

Motorola 集成电路应用技术丛书



沈耀忠 任志纯 编

半导体开关元件原理及应用



电子工业出版社

Motorola 集成电路应用技术丛书

半导体开关元件原理及应用

沈耀忠 任志纯 编

电子工业出版社

内 容 简 介

本书从生产厂商的角度结合实际应用深入浅出地介绍了晶闸管(SCR)、双向晶闸管(TRIAC)、可编程单结晶体管(PUT)、硅双向开关(SBS)和高压触发器(SIDAC)半导体开关元件的原理和应用中的问题,还介绍了很多实用线路。

本书可供从事电力电子、电力拖动、工业自动化、电源等方面工作的工程技术人员及高等院校有关专业的师生参考。

Motorola 集成电路应用技术丛书
半导体开关元件原理及应用

沈耀忠 任志纯 编

特约编辑 赖金福

责任编辑 连潮东

*

电子工业出版社出版(北京市万寿路)
电子工业出版社发行 各地新华书店经销
北京大中印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 16.5 字数: 396 千字

1996 年 6 月第 1 版 1996 年 6 月第 1 次印刷

印数: 3000 册 定价: 30.00 元

ISBN 7-5053-3642-8/TN·972

**《Motorola 集成电路应用技术丛书》
编 委 会**

主 任： 陈怀琛
副主任： 赖金福 龚兰方
委 员： 孙肖子 张厥盛 张义门
 沈耀忠 杨新辉 高有行
 高 平

前 言

本书系根据 Motorola 公司出版的“Thyristor Device Data”一书的理论和应用部分编撰而成。

虽然晶闸管从五十年代末问世以来至今已有几十年的生产和使用历史,它已在电力电子、电力拖动、能源、控制等领域中普及使用,并随着技术的发展已派生出很多新的产品,如快速、双向、可关断等晶闸管器件,但作为电力半导体开关的晶闸管现在仍然发挥着重要的作用。

本书从生产厂商的角度深入地介绍了晶闸管的原理、结构、特点、各种参数、性能指标以及测试和检查产品质量的方法和设备。同时还详细介绍了双向晶闸管和主要作为晶闸管触发器件的可编程单结晶体管(PUT)、硅双向开关(SBS)以及高压触发器(SIDAC)的原理和应用。而这些触发器件的产品和技术资料国内还很少见。

本书的特点是理论与实际紧密结合,立足于正确选择和应用,并有不少篇幅介绍了应用实例和如何正确安装。在国内像这样系统地介绍晶闸管及其外围器件以及与使用紧密结合的专著还不多见。所以我们编写出来提供给从事电力电子、电力拖动、工业自动化、电源以及功率电子器件生产的科技人员和高等院校有关专业的师生参考。

参加本书编写的有沈耀忠、任志纯、刘晰义、舒炳珍、罗毅、温有奎及陈逢时等同志。其中:引言、第一、二章由沈耀忠编写,第三、四章由刘晰义编写,第五章由沈耀忠、罗毅、陈逢时编写,第六章由任志纯、沈耀忠、刘晰义编写,第七章由舒炳珍编写,第八章由任志纯编写,第九章由温有奎编写。沈耀忠和任志纯并负责本书内容的遴选和全书的定稿和审校工作。

由于时间仓促,译文中不妥和错误之处在所难免,希望读者批评指正。

沈耀忠 1996年2月

引言

半导体开关元件有很多类型，但它们都有一些共同的属性，都可以作为固态开关，在没有被触发前都有断开电路的能力。当半导体开关元件被触发时，就呈现出很低的阻抗而构成电流通路，一直到流经它的电流为零或者它两端电压降低到维持电压电平以下时才又重新断开，一旦它被触发后，即使触发电流再降为零，它也不会再断开。

硅可控整流器 (SCR) 和三端双向可控硅开关 (TRIAC) 是半导体开关元件族中的两个系列。SCR 是单向器件，而 TRIAC 是双向器件。SCR 设计成被它通断的负载电流是在一个方向上，而双向可控硅开关设计成被它开断的负载电流可以在两个方向上流动。

从结构上说，所有半导体开关元件都由几个 P 和 N 硅片交替叠成，结构上的精确的改变就得到特定种类的器件。负载回路通过器件内多个结，而触发电流是在它们之中的一个结上注入。触发电流注入引起负载电流通过器件并建立起再生作用而使器件饱和导通，以至此时将触发电流移开，负载电流也能维持住。

