

调速用变频器 及配套设备 选用指南

吴忠智 黄立培 吴加林 编著

第2版

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



调速用变频器及配套设备 选用指南

第2版

吴忠智 黄立培 吴加林 编著

附录 (A) 目录附录图

附录 (A) 目录附录图
附录 (A) 目录附录图
附录 (A) 目录附录图
附录 (A) 目录附录图

附录 (A) 目录附录图

附录 (A) 目录附录图

附录 (A) 目录附录图

附录 (A) 目录附录图

附录 (A) 目录附录图

附录 (A) 目录附录图

附录 (A) 目录附录图

附录 (A) 目录附录图

附录 (A) 目录附录图

附录 (A) 目录附录图

附录 (A) 目录附录图



机械工业出版社

本书对变频器原理、构成、种类及对电动机控制方式、变频器用的元件、质量可靠性做了详细介绍；对控制速度、位置、张力、流量、温度、压力、响应速度、精度、反向负载、冲击负载以及各种类型电动机如何选用变频器及配套设备做了深入的阐述；对使用变频器遇到干扰如何处理做到电磁兼容，在理论和实践上都作了介绍；还介绍了电动机在工频及变频运行时的特性及比较。

本书可供企事业单位、设计院所的工程技术人员及大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

调速用变频器及配套设备选用指南/吴忠智, 黄立培,
吴加林编著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2006.10
ISBN 7-111-07808-X

I. 调… II. ①吴…②黄…③吴… III. 调速-
变频器-指南 IV. TN773-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 067556 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: 李振标 版式设计: 冉晓华 责任校对: 姚培新
封面设计: 鞠 杨 责任印制: 洪汉军
北京京丰印刷厂印刷
2006 年 8 月第 2 版·第 1 次印刷
169mm×239mm·14.25 印张·2 插页·555 千字
16 001—20 000 册
定价: 40.00 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
编辑热线电话 (010) 88379768
封面无防伪标均为盗版

第2版前言

《调速用变频器及配套设备选用指南》一书，自2000年第1版出来以后，受到广大读者欢迎，先后6次印刷，读者来信来电来访者很多，纷纷要求扩大内容及再版，为此机械工业出版社特约我们组织再版编写。这次修订时，作者将近五年来在研究试验及变频器生产应用中积累的有价值的内容增加进去，真正名符其实的成为读者对变频器及配套设备选用的指南。现在市面上的变频器花色品牌很多，国际国内的生产厂家几十家，销售商不计其数。经销者都说自己的变频器价廉物美、是最好、是变频器专家、是矢量控制。把最好的褒义词汇都用上。有一个电厂为了购买变频器成立了一个招标组，方法是对的，不知是怎样评的，买了一台价值几百万的高压变频器，安装完后调试不成功，退了货。既耽误了时间又浪费了钱。又有个单位请某设计院设计某个工程，进口了中央空调，同时变频器也随空调成套引进，共34台75kW以上，由于设计人员不熟悉变频器及有关规范，合同上并未注明什么样的变频器，遵守什么样的标准，结果到货安装调试完后并验收合格达到调温要求，但在运行中零序保护经常跳闸，经检测才知道是晶闸管变频器谐波电流过大，导致零序电流增大，使零序保护动作。使用部门与供电局协商把零序保护整定值提高，零序保护不跳了，但110kV差动保护跳闸，事故扩大而且隐形成事故增多，后来只有更换变频器，买了符合IEC标准要求的IGBT变频器。精力、时间、经费都大大浪费。还有用户经常只注意买主设备变频器，不注意买配套设备，如有个用户家里买了一个小的变频集中空调，安装完后参数合格，晚上在客厅看电视，空调一开，干扰了电视，图像看不见，只有轰轰的声音，后来买了相应的配套设备才解决了这个问题。类似之事相当的多，每年至少有10个读者打电话向我们咨询此事。所以本书此次修改的主题就是要让读者看了此书后能明明白白的选用变频器及配套设备，其内容是：变频器电路方式、动作原理、组成、所用元器件、质量标准及评定方法；高、低压变频器的类型优缺点比较；电动机在工频及变频运行时的特性及其比较；变频器对异步电动机控制方式；变频器的电磁兼容及配套设备；速度、位置、张力、流量、温度、压力、响应速度、精度、反向负载、冲击负载等的控制调节及如何选用变频器及配套设备；各种电动机如何选用变频器及配套设备；调速及防止干扰国际、国内标准规范。由于变频器发展较快，涉及科学领域较广，应用场合较多，作者精力水平有限，希广大读者批评指正。

