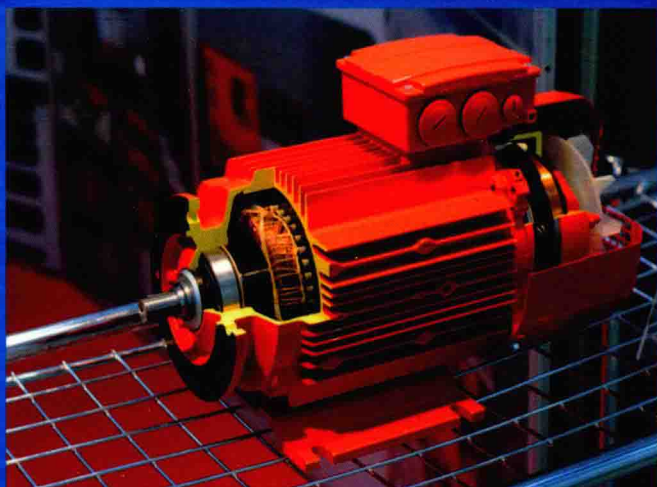


“十三五”普通高等教育规划教材

现代交流电机 控制技术

潘月斗 楚子林 主编



含电子教案

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”普通高等教育规划教材

现代交流电机控制技术

主 编 潘月斗 楚子林
主 审 李华德



机械工业出版社

本书全面、系统、深入地介绍了现代交流电机调速控制技术。从建立交流电机静态和动态数学模型入手,着重介绍了现代交流电机调压调频系统的基本组成、工作原理、控制策略以及交流调速系统的静、动态特性分析,还特别介绍了完善和提高交流电机控制性能的新理论、新技术、新方法。本书的重点是交流电机矢量控制技术、直接转矩控制技术、定子磁链轨迹控制技术、正弦波永磁同步电动机控制技术以及梯形波永磁同步电动机控制技术。

本书可作为电气工程、自动化、机械电子工程专业的研究生教材,也可作为本科生教材,还可以作为从事电气传动工作的技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代交流电机控制技术/潘月斗,楚子林主编. —北京:机械工业出版社,2017. 11

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-111-58787-3

I. ①现… II. ①潘… ②楚… III. ①交流电机-控制系统-高等学校-教材 IV. ①TM340.12

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第320067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:时静 责任编辑:时静

责任校对:张艳霞 责任印制:张博

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2018年1月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·21.75印张·521千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-58787-3

定价:59.00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

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

前 言

交流电机控制技术是一种通过控制电动机转速来满足各种生产工艺要求、改善工作效果的技术，它是信息、能源和机械的接口。早期的电动机调速是直流调速独霸天下，自 20 世纪 80 年代以来，随着电力电子技术、数字控制技术的发展和高性能交流调速方法的发明，交流调速技术已经得到了广泛的应用，现在已实现了以交流调速取代直流调速的目标。

本书全面、系统、深入地介绍了现代交流电机的控制理论与技术。从建立交流电机数学模型入手，着重介绍了现代交流电机调压调频系统的基本组成、工作原理、控制策略以及静、动态特性分析；介绍了完善和提高交流电机控制性能的新理论、新技术。本书的重点是交流电机矢量控制技术、直接转矩控制技术、定子磁链轨迹控制技术、正弦波永磁同步电动机控制技术以及梯形波永磁同步电动机控制技术。本书的特点如下：

1) 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。考虑到本书可作为研究生教材，因此对本书的理论内容进行了加深和充实。

2) 本书澄清了直接转矩控制的基本概念，拓展了直接转矩控制技术的内容。

3) 为提高和完善交流电机的控制性能，本书第 10 章比较全面地介绍了新型的先进控制技术 & 智能控制技术。

4) 磁链轨迹控制是近几年研究出来的一种新控制方法，主要解决由于使用高压开关器件后开关频率低带来的问题，它既不同于常规矢量控制，又不同于直接转矩控制，性能优于二者，在本书第 5 章中详细介绍了该方法。

5) 不同于其他教材，本书根据交流电机控制技术的新发展和实际应用的需要，把正弦波永磁同步电动机控制技术和梯形波永磁同步电动机控制技术作为重点内容做了全面而深入的介绍。

