

高等学校通用教材

机电控制

Mechatronic Control

李运华 等编著



北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

高等学校通用教材

机 电 控 制

Mechatronic Control

李运华 等编著

北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

内 容 简 介

机电控制是机械工程、电子科学、自动控制等学科相交叉所形成的一门科学。主要研究机电控制系统中的特性分析、信息综合与控制器设计问题,内容包括放大元件、执行元件、检测与转换元件、导向与支承元件和传动机构等的选择与设计,以及控制器的设计与工程实现等。机电控制在机电一体化技术中占有非常重要的地位。

本书主要结合电气伺服系统、电液伺服系统和机械传动与操纵系统,论述了机电控制系统的结构组成与工作原理,主要元件的性能分析与选择方法,机电控制系统的分析与综合等。内容主要包括信号综合与转换元件、转换与功率放大元件(如 PWM 放大器、功率驱动电路、伺服放大器、液压放大器和电液伺服阀等),执行与驱动元件、动力传动与运动控制机构、控制器的工程实现方法、机电控制系统的分析与综合、典型机电控制系统的介绍和研究专题等。

本书可作为高等院校本科“机械制造与自动化”、“机械设计与自动化”等专业“机电控制”课程的教材,也可供从事机电一体化和自动控制专业工作的工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

机电控制/李运华等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2003.8

ISBN 7-81077-307-0

I. 机… II. 李… III. 机电一体化—控制系统—高等学校—教材 IV. TH—39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 026052 号

机 电 控 制

Mechatronic Control

李运华 等编著

责任编辑 金友泉

责任校对 戚 爽

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: bhpess@263.net

河北省涿州市新华印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:17.25 字数:442 千字

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 7-81077-307-0 定价:20.00 元

序

《机电控制》是作者为机械工程与自动化、自动控制、过程装备与控制等专业的本科生和相关行业的工程技术人员撰写的一本教材或应用参考书。书中凝聚了作者多年来从事机械电子工程方面教学与科学研究的成果与经验。

出版这本书是有实际意义的。一方面由于机电一体化技术已在我国日益受到重视并已被认为是提高产品技术性能和市场竞争力的重要手段与措施;另一方面各行业对机电一体化领域的人才需求量愈来愈大,然而反映机电控制的主要知识领域与实际应用情况的教材和技术参考书却远不能满足要求,眼下很需要这样一本书。本书以机电系统的信息综合与处理、控制器设计和机电动力机构作为主线来阐述机电控制的主要内容,体系比较严谨,书中还对作为机电控制实现手段的计算机控制方面的内容给予了应有的重视,这对于丰富和完善本学科的研究体系和促进机电一体化技术的发展很有意义。

作者所在的单位——北京航空航天大学机载机电研究所,在运动体电子液压控制,特别是飞机流体控制与操纵、机载机电系统综合管理、大型工程机械现场总线控制等方面做过许多很有意义的工作,经常有新的研究成果问世。本书也在一定程度上反映了作者及其所在单位的工作。希望本书的出版能够在深入研究、广泛交流、大力推广和应用机电一体化技术、促进学科建设和发展等方面起到积极的作用,并为培养面向 21 世纪的创新人才和提高机电装备的技术水平做出有益的贡献。

我非常高兴向读者推荐这本书,并愿该书作者在今后的教学、科研中(特别是在机电控制方面)取得新的成绩。

北京航空航天大学自动化学院 王占林
2003 年 6 月于北京

前 言

机械工程是技术科学领域比较古老的学科之一。随着近代科学技术的发展,电子技术、计算机、自动控制、测试技术等学科与机械工程的紧密结合和交叉渗透形成了一门以机电整合或机电一体化为主要特色的新学科——机电控制(Mechatronic Control)。目前,机电一体化已成为机械工程领域比较活跃的技术分支之一,并已成为提高机电装备技术性能、使用性能和市场竞争力的重要手段。

随着机电一体化技术在机械工程领域的推广、普及和发展,使得市场对机电兼备方面的人才的需求日益扩大。为了培养具有机电整合和系统综合集成知识方面的人才,满足原流体传动与控制专业为拓宽专业范围而设立的机械电子工程专业方向的教学需要,特编写此书。本书可作为从事该专业方向(或机械工程及其自动化、电气工程及其自动化类专业机电控制专业方向)的应用领域人才以及高等院校本科生学习“机械电子学”的教材或参考书。

本课程的先修课程是机械设计基础、模拟电路与数字电路、微机原理、自动控制原理、流体力学与液压传动等。

本书总结了北京航空航天大学303教研室近10年来“机电控制”、“液压伺服控制”等课程的教学经验,裘丽华教授、喻统武教授曾为本课程的教学改革付出过辛勤的劳动。书中内容一部分参考了国内外相关教材和著作,同时也收入了编著者及其所在单位的科研成果。全书由李运华教授任主编。其中王曦撰写第5章的初稿,高元楼撰写了4.3节和6.5节的初稿,其余各章由主编撰写。

