



普通高等教育“十二五”规划教材

# 电力电子技术与 MATLAB仿真 (第二版)

周渊深 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

# 电力电子技术与 MATLAB仿真 (第二版)

主编 周渊深

编写 朱希荣 宋永英 周玉琴

主审 文俊



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书从电力电子技术应用的角度出发, 简明扼要地介绍了常用的不控型、半控型和全控型电力电子器件; 重点介绍了交流—直流变换、直流—交流变换、交流—交流变换、直流—直流变换等电力电子变流电路。为强化应用型本科院校教学中的实践技能培养, 本书介绍了基于 MATLAB 的图形化仿真实验内容, 基本的教学内容均配有仿真实验内容; 还安排了器件测试、实物实验等实训内容; 本书特色是提供了与理论分析波形相对应的仿真实验波形和实物实验波形, 这有利于加强学生的感性认识。全书内容深入浅出, 简明扼要, 实用性较强。

本书既可作为普通本科、应用型本科、民办本科学校电类专业教材, 也可供从事电力电子技术工作的工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术与 MATLAB 仿真/周渊深主编. —2 版.  
—北京: 中国电力出版社, 2014. 8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 6067 - 9

I. ①电… II. ①周… III. ①电力电子技术—计算机仿真—Matlab 软件—高等学校—教材 IV. ①TM1 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 135994 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2007 年 8 月第一版

2014 年 8 月第二版 2014 年 8 月北京第五次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.75 印张 561 千字

定价 46.00 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

## 目 录

前言

0 绪论 .....	1
第1章 电力电子器件 .....	6
1.1 功率二极管 .....	6
1.2 晶闸管 .....	8
1.3 门极可关断晶闸管(GTO) .....	22
1.4 电力晶体管(GTR) .....	24
1.5 功率场效应晶体管(P-MOSFET) .....	27
1.6 绝缘栅双极型晶体管(IGBT) .....	30
1.7 其他新型电力电子器件 .....	33
1.8 电力电子器件的驱动 .....	35
1.9 电力电子器件的保护 .....	40
1.10 电力电子器件的缓冲电路 .....	41
1.11 典型电力电子器件的MATLAB仿真模型 .....	42
1.12 典型电力电子器件的测试实验 .....	51
习题 .....	55
第2章 交流—直流变换电路及其仿真 .....	57
2.1 单相可控整流电路 .....	57
2.2 三相半波可控整流电路 .....	73
2.3 三相桥式全控整流电路 .....	78
2.4 三相桥式半控整流电路 .....	84
2.5 带平衡电抗器的双反星形大功率整流电路 .....	85
2.6 整流电路的谐波和功率因数 .....	90
2.7 变压器漏抗对整流电路的影响 .....	95
2.8 晶闸管相控电路的驱动控制 .....	97
2.9 PWM整流器 .....	109
2.10 交流—直流变换电路的MATLAB仿真研究 .....	116
习题 .....	162
第3章 直流—交流变换电路及其仿真 .....	167
3.1 逆变的概念 .....	167
3.2 有源逆变电路 .....	167
3.3 无源逆变(变频)电路 .....	170
3.4 脉宽调制(PWM)逆变器技术 .....	184

3.5 直流—交流变换电路的 MATLAB 的仿真研究 .....	199
习题 .....	237
<b>第 4 章 交流—交流变换电路及其仿真</b> .....	239
4.1 概述 .....	239
4.2 交流调压电路 .....	239
4.3 交—交变频器 .....	252
4.4 矩阵变换器 .....	257
4.5 交流—交流变换电路的 MATLAB 仿真研究 .....	261
习题 .....	278
<b>第 5 章 直流—直流变换电路及其仿真</b> .....	280
5.1 直流斩波器 .....	280
5.2 单管非隔离直流斩波器 .....	281
5.3 变压器隔离的直流—直流变换器 .....	291
5.4 直流—直流变换电路的 MATLAB 仿真研究 .....	294
习题 .....	314
<b>附录 A 电力电子技术课程设计</b> .....	317
<b>附录 B 电力电子技术实验指导书</b> .....	339
<b>参考文献</b> .....	358

## 0 绪 论

电力电子技术是一门建立在电子学、电力学和控制学三个学科基础上的交叉学科,它横跨“电子”、“电力”和“控制”三个领域,主要研究各种电力电子器件,以及由这些电力电子器件所构成的各种变流电路或变流装置,来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。

电力电子技术课程的主要内容包括三个方面:电力电子器件、电力电子变流技术和控制技术。

本课程在讨论电力电子器件时,着重介绍电力电子器件的基本工作原理、特性和参数。主要了解如何合理地选择和使用电力电子器件来构成各种变流装置,而对器件的制造工艺及载流子运动的物理过程等细节不加详细讨论;在讨论电力电子变流技术时,则围绕交流一直流、直流—交流、交流—交流、直流一直流四种电能变换方式,研究由电力电子器件组成的变流装置的主电路、控制电路及其他辅助电路。

### 1. 电力电子器件的分类

用作电能变换的大功率电力电子器件与信息处理用电子器件不同,它一方面必须承受高电压、大电流,另一方面是以开关模式工作,因此通常被称为电力电子开关器件。电力电子器件有不同的分类方式,其中按照开通、关断控制方式则可分为三大类型。

