



普通高等教育创新型人才培养规划教材

# 机电传动与控制(第2版)

JIDIAN CHUANDONG YU KONGZHI

王 丰 琚立颖 杨 杰 王鑫阁 施政达 编著



配有课件



北京航空航天大学出版社  
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

外借



普通高等教育创新型人才培养规划教材

# 机电传动与控制

## (第2版)

王 丰 琚立颖

杨 杰 王鑫阁 施政达 编著

北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书以机电传动和电气控制为两条主线编写而成,主要包括绪论、机电传动控制系统中的控制电动机、低压电器及其选择、继电接触器控制、可编程控制器、交流电动机无级调速控制和机电传动控制系统设计,书后附有实用技术资料,包括控制电动机、常用低压电器元件和 MM 440 变频器的主要技术数据、S7-200 系列 PLC 重要信息等。

本书可作为高等院校机械设计制造及其自动化专业和机械电子工程专业的教材,也可供从事电气控制技术工作的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

机电传动与控制 / 王丰等编著. -- 2 版. -- 北京 :  
北京航空航天大学出版社, 2017.7  
ISBN 978-7-5124-2460-9

I. ①机… II. ①王… III. ①电力传动控制设备—高等学校—教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 162615 号

版权所有,侵权必究。

### 机电传动与控制

(第 2 版)

王 丰 琚立颖

杨 杰 王鑫阁 施政达 编著

责任编辑 金友泉

\*

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(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: [goodtextbook@126.com](mailto:goodtextbook@126.com) 邮购电话:(010)82316936

北京兴华昌盛印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1 092 1/16 印张:17.25 字数:442 千字

2017 年 7 月第 2 版 2017 年 7 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-2460-9 定价:36.00 元

# 前 言

距 2013 年出版《机电传动与控制》已有 4 年。其间,该书承蒙多所兄弟院校同仁们的厚爱而被广泛采用,作者心存万分感念。结合多年来的教学实践和科研经历,作者认为有必要纳入 S7-200 PLC 关于高速计数器、脉宽调制、步进电动机定位控制等方面的高级应用示例,故有了此次再版。除此之外,还对教材的体系结构做了较大幅度的调整,从而使其专业条理性更加清晰。

本书共分为 6 章和附录。第 1 章介绍机电传动控制的目的、任务及其发展,以及机电传动控制系统的组成和分类;第 2 章介绍机电传动控制系统中的常用控制电动机,如直流伺服电动机、交流伺服电动机、步进电动机的工作原理及其基本控制方法;第 3 章介绍常用低压电器元件(包括一些新型元器件)的基本结构、工作原理、主要技术参数、选用方法以及继电器接触器控制的基本控制线路、继电器接触器控制系统的设计方法和设计实例;第 4 章以德国西门子公司的 S7-200 系列 PLC 为例介绍 PLC 的基本知识以及 S7-200 PLC 编程软件、S7-200 PLC 常用指令和高级应用(包括高速计数器、脉宽调制、步进电动机定位控制)、PLC 控制系统的设计原则、基本设计方法和设计实例;第 5 章介绍交流电动机无级调速控制,并以西门子公司 MM 440 变频器为例介绍变频器的基本结构和功能、变频器的选用方法以及变频器的参数设定;第 6 章介绍机电传动控制系统设计的基本原则和一般步骤,并通过设计实例,详细介绍机电传动控制系统的设计内容和设计方法。从实用角度出发,书后附录部分提供了一些经过作者精心挑选的技术资料,包括日本三菱公司交流伺服电动机和德国百格拉公司三相混合式步进电动机的技术规格和特性曲线、常用电器元件技术数据、S7-200 PLC 模块接线图、S7-200 PLC 特殊存储器(SM)标志位含义及其功能、S7-200 PLC SIMATIC 指令集、MM440 变频器技术数据等。为了便于读者自学,每章后均附有习题和思考题。书中图形符号和文字符号采用新的国家标准 GB/T 4728—2005~2008 及 GB7159—87。附录部分包括附录 A 到附录 D,从附录中可以查找 MELSERVOJ3 交流伺服系统技术数据、德国百格拉公司步进电动机技术数据、常用电器元件等的技术数据。

参加本书编著工作的有王丰、琚立颖、杨杰、王鑫阁和施政达。全书由王丰统稿和定稿,除了第 1 章由王丰和杨杰、第 5 章由王丰和琚立颖共同编著、西门子 S7-200 PLC 高级应用示例由王鑫阁和施政达增补外,其余章节由王丰完成。本

