



高等职业教育“十一五”规划教材

高职高专电子信息类系列教材

变流技术的实现

孙慧峰 熊旭平 主 编



科学出版社

www.sciencep.com

高等职业教育“十一五”规划教材

高职高专电子信息类系列教材

变流技术的实现

孙慧峰 熊旭平 主 编

钟晓强 崔 延 副主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要包括常用电力电子器件的结构原理与驱动,由此组成的变流电路及其测调,以及变频器应用技术。本书的编写本着“源于现场,又服务于现场”的原则,依据职业岗位、参照职业资格标准,确定学生应具备的知识与技能,选取教学载体,设计课程内容。

本书可供高职高专院校电气自动化技术、机电一体化技术等电气工程和电子信息类专业师生使用。

图书在版编目(CIP)数据

变流技术的实现/孙慧峰,熊旭平主编. —北京:科学出版社,2009
(高等职业教育“十一五”规划教材·高职高专电子信息类系列教材)
ISBN 978-7-03-023578-7

I. 变… II. ①孙…②熊… III. 变流技术-高等学校:技术学校-教材
IV. TM46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 192199 号

责任编辑:孙露露/责任校对:赵 燕

责任印制:吕春珉/封面设计:东方人华平面设计部

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年2月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009年2月第一次印刷 印张:17 1/2

印数:1—3 000 字数:403 000

定价:25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新蕾〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62138978-8212

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

随着高职教育改革的进一步深化,以培养应用型人才为目标的高职课程教育体系改革显得极为重要。本书编写人员在借鉴德国“双元制”职业教育模式的基础上,结合我国高职教育的特点编写了本书,其主要特点是在内容的选取与结构安排上本着“源于企业,又服务于企业”的原则,贴近岗位选取教学载体,设计课程内容,注重学生实践操作能力的培养,体现了工作过程的完整性,突显高职教育特色。所列举的实例尽量与实际相结合,文字表达力求简单易懂,在保证基本理论的前提下,简化甚至舍去了繁琐的理论推导和复杂的数据计算,突出实用性,侧重于学生基本技能的训练和综合能力的培养。

本书由孙慧峰、熊旭平任主编,由钟晓强、崔延任副主编。孙慧峰编写了本书的第7、8两章,崔延编写了第1章,马超编写了第2章,熊旭平编写了绪论和第3、9两章,沈占彬编写了第6章,钟晓强编写了第4、5两章。

第1~6章实操部分,以浙江天皇科技实业有限公司生产的电力电子及电机控制实训装置为实操平台;第7~9章以MM420西门子变频器为学习实例。

本书配有电子课件,下载网址: www.abook.cn。

在本书编写过程中,限于编者的水平,书中难免有不妥之处,恳请广大读者批评指正(主编邮箱: shf4998055@yahoo.com.cn)。

目 录

绪论	1
第1章 可控整流技术的实现	4
任务1 晶闸管的功能测试	4
任务2 晶闸管的触发电路调试	19
任务3 单相半波 (Half-Wave) 可控整流的实现	33
任务4 单相桥式可控整流的实现	42
任务5 三相半波可控整流的实现	51
任务6 三相桥式可控整流的实现	61
本章小结	72
第2章 有源逆变技术的实现	73
任务1 有源逆变及其基本逆变电路	73
任务2 有源逆变电路的应用	77
本章小结	83
第3章 全控型电力电子器件的检测与驱动	84
任务1 全控型器件的认识与检测	84
任务2 电力电子器件的保护及缓冲措施	108
本章小结	115
第4章 直流斩波技术的实现	116
任务1 降压式直流斩波电路	116
任务2 升压式直流斩波电路	124
任务3 升降压式直流斩波电路	129
本章小结	134
第5章 交流调压技术的实现	135
任务1 单相交流调压电路	135
任务2 三相交流调压电路	142
任务3 交流开关及其应用电路	149
本章小结	158
第6章 变频技术的实现	159
任务1 无源逆变技术的实现	159
任务2 变频器的组成及运行	175
任务3 脉宽调制技术的应用	183
本章小结	194
第7章 变频器的操作运行与功能预置	195
任务1 变频器的认识与操作	195

任务 2 面板运行模式下的电动机启停及正、反转控制	205
任务 3 外部端子运行模式下电动机的启停和反转	218
任务 4 外接给定信号控制的变频调速	222
任务 5 变频器的功能及预置	228
任务 6 变频器的 PID 控制	239
任务 7 PLC 与变频器的配合使用	246
本章小结	251
第 8 章 变频器的典型应用	253
本章小结	262
第 9 章 变频器的保养、维护与故障对策	263
任务 1 变频器的维护与保养	263
任务 2 变频器的维修与检查	265
本章小结	270
参考文献	271

