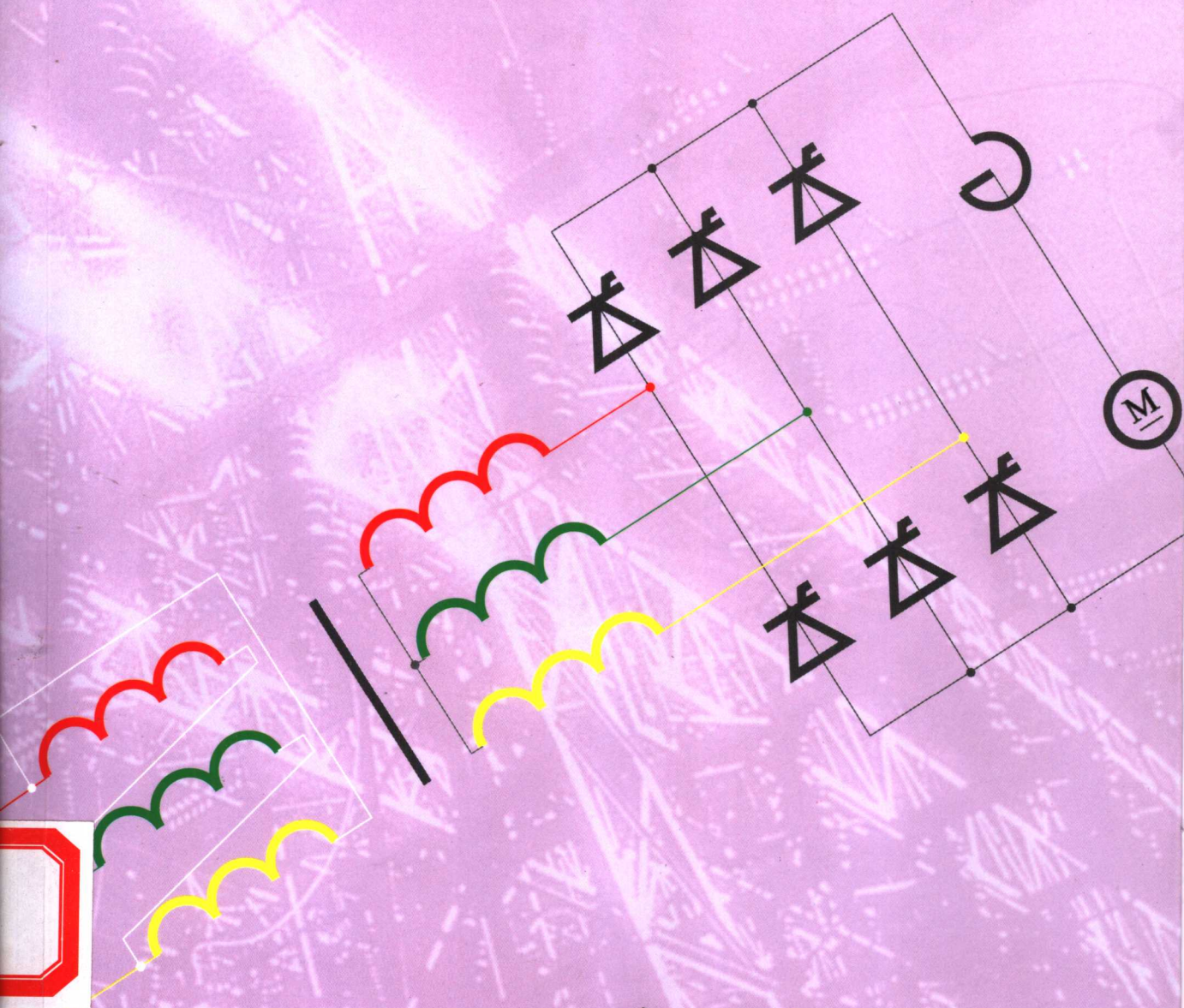


电力电子技术基础

贺益康 潘再平 编著



浙江大学出版社

电力电子技术基础

贺益康 潘再平 编著

浙江大学出版社

内 容 提 要

本书为“电机及其控制”等专业学习“电力电子技术基础”课程而编写,内容包括功率半导体器件、可控整流电路、有源逆变电路、变频电路、直流斩波电路及交流调压电路,以及主电路计算和保护、功率半导体器件的触发、驱动电路。

本书可作为“电机及其控制”、“电气技术”、“机电一体化”等有关专业的教材,同时也对从事变流技术、电机调速与控制等工作的工程技术人员有较好的参考价值。

电力电子技术基础

贺益康 潘再平 编著

责任编辑 樊晓燕

* * *

浙江大学出版社出版

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

浙江大学出版社电脑排版中心排版

浙江大学印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

787mm×1092mm 16 开 14 印张 358 千字

1995 年 2 月第 1 版 2003 年 6 月第 3 次印刷

印数 2501—3500

ISBN 7-308-01604-8/TM · 019 定价:17.00 元

前 言

随着大功率半导体开关器件的发明和发展,产生了利用这类器件作为工具实现电能变换与控制的技术——电力电子技术。电力电子技术横跨“电力”、“电子”与“控制”三个领域,是现代电子技术的基础之一,已被广泛地应用在工农业生产、国防、交通等各个领域,有着极其广阔的应用前景。在电机的调速与控制中,运用电力电子技术所构成的各种调速装置更是弱电对强电实现控制的桥梁和纽带。

