



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
“十三五”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5版

阮毅 杨影 陈伯时 编著
杨耕 主审



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及其自动化类“十三五”规划教材

电力拖动自动控制系统

——运动控制系统

第5版

阮毅 杨影 陈伯时 编著
杨耕 主审

机械工业出版社

本书是在第4版的基础上修订而成的,内容的主线仍然是电力拖动控制系统的原理、分析和设计。编写本书的主要思路是: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。以转速、转矩(电流)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。

本书适用于高等院校电气、自动化类专业本科“运动控制系统”或“电力拖动自动控制系统”课程教学,其深入部分也可作为电力电子与电力传动、工业自动化等相关学科研究生用书,还可供从事电力拖动控制系统的工程技术人员参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的教师发邮件到 [jinacmp@163.com](mailto:jincamp@163.com) 索取,或登录 www.cmpedu.com 注册下载。

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,杨影,陈伯时编著.
—5版. —北京:机械工业出版社,2016.8

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“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-54419-7

I. ①电… II. ①阮…②杨…③陈… III. ①电力传动-自动控制系统-高等学校-教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第174531号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 王康 于苏华
责任校对:刘怡丹 责任印制:李洋
保定市中华美凯印刷有限公司印刷
2016年11月第5版第1次印刷
184mm×260mm·17.75印张·435千字
标准书号:ISBN 978-7-111-54419-7
定价:39.80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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

封面无防伪标均为盗版


网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com



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 汪樾生 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，满足不同层次、不同类型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。

此套教材的顺利出版，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

江植生 陈万时 郑大钟

前 言

本书适用于高等院校电气工程及其自动化、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，其深入部分也可作为电力电子与电力传动、工业自动化等相关学科研究生用书，还可供从事电力拖动控制系统的工程技术人员参考。

本书第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》，于1992年出版，并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。2009年修订出版第4版，2011年，本书获上海市普通高校优秀教材奖一等奖和中国机械工业科学技术奖二等奖。本书自第1版出版以来，社会反响良好，获得相关课程授课教师的广泛选用及好评。为了进一步促进和提高相关课程的教学质量，为教师、学生提供更好的教材，机械工业出版社将本书第5版再次列入了重点教材精品化建设计划，以期继续完善、提高教材的质量。

本书第5版的主线仍然是电力拖动控制系统的原理、分析和设计。主要思路是：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。以转速、转矩（电流）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。

交流调速系统是现代实际应用的主流，但直流调速系统仍是其理论基础，所以本书仍从直流系统入门，在建立了扎实的控制系统设计概念和能力以后，再进入交流调速系统的学习，最后在掌握了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。根据编著者的教学经验，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，应该让学生掌握其基本概念和分析方法，授课教师可在实际教学中灵活处理其深度。

直流调速系统部分在沿承第3版的经典结构和内容、吸收第4版数字控制精华的基础上，主要做了如下改动：

1) 考虑到中小功率直流调速系统中已用PWM变换器取代了晶闸管整流器，因此删减了V-M可逆直流调速系统部分，以PWM变换器为主要供电方式，并在第4章中先后分析了起动过程和转速反向过渡过程。

2) 更加强调运动控制系统概念。在第2章阐述电力电子变换器和电动机机械特性时，结合PWM脉冲产生原理，推导控制电压对电枢电压和电动机机械特性的控制调节作用。在分析起动过程和制动过程时，结合控制电压变化分析了各阶段转速、电流变化规律。

3) 第4章补充了按照典型II型系统进行电流调节器设计。

4) 第5章结合运动控制系统讨论电流环和转速环采样频率确定方法；将转速调节器输出与控制对象之间的零阶保持器用一阶惯性环节来近似，再按照模拟系统设计方法设计数字调节器，保留原工程设计方法简单明了的优势，又兼顾系统动态性能。

交流调速系统基本保留了第4版的内容和风格。第6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。第 7 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，对直接转矩控制系统做了较大的改动，以切合实际工程应用。第 8 章的标题改为“绕线转子异步电机转子变频控制系统”，以强调重点是“转子变频控制”，内容包括串级调速系统、双馈调速系统和双馈风力发电系统。第 9 章为同步电动机调速系统，对同步电动机的稳定运行、矢量控制和直接转矩控制做了分析与讨论。

