



应用型本科规划教材

POWER ELECTRONICS
TECHNIQUE

电力电子技术

◆ 主 编 任国海
副主编 王 鸣 王雪洁 江 皓



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

应用型本科规划教材

电力电子技术

主 编 任国海

副主编 王 鸣 王雪洁 江 皓



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

内 容 简 介

本书面向应用型人才培养,以了解基本技术体系、掌握基本理论分析方法,培养基本应用能力为目标,教材定位于既是比较浅显易懂的理论教材,又是掌握基本应用技术的学习手册。基本理论部分内容分为6章,以介绍电力电子基本应用技术的原理、方法为重点。考虑到应用型人才培养目标,为了达到培养基本应用能力的目的,本书增设了7个附录,以不同的电力电子技术专题为核心,介绍了电力电子系统基本应用设计的技术,通过专题设计的训练,有助于举一反三掌握电力电子基本应用技术。

本书适合应用型本科院校自动化等相关专业的学生使用,也可供相关技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术 / 任国海主编. —杭州:浙江大学出版社,
2009. 1
应用型本科自动化专业规划教材
ISBN 978-7-308-06454-5

I. 电… II. 任… III. 电力电子学—高等学校—教材
IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 201671 号

电力电子技术

主 编 任国海

丛书策划	樊晓燕 王 波
责任编辑	王 波
文字编辑	魏文娟
封面设计	刘依群
出版发行	浙江大学出版社 (杭州天目山路 148 号 邮政编码 310028) (E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn) (网址: http://www.zjupress.com http://www.press.zju.edu.cn) 电话: 0571—88925592, 88273066(传真)
排 版	杭州好友排版工作室
印 刷	临安市曙光印务有限公司
开 本	787mm×1092mm 1/16
印 张	17.75
字 数	434 千
版 印 次	2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000
书 号	ISBN 978-7-308-06454-5
定 价	30.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话(0571)88925591

应用型本科院校自动化专业规划教材

编 委 会

主 任 宋执环

委 员 (以姓氏笔画为序)

卫 东 马修水 王培良 石松泉

刘勤贤 那文波 任国海 邵世凡

肖 铎 庞文尧 胡即明

总 序

近年来我国高等教育事业得到了空前的发展,高等院校的招生规模有了很大的扩展,在全国范围内涌现了一大批以独立学院为代表的应用型本科院校,这对我国高等教育的全方位、持续、健康发展具有重大的意义。应用型本科院校以着重培养应用型人才为目标,开设的大多是一些针对性较强、应用特色明确的本科专业,但目前所采用的教材大多是直接选用普通高校的那些适用于研究型人才培养的教材。这些教材往往过分强调系统性和完整性,偏重基础理论知识,而对应用知识的传授却不足,难以充分体现应用类本科人才的培养特点,无法直接有效地满足应用型本科院校的实际教学需要。

浙江大学出版社认识到,高校教育层次化与多样化的发展趋势对出版社提出了更高的要求,即无论在选题策划,还是在出版模式上都要进一步细化,以满足不同层次的高校的教学需求。应用型本科院校是介于研究型本科与高职之间的一个新兴办学群体,它有别于普通的本科教育,但又不能偏离本科生教学的基本要求,因此,教材编写必须围绕本科生所要掌握的基本知识与概念展开。但是,培养应用型与技术型人才又是应用型本科院校的教学宗旨,这就要求教材改革必须有利于进一步强化应用能力的培养。

在人类科技进步的历史进程中,自动化科学和技术的产生改变了人们的生产方式和工作方式,控制和反馈思想则一直影响着人们的思维方式。蒸汽机和电机的应用,延伸了人的体力劳动,推动了自动化技术的发展,催生了工业革命,使人类社会通过工业化从农业社会发展到工业社会。而现代信息技术的应用,则延伸了人的脑力劳动,引发了以数字化、自动化为主要特征的新的工业革命,使人类社会通过信息化从工业社会发展到信息社会。信息时代的自动化技术有了更加宽广的应用领域和难得的发展机遇。为了满足当今社会对自动化专业应用型人才的需要,国内百余所应用型本科院校都设置了自动化及相关专业。