本教材是为“电机及其控制”和“电气技术”专业编写的,也适合于机电一体化工程等其他有关专业的教学需要。本书内容包括功率半导体器件、可控整流电路、有源逆变电路、变频电路、交流调压电路、直流斩波电路,以及主电路计算及保护、触发电路等。内容选择上除考虑课程本身的系统性外,特别注意在电机调速与控制中的应用,故能较好地与后续课程《电机控制》相衔接,这是本教材内容上的特点。同时对电力电子技术的最新发展,新的自关断器件原理及其应用给予了很大的重视,内容较原教材有很大程度的更新。

本教材由浙江大学电机系贺益康教授编写第一章至第四章,潘再平副教授编写第五章至第七章,博士研究生徐烈绘制了全部插图。对于他的辛勤劳动,作者表示诚挚的感谢。限于作者水平和教材篇幅,错误和疏漏之处在所难免。恳切希望广大读者批评指正。

作 者

1994 年 4 月

目 录

绪论	1
第一章 功率半导体器件	4
§ 1-1 晶闸管的结构和工作原理	4
§ 1-2 晶闸管的特性	7
§ 1-3 晶闸管的主要参数	9
§ 1-4 大功率二极管	16
§ 1-5 特种晶闸管	19
§ 1-6 大功率晶体管	24
§ 1-7 功率场效应晶体管	28
§ 1-8 绝缘栅双极型晶体管	32
习题	36
第二章 可控整流电路	39
§ 2-1 单相半波可控整流电路	39
§ 2-2 单相桥式全控整流电路	50
§ 2-3 三相半波可控整流电路	61
§ 2-4 三相桥式全控整流电路	68
§ 2-5 换流重叠现象	79
习题	84
第三章 有源逆变电路	87
§ 3-1 有源逆变的工作原理及实现的条件	87
§ 3-2 三相半波逆变电路	89
§ 3-3 三相桥式逆变电路	92
§ 3-4 逆变颠覆及其防止	96
§ 3-5 晶闸管变流装置的功率因数	99
习题	101
第四章 主电路计算及保护	103
§ 4-1 主电路型式的选用	103
§ 4-2 整流变压器的参数计算	104
§ 4-3 整流元件的选择	109
§ 4-4 晶闸管的保护	114
§ 4-5 自关断器件的保护	122
§ 4-6 平波电抗器参数计算	126
习题	128

第五章 功率半导体器件的触发电路与驱动电路	130
§ 5-1 晶闸管触发电路的基本要求	130
§ 5-2 晶闸管分立元件触发电路	131
§ 5-3 晶闸管集成、数字触发器	145
§ 5-4 触发脉冲与主电路的同步	148
§ 5-5 可关断晶闸管门极驱动电路	152
§ 5-6 大功率晶体管基极驱动电路	154
§ 5-7 功率场效应晶体管驱动电路	158
§ 5-8 绝缘栅双极型晶体管驱动电路	159
习题	163
第六章 变频电路	166
§ 6-1 变频电路的基本概念	166
§ 6-2 负载谐振式逆变器	168
§ 6-3 强迫换流式逆变器	170
§ 6-4 逆变器的多重化技术	179
§ 6-5 脉宽调制型(PWM)逆变器	182
§ 6-6 交—交变频电路	189
习题	195
第七章 斩波器和交流调压器	197
§ 7-1 斩波器的基本原理	197
§ 7-2 晶闸管斩波器	199
§ 7-3 斩波器的多象限运行	204
§ 7-4 交流调压器基本原理	207
§ 7-5 单相交流调压器	209
§ 7-6 三相交流调压器	211
习题	215
参考文献	216

绪 论

一、电力电子技术的内容

众所周知,电能从性质上可以区分为直流电和交流电;就其中任何一种电流来说,又存在频率、幅值等参数上的差异。将交流电转换成直流电或者反过来将直流电转换成交流电,以及改变直流电的幅值大小,进行交流电频率或幅值上的变化,都属于电流性质或参数的变化。改变电流性质或参数的技术称之为变流技术。

在以前,实现变流的传统方法是采用变流机组、变压器,或者诸如闸流管、引燃管、汞弧整流器这类老一代的大功率电子器件。这些变流装置不仅体积大、占地多,而且变流性能差,如功率放大倍数低,响应速度慢,功耗大、效率低,控制性能也差。自从 50 年代末世界上第一只晶闸管(可控硅 SCR)问世以来,由于这类功率半导体器件效率高、控制性能好、寿命长、体积小等优点,迅速获得了广泛的应用和发展,出现了一大批以半导体为材料的高电压、大电流的大功率电子器件,如大功率二极管、各类晶闸管、大功率晶体管(GTR)、功率金属氧化物——半导体场效应管(Power MOSFET)、绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)等等。这样就有可能采用这类功率半导体器件来改变电流的性质或电流的参数,从而形成了半导体变流技术,这也就是电力电子技术(Power Electronics)。因此,电力电子技术是一门采用功率半导体器件作工具,通过弱电对强电的控制,实现电能变换与控制的技术。

从学科的角度来讲,电力电子技术横跨“电力”、“电子”与“控制”三个领域,是一门交叉学科。从内容上讲,电力电子技术应包括三个方面的内容:

1. 电力电子器件:主要研究电能变换与控制中应用的大功率半导体电子器件的工作机理、特性以及设计、制造的技术。

电力电子器件品种繁多,随着现代科学技术的飞速发展,器件本身在不断更新换代。晶闸管可以算作是第一代电力电子器件,它的出现使变流技术发生了根本性的变化。但它是一种无自关断能力的半控器件,应用中必须考虑关断方式问题,电路结构上必须设置关断(换流)电路,大大复杂了结构、增加了成本、限制了应用。此外晶闸管的开关频率也不高,难于实现变流装置的高频化。70 年代出现了称之为第二代的自关断器件,如门极可关断晶闸管(GTO),大功率双极型晶体管(GTR),功率场效应管(Power MOSFET)等,它们的开、关均可由门极(或基极、栅极)控制,开关频率高达(几~几十)kHz。但也有不足之处:GTR、GTO 开关频率仍低(几 kHz),GTR 有耐压低、二次击穿问题;P-MOSFET 功率难以做大等,迫使人们寻找更理想器件。80 年代出现了以绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)为代表的第三代复合导电机构的场控半导体器件,它们还有:静电感应式晶体管(SIT),静电感应式晶闸管(SITH),MOS 控制晶体管(MCT),MOS 控制晶闸管(MCTH)等。这些器件有很高的开关频率,(几十~几百)kHz,更高的耐压,使变流技术能得以高频化。目前,先进的工业国家正在开发第四代电力电子器件——集成功率半导体器件(PID),它将功率器件与驱动电路、控制电路及保护电路集成在一块芯片上,从而开辟了电力电子器件智能化的方向。

值得指出的是新的一代器件的出现并不意味着老的器件被淘汰,世界上 SCR 产量仍占全部电力电子器件总数的一半,是目前高压、大电流装置中不可替代的元件。

2. 电力电子电路:主要分析、研究由电力电子器件组成的、用以实现电能变换与控制的各基本电路的构成、工作原理、设计计算等。这些电路有如可控整流电路,逆变电路,斩波电路,交流调压电路以及周波数变换(变频)电路等。这部分内容是电力电子技术的基础理论。

3. 电力电子装置及系统:这是一些由能实现各类基本功能的电力电子电路组合而成的,加上一定微电子控制手段,藉以实现某种电能变换与控制目的的工业应用装置或系统。比如晶闸管直流调速系统,交流变频调速系统,中频电源,不停电电源等。这是电力电子技术的应用领域。

在当前,电力电子器件中以晶闸管制造技术最为成熟,可变换或控制的功率最大,是目前大功率变流技术中应用最广的电力电子器件。因此本书将重点介绍应用晶闸管进行电能变换与控制的电力电子技术。对于高频领域中使用较广的自关断器件,如大功率晶体管、门极可关断晶闸管、功率 MOSFET 及绝栅极双极型晶体管的有关知识,亦将进行介绍。

二、半导体变流的类型

1. 可控整流

这是一种将某一固定频率(通常是电网工频)的交流电,经过整流装置变换成电压大小可调(可控)的直流电的变换过程。

以往获得电压大小可调直流的传统方法是采用交流电动机——直流发电机构成的变流机组;现代方法则是采用晶闸管构成的可控整流器。两种方法比较,采用电力电子技术可控整流器其装置小、占地少、投资省,无旋转部分带来的噪音、磨损、维护问题,响应快、效率高。以 100kW 装置为例,变流机组的初投资为晶闸管可控整流器的一倍,总效率为 0.6 左右,而后者总效率则可达 0.8。发展趋势将是半导体变流装置取代变流机组。

2. 逆变

逆变是将直流变换成交流的过程,是整流的逆变换,其半导体变流装置称为逆变器。

逆变技术可以方便地将直流变换成频率及幅值可调的交流,广泛应用于交流电机的变频调速、绕线式异步电机串级调速、中频电源、不停电电源以及高压直流输电(用电侧将直流电逆变成交流电)。这是目前电力电子技术很有发展前途的应用领域。

3. 变频

变频是将一种固定频率(比如工频)的交流电变换成另一种可变频率交流电的变换过程。与逆变不同,它是交—交方式的变频,而逆变则是直—交方式的变频。它主要用于交流电机的交—交变频调速、绕线式异步电机超同步串级调速等。

将一种频率的交流变换成另一种频率的交流可以采用交—交变频方式,也可以采用整流—逆变的交—直—交方式。由于前者的能量转换环节要比后者少一道,故前者的能量变换效率高于后者。

4. 交流调压

交流调压是将电压幅值固定的交流变成幅值大小可调交流的变流方法,其频率不变化。

传统的交流调压是采用自耦变压器、感应调压器和饱和电抗器等电磁装置。采用电力电子技术时,则是利用半导体器件的开关特性来实现。交流调压技术可用于交流电机的调压调速、灯光控制以及温度控制等场合。

5. 斩波调压

这是实现大小固定的直流变成大小可调直流的变换技术。它是采用半导体器件作直流开关,将恒定直流电压变为断续的矩形波电压;通过改变矩形波电压的占空比来改变直流电压的平均值,从而实现直流电压的升高或降低。

斩波调压广泛应用于采用直流电源的车辆调速传动,如城市电车、电气机车、电瓶搬运车、叉车等。也用作电火花加工的高频脉冲电源。

由于用功率半导体器件构成的变流装置是静止型的,无旋转部分,与旋转式的变流机组相比,具有一系列明显的优点:

- 1) 功率放大倍数大,在 10^4 以上,比机组(10)高出三个数量级。
- 2) 响应速度快。机组是秒级,半导体变流装置为毫秒级。
- 3) 功耗小,效率高。如晶闸管空载损耗只 0.6%,满载损耗小于 1%,投资也比机组省。
- 4) 体积小,重量轻,可靠性高,无需经常维护。

然而半导体变流装置也有它的一些缺陷:

- 1) 功率半导体元件的电压、电流过载能力差,变流装置必须设置可靠的保护措施以策安全。
- 2) 由于晶闸管采用移相触发的控制方式,使变流装置输出的电压、电流波形发生畸变,包含大量的高次谐波,对电源产生了“谐波污染”,影响了电网供电质量。
- 3) 装置的功率因数较低。

当然,随着功率半导体元件质量的提高,新型半导体器件的出现,电力电子电路的改进和创新,装置或系统保护措施完善,以上缺点会被逐步克服,优点得以充分发挥,电力电子这门电气新技术必将获得更广泛的应用。

第一章 功率半导体器件

本章主要介绍电力电子技术中最广泛使用着的大功率半导体器件,包括不可控的功率二极管、半控的晶闸管和全控的自关断器件,诸如大功率双极型晶体管(GTR)、功率金属氧化物场效应管(Power MOSFET)、绝缘栅极双极型晶体管(IGBT)等。晶闸管俗称为可控硅(SCR),包括普通晶闸管、快速晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管和可关断晶闸管。由于普通晶闸管应用最广,通常所说晶闸管就是指普通晶闸管,这是本章主要讨论的对象。

§ 1-1 晶闸管的结构和工作原理

一、晶闸管的结构

晶闸管是大功率的半导体器件,从总体结构上看,可区分为管芯及散热器两大部分,分别如图 1-1 及图 1-2 所示。

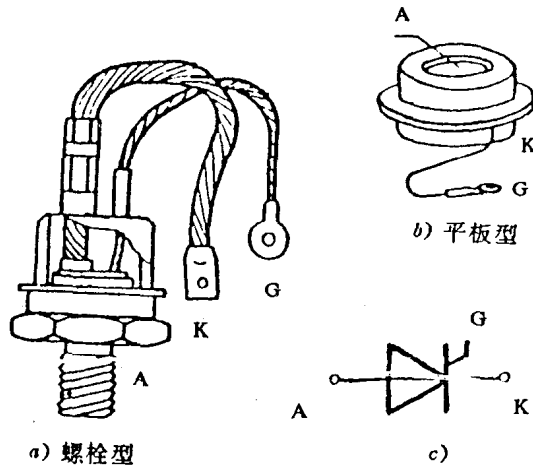


图 1-1 晶闸管管芯及电路符号表示

管芯是晶闸管的本体部分,由半导体材料构成,具有三个与外电路可以连接的电极:阳极 A,阴极 K 和门极(或称控制极)G,其电路图中符号表示如图 1-1c)所示。散热器则是为了将管芯在工作时由损耗产生的热量带走而设置的冷却器。按照晶闸管管芯与散热器间的安装方式,晶闸管可分为螺栓型与平板型两种。螺栓型(图 1-1a))依靠螺栓将管芯与散热器紧密连接在一起,并靠相互接触的一个面传递热量。显然,螺旋型结构散热效果差,用于 200A 以下容量的元件;平板型结构散热效果好,可用于 200A 以上的元件。冷却散热片的介质可以是空气,此时有自冷与风冷之分。自冷是利用空气的自然流动进行热交换带走传递到散热片表面的热量,风冷则是采用一定风速的流动空气吹拂散热器表面带走热量。显然强迫风冷的效果比自冷效果好,但需要配备强迫通风设备。由于水作为散热介质时其热容量比空气大,故在大容量或者相

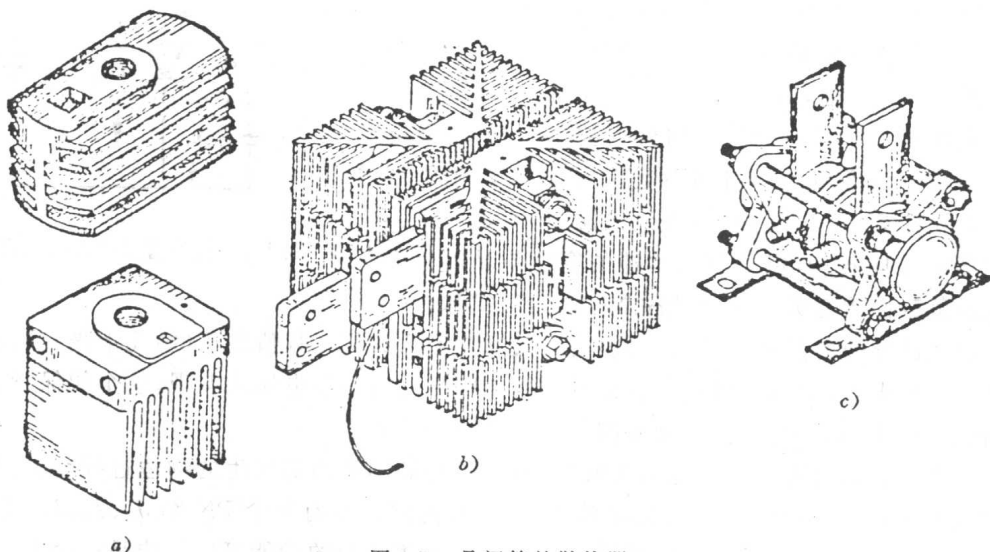


图 1-2 晶闸管的散热器

a) 自冷; b) 风冷; c) 水冷

当容量却需要缩小散热器体积的情况下,可以采用水冷结构。水冷是用水作散热介质,使它流过平板式管芯的两个面,带走器件工作时产生的热量(图 1-2c)。

晶闸管管芯的内部结构如图 1-3 所示,是一个四层($P_1-N_1-P_2-N_2$)三端(A、K、G)的功率半导体器件。它是在 N 型的硅基片(N_1)的两边扩散 P 型半导体杂质层(P_1 、 P_2),形成了两个 PN 结 J_1 、 J_2 。再在 P_2 层内扩散 N 型半导体杂质层 N_2 又形成另一个 PN 结 J_3 。然后在相应位置放置钼片作电极,引出阳极 A,阴极 K 及门极 G,形成了一个四层三端的大功率电子元件。这个四层半导体器件由于有三个 PN 结的存在,决定了它的可控导通特性。