(1) 不可控型:这类器件一般为二端器件,一端是阳极,另一端是阴极。其开关性能取决于施加于器件阳、阴极间的电压极性。加正向电压导通,反向电压关断,流过器件的电流是单方向的。由于其开通和关断不能按需要控制,故这类器件称为不可控型器件,常见的有大功率二极管、快速恢复二极管及肖特基二极管等。

(2) 半控型:这类器件是三端器件,除阳极和阴极外,还增加了一个控制门极。半控型器件也具有单向导电性,但开通不仅需在其阳、阴极间施加正向电压,而且还必须在门极和阴极间输入正向控制电压,以控制其开通。然而这类器件一旦开通,就不能再通过控制门极来控制关断,只能从外部改变加在阳、阴极间的电压极性或强制使阳极电流减小至零才能使其关断,所以把它们称为半控型。这类器件主要是晶闸管及其派生器件(如双向、逆导晶闸管等)。

(3) 全控型:这类器件也是带有控制端的三端器件,控制端不仅可控制其开通,而且也能控制其关断,故称全控型。由于这类器件仅靠控制器件自身即可关断,因此被称为自关断器件。这类器件种类较多,工作机理也不尽相同,在现代电力电子技术应用中起着越来越重要的作用。属于这一类的代表器件有大功率晶体管(GTR)、门极可关断晶闸管(GTO)、功率场效应晶体管(P-MOSFET)和绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等。

按电力电子器件的驱动性质可以将器件分为电压型和电流型器件。电流型器件必须有足够的驱动电流才能使器件导通,因而一般需要较大功率的驱动电路,这类器件有GTR、GTO和普通晶闸管(Th)等;电压型器件的导通只需足够的电压和很小的驱动电流即可,因而电压型器件仅需很小的驱动功率,这类器件有IGBT、P-MOSFET和场控晶闸管



MCT 等。

回顾 40 多年来电力电子器件的发展过程,大体可分为以下四个阶段。

第一阶段是以整流管、普通晶闸管为代表的发展阶段。这一阶段的半导体器件在低频、大功率变流领域中得到广泛应用,很快便取代了汞弧整流器。

第二阶段是以大功率晶体管 (GTR)、门极可关断晶闸管 (GTO) 等全控器件为代表的发展阶段。这一阶段的半导体器件属于电流型控制模式,它们的应用使得变流器的高频化得以实现。

第三阶段是以功率场效应晶体管 (P-MOSFET) 和绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 等电压型全控器件为代表的发展阶段,此时的半导体器件可直接用 IC (集成控制器) 进行驱动,高频特性更好,电力电子器件制造技术已进入了和微电子技术相结合的初级阶段。

第四阶段是以 PIC 等功率集成电路为代表的发展阶段,目前正处在发展初期。这一阶段中,电力电子技术已经与微电子技术紧密结合在一起,所使用的半导体器件是将全控型电力电子器件与驱动电路、控制电路、传感电路、保护电路、逻辑电路等集成在一起的高度智能化的功率集成电路,它实现了器件与电路的集成,强电与弱电的集成,成为机电之间的智能化接口、机电一体化的基础单元。预计 PIC 的发展将会使电力电子技术实现第二次革命,进入全新的智能化时代。

## 2. 电力电子变流技术

以电力电子器件为核心,通过不同形式的电路结构和控制方式来实现对电能的转换和控制,这就是电力电子变流技术。

(1) 变流电路的换流方式。变流电路的研究内容之一是确定主电路的结构和对变流电路进行综合性能分析,内容之二是变流电路的换流过程。变流电路工作时,各开关器件轮流导通向负载传递电能,因此流向负载的电能一定要从一个或一组元件向另一个或另一组元件转移,这个过程叫做换流或换相。变流电路主要有以下三种换流方式:

电源换流——通过改变电源电压极性向导通元件提供反向电压使其关断。这种换流方式只适用于交流电源供电,以不控或半控开关器件组成的变流电路,如晶闸管整流器等。

负载换流——由负载电压或电流极性改变向导通元件施加反向电压使其关断。它用于直流供电、负载可振荡的直流—交流变换电路。

强迫换流——由外部电路向导通元件强行提供反向电压,或从导通元件控制极施加关断信号迫使其关断。这种方式常见于晶闸管直流—直流变换电路和所有斩波变换电路。

(2) 电能变换的基本类型。电能变换的基本类型有交流—直流变换 (AC/DC)、直流—交流变换 (DC/AC)、交流—交流变换 (AC/AC)、直流/直流变换 (DC/DC)。在某些变流装置中,可能同时包含两种以上变换。

1) AC/DC 变换 (变流装置称为整流器): 把交流电变换成固定或可调的直流电即为 AC/DC 变换。传统的 AC/DC 变换是利用晶闸管元件和相控技术,依靠电源电压进行换流的。目前工业中应用的大多数变流装置都是属于这类整流装置。其特点是控制简单,运行可靠,适宜大功率应用。相控整流器存在的问题是有谐波,对电网有较严重的影响。

2) DC/AC 变换 (变流装置称为逆变器): 把直流电变换成频率固定或可调的交流电,通常被称为逆变。按电源性质可分为电压型和电流型;按控制方式可分为六拍 (六阶梯) 方波逆变器、PWM 逆变器和谐振直流开关 (软性开关) 逆变器。按换流性质可分为依靠电源

换流的有源逆变和由自关断元件构成的无源逆变。逆变装置主要被用于机车牵引、电动车辆和其他交流电动机调速、不间断电源(UPS)和感应加热。

3) AC/AC 变换(变流装置称为交—交变频器和交流调压器):把频率、电压固定或变化的交流电直接变换成频率、电压可调或固定的交流电,即为 AC/AC 变换,传统的交—交变频采用晶闸管相控技术,交—交变频器的新发展是基于 PWM 变换理论的矩阵式变换器。

