



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANLI DIANZI JISHU

电力电子技术

(第二版)

袁 燕 主 编
王汉桥 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

Electric Power
Power
Technology



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANLI DIANZI JISHU

电力电子技术

(第二版)

主 编 袁 燕
副主编 王汉桥
编 写 宋廷臣 陈 晔
主 审 石新春 赵文建



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）。

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、触发电路、有源逆变电路、交流变换电路、直流斩波电路、无源逆变电路，并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，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相关专业的教学用书，也可作为有关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术/袁燕主编. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专教育
ISBN 978-7-5083-8140-4

I. 电… II. 袁… III. 电力电子学-高等学校: 技术学校-教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 188115 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 3 月第一版

2009 年 1 月第二版 2009 年 1 月北京第三次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.75 印张 255 千字

定价 17.20 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
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

近年来，随着现代电力电子技术的发展，新型的电力电子器件及电路不断涌现，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、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，本书在第一版的基础上进行了修订。

本书以培养高等技术应用型人才为宗旨，在编写修订中充分体现先进性、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。另外，针对现代电力电子技术的飞速发展，本书也引入一些相关的先进技术，为学生今后的就业和知识拓展打下良好的基础。

修订的主要内容有：①删减了第1章电力电子器件中电力二极管的内容；②在第1章中增加了全控型电力电子器件的驱动电路；③增加了“软开关技术”内容，并将其编入第7章中；④修改了部分章节的内容；⑤改正了若干文字和图表错误。

本书第1、3章由王汉桥、袁燕共同改编，第4章由王汉桥改编，第2、7章由袁燕改编，第5、6章由刘玮改编，第8章及附录由宋廷臣改编。全书由袁燕统稿并担任主编，华北电力大学石新春教授、武汉电力职业技术学院赵文建副教授担任主审，并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。

由于编者的学识水平及实践经验有限，修订后的本书仍存在一定的疏漏和错误，恳请使用本书的教师和广大读者多加批评指正。

编 者

2008年10月

目 录

前言	
绪论	1
第1章 电力电子器件	3
1.1 晶闸管	3
1.2 典型全控型电力电子器件	13
1.3 电力电子器件的驱动	30
习题	35
第2章 晶闸管可控整流电路	38
2.1 单相可控整流电路	38
2.2 三相可控整流电路	50
2.3 可控整流电路的换相压降	58
2.4 晶闸管的保护与容量扩展	60
习题	64
第3章 晶闸管的触发电路	67
3.1 概述	67
3.2 简易触发电路	68
3.3 单结晶体管触发电路	69
3.4 集成触发电路和数字式移相触发电路	72
3.5 触发脉冲与主电路电压的同步	76
习题	80
第4章 有源逆变电路	82
4.1 有源逆变电路的工作原理	82
4.2 三相有源逆变电路	85
4.3 逆变失败的原因及防止对策	89
习题	91
第5章 交流变换电路	93
5.1 交流电力电子开关电路	93
5.2 交流调压电路与交流调功电路	93
5.3 交交变频电路	102
习题	105
第6章 直流斩波电路	107
6.1 基本斩波电路	107
6.2 其他斩波电路	113
习题	114

第 7 章 无源逆变电路	116
7.1 无源逆变电路的基本概念	116
7.2 单相逆变器	118
7.3 三相逆变器	120
7.4 脉冲宽度调制型逆变器	124
7.5 软开关技术	128
习题	133
第 8 章 典型电力电子应用	134
8.1 开关稳压电源	134
8.2 不间断电源	140
8.3 变频调速装置	144
8.4 三相移相触发集成电路 TC787/TC788 应用	147
附录	154
实验一 单结晶体管触发电路及单相半控桥式整流电路	154
实验二 锯齿波触发电路与三相全控桥式整流电路	155
实验三 三相半波有源逆变电路的性能研究	159
实验四 IGBT 斩波电路的研究	160
参考文献	163

绪 论

电力电子技术是一门利用电力电子器件进行电能变换和控制的技术，包括电压、电流、波形、频率和相数的变换。它又是一门交叉于“电力”、“电子”与“控制”三大领域之间的边缘技术，包含电力电子器件、变流器电路、计算机辅助设计、模拟电子学、数字电子学、微型计算机、控制理论、超大规模集成电路以及高频技术和电磁兼容等。它既是电子学在强电（高电压、大电流）领域的一个分支，又是电工学在弱电（低电压、小电流）领域的一个分支，因此电力电子技术可以说是强电与弱电相结合的新学科。

电力电子技术已渗透到生产、生活、建设、科研、国防、交通、医疗卫生、环保、航空管理、办公自动化等各个领域。虽然这些领域有相当一部分是直接利用工频交流电，但更多领域却是间接使用工频交流电，换句话说，都少不了使用电力电子技术。

