

第 2 章 电力电子器件

本章要点

- 常用电力电子器件的结构和工作原理。
- 常用电力电子器件的应用特点。
- 智能电力模块及其应用。

技能目标

- 会分析常用电力电子器件的特性曲线。
- 掌握常用电力电子器件的测试方法。
- 会利用相关设备做电力电子器件的试验。

2.1 电力二极管

电力二极管(Power Diode, PD)是指可以承受高电压、大电流,具有较大耗散功率的二极管,它与其他电力电子器件相配合,作为整流、续流、电压隔离、钳位或保护元件,在各种变流电路中发挥着重要的作用。

电力二极管与小功率二极管的结构、工作原理和伏安特性相似,但它的主要参数的规定、选择原则等不尽相同,使用时应当引起注意。

2.1.1 结构与伏安特性

1. 结构

电力二极管的内部结构也是一个 PN 结,其面积较大,最新研制出的特殊二极管(如快速恢复二极管),在制作工艺上有新的突破,使开关时间大为减少。

电力二极管引出两个极,分别称为阳极 A 和阴极 K,使用的符号也与中、小功率二极管一样,如图 2.1 所示。由于电力二极管的功耗较大,它的外形有螺旋式和平板式两种。螺旋式二极管的阳极紧拴在散热器上。平板式二极管又分为风冷式和水冷式,它的阳极和阴极分别由两个彼此绝缘的散热器紧紧夹住。

2. 伏安特性

电力二极管的阳极和阴极间的电压和流过的电流之间的关系称为伏安特性,如图 2.2 所示。当从零逐渐增大二极管的正向电压时,一开始,阳极电流很小,这一段特性曲线很

靠近横坐标轴。当正向电压大于 0.5V 时, 正向阳极电流急剧上升, 二极管正向导通, 如果电路中不接限流元件, 二极管将被烧毁。

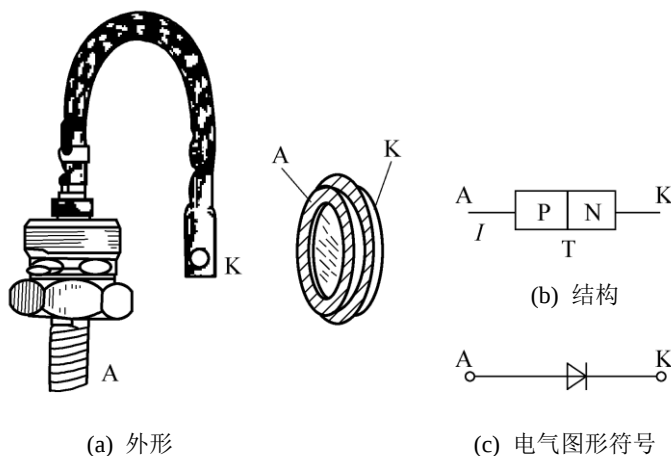


图 2.1 电力二极管的外形、结构和电气图形符号

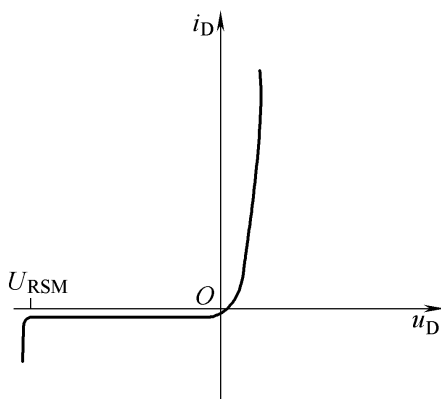


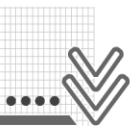
图 2.2 电力二极管的伏安特性

当二极管加上反向电压时, 起始段的反向电流也很小, 而且随着反向电压的增大, 反向电流只略有增加, 但当反向电压增加到反向不重复电压值时, 如图 2.2 中的 U_{RSM} 所示, 反向漏电流开始急剧增加。同样, 如果对反向电压不加限制的话, 二极管将被击穿而损坏。

2.1.2 主要参数

1. 额定电流(正向平均电流) I_F

在规定的环境温度为 40°C 和标准散热条件下, 元件 PN 结的温度稳定且不超过 140°C 时, 允许长时间连续流过 50Hz 正弦半波的电流平均值, 取规定系列的电流等级, 即为元件的额定电流。



2. 反向重复峰值电压 U_{RRM}

在额定结温条件下, 取元件反向伏安特性不重复峰值电压值 U_{RSM} (见图 2.2)的 80%, 称为反向重复峰值电压 U_{RRM} 。将 U_{RRM} 值取规定的电压等级, 就是该元件的额定电压。

3. 正向平均电压 U_F

在规定的环境温度 40°C 和标准散热条件下, 元件通过 50Hz 正弦半波额定正向平均值电流时, 元件阳极和阴极之间的电压的平均值, 取规定系列组别, 称为正向平均电压 U_F , 简称管压降, 范围一般为 $0.45\sim 1\text{V}$ 。

4. 最高工作结温 T_{JM}

结温是指管芯 PN 结的平均温度, 用 T_{JM} 表示。最高工作结温是指在 PN 结不致损坏的前提下所能承受的最高平均温度。 T_{JM} 的范围通常为 $125\sim 175^{\circ}\text{C}$ 。

2.1.3 电力二极管的参数选择及使用注意事项

1. 参数选择

(1) 额定正向平均电流 I_F 的选择原则。在规定的室温和冷却条件下, 额定正向平均电流 I_F 可按式(2-1)计算后取相应标准系列值, 即:

$$I_F = (1.5 \sim 2) \frac{I_{DM}}{1.57} \quad (2-1)$$

式中 I_{DM} 为流经二极管的最大电流有效值。考虑到元件的过载能力较小, 因此选择时考虑 1.5~2 倍的安全余量。

(2) 额定电压 U_{RRM} 的选择原则。选择电力二极管的反向重复峰值电压 U_{RRM} 的原则是, 电力二极管所工作的电路中可能承受的最大反向瞬时值电压 U_{DM} 的 2~3 倍, 即:

$$U_{RRM} = (2 \sim 3)U_{DM} \quad (2-2)$$

使用时取相应系列值。

2. 电力二极管使用时的注意事项

(1) 必须保证规定的冷却条件, 如强迫风冷。如不能满足规定的冷却条件, 必须降低使用的容量。如规定风冷元件使用在自冷条件时, 只允许用到额定电流的 1/3 左右。

(2) 平板形元件的散热器一般不应自行拆装。

(3) 严禁用兆欧表检查元件的绝缘情况。如需检查整机的耐压, 应将元件短接。

2.2 晶 闸 管

晶闸管(Silicon Controlled Rectifier, SCR)是硅晶体闸流管的简称,包括普通晶闸管、双向晶闸管、可关断晶闸管和逆导晶闸管和快速晶闸管等。普通晶闸管又叫可控硅,常用SCR表示,国际通用名称为Thyristor,简写为T。

2.2.1 晶闸管的外形和图形符号

晶闸管的种类很多,从外形上看,主要有螺栓形和平板形两种,如图2.3(a)、(b)所示。3个引出端分别叫作阳极A、阴极K和门极G,门极又叫控制极。晶闸管的图形符号如图2.3(c)所示。

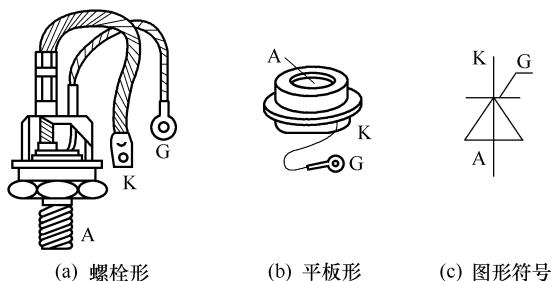


图 2.3 晶闸管的外形和图形符号

2.2.2 晶闸管的工作原理

晶闸管是四层(P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2)的三端器件,有 J_1 、 J_2 、 J_3 三个 PN 结,如图 2.4(a)所示。如果把中间的 N_1 和 P_2 分为两部分,就构成了一个 NPN 型晶体管和一个 PNP 型晶体管的复合管,如图 2.4(b)所示。

晶闸管具有单向导电特性和正向导通的可控性。需要导通时,必须同时具备以下两个条件。

- (1) 在晶闸管的“阳极—阴极”之间加正向电压。
- (2) 在晶闸管的“门极—阴极”之间加正向触发电压,且有足够的门极电流。

晶闸管承受正向阳极电压时,为使晶闸管从关断变为导通,必须使承受反向电压的 PN 结失去阻断作用。

如图 2.4(c)所示,每个晶体管的集电极电流是另一个晶体管的基极电流。两个晶体管相互复合,当有足够的门极电流 I_g 时,就会形成强烈的正反馈,即:

$$I_g \uparrow \rightarrow I_{b2} \uparrow \rightarrow I_{c2} \uparrow = I_{b1} \uparrow \rightarrow I_{c1} \rightarrow I_{b2} \uparrow$$

