

**最新功率**

**半导体器件**

**应用技术**

**何希才 尤克 编**

**机械工业出版社**

# 最新功率半导体器件 应用技术

何希才 尤克 编



机械工业出版社

# (京)新登字 054 号

本书主要讲述最新功率半导体器件的特性、主电路以及控制电路的原理,并给出 30 多例实用电路。全书共分七章,前两章介绍功率晶体管、功率场效应晶体管、静电感应晶体管、绝缘栅双极晶体管、可关断晶闸管、静电感应晶闸管、功率集成电路等最新功率半导体器件的特性与控制电路原理。第三章至第六章介绍这些功率半导体器件在整流、电源、逆变、斩波、变速驱动中的应用技术。第七章提供了 30 多个实用电路。

本书可供科研人员、工程技术人员、大专院校师生使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

最新功率半导体器件应用技术 / 何希才, 尤克编。

—北京: 机械工业出版社, 1994.12

ISBN 7-111-04763-2

I. 最... II. ①何... ②尤... III. 功率晶体管 IV. TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 94 第 02130 号

出版人: 马九荣(北京市万庄国新里 1 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 蒋克 王莉 王颖 责任校对: 张媛

封面设计: 郭景云

责任印制: 路琳

机械工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1995 年 3 月第 1 版·1995 年 3 月第 1 次印刷

787mm×1092mm<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·8.125 印张·175 千字

0 001—2 500 册

定价: 10.00 元

## 前 言

随着功率半导体器件及其应用技术的发展，给电力电子技术带来了很大变化，使电力电子应用领域不断扩大。

本书有三部分内容：第一，讲述了最新功率半导体器件，如功率晶体管、功率场效应晶体管、静电感应晶体管、绝缘栅双极晶体管、可关断晶闸管、静电感应晶闸管、功率集成电路等的基本特性、选用原则及控制电路原理。第二，介绍这些最新功率半导体器件在整流、电源、逆变、斩波、变速驱动中的应用技术。第三，提供最新功率半导体器件的实用电路 30 多例，这些电路设计新颖，性能优良，为广大读者设计电路提供了有益参考。

本书由赵长奎教授主审，并得到赵宗英副教授的指导，在此深表谢忱。

由于编者水平有限，难免存在不妥和错误之处，希读者提出宝贵意见。

编者  
1993 年

# 目 录

概述 .....	1
第一章 功率半导体器件 .....	2
第一节 功率晶体管 .....	2
一、功率晶体管的结构与特性 .....	2
二、功率晶体管驱动电路的设计 .....	8
三、功率晶体管的保护电路 .....	16
第二节 功率 MOS 场效应晶体管 .....	20
一、功率 MOS 场效应晶体管的结构与特性 .....	20
二、功率 MOS 场效应晶体管的应用技术 .....	24
三、功率 MOS 场效应晶体管的保护电路 .....	31
第三节 静电感应晶体管 .....	34
一、静电感应晶体管的结构与特性 .....	34
二、静电感应晶体管的驱动电路 .....	36
三、静电感应晶体管的保护电路 .....	40
第四节 绝缘栅双极晶体管 .....	43
一、绝缘栅双极晶体管的结构与特性 .....	43
二、绝缘栅双极晶体管的栅极控制技术 .....	49
三、绝缘栅双极晶体管的应用技术 .....	55
第五节 可关断晶闸管 .....	62
一、可关断晶闸管的工作原理与特性 .....	62
二、可关断晶闸管的门极控制技术 .....	66
三、可关断晶闸管的保护电路 .....	70

