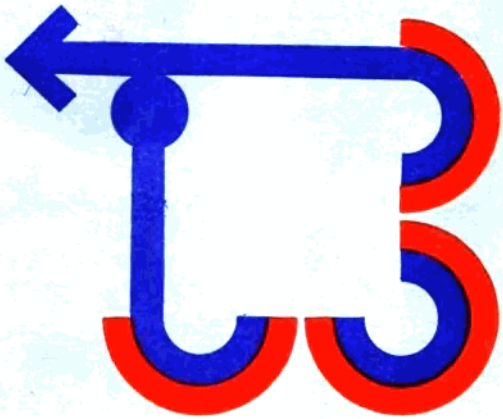
高等工程专科学校教材

交流调速系统

姜泓 赵洪恕 主编

华中理工大学出版社



交流调速系统

姜　沛　赵洪恕　主编
责任编辑　黄以铭

华中理工大学出版社出版发行
《武昌喻家山》
新华书店湖北发行所经销
华中理工大学出版社丙阳印刷厂印刷

开本：850×1168　1/32　印张：9.75　字数：252 000
1990年7月第一版　1990年7月第一次印刷
印数：　1—6 000
ISBN 7-5609-0431-9/TP·36
定价：3.94元

内 容 提 要

本书介绍了用电力电子器件所组成的交流调压调速、串级调速、变频调速、无换向器电动机及其调速系统和矢量变换控制系统的主要类型、工作原理、机械特性、运行特点及适用场合等。重点为串级调速系统及变频调速系统。

本书特点是：叙述简练、概念清楚、重点突出；着重物理概念的分析与阐述；内容经过精选，注意反映工业应用上的新成就。每部分均有应用实例，重点部分还介绍了系统参数的工程计算方法。各章附有小结及习题，便于学生自学及巩固所学知识。因此，它具有理论联系实际、着重实际应用的专科教材特色。

本书为高等工程专科学校工业电气自动化专业及相近专业的试用教材，也适用于职工大学及业余大学，对于中等专业学校及短期培训班亦可选用。可供矿工程技术人员进修及工作参考。

序

随着电力电子学、微电子学和自动控制理论的发展，交流电动机的调速技术近年来发展迅猛。由于交流传动克服了直流传动的缺点，发挥了交流电动机固有的优点，当前又很好地解决了交流电动机调速系统的电源装置，所以交流传动已进入了与直流传动相竞美、相竞争的时代，并有明显的取代趋势。

交流调速技术是一门横跨电力、电子、电机、计算机和现代控制理论的新兴的综合技术，它的内容在不断充实、丰富和发展中。在国外，交流调速技术已进入实用化阶段，在国内，虽然在实用化方面差距较大，但近年来发展很快，近期将会出现一个推广近代交流调速的新热潮。

国内外近代交流调速的内容，目前可概括为：①*变频调速；②串级调速；③*双馈电机调速；④*无换向器电机调速；⑤交流伺服系统；⑥交流步进拖动系统；⑦无功补偿和谐波抑制；⑧*交流调速节能技术；⑨中高频电源应用技术等。交流调速控制技术可归纳为以下几个方面：①相位控制；②变压变频（VVVF）控制；③滑差频率控制；④*脉冲宽度调制（PWM）控制；⑤*矢量变换控制；⑥磁场控制；⑦*微型计算机控制；⑧*现代控制理论的应用；⑨*直接转矩控制等。其中带*号者为最近发展的主要技术。

由于交流调速新技术的迅速发展及我国工矿企业应用的日益广泛，“交流调速系统”课程在教学计划中的地位更加重要了，已从选修课改为必修课。在目前交流调速资料较少、高等专科学校教材紧缺的情况下，重庆钢铁专科学校姜泓副教授和沈阳冶金机械专科学校赵洪恕讲师共同主编的高等专科用《交流调速系统》一书的出版是非常及时的。它不仅填补了国内冶金专科教材中的空白，而且

将为提高教学质量和发展交流调速技术起到重要作用。

该书是根据三年制专科工业电气自动化专业"[illegible]速系统"课程的教学大纲要求而编写的，具有重点突出、概念清楚、理论联系实际、着重实际应用的特点，颇适用于高等专科学校。这是一本既有一定理论分析又注重实用性的好书，现推荐给高等专科学校、职工大学、业余大学的师生和有关科技工作者。

东北工学院 教授 [illegible]序

一九八九[illegible]二十日

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.