针对这一情况,浙江大学出版社组织了十几所应用型本科院校自动化类专业的教师共同开展了“应用型本科自动化专业教材建设”项目的研究,共同研究

目前教材的不适应之处,并探讨如何编写能真正做到“因材施教”、适合应用型本科层次自动化类专业人才培养的系列教材。在此基础上,组建了编委会,确定共同编写“应用型本科院校自动化专业规划教材”系列。

本套规划教材具有以下特色:

在编写的指导思想上,以“应用型本科”学生为主要授课对象,以培养应用型人才为基本目的,以“实用、适用、够用”为基本原则。“实用”是对本课程涉及的基本原理、基本性质、基本方法要讲全、讲透,概念准确清晰。“适用”是适用于授课对象,即应用型本科层次的学生。“够用”就是以就业为导向,以应用型人才为培养目的,讲透关键知识点,达到理论够用,不追求理论深度和内容的广度。突出实用性、基础性、先进性,强调基本知识,结合实际应用,理论与实践相结合。

在教材的编写上重在基本概念、基本方法的表述。编写内容在保证教材结构体系完整的前提下,注重基本概念,追求过程简明、清晰和准确,重在原理,压缩繁琐的理论推导。做到重点突出、叙述简洁、易教易学。还注意掌握教材的体系和篇幅能符合各学院的计划要求。

在作者的遴选上强调作者应具有丰富的应用型本科教学经验,有较高的学术水平并具有教材编写经验。为了既实现“因材施教”的目的,又保证教材的编写质量,我们组织了两支队伍,一支是了解应用型本科层次的教学特点、就业方向的一线教师队伍,由他们通过研讨决定教材的整体框架、内容选取与案例设计,并完成编写;另一支是由本专业的资深教授组成的专家队伍,负责教材的审稿和把关,以确保教材质量。相信这套精心策划、认真组织、精心编写和出版的系列教材会得到广大院校的认可,对于应用型本科院校自动化工程类专业的教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

系列教材编委会主任

宋执环

2008年12月

前言

现代工业、交通运输、军事装备、尖端科技的进步以及人类生活质量和生存环境的改善都依赖于高品质的电能。据统计,目前 70% 的电能都是经过变换后应用于实际工作,电力电子技术在其中占有重要的地位。随着科学技术的发展,这个比例将不断提高,据美国国家电力科学研究院预测,到 2010 年,80% 的电能将通过电力电子变流器来处理。20 世纪,人类最伟大的 20 项科技成果分别是电气化、汽车、飞机、自来水供水系统、电子技术、无线电与电视、农业机械化、计算机、电话、空调与制冷、高速公路、航天、互联网、成像技术、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用、新材料,这些科技成果几乎都不同程度地应用了电力电子技术,可以说,电力电子技术与我们的生活息息相关,已经广泛应用到社会的方方面面。

1. 什么是电力电子技术

电力电子学是 Power Electronics 的中文译名,在工程应用中通常称为电力电子技术。电力电子学是应用于电力技术领域的电子学,它以大功率电子器件对能量进行控制和变换为主要内容,是电气工程、电子科学与技术、控制理论三大学科的交叉科学。1974 年,美国学者 W. Newell 提出了电力电子学的定义,并用倒三角形(见图 1)对电力电子学做了描述,表明了电力电子学与三大学科之间的关系,这一观点已被学术界普遍接受。

电力电子学在能量的产生和使用之间建立一种联系(见图 2)。它可以使不同的负载得到其所希望的最佳能量供应形式和得到最佳的控制,同时保证能量传递、使用过程的高效率。显然使用模拟电子技术的一些方法也可以实现电能的控制和变换,如采用串联稳压方式实现电压变换、功率放大电路实现交流电能输出,但这些方法由于功率器件工作于线性放大状态,损耗很大,从而导致电路工作效率低下,因此这些变换不属于电力电子学的范畴。电力电子电路的重

