

中等专业学校教学用书

电力拖动自动控制系统

冶金工业出版社

中等专业学校教学用书
电力拖动自动控制系统
吉林冶金电气化学校 王会群、刘天赐 主编

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74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 39 1/4 字数 943 千字

1980年12月第一版 1980年12月第一次印刷

印数00,001~14,600册

统一书号: 15062·3507 定价 3.10 元

前 言

本书是根据冶金工业部1978年制订的冶金中专电气化专业“电力拖动自动控制系统”课程教学大纲编写的。全书共分三篇：第一篇，可控硅电路，介绍可控硅供电系统主电路和触发电路的基本工作原理和主要参数计算方法；第二篇为可控硅控制系统，介绍可控硅自动调速系统及其静态特性、动态特性，可控硅系统的工程最佳控制原理及其参数计算方法。两篇合起来构成可控硅电力拖动系统的完整内容，这是本书的重点；第三篇为其它电磁元件控制的电力拖动系统，扼要地介绍继电器-接触器控制系统；交磁放大机控制系统和磁放大器。

学习本书需要具备高等数学、拉氏变换、电子技术基础以及电力拖动基础等方面的基础知识。由于本书的实用性较强，也可供从事冶金车间、冶金矿山电力拖动的工程技术人员参考。

本书由吉林冶金电气化学校王会群、刘天赐，包头钢铁学院陈观顺，长沙冶金工业学校宁志强，昆明冶金工业学校胡兴珉，鞍山冶金工业学校吴多友等同志编写，最后由王会群、刘天赐二人整理定稿。由于编者能力与教学经验有限，疏漏及错误之处在所难免。热忱希望读者给我们提出宝贵意见。

编 者

一九七九年二月

绪 论

人类应用电力作为生产动力,迄今仅有百余年的历史。十九世纪末叶,可供实用的交流与直流电动机相继出现,从此才用电动机逐步代替了蒸气机。当时电动机仅作为生产的动力,采取成组拖动,即由一台电动机通过天轴、皮带拖动许多生产机械。这样,当然无法实现电力拖动的自动控制。不久,人们就发现直流电力拖动比其它类型的动力源泉调速简单、经济,从而简化了机械结构,并且可以用极小的功率去控制很大的功率输出。因而,对电力拖动的研究引起人们的重视。本世纪初,在电机可逆性原理基础上,出现了直流发电机—电动机拖动系统,成组拖动逐渐过渡到单机拖动和多机拖动。第一次世界大战后,出现了电机放大机这样的控制元件,同时,将蒸气机时代出现的古典自动调节理论,开始应用于电力拖动自动控制领域。本世纪三十年代,应用反馈原理构成的恒值电力拖动系统(恒速、恒张力等)和随动电力拖动系统已在冶金、机械制造、交通运输和军事装备上大量应用。同时,电力拖动及其控制技术逐渐从电机学领域中分离出来,形成一支专门的技术科学——电力拖动自动控制。四十年代,随着电真空技术的发展,新型的大功率可控水银整流器问世,水银整流器给电动机供电已经超越了传统的电力拖动概念,形成离子拖动的新概念。水银整流器是一种静止的非电磁变换器件,它不经过机械系统直接把交流电能变换成电压可调的直流电能,功率放大倍数大,电磁惯性小。但水银整流器也有致命的缺点,供电可靠性差,需要的辅助设备多,维护工作量大而且蒸发出来的汞蒸气损害工人的健康。所以,离子拖动刚刚兴起十余年光景就被可控硅整流装置淘汰了。可控硅是五十年代末期出现的大功率固体可控整流器件,它具有水银整流器相同的可控整流特性,却完全克服了水银整流器的缺点。它的优点是功率大、体积小、成本低、寿命长和对环境无污染等。可控硅的出现,为电力拖动自动控制系统开辟了新纪元,受到人们的普遍重视。近二十年来,国内外无论是在器件的研制和自动控制系统的应用方面,都得到了突飞猛进的发展。目前我国冶金企业中从矿井提升、运矿、选矿、高炉卷扬、炼钢、铸锭到轧机的主副传动可控硅供电和可控硅励磁系统都有应用。

现代钢铁工业生产的特点是:设备容量越来越大,产量越来越高,质量要求越来越严,劳动生产率也迅速提高……。近30年来,连轧机的轧制速度提高近四倍,全员劳动生产率提高30余倍,生产成本大幅度下降,这一切都与冶金生产实现了综合自动化有直接关系。现代钢铁生产是以采用电子计算机进行生产过程闭环最优值控制和自动化生产管理为主要标志。这就要求冶金生产线上各单机自动化水平进一步提高,调节的快速性与准确性更加严格。因此,只有将可控硅技术与近代电子技术等先进技术,应用于电力拖动自动控制系统,才能适应高速度连续生产的需要。所以,可控硅电力拖动自动控制系统已成为生产过程自动化不可缺少的重要一环。

全书共分三篇:第一篇为可控硅电路,第二篇为可控硅自动控制系统,两篇合起来构成可控硅自动调速系统的完整内容;第三篇为其它控制元件和系统。为适应冶金生产现代化的要求,应使学生重点掌握可控硅自动调速系统的基本工作原理(包括主电路、触发电

路、典型自动调节系统的结构图、静特性分析、动特性分析和校正方法),为从事冶金企业可控硅自动调速系统的安装、调整、维护和局部设计打下基础。第三篇介绍继电接触控制系统、交磁放大机控制系统和磁放大器的工作原理,为从事冶金车间这一部分控制系统的安装、调试和维修准备必要的知识。

