

电力电子技术

〔英〕C.W.兰德 著

郭彩霞 温绍森 李佑持 译

张明勋 校



机械工业出版社

本书介绍电力半导体器件的结构、原理、特性及其应用，主要介绍了电力半导体器件（如二极管、晶闸管、双向晶闸管和电力晶体管）在整流、逆变、变频、换向、滤波、交流电机和直流电机控制及其它方面的应用。

本书共分为十章，第一章详细介绍了电力半导体器件，其它各章介绍这些器件的应用及其特性，每章后还附有难度不同的例题，可以帮助读者掌握基本原理及解决实际问题的方法。

本书内容由浅入深，大量的例题具有实用价值，可为从事电力电子技术工作的技术人员及高等院校师生参考。

Power Electronics

Cyril W. Lander

McGRAW-HILL Book Company (UK) Limited

Copyright © 1981

电力电子技术

[英] C.W. 兰德 著

郭彩霞 温绍森 李佑持 译

张明勋 校

机械工业出版社（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

北京市振华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $15\frac{3}{4}$ · 字数350千字

1987年1月北京第一版·1987年1月北京第一次印刷

印数 0,001—4,030 · 定价3.30元

统一书号：15033 · 6357

目 录

第一章 整流器件	1
1-1 二极管.....	1
1-2 晶闸管.....	3
1-3 双向晶闸管.....	6
1-4 电力晶体管.....	7
1-5 晶闸管的触发要求	11
1-5-1 触发电路的要求	14
1-5-2 典型的触发电路	16
1-5-3 触发电路的控制特性	19
1-6 额定值	19
1-7 冷却	22
1-8 例题	26
第二章 整流电路	36
2-1 电路术语	36
2-2 换相二极管	37
2-3 单相半波(或单拍)	38
2-4 双相半波(或单拍)	43
2-5 单相桥(或双拍)	46
2-5-1 不可控	46
2-5-2 全控	49
2-5-3 半控	50
2-6 3相半波(单拍)	52
2-7 6相半波(单拍)	58
2-8 3相桥(双拍)	64
2-9 12脉波电路	71
2-10 变压器的额定值.....	72

2-11 小结.....	74
2-12 例题.....	75
第三章 变流器的工作情况	103
3-1 重叠.....	103
3-2 功率因数.....	111
3-3 逆变.....	112
3-4 调节.....	117
3-5 P脉波变流器采用的公式	119
3-6 例题.....	121
第四章 直流电网换相.....	141
4-1 并联电容.....	141
4-2 谐振关断.....	147
4-3 耦合脉冲.....	152
4-4 依靠另一负载晶闸管进行换相.....	156
4-5 用公式进行小结.....	164
4-6 例题.....	167
第五章 频率变换	189
5-1 周波变流器.....	189
5-1-1 原理.....	189
5-1-2 闭锁组的运行.....	192
5-1-3 环流方式.....	200
5-1-4 控制.....	203
5-2 包络式周波变流器.....	205
5-3 具有中心抽头的单相逆变器.....	207
5-4 单相桥式逆变器.....	211
5-5 3相桥式逆变器	219
5-6 恒流源逆变器.....	225
5-7 大功率晶体管逆变器.....	228
5-8 逆变器的功率反馈.....	229

5-9 例题.....	230
第六章 应用	255
6-1 接触器.....	256
6-2 加热.....	258
6-3 调压	270
6-4 倍压器	273
6-5 备用逆变器	274
6-6 并联联结	276
6-7 串联联结	278
6-8 电化	281
6-9 高压直流输电	286
6-10 例题.....	287
第七章 谐波	303
7-1 谐波分析	303
7-2 负载侧谐波	306
7-3 电源侧谐波	308
7-4 滤波器	313
7-4-1 整流器输出平波器	313
7-4-2 逆变器的输出滤波器	315
7-4-3 交流电网滤波器	316
7-4-4 射频干扰的抑制	317
7-5 例题	319
第八章 直流电机的控制.....	349
8-1 电机的基本方程	349
8-2 变速传动	352
8-3 反馈控制环节	359
8-4 牵引传动	365
8-5 有关工业应用的考虑	373
8-6 例题	374

