



PUTONG GAODENG YUANXIAO  
JIXIELEI GUIHUA XILIE JIAOCAI

普通高等院校机械类规划系列教材

# 机电控制技术基础

JIDIAN KONGZHI JISHU JICHU

主 编 任 同

副主编 马有良 曹 辉

JIDIAN KONGZHI  
JISHU JICHU



西南交通大学出版社



PUTONG GAODENG YUANXIAO  
JIXIELEI GUIHUA XILIE JIAOCAI

普通高等院校机械类规划系列教材

# 机电控制技术基础

---

JIDIAN KONGZHI JISHU JICHU

---

主 编 任 同

副主编 马有良 曹 辉

西南交通大学出版社  
· 成 都 ·

## 内容简介

《机电控制技术基础》是根据机械设计制造及其自动化专业“机电控制技术基础”课程教学大纲编写的。全书共有9章、2个附录，内容包括：机电传动系统的动力学基础，直流电机，交流电动机，控制电机，继电器-接触器控制，可编程控制器，直流传动控制系统，交流传动控制系统以及我们开发的继电器、接触器虚拟实验系统简介等。

本书突出机电结合的特点，力求理论联系实际，以电机及电机控制为主线，讲述电机拖动在控制系统中的应用。课程体系新，内容简洁、实用，由浅入深，重点突出，每章附有思考与练习，便于自学。

本书可作为机械设计制造及其自动化专业、机械电子工程专业本科生的教材，也可作为机械类或近机类专业高职、电大、自考、网络教育学生的教材和其他机械类、机电类与相近机电类专业本科生或研究生的教材，还可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

机电控制技术基础 / 任同主编. — 成都: 西南交通大学出版社, 2015.2  
普通高等院校机械类规划系列教材  
ISBN 978-7-5643-3698-1

I. ①机… II. ①任… III. ①机电一体化—控制系统—高等学校—教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第016778号

---

普通高等院校机械类规划系列教材

## 机电控制技术基础

主编 任同

责任编辑 李芳芳  
特邀编辑 韩迎春 李娟  
封面设计 何东琳设计工作室

---

出版发行 西南交通大学出版社  
(四川省成都市金牛区交大路146号)  
发行部电话 028-87600564 028-87600533  
邮政编码 610031  
网址 <http://www.xnjdcbs.com>

---

印刷 四川嘉乐印务有限公司  
成品尺寸 185 mm × 260 mm  
印张 14.5  
字数 362 千  
版次 2015年2月第1版  
印次 2015年2月第1次  
书号 ISBN 978-7-5643-3698-1  
定价 35.00 元

---

课件咨询电话: 028-87600533

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 前 言

“机电控制技术基础”是机械设计制造及其自动化专业的一门必修课，是根据“机电传动控制”课程演变而来的，其目的是突出工厂车间的电气控制技术。本书是结合我们十几年来的授课经验，为了使學生能掌握实际应用知识，在理论课时减少、实践环节增加的情况下，为培养应用技术型人才而编写的。另外，有些内容如步进电机、测速发电机等与数控技术课程内容重复，故把它调整到数控技术里去讲解。全书共有9章，2个附录，内容包括：机电传动系统的动力学基础，直流电机，交流电动机，控制电机，继电器-接触器控制，可编程控制器，直流传动控制系统，交流传动控制系统以及我们开发的继电器、接触器虚拟实验系统简介等。

本书突出机电结合的特点，力求理论联系实际，以电机及电机控制为主线，讲述电机在拖动控制系统中的应用，使学生在掌握电机结构及其基本原理、电器控制元件结构原理的基础上，掌握利用继电器、接触器与可编程序控制器实现对电机的启动、调速、制动等控制，掌握常用的直流调速控制系统和交流调速控制系统。可以利用继电器、接触器模拟软件完成对电机控制的模拟实验，以提高学生的动手能力。课程体系新，内容简洁、实用，由浅入深，重点突出，每章附有思考与练习，便于自学。

本书由任同任主编。全书编写分工如下：任同编写第1章、第5章及附录1，王皓辉编写第3章及第8章，刘自红编写第4章及第9章，曹辉编写第7章，马有良编写第6章及附录2。李雪峰、李富强、陈开静、李攀飞、丁林米、高隆阳、邓世超等七位同学绘制了教材中的部分插图。全书由任同和马有良一起统筹并定稿。

