

变频调速控制系统的设计与维护

山东科学技术出版社

前 言

通用变频器的使用已经在各行业得到了普及。如何设计好、维护好由通用变频器所组成的控制系统，是从事工业自动化专业的工程技术人员面临的实际问题。

本书是作者多年来从事通用变频器控制系统设计与维护的教学和科研工作的总结。它介绍了交流调速自动控制系统设计的基础知识，着重讲述了通用变频器的工作原理及控制系统的构造方法；从实际工程出发，既介绍了单机控制系统的组成，又介绍了多机同步传动变频器网络控制系统的组成知识；针对不同的生产工艺要求，对通用变频器的应用方法、注意事项和维修方法，通过应用实例都作了详细介绍。

本书内容共分6章：第1章简单介绍BJT(GTR)和IGBT在通用变频器中的应用知识及它们的驱动电路；第2章介绍通用变频器的最新发展、工作原理及控制方式；第3章介绍通用变频器的参数设定方法及功能选择，包括用串行通讯方式设置通用变频器的参数；第4章讲述了交流调速控制系统的设计方法，着重讲解了控制系统的设计、构造原理及维护方法；第5章通过一些成功的具体应用实例，讲解如何根据控制系统的基本构造原理，设计出一个实用的交流调速控制系统，包括工程项目的技术要点和多机同步传动变频器网络控制系统的组成等知识；第6章介绍几种通用变频器常见故障排除过程及维修方法。

为了便于设计与维修交流调速控制系统，本书还在附录部分收录了部分国内外常见通用变频器的功能码表和控制端子配置图。

本书既可作为工业自动化专业学生的专业教材，又可作为工程技术人员、大专院校师生的实用参考书，也可供变频器维修人员作培训教材使用。

由于作者学识水平有限，再加上交流调速技术近年来几乎达到了日新月异的地步，所以在交流调速控制系统设计与维护的方法和程序编制上，若存在不当之处，殷切希望读者批评指正。

作 者

1999年4月

目 录

绪言	1
第1章 常用电力半导体器件及其应用	3
§1—1 双极晶体管 BJT (GTR)	4
一、BJT (GTR) 的外形与等效电路	5
二、BJT (GTR) 的主要参数	5
三、BJT (GTR) 的选择方法	6
四、BJT (GTR) 的驱动电路模块	7
五、BJT (GTR) 的并联方法及注意事项	8
六、BJT (GTR) 的保护方法	10
§1—2 绝缘栅双极晶体管 IGBT	12
一、IGBT 的外形与特点	12
二、IGBT 的主要参数及特性的测量方法	13
三、对 IGBT 驱动电路的基本要求	15
四、IGBT 驱动模块的工作原理及特点	17
五、IGBT 模块的过流保护	36
§1—3 其他电力半导体器件	39
一、集成门极换流晶闸管 IGCT	39
二、功率场效应晶体管 (MOSFET)	41
三、IGBT 智能模块 (IPM)	42
§1—4 BJT (GTR) 和 IGBT 的缓冲电路	44
一、缓冲电路的作用与类型	44
二、IGBT 的缓冲电路	46
参考文献	47
第2章 通用变频器的工作原理	49
§2—1 通用变频器的发展概况	49
一、通用变频器的发展过程	49
二、通用变频器的技术发展动向	50
§2—2 变频器的基本工作原理	51
一、变频器的基本控制方式	51

二、SPWM 控制技术原理	53
§ 2—3 通用变频器的基本结构	60
一、变频器的基本外形结构	60
二、变频器的类别	61
三、变频器的额定值和频率指标	64
四、变频器的主电路	65
§ 2—4 三相 SPWM 专用集成电路及其应用	67
一、MA818 及其应用	67
二、HEF4752 及其应用	78
三、SLE4520 及其应用	80
§ 2—5 通用变频器的控制电路原理图	88
一、U/f 控制通用变频器	88
二、矢量控制的变频变压通用变频器	95
参考文献	103
第3章 通用变频器的参数设定及功能选择	104
§ 3—1 通过操作面板设定和选择变频器的参数与功能	104
一、通用变频器运行频率的设定方法	104
二、通用变频器运行频率范围的设定及有关的功能	105
三、通用变频器频率设定应用举例	106
§ 3—2 通用变频器的制动方法与功能选择	116
一、变频调速控制系统制动的目的	116
二、通用变频器采用的制动方法	117
§ 3—3 通用变频器的控制方式及开闭环控制的选择	121
一、矢量控制的选择与设定	121
二、U/f 控制方式及开闭环控制的选择设定原则	122
§ 3—4 用微机设置通用变频器的参数和功能	124
一、接口与标准转换	124
二、系统的硬件连接	125
三、系统的通讯原理	125
四、通讯软件的初始化与操作界面	129
五、运行监测和故障自诊断	134
六、通讯软件的安装与应用实例	135
参考文献	151
第4章 由通用变频器组成的调速系统	152
§ 4—1 电气控制线路的设计方法	152