第六节 静电感应晶闸管 .....	73
一、静电感应晶闸管的结构与特性 .....	73
二、静电感应晶闸管的驱动电路 .....	78
三、静电感应晶闸管的保护 .....	82
第七节 功率集成电路 .....	86
一、概述 .....	86
二、高电压集成电路 .....	86
三、步进电机控制集成电路 .....	86
四、电磁阀驱动用集成电路 .....	90
五、无刷直流电机专用功率集成电路 .....	91
第二章 整流电路与循环换流器电路 .....	93
第一节 整流电路 .....	93
一、单相半波整流电路 .....	93
二、单相桥式整流电路 .....	96
三、三相半波可控整流电路 .....	99
四、三相全控桥整流电路 .....	101
五、功率因数及其改善对策 .....	103
六、换流时电流的重叠 .....	106
七、他励式逆变器 .....	107
第二节 循环换流器电路 .....	110
一、基本方式 .....	110
二、连续式循环换流器 .....	112
三、定比式循环换流器 .....	115
第三节 交流开关与交流功率调整电路 .....	117
一、基本电路 .....	117
二、交流功率调整的相位控制方式 .....	118
三、交流开关的通断控制 .....	122

第三章 直流斩波器与逆变器 .....	126
第一节 直流斩波器 .....	126
一、斩波原理 .....	126
二、可逆斩波器 .....	129
三、晶闸管直流开关中的换流电路 .....	131
第二节 逆变器 .....	140
一、逆变器的基本工作原理 .....	140
二、谐振型逆变器 .....	140
三、矩形波逆变器 .....	142
四、PWM 逆变器 .....	146
第四章 电源装置 .....	151
第一节 直流电源 .....	151
一、直流电源的分类 .....	151
二、直流电源实例 .....	156
第二节 不间断电源与频率变换装置 .....	157
一、CVCF 功能与组成 .....	158
二、高次谐波的消除方法 .....	161
三、逆变器系统的构成方式 .....	167
四、提高 CVCF 系统可靠性的方法 .....	167
五、逆变器并联运行的控制方式 .....	169
第三节 开关稳压器 .....	171
一、整流器 .....	171
二、DC-DC 变换器 .....	172
第四节 高频电源 .....	174
一、高频感应加热用电源 .....	174
二、电气加工机与电焊机用电源 .....	176
第五章 变速驱动装置 .....	180

第一节	变速驱动装置的种类	180
第二节	直流电动机的变速驱动	181
一、	控制原理	181
二、	晶闸管伦纳德方式	181
三、	斩波器	186
第三节	感应电动机的变速控制	190
一、	控制原理	190
二、	逆变器变速驱动感应电动机	194
三、	循环换流器变速驱动感应电动机	200
四、	晶闸管谢尔比斯方式变速驱动感应电动机	201
第四节	同步电动机的变速驱动	202
一、	控制原理	202
二、	自制式逆变器变速驱动同步电动机	202
三、	他制式逆变器变速驱动同步电动机	205
四、	循环换流器变速驱动同步电动机	206
第五节	电气牵引传动	207
一、	晶闸管伦纳德驱动方式	207
二、	斩波驱动方式	208
三、	逆变器驱动电车牵引的电动机	210
第六章	功率半导体器件应用电路实例	212
第一节	功率晶体管应用电路实例	212
一、	电焊机用逆变器	212
二、	通用逆变器	214
第二节	功率 MOS 场效应晶体管应用电路实例	214
一、	电源电路	214
二、	电动机控制电路	220
三、	照明电路	227



四、高频功率振荡电路 .....	232
五、开关电路 .....	233
第三节 静电感应晶体管应用电路实例 .....	236
一、基本应用电路 .....	236
二、开关电源 .....	237
三、开关方式的高电压电源 .....	237
第四节 绝缘栅双极晶体管应用电路实例 .....	238
一、通用逆变器 .....	238
二、在交流不间断电源 (UPS) 中的应用 .....	240
三、在交流伺服系统中的应用 .....	241
四、电梯的控制装置 .....	241
第五节 可关断晶闸管应用电路实例 .....	243
第六节 静电感应晶闸管应用电路实例 .....	246
一、静电感应晶闸管高频逆变器 .....	246
二、有源滤波器的无功功率补偿装置 .....	246
参考文献 .....	249

