



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

电力电子技术 (第四版)

袁 燕 主编



配套课件



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

电力电子技术 (第四版)

主 编 袁 燕

副主编 陈俊安 刘 暉

编 写 王汉桥 宋廷臣 齐 磊

主 审 石新春 赵文建



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十二五”职业教育国家规划教材。

全书共有 8 章, 首先介绍晶闸管及几种典型全控电力电子器件的基本原理、基本特性和主要参数; 以器件为基础, 以实用为目的重点介绍晶闸管可控整流电路、晶闸管的触发电路、有源逆变电路、交流调压和直流斩波电路、无源逆变电路和变频电路; 从应用的角度出发介绍了几种典型电力电子装置。同时为适应先进性要求, 书中对全控型电力电子器件的驱动电路和软开关技术也作了必要的阐述。本书具有理论浅、知识新、实用性强、通俗易懂的特点。

本书可作为高职高专、成人高校电力技术类专业的教学用书, 也可作为相关工程技术人员参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术/袁燕主编. —4 版. —北京: 中国电力出版社, 2015. 4

“十二五”职业教育国家规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 6830 - 9

I. ①电… II. ①袁… III. ①电力电子技术-高等职业教育-教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 283151 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 [http: //www. cepp. sgcc. com. cn](http://www.cepp.sgcc.com.cn))

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 5 月第一版

2015 年 4 月第四版 2015 年 4 月北京第九次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 251 千字

定价 23.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

现代电力电子技术的发展带来了电力电子技术学科内涵的发展与更新，使电力电子技术在新能源发电、高压直流输电、节能技术、交直流供电电源、电力机车、城市轻轨交通、船舶推进、电梯控制、机器人控制等领域，乃至日常生活等多方面的应用不断延伸。为满足现代经济发展对电力电子技术应用型人才的需求，进一步适应现代电力电子技术先进性及应用性，教材修订中增加了全控器件的驱动电路和软开关技术。本书以培养高等技术应用型人才为宗旨，充分体现先进性、教学适用性和职业教育的特点，力求做到深入浅出、够用为度、实用为本；针对高职高专学生的特点，重点介绍电力电子器件的外部电气特性、主要工作特点及其典型应用；避开繁琐的数学推导和理论分析，强调分析思路与分析方法，对于典型电路的工作原理、工作特点加以归纳总结，便于学生的学习和教师的教学。

本次修订在保持原书循序渐进、浅显易懂、适于教学等优点的同时，对教材内容进行了整合与更新。修订的主要内容有：①简化了交流调压和直流斩波电路中繁琐的理论推导；②为适应现代电力系统的应用需求，对第8章典型电力电子技术应用做了一定调整，增加高频开关电源和高压直流输电的相关内容；③将书中的部分章节进行了合并和调整；④为满足今后学生就业的需要，增加了变频电路的有关内容，并将其作为一个单独章节学习。

本书第1、2章由袁燕改编，第3、4章由王汉桥改编，第5章由刘曄、袁燕共同改编，第6、7章和第8章8.1节由陈俊安改编，第8章8.2节和附录部分由宋廷臣改编，绪论和第8章8.3节由齐磊改编。全书由袁燕统稿并担任主编，华北电力大学石新春、武汉电力职业技术学院赵文建担任主审，对本书提出了许多宝贵意见。同时在本书的编写过程中，参阅了大量的参考文献。在此，对主审及本书所用参考文献的作者表示衷心的感谢。

限于编者水平，修订后仍会存在一定的疏漏和不足，恳请使用本书的教师和广大读者多加批评指正。

编 者

2015年1月

目 录

前言

绪论	1
1 电力电子器件	6
1.1 晶闸管	6
1.2 典型全控型电力电子器件	18
1.3 电力电子器件的驱动	30
习题	34
2 晶闸管可控整流电路	36
2.1 单相可控整流电路	36
2.2 三相可控整流电路	50
2.3 可控整流电路的换相压降	59
2.4 晶闸管的保护与容量扩展	60
习题	66
3 晶闸管的触发电路	68
3.1 概述	68
3.2 简易触发电路	69
3.3 单结晶体管触发电路	70
3.4 集成触发电路和数字式移相触发电路	74
3.5 触发脉冲与主电路电压的同步(定相)	78
习题	83
4 有源逆变电路	85
4.1 有源逆变电路的基本原理	85
4.2 常用的晶闸管有源逆变电路	88
4.3 逆变失败的原因及防止对策	91
习题	93
5 交流调压和直流斩波电路	95
5.1 晶闸管交流开关和交流调功器	95
5.2 交流调压电路	97
5.3 直流斩波电路	102
5.4 软开关技术	109
习题	113

