

普通高等教育“十二五”规划教材

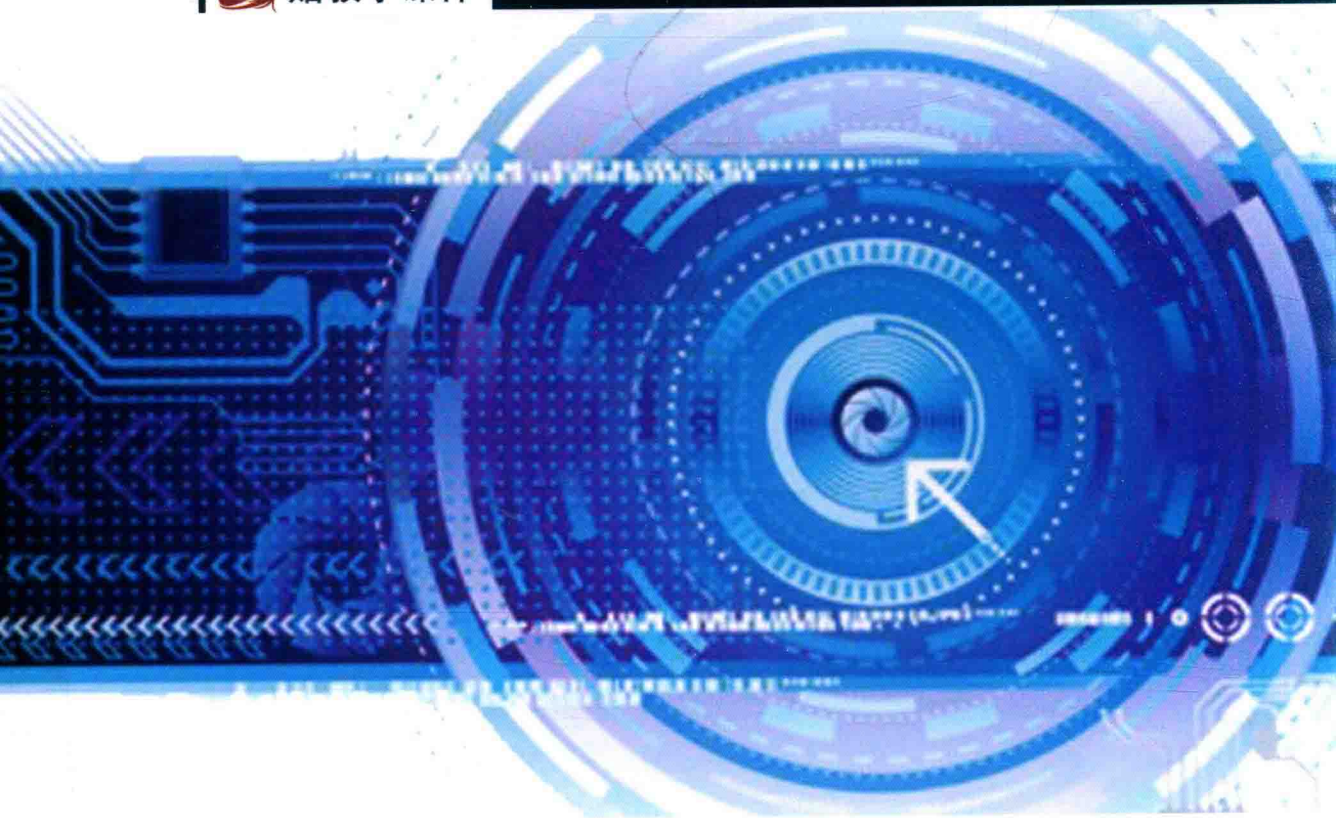
DIAN LI DIAN ZI JI SHU

# 电力电子技术



赠教学课件

符亚杰 王利婷 毛新红 主编



◎ 吉林大学出版社

# 电力电子技术

主 编 王利婷 符亚杰 毛新红

吉林大学出版社

---

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术 / 王利婷, 符亚杰, 毛新红主编. --  
长春: 吉林大学出版社, 2016.5  
ISBN 978-7-5677-6400-2

I. ①电… II. ①王… ②符… ③毛… III. ①电力电  
子技术 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 100300 号

---

书 名: 电力电子技术  
作 者: 王利婷 符亚杰 毛新红 主编

责任编辑: 陈颂琴 责任校对: 魏丹丹  
吉林大学出版社出版、发行  
开 本: 787×1092 毫米 1/16  
印 张: 13.25 字数: 260 千字  
ISBN 978-7-5677-6400-2

封面设计: 刘益军  
北京市文星印刷厂印刷  
2016 年 4 月第 1 版  
2016 年 5 月第 1 次印刷  
定 价: 33.00 元

---

版权所有 翻印必究

社址: 长春市明德路 501 号 邮编: 130021  
发行部电话: 0431-89580028/29  
网址: <http://www.jlup.com.cn>  
E-mail: [jlup@mail.jlu.edu.cn](mailto:jlup@mail.jlu.edu.cn)

