

可控硅原理及应用

(第三版)

中国人民解放军电子工程学院

1979.7.

可控硅原理及应用

(第三版)

中国人民解放军武字二五一部队编辑出版

湖北省新华印刷厂印刷

1968年8月初版

1969年5月再版

1970年5月第三版

(内部发行)

定价：2.50元

目 录

基 本 原 理

可控硅元件.....	(1)
一、概述	(1)
二、可控硅元件的主要参数及技术规格	(9)
三、元件使用说明	(14)
四、元件的串并联	(19)
五、元件的保护.....	(26)
可控硅整流器和有源逆变器主电路.....	(33)
一、可控硅整流电路的工作原理.....	(33)
二、有源逆变电路的工作原理	(63)
三、可逆整流电路	(67)
四、各种整流电路的比较和参数选择	(74)
可控硅整流器的控制电路.....	(93)
一、移相触发电路	(93)
二、晶体管调节放大器	(114)
三、调节系统的几个问题.....	(123)
可控硅逆变器	(130)
一、单相并联逆变器	(131)
二、单相串联逆变器	(148)
三、三相桥式并联逆变器	(152)
四、三相串联逆变器	(183)
五、三相逆变器的控制电路	(184)

可控硅开关	(199)
一、可控硅交流开关	(199)
二、可控硅直流开关	(207)

应 用 实 例

(国 内 部 分)

1. 可控硅电磁调速系统	(219)
2. 电磁调速的异步电动机控制装置	(222)
3. 异步电动机的可控硅电磁调速装置	(225)
4. 可控硅脉冲调节式执行装置	(230)
5. 直流电动机的可控硅整流调速	(247)
6. 可控硅直流调压器	(263)
7. 可控硅自动调压装置	(267)
8. 小滚刀铲磨床用可控硅直流无级调速系统	(275)
9. 可控硅整流调速装置	(284)
10. 可控硅元件在中频发电机调压系统中的应用	(288)
11. 可控硅自励自调装置	(296)
12. 可控硅自励装置	(303)
13. 可控硅自励恒压装置	(315)
14. 可控硅自励恒压系统	(320)
15. 电机车可控硅励磁装置	(332)
16. 可控硅励磁调节线路	(340)
17. 汽轮发电机静止励磁装置	(348)
18. 可控硅交流调压器	(363)
19. 空气淬火炉可控硅供电装置	(366)
20. 卧式座标镗床主轴可控硅直流无级调速系统	(370)

21. 可逆热轧机主传动可控硅励磁系统	(396)
22. 轧钢机压下装置可控硅整流供电线路	(406)
23. 可控硅元件在龙门刨床上的应用	(412)
24. 高精度半自动化万能磨床主轴调速系统	(422)
25. 可控硅交流伺服放大器	(427)
26. 可控硅脉冲稳弧线路	(431)
27. 无触点电栅栏脉冲器	(436)
28. 可控硅开关	(440)
29. 24伏中频变流器	(443)
30. 可控硅静止逆变器	(457)
31. 恒压充电用可控硅单相逆变装置	(467)
32. 可控硅单相逆变器	(477)
33. 可控硅变频装置	(489)
34. 可控硅静止变频器	(512)
35. 高速电机变频调速系统	(526)
36. 可控硅整流器式变频器	(531)
37. 可控硅电气串级调速	(538)
38. 蓄电池电机车的可控硅脉冲调速	(551)
39. 半导体式可控硅触发装置	(556)
40. 煤矿卷扬机可控硅整流器调速系统	(567)
41. 小滚刀磨床交流无级变频调速系统	(589)
42. 无直流环节变频器	(601)
43. 10瓩可控硅变频调速系统	(634)
44. 卷扬机用可控硅低频电源	(652)
45. 采用可控硅元件的无整流子直流电动机	(674)

(国 外 部 分)

- 46. 直流电动机可控硅自动控制线路(689)
- 47. 快速响应的可控硅直流伺服系统(692)
- 48. 用可控硅电磁离合器的异步电动机调速系统(699)
- 49. 可控硅直流稳压器(709)
- 50. 可控硅电压调节器(712)
- 51. 可控硅直流电源装置(715)
- 52. 可控硅整流调速系统(721)
- 53. 可控硅整流调速线路(726)
- 54. 可控硅不停电直流电源装置(734)
- 55. 可控硅调光装置(744)
- 56. 二相伺服电动机可控硅控制(749)
- 57. 直流电动机的可控硅可逆调速(757)
- 58. 温度保护电路(762)
- 59. 电镀用可控硅电源(767)
- 60. 可控硅环形计数器(772)
- 61. 压缩机可控硅整流调速装置(775)
- 62. 可控硅单相逆变器(783)
- 63. 通讯用可控硅直流一直流变换装置(789)
- 64. 可控硅逆变器(799)
- 65. 可控硅变频调速(807)
- 66. 异步电动机可控硅变频调速(817)
- 67. 异步电动机变频控制系统(830)
- 68. 直流一直流 30 马力电动机可控硅传动装置(839)

