

■ 高等院校机械工程精品系列教材

Mechanical and
Electrical Drive Control

机电传动系统与控制

主 编：倪 敬

副主编：许 明 孟爱华

季国顺 王万强



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

机电传动系统与控制

主 编 倪 敬
副主编 许 明 孟爱华
季国顺 王万强

图书在版编目(CIP)数据

机电传动系统与控制 / 倪敬主编. — 杭州: 浙江大学出版社, 2015.9

ISBN 978-7-308-15122-1

I. ①机… II. ①倪… III. ①电力传动控制设备—教材— IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 213277 号

内容简介

本书依据理论知识点树形图,对机电传动控制技术所涉及的系统运动学方程及稳定运行条件、直流电动机与交流电动机工作特性、控制电动机工作特性、典型断续控制电气元件工作特性、典型断续控制电路设计技术和可编程逻辑控制技术进行详细的阐述。本书还在具体机电传动控制系统设计实现方面,结合教师科研实际,给出了设计规范与实例。

本书本着“工程图纸进课堂和工程实践进课堂”的理念,着眼于基础,从工程应用和教学相促进角度,对机电传动控制技术进行系统的、深入浅出的论述。其可作为机械工程类本科生、研究生机电控制课程的参考书,也可作为机电专业技术人员和管理人员专业培训的参考书。

机电传动系统与控制

主 编 倪 敬



责任编辑 王元新

责任校对 徐 霞

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州林智广告有限公司

印 刷 杭州杭新印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 13

字 数 325 千

版 印 次 2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-15122-1

定 价 35.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: (0571) 88925591; <http://zjdxcbss.tmall.com>

前 言

机电传动控制技术已成为开发各种数控机床、精密机械以及国防尖端产品不可或缺的重要手段,得到了工业界和技术界的格外重视。但由于其所具有的一些特点,对这种技术的了解、掌握和运用,无论是理论还是实践,都有很多问题需要探讨、总结与提高,使其更好地推动机电传动控制技术的发展和相关人才的培养。

《机电传动系统与控制》由杭州电子科技大学机械工程学院机械电子工程研究所倪敬担任主编,许明、孟爱华、季国顺、王万强担任副主编。根据机电传动控制技术的发展,结合本校教学团队教师科研推广应用积累的经验,在浙江省课堂教学模式改革项目(编号:KG2013127)的资助下,形成了这一本教材。本教材侧重从工程实际应用角度来讲解理论知识,从教师教学安排和学生自学的角度来安排课程内容,在课程地位与内容协调性方面,介绍了机电传动控制课程在机械类大学生课程中的地位 and 作用,给出了课程串起所有知识点内容的树形图;在机电传动系统稳定运行理论方面,阐述了系统运动学方程以及相关物理量的等效折算原理,给出了机电传动系统稳定运行的充要条件和充分条件;在直流电动机和交流电动机工作特性方面,详细阐述了直流电动机和三相交流异步电动机的结构组成、工作原理、特性方程及推导、起动特性、调速特性和制动特性;在控制电动机方面,详细阐述了交流伺服电动机、步进电动机和伺服舵机的结构组成、工作原理和典型应用;在机电传动系统断续控制方面,详细阐述了断路器与熔断器、按钮开关与指示灯、继电器与接触器、接近开关和位移传感器等电气元器件工作原理及应用,给出了典型的断续控制电路和相应的识图规范;在机电传动系统可编程逻辑控制方面,详细阐述了可编程控制器的结构组成、工作原理、指令系统和典型应用编程;在机电传动控制系统设计方面,阐述了系统整体设计和具体设计规范,给出了典型系统设计实例。

本教材由倪敬执笔第1章和第8章,许明执笔第4章和第5章,孟爱华执笔第3章和第7章,季国顺执笔第2章和第6章,王万强执笔附录部分,全书由倪敬策划与统稿。由于作者水平、时间和条件的限制,书中难免有疏漏或者错误之处,敬请读者批评指正。

