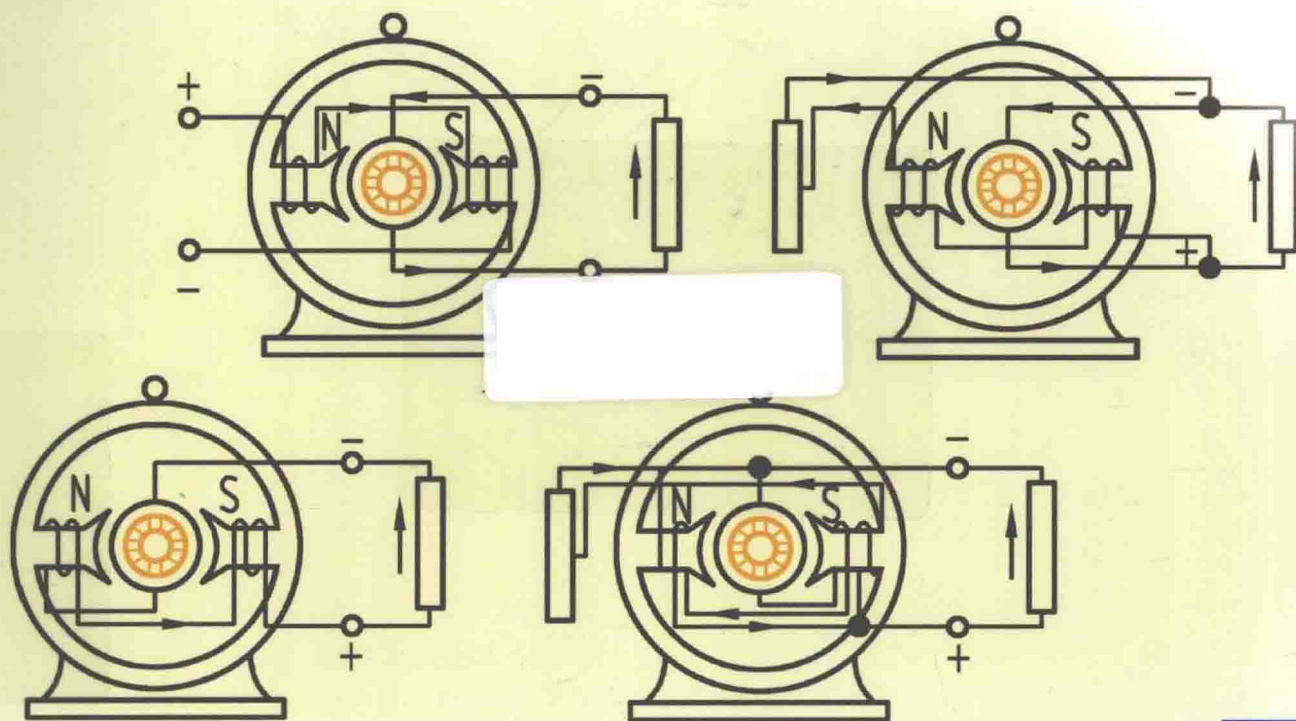


机械设计制造及其自动化专业本科系列规划教材

JIXIE DIANQI  
ZIDONG KONGZHI

# 机械电气自动控制

主 编 廖映华  
副主编 杜柳青 黄 波



重庆大学出版社  
<http://www.cqup.com.cn>

# 机械电气自动控制

主 编 廖映华

副主编 杜柳青 黄 波



重庆大学出版社

## 内容提要

本书系统地介绍了典型的机械电气自动控制系统——接触器-继电器和 PLC 控制系统的设计,同时介绍了交、直流调速和步进电动机控制系统,采用了最新电气设计标准。全书共 8 章。第 1 章绪论,第 2 章机电传动系统的动力学基础,第 3 章电动机的工作原理及机械特性,第 4 章常用低压电器及其选择,第 5 章接触器-继电器控制系统,第 6 章可编程控制器(PLC)控制系统,第 7 章交、直流调速系统,第 8 章步进电动机控制系统。

本书是高等工科院校机械类专业系列教材之一,可作为机械电子工程、机械工程及自动化专业、机械设计制造及其自动化专业本科学生学习机械电气自动控制技术的专业基础教材,也可作为高职高专或中专、技校的教学人员及有关的工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械电气自动控制/廖映华主编. —重庆:重庆大学出版社,2013. 1

机械设计制造及其自动化本科系列教材:新编  
ISBN 978-7-5624-7155-4

I. ①机… II. ①廖… III. ①机械设备—电气控制—自动控制—高等学校—教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 307663 号

## 机械电气自动控制

主 编 廖映华

副主编 杜柳青 黄 波

策划编辑:周 立

责任编辑:李定群 高鸿宽 版式设计:周 立

责任校对:费 梅 责任印制:赵 晟

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617183 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆五环印务有限公司印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:22 字数:549 千

