



普通高等教育 电气工程
自动化 系列规划教材

Electric Drive
Control Systems

电力传动控制系统

上册：基础篇

◎ 汤天浩 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程系列规划教材
自动化

电力传动控制系统

上册：基础篇

主编 汤天浩

参编 谢 卫

主审 陈伯时



机械工业出版社

本书是普通高等教育电气工程、自动化系列规划教材。为适应当前教育改革和学科发展的需要,在“电力传动控制系统”课程传统教材的基础上,根据当前电力传动控制技术的最新发展,对该课程教材进行了重组、扩展和深化。全书分为3篇,按上下两册出版,上册为基础篇,下册为提高篇及应用篇。

基础篇共有6章,重点介绍电力传动控制系统的基本结构、原理与方法。第1章介绍了电力传动系统的基本组成和共性问题,包括系统基本结构与组成,电动机、传感器和控制器的基本概念及原理。第2章概要地介绍了电力传动系统常用的各种变换器的拓扑结构及其变流方法。第3章以稳态等效电路为基础,建立了各种电动机的数学模型,并构建了电力传动系统各环节的数学模型。第4章专门分析和讨论了直流电力传动系统的控制,包括系统控制原理、结构和运行特性等内容。第5章为基于稳态模型的交流传动控制系统,包括异步电动机和同步电动机的控制原理、系统结构和运行特性等内容。第6章介绍了电力传动控制系统的设计方法。

本书适用于普通高等学校电气工程及其自动化专业本科教材。基础篇的内容精炼,概念清晰,论述浅显,特别适用于少学时学校的课程教学,也可用于控制、机械和电子工程等非电气工程专业,并可作为职工大学、夜大学以及大专院校有关专业的教材,也可供有关工程技术人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力传动控制系统. 上册: 基础篇/汤天浩主编. —北京: 机械工业出版社, 2015. 12

普通高等教育电气工程及其自动化系列规划教材

ISBN 978-7-111-51519-7

I. ①电… II. ①汤… III. ①电力传动—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(2015)第209963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: 于苏华 责任编辑: 于苏华 路乙达

版式设计: 霍永明 责任校对: 张玉琴

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京中兴印刷有限公司印刷

2016年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·10.25印张·238千字

标准书号: ISBN 978-7-111-51519-7

定价: 23.00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

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

前 言

我编写的普通高等教育自动化专业规划教材《电力传动控制系统》于2010年出版以来,由于体现了以电力传动系统的基本规律和共性问题为主线,利用电机原理、控制理论和电力电子技术等理论与工具,深入探讨系统结构、数学模型和控制策略,分析系统特性,给出系统设计方法和仿真试验结果的编写理念,在一些高校的使用中获得一定的好评,但也暴露出一些缺点和不足。

随着近年来电力电子与电力传动技术的飞速发展和广泛应用,尤其在电气节能技术、可再生能源与电气化交通等技术需求下,原有的教材已不能适应时代的要求。为此,出版了这本《电力传动控制系统》教材,力图与时俱进,使教学能跟上技术发展的需要。

在编写过程中,考虑到目前各高校都在精简课程和学时,而原有的教材内容尚显繁杂艰深,教学和学习难度较大,从选材、内容安排到阐述方法等方面都作了一些新的尝试。全书分为3篇按两册出版,上册基础篇重点讲解电力传动控制系统的基本结构、基础知识和控制原理。下册的提高篇将以统一电机模型为基础,重点介绍交流传动系统的高性能控制方法;应用篇着重介绍近年来电力传动系统主要的应用领域与典型案例,使全书内容得到扩展和充实,而难点可以分散。

本书为基础篇,共有6章,其特点是:

第1章介绍了电力传动控制系统的基本组成和共性问题,包括系统基本结构与组成,电动机、传感器和控制器的基本概念及原理,作为全书的引导。

第2章概要回顾和介绍了电力传动控制系统常用的电力电子变换器,重点分析了各种变换电路拓扑和变流控制方法,既可让学过“电力电子技术”课程的同学复习和巩固原先的知识,也可使没有电力电子知识基础的人学习和掌握电力传动所需的电能变换技术。

第3章以稳态等效电路为基础,集中建立了交、直流电动机的稳态数学模型,并构建了电力传动系统各环节的数学模型。避免了初学者学习和掌握交流电机动态建模与坐标变换的困难。

在前3章的基础上,第4章专门分析和讨论了直流电力拖动系统的控制,包括系统控制原理、结构和运行特性等内容。

第5章探讨了基于稳态模型的交流拖动控制系统,包括异步电动机和同步电动机的基本控制原理、系统结构和运行特性等内容。为避免初学者在学习矢量控制系统方面的困难,仅简要介绍矢量控制的基本思想和方法,不做动态模型和坐标变换的推导,并适当介绍这些系统的应用场合和实例,以加深同学对学习内容的理解。

