



普通高等教育“十二五”创新型规划教材

# 电力电子技术

DIANLI DIANZI JISHU

主 编 殷 刚 王涌泉

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育“十二五”创新型规划教材

# 电力电子技术

主 编 殷 刚 王涌泉  
副主编 戴 毅  
参 编 贺巧利 邓久艳  
主 审 杨继新

 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

电力电子技术是电气自动化、电气工程及其自动化等相关专业的主干课程之一。本书着重物理概念与基本分析方法的学习,理论联系实际,器件、电路、系统(包括控制技术)应用相结合。在学习方法上,本书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和截止的变化过程,从波形分析中进一步理解电路的工作情况。同时本书注意培养学生读图与分析、器件的选择、电路参数计算与测量、电路调整以及故障分析等方面的实践能力。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/殷刚,王涌泉主编. —北京:北京理工大学出版社, 2012. 12

ISBN 978 - 7 - 5640 - 7251 - 3

I. ①电… II. ①殷… ②王… III. ①电力电子技术 IV. ①TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第318204号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 710毫米×1000毫米 1/16

印 张 / 13

字 数 / 230千字

责任编辑 / 张慧峰

版 次 / 2012年12月第1版 2012年12月第1次印刷

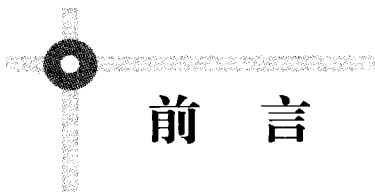
责任校对 / 杨 露

定 价 / 38.00元

责任印制 / 王美丽

---

图书出现印装质量问题,本社负责调换



# 前 言

近年来，电力电子设备的数量和品种急剧增长，生产第一线迫切需要大量的具有一定理论基础和较高实践技能的工程技术人员对其进行操作和维护。为适应社会和经济对电力电子技术应用型人才的需求，我们根据多年的教学经验，特编写了本书。

全书共分7章，建议按108学时讲授（含仿真及实训30学时），仿真实验可在课后或校内专业实习中完成，实验实训可结合课程教学安排进行。

本书除绪论外，第1章介绍了功率二极管、晶闸管和功率场效应晶体管等电力电子器件；第2章介绍了交流-直流变换电路，具体分析了典型单相和三相可控整流电路的组成、工作原理及基本计算；第3章介绍了几种晶闸管的触发电路；第4章介绍了以全控型器件为基础的直流-直流变换电路；第5章介绍了交流变换电路，分析了以晶闸管器件为基础的交流开关、交流调压和交-交变频电路；第6章安排了电力电子技术工程项目设计的内容；第7章是利用MATLAB仿真软件对前面内容的仿真；附录中给出了电力电子的MATLAB图形化仿真基础知识。

本书由殷刚和王涌泉任主编，戴毅任副主编，贺巧利、邓久艳参与编写，具体分工如下：第1章、第4章由邓久艳编写；第2章、第3章由王涌泉编写；第5章由戴毅编写；第6章由殷刚编写；第7章及绪论部分由贺巧利编写。与此同时邀请了杨继新高级工程师参与指导，提出宝贵的意见。

