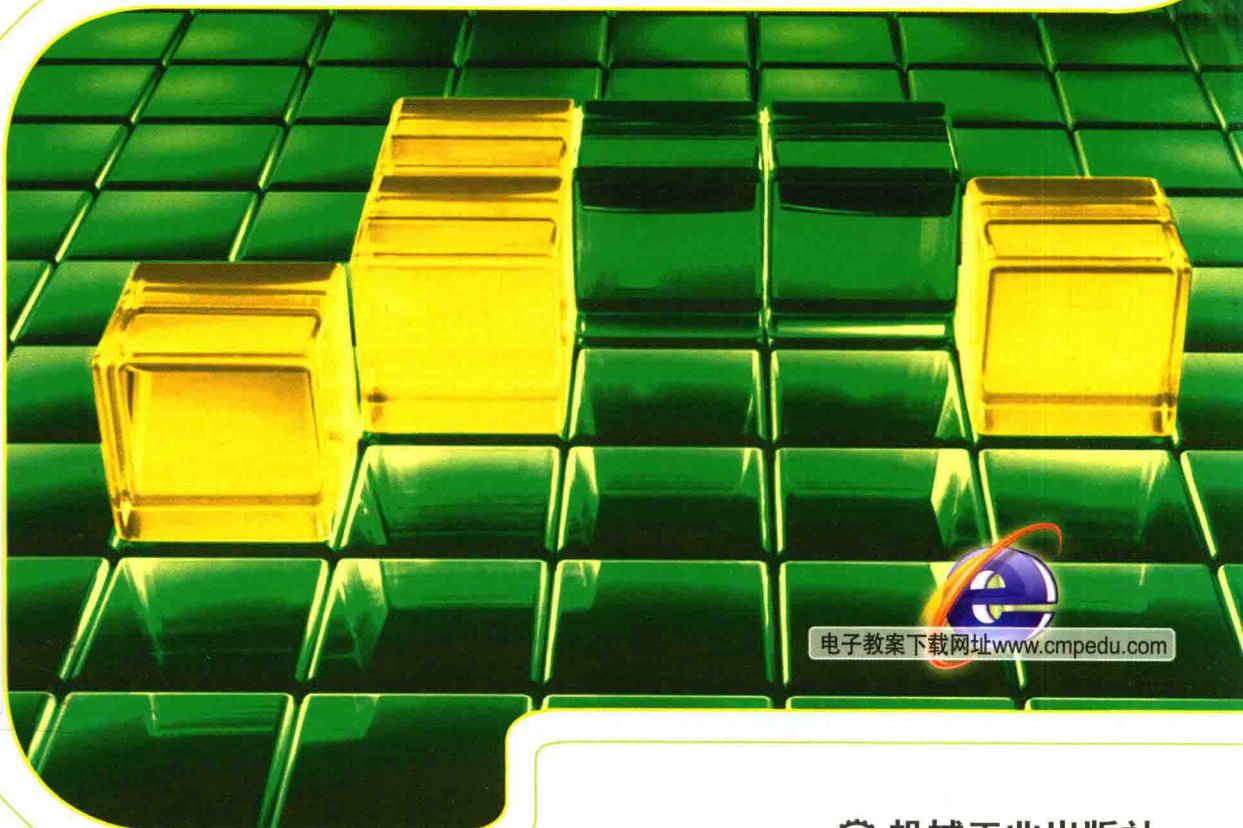




全国高等职业教育规划教材

变频器系统运行 与维护

周 奎 吴会琴 高文忠 主编



电子教案下载网址 www.cmpedu.com



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

全国高等职业教育规划教材

变频器系统运行与维护

周 奎 吴会琴 高文忠 主编
王 玲 侍寿永 景绍学 庄彦钦 参编
成建生 主审



机械工业出版社

本书以“基于工作过程的课程开发理论”为指导思想,校企合作共同编写而成。全书以变频器安装、操作、运行、维护为主线,将本书内容分为:变频器的基础知识、变频器基本调速电路的装调、基于 PLC 的变频调速系统的装调、变频器的工程实践、变频器系统的维护与保养 5 个学习情境。情境 1 是理论基础,采用常规教学;情境 2、3 为变频器的功能应用,采用项目教学;情境 4 为变频调速系统的工程应用,设计情境案例教学;情境 5 为变频器的保养和维护,是日常使用中的保养和对常见故障的判断和处理。

本书可作为高职高专电气类、机电类专业教材,也可供机电技术和电气技术人员参考。

为配合教学,本书配有电子课件,读者可以登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 免费注册后下载,或联系编辑索取(QQ: 1239258369,电话(010) 88379739)。

图书在版编目(CIP)数据

变频器系统运行与维护/周奎,吴会琴,高文忠主编. —北京:机械工业出版社, 2014. 1 (2016. 1 重印)

全国高等职业教育规划教材

ISBN 978-7-111-45315-4

I. ①变… II. ①周… ②吴… ③高… III. ①变频器-高等职业教育-教材
IV. ①TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 001254 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:刘闻雨 张利萍

责任印制:乔宇

北京玥实印刷有限公司印刷

2016 年 1 月第 1 版第 2 次印刷

184mm×260mm·17.25 印张·426 千字

3001—4800 册

标准书号:ISBN 978-7-111-45315-4

定价:37.00 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

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

出版说明

根据“教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见”中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位，促进学生技能的培养，以及教材内容要紧密结合生产实际，并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神，机械工业出版社组织全国近60所高等职业院校的骨干教师对在2001年出版的“面向21世纪高职高专系列教材”进行了全面的修订和增补，并更名为“全国高等职业教育规划教材”。

