

上海市本科教育高地建设  
机械制造及其自动化系列教材

# 机电传动控制

汤以范 主 编  
钱 华 副主编  
程武山 主 审

L.5

清华大学出版社

58

上海市本科教育高地建设  
机械制造及其自动化系列教材

# 机电传动控制

汤以范 主 编  
钱 华 副主编  
程武山 主 审

Tm921.5

T221

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本教材介绍机电传动控制技术,全书共分8章。内容包括:机电传动控制的动力学基础、电动机的工作原理及其机械特性、机电传动断续控制、机电传动系统方案及电动机的选择、直流传动控制系统、交流传动控制系统、步进电动机传动控制系统和机电传动伺服系统控制技术。针对各章内容,每章附有思考与习题,方便学生复习本章内容。

本教材适用于机械工程及自动化专业和机械设计制造及其自动化(现代装备与控制工程)专业的本、专科学生,也可以作为各类成人教育相关专业的专业课教材。本书中所举的应用实例具有较好的应用价值,可以供工程技术人员学习参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

机电传动控制/汤以范主编. —北京:清华大学出版社,2010.3

(上海市本科教育高地建设机械制造及其自动化系列教材)

ISBN 978-7-302-21635-3

I. ①机… II. ①汤… 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(2010)第016322号

责任编辑:庄红权 赵从棉

责任校对:刘玉霞

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

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

社 总 机:010-62770175

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:20

字 数:479千字

版 次:2010年3月第1版

印 次:2010年3月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:32.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。  
联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:032786-01

上海市本科教育高地建设  
机械制造及其自动化系列教材编写委员会

顾 问 陈关龙

主 任 程武山

副主任 何法江

编 委 王明红 蔡颖玲 陆 宁 陆 文

秘 书 周玉凤

# 序言

进入 21 世纪以来,我国制造业得到了飞速发展。中国已成为世界制造业大国,正面临着从制造业大国向制造业强国转型的关键时期。培养大批适应中国机械工业发展的优秀工程技术人才,是实现这一重大转变的关键。

遵循高等教育、人才培养和社会主义市场经济的规律,围绕《上海优先发展先进制造业行动方案》,紧贴区域经济和社会需求的发展,上海工程技术大学机械工程学院抓住“上海市机械制造及其自动化本科教育高地建设”这一机遇,把握先进制造业和现代服务业互补、融合的趋势,把打造工程本位的复合应用型人才培养基地作为高地建设的核心,把培养具有深厚的科学理论基础和一定的工程实践能力及创新能力的优秀的复合应用型人才——生产一线工程师,作为高地建设的战略发展目标。

正是基于上述考虑,本编写委员会联合清华大学出版社推出“上海市本科教育高地建设机械制造及其自动化系列教材”,希望根据“以生为本,以师为重,以教为基,以训为媒,突出工程实践”的教育思想理念和当前的科技水平及社会发展的需求,精心策划和编写本系列教材,培养出更多视野宽、基础厚、素质高、能力强和富于创造性的工程技术人才。

本系列教材的编写,注重文字通顺,深入浅出,图文并茂,表格清晰,符合国家与部门标准。在编写时,作者重视基础性知识,精选传统内容,使传统内容与新知识之间建立起良好的知识构架;重视处理好教材各章节间的内部逻辑关系,力求符合学生的认识规律,使学习过程变得顺理成章;重视工程实践与教学实验,改变原教材过于偏重理论知识的倾向,力图引导学生通过实践训练,发展自己的工程实践能力;倡导创新实践训练,引导学生发现问题、提出问题、分析问题和解决问题,培养创新思维能力和团队协作能力。

本系列教材的编写和出版,是上海市本科教育高地建设课程和教材改革中的一种尝试,教材中一定会存在不足之处,希望全国同行和广大读者不断提出宝贵意见,使我们编写出的教材能更好地为教育教学改革服务,更好地为培养高质量的人才服务。

陈关龙

2008 年 12 月

# 前言



本书主要介绍机电传动控制技术,是为机械工程及自动化专业、机械设计制造及其自动化(现代装备与控制工程)专业的本科学生学习机电传动控制技术而编写的专业基础教材,共分8章。

