



21 世纪高等院校电气信息类系列教材

Electrical Information
Science and Technology

现代交流调速系统

张勇军 潘月斗 李华德 编著



附赠电子教案

[http:// www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”国家科技支撑计划课题(2012 BAF 09B02)资助项目

“十二五”电力电子及电力传动新技术系列图书

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

现代交流调速系统

张勇军 潘月斗 李华德 编著



机械工业出版社

本书结合工程实际,全面、系统、深入地阐述了现代交流电动机调速理论和控制技术,重点介绍了恒压频比控制、矢量变换控制、直接转矩控制、磁链轨迹控制。考虑到实际应用,本书介绍了异步电动机调压调速系统和绕线转子异步电动机双馈及串级调速系统。本书最后一章介绍了交流调速的先进控制策略。

本书可作为高等院校相关专业的科研、教学用书,也可作为科研院所、厂矿企业中从事电气传动的工程技术人员的参考用书。

本书配套授课电子课件,需要的老师可登录 www.cmpedu.com 免费注册、审核通过后下载,或联系编辑索取(QQ: 1157122010, 电话: 010-88379753)。

图书在版编目(CIP)数据

现代交流调速系统/张勇军,潘月斗,李华德编著. —北京:机械工业出版社,2014.4

21世纪高等院校电气信息类系列教材

ISBN 978-7-111-46512-6

I. ①现… II. ①张…②潘…③李… III. ①交流电机—调速—高等学校—教材 IV. ①TM340.12

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第082819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 王荣

版式设计:霍永明 责任校对:陈立辉 肖琳

责任印制:李洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2014年7月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17.25印张·409千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-46512-6

定价:39.00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

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着科学技术的不断进步，整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的，期间，与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业教材。

本套教材涵盖多层面专业课程，定位准确，注重理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上力求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前 言

现代交流调速技术是 20 世纪后期的重大技术进步之一，其发展速度之快、应用面之广都是前所未有的。应用实践表明，采用现代交流调速技术极大地提高了传动系统的运行质量，带来了巨大的经济和社会效益。进入 21 世纪，交流调速技术继续向纵深方向发展，仍是科学技术发展中的热点课题。本书是为适应交流调速新发展的需要而编著的。

现代交流调速技术是电机学、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和交叉应用。但同其他任何自动控制系统一样，现代交流调速技术的理论基础也是自动控制理论，也就是说交流调速控制系统是根据某种控制方式、控制方法建立起来的。因此本书的编写立足于对控制系统的分析和设计，即全面、系统、深入地讨论现代交流调速系统的控制原理、控制结构及设计方法。但是现代交流调速系统在控制理论和控制方法上与其他自动控制系统相比有其自身特殊性。

本书题材来源于实际，具有前沿性和先进性，其中融入了笔者的许多研究成果和研究内容。本书的编写遵循了深入浅出，循序渐进及理论联系实际的原则。书中所涉及的公式、方程式及数学表达式都进行了严格的推导证明，力争准确无误。为了防止体系上的混乱和篇幅的膨胀，在本书编写过程中以控制理论、控制方法为主线贯穿始终。与本书有关的其他学科知识，已有专门著作或教材论述过的内容，本书不再列入。

本书的重点内容是现代交流电动机变频调速系统，即以第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 7 章作为本书的重点。考虑到工业生产中不少场合使用绕线式异步电动机，为此在第 6 章介绍了双馈及串级调速系统。由于笼型异步电动机电力电子调压调速系统还有应用，特别是在软起动方面的应用很普遍，为此本书第 1 章介绍了异步电动机调压调速系统。

本书第 1~3 章由北京科技大学自动化学院博士、副教授潘月斗编写。第 4~8 章由北京科技大学高效轧制国家工程研究中心博士、副研究员张勇军编写。本书绪论由北京科技大学李华德教授编写，并负责全书的统一规划、审查、删改和补充。北京科技大学硕士研究生陈泽平、郭凯、郭映维、陈铁柱、张小庆，博士研究生张永康、肖雄参加了本书的整理、校对、录入及编辑工作。