## 概 述

电力电子技术是功率半导体器件（又称电力电子器件）及其应用技术。电力电子学与信息电子学在技术上的主要不同点是功耗问题。信息电子技术涉及信息的检出、传送和处理，多采用低电平电路，一般对效率要求不高；而电力电子技术则应用变换、传送和控制功率的电路，对效率要求较高。

电力电子技术应用有两大特点，第一，应用的电压和电流的变化较大即功率范围极宽。电流可小到几十毫安，大到几十万安培；电压可低到几伏，高到几十万伏。第二，主回路采用功率半导体器件，并对其进行控制。也就是说电力电子技术是电力、电子和控制三者密切结合的技术。

随着电子技术的发展，新的功率半导体器件不断涌现，例如，可关断晶闸管（GTO），功率场效应晶体管（MOSFET），静电感应晶体管（SIT），绝缘栅双极晶体管（IGBT）等，这样，使电力电子装置小型轻量化、高效率化、廉价化和高可靠性化，这就不断地扩大了电力电子技术的应用领域。本书主要介绍这些新型功率半导体器件及其应用技术。

# 第一章 功率半导体器件

## 第一节 功率晶体管

### 一、功率晶体管的结构与特性

1. 功率晶体管的用途与特点 功率晶体管 (GTR) 是一种双极型大功率晶体管。它具有自关断能力、开关时间短、安全工作区宽等特点。它不仅能适用于高频领域工作, 而且能使变流装置结构大为简化, 可靠性高, 在交流调速、各类电源装置等变流技术中获得了广泛的应用。目前功率晶体管的容量已达  $400\text{A} / 1200\text{V}$ 、 $1000\text{A} / 400\text{V}$ , 耗散功率  $3\text{kW}$ 。

2. 功率晶体管的结构 功率晶体管都采用三重扩散台面型结构, 其优点是结面积较大, 电流分布均匀, 易于提高耐压和耗散热量; 但电流增益较低。为此采用达林顿连接方法, 它是提高增益的有效方式。

目前最通用的是达林顿模块, 如图 1-1 所示。它是将单个或多个达林顿结构的 GTR 及其辅助电路元器件, 如续流二极管、稳定电阻、加速二极管等制作在一起, 再用环氧树脂密封而成, 结构紧凑、功能强、体积小。

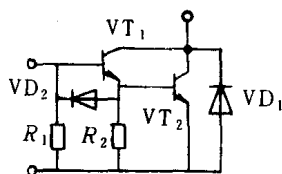


图 1-1 达林顿模块结构

### 3. 功率晶体管的特性与参数

(1) 集电极发射极间电压 若在集电极发射极间加正向电压时, 则集电极发射极间电压  $V_{CE}$  与集电极电流  $I_C$  之间的关系如图 1-2 所示。这条曲线随基极发射极间的偏置条件不同而异。基极发射极反向偏置时的集电极发射极间保持电压  $V_{CEX(SUS)}$  是功率晶体管用作开关时的重要参数之一, 感性负载时, 晶体管保持电压较高, 则容易损坏晶体管, 因此将功率晶体管用于逆变器电路中时, 有必要缩短晶体管的关断时间。图 1-2 中的  $V_{CE0(SUS)}$  表示基极与发射极间开路的保持电压。

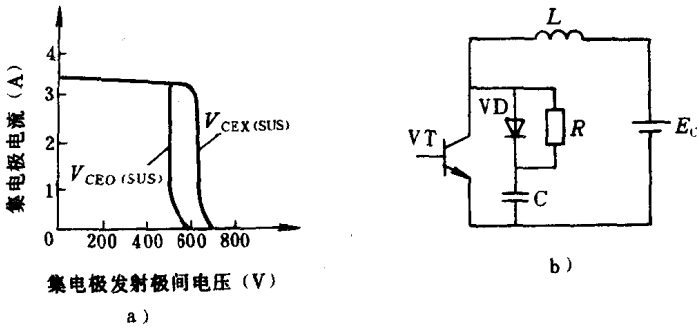


图 1-2 集电极发射极间电压特性

一般情况下, 200V 的电源装置要选用  $V_{CEX}$  为 600V 的晶体管。400V 的电源装置要选用  $V_{CEX}$  为 1000V 的晶体管。为防止浪涌电压损坏晶体管, 要在电路中接入由电容、电阻和二极管制成的浪涌电压吸收电路。

