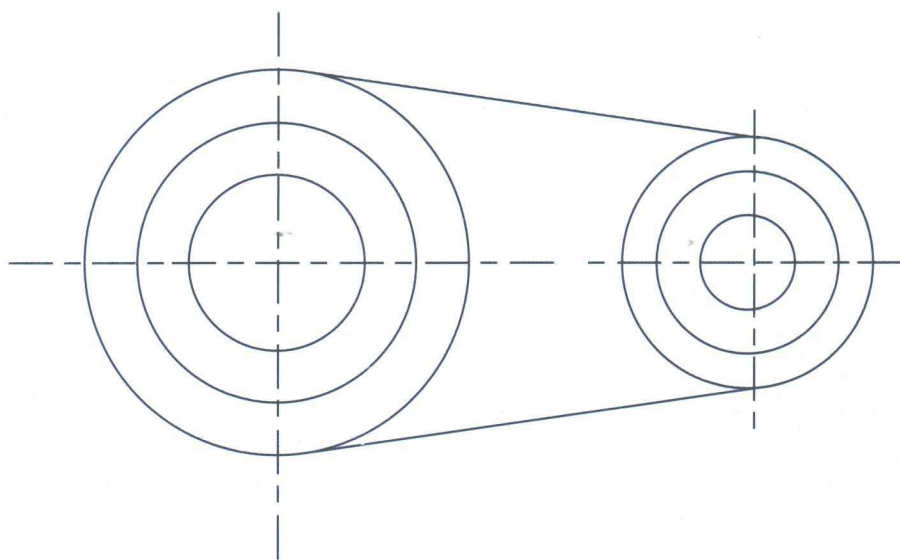


· 普通高等院校机械工程学科“十二五”规划教材 ·

机电传动控制

JIDIAN CHUANDONG
KONGZHI

■ 同志学 吴晓君 马松龄 张明慧 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



随书附光盘一张

普通高等院校机械工程学科“十二五”规划教材

机电传动控制

同志学 吴晓君 马松龄 张明慧 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统地介绍了机电传动控制系统中的有关电动机的基本理论及机电控制的基本知识,内容涉及知识面较广,其中包括机电传动系统的动力学基础,直流电动机、交流电动机、控制电动机的特性与调速,继电器—接触器控制系统,可编程控制器的编程等。

本书知识面宽、内容丰富、应用性强,体现了理论先导、机电结合、理论联系实际、精练实用的原则。理论阐述抓住本质,工程问题结合要点。全书内容实用、全面,由浅入深,重点突出,每章后附有习题与思考题。本书可作为机械设计制造及其自动化专业、机械电子工程或相关专业本科生教材,也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

机电传动控制/同志学等编著. —北京:国防工业出版社,2011.8

普通高等院校机械工程学科“十二五”规划教材

ISBN 978-7-118-07536-6

I. ①机... II. ①同... 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(2011)第 140554 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 14 $\frac{3}{4}$ 字数 338 千字

2011 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 35.00 元(含光盘)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

“机电传动控制”课程是各高校机械工程类专业最重要的基础课程之一。本教材是根据教育科学“十二五”国家规划项目中对机械设计制造及其自动化、机械电子工程专业本科人才培养目标的要求而精心编排的。从人才培养目标出发,在知识结构、内容安排、例题和习题选择等方面体现了机械工程专业特点,力求内容完整、结构紧凑、实用性强。教材的编写原则是,语言通畅,叙述清楚,讲解细致,便于教学。尽可能反映近年来与本课程有关的科技发展的新内容、新技术,并引入了工程应用实例。