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-7155-4 定价:39.50 元

---

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

# 前 言

---

随着制造技术发展,对现代化生产机械的生产工艺不断提出了新的要求,要满足这些不断提高的新要求,除了依靠机械设备设计水平和制造质量之外,在很大程度上还取决于电气自动控制系统的完善功能和优良性能。由于一般的生产机械都是采用电动机作为原动机,因此机械电气自动控制主要研究解决与以电动机作为原动机的机械设备启动、制动、反向、调速、快速定位的电气自动控制相关的问题。其目的是使生产机械满足加工工艺过程要求,确保生产过程正常进行。按照控制系统处理的信号的不同,电动机自动控制方式大致可分为断续控制、连续控制和数字控制3种。本书主要介绍断续控制、连续控制的控制系统设计。本书的特色主要体现在以下4个方面:

1. 参考最新标准。电气设备图的绘制主要参考《工业机械电气设备电气图、图解和表的绘制》(JB/T 2740—2008)。图形符号主要按《工业机械电气图用图形符号》(JB/T 2739—2008)规定的符号使用或原则组合使用,对于超出JB/T 2739—2008的内容,参考GB/T 4728中的符号。文字符号参考《电气技术中的文字符号制定通则》(GB/T 7159—1987)。

2. 内容组织逻辑性强,便于读者学习。在内容组织上,本书首先介绍控制对象(电动机)以及控制系统中常用的各类电器元件;然后介绍常用机械电气自动控制系统的设计;最后介绍交、直流调速及步进电动机控制。

3. 内容的实用性和系统性。以目前机械设备常用的接触器-继电器控制和PLC控制为主线,完整地介绍了两种控制系统的设计方法,增加了电气工艺设计方面的知识。

4. 注重与其他课程前后衔接,为后续课程的学习打下必要的基础。引入交、直流调速及步进电动机控制等内容,为后续“数控技术”课程中进一步深入学习伺服驱动系统打下基础。

本书是在重庆大学出版社的组织和指导下,由四川理工学院、重庆理工大学等院校合作编写的。参与本书编写的有四川理工学院廖映华、黄波、王春、赵献丹;重庆理工大学杜柳青。全书由廖映华负责统稿并担任主编,杜柳青、黄波担任副主编。

在本书的编写过程中,得到了重庆大学出版社、四川理工学院、重庆理工大学的有关同志的大力支持和热忱帮助,在此表示感谢。

编者虽然花了大量精力和时间编写,但书中仍难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2012年5月

# 目 录

---

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第1章 绪 论 .....                | 1  |
| 1.1 机械电气自动控制的研究目的和研究任务 ..... | 1  |
| 1.2 机械电气自动控制系统的组成和分类 .....   | 1  |
| 1.2.1 断续控制、连续控制和数字控制系统 ..... | 1  |
| 1.2.2 开环和闭环控制系统 .....        | 2  |
| 1.3 机械电气自动控制技术的发展 .....      | 2  |
| 1.3.1 电力拖动技术的发展 .....        | 2  |
| 1.3.2 逻辑控制技术的发展 .....        | 3  |
| 1.3.3 数字控制技术的发展 .....        | 3  |
| 第2章 机电传动系统的动力学基础 .....       | 5  |
| 2.1 机电传动系统的运动方程式 .....       | 5  |
| 2.1.1 运动方程式 .....            | 5  |
| 2.1.2 运动方程式中转矩方向的确定 .....    | 7  |
| 2.2 转矩、转动惯量、飞轮转矩的折算 .....    | 8  |
| 2.2.1 负载转矩的折算 .....          | 9  |
| 2.2.2 转动惯量和飞轮转矩的折算 .....     | 12 |
| 2.3 生产机械的机械特性 .....          | 13 |
| 2.3.1 恒转矩型机械特性 .....         | 13 |
| 2.3.2 恒功率型机械特性 .....         | 14 |
| 2.3.3 离心式通风机型机械特性 .....      | 15 |
| 2.3.4 直线型机械特性 .....          | 15 |
| 2.4 机电传动系统稳定运行的条件 .....      | 15 |
| 习题 .....                     | 17 |
| 第3章 电动机的工作原理及机械特性 .....      | 19 |
| 3.1 直流电动机的工作原理及机械特性 .....    | 19 |
| 3.1.1 直流电机的基本结构 .....        | 19 |
| 3.1.2 直流电机的工作原理 .....        | 20 |
| 3.1.3 直流发电机 .....            | 22 |
| 3.1.4 直流他励电动机的机械特性 .....     | 25 |
| 3.1.5 直流他励电动机的启动特性 .....     | 29 |