一、功能添加法	152
二、步进逻辑公式法	157
三、电气控制线路设计应用举例	159
§ 4—2 恒值控制系统的形成方法	165
一、系统的抑制能力	166
二、抑制定理与反馈定理	167
三、应用举例	169
§ 4—3 由通用变频器组成的调速系统	172
一、变频调速控制系统的设计方法	172
二、异步电动机的选择方法	174
三、变频器的选择方法	175
四、特殊电动机对于变频器的要求	176
五、调速系统的并联运行方法	179
§ 4—4 变频器的外围设备及其选择	180
一、常规配件的选择原则	180
二、逆变器对外产生的干扰与抑制措施	182
三、全波整流器对功率因数的影响及其改善措施	184
§ 4—5 通用变频器的安装与调试	185
一、通用变频器的安装	185
二、由通用变频器组成的调速系统的调试	188
§ 4—6 通用变频器的维护及故障处理	190
一、通用变频器的维护	190
二、通用变频器故障原因的分析	191
三、通用变频器的故障处理及维修方法	191
参考文献	196
第5章 通用变频器的应用实例	197
§ 5—1 通用变频器的结构图	197
§ 5—2 硅胶自动添加变频调速控制系统	202
一、设计目的	202
二、控制系统原理结构介绍	202
三、控制系统组成介绍	203
四、控制系统设计时的注意事项	207
§ 5—3 通用变频器在龙门铣床上的应用	207
一、X2010A 工作台进给机构改造前的状况	207
二、龙门铣床工作台电力拖动控制系统的工艺要求	207

三、控制系统的构造	210
四、控制系统改造时应注意的几个问题	211
§ 5—4 通用变频器在恒压供水方面的应用	213
一、恒压供水的意义	213
二、两种恒压供水主体方案的比较	213
三、用于恒值系统的控制方案	214
四、恒压供水变频调速控制系统设计要点	214
五、恒压供水变频调速控制系统应用举例	214
§ 5—5 通用变频器在三连冷轧成型机上的应用	227
一、三连成型轧机生产工艺及对电力拖动系统的要求	227
二、电力拖动控制系统的组成	228
三、系统设计及调试时应注意的事项	229
§ 5—6 碳纤维生产线变频同步控制系统	230
一、工艺概况与电力拖动控制的要求	230
二、碳纤维牵引电力拖动控制系统的硬件配置	230
三、碳纤维同步传动模糊控制器的设计思想	234
四、碳纤维同步传动控制系统开环控制程序清单	235
五、设计碳纤维同步传动控制系统的注意事项	235
§ 5—7 通用变频器在轧花机方面的应用	237
一、MY—121 型锯齿轧花机工作原理简介	238
二、问题的提出	238
三、轧花机变频调速模糊控制系统	239
四、系统的主要特点	243
五、系统的关键技术	243
§ 5—8 通用变频器在浆染联合机上的应用	243
一、系统概述	243
二、控制系统组成	244
三、可编程序控制器部分	245
四、该控制系统设计的缺陷及注意事项	245
参考文献	246
第6章 通用变频器的故障检修实例	247
§ 6—1 SAMI STAR 变频器故障维修实例	247
一、故障信息	247
二、分析故障	247
三、问题解决过程	247

§ 6—2 富士变频器故障维修实例	249
一、FVR110G7S—4EX 富士变频器主控板损坏	249
二、FVR150G7S—4EX 富士变频器欠压保护	249
三、FVR150G7S—4EX 富士变频器过流保护	250
四、FVR075G7S—4EX 富士变频器无显示, 不工作	251
五、FVR110G7—4EX 富士变频器因蒸气泄漏引起短路损坏	252
六、FVR110G7—4EX 富士变频器因机内落入螺钉短路损坏	252
七、FVR055G5S—2 富士变频器因冷却风扇故障而损坏	253
八、FVR055G5S—2 富士变频器因潮湿造成损坏	253
§ 6—3 SANKEN 变频器故障维修实例	254
一、SVF—552—380V SANKEN 变频器输出短路损坏	254
二、SVF—552—380V SANKEN 变频器单相 (电机绝缘不好) 对地短路损坏	255
三、MF—7.5k—380V SANKEN 变频器风扇损坏引起的故障	255
四、MF—7.5k—380V SANKEN 变频器热传感器不稳定引起的故障	256
五、MF—7.5k—380V SANKEN 变频器由于铁粉粘附造成主回路短路损坏	256
六、MF—7.5k—380V SANKEN 变频器过流保护	256
七、MF—7.5k—380V SANKEN 变频器主控板与底板打火造成的损坏	257
八、MF—7.5k—380V SANKEN 变频器主控板短路损坏	257
九、MF—110k—380V SANKEN 变频器输出对地短路损坏	259
十、SVS—252C SANKEN 变频器因漏入溶化的冷冻液后造成机内短路而损坏	259
§ 6—4 其他品牌的变频器故障维修实例	260
一、JNJGBFBB7R50AZ (台湾产) 变频器无输出、无显示	260
二、9G9XV—AB015—EV2 (日本欧姆龙产) 变频器模拟频率输出有问题	261
三、VF5120HG—10 (东洋电机产品) 变频器因雷电损坏	262
四、NPG9357 (中国南普公司产品) 变频器因粉尘而损坏	262
五、NORWIL (北京) 变频器运行开关失灵造成的故障	263
六、VWS 5.5 HF3EH (日立公司) 变频器过流保护	263
§ 6—5 790kW UR—I 型电流型变频调速器的维修	264
一、工作原理	264
二、故障现象	265
三、触发板故障的排除方法	265
参考文献	266