6 无源逆变电路	114
6.1 无源逆变电路的基本原理	114
6.2 单相逆变电路	117
6.3 三相逆变电路	118
6.4 脉冲宽度调制型逆变电路	122
习题.....	126
7 变频电路	127
7.1 变频的基本概念及变频电路的分类	127
7.2 交—直—交变频电路	128
7.3 交—交变频电路	132
习题.....	137
8 典型电力电子技术应用	138
8.1 大功率高频开关电源	138
8.2 不间断电源	142
8.3 高压直流输电	146
附录.....	151
实验1 单结晶体管触发电路及单相半控桥式整流电路	151
实验2 锯齿波触发电路与三相全控桥式整流电路	152
实验3 三相半波有源逆变电路的性能研究	156
实验4 IGBT 斩波电路的研究	157
参考文献.....	160

绪 论

一、电力电子技术概述

从广义上来讲，电子技术应包含信息电子技术和电力电子技术两大分支，而通常所说的电子技术一般是指信息电子技术。

电力电子技术也称为电力电子学，它真正成为一门独立的学科始于 1957 年第一只晶闸管的问世。在 1970 年国际电气和电子工程师协会（IEEE）电力电子学会上对电力电子技术作了如下定义：“电力电子技术就是有效地使用电力电子器件，应用电路和设计理论及分析开发工具，实现对电能的高效能变换和控制的一门技术。它包括对电压、电流、频率和波形的变换”。简言之，电力电子技术就是利用电力电子器件对电能形态进行变换和控制的一门技术。

电力电子技术是电力、电子、控制三大电气工程技术领域之间的交叉学科，它们之间的关系可用一个倒三角图形描述，如图 0-1 所示。第一，电力电子技术是在电子技术的基础上发展起来的，它们都可分为器件、电路和应用三部分，且器件的材料和制造工艺基本相同。另外，电力电子电路和电子电路的分析方法也基本相同，只是两者的应用目的有所不同。电子技术应用于信息的处理（如放大等）；电力电子技术应用于电力变换和控制，它所变换的功率可大到数百甚至数千兆瓦，也可以小到几瓦或毫瓦数量级。第二，电力电子技术广泛应用于电气工程，如高压直流输电、静止无功补偿、电力机车牵引、交直流电力传动、电解、励磁、电加热、高性能交直流电源等，对电气工程的现代化起着重要的推动作用。第三，电力电子技术可以看成是弱电控制强电的技术，是弱电和强电之间的接口。而控制理论是实现这种接口的一条强有力的纽带，是电力电子技术的重要理论依据。所以，也可认为电力电子技术是运用控制理论将电子技术应用到电力领域的一门综合性技术。

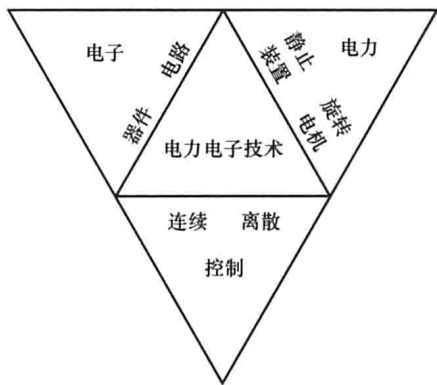


图 0-1 电力电子技术与其他学科的关系

二、电力电子技术的研究内容

电力电子技术研究的内容包括电力电子器件、电力变换电路和控制技术三部分，其中电力电子器件是基础，电力变换电路是核心。在电力电子技术工程应用中，侧重于研究电力电子器件的基本原理、特性和参数，以及由电力电子器件所组成的各种电力变换电路的结构、工作原理、控制电路和保护电路。

1. 电力电子器件

在电气设备或电力系统中，直接承担电能变换或控制任务的电路称为主电路。电力电子器件就是指可直接用于主电路中实现电能变换或控制的电子器件。

电力电子器件的主要特征有以下四点：

- (1) 处理电功率的能力远远大于普通电子器件。
- (2) 一般工作在开关状态。
- (3) 一般需由信息电子电路来驱动或控制。
- (4) 功率损耗远远大于普通电子器件, 所以必须安装散热器。

电力电子器件按其控制方式不同可分为以下三大类:

(1) 不可控型器件: 不能用控制信号来控制其通断的电力电子器件。这类器件一般为二端器件, 不需要驱动电路, 具有结构简单、工作可靠的特点。电力二极管、快恢复二极管及肖特基二极管等就属于不可控型器件。

(2) 半控型器件: 只能通过控制信号控制其导通, 而不能控制其关断的电力电子器件。这类器件一般为三端器件。半控型器件的导通可通过门极加入适当的控制信号实现, 而一旦器件导通, 门极就失去了控制作用。若要使器件关断, 只有改变外电路参数使通过器件的电流减小到接近于零才能达到。半控型器件反应快、可靠性高、寿命长、功率大、价格低, 特别是具有节能的特点。晶闸管及其派生型器件就属于半控型器件。