第6章介绍了电力传动控制系统的设计方法，从经典设计方法存在的问题出发，论述了具有实用价值的工程设计方法；针对数字控制系统广泛应用的需求，探讨了采用数字频域法进行系统设计，试图得到与工程设计法相似的设计方法；进而利用 MATLAB 仿真工具，通过计算机模拟实现系统设计和仿真，并以系统举例，给出一些典型系统的设计和仿真实验结果。

基础篇比较浅显易学，可供本科生和专科生学习，特别适合作为少学时的教材。主要内容的教学时数为 36~54 学时，各学校可根据各自教学大纲的需要选择内容和安排教学。本书试图突破传统的教学模式，按照电力传动控制系统的框架结构、数学建模、系统分析和设计的思路组织课程内容和进行教学。由于与传统教材有较大差异，建议任课老师可根据教学要求、课程时数和学生程度有所选择。比如：对于少学时课程，可以选择第 1~5 章的主要内容组织教学和学习，第 6 章电力传动控制系统设计建议用于课程设计。在教学中，如果同学已事先学过“电力电子技术”“检测技术”“计算机控制”等课程，第 1、2 章中有关内容可以跳过或只作简单的回顾，有些电力电子技术的深入内容也可略去不讲；在第 3 章中，主要以直流电动机调压控制为主，可为学习电力传动控制系统的基本结构、控制方法以及系统分析和设计思路奠定基础，有些较深入的内容仅供选用；第 5 章也是以交流异步电动机变压变频控制为主，其他调速方法或系统可根据需要选择。

本书由上海海事大学汤天浩教授主编，参加编写的有上海海事大学谢卫教授。谢卫教授以他在电机理论方面的深厚造诣，编写了第 3 章中的电动机建模，并负责电子课件的制作。汤天浩教授编写了第 1~2 章和第 4~6 章，并负责全书的统稿。

本书的编写还得到上海海事大学的大力支持，韩金刚博士和研究生沈扬、陈雯洁等在 MATLAB 的 Simulink 仿真平台，设计和建立了部分系统的仿真模型并进行了仿真实验，在此谨向他们的辛勤工作表示感谢。

本书由上海大学陈伯时教授担任主审。作为作者的博士生导师和学术领路人，陈教授自始至终关心和指导着本书全过程的编写，从编写大纲的拟定到内容的选取以及表述的方式，都提出了许多宝贵意见。特别是有关调节器设计的工程设计法，就是陈教授多年悉心研究和总结的成果，本书几乎全盘照搬。在审稿过程中，陈教授仔细审阅了书稿，并在许多内容上作了逐字逐句的修改，本人对此表示衷心的感谢。

由于本人水平有限，本书仍会存在许多缺点和不足，恳请广大读者批评指正。

汤天浩
于上海

常用符号表

元件和装置用的文字符号（按国家标准 GB7159—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
A/D	模数转换器	MD	直流电动机
AE	电动势运算器	MS	同步电动机
AER	电动势调节器	P/D	脉冲数字转换器
AFR	励磁电流调节器	PG	脉冲发生器
AR	反号器	PR	极性转换器
ASR	转速调节器	RP	电位器
A Ψ R	磁链调节器	S	开关器件
B	非电量-电量变换器，B 相绕组	SA	控制开关，选择开关
BQ	位置传感器，转子位置检测器	SE	转速编码器
C	电容器，C 相绕组	ST	饱和限制环节
CPU	中央处理器	T	变压器
D	数字集成电路和器件，整流二极管	TA	电流互感器，霍尔电流传感器
D/A	数模转换器	TG	测速发电机
DLC	逻辑控制环节	TVC	双向晶闸管交流调压器
F	励磁绕组	TVD	直流电压隔离变换器
FA	具有瞬时动作的限流保护	U	变换器，调制器
FBC	电流反馈环节	UCR	可控整流器
FBS	测速反馈环节	UCH	直流斩波器
FC	频率控制器	UI	逆变器
FG	函数发生器	UPW	PWM 波生成环节
G	发电机	UR	整流器
GD	驱动电路	V	晶闸管整流装置
GT	触发装置	VBT	晶体管
GTF	正组触发装置	VCO	压控振荡器
GTR	反组触发装置	VD	二极管，续流二极管
I/O	输入输出接口	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	VST	稳压管
L	电感，电抗器	VT	晶体管，晶闸管，功率开关器件
LED	发光二极管		

