



高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十一五”规划教材



运动控制系统

主编 贺昱曜
主审 侯媛彬



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十一五”规划教材

运动控制系统

主 编 贺昱曜
副主编 李 宏 巨永锋
陈金平 王崇武
主 审 侯媛彬

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

本书全面、系统、深入地介绍了运动控制系统的基本控制原理、系统组成和结构特点、分析和设计方法。

本书内容主要包括直流调速、交流调速和随动系统三部分。直流调速部分主要介绍单闭环、双闭环直流调速系统和以全控型功率器件为主的直流脉宽调速系统等内容；交流调速部分主要包括基于异步电动机稳态模型的调速系统、基于异步电动机动态模型的高性能调速系统以及串级调速系统；随动系统部分介绍直、交流随动系统的性能分析与动态校正等内容。此外，书中还介绍了近几年发展起来的多电平逆变技术和数字控制技术等内容。本书既注重理论基础，又注重工程应用，体现了理论性与实用性相统一的特点。书中结合大量的工程实例，给出了其仿真分析、图形或实验数据，具有形象直观、简明易懂的特点。

本书可作为高等学校自动化、电气工程及机电一体化类专业的本科教材，也可供科研院所、工矿企业从事电气传动的科技工作者参考使用。

★本书配有电子教案，需要者可登录出版社网站，免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

运动控制系统/贺昱曜主编. —西安:西安电子科技大学出版社, 2009.1

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2144-9

I. 运… II. 贺… III. 自动控制系统—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 166342 号

策 划 马乐惠

责任编辑 张晓燕

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址: www.xduph.com 电子邮箱: xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2009年1月第1版 2009年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 23.75

字 数 551千字

印 数 1~4000册

定 价 33.00元

ISBN 978-7-5606-2144-9/TP·1094

XDUP 2436001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

高等学校

自动化、电气工程及其自动化、机械设计制造及其自动化专业

“十一五”规划教材编审专家委员会名单

主任：张永康

副主任：姜周曙 刘喜梅 柴光远

自动化组

组长：刘喜梅（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

韦力 王建中 巨永锋 孙强 陈在平 李正明
吴斌 杨马英 张九根 周玉国 党宏社 高嵩
秦付军 席爱民 穆向阳

电气工程组

组长：姜周曙（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

闫苏莉 李荣正 余健明
段晨东 郝润科 谭博学

机械设计制造组

组长：柴光远（兼）

成员：（成员按姓氏笔画排列）

刘战锋 刘晓婷 朱建公 朱若燕 何法江 李鹏飞
麦云飞 汪传生 张功学 张永康 胡小平 赵玉刚
柴国钟 原思聪 黄惟公 赫东锋 谭继文

项目策划：马乐惠

策划：毛红兵 马武装 马晓娟

前 言

目前,运动控制系统已经广泛用于机械制造、冶金、交通运输、石油化工、航空航天、国防工业等领域,即只要是需要使用动力的部门,就要解决动力的传输和机器与设备的运动控制问题。由此可见,运动控制系统在国民经济中具有举足轻重的作用。

自20世纪80年代以来,运动控制领域已经并正在发生着日新月异的变化。随着电力电子技术、微电子技术和现代控制理论与技术的发展,已将电力电子器件、控制装置、驱动装置及保护装置等集为一体,为运动控制系统的发展开辟了广阔的前景。数字脉宽调制(PWM)技术、微型计算机控制及各种现代控制技术,如自适应控制、最优控制、鲁棒控制、滑模变结构控制、模糊控制、神经网络控制及各种智能控制已经深入到传统的运动控制系统中,具有较高的静、动态性能的运动控制系统不断涌现。

大功率电力电子技术和新型调速理论的发展,特别是变频和矢量控制以及直接转矩控制技术的不断完善,使交流调速系统发生了质的飞跃,逐步取代直流调速系统,成为主要的传动装置。例如,现代化的轧钢机、矿井提升机、船舶推进机、高速列车、地铁、电动汽车等都采用了交流调速系统。交流电机调速传动不仅具有与直流传动同样优越的调速性能,还具有过载能力大、效率高、体积小、重量轻、转动惯量小、维护简单和可靠性高等优点。

