



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

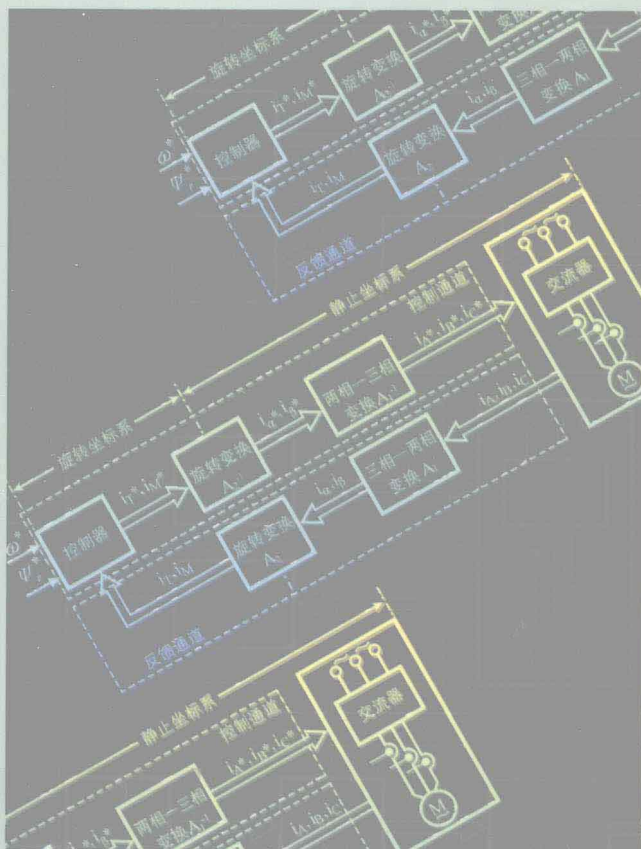
21世纪高等院校

●●●●● 自动化专业系列教材 ●●●●●

电力拖动自动控制系统

主编 李华德 李擎 白晶

主审 马小亮



免费提供电子教案
<http://www.cmpedu.com>



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
21世纪高等院校自动化专业系列教材

电力拖动自动控制系统

Automatic Control Systems of Electric Drive

主 编 李华德 李 擎 白 晶
副主编 潘月斗 孙昌国
主 审 马小亮



机械工业出版社

本书全面地介绍了现代电力拖动自动控制系统的基本组成、基本工作原理、基本控制方法,以及对系统的静、动态特性进行了深入的分析。介绍了数字电力拖动自动控制系统的实现方法。

第1篇的主要内容:依据直流电动机的广义数学模型,建立了直流电动机的闭环控制结构及相应的控制系统;分析了闭环直流调速系统的静、动态特性;介绍了直流调速系统可逆运行的方法;给出了电力拖动自动控制系统的工程设计方法。

第2篇的主要内容:从建立交流电动机数学模型入手,讲述现代交流电动机变压变频调速系统的基本组成、基本工作原理、基本控制方法,以及静、动态特性分析。本篇的重点内容是,恒压频比控制的异步电动机变压变频调速系统;异步电动机矢量控制系统和直接转矩控制系统;普通三相同步电动机自控式变压变频调速系统及矢量控制系统、正弦波永磁同步电动机矢量控制系统和直接转矩控制系统,以及梯形波永磁同步电动机变压变频调速系统。本篇最后介绍了先进控制理论在电力拖动系统中的应用。

第3篇的主要内容:介绍了位置伺服系统的基本特点、组成、类型、基本工作原理,以及伺服系统的稳态分析和设计、动态分析和设计。本篇最后介绍了工业生产中的位置伺服系统。

第4篇的主要内容:指出了数字(计算机)电力拖动自动控制系统的基本特点;介绍了数字控制系统的基本组成,以及数字控制器的硬件与软件;介绍了数字电力拖动自动控制系统及其数字化设计。

图书在版编目(CIP)数据

电力拖动自动控制系统/李华德,李擎,白晶主编. —北京:机械工业出版社, 2008.9

(21世纪高等院校自动化专业系列教材)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-24867-5

I. 电… II. ①李…②李…③白… 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(2008)第124119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:李馨馨 责任校对:李 婷