第 10 章为伺服系统，包括直流和交流伺服系统，建立直流和交流伺服系统的统一模型，讨论系统结构，并分析系统的设计方法及稳定性。

本书按 64 学时编写，根据编著者的教学经验，在 64 学时内，难以全部完成 10 章内容的教学。考虑到各校相应专业对课程的要求不同，在实际教学中可选用部分内容，以第 2~7 章为重点，带 * 部分可作为选讲内容。本书给出一定数量的习题和思考题，以供任课教师选用。

本课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。

本书第 5 版由上海大学阮毅教授、杨影副教授和陈伯时教授修改编写，其中直流调速系统部分（第 2~5 章）由杨影副教授修改编写，陈伯时教授协助讨论；交流调速系统部分第 8 章由陈伯时教授修改编写；其余各章均由阮毅教授修改编写。

本书由清华大学杨耕教授主审，杨耕教授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、陈维钧副教授，上海大学倪国宗副教授和沙立民副教授参加过本教材前几版的编写工作，东南大学赵家璧教授曾承担前几版的主审工作，自然有其不可磨灭的贡献。天津大学马小亮教授根据自身的工作经验，对调节器的设计和数字调节器设计提出了宝贵的意见，在此深表谢意。

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

编著者

常用符号表

一、元件和装置用的文字符号

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；磁链调节器	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	伺服电动机
B	非电量-电量变换器	T	变压器
BQ	位置传感器；转子位置检测器	TA	电流互感器；霍尔电流传感器
C	电容器	TAF	励磁电流互感器
CD	电流微分环节	TG	测速发电机
CU	功率变换单元	TI	逆变变压器
D	数字集成电路和器件	TVC	双向晶闸管交流调压器
DLC	逻辑控制环节	TVD	直流电压隔离变换器
DSP	数字转速信号形成环节	U	变换器；调制器
F	励磁绕组	UCR	可控整流器
FA	具有瞬时动作的限流保护	UI	逆变器
FBC	电流反馈环节	UPE	电力电子变换器
FBS	测速反馈环节	UPEM	桥式可逆电力电子变换器
GD	驱动电路	UPW	PWM波生成环节
GE	励磁发电机	UR	整流器
GT	触发装置	URP	相敏整流器
GTF	正组触发装置	VD	二极管
GTR	反组触发装置	VF	正组晶闸管整流装置
HBC	滞环控制器	VR	反组晶闸管整流装置
K	继电器；接触器	VS	稳压管
L	电感；电抗器	VT	晶体管；晶闸管；功率开关器件

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	I_d, \bar{i}_d	整流电流; 直流平均电流
a	线加速度; 特征方程系数	I_{dl}	负载电流
B	磁通密度	I_f, i_f	励磁电流
C	电容; 输出被控变量	J	转动惯量
C_e	直流电机在额定磁通下的电动势系数	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
C_m	直流电机在额定磁通下的转矩系数	K_e	直流电机电动势的结构常数
D	调速范围; 摩擦转矩阻尼系数	K_m	直流电机转矩的结构常数
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	K_p	比例放大系数
e_d	检测误差	K_s	电力电子变换器放大系数
e_s	系统误差	k	谐波次数; 振荡次数
e_{st}	扰动误差	k_N	绕组系数
e_{sr}	给定误差	L	电感, 自感; 对数幅值
F	磁动势; 扰动量	L_0	漏感
f	频率	L_m	互感
f_s	开关频率	M	闭环系统频率特性幅值; 调制度
G	重力	M_r	闭环系统频率特性峰值
$G(s)$	传递函数	m	整流电压 (流) 一周内的脉冲数; 典型 I 型系统两个时间常数之比
g	重力加速度	N	匝数; 载波比; 传递函数分子
GD^2	飞轮惯量	n	转速
GM	增益裕度	n_0	理想空载转速
h	开环对数频率特性中频宽	n_1	同步转速
I, i	电流; 电枢电流	n_p	极对数
I_a, i_a	电枢电流		