本书获西南科技大学2014年度教材建设基金资助。

由于编者学识水平有限，编写内容难免存在不当之处，敬请读者批评指正，并请谅解。

编 者

2015年1月

# 目 录

第 1 章 概 论	1
1.1 机电控制系统的概念	1
1.2 机电传动的目的	2
1.3 机电传动系统的组成	3
1.4 机电传动的任务	3
1.5 机电传动控制技术的发展概述	3
1.6 课程的性质	6
1.7 课程的任务	6
1.8 对本课程学习的基本要求	6
思考与练习	6
第 2 章 机电传动系统的动力学基础	7
2.1 机电传动系统的运动方程式	7
2.2 生产机械的负载转矩特性	15
2.3 机电传动系统稳定运行分析	18
思考与练习	19
第 3 章 直流电机的工作原理及特性	21
3.1 直流电机的工作原理和基本结构	21
3.2 直流电机的机械特性	28
3.3 直流他励电动机的启动特性	33
3.4 直流他励电动机的调速特性	35
3.5 直流他励电动机的制动特性	39
思考与练习	46
第 4 章 交流电动机的工作原理及特性	48
4.1 三相异步电动机的结构和工作原理	48
4.2 异步电动机的额定参数	51
4.3 三相异步电动机的转矩与机械特性	56
4.4 三相异步电动机的启动特性	62
4.5 三相异步电动机的调速方法与特性	66
4.6 三相异步电动机的制动特性	69
4.7 单相异步电动机	73
4.8 三相同步电动机	76
思考与练习	79

第 5 章 控制电机 .....	81
5.1 交流伺服电动机 .....	81
5.2 直流伺服电动机 .....	86
5.3 直流力矩电动机 .....	88
5.4 小功率同步电动机 .....	90
5.5 直线电动机 .....	92
思考与练习 .....	95
第 6 章 继电器-接触器控制 .....	96
6.1 机床常用低压电器 .....	96
6.2 机床电器基本控制电路 .....	116
6.3 典型机床电气控制线路分析及设计 .....	131
思考与练习 .....	138
第 7 章 可编程控制器原理及应用 .....	139
7.1 可编程控制器的结构及工作原理 .....	139
7.2 可编程控制器的功能和特点 .....	146
7.3 PLC 的编程元件 .....	147
7.4 PLC 可编程控制器的编程语言 .....	150
7.5 PLC 的应用 .....	163
思考与练习 .....	173
第 8 章 直流传动控制系统 .....	176
8.1 调速系统的静态及动态指标 .....	176
8.2 晶闸管-电动机直流传动控制系统 .....	180
8.3 直流脉宽调速系统 .....	196
思考与练习 .....	207
第 9 章 交流传动控制系统 .....	208
9.1 晶闸管交流调压调速系统 .....	208
9.2 串级调速系统 .....	210
9.3 变频调速系统 .....	212
思考与练习 .....	220
附录 1 常用电器元件图形符号、文字符号一览表 .....	221
附录 2 机床电气控制技术虚拟实验简介 .....	224
参考文献 .....	226

# 第1章 概论

## 1.1 机电控制系统的概念

### 1.1.1 控制的基本概念

“控制 (control)”一词已广泛应用于各行各业,如温度控制、微机控制、人口控制等。所谓控制,其定义是:为达到某种目的,对某一对象施加所需的操作。含有“调节、调整”,“管理、监督”,“运用、操作”等意思。

在上述定义中所说的对象,是指物体、机器、过程或经济、社会现象等一般广泛的系统,又叫作被控对象。对于想实现控制的目标量,比如,电动机的转速、储水容量水位、油压缸中活塞的位置、炉内温度等叫作控制量,而把所希望的转速、水位、位置、温度等叫作目标值或参量。

根据产生控制作用的主体的不同,控制可分为手动控制和自动控制。由人本身通过判断和操作进行的控制叫作手动控制。例如汽车的驾驶,司机为到达目的地,需要根据路况和车况不断地操纵方向盘;又如人的行走、抓放物品等行为也都可称为手动控制。所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,利用外加的设备或装置(称控制装置或控制器)使机器、设备或生产过程的某个工作状态或参数自动地按照预定的规律运行。

