

电 力 电 子 技 术

丁道宏 主编

(京)新登字 161 号

内 容 简 介

本书在介绍晶闸管基本特性的基础上,着重分析讲解晶闸管在整流、逆变、变频和调压中的应用,介绍典型电路,分析线路原理及线路参数的计算方法。结合讲解无源逆变和交流调压,还介绍了可关断晶闸管和双向晶闸管的基本特性和应用。

本书结合在电源中的应用特点,介绍功率晶体管所组成的线路,分析线路的基本特性和功率晶体管应用中的共同问题,为线路设计打下基础。

本书还系统地分析了功率电子线路中磁性元件(脉冲变压器、电感)的几种工作状态,并介绍了设计计算方法。

本书是电气技术专业本科用教材,也可供有关专业师生和工程技术人员参考。

电 力 电 子 技 术

丁道宏 主编

航空工业出版社出版发行
(北京市安定门外小关东里 14 号)

—邮政编码: 100029—

全国各地新华书店经售
南京航空学院印刷厂印刷

1992年6月第1版 1992年6月第1次印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 21.5

印数: 1—3550册 字数: 537千字

ISBN 7-80046-421-0/G·057

定价: 5.90元

前 言

《电力电子技术》编写大纲是根据航空航天工业部航空高等学校第三教材委员会1988年下半年所提出的该课程的教学基本要求拟定的,在1989年5月,全国电气技术专业教学指导委员会召开的“电力电子技术”课程教材编写及研讨会上,又对编写大纲进行了深入讨论,基本肯定了编写大纲,并作了一些修改和补充,而后分工编写。

本书对晶闸管所组成的可控整流电路、逆变电路和变频与调压电路的基本原理及分析方法作了较详尽的阐述,因为这是应用广泛的直流传动的基础;并介绍了触发器的各种典型电路,特别由数字集成单元组成的触发器。对于比较新型的晶闸管,如双向晶闸管,结合讲解交流调压作了介绍;还有具有自关断能力的可关断晶闸管(GTO),则在无源逆变一章中作了介绍。当然这些元件的应用并不限于所在章节的有关内容。

本书的主要特点在于较大幅度地、系统地增加了大功率晶体管的内容。大功率晶体管有二极管和三极管,还介绍了功率场效应晶体管和绝缘栅功率晶体管。内容包括晶体管的功率电路,还有缓冲电路、控制电路、驱动电路。这些电路是保证功率晶体管正常工作必不可少的。脉冲变压器和电感这些磁性元件在功率电路中应用广泛,本书对这些磁性元件的工作状态分析和设计也作了系统和详尽的讲解。还扼要介绍了热设计问题。最后介绍了电力电子技术几个方面的典型应用。对于电路的一般保护和元件的串并联计算,考虑到参考书已很多,本书未作介绍。

在60~70年代,电力电子技术主要以晶闸管为核心元件;在70年代后期和80年代,由于大功率晶体管的发展,应用越来越广泛,特别在较高工作频率和中小功率电路中得到更多应用,学生毕业后不仅要从事大功率(几百千伏安)变换装置的工作,还应能从事中小功率变换装置的研制生产工作,而后者人才需求量不会少于前者。因之大功率晶体管及其应用,应是电力电子技术必不可少的部分。

本书采用我国颁布的电气图形符号最新标准,新的国家标准基本采用了国际电工委员会(IEC)发布的电气图形符号。按国家标准局的要求,最新标准应自1990年1月1日起在全国全面推行。

本书主要作为高等工科院校电气技术专业的教学用书,适用于60~80学时。带“*”号章节,可由授课者灵活选用。

本书由南京航空学院丁道宏教授主编。参加编写的有:第一、二章由北京航空航天大学孙明迪副教授编写,第四章由西北轻工业学院谭惠元副教授编写,第六、七、十五章由重庆大学侯振程教授编写,第八、九、十、十四章由南京航空学院赵修科副教授编写,第十一、十二、十三章由南京航空学院沈冬珍副教授编写,其余各章由丁道宏教授编写。本书由清华大学蔡宣三教授主审,并提出了不少宝贵意见,在此表示感谢。

编 者

1990年12月

目 录

绪 论	(1)
第一章 晶闸管	(5)
第一节 晶闸管的结构和工作原理	(5)
第二节 晶闸管的特性和主要参数	(8)
习 题	(15)
第二章 可控整流电路	(17)
第一节 单相桥式可控整流电路	(17)
第二节 三相半波可控整流电路	(28)
第三节 三相桥式全控整流电路	(35)
第四节 整流电压的谐波分析和脉动系数	(40)
第五节 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路	(44)
第六节 整流变压器漏抗对可控整流电路的影响	(49)
第七节 可控整流电路供电的电动机机械特性	(52)
习 题	(58)
第三章 有源逆变	(61)
第一节 电能的流转	(61)
第二节 三相半波逆变电路	(62)
第三节 三相桥式逆变电路	(65)
第四节 逆变失败与控制角的限制	(68)
第五节 逆变工作状态时电机的机械特性	(70)
第六节 有源逆变的应用举例	(72)
习 题	(76)
第四章 晶闸管的触发电路	(77)
第一节 对触发电路的基本要求	(77)
* 第二节 单结晶体管触发电路	(77)
第三节 同步信号为锯齿波的晶闸管触发电路	(82)
* 第四节 集成元件组成的移相触发器	(86)
第五节 集成化晶闸管移相触发电路	(88)
* 第六节 微机触发电路	(93)
第七节 触发脉冲限位控制	(100)
第八节 触发电路同步电源电压的选择	(102)
第九节 防止误触发措施	(103)