本书由吴忠智、黄立培、吴加林共同编写。其中第5章变频器对异步电动机

控制方式、12.10.4 节制动电阻与制动单元由清华大学黄立培教授编写，其余由吴忠智、吴加林编写，吴忠智统稿。

本书在编写过程中成都佳灵电气制造有限公司在物质资料、人力上给予了大力支持，该公司的席军、张锦荣等作了大量工作，自动化信息主编张晖、执行主编唐仕正提供了资料，信息产业电子第 10 研究所冯清澄研究员提供了宝贵资料，信息产业电子 11 设计研究院教授级高工谭玉珍进行了大力协助，美国范德比尔大学教授吴跃进、美国麻省理工学院学生吴耘济、信息产业雷达局设计院院长赵立丰、副院长吴晓卫等均提供了宝贵资料 and 大力支持。对上述单位和个人的支持和帮助在此表示十分感谢！

作者 吴忠智 黄立培 吴加林
2006 年 4 月于成都

第1版前言

随着电力电子技术、微电子技术及控制理论的发展,变频器已经广泛用于交流电动机速度控制。其最主要的特点是具有高效率的驱动性能、良好的控制特性。应用变频器不仅可以节约大量电能,而且变频器的自动控制性能可以提高产品质量和数量;机械行业中应用变频器是改造传统产业、实现机电一体化的重要手段;在工厂自动化技术中,交流伺服系统正在取代直流伺服系统。发展变频器的应用技术,可以有效地提高经济效益和产品质量。为了迎接交流调速新时代,以及贯彻原机械部、国家计委、国家经贸委、国家科委、国家技术监督局等八部委以机械科[1996]68号文公布的第十七批机电产品节能推广项目,应机械工业出版社的约稿特编写本书。

我们将几年来在变频器的生产、教学、科研、销售服务过程中积累的资料、知识和经验汇编成本书,供设计院所电气设计人员及各企事业单位选用变频器及配套设施。

全书分为7章,内容包括变频器的类型、电力半导体器件的使用、电动机变频调速的原理、变频器的基本功能和合理使用、变频器的安装与调试、变频器的配套设施以及变频器在节能中的应用,并回答了变频器使用过程中的一些实际问题。全书以通用变频器为主,适当介绍了高性能交流调速系统的有关知识。

本书可以作为工程技术人员进行变频器设计、安装调试的参考书,亦可作为在职人员进行继续教育的教材。

由于我们水平有限,研究不深,有不足之处,还希望广大读者提出宝贵意见。

全书由吴忠智、黄立培、吴加林共同编写,吴忠智统稿,黄立培负责统校。黄立培负责编写第二章第二~五节以及第三章第四节,吴加林编写第五章,其余章节由吴忠智编写。

在编写过程中还得到了成都佳灵电气制造有限公司的支持,在此表示感谢!

作者 吴忠智 黄立培 吴加林

目 录

第2版前言

第1版前言

第1章 电气调速传动概论	1
1.1 概述	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 电气传动发展史	1
1.1.3 调速传动系统的优点	3
1.1.4 调速传动系统的缺点	4
1.2 传动系统的要求和规范	7
1.2.1 市场要求	7
1.2.2 传动规范	10
1.3 传动系统的分类和特性	11
1.3.1 按应用分类	12
1.3.2 按电力电子器件类型分类	13
1.3.3 按变频器类型分类	14
第2章 异步电动机变频调速原理及特性	19
2.1 异步电动机的原理与构造	19
2.2 异步电动机的旋转磁场	20
2.3 变频器与异步电动机	22
2.3.1 定子电压与气隙磁通	22
2.3.2 异步电动机的特性	23
2.3.3 用工频电源传动时电动机的特性	25
2.3.4 用变频器传动时电动机的特性	26
2.4 异步电动机在变频与工频运行下特性比较	27
2.4.1 等效电路	27
2.4.2 空载特性	27
2.4.3 负载特性	28
2.4.4 转矩特性	29
2.4.5 电动机温升及使用限制范围	30
2.4.6 负载的转矩特性	32
2.4.7 电动机的起动与起动电流	33