1. 电力电子技术的研究内容及应用

电力电子技术就是利用电力电子器件组成相应的电路，同控制技术有效结合，实现电能变换的技术，按其电能变换功能划分，主要有以下几种类型：

整流器：将正弦交流电变换为固定或可调的直流电，简称交流—直流（AC—DC）变换。主要用于充电、电镀、电解和直流电动机的调速等领域。

逆变器：将直流电变换为频率和幅值固定或可调的交流电，简称直流—交流（DC—AC）变换。主要用于不间断供电电源（UPS）、各种变频电源、中频感应加热和交流电动机的变频调速等领域。

斩波器：将固定的直流电压变换为可调的直流电压，简称直流—直流（DC—DC）变换。主要用于直流电压变换、开关电源、电车、地铁、搬运车等电气机车上所用直流电动机的牵引传动等场合。

交流变换器：将幅值和频率固定的交流电压变换为幅值和频率可调的交流电压，简称交流—交流（AC—AC）变换。其中改变交流电压幅值的交流变换器主要用于调温、调光、交流电动机的调压、调速等场合；能将 50Hz 工频交流电直接转换成其他频率的交流电的交—交变频器（周波变换器）主要用于交流电动机的变频调速。

2. 电力电子技术发展的历史及远景

电力电子技术的发展开始于 20 世纪初汞弧整流器的发明，真正的革命开始于 1956 年贝尔实验室发明晶闸管。1957 年美国通用电气公司制成第一只工业用的晶闸管，这种大功率电力半导体器件的诞生及其性能指标上的优越性为电力电子技术开辟了一条崭新的道路。在这之前，电能转换是依靠旋转机组来实现的。与旋转的变流机组相比较，利用电力电子器件组成静止的电能变换器，具有体积小、质量轻、无机械噪声、无磨损、效率高、易于控制、响应快及使用方便等优点。

经过 40 多年的发展，电力电子技术的应用取得了极大进展，从开始的整流、交直流可调电源，到现在已应用到电化学生产、加热和照明控制、电焊接技术、电网无功和谐波补偿、高压直流输电系统、光电池和燃料电池的变换、电机直流调速和交流变频调速系统、固态断路、

感应加热、电机传动、中频电源和超声波电源, 还出现了谐振变换技术, 其频率达数兆赫兹。

今后, 电力电子技术的发展趋势将会以碳化硅 (SiC) 等下一代半导体材料作为研究方向, 这种材料制成的器件导通损耗很小, 承受的电压很高, 耐受的温度可达 150、250℃甚至 300℃。除此之外, 做成集成电力电子模块 (IPEM) 也是个重要趋势。今后 10 年内, 变频调速是电力电子装置的主要应用场合之一; 电动汽车、航空航天等也一直是电力电子技术发展的推动力。

3. 电力电子技术的重要作用

20 世纪 60 年代的电力电子技术以省工和长寿命为重点。20 世纪 70 年代进入逆变器时代, 并把节能放在首位。到了 20 世纪 80 年代, 电力电子进入了自关断器件时代, 其技术要求是小型、快速和高精度。20 世纪 90 年代是高频电力电子技术时代, 而 2000 年以后, 则是智能电力电子时代。

控制电路经历了由分立元件到集成电路的发展阶段。现在已有专为各种控制功能设计的专用集成电路, 使变换器的控制电路大为简化。而微处理器和微型计算机的引入, 特别是它们的位数成倍增加, 运算速度不断提高, 功能不断完善, 使控制技术发生了根本的变化。同时将新的控制理论和方法应用在变换器中, 使控制不仅依赖硬件电路, 而且可利用软件编程, 既方便又灵活。

(1) 优化电能使用。通过电力电子技术对电能的处理, 使电能的使用达到合理、高效和节约, 实现电能使用最佳化。例如, 在节电方面, 针对风机水泵、电力牵引、轧机冶炼、轻工造纸、工业窑炉、感应加热、电焊、化工、电解等几个方面的调查, 潜在节电总量相当于 1990 年全国发电量的 16%。所以, 推广应用电力电子技术是节能的一项战略措施, 一般节能效果可达 10%~40%。我国已将许多装置列入节能的推广应用项目。

(2) 改造传统产业和发展机电一体化等新兴产业。据发达国家预测, 今后将有 95% 的电能要经过电力电子技术处理后再使用, 即工业和民用的各种机电设备中, 有 95% 与电力电子产业有关。特别是, 电力电子技术是弱电控制强电的媒介, 是机电设备与计算机之间的重要接口, 它为传统产业和新兴产业采用微电子技术创造了条件, 成为发挥计算机作用的保证和基础。

