

机电一体化系列

985929

# 机电传动控制

JIDIAN CHUANDONG KONGZHI

邓星钟 周祖德

华中理工大学出版社

1.5  
K

(鄂)新登字第 10 号

## 内 容 提 要

《机电传动控制》是根据机械电子工程专业“机电传动控制”课程教学大纲编写的。

全书共分十三章,内容包括:电机,控制电器,拖动基础,传动系统的过渡过程,有触点控制系统,顺序控制器,可编程序控制器,晶闸管电路,直流伺服、交流伺服、步进电动机等开、闭环控制系统。

本书力求突出机电结合、电为机用的特点,尽力作到理论联系实际,元器件的介绍着重于外部特性和在拖动控制系统中的应用。课程体系崭新。内容全面、实用,由浅入深,重点突出,便于自学。

本书是机械电子工程专业本科生的教材,并可作为机械类专业本科生和这两个专业电大、函大、夜大、职大生的教材,亦可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考。

## 机电传动控制

邓星钟 周祖德

责任编辑 黄以铭

\*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

武汉工业大学出版社核工业中南三〇九印刷厂印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:17.25 字数:427 000

1992年7月第1版 1996年5月第5次印刷

印数:12001—20000

ISBN7-5609-0674-5/TP·67

定价:13.80元

(本书若有印装质量问题,请向承印厂调换)

## 代序

机械工业是重要的基础工业，是国民经济发展的先导部门。历史的实践已一再证明：先进的技术装备与先进的制造技术在国民经济发展中，起着何等重要的作用；而先进的装备与先进的制造技术则正是由先进的机械工业来提供的。马克思讲得何等的深刻：“大工业必须掌握它特有的生产资料，即机器的本身，必须用机器生产机器，这样，大工业才建立起与自己适应的技术基础，才得以自立。”过去是这样，现在还是这样，将来也还是这样。

当然，由于现代科学技术的迅猛发展，特别是由于微电子技术、电子计算机技术的迅猛发展，机械工业已发生了而且还在继续发生极为深刻的变化：机械技术与微电子技术的紧密结合，特别是与微计算机技术的紧密结合，现代机械技术所拥有的技术较以往远为高，远为新，远为广，远为复杂而先进；机电一体化技术与产品是十分突出的表现之一。这一深刻的变化是一股强大的潮流与一个严重的挑战，而且这一股潮流与这一个挑战是不应抗拒的，也是不可抗拒的。“顺之者昌，逆之者亡”，这是无法改变的现实。

这一深刻的变化反映在：机械工程、机械工业的面貌与内容发生了根本性的变化。过去，理论上主要以力学作为基础，实践上主要以经验作为基础，现在，作为基础的理论远不限于力学，还有系统论、控制论、信息论、传感理论、信号处理理论、电子学、计算机学等等，作为实践的基础远不限于经验，而且还涉及各有关的学科，同时，本身也在形成自己的学科体系——制造理论、工艺理论。机械产品的性质也在发生重大的变化，新的机械产品在不同程度上都同微电子技术、微计算机技术相结合，取代、延伸、加强与扩大人脑的部分作用。机械产品的种类与品种正日新月异，老的正在脱胎换骨，新的不断问世，几乎“无所不包”、“无孔不入”，大有令人瞠目结舌之势。与此相适应，机械制造技术正在彻底改造；广泛采用各种高新技术，特别是微电子技术与电子计算机技术，从数控化走向柔性化、集成化、智能化，成为现代科技前沿热点之一。与此相适应，企业的管理也在发生根本性的变化，从以产品为主的管理发展到以面向市场的信息为主的管理。

在这一深刻变化与严重挑战面前，谁胜谁负，谁兴谁衰，人才是关键。中共中央负责同志今年4月24日同部分学部委员座谈时就强调指出：要振兴经济，首先要振兴科技；要振兴科技，首先是人才。要发展机电一体化技术与产品，要实现机械工业的根本改造，没有高层次的科技人才是不行的。为了培养机械技术与电子技术紧密结合的高层次科技人才，有关各国都在探索其最优道路。我国采取果断措施，在大量减少专业种类的情况下，设立了“机电控制与自动化专业”，为进一步高质量地快速地培养这方面的人才创造更好的条件。事实上，我国不少高等院校

已在这一工作上作了多年的探索,试办了诸如机电一体化试点班,试点专业之类,华中理工大学也是其中的一员。创办这一方面的专业,也是一项改革,也是一项艰难的事业。鲁迅先生讲得好:“愈艰难,就愈要做。改革,是向来没有一帆风顺的。”正因为如此,我们必须继续迎着艰难去探索。

众所周知,教材,是人才培养中的重要一环,教材建设是一个学校最基本的建设之一。为此,华中理工大学有关教师在以往试点工作的基础上,总结了自己的经验,学习了兄弟学校的经验,有组织有计划地编写了这一方面的成套教材。这样,可以一方面适应目前形势发展的急需,一方面也是进一步的继续探索。

《诗经》讲得好:“嘒其鸣矣,求其友声。”由于编者业务水平的有限,探索经验的不足,编写时间的紧迫,这套教材中的错误、不妥与缺陷在所难免,敬希专家与读者拨冗指教,我们将不胜感谢。

教授、中国科学院学部委员

杨叔子

1992. 4. 30.

