

综述

可控硅整流器——一种新型自动化元件*

华清

摘要

本文介绍自动控制系统中一种有发展前途的新型元件——可控硅整流器，它可用作变流器、逆变流器及静止开关等。系统地叙述了可控硅整流器的原理、应用线路、特点、特性与参数等，并从使用角度出发，介绍在应用这种新型元件时应注意的某些问题，如控制线路的选择、串联及并联应用、保护问题等。最后介绍了设计可控硅整流器装置时的一般步骤。

可控硅整流器(SCR)^[1]自1957年问世以来，十年间发展极为迅速。它具有轻小、坚固可靠、快速动作等许多优点，在工业自动化系统中得到日益广泛的应用，对于电力拖动的调节和控制具有重大的现实意义，并可适用于各种恶劣的工作条件及某些特殊场合。

可控硅整流器是在不可控硅整流器的基础上进一步发展起来的，但具有它的特殊性，就工作特性而言，它与闸流管相似。

本文从可控硅整流器在自动化系统中应用的角度出发，介绍这种新型自动化元件应用的几个问题。全文分四部分，即：原理、线路与应用，特性及参数，控制线路，保护及串并联应用。

一、可控硅整流器的原理、线路与应用^[1-10]

1. 可控硅整流器的基本工作原理概述

可控硅整流器由PNPN四层半导体组成，它的符号表示见图1。我们已知：PN半导体在反压作用下，仅有反向电流 I_{c0} 流通，四层半导体共有三个PN结，即使阳极接正，阴极接负，由于 J_2 承受反压作用，仍然只有很小的反向电流 I_{c0} 流通。

我们可以把四层半导体看成是具有公共集电结的两个三极管PNP及NPN的合成(见图2)，每个晶体三极管各极电流分配显然是一定的。设流过PNPN的电流为 I ，则PNP发射结(J_1)空穴电流到达集电极(c_1)部分可用集电极电流表示：

$$I_{c1} = \alpha_1 I,$$

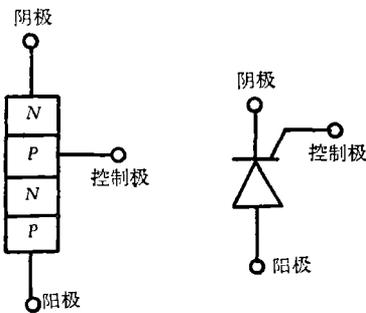


图1 可控硅整流器示意图

* 本文于1965年11月收到。

1) 本文以英文缩写SCR(Silicon Controlled Rectifier)代表可控硅整流器。

式中 α_1 为 PNP 的电流放大系数。

I_{c1} 同时也是 NPN 的基极电流 I_{b2} 。与此相仿，PNP 的基极电流 I_{b1} 等于 NPN 发射结 (J_3) 电子电流到达集电极 (c_2) 部分，即 NPN 集电极电流为：

$$I_{c2} = \alpha_2 I,$$

式中 α_2 为 NPN 的电流放大系数。

这样，流过 PNP 的电流包括三部分，除了 I_{c0} 外，还有 $\alpha_1 I$ 及 $\alpha_2 I$ ，即：

$$I = I_{c0} + \alpha_1 I + \alpha_2 I^{1)},$$

$$\text{或} \quad I = \frac{I_{c0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} = \frac{I_{c0}}{1 - \alpha}.$$

若提高 α ，使之近于 1，则 I 很大。

可是在图 3 所示的 PNP 半导体中，当电压不够大时， α 很小， I 只能等于 I_{c0} 。

提高阳极电压，或者在 NPN 的基极（即 J_3 的 P 型半导体）注入电流 i_g （见图 3），可使 α 增大，从而使阳极电流也增大。我们可以用两个晶体三极管组成的等值电路说明其工作原理（见图 4）。

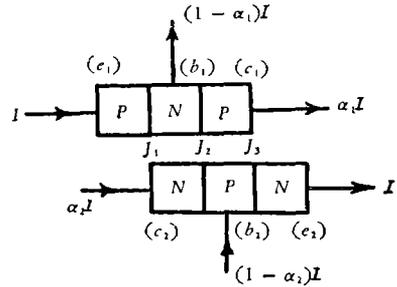


图 2 PNPN 分解为 PNP 及 NPN 时电流分布

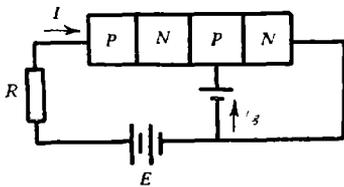


图 3 PNPN 半导体中引入控制电流 i_g

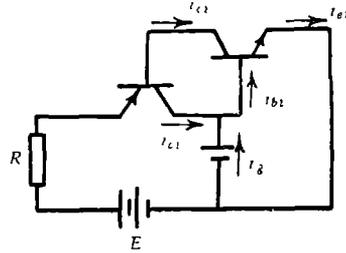


图 4 引入 i_g 后 PNPN 工作原理示意图

i_g 使 NPN 的基极电流 i_{b2} 增大，使 PN 结 J_2 导电。已知：

$$i_{c2} = \alpha_2 i_{b2},$$

$$i_{c1} = \alpha_1 i_{b1},$$

式中 i_{c2} 是 PNP 的基极电流 i_{b1} 。它的增大使 i_{c1} 增大，因此 i_{c1} 及 i_g 共同产生的 i_{b2} 将使 i_{c2} 更大。

由上述可知，在 SCR 的控制极和阴极间加一个控制电流，就可使 SCR 由阻断状态转入导通状态。当控制电流为零时，阳极电压达到转折电压 V_{B0} 以前，只有很小的反向电流通流（见图 5a），即这时 SCR 处于高内阻的阻断状态。当阳极电压大于转折电压时， α 增大，SCR 的电流突然升高，由阻断状态过渡到导通状态有明显的负阻区域。一旦导通，SCR 的伏安特性即与硅整流器相似，而它的反向伏安特性也和硅整流器相同。当加入控制电流后，阳极电压无需增加到转折值 V_{B0} ，即可使 SCR 导通。控制电流越大，在较低的阳极电压下，SCR 就可导通（见图 5b）。

SCR 处于导通状态后，即使撤去控制电流，只要阳极电流大于保持电流 I_h ，仍可继续

1) 我们令空穴倍增因数 M_p 及电子倍增因数 M_n 均等于 1。

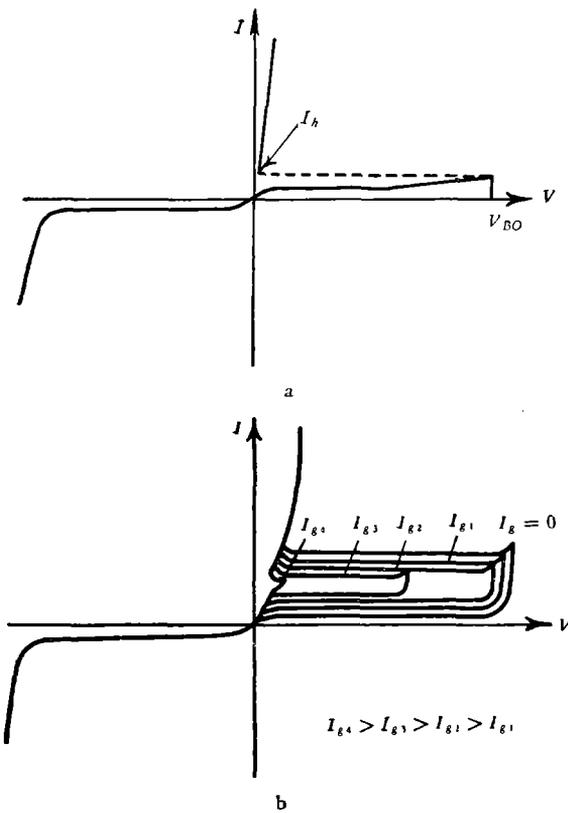


图 5 SCR 的正向及反向伏安特性

保持导通。当阳极电压为交流时，利用电源电压自然过零，可使 SCR 由导通状态转入阻断状态。但是阳极电压为直流时，为了阻断 SCR，需在撤除控制讯号的同时，将阳极电路切断，或者外加一个反向电流。一般采用特殊的阻断装置（例如利用电容放电）使 SCR 流过反向电流而被阻断。

目前人们在 SCR 的基础上又陆续发展了许多新的半导体器件，主要有：

- (1) 光控 SCR；
- (2) 控制极加入负脉冲电流即可阻断的 SCR，简称 GTO 或 GCS¹⁾；
- (3) 硅可控开关 (SCS)²⁾，它比 SCR 多一个电极，导通和阻断同样方便；
- (4) 雪崩式 SCR，雪崩击穿是可逆的；
- (5) 由 NPNPN 五层半导体组成的两极开关，其正反向伏安特性是对称的；

(6) 具有五层半导体的三极开关，利用控制极控制其导通和阻断。

这些新的元件目前还在发展初期，应用还刚开始。但是具有广阔的发展前途。

2. 可控硅整流器的应用与线路

SCR 在自动化系统中的应用大体可分三类：

- (1) 用作可控整流电源——变流器；
- (2) 用作无触点开关；
- (3) 用作逆变器。

小的 SCR 还可以构成脉冲计数元件、逻辑元件及栅控元件等。

以下简要叙述一些应用线路。

(1) 可控整流电源

由于 SCR 只能单向导通，导通时刻取决于控制信号作用的时间，因此它的特性和汞弧整流器相似。

应用 SCR 组成的整流线路，主要有单相半波线路（见图 6a）、单相全波桥式线路（见图 6b）、单相全波中点抽头线路（见图 6c）、三相半波线路（见图 6d）及三相全波桥式线路（见

1) GTO——Gate Turn-off SCR,
GCS——Gate Controlled Switch.
2) SCS——Silicon Controlled Switch.

