



普通高等教育电气电子类工程应用型“十二五”规划教材

运动控制系统

MOTION CONTROL SYSTEMS

吴贵文 主编



免费电子课件

www.cmpedu.com



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气电子类工程应用型“十二五”规划教材

运动控制系统

主编 吴贵文

参编 何红军



机械工业出版社

本书是针对应用型本科院校电气工程与自动化类专业编写的。随着电力电子技术、自动检测技术、计算机技术、智能控制技术和网络技术的快速发展,运动控制系统也日新月异。本书内容吸收了运动控制系统已在工程上应用得比较成熟的新技术,压缩了直流调速系统的部分内容,突出了交流异步电动机和同步电动机调速系统,并介绍了位置随动系统和数字式运动控制系统。为适应教学改革的需要,本书秉承“理论够用,注重应用”的理念,对基本原理讲透,对高深理论简略,特别强调运动控制系统在工程上的应用。在实践性内容的安排上,除将其有机融于各章外,还在第8章专门介绍了运动控制系统的5个应用实例。

本书可作为高等学校电气工程与自动化、电气工程及其自动化、自动化专业的教材,也适用于机电一体化、电子等专业,还可供有关工程技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

运动控制系统/吴贵文主编. —北京:机械工业出版社,2014.7
普通高等教育电气电子类工程应用型“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-46189-0

I. ①运… II. ①吴… III. ①自动控制系统—高等学校—教材
IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第054080号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤

版式设计:常天培 责任校对:樊钟英

封面设计:张静 责任印制:李洋

北京瑞德印刷有限公司印刷(三河市胜利装订厂装订)

2014年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15印张·362千字

标准书号:ISBN 978-7-111-46189-0

定价:32.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面防伪标均为盗版

前 言

运动控制系统（电力拖动自动控制系统）课程作为电气工程及其自动化类本科专业的一门专业必修课，已有多种版本的教材在各高校使用。其中，陈伯时教授主编的《自动控制系统》和后来的第2版、第3版，以及他与阮毅教授主编的第4版，一直是改革开放以来历届电气自动化专业学生选用的经典教材。自大学扩招以来，许多大学将自身定位于应用型本科院校，就读的学生普遍存在抽象思维和数理知识方面的欠缺，对理论性较强的教学内容理解困难，而且他们的就业方向主要是基层一线，面对自动控制系统的设计、安装、调试、维护和系统集成等电气技术工作，他们需要的是系统的思维能力、宽广的知识面、较强的动手实践能力和解决实际工程问题的能力，而对于电力传动设备内部的深奥原理以及具体电路，有所了解就可以了。基于以上认识，本书以必要的理论知识为基础，着重于应用，力图适合于应用型本科院校师生的教学。

全书内容安排如下：第1章绪论。除了介绍运动控制系统的发展历史外，主要介绍运动控制系统的3个类型，即液压传动系统、气压传动系统和电气传动系统。由于液压传动系统和气压传动系统仍在工业上大量使用且具有独特的优点，因此这方面内容将有助于扩展学生的知识面。本章最后介绍的转矩控制规律是后续学习的预备知识。第2章开环运动控制系统。首先介绍运动控制系统的要求和稳、动态性能指标，然后介绍常用的晶闸管整流器-电动机系统和直流PWM变换器-电动机系统，最后介绍广泛使用的一种开环运动控制系统——步进电动机运动控制系统，并给出一个步进驱动器的实例。第3章闭环控制的直流电动机调速系统。尽管直流调速系统已被交流调速系统逐步替代，但直流调速系统特别是双闭环控制系统仍是交流调速系统的基础，其工程设计和分析方法对工程技术人员有重要作用，所以本章循序渐进地讲解了单闭环直流调速系统、双闭环直流调速系统、可逆直流调速系统和弱磁控制的直流调速系统。第4章交流异步电动机调速系统。在提出异步电动机稳态数学模型的基础上，导出了交流调速的方法；在变压控制方面，除了介绍变压调速系统外，还介绍了软起动器和电动机节电器；在变频控制方面，重点介绍了变频调速的机械特性、SPWM和SVPWM控制方法、VVVF调速系统，对矢量控制系统和直接转矩控制系统只作一般介绍，省略了动态数学模型，还介绍了绕线转子异步电动机串级调速系统和双馈调速系统；最后对通用变频器的使用作了详细介绍。第5章同步电动机调速系统。介绍同步电动机的稳态数学模型及调速方法，重点关注无刷直流电动机控制系统和三相永磁同步伺服电动机控制系统，最后介绍一种交流伺服电动机驱动器。第6章位置随动系统。近年来随着各种数控机床和机器人技术的普遍应用，位置随动系统在工业上显得日益重要，本章在介绍位置随动系统的要求、组成、特点和性能指标后，着重介绍数控加工特别是轨迹控制原理，最后介绍随动系统校正方法。第7章数字式运动控制系统。数字化、智能化、网络化正在成为运动控制系统的主流，本章首先介绍数字控制的特点、系统组成及测速滤波方法，然后介绍数字PID调节器的算法实现，并讲述基于DSP的运动控制器，还详细介绍以Profibus为代表的现场总线，最后给出数字式运动控制系统的设计内容和流程。第8章运动控制系统应用实例。结合