习 题	(104)
* 第五章 交流—交流变频电路	(105)
第一节 单相—单相变频电路	(105)
第二节 三相—单相变频电路	(109)
第三节 变频器的有环流工作状态	(111)
第四节 触发脉冲的重叠控制	(113)
习 题	(114)
第六章 交流调压	(115)
第一节 概述	(115)
第二节 开关通断控制	(116)
第三节 单相相控调压	(117)
第四节 双向晶闸管及其应用	(120)
* 第五节 三相交流调压	(124)
第六节 单相变压器抽头换接器和交流稳压电源	(127)
* 第七节 相位控制器	(130)
习 题	(132)
* 第七章 无源逆变器	(133)
第一节 逆变器的工作原理	(133)
第二节 功率晶体管单相逆变器	(134)
第三节 可关断晶闸管及其组成的单相逆变器	(139)
第四节 晶闸管的换流与斩波器	(144)
第五节 晶闸管并联谐振式逆变器	(146)
第六节 晶闸管单相并联逆变器	(150)
第七节 电流型逆变器	(155)
第八节 逆变器的谐波抑制及多重化连接	(158)
第九节 三相桥式逆变器	(160)
习 题	(166)
第八章 功率二极管和三极管	(168)
第一节 功率二极管	(168)
第二节 功率晶体管	(172)
习 题	(191)
第九章 晶体管功率电路	(193)
第一节 单晶体管功率电路	(193)
第二节 多晶体管功率电路	(214)
第三节 准谐振变换器	(223)

第四节	晶体管功率电路的应用	(229)
习 题		(231)
第十章	功率晶体管的缓冲电路	(234)
第一节	概述	(234)
第二节	电感电流不连续时晶体管的负载线和缓冲电路	(234)
第三节	电感电流连续时晶体管负载线和缓冲电路	(236)
第四节	无损耗缓冲电路	(242)
习 题		(245)
第十一章	脉宽调制控制电路	(246)
第一节	概述	(246)
第二节	分立元件 PWM 控制电路	(247)
第三节	集成 PWM 控制器的基本组成和工作原理	(249)
* 第四节	SG 1525 / 1527 系列集成 PWM 控制器	(251)
* 第五节	UC1840 可编程 PWM 控制器	(255)
第六节	电流控制脉宽调制技术	(258)
习 题		(267)
第十二章	驱动电路	(268)
第一节	对驱动电路的要求	(268)
第二节	驱动电路的隔离技术	(269)
第三节	恒流驱动电路	(271)
第四节	比例驱动电路	(277)
第五节	功率 MOSFET 驱动电路	(282)
习 题		(283)
第十三章	功率变换器中的磁性元件设计	(285)
第一节	铁心的磁特性及基本的磁物理量	(285)
第二节	铁心的工作状态	(288)
第三节	几种常用铁心材料的性能及选用	(292)
第四节	脉冲功率变压器及电感的设计	(299)
习 题		(313)
* 第十四章	功率半导体器件的热设计	(315)
第一节	半导体器件最高允许结温与结温减额	(315)
第二节	热路与温度计算	(315)
第三节	外部热阻测定方法和散热器设计	(318)
第四节	瞬态热阻	(320)
习 题		(322)
* 第十五章	电力电子技术应用举例	(323)
主要参考文献		(336)

绪 论

一、电力电子学科的形成

在今天,电力电子技术已发展成为一门新兴学科。国际电气和电子工程师协会(IEEE)的电力电子学会将电力电子技术(或电力电子学)表述为:有效地使用电力半导体器件,应用电路和设计理论以及分析开发工具,实现对电能的高效能变换和控制的一门技术,它包括电压、电流、频率和波形等方面的变换。电力半导体器件主要有整流二极管、晶闸管及其派生器件、功率晶体管及其派生器件、电力光电器件等。当前普通型晶闸管(可控硅)应用广泛,随着技术发展和应用范围的扩大,特别从八十年代以来,晶闸管的派生器件和功率晶体管的应用明显增多;在国外,可关断晶闸管和大功率晶体管已获得大量应用。

早在三、四十年代,人们是应用电机组、汞弧整流器、闸流管、电抗器、接触器等对电能进行变换和控制,而这些器件构成的变流装置存在着明显缺点,如功率放大倍数低,响应慢,体积大,功耗大,效率低和有噪音等。1957年晶闸管的出现带来了电力电子学的革命,使之走出了雏形期。七十年代后,各种高速、全控型开关器件的先后问世,使许多早期的变流器拓扑再次焕发活力,也使新的、更为简单紧凑的拓扑结构以及以往难以实现的控制方式得以实现。由于有低导通压降、优良阻断能力及快速开关的电力半导体器件,性能大为改善的磁性和绝缘材料,频率高达兆赫的电能处理方法,新型电力拓扑结构及分析方法,微型计算机和超大规模集成电路技术等方面的不断突破,这一切使今天的电力电子技术具有全新面貌。随之而来的是应用领域日益广泛,对国民经济产生的效益日益显著,令人瞩目。

二、电力半导体器件

以开关方式工作的电力半导体器件是现代电力电子技术的基础与核心。器件特性的每一步新发展都带动变换电路技术的相应突破。对于一般电力电子器件,可用开关功率 P_s 表示其开关能力。 P_s 定义为最大断电压与最大通态平均电流的乘积。工作于工频电网(50~60Hz)的普通整流管和晶闸管,包括双向晶闸管、逆导晶闸管等传统派生器件,开关功率已达5000V/5000A。目前,器件发展的中心是开发高速器件,尤其自身兼有开通和关断功能的所谓全控型高速器件,其家族包括:可关断晶闸管(GTO),大功率晶体管(GTR),功率场效应晶体管(Power FET),绝缘栅功率晶体管(IGBT),MOS控制晶闸管(MCT)等。

一般来说,半导体器件电荷存储量或者说平均载流子密度越大,正向导通压降就越低,导通损耗越低,但开关损耗却越大,因为建立和驱散这些载流子所需时间较长。因而具有低导通压降和高开关速度的器件,同时达到两方面性能的高水平是矛盾的,是有难度的。

过去十年来,GTO技术上日臻完善,开关功率水平几与晶闸管持平,它可使功率高达1MW的逆变器设计简化,工作频率提高,并日益取代需要强迫换流的晶闸管,使变换器效率提高,体积减小;但受工作机理限制,开关时间仍需要数十微秒(约25 μ s),其极限使用频率限制在几十千赫。

大功率晶体管(也称“巨型晶体管”Grant Transister,GTR)的功率水平不及GTO,

而开关频率却远比 GTO 高, 且开关损耗小, 故在数百千瓦以下的中小变流装置中得到广泛应用, 在使用中需精心设计驱动电路及缓冲保护电路, 才能使其优良特性得到发挥。