绪 论

（一）“变流技术”概述

利用各种电力电子器件，对电能进行电压、电流、频率和波形等方面的控制和变换的技术，称为变流技术。它是以电力为控制对象的，因此又称为电力电子技术，包括电力电子器件、电路和控制 3 个部分。也可形象通俗地讲，变流技术是将电网的交流电，所谓的“粗电”，通过电力电子电路进行处理变换，精炼到使电能能在稳定、波形、频率、数值、抗干扰性能等方面符合各种用电设备需要的“精电”过程。

半导体电子技术发展至今已形成两大技术领域，即以集成电路为核心的微电子技术和以功率半导体器件（亦称电力电子器件）为核心的电力电子技术。前者主要用于信息处理，向小功率发展；后者主要用于对电力的处理，向大功率多功能发展。

电力电子器件的发展可分为以下两个阶段。

（1）传统电力电子器件

传统电力电子器件主要是功率整流管与晶闸管（又称可控硅），属于不控与半控器件。自 1957 年第一只晶闸管问世以来，现已由普通晶闸管衍生出快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、不对称晶闸管等品种，器件的电压、电流等技术参数均有很大提高，单只普通晶闸管的容量已达 8000V、6000A。此类器件通过门极只能控制开通而不能控制关断，另外它立足于分立元件结构，工作频率难以提高，因而大大限制了其应用范围。但是晶闸管器件价格相对低廉，在大电流、高电压的发展空间依然较大，目前以晶闸管为核心的设备仍然在许多场合使用，晶闸管及其相关知识目前仍是初学者的基础。

（2）现代电力电子器件

20 世纪 80 年代以来，将微电子技术与电力电子技术相结合，研制出新一代高频、全控型器件，称为现代电力电子器件。主要有功率晶体管（GTR）、可关断晶闸管（GTO）、功率场控晶体管（MOSFET）、绝缘栅双极晶体管（IGBT）、MOS 门极晶闸管（MCT）等。最有发展前途的是绝缘栅双极晶体管与 MOS 门极晶闸管，两者均为场控复合器件，工作频率可达 20kHz。目前 IGBT 器件已取代 GTR，而 MCT 将可能会取代晶闸管与 GTO，功率 MOS 在低压高频变流领域仍有发展潜力。

（二）电力电子技术的主要功能与应用

电力电子电路是以电力电子器件为核心，通过对不同电路的各种控制来实现对电能的转换和控制，它的基本功能有以下 4 种。

1) 整流与可控整流电路亦称交流、直流（AC/DC）变换电路，其功能是把交流电变换为固定或可调直流电。

2) 逆变电路亦称 DC/AC 变换电路，其功能是把直流电变换成频率固定或频率可调的交流电。如把直流电能逆变成 50Hz 的交流电返送交流电网称为有源逆变，把直流

电能逆变为固定频率或频率可调的交流电供给用电器则称为无源逆变。

3) 直流斩波电路亦称 DC/DC 变换电路, 其功能是把固定直流电变换成可调或固定直流电。

4) 交流调压与周波变换亦称 AC/AC 变换电路, 把恒定交流电变换为可变交流电称为交流调压, 把固定频率的交流电变为频率可变的交流电称为变频电路。

在实际使用时可将一种或几种功能电路进行组合, 据先进国家 20 世纪 90 年代的统计资料, 超过 60% 以上的电能是经过电力电子技术处理变换后才使用的。

由于电力电子器件具有体积小、重量轻、容量大、损耗小、寿命长、维护方便、控制性能好以及可采用集成电路制造工艺等优点, 用它组成的装置具有可靠性高、节能、性能好等优点。应用范围已从传统的工业、交通、电力等部门, 扩大到信息通信、家用电器以至宇宙开发等领域。

电力电子技术在生产与生活中的具体应用主要有直流可调电源、电镀、电解、加热、照明控制与节能照明、不间断电源与开关电源、充电、电磁合闸、电机励磁、电焊、电网无功与谐波补偿、高压直流输电、光电池与燃料电池变换、固态断路器、感应加热、电机直流调速与变频交流调速、电力牵引(地铁机车、矿山机车、城市电车、电瓶车、电动汽车)、汽车电气、计算机及通信电源, 以及各类家电与便携式电器等。

(三) 电力电子技术的发展

1. 电力电子器件的发展

器件是电力电子技术的基础, 也是电力电子技术发展的动力, 电力电子技术的每一次飞跃都是以新器件的出现为契机的。电力电子器件的发展方向主要表现在以下 6 个方面。

1) 大容量化。应用微电子工艺, 使单个器件的电压、电流容量进一步提高, 以满足高电压、大电流的需要。

2) 高频化。采用新材料、新工艺, 在一定的开关损耗下尽量提高器件的开关速度, 使装置运行在更高频率。频率提高不仅可提高系统的性能、改善波形, 而且大大减少装置的体积与重量, 因此高频器件的技术性能指标用“容量 $\times$ 工作频率”来衡量。

3) 易驱动。由电流驱动发展为电压驱动, 大力发展 MOS 结构的复合器件, 如 IGBT、MCT。由于控制驱动功率小, 因此可研制专用集成驱动模块, 甚至把驱动与器件制作于一个芯片, 以便更适合中、小功率控制。

