

第2版

BIANPIN TIAOSU JISHU JICHU JIAOCHENG

变频调速技术 基础教程

曾允文 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

变频调速技术基础教程

第 2 版

曾允文 编

机械工业出版社

本书共分九章, 主要内容包括变频器的基本结构和工作原理、电力电子器件、电动机的运行和负载、变频调速系统的控制与数字化、变频器对周边电气设备的影响及对策、通用变频器及其应用、高压变频器及其应用、同步电动机的变频调速、智能控制及其在变频调速系统中的应用, 概括了变频调速技术的全部内容, 为学习该门技术打下良好的基础。

本次修订增加了第九章智能控制及其在变频调速中的应用, 并补充了习题和思考题。本书作为基础教程, 可供大专院校有关专业作为教材或参考书, 也可供工程技术人员作入门读本。

图书在版编目 (CIP) 数据

变频调速技术基础教程/曾允文编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2011. 10

ISBN 978-7-111-35865-7

I. ①变... II. ①曾... III. ①变频调速—教材 IV. ①TM921. 51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 188023 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: 罗 莉 责任编辑: 罗 莉

版式设计: 霍永明 责任校对: 申春香

封面设计: 陈 沛 责任印制: 李 妍

唐山丰电印务有限公司印刷

2012 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

148mm × 210mm · 9 印张 · 262 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-35865-7

定价: 29.80 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

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销 售 一 部: (010)68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部: (010)88379649

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

自从20世纪50年代末晶闸管诞生后,60年代交付生产的变频调速装置相继产生。随着时间的流逝,迄今已有半个世纪,依托着电力电子技术、电气传动技术、控制理论和计算机技术等学科不断地发展丰富,变频调速已从昔日的谐波严重、调速范围不宽、效率不高、应用不广等“原始”状态,发展到今天的开关器件不断更新换代,PWM技术日益成熟,近代控制理论得到应用、计算机引入,促使变频调速的控制性能、操作安全不断地提高完善,应用遍及各行各业,新型变频器不断涌现;群星灿烂、各显其能。因此不仅取代昔日称雄调速领域的直流调速,而且有一统调速领域之势。

变频调速技术就是完成变频传动任务的技术。根据它的发展过程,可以说是变频调速技术是电力电子技术、电气传动、控制理论、计算机技术等多门学科的综合。内容十分丰富、广阔、深邃,自成系统。因此我们认为它是一门重要的学科分支,可以从“交流调速系统”或“电力电子技术”课程中分离出来,成为一门课程单独讲授。

根据上述,变频调速技术这门课程应包含下述内容:电力电子开关器件,变频器基本结构与工作原理,电动机机械特性、负载机械特性及它们的配合,调速系统的控制与数字化,变频器对周边电气设备的影响与对策,通用变频器及其应用,高压变频器及其应用,同步电动机的变频调速,变频调速系统的智能控制等。

为了讲述上述内容,我们编写了本书,可作为大专院校的教材或参考书,也可作为工矿企业培训教材。由于变频调速技术内容丰富,本书只是打下一个必要的基础,故称基础教程。

在编写本书时,参考和引用了不少文献资料,谨向原编著者致以衷心的感谢。限于作者水平,书中错误之处在所难免,恳请专家和读者指正。

作 者

相关图书推介

序号	书 名	书 号	定价	出版时间
1	施耐德变频器的应用	978-7-111-35783-4	28	201110
2	施耐德变频器原理与应用	978-7-111-26954-0	47	201001
3	变频器应用教程（第2版）	978-7-111-34130-7	40	201106
4	生产机械的变频调速	978-7-111-33189-6	69.8	201106
5	变频器应用与维修	978-7-111-32496-6	45	201103
6	变频器应用图册	978-7-111-31948-1	29.8	201101
7	变频器原理与维修	978-7-111-29808-3	46	201101
8	变频器电路维修与故障实例分析	978-7-111-28319-5	38	201103
9	变频器实用电路图集与原理图说	978-7-111-26924-3	29	201008
10	西门子系列变频器及其工程应用	978-7-111-24328-1	36	201008
11	感应电动机传动和变频器应用技术	978-7-111-23059-5	20	200803
12	变频器应用手册（第3版）	978-7-111-21185-3	43	200802
13	常用变频器功能手册	978-7-111-14979-3	27	200603
14	调速用变频器及配套设备选用指南 （第2版）	978-7-111-07808-×	40	200608
15	变频器、PLC在仿制工业中的应用	978-7-111-26876-5	50	200908
16	变频器、PLC及组态软件实用技术速 成教程	978-7-111-29856-4	59.8	201101
17	变频器、可编程序控制器及触摸屏综 合应用技术	978-7-111-18581-9	65	201009
18	S7-300 PLC和MM440变频器的原理与 应用	978-7-111-19667-9	33	201103