可控硅元件

一、概 述

可控硅元件是一种四层 (PNPN) 三端硅半导体器件。它的结构和线路中的符号如图 1 所示。三端分别为阳极 A 、阴极 C 和控制极 G 。



图 1 可控硅元件的结构图 (a) 和线路符号 (b)

A—阳极，C—阴极，G—控制极。

可控硅元件的外形图如图 2 所示。

可控硅元件的电气性能与闸流管类似。它的阳极—阴极间的电压—电流特性 (又叫伏安特性) 如图 3 所示。

元件加上反向电压，也就是阳极为负，阴极为正时，它的特性和普通的二极管特性一样。也就是说，当反向电压没有超过 $-U_{BO}$ (我们把 $-U_{BO}$ 叫做反向峰值电压) 时，只有很小的漏泄电流 (几毫安到十几毫安) 通过元件。当反向电压超过 $-U_{BO}$ 后，元件漏泄电流迅速增长，终至击穿损坏。

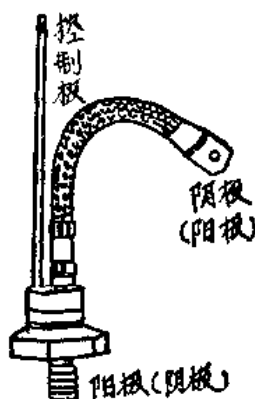


图2 可控硅元件的外形图
注：括弧中为反烧

元件加上正向电压（阳极为正、阴极为负）时，它的特性和闸流管相似，如图3第一象限所示。当正向电压未超过正向转折电压 U_{BO} （通常可控硅元件都在这种电压之下工作），如果控制极没有加上电压，即控制极电流 $i_g = 0$ ，那么，正向流过元件的电流也很小（几毫安到十几毫安），相当于元件内电阻很大，我们把这种状态叫做正向阻断状态，即元件没有导通。但是，当控制极加上足够大的

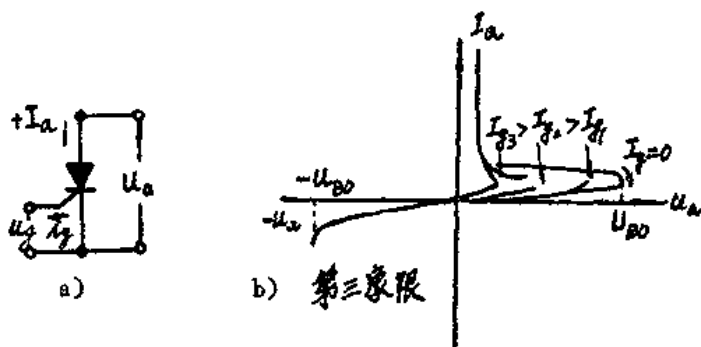


图3 可控硅元件的伏安特性

电压，使控制极—阴极间流过足够大的电流（几十毫安到一百多毫安）时，阳极和阴极间内电阻立刻变得很小，流过很大的电流，我们说这时元件导通了。我们把加到控制极的电压、电流叫做控制信号或触发信号。

元件一旦导通，即使把控制极电压去掉，元件仍将继续保持导通。要使元件重新回到不导通状态，或简单地说，要使元件断开，必须把阳极—阴极间电压降得很低，使流过元件的电流小于

