

高等学校教学用书

可控硅电路

(修订版)

北京钢铁学院 赵殿甲 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书
可控硅电路
(修订版)

北京钢铁学院 赵殿甲 主编

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街崇文门北巷39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 17 字数 405 千字

1980年5月第一版 1980年5月第一次印刷

1986年5月第二版 1986年5月第二次印刷

印数2,601~11,300册

统一书号: 15062·4418 定价2.80元

前 言

本书是在1980年冶金工业出版社出版的《可控硅电路》一书的基础上,根据冶金部属高等院校工业电气自动化专业可控硅电路课程教学大纲修改编写的。由于可控硅在交流调速方面的应用越来越广,因此书中较多地增加了变频电路、斩波器、交流开关等内容。鉴于授课学时有限,部分新内容(第六、七章)和一些带“*”号的章节,可由授课者灵活选用。

本书对各种可控整流电路、逆变电路和变频电路的基本原理及分析方法作了较详尽的阐述,对电动机负载电路作了比较深入地探讨,并介绍了触发器的典型线路。有关电路的参数计算,只在部分章节中进行重点分析。对特殊可控硅元件、主回路元件的选择与保护在附录中作了介绍,以期使学生在掌握了可控硅电路的基本原理之后,能分析和解决工程实际问题。

本书主要作为高等工科院校工业电气自动化专业的教材,也可供其它专业师生及工矿企业的工程技术人员参考。

本书由北京钢铁学院电气传动教研室场国梁(第一、二章和第三章前两节及附录一),许启瑞(第三章后两节和第五章及附录二),赵殿甲(第四章),诸祖同(第六、七章)四位同志执笔编写。赵殿甲同志担任主编。

鞍山钢铁学院,西安冶金建筑学院,武汉钢铁学院,广东工学院等院校工业电气自动化专业的有关同志曾经对该书原稿进行了审阅,并提出了宝贵的修改意见,在此表示感谢。

由于我们学识水平有限,书中缺点错误在所难免,诚恳希望读者提出批评和改进意见。

编 者

一九八五年九月

目 录

第一章 可控硅整流元件	1
第一节 可控硅的结构及工作原理	1
第二节 可控硅的特性	5
第三节 可控硅的主要参数	8
第二章 单相可控整流电路	17
第一节 单相半波可控整流电路	17
第二节 单相桥式全控整流电路	30
第三节 单相桥式半控整流电路	40
第三章 三相可控整流电路	45
第一节 三相零式可控整流电路	45
第二节 三相桥式全控整流电路	61
第三节 大功率可控整流电路*	67
第四节 变压器漏抗对整流电路的影响	77
第四章 电动机负载电路	85
第一节 电势负载电路	85
第二节 可逆电路	97
第三节 可控整流的功率因数	130
第五章 可控硅触发电路	147
第一节 对触发电路的要求	147
第二节 单结晶体管及其触发电路*	147
第三节 锯齿波触发电路	154
第四节 触发脉冲与主回路电压同步问题	159
第五节 正弦波触发电路	163
第六章 可控硅变频电路	168
第一节 可控硅变频电路的基本概念	168
第二节 单相逆变器	173
第三节 三相逆变器	179
第四节 交-直-交变频器的中间耦合电路	191
第五节 交-直-交变频器的电压控制	193
第六节 电流型逆变器	195
第七节 交-直-交逆变器中异步电机运行在回馈制动状态	205
第八节 逆变器的脉宽调制原理	209
第九节 逆变器的多重化连接	212
第十节 由可关断可控硅组成脉宽调制的逆变器	214
第十一节 交-交变频电路	219
第七章 交流调压器和直流调压器	229
第一节 交流调压器	229
第二节 直流调压器	238

附录一	特殊可控硅简介	243
附录二	主回路元件的计算和保护	247
第一节	整流变压器额定参数的计算	247
第二节	整流元件的选择	253
第三节	电抗器参数计算	254
第四节	可控硅保护元件参数计算	256
第五节	可控硅串并联时均压、均流元件参数计算	264

第一章 可控硅整流元件

可控硅整流元件简称可控硅，它是用硅半导体材料做成的硅晶体闸流管，因而又称为晶闸管。可控硅又分为普通型可控硅，可关断可控硅，双向可控硅，逆导可控硅等各种类型。可控硅这一名称是指以上各种类型的总称，由于现阶段被大量和广泛使用的主要是普通型可控硅，所以习惯上把普通型可控硅称为可控硅。本书中所谈到的可控硅都是指的普通型可控硅。为了与普通型可控硅有所区别，对其它类型的可控硅一般称为特殊可控硅。特殊可控硅只在书后附录中做简单介绍，若需详细了解，可查阅有关专著。

本书主要分析和讨论用普通型可控硅组成的各种电路。在这之前，首先应对可控硅元件有所认识。可控硅的结构和制造工艺有专门的论著，本书仅从使用可控硅的角度出发，对其结构、工作原理、特性和参数做些简单介绍。

第一节 可控硅的结构及工作原理

一、可控硅的结构

我国目前生产的可控硅整流元件从外形上看，主要有两种形式：螺栓式和平板式，如图1-1(a)和(b)所示。无论哪种形式都有三个电极：阳极 A 、阴极 K 和门极（又称控制极） G 。可控硅在电路中用图1-1(c)所示的符号表示。

可控硅是大功率半导体器件，流过的电流较大，因有内阻损耗，工作时会产生大量的热量，要靠与电极紧密相连的散热器将热量传给周围的冷却介质。冷却方式有自然冷却、风冷或在散热器中通循环水冷却。

对于螺栓式可控硅，螺栓是阳极 A ，它上面拧装散热器；粗辫子引线是阴极 K ；细辫子引线为门极 G 。螺栓式可控硅使用时安装和更换比较方便，但散热效果差一些，仅在100 A以下的小容量可控硅元件中采用，有些200 A的可控硅元件也采用螺栓式。

