

内 容 提 要

《双向晶闸管应用技术》是一本新型大功率半导体器件应用读物。

书中先简要地说明了双向晶闸管的结构特性、工作原理及主要技术参数，接着较为详细地介绍了几种常用的触发电路，最后汇编了一些典型的双向晶闸管应用实例。对问题的论述既有定性分析，也有定量估算。其写法力求通俗易懂，由浅入深，基础知识与应用技术相结合。另外，对普通型晶闸管的选用和检测及常见故障也作了具体的分析和介绍。

本书可供工矿、企业单位从事自动控制的电工和工程技术人员参考。

编者的话

现代工业生产技术的迅猛发展，对交流电气控制装置提出了高速度、高质量、高效率、低消耗的新要求。双向晶闸管交流控制装置在各个领域自动化控制中得到越来越广泛的应用成为必然趋势。从1960年晶闸管与电子器件问世以来，许多国家先后研制了交流控制装置，已广泛应用在调压调速的起重运输机械、通风泵、卷绕机和电梯等设备上。近十几年来，我国双向晶闸管元件的制造和应用，发展极快。其应用范围可分为三大类：1. 交流调光、调功；2. 交流调压调速、调频调速；3. 交流无触点开关。

本书简要地说明了双向晶闸管的结构特性、工作原理、主要技术参数，详细地介绍了几种典型的应用实例，并讨论了几种常用的触发电路。同时对普通晶闸管的选择、检测和常见故障也作了具体的介绍。

该书在编写过程中，参考了西安交通大学、中国科学技术情报研究所重庆分所、湖南湘潭电机制造学校、上海整流器总厂、上海第一钢铁厂、上海电压调整器厂等单位技术资料文献。上海整流器总厂罗宗英高级工程师，陈泽声、杨启龙、温光华工程师和《电世界》编辑部徐自湘工程师均对本书进行了认真的审核修改，陈文洁同志对书中文稿、图稿做了大量的工作，在此一并表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限、经验不足，本书尚有疏漏、错误及不妥之处，恳切希望读者批评指正。

编 者

1986年9月

目 录

第一章 概 述.....	1
第一节 双向晶闸管的特点.....	1
第二节 双向晶闸管的型号含义.....	2
第三节 双向晶闸管的基本结构和伏安特性.....	3
第二章 双向晶闸管的工作原理和主要特性参数	5
第一节 双向晶闸管的工作原理.....	5
第二节 双向晶闸管的主要特性参数.....	8
第三章 双向晶闸管的常用触发电路	14
第一节 交流静态开关触发电路.....	14
第二节 零电压开关的触发电路.....	16
第三节 移相控制的触发电路.....	21
第四章 双向晶闸管的选择.....	30
第一节 额定电流的选择.....	30
第二节 额定电压的选择.....	31
第五章 双向晶闸管的应用实例	32
第一节 单相交流调压.....	32
第二节 三相交流调压.....	46

附 录	84
附录一 KP型晶闸管的合理选用	84
附录二 用万用表、图示仪检测KP型晶闸管	92
附录三 KP型晶闸管常见故障分析.....	100
主要符号说明	110
参考文献	111

第一章 概 述

双向晶闸管（简称双向元件）是由普通晶闸管派生出来的一种新型的大功率半导体器件。它与普通晶闸管所不同的是能采用正的或负的门极（即控制极）信号，可以使正、反两个方向导通。虽然双向晶闸管的封装形式和配用的散热器与同等规格的普通晶闸管完全相似，在结构和原理上也有共同之处，但是，就其本质上讲，它们之间却存在着很大的差异。下面简要介绍双向晶闸管的基本原理、特性参数及一些应用实例。

第一节 双向晶闸管的特点

双向晶闸管与普通晶闸管比较，其主要优点：

（1）在交流电路中只要使用一个双向晶闸管就可以代替两个反并联的普通晶闸管；

（2）有多种触发方式，能方便、灵活地满足各种控制要求，对于控制电路的设计极为有利；

（3）在使用时，如果施加的瞬时电压超过转折峰值电压，即使是暂态，元件也会导通，经过半个周期后又恢复正常工作。所以，一般情况下可简化过电压保护线路；

（4）双向晶闸管具有容量大、体积小、能耗低、无噪音等特点，使设备简单、可靠。

双向晶闸管的质量可靠、性能优良、使用简单，是广泛应用于强电领域的自动化控制方面较为理想的交流器件。所以，大力推广双向晶闸管的应用技术，对于发展国民经济有着十分重要的意义。