前　言

本教材是根据1987年冶金工业部及有色金属总公司所属高等工业专科学校工业电气自动化专业昆明会议共同制订的“交流调速系统”教学大纲而编写的，总学时为48学时。

本课程的先行课是“电子技术基础”、“电机与拖动基础”、“半导体变流技术”、“自动控制原理”、“直流调速系统”等课程。全书共分六章，包括交流调压调速系统、串级调速系统、变频调速系统（交-交变频、交-直-交变频、多重化技术及PWM控制）、无换向器电动机及其调速系统、矢量变换控制系统，其中以串级调速系统及变频调速系统为重点。本书讲述了这些系统的组成、工作原理、机械特性及运行特点等。每章均有应用实例，重点部分还介绍了系统参数的工程计算方法，每章后面都附有小结及一定数量的复习思考题。

本书编写时力求内容精练，重点突出，注重物理概念的阐述和分析，努力反映工业应用上的新成就，作到理论联系实际，加强应用性，体现专科教材的特点。它既可以作为高等工程专科学校电类专业的教材，也可以作为职工大学、业余大学电类专业的教材及设计参考用书，还可以供工矿企业技术人员学习参考及作为培训班教材。

本书由重庆钢铁专科学校姜泓副教授和沈阳冶金机械专科学校赵洪恕讲师任主编，本溪冶金专科学校吕桂复副教授主审。其中绪论、第一、五章由赵洪恕执笔，第二章由昆明冶金专科学校胡兴珉讲师执笔，第三章由上海冶金专科学校庞敏莉副教授执笔，第四章由姜泓执笔，第六章由沈阳黄金学院姚军讲师执笔，最后由姜泓统稿。本书的编写得到了东北工学院佟纯厚教授的关心和支持，

他为本书作了序，在此我们表示衷心的感谢！

由于我们的水平所限，不足之处在所难免，诚恳地希望广大读者、同行和专家们指正。

编　者

1989年2月

本书文字符号表

1. 设备、元件的文字符号

A	放大器	QF	断路器
AI	电流调节器	R	电阻器
AS	速度调节器	RC	环形计数器
AV	电压调节器	RF	频敏电阻器
AΦ	磁通调节器	RP	电位器
BI	电流检测器	RV	压敏电阻器
BS	速度检测器	S	开关
C	电容器	SQ	位置检测器
D	二极管	T	变压器，晶体三极管
D_z	稳压管	TA	电流互感器
F	触发器	TC	控制变压器
FU	熔断器	TG	测速发电机
K	继电器	TS	同步变压器
KS	接触器	U	变流器（整流器、逆变器）
K/P	直角坐标/极坐标变换器	V	晶闸管
L	电抗器	VA	矢量分析器
LS	逻辑开关	V/F	电压/频率变换器
M	电动机	VR	矢量旋转变换器
MS	同步电动机	2φ/3φ	二相/三相变换器

2. 物理量的文字符号

C_e	异步电动机等效电势常数	E_2	电动机转子电势
C_M	异步电动机转矩常数	E_d	整流电源的电势
D	调速范围	E_{1m}	电动机定子电势最大值
E_1	电动机定子电势	F_1	定子磁势