4) DC/DC 变换(变流装置称为直流斩波器):把固定或变化的直流电压变换成可调或恒定的直流电压即为 DC/DC 变换器。按输出电压与输入电压的相对关系可分为降压式、升压式和升降压式。DC/DC 变换器被广泛地用于计算机电源、各类仪器仪表、直流电机调速及金属焊接等。

谐振型开关技术是 DC/DC 变换的新发展,可减小变换器体积、质量并提高可靠性。这种变换器有效地解决了开关损耗和电磁干扰问题,是 DC/DC 变换的主要发展方向。

(3) 电力电子变流技术控制方式。控制电路的主要功能是为变流器中的功率器件提供门极(控制极)驱动信号,从而实现所需的电能变换与控制。变流电路的控制方式一般都按器件开关信号与控制信号间的关系分类。

相控式:器件的开通信号相位,即导通时刻的相位,受控于控制信号幅度的变化。晶闸管相控整流和交流调压电路均采用这种方式,通过改变导通相位角以改变输出电压的大小。

频控式:用控制电压的幅值变化来改变器件开关信号的频率,以实现器件开关工作频率的控制。这种控制方式多用于直流—交流变换电路中。

斩控式:器件以远高于输入、输出电压工作频率的开关频率运行,利用控制电压(即调制电压)的幅值来改变一个开关周期中器件导通占空比,如 PWM,从而实现电能的变换与控制。

### 3. 电力电子变流技术的发展

变流技术的发展已经历了以下三个阶段。

(1) 第一阶段是电子管、离子管(闸流管、汞弧整流器、高压汞弧阀)的发展与应用阶段,此时的变流技术属于整流变换,只是变流技术的一小部分。

(2) 第二阶段是硅整流管、晶闸管的发展与应用阶段。随着器件制造水平的不断提高,变流装置保护措施的不断完善,使得硅整流管、晶闸管在变流装置中的应用技术日趋成熟。

(3) 第三阶段是全控型电力半导体器件的发展与应用阶段,是半导体电力变流器向高频化发展的阶段,也是变流装置的控制方式由移相控制(Phase Shift Control, PSC)向时间比率控制(Time Ratio Control, TRC)发展的阶段。

TRC 控制方式一般有三种方式,即脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)、脉冲频率调制(Pulse Frequency Modulation, PFM)和混合调制(PWM+PFM)。PWM 方式因为调制频率固定,即调制周期  $T$  恒定(或基本不变),通过改变控制脉冲的占空比进行变换电路的调节,从而使滤波电路的设计比较简单,所以常用的 TRC 是 PWM 方式。

第三阶段的发展是随着全控型器件的发展而逐渐展开的。

(1) GTO、GTR 等电流型全控器件的应用使逆变、变频、斩波变换电路的结构大为简化,变换频率可以提高到 20kHz 左右,为电气设备的高频化、小型化奠定了基础。其缺点是由于 GTO、GTR 是电流型控制器件,所需要的控制功率大。

(2) 以 P-MOSFET 和 IGBT 为代表的电压型全控器件和 PWM 控制技术的应用,使变



流装置的高频特性更好。但是随着变换频率的不断提高, PWM 电路的缺点便逐渐暴露出来。由于 PWM 电路属硬开关电路, 变换过程中过高的  $du/dt$ 、 $di/dt$  会产生严重的电磁干扰, 使电力电子设备的电磁兼容问题变得突出; 另一方面器件开通与关断损耗严重制约了变换频率的进一步提高。

(3) 建立在谐振、准谐振原理之上的软开关电路, 即所谓的零电压开关 (ZVS) 与零电流开关 (ZCS) 电路问世。它是利用谐振进行换相的一种新型变流电路, 实现了器件在零电压下的导通和零电流下的关断, 从而大大降低了器件的开关损耗, 这样一来, TRC 技术加软开关技术使得变换频率进一步得到提高。之后, 功率 MOSFET、IGBT 等电压型控制的混合型全控器件的应用真正实现了高频化, 使变换频率达到  $100\sim 500\text{kHz}$  甚至更高, 为电力电子设备更加高频化、小型化创造了条件。时至今日, 晶闸管应用领域的绝大部分已经或即将被功率集成器件所取代, 只是在大功率、特大功率的电化、电冶电源以及与电力系统有关的高压直流输电 (HVDC)、静止式动态无功功率补偿装置 (SVC)、串联可控电容补偿装置 (SCC) 等应用领域, 晶闸管暂时还不能被取代。

#### 4. 电力电子变流技术的应用

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, 变流技术得到了迅猛发展, 经过变流技术处理的电能在整个国民经济的耗电量中所占比例越来越大, 成为其他工业技术发展的重要基础。电力电子技术应用非常广泛, 下面举例概括说明。

(1) 电源: 不间断电源 (UPS)、电解电源、电镀电源、开关电源、航空电源、通信电源; 交流电子稳压电源、脉冲功率电源; 电力牵引及传动控制 (如电力机车、电传动内燃机车、矿井提升机、轧钢机传动) 用电源。

