

工业自动化新技术丛书

通用变频器选型、应用与维护

王仁祥 王小曼 编著

人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

通用变频器选型、应用与维护 / 王仁祥, 王小曼编著. —北京: 人民邮电出版社, 2005.9
(工业自动化新技术丛书)

ISBN 7-115-13802-8

. 通... . 王... 王... . 变频器—基本知识 . TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 089391 号

内 容 提 要

本书详细地介绍了通用变频器的基本结构原理、功能特性、电磁兼容性、选型、运行与维护技术, 通用变频器网络通信技术、通信原理及现场总线技术的基础知识。同时, 选择了几种具有代表性的品牌产品给予介绍, 如西门子、ABB、富士、三菱、施耐德等品牌的产品。全书密切联系实际, 列举了大量的工程应用实例, 侧重于实际工程应用。

本书可供从事电气工程自动化、生产过程自动化、工业网络控制技术各领域的工程技术人员阅读及作培训教材, 亦可作为高等学校有关专业的选修课教材和教学参考书, 中等院校相关专业也可选用。

工业自动化新技术丛书

通用变频器选型、应用与维护

-
- ◆ 编 著 王仁祥 王小曼
责任编辑 张 伟
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 27
字数: 670 千字 2005 年 9 月第 1 版
印数: 1—5 000 册 2005 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-13802-8/TN · 2559

定价: 39.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

《工业自动化新技术丛书》

前 言

现代工业自动化技术涉及微电子技术、计算机技术、现代控制技术、传感器技术、通信技术、网络技术、运动控制技术、制造技术等诸多学科。其中，计算机控制技术、可编程序控制器、通用变频器与伺服驱动技术以及机器人技术充当了重要角色，它们通过网络控制技术和现场总线技术的联系，实现了智能化控制系统、网络化控制系统、高性能运动控制系统、分布式控制系统和基于网络系统的虚拟企业自动化系统等。这些新技术正在工业现场得到日新月异地发展，自动化工厂也不断涌现，在工业自动化领域产生了巨大的社会和经济效益。

为了进一步探索、研究和推广工业自动化新技术，推动我国自动化领域的技术进步，提高工业自动化技术的应用水平，培养高水平的工程技术人才，帮助工作在生产一线的工程技术人员及时拓展知识结构，全面地了解和掌握现代工业自动化领域中的最新技术和应用，我们组织有关专家、学者和技术人员编写了《工业自动化新技术丛书》，该丛书内容基本涵盖了现代工业自动化领域中的最新技术及其应用，以适应我国工业自动化发展的需要。

丛书的编写宗旨是以技术应用为主，理论与实践密切结合，强调实用性和系统性，以期在向读者展示国内外最新技术、产品应用与发展动态的同时，提供解决现代工业自动化技术应用的思路与方法，为实现现代自动化工厂提供典型示范。丛书选题既考虑内容的实用性，又考虑到一定的系统性，语言通俗易懂，便于读者自学。

当然，由于工业自动化技术的发展日新月异及编者的水平有限，书中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。

前 言

通用变频器传动已成为实现工业自动化的主要手段之一，在各种生产机械和生产线中有着广泛的应用。其中，重要的技术特征是可以充分地与现代网络技术结合，发挥智能控制的优势，实现分布式网络控制系统，这是工业企业自动化的重要发展方向，并已有一些很好的范例。现在，通用变频器在各行各业中的应用，已成为改造传统工业、改善工艺流程、提高生产过程自动化水平、提高产品质量、改善生产环境、节约能源、推动技术进步的主要技术手段之一，也是国际上更新换代最快的新技术领域之一。

工业自动化主要包括单机系统自动化、工业生产过程自动化和管理自动化等三个方面，现代自动化的核心是生产过程信息化、网络化，具有开放性、智能性、分布式和网络化控制的特点。其中，计算机控制技术充当了极为重要的角色，包括可编程控制器、通用变频器、智能化仪器仪表和传感器等在内的可通信智能化设备，为其在工业自动化方面的应用提供了坚实的舞台，而通用变频器在其中起着举足轻重的作用。

现代通用变频器的控制理论与技术、全数字化控制技术、网络通信技术等的迅速发展，是通用变频器应用技术日新月异地发展的基础，特别是在网络化控制技术方面愈显突出。目前，现代交流传动控制以网络化控制技术取代单机控制已成为现实，交流传动控制已不再仅局限于单一的调速控制要求，而更多的是要求装置化、系统化、网络化应用，以获得更强的控制功能。因此，当今的变频调速控制技术已成为高科技领域的综合性技术之一，网络化传动控制技术将是现代变频调速控制技术发展的核心技术。在控制系统中，通用变频器通过可编程控制器或工业计算机与工厂管理系统相结合，与生产线控制系统及现场设备一起构成一个多级分布式控制系统。从这个现实出发，现在我们讨论交流电动机变频调速技术就不能不与计算机控制技术和网络控制技术，尤其是与现场总线及其通信技术紧密联系，这也是本书写作过程中重要考虑的内容之一。本书以相当篇幅详细地介绍了通用变频器的通信功能及通信网络技术，列举了一些编程实例，由于其与现场总线紧密相联系，所以也较详细地介绍了现场总线的基础知识。