本书承北京航空航天大学于凤仙教授审阅并提出宝贵意见,在此表示衷心感谢。

我国著名教育家和流体控制专家,西安交通大学原校长史维祥教授和著名飞机操纵与机电控制专家王占林教授在本书的编写和出版过程中对作者给予了关心和指导。作者对两位导师的培养和指导表示谢意。

限于编著者业务水平和掌握资料有限,加之按新教材组织教学时间较短,对书中错误和不妥之处,恳请读者和使用人员提出宝贵意见。意见请寄: yhli@buaa.edu.cn。

李运华

2003年于北航

目 录

第1章 绪 论

1.1 机电控制系统的结构组成和工作原理	1
1.2 机电控制系统的分类及其特点	2
1.3 典型机电控制系统	5
1.3.1 电气位置伺服控制系统	5
1.3.2 增量运动控制单元(步进电机及其控制系统)	6
1.3.3 电液伺服控制系统	7
1.3.4 数控机床控制系统	8
1.3.5 工业机器人控制系统	9
1.3.6 汽车防抱死制动(ABS)系统	11
1.3.7 飞行器液压伺服机构与飞行器姿态控制	12
1.4 机电控制与机电一体化	14
1.4.1 机电控制与机电一体化的关系	14
1.4.2 典型机电一体化产品	15
1.4.3 机电一体化中的共性关键技术	16
1.4.4 机电一体化发展趋势	18
1.5 本课程的性质与主要任务	19

第2章 信号综合、转换与功率放大元件

2.1 放大器的基本概念、功能、分类和性能参数	20
2.1.1 放大器的基本概念和功能	20
2.1.2 放大器的分类	20
2.1.3 放大器的性能参数	21
2.2 信号综合与转换元件	21
2.2.1 运算放大器	21
2.2.2 测量放大器	22
2.2.3 信号的处理和放大	23
2.2.4 控制信号电路	28
2.2.5 调制与解调	29
2.2.6 滤波电路	31
2.3 电气功率放大器的特性分析与使用方法	32
2.3.1 常用功率放大器件	32
2.3.2 电压反馈型功率放大器	33

2.3.3 电流反馈型功率放大器	34
2.3.4 开关式功率放大器	36
2.3.5 PWM型功率放大器	38
2.4 液压放大器的特性分析与设计计算	42
2.4.1 液压控制阀的结构及分类	42
2.4.2 滑阀静态特性的分析	44
2.4.3 喷嘴挡板阀的特性	51
2.5 电液伺服阀的特性分析、性能指标和选择方法	56
2.5.1 结构及工作原理	56
2.5.2 特性分析及性能指标	61
2.5.3 选择和使用	65

第3章 机电系统的执行与驱动元件

3.1 基本概念、功用、分类和性能参数	68
3.1.1 执行元件的特点及类型	68
3.1.2 机电控制系统对执行元件的要求	68
3.1.3 性能参数	69
3.2 电气—机械转换装置的特性与选择方法	69
3.2.1 动圈式电气—机械转换器	69
3.2.2 动铁式电气—机械转换器	72
3.2.3 电致伸缩式电气—机械转换器	82
3.2.4 磁致伸缩式电气—机械转换器	83
3.3 电动执行与驱动元件的特性与选择方法	84
3.3.1 直流伺服电动机	85
3.3.2 力矩电动机	90
3.3.3 交流电动机	94
3.3.4 步进电动机	104
3.4 液压执行元件的特性与选择方法	109
3.4.1 液压缸	109
3.4.2 液压马达	110
3.4.3 液压执行元件的选择方法	110

第4章 机械传动与机电动力机构

4.1 基本概念	111
4.2 机械传动的特性和控制方法	111
4.3 电气动力机构	115
4.3.1 直流线性伺服放大型电气动力机构	115
4.3.2 晶闸管功率放大型电气动力机构	117
4.3.3 直流PWM型电气动力机构	118

4.3.4 速度环	120
4.3.5 交流变频变压(VVVF)型电气动力机构	121
4.3.6 交流矢量控制型电气动力机构	122
4.4 液压动力机构	122
4.4.1 四通阀控制双出杆液压缸	122
4.4.2 四通阀控制液压马达	129
4.4.3 三通阀控制单出杆液压缸	130
4.4.4 四通阀控制单出杆液压缸	131
4.4.5 泵控马达式动力机构	132
4.5 机电控制系统的机械装置设计	134
4.5.1 机电控制系统对机械装置的基本要求	134
4.5.2 机械装置的组成	135
4.5.3 传动机构设计	135

