

高等学校教学用书

可控硅电路

冶金工业出版社



高等学校教学用书

可控硅电路

北京钢铁学院 赵殿甲 主编

冶金工业出版社

Dt01/53

高等学校教学用书

可控硅电路

北京钢铁学院 赵殿甲 主编

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 21 字数 501 千字

1980年5月第一版 1980年5月第一次印刷

印数 00,001~26,000册

统一书号: 15062·3531 定价2.40元

前 言

“可控硅电路”一书是根据一九七七年冶金工业部教材会议制订的高等院校教学计划编写的。本书主要是供工科院校“工业自动化”专业师生教学之用，也可供七二一大学的师生以及工矿企业从事这方面技术工作的同志参考。

本书对各种整流电路及逆变电路等的基本原理和分析方法，作了较详尽的阐述。在此基础上又进一步对一些电路及主要部件的设计计算方法作了介绍，以期学生在掌握了可控硅电路的基本原理之后，能分析和解决一定的工程实际问题。

本书第一、二和三章由北京钢铁学院赵殿甲同志执笔；第四、六章由广东矿冶学院张占松同志执笔；第五章由北京钢铁学院刘宏才同志执笔。全书由赵殿甲同志负责主编。

在编写过程中，曾邀请鞍山钢铁学院、东北工学院、河北矿冶学院、西安冶金建筑学院、马鞍山钢铁学院、武汉钢铁学院、中南矿冶学院、江西冶金学院、昆明工学院和上海机械学院等院校工业自动化专业教研室的有关同志进行审查和讨论，提出了许多宝贵意见和建议，在此表示感谢。

由于我们的政治思想水平和业务水平都不高，加之编写时间较仓促，缺点错误一定不少，希读者提出批评和宝贵意见。

编 者

一九七八年十二月

目 录

第一章 整流电路	1
第一节 可控硅整流元件	1
第二节 单相整流电路	13
第三节 三相零式整流电路	27
第四节 三相桥式整流电路	39
第五节 多相整流电路	56
第六节 考虑变压器漏抗时的整流电压	67
第七节 整流电路的过程分析	74
第二章 电动机负载电路	81
第一节 电势负载电路	81
第二节 可逆电路	100
第三节 可逆电路的环流问题	117
第四节 可控整流的功率因数	133
第三章 无源逆变电路	146
第一节 可控硅关断特性和关断方法	146
第二节 单相并联逆变器	153
第三节 单相桥式并联逆变器	163
第四节 三相桥式并联逆变器	171
第五节 单相串联逆变器	177
第四章 可控硅主回路保护及元件计算	187
第一节 可控硅容量的计算	187
第二节 可控硅保护器件的计算	192
第三节 整流变压器参数计算	238
第四节 电抗器的计算	242
第五章 可控硅触发电路	250
第一节 对触发电路的要求	250
第二节 触发电路的控制方式及组成	251
第三节 触发电路的抗干扰问题	261
第四节 单结晶体管及其触发电路	262
第五节 同步波形为锯齿波的触发电路	269
第六节 触发电路与主回路电源同步问题	274
第七节 其它类型的触发电路简介	278
第八节 触发电路的输出级	298
第九节 逆变器的触发控制线路	306
第六章 特殊可控硅及其应用简介	309
第一节 双向可控硅	309
第二节 门极可关断可控硅	312
第三节 逆导可控硅	316
第四节 快速可控硅	321
第五节 特殊可控硅的发展	328

第一章 整流电路

第一节 可控硅整流元件

可控硅是近二十年发展起来的一种新器件。自从美国在1958年试制成功第一个只有16安的可控硅以后，大功率变流技术进入了一个新时代。由于可控硅独特的优点，所以自问世以来发展甚快。在国际上，400伏的可控硅由1964年的470安到1973年增到1420安，而1973年到1974年只用一年的时间就增到了5000安（有效值）。元件的电压水平增加也较快，1964年225安的元件的电压为1300伏，至1974年320安的元件其电压已达4000伏，而到1977年已制出4000伏、1000安的元件，170安的元件的电压则已达5200伏。国际上一定电压等级电流的增加情况可形象地用图1-1表示。从图可以看出，从1973年到1974年600伏的元件的电流水平增加甚快。

我国自1965年后才有小容量可控硅生产，当时的电流只有5安，电压也很低。1971年元件的平均电压为430伏，1975年元件的平均电压为934伏，个别厂已能生产500安2000伏的元件。1977年生产的可控硅电流为1000安，电压可达3000伏。由于可控硅性能和容量的提高，我国整流装置发展也较快。根据1975年的统计，全国可控整流装置已达17200台以上，总容量达38.654万千瓦。

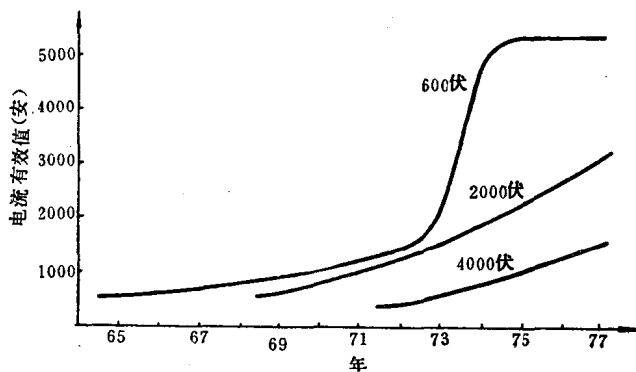


图 1-1 国外可控硅发展情况

可控硅的出现，实现了弱电对强电的控制，使电子工业从弱电扩大到强电领域，在工业上引起了一场技术革命。可控硅与水银整流器等元件相比较，具有体积小、重量轻、效率高、寿命长、无噪声、无毒、无磨损、维修方便等优点，故在工业上得到广泛应用。在冶金企业中，可控硅直流传动在轧机上的应用日益增多。可控硅还可用来变频，将50周/秒的工频交流电变为中频交流电，可用于冶炼、弯管和热处理。作为这种用途的装置叫逆变器。此外，可控硅也可用作电子开关，代替有触点交流接触器，用于交流电动机起动和工作频繁的场所。在直流脉冲调速中，可控硅可以用作直流开关，控制可控硅交替通断的频率，可实现直流电压调节以改变电动机转速。作为这种用途的可控硅叫做斩波器。