对于平板式可控硅，中间细辫子的引出线是门极 G ，两个端平面中一端是阳极 A ，另一端是阴极 K ，这两个电极由元件上标注的符号判断。由于用两个互相绝缘的散热器从两边把可控硅紧紧地夹在中间，因此平板式可控硅散热效果较好，但安装和更换比较麻烦。目前大部分200 A和所有200 A以上的可控硅元件都做成平板式。

可控硅的内部结构示意在图1-2中。它的核心部分是一个由硅半导体材料做成的管芯。管芯为圆形薄片，由 $PNPN$ 四层组成。从一端 P_1 区引出阳极 A ，另一端 N_2 区引出阴极 K ，中间的 P_2 区引出门极 G ，所以可控硅又称四层三端元件。四层结构形成三个 PN 结（ J_1 、 J_2 、 J_3 ），这三个 PN 结是正反正地串联在一起，如图1-2(b)、(c)所示。在正常情况下，阳极与阴极间无论加什么电压，总有 PN 结处于反向状态，可控硅都不会导通。

二、可控硅的工作情况

为了搞清可控硅在什么条件下可以导通，如何才能关断，可以用图1-3的实验线路来说明。可控硅同灯泡串联经开关 P_1 接到电源 E_a 上，门极与阴极经开关 P_2 接到电源 E_g 上。 E_a 用6V， E_g 用3V即可；开关 P_1 、 P_2 皆为双投开关，可有正、零、反三种位置。首先规定：当 E_a 的正极经灯泡接 A ，负极接 K 时，称可控硅受正向阳极电压；当 E_a 的负极经灯

泡接A，正极接K时，称可控硅受反向阳极电压。当 E_g 的正极接G，负极接K时，称可控硅受正向门极电压；当 E_g 的负极接G，正极接K时，称可控硅受反向门极电压。然后，按表1-1所列各项内容逐一进行实验，实验条件和结论均列于表中。从实验中可以得出可控硅导通与关断的主要结论是：

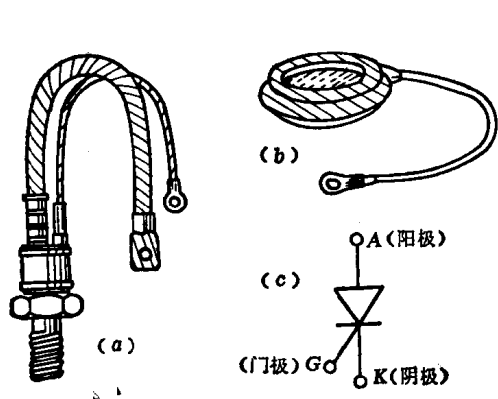


图 1-1 可控硅整流元件的外形及符号

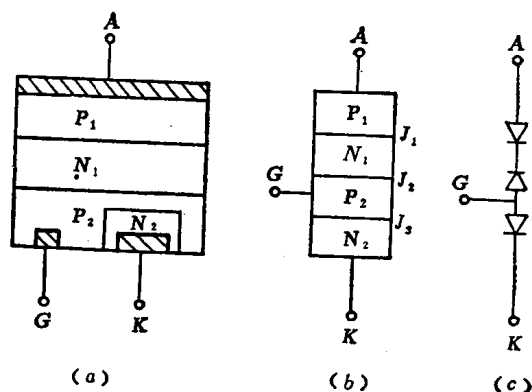


图 1-2 可控硅结构示意图

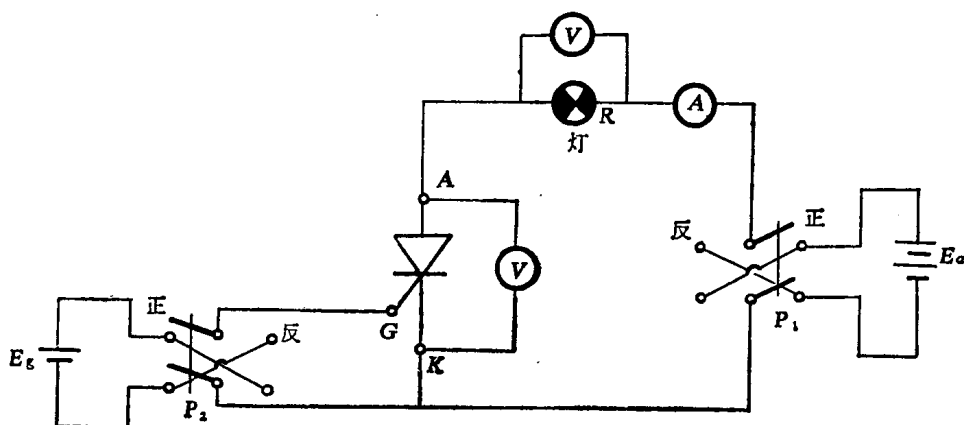


图 1-3 可控硅工作情况实验线路

1. 可控硅受反向阳极电压时，不论门极受何种电压，可控硅均处于关断状态，不会导通。
2. 欲使可控硅从关断状态转为导通，必须同时具备两个条件：（1）受正向阳极电压，（2）受正向门极电压。
3. 可控硅导通后，无论门极电压极性如何改变，仍将保持导通状态。即可控硅一旦导通，门极就失去控制作用。这样为使可控硅从关断转为导通，在门极加一个正向脉冲电压就可以了。
4. 可控硅导通后，当减小电源电压 E_s ，使流过可控硅的电流减小到某一数值时，可控硅即关断。这个维持可控硅导通的最小电流称为维持电流。当可控硅阳极电压为零或受反向阳极电压时，将加速流过电流的减少，有利于可控硅关断。所以在实际电路中使可控硅关断的方法有三个：（1）电源电压是变化的，当电压降低至一定值时，使可控硅电流

