

电力电子技术

DIANLI DIANZI JISHU

赵慧敏 张 宪 主编



化学工业出版社



郑州大学 *04010779133Z*

电力电子技术

赵慧敏 张 宪 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

TM1
Z304

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术/赵慧敏, 张宪主编. —北京: 化学工业出版社, 2012. 1
ISBN 978-7-122-11013-8

I. 电… II. ①张…②赵… III. 电力电子技术
IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 064415 号

责任编辑: 刘 哲
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 高 震
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京市振南印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 11¼ 字数 291 千字 2012 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

前 言

电子技术包括信息电子技术和电力电子技术两大部分。采用半导体电力开关器件构成各种开关电路,按一定的规律、周期性地、实时控制开关器件的通、断状态,可以实现电子开关型电力变换和控制。这种电力电子变换的控制,被称为电力电子学(Power Electronics)或电力电子技术。

科学技术的发展,对于提高生产力、推动人类文明前进和改善人民生活,具有极其重要的作用。自从20世纪50年代晶闸管问世以来,电力电子技术得到了迅猛发展,目前已经广泛应用于工业及生活的各个领域,并对国民经济产生越来越大的影响。这种影响可以从社会对电力电子技术方面的人才需求反映出来。目前,电力电子技术通过电能变换的方式,给各种各样的负载提供所需要的电源形式和节约电能的手段。因此可以说电力电子技术的应用无所不在。为了电力电子器件更加实用、高效、可靠地应用到电源变换电路系统中,电力电子应用技术在集成化、功能单元模块组件化、智能化、高频化、不断提高装置效率、不断拓展电压应用范围等方面不断探索并不断发展着,这使得电力电子技术人才在社会上供不应求,考虑到社会需求的广泛性和实用性,我们编写了本书。

由于所有与电力、电子有关的高科技领域都涉及电力电子变换和控制技术,所以电力电子学是从事相关工作的专业人员所必须具有的基础知识。本书以电力元器件、电气工程、电子学和控制理论最基本的原理为起点,完整、系统地讲述电力电子变换和控制技术的基础知识、新技术的发展和应用前景。

在编写本书时,力求深入浅出、简单明确、通俗易懂。突出实用性,兼顾覆盖面,并注意培养读者分析问题和解决问题的能力。学完本书后,读者可以掌握电力电子电路的基本分析方法和电力电子学的基本理论,了解主要电力电子器件的特性和电力电子基本电路的基本功能,可供电力电子设备维修时参考。

本书内容包括常用电力电子器件、整流电路、晶闸管触发电路及应用、交流调压电路与交-交变频电路、逆变电路、开关电路、电力电子应用电路七个部分。

本书可供广大维修电工、电气技师和工程技术人员使用,也可供大、中专院校以及技工学校相关专业的师生作参考书使用。

本书由赵慧敏、张宪主编,张大鹏、闫宏副主编,参加本书编写工作的人员还有韩凯鸽、沈虹、李志勇、刘卜源、付兰芳、李纪红、余妍、刘健、程金海等,全书由付少波、李良洪主审。

鉴于本人实践经验和学识水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2011. 11

目 录

第一章 常用电力电子器件	1
第一节 功率二极管.....	1
一、功率二极管的基本特性.....	1
二、功率二极管的主要参数.....	2
三、功率二极管的选择.....	3
第二节 晶闸管.....	3
一、基本结构.....	3
二、工作原理.....	4
三、伏安特性.....	6
四、主要参数.....	6
五、晶闸管的选用.....	7
六、门极关断晶闸管 (GTO).....	7
第三节 双极型功率晶体管 (GTR).....	10
一、双极型功率晶体管的基本特性.....	10
二、GTR 的极限参数.....	11
三、二次击穿和安全工作区.....	11
四、GTR 的缓冲电路.....	12
五、GTR 的应用.....	13
六、GTR 的选用.....	13
第四节 电力场效应晶体管 (MOSFET).....	15
一、电力场效应晶体管的基本结构.....	15
二、电力 MOSFET 的基本特性.....	16
三、电力 MOSFET 的主要参数.....	17
第二章 整流电路	26
第一节 单相半波整流电路.....	26
一、单相半波不可控整流电路.....	26
二、单相半波可控整流电路.....	28
第二节 单相全波整流电路.....	30
一、单相桥式不可控整流电路.....	30
二、单相桥式半控整流电路.....	31
三、单相桥式全控整流电路.....	33
四、单相全波不可控整流电路.....	35
五、单相全波可控整流电路.....	35
第三节 三相整流电路.....	36
一、三相半波不可控整流电路.....	36
二、三相半波可控整流电路.....	37
三、三相桥式不可控整流电路.....	39
四、三相桥式全控整流电路.....	41
五、三相半控桥稳压电源.....	44
第四节 晶闸管的保护.....	47
一、晶闸管的过电流保护.....	47
二、晶闸管的过电压保护.....	47
第五节 晶闸管的应用举例.....	48
一、晶闸管延时继电器.....	48
二、晶闸管调光电路.....	49
三、双向晶闸管.....	49
四、双向晶闸管的应用.....	51
第三章 晶闸管触发电路及应用	52
第一节 对触发电路的要求.....	52
一、触发电路的一般要求.....	52
四、电力 MOSFET 的选用.....	17
五、电力 MOSFET 器件在变流技术中的 应用.....	18
六、电力 MOSFET 驱动电路举例.....	18
第五节 绝缘门极双极型晶体管 (IGBT).....	19
一、IGBT 工作原理.....	19
二、IGBT 的工作特性.....	20
三、IGBT 的主要参数.....	21
四、IGBT 的选用.....	21
五、IGBT 的门极驱动和保护.....	22
六、IGBT 的应用实例.....	22
第六节 新型电力电子器件.....	23
一、MOS 控制晶闸管 MCT.....	23
二、静电感应晶体管 SIT.....	23
三、静电感应晶闸管 SITH.....	23
四、集成门极换向晶闸管 IGCT.....	23
五、功率模块与功率集成电路.....	24
第七节 全控型电力电子器件的比较.....	25
一、电压、电流的比较.....	25
二、性能的比较.....	25

