

5.1 可控硅简介

可控硅又称为晶闸管(Thyristor),可在高电压、大电流条件下工作,具有耐压高、容量大、体积小的优点,是大功率开关型半导体器件,可以替代接触器等笨重开关,广泛应用于电力、电子线路中。

1. 可控硅的符号

可控硅分单向和双向两种,常用符号如图 5.1 所示。

2. 可控硅的内部结构

可控硅内部近似由三个 P-N 结组成,如图 5.2 所示。

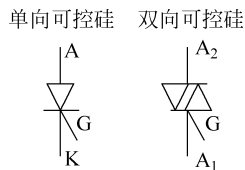


图 5.1 可控硅常用符号

A—阳极; G—控制极; K—阴极; A_1, A_2 —第一、第二阳极

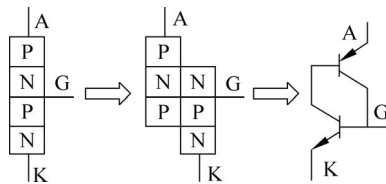


图 5.2 可控硅内部结构

A—阳极; G—栅极(控制极); K—阴极

5.2 可控硅特性

单向可控硅有阳极 A、控制极 G 和阴极 K 三个极,双向可控硅有第一阳极 A_1 、第二阳极 A_2 和控制极 G,二者的导通条件是不相同的。单向可控硅只有 A、K 极之间加有正向电压,同时 G、K 两极之间加有所需的正向触发电压(0.6V 以上)时,方可被触发导通,此时 A、K 极之间呈低阻导通状态,阳极、阴极之间导通电压约 1V。此时即使 G 极失去触发电压,只要 A、K 两极之间维持正向电压,A、K 两极之间仍维持导通状态。只有将 A 极电压撤除,或 A、K 两极的电压极性变化(如交流的零点),单向可控硅才能由导通变为截止,且一旦截止,即使 A、K 两极又加上正向电压,该元件也不能重新导通,只有在 G 极上重新加上正向触发电压才能导通,其导通与截止犹如开关的闭合与断开,可相当于无触点开关。

双向可控硅加于 A_1, A_2 两极间的电压不分极性,只要 G 与 A_1 极之间加有极性不同的

触发电压,就可触发该元件进入低阻状态。此时 A_1 、 A_2 极之间导通电压约为 1V,双向可控硅一旦导通,只有当 A_1 、 A_2 极的电流减小,不足以维持电流且 G 极失去触发电压时,双向可控硅才能截止重新获得触发电压,且 A_1 、 A_2 极之间有一定电压,双恢复导通。

5.3 可控硅检测

5.3.1 单向可控硅检测

一般非在路可用万用表 $R \times 1\Omega$ 挡,测可控硅任两个引脚之间的正反向阻值,有且只有一次万用表示数较小,约为 10Ω ,此时黑表笔所接为 G 极,红表笔所接为 K 极,余下的为 A 极。

若有两次或更多次导通,则该元件已损坏。判断出各极后,黑表笔接 A 极,红表笔接 K 极,瞬间短路 AG,断开后,万用表指针维持右摆,断开后再接通,万用表示数为 ∞ 为正常。

5.3.2 双向可控硅检测

同样使用万用表 $R \times 1\Omega$ 挡,测可控硅任意两脚之正反向阻值,其中有两次的阻值较小,约数十欧。此时该两个引脚为 G 和 A_1 ,另一个引脚为 A_2 。判断出 G、 A_1 后,仔细测量 A_1 G 间的阻值,其中读数较小的一次红表笔所接的为 G 极,黑表笔所接的为 A_1 极。若黑表笔接 A_2 ,红表笔接 A_1 ,万用表指针不偏转,示数为 ∞ ,此时,外接 A_2 与 G 后马上分开,即利用万用表内电池给控制板加上触发电压,万用表的示数应为 15Ω 左右,并维持在此值。同样,黑表笔接 A_1 ,红表笔接 A_2 ,瞬间短路 A_2 G,万用表示数仍为 10Ω 左右并能维持。断开表笔再接触示数又为 ∞ 。符合此规律,该双向可控硅正常,否则损坏。检测大功率可控硅 ($I > 10\text{mA}$),用此法未必可行,此时可用两块万用表 $R \times 1\Omega$ 挡串联使用或在万用表中串接一电池(1.5V)试之。

