



普通高等教育“十二五”机电类规划教材

精品力作



机电传动与控制 (第2版)

王宗才 主 编

精品课程配套教材

采用国家最新标准

配套习题、答案、课件等教学资源

• 教学资源请登录华信教育资源网 (www.hxedu.com.cn) 免费获取



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”机电类规划教材

机电传动与控制

(第2版)

王宗才 主编

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

全书分为 2 篇, 共 8 章, 内容包括直流电动机的工作原理和特性, 三相异步电动机的工作原理及特性, 常用控制电动机的工作原理和应用, 电动机的选择, 机电传动系统的继电器-接触器控制, 可编程序控制器控制和微机控制。

本书课程体系新, 内容实用, 重点突出。全书分为机电传动系统的驱动元件、电动机与机电传动系统的控制两篇, 层次分明又相互联系, 知识体系完整。

本书适合用作为高等工科院校机械电子工程、机械工程及自动化及相关机电类专业的本科生、研究生教材, 也可供高职高专等相关专业使用及有关的工程技术人员参考。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

机电传动与控制 / 王宗才主编. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2014.2

普通高等教育“十二五”机电类规划教材

ISBN 978-7-121-21904-7

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 (2013) 第 274366 号

策划编辑: 李 洁

责任编辑: 刘 凡

印 刷: 北京市李史山胶印厂

装 订: 北京市李史山胶印厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 26.5 字数: 678 千字

印 次: 2014 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 49.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

第 2 版前言

《机电传动与控制》教材自 2011 年出版以来,经兄弟院校使用,反映良好,同时也给出了一些中肯的意见和建议,另外,随着教学改革不断深入及相关学科技术的发展,机电控制的内容也需要补充完善,为此,根据大家的意见和教学实践,考虑到学科发展和专业改革需要,对第 1 版的内容进行了修订。主要修订和补充内容说明如下:

(1) 教材的体系和风格不变,贴近实际,强调应用,方便自学。

(2) 鉴于 PLC 在工程中的广泛应用,对第 7 章的内容进行了补充:

① 增加 S7-200 PLC 功能指令的介绍及应用实例;

② 增加 PLC 人机界面设计的介绍与应用;

③ 增加 PLC 可靠性设计的介绍。

(3) 鉴于变频器在工程中的广泛应用,丰富了对变频器相关内容的介绍,重点突出变频器的应用。

(4) 重新编写了各章的习题与思考题,方便学生学习。

(5) 订正了第 1 版中出现的错误。

本书适合作为高等工科院校机械电子工程、机械工程及自动化及相关机电类专业的本科生、研究生教材,也可供高职高专等相关专业使用及有关的工程技术人员参考。本书的教学资源(PPT 课件,习题答案或提示,课程设计指导, S7-200 快速参考手册等)请登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)免费索取。

河南工业大学王宗才任本书主编,负责全书修订的组织、统稿和改稿工作。本书的绪论、第 1、7 章由河南工业大学王宗才编写;第 2、4 章由河南理工大学张小明编写;第 3、5 章由河南理工大学杜习波编写;第 6 章由新乡学院郭宏亮编写;第 8 章由河南工业大学邱超编写。

在本书修订过程中,参考了许多教材和相关资料,在此向这些教材和资料的作者致以深切的感谢。本书的修订,得到了电子工业出版社的大力支持和帮助,在此也一并表示衷心的感谢。

限于编者水平及时间紧迫,书中难免存在错漏和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2013 年 12 月

第 1 版前言

机电传动与控制是高等工科院校中一门应用性很强的技术基础课，同时又具有专业课的性质，涉及的基础理论和实际知识面广，是电磁学、动力学、热力学、电气控制、伺服控制等学科知识的综合。随着计算机技术、电力电子技术、自动控制技术的发展，机电传动系统的控制已由继电器—接触器硬接线的常规控制转向以微机为核心的软件控制。特别是可编程控制器(PLC)，它具有抗干扰能力强、可靠性和性能价格比高、编程方便、易于应用等特点，在机电传动系统中得到了广泛的应用。

为了适应新技术的发展，满足工程实际的需要，我们编写了这本教材。本书分为两篇，共 8 章内容。第 1 篇介绍机电传动系统的驱动元件，包括第 1 章电动机概述、第 2 章直流电动机、第 3 章交流电动机、第 4 章控制电动机、第 5 章机电传动控制系统中电动机的选择。第 2 篇介绍机电传动系统的控制，包括第 6 章机电传动系统继电器—接触器控制、第 7 章机电传动系统可编程序控制器控制、第 8 章机电传动系统微机控制。本书层次分明又相互联系，知识体系完整。在内容组织上，本书突出新（新技术、新元件），侧重应用，适当淡化纯理论分析，彰显应用实例。每章后均有习题与思考题，便于学生课后练习。