F_d 直流电动机电枢磁势
F_α α绕组的磁势
F_β β绕组的磁势
f_1 定子频率
f_c 调制频率
f_n 额定频率
I 电流的有效值、平均值
I_d 直流电动机的电枢电流
I_L 负载电流
I_{Lm} 最大负载电流
I_m 励磁电流
I_n 额定电流
I_{1m} 最大线电流有效值
I_{qT} 启动电流
i 电流瞬时值
i_k 短路电流
i_{1M} 定子电流在M轴上的分量
i_{1T} 定子电流在T轴上的分量
$i_{1\alpha}$ 定子电流在α轴上的分量
$i_{1\beta}$ 定子电流在β轴上的分量
K_i 电流反馈的反馈系数
K_{in} 转速反馈的反馈系数
K_i 电流调节器的放大倍数
$K_{L\Sigma}$ 串级调速系统主电路放大倍数
K_S 速度调节器的放大倍数
K_V 晶闸管调压器的放大倍数
L_1 定子电感
L'_2 转子电感向定子侧的折合值
L_d 电抗器电感
L_k 异步电动机的短路电感
L_M 电动机互感
L_m 电动机励磁电感
L_Σ 总电感值
M 电动机的转矩
M_{dz} 异步电动机理想空载转矩
M_L 负载转矩
M_m 异步电动机最大转矩
M_n 异步电动机额定转矩
n 电动机转速
n_n 电动机额定转速
P_1 电动机定子输入功率
P_2 电动机转子输入功率
P_M 电动机轴上的机械功率
P_n 电动机额定功率
P 电动机输出功率
P_S 电动机的转差功率
P_T 变压器的有功功率
P_W 电网输入总功率
p 电动机极对数
R_Σ 总电阻
r_d 电抗器电阻
r_m 电动机励磁电阻
S 电动机的转差率
S_K 串级调速系统总机械功率
S_m 电动机的临界转差率
S_{max} 电动机最大转差率
S_n 电动机额定转差率
s 算子符号，拉氏变换符号
T 周期，时间常数
T_{fi} 电流反馈回路时间常数
T_{fn} 速度反馈回路时间常数
T_i 电流调节器时间常数
$T_{L\Sigma}$ 串级调速系统主电路时间常数
T_n 速度调节器时间常数

t_{ff} 晶闸管[illegible]断时间

t_{on} 晶闸管[illegible]通时间

t_r 晶闸管[illegible]反压时间

t_o 晶闸管[illegible]剩余时间

U 电[illegible]压、有效值

u 电[illegible]

U_d 整[illegible]

U_{fi} 电[illegible]压

U_n 转[illegible]电压

U_{ia} 电[illegible]压

U_{sd} 给[illegible]

U_1 输[illegible]

U_n 额[illegible]

U_{pp} 晶[illegible]压

u_M M轴[illegible]分量

u_T T轴[illegible]分量

u_α α轴[illegible]分量

u_β β轴[illegible]分量

$u_k\%$ 变[illegible]路电压

X_1 电[illegible]漏抗

X'_2 电[illegible]漏抗向

定[illegible]合值

X_k 电动机短路电抗

X_m 电动机励磁电抗

Z 阻抗

α 整流控制角

α_N 反组整流控制角

α_p 正组整流控制角，延迟导通角

β 逆变控制角

γ 换相重叠角

δ 换流剩余角

ε 换流超前角

θ 导通角，同步电动机功角，多重化错开角

λ_M 电动机过载倍数

ρ 分压比，频率比

σ 漏磁系数

τ 时间常数

φ 阻抗相角

Φ 异步电动机气隙磁通

Ψ 磁链

ω 定子电压电角频率

ω_1 定子旋转磁场角频率

目　录

绪论……（1）
第一章　异步电动机调压调速系统……（6）
1.1　异步电动机调压调速的原理……（6）
1.2　晶闸管三相交流调压电路……（9）
1.2.1　三相全波相位控制的Y形联接调压电路……（10）
1.2.2　电阻-电感性负载电路的工作特点及输出电流中的谐波……（14）
1.2.3　几种常用的三相交流调压电路……（18）
1.3　调压调速系统的组成与特性分析……（20）
1.3.1　转速闭环调压调速系统的组成及静特性……（20）
1.3.2　调压调速系统中的能耗及谐波……（23）
1.4　应用举例……（26）
小结……（28）
习题……（30）
第二章　异步电动机串级调速系统……（31）
2.1　串级调速的原理与类型……（31）
2.1.1　串级调速的原理……（31）
2.1.2　串级调速的运转状态与功率传递关系……（35）
2.1.3　串级调速的基本类型……（37）
2.1.4　低同步晶闸管串级调速系统的典型主电路……（40）
2.2　串级调速系统的机械特性……（41）
2.2.1　转子整流电路的特殊工作状态……（42）
2.2.2　串级调速系统的调速特性……（47）
2.2.3　串级调速系统的机械特性……（50）
2.3　串级调速系统的能量指标……（56）
2.3.1　串级调速系统的能量流图……（56）
2.3.2　串级调速系统的总效率……（57）

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.

