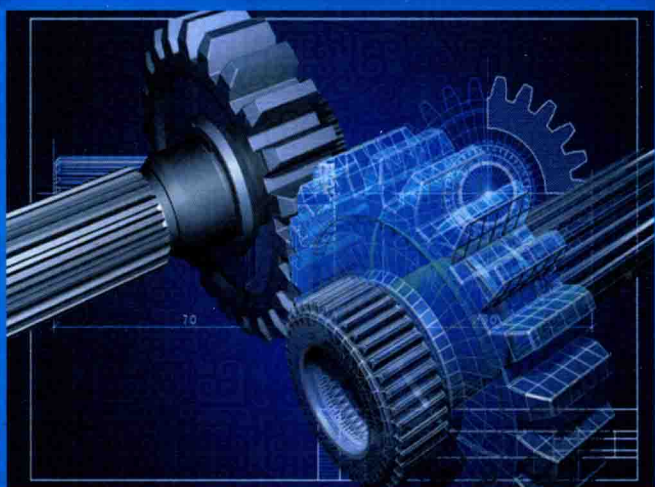


“十三五”普通高等教育规划教材

# 机电传动控制

凌永成 主编



含电子课件

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材

# 机电传动控制

主 编 凌永成  
参 编 李雪飞 卢 达  
主 审 黄晓云



机械工业出版社

本书共分6章,在简要介绍机电传动系统的构成与动力学分析方法的同时,重点阐述和讲授了驱动用电动机、低压电器、电气控制系统、可编程序控制器及变频器的使用、维护与检修知识,是一本内容宽泛、简明扼要地反映机电传动控制技术的规划教材。

本书为全国应用型院校机械设计制造及其自动化(机自)类、机电类专业规划教材,也可作为高等工程专科学校、高等职业技术学院以及职业培训学校的机自、机电类专业教材,还可作为广大机电行业工程技术人员的参考读物。

本书配套授课电子课件,需要的教师可登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 免费注册,审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 308596956, 电话: 010-88379753)。

## 图书在版编目(CIP)数据

机电传动控制/凌永成主编. —北京:机械工业出版社, 2017. 8  
“十三五”普通高等教育规划教材  
ISBN 978-7-111-57809-3

I. ①机… II. ①凌… 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206625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:时静 责任编辑:时静

责任校对:刘雅娜 责任印制:张博

三河市国英印务有限公司印刷

2017年9月第1版第1次印刷

184mm×260mm·23.5印张·577千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-57809-3

定价:59.80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

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线:010-88379649

机工官博:[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网:[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面无防伪标均为盗版

金书网:[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

# 前 言

本书是根据全国应用型院校机械设计制造及其自动化（机自）类、机电类专业的教学目标、培养方案及教学大纲的要求编写的。

本书共分6章，在简要介绍机电传动系统的构成与动力学分析方法的同时，重点阐述和讲授了驱动用电动机、低压电器、电气控制系统、可编程序控制器及变频器的使用、维护与检修知识，是一本内容宽泛、简明扼要地反映机电传动控制技术的规划教材。

为进一步强化实践教学，切实培养和提高学生的机电传动控制系统设计、使用和维护技能，本书附录中还配有机电传动控制实验（实训）指导，使实践教学更具可操作性，也便于任课教师组织实践教学。各学校可以结合自身的实验（实训）条件，参照执行。

本书条理清晰，层次分明，语言简练，图文并茂，内容全面，重点突出，详略得当，删除了冗长的理论分析，强化了机电传动控制系统设计、使用、维护实用技术的介绍。内容的取舍以充分满足机电传动系统现场工程师知识结构的要求为出发点，注重强化标准意识（全面采用以GB/T 4831—2016、GB/T 5094.2—2003和GB/T 20939—2007为代表的最新国家标准）和工程意识，特别注重理论与实践的紧密结合，内容具有极强的针对性和实用性，旨在开阔学生的专业知识视野，切实培养和提高学生的技术应用能力，是一本具有鲜明特色的实用规划教材。

