

# 电力电子学

贾正春 马志源 主编



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 电力电子学

---

贾正春 马志源 主编



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

电力电子学是 20 世纪 70 年代发展起来的新兴学科。

全书共分八章：第一章是从应用的角度介绍电力半导体器件的特性；第二、三章是讲述利用相控原理的可控整流与有源逆变和交—交变频器；第四章是讲述研究 DC—DC 变换的斩波器的工作原理；第五章主要是研究采用 PWM 技术的无源逆变器；第六章是功率因数校正；第七章是软开关技术及其应用；第八章是开关电源。本书的第六~八章是电力电子学最新的内容，其中，电感电流连续的功率因数校正的原理电路分析，直流环节谐振的软开关逆变器的补偿损耗电流的计算公式，电压电流工作波形的计算；推导出的反激式、正激式、半桥式和桥式变换的开关电源的输入输出和导通时间的统一公式，这些都是由我们首先完成但还没有正式发表过论文的科研工作的成果。

本书可作为授课 80 学时左右的本科电工类学生的专业用书，也可供相关专业的技术人员作为参考！

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子学/贾正春 马志源 主编.-北京：中国电力出版社，2001

ISBN 7-5083-0839-5

I. 电… II. ①贾…②马… III. 电力电子学 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 076403 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

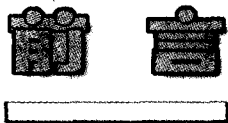
2002 年 1 月第一版 2002 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18 印张 406 千字

印数 0001—3000 册 定价 29.00 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)



电力电子学是研究采用电力半导体器件实现对电能的变换和控制的科学，是 20 世纪 70 年代发展起来的新兴学科。由华中理工大学贾正春、许锦兴老师编写的《电力电子学》，在过去十多年的教学实践中，获得了许多宝贵的经验。本书的前版曾经华中理工大学出版社出版并多次重印，1996 年被评为国家电力部优秀教材二等奖。但是，随着电力半导体器件和控制理论的发展，电力电子学的发展也很快，必须对原有的教材进行修改，推陈出新，才能适应电力电子学本身的发展和培养 21 世纪电工学科人才的需要。因此，华中理工大学的贾正春、马志源等老师重新编写了这本《电力电子学》教材。

电力电子学是由电力电子器件、电力电子电路和控制三个主要方面的内容所构成，其内容极其丰富多彩。为了不使教材篇幅过于庞大，我们在选材上考虑了以下几点：①站在多学科交叉的角度来研究电力电子学；②对于各种类型的变换器，重点研究常用的典型电路，且只讨论典型变换器本身的工作原理，而不涉及到各种变换器的输出外特性等；③控制部分只研究与各类变换器相关的控制特点和专用的集成电路。这样既避免了和电力拖动、自动控制原理课程的重复，同时在有限的版面可以将电力电子学最新的内容都纳入。例如，在 10 年前 IGBT 刚刚问世，它的发展和應用潜力还不明朗。而现在 IGBT 已成为电力电子器件发展的平台，因此必须在教材中较多的反映出来。晶闸管斩波电路、晶闸管 PWM 逆变器，在很中的应用领域已逐渐被 IGBT 所替代，因此必须从教材中尽量删除这部分内容。而在交流调压中，我们认为采用晶闸管的相控交流调压有明显的特点，因此对于采用 IGBT 的高频斩波交流调压的 Buck、Boost 和 Buck-Boost 电路，本书就没有作讨论。功率因数校正和软开关技术是电力电子学的最新发展成就，对今后电力电子学的发展将产生深远影响，因此，本书都以一定的篇幅作了阐述。控制原理是电力电子学的重要组成部分，在本书中我们是根据各类变换器的特点，研究相关的控制原理。如可控整流与有源逆变器，我们只研究移相触发电路的原理。无源逆变器用的最多的是交流电动机调速，其控制部分几乎用上了现代控制理论中的所有理论，但是这些都只能在拖动、电机调速的课程中讲授，而其与主电路开关有关的基极驱动、过压过流保护及牵涉到逆变器安全运行的控制问题则是研究的重点。又如有源功率因数校正，其主电路就是一个 Boost 整流器，但为了实现功率因数为 1，其控制部分必须与之构成一个不可分割的整体，它必须有由输入电压、输出电压检测反馈构成的电压外环，同时还必须有电流内环，以达到控制电感电流为与电压同相位的正弦波。即该升压整流器是一个典型的双环控制系统，并与输入输出的外电路无关。因此，对于功率因数校正，重点研究了功率因数的控制芯片和其独特的控制原理。

本书共分八章，可作为授课 80 学时左右的本科电工类专业用书。第一章是从应用的角度介绍电力半导体器件的特性；第二、三章是讲述利用相控原理的可控整流与有源逆变和交—交变频器；第四章是讲述研究 DC—DC 变换的斩波器的工作原理；第五章主要是分析采用 PWM 技术的无源逆变器；第六章是功率因数校正；第七章是软开关技术及其应用；第八章是开关电源。本书第六~八章的内容是电力电子学最新技术，其中，电感电流临界连续的功率因数校正的原理电路分析，直流环节谐振的软开关逆变器补偿损耗电流的计算公式，电压电流工作波形的计算，以及本书推导出的反激式、正激式、半桥式和桥式变换的开关电源的输入输出和导通时间的统一公式，这些都是我们首先完成但还没有发表过论文的科研成果。

