1 电力电子技术的发展和应用简介

1.1 电力系统与电力电子技术概况

电力系统包括发电、送电和用电全过程，所用的器具有一些是线性的，即在主要运行参数范围内，所加电压与流过的电流成正比，例如，变压器、输电线在其正常运行时都可看成是线性设备。而非线性的器具可能产生更为特殊、也相当有用的特性。电力系统使用的非线性元件有些不属于电力电子的领域，例如为了防止过电压所采用的空气间隙和阀型避雷器，利用磁饱和现象设计的磁电器件等。电真空技术的发现和发展，给非线性元件的应用开辟了一个新阶段。电真空器件的单向导电特点、电流可关断特点，以及它的可控性，使其增加了极丰富的处理电能的方法。汞弧整流器、闸流管、引燃管的应用，产生了可控整流器和直流拖动设备。

现代电力电子学是与固体物理学一起发展起来的。40年代中期半导体二极晶体管和三极晶体管的发明是电子技术的里程碑。随后，固体电子器件向高频化发展。同时还有两个趋向，一是小型化、微形化（这就是现在通信和计算机系统的技术基础），二是大容量化。这样它就开始取代电真空器件。

大容量化这个方向在于提高工作频率，首先解决的是提高工作电压和工作电流。1957年，通用公司制造出300V、16A的可控硅，其特性极像电真空器件的闸流管，后来被定名为晶

闸管（thyristor）。它的额定电压、电流都逐渐增大。由于晶闸管的高可靠性和低成本，很快就在各应用领域取代容量近似的电真空器件。容量最大的电力电子器件是电力系统中的高压直流输电，也在 70 年代被半导体器件——晶闸管所占领。

为了便于阅读，本章将简略回顾晶闸管的特性。至于晶闸管的具体知识，在直流输电的书籍或其他专著中已有详细的讨论，读者可以自行参看。另外，本章还将介绍电力系统可能使用或已在使用的几种较新的半导体（固体）电力电子器件。

1.2 门极可关断晶闸管（GTO）

晶闸管也称可控硅，是 50 年代发展起来的开关器件，它在阳极加正电压，门极用正向电流触发而开始导通，电流流过阳极和阴极，当电流降到零时晶闸管即呈断开状态。由于晶闸管是最基本的开关器件，并已广泛应用，成为电工知识的素材，故此处不详细讨论，而只说明大容量晶闸管的情况。

80 年代晶闸管的容量发展到 5kV、3kA 的水平，硅片直径达到 100mm。如今，100mm 直径的晶闸管是直流输电的基本开关元件。较低电压的晶闸管其额定电流已达 5kA，较小电流的晶闸管耐压达 8kV。大容量晶闸管也用在无功静止补偿器和大容量电机启动和变速上。

与晶闸管几乎同时出现的门极可关断晶闸管（gate turn-off thyristors，以下简称 GTO）是另一种功率大的开关元件。GTO 与普通晶闸管性能不同之处在于它可由门极注入一个反方向电流，使阳极与阴极间不为零的电流关断。目前由于 GTO 的容量达到 5MVA 左右，又有可控关断的特点，因而在很多领域广泛采用。现代电力电子技术在大容量的应用方面，

GTO 是使用最广的开关部件，担当最重要的角色。

1.2.1 GTO 晶闸管介绍

这里只描述 GTO 晶闸管使用的有关问题，希望通过这个介绍，能使读者基本上了解与晶闸管应用有关的原理和特性。GTO 晶闸管是 PNPN 四层半导体器件，有三个引出端，这与晶闸管相同。 GTO 的阳极 A 加正电压，阴极 K 加负电压，负载在这个电路里与 GTO 晶闸管串联，当门极与阴极间加一个门极 G 为正的电压时，GTO 被触发导通，如果阳极和阴极电流足够大，在触发电压不存在时阳阴极之间仍然导通，电流过小则自行关断，这些特点与普通晶闸管相同。

GTO 的独特之处是门极 G 可关断阳阴极间的电流。只要在门极与阴极间加一个负偏置电压形成负电流，并有足够大的幅值，则负荷电流将关断，这个行为可由电子空穴的理论说明。

