

变频器选型、 调试与维修

BIANPINQI XUANXING
TIAOSHI YU WEIXIU

- ★ 16种变频器的技术参数
- ★ 27种常见的故障与对策
- ★ 63个变频器的维修实例

杜增辉 孙克军 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

变频器选型、调试与维修

杜增辉 孙克军 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍了变频器的选型、调试与维修技术。内容包括：变频器基础知识、变频器的选型、常用变频器、典型变频器应用电路设计、变频器调试与维护、变频器的常见故障与对策、变频器维修实例。本书突出了内容的先进性与技术的综合性，对新型变频器的选型与维护、变频器应用电路的设计与调试及故障处理对策、多种类型变频器维修实例进行了介绍，具有较强的实用性、针对性和可操作性。

本书可供从事变频器维修、调试、使用的工程技术人员、工人参考，也可以作为相关专业在校师生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

变频器选型、调试与维修/杜增辉, 孙克军编著. —北京: 机械工业出版社, 2017. 12

ISBN 978-7-111-59394-2

I. ①变… II. ①杜… ②孙… III. ①变频器-选型②变频器-安装③变频器-维修 IV. ①TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 047855 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: 陈保华 责任编辑: 陈保华 张利萍

责任校对: 刘雅娜 封面设计: 马精明

责任印制: 孙 炜

北京中兴印刷有限公司印刷

2018 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·14 印张·265 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-59394-2

定价: 49.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

策划编辑: 010-88379734

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

➔ 前 言 ➔



近年来，变频器已经广泛应用在工业的各个领域。随着技术的发展，变频器的性能越来越好。变频器结合专用的变频电动机使用，可以很方便地实现调速。对于很多应用变频器控制主轴变频电动机的经济型数控机床和普通机床来说，变频器与变频电动机的组合可以方便地得到加工各个环节所需的主轴速度，省去了很多机械换档变速环节。变频器和变频电动机的高可靠性可以大大减少机床的故障率及维修消耗和维修时间，迎合了机械部件越来越简单、电气越来越智能化的趋势。另外，变频器节能也是很多单位愿意进行改造的原因。变频器可以根据设备不同的工作状态调整出适合的输出频率和速度。变频器的使用需要合适的环境温度和湿度，变频器在有粉尘以及含腐蚀性气体或者含有油污等其他恶劣环境中工作，必须做好相应的防护工作，要及时维护保养，以保障其安全正常运行。

本书针对变频器的选型、电路设计及调试、维护及维修技术所写，主要内容包括：变频器基础知识、变频器的选型、常用变频器、典型变频器应用电路设计、变频器调试与维护、变频器的常见故障与对策和变频器维修实例，尤其针对应用性相关的变频器选型、应用电路设计、调试、维护维修等重点内容做了详细的介绍，可参考性强，内容新颖，通俗易懂。本书突出了内容的先进性与技术的综合性，选用了许多新型变频器故障处理对策和多种类型变频器维修实例，以求针对性强和实用性强。

本书是刚刚从事变频器维修人员和有一定基础技术人员提高变频器应用技术的必备参考资料，既可供研究单位、企业从事变频器设计、维修、调试、培训的各类技术人员参考，也可以作为各类高等学校相关专业的参考教材。本书由石家庄椿凯动力传输机械有限公司的杜增辉和河北科技大学的孙克军编著，第1~3章由孙克军编写，第4~7章由杜增辉编写。全书由杜增辉统稿和定稿。

在编写过程中，作者参考了诸多著作、教材和安川变频器、艾默生变频器、西门子变频器、三菱变频器、台达变频器、超同步变频器、三垦变频器、博世力士乐等相关厂家的产品手册，在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不当之处，欢迎广大读者批评指正。

作 者

目 录



前 言

第 1 章 变频器基础知识	1
1.1 概述	1
1.1.1 变频器的用途与优点	1
1.1.2 变频器的分类和特点	2
1.2 变频器的基本结构与工作原理	7
1.2.1 通用变频器的基本结构	7
1.2.2 变频器的工作原理	9
1.3 变频器的额定值	10
1.4 变频器的主要功能	11
1.4.1 系统所具有的功能	11
1.4.2 频率设定功能	13
1.4.3 与保护有关的功能	16
1.4.4 与运行方式有关的功能	18
1.4.5 与状态监测有关的功能	19
1.5 变频调速系统	19
1.5.1 变频调速系统的构成与特点	19
1.5.2 交流调速系统的主要指标	20
1.5.3 变频调速的基本规律	21
1.5.4 变频调速时电动机的机械特性	23
1.5.5 从基频向下变频调速	24
1.5.6 从基频向上变频调速	25
1.6 关于交流低压变频器的几点补充说明	27
第 2 章 变频器的选型	28
2.1 概述	28
2.2 变频器的选择	29
2.2.1 变频器类型的选择	29
2.2.2 变频器防护等级的选择	30
2.2.3 变频器容量的选择	30
2.2.4 通用变频器用于特种电动机时的注意事项	38