本书的第一章由黄声华教授编写，第二、三章由马志源教授编写，第四章由夏胜芬讲师编写，第五章由韦忠朝副教授编写，第六、七、八章由贾正春教授编写。全书由贾正春、马志源教授负责统审稿工作。在编写过程中，部分章节的文字输入和绘图的工作得到了青年教师熊娅俐和研究生邹志革的热心配合，在此一并表示感谢。

电力电子学是一门边缘学科，由于作者水平有限，书中难免有不妥甚至错误之处，恳请读者批评指正。

**编者**



## 前言

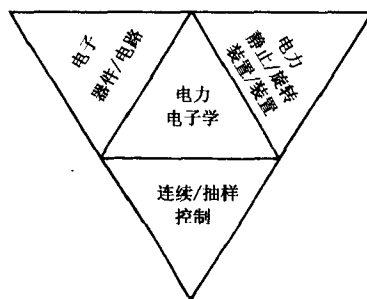
绪论	1
<b>第1章 电力半导体器件</b>	<b>5</b>
1.1 电力半导体器件种类与特点	5
1.2 功率二极管	7
1.3 功率晶体管	9
1.4 功率场效应管	17
1.5 绝缘栅极双极型晶体管	22
1.6 晶闸管	24
1.7 晶闸管的派生器件	37
1.8 主要电力半导体器件特性比较	41
习题与思考题	43
<b>第2章 整流与有源逆变</b>	<b>45</b>
2.1 概述	45
2.2 单相可控整流电路	46
2.3 三相半波可控整流电路	59
2.4 三相桥式全控整流电路	66
2.5 整流电路换流过程	75
2.6 有源逆变电路	80
2.7 电动势负载和电容性负载的整流电路	88
2.8 可控整流器主电路的参数选择	97
2.9 晶闸管触发电路	101
习题与思考题	113
<b>第3章 交流—交流变换器</b>	<b>117</b>
3.1 交流调压器概述	117
3.2 相控单相交流调压器	118
3.3 相控三相交流调压器	121
3.4 两组晶闸管整流器反并联的可逆电路	126
3.5 交—交变频器	128
习题与思考题	134

<b>第 4 章 直流斩波电路</b>	136
4.1 概述	136
4.2 直流斩波电路的工作原理	137
4.3 斩波电路的控制	142
4.4 桥式斩波电路	149
4.5 MOSFET、BJT 和 IGBT 斩波器	152
4.6 晶闸管斩波电路	156
习题与思考题	160
<b>第 5 章 无源逆变器</b>	162
5.1 概述	162
5.2 180°导通的电压源型三相逆变器	164
5.3 串联二极管电流源型逆变器	167
5.4 正弦脉宽调制 (SPWM) 技术	169
5.5 PWM 逆变器	173
5.6 PWM 逆变器的特殊问题	179
习题与思考题	188
<b>第 6 章 有源功率因数校正</b>	190
6.1 概述	190
6.2 峰值电流控制的双级式 APFC	194
6.3 平均电流控制的双级式 APFC	202
6.4 单级式功率因数校正变换器	207
6.5 三相功率因数校正	209
习题与思考题	212
<b>第 7 章 软开关技术及其应用</b>	213
7.1 概述	213
7.2 谐振直流环节逆变器	216
7.3 极谐振型逆变器	223
7.4 移相控制软开关 PWM 变换器	237
习题与思考题	241
<b>第 8 章 开关电源</b>	243
8.1 概述	243
8.2 DC/DC 变换的开关电源	246
8.3 单端功率输出的直流变换器	257
8.4 单端反激式开关电源	259
8.5 单端正激式变换器	267
8.6 半桥式变换器	270
8.7 全桥式变换器的开关电源	276
习题与思考题	279

# 绪 论

## 一、电力电子学的科学性质与发展

电力电子学 (Power Electronics) 是研究采用半导体器件实现对电能的控制和变换的科学, 它是一门应用于电力技术领域中的电子学。自 1974 年, 国际上开始接受了 W·Newell 的定义, 即把电力电子学作为介于电气工程三大主要领域——电力、电子和控制之间的交叉学科, 如图所示。所以电力电子学是应用电子学的一个分支, 是与电气工程的主要学科紧密相关的。



