

# 可控硅电路

2  
23

浙江大学《新技术译丛》编译组

# 可控硅电路

(译文集)

上海船舶运输科学研究所  
浙江大学工业电子装置教研组 编译  
《新技术译丛》编译组

1973

## ‘可控硅电路

(译文集)

上海船舶运输科学研究所  
工业电子装置教研组 编译  
浙江大学《新技术译丛》编译组

\*

浙江大学《新技术译丛》编译组出版  
杭州市新华书店发行  
浙江临安印刷厂印刷

\*

定价: 0.60元 (只限国内发行)

## 内 容 简 介

本译文集主要介绍几种常用可控硅控制电路及其基本原理。内容包括：可控硅开关、交流电路控制、直流电路控制、可控整流、电气车辆控制器、变频器、斩波器和逆变器的设计、逆变、斩波器和逆变器的特殊改进以及可控硅的使用等。

本书可供有关单位从事可控硅应用的同志参考。

## 前 言

在毛主席革命路线指引下，在无产阶级文化大革命和批林整风运动的推动下，我国电子工业迅速发展：电子技术推广应用的路子正在打开，为国民经济服务的电子产品迅速增加，电子工业已经成为我国国民经济中一个新兴的比较完整的工业部门。

可控硅元件于1957年发现以来，已成为常用的半导体开关器件，其用途之广仅次于晶体管，目前它的应用范围正在扩大到许多工程领域。根据“洋为中用”的方针，我们编译了这本“可控硅电路”专辑，共十篇文章，原文系连载讲座，主要介绍几种常用可控硅控制电路及其基本原理，供有关同志参考。

遵照毛主席“批判地吸收外国文化”的教导，我们对原文作了一些删改。但由于我们思想和业务水平不高，译文中一定会有不少缺点和错误，衷心希望读者批评指正。

## 目 录

|                     |        |
|---------------------|--------|
| 一、可控硅开关.....        | ( 1 )  |
| 二、交流电路控制.....       | ( 14 ) |
| 三、直流电路控制.....       | ( 29 ) |
| 四、可控整流.....         | ( 41 ) |
| 五、电气车辆控制器.....      | ( 55 ) |
| 六、变频器.....          | ( 65 ) |
| 七、斩波器和逆变器的设计.....   | ( 76 ) |
| 八、逆变.....           | ( 92 ) |
| 九、斩波器和逆变器的特殊改进..... | (110)  |
| 十、可控硅的使用.....       | (124)  |

# 一. 可控硅开关

提要——本讲引用可控硅元件数据说明书讲解可控硅的特性。以典型电路举例说明在任何给定的应用情况下正确选择可控硅元件的设计方法。

## 引 言

可控硅元件不是什么别的，而只是一个半导体开关。对这一点必须持有清楚的概念。

本讲将详细研究可控硅元件的特性。在使用任何器件时，必须能从该器件的出厂数据知道它的性能。因此本讲将参考典型的可控硅元件——CRS 3 器件，根据需要转载其数据说明书的若干部分。

## 电气机械模拟

可控硅元件是一个半导体，它的特性可以用如图 1 所示的电气机械模拟十分方便地说明。

当控制极相对于阴极为正时，继电器被激磁，RL 1 闭合，这时即使控制极电源断开，可控硅仍保持导通。要使可控硅关断，必须打开SW或由一个外加电源使RL上的电压反向，断开负载电流，断开时间必须足以使继电器去磁。二极

管 $D_1$ 使可控硅单向工作， $D_2$ 防止负的控制极讯号使可控硅关断。

数据说明书给出两类数据〔1、2、3、4〕：第一类是器件的额定值，该值是不能超过的，否则会使可控硅损坏；第二类是它的电特性，表明在某些条件下可控硅的性能。本讲将参照图1所示的模型研究这两类数据。