考虑到为各种不同类型冶金厂矿培养人材的需要,带*的内容可根据各地区的具体情况有选择地进行讲授。

学习本课程要贯彻理论联系实际的原则,培养分析问题和解决问题的能力。对练习题、实验、实习和设计等训练必须全面重视。由于冶金企业电气化、自动化技术的发展一日千里,本书不能全面反映出日新月异的新成就,因此,在学习本课程时,还应密切注意国内外的动态,以便把基础理论与最新技术结合起来。

目 录

绪 论

第一篇 可控硅电路

第一章 可控硅整流元件	(1)
第一节 可控整流的基本概念	(1)
第二节 可控硅的结构、工作原理及特性	(2)
第三节 可控硅的主要参数及其冷却方式	(11)
第二章 可控整流电路	(21)
第一节 单相整流电路	(21)
第二节 三相零式整流电路	(35)
第三节 三相桥式整流电路	(45)
*第四节 双反星形整流电路	(59)
*第五节 六相桥全控十二相整流电路	(68)
第六节 变压器漏抗对整流电压的影响	(78)
第七节 电动机由可控硅供电的机械特性	(82)
第八节 整流变压器的联接	(93)
第三章 可控硅-电动机可逆电路	(95)
第一节 有源逆变电路	(95)
第二节 有环流可逆电路	(105)
第三节 无环流可逆电路	(121)
第四节 可控整流的功率因数及其改善	(128)
第四章 可控硅主电路元件选择与计算	(135)
第一节 可控硅的保护和串并联应用	(135)
第二节 可控硅容量选择	(159)
第三节 整流变压器参数计算	(163)
第四节 电抗器电感量计算	(168)
附录一、整流变压器的结构计算	(177)
附录二、电抗器的结构计算	(180)
附录三、各种整流线路主要参数	(190)
第五章 可控硅触发电路	(193)
第一节 概述	(193)
第二节 单结晶体管及其触发电路	(195)
第三节 正弦波同步的晶体管触发电路	(206)
第四节 用控制电压给电容充电的锯齿波触发电路	(213)
第五节 其它类型的触发电路	(224)
一、带小可控硅放大的正弦波同步触发电路	(224)
二、锯齿波同步的脉冲列触发电路	(228)
三、带固体组件的正弦波同步触发电路	(235)

四、数字式触发电路简介	(242)
第六节 输出级和脉冲变压器	(246)

第二篇 可控硅自动控制系统

第六章 自动控制系统的静态特性	(255)
第一节 自动控制的基本概念	(255)
第二节 转速负反馈自动调速系统	(258)
第三节 其它反馈在自动调速系统中的应用	(262)
第四节 自动调速系统的静态结构图	(268)
第五节 无静差调速系统	(278)
第七章 自动控制系统的动态特性	(287)
第一节 典型环节的微分方程和传递函数	(287)
第二节 典型环节的频率特性	(298)
第三节 动态结构图	(305)
第四节 自动调节系统的稳定性	(316)
第五节 代数稳定判据	(322)
*第六节 应用对数频率特性分析稳定性	(326)
第七节 电子调节器	(339)
*第八节 动态校正	(353)
第八章 可控硅自动调速系统	(364)
第一节 逻辑无环流电枢可逆自动调速系统	(365)
第二节 可控环流电枢可逆系统	(382)
第三节 错位无环流可逆系统	(386)
第四节 非独立励磁控制系统	(400)
*第五节 可控硅串级调速系统	(414)
第九章 可控硅自动调速系统的“最佳”控制	(427)
第一节 “最佳”控制的概念	(428)
第二节 二阶最佳闭环系统	(431)
第三节 三阶最佳闭环系统	(446)
第四节 反馈回路的惯性滞后对最佳参数的影响及其补偿	(468)
第五节 加串并联校正的二阶最佳闭环系统	(474)
第六节 直流电动机电枢电流断续对调节系统的影响	(482)
第十章 可控硅逻辑无环流自动调速系统的分析	(494)
第一节 电路图与结构图、系统的结构与主要环节分析	(495)
第二节 主回路元件选择与变压器、电抗器参数计算	(515)
第三节 双闭环校正装置的参数选择	(518)

第三篇 其他控制元件和电路

第十一章 继电器和接触器	(528)
第一节 触头	(528)
第二节 电磁机构	(533)
第三节 电磁式接触器	(540)

第四节	电磁式继电器	(543)
第五节	继电器和接触器型号简介	(549)
第十二章	继电接触器控制系统	(555)
第一节	控制电路的绘图规则和符号	(555)
第二节	鼠笼型异步电动机控制	(561)
第三节	绕线型异步电动机的控制	(569)
第四节	直流电动机控制	(578)
第十三章	交磁放大机控制系统	(584)
第一节	交磁放大机的工作原理	(584)
第二节	带转速负反馈的调速系统	(589)
第三节	电压负反馈和电流截止负反馈系统	(594)
第四节	交磁放大机系统的最佳过渡过程	(597)
第十四章	磁放大器	(599)
第一节	磁放大器的物理基础	(599)
第二节	理想磁放大器的工作原理和基本性能	(605)
第三节	磁放大器的偏移和反馈	(610)
第四节	直流电流互感器、高频磁放大器	(616)

第一篇 可控硅电路

第一章 可控硅整流元件

第一节 可控整流的基本概念

一、基本概念

在电子技术基础中我们已经学过二极管整流电路，它输出的直流电压大小一般是不可调节的。在现代工业生产中往往需要电压可以调节的直流电源，例如直流电动机的调速、发电机的励磁调节、电解、电镀等等。