另一方面,为了实现各种复杂的控制任务,首先要将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来,组成一个有机整体,这就是自动控制系统。在自动控制系统中,被控对象的输出量,即被控量是需要严格加以控制的物理量,可以要求它保持为某一恒定值,例如温度、压力、液位等,也可以要求它按照某个给定规律运行,例如飞行航线、记录曲线等。而控制装置则是对被控对象施加控制作用的机构的总体,它可以采用不同的原理和方式对被控对象进行控制。

自动控制理论是研究自动控制规律的技术科学。发展初期,它是以反馈理论为基础的自动调节原理,并主要用于工业控制。第二次世界大战期间,为了设计和制造飞机及船用自动驾驶仪、火炮定位系统、雷达跟踪系统以及其他基于反馈原理的军用装备,而进一步促进并完善了自动控制理论的发展。战争结束后,已形成完整的自动控制理论体系,这就是以传递函数为基础的经典控制理论,它主要研究单输入-单输出、线性定常系统的分析和设计问题。

20世纪60年代初期,随着现代应用数学新成果的推出和电子计算机技术的应用,为适应宇航技术的发展,自动控制理论跨入了一个新阶段——现代控制理论。它主要研究具有高性能、高精度的多变量变参数系统的控制问题,采用的方法是以状态方程为基础的时

域法。目前,自动控制理论还在继续发展,并且已跨越学科界限,正向以控制论、信息论、仿生学为基础的智能控制理论深入。

### 1.1.2 机电控制系统的概念

有史以来,机械可以代替人类从事各种有益的工作,弥补了人类体力和能力的不足,在各个方面都给我们的生活带来了极大的帮助。从机械的发展史可看到,机械的发展和进步与控制是密不可分的。一方面,机械运转本身,广义地讲也可称为控制,只有配备一定的控制装置才可以达到某种较复杂的工作目的(尽管这种控制装置最初是通过纯机械来实现的);另一方面,机械的广泛应用,也促进了控制科学的产生和发展。例如,作为工业革命象征的蒸汽机当时主要用于各种机械驱动,为了消除蒸汽机因负荷变化而对转速造成的影响,19世纪末詹姆斯·瓦特发明了离心调速器。但离心调速器在某种使用条件下,蒸汽机的转速和调速器套筒的位置依然会周期性地发生很大的变化,形成异常运转状态。蒸汽机和调速器能单独地各自稳定地工作,为什么在组合的情况下就出现不稳定状态呢?这一问题促使人们展开相关的研究和探索。直到19世纪后半叶,麦克斯韦提出了系统特性以及劳斯·胡尔维兹发现了系统稳定工作的条件(稳定性判据)后上述问题才得以解决,这也可以说是控制理论的开始。

生产工艺的发展也对机械系统提出了越来越高的要求,为达到工作目的,机械已不再是纯机械结构了,更多的是与电气、电子装置结合在一起形成的机电控制系统。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,重型镗床为保证加工精度和光洁度,要求在极慢的稳速下进给,即要求在很宽的范围内调速;为了提高效率,由数台或数十台设备组成的生产自动线,要求统一控制和管理等。这些要求都是靠驱动装置及其控制系统和机械传动装置的有机结合来实现的。

由此也可得出机电控制和自动控制的关系:自动控制是以一般系统为对象,广泛地使用控制方法进行控制系统的理论设计;而机电控制就是应用自动控制工程学的研究成果,把机械作为控制对象,研究怎样通过采用一定的控制方法来适应对象特性的变化,从而达到期望的性能指标。

## 1.2 机电传动的目的

机电传动:以电动机为原动机驱动生产机械运行的系统之总称。目的:将电能转变为机械能,实现生产机械的启动、停止以及速度的调节,完成各种生产工艺过程的要求,保证生产过程的正常进行。

机电传动控制的目的,从广义上讲,就是要使生产设备、生产线、车间乃至整个工厂都实现自动化;从狭义上讲,则指控制电动机驱动生产机械,实现生产产品数量的增加(效率)、质量的提高(精度)、生产成本的降低、工人劳动条件的改善以及能量的合理利用等。