使用可控硅虽然优点很多，但任何事物都是一分为二的，可控硅也有其不足之处。如由于整流器的非线性，交流侧的电流就会出现脉动，这电流中包含着大量谐波，这些谐波对电网有着不良的影响。此外，在低速运行中，功率因数甚低，也是一个较大的缺点。因此，在大功率整流中，这些因素都要予以足够的重视，对冶金厂而言，主要是使用大功率整流装置。因此本书着重分析各种整流电路，用一定篇幅讨论逆变器，对斩波器和交流开关只作简单介绍。

一、可控硅整流元件的结构及其工作情况

目前大量生产的可控硅元件主要有两种，电流较小的元件为螺栓形，100安以上的大电流元件则多为平板型，如图1-2(a)、(b)所示。平板型的外形像一个圆饼，从边缘引出门极引线，两侧为阳极和阴极，散热片压在两侧，一般出厂时都把散热片装好。螺旋型的外形像一只螺钉，它有三个电极，其中一端带螺栓拧散热片的是阳极，用符号A表示，另一端有两个电极，粗引线是阴极，用C表示，细引线是门极（控制极），用G表示。工程上可控硅的符号用图1-2(c)表示。

目前，可控硅元件按国家标准名为KP系列，元件的型号及所代表的意义如图1-2(d)所示。如KP500-2000，1表示通态平均电流为500安，正反向重复峰值电压为2000伏，通态平均压降为1伏的一般可控硅元件。

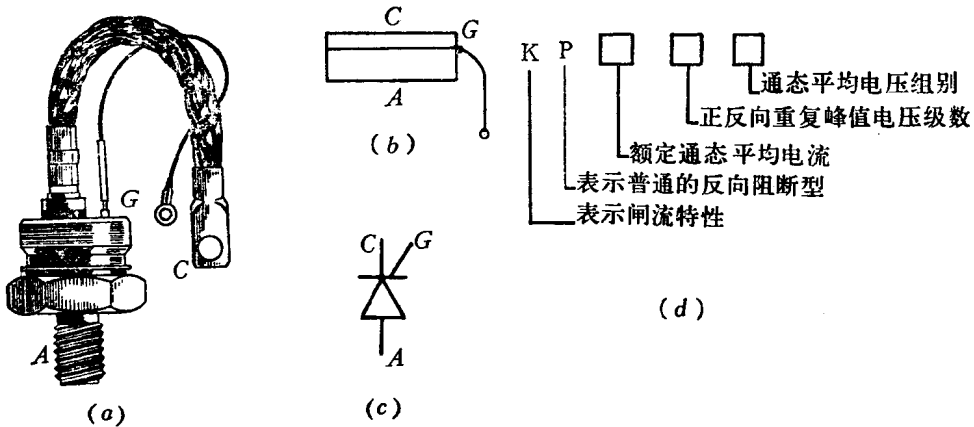


图 1-2 可控硅外形和型号

(a) 螺栓型可控硅；(b) 平板型可控硅；(c) 符号；(d) 型号及所代表意义

螺旋型和平板型的内部结构如图1-3和图1-4所示。两种型号的可控硅管心基本相同，只是平板型的门极在中间。以螺旋型的管心加以说明，如图1-5所示。在N型硅基体两面上扩散铝（P型杂质），制作P型层以形成PNP结构。然后在其中一面的大部分区域放置金锑合金箔（N型杂质）作阴极。在同一面的另一小区域放置金硼钨金属片作门极。其反面整个面上放置铝（P型金属片）作为阳极的欧姆接触，经过合金化热循环，即形成PNPN四层结构。

上面的N型硅片中引出阴极，第二层P型硅片中经金硼钨引出门极，下面的P型硅片通过钼片与阳极底座相连。整个管心被金属外壳密封在里面，以防漏气，如图1-3所示。底座用铜制成，下端制成螺栓形状，以便安装散热器。

从可控硅管心可以看出，它由三个PN结正反正串联起来组成，可用图1-6表示。

为了搞清楚可控硅在什么条件下可以导通，在什么条件下关断，用图1-7的线路进行分析。图中 E_a 为阳极电压，用200伏； E_g 为门极电压（控制极电压）较低，用1.5伏；SCR为可控硅，R为灯泡。

设 E_a 的正极经R接可控硅的阳极， E_a 的负极接可控硅的阴极。电源极性这样联接为正向阳极电压。 E_g 正极经开关K接门极， E_g 负极接可控硅阴极，即加正向门极电压。若开

关 K 未合上, 则灯 R 不亮。这就是说, 若未加上正向控制电压, 即使加上正向阳极电压, 可控硅也不导通。如果合上开关 K , 则灯泡就亮了。在灯泡亮了之后, 即使把开关 K 打开, 灯泡仍继续亮着, 甚至把 E_c 反接, 灯泡也不会熄灭。这说明在加上正向阳极电压和正向门极电压后, 可控硅导通, 且一经导通, 门极电压就失去控制作用。要想使灯泡熄灭, 必须把 E_c 降低到一定值, 或使电路断开, 或使阳极电压反向。

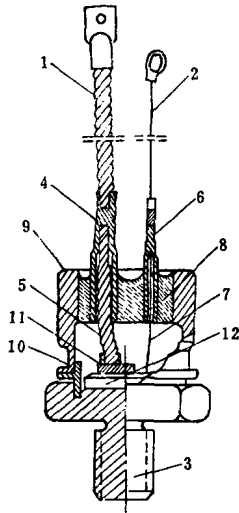


图 1-3 螺旋型元件结构图

1—阴极外引线；2—门极外引线；3—底座（阳极）；4—阴极导管；5—阴极内引线；6—门极导管；7—门极内引线；8—玻璃绝缘子；9—钢套；10—钢环；11—上钼片；12—管心