二、晶闸管的触发电路	52	三、KC10 移相触发器	62
三、三相桥式可控整流电路触发电路的 基本结构	54	四、KC08 过零触发器	63
第二节 单结晶体管触发电路	54	五、数字式触发电路	64
一、单结晶体管	55	第四节 触发脉冲与主电路电压的同步	65
二、单结晶体管振荡电路	56	一、同步的概念	65
三、单结晶体管触发电路	57	二、实现同步的方法	66
四、单结晶体管的检测	58	三、正弦波同步触发电路	67
第三节 集成电路触发器	59	四、同步信号为锯齿波的触发电路	68
一、KC01 移相触发器	59	第五节 晶闸管触发电路应用实例	71
二、KC04 集成触发器	61	一、单向晶闸管触发电路	71
第四章 交流调压电路与交-交变频电路	76	二、双向晶闸管触发电路	73
第一节 晶闸管交流开关电路	76	三、AC-AC 变频器	87
一、晶闸管交流开关的电路结构及触 形式	76	一、AC-AC 变频器电路结构和工作 原理	87
二、双向晶闸管交流开关电路	77	二、单相交-交变频电路	89
三、自动恒温电热炉	78	三、三相交-交变频电路	91
四、带抽头变压器的晶闸管稳压电源	78	四、AC-AC 变换电路的特点	91
第二节 交流调压电路	79	五、变频器主电路结构及功能	93
一、双向晶闸管构成的交流调压电路	79	六、龙门铣床的交流变频调速驱动	93
二、脉冲控制型交流调压电路	83	七、变频器的 DSP 典型应用电路	96
三、三相交流调压电路	85	八、变频电源电路及其使用与维护	96
第五章 逆变电路	98		
第一节 逆变电路的工作原理	98	一、单相桥式电流型逆变电路	107
一、逆变电路基础知识	98	二、三相电流型逆变电路	108
二、逆变电路的工作原理	99	三、采用 IGBT 的典型电流源逆变器	108
第二节 电压型逆变电路	100	第四节 复合型逆变电路	109
一、单相半桥逆变电路	101	一、多重逆变电路	109
二、单相全桥逆变电路	102	二、采用晶闸管的多电平逆变电路	110
三、单相变压器逆变电路	103	第五节 实用逆变电源电路及其维护	111
四、三相电压逆变电路	103	一、实用逆变电源电路	111
五、采用 IGBT 的典型电压源逆 变器	104	二、采用负载谐振式换流的逆变电源 电路	118
六、二极管钳位的三电平逆变器	105	三、采用脉冲强迫式换流的逆变电源 电路	122
七、级联式多电平逆变器	106	四、逆变电源电路维修实例	122
第三节 电流型逆变电路	106		
第六章 开关电路与开关电源电路	125	七、路灯自动控制开关电路	127
第一节 开关电路应用	125	八、KJW-1 型或门交流开关电路	129
一、零点开关电路	125	九、单向晶闸管交流开关电路	129
二、光控继电器电路	125	十、双向晶闸管交流开关电路	130
三、常开型接近开关电路	125	十一、具有晶闸管的晶体管时间继 电器	133
四、无触点定时开关电路	126	十二、触摸式电子密码锁	133
五、采用光耦合器的交流开关电路	127		
六、固态继电器电路	127		

十三、气体/烟雾报警器	134	电路	141
十四、延时照明开关	135	一、全桥移相功率变换器开关电源电路基	
十五、电风扇阵风装置	135	本组成	141
第二节 半桥式变换开关电源电路	137	二、UC3875 的内部结构	142
一、半桥式变换开关电源电路基本		三、UC3875 控制的全桥移相变换器开关	
组成	137	电源	143
二、大功率开关电源	137	第四节 集成开关电源及其应用	147
三、SG3525 控制的 500W 半桥式变换器		一、开关电源集成控制器	147
开关电源	139	二、UC3842 的工作原理	147
第三节 全桥移相功率变换器开关电源		三、集成开关电源应用	148
第七章 电力电子技术应用电路	150		
第一节 UPS 电源实用电路	150	四、异步电动机变频调速的应用实例	164
一、UPS 使用目的与类型	150	五、PM 电动机变频调速驱动的应用	165
二、UPS 实用电路	151	六、KZD-II 型小功率直流电动机晶闸管	
三、UPS 的使用维护及故障处理	155	调速电路	166
第二节 电动机调速的实用电路	161	第三节 电力系统中的应用电路	172
一、简单的晶闸管无级调速电路	161	一、12~30V/20A 的稳压电源	172
二、单结晶体管控制的单向晶闸管调速		二、直流脉宽调速电源	173
电路	162	三、功率器件的保护电路	176
三、ZLK-1 电磁调速异步电动机的调速		四、串联谐振式逆变电源	178
控制	162	五、逆变器频率跟踪控制电路	179
参考文献	182		

第一章 常用电力电子器件

电力电子器件被广泛用于处理电能的主电路中,是实现电能的传输、变换或控制的电子器件。电力电子器件具有的主要特征为:①其处理电功率的能力小至几毫瓦,大至兆瓦,一般远大于处理信息电路信号的电子器件;②电力电子器件往往工作在开关状态;③在实际应用中,需要驱动电路对控制信号进行放大和隔离。