图 1.1 是 GTO 关断时的电子流动断面，在关断时门极

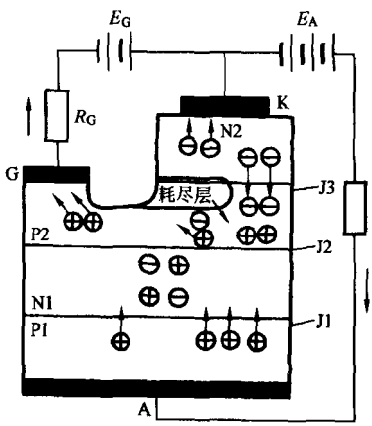


图 1.1 GTO 晶闸管关断过程

电流为一 I_G，门极电压 $-E_G$。

GTO 在导通状态电流从阳极 A 通过 P1、N1、P2、N2 四层中的三个结流向阴极，相当于从 A 到 K 的电流。当门极 G 加入电压 $-E_G$，中和了非平衡空穴载流子、阻断 N2 非平衡电子流的流入，门极电流一 I_G 相当于空穴电流从门极通过，电子则从此门极为正的阴极排空，当空穴和电子在 J3 结门极附近消失，J3 结这个部件形成耗尽层，并向远离门极的部件扩展。这样 N2 层不再供应电子，P2 层将中和掉过剩载流子。J3 结这种离断的反偏使 J2 结循复了阻断能力，从而关断了 GTO，在 J2 结上恢复耗尽层。GTO晶闸管的三极管说明图和符号见图 1.2。

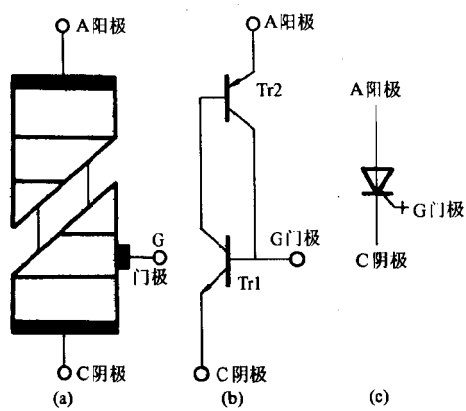


图 1.2 GTO 晶闸管的三极管说明图和符号

(a) 功能示意图；(b) 等值电路；(c) 符号

某些出版物中所用 Tr1 和 Tr2 与此处规定不同，请读者注意。被关断阳极电流与门极关断电流之比称为关断增益 Goff，这一概念已被广泛采用，其值为

$$G_{off}=\frac{\alpha_1}{\alpha_1+\alpha_2-1}=\frac{I_A}{I_{GQ}}$$

1.2.2 GTO 晶闸管的主要参数

为了便于查阅样本等资料，此处列出 GTO 晶闸管各主要参数的英文名称，有的还列出参数的指定条件（GTO 关断时的等值电路见图 1.3）。

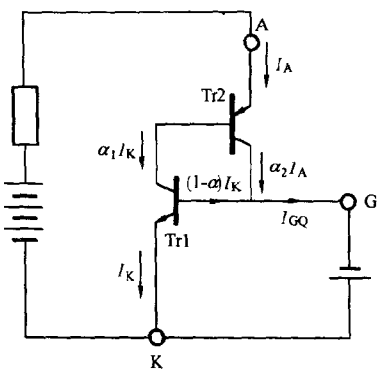


图 1.3 GTO 关断时的等值电路

(1) U_{RRM}——反向重复峰值电压（repetitive peak reverse voltage）。在额定结温范围，门极和阴极间无外加信号，规定的每周期的重复的反向峰值（最大）电压。GTO 的型号上、铭牌上所规定的额定电压（另有说明除外）。

(2) $I_{T(RMS)}$——通态电流有效值（RMS on-state current）。在指定的外温下，加在器件上的连续通态电流的有效值。

(3) $I_{T(av)}$——通态平均电流（average on-state current）。在指定外温下，器件接电阻或电感性负荷（正弦工频半周）可连续通过的平均正向电流。

(4) I_{TQRM}——重复可控通态电流（repetitive controllable

on-state current）。门极控制可关断的允许电流值，无特别说明时为最大值。某些产品以此作为铭牌上规定的额定电流值。

（5）I_{TGQM}、I_{TGQ}—— 可控通态电流（controllable on-state current）。在器件关断前的瞬间，门控可关断的瞬时电流值。某些产品以此为额定电流。

