

工程院校电工技术类专业辅助教材

电力电子技术题例与电路设计指导

石 玉 栗书贤 王文郁 编



机械工业出版社

目 录

前 言		第十一章 主电路计算	143
第一章 电力半导体器件	1	第十二章 触发与驱动电路的参数选择 与校验	154
练习题	14	第十三章 直流调速控制系统的选择与 计算	168
第二章 基础练习	15	第十四章 继电器—接触器控制电路电 器的选择与接线图的绘制	183
练习题	20	第十五章 电气控制装置的结构 设计	189
第三章 整流电路	21	第十六章 设计举例	191
练习题	66	附录	223
第四章 触发电路	68	附录 A 变压器、电抗器、脉冲变压器 结构参数计算	223
练习题	80	附录 B 集成触发器应用举例	233
第五章 同步	82	附录 C 变压器、导线参数表	237
练习题	89	附录 D 直流电动机技术数据表	247
第六章 斩波电路	91	附录 E 常用低压电器技术数据	255
练习题	101	附录 F 常用小功率电力电子元器件技术 数据	268
第七章 交流调压	102	附录 G 介绍几种实验装置	288
练习题	115	参考文献	295
第八章 逆变电路	116		
练习题	130		
第九章 保护电路	131		
练习题	134		
第十章 小功率电力电子电路设计内容 及设计方案的确定	135		

第一章 电力半导体器件

一、普通晶闸管

反向阻断型晶闸管是四层 (PNPN)、三端 (A、G、K) 半导体器件, 外形有螺栓形和平板形两种, 如图 1-1 所示。小功率晶闸管外形有的类似晶体管, 其塑封形式多种, 如图 1-2 所示。

普通晶闸管等效电路和图形符号如图 1-3 所示。

加正向阳极电压和足够大的正向门极电压可使晶闸管导通, 晶闸管导通后, 门极就失去控制作用, 因此门极只需加足够大的脉冲电压即可。要使已导通的晶闸管关断, 可将阳极电流降至维持电流以下即可实现。

二、可关断晶闸管 (GTO)

可关断晶闸管也是一个四层三端半导体器件, 其结构与伏安特性均与普通晶闸管相同, 图形符号如图 1-4 所示, 型号用 KG 表示。

由于采用了特殊工艺, 使晶闸管工作时处于接近临界饱和状态。这样当门极加正触发脉冲时可使晶闸管导通, 当门极加上足够的负脉冲时又能使导通着的晶闸管关断。因此, 可关断晶闸管是一种较理想的无触点直流开关元件, 特别适用于各种高速直流开关电路与逆变电路。

三、双向晶闸管 (TRIAC)

双向晶闸管是一种五层 (NPNPN) 半导体器件, 它有两个主电极 T_1 、 T_2 和一个门极, 从特性上看, 可以等效为一对反并联的普通晶闸管, 其内部结构、等效电路和图形符号如图 1-5 所示, 型号用 KS 表示。

双向晶闸管加正负触发脉冲都能使其导通, 但用负脉冲触发灵敏度高, 故多采用 G 接负, T_1 接正的脉冲触发。双向晶闸管工作时, 由于

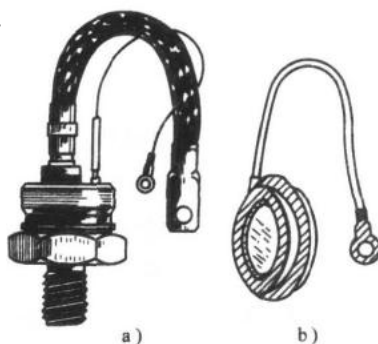


图 1-1 普通晶闸管外形

a) 螺栓式 b) 平板式

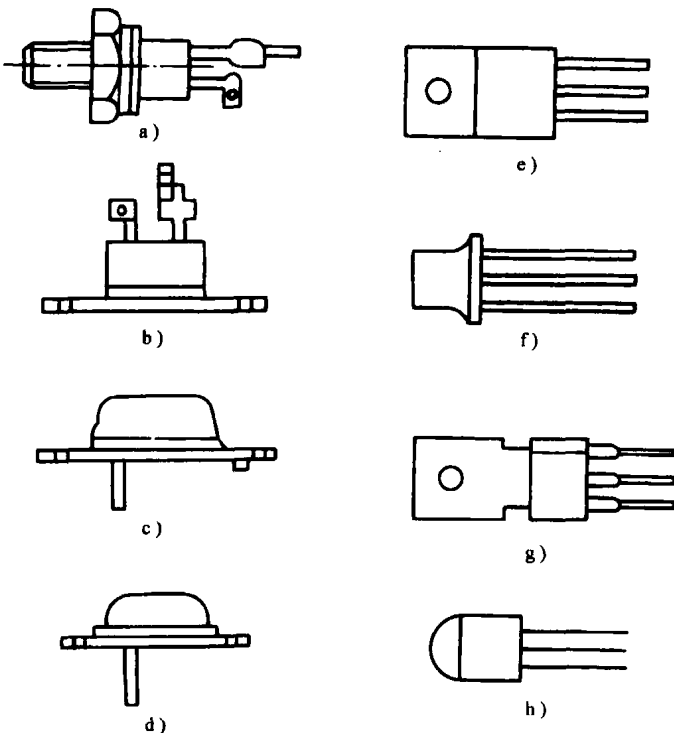


图 1-2 小功率晶闸管外形

a) 螺栓形 b) 扁平形 c) 晶体管形 d) TO-66CAN
e) 塑封形, TO-66 f) TO-5CAN g) 塑封形, TO-5 h) 塑封形, TO-92

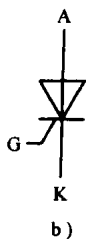
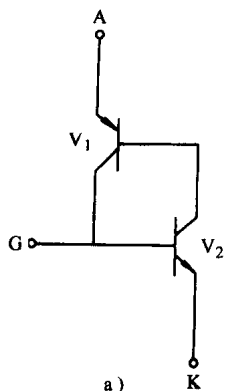


图 1-3 普通晶闸管的等效电路及图形符号
a) 等效电路 b) 图形符号



图 1-4 GTO 的图形符号

正反两个方向的灵敏度不同,可能会出现正负电流波形不对称,存在直流分量,解决的方法是采用强触发,通常触发电流的幅值(最大触发电流) $I_{Gm} > (2 \sim 4) I_G$ 。

用双向晶闸管来代替两只反并联的晶闸管可使主电路大大简化,触发电路设计也比较灵活,在交流电路中得到广泛的应用。

四、光控晶闸管

光控晶闸管也是一种 PNPN 四层半导体器件,利用光激发使之导通,其图形符号、内部结构及等效电路如图 1-6 所示。器件有两端的,

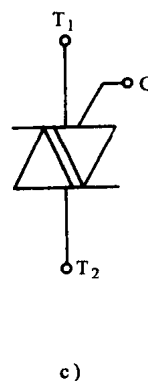
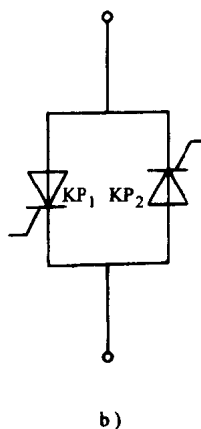
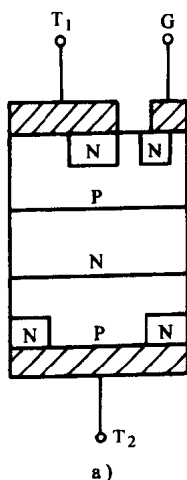


