

21世纪电学科高等学校教材

变流技术 基础及应用

黄操军 陈润恩 王桂英 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

21世纪电学科高等学校教材

变流技术 基础及应用

主 编 黄操军 陈润恩 王桂英

副主编 胡顺斌 周修理 赵朝会 康文彪



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是由全国农业高等院校电学科教材研究会组织编写的系列教材之一。

本书主要内容：晶闸管结构原理与测试、单相和三相可控整流电路、触发电路、主电路的计算和保护、有源逆变电路、单相和三相调压电路、变频与斩波电路、自关断器件以及新型电力电子器件介绍等。全书是在作者多年教学经验的基础上，针对农业高等院校电学科而编写的，具有淡化理论推导，而强调实际应用的特点。

本书可作为高等农业院校工科工业电气化、电气工程及其自动化、电子技术应用、建筑环境与设备等专业本科生教材，同时也适用于一般工科院校包括高职相关专业作为教材使用，亦可作为有关院校师生及工程技术人员参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

变流技术基础及应用/黄操军等主编. —北京：中国水利水电出版社，2001

21 世纪电学科高等学校教材

ISBN 7-5084-0867-5

I. 变… II. 黄… III. 电力系统-变流技术-高等学校-教材 IV. TM46

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2001）第 076250 号

书 名	21 世纪电学科高等学校教材 变流技术基础及应用
作 者	黄操军 陈润恩 王桂英 主编
出版、发行	中国水利水电出版社（北京市三里河路 6 号 100044） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sale@waterpub.com.cn
经 售	电话：（010）63202266（总机）、68331835（发行部） 全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	水利电力出版社印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 11.5 印张 273 千字
版 次	2002 年 1 月第一版 2002 年 1 月北京第一次印刷
印 数	0001—5200 册
定 价	18.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

《变流技术基础及应用》一书是由全国高等农业院校电学科教材研究会组织编写的系列教材之一,该书的基本内容符合全国高等农业院校电学科教材研究会审定的《变流技术基础及应用》教学大纲,适用于高等农业、林业、水利水电院校或其它院校非电专业的本、专科教材,以及电气工程技术人员和电气技术爱好者参考与自学。

本教材在编写过程中,作者总结和吸收了各院校教学和教学改革的有益经验,一方面注重理论的系统性,删除了以往教材中陈旧过时或不适用的内容;另一方面,广泛地收集和整理了目前电力电子技术行业大量使用的新型器件的有关资料,使该教材更具实用性。同时,还修改了对一些问题的分析思路和解答方法,使之更适合于组织教学和学生自学。书中配有一定量的例题、习题。图形、符号均采用最新国家标准。书后附有目前市场常见电力电子器件参数选择表,可供有关人员参考使用。本课程在一般院校均为少学时授课,参考学时为40~50学时。

本书主要包括:晶闸管及单相和三相可控整流电路、触发电路、主电路的计算和保护、有源逆变电路、单相和三相调压电路、自关断器件与变频斩波电路以及新型电力电子器件介绍等内容。

参加本教材编写的单位有:黑龙江八一农垦大学、沈阳农业大学、河北农业大学、华南农业大学、东北农业大学、内蒙古农业大学、河南农业大学等院校。

本书编写人员有:黄操军、姜新通(第一、二、八章及附录)、赵朝会(第六章),周修理(第四章),康文彪(第七章一、二节),陈润恩(第七章三、四节),胡顺斌(第三章),王桂英(第五章)。河南省驿马市煤气化公司袁长文,黑龙江八一农垦大学高彦彬为本教材提供了大量的资料,并编写了部分内容。黑龙江八一农垦大学工程学院的张冬梅、李爱传,华南农业大学的周小龙等同志为本书绘制了大量的插图。全书由黑龙江八一农垦大学黄操军统稿和校审。

在编写过程中作者对书后所列文献进行了借鉴和参考,本书在出版之际,对文献的作者、提供资料的单位和个人,致以编者衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中疏漏和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2001年9月

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 晶闸管	4
第一节 晶闸管的结构及其工作原理	4
第二节 晶闸管的阳极伏安特性和主要参数	7
第三节 晶闸管门极伏安特性及主要参数	10
第四节 其它形式的晶闸管	11
第五节 晶闸管的测试与使用	13
习题	14
第二章 单相和三相可控整流电路	15
第一节 单相半波可控整流电路	15
第二节 单相桥式全控整流电路	20
第三节 单相可控整流电路应用实例	26
第四节 三相半波可控整流电阻负载电路	29
习题	33
第三章 触发电路	35
第一节 单结晶体管触发电路	35
第二节 光电隔离触发电路	40
第三节 集成移相触发器	44
第四节 单片机控制的触发电路	47
习题	51
第四章 主电路计算及保护	52
第一节 晶闸管的查表选择法	52
第二节 平波电抗器电感量的计算	56
第三节 晶闸管的过电压保护	58
第四节 晶闸管的串联和并联	65
习题	69
第五章 有源逆变电路	71
第一节 有源逆变的基本工作原理	71
第二节 三相有源逆变电路	72
第三节 逆变失败原因及最小逆变角的确定	75
第四节 有源逆变电路的应用举例	77
第五节 变流装置的功率因数	83