本系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会分别会同各高职高专院校的一线骨干教师，针对相关专业的课程设置，融合教学中的实践经验，同时吸收高等职业教育改革的成果而编写完成的，具有“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。在几年的教学实践中，本系列教材获得了较高的评价，并有多品种被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。在修订和增补过程中，除了保持原有特色外，针对课程的不同性质采取了不同的优化措施。其中，核心基础课程的教材在保持扎实的理论基础的同时，增加实训和习题；实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合；涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。同时，根据实际教学的需要对部分课程进行了整合。

归纳起来，本系列教材具有以下特点：

- 1) 围绕培养学生的职业技能这条主线来设计教材的结构、内容和形式。
- 2) 合理安排基础知识和实践知识的比例。基础知识以“必需、够用”为度，强调专业技术应用能力的训练，适当增加实训环节。
- 3) 符合高职学生的学习特点和认知规律。对基本理论和方法的论述容易理解、清晰简洁，多用图表来表达信息；增加相关技术在生产中的应用实例，引导学生主动学习。
- 4) 教材内容紧随技术和经济的发展而更新，及时将新知识、新技术、新工艺和新案例等引入教材。同时注重吸收最新的教学理念，并积极支持新专业的教材建设。
- 5) 注重立体化教材建设。通过主教材、电子教案、配套素材光盘、实训指导和习题及解答等教学资源的有机结合，提高教学服务水平，为高素质技能型人才的培养创造良好的条件。

由于我国高等职业教育改革和发展的速度很快，加之我们的水平和经验有限，因此在教材的编写和出版过程中难免出现问题和错误。我们恳请使用这套教材的师生及时向我们反馈质量信息，以利于我们今后不断提高教材的出版质量，为广大师生提供更多、更适用的教材。

机械工业出版社

前 言

在现代工业和经济生活中，随着电子技术的应用，自动化、节能化和系统化得到了迅速的发展。伴随着电力电子技术、微电子技术及现代控制理论的发展，变频技术已广泛应用于各个领域。如从最初的整流、交直流可调电源等已发展到直流输电、不同频率电网系统的连接、静止无功功率补偿和谐波吸收、超导电抗器的电力储存、高频输电等；在运输等行业正在以交流电动机调速逐步代替直流电动机调速，并应用到超导磁悬浮列车、高速铁路、电动汽车、产业用机器人；在家用电器方面有变频空调器、变频洗衣机、变频电动自行车等；在通信及航天等领域则有通信、导航、雷达、宇宙设备的小型轻量化电源等；石油行业已实现了采油的变频调速、超声波驱动等。

本书以“变频器安装、操作、运行、维护”为主线，共分5个学习情境。学习情境1主要介绍变频技术概念、电力电子器件、变频器工作原理、交-直-交变频技术、脉宽调制技术、交-交变频技术等基础知识；学习情境2主要介绍单向运行调速、可逆运行调速、多段速运行等基本调速电路的设计、安装与调试；学习情境3主要介绍基于PLC控制的可逆运行调速系统、多挡调速系统、工频与变频切换系统、自动送料系统等变频器系统的设计、安装与调试；学习情境4主要介绍变频器恒压供水系统、面漆线控制系统的工程设计、硬件选型、系统装调；学习情境5主要介绍变频器的维护与保养。

本书的教学模块选自企业真实的案例，教学中以做到什么、需要什么、就学什么的行动导向原则，实现教学做一体、理论与实践一体。教学情境及项目的设计遵循由简单到复杂、由单一到综合的认知规律，并注重企业文化的渗透以及学生专业能力、实践能力与社会能力的综合培养。本书作为电气类、机电类专业的课程教材，学生须具备电机、电气、PLC等前导知识。本书的推荐学时为60~70学时。

本书由周奎、吴会琴、高文忠主编，王玲、侍寿永、景绍学、庄彦钦参编。本书学习情境1由王玲、景绍学编写；学习情境2由吴会琴编写；学习情境3由周奎编写；学习情境4由侍寿永、庄彦钦编写；学习情境5由高文忠编写。全书由周奎统稿，成建生主审。在本书的编写过程中得到淮安奥特电气有限公司、西子奥的斯电梯有限公司、淮安东辰恒凯有限公司的大力支持，特此表示感谢！

限于水平与经验，疏漏之处在所难免，请读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

学习情境 1 变频器的基础知识	1
任务 1.1 了解变频器系统	1
1.1.1 变频调速系统	1
1.1.2 变频器的分类	2
1.1.3 变频器的应用	5
1.1.4 变频器技术发展	6
任务 1.2 了解电力电子器件	8
1.2.1 电力电子器件的概念	8
1.2.2 应用电力电子系统的组成	8
1.2.3 电力电子器件的分类	9
1.2.4 不可控器件——电力 二极管	10
1.2.5 半控型器件——晶闸管	11
1.2.6 门极可关断晶闸管	13
1.2.7 电力晶体管	14
1.2.8 电力场效应晶体管	15
1.2.9 绝缘栅双极型晶体管	17
1.2.10 其他新型电力电子器件	19
1.2.11 电力电子器件的驱动与 保护	19
任务 1.3 了解变频器的工作 原理	26
1.3.1 变频器内部结构	26
1.3.2 交-直-交变频器	27
1.3.3 交-交变频器	37
1.3.4 SPWM 控制技术	38
1.3.5 变频器的控制方式	42
任务 1.4 认识变频器	45
1.4.1 变频器的功能	45
1.4.2 MM440 型变频器概述	48
1.4.3 MM440 型变频器的端子 介绍	50
1.4.4 变频器的操作面板	51
1.4.5 变频器的参数介绍	54