功率 MOS 场效应管 (Power MOSFET) 是多子导电的电压控制型器件, 开关损耗小而频率高, 可用于工作频率高达几兆赫的高频变换器中, 且使用较 GTR 方便。但导通压降大, 限制了电流密度, 因而限制了其开关功率水平。

绝缘栅功率晶体管 (IGBT) 和 MOS 控制晶闸管 (MCT) 是具有 MOS 和双极型的混合机制新型器件, 两者都由 MOS 栅(门)极控制开通和关断, 兼有 MOSFET 的高输入阻抗和 GTR 或 GTO 的低导通损耗优点, 载流能力令人瞩目。多年来人们一直希望能有特性近乎理想的器件, 即开关功率大, 通态压降近于零, 无漏电, 耐高温及开关频率高。MCT 的面世无疑朝这个方向迈了一步。由美国通用电气公司 (GE) 等联合研制的典型 $60\text{A}/1400\text{V}$ 的 MCT, 其开通和关断时间总和为 $2.2\mu\text{s}$, 电压上升率允许 $20\text{kV}/\mu\text{s}$, 电流上升率允许 $2\text{kA}/\mu\text{s}$, 导通压降 $U_{0N}=1\text{V}$, 持续结温 $T_j=250\sim 300^\circ\text{C}$, 管芯电流密度达 $1\text{kA}/\text{cm}^2$ 。目前 IGBT 已有 $300\text{A}/1200\text{V}$ 的商品。

将功率开关与控制逻辑集成同一芯片的思想已随高压集成电路制造技术的进步而有可能实现, 产生了新一代功率集成电路 (Power IC 或 Smart Power)。实际上, 双机制器件 IGBT、MCT 等已具有功率集成电路的雏形。当前功率集成电路设计与工艺还不成熟, 主要技术障碍在于功率开关和逻辑控制器件在同一硅片上争地盘, 以及两者之间隔离区的构造。随着技术的进步可望会被突破。

我国晶闸管和整流二极管的生产水平, 可由西安电力电子技术研究所生产的 KP 型晶闸管作为代表, 其硅片直径为 77mm , 电流达 $1620\sim 2500\text{A}$, 电压 $4400\sim 1800\text{V}$; 其次北京整流器厂的生产技术水平为 $1100\sim 2500\text{A}$, $4500\sim 5000\text{V}$ 。

GTR 的生产水平可用北京椿树整流器厂和上海海燕半导体器件厂的生产线作为代表, 其水平为 $50\sim 800\text{A}$, $1200\sim 600\text{V}$, 工作频率限于工频或低频。

GTO 的水平可用北京椿树整流器厂和上海整流器厂的生产线作为代表, 其水平为电流 $2500\sim 600\text{A}$, 电压 $1800\sim 4500\text{V}$ 。

功率 MOS 场效应管 (MOSFET), 国内已有 1000V 的商品, 低压的电流达 50A 。IGBT 和 MCT 等新型器件, 国内还刚刚起步。

三、电力电子技术的地位

电力电子器件的基本特点之一是能以小信号输入控制很大的输出, 放大倍数极大, 这就是电力电子设备成为强、弱电之间接口的基础。微电子技术和计算机技术的新成就, 可以通过这一接口移植到传统产业产品, 可以促使传统产品的更新换代。当今机电产品技术上的突破主要出路在于电子化。电力电子器件的另一基本特点是工作于开关状态, 正向压降低而反向漏电流小, 从而在理论上保证了各类电力电子设备所共有的节能性能。我国缺电严重, 但另一方面却用电严重浪费, 每单位产值耗电量为日本的 6 倍, 美国的 2~3 倍, 苏联的 1.7 倍, 矛盾十分尖锐。电力电子技术的应用正是解决这一矛盾的有力措施。

由于以上考虑, 国家科委已将电力电子技术列为我国重点发展的高技术领域之一, 电力电子技术的地位已被充分肯定。

四、电力电子技术应用概况

应用电力电子技术构成的变流装置，按其功能可分为如下几种类型：

可控整流器 把交流电压变换成固定或可调的直流电压。

逆变器 把直流电变换成频率固定或可调的交流电。

交流调压器 把固定或变化的交流电压变换成可调或固定的交流电压。

周波变换器 把固定或变化频率的交流电变换成频率可调或恒定的交流电。

斩波器 把固定或变化的直流电压变换成可调或恒定的直流电压。

电力半导体器件构成的变流装置有很多优点，在很大程度上与半导体器件本身的优点分不开，大致归纳如下：

1. 体积小、重量轻，与机组相比，没有机械旋转部分的磨损，无噪声，维修方便。
2. 功率增益高。只需很小信号（几伏电压、几百毫安电流）即可控制数百安、数千伏以上的工作电流和电压，功率放大倍数可达数万以上。
3. 控制动态特性好。晶闸管装置响应为毫秒级，功率晶体管则为微秒级，反应迅速，动态过程短。
4. 效率高，节省能源。
5. 经济指标优异。

缺点归纳主要有：

1. 过电压、过电流能力低。
2. 某些工作状态功率因数低。
3. 对电网的影响。由于器件处于开关工作状态，使交流侧电流含有高次谐波，引起电源波形畸变而影响到电网上其它负载。

上述缺点已在不断克服，且随着技术的发展将会获得更好效果。

电力电子技术应用非常广泛，国防军事、工业交通、农业商业和文体医药等以至家用电器无不渗透着电力电子技术的新成就。下面概括举例说明。

（一）直流调速

改变电枢电压或激磁电压可对直流电机进行调速。过去采用电动—发电机组，需多台电机，机构庞大不经济。改用晶闸管供电组成晶闸管电动机系统，只需一台直流电机，结构简单，动、静态特性好，且易于实现自动控制。国内中小容量的晶闸管传动装置技术上成熟，已有统一设计规格的系列产品，已在冶金、机械、造纸、纺织等多部门使用。大功率的传动装置也在逐年增长，如几千千瓦晶闸管轧机已在工作运行。