## 前 言

“机电传动控制”课程是机械电子工程专业的一门必修的专业基础课,它是机电一体化人才所需电知识结构的驱体。由于电力传动控制装置和机械设备是一个不可分割的整体,所以本课程的任务是使学生了解机电传动控制的一般知识,掌握电机、电器、晶闸管等的工作原理、特性、应用和选用的方法,掌握常用的开环、闭环控制系统的工作原理、特点、性能及应用场所,了解最新控制技术在机械设备中的应用。

本书的组成系统是根据机械电子工程专业的需要而独自建立的,内容比较全面,在编写时着重考虑了以下几个辩证关系的处理:

- (1) 原理与应用——两者并重,注意理论与实际应用相结合。
- (2) 元件与系统——两者紧密结合,但元件着重外部特性,为在系统中应用服务。
- (3) 定性与定量——重在定性,但建立必要的数量概念。
- (4) 保旧与建新——既要保旧,以反映我国机电传动控制技术的现状;又要建新,以适应当前机电传动控制新技术发展的需要。
- (5) 掌握与了解——对现有正在广泛应用的知识要掌握,对现已出现并开始应用的新技术要了解。

书中所用图形符号采用中华人民共和国国家标准 GB4728-85,文字符号采用 GB7159-87,量和单位采用 GB3100~3102-86。

本课程的前修课是高等数学、物理、电路基础和电子技术,它又要为后续课数控机床、微机控制系统打下基础。

本书是机械电子工程专业本科生的教材,并可作为机械制造专业本科生和这两个专业电大、函大、夜大、职大生的教材,也可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考。

本书原稿于1988年10月作为内部教材印出后,除经华中理工大学机械电子工程专业几届学生使用外,还在其他几所学校使用过,受到了从事机电一体化工作的教授、专家和学生们的热情支持和鼓励,华中理工大学王离九教授、徐恕宏教授、林奕鸿教授、熊有伦教授、胡乾斌副教授、合肥工业大学方维坤副教授、王孝武副教授、上海机械学院赵松年副教授、广东工学院孙健教授、成都科技大学张奇鹏副教授、长沙职工大学罗伯强副教授、湖南大学黄义源副教授、西北工业大学马慎兴副教授等对本书提出了许多宝贵意见,指导和促进了本书的修改。在此,作者对他们表示衷心的感谢。

本书第十二、十三章由周祖德编写,邓星钟编写其余各章并负责全书的统编和定稿。

限于编者的水平,书中定有缺点和错误,恳请读者批评指正。

编者 1991年5月

# 目 录

第一章 概述	用 .....	( 70 )
§ 1.1 机电传动的目的和任务 .....	习题与思考题 .....	( 1 )
§ 1.2 机电传动及其控制系统的 发展概况 .....		( 1 )
§ 1.3 内容安排 .....		( 2 )
第二章 机电传动系统的动力学基础		
§ 2.1 机电传动系统的运动方程式 .....		( 4 )
§ 2.2 转矩、转动惯量和飞轮转矩的折算 .....		( 6 )
§ 2.3 生产机械的机械特性 .....		( 8 )
§ 2.4 机电传动系统稳定运行的条件.....		( 10 )
习题与思考题 .....		( 11 )
第三章 直流电机的工作原理与其特性		
§ 3.1 直流电机的基本结构和工作原理.....		( 13 )
§ 3.2 直流发电机.....		( 16 )
§ 3.3 直流电动机的机械特性.....		( 19 )
§ 3.4 直流他励电动机的启动特性.....		( 23 )
§ 3.5 直流他励电动机的调速特性.....		( 24 )
§ 3.6 直流他励电动机的制动特性.....		( 27 )
习题与思考题 .....		( 33 )
第四章 机电传动系统的过渡过程		
§ 4.1 研究机电传动系统过渡过程的实际 意义.....		( 35 )
§ 4.2 机电传动系统过渡过程的分析.....		( 35 )
§ 4.3 机电时间常数 $\tau_m$ .....		( 38 )
§ 4.4 加快机电传动系统过渡过程的方法.....		( 38 )
习题与思考题 .....		( 40 )
第五章 交流电动机的工作原理及其特性		
§ 5.1 三相异步电动机的结构和工作原理 .....		( 41 )
§ 5.2 三相异步电动机的定子电路和转子 电路.....		( 47 )
§ 5.3 三相异步电动机的转矩与机械特性 .....		( 51 )
§ 5.4 三相异步电动机的启动特性.....		( 55 )
§ 5.5 三相异步电动机的调速特性.....		( 63 )
§ 5.6 三相异步电动机的制动特性.....		( 65 )
§ 5.7 单相异步电动机.....		( 67 )
§ 5.8 同步电动机的工作原理、特点及应 用 .....		( 70 )
习题与思考题 .....		( 73 )
第六章 控制电机		
§ 6.1 交流伺服电动机 .....		( 75 )
§ 6.2 直流伺服电动机.....		( 78 )
§ 6.3 力矩电动机.....		( 80 )
§ 6.4 小功率同步电动机.....		( 81 )
§ 6.5 测速发电机.....		( 84 )
§ 6.6 自整角机.....		( 87 )
习题与思考题 .....		( 91 )
第七章 机电传动控制系统中 电动机的选择		
§ 7.1 电动机容量选择的原则 .....		( 93 )
§ 7.2 电动机的发热与冷却.....		( 93 )
§ 7.3 不同工作制下电动机容量的选择.....		( 94 )
§ 7.4 电动机容量选择的统计法和类比法 .....		( 99 )
§ 7.5 晶闸管供电对电动机的影响 .....		( 100 )
§ 7.6 电动机的种类、电压、转速和结构 类型的选择 .....		( 101 )
习题与思考题.....		( 103 )
第八章 继电器-接触器控制系统		
§ 8.1 常用控制电器与执行电器 .....		( 105 )
§ 8.2 继电器-接触器控制的常用基本线 路 .....		( 118 )
§ 8.3 继电器-接触器控制线路举例 .....		( 141 )
§ 8.4 继电器-接触器控制线路设计简介 .....		( 143 )
习题与思考题.....		( 145 )
第九章 顺序控制器与可编程序控制器		
§ 9.1 基本逻辑型顺序控制器 .....		( 148 )
§ 9.2 可编程序控制器 .....		( 156 )
习题与思考题.....		( 162 )
第十章 电力电子学——晶闸管及其 基本电路		
§ 10.1 电力半导体器件 .....		( 164 )
§ 10.2 单相可控整流电路.....		( 170 )
§ 10.3 三相可控整流电路.....		( 176 )
§ 10.4 逆变器.....		( 180 )

