



高等职业技术教育机电类专业规划教材
机械工业出版社精品教材

变频器应用基础

第2版

石秋洁 主编 / 张燕宾 主审



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



赠 电 子 课 件

高等职业技术教育机电类专业规划教材
机械工业出版社精品教材

变频器应用基础

第2版

主 编 石秋洁
副主编 肖 平 陈忠仁
参 编 唐 锋 何业军
主 审 张燕宾



NLIC2970862379



机械工业出版社

本书主要包括：认识变频器，变频与变压，变频调速时电动机的机械特性，提高转矩的方法，变频器的各种频率参数，变频器的加速与减速，变频器的控制端子及外接控制电路，变频调速系统闭环控制，变频器的安装、调试及干扰防范，变频调速拖动系统的设计，风机、水泵类负载变频调速应用实例，其他各类负载变频调速应用实例，变频器与其他设备的通信，高压变频及其应用，以及附录。

本书的特点是：将实验、实操融入到各项目中，在实验中提出问题、验证问题。本书从实用、实操的角度分析讲解，淡化理论，便于理解和接受。应用部分邀请变频专家编写，内容既新颖实用，又避免了理论计算。

本书可作为高职、中职和培养技能型人才的本科院校的电气、机电类专业的教材，也可作为短期培训班的教材，还可供相关工程技术人员参考。

为方便教学，本书配有免费电子课件及模拟试卷等，凡选用本书作为授课教材的学校，均可来电索取。咨询电话：010-88379375；电子邮箱：cmpgaozhi@sina.com。

图书在版编目 (CIP) 数据

变频器应用基础/石秋洁主编. —2版. —北京：机械工业出版社，2012.12

高等职业技术教育机电类专业规划教材 机械工业出版社精品教材
ISBN 978-7-111-40243-5

I. ①变… II. ①石… 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 (2012) 第 257223 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：于宁 责任编辑：于宁 王宗锋

版式设计：霍永明 责任校对：张媛

封面设计：鞠杨 责任印制：乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 16 印张 · 395 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-40243-5

定价：30.00 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

前言

本书第1版是2003年出版的高等职业技术教育机电类专业规划教材。它以介绍变频器应用为主要内容,并且第一次构架了变频器应用的教学体系,也是该类教材的第一个版本。随着更多的学校将《交流调速》改成了《变频器应用基础》,该教材受到了广大师生的热烈欢迎,近10年来,先后重印16次。随着变频应用技术的不断成熟,其应用领域也在不断扩展,因此迫切需要对该教材在内容和形式上进行补充和更新。

本书第2版以任务驱动形式编写,从解决问题的方面入手,切入项目或任务,并且补充了大量的实例、实验,不论是在形式还是在内容上都有了一个很大的飞跃。

本书补充了大量实验,在实验的构思上,尽量采用简单的设备,以兼顾到设备不全的学校。如PID闭环实验,在实验构思上摆脱了依靠成套设备的局限,反馈信号取自电位器,同样可以完成PID调节。

本书由广东省中山市中等专业学校石秋洁高级讲师任主编,广东省中山职业技术学院的肖平副教授、陈忠仁副教授任副主编,参加编写的还有广东明阳龙源电力电子有限公司的唐锋工程师和广东省中山职业技术学院的何业军老师。其中,石秋洁编写项目四、五、六、七、十、十二、十三及附录,并对全书进行了统稿;肖平编写项目一、二、三、九;陈忠仁编写项目十一;唐锋编写项目十四;何业军编写项目八。

本书由湖北省宜昌市自动化研究所张燕宾高级工程师主审。

在该书的编写过程中,还得到了广东明阳龙源电力电子有限公司的孙文艺、卢章辉两位副总经理和广东中山华源机电设备有限公司曾华春总经理的大力协助,在此一并表示衷心的感谢!

编者

目 录

前言	二、电动机的稳定运行	36
项目一 认识变频器	三、异步电动机的起动和制动	37
任务一 变频的内涵	四、负载的机械特性	37
一、变频调速的原理	任务二 电动机变频后的机械特性	39
二、变频器的构成框图	一、调频、调压比	39
任务二 变频器的主电路	二、变频后电动机的机械特性	39
一、变频器的分类	三、变频后电动机的有效转矩线	41
二、交—直—交变频器的主电路	四、对额定频率 f_N 以下变频调速特	42
三、逆变原理	性的修正	42
四、变频器中的半导体开关器件	五、变频调速时理想有效转矩线的	43
任务三 变频器操作实验	特点	43
一、变频器面板及工作模式介绍	项目小结	45
二、变频器的面板操作及运行	思考题	46
三、变频器的外部运行、组合运行	项目四 提高转矩的方法	47
任务四 变频器相关内容拓展	任务一 V/F 控制	47
一、变频器的应用	一、V/F 控制的程度	47
二、变频器的外接主电路、各元器	二、V/F 控制功能的选择	48
件的作用及选择	三、转矩补偿时 U/f 值的验证	49
三、实物变频器的内部构成解析	四、补偿不当举例	50
项目小结	任务二 矢量控制	50
思考题	一、直流电动机与异步电动机调速上	51
项目二 变频与变压	的差异	51
任务一 变频与变压概述	二、矢量控制中的等效变换	51
一、异步电动机的平衡方程	三、变频器矢量控制的基本思想及反	53
二、变频也需变压	馈	53
三、变频变压的实现方法	四、V/F 控制与矢量控制的差别	54
任务二 变频器主电路参数的测量	五、使用矢量控制的要求	54
一、输出电压的测量	任务三 传动机构的作用	55
二、输入电流的测量	一、拖动系统的组成	55
三、功率的测量	二、传动机构的作用及系统参数折算	56
项目小结	任务四 基本频率、电动机磁极对转矩	58
思考题	的影响	58
项目三 变频调速时电动机的机械	一、基本频率对转矩的影响	58
特性	二、不同磁极的电动机有效转矩的差	59
任务一 异步电动机及各类负载的机械	别	59
特性	三、转矩提高的综合思考	60
一、异步电动机的机械特性	项目小结	61