所有这些特性，使半导体开关元件在控制工程应用领域中非常有用。与机械开关相比，半导体开关元件具有使用寿命长、开关速度快的特点。因为它一旦被触发后，响应速度快，有再生作用以及具有低的阻抗，因此它在作为功率控制器、瞬态超压保护器等方面非常有用；也可作为简单的通—断开关。半导体开关元件也用在控制电机、白炽灯和许多其他设备。

尽管半导体开关元件非常耐用，但在应用中还有几点在设计电路时需要注意的；其中最重要的一个问题是关于电压和电流变化率 (dv/dt 和 di/dt) 额定范围的限制。假如超过这些范围，半导体开关可能被损坏或失效，另一个重要问题是触发脉冲要足够大、足够快来开通门极，使器件很快完全导通。通常门极触发电流至少包含三项内容：最小开通电流，小于 $1\mu s$ 的脉冲上升时间，大于 $10\mu s$ 的脉冲宽度。驱动半导体开关可以用许多不同手段；包括直接来自晶体管或逻辑族器件和功率控制组件，用光隔离双向可控硅驱动器，可编程单结晶体管 (PUT)，硅双向开关 (SBS) 和 SIDAC 等。这些器件和其他设计时需考虑的问题将在本书中详述。

目 次

第一章 符号和术语	1
1.1 符号	1
1.2 术语及其定义	1
第二章 半导体开关元件的工作原理	4
2.1 基本品质	4
2.2 晶闸管功率控制的理论	11
2.3 三端双向半导体开关 (双向晶闸管) 理论	18
2.4 控制的方法	20
2.5 过零点开关技术	22
第三章 晶闸管驱动器与触发	25
3.1 可控硅的脉冲触发	25
3.2 温度、电压、电流和负载的影响	30
3.3 运用负偏置和分流	31
3.4 减小 di/dt 效应的影响	32
3.5 为什么与如何来缓冲晶闸管	35
3.6 敏感门极晶闸管的使用	36
3.7 驱动器: MOC3011 非零交叉双向可控硅开关驱动器	41
3.8 驱动器: 可编程单结晶体管 (PUT)	46
第四章 硅对称二端开关元件——一种新型的高压双向触发器	53
第五章 半导体可控整流器 (SCR) 的特性	64
5.1 SCR 关断特性	64
5.2 在直通应用中的 SCR 特性	74
5.3 开关特性用作线型调制器	83
5.4 SCR 的并联	89
5.5 在可控硅电路中射频干扰 (RFI) 抑制特性	94
第六章 应 用	99
6.1 晶闸管相位控制	99
6.2 电机控制	100
6.3 使用触发器件的相位控制	108
6.4 非零点触发的光耦 TRIAC 驱动器的使用	112
6.5 利用固态继电器的交流功率控制	117
6.6 双向晶闸管和感性负载	122
6.7 功率控制用反向并联晶闸管	125
6.8 数字电路与晶闸管控制交流负载接口	126
6.9 用晶闸管控制直流电动机	137
6.10 电动机方向与速度控制	140

6.11	可编程单结晶闸管的应用	142
6.12	硅双向开关 (SBS) 的应用	147
6.13	双向晶闸管零点开关的应用	150
6.14	电压过零触发的光隔双向晶闸管开关器件的应用 (AN982)	154
6.15	串联双向晶闸管在交流高压开关电路中的应用 (AN1045)	164
6.16	为半导体开关元件的功率控制和瞬态抑制用的 RC 缓冲网络 (AN1048)	175
第七章	晶闸管的安装	200
7.1	引 言	200
7.2	装配表面的准备	201
7.3	界面处理	202
7.4	绝缘问题	205
7.5	紧固件和附件特性	207
7.6	紧固方法	209
7.7	插座安装	215
7.8	接线端子的连接	216
7.9	电路板的清洗	218
7.10	热系统评价	218
7.11	附录 A 热阻概念	219
7.12	附录 B 界面热阻测量	220
7.13	附录 C 附件来源	222
7.14	封装类型索引	223
第八章	可靠性与质量	225
8.1	高功率脉冲晶闸管应用中瞬态热阻数据的使用	225
8.2	可靠性及其评价	236
8.3	晶闸管的制造	240
8.4	可靠性测试	242
第九章	附 录	248
9.1	附录 I 利用两个晶体管模型分析	248
9.2	附录 II 电荷和脉冲宽度	249
9.3	附录 III TTL 安全工作区 (SOA) 测试电路	250
9.4	附录 IV 晶闸管直通寿命测试	250
9.5	附录 V 指数衰减的电流波形的有效值电流 I_{rms} 的推导	251
9.6	附录 VI 各种时间的 I^2t 的推导	252
9.7	附录 VII 热阻的概念	252
9.8	附录 VIII 射频干扰 (RFI) 设计方程的推导	253

