

第3版

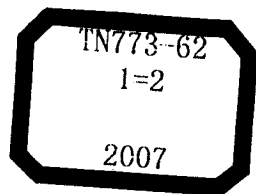
BIANDINQI YINGYONG SHOUCHE

变频器应用手册

吴忠智 吴加林 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



变频器应用手册

第 3 版

吴忠智 吴加林 编著

机械工业出版社

本书主要内容有高中低压变频器的类型及变频原理、拓扑电路、构成、质量评定及相互比较；使用的元器件特性、控制芯片的种类特点、变频器对电动机的控制方式的种类及实例；安装接线、人机界面操作运行、维修检查、故障诊断判定；以及根据各种物理量（温度、压力、速度、张力、位置、流量等）、各种负载特性、各种电动机选用变频器；在应用中如何处理电磁干扰及谐波对电网和电动机及其他设备的影响，电磁兼容标准规范。

本书可作为工矿、企事业单位、科研院所的电气技术人员，以及大专院校和各种节能培训班参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

变频器应用手册/吴忠智，吴加林编著 - 3版. - 北京：
机械工业出版社，2007.4

ISBN 978 - 7 - 111 - 21185 - 3

I. 变… II. ①吴…②吴… III. 变频器 - 技术手册
IV. TN773 - 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 037006 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：张沪光 版式设计：冉晓华 责任校对：姚培新

封面设计：陈 沛 责任印制：洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2007 年 4 月第 3 版·第 1 次印刷

140mm × 203mm · 21.25 印张 · 567 千字

39 701—43 000 册

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 21185 - 3

定价：43.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

销售服务热线电话：（010）68326294

购书热线电话：（010）88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：（010）88379768

封面防伪标均为盗版

第3版前言

变频器应用手册，1995年第1版先后印刷8次，2002年第2版先后印刷4次。深受读者欢迎。自该书与读者见面后，几乎每年都有几十个单位来信来电来人咨询并请到现场解决实际应用和生产问题或讲课，使我们深受教育和锻炼，也使我们在实践中得到了提高，丰富了再版的内容。此次第3版，就是根据读者、出版社和国家发改委对节能的要求而改编的。指导思想是：在第1章首先使读者知道创建节约型社会的重要意义及应用变频器的重要作用；以后各章使读者知道变频器是如何变频的；高中低压变频器的种类、拓扑电路、变频器的组成、质量及评定标准和相互比较；变频器使用的元器件的种类、型号规格对变频器质量水平的重要作用；计算机芯片种类、特点以及在变频器中计算控制保护的作用；变频器对电动机控制方式的种类优缺点及数学模型和实例；使读者在千变万化的用电设备中归纳为如何根据不同物理量（温度、压力、速度、张力、位置、流量等）的不同负载特性、冲击负载以及往复四象限运行负载，不同电动机（标准笼型异步电动机、绕线转子异步电动机、同步电动机、无刷直流电动机、开关磁阻电动机、直线电动机、步进电动机、集成电动机、变频电动机、齿轮减速电动机、带制动器的电动机、变极电动机、防爆电动机、单相电动机）来选用变频器并列使用变频器的标准配置容量计算以及在变频、工频运行下电动机特性的变化；在应用变频器时如何处理电磁干扰达到电磁兼容；使应用变频器的人知道如何安装接线，使用人机界面进行操作运行测试、判断故障、维修检查等。总之，使要应用变频器的读者在对变频器一点不了解的情况下，只要懂得电的基础知识就对变频器有个系统全面的了解，在书中可找到变频器原理及应用的解答，真正使变频器应用手册成为读者的知心朋友。所以在改编时，从章节题目和字面上看变化并不大，而实际内容却作了全新变动、

充实、扩大，使该书内容不断地完善和提高也使书的内涵更上一个新的台阶，能更好地满足读者对变频器的原理及应用的了解。但变频器是个高新技术，学科种类很多，发展也很快，由于我们的水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