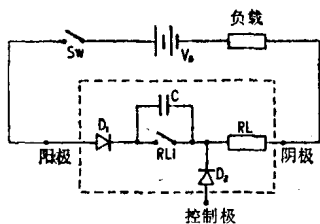


图1 可控硅元件的电气机械模拟

## 可控硅元件的额定值

图2转载CRS3数据说明书中关于其额定值的两页。基本上有五个主要参数，即电压、电流、频率、功率和温度。

### 额定电压

图1的可控硅在正方向上能承受的电压等于触点 $RL1$ 的额定闪络电压。如果超过该值，电流会在继电器线圈 $RL$ 中流通，可控硅导通，但不会损伤该器件。该值称为“持续正向阻断电压”。最大正向阻断电压表示电容器 $C$ 的击穿电压，超过该值会使可控硅损坏。

在反方向上最大工作电压是可以安全施加的正弦电压峰值，如果超过该值，二极管 $D_1$ 会被破坏，但对于短持续时间脉冲该值可能变得较高，达重复反向峰值电压。只要不超过该最大值，脉冲能量不足以使触点 $RL1$ 之间发生闪络。如果不重复，甚至可以用更高的电压，该电压威胁触点绝缘电



阻，因此不能常常施加。

正向阻断电压规定在一定的电压上升率 $dv/dt$ 时的电压， $dv/dt$ 引起通过C的电流，该电流值为  $I = C \times dv/dt$ 。

如果该电流足够大，即使没有超过最大正向阻断电压，可控硅也将导通。

控制极额定值取决于  $D_2$ 。控制极最大正向电压主要依赖于控制极电流，如果电源阻抗也增加，则控制极最大正向电压可以增加。在反方向上， $D_2$  的击穿电压限制该电压为一定的值。

可控硅反向偏置时的控制极触发问题将在以后讨论。

**图2 CRS3数据说明书两页中有关可控硅额定值的摘录**

**CRS 3 数据说明书**

**一般说明**

CRS 3 反向阻断三极可控硅是硅全扩散 $p-n-p-n$ 器件，具有控制极导通控制。本器件符合国际电工委员会IECA13纲要（相当于VASCA SO-35, JEDEC TO64）。

**额定电压**

最高壳温125℃时的最大额定值

| 型 号         | 最大反向<br>工作电压 | 重复反向<br>峰值电压 | 不重复<br>反向峰值<br>电压 | 持续反向<br>电压 | 最大正向<br>阻断电压 <sup>*</sup> | 持续正向<br>阻断电压 |
|-------------|--------------|--------------|-------------------|------------|---------------------------|--------------|
| CRS 3 /05AF | 50           | 55           | 60                | 50         | 60                        | 50           |
| CRS 3 /10AF | 100          | 110          | 120               | 100        | 120                       | 100          |
| CRS 3 /20AF | 200          | 220          | 240               | 200        | 240                       | 200          |
| CRS 3 /30AF | 300          | 330          | 360               | 300        | 360                       | 300          |
| CRS 3 /35AF | 350          | 385          | 420               | 350        | 420                       | 350          |
| CRS 3 /40AF | 400          | 440          | 480               | 400        | 480                       | 400          |
| CRS 3 /50AF | 500          | 550          | 600               | 500        | 600                       | 500          |
| CRS 3 /60AF | 600          | 660          | 720               | 600        | 720                       | 600          |

\* 最大电压上升率为15伏/微秒

† 控制极开路

控制极最大正向电压

电源电阻最小值15欧姆(阳极相对于阴极为正): 10伏(见曲线图1)。

控制极最大正向电压

(阳极相对于阴极为负): 0.25伏。

控制极最大反向电压

电源电阻最小值15欧姆: 10伏。

### 额定电流

最高亮温为100℃时的最大值

额定正向平均电流: 3 安

(单相半波电路, 电感负载, 导通角为180°)。

导通角小于180°: 见曲线图 2

额定正向最大重复电流(在任何导通角时): 15安。

额定正向过载电流: 见曲线图 4。

额定正向浪涌(不重复)电流, 50赫正弦半波

由额定负载起始: 40安(峰值)。

由空载起始: 55安(峰值)。

额定持续正向电流(亮温90℃): 4.5安

$I^2t$ 熔断值( $t \leq 0.01$ 秒):  $10\text{安}^2\text{秒}$

控制极额定最大正向电流(阳极相对于阴极为正): 1.0安。

### 额定频率

不降低额定值的最大工作频率: 400赫

频率在400至2500赫之间的最高亮温降低量 $\delta T_s = 2VI(f-400) \times 10^{-6} \text{℃}$

式中  $V$  = 刚导通前的瞬时电压(伏)