通用变频器控制系统终究是一个技术密集、比较复杂、规模较大、一次性投资大的项目。目前在市场上的通用变频器产品品牌、种类越来越多，有近百个品牌，上千个系列，不同公司的产品各有特点，使用起来差异较大，尤其是在设计选型方面，大家面对众多的品牌和功能参数往往难以轻易定论，厂家在售后服务和维修方面也有许多不便和困难。如果不能做到胸有成竹，不预先弄清楚它们的技术要点，匆匆下手就难免造成不必要的损失。目前关于专门介绍通用变频器的著作不少，这些著作对在我国推广普及应用通用变频器技术起到了功不可没的作用，作者也从中受益匪浅。本书将试图从通用变频器应用技术的角度出发，比较全面地反映目前通用变频器的最新技术及应用，给广大读者在应用、选型及维护技术方面提供一点参考资料，另外，作者经常深入到生产现场，深知资料匮乏带来的尴尬场面，本书正是在这一背景下编写的，一旦出版面世亦请多多指教为盼。

根据本书编写目的，作者选择了几种具有代表性的、在国内有一定影响力的、能体现不同技术层次特点的品牌产品给予介绍，重点介绍了它们的网络通信技术及最新系列产品的特

点，对它们的通用技术并不过多地叙述，并无意涉及理论研究方面的内容，这样会使读者居高临下地了解和掌握通用变频器的最新技术，而不会有高不可攀的感觉。另外，作者将一些应用技术分散在相应的技术要点处，而不是集中叙述，这样更接近现场，这也是本书写作的特点之一。

本书内容具有下列特点：内容切合工程实际，取材先进、新颖。联系工程实际，引入学科交叉内容，介绍了一些新思想、新方法和新技术。较系统地论述了通用变频器在一些行业中的应用技术，尤其是通用变频器网络通信技术及现场总线技术的基础知识，符合现代工业自动化技术发展的需求。理论联系实际，具有面向广大工程技术人员的特点，因而具有很强的工程性、实用性。技术内容系统、准确、深入浅出、便于工程应用。

本书编写过程中曾参考和引用了国内外许多专家、学者最新发表的论文、著作以及一些厂商网站的资料、产品说明书的内容，也受到了许多厂商的大力支持，并寄来了详尽的产品资料。由于各种因素不能一一列举、面谢，作者在此一并致谢。同时感谢青岛大学刘湘波同志对全部书稿进行了逐字逐句的审查，提出了详细的审稿意见，在校稿、打字、绘图等工作中作了大量工作，给予了热情的帮助和支持。

由于水平及时间所限，书中难免存在错误和不妥，热忱欢迎广大读者批评指正，作者将不胜感谢。

编者

目 录

绪论	1
0.1 通用变频器的发展	2
0.2 通用变频器相关技术的发展	4
0.3 国外交流变频调速技术现状	8
0.4 关于本书的一些思考	9
第 1 章 通用变频器原理	10
1.1 交流电动机变频调速时的基本理论	10
1.1.1 生产机械的运动方程	10
1.1.2 异步电动机的机械特性	12
1.1.3 生产机械的负载特性	15
1.2 变频调速时的机械负载特性	17
1.2.1 变频调速时电动机的转矩特性	18
1.2.2 通用变频器驱动恒转矩负载	19
1.2.3 通用变频器驱动降转矩负载	21
1.2.4 通用变频器驱动恒功率负载	21
1.2.5 通用变频器驱动四象限运行的负载	23
1.2.6 通用变频器驱动张力控制类负载	24
1.2.7 通用变频器驱动高速运转的负载	26
1.2.8 通用变频器驱动大起动转矩负载	26
1.2.9 通用变频器驱动多分部(单元)速度协调类负载	27
1.2.10 通用变频器驱动宽调速类负载	27
1.2.11 通用变频器驱动大惯性负载	27
1.2.12 通用变频器驱动脉动转矩负载	28
1.2.13 变频器专用电动机	28
1.3 通用变频器的控制方式	29
1.3.1 通用变频器的基本控制原理	29
1.3.2 U/f 控制方式与转差频率控制方式	30
1.3.3 矢量控制方式	31
1.3.4 直接转矩控制方式	32
1.3.5 PAM、PWM、SPWM 和高频载波控制方式	33
1.3.6 通用变频器的分类	34
1.4 通用变频器的基本结构原理	38
1.4.1 通用变频器的基本结构原理	38
1.4.2 通用变频器主电路的基本功能	39