本书是按照教学时数约为48学时编写的。各学校在选用本书作为教材时，可根据自己的教学大纲适当增、减学时。

本书第1、3、4章及附录部分由凌永成编写，第2、5章由李雪飞编写，第6章由卢达编写。在书稿写作过程中，参考、借鉴了许多国内外公开出版和发表的文献，在此一并致谢！

沈阳大学黄晓云教授作为主审，对全书进行了认真的审阅，并提出了许多宝贵意见，使本书结构更为严谨，在此深表谢忱！

由于时间仓促，水平有限，书中难免存在不足或疏漏之处，恳请广大读者批评指正，以便再版时修订。

编 者

# 目 录

## 前 言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1	<b>第 3 章 低压电器</b> .....	59
1.1 机电传动系统 .....	1	3.1 低压电器的分类与型号 .....	59
1.1.1 机电传动系统的组成与 控制 .....	1	3.1.1 低压电器的分类 .....	59
1.1.2 机电传动系统的发展历程 .....	2	3.1.2 低压电器的产品型号 .....	60
1.2 机电传动系统的动力学分析 .....	5	3.2 刀开关 .....	61
1.2.1 机电传动系统的运动方程式 .....	5	3.2.1 开启式刀开关 .....	61
1.2.2 机电传动系统的负载特性 .....	8	3.2.2 开启式负荷开关 .....	62
1.2.3 机电传动系统的稳定运行 .....	10	3.2.3 封闭式负荷开关 .....	63
1.2.4 机电传动系统的过渡过程 .....	11	3.2.4 组合开关 .....	64
思考与实训 .....	14	3.2.5 刀开关的技术参数与选用 .....	65
<b>第 2 章 驱动用电动机</b> .....	15	3.3 断路器 .....	66
2.1 电动机的分类与应用 .....	15	3.3.1 断路器的用途、分类和工作 原理 .....	66
2.1.1 电动机的分类 .....	15	3.3.2 断路器的主要技术参数 .....	69
2.1.2 电动机的应用 .....	16	3.3.3 断路器的选用 .....	70
2.2 三相异步电动机的结构与工作原理 .....	17	3.3.4 断路器的安装与维护 .....	72
2.2.1 异步电动机概述 .....	17	3.4 熔断器 .....	73
2.2.2 电动机的结构 .....	17	3.4.1 熔断器的结构与主要技术参数 .....	73
2.2.3 电动机的工作原理 .....	22	3.4.2 熔断器的类型 .....	73
2.3 三相异步电动机的特性 .....	25	3.4.3 熔断器的选用 .....	77
2.3.1 电动机的转矩特性 .....	25	3.4.4 熔断器的使用与故障处理 .....	78
2.3.2 电动机的机械特性 .....	26	3.5 接触器 .....	79
2.4 三相异步电动机的铭牌数据与能效 标识 .....	30	3.5.1 接触器的结构和工作原理 .....	79
2.4.1 电动机的铭牌数据 .....	30	3.5.2 接触器的主要技术参数 .....	83
2.4.2 电动机的效率及提高措施 .....	40	3.5.3 接触器的选用、安装与维护 .....	84
2.4.3 能效等级的划分与能效标识 .....	41	3.6 继电器 .....	88
2.5 三相异步电动机的选用与维护 .....	44	3.6.1 普通电磁式继电器 .....	89
2.5.1 电动机的选择 .....	44	3.6.2 热继电器 .....	91
2.5.2 电动机的安装与使用 .....	49	3.6.3 时间继电器 .....	97
2.5.3 电动机的维护与保养 .....	50	3.6.4 其他继电器 .....	100
2.5.4 电动机的常见故障及处理方法 .....	51	3.7 主令电器 .....	102
2.6 直流电动机 .....	55	3.7.1 按钮 .....	102
2.6.1 直流电动机的基本结构 .....	55	3.7.2 位置开关 .....	104
2.6.2 直流电动机的特点及应用 .....	57	3.7.3 万能转换开关与主令控制器 .....	107
思考与实训 .....	57	3.7.4 信号电器 .....	109
		3.8 其他常用电器 .....	110
		3.8.1 控制变压器 .....	110

3.8.2	电磁铁	111	5.4.2	基本位逻辑指令的应用	238
3.8.3	电磁阀	112	5.5	定时器指令及应用	244
3.8.4	电磁制动器	114	5.5.1	定时器指令	244
	思考与实训	114	5.5.2	定时器指令的应用	247
<b>第4章</b>	<b>电气控制系统</b>	<b>116</b>	5.6	计数器指令及应用	250
4.1	电气制图规范	116	5.6.1	计数器指令	250
4.1.1	电气制图标准	116	5.6.2	计数器指令的应用	253
4.1.2	电气系统图的绘制	131	5.7	功能指令及其应用	255
4.1.3	电气原理图的阅读方法	136	5.7.1	程序控制类指令	255
4.1.4	安装接线图的阅读方法	139	5.7.2	步进顺序控制指令	261
4.2	基本控制环节	141	5.7.3	功能指令	271
4.2.1	全压起动控制	141	5.8	PLC控制系统设计	278
4.2.2	正、反转控制	147	5.8.1	PLC控制系统的设计步骤	278
4.2.3	顺序控制	151	5.8.2	PLC应用的注意事项	279
4.2.4	减压起动控制	153	5.8.3	PLC控制系统的抗干扰措施	282
4.2.5	制动控制	162	5.8.4	PLC控制系统的安全保护	283
4.2.6	自动循环控制	167	5.8.5	典型机床的PLC控制系统设计	283
4.2.7	速度控制	169		思考与实训	286
4.2.8	电气控制系统的保护环节	173	<b>第6章</b>	<b>变频器及其应用</b>	<b>287</b>
4.3	典型机电设备电路分析	175	6.1	变频器概述	287
4.3.1	分析方法与步骤	175	6.1.1	变频调速原理与变频调速特性	287
4.3.2	卧式车床电路分析	176	6.1.2	变频器的作用与结构	289
4.3.3	摇臂钻床电路分析	179	6.1.3	变频器的工作原理	290
4.3.4	万能铣床电路分析	189	6.1.4	变频器的基本功能	294
	思考与实训	199	6.1.5	变频器的分类	298
<b>第5章</b>	<b>可程序控制器及其应用</b>	<b>201</b>	6.2	变频器的选择	302
5.1	PLC概述	201	6.2.1	变频器的技术参数	302
5.1.1	PLC的特点与分类	201	6.2.2	变频器容量的计算	303
5.1.2	PLC的结构组成	204	6.2.3	变频器类型的选择	306
5.1.3	PLC的工作原理	208	6.3	西门子MM440变频器	308
5.1.4	PLC的应用领域	210	6.3.1	技术规格	309
5.2	西门子S7-200系列PLC	211	6.3.2	电气原理	310
5.2.1	PLC的构成	211	6.3.3	参数结构	314
5.2.2	数据类型和寻址方法	215	6.3.4	参数过滤及用户访问等级	315
5.2.3	数据存储区	216	6.3.5	起动与停车	315
5.2.4	编程软件	219	6.4	基本操作	318
5.3	PLC的编程语言与程序结构	229	6.4.1	基本操作面板	318
5.3.1	梯形图	229	6.4.2	基于BOP的基本操作	320
5.3.2	语句表	230	6.4.3	快速修改参数	324
5.3.3	顺序功能流程图	230	6.5	运行控制	325
5.3.4	功能块图	231	6.5.1	基于BOP的运行控制	325
5.4	基本位逻辑指令及应用	231	6.5.2	基于数字量的运行控制	327
5.4.1	基本位逻辑指令	231	6.5.3	基于模拟量的运行控制	331