工程实际，列举了5个应用实例，涉及步进电动机的 PLC 控制、直流调速器的应用、变频器的应用、伺服电动机在机器人上的应用以及运动控制器的应用，以期学生从事工程实践时有所借鉴。

本书主要内容的理论教学时数约为48学时，建议安排第1章2学时、第2章6学时、第3章10学时、第4章8学时、第5章6学时、第6章6学时、第7章4学时、第8章6学时，各学校可根据各自教学大纲的要求选择内容和安排教学。本课程是一门实践性很强的课程，实验是学好本课程必不可少的环节，建议按课堂教学进程和实验设备条件安排相关实验。实验内容应突出设计性和综合性，注意运用理论分析解决实际问题。如条件许可，建议另外安排一次运动控制系统的课程设计或综合实践，以培养学生的工程实践能力。

全书由吴贵文担任主编，编写了第1~6章和第8章并负责统稿。作者本人从事本课程教学前后15年，中间又有15年时间在工业企业从事相关技术研发工作，有一定的经验，依托这些积累，作者力图在现有各种优秀教材的基础上，使本书在应用方面体现特色。何红军老师编写了本书的第7章并负责电子课件的制作。

本书在编写过程中还得到温州研硕自动化设备有限公司的大力支持，在此表示衷心的感谢。徐虎老师对本书内容和插图提出了宝贵意见，刘希真老师给予了许多帮助，在此一并致谢。

本书的成功出版需要特别感谢机械工业出版社责任编辑的努力，为本书的策划、申报、立项到编辑出版付出了大量辛勤的劳动。希望本书能对推动本课程的教学改革有所裨益，对培养高素质应用型人才有所帮助。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作为教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载。