|                               |         |
|-------------------------------|---------|
| 3.1.6 直流他励电动机的调速特性 .....      | 30      |
| 3.1.7 直流他励电动机的制动特性 .....      | 32      |
| 3.2 交流电动机的工作原理及机械特性 .....     | 38      |
| 3.2.1 三相异步电动机的结构和工作原理 .....   | 38      |
| 3.2.2 三相异步电动机的定子电路和转子电路 ..... | 44      |
| 3.2.3 三相异步电动机的转矩与机械特性 .....   | 48      |
| 3.2.4 三相异步电动机的启动特性 .....      | 52      |
| 3.2.5 线绕式异步电动机的启动方法 .....     | 57      |
| 3.2.6 三相异步电动机的调速方法与特性 .....   | 58      |
| 3.2.7 三相异步电动机的制动特性 .....      | 67      |
| 3.2.8 单相异步电动机 .....           | 70      |
| 3.2.9 同步电动机 .....             | 73      |
| 习题 .....                      | 75      |
| <br>第4章 常用低压电器及其选择 .....      | <br>78  |
| 4.1 低压电器的电磁机构及执行机构 .....      | 78      |
| 4.1.1 电磁机构 .....              | 79      |
| 4.1.2 执行机构 .....              | 81      |
| 4.2 控制电器 .....                | 84      |
| 4.2.1 主令电器 .....              | 84      |
| 4.2.2 非自动控制电器 .....           | 87      |
| 4.2.3 自动控制电器 .....            | 90      |
| 4.3 执行电器 .....                | 98      |
| 4.3.1 电磁铁 .....               | 98      |
| 4.3.2 电磁夹具 .....              | 99      |
| 4.3.3 电磁离合器 .....             | 100     |
| 4.4 检测电器 .....                | 101     |
| 4.4.1 速度继电器 .....             | 101     |
| 4.4.2 行程开关 .....              | 102     |
| 4.5 保护电器 .....                | 104     |
| 4.5.1 熔断器 .....               | 105     |
| 4.5.2 热继电器 .....              | 107     |
| 4.5.3 低压断路器 .....             | 110     |
| 习题 .....                      | 112     |
| <br>第5章 接触器-继电器控制系统 .....     | <br>113 |
| 5.1 电气设备图的绘制及阅读方法 .....       | 113     |
| 5.1.1 电气设备电路图 .....           | 113     |
| 5.1.2 电气设备接线图 .....           | 114     |

|                                 |         |
|---------------------------------|---------|
| 5.1.3 电气设备安装图 .....             | 114     |
| 5.2 接触器-继电器控制系统的基本控制电路 .....    | 116     |
| 5.2.1 三相异步电动机的启动控制电路 .....      | 116     |
| 5.2.2 三相异步电动机的正反转控制电路 .....     | 119     |
| 5.2.3 三相异步电动机的制动控制电路 .....      | 120     |
| 5.2.4 双速电动机控制电路 .....           | 123     |
| 5.2.5 控制线路的其他基本环节 .....         | 124     |
| 5.2.6 电气控制系统保护 .....            | 127     |
| 5.3 典型机械设备控制电路分析 .....          | 130     |
| 5.3.1 C650-2 型普通车床控制电路 .....    | 130     |
| 5.3.2 X62W 万能升降台铣床控制电路 .....    | 132     |
| 5.3.3 Z3040 型摇臂钻床的控制电路 .....    | 137     |
| 5.3.4 组合机床控制电路 .....            | 140     |
| 5.4 接触器-继电器控制系统设计 .....         | 145     |
| 5.4.1 电气控制系统设计的一般步骤 .....       | 145     |
| 5.4.2 电气原理设计 .....              | 146     |
| 5.4.3 电气工艺设计 .....              | 151     |
| 习题 .....                        | 158     |
| <br>第 6 章 可编程控制器(PLC)控制系统 ..... | <br>161 |
| 6.1 PLC 的概述 .....               | 161     |
| 6.1.1 PLC 的基本结构 .....           | 161     |
| 6.1.2 PLC 的工作原理 .....           | 165     |
| 6.1.3 PLC 的主要特点和应用 .....        | 169     |
| 6.1.4 PLC 与其他工业控制系统的比较 .....    | 171     |
| 6.2 FX2N 系列可编程序控制器及其指令系统 .....  | 171     |
| 6.2.1 FX2N 系列可编程序控制器硬件配置 .....  | 171     |
| 6.2.2 FX2N 系列可编程控制器的编程元件 .....  | 174     |
| 6.2.3 FX 系列可编程控制器的编程语言 .....    | 181     |
| 6.2.4 FX2N 系列可编程序控制器的基本指令 ..... | 183     |
| 6.2.5 梯形图编程的基本规则 .....          | 189     |
| 6.2.6 FX2N 系列可编程序控制器的功能指令 ..... | 191     |
| 6.3 PLC 的程序设计方法 .....           | 209     |
| 6.3.1 常用典型单元的梯形图 .....          | 209     |
| 6.3.2 梯形图的经验设计法 .....           | 212     |
| 6.3.3 继电器电路转化设计法 .....          | 214     |
| 6.3.4 顺序功能图(SFC)设计法 .....       | 218     |
| 6.3.5 顺序控制梯形图的编程方式 .....        | 224     |
| 6.3.6 复杂控制系统的编程方式 .....         | 230     |