6.5.4	多段速度控制	336	6.7.2	变频器的接线	351
6.6	变频器的工程应用	337	6.7.3	变频器的电磁干扰及抑制 措施	357
6.6.1	变频器在机床主轴调速系统中的 应用	337	6.7.4	变频器的维护	359
6.6.2	变频器在恒压供水系统中的 应用	338	思考与实训	359	
6.6.3	变频器在离心机调速系统中的 应用	343	<b>附录 机电传动控制实验 (实训)</b>		
6.7	变频器的安装与维护	347	<b>指导</b>	360	
6.7.1	变频器的安装	347	<b>参考文献</b>	370	

# 第1章 绪论

## 学习目标

- 熟悉机电传动系统的构成
- 熟悉机电传动系统的负载特性
- 熟练掌握机电传动系统的运动方程式
- 能够从动力学分析的角度提出加快机电传动系统过渡过程的方法

## 1.1 机电传动系统

### 1.1.1 机电传动系统的组成与控制

#### 1. 机电传动系统的组成

机电传动系统一般由电力供应系统、电气控制系统、机电传动机构及生产机械组成(图1-1)。

电力供应系统主要包括工厂变电(配电)系统、电力变压器、供电线路以及整流器、逆变器、变频器等,其作用是为机电传动系统提供电源(能源),并采取必要的保护措施,以确保用电安全。

电气控制系统主要由各种常用的低压控制电器组成,其作用是对机电传动系统的电动机实施有效控制,以满足生产机械的各种控制要求。

机电传动机构是对以电动机为原动机驱动生产机械的系统的总称。由于现代生产机械广泛采用电动机为原动机,因此,机电传动又称电力拖动。

生产机械则完成具体的生产任务,如金属切削、驱动工作机构等。

国民经济领域中的制造业(如各种机床、轧钢机、造纸机、印刷机)、高新技术产业(如高速电力机车、磁悬浮列车、机器人、电动汽车)以及日常生活中的冰箱、空调、洗衣机等都属于机电传动系统的范畴。

#### 2. 机电传动控制

电气控制系统和机电传动机构是机电传动系统的重要组成部分,也是机电传动控制学科的主要研究内容。

机电传动控制的任务,就是将电能转变为机械能,实现生产机械的起动、停止以及速度

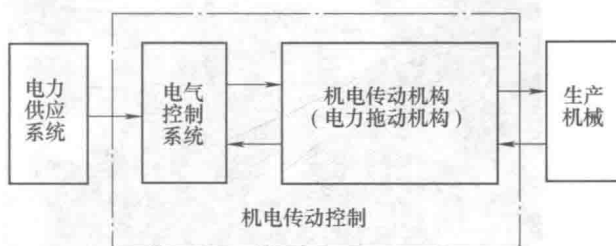


图1-1 机电传动系统的组成



调节，满足各种生产工艺过程的要求，确保生产过程得以高效、可靠地进行。从广义上讲，就是使生产机械、车间、生产线，甚至整个工厂实现自动化和智能化。从狭义上讲，则专指控制电动机驱动生产机械，实现经济、优质、高效的生产。

## 1.1.2 机电传动系统的发展历程

### 1. 机电传动机构的发展

机电传动机构的发展，经历了成组拖动、单电机拖动到多电机拖动的演进历程。

#### (1) 成组拖动

所谓成组拖动，就是由一台电动机拖动一根天轴运转，再由天轴通过带轮和传动带拖动多个生产机械工作（图 1-2）。成组拖动系统结构复杂、传动效率低、能量损耗大、工作可靠性差，一旦电动机出现故障，将造成成组的生产机械停车。成组拖动属于电动机稀缺、昂贵时期的无奈之举，现今已被淘汰。

#### (2) 单电机拖动

单电机拖动是指每一台生产机械都由一台电动机单独拖动（如立式钻床，图 1-3），较成组拖动已有很大进步。但是，当生产机械的运动部件较多时，则需要设置分动箱、离合器等机构，总体结构仍显复杂，无法满足生产工艺的特殊要求。



图 1-2 成组拖动（天轴分动）

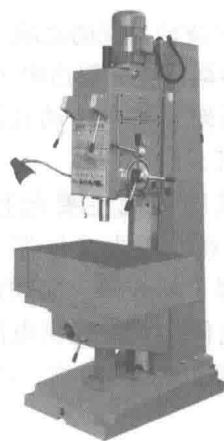


图 1-3 单电机拖动（立式钻床）

#### (3) 多电机拖动

随着电动机品种的丰富、价格的降低、机械特性的多样化，在机电传动领域，开始逐步普及多电机拖动方案。

所谓多电机拖动方案，是指在大型、复杂的生产机械上，同一台设备的每一个运动部件都由一台专门的电动机进行拖动，且电动机的功率、机械特性以及安装位置可以进行有针对性的、个性化的配置，以充分满足生产工艺的实际需求。例如，龙门刨床的工作台、左垂直刀架、右垂直刀架、侧刀架、横梁以及夹紧机构，就是各自由一台电动机拖动的（图 1-4）。

