

第2版

交流调速系统

陈伯时 陈敏逊 编著

电气自动化
新技术丛书

11) DC 21



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



电气自动化新技术丛书

交流调速系统

第2版

陈伯时 陈敏逊 编著



机械工业出版社

本书全面系统地介绍了现代交流调速系统的基本原理、数学模型、控制系统和应用性能,以理论联系实际、深入浅出作为编写方针,对于在研究工作中涉及而目前尚无实际应用的理论问题,则不加论述。第2版是在第1版的基础上,按照技术与应用发展的需要,作了必要的扩充与修订,其中特别增加了“中压大容量变频技术”和“无速度传感器的高性能异步电动机调速系统”两章内容。

本书主要供电气自动化领域的工程技术人员阅读和参考,也可作为大专院校相关专业的教师、研究生和高年级学生的教学参考书,以及工程技术人员继续教育的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

交流调速系统/陈伯时,陈敏逊编著. —2版. —北京:机械工业出版社,2005.4

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-06084-9

I. 交… II. ①陈…②陈… III. 交流电机—调速

IV. TM344.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第014817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:孙流芳 版式设计:张世琴

责任校对:张莉娟 封面设计:姚毅

责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2005年4月第2版·第1次印刷

850mm×1168mm^{1/32}·8.75印张·232千字

0 001—5 000册

定价:16.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294

封面无防伪标均为盗版

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展,对于改变社会的生产面貌,推动人类文明向前发展,具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合,特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天,电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问,电气自动化技术必将在提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术,中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会,负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色:

一、本丛书是专题论著,选题内容新颖,反映电气自动化新技术的成就和应用经验,适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际,重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出,条理清晰,语言通俗,文笔流畅,便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者,也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》,对于我们是一种尝试,难免存在不少问题和缺点,希望广大读者给予支持和帮助,并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

第4届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任：王 炎

副主任：王兆安

委员：王正元

王志良

刘宗富

李永东

陈维均

赵相宾

涂 健

霍勇进

秘 书：刘凤英

王志良

王永骥

王 炎

许宏纲

李崇坚

周国兴

张 浩

徐殿国

戴先中

赵相宾

王兆安

牛新国

孙流芳

陈伯时

赵光宙

张敬明

黄席樾

牛新国

王 旭

尹力明

阮 毅

陈敏逊

赵 杰

郑颖楠

彭鸿才

第4届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来,在学会领导和广大作者、读者的支持下,至今已出版发行丛书38种33万余册,受到广大读者的欢迎,对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了很大作用。

许多读者来信,表示这套丛书对他们的工作帮助很大,希望我们再接再厉,不断推出介绍电气传动自动化新技术的丛书。因此,本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题,继续组织编写出版,同时对受读者欢迎的已出版的丛书,根据技术的发展,我们将组织一些作者进行修订再版,以满足广大读者的需要。

我们诚恳地希望广大读者来函,提出您的宝贵意见和建议,以使本丛书搞得更好。

在本丛书出版期间,为加快与支持丛书出版,成立了丛书出版基金,得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位的支持,在此我们对所有资助单位再次表示感谢。

第4届《电气自动化新
技术丛书》编辑委员会

2002年10月12日

第2版前言

自从本书第1版于1998年出版以来,交流调速技术又有很大发展,交流调速系统新装置的生产和应用已经大大超过了直流调速系统。为了适应技术发展,满足读者需要,我们着手编写第2版。将第1版共6章扩充修订成第2版的11章,主要修改或增加的内容如下:

(1) 在第2章中,增加了变压调速系统在“软起动器”和“轻载减压节能”中的应用。

(2) 在第3章中,扩大了“双馈调速系统”的篇幅,增加了“双馈调速的矢量控制”,并适当压缩“串级调速”部分。

(3) 原书第4章扩大成现在的第4章4.1、4.2节和第5章,加强对现已广泛应用的电压空间矢量PWM控制变频器的分析与阐述。

(4) 增设第6章:中压大容量变频技术,着重介绍“三电平逆变器”和“单元串联式多电平PWM变频器”。

(5) 原书第5章扩充改写成三章一节,即4.3节和第7、8、9章。具体是:第7章“异步电动机的动态数学模型和坐标变换”,其中增写了科技论文中普遍采用的“状态方程”;第8章“按转子磁链定向的矢量控制系统”;第9章“异步电动机按定子磁链控制的直接转矩控制系统”,第8、9章的内容均有更新。

