

中等专业学校试用教材

可控硅技术

湘潭电机制造学校 主编

机械工业出版社

编 者 的 话

本书是根据第一机械工业部一九七七年十二月在北京召开的一机系统中专教材座谈会和一九七八年一月在湘潭召开的中专工业电气自动化和电机制造两专业教材会议制订的《可控硅技术》教材编写大纲编写的。

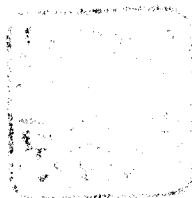
本书内容包括：可控硅整流元件、单相及三相可控整流电路、可控硅主电路及其计算、可控硅触发电路、可控硅交流调压、可控硅有源逆变、可逆电路、可控硅无源逆变及直流断续器等。

本书可作为中等专业学校工业电气自动化专业的试用教材和有关专业的教学参考书，亦可供从事可控硅技术应用方面的人员参考。

本书由湘潭电机制造学校周金明同志担任主编，上海机器制造学校莫正康同志、孔凡才同志参加编写。

本书经一九七八年七月在青岛召开的审稿会议讨论通过。参加审稿会议的单位有：湖南大学、青岛整流器厂、咸阳机器制造学校、西安航空学校、广西机械学校、哈尔滨电机制造学校、吉林机械工业学校、黑龙江机械制造学校、内蒙古工业学校、北京机械学校、上海机器制造学校和湘潭电机制造学校。参加审稿会议的代表对本书提出了不少改进意见，对此我们表示衷心感谢。

限于编者水平及编写时间仓促，书中一定存在不少缺点和错误。恳切希望广大读者批评指正。



目 录

绪论	1
第一章 可控硅整流元件	2
§ 1-1 可控硅的可控单向导电性	2
§ 1-2 可控硅的工作原理	4
§ 1-3 可控硅的阳极伏安特性	5
§ 1-4 可控硅的主要特性参数	6
§ 1-5 可控硅的型号含义及测试方法	12
§ 1-6 特殊可控硅简介	13
第二章 单相可控整流电路	18
§ 2-1 单相半波可控整流电路	18
§ 2-2 单相双半波可控整流电路	23
§ 2-3 单相桥式可控整流电路	25
§ 2-4 可控硅在负载侧的单相桥式整流电路	30
第三章 三相可控整流电路	33
§ 3-1 三相半波可控整流电路	33
§ 3-2 共阴极组及共阳极组可控整流电路	38
§ 3-3 三相桥式全控整流电路	40
§ 3-4 三相桥式半控整流电路	42
§ 3-5 带有平衡电抗器的双反星形可控整流电路	45
§ 3-6 整流变压器的漏抗对整流电压的影响	48
§ 3-7 整流电路的选用比较	50
§ 3-8 可控硅调速系统中直流电动机的机械特性	54
第四章 可控硅主回路及其计算	61
§ 4-1 可控硅的过电流保护	61
§ 4-2 可控硅的过电压保护	64
§ 4-3 可控硅的正向电压上升率与电流上升率的抑制	73
§ 4-4 可控硅的串联和并联	75
§ 4-5 可控硅电压电流的计算与选择	79
§ 4-6 整流变压器额定参数的计算	89
§ 4-7 平波电抗器的计算	93
第五章 可控硅触发电路及应用实例	98
§ 5-1 可控硅对触发电路的要求	98
§ 5-2 阻容移相桥触发电路	100
§ 5-3 单结晶体管触发电路	103
§ 5-4 同步电压为正弦波的触发电路	110
§ 5-5 同步电压为锯齿波的触发电路	117
§ 5-6 用小可控硅放大脉冲功率的触发电路	122

§ 5-7 输出为脉冲列的触发器	123
§ 5-8 触发电路与主回路电源同步问题	124
§ 5-9 脉冲变压器	126
§ 5-10 可控硅应用实例	130
第六章 交流调压	136
§ 6-1 单相交流调压	136
§ 6-2 三相交流调压	140
§ 6-3 可控硅调功器和过零触发电路	148
§ 6-4 交流调压应用实例——可控硅电镀电源	150
第七章 可控硅有源逆变电路及可逆电路	154
§ 7-1 有源逆变的工作原理及实现逆变的条件	154
§ 7-2 几种常用的可控硅有源逆变电路	158
§ 7-3 逆变颠覆与控制角的限制	160
§ 7-4 有源逆变电路的应用举例——线绕式异步电动机的串级调速	162
§ 7-5 可控硅可逆直流拖动系统的工作原理	163
§ 7-6 可逆系统中的环流	168
§ 7-7 可逆系统中电抗器安排及计算	172
§ 7-8 可控环流的可逆系统的概念	173
§ 7-9 无环流可逆系统的概念	175
§ 7-10 可控整流电路的功率因数	176
§ 7-11 可控硅直流自动调速系统	179
第八章 逆变器与直流断续器	196
§ 8-1 概述	196
§ 8-2 单相并联逆变器	199
§ 8-3 串联逆变器	208
§ 8-4 三相逆变器	210
§ 8-5 直流断续器	212
§ 8-6 可控硅中频装置 (KGPS-100-1.0 型)	215
本书符号说明	225
本书主要参考书	227

绪 论

可控硅整流元件是一种新型大功率半导体器件。可控硅整流元件的出现极大地发展了弱电对强电的控制。从一九五七年它首次被研究出来到现在只有二十多年的时间，这期间元件的制造和应用技术发展极快，目前可控硅已在各工业部门获得了广泛的应用，其应用范围按工作原理大致分为四类：

1. 整流 把交流电转变成大小可调的直流电。
2. 逆变 把直流电转变成交流电或把交流电转变成另一种频率的交流电。
3. 直流开关 作直流回路开关或直流调压。
4. 交流开关 作交流回路开关或交流调压。

可控硅有些什么特点呢？从控制的观点看，它的功率放大倍数很大，用几十到二、三百毫安电流，二、三伏的电压可以控制几千安、几千伏的工作电流、电压，即它的功率放大倍数可以达到几百万倍。