(3) 电力电子技术高频化和变频技术的发展, 将使机电设备突破工频传统, 向高频化方向发展。实现最佳工作效率, 将使机电设备的体积减小为原来的几分之一, 甚至几十分之一。响应速度达到高速化, 并能适应任何基准信号, 实现无噪音且具有全新的功能和用途。

(4) 电力电子智能化的进展, 在一定程度上将信息处理与功率处理合二为一, 使微电子技术 with 电力电子技术一体化, 其发展有可能引起电子技术的重大改革。有人甚至提出, 电子学的下一项革命将发生在以工业设备和电网为对象的电子技术应用领域, 电力电子技术将把人们带到第二次电子革命的边缘。

4. 学习要求

电力电子技术是电气工程及其自动化专业、工业电气自动化等专业的一门专业性能较强, 且与生产实践联系紧密的课程。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, 做到元件、电路、应用三结合。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, 抓住波形分析这个重要环节, 进一步理解电路的工作特点和分析计算方法。同时在理解原理的基础上, 重视实验, 加强实践环节, 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。

第1章 电力电子器件

在电气设备或电力系统中，把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，它是电子器件的一大分支，能承受高电压和大电流，是弱电控制强电的纽带。

电力电子器件可分为三大类：通过控制信号能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；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；不能用控制信号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

晶闸管（Thyristor）的全称是硅晶体闸流管，普通晶闸管也称为可控硅整流器 SCR（Silicon Controlled Rectifier），它是一种具有开关作用的大功率半导体器件，常简称为晶闸管，目前其容量水平已达 8kV/6kA。

1.1.1 晶闸管的结构与工作原理

一、晶闸管的结构

晶闸管是四层（P1N1P2N2）三端（A 阳极、K 阴极、G 门极）器件，它的外形及符号如图 1-1 所示。晶闸管的外形大致有三种，即塑封形、螺栓形和平板形。它有三个引出极：阳极 A、阴极 K 和门极（也称控制极）G。

图 1-1 (a) 为塑封形，多见于额定电流 10A 以下；图 1-1 (b)、(c) 为螺栓形，螺栓端是阳极，它与散热器紧密地拧在一起，粗辫子是阴极，细辫子是门极。一般为 10A 以上、

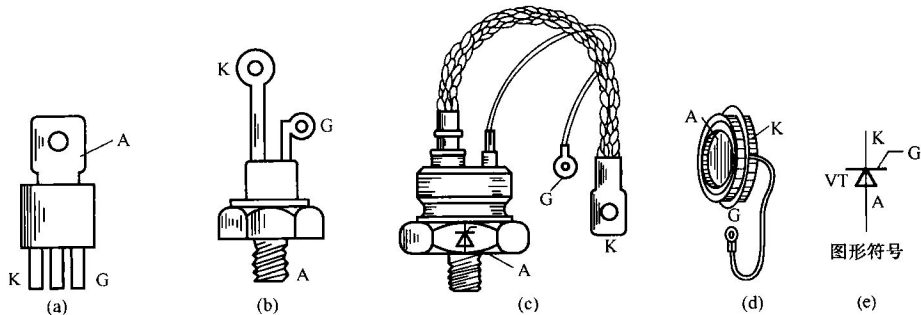


图 1-1 晶闸管的外形及符号

(a) 塑封形；(b)、(c) 螺栓形；(d) 平板形；(e) 图形符号

200A 以下。图 1-1 (d) 是平板形晶闸管, 它是由两个彼此绝缘的散热器把晶闸管紧紧地

夹在中间的, 呈圆饼形, 两侧分别是阳极和阴极, 细辫子线为门极, 离门极较近的一端为阴极, 一般用于 200A 以上。图 1-1 (e) 所示为晶闸管的图形符号。