(3) 全控型器件: 通过控制信号既可控制其导通, 又可控制其关断的电力电子器件。这类器件也是带有控制端的三端器件, 控制端不仅可用来控制器件的导通, 还能控制器件的关断。由于无需外电路提供关断条件, 仅靠器件自身控制即可关断, 所以也称为自关断器件。这类器件的种类繁多, 工作原理也不尽相同, 是电力电子器件发展的主导方向, 具有集成化、高频化、全控化和多功能化等特点, 目前应用非常广泛。典型的全控型电力电子器件有电力晶体管 (GTR)、门极可关断晶闸管 (GTO)、电力场效应晶体管 (Power MOSFET) 和绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 等。

电力电子器件按其驱动信号的性质不同又可分为电压型器件和电流型器件两种。电流型器件必须给它提供足够大的驱动电流才能导通, 因而驱动功率较大, 如普通晶闸管、电力晶体管 (GTR)、门极可关断晶闸管 (GTO) 等; 电压型器件的导通只需要有足够的驱动电压和很小的驱动电流即可, 因而所需的驱动功率很小, 如电力场效应晶体管 (Power MOSFET) 和绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 等。

2. 电力变换电路

电力变换电路以电力电子器件为核心, 通过不同的电路拓扑和控制方法来实现电能的变换和控制。按其电能变换功能划分, 主要有以下几种类型:

(1) 整流电路: 将交流电变换为固定或可调的直流电的电力变换电路, 也称为 AC/DC 变换电路。

(2) 逆变电路: 将直流电变换为频率固定或频率可调的交流电的电力变换电路, 也称为 DC/AC 变换电路。如将直流电逆变成 50Hz 的交流电返送回交流电网称为有源逆变, 将直流电逆变成频率固定或频率可调的交流电供给用电器则称为无源逆变。

(3) 交流变换电路: 将一种形式的交流电变换为另一种形式的交流电的电力变换电路, 也称为 AC/AC 变换电路。交流变换电路种类较多, 有交流调压电路、交流调功电路、交流开关及变频电路等。

(4) 直流斩波电路: 将恒定的直流电压变换为大小可调或固定的直流电压的电力变换电路, 也称为 DC/DC 变换电路。

以上四种变换功能统称为变流, 故电力电子技术通常也称为变流技术, 电力变换电路也

常称为变流电路。

3. 控制技术

控制技术是改进变流电路的性能和效率所不可缺少的关键技术之一。它主要有以下两种类型：

(1) 相控技术：通过调整电力电子器件导通时刻的相位，即控制触发脉冲与主电路之间的相移角，从而实现电能的变换与控制。这种控制技术主要应用于晶闸管变流电路中，称为相控式变流电路。

(2) 脉宽调制 (PWM) 技术：通过调整电力电子器件在一个开关周期中导通的时间比 (占空比)，从而实现电能的变换与控制。这种控制技术主要应用于全控型器件组成的变流电路中。由于 PWM 技术可以有效地抑制谐波，动态响应速度快，使变流电路的性能大大提高，故目前应用非常广泛。

三、电力电子技术的发展与应用

电力电子技术的发展是以电力电子器件的发展为核心的，大体可分为两个阶段：1957~1980 年为传统电力电子技术阶段，1980 年至今为现代电力电子技术阶段。

1. 传统电力电子技术阶段

随着 1957 年第一只晶闸管的诞生，电子技术步入功率领域，在工业上引起了一场技术革命，很快取代了水银整流器和旋转变流机组，并使电力电子技术得到迅速发展，应用范围也迅速扩大。此期间由最初的普通晶闸管逐渐派生出快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、不对称晶闸管等，形成了一个晶闸管大家族。目前，器件的功率越来越大，性能越来越好，单只普通晶闸管的容量已达 8000V、6000A。

但是晶闸管的发展受到了两个方面因素的制约：一是控制功能上的欠缺。晶闸管属于半控型器件，通常要依靠电网电压等外部条件或设置专门的换流电路才能实现关断，这致使设备的体积增大、质量增加、效率降低。二是工作频率上的欠缺。晶闸管立足于分立元件结构，工作频率难以提高（一般低于 400Hz），因而大大限制了晶闸管的应用范围。

尽管以晶闸管为代表的传统电力电子器件存在上述缺陷，但由于晶闸管系列器件的价格低廉，在大电流、高电压应用中的发展空间依然较大，尤其在特大功率应用场合，其他器件尚且不易替代。在我国，以晶闸管为核心的很多设备仍应用于生产现场。晶闸管及其相关的知识是初学者的基础，因此该部分内容在本书中占据了相当的篇幅，也是本课程的重点内容之一。

2. 现代电力电子技术阶段

20 世纪 80 年代以后，微电子技术与电力电子技术各自发展的基础上相结合而产生了新一代高频率、全控型、多功能的功率集成器件，使电力电子技术跨入了现代电力电子技术的新时代。