第一章 符号和术语

1.1 符号

下面是半导体开关元件常用的符号。

器件名称	符 号
硅可控整流器 (SCR) (晶闸管)	
三端双向可控硅开关 (TRIAC) (双向晶闸管)	
可编程单结晶体管 (PUT)	
硅双向开关 (SBS)	
高压双极性触发器件 (SIDAC)	

1.2 术语及其定义

下面列出了在晶闸管和双向晶闸管中常用的参数符号、术语及其定义。

di/dt :	器件能忍受的最大电流变化率。
$I_{T(RMS)}$:	正向电流有效值
	器件允许流过的最大通态电流有效值。
I_{GM}, I_{GFM} :	正向门极峰值电流
	加到器件使其导通的最大门极电流。
I_{TSM} :	正向浪涌峰值电流
	在规定的冲击宽度下器件能忍受的最大不重复浪涌电流。
$I_{T(AV)}$:	平均通态电流
	在静态条件下, 器件允许流过的最大平均通态电流。
P_{GM} :	门极峰值功率

	损耗在门-阴极之间的门极功率的最大瞬时值。
$P_{G(AV)}$:	正向平均门极功率 损耗在门-阴极之间的一个周期内平均的门极功率最大允许值。
I^2t :	电流熔断器选择依据 最大正向不重复过电流能力, 通常规定工作在 60Hz 的半个周期。
V_{FGM}, V_{GFM} :	正向门极峰值电压 使门-阴极正向偏置时门极允许的最大脉冲电压值。
V_{RGM}, V_{GRM} :	反向门极峰值电压 使门-阴极反向偏置时门极允许的最大脉冲电压值。
V_{DRM} :	正向重复能忍受的峰值电压 (SCR) 不会使它击穿的最大正向重复电压。
V_{RRM} :	反向重复能忍受的峰值电压 (SCR) 可以加到阳极端的重复反向电压的最大值。
V_{DRM} :	重复断态峰值电压 (TRIAC) 不会使双向晶闸管导通的最大断态重复电压。
I_{DRM} :	正向能忍受的电流峰值 (SCR) 在规定的温度下, 在 V_{DRM} 时的最大电流值。
I_{RRM} :	反向能忍受的电流峰值 (SCR) 在规定温度下, 在 V_{RRM} 时的电流最大值。
I_{DRM} :	能忍受的峰值电流 (TRIAC) 在规定的温度下, 不管那一极为 V_{DRM} 时的电流最大值。
V_{TM} :	通态峰值电压 导通时降在器件两端的最大电压值。
I_{GT} :	门极触发电流 在规定的条件下, 器件从断态转到导通时需要最大门极电流的值。
V_{GT} :	门极触发电压 要求产生门极触发电流的门极直流电压。
I_H :	维持电流 器件能维持原有导通状态的正向阳极电流值。在这个值下, 器件返回先前门极触发前的断态。
dv/dt :	断态电压的临界上升率 引起开关从断态变为通态的这个正向电压器上升速率的最小值。
t_{gt} :	开通时间 (SCR) 在门极脉冲来开启 SCR 使其从断态转为通态的过程中专门规定从门极脉冲开始的这个点到器件两端电压 (电流) 下降到规定点值以下的瞬间的这点, 这两点之间的时间即为开通时间。
t_q :	关断时间 (SCR) 当 SCR 电流降至零时刻开始到能忍受外电路的特定电压波形下不会再导通的瞬间为止的时间。

T_j :	工作结温 器件的结温作为对环境和负载要求的原因。
T_C :	存贮温度 在特定条件下器件外壳的温度。
T_A :	环境温度 器件置在一个稳定的环境温度，其温度的冷热完全由自然空气对流形成，不受任何金属的辐射、物体表面的反射等影响。
$R_{\theta CA}$:	管壳到环境的热阻 从器件的管壳到环境的热电阻（稳态）。
$R_{\theta JA}$:	结到环境的热阻 从半导体的结到管壳上一个固定位置之间的稳态热电阻。
$R_{\theta jm}$:	结与安装表面的热阻 从半导体的结到安装表面上固定位置之间的稳态热电阻。
$Z_{\theta JA(t)}$:	结到环境之间瞬态热阻抗 从半导体的结到环境的瞬态热阻抗。
$Z_{\theta JC(t)}$:	结到管壳的瞬态热阻抗 从半导体的结到管壳上一个固定位置之间形成的热阻抗。