描述电力电子学是一门交叉学科的三角形

电力电子学是随着电力半导体器件的发展而发展的。1948 年晶体管的发明, 使电子工业产生了一次革命。1957 年晶闸管的出现和在电力领域中的应用, 实质上就是电力电子学的开端 (晶闸管雏型在 1956 年由贝尔电话研究所的 John Moll 研制出来, 1958 年由通用电气公司的 RA·York 等完成了其生产工艺, 并开始将其应用于电力控制)。1980 年可关断晶闸管 GTO 的商品化 (2500V/1000A), 使电力电子学向前推进了一大步。1975 年美国 Siliconix 公司制造出 V 形沟道的金属氧化物半导体场效应功率晶体管, 即 MOSFET。1988 年 IGBT 的出现, 它集功率晶体管 BJT 和场效应功率晶体管的优点于一体, 这是电力半导体器件向理想化方面迈进的最重大事件, 使电力电子学的发展进入到一个日新月异的阶段。与此同时, 新的电路、新的控制技术也不断出现, 助使电力电子学向更新、更深的领域发展。另一方面, 电力电子学作为一门交叉学科, 它反过来又向其邻近的学科渗透, 特别是电工技术领域也出现了前所未有的新的发展局面。

电力电子学包含以下三个方面的内容:

### (一) 电力电子器件

电力电子器件是电力电子学发展的基础。目前, 电力电子器件主要有硅整流二极管 (Diode)、晶闸管 (Thyristor)、双极型功率晶体管 (BJT)、功率场效应晶体管 (MOSFET) 和绝缘基极的功率晶体管 (IGBT)。这些器件正沿着功率化、快速化、模块化和智能化方面发展。

在高电压大电流的应用中 (如高压直流输电、无功补偿等), 目前晶闸管仍占主导地位, 但由于 IGBT 开关速度快、又是电压驱动元件、控制灵活, 因此在 1000kW 以下的电力变换器中, IGBT 是当然的佼佼者。也正因为如此, IGBT 发展很快, 开关电源中的单管



IGBT元件，如IR公司的600V、30A、工作频率为150kHz的产品，Mitsubishi公司的1200V、40A、工作频率75kHz的产品，已有取代MOSFET的趋势。在IGBT模块化方面，已有把驱动与保护都集成在一块的智能模块（IPM），还有将整流和逆变器集在一块的功率集成模块（PIM）。电力半导体器件的发展，自然助进了电力电子装置的发展与更新换代。

## （二）电力电子电路及装置

采用半导体器件实现电能的控制与变换，其功率范围从数十瓦到数千瓦。例如家用电器和调光台灯，功率一般都是数十瓦到数百瓦；电动汽车和电车等功率一般是几十千瓦到数百千瓦；轧钢机和高压直流输电等，功率一般是数千千瓦以上。

电力电子电路及装置是电力电子学的主体。电力电子电路及装置通常被叫做变换器（Converter），按照电能变换功能可分为如下几类：

（1）DC→DC变换器：可改变电压幅值的大小，实现直流对直流的变换，一般叫做斩波器（Chopper）。

（2）AC→DC变换器：可改变电压和频率，实现从交流到直流的变换，一般叫做整流器（Rectifier）。

（3）AC→AC变换器：可改变电压和频率，实现从交流到交流的变换，一般叫做周期变换器（Cycle converter）。

（4）DC→AC变换器：可改变电压和频率，实现从直流到交流的变换，一般叫做逆变器（Inverter）。

（5）AC→DC→AC变换器：这是一个复杂的而又最常用的电力电子变换系统，是由整流器和逆变器构成的，中间有一个直流环节。在电力系统中，它是一个典型的高压直流输电系统。在交流调速中，它是典型的变压变频变换器（VVVF Converter），其输出频率的变化范围很广。

除了上述典型的变换器外，还有由这些变换器组合起来的电力电子变换器，如不停电电源（AC→DC→AC）和开关电源（AC→DC→DC）等。

电力电子器件和电力电子电路相互之间的依赖关系很密切。新器件的出现会促使电路达到新的水平，新的电路设计又反过来对器件提出新的要求。随着电力电子器件的功率化、高速化，电力电子电路的容量水平和频率范围不断提高，电能变换的性能也越来越好。

## （三）电力电子电路的控制系统

电能的控制与变换是通过变换频率、变换电压来满足各种不同应用的要求。为了实现这一目的，电力电子电路就离不开各式各样的模拟控制、检测反馈等信息处理与信号控制系统。

同一电力电子电路，由于控制水平的提高，可以使电路达到更为完善的性能水平。脉冲宽度调制（即PWM）技术对直流调速、交流调速、开关电源的影响便是一个明显的例子。最近出现的有源功率因数校正技术，采用电压电流波形跟踪、输出电压反馈和电压前馈控制，能使普通整流器的功率因数从0.5提高到0.99以上，变成了无谐波污染的“绿色”用电装置。所以新的控制方式的研究和新的控制工具的使用是电力电子学的重要内

容。

微处理器在电力电子装置中的应用,说明了当代学科间是互相渗透的。由于自动控制技术的发展,电力电子学不仅与电子学紧密相关,而且已经和计算机科学发生了紧密的联系。特别是最近几年来,由于微电子技术的发展,工业控制的功能模块或专用芯片不断涌现。例如,美国的AD公司和TI公司都推出了用于电动机调速的数字信号处理器(DSP),将32位的DSP和外设都集成在一块芯片上,ADMC300和TMS320C240把DSP、CPU、ADC和PWM等外设都集于一体,使AC/DC→DC/AC变换器的控制系统变得小型化和高可靠性,使变换装置更加完美,很容易实现系列化和标准化。