5.3.3 光控可控硅检测

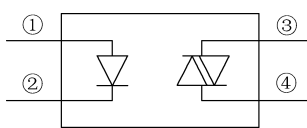


图 5.3 光控可控硅

该元件为新兴器件,原理与一般可控硅大致相同,只是触发电流被光电流替代,如图 5.3 所示。检测该元件时,①②脚加上①正②负的正向电压 1V 左右,③④导通,若①②脚不加电压,则③④截止。该器件可广泛应用于高压的低压控制。

5.4 可控硅元件的使用原理

通态平均电压是可控硅的重要判别标准之一。同样的电流下,正向压降越小则损耗越小。可控硅的使用需要选择正向压降较小的,要与它的压降相配合。可控硅的使用一般正向平均压降为生产厂家标准,一般是 $0.5 \sim 1.2\text{V}$,以小于或等于 0.5V 最为适宜。可控硅的分散性很大,不同容量、不同功率的可控硅设备,其触发通路也是不同的。

对于小功率的可控硅,应该选择较小的触发电路,否则会降低元件的抗干扰能力。大多数可控硅采用的是晶体管组成的触发电路,在这种情况下,使用时要注意触发电路的极限

值,每个触发电路都有它本身的极限值,这个极限值必须满足,否则会损坏可控硅。

在多只可控硅串联或并联的大型设备中,通常采用强触发脉冲电路。在使用过程中,需要将电压控制在合理范围内,保证各元件触发时间的一致性。可控硅脉冲是否能够正常触发是电路正常工作的根本保证。对于可控硅,有明确的使用要求,必须要遵循特定的电流、电压标准,只有遵循标准,可控硅的使用才能够达到安全可靠的状态。

5.4.1 可控硅的分类

可控硅有多种分类方法。

1. 按关断、导通及控制方式分类

可控硅按其关断、导通及控制方式可分为普通可控硅、双向可控硅、逆导可控硅、门极关断可控硅(GTO)、BTG可控硅、温控可控硅和光控可控硅等多种。

单向可控硅和双向可控硅都是三个电极。单向可控硅有阴极(K)、阳极(A)、控制极(G)。双向可控硅等效于两只单向可控硅反向并联而成。即其中一只单向硅阳极与另一只阴极相连,其引出端称为 T_1 极,向一只单向硅阴极与另一只阳极相连,其引出端称为 T_2 极,剩下则为控制极(G)。

单向可控硅是一种可控整流电子元件,能在外部控制信号作用下由关断变为导通,但一旦导通,外部信号就无法使其关断,只能靠去除负载或降低其两端电压使其关断。单向可控硅是由三个P-N结PNPN组成的四层三端半导体器件,与具有一个PN结的二极管相比,单向可控硅正向导通受控制极电流控制;与具有两个P-N结的三极管相比,差别在于可控硅对控制极电流没有放大作用。

双向可控硅具有两个方向轮流导通、关断的特性。双向可控硅实质上是两个反并联的单向可控硅,是由NPNPN五层半导体形成四个P-N结构成、有三个电极的半导体器件。由于主电极的构造是对称的(都从N层引出),所以它的电极不像单向可控硅那样分别称为阳极和阴极,而是把与控制极相近的称为第一电极 A_1 ,另一个称为第二电极 A_2 。双向可控硅的主要缺点是承受电压上升的能力较低。这是因为双向可控硅在一个方向导通结束时,硅片在各层中的载流子还没有回到截止状态的位置,必须采取相应的保护措施。双向可控硅元件主要用于交流控制电路,如温度控制、灯光控制、防爆交流开关以及直流电机调速和换向等电路。

2. 按引脚和极性分类

可控硅按其引脚和极性可分为二极可控硅、三极可控硅和四极可控硅。

3. 按封装形式分类

可控硅按其封装形式可分为金属封装可控硅、塑封封装可控硅和陶瓷封装可控硅三种类型。其中,金属封装可控硅又分为螺栓形、平板形、圆壳形等多种;塑封封装可控硅又分为带散热片型和不带散热片型两种。

