

清华大学电气工程系列教材

电动机控制

Motor Control

黄立培 主编

Huang Lipei

0.12

清华大学出版社

清华大学电气工程系列教材

电动机控制

Motor Control

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

全书共12章,主要包括电力传动计算基础、直流电动机的闭环调速系统、电动机变频调速的原理、变频器的基本功能和合理使用、异步电动机的数学模型和高性能变频调速、同步电动机和无刷电动机的控制方法,以及电动机控制系统的数字仿真等。全书以直流电动机的控制为基础,以交流电动机变频调速为主线,着重介绍电力传动与控制的基础知识,探讨电动机的转速、电流、电压、磁通(链)、转矩等的控制策略,同时适当介绍较为深入的最新研究成果。每章的作业中适当引入一些工程应用类型题,供读者深入探讨某些问题。

本书可作为电气工程及其自动化专业和相关专业在职人员进行继续教育的教材,也可作为工程技术人员进行电力传动和控制系统设计、安装调试的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电动机控制/黄立培主编. —北京:清华大学出版社,2003

(清华大学电气工程系列教材)

ISBN 7-302-07117-9

I. 电… II. 黄… III. 电动机—控制—高等学校—教材 IV. TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 073205 号

出 版 者: 清华大学出版社

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

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: 010-62776969

责任编辑: 陈国新

印 刷 者: 北京国马印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×260 印张: 14.5 字数: 328 千字

版 次: 2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-07117-9/TM·45

印 数: 1~4000

定 价: 22.00 元

清华大学电气工程系列教材编委会

主 任 王赞基

编 委	邱阿瑞	梁曦东	夏 清
	袁建生	周双喜	谈克雄
	王祥珩		

序

“电气工程”一词源自英文的“Electrical Engineering”。在汉语中，“电工程”念起来不顺口，因而便有“电机工程”、“电气工程”、“电力工程”或“电工”这样的名称。20 世纪 60 年代以前多用“电机工程”这个词。现在国家学科目录上已经先后使用“电工”和“电气工程”作为一级学科名称。

大致是第二次世界大战之后出现了“电子工程”(Electronic Engineering)这个词。之后，随着科学技术的迅速发展，从原来的“电(机)工程”范畴里先后分出去了“无线电电子学(电子工程)”、“自动控制(自动化)”等专业，“电(机)工程”的含义变窄了。虽然“电(机、气)工程”的专业含义缩小到“电力工程”和“电工制造”的范围，但是科学技术的发展使得学科之间的交叉、融合更加密切，学科之间的界限更加模糊。“你中有我，我中有你”是当今学科或专业的重要特点。因此，虽然高等院校“电气工程”专业的教学主要定位于培养与电能的生产、输送、应用、测量、控制等相关科学和工程技术的专业人才，但是教学内容却应该有更宽广的范围。

清华大学电机系在 1932 年建系时，课程设置基本上仿效美国麻省理工学院电机工程学系的模式。一年级学习工学院共同必修课，如普通物理、微积分、英文、国文、画法几何、工程画、经济学概论等课程；二年级学习电工原理、电磁测量、静动力学、机件学、热力学、金工实习、微分方程及化学等课程；从三年级开始专业分组，电力组除继续学习电工原理、电工实验、测量外，还学习交流电路、交流电机、电照学、工程材料、热力工程、电力传输、配电工程、发电所、电机设计与制造以及动力厂设计等选修课程。西南联大时期加强了数学课程，更新了电工原理教材，增加了电磁学、应用电子学等主干课程和电声学、运算微积分等选修课程。抗战胜利之后又增设了一批如电子学及其实验，开关设备、电工材料、高压工程、电工数学、对称分量、汞弧整流器等选修课程。

1952 年院系调整之后，开始了学习前苏联教育模式的教学改革。电机系以莫斯科动力学院和列宁格勒工业大学为模式，按专业制定和修改教学计划及教学大纲。这段时期教学计划比较注重数学、物理、化学等基础课，注重电工基础、电机学、工业电子学、调节原