常用缩写符号

AC	交流电 (Alternating Current)
ANN	人工神经网络 (Artificial Neural Networks)
APF	有源电力滤波器 (Active Power Filters)
BJT	双极性晶体管 (Bipolar Junction Transistor)
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)
DC	直流电 (Direct Current)
DF	位移因数 (Displacement Factor)
DSP	数字信号处理器 (Digital Signal Processor)
DTC	直接转矩控制系统 (Direct Torque Control)
GTO	门极可关断晶闸管 (Gate Turn-off Thyristor)
EMI	电磁干扰 (Electromagnetic Interference)
FFT	快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform)
IGBT	绝缘栅双极晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor)
IGCT	绝缘栅双极晶闸管 (Insulated Gate Commutated Thyristor)
PD	比例微分 (Proportion, Differentiation)
PF	功率因数 (Power Factor)
PFC	功率因数校正 (Power Factor Correction)
PID	比例积分微分 (Proportion, Integration, Differentiation)
PLL	锁相环 (Phase Lock Loops)
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)
SOA	安全工作区 (Safe Operation Area)
SPWM	正弦波脉宽调制 (Sinusoidal PWM)
SVPWM	电压空间矢量脉宽调制 (Space Vector PWM)
THD	总谐波畸变率 (Total Harmonic Distortion)
VC	矢量控制 (Vector Control)
VR	矢量旋转变换器 (Vector Rotator)
VS	电压源 (型) 逆变器 (Voltage Source Inverter)
VVVF	变压变频 (Variable Voltage Variable Frequency)

常见下角标

A	A 相绕组	max	最大值 (maximum)
a	电枢绕组 (armature); a 相绕组	min	最小值 (minimum)
add	附加 (additional)	N	额定值, 标称值 (nominal)

av	平均值 (average)	off	断开 (off)
B	B 相绕组	on	闭合 (on)
b	b 相绕组; 偏压 (bias); 基准 (basic)	op	开环 (open loop)
bl	堵转; 封锁 (block)	out	输出 (out)
C	C 相绕组	p	磁极 (poles); 峰值 (peak)
c	c 相绕组; 环流 (circulating); 控制 (control)	P	比例 (proportion); 有功功率
cl	闭环 (closed loop)	q	q 轴 (quadrature axis)
com	比较 (compare); 复合 (combination)	Q	无功功率
cr	临界 (critical)	r	转子 (rotator); 上升 (rise); 反向 (reverse)
d	直流 (direct current); d 轴 (direct axis)	ref	参考 (reference)
D	微分 (differential)	rec	整流器 (rectifier)
e	电 (electricity); 电源 (electric source)	s	定子 (stator); 串联 (series)
em	电磁的 (electric-magnetic)	sam	采样 (sampling); 脉动 (pulse)
f	磁场 (field); 正向 (forward); 反馈 (feedback)	sl	转差 (slip)
g	气隙 (gap); 栅极 (gate)	ss	稳态 (steady state)
I	积分 (integral)	st	起动 (starting)
in	输入 (input)	sy	同步 (synchronous)
L	负载 (load)	t	触发 (trigger); 三角波 (triangular wave)
l	线值 (line); 漏磁 (leakage)	T	转矩 (torque)
lim	极限, 限制 (limit)	W	线圈 (winding)
m	磁的 (magnetic); 主要部分 (main)	∞	稳态值, 无穷大处 (infinity)
m	机械的 (mechanical)		

主要参数和物理量符号

A	散热系数	$E'_r, \dot{E}'_r$	交流电机转子折算感应电动势
a	线加速度; 特征方程系数	$E_{r0}, \dot{E}_{r0}$	交流电机转子静止电动势
B	磁通密度	$E_s, \dot{E}_s$	交流电机定子感应电动势
C	电容	$E_{sr}, \dot{E}_{sr}$	交流电机定子漏磁电动势
C_e	他励直流电动机在额定磁通的电动势系数	F	磁动势、扰动量
C_T	他励直流电动机在额定磁通的转矩系数	f	频率
D	调速范围; 摩擦转矩阻尼系数	f_c	电源频率
E, e	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	f_M	调制信号频率
E_a, e_a	直流电机电枢感应电动势、反电动势	f_r	交流电机转子频率
E_{add}, e_{add}	附加电动势	f_{sl}	交流电机转差频率
e_d	检测误差	f_s	交流电机定子频率
E_f	同步电机转子励磁感应电动势	f_{sw}	开关频率
e_s	系统误差	f_T	载波信号频率
E_2, e_2	变压器二次绕组感应电动势	G	重力; 电机旋转感应系数; 传递函数
$E_r, \dot{E}_r$	交流电机转子感应电动势	$G(s)$	开环传递函数

