



普通高等教育  
“十一五”国家级  
规划教材



普通高等教育  
电气工程与自动化类  
“十一五”规划教材

Control Systems of  
Electric Drives—  
Motion Control Systems

# 电力拖动自动控制系统

## ——运动控制系统

第4版

上海大学 阮毅 陈伯时 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材

# 电力拖动自动控制系统

## ——运动控制系统

第4版

上海大学 阮毅 陈伯时 主编

上海交通大学 陈维钧 参编

上海大学 沙立民

东南大学 赵家璧 主审

上海交通大学 陈敏逊



机械工业出版社

根据全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会制定的普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材的要求,在本书第3版的基础上进行修订,成为第4版,并入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书第3版2003年出版,第3版主要体现了三方面的技术进步:全控型电力电子器件取代半控型器件,变换技术由相位控制转变成脉宽调制;模拟电子控制已基本上让位于数字电子控制;交流可调拖动系统逐步取代直流拖动系统已经成为不争的事实,而且交流拖动控制技术本身也有不小的进展。第4版在继承与发扬第3版特色的基础上,将计算机仿真与辅助设计逐步融入运动控制系统的性能分析与设计中。

第4版共3篇,第1篇直流调速系统,第2篇交流调速系统,第3篇伺服系统。编写的思路继承了前三版的特色,理论和实际相结合,应用自动控制理论解决运动控制系统的分析和设计问题,以转矩和磁链(或磁通)控制规律为主线,由简入繁、由低及高地循序深入,论述系统的静、动态性能。为了适应技术的发展,补充和添加了部分新内容,以供选用。

本书可作为高等学校电气工程与自动化、电气工程及其自动化专业和自动化专业的教材,也可供有关工程师和技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电力拖动自动控制系统:运动控制系统/阮毅,陈伯时主编. —4版.  
—北京:机械工业出版社,2009.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-27746-0

I. 电… II. ①阮…②陈… III. 电力传动—自动控制系统—高等学校—教材 IV. TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第119541号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:王保家 版式设计:霍永明 责任校对:张晓蓉

封面设计:王洪流 责任印制:杨曦

唐山丰电印务有限公司印刷

2010年1月第4版第1次印刷

184mm×260mm·18.5印张·452千字

标准书号:ISBN 978-7-111-27746-0

定价:32.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

# 全国高等学校电气工程与自动化系列教材 编审委员会

主任委员 汪楫生 浙江大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

王兆安 西安交通大学

王孝武 合肥工业大学

田作华 上海交通大学

刘 丁 西安理工大学

陈伯时 上海大学

郑大钟 清华大学

赵光宙 浙江大学

赵 曜 四川大学

韩雪清 机械工业出版社

委 员 (按姓氏笔画排序)

戈宝军 哈尔滨理工大学

王钦若 广东工业大学

吴 刚 中国科技大学

张纯江 燕山大学

张晓华 哈尔滨工业大学

邹积岩 大连理工大学

陈庆伟 南京理工大学

夏长亮 天津大学

萧蕴诗 同济大学

韩 力 重庆大学

熊 蕊 华中科技大学

方 敏 合肥工业大学

白保东 沈阳工业大学

张化光 东北大学

张 波 华南理工大学

杨 耕 清华大学

陈 冲 福州大学

范 瑜 北京交通大学

章 兢 湖南大学

程 明 东南大学

雷银照 北京航空航天大学

# 序

随着科学技术的不断进步，电气工程与自动化技术正以令人瞩目的发展速度，改变着我国工业的整体面貌。同时，对社会的生产方式、人们的生活方式和思想观念也产生了重大的影响，并在现代化建设中发挥着越来越重要的作用。随着与信息科学、计算机科学和能源科学等相关学科的交叉融合，它正在向智能化、网络化和集成化的方向发展。

教育是培养人才和增强民族创新能力的基础，高等学校作为国家培养人才的主要基地，肩负着教书育人的神圣使命。在实际教学中，根据社会需求，构建具有时代特征、反映最新科技成果的知识体系是每个教育工作者义不容辞的光荣任务。