理等技术基础课,同时还加强了实践环节,包括实验、实习和“真刀真枪”的毕业设计等。但是这个时期存在专业划分过细,工科内容过重等问题。

改革开放之后,教学改革进入一个新的时期。为了适应科学技术的发展和人才市场从计划分配到自主择业转变的需要,清华大学电机系在 20 世纪 80 年代末把原来的电力系统及其自动化、高电压与绝缘技术、电机及其控制等专业合并成“宽口径”的“电气工程及其自动化”专业,并且开始了更深刻的课程体系的改革。首先,技术基础课的课程设置和内容得到大大的拓展。不但像电工基础、电子学、电机学这些传统的技术基础课的教学内容得到更新,课时有所压缩,而且像计算机系列课、控制理论、信号与系统等信息科学的基础课程以及电力电子技术系列课已经规定为本专业必修课程。此外,网络和通信基础、数字信号处理、现代电磁测量等也列入了选修课程。其次,专业课程设置分为专业基础课和专业课两类,初步完成了从“拼盘”到“重组”的改革,覆盖了比原先 3 个专业更宽广的领域。电力系统分析、高电压工程和电力传动与控制等成为专业基础课,另外,在专业课之外还有一组以扩大专业知识和介绍新技术、新进展为主的任选课程。

虽然在电气工程学科基础上新产生的一些研究方向先后形成独立的学科或专业,但是曾经作为第三次工业革命三大动力之一的电气工程,其内涵和外延都会随着科学技术和社会经济的发展而发展。大功率电力电子器件、高温超导线材、大规模互联电网、混沌动力学、生物电磁学等新事物的出现和发展等,正在为电气工程学科的发展开辟新的空间。教学计划既要有相对的稳定,又要与时俱进、不断有所改革。相比之下,教材的建设往往相对滞后。因此,清华大学电机系决定分批出版电气工程系列教材,这些教材既反映近 10 多年来广大教师积极进行教学改革已经取得的丰硕成果,也表明我们在教材建设上还要不断努力,为本专业和相关专业的教学提供优秀教材和教学参考书的决心。

这是一套关于电气工程学科的基本理论和应用技术的高等学校教材。主要读者对象为电气工程专业的本科生、研究生以及在本专业领域工作的科学工作者和工程技术人员。欢迎广大读者提出宝贵意见。

清华大学电气工程系列教材编委会

2003 年 8 月于清华园

前言

随着电力电子技术、微电子技术及现代控制理论的发展,以电动机速度控制为中心的电动机控制系统已经得到广泛应用。在各个工业部门及日常生活中,电动机控制系统展示了高效率的驱动性能、良好的控制特性。

为了适应传统学科改造的需要,使学生在学完电机学、电力电子技术、自动控制原理等专业基础课之后,能够结合电动机控制系统,学会分析电动机的转速、转矩、电压、电流、磁链等的控制策略和方法,我们曾编写了变频器和电动机控制讲义,作为本科生“电力传动与控制”课程的教材。为适应近两年推行的减少学时、增加学生实践能力的教学改革,结合这几年的教学实践,再次进行集中修订。其中卢海惟编写第3、5章,黄立培编写其余章,并负责全书的整理工作。

全书以直流电动机的控制为基础,以交流电动机变频调速为主线,着重介绍电力传动与控制的基础知识,同时适当介绍较为深入的最新研究成果;以负反馈控制为基本控制策略,按照不同控制对象介绍控制系统的构成及其控制效果;使用数学方程式(时域、频域)、结构图、相量图等不同类型的数学模型,分析电机控制系统的基本工作原理与性能;注重物理过程分析,亦关注必要的定量计算。全书包括电力传动计算基础、直流电动机调速系统、电动机变频调速的原理、变频器的基本功能和合理使用、高性能变频调速、各种电动机的控制方法,以及电动机控制系统的数字仿真等。每章的作业中适当引入一些工程应用类型题,供读者深入探讨某些问题。