思考题	62	任务三 变频/工频切换控制电路	105
项目五 变频器的各种频率参数	63	一、继电器控制电路	105
任务一 各种频率参数的意义及验证	63	二、变频器自带的切换功能	106
一、各种频率参数的意义	63	项目小结	108
二、常见频率参数的功能验证	64	思考题	109
任务二 多挡转速频率的控制和验证	65	项目八 变频调速系统闭环控制	111
一、多挡转速频率的控制	65	任务一 PID 控制的基本知识	111
二、多挡转速运行验证	66	一、闭环控制	111
三、多挡转速的 PLC 控制验证	68	二、PID 调节	112
任务三 程序控制	69	三、传感器接线及目标值的设置	115
一、程序控制概述	69	方式	115
二、程序运行方式验证	70	任务二 PID 闭环调节实验	117
项目小结	74	一、反馈值取自电位器时的操作	117
思考题	74	二、有实验设备时的操作	118
项目六 变频器的加速与减速	76	项目小结	120
任务一 加速及起动	76	思考题	121
一、工频起动与变频起动	76	项目九 变频器的安装、调试及干扰	122
二、加速时间	77	防范	122
三、加速模式	79	任务一 变频器的安装及布线	122
任务二 减速与停机	80	一、变频器的设置环境	122
一、减速时电动机工作在发电状态	80	二、变频器的安装	123
二、减速时的泵升电压	81	三、变频器的布线	124
三、制动电阻和制动单元的作用	82	任务二 变频器的功率因数和改善措施	126
四、制动电阻的选择	82	一、变频器输入电流中的高次谐波	126
任务三 变频器的保护功能	83	二、高次谐波对功率因数的影响	127
一、过载和过电流保护	83	任务三 变频器的抗干扰措施	128
二、电压保护	85	一、外界对变频器的干扰	129
三、自动重合闸	85	二、变频器对周边设备的干扰和对策	129
项目小结	86	任务四 变频调速系统的调试及常见	132
思考题	87	故障	132
项目七 变频器的控制端子及外接	88	一、变频调速系统的调试	132
控制电路	88	二、变频调速系统故障原因分析	133
任务一 变频器的控制端子	88	项目小结	134
一、变频器的输入控制端子	88	思考题	135
二、变频器的输出控制端子	94	项目十 变频调速拖动系统的设计	136
任务二 变频器控制端子功能验证	97	任务一 变频调速系统设计的基本知识	136
一、监视器输出信号的应用验证	97	一、变频调速系统设计的基本要求	136
二、自锁、加减速端子和封锁输出的	99	二、变频调速系统中电动机的有效转	138
应用验证	99	矩线和有效功率率线	138
三、模拟量输入端子的应用实验	100	任务二 恒转矩负载变频调速系统的	139
四、实现电动机正反转的几种方法	102	设计	139
五、多功能端子的应用	103	一、恒转矩负载的基本特点	139



二、系统设计的主要问题	140	三、溜钩的防止	180
三、电动机和变频器的选择	143	任务三 车床主轴的变频调速	182
任务三 恒功率负载变频调速系统的设计	144	一、普通车床的大致构造	182
一、恒功率负载的基本特点	144	二、普通车床主运动的负载性质	182
二、系统设计的主要问题	145	三、计算实例	183
三、电动机和变频器的选择	148	任务四 龙门刨床的变频调速	186
任务四 二次方律负载变频调速系统的设计	149	一、龙门刨床的构造与工作特点	186
一、二次方律负载的基本特点	149	二、刨台运动的变频调速	187
二、系统设计的主要问题	149	项目小结	189
三、电动机与变频器的选择	150	思考题	190
项目小结	151	项目十三 变频器与其他设备的通信	191
思考题	152	任务一 通信的基础知识	191
项目十一 风机、水泵类负载变频调速应用实例	153	一、数据通信方式	191
任务一 变频调速的节能	153	二、数据传送方向	193
一、节能的几种情况	153	三、传送介质	193
二、节能的计算	156	四、串行通信接口标准	193
任务二 风机和空气压缩机的变频调速	157	任务二 三菱系列变频器的 RS-485 通信	194
一、风机的变频调速	157	一、数据格式	194
二、空气压缩机的变频调速	159	二、数据定义	196
任务三 恒压供水系统	162	三、三菱 PLC 串行数据通信	196
一、单机的恒压供水系统	162	四、变频器通信设置	198
二、PLC 控制的 1 控 3 的恒压供水系统	164	任务三 变频器与其他自动化设备通信实验	199
三、变频器自带的恒压供水控制	165	一、触摸屏与变频器的通信	199
任务四 水泵的变频调速	168	二、PLC 与变频器的通信	203
一、中央空调冷却水的变频调速系统	168	项目小结	208
二、水位控制的变频调速系统	171	思考题	209
项目小结	173	项目十四 高压变频及其应用	211
思考题	174	任务一 高压变频器的组成原理	211
项目十二 其他各类负载变频调速应用实例	175	一、高压变频器的分类	211
任务一 多单元同步的变频调速系统	175	二、单元串联高压变频器的构成	214
一、概述	175	三、高压变频器的应用领域	216
二、手动微调的同步控制	175	任务二 高压变频器的操作及常见功能	216
三、自动微调的同步控制	176	一、常见产品界面介绍	216
任务二 起重机械的变频调速	178	二、高压变频器的操作	218
一、起重机械中的电动机运行状态	178	任务三 应用举例	220
二、再生电能的处理	179	一、发电厂引风机变频改造	220
		二、高压变频器在冶金企业中的应用	222
		项目小结	224
		思考题	225