附录 1 常用电机电器图形符号.....	267
附录 2 色环电阻的阻值读取方法.....	268
附录 3 异步电动机调速方案比较表.....	269
附录 4 通用变频器常用器件表.....	270
附录 5 部分国内外通用变频器功能码汇编.....	282
一、中国南普 NPG92 系列通用变频器	282
二、西门子 MICRO MASTER/MIDI MASTER 系列变频器	284
三、富士 FVR—G7S 系列通用变频器	289
四、三垦 SAMCO—i 系列通用变频器	295
五、富士 FRN—G9S/P9S 系列变频器	304
六、日立 J300 系列变频器	315
七、三菱公司 FR—A240 系列通用变频器	317
八、安川公司 VS—616 PC5/P5 系列通用变频器	326
参考文献	338

绪 言

随着微机技术的日新月异、现代电力电子技术的迅速发展和现代调速控制理论的长足进步，通用变频器不仅用于一般性能的节能调速控制，而且已经用于高性能、高转速、大容量调速控制方面。变频器作为一种智能调速“元件”，以其多用途、高可靠性和明显的节电效果迅速广泛地应用于各种大型自动化生产线和各类电机控制上，如造纸、轧钢、印染和机械加工等生产线。变频器不仅可以单台工作，也可多台分别控制各自的被控对象，并相互串连，与计算机进行通讯，采用计算机对变频器网络的集中控制，形成连续生产线的调速控制系统，如图 0—1 所示。因此，现在的通用变频器在各