本书在编写过程中参考了许多图书和网站上的资料，引用了其中有关章节的内容，在此表示感谢！

书中错误和不妥之处，恳请广大师生和读者批评指正。



# 目 录

绪论 .....	1
<b>第 1 章 电力电子器件</b> .....	4
1.1 电力电子器件概述 .....	4
1.2 功率二极管 .....	5
1.3 晶闸管 .....	8
1.4 功率场效应晶体管 .....	14
习题 .....	19
<b>项目一 晶闸管导通关断实验</b> .....	20
<b>项目二 典型电力电子器件的测试实验</b> .....	22
任务一 晶闸管的简单测试 .....	22
任务二 功率场效应晶体管的检测方法 .....	24
<b>第 2 章 交流 - 直流变换电路</b> .....	28
2.1 单相可控整流电路 .....	28
2.2 三相可控整流电路 .....	36
2.3 相控整流电路的换相压降 .....	47
2.4 有源逆变电路 .....	48
2.5 无源逆变电路 .....	53
2.6 逆变器的 SPWM 控制技术 .....	58
习题 .....	61
<b>第 3 章 晶闸管触发电路</b> .....	63
3.1 对触发电路的要求 .....	63
3.2 单结晶体管触发电路 .....	63
3.3 同步信号为锯齿波的触发电路 .....	65
3.4 KC04 集成移相触发器 .....	67
3.5 六路双脉冲发生器 KC41C .....	69
3.6 三相全控桥整流电路的集成触发电路 .....	70
<b>项目三 晶闸管触发电路的应用</b> .....	71
任务一 单结晶体管触发电路实验 .....	71

任务二 音乐彩灯控制器 .....	73
任务三 调光灯 .....	74
<b>项目四 整流逆变应用 .....</b>	<b>75</b>
任务一 磨床调速装置 .....	75
任务二 电力机车 .....	76
<b>第4章 直流-直流变换电路 .....</b>	<b>79</b>
4.1 直流变换的基本结构和工作原理 .....	79
4.2 直流斩波器 .....	80
4.3 变压器隔离的直流-直流变换器 .....	84
习题 .....	88
<b>项目五 开关电源 .....</b>	<b>89</b>
任务一 开关电源电路分析及检测 .....	89
任务二 开关电源故障分析及检修方法的讨论 .....	91
<b>第5章 交流变换电路 .....</b>	<b>96</b>
5.1 晶闸管交流开关电路 .....	96
5.2 交流调压电路 .....	99
5.3 交-交变频电路 .....	108
习题 .....	116
<b>项目六 交流变换电路的应用 .....</b>	<b>118</b>
任务一 龙门铣床调速系统 .....	118
任务二 变频电源使用与维护研究 .....	121
<b>第6章 电力电子技术工程项目设计 .....</b>	<b>123</b>
6.1 项目设计大纲 .....	123
6.2 项目设计任务书 .....	124
6.3 晶闸管整流器项目设计指导书 .....	126
<b>第7章 MATLAB 仿真 .....</b>	<b>143</b>
7.1 典型电力电子器件的 MATLAB 仿真模型实训 .....	143
7.2 交流-直流变换电路的 MATLAB 仿真研究 .....	151
7.3 直流-交流变换电路的仿真 .....	167
7.4 交流-交流变换电路的 MATLAB 仿真 .....	173
7.5 直流-直流变换电路的 MATLAB 仿真 .....	179
<b>附录 MATLAB/Simulink/Power System 工具箱及应用简介 .....</b>	<b>186</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>201</b>

# 绪 论

## 1. 电力电子技术的内容

电力电子技术是建立在电子学、电力学和控制学三个学科基础上的边缘学科，它横跨“电子”“电力”“控制”三个领域，主要研究各种电力电子器件，以及由电力电子器件所构成的各种电路或变流装置，以完成对电能的变换和控制。它运用弱电（电子技术）控制强电（电力技术），是强弱电相结合的新学科。

实际上，就其内容而言，电力电子技术主要完成各种电能形式的变换。以电能输入 - 输出变换的形式来分，主要包括以下四种基本变换。

1) 交流 - 直流 (AC - DC) 变换。交流 - 直流的变换一般称为整流，完成交流 - 直流变换的电力电子装置称为整流器。交流 - 直流变换常应用于直流电动机调速、蓄电池充电、电镀、电解以及其他直流电源等。