为了使整流器输出的直流电压能够调节，可以采取下述两种方法：一种是用改变整流器输入端交流电源电压的幅值来实现改变整流器输出端直流电压的大小，其原理如图1-1-1 (a) 所示；另一种是利用可控整流元件，将整流器输出的直流电压波形可控制地加以切割，从而使输出的直流电压平均值大小改变，其原理如图1-1-1 (b) 所示。由于图1-1-1

(a) 所示的电路具有机械惯性，不能实现快速调节以及所需的控制功率较大等缺点，不为实际所采用。在生产实际中所用的调压整流电源均属图 1-1-1 (b) 所示那样的可控整流电路。本篇中所讨论的即为这种可控整流电路。

二、可控整流元件

作为可控整流电路中的关键元件是可控整流元件。从电子技术发展的历史来看，可控整流元件经历了：闸流管、引燃管、可控水银整流器等离子可控整流器件阶段而进入了近代半导体大功率可控整流元件的新纪元。这种半导体大功率可控整流元件就是可控硅整流元件，简称为“可控硅”（又叫“晶闸管”），记作SCR。

可控硅自从1957年首次被研制出来至今不过只有二十多年的历史，在这期间，元件的制造和应用技术都发展得极快，目前已进一步研制成实用的双向可控硅、控制极可关断可控硅以及快速可控硅等派生元件。目前可控硅元件在冶金、机械制造、铁路运输以及石油、化工和国防工业等许多方面都得到广泛地应用，显示出极大的优越性。

可控硅整流元件，较其它类型的旧式可控整流元件具有体积小、重量轻、效率高、寿命长、运行中无噪声、无毒、无磨损、不需预热，使用维修方便等显著优点。

可控硅与普通硅整流二极管相比较，由于它具有可控整流的功能，因此利用它可以实现一系列交、直流电能形式间的特殊转换，例如：

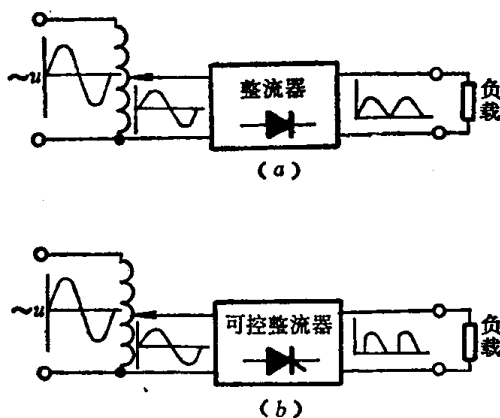


图 1-1-1 两种调压整流电路

1. 可控整流：将幅值一定的交流电能变成电压可调的直流电能，被广泛应用于交、直流电动机无级调速、同步机励磁、电解、电焊和电镀等电源中。

2. 逆变：将直流电能变成交流电能，应用于绕线型感应电动机的串级调速、直流电动机的再生制动等。

3. 变频：把交流从一种频率转变为另一种频率。例如用作中频电源和控制交流感应电动机的变频调速。

4. 交流调压：将某种交流电压变成另一种交流电压，取代了用硅钢片和铜线制成的调压器和饱和电抗器等。

5. 交、直流无触点开关：能快速接通或断开大功率的电路，又不产生火花，既防爆又防潮而且耐震，它可以取代防爆开关、接触器、有触点的继电器等电器。

利用可控硅作为可控整流元件虽然优点甚多，但可控硅也有不足之处，属于器件本身方面的有：它与其它半导体器件一样，过载能力差，无论是过电压，还是过电流都容易引起损坏，而且抗干扰能力也较差，因此需要从线路上采取相应的保护措施使线路复杂化。此外，在提高应用频率以及提高单个元件的电压、电流容量等方面，可控硅元件都面临着许多新课题。属于在应用技术方面的有：由于可控整流、逆变将使交流侧的电流内出现大量谐波，这些谐波对电网产生不良的影响；此外在低压运行时，功率因数较低，这也是一个较大的缺点。因此在大功率整流电路中，这些问题都要予以足够的重视，采取措施加以解决。