图 1-5 双向晶闸管的内部结构、等效电路及图形符号
a) 内部结构 b) 等效电路 c) 图形符号

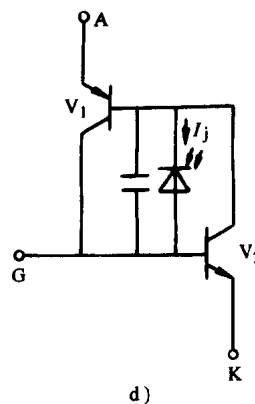
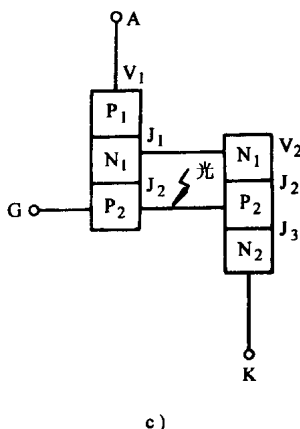
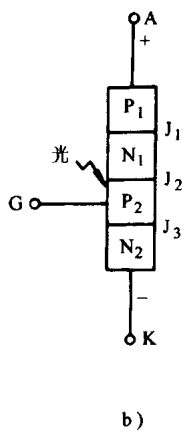
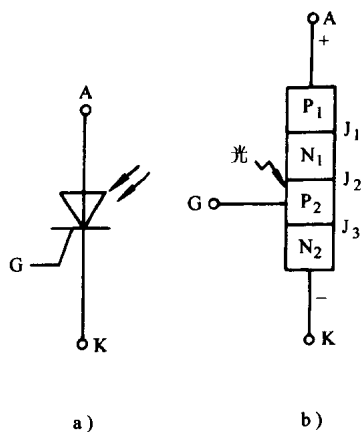


图 1-6 光控晶闸管

a) 光控晶闸管 b) 等效电路 c) 内部结构 d) 内部等效电路

也有三端的，三端器件也可用电流触发代替光激发，使得使用更加灵活，型号用 GK 表示。

使用时，通过负载加上正向阳极电压，由于 J_2 结反向偏置，阻止了电流流动。然而，射入光控晶闸管的光将在 J_2 结附近产生电子空穴对，随之有电流通过 J_2 结。如图 1-6d 所示，有光照时，等效光敏二极管电流 I_f 将增加，使等效的两晶体管 V_1 、 V_2 的基极电流增大，互联电路将产生很强的正反馈，从而使光控晶闸管导通。

光控晶闸管灵敏度与入射光的波长和阳极电压有关，一般来说，用红外线激发灵敏度较高。阳极电压高时，可使触发所需的辐照减小。

光控晶闸管的优点是响应速度快(一般约几微秒)，主电路与控制电路在电气上完全绝缘，这在高压直流输电线路中，使主电路与控制电路之间的绝缘问题变得简单。

五、逆导晶闸管 (RCT)

逆导晶闸管是由一个晶闸管和一个反并联的二极管集成在同一硅片内的电力半导体复合器件，因此，正向特性与普通晶闸管相同，反向特性如同一个二极管的正向特性，其内部结构、等效电路、伏安特性及图形符号如图 1-7 所示，型号用 KN 表示。与普通晶闸管相比，逆导晶闸管具有容量大、电压高、快速性好等优点，适用于反向不需要承受电压的场合。

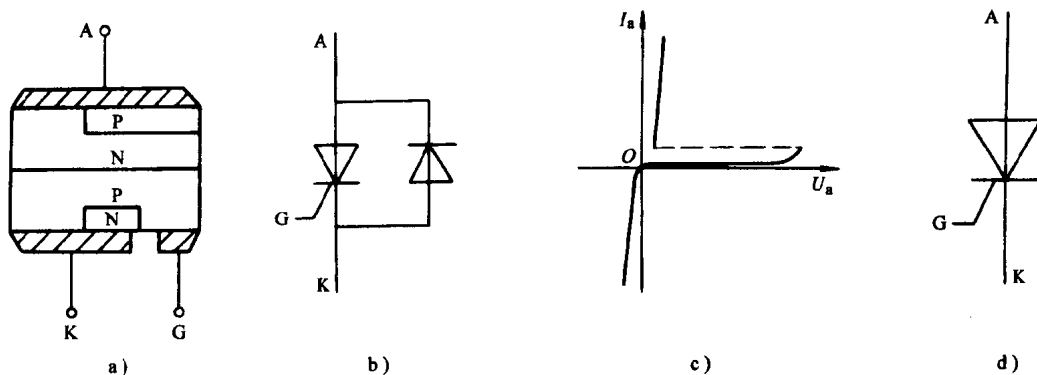


图 1-7 逆导晶闸管

a) 内部结构 b) 等效电路 c) 伏安特性 d) 图形符号

六、功率晶体管 (GTR)

通常将耗散功率(或输出功率)为 1W 以上的晶体管称为功率晶体管，其基本结构和图形符号均与普通晶体管相同，如图 1-8 所示。

随着电流和电压的增大，一些新的物理效应越来越显著，它影响着功率晶体管的电气特性及稳定性，为此设计制造出多种结构形式的功率晶体管。NPN 三重扩散台面型结构功率晶体管的典型结构，如图 1-9 所示。这里以该结构为例，介绍功率晶体管的结构特点。

① 它的管芯是由高掺杂的发射区 N^+ 层、中掺杂的基区 P 层、低掺杂的集电区 N^- 层及高掺杂的集电区 N^+ 层所组成。 N^- 层为原始单晶材料，其它两个 N^+ 层和 P 层是由三次扩散分别形成的。

② 管芯表面有一层二氧化硅膜或钝化膜保护层，因此该结构的可靠性较高。

③ 管芯外形为台面结构，集电结是平坦的平面结，它消除了平面管集电结边缘局部弯曲的结面，因而避免了电场集中效应。台面的表面造型是适当角度的正斜角，使集电结空间电荷区的暴露部分的宽度 L 大于体内部分的宽度 δ 。这样，结的击穿电压将由体内击穿电压决