§10.5 晶闸管的触发电路.....	(186)	§12.3 线绕式异步电动机调速系统.....	(236)
§10.6 晶闸管的串并联和保护.....	(191)	§12.4 晶闸管变频调速系统.....	(228)
习题与思考题.....	(193)	§12.5 异步电动机矢量变换控制.....	(245)
<b>第十一章 直流传动控制系统</b>		§12.6 无换向器电动机及其调速系统 ...	(247)
§11.1 机电传动控制系统的组成和分类		习题与思考题.....	(250)
.....	(195)	<b>第十三章 步进电动机传动控制系统</b>	
§11.2 机电传动控制系统调速方案的选择.....	(198)	§13.1 步进电动机.....	(251)
§11.3 晶闸管-电动机直流传动控制系统		§13.2 步进电动机的环形分配器.....	(253)
.....	(202)	§13.3 步进电动机的驱动电路.....	(256)
§11.4 晶体管-电动机直流脉宽调速系		§13.4 步进电动机的运行特性及选用中	
统.....	(222)	应注意的问题.....	(257)
习题与思考题.....	(229)	习题与思考题.....	(260)
<b>第十二章 交流传动控制系统</b>		附录一 电气图形符号.....	(261)
§ 12.1 电磁转差离合器调速系统.....	(231)	附录二 电器文字符号.....	(265)
§ 12.2 交流调压调速系统.....	(233)	参考文献.....	(267)

# 第一章 概 述

## §1.1 机电传动的目的和任务

机电传动(又称电力传动或电力拖动)就是指以电动机为原动机驱动生产机械的系统之总称,它的目的是将电能转变为机械能,实现生产机械的启动、停止以及速度调节;完成各种生产工艺过程的要求,保证生产过程的正常进行。

在现代工业中,为了实现生产过程自动化的要求,机电传动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,也就是说,现代机电传动是和由各种控制元件组成的自动控制系统紧密地联系在一起的,所以本书取名为《机电传动控制》。

从现代化生产的要求来说,机电传动控制系统所要完成的任务,从广义上讲,就是要使生产机械设备、生产线、车间、甚至整个工厂都实现自动化。从狭义上讲,则专指控制电动机驱动生产机械,实现生产产品数量的增加、质量的提高,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。随着生产工艺的发展,对机电传动控制系统提出了愈来愈高的要求,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;轧钢车间的可逆式轧机及其辅助机械,操作频繁,要求在不到一秒的时间内就得完成从正转到反转的过程,即要求能迅速地启动、制动和反转;对于电梯和提升机则要求启动和制动平稳,并能准确地停止在给定的位置上;对于冷、热连轧机以及造纸机的各机架或分部,则要求各机架或各分部的转速保持一定的比例关系进行协调运转;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,诸如此类的要求,都是靠电动机及其控制系统和机械传动装置来实现的。

## §1.2 机电传动及其控制系统的发展概况

机电传动及其控制系统总是随着社会生产的发展而发展的。单就机电传动而言;它的发展大体上经历了成组拖动、单电机拖动和多电机拖动三个阶段:所谓成组拖动,就是一台电动机拖动一根天轴,然后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;所谓单电机拖动,就是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;多电机拖动,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。

控制系统的发展伴随控制器件的发展而发展。随着功率器件、放大器件的不断更新,机电传动控制系统的发展日新月异,它主要经历了四个阶段: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,它的控制速度慢,控制精度差;30年代出现了电机放大机控制,它使控制系统从断续控制发展到连续控制,连续控制系统可随时检查控制对象的工作状态,并根据输出量与给定量的偏差对控制对象自动进行调整,它的快速性及控制精度都大大超过了最初的断续控制,并简化了控制系统,减少了电路中的触点,提高了可靠性,使生产效率大为提高;40~50年代出现了磁放大器控制和大功率可控水银整流器控制;可时隔不久,于50年代末期出现了大功率固体可控整流元件——晶闸管,很快晶闸管控制就取代了水银整流器控制,后又出现了功率晶体管控制,由于晶体管、晶闸管具有效率高、控制特性好、反应快、寿命长、可靠性高、维护容易、体积小、重量轻等优点,它的出现为机电传动自动控制系统开辟了新纪元;随着数控技术的发展,计算机的应用特别是微型计算机的出现和应用,又使控制系统发展到一个新阶段——采样控制,它也是一种断续控制,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,因此在客观上完全等效于连续控制,它把晶闸管技术与微电子技术、计算机技术紧密地结合在一起,使晶体管与晶闸管控制具有强大的生命力。