本书适合作为高等工科院校机械电子工程、机械工程及自动化及相关机电类专业的本科生、研究生教材，也可供高职高专、函大、夜大及职大等相关专业使用及有关的工程技术人员参考。

本书由河南工业大学王宗才任主编，负责全书的组织、统稿和改稿工作。本书的绪论、第 1 章、第 7 章由河南工业大学王宗才编写；第 2 章、第 4 章由河南理工大学张小明编写；第 3 章、第 5 章由河南理工大学杜习波编写；第 6 章由新乡学院郭宏亮编写；第 8 章由河南工业大学邱超编写。

在本书的编写过程中，参考了大量相关教材和资料，在此对这些教材和资料的作者致以深切的感谢。在本书的出版过程中，得到了电子工业出版社的大力支持和帮助，在此也一并表示衷心的感谢。

由于编者水平及编写时间所限，书中难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者给予批评指正。

编 者

目 录

绪 论	1
一、机电传动系统的组成	1
二、机电传动及其控制系统的发展概况	1
三、机电传动系统的动力学基础	3
四、课程的性质与任务	10
习题与思考题	10
第 1 篇 机电传动系统的驱动元件	
第 1 章 电动机概述	15
1.1 电动机的型号与分类	15
1.2 电动机外壳防护等级	17
1.3 电动机中的电磁定律	18
1.4 电动机中使用的材料	22
1.5 电动机中的电磁功率损耗	22
习题与思考题	23
第 2 章 直流电动机	24
2.1 直流电动机的结构和分类	24
2.1.1 直流电动机的基本结构	24
2.1.2 直流电动机的分类	28
2.2 直流电动机的工作原理	29
2.3 直流电动机的额定参数	32
2.4 直流电动机的机械特性	33
2.4.1 他励直流电动机的机械特性	33
2.4.2 串励直流电动机的机械特性	41
2.4.3 复励直流电动机的机械特性	43
2.5 他励直流电动机的启动特性	43
2.6 他励直流电动机的调速特性	46
2.6.1 改变电枢电路外串电阻调速	48
2.6.2 改变电动机电枢供电电压调速	49
2.6.3 改变电动机主磁通调速	51
2.7 他励直流电动机的制动特性	54
2.7.1 能耗制动	55
2.7.2 反接制动	58
2.7.3 反馈制动	61
习题与思考题	64
第 3 章 交流电动机	67
3.1 三相异步电动机的结构和工作原理	67
3.1.1 三相异步电动机的基本结构	67

3.1.2	三相异步电动机的工作原理	69
3.1.3	三相异步电动机的旋转磁场	69
3.1.4	定子绕组出线端子的连接方式	72
3.2	三相异步电动机的定子电路和转子电路	73
3.2.1	三相异步电动机的定子电路	73
3.2.2	三相异步电动机的转子电路	75
3.2.3	三相异步电动机的额定参数	76
3.2.4	三相异步电动机的功率传递	77
3.3	三相异步电动机的电磁转矩与机械特性	78
3.3.1	三相异步电动机的电磁转矩	78
3.3.2	三相异步电动机的机械特性	79
3.4	三相异步电动机的启动方法	82
3.4.1	三相笼型异步电动机的启动方法	82
3.4.2	绕线式三相异步电动机的启动方法	87
3.4.3	特殊三相笼型异步电动机	89
3.5	三相异步电动机的调速方法	91
3.5.1	调压调速	91
3.5.2	转子电路串电阻调速	92
3.5.3	变极对数调速	93
3.5.4	变频调速	94
3.6	三相异步电动机的制动	97
3.6.1	反馈制动	97
3.6.2	反接制动	98
3.6.3	能耗制动	99
3.7	单相异步电动机	100
3.7.1	单相异步电动机的工作原理	100
3.7.2	单相异步电动机的启动方法	102
3.7.3	单相异步电动机的调速方法	103
3.8	三相同步电动机	104
3.8.1	三相同步电动机的结构	104
3.8.2	三相同步电动机的工作原理	105
3.8.3	三相同步电动机的启动方法	106
3.8.4	三相同步电动机的特点	108
	习题与思考题	108
第4章	控制电动机	110
4.1	伺服电动机	110
4.1.1	交流伺服电动机	111
4.1.2	直流伺服电动机	115
4.1.3	两相交流伺服电动机与直流伺服电动机的性能比较	118
4.2	力矩电动机	119
4.2.1	永磁式直流力矩电动机的结构特性	119