(2) 功率晶体管输出特性与电流增益 功率晶体管输出特性具有恒流特性, 如图 1-3 所示。功率晶体管主要用于开关工作, 因此, 饱和压降  $V_{CE(sat)}$  是极其重要的参数。 $V_{CE(sat)}$  决定功率晶体管工作时的功率损耗, 希望  $V_{CE(sat)}$

越小越好。如果基极电流加大，晶体管进入深度饱和区， $V_{CE(sat)}$ 就降低，功耗小。因此，从功耗观点看要深度饱和。但带来的是关断时间加长，安全工作区变窄，因此不希望进入深度饱和。

晶体管电流增益  $\beta$  与集电极电流和 PN 结温度有关，如图 1-4 所示。在大电流条件下， $\beta$  随 PN 结温度升高而减小。应用时希望  $\beta$  大一些为好，但要兼顾其它特性，一般限制在 100~300 之间。达林顿结构晶体管的电流增益较大。

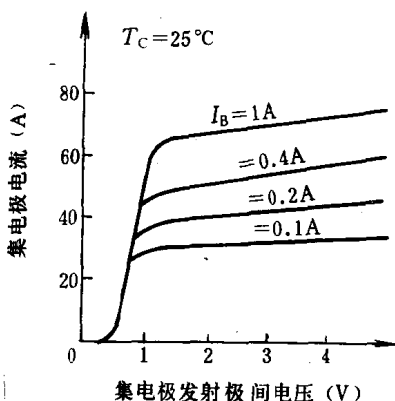


图 1-3 晶体管输出特性

(3) 开关特性 晶体管开关工作时，关断与开通过程的时间称为开通时间  $t_{on}$  与关断时间  $t_{off}$ ，这些时间与晶体管集电极电流和基极电流有关。关断时间  $t_{off}$  包括存储时间  $t_s$  和下降时间  $t_f$ ， $t_s$  是电路设计时应该考虑的重要参数。

图 1-5 所示为 100A 达林顿晶体管的开关时间与集电极电流之间的关系。 $t_{on}$  和  $t_f$  随  $I_c$  增加而加长，但存储时间  $t_s$  在  $I_c$  增大到某一值以上时反而缩短。

一般来说，开关时间越短，工作频率就越高，晶体管工作频率可达几千赫。为了缩短开通时间，可以选择结电容小的管子或提高基极正向驱动电流的幅值和陡度。为了缩短关断时间，可以选择电流增益小的管子，防止深度饱和，增加反向偏置电流等。

电压上升率  $dv/dt$  和电流上升率  $di/dt$  将会影响晶体管开关过程中的工作，因为实际电路中必然存在电感和电容，过大的  $dv/dt$  和  $di/dt$  将增大管子中的瞬时电流或电压，可能导致运行点超过安全工作区，使管子损坏。