书的出版得到了北京航空航天大学出版社的大力支持,唐宇轩、何磊、魏鹏、彭辉辉、李峥、史浩楠、刘绍川等同学为本书的文字录入、图表制作做了大量工作,在此谨致衷心的感谢。

本书参考了参考文献中的部分内容和图表,书中部分技术资料取材于互联网,作者在此对其作者一并表达谢意。由于机电传动控制涉及多个学科,限于作者的学识水平,书中不妥之处未可避免,敬请使用本书的教师和读者提出宝贵意见。

作 者

2017年5月

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 第 1 章 绪 论              | 1  |
| 1.1 机电传动控制的目的和任务       | 1  |
| 1.2 机电传动控制的发展          | 1  |
| 1.2.1 机电传动的发展          | 1  |
| 1.2.2 机电传动控制系统的发展      | 2  |
| 1.3 机电传动控制系统的组成和分类     | 4  |
| 1.3.1 机电传动控制系统的组成      | 4  |
| 1.3.2 机电传动控制系统的分类      | 4  |
| 习题与思考题                 | 5  |
| 第 2 章 机电传动控制系统中的控制电动机  | 6  |
| 2.1 伺服电动机              | 6  |
| 2.1.1 直流伺服电动机及其控制      | 6  |
| 2.1.2 交流伺服电动机及其控制      | 9  |
| 2.2 步进电动机              | 12 |
| 2.2.1 步进电动机的分类和工作原理    | 12 |
| 2.2.2 步进电动机的特点         | 15 |
| 2.2.3 步进电动机的运行特性和性能指标  | 16 |
| 2.2.4 步进电动机的驱动与控制      | 17 |
| 习题与思考题                 | 24 |
| 第 3 章 继电器接触器控制         | 25 |
| 3.1 常用低压电器             | 25 |
| 3.1.1 开关电器             | 25 |
| 3.1.2 主令电器             | 29 |
| 3.1.3 保护电器             | 33 |
| 3.1.4 控制电器             | 38 |
| 3.1.5 信号电器             | 44 |
| 3.2 电气原理图              | 48 |
| 3.2.1 电气原理图的绘制原则       | 48 |
| 3.2.2 电气原理图中的图形符号和文字符号 | 48 |
| 3.3 基本控制线路             | 54 |
| 3.3.1 异步电动机的启动控制线路     | 54 |

