



全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

电子·教育

工业变频器原理 及应用

魏召刚 主编

刘林山 冯丽平 副主编 刘刚 主审

<http://www.phei.com.cn>



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

工业变频器原理及应用

魏召刚 主编

刘林山 冯丽平 副主编

刘 刚 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书内容主要包括：工业变频器基本知识，工业变频器结构，工业变频器控制方式，富士变频器介绍，变频控制系统设计，变频器运行与维护，变频控制系统应用实例。全书分7章，对以上内容做了较详细地分析和介绍。

本书在内容编排上以应用为重点。考虑到读者对变频器维修的要求和知识连贯性，对变频器的工作原理做了适度的介绍。在选型上，以目前国内市场占有率最大和市场定位较高的富士产品为例进行介绍，目的是满足大多数变频器用户的知识需求。变频器维护和应用实例等方面的内容取材于众多变频器生产企业的培训教材，具有专业的指导作用。

本书可作为高职高专院校电气工程及自动化专业、机电一体化专业、自动控制专业及相关专业的教材，也可作为工业企业相关技术人员的实用的参考资料。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

工业变频器原理及应用/魏召刚主编. —北京：电子工业出版社，2006.9

全国高等职业教育工业生产自动化技术系列规划教材

ISBN 7-121-02949-9

I. 工… II. 魏… III. 变频器—高等学校：技术学校—教材 IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 092561 号

责任编辑：王 博

印 刷：北京市海淀区四季青印刷厂

装 订：三河市万和装订厂

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销：各地新华书店

开 本：787×1092 1/16 印张：12.75 字数：326 千字

印 次：2006 年 9 月第 1 次印刷

印 数：5 000 册 定价：18.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系电话：(010) 68279077；邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

出版说明

党的“十六大”报告提出，走我国新型工业化发展的道路，必须坚持“以信息化带动工业化、以工业化促进信息化”，而且要达到“科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势”等五个具体目标，这表明我国要基本实现工业化，不仅要采用机械化和电气化，而且要充分利用自动化和信息化。因此，以自动化技术为代表的先进生产技术，将在我国产业结构调整、推动传统产业现代化、实现经济及社会持续协调发展中，发挥极其重要的作用。

目前，作为我国高等教育一翼的高等职业教育，已经在招生规模方面取得了巨大的突破，但在教学改革方面与西方发达的职业教育相比，还相对落后。高职教育的培养目标是培养企业真正需要的具有实践动手能力的技术工人，这是当前高职教育改革的重点，也是一线教师所真正关心的话题。而工业自动化技术是高职教育中的一个重要领域，承担着为工业生产培养一线技术工人的重要作用，而且，无论是社会用人需求还是就业前景，这一领域目前都被广泛看好。

与此相适应，电子工业出版社在广泛调查研究的基础上，于2006年3月组织全国数十所高等职业院校的一线教师和企业技术专家，在上海召开了“全国高等职业教育工业生产自动化技术规划教材研讨会”，就相关的课程教学和高职培养目标进行了深入的探讨，确定了相关的主干教材10余种。与会代表多是所在学校的领导和业务骨干，具有丰富的教学经验、实践经验和编写教材的经验。

本套教材体现了高等职业教育改革的方向，以培养岗位技术人员的综合能力为中心，淡化理论、强化应用，突出职业教育的教育特色，并且根据教育部制定的“高职高专教育课程教学基本要求”，将传统课程重新组合，缩短教学课时，力求突出应用性、针对性、岗位性和专业性等特点。

本套教材在内容编排上以能力为单位模块，强调实用原则；书中实例完整，注重原理和方法的应用，以提高对高职学生技能的培养。本套教材将学历课程与资格应试结合，满足目前大多数高等职业院校学生毕业时对毕业证与资格证或上岗证的要求。本套教材力求内容新颖性，紧跟国内外工业自动化技术的最新进展，同时兼顾国内高职院校相关专业的最新教学内容。本套教材均配套教学参考资料，为高职师生的教与学提供方便和帮助。

本套教材的出版对于高等职业教育的改革和高等职业专门人才的培养将起到积极的推动作用。对于教材中所存在的一些不尽如人意之处，将通过今后的教学实践不断修订、完善和充实，以便我们更好地服务于高等职业教育。