本书可作为高等院校相关专业的科研、教学用书，也可作为科研院所、厂矿企业中从事电气传动的工程技术人员的参考用书。

由于本书作者水平有限，在编写过程中难免出现缺点、错误及不当之处，敬请广大读者批评指正，并给予谅解。

编 者

g	气隙 (gap); 栅极 (gate)	max	最大值 (maximum)
R	合成 (resultant)	min	最小值 (minimum)
r	转子 (rotator); 上升 (rise); 反向 (reverse)	N	额定值, 标称值 (nominal)
r, ref	参考 (reference)	obj	控制对象 (object)
rec	整流器 (rectifier)	off	断开 (off)
s	定子 (stator); 电源 (source)	on	闭合 (on)
s, ser	串联 (series)	op	开环 (open loop)
in	输入; 入口 (input)	p	脉动 (pulse)
i, inv	逆变器 (inverter)	sam	采样 (sampling)
k	短路 (short)	st	起动 (starting)
L	负载 (load)	syn	同步 (synchronous)
l	线值 (line); 漏磁 (leakage)	t	力矩 (torque); 触发 (trigger); 三角波 (triangular wave)
Lim	极限, 限制 (limit)	∞	稳态值, 无穷大处 (infinity)
m	极限值, 峰值; 励磁 (magnetizing)	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)

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

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 晶体管; 晶闸管

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 直流电动机电动势的结构常数
 K_m 直流电动机转矩的结构常数
 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_l 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
 P_m 电磁功率
 P_s 转差功率
 Q 无功功率
 R 电阻; 电阻器; 变阻器
 R_a 直流电动机电枢电阻
 R_L 电力电子变换器内阻
 R_{rec} 整流装置内阻
 S 视在功率
 s 转差率; 静差率; 拉普拉斯变换因子
 $s = \alpha + j\omega$ 拉普拉斯变量
 T 时间常数; 开关周期; 感应同步器绕组节距
 t 时间
 T_c 脉宽调制载波的周期
 T_e 电磁转矩
 T_{ei} 异步电动机电磁转矩
 T_{ed} 直流电动机电磁转矩
 T_{es} 同步电动机电磁转矩
 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_m	最大动态降落时间	α	速度反馈系数; 可控整流器的控制角
T_o	滤波时间常数	β	电流反馈系数; 可控整流器的逆变角
t_{on}	开通时间	γ	电压反馈系数; 相位裕度; (同步电动机反电动势换流时的) 换流提前角
t_{off}	关断时间		
t_p	峰值时间	γ_0	空载换流提前角
t_r	上升时间	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_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	Δn	转速降落
t_s	调节时间	ΔU	偏差电压
t_w	恢复时间	$\Delta \theta$	失调角, 角差
U, u	电压, 电枢供电电压	ζ	阻尼比
U_b	基极驱动电压	η	效率
U_{bs}	自整角机输出电压	θ	电角位移; 可控整流器的导通角
U_C	控制电压	θ_m	机械角位移
U_d, u_d	整流电压; 直流平均电压	λ	电动机允许过载倍数
U_{d0}, u_{d0}	理想空载整流电压	μ	磁导率; 换流重叠角
U_f, u_f	励磁电压	ρ	占空比; 电位器的分压系数
U_s	电源电压	σ	漏磁系数; 超调量
U_x	变量 x 的反馈电压 (x 可用变量符号代替)	τ	时间常数, 积分时间常数
U_x^*	变量 x 的给定电压 (x 可用变量符号代替)	Φ, ϕ	磁通
v	速度; 线速度	Φ_m, ϕ_m	每极气隙磁通
$W(s)$	开环传递函数	φ	相位角、阻抗角; 相频; 功率因数角
$W_{cl}(s)$	闭环传递函数	Ψ, ψ	磁链
$W_{obj}(s)$	控制对象传递函数	Ω	机械角速度
W_m	磁场储能	ω	角速度, 角频率
X	电抗	ω_b	闭环特性通频带
x	机械位移	ω_c	开环特性截止频率
Z	阻抗; 电抗器	ω_m	机械角速度
z	负载系数	ω_n	二阶系统的自然振荡频率
		ω_s	同步角速度
		ω_{sl}	转差角速度