习题	90
第六章 单相与三相交流调压电路	92
第一节 晶闸管交流开关	92
第二节 单相交流调压电路	96
第三节 三相交流调压电路	100
习题	106
第七章 自关断器件与变频、斩波电路	108
第一节 可关断晶闸管	108
第二节 GTO 的驱动与保护	113
第三节 斩波电路	117
第四节 变频电路及应用	135
习题	155
第八章 新型电力电子器件	156
第一节 新型电力电子器件发展概况	156
第二节 大功率晶体管 GTR	156
第三节 电力场效应晶体管 MOSFET	158
第四节 MOS 控制晶闸管 MCT	162
第五节 绝缘栅双极晶体管 IGBT	163
第六节 静电感应晶体管 SIT 与静电感应晶闸管 SITH	164
第七节 功率集成电路 PIC	165
习题	167
附录 A 常用电力电子器件型号及参数	168
附录 B 电力电子技术及电力电子器件相关网站	176
参考文献	178

绪 论

电力电子技术是电工技术的重要分支之一。现代电力电子技术的作用主要体现在对电功率（电压、电流或二者兼有）特别是对大功率电能进行处理和变换上。

电力电子器件是由半导体材料制成的固态高电压大电流开关器件的统称。晶闸管自 20 世纪 60 年代问世以来，得到了广泛的应用，发展十分迅速。电子技术进入到强电领域这不仅使强电变流更为方便可靠，而且大大节约了电能。目前，电力电子技术将电力技术、电子技术、控制技术相结合，形成了电气技术中一门综合性很强的边缘学科。通常认为，电力电子技术包含以下三个部分：

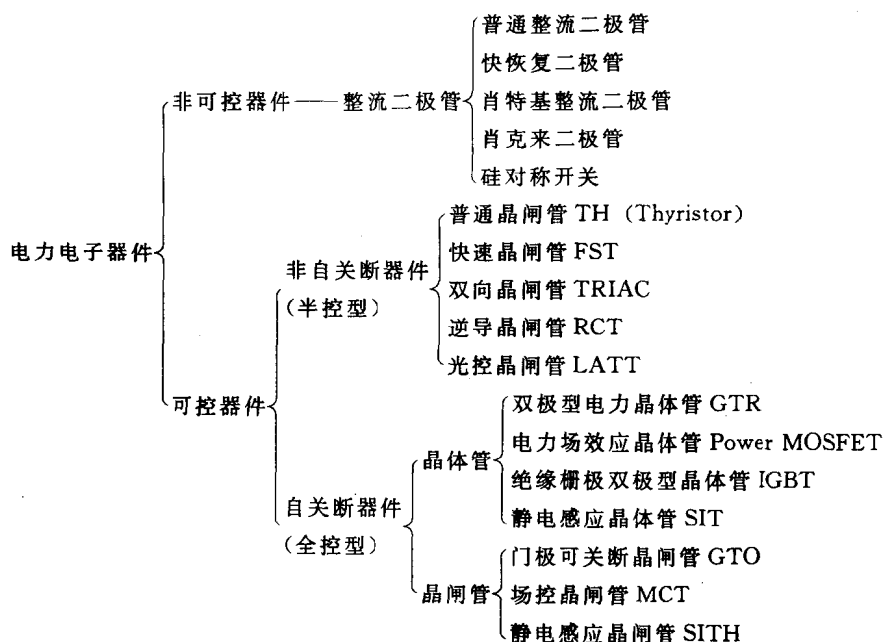
- (1) 元器件（电力电子器件等）。
- (2) 电力电子换流技术（包括频率、电压、电流、相数等）。
- (3) 微电子学与控制技术相结合，实现智能电力电子控制。

随着电子技术的发展，特别是微电子理论和器件制造工艺的不断进步，现在电力电子器件的应用已深入到国防、工农业生产的各个方面。典型的应用有：直流传动与直流拖动、交流传动与交流拖动、金属冶炼与电加工、发电与变配电、直流输电与无功补偿，交直流稳压、电气装置的遥控与远动等等，已经成为传统产业和高新技术领域必不可少的技术支持。

一、电力电子器件发展概况

1948 年普通晶体管问世引发了电子学革命，由于普通晶体管只能用于像通信、计算机等小功率领域，然而，随着电力技术和半导体技术的不断发展为大功率器件的开发和研制提供了技术保证。1958 年，美国通用电气公司研制成功了工业用普通晶闸管，将原来庞大而又笨重的变流机组、离子变流器等电能变换装置变成了以电力半导体器件组成的变流器，从而使得半导体功率器件的应用范围大大扩展，同时也标志着现代电力电子技术的开始。

普通晶闸管可谓电力电子学科的功臣，但由于它属于半控型，不能自关断，属第一代电力电子器件。几十年来，半导体制造技术和变流技术发展迅速，新型电力电子器件层出不穷，出现了能够自关断的电力电子器件（全控型器件），即第二代电力电子器件，像电力晶体管 GTR、可关断晶闸管 GTO、电力场效应晶体管 MOSFET、静电感应晶闸管 SITH、MOS 控制晶闸管 MCT 等。其中，MCT 是 MOSFET 驱动晶体管的复合器件，集 MOSFET 和晶闸管优点于一身，被认为是性能最好、最有发展前途的一种新器件。另外，现在研究较多的是功率集成电路 PIC，它是在器件的模块化和复合化的基础上发展起来的新一类电力电子器件。它是微电子技术与电力电子技术相结合的产物，是指功率在 1W 以上，将逻辑、控制、保护、传感器、检测、自诊断电路集成在一片 IC 上而形成的器件。下面按照分类关系列出主要的电力电子器件：