$G_{cl}(s)$	闭环传递函数	M_r	闭环系统频率特性峰值
g	重力加速度	m	质量, 相数, 脉冲数, 检测值
GD^2	飞轮惯量	N	绕组匝数
GM	增益裕度	n	转速
h	开环对数频率特性中频宽, 滞环宽度	n_0	理想空载转速、同步转速
H	风机的风压; 水泵的扬程	n_p	极对数
I, i	电流 (大写为平均值或有效值, 小写为瞬时值, 下同)	P	功率
I_a, i_a	电枢电流	P_{em}	电磁功率
I_d, i_d	整流电流、直流平均电流	P_L	负载功率
I_f, i_f	励磁电流	P_m	机械功率
I_g, i_g	发电机电流	P_N	额定功率
I_G, i_G	电网电流	P_G	电网功率
$\dot{I}_m, i_m$	交流电机励磁电流	P_{sl}	转差功率
I_2, i_2	变压器二次侧电流	$p = \frac{d}{dt}$	微分算子
I_L, i_L	负载电流	Q	无功功率, 热量, 流量
I_N, i_N	额定电流	R	电阻, 电枢回路总电阻
I_r, i_r	交流电机转子电流	R_a, R_{ac}	直流电机电枢电阻, 电枢回路串接电阻
I'_r, i'_r	交流电机转子折算电流	R_b	镇流电阻, 泻流电阻
I_s, i_s	交流电机定子电流	R_f	励磁电阻; 反馈电阻
I_{st}, i_{st}	电机起动电流	R_o	运算放大器输入电阻
J	转动惯量	R_r, R'_r	转子绕组电阻及折算
j	传动机构减速比	R_e	整流装置内阻
K	系数、常数、比值	R_s	定子绕组电阻
K_e	直流电动机电动势结构常数	r	参考变量, 控制指令
K_D, k_D	微分系数	S	视在功率, 面积, 开关状态
K_I, k_I	积分系数	s	转差率, Laplace 变量
K_P, k_P	比例放大系数	T	转矩、时间常数, 开关周期
K_i	电流检测环节比值, 电流反馈系数	T_c	电力电子开关周期、定时或计数时间
K_m	电机结构常数	T_d	检测环节的时间常数
K_n	转速检测环节比值, 转速反馈系数	T_e	电磁转矩
K_s	电力电子变换器放大系数	T_{em}	最大电磁转矩
K_T	直流电动机转矩结构常数, 起动转矩倍数	T_d	滤波时间常数
k	谐波次数, 振荡次数	T_l	电枢回路电磁时间常数
k_i	电流比, 起动电流倍数	T_L	负载转矩
k_N	绕组系数	T_m	机电时间常数
L	电感	T_N	额定转矩
L_l	漏感	T_r	转子电磁时间常数
L_m	互感	T_{st}	起动转矩
L_s	同步电感	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
M	闭环系统频率特性幅值, PWM 调制比		

T_{sam}	采样周期	Δn	转速降落
T_{sw}	电力电子器件开关时间	Δp	功率损耗
T_{T}	载波信号周期	ΔU	电压差
t	时间	$\Delta \theta_{\text{m}}$	相角差
t_{m}	最大动态降落时间	ξ	阻尼比
t_{on}	开通时间	η	效率
t_{off}	关断时间	θ	电角位移, 相位角, 可控整流器的导通角
t_{p}	峰值时间	θ_{m}	机械角位移
t_{r}	上升时间	λ	电机允许过载倍数
t_{s}	调节时间	ρ	占空比, 电位器的分压系数
t_{v}	恢复时间	σ	漏磁系数, 转差功率损耗系数
$U, u, \mathbf{u}$	电压, 电源电压 (大写为平均值或有效值, 小写为瞬时值, 粗体为矢量, 下同)	$\sigma\%$	超调量
U_2, u_2	变压器二次电压	τ	时间常数, 积分时间常数, 微分时间常数
$U_{\text{s}}, u_{\text{s}}$	电源电压、交流电机定子电压	Φ	磁通
$\mathbf{u}_{\text{s}}$	空间电压矢量	Φ_{m}	每极气隙磁通量
u_{T}	三角载波电压	Φ_{N}	额定磁通
U_x^*, U_x	变量 x 的给定和反馈电压 (x 可用变量符号替代)	Φ_{r}	转子磁通
v	速度, 线速度; 转换变量	Φ_{rs}	合成磁通
w	W 变换的变量	Φ_{s}	定子磁通
W	能量	φ	相位角, 阻抗角
x	位移, 距离	Ψ, ψ	磁链
X	电抗	Ψ_{m}	交互磁链
X_{s}	同步电抗	ω	角转速, 角频率
y, Y	系统输出变量	ω_{b}	闭环频率特性带宽
z	z 变换的变量	ω_{c}	开环频率特性截止频率
Z	电阻抗	ω_{e}	电角频率
α	可控整流器的控制角	ω_{m}	机械角转速
β	可控整流器的逆变角, 机械特性的斜率	ω_{n}	二阶系统的自然振荡频率
γ	相角裕度, PWM 电压系数	ω_{r}	转子角转速, 角频率
δ	放大系数, 静差率, 同步电机功率角	ω_{s}	定子角转速 (频率), 同步角转速 (频率)
		ω_{sl}	转差角转速, 角频率