(2) 电力系统应用: 高压直流输电 (HVDC)。在输电线路的输送端将工频交流变为直流, 在接受端再将直流变回工频交流。

(3) 有源滤波器: 由于电力电子装置的应用与普及, 导致电网的谐波问题越来越严重。传统的无源滤波器由于其滤波性能较差, 难以应付日益严重的电网“公害”。人们从电力电子学本身找到了解决的途径, 这就是有源滤波器。它主要是由电压源型或电流源型 PWM 变流器和一个基准器构成的谐波发生器。目的是产生大范围动态谐波和无功功率, 重新“修补”电网波形。因此, 有源滤波器不但可用来滤波, 还可作为功率补偿器、电压稳定器及不对称负载的电压调节器。

(4) 新能源利用: 电力电子装置还将用于太阳能发电及风力发电装置与电力系统的连接。

(5) 节能: 采用电力电子装置实现电动机调速, 可以达到很高的效率。

(6) 家用电器: 种类繁多的家用电器, 小至一台调光灯具、高频荧光灯具, 大至通风取暖设备、微波炉及众多的电动机驱动设备, 都离不开电力电子变流电路。各种 PWM 变流设备及专用功率集成电路将被广泛地用于现代化的家庭中, 如家用的电冰箱及冰柜、暖气空调机、电子装置 (个人电脑、其他家用电器) 等。

(7) 电动汽车和电动自行车。

(8) 照明: 白炽灯发光效率低、热损耗大, 因此现在广泛采用了日光灯。但是, 日光灯必须要有扼流圈 (电感) 启辉, 全部电流要流过扼流圈, 无功电流大, 不能达到有效节能。近年来, 电子镇流器的出现, 较好地解决了这个问题。电子镇流器是一个 AC—DC—AC 变

换器。如用于 20~40W 的日光灯，其体积要比相应功率的扼流圈小，可以减少无功电流和有功损耗。据美国统计，每盏灯每年可节电 30~70 美元，可见其节能效益。

综上所述，电力电子技术已经渗透到航天、国防、工农业生产、交通、文教卫生、办公自动化乃至家庭的任何角落。伴随着电力电子器件与变流电路的进步，电力电子技术的应用领域也将会有新的突破。

#### 5. 本课程的任务与要求

电力电子变流技术是电气工程与自动化专业的专业基础课。内容包括电力电子器件、电路、控制、应用几个方面，但应以电路为主。电力电子器件讲解的内容主要包括常用器件的基本工作机理、特性、参数及它们的驱动和保护方法，目的是为了应用这些电力电子器件组成电路，故应注意掌握器件外部特性及极限额定参数的应用。变流电路则主要研究由不同电力电子器件所构成的各种典型变流电路的工作原理、主电路拓扑结构、分析方法、设计计算的基本手段、主电路开关元件的选择方法。控制要研究的是各种典型触发、驱动以及必要的辅助电路的工作原理和特点。

学习电力电子变流技术课程的基本要求是：

- (1) 熟悉和掌握常用电力电子器件的工作原理、特性和参数，能正确选择和使用它们。
- (2) 熟悉和掌握各种基本变换电路的工作原理，掌握其分析方法、工作波形分析和变换器电路的初步设计计算。
- (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、训练基本实验技能。

## 第1章 电力电子器件

本章重点介绍功率二极管、晶闸管、双向晶闸管的结构、工作原理、特性和参数以及选用原则；简要介绍可关断晶闸管（GTO）、电力晶体管（GTR）、功率场效应晶体管（P-MOSFET）、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）的结构、工作原理、特性和参数；对新型电力电子器件的结构和工作原理也将简要介绍；另外还安排了电力电子器件测试、仿真软件中的器件介绍等实训内容。

### 1.1 功率二极管

功率二极管（Power Diode）又称电力二极管，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，只能由加在元件阳阴极上电压的极性控制其通断。它可用于不需要调压的整流、感性负载的续流以及用作限幅、钳位、稳压等。功率二极管还有许多派生器件，如快恢复二极管、肖特基整流二极管等。

#### 1.1.1 功率二极管的结构和工作原理

##### 1. 元件结构、电气符号和外形

(1) 元件结构和电气符号。普通功率二极管的内部由一个面积较大的PN结和两端的电极及引线封装而成。在PN结的P型端引出的电极称为阳极A（Anode），在N型端引出的电极称为阴极K（Cathode）。功率二极管的结构和电气符号如图1-1（a）、（b）所示。

(2) 元件外形。功率二极管主要有螺栓型和平板型两种外形结构，如图1-2所示。一般而言，额定电流200A以下的器件多数采用螺栓型，200A以上的器件则多数采用平板型。若将几个功率二极管封装在一起，则组成模块式结构。

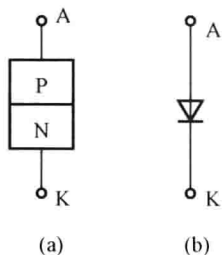


图 1-1 功率二极管的结构和电气符号

(a) 功率二极管的结构；(b) 功率二极管的电气符号

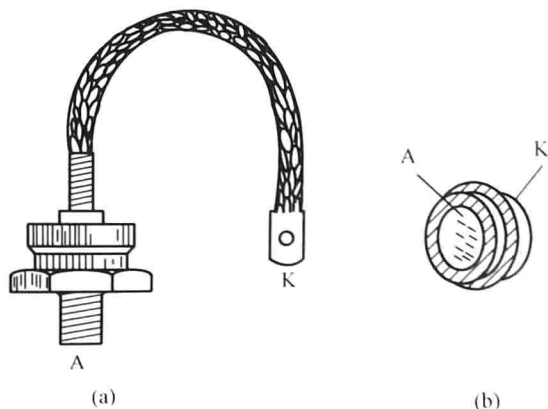


图 1-2 功率二极管的外形

(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，当二极管处于正向电压作用时，PN结导通，正向管压降很小；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。