|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 6.4 PLC 控制系统设计 .....        | 239 |
| 6.4.1 PLC 控制系统的分析方法 .....   | 239 |
| 6.4.2 PLC 控制系统设计步骤 .....    | 240 |
| 6.4.3 机械手 PLC 控制系统设计 .....  | 244 |
| 6.4.4 摇臂钻床 PLC 控制系统设计 ..... | 251 |
| 习题 .....                    | 253 |
| <br>                        |     |
| 第7章 交、直流调速系统 .....          | 256 |
| 7.1 调速方法及其性能指标 .....        | 256 |
| 7.1.1 调速方法 .....            | 256 |
| 7.1.2 调速的性能指标 .....         | 256 |
| 7.2 常见电力电子器件的开关特性 .....     | 258 |
| 7.2.1 电力电子器件的分类 .....       | 258 |
| 7.2.2 电力电子器件的开关特性 .....     | 259 |
| 7.3 直流电动机无级调速系统 .....       | 262 |
| 7.3.1 可控直流电源 .....          | 262 |
| 7.3.2 几种常见的反馈控制直流调速系统 ..... | 265 |
| 7.3.3 无静差调速系统 .....         | 270 |
| 7.4 交流电动机调速系统 .....         | 272 |
| 7.4.1 变频调速系统 .....          | 272 |
| 7.4.2 其他调速系统 .....          | 277 |
| 习题 .....                    | 284 |
| <br>                        |     |
| 第8章 步进电动机控制系统 .....         | 285 |
| 8.1 步进电动机结构、工作原理及分类 .....   | 286 |
| 8.1.1 步进电动机的结构与工作原理 .....   | 286 |
| 8.1.2 小步距角步进电动机 .....       | 287 |
| 8.1.3 步进电动机的分类 .....        | 289 |
| 8.2 步进电动机驱动电源 .....         | 290 |
| 8.2.1 步进电动机的驱动方式 .....      | 290 |
| 8.2.2 步进电动机的环形分配器 .....     | 290 |
| 8.2.3 步进电动机的驱动电路 .....      | 293 |
| 8.3 步进电动机的运行特性及主要技术指标 ..... | 297 |
| 8.3.1 步进电动机的运行特性 .....      | 297 |
| 8.3.2 步进电动机的运行特性的影响因素 ..... | 300 |
| 8.3.3 步进电动机的主要技术指标及应用 ..... | 302 |
| 8.4 步进电动机的开、闭环控制 .....      | 304 |
| 8.4.1 步进电动机的开环控制 .....      | 304 |
| 8.4.2 步进电动机的闭环控制 .....      | 306 |

|                                 |         |
|---------------------------------|---------|
| 8.5 步进电动机控制系统应用实例 .....         | 306     |
| 8.5.1 步进电动机在数控机床的应用 .....       | 306     |
| 8.5.2 基于 PLC 的步进电动机控制的应用 .....  | 310     |
| 习题 .....                        | 314     |
| <br>附 录 .....                   | <br>315 |
| 附录 A 常用电气图形符号 .....             | 315     |
| 附录 B 常用电气技术文字符号 .....           | 319     |
| 附录 C 常用低压电器技术参数 .....           | 322     |
| 附录 D FX 系列 PLC 的内部软继电器及编号 ..... | 331     |
| 附录 E 三菱 FX 系列 PLC 功能指令一览表 ..... | 333     |
| <br>参考文献 .....                  | <br>339 |

# 第 1 章 绪 论

---

## 1.1 机械电气自动控制的研究目的和研究任务

生产机械一般由工作机构、传动机构、原动机以及机械电气自动控制系统等部分组成。由于一般的生产机械都是采用电动机作为原动机,因此机械电气自动控制主要研究解决与以电动机作为原动机的机械设备启动、制动、反向、调速、快速定位的电气自动控制有关的问题。其目的是使生产机械满足加工工艺过程要求,确保生产过程能正常进行。电气自动控制系统根据生产机械的生产工艺过程的要求,设计合适的自动控制功能,以获得最优的技术经济指标。因此,它是整个生产机械中的重要组成部分之一。它的性能和质量在很大程度上影响到产品的质量、产量、生产成本及工人劳动条件。

随着制造技术发展,对现代化生产机械的生产工艺不断提出了新的要求,使得生产机械的功能从简单到复杂,而操作上则要求由复杂到简单,因而对生产机械的电气自动控制系统提出了越来越高的要求。例如,在大批大量生产中使用专用机械设备以及自动化生产线,既要求自动化程度和加工效率高,又要求加工质量好,同时自动化生产线还要求统一控制和管理;轧钢车间的可逆式轧机及其辅助机械,操作频繁,要求在极短的时间内完成正转到反转的过程,即要求能迅速启动、制动和反转;对电梯和升降机之类的载运机械设备,则要求其启动和制动平稳,并能准确地停靠在预定的位置;加工中心由于工序的集中,则要求控制系统能控制机床按不同的工序,自动选择和更换刀具,自动改变机床主轴转速、进给量和刀具相对工件的运动轨迹及其他辅助功能,依次完成工件几个面上多工序的加工。要满足诸如此类机械设备的要求,除了依靠机械设备设计水平和制造质量之外,在很大程度上还取决于电气自动控制系统的完善功能和优良性能。