某一值（这个电流值叫做维持电流），或者阳极—阴极间加一反向电压，元件才能断开。

可控硅元件的工作原理可以从图 5 得到了解。为了更好说明，先简要谈一下 PN 结的性质。众所周知，在 P 型半导体中，带正电荷的空穴是多数载流子，起主要的导电作用。而带负电荷的电子是少数载流子；在 N 型半导体中，带负电荷的电子是多数载流子，起主要的导电作用。而带正电荷的空穴是少数载流子。当一块半导中，如果一边是 N 型半导体，另一边是 P 型半导体，则在 N 型半导体里面，电子的浓度远远超过了空穴的浓度，而在 P 型半导体里面，空穴浓度远远超过电子的浓度（图 4 a、b）。由于这种不均匀的浓度分布，而载流子受热运动的影响，力图使载流子分布均匀，因此，N 型区域内的电子就向 P 型半导体一边扩散，扩散的结果，N 型区域中邻近 P 型区域一边的薄层 A 中有一部分电子扩散到 P 型区域中去了。由于薄层 A 失去一些电子，因此变成带正电（图 4 c）。同样 P 型区域中邻近 N 型区域一边的薄层 B 中有一部分空穴扩散到 N 型区域一边去了，结果使薄层 B 带有负电（图 4 d）。上述的电子和空穴的扩散是同时进行的，所以薄层 A 和 B 同时产生于 N 型和 P 型交界面 S 的两侧。

由于电子和空穴扩散的结果，使薄层 A 带正电，薄层 B 带负电。因此在 A、B 间产生一个电场（图 4 e）。这个电场的方向是由 N 型区域指向 P 型区域的，它阻止电子从 N 型区域进入 P 型区域，阻止空穴从 P 型区域进入 N 型区域。也就是说，电场阻止扩散作用的进行。当达到平衡状态时，N 型区域的电子和 P 型区的空穴不再减少了，薄层厚度也不再增加。上述的薄层 A 和 B，称作 P-N 结，又叫做阻挡层。

当 P-N 结上加上反向电压时，即 P 端接负，N 端接正时

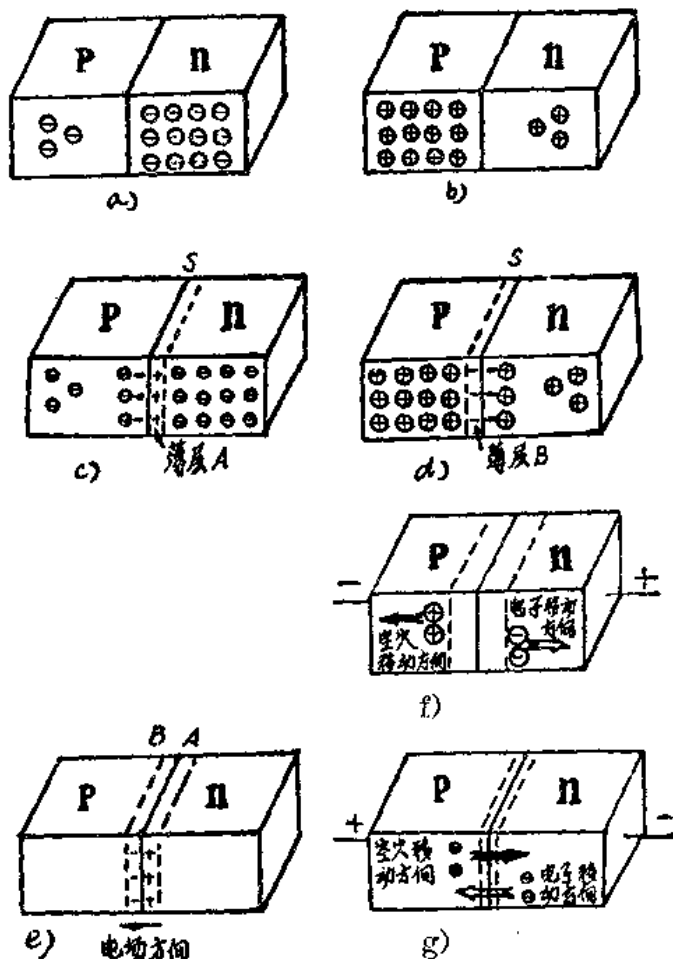


图4 $p-n$ 结的性质

- (a) P型半导体和N型半导体中电子分布图;
- (b) P型半导体和N型半导体中空穴分布图;
- (c) 电子扩散至P型区域;
- (d) 空穴扩散至N型区域;
- (e) 载流子扩散产生的电场;
- (f) 外加反向电压时阻挡层变厚;
- (g) 外加正向电压时阻挡层变薄。

(图 4 f), N 型区域里的电子和 P 型区里的空穴各自背向交界处向正负极移动。这样一来, 阻挡层变厚, 电阻大大增加。只有少数载流子 (N 型中的空穴和 P 型中的电子) 能穿过 P-N 结, 构成饱和漏电流。