1.4.6 变频器的频率给定方式

56

1.4.7 MM440 型变频器的调试

61

学习情境 2 变频器基本调速电路的
装调

任务 2.1 单向运行调速电路的
装调

2.1.1 面板控制单向调速电路的
装调

2.1.2 变频器设置电动机的运行
性能

任务 2.2 电动机可逆运行调速
电路的装调

2.2.1 面板控制的可逆运行调速
电路的装调

2.2.2 外部开关控制的可逆运行
电路的装调

2.2.3 外部电位器控制电动机调速
电路的装调

2.2.4 外部端子控制电动机可逆运行
调速电路的装调

任务 2.3 变频器的多段速运行
电路的装调

2.3.1 直接选择频率的电动机
多段速运行电路的装调

2.3.2 开关状态组合选择频率的电动机
多段速运行电路的装调

任务 2.4 恒压供水 PID 控制系统的
装调

2.4.1 恒压供水 PID 系统的硬件
接线

2.4.2 恒压供水 PID 系统变频器的
参数设定

2.4.3 恒压供水 PID 控制系统的功能
调试

学习情境 3 基于 PLC 的变频调速
系统的装调

任务 3.1 PLC 控制的可逆运行调速

	系统的装调	105		系统中的应用	168
3.1.1	PLC 与变频器的连接	105	4.4.1	面漆控制系统的组成	169
3.1.2	可逆运行调速系统的 安装与调试	111	4.4.2	系统控制要求	169
任务 3.2	PLC 控制的变频多档调速 系统的装调	115	4.4.3	变频器的 USS 通信	169
3.2.1	基于 PLC 的 3 段速固定 频率的控制	115	4.4.4	人机界面	177
3.2.2	基于 PLC 的 7 段速固定 频率的控制	119	4.4.5	系统硬件设计	179
任务 3.3	工频与变频切换系统的 装调	123	4.4.6	PLC 与触摸屏的连接	182
3.3.1	工频与变频切换控制系统的 装调	123	4.4.7	变频器参数设定	183
3.3.2	工频与变频切换报警与显示 系统的装调	126	4.4.8	系统软件设计	184
任务 3.4	自动送料系统的装调	131	学习情境 5 变频器的维护与 保养		
3.4.1	两站自动送料系统的 装调	131	任务 5.1	变频器的测量	191
3.4.2	多站自动送料系统的 装调	134	5.1.1	测试方法	191
学习情境 4 变频器的工程实践		138	5.1.2	主电路和控制电路的 测定	192
任务 4.1	变频器的选择	138	5.1.3	输入侧的测定	194
4.1.1	变频器类型的选择	138	5.1.4	输出侧的测定	195
4.1.2	变频器容量的选择	141	5.1.5	绝缘电阻的测量	195
4.1.3	变频器的主电路和外围 电器的选择	142	任务 5.2	变频器的调试	196
任务 4.2	变频器的安装与布线	146	5.2.1	调试的工作条件	196
4.2.1	变频器的运行环境	146	5.2.2	通电前的检查	196
4.2.2	变频器的安装	148	5.2.3	通电检查	197
4.2.3	MM440 型变频器的电气 安装	150	5.2.4	空载试验	197
任务 4.3	变频器在恒压供水控制 系统中的应用	153	5.2.5	带负载测试	198
4.3.1	恒压供水系统的组成	154	任务 5.3	变频器的日常 维护	198
4.3.2	水泵调速节能原理	154	任务 5.4	变频器的常见故障 与处理	201
4.3.3	系统控制要求	155	5.4.1	变频器过电流故障分析 及处理	201
4.3.4	系统硬件设计	156	5.4.2	变频器过载故障分析 及处理	203
4.3.5	变频器参数设定	159	5.4.3	变频器过欠电压故障分析 及处理	205
4.3.6	系统软件设计	159	附录		208
任务 4.4	变频器在面漆线控制		附录 A	学生工作过程任务单	208
			附录 B	变频器的参数与故障 信息	246
			参考文献		266

学习情境1 变频器的基础知识

任务1.1 了解变频器系统

近10年来,随着电力电子技术、计算机技术、自动控制技术的迅速发展,电气传动技术面临着一场革命,即用交流调速取代直流调速、计算机数字控制技术取代模拟控制技术已成为发展趋势。电动机交流变频调速技术是当今节能、改善工艺流程以提高产品质量和改善环境、推动技术进步的一种主要手段。变频调速以其优异的调速启动、制动性能,高效率、高功率因数和节能效果,广泛的适用范围及其他许多优点而被国内外公认为是最有发展前途的调速方式。

1.1.1 变频调速系统

1. 电气传动系统分类

电气传动关系到合理地使用电动机以节约电能和控制机械的运转状态(位置、速度、加速度等),实现电能-机械能的转换,达到优质、高产、低耗的目的。电气传动系统分为不调速系统和调速系统两大类。随着电力电子技术的发展,原本不调速的机械系统越来越多的改用调速系统以节约电能,改善产品质量,提高生产率。调速系统分为直流调速系统和交流调速系统两大类。

(1) 直流调速系统 直流电动机虽然有调速性能好的优越性,但也有一些固有的难以克服的缺点。主要是机械式换向器带来的弊端,即维修工作量大,事故率高;容量、电压、电流和转速的上限值均受到换向条件的制约,在一些大容量和特大容量的调速领域中无法应用;使用环境受限,特别是在易燃易爆场合难以应用。

(2) 交流调速系统 交流电动机有一些固有的优点:容量、电压、电流和转速的上限,不像直流电动机那样受限制;结构简单,造价低;坚固耐用,事故率低,容易维护。它的最大缺点是调速困难,简单调速方案的性能指标不佳。

