频率太高,阀不能响应每个脉冲,阀和电磁铁的效果使信号平均。这种技术的优点在于:在每个断脉冲期间,没有任何电流通过功率管;而在每个通脉冲期间,功率管上有很小电压降(一般为 $0.7\sim 1.4\text{V}$)。同时,通断也是在一定时间内完成的,因而仍要产生少量热量。不过所需冷却器的尺寸显著小于普通模拟直流输出信号所需的尺寸。

(6)必须有手动控制功能。在电控系统出现故障后使机器脱离工作场地或仍能维持正常施工,只是操作工序复杂一些或系统不节能。

(7)尽可能采用数字控制,提高系统控制精度。

2. 控制系统组成

图6-42为这一通用平台系统组成框图。各模块的功能如下:

(1)电源开关模块:来自车辆上提供的电源标准电源为 24V ,一般电压波动范围为 $22\sim$

29V。电源开关模块提供 +24V, ±12V, ±8V, ±5V 四组输出, 作为操作模块、模拟控制板、A/D 转换模块、CPU 信号处理模块、功率分配模块、手控单元、显示模块、死区补偿模块、转速转换器等提供工作电源。

(2) 操纵模块: 由三只高精度线性滑动电位器组成, 实际上它是车辆的操纵机构 FB(前进/后退控制), LP(左转向控制) 和 RP(右转向控制), 在摊铺机操纵控制中这三个均为手动操作电位计; 在振动压路机中, LP 和 RP 是断开状态, 因为振动压路机的转向是独立的液压转向系统, 不需要通过电磁阀来控制; 在履带式装载机中, FB 是通过操纵杆实现的, LP 和 RP 是通过左右转向踏板实现的。

(3) 死区补偿模块: 这一消除死区补偿电路的电压大小可调, 以满足不同车辆不同型号电磁阀消除死区电压大小的要求。

(4) 模拟控制板: 对输入信号 FB、LP、RP 以及死区补偿电压、转速测量信号与设定速度信号进行比较综合处理后, 产生控制比例电磁阀(LF 左前进, RF 右前进, LB 左后退, RB 右后退)的模拟信号电压。

(5) A/D 转换模块: 它由 A/D 转换器(ADC0809)和 CPU(89C51)组成, 它将用于控制器控制四路电磁阀的模拟电压信号转换成数字信号, 这一数字信号通过 CPU 变成固定频率为 1kHz 的脉冲信号, 脉冲信号的宽度是随模拟信号电压的大小而变化, 即模拟信号电压高, “通”脉冲相对“断”脉冲所持续的时间就长, 电磁阀上通过的有效电流就越大。模拟信号电压低, “通”脉冲相对“断”脉冲所持续的时间就越短, 电磁阀上通过的有效电流就越小。

(6) 功率放大与分配模块: 功率驱动电路可以简化分立元件, 如发射极反馈电阻和集电极反馈电阻以及热敏电阻都可以取消, 它利用三极管的开关特性直接驱动电磁阀。同时将开关电源的输出电压转换成不同等级的正、负电压以适应各模块电源的需要; 利用光电耦合器隔离功率放大驱动电路与控制电路, 以防止电路间发生耦合。

(7) 显示模块: 主要显示模拟信号控制下的前进、后退速度设定信号, 前/后指示信号, 左/右转向信号, 合成速度信号及电磁阀的工作电压以及相应的 PWM 占空比千分比的数字显示。

(8) 手动控制单元: 它包括自动/手动切换装置和手动操作独立简单控制电路。

(9) 原地转向设定: 它以固定的速度实现原地转向, 并设有左原地转向和右原地转向。

图 6-43 为通用平台控制主回路数字模型示意图。

五、通用平台控制系统

1. 自动控制

图 6-44 为通用平台控制系统图, 其中 A 为前面所述的主控制器部分, 其它为行驶操纵、检测、报警和手控单元部分, 现将各元件功能分别叙述如下。

F 为控制器电源保险; K_1 为主控制器电源起动继电器开关; K_2 为自动/手动切换开关。 K_2 合上后主控制器内部电源关闭, 转入手动控制, 反之进入自动控制; S 为左右原地转向开关, 保证车辆以某一恒定速度原地转向(在振动压路机中, 此开关不用), S 中位为断开; V_1 和 V_2 为左右驱