感谢杭州电子科技大学机械工程学院机械电子工程研究所所有同仁对本书的大力支持。

作 者

2015年7月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 本课程的地位和任务	1
1.2 机电传动与控制技术涉及范畴	2
1.3 机电传动与控制技术发展概况	5
1.4 本课程的内容安排和知识点树形图	6
1.5 本课程的学习建议	7
第 2 章 机电传动系统动力学基础	8
2.1 机电传动系统动力学基本方程	8
2.2 典型机电传动系统负载特性	10
2.3 机电传动系统等效负载转矩折算	12
2.4 机电传动系统等效转动惯量折算	14
2.5 机电传动系统稳定运行条件	15
2.6 机电传动系统的动态过渡过程	17
课后习题与动手实践题	18
第 3 章 直流电动机的工作特性与应用	21
3.1 直流电动机分类	21
3.2 直流电动机结构与工作原理	22
3.3 直流电动机机械特性方程及其推导	27
3.4 直流电动机固有机械特性与参数计算	29
3.5 直流电动机启动特性	31
3.6 直流电动机人为调速特性	32
3.7 直流电动机制动特性	36
3.8 典型直流电动机选型与应用	41
课后习题和动手实践题	44
第 4 章 交流电动机的工作特性及应用	47
4.1 交流电动机的分类	47
4.2 三相交流异步电动机结构和工作原理	48
4.3 三相交流异步电动机机械特性及其推导	54

4.4	三相交流异步电动机固有机械特性与参数计算	58
4.5	三相交流异步电动机的启动特性	61
4.6	三相交流异步电动机人为调速机械特性	63
4.7	三相交流异步电动机的制动特性	67
4.8	三相交流异步电动机与变频器选型及应用	71
	课后习题和动手实践题	79
第 5 章	控制电动机工作特性及应用	81
5.1	控制电动机的分类	81
5.2	交流伺服电动机工作特性与应用	82
5.3	步进电动机工作原理与应用	94
5.4	舵机工作原理与应用	102
	课后习题和动手实践题	105
第 6 章	机电传动系统断续控制技术与应用	107
6.1	机电传动系统元件功能特点与应用	108
6.2	机电传动系统断续控制技术	132
	课后习题和动手实践题	140
第 7 章	可编程逻辑控制技术	142
7.1	可编程逻辑控制器发展简介	142
7.2	西门子 S7-200 系列 PLC 基本结构和工作原理	145
7.3	西门子 S7-200 系列 PLC 标准模块和扩展模块	149
7.4	西门子 S7-200 系列 PLC 编程基础	158
7.5	西门子 S7-200 系列 PLC 典型应用实例	168
	课后习题和动手实践题	173
第 8 章	机电传动控制系统设计规范与实例	175
8.1	机电传动控制系统设计规范	175
8.2	机电传动控制系统设计实例	178
	动手实践题	190
附录 A	常用电器元件符号	192
附录 B	可编程控制器典型应用接线图	196
附录 C	标准 A4 图框	198
附录 D	各种电气系统安装附件	199
参考文献		202

第1章 绪 论

1.1 本课程的地位和任务

1.1.1 本课程的地位

“机电传动系统与控制”课程是高等学校机械设计制造及其自动化本科专业中培养学生机电一体化能力和创新能力的一门主干技术基础课,是学习专业课程和从事机电产品设计的必备基础。该课程在大学培养体系中的位置如图 1.1 所示。

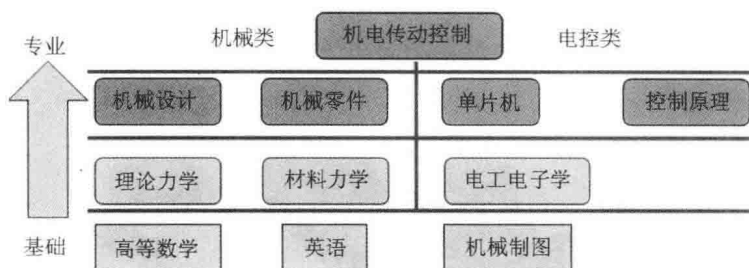


图 1.1 课程在大学培养体系中的位置

1.1.2 本课程的任务

根据机械制造及其自动化专业的国际认证标准,本课程的任务是培养学生:

- (1) 具有运用机械工程基础知识和机械设计制造及其自动化专业基础知识解决问题的能力,了解机电一体化领域前沿技术及发展趋势。
- (2) 掌握机电系统设计的基础知识,初步具备一般机电系统方案设计和分析的能力。
- (3) 了解机电传动系统与控制的基本原理和方法,学会用各种电动机、电器、电子元器件、检测元件及电子计算机按一定规律组成控制系统,以对生产机械进行动力传动及控制。
- (4) 培养学生运用标准、规范、手册、图册及网络信息等技术资料的能力。
- (5) 掌握基本实验技能,培养学生制定实验方案,进行实验、分析和解释数据的能力。
- (6) 培养学生的团队合作能力以及语言表达能力。
- (7) 培养学生的自学能力。