三、常用下角标

		trol)	
add	附加值 (additional)	cl	闭环 (closed loop)
av	平均值 (average)	com	比较 (compare); 复合 (combination)
b	偏压 (bias); 基准 (basic); 镇流 (ballast)	cr	临界 (critical)
b, bal	平衡 (balance)	d	延时; 延滞 (delay); 驱动 (drive)
bl	堵转封锁 (block)	er	偏差 (error)
br	击穿 (break down)	ex	输出, 出口 (exit)
c	环流 (circulating current); 控制 (con	f	正向 (forward); 磁场 (field); 反馈 (feedback)

目 录

出版说明

前言

常用符号表

绪论 1

0.1 交流调速技术的发展概况与发展
趋势 1

0.1.1 直流调速技术存在的问题 1

0.1.2 交流调速技术的发展概况 2

0.1.3 现代交流调速技术的发展趋势 5

0.2 现代交流调速系统的类型 8

0.2.1 同步电动机调速系统的基本
类型 9

0.2.2 异步电动机调速系统的基本
类型 10

0.3 现代交流调速系统的调速方法和
应用领域 10

0.3.1 现代交流调速系统的调速方法 10

0.3.2 交流调速系统的应用领域 11

第1章 异步电动机调压调速系统 12

1.1 异步电动机晶闸管调压调速系统
工作原理 12

1.2 异步电动机调压调速时的机械特性 13

1.3 异步电动机调压调速的功率损耗 14

1.4 异步电动机 PWM 调压调速系统 15

1.5 闭环控制的异步电动机调压调速
系统 16

1.5.1 闭环控制的异步电动机调压调速
系统静态分析 17

1.5.2 闭环控制的异步电动机调压调速
系统动态分析 18

1.6 异步电动机晶闸管软起动器 20

第2章 基于稳态数学模型的异步电动机

变压变频调速系统 22

2.1 基于异步电动机稳态数学模型的
变压变频调速系统控制方式 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 28

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
变压变频调速系统 36

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系统的构成
及工作原理 36

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系统 38

第3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 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 异步电动机在二相静止坐标系上的数学模型	60	4.3.3 在弱磁范围内 DSC 系统的转矩控制及恒功率调节	109
3.2.5 异步电动机在任意二相旋转坐标系上的数学模型	66	4.4 异步电动机 DTC 系统	113
3.2.6 异步电动机在二相同步旋转坐标系上的数学模型	67	4.5 无速度传感器直接转矩控制系统	116
3.2.7 异步电动机在二相坐标系上的状态方程	68	4.6 直接转矩控制系统存在的问题及改进方法	121
3.3 磁场定向和矢量控制的基本控制结构	70	4.6.1 直接转矩控制系统存在的主要问题	121
3.3.1 转子磁场定向的异步电动机矢量控制系统	70	4.6.2 改善和提高直接转矩控制系统性能的方法	122
3.3.2 异步电动机的其他两种磁场定向方法	73	4.7 直接转矩控制的仿真研究	129
3.4 转子磁链观测器	75	第 5 章 异步电动机定子磁链轨迹控制	133
3.4.1 计算转子磁链的电流模型法	75	5.1 异步电动机定子磁链轨迹控制方法的提出背景	133
3.4.2 计算转子磁链的电压模型法	77	5.2 同步对称优化 PWM 的应用	135
3.5 异步电动机矢量控制系统	78	5.3 定子磁链轨迹控制	137
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	78	5.4 SFTC 的闭环调速系统	140
3.5.2 转差型异步电动机间接矢量控制系统	80	5.5 SFTC 与常规矢量控制及直接转矩控制的比较	144
3.5.3 无速度传感器矢量控制系统	82	第 6 章 绕组式异步电动机的串级调速和双馈调速系统	146
3.6 具有双 PWM 变换器的矢量控制系统	85	6.1 串级调速和双馈调速的基本原理	146
3.7 抗负载扰动调速系统	86	6.1.1 绕组式异步电动机双馈调速的基本原理	146
第 4 章 异步电动机直接转矩控制系统	88	6.1.2 绕组式异步电动机串级调速的基本原理	153
4.1 概述	88	6.2 双馈调速系统和串级调速系统的稳态特性	155
4.2 异步电动机直接转矩控制原理	89	6.2.1 双馈调速系统的稳态特性	155
4.2.1 通过异步电动机定子数学模型来了解直接转矩控制的基本思想	89	6.2.2 串级调速系统的稳态特性	160
4.2.2 异步电动机定子磁链和电磁转矩控制原理	90	6.3 双馈调速和串级调速的闭环控制系统	174
4.3 异步电动机 DSC 系统	96	6.3.1 双馈调速的简单闭环控制系统	175
4.3.1 异步电动机 DSC 系统的基本组成	96	6.3.2 串级调速的闭环控制系统	176
4.3.2 在低速范围内 DSC 系统的转矩控制与调节方法	104	6.4 双馈调速系统和串级调速系统的其他形式	179
		6.4.1 双馈调速系统的其他形式	179