用晶闸管（或功率晶体管）作为直流开关，构成斩波器，对直流电压调节，即实现了直流电机的直流脉冲调速。调速、启动、制动平稳，操纵灵活，维修方便，可无级调速，并能实现再生制动。比过去采用电阻调速，可节能 30%~40% 以上。已广泛用于地铁电机车、矿山机车、城市电车和蓄电池电瓶车等。

（二）交流调速

采用逆变或变频装置进行交流调速，应用这种静止变频装置，频率连续可调，可实现交流电动机四象限运行，调速性能优异。国内晶闸管构成的中小功率变频装置已经使用，但尚

未普及。小功率的功率晶体管变频调速控制器,近两年来开始有商品,这个领域有大量工作要做。许多国家都十分重视变频调速技术,因其调速范围宽、功率因数高及可靠性好等优点,变频调速的研究已成为电力电子技术近期的一个发展重点。由于具有自关断能力的半导体器件——GTO和GTR的发展,简化了换相,提高了开关速度,并且降低了价格,为发展交流变频调速提供了很好条件。

线绕式异步电动机的串级调速,是应用晶闸管可逆整流电路,将转子电压逆变成交流电送回电网。这种方式比过去用电阻调速优越得多,它节能显著、结构简单、调速范围宽,特别适用于泵和风机类负载。

无换向器电动机是一种自控式变频调速电动机。这种电机兼有交、直流电机的优点,结构简单,具有良好控制特性。还有开关磁阻电机,它是由电力电子变换器驱动的磁阻电机,除具有电机转子结构简单,造价低廉,转矩/阻尼比大等特点外,电子变换器结构简单是另一突出优点。这些与电子变换器结合产生的新型调速电机,都很有发展前途。

(三) 晶闸管中频电源

它是将工频交流电经整流再逆变成中频交流电以供给交流负载。有400~800Hz供电给仪器设备的试验用电源;1000Hz以上的中频电源则用于熔炼、热处理等。它已逐渐取代了过去的中频发电机组。目前国内生产的单机容量已达1000kW。

(四) 不停电电源

主要用于某些不能断电的重要设备和部门,如:通信中心,计算机房,气象站,化工厂,医院和国防重要部门等。这种不停电电源主要靠逆变器。在交流电网断电时把蓄电池的直流电逆变为交流电,自动投入供电。国内已生产中小容量的不停电电源。

(五) 电子开关

晶闸管本身就是一个无触点开关元件。它动作快、损耗小、寿命长,已在多种场合取代有触点的接触点。

电力电子技术还应用于高压直流输电、有源滤波、无功补偿等等,应用极为广泛。上面的介绍较多地是从工业自动化的角度给予的概括,且不全面。可以肯定,随着电力电子技术的进一步发展和推广应用,它将在国民经济各部门中发挥更大作用。

五、教学要求

“电力电子技术”是电气技术专业的一门专业基础课。该课程包含器件、电路、应用三方面的内容,但应以电路为主,讲解器件原理及特性目的是为了应用器件组成电路,故应注意掌握器件外部特性及极限额定参数。本课程的主要篇幅在于研究各类电力半导体器件所构成的各种功率变换电路。学生应掌握功率变换主电路的构成和工作原理、不同负载对电路工作特性的影响以及主电路的元件参数计算与选择。学生应熟悉了解各种典型触发电路的组成、工作原理和特点。在组成各种功率电路时,脉冲变压器和电感常常必不可少,并且是重要的组成部分。为了建立系统完整的概念和掌握设计方法,本书专门用一章系统分析了铁芯的不同工作状态、材料的选用和参数的设计计算。学生应能运用这些知识,进行设计和计算工作。

第一章 晶 闸 管

晶体闸流管简称晶闸管。电力电子技术，就是以晶闸管和功率晶体管等电力半导体器件对电能进行变换与控制的技术。它包括电压、电流、频率、波形和相数的变换等。自从1957年第一只晶闸管问世以来（当时额定值只有 $16\text{A}/300\text{V}$ ），由于科学技术的发展和进步，现在已能生产数千安培、数千伏的大功率晶闸管元件。晶闸管也从普通晶闸管（又称可控硅）发展到快速晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管、可关断晶闸管及光激发晶闸管等。晶闸管作为大功率可以控制的静态固体开关，只需用几十至几百毫安的电流，就能控制几百至几千安培的电流，实现了弱电对强电的控制，使电子技术从弱电扩展到强电领域。

晶闸管作为电力半导体器件，由于具有体积小、重量轻、效率高、反应快、控制特性好等优点，特别是它的高压大容量、低损耗和高性能使其在国民经济各个领域及国防方面获得了广泛的应用。

普通晶闸管又称可控硅整流元件，是国内目前应用最为广泛的一种；在以后的各章节中，如果不做特别说明，通常用晶闸管代替普通晶闸管的名称。

第一节 晶闸管的结构和工作原理

一、晶闸管的结构

晶闸管的外形与符号如图 1-1 所示。目前国内生产的晶闸管，外形有两种形式，一种为螺栓形，一种为平板形。晶闸管在工作过程中，由于损耗而产生的热量将通过散热器散发，以降低管芯的温度。螺栓形晶闸管有三个极，螺栓一端是阳极 A ，使用时用螺帽固定在散热器上，另一端粗引线是阴极 K ，细引线是门极（也称控制极） G 。平板形晶闸管，它的两面分别是阳极和阴极，中间引出线是门极。使用时，用两个互相绝缘的散热器把元件紧夹在中间，由于平板形元件散热效果较好，故容量较大的晶闸管都采用平板式结构。晶闸管内部的管芯结构如图 1-2 所示，它是以硅单晶体为基本材料的 $P_1N_1P_2N_2$ 四层三端器件。