目前全球范围内各类电力电子器件已达到的水平为：

普通晶闸管：12 kV、1 kA；4 kV、3 kA

可关断晶闸管：9 kV、1 kA；4.5 kV、4.5 kA

逆导晶闸管：4.5 kV、1 kA

光触晶闸管：6 kV、2.5 kA；4 kV、5 kA

电力晶体管：单管 1 kV、200 A；模块 1.2 kV、800 A；1.8 kV、100 A

场效应管：1 kV、38 A

绝缘栅极双极型晶体管：1.2 kV、400 A；1.8 kV、100 A

静电感应晶闸管 (SITH)：4.5 kV、2.5 kA

场控晶闸管：1 kV、100 A

20 世纪 70 年代由于人们考察电力电子器件性能的指标主要是容量问题，因而评价器件主要用电压×电流指标表示；80 年代电力电子器件发展的主要目标是高频化，因而评价器件的指标主要用电压×电流×频率表示；进入 90 年代，电力电子器件发展的目标是高性能化，因而评价器件的指标主要用容量、开关速度、驱动功率、通态压降、芯片利用率等表示。

二、电力电子技术的主要应用

(1) 可控整流。可控整流的任务是将不变的交流电压变换为固定或可调的直流电压，提供给电解、电镀、直流电机等作为直流电源。

(2) 有源逆变。有源逆变的任务是把直流电变换为与交流电网同频率的交流电，以达到将直流电能回送给交流电网的目的。例如，目前世界上许多国家正迅速发展的直流高压输电工程，即将三相高压交流电先变换成高压直流，再进行远距离传输，到达目的地后再利用逆变设备变换成与当地交流电网同频的交流电。

(3) 交流调压。交流调压的目的是将不变的交流电压变换成电压有效值可调的交流电

压。如灯光控制、温度控制、交流电动机的调压调速等就是利用的交流调压功能。

(4) 变频器。变频器的目的是把电网的交流电转换成电压、频率均可调的交流电压。通常的做法是先将电网的交流电转换成直流电(经可控整流或不可控整流),然后再变成电压、频率均可调的交流电。例如,对电源要求可靠性较高的设备中所使用的不间断电源(UPS),异步电机的变频调速器等都是变频器应用的例子。

(5) 斩波器。斩波器的作用是将固定的直流电压转换成可调的直流电压。例如,城市中所使用的电车调速器、电气机车、地铁牵引直流电动机等所用的调速器均为斩波直流调速。这种调速方式比以往的串联电阻调速方式方便而且节省电能。

(6) 无触点型静态功率开关。无触点型静态功率开关常用于要求功率负荷接入、断开频繁,而且噪音低的场合,以取代接触器、继电器等机械触点的闭和与断开操作。例如,应用在电动机频繁正反转、频繁起停、防爆防火的场合。

三、本课程的任务与要求

本课程是电气工程及其自动化、工业企业电气化及相关专业的一门骨干课之一。通过对该门课程的学习要求达到以下要求:

(1) 熟悉和掌握电力电子器件(包括普通晶闸管、GTR、GTO、MOSFET等)的工作原理,开关特性和电气参数。

(2) 熟练掌握单相、三相半波整流电路的分析方法和相应计算,并能对其它整流方式进行理论分析。掌握有源逆变电路的工作原理、波形分析和各种负载对电路的影响。

(3) 掌握无源逆变电路、交流调压电路、斩波电路的工作原理、电路结构、波形分析和有关参数计算。

(4) 掌握PWM型逆变电路的工作原理及波形分析。

(5) 对一般可控整流电路能正确连接,并掌握一定的故障判断和故障排除方法。

(6) 掌握常用的触发电路的工作原理、波形分析,并能根据不同的变流装置选择合适的触发电路。

(7) 了解新型电力电子器件的工作原理和电力电子学科的发展动向和趋势。

对本课程的学习,要求读者已经熟练地掌握了模拟电子技术,特别是晶体管的微观工作原理及其晶体管电路的原理和计算。除此之外,本课程还涉及到电路理论、数字电子技术、计算机原理与应用、电机与拖动等基础知识。

第一章 晶 闸 管

晶闸管原称可控硅，是硅晶体闸流管的简称。它是近几十年发展起来的一种较理想的大功率变流新器件。它的出现使大功率变流技术进入一个新时代。

晶闸管包括普通晶闸管 (Conventional Thyristor)、双向晶闸管 (Bidirectional Thyristor)、快速晶闸管 (Fast Switching Thyristor)、可关断晶闸管 (Gate Turn off Thyristor)、光控晶闸管 (Light Activated Thyristor) 和逆导晶闸管 (Reverse Conducting Thyristor) 等。晶闸管既代表这一族系的总称，又代表着广泛使用的普通晶闸管。由于普通晶闸管应用较为普遍，所以对其着重介绍。本书如不特别说明，则所说的晶闸管就指普通晶闸管。

第一节 晶闸管的结构及其工作原理

一、晶闸管的结构

常用的晶闸管可分为螺栓形和平板形两种结构，如图 1-1 所示。一般额定电流小于 200A 的晶闸管采用螺栓形，大于 200A 的采用平板形。对于螺栓形晶闸管，螺栓是晶闸管的阳极 A，它与散热器紧密联接。粗辫子线是晶闸管的阴极 K，细辫子线是门极 G。对于平板形晶闸管，它的两个平面分别是阳极和阴极，而细辫子线则是门极。使用时两个互相绝缘的散热器把晶闸管紧紧地夹在一起。大功率晶闸管工作时必须安装散热器，并且可采取自冷、风冷和水冷三种形式。晶闸管是一种大功率的 PNP 四层半导体元件，它有 A、K、G 三个端子，其内部有一个由硅半导体材料做成的管芯，管芯是一个圆形薄片，它决定晶闸管的性能。