2.4.8 噪声与振动	34
2.4.9 抑制噪声、振动的对策	37
第3章 变频器的电路方式及变频原理	39
3.1 交-交变频电路方式	39
3.1.1 传统式交-交变频工作原理	39
3.1.2 传统式交-交变频运行方式	41
3.1.3 传动式交-交变频主电路型式	43
3.1.4 新式交-交矩阵变换器	46
3.2 交-直-交变频电路方式	47
3.2.1 电压型与电流型	49
3.2.2 电压控制与电流控制	51
3.2.3 PAM 与 PWM	52
3.2.4 PWM 的种类及原理	53
3.2.5 多重化变频器	56
3.2.6 正转与反转	57
3.2.7 电动与再生	57
第4章 变频器的构成、质量与可靠性	59
4.1 变频器的构成	59
4.1.1 主回路	59
4.1.2 控制回路	62
4.2 变频器的散热与通风	64
4.2.1 风冷装置	64
4.2.2 水冷装置	64
4.3 变频器质量的性能指标	65
4.3.1 变频器质量性能指标的内容	65
4.3.2 变频器质量性能指标的简易评定方法	68
4.4 变频器质量的可靠性指标	71
4.4.1 变频器可靠性指标的分配	72
4.4.2 元器件的选用	75
4.4.3 元器件及模块的测试	76
4.4.4 功率器件电路可靠性热设计技术	77
4.4.5 变频器整机可靠性试验	77
第5章 变频器对异步电动机的控制方式	80
5.1 U/f 恒定控制	80
5.1.1 控制原理	80
5.1.2 电压型变频器对异步电动机的 U/f 比恒定控制的构成	83
5.2 转差频率控制	85

5.2.1 控制原理	86
5.2.2 转差频率控制的系统构成	87
5.2.3 系统性能分析	87
5.3 矢量控制	91
5.3.1 矢量控制简介	91
5.3.2 异步电动机的动态数学模型	92
5.3.3 矢量控制理论	97
5.3.4 转子磁场定向矢量控制系统的构成	98
5.4 变频器的电压空间矢量和磁通轨迹控制	101
5.4.1 PWM 变频器输出电压的矢量表示	101
5.4.2 磁通轨迹控制	103
第 6 章 变频器用晶闸管	106
6.1 普通晶闸管的特性和主要参数	107
6.2 可关断晶闸管 GTO	109
6.2.1 可关断晶闸管导通与关断条件	109
6.2.2 可关断晶闸管特性及主要参数	110
6.2.3 GTO 发展方向	112
6.2.4 晶闸管触发器	113
6.2.5 晶闸管智能模块	114
6.2.6 模块的保护和控制	118
6.3 MOS 控制晶闸管 MCT	120
6.3.1 等效电路和开关特性	121
6.3.2 MCT 与其他电力电子器件的比较	122
6.3.3 MCT 的门极驱动	123
6.4 集成门极换流晶闸管 IGCT	123
6.4.1 IGCT 规格及应用范围	124
6.4.2 IGCT 的优越性	125
6.4.3 IGCT 技术参数	127
6.4.4 IGCT 的串联	129
6.5 逆阻断型晶闸管 GCT	131
6.5.1 GCT 的特点	132
6.5.2 GCT 的特性	132
6.5.3 GCT 的型号规格及外形尺寸	133
6.5.4 GCT 的应用	134
第 7 章 变频器用晶体管	136
7.1 开关二极管	136
7.1.1 PN 结的特性	137

