



21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

电力电子技术 与 MATLAB 仿真

周渊深 主 编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century

电力电子技术 与 MATLAB 仿真

主 编 周渊深
编 写 宋永英
主 审 文 俊



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书较为详细地介绍了常用的不控型、半控型和全控型电力电子器件以及它们的应用基础；重点介绍了整流 (AC/DC)、有源和无源逆变 (DC/AC)、交流调压和交—交变频 (AC/AC)、直流斩波 (DC/DC) 四种电力变换方式所涉及的典型电力变换电路。为强化实践技能的培养，本书采用基于 MATLAB 软件、面向电气系统原理结构图的图形化仿真技术，系统地针对上述典型电力变换电路进行了仿真实验。该方法具有方便易学、实践性强的特点，可弥补学生平时实验训练不足的缺陷。另外，书中安排了如整流器的工程计算、实验和课程设计指导书等内容，突出了实践教学内容。教材内容涵盖了电力电子技术课程的大部分教学环节，便于教学使用。全书内容深入浅出，简明扼要，实用性强。

本书可作为高等学校本科和高职高专电类专业的教材，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. —北京：中国电力出版社，2005

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 7 - 5083 - 4070 - 1

I. 电... II. 周... III. 电子系统—系统仿真—软件包, MATLAB—高等学校—教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 003882 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 12 月第一版 2005 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18 印张 416 千字

印数 0001—3000 册 定价 27.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

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,我们编写了本教材。

《电力电子技术与 MATLAB 仿真》是电类专业 21 世纪高等学校规划教材的重要组成部分,是普通高等教育“十五”规划教材《交直流调速系统与 MATLAB 仿真》的姐妹篇。它根据应用型本科教育教学要求而编写,兼顾了高等职业教育的教学需要。

电力电子技术是一门实践性很强的课程,有大量的波形需要分析、计算。作者运用面向电气原理结构图的图形化仿真技术,对本书中所讨论的大部分变流电路进行了仿真实验,大大增加了读者的感性认识。本书试图围绕应用型本科教育和高等职业教育的定位,减少了以往的理论教学、数学推导内容,增加了直观的图形、波形分析内容。本书内容全面,涵盖了课堂、实验和课程设计各个教学环节,特别是强调实践能力的培养。

本书第 1 章介绍了二极管、晶闸管、GTO、GTR、P-MOSFET、IGBT 等典型电力电子器件的结构、工作原理、特性和主要参数。第 2 章讨论了上述电力电子器件的一些应用问题,如器件的驱动、保护和缓冲问题。本书将晶闸管的触发电路归结在驱动电路中进行讨论。第 3 章介绍了“交流/直流”变换技术,具体分析了典型单相和三相整流电路的组成、工作原理、运行波形和基本的参数计算;对晶闸管整流器的工程计算作了详实的介绍,并结合工程实例进行了具体计算。第 4 章介绍了“直流/交流”变换技术,具体分析了有源逆变和无源逆变(变频)电路。一是以晶闸管为主的有源逆变和无源逆变电路;二是以全控型器件为基础的 SPWM 逆变器,包括电压正弦 PWM、电流正弦 PWM 和磁通正弦 PWM 等。第 5 章介绍了“交流/交流”变换技术,具体分析了以晶闸管器件为基础的交流开关、交流调功和交流调压电路,本章还介绍了交-交变频技术。第 6 章介绍了“直流/直流”变换技术,内容是以全控型器件为基础的直流斩波电路。第 7 章重点介绍了基于 MATLAB 的图形化的电力电子仿真技术,这是作者教学、科研工作的总结,对学生更好地掌握电力电子技术和提高设计应用能力具有重要作用。通过 MATLAB 仿真可以解决教学实验设备短缺的困难,对提高教学效果起到事半功倍的作用。该方法有与实物实验相似的实验方法,是本教材的原创性内容。本书还安排了实验指导书和课程设计大纲及任务书内容,课程设计内容紧扣第 3 章的工程计算方法,因而晶闸管整流器的工程计算也可作为课程设计指导

书的内容。本书最后的附录给出了与电力电子仿真技术紧密相关的 MATLAB 图形化仿真知识。

全书按 48~56 学时理论教学内容编写；仿真实验可由学生利用计算机课后自行完成，也可安排在校内专业实习中完成；实物实验可结合课程教学安排 8 学时左右，复杂和大型实验则安排在实习中进行；课程设计时间以 1~1.5 周为宜。