本书由吴忠智、吴加林合作编写，吴忠智负责统稿。

在编写此书的过程中，得到了北京中瑞电子系统工程设计院赵立丰院长、吴晓卫副院长、顾问总设计师谭玉珍教授级高工等的大力支持和帮助；作者在编写期间2006年9月至2007年1月访问了美国IEEE、IOWA大学教授吴跃进、麻省理工学院在校生吴耘济，他们提供了最新的资料；成都佳灵电气制造有限公司也提供了资料和帮助。

对上述的支持和帮助的同仁，在此表示衷心的感谢。

作者 吴忠智 吴加林

2007年1月于北京

第 2 版前言

变频器应用手册，自 1995 年出版以来，受到广大读者欢迎，对变频器应用起到了一定的指导作用，同时作者也收到很多读者的来信和来访，而且到了一些应用现场解决了很多应用技术问题。这些问题有变频器选型不合适，容量计算不准确，特别是一台变频器带多台电动机容量选择不当，造成变频器电动机发热；选择变频器达不到预期的效果；安装变频器不符合环境规定要求；更多的遇到供电电源上电压不平衡或变频器同一电源母线上接有非线性负载及工业干扰源设备。如高频炉等对变频器干扰，变频器误动作，或者是变频器输出侧谐波对其他设备干扰造成误动作等；还有安装线路不规范，接地不良等，这些种种问题影响了变频器的应用。此次是根据广大读者需要，我们根据近几年生产、应用及出口到西欧的经验，并吸收国内外几届交流电机调速学术会议、电力电子学会会议等同行学者、专家的经验介绍（参考文献不详列，在此表示感谢），并参考 IEEE 电力电子方面会刊、学报的文章及参加 IEEE 修订 EMC 标准的体会，在第 1 版变频器应用手册的基础上作了大量补充，增加了新内容，重点有变频器质量性能指标及可靠性指标的衡量和验证；变频器特别是中（高）压、智能变频器三电平的主电路及特点；电力电子器件 IGBT、IGCT、IPM 在变频器应用中串并联、接地、保护、驱动电路；变频器数字化单片机应用的有关芯片；变频器电磁兼容（EMC）及配套设备。其他章节也稍做变动，特别是变频器应用实例，由于各行各业应用较多，介绍的书和文章也很多，大同小异，为了出版方便，此次再版未做大的修改。