1.4.3	通用变频器控制电路的基本功能	44
1.5	通用变频器的主要控制功能与设定	52
1.5.1	通用变频器的外部接口电路	53
1.5.2	通用变频器的主要控制功能	56
1.5.3	通用变频器的参数设定实例	73
1.6	通用变频器选型基础	77
1.6.1	通用变频器产品简介	77
1.6.2	通用变频器的标准技术规范	80
1.6.3	通用变频器的选型	86
1.7	通用变频器选型与应用中的若干问题	104
1.7.1	关于通用变频器控制方式的选择	105
1.7.2	通用变频器用于控制特殊电动机与机械设备	108
1.7.3	特殊情况下通用变频器的应用问题	109
1.7.4	通用变频器的电磁干扰与安全运行	110
1.7.5	关于通用变频器的参数设定问题	112
第 2 章	通用变频器应用设计基础	115
2.1	通用变频器调速系统的负载计算	115
2.1.1	典型负载的计算	115
2.1.2	变频调速时的典型负载设计要点	118
2.1.3	选定电动机时的注意事项	119
2.2	变频控制系统的设计	121
2.2.1	变频控制柜的电气设计	122
2.2.2	通用变频器使用要点	125
2.3	通用变频器应用中的电磁兼容性	126
2.3.1	概述	126
2.3.2	电磁兼容性 (EMC) 的定义	128
2.3.3	通用变频器的谐波和噪声的产生	129
2.3.4	通用变频器系统的电磁噪声干扰	130
2.3.5	通用变频器的谐波抑制	132
2.3.6	通用变频器外部干扰的抑制	135
2.3.7	通用变频器内部干扰的抑制	138
2.3.8	通用变频器的电磁兼容性设计	140
2.3.9	谐波干扰故障处理实例	150
2.4	通用变频器在各行业中的应用	151
2.4.1	概述	151
2.4.2	通用变频器在泵和风机中的应用	152
2.4.3	通用变频器在中央空调中的应用	160
2.4.4	通用变频器在纺织行业中的应用	166
2.4.5	通用变频器在水泥工业中的应用	169

2.4.6	通用变频器在塑料机械中的应用	171
2.5	智能 PID 调节器简介	173
2.5.1	PID 控制器的原理和特点	174
2.5.2	智能 PID 控制器的原理和特点	175
2.5.3	智能 PID 调节器简介	176
2.5.4	开环控制和闭环控制	179
2.5.5	PID 控制器的参数整定	180
2.6	常用工业自动化仪表和传感器简介	188
2.6.1	概述	188
2.6.2	传感器与变送器	189
2.6.3	工业自动化仪表	199
第 3 章	通用变频器网络通信与现场总线	203
3.1	概述	203
3.2	数据通信基础	205
3.2.1	数据编码	206
3.2.2	数据通信的基本概念和技术指标	208
3.2.3	数据通信方式	210
3.2.4	网络通信协议	211
3.2.5	介质访问控制	222
3.2.6	通道利用方式	223
3.2.7	网络拓扑结构	224
3.2.8	通信传输介质	225
3.3	串行通信的基本原理	229
3.3.1	串行通信接口及组成	230
3.3.2	RS232C 串行通信接口	231
3.3.3	RS423 串行通信接口	235
3.3.4	RS422 串行通信接口	235
3.3.5	RS485 串行通信接口	235
3.3.6	USB 总线接口	236
3.3.7	蓝牙技术简介	239
3.4	现场总线技术基础	240
3.4.1	现场总线技术优势	241
3.4.2	现场总线与通信协议简介	246
3.4.3	西门子 USS 通信协议与应用	259
3.5	通用变频器网络通信实例	263
3.5.1	点对点网络的建立	264
3.5.2	分层结构工业控制网络的建立	266
3.5.3	西门子 PLC 与通用变频器间的通信	267
3.5.4	用 Visual Basic 6.0 编制通用变频器串行通信控制程序	272

3.5.5	利用 Windows API 函数编制通用变频器串行通信控制程序	275
第 4 章	通用变频器产品简介	280
4.1	通用变频器的技术参数	280
4.2	西门子通用变频器	281
4.2.1	西门子通用变频器概述	281
4.2.2	MM4 系列通用变频器	282
4.2.3	MM3 系列通用变频器概述	286
4.2.4	电动机变频器一体化装置	289
4.2.5	SINAMICS G110 系列变频器	290
4.2.6	SIMATIC ET200S FC 系列分布式 I/O 变频器	299
4.3	ABB 通用变频器	303
4.3.1	ABB 通用变频器概述	304
4.3.2	Comp-AC™ 通用变频器	306
4.3.3	ACS400 系列通用变频器简介	309
4.3.4	ACS550 系列标准型通用变频器	314
4.3.5	ACS600 系列通用变频器	315
4.3.6	ACS800 系列通用变频器	317
4.4	富士通用变频器	319
4.4.1	富士通用变频器的主要特征	320
4.4.2	富士 FRENIC5000G11S/P11S 系列通用变频器性能概述	321
4.4.3	富士 FVR-E11S 系列通用变频器性能概述	324
4.4.4	富士通用变频器的通信	325
4.5	三菱通用变频器	336
4.5.1	三菱通用变频器简介	336
4.5.2	FR-F500 风机水泵专用型通用变频器应用简介	338
4.6	施耐德通用变频器	348
4.6.1	施耐德通用变频器简介	348
4.6.2	施耐德通用变频器的通信与网络功能	351
4.7	LG 通用变频器	358
4.7.1	LG 通用变频器简介	358
4.7.2	LG 通用变频器的内置通信功能	359
第 5 章	通用变频器的故障分析与维护	364
5.1	通用变频器故障的行为率曲线	364
5.2	通用变频器的主要故障类型	366
5.2.1	参数设置类故障	366
5.2.2	过电流和过载类故障	367
5.2.3	过电压和欠电压类故障	368
5.2.4	综合性故障	368