从应用上看，可控硅整流器比起汞弧整流器或用自耦调压器调压的硅整流器，具有重量轻、体积小、维护简单和操作方便的优点。比起采用“交流电动机-直流发电机组”的直流电源，具有占地面积小、无噪音、无振动、效率高、操作方便、没有转动部分和容易维护的优点。以可控硅装置为电源的中频感应电炉与以发电机组为电源的中频感应电炉比较，可控硅装置结构简单，制造容易。运行效率可控硅可达90~95%，而中频机组效率最高为80~85%，同时，可控硅装置的起动、停止、调节等均较机组方便。可控硅用于机床的无级调速，可以极大地简化齿轮箱，减少耗电量，增加机床的加工能力。用于轧钢机可以缩短加工时间，提高生产效率。总之可控硅整流元件具有一系列突出的优点，所以它一出现，立刻便在工业上得到广泛的应用，已经成为当前技术革新中采用的重要器件之一。

可控硅虽然优点很多，但也有其不足之处。如整流元件的非线性，交流侧的电流就会出现脉动，包含着大量谐波，这些谐波对电网有不良影响；可控硅整流装置在输出低电压时，功率因数很低。此外，可控硅装置的设计及调整维修需要有一定的电工及半导体电路的知识和分析问题、解决问题的实际工作能力。可控硅的推广应用是个发展方向，我们应努力使可控硅技术在实践中逐步推广应用。

本课程主要分析可控硅整流电路、直流电动机的可控硅可逆调速电路和可控硅逆变电路。本课程从分析元件、主电路和触发电路入手，阐明可控硅整流、调速、逆变电路的工作原理，并结合实践环节使学员能掌握这些基本原理，能够为正确使用和维修常见的可控硅设备具备必要的基础知识。

第一章 可控硅整流元件

§ 1-1 可控硅的可控单向导电性

可控硅整流元件是由PNPN四层半导体构成的元件，其外形如图1-1所示。它有三个极。螺栓式元件螺栓那一端是阳极A，另一端粗的那根引线是阴极K，细的那根引线是门极G（也叫控制极）。平板形元件，中间引出线是门极G，两个端面一个是阳极，一个是阴极，由元件上标志的符号判断。可控硅整流元件的符号如图1-1右下方所示。其文字符号一般用SCR。

可控硅整流元件的内部结构如图1-2所示。它的核心部分是一块0.27毫米厚的硅片，这硅片有四个交迭的P、N区，所以可控硅整流元件又称四层三端元件，其内部有三个PN结，当在阳极至阴极加反向电压时，有两个PN结处在反向状态，当加正向电压时中间的那个

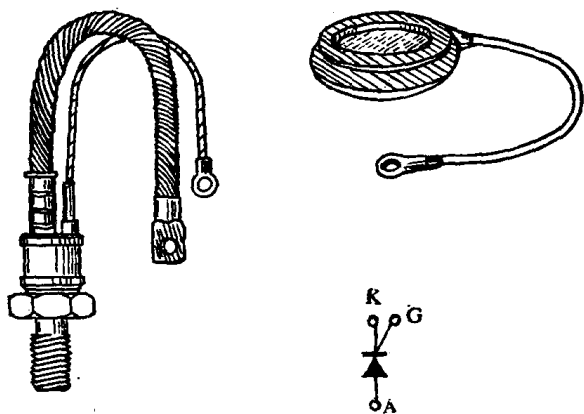


图1-1 可控硅整流元件的外形及符号

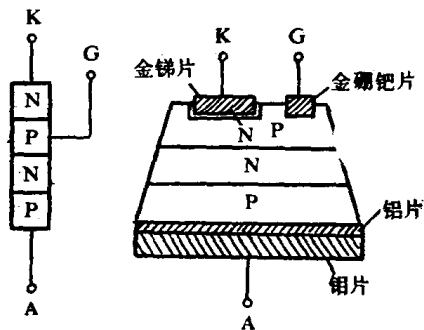


图1-2 可控硅整流元件的内部结构

PN结处于反向状态，所以可控硅整流元件都不会导通，那么元件在什么条件下才能从阻断状态转变成导通呢？

下面我们通过实验来观察可控硅整流元件的导通条件。

1. 如图1-3 a所示。当门极开路或在门极与阴极间加反向电压时，在可控硅的阳极、阴极之间加正向电压，这时灯不亮，可控硅不导通。

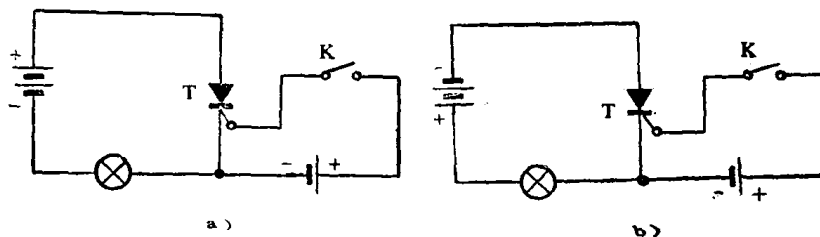


图1-3 可控硅的导通条件

2. 如图 1-3 a 所示。在可控硅的阳极、阴极之间加正向电压，当把开关 K 合上时，使门极至阴极之间也加上正向电压，这时灯亮，表示可控硅导通。

3. 可控硅导通，灯亮后，如把开关 K 断开或在可控硅的门极至阴极之间加反向电压，这时，灯仍然亮，可控硅照常导通。

4. 如图 1-3 b 所示，当可控硅的阳极、阴极之间加反向电压，这时不管门极是断路还是加正向、反向电压，可控硅都不导通，灯不亮。

通过以上实验，我们可知，要使可控硅从不通转化为导通就必须使它具备以下两个条件：

1. 可控硅阳极与阴极之间加上正向电压；
2. 门极对阴极同时加上适当的正向电压。

当可控硅阳极与阴极之间加上正向电压，门极对阴极亦加适当的正向电压，而使可控硅导通的过程称为触发。

可控硅转化为导通后，门极对它就失去了控制作用，那么可控硅导通后，应如何使它关断呢？按图 1-4 接线，当合上开关 K，可控硅导通后，把 K 断开，这时可控硅仍导通。毫安