(6) 增设第10章“无速度传感器的高性能异步电动机调速系统”,这是当前受到普遍重视的调速技术。但现有许多文献只是罗列了各种方法,我们编写时着重研究了它们的基本概念,把所有的无速度传感器控制方法划分成三种类型,对一些基本理论问题也做了分析与澄清。由于这是一个新的尝试,是否恰当,希望读者批评指正。

(7) 原第 6 章“同步电动机调速系统”现改为第 11 章，并作了一定的扩充。

鉴于本丛书是以工程技术人员为主要读者对象的，再版仍以理论联系实际、深入浅出作为编写方针。有些理论问题，虽然在交流调速的研究工作中常被采用，但目前尚无实际应用，本书亦不予论述。

本书第 1、2、4、7~11 章由陈伯时执笔，第 3、5、6 章由陈敏逊执笔，全书由陈伯时统稿。

交流调速技术发展很快，笔者学识有限、工程实践经验不足，遗漏和错误在所难免，殷切期望读者批评指正。

陈伯时 陈敏逊

2005 年 1 月

第1版前言

自20世纪80年代以来,交流调速技术及其应用发展很快,在电气传动领域内,长期被认为是天经地义的“直流传动调速、交流传动不调速”的分工格局已被彻底打破。交流调速系统在风机、水泵等的节能调速,轧钢机、机床、电力机车等的高动态性能调速,石化、纺织、轻工机械等的同步调速和一般性能调速,矿井卷扬机、厚板轧机等的大容量调速,高速磨头、离心机等的高转速调速诸方面,已经获得越来越广泛的应用。在这样的形势下,迫切需要系统地、理论联系实际地阐述交流调速系统原理和方法的书籍,以满足广大工程技术人员的需求。

1983年,我们主持了昆明“交流调速系统讲习讨论会”,邀请国内各大学7名教授共同讲授,并编写了讲义,会后由刘克成教授主编,把讲义整理成《交流调速系统》一书,于1984年由上海交通大学出版社出版,解决了燃眉之急。后由全国高校工业电气自动化专业教学指导委员会定为“推荐教材”。80年代后期,在电力电子和微机控制迅速发展的推动下,交流调速技术又有了很大进展,我们和刘宗富、王正元等教授一起编写了《现代电力电子器件与交流调速》,于1990年6月出版,并由中国自动化学会电气自动化专业委员会等举办研讨会多次,进行宣讲与推广。在上述两本书的基础上,我们又对交流调速系统的规律和体系进行了整理和提高。对于异步电机调速系统,改变了以往仅罗列调速方法的体系,从提高能量转换效率的角度看,归纳成转差功率消耗型、转差功率回馈型和转差功率不变型三种类型,而同步电机没有转差功率,所以只能有转差功率不变型,这样就建立起交流调速系统新的统一体系。按照这一思路,再把交流调速系统和直流调速系统合在一起,编写了《电力拖动自动控制系统》

教材,于1992年由机械工业出版社出版。该书出版发行后很受读者欢迎,但受到教材发行政策上的限制,除高等学校预订以外,在市面上不易买到。为此再利用《电气自动化新技术丛书》这块园地,把交流调速系统单独提出来,并吸收近年来技术进步的新内容,重新编写成书,以飨读者。鉴于丛书中已有一些单独介绍某种具体的交流调速的内容,本书把重点放在调速系统的原理和自动控制规律方面,对于具体装置只作概述,以免重复。