书中一些试验数据和资料由清华大学黄立培教授、李勇、王健两位副教授提供。

在编写过程中，成都佳灵电气制造有限公司在物质上、资料上给予了大力支持，公司中的张锦荣、谭静也提供了宝贵

VI

资料，另外还得到信息产业部电子 11 院赵振源院长以及四川省电工技术学会殷嘉胜副理事长的关心和支持，在这里均表示感谢。

由于变频器发展很快，涉及的学科类别较多，范围很广，我们的知识也不是很全面，肯定有很多不足之处，希望广大读者批评指正。

作者 吴忠智 吴加林
2002 年 3 月于成都

第 1 版前言

变频技术随着微电子学、电力电子技术、电子计算机、自动控制理论等的发展已经进入一个崭新的时代。其应用也相应地进入了一个新的高潮，从开始的整流、交直流可调电源等现已发展到直流输电、不同频率电网系统的连接、静止无功功率补偿和谐波吸收、超电导电抗器的电力贮存、高频输电；在运输及产业行业正在以交流电动机调速逐步代替直流电动机调速，进而还应用到超电导电磁悬浮列车、高速铁路、电动汽车、产业用机器人；石油行业已实现了采油的调速、超声波驱油；在家用电器方面有变频空调、洗衣机等；军事方面则有通信、导航、雷达、宇宙设备的小型轻量化电源等。但在应用中常碰到大量的问题是，用户对变频器选型不合适造成带不动电动机、电动机发热、变频器发热、经常误跳闸、调速范围不够、调速精度不够等不能充分发挥变频调速的效果；变频器安装接线方式不合适，造成变频器温升太高、烧毁变频器模块、冷却风扇堵塞；使用变频器时没有注意选用配套设备造成变频器本身工作不可靠、对附近其他用电设备造成干扰甚至烧毁，而且噪声也很大；在变频器外部主接线、控制线、长度、截面、敷设方式没有很好考虑，造成干扰，使变频器不能正常工作；一条生产线用几台变频器的同步、同速运行没有很好设计，造成生产线运转不正常等等。为了解决应用中大量的问题，使用户根据不同负载性质、调速精度选择最理想的变频器达到最佳的效果，进行很好的安装和接线，从而使昂贵的变频器长寿命地工作，同时与其他电气、电子设备电磁兼容，我们根据自己的工作经验考察访问西欧及日本等使用变频器的经验，同时总结了国内十几个生产厂家特别是成都佳灵电气制造公司生产销售变频器的经验、用户的反映，再搜集了德国西门子公司，美国 IR 公司，英国 Bruzh、CT 公司，日本安川、富士、三菱、日立等公司的变频器使用手册和国际电工委员会（IEC）关于变频

器的标准，编写了此书，使广大读者对国内外各类型变频器的原理、基础知识、应用领域有所了解而且还能进一步根据自己的实际情况选好、用好变频器，达到节能、提高产品数量和质量的目的。我们虽然有如此良好的愿望，但由于水平有限，而且这是一门新的技术，不可能介绍得很全面，有不足之处请广大读者批评指正。

全书由吴忠智、吴加林共同编写，吴忠智负责统稿。

书中变频器的一些参数测试得到清华大学黄立培教授，李勇、王键两位硕士的帮助。

在编写过程中，成都佳灵电气制造公司在物质上、资料上给予了大力支持，其中得到李红卫小姐，刘仁祥、王勇、周光昕、叶荣成几位先生大力协助和该公司的几家用户提供了宝贵资料，电子部第十一设计研究院张树、赵振源两位副院长对编写工作给予很大的关心。对上述的关心、支持、帮助、协助，在此我们表示真诚的感谢。

作 者

1993 年 11 月于成都

目 录

第3版前言

第2版前言

第1版前言

第1章 总论	1
1.1 调速传动的发展	1
1.2 变频器的发展	7
1.3 使用变频器的目的	20
第2章 异步电动机与变频器	39
2.1 异步电动机的原理与构造	39
2.2 异步电动机的旋转磁场	41
2.3 变频器与异步电动机	42
2.4 变频器工作原理	49
2.5 异步电动机在变频与工频运行下特性比较	96
第3章 变频器的构成、质量与可靠性	108
3.1 变频器的构成	108
3.2 变频器质量的性能指标	114
3.3 变频器质量的可靠性指标	118
3.4 可靠性热设计及整机可靠性试验	126
第4章 变频器的种类、功能、特点	129
4.1 变频器的分类	129
4.2 交-交变频器的类型和特点	142
4.3 交-直-交电流源型变频器	158
4.4 交-直-交电压源型两电平高中低压变频器	162
4.5 中高压交-直-交电压源型多重化多脉波多电平通用变频器	185
4.6 交-直-交电压源型两电平变频器与其他拓扑电路变频器的比较	196
第5章 电力电子器件	212
5.1 晶闸管	215

5.2	晶体管	247
5.3	智能功率模块	296
第6章 数字控制芯片		324
6.1	数字控制的优点及功能	324
6.2	控制电动机专用芯片	326
6.3	DSP 及其他单片机	340
6.4	多 CPU 控制	349
第7章 变频器对异步电动机的控制方式		353
7.1	U/f 恒定控制	353
7.2	转差频率控制	358
7.3	矢量控制	365
7.4	直接转矩控制	379
7.5	直接转速控制	387
第8章 按控制不同物理量及负载特性选用变频器		390
8.1	速度控制变频器的选择	397
8.2	位置控制变频器的选择	408
8.3	张力控制变频器的选择	414
8.4	流量控制变频器的选择	419
8.5	温度控制变频器的选择	426
8.6	压力控制变频器的选择	431
8.7	负载特性要求响应快变频器的选择	438
8.8	负载特性要求调节准确度高变频器的选择	443
8.9	负负载变频器的选择	448
8.10	冲击负载变频器的选择	456
第9章 按不同电动机的种类选择变频器		460
9.1	标准笼型电动机变频器的选择及容量计算	460
9.2	绕线转子异步电动机	473
9.3	同步电动机	475
9.4	无刷直流电动机	477
9.5	开关磁阻电动机	478
9.6	直线电动机	479
9.7	步进电动机	479