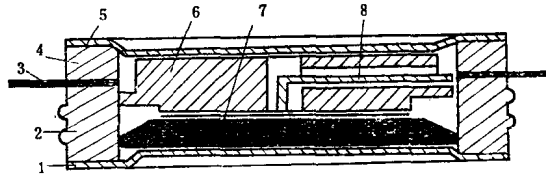


图 1-4 平板型元件结构图

1—下金属件；2—下陶瓷件；3—门极金属件；4—上陶瓷件；5—上金属件；6—阴极铜压块；7—管心；8—门极内引线

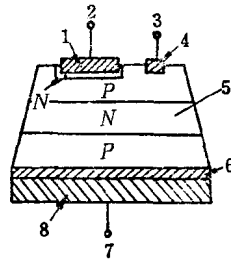


图 1-5 可控硅元件的内部结构

1—金铂片；2—阴极；3—控制极；4—金铂钼片；5—硅片；6—钼片；7—阳极；8—钼片

当可控硅的阳极经灯泡接 E_c 的负极, 阴极接 E_c 的正极时(此时称反向阳极电压), 不管 E_c 极性如何, K 的开、合都不能使灯泡发亮。这说明可控硅在反向阳极电压下, 电路不通。

当可控硅的阳极接正向电压, 但门极接 E_c 的负极, 阴极接 E_c 的正极(此时称反方向门极电压), 这时, 不论 K 的分合, 灯泡也始终不亮。这说明可控硅即使在正向阳极电压的作用下, 如果门极电压接反, 电路也不通。

综上所述, 可以得出一个重要结论, 即: 要使可控硅导通, 必须同时具备两个条件:

- (1) 可控硅加上正向阳极电压;
- (2) 加上适当的正向门极电压。

上面讲的是可控硅正常工作情况。当正向阳极电压过高或上升得太快时, 虽未加控制信号, 可控硅也会导通, 从而造成误动作。当反向阳极电压过高时, 可控硅也会突然反向击穿, 造成永久性破坏。为使可控硅正常工作, 上述情况必须避免。

二、可控硅的工作原理

为什么具有PNPN结构的可控硅具有可控整流的特点呢? 它可用晶体三极管的工作原理简略地加以解释。一个可控硅整流元件可以看作一对互补晶体三极管(见图1-8)。一

一个是 $P_1N_1P_2$ 管，一个是 $N_1P_2N_2$ 管。

在图1-8中，当阳极接到电源正端时，就有空穴自 P_1 通过 J_1 结流向 N_1 （图中实线箭头）。这些空穴一部分在 N_1 区复合，另一部分则达到 J_2 结作为 J_2 结的少数载流子。同理，当C接电源负端时，就有电子自 N_2 通过 J_3 流向 P_2 （图中虚线箭头）。这些电子一部分在 P_2 区复合，另一部分也达到 J_2 结，作为 J_2 结的少数载流子。这样一来， J_2 结两侧的少数载流子增加，于是通过 J_2 结的反向电流就比没有 J_1 和 J_3 时大多了。

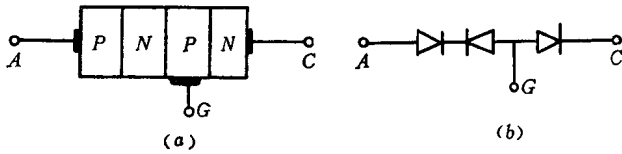


图 1-6 可控硅管心示意图

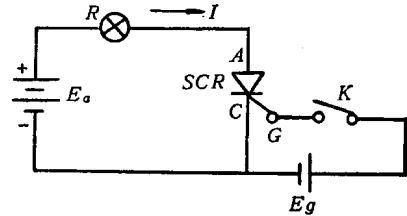


图 1-7 可控硅工作情况示意图

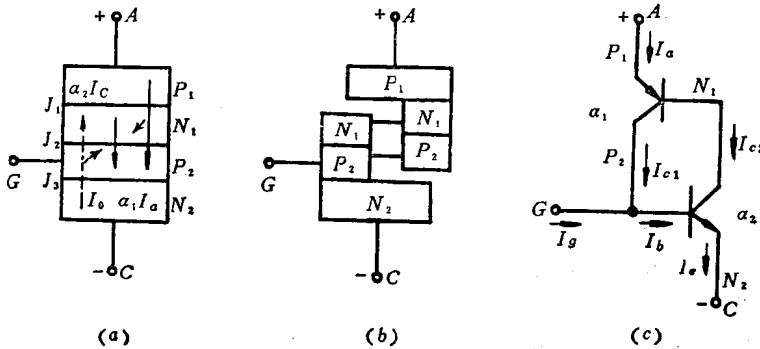


图 1-8 可控硅工作原理示意图

(a) 管心结构和电流情况；(b) 分成两个等效二极管；(c) 加 u_g 后电流通情况

如果近似地认为通过 J_1 结的电流都是空穴电流，且其数值为 I_a ，则流过 J_2 结的电流为 $\alpha_1 I_a$ ， α_1 为 $P_1N_1P_2$ 晶体管共基极的电流放大系数。同理，认为流过 J_3 结的电流都是电子电流，其值为 I_c ，则流过 J_2 结的电子电流为 $\alpha_2 I_c$ ， α_2 为 $N_1P_2N_2$ 晶体管共基极的电流放大系数。这样，流过 J_2 结的总电流就是 $\alpha_1 I_a + \alpha_2 I_c$ 。再假设没有 J_1 结和 J_3 结影响时流过 J_2 结的反向电流是 I_0 ，于是，流过 J_2 结的总电流为

$$I = \alpha_1 I_a + \alpha_2 I_c + I_0$$

如果认为空穴电流即为阳极电流，电子电流即为阴极电流，且

$$I_a = I_c = I$$

于是

$$I_a = \alpha_1 I_a + \alpha_2 I_a + I_0 = I_a(\alpha_1 + \alpha_2) + I_0$$

即

$$I_a = \frac{I_0}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \tag{1-1}$$