|       |                               |     |
|-------|-------------------------------|-----|
| 3.3.2 | 异步电动机的正反转控制线路 .....           | 59  |
| 3.3.3 | 异步电动机的制动控制线路 .....            | 61  |
| 3.3.4 | 其他基本控制线路 .....                | 65  |
| 3.4   | 继电器接触器控制系统设计 .....            | 68  |
| 3.4.1 | 继电器接触器控制系统设计的基本原则 .....       | 68  |
| 3.4.2 | 电器元件的选择 .....                 | 72  |
| 3.4.3 | 继电器接触器控制系统设计举例 .....          | 83  |
|       | 习题与思考题 .....                  | 86  |
| 第4章   | 可编程控制器 .....                  | 88  |
| 4.1   | PLC 基础 .....                  | 88  |
| 4.1.1 | PLC 的产生和发展 .....              | 88  |
| 4.1.2 | PLC 的分类 .....                 | 89  |
| 4.1.3 | PLC 的编程语言 .....               | 91  |
| 4.1.4 | PLC 控制与继电器接触器控制的区别 .....      | 93  |
| 4.1.5 | PLC 的基本组成 .....               | 94  |
| 4.1.6 | PLC 的工作过程 .....               | 96  |
| 4.2   | S7-200 系列 PLC .....           | 98  |
| 4.2.1 | S7-200 PLC 的模块 .....          | 98  |
| 4.2.2 | S7-200 PLC 的存储器单元 .....       | 103 |
| 4.2.3 | S7-200 PLC 的寻址方式 .....        | 105 |
| 4.2.4 | S7-200 PLC 的地址分配 .....        | 108 |
| 4.2.5 | S7-200 PLC 的编程软件 .....        | 109 |
| 4.3   | S7-200 PLC 指令 .....           | 110 |
| 4.3.1 | S7-200 PLC 的基本指令 .....        | 110 |
| 4.3.2 | S7-200 PLC 的数据处理指令 .....      | 119 |
| 4.3.3 | S7-200 PLC 的数学运算指令 .....      | 125 |
| 4.3.4 | S7-200 PLC 的程序控制指令 .....      | 126 |
| 4.3.5 | S7-200 PLC 的高速处理指令 .....      | 132 |
| 4.3.6 | S7-200 PLC 的 PID 回路控制指令 ..... | 137 |
| 4.4   | S7-200 PLC 高级应用示例 .....       | 142 |
| 4.4.1 | 高速计数器的应用示例 .....              | 142 |
| 4.4.2 | 脉宽调制的应用示例 .....               | 146 |
| 4.4.3 | 步进电动机定位控制的应用示例 .....          | 150 |
| 4.5   | PLC 控制系统设计 .....              | 155 |
| 4.5.1 | PLC 控制系统设计的基本步骤 .....         | 155 |
| 4.5.2 | PLC 控制系统设计的主要内容 .....         | 157 |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 4.4.3 PLC 控制系统设计举例 .....              | 161        |
| 习题与思考题 .....                          | 168        |
| <b>第 5 章 电动机无级调速控制</b> .....          | <b>171</b> |
| 5.1 电动机调速的概念和指标 .....                 | 171        |
| 5.1.1 电动机调速的概念 .....                  | 171        |
| 5.1.2 调速的性能指标 .....                   | 172        |
| 5.2 异步电动机无级调速控制 .....                 | 173        |
| 5.2.1 异步电动机调速系统的基本类型 .....            | 174        |
| 5.2.2 异步电动机变压调速系统 .....               | 175        |
| 5.2.3 绕线式异步电动机串级调速系统 .....            | 177        |
| 5.2.4 鼠笼式异步电动机变频调速系统 .....            | 179        |
| 5.3 变频器 .....                         | 183        |
| 5.3.1 变频器的分类与基本结构 .....               | 183        |
| 5.3.2 正弦波脉宽调制 (SPWM) 变频器 .....        | 184        |
| 5.3.3 变频器的使用与选择 .....                 | 186        |
| 5.3.4 西门子 MM440 通用型变频器 .....          | 190        |
| 习题与思考题 .....                          | 196        |
| <b>第 6 章 机电传动控制系统设计</b> .....         | <b>197</b> |
| 6.1 机电传动控制系统设计的基本原则 .....             | 197        |
| 6.2 机电传动控制系统设计的一般步骤和主要内容 .....        | 197        |
| 6.3 机电传动控制系统设计要点 .....                | 198        |
| 6.4 机电传动控制系统设计实例 .....                | 202        |
| 习题与思考题 .....                          | 214        |
| <b>附 录</b> .....                      | <b>215</b> |
| 附录 A 控制电动机技术数据 .....                  | 215        |
| A.1 日本三菱 MELSERVO J3 交流伺服系统技术数据 ..... | 215        |
| A.2 德国百格拉公司步进电动机技术数据 .....            | 230        |
| 附录 B 常用电器元件主要技术数据 .....               | 234        |
| B.1 接触器主要技术数据 .....                   | 234        |
| B.2 电磁式继电器主要技术数据 .....                | 237        |
| B.3 热继电器主要技术数据 .....                  | 238        |
| B.4 时间继电器主要技术数据 .....                 | 239        |
| B.5 主令电器 .....                        | 240        |
| B.6 熔断器主要技术数据 .....                   | 244        |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| B.7 断路器主要技术数据 .....           | 245 |
| 附录 C S7-200 系列 PLC 技术资料 ..... | 247 |
| C.1 S7-200 PLC 模块接线图 .....    | 247 |
| C.2 特殊存储器(SM)标志位及其功能 .....    | 255 |
| C.3 SIMATIC 指令集 .....         | 260 |
| 附录 D MM440 变频器技术规格 .....      | 263 |
| 参考文献 .....                    | 267 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 机电传动控制的目的和任务

机电传动也称电力拖动或电力传动,是指以电动机为原动机驱动生产机械的系统的总称。其目的是将电能转变成机械能,实现生产机械的启动/停止和速度调节,以满足生产工艺过程的要求,保证生产过程正常进行。因此,机电传动控制包括用于拖动生产机械的电动机以及电动机控制系统两大部分。