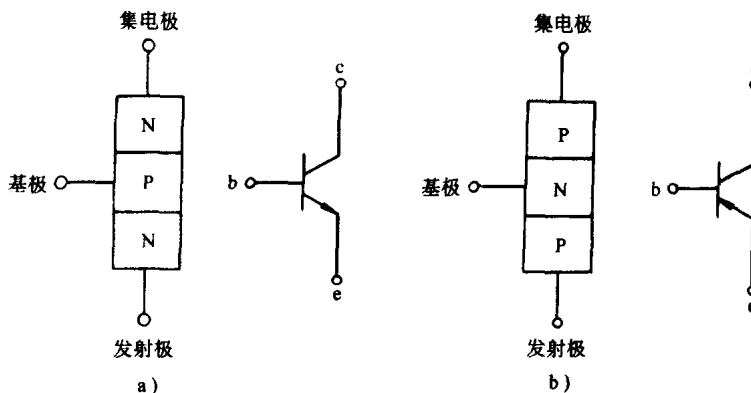


图 1-8 功率晶体管的结构和图形符号

a) NPN 管 b) PNP 管

定。

④ 集电结和发射结的面积都比较大, 电极图形常采用圆环形等图案, 故发射结电流分布较均匀, 有利于减弱大电流效应和改善二次击穿特性。

⑤ 高阻集电区 N^- 层为单晶材料, 掺杂均匀, 质量比外延材料好, 有利于保持电气性能一致, 提高抗二次击穿能力。另一方面, 只要适当控制 N^- 层厚度和它的掺杂浓度, 就能兼顾提高耐压和减小饱和压降的要求, 故可作成大电流和高电压的晶体管。

⑥ 集电区 N^+ 层和金属管座连成一体, 金属管座又和散热器连成一体, 这样既减小了晶体管的内部热阻, 又减小了它的外部热阻, 大大提高了晶体管的耗散功率 P_{CM} 。

功率晶体管的一个缺点是它的饱和状态中比较低的电流增益, 在整个导通周期需要相当大的基极驱动电流。如集电极电流为 100A 的功率晶体管在饱和模式中需要 10A 的连续基极电流。然而, 两个单个晶体管可以互连以使输入晶体管驱动另一个晶体管的基极, 这样合成的达林顿结构可提高直流电流增益。图 1-10a 表示串级的达林顿连接, 这里对于输出晶体管中 100A 的集电极电流, 驱动晶体管的输入基极电流一般需要 300~500mA。在新单块功率达林顿管中两个晶体管被制造在单一硅片上, 可以附加漏电流稳定电阻, 如图 1-10b 所示, 合成的三端器件具有大电流、高增益晶体管特性。

达林顿连接的一个缺点是集电极至发射极饱和电压比起相同定额的单个晶体管稍高, 因而通态功率损耗较大, 但与其它电

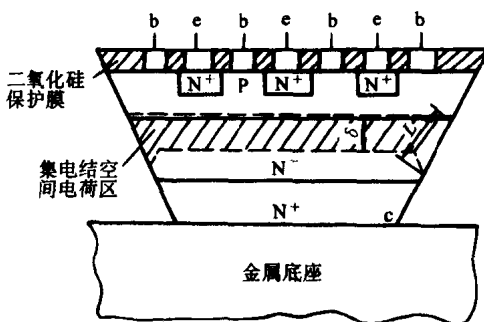


图 1-9 功率晶体管的典型结构

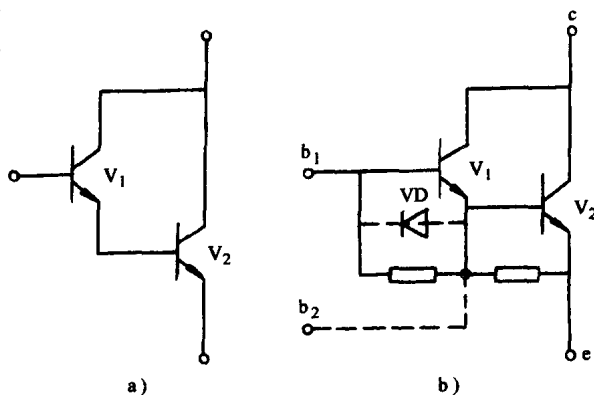


图 1-10 功率达林顿管

a) 基本达林顿连接 b) 单块达林顿晶体管的典型结构

力半导体器件相比也并不算高。

在基本的达林顿连接中,驱动晶体管必须在输出晶体管开始导通或关断之前导通或关断,这致使器件开关缓慢,为此引入加速二极管 VD,如图 1-10b 所示,它为 V_2 反向基极电流提供一条通路,因而加速了关断过程。在新型单块达林顿管中,输出晶体管的基极经常制成一个可以使用的外部端子,如图 1-10b 所示那样,以优化开关性能。

功率晶体管既可作开关器件用,也可作放大器件用,在与晶闸管竞争中,它更适用于开关领域。由于功率晶体管具有自关断能力和较高的工作频率,从而在斩波器、逆变器中得到了日益广泛的应用。

七、功率场效应晶体管 (MOSFET)

MOSFET 器件内部结构及图形符号如图 1-11 所示,它有漏极、源极和门极三个端子,分别相应于晶体管的集电极、发射极和基极。在没有门极偏置的情况下,由于两个背对背的 PN 结使源和漏极之间电流不能流动。但是,当绝缘的门极相对于源极为正时,电场吸引自由电子到 P 基片表面,形成 N 型沟道,使电子从源极流向漏极形成电流。图 1-11a 是 N 沟道增强型平面 MOSFET,是电压控制的电流器件,其导通完全是由于电子的移动。相反地, P 沟道 MOSFET,其导通完全是空穴的移动。

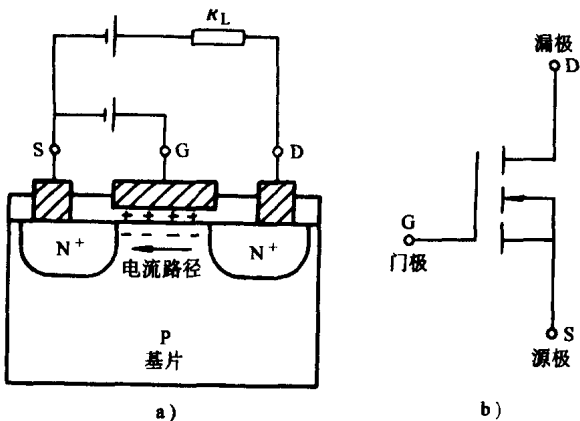


图 1-11 MOSFET 内部结构和图形符号

a) 内部结构 b) 图形符号

通常, MOSFET 导通只靠多数载流子,因此,消除了少数载流子的移动和延迟,故工作频率高。但图 1-11a 结构的特点是漏极和源极之间的导电通道距离长,通态电阻大,功率损耗大,一般仅用于 1W 以下。

新型功率 MOSFET 保留有平面 MOSFET 的高输入阻抗和高开关速度,但让电流从漏极垂直流动,而后横向通过通道区,如图 1-12 所示。这种垂直式 DMOS (双扩散 MOS) 通道长度取决于扩散过程,并且可以准确地控制,获得短的长度和低的通态电阻。

功率 MOSFET 的开关特性很大程度上取决于由器件的输入电容和门极驱动电路的原阻抗组成的串联 RC 电路的时间常数。导通时,当输入电容充电到阈值电压有一个初始的延迟,并且在门极电压达到完全导通所需要的值之前有进一步延迟,为了减小导通时间,必须采用低阻抗驱动源增加电容的充电电流,要求几安培的充电电流峰值。