本书可作为电气工程、自动化、机械电子工程专业的研究生教材，也可作为本科生教材，还可以作为从事电气传动工作的技术人员的参考用书。

本书由潘月斗副教授、楚子林教授级高工担任主编，李华德教授担任主审。其中第 1 ~ 7 章、第 10 章由北京科技大学潘月斗副教授编写，第 8 ~ 9 章由天津电气传动研究院楚子林教授级高工编写。研究生王丞伟、陈涛、郭凯、张立中、王国防、赵家兴、李永亮参加了本书的编写、录入及校对工作。

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。

编 者

常用符号

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

U	变换器；调制器
UI	逆变器
UPE	电力电子变换器
UR	整流器
URP	相敏整流器
UCR	可控整流器
V	开关器件；晶闸管整流装置

VBT	晶体管
VD	二极管
VF	正组晶闸管整流装置
VFC	励磁电流可控整流装置
VR	反组晶闸管整流装置
VS	稳压管
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
a	线加速度；特征方程系数
B	磁感应强度
C	电容；输出被控变量
C_e	直流电动机在额定磁通下的电动势系数
C_m	直流电动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；脉冲数
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
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；力；扰动量
f	频率
G	重力
GD^2	飞轮惯量
GM	增益裕度
g	重力加速度
h	开环对数频率特性中频宽度
I, i	电流
I_a, i_a	电枢电流
i	减速比
I_d, i_d	整流电流
I_{dL}	负载电流
I_f, i_f	励磁电流

J	转动惯量
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
K_{bs}	自整角机放大系数
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_{rp}	相敏整流器放大系数
K_s	电力电子变换器放大系数
k	谐波次数；振荡次数
k_N	绕组系数
K_g	减速器放大系数
L	电感；自感；对数幅值
L_1	漏感
L_m	互感
M	电动机；调制度；闭环系统频率特性幅值
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
N	匝数；扰动量；载波比；额定值
n	转速； n 次谐波
n_0	理想空载转速；同步转速
n_s	同步转速
n_p	极对数
P, p	功率

$P\left(=\frac{d}{dt}\right)$	微分算子	U_d, u_d	整流电压; 直流平均电压
P_m	电磁功率	U_{d0}, u_{d0}	理想空载整流电压
P_s	转差功率	U_f, u_f	励磁电压
Q	无功功率	U_s	电源电压
R	电阻; 电阻器; 变阻器	U_x	变量 x 的反馈电压 (x 可用变量符号代替)
R_a	直流电机电枢电阻	U_x^*	变量 x 的给定电压 (x 可用变量符号代替)
R_L	电力电子变换器内阻	v	速度, 线速度
R_{rec}	整流装置内阻	$W(s)$	开环传递函数
S	视在功率	$W_{cl}(s)$	闭环传递函数
s	转差率; 静差率; 拉氏变换因子	$W_{obj}(s)$	控制对象传递函数
$s = \alpha + j\omega$	Laplace 变量	W_m	磁场储能
T	时间常数; 开关周期; 感应同步器绕组节距	X	电抗
t	时间	x	机械位移
T_c	脉宽调制载波的周期	Z	阻抗; 电抗器
T_e	电磁转矩	z	负载系数
T_{ei}	异步电动机电磁转矩	α	速度反馈系数; 可控整流器的触发延迟角
T_{ed}	直流电动机电磁转矩	β	电流反馈系数; 可控整流器的逆变角
T_{es}	同步电动机电磁转矩	γ	电压反馈系数; 相角裕度; (同步电动机反电动势换流时的) 换流提前角
T_l	电枢回路电磁时间常数	γ_0	空载换流提前角
T_L	负载转矩	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	机电时间常数	Δn	转速降落
t_m	最大动态降落时间	ΔU	偏差电压
T_o	滤波时间常数	$\Delta\theta$	失调角, 角差
t_{on}	开通时间	ξ	阻尼比
t_{off}	关断时间	η	效率
t_p	峰值时间	θ	电角位移; 可控整流器的导通角
t_r	上升时间	θ_m	机械角位移
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	λ	电机允许过载倍数
t_s	调节时间	μ	磁导率; 换流重叠角
t_v	恢复时间	ρ	占空比; 电位器的分压系数
U, u	电压, 电枢供电电压		
U_b	基极驱动电压		
U_{bs}	自整角机输出电压		
U_C	控制电压		