晶闸管的内部结构及等效电路如图 1-2 所示。

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 给出了几种散热器的外形。

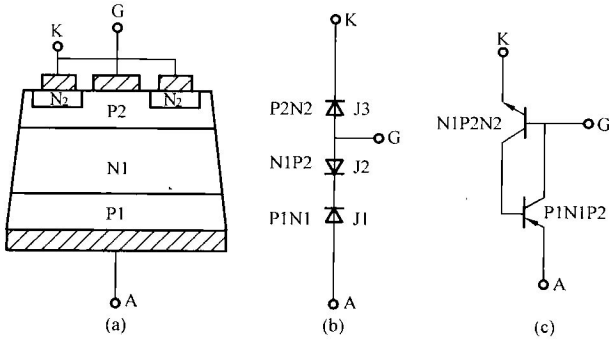


图 1-2 晶闸管的内部结构及等效电路
(a) 芯片原理结构; (b) 三个 PN 结等效电路;
(c) 互补三极管等效电路

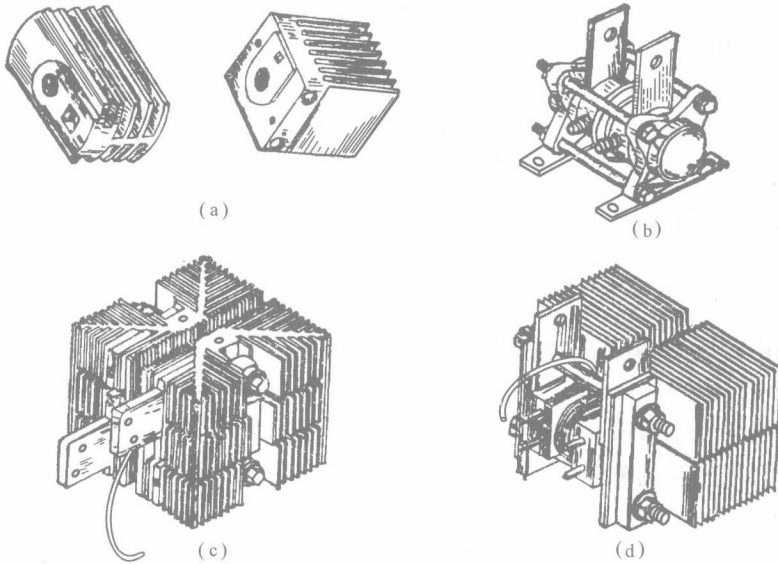


图 1-3 晶闸管的几种散热器外形
(a) 自冷; (b) 水冷; (c) 风冷; (d) 热管

二、晶闸管的导通和关断条件

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。主电源 E_a 和门极电源 E_g 通过双刀开关 S1 和 S2 正向或反向闭合接通晶闸管的有关电极, 用灯泡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, 晶闸管承受反向阳极电压, 不论 S2 正向或反向闭合即门极承受何种电压, 灯泡都不亮, 说明晶闸管处于关断状态。

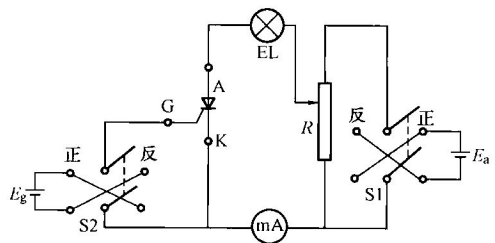


图 1-4 晶闸管的导通关断实验电路

(2) 当 S1 向右闭合, 晶闸管承受正向阳极电压, 仅当 S2 正向闭合即门极也承受正向电压时灯泡才亮。

(3) 晶闸管一旦导通, S2 不论正接、反接或者断开, 晶闸管保持导通状态不变, 说明门极失去了控制作用。

(4) 要使晶闸管关断, 可以去掉阳极电压, 或者给阳极加反压; 也可以降低正向阳极电压数值或增大回路电阻, 使流过晶闸管的电流小于一定数值(维持电流)以下。

由以上实验结果, 可得到如下结论:

(1) 晶闸管的导通条件: 在晶闸管的阳极和阴极之间加正向电压, 同时在它的门极和阴极之间也加正向电压。两者缺一不可。

(2) 晶闸管一旦导通, 门极即失去控制作用, 因此门极所加的触发电压一般为脉冲电压。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, 可以通过几百、几千安的电流。

(3) 晶闸管的关断条件: 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三极管, 如图 1-2 (c) 所示。晶闸管的工作原理可依此进行简单分析, 如图 1-5 所示。

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, 就有电流 I_g 从门极流入 NPN 管的基极, 经 NPN 管放大后的集电极电流 I_{c2} 作为 PNP 管的基极电流, 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:

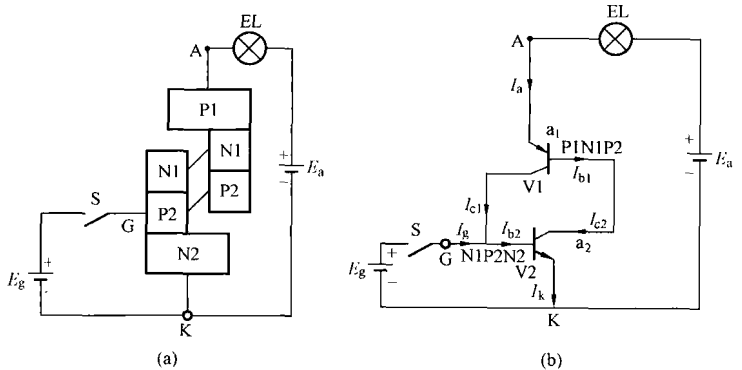


图 1-5 晶闸管的工作原理

(a) 等效成 PNP 和 NPN 管复合作用; (b) 内部电流关系

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

使两个晶体管很快饱和和导通, 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的大小。

晶闸管一旦导通后, 即使 $I_g = 0$, 但因 I_{c1} 的电流在内部直接流入 NPN 管的基极, 晶闸管仍将继续保持导通状态。若要晶闸管关断, 只有降低阳极电压到零或对晶闸管加上反向阳极电压, 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, 晶闸管方可恢复阻断状态。