小于维持电流而关断；(2)使可控硅阳极电压短时为零；(3)使可控硅短时承受反向阳极电压。这些方法的实质都是设法使流过可控硅的电流小于维持电流，迫使可控硅关断。

5. 可控硅关断时承受全部电源电压；导通后阳极与阴极间的管压降很小，只有1V左右，电源电压主要降落在负载（灯泡）上。

可控硅导通与关断实验 表 1-1

实验序号		实验前 灯的状态	可控硅所加电压		实验后 灯的状态	可控硅的 电压 U_{Ak}	灯泡两端 电压 U_R	可控硅中电流 I_{Ak}
			阳极电压	门极电压				
导通实验	1	暗	反向	反向	暗	E_a	零	零
	2			零				
	3			正向				
	4	暗	正向	反向	暗			
	5			零				
	6			正向	亮			
关断实验	7	亮	正向	正向	亮	1V左右	约为 E_a	约为 $\frac{E_a}{R}$
	8			零				
	9			反向				
	10	亮	正向逐渐 减小至零	(任何)	暗	随正向电压逐渐减小, I_{Ak} 下降。当 I_{Ak} 下降至某一小数值时, 突变为零, 同时 U_{Ak} 升为 E_a , U_R 降为零		

三、可控硅的工作原理

为什么可控硅具有以上的工作情况呢？这主要是由其内部结构决定的。如图1-4所示， $P_1N_1P_2N_2$ 四层结构的管芯形成 J_1 、 J_2 、 J_3 三个PN结，若把 N_1 和 P_2 各分为两部分，如图1-4(b)，则可控硅可视为由PNP型和NPN型两个三极管互补组成的复合作用管。

图1-4(a)表示当可控硅阳极A接电源正极，阴极K接电源负极时，就有空穴自 P_1 区

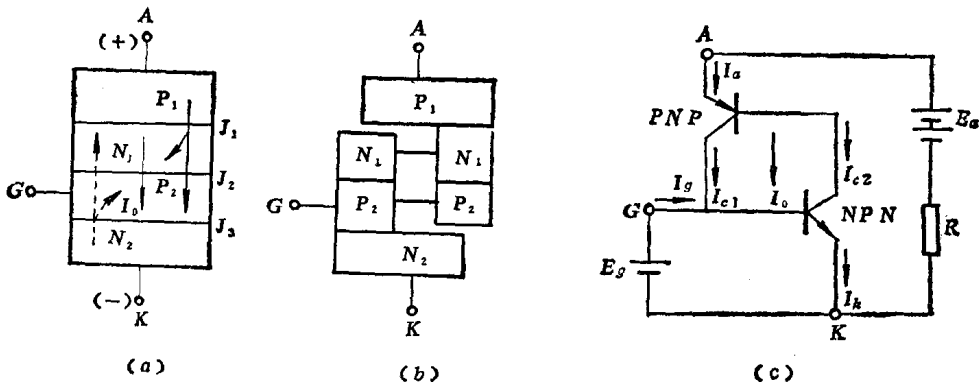


图 1-4 可控硅工作原理示意图

(a) 管芯结构和电流情况；(b) 分成两个等效三极管；(c) 导通时电流情况

通过 J_1 结流向 N_1 区（图中实线箭头所示），这些空穴一部分在 N_1 区同电子复合，另一部分则到达 J_2 结，成为 J_2 结 N_1 侧的少数载流子。同理，电子自 N_2 区通过 J_3 结流向 P_2 区

(图中虚线箭头所示), 一部分在 P_2 区同空穴复合, 另一部分则到达 J_2 结, 成为 J_2 结 P_2 侧的少数载流子。本来在 A 正 K 负时, J_2 结承受反向电压, 只有少数载流子形成的漏电流 I_0 (从 N_1 流向 P_2)。今在电源作用下, 通过 J_1 和 J_3 结使得在 J_2 结两侧聚集的少数载流子增加了, 从而流过 J_2 结的反向电流比没有 J_1 和 J_3 时的 I_0 增加了许多, 若在门极 G 与阴极 K 间加上正向电压, 将加速载流子的聚集, 促使可控硅由关断转为导通。

根据三极管的工作原理, 按图1-4(c) 接线, 可以找出各电流间的相互关系。设 $P_1N_1P_2$ 管和 $N_1P_2N_2$ 管的集电极电流相应为 I_{c1} 和 I_{c2} , 发射极电流相应为 I_a 和 I_k , 共基极电流放大系数分别为 α_1 和 α_2 , 流过 J_2 结的反向漏电流为 I_0 , 则

$$\alpha_1 = \frac{I_{c1}}{I_a} \quad \alpha_2 = \frac{I_{c2}}{I_k} \quad (1-1)$$

由图可见可控硅的阳极电流等于两管集电极电流和 J_2 结漏电流的总和:

$$I_a = I_{c1} + I_{c2} + I_0 \quad (1-2)$$

从外部来看, 可控硅的阴极电流为

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

将公式 (1-1) 和 (1-3) 代入公式 (1-2) 可得到可控硅阳极电流为

$$I_a = \frac{I_0 + \alpha_2 I_g}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-4)$$

式中的电流放大系数 α_1 和 α_2 随各自的发射极电流的增加而提高, 其变化情况如图 1-5 所示。由于门极 G 靠近 N_2 区, 故 α_2 大于 α_1 。

公式 (1-4) 表明, 当没有门极电流 I_g 时, $I_a = \frac{I_0}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$ 。由于漏电流小, α_1 和 α_2 也很小, $I_a \approx I_0$, 可控硅处正向阻断状态。随着阳极电压的增加, 漏电流 I_0 也缓慢增加, α_1 、 α_2 及 I_a 的增加也比较缓慢, 可控硅仍处阻断状态。只有当阳极电压达到足够大