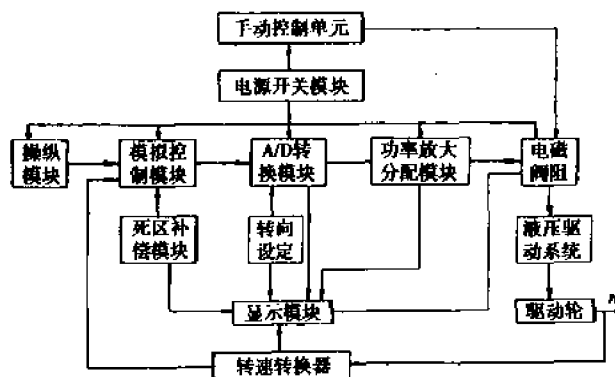


图 6-42 通用平台系统组成框图

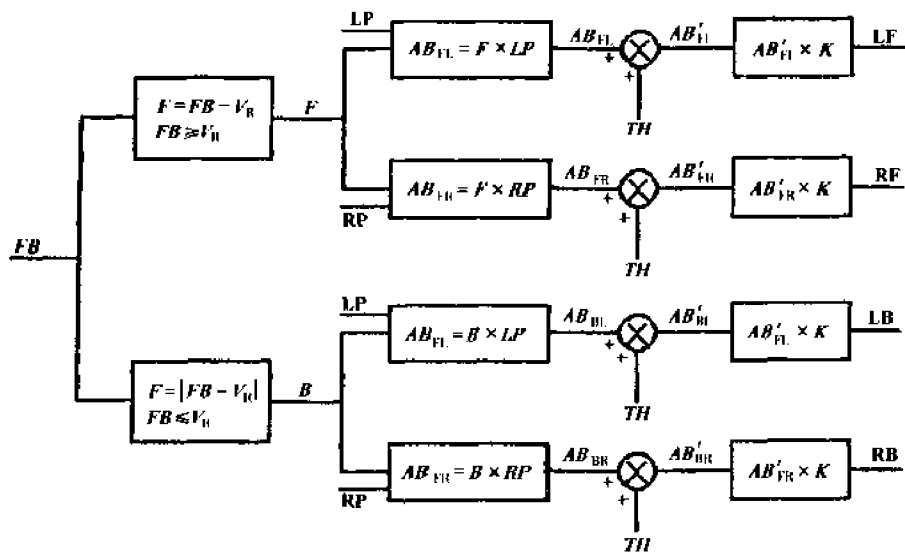


图 6-43 模拟—数字控制主电路数学模型示意图

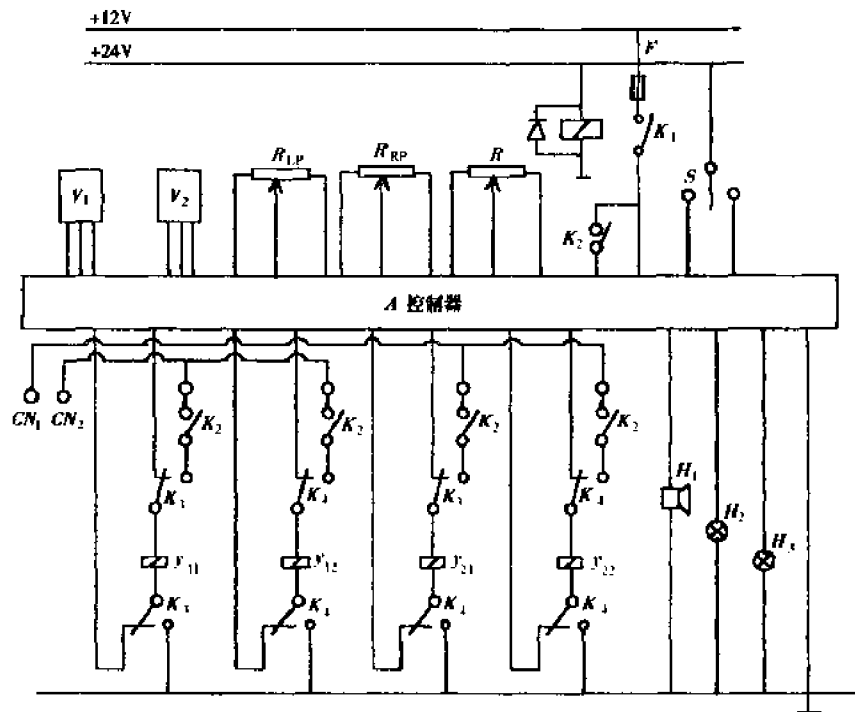


图 6-44 通用平台控制系统

动轮速度测量传感器(振动压路机只需一个); R_{FB} 为前进/后退控制电位器; R_{LP} 、 R_{RP} 为左右转向控制电位器(振动压路机上不使用或不装 R_{LP} 、 R_{RP} 、摊铺机上用手动控制,装载机上用左右踏板控制); Y_{11} 、 Y_{12} 为左前进和右前进电磁阀; Y_{12} 、 Y_{22} 为左后退和右后退电磁阀(振动压路机中只接入 Y_{11} 和 Y_{12}); K_3 开关接至右边时为前进手动控制接通; K_4 开关接至右边时为后退手动控制接通; H_1 为自动控制倒车喇叭示警, H_2 和 H_3 为左右速度传感器工作指示灯。 C_{N1} 和 C_{N2} 为手动控制部分接线柱, 手动控制部分的电路元件及参数要根据不同电磁阀工作参数进行设计和选择。