责任印制:李 妍

北京富生印刷厂印刷

2009年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·27.5印张·674千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-24867-5

定价:43.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379753 88379739

封面无防伪标均为盗版

21 世纪高等院校自动化专业系列教材 编 审 委 员 会

主 任 袁著祉 南开大学

副主任 王桂增 清华大学

席裕庚 上海交通大学

委 员 (以姓氏笔画为序)

田作华 上海交通大学

李华德 北京科技大学

陈大钦 华中科技大学

张长水 清华大学

胡毓坚 机械工业出版社

贾 磊 山东大学

韩崇昭 西安交通大学

薛定宇 东北大学

出版说明

自动化技术是一门集控制、系统、信号处理、电子和计算机技术于一体的综合技术，广泛用于工业、农业、交通运输、国防、科学研究以及商业、医疗、服务和家庭等各个方面。自动化水平的高低是衡量一个国家或社会现代化水平的重要标志之一，建设一个现代化的国家需要大批从事自动化事业的人才。高等院校的自动化专业是培养国家所需要的专业面宽、适应性强，具有明显的跨学科特点的自动化专门人才的摇篮。

为了适应新时期对高等教育人才培养工作的需要，以及科学技术发展的新趋势和新特点，并结合最新颁布实施的高等院校自动化专业教学大纲，我们邀请清华大学、南开大学、上海交通大学、西安交通大学、东北大学、华中科技大学、山东大学、北京科技大学等名校的知名教师、专家和学者，成立了教材编写委员会，共同策划了这套面向高校自动化专业的教材。

本套教材定位于普通高等院校自动化类专业本科层面。按照教育部颁发的《普通高等院校本科专业介绍》中所提出的培养目标和培养要求，适合作为广泛高校相关专业的教材，反映了当前教学与技术发展的主流和趋势。

本套教材的特色：

1. 作者队伍强。本套教材的作者都是全国各院校从事一线教学的知名教师和相关专业领域的学术带头人，具有很高的知名度和权威性，保证了本套教材的水平和质量。
2. 观念新。本套教材适应教学改革的需要和市场经济对人才培养的要求。
3. 内容新。近 20 年，自动化技术发展迅速，与其他学科的联系越来越紧密。这套教材力求反映学科发展的最新内容，以适应 21 世纪自动化人才培养的要求。
4. 体系新。在以前教材的基础上重构和重组，补充新的教学内容，各门课程及内容的组成、顺序、比例更加优化，避免了遗漏和不必要的重复。根据基础课教材的特点，本套教材的理论深度适中，并注意与专业教材的衔接。
5. 教学配套的手段多样化。本套教材大力推进电子讲稿和多媒体课件的建设工作。本着方便教学的原则，一些教材配有习题解答和实验指导书，以及配套学习指导用书。

机械工业出版社

前 言

进入 21 世纪以来,《电力拖动自动控制系统》(或称“运动控制系统”)一书所涉及的理论与技术又有新的发展,因此,本书内容和体系也必须不断更新,力争做到理论发展要超前、技术发展要同步。

现代电力拖动(运动)自动控制系统是电机学、电力电子学、微电子学、计算机科学、自动控制理论等多种学科的有机结合与交叉。但是同其他任何自动控制系统一样,其根本的理论基础是自动控制理论。为此,本书运用自动控制理论对电力拖动自动控制系统进行分析与设计。

本书题材来源于工程实际,具有前沿性和先进性。遵循了深入浅出,循序渐进的写作思想及理论联系实际的原则。为了防止体系上的混乱和篇幅上的膨胀,凡是本书的前续课程(包括电力电子技术,计算机控制技术等)的相关内容,都不再专门列入。虽然实际的电力拖动自动控制系统都已经数字化,但是由于连续(模拟)系统物理概念清晰,为了使读者便于理解和掌握,所以控制系统的基本理论和控制方法仍按连续系统进行讲述,而控制系统的设计和实际实现则按数字控制系统进行讲述。