在现代化生产中,生产机械的先进性和电气自动化程度反映了工业生产发展的水平。现代化机械设备和生产系统已不再是传统的单纯机械系统,而是机电一体化的综合系统。机电传动控制已成为现代化机械的重要组成部分。机电传动控制的任务从狭义上讲,是通过控制电动机驱动生产机械,实现产品数量的增加、产品质量的提高、生产成本的降低、工人劳动条件的改善以及能源的合理利用;而从广义上讲,则是使生产机械设备、生产线、车间乃至整个工厂实现自动化。

随着现代化生产的发展,生产机械或生产过程对机电传动控制的要求越来越高。例如:一些精密机床要求加工精度达百分之几毫米,甚至几微米;为了保证加工精度和粗糙度,重型镗床要求在极低的速度下稳定进给,因此要求系统的调速范围很宽;轧钢车间的可逆式轧机及其辅助机械操作频繁,要求在不到 1 s 的时间内就能完成正反转切换,因此要求系统能够快速启动、制动和换向;对于电梯等提升机构,要求启停平稳,并能准确地停止在给定的位置上;对于冷、热连轧机或造纸机,要求各机架或各部分之间保持一定的转速关系,以便协调运转;为了提高效率,要求对由数台或数十台设备组成的自动生产线实行统一控制和管理。上述这些要求都要依靠机电传动控制来实现。

随着计算机技术、微电子技术、自动控制理论、精密测量技术、电动机和电器制造业及自动化元件的发展,机电传动控制正在不断地创新与发展,如直流或交流无级调速控制系统取代了复杂笨重的变速箱系统,简化了生产机械的结构,使生产机械向性能优良、运行可靠、体积小、质量轻、自动化方向发展。因此,在现代化生产中,机电传动控制具有极其重要的地位。

## 1.2 机电传动控制的发展

### 1.2.1 机电传动的发展

机电传动及其控制系统总是随着社会生产的发展而发展的。20 世纪初,由于电动机的出现,使得机床的传动方式发生了深刻的变革,电动机替代了蒸汽机。而后,它的发展大体上经历了成组拖动、单电机拖动、多电机拖动和交、直流无级调速四个阶段。

### 1. 成组拖动

成组拖动是用一台电动机拖动一根天轴,然后再由天轴通过传递带轮和传递带分别拖动各生产机械,这种传动方式生产效率低,劳动条件差,一旦电动机发生故障,将造成成组的生产机械停车。

### 2. 单电机拖动

单电机拖动是用一台电动机拖动一台生产机械。较之成组拖动,单电机拖动简化了传动机构,缩短了传动路线,提高了传动效率,至今仍有一些中小型通用机床采用单电机拖动。

### 3. 多电机拖动

多电机拖动是指一台生产机械的每一个运动部件分别由一台专门的电动机拖动,例如龙门刨床的刨台、左右垂直刀架与侧刀架、横梁及其夹紧机构,均分别由一台电动机拖动,这种传动方式不仅大大简化了生产机械的传动机构,而且控制灵活,为生产机械的自动化提供了有利的条件,所以现代化机电传动基本上均采用这种传动形式。

### 4. 交、直流无级调速

电气无级调速具有可灵活选择最佳切削速度和极大简化机械传动结构的优点。由于直流电动机具有良好的启动、制动和调速性能,可以很方便地在宽范围内实现平滑无级调速,所以20世纪30年代以后直流调速系统在重型和精密机床上得到广泛应用。20世纪60年代以后,由于大功率晶闸管的问世以及大功率整流技术和大功率晶体管的发展,晶闸管直流电动机无级调速系统和采用脉宽调制的直流调速系统获得广泛应用。20世纪80年代以后,由于半导体交流技术的发展,使得交流电动机调速系统有突破性进展。交流调速有许多优点:单机容量和转速可大大高于直流电动机;交流电动机无电刷与换向器,易于维护,可靠性高。与直流电动机相比,交流电动机还具有体积小、质量轻、制造简单、坚固耐用等优点。目前,交流调速已突破关键性技术,从实用阶段进入了扩大应用、系列化的新阶段。以鼠笼式交流伺服电动机为对象的矢量控制技术,是近年来新兴的控制技术,它能使交流调速具有直流调速的优越调速性能。交流变频调速器、矢量控制伺服单元及交流伺服电动机已日益广泛地应用于工业生产中。交流调速的发展必将对机床行业产生深远影响,必须引起充分重视。

## 1.2.2 机电传动控制系统的发展

自从以电动机作为原动机以来,伴随着电气拖动的发展,机电传动控制系统的发展经历了以下几个阶段:

### 1. 继电器接触器控制

最早的自动控制是20世纪20~30年代出现的传统继电器接触器控制,它可以实现对控制对象的启动、停车、调速、自动循环以及保护等控制。其优点是所用控制器件结构简单、价格低廉、控制方式直观、易于掌握、工作可靠、维护方便,在机电传动控制中得到广泛的应用。但是经过长期使用,这种控制方式的不足之处也日益显现,即体积大、功耗大、控制速度慢、改变控制程序困难;由于是有触点控制,在控制系统复杂时可靠性降低,因此不适合对生产工艺及流程经常变化的机械进行控制。

### 2. 顺序控制器控制

在20世纪60年代,随着半导体技术的发展,出现了顺序控制器。它是继电器和半导体元件综合应用的控制装置,具有易于修改程序、通用性较强等优点,广泛用于组合机床和自动

线上。

### 3. 可编程控制器(PLC)

可编程序控制器是计算机技术与继电器控制技术相结合的产品。它是以微处理器为核心、顺序控制为主的控制器,不仅具有顺序控制器的特点,而且具有微处理器的运算功能。PLC的设计以工业控制为目标,因而具有功率级输出、接线简单、通用性强、编程容易、抗干扰能力强、工作可靠等优点。它一经问世,便以强大的生命力迅速地占领了传统的控制领域。PLC的发展方向之一是微型、简易、价廉,以图取代传统的继电器控制;而它的另一个发展方向是大容量、高速、高性能,对大规模复杂控制系统能进行综合控制。

### 4. 数字控制技术(NC)

数字控制技术是以数字化的信息,通过数控装置(专用或通用计算机)实现控制的技术,数控机床是其最典型的产品。它集高效率、高柔性、高精度于一身,特别适合多品种、小批量的加工自动化。早期的数控装置实质上就是一台专用计算机,由固定的逻辑电路来实现专门的控制运算功能,可以实现插补运算。

在数字控制的基础上,又出现了以下几种控制方式:

#### 1) 计算机数字控制技术(CNC)

计算机数字控制技术是利用小型通用计算机来实现数控装置的运算功能,其运算功能更强。

#### 2) 加工中心机床(MC)

加工中心机床是采用计算机数字控制技术,集铣床、镗床、钻床三种功能于一体的加工机床,它单轴加工,配有刀库和自动换刀装置,大大地提高了加工效率,是多工序自动换刀数控机床。

#### 3) 自适应数控机床(AC)

自适应数控机床可针对加工过程中加工条件的变化(如材料变化、刀具磨损、切削温度变化等),自动进行适应调整,使加工过程处于合理的最佳状态。自适应数控机床基于最优控制及自适应控制理论,可在扰动条件下实现最优。

#### 4) 柔性制造系统(FMS)

柔性制造系统将一组数控机床与工件、刀具、夹具以及自动传输线、机器人、运输装置相配合,并由一台中心计算机(上位机)统一管理,使生产多样化,为生产机械赋予柔性,可实现多级控制。FMS是适应中小批量生产的自动化加工系统。有些较大的FMS由一些较小的FMS组成,而这些较小的FMS系统也称为柔性加工单元(FMC)。

#### 5) 计算机集成制造系统(CIMS)

虽然柔性制造系统具有柔性,但是由于缺少计算机辅助设计等环节,因此不能保证“及时生产”(即边生产边设计)。计算机集成制造系统是在柔性制造系统的基础上,增加计算机辅助设计环节,从而使设计和制造一体化。它利用计算机对产品的初始构思设计、加工、装配和检验的全过程实行管理,从而保证了生产既多样化,又能“及时生产”,使整个生产过程完全自动化。只要向CIMS系统输入所需产品的有关信息和原始材料,就可以自动地输出经检验合格的产品。因此,CIMS是今后机电传动控制系统的发展方向。

## 1.3 机电传动控制系统的组成和分类

### 1.3.1 机电传动控制系统的组成

机电传动控制系统是一种实现预定的自动控制功能,以满足生产工艺和生产过程的要求,并达到最优技术经济指标的控制系统,是现代化生产机械中的重要组成部分,其性能和质量在很大程度上影响着产品的质量、产量、生产成本和工人劳动条件。

机电传动控制系统以电动机为控制对象,按工艺要求对生产机械进行控制,因此机电传动控制系统的硬件组成可以包括电动机、控制电器、检测元件、功率半导体器件及微型计算机等。大型的机电传动控制系统往往需要控制多台电动机,可以采用多层微型计算机构成网络来实现控制。