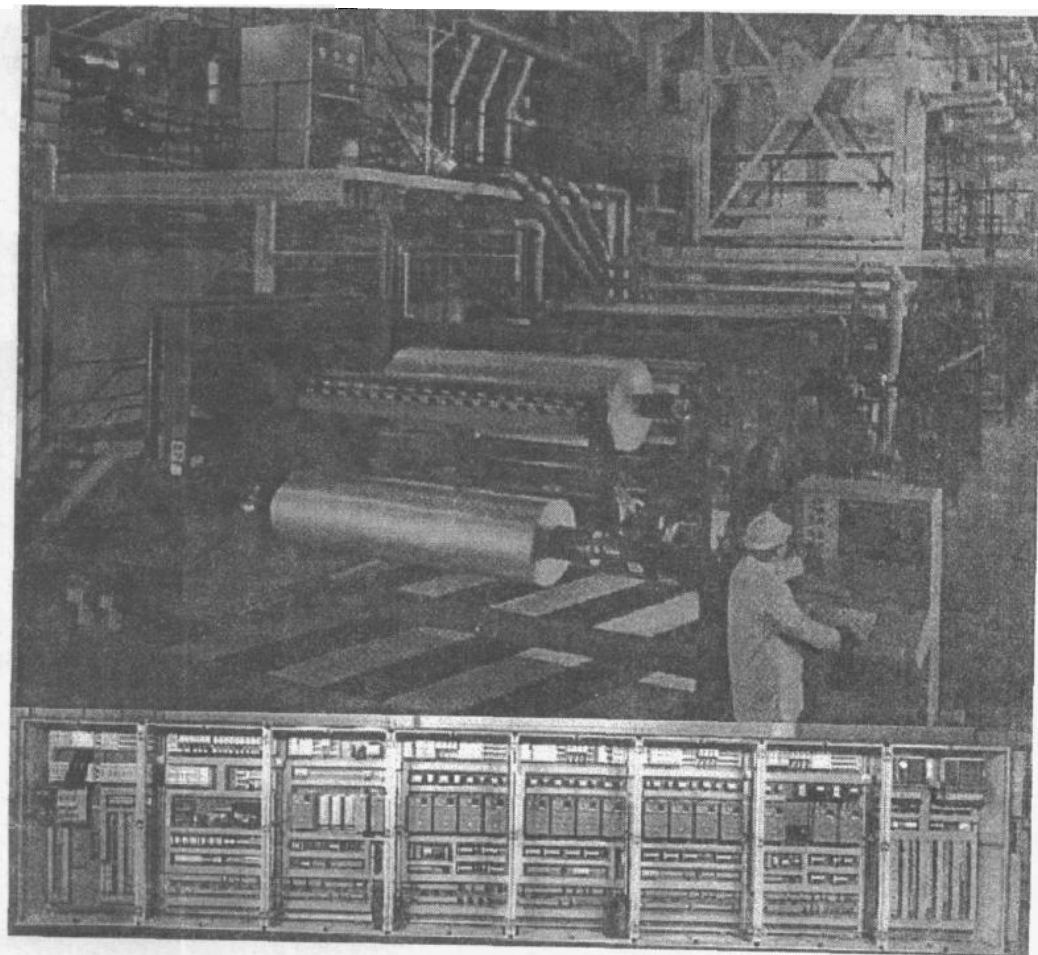


图 0—1 变频器网络同步传动控制系统的控制柜和现场一角

行业得到了普及。所谓“通用”，是指能与通用的鼠笼电动机配套使用，能适用各种不同性质的负载并具有多种可供选择的功能。通用变频器是组成调速控制系统的主要部件，如图 0—2 所示。

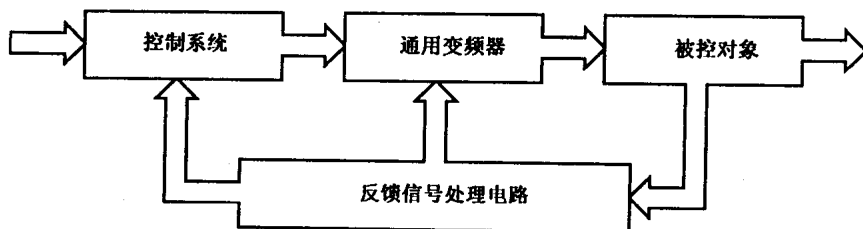


图 0—2 典型调速控制系统示意

由交流异步电动机的基本原理可知，转差功率 $P_s = SP_M$ ，与转差率 S 成正比。从能量转换的角度看，通用变频器的调速类型属于转差功率不变型，因此在种类繁多的调速类型中它的效率最高。它的结构形式主要由应用最广的交—直—交变压变频方式构成。通用变频器的基本构成如图 0—3 所示。

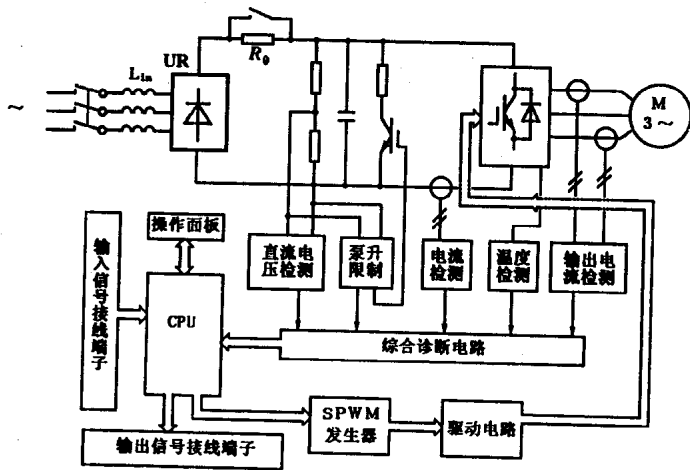


图 0—3 通用变频器的基本结构

也许大家要问，通用变频器为什么是这种结构？它的工作原理是什么？利用通用变频器如何构造一个调速控制系统呢？还有，如果通用变频器出现故障如何解决呢？要回答这些问题就必须从通用变频器所使用的电力电子器件开始探讨。

第 1 章 常用电力半导体器件及其应用

变频器的功能是将频率、电压都固定的交流电变换成频率、电压都连续可调的三相交流电源。由于把直流电逆变成交流电的环节比较容易控制，并且在电动机变频后的特性等方面比其他方法具有明显的优势，所以通用变频器采用了先把频率、电压都固定的交流电整流成直流电，再把直流电逆变成频率、电压都连续可调的三相交流电，即交—直—交方式，如图 1—1 所示。