第5章 机电系统的计算机控制

5.1 计算机控制系统概论	141
5.1.1 计算机控制系统的组成及其特点	141
5.1.2 计算机控制系统的分类	142
5.1.3 计算机控制系统的几种实现方式	143
5.1.4 计算机控制系统的设计步骤	146
5.2 计算机控制系统的硬件结构、接口、中断及其定时技术	147
5.2.1 MCS-51 单片机硬件结构	147
5.2.2 MCS-51 中断技术	153
5.2.3 MCS-51 定时/计数技术	158
5.2.4 MCS-51 的 A/D、D/A 转换技术	164
5.3 计算机控制系统的控制算法设计	169
5.3.1 计算机控制系统的模拟设计法	169
5.3.2 计算机控制系统的离散设计法	180
5.4 计算机控制系统设计实例	190
5.4.1 硬件系统的设计	190
5.4.2 软件系统的设计	195

第6章 机电控制系统的分析、设计与应用

6.1 机电控制系统的初步设计	210
6.1.1 电液控制系统的初步设计	211
6.1.2 电动机控制系统的初步设计	216
6.2 机电控制系统动态设计的基本方法	218
6.3 机液伺服系统的动态设计	218
6.4 电液控制系统的动态设计	220

6.4.1 以惯性负载为主的电液位置控制系统	220
6.4.2 弹性负载系统	222
6.4.3 速度控制系统	225
6.4.4 控制系统的精度	226
6.4.5 控制系统的校正	227
6.5 电气控制系统的动态设计	228
6.5.1 静态误差	229
6.5.2 瞬态响应品质指标	229
6.5.3 刚度特性	230
6.5.4 性能改进设计	233

第7章 机电控制系统的专题研究

7.1 机电控制系统发展中的问题	242
7.1.1 液压控制系统发展中的问题	242
7.1.2 电气控制系统发展中的问题	243
7.1.3 机电控制系统非线性动力学	243
7.2 研究专题	246
7.2.1 近代控制理论在机电控制系统上的应用	246
7.2.2 机电控制系统对负载与干扰变化的补偿	249
7.2.3 机电控制系统的余度问题	250
7.2.4 机器人控制系统	251
7.2.5 微机电控制系统	254
7.2.6 基于现场总线和网络通信的多机电控制系统	257

习 题

参考文献

第1章 绪 论

机械工程是技术科学领域比较古老的学科之一。机器及其制造与使用机器的所有自然活动是机械工程研究的主要范畴。

对于一般的机器,马克思在《资本论》中曾下过一个定义:“一切已经发展的机器,都是由其本质上不同的部分——发动机、传动机构和工作机所构成”。在这一时期,发动机(能源)主要是蒸汽机、水轮机和风力机组等;机器从某种程度来看主要是人的体力和臂力的延伸,主要任务是实现原动机与工作机之间运动和力的变换与协调,还谈不上具有自动控制、信息处理、状态监测与诊断、智能与柔性等功能。从现代科学技术的发展水平和对机器所赋予的要求来看,这个定义只适用于经典(早期)的机器。

进入20世纪70年代以来,以大规模集成电路和微型计算机为代表的微电子技术,以信息转换与系统综合为代表的自动控制理论,迅速应用到机械工程中,出现了种类繁多的计算机控制的机械、仪器和军械装备,以及具有柔性和集管理、监督和控制一体化的生产线、车间、工厂等。具备这些特征的机器称为现代机器。和经典机器不同,现代机器由原动机、控制与调节机构、传动机构、工作机构与机械本体、检测与转换装置等5部分组成。现代机器已在机械制造、冶金、化工、武器装备、航空航天、海洋等领域获得了广泛的应用。

随着近代科学技术的发展,电子工程、计算机、自动控制、测试技术、光电技术等领域的科学技术与机械工程的紧密结合和交叉渗透形成了一门以机电整合或机电一体化为主要特色的新兴边缘学科——机械电子学(mechatronics)。它正处于发展阶段,代表着机械工业技术革命的前沿方向。

机电控制(mechatronic control)是指采用自动控制理论和电子技术解决机电系统控制问题的一门科学,是机械电子学的一个分支,在机电一体化中占有重要的地位。机电一体化已成为机械工程领域最活跃的技术分支之一,并已成为提高机电装备技术性能、使用性能和市场竞争力的重要手段。

1.1 机电控制系统的结构组成和工作原理

机电控制是研究如何设计控制器并合理选择或设计放大元件、执行元件、检测与转换元件、导向与支承元件和传动机构等,并由此组成机电控制系统使机电装备达到所要求的性能的一门科学,在机电一体化技术中占有非常重要的地位。机电控制系统是机电一体化产品及系统中承担着控制对象输出,并按照指令规定的规律变化的功能单元,是机电一体化产品及系统的重要组成部分。机电控制系统是一种自动控制系统。