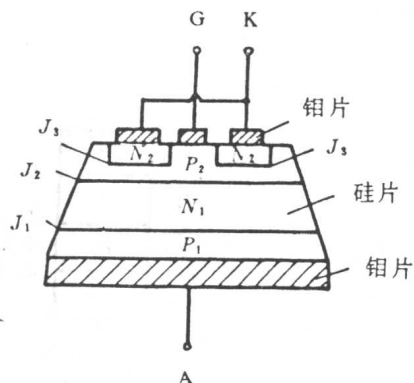


图 1-3 晶闸管芯结构

二、晶闸管的工作原理

晶闸管内部结构上有三个 PN 结。当阳极加上负电压、阴极加上正电压时(此时称为晶闸管承受反向阳极电压), J_1 、 J_3 结上反向偏置,管子处于反向阻断状态,不导通。当阳极加上正电压、阴极加上负电压(此时称晶闸管承受正向阳极电压)时, J_2 结又处于反向偏置,管子处于正向阻断状态,仍然不导通。那么晶闸管在什么条件下才能从阻断变成导通,又能在什么条件下又从导通恢复为阻断呢?

晶闸管使用中常构成有两个回路,如图 1-4 所示。一是由阳极 A、阴极 K、阳极电源 E_a 及负载 R_a 构成的阳极主回路,另一是由门极 G、阴极 K 以及控制晶闸管导通的触发电路所构成的门极控制回路。当阳极电源使晶闸管阳极电位高于阴极电位时,晶闸管承受正向阳极电压,

反之承受反向阳极电压。当门极控制电源使晶闸管门极电位高于阴极电位时,晶闸管承受正向门极电压,反之承受反向门极电压。通过理论分析和实验验证表明:

1)只有当晶闸管同时承受正向阳极电压和正向门极电压时晶闸管才能导通,两者不可缺一。

2)晶闸管一旦导通后门极将失去控制作用,门极电压对管子随后的导通或关断将均不起作用,故使晶闸管导通的门极电压不必是一个持续的直流电压,只要是一个具有一定宽度的正向脉冲电压即可,脉冲的宽度与晶闸管的开通特性及负载性质有关。这个脉冲常称之为触发脉冲。

3)要使已导通的晶闸管关断,必须使阳极电流降低到某一数值之下(约几十毫安)。这可以通过增大负载电阻,降低阳极电压至接近于零或施加反向阳极电压来实现。这个能保持晶闸管导通的最小电流称为维持电流,是晶闸管的一个重要参数。

晶闸管为什么会有以上导通和关断的特性,这与晶闸管内部发生的物理过程有关。晶闸管是一个具有 $P_1-N_1-P_2-N_2$ 四层半导体的器件,内部形成有三个PN结 J_1, J_2, J_3 ,其中 J_1, J_3 承受反向阻断电压, J_2 承受正向阻断电压。这三个PN结的功能可以看作是一个PNP型三极管 $VT_1(P_1-N_1-P_2)$ 和一个NPN型三极管 $VT_2(N_1-P_2-N_2)$ 构成的复合作用,如图1-5所示。

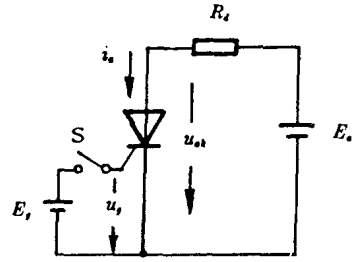


图 1-4 晶闸管阳极及门极回路

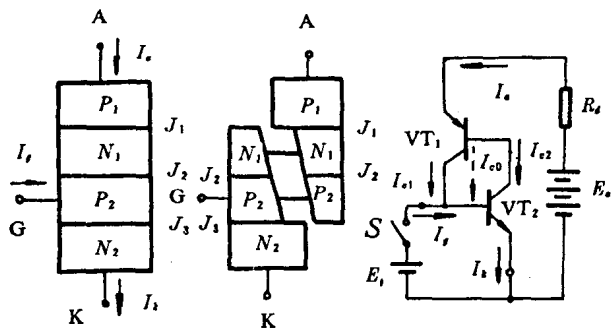


图 1-5 晶闸管的等效复合三极管效应

可以看出,两个晶体管连接的特点是一个晶体管的集电极电流就是另一个晶体管的基极电流,当有足够的门极电流 I_g 流入时,两个相互复合的晶体管电路就会形成强烈的正反馈,导致两个晶体管饱和导通,也即晶闸管的导通。