第九章 交流电机控制	397
9-1 电机的基本方程.....	397
9-1-1 同步电机.....	397
9-1-2 笼型感应电动机.....	402
9-1-3 滑环型感应电动机.....	410
9-2 用电压调节法控制电动机转速.....	411
9-3 恒压逆变器传动.....	413
9-4 恒流逆变器传动.....	421
9-5 采用周波变流器的电动机转速控制.....	424
9-6 晶体管逆变器传动.....	425
9-7 滑环型感应电动机的控制.....	427
9-8 无刷同步电机.....	431
9-9 传动的考虑.....	434
9-10 例题.....	434
第十章 保护	442
10-1 电流.....	442
10-2 电压.....	447
辅导习题	453
答案	460
术语注释	462
参考文献	472
名词索引	480

第一章 整 流 器 件

整流器件是只允许电流沿一个方向流通的器件，沿其阻断方向，只能够承受电压而不能流过电流。用于电力整流的四种主要器件是二极管、晶闸管、双向晶闸管和电力晶体管。后三种器件还具有在任一方向上都能承受电压的能力，因而是可控整流器件。^{[1]、[2]}

1-1 二 极 管

制造半导体电力二极管使用的有效材料是硅。半导体材料是介于绝缘材料和导电材料之间的一种材料，其电阻随温度升高而减小。

硅是周期表第Ⅳ族的元素之一，在硅原子结构的最外层轨道上有四个电子。如果掺入具有五个最外层电子的Ⅴ族元素，则在晶体结构中将出现自由电子。这些自由电子可使材料的导电性能显著提高。由于存在这些带负电荷的电子，故称这种材料为N型半导体。

如果在硅中掺入具有三个最外层电子的Ⅲ族杂质元素，则在晶体结构中，将出现一种能够接纳一个电子的空隙或空穴。可以认为，这种空隙能提供一个正的载流子，即所谓的空穴，从而使导电性能得到显著提高。这样掺杂的材料称为P型半导体。

掺杂（掺入杂质）的数量级是原子数的 10^7 分之一。在N型半导体中，多数载流子是电子，少数载流子是空穴。P

型半导体则恰恰相反。依照掺杂的程度， N 型半导体或 P 型半导体的电导率比纯硅的电导率大得多。

在 P 型和 N 型单晶材料中形成的结所构成的二极管示于图1-1。在结区中， N 区的自由电子和 P 区的自由空穴的扩散，使 N 侧带正电而 P 侧带负电。因此在结区存在一个约0.6V的势垒压降。

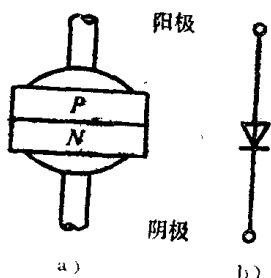


图1-1 二极管
a) 结构 b) 符号

二极管的特性见图1-2，并参阅图1-1a，在 P 侧（阳极）施加相对于 N 侧（阴极）为正的电压，一旦克服了0.6V的势垒压降，就会产生电流；在额定电流下，二极管两端有0.7V左右的正向压降。施加相反的电电压，则使运动的空穴和电子各自从结的 P 侧和 N 侧离开，从而阻止电流

的流通，使结能够承受电压而不致导通。此时结区存在着较高的电场梯度，因此可以认为结具有电容。热激发使一些晶体键断裂，形成少数载流子，这样便产生了一个很小的反向

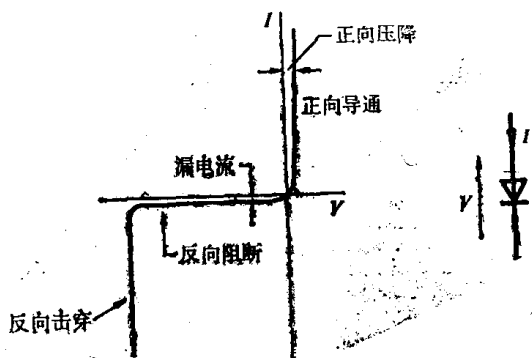


图1-2 二极管特性

电流即图上所示的漏电流。反向电压的增加将使结区少数载流子的加速度增大，当少数载流子通过碰撞具有足够的能量时，便发生雪崩倍增，最终结被击穿，形成反向击穿特性。典型的漏电流为数毫安。

1-2 晶 闸 管

晶闸管是具有第三个端子（门极）的一种 $PNPN$ 四层器件，如图1-3所示。例如：一个2000V、300A器件通常用一块直径为30mm、厚0.7mm的硅片制成。

当门极不与外部电路连接时， $PNPN$ 器件的特性示于图1-4。这时晶闸管可以看作由三个二极管串联而成，在任一方向上都不导电。其反向特性即阴极侧为正极性时的特性与二极管相似。其正向特性即阳极侧为正时的特性是：在电压超过中间的控制结的转折电压之前，除漏电流外没有其他电流。正