本套教材适用于生产过程自动化技术、计算机控制技术、工业网络技术、液压与气动技术、检测技术及应用等专业，也适用于机电类专业。

电子工业出版社
高职高专教育教材事业部
2006年7月

前 言

工业变频器经过几十年的发展,目前已处于普及应用阶段。但在我国许多企业的工程技术人员对工业变频器的了解还处于非常初级的阶段。作为高职高专的毕业生,毕业后即将面对的是具有相对高端技术的企业环境,所以对变频器技术及应用的掌握是必需的。本书几位作者均是具有多年教学经验的专业教师,同时又都是具有丰富实践经验的高级工程技术人员。我们从教学应用出发,以让学生掌握必要的知识和技能为出发点,对本书的内容作了充分的讨论。在知识的介绍上,力图简洁、明了,使之适应不同知识层次的读者需要。

本书内容主要包括:工业变频器基本知识,工业变频器结构,工业变频器控制方式,富士变频器介绍,变频控制系统设计,变频器运行与维护,变频控制系统应用示例。在介绍变频器的基本工作原理及结构的基础上,重点从实用的角度介绍了变频器的主要参数设置、报警及保护信息处理、工作环境对变频器的影响等方面的内容。在系统设计方面,给出了多种典型应用环境的实例、详尽的设计资料和参数设置方案。这些知识内容对初学者认识并应用变频器具有极大的帮助。

本书由山东工业职业学院魏召刚主编,吉林电子信息职业技术学院刘林山、上海第二工业大学冯丽平担任副主编。其中,第1、4、6章由魏召刚编写,第2、3章由冯丽平编写,第5、7章由刘林山编写。鞍山科技大学的刘刚老师对本书的内容提出了宝贵意见,并在百忙中审阅了全书。山东工业职业学院的孙志老师、韩晓冬老师在全文的编排上给予我们极大的帮助。在编写过程中,我们参阅了许多同行专家的文献,参考了变频器生产企业的产品说明及培训资料,在此对这些资料的作者和提供者一并表示真诚的感谢。

我们努力奉献给读者一本优秀、适用的教材和参考书,但限于水平,加之时间紧迫,难免会有不如意之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2006年7月

目 录

第 1 章 变频技术概述	(1)
1.1 交流电动机调速方式	(1)
1.1.1 交流电动机的调速特性	(1)
1.1.2 几种交流调速方式的特点	(2)
1.2 工业变频器的类型及发展	(3)
1.2.1 工业变频器的分类	(3)
1.2.2 工业变频器的发展	(5)
1.3 工业变频器的应用领域及意义	(6)
思考题与习题	(7)
第 2 章 工业变频器的基本结构	(8)
2.1 交-直-交工业变频器的基本结构	(8)
2.2 整流电路	(9)
2.2.1 不可控整流电路	(9)
2.2.2 可控整流电路	(12)
2.3 中间电路	(19)
2.3.1 滤波电路	(20)
2.3.2 制动电路	(20)
2.4 逆变电路	(26)
2.4.1 逆变电路的结构	(26)
2.4.2 逆变电路常用元器件	(35)
2.4.3 逆变电路的常用控制方式	(37)
2.5 工业变频器的其他功能部件	(39)
2.5.1 人机接口	(40)
2.5.2 主控板	(42)
2.5.3 驱动电路	(58)
2.6 交-交变频器介绍	(64)
2.6.1 交-交变频器的基本工作原理	(64)
2.6.2 交-交变频器的特点	(70)
2.6.3 交-交变频器的发展优势	(70)
思考题与习题	(71)
第 3 章 变频器的控制方式	(72)
3.1 U/f 控制方法	(72)
3.1.1 U/f 控制方式的理论基础	(72)
3.1.2 U/f 控制方式的实现	(73)
3.1.3 U/f 控制方式在工业变频器中的实际应用	(78)