设流入 PNP 型 VT_1 管的发射极电流 I_{e1} 即晶闸管的阳极电流 I_a ,它就是 P_1 区内的空穴扩散电流。这样流过 J_2 结的电流应为 $I_{c1} = a_1 I_{e1}$,其中 $a_1 = I_{c1} / I_{e1}$ 为 VT_1 管的共基极电流放大倍数。同样流入 NPN 型 VT_2 管的发射极电流 I_{e2} 即晶闸管的阴极电流 I_k ,它就是 N_2 区内的电子扩散电流。这样流过 J_2 结的电流应为 $I_{c2} = a_2 I_{e2}$,其中 $a_2 = I_{c2} / I_{e2}$ 为 VT_2 管的共基极电流放大倍数。流过 J_2 结的电流除 I_{c1}, I_{c2} 外,还有在正向阳极电压下处于反压状态下 J_2 结的反向漏电流 I_{co} 。

如果把两个晶体管分别看成两个广义的结点,则晶闸管的阳极电流应为

$$I_a = I_{c1} + I_{c2} + I_{co} = a_1 I_a + a_2 I_k + I_{co} \quad (1-1)$$

若门极开关 S 已合上,就有门极电流 I_g 送入,则晶闸管的阴极电流为

$$I_k = I_a + I_g \quad (1-2)$$

从以上两式中可求出阳极电流表达式为

$$I_a = \frac{I_{co} + a_2 I_g}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-3)$$

这里值得注意的是两等效晶体管共基极电流放大倍数 α_1 、 α_2 是随其发射极电流作非线性变化的,其规律如图 1-6 所示。通过对 α_1 、 α_2 的变化分析,可以说明晶闸管导通与关断的内部机理。

当晶闸管承受正向阳极电压但门极电压为零时, $I_g = 0$ 。由于 I_g 同时作为 VT₂ 管发射极电流,致使 α_1 、 α_2 很小。从式(1-3)可见,此时 $I_a \approx I_{co}$,为正向漏电流,晶闸管处于正向阻断状态,不导通。

当晶闸管承受正向阳极电压而门极电流为 I_g 时,特别是当 I_g 增大到一定程度时,等效晶体管 VT₂ 的发射极电流 I_{e2} 也增大,致使电流放大系数 α_2 随之增大,产生足够大的集电极电流 $I_{c2} = \alpha_2 I_{e2}$ 。由于两等效晶体管的复合接法, I_{c2} 就是流过等效晶体管 VT₁ 的发射极电流 I_{e1} ,从而也增大了 VT₁ 管的电流放大系数 α_1 。 α_1 的增大将导致产生更大的集电极电流 $I_{c1} = \alpha_1 I_{e1}$ 流过 VT₂ 管的发射结,这样强烈的正反馈过程将导致两等效晶体管电流放大系数的迅速增加。当 $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时(即图 1-6 中的临界点 K 处),式(1-3)表达的阳极电流 I_a 将急剧增大,变得无法从晶闸管内部进行控制,此时的晶闸管阳极电流 I_a 完全由外部电路条件来决定,即由阳极电源电压 E_a 及负载电阻 R_a 来决定。晶闸管此时已处于正向导通状态。

正向导通以后,由于正反馈的作用,可维持 $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 0$ 。此时即使 $I_g = 0$ 也不能使晶闸管关断,说明门极对已导通的晶闸管失去控制作用。

为了使已导通的晶闸管关断,唯一可行的办法是使阳极电流 I_a 减小到维持电流以下。因为此时 α_1 、 α_2 已相应减小,内部等效晶体管之间的正反馈关系无法维持。当 α_1 、 α_2 减小到 $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时, $I_a \approx I_{co}$,晶闸管恢复阻断状态而关断。