## 1.2 机械电气自动控制系统的组成和分类

就硬件而言,生产机械的电气自动控制系统可以包括电动机、控制电器、检测元件、功率半导体器件、微电子器件及微型计算机等。一个复杂机械设备的电气自动控制系统可能需要采用多层微型计算机控制多台电动机,以满足设备的加工工艺要求。按照不同的分类方式,机械电气自动控制系统有如下分类:

### 1.2.1 断续控制、连续控制和数字控制系统

按照控制系统处理的信号的不同,电动机自动控制方式大致可分为断续控制、连续控制和数字控制 3 种。在断续控制方式中,控制系统处理的信号为断续变化的开关量,如异步电



动机的接触器-继电器控制系统。在连续控制方式中,控制系统处理的信号为连续变化的模拟量,如交流电动机变频调速系统和直流电动机调速系统。在数字控制方式中,控制系统处理的信号为离散的数字量,如机床的数控系统。

### 1.2.2 开环和闭环控制系统

按组成原理,机械电气自动控制系统可分为开环控制系统和闭环控制系统。

如图 1.1 所示为开环控制系统。这种系统输入的控制信号保持不变,但在某种扰动作用下,会使输出量偏离给定值,因此系统的抗干扰能力弱。



图 1.1 开环控制系统框图

如图 1.2 所示为闭环控制系统。当输出量的反馈值偏离给定输入值时,由于系统输出量信息反馈到系统输入端,使得作用到调节器的输入量发生变化,调节器根据这一信息产生控制信号,作用到变流器,确保系统输出量变化具有预期的特性。

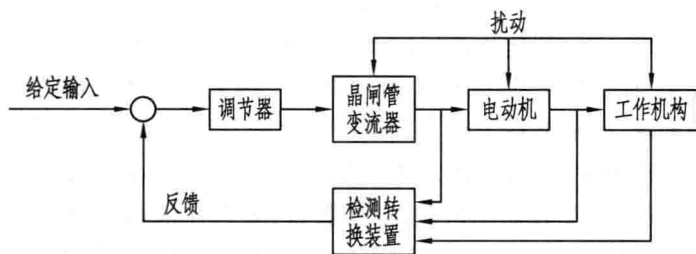


图 1.2 闭环控制系统框图

## 1.3 机械电气自动控制技术的发展

### 1.3.1 电力拖动技术的发展

电力拖动经历了成组拖动、单电机拖动和多电机拖动 3 个阶段。成组拖动是一台电动机拖动一个天轴,再由天轴通过带传动分别拖动多台生产机械;单电机拖动是一台电动机拖动一台生产机械;多电机拖动是一台生产机械的每个运动部件分别由一台专门的电动机拖动。现代化的生产机械基本上均采用这种拖动形式。

早期的电动机的输出为旋转运动,当电机拖动工作机构做直线往复运动时,必须通过一套传动机构将电动机的旋转运动转换为工作机构的直线往复运动。为了提高传动效率和速度,20 世纪 80 年代发展了直线电动机,实现了直线往复运动的直接电力拖动。对于旋转运动机构的电力拖动,近年又推出了运动机构和电动机融为一体的电主轴直接拖动方式,这种拖动方式的运动机构的转速可高达 60 000 r/min。

在电动机无级调速方面,20 世纪 30 年代出现了直流发电机-直流电动机的直流调速系

统。20 世纪 60 年代以后,随着电力电子元件的出现及其应用技术的发展,出现了采用大功率晶体管、晶闸管和大功率整流技术的直流调速系统,取代了直流发电机-直流电动机的直流调速系统。20 世纪 80 年代开始,发展了大功率半导体变流技术,使交流电动机调速技术取得突破性进展,以交流异步电动机为对象和以交流变频调速器为控制器的交流调速系统目前已经得到广泛的应用。由于脉宽调制技术和矢量控制技术的发展和其在交流调速系统中的应用,交流调速系统的性能已与直流调速系统相媲美,并有取代直流调速系统的趋势。

### 1.3.2 逻辑控制技术的发展

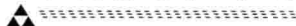
最早机械电气控制系统出现在 20 世纪 20 年代,最初采用按钮和开关进行手动控制,后来出现了接触器和继电器及其控制系统,实现了对控制对象的启动、停止、有级调速及自动工作循环控制。这种控制装置结构简单、直观易懂、维护方便、价格低廉,因此在机械设备控制上得到广泛的应用,而且一直应用至今。其缺点是,控制系统难以改变控制程序,采用机械触点实现开关控制,触点容易出现松动和电磨损,若控制系统稍为复杂一些,则可靠性较低。

20 世纪 60 年代中期,随着成组技术的出现,要求在同一台自动机床加工工艺相似而结构不同的零件,生产工艺及流程经常变化,接触器-继电器控制系统已经不能满足这种需要,于是出现了以逻辑门电路和继电器组成的顺序控制器。这种控制器利用二极管矩阵或二极管矩阵插销板编制程序,可方便地改变程序,同时这种控制系统克服了接触器-继电器控制系统寿命短、工作频率低、功能简单、可靠性差等缺点,是常用的顺序控制系统之一。