本书分为电力拖动直流调速系统、电力拖动交流调速系统、位置伺服系统、数字电力拖动自动控制系统 4 篇。第 1 篇为本书的基础,第 2 篇为本书的重点,第 3 篇和第 4 篇可作为选修课内容及应用参考。需要指出,本课程是一门实践性很强的课程,实验或实践是学好本课程必不可少的重要环节。

本书第 1~4 章由北京科技大学李肇副教授编写,第 5 章及附录由北京科技大学孙昌国副教授编写,第 6~9 章由北京科技大学李华德教授编写,第 10 章由北方工业大学杨立永副教授编写,第 11 章由北华大学白晶教授编写,第 12 章由北京科技大学潘月斗副教授编写。李华德教授统编全书。博士研究生陈书锦、曹勇、郝智红、刘刚,硕士研究生张伟、周中军参加了本书的编写、录入及校对工作。

我国著名电机与控制专家天津大学教授马小亮对本书内容进行了全面、深入的审校,并为本书提供了许多重要资料,对本书水平的进一步提升发挥了重要作用。本书全体作者在这里向马小亮教授致以深深的谢意。

由于作者水平有限,虽然尽力而为,但仍难免有错误和不足之处,敬请广大读者批评指正。

为了配合教学,读者可在 www.cmpedu.com 下载本书配套的电子教案。

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	GF	函数发生器
ACR	电流调节器	GT	触发装置
ADR	电流变化率调节器	GTF	正组触发装置
AE	电动势运算器	GTR	反组触发装置
AER	电动势调节器	GI	给定积分器
AFR	励磁电流调节器	K	继电器；接触器
AP	脉冲放大器	KF	正向继电器
APR	位置调节器	KMF	正向接触器
AR	反号器	KMR	反向接触器
ASR	转速调节器	KR	反向继电器
ATR	转矩调节器	L	电感；电抗器
AVR	电压调节器	M	电动机
AΨR	磁链调节器	LS	饱和电抗器
B	非电量—电量变换器	MA	异步电动机
BQ	位置传感器	MD	直流电动机
BS	自整角机	MS	同步电动机
BSR	自整角机接收机	N	运算放大器
BST	自整角机发送机	R, r	电阻，电阻器；变阻器
BRT	转速传感器	RP	电位器
C	电容	SA	控制开关；选择开关
CD	电流微分环节	SB	按钮开关
CU	功率变换单元	SM	伺服电动机
D	数字集成电路和器件	T	变压器
DHC	滞环比较器	TA	电流互感器
DLC	逻辑控制环节	TAF	励磁电流互感器
DLD	逻辑延时环节	TC	控制电源变压器
F	励磁绕组	TG	测速发电机
FB	反馈环节	TI	逆变变压器
FBC	电流反馈环节	TM	电力变压器；整流变压器
FBS	测速反馈环节	TU	自耦变压器
G	发电机；振荡器；发生器	TV	电压互感器
GD	驱动电路	U	变换器；调制器
GAB	绝对值变换器	UI	逆变器

UPE	电力电子变换器	VD	二极管
UR	整流器	VF	正组晶闸管整流装置
URP	相敏整流器	VFC	励磁电流可控整流装置
UCR	可控整流器	VR	反组晶闸管整流装置
V	开关器件; 晶闸管整流装置	VS	稳压管
VBT	晶体三极管	VT	晶闸管, 功率开关器件