4. 按电流容量分类

可控硅按电流容量可分为大功率可控硅、中功率可控硅和小功率可控硅三种。通常,大功率可控硅多采用金属壳封装,而中、小功率可控硅多采用塑封或陶瓷封装。

5. 按关断速度分类

可控硅按其关断速度可分为普通可控硅和高速(快速)可控硅。

5.4.2 可控硅元件使用的注意事项

虽然可控硅本身有很多优点,但不可否认的是,可控硅也有一些不足之处,在使用时就要尽量避开它的缺点,充分发挥它的优点。对于大功率设备中连续使用的可控硅,其额定电压的要求很高,一般需要达到额定电流的3~4倍。为了保证使用的安全性,建议在可控硅装置中安装过电流或者过电压的安全装置,以免过大的电流或电压影响可控硅使用的安全性,尽可能延长可控硅的使用寿命。虽然可控硅有很多优点,但是如果在日常使用中不注意维护,那么必然会影响系统运行的安全性。

另外,可控硅的各种使用性能和温度有密切的关系,所以在可控硅使用时,就必须保障其温度与散热性。冷却散热是可控硅使用的一个前提,为此,需要将允许通过的电流值设定于额定电流的30%左右,能够最大限度地延长可控硅的使用寿命。

可控硅还有一些其他缺点,比如电压、电流有限。能否根据脉冲电路可靠地接触和关闭是可控硅运行的关键。当工作环境超过40℃时,可控硅的额定电流也应该比原来的额定电流稍大;如果冷却温度低于可控硅的额定温度时,可控硅的使用电流应该比额定电流稍微小一些。为了达到这一目的,需要在可控硅上安装过流过压装置,过流过压装置能够在可控硅内部消耗掉过大的电流或电压,使它的工作始终处在额定的电流电压状态,能够极大地减小可控硅的损耗。安装过流过压装置,能够使可控硅过度的电流和电压得到储存,使电流、电压始终保持在正常状态,当电流或者电压过大时即可自动调整,当电流或者电压过小时可以自动补充,这样就会使可控硅始终运行在正常的电流、电压范围内。

交流调压多采用双向可控硅,它具有体积小、重量轻、效率高和使用方便等优点,对提高生产效率和降低成本等都有显著效果。但它也有过载和抗干扰能力差,且在控制大电感负载时会干扰电网和自干扰等缺点。以下讨论可控硅在使用中如何避免上述问题。

1. 灵敏度

双向可控硅是一个三端元件,但我们不再称其两极为阴、阳极,而是称作 T_1 和 T_2 极, G 为控制极,其控制极上所加电压无论为正向触发脉冲或负向触发脉冲,均可使控制极导通,四种条件下双向可控硅均可被触发导通,但是触发灵敏度互不相同,即保证双向可控硅能进入导通状态的最小门极电流 I_{GT} 是有区别的。

2. 可控硅过载的保护

可控硅元件优点很多,但是它过载能力差,即使短时间的过流、过压都会造成元件损坏,因此为保证元件正常工作,须有条件:①外加电压情况下允许超过正向转折电压,否则控制极将不起作用;②可控硅的通态平均电流从安全角度考虑一般按最大电流的1.5~2倍来取;③为保证控制极可靠触发,加到控制极的触发电流一般取大于其额定值。此外,还必须采取保护措施,一般对过流的保护措施是在电路中串入快速熔断器,其额定电流取可控硅电流平均值的1.5倍左右,其接入的位置可在交流侧或直流侧,当在交流侧时额定电流取大些,一般多采用前者。过电压保护常发生在存在电感的电路上,或交流侧出现干扰的浪涌电压或交流侧的暂态过程产生的过压。由于过电压的尖峰高,作用时间短,常采用电阻和电容吸收电路加以抑制。