如果晶闸管承受的是反向阳极电压,由于等效晶体管 VT₁、VT₂ 均处于反压状态,无论有无门极电流 I_g ,晶闸管都不能导通。

这就是晶闸管导通和关断的物理过程。

§ 1-2 晶闸管的特性

任何一种电子器件,往往采用特性曲线的形式来直观地表达它的工作性能、使用条件。晶闸管是一个三端器件,它的特性需要用阳极以及门极的伏安特性来分别表达。

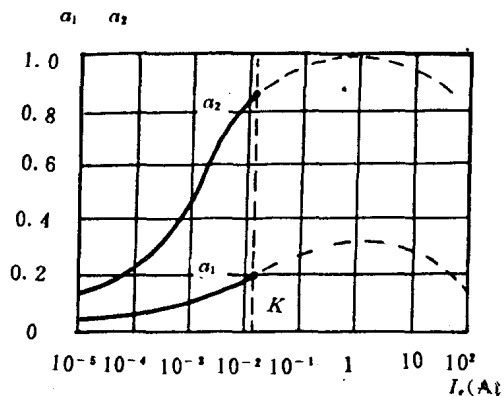


图 1-6 两等效晶体管电流放大系数 α 与发射极电流 I_e 的关系

一、晶闸管的阳极伏安特性

晶闸管的阳极伏安特性表达了晶闸管阳极与阴极之间的电压 u_{ak} 与阳极电流 i_a 之间的关系曲线,如图 1-7 所示。

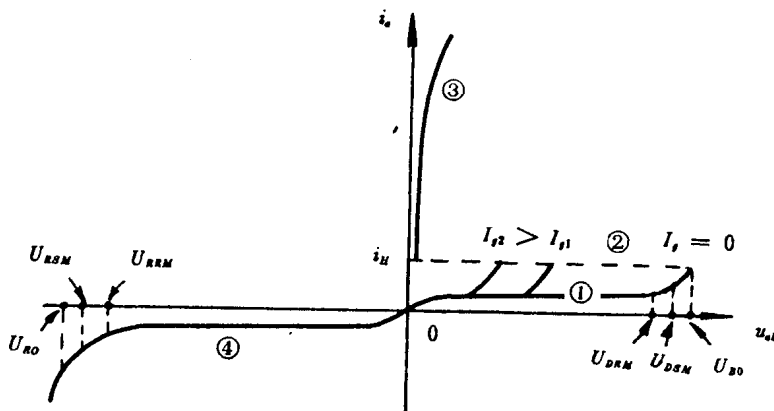


图 1-7 晶闸管阳极伏安特性

①正向阻断高阻区；②负阻区；③正向导通低阻区；④反向阻断高阻区

阳极伏安特性可以划分为两个区域:第Ⅰ象限为正向特性区,第Ⅲ象限为反向特性区。

第Ⅰ象限的正向特性又可区分为正向阻断状态及正向导通状态。正向阻断状态随着不同的门极电流 I_g 大小呈现不同的分支。在 $I_g = 0$ 的情况下,随着正向阳极电压 u_{ak} 的增加,由于 J_2 结处于反压状态,晶闸管处于断态,在很大范围内只有很小的正向漏电流,特性曲线很靠近并与横轴平行。当 u_{ak} 增大到一个称之为正向转折电压的 U_{B0} 时,漏电流增大到一定数值, J_1 、 J_3 结内电场削弱很多,两等效晶体管的共基极电流放大系数 α_1 、 α_2 随之增大,使电子扩散电流 $\alpha_2 I_k$ 与空穴扩散电流 $\alpha_1 I_a$ 分别与 J_2 结中的空穴和电子相复合,使得 J_2 结的电势壁垒消失。这样,晶闸管就由阻断突然变成导通,反映在特性曲线上就从阻断状态的高阻区①(高电压、小电流),经过虚线所示的负阻区②(电流增大、电压减小),到达导通状态的低阻区③(低电压、大电流)。

正向导通状态下的特性与一般二极管的正向特性一样,此时晶闸管流过很大的阳极电流而管子本身只承受约 1V 左右的管压降。特性曲线靠近并几乎平行于纵轴。

在正常工作时,晶闸管是不允许采取使阳极电压高过转折电压 U_{B0} 而使之导通的工作方式,而是采用施加正向门极电压,送入触发电流 I_g 使之导通的工作方式,以防损伤元件。

当加上门极电压使 $I_g > 0$ 后,晶闸管的正向转折电压就大大降低,元件将在较低的阳极电压下由阻断变为导通。当 I_g 足够大时,晶闸管的正向转折电压很小,相当于整流二极管一样,一加上正向阳极电压管子就可导通。晶闸管的正常导通应采取这种门极触发方式。

晶闸管正向阻断特性与门极电流 I_g 有关,说明门极可以控制晶闸管从正向阻断至正向导通的转化,即控制管子的开通。然而一旦管子导通,晶闸管就工作在与 I_g 无关的正向导通特性上。要关断管子,就只得像关断一般二极管一样,使阳极电流 I_a 减小。当阳极电流减小到 $I_a < I_H$ (维持电流),晶闸管才能从正向导通的低阻区③返回到正向阻断的高阻区①,管子关断阳极电流 $I_a \approx 0$ 后并不意味着管子已真正关断,因为管内半导体层中的空穴或电子等载流子仍然

存在,没有复合。此时重新施加正向阳极电压,即使没有正向门极电压也可使这些载流子重新运动,形成电流,管子再次导通,我们称之为未恢复正向阻断能力。为了保证晶闸管可靠而迅速关断,真正恢复正向阻断能力,常在管子阳极电压降为零后再施加一段时间的反向电压,以促使载流子经复合而消失。

第Ⅲ象限的反向特性表达了反向阳极电压与阳极反向漏电流的关系。这是由于在反向阳极电压作用下, J_1 、 J_3 结反向偏置,元件反向被阻断,只有很小的反向漏电流流过,特性呈现反向高阻状态,靠近并平行于横轴。但当反向阳极电压升高大于 U_{R0} (反向击穿电压)时,反向漏电流剧烈增加,晶闸管反向击穿而损坏。

二、晶闸管门极伏安特性

晶闸管的门极与阴极间存在着一个PN结 J_3 ,门极伏安特性就是指这个PN结上正向门极电压 U_g 与门极电流 I_g 间的关系。

由于这个结的伏安特性很分散,无法找到一条典型的代表曲线,只能用一条极限高阻门极特性和一条极限低阻门极特性之间的一片区域来代表所有元件的门极伏安特性,如图1-8阴影区域所示。

在晶闸管的正常使用中,门极PN结不能承受过大的电压、过大的电流及过大的功率,这是门极伏安特性区的上界限,它们分别用门极正向峰值电压 U_{GFM} 、门极正向峰值电流 I_{GFM} 、门极峰值功率 P_{GM} 来表征。此外门极触发也具有一定的灵敏度,为了能可靠地触发晶闸管,正向门极电压必须大于门极触发电压 U_{GT} ,正向门极电流必须大于门极触发电流 I_{GT} 。 U_{GT} 、 I_{GT} 规定了门极上的电压、电流值必须位于图1-8的斜线区内,而平均功率损耗也不应超过规定的平均功率 P_G 。

晶闸管门极与阴极间的PN结的反向特性不如二极管反向特性那么理想,正向和反向电阻值比较接近。为了防止晶闸管在承受正向阳极电压时发生误触发,可在门极上施加负电压,但负电压的绝对值不得超过10V,否则会造门极PN结损坏。