功率 MOSFET 是多数载流子晶体管,当除去门极电压时,它立刻开始关断,但是开关速度受输入电容通过驱动电路放电速率的限制,直到输入电容放

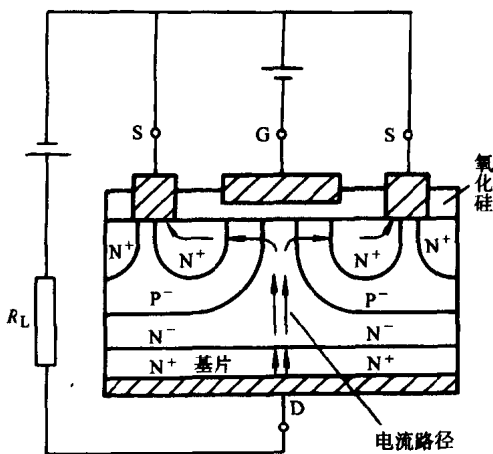


图 1-12 垂直通道 DMOS 功率 MOSFET 内部结构

电到门极阈值电压时关断才完成。

这种电容效应在大电流器件中 10ns 级开关时间的 MOSFET 是可能的，并且门极需要的功率很小，以致能直接从 CMOS 或 TTL 集成电路逻辑驱动功率 MOSFET。

与功率晶体管相比，MOSFET 通态压降大于功率晶体管通态压降，因此，通态损耗比功率晶体管大。功率 MOSFET 是一个电压控制的多数载流子器件，驱动功率可以忽略不计，而且驱动电路简单，开关时间短，在高频时具有较高的效率，从而在低功率高频电路应用中，已获得了牢固的立足点。

八、复合电力半导体器件

1. 绝缘门极晶体管 (IGBT)

功率 MOS 工艺中的新发展是绝缘门极晶体管 (IGBT) 或电导率可调整的场效应晶体管 (COMFET)。这种器件保留了发射极 MOSFET 的高输入阻抗并且又有和功率晶体管相差不多的低的通态电压降。然而，IGBT 的关断时间却远大于功率 MOSFET。IGBT 的内部结构和图形符号如图 1-13 所示。当施加正的门极—发射极电压时器件导通，减小这个电压到零时器件关断。

从目前情况看，100V 以下的阻断电压，功率 MOSFET 有较低的导通损耗，优于 IGBT。在较高的阻断电压时，MOSFET 的通态电阻急剧增长，详细计算表明，对于运行电压在 200V 以上和开关频率在 50kHz 以下的电动机的驱动应用 IGBT 占优势。

IGBT 有功率 MOSFET 的高输入阻抗和电压控制特性，但是在高集电极电流等级下门极关断能力降低。目前的发展状态是 IGBT 还不能达到 GTO 的电压阻断能力。

2. MOS 控制晶闸管 (MCT)

MOS 控制晶闸管的等效电路如图 1-14a 所示，实际上这种器件是由 MOSFET 和晶闸管并联集成的。当门极电压超过阈值电压时，在分路电阻中电流流通并且接通晶闸管。器件的内部结构如图 1-14b 所示。这种器件具有 MOSFET 的高输入阻抗，而且又有晶闸管的低导通压降。

3. 功率模块

为了增加经济性、可靠性和用户使用方便，1970 年后半导体器件开始朝模块装配发展。

在这些集成化的功率模块中，两个或更多的半导体芯片被安装在一个公共的金属基板上。芯片与基片之间的电绝缘是用氧化铍实现的，它在电气上是绝缘的，但是导热的，所以热量被有效地从芯片传到金属基板上。密封的或玻璃钝化的硅片被用来改善长期电压阻断稳定性。

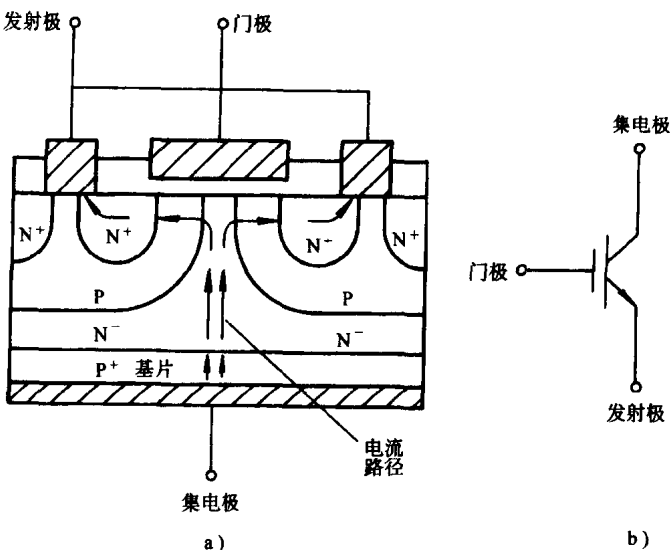


图 1-13 IGBT 的内部结构和图形符号

a) 内部结构 b) 图形符号

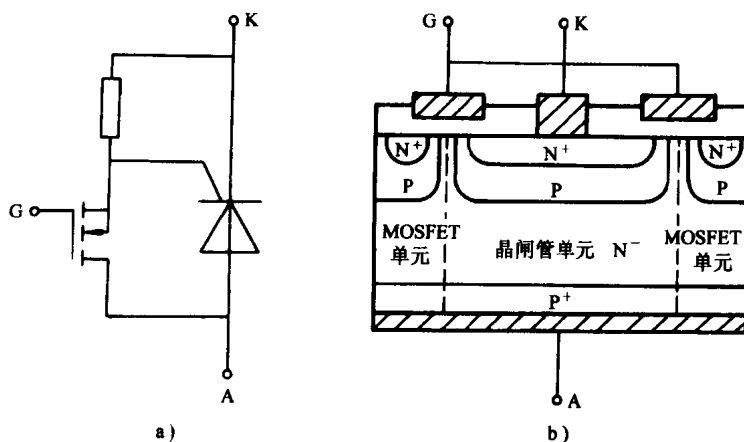


图 1-14 MOS 控制晶闸管的等效电路和内部结构

a) 等效电路 b) 内部结构

九、反向阻断四端晶闸管 (SCS)

反向阻断四端晶闸管又称硅可控开关，即 SCS。它是具有两个控制门极的 PNP 四层半导体器件，它的内部结构、等效电路和图形符号如图 1-15 所示。由图可知，它仅比一般晶闸管多了一个门极 G_A ，若在 G_A 上加一适当的偏压，可使门极 G_K 的灵敏度大为提高，也即可改变器件的动作特性。