二、参数和物理量文字符号

A_d	动能	K_m	直流电机转矩的结构常数
a	线加速度; 特征方程系数	K_p	比例放大系数
B	磁感应强度	K_{rp}	相敏整流器放大系数
C	电容; 输出被控变量	K_s	电力电子变换器放大系数
C_e	直流电动机在额定磁通下的电势系数	k	谐波次数; 振荡次数
C_m	直流电动机在额定磁通下的转矩系数	k_N	绕组系数
D	调速范围; 摩擦转矩阻尼系数; 脉冲数	K_g	减速器放大系数
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	L	电感; 自感; 对数幅值
e_d	检测误差	L_1	漏感
e_s	系统误差	L_m	互感
e_{st}	扰动误差	M	电动机; 调制度; 闭环系统频率特性幅值
e_{sr}	给定误差	m	整流电流 (电压) 一周内的电脉冲数; 典型 I 系统两个时间常数比
F	磁动势; 力; 扰动量	N	匝数; 扰动量; 载波比; 额定值
f	频率	n	转速; n 次谐波
G	重力	n_0	理想空载转速
GD^2	飞轮惯量	n_s	同步转速
GM	增益裕度	n_p	极对数
g	重力加速度	P, p	功率
h	开环对数频率特性中频宽度	$p \left(= \frac{d}{dt} \right)$	微分算子
I, i	电流	P_m	电磁功率
I_a, i_a	电枢电流	P_s	转差功率
i	减速比	Q	无功功率
I_d, i_d	整流电流	R	电阻; 电阻器; 变阻器
I_{dl}	负载电流	R_a	直流电机电枢电阻
I_f, i_f	励磁电流	R_L	电抗器电阻
J	转动惯量	R_{pc}	电力电子变换器内阻
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	R_{rec}	整流装置内阻
K_{ba}	自整角机放大系数	S	视在功率
K_e	直流电机电动势的结构常数	s	转差率; 静差率
		$s = \alpha + j\omega$	Laplace 变量

T	时间常数; 开关周期; 感应同步器绕组节距	W_m	磁场储能
t	时间	X	电抗
T_c	脉宽调制载波的周期	x	机械位移
T_e	电磁转矩	Z	阻抗; 电抗器
T_{ei}	异步电动机电磁转矩	z	负载系数
T_{ed}	直流电动机电磁转矩	α	速度反馈系数; 可控整流器的控制角
T_{en}	同步电动机电磁转矩	β	电流反馈系数; 可控整流器的逆变角
T_l	电枢回路电磁时间常数	γ	电压反馈系数; 相角裕度; (同步电动机反电势换流时的) 换流提前角
T_L	负载转矩	γ_0	空载换流提前角
T_m	机电时间常数	δ	转速微分时间常数相对值; 磁链反馈系数; 脉冲宽度; 换流剩余角
t_m	最大动态降落时间	Δn	转速降落
T_o	滤波时间常数	ΔU	偏差电压
t_{on}	开通时间	$\Delta \theta$	失调角, 角差
t_{off}	关断时间	ξ	阻尼比
t_p	峰值时间	η	效率
t_r	上升时间	θ	电角位移; 可控整流器的导通角
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	θ_m	机械角位移
t_s	调节时间	λ	电机允许过载倍数
t_v	恢复时间	μ	磁导率; 换流重叠角
U, u	电压, 电枢供电电压	ρ	占空比; 电位器的分压系数
U_b	基极驱动电压	σ	漏磁系数; 超调量
U_{ba}	自整角机输出电压	τ	时间常数, 积分时间常数
U_c	控制电压	Φ, ϕ	磁通
U_d, u_d	整流电压; 直流平均电压	Φ_m, ϕ_m	每极气隙磁通量
U_{d0}, u_{d0}	理想空载整流电压	φ	相位角、阻抗角; 相频; 功率因数角
U_f, u_f	励磁电压	Ψ, ψ	磁链
U_n	电源电压	Ω	机械角速度
U_x	变量 x 的反馈电压 (x 可用变量符号代替)	ω	角速度, 角频率
U_x^*	变量 x 的给定电压 (x 可用变量符号代替)	ω_b	闭环特性通频带
v	速度, 线速度	ω_c	开环特性截止频率
$W(s)$	开环传递函数	ω_m	机械角速度
$W_{cl}(s)$	闭环传递函数	ω_n	二阶系统的自然振荡频率
$W_{obj}(s)$	控制对象传递函数	ω_o	同步角速度
		ω_{sl}	转差角速度

三、常用下角标

add 附加值 (additional)

av 平均值 (average)