第二节 可控硅的结构、工作原理及特性

一、可控硅的结构

1. 外形和符号

目前，可控硅元件有两种形式，一种是螺栓型的，另一种是平板型的，其外形如图

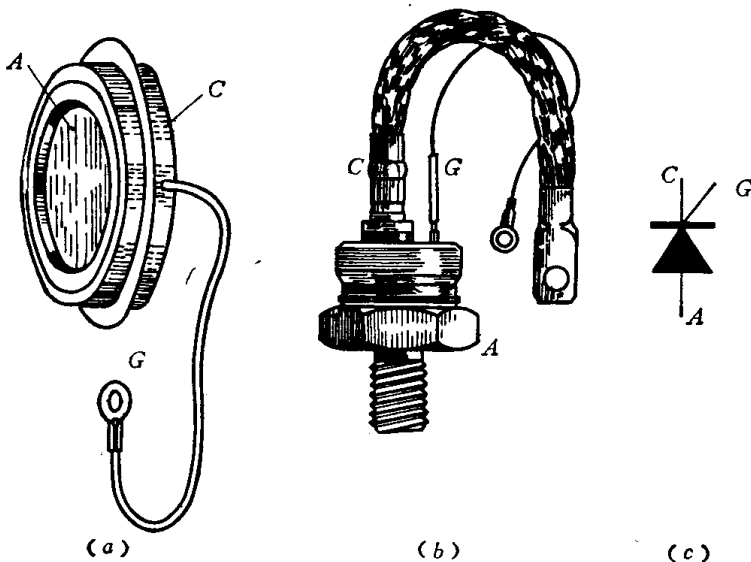


图 1-2-1 可控硅外形和符号

1-2-1 所示。它们均有三个电极，分别用符号 A 表示它的阳极、符号 C 表示它的阴极、符号 G 表示它的控制电极。对于：

螺栓型元件——有螺栓的一端是阳极，此端可装散热器，另一端有二根电极，粗引线是阴极，细引线就是控制极。

平板型元件——中间的金属环是控制极，离控制极较近的一面是阴极，较远的一面是阳极（也有

的元件金属环与两个极面距离相等，这时金属环上的引线焊在靠近阴极一侧）。

在电路图上则用图1-2-1 (c) 所示的符号来表示可控硅。

平板型元件比螺栓型元件具有如下的优点：它可以两面散热，即比螺栓型元件的散热面积大一倍。因此，在同样散热条件下它可以使元件的电流容量大大增加，这种结构对大功率元件尤为适宜，另外，它是用压接方法引出电极，并改进了管芯引线方式，从而提高了元件的成品率和改善了元件的性能，同时也提高了元件的机械强度和耐震、耐冲击的能力。此外，还具有体积小、重量轻，可以大量节约紫铜等优点。因此，目前大容量(200A以上)的可控硅均制成平板型结构。下面就来介绍上述两种可控硅元件的内部构造。

2. 内部结构

(1) 螺栓式可控硅元件 螺栓型可控硅元件的内部结构如图1-2-2(a)、(b)所示。

螺栓型可控硅元件的结构大致可分为：管芯、电极引线、管壳和散热器几部分。其整体结构如图1-2-2(a)所示。

其管芯则如图1-2-2(b)所示，在N型硅基体两面扩散铝(P型杂质)制作P型层以形成PNP结构，然后在其中一面的大部分区域，放置金锑合金箔(N型杂质)作阴极，在同一面的另一小区域放置金硼钨作控制极。其反面整个平面上放置铝(P型金属片)作为阳极的欧姆接触，经过合金化热循环，即形成PNPN四层结构。

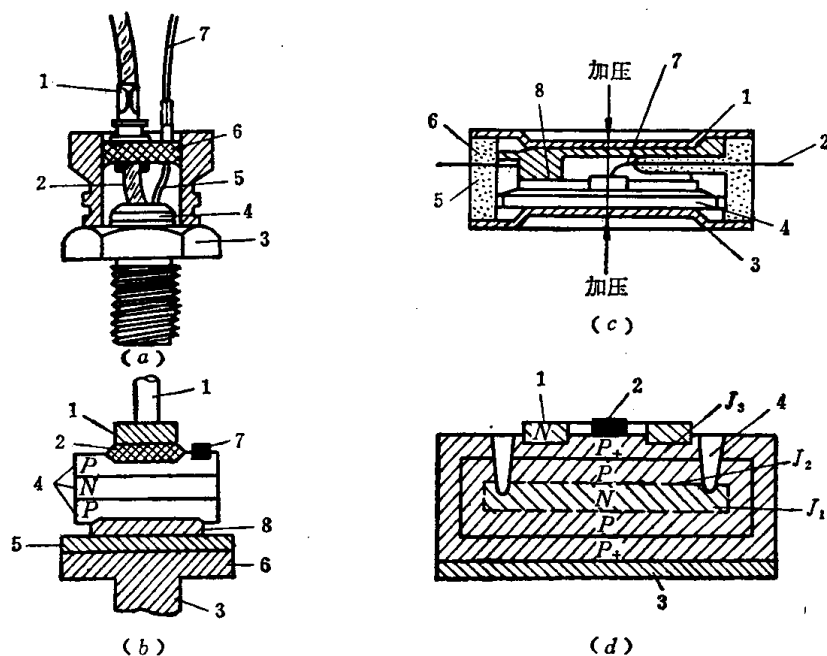


图 1-2-2 螺栓式和平板式可控硅内部结构

(a) 螺栓式可控硅结构

1—阴极；2—阴极内引线；3—阳极铜底座；4—管芯；5—控制极内引线；6—玻璃绝缘子；7—控制极

(b) 螺栓式可控硅管芯

1—阴极；2—金锑合金；3—阳极；4—硅片；5—钼；6—铜；7—控制极（金硼钨片）；8—铝

(c) 平板式可控硅结构

1—上金属件（阴极）；2—控制极金属件（氩弧焊）；3—下金属件（阳极）；4—管芯；5—下陶瓷片；6—上陶瓷片

(d) 平板式可控硅管芯

1—阴极；2—控制极；3—阳极；4—分割沟槽

从上边的N型硅片中引出阴极，第二层P型硅片中经金硼钨引出控制极，正面的P型硅片通过钼片与阳极底座相连。

整个管芯被密封在金属外壳里面，以防漏气；底座由铜制成螺栓形状，以便安装散热器。

(2) 平板式可控硅元件 平板式可控硅元件的内部结构和管芯如图1-2-2(c)(d)所示。这种元件的管芯结构较螺栓式更为合理，它的控制极位于管芯的中央，可以承受较大的电流上升率，同时管芯封装采用压接法，增大了阴极引线的接触面积，可以得到较好的电流扩展条件。特别是近年来大功率平板型元件采用了双扩散工艺制造管芯的三个PN结，这样制造的管芯允许大大提高电极的接触压力，从而大大改善了电流分配状况，减少接触损耗和热阻；加之平板型元件是两面散热的，因此它的电流容量比起螺栓式元件可以大幅度提高，故500 A以上的元件都制成平板式的。