7.1.2 通用二极管的类型	138
7.1.3 二极管及整流模块型号规格参数	139
7.2 电力双极型晶体管 BJT	140
7.2.1 基本结构和工作原理	142
7.2.2 静态特性	144
7.2.3 动态特性	147
7.2.4 晶体管基极驱动电路	149
7.3 电力场效应晶体管 MOSFET	153
7.3.1 电力场效应晶体管的结构	153
7.3.2 通态电阻	155
7.3.3 内部体二极管	155
7.3.4 内部电容	156
7.3.5 工作区	157
7.3.6 开关特性	160
7.3.7 安全工作区	161
7.4 绝缘栅双极型晶体管 IGBT	162
7.4.1 基本结构和工作原理	164
7.4.2 静态特性	166
7.4.3 开通特性	168
7.4.4 关断特性	169
7.4.5 性能参数	170
7.4.6 栅极驱动要求	173
7.5 高压 IGBT	176
7.6 电子加强注入型绝缘栅极晶体管 IEGT	185
7.6.1 IEGT 的基本原理	186
7.6.2 产品和特性	187
第 8 章 变频器用智能功率模块 IPM	188
8.1 智能功率模块的结构	188
8.1.1 多层环氧树脂粘合结构	188
8.1.2 铜箔直接键合结构	190
8.2 额定值和特性	190
8.2.1 最大额定值	190
8.2.2 热阻	191
8.2.3 电气特性	192
8.2.4 推荐工作条件	193
8.2.5 测试电路和测试条件	193
8.3 安全工作区	195

8.3.1 开关安全工作区	196
8.3.2 短路安全工作区	196
8.4 自保护功能	197
8.4.1 自保护特点	197
8.4.2 控制电源欠电压锁定 (U_V)	197
8.4.3 过热保护	198
8.4.4 过电流保护 (O_C)	199
8.4.5 短路保护 (S_C)	200
8.5 IPM 的选用	202
8.6 控制电路电源	204
8.6.1 控制功率消耗	204
8.6.2 布线指南	206
8.6.3 电路结构	206
8.7 接口电路	207
8.7.1 接口电路的要求	207
8.7.2 布线指南	208
8.7.3 IPM 输入/输出电路	210
8.7.4 接口电路的连接	210
8.7.5 死区时间	211
8.7.6 F_0 输出信号使用	212
8.8 HVIPM 高压功率集成块	212
8.9 电力电子器件的比较	213
8.10 电力电子器件的未来发展方向	214
第9章 高压大功率变频器的种类及特点	215
9.1 矩形电压波交-交变频器	215
9.1.1 工作原理	215
9.1.2 换相过程和换组过程	216
9.2 正弦电压波交-交变频器	218
9.3 正弦电流波交-交变频器	220
9.4 交-直-交电流源型变频器	225
9.4.1 串联二极管式电流源型变频器	226
9.4.2 输出滤波器换相式电流源型变频器	226
9.4.3 负载换相式电流源型变频器	228
9.4.4 GTO-PWM 式电流源型变频器	229
9.5 多电平交-直-交电压源型中(高)压变频器	231
9.5.1 五种多电平结构的构成及比较	231
9.5.2 多电平电压型变频器的基本原理及实例	241

9.6 多脉波、多电平交-直-交电压源型中(高)压变频器	248
9.6.1 多脉波电路对谐波的影响	248
9.6.2 多脉波的构成	249
9.6.3 多脉波变频器实例	251
9.7 多重化功率单元变频器	253
9.7.1 功率单元串联多电平变频器原理	253
9.7.2 特点及构成实例	256
9.7.3 具有再生能力多重化的中(高)压变频器	263
9.8 直接串联 IGBT、IGCT 变频器	264
9.8.1 直接串联 IGBT 变频器	264
9.8.2 直接串联 IGCT 变频器	268
9.9 直接串联组件变频器与其他变频电路方式的比较	269
9.9.1 直接串联与交-交变频器的比较	269
9.9.2 直接串联与电流源型变频器的比较	270
9.9.3 直接串联与多电平、多重化电路方式的比较	270
第 10 章 中小容量变频器的主电路及特点	276
10.1 中小容量通用变频器	276
10.1.1 通用变频器的主电路	276
10.1.2 控制技术	277
10.1.3 功能特点	278
10.1.4 通用变频器的规格	282
10.2 智能型变频器的主电路及特点	284
10.2.1 系统的组成	284
10.2.2 神经网络的结构	284
10.2.3 硬件实现及结果	286
10.3 高功率因数变频器的主电路及特点	287
10.4 风机、水泵用节能型变频器的主电路及特点	289
10.5 能量回馈式变频器的主电路及特点	291
10.6 变频空调变频器的主电路及特点	293
10.6.1 变频压缩机	293
10.6.2 变频控制系统	293
10.6.3 一拖三变频空调模糊变频控制器	295
10.7 单相电容分相式电动机变频器主电路及其特点	297
10.7.1 单相电容电动机的工作原理	298
10.7.2 单相电容电动机变频调速控制系统	299
10.7.3 单相电容式电动机变频调速系统的实现	300
10.7.4 输出电流波形	301