图 6e).

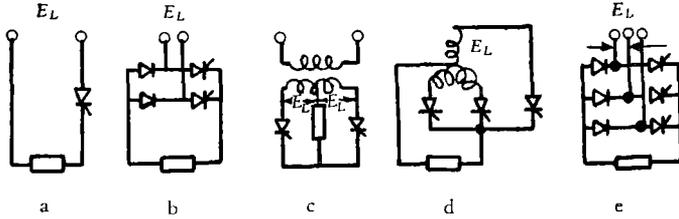


图 6 应用 SCR 组成的整流线路

(2) 无触点开关

SCR 没有加上控制讯号时, 电流很小; 加上控制信号后, SCR 导通, 正向压降很小, 因此可以作为无触点开关使用。

与继电器、接触器相比, 用 SCR 组成的无触点开关的优点是: 没有可动部分和触点, 因此工作可靠, 没有电弧火花, 无需经常维护检修, 操作频率 (开闭次数/小时) 可以很高, 寿命也较长。

(3) 逆变流器

利用 SCR 可以组成逆变流器, 将直流变成交流 (见图 7)。应用 SCR 变流器将交流变成直流, 供给逆变流器, 可以组成变频电源, 在工业控制系统中应用极广, 例如用它作为异步电动机电源可以实现交流调速。

最后我们再简要叙述变流器线路中电感性负载的某些特点。

电阻负载时, 负载电压波形与电流波形一样。在电感负载时, 即使电源电压为正弦, 负载电流也接近矩形。对于半控的单相或三相桥式线路, 在电感性负载下工作, 为了保证线路正常工作, 防止在撤除讯号时线路失控, 必须在负载两端并联一个旁路二极管 (图 8)。

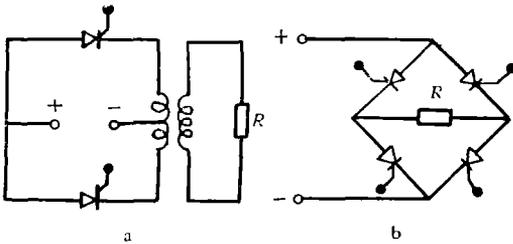


图 7 单相 SCR 逆变流器线路原理图

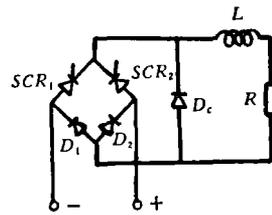


图 8 单相半控桥式电路 (接入旁路二极管)

3. 可控硅整流器的特点

SCR 与磁放大器, 两者各有优缺点, 例如 SCR 体积小, 重量轻, 能快速动作等是其主要优点; 而磁放大器可以综合讯号, 控制电路较简单, 控制与负载回路无电联系, 过载能力较强, 反应弱讯号的灵敏度较高等优点则是 SCR 所不及的。

表 2 及表 3 分别表示 SCR 与磁放大器元件的可靠性及组成直流调速系统后的特点比较^[12]。

一般认为中等功率的磁放大器可以用 SCR 代替^[13]。两者结合起来使用, 可以各自发挥特点, 是一个发展方向。

表 1 SCR 与汞弧整流器比较

名 称	SCR	汞弧整流器
1.正向压降	1 伏左右	20 伏左右
2.尺寸、重量	小	大
3.工作温度范围	-50—+150℃	5—40℃
4.寿命	长或半永久	10000 小时
5.恢复可控能力时间	25—35 微秒	200—500 微秒
6.预热要求	无	需要
7.维护复杂程度	简单	复杂
8.控制方式	电流控制	电压控制
9.工作频率(最高)	10 千赫	200—300 赫
10.过载能力	小	大

表 2 三种放大器可靠性比较

名 称	工作失常可能性 λ (10^{-5} 1/小时)	可 靠 性 $P_{1000}^{1)}$
磁 放 大 器	1.34	0.987
晶 体 三 极 管	4.72	0.954
可 控 硅 整 流 器	8.04	0.923

表 3 三种直流调速方案比较

名 称	尺 寸(毫米)	重 量(公斤)	λ (10^{-5} 1/小时)	$P_{1000}^{1)}$
汞弧整流器	900×400×1200	120	65.5	0.519
可控硅整流器	500×400×400	80	67.7	0.508
中频磁放大器	900×800×400	150	8.94	0.914

1) P_{1000} 为每 1000 小时可靠工作的几率。

二、可控硅整流器的主要特性与参数^{[1-6][14]}

SCR 有两种主要特性:电特性与热特性,前者包括伏安特性、过载能力特性、控制极特性、开关时间特性、功率损耗特性等,后者包括结温特性及热阻特性等。

SCR 的主要参数也可以分为电参数与热参数两种,前者包括正向和反向电压、电流、电压及电流上升速度、控制极参数、开关时间等,后者包括结温、壳温及热阻等。

本文着重讨论 SCR 的几个主要电特性与参数。在这些参数中,有一类表示 SCR 的最大额定值,如转折电压、正向电流、功率损耗等。这些参数在使用时如果超过了规定的额定值,将使 SCR 性能下降或缩短其寿命。另一类则是表示 SCR 在一定条件下工作性能或表示标准量具有典型意义的参数,如开关时间、正向压降、保持电流、漏电流、控制极触发电流及电压等。

1. 正向电流 I_F

额定正向(阳极)电流通常用一周期内平均值表示,它指的是在纯电阻负载和一定频率、温度和冷却条件下,导通角 $\lambda = 180^\circ$ 时,单相半波正弦电路中 SCR 所能长期通过的最大允许直流分量的电流。它与下列因素有关:

(1) PN 结温——SCR 的最大允许结温决定了电流值。SCR 的允许结温与工艺、材料

等有关,一般约为 100—125℃,相应的壳温约为 60—80℃.

(2) SCR 散热情况(冷却条件)——SCR 应当有足够散热面积的散热器. 采用强迫冷却方式(如风冷或水冷)可以提高额定电流值. 一般正向电流超过 50 安的 SCR,必须采用强迫冷却.

(3) 线路——一般给定的额定参数均系指单相半波线路,对其它全波或三相线路,则允许负载电流应另行换算.

(4) 导通角及波形——给定的额定参数是指单相半波正弦、导通角为 180° 的情况,导通角小于 180° 或波形为矩形时需另行换算.

对于不同线路及不同电流波形,允许电流值可由壳温特性 $T = f(I_F, \lambda)$ 求得(见图 9). 壳温越高,允许电流越小.

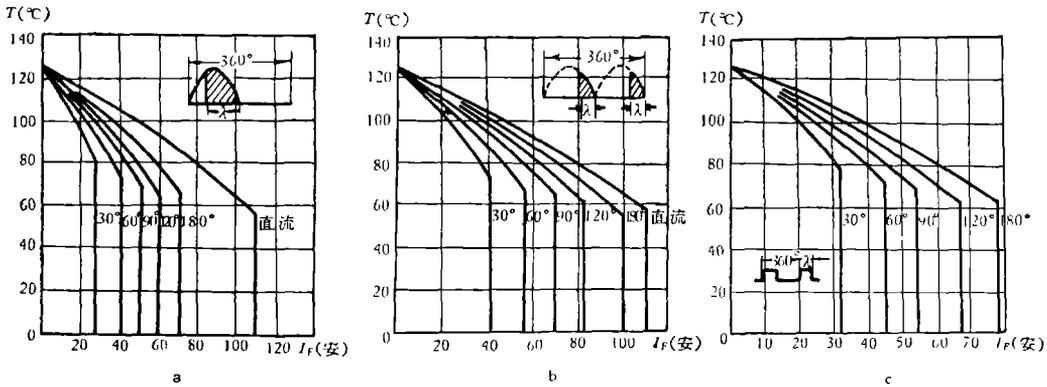


图 9 额定电流为 70 安的 SCR, $T = f(I_F, \lambda)$, (T ——壳温)

2. 过载能力

一般用浪涌电流 I_s 或 I^2t 表示 SCR 的过载能力. SCR 在工作时,由于过载或偶然短路,将承受短时(不重复)的浪涌. 如果结温在过载前已达额定值,则过流可能使结温超过允许值. 因此必须规定浪涌倍数和浪涌持续时间.