本书可以作为高等院校电气工程及其自动化专业的教材和相关专业在职人员进行继续教育的教材,亦可作为工程技术人员进行电力传动和控制系统设计、安装调试的参考书。

由于水平所限,书中一定有错误之处,希望读者给以批评指正。

编者

2003年4月于北京清华园

目 录

序	III
前言	V
第 1 章 电力传动计算基础	1
1.1 直线运动	1
1.1.1 距离、速度、加速度、力和质量	1
1.1.2 质量和重量	2
1.1.3 直线运动的功、功率、动能	2
1.2 旋转运动	2
1.2.1 转矩、角速度	2
1.2.2 转动惯量、飞轮矩 GD^2 和运动方程	3
1.2.3 旋转运动的功、功率和动能	4
1.2.4 GD^2 的折算及惯性系数	5
1.3 电动机所需输出功率的计算基础	6
1.3.1 由力和速度确定输出功率	7
1.3.2 由转矩和角速度确定输出功率	8
1.3.3 输送流体的功率	9
1.3.4 动力传动装置的效率	10
1.4 小结	10
计算与思考	10
第 2 章 电动机的启动与制动	12
2.1 电机的发展	12
2.2 电动机的转速转矩特性	14
2.3 负载的转速转矩特性和稳定运行	16

2.4	加速时间	18
2.4.1	转速与时间的关系	18
2.4.2	异步电动机的加速时间	19
2.4.3	直流电动机的加速时间	20
2.5	启动电阻的计算	22
2.5.1	电阻值和启动档数	22
2.5.2	串电阻启动的启动时间	23
2.6	各种电动机的启动方法	25
2.6.1	笼式异步电动机的启动方法	25
2.6.2	绕线式异步电动机的启动	26
2.6.3	直流电动机的启动	26
2.6.4	同步电动机的启动	26
2.7	制动	27
2.7.1	制动的分类	27
2.7.2	制动时间	28
2.7.3	制动机构所产生的损耗	28
2.8	正转、反转、拖动转矩、制动转矩的表示方法	29
2.9	小结	30
	计算与思考	30
第3章	电动机控制基础	32
3.1	电力传动与电动机调速	32
3.2	异步电动机调速的基础知识	34
3.2.1	异步电动机的基本原理	34
3.2.2	异步电动机的等值电路	35
3.2.3	电力半导体器件	37
3.2.4	变频器的种类	39
3.2.5	PWM 控制技术	42
3.2.6	调速系统的性能指标	43
3.3	小结	45
	计算与思考	45
第4章	直流电动机调速系统	46
4.1	直流他励电动机的基本原理和机械特性	46
4.2	斩波器-直流电动机系统的控制	48
4.2.1	用于传动的直流斩波器的基本电路	48
4.2.2	混合式斩波器系统运行分析	53
4.3	相控整流器-直流电动机的调速性能	56

4.3.1	开环机械特性	56
4.3.2	单闭环调速系统的性能分析	57
4.3.3	单闭环有静差直流控制系统的其他形式	64
4.3.4	双闭环调速系统的性能分析	67
4.3.5	双闭环调速系统的设计	71
4.4	小结	71
	计算与思考	72
第5章	异步电动机调速的基本方法	76
5.1	异步电动机的速度控制方法	76
5.1.1	变极调速	76
5.1.2	定子调压调速	77
5.1.3	转子串电阻调速	78
5.1.4	串级调速	79
5.1.5	电磁转差离合器调速	81
5.1.6	变频调速	82
5.2	异步电动机非正弦供电时的运行特性	83
5.2.1	异步电动机的谐波磁场	83
5.2.2	异步电动机的谐波电流	84
5.2.3	异步电动机的谐波转矩	84
5.2.4	谐波电流引起的损耗	85
5.2.5	异步电动机特性的测量	85
5.3	小结	88
	计算与思考	88
第6章	异步电动机的变压变频调速	90
6.1	异步电动机变频调速的控制方式	90
6.1.1	保持 U/f 恒定	90
6.1.2	保持输出转矩为常数(恒转矩调速)	92
6.1.3	保持输出功率为常数(恒功率调速)	93
6.1.4	矢量控制	93
6.2	电压型变频器-异步电动机系统的 VF 比恒定控制	95
6.2.1	系统构成	95
6.2.2	基本性能分析	97
6.2.3	VF 比恒定控制运行中的不稳定现象	98
6.2.4	回馈制动方式	99
6.3	异步电动机的转差频率控制	101
6.3.1	转差频率控制的基本原理	101