6.4.2 超同步串级调速系统	181	电动机矢量控制系统	213
6.5 绕线式异步电动机串级调速系统和 双馈调速系统的设计	184	7.5.1 普通三相同步电动机的多变量 数学模型	213
6.5.1 电动机及变流器的容量选择	184	7.5.2 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	215
6.5.2 主电路设计	185	7.6 正弦波永磁同步电动机变压变频调速 系统	219
6.5.3 起动装置的选择	187	7.7 梯形波永磁同步电动机变压变频调速 系统	228
6.6 绕线式异步电动机双馈调速系统和双馈 矢量控制系统	189	第8章 交流调速系统的控制策略	231
6.6.1 绕线式异步电动机双馈调速 系统	189	8.1 交流电动机变压变频调速系统 控制策略综述	231
6.6.2 绕线式异步电动机双馈矢量控制 系统	190	8.2 交流电动机的逆系统控制方法	235
6.6.3 双馈电动机矢量控制的其他 方案	194	8.2.1 逆系统控制方法的理论基础	236
第7章 同步电动机变压变频调速 系统	195	8.2.2 交流电动机动态模型的可逆性 及其逆系统	237
7.1 同步电动机变压变频调速的特点及 基本类型	195	8.2.3 闭环控制器的设计	239
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	197	8.3 内模控制方法在异步电动机调速中的 应用	240
7.2.1 同步电动机交-直-交型变压变频 调速系统的逆变器中晶闸管换流 关断的机理及其方法	197	8.3.1 内模控制的基本原理和特点	241
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	200	8.3.2 定子电流的内模解耦控制	242
7.3 他控变频同步电动机调速系统	202	8.3.3 二自由度内模控制策略	244
7.3.1 转速开环恒压频比控制的同步 电动机调速系统	202	8.3.4 异步电动机调速系统的二自由度 内模控制方法	245
7.3.2 交-直-交型他控变频同步电动机 调速系统	202	8.4 具有参数自校正功能的转差型矢量 控制系统	248
7.4 自控式变频同步电动机(无换向器 电动机)调速系统	203	8.5 智能控制方法在异步电动机调速系统 中的应用	250
7.4.1 自控变频同步电动机(无换向器 电动机)调速原理及特性	203	8.5.1 异步电动机的神经网络模型参考 自适应控制方法	250
7.4.2 自控变频同步电动机调速系统	210	8.5.2 异步电动机调速系统的模糊控制 方法	252
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	213	8.5.3 异步电动机的自适应模糊神经网络 控制方法	256
		参考文献	260

绪 论

0.1 交流调速技术的发展概况与发展趋势

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。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，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应。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。

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，相应的电动机调速系统有同步电动机调速系统和异步电动机调速系统。

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。

0.1.1 直流调速技术存在的问题

20 世纪 60 年代以前主要是以旋转变流机组供电的直流调速系统（见图 0-1），还有一些是静止式水银整流器供电的直流调速系统如图 0-2 所示。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），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变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

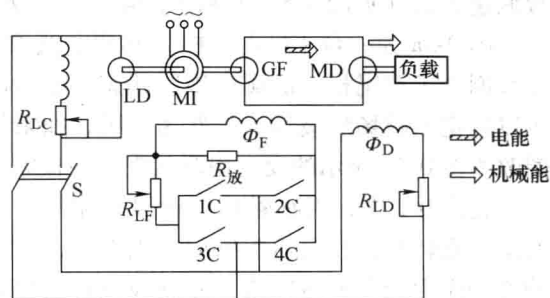


图 0-1 直流发电机-直流电动机系统

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，给直流调速系统的发展带来了一系列限制。

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 $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r/min}$ ）。如果要超过极限容许值，就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，一些要求特高转速、特大功率的应用场合，则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，往往需增大电枢和换向器直径，使得电动机体积增大，导致转动惯量大，对于要求快速响应的生产工艺，采用直流调速方案难以实现。