当反向电压增加到某一值 U_B 后, 穿过结层的少数载流子因碰撞而倍增, 并在雪崩效应下击穿。 U_B 由两个区域的浓度和浓度变化率决定。

当 P-N 结加上正向电压时, 即 P 端接正, N 端接负时 (图 4 g), 外加电源在 P-N 结中产生的电场的方向恰好同 P-N 结原来存在的电场方向相反。因此, P-N 中原来的电场被削弱, 阻挡层变薄, 以致于消失, 电阻很小, 流过很大电流。

现在再对照图 5 来说明可控硅元件的工作原理。首先, 当可控硅元件加上逆向电压时, 如图 5 (a) 所示, 结 (P-N 结) J_1 、 J_3 受逆偏压, 同硅二极管一样, 电流不能通过。这里, 因 n_1 层电阻很大, 所以反向电压大部分加在结 J_1 上。

当加上正向电压, 元件处在图 5 (b) 所示的正向阻断状态时, 结 J_2 承受逆偏压, 同二极管一样, 阻止电流流动。在这种状态下, 当正向电压继续增加时, 如图 5 (c) 所示, 空穴从 p_1 流向 n_1 , 而电子从 n_2 流向 p_2 (因为 J_1 、 J_3 是正偏压), 并且电子和空穴分别到达结 J_2 的两侧。空穴和电子的数目随外加电压增大而增大, 当 J_2 两边的电子和空穴数目达到某一数值以上时, 结 J_2 从 $n \rightarrow p$ 结变成 $p \rightarrow n$ 结一样。 J_2 对外施电压来说, 变成正向偏压了, 电流能顺利通过可控硅元件, 亦即, 可控硅元件从断开变为导通了。这种状态叫做正向转折状态, 这时的电压称为正向转折电压。

在控制极加电压, 也能使可控硅元件从断开变为导通。其工作原理如图 5 (d) 所示。当控制极和阴极间加上正向电压 (控制

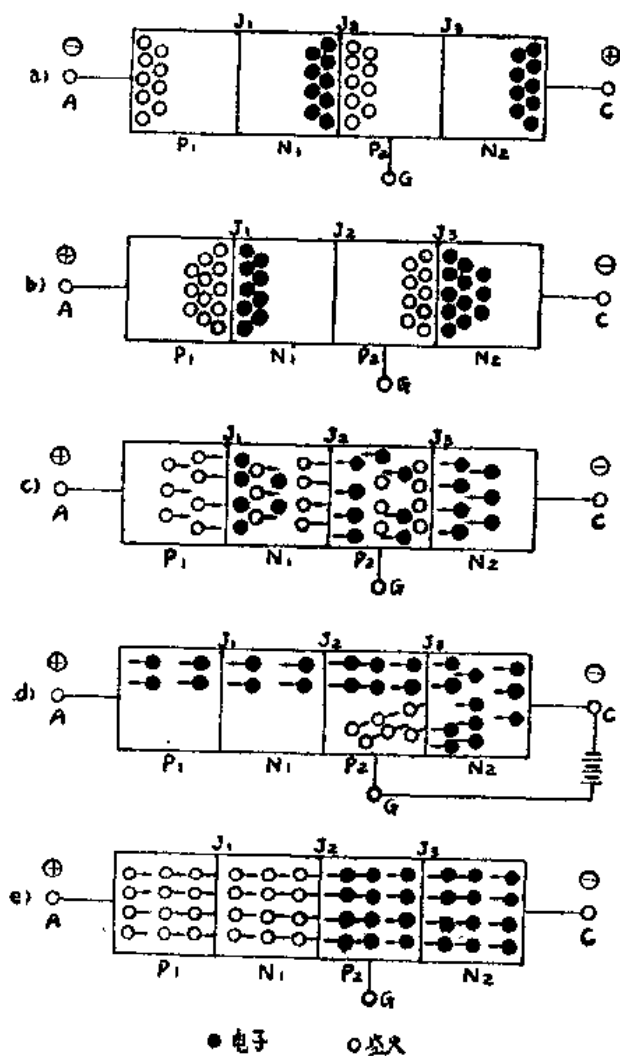


图5 可控硅元件工作原理图

极为正) 时, 因 J_3 结处于正偏压, 而使电流流动。电子从 n_2 区域流向 p_2 区域, 但因为 p_2 层做得很薄, 所以从 n_2 进到 p_2 的电子, 因扩散到达结 J_2 上, 并由 A 、 C 两端所加正向电压形成的电场, 使这些电子穿过 J_2 进到 n_1 区域, 这样一来, J_2 的阻挡作用就消失了。可控硅元件由断开状态变为导通状态。