## 二、电力电子学的应用领域

电力电子学是近20多年来发展的新型学科,具有很强的生命力。据预计21世纪的主导工业第一是信息产业,第二是计算机与电力电子。因此电力电子学将在以下领域得到长足发展和应用:

### (一) 节约能源的应用领域

从节能的观点出发,人们对电力电子学的评价很高,例如把电力电子学称为20世纪新的电气技术,节能的王牌。具体体现如下:

(1) 降低通态压降,提高整流效率而节能。在20世纪80年代人们就认识到,用硅整流二极管和晶闸管替代水银整流器时,将其导通压降降低可节约大量的电能。如,我国沈阳某铝厂改造后,整流效率从93.5%提高到97.5%,功率因数也从89%提高到90.6%,因而每天可节约电21万kWh。又如,沈阳某冶炼厂经过改造后,年节电量为950万kWh。在低压大电流整流中,目前国外的趋势是采用通态压降非常低的(约0.3V)肖特基二极管,可进一步提高整流器的效率,节约电能。

(2) 调速节能。采用变频器实现调速节能,对风机、水泵类负载节能潜力很大。目前我国的风机、水泵基本上采用电动机全额运行,通过挡板节流来调节流量与压力,这使能量损失在阀门上,浪费很大。如果改用电力电子变换器实现变频调速,即通过调节电动机的输入能量来达到调节流量与压力的效果,根据1983年国家经委组织的专家调查组的结论可知,节约电能约达30%左右。同时根据专家调查组的结论,国家每年发电量的30%用于风机、水泵和交流牵引的异步电动机,如果这些异步电动机都改用变频调速,则每年全国发电量的9%就节约下来了。

### (二) 电力系统的应用领域

- (1) 自动化装置,最有代表性的是同步发电机的励磁调节系统。
- (2) 高压直流输电装置。
- (3) 静止无功补偿装置。
- (4) 新能源的开发和超导贮能装置。
- (5) 固态断路器——切换用的电力电子断路器。

上述电力系统用的电力电子装置,除高压直流输电外,目前统称为柔性输电系统(Flexible AC Transmission System——FACTS),这些电力电子装置实现对交流输电的调节,

控制更加可靠、更快和更灵活，大大提高了电力系统运行的可靠性。从这些 FACTS 中看出，电力电子学在电力系统中的应用是全面的。FACTS 不仅是电力电子器件，它还需要辅以微型计算机、通信和测量手段，同时软件技术也是不可少的，因为需要快速地、完善地测知电力网运行条件的变化，并快速计算出应怎样操作、应有多大补偿及其变化等，然后又要能快速将这些操作信息送到相应设备中去，进行控制调节与操作。

### **(三) 工业自动化应用领域**

工业电气自动化是电力电子学最活跃最能体现技术水平的领域，也是电力电子学渗透最深的工业自动化、机器人控制、交通运输和国防现代化等领域中的一个。在工业自动化方面可以集中到一点的是“电力传动”，即直流电动机、交流永磁电动机和直线电动机调速的系统。有典型代表性的是交直流伺服系统。它的水平将体现一个国家的机床数控、机器人控制、国防工业、计算机控制的综合制造系统（CIMS）的能力。

### **(四) 各类电源的应用领域**

电力电子学的发展，使各类稳压电源从线性放大发展到无工频变压器的各种开关电源，从而大大提高了电源效率，并且缩小了体积、节省了有色金属材料。大功率的超声源和交换机用的通信电源，采用电力电子技术后，从原来的庞然大物变为“一个模块”。在电源领域，当前的发展方向是采用有源功率因数校正技术，使之功率因数为 1，并成为对电网无谐波污染的“绿色”电源，同时采用软开关技术，提高电源的变换效率。

### **(五) 家用电器（包括公共照明）的应用领域**

家用电器和公共照明系统的特点是电压比较低（220V AC），功率一般都只有几十瓦到数百瓦，而又量大、面广。这刚好是电力半导体器件最适应和最便宜的范围，因而促进了电力电子技术在这一应用领域的发展。从调光台灯到电子镇流器的节能灯，从变频空调到变频冰箱，无一不是用到电力电子技术，甚至连电视机的电源都要用到电力电子技术。

## **三、教学任务与要求**

电力电子学作为电气工程专业本科的一门技术基础课，为培养具有开拓性和创造性的人才打好基础、拓宽知识面。

通过本课程的学习，要求学生：

- (1) 掌握典型电力半导体器件的运行特性和应用技术；
- (2) 掌握典型的电力电子变换器的工作原理：包括变换器本身的换流原理、工作波形；
- (3) 熟悉和掌握典型电力电子变换器中主要元件的参数选择；
- (4) 熟悉几种典型电力电子变换器的集成调制器的工作原理。