本书共分6章。第1章绪论,简述交流调速系统的发展和基本类型,并介绍作为现代交流调速系统物质基础的电力电子技术和微机控制技术的最新进展。第2章讨论异步电机转差功率消耗型的调速系统,着重分析闭环控制的变压调速系统和电磁转差离合器调速系统。第3章分析异步电机转差功率回馈型调速系统,即串级调速系统。第4章首先阐明异步电机变压变频调速的基本原理,然后简述静止式电力电子变频器的特点,其中对目前普遍应用的全控制器件SPWM变频器作重点介绍。第5章介绍异步电机转差功率不变型的变压变频调速系统,其中重点阐述矢量控制系统,并扼要地介绍直接转矩控制系统。异步电机的多变量数学模型和坐标变换是分析矢量控制的必要工具,但为了节省篇幅,本书只着重说明其概念与应用,而不作过多的公式推导。最后,在第6章中分析同步电机的调速系统。本书第3章和第4章的4.4节、4.5节由陈敏逊执笔,其余章节由陈伯时执笔,全书由陈伯时统稿。

交流调速技术近年来发展很快,几乎达到日新月异的地步,笔者学识有限,很难把所有新技术都全面完整地反映出来,遗漏和错误在所难免,殷切期望读者批评指正。

陈伯时 陈敏逊

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话

第2版前言

第1版前言

第1章 绪论	1
1.1 交流调速系统的发展	1
1.2 交流调速系统的基本类型	2
1.2.1 异步电动机调速系统的基本类型	2
1.2.2 同步电动机调速系统的基本类型	4
1.3 现代交流调速的技术基础	4
第2章 异步电动机转差功率消耗型调速系统	6
2.1 异步电动机恒频变压调速系统	6
2.1.1 异步电动机恒频变压调速电路	6
2.1.2 异步电动机改变电压时的机械特性	7
2.1.3 闭环控制的恒频变压调速系统及其静特性	12
2.2 异步电动机恒频变压调速时的转差功率损耗分析	13
2.3 变压控制在软起动器和轻载 减压节能运行中的应用	16
2.3.1 软起动器	16
2.3.2 轻载减压节能运行	18
2.4 电磁转差离合器调速系统	20
第3章 异步电动机转差功率馈送型调速系统—— 绕线转子异步电动机双馈调速系统	23
3.1 异步电动机双馈调速工作原理	23
3.1.1 异步电动机转子附加电动势的作用	23

3.1.2 异步电动机双馈调速的五种工况	25
3.2 异步电动机在次同步电动状态下的双馈系统——串级调速系统	30
3.2.1 串级调速系统的工作原理	30
3.2.2 其他类型串级调速系统	34
3.3 异步电动机串级调速时的机械特性	35
3.3.1 异步电动机串级调速机械特性的特征	35
3.3.2 异步电动机串级调速时的转子整流电路	37
3.3.3 异步电动机串级调速机械特性方程式	41
3.4 串级调速系统的技术经济指标及其提高方案	47
3.4.1 串级调速系统的效率	47
3.4.2 串级调速系统的功率因数及其改善途径	48
3.4.3 斩波控制的串级调速系统	49
3.4.4 串级调速装置的电压和容量	51
3.5 双闭环控制的串级调速系统	53
3.5.1 双闭环控制串级调速系统的组成	53
3.5.2 串级调速系统的动态数学模型	54
3.5.3 调节器参数的设计	56
3.5.4 串级调速系统的起动方式	58
3.6 异步电机双馈调速系统	59
3.6.1 双馈调速系统的构成	60
3.6.2 双馈调速系统的矢量控制	61
第4章 异步电动机变压变频调速原理和转差功率不变型恒压频比调速系统	64
4.1 异步电动机变压变频调速的基本控制方式	64
4.1.1 基频以下调速	65
4.1.2 基频以上调速	66
4.2 异步电动机电压-频率协调控制时的稳态特性	66
4.2.1 异步电动机的稳态等效电路和感应电动势	66
4.2.2 恒压恒频正弦波供电时异步电动机的机械特性	67