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

四、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)
DSP	数字信号处理器 (Digital Signal Processor)
IPM	智能功率模块 (Intelligent Power Module)
PIC	功率集成电路 (Power Integrated Circuit)
PWM	脉宽调制 (Pulse Width Modulation)
SCR	可控整流器 (可控硅) (Silicon Controlled Rectifier)
SHEPWM	消除指定次数谐波的 PWM (Selected Harmonics Elimination PWM)
SOA	安全工作区 (Safe Operation Area)
SPWM	正弦波脉宽调制 (Sinusoidal PWM)
SVPWM	电压空间矢量 PWM (Space Vector PWM)
VCO	压控振荡器 (Voltage-Controlled Oscillator)
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)

目 录

出版说明

前言

常用符号表

绪论	1
0.1 电力拖动及其自动控制系统	1
0.2 电力拖动自动控制系统的发展概况与趋势	1
0.2.1 电力拖动调速系统的发展概况和趋势	2
0.2.2 电力拖动位置伺服系统的发展概况和趋势	6

第 1 篇 电力拖动直流调速系统

第 1 章 直流电动机的数学模型及其闭环控制系统	10
1.1 闭环直流调速系统广义被控对象的数学模型及其动态结构图	10
1.1.1 旋转电枢系统的数学模型及其动态结构图	10
1.1.2 他励直流电动机励磁回路的数学模型及其动态结构图	17
1.2 直流调速系统的闭环控制结构及其相应的闭环直流调速系统	19
1.2.1 转速单闭环的控制结构	19
1.2.2 转速、电流双闭环控制结构及相应的控制系统	20
1.2.3 他励直流电动机闭环励磁控制系统的动态结构及相应的控制系统	22
1.2.4 直流电动机双域闭环控制调速系统（先升压后弱磁调速系统）	22
第 2 章 闭环控制直流调速系统的稳态分析和计算	25
2.1 直流调速系统的静态调速指标及开环系统存在的问题	25
2.1.1 生产工艺对转速控制的要求和调速指标	25
2.1.2 开环调速系统存在的问题	27
2.2 单闭环直流调速系统的稳态分析和计算	28
2.2.1 ASR 为比例调节器时的转速单闭环直流调速系统稳态分析与计算	28
2.2.2 ASR 采用 PI 调节器时的转速单闭环直流调速系统	31
2.2.3 带电流截止负反馈的转速单闭环直流调速系统稳态分析	32
2.3 转速、电流双闭环调速系统稳态分析及计算	35
2.4 习题	37
第 3 章 闭环直流调速系统的动态分析	39
3.1 单闭环直流调速系统的动态分析	39
3.1.1 ASR 为比例调节器的单闭环直流调速系统的稳定性分析	39
3.1.2 ASR 采用 PI 调节器的单闭环直流调速系统动态分析	41
3.2 转速、电流双闭环直流调速系统的动态分析	44
3.2.1 快速系统与最佳过渡过程的概念	44
3.2.2 转速、电流双闭环直流调速系统的动态特性分析	46

3.3 闭环直流调速系统的自适应控制	52
3.3.1 电流自适应调节器	52
3.3.2 转速自适应调速器	55
3.4 习题	58
第4章 可逆直流调速系统	59
4.1 晶闸管-电动机可逆调速系统 (V-M 可逆系统)	59
4.1.1 晶闸管-电动机可逆调速系统的基本结构	59
4.1.2 电枢可逆系统中的环流	60
4.1.3 有环流可逆调速系统	62
4.1.4 无环流可逆调速系统	66
4.2 可逆直流脉宽调速系统 (PWM 可逆系统)	70
4.3 习题	72
第5章 调节器的工程设计方法	73
5.1 调节器工程设计方法的基本思想和意义	73
5.2 典型系统	74
5.3 闭环控制系统的动态性能指标	76
5.4 典型系统的参数和性能指标的关系	77
5.4.1 典型 I 型系统参数与性能指标的关系	77
5.4.2 典型 II 型系统参数与性能指标的关系	81
5.5 非典型系统的典型化	85
5.5.1 直接校正成典型系统	85
5.5.2 低频大惯性环节的近似处理	86
5.5.3 高频小惯性群的近似处理	89
5.6 双闭环不可逆直流调速系统的工程设计	93
5.6.1 电流环的设计	94
5.6.2 转速环的设计	97
5.7 习题	104