5.3	通用变频器的故障分析	369
5.3.1	通用变频器主要部件的故障分析	369
5.3.2	通用变频器控制系统中的电力电缆及其电磁兼容性	371
5.3.3	通用变频器控制系统中的接地	372
5.3.4	通用变频器控制系统中常见问题	374
5.3.5	通用变频器故障维修实例	377
5.3.6	通用变频器载波频率与其他各量的关系	380
5.4	通用变频器控制系统故障诊断	381
5.5	通用变频器的维护保养	392
5.5.1	日常检查和定期检查	394
5.5.2	通用变频器的基本检测和测量方法	396
5.5.3	异步电动机的日常检查测量	399
5.5.4	常用测量仪器仪表简介	402
5.5.5	常用电子元器件检测方法	412
	参考文献	417

绪 论

通用变频器是指可以应用于通用交流电动机调速控制的变频器，其特点是具有通用性，并具有智能化特征，“通用变频器”也因此而得名。由于通用变频器强调通用性，不但从控制思想上有其内在的通用性能，同时也将现场经验和应用技巧不断地融入控制策略中，使其功能不断地得到充实和加强，智能化的特征也越来越明显。如 ABB 公司的 Comp-AC™ 理念认为：小功率通用变频器作为一种产品，应当像使用普通开关电器，如接触器、继电器等一样，使用简单、方便、安全、可靠。Comp-AC™ 理念使用户完成一项传动任务非常简单，只要按照所提供的简明示意图和安全操作指南，就可以很快将变频器投入使用；在选型或确定技术方案时，如果需要，会即刻得到相关的技术解决方案、产品选型资料和技术支持。新型的通用变频器还增加了友好的图形化用户界面、引导式调试步骤、参数趋势图形和多种通信协议，提供与上位机通信的接口，可方便地通过 RS232/RS485 等串行通信接口和现场总线构成网络。ABB 公司最近推出的新产品 ACS800 还增加了简易 PLC（可编程序控制器）功能，不需要专用工具和编程语言，用户可以自定义编程多达 15 个功能程序模块，并能将程序存储在功能模块模板上。此外，还专门针对不同行业开发了多个宏程序，包括造纸机械上使用的主从宏、纺织机械上使用的摆频宏、恒压供水系统上使用的 PFC 宏、PID 控制宏、转矩控制宏等。西门子公司新型第 4 代产品中的 Micro Master 420 具有友好的新型参数结构，安装和调试方便，并具有系统集成软件 Drive ES。所有这些都充分体现了当代通用变频器的技术水平和发展方向。

目前，通用变频器已在各行各业中的各种设备上普及应用，并成为当今节电、改造传统工业、改善工艺流程、提高生产过程自动化水平、提高产品质量、改善环境、推动技术进步的主要手段之一。它以其优异的性能和广泛的适用性被国内外公认为最有发展前途的绿色技术，是国民经济和日常生活中普遍需要的新技术，也是国际上技术更新换代最快的领域之一。随着电力电子器件制造、基于电力电子电路的电力变换、计算机、现代控制、微电子、全数字化控制、网络通信等技术的迅速发展，通用变频器技术也日新月异。特别是通用变频器的全数字化、网络化控制技术，在提高其性能方面起到了举足轻重的作用，从而使电气运动控制技术也发生了深刻的历史性变革。现代交流电动机传动控制已不再仅局限于单一的调速控制要求，而更多地是要求装置化、系统化、网络化应用。新一代的变频调速控制技术是基于正弦波 SPWM 脉宽调制技术、矢量变换技术、直接转矩控制和网络通信技术为基础的全数字化控制技术。微处理器技术、PWM 控制技术和电力电子开关器件是通用变频器控制技术的基础。可以说，电力电子器件的更新换代，促使了电力变换技术的不断发展，通用变频器控制技术的发展完全得益于微处理器技术、PWM 控制技术和电力电子开关器件的发展。

自从 1991 年 Intel 公司推出 8X196MX 系列芯片以来，8X196KB、8X196KC、8X196MC

等在通用变频器中应用广泛，专门用于电动机控制的芯片在品种、性能、处理速度、控制功能、性能价格比等方面也都有很大的发展，如日本 NEC 的 PD78366 微处理器，三菱电机的 M37704、M37705 单片机，日立公司的 SH7000 系列微处理器等。由于交流电动机控制理论不断发展，控制策略和控制算法也日益复杂。扩展卡尔曼滤波、FFT、状态观测器、自适应控制、人工神经网络等均应用到了通用变频器控制策略中，因此，数字处理器 DSP 芯片在全数字化的高性能通用变频器中被广泛应用，如美国 TI 公司的数字处理器 TMS320C240 DSP 等都是颇具代表性的产品。最近 TI 公司推出的 MCS320F240X 系列产品将价格降低到了单片机的水平，从而使得在较短时期内，全数字化进程就由 8 位 CPU 发展到 16 位、32 位乃至双 CPU 占主流。目前，并行运算的 32 位 DSP，与 16 位 CPU 相比较，运算速度提高了近 50 倍。用模拟控制方式下所不能想象的控制功能，在各种软件的支持下轻而易举地实现了，并且能够在 Windows 95/98/NT 平台下编程、交换数据，使通用变频器的性能不断提高，功能不断充实、增强。新型通用变频器已经实现了转矩控制功能，具有无跳闸能力，由这种变频器驱动的通用异步电动机已经具备了挖土机特性，像直流电动机一样，可以人为地设定其极限输出转矩，零速时的起动转矩可以达到额定转矩的 200%，如日立、富士公司采用动态转矩矢量控制方法，可达到在 0.5Hz 附近 200%的转矩，甚至更高。微处理器适时快速地完成复杂的控制算法，使矢量控制、直接转矩控制通用变频器的实用化成为现实，并使异步电动机控制系统在动态性能方面已经赶上或超过了直流调速系统。值得一提的是，在通用变频器全数字化过程中，各种总线也扮演了相当重要的角色，如 STD 总线、工业 PC 总线、现场总线等。