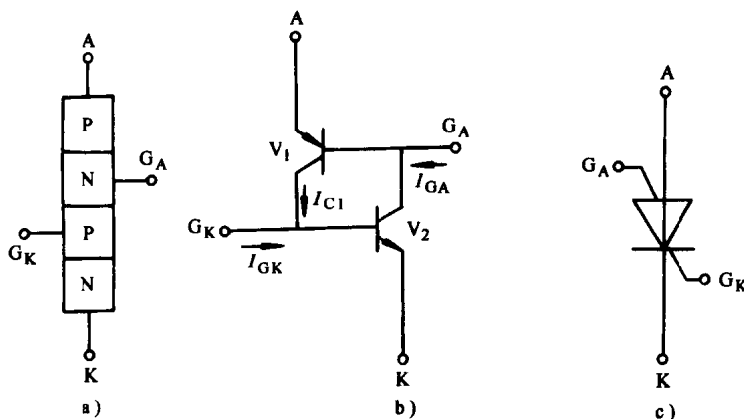


图 1-15 硅可控开关

a) 内部结构 b) 等效电路 c) 图形符号

门极 G_A 还可作为一个输出端子。由图 1-15b 可知， G_K 门极与一般晶闸管的门极功能相同。而门极 G_A 则有使 SCS 导通和关断两种功能，即给 G_A 施加负脉冲电压，可使 SCS 导通，反之，若施加正脉冲电压，又可使 SCS 关断。因此，在控制操作上，SCS 比一般晶闸管要简单、方便得多。

当在 SCS 的门极 G_A 上施加负脉冲电压时，晶体管 V_1 的基极与发射极间为正向偏压，所以 V_1 导通，产生 I_{C1} 作为 V_2 的基极电流，而使 V_2 导通。互联电路内将产生很强的正反馈， V_1 、 V_2 两管迅速达到饱和状态，从而使 SCS 导通。通常由门极 G_A 使 SCS 触发所需的门极电流比门极 G_K 触发时要大得多。

在 SCS 已经开通时，若在门极 G_A 施加正脉冲电压，使晶体管 V_1 的基极与发射极间为反

向偏压, 则可使 V_1 截止, 故 V_2 也截止, SCS 关断。

十、触发器件

常用的触发器件有单结晶体管 (UJT)、程控单结晶体管 (PUT)、双向触发二极管 (DIAC)、硅单向开关 (SUS) 以及集成触发器等。

1. 单结晶体管 (UJT)

单结晶体管的内部结构、等效电路及图形符号如图 1-16 所示。

工作时, 在 b_2b_1 间加上一定直流电压, 只要发射极电压 U_e (eb_1 间电压) 大于单结晶体管峰点电压 U_P , 则单结晶体管导通, 小于谷点电压 U_V , 单结晶体管关断, 利用这种特性可以组成各种电路。

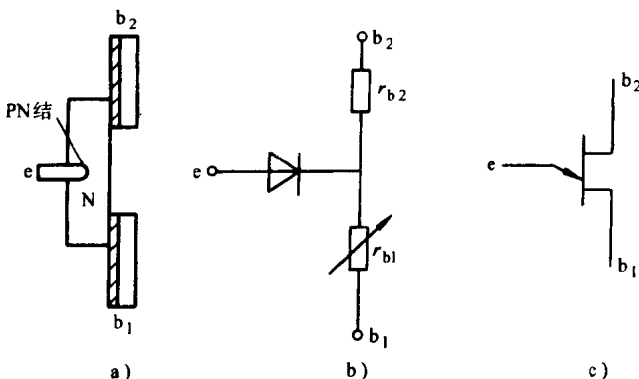


图 1-16 单结晶体管

a) 内部结构 b) 等效电路 c) 图形符号

2. 程控单结晶体管 (PUT)

程控单结晶体管与普通晶闸管的内部结构基本相同, 也是 PNP 四层半导体器件, 也有三个电极, 即阳极、阴极和门极。所不同的是, 程控单结晶体管的门极是从靠近阳极的 N 型半导体层引出的, 其内部结构、等效电路及图形符号如图 1-17 所示。当阳极 A 的电压低于门极 G 的电压时, 等效晶闸管 V_1 、 V_2 截止, 即程控单结晶体管关断。如果升高阳极电压, 当它高于门极电压时, 等效晶体管 V_1 导通, 由于互联电路中产生很强的正反馈, 所以两只晶体管 (即程控单结晶体管) 迅速饱和导通。

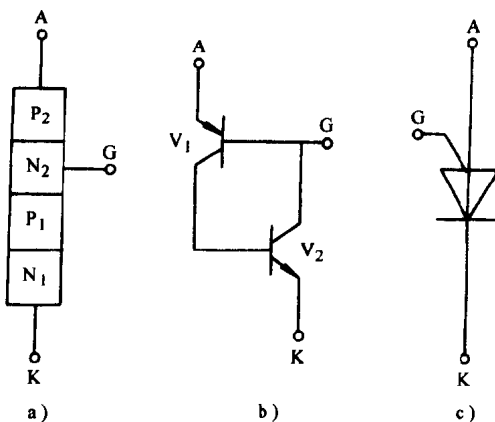


图 1-17 程控单结晶体管

a) 内部结构 b) 等效电路 c) 图形符号

程控单结晶体管 (PUT) 与单结晶体管 (UJT) 一样, 主要用于弛张振荡器, 如图 1-18 所示。E 经 R_1 和 R_2 给 PUT 加入适当的门极电压, 另一方面通过 R_3 对电容 C 充电, 当 C 两端的电压 (即 PUT 的阳极电压) 高于门极电压时, PUT 导通, 电容 C 通过 PUT 和 R_4 放电, R_4 两端的脉冲电压即可作为晶闸管的门极触发电压。当电容 C 的放电电流 (即 PUT 的阳极电流) 小于一定数值后, PUT 关断, 电容又开始充电, 重复上述过程。这样, R_4 两端即可得到具有一定频率的脉冲电压。改变 R_3 的数值, 便可改变电容 C 的充电速度, 因而可以改变振荡器的频率。当 PUT 的漏电流不足以触发晶闸管时, R_4 可以不用, PUT 的阴极可以直接接到晶闸管的门极。

3. 硅单向开关 (SUS)

它是由一个程控单结晶体管 (PUT) 和一个稳压管 (V) 组成, 其等效电路和图形符号如图 1-19 所示。图中 A 为阳极、G 为门极、K 为阴极, 稳压管跨接在门极和阴极之间。

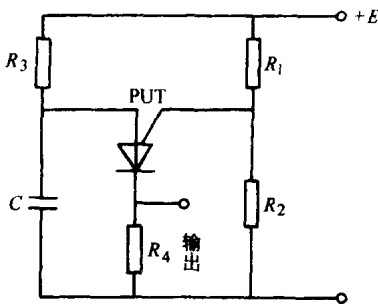
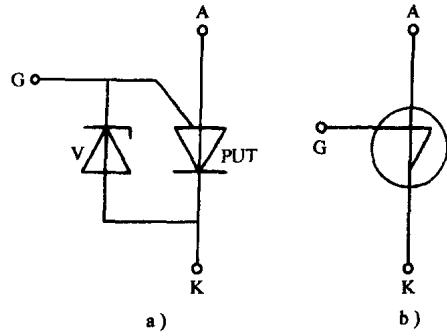


图 1-18 PUT 弛张振荡器

图 1-19 硅单向开关
a) 等效电路 b) 图形符号

硅单向开关的伏安特性曲线如图 1-20 所示。当正向阳极电压 U_{AK} 上升到稳压管的击穿电压 U_S (通常为 $6 \sim 15V$) 时,其内部的 PUT 的阳极-门极 P-N 结因正向偏置而导通,因此, SUS 迅速导通,使阳极与阴极间呈一低电阻值。SUS 的反向耐压值 U_R 比正向转折电压高。