# 前 言

随着科学技术的不断进步,电气工程与自动化技术正以令人瞩目的发展速度,改变着我国工业的整体面貌。同时,对社会的生产方式、人们的生活方式和思想观念也产生了重大的影响,并在现代化建设中发挥着越来越重要的作用。随着与信息科学、计算机科学和能源科学等相关学科的交叉融合,它正在向智能化、网络化和集成化的方向发展。

教育是培养人才和增强民族创新能力的基础,高等学校作为国家培养人才的主要基地,肩负着教书育人的神圣使命。在实际教学中,根据社会需求,构建具有时代特征、反映最新科技成果的知识体系是每个教育工作者义不容辞的光荣任务。

本书以能力培养为目标,突出了“实际、实用、实践”的原则。适当降低了理论深度,尽量避免繁琐的数学推导,力求深入浅出,循序渐进地介绍电力电子学的概念、原理及应用。重点放在基本概念的阐述、典型电路原理的分析及应用实例的介绍上;注重对学生应用技术能力及分析问题、解决问题能力的培养,以利于学生对技术知识的灵活应用及毕业后进行自学。

由于作者水平有限,本书难免有遗漏和错误之处,期望使用本教材的老师和学生批评指正。

编 者

# 目 录

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 绪论 .....                 | 1   |
| 项目 1 电力电子器件 .....        | 5   |
| 任务 1 电力电子器件概述 .....      | 5   |
| 任务 2 不可控器件——电力二极管 .....  | 8   |
| 任务 3 半控型器件——晶闸管 .....    | 13  |
| 任务 4 典型全控型器件 .....       | 20  |
| 任务 5 其他新型电力电子器件 .....    | 32  |
| 任务 6 电力电子器件的驱动 .....     | 34  |
| 任务 7 电力电子器件的保护 .....     | 40  |
| 项目 2 可控整流电路 .....        | 44  |
| 任务 1 单相可控整流电路 .....      | 44  |
| 任务 2 三相可控整流电路 .....      | 51  |
| 任务 3 整流电路的有源逆变工作状态 ..... | 57  |
| 任务 4 整流电路相位控制的实现 .....   | 62  |
| 项目 3 逆变电路 .....          | 70  |
| 任务 1 电力电子器件的换流方式 .....   | 70  |
| 任务 2 有源逆变电路 .....        | 73  |
| 任务 3 无源逆变电路 .....        | 79  |
| 任务 4 电压型逆变电路 .....       | 81  |
| 任务 5 电流型逆变电路 .....       | 86  |
| 项目 4 直流斩波电路 .....        | 88  |
| 任务 1 直流斩波电路工作原理 .....    | 88  |
| 任务 2 直流斩波器基本电路 .....     | 90  |
| 任务 3 直流斩波电路应用实例 .....    | 100 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 项目 5 交流-交流变流电路 .....        | 103 |
| 任务 1 交流调压电路 .....           | 103 |
| 任务 2 其他交流电力控制电路 .....       | 114 |
| 任务 3 交-交变频电路 .....          | 117 |
| 任务 4 矩阵式变频电路 .....          | 127 |
| 项目 6 PWM 控制技术 .....         | 132 |
| 任务 1 PWM 控制的基本原理 .....      | 132 |
| 任务 2 PWM 逆变电路及其控制方法 .....   | 134 |
| 任务 3 PWM 跟踪控制技术 .....       | 142 |
| 任务 4 PWM 整流电路及其控制方法 .....   | 145 |
| 项目 7 软开关技术 .....            | 151 |
| 任务 1 软开关的基本概念 .....         | 151 |
| 任务 2 软开关电路的分类 .....         | 153 |
| 任务 3 典型的软开关电路 .....         | 155 |
| 任务 4 软开关技术新进展 .....         | 162 |
| 项目 8 电力电子技术的应用 .....        | 164 |
| 任务 1 开关电源 .....             | 164 |
| 任务 2 不间断电源 .....            | 168 |
| 任务 3 功率因数校正技术 .....         | 169 |
| 任务 4 变频调速装置 .....           | 172 |
| 任务 5 电力电子技术在可再生能源中的应用 ..... | 175 |
| 任务 6 电力电子技术在电力系统中的应用 .....  | 183 |
| 任务 7 电力电子技术的其他应用 .....      | 191 |
| 附录:教学实验 .....               | 195 |
| 实验 1 三相桥式全控整流电路的性能研究 .....  | 195 |
| 实验 2 直流斩波电路的性能研究 .....      | 197 |
| 实验 3 单相交流调压电路的性能研究 .....    | 198 |
| 实验 4 单相交-直-交变频电路的性能研究 ..... | 200 |
| 参考文献 .....                  | 203 |