P, p	功率		替代)
$p = \frac{d}{dt}$	微分算子	v	速度; 线速度
P_m	电磁功率	$W(s)$	传递函数; 开环传递函数
P_s	转差功率	$W_{cl}(s)$	闭环传递函数
Q	无功功率	$W_{obj}(s)$	控制对象传递函数
R	电阻; 电枢回路总电阻	W_m	磁场储能
R_a	直流电机电枢电阻	$W_x(s)$	环节 x 的传递函数
R_l	电抗器电阻	X	电抗
R_{pe}	电力电子变换器内阻	Z	电阻抗
R_{rev}	整流装置内阻	z	负载系数
R_0	限流电阻	α	转速反馈系数; 可控整流器的触发延迟角
S	视在功率	α_m	机械角加速度
s	静差率; 转差率	β	电流反馈系数; 可控整流器的逆变角
$s = \sigma + j\omega$	拉普拉斯变量	γ	电压反馈系数; 相角裕度; PWM 电压系数
T	时间常数; 开关周期	δ	转速微分时间常数相对值; 脉冲宽度
t	时间	Δn	转速降落
T_e	电磁转矩	ΔU	偏差电压
T_l	电枢回路电磁时间常数	$\Delta\theta_m$	角差
T_{li}	负载转矩	ξ	阻尼比
T_m	机电时间常数	η	效率; 减速比
t_m	最大动态降落时间	θ	电角位移; 可控整流器的导通角
T_n	滤波时间常数	θ_m	机械角位移
t_{on}	开通时间	λ	电机允许过载倍数
t_{off}	关断时间	ρ	占空比; 电位器的分压系数
t_p	峰值时间	σ	漏磁系数; 转差功率损耗系数, 超调量
t_r	上升时间	τ	时间常数; 积分时间常数; 微分时间常数
T_s	电力电子变换器平均失控时间; 电力电子变换器滞后时间常数	Φ	磁通
t_s	调节时间	Φ_m	每极气隙磁通量
t_r	恢复时间	φ	相位角; 阻抗角; 相频
U, u	电压; 电枢供电电压	Ψ, ψ	磁链
U_2	变压器二次侧(额定)相电压	ω	角转速; 角频率
U_c	控制电压	ω_b	闭环频率特性带宽
U_d, u_d	整流电压; 直流平均电压	ω_c	开环频率特性截止频率
U_{d0}, u_{d0}	理想空载整流电压	ω_m	机械角转速
U_f, u_f	励磁电压	ω_n	二阶系统的自然振荡频率
U_g	栅极驱动电压	ω_s	转差角转速
U_m	峰值电压	ω_s	同步角转速; 同步角频率
U_s	电源电压		
U_x	变量 x 的反馈电压 (x 可用变量符号替代)		
U_x^*	变量 x 的给定电压 (x 可用变量符号替代)		

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)	∞	稳态值; 无穷大处 (infinity)
lim	极限, 限制 (limit)	Σ	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	2
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	5
1.4.3 风机、泵类负载特性	5

第1篇 直流调速系统

第2章 转速开环控制的直流调速系统	9
2.1 晶闸管整流器-直流电动机系统的工作原理及调速特性	9
2.1.1 触发脉冲相位控制	9
2.1.2 电流脉动及波形断续问题	11
2.1.3 晶闸管整流器-直流电动机系统的机械特性	12
2.1.4 晶闸管触发和整流装置的传递函数	13
2.1.5 晶闸管整流器-直流电动机系统的可逆运行	15
2.2 PWM 变换器-电动机系统的工作原理及调速特性	16
2.2.1 不可逆 PWM 变换器-电动机系统	16
2.2.2 可逆 PWM 变换器-电动机系统	19
2.2.3 直流 PWM 调速系统的机械特性	21
2.2.4 PWM 控制器与变换器的动态数学模型	22
2.2.5 直流 PWM 调速系统的电能回馈和泵升电压	23
2.3 稳态调速性能指标和开环系统存在的问题	24
2.3.1 转速控制的要求和稳态调速性能指标	24
2.3.2 开环直流调速系统的性能和存在的问题	26