70年代初,计算机数字控制(CNC)系统应用于数控机床和加工中心,这不仅加强了自动化程度,而且提高了机床的通用性和加工效率,在生产上得到了广泛的应用。工业机器人的诞生,为实现机械加工全盘自动化创造了物质基础。80年代以来,出现了由数控机床、工业机器人、自动搬运车等组成的统一由中心计算机控制的机械加工自动线——柔性制造系统(FMS),它是实现自动化车间和自动化工厂的重要组成部分。机械制造自动化高级阶段是走向设计、制造一体化,即利用计算机辅助设计(CAD)与计算机辅助制造(CAM)形成产品设计和制造过程的完整系统,对产品构思和设计直至装配、试验和质量管理这一全过程实现自动化。为了实现制造过程的高效率、高柔性、高质量,研制计算机集成生产系统(CIMS)是人们今后的任务。

### § 1.3 内容安排

全书共分十三章。第一章为概述。第二章重点介绍了机电传动系统的运动方程式。基于电动机是机电传动的动力与电气控制的对象,故第三、第五章分别介绍了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,控制电机作为一种重要的检测、控制元件,用得愈来愈多,故第六章介绍各类常用控制电机的结构特点、工作原理、性能和应用。第七章介绍了电动机的选择。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,它仍然还将起着重要的作用,第八章介绍了继电器-接触器控制系统中用到的常用电器和基本控制线路,以及典型的应用实例等。顺序控制器早已应用在自动化的生产中,随着微型计算机的出现和迅速发展,可编程序控制器PC正在取代传统的顺序控制器,第九章介绍了顺序控制器和PC;晶闸管的出现改变了闭环控制系统的面貌,第十章重点介绍了晶闸管和可控整流电路。调速系统是机电传动控制系统中非常重要的组成部分,第十一、十二、十三

三章分别介绍了各类常用直、交流传动控制系统和步进电动机传动控制系统的组成、工作原理及性能。为了分析机电传动控制系统的动态性能，第四章还简要地介绍了机电传动系统的过渡过程。

本教材是按课程学时数为 90 而编写的。除了课堂讲授的基本内容之外，有一些内容可在教师启发下由学生自学完成，这些内容为第四章，第七章，第八章的 § 8.1，§ 8.3，§ 8.4，第十章的 § 10.6，第十一章的 § 11.2.3。还编写了一些较深入的内容，这些内容为第六章的 § 6.6，第十一章的 § 11.4.3 之二，§ 11.4.4，第十二章的 § 12.5，§ 12.6，这部分内容可由教师灵活掌握。

本书各章后面均附有习题和思考题。

## 第二章 机电传动系统的动力学基础

本章要求掌握机电传动系统的运动方程式及其含义；掌握多轴拖动系统中转矩折算的基本原则和方法；了解几种典型生产机械的负载特性；了解机电传动系统稳定运行的条件，并学会用它来分析系统的稳定平衡点。

机电传动系统是一个由电动机拖动，并通过传动机构带动生产机械运转的机电运动的动力学整体，尽管电动机种类繁多、特性各异，生产机械的负载性质也可以各种各样，但从动力学的角度来分析时，则都应服从动力学的统一规律，所以本章首先分析机电传动系统的运动方程式，进而分析机电传动系统稳定运行的条件。

### §2.1 机电传动系统的运动方程式

图2.1所示为一单轴机电传动系统，它是由电动机M产生转矩 $T_M$ ，用来克服负载转矩 $T_L$ ，以带动生产机械运动，当这两个转矩平衡时，传动系统维持恒速转动，转速 $n$ 或角速度 $\omega$ 不变，加速度 $dn/dt$ 或角加速度 $d\omega/dt$ 等于零，即 $T_M = T_L$ 时， $n = \text{常数}$ ， $dn/dt = 0$ ，或 $\omega = \text{常数}$ ， $d\omega/dt = 0$ ，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 $T_M$

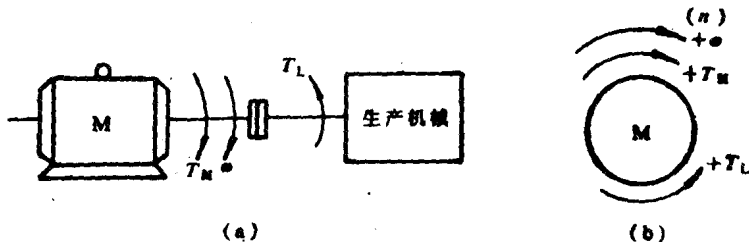


图2.1 单轴拖动系统

(a) 传动系统图 (b) 转矩、转速的正方向

$\neq T_L$ 时，速度（ $n$ 或 $\omega$ ）就要变化，产生加速或减速，速度变化的大小与传动系统的转动惯量 $J$ 有关，把上述的这些关系用方程式表示，即为