4. 双向触发二极管 (DIAC)

它是 NPNPN 五层半导体器件,可看成由四层半导体器件反并联而成,其内部结构、等效电路及图形符号如图 1-21 所示。它不分阳极和阴极,因此,不管外加电压的极性如何,只要外加电压值大于双向触发二极管的触发电压,它均会因雪崩击穿而导通。

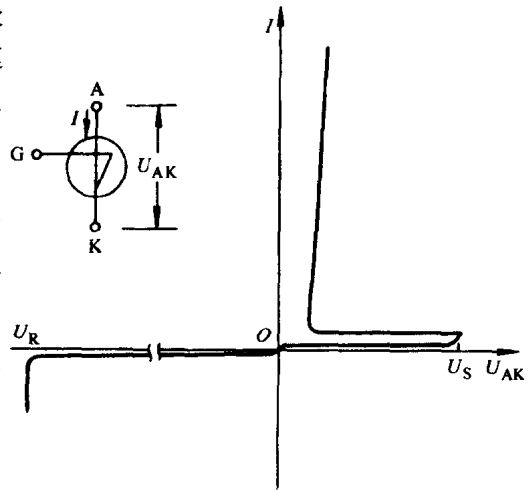


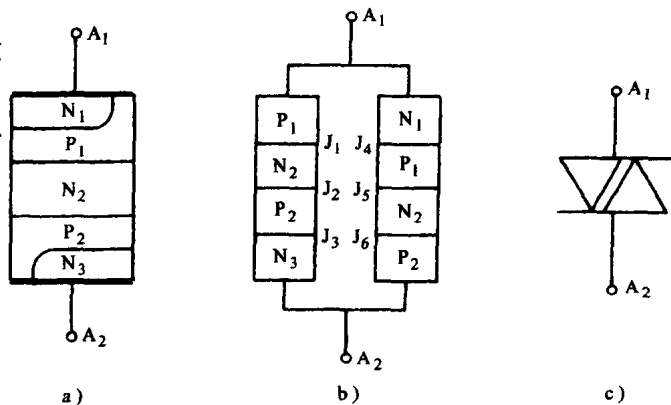
图 1-20 SUS 伏安特性曲线

双向触发二极管的伏安特性曲线如图 1-22 所示。

5. 集成触发器

触发电路集成化,不但能简化电路,而且有移相性能好、输出电流大等优点,因此发展很快。目前常用的有 KC01、KC02、KC04~KC11 等多种。使用时应注意管脚的外围电路及电源的正负极性,并按要求把线路焊好,测试有关端子波形是否正确,脉冲是否能够移相,幅值、宽度是否满足要求,一切正常后,再与主电路接好。详细结构及原理可参见产品说明书及有关资料,这里不再叙述。

随着电力半导体器件的广泛应用,新的触发器件不断出现,使触发灵敏度、可靠性都有很大提高,从而

图 1-21 双向触发二极管
a) 内部结构 b) 等效电路 c) 图形符号

使触发电路的使用变得更加灵活和多样。

例 1-1 使晶闸管导通的条件是什么？

- 答**
- ① 加正向阳极电压。
 - ② 同时加上足够的正向门极电压。
 - ③ 并且要有足够的触发功率。

例 1-2 晶闸管导通后，移去门极电压，晶闸管是否还能继续导通？为什么？

答 能。这因为晶闸管可看作一个 PNP 型与 NPN 型晶体管互联的器件，如图 1-23 所示。晶闸管一旦导通后，即使除去门极电压，使 $I_g = 0$ ，但复合管中的 V_2 仍保持着远大于触发电路的基极电流，使晶闸管继续导通。

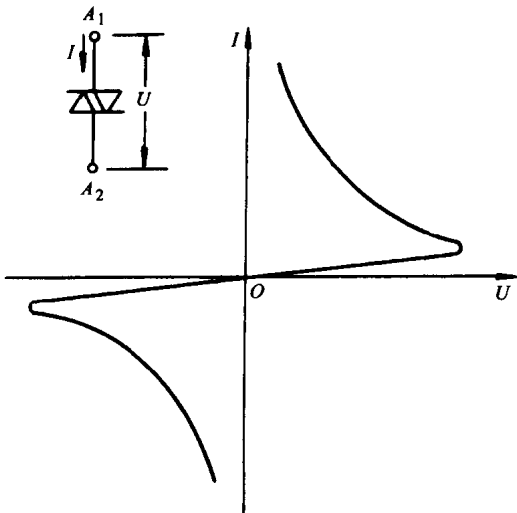


图 1-22 双向触发二极管伏安特性曲线

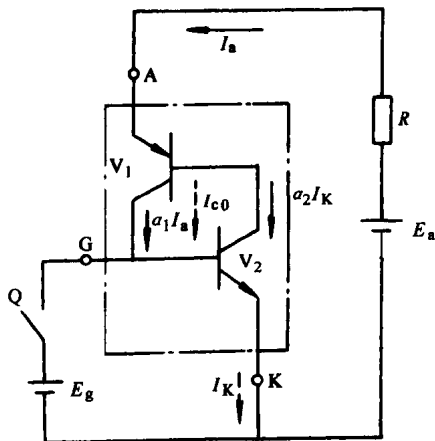


图 1-23 晶闸管等效电路

例 1-3 怎样才能使晶闸管由导通变为关断？

答 在实际电路中是采用阳极电压反向、减小阳极电压、或增大回路阻抗等方式，使阳极电流小于维持电流，晶闸管即关断。

例 1-4 在晶闸管的门极通入几十毫安的小电流可以控制阳极几十、几百安培的大电流的导通，它与晶体管用较小的基极电流控制较大的集电极电流有什么不同？晶闸管能不能像晶体管一样构成放大器？

答 晶体管在共发射极接法时，基极电流 I_b 可以控制较大的集电极电流 I_c 变化，起到了电流放大的作用；而晶闸管在电路中只能由门极控制信号控制其导通，在电路中只起到一个开关作用，要关断还需采取措施（如阳极加反向电压）。因此，不能构成放大器。

例 1-5 温度升高时，晶闸管的触发电流、正反向漏电流、维持电流以及正向转折电压和反向击穿电压各如何变化？

答 当温度升高时，晶闸管的触发电流 I_g 下降；正反向漏电流上升；维持电流 I_H 下降；正向转折电压与反向击穿电压都减小。

例 1-6 在夏天，工作正常的晶闸管装置到冬天变得不可靠了，可能是什么原因？冬天工作正常，夏天工作不正常又可能是什么原因？

答 夏天工作正常，冬天工作不正常的原因可能是电路提供的触发电流 I_g 偏小，夏天勉

强能触发，而冬天则不能满足对触发电流的要求了。冬天正常，夏天不正常的原因可能是晶闸管的维持电流小，冬天勉强能关断，到了夏天不容易关断；或者是，选用的晶闸管电压偏低，到了夏天，管子的转折电压与击穿电压值下降，造成“硬开通”或击穿。