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的维护工作量大，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、易爆的生产场合以及一些多粉尘、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上述限制，使得直流调速系统的发展也受到限制。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 交流调速技术的发展概况

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动机的困难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，如绕线式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有利用自耦变压器的变压调速，利用饱和电抗器的变压调速和利用晶闸管交流调压器调压调速，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 0-5a 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，使极数减半。

在图 0-1 中，当励磁绕组通以直流电，电枢以恒速定向旋转时，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节

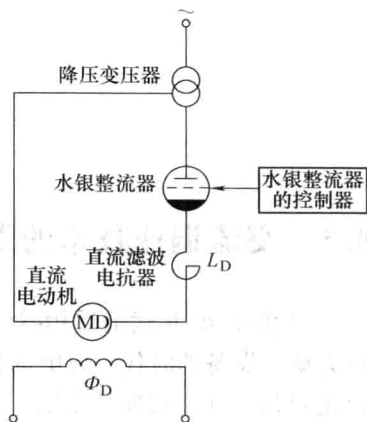


图 0-2 离子电力拖动的主回路

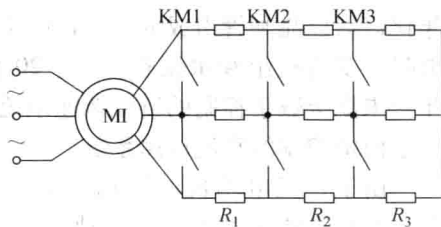


图 0-3 绕线式异步电动机转子外串电阻调速原理图

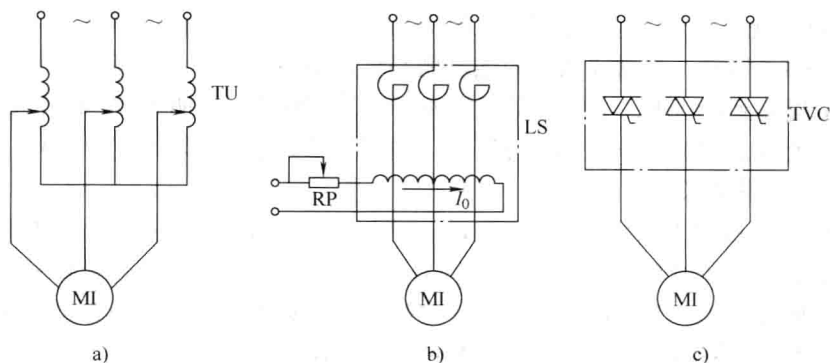


图 0-4 异步电动机变压调速系统

a) 利用自耦变压器变压调速 b) 利用饱和电抗器变压调速 c) 利用晶闸管交流调压调速
 TU—自耦变压器 LS—饱和电抗器 TVC—双向晶闸管交流调压器

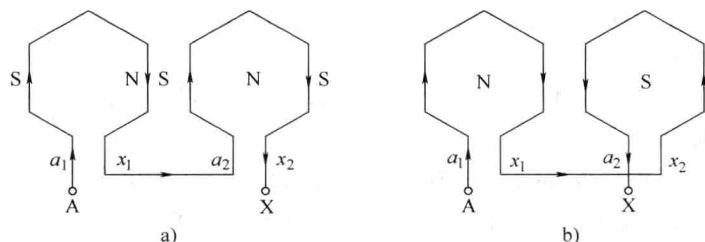


图 0-5 变极对数调速方法原理图

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

省电能的迫切要求，促使世界各国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，由于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，以变频调速为主要内容的现代交流调速系统沿着下述四个方面迅速发展。

(1) 电力电子器件 (Power Electronic Device) 的蓬勃发展和迅速换代推动了交流调速的迅速发展

电力电子器件是现代交流调速装置

的支柱，其发展直接决定和影响交流调速技术的发展。20 世纪 80 年代中期以前，变频调速装置的功率电路主要采用晶闸管器件。装置的效率、可靠性、成本、体积均无法与同容量的直流调速装置相比。80 年代中期以后采用第二代电力电子器件 [GTR (Giant Transistor)、GTO (Gate Turn Off thyristor)、VDMOS-IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) 等功率器件] 制造的变频器，在性能上与直流调速装置相当。90 年代第三代电力电子器件问世，在这个时期，中、小功率的变频器 (1 ~ 1000kW) 主要采用 IGBT 器件，大功率的变频器采用 GTO 器