2. 手动控制

(1)手动控制电路一

电路原理图见图 6-45 所示。图中 K 为开关, R_1 为保护电路电阻, 并进行电磁阀最大工作电流限定, R_2 速度控制电位器, R_3 转向控制电位器, R_{L1} 、 R_{L2} 电磁阀电阻。

图中 R_1 为固定电阻, R_2 为速度调节电阻, R_1 和 R_2 的大小是由电磁阀允许工作电流和死区补偿工作电压大小决定的。

当 R_2 调节至最上端 ($R_2 = 0$), R_3 调至最左端或最右端时, 由电磁阀的最大允许工作电流 I_{max} 得关系式

$$V = [R_1 + R_L / (R_3 + R_L)] I_{max} \quad (6-14)$$

式中 V 为电源电压, R_L 为其中任一电磁阀电阻, 且 $R_{L1} = R_{L2} = R_L$ 。死区补偿工作电压 V_{min} 或最小工作电流 I_{min} ($I_{min} = V_{min} / R_L$) 一般由电磁阀技术参数提供, 因此 R_2 在最大电阻取值时, 有关系式

$$V = [R_1 + R_2 + (0.5R_3 + R_L) / (0.5R_3 + R_L)] I_{min} \quad (6-15)$$

车辆在直线行驶时, 最高车速 ($R_2 = 0$), 由电磁阀上的额定工作电流 I_e 或额定工作电压 V_e 得关系式

$$V_e = \frac{V}{R_1 + (0.5R_3 + R_L) / (0.5R_3 + R_L)} R_L \quad (6-16)$$

由式子 (6-14) ~ (6-16) 唯一可求得 R_1 、 R_2 和 R_3 的值, 但其电阻功率的选取为大于等于两个电磁阀功率之和。

(2)手动控制电路二

图 6-46 手动控制电路实际上是一个直流电阻电桥输出电路。电桥输出电压为:

$$V_{AB} = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_3}{R_1 + R_2} \right) V_{CD} \quad (6-17)$$

当 A 处于 C 、 D 两点中心时, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, 此时电桥输出 $V_{AB} = 0$, 即滑动变阻器处于中心位置时, 输出电压为零。

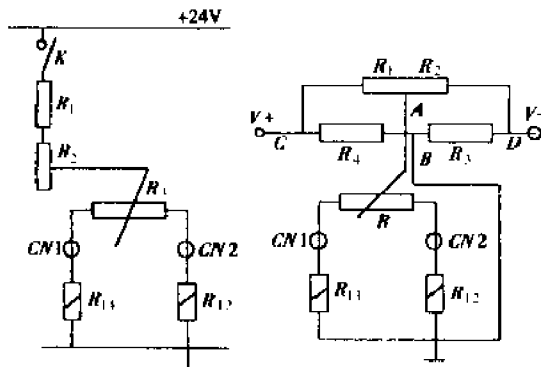


图 6-45 手动控制电路一

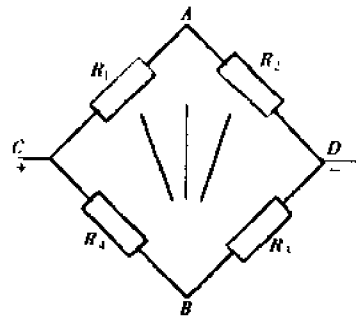


图 6-46 手动控制电路二

当 A 点向 D 点移动时, R_1 增大, R_2 减小, 输出端 A 呈负电位, 滑动至 D 点时, 输出电压为桥路电压的 $1/2$ 。

当 A 点向 C 点移动时, R_1 电阻减小, R_2 增大, 输出端 A 呈正电位, 当滑动至 C 点时, 输出电压为桥路电压的 $1/2$ 。

由以上分析可知, 动臂的移动具有调压和改变电源极性的作用。电压大小的改变可以改

变车辆的行驶速度, R 用于车辆转向控制。电源极性的改变可以通过操纵杆(控制 A 点移动)联动相应的接近开关, 或开关控制接通前进或后退电磁阀, 实现前进和后退控制。这一点在有些同一比例阀由电源极性来改变控制方向的电磁阀中非常方便, 而且使电路大大简化。