散热器的接触压力大小及其分布是否均匀对元件的负荷能力有密切关系，故元件出厂时，散热器同元件都装配成为一个整体。在使用时用户不应无故拆动已装配好的压接散热器。

从可控硅管芯结构可以看出，它是由三个PN结正反串联起来组成，其结构原理如图1-2-3所示。

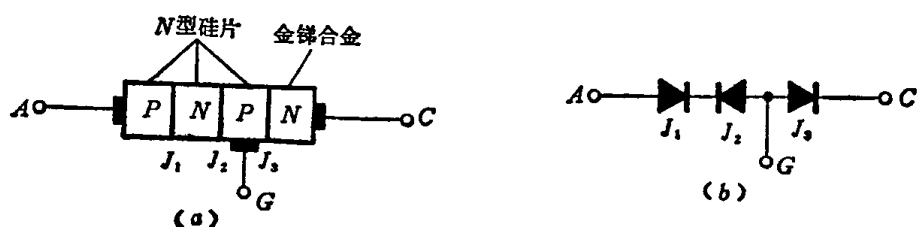
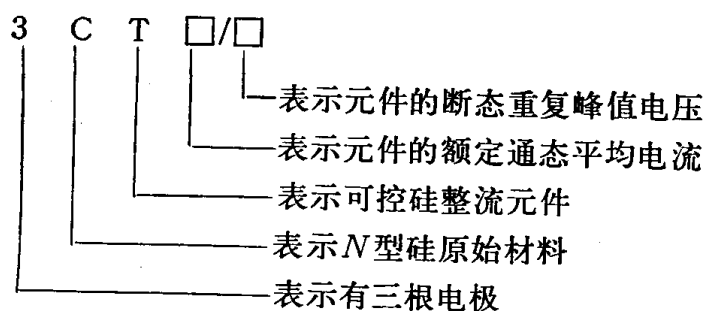


图 1-2-3 可控硅中的P-N结

3. 国产可控硅元件的型号

目前，国产可控硅元件是按国家标准命名为3CT系列，元件型号及所代表的意义如下：



如3CT200/750表示通态平均电流为200安，断态重复峰值电压为750伏的可控硅整流元件。

二、可控硅的工作原理

1. 可控硅导通与关断的规律

我们先来做一个实验，观察一下可控硅导通与关断的客观规律。实验电路如图1-2-4所示，其中SCR为可控硅，主回路由电源 E 供电，倒向开关 K_2 是用来改变加在可控硅阳极和阴极之间的电压极性的，主回路中串接一个灯泡用来判别可控硅导通或关断。控制回路由电源 E_c 供电，操作倒向开关 K_1 便可改变加在可控硅控制极和阴极之间的电压极性。

实验程序如下：

可控硅导通实验：

(1) 阳极接电源负极，阴极接电源正极

将图1-2-4中开关 K_2 合在左侧。

控制极不加电压，将 K_1 断开；

控制极加正向电压，将 K_1 合在左侧；

控制极加反向电压，将 K_1 合在右侧。

上列各项实验结果灯都不亮，说明可控硅的阳阴极间加反向电压，不论控制电压如何改变，可控硅均不会导通。

(2) 阳极接电源正极，阴极接电源负

极

将图1-2-4中开关 K_2 合在右侧。

控制极不加电压，灯不亮，可控硅不导通；

控制极加反向电压，灯不亮，可控硅不导通；

控制极加正向电压，灯亮，说明主回路中有电流通过，即可控硅导通了。

上列各项实验说明当可控硅的阳阴极间和控制极、阴极间同时都加正向电压时，可控硅才能导通。

(3) 可控硅导通后，控制极作用的实验

可控硅导通后，撤去控制极电压（将 K_1 开断）灯仍亮；

可控硅导通后，给控制极施加反向电压（将 K_1 合向右侧）灯仍亮。

上例实验说明，可控硅一旦导通后，控制极就失去其控制作用。

可控硅关断实验。

可控硅导通后，撤去控制极电压，通过以下各项实验：

降低阳、阴极间正向电压，使可控硅主回路的电流值递减到某一最低值（即所谓的维持电流值）时，再重新恢复阳、阴极间正向电压，灯不再亮；

撤去阳、阴极正向电压（开断 K_2 ， $U_{AC}=0$ ），灯熄灭；

阳、阴极间加反向电压（开关 K_2 由右侧合向左侧），灯熄灭。

通过以上各项实验我们从中可以得出如下几点结论：

可控硅导电的基本特点：

- 1) 可控硅具有单向导电的特性；
- 2) 可控硅的导通是可以通过控制极加以控制的。

可控硅导通的条件：

- 1) 阳、阴极间必须施加正向电压；
 - 2) 控制极、阴极之间必须施加具有一定功率的正向电压，这个电压一般称为触发信号或触发电压。
 - 3) 阳、阴极间通过的电流必须大于维持电流值。
- 以上三个条件必须同时具备，缺一不可。

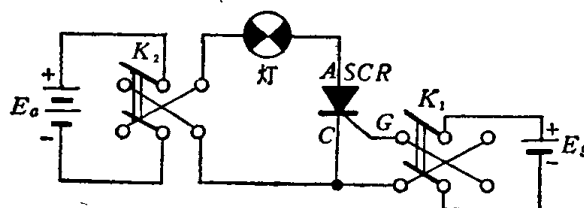


图 1-2-4 可控硅通断实验

可控硅关断的条件:

- 1) 阳、阴极间通过的电流小于维持电流值;
- 2) 阳、阴极间施加反向电压;
- 3) 阳、阴极间施加的正向电压减小为零。

以上三个条件中, 只要具备其中之一, 就可使导通的可控硅关断。

为什么可控硅能具有上述可以控制的整流特性呢? 为了回答这个问题, 下面就来分析可控硅的工作原理。

2. 可控硅的工作原理

在说明可控硅结构时, 已经明了可控硅是由三个PN结串联起来组成的, 当考虑它们之间的相互作用和内在联系时, 可将这三个结看成一对互补的晶体三极管, 一个是PNP型管, 另一个是NPN型管如图1-2-5所示。

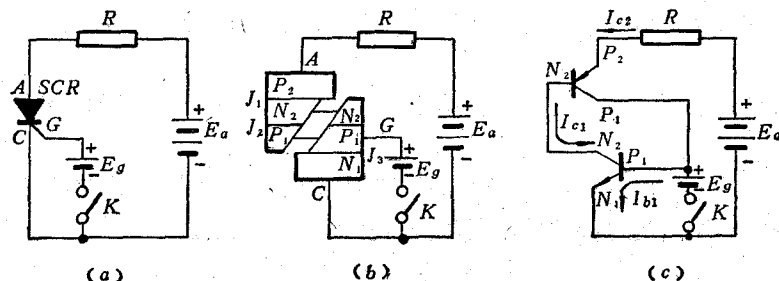


图 1-2-5 可控硅的工作原理

图中 $P_2N_2P_1$ 、 $N_2P_1N_1$ 可视为两个三极管, 中间 N_2P_1 部分为两个三极管所共有。这两个三极管的集电极同时又是对方的基极。图中可控硅阳极A接电源 E_a 正极, 阴极C接负极, 控制极G——阴极C间接正向电源 E_g 。当合上开关K时, 两只三极管都处于放大工作状态, 对 $N_2P_1N_1$ 管, 基极 P_1 的电位高于发射极 N_1 , 故流过基极电流 I_{b1} (方向从 $P_1 \rightarrow N_1$) 经放大, 在集电极 N_2 就流过电流 $I_{c1} = \beta_1 \cdot I_{b1}$ (β_1 为 $N_2P_1N_1$ 管的共射极电流放大系数)。这个 $\beta_1 I_{b1}$ 又恰是 $P_2N_2P_1$ 管的基极电流, 同样, 在 $P_2N_2P_1$ 管的集电极也形成一个 $\beta_2 \beta_1 I_{b1}$ 的电流 (β_2 为 $P_2N_2P_1$ 管的共射极电流放大系数), 当 $\beta_1 \beta_2 > 1$ 时, 这个电流又流入 $N_2P_1N_1$ 的基极再进行放大, 这样就形成了下列的正反馈过程:

$$\begin{array}{c} I_{b1} \xrightarrow{\beta_1} I_{c1} \xrightarrow{\beta_2} I_{b2} \xrightarrow{\beta_1} I_{c2} \xrightarrow{\beta_2} I_{b3} \dots \\ \uparrow \quad \quad \quad \text{正反馈} \quad \quad \quad \uparrow \end{array}$$

按此循环下去, 就使两只假想的三极管很快进入饱和导通状态, 表现为可控硅导通。由上述可见可控硅由阻断变为导通是通过控制 J_3 的电流来使 J_2 开通的, 这个导通过程是在极短的时间内完成, 一般不超过几微秒。上述的基极电流 I_{b1} 也就是可控硅的控制极电流 I_g , 通称为触发电流。

由上述可控硅导通过程, 可以清楚地看出, 由于可控硅内部正反馈作用, 它一旦导通后就使 $I_{c2} \gg I_{b1}$ (比 I_{b1} 大 $\beta_1 \cdot \beta_2$ 倍), 故此时即使撤去控制电源甚至使控制电压反向也不致于影响可控硅的继续导通, 即此刻控制极已经失去了对可控硅的控制作用, 直到 I_{c2} 降到维持电流以下时, 元件才能关断。

上面讲的是可控硅的正常工作情况。但是，当正向阳极电压过高或上升得太快时，即使未加控制电压，可控硅也会导通，从而造成误动作；当反向阳极电压过高时，可控硅也会突然反向击穿，造成永久性破坏，为使可控硅正常工作，上述情况必须避免。

三、可控硅的特性

通过以上对可控硅工作情况的分析，导通和关断是可控硅正常工作的主要矛盾，它是随阳极-阴极间的电压、阳极电流、控制极电流和管芯温度等条件相互转化的。在实际应用中，通过实验作出阳极伏安特性和控制极伏安特性，来进一步描绘可控硅导通和关断之间相互转化的外部条件。

1. 阳极伏安特性

把可控硅控制极断开（控制极电流 $I_g = 0$ ），在元件阳极-阴极间施加正向或反向的直流电压，此时可控硅阳极-阴极间正（反）向电压和阳极正（反）向电流之间的关系 $i_a = f(u_a)|_{I_g=0}$ 称为阳极伏安特性。

可控硅的阳极伏安特性如图1-2-6所示。横坐标表示电压，纵坐标表示电流，图的右上方电压、电流都是正值，表示可控硅的正向工作区，图的左下方电压、电流都是负值，表示可控硅的反向阻断区。