第 2 篇 电力拖动交流调速系统

第6章 基于稳态数学模型的异步电动机变压变频调速系统	108
6.1 基于稳态数学模型的异步电动机变压变频调速系统控制方式	108
6.1.1 电压-频率协调控制方式	108
6.1.2 转差频率控制方式	112
6.2 电力电子变频调速装置及其电源特性	115
6.3 电压源型转速开环恒压频比控制的异步电动机变压变频调速系统	118
6.4 电流源型转速开环恒压频比控制的异步电动机变压变频调速系统	121
6.5 异步电动机转差频率控制的变压变频调速系统	123
6.5.1 电流源型转差频率控制的异步电动机变压变频调速系统	123
6.5.2 电压源型转差频率控制的异步电动机变压变频调速系统	124
6.6 习题	126
第7章 基于动态数学模型的异步电动机矢量控制变压变频调速系统	127
7.1 矢量控制的基本概念	127
7.1.1 直流电动机和异步电动机的电磁转矩	127

7.1.2	矢量控制的基本思想	129
7.2	异步电动机在不同坐标系上的数学模型	131
7.2.1	交流电动机的坐标系与空间矢量的概念	132
7.2.2	异步电动机在静止坐标系上的数学模型	133
7.2.3	坐标变换及变换矩阵	138
7.2.4	异步电动机在二相静止坐标系上的数学模型	148
7.2.5	异步电动机在任意二相旋转坐标系上的数学模型	153
7.2.6	异步电动机在二相同步旋转坐标系上的数学模型	155
7.2.7	异步电动机在二相坐标系上的状态方程	156
7.3	磁场定向和矢量控制的基本控制结构	158
7.3.1	转子磁场定向的异步电动机矢量控制系统	158
7.3.2	异步电动机的其他两种磁场定向方法	161
7.4	转子磁链观测器	163
7.4.1	计算转子磁链的电流模型法	163
7.4.2	计算转子磁链的电压模型法	165
7.5	异步电动机矢量控制系统	166
7.5.1	具有转矩内环的转速、磁链闭环异步电动机直接矢量控制系统	166
7.5.2	转差型异步电动机间接矢量控制系统	168
7.5.3	无速度传感器矢量控制系统	172
7.6	具有双 PWM 变流器的矢量控制系统	175
7.7	习题	176
第 8 章	异步电动机直接转矩控制变压变频调速系统	178
8.1	异步电动机直接转矩控制系统的基本理论	178
8.1.1	直接转矩控制的基本思想	178
8.1.2	逆变器的 8 种开关状态和逆变器的电压状态	178
8.1.3	电压空间矢量的概念	181
8.1.4	电压空间矢量与磁链空间矢量的关系	183
8.1.5	电压空间矢量对电动机转矩的影响	184
8.1.6	电压空间矢量的正确选择	185
8.1.7	异步电动机直接转矩控制的基本结构	187
8.1.8	异步电动机定子轴系的数学模型	188
8.2	异步电动机直接转矩控制系统的基本组成及工作原理	191
8.2.1	磁链自控制	192
8.2.2	转矩调节	198
8.2.3	磁链调节	203
8.2.4	电压状态的选择	206
8.2.5	最小开关持续时间	210
8.2.6	逆变器的开关频率调节	211
8.3	在低速范围内直接转矩控制系统的转矩控制与调节方法	212
8.3.1	在低速范围内直接转矩控制系统的结构特点	212
8.3.2	区段的电压状态选择	213
8.3.3	低速范围内转矩与磁链调节的协调	215
8.3.4	使用 -120° 电压的磁链调节	217