附录	226	说明	230
附录 A 简易实验台的制作	226	附录 C 森兰变频器简介	243
一、需要的材料和元器件	226	一、森兰 SB60G 系列变频器端子图	243
二、实验台的制作	226	二、森兰 SB60G 系列变频器控制回路	
附录 B 三菱 FR-A700 变频器简介	227	端子说明	243
一、三菱 FR-A700 变频器端子图	227	三、森兰 SB60G 系列变频器主要功能	
二、三菱 FR-A700 变频器端子说明	227	说明	244
三、三菱 FR-A700 变频器主要功能		参考文献	248

项目一

认识变频器

一、学习目标

- 1) 了解变频器的内涵、变频器的组成原理。
- 2) 了解异步电动机的结构、常见开关元器件的种类。
- 3) 掌握变频器的接线、常规操作、参数测量。

二、问题的提出

变频可以节能，这是一般人都有的认识，变频为什么可以节能，变频的真正内涵是什么？变频器是如何工作、如何组成、如何操作的？这些是本项目所要解决的问题。

任务一 变频的内涵

随着变频空调、变频冰箱走入成千上万普通百姓的生活，人们对变频的认识就是节能，至于为什么能节能，大多数人并不关心。下面以空调为例来说明变频与不变频的区别。

普通空调：当室内实际温度与设定温度有差别时，压缩机起动工作，两温度差逐步缩小，直至它们基本相等时，压缩机停止工作。当室内实际温度与设定温度再度不同时，压缩机又起动，如此周而复始，以保证室内实际温度基本维持在一恒定的范围以内。可以看到：普通空调工作时压缩机的工作速度一定，它是以额定转速运行的。

变频空调：当室内实际温度与设定温度有差别时，压缩机起动工作，随着两温度差逐步缩小，压缩机的转速逐步降低，直至室内实际温度与设定温度基本相等时，压缩机以低速运转，维持一个低水平的制冷量，以保证室内实际温度基本维持在一恒定的范围以内。可以看到：变频空调工作时压缩机的速度是变化的，这就是它与普通空调的区别所在。

变频的内涵就是给电动机调速。

一、变频调速的原理

1. 异步电动机的结构

异步电动机由定子、转子及其他附件组成。

1) 定子。异步电动机的定子由定子铁心和三相绕组构成，其中，三相绕组在空间上互差 $2\pi/3$ 电角度均匀地安放在定子铁心的槽内。三相绕组按适当方式（星形或三角形）连接后与三相电源相接，自电源吸取电功率。

2) 转子。异步电动机的转子主要由转子铁心和转子绕组构成，它是电动机输出机械能、带动负载旋转的部分。其中，转子绕组自行闭合，不与电源相接；转子的功率是由定子吸取的电功率经电磁感应得来的。根据转子绕组的形式不同，异步电动机又可以分为笼型和绕线转子型两种。



2. 异步电动机的旋转原理

1) 旋转磁场。在空间上互差 $2\pi/3$ 电角度的三相定子绕组 $U_1 - U_2$ 、 $V_1 - V_2$ 、 $W_1 - W_2$ 中通入在时间上互差 $2\pi/3$ 相位角的三相交变电流 i_U 、 i_V 、 i_W 后，它们的合成磁场将是一个旋转磁场。两极旋转磁场示意图如图 1-1 所示。