σ	漏磁系数; 超调量	ω	角速度, 角频率
τ	时间常数, 积分时间常数	ω_b	闭环特性通频带
Φ, ϕ	磁通	ω_c	开环特性截止频率
Φ_m, ϕ_m	每极气隙磁通量	ω_m	机械角速度
φ	相位角、阻抗角; 相频; 功率因数角	ω_n	二阶系统的自然振荡频率
Ψ, ψ	磁链	ω_s	同步角速度
Ω	机械角速度	ω_{sl}	转差角速度

三、常用下角标

add	附加值 (additional)	s	定子 (stator); 电源 (source)
av	平均值 (average)	s, ser	串联 (series)
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 (short)
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)
		syn	同步 (synchronous)
		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	晶闸管 (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)
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

前言

绪论	1
0.1 交流电动机控制技术的发展	1
0.1.1 直流电动机控制技术存在的问题	1
0.1.2 交流电动机控制技术的发展概况	2
0.1.3 交流电动机控制技术的发展动向	6
0.2 交流电动机控制系统的类型	9
0.2.1 同步电动机控制系统的基本类型	10
0.2.2 异步电动机控制系统的基本类型	11
0.3 交流电动机的控制方法和应用领域	11
0.3.1 交流电动机的控制方法	11
0.3.2 交流电动机控制技术的应用领域	12
第1章 基于稳态数学模型的异步电动机调压调速控制技术	13
1.1 异步电动机晶闸管调压调速控制原理	13
1.2 异步电动机调压调速的机械特性	14
1.3 异步电动机调压调速的功率损耗	15
1.4 异步电动机 PWM 调压调速控制系统	16
1.5 闭环控制的异步电动机调压调速控制系统分析	18
1.5.1 闭环控制的异步电动机调压调速控制系统静态分析	18
1.5.2 闭环控制的异步电动机调压调速控制系统动态分析	19
第2章 基于稳态数学模型的异步电动机变压变频调速控制技术	22
2.1 基于异步电动机稳态数学模型的变压变频调速控制方式	22
2.1.1 电压-频率协调控制方式	22
2.1.2 转差频率控制方式	26
2.2 电力电子变频调速装置及其电源特性	29
2.3 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控制系统	32
2.4 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控制系统	35
2.5 异步电动机转速闭环转差频率控制的变压变频调速控制系统	37
2.5.1 电流源型转差频率控制的异步电动机变压变频调速控制系统	37
2.5.2 电压源型转差频率控制的异步电动机变压变频调速控制系统	38
第3章 基于动态数学模型的异步电动机矢量控制技术	40
3.1 矢量控制的基本概念	40
3.1.1 直流电动机和异步电动机的电磁转矩	40
3.1.2 矢量控制的基本思想	42

3.2	异步电动机在不同坐标系上的数学模型	44
3.2.1	交流电动机的坐标系与空间矢量的概念	44
3.2.2	异步电动机在静止坐标系上的数学模型	46
3.2.3	坐标变换及变换矩阵	51
3.2.4	异步电动机在两相静止坐标系上的数学模型	61
3.2.5	异步电动机在任意两相旋转坐标系上的数学模型	66
3.2.6	异步电动机在两相同步旋转坐标系上的数学模型	68
3.2.7	异步电动机在两相坐标系上的状态方程	68
3.3	磁场定向和矢量控制的基本控制结构	70
3.3.1	转子磁场定向的异步电动机矢量控制系统	71
3.3.2	异步电动机的其他两种磁场定向方法	73
3.4	转子磁链观测器	76
3.4.1	计算转子磁链的电流模型法	76
3.4.2	计算转子磁链的电压模型法	78
3.5	异步电动机矢量控制系统	78
3.5.1	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	79
3.5.2	转差型异步电动机间接矢量控制系统	81
3.5.3	无速度传感器矢量控制系统	83
3.6	具有双 PWM 变换器的矢量控制系统	86
3.7	抗负载扰动调速控制系统	87
3.8	交流电动机矢量控制系统仿真研究方法	89
第 4 章	异步电动机直接转矩控制技术	93
4.1	异步电动机直接转矩控制原理	93
4.1.1	异步电动机定子轴系的数学模型	93
4.1.2	异步电动机定子磁链和电磁转矩控制原理	95
4.2	异步电动机磁链直接自控制直接转矩控制 (DSC) 系统	102
4.2.1	异步电动机直接自控制直接转矩控制 (DSC) 系统的基本结构	102
4.2.2	在低速范围内 DSC 系统的转矩控制与调节方法	110
4.2.3	在弱磁范围内 DSC 系统的转矩控制及恒功率调节	116
4.3	异步电动机磁链闭环直接转矩控制 (DTC) 系统	120
4.4	无速度传感器直接转矩控制系统	123
4.5	直接转矩控制仿真研究	128
第 5 章	异步电动机定子磁链轨迹控制技术	133
5.1	异步电动机定子磁链轨迹控制方法提出的背景	133
5.2	同步对称优化 PWM 的应用	136
5.3	定子磁链轨迹控制原理	137
5.4	SFTC 的闭环调速系统	141
5.5	SFTC 与常规矢量控制及直接转矩控制的比较	146
第 6 章	绕线转子异步电动机的串级调速和双馈调速控制技术	147