2. 交流电动机的调速方法

由电机学原理可知,交流异步电动机的转速表达式为

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

式中 n ——电动机转速;
 f ——定子供电电源频率;
 p ——极对数;
 s ——转差率。

由此可以归纳出交流异步电动机的三种调速方法:变极对数 p 调速、变转差率 s 调速及

变电源频率 f 调速。

(1) 变极对数调速 变极调速只适用于变极电动机，在电动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对数，从而改变电动机的转速。这种方式的优点是：在每一个转速等级下，具有较硬的机械特性，稳定性好；其缺点是：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；电动机的体积大，制造成本高。

(2) 变转差率调速 变转差率调速又可采用降低定子电压、转子串电阻、串级调速来实现。

1) 降低定子电压。降低定子电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。当电动机定子电压改变时，可以使工作点处于不同的机械特性曲线上，从而改变电动机的工作速度。降低定子电压调速的特点是：调速范围窄，机械特性软；适用范围窄。为改善调速特性，一般要使用闭环控制的工作方式，系统的结构复杂。

2) 转子串电阻。转子串电阻调速适用于绕线转子异步电动机。通过在电动机转子回路中串入不同阻值的电阻，人为地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。这种方式的优点是：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，转差率大，转子铜损高，运行效率低。

3) 串级调速。串级调速是转子串电阻调速方式的改进，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。实现方法是：在转子回路中串入一个可变的电动势，从而改变转子回路的回路电阻，来改变电动机的转速。优点是：可以通过某种控制，使转子回路的能量回馈到电网，从而提高效率；在适当的控制下，可以实现低同步或高同步的连续调速。缺点是：只适用于绕线转子异步电动机，且控制系统相对复杂。

(3) 变频调速 变频调速适用于笼型异步电动机。由电动机调速公式可知，如果能连续改变电动机的电源频率，就可以连续地改变电动机的同步转速，使其转速可以在一个较宽的范围内连续可调，因此它属于无级调速。变频调速在运行的经济性、调速的平滑性、机械特性方面都有明显的优势。

变频调速技术也是交流调速中发展最快、最有潜力的技术。随着交流电动机调速理论的突破和变频器性能的不断完善，变频调速开始成为交流调速的主流。目前，交流调速系统的性能已经可以和直流调速系统相媲美，有些甚至超过直流调速系统。

3. 电气传动系统的组成

电气传动控制系统通常由电动机、控制装置和信息装置三部分组成。一般机械设备中的不调速的电气传动系统框图如图 1-1 所示。变频调速的电气传动系统框图如图 1-2 所示。

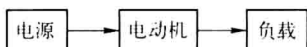


图 1-1 不调速的电气传动系统框图



图 1-2 变频调速的电气传动系统框图

1.1.2 变频器的分类

长期以来，交流电的频率一直是固定的，变频器的出现使频率变成可以充分利用的资源。变频器是将固定频率的交流电变换成频率连续可调的交流电的装置。变频器的种类很

多，下面按照不同的分类方法介绍。

1. 按变频器的用途分类

对于大多数用户来说，可能更为关心的是变频器的用途，变频器按照用途不同可以分为通用变频器和专用变频器两种。

(1) 通用变频器 顾名思义，通用变频器的特点是通用性。随着变频技术的发展和市场需要的不断扩大，通用变频器也在朝着两个方向发展：一是低成本的简易型通用变频器；二是高性能的多功能通用变频器。

1) 简易型通用变频器。简易型通用变频器是一种以节能为主要目的而简化了一些系统功能的通用变频器。它主要应用于水泵、风扇、鼓风机等对于系统调速性能要求不高的场合，并具有体积小、价格低等优势。

2) 高性能的多功能通用变频器。高性能的多功能通用变频器在设计过程中充分考虑了在变频器应用中可能出现的各种需要，并为满足这些需要在系统软件和硬件方面都做了相应的准备。在使用时，用户可以根据负载特性选择算法并对变频器的各种参数进行设定，也可以根据系统的需要选择厂家所提供的各种备用选件来满足系统的特殊需要。高性能的多功能通用变频器除了可以应用于简易型变频器的所有应用领域之外，还可以应用于电梯、数控机床、电动车辆等对调速系统的性能有较高要求的场合。

(2) 专用变频器

1) 高压变频器。高压变频器一般是大容量的变频器，最大功率可做到 5000 kW，电压等级为 3 kV、6 kV、10 kV。

高压大容量变频器主要有两种结构形式：一种采用大容量 GTO 晶闸管或集成门极换相晶闸管 (IGCT) 串联方式，不经变压器直接将高压电源整流为直流，再逆变输出高压，称为“高-高”式高压变频器，也称为直接式高压变频器，由它组成的直接高-高型变频调速系统如图 1-3 所示；另一种是由低压变频器通过升降压变压器构成的，称为“高-低-高”式变压变频器，也称为间接式高压变频器，由它组成的高-低-高型变频调速系统如图 1-4 所示。

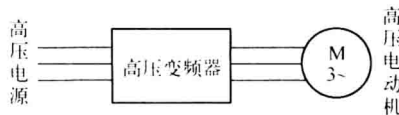


图 1-3 直接高-高型变频调速系统



图 1-4 高-低-高型变频调速系统

2) 高频变频器。在超精密机械加工中常要用到高速电动机。为了满足其驱动的需要，出现了采用脉幅调制控制的高频变频器，其输出主频率可达 3 kHz，驱动两极异步电动机时最高转速为 180000 r/min。

3) 高性能专用变频器。随着控制理论、交流调速理论和电力电子技术的发展，异步电

动机的矢量控制得到发展，矢量变频器及其专用电动机构成的交流伺服系统的功能已经达到并超过了直流伺服系统。此外，由于异步电动机还具有环境适应性强、维护简单等许多直流伺服电动机不具备的优点，在要求高速、高精度的控制中，这种高性能交流伺服变频器构成的交流伺服系统正逐步代替直流伺服系统。