虽然在编写时倾注了大量心血，时时刻刻如履薄冰，唯恐失误，但因学识水平有限，书中仍会存在许多缺点和不足，恳请广大师生和读者批评指正。

吴贵文

目 录

前言

第 1 章 绪论 1

本章教学要求与目标 1

1.1 运动控制系统的组成和类型 1

1.1.1 液压传动系统 1

1.1.2 气压传动系统 3

1.1.3 电气传动系统 4

1.2 运动控制系统的发展历史 5

1.3 运动控制系统的转矩控制规律 7

本章小结 8

思考题与习题 8

第 2 章 开环运动控制系统 9

本章教学要求与目标 9

2.1 直流电动机拖动的运动控制系统的基本问题 9

2.1.1 直流调速的主要方法 9

2.1.2 转速控制的要求和调速性能指标 9

2.1.3 直流调速系统使用的 3 种可控直流电源 12

2.2 开环控制的直流电动机调速系统 13

2.2.1 晶闸管整流器-电动机系统 13

2.2.2 直流 PWM 变换器-电动机系统 19

2.2.3 开环直流调速系统的稳态分析 23

2.3 步进电动机运动控制系统 25

2.3.1 步进电动机简介 25

2.3.2 步进电动机的控制方式 26

2.3.3 步进电动机控制系统 28

本章小结 32

思考题与习题 32

第 3 章 闭环控制的直流电动机调速系统 34

本章教学要求与目标 34

3.1 单闭环直流调速系统 34

3.1.1 单闭环直流调速系统的组成 34

3.1.2 单闭环直流调速系统的稳、动

态性能分析 35

3.1.3 无静差直流调速系统 41

3.1.4 其他形式的单闭环直流调速系统 44

3.2 转速、电流双闭环直流调速系统 49

3.2.1 单闭环直流调速系统存在的问题 49

3.2.2 转速、电流双闭环直流调速系统的组成 49

3.2.3 转速、电流双闭环直流调速系统的性能分析 50

3.2.4 转速、电流双闭环直流调速系统的工程设计方法 54

3.2.5 转速、电流双闭环直流调速系统调节器工程设计实例 66

3.3 可逆直流调速系统 77

3.3.1 PWM 可逆直流调速系统 78

3.3.2 V-M 可逆直流调速系统 79

3.4 弱磁控制的直流调速系统 82

3.4.1 弱磁与变压协调控制 82

3.4.2 弱磁与变压协调控制的直流调速系统 82

本章小结 83

思考题与习题 83

第 4 章 交流异步电动机调速系统 86

本章教学要求与目标 86

4.1 异步电动机的稳态数学模型和调速方法 86

4.1.1 异步电动机的稳态数学模型 86

4.1.2 异步电动机的调速方法 88

4.2 异步电动机的变压控制系统 88

4.2.1 异步电动机的变压调速 88

4.2.2 变压调速时的机械特性 89

4.2.3 闭环控制的变压调速系统 90

4.2.4 变压控制在软启动器中的应用 90

4.2.5 变压控制在电动机节

电器中的应用	93	调速系统	139
4.3 异步电动机的变压变频		5.3 三相永磁无刷直流电动机	
(VVVF) 调速	93	控制系统	140
4.3.1 变压变频调速的基本原理	93	5.3.1 无刷直流电动机的组成	
4.3.2 变压变频调速时的机械特性	95	和工作原理	140
4.4 变压变频 (VVVF) 调速技术	97	5.3.2 无刷直流电动机转矩的波动	143
4.4.1 交一直一交 PWM 变		5.3.3 无刷直流电动机控制系统	143
频器主电路	97	5.4 三相永磁同步伺服电动	
4.4.2 正弦波脉宽调制 (SPWM)		机控制系统	144
技术	98	5.4.1 位置信号的检测	144
4.5 变压变频 (VVVF) 调速系统的结构		5.4.2 电子齿轮的功能	148
和工作原理	111	5.4.3 交流伺服电动机驱动器实例	149
4.6 高性能异步电动机调速系统	114	本章小结	152
4.6.1 矢量控制的交流变		思考题与习题	152
频调速系统	115	第 6 章 位置随动系统	153
4.6.2 直接转矩控制的交流变频		本章教学要求与目标	153
调速系统	116	6.1 位置随动系统概述	153
4.7 绕线转子异步电动机调速系统	117	6.1.1 位置随动系统的组成	153
4.7.1 绕线转子异步电动机双馈控制的		6.1.2 位置随动系统的特点	154
基本原理	117	6.1.3 位置随动系统的基本	
4.7.2 绕线转子异步电动机串级		性能指标	155
调速系统	119	6.2 闭环位置随动系统及其	
4.7.3 绕线转子异步电动机		控制原理	156
双馈调速系统	120	6.2.1 闭环伺服系统的执行电动机	157
4.8 通用变频器	122	6.2.2 数字脉冲比较式伺服系统	158
4.8.1 通用变频器简介	122	6.2.3 数控加工过程	158
4.8.2 变频器的选型、安装及维护	122	6.2.4 数控机床的轨迹控制原理	
本章小结	133	及其实现	159
思考题与习题	134	6.3 位置随动系统的数学模型与	
第 5 章 同步电动机调速系统	135	校正设计	165
本章教学要求与目标	135	6.3.1 位置伺服系统的数学模型	165
5.1 同步电动机的稳态数学模型		6.3.2 位置调节器设计	166
与调速方法	135	本章小结	168
5.1.1 同步电动机的特点	135	思考题与习题	168
5.1.2 同步电动机的分类	135	第 7 章 数字式运动控制系统	170
5.1.3 同步电动机的转矩角特性		本章教学要求与目标	170
和稳定运行	136	7.1 数字控制系统的主要特点	170
5.1.4 同步电动机的起动	137	7.2 数字式运动控制系统的基本组成	171
5.1.5 同步电动机的调速	138	7.3 数字控制的关键部件	172
5.2 他控变频同步电动机调速系统	139	7.3.1 数字测速指标	172
5.2.1 转速开环恒压频比控制的同步电动机		7.3.2 数字测速方法	172
群调速系统	139	7.3.3 数字滤波	173
5.2.2 大功率同步电动机		7.3.4 数字 PID 调节器	174

7.4 基于 DSP 的运动控制器	176	本章教学要求与目标	193
7.4.1 DSP 运动控制器的硬件构成	176	8.1 步进电动机在勾心刚度测 试仪中的应用	193
7.4.2 DSP 运动控制器的软件构成	178	8.2 西门子 6RA70 型直流调速器在热连轧 机中的应用	201
7.5 现场总线及 Profibus 现场总线	181	8.2.1 6RA70 型直流调速器简介	201
7.5.1 现场总线的概念及特点	181	8.2.2 6RA70 型直流调速器在热连轧机 中的应用	203
7.5.2 典型现场总线介绍	182	8.3 变频器在恒压供水系统 中的应用	206
7.5.3 Profibus 现场总线概述	183	8.4 机械手关节伺服控制系统	211
7.5.4 Profibus-DP 协议	186	8.5 运动控制器在纸箱切割打样 机中的应用	216
7.5.5 Profibus-DP 的数据通信	188	参考文献	229
7.5.6 Profibus-DP 的交叉通信方式	189		
7.5.7 Profibus-DP 的技术优势	190		
7.6 数字式运动控制系统的设计 内容和流程	190		
本章小结	191		
思考题与习题	192		
第 8 章 运动控制系统应用实例	193		