电力电子器件可以按可控性或驱动信号的类型来分类。

1. 按可控性分类

根据驱动(触发)电路输出的控制信号对器件的控制程度,可将电力电子器件分为不控型、半控型和全控型三种器件。

(1) 不控型器件 不能用控制信号控制其导通和关断的电力电子器件,如功率二极管(Power Diode)。这类器件不需要驱动电路,其特性与信息电子电路中的二极管一样,器件的导通和关断完全由器件所承受的电压极性或电流大小决定。对功率二极管来说,在阳极(A)-阴极(K)之间施加正向电压,使其导通;施加反向电压,使其关断。

(2) 半控型器件 可以通过控制极(门极)控制器件导通,但不能控制其关断的电力电子器件。主要有晶闸管(Thyristor)及其大部分派生器件[除GTO及MCT(MOSFET控制晶闸管)等复合器件外],器件的关断一般依靠其在电路中承受反向电压或减小通态电流使其恢复阻断。

(3) 全控型器件 既可以通过器件的控制极(门极)控制其导通,又可控制其关断的器件。主流全控型器件主要有功率晶体管(GTR, Giant Transistor)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT, Insulated Gate Bipolar Transistor)、门极关断晶闸管(GTO, Gate Turn-Off Thyristor)和电力场效应晶体管(P-MOSFET, Power MOSFET)等。由于这类器件通过控制极既可控制其导通又可控制其关断,又称为自关断器件。

2. 按驱动信号类型分类

根据电力电子器件控制极对驱动信号的不同要求,可将电力电子器件分为电流驱动型和电压驱动型两种。

(1) 电流驱动型 通过对控制极注入或抽出电流,实现其开通或关断的电力电子器件,称为电流驱动型器件,如Thyristor、GTR、GTO等。

(2) 电压驱动型 通过对控制极和另一主电极之间施加控制电压信号,实现其开通或关断的电力电子器件,称为电压驱动型器件,如电力MOSFET、IGBT等。

第一节 功率二极管

一、功率二极管的基本特性

功率二极管(Power Diode)不同于普通的二极管,它承受的反向电压耐力与阳极通流能力均比普通二极管大得多,但它的工作原理和伏安特性与普通二极管基本相同,都具有正

向导电性和反向阻断性。作为理想开关时,加上正电压,二极管就导通;去掉正向电压或加上反向电压,二极管就截止。理想的二极管正向导通时,电压降为零;反向截止时,漏电流为零;导通到截止或截止到导通都在瞬间完成,没有过渡过程。但实际的二极管并不这样,它既有电压、电流的限制,又有导通电压降和反向恢复时间等问题。在大电流、高电压的场合,还有正向导通的开通时间等问题。功率二极管是最简单、又十分重要的电力电子器件,在各类电源中应用非常广泛。

1. 静态特性

功率二极管的静态特性主要指其伏安特性。电路图形符号、伏安特性及外形如图 1-1 所示, A 为阳极, K 为阴极。当二极管 A-K 间承受的正向电压 U 大于阈值电压 U_{TO} 时, 二极管处于稳定导通状态, 正向电流 I 由外电路决定, 与 I_F 相对应的两端电压 U_F 称为二极管的正向通态压降。当二极管承受反向电压时, 只通过微小的反向漏电流, 其数值基本上不随电压而变化。当反向电压超过一定数值 (U_{RBO}) 后, 二极管的反向电流迅速增大, 产生雪崩击穿, U_{RBO} 称为反向击穿电压。

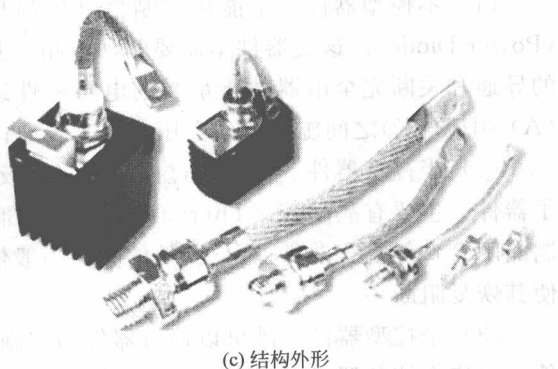
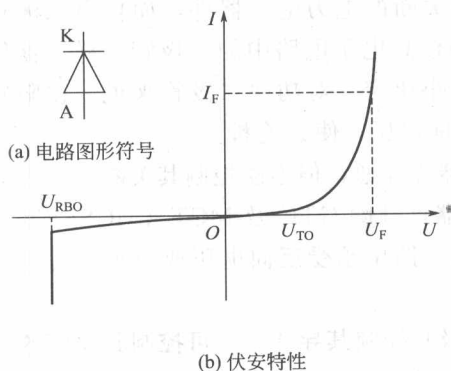


图 1-1 功率二极管电路图形符号、伏安特性及外形

2. 动态特性

由于电力二极管的 PN 结存在结电容, 因此, 在零偏置、正向偏置和反向偏置三种状态之间转换的时候需要一定的时间, 称之为过渡过程。其 PN 结区域的带电状态是随时间变化的, 这就是电力二极管的动态特性。

二、功率二极管的主要参数

(1) 正向平均电流 $I_{F(AV)}$ 功率二极管在连续稳定运行条件时, 器件在额定结温和规定的散热条件下, 允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值。此时与之对应的电流有效值是 $1.57I_{F(AV)}$ 。

(2) 反向重复峰值电压 U_{RRM} 指对功率二极管所能重复施加而不被反向击穿的反向最高峰值电压。通常是反向击穿电压 U_{RBO} 的 $2/3$ 。

(3) 正向通态压降 U_F 在额定结温下, 功率二极管在导通状态流过某一稳态正向电流 (I_F) 所对应的正向压降。正向压降越低, 表明其导通损耗越小。

(4) 最高工作结温 T_{JM} 结温指 PN 结的平均温度。最高工作结温指在 PN 结不致损坏的条件下所能承受的最高平均温度, 通常为 $125 \sim 175^\circ\text{C}$ 。