多电机拖动方案的应用，使传动机构得以大大简化，机电传动系统的运动精度、工作可靠性大大提高，加之控制灵活，极大地提升了生产过程的自动化水平，也为生产过程的智能化奠定了基础。因此，现代化的机电传动系统基本上都是采用多电机拖动方案。

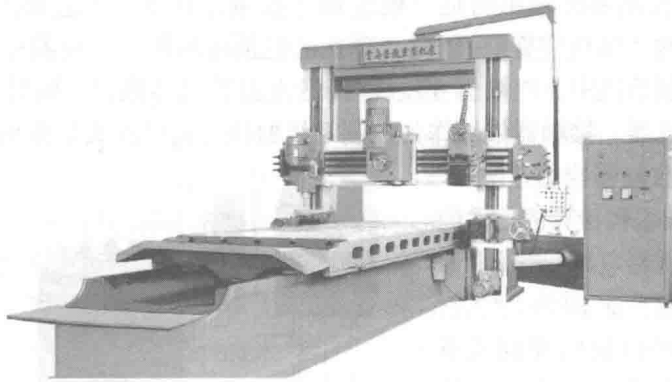


图 1-4 龙门刨床采用多电机拖动方案

## 2. 电气控制系统的发展

电气控制系统伴随控制技术和控制器件的发展而发展。随着控制器件、功率器件的不断推陈出新，电气控制系统的发展日新月异，主要经历了以下几个阶段：

### (1) 继电器-接触器控制系统

继电器-接触器控制系统出现于 20 世纪初期。该系统通过继电器和接触器等低压控制器件，实现对控制对象的起动、停车以及有级调速等控制（图 1-5）。

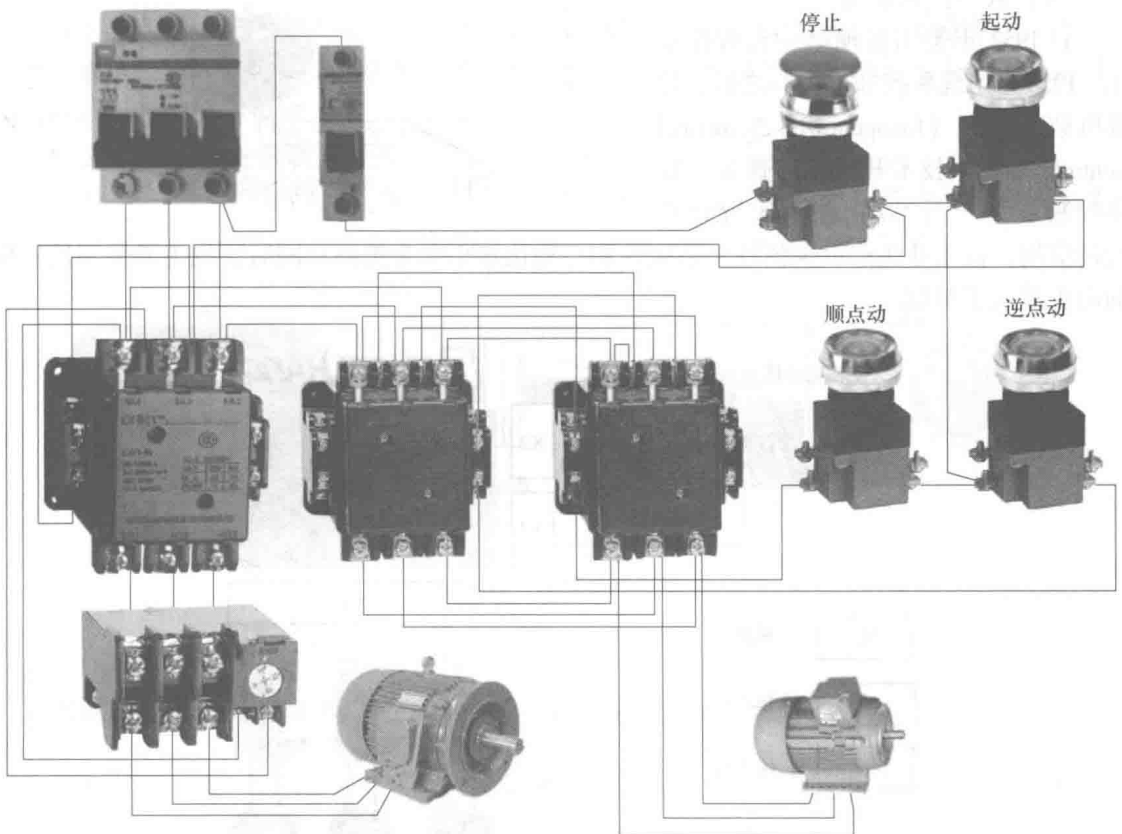


图 1-5 继电器-接触器控制系统

继电器-接触器控制系统采用的是“硬逻辑”控制，在生产工艺要求复杂多变的场合，难以实现控制关系的“随机应变”，因此，现在已经被可编程序控制器控制系统取代。但在相对简单的电气控制系统中，继电器-接触器仍然占据着主导地位。同时，在可编程序控制器控制系统中，继电器、接触器依然作为控制系统的执行器件在大量使用。

(2) 可编程序控制器控制系统

得益于微电子技术和计算机技术的发展，可编程序控制器（Programmable Logic Controller, PLC）采用的是“软逻辑”控制，当生产机械的控制关系发生变化时，只需更改控制程序（即对控制软件重新编程，很容易做到），就可以实现新的控制要求，而不需要对硬件做太多的调整（图 1-6）。因此，在生产工艺要求复杂多变的场合，可编程序控制器可以大显身手，并已经成为机电传动控制系统的主流控制器件。