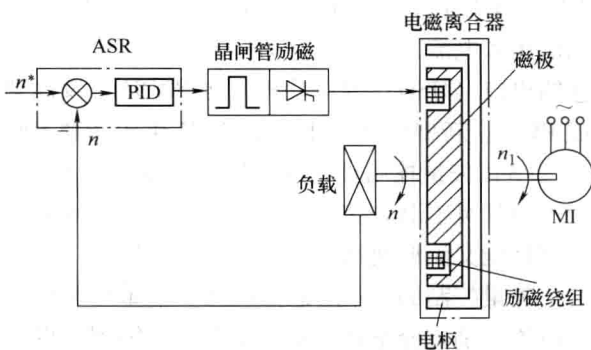


图 0-6 电磁转差离合器调速系统

件。20 世纪 90 年代末至今, 电力电子器件的发展进入了第四代, 主要实用的器件有:

1) 高压 IGBT 器件 沟槽式结构的绝缘栅晶体管 IGBT 问世, 使 IGBT 器件的耐压水平由常规 1200V 提高到 4500V, 实用功率容量为 3300V/1200A, 表明 IGBT 器件突破了耐压限制, 进入第四代高压 IGBT 阶段, 与此相应的三电平 IGBT 中压 (2300 ~ 4160V) 大容量变频调速装置进入实用化阶段。

2) IGCT (Insulated Gate Controlled Transistor) 器件 ABB 公司把环形门极 GTO 器件外加 MOSFET 功能, 研制成功全控型 IGCT (ETO) 器件, 使其耐压及容量保持了 GTO 的水平, 但门极控制功率大大减小, 仅为 0.5 ~ 1W。目前实用化的 IGCT 功率容量为 4500V/3000A, 相应的变频器容量为 $(315 \sim 10000\text{kW})/(6 \sim 10\text{kV})$ 。

3) IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) 器件 IEGT 是东芝公司研制的高压、大容量、全控型功率器件, 它是把 IGBT 器件和 GTO 器件二者的优点结合起来的注入增强栅晶体管。IEGT 器件实用功率容量为 4500V/1500A, 相应的变频器容量达 8 ~ 10MW。

由于 GTR、GTO 器件本身存在的不可克服的缺陷, 功率器件进入第四代以来, GTR 器件已被淘汰不再使用, GTO 器件也将被逐步淘汰。用第四代电力电子器件制造的变频器性能/价格比与直流调速装置相当。

第四代电力电子器件模块化更为成熟, 如功率集成电路 (PIC)、智能功率模块 (IPM) 等。

(2) 脉宽调制技术

1964 年, 德国学者 A. Schonung 和 H. Stemmler 提出将通信中的调制技术应用到电动机控制中, 于是产生了脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 技术。脉宽调制技术的发展和运用优化了变频装置的性能, 适用于各类调速系统。

脉宽调制 (PWM) 种类很多, 并且正在不断发展之中。基本上可分为四类, 即等宽 PWM、正弦 PWM (SPWM)、磁链追踪型 PWM (SVPWM) 及电流滞环跟踪型 PWM (CHBPPWM)。PWM 技术的应用克服了相控方法的所有弊端, 使交流电动机定子得到了接近正弦波的电压和电流, 提高了电动机的功率因数和输出功率。现代 PWM 生成电路大多采用具有高速输出口 (HSO) 的单片机 (如 80196) 及高速数字信号处理器 (DSP), 通过软件编程生成 PWM。新型全数字化专用 PWM 生成芯片 HEF4752、SLE4520、MA818 等已实际应用。