教书育人，教材先行。机械工业出版社几十年来出版了大量的电气工程与自动化类教材，有些教材十几年、几十年长盛不衰，有着很好的基础。为了适应我国目前高等学校电气工程与自动化类专业人才培养的需要，配合各高等学校的教学改革进程，满足不同类型、不同层次的学校在课程设置上的需求，由中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科教育委员会、中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会、机械工业出版社共同发起成立了“全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会”，组织出版新的电气工程与自动化类系列教材。这类教材基于“**加强基础，削枝强干，循序渐进，力求创新**”的原则，通过对传统课程内容的整合、交融和改革，以不同的模块组合来满足各类学校特色办学的需要。并力求做到：

**1. 适用性：**结合电气工程与自动化类专业的培养目标、专业定位，按技术基础课、专业基础课、专业课和教学实践等环节，进行选材组稿。对有的具有特色的教材采取一纲多本的方法。注重课程之间的交叉与衔接，在满足系统性的前提下，尽量减少内容上的重复。

**2. 示范性：**力求教材中展现的教学理念、知识体系、知识点和实施方案在本领域中具有广泛的辐射性和示范性，代表并引导教学发展的趋势和方向。

**3. 创新性：**在教材编写中强调与时俱进，对原有的知识体系进行实质性的改革和发展，鼓励教材涵盖新体系、新内容、新技术，注重教学理论创新和实践创新，以适应新形势下的教学规律。

**4. 权威性：**本系列教材的编委由长期工作在教学第一线的知名教授和学者组成。他们知识渊博，经验丰富。组稿过程严谨细致，对书目确定、主编征集、资料申报和专家评审等都有明确的规范和要求，为确保教材的高质量提供了有力保障。

这套教材的顺利出版，先后得到全国数十所高校相关领导的大力支持和广大骨干教师的积极参与，在此谨表示衷心的感谢，并欢迎广大师生提出宝贵的意见和建议。

此套教材的出版如能在转变教学思想、推动教学改革、更新专业知识体系、创造适应学生个性和多样化发展的学习环境、培养学生的创新能力等方面收到成效，我们将会感到莫大的欣慰。

全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会

汪植生 陈树 郑大钟

# 前 言

本教材第1版的书名是《自动控制系统》，于1981年出版；第2版改名为《电力拖动自动控制系统》，1992年出版，荣获第三届机械部优秀教材一等奖；作为普通高等教育“九五”国家级重点教材的第3版改名为《电力拖动自动控制系统——运动控制系统》，于2003年出版。现根据教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材的要求，在第3版基础上修订成为第4版，仍沿用第3版的书名。

本书适用于高等院校电气工程与自动化、电气工程及其自动化专业本科“运动控制系统”或“电力拖动自动控制系统”课程教学，也可作为电力电子与电力传动、工业自动化等相关学科硕士研究生用书，还可供从事电力拖动控制系统的工程技术人员参考。

第3版主要体现了三方面的技术进步：

- 1) 全控型电力电子器件取代半控型器件，变换技术由相位控制转变成脉宽调制；
- 2) 模拟电子控制让位于数字电子控制；
- 3) 交流可调拖动系统逐步取代直流拖动系统，交流拖动控制技术本身也有不小的进展。

第4版在继承第3版上述三项进步特征的基础上，更将计算机仿真与辅助设计逐步融入运动控制系统的性能分析与设计中。

教材的主线仍然是控制系统的原理、分析和设计。本次修订的主要思路是：继承前三版的特色，理论与实际相结合，应用自动控制理论解决运动控制系统的分析和设计等实际问题。以转矩和磁链（磁通）控制规律为主线，由简入繁、由低及高地循序渐进，按照从开环到闭环、从直流到交流、从调速到伺服的层次论述运动控制系统的静、动态性能和设计方法。

本书内容涵盖：可控电源-电动机系统的特殊问题及机械特性，调速系统的性能指标，交、直流调速系统及伺服系统的工作原理和结构，反馈控制的基本特点，反馈控制系统的静态和动态性能指标及分析方法，调节器结构及参数的设计方法，反馈控制系统的实现，计算机仿真在控制系统中的应用等。在内容中避免与前期课程简单的重复，对与前期课程的交叉点仅按照本课程的需要做必要的论述，引导读者综合利用前期课程的基础知识，分析与解决新的问题。