由于电力电子学是一门实践性和适应性很强的课程，要求学生尽量争取参与一切可能的实验和科研课题等实践环节，以培养动手能力。

# 第 1 章

## 电力半导体器件

### 1.1 电力半导体器件种类与特点

#### 1.1.1 半导体器件分类

半导体器件分类方法很多，如按功率等级来分类，有微功率器件、小功率器件、大功率器件等等；按制造材料分类有锗管、硅管等；按导电机理分类有双极型器件、单极型器件、混合型器件等；按控制方式来分类，可分为不可控器件、半可控器件和全可控器件三类器件。

不可控器件包括整流二极管、快速恢复二极管、肖特基二极管等。

半可控器件包括普通晶闸管、高频晶闸管、双向晶闸管、光控晶闸管等。

全可控器件包括功率晶体管 (BJT)、功率场效应管 (Power MOSFET)，绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)、静电感应晶体管 (SIT)、可关断晶闸管 (GTO)、静电感应晶闸管 (SITH) 等。

#### 1.1.2 电力半导体器件使用特点

电力半导体器件主要用于高电压、大电流的装置中，为避免过大的功率损耗，电力半导体器件稳态时通常工作在饱和导通与截止两种工作状态。饱和导通时，器件压降很小，而截止时它的漏电流小得可以忽略，这样在饱和导通与截止两种工作状态下的损耗都很小，器件近似于理想的开关。因此，饱和导通与截止两种工作状态有时称通、断状态或开、关状态。例如，图 1-1 所示电路中  $U_{CC} = 50V$ ， $R_L = 5\Omega$ ，当 V1 工作在饱和导通状态时，管压降  $U_{CE} \approx 0.3V$ ，V1 的管耗  $P_{V1} = I_C \times U_{CE} \approx (U_{CC}/R_L) \times U_{CE} = 10 \times 0.3 = 3W$ ，V1 截止的漏电流  $I_C = 0$ ，即截止时 V1 的管耗  $P_{V1} \approx 0$ 。如果 V1 工作在线性放大状态时，设  $I_C = 5A$ ，则 V1 的管耗  $I_C \times U_{CE} = I_C \times (U_{CC} - I_C \times R_L) = 5 \times (50 - 5 \times 5) = 75W$ 。这样

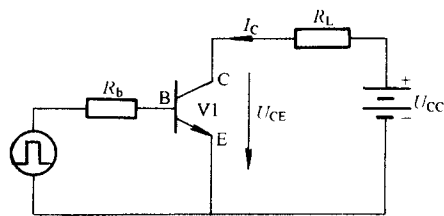


图 1-1 简单的 BJT 电路

大的管耗将使得 V1 严重发热，甚至可能超出其安全工作区造成器件损坏。但需要指出的是，电力半导体器件在开关状态转换过程时并不是瞬时完成的（所需时间称开关时间），而是要经过一个转换过程（称开关过程），在这个转换过程中开关元件会进入放大区工作，使开关过程的功率损耗（称开关损耗）剧增，因此应尽量减少器件开关过程的时间或采用软开关技术降低器件开关损耗。

从使用角度出发，主要可从以下五个方面考查电力半导体器件的性能特点。

(1) 导通压降。从上面的计算实例可知，半导体器件工作在饱和导通时仍产生一定的管耗，管耗与器件导通压降成正比，所以应尽量选择低导通压降的电力半导体器件。

(2) 运行频率。电力半导体器件运行频率除了与器件的最小开、关时间有关外，还受到开关损耗和系统控制分辨率的限制，器件的开、关时间越短，器件可运行的频率越高。

(3) 器件容量；器件容量包括输出功率、电压及电流等级、功率损耗等参数。高电压等级的功率 MOSFET，导通电阻大，通态功率损耗大，一般应用在中、小功率的高频装置中。近年来 IGBT 发展很快，IGBT 取代 BJT 已成为现实，甚至有取代 GTO 的趋势。

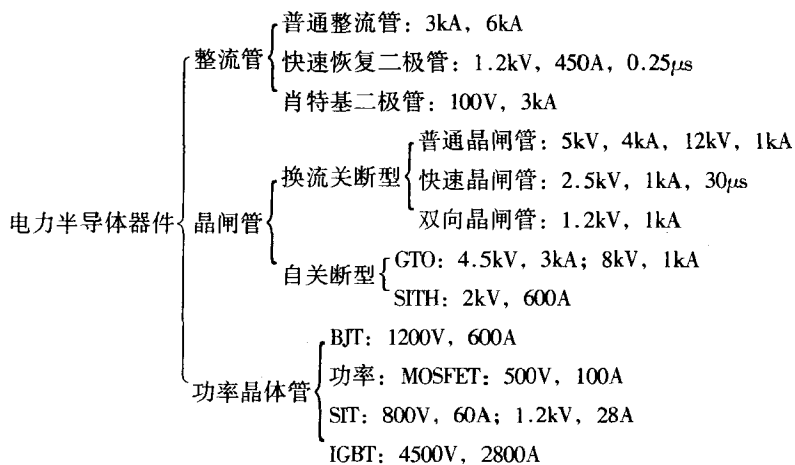
(4) 耐冲击能力。主要是指器件短时间内承受过电流的能力。半可控器件的耐冲击能力远高于全可控器件。例如普通晶闸管在工频半个周期内（10ms）可承受 20 倍以上的额定电流冲击而不损坏。