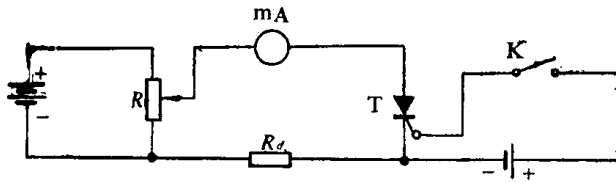


图1-4 可控硅的关断条件

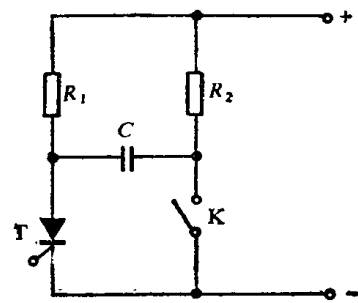


图1-5 元件的关断

表有读数。调节电阻 R 的可动头，使加于电阻 R_d 与可控硅串联电路的电压减小，这时毫安表读数也减小，当电流减至一定值时会出现毫安表的指针突然降到零，之后再调高电压，毫安表的指示很小（流过的是漏电流），可控硅关断了。

这个实验说明了当门极断路、流过可控硅的通态电流小于一定值时，可控硅会从通态转化为阻断状态。维持可控硅导通所需的最小通态电流叫维持电流。如果门极断路，流过可控硅的通态电流小于维持电流，可控硅关断。

在一般电路中，使流过可控硅的通态电流小于维持电流的方法有下列三种：一是电源电压是变化的，当电源电压降低至一定值，使流过可控硅的正向电流小于维持电流，可控硅关断；二是把可控硅主电路的电源短时断开或把可控硅的阳极与阴极之间用开关或继电器触头短时分路；三是如图 1-5 所示，合上开关 K，用电容 C 上充电的电压给已导通的可控硅短时加上反向电压，使可控硅关断。

例 如图 1-6 所示，主电路电源电压交变，门极在 t_1 瞬间合上开关 K，在 t_4 瞬间拉开 K，求电阻 R_d 上

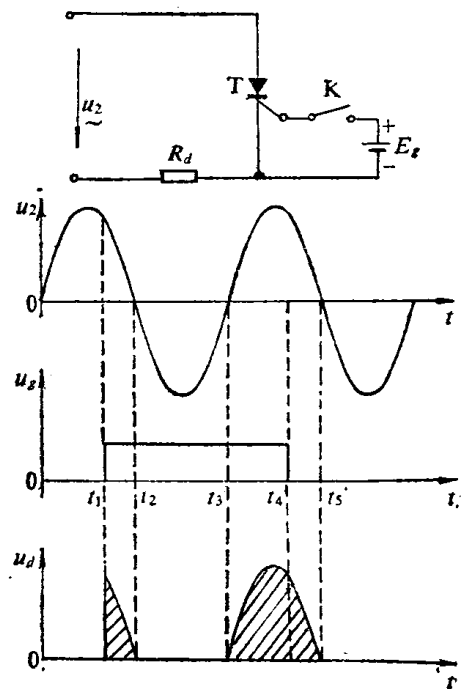


图 1-6

的电压 u_d 的波形。

解 当 $t = t_1$ 时刻, 可控硅主电压 (可控硅阳极对阴极的电压) 为正, 由于开关 K 合上, 使得门极对阴极的电压也为正, 所以可控硅导通, 可控硅管压降很小, 电源电压 u_2 加于负载; 当 $t = t_2$ 时刻, 由于 $u_2 = 0$, 所以流过可控硅电流小于维持电流, 可控硅关断, 之后可控硅承受反向电压不会导通; 当 $t = t_3$ 时, u_2 开始从零变正, 可控硅的阳极对阴极又开始承受正向电压, 这时门极对阴极有正电压 $u_g = E_g$, 所以可控硅又导通, 电源电压 u_2 再次加于负载; 当 $t = t_4$ 时, $u_g = 0$, 但由于这时可控硅处于导通状态, 维持导通; 当 $t = t_5$ 时, 由于 $u_2 = 0$, 可控硅又关断, 之后由于 $u_g = 0$ 所以可控硅处于阻断状态。由上述分析得出负载上电压 u_d 波形如图 1-6 所示。

§ 1-2 可控硅的工作原理

可控硅为什么有可控的单向导电性呢?

我们从可控硅整流元件的内部结构来进行分析。

可控硅的三个 PN 结可以看成 PNP 与 NPN 两个晶体三极管互联, 如图 1-7 所示。当外加电压通过负载电阻加于可控硅, 并使阳极为正, 阴极为负时, 要使可控硅正向导通, 关键

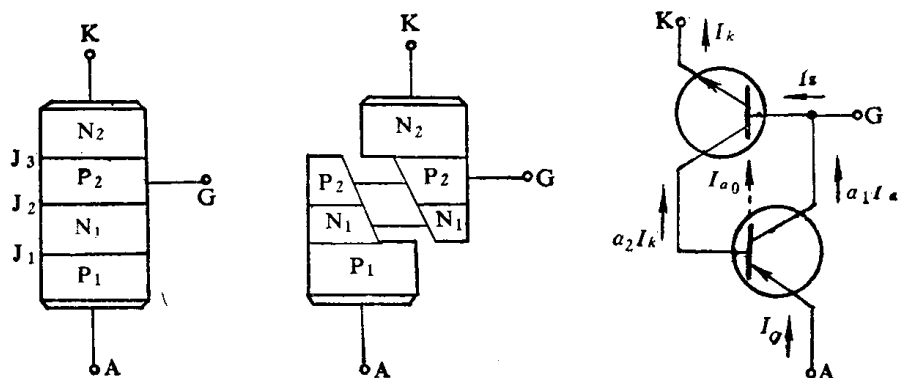


图1-7 用PNP与NPN两个晶体管相互作用来说明可控硅的工作原理

在于使 J_2 这个承受反向电压的 PN 结失去阻挡作用, 从图 1-7 不难看出, 这两个晶体管中每一个管的集电极电流, 同时就是另一个管的基极电流。故如此互联的晶体管电路, 一旦有足够的门极电流 I_g 流入, 就形成强烈的正反馈, 即: $I_g \rightarrow I_{b2} \uparrow \rightarrow I_{c2} \uparrow = I_{b1} \uparrow \rightarrow I_{c1} \uparrow$, 这样使两个晶体管均成为饱和导通。下面我们就分析这个过程。