二、晶闸管的工作原理

下面按图 1-2 做几个实验，来弄清晶闸管是如何工作的？主电源 E_A (可为 3~6V) 和

门极 E_G (一般 1.5~3 V) 通过双刀双掷开关 S_1 和 S_2 正向或反向作用接通或断开晶闸管的有关电极，主电路的通断由灯泡显示，经实验可得晶闸管通和断的规律如下：

(1) 当晶闸管承受反向阳极电压时，不论门极承受何种电压，晶闸管都处于关断状态。

(2) 当晶闸管承受正向阳极电压时，仅在门极承受正向电压的情况下晶闸管才能导通，正向阳极电压和正向门极电压两者缺一不可。晶闸管导通后的管压降为 1V 左右，电源电压几乎全加到灯泡上，灯泡点亮。

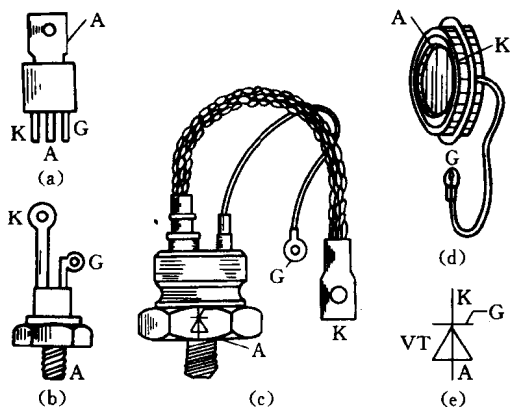


图 1-1 晶闸管的外形及符号

(3) 晶闸管一旦导通，门极就失去控制作用，此时不论门极电压是正还是负，晶闸管将保持导通。即门极只能触发晶闸管导通，而不能使已导通的晶闸管关断。因而普通晶闸管是不能自行关断的半控型器件。

(4) 要使晶闸管关断，必须去掉阳极正向电压，或者给阳极加反压，或者降低正向阳极电压，使通过晶闸管的电流降低到一定数值以下。能保持晶闸管导通的最小电流，称为维持电流。

(5) 当门极未加触发电压时，晶闸管具有正向阻断能力，它是一般二极管不具备的。为什么会出现上述现象呢？这需从图 1-3 晶闸管内部的四层结构来分析。它有 J_1 、 J_2 、 J_3 三 PN 结，是用扩散工艺制造的。 P_1 区引出阳极 A， N_2 区引出阴极 K， P_2 区引出触发控制极（门极）G。如果正向电压加到器件上，中间结 J_2 变成反偏，PNPN 结构处于阻断状态，只能通过很小的正向漏电流。这与一般二极管的反向特性相似。

晶闸管的工作原理可以作一个形象的比喻。由于元件有三个 PN 结，就好比有三个阀门的水管。如图 1-3 所示。

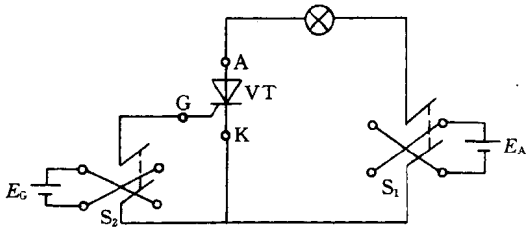


图 1-2 晶闸管工作条件实验电路

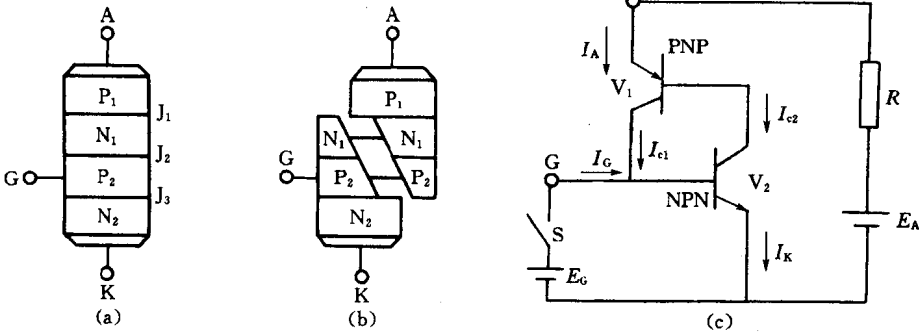


图 1-3 晶闸管的双晶体管模型

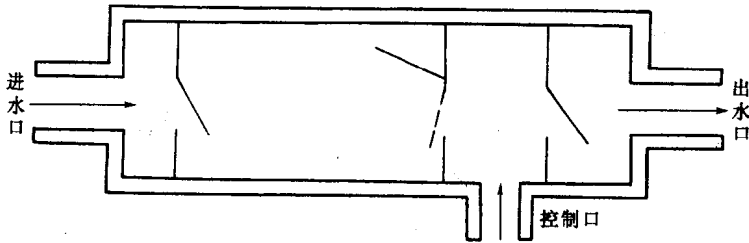


图 1-4 晶闸管工作原理的形象比喻

水若从右向左流有两个阀门挡着，显然不能流通。从左向右流也不能流通，因为中间有一个反向的阀门挡着，相当于元件门极无脉冲信号加入时，元件正反向都不导通。如果要使水从左向右流通，只需从下面加入一股小水流，此时要求从下面加入的那股水流应足够