### 1.1.2 功率二极管的伏安特性

功率二极管的伏安特性是指功率二极管阳阴极间所加的电压与流过阳阴极间电流的关系特性。功率二极管的伏安特性曲线如图 1-3 所示。

功率二极管的伏安特性曲线位于第 I 象限和第 III 象限。

(1) 第 I 象限特性为正向特性, 表明正向导通状态。当所加正向阳极电压小于门坎电压时, 二极管只流过很小的正向电流; 当正向阳极电压大于门坎电压时, 正向电流急剧增加, 此时阳极电流的大小完全由外电路决定, 二极管呈现低阻态, 其管压降大约为 0.6V。

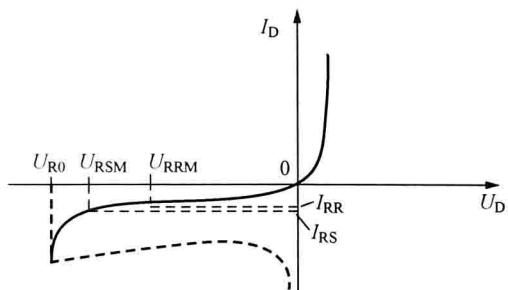


图 1-3 功率二极管的伏安特性曲线

(2) 第 III 象限为反向特性区, 表明反向阻断状态。当二极管加上反向阳极电压时, 开始只有极小的反向漏电流, 管子呈现高阻态。随着反向电压的增加, 反向电流有所增大。当反向电压增大到一定程度时, 漏电流就会急剧增加而管子被击穿。击穿后的二极管若为开路状态, 则管子两端电压为电源电压; 若二极管击穿成短路状态, 则管子电压将很小, 而电流却较大, 如图 1-3 中虚线所示。所以必须对反向电压及电流加以限制, 否则二极管将被击穿而损坏。其中  $U_{R0}$  为反向击穿电压。

### 1.1.3 功率二极管的主要参数

#### 1. 正向平均电流 $I_{dD}$ (额定电流)

功率二极管的正向平均电流  $I_{dD}$  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。实际应用中, 功率二极管所流过的最大有效值电流为  $I_{DM}$ , 则其额定电流一般选择为

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

式中的系数 1.5~2 是安全系数。

#### 2. 正向压降 $U_D$ (管压降)

正向压降  $U_D$  是指在规定的温度下, 流过某一稳定正向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)

在额定结温条件下, 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两倍来选择额定电压。

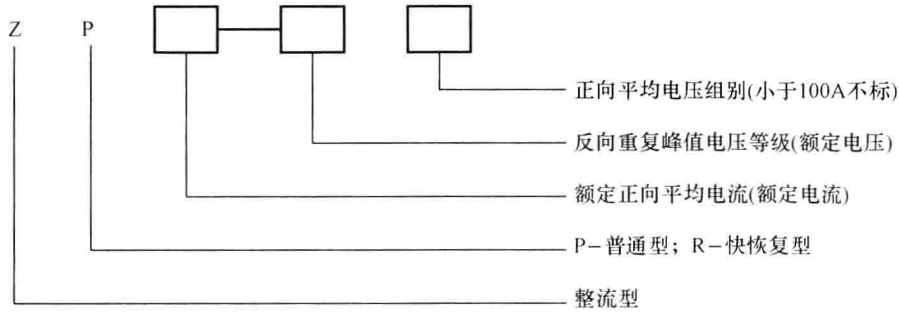
#### 4. 反向恢复时间

反向恢复时间是指功率二极管从正向电流降至零起到恢复反向阻断能力为止的时间。

### 1.1.4 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下:



## 2. 功率二极管的选择

(1) 选择额定正向平均电流  $I_{dD}$  的原则。在规定的室温和冷却条件下，只要所选管子的额定电流  $I_{dD}$  对应的有效值  $I_{DM}$  大于管子在实际电路中可能通过的最大电流有效值  $I_{Dm}$  即可，即  $I_{DM} > I_{Dm}$ 。

首先根据电路结构确定  $I_{Dm}$ ，从而求得  $I_{DM}$ ，再由  $I_{dD} = (1.5 \sim 2) \frac{I_{DM}}{1.57}$  求得  $I_{dD}$ ，然后取相应标准系列值。

(2) 选择额定电压  $U_{RRM}$  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）的原则，应为管子在所工作的电路中可能承受的最大反向电压  $U_{DM}$  的 2~3 倍，即

$$U_{RRM} = (2 \sim 3)U_{DM}$$

式中： $U_{DM}$  为电路中可能承受的最大反向电压。然后取相应标准系列值。

### 1.1.5 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  $5\mu s$  以内，可用于要求很小反向恢复时间的电路中，例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势垒为基础的二极管，其反向恢复时间更短，一般为  $10 \sim 40 ns$ 。其开关损耗和正向导通损耗都很小。

## 1.2 晶 闸 管

在实际应用中，往往要求直流电压能够进行调节，即具有可控性。晶闸管是一种能够通过控制信号控制其导通，但不能控制其关断的半控型器件。由于其导通时刻可控，满足了调压要求。它具有体积小、效率高、动作迅速、操作方便等特点，因而在生产实际中获得了广泛的应用。晶闸管也有许多派生器件，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（LATT）等。