机电控制系统一般由指令元件,比较、综合与放大元件,转换与功率放大元件,执行元件,工作机构,检测与转换元件等6部分组成。为研究问题方便,通常又把指令元件和比较、综合与放大元件合称为控制器(控制元件);将转换与功率放大元件和执行元件合称为机电动力机构;机电动力机构和工作机构合称为被控对象。对于控制精度要求不高且执行元件的输出能

够按其给定规律运动时,可以采用开环控制。此时检测与转换元件也可以没有;但为了显示与监测,系统中仍应装有检测与转换元件。图 1-1 是机电控制系统最基本的方块图。

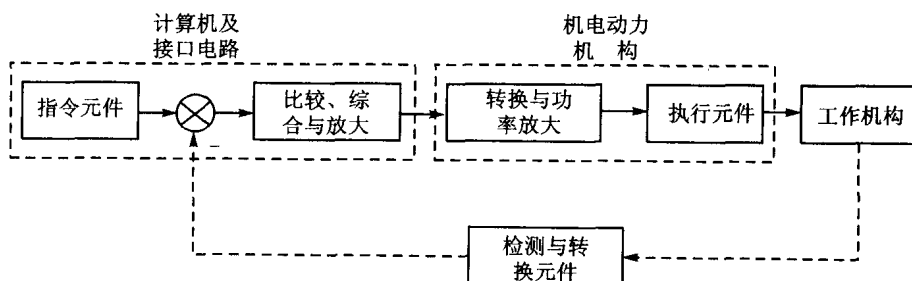


图 1-1 机电控制系统方块图

机电控制系统的工作原理是:由指令元件发出指令,通过比较、综合与放大元件将此信号与输出反馈信号比较,再将差值进行处理和放大、控制及转换,将此处处理后的信号加到功率放大元件并施加到执行元件的输入信号,使得执行元件按指令的要求运动;而执行元件往往和机电装备的工作机构相连接,从而使机电装备的被控量(如位移、速度、力/转矩等)符合所要求的规律。

机电伺服控制系统是指系统的输出为机械量,且输出跟随指令运动的机电控制系统。

随着计算机(特别是微处理机)的普及和性能价格比的提高,机电控制系统的指令产生、信号比较与综合等功能可以交由计算机完成。采用计算机控制的机电系统,由于计算机的强大数据处理功能、良好的重复性、方便的软件编程和入机接口,因此可以使机电系统的灵活性和自动化程度大大提高。

1.2 机电控制系统的分类及其特点

可以根据不同的分类原则对机电控制系统进行分类。

按照有无输出量的反馈,可以将机电控制系统分为开环式机电控制系统和闭环式机电控制系统。前者组成简单,但精度低。典型代表是以步进电机作为执行元件的增量控制系统,它是通过电机的转角与脉冲链同步来保证精度的。后者精度高,但构成比较复杂,是机电控制系统的主要形式。

按照系统中控制器的工程实现方式不同,可以将机电控制系统分为模拟式机电控制系统和数字式机电控制系统(或基于计算机控制的机电控制系统)。模拟式机电控制系统中的控制器一般是以运算放大器和分立元件为基本单元所构成的模拟电路。其优点是实时性好、构成简单、成本低、开发难度小;但灵活性差、温漂大、不易实现复杂控制律,不易监督系统异常状态等。数字式机电控制系统中的控制器一般采用微处理机(可以是可编程控制器 PLC、单片机或工控机等),并通过软件算法和接口电路实现。其优点是精度高(通过增加分辨率和字长),灵活性强,数据处理功能强,易于实现复杂控制算法和能够监督系统异常状态并及时处理等;其缺点是实现高精度和高响应时成本高,设计和开发一般需要专门的开发工具和环境,重现连续信号过程有信息丢失,采样保持器会产生滞后问题和设计方法复杂等。

按照系统中机电动力机构的不同分为机械式、电气式、流体式(包括液压式和气压式)3 大类机电控制系统。

三种机电动力机构的性能可根据其构造从能量转换元件、功率转换及放大元件的角度进行对比,如表 1-1 所列。

表 1-1 各种机电动力机构的比较

机电动力机构类型	功率源	能量转换元件	转换与功率放大元件	
			阀式控制	容积(排量)控制
机械式	电机、内燃机等	无	离合器、变传动比传动	无
流体式	液压泵、蓄能器、空气压缩机等	液压(气压)马达(缸)	伺服阀、比例阀等	变量泵、变量马达
电气式	动力电源、电池	电动机、电磁铁	线性功率放大器和开关功率放大器等	可调压发电机或电池,变频驱动器等

纯机械式的动力机构从结构组成角度看不需要能量转换元件,而控制和调节原理主要基于以下两种方式之一:

(1) 基于摩擦传动的调节离合器的接合程度或调节传动比,控制元件只能用离合器和可变传动比 V 型带传动装置实现;