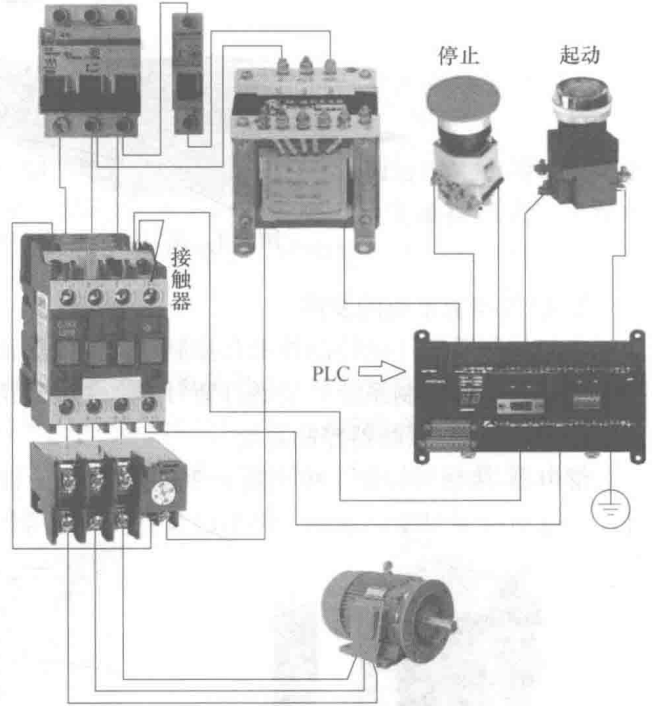


图 1-6 可编程序控制器控制系统

(3) 数字控制系统

自 1952 年美国出现第一台数控铣床、1958 年出现数控加工中心之后，计算机数字控制（Computerized Numerical Control, CNC）技术开始逐渐普及。数字控制系统（图 1-7）在机床行业的大量应用，使工业生产的灵活性、适应性和自动化水平大为提高。同时，也为柔性制造系统的出现奠定了基础。

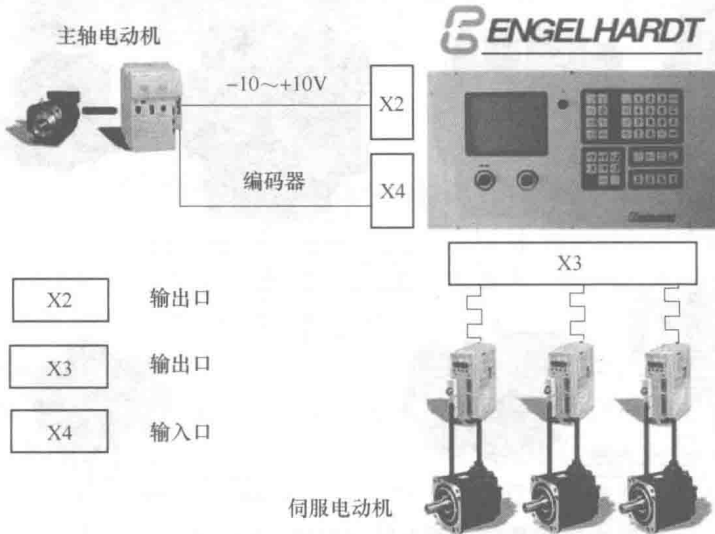


图 1-7 德国恩格哈 (Engelhardt) 公司的数字控制系统

#### (4) 柔性制造系统和计算机集成制造系统

柔性制造系统 (Flexible Manufacturing System, FMS) 由信息控制系统、物料储运系统和数字控制加工设备组成, 是能够适应加工对象频繁变化的自动化机械制造系统。

柔性制造系统 FMS 与计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD)、计算机辅助制造 (Computer Aided Manufacturing, CAM) 相融合, 又促使工业生产向计算机集成制造系统 (Computer/Contemporary Integrated Manufacturing Systems, CIMS) 迈进。

电气控制系统的发展除了与现代控制理论、计算机技术的发展息息相关之外, 功率器件的发展也功不可没。正是由于晶闸管 (Thyristor, 亦称 Silicon Controlled Rectifier, SCR)、门极可关断晶体管 (Gate-Turn-Off Thyristor, GTO)、电力晶体管 (Giant Transistor, GTR)、功率场效应晶体管 (Power-Metal Oxide Semiconductor FET, P-MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管 (Insulated-Gate-Bipolar Transistor, IGBT) 等大功率电力电子器件 (Power Electronic Device, 亦称功率半导体器件) 的快速发展, 为机电传动系统提供了可靠的半导体变流设备, 才使得上述各种控制系统的发展和应用成为可能。

## 1.2 机电传动系统的动力学分析

### 1.2.1 机电传动系统的运动方程式

机电传动系统是一个由电动机驱动、通过传动机构带动生产机械运转的整体。尽管电动机种类繁多、性能各异, 生产机械的负载特性多种多样, 但从动力学的角度去分析, 它们都应服从动力学的统一规律。

#### 1. 单轴驱动系统运动方程式

如图 1-8 所示, 电动机通过联轴器直接与生产机械相连, 由电动机 M 产生输出转矩  $T_M$ , 用来克服生产机械的负载转矩  $T_L$ , 带动生产机械以角速度  $\omega$  (或转速  $n$ ) 进行运动。