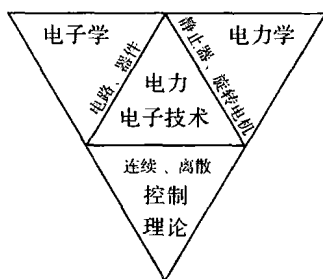


图1 电力电子学的描述

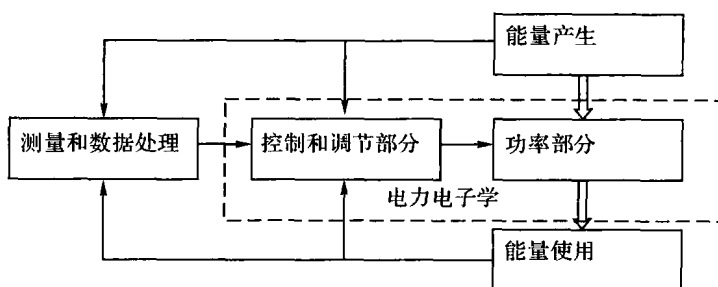


图2 电力电子学与电能控制的关系

要特征是功率器件工作于开关状态。电力电子学主要包含如下几个部分：

(1) 电力电子器件：如功率二极管、晶闸管、功率 MOSFET、IGBT、MCT 等，分为不控型、半控型、全控型三种类型。

(2) 电力电子电路：包括整流(AC/DC 变换)、逆变(DC/AC 变换)、直流变换(DC/DC 变换)、交流变换(AC/AC 变换)四大基本类型的变换电路。

(3) 电力电子电路的辅助电路：包括控制电路、驱动电路、缓冲电路、保护电路等几大类电路。

典型的电力电子电路系统如图 3 所示，它包含了前面所述的各个部分。其中，开关 S 代表以开关方式工作的电力电子器件，S、D、L、C 等构成了电力电子电路，通常称为电力电子电路系统的主电路。

2. 电力电子技术的发展历史与现状

电力电子技术的发展依赖于电力电子器件的发展，因此，电力电子技术的发展史是以电力电子器件发展史为纲的。

一般认为，电力电子技术的诞生是以 1957 年美国通用电气公司研制出第一

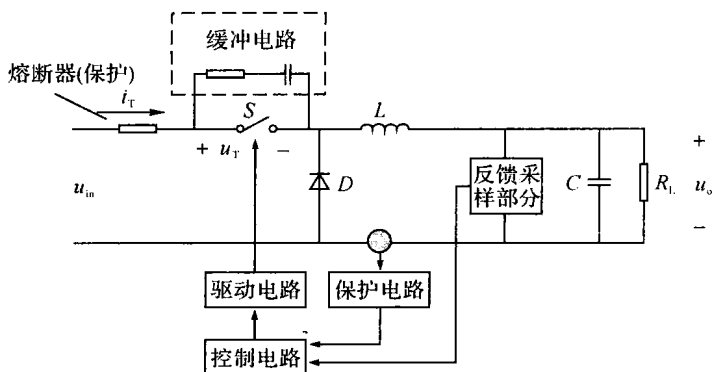


图3 典型的电力电子电路系统

个晶闸管为标志的。由于其优越的电气性能和控制性能，晶闸管很快取代了水银整流器和旋转变流器组，并进而在电化学工业、铁道电气机车、钢铁工业（轧钢用电气传动、感应加热等）、电力工业（直流输电、无功补偿等）等领域得到了广泛应用。正是由于晶闸管变流技术的发展，电力电子技术的概念和基础得以确立。

由于晶闸管只能控制导通，关断需要通过外部条件来实现，其应用受到一定的局限。20世纪70年代后期，以门极可关断晶闸管（GTO）、电力晶体管（GTR）、功率场效应管（P-MOSFET）为代表的全控型器件迅速发展，这些器件的控制既可以使其开通又可使其关断，并且开关速度普遍高于晶闸管，使电力电子技术的面貌焕然一新，达到一个新的发展阶段。晶闸管电路一般采用相位控制方式，而全控型器件主要采用脉宽控制（PWM）方式。

20世纪80年代后期，以绝缘栅双极型晶体管（IGBT）为代表的复合型器件异军突起。IGBT是MOSFET和GTR的复合，兼有MOSFET驱动功率小、速度快的优点和GTR通态压降小、载流能力强的优点，性能优越，已经成为现代电力电子技术的主导器件之一。与IGBT相对应，MOS控制晶闸管（MCT）和集成门极换流晶闸管（IGCT）都是MOSFET和GTO的复合，它们也综合了MOSFET和GTO两种器件的优点。

为了使电力电子装置的结构紧凑、体积减小，常常把若干个电力电子器件及其必要的辅助元件做成模块的形式，给应用带来方便；后来又把驱动、控制、保护电路和功率器件集成在一起，构成了功率集成电路（PIC），这代表了当代电力电子技术发展的一个重要趋势。