本书从机电传动控制的必要环节出发,依据“机电传动控制”课程的教学目标,采用理论知识体系完整、知识面宽、综合性强、实用为度的知识构架。在内容组织上,从机电传动系统的动力学基础开始,介绍机电传动系统的运动方程式、生产机械的负载特性、过渡过程等基本知识,进而逐一深入阐述机电传动系统中直流电动机、交流电动机、伺服电动机的基本理论和特性;为突出机电结合工程实用,有专门章节叙述电动机的选择;由此涉及继电器—接触器控制知识以及可编程序控制器编程技术。各章节内容独立完整而又相互关联,从而构成完整的“机电传动控制”课程知识体系。通过本课程的学习,可使学生掌握电动机、电器结构、机电控制等必备的基础理论,了解机电传动控制系统的基本概念、工作原理、方法、类型及最新控制技术在机械设备上的应用。

全书共分8章。第2、4、6、8章由同志学编写,第1、7章由吴晓君编写,第3章由马松龄编写,第5章由张明慧编写。全书由同志学统稿。

对书中参考和引用的教材、资料的相关兄弟院校、单位和作者,一并表示感谢。限于编者的学识水平,加之时间仓促,书中难免存在不妥之处,诚望使用本书的教师和读者给予指正,在此我们表示衷心的感谢。

编 者

2011年6月于西安

目 录

第1章 绪论	1
1.1 机电传动与控制系统的发展概况	1
1.1.1 机电传动系统的发展	1
1.1.2 机电传动控制系统的发展	2
1.2 本课程的性质和任务	4
1.3 课程内容安排	4
第2章 机电传动系统的动力学基础	6
2.1 机电传动系统的运动方程式	6
2.1.1 单轴机电传动系统运动方程式	6
2.1.2 多轴机电传动系统的等效动力学模型	7
2.2 机电传动系统的典型负载特性	9
2.3 机电传动系统稳定运行的条件	10
2.4 机电传动系统的过渡过程	11
2.4.1 研究机电传动系统过渡过程的实际意义	11
2.4.2 机电传动系统产生过渡过程的原因	11
2.4.3 加快机电传动系统过渡过程的方法	12
习题与思考题	13
第3章 直流电动机的特性与调速	14
3.1 直流电动机的基本结构和工作原理	14
3.1.1 直流电动机的基本结构	14
3.1.2 直流电动机的基本工作原理	17
3.1.3 直流电动机铭牌数据	18
3.1.4 直流电动机的励磁方式	19
3.2 他励直流电动机的机械特性	19
3.2.1 他励直流电动机的机械特性方程	20
3.2.2 固有机械特性	21
3.2.3 人为机械特性	22
3.3 他励直流电动机的启动	24
3.3.1 电枢回路串接电阻启动	24
3.3.2 降压启动	25
3.4 他励直流电动机的调速	26
3.4.1 调速指标	26

3.4.2 常用的调速方法	27
3.5 他励直流电动机的制动	29
3.5.1 能耗制动	30
3.5.2 反接制动	31
3.5.3 反馈制动	33
3.6 直流调速控制系统简介	36
3.6.1 直流调速控制系统概述	36
3.6.2 晶闸管—电动机调速系统	38
3.6.3 直流脉宽调制调速系统基本工作原理	42
3.6.4 数字控制直流调速系统	42
3.6.5 产品化的数字直流调速装置简介	43
习题与思考题	45
第4章 交流电动机的特性与调速	47
4.1 三相异步电动机的结构和工作原理	47
4.1.1 三相异步电动机的基本结构	47
4.1.2 三相异步电动机的工作原理	48
4.1.3 三相异步电动机的铭牌数据	51
4.1.4 三相异步电动机的能流图	52
4.2 三相异步电动机的转矩和机械特性	52
4.2.1 三相异步电动机的定子电路和转子电路	52
4.2.2 三相异步电动机的电磁转矩	54
4.2.3 三相异步电动机的机械特性	55
4.3 三相异步电动机的启动特性	58
4.3.1 鼠笼式异步电动机的启动方法	59
4.3.2 线绕式异步电动机的启动方法	62
4.3.3 特殊鼠笼式电动机	63
4.4 三相异步电动机的调速方法与特性	65
4.4.1 变极调速	65
4.4.2 改变转差率调速	66
4.4.3 变频调速	70
4.5 三相异步电动机的制动特性	71
4.5.1 反馈制动	71
4.5.2 反接制动	72
4.5.3 能耗制动	73
4.6 交流变频调速系统简介	74
4.6.1 交流变频器基本构成与分类	74
4.6.2 通用变频器性能特点	78
4.6.3 变频电动机的特点	81
4.7 单相异步电动机	81