随着计算机技术和自动控制技术的飞速发展,20 世纪 60 年代末,出现了具有运算功能和功率输出能力的可编程逻辑控制器(PLC)。它是由大规模集成电路、电子开关、功率输出器件等组成的专用微型电子计算机,具有逻辑控制、定时、计数、算术运算、编程及存储功能,程序编制和修改容易,输入输出接线简单,通用灵活,抗干扰能力强,适用于工业环境,工作可靠性高,以及体积小等一系列优点。到 20 世纪 80 年代中期,PLC 已广泛地应用到各行各业的机械设备的自动控制上,成为工业自动化领域的主流控制器。目前,PLC 总的发展趋势是高集成度、小体积、大容量、高速度、易使用、高性能。

### 1.3.3 数字控制技术的发展

1952 年,美国的帕森斯与麻省理工学院合作研制出了世界上第一台三坐标直线插补数控铣床,并获得专利。1954 年底,美国本迪克斯公司在帕森斯专利基础上生产出了第一台工业用的数控机床。此时的数控机床的数控系统采用的电子管,其体积大、功耗高。到了 20 世纪 60 年代,晶体管技术应用于数控系统中,提高了数控系统的可靠性,而且价格降低,这一时期,点位控制的数控机床得到了很大的发展。到了 70 年代中期,随着微电子技术的发展,微处理机得以出现。美、日、德等国都迅速推出了以微处理器为核心的数控系统,数控系统的功能也从硬件数控进入了软件数控的新阶段,这种数控系统成为计算机数控系统(CNC)。80 年代以来,随着工业机器人的诞生,出现了数控机床、工业机器人、自动搬运车等,组成统一由中心计算机控制的机械加工自动线——柔性制造系统(FMS)。为了实现制造过程的高效率、高柔性和高质量,计算机集成生产系统(CIMS)成为数控技术发展的方向之一。



伺服驱动系统是数字控制系统的重要组成部分。它是以机床移动部件的位置和速度为控制量的自动控制系统,又称位置随动系统、驱动系统、伺服机构或伺服单元。伺服系统的性能在很大程度上决定了设备的性能,如数控设备的最高移动速度、跟踪精度、定位精度等重要指标均取决于伺服驱动系统的动态和静态特性。

伺服驱动系统按调节理论,可分为开环和闭环。开环伺服驱动系统的驱动元件是步进电动机,即步进电动机控制系统,其结构简单,易于控制,但是精度差,低速不平稳,高速扭矩小。它主要用于轻载、负载变化不大或经济型数控机床上。目前,高精度、硬特性的步进电动机及其驱动装置正在迅速发展。闭环伺服驱动系统可分为直流和交流伺服系统。直流伺服驱动系统在 20 世纪七八十年代的设备中占据主导地位。20 世纪 80 年代以后,由于交流伺服电动机的材料结构、控制理论和方法均有突破性发展,促使交流伺服驱动系统发展迅速,大有逐步取代直流伺服驱动系统的趋势。

# 第 2 章 机电传动系统的动力学基础

原动机带动负载运转称为拖动;以电动机带动生产机械运转的拖动方式称为电力拖动,其中电动机为原动机,生产机械是负载。机电传动系统是一个由电动机拖动并通过传动机构带动生产机械运转的机电运动的动力学整体。尽管机电传动系统中所用的电动机种类繁多、特性各异,生产机械的负载性质也各不相同,但从动力学的角度看,它们都应服从动力学的统一规律。因此,在研究机电传动系统时,首先要分析机电传动系统的动力学问题,建立其运动方程式,进而分析机电传动系统稳定运行的条件。

## 2.1 机电传动系统的运动方程式

### 2.1.1 运动方程式

生产实践中,生产机械的结构和运动形式是多种多样的,其机电传动系统也有多种类型。最简单的系统是单台电动机直接与生产机械同轴联接,即单轴机电传动系统(简称单轴系统),如图 2.1 所示。但是在多数情况下,由于生产机械转速较低或者具有直线运动部件,因此电动机必须通过传动机构(如齿轮减速箱、蜗轮蜗杆等)多根转轴的传动才能带动生产机械运动,称为多轴机电传动系统(简称多轴系统),如图 2.2 和图 2.3 所示。在少数场合,还有两台或多台电动机来带动一个或多个工作机构,称为多电机拖动系统,简称多机系统。