## 1.3 机电传动系统的组成

机电传动系统总的来说由以下两部分组成：

- (1) 拖动生产机械的电动机：直流电动机、交流电动机以及控制电机等。
- (2) 控制电动机的控制系统：本教材主要有接触器-继电器控制系统、可编程序控制器(PLC)控制系统。

完整的机电传动系统包括电源、电气控制、电动机、传动机构、工作机构等，如图 1.1 所示。

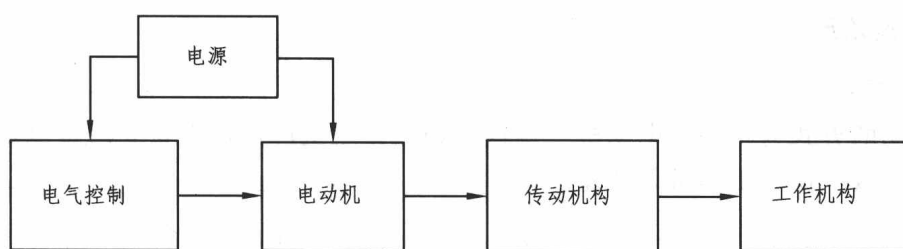


图 1.1 机电传动系统组成

生产技术的发展及生产机械的自动化程度和生产精度的提高，要求机电传动系统不仅能完成能量转换的工作，还要对传动过程进行控制，即机电传动控制。指控制电动机驱动生产机械设备，实现具体的工作要求。

## 1.4 机电传动的任务

实现生产机械的启动、停止及速度调节，保证生产过程的正常进行，实现生产产品数量的增加、产品质量的提高、生产成本的降低、工人的劳动条件改善及能量的合理利用。

## 1.5 机电传动控制技术的发展概述

### 1.5.1 设备驱动方式的发展概述

#### 1. 发展概述

按电动机供电电流制式的不同，有直流电力拖动和交流电力拖动两种。早期的生产机械如通用机床、风机、泵等不要求调速或调速要求不高，以电磁式电器组成的简单交、直流电力拖动即可以满足。随着工业技术的发展，对电力拖动的静态和动态控制性能都有了较高的要求，具有反馈控制的直流电力拖动以其优越的性能曾一度占据了可调速与可逆电力拖动的绝大部分应用场合。自 20 世纪 20 年代以来，可调速直流电力拖动较多采用的是直流发电机-电动机系统，并以电机扩大机、磁放大器作为其控制元件。电力电子器件发明后，以电子元件控制、由可控整流器供电的直流电力拖动系统逐渐取代了直流发电机-电动

机系统，并逐步发展到采用数字电路控制的电力拖动系统。这种电力拖动系统具有精密调速和动态响应快等性能。这种以弱电控制强电的技术是现代电力拖动的重要特征和趋势。

交流电动机没有机械式整流子，结构简单、使用可靠，有良好的节能效果，在功率和转速极限方面都比直流电动机高；但由于交流电力拖动控制性能没有直流电力拖动好，所以 20 世纪 70 年代以前未能在高性能电力拖动中获得广泛应用。随着电力电子器件的发展，自动控制技术的进步，出现了如晶闸管的串级调速、电力电子开关器件组成的变频调速等交流电力拖动系统，使交流电力拖动已能在控制性能方面与直流电力拖动相抗衡和媲美，并已在较大的应用范围内取代了直流电力拖动。

## 2. 主要拖动形式

### 1) 成组拖动

成组拖动的方式为：一台电动机—一根天轴—一组生产机械设备。其特点是：机构复杂，损耗大，效率低，工作可靠性差。

### 2) 单台电动机拖动

单台电动机拖动的结构方式是：一台电动机—一台设备。其特点是：当生产机械设备运动部件较多时，机构太复杂，满足不了生产工艺要求。

### 3) 多台电动机拖动

多台电动机拖动的结构是：一台专门的电动机—同一台设备的每一个运动部件。其特点为：机构简单，控制灵活，便于生产机械的自动化。

举例：龙门刨床的刨台，左垂直刀架，右垂直刀架，侧刀架，横梁，夹紧机构都是分别由一台电动机拖动的。

其组成及特点如表 1.1 所示。

表 1.1 设备驱动方式的拖动形式及特点

名称	组成	特点
成组拖动	一台电机拖动一根天轴（地轴），然后由天轴（或地轴）通过皮带轮或皮带分别拖动多台不同的生产机械	生产效率低，劳动条件差，一旦电动机出现故障，将造成成组的生产机械停车
单电机拖动	一台电动机拖动一台生产机械的各个运动部件	运动部件较多时，其传动机构仍十分复杂
多电机拖动	一台生产机械的各个运动部件分别由不同的电动机来拖动	机械传动机构简单，而且控制灵活