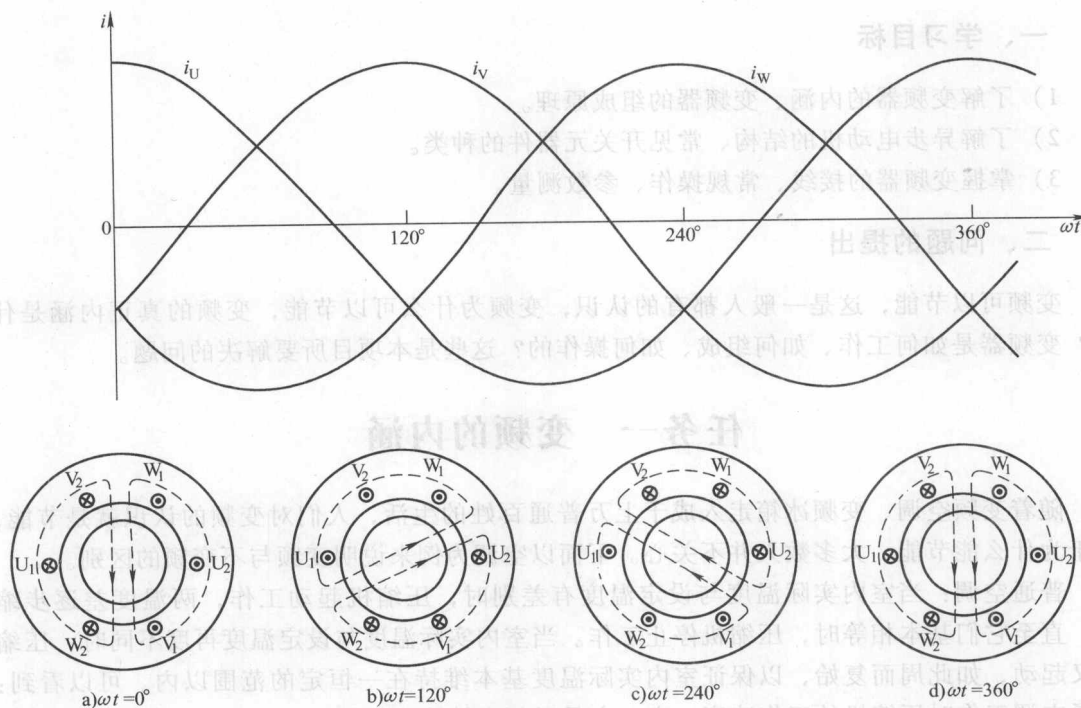


图 1-1 两极旋转磁场示意图

磁场旋转的转速（即同步转速） n_0 可用下式表示：

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (1-1)$$

式中， f_1 为电流的频率； p 为旋转磁场的磁极对数。

由式 (1-1) 知，如果频率可以调节成 f_x 的话，则同步转速 n_{0x} 也随之调节成

$$n_{0x} = \frac{60f_x}{p}$$

这是变频调速的基本原理。

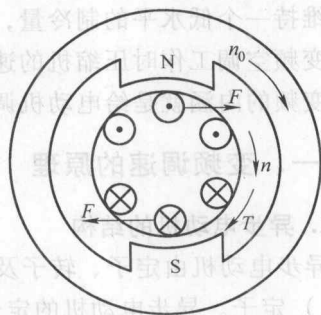


图 1-2 异步电动机的工作原理图

2) 异步电动机的旋转。在图 1-2 中，转子绕组切割旋转磁场，可以看做是磁场静止、转子绕组向反方向旋转切割磁力线，由右手定则可判断转子绕组中的电流方向，如图中所示。根据左手定则，载流的转子绕组在磁场中受到电磁力的作用，形成电磁转矩 T ，在 T 的作用下转子“跟着”定子的旋转磁场旋转起来。

3) 转差率。由于转子绕组和旋转磁场之间必须有相对运动，转子绕组才能切割磁力

线,才能产生感应电流,从而产生电磁转矩,因此转子转速 n 与旋转磁场转速 n_0 之间一定存在着一个差值,我们把这个差值叫转差,用 Δn 表示,即

$$\Delta n = n_0 - n$$

转差 $n_0 - n$ 的存在是异步电动机运行的必要条件。如果频率调节为 f_x , 则转差 Δn_x 可用下式表示:

$$\Delta n_x = n_{0x} - n_x \tag{1-2}$$

式中, n_{0x} 、 n_x 分别为频率为 f_x 时的同步转速及转速。

转差 $n_0 - n$ 与同步转速 n_0 的比值称为转差率,用 s 表示,即

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0}$$

转差率的大小同样也能反映转子转速和电动机的工作状态,由上式可知:

$$n = n_0 (1 - s) = \frac{60f_1}{p} (1 - s) \tag{1-3}$$

电动机在额定状态时,转子转速 n 通常与 n_0 相差不大,因此额定转差率一般都比较小,其范围 $s_N = 0.01 \sim 0.05$ 。例如:某4极(2对磁极)电动机,在额定状态时,同步转速 $n_0 = 1500\text{r/min}$,额定转速 $n_N = 1460\text{r/min}$, $s_N \approx 0.027$ 。不同功率、不同磁极时的 n_0 、 n_N 之间的关系见表 1-1。

表 1-1 不同功率、不同磁极时的 n_0 、 n_N 之间的关系

p	$2p$	$n_0 / (\text{r/min})$	$n_N / (\text{r/min})$	$\Delta n / (\text{r/min})$	s	备 注
1	2	3000	2900	100	0.033	5.5 ~ 7.5kW
			2930	70	0.023	11 ~ 18.5kW
			2970	30	0.01	45 ~ 160kW
2	4	1500	1460	40	0.027	11 ~ 15kW
			1470	30	0.02	18.5 ~ 30kW
			1480	20	0.013	37 ~ 315kW
3	6	1000	960	40	0.04	3 ~ 5.5kW
			970	30	0.03	7.5 ~ 30kW
			980	20	0.02	37 ~ 250kW