2.3 变频调速系统电动机的选择	39
2.3.1 电动机类型的选择	39
2.3.2 电动机功率的选择	41
2.3.3 电动机转速的选择	43
2.4 变频器外围设备的选择	44
2.4.1 熔断器和断路器的选择	45
2.4.2 接触器的选择	47
2.4.3 电抗器的作用与选择方法	48
2.4.4 噪声滤波器的作用与选择方法	50
2.4.5 制动电阻的作用与理论选择方法	51
第3章 常用变频器	54
3.1 安川变频器	54
3.1.1 安川 VARISPPD-616G5 多功能全数字式变频器 (200V) 技术参数	54
3.1.2 安川 VARISPPD-616G5 多功能全数字式变频器 (400V) 技术参数	54
3.2 三垦变频器	54
3.2.1 SAMCO-VM05 系列高性能多功能静音式变频器 (400V 级 SHF 系列) 技术 参数	54
3.2.2 SAMCO-VM05 系列高性能多功能静音式变频器 (400V 级 SPF 系列) 技术 参数	54
3.3 森兰变频器	65
3.3.1 森兰 SB20 系列变频器基本规格和主要技术参数	65
3.3.2 森兰 SB200 系列变频器基本规格和主要技术参数	66
3.4 艾默生变频器	68
3.4.1 EV1000 系列通用变频器基本规格和主要技术参数	68
3.4.2 EV3000 系列高性能矢量控制变频器基本规格和主要技术参数	70
3.5 富凌变频器	73
3.5.1 DZB100 系列变频器基本规格和主要技术参数	73
3.5.2 DZB500 系列变频器基本规格和主要技术参数	75
3.6 西门子变频器	77
3.6.1 MICROMASTER430 系列变频器主要技术参数	77
3.6.2 MICROMASTER440 系列通用型变频器主要技术参数	79
3.7 富士变频器	80
3.7.1 富士 FRENIC 5000 G11S 系列变频器基本规格和主要技术参数	80
3.7.2 富士 FRENIC 5000 P11S 系列变频器基本规格和主要技术参数	81
3.8 三菱变频器	81
3.8.1 三菱 FR-A240E 系列变频器基本规格和主要技术参数	81
3.8.2 三菱 FR-A500 系列变频器基本规格和主要技术参数	88
第4章 典型变频器应用电路设计	91
4.1 变频器应用电路介绍	91

4.2	变频器的端子功能及外接线路要求	94
4.3	变频器外接制动电阻选择	100
第5章 变频器调试与维护		107
5.1	变频器的调试	107
5.1.1	变频器功能调试	107
5.1.2	变频器试运行调试	121
5.2	变频器的维护	123
5.2.1	变频器的日常维护	123
5.2.2	变频器的定期维护	125
第6章 变频器的常见故障与对策		127
6.1	三菱 FR-A500 常见故障与对策	127
6.2	三菱通用变频器常见故障与对策	132
6.3	富士 FREG11UD 变频器的故障报警信息与对策	134
6.4	安川变频器的故障报警信息与对策	135
6.5	日立变频器的故障报警信息与对策	138
6.6	东芝变频器故障原因与对策	141
6.7	东芝变频器 [警报] 不发生跳闸故障原因与对策	147
6.8	施耐德变频器故障显示原因与对策	149
6.9	施耐德变频器屏幕显示故障原因与对策	150
6.10	EDS2000/EDS2800 变频器的故障报警信息与对策	150
6.11	SINE003 系列变频器的故障报警信息与对策	153
6.12	神源变频器的故障报警信息与对策	154
6.13	神源变频器异常的原因与对策	156
6.14	艾默生 TD900 系列变频器的故障与对策	156
6.15	东元 7200GS 系列变频器的异常故障信息与对策	158
6.16	东元 7200GS 系列变频器的报警信息及自我诊断功能对策	160
6.17	台达变频器的故障显示与对策	163
6.18	森兰变频器报警内容与对策	166
6.19	艾默生 EV-2000 变频器故障原因与对策	167
6.20	艾默生 EV-2000 变频器操作异常与对策	170
6.21	博世力士乐 Fe 变频器故障类型与对策	172
6.22	博世力士乐变频器故障保护动作一览表	173
6.23	博世力士乐 CVF-G3 系列变频器的故障报警与对策	174
6.24	北京超同步科技股份有限公司 GA 系列变频器故障报警与对策	175
6.25	北京超同步科技股份有限公司 GA 系列变频器故障分析	177
6.26	沃森 VD300A 系列高性能通用矢量变频器故障诊断与对策	179
6.27	科川 KC220/300 系列变频器故障检查与对策	183