2. 按变频器的工作原理分类

变频器按照工作原理可分为交-直-交变频器和交-交变频器两类。

(1) 交-直-交变频器 交-直-交变频器（又称为间接变频器）是先将工频交流电通过整流器变成直流电，再经过逆变器变成电压和频率可调的交流电。交-直-交变频器由整流器、中间环节和逆变器三部分组成。整流器的作用是将恒压恒频的交流电变成电压可调的直流电；中间环节的作用是通过电感或电容对整流后的直流电压或电流进行滤波为逆变器提供直流电源；逆变器是将直流电变换成可以调频的交流电。逆变器是变频器的核心部分。

按照直流环节的储能方式的不同，交-直-交变频器又分为电压型和电流型两种。

1) 电压型变频器。在交-直-交变频器中，整流电路产生的直流电压通过电容进行滤波后供给逆变电路。由于采用大电容滤波，故输出电压波形比较平直，在理想情况下可以看成是一个内阻为零的电压源，逆变电路输出的电压为矩形波或阶梯波，因此这类变频器也叫电压型变频器。电压型变频器多用于不要求正反转或者快速加减速的通用变频器中。

2) 电流型变频器。在交-直-交变频器中，中间直流环节采用大电感进行滤波时，直流电流波形比较平直，因而电源内阻很大，对负载来说基本上是一个电流源，逆变电路输出的电流为矩形波或阶梯波，因此这类变频器也叫电流型变频器。电流型变频器适用于频繁可逆运转的变频器和大容量的变频器中。

根据调压方式的不同，交-直-交变频器又分为脉幅调制和脉宽调制两种。

1) 脉幅调制。脉幅调制（Pulse Amplitude Modulation, PAM）是指通过调节输出脉冲的幅值来调节输出电压的一种方式。在调节过程中，逆变器负责调频，相控整流器或直流斩波器负责调压。目前，在中小容量变频器中很少采用。

2) 脉宽调制。脉宽调制（Pulse Width Modulation, PWM）是通过改变输出脉冲的宽度和占空比来调节输出电压的一种方式。在调节过程中，逆变器负责调频和调压。目前普遍使用的是脉宽按正弦规律变化的正弦波脉宽调制方式，即 SPWM 方式。中小容量的通用变频器几乎全部采用此类调压方式。

(2) 交-交变频器 交-交变频器（又称为直接变频器）是把频率固定的交流电变换成频率连续可调的交流电。优点是：没有中间变换环节，故变频器的效率高。但其连续可调的频率范围窄，一般在固定频率的 1/2 之下。另外，交-交变频器所用的器件多，总设备投资大，使其应用受到限制。

3. 按变频器的控制方式分类

(1) 恒压频比控制变频器 恒压频比控制变频器的基本特点是对变频器输出的电压和频率同时进行控制，通过保持 U/f 恒定使电动机获得所需的转矩特性。这种控制方式控制电路成本低，多用于精度要求不高的通用变频器。

(2) 转差频率控制变频器 转差频率控制变频器是在 U/f 控制基础上改进的一种闭环控制方式。采用这种控制方式，变频器通过电动机、速度传感器构成速度反馈闭环调速系统。变频器的输出频率由电动机的实际转速与转差频率之和来自动设定，从而达到在调速控制的

同时也使输出转矩得到控制。优点是：调速精度与转矩的动特性较好。但是这种控制需要在电动机的轴上安装速度传感器，并需要依据电动机特性调节转差，故通用性较差。

(3) 矢量控制变频器 矢量控制是 20 世纪 70 年代由德国 Blaschke 首先提出来的对交流电动机的一种新的控制思想和控制技术，也是异步电动机的一种理想调速方法。矢量控制的基本思想是：模仿直流电动机的控制方法，将异步电动机的定子电流分解为产生磁场的电流分量（励磁电流）和与其垂直的产生转矩的电流分量（转矩电流），并分别加以控制。由于这种控制方式中必须同时控制异步电动机定子电流的幅值和相位，即控制定子电流矢量，故被称为矢量控制。

矢量控制方法的提出具有划时代的意义，矢量控制使异步电动机高性能的调速成为可能。矢量控制变频器不仅在调速范围上可以与直流电动机相匹敌，而且可以直接控制异步电动机转矩的变化。然而，在实际的应用中，由于转子磁链难以准确观测，系统特性受到电动机参数的影响较大，且在等效直流电动机控制过程中所用到的矢量旋转变换较复杂，使得实际的控制效果难以达到理想的效果。

(4) 直接转矩控制变频器 1985 年，德国鲁尔大学的 DePenbrock 教授首次提出了直接转矩控制。该技术在很大程度上解决了矢量控制的不足，并以新颖的控制思想、间接明了的系统结构、优良的动静态性能得到了迅速发展。直接转矩控制直接在定子坐标系下分析交流电动机的数学模型，控制电动机的定子磁链和转矩。它不需要将交流电动机转换成等效的直流电动机，因而省去了矢量旋转变换中的许多复杂计算。

1.1.3 变频器的应用

变频器主要用于交流电动机（异步电动机或同步电动机）转速的调节，是公认的交流电动机最理想、最有前途的调速方案，除了具有卓越的调速性能之外，变频器还有显著的节能作用，是企业技术改造和产品更新换代的理想调速装置。自 20 世纪 80 年代被引进中国以来，变频器在节能应用与速度工艺控制中得到了快速发展和广泛的应用。