二、变频器的构成框图

变频器是一种将工频交流电转换成任意频率交流电的仪器,并且可以拖动电动机带负载运行,因此它又是一个驱动器。变频器的构成框图如图 1-3 所示。

1. 主电路

输入: R、S、T 接工频电源。

输出: U、V、W 接电动机。

变频器首先将工频交流电整流成直流,再经过逆变将直流变成交流,在逆变的过程中实现频率的改变,通常主电路的电流很大。

2. 控制电路

控制电路是指图 1-3 中除主电路以外的部分。

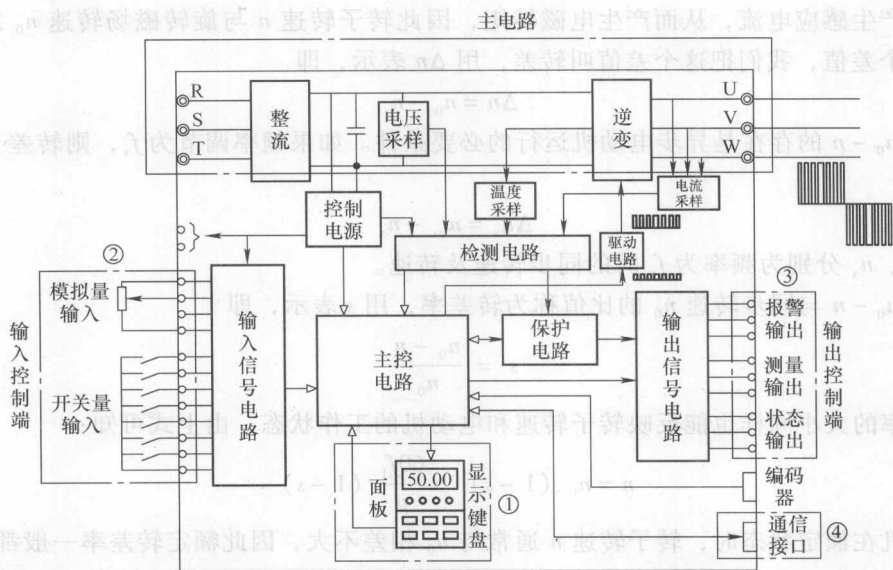


图 1-3 变频器的构成框图

1) 输入：有面板、输入控制端子、通信接口三种方式。给变频器的指令，如给定频率（希望变频器输出的频率）、起动信号等通过某一种输入端口进入变频器的 CPU，从而实现对逆变电路的控制。

2) 输出：有面板、输出控制端子两种方式。

变频器的输出频率、错误信号、工作状态可以通过上述端口输出。在输入/输出的过程中，具体选择哪种设备，可以通过操作模式（也叫控制通道）的选择来完成。图 1-3 中：面板①主要用于近距离、基本控制；输入输出控制端子②和③主要用于远距离、多功能控制；通信接口④主要用于多电动机、系统控制。

3) 驱动电路：逆变电路主要由 6 只逆变管组成的逆变桥组成，逆变管始终处在交替的导通、关断状态。控制逆变管的导通、关断信号由 CPU 经计算确定，再由驱动电路使其具有一定的驱动功率，从而驱动逆变管工作。

4) 保护电路：变频器在工作过程中实时采样主电路的直流电压、输出电流及逆变管的温度，一旦出现超标，保护电路将给出过电压、过电流及高温报错并关断逆变管，通过输出设备给出错误报警及错误代码。

任务二 变频器的主电路

一、变频器的分类

1. 按照变频器的用途来分

1) 专用变频器。专用变频器是针对某一种（类）特定的控制对象而设计的，这种变频器均是在某一方面的性能比较优良，如风机用变频器、水泵用变频器、电梯及起重机械用变频器、中频变频器等。



2) 节能型变频器和通用变频器。常见的中小容量变频器主要有两大类：节能型变频器和通用型变频器。

① 节能型变频器。由于节能型变频器的负载主要是风机、泵等二次方律负载，它们对调速性能的要求不高，因此节能型变频器的控制方式比较单一，一般只有 V/F 控制，功能也没有那么齐全，但是其价格相对要便宜些。

② 通用型变频器。通用变频器是变频器家族中数量最多、应用最广泛的一种，通用型变频器主要用在生产机械的调速上。生产机械对调速性能的要求（如调速范围，调速后的动、静态特性等）往往较高，若调速效果不理想则会直接影响到产品的质量，所以通用型变频器必须使变频后电动机的机械特性符合生产机械的要求。因此这种变频器功能较多，价格也较贵。它的控制方式除了 V/F 控制，还使用了矢量控制技术。因此，在各种条件下均可保持系统工作的最佳状态。除此之外，高性能的变频器还配备了各种控制功能，如 PID 调节、PLC 控制、PG 闭环速度控制等，为变频器和生产机械组成的各种开、闭环调速系统的可靠工作提供了技术支持。

2. 按变频器的主电路结构来分

1) 交—交变频器。它是将频率固定的交流电源直接变换成频率连续可调的交流电源，其主要优点是：没有中间环节，变换效率高。但其连续可调的频率范围窄，一般在额定频率的 $1/2$ 以下 ($0 < f < f_N/2$)，故主要用于容量较大的低速拖动系统中。

2) 交—直—交变频器。它是先将频率固定的交流电整流后变成直流，再经过逆变电路，把直流电逆变成频率连续可调的三相交流电，由于把直流电逆变成交流电较易控制，因此在频率的调节范围以及变频后电动机特性的改善等方面，都具有明显的优势。目前，使用最多的通用型变频器均属于交—直—交变频器。