1.2 机电传动与控制技术涉及范畴

机电传动及其控制系统总是随着社会生产力的发展而发展的。虽然对机电传动系统的要求不同,其控制系统也不同,但归纳起来,通常涉及五大要素与功能,即机械传动装置(结构功能)、执行装置(驱动和能量转换功能)、供能装置(动力源)、传感器与检测装置(检测功能)、信息处理与控制装置(控制功能)。

1.2.1 机械传动装置(结构功能)

机械传动装置是由若干个运动机械零件组成的,能够传递运动并完成某些有效工作的装置,又叫传动机构或者传动链。该装置一般由输入部分、转换部分、传动部分、输出部分及安装固定部分组成,通常用于传动的机械零件等。

如何选择、分析和设计机械传动装置,在“机械原理”和“机械设计”两门课程中有详细论述。为了实现机电传动控制系统整体最佳的目标,从系统动力学方面来考虑,传动链越短越好,因为各传动副中存在的“间隙非线性”会影响系统动态性能和稳定性。另外,传动件本身的转动惯量也会影响系统响应速度和稳定性。这样就出现了数控机床中的“轴对轴传动”,即电动机直接传动机床的主轴,主轴就是电动机的转子,也叫“电主轴”传动。如图 1.2 所示。



图 1.2 各类机械传动机构

1.2.2 执行装置(驱动和能量转换功能)

执行装置包括以电、气压和液压等作为动力源的各种元器件及装置。例如,以电作为动力源的直流电动机、直流伺服电动机、三相交流异步电动机、变频三相交流电动机、三相交流永磁伺服电动机、步进电动机、比例电磁铁、电动调节阀及电磁泵等;以气压作为动力源的气动马达和气缸;以油压作为动力源的液压马达和液压缸等。

选择、分析和设计执行装置时,要考虑执行装置与机械传动装置之间的协调与匹配问

题。如根据应用普遍性和通用性,可优先考虑交流电动机和直流电动机;在需要低速、大推力或大扭矩的场合下,可优先考虑选用液压缸或液压马达;在医疗卫生和食品行业,可优先考虑考虑气动马达和气缸。如图 1.3 所示。



图 1.3 各类执行装置

1.2.3 供能装置(动力源)

供能装置是指为执行器运动产生匹配动力源的装置。如驱动各式电动机的各式电源、驱动液压系统的液压源和驱动气压系统的气压源。

选择、分析和设计供能装置时,要考虑执行装置与供能装置之间的协调与匹配。如驱动电动机常用的电源包括直流调速器、变频器、交流伺服驱动器及步进电动机驱动器等;液压源通常称为液压站,气压源通常称为空压站。如图 1.4 所示。



图 1.4 各类供能装置

1.2.4 传感器与检测装置(检测功能)

传感器是从被测对象中提取信息的器件,用于检测机电控制系统工作时所要监视和控制的物理量、化学量和生物量。大多数传感器是将被测的非电量转换为电信号,用于显示和构成闭环控制系统。

选用传感器,要考虑传感器与其他要素之间的协调与匹配。如需要极限位置保护的场合,可考虑机械式或者电磁式极限开关和接近开关等;需要反馈诸如环境压力、称重、温度和机构位置等连续物理量,可以考虑压力传感器、称重传感器、温度传感器、光电旋转编码器、磁致伸缩位移传感器、激光位移传感器和视觉检测系统等。如图 1.5 所示。



图 1.5 各种用途的传感器

1.2.5 信息处理与控制装置(控制功能)

信息处理与控制装置是机电传动控制系统的核心,以控制装置(继电器、可编程控制器、微处理器、单片机和计算机等)为控制硬件平台,以控制理论、控制算法和控制程序为控制软件平台,通过硬件和软件的协调与匹配,使整体处于最优工况,实现相应的机电传动与控制功能。

选用、分析和设计控制软硬件时,要考虑与其他要素之间的协调与匹配。如断续控制系统,可考虑继电器—接触器控制系统;开关量数字逻辑控制系统,可考虑中低端可编程控制器(PLC)和 51 单片机控制器;高频响高精度伺服驱动控制系统,可考虑高端可编程控制器、ARM7、DSP 等高等微处理器。如图 1.6 所示。