可以看出，当 $\alpha_1 + \alpha_2$ 很小时， I_a 接近于 I_0 ，而当 $(\alpha_1 + \alpha_2)$ 接近于1时，电流上升甚快。其实，当 α_1 和 α_2 很小时， $\alpha_1 I_a$ 和 $\alpha_2 I_c$ 都很小，即集结在 J_2 结两侧的少数载流子不多，故电流 I_a 小。当可控硅的阳极电压增加时，漏电流 I_0 增加， α_1 和 α_2 也随 I_0 的增加而增加。

可控硅的电流放大系数随电流的变化情况如图1-9所示。这样，当电流增到使 $\alpha_1 + \alpha_2$ 接近于1时，聚集在 J_2 结两侧的少数载流子剧增， I_a 就急剧增大。当 $(\alpha_1 + \alpha_2) = 1$ 时， I_a 就只受外部电阻的限制，可控硅正向导通。

当有门极电流 I_g 时，各部分电流情况如图1-8(c) 所示。设 $P_1N_1P_2$ 的漏电流是 I_{01} ， $N_1P_2N_2$ 的漏电流是 I_{02} 。于是，可根据图1-8(c) 列出下列方程。

$$I_a + I_g = I_e \quad (1-2)$$

$$I_b = I_{c1} + I_g \quad (1-3)$$

$$I_b = I_e(1 - \alpha_2) - I_{02} \quad (1-4)$$

$$I_{c1} = \alpha_1 I_e + I_{01} \quad (1-5)$$

解上列方程得

$$I_a = \frac{\alpha_2 I_g + I_{01} + I_{02}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} = \frac{\alpha_2 I_g + I_0}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-6)$$

式中

$$I_0 = I_{01} + I_{02}$$

当没有 I_g 时，公式 (1-6) 与公式 (1-1) 相同，当有门极电流 I_g 时， I_a 的变化由公式 (1-6) 表示。可以看出当 I_g 增加时， I_a 上升快， α_1 ， α_2 上升也快。因此， I_g 使可控硅的断态不重复峰值电压降低，即使可控硅在阳极电压甚低时就能导通。

其实，门极电流的作用可以利用正反馈的道理简单地加以说明。当 $N_1P_2N_2$ 晶体管有控制电流通过时， I_{c2} 就要增加到 I_b 的 β_2 倍，而 I_{c2} 又是 $P_1N_1P_2$ 的基极电流。于是 $I_{c1} = \beta_1 I_{c2} = \beta_1 \beta_2 I_b$ ，这个 I_{c1} 是 $N_1P_2N_2$ 的基极电流。这样一来，虽然有一个甚小的基流，但在正反馈的作用下，两个晶体管很快就趋于饱和，即可控硅完全导通。元件导通后，门极信号可以去掉。因为此时 $P_1N_1P_2$ 管供给 $N_1P_2N_2$ 管以更大的基极电流，可控硅继续导通，直到集电极电流降到维持电流以下时，元件才关断。

三、可控硅的特性

1. 可控硅的阳极伏安特性

通过对可控硅工作情况的分析，导通和关断是可控硅正常工作的主要矛盾。它是随阳极—阴极间的电压、阳极电流、门极电流和管心温度等条件互相转化的。在实际应用中，通过实验作出伏安特性。它表示阳极—阴极间正(反)向电压和正(反)向电流的关系。可控硅的阳极伏安特性如图1-10(b)所示，横坐标表示电压，纵坐标表示电流。

先设门极电流 $I_g = 0$ ，给可控硅加正向阳极电压 E_a ，改变 E_a 使其从零逐渐增加，可控硅两端的电压 U_a 也逐渐增加， I_a 就按图中箭头所示方向从零逐渐增大，但增加很慢。即使阳极电压 U_a 已较大， I_a 仍然很小，只有几个毫安，可控硅是关断的。这时的 I_a 称为正向漏电流。待 U_a 升到某一数值 U_{DSM} ，阳极电流 I_a 突然增大，而阳极电压 U_a 突然降到很小，

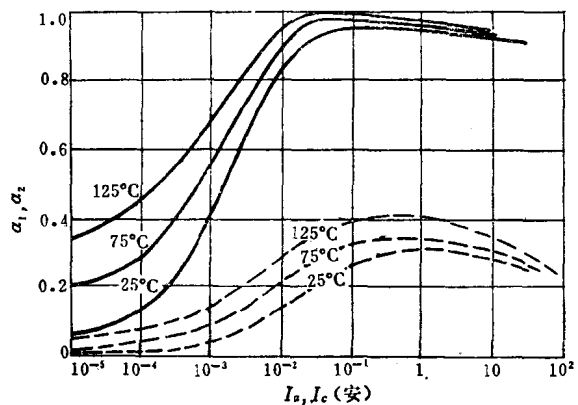


图 1-9 α_1 ， α_2 与 I_a 的关系

虚线— α_2 ，实线— α_1

这时电源电压几乎全部加在负载 R 上, 而 I_a 的数值就由 R 所限定。这时的可控硅就由关断变为导通了。电压 U_{DSM} 称为断态不重复峰值电压。这种不加控制电压, 而是在很大的阳极电压下使可控硅从关断转化为导通的条件, 不是正常工作条件。可控硅的正常导通应是在加门极电流 I_g 的条件下发生的。

如果在门极和阴极间加上正向门极电压, 使门极有正向电流 I_g 流过, 则可控硅导通所需正向阳极电压就变低。正向门极电流 I_g 越大, 导通所需正向阳极电压越低。当 I_g 足够大时, 只要在阳极—阴极间加上很小的正向电压就能导通。图1-10(b) 给出了在不同门极电流 I_g 时, 可控硅导通所需的阳极电压 U_a 。上述特性与前面讲的工作原理完全一致。