4) 降低导通压降。研制出比肖特基二极管正向压降还低的器件以提高变流效率、节省电能, 特别适用于便携式低压电器。

5) 模块化。采用制造新工艺, 如塑封化、表面贴装化和桥式化, 将几个器件封装在一起以缩小体积与减少连线。如几个 IGBT 器件与续流管以及保护、检测器件、驱动等组成桥式模块, 称智能器件(Intelligent Power Module, IPM)。

6) 功率集成化。充分应用集成电路工艺, 将驱动、保护、检测、控制、自诊断等功能与电力电子器件集成于一块芯片, 发展为功率集成电路(Power Integrated Circuit, PIC), 实现集成电路功率化、功率器件集成化, 使功率与信息集成在一起, 成为机电一体化的接口, 并逐步向智能化(Smart PIC)方向发展。

2. 变流电路与变频器的发展

传统电力电子技术以整流为主导,以移相触发(相控)、PID 模拟控制方式为主。20 世纪 70 年代以后,电力电子技术和微电子技术以惊人的速度向前发展,高频全控器件的出现,使逆变、斩波电路的应用日益广泛。由于逆变、斩波电路中都需要直流电源,因此整流电路仍占重要地位。在逆变、斩波电路中,以斩控形式的脉宽调制(PWM)技术大量应用,使变流装置的功率因数提高、谐波减少、动态响应快。特别是以微处理器实现的数字控制替代了模拟控制,并应用了静止旋转坐标变换的矢量控制,使电力电子技术日臻完善。

同时变频调速传动技术也取得了日新月异的进步,特别是进入 20 世纪 90 年代,随着半导体开关器件 IGBT、矢量控制技术的成熟,微机控制的变频调速成为主流。随着变频器专用大规模集成电路、半导体开关器件、传感器的性能越来越高,变频器的性能和功能也得到了进一步提高。

(1) 网络智能化

智能化的变频器买来即可使用,不必进行太多的设定,而且可进行故障自诊断、遥控诊断及部件自动置换,同时利用互联网可实现多台变频器联动,甚至是以工厂为单位的变频器综合管理控制系统。

(2) 专门化和一体化

变频器制造的专门化,可以使变频器在某一领域的性能更强,如风机、水泵用变频器、电梯专用变频器、起重机械专用变频器、张力控制专用变频器等。除此以外,变频器有与电动机一体化的趋势,使变频器成为电动机的一部分,可以使体积更小,控制更方便。

(3) 环保无公害

保护环境,制造“绿色”产品是人类的新理念。21 世纪的电力拖动装置应着重考虑:节能,变频器能量转换过程的低公害,使变频器在使用过程中的噪声、电源谐波对电网的污染等问题减少到最小程度。

(4) 适应新能源

现在以太阳能和风力为能源的燃料电池以其低廉的价格崭露头角,有后来居上之势。这些发电设备的最大特点是容量小而分散,将来的变频器就要适应这样的新能源,既要高效,又要低耗。

(四) 课程性质与学习方法

变流技术是一门专业基础性很强且与生产实际应用紧密联系的课程,在高等学校电气工程类专业中被确定为主干课程。

学习本课程时,要着重物理概念与基本分析方法的学习,理论要结合实际,尽量做到器件、电路、应用三者结合。在学习方法上要特别注意电路的波形与相位分析,抓住电力电子器件在电路中导通与截止的变化过程,从波形分析中进一步理解电路的工作情况,同时要注意培养读图与分析能力,掌握器件计算、测量、调整以及故障分析等方面的实践能力。

本课程涉及高等数学、电工基础、电子技术、电机拖动等知识,学习时需要复习相关课程并综合运用所学知识。

第 1 章 可控整流技术的实现

自 1957 年美国研制出第一只普通晶闸管以来，至今已形成了从低压小电流到高压大电流的系列产品。同时，世界各国还研制出多种晶闸管的派生器件，如双向晶闸管、快速晶闸管、逆导晶闸管及光控晶闸管等。晶闸管作为大功率的半导体器件，可用几十至几百毫安的小电流来控制几百至几千安培的大电流，实现了弱电对强电的控制。晶闸管具有体积小、重量轻、损耗小、控制特性好等优点，曾经在许多领域中得到了广泛的应用。

可控整流技术是晶闸管最基本的应用之一，在工业生产上应用也极广。可控整流电路的作用是将交流电转换成大小可以调节的直流电，为直流用电设备（要求电压可调）供电，如电炉的温度控制、直流电动机的转速控制、同步发电机的励磁调节控制、电镀及电解电源控制等设备或装置。可控整流电路的结构形式视用电负载容量大小不同而定，通常小容量（4kW 以下）的负载供电采用单相可控整流，它具有电路简单、投资省、维护方便等优点。对于容量较大的负载，采用三相可控整流电路易于满足负载对高电压、大电流的需求，同时也保证负载上的直流电压脉动小，供电的交流电网三相平衡。