## 1.5.2 电气控制系统的发展概况

### 1. 发展概况

电气控制系统一般称为电气设备二次控制回路，不同的设备有不同的控制回路，而且高压电气设备与低压电气设备的控制方式也不相同。

随着科学技术的不断发展、生产工艺的不断改进，特别是计算机技术的应用，新型控制策略的出现，不断改变着电气控制技术的面貌。在控制方法上，从手动控制发展到自动

控制；在控制功能上，从简单控制发展到智能化控制；在操作上，从笨重发展到信息化处理；在控制原理上，从单一的有触头硬接线继电器逻辑控制系统发展到以微处理器或微计算机为中心的网络化自动控制系统。现代电气控制技术综合应用了计算机技术、微电子技术、检测技术、自动控制技术、智能技术、通信技术、网络技术等先进的科学技术成果。

## 2. 主要形式

### 1) 继电器-接触器控制系统

功能：能对控制对象实现启动、制动、有级调速控制；

特点：结构简单、动作可靠、控制速度慢、控制精度差。

### 2) 连续控制方式和自动控制系统

20世纪30年代的电机放大机控制；

40—50年代的磁放大器控制和水银整流器控制；

1958年以后的晶闸管-直流电动机无级调速系统；

80年代以来的新型电力电子元件-交流电动机无级调速系统。

特点：控制简单、可靠性高、连续控制、拖动性能好。

### 3) 可编程序控制器（PLC）

它是继电器常规控制技术与微机技术的结合，是一台按开关量输入的工业控制专用计算机。具有逻辑运算功能、定时/计数功能、数字运算功能、通信功能。

### 4) 计算机数字控制系统

1952年美国出现第一台数控机床，1958年出现加工中心，20世纪70年代CNC应用于数控机床和加工中心，80年代出现了柔性制造系统（FMS），提高了生产机械的通用性和效率，实现了机械加工的全盘自动化。

其组成特点如表1.2所示。

表 1.2 电气控制系统组成特点

名 称	年代	组 成	特 点
继电器-接触器控制	20世纪初	借助简单的接触器与继电器实现对控制对象的启动、停车以及有级调速等控制	控制速度慢，控制精度低
电机放大机控制	30年代	控制系统从断续控制发展到连续控制。随时检查控制对象的工作状态，并根据给定量与输出量的偏差对控制对象进行调整	快速性和控制精度大大提高，并简化了控制系统，减少了电路中的接触点，提高了可靠性，使生产效率大为提高
磁放大器控制	40—50年代	晶闸管控制取代了水银整流器控制，后来，又出现了功率晶体管控制	晶体管、晶闸管具有效率高、控制好、反应快、可靠性高、体积小、维护方便等优点
计算机数字控制	70年代	随着数控技术的发展，计算机的出现与应用，使控制系统发展到新的阶段——采样控制	PLC控制，把晶闸管技术，微电子技术与计算机技术紧密地结合起来

## 1.6 课程的性质

本课程是工业电气自动化、机电一体化、机械设计制造及自动化等专业的一门专业基础课。它是将电机学、机电传动、控制电机等课程有机结合而成的一门课。通过本课程的学习可加强系统性、实用性，学以致用，理论联系实际。

## 1.7 课程的任务

通过本课程和机电综合实验的学习，掌握交、直流电机及控制电机的基本结构和工作原理，以及机电传动的运行性能、分析计算、电机与控制系统选择。掌握继电器-接触器控制系统和可编程序控制器（PLC）控制系统设计，为后继课程和今后的工作准备必要的专业知识。

## 1.8 对本课程学习的基本要求

- (1) 了解机电传动控制系统的组成，掌握机电传动的基本规律；
- (2) 掌握常用电机、电器、晶闸管及其基本电路的基本工作原理、主要特性，了解其应用与选用；
- (3) 掌握可编程序控制器（PLC）的基本工作原理、指令系统和编程方法，学会用它来实现生产过程的自动化；
- (4) 掌握常用的直流、交流控制系统的基本工作原理和特点，了解其性能和应用场所；
- (5) 学会分析和设计机电传动控制系统的基本方法。