4.7.1	单相异步电动机的磁场	82
4.7.2	单相异步电动机的启动方法	83
4.8	同步电动机的基本结构和工作原理	83
4.8.1	同步电动机的基本结构	84
4.8.2	同步电动机工作原理	84
	习题与思考题	85
第5章	控制电动机	88
5.1	交流伺服电动机	88
5.1.1	两相交流伺服电动机的结构特点和工作原理	88
5.1.2	交流伺服电动机的特性及应用	89
5.2	步进电动机	93
5.2.1	反应式步进电动机的典型结构和工作原理	93
5.2.2	步进电动机的分类	96
5.2.3	反应式步进电动机的静态特性	97
5.2.4	反应式步进电动机的动态特性	97
5.2.5	驱动电源	98
5.3	力矩电动机	100
5.3.1	永磁式直流力矩电动机的结构特点	101
5.3.2	直流力矩电动机转矩大、转速低的原因	101
5.3.3	直流力矩电动机的特点和应用	102
5.4	小功率同步电动机	102
5.4.1	永磁式同步电动机	103
5.4.2	磁阻式电磁减速同步电动机	104
5.5	直流无刷电动机	105
5.5.1	无刷直流电动机的基本结构	105
5.5.2	无刷直流电动机的工作原理	106
5.5.3	无刷直流电动机调速系统	108
5.6	直线电动机	109
5.6.1	直线异步电动机的结构	109
5.6.2	直线异步电动机的工作原理	109
5.6.3	直线电动机应用举例	110
	习题与思考题	112
第6章	机电传动控制系统中电动机的选择	113
6.1	电动机容量选择的原则	113
6.2	电动机容量的选择方法	114
6.2.1	选择电动机容量的方法	114
6.2.2	不同工作制下电动机容量的选择	115
6.3	电动机的种类、电压、转速和结构形式的选择	120
6.3.1	类型的选择	120

6.3.2	电压等级的选择	121
6.3.3	电动机额定转速的选择	122
6.3.4	结构形式的选择	122
6.3.5	安装形式的选择	123
	习题与思考题	124
第7章	继电器—接触器控制系统	126
7.1	常用低压电器	126
7.1.1	熔断器	126
7.1.2	低压开关和低压断路器	127
7.1.3	主令电器	130
7.1.4	接触器	133
7.1.5	继电器	137
7.2	继电器—接触器控制的常用基本电路	143
7.2.1	继电器—接触器自动控制电路的构成	143
7.2.2	继电器—接触器控制的基本电路	145
7.2.3	常用自动控制方法	149
7.2.4	电气制动的基本控制电路	152
7.3	典型生产机械的继电器—接触器控制电路分析	154
7.3.1	KH—Z3040B 摇臂钻床电气控制电路分析	155
7.3.2	桥式起重机的电气控制	158
	习题与思考题	163
第8章	可编程控制器	164
8.1	可编程控制器结构和工作原理	164
8.1.1	PLC 系统基本组成	164
8.1.2	PLC 工作原理	166
8.2	S7-200 PLC 的数据类型与编程方法	168
8.2.1	S7-200 PLC 的编程元件	168
8.2.2	编程语言	171
8.3	S7—200PLC 的位操作指令	172
8.3.1	基本逻辑指令	172
8.3.2	定时器指令	178
8.3.3	计数器指令	183
8.3.4	比较指令	185
8.4	数据运算指令与处理指令	188
8.4.1	算术运算指令	188
8.4.2	数学函数指令	190
8.4.3	增减指令	191
8.4.4	逻辑运算指令	191
8.4.5	传送类指令	192