第 7 章 变频器维修实例	186
7.1 艾默生变频器维修实例	186
7.2 森兰变频器维修实例	193
7.3 博世力士乐变频器维修实例	196
7.4 北京超同步变频器维修实例	197
7.5 西门子变频器维修实例	198
7.6 富士变频器维修实例	202
7.7 安川变频器维修实例	205
7.8 英威腾变频器维修实例	206
7.9 丹佛斯变频器维修实例	208
7.10 东元变频器维修实例	209
7.11 其他变频器维修实例	211
参考文献	216

第1章



变频器基础知识

1.1 概述

1.1.1 变频器的用途与优点

变频器是一种静止的频率变换器，它利用电力半导体器件的通断作用，可以把电力配电网 50Hz 恒定频率的交流电，变换成频率、电压均可调节的交流电。

变频器是一种先进的交流电动机调速装置，其功能是将工频电源转换成设定频率的电源来驱动电动机运行。一般的电动机控制电路只能对电动机进行起动、停止、正转和反转等控制，一些调速控制电路也只能对电动机进行几档不连续的转速调节，而变频器除了具有前述一般控制电路对电动机的控制功能外，还有一些智能控制功能（例如：变频器能使电动机实现软起动、软停车、无级调速及特殊要求的加、减速特性等；调速过程中有显著的节电效果，具有过电流、短路、过电压、欠电压、过载、接地等保护功能，具有各种预警、信息预报、故障诊断功能；具有通信接口，便于组网控制）。

交流电动机变频调速技术是当今节电、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和起/制动性能、高效率、高功率因数、良好的节电效果、广泛的适用范围等许多优点而被公认为最有发展前途的调速方式。

变频器不仅可以作为交流电动机的电源装置，实现变频调速，还可以用于中频电源加热器、不间断电源（UPS）、高频淬火机等。

变频器具有体积小、自重轻、精度高、工艺先进、功能丰富、保护齐全、可靠性高、操作简便、通用性强、易形成闭环控制等优点，综合性能优于以往的任何调速方式，如变极调速、调压调速、转差调速、串级调速等，因而深受钢铁、石油、化工、化纤、纺织、机械、电力、建材、煤炭、医药、造纸、城市供水及污水处理等行业的欢迎。

1.1.2 变频器的分类和特点

变频器的种类非常多，常用变频器的外形如图 1-1 所示。



图 1-1 常用变频器的外形

1. 变频器按变换频率的方法分类及各类别的特点

(1) 交-直-交变频器 交-直-交变频器又称间接变频器，它是先将工频交流电通过整流器变换成直流电，再经过逆变器将直流电变换成频率、电压均可控制的交流电，其基本原理如图 1-2 所示。

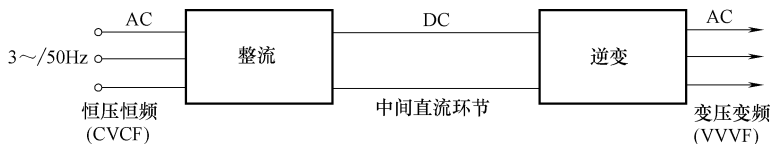


图 1-2 交-直-交变频器

(2) 交-交变频器 交-交变频器又称直接变频器，它可将工频交流电直接变换成频率、电压均可控制的交流电。交-交变频器的基本原理如图 1-3 所示，其整个系统由两组晶闸管整流装置反向并联组成，正、反向两组按一定周期相互切换，在负载上就可获得交变的输出电压 u_o 。