现代电力电子器件是指全控型的电力电子器件，可分为双极型、单极型和混合型三大类。双极型器件是指器件内部有两种载流子（自由电子和空穴）同时参与导电，具有通态压降低、阻断电压高、电流容量大等特点，适合于中大容量的变流装置，如门极可关断晶闸管 (GTO)、电力晶体管 (GTR) 等。单极型器件是指器件内部只有一种载流子（多数载流子）参与导电，具有开关时间短、工作频率高、输入阻抗高、驱动功率小、抗干扰能力强等特点，如电力场效应晶体管 (Power MOSFET)、静电感应晶体管 (SIT) 等。混合型器件是

指双极型器件与单极型器件集成混合，它集双极型器件和单极型器件的优点于一体，具有极好的应用前景，目前应用非常广泛，如绝缘栅双极晶体管（IGBT）、集成门极换流晶闸管（IGCT）等。

随着集成工艺的提高和突破，功率集成电路（PIC）也得到了迅速发展。它把功率器件与驱动电路、控制电路以及保护电路集成在一个芯片上，实现了器件与电路的总体集成，使强电与弱电的结合更趋完美，应用电路更加简化，也使电力电子技术的应用范围进一步拓宽。

3. 电力电子技术主要应用范围

（1）一般工业：交直流电动机调速，电化学工业用的整流电源，冶金工业中高频、中频感应炉电源等。

（2）交通运输：电气化铁道、无轨电车、地铁列车、电动车的无级调速和控制，汽车、电梯、航空、航海的电源和控制等。

（3）电力系统：高压直流输电（HVDC）、柔性交流输电（FACTS）、无功功率补偿（SVC）、有源电力滤波器（APF），以及配电系统中高质量供电电源、变电站中交直流操作电源、蓄电池充电电源等。

（4）电子装置电源：程控交换机、计算机中的开关电源，仪器仪表及各种电子装置中的电源等。

（5）家用电器：变频空调、节能灯、电视机、音响设备、洗衣机、电冰箱、微波炉等电器。

（6）其他：不间断电源（UPS），抽水储能发电站中的大型电动机启动和调速，航天飞行器中各种电子仪器所用电源，以及新能源（太阳能、风能、核能发电）等。

总之，电力电子技术的应用非常广泛，从人类对宇宙和大自然的探索，到国民经济的各个领域，再到人们的衣食住行，电力电子技术都在发挥着极其显著的作用。

由于电力电子技术提供给负载的是各种不同的电源，所以可以认为，电力电子技术研究的就是电源技术。而且，电力电子技术对节能有重要意义，其节能效果十分显著，因此也被称为节能技术。

能源是人类社会的永恒话题，而电能是最优质的能源。伴随着科学的发展与进步，以及一代代学者和工程技术人员的研究与探索，电力电子技术必将会更加飞速发展，电力电子技术的应用领域也会有新的突破。

四、本课程的性质、特点及学习方法

电力电子技术是电气工程及其自动化、工业电气自动化等专业的一门专业性、实用性较强，且与生产实践联系紧密的技术基础课程。

本课程涉及面广，内容丰富，需要综合运用高等数学、电路原理、电子技术基础、电机与拖动等课程的知识。在学习本课程时，要着重物理概念与基本分析方法，理论联系实际，做到器件、电路、应用三方面相结合。在学习方法上要以变流装置中的主电路、触发电路、保护电路的工作原理等基本概念为主，特别注意各种电路的波形与相位分析，抓住波形分析这个重要环节，从波形分析中进一步理解电路的工作原理，并且逐步培养设计计算和读图能力，从而培养设计、调试以及故障分析与排除的能力，达到发展创新的目的。

五、本课程的学习要求

学习电力电子技术课程要达到以下基本要求：

- (1) 熟悉和掌握常用电力电子器件的工作特点、外部特性和主要参数，能正确选择和使用它们。
- (2) 掌握各种基本变换电路的工作原理，特别是基本电路中的工作过程和工作特点，掌握波形分析和定量计算方法。
- (3) 了解常用驱动电路的工作原理，熟悉晶闸管触发电路和保护电路的工作原理。
- (4) 了解各种变换器的特点、性能指标和使用场合。
- (5) 培养读图、识图能力，能看懂简单的电力电子装置的组成及工作原理。
- (6) 掌握基本的实验方法和实验技能。

1 电力电子器件

电力电子器件是电力电子技术的基础，是电力变换电路的核心。因此，掌握各种常用电力电子器件的基本特性及使用方法，是学好电力电子技术的关键。

电力电子器件可分为三大类：一，只能用控制信号来控制其导通而不能控制其关断的电力电子器件称为半控型器件，这类器件主要指晶闸管及其大部分派生器件；二，通过控制信号既可以控制其导通，又可以控制其关断的电力电子器件称为全控型器件（又称为自关断器件），这类器件的品种很多，如电力晶体管、电力场效应晶体管、绝缘栅双极晶体管、门极可关断晶闸管等；三，不能用控制信号来控制其通断的电力电子器件称为不可控器件，电力二极管就属于这类器件。电力二极管是问世最早、功率最大的半导体器件，具有高电压、大电流的工作能力，其基本工作特性与中小功率二极管大致相同，故本章主要介绍半控型的晶闸管 and 全控型器件。