6.1	串级调速和双馈调速的基本原理	147
6.1.1	绕线转子异步电动机双馈调速的基本原理	147
6.1.2	绕线转子异步电动机串级调速的基本原理	155
6.2	双馈调速系统和串级调速系统的稳态特性	157
6.2.1	双馈调速系统的稳态特性	157
6.2.2	串级调速系统的稳态特性	162
6.3	双馈调速和串级调速的闭环控制系统	178
6.3.1	双馈调速的简单闭环控制系统	178
6.3.2	串级调速的闭环控制系统	179
6.4	绕线转子异步电动机双馈矢量控制系统	183
6.4.1	绕线转子异步电动机双馈调速系统	183
6.4.2	绕线转子异步电动机双馈矢量控制系统	184
第7章	普通同步电动机变压变频调速控制技术	189
7.1	同步电动机变压变频调速的特点及基本类型	189
7.2	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	191
7.2.1	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机理	191
7.2.2	交-交变频同步电动机调速系统主电路晶闸管的换流机理	194
7.3	他控变频同步电动机调速系统	197
7.3.1	转速开环恒压频比控制的同步电动机调速系统	197
7.3.2	交-直-交型他控变频同步电动机调速系统	197
7.4	自控式变频同步电动机(无换向器电动机)的调速系统	198
7.4.1	自控变频同步电动机(无换向器电动机)的调速原理及特性	199
7.4.2	自控变频同步电动机调速系统	205
7.5	按气隙磁场定向的普通三相同步电动机矢量控制系统	209
7.5.1	普通三相同步电动机的多变量数学模型	209
7.5.2	按气隙磁场定向的普通三相同步电动机交-直-交变频矢量控制系统	211
第8章	正弦波永磁同步电动机(永磁同步电动机)的控制技术	216
8.1	永磁同步电动机的转子结构及物理模型	216
8.1.1	永磁同步电动机的转子结构	216
8.1.2	永磁同步电动机的物理模型	217
8.2	永磁同步电动机的数学模型	218
8.2.1	面装式三相永磁同步电动机的数学模型	218
8.2.2	插入式三相永磁同步电动机的数学模型	222
8.3	永磁同步电动机矢量控制系统	227
8.3.1	面装式三相永磁同步电动机矢量控制系统	227
8.3.2	插入式三相永磁同步电动机矢量控制系统	233
8.4	永磁同步电动机的弱磁控制及定子电流的最优控制	235
8.4.1	弱磁控制	235
8.4.2	定子电流的最优控制	238