1.1.2 晶闸管的特性和参数

一、晶闸管的伏安特性

晶闸管的阳极与阴极间电压 U_{AK} 和阳极电流 I_A 之间的关系, 称为晶闸管的伏安特性,

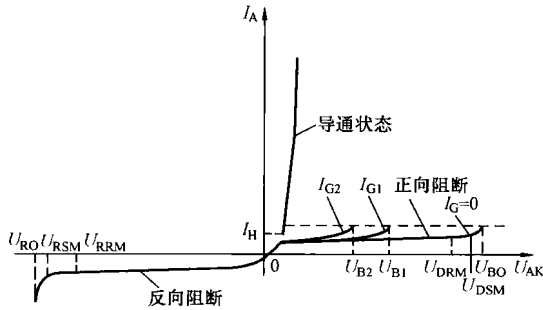


图 1-6 晶闸管的伏安特性

如图 1-6 所示。其特性可分为正向特性（第 I 象限）和反向特性（第 III 象限）。

(1) 正向特性。晶闸管的正向特性又有阻断状态和导通状态之分。在门极电流 $I_G = 0$ 情况下，逐渐增大晶闸管的正向阳极电压，这时晶闸管处于断态，只有很小的正向漏电流；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，特性从高阻区（阻断状态）经负阻区（虚线）到达低阻区（导通状态）。导通状态时的晶闸管状态与二极管的正向特性相似，即通过较大的阳极电流，而晶闸管本身的压降却很小。正常工作时，不允许把正向阳极电压加到转折值 U_{BO} ，而是从门极输入触发电流 I_G ，使晶闸管导通。门极电流愈大，阳极电压转折点愈低（图 1-6 中 $I_{G2} > I_{G1} > 0$ ）。

(2) 反向特性。晶闸管的反向特性与一般二极管的反向特性相似。当晶闸管承受反向阳极电压时，晶闸管总是处于阻断状态。当反向电压增加到一定数值时，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，必须掌握晶闸管的主要参数及意义，其中一些主要参数的数值列于表 1-1 中。

表 1-1 晶闸管的主要参数

通态平均电流 $I_{T(AV)}/A$	断态正反向 重复峰值电压 $U_{DRM}, U_{RRM}/V$	断态正反向 重复峰值电流 $I_{DRM}, I_{RRM}/mA$	维持电流 I_H/mA	通态峰 值电压 U_{Tm}/V	工作结 温 $T_j/^\circ C$	断态电压 临界上升率 $du/dt/ (V/\mu s)$	通态电流 临界上升率 $di/dt/ (A/\mu s)$	浪涌电流 I_{Tsm}/kA		
1	50~1600	≤ 3	≤ 10	≤ 2.0				L 级 0.12	H 级 0.20	
3	100~2000	≤ 8	≤ 30	≤ 2.2	-40~ +100	25~800	25~50	0.036	0.056	
5			≤ 60					0.064	0.09	
10			≤ 100					0.12	0.19	
20			≤ 10					0.24	0.38	
30	100~2400	≤ 20	≤ 150	≤ 2.4		50~1000	25~100	0.36	0.56	
50			≤ 200					0.64	0.94	
100			≤ 40					1.3	1.9	
200	100~3000	≤ 50	≤ 300	≤ 2.6	-40~ +125	100~1000	50~200	2.5	3.8	
300								3.8	5.6	
400								5.0	7.5	
500								6.3	9.4	
600								7.6	11	
800								50~500	10	15
1000									13	18

1. 晶闸管的电压定额

(1) 正向断态重复峰值电压 U_{DRM} 。在图 1-6 所示的晶闸管伏安特性中, 当门极开路, 元件处于额定结温时, 所测定的正向转折电压 U_{BO} , 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} (不可连续或重复施加), 将此值再乘以 0.9 即得正向断态重复峰值电压 U_{DRM} 。

(2) 反向阻断重复峰值电压 U_{RRM} 。在图 1-6 中, 当门极断开, 元件处于额定结温时, 所测反向击穿电压 U_{RO} , 同样将 U_{RO} 减去一定数值 (100V) 可得到反向不重复峰值电压 U_{RSM} , 再乘以 0.9 可得到反向重复峰值电压 U_{RRM} 。

(3) 额定电压 U_{Tn} 。通常用实测的 U_{DRM} 、 U_{RRM} 中较小值, 按规定的标准电压等级就低取整数, 在晶闸管的型号上标出, 即为该晶闸管的额定电压。规定的标准电压等级: 在 1000V 以下, 每隔 100V 为一级; 1000~3000V, 每隔 200V 为一级, 用百位数或千位和百位数表示级数, 见表 1-2。