把中间的阀门冲开，并使阀门翻上去才行，否则水还是不能流通的。即晶闸管触发导通需要一定大小的门极电流才行。这水管的水流通后，下面所加的那股水流就不再影响水的流通了。如果水管中水流减小到不足以顶住中间的阀门，阀门自行关上，水管恢复阻断能力。这相当于当晶闸管通过的电流小于维持电流时，晶闸管就自行关断。

晶闸管的工作原理通常是用串级的双晶体管模型来解释的，如图 1-4 (b)、(c) 所示。如在器件上取倾斜的截面，晶闸管 PNP 和 NPN 晶体管的组合来表达，如果门极电流 I_G 注入晶体管 V_2 的基极，即产生集电极电流 I_{C2} ，它构成晶体管 V_1 的基极电流，放大成集电极电流 I_{C1} ，又进一步增大 V_2 的基极电流，如此形成强烈正反馈，最后 V_1 和 V_2 进入完全饱和状态，即晶闸管饱和导通。

在阻断状态可以写出下列方程：

$$I_{C1} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1} \quad (a)$$

$$I_{C2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2} \quad (b)$$

$$I_K = I_A + I_G \quad (c)$$

式中 α_1 、 α_2 —— V_1 和 V_2 晶体管的共基极电流增益；

I_{CBO1} 、 I_{CBO2} —— V_1 和 V_2 的共基极漏电流。

联立方程式 (a) ~ 式 (c) 得：

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-1)$$

硅晶体管的共同特性是：在低发射极电流下 α 是很小的，而当发射极电流建立起来后， α 迅速增大。在正常阻断情况下， $I_G = 0$ ，而 $\alpha_1 + \alpha_2$ 是很小的。因此漏电流稍大于两个单管漏电流之和。如用触发手段使各个晶体管的发射极电流增大以致 $\alpha_1 + \alpha_2$ 趋近于 1 的话，将趋近无穷大，实现器件饱和导通，实际上由外接负载 R 来限制阳极电流。

由上述晶闸管实验可得如下结论：

(1) 正常情况下晶闸管阳极电压不能超过额定电压，正向漏电流 I_{C0} 很小，所以 $\alpha_1 + \alpha_2$ 远小于 1， $I_A \approx I_{C0}$ ，晶闸管就处在正向阻断状态。

(2) 如果在晶闸管阳极承受正向电压的同时，闭合门极开关，当门极流入的触发电流 I_G 增大到一定程度时，发射极电流也增大，当 $\alpha_1 + \alpha_2$ 增大至接近 1 时，则阳极电流 I_A 急剧增到等于饱和值，这表明晶闸管已完全导通。由于元件导通后 I_A 大大超过 I_G ，此时即使将门极电流降为零或负值，也不能使晶闸管关断。

(3) 晶体管导通后，逐渐减小阳极电流 I_A 至维持电流以下， $\alpha_1 + \alpha_2$ 远小于 1， $I_A = I_{C0}$ ，说明晶闸管已关断。

(4) 如果不加入触发电流，只是增大晶闸管正向阳极电压 U_A ，此时正向漏电流 I_{C0} 随其增大而上升， α_1 与 α_2 也随着增大。当上升到一定程度， I_{C0} 已增大到使 $\alpha_1 + \alpha_2$ 接近 1 时，晶闸管也会完全导通。这时阳极所加的最大正向电压称为晶闸管的正向转折电压 U_{BO} 。

(5) 由于半导体少数载流子所引起的阳极正向漏电流 I_{C0} ，不仅与 U_A 大小有关，同时与温度也有关系。随着温度的升高，漏电流 I_{C0} 也增大。因而在晶闸管正向电压不变的情况下，要使晶闸管导通，温度愈高，触发电流愈小，反之则相反。

影响晶闸管导通的因素是多方面的，从控制角度看，门极触发是最通用的方法，可在

精确限定的瞬间触发晶闸管，这也是晶闸管广泛应用于控制领域的一个方面。

第二节 晶闸管的阳极伏安特性和主要参数

要正确理解晶闸管工作原理和对它进行定量和定性的分析，我们需首先了解晶闸管的阳极伏安特性及其晶闸管的主要参数。

一、晶闸管的阳极伏安特性 (V-A Characteristic)

晶闸管的阳极与阴极之间的电压和晶闸管阳极电流的关系称为晶闸管的阳极伏安特性，如图 1-5 所示。正向伏安特性曲线如图 1-5 的第 I 象限所示，当 $I_g=0$ 晶闸管正向电压未增到正向转折电压 U_{B0} 时，元件都处在正向阻断状态，其正向漏电流随着阳极电压 u_A 增大而逐渐增大，当 u_A 增到 U_{B0} 时，晶闸管就被导通。导通后元件的阳极伏安特性与整流二极管正向伏安特性相似。 $I_g=0$ 的这条特性曲线，称为晶闸管的自然伏安特性曲线。通常是不允许正向电压增加到自然转折电压使管子导通。因为用这方法使管子导通的是不可控的，而且多次这样导通会损坏管子。一般是给门极输入足够的触发电流，使转折电压明显降低来导通晶闸管。如图 1-5 所示，由于 $I_{g2} > I_{g1} > I_g$ ，相应的 $U_{B2} < U_{B1} < U_{B0}$ 。晶闸管一旦导通后，其阳极伏安特性与整流二极管的正向伏安特性相似。