在单相正弦半波电路中,一定频率下一周期内允许通过 SCR 的正向电流最大峰值,称为浪涌电流. 在发生过载前,若 SCR 已在额定情况下(电压、电流、结温均为额定值,控制功率为最大允许值)工作,则该电流称为负荷浪涌电流.

例如通用电气公司有效值为 16 安的 SCR 的过载能力,可用图 10 的安秒特性表示.

当 SCR 不通过负载电流时,一定时间内所能通过的正向电流最大允许峰值,则称为无负荷浪涌电流.

过载能力也可以用 I^2t 乘积表示. 在图 10 所示的例中, $I^2t = 40$ 安²秒.

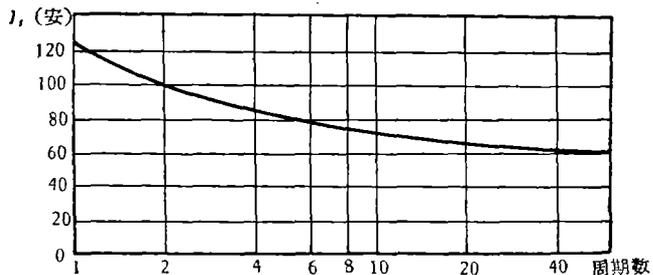


图 10 26 安的 SCR 的过载能力

3. 最大允许电压峰值

在额定结温下,当控制极断开时,重复加到 SCR 上的最大允许反压瞬时值,一般用

PIV 表示。这个电压常保证小于击穿电压(例如令反向转折电压减去 100 伏作为 PIV)。有的厂家还给出瞬时 PIV 值,例如通用电气公司一般保证 SCR 允许超过 PIV 值 20—50% 时运行 1/4 周期,西屋公司给出 16 安系列 SCR 的瞬时 PIV 值允许持续 5 毫秒。

目前国际上已做出的 SCR 的最大电压为 $PIV = 1300$ 伏(500 安)及 $PIV = 2000$ 伏(250 安)。

在额定结温下不加控制讯号时可反复加在 SCR 上的最大瞬时正向电压,一般用 PFV 表示。PFV 值通常取比转折电压略低(例如小 100 伏)。PFV 值与结温有关,结温为额定时的 PFV 值约为室温时的 70%。

4. 控制回路的特性与参数

控制回路参数有允许控制极功率、电流及电压,触发电流(电压)和不触发电流(电压)等。

实际工作时的 SCR 的控制功率、电流和电压,均不得大于规定的允许值,否则 SCR 将被破坏。一般控制极允许功率分瞬时最大值(例如 5 瓦)和平均值(例如 0.5 瓦)两种。控制极允许反压比允许正向电压低。

我们现以通用电气公司 2N681 型 SCR 的控制特性 $V_g = f(I_g)$ 来说明各参数关系(见图 11 及 12)。控制极的损耗线由允许控制极功率表示(如曲线 1,2,3,4),它与脉冲电流

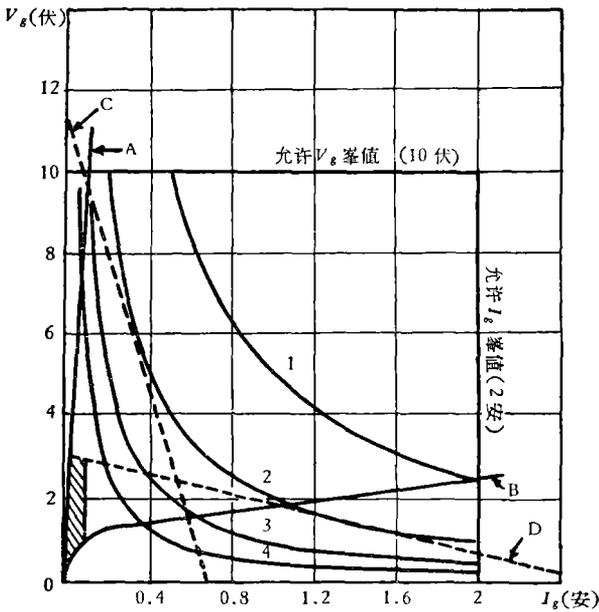


图 11 控制极伏安特性

A, B 为极限伏安特性

C, D 为极限负载线(I_g 持续 1/4 周期)

损耗线 1,2,3,4 分别表示 I_g 持续时间为 1/10, 1/4, 1/2, 1 周期。

在一周期内持续时间有关。由给定的损耗线可以求得极限负载线,如相应于损耗线 2 的脉冲控制装置极限负载线即为 C 及 D。亦即对脉冲控制装置而言,脉冲电流为 1/4 周期时,负载线均应在直线 C, D 的下方,这样可以保证 SCR 控制极不致被破坏。

在控制极伏安特性上,还标明允许控制电流线 (I_g 峰值为 2 安)及允许控制电压线

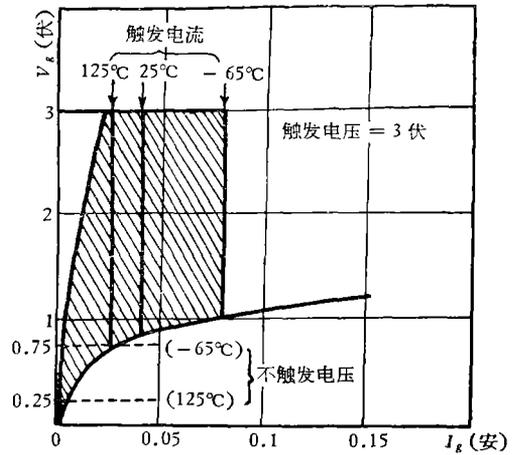


图 12 控制极伏安特性局部放大

阴影面积表示 PN 结温度在 -65°C — $+125^{\circ}\text{C}$ 间 SCR 可能触发的区域。

(V_g 峰值为 10 伏)。控制极的反压不得超过 5 伏。

图 12 是控制极伏安特性的局部放大,其上标明了触发电流(电压)及不触发电流(电压)值。所谓触发电流(电压)是指在给定温度时(一般应指低温如 -40°C 或 -65°C 等)使 SCR 从阻断转入导通状态所需最小控制极直流电流(电压)值,它与结温及正向电压有关。不触发电流(电压)是指在给定温度时(一般为高温,例如 125°C)及加正向阻断峰值电压时,保持 SCR 为阻断状态所能加的最大控制极直流电流(电压)值。结温越高,不触发值越小。

图13是用对数坐标表示的控制极伏安特性。图 12 及 13 中阴影面积表示一个 SCR 可能触发的区域。

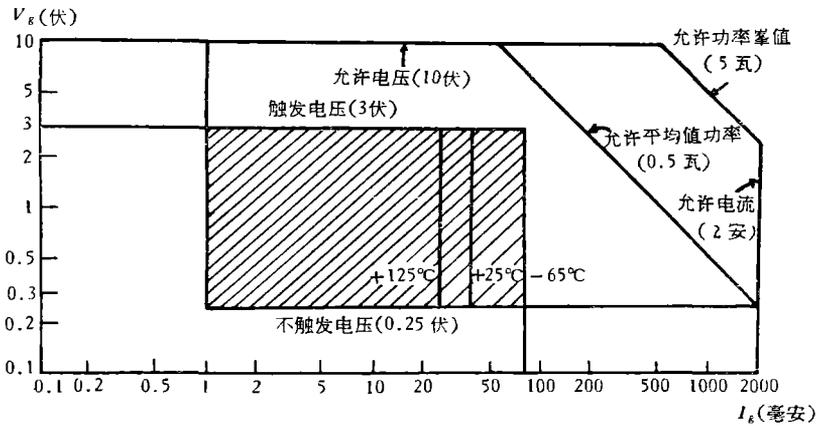


图 13 控制极的伏安特性

根据控制极特性及参数可以确定控制脉冲应有的幅值及宽度。

5. 开关时间

SCR 的开关时间是指导通时间及阻断时间,前者一般为 1—4 微秒,后者一般为 10—20 微秒。

导通时间是指在规定温度时,从控制极电流到达 50% 幅值起直到 SCR 转入导通状态(正向电流按达到 90% 最大值计算)为止的时间,它包括延迟时间及上升时间两部分(见图 14)。