2) 直流 - 交流 (DC - AC) 变换。直流 - 交流的变换一般称为逆变，这是与整流相反的变换形式，完成直流 - 交流变换的电力电子装置称为逆变器。当逆变器的交流输出与电网相连时，其直流 - 交流的变换称为有源逆变；当逆变器的交流输出与电机等无源负载连接时，其直流 - 交流的变换称为无源逆变。有源逆变实际上是整流器的逆运行状态，主要用于电能的连网馈电，如交、直流调速四象限运行中的电能回馈和太阳能、风能等新能源的并网发电等；无源逆变主要用于交流调速、恒频恒压逆变电源、不间断供电电源 (UPS) 以及中频感应加热电源等。

3) 交流 - 交流 (AC - AC) 变换。交流 - 交流变换主要有交流调压和交 - 交变频两种基本形式，其中：交流调压只调节交流电压而频率不变，常应用于调温、调光、交流电动机的调压调速等场合；交 - 交变频则是频率和电压均可调节，完成交 - 交变频的电力电子装置也称为周波变换器，主要用于大功率交流变频调速等场合。

4) 直流 - 直流 (DC - DC) 变换。直流 - 直流变换主要完成直流电压幅值和极性的调节与变换，主要包括升压、降压和升 - 降压变换等。采用脉宽调制 (PWM) 技术实现直流 - 直流变换的电力电子装置一般称为斩波器。直流 - 直流变换常应用于开关电源、电动汽车、电池管理、升降压直流变换器等。

## 2. 电力电子技术的发展

电力电子器件对电力电子技术的发展起着决定性的作用。因此，电力电子技术的发展史是以电力电子器件的发展史为纲的。

在有电力电子器件以前，电能转换是依靠旋转机组来实现的。与这些旋转式的交流机组相比较，利用电力电子器件组成的静止的电能变换器，具有体积小、重量轻、无机械噪声和磨损、效率高、易控制、响应快及使用方便等优点。

1957年第一只晶闸管（也称可控硅）问世，因此，自20世纪60年代开始进入了晶闸管时代。

70年代以后，出现了通和断或开和关都能控制的全控型电力电子器件，如：门极可关断晶闸管（GTO）、双极型功率晶体管（BJT/GTR）、功率场效应晶体管（P-MOSFET）、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）等。

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。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：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。各种新颖、复杂的控制策略和方案得到实现，具有自诊断和智能化的功能，并将新的控制理论和方法应用在变换器中。

电力电子器件的发展趋势是大容量、高频率、易驱动、低损耗、小体积、模块化。

综上所述，微电子技术、电力电子器件和控制理论是现代电力电子技术的发展动力。

## 3. 电力电子技术的应用

电力电子技术是对电能的基本参数进行变换和控制的现代工业电子技术。近年来，它的应用范围已十分广泛。下面分几个主要的领域加以叙述。

### （1）一般工业应用

据不完全统计，在目前所有能源中，电能约占40%，电能中55%以上是通过各种电机消耗的，而为各种电机供电的电源都是电力电子装置。此外，电化学、电解、电镀等所需要的整流电源，冶金工业中的中频、高频感应加热电源，直流电弧炉电源等都是电力电子装置。

### （2）交通运输中的应用

电力机车、城市电车、地铁都采用电力电子装置进行调速和控制。电动汽车的电机也需要电力电子装置进行电力变换和控制。飞机、船舶需要多种不同性能的电源，也离不开电力电子技术。



### (3) 电力系统中的应用

电力电子技术在电力系统中的应用也非常广泛。直流输电具有输电距离远、调节性能好、过电压水平低、线路损耗小的优点,近年来得到迅速发展,我国也已投建了多条高压直流输电线路。直流输电送电端和受电端的换流阀都采用晶闸管变流装置。近年来发展起来的柔性交流输电技术也是依靠电力电子装置才得以实现的。无功补偿和谐波抑制对提高电力系统电能质量具有重要意义,其中各种补偿装置,如晶闸管控制电抗器、晶闸管投切电容器、静止无功发生器、有源电力滤波器等,都是电力电子装置。