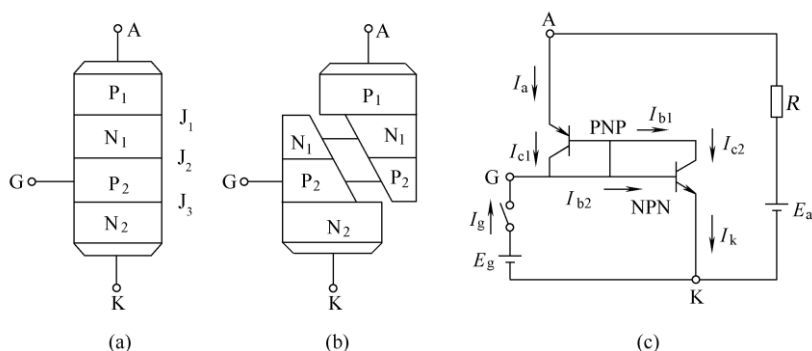


图 2.4 晶闸管的内部工作过程

这时，两个晶体管迅速饱和导通，即晶闸管饱和导通。

晶闸管一旦导通，门极即失去控制作用，因此，门极所加的触发电压一般为脉冲电压。晶闸管从阻断变为导通的过程称为触发导通。门极触发电流一般只有几十毫安到几百毫安，而晶闸管导通后，从阳极到阴极可以通过几百安、几千安的电流。要使导通的晶闸管阻断，必须将阳极电流降低到一个称为维持电流的临界极限值以下。

2.2.3 晶闸管的阳极伏安特性

晶闸管的阳极与阴极之间的电压和电流之间的关系，称为阳极伏安特性。其伏安特性曲线如图 2.5 所示。

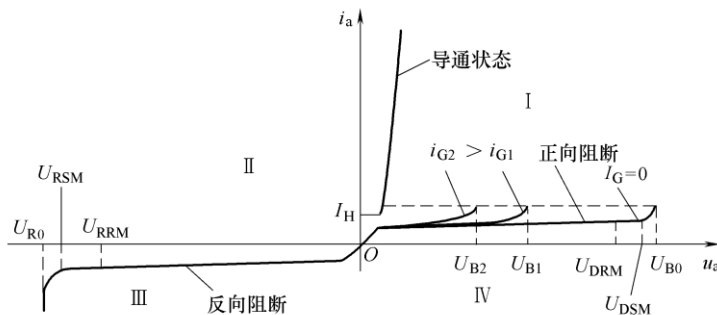


图 2.5 晶闸管的阳极伏安特性曲线

在图 2.5 中，第 I 象限为正向特性，当 $i_a=0$ 时，如果在晶闸管两端所加的正向电压 u_a 未增加到正向转折电压 U_{B0} 时，器件处于正向阻断状态，只有很小的正向漏电流。当 u_a 增加到 U_{B0} 时，则漏电流急剧增大，器件导通，正向电压降低，其特性与二极管的正向伏安特性相仿。通常不允许采用这种方法使晶闸管导通，因为这样重复多次会造成晶闸管损坏。一般采用对晶闸管门极加足够大的触发电流使其导通，门极触发电流越大，正向转折电压就越低。晶闸管的反向伏安特性如图 2.5 中第 III 象限所示，处于反向阻断状态时，只有很

小的反向漏电流,当反向电压超过反向击穿电压 U_{R0} 后,反向漏电流急剧增大,造成晶闸管反向击穿而损坏。

2.2.4 晶闸管的参数

为了正确选择和使用晶闸管,需要理解和掌握晶闸管的主要参数。

1. 额定电压 U_{TM}

由图 2.5 所示晶闸管的阳极伏安特性曲线可见,当门极开路,器件处于额定结温时,根据所测定的正向转折电压 U_{B0} 和反向击穿电压 U_{R0} ,由制造厂家规定减去某一数值(通常为 100V),分别得到正向不可重复峰值电压 U_{DSM} 和反向不可重复峰值电压 U_{RSM} ,再各乘以 0.9,即得到正向断态重复峰值电压 U_{DRM} 和反向阻断重复峰值电压 U_{RRM} 。将 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小的那个值取整后,作为该晶闸管的额定电压值。

晶闸管使用时,若外加电压超过反向击穿电压,会造成器件永久性损坏。若超过正向转折电压,器件就会误导通,经数次这种导通后,也会造成器件损坏。此外,器件的耐压还会因散热条件恶化和结温升高而降低。

因此,选择时,应注意留有充分的裕量,一般应按工作电路中可承受到的最大瞬时值电压 U_{TM} 的 2~3 倍来选择晶闸管的额定电压 U_{TN} ,即:

$$U_{TN} = (2 \sim 3) U_{TM} \quad (2-3)$$

2. 额定电流 $I_{T(AV)}$

晶闸管的额定电流也称为额定通态平均电流,即在环境温度为 40℃ 和规定的冷却条件下,晶闸管在导通角不小于 170° 的电阻性负载电路中,当不超过额定结温且稳定时,所允许通过的工频正弦半波电流的平均值。将该电流按晶闸管标准电流系列取值,称为该晶闸管的额定电流。

由于晶闸管的过载能力差,实际应用时,额定电流一般取 1.5~2 倍的安全裕量,即:

$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) I_T / 1.57 \quad (2-4)$$

式中 I_T 为正弦半波电流的有效值。

3. 通态平均电压 $U_{T(AV)}$

当晶闸管中流过额定电流并达到稳定的额定结温时,阳极与阴极之间电压的平均值,称为通态平均电压。当额定电流大小相同,而通态平均电压较小时,晶闸管的耗散功率也较小,该管子的质量较好。

4. 其他参数

(1) 维持电流 I_H 。在室温下,当门极断开时,器件从较大的通态电流降至维持通态所



必需的最小电流称为维持电流。它一般为几毫安到几百毫安。

维持电流与器件的容量、结温有关,器件的额定电流越大,维持电流也越大。结温低时维持电流大。

(2) 擎住电流 I_L 。晶闸管刚从断态转入通态就去掉触发信号,能使器件保持导通所需的最小阳极电流称为擎住电流。一般擎住电流 I_L 为维持电流 I_H 的几倍。

(3) 通态浪涌电流 I_{TSM} 。由电路异常情况引起的,并使晶闸管结温超过额定值的不重复性最大正向通态过载电流称为通态浪涌电流,用峰值表示。

(4) 断态电压临界上升率 du/dt 。在额定结温和门极开路情况下,不使器件从断态到通态转换的阳极电压最大上升率,称为断态电压临界上升率。

(5) 通态电流临界上升率 di/dt 。在规定条件下,晶闸管在门极触发导通时所能承受的不导致损坏的最大通态电流上升率,称为通态电流临界上升率。

2.2.5 晶闸管的门极伏安特性及主要参数

1. 门极伏安特性

门极伏安特性是指门极电压与电流的关系,晶闸管的门极和阴极之间只有一个 PN 结,所以电压与电流的关系与普通二极管的伏安特性相似。门极伏安特性曲线如图 2.6 所示。

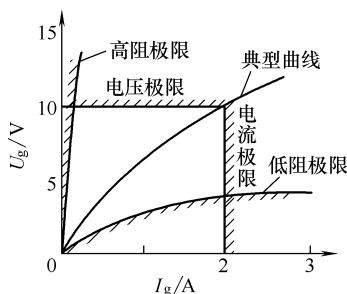


图 2.6 晶闸管的门极伏安特性

同一型号的晶闸管,门极伏安特性曲线呈现较大的离散性,通常以高阻和低阻两条特性曲线为边界,划定一个区域,其他的门极伏安特性曲线都处于这个区域内。该区域又分为不触发区、不可靠触发区及可靠触发区。

2. 门极的主要参数

(1) 门极不触发电压 U_{GD} 和门极不触发电流 I_{GD} 。不能使晶闸管从断态转入通态的最大门极电压,称为门极不触发电压 U_{GD} ,相应的最大门极电流称为门极不触发电流 I_{GD} 。显然,小于该数值时,处于断态的晶闸管不可能被触发导通,当然,干扰信号应限制在

该数值以下。

(2) 门极触发电压 U_{GT} 和门极触发电流 I_{GT} 。在室温下, 对晶闸管加上一定的正向阳极电压时, 使器件由断态转入通态所必需的最小门极电流, 称为门极触发电流 I_{GT} , 相应的门极电压称为门极触发电压 U_{GT} 。

需要说明的是, 为了保证晶闸管触发的灵敏度, 各生产厂家的 U_{GT} 和 I_{GT} 的值不得超过标准规定的数值, 但对用户而言, 设计的实用触发电路提供给门极的电压和电流应适当大于标准值, 才能使晶闸管可靠地触发导通。

(3) 门极正向峰值电压 U_{GM} 、门极正向峰值电流 I_{GM} 和门极峰值功率 P_{GM} 。在晶闸管触发过程中, 不会造成门极损坏的最大门极电压、最大门极电流和最大瞬时功率, 分别称为门极正向峰值电压 U_{GM} 、门极正向峰值电流 I_{GM} 和门极峰值功率 P_{GM} 。

2.3 门极可关断晶闸管

门极可关断(Gate Turn-Off, GTO)晶闸管, 具有普通晶闸管的全部优点, 如耐压高、电流大、控制功率小、使用方便和价格低等; 但它具有自关断能力, 属于全控器件。在质量、效率及可靠性方面有着明显的优势, 成为被广泛应用的自关断器件之一。

2.3.1 GTO 晶闸管的结构

门极可关断晶闸管的结构与普通晶闸管相似, 也为 PNP 四层半导体结构、三端(阳极 A、阴极 K、门极 G)器件。它的内部结构、等效电路及符号如图 2.7 所示。

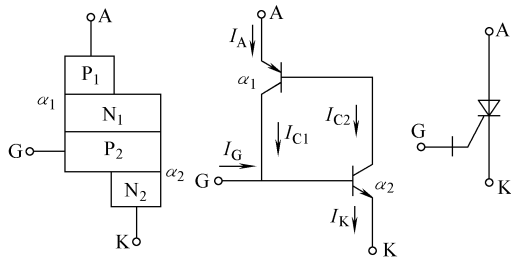
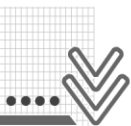