■ 任务 1 晶闸管的功能测试 ■

知识点：

1. 晶闸管的结构、工作原理、导通与关断特性及主要参数。
2. 晶闸管派生器件的结构及功能。

技能点：

1. 晶闸管的电极判别。
2. 晶闸管的功能测试。

■ 任务导入

晶闸管是一种既具有开关作用又具有整流作用的大功率半导体器件。由于它具有体积小、重量轻、效率高、动作迅速、维护简单、操作方便和寿命长等特点，因而在生产实际中获得了广泛的应用。

■ 相关知识

(一) 普通晶闸管

晶闸管 (Thyristor) 是一种以硅单晶为基本材料的 P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2 这 4 层三端器件, 由于它的特性类似于真空闸流管, 所以国际上通称为硅晶体闸流管, 简称晶闸管。又由于晶闸管最初应用于可控整流, 所以又称为硅可控整流元件, 简称为可控硅 (Silicon Controlled Rectifier, SCR)。

1. 晶闸管的结构

常用的晶闸管有螺栓型和平板型两种外形, 如图 1.1.1 (a) 所示。晶闸管在工作过程中会因损耗而发热, 因此必须安装散热器。螺栓型晶闸管是靠阳极 (螺栓) 拧紧在铝制散热器上, 可自然冷却; 平板型晶闸管由两个相互绝缘的散热器夹紧晶闸管, 靠冷风冷却。额定电流大于 200A 的晶闸管都采用平板型的外形结构。此外, 晶闸管的冷却方式还有水冷、油冷等。

不管晶闸管的外形如何, 它们的管芯都是由 P 型硅和 N 型硅组成的 4 层 P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2 结构, 其结构和图形符号如图 1.1.1 (b)、(c) 所示。它有 3 个 PN 结 (J_1 、 J_2 、 J_3), 从 J_1 结构的 P_1 层引出阳极 A, 从 N_2 层引出阴极 K, 从 P_2 层引出控制极 G (也称为门极), 所以它是一种 4 层三端的半导体器件。

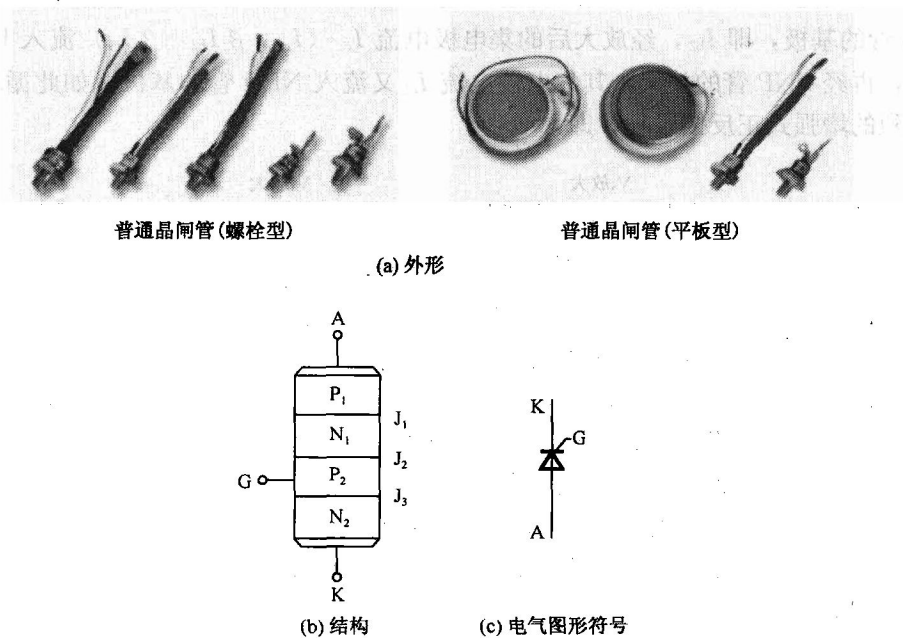


图 1.1.1 晶闸管的外形、结构和电气图形符号

2. 晶闸管的工作原理

在性能上, 晶闸管不仅具有单向导电性, 而且还具有比硅整流元件 (俗称“死硅”) 更为可贵的可控性。它只有导通和关断两种状态。

晶闸管是 P_1 、 N_1 、 P_2 、 N_2 这 4 层三端结构元件, 共有 3 个 PN 结 (J_1 、 J_2 、 J_3),

具有 3 个电极——阳极 A、阴极 K、控制极 G。分析原理时，可以把晶闸管看成由一个 PNP 和一个 NPN 两个晶体管连接而成，每一个晶体管的基极与另一个晶体管的集电极相连，阳极 A 相当于 PNP 型晶体管 V_1 的发射极，阴极 K 相当于 NPN 型晶体管 V_2 的发射极。其等效图解如图 1.1.2 所示。