设由阳极流入的电流为 I_a , 这个电流进入 P_1 区域形成空穴扩散电流, 它达到 J_2 的电流由 $P_1N_1P_2$ 晶体管的电流放大系数 α_1 所决定, 其值为 $\alpha_1 I_a$, α 就是晶体管集电极电流与发射极电流之比, 它与晶体管参数 β 的关系为:

$$\alpha = \frac{I_c}{I_e} = \frac{\beta I_b}{\beta I_b + I_b} = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad (1-1)$$

而阴极电流 I_k 在 N_2 区域是一个电子扩散电流, 它达到 J_2 的电流为 $\alpha_2 I_k$, 此外流过 J_2 的还有反向漏电流 I_{a0} , 上述三个电流之总和应等于阳极电流 I_a 。

$$I_a = \alpha_1 I_a + \alpha_2 I_k + I_{a0} \quad (1-2)$$

如果在门极加入的电流为 I_g ，则阴极电流为：

$$I_k = I_a + I_g \quad (1-3)$$

把式(1-3)代入式(1-2)，简化后得：

$$I_a = \frac{I_{a0} + \alpha_2 I_g}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-4)$$

硅晶体管的电流放大系数 α 有随着发射极电流的大小而变化的特点。当门极电流 I_g 较小时，发射极电流较小， α 也小。当门极电流 I_g 增大到一定程度，发射极电流也增大，而 α 将显著增大。如图 1-8 所示，当 $\alpha_1 + \alpha_2$ 增大到接近 1 时（即图中临界点 K），上面式子中的 I_a 将急剧增大而成为不可控制。这时流过可控硅的电流将由外加电压及负载电阻来决定，可控硅成为正向导通状态，管压降为 1 伏左右。所以门极电流 I_g 的增大，就能促使可控硅由不通转化为导通。此外若阳极电压过高， I_{a0} 过大，使 $\alpha_1 + \alpha_2$ 接近于 1 时，也会造成可控硅转折导通。可控硅导通后，门极电压即使降为零或为负，也不能改变其保持导通的状态。但是如果外加电压下降或负载电阻加大，使 I_a 减小到某一数值（约为几十毫安）后， $\alpha_1 + \alpha_2$ 也减小了，可控硅将恢复阻断状态。如果可控硅的阳极电压反接，此时两只等效三极管处于反向电压下，不能工作，故无论有无门极电压，可控硅都不能导通。

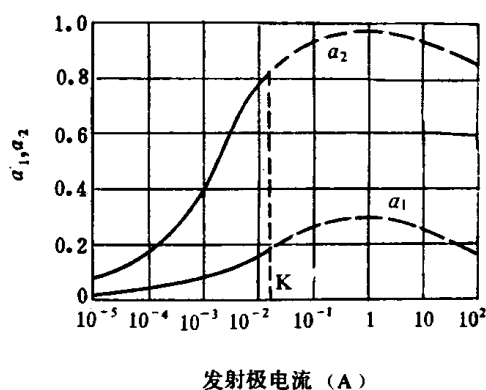


图1-8 PNP、NPN 两个晶体管的电流放大系数与发射极电流的关系

§ 1-3 可控硅的阳极伏安特性

在可控硅门极开路情况下改变阳极电压的大小和极性，可以测得如图 1-9 所示的阳极电压与阳极电流的关系，这就是可控硅的阳极伏安特性曲线。

在可控硅的阳极与阴极间加上正向电压时，开始元件中只有很小的电流（称为正向漏电流）流过，可控硅阳极与阴极间表现出很大的电阻，处于截止状态（或称为阻断状态）。当阳极电压上升到某一数值时，可控硅突然由阻断状态转化为导通状态，此阳极电压值称为正向转折电压，用 V_{BO} 表示。元件导通后，元件中流过较大的电流，其值主要由限流电阻（使用时由负载）决定。可控硅导通后元件两端约有 1 伏左右的管压降。在减小阳极电源电压或增加负载电阻时阳极电流随之减小，当阳极电流小于维持电流 I_H 时，可控硅便从导通状态转化为阻断状态。

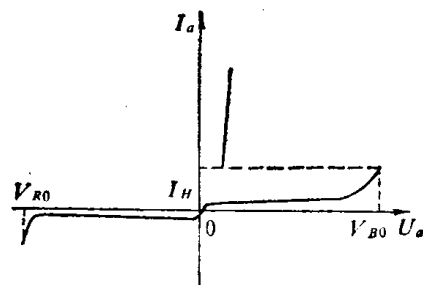


图1-9 可控硅的阳极伏安特性曲线

在可控硅阳极与阴极间加上反向电压时，随着反向电压的增大，开始可控硅处于阻断状态，只有很小的反向漏电流流过。当反向电压增大到某一数值时，可控硅反向击穿。反向击穿的电压称为可控硅的反向击穿电压，用 V_{RO} 表示。可见可控硅的反向伏安特性与二极管反

向特性类似。

必须指出,上面这种增大正向阳极电压到 V_{so} 使可控硅导通的方法,在正常使用时是不采用的,因为它很容易造成可控硅的损坏。

下面来看一下可控硅门极正向电流 I_g 对可控硅正向伏安特性的影响。当可控硅门极流过正向电流 I_g 时,我们发现可控硅的正向转折电压显著降低,如图1-10所示。当 I_g 足够大时,可控硅正向转折电压很小,一加上正向阳极电压,可控硅就导通。

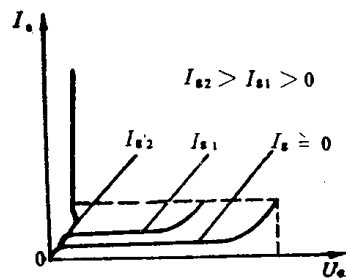


图1-10 I_g 对正向阳极伏安特性的影响

我们在一般电路中使用可控硅时,就是根据这种特性使可控硅导通的,即先在可控硅上加上一一定的阳极电压,然后在控制极与阴极之间加足够大的触发信号,使可控硅因它的正向转折电压下降到很小而导通。这是我们常用的使可控硅导通的方法。