图书团购:

联系人: 李红勇

电 话: 010-88379766

Email: dgdzcmp@sina.com

图书写作与内容咨询:

电 话: 010-88379762

传 真: 010-68326336

联系人: 罗莉

网 址: www.cmpbook.com

E-mail: cmpluoli@163.com

地 址: 北京市西城区百万庄大街 22 号
机械工业出版社 电工电子分社

邮 编: 100037

目 录

前言

绪论	1
一、历史沧桑话调速	1
二、一枝独秀——变频调速	2
三、变频调速系统概述	5
四、变频调速的发展过程	7
五、变频调速技术的主要内容	8
第一章 变频器的基本结构和工作原理	10
一、交-直-交电压型变频器	10
(一) 工作原理	10
(二) 电压型三相变频器分类	14
二、正弦波脉宽调制 (SPWM)	17
(一) 谐波的影响	17
(二) PWM 变频器	18
(三) SPWM 波形成的方法	20
(四) SPWM 的优点	22
(五) 采用 SPWM 应注意的问题	22
三、空间矢量脉宽调制 (SVPWM)	23
(一) 定义与调制原理	23
(二) 电压矢量切换方式与磁链轨迹	23
四、对称调制模式	27
五、交-直-交电流型变频器	28
(一) 强迫换相式逆变器	28
(二) 输出滤波器换相式逆变器	30
(三) 自换相式逆变器	31
六、交-交变频器	31
(一) 概述	31
(二) 交-交变频器的基本结构	33

(三) 交-交变频器的工作原理	33
(四) 交-交变频器的运行方式	36
(五) 换相及触发脉冲产生原理	38
习题及思考题	42
第二章 电力电子器件	43
一、概述	43
二、变频器对电力电子器件的要求	45
三、二极管	46
四、开关器件及其驱动、保护电路	46
(一) 晶闸管 (SCR)	46
(二) 门极关断 (GTO) 晶闸管	47
(三) 大功率晶体管 (GTR、BJT)	50
(四) 功率 MOS 场效应晶体管 (MOSFET)	52
(五) 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	53
(六) 智能功率模块 (IPM)	56
(七) 集成门极换流晶闸管 (IGCT)	58
(八) MOS 控制晶闸管 (MCT)	59
(九) 注入增强栅晶体管 (IET)	60
(十) 静电感应晶体管 (SIT)	60
(十一) 静电感应晶闸管 (SITH)	61
(十二) 碳化硅 (SiC) 功率器件	62
五、开关器件串并联技术	62
(一) 晶闸管的串并联	62
(二) GTO 晶闸管的串并联	64
(三) MOSFET 的串并联	65
(四) GTR 的串并联	65
(五) IGBT 的串并联	66
(六) IGCT 的串联	67
习题及思考题	67
第三章 电动机的运行和负载	69
一、异步电动机的运转状态与控制	69
(一) 起动	69
(二) 升速和调速	71
(三) 降速和制动	72

(四) 反转、四象限运行	73
二、变频调速电动机的机械特性	74
(一) 恒 U_1/f_1 运行方式的机械特性	74
(二) 恒最大转矩 M_m 运行方式的机械特性	76
三、电动机的负载	76
(一) 恒转矩负载	78
(二) 降转矩负载	78
(三) 恒功率负载	79
四、主要负载的特征与变频传动	80
(一) 风机、泵类	80
(二) 机床	82
(三) 卷取机	84
(四) 注塑机	85
(五) 轧钢系统	86
(六) 机车牵引	87
(七) 提升机械	89
(八) 家用电器	90
习题及思考题	91
第四章 变频调速系统的控制与数字化	92
一、变频调速的主要技术指标	92
二、开环控制	93
三、闭环控制	94
(一) 转差频率控制	94
(二) 矢量变换控制	97
(三) 直接转矩控制 (DTC)	103
四、数字控制	108
(一) 大规模集成电路与应用	108
(二) 计算机的应用	112
习题及思考题	119
第五章 变频器对周边电气设备的影响及对策	120
一、输入侧谐波的影响和对策	120
(一) 产生的原因及影响	120
(二) 消除污染的对策	122
(三) 功率因数问题	127