### 思考与练习

- 1.1 说明控制的基本概念。
- 1.2 说明机电传动的目的。
- 1.3 说明机电传动控制技术的发展概述。

## 第2章 机电传动系统的动力学基础

在研究机电传动系统的运动规律时，一般情况下不考虑系统中所用的电动机的种类以及生产机械的性质，而是把电动机、传动机构和生产机械看作是一个运动着的整体进行分析、研究，找出它们所遵循的统一的运动规律，建立机电传动系统的运动方程。

### 2.1 机电传动系统的运动方程式

#### 2.1.1 单轴拖动系统的运动方程式

所谓单轴拖动系统是指电动机输出轴直接拖动生产机械运转的系统。此时电动机、传动机构、机械负载等所有的运动部件均以同一转速运动。这种单轴拖动系统是机电传动系统中最基本的一种，它是研究复杂机电传动系统的基础。单轴拖动系统又分为两种形式，一种形式是单轴旋转拖动系统，另一种形式是单轴直线运动的拖动系统。下面分别研究这两种简单机电传动系统的运动方程式。

##### 1. 单轴旋转拖动系统的运动方程式

###### 1) 运动方程式

如图 2.1 所示，电动机 M 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  $T_M$ ，用来克服负载转矩  $T_L$ ，带动生产机械以角速度  $\omega$ （或速度  $n$ ）进行运动。

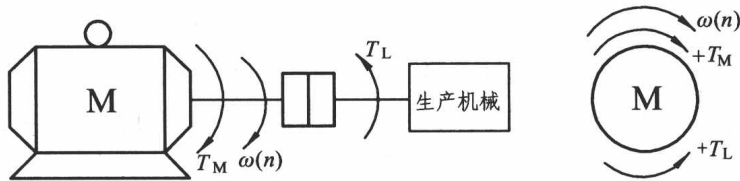


图 2.1 单轴旋转拖动系统

在各种结构形式的电力拖动系统中，电动机轴与生产机械的旋转机构直接相连的单轴系统是最基本的一种。与单轴直线运动的拖动系统相似，作用在电动机轴上的拖动转矩为  $T_M$ ，生产机械的阻转矩为  $T_L$ ，则单轴旋转运动拖动系统的基本运动方程式为

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

式中  $T_M$  —— 拖动转矩， $N \cdot m$ ；  
 $T_L$  —— 负载转矩， $N \cdot m$ ；

$\omega$ ——电动机的角速度, rad/s;

$\frac{d\omega}{dt}$ ——角加速度, rad/s<sup>2</sup>;

$J$ ——电动机轴上的转动惯量, kgm<sup>2</sup>。

上面的微分方程式就是描述单轴旋转拖动系统运动规律的运动方程式, 是研究电力拖动系统各种运动状态的基础。

在工程计算中, 通常用速度  $n$  代替角速度  $\omega$ ; 用飞轮力矩  $GD^2$  代替转动惯量  $J$ 。  $n$  与  $\omega$  的关系为  $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ ,  $J$  与  $GD^2$  之间的关系为  $J = \frac{GD^2}{4g}$ 。即可得到单轴旋转拖动系统运动方程的实用形式为

$$T_M - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (2.2)$$

式中, 375 是具有加速度量纲的系数。其值为  $4g \times \frac{60}{2\pi}$ , 单位为 m/s<sup>2</sup>。

## 2) 运动方程式中正负号的规定

在电力拖动系统中, 随着生产机械负载类型的不同, 电动机的运行状态也将发生变化, 电动机轴上的拖动转矩  $T_M$  及生产机械的负载转矩  $T_L$  不仅大小会发生变化, 方向也发生变化。因此, 单轴旋转拖动系统运动方程式可写成下列一般形式:

$$\pm T_M - (\pm T_L) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (2.3)$$