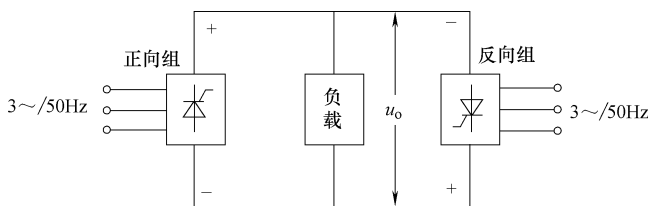


图 1-3 交-交变频器

交-交变频器与交-直-交变频器的主要特点比较见表 1-1，目前应用较多的是交-直-交变频器。

表 1-1 交-交变频器与交-直-交变频器的主要特点比较

项 目	交-交变频器(电压型)	交-直-交变频器
换能方式	一次换能,效率较高	二次换能,效率较高
换流方式	电源电压换流	强迫换流或负载换流
元件数量	较多	较少
元件利用率	较低	较高
调频范围	输出最高频率为电源频率的 $1/3 \sim 1/2$	频率调节范围宽
电源功率因数	较低	如用晶闸管整流桥调压,则低频低压时,功率因数较低;如用斩波器或 PWM 方式调压,则功率因数较高
适用场合	低速大功率传动	各种传动装置、稳频稳压电源和不间断电源

2. 变频器按主电路工作方式的分类及各类别的特点

(1) 电压型变频器 电压型变频器的主电路如图 1-4 所示。在电压型变频器中，整流电路产生逆变所需的直流电压，通过中间直流环节的电容进行滤波后输出。由于采用大电容滤波，故主电路直流电压波形比较平直，在理想情况下可看成一个内阻为零的电压源。电压型变频器输出的交流电压波形为矩形波或阶梯波，多用于不要求正反转或快速加减速的通用变频器中。

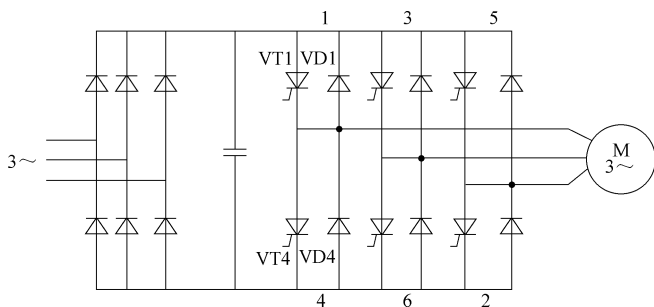


图 1-4 电压型变频器的主电路

(2) 电流型变频器 电流型变频器的主电路如图 1-5 所示，其特点是中间直流环节采用大电感滤波。由于电感的作用，直流电流波形比较平直，因而直流电源的内阻抗很大，近似于电流源。电流型变频器输出的交流电流波形为矩形波或阶梯波，其最大优点是可以进行四象限运行，将能量回馈给电源，且在出现负载短路等情况时容易处理，故该方式适用于频繁可逆运转的变频器和大容量变频器。

电流型变频器与电压型变频器主要特点的比较见表 1-2。

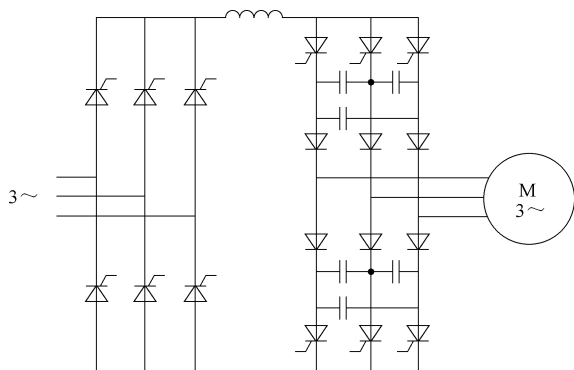


图 1-5 电流型变频器的主电路

表 1-2 电流型变频器与电压型变频器主要特点的比较

项 目	电流型	电压型
直流回路滤波环节	电抗器	电容器
输出电压波形 ^①	取决于负载,当负载为异步电动机时,近似为正弦波	矩形
输出电流波形 ^①	矩形	决定于逆变器电压与电动机的电动势,有较大谐波分量
输出动态阻抗	大	小
再生制动(发电制动)	方便、不需附加设备	需要附加电源侧反并联逆变器
过电流及短路保护	容易	困难
动态特性	快	较慢,用 PWM 则快
对晶闸管要求	耐压高,对关断时间无严格要求	一般耐压较低,关断时间要求短
线路结构	较简单	较复杂
适用范围	单机,多机	多机,变频或稳频电源