（6）U_{RSM}—— 不重复反向峰值电压（non-repetitive peak reverse voltage）。额定结温范围，门极阴极间无信号，规定峰值非重复反向电压，其所加时间不大于工频半个正弦波。

（7）$U_{R(DC)}$—— 直流反向电压（DC reverse voltage）。同上条件，规定的反向直流电压最大值。

（8）U_{DRM}—— 重复峰值断态电压（repetitive peak off-state voltage）。同上条件，每周加的峰值重复断态电压，包括重复的暂态电压的最大瞬时值。

（9）U_{DSM}——非重复的断态峰值电压（peak non-repetitive off-state voltage）。与前项相同条件，规定非重复的断态峰值电压，其所加时间小于工频半个正弦波，即非重复暂态断态电压的最大瞬时值。

（10）$\frac{dU}{dt}$ —— 断态电压临界上升率（critical rate of rise of off-state voltage）。GTO 在最大额定结温，门极阴极间没有信号的条件下，不由断态转向通态的规定的最大断态电压主上升率。

（11）U_T、U_{TM}——通态电压（最大值）（on-state voltage）。通态电流在阳极和阴极间的电压降，规定的通态电压最大值是规定的半个正弦工频电流在阳极和阴极间的电压降的最大值。

（12）I_{TSM}—— 浪涌电流（surge-on current）。在额定结温

范围内，非重复通态电流（工频半周正弦）值，是周期的函数。

(13) $\frac{di}{dt}$ ——通态临界电流上升率（critical rate of rise of on-state current）。在规定的器件外壳温度下，门极触发导通，使 GTO 能承受的电流上升的最大速率。

(14) I_H——维持电流 (holding current)。在规定结温，门极条件规定的断态电压下，维持 GTO 导通的最小电流。

(15) I_L——闩住电流 latching current)。亦译为擎住电流，在规定结温，断态电压和门极条件下， GTO 才从断态进入通态，立即除去门极触发电流，此时能维持 GTO 导通的最小阳极电流。

(16) P_T、$P_{T(av)}$—— 通态损耗 (on-state power dissipation)。在规定的导通条件，通态电流与电压瞬时值乘积一周内的积分值平均值。

(17) I_{GT}—— 门极最小触发电流 gate trigger current)。在结温 25℃，断态电压 6V，规定的负荷电阻，GTO 由断态转变为通态的最小门极直流电流。

(18) I_{GQ}、I_{RG}—— 门极关断电流（gate turn-off current)。使 GTO 由通态转为断态，所需最大门极反向电流的最小值，其他门极电流为 I_G。

(19) G_{off}——关断增益(turn-off gain)。可控阳极电流与关断它所需门极反向电流之比。

(20) t_{gt}——开通时间（turn-on time)。门极加正向触发电流到 GTO 转为导通状态所需时间，见图 1.4。

(21) t_{gq}——关断时间 (turn-off time)。门 极加反向关断电流，到 GTO 从通态转为断态所需时间，见图 1.5。

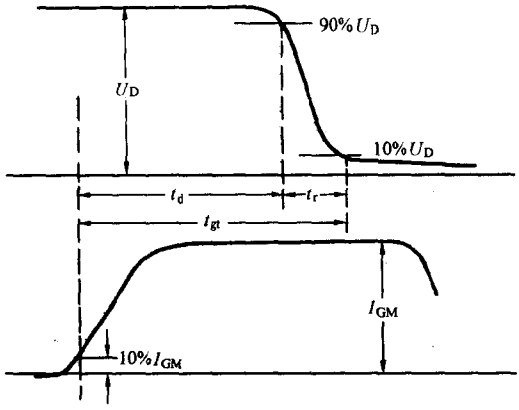


图 1.4　开通时间

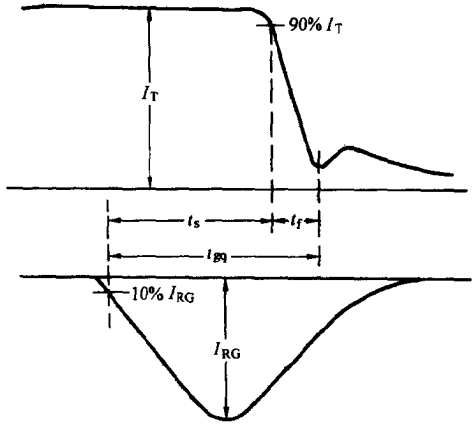


图 1.5　关断时间图

(22) t_d—— 延迟时间（delay time）。在开通的时间 t_{gt}内，门极开通电流达到 10%I_{GM}时开始，到阳极电压下降到 90%

U_D 这段时间。

(23) t_s—— 存储时间（storage time）。门极反向关断电流达到 $10\%I_{RG}$ 开始到阳极电流下降到 $90\%I_T$ 时这段时间。