(5) 反向恢复电流 I_{RP} 及反向恢复时间 t_{rr} 受二极管 PN 结中空间电荷区存储电荷的影

响, 向正向导通的二极管施加反向电压时, 二极管不能立即转为截止状态, 只有存储电荷完全复合后, 二极管才呈现高阻状态。这一过程称为二极管的反向恢复过程。

反向恢复时间 t_{rr} 通常定义为从电流下降为零至反向电流衰减至反向恢复电流峰值 25% 的时间。反向恢复电流 I_{RP} 及恢复时间 t_{rr} 与正向导通时的正向电流 I_F 及电流下降率 di_F/dt 密切相关。

三、功率二极管的选择

在二极管的选择使用中, 要着重考虑以下几个问题。

① 二极管允许流过的电流。

② 二极管允许承受的反向电压。

③ 二极管正向导通时有零点几伏到几伏的导通电压降, 导通电压降因器件情况和电流大小而变化。

④ 二极管从导通到截止存在电荷的反向恢复问题, 这是二极管损耗的重要组成部分, 是影响二极管工作频率的重要因素, 也是造成电磁噪声的原因之一。

⑤ 二极管的工作频率, 主要与二极管的反向恢复有关。

常用的二极管分为三种: 第一种是普通二极管, 它常用在工频电路或晶闸管等频率不高的电路中; 第二种是快速恢复二极管, 它利用特殊工艺制造, 反向恢复的电流很小且恢复时间很短, 常用在 IGBT 或 VDMOS 等高速开关器件的电路和高频整流电路中; 第三种是肖特基 (Schottky) 二极管, 因为它不是 PN 结导电特性, 导通电压降很小, 且几乎没有反向恢复时间, 反向耐压较低, 常用在开关电源等低电压输出的高频整流电路中。

第二节 晶 闸 管

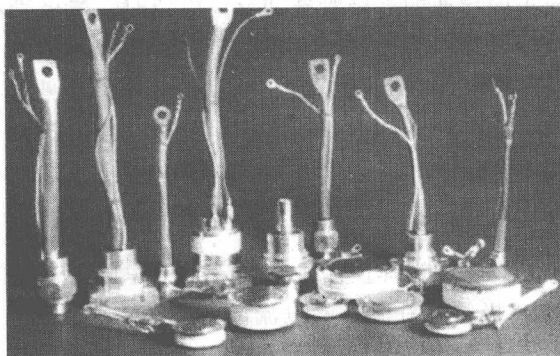
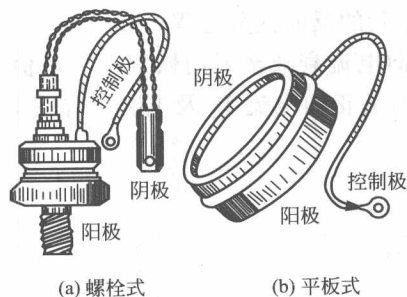
二极管整流电路在输入交流电压一定时, 输出的直流电压也是一个固定值, 一般不能任意调节。但在某些情况下, 要求直流电压能够进行调节, 即具有可控的特点。晶闸管 (Thyristor) 是晶体闸流管的简称, 又称可控硅, 常用 SCR (Silicon Controlled Rectifier) 表示。晶闸管不仅可以在低电压、小电流的条件下工作, 而且可以在高电压 (可达几千伏)、大电流 (可达几千安) 的条件下工作, 所以它的出现使半导体器件从弱电领域进入了强电领域。

晶闸管可以承受的电压、电流在功率半导体中均为最高, 具有价格便宜、工作可靠等优点, 尽管其开关频率较低, 但在大功率、低频电力电子装置中仍占主导地位。

晶闸管主要用来组成整流、逆变、斩波、交流调压、变频等变流装置和交流开关, 以及用于家用电器实用电路等, 具有体积小、重量轻、效率高、动作迅速、寿命长等优点, 并且无毒、无噪声、造价低、维修方便, 在各个工业部门和民用领域都得到广泛应用。

一、基本结构

晶闸管的种类很多, 有普通型、双向型、可关断型和快速型等。普通型晶闸管的外形有螺栓式和平板式, 如图 1-2 所示。它们都有 3 个电极: 阳极 A、阴极 K、控制极 G。螺栓式晶闸管有螺栓的一端是阳极, 使用时可将螺栓固定在散热器上, 另一端的粗引线是阴极, 细引线是控制极。平板式晶闸管中间金属环的引出线是控制极, 离控制极较远的端面是阳极, 离控制极较近的端面是阴极。使用时可把晶闸管夹在两个散热器中间, 散热效果好。



(c) 实物图

图 1-2 晶闸管的外形

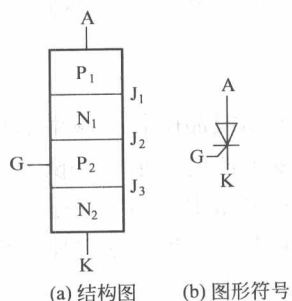


图 1-3 晶闸管的结构及图形符号

晶闸管的内部结构如图 1-3(a) 所示, 由 4 层半导体 P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2 重叠构成, 从而形成 J_1 、 J_2 、 J_3 三个 PN 结。由端面 P_1 层半导体引出阳极 A, 由端面 N_2 层半导体引出阴极 K, 由中间 P_2 层半导体引出控制极 G。图 1-3(b) 为晶闸管的图形符号。