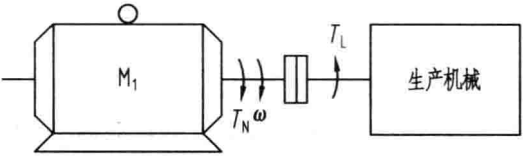


图 2.1 单轴机电传动系统

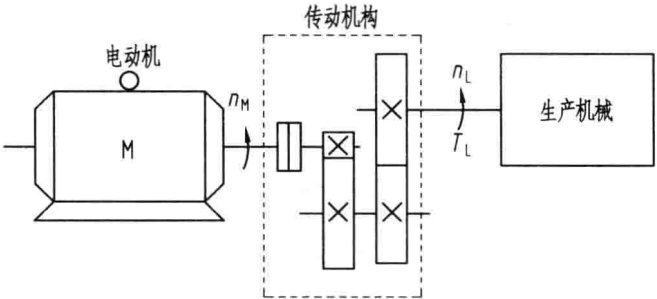


图 2.2 多轴机电传动系统

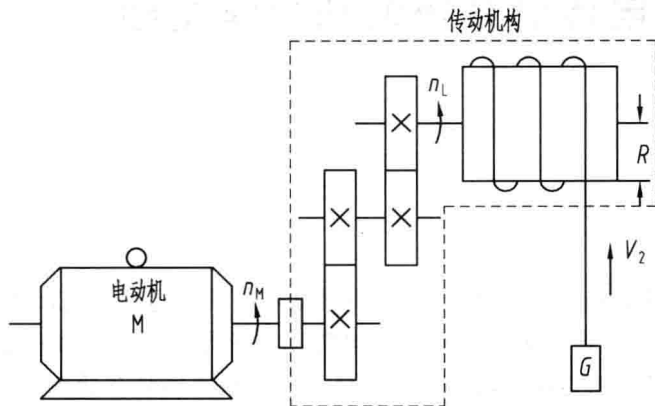


图 2.3 具有直线运动部件的多轴机电传动系统

如图 2.1 所示,由电动机 M 产生的转矩  $T_M$  (称为电磁转矩),用来克服负载转矩  $T_L$ ,带动生产机械运动。电力拖动系统中,通常把空载转矩考虑在负载转矩  $T_L$  中,不再单独考虑。当  $T_M$  与  $T_L$  这两个转矩平衡时,传动系统维持恒速转动,转速  $n$  或角速度  $\omega$  不变,加速度  $dn/dt$  或角加速度  $d\omega/dt$  等于零,即  $T_M = T_L$  时,  $n$  为常数,  $dn/dt = 0$ , 或  $\omega$  为常数,  $d\omega/dt = 0$ 。这种运动状态称为静态(相对静止状态)或稳态(稳定运转状态)。当  $T_M \neq T_L$  时,速度  $n$  或角速度  $\omega$  就要变化,产生加速或减速,速度变化的大小与传动系统的转动惯量  $J$  有关。把上述关系用方程式表示,即

$$T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.1)$$

式中  $T_M$ ——电动机产生的转矩,  $N \cdot m$ ;

$T_L$ ——单轴传动系统的负载转矩,  $N \cdot m$ ;

$J$ ——单轴传动系统的转动惯量,  $kg \cdot m^2$ ;

$\omega$ ——单轴传动系统的角速度,  $rad/s$ ;

$t$ ——时间,  $s$ 。

式(2.1)就是单轴机电传动系统的运动方程式。

$J$  是衡量惯性作用的一个物理参数,包括电动机的转动惯量及生产机械的转动惯量。但在实际工程计算中,往往用转速  $n$  代替角速度  $\omega$  来表示系统的转动速度,用飞轮惯量或称飞轮转矩  $GD^2$  代替转动惯量  $J$  来表示系统的机械惯性。由于  $J = m\rho^2 = mD^2/4$  (其中  $\rho$  和  $D$  定义为惯性半径和惯性直径),而质量  $m$  和重力  $G$  的关系是  $G = mg$ ,  $g$  为重力加速度,故  $GD^2$  和  $J$  的关系为

$$J = \frac{1}{4}mD^2 = \frac{1}{4}\frac{G}{g}D^2 = \frac{1}{4}\frac{(GD^2)}{g} \quad (2.2)$$

或

$$GD^2 = 4gJ$$

且

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.3)$$

将式(2.2)和式(2.3)代入式(2.1),可得运动方程式的实用形式为



$$T_M - T_L = \frac{(GD^2)}{375} \frac{dn}{dt} \quad (2.4)$$

式中,常数375包含着  $g=9.8 \text{ m/s}^2$ ,故它有加速度的量纲。 $GD^2 (\text{N} \cdot \text{m}^2)$ 是个整体物理量,为电动机转子与生产机械转动部分的飞轮转矩之和。电动机和生产机械的  $GD^2$  可从产品样本和有关设计资料中查得,如果查到的飞轮转矩以  $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$  为单位,则必须乘以9.8。

运动方程式是研究机电传动系统最基本的方程式,它决定着系统运动的特征,是研究机电传动系统各种运动状态的理论基础。

①当  $T_M = T_L$  时,加速度  $a = \frac{dn}{dt} = 0$ ,则  $n = \text{常数}$ ,系统处于稳定运行状态(包括静止状态)。为此,要使系统达到稳定,先决条件必须使  $T_M = T_L$ 。

②当  $T_M > T_L$  时,加速度  $\frac{dn}{dt} > 0$ ,即转速在升高,系统处于加速过程中。由此可知,要使系统从静止状态启动运转,必须使启动时的电磁转矩(称为启动转矩)大于  $n = 0$  时的负载转矩。