双向晶闸管的缺点是承受过电流和过电压的能力差；在运用过程中会产生高次谐波，使电网电压波形畸变，对电网干扰严重。这些问题，可以分别采取措施使之适应过电流和过电压暂态快速变化并把对电网电源的干扰降低到最小程度。

第二节 双向晶闸管的型号含义

目前根据我国原一机部部标JB2173—77,对于双向晶闸管型号的规定如图 1—1 所示。

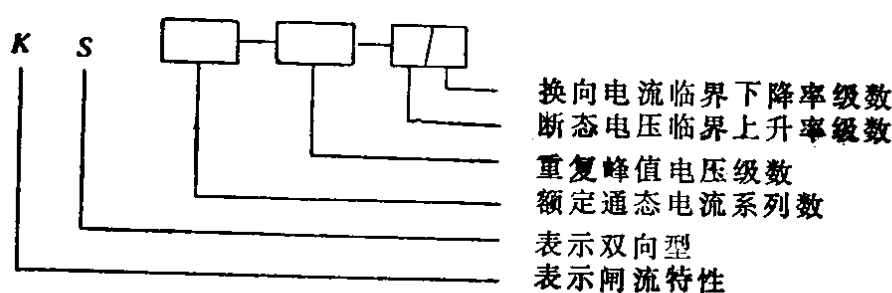


图1—1 双向晶闸管的型号规定

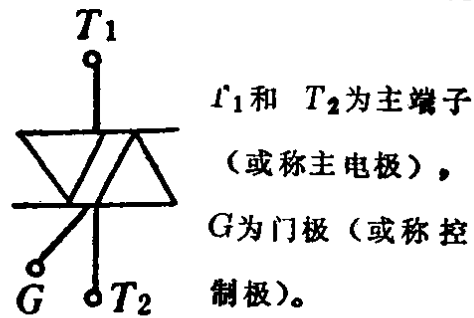


图1—2 双向晶闸管的符号

本标准适用于额定通态电流（有效值）在 1 安及 1 安以上的KS型双向晶闸管。

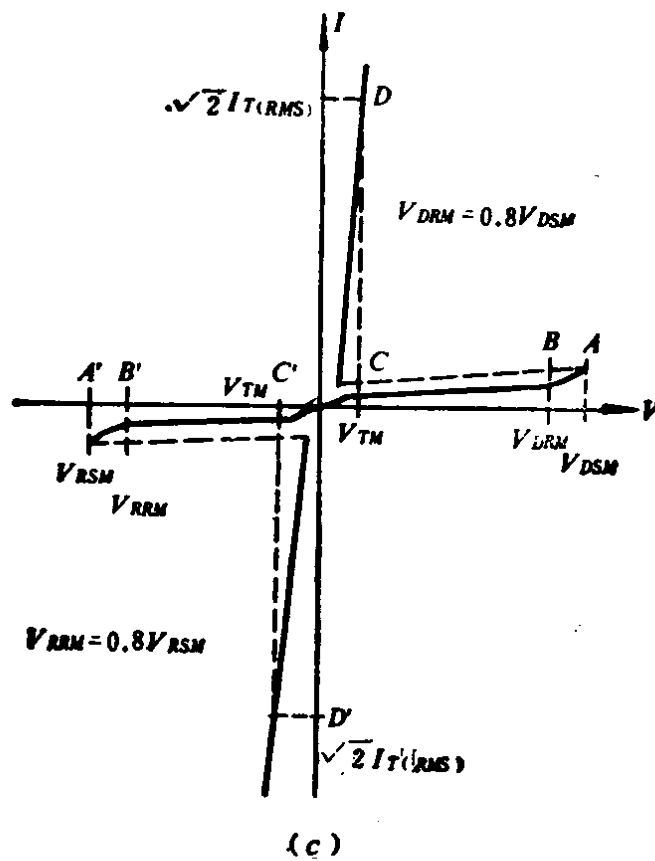
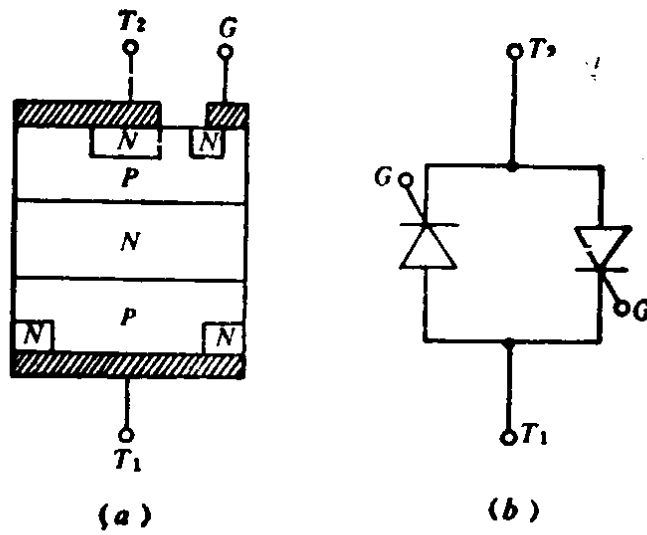
双向晶闸管的符号规定如图 1—2 所示。