表 1-2 晶闸管断态正反向重复峰值电压的等级

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		

例如: 实测某晶闸管 $U_{\text{DSM}}=1240\text{V}$, $U_{\text{RSM}}=1400\text{V}$, 按规定

$$U_{\text{DRM}}=90\%U_{\text{DSM}}=1116\text{V}$$

$$U_{\text{RRM}}=90\%U_{\text{RSM}}=1260\text{V}$$

取其中较小值, 按标准电压等级就低取整数, 此晶闸管的额定电压应为 1000V, 即 10 级。

晶闸管使用时, 若外加电压超过反向击穿电压, 会造成元件永久性损坏。若超过正向转折电压, 会引起元件误导通, 经数次这种导通后, 会造成元件损坏。此外元件的耐压还会因散热条件恶化和结温升高而降低。因此在实际应用时, 选择晶闸管应注意留有充分的裕量, 一般选择原则是: 按工作电路中元件可能承受到的最大瞬时值电压 U_{TM} 的 2~3 倍来选择晶闸管的额定电压 U_{Tn} , 即

$$U_{\text{Tn}}=(2\sim 3)U_{\text{TM}} \quad (1-1)$$

(4) 通态平均电压 $U_{\text{T(AV)}}$ 。在规定的环境温度和标准散热条件下, 晶闸管通过正弦半波的额定通态平均电流时, 阳极与阴极之间电压降的平均值叫通态平均电压 $U_{\text{T(AV)}}$, 也叫管压降, 其数值为 0.4~1.2V, 见表 1-3。从减小元件发热和功率损耗的角度考虑, 应选择 $U_{\text{T(AV)}}$ 较小的晶闸管。

表 1-3 晶闸管正向通态平均电压的组别

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

续表

正向通态 平均电压	$0.8V < U_{T(AV)}$ $\leq 0.9V$	$0.9V < U_{T(AV)}$ $\leq 1.0V$	$1.0V < U_{T(AV)}$ $\leq 1.1V$	$1.1V < U_{T(AV)} \leq 1.2V$
组别代号	F	G	H	I

2. 晶闸管电流定额

(1) 额定电流 $I_{T(AV)}$ 。元件的额定电流也称为通态平均电流,是指元件工作在环境温度

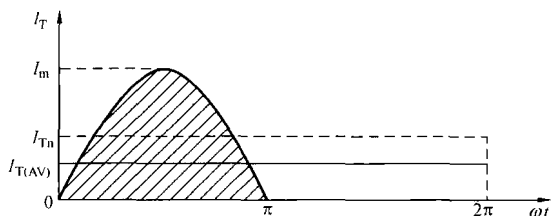


图 1-7 流过晶闸管的工频正弦半波电流波形

为 $+40^{\circ}\text{C}$ 和规定的冷却条件下,在电阻性负载的单相工频正弦半波,导通角不小于 170° 的电路中,当结温达到稳定且不超过额定结温时,所允许的最大通态平均电流。此电流按照标准的电流系列取相应的电流等级(见表 1-1)定为该元件的额定电流标在元件的铭牌上。

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

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

而正弦半波电流的有效值为

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

将正弦半波情况下电流有效值和平均值的比值定义为波形系数,即

$$K_f = \frac{I_{Tn}}{I_{T(AV)}} = \frac{\pi}{2} = 1.57 \quad (1-4)$$

由式 (1-4) 可知,额定电流为 100A 的晶闸管,其允许通过的电流有效值为

$$I_{Tn} = K_f I_{T(AV)} = 1.57 \times 100 = 157 \text{ (A)}$$

晶闸管的额定电流用通态平均电流来表示,但在实际应用中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由有效值决定的,即不论流经元件的电流波形如何,导通角有多大,只要电流有效值相等,其热效应就是相同的。

根据电流有效值相等的原则,允许流过晶闸管的实际电流有效值应等于额定电流 $I_{T(AV)}$ 时的电流有效值,即 $I_T = 1.57 I_{T(AV)}$,据此可以推出流过任何电流波形时,选择晶闸管电流定额的计算式。

任何含有直流分量的电流波形,都可以求出平均电流 I_d 和有效值电流 I ,我们定义电流的波形系数为

$$K_f = \frac{I}{I_d} \quad (1-5)$$

所以

$$I = K_f I_d \quad (1-6)$$

如果实际流过元件的电流有效值为 $I = K_f I_d$,按电流有效值相等的原则,有

$$K_f I_d = 1.57 I_{T(AV)} \quad (1-7)$$

所以，对于不同的电流波形，其额定电流 $I_{T(AV)}$ 应为

$$I_{T(AV)} = \frac{K_f I_d}{1.57} \quad (1-8)$$

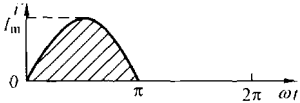
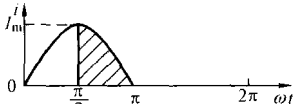