### 1.3.2 机电传动控制系统的分类

按组成原理分,机电传动控制系统可分为开环系统和闭环系统。

在开环控制的传动系统中,虽然系统输入的控制信号保持不变,但是在扰动的作用下,输出量将偏离给定值。如图 1.1 所示,一个机电传动开环控制系统由晶闸管变流器、电动机和工作机械组成,其中工作机械包含传动机构和执行机构。在该系统中,晶闸管变流器向电动机供电并控制其运行状态。当电网电压波动、负载转矩变化等扰动作用于系统时,将导致系统输出量偏离给定值,此时系统的静态和动态特性将由变流器、电动机和工作机械的特性决定。



图 1.1 机电传动开环控制系统

如图 1.2 所示的闭环机电传动系统采用测速发电机、位置传感器等检测装置来测量系统的输出量,并将其转换成与被测量成正比的电信号。当输出量的反馈值偏离给定输入值时,控制器将根据偏差信息产生控制信号,并作用到变流器上,以确保系统输出具有预期的特性。

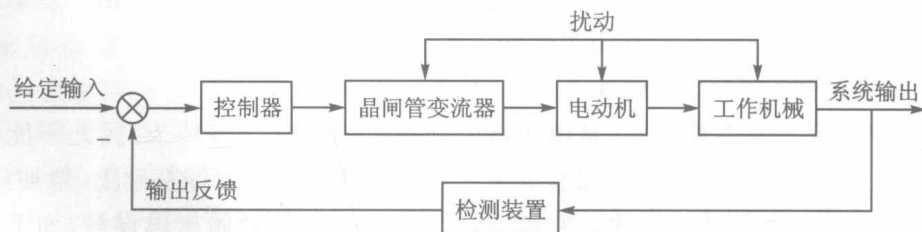


图 1.2 机电传动闭环控制系统

按控制目的分,机电传动控制系统又可分为定值控制、位置随动控制和程序控制。

定值控制可以保持受控量恒定,最常见的机电传动定值控制系统是稳速控制系统。当然,这种系统也可以控制生产过程中的其他工艺参数,如带形物料卷取时的张力控制。

位置随动控制可以用来控制工作机构的位移,即电动机的转角按事先规定的或者未知的规律变化。典型例子是雷达天线的方位控制系统,其功能是将天线对准所跟踪的目标。

程序控制可以使受控量按预先确定的规律变化。如机床上刀具的位移控制系统就属于程序控制,其功能是实现切削刀具和工件之间的复杂运动轨迹。

由此可见,将机电传动控制系统按控制目的进行分类,主要取决于给定量的变化特性,而与系统的构成原理无关。

## 习题与思考题

1. 机电传动控制的主要目的和任务是什么?
2. 机电传动以及机电传动控制技术的发展分别经历了哪几个阶段?今后的发展方向是什么?
3. 机电传动开环系统和闭环系统的优缺点是什么?
4. 按控制目的分类,机电传动控制系统分为哪几种?试简要说明。

## 第2章 机电传动控制系统中的控制电动机

控制电动机一般用于自动控制、随动系统以及计算装置中,它是在一般旋转电动机的基础上发展起来的小功率电动机,其电磁过程及所遵循的基本规律与一般旋转电动机没有本质区别,只是所起的作用不同:传动电动机主要是将电能转换为机械能,以达到拖动生产机械的目的,因此需要具有较高的力能指标,如输出转矩、传动效率和功率因数等;控制电动机则主要用来完成控制信号的传递和变换,要求技术性能稳定可靠、动作灵敏、精度高、体积小、质量轻、耗能少等。事实上,传动电动机与控制电动机之间并无严格的界限,同一台电动机有时既起到控制电动机的作用,也起到传动电动机的作用。

### 2.1 伺服电动机

伺服电动机又称为执行电动机,是控制电动机中的一种。它在控制系统中用作执行元件,将输入的受控电压信号转换为电动机轴上的角位移或角速度等机械信号输出。按控制电压来分,伺服电动机分为直流伺服电动机和交流伺服电动机两大类。直流伺服电动机的输出功率一般为 $1\sim 600\text{ W}$ ,也可达数千瓦,多用于功率较大的控制系统。交流伺服电动机的输出功率较小,一般在 $100\text{ W}$ 以下,常用于功率较小的控制系统。