本书的编者长期从事机电传动控制课程的教学工作,长期的教学实践活动使我们体会到一本合适的教材对于提高教学质量的重要性。不同类型的学校,除了培养目标不同,教学内容和要求不一样外,在学生方面的具体表现就是学习习惯的差别;即使是同类型学校不同学生,自学能力方面也有很大的差异。因此,根据我校和同类学校学生情况编写合适的、能够帮助学生自学的教材成为了我校教学改革的一项重要任务。

本教材的编写思想是既能满足最大多数学生的自学需要,又具有一定的应用价值,特别在涉及电动机机械特性方面的每一个知识点的教学安排上力求循序渐进,讲清每一个问题,使学生能够从理解现象开始,逐渐过渡到自由想象结论,期间避免学生还不能接受的跳跃式(联想)教学,以期学生能打好坚实的电动机应用基础。在此基础上,各章都安排了与实际应用相关的知识内容。通过对实用技术的介绍,希望能够进一步激活学生潜在的学习动力,提高分析解决问题的能力。

本书第1章介绍了动力学方程的应用知识,希望学生能根据动力学方程了解电动机的运行状态,从而为学习机电传动速度控制系统交流技术中的能量转换现象提供理论基础。第2章介绍了交、直流电动机四象限运行特性和控制电机原理。第3,4章介绍了电动机断续控制技术及其容量计算方法。第5,6章介绍了直流、交流电动机调速技术及其系统组成原理。第7,8章介绍了步进电动机控制技术与伺服系统驱动技术。书中举例具有较强的应用针对性,学生通过例题、思考与习题和相应实验,能够较全面和深入地掌握机电传动控制方面的实用技术。

本教材的第1,2,6,8章由汤以范编写,第3,4,5章由钱华编写,第7章由范荻庆编写;全书由汤以范统稿。

本书在编写过程中,得到了教研室全体教师的大力帮助,另外,程武山教授担任本书的主审,他仔细审阅了全部书稿,提出了许多建设性意见和宝贵的建议,在此向他表示诚挚的谢意。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。由于作者水平有限,错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2009年11月于上海

# 目录



<b>1</b>	<b>机电传动控制的动力学基础</b> .....	<b>1</b>
1.1	机电传动系统的运动方程式 .....	1
1.1.1	运动方程式 .....	2
1.1.2	运动方程式中转矩的正负号分析 .....	3
1.2	生产机械的负载转矩特性 .....	4
1.3	机电传动系统的稳定运行条件 .....	6
	小结 .....	7
	思考与习题 .....	8
<b>2</b>	<b>电动机的工作原理及其机械特性</b> .....	<b>9</b>
2.1	发电机定则与电动机定则 .....	9
2.2	交流异步电动机 .....	10
2.2.1	交流异步电动机的结构 .....	10
2.2.2	异步电动机的工作原理与铭牌数据 .....	12
2.2.3	三相异步电动机的机械特性 .....	16
2.2.4	异步电动机的起动和制动 .....	22
2.2.5	异步电动机运行特性小结 .....	28
2.3	直流电动机 .....	28
2.3.1	直流电动机的结构 .....	28
2.3.2	直流电动机的工作原理与铭牌数据 .....	29
2.3.3	直流电动机的机械特性 .....	34
2.3.4	直流电动机的起动和制动 .....	39
2.3.5	他励直流电动机运行特性小结 .....	47
2.4	单相异步电动机 .....	47
2.4.1	单相异步电动机的磁场 .....	47
2.4.2	单相异步电动机的起动方法 .....	50
2.5	直线异步电动机 .....	51

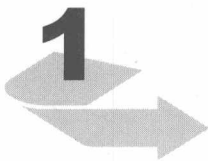
2.6	同步电动机	53
2.6.1	同步电动机的基本结构	53
2.6.2	同步电动机的工作原理和运行特性	54
2.6.3	同步电动机的起动	55
2.7	控制电动机	57
2.7.1	控制电动机概述	57
2.7.2	伺服电动机	58
2.7.3	测速发电机	65
2.7.4	旋转变压器	68
2.7.5	自整角机	76
	小结	89
	思考与习题	90
<b>3</b>	<b>机电传动断续控制</b>	<b>91</b>
3.1	常用低压电器	91
3.1.1	执行电器	91
3.1.2	检测电器	94
3.1.3	控制电器	96
3.1.4	保护电器	98
3.2	电动机的起、制动控制电路及起、制动设备的计算	100
3.2.1	电气控制原理图	100
3.2.2	继电-接触器自动控制的基本线路	102
3.3	电动机的保护	110
3.4	继电-接触器控制电路的设计方法	111
3.5	机床控制电路举例	113
	小结	117
	思考与习题	118
<b>4</b>	<b>机电传动系统方案及电动机的选择</b>	<b>119</b>
4.1	机电传动系统的组成及控制方案选择	119
4.1.1	机电传动系统的组成	119
4.1.2	机电传动控制方案的选择	119
4.2	电动机容量选择的原则	122
4.3	不同工作制下电动机容量的选择	122
4.3.1	连续工作制下电动机容量的选择	122
4.3.2	短时工作制下电动机容量的选择	124
4.3.3	重复短时工作制下电动机容量的选择	125
	小结	126
	思考与习题	126