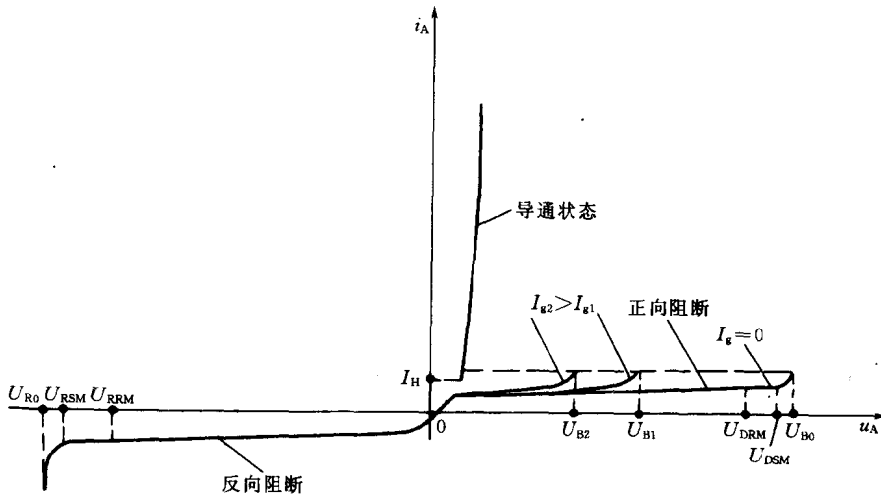


图 1-5 晶闸管阳极伏安特性

U_{R0} —反向击穿电压； U_{RSM} —断态反向不重复峰值电压； U_{RRM} —断态反向重复峰值电压；

U_{B0} —正向击穿电压； U_{DSM} —断态正向不重复峰值电压； U_{DRM} —断态正向重复峰值电压

反向伏安特性曲线如图 1-5 第 III 象限所示，它与整流二极管的反向伏安特性曲线相似。若反向电压增大到反向击穿电压 U_{R0} 时，晶闸管将造成永久性的损坏，使用时晶闸管两端可能承受的最大峰值电压，都必须小于管子的反向击穿电压，否则管子将被损坏。

二、晶闸管阳极主要参数

要正确地使用晶闸管，不仅需要了解晶闸管的工作原理及特性，更重要是理解晶闸管的主要参数含义。现就常用的晶闸管阳极主要参数介绍如下：

1. 额定电压 U_{TN}

从图 1-5 中元件自然阳极伏安特性曲线可见, 当门极断开, 元件处在额定结温时, 所测定的正向不重复峰值电压 U_{DSM} 、反向不重复峰值电压 U_{RSM} 各乘 0.9 所得的数值, 分别称为元件的正向阻断重复峰值电压 U_{DRM} 和反向阻断重复峰值电压 U_{RRM} 。至于正反向不重复峰值电压和相应的转折电压 U_{BO} , 击穿电压 U_{RO} 的差值, 一般由晶闸管制造厂自定。

所谓元件的额定电压 U_{TN} , 是指 U_{DRM} 与 U_{RRM} 中较小的值, 在取相应于标准电压等级表 1-1 中偏小的电压值。例如, 某晶闸管实测 $U_{DRM}=734\text{ V}$, $U_{RRM}=810\text{ V}$, 取两者其中小的数值 734 V。

表 1-1 晶闸管的断态正反向重复峰值电压标准等级

级 别	断态正反向重复 峰值电压 (V)	级 别	断态正反向重复 峰值电压 (V)	级 别	断态正反向重复 峰值电压 (V)
1	100	8	800	20	2000
2	200	9	900	22	2200
3	300	10	1000	24	2400
4	400	12	1200	26	2600
5	500	14	1400	28	2800
6	600	16	1600	30	3000
7	700	18	1800		

因为晶闸管的额定电压是瞬时值, 若超过反向击穿电压, 就会造成元件永久性损坏。若超过正向转折电压, 元件就会误导通。晶闸管工作, 由于会出现环境温度升高、散热不良和出现各种过电压等情况。因此, 选择晶闸管的额定电压值时, 应为元件在实际工作电路中可能承受到的最大瞬时值电压的 2~3 倍较安全, 即 $U_{TN} = (2 \sim 3) U_{TM}$ 。按表 1-1 选取相应电压标准等级。

2. 额定电流 $I_{T(AV)}$

在环境温度为 40°C 、标准散热条件下, 元件在电阻性负载的单相工频正弦半波、导通角不小于 170° (全导通) 的电路中, 当结温不超过额定结温且稳定时, 所允许的最大通态平均电流, 称为额定通态平均电流 $I_{T(AV)}$ 。

按上述 $I_{T(AV)}$ 的定义, 由图 1-6 可分别求得正弦半波电流平均值 $I_{T(AV)}$ 、电流有效值 I_T 和电流最大值 I_m 三者的关系:

$$I_{T(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi} \quad (1-2)$$

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2} \quad (1-3)$$

各种有直流分量的电流波形, 其电流波形的有效值 I 与平均值 I_d 之比, 称为这个电流的波形系数, 用 K_f 表示为:

$$K_f = \frac{I}{I_d} \quad (1-4)$$

因此, 在正弦半波情况下电流波形系数为:

$$K_f = \frac{I_T}{I_{T(AV)}} = \frac{\pi}{2} = 1.57 \quad (1-5)$$

例如，对于一只额定电流 $I_{T(AV)}=100\text{A}$ 的晶闸管，按式 (1-5) 可知其允许的电流有效值应为 157A 。

晶闸管允许流过电流的大小主要取决于元件的结温，在规定的室温和冷却条件下，结温的高低仅与发热有关，造成元件发热的主要因素是流过元件的电流有效值和元件导通后管芯的内阻，一般认为内阻不变，则发热取决于电流有效值。因此，在实际中选择晶闸管额定电流 $I_{T(AV)}$ 应按以下原则：所选的晶闸管额定电流有效值 I_{TN} 大于元件在电路中可能流过的最大电流有效值 I_{TM} 。考虑到元件的过载能力比一般电机电器产品小得多，因此选择时考虑 $1.5\sim 2$ 倍的安全余量是必要的，即：

$$I_{TN} = 1.57 I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) I_{TM}$$

$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) \frac{I_{TM}}{1.57} \quad (1-6)$$