3. 控制大电感负载时的干扰电网和自干扰的避免

可控硅元件控制大电感负载时会有干扰电网和自干扰的现象,其原因是当可控硅元件

控制一个连接电感性负载的电路断开或闭合时,其线圈中的电流通路被切断,其变化率极大,因此在电感上产生一个高电压,这个电压通过电源的内阻加在开关触点的两端,然后感应电压一次次放电直到感应电压低于放电所必需的电压为止,在这一过程中将产生极大的脉冲束。这些脉冲束叠加在供电电压上,并且把干扰传给供电线或以辐射形式传向周围空间,这种脉冲具有很高的幅度、很宽的频率,因而具有感性负载的开关接点是一个很强的噪声源。

为防止或减小噪声,对于移相控制式交流调压一般的处理方法有电感电容滤波电路、电阻、电容阻尼电路和双向二极管阻尼电路及其他电路。

电感电容滤波电路,由电感电容构成谐振回路,其低通截止频率为 $f=1/2\pi Lc$,一般取数十千赫的低频率。

双向二极管阻尼电路,由于二极管是反向串联的,所以它对输入信号极性不敏感。当负载被电源激励时,抑制电路对负载无影响。当电感负载线圈中电流被切断时,则在抑制电路中有瞬态电流流过,因此就避免了感应电压通过开关接点放电,也就减小了噪声。但是要求二极管的反向电压应比可能出现的任何瞬态电压高,另外,额定电流值要符合电路要求。

电阻电容阻尼电路,利用电容电压不能突变的特性吸收可控硅换向时产生的尖峰状过电压,把它限制在允许范围内。串接电阻在可控硅阻断时防止电容和电感振荡,起阻尼作用;另外,阻容电路还具有加速可控硅导通的作用。

另外一种防止或减小噪声的方法是利用通断比控制交流调压方式,其原理是采用过零触发电路,在电源电压过零时就控制双向可控硅导通和截止,即控制角为零,这样在负载上得到一个完整的正弦波;但其缺点是仅适用于时间常数比通断周期大的系统,如恒温器。

5.4.3 可控硅元件的保护措施

可控硅元件的主要弱点是承受过电流和过电压的能力很差,即使短时间的过流和过电压,也可能导致可控硅元件的损坏,所以必须对它采用适当的保护措施。

1. 过电流保护

可控硅元件出现过电流的主要原因是过载、短路和误触发。过电流保护有以下几种:

(1) 快速熔断器。快速熔断器中的熔丝是银质的,只要选用适当,在同样的过电流倍数下,它可以在可控硅元件损坏前先熔断,从而保护了可控硅元件。

(2) 过电流继电器。当电流超过过电流继电器的整定值时,过电流继电器就会动作,切断保护电路。但由于继电器动作到切断电路需要一定时间,所以只能用作可控硅元件的过载保护。

(3) 过载截止保护。利用过电流的信号将可控硅元件的触发信号后移,或使可控硅元件的导通角减小,或干脆停止触发保护可控硅元件。

2. 过电压保护

过电压可能导致可控硅元件的击穿,其主要原因是电路中电感元件的通断、熔断器熔断或可控硅元件在导通与截止间的转换。对过电压保护可采用阻容保护措施,即电阻和电容串联后,接在可控硅元件电路中的一种过电压保护方式,其实质是利用电容器两端电压不能突变和电容器的电场储能以及电阻是耗能元件的特性,把过电压的能量变成电场能量储存在电场中,并利用电阻把这部分能量消耗掉。

5.5 可控硅应用

双向可控硅元件可广泛用于工业、交通、家用电器等领域,实现交流调压、电机调速、交流开关、路灯自动开启与关闭、温度控制、台灯调光、舞台调光等多种功能,它还被用于固态继电器(SSR)和固态接触器电路中。图 5.4 所示是由双向可控硅构成的接近开关电路。

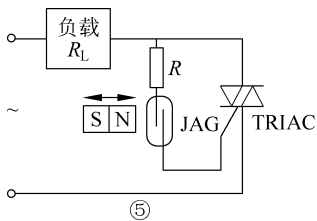


图 5.4 接近开关电路

图中, R 为门极限流电阻, JAG 为干式舌簧管。平时 JAG 断开, 双向可控硅 TRIAC 也关断。仅当小磁铁移近时 JAG 吸合, 使双向可控硅导通, 将负载电源接通。由于通过舌簧管的电流很小, 时间仅几微秒, 所以开关的寿命很长。