第二章 半导体开关元件的工作原理

为了更好地应用半导体开关元件,必须首先要掌握它的特性,参数值和各种限制条件等。本章将讨论半导体开关元件的一些重要特性,主要的几个参数和它们与电路设计之间的关系。

表 2-1 列出了几种不同类型的半导体开关元件:硅可控整流器(晶闸管)(SCR)是最广泛应用的功率控制元件,三端双向可控硅开关(双向晶闸管)(TRIAC),通常用在电流较小(在 40A 以下)的交流功率电源中,DIACS, SUS 和 SBS 通常大部分是用作功率控制单元的门极触发器件。

表 2-1 半导体开关元件的种类

名 称*	通用名字(典型)
反向阻断二极管的半导体开关	△ 四层二极管, 硅单向开关(SUS)
反向阻断三极管半导体开关	硅可控整流器(SCR)(晶闸管)
反向导通二极管半导体开关	△ 反向导通四层二极管
反向导通三极管半导体开关	反向导电的硅可控整流器
双向三极管半导体开关	双向可控硅(TRIAC)

* 电子器件工程联合会(JEDEC)定的名称。

△ 一般不用。

在论述半导体开关元件特性之前,先简单地回顾一下晶闸管用两个晶体管模拟它的工作原理。

2.1 基 本 品 质

通过对晶闸管的结构分析,就能很方便地解释半导体开关元件的双稳机理。这个分析,本质上与双向晶闸管工作在任何一个象限的原理相同。因为一个双向晶闸管可以认为是两个晶闸管反向并联。图 2-1(a)是晶闸管的符号,图 2-1(b)是用 P-N-P-N 结构的符号表示。双晶体管模型的晶闸管表示在图 2-1(c)中,其中还揭示了两个晶体管内部这样联接所发生的再生作用。可以看到,假如电流从这个模型的任何一端注入,由于晶体管的增益(假如足够高)在另一端上电流将会被放大。为了发生这种再生作用,必须满足两个晶体管总的共基极电流增益(α)超过 1。为此,因为结的泄漏电流较小,且在这种泄漏电流下电流增益被设计得非常低,所以 PNP 器件在没有外加电流的情况下保持截止。当足够的触发电流加进来(例如晶闸管加到门极)使电流增益大于 1 时,产生再生作用使其导电。导电状态下的主电流由外部电路的阻抗所决定。假如最初的触发电流移开时,只要提供它的主电流大于所遇到的增益为 1 的临界电流时,半导体开关保持导通状态。这个临界电流被称为锁定电流。

为了关断晶闸管,必须减小其主电流以便使器件内部电流再生环增益降低到小于 1。从模型上看,短路门-阴极就可能出现这种情况,但是实际的晶闸管结构,门极的面积仅仅是阴极

面积的一小部分，因此只有很小一点电流被短路掉。事实上，在增益下降到 1 以前主电流必须减小到称为维持电流的临界电流值以下才可转为关断。

在构成实际的晶闸管和双向晶闸管时，通常将其设计成“短路发射极”，简略地说，就是从门极到阴极或门极到 MT1，附加了一个电阻。因为从 N 基片通过该电阻转移了电流，使门极触发电流、锁住电流和维持电流都增加了。采用这个系统电阻的主要理由之一是用来改善高温时的动态性能。若没有这种分流，则在高温时多数大电流晶闸管的泄漏电流会使它们一开始就导通。

敏感门极的晶闸管应用高电阻分流，或者全然没有，相应地利用一个外加电阻来改变它们的特性。外加电阻对大部分短路发射极设计的晶闸管来说影响是很小的。

结温是影响半导体开关元件特性变化的首要因素。温度增加使开关元件更容易导通和保持。相应地，确定导通时的电路条件必须考虑到它工作在预计的最低结温下；而关断时的条件要设计成它在最高的结温下确保关断或阻止误触发。

半导体开关元件的技术条件中通常标出了规定的管壳温度和电参数，这样，功率散耗小到足以使结温实质上等于管壳温度。用户应正确地记录下由于电路工作条件与测试条件的差别而引起特性的改变情况。