### 1.2.1 晶闸管的结构、电气符号和外形

#### 1. 元件结构和电气符号

晶闸管是一种大功率半导体器件，它的内部是 PNP 的四层结构，形成了三个 PN 结（J1, J2, J3），并对外引出三个电极，晶闸管的结构如图 1-4（a）所示。由最外部 P1 层和 N2 层引出的两个电极，分别为阳极 A（Anode）和阴极 K（Cathode）。由中间 P2 层引出的电极是门极 G（Gate），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

三个二极管连接而成的。晶闸管的电气符号如图 1-4 (b) 所示。

## 2. 元件外形

元件外形如图 1-4 (c) 所示, 晶闸管的外形有塑封式、螺栓式、平板式和模块式等, 常用的有螺栓式、平板式两种。图 1-4 (c) 给出了塑封式、螺栓式和平板式晶闸管的外形。

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, 可自然冷却; 平板式晶闸管由两个相互绝缘的散热器夹紧晶闸管, 靠冷风冷却。和功率二极管一样, 额定电流大于 200A 的晶闸管采用平板式外形结构。此外, 晶闸管的冷却方式还有水冷、油冷等。

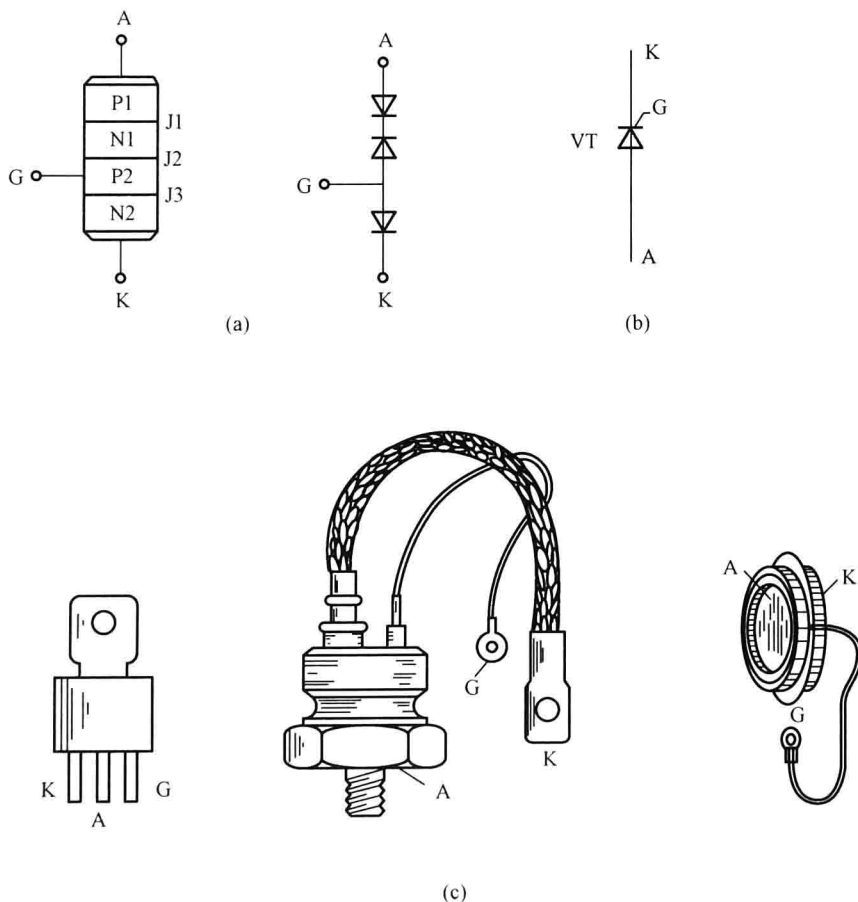


图 1-4 晶闸管的结构、电气符号和外形  
(a) 结构; (b) 电气符号; (c) 外形

## 1.2.2 晶闸管的工作原理

### 1. 晶闸管的导通、关断实验

为了说明晶闸管的工作原理, 先做一个实验。实验电路如图 1-5 所示, 阳极电源  $E_A$  通过电位器  $R_P$  连接负载  $R_L$  (白炽灯) 接到晶闸管的阳极 A 与阴极 K, 组成晶闸管的主电路。流过晶闸管阳极的电流称阳极电流  $I_A$ , 晶闸管阳极和阴极两端的电压称阳极电压  $U_A$ 。门极电源  $E_G$  通过电阻  $R_g$  连接晶闸管的门极 G 与阴极 K 组成控制电路也称触发电路。流过门极的电流称门极电流  $I_G$ , 门极与阴极之间的电压称门极电压  $U_G$ 。用灯泡来观察晶闸管的通断情况。该实验分九个步骤进行。