4.2.2	直流力矩电动机的特点	120
4.3	小功率同步电动机	121
4.3.1	永磁式同步电动机	121
4.3.2	磁阻式电磁减速同步电动机	123
4.3.3	磁滞式同步电动机	124
4.4	步进电动机	126
4.4.1	步进电动机的结构与分类	126
4.4.2	步进电动机的工作原理	128
4.4.3	步进电动机的运行特性	131
4.4.4	步进电动机的主要性能指标	134
4.4.5	步进电动机的选择	135
4.5	直线电动机	135
4.5.1	直线异步电动机	136
4.5.2	直线直流电动机	139
4.5.3	直线同步电动机	141
4.5.4	直线步进电动机	142
	习题与思考题	144

第 5 章	机电传动控制系统中电动机的选择	146
5.1	电动机功率选择的原则	146
5.2	电动机的温度变化规律	147
5.3	不同工作制电动机功率的选择	148
5.3.1	连续工作制电动机功率的选择	148
5.3.2	短时工作制电动机功率的选择	151
5.3.3	重复短时工作制电动机功率的选择	152
5.4	电动机功率选择的统计法和类比法	154
5.5	电动机种类、电压、转速和结构形式的选择	154
5.5.1	根据生产机械的负载性质来选择电动机的类型	154
5.5.2	电动机电压等级的选择	155
5.5.3	电动机额定转速的选择	155
5.5.4	电动机结构形式的选择	156
	习题与思考题	156

第 2 篇 机电传动系统的控制

第 6 章	机电传动系统的继电器-接触器控制	159
6.1	常用低压电器	160
6.1.1	低压开关	161
6.1.2	低压断路器	163
6.1.3	接触器	165
6.1.4	继电器	167
6.1.5	熔断器	173
6.1.6	主令电器	175
6.2	电气控制系统的电路图及绘制原则	179

6.2.1	电气控制系统图中的图形符号和文字符号	179
6.2.2	电气原理图	180
6.2.3	电气元件布置图	182
6.2.4	电气安装接线图	183
6.3	三相笼型异步电动机的基本控制线路	184
6.3.1	三相笼型异步电动机全压启动控制线路	184
6.3.2	三相笼型异步电动机降压启动控制线路	185
6.3.3	三相笼型异步电动机正反转控制线路	191
6.3.4	三相笼型异步电动机制动控制线路	193
6.3.5	多速三相笼型异步电动机控制线路	199
6.3.6	三相笼型异步电动机的其他控制线路	200
6.4	继电器-接触器控制系统的设计	203
6.4.1	继电器-接触器控制系统设计的基本内容	203
6.4.2	电气原理图设计的基本步骤及一般规律	203
6.4.3	电气控制线路设计举例	205
	习题与思考题	210
第 7 章	机电传动系统的可编程序控制器控制	211
7.1	可编程序控制器概述	211
7.1.1	可编程序控制器的产生	211
7.1.2	可编程序控制器的特点	212
7.1.3	可编程序控制器的主要功能及应用	214
7.1.4	可编程序控制器与继电器-接触器控制系统的区别	215
7.1.5	可编程序控制器的发展趋势	216
7.2	可编程序控制器的组成与工作原理	219
7.2.1	可编程序控制器的基本组成	219
7.2.2	可编程序控制器的工作原理及主要技术指标	223
7.2.3	可编程序控制器的分类	225
7.2.4	可编程序控制器的编程语言	225
7.3	S7-200 系列 PLC 的基础知识	228
7.3.1	S7-200 系列 PLC 的硬件系统	228
7.3.2	S7-200 系列 PLC 的内部资源及寻址方式	235
7.3.3	S7-200 系列 PLC 的指令系统及编程软件	242
7.4	S7-200 系列 PLC 的基本指令及编程方法	244
7.4.1	基本逻辑指令及使用举例	244
7.4.2	定时器指令和计数器指令	254
7.4.3	顺序控制指令	260
7.4.4	程序控制指令	262
7.4.5	梯形图编程的基本规则及注意事项	269
7.5	S7-200 系列 PLC 的功能指令及应用	272
7.5.1	运算指令	272
7.5.2	数据处理指令	281