3.2	转差频率控制	(83)
3.2.1	转差频率控制的理论基础	(84)
3.2.2	转差频率控制的系统构成	(86)
3.3	矢量控制	(89)
3.3.1	矢量控制的理论基础	(89)
3.3.2	矢量控制的实现方法	(92)
3.3.3	矢量控制的意义	(97)
3.4	直接转矩控制	(98)
3.4.1	直接转矩控制的理论基础	(98)
3.4.2	直接转矩控制在工业变频器中的应用	(100)
3.4.3	直接转矩控制的意义	(103)
	思考题与习题	(103)
第4章	富士 FRENIC 5000 系列变频器应用详解	(104)
4.1	富士 FRENIC 5000 系列变频器概述	(104)
4.2	富士 G11 系列变频器主回路	(105)
4.3	富士 G11 系列变频器的外部端子	(106)
4.3.1	富士 G11 系列的主回路端子	(106)
4.3.2	富士 G11 系列的控制回路端子	(107)
4.4	富士 G11 系列变频器的功能参数	(108)
4.4.1	富士 G11 系列参数分类	(108)
4.4.2	富士 G11 系列变频器的基本参数	(109)
4.4.3	富士 G11 系列变频器频率控制参数	(116)
4.4.4	富士 G11 系列变频器高级功能参数	(119)
	思考题与习题	(121)
第5章	变频控制系统的实现	(122)
5.1	变频控制系统结构设计	(122)
5.1.1	转速开环的电压型变频调速控制系统结构	(123)
5.1.2	转速开环的电流型变频调速控制系统结构	(123)
5.1.3	恒幅型 SPWM 结构变频调速控制系统结构	(124)
5.1.4	电流跟踪型 PWM 变频调速控制系统结构	(124)
5.2	变频控制系统的主电路设计	(124)
5.2.1	变频控制系统主电路元件作用	(124)
5.2.2	变频控制系统主电路元件选择	(126)
5.3	变频控制系统控制方式设计	(139)
5.3.1	变频控制系统控制方式设计	(139)
5.3.2	变频控制系统控制方式的实现	(140)
5.3.3	变频控制系统参数设置	(141)
5.4	变频控制系统设计示例	(148)
5.4.1	多段速自动系统设计	(148)

5.4.2 一拖多变频系统设计	(149)
思考题与习题	(151)
第6章 工业变频器的安装与维护	(152)
6.1 工业变频器的环境要求	(152)
6.2 工业变频器的安装与运行	(153)
6.2.1 安装场所	(153)
6.2.2 安装方向与空间	(153)
6.2.3 连接	(154)
6.2.4 运行	(156)
6.2.5 运行维护	(157)
6.3 工业变频器常见故障及处理	(158)
6.3.1 运行性能方面的报警及原因	(158)
6.3.2 因外部条件产生的损毁	(160)
6.4 工业变频器的干扰及对策	(162)
6.4.1 干扰的方式及对策	(162)
6.4.2 抗干扰措施的应用示例	(166)
思考题与习题	(168)
第7章 工业变频器的应用实例	(169)
7.1 工业变频器在民用方面的应用	(169)
7.1.1 变频恒压供水系统	(169)
7.1.2 变频器在中央空调中的应用	(174)
7.2 工业变频器在工业方面的应用	(178)
7.2.1 离心机多段速控制系统	(178)
7.2.2 龙门刨床主传动变频控制	(180)
7.2.3 变频器在物料传输系统的应用	(185)
7.2.4 变频器在风机系统的应用	(190)
思考题与习题	(194)
参考文献	(195)

第1章

变频技术概述

本章提要

本章对变频器的发展以及应用作了简单介绍。变频器作为一种新兴的调速设备，在许多工业应用中具有极大的优越性。本章对变频器的应用目的、分类、简单工作原理以及应用意义几个方面简单地作了叙述，希望读者对变频器的应用有一个概括的了解。

1.1 交流电动机调速方式

1.1.1 交流电动机的调速特性

在工业生产系统的动力装置中，交流异步电动机已占了大约 90% 以上的份额。原因不难理解，通过与交直流电动机的对比很容易看出，交流异步电动机具有以下优点：体积小、造价低、维护简单、可适应复杂的工作环境等。但在交流变频器推广使用之前，在需要进行连续调速或精确调速的应用方面，直流电动机仍具有很大的优势。原因在于常规的交流调速方式很难满足以上几种情况下的应用要求。交流异步电动机几种调速方式下的特性如图 1.1 所示。