该电路没有死区补偿。

这里需要说明的一点是图示的电路是通过 A 点的移动改变 R_1 和 R_2 的大小, 且 R_1 和 R_2 是差动的, 即 R_1 增大 ΔR , R_2 就减小 ΔR 。反之亦然。假设 R_1 减小 ΔR , 则这时桥路输出为

$$\begin{aligned} V_{AB} &= \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_1 - \Delta R}{R_1 - \Delta R + R_2 + \Delta R} \right) V_{CD} \\ &= \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_1 - \Delta R}{R_1 + R_2} \right) V_{CD} \\ &= \frac{\Delta R}{2R} V_{CD} \end{aligned} \quad (6-18)$$

若桥路输出点 A 不变, C 点作为输入移动点, 从而改变 R_1 和 R_4 的大小, 同样假设 R_4 增加 ΔR , 则 R_1 减小 ΔR , 这时桥路输出为

$$\begin{aligned} V'_{AB} &= \left(\frac{R_4 + \Delta R}{R_3 + R_4 + \Delta R} - \frac{R_1 - \Delta R}{R_1 - \Delta R + R_2} \right) V_{CD} \\ &= \frac{\Delta R}{2R} \left[1 - \left(\frac{\Delta R}{2R} \right)^2 \right] V_{CD} \end{aligned} \quad (6-19)$$

式子(6-18)和(6-19)反映了卧式桥和立式桥桥路输出电压的结果有差异, 由此可以得出如下结论:

①当 $(\Delta R/R)^2$ 远远小于 1 时,

$$V'_{AB} = \frac{\Delta R}{2R} V_{CD} = V_{AB}$$

即忽略高阶无穷小后, 两桥路输出结果相同。但在实际控制中, ΔR 常常增至 R , 这样非线性误差就很大。

②立式桥有非线性误差, 而卧式桥没有, 所以卧式桥比立式桥线性度高, 因此设计时应优先采用卧式桥。

第六节 液压挖掘机控制系统

液压挖掘机的控制系统是对挖掘机动力传动系统进行控制的系统, 按元器件可分为发动机控制系统、液压泵控制系统、液压控制阀控制系统、执行元件控制系统和整机控制系统。

一、发动机控制系统

由柴油机的外特性曲线可知, 柴油机基本上是恒扭矩调节, 输出功率的变化表现为输出转速的变化, 即不同的油门开度对应着不同的柴油机输出转速。柴油发动机控制的目的是控制油门开度的大小来实现柴油机输出转速的调节。常用的控制型式有下列三种:

1. 利用普通电磁阀和液压缸来控制发动机的油门开度。

2. 利用步进电机来控制发动机的油门开度。由电位计发出信号输入控制器, 经控制器综合分析后发出指令, 控制步进电机, 从而控制油门开度。这是目前应用最多的一种控制型式。

3. 发动机电子调速器。美国康明斯公司新开发的发动机电子调速器如图 6-47 所示。用

控制器对发动机燃料系统和泵的变量系统进行控制,达到高性能和低成本的目的。即根据柴油机实际转速 n_e 、齿条位移 R 和柴油机目标转速 n_r ,经发动机控制器分析后,确定齿条位移目标值 R_r ,由可动线圈调节齿条位置,达到柴油机目标转速 n_r 。同时将转速偏差 Δn 输入泵控制器,由电磁比例阀控制泵的摆角,达到泵的流量目标值 Q ,这样泵的流量与柴油机转速就能始终达到合理的匹配。