1.1 晶 闸 管

普通晶闸管是一种具有开关作用的大功率半导体器件，它的全称是硅晶体闸流管，又称为可控硅整流器，常简称为晶闸管或可控硅（SCR）。晶闸管具有功率大、体积小、质量轻、效率高、反应快、寿命长、操作方便和维护简单等特点，在生产实际中的应用十分广泛。晶闸管也有许多派生型器件，如快速晶闸管（FST）、双向晶闸管（TRIAC）、逆导晶闸管（RCT）和光控晶闸管（LTT）等。

1.1.1 晶闸管的结构与工作原理

一、晶闸管的结构

目前常用晶闸管的外形有塑封形、螺栓形和平板形三种。图 1-1 (a) 所示为塑封形，多见于额定电流 10A 以下；图 1-1 (b)、(c) 所示为螺栓形，额定电流一般为 10~200A；图 1-1 (d) 所示为平板形，用于额定电流 200A 以上。

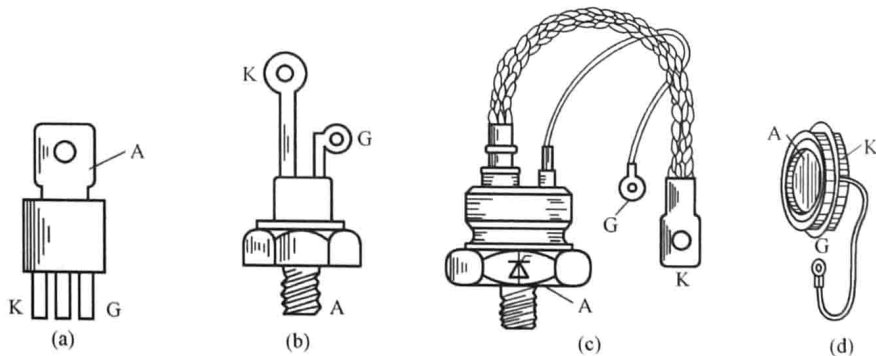


图 1-1 晶闸管的外形

(a) 塑封形；(b)、(c) 螺栓形；(d) 平板形

晶闸管是四层 (P1N1P2N2) 三端 (阳极 A、阴极 K、门极 G) 器件, 其内部结构、等效电路及图形符号如图 1-2 所示。

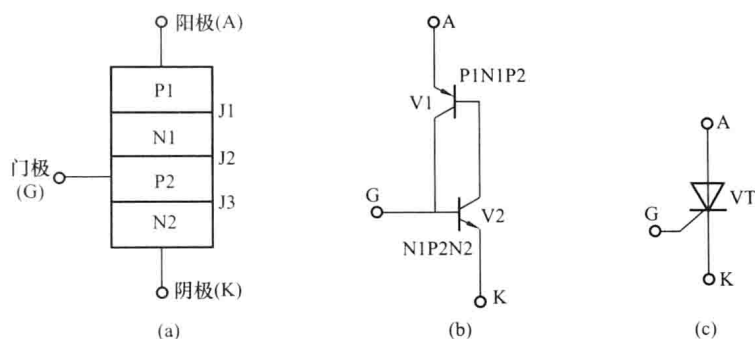


图 1-2 晶闸管的内部结构及等效电路

(a) 内部结构; (b) 等效电路; (c) 图形符号

晶闸管工作时, 由于器件损耗而产生热量, 需要通过散热器降低管芯温度, 器件外形是为便于安装散热器而设计的。图 1-3 所示为晶闸管的几种常见散热器。

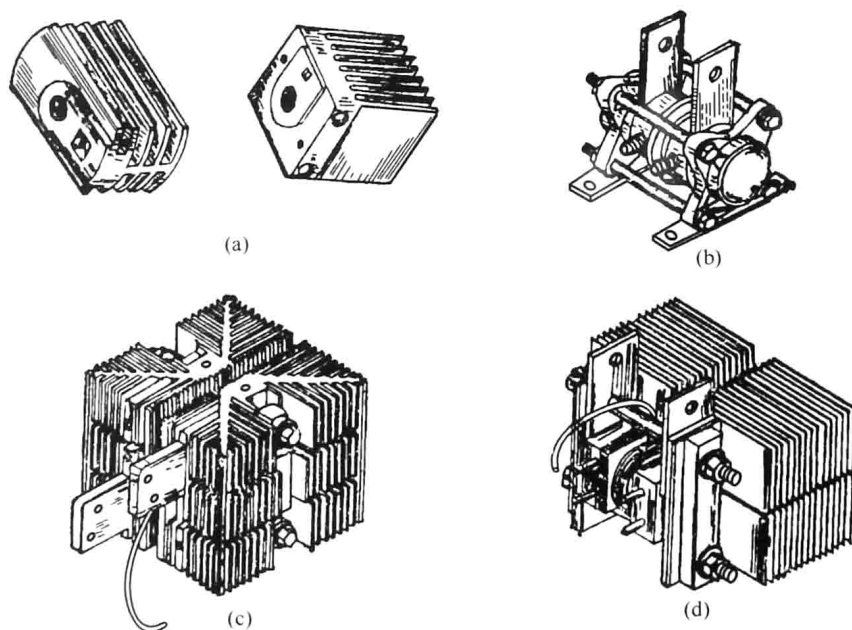


图 1-3 晶闸管的几种常见散热器

(a) 自冷; (b) 水冷; (c) 风冷; (d) 热管

二、晶闸管的导通与关断条件

晶闸管是具有可控单向导电性的开关元件, 它的导通和关断条件可通过图 1-4 所示的实验电路来说明。在该电路中, 由主电源 E_A 、双掷开关 S1、灯泡 HL、晶闸管的阳极和阴极构成晶闸管的主电路, 门极电源 E_G 、双掷开关 S2、晶闸管的门极和阴极构成晶闸

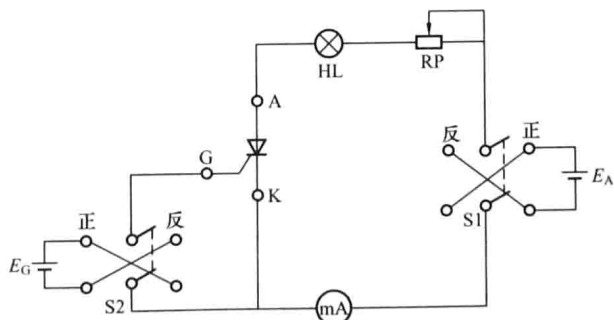


图 1-4 晶闸管的导通与关断实验电路