# 绪 论

电力电子学(Power Electronics)这一名称是在 20 世纪 60 年代出现的。它是一门交叉于电气工程三大领域——电力学、电子学和控制理论之间的边缘学科技术。“电力电子学”和“电力电子技术”是分别从学术和工程技术两个不同的角度来称呼的,但是其实际内容并没有很大区别。电力电子技术简单地说就是以电力为对象的电子技术,具体地说就是利用电力电子器件对电能实现变换和控制的技术,它能够实现对电压、电流、频率和相位等基本电参数的控制和处理,是现代电子学的一个重要分支,也是电工技术的分支之一。

通常所用的电力分为交流电力和直流电力两种。交流电力通常是从公用电网直接得到的电力,直流电力通常是从蓄电池和干电池得到的电力,从这些电源得到的电力往往不能满足实际需求,因此需要进行电力处理和变换。电力电子技术所变换的“电力”,功率可以大到数百兆瓦,也可以小到 1 瓦以下。

电力电子技术和信息电子技术是现代电子技术的两个分支。信息电子技术主要用于信息处理,其在处理信号的通信、信息测量和信息控制等领域取得了显著进展,也就是常说的模拟电子技术和数字电子技术;而电力电子技术则主要用于电力变换,是能源变换和控制的基础,也是弱电控制强电的桥梁,它拓宽了信息电子技术的应用领域,为现代通信、电子仪器、计算机、工业自动化、电网优化、电力工程、新能源、航天、核能超导、激光、海洋、生物等各种高新技术提供高性能、高精度、高效率的电控设备和电源设备,成为发展高新技术的基础和关键。

## 一、电力电子技术的主要组成部分

电力电子技术主要由电力电子器件、变流技术和控制技术三个部分组成。其中电力电子器件是电力电子技术的基础。如果没有晶闸管和电力晶体管等电力电子器件,也就没有电力电子技术。电力电子技术主要用于电力变换,因此可以认为变流技术是电力电子技术的核心和主体。电力电子器件制造技术的理论基础是半导体物理,而变流技术的理论基础是电路理论。电力电子变流技术是包括用电力电子器件构成的各种电力变换电路以及用这些电路构成电力电子装置和电力电子系统的技术。

电力电子技术对电力的变换通常有四大类:交流转变成直流(整流)、直流转变成交流(逆变)、直流转变成直流(斩波)、交流转变成交流(交流调压、变频、变相)。

## 二、电力电子技术与其他学科的关系

电力电子技术和电子学的关系是显而易见的。电子学可分为电子器件和电子电路两大分支,这两大分支分别与电力电子器件和电力电子电路相对应。电力电子器件制造技术和电子器件制造技术的理论基础是一样的,其大多数工艺也是相同的。特别是现代电力电子器件的制造大部分使用集成电路制造工艺,采用微电子制造技术,许多设备都和微电子器件制造设备通用,这说明两者同根同源。电力电子电路和电子电路的许多分析方法也是一致的,只是两者的应用目的不同,前者用于电力变换和控制,后者用于信息处理。电子电路中的功率放大和功率输出部分也可算作电力电子电路。此外,电力电子电路广泛用于包括电视机、计算机在内的各种电子装置(其电源部分都是电力电子电路)中。在电子技术中,半导体器件既可处于放大状态,也可处于开关状态;而在电力电子技术中,为避免功率损耗过大,电力电子器件总是工作在开关状态,这是电力电子技术的一个重要特征。

电力电子技术广泛用于电气工程中,这就是电力电子学和电力学的主要关系。各种电力电子装置广泛应用于高压直流输电、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电力系统和电气工程中,因此,通常把电力电子技术归属于电气工程学科。电力电子技术是电气工程学科中一个最为活跃的分支。电力电子技术的不断进步给电气工程的现代化以巨大的推动力,也是保持电气工程活力的重要源泉。

控制理论广泛用于电力电子技术中,它使电力电子装置和系统的性能不断满足人们日益增长的各种需求。电力电子技术可以看成是弱电控制强电的技术,它是弱电和强电之间的接口,而控制理论则是实现这种接口的一条强有力的纽带。另外,控制理论和自动化技术密不可分,而电力电子装置则是自动化技术的基础部件和重要支撑。

随着科学技术的发展,电力电子技术又与电磁学、物理学、材料科学、电机工程、现代控制理论、仿真与计算、信号处理和计算机科学等许多学科密切相关。目前电力电子技术已逐步发展成为一门多学科相互渗透的综合性技术学科。

## 三、电力电子技术的发展简介

### (一) 电力电子技术史前期

1904年电子管的出现,开启了电子技术的先河。1947年美国贝尔实验室研制出的晶体管,引发了电子技术的革命。1957年美国通用公司研制出第一个晶闸管,标志着电力电子技术的诞生。在此之前的时期称为电力电子技术的史前期。