(5) 可靠性，主要是指器件防止误导通的能力。半可控器件一旦受到干扰信号产生了误导通，则无法通过控制信号将其关断，因此在主要承受正向阻断电压的有源逆变系统中，容易造成系统的颠覆。而全可控器件可以通过控制信号迅速关断误导通的器件，因此系统工作可靠性高。

此外，诸如控制功率、可串并联运行的难易程度、价格等也是选择电力半导体器件应考虑的因素。

### 1.1.3 电力半导体器件发展水平

电力半导体器件的主要品种及目前可达到水平如下所示。



对上述器件，可以预测的发展趋势是：

(1) 在整流管类中，快速恢复二极管将有较大的发展。由于逆变器和斩波器中，都需要快速恢复二极管（功率模块中已集成了这个二极管）续流，以维持电流的连续和通过无功电流，因此超快速软恢复二极管的性能和数量都会有较大幅度的提高。

(2) 晶闸管类中，光控晶闸管主要用于高压直流输电、无功补偿、高压开关等领域，主要向高电压方向发展；晶闸管快速关断与高电压、快速关断与低的通态压降之间的矛盾是目前研究的重点，世界各国都在从不同的侧面努力攻关，欧美各国主要是发展快速晶闸管，日本主要是发展 GTO。在高频大功率领域中，上述两种器件正处于竞争的势态。在高压直流输电中，晶闸管（光控晶闸管）将有很好的发展机遇。

(3) 在功率晶体管类中，以 IGBT 发展最为迅速。IGBT 不仅在容量方面而且在控制性能方面都有令人瞩目的发展，目前 IGBT 最高电压可达 4500V，相应最大电流可达 2800A，在许多大功率应用场合已有取代 GTO 的趋势。IGBT 的控制性能也有了很大改善，第三代 IGBT 已成功地消除了第一代 IGBT 关断拖尾效应。而智能化 IGBT，将驱动保护电路与主电路融为一体，大大简化了控制 IGBT 的外围硬件电路，为人们更安全可靠使用电力电子器件铺平了道路。目前 IGBT 已成为电力半导体器件的发展平台，其优良的控制性能无疑会使它获得更快的应用与发展。

## 1.2 功率二极管

### 1.2.1 二极管工作原理与伏安特性

二极管工作原理基于用 P 型半导体及 N 型半导体组成的 PN 结，它具有单向导电性。当外加正向电压（P 区加正、N 区加负）时，外加电压与内部电场方向相反，削弱了内电场，空间电荷区变窄，P 区多数载流子（空穴）以及 N 区多数载流子（电子）容易越过势垒区（耗尽层），使 PN 结导通，形成电流。电流大小由外加电压和外串电阻大小所决定。

二极管外加反向偏压（P 区加负、N 区加正）时，外加电压与内部电场方向相同，P 区空穴向电源负极方向移动，N 区电子向电源正极方向移动，结果使空间电荷区变宽，则多数载流子的扩散更加困难。虽然 P 区少数载流子（电子）和 N 区少数载流子（空穴）

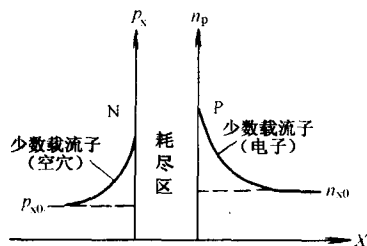


图 1-2 二极管耗尽层与少数载流子浓度分布

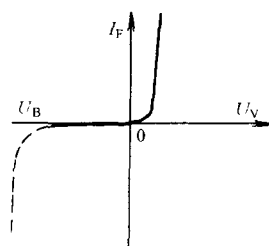


图 1-3 二极管伏安特性

$\Delta$ 电场的增大而增强（见图 1-2），但少数载流子浓度很低，所以反向电流非常小，在反向击穿电压  $U_B$  范围以内，反向电流基本上不随反向偏压而变。由此可得二极管的伏安特性如图 1-3 所示。

### 1.2.2 功率二极管开关特性

功率二极管开通时间很短，一般可以忽略不计，但二极管的关断过程较复杂，对电路的影响不能忽视。

研究二极管关断过程的电路及关断波形如图 1-4 所示。示波器用来观察二极管电流  $i_V$  在取样电阻  $R$  上的压降。在  $t_1$  时刻之前，二极管  $V$  中流过的电流  $i_V$  等于恒流源电流  $I_F$ ，二极管承受正向导通压降  $\Delta U$ 。在  $t_1$  时刻，脉冲发生器发出的脉冲波反接到二极管  $V$  上，下面分三个时间段分析二极管  $V$  的关断过程。