直流调速系统是运动控制系统的基础，所以本书仍从直流调速系统入门，建立了扎实的控制系统的分析与设计的概念和能力以后，再进入交流调速系统的学习。最后，在掌握调速系统的基本规律和设计方法的基础上，进一步学习伺服系统的分析与设计。根据编者的教学经验，交流电动机的动态模型、矢量控制系统与直接转矩控制系统在本科教学中难度较大，其内容和深度可在实际教学中灵活掌握。

本书第4版分3篇,共9章。第1章绪论。第1篇直流调速系统共分3章,第2章转速反馈控制的直流调速系统;第3章转速、电流反馈控制的直流调速系统;第4章可逆控制和弱磁控制的直流调速系统。第2篇交流调速系统共分4章,第5章基于稳态模型的异步电动机调速系统;第6章基于动态模型的异步电动机调速系统;第7章绕线转子异步电动机双馈调速系统;第8章同步电动机变压变频调速系统。第3篇伺服系统只有一章,即第9章伺服系统。

增加了绪论一章,对运动控制系统的历史与发展以及相关学科作简单的介绍,着重指出转矩控制是运动控制系统的根本规律,磁场(或磁链)控制也相当重要。最后介绍了典型的负载特性。

与第3版相比,直流调速系统的前两章基本保持原有结构,数字控制不单独成章,相关内容融入前两章中,添加了计算机仿真的内容。第4章可逆与弱磁调速内容基本保留,直流桥式PWM主回路移到第4章。随动系统归入第3篇伺服系统。

对于交流调速系统,将第3版的第5和第6两章重新组合,按基于稳态模型的异步电动机调速系统和基于动态模型的异步电动机调速系统分为两章。

第5章包括异步电动机稳态模型、PWM技术、调压调速、转速开环变压变频调速和转速闭环转差控制系统。考虑到将电力电子变流器的内容完全放在“电力电子技术”课程中为妥,本书删减了相关内容,但由于现有的“电力电子技术”教材对电流跟踪PWM和SVPWM的论述深度不够,而SVPWM又是现在应用最多的一种调制方法,故本书仍保留了这两种PWM方法,仅对电流跟踪PWM作了减缩,而对SVPWM则有所加强。

第6章包括异步电动机动态模型、矢量控制系统与直接转矩控制系统,与第3版相比,相对加深了对直接转矩控制系统的分析。在动态数学模型中,除微分方程和矩阵方程外,突出了状态方程的应用,并配上控制对象和控制系统的动态结构框图,增加了异步电动机和控制系统的仿真。最后,讨论了异步电动机的转速估算方法,以供参考和选用。

第7章为绕线转子异步电动机串级和双馈调速系统,加重了双馈调速在风力发电中的应用。

第8章为同步电动机调速系统,对原有顺序作了调整,增加了同步电动机的直接转矩控制。

第9章为伺服系统,包括直流和交流伺服系统,首先建立直流和交流伺服系统的统一模型,再讨论系统结构,并分析系统的设计方法及稳定性。

本书按讲课64学时编写,根据编者的教学经验,在64学时内,难以全部完成九章内容的教学。考虑到各校相应专业对课程的要求不同,在实际教学中可选取部分内容,以第1、2、3、5、6章为重点,带\*部分可作为选讲内容。每章后给出一定数量的习题或思考题,供任课教师选用。

本课程是一门实践性很强的课程,实验是学好本课程必不可少的重要环节,可以随课堂教学过程进行,也可以开设单独的实验课,其目的在于培养学生掌握实验方法和运用理论分析解决实际问题的能力。考虑到机械工业出版社正在组织编写“运动控制系统实验教程”,故修订后的第4版不再附“实验指导”。