现在可控硅应用市场相当广阔, 在自动控制领域、机电领域、工业电器及家电等方面都有可控硅的身影。更重要的是, 可控硅应用相当稳定, 比如用于家电产品中的电子开关, 可以说是鲜少变化的。无论其他的元件怎么变化, 可控硅的变化都是不大的, 这相当于扩大了可控硅的应用市场, 减少了投资的风险。随着消费类电子产品的热销, 更为可控硅提供了销售空间。现在常见的可优化消费电子产品性能的新型标准三端双向可控硅开关元件, 采用先进的平面硅结构设计, 具有很高的可靠性, 加上在导通状态下的损耗最多仅为 1.5V, 因而可达到高效率。这种产品的目标应用领域包括洗衣机、吸尘器、调光器、遥控开关和交流电机控制设备。

过零触发型交流固态继电器(AC-SSR)的内部电路, 主要包括输入电路、光电耦合器、过零触发电路、开关电路(包括双向晶闸管)、保护电路(RC 吸收网络)。当加上输入信号 V_i (一般为高电平), 并且交流负载电源电压通过零点时, 双向可控硅被触发, 将负载电源接通。固态继电器具有驱动功率小、无触点、噪声低、抗干扰能力强、吸合/释放时间短、寿命长等优点, 能与 TTL/CMOS 电路兼容, 可取代传统的电磁继电器。

5.6 小结

可控硅器件具有体积小、效率高、寿命长等优点。在自动控制系统中, 可作为大功率驱动器件, 实现用小功率控件控制大功率设备。它在交直流电机调速系统、调功系统及随动系统中得到了广泛的应用, 为推动绿色科技创新, 促进绿色发展, 贯彻新发展理念, 构建新发展格局提供了有力支持。在高压大功率器件中有着广阔的应用前景, 也特别适合作交流无触点开关使用, 这为夯实科技基础, 提高社会生产力, 建设现代化经济体系, 科技兴国提供战略支撑。

参 考 文 献

- [1] 袁寿财. IGBT 场效应半导体功率器件导论[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 周志敏, 周纪海, 纪爱华. IGBT 和 IPM 及其应用电路[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [3] 王树振, 单威, 宋玲玲. IGBT 绝缘栅双极型晶体管发展简述[J]. 微处理机, 2008, 4(2): 41-44.