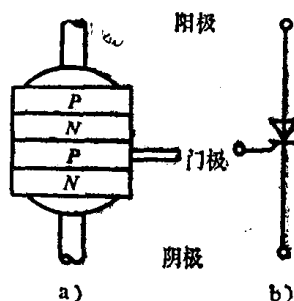


图1-3 晶 闸 管
a) 结构 b) 符号

向与反向转折电压的数值是相近的。当处于反向阻断状态时，几乎全部电压都由阳极 PN 结所承受，阴极 PN 结只承受10V左右的电压。一旦发生正向转折，则中间 P 区被来自阴极的电子所中和，此时器件可以被看作有两个结的导通二极管，并具有约二倍于二极管的正向压降。要使晶闸管进入稳定通态，阳极电流必须达到擎住电流值，并且不能下降到维持电流以下，如图1-5所示。擎住电流一般为保持电流的两倍。这两种电流值都非常小，大大低于满载额定值的1%。

当晶闸管处于正向偏置（阳极为正）时，可通过向门极

注入电流的方法来开通晶闸管,如图1-5所示。门极电流的作用是向中间 P 区注入空穴,这些空穴和由阴极 N 区注入的电子使控制结转折,从而使晶闸管开通进入通态。一旦阳极电流大于维持电流,门极电流便可以中断,且此后无论门极电路处于何种状态,晶闸管都能够维持导通。

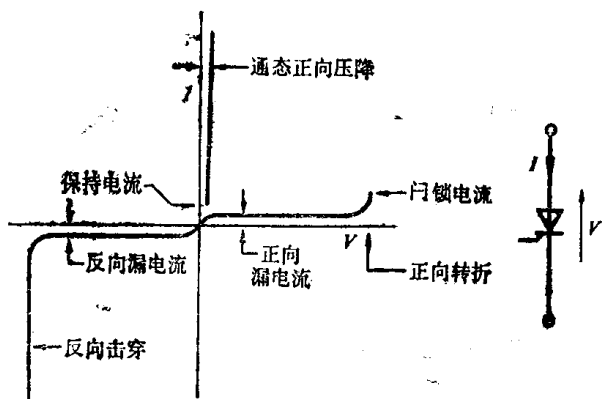


图1-4 无门极电流时的晶闸管特性

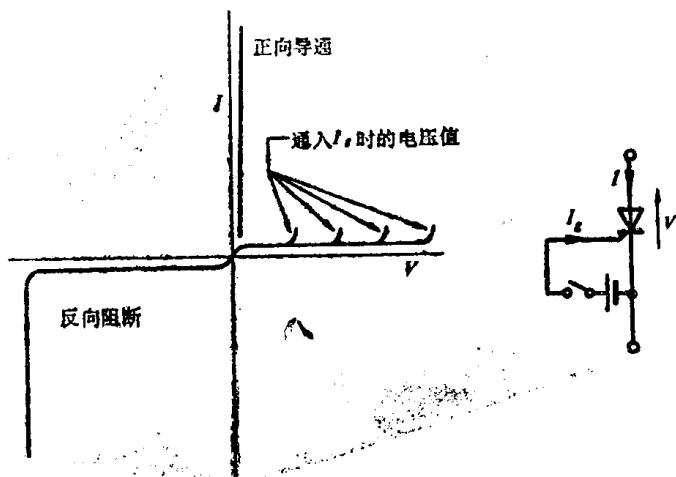


图1-5 有门极电流时的晶闸管特性

为了关断晶闸管，阳极电流必须降低到保持电流以下，并保持相对长的时间，从而使晶闸管控制结恢复阻断状态，并能够再次承受正向电压而不致导通。晶闸管更典型的关断方式是，其阳极电流在外部电路的激励下反向，并在一个很短的时间内流过反向电流，如图1-6所示，此时电荷在 PN 层中移动，当外侧的两个结的储存电荷被复合之后，能进一步阻断反向电流。电荷的储存是由于结区存在载流子。但此时控制结仍不能承受正向电压，而是需要经过一段时间，以使结区载流子充分复合。一般来说，必须经过 $10\sim 100\mu\text{s}$ ，才能再次承受正向电压而不导通。对于一个 20A 的晶闸管来说，典型的储存电荷是 $20\mu\text{C}$ 。