### (4) 新能源中的应用

电力电子装置还将用于太阳能发电以及风力发电装置与电力系统的连接。

### (5) 家用电器中的应用

各种电子装置都需要不同电压等级的直流电源供电,近年来高频开关电源因其具有体积小、重量轻、效率高的特点,已经取代了传统的线性稳压电源。家用电器中,各种节能灯的镇流器、电视机、变频空调、变频冰箱等,都采用了电力电子技术。

总之,电力电子技术将渗透到航天、国防、工农业生产、交通、文教卫生、办公自动化乃至家庭的各个角落。随着元器件的发展,电力电子技术的应用领域也会有新的突破。

## 4. 本课程的任务与要求

电力电子技术是电气自动化、电气工程及其自动化等相关专业的主干课程之一。学习本课程时,要着重学习物理概念与基本分析方法,理论联系实际,尽量做到器件、电路、系统(包括控制技术)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、器件参数选择、电路参数计算与测量、调整以及故障分析等方面的实践能力。

通过本课程的学习应达到以下要求:

- 1) 熟悉和掌握常用电力电子器件的工作机理、特性和参数,能正确选择和使用它们。
- 2) 掌握整流电路、直流变换电路、逆变电路、交流变换电路的结构、工作原理、控制和波形分析方法。
- 3) 了解各种开关元件的控制电路、缓冲电路和保护电路。
- 4) 了解各种变换器的特点、性能指标和使用场合。
- 5) 掌握基本实验方法与训练基本实验技能。

# 第 1 章

## 电力电子器件

### 1.1 电力电子器件概述

#### 1.1.1 电力电子器件的概念

电力电子器件是可直接于电能主电路中实现电能变换或控制的电子器件。广义上电力电子器件可分为电真空器件和半导体器件两大类。

自 20 世纪 50 年代以来，真空管仅在频率很高（如微波）的大功率高频电源中还在使用，而电力半导体器件已取代了汞弧整流器、闸流管等电真空器件，成为绝对主力。因此，电力电子器件目前也往往专指电力半导体器件。电力半导体器件所采用的主要材料仍然是硅。

#### 1.1.2 电力电子器件的基本模型

电力电子器件可以抽象成图 1-1 所示的理想开关模型，它有三个电极，其中 A 和 B 代表开关的两个主电极，K 是控制开关通断的控制极。

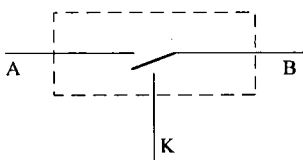


图 1-1 电力电子器件的理想开关模型

#### 1.1.3 电力电子器件的基本特性及分类

电力电子器件种类繁多，其结构特点、工作原理、应用范围各不相同，但是在电力电子电路中它们的功能相同，都是工作在通、断状态。

##### 1. 电力电子器件的基本特性

- 1) 电力电子器件一般都工作在开关状态。
- 2) 电力电子器件的开关状态由外电路（驱动电路）来控制。

3) 在工作中器件的功率损耗(通态、断态、开关损耗)很大,为防止器件温度过高而损坏,一般都要安装散热器。

## 2. 电力电子器件的分类

按照开关控制特性分为:

- 1) 半控型器件,例如晶闸管。
- 2) 全控型器件,例如 GTO (门极可关断晶闸管)、GTR (电力晶体管)、电力 MOSFET (电力场效应晶体管)、IGBT (绝缘栅双极晶体管)。
- 3) 不可控器件,例如电力二极管。

按照控制信号的特性分为:

- 1) 电压驱动型器件,例如 IGBT、MOSFET。
- 2) 电流驱动型器件,例如晶闸管、GTO、GTR。

根据驱动电路加在电力电子器件控制端和公共端之间的有效信号波形分为:

- 1) 脉冲触发型,例如晶闸管、GTO。
- 2) 电子控制型,例如 GTR、MOSFET、IGBT。

按照电力电子器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况分为:

- 1) 单极型器件,例如电力二极管、晶闸管、GTO、GTR。
- 2) 双极型器件,例如 MOSFET、IGBT。
- 3) 复合型器件,例如 MCT (MOS 控制晶闸管)。