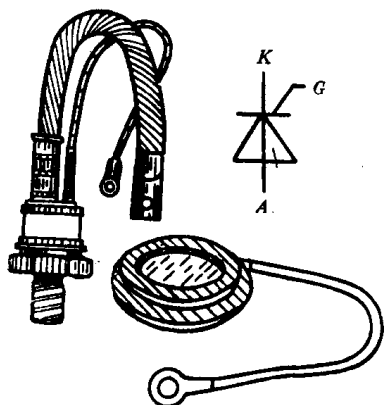


图 1-1 晶闸管的外形与符号

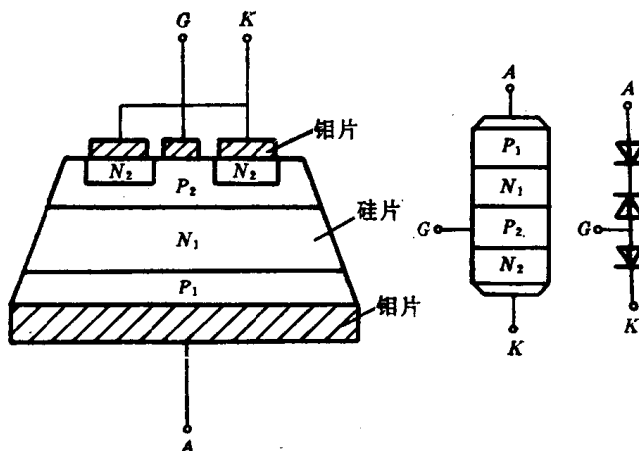
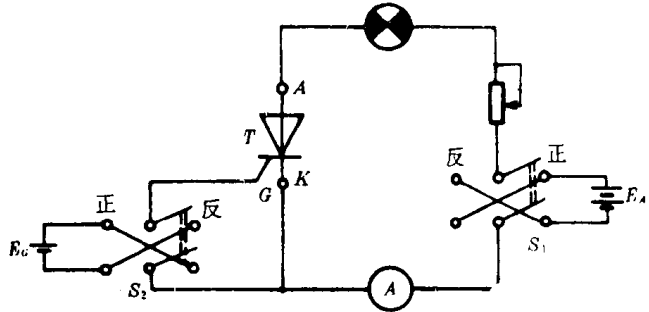


图 1-2 晶闸管的结构

二、晶闸管导通关断条件

晶闸管作为开关元件它在什么条件下导通和关断, 通过以下实验来说明, 实验线路如图1-3所示。晶闸管的阳极和阴极通过开关 S_1 与电源电压 E_A 连接, 门极和阴极通过开关 S_2 与电源 E_G 相连。当晶闸管阳极 A 接电源正端、阴极接电源负端时, 称晶闸管接正向阳极电压, 否则为接反向阳极电压; 当晶闸管门极 G 接门极电源 E_G 正端、阴极 K 接 E_G 负端时, 称晶闸管门极接正向门极电压, 否则为反向门极电压。

晶闸管的导通、关断实验如下所述:



1. 晶闸管加上正向阳极电压, 门极电路断开或接反向门极电压时, 电路灯泡不亮, 说明晶闸管处于关断状态。
2. 晶闸管加上反向阳极电压, 则不论门极电源开关闭合与否, 灯泡均不亮, 说明晶闸管仍处于关断状态。
3. 晶闸管加上正向阳极电压, 门极接正向门极电压, 这时灯泡亮, 说明晶闸管导通。
4. 当晶闸管导通以后, 如果将门极电路开关 S_2 打开或接反向门极电压, 灯泡继续亮, 说明晶闸管继续保持导通。
5. 在晶闸管主电路中接上电流表, 当减小晶闸管正向阳极电压, 电路中电流表读数减小, 说明流过晶闸管电流减小; 当电流减小到某最小值时, 灯泡熄灭, 说明晶闸管关断。将这个能保持晶闸管导通的最小电流称为晶闸管的维持电流, 一般为十几到几十毫安。

通过上述试验现象, 可以得出以下结论:

1. 晶闸管的导通条件有两个, 一是晶闸管的阳极、阴极间必须加上正向阳极电压; 二是晶闸管的门极、阴极间必须加上适当的正向门极电压和电流。
2. 晶闸管一旦导通, 门极电压即失去控制作用。故欲使晶闸管从阻断变为导通, 在晶闸管承受正向阳极电压的同时, 只需在门极和阴极间加正向脉冲电压或电流即可。
3. 当晶闸管导通后, 欲使其关断, 需使流过晶闸管的电流减小到其维持电流以下。这可以用减小阳极电压到零或在晶闸管阳极、阴极间加反向阳极电压的办法达到。

晶闸管承受正向阳极电压时, 给门极加正向脉冲, 晶闸管从阻断变为导通的过程称为触发导通。门极触发电流一般只有几十毫安到几百毫安, 而晶闸管触发导通以后, 则可以通过几百、几千安培电流, 故晶闸管是一个可以控制的大功率静态开关。

三、晶闸管的工作原理

下面从晶闸管内部来分析晶闸管单向导通的工作原理。

晶闸管的管芯是 $P_1 N_1 P_2 N_2$ 四层半导体, 形成三个 PN 结 J_1 、 J_2 、 J_3 如图 1-4 (a) 所示。当晶闸管阳极、阴极间加上正向电压时, J_1 、 J_3 处于正向偏置, J_2 处于反向偏置, 只流过很小漏电流, 称为正向阻断状态。当晶闸管阳极阴极间加上反向电压时, J_2 结正向偏