1.2.3 GTO 晶闸管的开关特性

（一）GTO 开通过程

GTO 的开通过程与普通晶闸管的开通过程极为相似，但所需触发能量稍大于同级晶闸管，损耗则较晶闸管大。

门极触发电流 I_G 的幅值越大，上升斜率陡度越大，则开通时间越小。从图 1.4 可知，开通时间 t_{gt} 包括延迟时间 t_d 和上升时间 t_r（实际是电压下降时间）两部分，开通时间短即减小了开通损耗。

开通过程的另一个要求是：最好在 GTO 开通后门极仍保留一个较小的正向门极电流，这对保持 GTO 导通是有利的，尤其是对感性负荷有利，许多实际应用便采用高频脉冲列贯穿整个导通期间。

（二）GTO 的关断过程

GTO由门极关断的过程有独特的性质，在图 1.1 已说明在 J3 结扩展耗尽层使 J2 形成势垒电荷层而完全关断。J3 结上耗尽层扩展的时间大致是 GTO 关断过程中的下降时间 t_f，见图 1.5。

在电流下降之前，由于反向门极电流的作用，从门极和阴极排除不平衡正载流子和电子所需的时间，相当于存储时间 t_s。t_s 与 t_f 构成关断时间 t_{gq}。

由于阳极回路中存在着分布电感，在关断过程中，当阳极电压开始上升而电流下降后，会产生一个电压尖峰 U_{DSP}。它出现在反向结的绝缘还没有完全恢复的时间内，其上升速度和峰值可能导致再次导通。因此，在阳极电路上必须有一组

吸收缓冲器来消除 U_{DSP}的作用。 U_{DSP}也称钉形电压（spike voltage）.

其后，由于分布电容和缓冲器电路的作用还会产生两个阳极电压峰值，其中一个是 U_{DM}，它出现在阳极电压恢复到最高位置时，表现为过冲；另一个在其后表现为随后的振荡，即图 1.6 中的 U_{SS}。这些电压的波动都应由缓冲器加以吸收。

在关断过程中电流在关断时间 t_{gq}以后，即电流有一个小的上升之后直到到达维持电流 I_H值这段时间，称为尾部时间

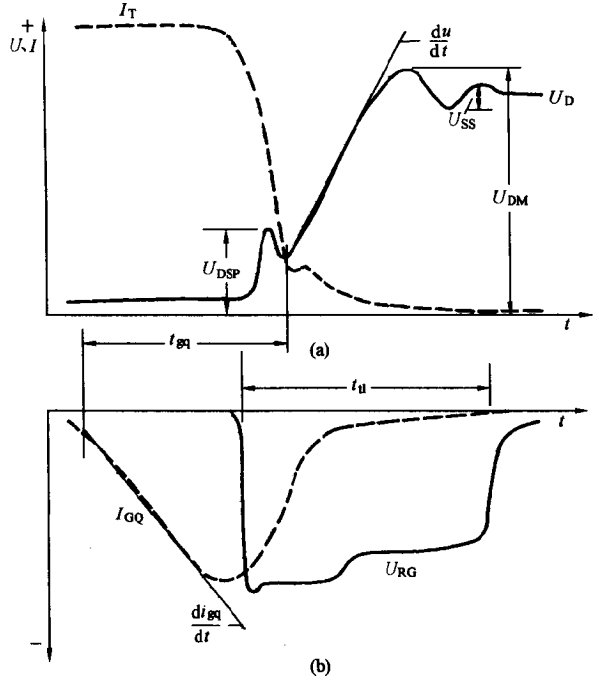


图 1.6 GTO 关断过程中阳极和门极的电压、电流过程

（a）电压波形；（b）电流波形

(tail time)。只有在尾部时间之后关断进程才结束。

1.2.4 缓冲器

本书对缓冲器的概况作一介绍，由于篇幅所限，不能详细讨论各种方案和参数选择。

缓冲器（snubber）也译为吸收器或吸收电路，是由图 1.7 所示的电路组成，其作用是平缓 GTO 器件内部电子对存储电荷在场方向改变时产生的电流突变。此电流通过外电路电感产生的电压可能损坏 PN 结。