管的触发电路 (控制电路), 用灯泡的亮与灭和电流表来观察晶闸管的通断情况。实验步骤如下:

(1) 当 S1 向左闭合, 晶闸管阳极与阴极之间承受反向电压, 不论 S2 正向或反向闭合即门极承受何种电压, 灯泡都不亮, 说明晶闸管不导通, 处于阻断状态。

(2) 当 S1 向右闭合, 晶闸管阳极与阴极之间承受正向电压, 仅当 S2 正向闭合即门极与阴极之间也承受正向电压时, 灯泡才亮, 说明只有在此条件下晶闸管才能导通。

(3) 当晶闸管导通后, 即使去掉门极电压 (即 S2 断开), 灯泡依然亮, 说明晶闸管一旦导通, 门极就失去控制作用。

(4) 要使已导通的晶闸管关断, 只要降低正向阳极电压或增大阳极回路电阻, 使流过晶闸管的阳极电流小于一定数值 (维持电流) 就可实现; 也可通过去掉阳极电压, 或者给阳极施加反向电压来实现。

由以上实验结果, 可得到如下结论:

(1) 晶闸管的导通条件是阳极和阴极之间必须加正向电压, 同时门极和阴极之间也必须加正向电压, 两者缺一不可。

(2) 晶闸管一旦导通, 门极即失去控制作用, 因此门极所加的电压一般为脉冲电压 (触发电压)。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, 而晶闸管导通后, 阳极电流可达几百安或几千安, 所以晶闸管是用小电流来控制大电流的电流控制型元件。

(3) 晶闸管的关断条件是使流过晶闸管的阳极电流小于维持电流。维持电流是保持晶闸管导通的最小阳极电流。

三、晶闸管的工作原理

晶闸管的内部结构可以等效为两个互补连接的双晶体管结构, 其工作原理如图 1-5 所示。

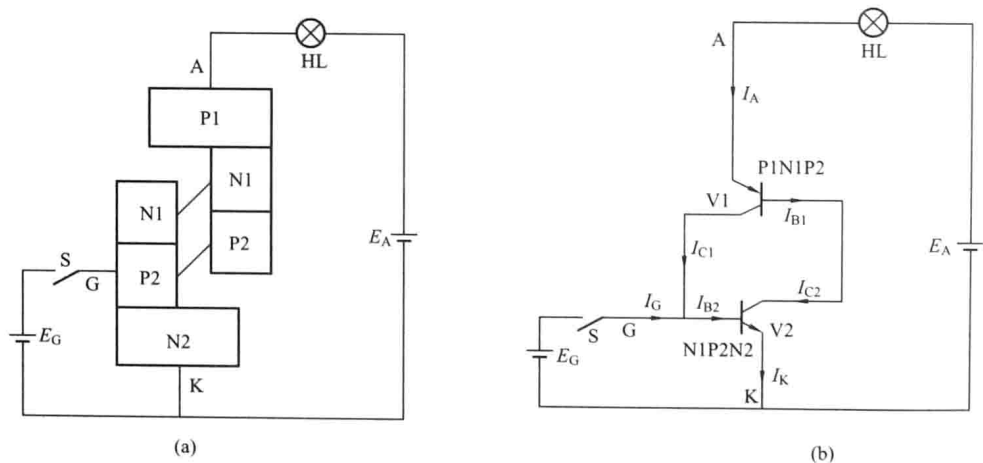


图 1-5 晶闸管的工作原理

(a) 双晶体管等效电路; (b) 内部电流关系

当晶闸管加上正向阳极电压, 门极也加上足够的正向门极电压时, 则有电流 I_G 从门极流入 NPN 管的基极, 即产生 I_{B2} ; 经 NPN 管放大后的集电极电流 I_{C2} 作为 PNP 管的基极电流 I_{B1} , 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, 产生强烈