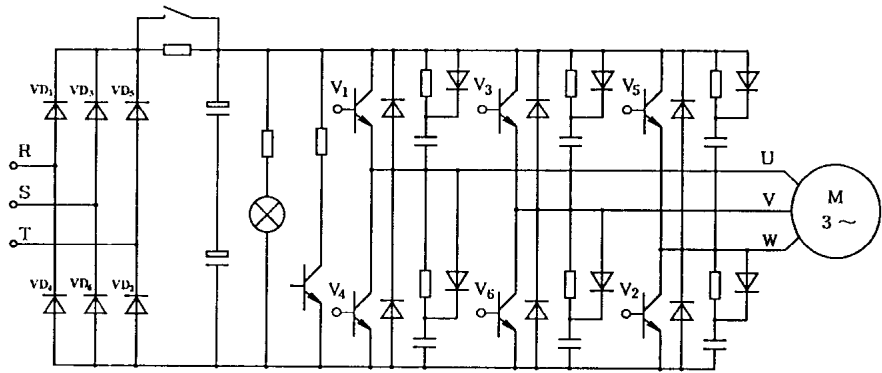


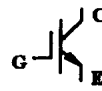
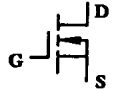
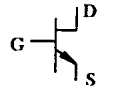
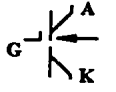
图 1—1 交—直—交变频器主电路原理

其中，电力半导体器件 $V_1 \sim V_6$ 是变频器的关键器件，在中小功率通用变频器中使用最多的是双极晶体管（BJT）和绝缘栅双极晶体管（IGBT）两种，在中大功率通用变频器中使用最多的是集成门极换流晶闸管（IGCT）、GTO 及 IGBT 三种。其他常用电力半导体器件见表 1—1。要想了解变频器的工作原理，首先应该了解变频器的核心器件电力半导体器件的一些基础知识。如果读者对电力半导体器件基础知识比较熟，可直接阅读下一章。

表 1—1 通用变频器常用电力半导体器件

名 称	代 号	符 号	控制方式	最高电压、电流及频率
双极型 晶体管	BJT (GTR)		电流	最高电压 450~1400V 最大电流 30~800A 最大频率 10k~50kHz

(续 表)

名 称	代 号	符 号	控制方式	最高电压、电流及频率
门极关断 晶闸管	GTO		电流	最高电压 4500~6000V 最大电流 4000~6000A 最大频率 1k~10kHz
绝缘栅双 极晶体管	IGBT		电压	最高电压 1800~3300V 最大电流 800~1200A 最大频率 20k~50kHz
集成门极 换流晶闸管	IGCT		电压 (光控)	最高电压 4500~6000V 最大电流 4000~6000A 最大频率 20k~50kHz
电力场效 应晶体管	P-MOSFET		电压	最高电压 50~1000V 最大电流 100~200A 最大频率 500k~200MHz
静电感应 晶体管	SIT		电压	最高电压 50~1500V 最大电流 10~200A 最大频率 30M~200MHz
双极型静电 感应晶闸管	SITH		电压	最高电压 500~4500V 最大电流 400~2200A 最大频率 40k~100kHz
MOS 控制 晶闸管	MCT		电压	最高电压 450~3000V 最大电流 400~1000A 最大频率 100k~1MHz

§ 1—1 双极晶体管 BJT (GTR)

双极晶体管 BJT 也称巨型晶体管 (Giant Transistor, 简称 BJT), 是一种高反压晶体管。它具有自关断能力, 并有开关时间短、饱和压降低和安全工作区宽等优点。由于 BJT 实现了高频化、模块化、廉价化, 因此被广泛用于交流电机调速、不停电电源和中频电源等电力变流装置中, 并且在中小功率 (600kVA 以下) 应用方面取代了传统的晶闸管。

一、BJT (GTR) 的外形与等效电路

用在通用变频器中的双极晶体管 BJT (GTR) 是模块型结构。这种模块型电力晶体管的三个极与散热片隔离, 因此散热片上不会带电。使用模块型电力晶体管的变频器, 其散热更容易、更均匀, 结构也更趋于合理。模块型电力晶体管的内部结构一般都是达林顿晶体管, 其容量范围从 450V/30A~1400V/800A 不等。为了使用上的方便, 使装置集成度更高、体积更小, 根据变频器的工作特点, 在晶体管旁还并联了一个反向联接的续流二极管。又根据逆变桥的特点, 常做成二单元模块 (见图 1—1—1)。对于小容量变频器一般使用六单元模块 (即六个单元做在一起的模块)。