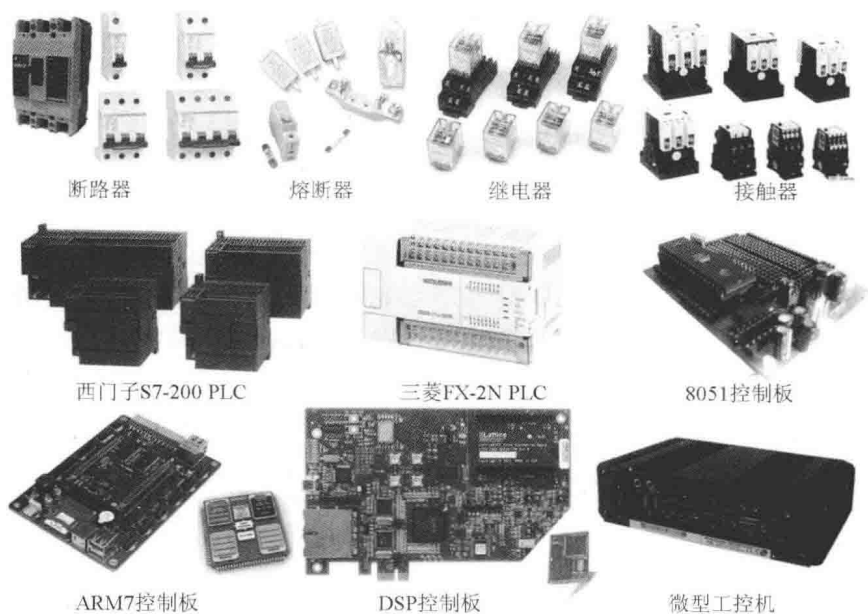


图 1.6 各种信息处理与控制装置

1.3 机电传动与控制技术发展概况

1.3.1 机电传动技术的发展

单就机电传动而言,它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。

(1) 成组拖动。即一台电动机拖动一根天轴,再由天轴通过皮带轮和皮带分别拖动各生产机械。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。

(2) 单电动机拖动。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。

(3) 多电动机拖动。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。所以,现代化机电传动基本上均采用这种拖动形式。

1.3.2 机电控制技术的发展

据报道,在现代机电一体化产品中,机电传动系统中控制部分的成本已占总成本的50%。特别是近年来随着微电子技术、计算机技术的迅速发展,越来越多的控制器使用微处理器和计算机,输入/输出及通信功能越来越强。同时,在功率器件、放大器件不断更新的推

动下,机电传动控制系统的发展日新月异。其发展历程主要经历了以下四个阶段:

(1) 开关量控制。最早的机电传动控制系统出现在 20 世纪初,它仅借助于简单的接触器与继电器等开关信号控制电器,实现对控制对象的启动、停车以及有级调速等控制。

(2) 模拟量控制。20 世纪 30 年代出现了电动机放大机控制,它使控制系统从开关量断续控制发展到连续量控制。连续量控制系统可随时检查控制对象的工作状态,并根据输出与给定量的偏差对控制对象进行自动调整。

(3) 采样控制。随着计算机处理速度的不断提高,特别是对微型计算机的应用,带来了一个新的阶段——采样控制。高频数字采样控制在客观上和模拟量连续控制是完全等效的。

(4) 功率数字控制。将晶闸管技术、微电子技术和计算机技术紧密相连在一起,形成具有更高驱动功率、更高驱动精度和更高驱动效率的信息处理及控制装置。

1.4 本课程的内容安排和知识点树形图

根据课程教学团队近 8 年的教学实践与经历,以及对课程知识点内容的精炼,总结得到了与课程大纲相关的“知识点树形图”,如图 1.7 所示。根据图示,本书一共分 8 章。