本书由上海大学阮毅、陈伯时教授主编,其中直流部分(第2、3、4章)由上海交通大学陈维钧副教授编写,第7章由上海大学沙立民副教授编写,其余各章由阮毅教授编写,



阮毅、陈伯时教授负责全书的统稿。

本书由东南大学赵家璧教授和上海交通大学陈敏逊教授主审，同济大学陶生桂教授参加了审稿，他们认真审阅了全部书稿，提出了许多宝贵而中肯的修改意见，在此谨致衷心的感谢。上海交通大学陈敏逊教授、上海大学倪国宗副教授参加过本教材第2版和第3版的编写工作，自然有其不可磨灭的贡献。上海大学高艳霞副教授、上海应用技术学院马立华副教授和孙国琴老师根据自身的教学经验，对第4版的修订提出了宝贵的意见，在此深表谢意。本书编写工作得到了机械工业出版社的支持，在此表示谢意。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册下载或发邮件到 [wbj@cmpbook.com](mailto:wbj@cmpbook.com) 索取。

我们在修编过程中虽然花了不少精力，仍难免有错误与不足之处，殷切期望广大读者批评指正。

编 者

# 常用符号表

## 一、元件和装置用的文字符号（按国家标准 GB/T 7159—1987）

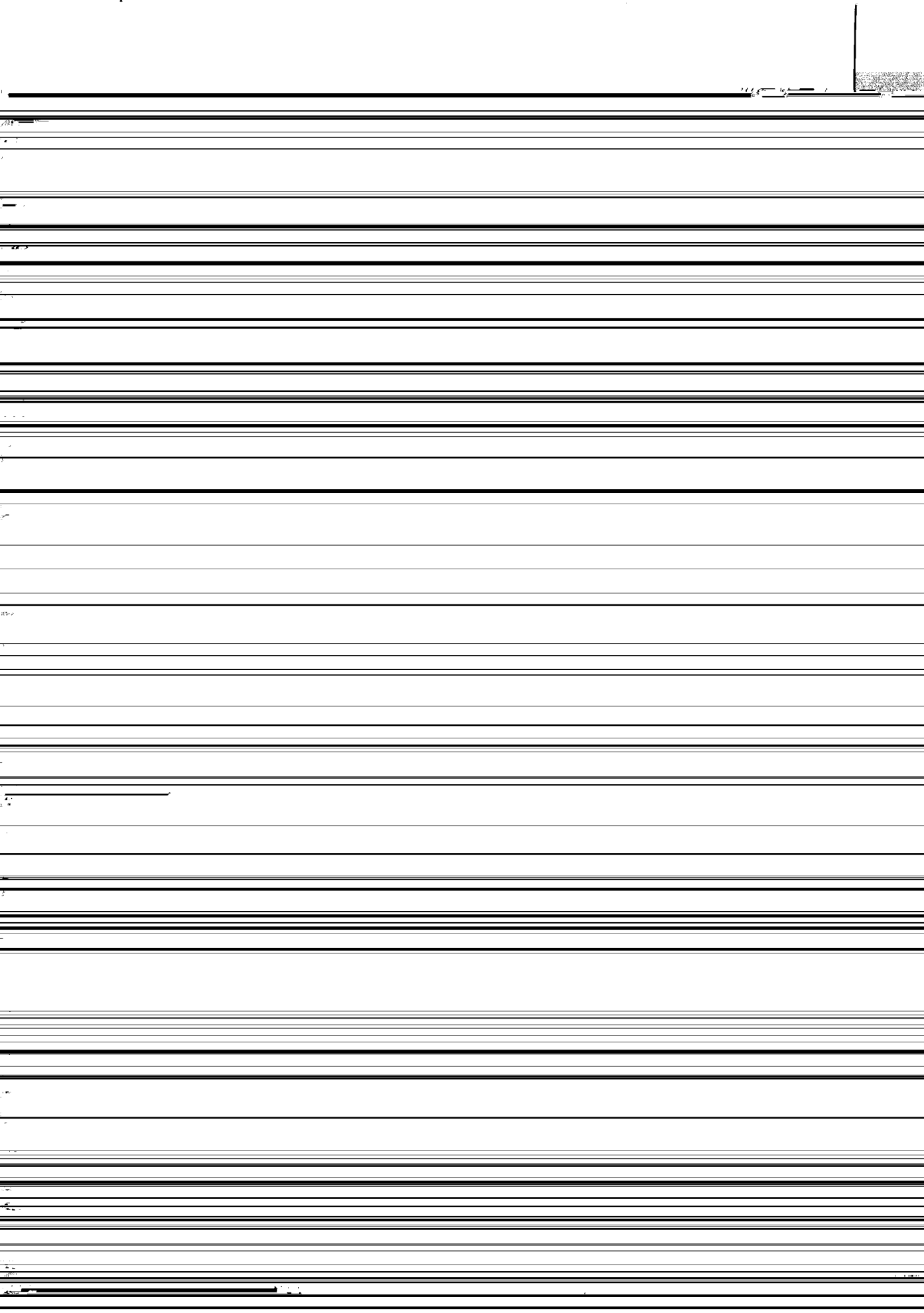
A	放大器；调节器；电枢绕组；A 相绕组	M	电动机（总称）
ACR	电流调节器	MA	异步电动机