延迟时间是指控制极电流脉冲由幅值的 50% 起到正向电流上升至最大值 10% 为止的时间。上升时间是指正向电流由 10% 上升到 90% 最大值的时间。

阻断时间是指额定结温时,从关断正向电流重新恢复 SCR 的正向阻断状态起到控制极恢复控制能力为止的时间(图 15)。

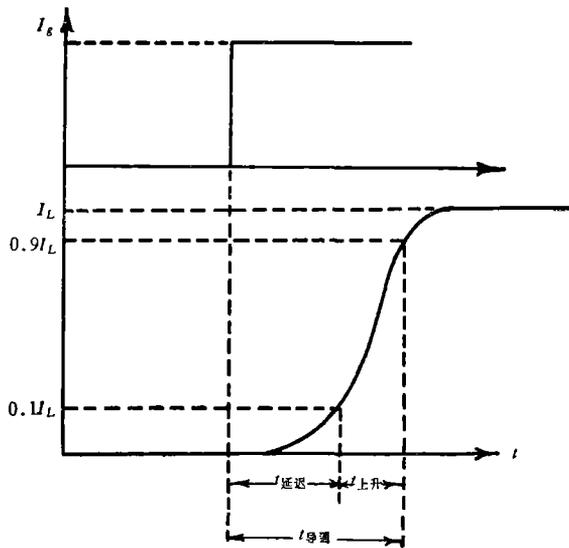


图 14 导通时间示意图

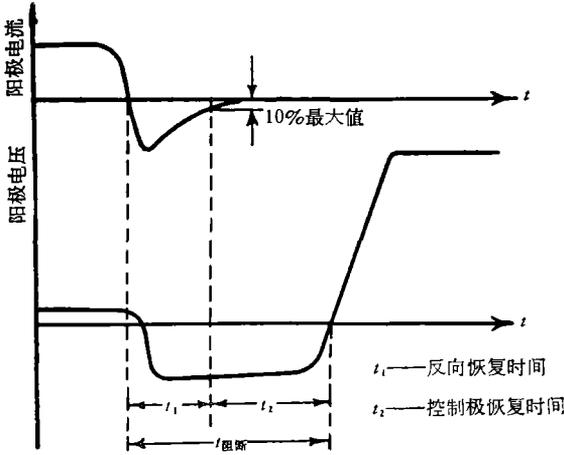


图15 阻断时间示意图

6. SCR 参数的温度稳定性

SCR 的参数与温度有关：温度上升时，保持电流及正向允许电流下降，正向漏电流上升而正向压降下降，正向转折电压下降，阻断时间上升，最大允许功率耗散及触发功率下降（见图 16—23）。

温度稳定性是决定 SCR 工作可靠性的重要因素之一，温度周期性变化，可能造成热疲劳现象，致使热阻增加，损耗也增大，结温超过允许值。温度大幅度变化时，可能造成硅片破坏。

也应该从热应力和热稳固性方面研究温度对 SCR 的影响，例如由于 SCR 是用不同金属零

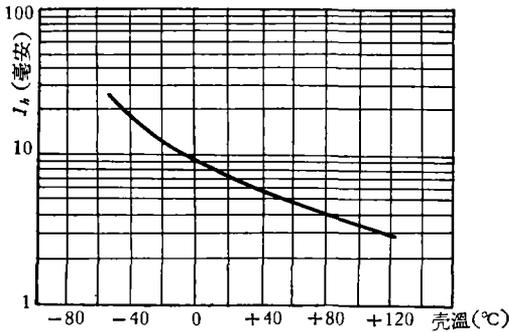


图 16 保持电流 $I_h = f(T)$

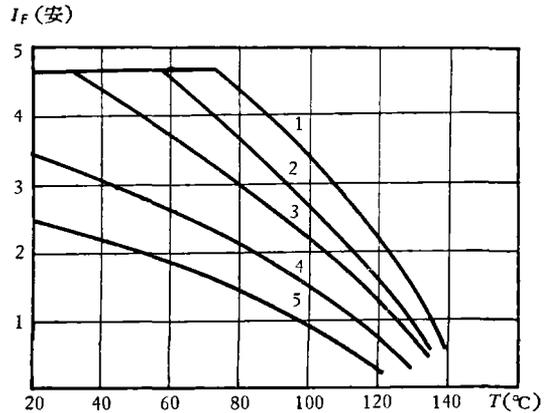


图 17 $I_F = f(T)$, 额定电流 4.7 安
散热器尺寸：1—152×152 毫米，2—102×102 毫米，
3—76×76 毫米，4—51×51 毫米，
5—38×38 毫米。

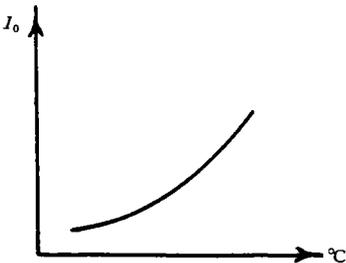


图 18 正向漏电流 $I_0 = f(T)$

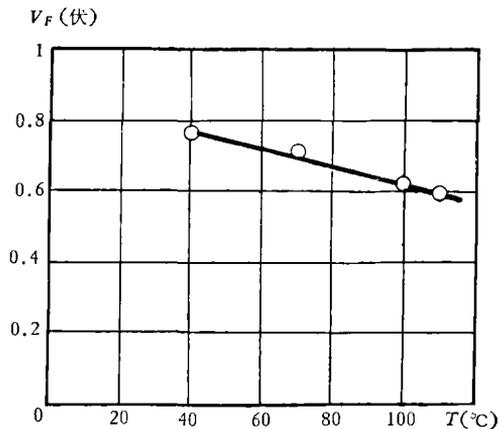


图 19 正向压降 $V_F = f(T)$

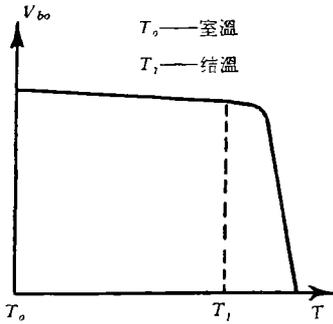


图 20 转折电压 $V_{Bo} = f(T)$

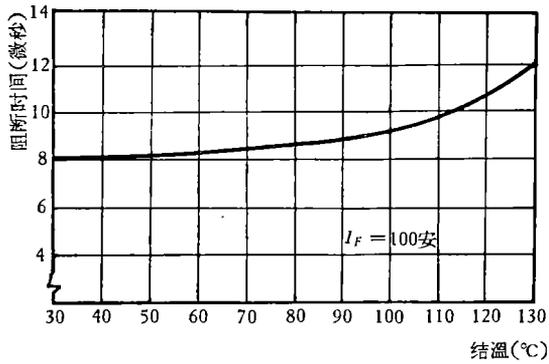


图 21 阻断时间 $t_{阻断} = f(T)$

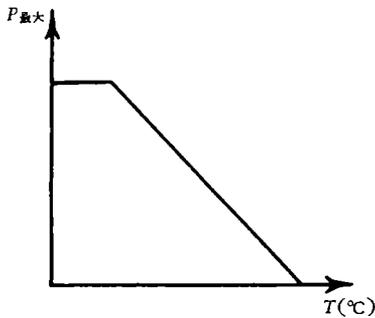


图 22 最大允许功率耗散 $P_{最大} = f(T)$

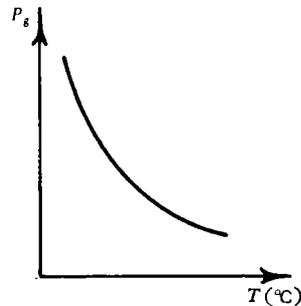


图 23 触发功率 $P_g = f(T)$

件组成，温度膨胀系数各不相同。SCR 的低温工作范围受到硅片的允许温度应力的限制，而其高温工作范围则受到热击穿和热破坏的限制。SCR 的储存温度范围可以稍大于工作温度范围，例如工作温度为 $-40-125^{\circ}C$ 时，储存温度可在 $-65-150^{\circ}C$ 范围内。储存温度极限受储存时元件老化稳定性的限制。

三、可控硅整流器的控制线路^{[1,2][4][15-22]}

SCR 一般应用相位控制，控制线路包括脉冲形成及移相两部分。改变脉冲电压与 SCR 阳极电压的相位差，可以控制 SCR 的导通时刻，从而改变正向电流平均值。

比较控制线路优缺点时，主要应从以下指标出发，即：脉冲幅值及前沿陡度，相位控制范围，快速性，输入功率大小，综合输入讯号的可能性，可靠性，体积重量及价格等^[16]。

对 SCR 控制线路的要求可说明如下^[15]：

1. 脉冲幅值应大于不触发电压，控制线路（脉冲源）的内阻应使负载线位于控制特性阴影区以上（见图 11），使脉冲功率大于触发功率。

2. 温度及电源电压变化时，脉冲幅值应为常数。以保证能使 SCR 触发，而又不会超出允许值。

3. 不工作时，输出脉冲幅值应小，以减小 SCR 的反向漏电流，并防止高温下使 SCR 误触发。

4. 输出脉冲应有足够宽度（至少是 6 微秒，再小时，应提高其幅值），以保证 SCR 在感性负载下也能触发（特别是在阳极电压较低时）。

5. 为保证在准确时刻使 SCR 导通, 脉冲前沿应较陡.

6. 控制线路输出脉冲的相位应与温度、电压及频率等无关, 而只与输入功率成比例, 移相范围应足够宽.