8.4.6 移位指令	194
8.4.7 填充指令	195
8.4.8 转换指令	195
8.5 程序控制指令	199
8.5.1 停止指令	199
8.5.2 跳转指令	199
8.5.3 子程序指令	200
8.5.4 循环指令	202
8.5.5 顺控指令	202
8.5.6 ENO 指令	204
8.6 特殊指令	205
8.6.1 中断指令	205
8.6.2 高速计数器指令	206
8.6.3 高速脉冲输出指令	211
8.6.4 PID 回路控制指令	218
习题与思考题	222
 附录 常用电气的图形符号与文字符号	 225
参考文献	228

第1章 绪论

1.1 机电传动与控制系统的发 展概况

机电传动系统是指以电动机为动力源,带动生产机械运动的运动整体。机电传动系统的目的是将电能转换成机械能,实现生产机械的启动、运动、切换和停止。一个完整的机电传动控制系统包含控制环节(电气控制)、驱动环节(原动力为电动机)和被控对象(机械部分)。其中任一环节中的技术更新,都会促进机电传动技术向前发展。

1.1.1 机电传动系统的发展

电动机是将电能转变为机械能的驱动装置。作为生产机械的动力源,电动机的主要作用是产生驱动转矩。电动机能提供的功率范围很大,从毫瓦级到万千瓦级。电动机使用方便,具有启动、加速、制动、反转等能力,能满足机电传动各种运行要求。

19 世纪末,第二次工业革命以电力的广泛应用为显著特点。由于电动机的出现,电力开始用于带动机器,成为补充和取代蒸汽动力的新能源,这使机械传动发生了变革,跨入了用电动机代替蒸汽机的电气时代。在其初期,常以一台电动机拖动一根天轴,然后再由天轴通过带轮和传动带分别拖动多台生产机械。这种拖动方式生产效率低,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。随后有了单电动机拖动系统,即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。在 20 世纪 30 年代出现了多电动机拖动系统,即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,左右垂直刀架和侧刀架、横梁机器夹紧机构,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,所以现代化机电传动基本上均采用这种拖动方式。

伴随着电动机驱动与调速系统的发展,机电传动系统得到快速的发展。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了广泛应用。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。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了突破性进展。交流调速具有许多优点,如单机容量和转速可大大高于直流电动机;交流电动机无需电刷与换向器,易于维护、可靠性高;能用于含有腐蚀性、易爆性和高粉尘气体等特殊环境中;与直流电动机相比,交流电动机还具有体积小、重量轻、制造简单、坚固耐用等优点。现在,交流调速已经突破关键技术,从实用阶段进入扩大应用、系列化的新阶段。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优越的直流调速性能。交流变频调速器及矢量控制伺服单元电动机已日益应用于工业中。交流调速技术的发展对机械行业产生的影响也日益显现。

除了驱动用电动机,控制用的伺服电动机在机电设备中具有的重要地位也日益凸显。伺服系统的发展经历了由液压到电气的过程。20 世纪 50 年代,无刷电动机和直流电动机实现了产品化,并在计算机外围设备和机械设备上获得了广泛应用。70 年代则是直流伺服电动机的应用最为广泛的时期。70 年代后期至 80 年代初期,随着微处理器技术、大功率高性能半导体功率器件技术和电动机永磁材料制造工艺的发展及其性能价格比的日益提高,交流伺服控制系统逐渐成为主导产品。交流伺服驱动技术已经成为工业领域实现自动化的基础技术之一,并将逐渐取代直流伺服系统。步进电动机作为一种开环控制的系统和现代数字控制技术有着本质的联系,而且利用了基本相同的技术以几乎相同的速度与伺服电动机同步发展。目前以运动准确为目标的机电传动控制系统中,大多采用步进电动机或全数字式交流伺服电动机作为执行电动机。数字化控制是机电传动系统的发展趋势。

1.1.2 机电传动控制系统的发展

机电传动的控制环节经历了以下几个发展阶段:

1. 继电器—接触器控制阶段

对于开关量的自动控制,从 20 世纪初开始采用接触器、继电器和行程开关等控制电器实现对控制对象的启动、停车以及有级调速等控制,这种继电器—接触器控制装置适用于动作比较简单、控制规模小的场合,具有结构简单、价格低廉、维修方便、抗干扰性强等特点,因此广泛应用于各类机床和机械设备上。采用这种控制装置可以方便地实现生产过程自动化,而且还可以实现集中控制和远程控制。继电器—接触器控制系统的缺点:由于采用固定接线形式,故在进行程序控制时,改变控制程序不方便、灵活性差;采用有触点的开关动作,工作效率低、触点易损坏、可靠性差,另外,它的控制速度慢、控制精度低。尽管如此,这种控制装置仍能满足在一定范围内的机械设备的自动控制。目前,继电器—接触器控制系统仍然是机床和其他机械设备最基本的电气控制形式之一。

2. 顺序控制器控制

20 世纪 60 年代随着电子计算机的出现及其在工业控制中的大量应用,大大提高了控制装置通用性和灵活性,而且它还具有采样速度快和控制功能强的优点。但是,对于开关量的自动化控制系统来说,由于它不需要复杂的数学运算,并且要求编程简单、使用维修方便,如果采用通用的电子计算机来完成开关量的控制,则存在“大材小用”和不经济等问题。因此,需要一种比继电器—接触器控制系统的通用性和灵活性更强,但又比计算机控制装置简便、经济的开关量控制装置,顺序控制器就是顺应这样的需要而产生的。

顺序控制器是通过组合逻辑元件的插接来实现逻辑控制的。顺序控制器的类型较多,它可以满足程序经常改变的控制要求,使程序可变、编程容易、可靠性高、使用和维护方便。但这种控制系统的输入/输出端数目往往受到矩阵板本身结果的限制,而且抗干扰性差,近年来已经很少应用。

3. 可编程序控制器

可编程序控制器(PLC)是计算机技术与继电器技术相结合的产物,是在顺序控制器和微机控制器的基础上发展起来的新型控制器,是一种以微处理器为核心用于数字控制的专用计算机。PLC 在现代工业自动化控制中是最值得重视的先进控制技术,现已成为工业控制三大支柱(PLC、计算机辅助设计/计算机辅助制造(CAD/CAM)、机器人(RO-BOT)之一。它以其可靠性高、逻辑控制功能强、体积小、可在线修改控制程序、具有远程通信联网功能、易于和计算机连接、能对模拟量进行控制、具备高速计数等优异性能,正在日益取代由大量中间继电器、时间继电器、计数继电器等组成的传统继电器—接触器控制系统,在机械、化工、石油、冶金、电力、轻工、电子、纺织、食品、交通等行业得到广泛应用。

4. 数字控制技术

数字控制(NC)技术在电气自动控制中占有十分重要的地位,它是以数字化的信息通过数控装置(专业或通用计算机)实现控制的一种技术,最典型的产品是数控机床。1952年,美国麻省理工学院研制成功世界上第一台三坐标数控铣床,它综合应用了当时电子计算机、自动控制、伺服驱动、精密检测与新型机械结构等多方面的最新技术成就,成为一种新型的通用性强的自动化机床,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。

5. 计算机数字控制技术

随着微电子技术的发展,由小型或微型计算机再加上通用或专用大规模集成电路组成的计算机数控装置性能更为完善,几乎所有的机床品种都实现了数控化,出现了具有自动换刀功能的数控加工中心机床。

6. 加工中心机床

加工中心机床是带有刀库和自动换刀装置的一种多功能数控机床。由于工件经一次装夹后能对多个表面自动完成铣、镗、钻、铰等多种工序的加工,并且有多种换刀或选刀功能,从而使生产效率和自动化程度大大提高。

7. 自适应数控机床

自适应数控机床可针对加工过程中加工条件的变化(材料变化、刀具磨损、切削温度变化等)做自动适应调整,使加工过程始终处于合理的最佳状态。自适应数控机床是基于最优控制及自适应控制理论,在扰动下实现最优。