(3) 矢量控制理论的诞生和发展奠定了现代交流调速系统高性能化的基础

1971 年德国学者伯拉斯切克 (F. Blaschke) 提出了交流电动机矢量控制理论, 这是实现高性能交流调速系统的一个重要突破。

矢量控制的基本思想是应用参数重构和状态重构的现代控制理论概念实现交流电动机定子电流的励磁分量和转矩分量之间的解耦, 将交流电动机的控制过程等效为直流电动机的控制过程, 从而使交流调速系统的动态性能得到了显著的提高, 使交流调速最终取代直流调速成为可能。目前对调速特性要求较高的生产工艺已较多地采用了矢量控制型的变频调速装置。实践证明, 采用矢量控制的交流调速系统的优越性高于直流调速系统。

针对电动机参数时变特点, 在矢量控制系统中采用了自适应控制技术。毫无疑问, 矢量控制在应用实践中将会更加完善, 其控制性能将得到进一步提高。

继矢量控制技术之后, 于 1985 年由德国学者 M. Depenbrock 提出的直接自控制 (DSC) 的直接转矩控制以及于 1986 年由日本学者 I. Takahashi 提出的直接转矩控制都取得了实际运用的成功。近二十多年的实际应用表明, 与矢量控制技术相比直接转矩控制可获得更大的瞬

时转矩和快速的动态响应,因此,交流电动机直接转矩控制也是一种很有发展前途的控制技术,目前,采用直接转矩控制方式的 IGBT、IEGT、IGCT 变频器已广泛应用于工业生产及交通运输部门。

(4) 微型计算机控制技术的迅速发展和广泛应用

微型计算机控制技术的迅速发展和广泛应用为现代交流调速系统的成功应用提供了重要的技术手段和保证。近三十多年来,由于微型计算机控制技术,特别是以单片机及数字信号处理器(DSP)为控制核心的微型计算机控制技术的迅速发展和广泛应用,促使交流调速系统的控制电路由模拟控制迅速走向数字控制。当今模拟控制器已被淘汰,全数字化的交流调速系统已普遍应用。

数字化使得控制器的信息处理能力大幅度提高,许多难以实现的复杂控制,如矢量控制中的坐标变换运算、解耦控制、滑模变结构控制、参数辨识的自适应控制等,采用微型计算机控制器后便都迎刃而解了。此外,微型计算机控制技术又给交流调速系统增加了多方面的功能,特别是故障诊断技术得到了完全的实现。

微型计算机控制技术的应用提高了交流调速系统的可靠性和操作、设置的多样性和灵活性,降低了变频调速装置的成本和体积。以微处理器为核心的数字控制已成为现代交流调速系统的主要特征之一。

交流调速技术的发展过程表明,现代工业生产及社会发展的需要推动了交流调速的发展;现代控制理论的发展和应用、电力电子技术的发展和应用、微型计算机控制技术及大规模集成电路的发展和应用为交流调速的发展创造了技术和物质条件。

20 世纪 90 年代以来,电力传动领域面貌焕然一新。各种类型的异步电动机变频调速系统、各种类型的同步电动机变频调速系统覆盖了电力传动领域的各个方面。电压等级从 110V 到 10000V,容量从数百瓦的伺服系统到数万千瓦的特大功率调速系统,从一般要求的调速传动到高精度、快速响应的高性能调速传动,从单机调速传动到多机协调调速传动,几乎无所不有。

0.1.3 现代交流调速技术的发展趋势

交流调速取代直流调速已是不争的事实,21 世纪必将是交流调速的时代。当前交流调速系统正朝着高电压、大容量、高性能、高效率、绿色化、网络化的方向发展。主要有:

- ① 高性能交流调速系统的进一步研究与技术开发。
- ② 新型拓扑结构功率变换器的研究与技术开发。
- ③ PWM 模式的改进和优化。
- ④ 中压变频装置(我国称为高压变频装置)的开发研究。

(1) 控制理论与控制技术方面的研究与开发

十几年的应用实践表明,矢量控制理论及其他现代控制理论的应用尚待随着交流调速的发展而不断完善,从而进一步提高交流调速系统的控制性能。各种控制结构所依据的都是被控对象的数学模型,因此,为了建立交流调速系统的合理的控制结构,仍需对交流电动机数学模型的性质、特点及内在规律做深入研究和探讨。

按转子磁链定向的异步电动机矢量控制系统实现了定子励磁电流和转矩电流的完全解耦,然而转子参数估计的不准确及参数变化造成定向坐标的偏移是矢量控制研究中必须解决