$I$  = 刚一导通时的瞬时电流(安)

$f$  = 频率(赫)

### 额定功率

最高亮温为100℃时的最大值

器件额定总功率耗散: 见曲线图 2 和 4。

控制极额定平均功率 } 见曲线图 1 { 0.5瓦  
控制极额定峰值功率 } 2.0瓦

### 额定温度

工作结温: 125℃。

最高亮温: 见曲线图 2

储藏温度范围: -65至+150℃。

---

## 额定电流

可控硅元件的额定电流取决于器件内部(继电器线圈及  $D_1$ )的热损耗[5]。可控硅所接触的导热面积越大,可控硅能

通过的电流也越大而不过热。

CRS 3 器件的极限电流值, 在  $180^\circ$  导通角 (即半波导通) 时为 3 安。导通角越小平均电流值越小, 图 3 示出这种情况。但是在所有情况下电流有效值 (或直流) 差不多相同, 只是在导通角很低的情况下, 电流峰值会引起局部热点。为了说明这一点, 考虑图 4 所示的  $180^\circ$  导通角时的情况。

这时半周的平均值为 3 安。因此

$$\begin{aligned} 3 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_M \sin \theta d\theta \\ &= \frac{I_M}{\pi} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{即 } I_M = 3\pi$$

有效的直流电流 (有效值)

$$\begin{aligned} &= \left[ \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_M^2 \sin^2 \theta d\theta \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= \frac{I_M}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

将 (1) 式代入 (2) 式

$$I_{DC} = 4.5 \text{ 安} \quad (3)$$

曲线图2. 不同导通角  
时电流额定值降低曲线  
(半波电阻负载)

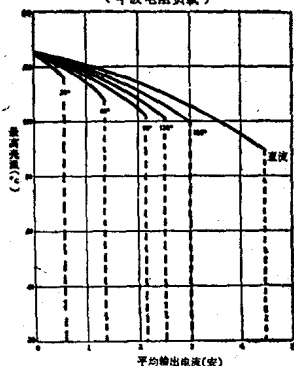


图3 可控硅电流曲线\*

\* 在导通角较小时, 容许电流偏于保守——译注

30°导通角时，触发点延迟到150°，如图4所示。

因此，由式(1)

$$\begin{aligned} (I_{\text{有效值}})_{30^\circ} &= \left( \frac{1}{2\pi} \int_{5\pi/6}^{\pi} I_M^2 \sin^2 \theta d\theta \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= 0.087 I_M \\ &= 0.8 A^* \end{aligned}$$

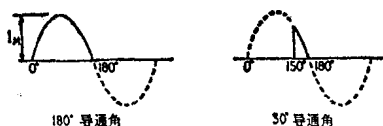


图4 导通角的变化

图3的曲线表明，以上计算结果近似地正确。另外，温度升高时可控硅的载流能力也降低。

电流流通的时间越短，可能的过载电流值越大。图5示出仅仅一个周期时（严格说来是半个周期，因可控硅在负半周时阻断），可以流过的电流峰值为5.5安。如果在发生过载之前，流过平均值为3安，180°导通角的额定负载电流，可控硅在已热状态，这时给出较低的额定浪涌电流，因此，在图5中示出两条曲线。