图 2.7 GTO 晶闸管的内部结构、等效电路及符号

2.3.2 GTO 晶闸管的工作原理

为了分析 GTO 晶闸管的工作原理, 也可将其等效为两个三极管 $P_1N_1P_2$ 与 $N_1P_2N_2$ 互补连接, 设 α_1 和 α_2 分别为晶体管 $P_1N_1P_2$ 和晶体管 $N_1P_2N_2$ 的共基极放大系数, α_1 比 α_2 小, 但都是随着发射极电流 I_e 的增加而增加的。

当 GTO 晶闸管的阳极加有正向电压, 门极加有正向触发电流 I_G 时, 通过 $N_1P_2N_2$ 晶体



管的放大作用,使 I_{C2} 和 I_K 增加, I_{C2} 又作为晶体管 $P_1N_1P_2$ 的基极电流,经晶体管 $P_1N_1P_2$ 放大,使 I_{C1} 和 I_A 增加。 I_{C1} 又作为晶体管 $N_1P_2N_2$ 的基极电流,使 I_{C2} 和 I_K 进一步增加。增强式强烈的正反馈过程,使 GTO 晶闸管很快饱和导通,这一过程与普通晶闸管的导通过程是一样的。

为了表征门极对 GTO 晶闸管关断的控制作用,引入门极控制增益 β , β 可表示为:

$$\beta = \frac{I_A}{I_G} = \frac{\alpha_2}{[1 - (\alpha_1 + \alpha_2)]} \quad (2-5)$$

上式中, $I_G < 0$ 时的 β 表示关断增益。

由式(2-5)可见,增大关断增益可以提高关断控制灵敏度, α_2 增大意味着提高 $N_1P_2N_2$ 晶体管的控制灵敏度,从而使得 GTO 晶闸管易于关断;减少 $\alpha_1 + \alpha_2$, 可使 GTO 晶闸管在导通时接近临界饱和,利于关断控制。

GTO 晶闸管的关断过程分析如下。

当 GTO 晶闸管已处于导通状态且阳极电流为 I_A 时,对门极加负的关断脉冲,形成 $-I_G$, 相当于将 I_{C1} 的电流抽出,使 $N_1P_2N_2$ 晶体管的基极电流减少,从而使 I_{C2} 和 I_K 减少, I_{C2} 的减少又使 I_A 减少,也使 I_{C2} 减少,也是一个正反馈过程,但它是衰减式的。当 I_A 和 I_K 的减少使 $(\alpha_1 + \alpha_2) < 1$ 时,等效晶体管 $P_1N_1P_2$ 和 $N_1P_2N_2$ 退出饱和, GTO 晶闸管不再满足维持导通的条件,阳极电路很快下降至零而关断。

GTO 晶闸管的外部虽然也是引出三个电极,但其内部却包含着数百个共阳极的小 GTO 晶闸管元(件),它们的门极和阴极分别并联在一起。与普通晶闸管不同的是, GTO 晶闸管是一种多元件的电力集成器件,这是为便于实现门极控制关断所采取的特殊设计。

2.3.3 GTO 晶闸管的特性

1. 阳极伏安特性

GTO 晶闸管的阳极伏安特性与普通晶闸管相似,如图 2.8 所示。

外加电压超过正向转折电压 U_{B0} 时, GTO 晶闸管正向导通,正向导通次数多了,就会引起 GTO 晶闸管的性能变差;但若外加电压超过反向击穿电压 U_{R0} , 则发生雪崩击穿,造成元件的永久性损坏。

对 GTO 晶闸管门极加正向触发电流时, GTO 晶闸管的正向转折电压随门极正向触发电流的增大而降低。

2. GTO 晶闸管的动态特性

图 2.9 给出了 GTO 晶闸管导通和关断过程中门极电流 i_G 和阳极电流 i_A 的波形。

与普通晶闸管类似,导通过程中,需要经过延迟时间 $t_d(i_A < 10\%I_A)$ 和上升时间 t_r

($i_A=(10\%\sim 90\%)I_A$)。关断过程则有所不同, 首先, 需要经历抽取饱和和导通时存储的大量载流子的时间——存储时间 t_s , 从而使等效晶体管退出饱和状态; 然后则是等效晶体管从饱和区退至放大区, 阳极电流逐渐减小的时间——下降时间 t_f ; 最后还有残存载流子复合所需要的时间——尾部时间 t_t 。

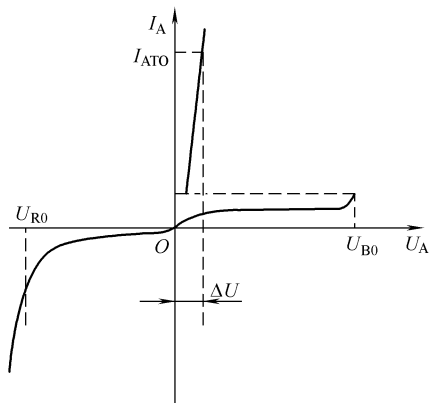


图 2.8 GTO 晶闸管的阳极伏安特性

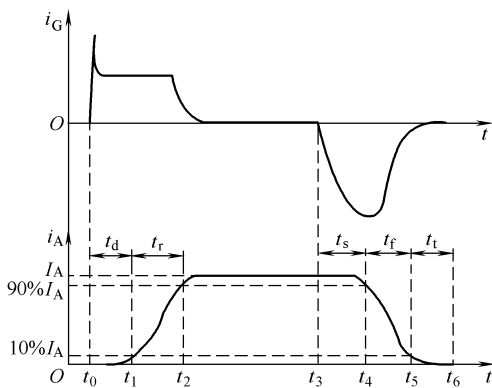


图 2.9 GTO 晶闸管的导通和关断过程中的电流波形

通常, t_f 比 t_s 小得多, 而 t_t 比 t_s 要长。门极负脉冲电流的幅值越大, 前沿越陡, 抽走存储载流子的速度越快, t_s 就越短。若使门极负脉冲的后沿缓慢衰减, 在 t_s 阶段仍能保持适当的负电压, 则可以缩短尾部时间 t_t 。

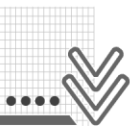
关断损耗基本集中在下降时间 t_f 内, 过大的瞬时功耗会造成 GTO 晶闸管的损坏, 其瞬时功耗与阳极尖峰电压有关。阳极尖峰电压随着阳极可关断电流的增加而增加, 过高则可能导致 GTO 晶闸管失效。阳极尖峰电压的产生是由器件外接保护与缓冲电路的引线电感、二极管正向恢复电压和电容中的电感造成的, 因此, 应用中要尽量减少缓冲电路的杂散电感。

2.3.4 GTO 晶闸管的主要参数

GTO 晶闸管的大多数参数与普通晶闸管相同, 这里仅讨论一些意义不同的参数。

1. 最大可关断阳极电流 I_{ATO}

GTO 晶闸管的最大阳极电流受两个方面的限制: 一是额定工作结温的限制; 二是门极负电流脉冲可以关断的最大阳极电流的限制, 这是由 GTO 晶闸管只能工作在临界饱和和导通状态所决定的。阳极电流过大, GTO 晶闸管便处于较深的饱和和导通状态, 门极负电流脉冲不可能将其关断。通常, 将最大可关断阳极电流 I_{ATO} 作为 GTO 晶闸管的额定电流。应用中, 最大可关断阳极电流 I_{ATO} 还与工作频率、门极负电流的波形、工作温度及电路参数等因素有关, 它不是一个固定不变的数值。



2. 关断增益 β_{off}

关断增益为最大可关断阳极电流 I_{ATO} 与门极负电流最大值 I_{GM} 之比, 其表达式为:

$$\beta_{\text{off}} = I_{\text{ATO}} / |I_{\text{GM}}| \quad (2-6)$$

β_{off} 比晶体管的电流放大系数 β 小得多, 一般只有 5 左右, 关断增益 β_{off} 低是 GTO 晶闸管的一个主要缺点。

3. 阳极尖峰电压 U_p

阳极尖峰电压 U_p 是在下降时间末尾出现的极值电压, 它几乎随阳极可关断电流线性增加, U_p 过高, 可能导致 GTO 晶闸管失效。 U_p 的产生是由缓冲电路中的引线电感、二极管正向恢复电压和电路中的电感造成的。

4. 维持电流 I_H

GTO 晶闸管的维持电流 I_H 是指阳极电流减小到开始出现 GTO 晶闸管元不能再维持导通的数值。

由此可见, 当阳极电流略小于维持电流时, 仍有部分 GTO 晶闸管元继续维持导通, 这时, 若阳极电流恢复到较高数值, 已截止的 GTO 晶闸管元不能再导电, 就会引起维持导通的 GTO 晶闸管元的电流密度增加, 出现不正常的工作状态。

5. 擎住电流 I_L

擎住电流 I_L 是指 GTO 晶闸管经门极触发后, 阳极电流上升到保持所有 GTO 晶闸管元导通的最低值。

由此可见, 擎住电流最大的 GTO 晶闸管元对整个 GTO 晶闸管的擎住电流影响最大, 若该 GTO 晶闸管元刚达到其擎住电流时, 遇到门极正脉冲电流极陡的下降沿, 则内部载流子增生的正反馈过程受阻而返回到截止状态, 因此必须加宽门极脉冲, 使所有的 GTO 晶闸管元都达到可靠导通。