在可控硅可控单向导电性实验中我们发现,可控硅不仅具有可控单向导电性,而且有以弱控制强的宝贵特性,即用很小的门极触发电流就能使有很大阳极电流的可控硅导通。

§ 1-4 可控硅的主要特性参数

要掌握可控硅的性能,应了解它的各项技术参数的意义及应用条件,但可控硅的参数有几十项之多,这里仅就主要参数作一介绍。

一、正反向重复峰值电压

为了说明本参数的物理意义,我们先介绍断态重复峰值电压与反向重复峰值电压。

断态重复峰值电压:在一定结温下,在门极断路时,按照元件正向伏安特性急剧弯曲点所决定的电压,称为断态不重复峰值电压 V_{DSM} (此电压是不可连续施加的),这个电压的80%称为断态重复峰值电压 V_{DRM} (此电压可连续施加,其重复率为每秒50次)。

反向重复峰值电压:在一定结温下,在门极断路时,按照元件反向伏安特性急剧弯曲点所决定的电压,称为反向不重复峰值电压 V_{RSM} ,取该值的80%作为反向重复峰值电压 V_{RRM} 。

取室温下断态重复峰值电压及反向重复峰值电压和额定结温下的断态重复峰值电压及反向重复峰值电压四者最低值纳入等于或小于该值的电压级别作为该元件正反向重复峰值电压。在额定结温下此电压对应的正反向平均漏电流称为断态重复平均电流 I_{DR} 和反向重复平均电流 I_{RR} 。

表1-1列出了可控硅整流元件正反向重复峰值电压等级。

表1-1 可控硅整流元件的正反向重复峰值电压等级

级 别	正反向重复峰值电压(V)	级 别	正反向重复峰值电压(V)	级 别	正反向重复峰值电压(V)
1	100	8	800	20	2000
2	200	9	900	22	2200
3	300	10	1000	24	2400
4	400	12	1200	26	2600
5	500	14	1400	28	2800
6	600	16	1600	30	3000
7	700	18	1800		

由于可控硅的工作电压瞬时超过反向不重复峰值电压即可造成可控硅的永久性损坏, 超过断态不重复峰值电压时, 如果通过电流大、次数多了, 也会造成元件特性下降, 甚至损坏, 所以选用元件时, 元件的正反向重复峰值电压应选为实际工作电压最大值的 1.5~2 倍以上。

二、额定通态平均电流 $I_{T(AV)}$

在环境温度为 40°C 和规定冷却条件下, 元件在电阻性负载的单相工频正弦半波, 导通角不小于 170° 的电路中, 当结温稳定且不超过额定结温时, 所允许的最大通态平均电流称为额定通态平均电流 $I_{T(AV)}$ (简称额定电流)。

这里说的半波电流平均值是指在半个周期流过可控硅的电流按一个周期平均的数值。该电流与电流最大值的关系为:

$$I_{T(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi} \quad (1-5)$$

而表征元件发热往往应按有效值, 这个电流的有效值为:

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{1}{2} I_m \quad (1-6)$$

所以当可控硅流过正弦半波电流时, 其有效值电流与平均值电流之比:

$$\frac{I_T}{I_{T(AV)}} = \frac{\pi}{2} = 1.57$$

这就是说额定电流为 100 安的可控硅允许通过电流有效值为 157 安, 电流的峰值为 314 安。

额定通态平均电流定义中所指的规定的冷却条件, 对不同容量的可控硅是不相同的, 现把冷却方式列于表 1-2 中。

表 1-2 可控硅的冷却方式

系 列	KP3	KP5	KP10	KP20	KP30	KP50	KP100
冷却方式	自然冷却				强迫空气冷却		
系 列	KP200	KP300	KP400	KP500	KP600	KP800	KP1000
冷却方式	强迫空气或液体冷却						

对强迫空气冷却的可控硅规定风速为 6 米/秒。对于强迫水冷却的可控硅, 规定水的流量为 4 升/分, 进水温度小于等于 35°C, 水的电阻率大于等于 200 欧-米, 水的 pH 值为 6~8。

实际工作中, 可控硅常常工作在导电角小于 180°, 电流波形也不是完整的正弦半波, 有时散热条件较差, 环境温度较高, 这时又应如何限制可控硅的工作电流呢?

如果散热条件符合要求, 而可控硅一个周期内导电的时间较短, 在同样电流平均值下电流的峰值就较大, 因而硅片的瞬时温升可能较大。再考虑到硅片因电流分布不匀, 局部范围电流密度大, 温升更高, 所以在小导电角时可控硅的允许电流既不能按平均损耗相同的条件来确定, 更不能按管壳温度 (即平均温升) 不超过允许值来确定。为了使用方便, 就规定了按照电流有效值相同的条件来确定小导电角时允许的电流平均值。在电流有效值相同的条件

下, 导电角越小允许的平均电流就越小。它们的关系如图 1-11 所示。图中还绘出了可控硅每周期导电两次时电流平均值与导电角的关系。

当散热条件不符合规定要求时, 例如环境温度超过规定值 40°C , 散热器不够大, 强迫风冷风速不足 6米/秒 等等条件下, 电流平均值的限制可以以管壳 (底座) 温度为依据, 当它超过 60°C 时, 按图 1-12 的曲线降低电流平均值使用。

如果按规定应采用风冷 (30 安以上的元件) 的元件采用自冷时, 则电流定额应下降到原有值的 $30\sim 40\%$, 反之如果改用水冷则电流定额可以增大 $30\sim 40\%$ 。