全书由江苏淮海工学院周渊深教授主编，并编写了绪论和第 1、2、3、4、5、6 章；宋永英实验师编写了实验指导书和课程设计部分，第 7 章和附录由宋永英和周渊深共同编写，以宋永英为主。朱希荣老师参加了校稿工作，周玉琴同志绘制了全书插图，全书由周渊深统稿。本书由华北电力大学文俊老师主审，文老师在审阅中提出了许多宝贵的意见，在此谨致衷心的感谢。在编写本书的过程中参阅和利用了部分兄弟院校的教材，对原作者也一并致谢。

由于时间仓促，书中难免存在不妥之处，请读者原谅，并提出宝贵意见。

作 者

2005.8



目 录

前言	
概述	1
第1章 电力电子器件	7
1.1 功率二极管	7
1.2 晶闸管	10
1.3 门极可关断晶闸管(GTO)	20
1.4 电力晶体管(GTR)	22
1.5 功率场效应晶体管(P-MOSFET)	25
1.6 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)	28
1.7 其他新型电力电子器件	31
思考题与习题	35
第2章 电力电子器件的应用基础	36
2.1 晶闸管的门极驱动电路	36
2.2 全控型电力电子器件的门极驱动电路	49
2.3 电力电子器件的保护	57
2.4 电力电子器件的缓冲电路	62
2.5 电力电子器件的串并联应用	64
思考题与习题	69
第3章 交流-直流变换电路	70
3.1 单相可控整流电路	70
3.2 三相半波可控整流电路	84
3.3 三相桥式全控整流电路	89
3.4 三相桥式半控整流电路	94
3.5 变压器漏抗对整流电路的影响	97
3.6 整流电路的同步与定向	98
3.7 晶闸管整流器的工程设计	101
思考题与习题	120
第4章 直流-交流变换电路	122
4.1 逆变的概念	122
4.2 有源逆变电路	123
4.3 无源逆变(变频)电路	127
4.4 无源逆变(变频)电路的原理	130

4.5 正弦波脉宽调制(SPWM)变频器	141
思考题与习题	153
第5章 交流-交流变换电路	155
5.1 交流电力控制电路	155
5.2 晶闸管交流调压器	159
5.3 晶闸管交-交变频器	168
思考题与习题	173
第6章 直流-直流变换电路	175
6.1 直流斩波器的工作原理和分类	175
6.2 单象限直流斩波器	176
6.3 直流电动机负载时的直流斩波器	180
6.4 软开关的基本概念	186
思考题与习题	187
第7章 电力电子的 MATLAB 仿真	188
7.1 典型电力电子器件的仿真模型	188
7.2 电力电子变流器中典型环节的仿真模型	196
7.3 典型电力电子变流电路的应用仿真	200
第8章 电力电子技术实验指导书	238
实验一 单结晶体管触发的单相半波可控整流电路实验	238
实验二 锯齿波同步移相触发电路实验	240
实验三 单相桥式半控整流电路实验	243
实验四 单相桥式全控整流及有源逆变电路实验	245
实验五 三相桥式全控整流及有源逆变电路实验	247
实验六 单相交流调压电路实验	249
实验七 三相交流调压电路实验	252
实验八 自关断器件及其驱动与保护电路实验	253
附录 MATLAB/Simulink/Power System 仿真基础	259
附 1.1 Simulink 工具箱简介	259
附 1.2 Power System 工具箱简介	263
附 1.3 Simulink/Power System 的模型窗口	267
附 1.4 Simulink/Power System 模块的基本操作	270
附 1.5 Simulink/Power System 系统模型的操作	273
附 1.6 Simulink/Power System 子系统的建立	274
附 1.7 Simulink/Power System 系统的仿真	275
参考文献	279

概 述

本章要点

- 电力电子器件：电力电子器件的分类（不可控型、半控型、全控型）及其发展历史；
- 电力电子变流技术：电力电子技术的研究内容，变流电路的换流方式、电能变换的基本类型（AC/DC变换、DC/AC变换、AC/AC变换和DC/DC变换）；
- 变流电路的控制方式；
- 变流技术的发展及其应用；
- 本课程的任务与要求。

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边缘学科，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和变流装置，运用这些变流装置完成对电能的变换和控制。

电力电子技术研究的内容包括三个方面：电力电子器件、电力电子变流技术和控制方式。

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原理、特性和参数，主要使学生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AC/DC、DC/AC、AC/AC、DC/DC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。

一、电力电子器件

用作电能变换的大功率电力电子器件与信息处理用器件不同，它一方面必须有高电压、大电流的承受能力，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。电力电子器件有许多种类和不同的分类方式，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，正向导通，反向关断，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。由于无须外部提供关断条件，仅靠器件自身控制即可关断，所以这类器件常被称为自关断器件。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其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，一般需要较大功率的驱动电路，这类器件有普通晶闸管（Th）、GTR、GTO 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 等。