### (二) 整流器时代

20世纪60年代至70年代,大功率硅整流管和晶闸管以及晶闸管的一系列派生器件

的开发,推动了电力变换在冶金、电化学和电力工业等行业中的运用和发展。

### (三) 逆变器时代

20 世纪 70 年代后期至 80 年代,随着变频调速装置的普及,大功率逆变用晶闸管、巨型功率晶体管和门极可关断晶闸管等全控型器件成为当时电力电子器件的主角,取代了普通晶闸管,将电力电子技术推进到一个新的发展阶段。

### (四) 变频器时代

20 世纪 80 年代后期,大规模和超大规模集成电路技术的迅猛发展,开辟了电力电子器件发展的智能化方向,为现代电力电子技术的发展奠定了基础。

## 四、电力电子技术的应用

电力电子技术的应用范围十分广泛。它不仅用于一般工业,也广泛用于交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统、航空航天和现代军事系统,在照明、空调等家用电器和其他领域中也有着广泛的应用。以下分别对几个主要应用领域加以叙述。

### (一) 一般工业应用

直流电动机具有良好的调速性能,为其供电的可控整流电源或直流斩波电源都是电力电子装置。

电化学工业大量使用直流电源,如电解铝、电解食盐水等。电力电子技术还大量用于冶金工业中作为高频或中频感应加热电源、淬火电源及直流电弧炉电源等。电镀装置也需要整流电源。

近年来电力电子变频技术的迅速发展,使交流电机的调速性能可与直流电机相媲美,交流调速技术大量应用并占据主导地位。电力电子技术还应用于几百瓦到数千千瓦的变频调速装置、软启动装置等。

### (二) 交通运输

电气化铁路中广泛采用电力电子技术,电气机车中的直流机车采用整流装置,交流机车采用变频装置。直流斩波器也广泛用于铁道车辆,在磁悬浮列车中,电力电子技术更是一项关键技术,除牵引电机传动外,车辆中的各种辅助电源也都离不开电力电子技术。电动汽车的电机靠电力电子装置进行电力变换和驱动控制,其蓄电池的充电也离不开电力电子装置。一台高级汽车中需要许多控制电机,它们也要靠变频器和斩波器驱动并控制。飞机和船舶需要很多不同要求的电源,因此交通运输也需要电力电子技术。

### (三) 电力系统

电力电子技术在电力系统有着非常广泛的应用。据估计,发达国家在用户最终使用的电能中有 60% 以上至少经过一次电力电子变流装置的处理。在电力系统的现代化进程中,电力电子技术是关键技术之一。毫不夸张地说,离开电力电子技术,电力系统的现

代化是不可想象的。直流输电在长距离、大容量输电时有很大的优势,其送电端的整流器和受电端的逆变器都采用晶闸管变流装置。近年发展起来的柔性交流输电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电力系统有重要的意义。晶闸管控制电抗器和晶闸管投切电容器都是重要的无功补偿装置。近年来出现的静止无功发生器和有源电力滤波器等新型电力电子装置具有更为优越的无功功率和谐波补偿的性能。在配电网系统,电力电子装置还可用于防止电网瞬时停电、瞬时电压跌落、闪变等,以进行电能质量控制,改善供电质量等。

### (四) 电子装置用电源

各种电子装置一般都需要不同电压等级的直流电源供电。通信设备中的程控交换机所用的直流电源以前使用晶闸管整流电源,现在已改为采用全控型器件的高频开关电源。大型计算机所需的工作电源和微型计算机内部的电源现在也都采用高频开关电源。在各种电子装置中,以前大量采用线性稳压电源供电,但由于高频开关电源体积小、重量轻、效率高,现在它已逐渐取代了线性稳压电源。因为各种信息技术装置都需要电力电子装置提供电源,所以可以说信息电子技术离不开电力电子技术。

### (五) 家用电器

变频空调是家用电器中应用电力电子技术的典型例子之一。电视机、音响设备和家用计算机等电子设备的电源部分也都应用了电力电子技术。此外,电力电子技术还应用于洗衣机、电冰箱和微波炉等电器。

### (六) 其他

不间断电源(UPS)在现代社会中的作用越来越重要,用量也越来越大。目前,UPS在电力电子产品中已占有相当大的份额。航天飞行器中的各种电子仪器需要电源,载人航天器中为了人的生存和工作,也离不开各种电源,而这些都必须采用电力电子技术。

总之,电力电子技术的应用范围十分广泛。从人类对宇宙和大自然的探索,到国民经济的各个领域,再到我们的衣食住行,到处都能感受到电力电子技术的存在和巨大魅力。这也激发了一代又一代学者和工程技术人员学习、研究电力电子技术,促使电力电子技术飞速发展。