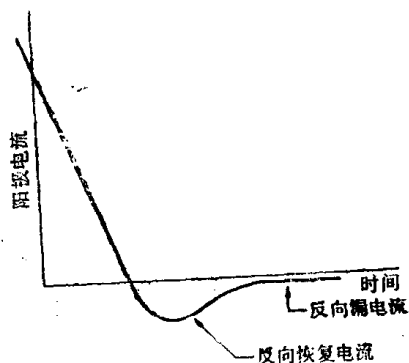


图1-6 典型的关断电流波形

如上所述，普通晶闸管只能通过使阳极电流下降至零值附近的方法来关断。下面简单地介绍一种有价值的器件，即可关断晶闸管。这种晶闸管能够通过反向门极电流来关断。可关断晶闸管与普通晶闸管的内部结构不同，若对门极施加反向电压（譬如 70V ），就可将一部分阳极电流分流至门极，并获得小于 $1\mu\text{s}$ 的关断时间。在关断的初始过程中，门极电流可以达到阳极电流的二分之一。额定反向断态电压小于正向断态电压。虽然导通时的要求与普通晶闸管相似，但是目前由于这种晶闸管需要附设门极电路、额定值受到限制以及损耗较大和价格等原因，使可关断晶闸管的应用受到限

制。

还有一种已经得到发展的器件。这是一个将晶闸管与一个反向导通二极管组合在一块硅片上的器件。这种器件反向导通而正向可控（与普通晶闸管相同）。这种逆导晶闸管用于如图5-20所示的逆变电路。在该种电路中一个逆导晶闸管能够代替并联的一个晶闸管和一个二极管。

1-3 双向晶闸管

双向晶闸管是一种图1-7所示的五层器件。它在 T_1 和 T_2 端子之间的任一方向上都有一个 PNP 通路。因此，如图中清楚表明的符号那样，器件沿任一方向都能导通。一个双向晶闸管能够具有图1-7c表示的两个反并联晶闸管的作用。

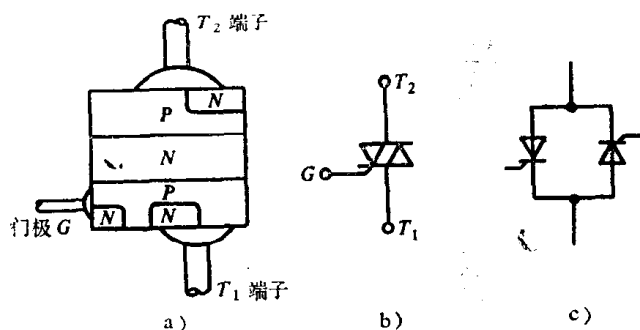


图1-7 双向晶闸管

a) 结构 b) 符号 c) 等效电路

对于双向晶闸管来说，正、负门极电流都能使其开通，进入通态。但是在 T_2 为正时注入正的门极电流、 T_1 为正时注入负的门极电流的情况下，开通最为灵敏。在实际中，通常采用负门极电流，这一点和器件特性一起都表示在图1-8

中。

在1-6节中列出的最大稳态和瞬态的额定值都低于普通晶闸管的数值。

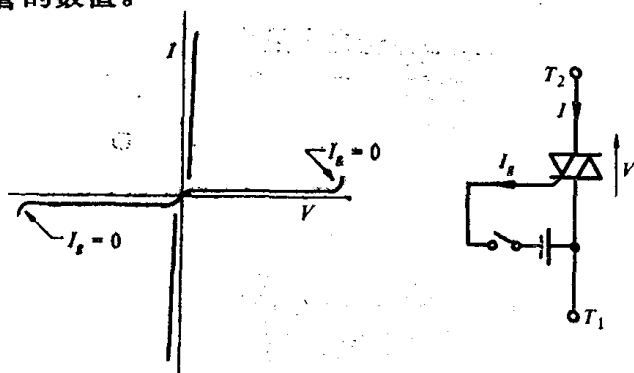


图1-8 双向晶闸管特性

1-4 电力晶体管

电力晶体管是一种如图1-9和1-10所示的NPN或PNP结构的三层器件。在其工作范围内，集电极电流 I_c 是基极电流 I_b 的函数，若给定集电极-发射极电压 V_{CE} ，则基极电流