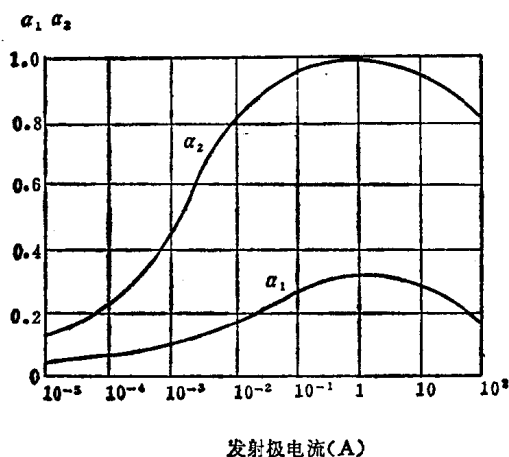


图 1-5 等效三极管电流放大系数 α 与发射极电流的关系

时, I_0 的增加才会加剧。随 I_0 的增加, α_1 和 α_2 的上升也加快。当 $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时, I_a 大大增加, 并只受外部电源和电阻的限制, 这时可控硅就处于正向导通状态。这种不加门极控制信号使可控硅从阻断转为导通的情况是非正常状态, 称为误导通。这种误导通一般是在阳极电压过高或上升太快时出现的, 在实际使用中是不允许的, 必须避免。

公式(1-4)还表明,当从门极输入电流 I_g 时, I_a 的变化将加快。由于 I_g 流经 $N_1P_2N_2$ 管的发射结,提高了其放大系数 α_2 ,将产生足够大的集电极电流 I_{c2} 。 I_{c2} 又流过 $P_1N_1P_2$ 管的发射结,并提高了其放大系数 α_1 ,产生了更大的集电极电流 I_{c1} 流过 $N_1P_2N_2$ 管的发射结。这样尽管阳极电压不太高,但在强烈的正反馈过程作用下,将会使阳极电流 I_a 迅速增加。当 α_1 、 α_2 随发射结电流上升而增加到 $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时,可控硅就转为正向导通状态了, I_a 值的大小完全由 E_a 与 R 值所决定。 I_g 值越大, I_a 值上升越快,使可控硅从阻断转为导通状态所需的阳极电压值就越小。

可控硅导通后,即使去掉 I_g ,由于两个复合的三极管可以互相提供基极电流,能维持继续导通而不断。

可控硅导通后,若逐渐减小电源电压或增大回路电阻,使阳极电流逐渐减小,则放大系数 α_1 、 α_2 也随之下降。当 I_a 减小到维持电流以下,即 α_1 、 α_2 下降至 $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时,则阳极电流只剩很小的漏电流,因此,可控硅不能维持导通状态而关断。

以上就是可控硅导通和关断的物理过程,不过要明确:用复合三极管原理可以帮助理解可控硅导通与关断的物理过程,但两个三极管的简单复合不能构成可控硅,可控硅是经过专门的制造工艺做成的四层三端半导体元件。

第二节 可控硅的特性

可控硅相当于一个可由门极信号控制的单相开关。实用中可控硅是按一定的条件不断地导通或关断,条件的转化决定于阳极电压、阳极电流、门极电流和管芯温度等量的变化。为正确使用可控硅元件,需深入探讨这些量之间的相互关系,这就是可控硅的特性。

一、可控硅的阳极伏安特性

可控硅阳极与阴极之间的电压 u_{ak} 同阳极电流 i_a 之间的关系叫可控硅的阳极伏安特性,也叫可控硅元件的伏安特性或简称可控硅伏安特性。这可由实验测得,实验线路和所测得的特性如图1-6(a)、(b)所示。

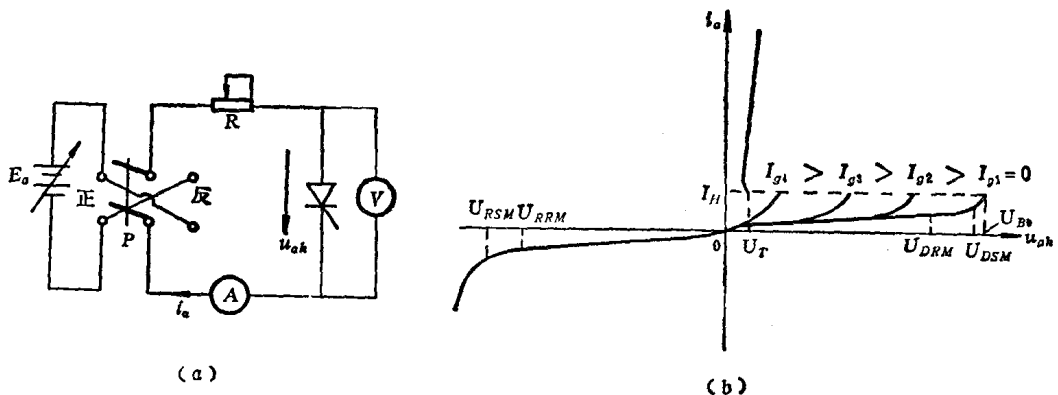


图 1-6 可控硅元件伏安特性

当门极不加控制信号时, $I_g = 0$,将开关 P 合向正,使 E_a 从零逐渐增加,则可控硅两端电压 u_{ak} 也逐渐增加,阳极电流 i_a 也从零逐渐上升,但数值很小,上升缓慢,即使 u_{ak} 已较大, i_a 值也增加很少,只有几或几十毫安,称为正向漏电流,这时可控硅呈关断状态。

待 u_{ak} 升到某一更高数值 U_{DSM} 时, i_a 急剧上升。当 u_{ak} 升到再高一点的 U_{BO} 时, i_a 突然增大。数值约为 $I_a = E_a / R$, 与此同时 u_{ak} 突然降得很小, 只有1V左右, 可控硅由关断转为导通了。这种不加控制信号使可控硅导通的情况是不允许的。正常使用时, 要从门极输入正向控制信号 I_g , 有了门极电流 I_g 后, 可控硅由关断变为导通的电压 u_{ak} 就要降低。输入电流 I_g 越大, 可控硅导通时所需要的正向阳极电压就越低。当 I_g 足够大时, 只要很小的 u_{ak} , 可控硅就可导通。图1-6(b)中表示出了不同 I_g 时, 可控硅导通时所需的最小 u_{ak} 值。