“运动控制系统”是自动化专业、电气工程及其自动化专业的主干课。为了适应学科发展的需要,增强学生面向工程实际的适应能力,我们在多年从事该课程教学的基础上编写了本书。本书综合利用先修课程“自动控制理论”、“电力电子技术”、“电机与拖动基础”和“计算机控制系统”的基础知识,培养学生理论联系实际的能力,使学生掌握运动控制系统的工作原理和设计方法。本书的宗旨是:从实际出发,深入地进行理论分析,从而解决运动控制系统中的实际问题,以计算机仿真和实验等手段验证理论分析结果,提高学生分析问题和解决问题的能力。

书中反映了近年来运动控制技术进步与发展的主要特征:①全控型电力电子器件取代半控型器件;②变换技术由相位控制转变成脉宽调制;③计算机数字控制逐渐成为运动控制的主要控制手段和方法;④交流运动控制系统逐步取代直流运动控制系统;⑤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。

直流调速系统是运动控制系统的基础,因此本书从直流调速系统入手,使学生在建立扎实的直流控制系统分析与设计概念的基础上,再进行交流系统的学习。交流调速系统着重论述交流电动机的变频调速。考虑到高性能的交流调速系统已被广泛应用,根据实际教学经验,书中详细介绍了异步电动机的动态模型、矢量控制系统与直接转矩控制系统等内容。在掌握调速系统的基本规律和设计方法之后,进一步介绍随动(伺服)系统的分析与设计方法。

本书以控制规律为主线,按照从直流到交流、从开环到闭环、从调速到随动的循序渐

进的原则编写,内容涵盖直、交流调速系统及随动系统的工作原理、系统结构,静态和动态性能指标及分析方法,可控电源-电动机系统的特殊问题及机械特性,开、闭环调速系统控制的基本特点,调节器结构及参数的设计方法,控制系统的实现,运动控制系统的网络控制等。

本书共 12 章,按照 64 学时编写。

第 1 章至第 4 章为直流调速部分,重点介绍单闭环直流调速系统;电流转速双闭环直流调速系统及工程设计方法;有环流控制和无环流控制的可逆直流调速系统;直流脉宽调速系统等。

第 5 章至第 10 章为交流调速部分,重点介绍交流调速系统的基本理论与方法;基于交流异步电动机稳态模型的调速系统,介绍了恒压频比控制和转差频率控制两类调速系统及其 PWM 控制技术;基于异步电动机动态数学模型的调速系统,主要介绍异步电动机的矢量控制和直接转矩控制;多电平逆变器变频技术;异步电动机串级调速系统和同步电动机调速系统。

第 11 章为位置随动系统,介绍了位置随动系统的组成,常用位置检测元件以及直、交流位置随动系统的性能分析和动态校正。

第 12 章为数字式运动控制系统,介绍了运动控制系统的数字控制技术,基于高速信号处理器(DSP)的交流调速控制系统,以及智能控制在运动控制中的应用与运动控制系统的网络控制。

“运动控制系统”是一门实践性很强的课程,实验是学好该课程必不可少的重要环节。可以随课堂教学过程进行实验,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并解决实际问题的能力。

本书由贺昱曜教授主编。其中第 1、5 章由李宏博士编写,第 2、4 章由王崇武博士编写,第 3、6、8、10 章由陈金平博士编写,绪论和第 7、12 章由贺昱曜教授编写,第 9、11 章由巨永锋教授编写。全书最后由贺昱曜教授统一定稿。西安科技大学的侯媛彬教授担任本书主审,提出了宝贵的建议和修改意见,在此表示衷心的感谢。

硕士生杨浩然、刘梦溪为本书描绘了大量的插图,并参与了有关章节的文字录入、校对和整理工作。此外,本书的编写得到了全国优秀博士论文专项资金(NO. 200250)、陕西省自然科学基金(NO. 2007E-29)等项目的大力支持,在此深表感谢。西安电子科技大学出版社的马乐惠编辑为本书的组稿和出版付出了辛勤的劳动,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平和研究兴趣所限,书中的缺点和不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