思考题	26
习题	27
第3章 转速闭环控制的直流调速系统	28
3.1 有静差的转速闭环直流调速系统	28
3.1.1 比例控制转速闭环直流调速系统的结构与静特性	28
3.1.2 开环系统机械特性和比例控制闭环系统静特性的对比分析	29
3.1.3 闭环直流调速系统的反馈控制规律	32
3.1.4 比例控制转速闭环系统的稳定性	33
3.2 无静差的转速闭环直流调速系统	38
3.2.1 积分调节器和积分控制规律	38
3.2.2 比例积分控制规律	39
3.2.3 无静差的转速闭环直流调速系统稳态参数计算	41
3.3 转速闭环直流调速系统的限流保护	42
3.3.1 转速闭环直流调速系统的限流问题	42
3.3.2 带电流截止负反馈环节的直流调速系统	42
3.4 转速闭环控制直流调速系统的仿真	45
3.4.1 转速闭环直流调速系统仿真平台	45
3.4.2 仿真模型的建立	46
3.4.3 仿真模型的运行	49
3.4.4 调节器参数的调整	50
思考题	51
习题	52
第4章 转速、电流双闭环控制的直流调速系统	53
4.1 转速、电流双闭环控制直流调速系统的组成及其静特性	53
4.1.1 转速、电流双闭环控制直流调速系统的组成	53
4.1.2 稳态结构图与参数计算	55
4.2 转速、电流双闭环控制直流调速系统的数学模型与动态过程分析	57
4.2.1 转速、电流双闭环控制直流调速系统的动态数学模型	57
4.2.2 转速、电流双闭环控制直流调速系统的动态过程分析	57
4.2.3 转速、电流调节器在双闭环直流调速系统中的作用	61
4.3 转速、电流双闭环控制直流调速系统的设计	61
4.3.1 控制系统的动态性能指标	61
4.3.2 调节器的工程设计方法	64
4.3.3 控制对象的工程近似处理方法	74
4.3.4 按工程设计方法设计转速、电流双闭环控制直流调速系统的调节器	77
4.4 双闭环直流调速系统的弱磁控制	91
4.4.1 弱磁与调压的配合控制	91
4.4.2 励磁电流的闭环控制	92
4.5 转速、电流双闭环控制直流调速系统的仿真	94
思考题	100

习题	100
第 5 章 直流调速系统的数字控制	102
5.1 采样频率的选择	103
5.2 转速检测的数字化	103
5.2.1 旋转编码器	103
5.2.2 数字测速方法的精度指标	104
5.2.3 M 法测速	105
5.2.4 T 法测速	106
5.2.5 M/T 法测速	106
5.3 数字 PI 调节器	108
5.4 数字控制器的设计	109
5.5 数字控制的 PWM 可逆直流调速系统	110
习题	111

第 2 篇 交流调速系统

第 6 章 基于稳态模型的异步电动机调速系统	116
6.1 异步电动机的稳态数学模型和调速方法	116
6.1.1 异步电动机的稳态数学模型	116
6.1.2 异步电动机的调速方法与气隙磁通	118
6.2 异步电动机的调压调速	119
6.2.1 异步电动机调压调速的主电路	119
6.2.2 异步电动机调压调速的机械特性	119
6.2.3 闭环控制的调压调速系统	120
*6.2.4 降压控制在软起动器和轻载降压节能运行中的应用	121
6.3 异步电动机的变压变频调速	123
6.3.1 变压变频调速的基本原理	123
6.3.2 变压变频调速时的机械特性	124
6.3.3 基频以下的电压补偿控制	126
6.4 电力电子变压变频器	128
6.4.1 交-直-交 PWM 变频器主回路	129
6.4.2 正弦波脉宽调制 (SPWM) 技术	129
*6.4.3 消除指定次数谐波的 PWM (SHEPWM) 控制技术	131
6.4.4 电流跟踪 PWM (CFPWM) 控制技术	132
6.4.5 电压空间矢量 PWM (SVPWM) 控制技术 (磁链跟踪控制技术)	133
*6.4.6 交流 PWM 变频器-异步电动机系统的特殊问题	143
6.5 转速开环变压变频调速系统	146
6.5.1 转速开环变压变频调速系统的结构	146
6.5.2 系统实现	147
6.6 转速闭环转差频率控制的变压变频调速系统	148