# 项目 1 电力电子器件

就像我们在学习电子技术基础时,晶体管和集成电路等电子器件是模拟和数字电子电路的基础一样,电力电子器件则是电力电子电路的基础。因而掌握各种常用电力电子器件的特性和正确使用方法是学好电力电子技术的基础。本项目将在对电力电子器件的概念、特点和分类等问题作简要概述之后,分别介绍各种常用电力电子器件的工作原理、基本特性、主要参数以及选择和使用中应注意的一些问题。

## 任务 1 电力电子器件概述

### 1.1.1 电力电子器件的概念和特征

在电气设备或电力系统中,直接承担电能的变换或控制任务的电路被称为主电路(Main Power Circuit)。电力电子器件(Power Electronic Device)是指可直接用于处理电能的主电路中,实现电能的变换或控制的电子器件。同我们在学习电子技术基础时广泛接触的处理信息的电子器件一样,广义上电力电子器件也可分为电真空器件和半导体器件两类。但是,自 20 世纪 50 年代以来,除了在频率很高(如微波)的大功率高频电源中还在使用真空管外,基于半导体材料的电力电子器件已逐步取代了以前的汞弧整流器(Mercury Arc Rectifier)、闸流管(Thyratron)等电真空器件,成为电能变换和控制领域的绝对主力。因此,电力电子器件也往往专指电力半导体器件。与普通半导体器件一样,目前电力半导体器件所采用的主要材料仍然是硅。

由于电力电子器件直接用于处理电能的主电路,因而同处理信息的电子器件相比,它一般具有如下特征:

- 1) 电力电子器件所能处理电功率的大小,也就是其承受电压和电流的能力,是其最重要的参数。其处理电功率的能力小至毫瓦级,大至兆瓦级,一般都远大于处理信息的电子器件。
- 2) 因为处理的电功率较大,为了减小本身的损耗,提高效率,电力电子器件一般都工作在开关状态。导通时(通态)阻抗很小,接近于短路,管压降接近于零,而电流由外电路决定;阻断时(断态)阻抗很大,接近于断路,电流几乎为零,而管子两端电压由外电路决

定;就像普通晶体管的饱和与截止状态一样。因而,电力电子器件的动态特性(也就是开关特性)和参数,也是电力电子器件特性很重要的方面,有些时候甚至上升为第一位的重要方面。而在模拟电子电路中,电子器件一般都工作在线性放大状态,数字电子电路中的电子器件虽然一般也工作在开关状态,但其目的是利用开关状态表示不同的信息。正因为如此,也常常将一个电力电子器件或者外特性像一个开关的几个电力电子器件的组合称为电力电子开关,或者电力半导体开关,做电路分析时,为简单起见也往往用理想开关来代替。广义上讲,电力电子开关有时候也指由电力电子器件组成的在电力系统中起开关作用的电气装置,这在后面将有适当的介绍。

3)在实际应用当中,电力电子器件往往需要由信息电子电路来控制。由于电力电子器件所处理的电功率较大,因此普通的信息电子电路信号一般不能直接控制电力电子器件的导通或关断,需要一定的中间电路对这些信号进行适当的放大,这就是所谓的电力电子器件的驱动电路。

4)尽管工作在开关状态,但是电力电子器件自身的功率损耗通常仍远大于信息电子器件,因而为了保证不致于因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏,不仅在器件封装上比较讲究散热设计,而且在其工作时一般都还需要安装散热器。这是因为电力电子器件在导通或者阻断状态下,并不是理想的短路或者断路。导通时器件上有一定的通态压降,阻断时器件上有微小的断态漏电流流过。尽管其数值都很小,但分别与数值较大的通态电流和断态电压相作用,就形成了电力电子器件的通态损耗和断态损耗。此外,还有在电力电子器件由断态转为通态(开通过程)或者由通态转为断态(关断过程)的转换过程中产生的损耗,分别称为开通损耗和关断损耗,总称开关损耗。对某些器件来讲,驱动电路向其注入的功率也是造成器件发热的原因之一。通常来讲,除一些特殊的器件外,电力电子器件的断态漏电流都极其微小,因而通态损耗是电力电子器件功率损耗的主要成因。当器件的开关频率较高时,开关损耗会随之增大而可能成为器件功率损耗的主要因素。

### 1.1.2 应用电力电子器件的系统组成

如图 1.1 所示,电力电子器件在实际应用中,一般是由控制电路、驱动电路和以电力电子器件为核心的主电路组成一个系统。由信息电子电路组成的控制电路按照系统的工作要求形成控制信号,通过驱动电路去控制主电路中电力电子器件的导通或者关断,来完成整个系统的功能。因此,从宏观的角度讲,电力电子电路也被称为电力电子系统。在有的电力电子系统中,需要检测主电路或者应用现场的信号,再根据这些信号并按照系统的工作要求来形成控制信号,这就还需要有检测电路。广义上人们往往将检测电路和驱动电路这些主电路以外的电路都归为控制电路,从而粗略地说,电力电子系统是由主电路和控制电路组成的。主电路中的电压和电流一般都较大,而控制电路的元器件只能承受较小的电压和电流,因此,在主电路和控制电路连接的路径上,如驱动电路与主电路的连接处,或者驱动电路与控制信号的连接处,以及主电路与检测电路的连接处,一般需要进行