（1）正向阳极伏安特性：参阅图1-2-4所示实验电路，断开控制极（断开 K_1 ）使 $I_g = 0$ ，给可控硅加正向电压 E_a 。（将 K_2 合向右侧）调节 E_a ，使其从零逐渐增加，可控硅两端的电压 u_a 也逐渐增加， i_a 也逐渐由零开始增大，但增加得很慢，即使阳极电压 u_a 已较大， i_a 仍然很小，只有几个毫安，此刻可控硅仍是关断的，对应此时的 i_a 称为正向漏电流。

上列现象可以用以前学过的 PN 结原理来解释，如图1-2-7所示，可控硅元件由 $PNPN$ 四层结构组成。当向阳极施加正向电压时， P_2 区接正， N_1 区接负，这时 J_1 和 J_3 结均处于正向偏置，而 J_2 结处于反向偏置。由于 J_2 结附近存在着高阻层，具有阻流作用，所以 $PNPN$ 结构正向只能流过小电流，故其正向特性曲线的 OA 段（图1-2-6）也和通常的 PN 结的反向特性曲线相似，它主要由 J_2 结的反向特性所决定。如果将 $PNPN$ 结构比作一条过道， J_1 结、 J_2 结、 J_3 结比作过道中的三道门，虽然过道前后两道门打开了，但中间的一道门却关闭着，因此人还是过不去的。但是，由于 J_1 和 J_3 结的作用， J_2 结流过的电流要比单独一个 J_2 结的反向电流要大些。

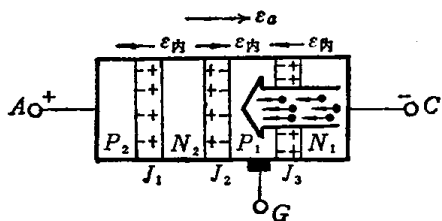


图 1-2-7 控制极的控制作用

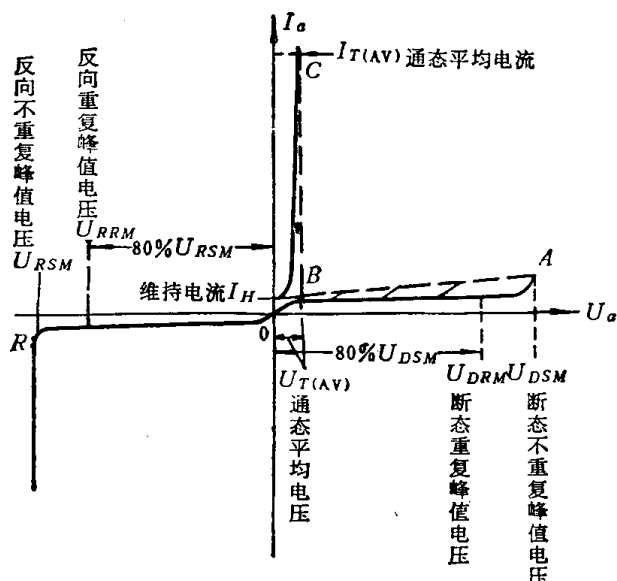


图 1-2-6 可控硅阳极伏安特性

当 E_a 升至某一数值 U_{DSM} 值时(对应图1-2-6曲线上的A点),阳极电流 i_a 突然增大,而阳极电压 u_a 突然降到很小(对应曲线上的B点)的值,这时电源电压几乎全部加在负载 R 上(即电灯泡上,见图1-2-4),而 i_a 的数值就由负载所限定,这时的可控硅就由关断变为导通了。曲线上的BC段对应着可控硅流过很大电流时PNPN结构上的压降却很小,这和PN结的正向特性相似。称刚导通电压 U_{DSM} 值为断态不重复峰值电压。这种不加控制电压,而是在很大的阳极电压下,使可控硅从关断转化为导通的条件,是一种不正常的工作条件。可控硅的正常导通应是在加控制极电流 i_g 的条件下发生的。为什么 u_a 升到某一数值会由关断变为导通呢?我们可以作如下粗浅的说明。

可控硅由关断变为导通的关键在于图1-2-6曲线上的A点到B点这一段,A点是如何过渡到B点的呢?也就是 J_2 结的高阻层是怎样变成低阻层的?如果按照前面的比方来说,也就是中间的这道门是怎样打开的?因为在特性曲线OA段时,由于 J_2 结附近高阻层的存在,使来自接到电源正极 P_2 区的空穴通过 J_1 流向 N_2 区,其中一部分在 N_2 区内复合,另一部分则到达 J_2 结附近积累起来。同样,由于接到电源负极的 N_1 区有电子经 J_3 结流向 P_1 区,这些电子一部分在 P_1 区复合,另一部分则到达 J_2 结附近积累起来。上述积累未达最高点时,只能使正向漏电流稍有增大(要比无 J_1 和 J_3 结时为大),但当积累数量变化达到某一个最高点时,就发生了质的飞跃, J_2 结附近就发生雪崩击穿现象(此原理已在电子技术中讲过),此刻对应到达曲线上的A点,于是通过 J_2 结的电流就骤然增大,高阻层就转变成低阻层,上述过程就是由A点向B点过渡的原理,也就是可控硅由关断变为导通的过程。

(2) 可控硅控制极是如何起作用的:前面说过,当 $i_g = 0$ 且PNPN结构在正向电压小于断态不重复峰值电压值时,可控硅便处于阻断状态。下面我们来看一下,当阳极-阴极加正向电压,又在控制极和阴极间加上一个小的正向控制电压时,可控硅由关断转化为导通的情况。这时 P_1 区接正, N_2 区接负,于是控制极便出现一个正向控制电流 i_g ,只要 i_g 足够大,尽管加在可控硅元件上的正向电压并不高,由于前述正反馈作用可控硅也能导通。实验证明控制电流 i_g 越大,导通所需之正向阳极电压值也就越低,这就是控制极的作用。例如当 $i_g = 0$ 时, $U_{DSM} = 800$ 伏;当 $i_g = 5$ 毫安时,正向阳极电压达200伏就可以使可控硅导通了。又当 $i_g = 15$ 毫安时,阳极电压只需5伏就能使可控硅导通。图1-2-6中示出了不同控制电流 i_g 时,可控硅导通所需阳极电压 U_a 值的变化情况。