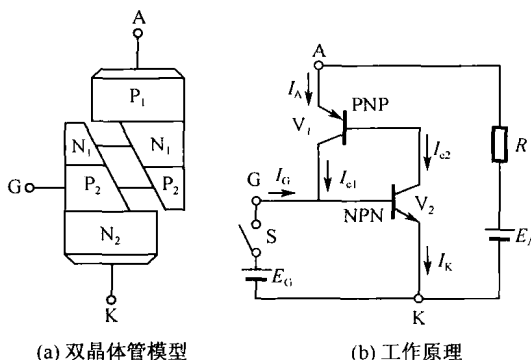
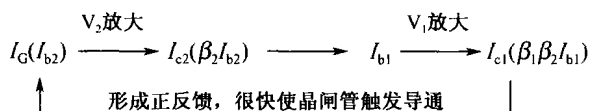


图 1.1.2 晶闸管的双晶体管模型及其工作原理

当晶闸管阳极承受正向电压（即 A 接电源正极，K 接电源负极），控制极 G 不加电压，这时晶闸管相当于由 3 个 PN 结相串接，其中一只反接，因而不导通。在晶闸管阳极承受正向电压，控制极 G 也加上适当电压（ $U_{GK} > 0$ ）时，则有电流 I_G 从门极流入 NPN 管的基极，即 I_{b2} ，经放大后的集电极电流 I_{c2} （ $I_{c2} = \beta_2 I_{b2} = \beta_2 I_G$ ）流入 PNP 管的基极，再经 PNP 管的放大，其集电极电流 I_{c1} 又流入 NPN 管的基极，如此循环，则产生强烈的增强式正反馈过程，即



使两个晶闸管很快饱和导通，从而使晶闸管由阻断迅速地变为导通。流过晶闸管的电流将取决于外加电源电压和主回路的阻抗大小。

晶闸管导通之后，它的导通状态完全依靠管子本身的正反馈作用来维持，即使控制极电流消失，晶闸管仍将处于导通状态。因此，控制极的作用仅是触发晶闸管使其导通，导通之后，控制极就失去了控制作用。

欲使晶闸管关断，最根本的方法就是必须使其阳极电流减小到使之不能维持正反馈的程度，也就是将晶闸管的阳极电流减小到维持电流以下，这只有用使阳极电压减小到零或反向的方法来实现。

3. 晶闸管的伏安特性

晶闸管的阳极与阴极间的电压 U_A 和阳极电流 I_A 的关系称为晶闸管伏安特性，正确使用晶闸管必须要了解其伏安特性。图 1.1.3 所示为晶闸管伏安特性曲线，包括正向特性（第一象限）和反向特性（第三象限）两部分。

晶闸管的正向特性又有阻断状态和导通状态之分。在正向阻断状态时，晶闸管的伏安特性是一组随门极电流的增加而不同的曲线簇。

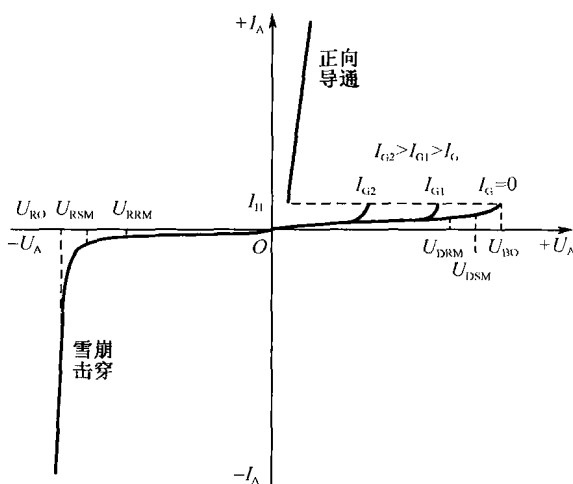


图 1.1.3 晶闸管伏安特性曲线

当控制极开路 ($I_G=0$)，阳极上加上正向电压时， J_1 、 J_3 结正偏，但 J_2 结反偏，这与普通 PN 结的反向特性相似，晶闸管正向阻断状态，只流过很小的正向漏电流；随着阳极电压的增加，当达到正向转折电压 U_{BO} 时，漏电流急剧增大，晶闸管由正向阻断状态变为正向导通状态。这种在 $I_G=0$ 时，依靠增大阳极电压而强迫晶闸管导通的方式称为“硬开通”。多次“硬开通”会使晶闸管损坏，因此通常不允许这样做。

随着门极电流 I_G 的增大，晶闸管的正向转折电压 U_{BO} 迅速下降，当 I_G 足够大时，晶闸管的正向转折电压很小，可以看成与一般二极管一样，只要加上正向阳极电压，管子就导通了。晶闸管正向导通的伏安特性与二极管的正向特性相似，即当流过较大的阳极电流时，晶闸管的压降很小。

晶闸管正向导通后，要使晶闸管恢复阻断，只有逐步减小阳极电流 I_A ，使 I_A 下降到小于维持电流 I_H （维持晶闸管导通所需的最小电流），则晶闸管又由正向导通状态变为正向阻断状态。图 1.1.3 中各物理量的含义如下：