7. 可靠性与稳定性要高, 以使 SCR 不会由于干扰或噪声而误触发.

8. 应将控制线路设计与 SCR 电路联系起来考虑, 以求得到最好的输入、输出特性.

9. 控制线路应灵活, 例如有综合信号可能性, 能同时输出几个脉冲, 输入与输出之间应绝缘.

10. 希望体积重量小, 消耗功率小, 经济指标和工艺性好. 一般趋势是用印刷电路.

SCR 控制线路的类型很多, 最常用的有移相装置输出脉冲发生器, 磁放大器, 单晶体管线路, 晶体管振荡器等; 也有用雪崩二极管, 隧道二极管, 可控整流器和光电元件等作为 SCR 控制线路中的主要元件.

现着重介绍下列四种主要的控制线路:

1. 移相装置及脉冲发生器组成的控制线路

常用的移相装置是 RL 或 RC 移相器. 在 RL 移相器中, 利用可变电感来移相, 它的原理图见图 24. 在 RC 移相器中, 利用晶体三极管做为可变电阻(见图 25).

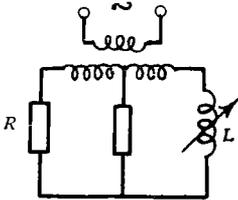


图 24 RL 移相器原理

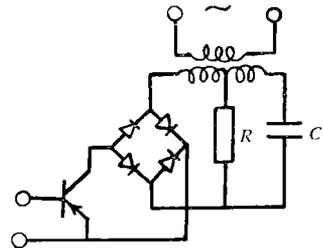
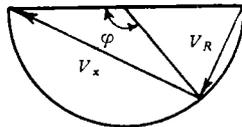


图 25 RC 移相器原理

图 26 表示由晶体三极管和脉冲变压器组成的脉冲发生器的线路原理. 当基极电位

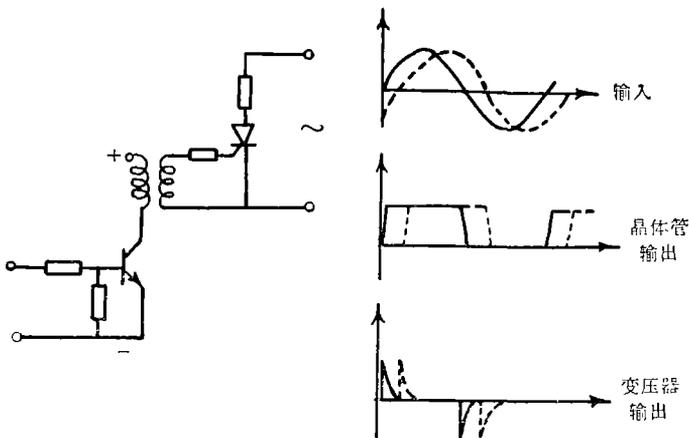


图 26 脉冲发生器原理

较发射极电位为正时, 晶体管导通, 产生一系列脉冲.

2. 用磁放大器组成的控制线路

应用磁放大器组成控制线路的主要优点是^[17]：工作可靠,抗振耐冲击;温度稳定性高;可以综合信号或进行磁差控制;对噪声不敏感;输入与输出回路绝缘;能够同时实现脉冲形成及移相作用,脉冲与阳极电压同步,因而线路较简单;脉冲前沿陡,可以准确控制等等。

与晶体管方案比较,其主要缺点是：脉冲上升时间相对说来较慢,电源频率及电阻值变化对输出有影响。

在 SCR 控制线路中,用得较多的是自饱和磁放大器,快速磁放大器及磁继电器等。

图 27a 表示一种典型的快速(半周期动作)磁放大器控制线路。工作回路上的二极管除了起自饱和作用外,还可防止反向脉冲出现。磁放大器铁心中的去磁,可用改变控制绕

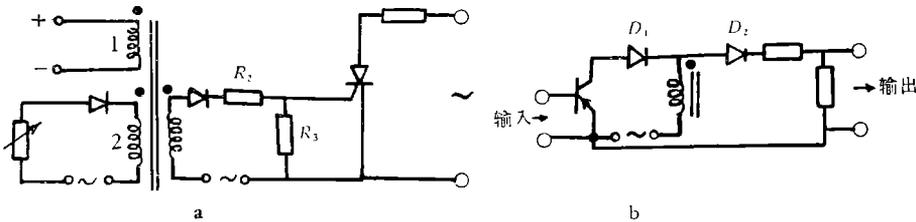


图 27 快速磁放大器控制线路

R_2 ——限制脉冲电流用; R_3 ——限制脉冲电压用。

组 1 的电流来实现,也可用改变控制绕组 2 的电阻 R_1 (例如晶体三极管内阻)来实现。图 27b 表示一个省去控制绕组用晶体三极管控制的快速磁放大器。设电源的第一半周为控制半周,则此时 D_1 导电, D_2 阻断,绕组内流过去磁电流,使铁心去磁。第二半周为工作半周,此时 D_1 阻断, D_2 导电,绕组内流过工作电流,在负载上出现脉冲电压。改变晶体三极管输入信号,可以改变其内阻,从而控制铁心去磁大小及脉冲相位。

一般为保证脉冲前沿陡度,铁心采用磁回线为矩形的铁镍合金。图 28 表示用矩形波供电的自饱和磁放大器。在此线路中,利用晶体三极管将正弦电源变成矩形波,以改变控制绕组电源和输出脉冲相位。

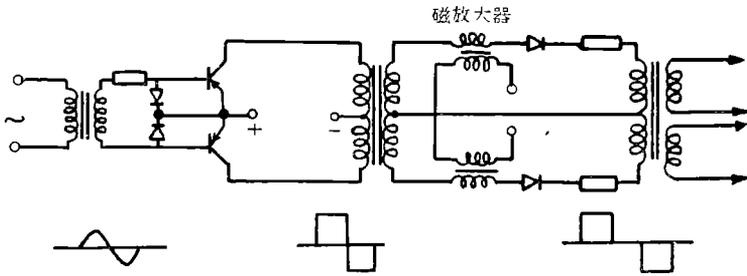


图 28 矩形波供电的自饱和磁放大器控制线路

图 29 表示用交流输出自饱和磁放大器控制一个全波 SCR 整流电路的线路原理^[13]。

在正弦波供电时,由于在每一半周期开始及未了脉冲前沿幅值较小,磁放大器输出移相范围是不够宽的。另外由于电源不稳定等原因,也可能使脉冲前沿幅值变化30—35%。这样移相范围仅 100° 左右^[16]。为了改进这种情况,可以用矩形波供电,也可采用扩大移相范围的方法(见图 30)。

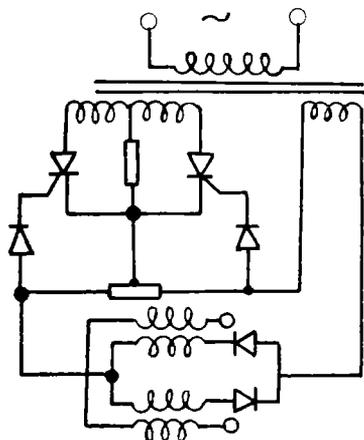


图 29 用自饱和磁放大器控制 SCR 全波电路

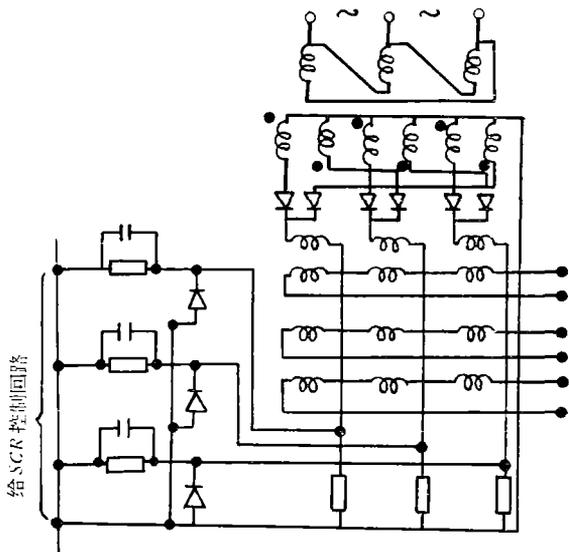


图 30 扩大移相范围达 150° 的三相半波磁放大器方案

半波磁放大器用相位差 60° 的电压迭加后供电，并在输出脉冲回路中串联一个电容（其上并联有电阻），采取这些措施后，可使移相范围由 120° 增加为 150°。

3. 晶体管脉冲控制线路

晶体管多谐振荡器(见图 31)可以用作 SCR 的控制线路。

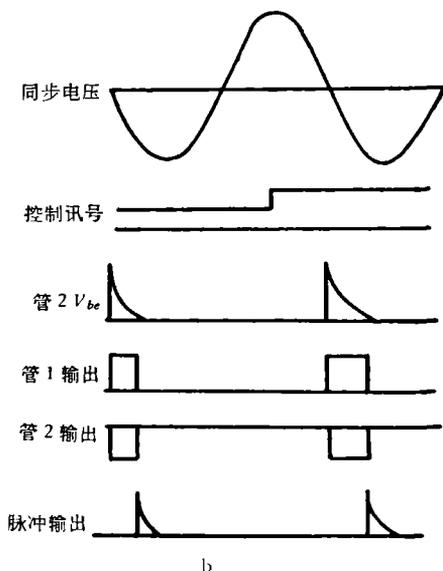
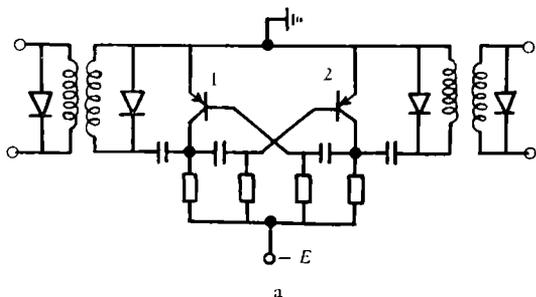