(2) 基于多级齿轮传动,通过改变和组合啮合副实现传动比的有级调节。

机械动力机构由于控制调节困难,目前除在汽车上用做无级变速器和机床上用做定比传动装置外,其他场合已很少使用。

流体式机电动力机构和电气式机电动力机构又可以分为阀控式控制和排量式控制两大类。

阀控式机电动力机构的控制与调节原理是,以阀的形式来控制驱动执行元件的功率,如用电液比例阀或伺服阀控制阀的开口来控制进入液压缸或液压马达的流量,还可用晶体管(或其他功率放大元件)控制加在电机绕组上的电压或动力马达线圈上的电压等。阀控式调节的优点是结构简单,操纵功率小,响应快;但系统效率低,能耗大。阀控式机电动力机构一般适用于拖动功率较小的机电系统,但基于脉宽调制原理的阀控式调节不受此限制。

排量(容积)式机电动力机构的控制与调节原理是以变容量的方式来控制执行元件的力(力矩)和速度(角速度)。它主要有两种实现方式:改变驱动端容量和改变执行端容量。前者如电液伺服变量泵型容积式电液动力机构,它通过改变泵的输出流量控制输入变量马达的流量(注意这里没有节流损失)。后者如基于恒压网络和变量马达组成转速量两次调节型容积式动力机构,它通过调节变量马达的排量来控制马达的转速和输出转矩。这种动力机构的特点是拖动功率大,损失小;但组成复杂,响应速度比较慢。它一般适用于动态要求不高的大功率机电系统。实际实现时,这种机构往往还需要一套阀控式位置系统来控制容量调节机构。

关于液压式动力机构与电气式动力机构的比较,从目前的技术水平来看,主要结论如下所述。

(1) 电气式动力机构

主要优点是:

- 固定场合使用容易获取动力,电能转换为机械能容易;
- 远距离输送容易;
- 控制和调节比较容易;
- 无污染;

- 可以获得较好的低速性和较大的调速范围。

主要缺点是：

- 相比液压式动力机构，功率质量比低，目前一般为液压式动力机构的十分之一；
- 在运动式机械上使用一般需要发电装置；
- 实现大行程的直线及往复运动比较困难。

(2) 液压式动力机构

主要优点是：

- 功率质量比(功率密度)大、快速性好；
- 调速范围大，低速性好；
- 易于实现直线运动和往复摆；
- 在中等距离范围内输送能量方便；
- 输出性能受负载的影响小；
- 控制和调节比较容易；
- 液压油具有自行润滑性能。

主要缺点是：

- 传动效率低；
- 有泄漏和污染问题，易燃烧对安全性要求高；
- 系统性能受液压油的污染和温度的影响；
- 存在导管振动问题；
- 需要专门的油源，使用和维护不便；
- 系统工作性能受液压油可压缩性的影响。

在许多场合，减轻系统的质量是决定性的重要因素，在这方面液压动力机构比电气机构具有突出的优点。因为液压泵和液压马达的功率质量比的典型值为 $1\ 680\ \text{W/kg}$ ，而发电机和电动机的功率质量比的典型值为 $168\ \text{W/kg}$ 。电动机和电磁铁的输出力或转矩受到磁性材料饱和因素的限制，而液压执行元件的输出力或转矩可以在相当大的范围内，通过提高工作压力(目前最大值可以达到 $56\ \text{MPa}$ 以上)的办法来获得较高的输出力或转矩。一般说，优质电磁铁的力输出性能的最大值为 $175\ \text{N/cm}^2$ ，力/质量比为 $130\ \text{N/kg}$ ；而液压缸的力输出性能很容易达到 $2\ 100\ \text{N/cm}^2$ 或更高，力/质量比为 $13\ 000\ \text{N/kg}$ 。回转式液压马达的扭矩/惯量比一般相当于电动机扭矩的 $10\sim 20$ 倍，只有无槽直流力矩电机才能与液压马达相当。液压动力机构在开环情况下就可以做到很大的输出刚度，而电气动力机构的输出刚度很小。液压动力机构由于液压油的不可压缩性，除非采用高精度的传感器和高性能控制算法组成闭环，否则不能用于精密定比传动。鉴于液压动力机构的优点，液压动力机构在航空、航天、汽车和工程机构等运动设备上获得了广泛的应用。

如果对于地面上的固定场合使用的机电装备，因为容易获得电能，这时应尽量考虑选用电气动力机构。除非是对质量和体积有特殊要求，如输出刚度大、多直线执行元件等场合可以考虑采用液压动力机构。

关于气压动力机构与液压式动力机构性能的比较，从目前的技术水平来看，主要结论如下：

(1) 由于空气可以从大气中取之不尽且不易堵塞，可将用过的气体排入大气，无需回气管路，处理方便，泄漏不会严重影响工作，不污染环境。

(2) 空气粘性很小,其沿程压力损失约为液压动力机构的管路沿程损失的千分之一,易于远距离输送及控制。

(3) 工作压力低,可降低对气动元件的材料性能和制造精度的要求。

(4) 对开环控制系统,它相对液压动力机构而言有动作迅速、响应快的优点。

(5) 维护简单,使用安全,没有防火、防爆问题。

气压动力机构适用于石油、化工、自动化生产线的物流输送机械、农药及矿山机械等行业的特点要求。对于无油的气动控制系统则特别适用于无线电元器件生产过程,也适用于食品及医药的生产过程。