8. 柔性制造系统

柔性制造系统是由数控加工设备、物料运储装置和计算机控制系统等组成的自动化制造系统,包括多个柔性制造单元,能根据制造任务或生产环境的变化迅速调整,适用于多品种、中小批量生产。

柔性制造系统虽然具有柔性,因为缺少计算机辅助设计等环节,不能保证“及时生产”(边生产边设计)。

9. 计算机集成制造系统

在柔性制造系统基础上,综合应用计算机辅助设计、计算机辅助制造、智能机器人等多项高新技术,形成了从产品设计到制造的智能化生产的完整体系。这就是计算机集成制造系统(CIMS),它将自动制造技术推进到了更高的水平,是今后电气自动控制的发展方向。

1.2 本课程的性质和任务

随着社会生产和科学技术的发展与进步,机电传动控制技术正在不断地深入到各个领域并迅猛地向前推进。机电传动控制技术水平是一个国家工业技术水平的重要标志之一。“机电传动控制”课程是机械设计制造及其自动化专业的一门必修的专业基础课。本课程把驱动电动机、控制电动机(如交流伺服电动机和步进电动机)、继电器—接触器控制系统、可编程序控制器等内容,根据学科的发展与其内在的规律,以驱动系统为主导,以控制为主线,将机电传动控制所需的强电控制知识系统、科学、有机地结合起来,指导学生学习机电传动过程中各类电动机特性与驱动技术,掌握机电传动控制系统中的各类电器、控制电路工作原理、特点性能,了解最新技术在机械设备中的应用。

本课程的基本任务:

(1) 学习机电传动系统的动力学分析方法,熟悉机电传动系统的运动方程式;掌握多轴机电传动系统中转矩、转动惯量的折算原则与方法;重点掌握典型生产机械的负载特性与电动机的匹配。

(2) 学习交流电动机、直流电动机及控制电动机的结构和工作原理;熟悉其机械特性;掌握交流电动机、直流电动机的启动、调速、制动特性与方法;了解伺服控制系统的构成;学会电动机的选用。

(3) 学习继电器—接触器控制系统,熟悉各种控制电器的工作原理、作用、特点和电气符号;掌握继电器—接触器控制电路中基本控制环节的构成和工作原理;学会分析简单控制电路;了解完整的机电传动控制系统的组成、要求与设计方法。

(4) 学习可编程控制器的工作原理和编程方法,掌握 S7-200 PLC 的指令系统与编程方法、应用实例。

本课程除课堂教学外,还有实验、课程设计、生产实习和毕业设计等实践性教学环节。通过从机电综合的角度学习电动机驱动技术、控制知识,使机械专业学生不仅掌握较为牢固的机电传动控制基本理论,而且还具有较强机电传动控制系统分析能力和实践动手能力。

1.3 课程内容安排

全书共分 8 章。第 1 章为绪论。第 2 章重点介绍机电传动系统的运动方程式。由于电动机是机电传动系统的动力与电气控制的对象,故第 3 章和第 4 章分别介绍直流电动机和交流电动机的工作原理及其特性。随着机电传动控制系统的发展,控制电动机作为一种重要的检测、控制元件,应用也越来越多,特别是在数控方面,伺服电动机和步进电动机应用越来越广泛,故第 5 章介绍各类常用控制电动机的结构特点、工作原理、性能和应用,并对伺服电动机和步进电动机组成的机电传动控制系统作简单介绍。第 6 章介绍电动机的选用。由于继电器—接触器控制系统目前还广泛应用在生产实际中,它仍然起着重要的作用,故第 7 章介绍继电器—接触器控制系统中用到的常用电器和基本控制电路

以及典型的应用实例等。随着微型计算机的出现和迅速发展,PLC 正在取代传统的顺序控制器,故第 8 章介绍 S7-200PLC。

本教材是根据机械设计制造及其自动化专业少学时学习的需要而安排内容的。授课内容不同,学时进度和安排有所不同,下面给出 40 学时的教学参考:

第 1 章 绪论——0.5 学时;

第 2 章 机电传动系统的动力学基础——1.5 学时;

第 3 章 直流电动机的特性与调速——6 学时;

第 4 章 交流电动机的特性与调速——8 学时;

第 5 章 控制电动机——3 学时;

第 6 章 机电传动控制系统中电动机的选择——3 学时;

第 7 章 继电器-接触器控制系统——8 学时;

第 8 章 可编程控制器——2 学时;

实验:S7-200 编程——6 学时;

交流电动机机械特性测试——2 学时。

本教材还配有电子教案,可供使用本教材的高等院校、高职高专和培训机构的教师参考。

第2章 机电传动系统的动力学基础

从动力学角度分析,机电传动系统是一个以电动机为动力源,并通过传动机构带动生产机械的运动系统。尽管每个机电传动系统的电动机种类繁多、特性各异,生产机械的负载特性也各种各样,但它们都服从动力学运动规律。本章主要介绍机电传动系统动力学模型和运动方程式的建立,并对系统的稳定运行条件进行分析,另外还介绍过渡过程产生的原因和研究意义。

2.1 机电传动系统的运动方程式

2.1.1 单轴机电传动系统运动方程式

图2.1为单轴机电传动系统动力学模型,其上作用有两个转矩,一个是电动机产生的转矩 T_M (与电动机运动方向相同,是一个驱动转矩),另一个是生产机械产生的负载转矩 T_L (与运动方向相反),二者同时作用在一个轴(电动机轴)上,使系统以角速度 ω 转动。根据牛顿运动定律,可得单轴机电传动系统的运动方程式为

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

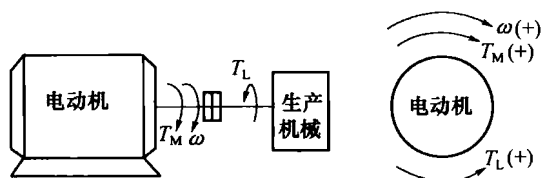


图 2.1 单轴机电传动系统动力学模型

式中 T_M ——电动机产生的转矩($N \cdot m$);
 T_L ——单轴机电传动系统的负载转矩($N \cdot m$);
 J ——单轴机电传动系统的转动惯量($kg \cdot m^2$);
 ω ——单轴机电传动系统的角速度(rad/s);
 t ——时间(s)。

工程实际中,常用转速 n 代替角速度 ω ,用飞轮转矩 GD^2 代替转动惯量 J 。则机电传动系统运动方程的实用形式变为

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

令 $T_d = J \frac{d\omega}{dt}$, 称为动态转矩, 则式(2.1)可写成转矩平衡方程式

$$T_M - T_L = T_d$$

或

$$T_M = T_L + T_d \quad (2.3)$$

由此可以看出, 在任何情况下, 电动机所产生的转矩总是与负载转矩(静态转矩)和动态转矩之和相平衡。

当 $T_M = T_L$ 时, $T_d = 0$, 这表示无动态转矩, 系统恒速运转, 即系统处于平衡状态。

值得指出的是图 2.1 中关于转矩正方向的约定: 由于传动系统有多种运动状态, 相应的运动方程式中转速和转矩就有不同的符号。因为电动机和生产机械以共同的转速旋转, 所以, 一般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。

根据上述约定就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(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 2.2 所示, 在重物提升过程中, 设电动机的旋转方向为 n 的正方向。

启动时: 如图 2.2(a) 所示, 电动机拖动重物上升, T_M 与 n 正方向一致, T_M 取“+”; T_L 与 n 正方向相反, T_L 也取“+”。

制动时: 如图 2.2(b) 所示, 重物仍在上升, n 为正, 只是电动机要制止系统运动, 所以, T_M 与 n 正方向相反, T_M 取“-”; T_L 仍然与 n 正方向相反, T_L 仍取“+”。