有时给出可控

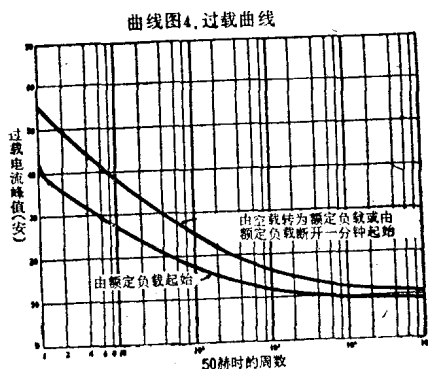


图5 额定浪涌电流

\* 本例导通角为30°时容许电流偏于保守——译注

硅的 $di/dt$ 额定值〔6〕。该值是在可控硅导通时，负载电流可以上升的最快速率。它代表继电器受激磁时 $RL1$ 触点电阻的变化率。

控制极电流受二极管 $D_2$ 中的耗散所限制，定为1.0安。 $I^2t$ 在以后讲述中考虑。

### 额定频率

可控硅和所有器件一样，在开通和关断时耗散热量，在高频时必须降低额定值，高频往往使图1所示的触点寿命缩短，数据说明书给出降低额定值的数字。

### 额定功率和额定温度

这些将在以后可控硅冷却问题的讲述中考虑。

## 可控硅的特性

可控硅特性是描述可控硅在各种条件下的性能，见图6。

图6 可控硅元件特性

#### CRS 3 数据说明书

#### CRS 3 系列可控硅元件

#### 特性

最大导通电压，4.5安持续正向电流时（壳温度 $25^{\circ}\text{C}$ ）：1.3伏，见曲线图6

最大维持电流，控制极开路时，随温度的典型变化：25毫安。见曲线图5。

最大正向漏电流，在额定持续正向阻断电压和最高壳温时（控制极开路）：1毫安。

最大反向电流，在额定最大反向工作电压及最大额定值时（控制极开路）：1毫安（峰值）。

控制极最小可触发电流（阳极相对于阴极为正6伏）：20毫安，见曲线图1。

控制极最小可触发电压（阳极相对于阴极为正6伏）：3伏。

控制极最大不触发电流，在额定最大正向阻断电压及最高壳温时：

0.75毫安。

控制极最大不触发电压，在额定最大正向阻断电压及最高亮温时：

0.25伏。

典型导通时间（见曲线图7和8）：2微秒。

典型换流电路关断时间：17微秒。

总功率损耗：见曲线图3。

最大热阻（结至壳间）：6℃/瓦。

---

当可控硅导电时，由于电流在 $RL$ 和 $D_1$ 中流通，因而产生压降。电压随电流非线性变化，通常用曲线表示。（数据说明书曲线图6，本文未转载），其4.5安时的最大值为1.3伏。

维持电流限定继电器的最小电流低于此值时，继电器不再保持激磁状态。对于CRS 3器件，如果负载电流低于25毫安，它将停止导通。维持电流随器件温度而下降（曲线图5，本文未转载）。

可控硅在 $RL_1$ 打开的情况下，正向偏置时的漏电流为流过电容 $C$ 的漏电流。反向时为流过 $C$ 和 $D_1$ 的漏电流。对于CRS 3器件， $D_1$ 具有低的反向阻抗，因此正反向漏电流均取决于电容 $C$ ，即最大电压时为1毫安。

数据说明书中曲线图1给出可控硅控制极特性，见图7。图中示出控制极最大不触发电压和电流（即不会使 $RL$ 激磁的值）。在25℃时使所有器件均导通的可触发电流和电压必须分别超过20毫安和3.0伏。该曲线图对于确定控制极触发阻抗是非常有用的。例如，假定可控硅由电压为 $V$ 伏的电源经电阻 $R$ 欧姆触发，当控制极特性使其压降等于 $V/2$ 时，控制极耗散最大。该耗散为 $V^2/4R$ 瓦。在暂载率为 $x\%$ 时，

$$\frac{x}{100} = \frac{W_{GM}}{V^2/4R}$$

式中  $W_{GM}$  为控制极平均功率。

$$\text{即 } R = \frac{xV^2}{400W_{GM}} \quad (4)$$

所以, 对于  $V = 5$  伏,  $W_{GM} = 0.5$  瓦, 在暂载率为 100% 时,  $R = 12.5$  欧姆; 在暂载率为 50% 时,  $R = 6.25$  欧姆。

$R$  是触发电源阻抗的最小值, 在图 7 中画出上述两条负载线, 这两条线各自与其相应的控制极最大功率曲线相切。一般选择控制极电源阻抗的工作负载线在该线和控制极最小可触发电压和电流所限定的面积之间。后面将考虑一个例子。

本讲要考虑的可控硅的仅有的其他特性是导通和关断时间。导通时间是激励可控硅 ( $RL$ ), 到它的控制极电源可以去掉, 它成为自锁之前所需要的时间。关断时间是可控硅由激励状态转换成去励状态之前, 必须阻断  $RL$  中的电流所需要的持续时间。这两个特性受若干因素的影响, 通常在数据说明书中的辅助曲线图上示出。