2008 年 6 月

常用符号表

一、元件和装置用文字符号

A	放大器、调节器, 电枢绕组
ACR	电流调节器
AER	电动势调节器
AFR	励磁电流调节器
APR	位置调节器
ASR	速度调节器
ATR	转矩调节器
AVR	电压调节器
A Ψ R	磁链调节器
BQ	位置传感器, 转子位置检测器
BS	自整角机
CD	电流微分环节
CU	功率变换单元
DLC	逻辑控制环节
F	励磁绕组
FA	具有瞬时动作的限流保护
FBC	电流反馈环节
FBS	测速反馈环节
G	发电机
GD	驱动电路
GE	励磁发电机
GT	触发装置
GTF	正组触发装置
GTR	反组触发装置
HBC	滞环控制器
K	继电器, 接触器
M	电动机(总称)
MA	异步电动机
MD	直流电动机
MS	同步电动机

RP	电位器
SA	控制开关, 选择开关
SAF	正组电子模拟开关
SAR	反组电子模拟开关
SM	伺服电机
T	变压器
TA	电流互感器, 霍尔电流传感器
TAF	励磁电流互感器
TG	测速发电机
UCR	可控整流器
UI	逆变器
UPE	电力电子变换器
UPEM	桥式可逆电力电子变换器
UPW	PWM 波形发生器
UR	整流器
V	晶闸管整流器
VF	正组晶闸管整流装置
VR	反组晶闸管整流装置
VST	稳压管
VT	功率开关器件
PMSM	永磁同步电机

二、常用缩写符号

CHBPWM	电流滞环跟踪 PWM(Current Hysteresis Band PWM)
CSI	电流源(型)逆变器(Current Source Inverter)
CVCF	恒压恒频(Constant Voltage Constant Frequency)
GTO	门极可关断晶闸管(Gate Turn Off Thyristor)
IGBT	绝缘栅双极(型)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)
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)
VSI	电压源(型)逆变器(Voltage Source Inverter)
VVVF	变压变频(Variable Voltage Variable Frequency)

三、参数和物理量文字符号

C_e	直流电机在额定磁通下的电动势系数
C_m	直流电机在额定磁通下的转矩系数
D	调速范围; 摩擦转矩阻尼系数; 传递函数分母
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
e_d	检测误差
e_s	系统误差
e_{sf}	扰动误差
e_{sr}	给定误差
F	磁动势, 扰动量
f_t	开关频率
h	开环对数频率特性中频宽
I_a, i_a	电枢电流
I_d, i_d	整流电流, 直流平均电流
I_{dL}	负载电流
I_f, i_f	励磁电流
J	转动惯量
K_e	直流电机电动势的结构常数
K_m	直流电机转矩的结构常数
K_p	比例放大系数
K_s	电力电子变换器放大系数
k_N	绕组系数
L	电感, 自感; 对数幅值
L_l	漏感
L_m	互感
M	闭环系统频率特性幅值; 调制度 M_r
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
N	匝数; 载波比; 传递函数分子
n	转速
n_0	理想空载转速; 同步转速
n_{syn}	同步转速
n_p	极对数
P	功率
$p = \frac{d}{dt}$	微分算子
P_m	电磁功率

P_s	转差功率
Q	无功功率
R_a	直流电机电枢电阻
R_b	镇流电阻
R_{pc}	电力电子变换器内阻
R_{rec}	整流装置内阻
s	转差率; 静差率
$s = \sigma + j\omega$	Laplace 变量
T_e	电磁转矩
T_l	电枢回路电磁时间常数
T_L	负载转矩
T_m	机电时间常数
t_t	最大动态降落时间
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
t_v	恢复时间
U, u	电压, 电枢供电电压
U_2	变压器二次侧(额定)相电压
U_{bs}	自整角机输出电压
U_d, u_d	整流电压; 直流平均电压
U_{d0}, u_{d0}	理想空载整流电压
U_f, u_f	励磁电压
U_g	栅极驱动电压
$W_{cl}(s)$	闭环传递函数
$W_{obj}(s)$	控制对象传递函数
W_m	磁场储能
$W_x(s)$	环节 x 的传递函数
z	负载系数
α	转速反馈系数; 可控整流器的控制角
β	电流反馈系数; 可控整流器的逆变角
γ	电压反馈系数; 相角裕度; PWM 电压系数
δ	转速微分时间常数相对值; 脉冲宽度
Δn	转速降落
ΔU	偏差电压
$\Delta\theta_m$	角差
θ_m	机械角位移
Φ	磁通
Φ_m	每极气隙磁通量
φ	相位角, 阻抗角; 相频
ψ	磁链