- [4] 张玉玲. 绝缘栅双极晶体管(IGBT)低温特性研究[D]. 北京: 中国科学院电工研究所, 2005.
- [5] 王可恕. 绝缘栅双极晶体管(IGBT)[J]. 电子设计工程, 1995(7): 35-42.
- [6] 吴滔. 绝缘栅双极晶体管(IGBT)的研究与设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [7] 成世明. 电子器件模拟软件中的 MOSFET 建模[D]. 长沙: 湖南大学, 2001.
- [8] 刘恩峰, 刘晓彦, 韩汝琦. 半导体器件模技术的研究[J]. 微电子学, 2002, 32(3): 206-209.
- [9] ATLAS Users Manual[M]. SILVACO International, Inc., 2007.
- [10] ATHENA Users Manual[M]. SILVACO International, Inc., 2007.
- [11] 吴昊, 杨霏, 于坤山. 1000V4H-SiCJBS 功率二极管元胞[J]. 微纳电子技术, 2013, 11: 695-700.
- [12] 殷丽, 王传敏. 超低导通电阻 RON 的 SiC 沟槽器件[J]. 电力电子, 2012, 5: 49-52.
- [13] Wang Li, Hu Xiaobu, Xu Xiangang, et al. Synthesis of High Purity SiC Powder for High-resistivity SiC single Crystals Growth[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2007, 1: 118-122.
- [14] 郝跃, 彭军. 碳化硅宽禁带半导体技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [15] 闫新强. 碳化硅外延材料生长温度场模拟和表征技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
- [16] Madar R. Materials science: silicon carbide in contention[J]. Nature, 2004, 430: 974-975.
- [17] 石绪忠. SiC 半导体材料的特性及其在舰船上的应用[J]. 船电技术, 2010, 30(6): 47-50.
- [18] 丁瑞雪. 碳化硅 MOS 器件电学特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
- [19] 张有润. 4H-SiCBJT 功率器件新结构与特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [20] 张波, 邓小川, 张有润, 等. 宽禁带半导体 SiC 功率器件发展现状及展望[J]. 中国电子科学研究院学报, 2009, 4(2): 111-118.
- [21] 李宇柱. SiC 电力电子技术综述[J]. 固体电子学研究进展, 2011, 31(3): 213-217.
- [22] Francis K Chai, Bruce OdekirK, Ed Maxwell, et al. ASiC static induction transistor(SIT) technology for pulsed RF power amplifier[C]//Proceeding of the 23rd International Symposium on Power Semiconductor Devices, 2011: 300-303.
- [23] Ghandi R, Buono B, Domeij M, et al. High-Voltage (2. 8kV) Implantation-Free 4H-SiC BJTs with Long-Term Stability of the Current Gain[J]. IEEE Trans., 2011, 58(8): 2665-2669.
- [24] 王言虹. 增强型 AlGaIn/GaN 槽栅 HEMT 器件的仿真研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [25] 张小玲, 吕长治, 谢雪松, 等. AlGaIn/GaN HEMT 器件的研制[J]. 半导体学报, 2003, 24(8): 847-848.
- [26] 孙会. GaN HEMT 器件建模与仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [27] 冯龙, 王燕, 余志平, 等. AlGaIn/GaN 材料 HEMT 器件优化分析与 I-V 特性[J]. 半导体学报, 2004, 25(10): 1285-1290.
- [28] 刘畅. AlGaIn/GaN 高电子迁移率晶体管 TCAD 仿真研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [29] Mishra U K, Likun S, Kazior T E, et al. GaN-based RF power devices and amplifiers[J]. Proceedings of the IEEE, 2008, 96(2): 287-305.
- [30] Wu Y F, Moore M, Saxler A, et al. 40-W/mm double field-plated GaN HEMTs [C]//Device Research Conference, 64th. IEEE, Park, Pennsylvania, 2006: 151-152.
- [31] Eastman L F, Mishra U K. The toughest transistor yet(GaN transistors)[J]. Spectrum, IEEE, 2002, 39(5): 28.
- [32] Javorka P, Alam A, Fox A, et al. AlGaIn/GaN HEMTs on silicon substrates with f_t of 32/20GHz and f_{max} of 27/22GHz for 0. 5/0. 7 μ m gate length[J]. IEEE Trans Electron Let, 2002, 38: 288.
- [33] Rashmi, Kranti A, Haldar S, et al. An accurate charge control model for spontaneous and piezoelectric polarization dependent two-dimensional electron gas sheet charge density of lattice-mismatched AlGaIn/GaN HEMTs[J]. Solid-State Electron, 2002, 46: 621.
- [34] 许其品, 朱晓东, 许其质. 可控硅整流桥故障对励磁系统的影响[J]. 水电厂自动化, 2005, 03.
- [35] 边凯, 陈维江, 李成榕, 等. 架空配电线路雷电感应过电压计算研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 31.

- [36] 李小龙,冯德仁,马丽华,等.基于 DSP 技术的重频脉冲源及软件加固[J].核技术,2012,10.
- [37] 冯德仁,罗进,徐笑娟,等.氢闸流管开关和感应叠加技术重频脉冲源的实验研究[J].中国电机工程学报,2012,10.
- [38] 李海泉,李健.计算机系统安全技术[M].北京:人民邮电出版社,2000.
- [39] 戴海尊,史嘉权.微型计算机技术及应用[M].北京:清华大学出版社,1996.
- [40] Wang Z H. On-chip ESD protection IC design perspective[M]. New York: Kluwer Academic,2002.
- [41] Wang A Z,Chen H T. On a dual-polarity on-chip electrostatic discharge protection structure[J]. IEEE Transon ED,2001,48(5): 978-984.
- [42] Zhu K H, YuZ G, Ddng S R, et al. Design analysis of a novel low riggering voltage dual direction SCR ESD device in 0.18 μm mixed mode RF CMDS technology[J]. J of Semiconductors,2008,29(11): 2164-2168.