9.8	集成电动机	481
9.9	变频电动机	482
9.10	齿轮减速电动机	490
9.11	带制动器的电动机	494
9.12	变极电动机	496
9.13	防爆电动机	497
9.14	单相电动机	497
第 10 章	变频器闭环运行及人机界面控制	499
10.1	变频器闭环运行	499
10.2	人机界面操作前的准备	509
10.3	人机界面基本功能参数整定	511
10.4	模式运行	520
10.5	端子功能	523
10.6	特殊功能	526
10.7	显示	529
10.8	控制方式选择	531
第 11 章	变频器的电磁兼容 (EMC)	535
11.1	对电源电网干扰的防止	535
11.2	变频器输入侧产生谐波的机理	544
11.3	变频器输入侧谐波对其他设备的干扰	555
11.4	防止变频器输入侧谐波干扰的对策	561
11.5	变频器输出侧 PWM 控制产生谐波的机理	565
11.6	变频器输出侧谐波干扰的途径及危害	567
11.7	防止变频器输出侧谐波干扰的对策	577
11.8	数字电路中常见干扰及一般对策	586
11.9	电磁兼容标准	588
11.10	变频器的配套设备及配线	596
第 12 章	变频器安装接线、维修及故障诊断	617
12.1	变频器安装	617
12.2	变频器室的设置	638
12.3	变频器维修检查	645
12.4	变频器的保护功能及故障诊断	654
参考文献		665

第 1 章 总 论

电力电子技术的发展开始于 20 世纪初汞弧整流器的发明。真正的革命开始于 1956 年贝尔实验室发明晶闸管, 1958 年通用电气公司推出商品化产品。经过 50 多年的发展, 电力电子技术已成为一门多学科的边缘技术, 它包含变流器电路、电力电子器件、计算机辅助设计、模拟电子学和数字电子学、微型计算机、控制理论、超大规模集成电路以及高频技术、电磁兼容等。电力电子技术的应用也取得了极大的进展, 从开始的整流, 交直流可调电源, 现已应用到电化学生产、照明控制、电焊接技术、电网无功和谐波补偿、高压直流输电系统、光电池和燃料电池及可再生能源、变速恒频系统、固态断路器、感应加热、电机传动、绿色交通电动机车、电动汽车、电动舰艇及磁悬浮列车、中频电源和超声波电源, 还出现了谐振变换技术, 频率达数兆赫。这些应用的发展中心是个变频技术问题, 就是把直流电逆变成不同频率的交流电, 或是把交流电变成直流电再逆变成不同频率的交流电。总之这一切都是电能不变化为其他能量而只是频率的变化。本书拟讨论变频在调速传动中的应用。

1.1 调速传动的发展

调速传动的目的见表 1-1, 调速传动在不同领域中的用途见表 1-2。根据表中所列目的和使用领域, 调速传动发展历史的概要如下。

表 1-1 调速传动的目的

使用目的	内 容
节能	风机、泵类机械根据要求流量调节转速; 挤压机、搅拌机等根据负载状态调节转速

(续)