2.1.1 触发特性

一个半导体开关元件的开通要求注入电流以引起再生环增益大于 1，这个电流取自加在门极的电流源上。从注入漏电流引出阳极电流，或者一个阻挡结雪崩击穿，作为一种因果关系来说，晶闸管的击穿电压是随门极端的注入电流大小而变化或控制的。图 2-2 表示晶闸管的门极电流与电压的相互关系曲线。

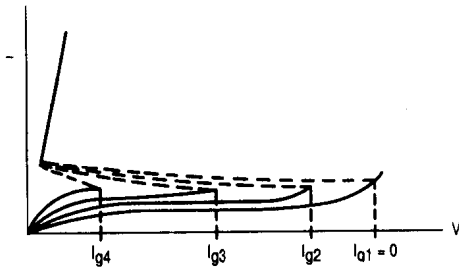


图 2-2 半导体开关元件的特性图解示出了击穿电压是门极电流的函数

在基底面积上，使基底内引起极端高的温度，因而可能发生损坏，除非主电流的大小和上升率 di/dt 限制在允许的范围内。因此，晶闸管和双向晶闸管在正常工作时所加的电源电压应小于它们的击穿电压，并且使它进入导通状态的门极信号大到足以保证根据所加的电压下能完

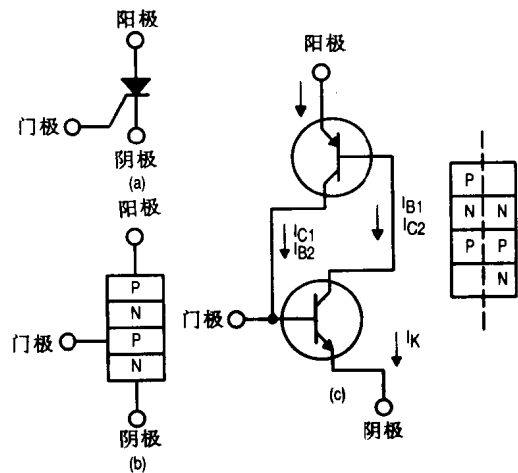


图 2-1 晶闸管的双晶体管模型：(a) 晶闸管符号；(b) PNPN 结构略图；(c) 晶闸管双晶体管模型

全导通。另一方面，双向器件和其他的晶闸管触发器件被设计成利用阳极击穿电压来触发，虽然它们也有 di/dt 和峰值电流的限制问题。

双向晶闸管的工作，对正电压和负电压是相同的，然而，因为双向晶闸管可以被门极信号在两个极性上开通，而且与跨接在主端的电压极性无关，所以这种状况有时候比晶闸管更加复杂。

门极与主回路端的极性的各种组合如图 2-3 所示。相对灵敏度取决于双向晶闸管的特殊物理构造。但一般来说，第一象限的灵敏度最高，而第四象限的灵敏度一般比其他象限低得多。

双向晶闸管门极的灵敏度是温度的函数，如图 2-4 所示。

因为结的泄漏电流和“晶体管”单元的增益都随温度的增加而增加，所以当温度增加时所需要的门极触发电流就减小。门极——它可以看成一个二极管——当温度增加时，降在它两端的电压减小。因此在设计门极触发电路时，需要考虑到门极在最低预计温度下能有足够的驱动电流。

建议观测一下最大的门极电流以及峰值和平均功率损耗的额定值范围。在负的方向上也一样，最大的门极额定范围也可观测到。正向和负向的门极极限通常在参数表上已给出，并且还指出了它们的保护器件。例如电压箝位和在某些应用场合所要求的限流器。通常不告诉在反方向上的功率散耗。

虽然导通的准则可用电流来表述，但更加基本的考虑是晶闸管是作为电荷控制。相应地，如果当触发脉冲的持续时间减小，则它们振幅相应地要增加。图 2-5 描述了在不同的脉冲宽度和温度时的典型状态曲线。