近年来,国产双向晶闸管额定电流(有效值)通常有1安、5安、10安、20安、50安、100安、200安、400安、500安、800安,其中最常见的有1安、5安、20安、50安、200安、500安等规格。额定阻断峰值电压为100~1500伏。双向晶闸管的冷却方式与普通晶闸管一样:1安、10安、20安为自然冷却;50安、100安、200安为强迫空气冷却;400安、500安、800安为强迫空气冷却或液体冷却。

第三节 双向晶闸管的基本结构和伏安特性

对双向晶闸管的结构和特性,可以理解为两个反向并联的普通晶闸管。它的基本结构、等效电路、伏安特性如图 1—3 所示。

从图 1—3 (a)可以看出,双向晶闸管的主电极 T_1 和主电极 T_2 之间是由 $N-P-N-P-N$ 五层结构所组成。门极区的结构比较复杂,在下面介绍工作原理时再详细说明。因为双向晶闸管在门极的作用下能正、反两个方向导通,所以它的两个电极不能采用普通晶闸管那样的“阳极”和“阴极”的名称。对引出的主端子,只能简称第一电极 T_1 和第二电极 T_2 。第二电极 T_2 是测量门极 G 和第一电极上电压、电流的基本参考点,图1—3(c)所示的双向晶闸管交流伏安特性就是以 T_2 作为参考点。第Ⅰ象限中 T_1 相对 T_2 为正,而第Ⅲ象限 T_1 相对 T_2 为负。双向晶闸管两端加上交流峰值电压小于额定断态重复峰值电压,给出任何极性的触发电流,均能使双向晶闸管由关断状态转变成导通状态,在主回路电流降到不能保持继续导通时,双向晶闸管又转至关断状态。



V_A, V'_A : 一断态不重复峰值电压。 V_B, V'_B : 一断态重复峰值电压。 V_C, V'_C : 一通态峰值压降。 I_D, I'_D : 一额定通态电流的峰值。

(a) 基本结构 (b) 等效电路 (c) 伏安特性

图1—3 双向晶闸管

第二章 双向晶闸管的工作原理 和主要特性参数

第一节 双向晶闸管的工作原理

因为双向晶闸管不仅在第Ⅰ、第Ⅲ象限内导通，而且门极 G 的电位对 T_1 主电极可正可负，所以它具有四种触发方式如表2—1所示。现以这四种触发方式的基本概念为要点，来分析双向晶闸管的工作原理。