4.2.3 基频以下电压-频率协调控制时的机械特性	68
4.2.4 基频以上恒压变频控制时的机械特性	72
4.3 笼型异步电动机恒压频比控制的调速系统	73
4.3.1 转速开环恒压频比控制调速系统的构成	74
4.3.2 转速开环恒压频比控制调速系统的控制作用	76
第5章 静止式变压变频器和 PWM 控制技术	78
5.1 静止式变压变频器的主要类型	78
5.1.1 交-直-交和交-交变压变频器	78
5.1.2 电压源型和电流源型逆变器	82
5.1.3 180°导通型和 120°导通型逆变器	84
5.2 六拍交-直-交变频器输出电压的谐波分析	89
5.2.1 谐波分析	89
5.2.2 变频器输出谐波对异步电动机工作的影响	92
5.3 正弦脉宽调制 (SPWM) 控制技术	96
5.3.1 基本思想	97
5.3.2 正弦脉宽调制原理	98
5.3.3 SPWM 波的基波电压	102
5.3.4 脉宽调制的制约条件	105
5.3.5 同步调制与异步调制	106
5.3.6 SPWM 波形控制的实现	108
5.3.7 SPWM 变压变频器的输出谐波分析	114
5.4 消除指定次数谐波的 PWM (SHEPWM) 控制技术	118
5.5 电流滞环跟踪 PWM (CHBPWM) 控制技术	119
5.6 电压空间矢量 PWM (SVPWM) 控制技术	125
5.6.1 电压空间矢量	125
5.6.2 电压与磁链空间矢量的关系	126
5.6.3 六拍阶梯波逆变器供电时电动机的旋转磁场	128
5.6.4 电压空间矢量的线性组合与 SVPWM 控制	132
5.7 桥臂器件开关死区对 PWM 变压变频器工作的影响	137
5.7.1 死区及其对变压变频器输出波形的影响	137

5.7.2 死区对变压变频器输出电压的影响	139
第 6 章 中压大容量变频技术	142
6.1 中压大容量变频技术的各种方案	143
6.2 三电平逆变器	144
6.2.1 三电平逆变器工作原理	144
6.2.2 中性点钳位型逆变器工作状态的切换	146
6.2.3 中性点钳位型逆变器的输出电压波形	148
6.2.4 中性点钳位型逆变器的特点	151
6.2.5 三电平逆变器的控制策略	152
6.3 单元串联式多电平 PWM 变频器	158
6.3.1 单元串联式多电平变频器的工作原理	158
6.3.2 变频器整流电路的多重化连接	161
6.3.3 多电平移相式 PWM 控制	164
第 7 章 异步电动机的动态数学模型和坐标变换	169
7.1 异步电动机动态数学模型的性质	169
7.2 三相异步电动机的多变量非线性数学模型	170
7.2.1 电压方程	171
7.2.2 磁链方程	172
7.2.3 转矩方程	175
7.2.4 电气传动系统的运动方程	176
7.2.5 三相异步电动机的数学模型	176
7.3 坐标变换和变换矩阵	177
7.3.1 坐标变换的原则和基本思路	177
7.3.2 三相-两相变换 (3/2 变换)	180
7.3.3 两相-两相旋转变换 ($2s/2r$ 变换)	182
7.3.4 直角坐标-极坐标变换 (K/P 变换)	183
7.4 三相异步电动机在两相坐标系上的数学模型	184
7.4.1 异步电动机在两相任意转速旋转坐标系 (dq 坐标系) 上的数学模型	184
7.4.2 异步电动机在两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系	