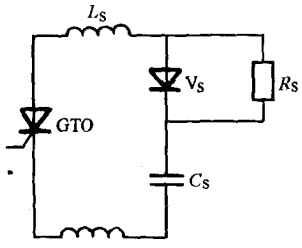


图 1.7 GTO 及其缓冲器

缓冲器电路中的分布电感 L_S 也起到产生过电压的作用，因此，缓冲电路的引线要极力缩短，使用扁平铜线并用良好的接触方式，这样做，分布电感的总值可以降到 0.3～0.15μH。大 GTO 一般要求降到 0.2μH 以下。L_S 与 GTO 的可关断电流（即容量）有明显关系。经过大量测试，发现在其他条件相同时，减小 L_S 可减少过电压击穿，增加了可关断电流 I_{TQRM}。例如三菱公司的一种 FG 型 GTO，当 $L_S=0.2\mu H$ 时，$I_{TQRM}=2800A$；当 $L_S=0.4\mu H$ 时，$I_{TQRM}=2200A$。可见减小分布电感的必要性。

增加电容可以减少过电压击穿的可能。测试表明，在相同条件下，可关断电流随电容 C_S 的增大而增大。上述 3000A GTO 的行为是在缓冲电容 $C_S=5\mu F$ 时测定的，若增到 $C_S=6\mu F$ 则在 $L_S=0.2\mu H$ 时，$I_{TQRM}=3000A$；而在 $C_S=2\mu F$ 时，$I_{TQRM}=1670A$；$C_S=4\mu F$ 时，$I_{TQRM}=2500A$。增大 C_S 在使 GTO 载流容量增加的同时，也使 GTO 的关断功率损耗减小，但问题是 C_S 的增大使缓冲器的损耗增大。

缓冲器电路的损耗可分为存储磁能损耗和电荷损耗，前者发生在主回路的电感部分，后者则与电容器电容 C_S 成正比，缓冲电路损耗可表示为

$$P_S = \frac{f}{2}(L_b I_{TGQ}^2 + C_S E_D^2)$$

式中 f——工作频率；

L_b——主回路流过阳极电流，与缓冲器并联部分的电感；

I_{TGQ}——可控通态电流；

E_D——关断阳极电压。

损耗 P_S 全部消耗在并联在二极管上的电阻 R_S 上，对高电压大容量的 GTO 和缓冲器，这个损耗是很大的，也需完善的冷却平衡它。

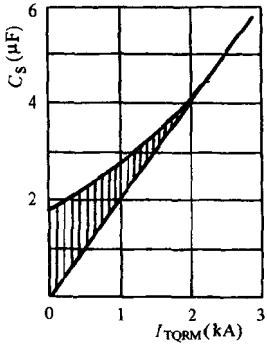


图 1.8 缓冲器电容与阳极通态电流关系

这里对缓冲器的参数 C_S 不进行详细的讨论，只给出制造厂推荐的数据，供参考。缓冲器电容与阳极通态电流关系如图 1.8 所示。

前面已说明 C_S 的作用在于吸收电压变动及过电压，为了防止在 GTO 导通时电容突然放电过大过快，可能导致损坏 GTO，因此在电容放电时设置二极管 V_S 以阻止直接放电，而是通过 R_S 放电，使放电电流趋于缓和。与 C_S 一起建议的 R_S 值示于图 1.9。

1.2.5 GTO 的驱动电路

GTO 晶闸管的开通特性与普通晶闸管相似，开通时，门

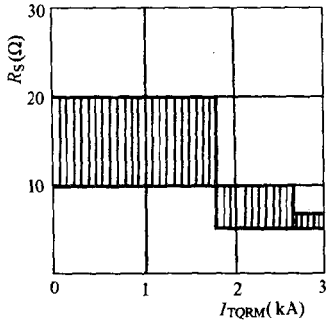


图 1.9　缓冲器电阻与电流的关系

极开通电流的幅值对开通速度和损耗有明显的影响。因此门极开通电流应比 I_{GT}大得多。门极开通电流 I_{GM}也要有较大的上升率 $\mathrm{d}i_G/\mathrm{d}t$，它也使门极开通时间 t_{tg}减小。但增大 $\mathrm{d}i_G/\mathrm{d}t$ 有电路设计上的困难，阳极电流开通后，还应维持较小的正向门极电流直到导通状态结束，此电流为 i_G。GTO 的门极电压和电流波形如图 1.10所示。