表2—1 双向晶闸管门极触发特性

触 发 方 式	T_1 电压极性	T_2 电压极性	相对于 T_2 的 G 电压极性	工作范围	简 称	触 发 灵敏度
(一)	+	-	+	第Ⅰ象限	I_+	好
(二)	+	-	-	第Ⅰ象限	I_-	一般
(三)	-	+	+	第Ⅲ象限	III_+	差
(四)	-	+	-	第Ⅲ象限	III_-	好

一、 I_+ 触发方式

在双向晶闸管主电极 T_1 为正、 T_2 为负时，触发电路输出给门极 G 的脉冲相对于 T_1 为正的触发过程，称为 I_+ 触发方式。

图 2—1 所示的双向晶闸管内部结构，可以把它看成由三部分组成：(1) $P_1N_1P_2N_3$ ；(2) $P_1N_1P_2N_2$ ；(3) $P_2N_1P_1N_4$ 。从表 2—1 中知道，在 T_1 为正、 T_2 为负， G 为正的情况下，使 $P_1N_1P_2N_2$ 单向导通。

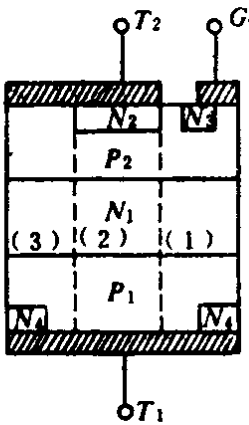


图2—1 触发方式示意

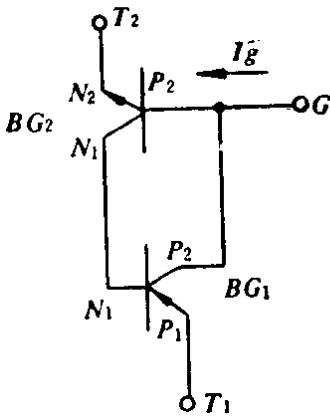


图2—2 I_+ 触发方式等效电路

现以 $P_1N_1P_2$ 与 $N_1P_2N_2$ 两个晶体管的相互作用来说明它的工作过程。从图 2—2 可看出，这两个晶体管中的一个管的集电极电流，就是另一个管的基极电流。这样形式的晶体管电路，一旦有足够的门极电流 I_g 流入，就发生极大的正反馈作用，即

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

最终使两个晶体管导通，并进入深饱和状态。所以门极电流 I_g 的增大，促使 $P_1N_1P_2N_2$ 由关断转化为导通。显然，这种触发方式完全与普通晶闸管工作原理相同。

二、 I_- 触发方式

当双向晶闸管主电极 T_1 为正、 T_2 为负时，触发电路输出给门极 G 的脉冲相对于 T_2 为负的触发过程，称为 I_- 触发方式。

从图 2—1 看出，当门极 G 电位相对于 T_2 为负时，可以理解为 T_2 是门极， G 是阴极。在 T_2 电流增大到一定程度时，首先使 $P_1N_1P_2N_3$ 单方向导通；随即， T_1 端电压立即转移到门极 G 端（即门极 G 端电位被突然提高，基本接近于 T_1 端），这样门极 G 端下面的 P_2 区电压高于 T_2 端；于是从主电极 T_1 端引来的主电流就流向 T_2 端，其作用类似于触发电流，促使 $P_1N_1P_2N_2$ 单方向导通。

三、 II_+ 触发方式

采用 II_+ 触发方式时，双向晶闸管主电极 T_1 为负、 T_2 为正，触发电路输出给门极 G 的脉冲相对于 T_2 为正的触发过程，称为 II_+ 触发方式。从门极 G 注入电流流入 T_2 ，使 $N_2P_2N_1$ 晶体管正偏导通，再使 $P_2N_1P_1$ 晶体管正偏导通，进而又使 $N_1P_1N_4$ 晶体管饱和导通，于是引起 $P_2N_1P_1N_4$ 单向导通。由此可见， II_+ 触发控制全过程必须要经过三个晶体管的相互作用才能完成，它所要求的门极触发电流往往较大。这就大大影响了触发灵敏度。