由于晶闸管电流过载能力较差，因而在选择元件额定电流时，应取实际需要值的（1.5~2）倍，使之有一定的安全裕量，保证元件可靠运行，式（1-8）应修正为

$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) \frac{K_f I_d}{1.57} \quad (1-9)$$

不同的电流波形，其平均值、有效值及波形系数 K_f 也不同。表 1-4 列出五种电流波形（周期皆为 2π 、最大值皆为 I_m ）分别通过晶闸管时，额定电流 $I_{T(AV)} = 100A$ 的晶闸管实际允许通过的电流平均值。于是有

$$I_d = \frac{1.57 I_{T(AV)}}{K_f} = \frac{1.57 \times 100}{K_f} = \frac{157}{K_f} \quad (1-10)$$

表 1-4 额定电流 100A 的晶闸管所允许的电流平均值

波 号	平均值 I_d 、有效值 I 与最大值 I_m 关系	波形系数 $K_f = I/I_d$	允许电流平均值 $I_{dn} = I_{Tn}/K_f$
	$I_d = \frac{I_m}{\pi}$ $I = \frac{I_m}{2}$	1.57	$I_{dn} = \frac{1.57 \times 100}{1.57} = 100 \text{ (A)}$
	$I_d = \frac{I_m}{2\pi}$ $I = \frac{I_m}{2\sqrt{2}}$	2.22	$I_{dn} = \frac{1.57 \times 100}{2.22} = 70.7 \text{ (A)}$
	$I_d = \frac{2I_m}{\pi}$ $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$	1.11	$I_{dn} = \frac{1.57 \times 100}{1.11} = 141.4 \text{ (A)}$
	$I_d = \frac{I_m}{3}$ $I = \frac{I_m}{\sqrt{3}}$	1.73	$I_{dn} = \frac{1.57 \times 100}{1.73} = 90.7 \text{ (A)}$
	$I_d = \frac{I_m}{6}$ $I = \frac{I_m}{\sqrt{6}}$	2.45	$I_{dn} = \frac{1.57 \times 100}{2.45} = 64.1 \text{ (A)}$

(2) 维持电流 I_H 。在室温且门极开路时，元件从较大的通态电流降至刚好能维持它导通所需的最小阳极电流称维持电流 I_H ，一般为几十到几百毫安。结温愈高，维持电流愈小。维持电流大的元件容易关断。

(3) 掣住电流 I_L 。给晶闸管门极加上触发电压，当元件从阻断状态刚转为导通状态就撤除触发电压，此时要保持元件继续导通所需的最小阳极电流，称为掣住电流 I_L 。对于同一只晶闸管，通常 I_L 为 I_H 的 2~4 倍。

(4) 浪涌电流 I_{TSM} 。指晶闸管在规定的极短时间内所允许通过的冲击性电流值, 通常浪涌电流比额定电流要大 4π 倍。

3. 晶闸管的门极定额

(1) 门极触发电流 I_{GT} 。在室温下, 阳、阴极间加 6V 正向直流电压, 使元件由断态转入通态所必需的最小门极电流, 称为门极触发电流, 用 I_{GT} 表示。

(2) 门极触发电压 U_{GT} 。对应于门极触发电流 I_{GT} 的门极电压, 称为门极触发电压 U_{GT} 。使用时为了保证晶闸管可靠触发, 应使触发电路提供给门极的电流和电压适当地大于晶闸管厂家给出的标准值, 但不应超过标准的峰值。

4. 动态参数

(1) 断态电压临界上升率 du/dt 。在额定结温和门极开路情况下, 不导致元件从断态到通态转换的最大正向阳极电压上升率, 称为断态电压临界上升率 du/dt 。

之所以要限制元件正向电压上升率, 是因为元件在正向阳极电压下, 由于 J2 结受反压使之阻断, 而在阻断状态下 J2 结相当于一个电容, 如果阳极正向电压突然增大即 du/dt 过大, 便会有一充电电流流过这个电容, 电流经 J2 结起到了触发电流的作用。 du/dt 愈大, 充电电流也愈大, 有可能使元件误导通。

断态电压临界上升率共分七级 A、B、C、D、E、F、G, 相应的数值分别为 25、50、100、200、500、800、1000, 单位是 $V/\mu s$ 。