门极关断的一些特点是由实验测试得到的，当然有些是

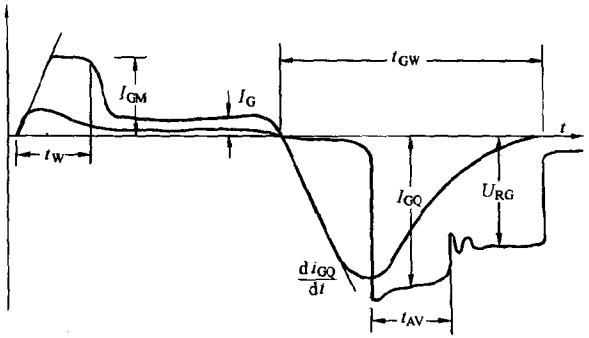


图 1.10　GTO 的门极电压和电流波形

制造厂测试后统计选择提供的。门极关断电荷 Q_{Gq}这个概念来源于 GTO 器件内控制极要吸收的多余载流子的电荷量，只有消除此电荷才能使 $J2$ 结恢复阻断状态。关断电荷与可关断电流近于成正比。从关断电荷可估计关断电流及其必须持续的时间。因为此电荷是关断电流对时间的积分，所需的关断电流 I_{GQ}随阳极电流的增大而相应增大，但关断增益 G_{off}在额定可关断电流时达最大，小于此电流时，G_{off}也下降。因此在很大范围内，关断电流不必有明显的变动，这在设计上可大为简化。关断电流的上升率（负值）越大，存储时间 t_s越小，下降时间 t_f 没有变化。因此，上升率 dI_{gq}/dt 是缩短关断时间 t_{gq}的重要因素。关断时间 t_{gq}及其相应的 dI_{gq}/dt 与元件的制造有关，目前提高关断速度的主要方法是将阴极和控制极分成更多分支，密布于 P 层上，在门极开始加关断电流时，门极阴极间阻抗很小，在存储时间 t_s 内维持此很小阻抗值，在下降时间 t_f 内阻抗增加，到门极阻断后，阻抗突然增大，在尾部时间后到最大值。下面介绍门控电路。

GTO 门极电路可分为以下几种基本类型：

1）利用电容储能作为关断电源；

2）利用直流电源作关断电源，用电阻限流；

3）用辅助电路或混合电容与电阻电路作为门极电路。

它们的共同电路如图 1.11，各种驱动电路或驱动器都是由这种基本构想演化而来，有的增加了振荡高频工作电源，相应的整流电路，有的增加了倍压装置或防止电流反向的二极管，或经过脉冲隔离变压器，控制信号可以 on1 与 on2合并，也可以与 off 合并，而正电压值信号使 GTO 开通，负电压值信号使 GTO关断。

对于一般的应用，驱动信号 on、off 与 GTO 的门极和阴

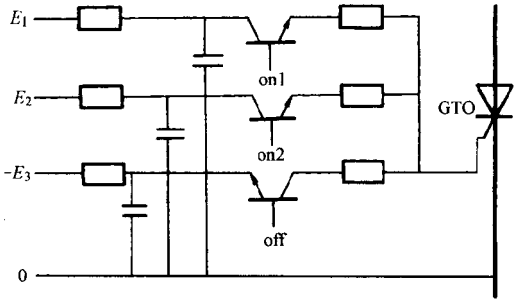


图 1.11 GTO的开关控制（驱动）电路示意图

极以及提供工作电源的一侧，三者是需要隔离的。低压系统应用的 GTO 有时部分会出现 GTO 和电源不需隔离而处于同一个电位上的情况。在电力系统的应用中这种同电位的情况极少出现，由于 GTO需要很大的关断门极电流，所以对电压的隔离方法与一般晶闸管或电压控制器件不相同，主要差别在于 GTO 工作电源所需功率大，这特点应在设计和使用中注意。在本书的介绍中略去关于 GTO 的工作损耗及热特性方面的内容，这些也都是很重要的。