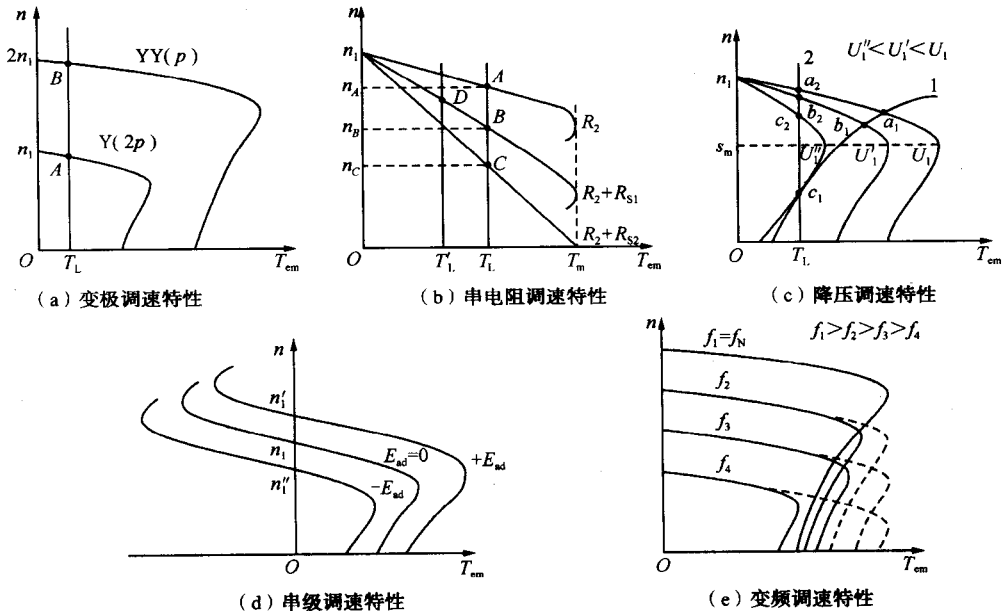


图 1.1 交流电动机的特性

1.1.2 几种交流调速方式的特点

由以上调速特性，根据其实现方法，可以总结出几种调速方式的特点。

1. 变极调速

变极调速只适用于变极电机，在电机制造时安装多套绕组，在运行时通过外部的开关设备控制绕组的连接方式改变极数，从而改变电机的转速。其特点如下：在每一个转速等级下，具有较硬的机械特性，稳定性好；转速只能在几个速度级上改变，调速平滑性差；在某些接线方式下最大转矩减小，只适用于恒功率调速；电机体积大、制造成本高。

2. 串电阻调速

串电阻调速适用于绕线式异步电动机，通过在电动机转子回路中串入不同阻值的电阻，人为改变电动机机械特性的硬度，从而改变在某种负载特性下的转速。其优点是：设备简单、易于实现。其缺点是：只能有级调速，平滑性差；低速时机械特性软，故静差率大；低速时转差大，转子铜损高，运行效率低。

3. 降压调速特性

降压调速适用于专门设计的具有较大转子电阻的高转差率异步电动机。由特性曲线可以看出，当电机定子电压改变时，可以使工作点处于不同的工作曲线上，从而改变电机的工作速度。降压调速的特点是：调速范围窄；机械特性软；适用范围窄。为改善调速特性，一般要使用闭环工作方式，系统结构复杂。

4. 串级调速特性

串级调速方式是转子回路串电阻方式的改进，基本工作方式也是通过改变转子回路的等效阻抗从而改变电动机的工作特性，达到调速的目的。实现方式是：在转子回路串入一个可变的电动势，从而改变转子回路的回路电流，进而改变电机转速。相对于其他调速方式的优点是：可以通过某种控制方式，使转子回路的能量回馈到电网，从而提高效率。在适当的控制方式下，可以实现低同步或高同步的连续调速。缺点是：只能适用于绕线式异步电动机，且控制系统相对复杂。