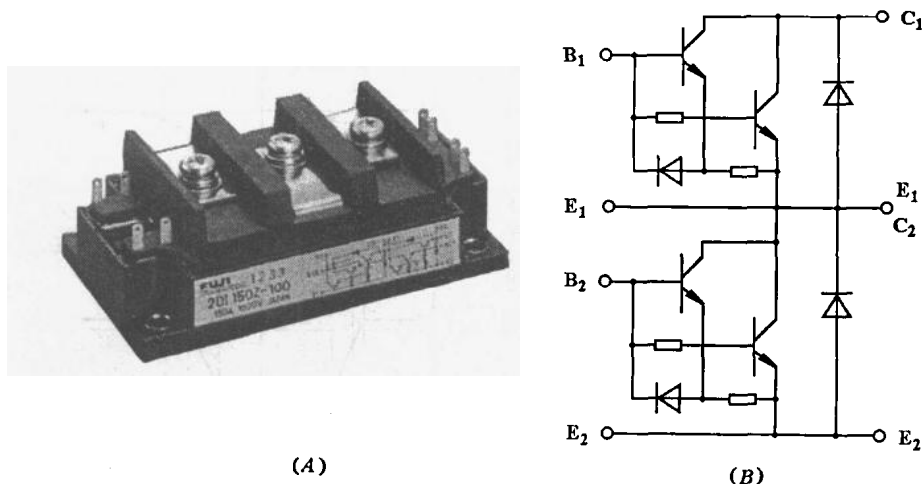


图 1—1—1 二单元双极晶体管 BJT (GTR) 模块
(A) 模块外形 (B) 等效电路

二、BJT (GTR) 的主要参数

在 BJT 模块上都标有 BJT 的主要参数。例如: 二单元、集电极最大持续电流 200A、通用型、开路阻断电压 1000V 的 BJT 模块, 在模块的标签上表示为 2DI200D—100。如果有一个模块的标签为 2DI150Z—120, 则说明该模块为二单元、集电极最大持续电流 150A、宽安全工作区型、开路阻断电压为 1200V 的 BJT。下面简单介绍 BJT 的一些经常使用的参数及定义。

1. 开路阻断电压 U_{CEO}

开路阻断电压体现了 BJT 的耐压能力, 经常使用的一种定义是: 基极开路时, 集电极—发射极间能承受的电压值为开路阻断电压 U_{CEO} 。开路阻断电压值反映了 BJT 的最大耐压能力。在通用变频器中, 用于 380V 交流电网时, 最好使用 1200V 电压等级的

BJT 模块。

2. 集电极最大持续电流 I_{CM}

当基极正向偏置时集电极能流入的最大电流。

3. 电流增益 h_{FE}

集电极电流与基极电流的比值称为电流增益，有时也称为电流放大倍数或电流传输比，即

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$

4. 开通时间 t_{on}

假设基极电流为正向阶跃信号 I_{B1} 时（见图 1—1—2）经过一段时间 t_d 延迟后，基极—发射极电压 U_{BE} 才上升到饱和值 U_{BES} ，同时集电极—发射极电压 U_{CE} 从 100% 下降到 90%，这段时间定义为延迟时间 t_d 。此后， U_{CE} 迅速下降到 10%，而集电极电流 I_C 上升到稳态值的 90%，这段时间定义为上升时间 t_r ，而导通时间 t_{on} 是延迟时间 t_d 与上升时间 t_r 之和，即 $t_{on} = t_d + t_r$ 。

5. 关断时间 t_{off}

从反向基流注入开始，到 U_{CE} 上升到 10% 的时间，定义为存储时间 t_s 。然后 U_{CE} 继续上升到 90%， I_C 下降到 10%，这段时间定义为下降时间 t_f 。而 BJT 的关断时间 t_{off} 是这两部分时间之和，即： $t_{off} = t_s + t_f$ （如图 1—1—2 所示）。一般 BJT 模块的饱和压降为 1.5 ~ 3V，存储时间和电流下降时间的典型值分别为 $1.5\mu s$ 和 $3\mu s$ 。

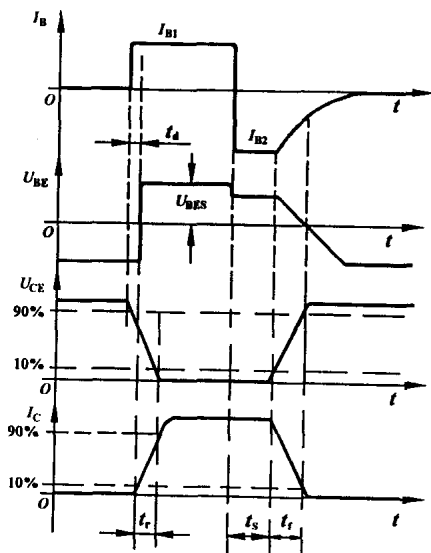


图 1—1—2 GTR 的开关时间

三、BJT (GTR) 的选择方法

BJT 模块在老型号的通用变频器中经常可以见到。由于 BJT 存在着固有的二次击穿，（所谓二次击穿，是指管子强大的电场作用下，由于发射结电荷的聚集效应，使集电极电流集中在反向偏置的集电结的很小范围内，其结果将产生过热点，由于负温度系数的特性，局部过热将加剧电流的集中，以致最后烧坏管子。）且其安全工作区受各项参数影响而变化、热容量小、过流能力低等问题，目前在通用变频器中 BJT 已逐步被 IGBT 所替代。但在维修变频器时还要考虑 BJT 的选择问题。