① 指三相桥式变频器,既不采用脉冲宽度调制,也不进行多重叠加。

3. 变频器按电压调节方式的分类及各类别的特点

(1) PAM 变频器 脉冲幅值调节 (Pulse Amplitude Modulation, PAM) 方式,是一种以改变电压源的电压 U_d 或电流源的电流 I_d 的幅值进行输出控制的方式。因此,在变频器中,逆变器只负责调节输出频率,整流部分则控制输出电压或电流。采用 PAM 方式调节电压时,变频器的输出电压波形如图 1-6 所示。PAM 控制的主电路原理图如图 1-6a 所示。

PAM 被用于中间电路电压可变的变频器,频率控制时,输出电压的频率通过逆变器改变工作周期来调节。在每一个工作周期内,功率开关器件都通断若干次。因为实施 PAM 的线路比较复杂,要同时控制整流和逆变两个部分,并且晶闸管整流后,直流电压的平均值并不和移相角成线性关系,从而使整流和逆变的协调变得相当困难,所以一般不采用这种调制方式。

(2) PWM 变频器和 SPWM 变频器 采用脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 方式时, 在变频器输出波形的一个周期中产生多个脉冲, 其等值电压近似为正弦波, 波形平滑且谐波较少。PWM 控制的主电路原理图如图 1-6b 所示。脉冲宽度调制方式又分为等脉宽 PWM 法和正弦波 PWM 法 (SPWM 法) 等。

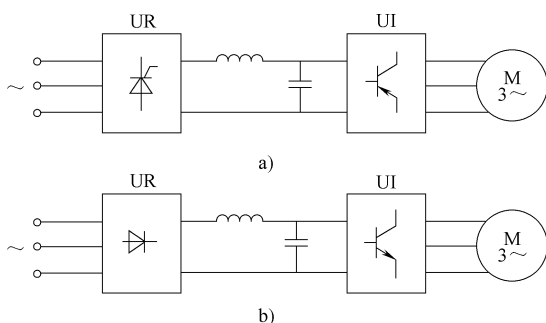


图 1-6 用 PAM 和 PWM 控制的主电路方式调压输出电压波形

a) PAM 控制的主电路 b) PWM 控制的主电路

等脉宽 PWM 法是最为简单的一种, 它每一脉冲的宽度均相等, 改变脉冲列的周期可以调频, 改变脉冲的宽度或占空比可以调压, 采用适当方法即可以使电压与频率协调变化。等脉宽 PWM 法的缺点是输出电压中除基波外, 还包含较大的谐波分量。

SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation, 正弦波脉宽调制) 法是为了克服等脉宽 PWM 法的缺点而发展来的, 其具体方法如图 1-7 所示, 是以一个正弦波作为基准波 (称为调制波), 用一系列等幅的三角波 (称为载波) 与基准正弦波相交如图 1-7a 所示, 由它们的交点确定逆变器的开关模式。当基准正弦波高于三角波时, 使相应的开关器件导通; 当基准正弦波低于三角波时, 使开关器件截止。由此, 使变频器输出电压波为图 1-7b 所示的脉冲列, 其特点是在半个周期中等距、等幅 (等高)、不等宽 (可调), 总是中间的脉冲宽, 两边的脉冲窄, 各脉冲面积与该区间正弦波下的面积成比例。这样, 输出电压中的谐波分量显然可以大大减小。