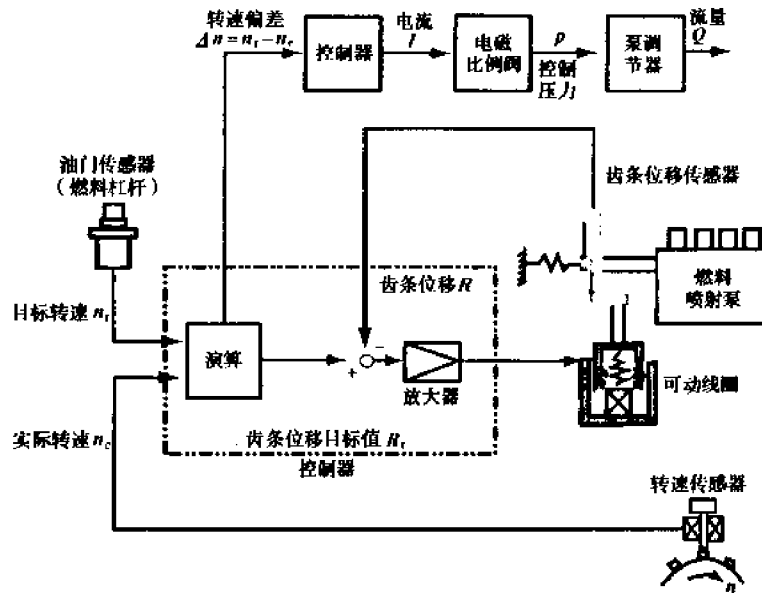


图 6-47 发动机电子调速器原理图

二、液压泵控制系统


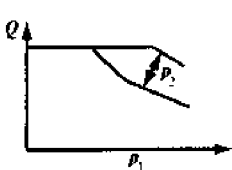
对液压泵的控制都是通过调节泵的变量摆角来实现的。根据控制型式的不同,可分为功率控制系统、流量控制系统和组合控制系统三大类。

1. 功率控制系统

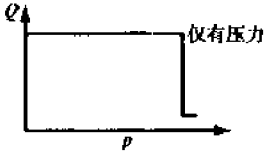

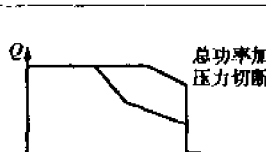
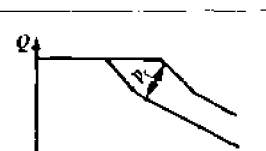
当泵轴转速不变时,功率控制实际上就是扭矩的控制。扭矩不变是恒功率控制,扭矩变化是变功率控制。各种功率控制型式、控制曲线及特点如表 6-3 所示。

功率控制系统

表 6-3

代号	控制型式	控制曲线	特点
1	分功率控制		随着泵本身输出压力的上升,使泵的摆角自动地减少,且保持扭矩不变
2	总功率控制		<ol style="list-style-type: none"> 1. 同分功率控制特点; 2. 由于互联泵压力 p_2 的作用使功率减少,进行总功率控制

续上表

代号	控制型式	控制曲线	特点
3	功率交叉控制		在分功率控制基础上,两泵互相交叉控制,具有分功率和总功率两者的全部优点
4	压力切断控制		泵输出压力在设定值以上时,泵的流量自动减少,进行压力切断控制
5			
6			
7	变功率控制		由外部引入的电流值或先导压力 p_1 , 使泵的输入功率可以任意控制

2. 流量控制系统

当泵轴转速不变时,流量控制实际上就是泵排量的控制,各种流量控制型式、控制曲线及特点如表 6-4 所示。

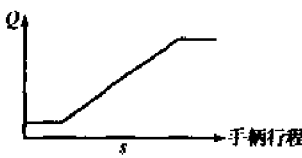
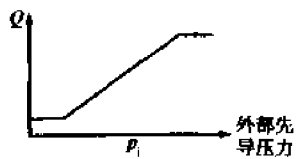
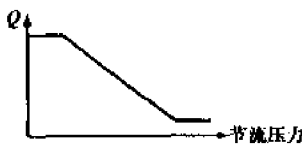
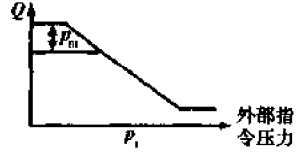
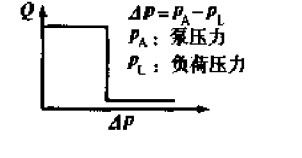
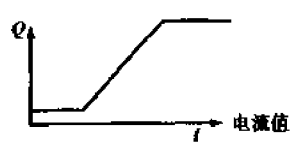
3. 组合控制系统

液压挖掘机液压泵的控制系統大多采用功率控制和流量控制的组合控制系统,很少采用单一控制型式的控制系统。常用的组合控制型式有:

(1)总功率控制、负流量控制和压力切断控制的组合控制系统。长江挖掘机厂的 WY203 型挖掘机和日本小松公司的中小型挖掘机都采用了这种组合控制系统。

(2)挖掘机作业模式的选择。根据作业工况的不同,改变发动机转速和泵的排量,以适应重型挖掘、标准型挖掘和轻型挖掘等工况的需要。目的是节能和降低噪音,已广泛应用于液压挖掘机上。