1. U_{CEO} 选择方法

U_{CEO} 通常按电源线电压 U_L 峰值的 2 倍来选择。

$$U_{CEO} \geq 2 \sqrt{2} U_L$$

2. I_{CM} 选择方法

按额定电流 I_N 峰值的 2 倍进行选择

$$I_{CM} \geq 2 \sqrt{2} I_N$$

四、BJT (GTR) 的驱动电路模块

1. BJT (GTR) 对驱动电路的要求

BJT 基极驱动电路性能的优劣直接影响到整个系统的效率和可靠性。采用性能优良的基极驱动电路, 可以缩短 BJT 的开关时间, 减小开关损耗, 提高 BJT 的工作可靠性。BJT 对基极驱动电路的要求是:

BJT 开通时, 驱动电路提供的基极电流上升率 di_b/dt 应尽可能高, 并能输出几倍于临界饱和电流的初始基极电流, 用以减小开通时间。

在 BJT 导通期间, 驱动电路提供的电流在任何负载情况下都应能保证 BJT 处于饱和状态, 以维持低的导通损耗。在关断前, BJT 处于临界饱和状态, 以减小存储时间。

在关断瞬间, 驱动电路应能提供足够的反向基极驱动, 以迅速抽出基区剩余载流子, 减小 t_s , 并加反偏截止电压, 使集电极电流迅速下降, 以减小下降时间 t_f 。

2. BJT (GTR) 的驱动电路模块

在通用变频器中, BJT 的驱动电路一般采用基极隔离方式驱动。常用的隔离方式有电磁隔离和光电隔离两种。经常用脉冲变压器作电磁隔离, 用光电耦合器作光电隔离。常见的驱动模块有: 具有保护功能的 UAA4002, 能驱动 50A/1000V 的 BJT 模块一个单元的 EXB356、M57215BL。EXB357 配合 1SI10A—100 (中间放大晶体管模块) 能驱动 75~400A/1000V 的 BJT 模块一个单元, EXB357 驱动器的性能见表 1—2。

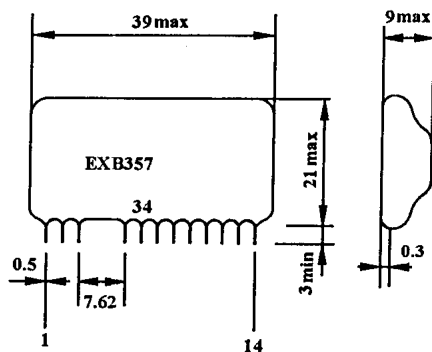
表 1—2

EXB357 驱动器的性能

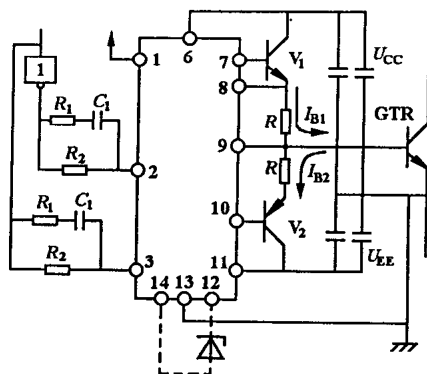
名 称	符 号	最 小 值	最 大 值	单 位
延迟时间	t_d	—	5.0	μs
上升时间	t_r	—	1.5	μs
存储时间	t_s	—	5.0	μs
反向偏置电流下降率	$-dI_{B2}/dt$	6.0		A/ μs
电压变化率	du/dt	4000		V/ μs

EXB357 的外形 [见图 1—1—3 (A)] 所示, 它的管脚为单列直插结构。使用时请参照图 1—1—3 (B)。EXB357 驱动模块的使用条件如下: 壳体温度 $T_c = -10 \sim 58^\circ C$; 驱动晶体管的结温 $T_j = -10 \sim 130^\circ C$; 驱动电路和被驱动 BJT (GTR) 模块之间的连线

必须小于 30cm；关断电流必须小于 405A； $U_{CC} = U_{EE} = (8.5 \pm 15\%) V$ ； V_1 用两个 2SB757J 晶体管并联； $R = 0.09\Omega$ 。



(A)



(B)

图 1—1—3 EXB357 驱动模块

(A) 外形图 (B) 接线图

五、BJT (GTR) 的并联方法及注意事项

1. 影响 BJT 电流平衡的主要原因

两个或多个 BJT 并联的目的是为了提高逆变器的电流容量，由于各个 BJT 的特性和参数不可能完全一致，如果不采取一定的措施而只是简单地把相同型号的 BJT 并联在一起，将会使每个管子的电流有很大的差别，从而造成某个管子负担过重以致损坏，所以电流的平衡是至关重要的，这种问题在维修变频器时经常遇见。电流的平衡分静态和动态平衡，影响 BJT 电流平衡的主要原因是：