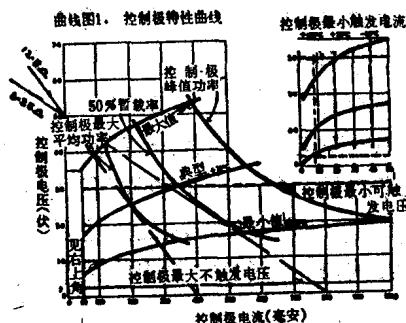


图 7 可控硅控制极特性曲线

## 典型开关电路

一般说来，最基本的可控硅电路是控制一电阻负载的交流静止开关。该电路及其触发电路示于图 8。当A点电位为正时，TR 2 导通，TR 1 截止，因此可控硅均保持阻断状态。当A降到零线电压时，晶体管TR 2 截止，然后TR 1 作为间歇振荡器给CSR 1 \*和CSR 2 以持续的正触发脉冲，使其导通。

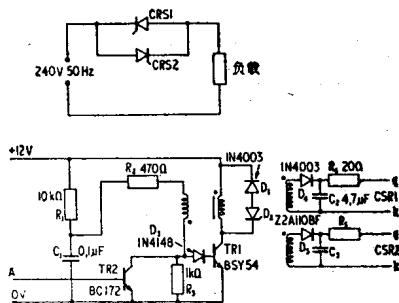


图8 静止接触器

我们来讨论一下可控硅CSR 1和CSR 2的设计要求，若负载电阻R为40欧姆，则当电源电压为240伏有效值时，每只可控硅流过正弦半波电流的峰值为8.5安，所以它们的额定平均值（180°导通角）为 $8.5/\pi$ 即2.8安。显然，前面介绍的CRS 3系列可控硅元件可能是适用的。每个器件上所承受的峰值电压为 $240 \times \sqrt{2} = 340$ 伏。CRS3/40AF元件的额定最大工作电压为400伏，具有足够的安全余量。

控制极脉冲变压器的匝比为2:1:1:1, 所以它的开路电压为6伏。电源电阻应按其负载线经过图7所示的3伏26毫安上面的区域来选择, 同时决不能截割控制极最大平均功率曲线。连接6伏和300毫安的线满足这些要求, 因此电源电阻为  $6/0.3 = 20$  欧姆, 比(4)式给出的最小值为大。

\* CSR = CRS ——译注



图 9 示出工作于24伏直流电源的可控硅信标闪光灯。

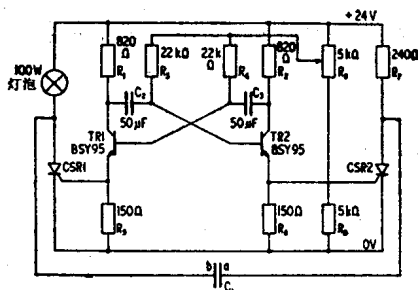


图 9 直流信标闪光灯

可控硅CSR 1 控制一个100瓦的灯泡。由于它工作于直流电源，所以要关断灯泡时，必须使该可控硅强迫换流。这一点由CSR 2 完成。倘若可控硅CSR 1 导通， $C_1$ 通过 $R_7$ 充电到24伏，极板a为正。如果CSR 2 被触发，该电容的电荷作为加到CSR 1 上的反向电压，使CSR 1 关断，同时 $C_1$ 开始经负载充电，使极板b为正。只要可控硅CSR 1 承受反向偏置的时间超过其关断时间，它就保持关断状态。要达到这一点， $C_1$ 的值可计算如下。

若在CSR 2 被触发之前， $C_1$ 被充电到 $V_0$ ，极板a为正。如果电源电压为V伏，在换流时间内电容电压由下式给出：

$$V_c = V \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t}{RC_1}\right) \right] - V_0 \exp\left(\frac{-t}{RC_1}\right) \quad (5)$$

当 $V_0 = 0$  时，关断时间结束，由(5)式可得：

$$C_1 = \frac{t_0}{R \log\left(1 + \frac{V_0}{V}\right)} \quad (6)$$

式中 $t_0$ 是可控硅关断时间，