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

这就是单轴机电传动系统的运动方程式。

式中  $T_M$ ——电动机产生的转矩；

$T_L$ ——单轴传动系统的负载转矩；

$J$ ——单轴传动系统的转动惯量；

$\omega$ ——单轴传动系统的角速度；

$t$ ——时间。

在实际工程计算中，往往用转速 $n$ 代替角速度 $\omega$ ，用飞轮惯量（也称飞轮转矩） $GD^2$ 代替转动惯量 $J$ ，由于 $J = m\rho^2 = mD^2/4$ ，其中 $\rho$ 和 $D$ 定义为惯性半径和惯性直径，而质量 $m$ 和重

量 $G$ 的关系是 $G = mg$ ,  $g$ 为重力加速度, 所以 $J$ 与 $GD^2$ 的关系是

$$\{J\}_{\text{kg}\cdot\text{m}^2} = \frac{1}{4}\{m\}_{\text{kg}}\{D^2\}_{\text{m}^2} = \frac{1}{4}\frac{\{G\}_{\text{N}}}{\{g\}_{\text{m/s}^2}}\{D^2\}_{\text{m}^2} = \frac{1}{4}\{GD^2\}_{\text{N}\cdot\text{m}}/\{g\}_{\text{m/s}^2} \quad (2.2)$$

或  $\{GD^2\}_{\text{N}\cdot\text{m}} = 4\{g\}_{\text{m/s}^2}\{J\}_{\text{kg}\cdot\text{m}^2}$

且  $\{\omega\}_{\text{rad/s}} = \frac{2\pi}{60}\{n\}_{\text{r/min}}$  (2.3)

将式(2.2)和(2.3)代入式(2.1), 就可得运动方程式的实用形式:

$$\{T_M\}_{\text{N}\cdot\text{m}} - \{T_L\}_{\text{N}\cdot\text{m}} = \frac{\{GD^2\}_{\text{N}\cdot\text{m}}}{375} \frac{d\{n\}_{\text{r/min}}}{d\{t\}_s} \quad (2.4)$$

式中常数375包含着 $g = 9.81\text{m/s}^2$ , 故它有加速度的因次,  $GD^2$ 是个整体物理量, 运动方程式是研究机电传动系统最基本的方程式, 它决定着系统运动的特征。当 $T_M > T_L$ 时, 加速度 $a = dn/dt$ 为正, 传动系统为加速运动; 当 $T_M < T_L$ 时,  $a = dn/dt$ 为负, 系统为减速运动。系统处于加速或减速的运动状态称为动态。处于动态时, 系统中必然存在一个动态转矩

$$\{T_d\}_{\text{N}\cdot\text{m}} = \frac{\{GD^2\}_{\text{N}\cdot\text{m}}}{375} \frac{d\{n\}_{\text{r/min}}}{d\{t\}_s} \quad (2.5)$$

它使系统的运动状态发生变化。这样, 运动方程式(2.1)或(2.4)也可以写成转矩平衡方程式

$$T_M - T_L = T_d$$

或

$$T_M = T_L + T_d \quad (2.6)$$

就是说, 电动机所产生的转矩在任何情况下, 总是由轴上的负载转矩(即静态转矩)和动态转矩之和所平衡。

当 $T_M = T_L$ 时,  $T_d = 0$ , 这表示没有动态转矩, 系统恒速运转, 即系统处于稳态, 稳态时, 电动机发出转矩的大小, 仅由电动机所带的负载(生产机械)所决定。

值得指出的是图2.1(b)中关于转矩正方向的约定: 由于传动系统有各种运动状态, 相应地运动方程式中的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 $T_M$ 与 $T_L$ 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, 在提升重物过程中, 试判定起重机启动和制动时电机转矩 $T_M$ 和负载转矩 $T_L$ 的符号。设重物提升时电动机旋转方向为 $n$ 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,  $T_M$ 取正号;  $T_L$ 与 $n$ 方向相反,  $T_L$ 亦取正号。这时的运动方程式为

$$\{T_M\}_{\text{N}\cdot\text{m}} - \{T_L\}_{\text{N}\cdot\text{m}} = \frac{\{GD^2\}_{\text{N}\cdot\text{m}}}{375} \frac{d\{n\}_{\text{r/min}}}{d\{t\}_s}$$

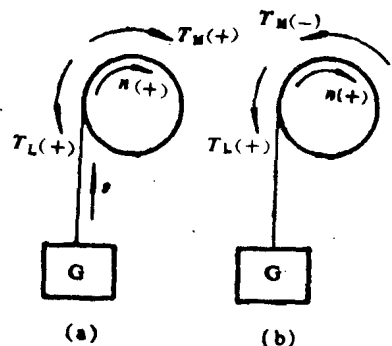


图2.2  $T_M, T_L$ 符号的判定

(a) 启动时 (b) 制动时

要能提升重物，必存在  $T_M > T_L$ ，即动态转矩  $T_d = T_M - T_L$  和加速度  $a = dn/dt$  均为正，系统加速运行。

制动时：如图 2.2 (b) 所示，仍是提升过程， $n$  为正，只是此时要电动机制止系统运动，所以  $T_M$  与  $n$  方向相反， $T_M$  取负号，而重物产生的转矩总是向下，和启动过程一样， $T_L$  仍取正号，这时运动方程式为

$$-(T_M)_{N.m} - (T_L)_{N.m} = \frac{(GD^2)_{N.m} \cdot \frac{d\{n\}_{r/min}}{d\{t\}_s}}{375}$$