6.3.2	转差频率控制的系统构成	101
6.3.3	系统性能分析	102
6.4	异步电动机的磁链轨迹控制	105
6.4.1	PWM 逆变器输出电压的矢量表示	105
6.4.2	磁链轨迹控制	107
6.5	小结	110
	计算与思考	110
第7章	通用变频器的基本性能和合理使用	112
7.1	通用变频器的发展	112
7.1.1	中小容量变频器	113
7.1.2	大容量变频调速	113
7.1.3	特殊用途的交流驱动调速	116
7.1.4	无速度传感器矢量控制调速系统	116
7.2	通用变频器的基本运行方式	117
7.2.1	通用变频器的操作和显示	117
7.2.2	通用变频器的基本运行方式	119
7.3	变频器的功能及合理使用	120
7.3.1	U/f 类型的选择	121
7.3.2	启动转矩的调整	121
7.3.3	加速、减速时间的设定	121
7.3.4	参数自动调整	122
7.3.5	频率跨跳	122
7.3.6	制动电阻的选择	123
7.3.7	电子热继电器保护设定	123
7.3.8	直流制动	124
7.3.9	变频器和商用电源的切换	124
7.3.10	变频器的保护	126
7.4	小结	129
	计算与思考	129
第8章	高性能异步电动机变频调速系统	131
8.1	异步电动机的矢量控制	131
8.1.1	异步电动机的动态数学模型	131
8.1.2	矢量控制理论	136
8.1.3	转子磁场定向矢量控制系统的构成	137
8.2	提高系统响应速度的技术	140
8.2.1	影响响应速度的因素	140

8.2.2 提高系统响应速度的方法	141
8.3 无速度传感器矢量控制	141
8.3.1 速度的辨识方法	141
8.3.2 磁链的观测	145
8.4 异步电动机控制系统的参数自整定	148
8.4.1 异步电动机控制系统参数自整定的目的	148
8.4.2 异步电动机参数自整定的分类	148
8.4.3 异步电动机控制系统参数自整定的原理	149
8.5 电流控制策略	152
8.5.1 非线性开关电流控制器	153
8.5.2 线性控制器	154
8.5.3 预测控制器	155
8.6 小结	156
计算与思考	156
第9章 绕线式异步电动机的串级调速	158
9.1 绕线式异步电动机串级调速的原理	158
9.1.1 绕线式异步电动机转子串电势调速的基本方程式	158
9.1.2 串级调速系统的功率流动	160
9.2 串级调速的实现方法	161
9.2.1 恒功率型串级调速	161
9.2.2 恒转矩型串级调速	162
9.2.3 晶闸管静止型串级调速	164
9.3 小结	165
计算与思考	165
第10章 同步电动机的变频调速	166
10.1 同步电动机的类型	166
10.1.1 隐极式同步电动机	166
10.1.2 凸极式同步电动机	167
10.1.3 永磁同步电动机	167
10.1.4 反应式同步电动机	167
10.2 同步电动机的稳态运行	168
10.2.1 隐极式同步电动机	168
10.2.2 凸极式同步电动机	169
10.2.3 永磁同步电动机	171
10.2.4 反应式同步电动机	171
10.3 变频调速运行	172