2.4 电力晶体管

电力晶体管(Giant Transistor, GTR)是一种高反压晶体管, 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。它被广泛用于交直流电动机调速、中频电源等电力变流装置中。

2.4.1 GTR 的结构

电力晶体管主要用作开关, 工作于高电压、大电流的场合, 一般为模块化, 内部为 2

级或3级达林顿结构,如图2.10所示。

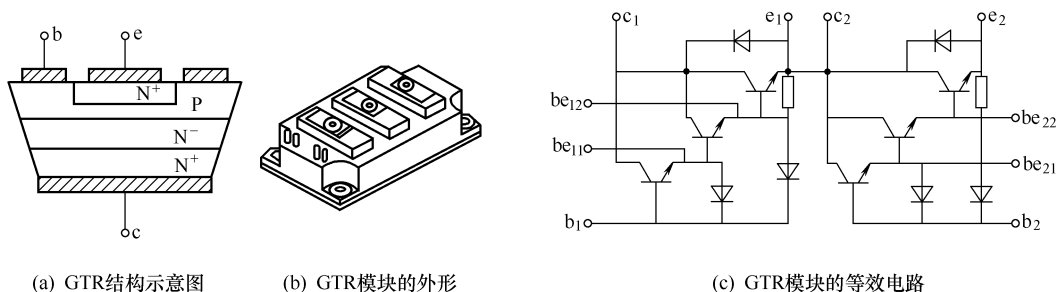


图 2.10 GTR 模块

图 2.10(a)所示为电力晶体管(GTR)的结构示意图;图 2.10(b)所示为 GTR 模块的外形;图 2.10(c)所示为其等效电路。为了便于改善器件的开关过程和并联使用,中间级晶体管的基极均有引线引出,即图 2.10(c)中的 be_{11} 、 be_{12} 等端子。目前,生产的 GTR 模块可将多达 6 个互相绝缘的单元电路做在同一个模块内,可以方便地组成三相桥式电路。

2.4.2 GTR 的主要参数

- (1) 开路阻断电压 U_{CEO} 。即基极开路时,“集电极—发射极”间能承受的电压值。
- (2) 集电极最大持续电流 I_{CM} 。即当基极正向偏置时,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,也叫电流放大倍数或电流传输比。
- (4) 集电极最大耗散功率 P_{CM} 。指 GTR 在最高允许结温时所消耗的功率,它受结温限制,其大小由集电结工作电压和集电极电流的乘积决定。
- (5) 开通时间 t_{on} 。包括延迟时间 t_d 和上升时间 t_r 。
- (6) 关断时间 t_{off} 。包括存储时间 t_s 和下降时间 t_f 。

2.4.3 二次击穿现象

当集电极电压 U_{CE} 逐渐增加到某一数值时,集电结的反向电流 I_C 急剧增加,出现击穿现象。首次出现的击穿现象称为一次击穿,这种击穿是正常的雪崩击穿。这一击穿可用外接串联电阻的方法加以控制,只要适当限制晶体管的电流(或功耗),流过集电结的反向电流就不会太大,如果进入击穿区的时间不长,一般不会引起 GTR 的特性变坏。但是,一次击穿后,若继续增大偏压 U_{CE} ,而外接的限流电阻又不变,反向电流 I_C 将继续增大,此时,若 GTR 仍在工作,GTR 将迅速出现大电流,并在极短的时间内,会使器件中出现明显的电流集中和过热点,且电流急剧增长,此现象便称为二次击穿。

一旦发生二次击穿,轻者将使 GTR 电压降低、特性变差,重者会导致集电结和发射结熔断,使晶体管被永久性损坏。

二次击穿最终是由于器件局部过热引起的,而热点形成需要能量的积累,即需要一定的电压、电流乘积和一定的时间。因此,诸如集电极电压、电流、负载特性,导通脉冲宽度,基极电路的配置,管芯材料及制造工艺等因素都对二次击穿有一定的影响。

2.4.4 GTR 的驱动电路模块

1. 对驱动电路的要求

(1) 电力晶体管位于主电路,电压较高,控制电路电压较低。所以,驱动电路应对主电路和控制电路有电气隔离作用。

(2) 电力晶体管导通时,驱动电流应有足够陡的前沿,并有一定的过冲,以加速导通过程,减小损耗。

(3) 电力晶体管导通期间,在任何负载下,基极电流都应使晶体管饱和导通,为降低饱和压降,应使晶体管过饱和。而为了缩短存储时间,则应使晶体管临界饱和。两种情况要综合考虑。

(4) 关断时,应提供幅值足够大的反向基极电流,并加反偏截止电压,以加快关断速度,减小关断损耗。

(5) 驱动电路应有较强的抗干扰能力,并有一定的保护功能。

2. 驱动电路的隔离

主电路和控制电路之间的电气隔离一般采用光隔离或磁隔离。常用的光隔离有普通、高速、高传速比几种类型,如图 2.11 所示。

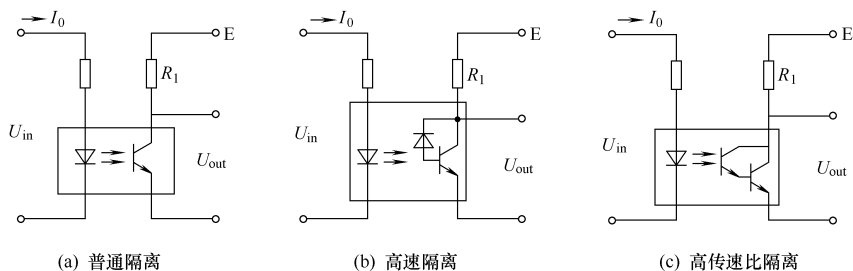


图 2.11 光隔离耦合的类型

磁隔离的元件通常是隔离变压器,为避免脉冲较宽时铁芯饱和,通常采用高频调制和解调的方法。

2.5 电力场效应晶体管

电力场效应晶体管(Power MOS Field-Effect Transistor, P-MOSFET), 是对功率小的一般 MOSFET 的工艺结构进行改进, 在功率上有所突破, 获得的单极性半导体器件, 属于电压控制型, 具有驱动功率小、控制线路简单、工作频率高的特点。

2.5.1 电力 MOSFET 的结构与工作原理

1. 电力 MOSFET 的结构

由电子技术基础可知, 功率较小的普通场效应管(MOSFET)的栅极 G、源极 S 和漏极 D 位于芯片的同一侧, 导电沟道平行于芯片表面, 是横向导电器件, 这种结构限制了它的电流容量。电力 MOSFET 采取了两次扩散工艺, 并将漏极 D 移到芯片另一侧的表面上, 使从漏极到源极的电流垂直于芯片表面流过, 这样有利于减小芯片面积和提高电流密度。这种采用垂直导电方式的 MOSFET 称为 VMOSFET。

电力 MOSFET 的导电沟道也分为 N 沟道和 P 沟道两种, 栅偏压为零时“漏极—源极”之间存在导电沟道的称为耗尽型; 栅偏压大于零(N 沟道)才存在导电沟道的称为增强型。下面以 N 沟道增强型为例, 说明电力 MOSFET 的结构。图 2.12 表示的是其结构和符号, 电力 MOSFET 是多元集成结构, 即一个器件由多个 MOSFET 元(件)组成。

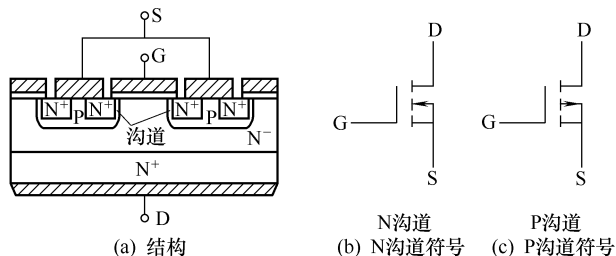


图 2.12 电力 MOSFET 的结构和符号

2. 电力 MOSFET 的工作原理

当漏极接电源正极, 源极接电源负极, “栅极—源极”之间的电压为零或为负时, P 型区和 N 型漂移区之间的 PN 结反向, “漏极—源极”之间无电流流过。如果在栅极和源极间加正向电压 U_{GS} , 由于栅极是绝缘的, 不会有电流。但栅极的正电压所形成的电场的感应作用却会将其下面的 P 型区中的少数载流子电子吸引到栅极下面的 P 型区表面。当 U_{GS} 大于某一电压值 U_T 时, 栅极下面的 P 型区表面的电子浓度将超过空穴浓度, 使 P 型反转为 N 型, 沟通了漏极和源极。此时, 若在漏极之间加正向电压, 则电子将从源极横向穿

过沟道,然后垂直(即纵向)流向漏极,形成漏极电流 I_D 。电压 U_T 称为开启电压, U_{GS} 超过 U_T 越多,导电能力就越强,漏极电流 I_D 也就越大。

电力 MOSFET 的多元结构,使得每个 MOSFET 元的沟道长度大为缩短,而且使所有 MOSFET 元的沟道并联,这势必使沟道电阻大幅度减小,从而使得在同样的额定结温下,器件的通态电流大大提高。此外,沟道长度的缩短,使载流子的渡越时间减小;沟道的并联,允许更多的载流子同时渡越,使器件的开通时间缩短,提高了工作频率,改善了器件的性能。