1.3 绝缘门极双极晶体管（IGBT）

1.3.1 结构

电力系统大功率电力电子装置主要是应用晶闸管和 GTO，但在小型电力电子装置方面已经大量采用了绝缘门极双极晶体管（简称 IGBT）。它的单支容量已经达到 1600V、400A，大约是 GTO容量的 3%。大容量的设备还不能指望立即应用，对电力用户则可能成为应用最广泛的电子开关元件。

电力系统中，使用功率较小时也最先选用 IGBT。

IGBT 的最大优点是它的门极用电压控制而不用大电流反向关闭，门极有电压时 IGBT 导通，无电压时自行关闭。由于门极对源极有很小的电容存在，因之驱动 IGBT 要有一点容量。由于它的性能优越，在经过开发扩展容量之后，可望取代 GTO，但目前还不行。电压控制的更有希望的开关器件是 MOS 控制晶闸管（Mos controlled thyristor，简称 MCT）。也正在与 IGBT 争先扩大容量。本书对 IGBT 作简短的介绍，以便于电力工作者参考。

IGBT 的结构如图 1.12，如果门极对发射极（E)加一个正电压，图 1.12（a）中晶体管 PNP 成正偏而导通，它是由 P 区诱发 N 通道。门极电压降到零，P 区的通道被切断，IGBT 成为开断状态。门集电容比门射电容小，在 du/dt 开通和关断时，Miller 反馈作用得到改善。IGBT 的开安全运行面积

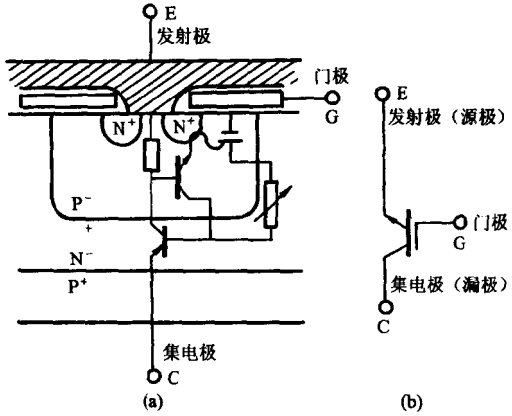


图 1.12 IGBT结构剖面，等值电路及表示符号

（a）IGBT 结构剖面，等值电路；（b）表示符号

(FBSOA)、关断安全运行面积(RBSOA)受到结温 T_j 的限制。IGBT 没有任何 2 次击穿现象。目前 IGBT 已具备 BJT(双极晶体管)的功率控制能力，但 IGBT 开关频率更高。

1.3.2 IGBT 的使用性能

首先观察 IGBT 的大范围特性，如图 1.13。当门射电压 $U_{GE}=U_{GE1}$，从集射电压 U_{CE} 为零开始。U_{CE} 增加，I_C 也成比例增加，各种 U_{GE} 的成比例增加特性组成 U_{CE}-I_C 的欧姆电阻特性，U_{GE1} 时，U_{CE} 增加到 A 点，I_C 呈饱和状。I_C 与 U_D 没有直接关系，I_C 不变区称为饱和电流，在雪崩线到欧姆区之间，有的厂家称此区 U_{CE} 为饱和电压值。

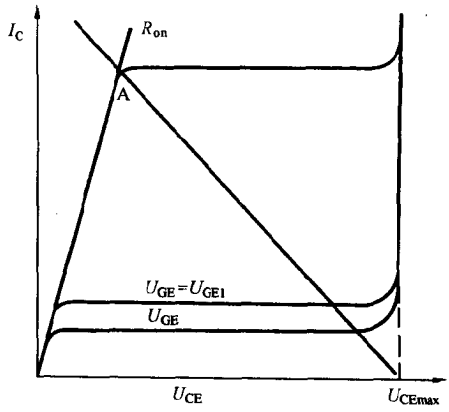


图 1.13 IGBT 的 U_{CE}-I_C 特性

擎住效应是 IGBT 的一个特性，参见图 1.12 (a)，即 I_{CE} 电流流过发射极和门极间 P 层的过程中在 P 层产生横向的空穴压降。它对发射极边的 N 区是正偏，当这个正偏足够大时会使最靠近发射极的 NPN 寄生晶体管导通，门极即失控。这种效应称为擎住效应，即由于通过电流过大，自身产生内