二、输出侧谐波影响的对策	127
(一) 输出波形的谐波分量	128
(二) 谐波等效电路与谐波电流计算	128
(三) 谐波损耗与电动机效率	129
(四) 谐波转矩	131
(五) 消除输出谐波影响的对策	133
三、电波噪声的产生及电磁兼容 (EMC)	134
(一) 传导噪声及其对策	135
(二) 辐射噪声及其对策	135
(三) 感应噪声及其对策	135
四、共模电压及对策	136
五、变频器的可靠性	137
习题及思考题	139
第六章 通用变频器及其应用	140
一、通用变频器概述	140
二、通用变频器的功能与使用	141
(一) 结构与功能	141
(二) 主要功能的设定	144
(三) 保护、自诊断、显示及报警系统	148
(四) 选用件功能与使用	149
三、通用变频器应用实例	151
(一) 变频器在水泵和风机传动中的应用	151
(二) 变频器在机车牵引中的应用	156
(三) 变频器在陶瓷生产中的应用	157
(四) 在冶金起重设备中的应用	160
四、变频传动电气系统的配电与控制设备	165
(一) 变压器	165
(二) 高压断路器及选择	166
(三) 熔断器	168
(四) 低压断路器	169
(五) 电磁接触器	169
(六) 过载继电器	170
(七) 可编程序控制器 (PLC) 简介	171
习题及思考题	174

第七章 高压变频器及其应用	175
一、概述	175
二、高-低-高方式高压变频器	176
三、高-高方式高压变频器	179
(一) 开关器件串联高压变频器	179
(二) 钳位式多电平高压变频器	182
四、高-低方式高压变频器——功率单元串联高压变频器	196
(一) 功率单元串联变频器的结构与原理	196
(二) 功率单元串联变频器分类	198
(三) 故障处理技术	204
(四) 功率单元串联变频器的优点	206
(五) 功率单元串联变频器的应用实例——水泥行业中的典型应用	208
习题及思考题	210
第八章 同步电动机的变频调速	211
一、概述	211
二、同步电动机的起动	212
三、同步电动机的调速	215
(一) 他控式变频调速系统	216
(二) 自控式变频调速系统	217
四、同步电动机调速的控制	222
(一) 转速电流双闭环反馈控制	222
(二) 同步电动机调速系统的矢量控制	224
习题及思考题	227
第九章 智能控制及其在变频调速系统中的应用	228
一、智能控制	228
二、模糊控制与应用 ^[29,30]	229
(一) 概述	229
(二) 模糊集合与输入量模糊化	231
(三) 知识库与模糊控制规则	235
(四) 模糊推理	237
(五) 解模糊化	240
(六) 模糊控制转差频率控制系统	241
三、神经网络控制与应用 ^[29,30]	245
(一) 人工神经网络概述	245

(二) 神经网络的分类与基本模型	247
(三) 神经网络的学习方法	249
(四) BP 神经网络	251
(五) 反馈型神经网络	255
(六) 神经网络控制应用实例——CPN (Counter-Propagation Network) 反向传播神经网络法在 SVPWM 技术中的应用	257
四、遗传算法与应用	260
(一) 概述	260
(二) 遗传算法的基本内容	262
(三) 遗传算法的基本运算过程	264
(四) 遗传算法的特点	265
(五) 遗传算法在电梯群控系统的应用	266
习题及思考题	271
附录	272
参考文献	274

绪 论

一、历史沧桑话调速

工业生产的工作机或称生产机械必须用原动机带动才能工作，最早的原动机是蒸汽机、内燃机、水轮机等，都是些效率不高又笨重的装置。电动机发明以后，由于使用方便、效率较高、装置轻小、占地面积少等一系列优点，很快就取代了那些原动机。用电动机作原动机带动工作机叫做电机传动或电气传动，于是工业生产进入电气传动时代。不仅工业生产，而且各种科研、交通运输、日用工具等也都用上电动机进行电气传动。

由于生产的需要，电气传动系统往往必须有调节速度的功能，才能达到提高工效、保证质量和节能的要求；直流电动机首先能满足这一要求。因为直流电动机可以方便地通过调节电压或调节励磁，便可调节速度，而且是平滑连续无级调速。而交流电动机由于结构关系和当时的技术条件不能满足这个要求，故此在早期的电气传动中，直流电动机调速简称直流调速，基本上处于垄断地位。