#### 2.1.1 直流伺服电动机及其控制

##### 1. 直流伺服电动机的种类和结构

直流伺服电动机的品种很多,按励磁方式分,可分为电磁式和永磁式两种;按控制方式分,可分为磁场控制和电枢控制方式;按电枢形式分,可分为一般电枢式、无槽电枢式、绕线盘式和空心杯电枢式等。为了避免电刷和换向器的接触,还有无刷直流伺服电动机。

##### 1) 普通直流伺服电动机

根据励磁方式不同,普通直流伺服电动机分为电磁式和永磁式两种:电磁式直流伺服电动机的定子磁极上装有励磁绕组,励磁绕组接励磁控制电压产生磁通,它实质上就是他励直流电动机;永磁式直流伺服电动机的定子磁极由永久磁铁或磁钢制成,其磁通不可控。这两种直流伺服电动机的性能接近,惯性比其他类型直流伺服电动机的大。

与普通直流电动机相同,直流伺服电动机的转子一般由硅钢片叠压而成。转子外圆有槽,槽内装有电枢绕组,绕组通过电刷和换向器与电枢控制电路相连。为了提高控制精度和响应速度,伺服电动机的电枢铁芯长度与直径之比要比普通直流电动机的大,定子和转子间的空气隙也较小。

##### 2) 无槽电枢直流伺服电动机

与普通伺服电动机不同的是,无槽电枢直流伺服电动机的电枢铁芯上不开齿槽,是光滑圆柱体,电枢绕组直接用环氧树脂粘在电枢铁芯表面,气隙较大,其结构如图2.1所示。

3) 空心杯电枢直流伺服电动机

空心杯电枢直流伺服电动机有两个定子，一个是由软磁材料制成的内定子，另一个是由永磁材料制成的外定子。外定子用于产生磁通，而内定子主要起导磁作用。电枢绕组用环氧树脂浇注成空心杯形，在内、外定子间的气隙中旋转。图 2.2 是空心杯电枢直流伺服电动机的结构图。

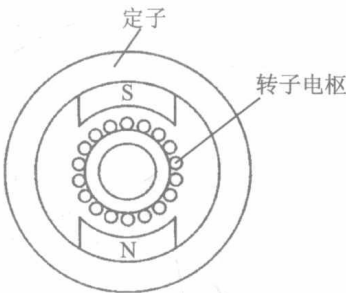


图 2.1 无槽电枢直流伺服电动机结构

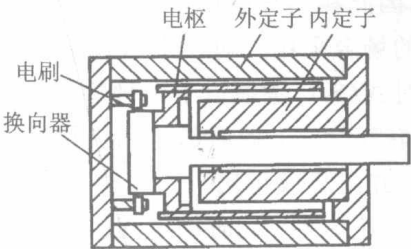


图 2.2 空心杯电枢直流伺服电动机结构

4) 盘形电枢直流伺服电动机

盘形电枢直流伺服电动机的电枢由线圈沿转轴的径向圆周排列，并用环氧树脂浇注成圆盘形。定子由永久磁铁和前、后铁轭共同组成，磁铁可以在圆盘电枢的一侧或两侧。盘形绕组中通过的电流是径向的，而磁通是轴向的，两者共同作用而产生电磁转矩，从而使伺服电动机旋转。图 2.3 是盘形电枢直流伺服电动机的结构图。

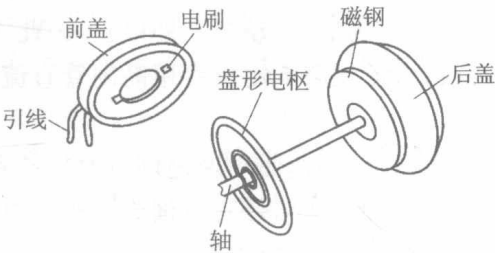


图 2.3 盘形电枢直流伺服电动机结构

与普通直流伺服电动机相比，无槽电枢、空心杯电枢和盘形电枢直流伺服电动机的转动惯量和机电时间常数小，因此动态特性较好，适用于需要快速动作的直流伺服系统。

5) 无刷直流伺服电动机

无刷直流伺服电动机由电动机主体、位置传感器、晶体管开关电路三部分组成。电动机主体由具有二极或多极结构的永久磁铁转子和一个多相式电枢绕组定子组成。晶体管开关电路和位置传感器代替了电刷和换向器，位置传感器是由传感器转子和传感器定子绕组串联而成的无机械接触的检测装置，用于检测转子位置，其信号决定了开关电路中各功率元件的导通和截止状态。