8.4 在弱磁范围内直接转矩控制系统的转矩控制及恒功率调节	218
8.4.1 弱磁范围内直接转矩控制系统的结构特点	218
8.4.2 弱磁范围内的转矩控制与调节	218
8.4.3 弱磁范围内的功率调节	219
8.5 圆形磁链轨迹的直接转矩控制系统	222
8.6 无速度传感器直接转矩控制系统	224
8.7 异步电动机的一种低速直接转矩控制 (ISC) 系统	229
8.8 直接转矩控制系统的特点	231
8.9 习题	232
第9章 同步电动机变压变频调速系统	233
9.1 同步电动机变压变频调速的特点及基本类型	233
9.2 同步电动机变压变频调速系统主电路晶闸管换流关断机理及其方法	234
9.2.1 同步电动机交-直-交型变压变频调速系统逆变器中晶闸管的换流关断机理及其方法	234
9.2.2 交-交变频同步电动机调速系统主电路晶闸管的换流	237
9.3 他控变频同步电动机调速系统	239
9.3.1 转速开环恒压频比控制的同步电动机调速系统	239
9.3.2 交-直-交型他控变频同步电动机调速系统	239
9.4 自控变频同步电动机 (无换向器电动机) 调速系统	241
9.4.1 自控变频同步电动机 (无换向器电动机) 调速原理及特性	241
9.4.2 自控变频同步电动机调速系统	248
9.5 按气隙磁场定向的普通三相同步电动机矢量控制系统	251
9.5.1 普通三相同步电动机的多变量数学模型	251
9.5.2 按气隙磁场定向的三相同步电动机交-直-交变频矢量控制系统	253
9.6 正弦波永磁同步电动机变压变频调速系统	256
9.7 梯形波永磁同步电动机变压变频调速系统	266
9.8 习题	269
第10章 电力拖动自动控制系统的先进控制策略	270
10.1 交流电动机变压变频调速系统新型控制策略综述	270
10.2 交流电动机的逆系统控制方法	274
10.2.1 逆系统控制方法的理论基础	275
10.2.2 交流电动机动态模型的可逆性及其逆系统	276
10.2.3 闭环控制器的设计	279
10.3 内模控制技术在异步电动机调速领域内的应用	280
10.3.1 内模控制的基本原理和特点	280
10.3.2 定子电流的内模解耦控制	282
10.3.3 二自由度内模控制策略	283
10.3.4 异步电动机调速系统的二自由度内模控制方法	285
10.4 智能控制方法在异步电动机调速系统中的应用	287
10.4.1 异步电动机的神经网络模型参考自适应控制方法	287
10.4.2 异步电动机模糊控制方法	290
10.4.3 异步电动机的自适应模糊神经网络控制方法	294

第 3 篇 位置伺服系统

第 11 章 位置伺服系统	300
11.1 位置伺服系统的基本组成及分类	300
11.1.1 位置伺服系统的基本组成	300
11.1.2 位置伺服系统的分类	301
11.2 位置伺服系统的控制结构及相应的控制系统	304
11.2.1 直流位置伺服系统的控制结构及相应的控制系统	304
11.2.2 交流位置伺服系统的控制结构及相应的控制系统	306
11.3 位置伺服系统的稳态分析	308
11.3.1 位置伺服系统稳态分析及稳态基本性能指标	308
11.3.2 提高位置伺服系统精度的方法	312
11.4 位置伺服系统的动态分析和设计	314
11.4.1 单闭环位置伺服系统的动态分析和设计	315
11.4.2 双环位置伺服系统的动态分析与设计	317
11.4.3 交流位置伺服系统的动态分析和设计	319
11.4.4 提高位置伺服系统动态性能的方法	323
11.5 位置伺服系统	324
11.5.1 直流位置伺服系统	324
11.5.2 交流位置伺服系统	330
11.6 数控机床及其插补算法	332
11.6.1 数控机床简介	332
11.6.2 数控机床的工作过程	333
11.6.3 数控机床的插补算法	334
11.7 机器人中的伺服系统	338
11.7.1 机器人简述	338
11.7.2 工业机器人基本控制系统的组成	340
11.7.3 机器人关节伺服控制	341
11.7.4 机器人关节的力伺服控制	342
11.8 习题	342