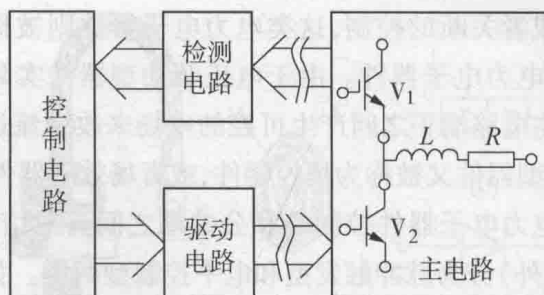


图 1.1 电力电子器件在实际应用中的系统组成

电气隔离,而通过其他手段如光、磁等来传递信号。此外,由于主电路中往往有电压和电流的过冲,而电力电子器件一般比主电路中普通的元器件要昂贵,但承受过电压和过电流的能力却要差一些,因此,在主电路和控制电路中附加一些保护电路,以保证电力电子器件和整个电力电子系统正常可靠运行,也往往是非常必要的。

从图 1.1 中还可以看出,电力电子器件一般都有三个端子(或者称为极或引脚),其中两个端子是连接在主电路中的流通主电路电流的端子,而第三端被称为控制端(或控制极)。电力电子器件的导通或者关断是通过在其控制端和一个主电路端子之间施加一定的信号来控制的,这个主电路端子是驱动电路和主电路的公共端,一般是主电路电流流出电力电子器件的那个端子。

### 1.1.3 电力电子器件的分类

按照电力电子器件能够被控制电路信号所控制的程度,可以将电力电子器件分为以下三类:

1) 通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断的电力电子器件被称为半控型器件,这类器件主要是指晶闸管(Thyristor)及其大部分派生器件,器件的关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的。

2) 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被称为全控型器件,由于与半控型器件相比,可以由控制信号控制其关断,因此又称为自关断器件。这类器件品种很多,目前最常用的是绝缘栅双极晶体管和电力场效应晶体管。

3) 也有不能用控制信号来控制其通断的电力电子器件,因此也就不需要驱动电路,这就是电力二极管,又被称为不可控器件。这种器件只有两个端子,其基本特性与信息电子电路中的二极管一样,器件的导通和关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的。

按照驱动电路加在电力电子器件控制端和公共端之间信号的性质,可以将电力电子器件(电力二极管除外)分为电流驱动型和电压驱动型两类。如果是通过从控制端注入或者抽出电流来实现导通或者关断的控制,这类电力电子器件被称为电流驱动型电力电子器件,或者电流控制型电力电子器件。如果是仅通过在控制端和公共端之间施加一定的

电压信号就可实现导通或者关断的控制,这类电力电子器件则被称为电压驱动型电力电子器件,或者电压控制型电力电子器件。由于电压驱动型器件实际上是通过加在控制端上的电压在器件的两个主电路端子之间产生可控的电场来改变流过器件的电流大小和通断状态的,所以电压驱动型器件又被称为场控器件,或者场效应器件。

根据驱动电路加在电力电子器件控制端和公共端之间有效信号的波形,又可将电力电子器件(电力二极管除外)分为脉冲触发型和电平控制型两类。如果是通过在控制端施加一个电压或电流的脉冲信号来实现器件的开通或者关断的控制,一旦已进入导通或阻断状态且主电路条件不变的情况下,器件就能够维持其导通或阻断状态,而不必通过继续施加控制端信号来维持其状态,这类电力电子器件被称为脉冲触发型电力电子器件。如果必须通过持续在控制端和公共端之间施加一定电平的电压或电流信号来使器件开通并维持在导通状态,或者关断并维持在阻断状态,这类电力电子器件则被称为电平控制型电力电子器件。

此外,同处理信息的电子器件类似,电力电子器件还可以按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况分为单极型器件、双极型器件和复合型器件三类。由一种载流子参与导电的器件称为单极型器件(也称为多子器件);由电子和空穴两种载流子参与导电的器件称为双极型器件(也称为少子器件);由单极型器件和双极型器件集成混合而成的器件则被称为复合型器件,也称混合型器件。

## 任务2 不可控器件——电力二极管

电力二极管(Power Diode, PD)也被称为半导体整流器(Semiconductor Rectifier, SR),属于不可控器件,20世纪获得应用最早的电力电子器件,但由于结构和原理简单,工作可靠,所以直到现在电力二极管仍然大量应用于许多电气设备中,尤其是快恢复二极管和肖特基二极管,它在中、高频整流和逆变以及低压高频整流的场合发挥着重要的作用,具有不可替代的地位。