(3)极限负荷控制、压力切断控制和回转扭矩控制的组合控制系统。大型挖掘机普遍采用三泵三回路系统,其液压系统的装机功率都大大超过发动机输出功率,各液压泵的功率分配也是变化的,独立的回转泵只是间歇地工作。为充分有效利用发动机功率,而又不使发动机超载,因此大型机广泛采用极限负荷控制。为了节能还采用了回转扭矩控制和压力切断控制。

代号	控制型式	控制曲线	特 点
M	手动流量控制		由手动指令可以任意地控制泵的输出流量
P	正流量控制		由先导压力进行正流量控制。泵排量随变量机构上先导控制压力的上升而增加
N	负流量控制		由节流压力进行负流量控制。泵排量随变量机构上节流控制压力的上升而减小
C	最大流量二段控制		由外部的指令压力 p_m 可以进行最大流量二段控制(仅用于负流量控制场合)
L	负荷传感控制		由稳定不变的压差 Δp (泵压力与负荷压力之差)进行负荷传感控制
E	电气流量控制		输入电流增加, 泵的输出流量也成比例地增加

三、液压控制阀控制系统

1. 先导型控制系统

(1) 机液先导型。用手柄操纵先导阀, 先导油作用于换向阀主阀芯而使其动作的形式。目前中小型挖掘机上广泛应用。

(2) 电液先导型。由比例式或数字式电机械转换器(常用比例电磁铁)操纵先导阀, 由先导

油再控制换向阀主阀芯动作的形式。目前大中型挖掘机应用较多。

2. 负荷传感控制系统

液压系统调速方法有节流调速(阀控方式)和容积调速(泵控方式)两大类。节流调速结构紧凑,动特性好,但传动效率低;容积调速传动效率高,但动特性较差。采用节流调速和容积调速相结合的电子控制负荷传感控制系统如图 6-48 所示,具有节流调速和容积调速两者的全部优点,已开始挖掘机上广泛应用。与以往的液压系统相比,主要优点有:

(1)设有可变压力补偿阀。补偿阀的开度由主阀前后压差、先导压力和比例电磁阀的输出压力共同控制,通过补偿阀开度的变化来控制进入主阀的流量,保证复合动作的实现。只有一个执行元件单独动作时,比例电磁阀不起作用,可变压力补偿阀处于全开状态。

(2)由压差传感器检测负荷压力,通过控制器、两个高速开关阀和泵变量缸,调节泵的摆角。从而保证泵的输出流量等于执行元件所需要的流量,无多余的流量损失掉。泵的压力略高于负荷压力,其压差仅为 2MPa 以内,只有一个小的能量损失,是一个较理想的节能系统。

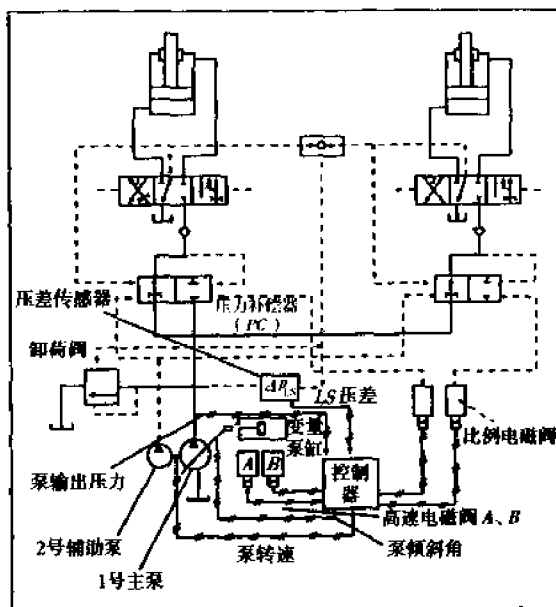


图 6-48 电子控制负荷传感控制系统

四、执行元件控制系统

1. 行走自动二速系统。在工地上挖掘机行走频繁,为了提高挖掘机的实际生产率,行走牵引力和行走速度都要求大大提高。目前挖掘机行走牵引力提高了 30% ~ 50%,行走速度也高于 5 ~ 7km/h。爬坡和转弯时需大的牵引力,平地行走时需高速度,因此行走自动二速系统诞生了,其工作原理如图 6-49。

(1)行走自动二速系统,只有在行走速度转换开关处于二速位置时,才具有此功能。此时,其信号使行走二速电磁阀换向; p_3 压力作用于控制选择阀并换向;同时,通过二速用伺服缸使行走马达处于二速位置,机器高速行驶。