40 多年来，随着半导体制造技术和变流技术的发展，一代又一代的电力电子器件相继问世，使它的应用领域迅速扩大。主要的电力电子器件的分类如表 0-1 所示。

表 0-1

主要电力电子器件的分类

电力电子器件	不可控型器件	整流二极管	普通整流二极管 (Diode)
			快恢复二极管
			肖特基整流二极管
			肖克来二极管
			硅对称开关
	半控型器件	晶闸管	普通晶闸管 (Th) (Thyristor)
			快速晶闸管 (FST)
			双向晶闸管 (TRIAC)
			逆导晶闸管 (RCT)
			光控晶闸管 (LCT)
	全控型器件	晶体管	大功率晶体管 (GTR)
			功率场效应晶体管 (P-MOSFET)
			绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)
		晶闸管	静电感应晶体管 (SIT)
			门极可关断晶闸管 (GTO)
		场控晶闸管 (MCT)	
		静电感应晶闸管 (SITH)	

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、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。这一阶段中, 电力电子技术与微电子技术紧密结合在一起了, 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。

二、电力电子变流技术

1. 电力电子变流技术的研究内容

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。

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。换流过程总是在一个开关开通的时候关断原来导通着的开关, 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 AC/DC 变换、DC/AC 变换、AC/AC 变换和 DC/DC 变换。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: 把交流电压变换成固定或可调的直流电压即为 AC/DC 变换, 如可控整流器。传统的 AC/DC 变换是利用晶闸管和相控技术, 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: 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机调速、不间断电源 (UPS) 和感应加热。

(3) AC/AC 变换: 把频率、电压固定或变化的交流电变换成频率、电压可调或固定的交流电, 即为 AC/AC 变换, 通常有交-交变频器和交流调压器。

(4) DC/DC 变换: 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。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、重量并提高可靠性。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。

三、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控制方式, 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。

四、变流技术的发展

变流技术的发展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, 主要指晶闸管的应用阶段。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, 所涉及的应用领域不断扩展。例如, 晶闸管感应加热、熔炼、淬火电源(1~8kHz)、晶闸管低频电源、400Hz 中频电源、高精度稳压电源与稳流电源相继开发出来。

(3) 第三阶段是随着全控型器件的发展而逐渐展开的。首先, GTO、GTR 等双极型全控器件的应用使逆变、变频、斩波电路的结构大为简化, 变换频率大为提高。但 GTO、GTR 是电流控制型器件, 需要控制电路提供较大的驱动功率, 而电压控制型的 P-MOS-FET、IGBT 等全控型器件的应用为电力电子设备高频化、小型化创造了条件。随着变换频率的进一步提高, 脉宽调制(PWM)电路的缺点逐渐暴露出来了。由于 PWM 电路属于硬开关电路, 变换过程中的 du/dt 、 di/dt 会产生严重的电磁干扰; 器件的开通与关断损耗严重制约了变换频率的进一步提高。于是建立在谐振、准谐振原理上的软开关电路, 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。

电力电子技术是发展高新技术的基础, 它拓宽了微电子技术、信息技术与传感器技术的应用领域, 推动了高新技术的发展。随着科技的发展, 它将发挥更为重要的作用。

五、电力电子技术应用

电力电子技术是对电能进行变换和控制的现代工业电子技术。近年来, 功率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. 电动机传动与控制

电动机调速是电力电子在电动机控制中的重要应用, 它包括两个内容:

(1) 运动控制。为了满足自动化生产线、特殊生产工艺要求而对电动机进行调速控制。主要的应用领域有: 电动汽车及各种电瓶车、地铁及机车牵引; 轧钢工业中热轧机、热连轧机、带钢冷连轧机、飞剪机等设备的速度控制; 港口机械中输送机、码头起重机、堆料机、取料机、装船机和装卸自动化设备的控制; 各类起重机械及矿井提升机、机床及各种自动化生产线、高炉控制系统、调速电梯、供水系统、造纸、印染及化工工业、纺织工业、船舶推进系统等。

(2) 节能。在各行各业中, 风机、水泵等用交流电动机来拖动的负荷, 其用电量占我国工业用电总量的 50% 以上。如果我国所拥有的风机、水泵, 全面采用变频调速后, 可节电 30% 以上, 每年节电将达到数百亿度。