二、工作原理

1. 晶闸管的反向阻断

将晶闸管的阴极接电源的正极, 阳极接电源的负极, 使晶闸管承受反向电压, 如图 1-4(a) 所示。这时不管开关 S 闭合与否, 灯泡都不会发光, 说明晶闸管加反向电压时不导通, 处于反向阻断状态。其原因是: 在反向电压作用下, PN 结 J_1 、 J_3 均处于反向偏置, 故晶闸管不导通。

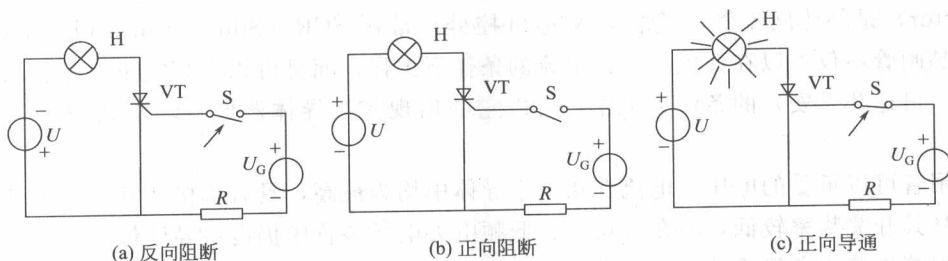


图 1-4 晶闸管工作原理实验电路

2. 晶闸管的正向阻断

在晶闸管的阳极和阴极之间加正向电压, 开关 S 不闭合, 如图 1-4(b) 所示, 灯泡也不亮, 晶闸管处于正向阻断状态。形成正向阻断的原因是: 当晶闸管只加正向电压而控制极未加电压时, PN 结 J_2 处于反向偏置, 故晶闸管也不会导通。

3. 晶闸管的导通

在晶闸管阳极加正向电压的同时, 将开关 S 闭合, 使控制极也加正向电压, 如图 1-4(c) 所示, 此时灯泡发出亮光, 说明晶闸管处于导通状态。

可见, 晶闸管导通必须同时具备两个条件:

- ① 晶闸管阳极与阴极之间加正向电压;
- ② 控制极与阴极间也加正向电压。

晶闸管导通后, 如果把开关 S 断开, 灯泡仍然发光, 即晶闸管仍处于导通状态。这说明晶闸管一旦导通后, 控制极便失去了控制作用。因此, 在实际应用中, 控制极只需施加一定的正脉冲电压便可触发晶闸管导通。

为了说明晶闸管导通的原理, 可以把晶闸管看成是由 PNP 型和 NPN 型两个三极管连接而成, 如图 1-5 所示。其中 N_1 、 P_2 为两管共有, 即一个三极管的基极与另一个三极管的集电极相连。阳极 A 相当于 PNP 型管 VT_1 的发射极, 阴极 K 相当于 NPN 型管 VT_2 的发射极。

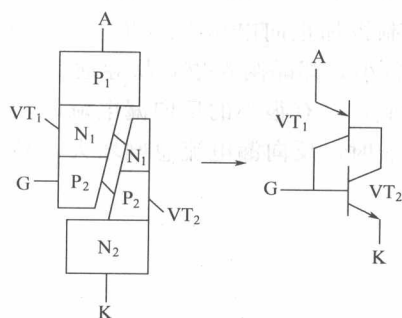


图 1-5 晶闸管的等效电路

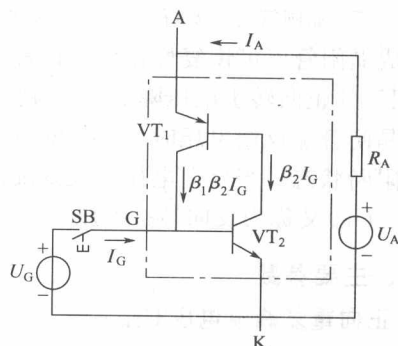


图 1-6 晶闸管导通原理图

如果晶闸管阳极加正向电压, 控制极也加正向电压, 两个等效三极管的各个 PN 结的偏置均符合放大工作的条件, 其电路如图 1-6 所示。在控制极正向电压 U_G 的作用下, 产生的控制极电流 I_G 就是 VT_2 管的基极电流 I_{B2} , VT_2 的集电极电流 $I_{C2} = \beta_2 I_{B2} = \beta_2 I_G$ 又是 VT_1 管的基极电流, VT_1 管的集电极电流 $I_{C1} = \beta_1 I_{C2} = \beta_1 \beta_2 I_G$, 其中 β_1 、 β_2 分别是 VT_1 、 VT_2 的电流放大系数。 I_{C1} 又流入 VT_2 的基极再一次放大。反复放大在电路中形成强烈的正反馈, 使两个三极管迅速达到饱和导通, 晶闸管便进入了完全导通的状态。晶闸管导通后的工作状态可完全依靠管子本身的正反馈来维持, 即使控制电流消失, 晶闸管仍处于导通状态。

晶闸管导通后, 其正向压降很小, 大约 1V 左右, 电源电压几乎全部加在负载上。所以, 晶闸管导通后电流的大小取决于外电路参数。

4. 晶闸管导通后的关断

晶闸管导通后, 若将外电路的负载电阻加大, 使晶闸管的阳极电流降低到不能维持正反馈的数值, 则晶闸管便自行关断, 恢复到阻断状态。对应于关断瞬间的阳极电流称为维持电流, 用 I_H 表示, 它是维持晶闸管导通的最小电流。