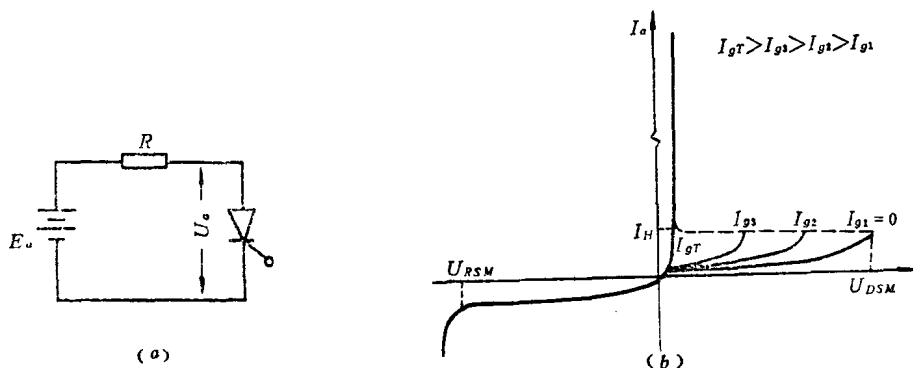


图 1-10 可控硅的阳极伏安特性
(a) 线路图; (b) 特性曲线

在可控硅导通后, 若逐渐减少电源电压, 阳极电流 I_a 也减小, 一直到某一值 I_H 时, 可控硅就从导通状态转化为关断状态, 电源电压几乎都加在可控硅上。电流 I_H 为要使可控硅保持导通状态所需的最小正向阳极电流, 称为维持电流。若阳极电流小于此值, 则可控硅关断。

当阳极接反向电压时, 特性曲线和硅二极管一样, 如图1-10(b) 左下方所示。随着反向电压升高, 反向漏电流也逐渐加大。因为反向漏电流的数值较小(几毫安到几十毫安), 故曲线靠近横坐标, 此时是反向阻断状态。当反向电压超过反向不重复峰值电压 U_{RSM} 时, 反向漏电流迅速增加, 使可控硅反向击穿而损坏。由反向阻断转化为事故导通, 这是不允许的, 必须避免这种情况发生。

2. 可控硅的门极伏安特性

实现可控硅从关断到导通的转化, 重要的条件之一是门极的触发电压和电流合适。

可控硅的门极—阴极间是一个 PN 结, 因此, 加上正向电压时, 就显出二极管的单向导电特性。通过实验可以测出门极正向电压和正向电流之间的关系, 如图1-11所示。称为门极的伏安特性。

图1-11(a) 中给出 KP-500 型可控硅的门极伏安特性。从图可以看出, 门极最大电压 U_{gM} 不能超过 25 伏, 门极最大电流 I_{gM} 不能超过 4 安, 门极最大功率 P_{gM} 不超过 30 瓦。图1-11(a) 中斜线部分表示可控硅的触发电压和触发电流, 把这部分放大如图 1-11(b) 所示。从图可见, 门极触发电压 U_{gT} 为 5 伏, 门极触发电流 I_{gT} 为 300 毫安, 由于门极的内阻参数不一致, 触发区限制在 A 、 B 曲线和两条直线组成的斜线区域里。

从图可以看出，当门极电压为5伏时，所有可控硅都能触发导通。图中A相当于高阻极限，即在这个系列中具有最大门极电阻的门极伏安特性。可以看出，当门极电压为5伏时，它的门极电流 I_g 不到50毫安。曲线B为低阻极限，即在这个系列中具有最小门极电阻的门极伏安特性曲线。可以看出，只要加上1伏的门极电压，就可有200~300毫安的门极电流，从而使可控硅触发导通。这就是说，只要在斜线所划的区域内，可控硅就可触发导通。可控硅的触发电压和触发电流一般是这样规定的：当元件的阳极与阴极间加上6伏的直流电压时，能使元件触发导通的门极最小电流和电压称为触发电流和电压。例如元件的合格证上写的触发电流为100毫安，触发电压为2伏，就是要使该元件触发导通所要加的脉冲信号电流必须大于100毫安，其电压必须大于2伏。另外，温度对门极触发电压和触发电流的影响也是很大的，合格证上给的是在常温下测得的数据。一般情况下，高温时触发电压和电流会显著下降。

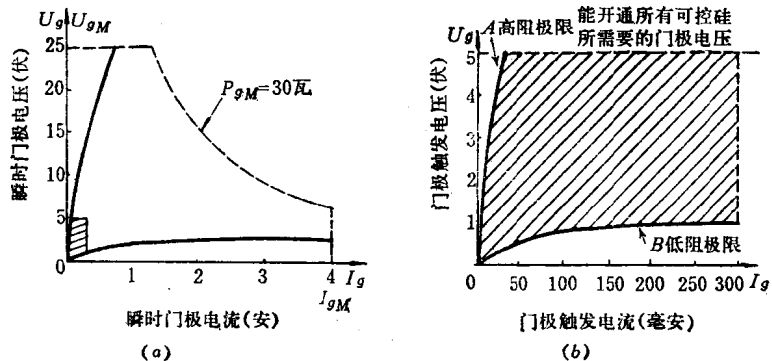


图 1-11 门极伏安特性

不能使可控硅触发的电压和电流是多少呢？在图1-11(b)左下角小于0.15伏、1毫安的一个小区域就表示这个类型的可控硅的不触发区。显然，如果将进入门极的干扰信号限制在这个数据以下，就可以保证该型可控硅不致由于干扰而产生误导通。

为了使元件的门极不致烧毁或击穿，这里附带谈一下给元件所加的触发信号所受限制的问题。

(1) 门极瞬时峰值电压和峰值电流的限制，对于各种类型的可控硅也不尽相同，如前面讲的KP-500型可控硅的最大容许瞬时峰值电压为25伏，最大容许瞬时峰值电流为4安。