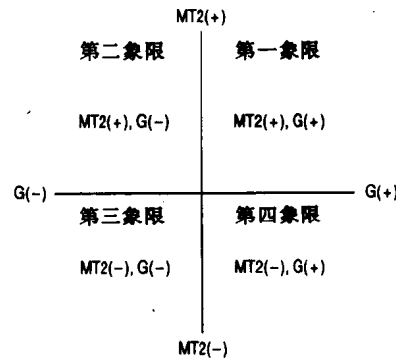


图 2-3 双向晶闸管的四象限定义

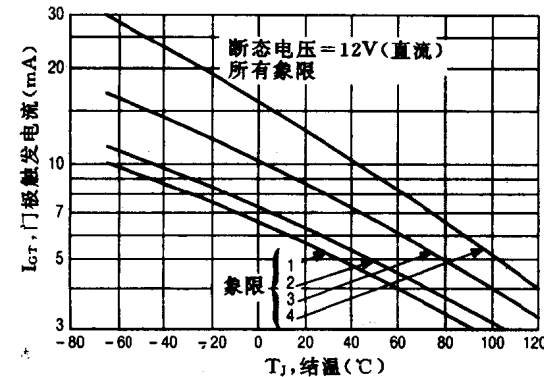


图 2-4 双向晶闸管在四个象限的触发灵敏度

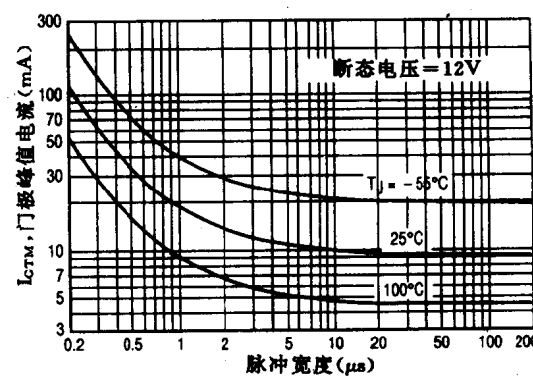


图 2-5 门极触发电流随脉冲宽度和温度变化的典型特性

触发晶闸管所要求的门极脉冲宽度也是取决于阳极电流达到维持值所需的时间。所以当负载是高度感性情况时，或者在导通期间内电流幅值波动会达到维持值以下时，门极信号必须维持在整个导通期间。

当用直流电流触发晶闸管时，假如触发信号维持到阳极电压反向阻断的相位期间，则通

常反向会出现过高的泄漏电流。这是因为晶闸管工作时很像一个远基极晶体管所具有的增益，一般大约是 0.5。当用大的门极驱动电流时，在晶闸管中可能会出现很多损耗或者在负载上很明显地有电流流过。因此，通常在反向阻断相位期间必须把门极信号拿掉。

2.1.2 锁定和维持特性

为了使晶闸管在去掉触发信号后仍保持导通状态，必须有足够的主电流流过以使它具有大于 1 的增益。这个所需电平的主电流就称为锁定电流 I_L 。该锁定电流对短发射极结构的晶闸管来说主要受温度影响。

为了让它关断，主电流必须减小到锁定电流的电平以下。使它发生关断的电流电平称为维持电流 I_H 。像锁定电流一样，维持电流受温度影响，同时也依赖于门极阻抗。

晶闸管的门极加上反向电压会显著地增加锁定和维持电流电平。晶闸管门极的正向偏置将会大大地降低这两个值。因此在参数表上给出的值通常是在门极开路时测得的。但当晶闸管由那些饱和电压小于十分之一伏的晶体管驱动时，如不考虑上述因素，则可能会使锁定和维持出现问题。

晶闸管做缩短发射极门极时，它对门极电路的灵敏度也明显不如那些没有构成分路的器件。

2.1.3 开关特性

当双向晶闸管或晶闸管被门极信号触发后，导通时间由两个时间组成：迟延时间 t_d 和上升时间 t_r ，如图 2-6 所示。门极控制导通的总时间 t_{gt} 通常规定为门极触发电压的上升边到达 50% 的点到主电流达到 90% 的点之间的时间。上升时间 t_r ，规定为主电流从它的最大值的 10% 上升到 90% 的这个区间所需的时间。上述这些定义规定是在电阻负载条件下得到的。

当断态峰值电压增加时，迟延时间减小并不明显，它主要与门极触发电流的幅值有关，而且可看出这种关系明显是反比关系。

上升时间主要受断态电压的影响，电压愈高引起的再生增益也愈大。在上升时间里，一个重要问题是主电压和流过晶闸管的电流 di/dt 之间的相对关系，在这个期间，动态电压起落很大和由于电流密度变化很快，就可能在基片中产生热点效应。这就可能永久地降低了阻断特性。因此，重要问题是在开通期间使功率损耗限制在安全范围内。

关断时间只是对晶闸管和其他单向器件而言（在双向晶闸管或双向器件中反向电压不能用来提供给换向电路作关断电压，因为反向电压只加在器件中的一半，而对另一半来说它是正偏电压）。对晶闸管来说，关断时间分为两个阶段来恢复，即反向恢复时间和门极或正向阻断恢复时间，如图 2-7 所示。