第 1 章 绪 论



本章教学要求与目标

- 熟悉运动控制系统的组成和类型
- 了解运动控制系统的历史与发展
- 掌握运动控制系统转矩控制规律

1.1 运动控制系统的组成和类型

自动控制系统 (Automatic Control Systems) 是在无人直接参与下可使生产过程或其他过程按期望规律或预定程序进行的控制系统。自动控制系统是实现自动化的主要手段。

运动控制系统就是以运动机构作为控制对象的自动控制系统。运动控制系统组成框图如图 1-1 所示。

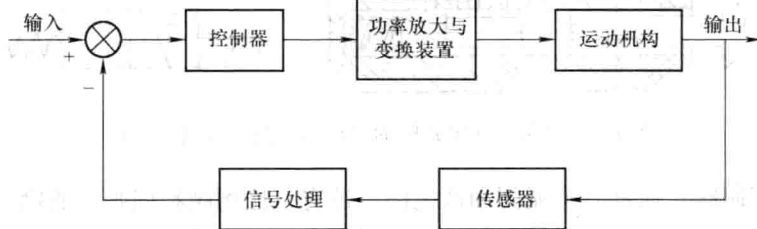


图 1-1 运动控制系统组成框图

控制器产生使运动控制系统性能满足要求的控制策略和控制信号，功率放大与变换装置将控制信号放大到足以推动执行元件动作且进行所需的能量变换，传感器将系统输出的速度或位置信号检测出来经转换和处理（包括滤波、整形、电压匹配、极性转换、A/D 转换等）后得到反馈信号，与给定输入信号比较后送给控制器决策运算。

运动控制系统从能量提供方式和传动方式来分类，主要有液压传动系统、气压传动系统和电气传动系统 3 种基本类型。

1.1.1 液压传动系统

液压传动是利用密封工作容积内液体的压力能完成由原动机向工作装置的能量或动力的传递、转换与控制。其主要的工作原理是流体力学的帕斯卡原理。

液压传动系统除了以液压油作为传动介质外，一般还包括动力元件、执行元件、控制元件以及一些辅助元件。典型液压传动系统的组成如图 1-2 所示。

液压传动的动力元件主要是指原动机和液压泵。原动机是指能够将液压油抽送到液压装置的动力机械，一般来讲主要以电动机为主。液压泵是将机械能转换为压力能，是整个系统

的动力源泉。液压泵有柱塞泵、齿轮泵、叶片泵等多种类型。

液压传动的执行元件主要包括液压马达和液压缸，它们可以将液压能转化成机械能。

液压传动的控制元件用来对液压系统的压力、执行机构的运动速度和运动方向实行控制，分为以下3类：

1) 方向控制阀：包括单向阀和换向阀。单向阀允许液体在管路中单方向流动，反向时不通。换向阀是一种利用阀芯和阀体相对运动来改变液压油液流动方向的控制阀，同时还兼有接通或关闭油路的作用。其中，电磁换向阀使用电气控制，信号传递方便，应用范围比较广泛。图 1-3 所示为一种二位三通电磁阀的结构示意图及其图形符号。

2) 压力控制阀：主要包括溢流阀、减压阀和顺序阀。

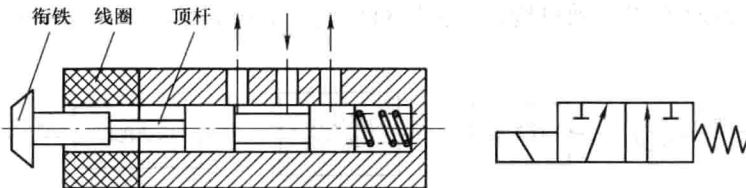


图 1-3 二位三通电磁阀的结构示意图及其图形符号

3) 流量控制阀：通常有节流阀和调速阀。还有，比例阀和伺服阀的输出流量可以受输入电流控制，数字阀可直接与计算机接口，不需要 D/A 转换器。

液压传动的辅助元件如油箱、滤油器、油管、密封装置等分别起储油、过滤、输送和防漏保压等作用。

液压传动的优点如下：

- 1) 能方便地实现无级调速，调速范围大。
- 2) 运动传递平稳、均匀。
- 3) 易于获得很大的力和力矩。
- 4) 单位功率的体积小，重量轻，结构紧凑，反应灵敏。
- 5) 易于实现自动化。
- 6) 易于实现过载保护，工作可靠。
- 7) 自动润滑，元件寿命长。
- 8) 液压元件易于实现通用化、标准化、系列化，便于设计制造和推广使用。