<b>5</b>	<b>直流传动控制系统</b> .....	<b>128</b>
5.1	直流电动机调速系统的分类与技术性能 .....	128
5.1.1	直流电动机调速系统的分类 .....	128
5.1.2	直流电动机调速系统的技术指标 .....	128
5.2	旋转变流机组型直流调速系统(G-M系统) .....	129
5.2.1	旋转变流机组型直流调速系统的结构 .....	129
5.2.2	旋转变流机组型直流调速系统的机械特性 .....	130
5.2.3	交磁电机扩大机-直流发电机-直流电动机系统(GA-M系统) .....	130
5.3	静止变流机组型直流调速系统 .....	132
5.3.1	变流器件 .....	132
5.3.2	单闭环直流调速系统 .....	144
5.3.3	双闭环控制直流调速系统 .....	148
5.4	晶体管-直流电动机调速系统(PWM系统) .....	152
5.4.1	双极式可逆 PWM 变换器 .....	152
5.4.2	单极式可逆 PWM 变换器 .....	154
5.4.3	受限单极式可逆 PWM 变换器 .....	155
5.5	直流电动机调速系统介绍 .....	156
	小结 .....	161
	思考与习题 .....	161
<b>6</b>	<b>交流传动控制系统</b> .....	<b>163</b>
6.1	交流传动控制系统的应用领域 .....	163
6.2	调压调速系统 .....	164
6.2.1	晶闸管交流移相调压器 .....	164
6.2.2	固态接触器交流移相调压器 .....	167
6.2.3	三相交流调压电源 .....	171
6.2.4	调压调速系统的组成与特性分析 .....	172
6.3	电磁转差离合器调速系统 .....	176
6.3.1	系统的组成和工作原理 .....	176
6.3.2	电磁调速电动机的工作特性 .....	176
6.3.3	电磁调速电动机的优缺点及适用范围 .....	177
6.4	晶闸管串级调速系统 .....	177
6.4.1	串级调速的基本工作原理 .....	177
6.4.2	串级调速的基本运转状态与功率传递关系 .....	179
6.4.3	调速范围与串级调速装置的容量、转子电压的关系 .....	180
6.4.4	串级调速的主回路方案 .....	181
6.4.5	功率因数和效率 .....	182
6.4.6	串级调速系统的机械特性 .....	182
6.4.7	串级调速控制系统 .....	183

6.5	变频调速 .....	184
6.5.1	变频器的主要类型和特点 .....	184
6.5.2	交-直-交电压源型变频器 .....	190
6.5.3	交-直-交电流源型变频器 .....	194
6.5.4	电压源型变频器与电流源型变频器的性能比较 .....	196
6.5.5	脉宽调制式电压源型变频器 .....	197
6.5.6	交-交变频器 .....	200
	小结 .....	205
	思考与习题 .....	206
<b>7</b>	<b>步进电动机传动控制系统 .....</b>	<b>207</b>
7.1	步进电动机工作原理及分类 .....	208
7.1.1	步进电动机的结构与工作原理 .....	208
7.1.2	小步距角步进电动机 .....	210
7.1.3	步进电动机的分类 .....	211
7.2	步进电动机驱动电源 .....	212
7.2.1	步进电动机的驱动方式 .....	212
7.2.2	步进电动机的环形分配器 .....	213
7.2.3	步进电动机的驱动电路 .....	216
7.3	步进电动机的运行特性及影响因素 .....	220
7.3.1	步进电动机的运行特性 .....	220
7.3.2	步进电动机运行特性的影响因素 .....	223
7.3.3	步进电动机的主要性能指标和应用 .....	224
7.4	步进电动机的开、闭环控制 .....	226
7.4.1	步进电动机的开环控制 .....	226
7.4.2	步进电动机的闭环控制 .....	227
7.5	步进电动机控制系统应用实例 .....	228
7.5.1	步进电动机在数控车床中开环控制的应用 .....	228
7.5.2	步进电动机闭环控制在挤压机速度系统中的应用 .....	233
7.5.3	基于 PLC 的步进电动机控制在工业机械手中的应用 .....	233
	小结 .....	237
	思考与习题 .....	237
<b>8</b>	<b>机电传动伺服系统控制技术 .....</b>	<b>239</b>
8.1	机电传动伺服系统概述 .....	239
8.2	机电传动伺服系统的驱动元件 .....	241
8.2.1	不可控器件 .....	242
8.2.2	半控型器件 .....	243
8.2.3	全控型器件 .....	247