7.5.3	表功能指令	289
7.5.4	转换指令	292
7.5.5	特殊指令	299
7.6	典型简单电路的 PLC 程序设计	325
7.6.1	启动、保持、停止电路	325
7.6.2	互锁电路	326
7.6.3	脉冲信号发生电路	326
7.6.4	脉冲宽度可调电路	327
7.6.5	长计数电路	327
7.6.6	长定时电路	328
7.6.7	报警电路	329
7.6.8	单按钮启停电路	330
7.7	PLC 控制系统的设计及应用	331
7.7.1	PLC 控制系统设计概述	331
7.7.2	PLC 控制系统的硬件设计	333
7.7.3	PLC 程序设计常用的方法	339
7.7.4	人机界面设计	350
7.7.5	提高 PLC 控制系统可靠性的措施	354
7.7.6	PLC 工程应用实例	362
	习题与思考题	371
第 8 章	机电传动系统的微机控制	375
8.1	微机控制系统的组成与特点	375
8.2	直流电动机的调速控制系统	378
8.2.1	直流电动机的调速方法	378
8.2.2	直流电动机的脉宽调制 (PWM) 电路	378
8.2.3	直流电动机调速的微机控制系统	382
8.3	三相交流异步电动机的变频调速控制系统	384
8.3.1	三相交流异步电动机的变频调速概述	384
8.3.2	变频器简介	387
8.3.3	SPWM 电压型变频器	392
8.3.4	通用变频器的介绍及应用	396
8.3.5	PLC 控制变频器的方法及应用	399
8.4	步进电动机的微机控制	402
8.4.1	步进电动机的脉冲分配	402
8.4.2	步进电动机的驱动电路	405
8.4.3	步进电动机的细分电路	408
8.4.4	步进电动机的微机控制	408
8.4.5	步进电动机的 PLC 控制	410
	习题与思考题	411
	参考文献	413

绪 论

一、机电传动系统的组成

机电传动系统（又称电力传动系统或电力拖动系统）是以电动机为原动机驱动生产机械的系统的总称。它的目的是将电能转变为机械能，实现生产机械的启动、停止及速度调节，满足各种生产工艺过程的要求，实现生产过程的自动化。该系统不仅包括拖动生产机械的电动机，而且包含控制电动机的一整套控制系统。机电传动系统的组成框图如图 0-1 所示。

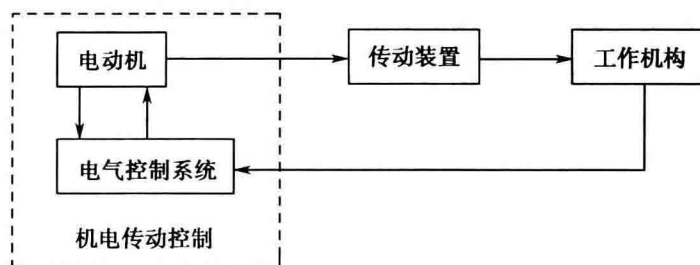


图 0-1 机电传动系统的组成框图

二、机电传动及其控制系统的发展概况

1. 机电传动的发展

机电传动是随着电动机的发展而发展的。1866 年，德国工程师西门子制成发电机；1870 年，比利时人格拉姆发明了电动机，电力开始取代蒸汽成为拖动机器的新能源。随后，各种用电设备相继出现。1882 年，法国学者德普勒发明了远距离送电的方法。同年，美国著名发明家爱迪生创建了美国第一个火力发电站，把输电线接成网络。从此，电力作为一种新能源而得到了广泛应用。而在当时，电动机刚刚在工业上初步应用，各种电动机初步定型，电动机设计理论和电动机设计计算也初步建立。

随着社会生产的发展和科技的进步，对电动机也提出了更高的要求，如性能良好、运行可靠、单位容量的质量轻、体积小等。而且随着自动控制系统的发展要求，在旋转电动机的理论基础之上，又派生出多种精度高、响应快的控制电动机，成为电动机学科的一个独立分支。目前，动力电动机正向着大型化、巨型化发展，而专用电动机正向着高精度、长寿命、微型化发展。

由于各类电动机已成为各种机电系统中极为重要的元件,所以机电传动便发展成为把电子学、电动机学和控制论结合在一起的新兴学科。

机电传动的发展大体上经历了成组拖动、单电动机拖动和多电动机拖动三个阶段。在电力拖动代替蒸汽或水力拖动之初,其方式是成组拖动。所谓成组拖动,就是指一台电动机拖动一根天轴(或地轴),然后再由天轴(或地轴)通过皮带轮和皮带分别拖动各生产机械,从电动机到各个生产机械的能量传递及各个生产机械之间的能量分配完全采用机械的方法完成。这种传动方式效率低,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。所谓单电动机拖动,就是指用一台电动机拖动一台生产机械。它虽较成组拖动前进了一步,但当一台生产机械的运动部件较多时,机械传动机构仍十分复杂。所谓多电动机拖动,就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,这种拖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,因此,现代化机电传动基本上均采用这种拖动形式。