8.5	谐波转矩及其抑制方法	241
8.5.1	谐波转矩	241
8.5.2	谐波转矩的削弱方法	245
8.6	三相永磁同步电动机直接转矩控制技术	247
8.6.1	转矩控制原理	247
8.6.2	滞环比较控制及其控制系统	248
8.6.3	磁链和转矩估计	250
8.6.4	转矩控制及最优控制	251
8.7	永磁同步电动机转子位置检测	252
第9章	梯形波永磁同步电动机(无刷直流电动机)的控制技术	255
9.1	无刷直流电动机的基本组成	255
9.1.1	永磁梯形波同步电动机——无刷直流电动机本体	255
9.1.2	电力电子逆变器及其工作方式	257
9.1.3	转子位置传感器	259
9.2	无刷直流电动机的工作原理	263
9.2.1	基本工作原理	263
9.2.2	无刷直流电动机的换向原理	265
9.3	无刷直流电动机与永磁同步电动机的比较	269
9.3.1	无刷直流电动机与永磁同步电动机的转矩产生原理比较	270
9.3.2	无刷直流电动机与永磁同步电动机的结构和性能比较	272
9.3.3	结论	276
9.4	无刷直流电动机的运行控制特性	276
9.4.1	无刷直流电动机的正反转运行	276
9.4.2	调速和起动控制	277
9.4.3	制动运行的控制	278
9.5	无刷直流电动机调速系统	281
9.5.1	梯形波永磁同步电动机的动态数学模型	281
9.5.2	梯形波永磁同步电动机调速系统	283
9.5.3	双重绕组无刷直流电动机及其控制	284
9.5.4	双通道的无刷直流电动机调速系统	287
9.5.5	双通道的无刷直流电动机调速系统容错控制	289
9.6	无刷直流电动机无位置传感器控制	291
9.6.1	反电动势检测法	292
9.6.2	3次谐波反电动势检测法	295
9.6.3	定子电感法	298
9.6.4	$G(\theta)$ 函数法	298
9.6.5	扩展卡尔曼滤波法	299
9.6.6	状态观测器法	300
9.6.7	利用微控制器和数字信号处理器的无传感器控制	300

第 10 章 交流电动机的先进控制技术	304
10.1 交流电动机变压变频系统的新型控制策略综述	304
10.2 交流电动机的逆系统控制方法	308
10.2.1 逆系统控制方法的理论基础	309
10.2.2 交流电动机动态模型的可逆性及其逆系统	310
10.2.3 闭环控制器的设计	312
10.3 内模控制技术在异步电动机调速领域内的应用	314
10.3.1 内模控制的基本原理和特点	314
10.3.2 定子电流的内模解耦控制	316
10.3.3 二自由度内模控制策略	317
10.3.4 异步电动机调速系统的二自由度内模控制方法	319
10.4 具有参数自校正功能的转差型矢量控制系统	321
10.5 智能控制方法在异步电动机调速系统中的应用	323
10.5.1 异步电动机的神经网络模型参考自适应控制方法	323
10.5.2 异步电动机模糊控制方法	325
10.5.3 异步电动机的自适应模糊神经网络控制方法	330
参考文献	333

绪 论

0.1 交流电动机控制技术的发展

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。以电动机为代表的动力机械，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。

在用电系统中，电动机作为主要的动力设备而广泛地应用于工农业生产、交通运输、空间技术、国防及社会生活等方面。电动机负荷约占总发电量的 70%，为用电量最多的电气设备。

根据采用的电流制式不同，电动机分为直流电动机和交流电动机两大类，其中交流电动机拥有量最多，提供给工业生产的电量多半是通过交流电动机加以利用的。经过一百多年的发展，至今为止人们已经制造出了型式多样、用途各异、多种容量、品种齐全的交流电动机。交流电动机分为同步电动机和异步（感应）电动机两大类：电动机的转子转速与定子电流的频率保持严格不变的关系，即是同步电动机；反之，若不保持这种关系，即是异步电动机。20 世纪 80 年代以来，开关磁阻电动机、永磁无刷直流电动机（梯形波永磁同步电动机）、正弦波永磁同步电动机等新型交流电动机得到了很快的发展和运用。根据统计，交流电动机用电量占电动机总用电量的 85% 左右，可见交流电动机应用的广泛性及其在国民经济中的重要地位。

在实际应用中，一是要使电动机具有较高的机电能量转换效率；二是要根据生产机械的工艺要求控制和调节电动机的旋转速度。电动机的调速性能如何，对提高产品质量、提高劳动生产率和节省电能有着直接的决定性影响。以直流电动机作为控制对象的电力拖动自动控制系统称为直流调速系统；以交流电动机作为控制对象的电力拖动自动控制系统称为交流调速系统。根据交流电动机的分类，相应地有同步电动机调速系统和异步电动机调速系统。