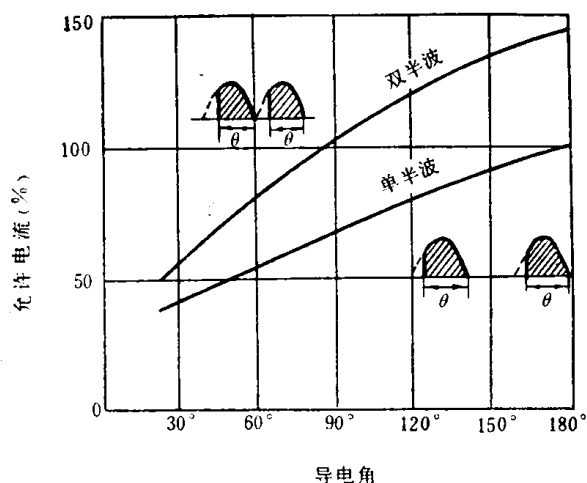


图1-11 允许平均电流百分数与导电角的关系

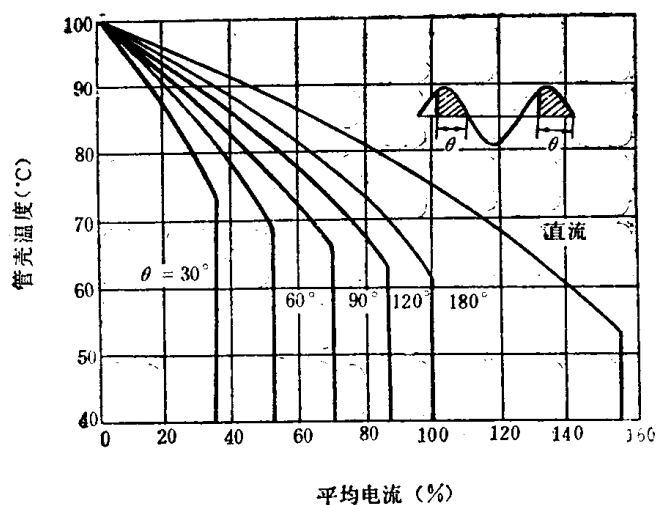


图1-12 管壳温度与允许电流百分数关系

由于可控硅的热容量较小, 短时间过载可能引起 PN 结温度急剧上升, 因此可控硅元件的过载能力比一般电机电器要小得多, 为此表 1-4 给出了可控硅的浪涌电流 I_{TSM} 这个参数, 它是指元件通以额定通态平均电流稳定工作以后, 在 50 赫正弦波半波期间, 元件能承受的最大过载峰值电流。浪涌时, 允许门极暂时失控, 紧接浪涌后的半周期间, 元件应能承受二分之一反向重复峰值电压。浪涌是故障状态, 因此浪涌电流值是不重复的, 在元件的寿命期间, 浪涌次数有一定的限制, 如 20 次。

三、通态平均电压 $V_{T(AV)}$

在规定环境温度、标准散热条件下, 元件通以额定通态平均电流、结温稳定时, 阳极和阴极间电压平均值称通态平均电压。

这个参数一般情况越小越好, 因为 $V_{T(AV)}$ 、 $I_{T(AV)}$ 之乘积就是可控硅导通时的正向损耗, 这个损耗是可控硅总损耗的主要部分, $V_{T(AV)}$ 小则正向损耗小, 管子温升也就小些。因此通态平均电压也是元件质量指标之一。

可控硅整流元件按通态平均电压分组示于表 1-3 中。

表1-3 可控硅整流元件通态平均电压分组

组 别	A	B	C	D	E
通态平均电压	$V_T \leq 0.4$	$0.4 < V_T \leq 0.5$	$0.5 < V_T \leq 0.6$	$0.6 < V_T \leq 0.7$	$0.7 < V_T \leq 0.8$
组 别	F	G	H	I	
通态平均电压	$0.8 < V_T \leq 0.9$	$0.9 < V_T \leq 1.0$	$1.0 < V_T \leq 1.1$	$1.1 < V_T \leq 1.2$	

四、门极触发电流 I_{GT} 、门极触发电压 V_{GT} 和门极不触发电流 I_{GD} 、门极不触发电压 V_{GD}

可控硅的门极和阴极之间是一个 PN 结，但它不是一个理想的 PN 结，它的正向特性并不象普通二极管那样具有较固定的压降，它的反向特性也并不表现出很大的电阻。

在室温下，元件阳极和阴极间施加 6 伏直流电压时，使元件完全开通所必须的最小门极直流电流，称门极触发电流 I_{GT} 。对应于门极触发电流时的门极触发电压称门极触发电压 V_{GT} 。

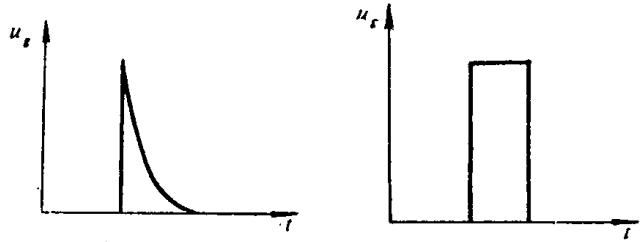


图1-13 一般采用的触发脉冲波形

可控硅的触发电压太小，容易受到干扰而造成误触发，触发电压太大会造成触发困难。一般电路上采用的触发电压波形如图 1-13 所示。

可控硅的 V_{GT} 及 I_{GT} 还受环境温度的影响，当温度增加时， V_{GT} 、 I_{GT} 会降低，反之则增大。这一点在设计触发电路及选择可控硅时需要根据使用地点及季节作适当考虑。

在表 1-5 中还给出可控硅的门极不触发电流 I_{GD} 及门极不触发电压 V_{GD} 。门极不触发电流是指在额定结温、主电压为断态重复峰值电压时，保持元件断态所能加的最大门极直流电流。对应于门极不触发电流的门极直流电压称门极不触发电压 V_{GD} 。在设计触发电路时，当元件不需触发时，其门极对阴极之间的电压要小于这个数值。对某一系列的一个具体的可控硅元件而言，其实测参数 V_{GT} 、 V_{GD} 、 I_{GT} 与 I_{GD} 应符合表 1-4 和表 1-5 部颁标准规定，否则为不合格产品，从这里可以看出可控硅的门极参数的分散性是很大的。