目 录

前言	
常用符号表	
绪论	1
第1章 电力传动控制系统的基本结构与组成	3
1.1 电力传动控制系统的基本结构和共同问题	3
1.1.1 电力传动控制系统的组成与分类	3
1.1.2 电力传动控制系统的共同问题	4
1.2 电动机的主要类型与调速方法	4
1.2.1 直流电动机及其调速方法	4
1.2.2 交流电动机及其调速方法	6
1.3 电力传动系统的信号检测	8
1.3.1 直接检测方法	9
1.3.2 信号处理	12
1.3.3 频率和相位的数字检测	14
1.4 电力传动控制系统的控制与分析	17
1.4.1 电力传动控制的要求和指标	17
1.4.2 PID 控制器	20
1.4.3 先进控制方法	22
1.4.4 系统分析和仿真	23
本章小结	24
思考题与习题	24
第2章 电力传动系统的电源变换	25
2.1 电力电子变流器的结构与分类	25
2.2 直流变换器	26
2.2.1 相控整流器	26
2.2.2 直流斩波器	28
2.2.3 PWM 整流器	29
2.3 交流变换器	32
2.3.1 交-直-交变频器	32
2.3.2 交-交变频器	48
2.4 电力电子变换器的设计与选型	50
2.4.1 电力电子变换器的设计	50
2.4.2 电力电子变换器的选型	53
本章小结	55
思考题与习题	55
第3章 电力传动系统的稳态模型	56
3.1 稳态模型概念和建模方法	56
3.2 直流电动机的数学模型	56
3.2.1 他励直流电动机的等效电路	57
3.2.2 他励直流电动机的静态模型与特性	57
3.2.3 他励直流电动机的动态模型	58
3.3 交流异步电动机的数学模型	59
3.3.1 异步电动机的基本结构和工作原理	59
3.3.2 异步电动机的稳态等效电路与静特性	59
3.3.3 异步电动机的稳态模型	60
3.4 交流同步电动机的稳态模型	62
3.4.1 同步电动机基本结构和工作原理	62
3.4.2 同步电动机的稳态等效电路与模型	63
3.5 电力电子变换器的稳态模型	64
本章小结	67
思考题与习题	67
第4章 直流调速系统	68
4.1 开环直流调速系统的组成与主要问题	68
4.1.1 开环直流调速系统的组成	68
4.1.2 开环直流调速系统的主要问题	68
4.1.3 开环系统的静特性计算	70
4.2 转速闭环直流调速系统	70
4.2.1 转速闭环直流调速系统的组成	70
4.2.2 转速闭环直流调速系统的稳态分析	70
4.2.3 反馈控制闭环直流调速系统的动态分析和设计	73

4.2.4 比例积分控制规律和无静差调速系统	77	5.2.3 转速闭环恒定子电动势频比控制系统	111
4.3 转速、电流双闭环直流调速系统	78	5.2.4 采用电压源变频器的交流调速系统应用举例	113
4.3.1 直流电动机起动的要求及控制策略	79	5.3 交流同步电动机的负载换流传动控制系统	115
4.3.2 转速、电流双闭环直流调速系统的结构	79	5.3.1 采用 LCI 逆变器供电的同步电动机及其负载换流模式	115
4.3.3 转速、电流双闭环直流调速系统的稳态分析	80	5.3.2 采用 CSI 变频器的同步电动机调速控制系统	116
4.3.4 转速、电流双闭环直流调速系统的动态分析	82	5.3.3 应用举例	119
4.3.5 转速和电流两个调节器的作用	85	5.4 交流电动机矢量控制系统	121
4.4 直流调速系统的可逆控制	85	5.4.1 电动机的等效变换概念	121
4.4.1 可逆控制的主要问题	85	5.4.2 电动机的等效模型与解耦	122
4.4.2 无环流控制的可逆直流调速系统	88	5.4.3 矢量控制系统的基本思想和解决方案	122
4.5 直流调速系统的 MATLAB 仿真	89	5.4.4 矢量控制系统的性能和应用	123
4.5.1 仿真建模	90	5.5 交流传动系统仿真举例	123
4.5.2 仿真实验	91	5.5.1 仿真系统建模	124
*4.6 应用举例——直流调速系统的微机控制	93	5.5.2 系统仿真结果分析	124
4.6.1 系统组成方式	93	本章小结	126
4.6.2 微机控制调速系统的硬件结构	94	思考题与习题	127
4.6.3 系统软件设计	96	第 6 章 电力传动控制系统的分析与设计	128
本章小结	98	6.1 电力传动控制系统性能指标	128
思考题与习题	99	6.1.1 电力传动系统的控制要求	128
第 5 章 交流异步电动机的基本控制方法	101	6.1.2 电力传动控制系统的稳态性能指标	129
5.1 交流异步电动机变压控制系统	101	6.1.3 电力传动控制系统的动态指标	129
5.1.1 交流异步电动机的变压控制方法	101	6.2 电力传动控制系统的设计方法	131
5.1.2 异步电动机变压控制的静特性分析	101	6.2.1 系统设计的基本原理和方法	131
5.1.3 转速反馈闭环控制的异步电动机变压控制系统	102	6.2.2 调节器最佳整定设计法	132
5.1.4 变压控制在异步电动机软起动中的应用	103	6.2.3 基于典型系统的工程设计方法	134
5.2 交流异步电动机的变压变频控制系统	106	*6.2.4 数字控制系统的设计方法	141
5.2.1 变压变频控制的控制模式及其机械特性	107	6.3 基于 MATLAB 的电力传动系统仿真	146
5.2.2 转速开环恒压频比控制系统	110	6.3.1 MATLAB 的 Simulink 仿真平台	146
		6.3.2 电力传动控制系统的 MATLAB 仿真举例	147
		本章小结	149
		思考题与习题	149
		参考文献	151