AE	电动势运算器	MD	直流电动机
AER	电动势调节器	MS	同步电动机
AFR	励磁电流调节器	R	电阻器、变阻器
APR	位置调节器	RP	电位器
AR	反号器	SA	控制开关，选择开关
ASR	转速调节器	SAF	正组电子模拟开关
ATR	转矩调节器	SAR	反组电子模拟开关
AVR	电压调节器	SM	伺服电机
AΨR	磁链调节器	T	变压器
B	非电量-电量变换器	TA	电流互感器；霍尔电流传感器
BQ	位置传感器；转子位置检测器	TAF	励磁电流互感器
C	电容器	TG	测速发电机
CD	电流微分环节	TI	逆变变压器
CU	功率变换单元	TVC	双向晶闸管交流调压器
D	数字集成电路和器件	TVD	直流电压隔离变换器
DLC	逻辑控制环节	U	变换器；调制器
DSP	数字转速信号形成环节	UCR	可控整流器
F	励磁绕组	UI	逆变器
FA	具有瞬时动作的限流保护	UPE	电力电子变换器
FBC	电流反馈环节	UPEM	桥式可逆电力电子变换器
FBS	测速反馈环节	UPW	PWM 波生成环节
GD	驱动电路	UR	整流器
GE	励磁发电机	URP	相敏整流器
GT	触发装置	VD	二极管
GTF	正组触发装置	VF	正组晶闸管整流装置
GTR	反组触发装置	VR	反组晶闸管整流装置
HBC	滞环控制器	VS	稳压管
K	继电器；接触器	VT	晶体管；晶闸管；功率开关器件
L	电感；电抗器		