ω	角转速, 角频率
ω_b	闭环频率特性带宽
ω_c	开环频率特性截止频率
ω_m	机械角转速
ω_s	转差角转速
ω_1	同步角转速, 同步角频率
λ	电机允许过载倍数

目 录

绪论	1
0.1 运动控制系统	1
0.2 运动控制系统的基本组成	1
0.3 运动控制系统的发展过程及应用	4
0.4 运动控制系统的发展趋势	7
0.5 课程的目的和主要内容	8
第 1 章 直流电机原理及单闭环调速系统	10
1.1 基本电磁定律	10
1.1.1 全电流定律	11
1.1.2 电磁感应定律	11
1.1.3 电路定律	12
1.1.4 安培定律	12
1.2 直流电机的工作原理及类型	12
1.2.1 直流电机工作原理	12
1.2.2 直流电机的种类	13
1.3 直流电机的模型	14
1.3.1 直流电机的转矩和反电势	15
1.3.2 直流电机的启动	16
1.4 他励直流电机的调速方法	17
1.4.1 改变电枢回路电阻调速	18
1.4.2 减弱电机励磁磁通调速	18
1.4.3 改变电枢电压调速	19
1.4.4 调速系统的静态及动态指标	19
1.5 开环调压调速系统	21
1.5.1 旋转交流机组	22
1.5.2 晶闸管相控静止整流	23
1.5.3 直流脉宽调制	24
1.6 转速单闭环调速系统	24
1.6.1 系统组成	25
1.6.2 转速单闭环调速系统的稳态特性	25
1.6.3 开环系统与转速单闭环调速系统稳态特性比较	26
1.6.4 转速单闭环调速系统动态模型	27
1.6.5 稳定性分析	29
1.7 无静差调速系统和基本调节电路	30
1.7.1 基本调节电路	30
1.7.2 单闭环无静差调速系统	33

1.8 其它反馈环节的直流调速系统	34
1.8.1 电压负反馈直流调速系统	34
1.8.2 电动势反馈直流调速系统	35
1.9 单闭环调速系统电流截止负反馈	37
1.9.1 问题的提出	37
1.9.2 电流截止负反馈环节	37
1.9.3 带电流截止负反馈的单闭环转速负反馈调速系统	38
习题与思考题	39
第2章 电流转速双闭环直流调速系统	40
2.1 最佳过渡过程的基本概念	40
2.2 电流转速双闭环调速系统	41
2.2.1 电流转速双闭环调速系统的组成及静特性	41
2.2.2 电流转速双闭环调速系统的动态分析	44
2.2.3 电流转速双闭环调速系统的动态抗干扰性能	47
2.3 电流转速双闭环调速系统的工程设计方法	48
2.3.1 工程设计方法的基本思路	48
2.3.2 典型Ⅰ型系统	49
2.3.3 典型Ⅱ型系统	54
2.3.4 传递函数的近似处理	58
2.3.5 系统的类型和调节器的选择	60
2.4 电流转速双闭环调速系统的工程设计	62
2.4.1 电流调节器的设计	62
2.4.2 转速调节器的设计	65
2.4.3 转速退饱和超调量的计算	68
2.4.4 退饱和超调的抑制	71
2.5 弱磁控制的直流调速系统	74
习题与思考题	75
第3章 晶闸管-电动机可逆调速系统	77
3.1 晶闸管直流调速系统可逆运行方案	77
3.1.1 问题的提出	77
3.1.2 可逆直流调速系统电路实现方式	77
3.1.3 反接电枢和反接磁场可逆系统的比较	80
3.2 两组晶闸管可逆线路中的环流及其处理原则	80
3.2.1 晶闸管装置的逆变状态与直流电动机的回馈制动	80
3.2.2 可逆系统中的环流分析	82
3.3 有环流控制的 $V-M$ 系统	86
3.3.1 $\alpha=\beta$ 配合控制的有环流可逆调速系统	86
3.3.2 制动过程分析	88
3.3.3 给定环流和可控环流的 $V-M$ 可逆调速系统	91
3.4 无环流控制的 $V-M$ 系统	96
3.4.1 错位控制的无环流可逆调速系统	97
3.4.2 逻辑控制的无环流可逆调速系统	102
习题与思考题	105