液压传动的缺点如下：

- 1) 由于液压传动的工作介质是液压油，所以无法避免会有泄漏，效率降低，污染环境。
- 2) 温度对液压系统的工作性能影响较大。

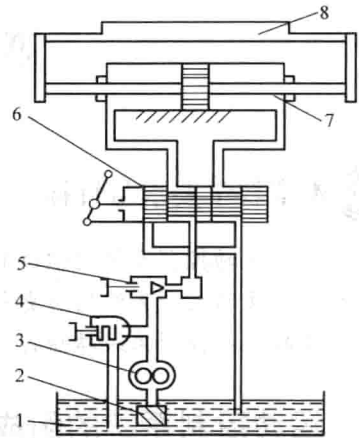


图 1-2 典型液压传动系统的组成

1—油箱 2—过滤器 3—液压泵 4—溢流阀
5—节流阀 6—换向阀 7—液压缸 8—工作台

- 3) 传动效率低。
- 4) 空气的混入会引起工作不良。
- 5) 为了防止泄漏以及满足某些性能上的要求, 液压元件的制造精度要求高, 使成本增加。
- 6) 液压设备故障原因不易查找。

由于液压传动有许多突出的优点, 因此它的应用非常广泛, 如一般工业用的塑料加工机械、压力机械、机床等, 行走机械中的工程机械、建筑机械、农业机械、汽车等, 钢铁工业用的冶金机械、提升装置、轧辊调整装置等; 土木水利工程用的防洪闸门及堤坝装置、河床升降装置、桥梁操纵机构等, 发电厂涡轮机调速装置、核发电厂等, 船舶用的甲板起重机械(绞车)、船头门、舱壁阀、船尾推进器等, 特殊技术用的巨型天线控制装置、测量浮标、升降旋转舞台等, 军事工业用的火炮操纵装置、船舶减摇装置、飞行器仿真、飞机起落架的收放装置和方向舵控制装置等。

随着机械制造技术、自动化技术、计算机技术的发展, 液压技术也得到了很大的发展, 并渗透到各个工业领域中去。当前液压技术正向高压、高速、大功率、高效、低噪声、经久耐用、高度集成化的方向发展。同时, 新型液压元件和液压系统的计算机辅助设计、计算机辅助测试、计算机直接控制, 以及计算机实时控制技术、机电一体化技术、计算机仿真和优化设计技术、可靠性技术、污染控制技术等方面, 也是当前液压传动及控制技术发展和研究的方向。

1.1.2 气压传动系统

气压传动的工作原理是: 把由电动机或其他原动机的机械能转换成有压气体的压力能, 通过控制元件控制, 输送给执行元件, 再还原成机械能。

典型的气压传动系统由以下 4 个部分组成:

1) 气压发生装置: 简称气源装置, 其作用是供给气动系统一定压力、一定流量, 干净、干燥的压缩空气。主要设备有空气压缩机、冷却器、储气罐等。

2) 控制元件: 用于控制压缩空气的流量、压力、方向, 以保证执行元件具有一定的输出力和速度, 并按设计的程序正常工作。主要元件有压力阀、流量阀、方向阀等。

3) 执行元件: 起能量转换作用, 把压缩空气的压力能转化为工作装置的机械能, 如由气缸产生直线往复运动, 由摆动气缸和气马达产生回转摇摆式运动和旋转运动等。

4) 辅助元件: 用于辅助保证气动系统正常工作的一些装置, 如过滤器、干燥器、油雾器、消声器、分水滤油器以及各种管路附件等。

气压传动系统的一般组成如图 1-4 所示。

气压传动的优点如下:

- 1) 气动装置结构简单、轻便,

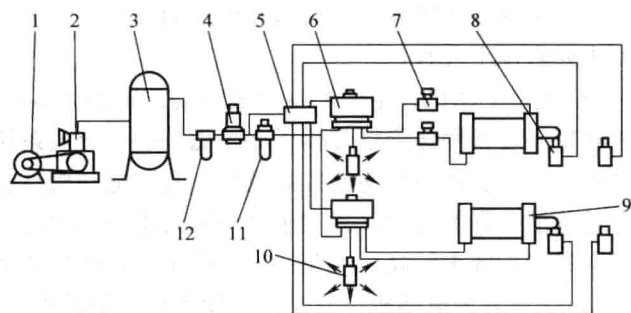


图 1-4 气压传动系统的一般组成

- 1—电动机 2—空气压缩机 3—储气罐 4—压力控制阀
5—逻辑元件 6—方向控制器 7—流量控制阀 8—机控阀
9—气缸 10—消声器 11—油雾器 12—空气过滤器

安装维护简单；压力等级低，故使用安全。

2) 工作介质是空气，取之不尽、用之不竭，又不花钱。排气处理简单，不污染环境，成本低。

3) 输出力及工作速度的调节非常容易。气缸工作速度一般为(50 ~ 500)mm/s，比液压和电气方式的动作速度快。

4) 可靠性高，使用寿命长。电器元件的有效动作约为数百万次，而较好的电磁阀的寿命大于3000万次，小型阀超过2亿次。

5) 利用空气的可压缩性，可储存能量，实现集中供气；可短时间释放能量，以获得间歇运动中的高速响应；可实现缓冲，对冲击负载和过负载有较强的适应能力。在一定条件下，可使气动装置有自保护能力。