可控硅导通后, 若逐渐减小 E_a 值或增加电阻 R , 则阳极电流 i_a 也逐渐下降, 当 $i_a < I_H$ 时, 可控硅又转为关断状态。维持电流一般用 I_H 表示。

以上特性与前一节讲的可控硅工作原理是完全一致的。

把开关 P 合向反, 给可控硅阳极加反向电压时, 不管有否 I_g , 反向漏电流都很小, 随反向电压的升高, 反向漏电流增加不多, 可控硅总处于关断状态。当反向电压增加到某一较高数值 U_{RSM} 以后, 反向电流才迅速增加, 使可控硅反向击穿而损坏, 实用中必须避免这种情况发生。

二、可控硅的门极伏安特性

可控硅承受正向阳极电压时, 欲使其从关断转为导通, 重要条件之一是在门极加入适当的控制信号, 所以门极又称控制极。在门极加入的电压和电流通常称做触发电压和触发电流。

可控硅门极和阴极之间有一个PN结 J_3 〔见图1-4(a)〕, 在门极与阴极之间加上电压时, 就显现出二极管的单向导电性。因门极的用途是加上适当的正向触发电压使可控硅从关断转为导通, 所以反向特性一般不用, 而将正向门极电压和正向门极电流之间的关系叫做可控硅的门极伏安特性, 它也可以通过实验测出。由于实际生产中可控硅门极参数的分散性很大, 就是同一系列的可控硅元件其门极伏安特性也很难一致。因而为使用方便, 多是在某一系列产品中选门极电阻最大(极限高阻)的伏安特性与门极电阻最小(极限低阻)的伏安特性之间所包含的区域来表示该系列所有可控硅的门极伏安特性, 称为门极伏安特性区, 如图1-7所示。图1-7表示的为500A系列可控硅元件的门极伏安特性, 图中所用的各符号名称和数值见表1-2和表1-3。

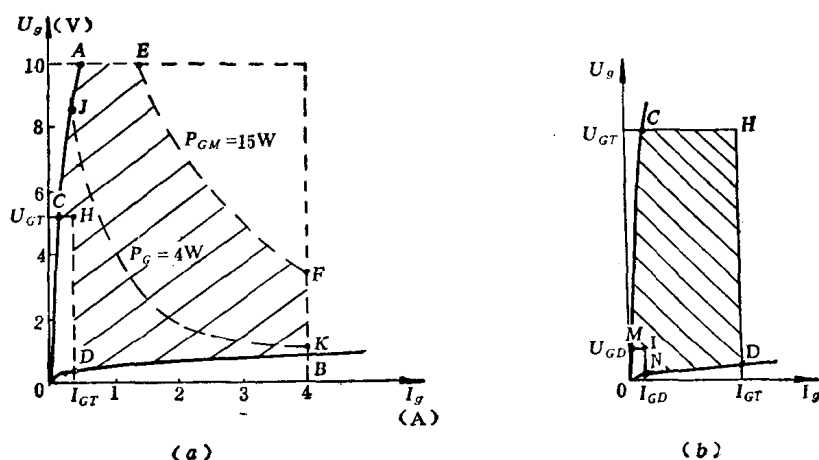


图 1-7 可控硅门极伏安特性 (KP500)

KP型可控硅元件的主要参数

表 1-2

参 数 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
	$I_T(AV)^*$	U_{DRM}, U_{RRM}	$I_{DS(AV)}$ $I_{RS(AV)}$	T_{JM}	I_{GT}	V_{GT}	du/dt	di/dt	I_{TSM}
	A	V	mA	℃	mA	V	V/μs	A/μs	A
序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
KP 1	1	100~3000	≤ 1	100	3~30	≤ 2.5	30	—	20
KP 5	5	100~3000	≤ 1	100	5~70	≤ 3.5	30	—	90
KP 10	10	100~3000	≤ 1	100	5~100	≤ 3.5	30	—	190
KP 20	20	100~3000	≤ 1	100	5~100	≤ 3.5	30	—	380
KP 30	30	100~3000	≤ 2	100	8~150	≤ 3.5	30	—	560
KP 50	50	100~3000	≤ 2	100	8~150	≤ 3.5	30	30	940
KP 100	100	100~3000	≤ 4	115	10~250	≤ 4	100	50	1880
KP 200	200	100~3000	≤ 4	115	10~250	≤ 4	100	80	3770
KP 300	300	100~3000	≤ 8	115	20~300	≤ 5	100	80	5650
KP 400	400	100~3000	≤ 8	115	20~300	≤ 5	100	80	7540
KP 500	500	100~3000	≤ 8	115	20~300	≤ 5	100	80	9420
KP 600	600	100~3000	≤ 9	115	30~350	≤ 5	100	100	11160
KP 800	800	100~3000	≤ 9	115	30~350	≤ 5	100	100	14920
KP 1000	1000	100~3000	≤ 10	115	40~400	≤ 5	100	100	18600

* 脚码: 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)。

KP型可控硅元件的其它参数

表 1-3

参 数 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
	$I_{DR(AV)}$ $I_{RR(AV)}$	$U_T(AV)$	I_H	I_{GD}	U_{GD}	I_{GFM}	U_{GRM}	U_{GFM}	$P_G(AV)$	P_{GM}	t_{gt}	t_q
	mA	V	mA	mA	V	A	V	V	W	W	μs	μs
序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
KP 1	< 1	*		0.4	0.3	—	5	10	0.5	—		
KP 5	< 1	*		0.4	0.3	—	5	10	0.5	—		
KP 10	< 1	*		1	0.25	—	5	10	1	—		
KP 20	< 1	*	实	1	0.25	—	5	10	1	—	典**	典**
KP 30	< 2	*		1	0.15	—	5	10	1	—		
KP 50	< 2	*		1	0.15	—	5	10	1	—		
KP 100	< 4	*		1	0.15	—	5	10	2	—		
KP 200	< 4	*	测	1	0.15	—	5	10	2	—	型	型
KP 300	< 8	*		1	0.15	4	5	10	4	15		
KP 400	< 8	*		1	0.15	4	5	10	4	15		
KP 500	< 8	*	值	1	0.15	4	5	10	4	15	值	值
KP 600	< 9	*		—	—	4	5	10	4	15		
KP 800	< 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制订, **: 同类产品中最有代表性的数值。