## 3. 电力电子器件的优缺点

电力二极管:结构和原理简单,工作可靠。

晶闸管:承受电压和电流容量在所有器件中最高。

IGBT:开关速度快,开关损耗小,具有耐脉冲电流冲击的能力,通态压降较低,输入阻抗高,驱动功率小。缺点:开关速度低于电力 MOSFET,电压、电流容量不及 GTO。

GTO:电压、电流容量大,适用于大功率场合,其通流能力很强。缺点:电流关断增益很小,关断时门极负脉冲电流大,开关速度低,驱动功率大,驱动电路复杂,开关频率低。

MOSFET:开关速度快,输入阻抗高,热稳定性好,所需驱动功率小且驱动电路简单,工作频率高,不存在二次击穿问题。缺点:电容量小,耐压低,一般只适用于功率不超过 10 kW 的电力电子装置。

## 1.2 功率二极管

功率二极管又称电力二极管或半导体整流器,常作为整流元件,属于不可控

型器件。它不能用控制信号控制其导通和关断，只能由加在元件上电压的极性控制其通断。功率二极管是 20 世纪最早获得应用的电力电子器件，在中、高频整流和逆变以及低压高频整流的场合发挥着积极的作用。

### 1.2.1 功率二极管的结构和工作原理

#### 1. 元件结构

普通功率二极管由 N 型半导体和 P 型半导体结合构成的，如图 1-2 所示。在 PN 结的 P 型端引出的电极称为阳极 A，在 N 型端引出的电极称为阴极 K。

功率二极管主要有螺栓型和平板型两种外形结构，如图 1-3 (a)、图 1-3 (b) 所示。

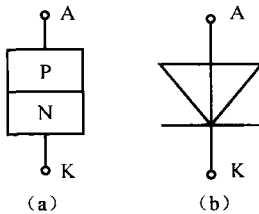


图 1-2 功率二极管的结构和电气符号

(a) 功率二极管的结构；(b) 功率二极管的电气符号

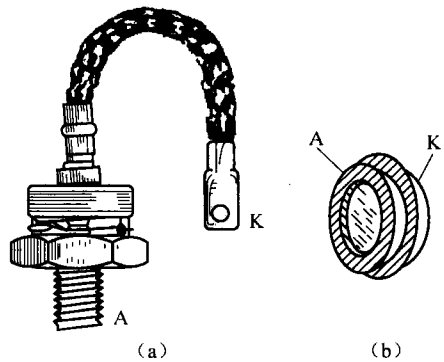


图 1-3 功率二极管的外形

(a) 螺栓型；(b) 平板型

#### 2. 工作原理

功率二极管的工作原理和普通二极管一样，当受到正向电压作用时，PN 结导通，正向压降很小；当二极管处于反向电压作用时，PN 结截止，仅有极小的漏电流流过二极管。

### 1.2.2 二极管的伏安特性

图 1-4 所示是电力二极管的伏安特性曲线。从图中可知电力二极管具有单向导电性。

第 I 象限为正向特性区，表明正向导通状态，呈现低阻态。这时管子两端的正向电压称为管压降。所加正向阳极电压小于门槛电压时，二极管只流很小的正向电流；当正向阳极电压大于门槛电压时，正向电流急剧增加，其管压降大约为 0.6 V。

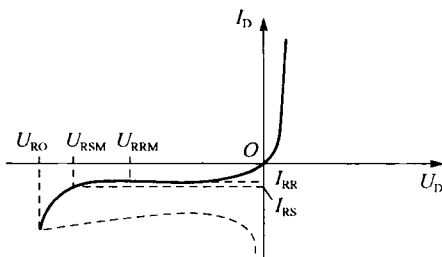


图 1-4 功率二极管的伏安特性曲线

第Ⅲ象限为反向特性区，表明反向阻断状态。当二极管加上反向电压时，开始只有极小反向漏电流，管子呈现高阻态，器件反向截止。随着反向电压的增加，反向电流有所增大。当反向电压增加到一定程度时，漏电流就会急剧增加，管子被击穿而损坏。其中  $U_{RO}$  为反向击穿电压。