8.3 机电传动伺服系统的速度测量、位移测量·····	260
8.3.1 速度测量·····	260
8.3.2 角度(角位移)检测·····	271
8.3.3 伺服系统功率集成驱动模块·····	276
8.4 机电传动伺服系统负载及电动机参数综合计算·····	292
8.4.1 定位精度及设计注意点·····	292
8.4.2 负载飞轮惯量 $GD^2$ 的计算·····	295
8.4.3 负载及电动机参数综合计算举例·····	296
小结·····	300
思考与习题·····	301
附录 电气图常用文字、图形符号·····	302
参考文献·····	303



# 机电传动控制的动力学基础

研究机电传动动力学的目的是为介绍机电传动的机械特性与过渡过程等内容准备必要的理论基础。通过动力学方程,可以了解机械部件的运动状态,并由此研究机电传动系统的控制策略。

## 1.1 机电传动系统的运动方程式

“机电传动”就是将各种电动机作为原动机来驱动生产机械产生运动,以完成一定的生产任务。一般情况下,机电传动系统由电动机、工作机构、控制设备及电源 4 部分组成,如图 1.1 所示。电动机是机电传动的执行器,它将电能转换成机械动力,用以拖动生产机械的某一工作机构;工作机构是生产机械执行某一任务的机械部分;控制设备是由各种控制电机、电器、自动化元件及工业控制计算机等组成的,用以控制电动机的运动;虚线是速度和位置反馈信号,表示对工作机构的运动实现开环或者闭环的自动控制。

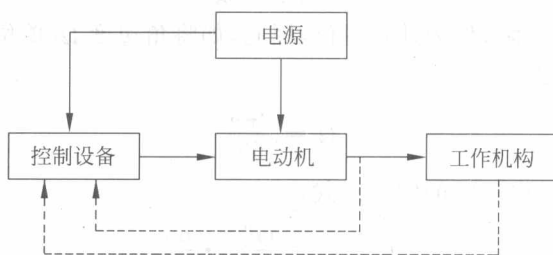


图 1.1 机电传动系统示意图

为了实现生产机械的速度调节,图 1.1 中的电源必须是可调电源。如果电动机是交流电动机,则电源可以是工频变压电源或者是变频电源;如果电动机是直流电动机,则电源可以是直流变压电源。

需要指出的是,在许多情况下,电动机与工作机构并不同轴,二者之间有传动机构,它把电动机的运动经过中间变速或运动方式变换后再传给生产机械的工作机构。

下面研究机电传动系统中电动机带动负载的力学问题。

### 1.1.1 运动方程式

电动机在机电传动系统中作直线运动(直线电动机)或旋转运动时,根据力学定律,必须遵循下列两个基本的运动方程式。

#### 1. 直线运动

直线运动的运动方程式为

$$F - F_z = m \frac{dv}{dt} \quad (1-1)$$

式中, $F$ 为拖动力(N); $F_z$ 为阻力(N); $m \frac{dv}{dt}$ 为惯性力,如果质量 $m$ 的单位是kg,速度 $v$ 的单位是m/s,时间 $t$ 的单位是s,则惯性力的单位是N。

#### 2. 旋转运动

旋转运动的运动方程式为

$$T - T_z = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-2)$$

式中, $T$ 为电动机产生的拖动转矩(N·m); $T_z$ 为阻转矩(或称负载转矩)(N·m); $J \frac{d\Omega}{dt}$ 为惯性转矩(或称加速度转矩)。

转动惯量 $J$ 可用下式表示:

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-3)$$

式中, $m, G$ 分别是旋转部分的质量(kg)与重量(N); $\rho, D$ 分别是惯性半径(m)与直径(m); $g$ 为重力加速度, $g=9.81 \text{ m/s}^2$ 。

这样,由式(1-3)可知,转动惯量 $J$ 的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

工程应用中,通常用速度作为计算单位,因此,如将角速度 $\Omega$ (单位为rad/s)化成用每分钟转数 $n$ 表示的形式,即

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}$$

并用式(1-3)代入,即得式(1-2)的实际形式:

$$T - T_z = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1-4)$$

式中, $GD^2$ 为飞轮力矩( $\text{N} \cdot \text{m}^2$ ), $GD^2=4gJ$ 。

必须注意,式(1-4)中的数字375包含 $g=9.81 \text{ m/s}^2$ 的因子,有加速度量纲。

令

$$T - T_z = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = T_d$$

式中, $T_d$ 为动态转矩。可以根据 $T_d$ 的正负和大小来判断系统的工作状态。

电动机电枢(或转子)及其他转动部件飞轮力矩 $GD^2$ 的数值可在相应的产品目录中查到,其单位目前有时用 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 表示。将查到的数据乘以9.81,就可换算成国际制单位 $\text{N} \cdot \text{m}^2$ 。

电动机的工作状态可由运动方程式表示出来。由式(1-4)可知:

(1) 当  $T_d = 0$  时,  $dn/dt = 0$ , 则  $n = 0$  或  $n = \text{常值}$ , 即电动机处于静止或等速旋转, 机电传动系统处于稳定的运转状态;

(2) 当  $T_d > 0$  时,  $dn/dt > 0$ , 机电传动系统处于加速的过渡过程状态;

(3) 当  $T_d < 0$  时,  $dn/dt < 0$ , 机电传动系统处于减速的过渡过程状态。

### 1.1.2 运动方程式中转矩的正负号分析

在运用运动方程式分析机电传动系统的运动状态及其能量转换的形式时, 通常以电动机轴为研究对象。由于电动机类型及运转状态的不同, 以及生产机械负载类型的不同, 电动机轴上的拖动转矩  $T$  及阻转矩  $T_z$  不仅大小不同, 方向也是变化的。因此, 运动方程式可写成下列一般形式:

$$\pm T - (\pm T_z) = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1-5)$$

式中转矩  $T$  与  $T_z$  前均带有正负号, 一般可作如下规定。

预先规定某一旋转方向(如顺时针方向)为参考方向, 如果电动机轴上输出转矩的方向与参考旋转方向相同, 式(1-5)中  $T$  取“+”号, 表明电动机输出驱动转矩; 如果电动机轴上输出转矩的方向与参考旋转方向相反, 式(1-5)中  $T$  前带“-”号, 表明电动机输出制动转矩。

同样, 当负载转矩的方向与电动机参考旋转方向相反时,  $T_z$  取“+”号, 表明负载是阻转矩; 当负载转矩的方向与参考旋转方向相同时,  $T_z$  取“-”号, 表明负载是驱动转矩。

加速转矩  $(GD^2/375) \cdot (dn/dt)$  的大小及正负号由转矩  $T$  及阻转矩  $T_z$  的代数和来决定。

下面以电动机起吊重物的势能负载机电传动系统为例, 用动力学方程讨论 4 种工况(见图 1.2)下的电动机动能情况。

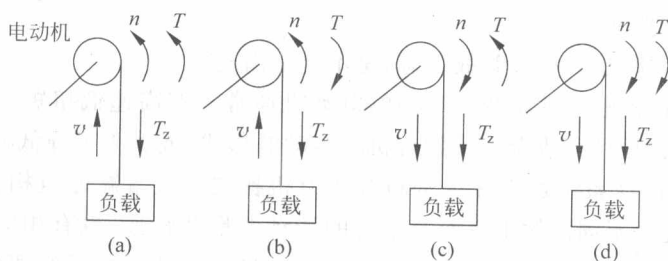


图 1.2 起重机的 4 种工况

#### 1. 电动机输出驱动转矩, 将电能转换为动能

由图 1.2(a)可知, 动力学方程为

$$+T - T_z = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = T_d$$

当  $T_d > 0$  时, 系统处于加速起吊重物的动态过渡过程;