可见在实际使用时，不论元件流过的电流波形如何，导通角有多大，只要遵循式 (1-6) 来选择管子的额定电流，管子的发热就不会超过允许范围。在使用中，当散热条件不符合规定要求时，如室温超过 40°C ，强迫风冷的出口风速不足 5 m/s 等，则元件的额定电流应立即降低使用，否则元件会由于结温超过允许值而损坏。例如，按规定应采用风冷的元件而采用自冷时，则电流的额定值应降低到原有值的 $30\%\sim 40\%$ ，反而如果改为采用水冷时，则电流的额定值可以增大 $30\%\sim 40\%$ 。

3. 通态平均电压（管压降） $U_{T(AV)}$

当元件流过正弦半波的额定电流平均值和稳定的额定结温时，元件阳极与阴极之间电压降的一周平均值简称管压降 $U_{T(AV)}$ 。其标准值分组列于表 1-2 中。管压降愈小，表明元件耗散功率愈小，管子质量愈好。以上三个阳极主要参数是选购晶闸管的主要技术数据。

表 1-2 晶闸管按正向通态平均电压的分组

正向通态平均电压	$U_{T(AV)} \leq 0.4\text{ V}$	$0.4\text{ V} < U_{T(AV)} \leq 0.5\text{ V}$	$0.5\text{ V} < U_{T(AV)} \leq 0.6\text{ V}$	$0.6\text{ V} < U_{T(AV)} \leq 0.7\text{ V}$	$0.7\text{ V} < U_{T(AV)} \leq 0.8\text{ V}$
组别代号	A	B	C	D	E
正向通态平均电压	$0.8\text{ V} < U_{T(AV)} \leq 0.9\text{ V}$	$0.9\text{ V} < U_{T(AV)} \leq 1.0\text{ V}$	$1.0\text{ V} < U_{T(AV)} \leq 1.1\text{ V}$	$1.1\text{ V} < U_{T(AV)} \leq 1.2\text{ V}$	
组别代号	F	G	H	I	

4. 其它参数

(1) 维持电流 I_H (Holding Current)。在室温与门极断开时，使晶闸管维持导通所必须的最小主电流称维持电流 I_H 。维持电流与元件容量、结温等因素有关，元件的额定电流愈

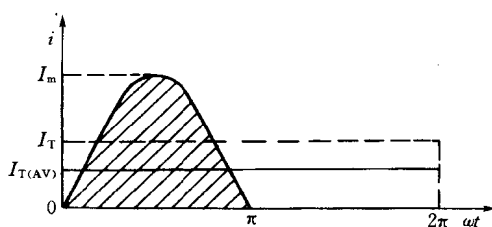


图 1-6 晶闸管的通态平均电流、有效值及最大值三者间的关系

大, 维持电流也愈大。结温低, 维持电流就大。维持电流大的管子, 容易关断。由于元件的离散性, 同一型号的不同管子, 维持电流也不相同。

(2) 擎住电流 I_L (Latching Current)。晶闸管刚从断态转入通态, 并移除触发信号之后, 使管子能维持通态所需要的最小极电流称擎住电流 I_L 。对同一个晶闸管来说, 通常擎住电流 I_L 比维持电流 I_H 大 (2~4) 倍。

(3) 通态电流临界上升率 di/dt 。在规定条件下, 元件在门极开通时能承受而不导致损坏的通态电流的最大上升率称通态电流临界上升率。

(4) 断态正向电压临界上升率 du/dt 。在额定结温和门极断路情况下, 使元件从断态转入通态, 元件所加的最小正向电压上升率称断态正向电压临界上升率。

第三节 晶闸管门极伏安特性及主要参数

一、晶闸管的门极伏安特性

晶闸管的门极和阴极间有一个 PN 结 J_3 [参见图 1-4 (a)], 它的伏安特性称为门极伏安特性。它的正向特性不像普通二极管具有很小的正向电阻及较大的反向电阻, 有时它的正反向电阻是很接近的。又因为元件存在着较大的离散性, 所以同一型号的晶闸管表现出高阻或低阻的不同特性, 多数是介于两者之间, 如图 1-7 所示。

二、门极的主要参数

1. 触发电压 U_G 和触发电流 I_G

门极触发电流 (Gate Trigger Current), 是指在室温下, 晶闸管施加 6V 正向阳极电压时, 使元件由断态转入通态所必须的最小门极电流。产生门极触发电流所必须的最小门极电压, 称为门极触发电压 (Gate Trigger Voltage)。触发电压、电流受温度影响很大。当元件工作温度升高, I_G 和 U_G 值会显著降低; 在冬季使用时, I_G 和 U_G 增加。使用时要注意这一特点。通常为了保证晶闸管可靠触发, 外加门极电压的幅值要比 U_G 大好几倍。