0.1 通用变频器的发展

1. 通用变频器技术的原型

1964 年德国人 A.Schonung 和 H.Stemmler 首先在《BBC 评论》上提出把通信技术中的脉宽调制 (PWM, Pulse Width Modulation) 技术应用到交流传动中，从此，自 20 世纪 70 年代初，对 PWM 调速技术的研究引起了人们的高度重视。到 20 世纪 80 年代初，日本学者提出了基本磁通轨迹的磁通轨迹控制方法，该方法以三相波形的整体生成效果为前提，以逼近电动机气隙的理想圆形旋转磁场轨迹为目的，一次生成二相调制波形，使 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 技术 (又称为 U/f 方式) 成为变频调速技术的核心，此后，人们着力于 PWM 模式的优化问题的研究，并得出诸多的优化模式，进一步活跃了变频调速技术的发展。这个时期的通用变频器的基本原理是以生成三相交流正弦波形的效果为前提，采用逼近电动机气隙的旋转磁场轨迹的方法，生成基于磁通轨迹的电压空间矢量 (或称磁通轨迹法) 和调制波形，以达到调压调频的目的。这种方法后来被称为电压空间矢量控制。从 20 世纪 80 年代后半期开始，美、日、德、英等发达国家的基于 VVVF 技术的通用变频器已商品化并广泛应用。如 1990 年前后进入中国市场的日本富士公司的 RN5000G5/P5、FVR 与 FRNG7/P7 系列，日本三菱公司的 SVF、MF 系列，西门子 Micro Master 系列等。新型 U/f 控制方式通用变频器在新型电力电子器件的支持下，融入了新的算法、控制技术和功能，在性能方面已有很大改进，低频性能大大提高，并具备自寻优运行功能，节电效果更好，已能满足一般工业控制的需求。

2. 矢量控制通用变频器

1968 年德国人哈斯 (Hasse) 博士首先提出了磁场定向 (Field Orientation) 控制理论, 1971 年德国人伯拉斯切克 (F.Blaschke) 以专利文献的形式提出了异步电动机转子磁场定向矢量控制的方法, 并以直流电动机和交流电动机比较的方法分析阐述了这一原理, 使人们了解到尽管交流电动机电磁关系复杂, 但同样可以实现转矩、磁场分别控制的方法。该理论提出对磁链和电磁转矩分别采用闭环控制, 实现电流和磁场的解耦, 进一步实现转子磁场定向矢量控制, 使异步电动机的控制特性和他励直流电动机特性相似, 从而使异步电动机的调速控制理论前进了一大步。这种系统可以实现很快的转矩响应速度和很高的速度、转矩控制精度, 但需依赖于精确的电动机数学模型和对电动机参数的自动辨识, 通过自动辨识确立电动机实际的定子阻抗、饱和因数、电动机惯量等重要参数, 然后根据精确的电动机模型, 估算出电动机的实际转矩、定子磁链和转子速度, 并由磁链和转矩的控制产生 PWM 信号对逆变器的开关状态进行控制。至 1980 年, 德国人 Leonhard 等在应用微处理器的矢量控制研究中取得了进展, 促进了矢量控制技术的实用化。此后, 日本厂商竞相研究矢量控制技术, 并在产品性能和价格两个方面取得进展, 理论界则应用现代控制理论把矢量控制的理论进一步深化, 开拓了解耦控制、速度观测、参数自适应、无速度传感器矢量控制等方面的理论成果。在实用化方面, 人们经过进一步分析研究发现, 对于一般的异步电动机调速控制系统, 可以采用较简单的转子磁场定向矢量控制, 即通常说的转差频率矢量控制, 显然这是对转子磁链定向控制方法的近似。转差频率矢量控制又分为电流型转差频率矢量控制和电压型转差频率矢量控制。转差频率矢量控制使异步电动机的动态特性控制方面有了长足的进展, 这也是目前矢量控制型通用变频器的理论基础。

通用矢量控制型变频器的基本理论是“派克 (Park) 变换”, 基本原理是将异步电动机在三相坐标系下的定子电流 I_a 、 I_b 、 I_c , 通过三相/二相变换, 将其等效成两相静止坐标系下的交流电流, 再通过按转子磁场定向旋转变换, 等效成同步旋转坐标系下的直流电流 I_{m1} 、 I_{t1} (I_{m1} 模拟直流电动机的励磁电流, I_{t1} 模拟与转矩成正比的电枢电流), 然后仿效直流电动机的控制方法, 求得电动机的控制量, 再经过相应的坐标反变换, 实现对异步电动机的参量控制。由此可见, 矢量控制的特征是控制转子磁链, 以转子磁链定向, 然后分解定子电流, 使之成为转矩和磁场两个分量, 再经过坐标变换实现正交或解耦控制。显然, 转子磁链是很难准确观测的, 它必须直接或间接地得到转子磁链在空间上的位置, 才能实现准确的定子电流解耦控制, 在这种矢量控制系统中需要配置转子位置或速度传感器, 这在众多应用场合上不太现实。随着现代控制理论的发展和数字信号处理器 DSP 在通用变频器中的应用, 上述问题得到了很好的解决, “只用电动机三根线控制”成为现实, 即现在所说的无速度传感器矢量控制通用变频器。