例 1-7 图 1-24 为调试晶闸管电路，在断开 R_d 测量输出电压 U_d 是否正确可调时，发现电压表读数不正常，接上 R_d 后一切正常，为什么？

答 当 Q 未合上时，因电压表内阻很大，即使晶闸管门极加触发脉冲，此时流过晶闸管的阳极电流仍小于擎住电流，晶闸管没有导通，电压表上显示的读数只是管子漏电流形成的电阻与电压表内阻的分压值，所以这个读数是不正确的。当 Q 合上后， R_d 接入电路，晶闸管能正常导通，电压表的读数才能正确显示。

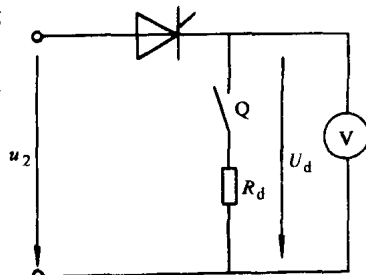


图 1-24 例 1-7 图

例 1-8 用万用表怎样区分晶闸管阳极 (A)、阴极 (K) 与门极 (G)？判断晶闸管的好坏有哪些简便实用的方法？

答 可用万用表测量晶闸管三个极间的电阻。管子阳、阴极间的正反向电阻接近无穷大，门极与阴极间电阻值约为几百欧，并且 G-K 间的阻值略小于 K-G 间的阻值。

判断晶闸管的好坏的方法有：

- ① 用万用表可以初步判断好坏，如上面讲的各极间的阻值状况。
- ② 用 6V 电源（干电池或直流稳压电源）作为阳极电源，接成如图 1-25 线路，如果按下开关 Q 后，灯亮，说明管子是好的。
- ③ 用晶体管图示仪测量管子正反向伏安特性。

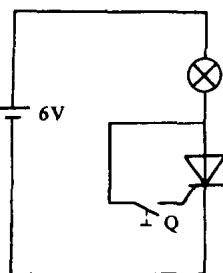


图 1-25 例 1-8 图

例 1-9 在环境温度较低时，或是加强通风冷却时，晶闸管与整流二极管是否可以超过额定电流运行？

答 按规定不可以超过额定电流运行，但实际上只要保证结温不超过允许值 100°C ，可以在一定范围内超额运行。

例 1-10 结温与管壳（底座）温度大概相差多少？50A 以上器件不用风冷时额定电流要打多少折扣？

答 结温与管壳温度的差别和环境温度、通过电流的大小、散热器大小、通风条件等有关。结温已达到 100°C 时，管壳温度因上述条件不同，可以相差 $20\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，所以不能以管壳温度来计结温。在规定的散热器及冷却条件下，两者大约相差 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 。规定用风冷的 50A 以上的器件，不用风冷时可按照 $30\%\sim 40\%$ 电流定额使用。

例 1-11 工作温度升高，晶闸管的正反向不重复峰值电压有多大变化？是一样吗？

答 因为晶闸管的正向与反向表现出阻断特性的 P-N 结不是同一个，所以在室温下及高温下，正反向不重复峰值电压变化不一样，变化幅度也不一定，与器件制造的工艺质量关系很大，一般正向不重复峰值电压下降更多一些，所以室温下测出的峰值电压不能作为高温下工作电压的依据，只能作为一个参考。

例 1-12 晶闸管在大电流时失控变成二极管是什么故障？晶闸管正向击穿后能否当二极管用？

答 这种故障说明器件的高温特性不好，即在大电流时器件失去正向阻断能力。晶闸管正向击穿往往集中在一个点上，如果当二极管用，通过较大电流，将引起器件结面局部发热

导致反向也击穿，所以当二极管只能通过较小的电流。

例 1-13 晶闸管的门极允许加多高电压？通过多大电流？不同规格的晶闸管一样吗？

答 按规定门极电压、电流瞬时值不能超过 10V、2A。在宽脉冲下，控制门极所加的平均功率，即电流电压乘积再乘以脉冲宽度的百分数，不能超过 500mW，但 100A 以上的器件门极的面积增大，能够承受的外加控制信号的功率也可以增大，对 100~200A 的器件可以允许平均损耗为 1W，对 300~500A 器件为 2W。

例 1-14 有些器件的门极只加 2V 就可使晶闸管触发导通，是否对于触发电路只输出 3V 就够了？

答 按规定门极触发电压在 3.5V (50A 器件) 或 4V (100A 以上器件) 以下者均为合格产品。但希望触发电压仍能在 5~6V 以上，这是因为一方面希望触发电路的通用性好些，另一方面，一般合格证上所给的数据是在室温下测定的，在低温下，要求触发电压、电流均显著增大，例如在 -25℃ 时触发电压、电流可能增大 1 倍左右。

例 1-15 为什么擎住电流比维持电流大几倍？

答 因为晶闸管刚导通时，在硅片结面上只有靠近门极附近的区域导通，触发脉冲结束后要使导通区域能继续扩展到整个结面所需要的电流比维持电流要大得多才行，所以擎住电流大于维持电流。

例 1-16 用万用表测晶闸管门极时，为什么正反向电阻不同？是否阻值愈小愈好？

答 晶闸管的门极对阴极是一个 P-N 结，所以正反向电阻不同。但是同一型号的门极伏安特性相差很大，所以不能以门极电阻大小来确定特性好坏。当然，如果测得电阻值为零或无穷大，则表明门极与阴极已短路或开路，不能使用。

例 1-17 晶闸管最大冲击电流允许多大？超过了是否一定会坏？

答 据对 100A 元件冷态进行冲击试验，通过正弦半波平均电流 3000A 达 28 次才损坏。但在热态下 (结温 100℃) 耐受冲击电流能力就要小得多。所以晶闸管在冷态下允许的冲击电流比热态时要大得多，参看表 1-1。

表 1-1 电流过载倍数

元件系列	电 流 过 载 倍 数		
	一个周波	5s	5min
KP ₁	5	2	1.25
KP ₅	5	2	1.25
KP ₁₀	5	2	1.25
KP ₂₀	5	2	1.25
KP ₅₀	5	2	1.25

例 1-18 螺栓式与平板式晶闸管拧紧在散热器上，是否拧得越紧越好？

答 元件固定在散热器上，拧得愈紧，散热效果愈好。但是，螺栓式元件在螺栓的六角上加力旋紧时，座底与硅片之间将产生应力，扭力大时会引起硅片损坏，所以拧紧时不可加力太大。

例 1-19 晶闸管在使用时突然损坏，有哪些可能的原因？

答 引起元件损坏的原因有很多，下面仅介绍一些常见的损坏元件的原因。

(1) 电流方面的原因

输出发生短路或过载, 而过电流保护不完善, 熔断器规格不对, 快速性能不合要求。输出接电容滤波, 触发导通时, 电流上升率太大造成损坏。

(2) 电压方面的原因

没有适当的过电压保护, 外界因开关操作、雷击等有过电压侵入或整流电路本身因换相造成换相过电压, 或是输出回路突然断开而造成过电压均可损坏元件。

元件特性不稳定, 正向电压额定值下降, 造成连续的正向转折引起损坏, 反向电压额定值下降引起反向击穿。

(3) 门极方面的原因

门极所加最高电压、电流或平均功率超过允许值; 门极和阳极发生短路故障; 触发电路有故障, 加在门极上的电压太高, 门极所加反向电压太大 (超过允许值 10V 以上造成反向击穿)。

(4) 散热冷却方面的原因

散热器没拧紧, 温升超过允许值, 或风机、水冷却泵停转, 元件温升超过允许值。

例 1-20 可用什么样的信号作为晶闸管的门极控制信号?