图 5 (e) 表示可控硅元件正向导通状态, 由图可见, 元件在导通后的导电状态下, n_1 中充满了空穴, p_2 中充满了电子, J_2 结变为 $p \rightarrow n$ 结了, 同硅二极管承受正向电压一样了。

可控硅元件的工作原理也可以用晶体三极管的工作作粗略解释。在图 6 中, 把可控硅元件看作一对互补晶体三极管, 一个是 PNP 型, 一个是 NPN 型。

工作时, Tr_2 的集电极触发 Tr_1 的基极, 而 Tr_1 的集电极又反馈到 Tr_2 的基极。设 Tr_1 电流放大系数为 β_1 , Tr_2 的电流放大系数为 β_2 。那么, 两个晶体管组成的正反馈回路的放大系数是它们的乘积 $\beta_1 \cdot \beta_2$ 。若乘积小于 1 时, 电路是稳定的; 若乘积大于 1, 则电路处于再生状态。当加一个小的负电流至 G 端 (即控制极电压为负) 时, NPN 晶体管将因负偏压而截止, 而回路放大系数小于 1。在这种情况下, 输出端 C 和 A 之间的电流只是很小的两个晶体管的截止集电极电流。因此, A 、 C 之间阻抗很高。

当正电流加到 G 端 (控制极电压为正) 时, 晶体管 Tr_2 受正偏压而导通, 造成 Tr_2 的集电极电流上升。 Tr_1 的基极电流也增大, Tr_1 的集电极电流跟着上升, 使 Tr_2 基极电流进一步增大, 由于晶体管的电流放大系数随基极电流增加而增大, 当控制极所加电流增加达到某一点 (称为阻断点) 时, 回路放大系数等于 1, 并变为再生状态。这时, 两个晶体管的集电极电流迅速上升到仅由外电路决定的极限值。两个晶体管激励到饱和状态。 A 和 C 之

间的阻抗很小。亦即可控硅元件导通了。

当回路达到自激再生状态后，就不再需要向端头 G 加正电流（即控制极控制信号可以除掉）了。因为这时 PNP 晶体管 Tr_1 供给触发 Tr_2 更大的基极电流。电路将维持再生状态（即可控硅元件维持导通），直到集电极电流被减到维持再生所需的电流值以下时，元件才断开。

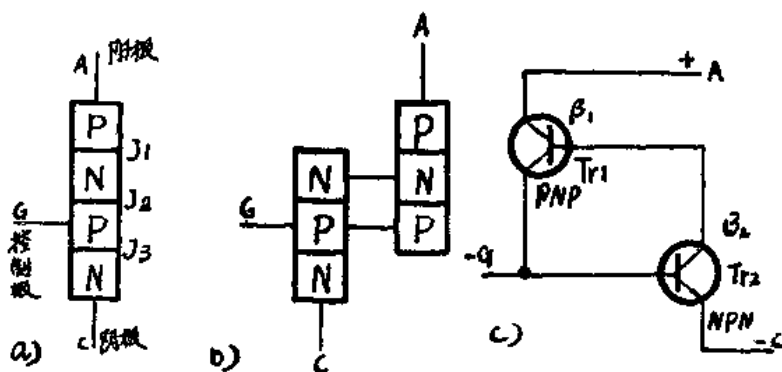


图6 可控硅元件工作原理图

可控硅元件由于具有上述特点，可以用很小的控制极电流去控制很大的阳极电流。同时，又是静止的固体元件，使用可靠，导通和断开的時間很短，本身的损耗也很小，因而它的推广使用为我国强电工业的电子化、自动化，提供了一条良好的途径。因此，1964年可控硅元件在我国一出现，就立刻受到广大工人和革命技术人员的重视。但是，在过去，叛徒、内奸、工贼刘少奇及其同伙，在科学技术方面，推行一条“专家治厂”、“洋奴哲学”的反革命修正主义路线，扼杀电子工业的发展，使这门新兴科学技术的发展，受到很大的阻碍。

在毛主席亲自发动、亲自领导的史无前例的无产阶级文化大革命中，亿万革命群众高举毛泽东思想伟大红旗，把叛徒、内奸、

工賊劉少奇及其在各地的代理人，掃進了歷史的垃圾堆。徹底批判了“洋奴哲學”、“專家治廠”等修正主義黑貨，工人階級掌握了科學技術大權。這就使得可控硅這門新興技術又蓬蓬勃勃地發展起來了。目前，可控硅元件的應用已遍及冶金、機床、造紙、電力機車、電力、化工、煤礦、石油、造船、航空、國防以及农牧等各個領域，並取得了顯著的成效。