第 11 章 变频器电磁兼容措施及配套设备选用指南	302
11.1 对电源电网干扰的防止	302
11.1.1 变频器接入配电网	302
11.1.2 防止不同电源网络电磁干扰的对策	305
11.2 变频器输入侧产生高次谐波的机理	309
11.3 变频器输入侧高次谐波对电网及其他设备的干扰	311
11.4 防止变频器输入侧高次谐波干扰的配套设备	318
11.4.1 输入侧进线电感小时, 6 脉冲变频器可加输入电抗器	318
11.4.2 输入侧进线电感大时, 可采用三相双开关两电平功率因数校正电路 (PFC)	321
11.4.3 有能量回馈要求时, 可采用三相六开关功率因数校正电路 (PFC)	322
11.5 变频器输出侧 PWM 控制产生高次谐波的机理	323
11.6 变频器输出侧高次谐波干扰的途径及对电动机的危害	325
11.6.1 变频器输出侧高次谐波干扰途径	325
11.6.2 输出侧高次谐波对电动机的危害	325
11.7 防止变频器输出侧高次谐波的配套设备	329
11.7.1 主电路采用多脉波、多电平、多重化	330
11.7.2 防止干扰的配套设备	330
11.8 数字电路干扰的产生及对策	332
11.8.1 干扰的产生	332
11.8.2 对策	333
11.9 电磁兼容标准	333
11.9.1 电压畸变率规定	334
11.9.2 变频器抗干扰国际标准	336
11.9.3 IEEE—519 简介	336
11.9.4 国外部分品牌变频器采标情况	338
11.10 配套设备	339
11.10.1 变频器主接线配套设备	339
11.10.2 电源协调用交流电抗器 (AC 电抗器)	341
11.10.3 改善功率因数直流电抗器 (DC 电抗器)	342
11.10.4 电源滤波器	342
第 12 章 按传动负载的类型和特性选用变频器及配套设备	349
12.1 负载的类型和特性	349
12.1.1 负载特性	349
12.1.2 电动机传动工作制	349
12.1.3 负载的起动转矩	352
12.1.4 $puGD^2$	352

12.1.5 过负载	353
12.1.6 齿轮的作用	353
12.1.7 前馈控制与反馈控制	354
12.2 速度控制	355
12.2.1 电动机速度的确定条件	355
12.2.2 加减速时间	356
12.2.3 速度控制系统	360
12.3 位置控制	364
12.3.1 位置控制特点	364
12.3.2 开环位置控制方式	364
12.3.3 开环位置控制的设计要点	365
12.3.4 手动决定位置的控制方式	366
12.3.5 闭环位置控制方式	366
12.4 张力控制	369
12.4.1 采用转矩电流控制张力	369
12.4.2 采用拉延控制张力	370
12.4.3 采用调节辊控制张力	371
12.4.4 采用张力检测器控制张力	372
12.5 流量控制	373
12.5.1 流量控制方法	373
12.5.2 流量控制的特点	374
12.5.3 采用变频器的流量控制系统	374
12.5.4 配套设备	375
12.5.5 系统设计要点	377
12.6 温度控制	378
12.6.1 温度控制的特点	379
12.6.2 配套设备	379
12.6.3 温度控制系统设计要点	381
12.7 压力控制	382
12.7.1 压力控制的特点	382
12.7.2 给水泵压力控制	382
12.7.3 出口恒压控制	382
12.7.4 预测末端压恒定控制	383
12.7.5 出口压阶段控制	384
12.7.6 实际末端压恒定控制	385
12.7.7 送风机的静压控制	386
12.7.8 压力系统设计要点	387
12.8 负载特性要求响应快	388