6) 全气动控制具有防火、防爆、耐潮的能力。与液压方式比较，气动方式可在高温场合使用。

7) 由于空气流动压力损失小，压缩空气可集中供气，较远距离输送。

气压传动的缺点如下：

1) 由于空气具有压缩性，气缸的动作速度易受负载的变化影响。当然，采用气液联动方式可以克服这一缺陷。

2) 气缸在低速运动时，由于摩擦力占推力的比例比较大，气缸的低速稳定性不如液压缸。

3) 虽然在许多应用场合气缸的输出力能满足工作要求，但其输出力比液压缸小。

气动系统的主要应用场合如下：

1) 要求无异味、无油污的轻工业生产的场合，如食品、服装、制鞋、纸张、包装等。

2) 粉尘较大、温度较高或较低以及潮湿的场合，如铸造、拌粉、玻璃、陶瓷、冷饮、灌酒等。

3) 有一定的动作程序要求，但又不是非常复杂的专用动作程序场合，如注塑机自动取件机械手等。

4) 凡要求功率不大、转速较高，又要瞬时反转的场合，如采用气马达的牙钻。

1.1.3 电气传动系统

电气传动系统即采用电力拖动的运动控制系统。它采用电动机作为执行元件。电动机的类型主要有以下几种。

1) 直流电动机：定子产生励磁磁场，转子（电枢）绕组通过电刷和换向器引入直流电产生转矩。定子励磁磁场和转子电枢磁场的正交关系使得其输出转矩与输入电压有明确的线性关系，便于实现高性能的控制效果。直流电动机具有调速范围广且平滑，起动、制动转矩大，过载能力强等优点，常用于对调速要求较高的场合。但由于电刷换向器的存在，使得设备成本和维护成本较高，火花产生电磁干扰，使用寿命也受到影响。

2) 交流异步电动机：它是目前使用最广泛的电动机。其定子绕组通入交流电产生旋转磁场，转子中闭合导体受到定子旋转磁场切割而产生感应电流和感应磁场，转子受到定子、转子合成磁场的电磁力作用而转动，转子速度小于定子旋转磁场的速度。异步电动机结构简单，维护方便，成本低，但以前调速困难。随着电力电子技术和自动控制技术的发展，现在

交流调速技术已日臻成熟,变频调速器已大量应用。

3) 同步电动机:其定子结构与异步电动机相似,转子结构则有隐极和凸极两种形式,有独立的直流励磁或用永久磁钢励磁,转子转速恒等于气隙旋转磁场的转速。它具有调速范围宽、功率因数高、动态响应快等优点,其失步与起动困难问题依靠变频技术也已解决。

4) 步进电动机:它是一种将电脉冲转化为角位移的执行元件,它的旋转是以固定的角度(称为步距角)一步一步进行的,其特点是没有误差积累,广泛应用于各种开环控制系统。

5) 开关磁阻电动机(SRD):结构和原理与传统交直流电动机有着根本区别,转子没有绕组也没有永磁体,定子极具有集中绕组,每对定子极绕组分时分别通电励磁。其主要特点是电机结构紧凑牢固,适合于高速运行,并且驱动电路简单、成本低、性能可靠,在宽广的转速范围内效率都比较高,而且可以方便地实现四象限控制。开关磁阻电动机的最大缺点是转矩脉动大,噪声大。

各种电动机均需相应的驱动器提供要求的电源,还要有控制器根据指令的要求产生控制策略,使运动控制系统的稳、动态指标满足规定要求。

电气传动系统由于具有控制方便、体积紧凑、噪声小、节能,容易实现自动化、智能化、网络化等优点,已成为运动控制系统的主流。

现代运动控制系统以各类电动机及所拖动的机构为控制对象,以计算机和其他电子装置为控制手段,以电力电子装置为弱电控制强电的纽带,以自动控制原理和信息处理理论为理论基础,以计算机数字仿真和计算机辅助设计(CAD)为研究和开发的工具。由此可见,现代运动控制技术已成为电机学、电力电子技术、微电子技术、计算机控制技术、控制理论、信号检测与处理技术等多门学科相互交叉的综合性学科。

本课程主要研究电气传动运动控制系统的原理,介绍运动控制系统的设计方法和工程应用实例。

1.2 运动控制系统的发展历史

液压传动的运动控制系统历史比较悠久。如果从17世纪中叶帕斯卡提出静压的传递原理算起,液压传动已有三百多年的历史,但真正用于工业生产是在19世纪。20世纪初,美国人Janney将矿物油引入液体传动作为传动介质,并设计制造了第一台轴向柱塞泵及其液压驱动装置,改善了液压元件的摩擦、润滑和泄漏问题,提高了液压系统工作效率。在第二次世界大战期间,由于武器工业的需要,机械制造工业得到很大的发展,在车辆、舰船、飞行器、兵器设备上,很多都采用了反应快、动作准、功率大的液压传动的运动控制装置,推动了液压元件功率密度和控制性能的提高以及液压传动运动控制系统的发展。战后,液压传动技术迅速转向民用领域,在机床、工程机械、汽车等行业逐步推广,并得到了长足的发展。