## 二、常用缩写符号

CFPWM	电流跟踪 PWM (Current Follow PWM)
CHBPWM	电流滞环跟踪 PWM (Current Hysteresis Band PWM)
CVCF	恒压恒频 (Constant Voltage Constant Frequency)
IGBT	绝缘栅双极晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor)
PD	比例微分 (Proportion, Differentiation)
PI	比例积分 (Proportion, Integration)
PID	比例积分微分 (Proportion, Integration, Differentiation)
P-MOSFET	场效应晶闸管 (Power Mos Field Effect Transistor)
PWM	脉宽调制 (Pulse Width Modulation)
SHEPWM	消除指定次数谐波的 PWM (Selected Harmonics Elimination PWM)
SPWM	正弦波脉宽调制 (Sinusoidal PWM)
SVPWM	电压空间矢量 PWM (Space Vector PWM)
VR	矢量旋转变换器 (Vector Rotator)
VVVF	变压变频 (Variable Voltage Variable Frequency)

## 三、参数和物理量文字符号

$A_d$	动能	$GD^2$	飞轮惯量
$a$	线加速度; 特征方程系数	$GM$	增益裕度
$B$	磁通密度	$h$	开环对数频率特性中频宽
$C$	电容; 输出被控变量	$I, i$	电流; 电枢电流
$C_e$	直流电机在额定磁通下的电动势系数	$I_a, i_a$	电枢电流
$C_m$	直流电机在额定磁通下的转矩系数	$I_d, i_d$	整流电流; 直流平均电流
$D$	调速范围; 摩擦转矩阻尼系数;	$I_{fl}$	负载电流
$E, e$	反电动势, 感应电动势 (大写为平均值或有效值, 小写为瞬时值, 下同); 误差	$I_f, i_f$	励磁电流
$e_d$	检测误差	$J$	转动惯量
$e_s$	系统误差	$K$	控制系统各环节的放大系数 (以环节符号为下角标); 闭环系统的开环放大系数; 扭转弹性转矩系数
$e_{sd}$	扰动误差	$K_e$	直流电机电动势的结构常数
$e_{sn}$	给定误差	$K_m$	直流电机转矩的结构常数
$F$	磁动势; 扰动量	$K_p$	比例放大系数
$f$	频率	$K_s$	电力电子变换器放大系数
$f_t$	开关频率	$k$	谐波次数; 振荡次数
$G$	重力	$k_N$	绕组系数
$G(s)$	传递函数	$L$	电感, 自感; 对数幅值
$g$	重力加速度	$L_d$	漏感



$\Psi, \psi$	磁链	$\omega_m$	机械角转速
$\omega$	角转速; 角频率	$\omega_n$	二阶系统的自然振荡频率
$\omega_b$	闭环频率特性带宽	$\omega_s$	转差角转速
$\omega_c$	开环频率特性截止频率	$\omega_1$	同步角转速; 同步角频率

#### 四、常见下角标

add	附加 (additional)	m	极限值, 峰值; 励磁 (magnetizing)
av	平均值 (average)	max	最大值 (maximum)
b	偏压 (bias); 基准 (basic); 镇流 (ballast)	min	最小值 (minimum)
b, bal	平衡 (balance)	N	额定值, 标称值 (nominal)
bl	堵转; 封锁 (block)	obj	控制对象 (object)
c	环流 (circulating current); 控制 (control)	off	断开 (off)
cl	闭环 (closed loop)	on	闭合 (on)
com	比较 (compare); 复合 (combination)	op	开环 (open loop)
cr	临界 (critical)	p	脉动 (pulse)
d	延时, 延滞 (delay); 驱动 (drive)	R	合成 (resultant)
er	偏差 (error)	r	转子 (rotator); 上升 (rise); 反向 (reverse)
ex	输出; 出口 (exit)	r, ref	参考 (reference)
f	正向 (forward); 磁场 (field); 反馈 (feedback)	rec	整流器 (rectifier)
g	气隙 (gap); 栅极 (gate)	s	定子 (stator); 电源 (source)
in	输入; 入口 (input)	s, ser	串联 (series)
i, inv	逆变器 (inverter)	sam	采样 (sampling)
k	短路	syn	同步 (synchronous)
L	负载 (load)	t	力矩 (torque); 触发 (trigger); 三角波 (triangular wave)
l	线值 (line); 漏磁 (leakage)	$\infty$	稳态值; 无穷大处 (infinity)
lim	极限, 限制 (limit)	$\Sigma$	和 (sum)

# 目 录

序

前言

常用符号表

第 1 章 绪论	1
1.1 运动控制系统及其组成	1
1.1.1 电动机	1
1.1.2 功率放大与变换装置	2
1.1.3 控制器	2
1.1.4 信号检测与处理	3
1.2 运动控制系统的历史与发展	3
1.3 运动控制系统的转矩控制规律	4
1.4 生产机械的负载转矩特性	5
1.4.1 恒转矩负载特性	5
1.4.2 恒功率负载特性	6
1.4.3 风机、泵类负载特性	6

## 第 1 篇 直流调速系统

第 2 章 转速反馈控制的直流调速系统	9
2.1 直流调速系统用的可控直流电源	9
2.1.1 晶闸管整流器-电动机系统	9
2.1.2 直流 PWM 变换器-电动机系统	16
2.2 稳态调速性能指标和直流调速系统的机械特性	21
2.2.1 转速控制的要求和稳态调速性能指标	21
2.2.2 直流调速系统的机械特性	23
2.3 转速反馈控制的直流调速系统	25
2.3.1 转速反馈控制直流调速系统的数学模型	25
2.3.2 比例控制的直流调速系统	29
2.3.3 比例积分控制的无静差直流调速系统	34
2.3.4 直流调速系统的稳态误差分析	37
2.4 直流调速系统的数字控制	40
2.4.1 微机数字控制的特殊问题	41
2.4.2 转速检测的数字化	41