图 31 晶体管多谐振荡器线路 a 及波形 b

应用晶体管矩形波发生器经过变压器输出，也可以控制 SCR (见图 32)。晶体管输入为锯齿波电压与给定电压 V_r 之差。电源变压器副边接入一个电感负载的整流电桥，将正弦电压变为矩形电流，再经过电容充放电而得锯齿波。改变给定电压 V_r 可以改变输出脉冲的相位。

4. 单结晶体管振荡器

单结晶体管(UJT)又称为双基极二极管^[23],它的结构及等值线路见图 33a,b 及 c.

利用基极间的电压分布,可以改变发射极伏安特性(见图 34).当 $V_{bb}=0$ 时, $I_{b2}=0$,这时发射极特性和二极管正向伏安特性相等.当 V_{bb} 为某一定值时,若 $V_E < V_{Em}$,则 PN 结(Eb_1 间)反向,只有很小的反向电流;若 $V_E = V_{Em}$,则 UJT 正向导通,射极电流增长,得到一个具有负阻的下降特性.

V_{Em} 与 V_{bb} 的关系如下:

$$V_{Em} = \eta V_{bb} + V_D,$$

式中 η 称为固有开关系数,约为 0.47—0.75,与电源电压及温度均无关; V_D 为发射极正向

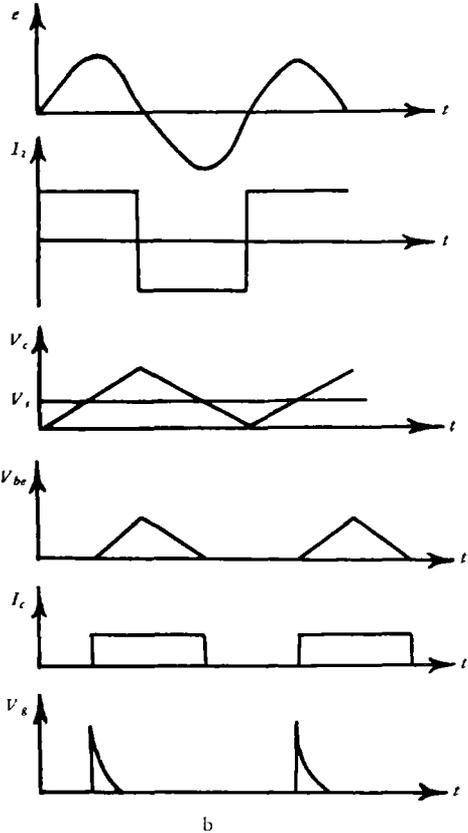


图 32 应用锯齿波发生器及晶体管矩形脉冲发生器控制 SCR

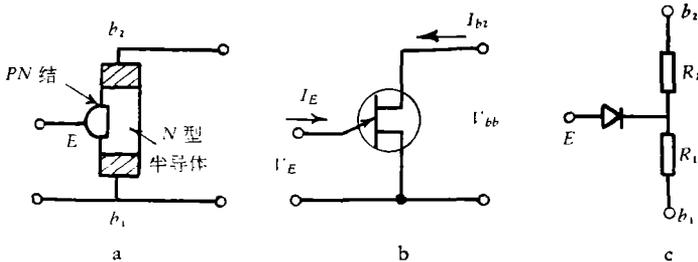
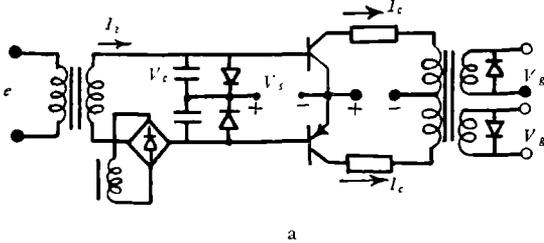


图 33 UJT 结构

(a)原理图(b)及等值线路图(c)

降压, 25°C 时约为 0.7 伏,随温度增加而下降,其温度系数约为 -2 毫伏/°C. 利用基极回路内电阻的正温度系数,可以补偿 V_{Em} 的温度漂移.

UJT 相当于一个对电压敏感的开关. 当 V_E 超过 V_{bb} 某一值时, Eb_1 之间几乎短路. 应用 UJT 作为脉冲发生器的主要优点是: 导通电压稳定, 导通电流小, 工作温度范围宽 (-55—+140°C), 允许电流幅值大(达 2 安), 用它构成控制线路简单, 结构紧凑, 消耗能量小, 功率放大系数较大.

UJT 脉冲发生线路的工作原理如下(见图 35).

电容 C 充电到 V_{Em} 时, UJT 导通, 当 C 经 R_1 放电至 $V_E = 2$ 伏时, UJT 被阻断, 然后

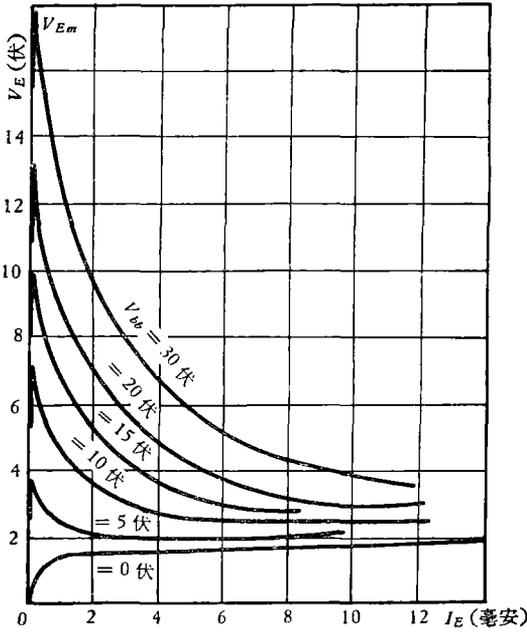


图34 UJT 特性

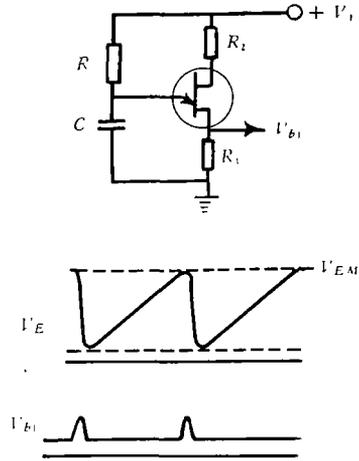


图35 UJT 脉冲发生器

重复充电。这样 R_1 上的电压脉冲 V_{b1} 的振荡周期,便与电源电压、温度等无关,只取决于下式:

$$T = \frac{1}{f} = RC \ln(1 - \eta)^{-1}$$

V_E 充电到 V_{Em} 的时间与 V_i 、 R 、 C 等有关,它由下式决定:

$$V_E = V_i(1 - e^{-t/RC})$$

为了控制脉冲相位,可以使电容 C 串联或并联一个晶体管(如图36)。改变晶体管的输入电流,可以改变 C 的充电电流,调节 UJT 的导通时间,从而改变输出脉冲的相位(见图37)。

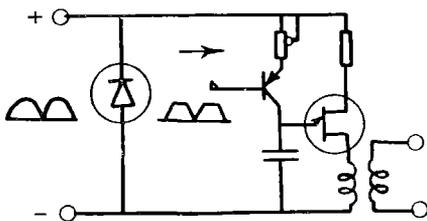


图36 UJT 控制电路

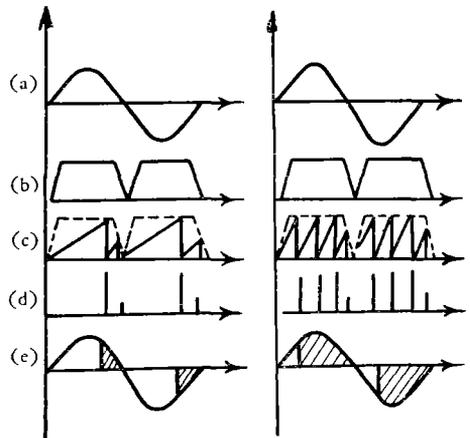


图37 UJT 控制电路波形

a. 电源电压; b. 稳压管电压; c. 电容电压; d. 输出脉冲; e. SCR 输出。

四、可控硅整流器的保护及串并联应用^{[1-6][24-26]}

和硅整流器一样，SCR 的过载能力是很弱的。它具有反向雪崩击穿的特性，PN 结的热容量又小，因此工作参数只要稍微超过最大允许值，SCR 就可能在几微秒内受到破坏。