为了防止门极损坏，还规定了加在门极上的峰值电压、峰值电流、平均功率和峰值功率。门极峰值电压、峰值电流和功率是在门极触发脉冲宽度为 400 微秒的情况下测出的，若脉冲宽度小于 400 微秒，对额定电流在 50 安以上的可控硅，门极峰值电压允许大于 10 伏，例如对于 50 安的可控硅，门极正向峰值电压为 10 伏，平均功率为 1 瓦，当门极触发脉冲宽度小于 400 微秒时，其门极正向峰值电流可达 2 安，峰值电压可达 15 伏，极限峰值功率可达 10 瓦。

可控硅处于正向阻断状态时，为防止因干扰而造成可控硅误导通，可在门极上加上负电压，但负电压的绝对值不得超过 5 伏。

五、维持电流 I_H 和掣住电流

在室温和门极断路时，元件从较大的通态电流降至刚好能保持元件处于通态所必需的最小通态电流称维持电流。

维持电流的大小和结温有关，结温越高，维持电流越小。

在可控硅触发导通的过程中，有时还用到另一个物理量，叫掣住电流，它是指元件加触发信号触发之后，移除触发信号，要保持元件维持通态所需要最小阳极电流。对一般可控硅而言掣住电流要比维持电流大数倍。

六、可控硅的其它参数

(一) 门极控制的开通时间 t_{gi} ：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。从门极触发脉冲前沿的 10% 到阳极电压下降至 10% 的时间间隔称为门极控制的开通时间。如果触发脉冲不够宽，可控硅就可能不能导通。对一般可控硅整流元件要求触发脉冲宽度大于 20~50 微秒。

(二) 电路换向关断时间 t_{co} ：从通态电流降至零这瞬间起，到元件开始能承受规定的断

态电压瞬间止的时间间隔称电路换向关断时间。这个参数表明可控硅在关断过程中,使可控硅中PN结的剩余载流子达到完全复合需要一段时间。这段时间内可控硅恢复了正向阻断能力。 t_q 的大小与关断前可控硅所通过的电流大小、结温高低、关断可控硅时所加反向电压的大小以及可控硅内部结构等因素有关。

如果可控硅的 t_q 太长,当用于逆变电路时,将影响逆变器的工作频率。希望这个数值越小越好。

(三) 通态电流临界上升率 $\frac{di}{dt}$: 在规定条件下,元件用门极开通时能承受而不导致损坏的通态电流的最大上升率称通态电流临界上升率。之所以要规定这一参数是由于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,导通区域逐渐扩大,直至全部截面,若开通瞬间,回路电流上升很快,会有很大的电流流经有限的区域,这区域局部温升增高,因此过大的电流上升率可能使元件烧坏。

限制电流上升率的办法是在主电路与可控硅串联一个不太大的电感。一般整流电路流经可控硅的电流取决于负载电流,由于整流变压器漏抗的存在,因此电流上升率不大可能超过允许值。但是当可控硅用于逆变器或无触点开关时,就必须考虑这个问题。

(四) 断态电压临界上升率 $\frac{dv}{dt}$: 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称断态电压临界上升率。

当可控硅处于正向阻断状态时,因可控硅的各层相距很近,其J₂结结面相当于一个电容C₀,如图1-14所示,这时可控硅的主电压变化便会有充电电流流过这个电容,并通过J₁结,这个电流相当于触发电流的作用。若所加的电压上升速度太快,则充电电流过大,就可能使可控硅产生误导通现象。所以对可控硅电路必须有一个电压上升率的限制,在使用50安以下的可控硅时,其值不应大于30伏/微秒。

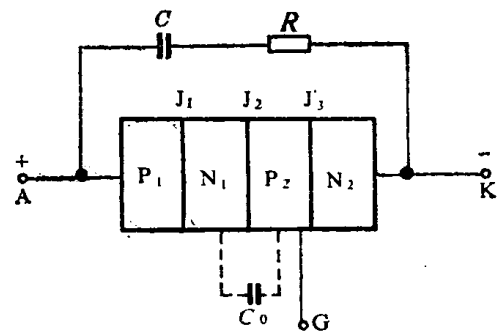


图1-14 电压上升率过高引起误导通及其预防措施

为了限制断态电压上升率,可以与元件并联一个阻容支路(如图1-14),利用电容两端电压不能突变的特点来限制电压上升率。因为电路总是存在电感的特点来限制电压上升率。因为电路总是存在电感(变压器漏感或负载电感),所以与电容C串联电阻是必要的,它可以防止R、L、C电路在过渡过程中,因振荡在电容C上可能出现的过电压,同时也是避免可控硅导通时,因电容放电电流太大,超过 $\frac{di}{dt}$ 的允许值造成元件损坏。实际应用中,在可控硅两端所加的R、C过电压吸收装置也可以起到这个作用。而门极的反向偏置也可以提高元件的断态电压临界上升率。

上面介绍了可控硅的主要参数,现把第一机械工业部1975年颁布的KP型可控硅整流元件的标准列于表1-4、表1-5中。表中脚码含义是:T表示通态或触发,D表示断态或不触发,R表示反向(第一位)或重复的(第二位),S表示不重复的,M表示最大值,AV表示平均值(可省略)。

表1-4 KP型可控硅整流元件主要额定值

参 数 系 列	通态平均 电 流	断态重复峰值 电压、反向重 复峰值电压	断态不重复 平均电流、 反向不重复 平均电流	额 定 结 温	门极触发 电 流	门极触发 电 压	断态电压 临 界 上 升 率	通态电流 临 界 上 升 率	浪涌电流
	$I_{T(AV)}$	$V_{DRM} V_{RRM}$	$I_{DS(AV)}$ $I_{RS(AV)}$	I_{JM}	I_{GT}	V_{GT}	dv/dt	di/dt	I_{TSM}
	A	V	mA	°C	mA	V	V/ μ s	A/ μ s	A
序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
KP1	1	100~3000	≤ 1	100	3~30	≤ 2.5	30	—	20
KP5	5	100~3000	≤ 1	100	5~70	≤ 3.5	30	—	90
KP10	10	100~3000	≤ 1	100	5~100	≤ 3.5	30	—	190
KP20	20	100~3000	≤ 1	100	5~100	≤ 3.5	30	—	380
KP30	30	100~3000	≤ 2	100	8~150	≤ 3.5	30	—	560
KP50	50	100~3000	≤ 2	100	8~150	≤ 3.5	30	30	940
KP100	100	100~3000	≤ 4	115	10~250	≤ 4	100	50	1880
KP200	200	100~3000	≤ 4	115	10~250	≤ 4	100	80	3770
KP300	300	100~3000	≤ 8	115	20~300	≤ 5	100	80	5650
KP400	400	100~3000	≤ 8	115	20~300	≤ 5	100	80	7540
KP500	500	100~3000	≤ 8	115	20~300	≤ 5	100	80	9420
KP600	600	100~3000	≤ 9	115	30~350	≤ 5	100	100	11160
KP800	800	100~3000	≤ 9	115	30~350	≤ 5	100	100	14920
KP1000	1000	100~3000	≤ 10	115	40~400	≤ 5	100	100	18600