2.4.3	数字 PI 调节器 .....	45
2.5	转速反馈控制直流调速系统的限流保护 .....	46
2.5.1	转速反馈控制直流调速系统的过电流问题 .....	46
2.5.2	带电流截止负反馈环节的直流调速系统 .....	47
2.6	转速反馈控制直流调速系统的仿真 .....	50
2.6.1	转速负反馈闭环调速系统仿真框图及参数 .....	50
2.6.2	仿真模型的建立 .....	51
2.6.3	仿真模型的运行 .....	54
2.6.4	调节器参数的调整 .....	55
	思考题 .....	56
	习题 .....	57
<b>第 3 章</b>	<b>转速、电流反馈控制的直流调速系统 .....</b>	<b>59</b>
3.1	转速、电流反馈控制直流调速系统的组成及其静特性 .....	59
3.1.1	转速、电流反馈控制直流调速系统的组成 .....	59
3.1.2	稳态结构图与参数计算 .....	60
3.2	转速、电流反馈控制直流调速系统的数学模型与动态过程分析 .....	62
3.2.1	转速、电流反馈控制直流调速系统的动态数学模型 .....	62
3.2.2	转速、电流反馈控制直流调速系统的动态过程分析 .....	63
3.3	转速、电流反馈控制直流调速系统的设计 .....	66
3.3.1	控制系统的动态性能指标 .....	66
3.3.2	调节器的工程设计方法 .....	67
3.3.3	按工程设计方法设计转速、电流反馈控制直流调速系统的调节器 .....	79
3.4	转速、电流反馈控制直流调速系统的仿真 .....	89
	思考题 .....	93
	习题 .....	94
<b>第 4 章</b>	<b>可逆控制和弱磁控制的直流调速系统 .....</b>	<b>96</b>
4.1	直流 PWM 可逆调速系统 .....	96
4.1.1	桥式可逆 PWM 变换器 .....	97
4.1.2	直流 PWM 可逆调速系统转速反向的过渡过程 .....	98
4.1.3	直流 PWM 功率变换器的能量回馈 .....	99
4.1.4	单片微机控制的 PWM 可逆直流调速系统 .....	100
4.2	V-M 可逆直流调速系统 .....	101
4.2.1	V-M 可逆直流调速系统的主回路及环流 .....	101
4.2.2	V-M 可逆直流调速系统的控制 .....	104
4.2.3	转速反向的过渡过程分析 .....	108
*4.3	弱磁控制的直流调速系统 .....	110
4.3.1	弱磁与调压的配合控制 .....	110
4.3.2	励磁电流的闭环控制 .....	111
	思考题 .....	112
	习题 .....	112