另外，从滤波方式来分，可以分为电压型变频器和电流型变频器。

二、交—直—交变频器的主电路

对于使用最广泛的交—直—交变频器来说，从结构上可将其分成整流、逆变和制动三部分。交—直—交电压型变频器主电路如图 1-4 所示。

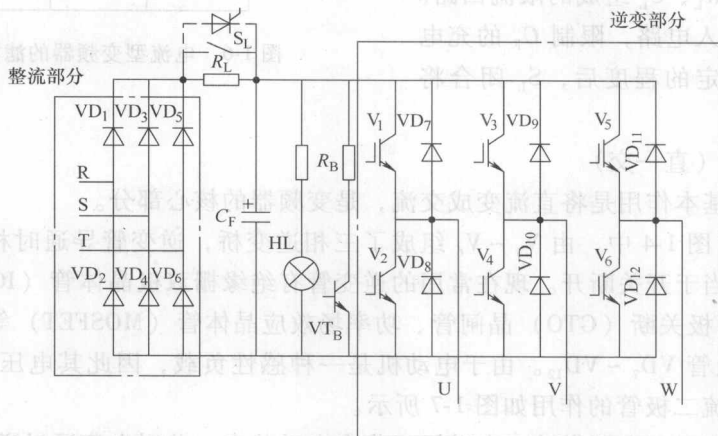


图 1-4 交—直—交电压型变频器主电路



现对图 1-4 中各部分的作用作如下说明。

1. 整流部分（交一直）

整流器是变频器中用来将交流变成直流的部分，它可以由整流单元、滤波电路及开启电流吸收回路组成。

1) 整流单元：VD₁ ~ VD₆。图中的整流单元是由 VD₁ ~ VD₆ 组成的三相整流桥，它们将工频 380V 的交流电整流成直流，该平均直流电压可用下式表示：

$$U_D = 1.35 U_L = 1.35 \times 380V = 513V$$

2) 滤波电路：C_F。图中滤波电容 C_F 的作用是对整流电压进行滤波，使直流电压保持平稳。值得指出的是，C_F 是一个大容量的电容器，它是电压型变频器的主要标志，它通常是由多个同规格的小容量电容器并、串联而成。滤波电容及均压电阻如图 1-5 所示。由于电容参数的离散性，C₁、C₂ 的值不会完全相等，为均衡 C₁、C₂ 两端的电压，并入了均压电阻 R_{C1}、R_{C2}，若 C₁ < C₂ 则 U_{C1} > U_{C2}，此时通过 R_{C1}、C₂ 的充电电流相对较大，以保证 C₁、C₂ 两端的电压基本相等。

如果均压电阻总是被烧坏，则最可能的原因是与其并联的电容器有损坏。

对电流型变频器来说，滤波的元件是电感。电流型变频器的滤波元件如图 1-6 所示。

3) 开启电流吸收回路：R_L、S_L。在电压型变频器的二极管整流电路中，由于在电源接通时，C_F 中将有一个很大的充电电流，该电流有可能烧坏二极管，容量较大时还可能形成对电网的干扰，影响同一电源系统的其他装置正常工作，所以在电路中加装了由 R_L、S_L 组成的限流回路。刚开机时，R_L 串入电路，限制 C_F 的充电电流，充电到一定的程度后，S_L 闭合将其切除。

2. 逆变部分（直—交）

逆变部分的基本作用是将直流变成交流，是变频器的核心部分。

1) 逆变桥。图 1-4 中，由 V₁ ~ V₆ 组成了三相逆变桥，逆变管导通时相当于开关接通，逆变管截止时相当于开关断开。现在常用的逆变管有绝缘栅双极晶体管（IGBT），大功率晶体管（GTR）、门极关断（GTO）晶闸管、功率场效应晶体管（MOSFET）等。