答 可用尖脉冲、矩形脉冲、强触发脉冲。多相可控整流时要求宽脉冲。为了减少门极控制回路的电源个数和各元件与阴极的绝缘, 通常把宽脉冲变换为高频脉冲列, 经脉冲变压器供给门极。此外, 如果使用光耦合器则无需变换为脉冲列, 而且能保证绝缘强度高。对可关断晶闸管 (GTO) 需要输入连续的阶跃脉冲信号, 所以多采用光耦合器。

例 1-21 用正弦半波测试晶闸管时, 正反向漏电流的波形也是正弦半波形状吗? 晶闸管导通时流过正弦半波电流, 其正向压降的波形是怎样的?

答 由于晶闸管的阳极伏安特性不是一条直线, 因此, 外加正弦波电压其漏电流的波形并不是正弦波。同理, 通过正向半波电流时, 其正向压降也不是正弦波。

例 1-22 按有效值相同来决定晶闸管在小导电角时的允许平均电流值, 这是不是根据不同导电角下晶闸管的损耗相同的条件来规定的?

答 导电角不同而损耗相同只说明了平均温升相同, 而小导电角时电流峰值较大, 因而硅片的瞬时温升可能较大, 再考虑到硅片中因电流分布不均, 局部发热可能很大, 所以既不能按平均损耗相同来确定允许平均电流, 也不能按管壳温度不超过允许值来确定平均电流。按电流有效值相同来确定小导电角时的平均电流只是一种近似的实用方法, 有时需要修正。

例 1-23 在图 1-26 中, 要使晶闸管 VT 导通, 门极触发信号——电流脉冲的宽度最小应为多少微秒? 图中 $E=50\text{V}$, $R=0.5\Omega$, $L=0.5\text{H}$, 晶闸管擎住电流 $I_L=15\text{mA}$ 。

答 晶闸管 VT 导通后, 主回路电流 i 按下式上升:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E$$

$$i = \frac{E}{R} (1 - e^{-Rt/L})$$

即

晶闸管要维持导通状态, i 需要达到擎住电流以上。在此之前门极触发信号电流必须继续流通。因此, 将数值代入上式 (大的单位为 s), 得

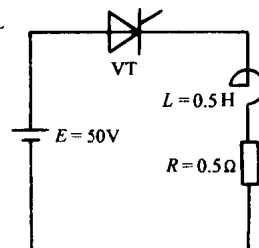


图 1-26 例 1-23 图

$$\frac{50}{0.5} (1 - e^{-t}) \text{ A} \geq 15 \times 10^{-3} \text{ A}$$

因为

$$e^{-t} \approx 1 - t$$

所以

$$t > 150 \times 10^{-6} \text{ s} = 150 \mu\text{s}$$

所以脉宽要大于 $150 \mu\text{s}$ 。

练 习 题

1-1 型号为 KP100-3、维持电流 $I_H = 4\text{mA}$ 晶闸管使用在图 1-27 中的电路是否合理？为什么（暂不考虑电压电流裕量）？

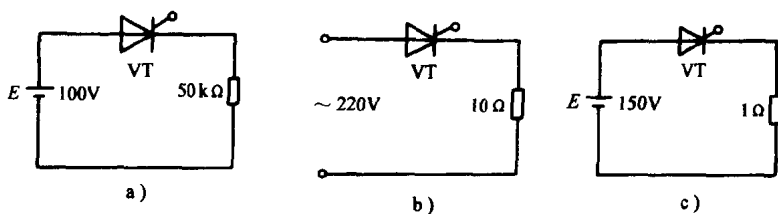


图 1-27 练习 1-1 图

- 1-2 有些晶闸管触发导通后，触发脉冲结束时它又关断是什么原因？
- 1-3 晶闸管阳极加较高电压或较低电压时，触发电压、触发电流是否一样？
- 1-4 晶闸管导通时，流过晶闸管的电流大小取决于什么？晶闸管阻断时，承受的电压大小决定于什么？
- 1-5 晶闸管当二极管使用时应如何联接？
- 1-6 画出晶闸管伏安特性，标出特殊点的名称，如何确定晶闸管的额定电压？
- 1-7 为什么要考虑断态电压上升率 dv/dt 和通态电流上升率 di/dt ？
- 1-8 普通晶闸管可以与两只三极管互补接法等效。第一只 $P_1N_1P_2$ 型的 α_1 要比第二只 $N_1P_2N_2$ 型的 α_2 小得多，为什么？

第二章 基础练习

在电力电子变流技术中，经常遇到电压或电流的平均值、有效值概念，经常遇到一个切去一部分的正弦波的平均值、有效值的计算，以及一些其它波形的平均值、有效值的计算，这些都可根据平均值、有效值的定义来求出。

设 $f(\theta)$ 为表示电压或电流的函数，则它在 $\alpha-\beta$ 期间的平均值和有效值用下式来定义：

$$\text{平均值为 } \frac{1}{\beta-\alpha} \int_{\alpha}^{\beta} f(\theta) d\theta$$

$$\text{有效值为 } \sqrt{\frac{1}{\beta-\alpha} \int_{\alpha}^{\beta} f^2(\theta) d\theta}$$

设函数 $f(\theta)$ 是周期函数，若 $f(\theta)$ 的周期是 2π ，那么函数 $f(\theta)$ 可以展开为三角级数：

$$f(\theta) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta)$$

式中 n ——高次谐波的次数；

$a_0/2$ ——直流分量。

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos n\theta d\theta$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \sin n\theta d\theta$$

或者

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) d\theta$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) \cos n\theta d\theta$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\theta) \sin n\theta d\theta$$

当 $f(\theta)$ 为偶函数，即 $f(\theta) = f(-\theta)$ 时，则

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\theta) \cos n\theta d\theta \quad b_n = 0$$

当 $f(\theta)$ 为奇数，即 $f(\theta) = -f(-\theta)$ 时，则

$$a_n = 0 \quad b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\theta) \sin n\theta d\theta$$

例 2-1 图 2-1 中打斜线部分表示流过晶闸管的电流波形，其最大值均为 I_m 。试计算各电流的平均值 $I_{d1}, \dots, I_{d6}$ ；电流的有效值 $I_1, \dots, I_6$ 和它们的波形系数 $K_{f1}, \dots, K_{f6}$ 。

解 ①
$$I_{d1} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{2\pi} (-\cos \omega t) \Big|_0^{\pi} = \frac{I_m}{\pi}$$