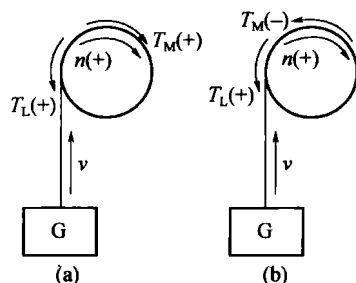


图 2.2 T_M 、 T_L 符号的判定
(a) 启动时; (b) 制动时。

2.1.2 多轴机电传动系统的等效动力学模型

实际应用中常见的是多轴机电传动系统(图 2.3), 负载转矩和电动机转矩没有作用在同一轴上。在建立动力学模型时, 为了简化运动方程式一般将其等效成单轴机电传动系统。即将负载转矩和系统的转动惯量(或质量)折算到电动机轴上, 得到一个等效负载转矩和等效转动惯量, 这个具有等效转动惯量和等效负载转矩的单轴机电传动系统就是多轴机电传动系统的等效动力学模型。

1. 等效负载转矩的计算

负载转矩是静态转矩, 可根据等效前后功率守恒的原则进行等效。例如, 生产机械作旋转运动, 如图 2.3(a) 所示, 等效前的负载功率为

$$P'_L = T'_L \omega_L$$

式中 ω_L ——生产机械的角速度;

T'_L ——真实负载转矩。

设 T'_L 折算到电动机轴上的等效负载转矩为 T_L , 电动机的角速度为 ω_M , 则等效后的负载功率为

$$P_M = T_L \omega_M$$

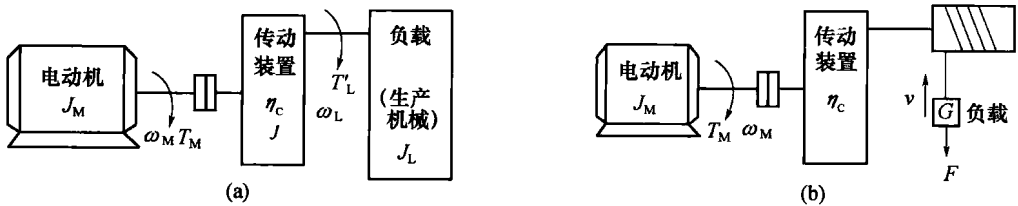


图 2.3 多轴机电传动系统

(a) 负载作旋转运动; (b) 负载作直线运动。

若传动系统的机械效率为 η_c , 则根据等效前后功率守恒可得

$$P_M \eta_c = P'_L$$

将等效前后的负载功率的具体表达式代入上式, 经整理, 得

$$T_L = \frac{T'_L}{\eta_c j} \quad (2.4)$$

式中 j ——传动系统的速比。

如图 2.3(b) 所示, 生产机械作直线运动 (如卷扬机提升重物), 则等效前的负载功率为

$$P'_L = Fv$$

等效后的负载功率为

$$P_M = T_L \omega_M$$

根据等效前后功率守恒原则, 即 $P_M \eta_c = P'_L$, 得

$$T_L = \frac{Fv}{\eta_c \omega_M} = \frac{9.55 Fv}{\eta_c n_M} \quad (2.5)$$

式中 F ——直线运动部件的负载力 (N);

n_M ——电动机的转速 (r/min);

v ——直线运动部件的速度 (m/s);

η_c ——传动系统的效率。

2. 等效转动惯量的计算

由于转动惯量与运动系统的动能有关, 所以等效转动惯量的计算可根据等效前后动能守恒的原则进行折算。对于生产机械作旋转运动的机电传动系统来说, 等效转动惯量 J_Z 和等效飞轮转矩 GD_Z^2 分别为

$$J_Z = J_M + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{j_L^2} \quad (2.6)$$

$$GD_Z^2 = GD_M^2 + \frac{GD_1^2}{j_1^2} + \frac{GD_L^2}{j_L^2} \quad (2.7)$$