使用目的	内 容
自动化	提高搬运机械停止位置精度, 提高生产线速度控制精度, 采用有反馈装置的流量控制实现自动化
提高产品质量	生产加工实现最佳速度控制及协调生产线内各装置的速度, 使其同步、同速提高产品质量和加工精度
提高生产率	根据产品种类, 实现生产线的最佳速度和加减速速度, 提高生产率
提高产品合格率	不损害产品质量条件下, 设备加速时间最小化, 实现克服外界各种干扰而提高速度的稳定性来提高产品合格率
增加设备使用寿命	采用对设备不产生冲击的起动、停止和空载时低速运转, 增加设备使用寿命
设备小型化	采用高速化的设备小型化变频效率增高, 体积减小
增加舒适性	电梯、电车等, 采用平滑加速、减速, 以提高乘坐的舒适性
环境舒适	改变空调位式控制为速度控制, 使空调小功率连续运转, 实现环境舒适
植物、家禽良好培植、教育	使空调在植物、家禽最佳条件下运转, 帮助发育
低噪声	根据负载降低转速, 以减小机械和风机的噪声

1.1.1 机械式调速传动

机械式调速传动采用机械式动力源调节传动速度是最为古老的调速方法, 其典型方式如下:

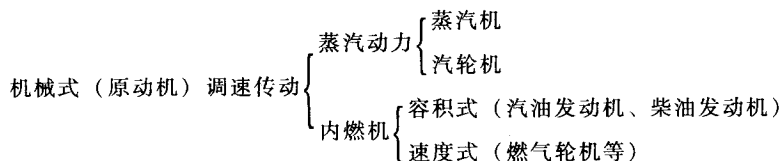


表 1-2 调速传动在不同领域中的使用对象

使用领域	内 容
钢铁	轧钢机、辊道、鼓风机、泵、起重机、搬运车
轧制铜线	拉线机、卷绕机、鼓风机、泵、起重机
化学	挤压机、胶片传送带、搅拌机、离心分离机、压缩机、喷雾器、鼓风机、泵
纤维	纺纱机、精纺机、织机、空调、鼓风机
汽车	传送带、搬运车、涂料搅拌、空调
电机、机械	泵、起重机、传送带、空调、鼓风机
机床	车床、立车、旋转平面磨床、机械加工中心、剃齿机
食品	制面机、制点心机、传送带、搅拌机
造纸	造纸机、风机、泵、粉碎机、搅拌机、鼓风机
水泥	回转炉、起重机、鼓风机、泵
矿业	提升机、传送带、掘削机、起重机、鼓风机、泵、压缩机
煤气	压缩机、鼓风机、泵、搬运机
交通	电车、电力机车、汽车、船舶推进、装卸机械、飞机
装卸搬运	自动仓库、搬运车、粉体送料器（输出传送带）
工厂建筑	电梯、传送带、空调、鼓风机、泵
农业	养猪、养鸡、养鱼、制茶机、灌溉用泵、空调
生活服务	空压机、缝纫机、电风扇、陈列柜用泵、工业及家用洗衣机
电力	锅炉用鼓风机、泵、扬水发电站、飞轮
试验研究	风洞实验、主轴试验、离心分离机
石油	游梁式抽油机、输油泵、注水泵