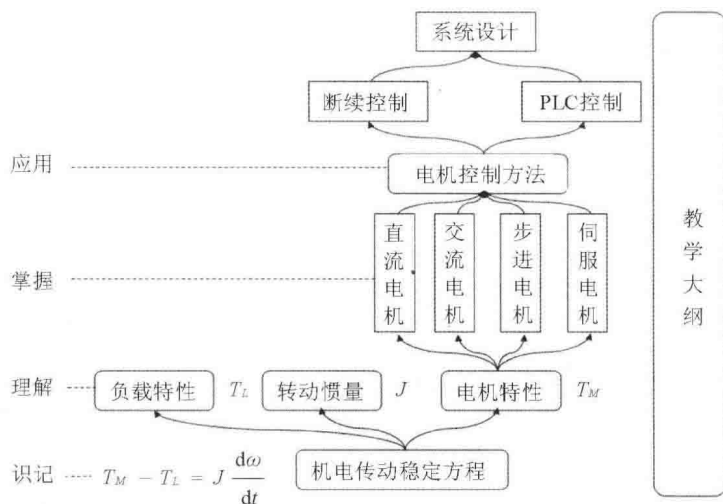


图 1.7 课程知识点树形图

第 1 章为绪论,主要说明课程的地位、作用和涉及范围,以及课程所有知识的相关联系(知识点树形图)。

第 2 章重点介绍了机电传动系统的动力学基础,给出了负载等效转动惯量和负载等效转矩的折算原则,阐述了机电传动系统稳定运行的充要条件和充分条件。

第 3 章重点介绍了直流电动机的结构、工作原理、机械特性以及启动、调速和制动特性,给出了直流电动机的应用选型实例。

第 4 章重点介绍了三相交流异步电动机的结构、工作原理、机械特性以及启动、调速和制动特性,给出了三相交流异步电动机的应用选型实例。

第 5 章重点介绍了交流伺服电动机、步进电动机以及舵机的结构、工作原理和应用特

性,给出了相应电动机的应用选型实例。

第6章重点介绍了低压电气元件的分类,阐述了开关电源、断路器、熔断器、按钮指示灯、继电器、接触器和传感器等结构及工作原理,并给出了经典断续控制回路原理及相应的元器件应用选型实例。

第7章重点介绍了可编程逻辑控制器(PLC)技术的发展,阐述了PLC结构、工作原理、编程环境、基本指令集和典型应用,并给出了PLC与变频器和伺服驱动器的应用说明。

第8章重点介绍了机电传动控制系统设计规范以及需要注意的问题,给出了典型设计实例。

1.5 本课程的学习建议

本书依据“工程实际应用知识进课堂、工程电气图纸进课堂和工程项目管理模式进课堂”的“三进”原则编写。具体内容按照32或42学时课程编排,主要涉及了当前机电传动系统中的常用元器件技术、电动机技术、断续控制技术和可编程逻辑控制技术。为了更好地实施本课程的“教与学”,促进教学相长,特向广大师生提出以下建议。

1.5.1 对教师的“教学实施”建议

(1) 本课程适宜小班化分组型教学。教师可以将一个教学班级30~40人分成8组,每组3~5人,设组长1人,分组分人进行成绩考核。

(2) 本课程适宜采用多层面成绩考核制。建议总评成绩(100%)由研讨课表现(30%)、结课实践项目(30%)和期末考试成绩(40%)三大部分组成。教师也可以根据实际情况酌情安排各部分成绩占比,以激励和调动学生参与课程的积极性。

(3) 本课程适宜应用“翻转课堂”模式。教师可以结合教材知识点和自身科研经历,课前录制并公布知识点视频;课堂上采取研讨式教学模式,针对重点难点进行研讨答疑,并将理论部分研讨课时压缩至全课程学时的一半以内;剩下的课程学时,还是采取研讨式教学模式,针对结课实践项目实施过程中出现的问题进行研讨答疑;具体各结课实践项目选取,教师可以结合教材知识点、自身科研实际和实验室条件自拟或者让学生自拟;具体结课实践项目由课程内各小组进行招标分配(项目难度系数不同,可以有不同的成绩起评分、不同的实现分等);最后依据具体结课实践效果评定学生平时成绩。

1.5.2 对学生的“学习实施”建议

(1) 建议学生做好动手的准备。本课程适宜动手能力较强或者希望培养自身动手能力的学生学习。本课程在每章后面都准备了丰富的“想一想,试一试”问题,供学生自学使用;课程最后一章还提供了部分结课实践项目,供学生挑战自己使用。

(2) 建议学生带着问题上课。学生在上课前尽量预习一下相应的课程内容或视频,准备好相应的疑问。

(3) 建议学生要有“问倒”老师的勇气。学生应该相信自身对于理论知识和工程实际应用知识的探索能力;坚信自己通过课程学习,能尽可能多地从老师那里学到专业技能和知识,能发现连老师都无法解决的难题。