(2)控制选择阀还受行走压力的作用,在上坡等负荷大的时候,控制选择阀向一速一侧换向;二速用伺服缸的控制油压卸荷,使行走马达自动向一速位置转换,牵引力增大。

(3)在平地上行走及下坡等工况时,行走压力变小,控制选择阀再次换向,对二速用伺服缸作用,行走马达自动地又回到二速位置上来,进行高速行驶。

2. 上车回转摇晃消除系统

回转摇晃是上车在回转过程中紧急制动造成的,消除回转摇晃的基本原理如图 6-50 所示。

(1)回转马达停止过程中,反转防止阀两侧 1、2 受卸荷压力作用,弹簧压缩,由于左右压力相同,反转防止阀不能换向。

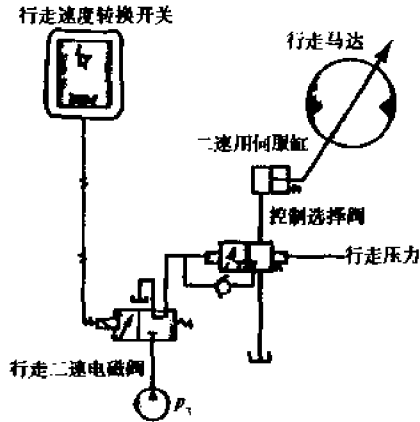


图 6-49 行走自动二速系统

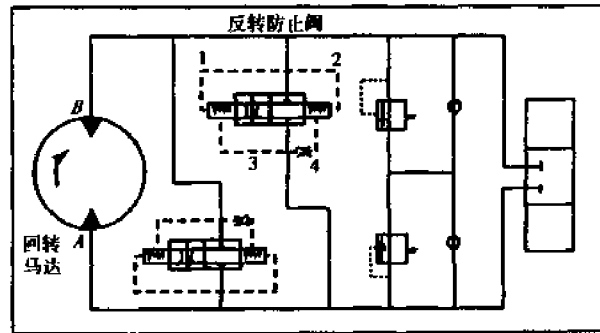


图 6-50 上车回转摇晃的消除系统

(2)回转马达停止后, B 口侧压力比 A 口侧压力高, 对回转马达产生反力作用, 回转马达摇晃。这样, A 口侧压力比 B 口侧压力高, 对反转防止阀的 3、4 产生压力。由于在 4 中有节流孔, 产生进间滞后, 滑阀向右移动。从而 A 口和 B 口联通, 压力相等。实验证明, 采用这种控制系统, 回转摇晃只有一次, 而没有第二次。

3. 工作装置控制系统

为了实现铲斗按规定轨迹进行自动挖掘, 要求动臂缸、斗杆缸和铲斗缸三者协调动作。工作装置运动位置的检出方法, 用线位移传感器(检出液压缸行程)或角位移传感器(检出构件相对转角)来进行控制。铲斗运动轨迹千变万化, 但控制原理上是基本相同的。

对于标准型挖掘机, 工作装置的位置由动臂和斗杆的角位移传感器、铲斗缸行程的线位移传感器检出; 操作信号由先导压力传感器检出; 上部平台的左右前后倾斜度由倾斜角传感器检出。同时还在先导阀和主换向阀之间设置了电磁比例阀组, 根据控制器指令, 对先导阀的压力进行校正, 再控制主换向阀, 使铲斗按规定轨迹进行自动挖掘。

4. 能量回收控制系统

(1)采用回转闭式系统, 上车制动时大部分的动能可以回收, 用来驱动其它泵或减轻发动机负荷。

(2)近年来, 要求力和速度大幅度提高, 但复合操作时工作装置的速度太慢了。为了提高复合操作时的速度, 各种各样的能量回收系统出现了。如动臂下降或斗杆挖掘时, 进行工作装置位置能的回收。

五、整机控制系统

液压挖掘机有 6 个自由度, 其运动的控制是十分复杂的。现介绍一种新的挖掘机综合控制系统(日立 EX 系统), 如图 6-51 所示。其主要特点是:

整机控制系统采用两台控制器, 即发动机控制器和泵阀控制器来对整个系统进行控制。控制器从系统中各种传感器和开关接受电信号, 分析处理后发出控制信号, 通过步进马达、高速电磁阀和比例电磁阀等对发动机油门、泵的摆角和压力补偿阀的开度等进行自动控制, 使机器随时处于最佳工作状态, 完成人们规定要求的各种目标任务。