绪 论

电力传动的历史可追溯到 1834 年俄罗斯人雅可比（Якоби）研制成功世界第一台实用的直流电动机。随后，1886 年意大利人 G. 费拉里斯（Ferraris）研制出世界第一台两相感应电动机，1888 年塞尔维亚人 N. 特斯拉（Tesla）与美国西屋公司合作制造了第一台三相感应电动机，从此开始了用电动机进行电力传动的时代。最初的电力传动是采用传导传动（又称联动电力拖动）的方式，它是由一台电动机，并由数个传动装置将运动传输到数个工作机构。代替传导拖动的是单机电力传动方式，即一个工作机械由一台电动机驱动。后来，由于生产的需要，工作机械也越来越复杂，出现了多电机电力传动，如自动化机床、加工中心等。

1956 年，晶闸管在 Bell 实验室诞生，开始了第二次电子革命，从此“电子”进入到强电领域，电力电子器件成为弱电控制强电的纽带。其重要意义在于：电力电子学把机器时代、电气时代和电子时代开创的技术融合在一起。20 世纪 60 年代，电力电子器件进入电力传动领域，可以方便地通过电能变换装置来控制电机的运行方式。其后，自动化技术和计算机技术也不断应用于电机控制，使电力传动系统发生了根本性改变。

目前，电力传动系统的工业应用范围不断扩大，已遍及能源、电力、机械、采矿、冶金、轻纺、化工、电子信息、交通运输和家用电器等领域。由于电动机具有性能优良、高效可靠、控制方便等优点，因此，电力传动系统已广泛应用到现代社会生产和生活的方方面面，可以说假如没有电力传动，需要运动的装置和系统就难以运行。目前，电机与传动的现状可以概括为：

（1）电力传动现已取代了其他传动形式，成为主要的运动控制系统形式。这是因为电动机与其他原动机相比有许多优点，比如：电能的获得和转换比较经济；传输和分配比较便利；操作和控制容易，特别是易于实现自动与远程控制。因此，目前绝大多数的生产机械都采用电力传动。

（2）当代科学和技术的新成果广泛地应用于电力传动系统之中，比如：电力电子学的发展，使半导体变流装置广泛地用作电力传动的电源；微电子学的发展，使电子控制器件和微处理机成为电力传动的主要控制手段；自动控制理论广泛应用于电力传动自动控制系统中，大大提高了系统的性能等。

由此可见，电力电子技术、自动化技术和计算机技术的发展是推动现代电力传动系统不断进步的动力。

特别值得注意的是：当前，“能源短缺”“节能减排”“气候变化”等词汇已成为普通公众耳熟能详的流行语，从各国政要、专家学者到大众传媒都在谈论这一话题。究其原因，这是因为人类赖以生存的地球生态环境遭到严重破坏，近百年来经济和社会发展的传统模式面临能源短缺的困境。众所周知，自工业革命以来，煤炭、石油等化石能源是人类利用的主

要能源。大量能源的消耗一方面给人们的生活带来便利,同时也造成了严重的问题:

(1) 不可再生——传统的化石类能源称为一次性能源,在人类大量开采利用下已经是日近枯竭。

(2) 环境污染——传统的能源利用方式给今天人类的生活环境造成了大量的污染。

(3) 温室效应——煤炭等化石燃料排放的温室气体对气候变化造成巨大影响。

解决全人类面临的共同问题的主要措施就是“开源节流”。开源是要寻找和开发可再生能源和清洁能源,以替代现有的传统能源。目前,太阳能、风能、海洋能和氢能等可再生能源成为新能源开发的热点,而电力电子与电力传动正是新能源开发利用的关键技术之一。节流就是通过节能来减少传统能源的消耗,也同时减少温室气体排放,以保护环境。而节省电能是节能的主要途径。其中,风机、泵类设备的节能控制,提高电力传动系统的效率和功率因数等措施已成为当前节能应用的重要途径。交通电气化也是当前另一个电力传动系统应用的新领域,电气化火车使中国进入高铁时代,电动汽车正在逐步进入千家万户,电力推进在船舶与海洋工程方面的应用是开发海洋的重要工具。

总之,人类正在进入以可再生能源、分布式发电和智能电网为标志的第4次工业革命的新纪元。在这伟大的变革中,电力传动控制系统的发展进入了一个新阶段,研发以节能降耗为目标的电力传动系统,以及发展应用于可再生能源的电力传动控制新方法和新技术。