1. 在节能方面的应用

变频器的最初用途是速度控制，但目前在国内应用较多的是节能。我国是能耗大国，能源利用率较低，且能源储备不足。我国在 2003 年的电力消耗中，60% ~ 70% 为动力电，而在总容量为 5.8 亿 kW 的电动机总容量中，只有不到 2000 万 kW 的电动机是带变频控制的。据分析，在我国，带变动负载、具有节能潜力的电动机至少有 1.8 亿 kW。因此国家大力提倡节能，并着重推荐了变频调速技术。

应用变频调速，可以大大提高电动机转速的控制精度，使电动机在最节能的转速下运行。以风机水泵为例，根据流体力学原理，轴功率与转速的三次方成正比。当所需风量减少，风机转速降低时，其功率按转速的三次方下降。因此，精确调速的节电效果非常可观。与此类似，许多变动负载电动机一般按最大需求来生产电动机的容量，因而设计裕量偏大。而在实际运行中，轻载运行的时间所占比例却非常高。如采用变频调速，可大大提高轻载运行时的工作效率。因此，变动负载的节能潜力巨大。

作为节能目的，变频器广泛应用于各行业。以电力行业为例，由于中国大面积缺电，电力投资将持续增长，同时，国家电改方案对电厂的成本控制提出了要求，降低内部电耗成为电厂关注焦点，因此变频器在电力行业有着巨大的发展潜力，尤其是高压变频器和大功率变频器。

2. 在自动化控制系统方面的应用

由于变频器内置有 32 位或 16 位的微处理器，具有多种算术逻辑运算和智能控制功能，输出频率精度高达 0.01% ~ 0.1%，还设置有完善的检测、保护环节。因此，变频器在自动化控制系统中获得了广泛的应用。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. 在产品工艺和质量方面的应用

变频器还可以广泛用于传动、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，减少设备的冲击和噪声，延长设备的使用寿命。采用变频调速控制后，使机械系统简化，操作和控制更加方便，有的甚至可以改变原有的工艺规范，从而提高了整个设备的功能。

4. 在家用电气方面的应用

除了工业相关行业，在普通家庭中，节约电费、提高家电性能、保护环境等受到越来越多的关注，变频家电成为变频器的另一个广阔市场和应用趋势。带有变频控制的冰箱、洗衣机、家用空调等，在节电、减小电压冲击、降低噪声、提高控制精度等方面有很大的优势。

1.1.4 变频器技术发展

1. 电力电子器件是变频器发展的基础

纵观变频技术的发展，变频器的主电路是以电力电子器件作为开关器件的。因此，电力电子器件是变频器发展的基础。

第一代电力电子器件是出现于 1956 年的晶闸管。晶闸管是电流控制型开关器件，只能控制其导通而不能控制其关断，所以也称为半控型器件。由晶闸管组成的变频器工作频率较低，应用范围较窄。

第二代电力电子器件是以门极关断（GTO）晶闸管和电力晶体管（GTR）为代表，在 20 世纪 60 年代发展起来的。这两种是电流型自关断器件，可以方便地实现逆变和斩波，然而，其开关频率仍然不高，一般在 5 kHz 以下。尽管这时已经出现了脉宽调制（PWM）技术，但因斩波频率和最小脉宽都受到限制，难以得到较为理想的正弦脉宽调制波形，使异步电动机在变频调速时产生刺耳的噪声，因而限制了变频器的推广和应用。

第三代电力电子器件是以电力 MOS 场效应晶体管（MOSFET）和绝缘栅双极型晶体管（IGBT）为代表，在 20 世纪 70 年代开始应用。这两种是电压型自关断器件，基极（栅极、门极）信号功率小，其开关频率可达到 20 kHz 以上，采用 PWM 的逆变器谐波噪声大大降低。低压变频器的容量在 380 V 级达到了 540 kVA；而 600 V 级则达到了 700 kVA，最高输出频率可达 400 ~ 600 Hz，能对中频电动机进行调频控制。利用 IGBT 构成的高压（3 kV/6.3 kV）变频器最大容量可达 7460 kW。

第四代是以智能功率模块（IPM）为代表，IPM 是以 IGBT 为开关器件，但集成有驱动电路和保护电路。由 IPM 组成的逆变器只需对桥臂上各个 IGBT 提供隔离的 PWM 信号即可。而 IPM 的保护功能有过电流、短路、过电压、欠电压和过热等，还可以实现再生制动。简单的外部控制电路，使变频器的体积、重量和链接导线的数量大为减少，而功能却大幅提高，可靠性也有较大改善。

2. 计算机技术与自动控制理论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立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、频率低，而且输出的电压和电流的波形是方波。

当 GTR 和 GTO 晶闸管问世并成为逆变器的电力电子器件时，PWM 技术也进入到了快速发展阶段，这时的逆变电路能够得到相当接近正弦波的输出电压和电流，同时 8 位微处理器成为变频器的控制核心，按压频比 (U/f) 控制原理实现异步电动机的变频调速，使变频器的工作性能有了很大提高。

后来人们研制出 IGBT，其优良的性能很快取代了 GTR，进而广泛采用的是性能更为完善的 IPM，使得变频器的容量和电压等级不断扩大和提高；此外 16 位（甚至 32 位）微处理器取代了 8 位微处理器，使得变频器的功能也从单一的变频调速功能发展到为包含算术逻辑运算以及智能控制在内的综合功能；自动控制理论的发展使变频器在改善 U/f 比控制性能的同时，推出了能实现矢量控制、直接转矩控制、模糊控制和自适应控制等多种控制模式的变频器。现代的变频器已经内置有参数识别系统、PID 调节器和 PLC 通信单元等，根据需要可实现拖动不同负载、宽调速和伺服控制等多种应用。