5. 变频调速特性

由特性曲线可以看出，如果能连续地改变电动机的电源频率，从而可以连续地改变其同步转速，电动机的转速则可以在一个较宽的范围内连续地改变。从实现原理上考虑，变频调速是一个简洁的方法。从调速特性上看，变频调速的任何一个速度段的硬度均接近自然机械特性，调速特性好；如果能有一个可变频率的交流电源，则可以实现连续的调速，平滑性好；其调速方式是通过改变电动机的定子电源实现，可以适用于鼠笼电动机，因而应用范围广。

比较几种调速方式可以看出，单就调速性能考虑，变频调速从运行的经济性、调速的平滑性、调速的机械特性这几个方面都具有明显的优势。但其实现需要一个具有一定控制方式的交流电源，在大功率电子器件以及单片机广泛应用之前，这一实现需要极高的成本。目前，随着电力电子器件及单片机的大规模应用，交流异步电动机变频调速已成为交流调速

的首选方案。

1.2 工业变频器的类型及发展

1.2.1 工业变频器的分类

实际工作的变频器种类繁多，根据不同的分类方法可以将变频器进行如下分类。

1. 按变频原理分类

按变频原理可以将变频器分为两大类：交-交变频器和交-直-交变频器。

(1) 交-交变频器。其工作原理如图 1.2 所示，将三相工频电源经过几对电子开关切换，直接产生所需要的变压变频的电源。本方法结构简单、造价低、体积小，与目前常用的变频器比较具有较大的经济优势，但其控制算法相对复杂，目前仅处于初步开发阶段。但计算机技术的发展为复杂的控制实现提供了理想的条件，随着该方法的进一步完善，交-交变频器必将是交流变频的发展方向。

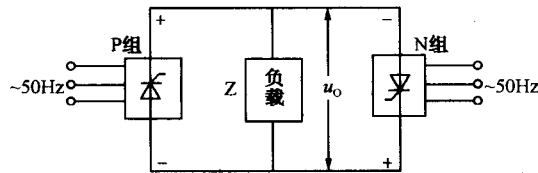


图 1.2 交-交变频器工作原理示意图

(2) 交-直-交变频器。交-直-交变频器是目前变频技术的主流，其基本工作原理如图 1.3 所示。

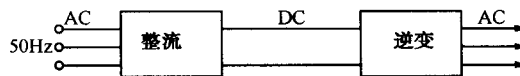


图 1.3 交-直-交变频器工作原理示意图

由上图可以看出，交-直-交变频器实际上是整流电路和逆变电路的组合。整流电路将工频交流电源整流，经不同方式的储能元件滤波后得到稳定的直流电源，逆变电路根据不同的控制方式逆变产生频率和电压可变的交流电源。该实现方式结构清晰，逆变控制简便，是目前工业变频器主流的控制方式。

2. 按变频控制方式分类

由电动机的运行特性我们知道，交流电动机制造中对交流电源的电压和频率关系有一定要求。变频器作为控制电源，需满足对电动机特性的最优化控制。十几种不同的变频器从其应用目的出发，采用了多种不同的控制方式。但其公共的目的就是最大限度地改善电机的工作状态，提高效率。根据其控制方式的不同，变频器又可分为以下几类。

(1) U/f 控制变频器。从电动机的磁路特点以及最大转矩与电压、频率的关系出发，变频器同时对输出电压和输出频率进行控制，以保证在运行过程中最大限度地发挥电机的效率

又不至于使磁路饱和。其基本思路是，通过保持输出交流电源的 U/f 恒定，使电动机保持恒定的最大转矩。实际实现中，考虑电动机的固有损耗，往往采用进一步的措施以提高电机的低频转矩。 U/f 控制方式的控制思路清晰，实现成本较低，为各种通用型变频器所普遍采用，但采用该控制方式的变频器未能充分考虑负载的影响，所以只应用于对精度要求不高的场合。

(2) SF 控制变频器。SF 控制是 U/f 控制方式的改进，实际上是一种闭环控制方式。其实现思路是：通过实际检测电动机的实际转速，根据设定频率与实际频率的差对输出频率进行连续的调节，从而使输出频率始终满足电动机设定转速的要求。因为其基本结构是以转速闭环控制系统，所以在调整转速的同时对输出转矩也进行了控制。与简单的 U/f 控制方式比较，采用这种控制方式的变频器可以实现更好的调速精度和转矩特性。但因需要实际检测电动机转速，整个系统的结构复杂，通用性较差。