置, J_1 、 J_3 处于反向偏置, 也只流过很小的漏电流, 晶闸管处于反向阻断状态。

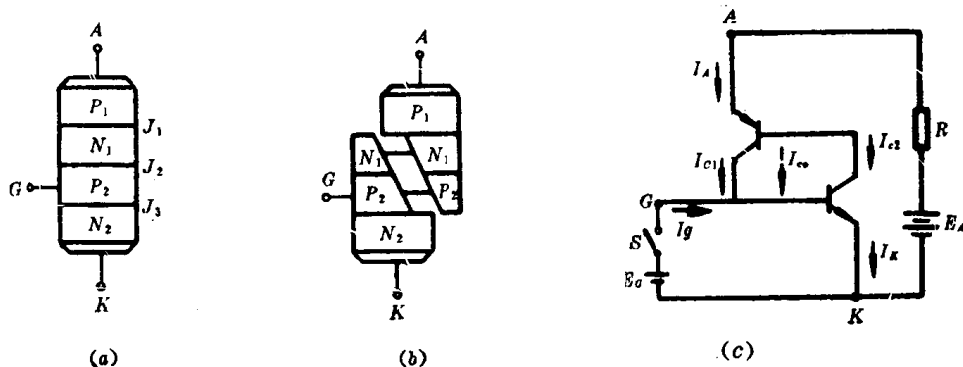


图 1-4 晶闸管工作原理示意图

将晶闸管 N_1 层和 P_2 层各分为两部分, 则可将晶闸管看成由 PNP 型和 NPN 型两个晶体管的互连, 如图 1-4(c) 所示。其中, 一个晶体管的集电极同时又是另一管的基极。当晶闸管加上正向阳极电压, 门极也加上足够的门极电压时, 则有电流 I_g 从门极流入 NPN 管的基极, NPN 管导通后, 其放大后的集电极电流 I_{c2} 流入 PNP 管的基极使其导通, 该管放大后的集电极电流 I_{c1} 又作为基极电流流入 NPN 管的基极, 如此循环, 产生强烈的正反馈过程, 造成两个晶体管的饱和导通, 从而使晶闸管由阻断迅速转为导通状态。

$$I_g \rightarrow I_{b2} \uparrow \rightarrow I_{c2} \uparrow (I_{b1} \uparrow) \rightarrow I_{c1} \uparrow$$

设两个晶体管的电流放大倍数分别为 α_1 和 α_2 , I_A 和 I_K 分别是 PNP 管及 NPN 管的发射极电流, 则 $\alpha_1 = I_{c1}/I_A$ 、 $\alpha_2 = I_{c2}/I_K$ 。在 J_2 内电场作用下, 流过 J_2 结的反向漏电流是 I_{c0} , 则晶闸管的阳极电流

$$\begin{aligned} I_A &= I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} \\ &= \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_K + I_{c0} \end{aligned} \quad (1-1)$$

若晶闸管的门极电流为 I_g , 则晶闸管的阴极电流

$$I_K = I_A + I_g \quad (1-2)$$

由式 (1-1) 及式 (1-2) 得晶闸管的阳极电流,

$$I_A = \frac{I_{c0} + \alpha_2 I_g}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-3)$$

两个晶体管的电流放大倍数 α_1 和 α_2 , 随发射极电流 I_{e1} (即 I_A) 和 I_{e2} (即 I_K) 的改变而变化, 其变化情况如图 1-5 所示。

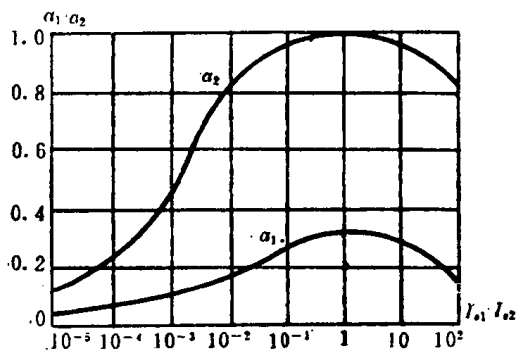


图 1-5 两个晶体管的 α_1 、 α_2 与发射极电流的关系曲线

当晶闸管只承受阳极电压, 而门极不加触发电压时, $I_g = 0$, 两晶体管的电流放大倍数 α_1 、 α_2 近似为零, 由式 (1-3) 知, 阳极电流 $I_A \approx I_{c0}$, 晶闸管处于正向阻断状态。当门极有足够电流 I_g 时, 则随着两晶体管发射极电流的上升而增大, 当 $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时, 式 (1-3) 中分母 $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 0$, 这时晶闸管的阳极电流 I_A 将急剧上升, 晶闸管由正向阻断状态转换为正向导通。此后流过晶闸管的电流仅决定于主回路负载和外加电源电压。

晶闸管导通以后, 由于 $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 0$, 由式 (1-3) 可知, 此时即使去掉门极信号使 $I_g = 0$, 晶闸管仍将保持原来的阳极电流而继续导通。欲关断晶闸管, 只有减小阳极电压到零或为负值, 使阳极电流小于维持电流, $\alpha_1 + \alpha_2$ 迅速下降近似于零, 晶闸管重新恢复阻断

状态, 只流过很小的漏电流。

第二节 晶闸管的特性和主要参数

晶闸管是一个可以控制的单向导电开关, 在使用过程中, 晶闸管导通后能通过多大电流, 管压降有多大, 晶闸管在阻断状态时能够承受多大电压, 要使它从阻断变为导通, 门极需要加多大的触发电压和触发电流等等, 这些都与晶闸管的伏安特性和参数有关。

一、晶闸管的伏安特性

晶闸管的伏安特性就是指晶闸管阳极阴极间的电压 u_{AK} 与阳极电流 i_A 之间的变化关系, 如图 1-6 所示, 它可以用实验的方法测得。

当门极触发电流 $I_g = 0$ 时, 晶闸管在正向阳极电压作用下只有很小的漏电流, 晶闸管处于正向阻断状态。随着正向阳极电压的加大, 晶闸管的正向漏电流也逐渐增加, 当阳极电压 u_{AK} 达到正向转折电压 U_{BO} 时, 阳极电流 i_A 突然急剧增大, 晶闸管从阻断转化为导通状态, 特性从高阻区(阻断状态)经负阻区到达低阻区(导通状态)。门极未加触发信号仅由于阳极电压过大, 处于反偏的 J_2 结