U_{DRM} 、 U_{RRM} ——正、反向断态重复峰值电压。

U_{BO} ——正向转折电压。

U_{RO} ——反向击穿电压。

晶闸管的反向特性与一般二极管的反向特性相似。在正常情况下，当承受反向阳极电压时，晶闸管总是处于阻断状态，只有很小的反向漏电流流过。当反向电压增加到一定值时，反向漏电流增加较快，再继续增大反向阳极电压会导致晶闸管反向击穿，造成晶闸管永久性损坏，这时对应的电压为反向击穿电压 U_{RO} 。

4. 晶闸管的主要参数

为了正确使用晶闸管，必须了解它的主要参数及其含义。晶闸管参数较多，实际应用中应考虑的主要参数有以下几项。

(1) 正、反向断态重复峰值电压 U_{DRM} 、 U_{RRM}

在额定结温、门极断路、晶闸管正向阻断条件下，允许重复加在阳极和阴极间的最大正向峰值电压称为正向断态重复峰值电压 U_{DRM} 。在额定结温、门极断路条件下，允

许重复加在阳极和阴极间的最大反向峰值电压称为反向断态重复峰值电压 U_{RRM} 。

(2) 额定电压 U_{Tn}

由图 1.1.3 所示晶闸管伏安特性曲线可见, 当门极开路、元件处于额定结温时, 根据所测定的正向转折电压 U_{BO} 和反向击穿电压 U_{RO} , 由制造厂家规定减去某一数值 (通常为 100V), 分别得到正向不可重复峰值电压 U_{DSM} 和反向不可重复峰值电压 U_{RSM} , 再各乘以 0.9, 即得正向断态重复峰值电压 U_{DRM} 和反向断态重复峰值电压 U_{RRM} 。将 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小的那个值按百位取整后作为该晶闸管的额定电压值。

例如, 一只晶闸管实测 $U_{DRM} = 840V$, $U_{RRM} = 720V$, 将二者较小的 720V 取整得 700V, 该晶闸管的额定电压为 700V, 即 7 级。表 1.1.1 所列为晶闸管额定电压的等级与额定电压范围的关系。

表 1.1.1 晶闸管正、反向重复峰值电压的等级

级 别	额定电压/V	说 明
1、2、3、…、10	100、200、300、…、1000	额定电压 1000V 以下, 每增加 100V 级别数加 1
12、14、16、…	1200、1400、1600、…	额定电压 1200V 以上, 每增加 200V 级别数加 2

使用晶闸管时, 若外加电压超过反向击穿电压, 会造成器件永久性损坏。若超过正向转折电压, 器件就会误导通, 经过数次这种导通, 也会造成器件损坏。此外, 器件的耐压还会因散热条件恶化和结温升高而降低。因此, 选择时应注意留有充分的裕量, 一般应按工作电路中可能承受到的最大瞬时电压 U_{TM} 的 2~3 倍来选择晶闸管的额定电压, 即

$$U_{Tn} = (2 \sim 3)U_{TM} \quad (1.1.1)$$

(3) 通态平均电流 $I_{T(AV)}$

在环境温度不超过 40℃、结温稳定且不超过额定值、电阻性负载条件下, 晶闸管全导通时允许通过的工频正弦半波电流在一个周期内的平均值称为通态平均电流 $I_{T(AV)}$ 或正向平均电流。因为晶闸管是可控的单向导通器件, 所以晶闸管的额定电流用通态平均电流来表示。通常所说晶闸管是多少安就是指这个电流。

根据通态平均电流 $I_{T(AV)}$ 的定义, 若正弦半波电流的峰值为 I_M , 则

$$I_{T(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_M \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_M}{\pi} \quad (1.1.2)$$

该电流的有效值为

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_M \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_M}{2} \quad (1.1.3)$$

决定晶闸管结温的是管子损耗的发热效应, 表征热效应的电流是以有效值表示的, 不论流经晶闸管的波形如何, 导通角有多大, 只要电流有效值相等, 其发热就是相同的。所以选择晶闸管时, 通常按电流有效值相等来选择。

对于不同的电路、不同的负载、不同的导通角, 流过晶闸管的电流波形不一样, 导致其电流平均值和有效值的关系也不一样。现定义某电流波形的有效值与平均值之比为这个电流的波形系数, 用 K_f 表示。

因此, 在正弦半波电流情况下的波形系数, 即电流有效值和平均值之比为

$$K_f = \frac{I_T}{I_{T(AV)}} = \frac{\pi}{2} = 1.57 \quad (1.1.4)$$

例如, 额定电流 $I_{T(AV)} = 100\text{A}$ 的晶闸管, 其允许通过的电流有效值 $I_T = 157\text{A}$ 。

不同的电流波形有不同的平均值与有效值, 波形系数 K_f 也不同。在选用晶闸管的时候, 首先要根据管子的额定电流求出元件允许流过的最大有效电流。不论流过晶闸管的电流波形如何, 只要流过元件的实际电流最大有效值不大于管子的额定有效值, 且散热冷却在规定的条件下, 管芯的发热就能限制在允许范围内。