可见，此时动态转矩和加速度都是负值，它使重物减速上升，直到停止。制动过程中，系统中动能产生的动态转矩由电动机的制动转矩和负载转矩所平衡。

## § 2.2 转矩、转动惯量和飞轮转矩的折算

上节所介绍的是单轴拖动系统的运动方程式，但实际的拖动系统一般常是多轴拖动系统，如图 2.3 所示。这是因为许多生产机械要求低速运转，而电动机一般具有较高的额定转速。这样，电动机与生产机械之间就得装设减速机构，如减速齿轮箱或蜗轮蜗杆、皮带等减速装置。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 2.1 所示的最简单的典型单轴系统，折算时的基本原则是折算前的多轴系统同折算后的单轴系统，在能量关系上或功率关系上保持不变。下面简单地介绍折算方法。

### § 2.2.1 负载转矩的折算

负载转矩是静态转矩，可根据静态时功率守恒原则进行折算。

对旋转运动，如图 2.3 (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  $T'_L$  和  $\omega_L$ ——生产机械的负载转矩和旋转角速度。

设  $T'_L$  折算到电动机轴上的负载转矩为  $T_L$ ，则电动机轴上的负载功率为

$$P_M = T_L \omega_M$$

式中  $\omega_M$ ——电动机转轴的角速度。

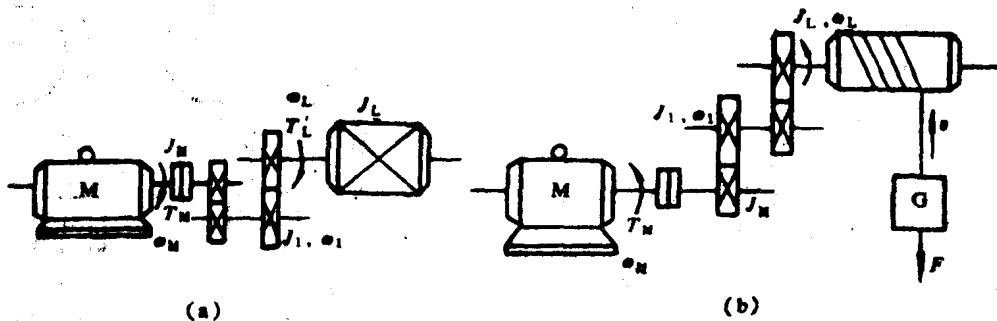


图 2.3 多轴拖动系统

(a) 旋转运动 (b) 直线运动

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  $\eta_c$  来表示，且

$$\eta_c = \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} = \frac{P'_L}{P_M} = \frac{T'_L \omega_L}{T_L \omega_M}$$

于是可得折算到电动机轴上的负载转矩

$$T_L = \frac{T'_L \omega_L}{\eta_c \omega_M} = \frac{T'_L}{\eta_c j} \quad (2.7)$$

式中  $\eta_c$ ——电动机拖动生产机械运动时的传动效率；

$j = \omega_M / \omega_L$ ——传动机构的速比。

对直线运动，如图 2.3 (b) 所示的卷扬机构就是一例。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

$$P_M = T_L \omega_M$$

式中  $T_L$ ——负载力  $F$  在电动机轴上产生的负载转矩。

如果是电动机拖动生产机械旋转或移动，则传动机构中的损耗应由电动机承担，根据功率平衡关系就有

$$T_L \omega_M = Fv / \eta_c$$

将  $\{\omega\}_{\text{rad/s}} = \frac{2\pi}{60} \{n\}_{\text{r/min}}$  代入上式可得

$$\{T_L\}_{\text{N}\cdot\text{m}} = 9.55 \{F\}_N \{v\}_m / \eta_c \{n_M\}_{\text{r/min}} \quad (2.8)$$

式中  $n_M$ ——电动机轴的转速。

如果是生产机械拖动电动机旋转，例如卷扬机构下放重物时，电动机处于制动状态，这种情况下传动机构中的损耗则由生产机械的负载来承担，于是有

$$T_L \omega_M = Fv \eta'_c$$

或  $\{T_L\}_{\text{N}\cdot\text{m}} = 9.55 \eta'_c \{F\}_N \{v\}_m / \{n_M\}_{\text{r/min}} \quad (2.9)$

式中  $\eta'_c$ ——生产机械拖动电动机运动时的传动效率。

### § 2.2.2 转动惯量和飞轮转矩的折算

由于转动惯量和飞轮转矩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。对旋转运动，如图 2.3 (a) 所示的拖动系统，折算到电动机轴上的总转动惯量为

$$J_z = J_M + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{j_L^2} \quad (2.10)$$

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；

$j_1 = \omega_M / \omega_1$ ——电动机轴与中间传动轴之间的速比；

$j_L = \omega_M / \omega_L$ ——电动机轴与生产机械轴之间的速比；

$\omega_M, \omega_1, \omega_L$ ——电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的角速度。

折算到电动机轴上的总飞轮转矩为

$$GD_z^2 = GD_M^2 + \frac{GD_1^2}{j_1^2} + \frac{GD_L^2}{j_L^2} \quad (2.11)$$

式中  $GD_M^2, GD_1^2, GD_L^2$ ——电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的飞轮转矩。