3. 变频器技术发展的趋势

变频器目前的发展水平可以概括为：

(1) 已从中小容量等级发展到大容量、特大容量等级，并解决了交流调速系统的性能指标问题，填补了直流调速系统在特大容量调速时的空白。

(2) 可以使交流调速系统具有高的可靠性和长期连续运行能力，从而满足有些场合长期不停机检修的要求或对可靠性的特殊要求。

(3) 可以使交流调速系统实现高性能、高精度的转速控制。除了控制部分可以得到和直流调速控制同样良好的性能外，异步电动机本身固有的优点又使整个控制系统得到更好的动态性能。采用数字锁相控制的异步电动机变频调速系统，调速精度可高达 0.002%。

(4) 交流调速系统已从直流调速的补充手段发展到与直流调速系统相竞争、相媲美、相抗衡，并有逐渐取代的趋势。

在进入 21 世纪的今天，电力电子器件的基片已经从 Si（硅）变换为 SiC（碳化硅），这使电力电子器件进入到高电压大容量化、高频化、组件模块化、微型化、智能化和低成本化，多种适宜变频调速的新型电动机正在开发研制之中，IT 技术的迅猛发展，以及控制理论的创新，这些与变频器相关的技术将影响其发展的趋势。

(1) 网络智能化 智能化的变频器安装到系统后，不必进行太多的功能设定，就可以方便地操作使用，既有明显的工作状态显示，又能够实现故障诊断与故障排除，甚至可以进行部件自动转换。利用互联网可以遥控监视，实现多台变频器按工艺程序联动，形成最优化的变频器综合管理控制系统。

(2) 专门化 根据某一类负载的特性，有针对性地制造专门化的变频器，这不但利于对负载的电动机进行经济有效的控制，而且可以降低制造成本。例如风机、水泵专用变频器，起重机械专用变频器，电梯控制专用变频器，张力控制专用变频器和空调专用变频器等。

(3) 一体化 变频器将相关的功能部件，如参数辨识系统、PID 调节器、PLC 和通信单元等有选择地集成到内部组成一体化机，不仅使功能增强，系统可靠性增加，而且可有效缩小系统体积，减小外部电路的连接。据报道，现在已经研制出变频器和电动机的一体化组合

机,从而使整个系统体积更小,控制更方便。

(4) 环保无公害 保护环境,制造“绿色”产品是人类的新理念。今后的变频器将更注重于节能和低公害,即尽量减少使用过程中的噪声和谐波对电网及其他电气设备的污染干扰。

总之,变频器的发展趋势是朝着操作简便、功能齐全、安全可靠、环保低噪、低成本、智能、小型化的方向发展。

任务 1.2 了解电力电子器件

电力电子器件是组成变频器的关键器件,由电力电子器件构成的电路可以实现电力变换和控制,例如:电源电压(电流)大小、频率、波形、相位的变换和控制,因而在学习变频器时首先要了解并掌握各种常用电力电子器件的特点、工作原理和正确选用方法。

1.2.1 电力电子器件的概念

在电气设备或电力系统中,直接承担电能的变换或控制任务的电路我们称之为主电路,电力电子器件(Power Electronic Device)就是可直接用于处理电能的主电路中,实现电能的变换或控制的电子器件。广义上电力电子器件可分为电真空器件和半导体器件两类。自 20 世纪 50 年代以来,真空管仅在频率很高(如微波)的大功率高频电源中使用,而电力半导体器件已取代了汞弧整流器(Mercury Arc Rectifier)、闸流管(Thyratron)等电真空器件,成为绝对主力。因此,电力电子器件目前也往往专指电力半导体器件。

同处理信息的电子器件相比,电力电子器件的一般特征如下:

- 1) 承受电压和电流的能力强,是最重要的参数,大多都远大于处理信息的电子器件。
- 2) 电力电子器件一般都工作在开关状态。电力电子器件导通时(通态)阻抗很小,接近于短路,管压降接近于零,而电流的大小则由外电路决定,阻断时(断态)阻抗很大,接近于断路,电流几乎为零,而管子两端的电压是由外电路决定的。电力电子的动态特性也就是它的开关特性和参数,也是电力电子器件特性很重要的方面,有些时候甚至上升为第一位的重要问题。

电力电子器件导通时器件上有一定的通态压降,形成通态损耗。阻断时器件上有微小的断态漏电流流过,形成断态损耗。在器件开通或关断的转换过程中产生的开通损耗和关断损耗,总称为开关损耗。

通常电力电子器件的断态漏电流极小,因而通态损耗是器件功率损耗的主要成因,当电力电子器件开关频率较高时,开关损耗会随之增大,可能成为器件功率损耗的主要因素。

- 3) 在实际使用中电力电子器件往往需要由信息电子电路来控制。
- 4) 为保证电力电子器件在工作中不至于因功率损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏,不仅在器件封装上要考虑散热设计,在其工作时一般都要安装散热器。

1.2.2 应用电力电子系统的组成

电力电子系统在实际应用时,一般是由控制电路、驱动电路和以电力电子器件为核心的主电路组成,如图 1-5 所示。

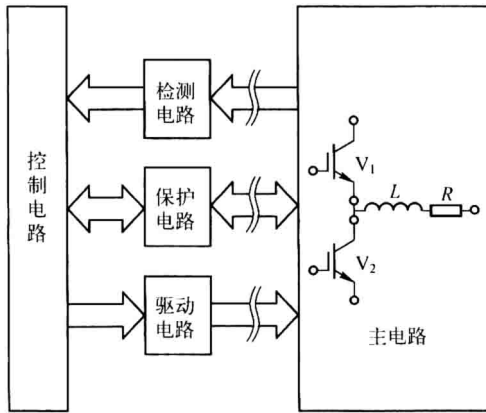


图 1-5 电力电子器件在实际应用中的系统组成

有的电力电子系统中，还需要有检测电路。从广义上往往将其和驱动电路等主电路之外的电路都归为控制电路，从而可粗略地说电力电子系统是由主电路和控制电路组成的。

控制电路的主要功能是根据工作要求形成控制信号，通过驱动电路去控制主电路中的电力电子器件的通或断，来完成整个系统的功能。主电路中的电压和电流一般都较大，而控制电路的元器件只能承受较小的电压和电流，因此，在主电路和控制电路连接的路径上，如驱动电路与主电路的连接处，或者驱动电路与控制信号的连接处，以及主电路与检测电路的连接处，一般需要进行电气隔离，如用光、磁等来传递信号。