③当  $T_M < T_L$  时,加速度  $\frac{dn}{dt} < 0$ ,转速在降低,系统处于减速过程中。故要使系统从运转状态停转(即制动),必须减小电磁转矩使之小于负载转矩,甚至改变  $T_M$  的方向。

系统处于加速或减速的运动状态,均称为动态。处于动态时,系统中必然存在一个动态转矩

$$T_d = \frac{(GD^2)}{375} \frac{dn}{dt} \quad (2.5)$$

它使系统的运动状态发生变化。这样,运动方程式(2.1)或方程式(2.4)也可写为转矩平衡方程式,即

$$\begin{aligned} T_M - T_L &= T_d \\ \text{或} \quad T_M &= T_L + T_d \end{aligned} \quad (2.6)$$

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

当  $T_M = T_L$  时,  $T_d = 0$ ,表示没有动态转矩,系统恒速运转,即系统处于稳态。稳态时电动机发出转矩的大小,仅由电动机所带的负载(生产机械)所决定。

### 2.1.2 运动方程式中转矩方向的确定

在机电传动系统中,随着生产机械负载类型和工作状况的不同,电动机的运行状态将发生变化,即作用在电动机转轴上的电磁转矩  $T_M$  和负载转矩  $T_L$  的大小和方向都可能发生变化。因此,运动方程式(2.4)中的转矩  $T_M$  和  $T_L$  是带有正、负号的代数量。在应用运动方程式时,必须注意转矩的正、负号。因为电动机和生产机械以共同的转速旋转,故一般约定以转动方向为参考来确定转矩的正负:设电动机某一转动方向的转速  $n$  为正,则约定电动机转矩  $T_M$  与  $n$  一致的方向为正向,负载转矩  $T_L$  与  $n$  相反的方向为正向。

根据上述约定,则可从转矩与转速的符号上判定  $T_M$  与  $T_L$  的性质:若  $T_M$  与  $n$  符号相同(同为正或同为负),则表示  $T_M$  的作用方向与  $n$  相同,  $T_M$  为拖动转矩;若  $T_M$  与  $n$  符号相反,则表示  $T_M$  的作用方向与  $n$  相反,  $T_M$  为制动转矩。而若  $T_L$  与  $n$  符号相同,则表示  $T_L$  的作用

方向与  $n$  相反,  $T_L$  为制动转矩;若  $T_L$  与  $n$  符号相反,则表示  $T_L$  的作用方向与  $n$  相同,  $T_L$  为拖动转矩。

如图 2.4 所示,在提升重物过程中,试判定起重机启动和制动时电动机转矩  $T_M$  和负载转矩  $T_L$  的符号。设重物提升时电动机旋转方向为  $n$  的正方向。

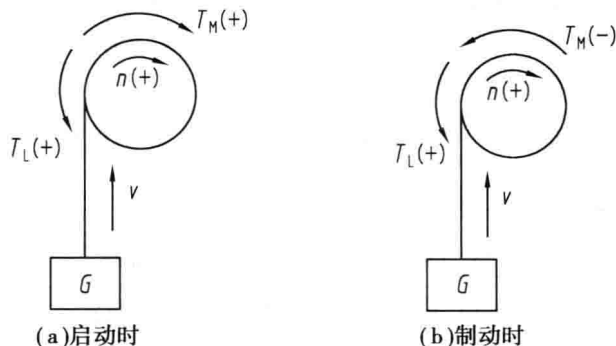


图 2.4  $T_M, T_L$  符号的判定

启动时:如图 2.4(a)所示,电动机拖动重物上升,  $T_M$  与  $n$  正方向一致,  $T_M$  取正号;  $T_L$  与  $n$  方向相反,  $T_L$  也取正号。这时的运动方程式为

$$T_M - T_L = \frac{(GD^2)}{375} \frac{dn}{dt}$$

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

制动时:如图 2.4(b)所示,仍是提升过程,  $n$  为正,只是此时要电动机制止系统运动,因此,  $T_M$  与  $n$  方向相反,  $T_M$  取负号,而重物产生的转矩总是向下,与启动过程一样,  $T_L$  仍取正号,这时的运动方程式为

$$-T_M - T_L = \frac{(GD^2)}{375} \frac{dn}{dt}$$

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

## 2.2 转矩、转动惯量、飞轮转矩的折算

实际的机电传动系统通常是多轴系统。因为生产机械多要求低速运转,而电动机一般具有较高的额定转速。这种情况下,电动机与生产机械之间就得装设减速机构,如齿轮减速箱或蜗轮蜗杆、皮带等减速装置。对于多轴机电传动系统,如果用单轴系统运动方程式研究其运行状态,则需对每根轴分别写出运动方程,再列出各轴间相互关系的方程,消去中间变量,联立求解,这显然是非常烦琐的。就多轴传动系统而言,一般不需研究每根轴上的问题,通常只需将电动机轴作为研究对象。

因此,对一个实际的多轴机电系统常采用折算的办法等效为一个单轴系统,即把传动机构和工作机构等效为电动机轴上的一个负载来分析。为了列出这个系统的运动方程,必须