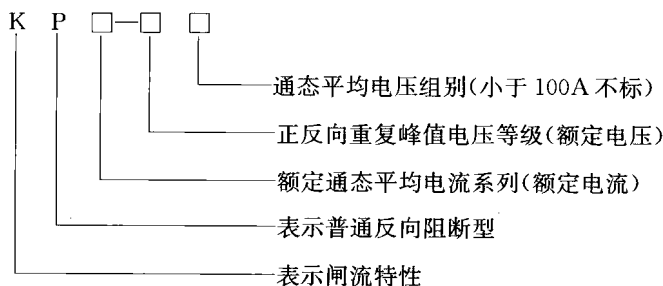
(2) 通态电流临界上升率 di/dt 。在规定条件下, 晶闸管在开通时所能承受而不导致损坏的最大通态电流上升率, 称为通态电流临界上升率 di/dt 。

如果电流上升过快, 则当晶闸管刚一开通时, 会有很大的电流集中在门极附近的小区域内, 从而造成局部过热而使晶闸管损坏。

通态电流临界上升率分七级字母排列 (A 到 G), 分别为 25、50、100、150、200、300、500, 单位是 $A/\mu s$ 。

5. 晶闸管的型号规格

按国家 JB 1144—1975 规定, KP 型普通晶闸管的型号及含义如下:








例如, KP100—12G 表示额定电流为 100A、额定电压为 1200V、管压降为 1V 的普通型晶闸管。

1.1.3 晶闸管派生型器件

前面介绍了 KP 型普通晶闸管的结构、原理及主要参数。随着生产实际需求的增加, 在 KP 型晶闸管基础上又派生出一些特殊型晶闸管, 如快速型晶闸管 (KK)、双向晶闸管 (KS) 和逆导晶闸管 (KN) 等, 其结构及特点见表 1-5。

表 1-5

晶闸管的类型及主要用途

名称	型号	符号	特征	用途
普通晶闸管	KP		反向阻断, 正向门被正信号开通	整流器, 逆变器, 变频器
快速晶闸管	KK		反向阻断, 正向门极正信号开通, 关断时间短, 开通速度快	中频冶炼电源, 逆变器, 高频控制设备, 超声波电源等
可关断晶闸管	KG		门极正信号开通, 门极负信号关断	步进电机电源, 变频器, 斩波器
双向晶闸管	KS		两个方向均可用门极信号开通 (相当于两只普通可控硅反并联)	电子开关, 直流可逆调速, 调光器, 调温器等
逆导晶闸管	KN		反向导通, 正向门极正信号开通 (相当硅整流管与普通晶闸管反并联)	逆变器, 斩波器

一、快速晶闸管

快速晶闸管 FST (Fast Switching Thyristor) 的关断时间小于或等于 $50\mu\text{s}$ 。前面介绍的普通晶闸管通常用于工作频率为 400Hz 以下的场合, 当工作频率达 400Hz 以上时, 开关损耗增大, 将导致额定电流明显下降。快速晶闸管的外形、电路符号、基本结构及伏安特性与普通晶闸管相同, 但制造工艺不同, 因而开通与关断时间短, 允许的电流上升率高, 开关损耗小。主要用于由直流供电的逆变器、斩波器以及较高频率 (400Hz 以上) 的其他变流电路中。

根据不同的需要, 快速晶闸管可分为快速关断型、快速开通型和两者兼顾型三种。

二、双向晶闸管

1. 结构与特性

双向晶闸管 (Bidirectional Thyristor) 不论从结构还是从特点方面来说, 都可把它看成一对反向并联的普通晶闸管。外形与普通晶闸管类似, 有塑封式、螺栓式和平板式。其内部是一种 NPNPN 五层结构引出三个端线的器件, 如图 1-8 所示。它有两个主电极 T1 和 T2, 一个门极 G。

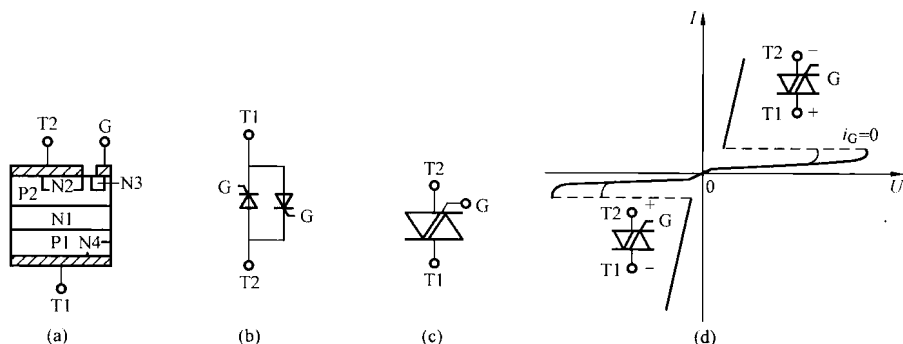


图 1-8 双向晶闸管

(a) 内部结构; (b) 等效电路; (c) 图形符号; (d) 伏安特性