第2章 机电传动系统动力学基础



本章导读

机电传动系统动力学是开展机电传动控制实践的基石所在,是分析直流电动机、交流电动机和控制电动机相关驱动控制应用实现的最基本方法,也是本课程理论认知和技能认知的基础所在。因此,要学习机电传动,就必须先学习机电传动系统动力学基础知识。

通过本章的学习,可以知晓机电传动系统的动特性基本方程、转动惯量特性及其折算方法、负载特性及其折算方法、系统稳定运行的充要条件和系统过度过程等问题。



学习思考

- (1) 机电传动系统的动特性基本方程是什么? 如何区分制动与驱动?
- (2) 什么是等效负载转矩,如何折算?
- (3) 什么是等效转动惯量,如何折算?
- (4) 什么是机电传动系统的负载特性,有哪几种典型负载特性?
- (5) 什么是机电传动系统的充要条件,如何应用于判断系统稳定性?
- (6) 什么是机电传动系统的充分条件,如何应用于判断系统稳定性?
- (7) 什么是机电传动系统的过渡过程,哪些参数是不可突变的?

2.1 机电传动系统动力学基本方程

2.1.1 基本动力学方程导出

由于机电传动系统研究对象主要是旋转机械,其他非旋转机械运动也可以经过等效变换,转换成旋转运动。因此,机电传动系统动力学基本方程来源于大学物理或者理论力学中的“刚体定轴转动定律”:刚体所受的对于某定轴的合外力矩等于刚体对此定轴的转动惯量与刚体在此合外力矩作用下所获得的角加速度的乘积。结合图 2.1 的机电传动系统,以电动执行器(如直流电动机、交流电动机)的输出轴为研究对象,该定律具体可以表示为

$$T_M - T_L = J\epsilon = J \frac{d\omega}{dt} = 2\pi J \frac{dn}{dt} \quad (2.1)$$

式中： T_M 是电动执行器通电后在输出轴上产生的电磁转矩(扭矩)； T_L 是折算到电动执行器输出轴上的等效负载转矩； J 是折算到电动执行器输出轴上的等效负载转动惯量； ω 是电动执行器通电后输出轴的转动角速度； ϵ 是对应的输出轴的转动角加速度； n 是对应的输出轴转速； t 为时间变量。

这个公式就是课程内容的统领方程，其描述了机电传动系统的基本特征，是分析机电传动系统实时运动状态的基础。它将一直指导我们开展后续各章节的学习和研究。

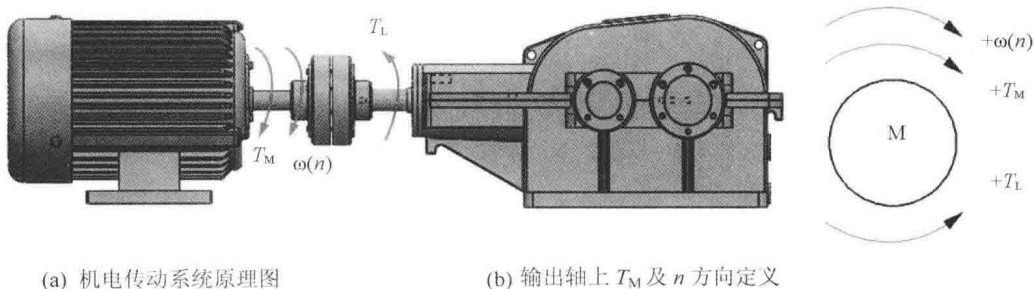


图 2.1 典型的机电传动系统

2.1.2 基本动力学方程描述的动态过程

根据式(2.1)的描述，结合牛顿第二定律可以得到

$$T_d = T_M - T_L \quad (2.2)$$

式中： T_d 为机电传动系统的动态转矩，或者合转矩。

式(2.2)统一描述了机电传动系统处于稳态和动态的情况。在机电传动系统运动的任何时刻，当动态转矩为零时，系统处于稳态，当动态转矩不为零时，系统处于动态： $T_d > 0$ ，系统加速； $T_d = 0$ ，系统稳定运行或静止； $T_d < 0$ ，系统减速。

2.1.3 基本动力学方程中矢量方向确定

为方便机电传动控制问题的讨论，一般规定，分析机电传动系统转动状态时，以电动机的转动方向作为转动的参考方向，如图 2.1 所示。同时规定电磁转矩 T_M 与转速 n 方向相同的方向为其正向，等效负载转矩 T_L 与转速 n 方向相反的方向为其正向。