当  $T_d = 0$  时, 系统处于匀速起吊重物的稳定过程;

当  $T_d < 0$  时, 系统处于减速起吊重物的动态过渡过程。

此时,电动机是原动机,从电源吸收电能,转变为机械能,输出驱动转矩,势能负载是阻转矩。

### 2. 电动机输出制动转矩,将动能转换为电能(回馈制动)

由图 1.2(b)可知,动力学方程为

$$-T - T_z = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = T_d$$

该工况下, $T_d$ 一定小于零,电机在负载转矩与制动转矩的共同作用下,处于制动减速起吊重物的动态过渡过程,且工作在发电状态,将势能转变为电能。需要说明的是,实现回馈制动还必须有变流电路配合。

### 3. 电动机输出制动转矩,将电能转换为热能(倒拉反接制动)

由图 1.2(c)可知,动力学方程为

$$-T - (-T_z) = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = T_d$$

当  $T_d > 0$  时,系统处于加速下放重物的动态过渡过程;

当  $T_d = 0$  时,系统处于匀速下放重物的稳定过程;

当  $T_d < 0$  时,系统处于减速下放重物的动态过渡过程。

此时,由于负载的势能性质,势能负载成为原动力,电动机输出制动转矩,将从电源吸收的电能转变为热能,消耗在绕组上。

### 4. 电动机与势能负载共同输出驱动转矩

由图 1.2(d)可知,动力学方程为

$$+T - (-T_z) = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} = T_d$$

该工况下, $T_d$ 一定大于零,系统在势能负载转矩与电动机输出转矩的共同作用下,处于加速下放重物的动态过渡过程。

实际上,这种工况是失控的事故状态,是不允许出现的。

到目前为止,在机电传动系统中采用的电动机通常具有高速低扭矩的特性。有时为了提高电动机输出轴的扭矩,或者为了配合机械运动的形式,或者为了降低机械运动部件的速度等,实际的机电传动系统通常在电动机与生产机械之间设置减速机构,成为多轴传动系统。多轴传动系统在不同的轴上各有其本身的转动惯量及转速,也有相应的反映电动机拖动的转矩及反映工作机构工作的阻转矩。这种系统显然比单轴的系统要复杂,也不能简单套用式(1-5)进行动力学分析,必须按能量守恒或者功率守恒的原则,先对传动机构的负载转矩、力、飞轮转矩和质量进行折算,然后再运用单轴传动系统的动力学方程式(1-5)进行动力学分析,如此,才能全面地研究系统的运动状态。

## 1.2 生产机械的负载转矩特性

研究生产机械的负载特性,可以选择相应的控制策略,使电动机的输出特性与之适应,以降低控制系统的运行成本,提高控制质量。

在运动方程式中,阻转矩(或称负载转矩) $T_z$ 与转速 $n$ 的关系 $T_z = f(n)$ 即为生产机械

的负载转矩特性。

负载转矩  $T_z$  的大小和多种因素有关,不同类型的生产机械,根据运动中受阻力的性质不同,其机械特性曲线的形状是不同的。以车床主轴为例,当车床切削工件时,主轴转矩与切削速度、切削量大小、工件直径、工件材料及刀具类型等都有密切关系。

根据统计,大多数生产机械的负载转矩特性可归纳为以下 3 种类型。

### 1. 恒转矩负载特性

所谓恒转矩负载特性,指负载转矩  $T_z$  与转速  $n$  无关的特性,即当转速变化时,负载转矩  $T_z$  保持常值。

恒转矩负载特性又分为反抗性恒转矩和位能性恒转矩,如图 1.3 所示。

由图 1.3(a)可见,反抗性恒转矩负载特性的特点是,恒值转矩  $T_z$  总是与运动的方向相反,即:正转时,运动方程式(1-5)中的  $T_z$  取“+”号;反转时,  $T_z$  取“-”号。显然,反抗性恒转矩负载特性应落在  $T_z=f(n)$  坐标系的第 I 和第 III 象限内。

属于这类特性的负载有:皮带输送机、金属压延机构、机床的平移机构和金属切削机床等。

由图 1.3(b)可见,位能性恒负载转矩则与反抗性的特性不同,它由拖动系统中某些具有位能的部件(如起重类型负载中的重物)造成,其特点是转矩  $T_z$  具有固定的方向,不随转速方向改变而改变。如图 1.2 所示,不论重物提升或下放,负载转矩始终为反方向,始终取“+”号。位能性恒负载转矩特性应落在  $T_z=f(n)$  坐标系的第 I 和第 IV 象限内,表示恒值特性的直线是连续的。