### 1.2.3 功率二极管的主要参数

#### 1. 额定正向平均电流 $I_{dD}$ （额定电流）

$I_{dD}$  是指在规定的环境温度和标准散热条件下，管子允许长期通过的最大工频半波电流的平均值。元件标称的额定电流就是这个电流。在实际应用中应按照流过二极管实际波形与工频正弦半波平均电流的有效值（热效应）相等的原则来选取额定电流。

$$I_{dD} \geq (1.5 \sim 2) \frac{I_{DM}}{1.57} \quad (1-1)$$

式中的系数 1.5~2 是裕量系数。

#### 2. 正向压降 $U_D$ （管压降）

$U_D$  是指在规定的温度下，流过稳定的额定电流时所对应的正向压降。

#### 3. 反向重复峰值电压 $U_{RRM}$ （额定电压）

在额定温度条件下，元件反向伏安特性曲线的转折处对应的反向电压称为反向不重复峰值电压  $U_{RSM}$ ， $U_{RSM}$  的 80% 称为反向重复峰值电压  $U_{RRM}$ （额定电压），它是功率二极管能重复施加的反向最高电压。一般在选用功率二极管时，以其在电路中可能承受的反向峰值电压的 2~3 倍来选择额定电压。

### 1.2.4 功率二极管的型号和选择原则

#### 1. 功率二极管的型号

国产普通功率二极管的型号规定如图 1-5 所示。

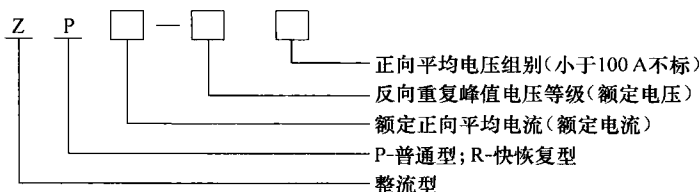


图 1-5 电力二极管型号

## 2. 功率二极管的选择原则

### (1) 选择额定正向平均电流 $I_{\text{dD}}$ 的原则

在规定的室温和冷却条件下,要求所选管子的额定电流  $I_{\text{dD}}$  对应的有效值  $I_{\text{DM}}$  大于管子在电路中实际可能通过的最大电流有效值  $I_{\text{Dm}}$ , 即  $I_{\text{DM}} > I_{\text{Dm}}$ 。所以首先要根据电路结构确定  $I_{\text{Dm}}$ , 从而求得  $I_{\text{DM}}$ ,

$$I_{\text{dD}} = (1.5 \sim 2) \frac{I_{\text{DM}}}{1.57} \quad (1-2)$$

### (2) 选择额定电压 $U_{\text{RRM}}$ 的原则

选择功率二极管的反向重复峰值电压等级(额定电压)应为管子在所工作的电路中可能承受的最大反向电压  $U_{\text{DM}}$  的 2~3 倍, 即:

$$U_{\text{RRM}} = (2 \sim 3) U_{\text{DM}} \quad (1-3)$$

式中,  $U_{\text{DM}}$  为电路中功率二极管可能承受的最大反向电压。

## 1.2.5 功率二极管的其他派生器件

### 1. 快恢复二极管

快恢复二极管的特点是恢复时间短,尤其是反向恢复时间短,一般在  $5 \mu\text{s}$  以内,用于反向恢复时间短的电路中,如用于与可控开关配合的高频电路中。