自 1992 年开始, 德国西门子公司相继开发了 6SE70 系列通用变频器, 通过 FC、VC、SC 板可以分别实现频率控制、矢量控制、伺服控制等, 至 1994 年该系列通用变频器的容量就扩展至 315kW 以上。这一时期的典型产品属于高功能型 U/f 控制方式通用变频器, 具有转矩控制功能和无跳闸能力, 输出静态转矩特性较普通型 U/f 控制方式通用变频器有很大改进, 机械特性硬度高于工频电网供电的异步电动机。在此基础上进一步发展的高性能型矢量控制通用变频器, 在动态性能方面有了很大提高, 具备了挖土机特性, 目前该系列通用变频器的容量已扩展到 4 000kW。富士电机新开发的“高性能转矩计算功能”, 转矩矢量控制是在各种运行条件下, 根据负载状态实时计算转矩, 使异步电动机能最大限度地输出转矩, 最适当地

控制电压、电流矢量，大大提高了低速领域的计算精度和速度。目前应用最多的还是高性能型 U/f 控制方式通用变频器，这类变频器的性能足以满足大多数生产机械高质量调速控制的需要，只有在特殊应用场合才考虑选用高性能型矢量控制通用变频器，市场上已有众多的品牌可供选择。如富士公司的 FRENIC5000VG7S 系列高性能无速度传感器矢量控制通用变频器，已做到了速度控制精度 $\pm 0.005\%$ 、速度响应 100Hz、电流响应 800Hz 和转矩控制精度 $\pm 3\%$ （带 PG）。日本三菱、日立，芬兰 VASON 等最新的系列产品采取了类似无速度传感器控制的设计，性能有了进一步提高。

3. 直接转矩控制通用变频器

直接转矩控制（Direct Torque Control, DTC），英文有的也称为 Direct Self Control（DSC），直译为直接自控制，这种控制思想以转矩为中心进行综合控制，不仅控制转矩，也用于磁链量的控制和磁链自控制。直接转矩控制与矢量控制的区别是：它不是通过控制电流、磁链等量间接控制转矩，而是把转矩直接作为被控量控制，其实质是用空间矢量的分析方法，以定子磁场定向方式，对定子磁链和电磁转矩进行直接控制。1985 年德国鲁尔大学的狄普布洛克（M. Depenbrock）教授首先提出了基于六边形的圆形磁链轨迹直接转矩控制理论，他称为 Direct Self Control（DSC）。这种方法不需要复杂的坐标变换，而是直接在电动机定子坐标上计算磁链的模和转矩的大小，并通过磁链和转矩的直接跟踪，实现 PWM 脉宽调制和系统的高动态性能。直接转矩控制的逆变器采用不同的开关器件，控制方法也有所不同。Depenbrock 最初提出的直接自控制理论，主要在高压、大功率且开关频率较低的逆变器控制中广泛应用。目前被应用于通用变频器的控制方法是一种改进的、适合于高开关频率逆变器的方法。ABB 公司的直接转矩控制通用变频器，目前已成为其各系列通用变频器的核心技术，动态转矩响应已达到小于 2ms，在带速度传感器时的静态速度精度达 $\pm 0.001\%$ ，在不带速度传感器的情况下即使受到输入电压的变化或负载突变的影响，同样可以达到 $\pm 0.1\%$ 的速度控制精度。

02 通用变频器相关技术的发展

1. 关于功率器件

自 20 世纪 60 年代后半期开始，电力电子开关器件经历了普通晶闸管 SCR、门极可关断晶闸管 GTO、双极型功率晶体管 GTR 或 BJT、金属氧化物场效应晶体管 MOSFET、静电感应晶体管 SIT、静电感应晶闸管 SITH、MOS 控制晶体管 MCT、绝缘栅双极型晶体管 IGBT、耐高压绝缘栅双极型晶体管 HVIGBT、复合功率模块或智能功率模块（IPM, Intelligent Power Module）的发展过程，这些开关器件不断地更新换代，促使了电力变换技术的不断发展。变频器技术的发展就是建立在这些技术基础之上的。在交流电动机的传动控制中，应用最多的功率开关器件有 SCR、GTO、GTR、IGBT 以及智能功率模块 IPM，其中，IGBT 及 IPM 集 GTR 的低饱和电压特性和 MOSFET 的高频开关特性于一体，是目前通用变频器中最广泛使用的功率开关器件。IGBT 集电极—发射极电压 V_{ce} 可小于 3V，开关频率可达到 20kHz，内含的集电极—发射极间超高速二极管的 T_{rr} 可达 150ns，1992 年前后开始在通用变频器中得到应用，并持续向开关损耗更低、开关速度更快、耐压更高、容量更大方向发展，目前已达到单只耐压 4kV、电流 1200A 的水平。目前第四代 IGBT 采用沟道型栅极技术、非穿通技术等

方法,大幅度降低了集电极—发射极间的饱和电压 $V_{CE(sat)}$,使通用变频器的性能有了很大的提高,具体体现在以下几个方面:

由于 IGBT 的发热减少,将曾占主回路发热 50%~70%的器件发热降低了 30%以上。

由于 IGBT 开关速度快,可采用高频载波控制,载波频率达到 10~20kHz,超过了人耳的感受范围,即可实现电动机的静音化运行,并使输出电流波形有明显改善。

由于 IGBT 开关器件的驱动功率减小,装置体积明显缩小。

智能功率模块 IPM 内包含了 IGBT 芯片及外围的驱动电路和保护电路,有的还集成了霍尔传感器和光电耦合器。日本三菱电机的专用智能模块 ASIPM 就不需要外接光电耦合器,通过内部自举电路可单电源供电,并采用了低电感封装技术,在实现系统小型化、专用化、高性能、低成本方面又推进了一步。日立公司的通用变频器专用集成功率模块 (ISPM),将整流电路、逆变电路、逻辑控制、驱动和保护、电源回路全部集成在一个模块内,通用变频器整机的元件数量比原来减少了 40%以上。因此智能功率模块 IPM 是一种高度集成型功率开关器件,目前,模块的最大额定电流可达 600A,小型通用变频器基本上是采用 IPM 作为主电路,采用 IPM 后的综合性能大大提高,其性能价格比已超过 IGBT,有很好的经济性。除此之外,其优点是:

开关速度快,驱动电流小,控制、驱动电路简单。

内含电流传感器,可以高效迅速地检测出过电流和短路电流,能对功率芯片给予足够的保护,故障率大大降低。

由于在器件内部电源电路和驱动电路的配线设计上做到优化,所以浪涌电压、门极振荡、噪声引起的干扰等问题有效得到了控制,可靠性很高。

智能功率模块 IPM 除了在通用变频器中被大量采用之外,经济型的 IPM 开始在一些家用电器如变频空调、变频冰箱、变频洗衣机中得到广泛应用。

2. 关于 PWM 脉宽调制技术

PWM 脉宽调制技术是通用变频器的核心技术之一,任何控制算法的最终实现几乎都是以各种 PWM 控制方式完成的。从 20 世纪 70 年代开始至 80 年代初,由于大功率晶体管主要为双极型达林顿三极管,载波频率一般最高不超过 5kHz,电动机绕组的电磁噪声及谐波引起的振动引起人们的关注,为求得改善,PWM 控制技术成为人们研究的热点。随着以功率晶体管 IGBT 为代表的高速功率开关技术的发展,PWM 控制技术进一步成为人们研究的热点,关于 PWM 控制技术的文章在很多著名的电力电子国际会议上,如 PESC、IECON、EPE 年会上已形成专题。尤其是微处理器应用于 PWM 控制技术并使之数字化以后,人们更多地关注了电流波形和磁通的正弦波形的实现,以及效率最优、减小转矩脉动和噪声等问题。

PWM 控制技术经历了从最初采用模拟电路产生正弦脉宽调制 PWM 信号以控制功率开关器件开始,到目前采用全数字化实时在线的软件化正弦波 SPWM 信号的发展过程,期间形成了包括电压、电流或磁通的以正弦波为目标的各种 PWM 方案的不断创新和完善的过 程,其中,空间矢量 PWM 技术以其电压利用率高、控制算法简单、电流谐波小等特点在通用变频器中得到了越来越多的应用。目前新方案不断被提出,证明这项技术的研究方兴未艾。由于高频载波方式的正弦波 SPWM 追求的是实现电流谐波最小、电压利用率最高、效率最优及转矩脉动最小等优化目标,它有可以同时实现变频、变压、抑制谐波的特点,并可通过调整载波频率减弱或消除机械和电磁噪声,因此在通用变频器及其他能量变换系统中得到广泛应用,据称日本三菱公司创造的 Soft-PWM 方式,可以从根本上减小噪声,并能减小射频干扰

噪声。旨在改善输出电压、电流波形，降低电源系统谐波的多重 PWM 控制技术在大功率变频器中发挥了其独特的优势，如 ABB 公司的 ACS1000 系列变频器和美国罗宾康公司的完美无谐波系列高压变频器等。

3. 通用变频器的新技术

(1) 模块化

新型通用变频器的模块化已经取得了很大进展，如日立公司的通用变频器专用功率模块 (ISPM)，将整流电路、逆变电路、逻辑控制、驱动和保护、电源回路全部集成在一个模块内，使整机的元器件数量比原来减少了 40% 以上，可靠性得到很大提高。

(2) 专用化

新型通用变频器产品还派生了许多专用机型，如风机水泵空调专用型、注塑机专用型、电梯专用型、纺织机械专用型、电源再生专用型、中频驱动专用型、机车牵引专用型等。

(3) 软件化

新型通用变频器的功能软件化已进入实用阶段，通过内置软件编程可实现所需的功能。有的产品还具有多种内置或可选的专用应用软件，以满足现场过程控制的需要，如 PID 控制软件、张力控制软件、同步控制、速度级连、速度跟随、变频器调试软件、通信软件等。其中，张力控制功能可自动计算卷径、锥度、电流限幅和速度给定等；速度级连可用于连续生产过程中顺序控制设备的速度给定；速度跟随可用于两台设备主从关系的速度同步跟随，直接读入主传动的速度反馈信号作为副传动的给定信号，实现跟随运行；变频器调试软件可以在 Windows 环境下运行，离线或在线操作，如调试控制维护软件、在线调试维护软件、工具软件、监控软件、故障诊断软件和选型工具软件等。