第一步: 按图 1-5 (a) 接线, 阳极和阴极之间加反向电压, 门极和阴极之间不加电压,



指示灯不亮, 晶闸管不导通。

第二步: 按图 1-5 (b) 接线, 阳极和阴极之间加反向电压, 门极和阴极之间加反向电压, 指示灯不亮, 晶闸管不导通。

第三步: 按图 1-5 (c) 接线, 阳极和阴极之间加反向电压, 门极和阴极之间加正向电压, 指示灯不亮, 晶闸管不导通。

第四步: 按图 1-5 (d) 接线, 阳极和阴极之间加正向电压, 门极和阴极之间不加电压, 指示灯不亮, 晶闸管不导通。

第五步: 按图 1-5 (e) 接线, 阳极和阴极之间加正向电压, 门极和阴极之间加反向电压, 指示灯不亮, 晶闸管不导通。

第六步: 按图 1-5 (f) 接线, 阳极和阴极之间加正向电压, 门极和阴极之间也加正向电压, 指示灯亮, 晶闸管导通。

第七步: 按图 1-5 (g) 接线, 去掉触发电压, 指示灯亮, 晶闸管仍导通。

第八步: 按图 1-5 (h) 接线, 门极和阴极之间加反向电压, 指示灯亮, 晶闸管仍导通。

第九步: 按图 1-5 (i) 接线, 去掉触发电压, 将电位器阻值加大, 晶闸管阳极电流减小, 当电流减小到一定值时, 指示灯熄灭, 晶闸管关断。

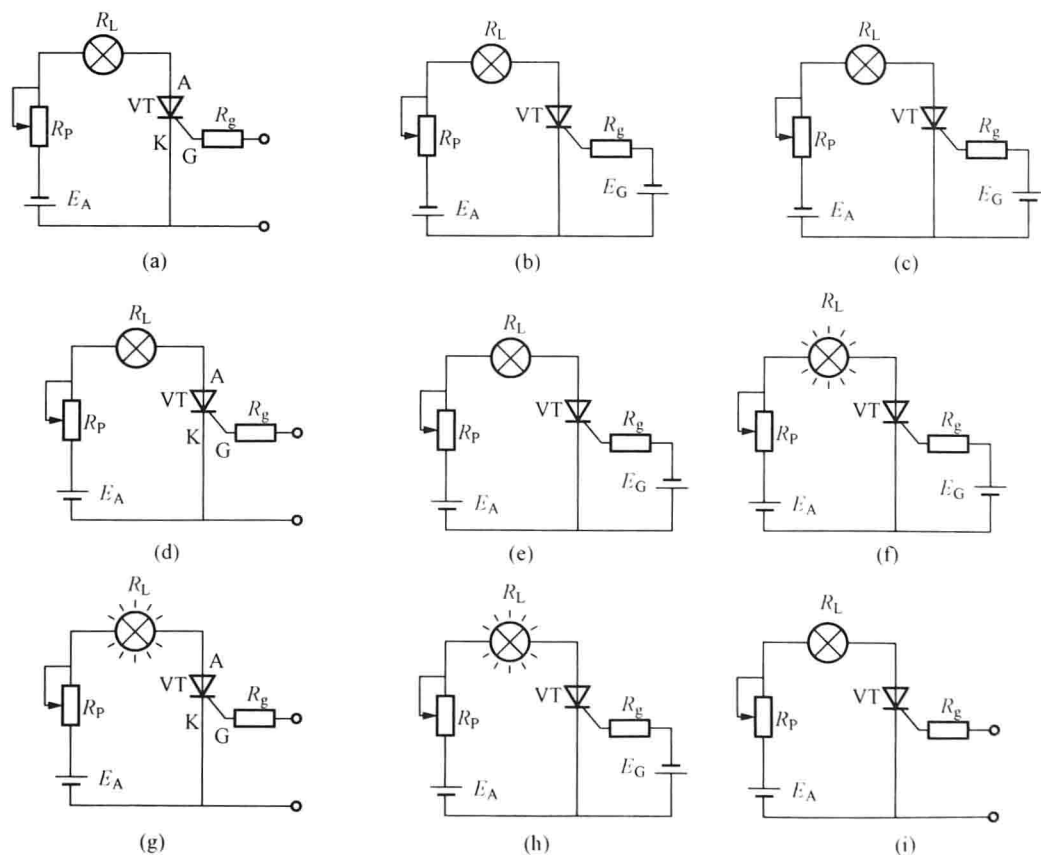


图 1-5 晶闸管导通关断条件实验电路

- (a) 阳极加反向电压, 门极不加电压, 灯灭; (b) 阳极、门极都加反向电压, 灯灭;  
 (c) 阳极加反向电压, 门极加正向电压, 灯灭; (d) 阳极加正向电压, 门极不加电压, 灯灭;  
 (e) 阳极加正向电压, 门极加反向电压, 灯灭; (f) 阳极、门极都加正向电压, 灯亮;  
 (g) 阳极加正向电压, 门极不加电压, 灯亮; (h) 阳极加正向电压, 门极加反向电压, 灯亮;  
 (i) 阳极加正向电压, 门极不加电压,  $R_p$  加大, 灯灭

实验现象与结论见表 1-1。

表 1-1 晶闸管导通和关断实验

实验顺序	实验前灯的情况	实验时晶闸管条件		实验后灯的情况	结论
		阳极电压 $U_A$	门极电压 $U_G$		
导通实验	1	暗	反向	反向	晶闸管在反向阳极电压作用下, 不论门极为何电压, 它都处于关断状态
	2	暗	反向	零	
	3	暗	反向	正向	
	1	暗	正向	反向	晶闸管在正向阳极电压与正向门极电压的共同作用下, 才能导通
	2	暗	正向	零	
	3	暗	正向	正向	
关断实验	1	亮	正向	正向	已导通的晶闸管在正向阳极作用下, 门极失去控制作用
	2	亮	正向	零	
	3	亮	正向	反向	
	4	亮	正向 (逐渐减小到接近于零)	任意	晶闸管在导通状态时, 当阳极电压减小到接近于零时, 晶闸管关断