气压动力机构与电气、液压动力机构比较有以下缺点:

(1) 因为气动装置的信号传递速度限制在声速范围之内;而它的声速远低于液体的声速,更低于电磁波速,所以它的工作频率和响应速度远不如电子装置,并且信号要产生较大失真和延迟,也不便于构成十分复杂的回路。但这个缺点对一般工业生产过程不会造成显著影响。

(2) 空气的压缩性远大于液压油的压缩性,精度较低。

(3) 气压动力机构的效率比液压传动还要低,且噪声较大。

(4) 工作压力较低,不易获得大的推力。气压动力机构的出力不如液压动力机构的大。

作为一名设计人员,在选择动力机构类型时能够熟练运用上述知识是非常重要的。

1.3 典型机电控制系统

本节介绍几种典型机电伺服控制系统或机电控制机构。

1.3.1 电气位置伺服控制系统

在工业与国防的许多领域,例如轧钢机械、数控机床、工业机器人、自动火炮、雷达天线等,都要求具有较高精度的定位或轨迹控制,因此都必须采用位置反馈的方法,组成电气位置伺服控制系统,以实现输出轴跟踪给定轴(输入轴)的运动。

图1-2是电气位置伺服系统原理图。它由自整角机(其中发送机作为指令元件,接收机用做反馈元件和比较元件)、相敏放大器、校正装置、功率放大器、直流伺服电机、减速器、测速发电机等组成。

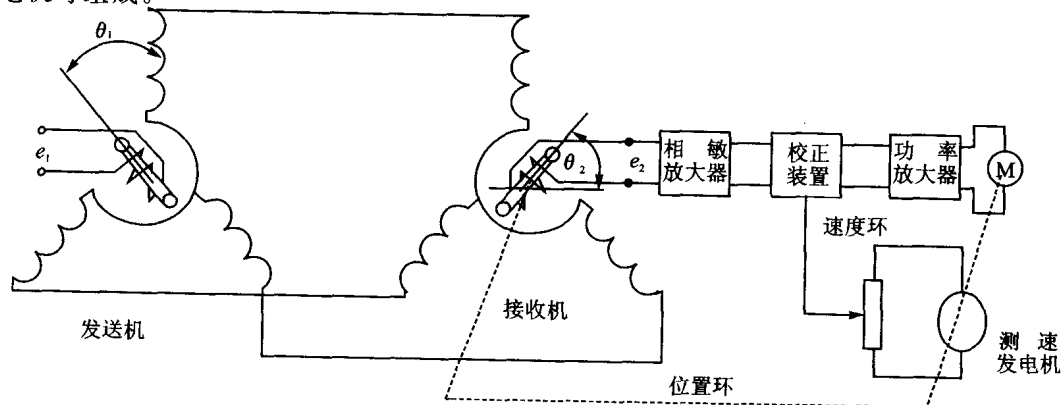


图1-2 电气位置伺服系统原理图

电气位置伺服系统的工作原理是:设发送机的输入指令角度为 θ_1 ,若接收机转子相对定子有转角 θ_2 ,则接收机转子绕组所产生的感应电压为

$$e_2 = U_m \sin(\theta_1 - \theta_2) \sin(\omega t - \varphi) = U_2 \sin(\omega t - \varphi)$$

式中:

$\Delta\theta$ ——误差角, $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$;

U_m ——感应电压中随误差角变化部分的幅值,与励磁电压的幅值和自整角机的变压比有关;

U_2 ——感应电压的直流分量;

ω ——励磁电压的圆频率。

φ ——磁场空间向量的位置角度。

由于误差角一般很小,所以 $\sin \Delta\theta \approx \Delta\theta$ 。误差电压 e_2 为交流电压,经过相敏放大后转换为与误差成比例的直流电压,再通过校正和功率放大,以足够的功率驱动直流伺服电机向消除误差的方向旋转,直到达到一定的位置精度为止。

为了保证系统的稳定性和满意的动态品质,功率放大器一般选用 PWM 功放,再加上校正装置。对于位置系统,校正装置含有位置调节器、速度调节器和电流调节器(图中未画出电流环),这时系统是一个三环路系统。其中位置环的作用是确保系统的位置跟踪精度和限制电机的最大工作转速;速度环主要控制转速跟随位置环的输出指令电压变化,限制电枢主回路的最大工作电流,并确保快速启动和制动;电流环的作用是确保电枢电流跟随转速调节器的输出指令变化,确保启动时获得最大电流,并抵抗外负载干扰和电网电压的波动引起的电流变化。