2. 电动机控制系统的发展

对电动机的控制可分为简单控制和复杂控制两种。简单控制是指对电动机进行启动、制动、正反转控制和顺序控制。这类控制可通过继电器、可编程控制器和开关元件来实现。复杂控制是指对电动机的转速、转角、转矩、电压、电流等物理量进行控制,而且有时往往需要非常精确的控制。以前,对电动机简单控制的应用较多。但是随着生产的发展和科技水平的提高,人们对自动化的需求越来越高,这使得电动机的复杂控制逐渐成为主流,其应用领域极为广泛,例如,军事和航天用的雷达天线、火炮瞄准、惯性导航、卫星姿态、飞船光电池对太阳跟踪的控制等;工业方面的各种加工中心、专用加工设备、数控机床、工业机器人、塑料机械、印刷机械、绕线机、纺织机械、新型工业缝纫机、绣花机、泵和压缩机、轧机主传动、轧辊等设备的控制;办公设备中的光盘驱动器、绘图仪、扫描仪、打印机、传真机、复印机等控制;音像设备和家用电器中的录像机、数码相机、数码摄像机、DVD、洗衣机、冰箱、空调、电扇、电动自行车等的控制。随着自动控制理论的不断发展和新型电力电子功率器件的不断涌现,电动机的控制也发生了深刻的变化,正在不断地完善和提高。

最早的机电传动控制系统是20世纪初出现的继电器-接触器自动控制系统,它属于有触点断续控制系统。该系统仅借助简单的接触器与继电器,实现对控制对象的启动、停车及有级调速等控制,其控制速度较慢,控制精度较差。

接着,出现了直流发电机-电动机调速系统。由于该系统需要旋转变流机组(至少包括两台与调速电动机容量相当的旋转电动机),还要一台励磁发动机,所以设备多、体积大、费用高、效率低、安装需打地基、运行有噪声、维护不方便。20世纪50年代,采用了水银整流器(大容量时)和闸流管(小容量时)静止变流装置来代替旋转变流机组。到了20世纪60年代,出现了晶闸管-直流电动机无级调速系统。晶闸管出现以后,又陆续出现了其他种类的电力电子器件,如门极可关断晶闸管(GTO)、电力功率晶体管(GTR)、电力场效应晶体管(电力MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等。由于这些器件的电压、电流定额及其他电气特性均得到了很大的改善,所以它们具有效率高、控制特性好、反应快、寿命长、可靠性高、维护容易、体积小、质量轻等优点,这就为机电传动控制系统开辟了新纪元。到了20世纪80年代,由于逆变技术、脉宽调制技术、矢量控制技术的出现和发展,使交流电动机无级调速系

统得到了迅速发展。由于交流电动机没有电刷与换向器,较之直流电动机具有结构简单、价格便宜、维护方便、惯性小等一系列优点,而且其单机容量可以做得很大,电压等级可以做得很高,可以实现高速拖动等,所以交流机电传动系统取代直流机电传动系统已经是无可争议的事实了。目前已出现了多种以多用芯片或 DSP 为核心的变频器调速系统,它们使交流电动机的控制变得更简单、可靠性更高、拖动系统的性能更好。它们的出现为机电传动系统的控制开辟了新纪元。

随着数控技术的发展和计算机的应用,特别是微型计算机的出现和应用,控制系统又发展到一个新阶段——采样控制。采样控制也是一种断续控制,但是和最初的断续控制不同,它的控制间隔(采样周期)比控制对象的变化周期短得多。因此,它在客观上完全等效于连续控制。采样控制把电力电子技术与微电子技术、计算机技术紧密地结合在一起,推动着机电控制技术向着集成化、智能化、信息化、网络化方向发展。

三、机电传动系统的动力学基础

机电传动系统是一个由电动机拖动、通过传动机构带动生产机械运转的整体。为了使该系统稳定运行,就需要知道电动机的工作特性及生产机械的负载特性。尽管电动机种类繁多、工作特性各异,生产机械的负载特性也可以是多种多样的,但从动力学的角度来分析,它们都应服从动力学的基本规律。

1. 单轴机电传动系统的运动方程式

如图 0-2 所示为一单轴机电传动系统。由电动机 M 产生的转矩 T_M 用来克服负载转矩 T_L ,带动生产机械运动。

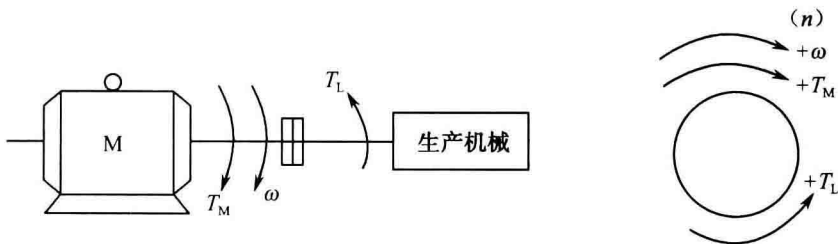


图 0-2 单轴机电传动系统

根据动力学列运动平衡方程式,则有

$$T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (0-1)$$

式中 T_M ——电动机的输出转矩 ($N \cdot m$);