由于晶闸管的电流过载能力比一般电机、电器要小得多, 因此, 在选择晶闸管额定电流时, 根据实际最大的电流计算后至少要乘以 1.5~2 的安全系数, 使其具有一定的电流裕量, 即

$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) I_T / 1.57 \quad (1.1.5)$$

(4) 通态平均电压 $U_{T(AV)}$

晶闸管正向通过通态平均电流时, 阳极和阴极间的电压平均值称为通态平均电压, 习惯上称为导通时管压降。当通态平均电流大小相同而通态平均电压较小时, 晶闸管耗散功率也较小, 则该管子的质量较好。

通态平均电压 $U_{T(AV)}$ 分为 A~I, 对应为 0.4~1.2V 共 9 个组别, 如 A 组 $U_{T(AV)} = 0.4\text{V}$ 、F 组 $U_{T(AV)} = 0.9\text{V}$ 等。

以上参数是选择晶闸管的主要技术数据, 按国标 JB1144—75 的规定, 普通硅晶闸管型号中各部分的含义如图 1.1.4 所示。

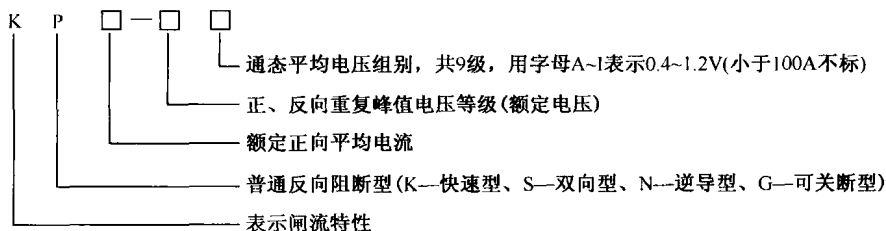


图 1.1.4 型号示意图

如 KP5-7E 表示额定电流为 5A、额定电压为 700V 的普通晶闸管。

【例 1.1.1】 一只晶闸管接在 220V 交流回路中, 通过器件的电流有效值为 100A, 问选择什么型号的晶闸管?

解 晶闸管额定电压

$$U_{Tn} = (2 \sim 3) U_{TM} = (2 \sim 3) \sqrt{2} \times 220\text{V} = 622 \sim 933\text{V}$$

按晶闸管参数系列取 800V, 即 8 级。

晶闸管额定电流

$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) \frac{I_T}{1.57} = (1.5 \sim 2) \frac{100}{1.57} \text{A} = 95 \sim 127\text{A}$$

按晶闸管参数系列取 100A, 所以选取晶闸管 KP100-8E 型号。

(5) 维持电流 I_H 和擎住电流 I_L

在室温和门极断路的情况下, 维持晶闸管继续导通所需的最小电流称为维持电流。

它一般为几毫安到几百毫安。要使导通的晶闸管关断,必须使正向电流小于 I_H 。维持电流大的晶闸管容易关断。维持电流与元件容量、结温等因素有关,同一型号的元件其维持电流 I_H 也不相同。通常在晶闸管的铭牌上标明了常温下的实测值。

晶闸管一经触发导通就去掉触发信号,能使晶闸管保持导通所需要的最小阳极电流称为擎住电流 I_L 。一般擎住电流 I_L 为维持电流 I_H 的几倍。欲使晶闸管触发导通,必须使触发脉冲保持到阳极电流上升到擎住电流以上,否则会造成晶闸管重新恢复阻断状态,因此触发脉冲必须具有一定的宽度。

(6) 通态电流临界上升率 di/dt

门极流入触发电流后,晶闸管开始只在靠近门极附近的小区域内导通,随着时间的推移,导通区域才逐渐扩大到 PN 结的全部面积。如果阳极电流上升得太快,则会导致门极附近的 PN 结因电流密度过大而烧毁,使晶闸管损坏。因此,对晶闸管必须规定允许的最大通态电流上升率,称通态电流临界上升率 di/dt 。

(7) 断态电压临界上升率 du/dt

晶闸管的结面积在阻断状态下相当于一个电容,若突然加一正向阳极电压,便会有一个充电电流流过结面,该充电电流流经靠近阴极的 PN 结时,产生相当于触发电流的作用,如果这个电流过大,将会使元件误触发导通,因此,对晶闸管还必须规定允许的最大断态电压上升率。通常,把在规定条件下晶闸管直接从断态转换到通态的最大阳极电压上升率称为断态电压临界上升率 du/dt 。

(8) 门极触发电压 U_{GT} 和门极触发电流 I_{GT}

室温下在晶闸管阳极和阴极间加 6V 正向电压时,使晶闸管从关断到完全导通所需的最小门极电流称为门极触发电流 I_{GT} ,相应的门极电压称为门极触发电压 U_{GT} 。