10.4	同步电动机的控制原理	173
10.4.1	同步电动机使用电压型变频器的开环控制	174
10.4.2	自控式同步电动机	175
10.5	永磁同步电动机的伺服控制	177
10.5.1	PWM 变频器同步电动机的驱动	177
10.5.2	永磁同步电动机的性能分析	177
10.5.3	自控式同步电动机的转矩角控制	178
10.5.4	电流追踪型永磁同步电动机驱动系统	179
10.5.5	永磁同步电动机的磁场定向控制	179
10.6	小结	180
	计算与思考	181
第 11 章	小型无刷电动机的调速	182
11.1	无刷直流电动机的调速系统	182
11.1.1	三相半波无刷直流电动机	182
11.1.2	三相全波无刷直流电动机	184
11.1.3	三相正弦无刷直流电动机	184
11.1.4	位置传感器	186
11.1.5	驱动性能和控制原理	186
11.2	步进电动机的速度控制	187
11.2.1	变磁阻步进电动机	187
11.2.2	永磁步进电动机	188
11.2.3	混合式步进电动机	188
11.2.4	驱动电路	189
11.3	开关磁阻电动机的速度控制	189
11.3.1	功率变换电路	190
11.3.2	开关磁阻电动机的转矩产生机理	191
11.4	小结	193
	计算与思考	194
第 12 章	电动机控制系统的数字仿真	195
12.1	概述	195
12.2	面向微分方程的数字仿真	196
12.2.1	一阶线性常微分方程	196
12.2.2	欧拉法	196
12.2.3	龙格-库塔法	197
12.3	面向结构图的数字仿真	197
12.3.1	线性系统的数字仿真	197

12.3.2	连续系统离散相似法数字仿真	200
12.4	电动机控制系统的仿真	204
12.4.1	双闭环直流调速系统的数字仿真	204
12.4.2	电压型变频器-异步电动机调速系统的数字仿真	207
12.5	控制系统仿真软件 SIMULINK 简介	208
12.5.1	系统构成	208
12.5.2	计算顺序	210
12.6	小结	211
	计算与思考	212
参考文献		215

第 1 章

电力传动计算基础

1.1 直线运动

1.1.1 距离、速度、加速度、力和质量

当物体作直线运动时,假定其移动距离为 $s(\text{m})$,速度为 $v(\text{m/s})$,加速度为 $a(\text{m/s}^2)$,且均为时间 $t(\text{s})$ 的函数,那么这些量相互之间有下列关系:

(1) 速度与距离的关系为

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (1-1)$$

(2) 加速度与速度及距离的关系为

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} \quad (1-2)$$

(3) 匀速运动时的距离与速度的关系为

$$s = s_0 + v_1 t \quad (1-3)$$

其中, s_0 表示初始位置; v_1 表示速度,为常数。

(4) 匀加速运动时的速度、加速度与距离的关系为

$$v = v_0 + a_1 t \quad (1-4)$$

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a_1 t^2 \quad (1-5)$$

其中, v_0 表示初速度; a_1 表示加速度,为常数。

(5) 如果物体的质量为 $M(\text{kg})$,加速度为 $a(\text{m/s}^2)$,力为 $F(\text{N})$,则力与加速度及质量的关系(运动方程式)为

$$F = Ma = M \frac{dv}{dt} = M \frac{d^2s}{dt^2} \quad (1-6)$$

上式表明,力与加速度成正比,其比例系数为质量,它表示获得加速度的难易,亦即惯性的大小。

工程上常将作用于 1kg 质量物体的地球引力作为力的单位,用 kgf 表示。 kgf 与国

际单位制的力的单位牛顿(N)之间的关系为

$$1\text{kgf} = 9.8\text{N} \quad (1-7)$$

1.1.2 质量和重量

地球对质量为 $M(\text{kg})$ 的物体的引力 $G(\text{N})$ 可表示为

$$G = Mg \quad (1-8)$$

式中的 g 是地球对所有物体的引力(重力)所产生的加速度,重力加速度的国际标准值为

$$g = 9.80665\text{m/s}^2 \quad (1-9)$$

通常,取 $g=9.8\text{m/s}^2$ 进行计算。

1.1.3 直线运动的功、功率、动能

当力 $F(\text{N})$ 作用于物体、并使该物体在力的方向上移动 $s(\text{m})$ 时所做的功

$$W = \int_0^s F \mathrm{d}s \quad (1-10)$$

力为常数时所做的功

$$W = Fs \quad (1-11)$$

做功快慢的程度,即单位时间所做的功称为功率,可表示为

$$P = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = F \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} = Fv \quad (1-12)$$

质量为 $M(\text{kg})$ 的物体以 $v(\text{m/s})$ 速度运动时,该物体所具有的动能

$$A = \frac{1}{2}Mv^2 \quad (1-13)$$

能量的单位与功的单位相同。也就是说,为了使物体的速度由零上升到 v ,需要对物体做大小等于 A 的功;另一方面,具有动能为 A 的物体在停止之前,只具有大小为 A 的做功能力。