### 2. 肖特基二极管

肖特基二极管是以金属和半导体接触形成的二极管,其反向恢复时间更短,一般为  $10 \sim 40 \text{ ns}$ , 其开关损耗和正向导通损耗都很小。

## 1.3 晶闸管

由于功率二极管是不可控器件,当输入的交流电压一定时,其输出的平均整流电压是固定的,不能调节。晶闸管是可控器件,能够满足调压要求。晶闸管具有体积小、效率高、动作迅速、操作方便等特点,因而在电压、电流定额大的场

合得到了广泛的应用。

### 1.3.1 晶闸管的结构

晶闸管是一种具有3个PN结的大功率4层半导体器件，其结构和电气符号如图1-6所示。

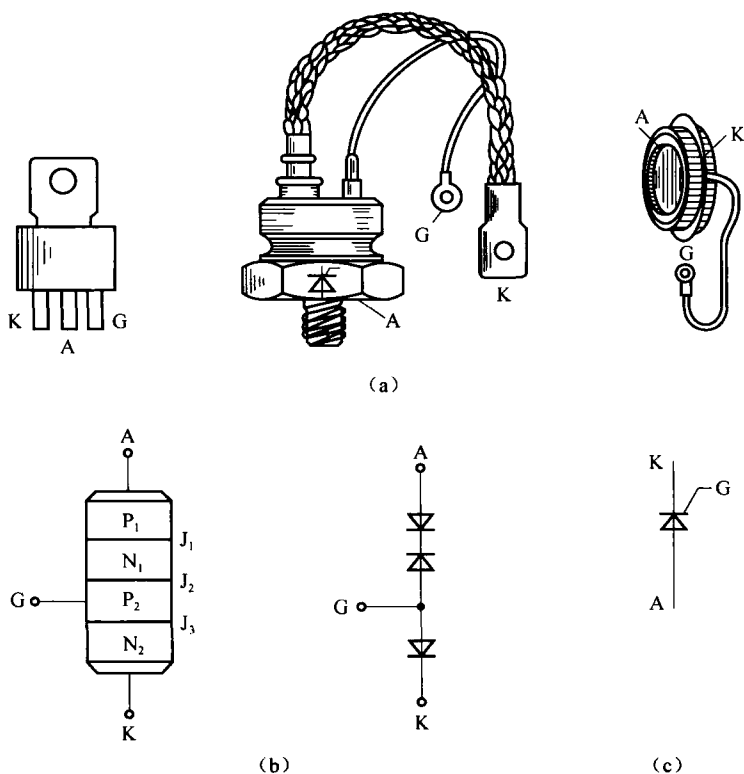


图1-6 晶闸管的外形、结构和电气符号

(a) 外形；(b) 结构；(c) 电气符号

晶闸管常用的有螺栓式、平板式两种。图1-6(a)示出了塑封式、螺栓式和平板式晶闸管的外形。

晶闸管的结构如图1-6(b)所示。由P<sub>1</sub>层和N<sub>2</sub>层引出的两个电极，分别为阳极A和阴极K。由P<sub>2</sub>层引出的电极是门极G，也称控制极。从晶闸管的结构图可知，晶闸管的内部可以看成是由3个二极管连接而成的。晶闸管的电气符号如图1-6(c)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。螺栓式晶闸管是靠阳极（螺栓）拧紧在铝制散热器上而自然冷却；平板式晶闸管由两个相互绝