第 4 章 直流脉宽调速系统	106
4.1 脉宽调制变换器	106
4.1.1 不可逆调速系统	107
4.1.2 电流反向的不可逆 PWM 调速系统	107
4.1.3 四象限可逆 PWM 变换器	110
4.2 脉宽调制系统的开环机械特性	116
4.3 PWM 变换器的控制电路	118
4.3.1 门极驱动器	119
4.3.2 缓冲与吸收电路	120
4.4 PWM 调速系统的电流脉动和转矩脉动分析	121
4.4.1 电流脉动	121
4.4.2 转矩脉动	123
习题与思考题	125
第 5 章 交流调速系统基础	126
5.1 概述	126
5.1.1 交流调速系统的发展历史	127
5.1.2 交流调速与直流调速的比较	128
5.2 交流异步电机基础	129
5.2.1 交流异步电机工作原理	129
5.2.2 交流异步电机组成	129
5.2.3 旋转磁场	132
5.2.4 旋转磁场对定子绕组的作用	135
5.2.5 旋转磁场对转子绕组的作用	136
5.2.6 转子和定子电路之间的关系	137
5.2.7 异步电机的功率及转矩表达式	138
5.3 交流调速的基本方法	139
5.3.1 变极对数调速方法	139
5.3.2 变频调速方法	140
5.3.3 变转差率调速的主要方法	140
5.4 逆变器的分类及指标	143
5.4.1 直接变换	143
5.4.2 间接变换	145
5.4.3 逆变器波形指标	146
习题与思考题	147
第 6 章 基于异步电机稳态模型的调速系统	148
6.1 变压变频调速的基本控制方式	148
6.1.1 基频以下调速	148
6.1.2 基频以上调速	149
6.2 异步电动机电压-频率协调控制时的机械特性	149
6.2.1 恒压恒频正弦波供电时异步电动机的机械特性	149
6.2.2 基频以下电压-频率协调控制时的机械特性	150
6.2.3 基频以上恒压变频时的机械特性	153

6.2.4	恒流正弦波供电时的机械特性	154
6.3	交流脉冲宽度调制(PWM)技术	155
6.3.1	PWM 波形生成原理	156
6.3.2	正弦 PWM 控制技术	157
6.3.3	选择谐波消除 PWM 控制技术	159
6.3.4	电流滞环 PWM 控制技术	160
6.3.5	电压空间矢量 PWM 控制技术	162
6.4	转速开环恒压频比控制调速系统	168
6.4.1	系统结构	168
6.4.2	系统实现	169
6.4.3	动态特性与静态特性	170
6.5	转速闭环转差频率控制的变压变频调速系统	171
6.5.1	转差频率控制的基本概念	171
6.5.2	基于异步电动机稳态模型的转差频率控制规律	172
6.5.3	转差频率控制的变压变频调速系统	173
6.6	PWM 变频调速系统的几个问题	173
6.6.1	转动脉动	174
6.6.2	直流电压利用率	175
6.6.3	能量回馈与泵升电压	176
6.6.4	对电网的污染	177
6.6.5	桥臂器件开关死区对 PWM 变频器的影响	177
	习题与思考题	179
第 7 章	基于异步电动机动态数学模型的调速系统	181
7.1	交流异步电动机动态数学模型和坐标变换	181
7.1.1	三相异步电动机数学模型	181
7.1.2	坐标变换	186
7.1.3	异步电动机在两相坐标系上的数学模型	189
7.1.4	异步电动机在两相坐标系上的状态方程	192
7.1.5	异步电动机动态数学模型的控制特性	196
7.2	按转子磁链定向的矢量控制系统	196
7.2.1	同步旋转坐标系中的数学模型	196
7.2.2	按转子磁链定向矢量控制的基本原理	197
7.2.3	按转子磁链定向的矢量控制系统	199
7.2.4	按转子磁链定向矢量控制系统的转矩控制方式	200
7.2.5	转子磁链计算	202
7.2.6	磁链开环转差型矢量控制系统——间接定向	205
7.3	无速度传感器矢量控制系统	207
7.3.1	速度推算与矢量控制分别独立进行	207
7.3.2	速度推算与矢量控制同时进行	208
7.3.3	无电压、速度传感器矢量控制系统	209
7.4	直接转矩控制系统	210
7.4.1	直接转矩控制系统的基本原理	210
7.4.2	基于定子磁链控制的直接转矩控制系统	216