### 1.2.1 电力二极管的结构及工作原理

由一个面积较大的PN结和两端引线封装组成电力二极管。图1.2(a)所示是电力二极管的外形(左边的是螺栓型,右边的是平板型)。图(b)所示是阳极A由P型半导体引出,阴极K由N型半导体引出,图(c)是它的电气图形符号。

电力二极管的内部结构如图1.3所示,将N型半导体和P型半导体结合在一起时,由于N型半导体中有大量的电子(多子),P型半导体存在大量的空穴(多子),在N区和P区交界处电子和空穴存在浓度差,于是N区中的电子会向P区扩散,在P区被空穴复合,而P区的空穴也会向N区扩散,并在N区被电子复合,结果在界面两侧形成了等量正、负

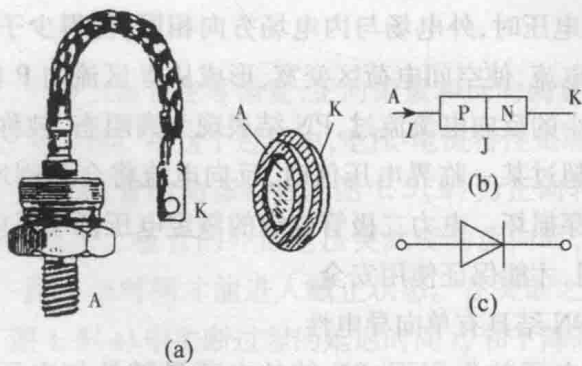


图 1.2 电力二极管的外形、结构及电气图形符号

(a) 电力二极管的外形 (b) 电力二极管的结构

(c) 电力二极管的电气符号

离子组成的空间电荷区。空间电荷建立的电场被称为内电场,其方向由 N 指向 P,所以会阻止扩散运动,有利于少子的漂移运动。当扩散运动和漂移运动达到动态平衡,正、负空间电荷量等量,形成了一个稳定的空间电荷区,即 PN 结。

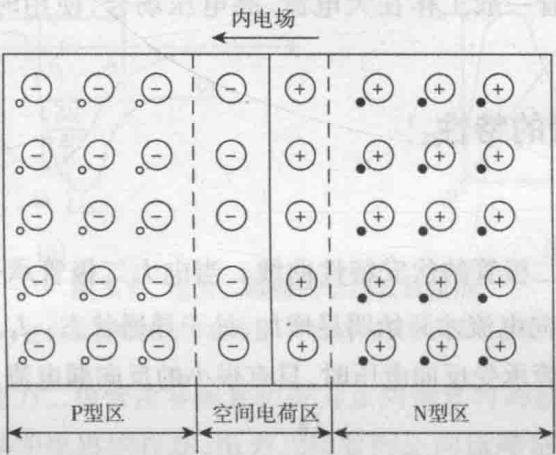


图 1.3 PN 结的形成

当 PN 结外加正向电压,即 P 正、N 负时,外加电场与 PN 结内电场方向相反,使得多子的扩散运动强于少子的漂移运动,使空间电荷区变窄,形成从 P 区流向 N 区的正向电流。当外加电压升高时,外电场削弱内电场,扩散电流进一步增加。这就是 PN 结的正向导通。当 PN 结上流过的正向电流较小时,二极管的电阻阻值较大且为常量,所以管压降随正向电流的上升而增加;当 PN 结上流过的正向电流较大时,注入并积累在低掺杂 N 区的少子空穴浓度将很大,为了维持半导体电中性条件,其多子浓度也相应大幅度增加,使得其电阻率明显下降,也就是电导率大大增加,这就是电导调制效应。电导调制效应使得 PN 结在正向电流较大时压降仍然很低,维持在 1V 左右,所以正向偏置的 PN 结表现为低阻态,并不随电流大小变化而变化。

当 PN 结外加反向电压时,外电场与内电场方向相同,使得少子的漂移运动强于多子的扩散运动,形成漂移电流,使空间电荷区变宽,形成从 N 区流向 P 区的反向电流,由于少子的浓度很小,只有很小的反向电流流过,PN 结表现为高阻态,被称为反向截止。如果增大反向电压,当增大到超过某一临界电压值时,反向电流将会急剧增大,电力二极管反向击穿,可导致二极管击穿损坏。电力二极管规定的额定电压低于反向击穿电压,当然它必须在额定电压以下使用,才能保证使用安全。

由以上分析说明,PN 结具有单向导电性。

必须注意,在外加电压的作用下,PN 结的电荷量随外加电压而变化,呈现电容效应,称为结电容  $C_j$ ,又称为微分电容。结电容按其产生机制和作用的差别分为势垒电容  $C_B$  和扩散电容  $C_D$ 。势垒电容只在外加电压变化时才起作用,外加电压频率越高,势垒电容作用越明显。势垒电容的大小与 PN 结截面积成正比,与阻挡层厚度成反比,而扩散电容仅在正向偏置时起作用。在正向偏置时,当正向电压较低时,势垒电容为主要成分;当正向电压较高时,扩散电容的主要成分为结电容。结电容影响 PN 结的工作频率,特别是在高速开关的状态下,可能使其单向导电性变差,甚至不能工作,应用时应加以注意。还有,电力二极管一般工作在大电流、高电压场合,使用时必须配备良好的散热器,确保安全运行。