(3) VC 变频器。VC 即矢量控制，其控制思路借鉴了直流调速的基本思想。基本控制方式是：将异步电动机的定子电流分解为相位上相差 90° 的两部分，即用来产生磁场的感性励磁电流和用来产生转矩的阻性转矩电流，并对两个电流分量分别进行控制。在实际控制上要同时控制电动机定子电流的幅值和相位，即控制定子电流矢量，故称其为矢量控制。

VC 变频器，其调速特性已完全达到了直流调速的调速精度和过渡过程快速性要求，目前已成为各高端变频器所普遍采用的控制方式。这类变频器被广泛应用于许多需要精密调速和快速性要求高的场合。但是进行矢量运算需要准确地掌握电动机的相关参数，这往往需要专用变频电机才能实现。目前随着变频控制技术的发展，VC 变频器都具备了一个参数自整定功能。可以自动测定电动机的相关参数并根据测定结果自动调整 VC 运算的相关参数，使 VC 变频器在一个大的范围内适用于普通异步电动机。

3. 按用途分类

从变频器的实际应用目的出发，可以使变频器应用的经济性与运行指标得到统一。变频器制造商根据产品不同的应用目的，在功能、控制方式及控制成本方面均有不同的考虑。以下我们根据变频器用途的不同对其进行简单的分类。

(1) 通用变频器。顾名思义，通用变频器的特点是其通用性，其应用方向是对调速性能没有很严格要求的场合，以其相对经济的产品和相对简单的控制方式来满足最基本的应用。但随着变频技术的进一步发展和市场需求的变化，通用变频器也更进一步地发展为两个方向。即针对以节能运行为主要目的的风机、泵类等平方转矩负载使用的平方转矩变频器和以普通恒转矩机械为主要控制对象的恒转矩变频器。

① 平方转矩变频器。该类变频器的主要控制对象是以风机、水泵为典型代表的平方转矩负载。我们对这类负载特点的基本理解是：启动转矩不大、对转速控制的精确性要求不高、低速运行可大幅度节能。从应用目的出发，该类变频器基本上以采用 U/f 控制方式为主，具有较小的过载能力，低频转矩相对较小，最高输出频率较低。但随着其功能的增强，其实用控制功能已非常全面，具有了比如：简易 PLC、闭环控制、多泵自动切换控制等多项针对该类负载实际应用的功能，从而使其系统的构成更方便、更经济、更简洁。

在实际应用中，由于该类变频器与恒转矩变频器具有较大的价格差。在许多恒转矩负载的控制中，如果设备的启动转矩不大或者工作过载倍数较小时，从经济性考虑，也经常选择该类变频器来控制。

② 恒转矩变频器。恒转矩通用型变频器的主要应用对象是启动转矩大、调速精度要求

不是非常高的恒转矩机械设备。与平方转矩变频器比较，它具有以下特点：过载能力强、调速范围宽、启动转矩大等。为了满足不同控制目的，该类变频器也内置了大量的应用软件，如：简易 PLC、闭环控制、多段速控制等非常实用的控制功能。

就控制方式而言，该类变频器仍然以具有多种可选择曲线的 U/f 控制为主，但随着其应用范围的不断扩大，目前基本上所有的恒转矩变频器均具有带自整定功能的无传感器矢量控制。对通用的机械设备，即使其调速精度和过渡过程要求较高，基本上也可以使用恒转矩通用型变频器实现。

(2) 专用变频器。专用变频器是指应用于某些特殊场合的具有某种特殊性能的变频器，其特点是某个方面的性能指标极高，因而可以实现高控制要求，但相对价格也较高。

① 高性能专用变频器。随着控制理论、交流调速理论以及电力电子技术的发展，采用 VC 变频器和专用变频电机构成的控制系统其性能指标已经达到甚至超过了直流调速系统。由于异步电动机所具有的环境适应性强、维护简单等直流系统所无法比拟的优势，越来越多的直流调速系统正逐渐被交流变频调速取代。如：冶金行业的可逆轧机控制；数控机床主轴驱动变频器等。