例如，某鋼廠一台初軋機的勵磁用可控硅代替原來蘇修所鼓吹的“阿氏線路”後，每年可增產幾十萬噸鋼，而且主電室的噪音大大降低了。

西安某研究所以工人為主搞出了一套可控硅供電裝置。使一台長期不能使用的20棍可逆冷軋機獲得了新生，軋出的鋼帶其質量超過了西德軋機的水平。

上海某紙廠造紙機用可控硅分部傳動後，省掉了大量齒輪和軸，提高了成品率，每年可節約用電10萬度。

機床傳動用可控硅後，可省掉大量齒輪，可使生產機床的工時節省30%以上。

從上面幾個簡單的应用例子，已可充分看出应用可控硅元件後的優越性。當然可控硅元件也還存在一些缺點，主要有：

- (1) 熱容量小，不能承受大的過電流；
- (2) 耐過電壓能力低；
- (3) 因可控硅元件觸發信號小，易受外界干擾而誤導通；
- (4) 因為導通、斷開的轉換時間快，有時會產生對無線電設備的干擾波。

二、可控硅元件的主要參數及技術規格

1. 主要參數：

- (1) 正向轉折電壓：元件正向從阻斷狀態轉向導通狀態的

电压（定为示波器上曲线开始弯曲时的电压）。如图 3 中的 U_{BO} 所示。

（2）正向阻断峰值电压：在控制极断路和正向阻断条件下，可以重复加于正向的峰值电压，此电压规定为小于正向转折电压 100 伏。平常我们所说的多大电压（例如 600 伏）的元件，就是指它的正向阻断峰值电压（600 伏）而言。

（3）额定正向平均电流：指在规定环境温度，标准散热和元件导通情况下，阳极与阴极间可连续通过的工频正弦半波（ 180° 导通角）电流的平均值。平常我们说 20 安，50 安的可控硅元件，就是指它的额定正向平均电流为 20 安、50 安。

（4）正向平均电压降：在规定环境温度，标准散热和元件导通条件下，通以工频正弦半波额定正向平均电流时，阳极与阴极间的电压平均值。

（5）正向平均漏电流：正向阻断，控制极断路和额定结温条件下，阳极与阴极间加以工频正弦半波正向阻断峰值电压时的正向平均电流。

（6）反向平均漏电流：控制极断路条件下，阳极与阴极间加以工频正弦半波反向峰值电压时的反向平均电流。

（7）正向电压上升率：在额定结温、控制极断路和正向阻断条件下，元件在单位时间内所能允许上升的正向电压（电压从零加到正向阻断峰值电压），通常用每微秒多少伏（伏/微秒）来表示。

（8）正向电流上升率：在规定的环境温度和标准散热条件下，元件单位时间所允许上升的正向电流（电流从零加到额定值），通常用安/微秒表示。

（9）维持电流：在规定环境温度，控制极断路和元件导通时，要保持元件处于导通状态所必须的最小正向电流。

(10) 反向最高测试电压：在控制极断路条件下，加于反向的峰值电压，此电压规定为反向漏电流急速增加，反向特性曲线开始弯曲时的电压。

(11) 反向峰值电压：在控制极断路条件下，可以重复加于反向的峰值电压，此电压规定为小于最高测试电压 100 伏。

(12) 控制极触发电压：在规定环境温度和阳极-阴极间加以一定的电压条件下，触发可控硅元件，使元件从阻断状态转变为导通状态所需要的最小控制极直流电压。

(13) 控制极触发电流：在规定环境温度及阳极与阴极间加以一定电压触发元件时，使其从阻断状态变为导通状态所需的最小控制极直流电流。

(14) 导通时间：在规定的环境温度下，通以一定的正向电流，元件自加以控制信号至进入导通状态所需要的时间。它是由上升时间和延迟时间两部分组成的。

(15) 断开时间：在额定结温条件下，元件从切断正向电流，使元件重新处于阻断状态，直到控制极恢复控制能力为止所需的时间。所谓恢复控制能力，就是当控制极未加信号时，阳极-阴极间重新加上正向电压，元件不会导通。

2. 技术规格：

目前可控硅元件按国家标准命名为 3CT 系列，元件型号及所代表的意义如下：