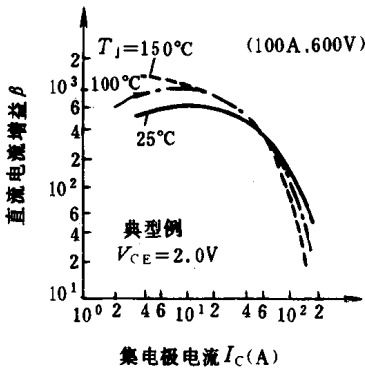


图 1-4 晶体管直流增益特性

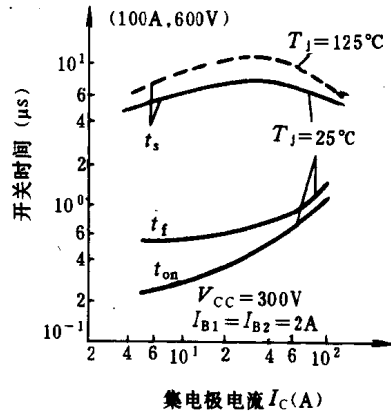


图 1-5 开关时间与集电极  
电流之间关系曲线

(4) 安全工作区 (SOA) 安全工作区是指功率晶体管能够安全运行的范围，又分为正向偏置安全工作区、反向偏置安全工作区和短路安全工作区。

1) 正向偏置安全工作区 正向偏置安全工作区是指晶体管基极加正向偏置电压时安全工作的范围，如图 1-6 所示。它是由直角坐标中 ABCDE 折线与坐标轴线所包围的面积，AB 段表示受最大集电极电流  $I_{CM}$  的限制，BC 段表示受最大允许功耗  $P_{CM}$  的限制，CD 段表示受正向偏置下二次击穿触发功率的限制，DE 段则受最大耐压  $BV_{CEO}$  的限制。图中实线折线是在直流条件下的安全工作区，称为直流安全工作区，它对应于最恶劣的条件，是功率晶体管可以

安全运行的最小范围，虚线图形对应于不同导通宽度的脉冲工作方式，随着导通时间的缩短，二次击穿耐压和允许的最大功耗均随之增大，安全工作区向外扩大，当脉冲宽度小于  $10\ \mu\text{s}$  时就已经不必考虑二次击穿的问题，若脉冲宽度减小至  $1\ \mu\text{s}$  或更小时，则根本不必考虑功耗与二次击穿的限制，相应的安全工作区变为由  $I_{\text{CM}}$  和  $BV_{\text{CEO}}$  所决定的矩形。

2) 反向偏置安全工作区 反向偏置安全工作区如图 1-7 所示，它表示功率晶体管在反向偏置下关断的瞬态过程。图 1-8 是试验电路及其实验时电压和电流波形。从图 1-7 的曲线中可见，基极关断反向电流绝对值越大，其安全工作区越窄。

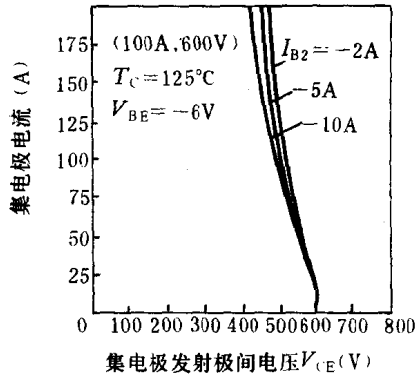
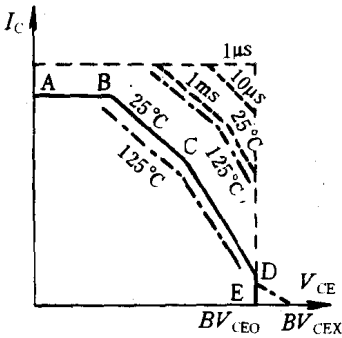