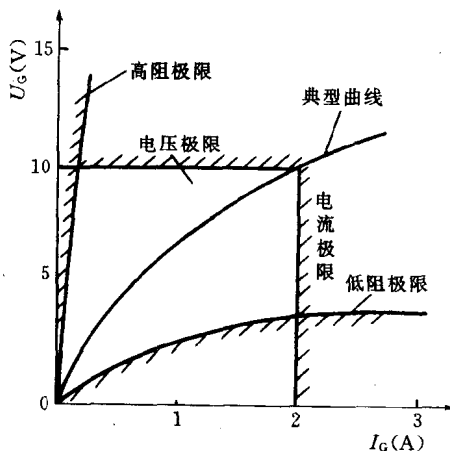


图 1-7 晶闸管门极伏安特性曲线

2. 门极不触发电压 U_{GD} 和不触发电流 I_{GD}

未能使晶闸管从断态转入通态, 门极所加的最大电压称不触发电压 U_{GD} 。相应的最大电流称不触发电流 I_{GD} 。

晶闸管的 U_{GD} 值应大于或等于规定的标准值, 否则表明元件太灵敏, 抗干扰能力差。使用时, 应使触发电路输出可能出现的“残压”小于标准值。否则, 有可能引起误触发导通。

3. 门极的开通时间 t_G 和关断时间 t_{GD}

当触发电流输入门极, 先在 J_2 结靠近门极附近形成导通区, 逐渐才扩展到 J_2 结的全区域, 这段时间称门极开通时间 (Gate “on” time)。普通晶闸管的开通时间约为几十微秒以下。

在额定结温下, 元件从切断正向阳极电流, 到元件恢复正向断态能力为止, 这段时间

称关断时间 (Gate “off” time), 一般为几百微秒。晶闸管虽然存在着开通与关断的时间, 但在工频电路中可以不计, 在高频电路中就必须考虑。如果普通晶闸管不能满足高频电路要求, 可选用快速晶闸管, 因它的开通时间通常在 $1\mu\text{s}$ 左右。

第四节 其它形式的晶闸管

一、双向晶闸管 (TRIAC)

双向晶闸管是一种特殊晶闸管, 具有正反向对称的伏安特性, 由一个控制极实现双向导通, 其触发信号可以是直流、交流和脉冲三种方式, 并且工作电压接近于转折电压, 不需要过大的安全系数。双向晶闸管具有结构简单、重量轻、体积小、维修方便等优点, 广泛应用于交流调压、调光、控温、稳压、调速等较小功率场合。

1. 工作原理

双向三端晶闸管开关器件是采用低阻高参杂硅材料制成的 NPNPN 五层三端器件, 其核心部分集成在一块硅单晶片上, 相当于具有公共门极的一对反并联的普通晶闸管, 其结构如图 1-8 所示。N₃ 区和 P₂ 区一部分用金属膜连通后引出接线端子称为公共门极 G, 而 N₄ 区和 P₁ 区、N₂ 区和 P₂ 区的表面用金属膜连通, 构成双向晶闸管的两个主端子 T₁、T₂ 三个电极 T₁、T₂ 和 G, 由于可以双向导通, 除门极 G 以外, 统称主端子, 不再分阴极和阳极。其特点是当门极 G 和 T₂ 相对 T₁ 的电压均为正时, T₂ 是阳极, T₁ 是阴极; 反之, 当门极 G 和 T₂ 相对于 T₁ 电压均为负时, T₁ 变成阳极, T₂ 变成阴极。

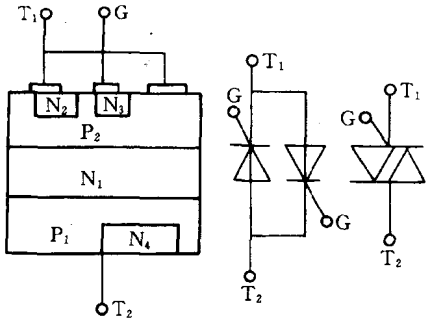


图 1-8 双向晶闸管的结构、符号及等效电路

2. 伏安特性

双向晶闸管有四种触发方式, 在 I 和 III 象限有相对称的伏安特性, 如图 1-9 所示。当门极开路 ($I_G=0$) 时, 增加正向电压, 这时只有很小的正向漏电流。当电压达到正向转折电压 U_{BO} 时, 管子由截止突然转为导通, 电流急剧增加, 管压降降到很小值。

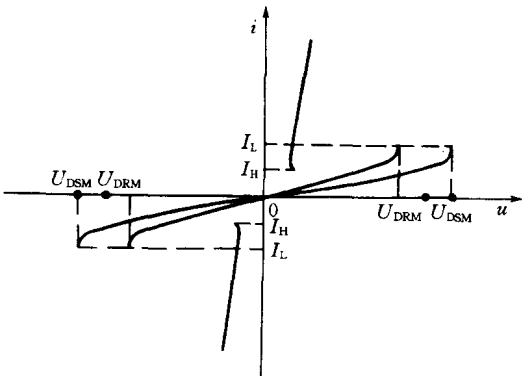


图 1-9 双向晶闸管伏安特性曲线

当反向电压增加时, 由于对称关系, 其过程相同。

当门极加入电流时, 转折电压将改变。随着 I_G 的增加转折电压 U_{Bo} 将减小, 甚至当门极电流大到一定程度时, 管子可不经转折而直接导通, 使用时要注意这个问题。

3. 主要参数

双向晶闸管通常用在交流电路中, 因而不能用平均值, 而应用有效值表示它的额定