T_L ——电动机的负载转矩 ($N \cdot m$);

ω ——电动机的角速度 (rad/s);

J ——转动惯量 ($kg \cdot m^2$)。

在实际工程计算中,经常用转速 $n(r/min)$ 代替角速度 $\omega(rad/s)$ 。其关系为 $\omega = 2\pi n/60 = n/9.55$, 则式 (0-1) 就变为

$$T_M - T_L = \frac{1}{9.55} J \frac{dn}{dt}$$

(0-2)

式（0-1）就是单轴机电传动系统的运动方程式。它是研究机电传动系统最基本的方程式，决定着系统运动的特征。当 $T_M > T_L$ 时， $\frac{d\omega}{dt} > 0$ ，系统加速；当 $T_M < T_L$ 时， $\frac{d\omega}{dt} < 0$ ，系统减速；当 $T_M = T_L$ 时， $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ，系统恒速。系统处于加速或减速的运动状态称为动态，系统处于恒速的运动状态称为稳态或静态。

由于传动系统有各种运动状态，以及工作机械负载性质的不同，输出转矩 T_M 和负载转矩 T_L 不仅大小不同，方向也是变化的，所以对式（0-1）中的转速、转矩符号给出一种约定（通常以转速 n 的方向作为参考来确定 T_M 、 T_L 的正负，如图 0-3 所示）：当 T_M 与 $n(+)$ 同向时为正，此时 T_M 为驱动转矩；当 T_M 与 $n(+)$ 反向时为负，此时 T_M 为制动转矩。 T_L 与 $n(+)$ 反向时为正（制动），反之为负（拖动）。

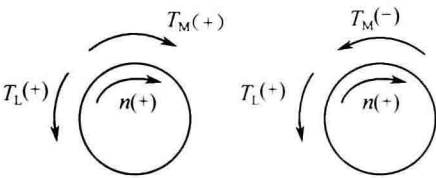


图 0-3 T_M 、 T_L 符号的约定

2. 多轴机电传动系统的运动方程式

式（0-1）是图 0-2 所示的单轴机电传动系统的运动方程式。但在实际机电传动系统中，电动机与生产机械之间往往设有减速齿轮箱、蜗轮、蜗杆、传动带等减速装置，这就形成了多轴机电传动系统，如图 0-4 所示。在这种情况下，为了列出这个系统的运动方程，必须先将各转动部分的转矩和转动惯量或直线运动部分的质量都折算到某一根轴上，一般折算到电动机轴上，即折算成图 0-2 所示的最简单的典型单轴系统。折算的基本原则是，折算前的多轴系统与折算后的单轴系统在能量关系上或功率关系上保持不变。

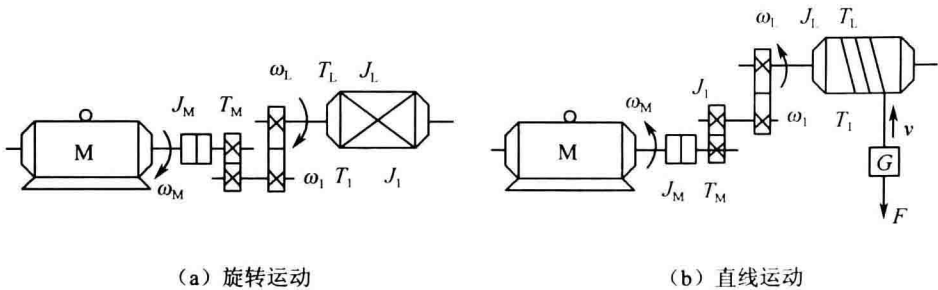


图 0-4 多轴机电传动系统

1) 负载转矩的折算

当负载转矩是静态转矩时，可根据静态时的功率守恒原则进行折算。

对于旋转运动，如图 0-4（a）所示，当系统匀速运动时，生产机械的负载功率为

$$P_L = T_L \omega_L$$

式中 T_L ——生产机械的负载转矩 ($N \cdot m$) ;

ω_L ——生产机械的旋转角速度 (rad/s)。

电动机输出功率为

$$P_M = T_M \omega_M$$

式中 T_M ——电动机的输出转矩 ($N \cdot m$) ;