当速比  $j$  较大时，中间传动机构的转动惯量  $J$  或飞轮转矩  $GD^2$ ，在折算后占整个系统的比重不大，所以实际工程中为了计算方便起见，多用适应加大电动机轴上的转动惯量  $J_M$  或飞轮转矩  $GD_M^2$  的方法，来考虑中间传动机构的转动惯量  $J$  或飞轮转矩  $GD^2$  的影响，于是有

$$J_z = \delta J_M + \frac{J_L}{j_L^2} \quad (2.12)$$

$$\text{或} \quad GD_z^2 = \delta GD_M^2 + \frac{GD_L^2}{j_L^2} \quad (2.13)$$

一般  $\delta = 1.1 \sim 1.25$ 。

对直线运动，如图 2.3(b) 所示的拖动系统，设直线运动部件的质量为  $m$ ，折算到电动机轴上的总转动惯量或总飞轮转矩分别为

$$J_z = J_M + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{j_L^2} + m \frac{v^2}{\omega_M^2} \quad (2.14)$$

$$\text{或} \quad \{GD_z^2\}_{N \cdot m^2} = \{GD_M^2\}_{N \cdot m^2} + \frac{\{GD_1^2\}_{N \cdot m^2}}{j_1^2} + \frac{\{GD_L^2\}_{N \cdot m^2}}{j_L^2} + 365 \frac{\{G\}_N \{v^2\}_{(m/s)^2}}{\{n_M^2\}_{(r/min)^2}} \quad (2.15)$$

依照上述方法，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拖动系统，折算成等效的单轴拖动系统，将所求得的  $T_L$ ， $GD_z^2$  代入式 (2.4) 就可得到多轴拖动系统的运动方程式

$$\{T_M\}_{N \cdot m} - \{T_L\}_{N \cdot m} = \frac{\{GD_z^2\}_{N \cdot m^2}}{375} \frac{d\{n_M\}_{r/min}}{d\{t\}_s} \quad (2.16)$$

以此来研究机电传动系统的运动规律。

## §2.3 生产机械的机械特性

上面所讨论的机电传动系统运动方程式中，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，今后提及生产机械的机械特性时，除特加说明外，均指电动机轴上的负载转矩和转速之间的函数关系即  $n = f(T_L)$  而言。

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

### §2.3.1 恒转矩型机械特性

此类机械特性的特点是负载转矩为常数，如图 2.4 所示。属于这一类的生产机械有提升机构、提升机的行走机构、皮带运输机以及金属切削机床等。

依据负载转矩与运动方向的关系，可以将恒转矩型的负载转矩分为反抗转矩和位能转矩。

反抗转矩也称摩擦转矩，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转矩。反抗转矩的方向恒与运动方向相反，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 §2.1 中关于转矩正方向的约定可知，反抗转矩恒与转速  $n$  取相同的符号，即  $n$  为正方向时  $T_L$  为正，特性在第一象限； $n$  为反方向时  $T_L$  为负，特性在第三象限，

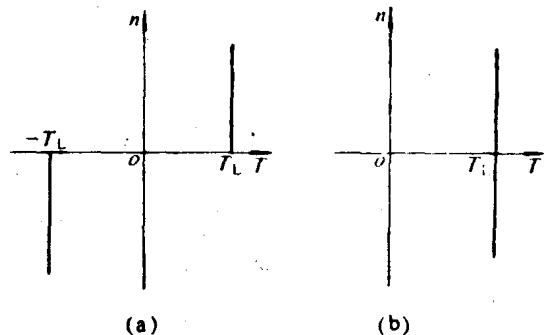


图2.4 两种恒转矩型机械特性

(a) 反抗转矩 (b) 位能转矩

如图2.4(a)所示。

位能转矩与摩擦转矩不同，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转矩。位能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，而在相反方向便促进运动。卷扬机起吊重物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 $n$ 方向相反；而当重物下降时， $T_L$ 则与 $n$ 方向相同。不管 $n$ 为正向还是反向， $T_L$ 都不变，特性在第一、四象限，如图2.4(b)所示。不难理解，在运动方程中，反抗转矩 $T_L$ 的符号总是正的，位能转矩 $T_L$ 的符号则有时为正，有时为负。

### §2.3.2 离心式通风机型机械特性

这一类型的机械是按离心力原理工作的，如离心式鼓风机、水泵等，它们的负载转矩 $T_L$ 与 $n$ 的平方成正比，即 $T_L = Cn^2$ ， $C$ 为常数，如图2.5所示。

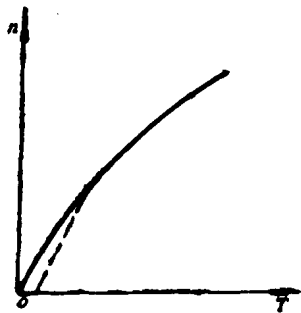


图2.5 离心式通风机型机械特性

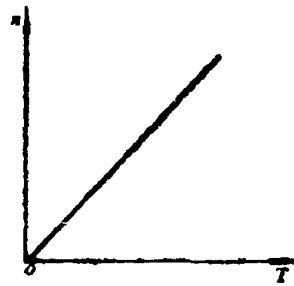


图2.6 直线型机械特性

### §2.3.3 直线型机械特性

这一类机械的负载转矩 $T_L$ 是随 $n$ 的增加成正比的增大，即 $T_L = Cn$ ， $C$ 为常数，如图2.6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。