四、 II_- 触发方式

双向晶闸管主电极 T_1 为负、 T_2 为正时，当触发电路输出给门极 G 的脉冲相对于 T_2 为负的触发过程，称为 II_- 触发方式。在这种触发条件下，以 T_2 端注入电流，使 $N_3P_2N_2$ 正偏导通，其发射极电流再使 $P_2N_1P_1$ 正偏导通，又使 $N_1P_1N_4$ 饱和导通，最终达到 $P_2N_1P_1N_4$ 单向导通。

双向晶闸管一个显著的特点就是具有上述多种触发方

式，无论在哪个方向均能起到关断与导通的控制作用。

从上述分析可知，双向晶闸管四种触发方式，其灵敏度最好的是 I_+ 和 III_- 触发方式，一般的是 I_- 触发方式，最差的是 III_+ 触发方式。因此，目前国内的双向晶闸管不采用 III_+ 触发方式，在实际应用时，规定使用 I_+ 、 I_- 、 III_- 三种触发方式。

第二节 双向晶闸管的主要特性参数

双向晶闸管特性参数有十几项之多，其中大部分的含义与普通晶闸管基本相似。现将主要的几项参数加以介绍和说明。

一、额定通态电流（有效值） $I_{T(RMS)}$

本参数表征双向晶闸管通态时的一个重要特性。它反映了双向晶闸管在环境温度为 40°C 和规定的冷却条件下，电阻性负载的单相正弦波电路中，当结温稳定而不超过额定结温时所允许的最大通态电流（有效值），简称额定电流。而普通晶闸管的额定电流，指的是单相工频正弦半波整流电流的平均值。

二、通态压降 $V_{T(RMS)}$

此项参数表明双向晶闸管通态时的又一个重要特性。通态压降是指元件在通过额定通态电流（有效值）的条件下两端的管压降（有效值）。这个参数的上限值由各生产厂根据浪涌电流和结温的合格型式试验决定，并满足 $|V_{T1(RMS)} -$

$V_{T_2(RMS)} \leq 0.5$ 。双向晶闸管工作时的损耗就是通态压降 $V_{T(RMS)}$ 与通态电流 $I_{T(RMS)}$ 的乘积，这个损耗是元件总损耗的主要部分。 $V_{T(RMS)}$ 越小则损耗越小，元件的温升也越小。因此，双向晶闸管的通态压降 $V_{T(RMS)}$ 越小越好。

三、断态重复峰值电压 V_{DRM} 和 断态重复峰值电流 I_{DRM}

这两项参数反映双向晶闸管在断态时的特性，它们是元件在门极断态情况下分别于室温及额定结温下测定的。双向晶闸管伏安特性急剧弯曲点所对应的电压，称为断态不重复峰值电压。这个电压的80%值，称为断态重复峰值电压 V_{DRM} 。此电压相对应的电流值，称为断态重复峰值电流 I_{DRM} 。

四、门极触发电流 I_{GT} 和门极触发电压 V_{GT}

在室温条件下，双向晶闸管的主端子 T_1 与 T_2 之间加上12伏直流电压，用门极触发；此时，能够使元件由断态转为通态所需的最小门极直流电流、电压，称为门极触发电流 I_{GT} 和门极触发电压 V_{GT} 。对于 I_+ 、 I_- 、 I_{-} 三种触发方式， I_{GT} 、 V_{GT} 值是不一致的，但均应符合标准要求。

五、换向断态电压临界上升率 $(dv/dt)_c$

换向断态电压临界上升率是指：在额定结温 $+115^\circ\text{C}$ 和门极断开的情况下，双向晶闸管通态换向过程中，由断态至转换时两个主端子 T_1 与 T_2 之间所允许的最大主电压上升率，

用符号 $(dv/dt)_c$ 表示。若超过此上升率，则换向将遭受失败，有时还会导致元件的损坏。

换向断态电压临界上升率是双向晶闸管区别于普通晶闸管的重要特征之一，它反映了元件换向能力的好坏。在交流线路中使用两个反并联普通型晶闸管组合时，每个元件都有整个半周期（正半波或者负半波）处于关断状态。换向时两个元件之间没有内在的联系。如用一个双向晶闸管时，只有主回路电流过零的短暂瞬间才能关断。对于电阻性负载来说，双向晶闸管的关断时间是从主回路电流下降到小于能够保持元件通态维持电流，直至重加电压超过元件由断态转换为通态的最小主电流所需电源电压值为止的时间。要实现上述要求对于阻性负载是容易的，而对于感性负载来说，双向晶闸管的换流问题较为困难。