1.3.2 增量运动控制单元(步进电机及其控制系统)

增量运动控制单元是一种输出跟随输入脉冲链呈阶梯状运动的机电控制系统。增量控制的含义是指输出的增量与此时此刻的输入脉冲数的增量成正比,当输入脉冲数的增量为零时,系统的输出维持不变。增量运动控制单元由脉冲发生器、环形分配器、开关式功率放大器、步进电动机、传动机构和工作装置等组成,其原理框图如图 1-3 所示。

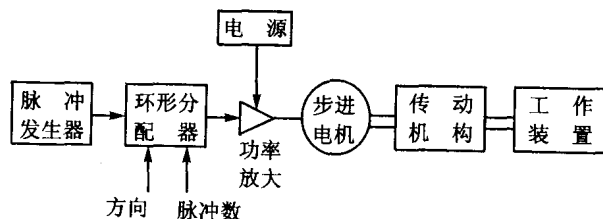


图 1-3 增量运动控制单元

步进电动机是增量运动控制单元的执行元件。步进电动机是由脉冲信号控制的特种电动机,对应一个电脉冲,电机将产生一个恒定量的步进运动,即电机运动的步数由脉冲数确定,运动方向由脉冲相序确定,而在一定时间内电机对脉冲链的响应角度由脉冲频率决定。在电机驱动能力和频响能力允许的范围内,这些关系不会因电源电压、负载大小、环境条件的波动而变化。由于增量运动控制单元可以直接实现数字信号转换,在没有反馈情况下可以保证一定的控制精度,可以在较宽的范围内通过改变脉冲频率来调速等优点,使得它在对精度要求不太高的开环机电系统,如经济型数控机床的进给系统和直接数字式液压控制阀的脉冲/位移转换

位置上得到了广泛的应用。

1.3.3 电液伺服控制系统

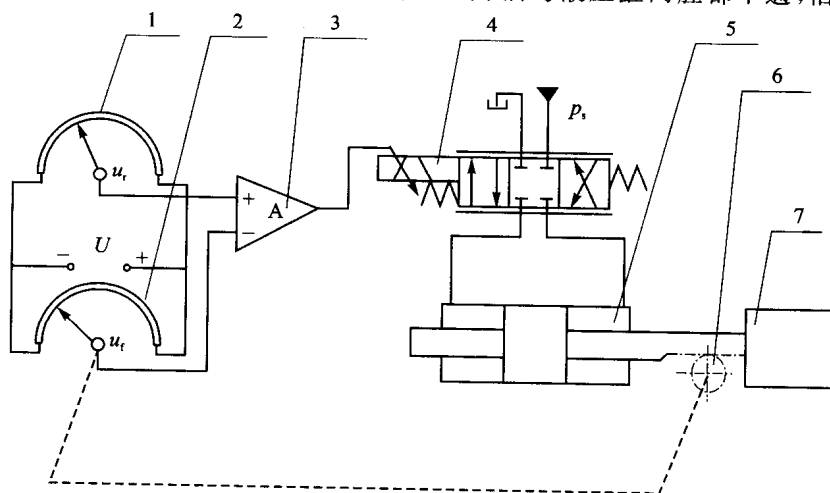
液压伺服系统是以液体压力能为动力的机械量(位移、速度和力)自动控制系统。按系统中实现信号传输和控制方式不同分为机液伺服系统和电液伺服系统两种。

机液伺服系统的典型实例是飞机、汽车和工程机械主离合器操纵装置上常用的液压助力器,机床上液压仿形刀架和汽车与工程机械上的液压动力转向机构等。

电液伺服控制系统是以液压为动力,采用电气方式实现信号传输和控制的机械量自动控制系统。按系统被控机械量的不同,它又可以分为电液位置伺服系统、电液速度伺服系统和电液力控制系统3种。电液位置伺服控制系统适合于负载惯性大的高速、大功率对象的控制,它已在飞行器的姿态控制、飞机发动机的转速控制、雷达天线的方位控制、机器人关节控制、带材跑偏、张力控制、材料试验机和加载装置等中得到应用。

按系统中承担功率转换与放大作用的元件不同,电液伺服控制系统可分为阀控(节流)式电液伺服控制系统(简称阀控系统)和容积控制型电液伺服控制系统(简称容积控制系统)。前者采用电液伺服阀控制驱动执行元件的流量来实现功率转换及放大,具有结构简单,成本低且响应速度快,所以一般情况下均采用它。不足之处是存在节流损失(如果采用定量泵加溢流阀供油还有溢流损失),效率低。后者采用调节电液伺服变量泵的排量控制进入执行元件的流量或电液伺服变量马达的排量控制驱动执行元件的转矩实现功率转换及放大,没有节流损失,效率高。实际上容积控制之中,常需要一个小规格的阀控式电液位置系统或电气位置系统来推动泵或马达的变量机构来改变排量,这使得容积系统较阀控系统复杂,成本高且响应慢,只有在功率较大,对系统效率和冷却装置体积有严格要求的场合,如车辆的液压行走系统和飞机发电机的恒速驱动装置等。