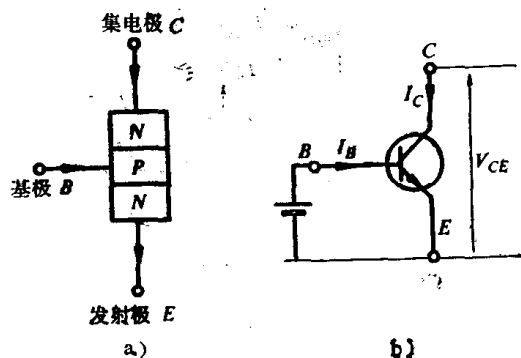


图1-9 NPN晶体管

a) 结构 b) 带有电流方向的符号

的变化将使集电极电流相应产生一个放大的变化。两电流的变化比率大致在15~100以内。对于图1-9b所示的电路，其晶体管的特性示于图1-11。与其他器件类似，当电压升高到击穿电压时，电力晶体管也会发生雪崩击穿。如果集电极-发射极电压反向，则基极-发射极结在较低的电压（譬如10V）下，便可被击穿，因此晶体管不能反向使用。但是，若将晶体管与一个二极管串联，就能够用于可能出现反向电压的电路。

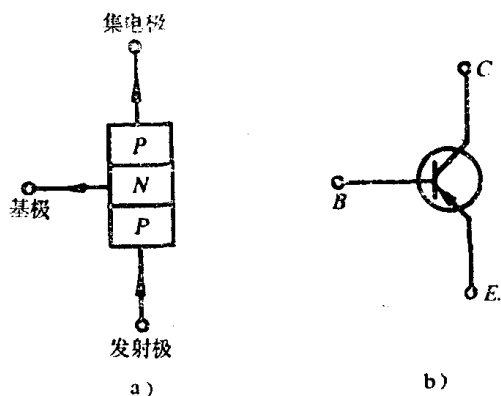


图1-10 PNP晶体管

a) 结构 b) 符号

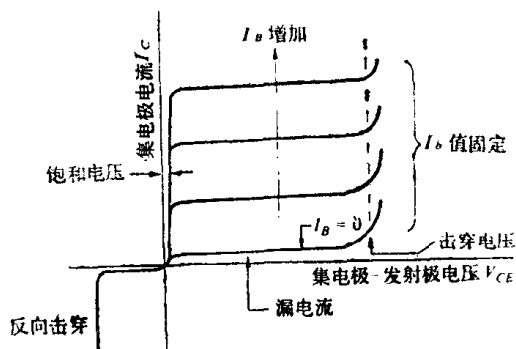


图1-11 NPN晶体管的共发射极特性

图1-10中示出的 PNP 型晶体管与 NPN 型晶体管的特性相似，只是电流，电压的方向相反。

晶体管的功率损耗是集-射极电压与集电极电流乘积的函数。参看图1-12，如果通过改变基极电流来控制集电极电路中的负载电流，则在晶体管上可能出现高电压。例如，如果 $V = 200V$ ，而将基极电流 I_b 调至某一值（譬如说，使 10Ω 的负载通过 $10A$ 电流），则晶体管将承受 $100V$ 的电压。同时晶体管将产生 $1kW$ 的功率损耗，使总效率只有 50% 。考虑到元件损耗、额定值和总效率，这个条件是不能接受的。

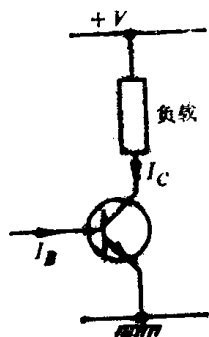


图1-12 晶体管的集电极负载

实际上，晶体管在电力应用中是以开关形式工作的。当基极电流为零时，晶体管实际上处于开路状态，如图1-13a所示。当基极电流是器件的饱和电流时，晶体管实际上是闭合的开关。晶体管是可控元件，通过改变基极电流可控制集电极电流的大小。为了控制晶体管保持饱和状态，同时避免过度的基极负荷，基极电流应正好满足饱和条件。导通初始瞬间，基极电流要高到足以实现快速导通。集电极电流的任何变化必须与基极电流的变化相匹配。在关断时，基极电流应以集电极电流跟得上的速度下降，以免发生二次击穿（见10-1节）。当处于断态时，保持小的反向电流以防止集电极杂散电流。由于断态漏电流很小，通态有集电极电流时的饱和电压（图1-11）很低，晶体管作开关时的功率损耗很小。硅电力晶体管典型的饱和电压是 $1.1V$ 。