对公式 (2.3) 中  $T_M$  与  $T_L$  前带有的正负符号, 作如下规定: 预先规定某一旋转方向为正方向, 则

- ① 拖动转矩  $T_M$  方向如果与所规定的旋转正方向相同,  $T_M$  前取正号, 相反时取负号。
- ② 负载转矩  $T_L$  方向如果与所规定的旋转正方向相同,  $T_L$  前取负号, 相反时取正号。
- ③ 加速转矩  $\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$  的大小及正负符号, 由拖动转矩  $T_M$  及负载转矩  $T_L$  的代数和来决定。

因  $T_M$  和  $T_L$  既有大小还有方向 (正负), 故确定传动系统的运行状态不仅取决于  $T_M$  和  $T_L$  大小, 还取决于  $T_M$  和  $T_L$  的正负 (方向), 因此, 列机电传动系统的运动方程式和电路平衡方程时, 必须规定各电量的正方向, 也必须规定各机械量的正方向, 对机电传动系统中各机械量的正方向约定如下: 在确定了转速  $n$  的正方向后,  $T_M$  与  $n$  同向为正向;  $T_L$  与  $n$  相反为正向。

根据上述约定, 可以从转矩与转速的符号上判定  $T_M$  和  $T_L$  的性质:

若  $T_M$  与  $n$  符号相同, 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;

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。

举例: 如图 2.2 所示, 电动机拖动重物上升和下降。

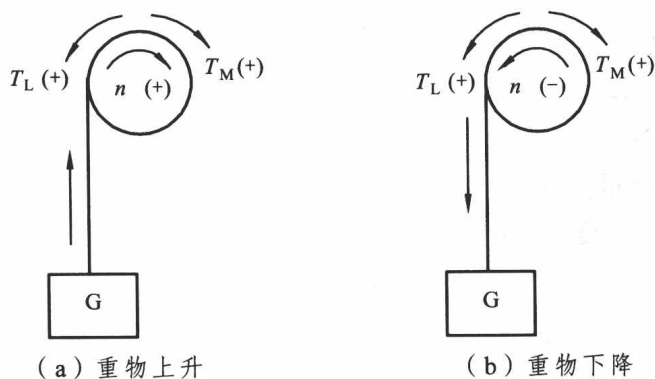


图 2.2 电动机拖动重物升降

设重物上升时速度  $n$  的符号为正，则重物下降时  $n$  的符号为负。

当重物上升时， $T_M$  的作用方向与  $n$  的方向相同，故  $T_M$  的符号与  $n$  的符号相同，同为正；而  $T_L$  的作用方向与  $n$  的方向相反，故  $T_L$  的符号也与  $n$  的符号相同，同为正。 $T_M$ 、 $T_L$ 、 $n$  的方向如图 2.2 (a) 所示。运动方程式为

$$T_M - T_L = J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}$$

因此重物上升时， $T_M$  为拖动转矩， $T_L$  为制动转矩。

当重物下降时， $T_M$  的作用方向与  $n$  的方向相反，故  $T_M$  的符号与  $n$  的符号相反， $n$  为负，则  $T_M$  为正；而  $T_L$  的作用方向与  $n$  的方向相同，故  $T_L$  的符号也与  $n$  的符号相反， $n$  为负， $T_L$  为正。 $T_M$ 、 $T_L$ 、 $n$  的方向如图 2.2 (b) 所示。运动方程式为

$$T_M - T_L = -J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}$$

因此重物下降时， $T_M$  为制动转矩， $T_L$  为拖动转矩。

### 3) 拖动系统的运动状态判断

分析式 (2.2) 可知，一个电力拖动系统的运动状态，可以从运动方程来判定。

① 当  $T_M = T_L$  时， $dn/dt = 0$ ，则  $n = 0$  或  $n = \text{常数}$ ，表示电力拖动系统处于静止不动或以恒定转速旋转的状态。

② 当  $T_M > T_L$  时， $dn/dt > 0$ ，电力拖动系统处于加速状态。

③ 当  $T_M < T_L$  时， $dn/dt < 0$ ，电力拖动系统处于减速状态。

由此可知，当  $T_M = T_L$  时，系统处于稳定运行状态；当  $T_M \neq T_L$ ，系统处于加速或减速状态，我们把这种运动状态称为动态或过渡状态。