控制极为什么会具有这种作用呢?这可用PN结的理论进行解释,如图1-2-7所示,当控制极和阴极间加正向电压时, P_1 区接正, N_1 区接负,在此控制极电压作用下, J_3 结处于正向偏置, N_1 区将有大量电子经 J_3 到达 P_1 区,使 P_1 区中的电子急剧增加,这部分电子参加到 P_1 区中少数载流子的行列,将使通过 J_2 结的反向电流剧增,抵消了 J_2 结的阻挡层,使 J_2 结由高阻层变为低阻层。因此,这时欲使可控硅开通就不须加较高的阳极电压 U_a 了。

(3) 维持电流 I_H 的概念:在可控硅导通后,若逐渐减小电源电压,阳极电流 i_a 也就减小,一直减到 I_H 值,即图1-2-6曲线上的B点,可控硅就从导通状态转化为阻断状态,此电流 I_H 值为保持可控硅导通所需之最小正向阳极电流值,通常称为维持电流。若阳极电流小于此值,可控硅就关断。可控硅关断后,阳极电压 u_a 便突然增大,这时电源电压几乎全部加在可控硅的两端。

(4) 反向阳极伏安特性:如前图1-2-4所示实验电路,当断开控制极(即 K_1 开断),

给可控硅加反向电压 E 。(即 K_2 合向左侧),再调节 E 。使其从 零逐渐增加, 如图1-2-6曲线左下方所示。随着反向电压升高, 反向漏电流也逐渐加大。因 为反向漏电流的数值较小(几毫安到几十毫安),所以, 曲线靠近横坐标轴, 此时可控硅处于反向阻断状态。

上述过程可以作如下解释: 由于此时阳极反向施加电压, 即 N_1 区接正, P_2 区接负, J_1 、 J_2 结为反向偏置、 J_2 为正向偏置, J_1 、 J_3 处于高阻, 致使整个 $PNPN$ 结构呈现高阻, 因此只能流过小电流, 这和一般 PN 结反向特性相似, 如前图1-2-6伏安特性曲线上的 OR 段。如果 OR 段也用前面的比方来说明, 即虽然中间的一道门是开的, 但由于前后两道门都关得紧紧的, 因此人还是照样过不去。

当反向电压超过反向不重复峰值电压 U_{RSM} (即反向最高测试电压)后, 由于 J_3 结的 N_2 区较薄, 因此 J_3 结处就发生“穿通”现象, 反向漏电流将迅速增加, 致使可控硅反向发生热击穿而损坏。我们称上述过程为从反向阻断转化为事故导通。这种情况是不允许发生的, 因此可控硅工作时所加的反向电压不能大于 U_{RSM} 值。

综上所述, 可以总结出控制可控硅导通和关断两种情况互相转化条件的为:

从关断状态转化为导通状态的条件	维持导通的条件	从导通状态转化为关断状态的条件
1. 阳极电位比阴极电位高。 2. 控制极有足够的正向电压和电流。 以上两条件需同时具备。	1. 阳极电位比阴极电位高。 2. 阳极电流应大于维持电流 I_H 值。 以上两条件需同时具备。	1. 阳极电流小于维持电流 I_H 值。 2. 阳极电位比阴极电位低。 以上两条件只具备一条即可。

2. 控制极伏安特性

在实践中, 常有这样的问題: 控制极加多大触发电压和电流才能满足可控硅状态转化的条件。

可控硅的控制极-阴极间是一个 PN 结, 因此, 加上正向电压时就显出二极管的单向导电性。通过实验, 可以测出控制极正向电压和正向电流之间的关系, 称为可控硅的控制极伏安特性, 如图1-2-8所示。

图 1-2-8 中只给出了可控硅控制电压与控制电流间的确定关系。但是, 由于各厂生产可控硅的工艺条件不同, 控制极特性相差很大, 就是同一厂的产品, 控制极的特性曲线也是不一致的。

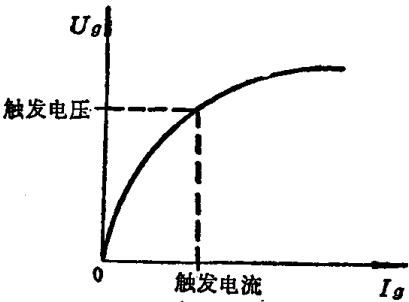


图 1-2-8 可控硅控制极的伏安特性

那么, 怎样来表示同一规格可控硅的触发电压和触发电流呢? 通常以一条典型的极限高阻抗控制极伏安特性和另一条极限低阻抗伏安特性之间的区域代表所有同规格元件的伏安特性, 称为控制极伏安特性区域。各种不同规格的元件各有其自己的控制极伏安特性区域。图 1-2-9 所示为 200A 可控硅元件的控制极伏安特性区。图中各符号意义详见表 1-2-1 所示。

图1-2-9中曲线 OD 和 OG 为极限低阻伏安特性和极限高阻伏安特性。图中 $OHIJ0$ 范围内的区域称为不触发区, 任何元件在额定结温时其控制极在此区域中都不会被触发, 而