0.1.1 直流电动机控制技术存在的问题

20 世纪 60 年代以前是以旋转变流机组供电的直流调速系统为主（见图 0-1），还有

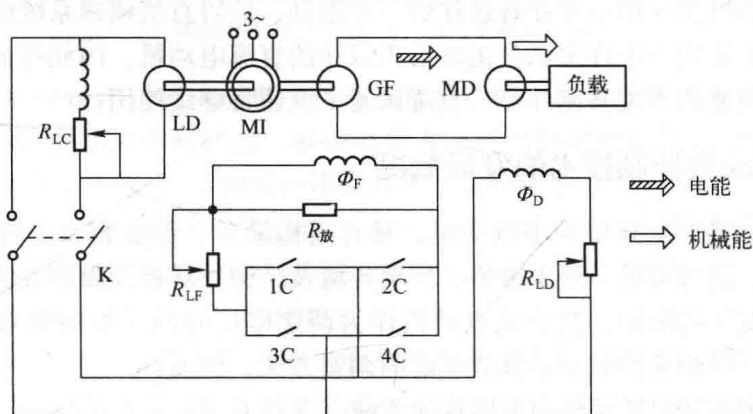


图 0-1 直流发电机 - 直流电动机系统

一些是静止式水银整流器供电的直流调速系统（见图 0-2）。1957 年美国通用电气公司的 A. R. 约克制成了世界上第一只晶闸管（SCR），又称为可控硅整流元件（简称可控硅），这标志着电力电子时代的开始。20 世纪 60 年代以后以晶闸管组成的直流供电系统逐步取代了直流机组和水银整流器。20 世纪 80 年代末期全数字控制的直流调速系统迅速取代了模拟控制的直流调速系统。

由于直流电动机的转速容易控制和调节，在额定转速以下，保持励磁电流恒定，可用改变电枢电压的方法实现恒转矩调速；在额定转速以上，保持电枢电压恒定，可用改变励磁的方法实现恒功率调速。近代采用晶闸管供电的转速、电流双闭环直流调速系统可获得优良的静、动态调速特性。因此，长期以来（20 世纪 80 年代中期以前）在变速传动领域中，直流调速一直占据主导地位。

然而，由于直流电动机本身存在机械式换向器和电刷这一固有的结构性缺陷，这给直流调速系统的发展带来了一系列限制，具体表现在以下几方面：

1) 机械式换向器表面线速度及换向电压、电流有一极限容许值，这就限制了电动机的转速和功率（其极限容量与转速乘积被限制在 $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r}/\text{min}$ ）。如果要超过极限容许值，则会大大增加电动机制造的难度和成本以及调速系统的复杂性。因此，在工业生产中，对一些要求特高转速、特大功率的场合则根本无法采用直流调速方案。

2) 为了使机械式换向器能够可靠工作，往往采用增大电枢和换向器直径的方法，这使得电动机体积增大，导致转动惯量增大，对于要求快速响应的生产工艺，采用直流调速方案就难以实现。

3) 机械式换向器必须经常检查和维修，电刷必须定期更换。这就表明了直流调速系统维护工作量大，维修费用高，同时停机检修和更换电刷也直接影响了正常生产。

4) 在一些易燃、易爆的生产场合或一些多粉尘、多腐蚀性气体的生产场合不能或不宜使用直流调速系统。

由于直流电动机在应用中存在着这样的一些限制，使得直流调速系统的发展也相应受到限制。但是目前工业生产中许多场合仍然沿用以往的直流电动机，因此在今后相当长的一个时期内会是直流调速和交流调速并存，直流调速系统还将继续使用。

0.1.2 交流电动机控制技术的发展概况

交流电动机，特别是笼型异步电动机，具有结构简单、制造容易、价格便宜、坚固耐用、转动惯量小、运行可靠、很少维修、使用环境及结构发展不受限制等优点。但是，长期以来由于受科技发展的限制，把交流电动机作为调速电机时的一些问题未能得到较好的解决，在早期只有一些调速性能差、低效耗能的调速方法，例如：