## 2. 单轴直线运动拖动系统的运动方程式

### 1) 运动方程式

根据牛顿第二定律，在电力拖动系统中如果生产机械做直线运动，作用在电动机轴上的电动力  $F$  与阻力  $F_L$  以及速度变化时产生的惯性力  $ma$  之间的关系，遵循下列基本运动方程式：

$$F - F_L = ma \quad (2.4)$$

式中  $F$ ——拖动力, N;  
 $F_L$ ——阻力, N;  
 $m$ ——物体的质量, kg;  
 $a$ ——物体的加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

式(2.4)也可以写成:

$$F - F_L = m \frac{dv}{dt} \quad (2.5)$$

式中,  $m \frac{dv}{dt}$  是惯性力, 如果质量  $m$  的单位为 kg, 速度  $v$  的单位为  $\text{m/s}$ , 时间  $t$  的单位为 s, 则惯性力的单位与  $F$  及  $F_L$  的单位相同, 为 N。

## 2) 转动惯量与飞轮转矩

转动的物体与直线运动的物体一样, 具有保持运动状态的性质, 即惯性。在直线运动中表示惯性大小的量是质量; 在旋转运动中, 表示惯性大小的量叫作转动惯量, 常用字母  $J$  表示。同一物体即可以做直线运动, 也可以转动, 所以转动惯量与质量是直接相关的。质量大的物体在转动时, 其转动惯量大; 同时, 转动惯量的大小显然还与物体距转轴轴心的距离有关。举个例子来分析一下: 在绳子的一端拴一个钢球, 用手抓住绳子, 甩动钢球, 如图 2.3 所示。

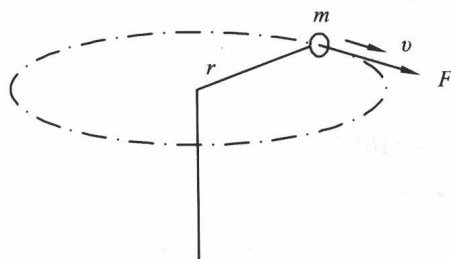


图 2.3 圆周运动的转动惯量

如果钢球转动时沿切线方向的力是  $F$ , 钢球质量是  $m$ , 沿切线方向的线速度是  $v$ , 加速度是  $a = \frac{dv}{dt}$ , 根据直线运动定律有

$$F = ma \quad (2.6)$$

式中  $F$ ——沿切线方向的力, N;  
 $m$ ——钢球质量, kg;  
 $a$ ——加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

设物体在时间  $t$  内转过的角位移是  $\theta$ , 走过的圆弧是  $s$ , 则线速度  $v$  为

$$v = \frac{s}{t} = \frac{r\theta}{t} = r\omega \quad (2.7)$$



式中  $\omega$ ——转动的角速度, rad/s。

如角加速度为  $\alpha$ , 则有

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (2.8)$$

由式(2.7)、式(2.8)可得

$$\alpha = \frac{1}{r} \frac{dv}{dt} = \frac{a}{r} \quad (2.9)$$

故

$$T = Fr = mar = mr\alpha r = mr^2\alpha \quad (2.10)$$

式中,  $T$  是产生角加速度的转矩。

与直线运动定律  $F = ma$  相比, 转动的运动定律应该是

$$T = Ja \quad (2.11)$$

因此转动惯量为

$$J = mr^2 \quad (2.12)$$

为了方便起见, 常把转动惯量的公式写成

$$J = m\rho^2 \quad (2.13)$$

式中,  $\rho$  是物体对转轴的惯性半径(回转半径)。旋转物体的形状不同或旋转轴心的位置不同, 则物体对转轴的惯性半径也不同。有时采用惯性直径  $D$  代替物体对转轴的惯性半径

$\rho$ , 应有  $\rho = \frac{D}{2}$ , 故有

$$J = m\left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}mD^2 \quad (2.14)$$

因旋转物体的质量  $m$  与所受的重力有如下关系, 即

$$G = mg \quad (2.15)$$

由此得出

$$J = \frac{GD^2}{4g} \quad (2.16)$$

或

$$GD^2 = 4Jg \quad (2.17)$$

式中  $GD^2$ ——一个物理量, 叫作飞轮转矩或飞轮惯量,  $\text{N} \cdot \text{m}^2$ ;

$m$ ,  $G$ ——旋转体的质量(kg)与重量(N);