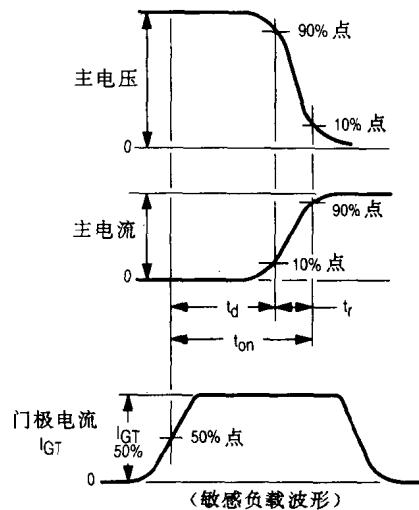


图 2-6 表示电阻性负载时的晶闸管开通时间的波形图

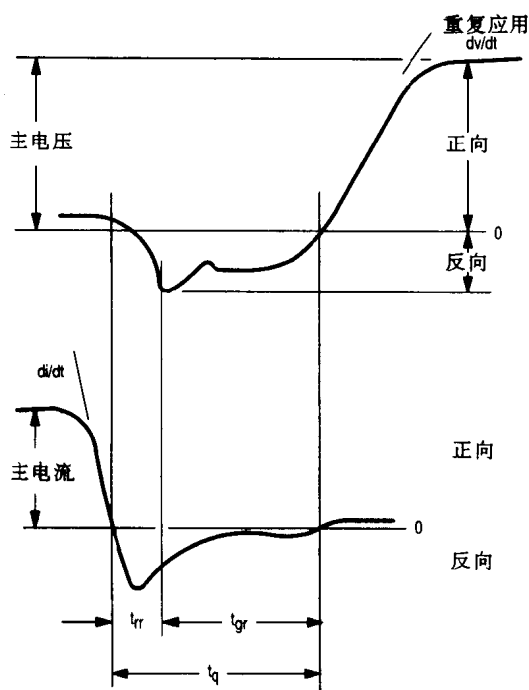


图 2-7 用波形来图解晶闸管关断时间

电流变化率，重新出现正向电压的变化速度，门极的偏置和结温。结温和通态电流增加，关断时间也增加，而且比其他任何因素影响更明显。门极负偏置会减小关断时间。

对那些应用在控制交流功率的晶闸管来说，正弦波的整个负半周期作为反向电压加到它的两端。对应用在几 kHz 以下的极大多数器件来说关断是很容易完成的。然而晶闸管用来控制一个全波整流桥的输出时，关断就没有反向电压可利用。这时关断唯一只能在桥输出电压减小到零时，而主电流在足够长的时间内其值小于器件的维持电流的条件下才实现。假如被控的是电感性负载，那么就是在 60Hz 的频率上也会发生关断问题。

在双向晶闸管中，反向极性电压快速加上也不会引起关断问题，因为它的主阻断结是器件的两半共有的。当反向晶闸管结构的第一个 SCR-1 处在导通状态时，由于主电流流过，一定量的电荷积贮在 N 型区。当主电流减小通过零参考点时，存留在 N 型区的电荷建立起反向电流，这个过程是器件的两半所共有的。相应地，反向恢复电流成为双向晶闸管器件另一半的正向电流，由存贮电荷形成的电流引起双向晶闸管第二个一半在门极信号出现后进入导通状态。每一次导通都是由于门极加了信号。因此，在功率控制时，双向晶闸管的全部损耗发生在 N 型基区互相作用的结果，除非有足够的经过时间，或者说反向电压加进来的速度很低足以允许在共 N 型基区中的几乎所有电荷重新复合，所以，双向晶闸管器件一般限制在低频—60Hz 时应用。双向晶闸管的关断或整流问题电感性负载比电阻性负载更加严重。因为对电感性负载来说电压与电流之间有相位滞后，图 2-8 所示的波形是针对具有迟后的电流功率因子的电感性负载情况，当电流到达零点交迭时间 (A 点)，也即当主电流下降到维持电流以下时，双向晶闸管导通的半边开始换流。在双向晶闸管导通的半边突然关断，一个与电流极性相反的电压加在双向晶闸管两端 (B 点)，因为这个电压对双向晶闸管第二个一半来说是正向偏置，在保留有存贮电荷的高压结上突然再加上电压而减小了整个器件承受电压的能力，结