需要说明的是,为了保证晶闸管触发的灵敏度,各生产厂家的 U_{GT} 和 I_{GT} 的值不得超过标准规定的数值。但对用户而言,设计的实用触发电路提供给门极的电压和电流应适当大于标准值,才能使晶闸管可靠触发导通。

5. 晶闸管的典型应用

晶闸管在电子技术和工业控制中,常被派作整流和电子开关等用场。在这里介绍它们的几种典型应用电路。

(1) 单向晶闸管 SCR 振荡器

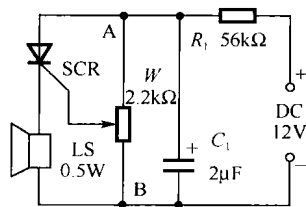


图 1.1.5 单向晶闸管 SCR 振荡器

图 1.1.5 所示电路是利用 SCR 的锁存性制作的低频振荡器电路。图中的扬声器 LS ($8\Omega/0.5W$) 作为振荡器的负载。当电路接上电源时,由于电源通过 R_1 对 C_1 充电,初始时, C_1 电压很低, A、B 端的电位器 W 的分压不能触发 SCR, SCR 不导通。当 C_1 充得电压达到一定值时, A、B 端电压升高, SCR 被触发而导通。一旦 SCR 导通,电容器 C_1 通过 SCR 和 LS 放电,结果 A、B 端的电压又下降,当 A、B 端电压下降到很低时,又使 SCR 截止,一旦 SCR 截止,电容器 C_1 又通过 R_1 充电,这种充、放电过程反复进行形成电路的振荡,此时 LS 发出响声。电路中的 W 可用来调节 SCR 门极电压的大小,以达到控制振荡器的频率变化。按图中元件数据, C_1 取值为

0.22~4μF，电路均可正常工作。

(2) 家用调光台灯

图 1.1.6 所示是一种家用调光台灯的电路原理，VT 是单向晶闸管，V 是单结晶体管，电阻 R_2 、 R_w 和电容 C 构成 RC 充电回路。当电容两端电压 u_C 达到单结晶体管峰点电压 U_P 时，V 导通，电容通过 R_4 放电，并在 R_4 上产生脉冲电压，触发晶闸管 VT 导通， u_C 下降到谷点电压 U_V 时，V 截止， C 再次充电，循环往复。调节 R_w 可改变充电时间，从而改变晶闸管 VT 的触发角，以达到调光的目的。

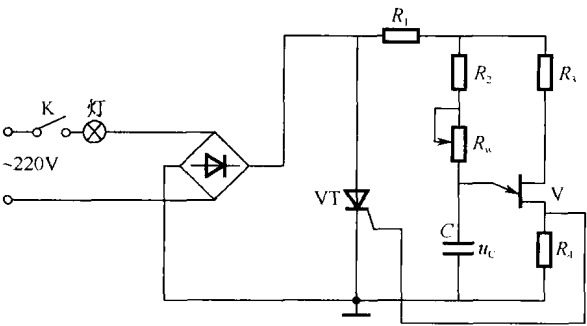


图 1.1.6 家用调光台灯的电路原理

6. 晶闸管的保护

晶闸管虽然具有很多优点，但是，它们承受过电压和过电流的能力很差，这是晶闸管的主要弱点。因此，在各种晶闸管装置中必须采取适当的保护措施。

(1) 晶闸管的过电流保护

由于晶闸管的热容量很小，一旦发生过电流时，温度就会急剧上升而可能把 PN 结烧坏，造成元件内部短路或开路。

晶闸管发生过电流的原因主要有：负载端过载或短路；某个晶闸管被击穿短路，造成其他元件的过电流；触发电路工作不正常或受干扰，使晶闸管误触发，引起过电流。晶闸管承受过电流能力很差，如一个 100A 的晶闸管，它的过电流能力如表 1.1.2 所列。这就是说，当 100A 的晶闸管过电流为 400A 时，仅允许持续 0.02s，否则将因过热而损坏。由此可知，晶闸管允许在短时间内承受一定的过电流。所以，过电流保护的作用就在于当发生过电流时，在通的时间内将过电流切断，以防止元件损坏。

表 1.1.2 晶闸管的过载时间和过载倍数的关系

过载时间	0.02s	5s	5min
过载倍数	4	2	1.25

晶闸管过电流保护措施有下列几种。

1) 快速熔断器。普通熔断丝由于熔断时间长，用来保护晶闸管时，很可能在晶闸管烧坏之后熔断器还没有熔断，这样就起不了保护作用。因此，必须采用用于保护晶闸管的快速熔断器。快速熔断器用的是银质熔丝，在同样的过电流倍数下，它可以在晶闸管损坏之前熔断，这是晶闸管过电流保护的主要措施。

快速熔断器的接入方式有 3 种，如图 1.1.7 所示。其一是快速熔断器接在输出（负