ω_M ——电动机转轴的角速度 (rad/s)。

由于系统处于匀速运行时, 电动机输出功率应该等于整个系统的负载功率, 即相当于电动机轴上有一等效的负载转矩 T_{eq} , 故有

$$P_M = T_{eq} \omega_M$$

考虑到传动机构在传递功率的过程中有损耗, 这个损耗可以用传动效率 η 来表示, 即

$$\eta = \frac{P_L}{P_M} = \frac{T_L \omega_L}{T_{eq} \omega_M}$$

于是可得折算到电动机轴上的负载转矩为

$$T_{eq} = \frac{T_L \omega_L}{\eta \omega_M} = \frac{T_L}{\eta i} \quad (0-3)$$

式中 η ——电动机拖动生产机械运动时的传动效率;

i ——传动机构的速比, $i = \omega_M / \omega_L$ 。

对于直线运动, 如图 0-4 (b) 的卷扬机所示, 若生产机械直线运动部件的负载力为 F , 运动速度为 v , 则所需的机械功率为

$$P_L = Fv$$

它反映在电动机轴上的机械功率为

$$P_M = T_{eq} \omega_M$$

式中 T_{eq} ——负载力 F 在电动机轴上产生的等效负载转矩。

如果是电动机拖动生产机械旋转或移动 (如卷扬机拖动重物上升), 则传动机构中的损耗应由电动机承担, 根据功率平衡关系, 有

$$T_{eq} \omega_M = Fv / \eta$$

将 $\omega_M = 2\pi n_M / 60$ 代入上式可得

$$T_{eq} = 9.55 Fv / (n_M \eta) \quad (0-4)$$

式中 n_M ——电动机轴的转速 (r/min)。

如果是生产机械拖动电动机旋转 (如在卷扬机下放重物时, 电动机处于制动状态), 则传动机构中的损耗由生产机械的负载来承担, 于是有

$$T_{eq} \omega_M = Fv \eta'$$

则 $T_{eq} = 9.55 Fv \eta' / n_M$

(0-5)

式中 η' ——生产机械拖动电动机运动时的传动效率。

2) 转动惯量的折算

转动惯量与运动系统的动能有关, 因此, 可根据动能守恒原则进行折算。设 J_{eq} 表示折算到电动机轴上的总转动惯量, 对于图 0-4 (a) 所示的旋转运动有

$$\frac{1}{2} J_{eq} \omega_M^2 = \frac{1}{2} J_M \omega_M^2 + \frac{1}{2} J_1 \omega_1^2 + \frac{1}{2} J_L \omega_L^2$$

则

$$J_{\text{eq}} = J_{\text{M}} + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_L}{i_L^2} \quad (0-6)$$

式中 J_{M} 、 J_1 、 J_L ——电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的转动惯量;

ω_{M} 、 ω_1 、 ω_L ——电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的角速度;

i_1 ——电动机轴与中间传动轴之间的速比, $i_1 = \omega_{\text{M}}/\omega_1$;

i_L ——电动机轴与生产机械轴之间的速比, $i_L = \omega_{\text{M}}/\omega_L$ 。

当速比 i_1 较大时, 中间传动机构的转动惯量 J_1 在折算后占整个系统的比重不大。为计算方便起见, 实际工程中多用适当加大电动机轴上的转动惯量 J_{M} 的方法来考虑中间传动机构的转动惯量 J_1 的影响, 于是有

$$J_{\text{eq}} = \delta J_{\text{M}} + \frac{J_L}{i_L^2} \quad (0-7)$$

式中 δ ——一般为 1.1~1.25。

对于图 0-4 (b) 所示的直线运动, 设直线运动部件的质量为 m , 根据动能守恒有

$$\frac{1}{2} J_{\text{eq}} \omega_{\text{M}}^2 = \frac{1}{2} J_{\text{M}} \omega_{\text{M}}^2 + \frac{1}{2} J_1 \omega_1^2 + \frac{1}{2} J_L \omega^2 + \frac{1}{2} m v^2$$

则折算到电动机轴上的总转动惯量为

$$J_{\text{eq}} = J_{\text{M}} + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_L}{i_L^2} + m \frac{v^2}{\omega_{\text{M}}^2} \quad (0-8)$$

3) 多轴机电传动系统的具体运动方程式

依照上述折算方法, 就可把具有中间传动机构、带有旋转运动部件或直线运动部件的多轴机电传动系统, 折算成等效的单轴拖动系统, 将所求得的 T_{eq} 、 J_{eq} 代入式 (0-1) 就可得到多轴机电传动系统的运动方程式为

$$T_{\text{M}} - T_{\text{eq}} = J_{\text{eq}} \frac{d\omega_{\text{M}}}{dt} \quad (0-9)$$

或

$$T_{\text{M}} - T_{\text{eq}} = \frac{1}{9.55} J_{\text{eq}} \frac{dn_{\text{M}}}{dt} \quad (0-10)$$