2.5.2 电力 MOSFET 的特性

1. 转移特性

栅源电压 U_{GS} 与漏极电流 I_D 之间的关系称为转移特性,如图 2.13 所示,特性曲线的斜率 dI_D/dU_{GS} 表示电力场效应管的放大能力,用跨导 g_m 表示,即:

$$g_m = dI_D / dU_{GS} \quad (2-7)$$

2. 输出特性

以“栅—源”电压 U_{GS} 为参变量,反映漏极电流 I_D 与漏极电压 U_{DS} 间关系的曲线簇,称为电力 MOSFET 的输出特性,如图 2.14 所示。输出特性可划分为 4 个区域:非饱和区 I、饱和区 II、截止区 III、雪崩区 IV。在非饱和区 U_{DS} 较小,当 U_{GS} 为常数时, I_D 与 U_{DS} 几乎呈线性关系。在饱和区,漏极电流几乎不再随漏源电压变化。当 U_{DS} 大于一定的电压值后,漏极 PN 结发生雪崩击穿,进入雪崩区 IV,此时漏电流突然增大,直至器件损坏。在图 2.14 中, $U_{GS5} > U_{GS4} > U_{GS3} > U_{GS2} > U_{GS1}$ 。

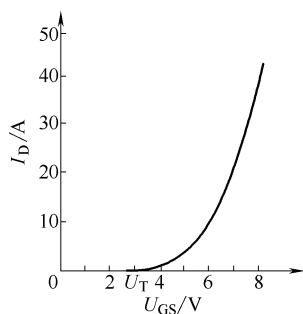


图 2.13 电力 MOSFET 的转移特性

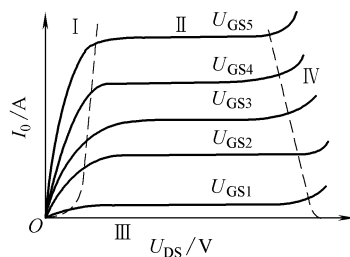


图 2.14 电力 MOSFET 的输出特性

3. 开关特性

图 2.15 是电力 MOSFET 的开关特性的测试电路及其开关过程的波形。图 2.15 中, u_p 为矩形脉冲电压信号源, R_S 为信号源内阻, R_G 为栅极电阻($\geq R_S$), R_L 为漏极负载电阻,漏

极电流可在 R_F 两端测得。

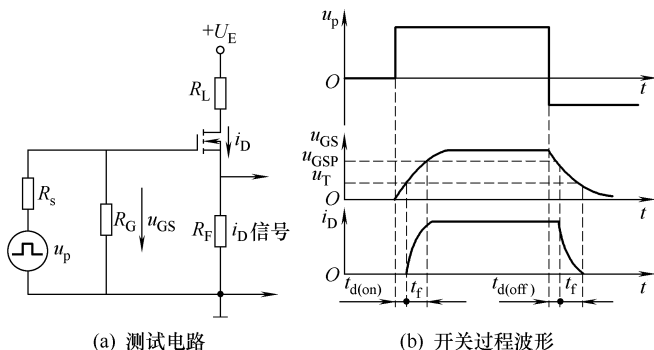


图 2.15 电力 MOSFET 的开关特性

由于器件内部存在输入电容 C_{in} , 因而 u_p 的前沿到来时, C_{in} 有充电过程, 栅极电压 U_{GS} 呈指数曲线上升。当 U_{GS} 上升到开启电压 U_T 时, 漏极电流 i_D 开始出现。从 u_p 前沿到 i_D 出现的这段时间定义为导通延迟时间 $t_{d(on)}$ 。此后, i_D 随 U_{GS} 的上升而上升, U_{GS} 从开启电压 U_T 逐渐上升到使电力场效应管刚刚进入非饱和区的栅极电压 U_{GSP} , 漏极电流 i_D 也达到稳态值, 这一过程对应的时间称为上升时间 t_r 。 i_D 稳态值的大小由漏极电源电压 U_E 和漏极负载电阻 R_L 决定, U_{GSP} 的大小与 i_D 的稳态值有关。 U_{GS} 在 u_p 的作用下继续上升, 直至达到稳态。但此后 i_D 不再变化。电力 MOSFET 的导通时间 t_{on} 为导通延迟时间与上升时间之和, 即:

$$t_{on} = t_{d(on)} + t_r \quad (2-8)$$

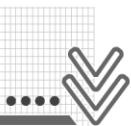
当 u_p 减小到零时, 栅极输入电容 C_{in} 通过 R_S 和 R_G 进行放电, U_{GS} 按指数规律下降, 当降至 U_{GSP} 时, i_D 开始减小, 这段时间称为关断延迟时间 $t_{d(off)}$ 。此后, C_{in} 继续放电, U_{GS} 从 U_{GSP} 继续下降, i_D 减小, 直至 $U_{GS} < U_T$ 时, 导电沟道消失, i_D 下降到零, 这段时间称为下降时间 t_f 。电力 MOSFET 的关断时间为关断延迟时间和下降时间之和, 即:

$$t_{off} = t_{d(off)} + t_f \quad (2-9)$$

综上所述, 电力 MOSFET 的开关时间与输入电容 C_{in} 的充、放电时间常数有很大的关系。使用时, C_{in} 的大小无法改变, 但可以改变信号源内阻 R_S 的值, 从而缩短时间常数, 提高开关速度。电力 MOSFET 的工作频率可达 100kHz 以上。尽管电力 MOSFET 的栅极绝缘, 且为电压控制器件, 但在开关状态, 驱动信号要给 C_{in} 提供充电电流, 因此需要驱动电路提供一定的功率。开关频率越高, 驱动功率就越大。

2.5.3 电力 MOSFET 的主要参数

除了前面已经涉及的跨导 g_m 、开启电压 U_T 、开通时间 t_{on} 及关断时间 t_{off} 之外, 电力 MOSFET 还有以下主要参数。



1. 漏源击穿电压 BU_{DS}

漏源击穿电压 BU_{DS} 决定了电力 MOSFET 的最高工作电压, 使用时, 应注意结温的影响, 结温每升高 100°C , BU_{DS} 就增加 10%。这与双极型器件 SCR 及 GTR 等随结温升高而耐压降低的特性恰好相反。

2. 漏极连续电流 I_D 和漏极峰值电流 I_{DM}

在器件内部温度不超过最高工作温度时, 电力 MOSFET 允许通过的最大漏极连续电流和脉冲电流称为漏极连续电流 I_D 和漏极峰值电流 I_{DM} 。它们是电力 MOSFET 的电流额定参数。

3. 栅源击穿电压 BU_{GS}

造成栅源极之间绝缘层被击穿的电压, 称为“栅—源”击穿电压 BU_{GS} 。在“栅极—源极”之间的绝缘层很薄, $U_{GS} > 20\text{V}$ 就将发生绝缘层击穿。

4. 极间电容

电力 MOSFET 的三个电极之间分别存在极间电容 C_{GS} 、 C_{GD} 和 C_{DS} 。一般生产厂家提供的是“漏极—源极”短路时的输入电容 C_{iss} 、共源极输出电容 C_{oss} 和反馈电容 C_{rss} 。它们之间有以下关系:

$$C_{iss} = C_{GS} + C_{GD} \quad (2-10)$$

$$C_{oss} = C_{DS} + C_{GD} \quad (2-11)$$

$$C_{rss} = C_{GD} \quad (2-12)$$

电力 MOSFET 不存在二次击穿问题, 这是它的一个优点。“漏—源”间的耐压、漏极最大允许电流和最大耗散功率决定了电力 MOSFET 的安全工作区。在实际使用中, 应注意留有适当的裕量。

2.6 绝缘栅双极型晶体管

绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)是 20 世纪 80 年代中期发展起来的一种新型器件。它综合了电力晶体管(GTR)和场效应管(MOSFET)的优点, 既有 GTR 耐高电压、电流大的特点, 又兼有单极型电压驱动器件 MOSFET 输入阻抗高、驱动功率小等优点。目前在 20kHz 及以下的中等容量变流装置中得到广泛应用, 已取代了 GTR 和电力场效应管的一部分市场, 成为中小功率电力电子设备的主导器件。近年来, 开发的第三代、第四代 IGBT 可使装置的工作频率提高到 $50\sim 100\text{kHz}$, 电压和电流容量进一步提高, 大有全面取代全控型器件的趋势。

2.6.1 IGBT 的结构与基本工作原理

图 2.16 所示为 IGBT 的结构剖面。由图可知, IGBT 也是四层的三端器件, IGBT 与电力 MOSFET 的结构非常相似, 是在 VDMOSFET 的基础上, 增加了一层 P^+ 注入区, 因而形成了一个大面积的 P^+N^+ 结 J_1 , 并由此引出集电极 C, 而其栅极 G 和发射极 E 则完全与电力场效应管的栅极和源极相似。IGBT 相当于一个由 MOSFET 驱动的厚基区 GTR, 其等效电路及图形符号如图 2.17 所示。可见, IGBT 是以 MOSFET 为驱动元件, GTR 为主导元件的达林顿结构器件。图中的电阻 R_N 是厚基区 GTR 内的调制电阻, R_s 是体区电阻。图中器件的 MOSFET 为 N 沟道型, 称为 N 沟道 IGBT。相应的还有 P 沟道 IGBT, 其图形符号仅将箭头反向即可。