绕线转子异步电动机转子外串电阻调速方法（见图 0-3）。

笼型异步电动机定子调压调速方法（利用自耦变压器变压调速；利用饱和电抗器变压

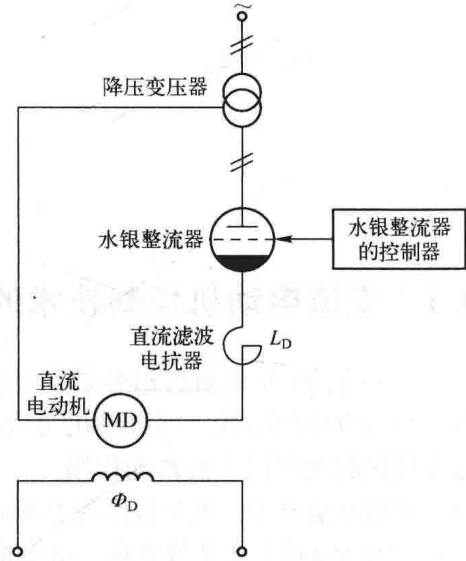


图 0-2 离子电力拖动的主回路

调速)，如图0-4所示。还有变极对数调速方法（见图0-5）及后来的电磁（转差离合器）调速方法（见图0-6）等。

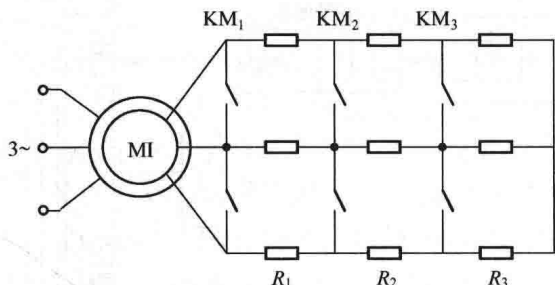


图0-3 绕线转子异步电动机转子外串电阻调速原理图

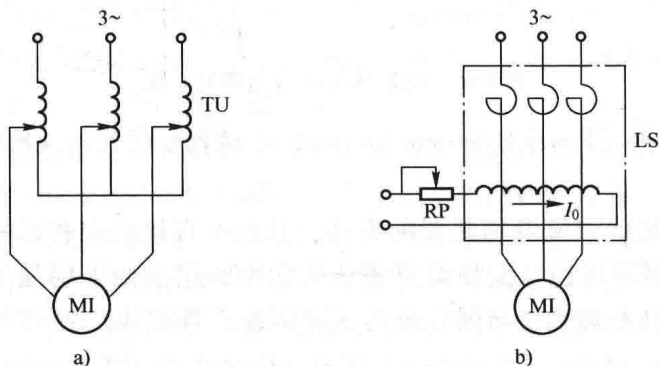


图0-4 异步电动机变压调速原理图

a) 利用自耦变压器变压调速 b) 利用饱和电抗器变压调速
TU—自耦变压器 LS—饱和电抗器

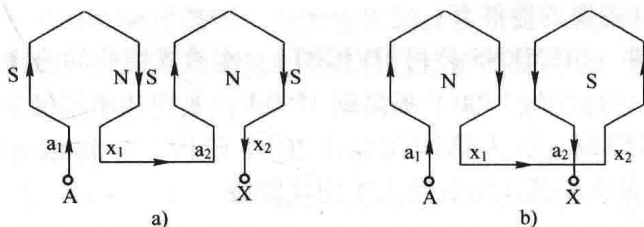


图0-5 变极对数调速方法原理图

a) 顺向串联 $2n_p = 4$ 极 b) 反向串联 $2n_p = 2$ 极

图0-5a为一台4极电动机A相两个线圈连接示意图，每个线圈代表半个绕组。如果两个线圈处于首尾相连的顺向串联状态，根据电流方向可以确定出磁场的极性，显然为4极，如果将两个线圈改为图0-5b所示的反向串联状态，会使极数减半。

在图0-6中，当励磁绕组通以直流电，电枢为电动机所拖动以恒速定向旋转时，在电枢中感应产生涡流，涡流与磁极的磁场作用产生电磁转矩，使磁极跟着电枢同方向旋转。改变励磁电流的大小就可以实现对负载的调速。

20世纪60年代以后，由于生产发展的需要和（由能源危机引起的）节省电能的迫切要求，促使世界各国开始重视交流调速技术的研究与开发。尤其是20世纪80年代以来，科学技术的迅速发展，为交流调速的发展创造了极为有利的技术条件和物质基础。从此，以变频