的正反馈过程,即

$$I_G \rightarrow I_{B2} \uparrow \rightarrow I_{C2} \uparrow \rightarrow I_{B1} \uparrow \rightarrow I_{C1} \uparrow$$

使两个晶体管很快进入饱和状况,即晶闸管由阻断状态迅速转为导通状态。由于晶闸管在导通后阳极与阴极之间的管压降很低(约 1V 左右),因此,流过晶闸管的电流将主要取决于外加的阳极电源电压和主回路阻抗的大小。

晶闸管一旦导通后,即使 $I_G=0$,由于其内部正反馈的存在,V1、V2 的电流仍可继续维持,所以晶闸管可继续保持导通。若要将晶闸管关断,只有使 I_{C1} 减少至 NPN 管接近截止状态,即流过晶闸管的阳极电流小于维持电流,使其内部的正反馈过程不能再继续维持时,晶闸管才可恢复阻断状态。

综上所述,晶闸管的特点可归纳如下:

(1) 晶闸管具有开关作用。它有导通与阻断两种工作状态,若忽略其导通时的管压降及阻断时的漏电流,则导通时相当于开关闭合,阻断时相当于开关断开。

(2) 晶闸管具有可控的单向导电性。它的单向导电性受门极电压的控制,只有在阳极与阴极之间加上正向电压,同时在门极正向电压的触发下,晶闸管才能导通。由于门极只能用来控制晶闸管的开通,而不能控制晶闸管的关断,所以晶闸管被称为半控型器件。

1.1.2 晶闸管的特性和参数

一、晶闸管的伏安特性

晶闸管阳、阴极间电压 U_{AK} 与阳极电流 I_A 之间的关系,称为晶闸管的伏安特性,如图 1-6 所示。图 1-6 中,第 I 象限为正向特性,第 III 象限为反向特性。

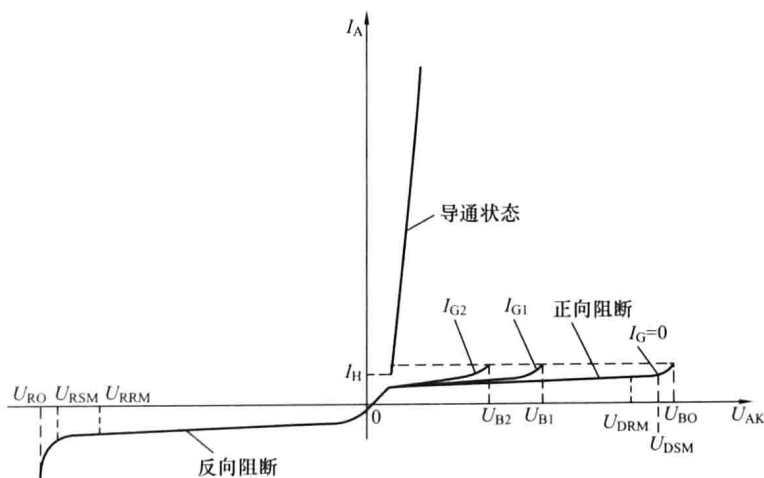


图 1-6 晶闸管的伏安特性

U_{DRM} 、 U_{RRM} —正、反向断态重复峰值电压; U_{DSM} 、 U_{RSM} —正、反向不重复峰值电压;

U_{BO} —正向转折电压; U_{RO} —反向击穿电压; I_H —维持电流

1. 正向特性

晶闸管的正向特性可分为正向阻断和正向导通两种。在正向阻断区,晶闸管的伏安特性是一组随门极电流 I_G 的增加而不同的曲线族。 $I_G=0$ 时,逐渐增大正向阳极电压,只有很

小的正向漏电流，晶闸管呈现正向阻断状态；随着正向阳极电压的增加，当达到正向转折电压 U_{BO} 时，漏电流突然剧增，晶闸管由正向阻断突变为正向导通状态。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”，实际应用时是不允许的。正常工作时，必须通过加入门极电流 I_G 来触发晶闸管导通，门极电流 I_G 越大，阳极电压转折点越低（图 1-6 中 $I_{G2}>I_{G1}>0$ ）。导通后的晶闸管特性与二极管的正向特性相似，即可通过较大的阳极电流，而其本身的管压降却很小。