6.6.1	转差频率控制的基本概念及特点	148
6.6.2	转差频率控制系统结构及性能分析	150
6.6.3	最大转差频率 ω_{smax} 的计算	152
6.6.4	转差频率控制系统的优点	152
	思考题	152
	习题	153
第7章	基于动态模型的异步电动机调速系统	155
7.1	异步电动机动态数学模型的性质	155
7.2	异步电动机的三相数学模型	156
7.2.1	异步电动机三相动态模型的数学表达式	157
7.2.2	异步电动机三相原始模型的性质	160
7.3	坐标变换	161
7.3.1	坐标变换的基本思路	161
7.3.2	三相-两相变换 (3/2 变换)	163
7.3.3	静止两相-旋转正交变换 (2s/2r 变换)	165
7.4	异步电动机在正交坐标系上的动态数学模型	165
7.4.1	静止两相正交坐标系中的动态数学模型	166
7.4.2	旋转正交坐标系中的动态数学模型	167
7.5	异步电动机在正交坐标系上的状态方程	169
7.5.1	状态变量的选取	169
7.5.2	以 $\omega-i_s-\psi_r$ 为状态变量的状态方程	169
7.5.3	以 $\omega-i_s-\psi_s$ 为状态变量的状态方程	172
7.6	异步电动机按转子磁链定向的矢量控制系统	175
7.6.1	按转子磁链定向的同步旋转正交坐标系状态方程	175
7.6.2	按转子磁链定向矢量控制的基本思想	176
7.6.3	按转子磁链定向矢量控制系统的电流闭环控制方式	178
7.6.4	按转子磁链定向矢量控制系统的转矩控制方式	179
7.6.5	转子磁链计算	180
7.6.6	磁链开环转差型矢量控制系统——间接定向	183
7.6.7	矢量控制系统的特点与存在的问题	184
7.7	异步电动机按定子磁链控制的直接转矩控制系统	185
7.7.1	定子电压矢量对定子磁链与电磁转矩的控制作用	185
7.7.2	基于定子磁链控制的直接转矩控制系统	188
7.7.3	定子磁链和转矩计算模型	189
7.7.4	直接转矩控制系统的特点与存在的问题	190
7.8	直接转矩控制系统与矢量控制系统的比较	191
*7.9	异步电动机无速度传感器调速系统	191
*7.10	异步电动机和交流调速系统仿真	193
7.10.1	异步电动机的仿真	194
7.10.2	矢量控制系统仿真	196

7.10.3 直接转矩控制系统仿真	198
思考题	200
习题	201
第8章 绕线转子异步电机转子变频控制系统	203
8.1 绕线转子异步电机转子变频控制原理	203
8.1.1 异步电机转子附加电动势的作用	203
8.1.2 转子电路变频器	204
8.2 绕线转子异步电机转子变频控制的四种基本工况	205
8.3 绕线转子异步电机转子变频串级调速系统	207
8.3.1 电气串级调速系统的组成	208
8.3.2 异步电动机串级调速机械特性的特征	209
8.3.3 转子变频器的电压和容量与串级调速系统的效率	210
8.3.4 串级调速系统的双闭环控制	212
8.4 绕线转子异步电机转子变频双馈控制系统	215
8.4.1 双馈控制变频调速系统	215
8.4.2 双馈控制风力发电系统	216
*第9章 同步电动机变压变频调速系统	218
9.1 同步电动机的稳态模型与调速方法	218
9.1.1 同步电动机的特点	218
9.1.2 同步电动机的分类	219
9.1.3 同步电动机的转矩角特性	219
9.1.4 同步电动机的稳定运行	221
9.1.5 同步电动机的起动	222
9.1.6 同步电动机的调速	222
9.2 他控变频同步电动机调速系统	223
9.2.1 转速开环恒压频比控制的同步电动机群调速系统	223
9.2.2 大功率同步电动机调速系统	223
9.3 自控变频同步电动机调速系统	224
9.3.1 自控变频同步电动机	224
9.3.2 梯形波永磁同步电动机(无刷直流电动机)的自控变频调速系统	225
*9.4 同步电动机矢量控制系统	229
9.4.1 基于转子旋转正交坐标系的可控励磁同步电动机动态数学模型	229
9.4.2 可控励磁同步电动机按气隙磁链定向矢量控制系统	232
9.4.3 正弦波永磁同步电动机矢量控制系统	236
*9.5 同步电动机直接转矩控制系统	239
9.5.1 可控励磁同步电动机直接转矩控制系统	240
9.5.2 永磁同步电动机直接转矩控制系统	241
思考题	242
习题	243

第3篇 伺服系统

第10章 伺服系统	246
10.1 伺服系统的特征及组成	246
10.1.1 伺服系统的基本要求及特征	246
10.1.2 伺服系统的组成	246
10.1.3 伺服系统的性能指标	250
10.2 伺服系统控制对象的数学模型	254
10.2.1 直流伺服系统控制对象的数学模型	254
10.2.2 交流伺服系统控制对象的数学模型	256
10.3 伺服系统的设计	256
10.3.1 调节器校正及其传递函数	257
10.3.2 单环位置伺服系统	257
10.3.3 双环位置伺服系统	259
10.3.4 三环位置伺服系统	261
10.3.5 复合控制的伺服系统	264
思考题	265
习题	265
参考文献	266