为了充分利用晶体管的容量，同时在开关过程中又不使

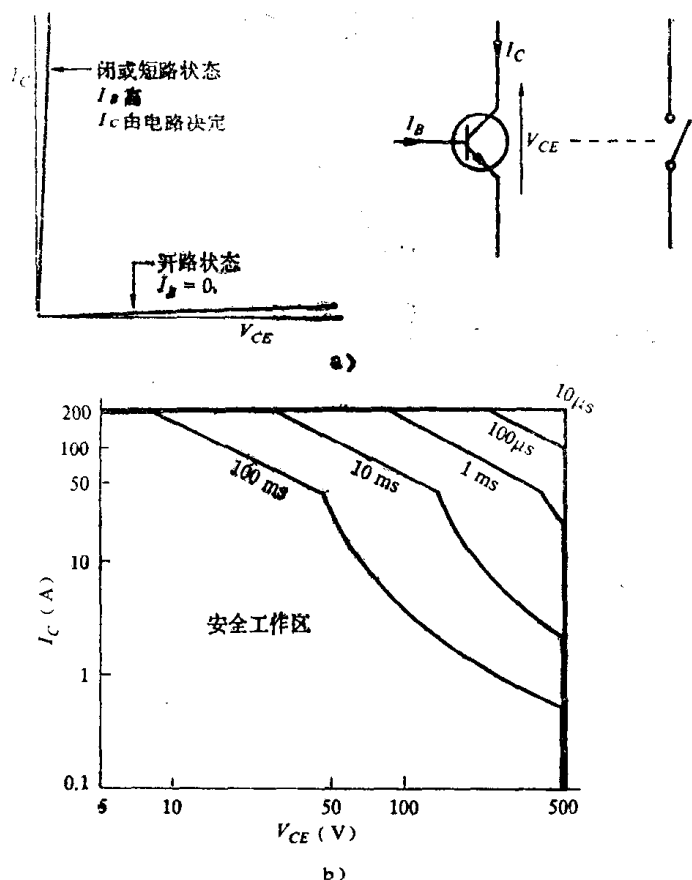


图1-13 作为开关的晶体管

a) 通态和断态 b) 典型的安全工作区

晶体管发生过热,可以使用图1-13b特性曲线的安全工作区。当在图1-13b所示的两个状态间通断转换时,要求在开关过程的全部时间内,使瞬时电压和瞬时电流值处于图1-13b所示的矩形内。仅当开关时间最短时,特性曲线才接近矩形,如图1-13b所示,随着开关时间的延长,应严格限制允许的瞬态功率损耗,其右上角被分隔的区域以外的部分是安全工

作区。注意安全工作区的图用的是对数坐标。

在开关期间，如果开关损耗允许提高，则晶体管电压和流过晶体管的电流可以提高，电压、电流、开关时间的乘积给出了在开关过程中的能量损耗。当开关频率很高时，开关损耗将是主要的损耗。精确的开关损耗是随负载电路参数和基极电流而变化的函数。

晶体管的开关速度比晶闸管快很多，其典型的一次开关时间能够小于 $1\sim 2\mu\text{s}$ 。晶体管的基极驱动条件比晶闸管的门极条件更加复杂，例如，一个 30A 的晶闸管可以用 0.1A 的脉冲进行触发导通，而对于一个 30A 的晶体管则在整个导通期间，需要维持 2A 的基极电流。电力晶体管的过载额定

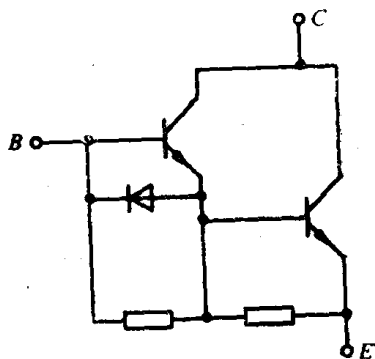


图1-14 电力晶体管的达林顿电路

值比晶闸管低得多。由基极电流控制的晶体管对负载电流有关断能力，而晶闸管在导通以后，门极便失去控制作用。

如图1-14所示，若电力晶体管从另一个晶体管获得基极驱动电流，即达林顿电路，则电流增益能够得到很大提高。驱动晶体管能够与主晶体管组合在同一块硅片上，总的电流增益可达250。但是，这种电路的开关时间较长。

1-5 晶闸管的触发要求

晶闸管的门-阴极特性相当于一个粗制的 PN 结的特性。单个晶闸管具有图1-15a所示的特性，而对于某一批晶闸管产品来说，其特性分布在一个相当大的范围内，所有晶闸