2. 电源

工业和社会的各个领域需要不同种类的电源。例如, 近几年以 P-MOSFET 和 IGBT 为主开关元件组成的逆变焊机取得了实质性进展。

通信电源是一种 DC/DC 高频开关电源。通信电源有一次电源和二次电源, 一次电源是将市电直接整流, 然后经过高频开关功率变换后再经过整流、滤波, 最后得到 48V 的直流电源。这里 P-MOSFET 被大量采用, 其开关工作频率广泛采用 100kHz。二次电源是电信设备内部集成电路所需用的电源, 因而要求体积小、规格齐全, 有 $\pm 5V$ 、 $\pm 12V$ 等等。它是将一次电源 (48V), 经过 DC/DC 高频功率变换, 获得不同规格的直流电压输出, 开关工作频率在几十千赫以上。

不间断电源 (UPS) 被广泛地应用于计算机、通信、仪器设备、各种微电子系统及公共场所。

3. 电网净化技术

近年来, 随着电力电子装置的应用与普及, 电网波形畸变日趋严重。传统的无源滤波方法难以应付日益严重的电网“公害”。人们从电力电子技术本身找到了解的途径, 这就是有源滤波器。电力有源滤波器的基本原理是产生与补偿对象相反的谐波电流及无功功率而抵消电网中的谐波。

4. 电力系统应用

高压直流输电 (HVDC) —— 在输电线路的送端将工频交流变为直流, 在受端再将直流变回工频交流。高压直流输电从根本上解决了输电系统的稳定性问题, 减少了线路的无

功损耗,实现了远距离、大功率高压直流输电。在高压直流输电系统中,它需在线路两端设置整流、逆变及无功补偿装置。

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、办公室自动化乃至于家庭的任何角落。伴随着器件与交流电路的进步,电力电子技术的应用领域也将会有新的突破。

六、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。内容包含器件、电路及应用三个方面,但以电路为主。器件讲解的内容主要包括常用器件的基本工作原理、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半导体器件所构成的各种典型功率变换电路的工作原理、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、各种典型触发、控制、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) 熟悉和掌握功率二极管、普通晶闸管、可关断晶闸管、大功率晶体管和功率场效应晶体管等电力电子器件的工作原理,开关特性和电气参数。

(2) 熟练掌握单相、三相整流电路和有源逆变电路的基本原理,波形分析和各种负载对电路工作的影响,并能对上述电路(含触发器与保护环节)进行初步设计计算。

(3) 掌握无源逆变电路、交流调压电路、斩波电路的工作原理、电路结构、换相方法、波形分析和参数计算。

(4) 掌握 PWM 型逆变电路的工作原理、控制方法、波形分析。

(5) 了解电力电子学科的发展动向。

(6) 掌握基本变流装置的调试试验方法。

(7) 掌握电力电子技术的仿真方法。

第 1 章 电力电子器件

本章要点

- 功率二极管的结构、工作原理、特性、参数、选用原则；
- 晶闸管、双向晶闸管的结构、工作原理、特性、参数、选用原则；
- 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、参数；
- 新型电力电子器件的结构和工作原理。

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, 只能由加在元件上的电源极性控制其通断。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. 功率二极管的结构

普通功率二极管的内部是由一个面积较大的 PN 结和两端的电极及引线封装组成的。功率二极管的结构和电气符号如图 1-1 (a)、(b) 所示。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)。功率二极管主要有螺栓型和平板型两种外形, 如图 1-2 所示。一般而言, 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。

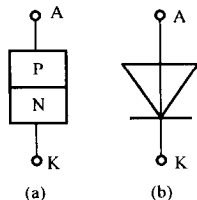


图 1-1 功率二极管
(a) 结构; (b) 电气符号

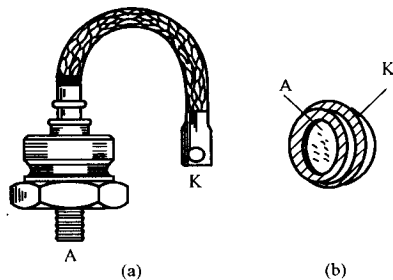


图 1-2 功率二极管的外形
(a) 螺栓型; (b) 平板型

2. 功率二极管的工作原理

功率二极管和普通二极管工作原理一样, 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的阴阳极间所加的电压与流过阴阳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。