## 2. 实验说明

(1) 当晶闸管承受反向阳极电压时, 不论门极加何种电压 (正向、反向或零电压), 晶闸管都不导通。此时只有很小的反向漏电流流过管子, 这种状态称为反向阻断状态。说明晶闸管像整流二极管一样, 具有单向导电性。

(2) 当晶闸管承受正向阳极电压时, 门极加上反向电压或者不加电压, 晶闸管不导通, 这种状态称为正向阻断状态。这是二极管所不具备的。

(3) 当晶闸管承受正向阳极电压时, 门极加上正向触发电压, 晶闸管导通, 这种状态称为正向导通状态。这就是晶闸管的闸流特性, 即可控特性。

(4) 晶闸管一旦导通后维持正向阳极电压不变, 将触发电压撤除管子依然处于导通状态。即门极对管子不再具有控制作用。

## 3. 实验结论

通过上述实验可知, 晶闸管导通必须同时具备两个条件

- (1) 晶闸管阳—阴极 (A-K) 加正向电压。
- (2) 晶闸管控制极—阴极 (G-K) 加合适的正向电压。

晶闸管一旦导通, 门极即失去控制作用, 故晶闸管为半控型器件。为使晶闸管关断, 必须使其阳极电流减小到一定数值以下, 可用减小阳极电压到零或反向的方法来实现。

## 4. 晶闸管的导通关断原理

为了进一步说明晶闸管的工作原理, 下面通过晶闸管的等效电路来分析。

(1) 晶闸管的等效电路。将内部是四层 PNP 结构的晶闸管看成是由一个 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 1-6 所示。晶闸管的阳极 A 相当于 PNP 型晶体管 V1 的发射极、阴极 K 相当于 NPN 型晶体管 V2 的发射极。

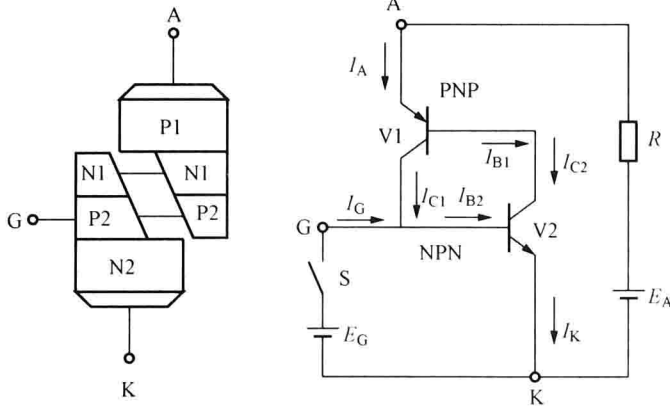


图 1-6 晶闸管导通、关断原理的等效电路

(2) 晶闸管的导通原理。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 V2 处于正向偏置， $E_G$  产生的控制极电流  $I_G$  就是 V2 的基极电流  $I_{B2}$ ；V2 的集电极电流  $I_{C2} = \beta_2 I_G$ ，而  $I_{C2}$  又是晶体管 V1 的基极电流  $I_{B1}$ ，V1 的集电极电流  $I_{C1} = \beta_1 I_{B1} = \beta_1 \beta_2 I_G$  ( $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别是 V1 和 V2 的电流放大系数)。电流  $I_{C1}$  又流入 V2 的基极，再一次被放大。这样循环下去，形成了强烈的正反馈，使两个晶体管很快达到饱和

导通，这就是晶闸管的导通过程，其正反馈过程如下：

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

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，此时  $I_{B2} = I_{C1} + I_G$ ，而  $I_{C1} \gg I_G$ ，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。

(3) 晶闸管的关断原理。要想关断晶闸管，最根本的方法就是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—阴极间加反向电压。

归纳之，晶闸管的工作特点是：晶闸管电路有两部分组成，一是阳—阴极主电路，二是门—阴极控制电路；阳—阴极之间具有可控的单向导电特性；控制门极仅起触发导通作用，不能控制关断；晶闸管的导通与关断两个状态相当于开关的作用，这样的开关又称为无触点开关。

### 1.2.3 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 1-7 所示。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；随着正向阳极电压的增加，当达到正向转折电压  $U_{B0}$  时，漏电流突然剧

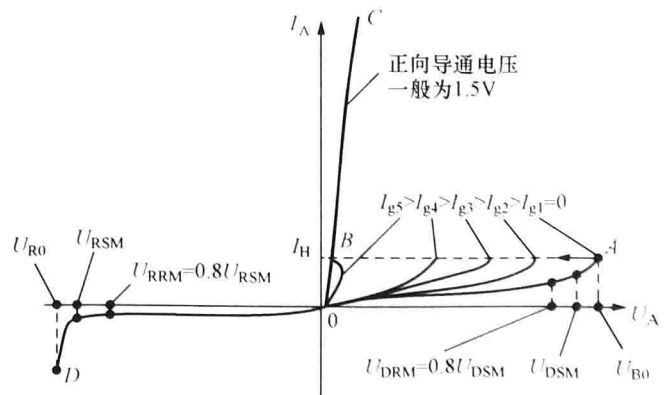


图 1-7 晶闸管的伏安特性曲线

$U_{DRM}$ 、 $U_{RRM}$ —正、反向断态重复峰值电压；  
 $U_{DSSM}$ 、 $U_{RSSM}$ —正、反向断态不重复峰值电压；  
 $U_{B0}$ —正向转折电压； $U_{R0}$ —反向击穿电压