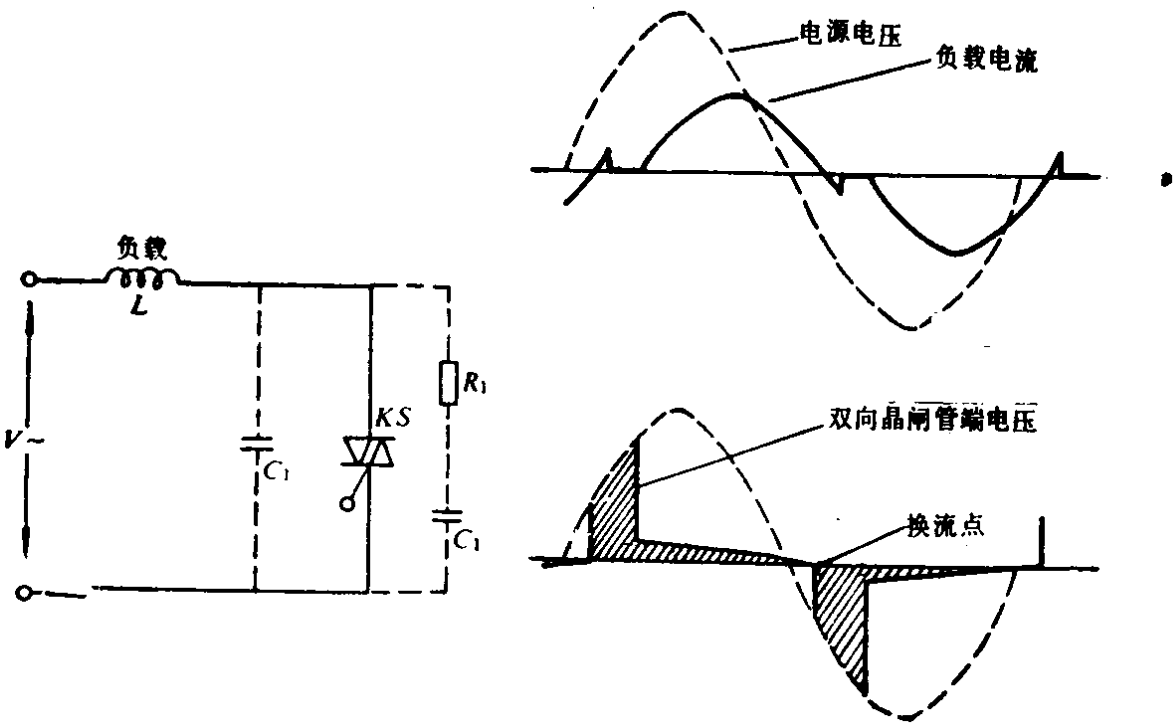


图2—3 感性负载时双向晶闸管电路及电源电压、电流波形

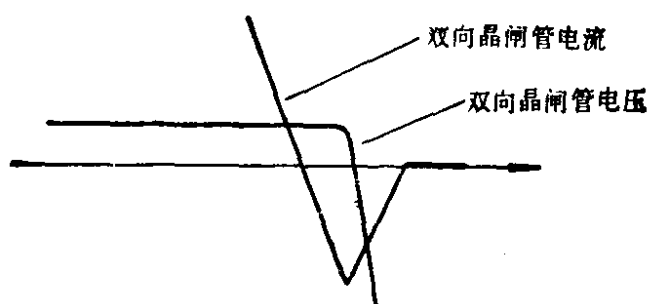


图2—4 双向晶闸管换流点的电流和电压波形

图 2—3 示出了在典型感性负载电路中双向晶闸管的电压、电流波形。双向晶闸管实质上是把两个反并联的普通晶闸管做在一块硅片材料上，换向时两者必然要发生相互影响。例如，双向晶闸管在一个方向导通后到达换流点时，会出现一个远大于最大阻断电流的瞬态反向电流，这股电流称为反向恢复电流，其波形如图 2—4 所示。在元件内有了这样的反向恢复电流，就可能起到相当于门极加了触发电流的作用，促使元件发生反向误导通。同时，由于结电容的存在和电压反向时具有一定的速率 dv/dt ，都会产生反向电流分量，这样的分量直接加在反向恢复电流上。反向恢复电流的大小，与换流点前半个周期的最后三分之一的通态电流下降率 $(-di/dt)_c$ 有关，还与换向断态电压临界上升率有关。 $(-di/dt)_c$ 或 $(dv/dt)_c$ 越小，则恢复电流愈小；反之，如果 $(-di/dt)_c$ 或 $(dv/dt)_c$ 较大，就会引起双向晶闸管换向失败。所以，在一般实用线路中必须增加 R_1C_1 组成的阻容吸收保护电路，如图 2—3 所示。

六、换向电流临界下降率 $(di/dt)_c$

双向晶闸管由一个通态方向向相反方向转换时，所允许

的最大通态电流下降率称为换向电流临界下降率，用符号 $(di/dt)_c$ 表示。在换向时刻，若通态电流下降率超过此值，将会出现另一方向有通态电流及再加电压下跌的现象，使换向失败，有时还导致元件的损坏。双向晶闸管换向的成功与失败可用双线示波器观察电流和电压波形，如图 2—5 所示加以判断。图中 I_{TM} 为正弦脉冲电流峰值，等于额定通态电流（有效值）； t_w 为 400 微秒的脉宽； V_D 为再加断态电压，等于三分之一断态重复峰值电压。

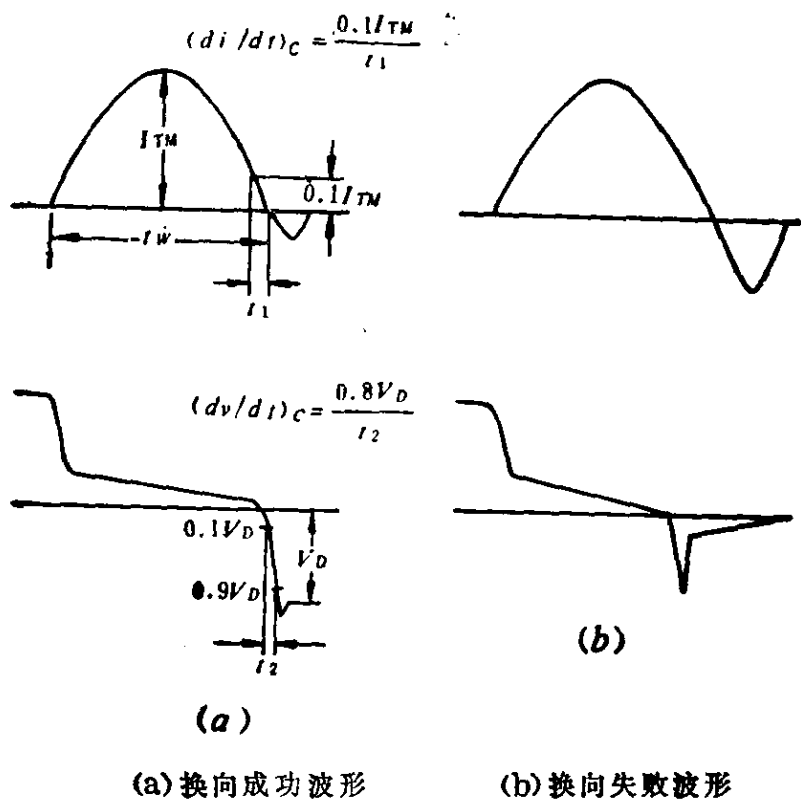


图2—5 双向晶闸管换向测试电压、电流波形

七、维持电流 I_H

双向晶闸管被触发导通后，其主回路电流降低到一定程度时就要转为关断状态，在室温和门极断路时，元件从较