气压传动技术出现在19世纪初,1829年出现了多级空气压缩机,为气压传动的发展创造了条件,使气压传动的运动控制系统有了实现的基础。1871年,气压风镐在采矿业上开始应用。美国人G.威斯汀豪斯在1868年发明了气动制动装置并于1872年应用于铁路车辆的制动,收到很好的效果。进入20世纪后,随着武器、机械、化工等工业的发展,气动元

件和气压传动的运动控制系统得到广泛的应用。在 1930 年出现了低压气动调节器，20 世纪 50 年代研制成功用于导弹尾翼控制的高压气动伺服机构。20 世纪 60 年代，射流和气动逻辑元件的发明使气压传动更加如虎添翼，在工程上有了很大发展。

电气传动（电力拖动）的运动控制系统是在电机发明之后发展起来的。从 1831 年法拉第发现电磁感应定律、1832 年斯特金发明直流电动机到 1886 年特斯拉发明两相交流电动机、1888 年多里沃·多勃罗沃尔斯基制成三相感应电动机，电力传动的运动控制系统开始提上日程并不断得到发展。由于直流电动机出现较早，所以 19 世纪 80 年代以前，直流电动机作为执行元件的电气传动是唯一的电气传动方式。在出现了交流感应电动机后，交流电气传动在工业上逐步展开。但是由于对交流电动机的运动控制的相应理论还没有进行深入的研究，因此在工业领域形成了直流调速和伺服系统一统天下的局面，而交流电动机只是用在大功率驱动场合。在这个阶段，直流电机的运动控制系统不断发展：由最早的旋转变流机组控制发展为静止变流装置（汞整流器），采用磁放大器控制到用晶闸管可控整流装置，采用模拟调节器再到后来的全控开关型 PWM 电路，采用数字控制。对调节器的设计也有了一套实用的工程设计方法，整个系统性能不断得到提高。不过，直流电动机存在制造工艺复杂、成本高、维护麻烦等固有弱点。相比较而言交流电动机具有结构简单、成本低等诸多优点，但其动态数学模型具有非线性多变量强耦合的性质，比直流电动机复杂得多。早期交流调速系统的控制方法是基于交流电动机稳态数学模型的，其动态性能无法与直流调速系统相比。20 世纪 70 年代，德国工程师 F. Blaschke 和 W. Flöter 等人提出“感应电机磁场定向控制原理”，美国 P. C. Custman 和 A. A. Clark 提出“定子电压坐标变换控制”，这形成了矢量控制的基本设想。1980 年日本难波江章教授等人提出转差型矢量控制，进一步简化了系统结构。1980 年，德国 W. Leonhard 教授用微机实现矢量控制系统的数字化，大大简化了系统的硬件结构，经过不断改进和完善，形成了现在的高性能矢量控制系统。1985 年，德国鲁尔大学 Depenbrock 教授提出直接转矩控制，并于 1987 年把它推广到弱磁调速范围，其控制结构简单，是一种高动态响应的交流调速系统。目前，随着电力电子技术、交流电机理论和控制理论的快速发展，交流电动机运动控制系统的成本逐步降低，性能逐步提高，直流调速系统正在被其取代。另外，其他类型的电气传动运动控制系统也崭露头角，步进电动机和开关磁阻电动机的运动控制系统在中小功率场合占有一定的份额，同步电动机运动控制系统在大中功率场合也有相当的优势，这些都已成为引人注目的新技术。

另一方面，以上 3 种传动方式相互配合、取长补短，形成了很多混合式的运动控制系统。电-液伺服系统兼有液压传动的输出功率大、反应速度快的优点和电气控制的操作性控制性良好、自动化程度高的优点；电-气开关/伺服系统成本低、对环境要求不高且易于计算机控制，在实现气缸在目标位置定位等方面的控制上显示了特有的控制效果和功能；气-液混合的控制系统可以在很大程度上改善气-液系统的性能。

当前，随着控制理论的不断发展和数字、网络技术的广泛应用，运动控制技术与信息技术相互融合，新型的控制方法和手段正在不断被应用到运动控制系统的各个方面，如模糊控制、滑模控制、鲁棒控制、专家系统、神经网络控制、远程网络控制等。另一方面，先进的运动控制系统除在传统工业生产上得到普遍应用外，正进入新能源（如风力发电、电动汽车）等各个领域。

1.3 运动控制系统的转矩控制规律

运动控制系统的任务就是控制电动机的转速或转角，对于直线电动机则是控制速度或位移。根据牛顿力学定律，运动控制系统的旋转运动基本方程式为

$$T_e - T_L - D\omega_m - K\theta_m = J \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (1-1)$$