12.8.1	要求响应快的原因	388
12.8.2	快速响应的表达	388
12.8.3	不同响应时间变频器的选择	390
12.8.4	快速响应系统选择变频器的要点	391
12.9	负载特性要求调节精度高	392
12.9.1	要求高精度的系统	392
12.9.2	高精度控制的实现	393
12.10	负负载	396
12.10.1	负负载的种类	396
12.10.2	变频器的负负载控制功能	397
12.10.3	再生过电压失速防止控制	397
12.10.4	制动电阻与制动单元	398
12.10.5	负负载系统变频器及配套设备选用指南	404
12.11	冲击负载	406
12.11.1	产生冲击负载的系统	406
12.11.2	冲击负载产生的问题	406
12.11.3	冲击负载系统的变频器及配套设备选用指南	407
12.11.4	转矩波动大负载	408
12.12	罗茨鼓风机	409
第 13 章	按不同电动机的种类选择变频器及配套设备	410
13.1	标准笼型电动机	410
13.1.1	根据电动机电流选择变频器容量	412
13.1.2	输出电压	417
13.1.3	额定电压、额定频率时的转矩特性	417
13.1.4	低速运转时的转矩特性	418
13.1.5	短时最大转矩	419
13.1.6	容许最高频率范围	419
13.1.7	噪声	420
13.1.8	振动	420
13.2	绕线转子异步电动机	420
13.3	同步电动机	422
13.4	无刷直流电动机	423
13.5	开关磁阻电动机	424
13.6	直线电动机	425
13.7	步进电动机	425
13.8	集成电动机	426
13.9	变频电动机	427

13.9.1 低噪声、低振动变频电动机	427
13.9.2 增高转矩特性变频电动机	430
13.9.3 高速变频电动机	431
13.9.4 带测速发电机的变频电动机	432
13.9.5 矢量控制用变频电动机	433
13.10 齿轮电动机	433
13.10.1 频率范围	433
13.10.2 容许最低频率	433
13.10.3 连续运行转矩特性	434
13.10.4 齿轮电动机的最佳用法	435
13.10.5 其他注意事项	435
13.11 带制动器的电动机	435
13.12 变极电动机	437
13.13 防爆电动机	438
13.14 单相电动机	438
参考文献	440

第 1 章 电气调速传动概论

1.1 概述

1.1.1 引言

工、农业生产领域内，在生产中出于正常运行或性能优化的目的，需要进行调速。调速通常都利用变速传动（Variable-Speed Drive, VSD）系统实现。VSD 系统是自动控制的一个重要组成部分。它可以帮助优化工、农业过程，降低投资费用、动力消耗和能源费用，提高产品质量。

实际中，有三种基本类型的变速传动系统：电气传动、液力传动和机械传动。本书主要讨论电气传动系统。

一个典型的变速电气传动系统如图 1-1 所示。它由电动机、电力变频器和控制系统三个基本部分组成。电动机与负载直接或间接（通过齿轮）相连。电力变频器通过电力电子半导体开关控制、调节供给电动机电源的电压和频率。

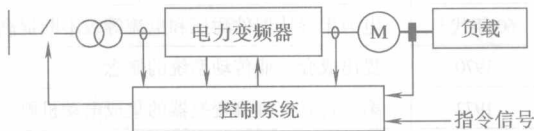


图 1-1 变速传动系统原理图

近年来伴随着电力半导体技术的变频器拓扑的进展，变速电气传动系统正经历着包括计算机外设传动，加工工具和机器人传动，试验台、风机、泵、压缩机以及造纸机传动，自动化、牵引和船舶推进、水泥磨机和轧钢机传动系统在内的各个应用领域中的变革。

为了实现适当的控制，变速传动系统中所有的变量，不论是机械的还是电气的，均需要加以控制和保护。控制所需的信号通常由传感器给出，其输出在很大程度上依赖于所采用的控制策略和所需的功能。

本章将对变速电气传动系统进行介绍，同时简要地说明其优点。书中将从不同角度对其分类进行讨论，并且针对不同工业应用对规范提出的要求进行了简要的概念。本章还对不同的变速传动系统的结构进行了仔细的研究和相互比较。

1.1.2 电气传动发展史

为了正确地评价变速电气传动，表 1-1 中列出了在电气传动发展过程中具有