## 第 2 篇 交流调速系统

<b>第 5 章 基于稳态模型的异步电动机调速系统</b> .....	115
5.1 异步电动机的稳态数学模型和调速方法 .....	115
5.1.1 异步电动机的稳态数学模型 .....	115
5.1.2 异步电动机的调速方法与气隙磁通 .....	117
5.2 异步电动机的调压调速 .....	118
5.2.1 异步电动机调压调速的主电路 .....	118
5.2.2 异步电动机调压调速的机械特性 .....	118
5.2.3 闭环控制的调压调速系统 .....	119
* 5.2.4 降压控制在软起动器和轻载降压节能运行中的应用 .....	120
5.3 异步电动机的变压变频调速 .....	122
5.3.1 变压变频调速的基本原理 .....	122
5.3.2 变压变频调速时的机械特性 .....	123
5.3.3 基频以下的电压补偿控制 .....	125
5.4 电力电子变压变频器 .....	128
5.4.1 交-直-交 PWM 变频器主回路 .....	128
5.4.2 正弦波脉宽调制 (SPWM) 技术 .....	129
5.4.3 消除指定次数谐波的 PWM (SHEPWM) 控制技术 .....	131
5.4.4 电流跟踪 PWM (CFPWM) 控制技术 .....	132
5.4.5 电压空间矢量 PWM (SVPWM) 控制技术 (磁链跟踪控制技术) .....	133
* 5.4.6 交流 PWM 变频器-异步电动机系统的特殊问题 .....	143
5.5 转速开环变压变频调速系统 .....	146
5.5.1 转速开环变压变频调速系统的结构 .....	146
5.5.2 系统实现 .....	147
5.6 转速闭环转差频率控制的变压变频调速系统 .....	148
5.6.1 转差频率控制的基本概念及特点 .....	148
5.6.2 转差频率控制系统结构及性能分析 .....	150
5.6.3 最大转差频率 $\omega_{s,max}$ 的计算 .....	152
5.6.4 转差频率控制系统的特点 .....	152
思考题 .....	153
习题 .....	153
<b>第 6 章 基于动态模型的异步电动机调速系统</b> .....	155
6.1 异步电动机动态数学模型的性质 .....	155
6.2 异步电动机的三相数学模型 .....	156
6.2.1 异步电动机三相动态模型的数学表达式 .....	157
6.2.2 异步电动机三相原始模型的性质 .....	161
6.3 坐标变换 .....	162
6.3.1 坐标变换的基本思路 .....	162
6.3.2 三相-两相变换 (3/2 变换) .....	163



6.3.3	静止两相-旋转正交变换 (2s/2r 变换)	165
6.4	异步电动机在正交坐标系上的动态数学模型	166
6.4.1	静止两相正交坐标系中的动态数学模型	166
6.4.2	旋转正交坐标系中的动态数学模型	168
6.5	异步电动机在正交坐标系上的状态方程	169
6.5.1	状态变量的选取	170
6.5.2	以 $\omega$ 、 $i_s$ 、 $\psi_r$ 为状态变量的状态方程	170
6.5.3	以 $\omega$ 、 $i_s$ 、 $\psi_s$ 为状态变量的状态方程	173
*6.5.4	异步电动机的仿真	176
6.6	异步电动机按转子磁链定向的矢量控制系统	179
6.6.1	按转子磁链定向的同步旋转正交坐标系状态方程	179
6.6.2	按转子磁链定向矢量控制的基本思想	180
6.6.3	按转子磁链定向矢量控制系统的电流闭环控制方式	182
6.6.4	按转子磁链定向矢量控制系统的转矩控制方式	183
6.6.5	转子磁链计算	185
6.6.6	磁链开环转差型矢量控制系统——间接定向	188
6.6.7	矢量控制系统的特点与存在的问题	189
*6.6.8	矢量控制系统的仿真	189
6.7	异步电动机按定子磁链控制的直接转矩控制系统	191
6.7.1	定子电压矢量对定子磁链与电磁转矩的控制作用	192
6.7.2	基于定子磁链控制的直接转矩控制系统	194
6.7.3	定子磁链和转矩计算模型	195
6.7.4	直接转矩控制系统的特点与存在的问题	196
*6.7.5	直接转矩控制系统的仿真	197
6.8	直接转矩控制系统与矢量控制系统的比较	199
*6.9	异步电动机无速度传感器调速系统	199
	思考题	202
	习题	202
*第7章 绕线转子异步电动机双馈调速系统		204
7.1	绕线转子异步电动机双馈调速工作原理	204
7.1.1	绕线转子异步电动机转子附加电动势的作用	205
7.1.2	绕线转子异步电动机双馈调速的五种工况	206
7.2	绕线转子异步电动机串级调速系统	208
7.2.1	串级调速系统的工作原理	208
*7.2.2	串级调速系统的其他类型	210
7.3	串级调速的机械特性	211
7.3.1	串级调速机械特性的特征	211
7.3.2	串级调速的转子整流电路	212
7.3.3	串级调速的机械特性方程式	214
*7.4	串级调速系统的技术经济指标	217
7.4.1	串级调速系统的效率	217