(4) 网络化

新型通用变频器内装 RS485 接口，可提供多种兼容的通信接口，支持多种通信协议，可由计算机控制和操作通用变频器，通过软件可与现场总线 Profibus、Interbus、Device Net、Modbus、CC-Link、Lonworks、Ethernet、CAN、T-link 等联网通信。如西门子 MM4 系列通用变频器可以通过 USS 通信协议连接调试和控制多达 31 台变频器。

(5) 低电磁噪声、静音化

新型通用变频器采用高频载波 SPWM 调制方式实现静音化。在逆变电路中采取电流软开关控制技术，以改善电流波形、降低谐波，在电磁兼容性 EMC 方面符合国际标准，实现清洁电能变换。所谓清洁电能变换是指变换器的功率因数为 1，网侧和负载侧有尽可能低的谐波分量，以减少对电网的电磁污染。如三菱公司的柔性脉宽调制 (Soft-PWM) 控制技术实现了更低噪声运行。

(6) 图形化用户界面

新型通用变频器的操作面板除了通常的下拉式菜单外，同时还提供图形工具、中文菜单等监控操作功能。参数趋势图可显示实时运行状态，在调试过程中可随时监控和记录运行参数。

(7) 引导式调试步骤

新型通用变频器机内固化“调试指南”，引导操作者的调试步骤，无需记忆参数，充分体现了易操作性，通用变频器参数自调整已实用化。

(8) 自定义编程

传统的编程方式是通过参数设置来控制通用变频器运行的。每个参数都有自己的一组固

定选项或取值范围。这样虽然编程简单，但选项却很受限制，用户不能根据需要自定义，而自定义编程将选项权交给用户，并且不需要使用专门的编程工具或编程语言即可实现，程序是由功能块组成，操作面板就是编程工具，用户可以用功能模板来编辑程序并存储，如西门子的 MM 系列通用变频器。

(9) IGBT 新技术

目前 IGBT 主要有 PT 穿通结构和 NPT 非穿通结构两种。NPT 型 IGBT 具有开关损耗小、正温度系数、易于实现高压的特点，与 PT 型 IGBT 相比，NPT 型 IGBT 的通态损耗下降了 20%；其次采用 NPT 技术可以实现 IGBT 的大功率化；再就是充分满足应用需求，简化逆变器驱动和保护电路设计，便于并联和安装。IGBT 新的技术动向是采用沟槽结构，这种新结构改善了 IGBT 的通态特性和频率特性，减小了通态压降，提高了硅片利用率。

(10) 滤波技术

有源电力滤波器进行谐波补偿已得到逐步推广应用。其原理是，从补偿对象中检测出谐波电流，然后产生一个与该谐波电流大小相等、极性相反的补偿电流，从而使电流只含基波分量。这种滤波器能对频率和幅值变化的谐波进行跟踪补偿，且补偿特性不受电网阻抗的影响。大容量变频器减少谐波的主要方法是采用多重化技术，将多个方波叠加以消除次数较低的谐波，从而得到接近正弦波的阶梯波。重数越多，波形越接近正弦波，但电路结构越复杂。几千瓦到几百千瓦的高功率因数变频器主要采用 PWM 整流技术，它直接对整流桥上各开关器件进行正弦波 PWM 控制，使得输入电流接近正弦波，相位与电源相电压相位相同。采用 PWM 整流器作为 AC/DC 变换的 PWM 逆变器，就是所谓的双 PWM 变频器。它具有输入电压、电流频率固定，波形均为正弦，功率因数接近 1，输出电压、电流频率可变的优点。这种变频器可实现四象限运行，从而达到能量的双向传送。小容量变频器为了实现低谐波和高功率因数，一般采用二极管整流加 PWM 斩波，通常称为功率因数校正 (PFC)，典型电路有升压型、降压型、升降压型等。

(11) 制动技术

新型通用变频器具有内部交流制动和直流制动两种方式。直流制动是当电动机的速度低于预设的制动速度时，变频器开始给电动机注入直流电压，使电动机停止运转，并在零速时锁定转子，如果电动机在制动过程中，转速又高于预设的制动速度时，变频器可以再次进入正常运行状态。交流制动是一种磁通制动方式，磁通制动是当变频器得到停机命令后立即启动制动功能，制动速度比直流制动快，制动能量以电动机发热的形式消耗掉。

4. 通用变频器未来的发展方向

(1) 控制策略

尽管矢量控制与直接转矩控制使交流调速系统的性能有了较大的提高，但还有许多领域有待深入研究，如磁通的准确估计或观测、无速度传感器的控制方法、电动机参数在线辨识、零速下电动机控制、电压重构与死区补偿策略、多电平逆变器的控制策略等。未来的通用变频器控制技术将在基于电动机模型的矢量控制、直接转矩控制的基础上，融入基于现代理论的模型参考自适应技术、多变量解耦控制技术、最优控制技术和基于智能控制技术的模糊控制、神经网络、专家系统和过程自寻优、故障自诊断技术等，使通用变频器傻瓜化。

(2) 高速全数字化控制

随着以 32 位高速微处理器为基础的数字控制器的应用，新型电力电子器件应用技术、Windows 操作系统以及各种 CAD 软件、通信软件被引入到变频器控制技术中，使得能够实