式中 T_e ——电磁转矩 ($N \cdot m$)；
 T_L ——负载转矩 ($N \cdot m$)；
 D ——阻转矩阻尼系数；
 K ——扭转弹性转矩系数；
 ω_m ——转子的机械角速度 (rad/s)；
 θ_m ——转子的机械转角 (rad)；
 J ——机械转动惯量 ($kg \cdot m^2$)。

若忽略阻尼转矩和扭转弹性转矩，则此运动方程式可简化为

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (1-2)$$

在工程计算中，通常用式 (1-3) 代替式 (1-2) 的第一行：

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-3)$$

式中 GD^2 ——飞轮力矩 ($N \cdot m^2$)， $GD^2 = 4gJ$ ；

n ——转子的机械转速 (r/min)， $n = \frac{60\omega_m}{2\pi}$ 。

式 (1-3) 表明，运动控制系统的转速变化（即加速度）由电动机的电磁转矩与生产机械的负载转矩之间的关系决定。

- 1) 当 $T_e = T_L$ 时， $\frac{dn}{dt} = 0$ ，电动机以恒定转速旋转或静止不动，即系统处于静态或稳态。
- 2) 当 $T_e > T_L$ 时， $\frac{dn}{dt} > 0$ ，系统处于加速状态。
- 3) 当 $T_e < T_L$ 时， $\frac{dn}{dt} < 0$ ，系统处于减速状态。

可见，要控制转速和转角，唯一的途径就是控制电动机的电磁转矩 T_e ，转矩控制是运动控制的根本问题。

为了有效地控制电动机的电磁转矩，应充分利用铁心，在一定的电流作用下尽可能产生最大的电磁转矩，以加快系统的过渡过程，必须在控制转矩的同时也控制磁通（或磁链）。

因为当磁通（或磁链）很小时，即使电枢电流（或交流电动机定子电流的转矩分量）很大，实际转矩仍然很小。何况由于受电动机额定参数限制，电枢电流（或定子电流）总是有限的。因此，电气传动运动控制系统应当同时重视磁链控制与转矩控制。通常，在基速（额定转速）以下采用恒磁通（或磁链）控制，而在基速以上采用弱磁控制。

本章小结

本章作为学习运动控制系统的预备知识，首先介绍了运动控制系统的3种类型：液压传动系统、气压传动系统和电气传动系统，并分析了它们各自的优缺点；然后介绍了运动控制系统的发展历史，使大家对本学科的来源、现状和未来趋势有所了解；最后阐述了动力学转矩控制规律，指明了运动控制的本质和方法。

思考题与习题

- 1-1 简述运动控制系统的类型及其优缺点。
- 1-2 常用的液压元件有哪些？
- 1-3 常用的气动元件有哪些？
- 1-4 试写出旋转运动的动力学方程式。

第 2 章 开环运动控制系统



本章教学要求与目标

- 掌握调速方法和性能指标
- 了解各种可控直流电源
- 掌握开环直流调速系统的组成原理和分析方法

2.1 直流电动机拖动的运动控制系统的基本问题

2.1.1 直流调速的主要方法

根据直流电动机的基础知识可知，直流电动机的稳态转速与电机其他参量的关系为

$$n = \frac{U - IR}{K_e \Phi} \quad (2-1)$$

式中 n ——转速 (r/min)；

U ——电枢电压 (V)；

I ——电枢电流 (A)；

R ——电枢回路总电阻 (Ω)；

Φ ——励磁磁通 (Wb)；

K_e ——由电动机结构决定的电动势常数。

从式 (2-1) 可以看出，直流电动机的调速方法有以下 3 种：

- 1) 改变电枢回路的电阻 R ——电枢回路串电阻调速。只能有级调速，且不易构成自动控制系统，当电动机低速运行时，电枢外串电阻上的功耗大，系统效率低，较少采用。
- 2) 调节电枢电压 U ——降压调速。可以构成无级调速，且调速范围大、控制性能好。
- 3) 减弱励磁磁通 Φ ——弱磁调速。可以构成无级调速，但只能在电动机额定转速以上做小范围升速，一般只是配合调压方案。

由于现代电力电子技术的发展，使得直流电源输出电压能够非常容易地实现连续可调，因此降压调速是直流调速系统的主导方案。

2.1.2 转速控制的要求和调速性能指标

运动控制系统在对转速进行控制时，一般来讲主要有以下 3 个方面要求。

- 1) 调速：在一定的转速范围内，可以连续地调节转速快慢。
- 2) 稳速：可以在系统所要求的转速精度上稳定运行，在各种扰动作用下不允许有过大的转速波动。
- 3) 加、减速：经常起、制动或频繁正、反转的设备要求过渡过程尽量短，以满足系统