主电路在完成电能的变换和控制的同时往往有电压和电流的过冲，因此，在主电路和控制电路中要附加一些保护电路，以保证电力电子器件和整个电力电子系统正常可靠运行。

1.2.3 电力电子器件的分类

电力电子器件种类繁多，发展迅速，技术内涵相当丰富，电力电子器件是组成变频器的关键器件，表 1-1 列出了当代应用的电力电子器件的类型。

表 1-1 电力电子器件的类型

类 型	器 件 名 称	代 号
不可控器件	电力二极管 (Power Diode)	PD
半控型器件	晶闸管 (Thyristor)	T 或 SCR
全控型器件	双极型晶体管 (Bipolar Transistor)、电力晶体管 (Grant Transistor)	BJT、GTR
	门极关断晶闸管 (Gate Turn - off Thyristor)	GTO 晶闸管
	电力场效应晶体管 (Power MOS Field - Effect Transistor)	P - MOSFET
	绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor)	IGBT
	集成门换相晶体管 (Insulated Gate Commutated Transistor)	IGCT
	MOS 控制晶体管 (MOS - Controlled Transistor)	MCT
	静电感应晶体管 (Static Induction Transistor)	SIT
静电感应晶闸管 (Static Induction Transistor)	SITH	
电力电子模块	智能功率模块 (Intelligent Power Module)	IPM

1.2.4 不可控器件——电力二极管

电力二极管是指可以承受高电压、大电流，且具有较高耗散功率的二极管。电力二极管与普通二极管的结构、工作原理和伏安特性相似，但它的主要参数和选择原则不尽相同。

1. PN 结与电力二极管的结构和工作原理

基本结构和工作原理与信息电子电路中的二极管一样，具有单向导电性。电力二极管是以半导体 PN 结为基础，由一个面积较大的 PN 结和两端引线（阳极 A 和阴极 K）以及封装组成的。从外形上看，主要有螺栓形和平板形两种封装。图 1-6a 为电力二极管的外形，图 1-6b 为电力二极管的电气图形符号。

电力二极管的阳极和阴极间的电压和流过管子的电流之间的关系称为伏安特性，其伏安特性曲线如图 1-7 所示。

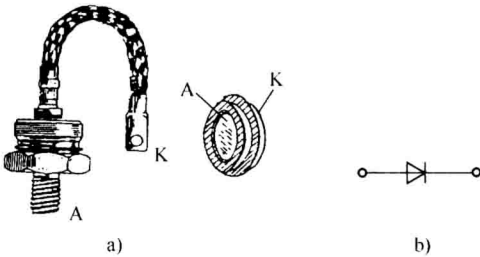


图 1-6 电力二极管的外形、结构和电气图形符号
a) 外形 b) 电气图形符号

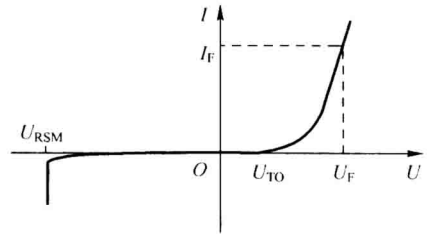


图 1-7 电力二极管的伏安特性曲线

当加在电力二极管的电压从零逐渐增大至正向电压时，开始阳极电流很小，这一段特性曲线很靠近横坐标轴。当正向电压大于门槛电压 U_{T0} 时，正向阳极电流急剧上升，管子正向导通。如果电路中不接限流元件，二极管将被烧毁。

当二极管加上反方向电压时，起始段的反向漏电流也很小，而且随着反向电压的增加，反向漏电流只略有增加，但当反向电压增加到反向不重复峰值电压值 (U_{RSM}) 时，反向漏电流开始急剧增加。如果反向电压不加限制，那么二极管将被击穿而损坏。

2. 主要参数

(1) 正向平均电流 I_F (AV) 正向平均电流是指在指定的管壳温度（简称壳温，用 T_C 表示）和散热条件下，允许长时间连续流过工频正弦半波电流的平均值。正向平均电流是按照电流的发热效应来定义的，因此使用时应按有效值相等的原则来选取电流额定值，并应留有一定的裕量。

(2) 正向平均压降 U_F (AV) 正向平均压降是指电力二极管在指定温度下，当器件通过 50 Hz 正弦半波额定正向平均电流时，器件阳极和阴极之间的电压平均值，取规定系列等级称为正向平均电压，简称管压降，一般在 0.45 ~ 1 V 范围内。

(3) 反向重复峰值电压 U_{RRM} 在额定结温条件下，取器件反向伏安特性不重复峰值电压 U_{RSM} 值的 80% 称为反向重复峰值电压 U_{RRM} 。将 U_{RRM} 值取规定系列的电压等级就是该器件的额定电压。

3. 电力二极管的选用

(1) 选择正向平均电流 I_F 的原则 在规定的室温和冷却条件下，只要管子的额定电流有