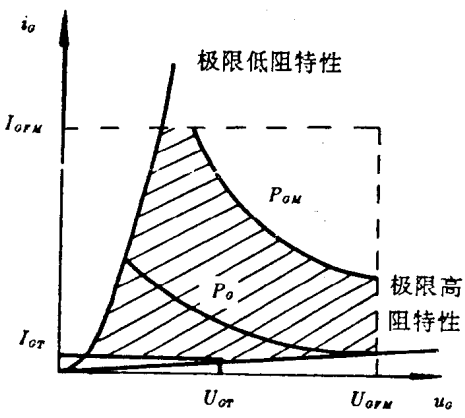


图1-8 晶闸管门极伏安特性

§ 1-3 晶闸管的主要参数

正确使用一个晶闸管,除了定性了解晶闸管的特性外,还必须定量地掌握晶闸管的一些主要参数。表1-1至表1-4给出了14个规格KP型(普通反向阻断型)晶闸管的主要参数及门极参数,现对经常使用的几个作一些介绍。

表 1-1 晶闸管的主要参数

通态平均电流 $I_{T(AV)}$		断态重复峰值电压, 反向重复峰值电压 U_{drm}, U_{rrm}	断态重复峰值电流, 反向重复峰值电流 I_{drm}, I_{rrm}	维持电流 I_H	通态峰值电压 U_{Tm}	工作结温 T_j	断态电压临界上升率 du/dt	通态电流临界上升率 di/dt	浪涌电流 I_{Tsm}			
单位	A	V	mA	mA	V	℃	V/ μ s	A/ μ s	kA			
1		50~1600	≤ 3	≤ 10	≤ 2.0				L 级 H 级 0.12 0.20			
3		100~2000	≤ 8	≤ 30	≤ 2.2	-40~ +100	A、B C、D E、F B、C D、E F、G	A、B	0.36 0.056			
5				≤ 60					0.064 0.09			
10			≤ 10	≤ 100					0.12 0.19			
20									0.24 0.38			
30		100~2400	≤ 20	≤ 150	≤ 2.4				0.36 0.56			
50										0.64 0.94		
100		100~3000	≤ 40	≤ 200				A、B、C	1.3 1.9			
200								B、C	2.5 3.8			
300			≤ 50	≤ 300			D、E	3.8 5.6				
400									B、C D、E F	5.0 7.5 6.3 9.4 7.6 11		
500					≤ 2.6	-40~125	C、D E、F G	B、C D、E F、G	10 15			
600												13 18
800												
1000												

表 1-2 断态电压临界上升率(du/dt)的级别

du/dt	25	50	100	200	500	800	1000
级 别	A	B	C	D	E	F	G

表 1-3 额定通态电流临界上升率(di/dt)的级别

di/dt	25	50	100	150	200	300	500
级 别	A	B	C	D	E	F	G

表 1-4 晶闸管的门极参数

通态平均电流 $I_{T(AV)}$ (A)	门极触发电流 I_{GT} (mA)	门极触发电压 U_{GT} (V)	门极不触发电压 U_{gD} (V)	门极正向峰值电流 I_{fgm} (A)	门极反向峰值电压 U_{rgm} (V)	门极正向峰值电压 U_{fgm} (V)	门极平均功率 $P_{g(AV)}$ (W)	门极峰值功率 P_{gm} (W)	
1	≤ 20	≤ 2.5	≥ 0.2		5	6			
3	≤ 60	≤ 3.0							
5									
10	≤ 100								
20									
30									
50	≤ 200	1		0.5		4			
100	≤ 250	≤ 3.5		2		2	8		
200									
300	≤ 350	≤ 4.0		3		3	15		
400				≤ 16			4	20	
500									
600									
800	≤ 450								
1000									

一、正反向重复峰值电压(额定电压) U_R

晶闸管的额定电压是从断态重复峰值电压和反向重复峰值电压中选取小者定义出来的,为此必须先对这两个电压进行定义。

1. 断态重复峰值电压 U_{DRM} : 门极开路, 元件额定结温时, 从晶闸管阳极伏安特性正向阻断高阻区(图 1-7 中的曲线①)漏电流急剧增长的拐弯处所决定的电压称断态不重复峰值电压 U_{DSM} , “不重复”表明这个电压不可长期重复施加。取断态不重复峰值电压的 80% 定义为断态重复峰值电压 U_{DRM} , “重复”表示这个电压可以以每秒 50 次, 每次持续时间不大于 10ms 的重复方式施加于元件上。

2. 反向重复峰值电压 U_{RRM} : 门极开路, 元件额定结温时, 从晶闸管阳极伏安特性反向阻断高阻区(图 1-7 中曲线④)反向漏电流急剧增长的拐弯处所决定的电压称为反向不重复峰值电压 U_{RSM} , 这个电压是不能长期重复施加的。取反向不重复峰值电压的 80% 定义为反向重复峰值电压 U_{RRM} , 这个电压允许重复施加。

3. 晶闸管的额定电压 U_R 是取 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小的一个, 并整化至等于或小于该值的规定电压等级上。电压等级不是任意决定的, 额定电压在 1000V 以下是每 100V 一个等级, 1000V 至 3000V 则是每 200V 一个电压等级。

例如某晶闸管的 $U_{DRM}=1380V$, $U_{RRM}=1310V$ 。取较小的 1310V 整化, 应为 1200V, 故该晶闸管的额定电压 $U_R=1200V$ 。

由于晶闸管工作中可能会遭受到一些意想不到的瞬时过电压, 为了确保管子安全运行, 在选用晶闸管时应使其额定电压为正常工作电压峰值的 2~3 倍, 以作安全余量。