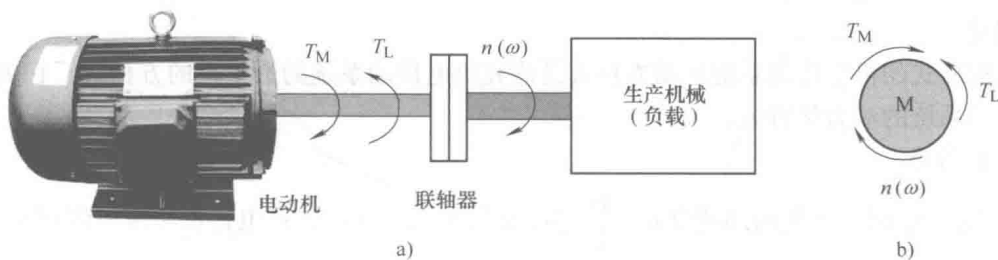


图 1-8 单轴驱动系统

a) 系统组成 b) 转矩方向

当电动机的输出转矩  $T_M$  与负载转矩  $T_L$  平衡时, 转速  $n$  或角速度  $\omega$  不变; 加速度  $\frac{dn}{dt}$  或角加速度  $\frac{d\omega}{dt}$  等于零, 即  $T_M = T_L$ , 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, 转速或角速度就要发生变化, 产生角加速度, 速度变化的大小与传动系

统的转动惯量  $J$  有关。

把上述各种参量的关系用方程式表示出来，则有

$$T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-1)$$

式中  $T_M$ ——电动机的输出转矩（亦称驱动转矩或拖动转矩， $N \cdot m$ ）；

$T_L$ ——生产机械的负载转矩（ $N \cdot m$ ）；

$J$ ——机电传动系统的转动惯量（ $kg \cdot m^2$ ）；

$\omega$ ——机电传动系统的角速度（ $rad/s$ ）；

$t$ ——时间（ $s$ ）。

式（1-1）就是机电传动系统的运动方程式。

在工程计算中，常用转速  $n$  代替角速度  $\omega$ ，用飞轮惯量（亦称飞轮转矩） $GD^2$  代替转动惯量  $J$  来进行系统的动力学分析。

由于 
$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (1-2)$$

$$J = m\rho^2 = \frac{G}{g} \left( \frac{D}{2} \right)^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-3)$$

式中  $G$ ——机电传动系统的重力（ $N$ ）；

$m$ ——机电传动系统的质量（ $kg$ ）；

$g$ ——重力加速度（ $m/s^2$ ）；

$\rho$ ——机电传动系统转动部分的转动惯性半径（ $m$ ）；

$D$ ——机电传动系统转动部分的转动惯性直径（ $m$ ）。

据此，机电传动系统的运动方程式可以转化为更为常用的工程形式：

$$T_M - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-4)$$

式中，常数 375 包含着  $g = 9.81 m/s^2$ ，因此，常数 375 具有加速度的量纲；而  $GD^2$  是一个整体物理量。

工程形式的机电传动系统运动方程式是研究机电传动系统的最基本的方程式，它决定着机电传动系统的动力学特征。

### （1）静态

当  $T_M = T_L$  时，系统的加速度  $a = \frac{dn}{dt} = 0$ ， $n$  为常数。此时，机电传动系统以恒速  $n$  运转，机电传动系统处于静态（亦称稳态）。

### （2）动态

当  $T_M > T_L$  时，系统的加速度  $a = \frac{dn}{dt} > 0$ ， $n$  不为常数。此时，机电传动系统加速运转，处于加速状态；当  $T_M < T_L$  时，系统的加速度  $a = \frac{dn}{dt} < 0$ ， $n$  不为常数。此时，机电传动系统减速运转，处于减速状态。

机电传动系统处于加速状态或减速状态时，称系统处于动态（亦称非稳态）。系统处于动态时，系统中必然存在一个动态转矩  $T_d$ 。

$$T_d = T_M - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-5)$$

正是因为动态转矩  $T_d$  的存在，才使得机电传动系统的运动状态发生了变化。因此，机电传动系统的运动方程 (1-1) 和式 (1-4) 还可以转化为系统的转矩平衡方程式

$$\begin{aligned} T_M - T_L &= T_d \\ \text{或者} \quad T_M &= T_L + T_d \end{aligned} \quad (1-6)$$

也就是说，在任何情况下，电动机所输出的驱动转矩  $T_M$  总是被生产机械的负载转矩 (即静态转矩)  $T_L$  和系统动态转矩  $T_d$  之和所平衡。

当  $T_M = T_L$  时， $T_d = 0$ 。此时，系统没有动态转矩，系统恒速运转，即系统处于稳态。系统处于稳态时，电动机输出转矩的大小仅由电动机所驱动的负载转矩决定。

## 2. 转矩方向的确定

由于传动系统有多种运动状态，相应的运动方程式中的转速和转矩的方向就不同，因此需要约定方向的表达规则。

因为电动机和生产机械以共同的转速旋转，所以，一般以  $n$  (或  $\omega$ ) 的转动方向为参考来确定转矩的正负。

### (1) $T_M$ 的符号与性质

当  $T_M$  的实际作用方向与  $n$  的方向相同时 (符号相同)，取与  $n$  相同的符号， $T_M$  为驱动转矩；当  $T_M$  的实际作用方向与  $n$  的方向相反时，取与  $n$  相反的符号， $T_M$  为制动转矩。驱动转矩促进运动；制动转矩阻碍运动。

### (2) $T_L$ 的符号与性质

当  $T_L$  的实际作用方向与  $n$  的方向相同时，取与  $n$  相反的符号 (符号相反)， $T_L$  为驱动转矩；当  $T_L$  的实际作用方向与  $n$  的方向相反时，取与  $n$  相同的符号 (符号相同)， $T_L$  为制动转矩。