如果将晶闸管的阳极电压降低到零, 或断开阳极电源, 或在阳极与阴极间加反向电压, 导通的晶闸管都能自行关断。

综上所述, 晶闸管阻断的条件: 阳极电流 I_A 小于维持电流 I_H ; 或在阳极与阴极间加反向电压。

晶闸管是一个可控的单向导电开关。与二极管相比, 它具有可控性, 能正向阻断; 与三极管相比, 其差别在于晶闸管对控制电流没有放大作用。

三、伏安特性

晶闸管的伏安特性是阳极电流 I_A 与阳、阴极间电压 U_{AK} 的关系, 其特性曲线如图 1-7 所示。

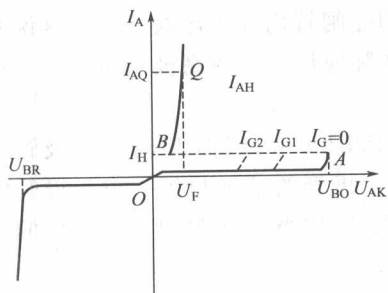


图 1-7 晶闸管的伏安特性

当 $U_{AK} > 0$ 、控制极未加电压 (即 $I_G = 0$) 时, 晶闸管处于正向阻断状态。由于管内 PN 结 J_2 处于反向偏置, 所以只有很小的漏电流, 对应于特性曲线的 OA 段。当 U_{AK} 增大到 A 点电压 U_{BO} 时, 漏电流突然增大, 晶闸管迅速由阻断变为导通状态。 A 点电压 U_{BO} 称为正向转折电压。晶闸管导通后, 其正向管压降约 $1V$, 但阳极电流很大, 因此特性曲线靠近纵轴且很陡直, 与二极管的正向特性相似。需要说明一点, $I_G = 0$ 、 U_{AK} 大于 U_{BO} 使晶闸管导通, 是管内 PN 结 J_2 被击穿形成的, 这种情况很容易造成晶闸管不可恢复性损坏。正常使用时应在控制极加正向电压 U_G 。 $U_G > 0$, 则 $I_G > 0$, 晶闸管的正向转折电压降低。 I_G 越大, 转折电压越小, 即晶闸管越容易导通。

当晶闸管加反向电压时, 其伏安特性与二极管相似, 只有很小的反向漏电流, 晶闸管处于反向阻断状态。当反向电压增大到反向击穿电压 U_{BR} 时, 反向漏电流急剧增大, 晶闸管反向击穿。 U_{BR} 又称为反向转折电压。

四、主要参数

1. 正向重复峰值电压 U_{FRM}

在控制极开路和正向阻断的条件下, 允许重复加在晶闸管两端的正向峰值电压称为正向重复峰值电压。通常规定此电压为正向转折电压 U_{BO} 的 80% 。

2. 反向重复峰值电压 U_{RRM}

在控制极开路时, 允许重复加在晶闸管上的反向峰值电压称为反向重复峰值电压。通常规定此电压为反向转折电压的 80% 。

一般, U_{FRM} 和 U_{RRM} 在数值上接近, 统称为晶闸管的重复峰值电压。通常把其中较小的那个数值作为该型号器件的额定电压, 用 U_N 表示。

3. 额定正向平均电流 I_F

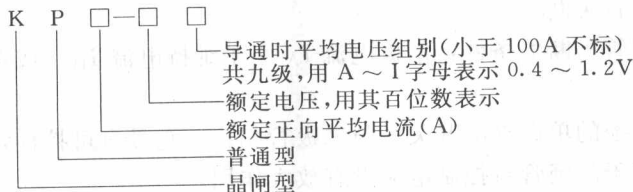
在规定的标准散热条件和环境温度 ($40^\circ C$) 下, 稳定结温不超过额定结温时, 晶闸管处于全导通时允许连续通过的工频正弦半波电流的平均值。

由于晶闸管的过载能力小, 在选用晶闸管时, 其额定正向平均电流应为正常工作平均电流的 $1.5 \sim 2$ 倍。

4. 维持电流 I_H

在室温下, 控制极断开后, 维持晶闸管继续导通所必需的最小电流称为维持电流 I_H 。当正向电流小于维持电流时, 晶闸管就自行关断。 I_H 的值一般为几十毫安至几百毫安。

目前我国生产的晶闸管的型号及其含义如下:



例如, KP300-10F 型晶闸管是普通型晶闸管, 额定电流为 300A, 额定电压为 1000V, 通态平均电压降为 0.9V。

五、晶闸管的选用

- ① 晶闸管允许承受的正反向断态电压。
- ② 允许流过晶闸管的浪涌电流和平均电流。流过晶闸管的电流一般称为阳极电流。
- ③ 晶闸管正向导通时有 2V 左右的导通电压降, 导通电压降因器件情况和电流大小而有所不同。
- ④ 晶闸管门极触发后到完全导通的时间。
- ⑤ 晶闸管的导通电流到零后, 要过一定的时间才能承受规定的电压, 这个时间称为晶闸管的关断时间。
- ⑥ 晶闸管开通时电流上升率 (即 di/dt) 不能太大, 否则会导致晶闸管损坏失效, 因此一般晶闸管回路中有一个电感来限制 di/dt 。
- ⑦ 晶闸管断态时或在关断过程中的电压上升率 (即 du/dt) 不能太大, 否则会引起晶闸管自动导通或失控, 从而导致电路或器件损坏, 因此常在晶闸管两端并联电阻和电容构成 RC 回路来吸收 du/dt 。
- ⑧ 晶闸管对门极触发信号的电压和电流值有一定的要求, 且触发信号撤离后, 只要晶闸管中流过的电流大于某个值时, 晶闸管就能维持导通, 若小于这个值晶闸管就会自动关断。这个值定义为擎住电流。

常见的晶闸管分为五种: 第一种是普通晶闸管, 容量等级大, 目前常用在大功率整流电路和周波变换器中; 第二种是快速晶闸管和高频晶闸管, 它利用特殊工艺制造, 关断时间小于 $50\mu\text{s}$, 主要用在感应加热的中频电源中; 第三种是逆导晶闸管 (RCT), 是将一个晶闸管和一个二极管反并联集成在同一硅片上面构成的组合器件, 常用在直流斩波器、倍频式中频电源及三相逆变器电路中; 第四种是双向晶闸管 (Triac), 它把两个反并联的晶闸管集成在同一硅片上, 是控制交流功率的理想器件, 主要用在交流无触点继电器、交流相位控制电路中; 第五种是光控晶闸管, 它不用电压电流触发, 而是用光触发晶闸管导通, 主要应用在电力系统等高电压、大电流场合。