图1-7(a)中曲线0A为极限高阻伏安特性, 曲线0B为极限低阻伏安特性。直线CH和HD对应着触发电压 U_{GT} 和触发电流 I_{GT} 。将靠近坐标原点的部分区域放大后如图1-7(b), 为看得清楚画图时又将图1-7(b)中不触发电压 U_{GD} (MI线)和不触发电流 I_{GD} (IN线)夸大了些。图中0MIN0所围的区域称为不触发区, 该系列任何元件在额定结温时所受的门极电压和电流在此区域内都不会被触发导通。实用中如将可控硅可能受到的门极干扰信号数值限制在此范围内, 可保证可控硅不会误导通。图中MCHDNIM所围的区域称为不可靠触发区, 由于触发电压 U_{GT} 和触发电流 I_{GT} 是表示该系列产品中所有元件都可以触发导通的数值, 而这个区域在此值以下, 所以有的元件可以触发导通, 有些元件则可能导通不了, 这是合格的可控硅元件所允许的范围。至于某个可控硅从关断转为导通需要多大的触发电压和触发电流, 则在出厂合格证上注明。图中CAEFBDHC所围的区域称为可靠触发区, 正常使用中实际加给可控硅的触发电压和电流都应位于该区域内。由于门极输入电压和电流后会产生功率损耗, 使门极附近发热引起可控硅结温上升, 影响其正常工作, 严重时会使门极烧坏。因此, 施加给门极的电压、电流和功率应有一定限度(见表1-3)。对于图1-7中所表示的500A系列可控硅元件其可靠触发区的上限是, 正向峰值电压 U_{GFM} 为10V, 正向峰值电流 I_{GFM} 为4A, 允许的最大瞬时功率损耗 P_{GM} 为15W(图中用曲线EF表示)。平均功率损耗 P_G 为4W(图中用曲线JK表示), 实际使用时也不应超过此值。

可控硅元件出厂时尽管合格证上注明了该元件的触发电压和电流, 但为使给门极提供控制信号的触发器能通用于该系列产品中的所有元件, 在设计触发器时应使其提供的触发电压和触发电流大于部颁标准规定的数值(见表1-2), 即大于图1-7中0CHD0的范围, 保证供给的数值在可靠触发区范围内。若触发电压和电流太低, 可控硅易受干扰而误导通。同时也应注意温度的影响, 温度升高时可控硅所需要的触发电压和电流会相应减小, 反之则要增大。实用中为防止可控硅受干扰而误导通, 可在门极与阴极间加上一个小的负压, 这时触发器供给的电压和电流数值要适当提高些。

第三节 可控硅的主要参数

为了正确地使用可控硅, 对可控硅的主要参数应有量值的概念。下面就经常用到的一些主要参数及其意义予以介绍, 各参数的名称、符号和数值皆以一机部1975年颁发的标准JB1144—75为依据, 其中一些主要参数列入表1-2和表1-3内, 可相应参照图1-6和图1-7的特性曲线。至于每个元件主要参数的实测值, 则在可控硅出厂合格证上注明。

一、可控硅的电压参数

1. 断态不重复峰值电压 U_{DSM} 门极断路时, 按正向伏安特性曲线急剧弯曲处所决定的断态峰值电压, 此电压是不可连续施加、持续时间不大于10ms的断态最大脉冲电压。

门极断路时, 在正向伏安特性曲线上元件从断态转为通态的峰值电压 U_{B0} 称为转折电压, 断态不重复峰值电压 U_{DSM} 一般小于转折电压 U_{B0} , 两者的差值是多少由可控硅元件制造厂自定。可控硅所承受的正向电压若超过断态不重复峰值电压几次即损坏报废。

2. 反向不重复峰值电压 U_{RSM} 门极断路时, 按反向伏安特性曲线急剧弯曲处所决定的反向峰值电压, 此电压是不可连续施加、持续时间不大于10ms的反向最大脉冲电压。当可控硅承受的反向电压超过此值一次即发生破坏性击穿而损坏。

3. 断态重复峰值电压 U_{DRM} 门极断路时, 重复率为每秒50次, 持续时间不大于10ms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 $U_{DRM}=80\%U_{DSM}$ 。

4. 反向重复峰值电压 U_{RRM} 门极断路时, 重复率为每秒50次, 持续时间不大于10ms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%, 即 $U_{RRM}=80\%U_{RSM}$ 。

5. 额定电压 U_{ke} 通常取 U_{DRM} 或 U_{RRM} 作为额定电压, 若 U_{DRM} 与 U_{RRM} 数值不同, 则取其小者作为额定电压。

如额定电压为1000V的可控硅是指该元件在重复施加的正向或反向峰值电压小于或等于1000V时不会误导通, 可以正常工作。不过在实际使用时线路中常会出现瞬时过电压, 同样会使可控硅损坏, 所以选择可控硅额定电压要留有一定的裕度。一般是将可控硅在线路中实际承受的峰值电压 U_{km} 再乘以(2~3)倍的系数作为应选元件的额定电压, 即 $U_{ke}=(2\sim3)U_{km}$, 这个系数称为安全裕量。