根据上述规定，可以从转矩与转速的符号来判断 T_M 与 T_L 在机电传动系统中所起的作用。如果 T_M 与 n 的符号相同，则表示 T_M 在系统中起到驱动作用，为驱动转矩；如果 T_M 与 n 的符号相反，则表示 T_M 在系统中起到制动作用，为制动转矩。如果 T_L 与 n 的符号相同，即方向相反，则表示 T_L 在系统中起到制动作用，为制动转矩；如果 T_L 与 n 的符号相反，即方向相同，则表示 T_L 在系统中起到驱动作用，为驱动转矩。由此可见，在机电传动系统中， T_M 与 T_L 既可以为驱动转矩又可以为制动转矩。

例 2-1 图 2.2 为矿用绞车吊起和下放重物

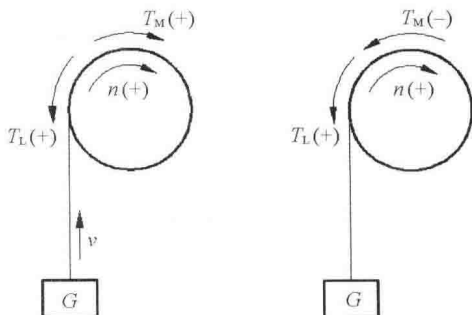


图 2.2 绞车提升和下放重物示意图

示意图,试分析在绞车吊起和放下重物两种情况下,电磁力矩 T_M 与负载 T_L 所起到的作用。

解: 以电动机输出轴的转动方向为参考方向。

(1) 当绞车吊起重物时,电动机 T_M 的方向与电动机转动 n 方向相同, T_M 是驱动力矩;负载 T_L 的方向与电动机的转动方向相反,是制动力矩。

(2) 当绞车放下重物时,电动机 T_M 的方向与电动机转动 n 方向相反, T_M 是制动力矩;负载 T_L 的方向与电动机的转动方向相同,是驱动力矩。

2.2 典型机电传动系统负载特性

根据机电传动系统动力学基本方程可知,机电传动系统的运行状态由等效电磁力矩 T_M 及等效负载力矩 T_L 决定。 T_M 由机电传动系统所使用的具体电动机的特性决定,必须在电动机设计制造出来后才能被确定,较为复杂。相比之下,等效负载的机械特性 $T_L = T_L(n)$ 或者 $n = n(T_L)$,也简称负载特性,只是一种客观存在,比较简单。因此,根据先易后难的原则,先介绍工程实际应用中机电传动系统的典型负载特性。

2.2.1 恒值负载特性

1. 恒值负载特性方程

恒值负载特性是最简单形式的负载特性。其具体表现是负载的大小与转速无关。这种负载特性又可以进一步分为两种形式:一种是负载的大小与方向均与转速无关,如图 2.3 (a)所示,一般称该类型负载为位能性恒值负载;另一种是负载的大小与转速无关,如图 2.3 (b)所示,负载的方向始终与转速相反,一般称该类型负载为反抗性恒值负载,或摩擦性恒值负载。位能性恒值负载和反抗性恒值负载的特性方程分别为:

$$T_L = C \quad (2.3)$$

$$T_L = \begin{cases} C_1, n > 0 \\ -C_2, n < 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

式中: C 、 C_1 和 C_2 为常数。

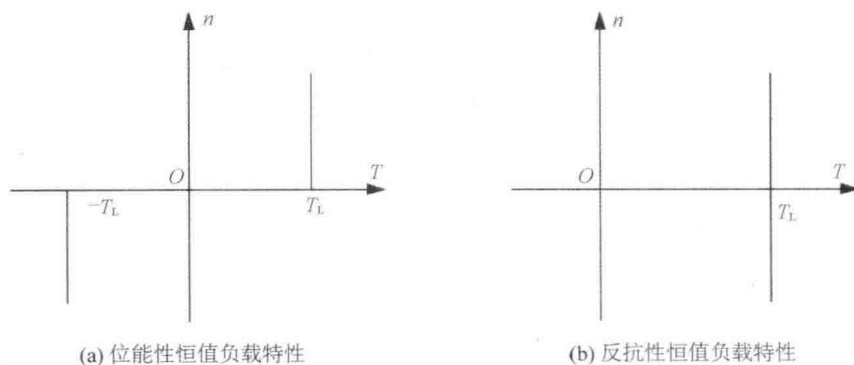


图 2.3 恒值负载特性