第 4 篇 数字（计算机）电力拖动自动控制系统

第 12 章 数字（计算机）控制的电力拖动系统	346
12.1 数字（计算机）自动控制系统的基本特点	346
12.1.1 离散和采样	346
12.1.2 连续变量的量化	347
12.1.3 增量式编码器脉冲信号的量化	348
12.1.4 电压、电流等模拟量的量化	350
12.1.5 模拟和数字调节器	352
12.1.6 开环前馈补偿（预控）	354
12.2 数字控制系统的组成及其数字控制器	355
12.2.1 数字控制器（计算机系统）的硬件系统	355

12.2.2	数字控制器的软件系统	359
12.3	数字电力拖动自动控制系统及其数字化设计	359
12.3.1	变量的相对值	359
12.3.2	直流双闭环调速系统全数字化设计	361
12.3.3	异步电动机矢量控制系统数字化设计	371
12.3.4	永磁同步电动机直接转矩控制系统数字化设计	380
12.3.5	数字控制的位置伺服(随动)系统	385
12.4	数字电力拖动自动控制系统中的检测技术	387
12.4.1	位置检测	387
12.4.2	速度(转速)测量	391
12.4.3	电压、电流检测	394
12.5	习题	396
附录	教学实验参考	398
实验 1	晶闸管直流调速系统参数和基本环节特性测定	400
实验 2	转速、电流双闭环直流调速系统	407
实验 3	SPWM 正弦脉宽调制变频器-异步电动机变压变频调速系统	410
实验 4	KR-LZH 三相异步电动机矢量控制实验系统及相关的实验	413
实验 5	KR-PMSM 交流伺服实验系统及相关的实验	417
参考文献	420

绪 论

0.1 电力拖动及其自动控制系统

具有自动控制和调节工作机械的速度或位移的电力拖动系统称为“电力拖动自动控制系统”，也称为“运动自动控制系统”。电力拖动自动控制系统中除了电动机、传动机构以及工作机械外，还配置电动机自动控制装置，如图 0-1 所示。电动机在系统中担负着能量转换任务，把输入的电能转换为机械能；机械传动机构是将机械能传递给工作机械。控制装置由电力电子变换器、控制器及反馈信息检测装置等组成，用来完成对电动机的转矩、转速及工作机械位移的自动控制。

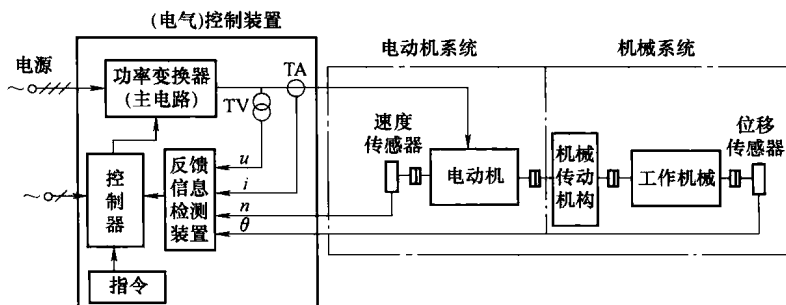


图 0-1 电力拖动（运动）自动控制系统的基本组成情况

这类系统的基本任务是通过控制和调节电动机的旋转速度或转角来实现工作机械对速度或位移的要求。

电力拖动自动控制系统按被控制量的不同，分为两大类：以电动机的转速为被控制量的系统叫做调速系统；以工作机械的角位移或直线位移为被控制量的系统叫做位置伺服系统，又叫做位置随动系统。除此以外，电力拖动自动控制系统还有其他多种类型，如张力控制系统，多电动机同步控制系统等。虽然电力拖动自动控制系统种类很多，但是，各种电力拖动自动控制系统都是通过控制电动机转速来工作的，因此，调速系统是最基本的电力拖动控制系统。

0.2 电力拖动自动控制系统的发展概况与趋势

19 世纪 70 年代前后相继诞生了直流电动机和交流电动机，从此人类社会进入了以电动机为动力设备的时代。以电动机作为动力设备，为人类社会的发展和进步、为工业生产的现代化起到了巨大的推动作用。