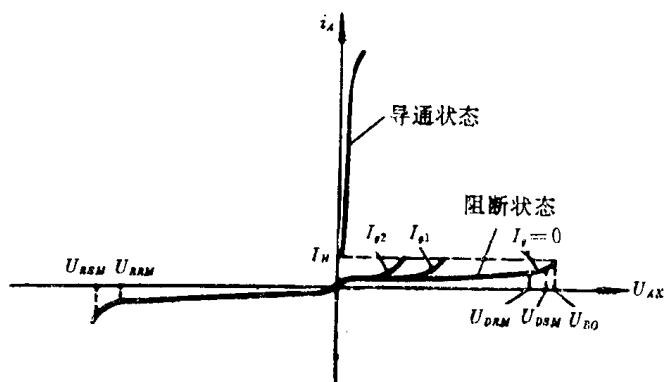


图 1-6 晶闸管的伏安特性

中的少数载流子得到足够大的能量, 能通过碰撞产生更多的载流子, 新生的载流子在电场作用下又获得较高的能量, 结果在 J_2 结形成雪崩, 造成晶闸管的雪崩击穿导通属于非正常导通。故在使用中, 晶闸管承受的工作电压不允许超过转折电压 U_{BO} 。如果在晶闸管门极加上触发电流 I_g , 它就会在较低的阳极电压下触发导通, 门极电流 I_g 越大, 转折电压越低, 当门极电流 I_g 足够大时, 只需很小的正向阳极电压, 就可使晶闸管从阻断变为导通。晶闸管导通后管压降很小, 其阳极电流 i_A 的大小决定于外加电压和负载。晶闸管导通后的伏安特性与二极管的正向伏安特性相似。当逐渐减小晶闸管的阳极电压时, 其阳极电流也随之减小, 当阳极电流 i_A 小于维持电流 I_H , 晶闸管就从导通转换为阻断状态。

晶闸管的反向伏安特性位于第Ⅲ象限。它是反向阳极电压与反向阳极漏电流的关系曲线, 其特性与一般二极管的反向特性相似。在正常情况下, 当晶闸管承受反向阳极电压时, 不论门极是否加上触发信号, 晶闸管总是处于反向阻断状态, 只流过很小的反向漏电流。反向电压增加, 反向漏电流也逐渐增大, 当反向电压增加到某值时, 反向漏电流将急剧增长, 导致晶闸管反向击穿而损坏。

二、晶闸管的主要参数

为了正确选择和使用晶闸管, 需要了解和掌握晶闸管的一些主要参数及其意义。表 1-1 和表 1-2 分别列出晶闸管主要参数和门极的主要参数。在厂家生产的晶闸管元件的合格证上, 还常给出某些参数的实测值, 如通态峰值电压、门极触发电压、门极触发电流、维持电流等等。

表 1-1 晶闸管元件的主要参数

参数 系列	通态平 均电流 I_{Ta} A	断态重复峰值电压, 反向重复峰值电压 U_{DRM}, U_{RRM} V	断态重复平均电流, 反向重复平均电流 I_{DR}, I_{RR} mA	额定结温 T_{jM} °C	断态电压 临界上升率 du/dt V/ μ s	通态电 流 临界 上升 率 di/dt A/ μ s	浪涌电 流 I_{TSM} A
序 号	1	2	3	4	5	6	7
KP 1	1	100~3000	≤ 1	100	30	—	20
KP 5	5	100~3000	≤ 1	100	30	—	90
KP 10	10	100~3000	≤ 1	100	30	—	190
KP 20	20	100~3000	≤ 1	100	30	—	380
KP 30	30	100~3000	≤ 2	100	30	—	560
KP 50	50	100~3000	≤ 2	100	30	30	940
KP 100	100	100~3000	≤ 4	115	100	50	1880
KP 200	200	100~3000	≤ 4	115	100	80	3770
KP 300	300	100~3000	≤ 8	115	100	80	5650
KP 400	400	100~3000	≤ 8	115	100	80	7540
KP 500	500	100~3000	≤ 8	115	100	80	9420
KP 600	600	100~3000	≤ 9	115	100	100	11160
KP 800	800	100~3000	≤ 9	115	100	100	14920
KP 1000	1000	100~3000	≤ 10	115	100	100	18600

注: T 表示通态 D 表示断态 R 表示反向 (第一位) 或重复的 (第二位)
 S 表示不重复的 M 表示最大值

表 1-2 晶闸管门极的参数

参数 系列	门 极 触发电流 I_{GT} mA	门 极 触发电压 U_{GT} V	门 极 不触发电流 I_{GD} mA	门 极 不触发电压 U_{GD} V	门极正向 峰值电流 I_{GFM} A	门极反向 峰值电压 U_{GRM} A	门极正向 峰值电压 U_{GFM} V	门 极 平均功率 P_{Gav} W	门 极 峰值功率 P_{GM} W
序 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
KP 1	3~30	≤ 2.5	0.4	0.3	—	5	10	0.5	—
KP 5	5~70	≤ 3.5	0.4	0.3	—	5	10	0.5	—
KP 10	5~100	≤ 3.5	1	0.25	—	5	10	1	—
KP 20	5~150	≤ 3.5	1	0.25	—	5	10	1	—
KP 30	8~150	≤ 3.5	1	0.15	—	5	10	1	—
KP 50	9~150	≤ 3.5	1	0.15	—	5	10	1	—
KP 100	10~250	≤ 4	1	0.15	—	5	10	2	—
KP 200	10~250	≤ 4	1	0.15	—	5	10	2	—
KP 300	20~300	≤ 5	1	0.15	4	5	10	4	15
KP 400	20~300	≤ 5	1	0.15	4	5	10	4	15
KP 500	20~300	≤ 5	1	0.15	4	5	10	4	15
KP 600	30~350	≤ 5	—	—	4	5	10	4	15
KP 800	30~350	≤ 5	—	—	4	5	10	4	15
KP 1000	40~400	≤ 5	—	—	4	5	10	4	15

注: G 表示门极 T 表示触发 D 表示不触发 F 表示正向 R 表示反向 M 表示最大值

表 1-3 列出了晶闸管正反向重复峰值电压的等级。

表 1-3 晶闸管正反向重复峰值电压等级

级 别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
正反向重复 峰值电压 (V)	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000

级 别	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
正反向重复 峰值电压 (V)	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000

1. 晶闸管的电压参数

(1) 断态不重复峰值电压 U_{DSM}

晶闸管在门极开路时, 施加于晶闸管的正向阳极电压上升到正向伏安特性曲线急剧弯曲处所对应的电压值。它是一个不能重复且每次持续时间不大于 10 毫秒的断态最大脉冲电压。 U_{DSM} 值小于转折电压 U_{BO} , 其差值有多大, 由晶闸管制造厂自定。