举例：如图 1-9 所示，电动机拖动重物上升和下降。设重物上升时速度  $n$  的符号为正，下降时  $n$  的符号为负。

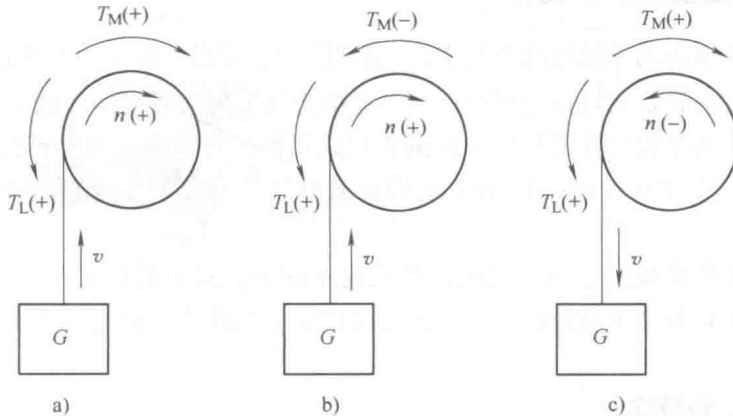


图 1-9  $T_M$  和  $T_L$  符号的判定

a) 系统起动时 b) 系统制动时 c) 重物下降时

当重物上升时， $T_M$  为正， $T_L$  也为正。 $T_M$ 、 $T_L$ 、 $n$  的方向如图 1-9a 所示。此时，系统的运动方程式为

$$T_M - T_L = J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} \quad (1-7)$$

因此，重物上升时， $T_M$  为驱动转矩， $T_L$  为制动转矩。

当重物在上升过程中制动（图 1-9b）时， $T_M$  为负， $T_L$  为正。此时，系统的运动方程式为

$$-T_M - T_L = J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} \quad (1-8)$$

此时，动态转矩和加速度都是负的，它们使重物减速上升，直到停止为止，系统中由动产生的动态转矩被电动机的制动转矩和负载转矩所平衡。

当重物下降时， $T_M$  为正， $T_L$  也为正。 $T_M$ 、 $T_L$ 、 $n$  的方向如图 1-9c 所示。此时，系统的运动方程式为

$$T_M - T_L = -J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}, \text{ 即 } T_L - T_M = J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} \quad (1-9)$$

因此，重物下降时， $T_M$  为制动转矩， $T_L$  为驱动转矩。

### 3. 多轴驱动系统的等效折算

由于许多生产机械都要求在低速状态下工作，而作为原动机的电动机，往往具有较高的额定转速。因此，多数生产机械在电动机与工作机构之间，都设有减速机构（齿轮减速器、蜗轮蜗杆减速器等）和变速机构（机床主轴箱变速器等），借此实现减速、增矩，以适应生产机械的工作要求。因此，在机电传动领域，绝大多数驱动系统实际上都是多轴驱动系统。

为了便于对多轴驱动系统进行运行状态的分析，一般是将多轴驱动系统等效折算为单轴驱动系统，即将多轴驱动系统中各转动部分的转矩和转动惯量或直线运动部分的质量折算到某一根轴（一般折算到电动机的输出轴）上，将其转化为等效的单轴驱动系统之后，再进行系统动力学分析。

负载转矩、转动惯量和飞轮转矩等效折算的基本原则是：折算前的多轴系统和折算后的单轴系统在能量关系或功率关系上保持不变，即遵循能量守恒原则或功率守恒原则。

## 1.2.2 机电传动系统的负载特性

前面讨论的机电传动系统运动方程中，负载转矩  $T_L$  可能是常数，也可能是转速的函数。我们把同一轴上负载转矩与转速之间的函数关系称为机电传动系统的负载特性。

机电传动系统的负载特性就是生产机械的负载特性，有时也称为生产机械的机械特性。如无特别说明，在本书中，机电传动系统的负载特性均指折算到电动机输出轴上的负载特性。

不同类型的生产机械在运动中受阻的性质是不同的，其负载特性曲线的形状也有所不同，大致可分为恒转矩型负载特性、离心式通风机型负载特性、直线型负载特性和恒功率型负载特性等几种。

### 1. 恒转矩型负载特性

这一类型负载特性的特点是负载转矩为常数，如图 1-10 和图 1-11 所示。依据负载转矩与运动方向的关系不同，恒转矩型负载特性可分为反抗性转矩和位能性转矩两种。

#### (1) 反抗性转矩

由摩擦、非弹性体的压缩、拉伸与扭转等作用所产生的负载转矩称为反抗性转矩，又称

摩擦性转矩。反抗性转矩的方向恒与运动方向相反，阻碍运动；反抗性转矩的大小恒定不变。

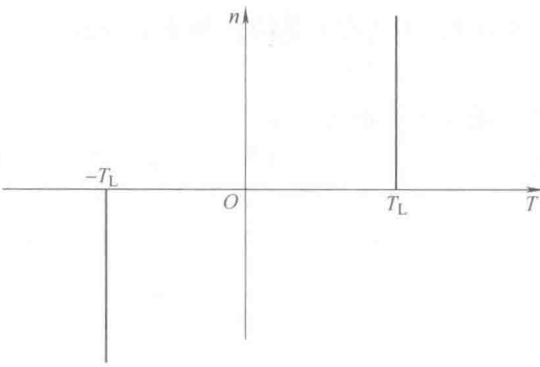


图 1-10 反抗性转矩的负载特性

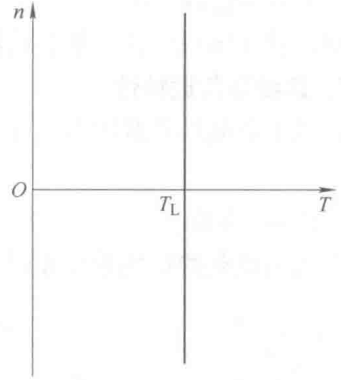


图 1-11 位能性转矩的负载特性

根据转矩正方向的约定可知，反抗性转矩与转速  $n$  的方向相反时取正号，即  $n$  为正方向时， $T_L$  为正，特性在第一象限； $n$  为负方向时， $T_L$  为负，特性在第三象限（图 1-10）。