3. 机电传动系统的负载特性

在前面所讨论的机电传动系统的运动方程式中, 负载转矩 T_L 可能是不变的常数, 也可能是转速 n 的函数。同一转轴上负载转矩和转速之间的函数关系, 称为机电传动系统的负载特性, 也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。为了便于和电动机的机械特性配合起来分析传动系统的运行情况, 今后提及生产负载的负载特性时, 除特别说明外, 均指电动机轴上的负载转矩和转速之间的函数关系, 即 $n=f(T_L)$ 。

不同类型的生产机械在运动中受阻力的性质不同, 其负载特性曲线的形状也有所不同。典型的负载特性大体上可以归纳为以下几种。

1) 恒转矩型负载特性

这一类型的负载转矩 T_L 与转速 n 无关, 即不管转速怎样变化, 负载转矩不变。恒转矩型负载有反抗性恒转矩负载和位能性恒转矩负载两种, 如图 0-5 所示。

(1) 反抗性恒转矩负载。反抗性转矩也称为摩擦转矩, 是因摩擦、非弹性体的压缩、拉伸与扭转等作用所产生的负载转矩, 机床加工过程中切削力所产生的负载转矩就是反抗性转矩。反抗性转矩的方向恒与运动方向相反, 当运动方向发生改变时, 负载转矩的方向也会随着改变,

因而它总是阻碍运动的。按前面介绍的关于转矩正方向的约定可知,反抗性转矩恒与转速 n 取相同的符号,即 n 为正方向时 T_L 为正,特性曲线在第一象限; n 为反方向时 T_L 为负,特性曲线在第三象限,如图 0-5 (a) 所示。

(2) 位能性恒转矩负载。位能性转矩与反抗性转矩不同,它是由物体的重力和弹性体的压缩、拉伸与扭转等作用所产生的负载转矩,卷扬机起吊重物时重力所产生的负载转矩就是位能性转矩。位能性转矩的作用方向恒定,与运动方向无关,它在某方向阻碍运动,而在相反方向则促进运动。由于重力的作用,卷扬机起吊重物时的方向永远向着地心,因此,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 方向相反;当重物下降时, T_L 则与 n 方向相同。不管 n 为正向还是反向, T_L 都不变,其特性曲线在第一、第四象限,如图 0-5 (b) 所示。不难理解,在运动方程式中,反抗性转矩 T_L 的符号总是正的;位能性转矩 T_L 的符号则有时为正,有时为负。

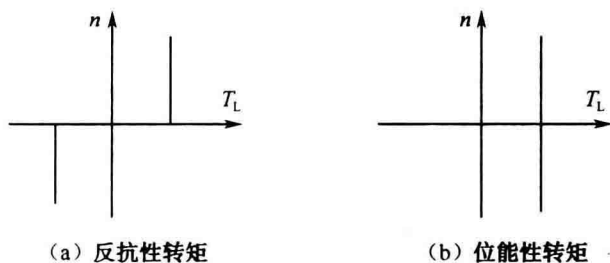


图 0-5 两种恒转矩型负载

2) 离心式通风机型负载特性

这一类型的负载是按离心力原理工作的,如离心式鼓风机、水泵等的负载转矩 T_L 与 n 的二次方成正比,即 $T_L=Kn^2$, K 为常数,其负载特性如图 0-6 所示。

3) 直线型负载特性

这一类型负载的负载转矩 T_L 随 n 的增加成正比地增大,即 $T_L=Kn$, K 为常数,其负载特性如图 0-7 所示。

实验室中作模拟负载用的他励直流发电机,当励磁电流和电枢电阻固定不变时,其电磁转矩与转速即成正比。

4) 恒功率型负载特性

这一类型负载的负载转矩 T_L 与转速 n 成反比,即 $T_L=K/n$, 或 $K=T_L n \propto P$ (常数),其负载特性如图 0-8 所示。例如,车床加工,在粗加工时,切削量大,负载阻力大,开低速;在精加工时,切削量小,负载阻力小,开高速。当选择这样的方式加工时,不同转速下的切削功率基本不变。

除了上述几种类型的负载特性外,还有一些生产机械具有各自的负载特性,如带曲柄连杆机构的生机械,它们的负载转矩 T_L 是随转角的变化而变化的,而球磨机、碎石机等生机械的负载转矩则随时间的变化而作无规律的随机变化等。

还应指出,实际使用中的负载可能是单一类型的,也可能是几种类型的综合。例如,实际使用中的通风机除了主要具有通风机性质的负载特性外,轴上还有一定的摩擦转矩 T_0 ,因此,其负载特性应为 $T_L=T_0+Kn^2$ 。