2) 续流二极管 VD₇ ~ VD₁₂。由于电动机是一种感性负载，因此其电压、电流之间有一个相位差 Φ。续流二极管的作用如图 1-7 所示。

当 u₁、i₁ 同相时，电源做功，电动机工作在电动状态，此时电容通过逆变管向电动机放电。

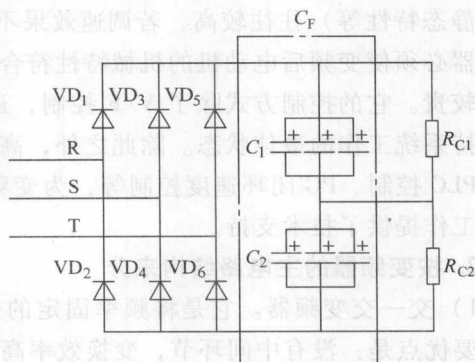


图 1-5 滤波电容及均压电阻

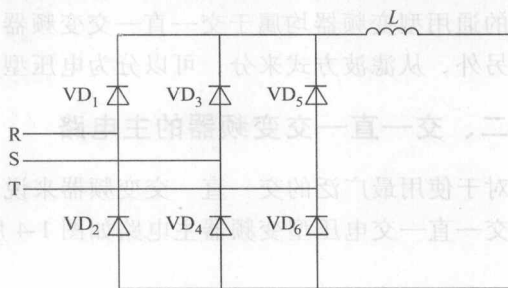


图 1-6 电流型变频器的滤波元件

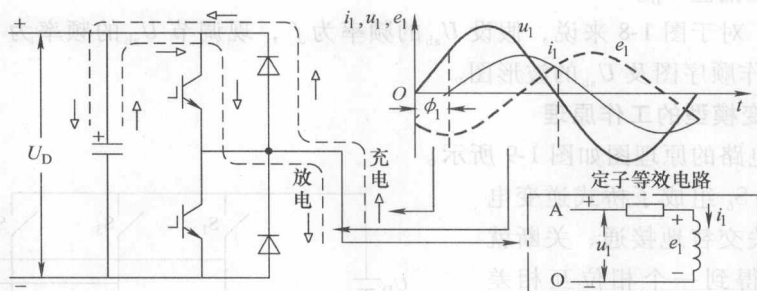


图 1-7 续流二极管的作用

当 u_1 、 i_1 反相时，电动机做功，电动机工作在发电状态，此时电动机通过续流二极管向电容充电。

大家都知道，发电状态时，电动机是将自己储存的能量回馈电网，但在变频器中，由于直流部分将电动机与电源分开，电动机的能量只能给电容充电，如果电动机持续工作在发电状态，就有可能使直流侧过电压。

3. 制动部分

(1) 制动电阻 R_B 变频调速在降速时处于再生制动状态，电动机是将自己储存的能量回馈电网，但回馈的能量到达直流电路，会使 U_D 上升，这是很危险的。因此，需要将这部分能量消耗掉，电路中的制动电阻 R_B 就是用于消耗该部分能量，如图 1-4 所示。

(2) 制动单元 制动单元由大功率晶体管 VT_B 及采样、比较和驱动电路构成，其功能是为放电电流 I_B 流过 R_B 提供通路。当直流侧电压升高到极限值时 VT_B 导通， R_B 接入放电回路，如图 1-4 所示。

三、逆变原理

在组成交—直—交变频器的各电路中，逆变电路的工作较为复杂，现通过下述模型予以说明。

1. 单相逆变模型的工作原理

在图 1-8 所示的单相逆变电路的原理图中，当 S_1 、 S_4 同时闭合时， U_{ab} 电压为正。 S_2 、 S_3 同时闭合时， U_{ab} 电压为负。

开关 $S_1 \sim S_4$ 轮番通断，可以将直流电压 U_D 逆变成交流电压 u_{ab} 。

可以看到在交流电变化的一个周期中，一个臂中的两个开关，如 S_1 、 S_2 交替导通，每个开关导通 π 电角度。因此，交流电的周期（频率）可以通过改变开关通断的速度来调节，交流电压的

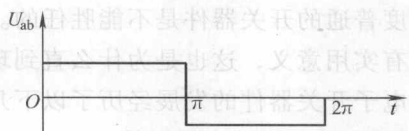
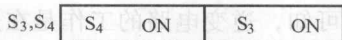
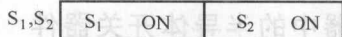
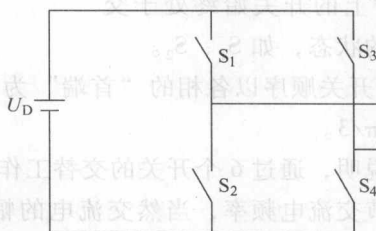


图 1-8 单相逆变电路的原理图



幅值为直流电压幅值 U_D 。

课堂练习：对于图 1-8 来说，假设 U_{ab} 的频率为 f ，现调节 U_{ab} 的频率为 $3f$ ，试画出开关 $S_1 \sim S_4$ 的动作顺序图及 U_{ab} 的波形图。

2. 三相逆变模型的工作原理

三相逆变电路的原理图如图 1-9 所示。

图中， $S_1 \sim S_6$ 组成了桥式逆变电路，这 6 个开关交替地接通、关断就可以在输出端得到一个相位互相差 $2\pi/3$ 的三相交流电压。

当 S_1 、 S_4 闭合时， u_{U-V} 为正；当 S_3 、 S_2 闭合时， u_{U-V} 为负。

用同样的方法可得：

S_3 、 S_6 同时闭合和 S_5 、 S_4 同时闭合，得到 u_{V-W} ； S_5 、 S_2 同时闭合和 S_1 、 S_6 同时闭合，得到 u_{W-U} 。

为了使三相交流电 u_{U-V} 、 u_{V-W} 、 u_{W-U} 在相位上依次相差 $2\pi/3$ ；各开关的接通、关断需符合一定的规律，其规律在图 1-9b 中已标明。根据该规律可得 u_{U-V} 、 u_{V-W} 、 u_{W-U} 波形如图 1-9c 所示。

观察 6 个开关的位置及波形图，可以发现以下两点：

1) 各桥臂上的开关始终处于交替打开、关断的状态，如 S_1 、 S_2 。

2) 各相的开关顺序以各相的“首端”为准，互差 $2\pi/3$ 电角度。如 S_3 比 S_1 滞后 $2\pi/3$ ， S_5 比 S_3 滞后 $2\pi/3$ 。

上述分析说明，通过 6 个开关的交替工作可以得到一个三相交流电，只要调节开关的通断速度就可调节交流电频率，当然交流电的幅值可通过 U_D 的大小来调节。需要说明的是，这个交流电不是正弦波，而且交流电的正负半周之间有 $\pi/3$ 的死区，如图 1-9c 所示。