属于这类特性的负载有:提升结构、提升机的行走结构等。

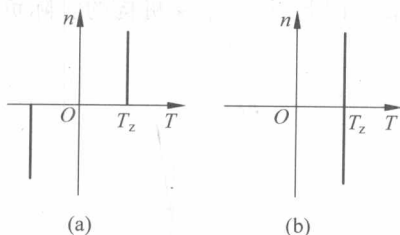


图 1.3 恒转矩负载特性

(a) 反抗性恒转矩; (b) 位能性恒转矩

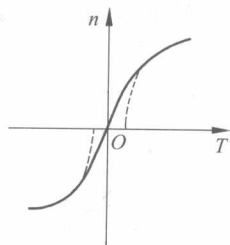


图 1.4 通风类负载转矩特性

### 2. 通风类负载特性

通风类负载的转矩与转速的大小有关,基本上与转速的平方成正比,即

$$T_z = Kn^2$$

式中,  $K$  为比例系数。

通风类负载的转矩特性如图 1.4 所示。

通风类负载是反抗性的,当转速反向( $n$  为负)时,  $T_z$  是负值,第 I 和第 III 象限对原点对称。实际通风机除了主要是通风类负载特性外,轴承上还有一定的摩擦转矩  $T_0$ ,因此,实际通风机负载特性应为

$$T_z = T_0 + Kn^2$$

图 1.4 中的虚线部分,就是静摩擦转矩  $T_0$  造成的。



属于通风类负载的生产机械有离心式通风机、水泵、油泵等,其中空气、水、油等介质对机器叶片的阻力基本上和转速的平方成正比。

### 3. 恒功率负载特性

一些机床,如车床,在粗加工时,切削量大,切削阻力大,此时开低速;在精加工时,切削量小,切削力小,往往开高速。当选择这样的方式加工时,不同转速下,切削功率基本不变。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  $T_z$  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;还有卷绕机构,在保持线速度不变的条件下,卷绕速度  $n$  与卷径成反比;等等。

因此,恒功率负载特性具有在不同转速下,负载转矩基本上与转速成反比的关系,即

$$T_z = \frac{K}{n}$$

$$P_z = T_z \Omega = T_z \frac{2\pi n}{60} = \frac{T_z n}{9.55} = \frac{K}{9.55} = K_1$$

式中,  $K_1 = \frac{K}{9.55}$ , 为常数;  $P_z$  为负载切削功率(W)。

可见,其切削功率基本不变,负载转矩  $T_z$  与  $n$  的特性曲线呈现恒功率的性质,如图 1.5 所示。

必须指出的是,实际生产机械的负载转矩特性可能是以上几种典型特性的综合。除了上述的通风类负载特性外,机床刀架等机构在平移时,负载的性质基本上是反抗性恒转矩负载,但从静止状态起动及当转速还很低时,由于润滑油没有散开,静摩擦系数比动摩擦系数大,摩擦阻力较大。另外,当传动机构在旋转时,有一些油或风的阻力,带一些通风类负载的性质,这导致在转速较高时,负载转矩  $T_z$  会略见增高。因此,机床平移机构的实际负载特性如图 1.6 所示。

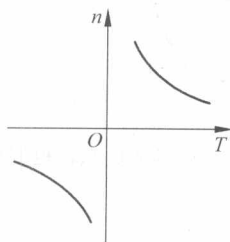


图 1.5 恒功率负载特性

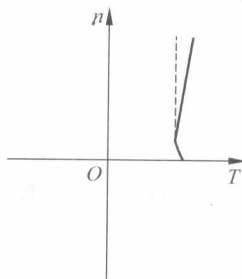


图 1.6 机床平移机构的实际负载特性

## 1.3 机电传动系统的稳定运行条件

任何机电传动系统,在电动机驱动下的生产机械能够稳定运行是系统设计的最基本要求。在此,稳定运行包含两重含义:第一是在任何速度下,电动机都能以一定的速度匀速运转;第二是电动机受某种外部干扰作用(如电源电压波动、频率波动、负载转矩波动等)而使运行速度发生变化时,系统应保证在干扰消除后,电动机具有能恢复到原来运行速度的能力。