2. 反向特性

晶闸管的反向特性与普通二极管的反向特性相似。承受反向阳极电压时，只有很小的反向漏电流，晶闸管处于反向阻断状态。当反向电压增加到超过反向击穿电压 U_{RO} 时，反向漏电流急剧增大，导致晶闸管反向击穿，可能造成晶闸管的损坏。

二、晶闸管的主要参数

为了正确使用晶闸管，保证其可靠工作，必须理解和掌握晶闸管的主要参数及意义。下面介绍晶闸管的主要参数。

1. 额定电压 U_{TN}

由图 1-6 所示伏安特性可见，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）得到正向不重复峰值电压 U_{DSM} 和反向不重复峰值电压 U_{RSM} ，再将此值各乘以 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} 。晶闸管的额定电压 U_{TN} 即为 U_{DRM} 与 U_{RRM} 中较小值，再靠取相近额定电压等级（就低取整），在产品的铭牌上标出。

例如，某晶闸管实测并计算得： $U_{DRM}=840V$ ， $U_{RRM}=730V$ ，则 $U_{TN}=700V$ ，即该晶闸管的额定电压为 700V（7 级）。晶闸管额定电压的等级见表 1-1。

表 1-1 晶闸管额定电压等级

级别	额定电压（V）	级别	额定电压（V）	级别	额定电压（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		

晶闸管在使用时会出现各种不可避免的瞬时过电压，同时由于工作温度的升高也会使正向转折电压下降。所以，为保证晶闸管安全，在选择管子的额定电压时，应比工作电路中加在管子两端的最大瞬时电压值 U_{TM} 大 2~3 倍，即

$$U_{TN} = (2 \sim 3)U_{TM} \tag{1-1}$$

2. 额定电流 $I_{T(AV)}$

晶闸管的额定电流是指在环境温度为 40℃ 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，当不超过额定结温且稳定工作时，所允许通过的最大工频正弦

半波电流的平均值,也称为额定通态平均电流 $I_{T(AV)}$ 。

按照规定条件,流过晶闸管的工频正弦半波电流波形如图 1-7 所示。设该电流的峰值为 I_m ,则通态平均电流 $I_{T(AV)}$ 为

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

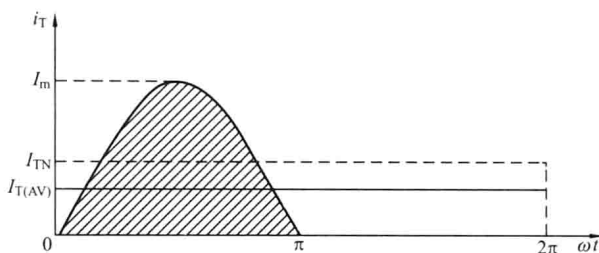


图 1-7 流过晶闸管的工频正弦半波电流波形

晶闸管的额定电流用通态平均电流来表示,这是因为晶闸管最早应用于整流电路,而整流电路的输出是用平均值来衡量的。然而,在实际应用中,决定晶闸管结温的是通态损耗的发热效应,而这种热效应主要由流过晶闸管电流的有效值决定。因此,需要将额定电流 $I_{T(AV)}$ 换算成额定电流有效值 I_{TN} 。

由图 1-7 可求得正弦半波电流的有效值,即额定电流有效值 I_{TN} 为

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

定义电流的波形系数 K_f 为电流有效值与电流平均值之比,即

$$K_f = \frac{\text{电流有效值}}{\text{电流平均值}} \quad (1-4)$$

由此可得到正弦半波电流的波形系数为

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

或

$$I_{TN} = 1.57 I_{T(AV)} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表明,额定电流为 $I_{T(AV)}$ 的晶闸管,其额定电流有效值为 $1.57 I_{T(AV)}$ 。例如 100A 的晶闸管,额定电流有效值为 157A。

实际应用时,不论流过晶闸管的电流波形如何,导通角有多大,只要流过管子的实际电流最大的有效值 I_{TM} 小于或等于其额定电流有效值 I_{TN} ,且散热条件符合规定,则管芯的发热便是允许的,这就要求晶闸管在实际使用时应满足

$$I_{TM} \leq I_{TN} = 1.57 I_{T(AV)} \quad (1-7)$$

故晶闸管额定电流 $I_{T(AV)}$ 的选择应为

$$I_{T(AV)} \geq I_{TM} / 1.57$$

由于晶闸管的过载能力很差,一般在选用时取 1.5~2 的安全裕量,即

$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) \frac{I_{TM}}{1.57} \quad (1-8)$$

不同的电流波形有不同的平均值和有效值,波形系数 K_f 也不同。表 1-2 列出四种典型电流波形(周期皆为 2π 、最大值皆为 I_m)的波形系数 K_f ,以及当这些电流分别通过晶闸管时,额定电流 $I_{T(AV)} = 100A$ 的晶闸管实际所允许通过的电流平均值。