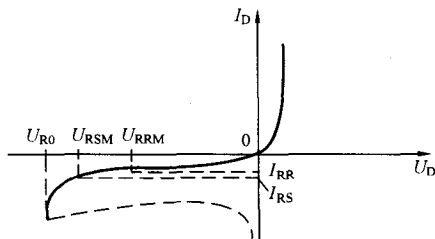


图 1-3 功率二极管的伏安特性曲线

第 I 象限为正向特性区，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。

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。

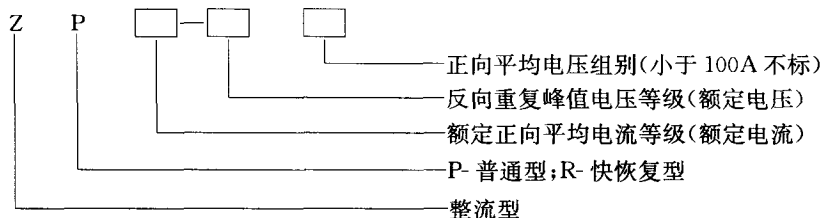
4. 反向恢复时间

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. 功率二极管的选择原则

(1) 选择正向平均电流 I_{ad} 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有效值大于管子在实际可能通过的最大电流有效值 I_{DM} 即可。考虑元件的过载能力，实际选择 I_{DM} 时应有 1.5~2 倍的安全裕量。其计算公式为

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

式中， I_{DM} 为电路中可能流过的最大电流有效值。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瞬时值电压 U_{DM} 的 2~3 倍，即

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

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 功率二极管的应用

(1) 整流：利用二极管正偏时导通、反偏时截止的不对称非线性特性可实现整流变换，如图 1-4 (a) 所示，这是二极管最基本的应用。

(2) 续流：如图 1-4 (b) 所示，当开关 S 切断电感电路时，为防止电感产生很高的自感电动势而损坏设备，可接入一个二极管 VD，使电感电流有一个继续流动的回路，使开关 S 在关断时其两端的电压不超过电源电压，避免了因电感断流而在开关器件两端出现的高压。

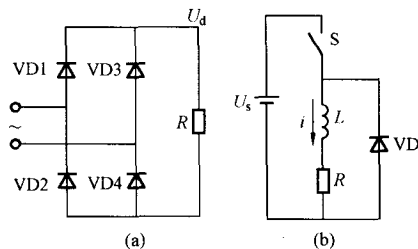


图 1-4 功率二极管的整流、续流应用
(a) 整流；(b) 续流

1.1.6 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，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 $10\sim 40\text{ns}$ 。肖特基二极管在正向恢复过程中不会有明显的电压过冲击，在反向耐压较低的情况下正向压降也很小，明显低于快速恢复二极管，因此，其开关损耗和正向导通损耗都很小。肖特基二极管的不足是：当所承受的反向耐压提高时，其正向电压有较大幅度提高。它适用于较低输出电压和要求较低正向管压降的变流器电路中。

1.2 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，其输出的整流平均电压也是固定值，不能调节。而在实际应用中，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（LCT）等。

1.2.1 晶闸管的结构

晶闸管是一种大功率半导体器件，它的内部是 PNPN 的四层结构，形成了三个 PN 结

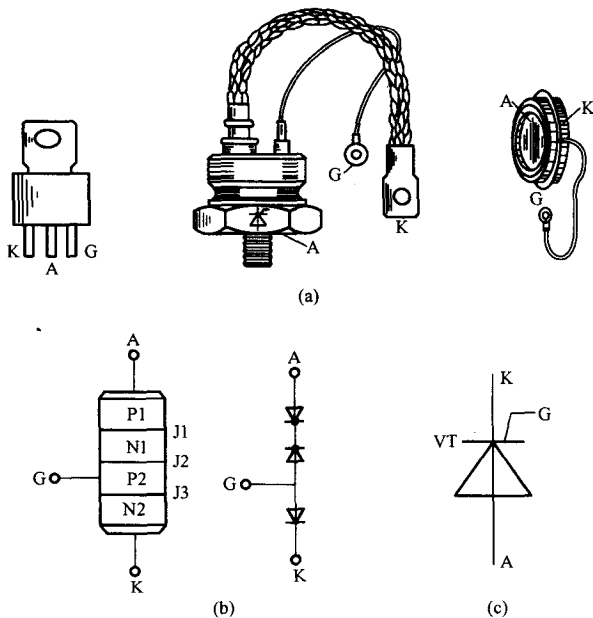


图 1-5 晶闸管

(a) 外形；(b) 结构；(c) 电气符号

(J1, J2, J3)，并对外引出三个电极。其外形、结构和电气符号如图 1-5 (a)、(b) 和 (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 1-5 (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 1-5 (b) 所示。由最外部的 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 1-5 (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，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。

1.2.2 晶闸管的工作原理

下面通过图 1-6 所示的电路来说明晶闸管的工作原理。在该电路中，由电源 E_A 、晶闸管的阳极和阴极、白炽灯组成晶闸管主电路；由电源 E_G 、开关 S、晶闸管的门极和阴极组成控制电路（触发电路）。

实验步骤及结果说明如下：