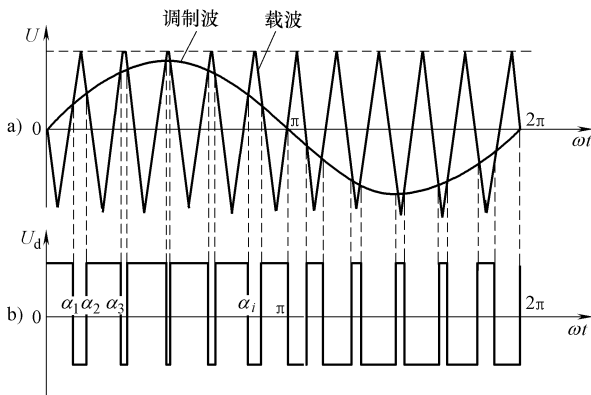


图 1-7 SPWM 变频器的调压原理

a) 正弦波与三角波 b) 变频器输出电压波形

4. 变频器按控制方式的分类及各类别的特点

异步电动机变频调速时, 变频器可以根据电动机的特性对供电电压、电流、频率进行适当的控制, 不同的控制方式所得到的调速性能、特性及用途是不同

的。同理，变频器也可以按控制方式进行分类。

(1) U/f 控制变频器 U/f （电压 U 和频率 f 的比）控制方式，又称为 VVVF（Variable Voltage Variable Frequency）控制方式。它的基本特点是对变频器输出的电压和频率同时进行控制，通过使 U/f 的值保持一定而得到所需的转矩特性。基频以下可以实现恒转矩调速，基频以上则可以实现恒功率调速。采用 U/f 控制方式的变频器控制电路成本较低，多用于对精度要求不太高的通用变频器。

(2) 转差频率控制变频器 转差频率控制方式是对 U/f 控制方式的一种改进。在采用转差频率控制方式的变频器中，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。该控制方式是闭环控制，故与 U/f 控制方式相比，在负载发生较大变化时，仍能达到较高的速度精度和具有较好的转矩特性。但是，由于采用这种控制方式时，需要在电动机上安装速度传感器，并需要根据电动机的特性调节转差，故通用性较差。

(3) 矢量控制变频器 矢量控制的基本思想是将交流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电动机定子电流的幅值和相位，即控制定子电流矢量，所以这种控制方式被称为矢量控制。采用矢量控制方式的交流调速系统能够提高变频调速的动态性能，不仅在调速范围上可以与直流电动机相媲美，而且可以直接控制异步电动机产生的转矩。因此，矢量控制变频器已经在许多需要进行精密控制的领域得到了应用。

5. 变频器按用途的分类及各类别的特点

(1) 通用变频器 通用变频器的特点是可以对普通的交流异步电动机进行调速控制。通用变频器可以分为低成本的简易型通用变频器和高性能多功能的通用变频器两种类型。

简易型通用变频器是一种以节能为主要目的而减少了一些系统功能的通用变频器。它主要应用于水泵、风机等对于系统的调速性能要求不高的场合，并具有体积小和价格低等优点。

高性能多功能通用变频器为了满足可能出现的各种需要，在系统硬件和软件方面都做了许多工作。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。该变频器除了可以应用于简易型通用变频器的所有应用领域外，还广泛应用于传动带、升降装置，以及各种机床、电动车辆等对调速系统的性能和功能有较高要求的场合。

(2) 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方式得到了重视和发展。高性能专用变频器主要是

采用矢量控制方式。采用矢量控制方式的高性能专用变频器和变频调速专用电动机所组成的调速系统，在性能上已达到和超过了直流调速系统。此外，高性能专用变频器往往是为了满足特定行业（如冶金行业、数控机床、电梯等）的需要，使变频器在工作中能发挥出最佳性价比而设计生产的。

(3) 高频变频器 在超精密机械加工中常常用到高速电动机。为了满足其驱动的需要出现了高频变频器。

(4) 单相变频器和三相变频器 与单相交流电动机和三相交流电动机相对应，变频器也分为单相变频器和三相变频器。两者的工作原理相同，但电路的结构不同。

1.2 变频器的基本结构与工作原理

1.2.1 通用变频器的基本结构

通用变频器是相对于专用变频器而言的，它的使用范围广泛，是所有中小型交流异步电动机都能使用的变频器。专用变频器的品种虽然很多，但多由通用变频器稍加功能“演变”而成，掌握了通用变频器，一通百通，其他变频器的安装、操作、使用和维护保养也就易如反掌了。