(2) 断态重复峰值电压 U_{DRM}

晶闸管在门极开路及额定结温下, 允许每秒 50 次, 每次持续时间不大于 10 毫秒, 重复施加于晶闸管上的正向断态最大脉冲电压。 $U_{DRM} = 80\% U_{DSM}$ 。

(3) 反向不重复峰值电压 U_{RSM}

晶闸管门极开路, 晶闸管承受反向电压时, 对应于反向伏安特性曲线急剧弯曲处的反向峰值电压值。它是一个不能重复施加且持续时间不大于 10 毫秒的反向最大脉冲电压。

(4) 反向重复峰值电压 U_{RRM}

晶闸管门极开路及额定结温下, 允许每秒 50 次、每次持续时间不大于 10 毫秒、重复施加于晶闸管上的反向最大脉冲电压。 $U_{RRM} = 80\% U_{RSM}$ 。

(5) 额定电压

将断态重复峰值电压 U_{DRM} 和反向重复峰值电压 U_{RRM} 中较小的那个值取整后作为该晶闸管的额定电压值, 其电压等级见表 1-3。

在使用时, 考虑瞬时过电压等因素的影响, 选择晶闸管的额定电压值要留有安全裕量。一般取电路正常工作时晶闸管所承受工作电压峰值的 2~3 倍。

(6) 通态平均电压 U_{ON}

通过正弦半波的额定通态平均电流和额定结温时, 晶闸管阳极阴极间电压降的平均值, 通称管压降。通态平均电压按规定分为九组, 每组差 0.1 V, 最低值为 0.4 V, 最高值为 1.2 V。如表 1-4 所示。

表 1-4 通态平均电压分组

组 别	通态平均电压 (V)	组 别	通态平均电压 (V)	组 别	通态平均电压 (V)
A	$U_{ON} \leq 0.4$	D	$0.6 < U_{ON} \leq 0.7$	G	$0.9 < U_{ON} \leq 1.0$
B	$0.4 < U_{ON} \leq 0.5$	E	$0.7 < U_{ON} \leq 0.8$	H	$1.0 < U_{ON} \leq 1.1$
C	$0.5 < U_{ON} \leq 0.6$	F	$0.8 < U_{ON} \leq 0.9$	I	$1.1 < U_{ON} \leq 1.2$

2. 晶闸管的电流参数

(1) 通态平均电流 I_{Tav}

在环境温度为 $+40^{\circ}\text{C}$ 和规定的冷却条件下, 晶闸管在导通角不小于 170° 的电阻性负载电路中, 在额定结温时, 所允许通过的工频正弦半波电流的平均值。将该电流按晶闸管标准电流系列取整数值, 称为该晶闸管的通态平均电流, 即该元件的额定电流, 见表 1-1。

晶闸管的额定电流用通态平均电流来标定是因为整流电路输出端的负载常需用平均电流。但是, 决定晶闸管允许电流大小的是管芯的结温; 而结温的高低是由允许发热的条件决定的, 造成晶闸管发热的原因是损耗, 其中包括晶闸管的通态损耗, 断态时正反向漏电流引起的损耗, 以及晶闸管元件的开关损耗, 此外还有门极损耗等。为了减小损耗, 希望元件的通态平均电压和漏电流要小些。门极的损耗较小, 而元件的开关损耗随工作频率的增加而加大。影响晶闸管发热的条件主要有散热器尺寸及元件与散热器的接触状况, 采用的冷却方式 (自冷却、强压通风冷却、液体冷却) 以及环境温度等。晶闸管发热和冷却的条件不同, 其允许通过的通态平均电流值也不一样。

从管芯发热角度看, 表征热效应的电流应以有效值表示, 不论流经晶闸管的电流波形如何, 导通角有多大, 只要电流的有效值相等, 其发热就是相同和等效的。因此, 只要流过晶闸管的任意波形电流的有效值等于该元件通态平均电流 (即额定电流) 的有效值, 则管芯发热一样, 其通过的电流就是允许的。

根据规定条件, 流过晶闸管的工频正弦半波电流波形如图 1-7 所示。

设电流峰值为 I_m , 则通态平均电流

$$\begin{aligned} I_{Tav} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{I_m}{2\pi} \left[-\cos \omega t \right] \Big|_0^{\pi} = \frac{I_m}{\pi} \quad (1-4) \end{aligned}$$

该电流波形的有效值

$$\begin{aligned} I_K &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} \\ &= I_m \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \left[\frac{1}{2} - \frac{\cos 2\omega t}{2} \right] d(\omega t)} = \frac{I_m}{2} \quad (1-5) \end{aligned}$$

正弦半波电流波形系数 K_f 应有

$$K_f = \frac{I_K}{I_{Tav}} = \frac{I_m/2}{I_m/\pi} = 1.57 \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 知, 如果额定电流为 100 A 的晶闸管, 其允许通过的电流有效值为 $1.57 \times 100 = 157\text{ A}$ 。

在实际电路中, 流过晶闸管的波形可能是任意的非正弦波形, 如何去计算和选择晶闸管的额定电流值, 应根据电流有效值相等即发热相同的原理, 将非正弦半波电流的有效值 I_K 或平均值 I_d 折合成等效的正弦半波电流平均值去选择晶闸管额定值, 即

$$\begin{aligned} I_K &= K_f I_d = 1.57 I_{Tav} \\ I_{Tav} &= \frac{K_f I_d}{1.57} = \frac{I_K}{1.57} \quad (1-7) \end{aligned}$$

式 (1-7) 中的 K_f 为非正弦波形的波形系数。由于晶闸管元件的热容量小, 过载能力

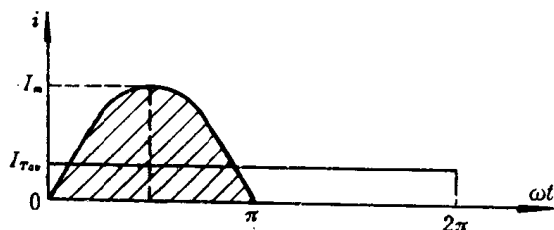


图 1-7 晶闸管的通态平均电流