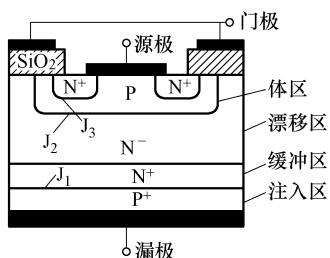


图 2.16 IGBT 的结构剖面

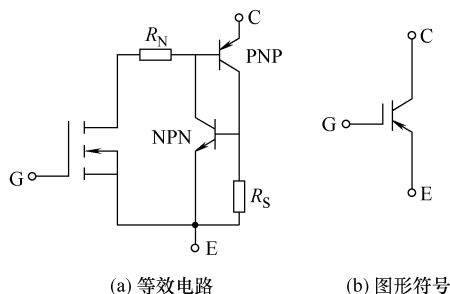


图 2.17 IGBT 等效电路及图形符号

IGBT 的驱动原理与电力 MOSFET 基本相同, 它是一种场控器件。其开通和关断是由栅极和发射极间的电压 U_{GE} 控制的, 当 U_{GE} 为正且大于开启电压 U_T 时, MOSFET 内形成导电沟道, 其漏源电流作为内部 GTR 的基极电流, 从而使 IGBT 导通。此时从 P^+ 注入 N^- 区的空穴对 N^- 区进行电导调制, 减小了 N^- 区的电阻 R_N , 使 IGBT 获得低导通压降。当栅极与发射极间不加信号或施加反向电压时, MOSFET 内的导电沟道消失, GTR 的基极电流被切断, IGBT 随即关断。

2.6.2 IGBT 的基本特性

1. 静态特性

IGBT 的静态特性主要包括转移特性和输出特性。

(1) 转移特性。

转移特性用来描述 IGBT 集电极电流 i_C 与“栅—射”电压 U_{GE} 之间的关系, 如图 2.18(a)所示。它与电力 MOSFET 的转移特性类似。开启电压 $U_{GE(th)}$ 是 IGBT 能实现电导调制而导通的最低“栅—射”电压。

(2) 输出特性。

输出特性也称伏安特性,描述以“栅—射”电压为参变量时,集电极电流 i_C 与“集—射”极间电压 U_{CE} 之间的关系。

IGBT 的输出特性与 GTR 的输出特性类似,不同的是控制变量,IGBT 的控制变量为“栅—射”电压 U_{GE} ,而 GTR 的控制变量为基极电流 I_B 。IGBT 的输出特性分为三个区域:正向阻断区、有源区和饱和区,如图 2.18(b)所示,与 GTR 的截止区、放大区和饱和区相对应。当 $U_{CE} < 0$ 时,IGBT 为反向阻断状态。在电力电子电路中,IGBT 在开关状态工作,在正向阻断区和饱和区之间转换。

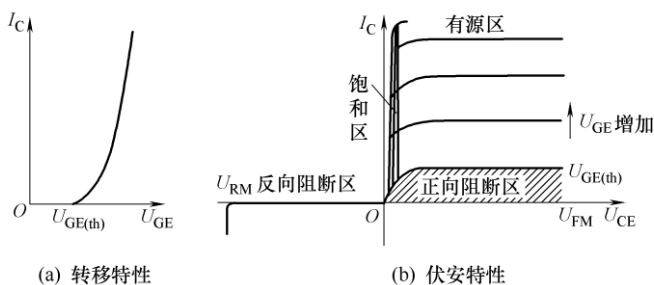


图 2.18 IGBT 的静态特性

2. 动态特性

IGBT 的动态特性包括导通过程和关断过程,如图 2.19 所示。

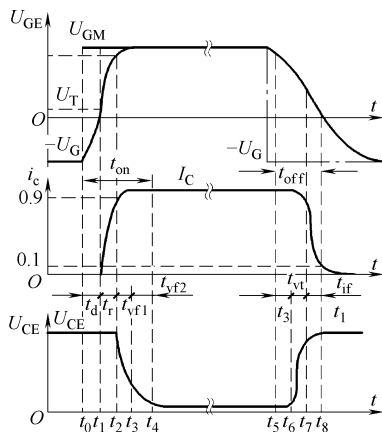


图 2.19 IGBT 的导通与关断过程

(1) 导通过程。

IGBT 的导通过程与电力 MOSFET 的开通过程相类似,这是因为 IGBT 在导通过程中大部分时间是作为电力 MOSFET 运行的。导通时间由四部分组成:一段是从外施栅极脉冲 U_{GM} 由负到正跳变开始,到“栅—射”电压充电到 U_T 的时间(对应 $t_1 - t_0$)的导通延迟时

间 t_d 。另一段是集电极电流从零开始,上升到 90%稳态值的时间($t_2 - t_1$),称为电流上升时间 t_r 。在这两段时间内,“集—射”极间电压 U_{CE} 基本不变。 $t = t_2$ 以后,“集—射”极电压 U_{CE} 开始下降, U_{CE} 的下降过程分为 t_{vf1} 和 t_{vf2} 两段。下降时间 t_{vf1} 是 MOSFET 单独工作时“集—射”极电压下降时间($t_3 - t_2$), t_{vf2} 是 MOSFET 和 PNP 晶体管同时工作时“集—射”极电压下降时间($t_3 - t_4$),由于 U_{CE} 下降时,IGBT 中 MOSFET 的栅、漏电容增加,而且 IGBT 中的 PNP 晶体管由放大状态转入饱和状态也需要一个过程,因此, t_{vf2} 段电压的下降过程变缓。只有在 t_{vf2} 段结束时,IGBT 才完全进入饱和状态。所以,总导通时间 $t_{on} = t_d + t_r + t_{vf1} + t_{vf2}$ 。

(2) 关断过程。

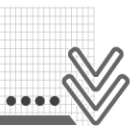
欲使 IGBT 关断时,给栅极施加反向脉冲电压 $-U_{GM}$,在此反向电压作用下,内部等效 MOSFET 输入电容放电,内部等效 GTR 仍然导通, $t_5 \sim t_6$ 时间内,集电极电流、电压无明显变化,这段时间定义为存储时间 t_s 。 t_6 时刻后, MOSFET 开始退出饱和,器件电压随之上升,PNP 晶体管集电极电流无明显变化。 t_7 时刻 U_{CE} 上升到接近 U_{CM} , $t_6 \sim t_7$ 这段时间称电压上升时间 t_{vr} 。之后, MOSFET 退出饱和, GTR 基极电流下降,集电极电流减小,从栅极电压 $+U_{GE}$ 的脉冲后沿下降到其幅值的 90% 的时刻起,到集电极电流下降至 90% I_{CM} 止(约为 $t_5 \sim t_7$),这段时间为关断延迟时间 $t_{d(off)}$ 。此后, U_{GE} 继续衰减,到 t_8 时刻, U_{GE} 下降到 U_T , MOSFET 关断, PNP 晶体管基极电流为零,集电极电流下降到接近于零。集电极电流从 90% I_{CM} 下降至 10% I_{CM} 的这段时间为电流下降时间 t_{if} 。由于晶体管内部存储电荷的消除还需要一定时间,因此 $t = t_8$ 以后,还有一个尾部时间 t_t ,这段时间内,由于“集—射”极电压已经建立,会产生较大的损耗。定义 $t_5 \sim t_8$ 这段时间为关断时间 t_{off} ,即 $t_{off} = t_{d(off)} + t_{if} + t_t$ 。 IGBT 内部由于双极型 PNP 晶体管的存在,带来了通流能力增大、器件耐压提高、器件通态压降降低等好处,但由于少了储存现象的出现,使得 IGBT 的开关速度比电力 MOSFET 的速度要低。

2.6.3 IGBT 的主要参数

(1) “集—射”极额定电压 U_{CES} 。它是“栅—射”极短路时的 IGBT 最大耐压值,是根据器件的雪崩击穿电压规定的。

(2) “栅—射”极额定电压 U_{GES} 。IGBT 是电压控制器件,靠加到栅极的电压信号来控制 IGBT 的导通和关断,而 U_{GES} 是栅极的电压控制信号额定值。通常,IGBT 对栅极的电压控制信号相当敏感,只有栅极在额定电压值很小的范围内,才能使 IGBT 导通,而不致损坏。

(3) “栅—射”极开启电压 $U_{GE(th)}$ 。它是指使 IGBT 导通所需的最小“栅—射”极电压。通常,IGBT 的开启电压 $U_{GE(th)}$ 在 3~5.5V 之间。



(4) 集电极额定电流 I_C 。它是指在额定的测试温度(壳温为 25°C)条件下, IGBT 所允许的集电极最大直流电流。

(5) “集—射”极饱和电压 U_{CEO} 。IGBT 在饱和导通时, 通过额定电流的“集—射”极电压, 代表了 IGBT 的通态损耗大小。通常, IGBT 的“集—射”极饱和电压 U_{CEO} 在 $1.5\sim 3\text{V}$ 之间。

2.6.4 IGBT 的驱动电路

1. IGBT 对栅极驱动电路的特殊要求

IGBT 的驱动电路在其应用中有着特别重要的作用, IGBT 应用的关键问题之一, 是驱动电路的合理设计。

(1) 栅极驱动电压脉冲的上升率和下降率要充分大。

(2) IGBT 导通后, 栅极驱动电路提供给 IGBT 的驱动电压和电流要具有足够的幅度。

(3) 栅极驱动电路提供给 IGBT 的正向驱动电压 $+U$ 增加时, IGBT 输出级晶体管的导通压降和导通损耗值下降, 并不是说 $+U$ 值越高越好。

(4) IGBT 在关断过程中, “栅—射”极施加的反偏压有利于 IGBT 的快速关断。

(5) IGBT 的栅极驱动电路应尽可能地简单、实用, 最好自身带有对被驱动 IGBT 的完整保护能力, 并且有很强的抗干扰性能, 且输出阻抗尽可能低。

(6) 由于栅极信号的高频变化很容易相互干扰, 为防止造成同一个系统多个 IGBT 中的某个误导通, 因此要求栅极配线走向应与主电流线尽可能远, 且不要将多个 IGBT 的栅极驱动线捆扎在一起。