通用变频器一般由主电路和控制电路两大部分构成。中、小型通用变频器的主要型式是交-直-交型变频器，其典型结构框图如图 1-8 所示。

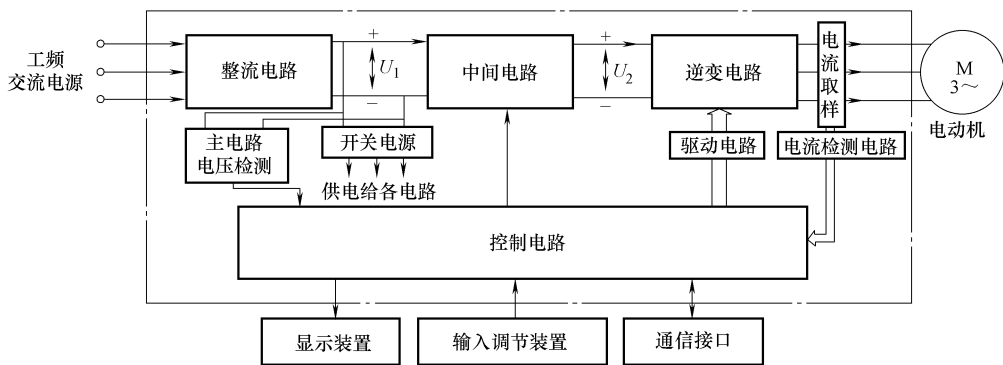


图 1-8 交-直-交型变频器的典型结构框图

(1) 主电路 交-直-交通用型变频器的主电路如图 1-9 所示。

主电路是由电力电子器件构成的功率变换部分，通常由整流电路、滤波电路、限流电路、逆变电路、续流电路以及制动电路等组成。

1) 整流电路的作用是把工频电源变换成直流电源。三相桥式整流电路又称为

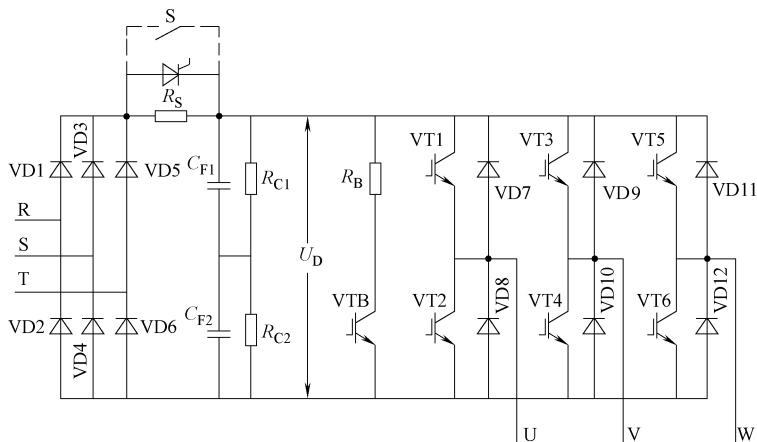


图 1-9 交-直-交通用型变频器的主电路

全波整流电路，在中小容量变频器中，通常采用此电路。VD1~VD6 通常采用电力整流二极管或整流模块。R、S、T（即 L1、L2、L3 或 A、B、C）为电源输入端。

2) 滤波电路通常用若干只电容器并联成 C_{F1} 以增大容量后，再串联相同容量的电容器 C_{F2} 组合而成。 R_{C1} 和 R_{C2} 是均压电阻器。

3) 限流电路由电阻器 R_S 和开关 S 并联组成。在图 1-9 中， R_S 和 S 之间另外并联一只晶闸管，通常 S 由晶闸管充当。在容量较小的变频器中，S 则由继电器的常开触点充当。

4) 逆变电路由电力电子器件 VT1~VT6 构成，常称为“逆变桥”。逆变电路的作用与整流电路的作用相反。逆变电路接受控制电路中 SPWM 调制信号的“命令”（控制），将直流电逆变成三相交流电，由 U、V、W 三个输出端输出，供给交流异步电动机。

5) 续流电路由 VD7~VD12 构成，它们为三相交流异步电动机绕组无功电流返回直流电路提供了通路。当频率下降引起电动机同步转速下降时，VD7~VD12 为绕组的再生电能反馈至直流电路提供续流。

6) 制动电路。在变频器调速系统中，电动机的降速和停机是通过逐渐减小频率来实现的。在频率刚刚减小的瞬间，电动机的同步转速随之下降，而由于机械惯性的作用，电动机转子转速未变。当同步转速低于转子转速时，转子电流的相位几乎改变 180° ，电动机此时处于发电机状态；与此同时，电动机轴上的转矩变成了制动转矩，使电动机的转速迅速下降。因此，认为此时的电动机处于再生制动状态。用于消耗电动机再生电能的电路，就是能耗制动电路。 R_B 是能耗制动电路中的重要元件，它把电动机的再生电能转换成热能而消耗掉。VTB 是电力功率管，用于接通或关断能耗电路。