(2) 最大容许功率的限制。最大容许瞬时功率，也因可控硅不同而不同，如上述500安可控硅的最大容许瞬时功率为30瓦。门极功率损耗除了上述瞬时容许值外，还受平均允许损耗的限制。当用门极的平均容许功率考虑脉冲是否合适时，求触发脉冲的功率以使用脉冲电流的有效值为宜。

四、可控硅的主要参数

为了能较好的使用可控硅，对它的主要参数应有所了解。下面，介绍一些主要参数。

1. 断态不重复峰值电压 U_{DSM} (或 U_{FB})

在可控硅门极断路时，它的阳极伏安特性曲线急剧弯曲处所规定的断态峰值电压。这个电压是一个不连续施加且持续时间不大于10毫秒的断态最大脉冲电压。这个电压与 N_1

区的宽度有关, N_1 区越宽, U_{DSM} 越大。

2. 反向不重复峰值电压 U_{RSM} (或 U_{RB})

门极断路, 可控硅加反向阳极电压时伏安特性急剧弯曲处所规定的反向峰值电压, 这是一个不连续施加且持续时间不大于10毫秒的反向最大脉冲电压。这电压也随 N_1 区宽度的增加而增加。当电压达到此值时, 反向电流将急剧增加, 即发生破坏性击穿。

3. 断态重复峰值电压 U_{DRM} (或正向阻断峰值电压 PFV)

指可控硅在门极断路和正向阻断条件下, 可施加的重复率为每秒50次且持续时间不大于10毫秒的断态最大脉冲电压。其值规定为断态不重复峰值电压的80%, 即

$$U_{DRM} = \frac{80}{100} U_{DSM}$$

通常我们说1000伏的可控硅即指它的 U_{DRM} 为1000伏。当外加电压的峰值小于或等于此值时, 可控硅不会误导通, 从而保证了可控硅正常工作。在实际应用时, 考虑到电源电压波动等影响, 还留有一定裕度, 一般乘以(1.5~2)的系数。即选用可控硅的断态重复峰值电压 U_{DRM} 大于或等于 $(1.5 \sim 2)U_M$ 。

4. 反向重复峰值电压 U_{RRM} (或 PRV)

指可控硅在门极断路的条件下, 可施加的重复率为每秒50次且持续时间不大于10毫秒的反向最大脉冲电压, 其值规定为反向不重复峰值电压的80%。在实际使用时, 也留一定的裕度, 即选用可控硅的反向重复峰值电压大于或等于最大电压的1.5~2倍。

5. 掣住电流 I_L

可控硅得到触发而导通时, 它的电流是自零逐渐上升的。如果电流还未升到足够大时, 就去掉触发信号, 可控硅又会关断。必须使电流升到一定程度再去掉触发信号可控硅才能继续导通, 这个一定大小的电流就是掣住电流, 可定义如下: 可控硅一经从断态转到通态, 就去掉控制信号, 能使元件保持导通所需的最小主电流叫掣住电流。

6. 维持电流 I_H

元件开通后, 要维持元件处于导通状态所需的最小主电流。

7. 额定平均电流 $I_{F(AV)}$

在规定的散热条件下, 环境温度不大于40°C, 导电角不小于170°, 允许通过的工频(50周/秒)正弦半波电流的平均值叫额定正向电流。

产品标定的额定电流是指正弦半波(导电角为180°)的平均值, 而表征元件发热的情况则应以有效值来表示。从图1-12可以看出, 当电流为正弦半波时其平均值 $I_{F(AV)}$ 为

$$I_{F(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_M \sin\theta d\theta = \frac{I_M}{\pi}$$

而其额定有效值 I_{rt} 为

$$I_{rt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_M \sin\theta)^2 d\theta} = \frac{I_M}{2}$$

于是

$$I_{rt} = 1.57 I_{F(AV)}$$

这就是说, 额定正向电流为100安的可控硅用于直流电路时, 允许通过的电流为157安。由上可以知道, 一个额定正向电流为100安的元件, 如果通过的电流不是正弦半波, 则它容许通过的电流就不是100安了。在图1-13所示的电流波形中, 它的有效值 I 和平均值 I_{AV}

可求之如下

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/3}^{\pi} (I_M \sin\theta)^2 d\theta} = 0.45 I_M$$

$$I_{AV} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/3}^{\pi} I_M \sin\theta d\theta = \frac{3}{4\pi} I_M$$

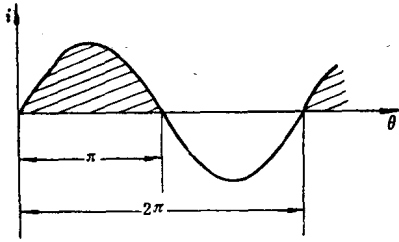


图 1-12 导电角为 π 时半波电流波形

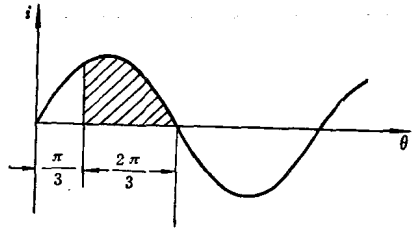


图 1-13 导电角为 $\frac{2}{3}\pi$ 时半波电流波形

平均值与有效值的关系为

$$I = 0.45 \times \frac{4\pi}{3} I_{AV}$$

根据有效值相等的原则，于是

$$\frac{0.45 \times 4\pi}{3} I_{AV} = 1.57 I_{F(AV)}$$

即

$$I_{AV} = 0.87 I_{F(AV)}$$

这就是说，当导电角不是180°时，它的额定正向电流减少。在导电角为120°时，它的额定正向电流降到原值的87%。图1-14给出了C380系列可控硅不同导电角时容许正向平均电流与壳温的关系曲线。这里认为可控硅的最大容许结温为125°C时，其壳温约为80°C。从图可以看出，在容许温度相同时，导电角越小，容许通过的正向平均电流越小。