2. IGBT 栅极驱动电路应满足的条件

栅极驱动条件与 IGBT 的特性密切相关。设计栅极驱动电路时, 应特别注意导通特性、负载短路能力和引起的误触发等问题。栅极串联电阻、栅极驱动电压的上升率、下降率对 IGBT 的导通和关断过程有较大的影响。

2.7 集成门极换流晶闸管

集成门极换流晶闸管(Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT)是 1996 年问世的一种新型半导体开关器件。

2.7.1 IGCT 的结构

IGCT 是将门极驱动电路与门极换流晶闸管(GCT)集成为一个整体而形成的。门极换流

晶闸管(GCT)是基于 GTO 晶闸管结构的一种新型电力半导体器件,它不仅有与 GTO 晶闸管相同的高阻断能力和低通态压降,而且有与 IGBT 相同的开关性能,即它是 GTO 晶闸管和 IGBT 相互取长补短的结果,是一种较理想的兆瓦级、中压开关器件,非常适合用于 6kV 和 10kV 的中压开关电路。

IGCT 和 GTO 晶闸管相比,IGCT 的关断时间降低了 30%,功耗降低了 40%。IGCT 不需要吸收电路,IGCT 在使用时,只需将它连接到一个 20V 电源和一根光纤上,就可以控制它的导通和关断。

由于 IGCT 的设计比较理想,使得 IGCT 的导通损耗可以忽略不计,再加上它的低导通损耗,使得它可以在以往大功率半导体器件所无法满足的高频率下运行。它是一种耐高压大电流器件,具有很强的关断能力,开关速度比 GTO 晶闸管高 10 倍。目前 IGCT 的最高阻断电压为 6kV,工作电流为 4kA,此外,其最突出的优点是可以取消浪涌电路。

图 2.20 所示为 IGCT 的原理框图和电路符号。

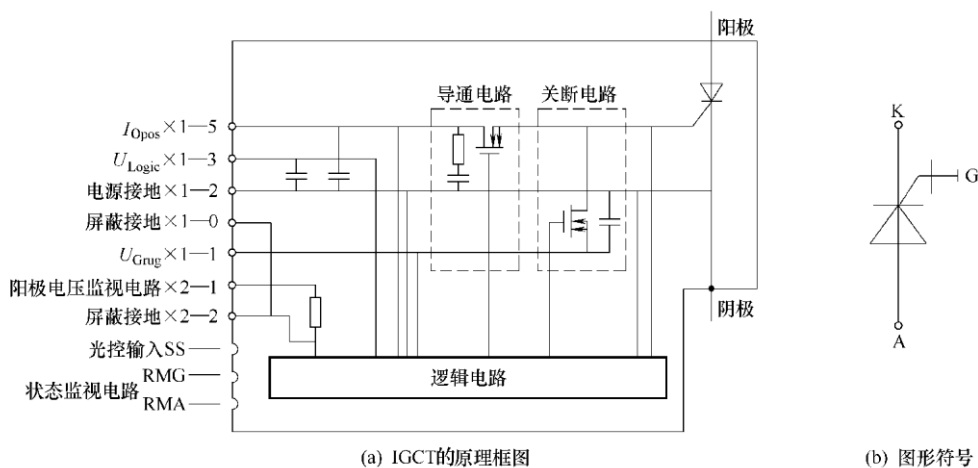
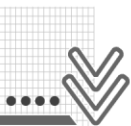


图 2.20 IGCT 的原理框图和电路符号

IGCT 采用缓冲层透明发射极(Buffer Layer Transparent Emitter)技术取代了 GTO 晶闸管阳极短路技术,从而克服了 GTO 晶闸管的触发及维持电流急剧增大的弊端,显著降低了触发电流和电荷存储时间。

IGCT 还采用了低电感封装技术,使阳极电流在 $1\mu s$ 的时间内全部经门极流出,而不流经阴极,使 PNPN 的四层结构的晶闸管暂时变为稳定的 PNP 三层结构,无需 GTO 晶闸管复杂的缓冲电路。

在获得相同阻断电压的前提下,IGCT 芯片可以比 GTO 晶闸管芯片制作得更薄,薄得如同二极管,故可与反并联的续流二极管集成在同一个芯片上。



2.7.2 IGCT 的特点

由于 IGCT 像 IGBT 一样具有快速开关功能,像 GTO 晶闸管一样具有导电损耗低的特点,故在各种高电压、大电流应用领域中的可靠性更高。IGCT 装置中的所有元件装在紧凑的单元中,降低了成本。IGCT 采用电压源型逆变器,与其他类型变频器的拓扑结构相比,结构更简单,效率更高。对于 4.16kV 的变频器,逆变器中需要 24 个高压 IGBT,如使用低压 IGBT,则需 60 个;而同类型变频器若采用 IGCT,则只需 12 个。

优化的技术只需更少的器件,相同电压等级的变频器采用 IGCT 的数量只需低压 IGBT 的 1/5。并且,由于 IGCT 的损耗很小,所需的冷却装置较小,因而内在的可靠性更高。更少的器件还意味着更小的体积。因此,使用 IGCT 的变频器比使用 IGBT 的变频器简洁、可靠性高。尽管 IGCT 变频器不需要限制 du/dt 的缓冲电路,但是,IGCT 本身不能控制 di/dt (这是 IGCT 的主要缺点),所以,为了限制短路电流上升率(di/dt),在实际电路中,常串入适当的电抗。

2.8 MOS 控制晶闸管

MOS 控制晶闸管(MOS Controlled Thyristor, MCT)是一种单极型和双极型结合而形成的复合器件,输入侧为 MOSFET 结构,因而输入阻抗高,驱动功率小,工作频率高;而输出侧为晶闸管结构,能够承受高电压,通过大电流,这是一种很有发展前途的器件。

2.8.1 MCT 的结构与工作原理

MCT 是在晶闸管结构基础上又制作了两只 MOSFET,其中,用于控制 MCT 导通的那只 MOSFET 称为开通场效应晶体管(ON-FET),用于控制阻断的那只 MOSFET 称为关断场效应晶体管(OFF-FET)。根据开通场效应晶体管的沟道类型不同,可分为 P-MCT 和 N-MCT 两种。MCT 采用多胞元集成工艺制成,一个 MCT 约含有 10 万个单细胞。图 2.21 所示为 P-MCT 一个单细胞的等效电路及图形符号。

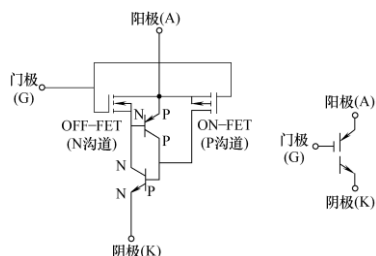


图 2.21 P-MCT 的单细胞等效电路及图形符号

如果是 N-MCT，其图形符号阳极的箭头方向相反。由图 2.21 可见，MCT 的电极和晶闸管一样，也是阳极 A、阴极 K 和门极 G，但 MCT 是电压控制器件；晶闸管的控制信号加在门极与阴极两端，而 MCT 控制信号是加在门极与阳极之间的。

当门极 G 相对于阳极 A 加负电压脉冲时，ON-FET 导通，ON-FET 的漏极电流作为 NPN 晶体管的基极电流，经 NPN 晶体管放大 β_2 倍后的集电极电流又作为 PNP 晶体管的基极电流，PNP 晶体管又放大 β_1 倍重新送入 NPN 晶体管的基极，如此循环，形成强烈的正反馈，当 $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$ 时，MCT 进入导通状态。

当门极相对于阳极加正电压脉冲时，OFF-FET 导通，PNP 晶体管的基极电流经 OFF-FET 流向阳极，使 PNP 晶体管截止，从而破坏了晶闸管的正反馈，使 MCT 关断。

一般，使 MCT 导通的负脉冲电压为 $-5 \sim -15\text{V}$ ，使 MCT 关断的正脉冲电压为 $+10 \sim +20\text{V}$ 。

2.8.2 MCT 的主要参数

- (1) 断态重复峰值电压 U_{DRM} ：是 MCT 的阳极和阴极之间的最大允许电压。
- (2) 反向重复峰值电压 U_{RRM} ：是 MCT 的阴极和阳极之间的最大允许电压。
- (3) 阴极连续电流 I_K ：在某一结温下，器件允许连续通过的电流。
- (4) 峰值可控电流 I_{TC} ：当 MCT 通过门极信号换向时，额定关断的最大阴极电流。

2.9 静电感应晶体管

静电感应晶体管(Static Induction Transistor, SIT)是一种电压型控制器件，具有工作频率高、输入阻抗高、输出功率大、放大线性度好、无二次击穿现象、热稳定性好等优点，广泛应用于超声波功率放大、雷达通信、开关电源和高频感应加热等方面。SIT 的单管耗散功率已做到数千瓦，工作频率已做到 10MHz ，电压电流容量已达 $2000\text{V}/300\text{A}$ 水平。

2.9.1 SIT 的基本结构和工作原理

SIT 的基本结构及电路图形符号如图 2.22 所示，在 N^+ 型衬底上外延高阻 N 层，然后在 N 高阻外延层内扩散若干个 P^+ 区，再在其顶部另外扩散一个 N^+ 层。从衬底上引出的电极叫漏极 D，将 P 区连在一起后，引出的电极叫栅极 G，从扩散的 N^+ 层上引出的电极称为源极 S。SIT 也是采用垂直导电形式的多细胞集成结构。