电力传动控制系统的自身研究和发展也在不断深入,随着现代电力电子技术、自动化技术和计算机技术的发展,各种新的系统方案和控制策略层出不穷,电力传动系统的发展新趋势为:

(1) 新材料和新元件的结合,正在全面改变传统电机的面貌。由于稀土永磁材料的迅速发展和电力电子器件性能的不断改善,涌现了大量的新型实用电机,如无刷直流电动机、开关磁阻电动机、无刷双馈电动机等。这些电机调速性能优良,更加扩展电力传动技术的应用范围。此外,风力发电、磁悬浮电力传动、超导电机的出现为电力传动的发展开辟了新领域。

(2) 高性能的微处理器如DSP的出现,为采用新的控制理论和控制策略提供了良好的技术基础,使电力传动系统的自动化程度大为提高。神经网络控制和模糊控制等智能控制技术以及现代控制理论在电力传动系统中的应用已成为新的研究热点。

(3) 继续采用新技术不断提高电力传动系统的性能和完善系统功能,比如:参数辨识、状态监测、故障诊断和容错控制等。通过系统集成和技术融合,组成综合自动化系统,以进一步提高生产效率。

本书将追随电力传动控制系统的发展历程,选择具有代表性的典型系统,重点简述系统结构、控制原理和方法,分析系统性能和特点。并注重应用需求和时代发展,力求与时俱进,介绍一些新的理论和方法以及应用领域,体现创新思想。

第 1 章 电力传动控制系统的基本结构与组成

本章是全书的基础，首先以电动机、电源变换装置、传感器和控制器构成电力传动控制系统的一般结构，然后从系统组成的角度，讨论传动控制系统的共同问题：电源变换、状态检测、辨识和估计，以及控制方法等。使读者对后续课程的学习以及传动控制需要解决的基本问题有一个全局的了解。

1.1 电力传动控制系统的基本结构和共同问题

1.1.1 电力传动控制系统的组成与分类

电力传动是以电动机作为原动机拖动生产机械运动的一种传动方式，由于电力传输和变换的便利，使电力传动成为现代生产机械的主要动力装置。电力传动自动控制系统的基本结构如图 1-1 所示，一般由电源、变流器、电动机、控制器、传感器和生产机械（负载）组成。

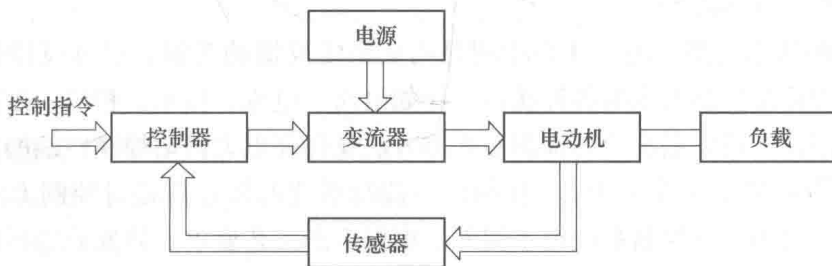


图 1-1 电力传动自动控制系统的基本结构

电力传动控制系统的基本工作原理是，根据输入的控制指令（比如速度或位置指令），与传感器采集的系统检测信号（速度、位置、电流和电压等），经过一定的处理给出相应的反馈控制信号，控制器按一定的控制算法或策略输出相应的控制信号，控制变流器改变输入到电动机的电源电压、频率等，使电动机改变转速或位置，再由电动机驱动生产机械按照相应的控制要求运动，故又称为运动控制系统。

根据生产机械的工艺要求，电力传动控制系统可以分为调速控制系统和位置控制系统两大类。

1. 调速控制系统

这类电力传动控制系统的控制指令为速度给定信号，控制器一般为速度调节器、电流调节器等，系统要求电动机按速度指令在一定的转速下工作。根据所选电动机的不同，调速系统又可分为：

(1) 直流调速系统 采用直流电动机作为系统驱动器,相应的电能变换器则需选用直流变换器,比如可控整流器、直流斩波器等。

(2) 交流调速系统 采用交流电动机作为系统驱动器,相应的电能变换器则需选用交流变换器,比如交流调压器、各种变频器等。

2. 位置控制系统

这类电力传动控制系统的控制指令为位置给定信号,控制器由位置控制器、速度控制器等组成,系统要求电动机驱动负载按位置指令准确到达指定的位置或保持所需的姿态。

1.1.2 电力传动控制系统的共同问题

虽然电力传动控制系统种类繁多,但根据图 1-1 所示的系统基本结构,可以提炼出研发或应用电力传动控制系统所需解决的共同问题:

(1) 电动机的选择 要使电力传动系统经济可靠地运行,正确选择驱动生产机械运动的电动机至关重要。应根据生产工艺和设备对驱动的要求,选择合适的电动机的种类及额定参数、绝缘等级等,然后通过分析电动机的发热和冷却、工作制、过载能力等进行电动机容量的校验。