### §2.3.4 恒功率型机械特性

此类机械的负载转矩 $T_L$ 与转速 $n$ 成反比，即 $T_L = K/n$ ，或 $K = T_L n = P$ 为常数，如图2.7所示。例如车床加工，粗加工时，切削量大，负载阻力大，开低速；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，切削功率基本不变。

除了上述几种类型的生产机械外，还有一些生产机械具有各自的转矩特性，如带曲柄连杆机构的生产机械，它们的负载转矩 $T_L$ 是随转角 $\alpha$ 而变化的，而球磨机、碎石机等生产机械，其负载转矩则随时间作无规律的随机变化，等等。

还应指出，实际负载可能是单一类型的，也可能是几种典型的综合，例如，实际通风机除了主要是通风机性质的负载特性

外，轴上还有一定的摩擦转矩 $T_0$ ，所以实际通风机的机械特性应为 $T_L = T_0 + Cn^2$ ，如图2.5

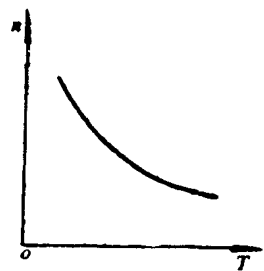


图2.7 恒功率型机械特性



中的虚线所示。

## § 2. 4 机电传动系统稳定运行的条件

机电传动系统里，电动机与生产机械联成一体，为了使系统运行合理，就要使电动机的机械特性与生产机械的机械特性尽量相配合。特性配合好的一个起码要求是系统要能稳定运行。

机电传动系统的稳定运行包含两重含义：一是系统应能以一定速度匀速运转，二是系统受某种外部干扰作用（如电压波动、负载转矩波动等）而使运行速度稍有变化时，应保证在干扰消除后系统能恢复到原来的运行速度。

为保证系统匀速运转，必要条件是电动机轴上的拖动转矩  $T_M$  和折算到电动机轴上的负载转矩  $T_L$  大小相等，方向相反，相互平衡。从  $T-n$  坐标平面上看，这意味着电动机的机械特性曲线  $n=f(T_M)$  和生产机械的机械特性曲线  $n=f(T_L)$  必须有交点，如图 2.8 所示，图中曲线 1 为异步电动机的机械特性，曲线 2 为电动机拖动的生产机械的机械特性（恒转矩型的），两特性曲线有交点 a 和 b，交点常称为拖动系统的平衡点。

但是机械特性曲线存在交点只是保证系统稳定运行的必要条件，还不是充分条件，实际上只有 a 点才是系统的稳定平衡点，因为在系统出现干扰时——例如负载转矩突然增加了  $\Delta T_L$ ，变为  $T'_L$ ，于是  $T_M < T'_L$ ，由拖动系统运动方程可知，系统要减速，即  $n$  要下降到  $n' = n_s - \Delta n$ ，从电动机机械特性的 AB 段可看出，电动机转矩  $T_M$  将增大为  $T'_M = T_M + \Delta T_M$ ，当干扰消除 ( $\Delta T_L = 0$ ) 后，必有  $T'_M > T_L$  迫使电动机加速，转速  $n$  上升，而  $T_M$  又要随  $n$  的上升而减小，直到  $\Delta n = 0$ ， $T_M = T_L$ ，系统重新回到原来的运行点 a；反之，若  $T_L$  突然减小， $n$  上升，当干扰消除后，也能回到 a 点工作，所以 a 点是系统的稳定平衡点。在 b 点，若  $T_L$  突然增加， $n$  要下降，从电动机机械特性的 BC 段可看出， $T_M$  要减小，当干扰消除后，则有  $T_M < T_L$  使得  $n$  又要下降， $T_M$  随  $n$  的下降而进一步减小，使  $n$  进一步下降，一直到  $n=0$ ，电动机停转；反之，若  $T_L$  突然减小， $n$  上升，直至越过 B 点进入 AB 段的 a 点工作。所以 b 点不是系统的稳定平衡点。可知，对于恒转矩负载，电动机必须具有向下倾斜的机械特性，系统才能稳定运行，若特性上翘，便不能稳定运行。

从以上分析可以总结出机电传动系统稳定运行的必要充分条件是：

(1) 电动机和生产机械的机械特性曲线  $n=f(T_M)$  和  $n=f(T_L)$  有交点（即拖动系统的平衡点）。

(2) 当转速大于平衡点所对应的转速时， $T_M < T_L$ ，即若干扰使转速上升，当干扰消除后应有  $T_M - T_L < 0$ ；而当转速小于平衡点所对应的转速时， $T_M > T_L$ ，即若干扰使转速下降，当干扰消除后应有  $T_M - T_L > 0$ 。只有满足上述二个条件的平衡点，才是拖动系统的稳定平衡点，即只有这样的特性配合，系统在受到外界干扰后，才具有恢复到原平衡状态的能力而进入稳定运行。

例如当异步电动机拖动直流他励发电机工作，具有图 2.9 的特性时，b 点便符合稳定运行条件，因此在此情况下，b 点是稳定平衡点。