8. 通态平均电压 $U_{T(AV)}$

在规定的环境温度、标准散热元件导热条件下，通以工频正弦半波额定正向平均电流，待结温稳定后，测得阳极与阴极间电压的平均值，就是元件的正向压降 $U_{T(AV)}$ 。通态电压增加时，元件的过载能力下降。

9. 浪涌电流 I_{EM} (电流过载倍数)

元件通以通态平均电流稳定后，在一定时间内容许通过的最大正向峰值电流。由于元件体积小，热容量小，所以能承受的浪涌过载能力是很小的，具体数据如表1-1。

10. 门极触发电压和电流

环境温度不大于40°C和在阳极阴极间加以一定的(一般是6伏)正向电压条件下，触发

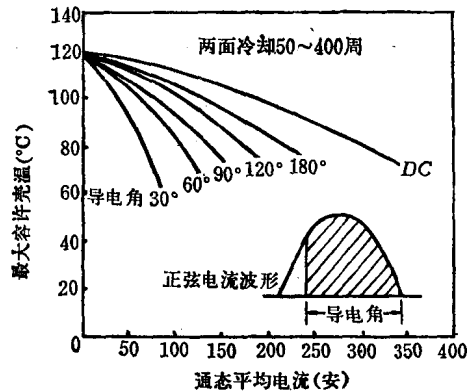


图 1-14 不同导电角容许电流与壳温关系

元件使其从阻断状态转化为导通状态的最小门极电压和电流。以某20安的可控硅为例，它的门极可触发电压为0.9伏，门极可触发电流为9毫安。如果我们设计的触发器能够达到这样的要求，则足以使可控硅导通。

表 1-1 浪涌电流过载能力

额定电流 (安)	电流过载倍数			
	一个周波	三个周波	六个周波	十五个周波
5	5	4	3.5	3
20	5	4	3.5	3
50	5	4	3.5	3
100	4	3	2.5	2.2
200	3	2.4	2.2	2
300	3	2.4	2.2	2

在产品样本中，给出的是门极最大触发电压和最大触发电流。它是指同一系列的产品中，出厂时不通过的数值。出厂合格证所给出的可触发电压和电流均小于产品样本规定的数值。在产品样本中给出的最大触发电压和电流的数值，是保证同一系列的可控硅都能触发的数值，并不是它的最大允许值。如20安可控硅的最大触发电压为3.5伏，而门极的最大允许电压是10伏。

11. 断态临界电压上升率 $\frac{dV}{dt}$

元件在阻断状态时，加上一个迅速上升的电压，则作用在元件上电压上升的速率叫电压上升率，一般用每微秒若干伏表示。在额定结温和门极断路条件下，使元件从断态转入通态的最低电压上升率，叫断态临界电压上升率 $\frac{dV}{dt}$ 。

由实践知道，当加在元件上的电压上升太快时，即电压上升率太大时，会使元件的正向阻断电压降低，造成误导通。这是因为元件的结面在阻断状态时相当于一个电容，若突然加一正向电压，便会有一个充电电流流过结面，这充电电流流经靠近阳极的PN结相当于一个触发电流的作用。若所加的正向电压上升很快，充电电流就相当大，这就有可能使元件误导通。所以对元件应有电压上升率的限制。在一般情况下，加在元件上的电压上升速率是变化的，因此，都是取一个平均值作为电压上升率。一般电压上升率是这样规定的：当加在可控硅上的电压按指数曲线上升到其稳态值 U_s 时（图1-15），指数曲线上时间常数 τ 处的一点与原点连接的直线的正切，就是电压上升率 $\frac{dV}{dt}$ 。按此定义，可控硅在规定的结

温、规定的门极回路的状态下，不能使可控硅开通的极限 $\frac{dV}{dt}$ 值就可被确定。因在按指数曲线变化的曲线中，当 $t = \tau$ 时，其电压升到 $0.632U_s$ ，故电压上升率可以写成

$$\frac{dV}{dt} = \frac{0.632}{\tau} U_s$$

我国生产的可控硅，50安以下的临界电压上升率为30伏/微秒，100安以上的临界电压上升率为100伏/微秒。但用双扩散法制成的高质量可控硅，其电压上升率可高达400伏/微秒。

可控硅的最大容许电压上升率与结温有关。结温越高，容许的 $\frac{dV}{dt}$ 下降，如图1-16所示。

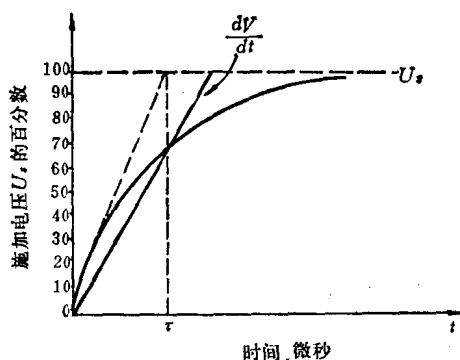


图 1-15 电压上升率表示法

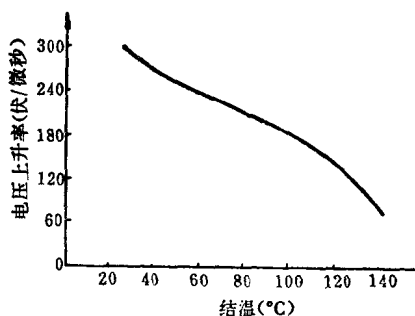


图 1-16 容许电压上升率与结温关系曲线

12. 通态临界电流上升率 $\frac{di}{dt}$

门极开通时，元件能承受的最大通态电流上升率，在此电流上升率下，元件不致损坏。

当门极加入触发电流后，元件首先在门极的附近逐渐形成导通区，并且随着时间的增长，导通区逐渐扩大，直至全部结面变成导通，这一过程需要几微秒到几十微秒的时间。一般结构的可控硅元件，它的门极是放在边上的，故由触发到全部结面导通需要的时间比较长，平板型元件门极放在中央，全部结面导通的时间则稍短，如图1-17所示。另外，如果采用双门极的方法，可使全开通的时间缩短约1/3。如果要获得更快的开通速度，可以采用多门极或把门极作成环形或梳形。