7.4.3 定子磁链和转矩计算模型	218
7.4.4 无速度传感器直接转矩控制	220
7.5 直接转矩控制系统与矢量控制系统的比较	222
7.6 直接转矩控制实例仿真	223
习题与思考题	225
第 8 章 多电平逆变器变频技术	227
8.1 多电平逆变器技术概述	227
8.1.1 多电平逆变器产生的背景	227
8.1.2 多电平逆变器技术	228
8.1.3 多电平逆变器的特点	231
8.2 多电平逆变器电路结构	231
8.2.1 箝位型逆变器	231
8.2.2 级联型逆变器	236
8.3 多电平 PWM 调制方法	238
8.3.1 阶梯波调制法	238
8.3.2 SPWM 法	239
8.3.3 空间矢量 PWM 法	240
8.3.4 选择谐波消去法	241
8.3.5 开关频率优化法	242
习题与思考题	243
第 9 章 异步电动机串级调速系统	244
9.1 异步电动机串级调速系统的工作原理	244
9.2 异步电动机串级调速时的机械特性	246
9.2.1 异步电动机串级调速机械特性的特征	246
9.2.2 异步电动机串级调速时的转子整流电路	249
9.2.3 异步电动机串级调速机械特性方程式	250
9.3 双闭环控制串级调速系统	254
9.3.1 双闭环控制串级调速系统的组成	254
9.3.2 串级调速系统的动态数学模型	255
9.3.3 调节器参数的设计	256
9.4 串级调速系统设计的几个特殊问题	257
9.4.1 串级调速系统的功率因数及其改善途径	257
9.4.2 串级调速系统的启动方式	257
习题与思考题	258
第 10 章 同步电动机调速系统	260
10.1 概述	260
10.2 同步电动机的工作原理	262
10.3 他控变频同步电动机调速系统	266
10.4 自控变频同步电动机调速系统	266
10.4.1 永磁无刷直流电动机工作原理	268
10.4.2 永磁无刷直流电动机的组成	270
10.4.3 永磁无刷直流电动机数学模型	272

10.4.4 正弦波永磁同步电动机	274
习题与思考题	274
第 11 章 位置随动系统	275
11.1 位置随动系统概述	275
11.1.1 位置随动系统的组成	275
11.1.2 位置随动系统的工作原理	276
11.2 位置随动系统中的检测装置	276
11.2.1 自整角机	276
11.2.2 旋转变压器	279
11.2.3 感应同步器	281
11.2.4 光电编码器	282
11.3 位置随动系统动、静态分析与设计	283
11.3.1 自整角机位置随动系统的组成和数学模型	283
11.3.2 位置随动系统的稳态分析	286
11.3.3 位置随动系统的动态校正	290
11.4 交流伺服运动控制系统	301
11.4.1 永磁同步电动机交流伺服运动控制系统	301
11.4.2 PMSM 伺服系统的数学模型	302
11.4.3 PMSM 伺服运动控制系统设计	305
习题与思考题	310
第 12 章 数字式运动控制系统	312
12.1 运动控制系统数字控制的特点	312
12.2 运动控制系统主要环节的数字化实现	313
12.2.1 系统状态量的数字检测	313
12.2.2 数字滤波	316
12.2.3 函数发生器	317
12.2.4 数字控制器	319
12.3 基于 DSP 的运动控制系统	324
12.3.1 TMS320 实现异步电动机矢量控制	324
12.3.2 TMS320 实现异步电动机直接转矩控制	329
12.4 智能控制在运动控制系统中的应用	334
12.4.1 模糊控制在运动控制系统中的应用	335
12.4.2 神经网络控制在运动控制系统中的应用	345
12.4.3 模糊神经网络在运动控制系统中的应用	350
12.5 运动控制系统的网络控制简介	354
12.5.1 工业控制系统的网络结构	355
12.5.2 基于 Profibus 总线的运动控制系统简介	357
习题与思考题	359
参考文献	360