2.3.3 串级调速系统的总功率因数……（59）
2.3.4 改善功率因数的方法……（62）
2.4 串级调速系统的闭环控制……（65）
2.4.1 双闭环控制系统的组成……（65）
2.4.2 串级调速主电路及电动机的传递函数……（66）
2.4.3 系统的动态结构图与动态参数计算……（69）
2.5 串级调速系统应用中的几个问题……（72）
2.5.1 异步电动机容量的选择……（73）
2.5.2 逆变变压器容量计算……（74）
2.5.3 启动方式的选择……（75）
2.5.4 系统的运行……（76）
2.6 应用举例……（77）
附：工程计算实例……（83）
小结……（91）
习题……（92）
第三章 变频调速中的一般问题及变频器……（94）
3.1 变频调速中的一般问题……（94）
3.1.1 变频器的主要类型和特点……（94）
3.1.2 异步电动机变频调速控制方式和特性……（101）
3.2 交-交变频器……（108）
3.2.1 方波型交-交变频器……（108）
3.2.2 正弦波型交-交变频器……（112）
3.2.3 交-交变频器的有环流电路……（120）
3.3 交-直-交电压型变频器……（122）
3.3.1 串联电感式逆变器……（122）
3.3.2 带辅助晶闸管式逆变器……（127）
3.4 交-直-交电流型变频器……（131）
3.4.1 异步电动机的简化等值电路……（131）
3.4.2 串联二极管式电流型逆变器……（133）
3.4.3 带辅助晶闸管式电流型逆变器……（144）
3.4.4 电流型逆变器的特点及与电压型的比较……（146）

3.5 电流型变频器的多重化技术……（147）
3.5.1 脉动转矩的产生及其影响的消除……（148）
3.5.2 多重化变频器的组成方式……（149）
3.6 脉宽调制型变频器(PWM)……（154）
3.6.1 脉宽调制变频器概述……（154）
3.6.2 脉宽调制逆变器……（158）
3.6.3 脉宽调制逆变器的控制原理……（161）
3.7 大功率晶体管与可关断晶闸管逆变器……（166）
3.7.1 大功率晶体管逆变器……（167）
3.7.2 可关断晶闸管的特性……（171）
小结……（174）
习题……（176）
第四章 异步电动机的变频调速系统……（177）
4.1 变频调速系统的主要控制单元……（177）
4.1.1 函数发生器……（178）
4.1.2 电压/频率变换器……（180）
4.1.3 环形分配器……（183）
4.1.4 脉冲功率放大及脉冲输出……（185）
4.1.5 频率/电压变换器……（188）
4.2 电压/频率比控制的变频调速系统……（189）
4.2.1 电压型六拍逆变器的变频调速系统……（189）
4.2.2 电流型六拍逆变器的变频调速系统……（193）
4.2.3 应用举例……（204）
4.3 转差频率控制的变频调速系统……（212）
4.3.1 转差频率控制的基本概念及其基本控制规律……（212）
4.3.2 转差频率控制系统的典型框图及系统工作原理……（214）
4.3.3 转差频率控制的其他形式……（218）
4.3.4 转差频率控制系统的动态结构图……（221）
小结……（224）
习题……（226）
第五章 无换向器电动机及其调速系统……（229）

5.1 概述……（229）
5.1.1 无换向器电动机的定义及分类……（229）
5.1.2 无换向器电动机的特点及适用范围……（230）
5.2 无换向器电动机的工作原理……（232）
5.2.1 工作原理……（232）
5.2.2 感应式位置检测器……（235）
5.3 无换向器电动机的换流……（237）
5.3.1 反电势换流法（自然换流法）……（238）
5.3.2 电流断续换流法……（240）
5.4 无换向器电动机的特性及调速方法……（241）
5.4.1 转速公式及调速方法……（241）
5.4.2 转矩公式及机械特性……（244）
5.4.3 过载能力……（248）
5.5 无换向器电动机的四象限运行及调速系统……（251）
5.5.1 四象限运行状态……（251）
5.5.2 无换向器电动机的闭环调速系统……（255）
小结……（257）
习题……（258）
*第六章 交流电动机矢量变换控制系统……（260）
6.1 矢量变换控制的工作原理……（260）
6.1.1 矢量变换控制的基本概念……（260）
6.1.2 矢量变换控制的应用概况及特点……（262）
6.2 交流电动机的电路数学模型及矢量变换控制方程式……（263）
6.2.1 原型电动机及其电压方程……（264）
6.2.2 变换到α-β轴上的交流电动机及其电压方程……（267）
6.2.3 变换到M-T轴上的交流电动机及其电压方程……（268）
6.2.4 矢量变换控制方程式……（270）
6.2.5 数学模型中各变量的关系……（271）
6.3 矢量变换运算功能的规律及实现……（274）
6.3.1 三相/二相（3φ/2φ）变换或二相/三相（2φ/3φ）变换……（274）