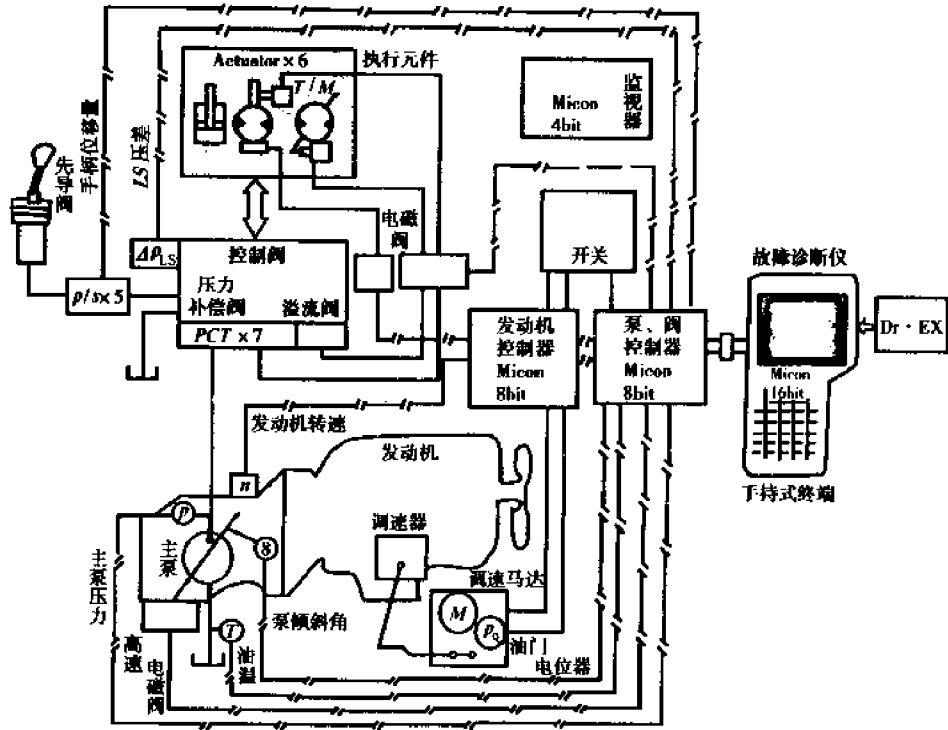


图 6-51 挖掘机综合控制系统

参 考 文 献

1. 胡泓, 姚伯威. 机电一体化原理及应用. 北京: 国防工业出版社, 1999
2. 魏俊民, 周砚江. 机电一体化系统设计. 北京: 中国纺织出版社, 1998
3. 王占民. 近代液压控制. 北京: 机械工业出版社, 1997
4. 季维发. 机电一体化技术. 北京: 电子工业出版社, 1995
5. 徐元昌. 机械电子技术. 上海: 同济大学出版社, 1995
6. 卢金鼎, 山静民. 机电一体化技术. 北京: 中国轻工业出版社, 1996
7. 李连升, 刘绍球. 液压伺服理论与实践. 北京: 国防工业出版社, 1990
8. 焦生杰. 现代筑路机械电液控制技术. 北京: 人民交通出版社, 1998
9. 黎启柏. 电液比例控制与数字控制系统. 北京: 机械工业出版社, 1997
10. 李朝青. 单片机原理及接口技术. 北京: 航空航天大学出版社, 1998
11. 何立民. 单片机应用系统设计. 北京: 航空航天大学出版社, 1999
12. 孙涵芳, 徐爱卿. 单片机原理及应用. 北京: 航空航天大学出版社, 1999
13. 陈宇. 可编程控制器基础及编程技巧. 广州: 华南理工大学出版社, 1999
14. 邓则名, 邝穗芳. 电器与可编程控制器应用技术. 北京: 机械工业出版社, 1997
15. 焦生杰. 电控液泵—马达车辆行驶系统研究. 西安: 西安公路交通大学学报, 1999
16. 焦生杰. 电控泵—马达车辆行驶控制通用平台系统研究. 北京: 建筑机械, 1999
17. 焦生杰, 许安. 现代工程机械自动换档控制系统(I). 西安: 筑路机械与施工机械化, 1997
18. 焦生杰, 许安. 现代工程机械自动换档控制系统(II). 西安: 筑路机械与施工机械化, 1997
19. 许安, 焦生杰. 现代工程机械自动换档液压系统(I). 西安: 筑路机械与施工机械化, 1997
20. 许宇, 焦生杰. 现代工程机械自动换档液压系统(II). 西安: 筑路机械与施工机械化, 1998
21. 张玉川. 液压挖掘机的控制系统. 北京: 建筑机械, 1999
22. 宋占伟, 闻邦椿. 21世纪工程机械的发展趋势. 北京: 建筑机械, 1999
23. 张光裕. 工程机械底盘构造与设计. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986
24. 司癸卯. 中置式稳定土拌和机新型全轮转向系统. 天津: 工程机械, 2000