六、门极关断晶闸管 (GTO)

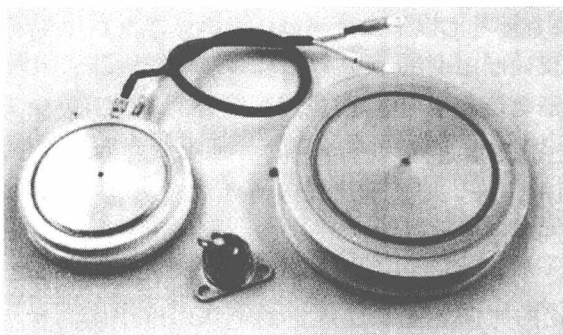
普通晶闸管由于只能用门极信号触发导通, 但不能使其关断, 因此必须设置强迫换流电路, 使整体线路的结构变得复杂, 效率降低。为克服这一缺点, 研制出具有自关断能力的晶闸管, 即门极可关断晶闸管 GTO (Gate Turn-Off Thyristor)。GTO 是晶闸管的一种派生器件, 它的导通触发与普通晶闸管相同, 若要使它关断, 只要在门极加上负电流脉冲即可, 因而 GTO 属于全控型器件。

GTO 是一种多元的功率集成器件, 其内部包含数十个甚至数百个共阳极的 GTO 元, 因而在兆瓦级以上的大功率场合得到较多的应用。

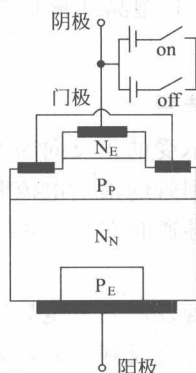
1. GTO 的结构及导电机理

GTO 的实物、内部结构和符号如图 1-8 所示。

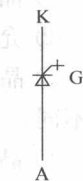
GTO 也是一种四层三端元件, 其导通机理和特性均类似于普通晶闸管, 而关断机理可用图 1-9 所示的双晶体管结构来说明。当晶体管 VT_2 的电流增益设计成接近 1, 并且负的门极电流足够大, 能将集电极电流 I_{C1} 向门极转移并流出门极, 则器件即可关断。关断的阳极



(a) 实物

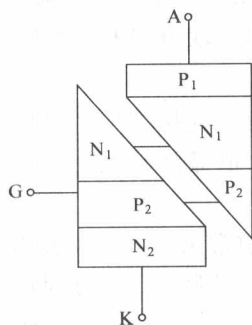


(b) 结构

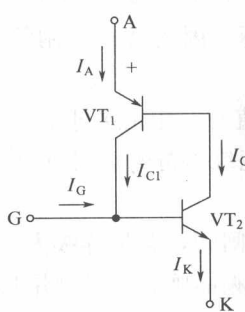


(c) 符号

图 1-8 GTO 实物、结构及符号



(a)



(b)

图 1-9 GTO 的双晶体管模拟图

电流与负门极电流之比称为关断增益，一般为 3~5。例如 600A 的 GTO 关断时，要求负的门极电流为 120A，约占阳极电流的 20%。

GTO 的普及与应用晚于晶闸管，主要由于存在触发功率大和缓冲保护复杂等缺点。一个 GTO 器件所需配置的驱动电路在体积上往往比 GTO 器件本身大得多。为了方便用户，通常把 GTO 器件与相应的驱动缓冲电路组合在一起，形成 GTO 组件，使安全与正常工作有了

保证。

目前 GTO 多用于大功率电气传动设备中，如交流传动机车、地铁车辆、大型轧钢机等都使用着 GTO 变频器。

2. GTO 的动态特性

图 1-10 给出了 GTO 开通和关断过程中门极电流 i_G 和阳极电流 i_A 的波形。

由图 1-10 可知，开通过程需要经过延迟时间 t_d 和上升时间 t_r ，这和 SCR 相似。关断过程则有所不同，首先需要经历抽取饱和导通时储存的大量载流子的时间，即储存时间 t_s ，从而使等效晶体管退出饱和状态；然后是等效晶体管从饱和区退至放大区，阳极电流逐渐减小的时间，即下降时间 t_f ；最后还有残存载流子复合所需时间，即尾部时间 t_t 。