图 1-6 正向偏置安全工作区 图 1-7 反向偏置安全工作区

3) 短路安全工作区 短路安全工作区表示电子装置出现故障或工作异常时晶体管不损坏的界限，即在短路安全工作区内，短时间流过极大电流也不会损坏晶体管。

例如，如果逆变器中采用较宽短路安全工作区的晶体管，即使负载短路时，晶体管也不会损坏，可以重新启动使

逆变器正常工作，因此这就极大地提高了逆变器的可靠性。

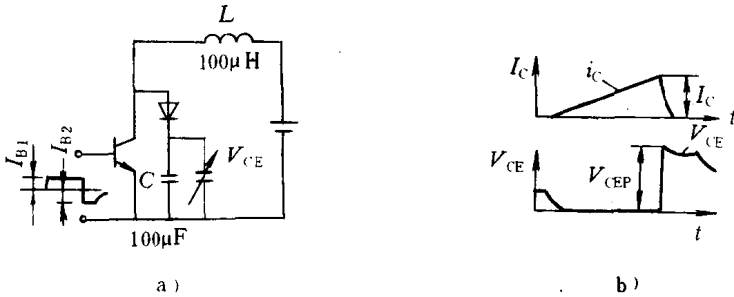


图 1-8 反向偏置安全工作区试验电路及其电压电流波形

a) 试验电路 b) 电压电流波形

图 1-9 所示是短路安全工作区试验电路。图 1-10 表示

试验结果。图中的纵坐标表示破坏值的概率，横坐标表示脉冲宽度，○表示非破坏情况，×表示破坏情况。负载短路时，电路阻

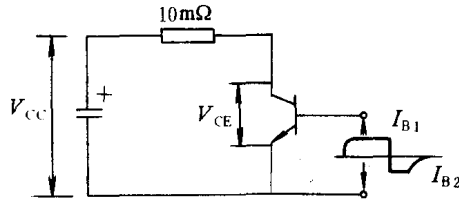


图 1-9 短路安全工作区试验电路

抗仅为配线阻抗，其值很小，电源电压都加到晶体管上。因此晶体管功耗较大，晶体管损坏与否与电源电压有关。

(5) 温度特性与散热 半导体器件的特性参数受温度影响较大，因此正确使用功率晶体管必须采取有效散热措施，确保功率晶体管不超过规定的结温最大值。

在高频开关条件下工作的功率晶体管，其功耗由静态导通功耗和动态开关损耗两部分组成，工作频率越高，开关损耗越大。设法改变功率晶体管工作点在开关过程中的轨迹，



则可大大减小甚至消除动态开关损耗。例如采用缓冲电路即可实现这一目的,在具有感性负载电路中,功率晶体管的开关轨迹如图 1-11 中曲线 A、B 所示;若采用复合缓冲电路,功率晶体管开关轨迹如图中 C、D 曲线所示,显然大大降低了功率晶体管上的功耗。若采用新型的软性开关电路——零电压零电流谐振开关电路,功率晶体管的开关轨迹则如图中曲线 E 所示,几乎不产生开关损耗。

## 二、功率晶体管驱动电路的设计

### 1. 功率晶体管的驱动方式

功率晶体管的驱动方式有两种,即直接驱动方式和隔离驱动方式。

直接驱动方式又分为简单驱动、推挽驱动和抗饱和驱动三种基本类型。图 1-12 示出直接驱动方式的三个基本类型电路。图 1-12a 是最简单的基极驱动方式,其输入信号  $V_i$  可由 TTL 电路直接提供,采用双电源以建立快速关断反向电流,若工作速度要求不高,也可采用单电源,此时将负电源

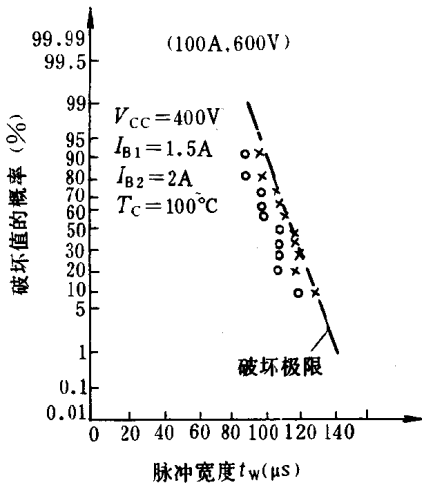


图 1-10 短路安全工作区的试验结果

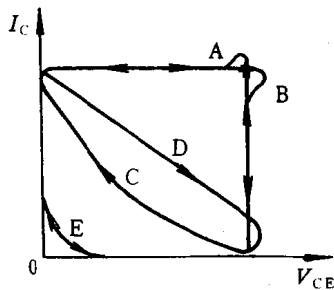


图 1-11 功率晶体管的开关轨迹