1.2 旋转运动

1.2.1 转矩、角速度

电动机带动物体旋转的能力用转矩表示。如图 1-1 所示,在电动机轴上安装一根杠杆,并在杆端固定一弹簧秤,通电后力就作用于秤,秤可以指示出多少牛顿的力。秤的读数(力的单位)与杠杆的长度(长度的单位)的乘积,就是转矩,即有

$$\tau = Fr \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (1-14)$$

如果按弹簧秤的刻度(kg)来读力 F ,转矩 τ 的单位就是 $\text{kgf} \cdot \text{m}$ 。 $\text{N} \cdot \text{m}$ 与 $\text{kgf} \cdot \text{m}$ 的关系为

$$1\text{kgf} \cdot \text{m} = 9.8\text{N} \cdot \text{m} \quad (1-15)$$

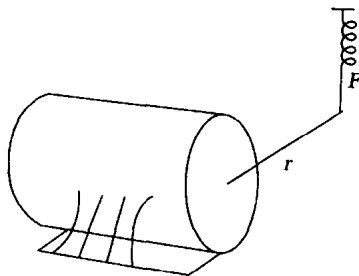


图 1-1 测量电动机的转矩

当电磁力作用在电动机的转子上,会产生使转轴旋转的转矩,即电磁转矩。电磁转矩是电机内部依靠电磁相互作用而产生的,是“电生磁、磁生电、电磁相互作用”的物理过程。

在旋转运动中,与直线运动时的距离相对应的量为角度 $\theta(\text{rad})$,它与杠杆的长度无关。与速度、加速度相对应的量分别为角速度 $\omega(\text{rad/s})$ 、角加速度 $a_\theta(\text{rad/s}^2)$ 。这些量之间的关系如下。

角速度与角度的关系为

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (1-16)$$

角加速度与角速度及角度的关系为

$$a_\theta = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1-17)$$

匀角速度运动时,角速度与角度的关系为

$$\theta = \theta_0 + \omega_1 t \quad (1-18)$$

式中, θ_0 表示初始角度; ω_1 表示角速度,为常数。

匀角加速度运动时的角加速度、角速度与角度的关系为

$$\omega = \omega_0 + a_{\theta 1} t \quad (1-19)$$

$$\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} a_{\theta 1} t^2 \quad (1-20)$$

1.2.2 转动惯量、飞轮矩 GD^2 和运动方程

如图 1-2 所示,在距旋转轴 $r(\text{m})$ 处有一质量为 $m(\text{kg})$ 的质点,在绕轴旋转时的速度与角速度、加速度与角加速度的关系为

$$\begin{cases} v = r\omega \\ a = ra \end{cases} \quad (1-21)$$

因此,若把式(1-6)两边乘以 r ,且代入式(1-14)及式(1-21),则

$$\tau = mr^2 a_\theta (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (1-22)$$

将式(1-22)与式(1-6)进行比较,若让力 F 及加速度 a 分别与转矩 τ 及角加速度 a_θ 相对应,显然, mr^2 与质量 M 相对应。

使旋转体旋转的转矩为 T ,是作用于旋转体各质点的转矩之总和,即

$$T = \sum \tau = a_\theta \sum mr^2 \quad (1-23)$$

将式(1-23)中

$$\sum mr^2 = J$$

称作旋转体对轴的转动惯量,它是构成该旋转体各质点的质量与各自至旋转轴距离平方的乘积 mr^2 的总和。

转动惯量

$$J = \sum mr^2 = MR^2 \quad (1-24)$$

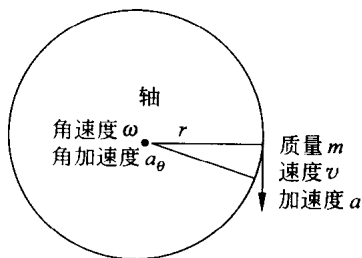


图 1-2 旋转时的速度与角速度