表1-5 KP型可控硅整流元件的其它特性参数

参 数 系 列	断态重复平均 电流反向重复 平均电流	通态平均 电 压	维持 电 流	门极不触 发电流	门极不触 发电压	门极正 向峰值 电 流	门极反 向峰值 电 压	门极正向 峰值电压	门极平均 功 率	门极 峰值 功率	门极控 制开通 时间	电路换 向关断 时间
	$I_{DR(AV)}$ $I_{RR(AV)}$	$V_{T(AV)}$	I_H	I_{GD}	V_{GD}	I_{GFM}	V_{GRM}	V_{GFM}	$P_{G(AV)}$	P_{GM}	t_{gt}	t_q
	mA	V	mA	mA	V	A	V	V	W	W	μ s	μ s
序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
KP1	<1	*	实 测 值	0.4	0.3	—	5	10	0.5	—	典** 型 值	典** 型 值
KP5	<1	*		0.4	0.3	—	5	10	0.5	—		
KP10	<1	*		1	0.25	—	5	10	1	—		
KP20	<1	*		1	0.25	—	5	10	1	—		
KP30	<2	*		1	0.15	—	5	10	1	—		
KP50	<2	*	测 值	1	0.15	—	5	10	1	—	典** 型 值	典** 型 值
KP100	<4	*		1	0.15	—	5	10	2	—		
KP200	<4	*		1	0.15	—	5	10	2	—		
KP300	<8	*		1	0.15	4	5	10	4	15		
KP400	<8	*		1	0.15	4	5	10	4	15		
KP500	<8	*	值	1	0.15	4	5	10	4	15	值 值	值 值
KP600	<9	*		—	—	4	5	10	4	15		
KP800	<9	*		—	—	4	5	10	4	15		
KP1000	<10	*		—	—	4	5	10	4	15		

* V_T 出厂上限值由各厂根据合格的型式试验自订。

** 同类产品中最有代表的数值。

1k 电阻上取得的反映电流大小的电压信号, 所以从示波器可以观察到可控硅的伏安特性, 当开关 K 置于“正”位置时, 由于可控硅主电压 (即阳极对阴极电压) 为正, 示波器上可观察到正向伏安特性, 当 K 置于“反”位置时, 示波器可观察到反向伏安特性。当正反向伏安特性曲线急剧弯曲时所对应的电压读数分别为断态不重复峰值电压和反向不重复峰值电压。把它们的数值分别乘以 0.8, 即得断态重复峰值电压及反向重复峰值电压。如需读取断态重复平均电流及反向重复平均电流, 只需调压器使电压表读数对应于断态和反向重复峰值电压, 按按钮 AN, 从毫安表即可以读取。

四、使用注意事项

为了保证可控硅整流元件正常工作, 不致造成损坏, 在使用时应注意以下几点:

1. 合理选择元件, 并留有一定余地。
2. 元件都必须安装规定的散热器, 并且保证规定的冷却条件。为保证散热器与管芯接触良好, 它们之间应涂薄层有机硅油或硅脂。
3. 应有过电流及过电压保护和限制电流电压变化率的措施。
4. 要防止可控硅控制结正向过载与反向击穿。
5. 严禁用兆欧表 (摇表) 检查元件的绝缘状况。

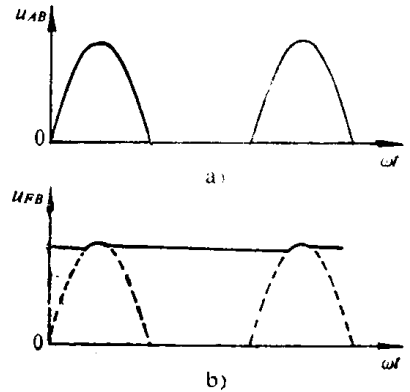


图1-17 电压波形

§ 1-6 特殊可控硅简介

一、可关断可控硅

KP 型可控硅门极, 只能控制可控硅使其从阻断状态转化为导通状态, 可控硅一旦导通后, 门极对它失去控制作用。可关断可控硅是一种在门极加正向控制电压, 就能使之触发导通, 加负向控制电压, 电流可以使之关断的可控硅器件。工作原理与 KP 型可控硅基本相同。

由本章的第二节分析可知, 在分析可控硅工作原理时, 可把可控硅看成二只相互连接的晶体三极管。由于生产工艺不同可关断可控硅可利用一定大小的反向门极电流破坏晶体管的饱和条件, 使元件关断。

可关断可控硅关断功率远比触发功率大, 因此控制极损耗较大, 目前我国生产的可关断可控硅最大容量只有 20 安, 它与功率晶体管相比, 较易做成耐压高、电流过载能力强的元件。可关断可控硅主要用于直流电路的过电流保护, 逆变电路等需要强迫关断的地方, 还可用它组成单稳态、双稳态、多谐振荡器等开关电路。

二、双向可控硅

双向可控硅是 NPNPN 五层半导体器件, 也称双向开关, 其伏安特性和符号如图 1-18 所示。它的正向与反向伏安特性基本相同。两个方向均能控制导通, 且只有一个控制极。双向可控硅相当于二只可控硅反并联, 在交流开关, 交流调压或可逆直流调速电路中使用双向可控硅可使电路简化。