6.3.2 矢量旋转变换(V/R)……(278)
6.3.3 直角坐标/极坐标变换(K/P)……(281)
6.3.4 矢量分析器(VA)……(282)
6.3.5 交流电动机磁通的检测和运算……(282)
6.4 交流电动机矢量变换控制系统 ……(286)
6.4.1 磁场定向式的交流电动机矢量变换控制系统……(286)
6.4.2 转差频率式交流电动机矢量变换控制系统……(288)
参考文献……(293)

绪　论

一、交流电动机调速概述

1．交流电动机调速的特点

从19世纪80年代以来，工业电气传动一直以直流传动为唯一方式。到19世纪末，出现了三相电源和坚固耐用的鼠笼式电动机后，在不调速的场合交流传动才代替了直流传动。然而，随着生产的不断发展，现代应用的许多变速传动系统，不仅要求有宽广的调速范围，而且要求静差小、稳定性好及有良好的动态性能。直流电动机能够满足这些要求，但由于直流电动机在制造和运行维护等方面的固有缺陷，长期以来，人们一直渴望用交流电动机代替直流电动机。从60年代起，国外对交流变速传动已开始重视，如日本在1961年就着手将三相绕线型异步电动机的转子滑差功率，经整流后供给直流电动机再去拖动交流发电机而将能量回馈给电源，可以认为这是交流串级调速研究的开始。随着电力电子学与电子技术的发展，特别是电力半导体开关器件的发展，使得采用半导体变流技术的交流调速系统得以实现。尤其是70年代以来，新器件的出现，大规模集成电路和计算机控制技术的发展以及现代控制理论的应用，为交流电力拖动系统的发展创造了有利条件，带有静止逆变器的各种类型的调速系统，如串级调速系统、变频调速系统、无换向器电动机调速系统及矢量控制调速系统等得到飞速发展。目前交流电力拖动系统已具备了较宽的调速范围、较高的稳速精度、较快的动态响应、较高的工作效率以及可以四象限运行，其静、动特性均可以与直流电动机拖动系统相媲美。国际上许多国家交流电力拖动系统已进入工业实用化阶段，并出现了逐步取代直流电力拖动系统的势

头。

直流电动机本身结构上存在的主要缺点是：

（1）存在机械磨损、噪声大、寿命短、维护困难。

（2）换向存在火花，在易燃易爆等恶劣环境中不适用。

（3）结构复杂、难以制造大容量、高转速及高电压的直流电动机。

而交流电动机与其相反，结构简单、工作可靠，由交流电动机组成的调速系统充分发挥了交流电动机本身固有的优点。

与直流拖动系统相比，交流拖动系统具有如下特点：

（1）交流电动机坚固耐用，用交流电动机组成的拖动系统经济可靠、运行噪声小、维护方便。

（2）能够适应易燃、易爆、高空、井下等恶劣环境，适应范围广。

（3）结构简单，便于制造大容量、高转速、高电压的电动机，这就为交流拖动系统的应用开辟了更广泛的领域。

（4）由于高性能、高精度新型调速系统的出现和不断发展，交流拖动系统已达到同直流拖动系统一样的性能指标，越来越广泛地应用于国民经济各个生产领域中。

2．交流调速在国民经济中的重要作用

在电气传动领域，由于历史的原因，目前工矿企业中存在着大量的直流调速系统。如果把直流调速逐步地改造成交流调速，不仅可节约能源、降低维修费用，还可延长使用寿命。特别是在油田、化工企业、井下、水下等地方，采用交流调速，更为安全可靠，且能获得明显的经济效益。

应该特别指出的是交流调速在节能方面的重大作用。以风机泵类机械为例，根据1980年的不完全统计，全国风机拥有量约为230万台，总装备容量约为1000万kW，耗电量占全国发电量的10%。全国水泵拥有量约为1300万台，总装备容量约为2100万kW，耗电量占全国发电量的21%，而整个工业用电占全国耗电量的67%，可

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.