这种电动机既保持了一般直流伺服电动机的优点，又克服了电刷和换向器带来的缺点，使用寿命长，噪声低，适用于要求噪声低、对无线电信号不产生干扰的控制系统。

2. 直流伺服电动机的控制特性

直流伺服电动机的机械特性公式与他励直流电动机的相同，即

$$n = \frac{U_c}{K_e \Phi} - \frac{R}{K_e K_t \Phi^2} T \tag{2.1}$$

式中：n——直流电动机的转速(r/min)；

$U_c$ ——电枢控制电压；

$R$ ——电枢回路电阻;

$T$ ——直流电动机的转矩;

$\Phi$ ——每极磁通;

$K_e$ 、 $K_t$ ——电动机结构常数。

由此可见,通过改变电枢控制电压  $U_c$  或磁通  $\Phi$  都可以控制直流伺服电动机的转速,前者称为电枢控制,后者称为磁场控制。电枢控制具有响应迅速、机械特性硬、调速特性线性度好的优点,因此在实际应用中大多采用电枢控制方式,而很少采用磁场控制,磁场控制只是在功率很小的场合采用。对于永磁式直流伺服电动机,则只能采用电枢控制。

针对式(2.1)考虑以下两种特殊情况:

① 转矩为零:此时的电动机转速称为直流伺服电动机的理想空载转速,它仅与电枢电压  $U_c$  有关,并与之成正比。

② 转速为零:此时的电动机转矩称为电动机的堵转转矩,它也仅与电枢电压  $U_c$  有关,并与之成正比。

由此可以得到不同电枢电压下的直流伺服电动机的机械特性曲线,如图 2.4 所示。

从图 2.4 可以看出,不同电枢电压下的直流伺服电动机的机械特性曲线是一组平行线,在一定负载转矩下,如果磁通  $\Phi$  不变,升高电枢电压  $U_c$ ,则电动机的转速上升,反之,转速下降;当电枢电压为零时,电动机立即停止,因此不会产生自转现象。

目前,直流伺服电动机常用晶闸管直流调速驱动和晶体管脉宽调制(PWM)调速驱动两种方式。

晶闸管直流调速驱动通过调节触发装置控制晶闸管的导通角来移动触发脉冲的相位,以改变整流电压的大小,使直流伺服电动机电枢电压发生变化,从而实现平滑调速。由于晶闸管本身的工作原理和交流电源的特点,晶闸管导通后利用交流过零来关闭,因此在整流电压较低时,其输出是很小的尖峰值的平均值,这就导致了电流的不连续性。

图 2.5 是晶闸管直流调速驱动系统,其中 CF 为晶闸管触发电路,KZ 为晶闸管整流电路,L 为整流线圈。

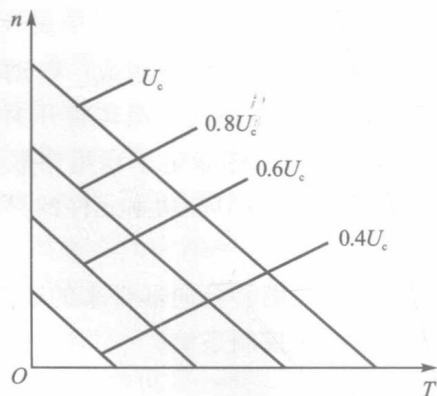


图 2.4 直流伺服电动机的机械特性

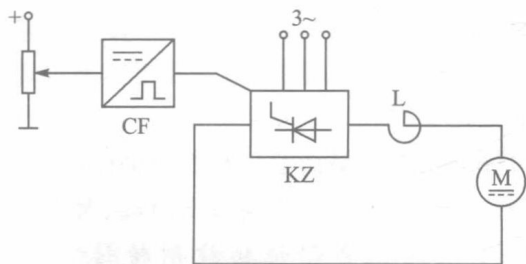


图 2.5 晶闸管直流调速驱动

如图 2.6 所示,PWM 直流调速驱动是在电枢回路中串入功率晶体管或晶闸管,功率晶体管或晶闸管工作在开关状态,这样就在电动机电枢两端得到一系列矩形波,矩形波电压的平均值就是电动机的工作电压,改变矩形波的脉冲宽度或周期,就可以改变平均电压的大小,从而达到控制转速的目的。采用 PWM 调速驱动系统,其开关频率较高(通常达 2 000~3 000 Hz),