缘的散热器夹紧晶闸管，靠风冷却。和功率二极管一样，额定电流大于 200 A 的晶闸管采用平板式。此外，晶闸管的冷却方式还有水冷、油冷等。

### 1.3.2 晶闸管的导通关断原理

晶闸管内部是 PNP 4 层结构，可以看成是由一个 PNP 型和一个 NPN 型晶体管连接而成的等效电路，连接形式如图 1-7 所示。

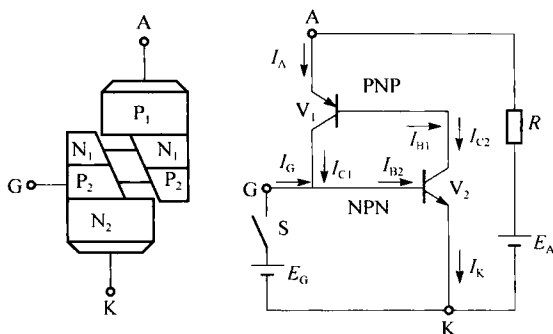


图 1-7 晶闸管导通、关断原理的等效电路

晶闸管的阳极 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。当晶闸管阳极承受正向电压，控制极也加正向电压时，晶体管  $V_2$  处于正向偏置， $E_G$  产生的控制极电流  $I_G$ ，就是  $V_2$  的基极电流  $I_{B2}$ ， $V_2$  的集电极电流  $I_{C2} = \beta_2 I_G$ 。而  $I_{C2}$  又是晶体管  $V_1$  的基极电流  $I_{B1}$ ， $V_1$  的集电极电流  $I_{C1} = \beta_1 I_{C2} = \beta_1 \beta_2 I_G$ ，( $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别是  $V_1$  和  $V_2$  的电流放大系数)。电流  $I_{C1}$  又流入  $V_2$  的基极，再一次被放大。这样循环下去，形成了强烈的正反馈，使两个晶闸管很快达到饱和导通，这就是晶闸管的导通过程。导通后，晶闸管上的压降很小，电源电压几乎全部加在负载上，晶闸管中流过的电流即负载电流。

在晶闸管导通之后，它的导通状态完全依靠管子本身的正反馈作用来维持，而  $I_{C1} \geq I_G$ ，即使控制极电流消失  $I_G = 0$ ， $I_{B2}$  仍足够大，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。要想关断晶闸管，必须将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小于维持电流。可采用的方法有：将阳极电源断开，改变晶闸管的阳极电压的方向，即在阳极和阴极间加反向电压。

### 1.3.3 晶闸管的特性

#### 1. 晶闸管的伏安特性

晶闸管的伏安特性是指晶闸管阳、阴极间电压  $U_A$  和阳极电流  $I_A$  之间的关系



特性，如图1-8所示。

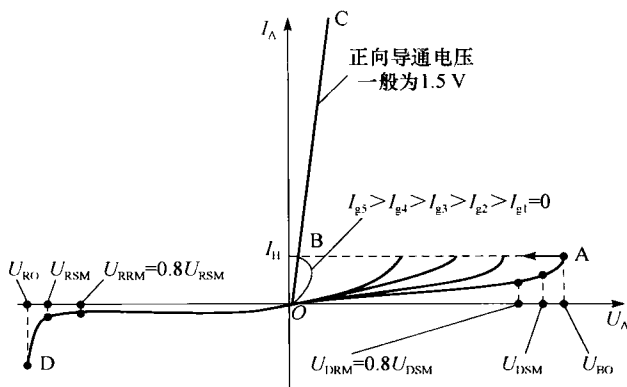


图1-8 晶闸管的伏安特性曲线

图1-8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；

$U_{DSM}$ 、 $U_{RSM}$ ——正、反向断态不重复峰值电压；

$U_{BO}$ ——正向转折电压；

$U_{RO}$ ——反向击穿电压。

晶闸管的伏安特性包括正向特性（第Ⅰ象限）和反向特性（第Ⅲ象限）两部分。

### (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  $I_{g1} = 0$  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；当正向阳极电压增加至正向转折电压  $U_{BO}$  时，漏电流突然剧增，特性从正向阻断状态突变为正向导通状态。

### (2) 反向特性

晶闸管的反向特性是指晶闸管的反向阳极电压与阳极漏电流的伏安特性。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，造成晶闸管的损坏。

## 2. 晶闸管的开关特性

晶闸管的开关特性如图1-9所示。

晶闸管的开通不是瞬间完成的，开通时阳极与阴极两端的电压有一个下降过程，而阳极电流的上升也有一个过程，这个过程可分为两段。第一段为延迟时间