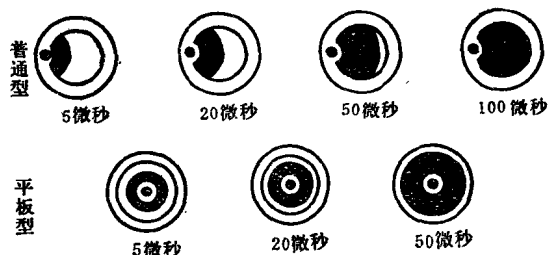


图 1-17 门极形成导通区的情况

为什么要限制电流上升率呢？如果电流上升率太大，则元件的结面还没有全导通时，电流已升到很大。在这种电流密度甚大的情况下，就有可能在门极附近的结部发生过热而使元件破坏。为此，规定了 $\frac{di}{dt}$ 极限值，此值与开通损耗有关，故允许的 $\frac{di}{dt}$ 随开通前的阳极电压而变。图1-18即为 C35型可控硅允许的 $\frac{di}{dt}$ 曲线。图中，横轴为开始导通后的时间，纵轴为允许电流。

13. 开通时间 t_{on}

当门极加上足够的触发信号后，可控硅并不是立即导通，而是要经过一小段时间，这段时间就是开通时间。为了统一起见，对开通时间作如下规定：在规定的环境温度下，从元

件的门极加上电压起，到元件通过的电流达到额定值的90%所需要的时间叫开通时间 t_{on} 。元件开通时它的电压、电流变化情况如图1-19所示。从图可以看出，从门极加触发信号起，到电流 i_{SCR} 升到额定电流的10%止，所需时间 t_d 叫延迟时间；从10%到额定电流的90%止所需的时间叫上升时间 t_r 。这两个时间之和就是元件的开通时间 t_{on} 。可以看出，如果触发脉冲不够宽，可控硅就可能触发不开。我国KP-500型可控硅的 t_{on} 在8微秒以下，采用特殊工艺的快速元件，开通时间可降到1微秒以下。

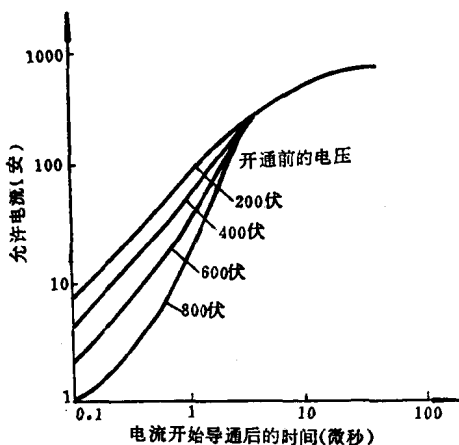


图 1-18 电流上升率与导通前阳极电压关系曲线

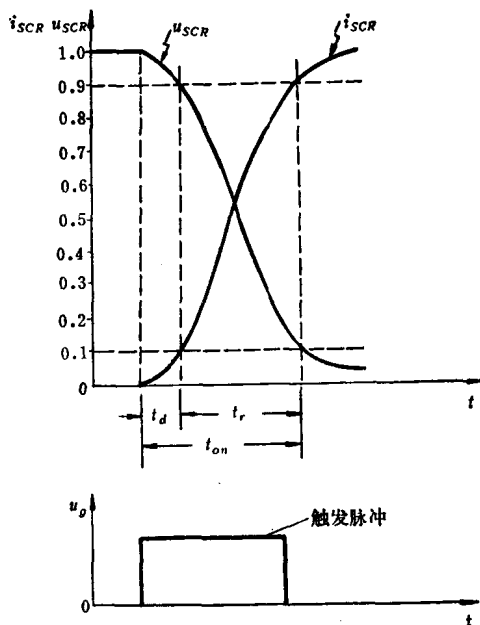


图 1-19 可控硅开通时的波形

为何元件有一个开通时间呢？可以根据图1-20简略地加以说明，当门极流入电流后， N_2 区中的电子开始向 P_2 区注入，并达到 J_2 结。这些电子到 N_1 区后，引起 P_1 区的空穴向 N_1 区注入，也达到 J_2 结。电流开始增加，直到 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 时，元件将要导通，这段时间就是延迟时间 t_d 。从这时起载流子开始在 J_2 结两边积累，阻挡层消失， J_2 结逐渐转为正偏置。与此同时，电流也逐渐上升到额定值。因此可以说元件的开通时间就是载流子积累所需的时间。

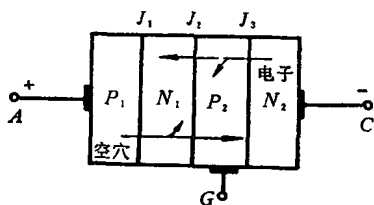


图 1-20 可控硅开通时电流流通情况

14. 关断时间 t_{off}

由实践知，如果在可控硅元件的阳极电流为零后，再很快的加上一个正向电压，它又会返回到导通状态。阳极电流过零后必须再经过一段时间，才能恢复阻断能力。这就是说，可控硅关断要经过一段时间，即所谓关断时间。可控硅的关断时间可定义如下：在额定结温下，元件从切断正向电流起，到恢复阻断能力止，这段时间叫关断时间。元件的关断情况如图1-21所示。由图可见，从 $t_1 \sim t_2$ 正向电流减少，但可控硅仍导通，故它承受的电压 u_{SCR} 为零。到 t_2 时电流降到零。由于此时 J_3 和 J_1 处有大量积累的载流子，故它们还