6. 通态平均电压 U_T 按规定条件, 它是元件通以额定通态平均电流, 待结温稳定时阳极与阴极之间电压降的平均值, 通常也称作管压降。根据数值的不同, 通态平均电压 U_T 按表1-7共分为九组。为了减少元件的损耗和发热, 应尽量选择 U_T 值较小的可控硅使用。

二、可控硅的电流参数

1. 通态平均电流 I_T 在环境温度为+40℃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, 当结温稳定并不超过额定结温时, 所允许通过的最大平均电流。按照标准中的系列, 取其整数作为该元件的额定电流。

可控硅元件和其它电气设备一样, 决定其允许电流大小的是温度, 即可控硅管芯的温度, 称为结温。可控硅工作时各种损耗(主要是通态时的损耗)会使管芯发热、结温上升, 一定的冷却条件可使结温稳定在某值上。当环境温度、冷却条件和结温不同时, 元件允许通过的通态平均电流也不同。上述定义中所指的规定冷却条件, 对不同容量的可控硅也不一样。标准中规定的冷却方式和冷却条件如表1-4所示。

可控硅的冷却方式及冷却条件

表 1-4

方 式	适用系列型号	条 件
自然冷却	KP1, KP5, KP10, KP20	
强迫空气冷却	KP30, KP50, KP100, KP200, KP300 KP400, KP500, KP600, KP800, KP1000	风速: 6m/s
强迫水冷却	KP200, KP300, KP400, KP500, KP600 KP800, KP1000	水质: 电阻率 $\geq 20k\Omega\cdot cm$, pH=6~8 流量: 4000ml/min 进水温度: 35℃

可控硅整流输出端所接的负载多用平均电流来衡量其性能, 故可控硅的额定电流是用一定条件下的最大通态平均电流来标定。但管芯发热是电流的热效应引起, 热效应仅与电流的有效值有关, 因而选择元件额定电流时, 还应从电流有效值入手。

按标准规定的条件, 可控硅流过正弦半波电流, 如图1-8所示, 设电流峰值为 I_m , 则

通态平均电流为

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

而正弦半波电流的有效值为

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

在正弦半波的情况下电流有效值与平均值之比为

$$\frac{I}{I_T} = \frac{\frac{I_m}{2}}{\frac{I_m}{\pi}} = \frac{\pi}{2}$$

即

$$I = 1.57 I_T \quad (1-7)$$

这就是说额定电流为100A的可控硅，在标准规定的条件下工作，其允许通过的电流有效值为157A，而峰值可为314A。

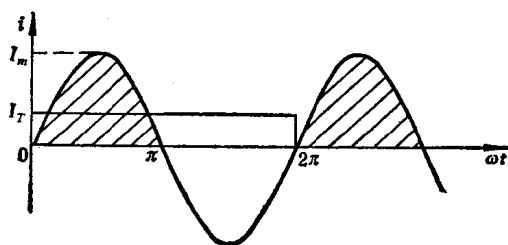


图 1-8 可控硅导通角为 π 时电流波形

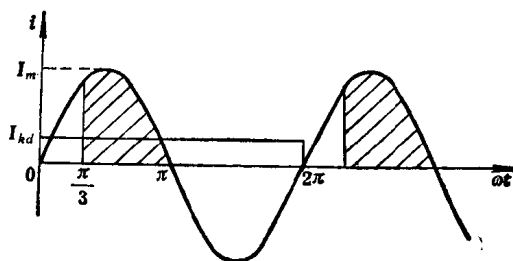


图 1-9 可控硅导通角为 $\frac{2\pi}{3}$ 时电流波形

当可控硅通过的电流波形不是正弦半波时，其电流有效值 I_k 、平均值 I_{kd} 及它们的比值就与上不同了。如图1-9所示，设可控硅的导电角为 120° 时，其电流平均值是

$$I_{kd} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/3}^{5\pi/3} I_m \sin \omega t d\omega t = \frac{3}{4\pi} I_m \quad (1-8)$$

电流有效值是

$$I_k = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/3}^{5\pi/3} (I_m \sin \omega t)^2 d\omega t} = 0.45 I_m \quad (1-9)$$

将电流有效值 I_k 与电流平均值 I_{kd} 的比值定义为波形系数 K_p ：

$$K_p = \frac{I_k}{I_{kd}} = 0.45 I_m / \frac{3 I_m}{4\pi} = 1.885$$

即一般情况下有下列关系：

$$I_k = K_p \cdot I_{kd} \quad (1-10)$$

可控硅在实际工作中通过的电流波形是各不相同的，其电流有效值、平均值和波形系数随导电角不同而变化，但它们之间的关系仍符合公式 (1-10)。根据电流有效值相等发热效果相同的原理，使一般情况下电流有效值 I_k [(1-10) 式] 与正弦半波的电流有效值 I [(1-7) 式] 相等，则管芯的发热是等效的和允许的，于是有

$$1.57 I_T = K_p \cdot I_{kd} \quad (1-11)$$

公式(1-11)表明:当知道了某种情况下流过可控硅的电流平均值 I_{kd} 和波形系数 K_p 时,可以选择元件的额定电流 I_T ;相反,当选定了元件的额定电流 I_T 时,可以确定在某波形系数 K_p 下可控硅允许通过多大的电流平均值 I_{kd} 。不过可控硅元件体积小、热容量小、过载能力不及一般电磁元件,所以实际选择可控硅额定电流时还要留有(2~3)倍的安全裕量,即应按下式选择:

$$I_T = (2 \sim 3) \frac{I_k}{1.57} = (2 \sim 3) \frac{K_p \cdot I_{kd}}{1.57} \quad (1-12)$$

2. 维持电流 I_H 可控硅被触发导通以后,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须的最小通态电流。当流过可控硅的电流小于维持电流 I_H 时,可控硅即从通态转化为关断状态。

3. 掣住电流 I_L 可控硅得到触发从关断转化为导通过程中,一经从断态转换到通态就取消触发信号之后,要保持元件维持通态所需要的最小主电流。可控硅在断态时若流过的干扰电流超过此值将会引起误导通。