然而直流电动机却有着不可克服的缺点。第一，结构复杂导致造价较高；其次，具有换向器和电刷，经常要清理和置换，增加维护工作量和成本；再有就是因有换向器和电刷，不适宜工作于恶劣工作条件，如潮湿、粉尘等环境，特别是有瓦斯的场合，电刷产生的火花会引起爆炸。可是与此相反，交流电动机特别是笼型异步电动机没有这些缺点。它具有结构简单、坚固、体积小、重量轻、占地小、维护简单、价格低廉，能适应恶劣工作条件等一系列优点。据统计，同功率同速度定额，笼型电动机的投资只是直流电动机的 $1/6$ ，功率重量比却是直流机的两倍。因此它们在电气传动中得到广泛应用，如把它们排斥在调速传动之外显然是不合理的现象，也是一个显著的矛盾；解决这个矛盾，广泛采用交流电动机调速即交流调速传动，一直是人们

的愿望。

现代工业生产的需要使这一矛盾更为突出，因为要求电动机具有大容量、高电压和高转速，直流电动机已经不能满足需要。这是由于它受到换向器和电刷结构的限制，单机容量只能做到 12000 ~ 15000kW，电压只能做到 1kV，转速只能做到 3000r/min。而交流电动机单机容量已做到几万千瓦，电压达 10 ~ 15kV，转速可达 1 万 r/min 以上，因而广泛采用交流调速更为迫切。

过去交流调速实际上也有几种方案，常见的有改变极对数调速和改变绕线转子电动机转子回路中所串电阻调速，这些调速均属有级调速，且后者损耗大、效率低，故应用不多。改变电源频率实现无级平滑调速，人们也有所尝试。早期采用变频机组供电作变频调速，由于投资大、效率低，不易推广。后来相继用汞弧（水银）整流器和闸流管制造变频器，也由于造价高且性能不好，很少被采用。所以总的来说，过去有一段较长的时间，交流调速发展很慢，采用很少，直流调速得以垄断调速传动的领域。

由于电力电子技术的发展，可控的电力电子器件的研制成功，情况大有改变。首先是 1957 年晶闸管的问世，交流电动机的无级调速问题得到了突破。由于晶闸管具有良好的开关特性与控制特性，促使交流调速发展很快，出现多种调速方案，在调速传动系统中得到越来越多的应用。许多先进工业国家已经有系列产品，所用电动机容量从几个千瓦到几十兆瓦。机械、冶金、造纸、化纤、食品、纺织、交通运输等工业，广泛予以采用，据统计国外在 20 世纪 70 年代后期，仅交流变频调速在调速传动领域中已占了相当大的比重，过后新的功率器件如大功率晶体管、GTO 晶闸管、IGBT 等诞生，加速了交流调速的发展，极大地扩充调速领域。由于采用新型功率开关器件，加上良好的控制技术，交流调速既有良好的调速特性，又能充分发挥交流电动机的优越性，所以有人预言交流调速有完全取代直流调速的趋势。

二、一枝独秀——变频调速

大家知道，交流电动机的转速公式是

$$n = \frac{60f}{p(1-s)}$$

式中 n ——转速 (r/min);

f ——电源频率 (Hz);

p ——极对数;

s ——转差率, 对于同步电动机 $s=0$ 。

可见只要改变 f 、 s 或 p 三个参数之一即可调节电动机的转速, 其中改变 f 或 s 为无级调速。改变 p 是有级调速, 只在某些场合作为辅助手段。

根据上述调速的基本原理, 出现了许多采用电力电子器件的交流调速方案, 常用的可归纳为四种基本方案; 即定子电压调压调速、电磁转差离合器调速、串级调速和变频调速。前三种属于改变转差率, 后一种属于改变频率。现分别简要介绍于下:

1. 定子电压调压调速

又称一次电压调压调速, 简称调压调速, 属于调转差率。它是通过晶闸管来改变定子绕组端电压来调速, 代替了过去用电阻调压, 优点是装置简单、控制方便、投资小、响应快。但其损耗与转差率成正比, 低速时损耗严重, 效率很低, 往往要降低电动机功率运行, 故称为能耗调速。再者, 调压调速的调速范围不宽, 机械特性软, 故属于不理想的方案, 以前常用于电梯系统, 现在已很少见。

2. 电磁转差离合器调速

属于调转差率, 用电磁转差离合器作为电动机和工作机的联轴器, 用晶闸管改变离合器的励磁电流就能改变工作机的转速。通常将电动机与离合器装成一体, 使用方便, 控制简单, 但损耗大, 也属于能耗调速。以前, 国内在纺织、印染、印刷、化工等机械上常见到, 现在也很少见。