SIT 的工作原理如下：当“栅—源”和“漏—源”之间都不加电压时，相邻两个 P^+ 区之间存在电中性区沟道，这时，若在“漏—源”两端加正向电压，则有电流流过沟道，“漏—源”电压越高，沟道电流越大，相当于器件处于导通状态。SIT 工作时，是在“栅



“漏—源”间加负偏压,使得PN结的空间电荷区变厚,沟道变窄,电子势垒变大。进一步分析表明,电子势垒的大小,不仅与负栅偏压 U_{GS} 有关,而且与正的“漏—源”电压 U_{DS} 有关。负栅偏压 U_{GS} 的绝对值越大,电子势垒越高;正“漏—源”电压 U_{DS} 越大,电子势垒越低。因此,可以通过改变 U_{GS} 和 U_{DS} 的大小,控制沟道的电位分布与势垒高度,从而控制“漏—源”电流的大小。由于SIT的沟道电位分布及势垒高度是由 U_{GS} 和 U_{DS} 的静电场形成的,因而将器件命名为静电感应晶体管。

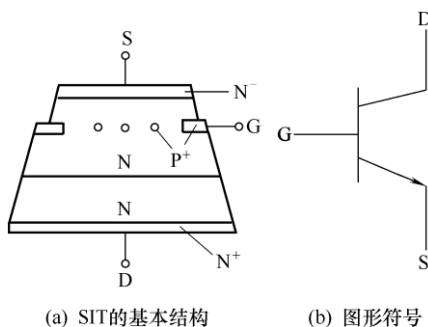


图 2.22 SIT 的基本结构及图形符号

2.9.2 SIT 的伏安特性

伏安特性是指SIT的“漏—源”电压 U_{DS} 与漏极电流 I_D 之间的关系。SIT是电压控制器件,其沟道势垒是由“栅—源”电压 U_{GS} 与“漏—源”电压 U_{DS} 共同决定的,沟道势垒的高度决定了“漏—源”电流的大小,图2.23表示了SIT的典型伏安特性。

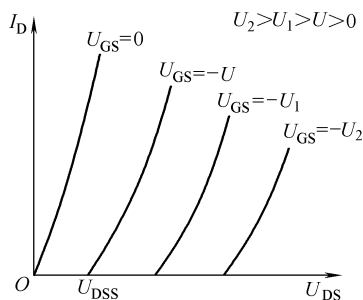


图 2.23 SIT 的典型伏安特性曲线

图中,“栅—源”电压 U_{GS} 为参变量,转折电压 U_{DSS} 是 $U_{GS}=-U$ 的伏安特性曲线与横轴的交点所对应的“漏—源”电压。

由图2.23所示的SIT的伏安特性曲线可以看出,当 $U_{GS}=0$ 时, I_D 和 U_{DS} 近似为线性关系,很小的“漏—源”电压就会产生很大的“漏—源”电流。这是因为 $U_{GS}=0$ 时,沟道中没有势垒存在,只表现为很小的体电阻。当“栅—源”之间加有负偏压 $U_{GS}=-U$ 后,沟道中的电位分布会发生变化,而出现势垒,当 $U_{DS} \leq U_{DSS}$ 时,几乎没有“漏—源”电流,即

I_D 和 U_{DS} 之间的关系存在一段死区；当 U_{DS} 继续增大时，则沟道势垒逐步降低，并开始有载流子越过势垒流动，即出现“漏—源”电流，随着 U_{DS} 的进一步增加，势垒高度越来越大。分析表明，在小电流区 I_D 随 U_{DS} 增大，呈指数关系，在较大电流区则呈线性关系。

2.9.3 SIT 的极限参数

- (1) “栅—源” 击穿电压 U_{GSO} ：漏极开路时“栅—源”之间可承受的最高反向电压。
- (2) “栅—漏” 击穿电压 U_{GDO} ：源极开路时“栅—源”之间可承受的最高反向电压。
- (3) 最大漏极电流 I_{Dmax} ：器件工作时漏极允许通过的最大峰值电流。
- (4) 允许功耗 P_T ：SIT 允许的最大耗散功率。

2.10 智能功率模块

智能功率模块(Intelligent Power Module, IPM)是一种混合集成电路，是 IGBT 智能化功率模块的简称。它以 IGBT 为基本功率开关器件，将驱动、保护和控制电路的多个芯片通过焊丝(或铜带)连接，封入同一模块中，形成具有部分或完整功能的、相对独立的单元。如构成单相或三相逆变器的专用模块，用于电动机变频调速装置。

图 2.24 所示为内部只有一个 IGBT 的 IPM 产品的内部框图，模块内部主要包括欠压保护电路、IGBT 驱动电路、过流保护电路、短路保护电路、温度传感器及过热保护电路、门电路和 IGBT。

图 2.25 所示为另一种内部带有制动电路和两个 IGBT 的半桥式 IPM 模块的内部结构。IPM 模块内部结构大体相同，都是集功率变换、驱动及保护电路于一体。使用时，只需为各桥臂提供开关控制信号和驱动电源，大大方便了模块的应用和系统的设计，并使可靠性大大提高，特别适用于正弦波输出的变压变频(VVVF)式变频器中。

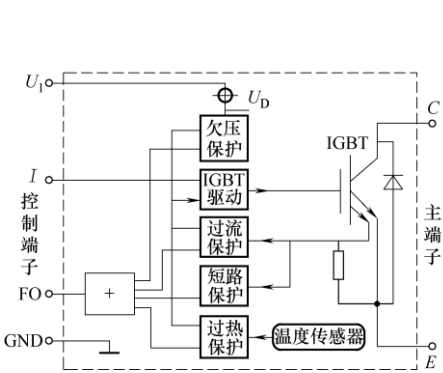


图 2.24 一种 IPM 产品的内部框图

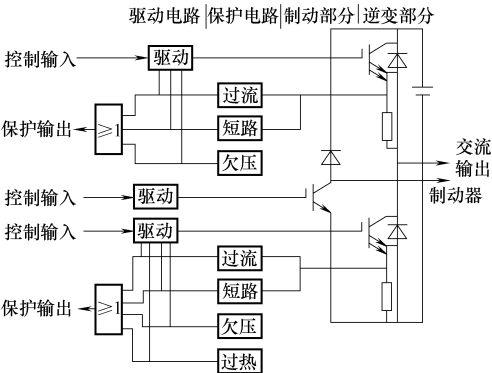
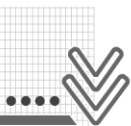


图 2.25 另一种 IPM 模块的内部结构



由于 IPM 模块内部具有多种保护功能,即便是内部的 IGBT 元件承受过大的电流、电压,IPM 模块也不会被损坏。所以使用 IPM 模块,不但可以提高系统的可靠性,而且可以实现系统小型化,缩短设计时间。

由于 IPM 是靠焊丝将内部各功率元件与控制等电路连接起来的,焊丝引入的线电感与焊丝、焊点的可靠性限制了 IPM 的进一步发展。为此,在国外一些研究机构的支持下,提出了 IPEM(Intelligent Power Electronic Module, 智能功率电子模块)这一系统集成概念。

本章小结

电力二极管(PD)的内部结构是一个 PN 结,加正向电压导通,加反向电压截止,是不可控的单向导通器件。

普通晶闸管(SCR)是双极型电流控制器件。当对晶闸管的阳极和阴极两端加正向电压,同时在它的门极和阴极两端也加正向电压时,晶闸管导通,但导通后,门极便失去控制作用,不能用门极控制晶闸管的关断,所以它是半控器件。

门极可关断(GTO)晶闸管的导通与晶闸管一样,但门极加负电压可使其关断,所以它是全控器件。

电力晶体管(GTR)是双极型全控器件,工作原理与普通中、小功率晶体管相似,但主要工作在开关状态,不用于信号放大,它承受的电压和电流数值大。

电力 MOS 场效应晶体管(P-MOSFET)是单极型全控器件,是属于电压控制的,驱动功率小。

绝缘栅双极型晶体管(IGBT)是复合型全控器件,具有输入阻抗高、工作速度快、通态电压低、阻断电压高、承受电流大等优点,是功率开关电源和逆变器的理想电力半导体器件。

集成门极换流晶闸管(IGCT)是将门极驱动电路与门极换流晶闸管(GCT)集成于一个整体形成的,是较理想的兆瓦级、中压开关器件,非常适用于 6kV 和 10kV 的中压开关电路。

智能功率模块(IPM)将高速度、低功耗的 IGBT 与栅极驱动器和保护电路一体化,因此具有智能化、多功能、高可靠性、速度快、功耗小等特点。

思考与练习

- (1) 晶闸管的导通条件是什么?截止条件是什么?
- (2) 说明 GTO 晶闸管的导通和关断原理。与普通晶闸管相比,有何不同?
- (3) GTO 晶闸管有哪些主要参数?其中哪些参数与普通晶闸管相同?哪些不同?

- (4) GTR 的应用特点及选择方法是什么？
- (5) 画出 GTR 的理想基极驱动电流波形，并加以说明。
- (6) MOSFET 的应用特点及选择方法是什么？
- (7) 说明 IGBT 的结构与工作原理，IGBT 的应用特点及选择方法是什么？
- (8) IGCT 和 GTO 晶闸管相比，具有什么特点？
- (9) IPM 的应用特点是什么？
- (10) 收集目前生产 IPM 模块的较大厂家的产品型号及其达到的容量、性能等参数。