## 1.2.2 电力二极管的特性

### (一) 伏安特性

图 1.4 所示是电力二极管的伏安特性曲线。当电力二极管承受的正向电压达到  $U_{T0}$  时( $U_{T0}$ 为门槛电压),正向电流才开始明显增加,处于导通状态。 $I_F$  和  $U_F$  是正向电流和正向电压降。当电力二极管承受反向电压时,只有很小的反向漏电流。

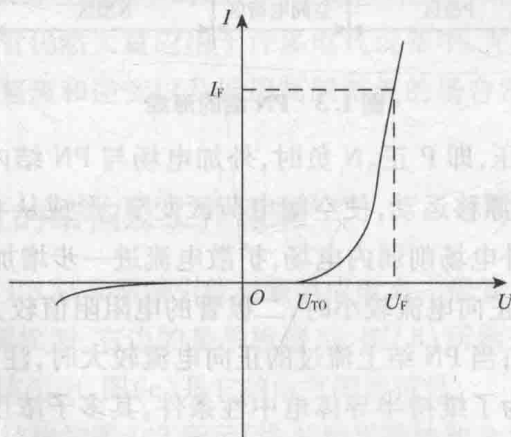


图 1.4 电力二极管的伏安特性

## (二) 动态特性

因为结电容的存在,电力二极管在零偏置、正向偏置和反向偏置这三种状态之间转换的时候,必然经历一个过渡过程。在这个过程中,电压-电流特性是随时间变化的。

图 1.5(a) 给出了电力二极管的动态特性。图 1.5(a) 为正向转为反向偏置的波形。当原处于正向导通状态的电力二极管的外加电压突然变为反向时,该电力二极管并不能立即关断,而是需经过一段反向时间才能进入截止状态。在关断之前有较大的反向电流及出现反向过冲电压。图 1.5(a) 中关断过程的延迟时间  $t_d$  和下降时间  $t_f$  为

$$t_d = t_1 - t_0$$

$$t_f = t_2 - t_1$$

电力二极管的反向恢复时间为  $t_{rr} = t_d + t_f$

图中  $t_F$  为外加电压由正向变为反向时刻;  $t_0$  为正向电流降为零的时刻;  $t_1$  为反向电流达到最大值的时刻;  $t_2$  为电流变化率接近于 0 的时刻。

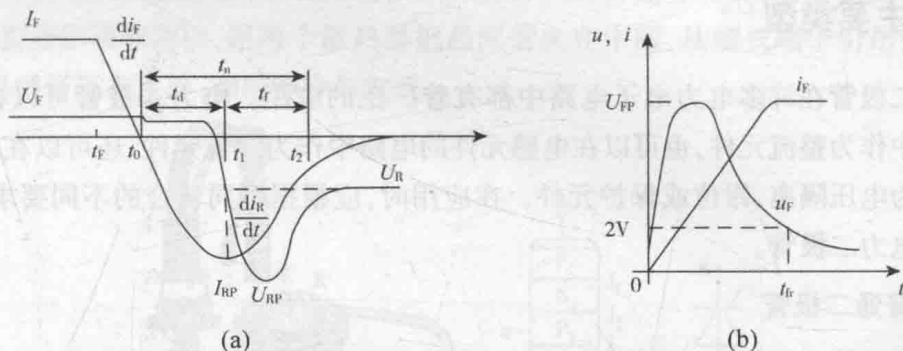


图 1.5 电力二极管的动态过程波形

(a) 正向偏置转换为反向偏置 (b) 零偏置转换为正向偏置

图 1.5(b) 给出了电力二极管由零偏置转换为正向偏置时的波形。从波形中可知,在开通过程中,由于外电路中电感的存在,电力二极管的正向压降也会先出现一个过冲  $U_{FP}$  (几伏至几十伏),经过一段时间接近稳态值  $U_F$  (约为 1~2V)。上述时间被称为正向恢复时间  $t_{fr}$ 。

### 1.2.3 电力二极管的主要参数

#### (1) 正向平均电流 $I_{F(AV)}$

正向平均电流指器件长期运行时,在规定的管壳温度(简称壳温,用  $T_c$  表示)和散热条件下允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值。在选择电力二极管时,按电流有效值来选,正向平均电流  $I_{F(AV)}$  对应的有效值为  $1.57I_{F(AV)}$ 。取电力二极管的额定电流,并应留有 1.5~2 倍的裕量。

#### (2) 正向压降 $U_F$

正向压降指在规定条件下,流过某一指定的稳态正向电流时对应的正向压降。