(1) BJT 的静态特性和主回路的布线电阻影响静态电流平衡：假设有三个 BJT，它们的静态特性曲线如图 1—1—4 所示，从图 1—1—4 中曲线①和②可以看出，当 BJT 进入准饱和态后 V_{CE} 取相同值 V_1 时，集电极电流 I_C 将相差 ΔI_C 。由此可见，对于形如曲线①和② BJT 来说，只要深饱和态的特性相同，当 I_C 低于某个电流值时，就可实现电流平衡。因而较为深度的饱和有益于电流平衡，当然这将使关断时间变长。从图 1—

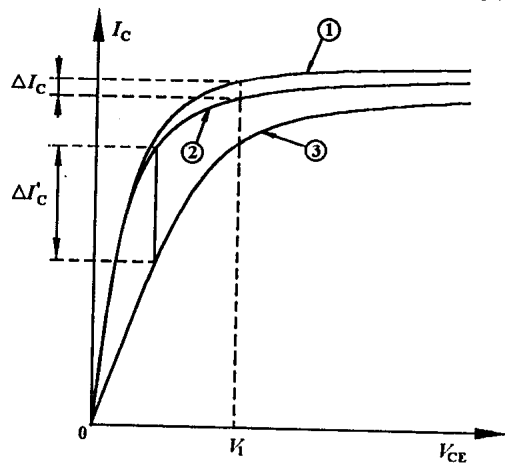


图 1—1—4 BJT 的静态特性

1—4 中曲线②和③可以看出, 当 V_{CE} 特性不同时, 即使在深饱和态, I_C 也会相差较大, 如图 1—1—4 中的 $\Delta I'_C$ 所示。

BJT 集电极和发射极侧的布线电阻对静态电流平衡也有较大的影响, BJT 并联使用时, 每个 BJT 通过的电流可达几十至上百安。尽管连线电阻很小, 但对并联 BJT 电流平衡的影响却较大, 不均匀程度可达 10%~30%。

(2) BJT 的开关特性和主回路的布线电感影响动态电流平衡: BJT 的开关特性和主回路连线的分布电感是影响并联动态电流平衡的主要因素。BJT 的开关特性影响到并联 BJT 在开关过程中的电流均衡, 其中存储时间 t_S 长的关断时电流不平衡幅值最大。这是因为存储时间 t_S 越长, BJT 关断得越慢, 电流大部分从该管流过, 造成电流分配不均, 而存储时间 t_S 短的元件, 关断时的基极反抽电流迅速减小, 使存储时间 t_S 长的元件基极反抽电流增大, 从而缩短存储时间 t_S 加快其关断过程, 能改善均流的作用。不过这种自流调整作用会使存储时间 t_S 长的元件反偏安全工作区变小。

主回路接线都存在着一一定的分布电感, 它对动态电流平衡的影响不容忽视。特别是发射极侧连线的分布电感会影响到基极和集电极侧的电流分配, 因而在接线时应使这些连线尽可能短, 且保证布线均匀。此外, 基极分布电感的存在, 对 BJT 关断时的均流自调整作用有一定影响。

2. 并联 BJT 的选择及注意事项

(1) 选择并联 BJT 的要点:

①选择 h_{FE} 、 V_{CE} 、 V_{BE} 、 t_S 、 t_{ON} 、 t_f 尽可能相近的 BJT。

在实际选择时元件特性不可能完全一致, 只能针对其中某一特性(如 h_{FE}) 进行选择, 找出折中方案。一般来说, 同一厂家生产的型号和等级相同的元件在特性方面是比较接近的, 有些厂家把 BJT 模块按 h_{FE} 值分级, 选用同一等级的 BJT 模块, 可使均流维持在 10% 以内。

②为保证系统的可靠性, BJT 使用时应留有充分的余量。

建议取最大工作电流为额定电流的 70% 左右, 并联时留取的余量一般为 50%~60%, 余量的大小要保证大于不均流的成分 ΔI_C , 这样在 I_C 略有不均的情况下 BJT 仍能安全工作。

(2) BJT 并联接线注意事项: BJT 并联使用时, 由于电流较大, 布线的分布电阻和电感对静、动态均流的影响较大, 因此布线是 BJT 并联运行成功与否的关键因素。实际布线时应注意如下几点:

①BJT 模块应尽可能地紧密排列, 使元件之间布线尽量短。

②元件间连线应采用导电性能好、分布电感小的材料, 导体形状应均匀, 这有利于减少分布电流的不均匀因素。

③集电极和发射极侧的引出线应从连接导体的中间走线, 这样可保证布线的电流相近。

④基极信号线应尽量远离发射极和集电极引线, 基极信号线应使用双绞线, 并注意其他电流感应的影响。