在导通期结束，当晶闸管的正向电流减小到零，因阳极和阴极之间加有反向电压，因此在晶闸管中会出现反向电流。这个电流一直维持到其中仅存泄漏电流为止。反向恢复时间 t_{rr} 通常是从主电流改变极性的这点到反向电流波形到达规定的点两点之间的时间来计量，如图 2-7 所示。这期间阳极和阴极的结被清除了自由电荷，所以可以忍受反向电压。第二个恢复期称为门极恢复时间 t_{gr} ，此时必须释放掉在正向阻断结上的电荷，重新建立起正向阻断电压，重新出现并完成由晶闸管的阻断。晶闸管的门极恢复时间通常比反向恢复时间长得多。整个时间从反向恢复电流开始瞬间到正向阻断电压开始这段时间定义为电路换向关断时间 t_q 。

关断时间取决于电路中很多条件，包括关断之前的通态电流，正向到反向瞬

果造成负载的控制功率有损失，以及在门极信号不存在时器件仍维持导通状态。双向晶闸管的关断能力是以能使它不会维持导通的反向电压上升速率来计量的，这就是所谓换流 dv/dt [dv/dt (C)]。电路条件和温度影响 dv/dt (C)，这个关系相似于在 SCR 中影响 t_q 。

这是一种不得已的方法采取限制重复电压的上升速率使双向晶闸管在感性负载的条件下也可关断。为了得到可允许的换流 dv/dt 值，一种通常可以接受的方法是用 RC 缓冲网络 (snubber) 并联在双向晶闸管元件的两主端。因为加在器件两端的电压上升速率是负载阻抗和 RC 缓冲网络的函数。这个电路能够根

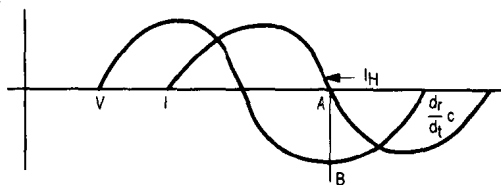


图 2-8 电感负载波形

据在不利的工作条件下管壳温度和最大主电流来估算。在缓冲网络中电阻和电容的值做成可调，这样换流 dv/dt 的上升速率的压力在上面提到的任何条件下为最小，缓冲电阻的值取高到足以限制缓冲电容在导通期间放电以及在换流期间阻尼 LC 产生振荡，缓冲网络数值的组合就是最高的电阻值和最低的电容值。这就提供了较好的安全工作。

2.1.4 误触发

由于电路条件会引起晶闸管在没有触发信号时导通。误触发可以由下面几种情况引起：

- (1) 高的阳极电压上升速率 (即 dv/dt 的影响)。
- (2) 瞬态电压引起阳极击穿。
- (3) 虚假门极信号。

静态 dv/dt 效应，当一个电压源突然加到原处于关断状态的晶闸管上，就可能使它从断态变成导通，假如晶闸管正在控制交流电压，那么由于瞬时出现的电压而引起的误导通被限制在所加电压的不到半个周期之内。因为电流通过零点时就会关断，然而，假如主回路电压是直流电压，那么瞬态可能引起的导通只有从电路上获得阻断条件才能关断。

在断态时由阳极电压上升的快速变化率而引起的开关效应是由于晶闸管内部存在电荷的缘故。晶闸管两端通过一个电压波形的激励而引起电容的充电电流流过该器件，而这个电流是所加断态电压的上升速率的函数 ($i=C \frac{dv}{dt}$)，假如电压上升速率超过了一个临界值，即电容充电电流超过门极触发电流就使器件导通。工作时结温升高，也就减小了晶闸管承受电压上升斜率 dv/dt 的能力，因为温度升高增加了对 dv/dt 的敏感性。

对 dv/dt 的承受能力在敏感门极器件和一些利用门极到阴极 (或 MT1) 加一个电阻的短路发射极外延设计的器件中很容易得到改善，然而晶闸管加反向偏置电压则更加有效。更一般地是利用缓冲网络使 dv/dt 限制在晶闸管门极开路时的临界值之内。

1. 瞬态电压

发生在电子系统中如分布在交流线端的电压瞬态是由多种能源引起的，例如能源变压器，负载开关，螺旋管开闭，接触器以及那些在晶体管回路里能够产生电压的地方。通常，晶闸管每当电压超过器件的击穿电压时，就从断态转到导通，能量也就传输到负载上。但是，除非这个晶闸管特殊利用击穿型工作，否则应注意使其保证不会发生击穿。当某些器件遭到表面损伤后，它的阻断特性综合性能将降级处理。在实践中，当晶闸管处在一个严重的瞬态环