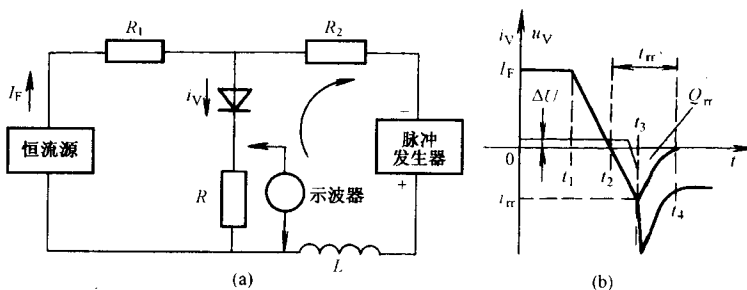


图 1-4 二极管开关

(a) 电路图；(b) 波形图

$t_1 \sim t_2$  时段：在反向脉冲波的作用下，二极管  $V$  的电流  $i_V$  迅速下降， $t_2$  时刻  $i_V = 0$ 。

$t_2 \sim t_3$  时段：电流  $i_V$  反向并向负值方向增加，此时段二极管仍承受正向偏压  $\Delta U$ 。

$t_3 \sim t_4$  时段： $t_3$  时刻  $i_V$  达负的电流峰值  $i_\pi$ ，然后  $i_V$  的绝对值迅速减少， $i_V$  的突变在电感  $L$  中产生一个很高的感应电势加在二极管上，使二极管承受一个较高的反向电压， $t_4$  时刻，二极管反向恢复电流由  $i_\pi$  下降为零。 $t_4$  以后二极管承受的反向电压恒等于脉冲波的幅值。

图 1-4 (b) 中， $t_\pi = t_4 - t_2$ ，是二极管的反向恢复时间， $i_\pi$  是二极管的反向恢复电流， $Q_\pi$  是反向恢复电荷。

图 1-4 (b) 中的波形是由二极管势垒区的电荷分布变化而引起的。在稳态情况下，这些电荷分布只取决于二极管中的电流，但电流的突然变化并不能立即改变电荷的重新分布，电荷分布的改变是由电流的变化及电子的复合作用所引起的。当二极管正向偏置时，尽管通过它的电流反向，但它的结间存贮电荷仍然是一个正的电荷分布。从正的电荷分布到承受反向偏置时，电荷分布的改变是需要一定时间的。电荷变化的大小，就决定了反向恢复电流  $i_\pi$  的峰值，如果正向电流很大，那么总的电荷变化就很大，导致  $i_\pi$  也大。随着电荷的消失，二极管的电阻增大到一定程度时，就斩断了反向恢复电流。通常二极管参数表

中所给定的数据,是在一定的电路参数条件下测得的。一般情况下,反向恢复时间  $t_r$  是一个近似的常数。所谓快速恢复二极管,是指它的结构具有存贮电荷少和迅速复合的能力。

普通二极管的反向恢复时间  $t_r > 2\mu s$ , 快速恢复二极管的  $t_r = 30 \sim 800ns$ , IN4148 小型二极管的反向恢复时间为  $4ns$ 。在工程计算中,反向恢复电流一般用  $1/3$  的负载电流来估计。由实际测试发现,在高电压的应用中,反向恢复电流  $i_r$  一般都超过  $1/2$  负载电流值。

如果二极管反向恢复电流很快降到零,那么可以说它是“突然截止”的,电流的突然下降可能在电路电感中产生一个很高的电压 [参见图 1-4 (b)], 有可能造成电力电子元件的损坏。为此,有时需在二极管 V 上跨接一个阻容吸收电路来保护二极管 (见图 1-5), 当二极管 V 反向恢复电流“突然截止”时,电路电感中的电流可以经  $V_S$ 、 $C_s$  构成通路,防止电路电感中电流突变产生的过电压。

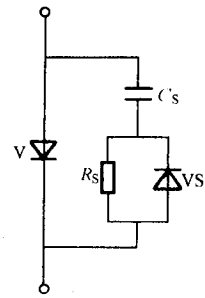


图 1-5 二极管阻容吸收电路

超快速软恢复二极管,  $t_r$  小,  $i_r$  也很小, 同时  $i_r$  降到零的速率  $di_r/dt$  较慢, 所以关断时所引起的过电压就不严重了。

## 1.3 功率晶体管

### 1.3.1 概述

自从 1941 年美国巴丁、肖克莱发明晶体管以来,特别是功率晶体管 BJT (Bipolar Junction Transistor) 的诞生与发展,大大促进了电力电子技术的进步及应用范围。功率晶体管 BJT 一般是指壳温为  $25^\circ C$  时功耗大于  $1W$  的晶体管,或管芯与外壳间热阻小于  $15^\circ C/W$  的晶体管,这两种定义的内含是一致的。

BJT 是一种双极型半导体器件,即其内部电流由电子和空穴两种载流子形成。基本结构有 NPN 和 PNP 两种。而在电力电子电路中主要采用 NPN 结构。为了提高 BJT 的耐压,一般采用  $NP_vN$  三重扩散结构 (图 1-6)。