(2) 变流技术研究 由于电动机的控制是通过改变其供电电源来实现的,比如:直流电动机的正反转控制需要改变其电枢电压或励磁电压的方向,而调速需要改变电枢电压或励磁电流的大小;交流电动机的调速需要改变其电源的电压和频率。因此,变流技术是实现电力传动系统的核心技术之一。

(3) 系统的状态检测方法 状态检测是构成系统反馈的关键,根据反馈控制原理,需要实时检测电力传动控制系统的各种状态,比如电压、电流、频率、相位、磁链、转矩、转速或位置等。因此,研究系统状态检测和观测方法是提高电力传动控制性能的重要课题。

(4) 控制策略和控制器的设计 任何自动控制系统的核心都是对控制方法的研究和控制策略的选择,电力传动控制系统也不例外。根据生产工艺要求,研发或选择适当的控制方法或策略是实现电力传动自动控制系统的主要途径。

1.2 电动机的主要类型与调速方法

自 1831 年法拉第发现电磁感应定律的 100 多年来,人们先后发明了各种类型的电动机,广泛应用于生产和生活的方方面面。目前,按电动机供电电源的不同,大致可以分为直流电动机和交流电动机两大类,其中交流电动机又可根据其工作方式分为同步电动机和异步电动机^[1]。

1.2.1 直流电动机及其调速方法

直流电动机的基本结构如图 1-2 所示,在定子励磁线圈通入直流电流,产生主极磁通,再由电刷向转子的电枢绕组提供直流电,利用电磁感应原理将在转子上产生电磁转矩,将电能转换成机械能输出。

在直流电动机中,由定子励磁线圈通电所产生的主磁场称为励磁磁场。按励磁绕组供电方式的不同,可把直流电动机分成他励直流电动机、并励直流电动机、串励直流电动机和复励直流电动机四种。采用不同的励磁方式,直流电动机的运行特性有很大差异。他励直流电动机具有机械特性硬、磁场与电枢可分别控制等优点,因此,直流调速系统通常采用他励直流电动机。本书也主要讨论由他励直流电动机组成的直流电力传动自动控制系统。

直流电动机转速和其他参量之间的稳态关系可用式(1-1)表达。

$$n = \frac{U_a - R_a I_a}{C_e \Phi} \quad (1-1)$$

式中 n ——转速 (r/min);

U_a ——电枢电压 (V);

I_a ——电枢电流 (A);

R_a ——电枢回路总电阻 (Ω);

Φ ——励磁磁通 (Wb);

C_e ——由电动机结构决定的电动势常数。

考虑到他励直流电动机电枢电流与电磁转矩 T_e 的关系 $T_e = C_T \Phi I_a$, 可以将其机械特性写成如下形式:

$$n = n_0 - \beta T_e \quad (1-2)$$

式中 n_0 ——理想空载转速, $n_0 = U_a / C_e \Phi$;

β ——机械特性的斜率, $\beta = R / C_e C_T \Phi^2$;

C_T ——电动机转矩系数, $C_T = 30 C_e / \pi$ 。

由式(1-1)有三种调节直流电动机转速的方法:

(1) 改变电枢回路电阻 R 该方法保持额定磁通和额定电枢电压 $U_a = U_{aN}$, 通过改变电枢回路的串接电阻 R_{as} 调速。这时, 电动机的理想空载转速 n_0 不变, 而机械特性的斜率 β 增大, 转速下降, 其人为机械特性如图 1-3a 所示。

(2) 减弱励磁磁通 Φ 为避免磁路饱和, 一般在额定转速以上采用弱磁调速。此时, 保持 $U_a = U_{aN}$ 和电枢电阻不变, 通过减小励磁电流 I_f 使主磁通 Φ 减弱, 由此使 n_0 升高, 而斜率 β 增大, 使特性曲线倾斜度增加, 电动机的转速较原来有所提高, 如图 1-3b 所示。

(3) 调节电枢供电电压 U_a 当电动机励磁电流为额定值, 使磁通为额定值 Φ_N 并保持不变, 电枢回路不外接电阻, 这时, 改变电动机的电枢电压 U_a , 可得到与固有机机械特性平行的人为机械特性。通过不断改变 U_a , 可得到一组平行曲线, 如图 1-3c 所示, 这组特性曲线的斜率均相同, 仅理想空载转速大小不同。

比较三种调速方法可知, 改变电阻只能有级调速; 减弱磁通虽然能够平滑调速, 但调速范围不大, 往往只是配合调压方案, 实现一定范围内的弱磁升速; 调节电枢供电电压的方式

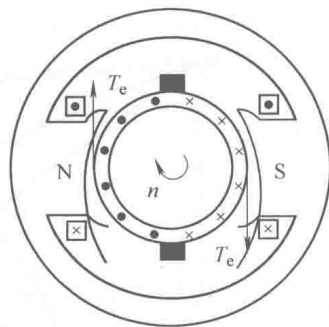


图 1-2 直流电动机的基本结构