通常 t_f 比 t_s 小得多，而 t_t 比 t_s 要

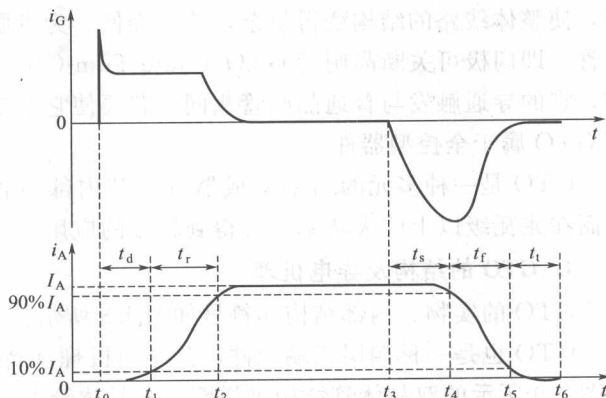


图 1-10 GTO 的开通和关断过程电流波形

长。门极负脉冲电流幅值越大, 前沿越陡, 则抽走储存载流子的速度越快, t_s 就越短。如果门极负脉冲在 t_1 阶段仍能保持适当的数值, 则可缩短尾部时间。

3. GTO 的主要参数

GTO 的参数与 SCR 大多相同, 现将较特殊的几个叙述如下。

(1) 最大可关断阳极电流 I_{ATO} 它也是标称 GTO 额定电流的参数。这一点与 SCR 用通态平均电流标称额定电流是不同的。

(2) 电流关断增益 β_{off} 定义为

$$\beta_{off} = \frac{I_{ATO}}{I_{GM}}$$

式中 I_{GM} ——门极负脉冲电流最大值。

β_{off} 一般为 3~5, 这是 GTO 的一个主要特点。

(3) 擎住电流 I_L 在门极信号作用下, GTO 从断态转为通态, 阳极电流开始上升, 当切除门极信号时, 若管子处于临界导通状态, 所对应的阳极电流就被定义为擎住电流。它比 SCR 的擎住电流大得多, 在感性负载时, 触发脉冲必须有足够的宽度。

4. GTO 的选用

就目前情况来说, 在所有可供应市场的全控器件中, GTO 的功率等级最大。在 GTO 的选择使用中, 要着重注意以下几个问题。

① GTO 允许承受的正反向断态电压, 不仅要考虑加在 GTO 两端的稳态电压, 还要考虑 GTO 开关过程带来的过电压。

② 允许流过 GTO 的电流只能小于其“最大可关断电流”。如果出现 GTO 电流大于其最大可关断电流时, 不能通过门极试图关断 GTO, 否则 GTO 就会烧损, 只能通过别的途径先把流过 GTO 的电流降到其最大可关断电流以下, 才可通过门极关断它。

③ GTO 与晶闸管一样, 正向导通时有 2V 左右或更高一些的导通电压降, 导通电压降因器件情况和电流大小而不同。

④ GTO 与晶闸管一样是四层半导体硅片结构, 但 GTO 的阴极和门极分成很多的细小单元, 不像晶闸管那样是一个大单元, 所以 GTO 触发后到完全导通的时间比晶闸管短得多。

⑤ GTO 可以在有电流流通的情况下给门极加上反向脉冲电流来关断它, 这个门极反向脉冲电流称为关断电流。流过 GTO 的电流称为阳极电流。通过强触发关断, 即增加关断电流, GTO 的关断会更加可靠, 且关断时间也会缩短。一般地, 设计驱动电路时, 门极关断电流不能小于 GTO 应关断电流的 $1/5 \sim 1/3$ 。因此, GTO 的使用, 其门极关断的大电流要求给驱动电路的设计带来不少困难。

⑥ GTO 开通时电流上升率 (即 di/dt) 和关断时的电压上升率 (du/dt) 都不能太大, 需要根据 GTO 的允许值进行限制。对电流上升率的限制, 一般采取在 GTO 器件回路中串联一定电感量的电抗器; 对电压上升率的限制, 一般在 GTO 器件两端并联一定电容量的电容器。这样的电抗器和电容器及其能量释放元件构成的回路, 称为吸收电路或吸收回路。

⑦ GTO 对门极触发信号的电压、电流的形状和大小有一定要求, 且触发信号撤离后, 只要 GTO 中流过的电流大于某个值时, GTO 就能维持导通; 若小于这个值, GTO 就会自动关断。像晶闸管一样, 这个值定义为擎住电流。

第三节 双极型功率晶体管 (GTR)

一、双极型功率晶体管的基本特性

双极型功率晶体管简称 GTR (Giant Transistor), 是一种耐高压、大电流的双极结型晶体管, 英文有时也称为 Power BJT (Bipolar Junction Transistor)。通常指耗散功率 (或输出功率) 1W 以上的晶体管。近几年来, GTR 的功率容量、耐压、大电流特性、频率性能和应用可靠性都有了显著提高。目前, GTR 已达到 I_{CM} (集电极最大电流) 几百安培、 BU_{CEO} (集电极发射极之间最大电压) 1kV 的水平, 可用来控制 100kW 以下的电气设备, 已进入了高电压、大电流领域, 用于直流稳压电源、直流电动机控制 (开关与调压调制)、低频与高频变流, 以及炉温控制、大功率脉冲发生器等场合。从 GTR 的性能分析, 在 750V、50A 范围内、150V、500A 范围内和在高频应用方面, GTR 较其他功率电子器件 (普通晶闸管、可关断晶闸管、功率场效应管等) 更有发展前途。

GTR 的三个极分别称为集电极 (Collector)、发射极 (Emitter) 和基极 (Base), NPN 型的 GTR 实物图与符号如图 1-11 所示。



图 1-11 双极型功率晶体管 GTR 实物及其符号

在电力电子技术中, GTR 的放大倍数比较小, 只有 10 左右。为了获得比较大的 GTR 集电极电流, GTR 通常采用至少由两个晶体管按达林顿 (Darlington) 接法组成的单元结构。GTR 的达林顿结构如图 1-11(c) 所示。

下面就晶闸管与大功率晶体管做一比较。

1. 容量

大功率是晶闸管的应用范围, 而 GTR 只能在中、小功率显示出优越性。

2. 特性

在电力电子电路中, GTR 多数工作在开关状态。作为开关器件, 两者比较如下。

① 快速性 GTR 的导通时间为 $0.05 \sim 1\mu s$, 关断时间为 $0.1 \sim 10\mu s$, 场效应晶体管的开关时间可达 $0.01 \sim 0.02\mu s$, 而晶闸管的开关时间为 $10 \sim 100\mu s$ 。

② 频率特性 GTR 可达 100kHz, 甚至几兆赫, 快速晶闸管在 1kHz 左右, GTO 达 5kHz。

③ 正向导通压降 GTR 为 1V 左右, 达林顿晶体管稍大为 1.5V, 而且晶体管的饱和压