图1-4是一个典型的电液位置伺服系统。系统中用输入电位计1控制液压缸5的活塞杆的运动,反馈电位计2检测活塞杆的位置。系统中采用电液伺服阀4作为功率转换与放大元件。其工作特性是:无电流时,阀芯处于中位,压力油与液压缸两腔都不通,活塞杆不动;当



1—输入电位计;2—反馈电位计;3—放大器;4—电液伺服阀;5—液压缸;6—齿轮条副;7—工作对象

图1-4 双电位计电液位置伺服控制系统

伺服阀的线圈通以一定电流时,阀芯偏离中位,油液进入液压缸,活塞杆以一定速度运动。在这里电流的极性决定液流方向,电流的绝对值大小则决定了阀芯偏离中位的距离和通过阀口的流量。

系统的工作原理如下:输入电位计 1 和反馈电位计 2 的两个固定端上加有固定电压 U , 根据其动臂位置分别截取电压 u_r 和 u_f , 并将它们分别接至放大器 3 的同相输入端和反相输入端,即放大器 3 的输入电压为 $u_r - u_f$ 。开始时令两电位计处于同一角度上,放大器输出电流为零,则活塞杆停在某一位置上。如果外加的控制作用(输入)使电位计 1 的动臂旋转一定角度,使 u_r 发生变化,则 $u_r - u_f$ 不再是零,放大器输出一定电流,使电液伺服阀 4 偏离中位造成一定流量的压力油进入液压缸 5,活塞杆便产生运动(输出)。活塞杆的运动通过齿条轮副 6 又使反馈电位计 2 的动臂旋转(注意必须使电位计 2 的动臂旋转方向与电位计 1 相同,否则将形成正反馈),直到电位计 2 截取电压 u_f 与 u_r 相同时,活塞杆停止运动。因此,活塞杆将完全跟随电位计 1 的旋转而产生相应的位移,达到电液位置伺服的目的。

1.3.4 数控机床控制系统

自从 1952 年世界上第一台 3 坐标数控铣床问世以来,数控机床的发展史至今已经有 50 余年的功史。在这 50 余年中,数控机床技术得到了巨大的发展。从数控系统来看,由以电子管为基础的硬件数控技术发展到目前以微处理器和高性能伺服驱动单元为基础的数控系统。伴随着数控系统的发展,数控机床的伺服驱动技术也得到了相应的发展,从电液脉冲马达、功率步进电动机发展到高性能交、直流伺服电机驱动系统。特别是高性能交流电动机伺服系统代表了当前伺服驱动系统的发展方向。数控机床控制系统作为机电控制系统的重要应用领域之一从某种程度上也代表了当前机电控制系统的发展方向。

数控机床控制系统的组成如图 1-5 所示。从图中可以看出,数控机床的数控系统是由机床控制程序、计算机数控装置(CNC, Computer Numerical Control)、可编程序控制器 PLC、主轴控制系统及进给伺服控制系统等组成的。

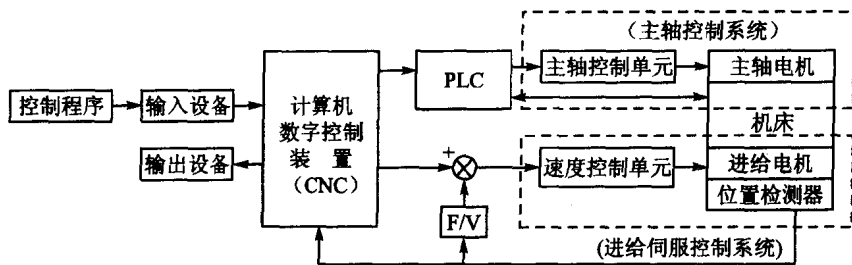


图 1-5 数控机床控制系统的组成

数控系统对机床的控制包含顺序控制和数字控制两个方面。顺序控制是指对刀具交换,主轴调速、冷却液开停,工作台极限位置等一类开关量的控制;数字控制则用于机床进给传动的伺服控制,以实现对工作台或刀架的进给量、进给速度以及各轴间运动协调的控制。数控系统中,CNC 装置根据输入零件加工程序,通过插补运算计算出理想的运动轨迹,然后输出到进给伺服控制系统,加工出所需要的零件。另外,CNC 装置还完成对进给坐标控制、主轴控制、刀具控制、辅助控制等功能。其中,进给伺服控制系统是 CNC 和机床机械传动部件间的联系环节,是一个典型的闭环控制系统,它接收 CNC 的控制命令后,能够平滑地调节运动速度,精