蒸汽机调速有起动转矩大、调速及反转容易等特点；缺点是热效率低、单位输出功率重量大。所以中小功率已被内燃机和电

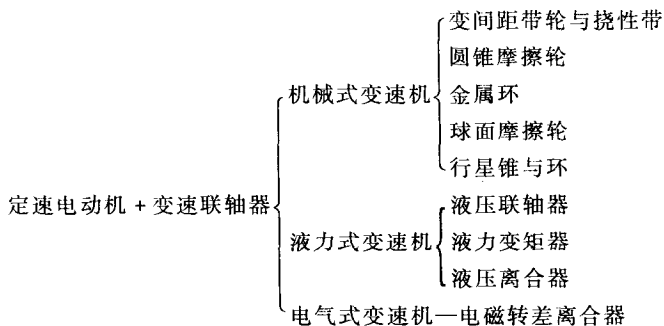
动机取代，大功率改为汽轮机或电动机。

汽轮机的优点是能量转换效率高，容易获得高速等；缺点是需用锅炉和大的附属设备，现逐步被变速联轴器和调速电动机所取代。

使用汽油等的内燃机主要用在汽车、船舶等交通部门，不需要电源。

1.1.2 变速联轴器

变速联轴器就是在以定速运转的电动机轴上装设可调速的联轴器，用于改变负载装置的输入转速，其典型代表如下：



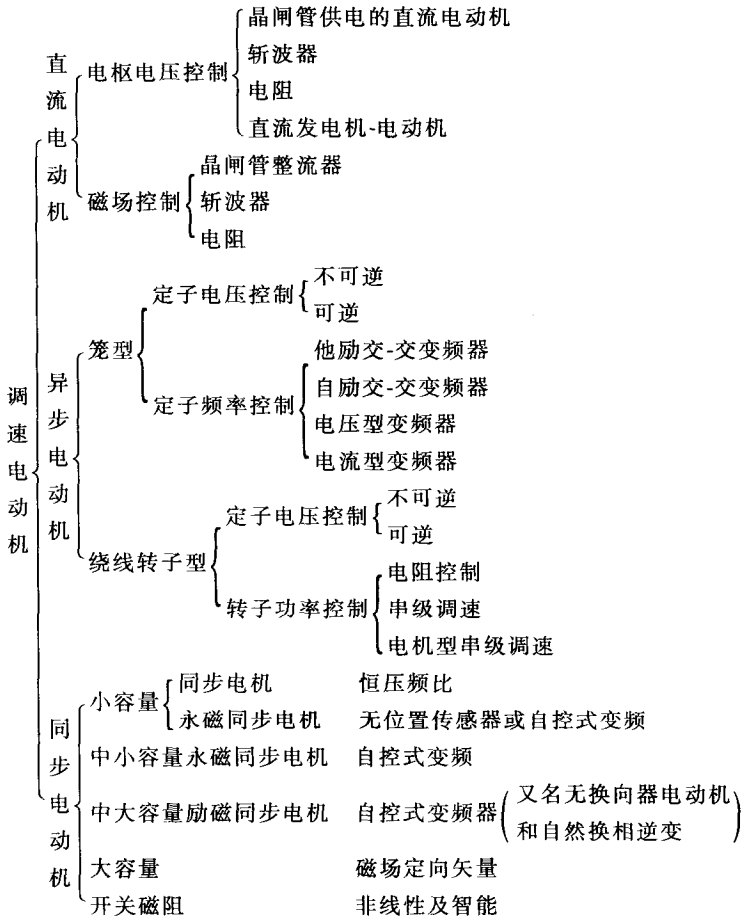
变间距带轮调速主要是利用带与带轮的接触面等摩擦力传递动力，调节轴的带与带轮间距、改变等效直径比进行调速，调速比为 1:3 ~ 1:6。这种调速响应性及精度差，现广泛改为变频器进行调速。

液力式变速机是利用改变液量来改变输出轴的转速，容易实现无级调速，比机械式调速好，但效率低、损耗大、无制动、急加减速困难，它也逐步被变频器代替。

电磁转差离合器是调节励磁电流来控制速度与转矩特性。它的缺点是总效率低，转筒需要冷却，不能产生制动转矩等，现也逐步被变频调速所代替。

1.1.3 调速电动机

在调速传动中，常常强烈要求将使用的电动机直接调速运转。现将调速电动机分类如下：



直流电动机调速用发电机-电动机组控制是调速电动机的先驱，在初期采用的汞弧整流器方式，是控制汞弧整流器的触发相位角以获得可变直流电源，从而改变直流电动机的转速。这个时代的控制回路采用电子管等，在系统的效率、稳定性方面欠佳。但在1958年晶闸管及控制用晶体管开始生产，到1967年以后，大容量平板形晶闸管生产，这种大容量晶闸管供电的直流电动机在工厂中被采用，实践证明其性能、效率、稳定性及维修性良