② 高频变频器。在超精密机械加工中常要用到高速电机。为了满足其驱动的需要，出现了输出频率可达 3kHz 的高频变频器，从而使异步电动机的转速达到要求。

③ 高压变频器。对于大容量的高压电机的驱动，可采用高压变频器。其电压等级为 3kV、6kV、10kV，驱动功率可达数兆瓦特。该类变频器的应用场所，如：冶金行业的高压拖动的大容量风机的控制、采油行业的高压驱动的大容量水泵等。

1.2.2 工业变频器的发展

工业变频器从最基本的应用到目前的广泛普及，经历了一个长期的发展过程。作为一个功能日益丰富的大功率电子产品，其发展与微电子学、电力电子技术、计算机技术以及自动控制理论的发展是密不可分的。

1. 电力电子器件的发展是变频器发展的基础

不论变频器的主电路如何变化，其实现最终是通过电力电子器件作为开关元件的。没有大功率电力电子器件的支持，任何变换方法都只是一种设想而已。因此，电力电子器件的发展是变频器发展的基础。

经过长时间的发展，目前变频器所使用的开关元件已日趋稳定。作为交-直-交变频器的整流部分，根据其采用可控或不可控电路，其主回路元件采用电力二极管或晶闸管。作为要求具有关断控制的逆变电路，目前均是以 IGBT（绝缘栅双基型晶体管）元件作为开关器件的。对于中小容量的变频器，更多的趋向于以 IGBT 元件为核心，将其他外围电路一起集成所构成的智能功率模块（IPM）。这一方面减小了整机的体积，更重要的是经过高度集成，其可靠性大幅度提高，从而使整机的可靠性提高。

2. 计算机技术和自动控制理论的发展是变频器发展的支柱

早期的晶闸管逆变器各桥臂的开关控制是由分离电子元器件组成的电路完成的，还未采用计算机控制技术，不仅可靠性差、开关频率低，而且输出的电压和电流的波形都是简单的方波。

随着电子器件的发展，其控制技术也有了长足的进步。PWM 技术的应用使得逆变电路能够得到接近正弦波的输出电压和电流。其控制核心也由分离的电子元器件逐步过渡到 8 位微处理器，进而发展到 16 位甚至 32 位微处理器。控制方式也随着计算能力的提高采用 U/f 控制进而发展为矢量控制、直接转矩控制等更有优势的控制方式。目前，现代变频器不仅输出性能得到了极大的提高，而且具有了内置参数辨识系统、PID 控制、简易 PLC 和通信单元等更适于现代控制方式的附加功能，使得变频器在许多领域得到了更广泛的应用。

1.3 工业变频器的应用领域及意义

目前，变频调速已被公认为是最理想、最有发展前途的调速方式之一，它的应用主要在以下几个方面。

1. 变频器在节能方面的应用

风机、泵类负载采用变频调速后，节电率可达到 20%~60%，这是因为风机、泵类负载的实际消耗功率基本与转速的三次方成比例，而其实际流量与转速成比例。由此可以计算，如果风机的实际风量为额定风量的 80%，通过变频调速其实际功率为额定功率的 51.2%。由此可以看出，当用户需要的平均流量较小时，风机、泵类采用变频调速使其转速降低，节能效果非常可观。传统的风机、水泵采用挡板和阀门进行流量调节，电动机转速不变，耗电功率下降很小。据统计，风机、泵类负载占全国用电量的 31%，占工业总用电量的 50%。因而从节能的角度出发，在此类负载中使用变频调速具有极大的经济效益。以节能为目的变频器的应用，在最近几十年来发展非常迅速，据有关方面统计，我国已经进行变频改造的风机、泵类负载的容量占总容量的 5% 以上，年节电量约为 4×10^{10} kWh。由于风机、泵类负载在采用变频调速后可以节省大量的电能，所需的投资在较短的时间内就可以收回，因此在这一领域的应用最广泛。目前应用较成功的有恒压供水、各类风机、中央空调和液压泵的变频调速。特别值得指出的是恒压供水，由于使用效果极好，已成为城市和乡村供水的首选模式。另外，变频技术也应用于部分家用电器，如目前日益普及的变频空调、变频冰箱等。