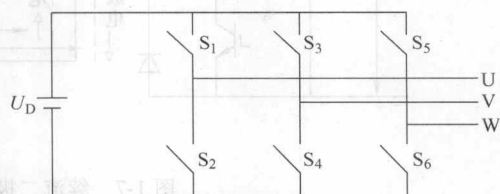
四、变频器中的半导体开关器件

经上述分析可知，逆变电路的工作是在逆变管高频率的通断下完成的。如果输出的交流电频率为 50Hz，逆变管则需每 0.01s 通断一次（通断频率为 100Hz），参见图 1-9。如此高的通断速度普通的开关器件是不能胜任的。直到大功率晶体管开关器件技术成熟，才使得逆变电路具有实用意义，这也是为什么直到现代变频器才得以推广应用的原因。

电力电子开关器件的发展经历了以下几个阶段。

1. 门极关断（GTO）晶闸管

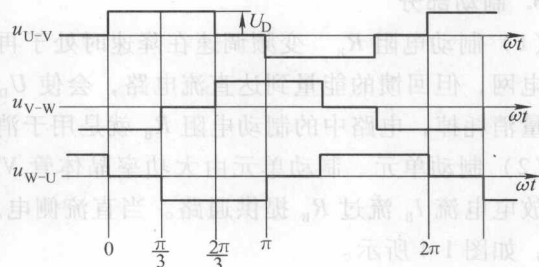
门极关断晶闸管是在普通晶闸管（SCR）的基础上发展而来的。从结构上来说，它有三



a) 结构图

S_1	S_2	S_1 ON	S_2 ON	S_1 ON
S_3	S_4	S_4 ON	S_3 ON	S_4 ON
S_5	S_6	S_5 ON	S_6 ON	S_5 ON

b) 开关的通断规律



c) 波形图

图 1-9 三相逆变电路的原理图



个极：阳极（A）、阴极（K）、门极（G），其工作特点是：它是通过门极信号进行接通和关断的晶闸管，其工作特点如下。

（1）导通条件 在门极和阴极之间加一正向电压，即 $G(+)、K(-)$ ，GTO 晶闸管导通。

（2）关断条件 在门极和阴极之间加一反向电压，即 $G(-)、K(+)$ ，GTO 晶闸管关断。

GTO 晶闸管基本电路如图 1-10 所示。GTO 晶闸管可以方便地通断，是一种无触点开关，因此成为逆变电路中的主要开关元件。但是 GTO 晶闸管的关断需极大的反向脉冲，控制容易失败，工作频率也不够高，所以 GTO 晶闸管在中小容量变频器中已经被新型的大功率晶体管（GTR）所取代，但是在大容量变频器中，GTO 晶闸管以其工作电流大、耐压高的特性，仍得到普遍应用。

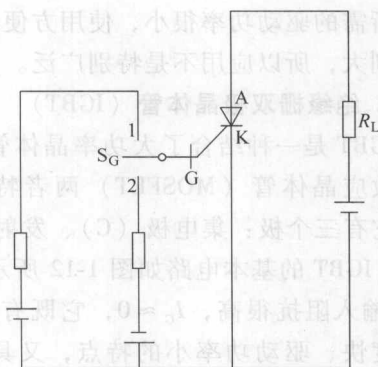


图 1-10 GTO 晶闸管基本电路

2. 大功率晶体管（GTR）

1）结构。大功率晶体管又叫双极型晶体管（BJT），GTR 在结构上常采用达林顿结构的形式，即由多个晶体管复合组成大功率的晶体管，同时还可将反相续流二极管与 GTR 组成一个模块。GTR 模块的内部电路如图 1-11 所示。

GTR 也像普通的晶体管一样，有三个极，分别是基极（B）、发射极（E）、集电极（C）。

2）GTR 的工作特征。像普通的晶体管一样，GTR 也有三种工作状态，即放大、饱和、截止。在电力电子应用领域中，GTR 主要工作在开关状态，即饱和和截止状态。

由于 GTR 工作在大功率电路中，因此管子的功耗是一个

不容忽视的问题，GTR 在截止和饱和状态时其功耗是很小的，但是在放大状态时其功耗将增大百倍，因此，逆变电路中的 GTR 在交替切换的过程中是不允许在放大区稍做停留的。GTR 具有自关断能力，还具有开关时间短、饱和压降低、安全工作区宽等特点，因此广泛用于交流调速、变频电源中。在中小容量的变频器中，它曾一度占据了主导地位。GTR 所需的驱动功率较大，故基极驱动系统较复杂，从而使工作频率难以提高，这是 GTR 存在的不足之处。

3. 功率场效应晶体管（MOSFET）

MOSFET 与场效应晶体管一样，也有三个极，分别是源极（S）、漏极（D）和栅极（G），管子的连接及工作特性也基本与场效应晶体管一样。MOSFET 是一个电压控制型器

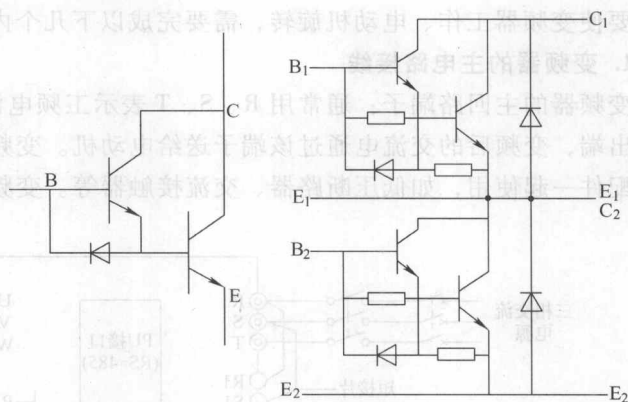


图 1-11 GTR 模块的内部电路