上的数学模型	188
7.4.3 异步电动机在两相同步旋转坐标系上的数学模型	189
7.5 三相异步电动机在两相坐标系上的状态方程	190
7.5.1 $\omega\text{-}\Psi_r\text{-}i_s$ 状态方程	190
7.5.2 $\omega\text{-}\Psi_s\text{-}i_s$ 状态方程	192
第 8 章 异步电动机按转子磁链定向的矢量控制系统	194
8.1 矢量控制系统的基本思路	194
8.2 按转子磁链定向的矢量控制方程及其解耦控制	196
8.3 转子磁链模型	200
8.3.1 计算转子磁链的电流模型	200
8.3.2 计算转子磁链的电压模型	203
8.4 转速、磁链闭环控制的矢量控制系统 ——直接矢量控制系统	204
8.4.1 带磁链除环环节的直接矢量控制系统	204
8.4.2 带转矩内环的直接矢量控制系统	205
8.5 磁链开环转差型矢量控制系统——间接矢量控制系统	206
第 9 章 异步电动机按定子磁链控制的 直接转矩控制系统	210
9.1 直接转矩控制系统的原理和特点	210
9.2 直接转矩控制系统的控制规律和反馈模型	211
9.3 直接转矩控制系统与矢量控制系统的比较	215
第 10 章 无速度传感器的高性能 异步电动机调速系统	217
10.1 基于电动机数学模型计算转速或转差角速度	218
10.1.1 利用转子电动势计算同步角速度后求得转速	219
10.1.2 利用转矩计算转差角速度后求得转速	222
10.2 基于闭环控制作用构造转速信号	223
10.2.1 比较定子电流转矩分量用 PI 控制闭环构造转速	223
10.2.2 比较转子磁链的电压模型和电流模型 用 PI 控制闭环构造转速	224

10.2.3 比较定子电压用 PI 控制闭环构造转速	227
10.2.4 比较定子电流或电磁转矩用 PI 控制闭环构造转速	228
10.3 利用电动机结构上的特征产生转速信号	231
10.3.1 检测转子齿谐波磁场的感应电动势以产生转速信号	231
10.3.2 注入高频信号获取转速信息	232
第 11 章 同步电动机调速系统	233
11.1 同步电动机变压变频调速的特点和类型	233
11.2 他控变频同步电动机调速系统	235
11.2.1 转速开环恒压频比控制的同步电动机群调速系统	235
11.2.2 由交-直-交电流型负载换相变压变频器 (LCI) 供电的同步电动机调速系统	236
11.2.3 由交-交变压变频器供电的大功率低速 同步电动机调速系统	237
11.2.4 按气隙磁场定向的同步电动机矢量控制系统	238
11.2.5 同步电动机的多变量动态数学模型	243
11.3 自控变频同步电动机调速系统	246
11.3.1 梯形波永磁同步电动机(无刷直流电动机) 的自控变频调速系统	248
11.3.2 正弦波永磁同步电动机的自控变频调速系统	252
参考文献	256

第1章 绪 论

1.1 交流调速系统的发展

直流电气传动和交流电气传动在 19 世纪先后诞生。在 20 世纪上半叶, 鉴于直流传动具有优越的调速性能, 高性能可变速传动都采用直流电动机, 而约占电气传动总容量 80% 以上的不变速传动系统则采用交流电动机, 这种分工在一段时期内已成为一种举世公认的格局。交流调速系统的多种方案虽然早已问世, 并已获得实际应用, 但其性能却始终无法与直流调速系统相匹敌。直到 20 世纪 60~70 年代, 随着电力电子技术的发展, 采用电力电子变流器的交流传动系统得以实现, 特别是大规模集成电路和计算机控制的出现, 使高性能交流调速系统应运而生, 交直流传动按调速性能分工的格局终于被打破了。这时, 直流电动机和交流电动机相比的缺点日益显露出来, 例如具有电刷和换向器因而必须经常检查维修, 换向火花使它的应用环境受到限制, 换向能力限制了直流电动机的容量和速度 (极限容量与转速之积约为 $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r/min}$) 等等。于是, 用交流可变速传动取代直流可变速传动的呼声越来越强烈, 交流传动控制系统已经成为电气传动控制的主要发展方向。据统计, 在 2001 年的世界可调电气传动产品中, 交流传动已占 2/3 以上。目前, 交流传动系统的应用领域主要有下述三个方面:

1. 一般性能的节能调速和按工艺要求调速 在过去大量的所谓“不变速交流传动”中, 风机、水泵等通用机械的容量几乎占工业电气传动总容量的一半, 其中有不少场合并不是不需要调速, 只是因为过去的交流传动本身不能调速, 不得不依赖挡板和阀门来调节送风和供水的流量, 因而把许多电能白白地浪费了。