2. 变频器在自动化系统中的应用

由于控制技术的发展，变频器除了具有基本的调速控制之外，更具有了多种算术运算和智能控制功能，输出精度高达 0.1%~0.01%。它还设置有完善的检测、保护环节，因此在自动化系统中得到了广泛的应用。例如，化纤工业中的卷绕、拉伸、计量、导丝；玻璃工业中的平板玻璃退火炉、玻璃窑搅拌、拉边机、制瓶机；电弧炉自动加料、配料系统以及电梯的智能控制等。

3. 变频器在提高工艺水平和产品质量方面的应用

变频器还广泛地应用于传送、起重、挤压和机床等各种机械设备控制领域，它可以提高工艺水平和产品质量，减少设备冲击和噪声，延长设备使用寿命。采用变频控制后，可以使机械设备简化，操作和控制更具有人性化，有的甚至可以改变原有的工艺规范，从而提高整个设备的功能。例如，防治和许多行业用的定型机，机内温度是靠改变送入热风的多少来调节的。输送热风通常采用的是循环风机，由于风机速度不变，风量的调节只有通过调节风门

的开度实现。如果风门调节失灵或调节不当就会造成定型机失控，从而影响成品质量。循环风机高速启动，传送带与轴承之间的磨损非常厉害，使传送带成为一种易耗品。在采用变频调速后，温度调节可以通过变频器自动调节风机的速度实现，解决了产品质量问题；此外，变频器可以很方便地实现电机的平滑启动，减少了传送带与轴承的磨损，延长了设备的寿命，同时可以节能 40%。

思考题与习题

1. 比较交流电动机几种调速特性的优缺点。
2. 简述交-直-交工业变频器的结构。
3. 比较工业变频器几种控制方式的特点。
4. 总结变频器不同领域应用的特点。

第2章

工业变频器的基本结构

本章提要

异步电动机的变频调速系统具有很多优点：在调速时转差功率不随转速而变化，调速范围宽；无论是高速还是低速时效率都很高；在采取一定的技术措施后能实现高动态性能，可与直流调速系统媲美。该系统的关键设备是变频器，目前多数实际应用的变频器为交-直-交变频器。本章主要介绍变频器的结构组成。

2.1 交-直-交工业变频器的基本结构

变频器分为交-交和交-直-交两种形式，交-交变频器可将工频交流电直接变换成频率、电压均可控制的交流电，又称直接式变频器。而交-直-交变频器则是先把工频交流电通过整流器变成直流电，然后再把直流电变换成频率、电压均可控制的交流电，它又称为间接式变频器。这里主要研究交-直-交变频器（以下简称变频器）。

变频器的基本构成如图 2.1 所示，由主电路（包括整流器、中间直流环节、逆变器）和控制电路组成，分述如下：

(1) 整流器。电网侧的变流器 I 是整流器，它的作用是把三相（也可以是单相）交流电整流成直流电。

(2) 逆变器。负载侧的变流器 II 为逆变器，最常见的结构形式是利用 6 个半导体主开关器件组成的三相桥式逆变电路。有规律地控制逆变器中主开关器件的通与断，可以得到任意频率的三相交流电输出。

(3) 中间直流环节。由于逆变器的负载为异步电动机，属于感性负载，无论电动机处于电动或发电制动状态，其功率因数总不会为 1。因此，在中间直流环节和电动机之间总会有无功功率的交换。这种无功能量要靠中间直流环节的储能元件（电容器或电抗器）来缓冲，所以又常称中间直流环节为中间直流储能环节。

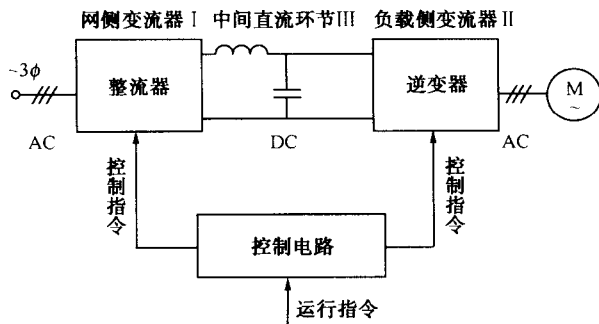


图 2.1 变频器的基本构成