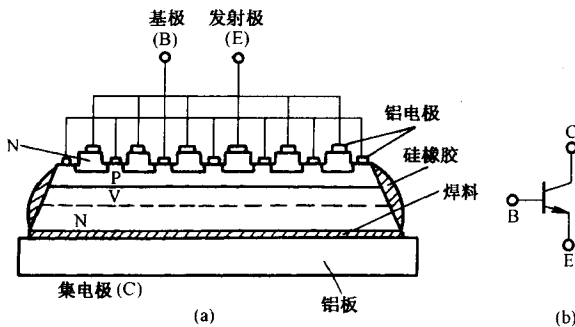


图 1-6 BJT 内部结构与元件符号  
(a) BJT 内部结构; (b) 元件符号

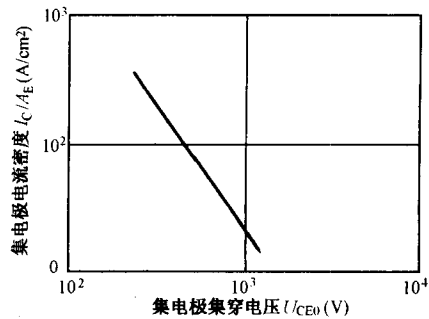


图 1-7 集电极耐压与单位发射面积电流密度关系



由于这种结构中，集电极能以 P-N 结构结合，具有  $\nu$  层薄而比电阻高的优点，即使提高电极电压，也可获得较大的电流。增加三重扩散型结构中的  $\nu$  层的比电阻和厚度，以及借用晶闸管中的斜削等表面处理技术，即可得到高耐压效果。但是由图 1-7 可知，单位发射极面积的容许电流随着耐压增大而减少。所以，要得到容量相同的电流，又要得到高耐压，只得增大面积。BJT 采用金属铜等导电材料把台形发射极区电极连接起来（见图 1-6），这样就把各电极电流集合起来，从而得到大的发射极电流。

### 1.3.2 工作原理及输出特性

BJT 有三种不同的基本电路，即共发射极电路、共基极电路和共集电极电路见图 1-8 所示。共发射极电路是电力电子电路中最常用的电路形式。

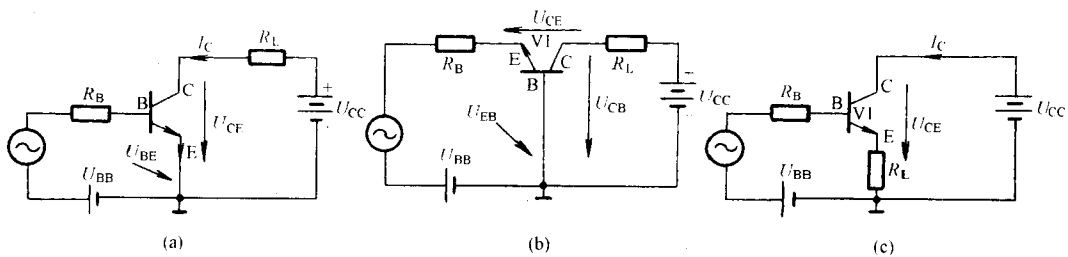


图 1-8 BJT 三种基本电路

(a) 共发射极电路；(b) 共基极电路；(c) 共集电极电路

由 BJT 三重扩散型结构可知，在不同类型半导体区的交界处会形成 PN 结。发射极和基极交界处的发射结  $J_E$  与集电极和基极交界处的集电结  $J_C$  通过很薄的基极区相联系。为了能传送和控制载流子的运动，发射结要加正向电压，使其空间电荷区变窄；集电结要加反向电压，使其空间电荷区变宽。这样将由发射极区向基极区流入电子，并经发射结  $J_E$

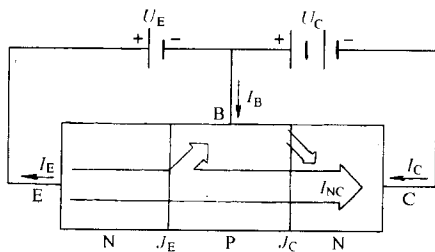


图 1-9 晶体管的电流分配关系

扩散到基极区，形成发射极电流  $I_E$ ，其方向与电子流动方向相反。图 1-9 所示为共基极电路晶体管的电流分配关系。其他电路结构时这个分配关系也相同。在形成电子流的同时，基极区空穴也扩散到发射极区，但是由于发射极区杂质浓度比基极区高得多（一般高几百倍），这部分空穴电流比电子流小得多，可以忽略不计，因此图中未画出。由发射极区注入基极区的大量电子，由于浓度高继续向集电极区扩散，在扩散过程中有一部分电子与基极区的空穴复合，同时接在基极区的电源  $U_E$  正端不断从基极区接走部分电子，形成基极电流  $I_B$ 。由于集电极加的是反向电压，它对扩散到集电极边缘的电子有很强的吸收力，使电子能很快地漂移过集电结为集电极区所收集，形成集电极电流  $I_C$ 。另一方面，在集电结的反向电压作用下，基极区内的少数载流子电子和集电极区内的少数载流子空穴形成反向漂移电流  $I_{CBO}$ ，因为少数