为了可靠工作，选用额定值比实际工作参数大得多的 SCR，显然是不经济的。最好是在线路中加入适当的保护元件，以限制故障电压(电流)值及故障持续时间。

一般发生 PN 结击穿要比断开的机率更多。当线路中的一个 SCR 发生短路，可能引起其它 SCR 的连续破坏。例如在桥式线路中，若电源电压是恆定的，则一个 SCR 短路，将使另一个 SCR 流过短路电流而被破坏(见图 38)。三相电路也可能发生这种情况。

在 SCR 串联应用的线路中，若一个 SCR 短路，将会使其它 SCR 受到过电压。在 SCR 并联应用的线路中，若一个 SCR 断开，则可能使其它 SCR 过载(见图 39)。

SCR 的故障一般是指失去反向阻断、正向阻断或正向导通能力，也即失去了可控性。

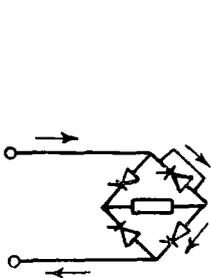


图 38 桥式电路中一个 SCR 破坏引起的连锁效应

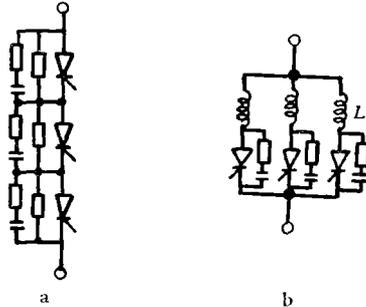


图 39 串联及并联线路
a. SCR 串联; b. SCR 并联(L 为均流电抗)。

SCR 的保护方法与硅整流器有共同之处，但要注意到 SCR 线路中出现危险过压的次数要比硅整流器更多，这是因为 SCR 工作时频繁断通，开关时间短，使过压数值也更高的缘故。在正向阻断状态下，SCR 有一定保护过压故障的能力，因为当电压达到转折数值时，SCR 即导通。

下面我们简要叙述在 SCR 电路中出现过电压和过载的原因，防护措施以及串并联应用的某些问题。

1. 过电压的一般分析

SCR 电路(例如图 40 所示单相桥式线路)中，出现过电压的原因常见的有以下几种。

(1) 正向突然阻断

SCR 突然由导通转入阻断状态时，PN 结中已进入 N 型半导体的空穴来不及转移，造成在阻断瞬间 SCR 上承受过电压(见图 41)。

在 SCR 串联应用的线路中，若正向电流突然加以阻断，有一个 SCR 首先恢复阻断状态，而其它 SCR 还处于导通状态，则首先恢复阻断状态的将承受全部过电压。

(2) 变压器原边突然断开

原边磁化电流突然消失时，铁心磁通快速下降， $\frac{d\phi}{dt}$ 很大，此时变压器副边将产生一过

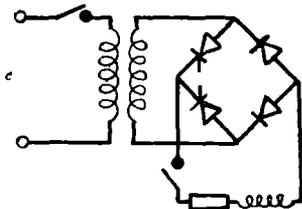


图 40 单相桥式 SCR 电路

电压 (见图 42)。当磁通为最大时断开原边, 则过电压最严重。

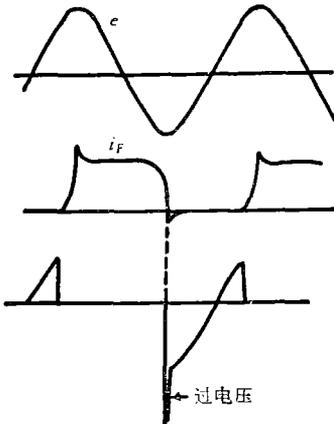


图 41 正向突然阻断时的过电压

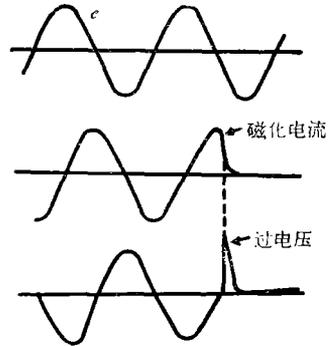


图 42 变压器原边断开时的过电压

(3) 变压器原边突然接通

由于漏抗及分布电容产生的谐振, 变压器的副边在原边突然接通时, 将有过电压产生。当电源电压为峰值时, 此种情况最严重 (如图 43)。电流互感器原边电流突然上升时, 也有这种情况。

(4) 直流侧突然断开

由于交流电源能量突然被阻断, 负载电感能量来不及散去而造成 SCR 上的过压 (见图 44)。当直流侧短路再断开时, 情况最严重。

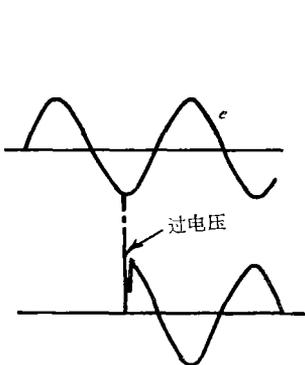


图 43 变压器原边突然接通时的过电压

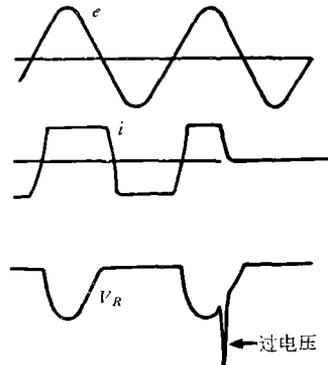


图 44 直流侧负载突然断开时的过电压

(5) 其它情况

由于雷电或特殊运行状态产生的过电压。

2. 保护方法

过电压的产生与线路、负载性质、运行方式、工作状态等许多因素有关, 目前还没有一个经验方法可用以指导各种情况下 SCR 的选择计算。有的文献指出, 合理的办法是, 一方面采取措施, 以降低反压峰值, 使之小于 SCR 的允许值; 同时在选择元件时, 应使 SCR 的允许电压为线路中重复产生的最大反压的 2—3 倍^[1], 也有的取 60% PIV 为工作电

压^[10]。

一种较经济的方法是将 SCR 与一个硅二极管串联(用均压电阻使电压分布均匀),这样还可以防止线路中一个 SCR 被破坏造成其它 SCR 连锁反应式的破坏。

采取保护措施,使过渡过程中储能元件中的能量不以较高速度向整流元件散发,从而降低过压击穿的危险。

例如在变压器整流器装置中,先使变压器副边断开,再断开原边,或者减低断开时的电流下降速度,使电磁场能量变成电弧的热能散发,均可降低 SCR 上的过电压。

常用的保护措施是在 SCR 上并联吸收和散发瞬变状态能量的元件。利用电容来吸收能量是一个有效办法。为了防止与分布电感共振,常采用 RC 元件,R 起阻尼作用,RC 的选择与负载容量、变压器参数、电路分断速度等许多因素有关,很难进行准确计算。

为了防止负载电感能量释放造成 SCR 上的过电压,可以在负载两端并联电阻电容,或并联电阻。

除了利用电容吸收能量的方法以外,还有并联非线性电阻的方法。当电压低于 SCR 的允许值时,非线性电阻中只有很小电流流过,产生过电压时,该电阻中电流增大,将能量散发。例如采用雪崩二极管或硒半导体做成过电压抑制器,由于具有二极管或硅稳压管的伏安特性,可用以限制 1.5—2 倍的过电压。使用时,可在直流侧并联一个元件,而在交流侧,则可将两个反向串联的元件并联在变压器的副边。

3. 防止过载或短路电流的保护

过流保护作用是限制过流的持续时间和频繁次数,限制直流侧短路持续时间及短路电流值,限制整流元件击穿时产生的故障电流持续时间及故障电流值等等。过流保护可分两类:

(1) 利用切断电路,预防故障电流的保护。例如用自动开关或熔断器使整个线路与电网隔离,将发生故障的 SCR 孤立。当负载发生短路时,保护电器动作,将直流侧断开。

(2) 利用电源、变压器或直流回路的内阻抗,限制故障电流大小及上升速度。

在设计保护线路时,各保护元件的配合以及保护元件与 SCR 特性的配合是很重要的,一方面需要“选择性”保护,另一方面也要防止在保护元件动作时又产生过电压。

为使保护装置在 SCR 没有被破坏前就动作,可以采用快速熔断器或“限流”熔断器,及时将发生故障的 SCR 断开,以保证整流装置不间断运行。

另一种保护方法是在发生过流时,停止发出控制脉冲,使 SCR 正向阻断。

4. 可控硅整流器的串联及并联

当线路中正反向电压超过一个 SCR 的允许电压时,需要将几个 SCR 串联使用;当正向电流超过一个 SCR 的允许电流时,需要将几个 SCR 并联运行。SCR 的串联与并联应用在某些方面与硅整流器相同,但也有一些特殊问题需加考虑,即一方面要使各 SCR 上的电流(或电压)均匀分配,另一方面要保证各 SCR 同时触发。

SCR 串联应用时,由于各 SCR 漏电流、结间电容、反向恢复时间不同等可能使电压分配不均匀。例如当 SCR 正向阻断时,由于各串联的 SCR 伏安特性不一致,漏电流较小的 SCR 将承受更多的电压,这时可能将这个 SCR 击穿,使电压加在其它 SCR 上造成连续破坏。

为使各串联的 SCR 电压分配均匀,可在每个 SCR 上并联均压电阻,该电阻值可按下式计算(见图 39a)¹⁾:

$$R = \frac{nV_{Bo} - E_m}{(n-1)I_{FB}}$$

式中 n 为串联的 SCR 个数, I_{FB} 为正向阻断时的漏电流, V_{Bo} 为正向转折电压, E_m 为外加电压峰值。

为了防止在过渡过程中串联的 SCR 承受过电压,可在每个 SCR 上再并联电容电阻(见图 39a)。并联电容不仅可以预防串联的 SCR 不同时触发而引起的过电压,并且可以保证在恢复阻断状态时均匀分配反电压。例如在一般情况下,可选择 0.1—0.5 微法的电容。当要求各串联的 SCR 能够同时恢复阻断性能时,电容值可按下式计算^[1]:

$$C = \frac{10I_F}{V_{RM}}$$

式中 V_{RM} 为加在 SCR 上的最大允许电压, I_F 为阻断前的正向电流。

为了防止高频振荡,可将电容与电阻串联,一般可取 5—50 欧。

SCR 串联时,必须使各个 SCR 的控制回路相互绝缘,否则会出现短路现象。一般在控制线路中采用隔离变压器。

并联运行时,要求各个 SCR 中电流均匀分配。一种简单的方法是在同样温度及相同电流下挑选具有相同正向压降的 SCR。选择配对时,应使各 SCR 正向压降差小于某允许值(例如 0.05 伏),至少是在对应于两个正向电流值时,能满足压降差的要求。

并联的 SCR 其允许负载电流 I_L 可按下式计算:

$$I_L = (\alpha n + \beta)I_F$$

式中 n 为并联的 SCR 数, α 及 β 为经验系数,取决于 SCR 参数。一般可取 $\alpha = 0.6—0.7$, $\beta = 0.3—0.4$ 。

例如美国通用电气公司的 2N 1909 型 SCR, $I_F = 70$ 安, $\alpha = 0.6$, $\beta = 0.4$; 当 $n = 2$ 时,允许负载电流计算值为 112 安。有的文献建议将每个 SCR 降低 20% 额定值再作并联使用。

由于 SCR 的正向压降随结温升高而降低,因此,在并联线路中,较热的 SCR 的正向电流势必较大,发热更严重,可能引起损坏。应将并联的 SCR 安装在同一个散热器上,使其冷却条件相同。

在并联线路中,应保证各个 SCR 在伏安特性不稳定或有不一致性均导通时才可停止控制脉冲,否则当某一个 SCR 还来不及导通即停止脉冲,将会造成其它 SCR 过载。这在设计控制线路时应特别注意。

未经选择的 SCR 作并联应用时,要采取措施保证电流均匀分配。例如在每个 SCR 中,可串联均流电阻,也可以采用均流电抗以避免能量额外消耗(见图 39b)。

由于各个 SCR 控制回路电阻值的不同,应在控制回路中串联电阻,以避免控制电流分配不均匀。

1) 对于串联运行的设计,也可以采用选择配对的方法,使串联各元件的正向阻断和反向伏安特性尽量均匀一致。

五、应用可控硅整流器的設計步驟

最后我们简单叙述应用 SCR 做为成套装置时的设计步骤,以供应用时参考。

(1) 决定线路要求: 如决定 SCR 在正常运行时的电压和电流值, 瞬变过程电压, 周围环境温度以及对恢复时间的要求等等。

(2) 选择 SCR: 按照所设计的线路及 SCR 的出厂额定数据, 选择元件。要适当地留有裕量, 例如可按 $1/3—2/3$ PFV 值作为 SCR 长期工作重复承受的电压。必要时, 可考虑串联或并联应用。选择元件时还应注意厂家规定的额定结温值, 并考虑各 SCR 的参数有一定分散性。

(3) 选择设计散热器和冷却方式: 散热器必须有足够的散热面积, 用试验方法检查壳温(例如限制在 60°C 以内)以防过热, 采用自然冷却还是强迫风冷, 既需参考出厂说明书, 也应根据试验决定。

(4) 设计控制线路。

(5) 设计保护装置: 设计保护装置要全面考虑, 例如应考虑系统对可靠性的要求, 发生事故后对工作连续性的要求, 事故发生的可能性或频繁程度, 故障电压、电流上升速度及峰值以及经济性等。在某些特定条件下, 也可能不适宜加以保护。

参 考 文 献¹⁾

- [1] Gutzwiller, F. W. (Editor), Silicon Controlled Rectifiers Manual, 2d edition, General Electric Co., New York, 1961.
- [2] Robert Murray, Jr. (Editor), Westinghouse Silicon Controlled Rectifier Designers' Handbook, 1st edition, U.S.A., 1964.
- [3] Dummer, G. W. A. and Mackenzie Robertson, J., British Transistor Diode and Semiconductor Devices Data Annual, 1963—1964, London, 1963, Compton Printing Works.
- [4] SCR 活用ガイドブック, *OHM* 电气杂志, **51** (昭和 39), No. 11.
- [5] 特集 SCR とその应用回路的设计, 电子技术, **4** (1962), No. 8.
- [6] 築地謙次、相川浩, SCR とその应用, 工业新闻社, 昭和 40.
- [7] Application of SCR, Fuji Electric Co., 1965.
- [8] 金旭源, 硅可控整流器, 电工杂志, No. 5, 1965.
- [9] Proceedings papers presented at the 3rd Conference on Rectifiers In Industry, *AIEE*, 1962.
- [10] Полупроводниковые управляемые вентили-тиристоры, Сборник статей ГЭИ, 1964.
- [11] Полупроводниковые управляемые вентили, Сборник переводных статей, ГЭИ, 1962.
- [12] Писарев, А. Л., Перспективы применения магнитных усилителей в промышленной автоматике и электроприводе, *Электротехника*, № 6, 1964.
- [13] 1963 Proceedings of Intermag Conference, IEEE, New York.
- [14] 田村琥男、宮崎素史, SCR の规格と測定法, *エレクトロニクス*, 1964, No. 1. (半导体快报 1964, No. 18).
- [15] Martin Glasberg, Ernst Adler, SCR Applications, *Electro-mechanical Components and Systems Design*, **9**, (1965), No. 1.
- [16] 希比洛 (Шипило, В. П.), 自动电力拖动中汞弧整流器的栅控系统, 上海科技出版社, 1964.
- [17] Baruch Berman, SCR in Automatic Power Control, *IEEE Trans. on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, 1964, Sept.
- [18] Shakespeare, C. J., Gate Firing Circuits Ensure Reliable Control of SCR, *Canadian Electronics Eng.*, **9** (1965), No. 2.
- [19] 小川和男, SCR 在控制电路中的应用, 电气自动化快报, No. 2, 1962.
- [20] Sylvan, T. P., Survey of Firing Circuits for SCR, *Electromechanical Design*, No. 10, 1960.

1) 1964 年以前有关文献可查阅: 可控硅整流器制造与应用专题文献索引, 电工杂志编辑部, 1965 年 9 月。

- [21] Nickels, L. E., 可控硅整流器电源的移相线路, 电气传动译丛, 1965, No. 4.
[22] 巫松亭, 半波磁放大器栅控元件, 自动化, 2 (1959), No. 7.
[23] Shea, R. F., 半导体管电路原理, 上海科技出版社, 1958.
[24] 洗碧琼等, 半导体整流器过电压分析及其保护方法, 电, No. 6, 7, 1963.
[25] Black, I. A., 半导体整流器回路中电压浪涌的产生与抑制, 电工快报, 1965, No. 5.
[26] Mulica, A. R., SCR in Series and Parallel, *Control Engineering*, 11 (1964), No. 5 (电气传动译丛, No. 6, 1965.).

SILICON CONTROLLED RECTIFIER—A NEW DEVICE OF AUTOMATION

HUA TSING