3. 串级调速

此方案只限于绕线转子异步电动机, 又分超同步和次同步两种, 串级调速也属于调转差率。其特点是能利用晶闸管制成的逆变器将转差功率反馈给电网, 因此效率较高, 造价较低。但功率因数低, 常需

要用移相电容补偿，因而增加投资。另外，机械特性较软，功率因数低，故也不理想。

4. 变频调速

属于改变频率 f 调速，采用各种电力电子器件制成的变频器，可以平滑地无级调速。它适用于异步电动机和同步电动机，但用于笼型异步电动机更显得优越。此种方案运行时转差率很小，故损耗小，效率和力能指标较高；同时，它既可向下调速又可以向上调速，因而调速范围宽，连续平滑调速分辨力不到1Hz；闭环控制时可得到很高的转矩、调速精度，还可以做多电动机传动。

基于上述，我们可以看出变频调速优点全面，适应面很广，所以是发展的主要方向。虽然此方案突出的缺点是造价高，比直流调速约高20%~50%（用晶闸管可控整流代替直流发电机组以后），但由于新的电力电子器件不断诞生，控制装置集成化、模块化、数字化，造价问题也将逐步获得解决。因此总的来说，变频调速是最佳调速传动方案，可以说是一枝独秀，其用途见表0-1。

表 0-1 变频调速技术应用范围及用途

变频器传动的效能	应用领域	主要相关技术	适用变频器
节能	风扇、鼓风机、泵、提升机、挤压机、搅拌机、传送带、工业用洗衣机	为提高运行可靠性，台数控制和调速控制并用	通用变频器
提高生产率	提升机、起重机、机床、食品机械、挤压机和自动仓库	运行程序或加工工艺的最佳速度，原有设备的增速运行运转可靠性提高	通用变频器、专用型变频器
提高产品质量	风扇、鼓风机、泵、机床、食品机械、造纸机、薄膜生产线、钢板加工生产线、印制电路板基板钻孔机、高速雕刻机	平滑加减速，加工对象所需最佳速度选定，高精度转矩控制，高精度定位停止，无转矩脉动，高速传动	通用变频器、系统用矢量控制变频器，高速通用变频器

(续)

变频器传动的效能	应用领域	主要相关技术	适用变频器
设备合理化, 少维护, 低成本, 机械的标准化、简单化与工厂自动化(FA)	搬送机械, 金属加工机械、纤维机械, 造纸生产线、薄膜生产线、钢板加工生产线	原有设备的增速运行, 高精度转矩控制, 多台电动机联动运行, 多台电动机联动比例运行, 提高运转可靠性, 传送控制	通用变频器、通用矢量控制变频器、系统用矢量控制变频器
改善或适应环境	空调机、风扇、鼓风机、压缩机、电梯	静音化, 平滑加减速, 使用防爆电动机、安全性等技术	通用变频器、专用变频器

三、变频调速系统概述

变频调速系统由变频器、传动电动机和控制装置组成, 有的把控制装置归并在变频器, 如图 0-1 所示, 有的还包括负载, 如图 0-2 所示。变频器将电网固定频率变成可调的频率, 输送给电动机, 实现变频调速, 因此变频器是调速系统的核心部件。

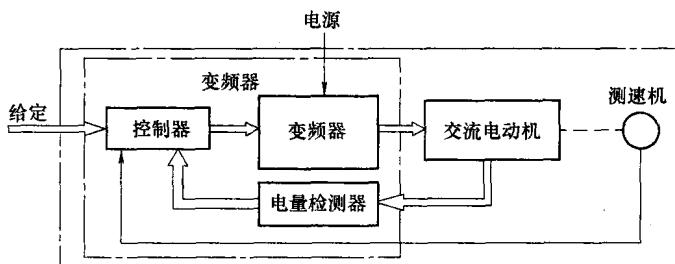


图 0-1 变频调速系统

变频器依照变频原理可分为两大类：一类是将电网固定频率的交流电直接变成可调频率的交流电, 叫做交流-交流变频器, 简称交-交变频器 (如图 0-3a 所示)。另一类是先将电网固定频率的交流电整流成直流电, 经过滤波, 使直流较平直, 再将直流电逆变成频率可调的交流电, 称为交流-直流-交流变频器, 简称交-直-交变频器, 它由整流器、滤波器和逆变器组成 (如图 0-3b 所示), 逆变器完成直流