## (2) 位能性转矩

位能性转矩是由物体的重力或弹性体的压缩、拉伸、扭转等作用所引起的负载转矩。位能性转矩的大小恒定不变，作用方向不变，与运动方向无关，即在某一方向阻碍运动而在另一方向促进运动（图 1-11）。

卷扬机起吊重物（图 1-12）时，由于重力的作用方向永远向着地心，所以，由它产生的负载转矩永远作用在使重物下降的方向。当电动机拖动重物上升时， $T_L$  与  $n$  的方向相反；当重物下降时， $T_L$  和  $n$  的方向相同（图 1-11）。

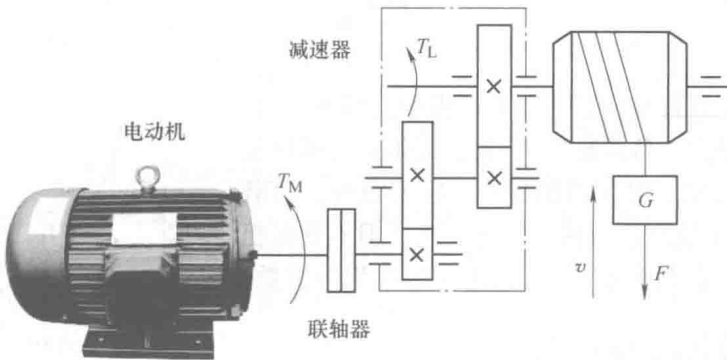


图 1-12 卷扬机起吊重物

假设  $n$  为正， $T_L$  阻碍运动；则  $n$  为负时， $T_L$  一定促进运动，其特性在第一、四象限。

不难理解，在运动方程式中，反抗性转矩  $T_L$  的符号总是与  $n$  相同；位能性转矩  $T_L$  的符号则有时与  $n$  相同，有时与  $n$  相反。

## 2. 离心式通风机型负载特性

离心式通风机型机械是按离心力原理工作的，如离心式鼓风机、水泵等，其负载转矩  $T_L$  的大小与转速  $n$  的二次方成正比（因此，这类负载特性亦称二次方特性），即



$$T_L = T_0 + Cn^2 \quad (1-10)$$

式中  $T_0$ ——摩擦阻力矩；  
 $C$ ——常数。

离心式通风机型机械的负载特性曲线（最初是沿着虚线变化的）如图 1-13 所示。

### 3. 直线型负载特性

直线型负载的负载转矩  $T_L$  的大小与转速  $n$  的大小成正比，即

$$T_L = Cn \quad (1-11)$$

式中  $C$ ——常数。

直线型负载的特性曲线如图 1-14 所示。

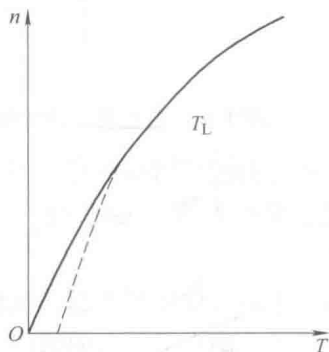


图 1-13 离心式通风机型负载特性曲线

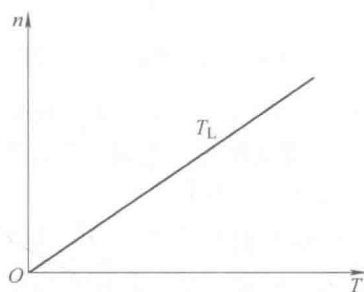


图 1-14 直线型负载特性曲线

### 4. 恒功率型负载特性

恒功率型负载的负载转矩  $T_L$  的大小与转速  $n$  的大小成反比，即

$$T_L = \frac{C}{n} \quad (1-12)$$

式中  $C$ ——常数。

例如，机床在进行金属切削加工过程中，粗加工时，切削量大，吃刀量大，负载转矩  $T_L$  大，机床主轴低速运转，转速  $n$  低；精加工时，切削量小，吃刀量小，负载转矩  $T_L$  小，机床主轴高速运转，转速  $n$  高。但不管是粗加工还是精加工，负载转矩  $T_L$  与转速  $n$  的乘积为常数，即功率恒定不变。

恒功率型负载的特性曲线如图 1-15 所示。

在实际的生产机械中，负载特性可以是单一类型的，也可以是几种类型的复合。

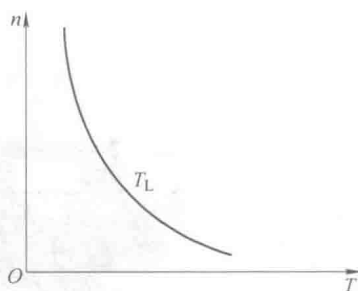


图 1-15 恒功率型负载的特性曲线

## 1.2.3 机电传动系统的稳定运行

在机电传动系统中，电动机与生产机械连成一体，为了使整个系统运行合理，就要使电动机的机械特性与生产机械的负载特性尽量相匹配。特性配合的基本要求是系统能够稳定运行。