对同一只可控硅元件来说,一般其掣住电流 I_L 值约为维持电流 I_H 值的若干倍。

4. 断态重复平均电流 I_{DR} 和反向重复平均电流 I_{RR} 额定结温和门极断路时,对应于断态重复峰值电压和反向重复峰值电压下的平均漏电流。它们的大小都应符合标准规定的数值范围,如表1-2所示。

5. 浪涌电流 I_{TSM} 在规定条件下,元件通以额定通态平均电流,稳定后,在工频正弦波半周期间元件能承受的最大过载电流,同时,紧接浪涌后的半周期间应能承受规定的反向电压。浪涌电流用峰值表示,是不重复的额定值,在元件的寿命期间,浪涌次数有一定限制。为防止元件损坏,可控硅在线路中可能出现的各种过电流皆应限制在该数值以下。

三、可控硅的门极参数

1. 门极触发电流 I_{GT} 在室温,主电压(阳极与阴极间电压)为6V直流电压时,使元件从阻断到完全开通所必须的最小门极直流电流。

2. 门极触发电压 U_{GT} 对应于门极触发电流时的门极直流电压。

可控硅制造厂必须使元件的 I_{GT} 和 U_{GT} 限制在一机部标准所规定的范围内(见表1-2)。实际使用可控硅时,为使触发器适用同一型号的所有元件,要使所设计的触发器输送给门极的电流和电压值适当地大于 I_{GT} 和 U_{GT} 值的上限,但不能超过它们的峰值 I_{GFM} 和 U_{GFM} 。门极的平均功率 P_G 和峰值功率 P_{GM} 也不能超过标准规定值。后述各值均见表1-3。

四、可控硅的动态参数

1. 断态电压临界上升率 $\frac{du}{dt}$ 在额定结温和门极断路条件下,使元件从断态转为通态的最低电压上升率。一般用每微秒若干伏表示。此值是可控硅保持关断状态所允许的最大电压上升率,超过此值会引起元件误导通。

可控硅元件的结面在阻断状态时相当于一个等效电容,(主要是 J_2 结,见图1-4),若突然加上变化的正向阳极电压,便会有充电电流流过结面,这个电流通过 J_3 结时相当于触发电流的作用,即使阳极电压低于正向转折电压 U_{B0} ,若电压上升的速率太大,充电电流足

够大,就有可能使元件误导通,所以对 $\frac{du}{dt}$ 要有一定限制。

标准规定采用电压线性上升的方法,在规定的条件下测量元件的断态电压临界上升率。其定义为:试验电压 U_D 的10%到90%两点的电压差除以这两点的时间差,即 $\frac{du}{dt} = \frac{0.8U_D}{\tau}$,如图1-10所示。试验时一般取 $U_D = \frac{2}{3}U_{DRM}$ 。

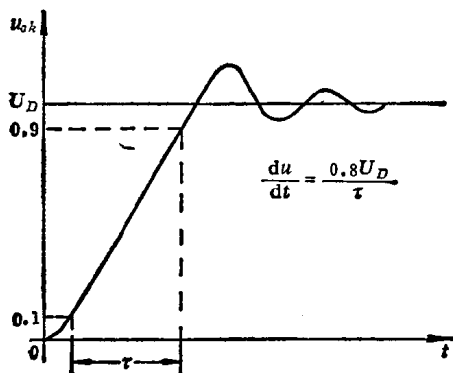


图 1-10 可控硅断态电压临界上升率 $\frac{du}{dt}$ 的测试波形

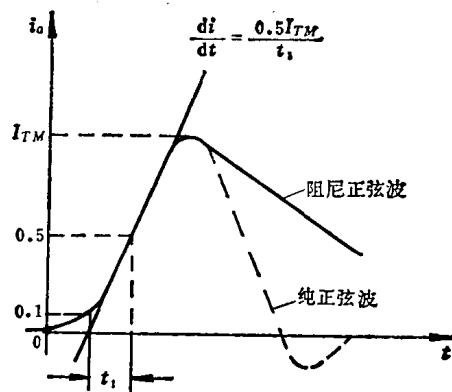


图 1-11 可控硅通态电流临界上升率 $\frac{di}{dt}$ 的测试波形

2. 通态电流临界上升率 $\frac{di}{dt}$ 在规定条件下,用门极信号触发使可控硅导通时,元件能承受而不导致损坏的通态电流的最大上升率。一般用每微秒若干安表示,超过此值会引起元件损坏。

可控硅元件在导通瞬间会产生较大的功率损耗,引起结面发热。从门极加入触发电流以后,元件先是在门极附近的小区域内导通,随着时间的增长,导通区逐渐扩大,直至全部结面导通为止。这个过程需要几微秒到几十微秒完成。如果电流上升的速率太大,导电结面还来不及扩展,很大的电流便集中在门极附近的小范围内通过,将会引起结面局部过热导致元件损坏,所以对 $\frac{di}{dt}$ 要有一定限制。

标准规定测试 $\frac{di}{dt}$ 的电流波形、 t_1 定义和 $\frac{di}{dt}$ 的取值范围如图1-11所示。小容量的可控硅

用阻尼正弦波测试,大容量可控硅用纯正弦波测试。数值 $\frac{di}{dt} = \frac{0.5I_{TM}}{t_1}$,其中 I_{TM} 为元件导通后的电流峰值,试验时一般取 $I_{TM} \geq 2I_T$ 。

3. 门极控制开通时间 t_{gt} 在室温下,从门极脉冲前沿的10%到阳极电压下降至10%的时间间隔。可用试验方法测取 t_{gt} ,其波形如图1-12所示。开通时间 t_{gt} 由两部分组成:从门极脉冲前沿的10%至阳极电压下降至90% (相应的阳极电流上升到10%)的时间,称为