随着全控型器件的广泛应用,电力电子电路的工作频率也不断提高,电力电子器件的开关损耗已成为重要的制约因素。为了减小损耗,软开关技术得到了快速的发展。软开关技术可以大幅度地降低器件的开关损耗,提高电力电子电路的工作频率,从而进一步提高电力电子装置的功率密度和效率,已逐步成为现代电力电子技术的一个重要手段。

随着电力电子技术的发展,电力电子器件的单管容量、开关频率已经有了极大的提高,但在某些场合应用仍不能满足人们对高压、大功率的需求,而且器件的开关容量与工作频率是一对相互制约的矛盾。为了实现高频化和低 EMI 的大功率变换,多电平变换技术成为现代电力电子技术高压大功率应用领域的研究热点。

经过半个多世纪的发展,电力电子技术已经取得了辉煌的成就,但与微电子领域的高度集成化相比,电力电子技术仍处于“分立元件”时代。1997 年,美国海军提出了电力电子积木(PEBB)的概念。这个概念主张使用标准化的电力电子单元,一台电力电子装置将由许多这样的电力电子单元组装而成,由于设计的标准化和模块化,电力电子装置的维护将变得十分简单。1998 年,美国电力电子系统中心(CPES)正式提出了电力电子集成技术的思想,其核心就是研制集成的电力电子模块(IPEM)。概念化的 IPEM 为三维结构,包括主电路、驱动控制电路、传感器与磁性元件等无源元件,并适合自动化生产。由于技术条件的限制,目前学术界将 IPEM 分为有源 IPEM(包括功率器件、驱动控制电路、传感器等有源部件)和无源 IPEM(包括磁性元件、电容、电阻等无源元件)两种开展研究,电力电子集成技术将是未来电力电子技术的重要发展方向。

3. 本书介绍

本书面向应用型人才培养,以了解基本技术体系、掌握基本理论分析方法、培养基本应用能力为目标。本教材定位于既是比较浅显易懂的理论教材,又是掌握基本应用技术的学习手册。基本理论部分内容分为 6 章,以介绍电力电子基本应用技术的原理、方法为重点。考虑到应用型人才培养目标,为了达到培养基本应用能力的目的,本书增设了 7 个附录,以不同的电力电子技术专题为核心,介绍了电力电子系统基本应用设计的技术,通过专题设计的训练,有助于举一反三掌握电力电子基本应用技术。

本书的前言、第 2 章、附录 1、附录 4 的编写及全书的修改统稿由任国海完成,第 1 章由郑利君编写,第 3 章、附录 2 和附录 3 由王雪洁编写,第 4、5 章由

王鸣编写,第6章和附录7由聂振宇编写,附录5由江皓编写,附录6由杜鹏英编写。

浙江大学程肇基教授详细、认真地审阅了全部书稿,提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢。本书编写中引用了国内外众多专家、学者的著作、论文等文献资料,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳切希望读者批评指正。

编 者

2008年12月

目 录

第 1 章 电力电子器件及其应用	1
1.1 电力电子器件概述	1
1.2 功率二极管	2
1.3 晶闸管	5
1.4 功率晶体管	12
1.5 功率场效应晶体管	16
1.6 绝缘栅双极型晶体管	19
1.7 其他新型电力电子器件	22
1.8 电力电子器件驱动与保护电路	25
本章小结	33
思考题与习题	34
第 2 章 直流—直流变换电路	35
2.1 概 述	35
2.2 降压式变换电路(Buck Converter)	36
2.3 直流升压变换电路(Boost Converter)	40
2.4 直流升降压变换电路(Buck-Boost Converter)	43
2.5 库克电路(Cuk Converter)	45
2.6 正向激励直流变换电路(Forward Converter)	48
2.7 反向激励直流变换电路(Flyback Converter)	51
2.8 其他典型直流变换电路	53
本章小结	58
思考题与习题	58

第3章 直流—交流变换技术	60
3.1 概 述	60
3.2 单相方波逆变电路	63
3.3 单相电压型方波逆变电路的输出电压控制	67
3.4 单相方波逆变电路的谐波控制	72
3.5 三相逆变电路	81
3.6 逆变器输出滤波器的设计	92
本章小结	94
思考题与习题	94
第4章 交流—直流变换电路	96
4.1 概 述	96
4.2 单相可控整流电路	96
4.3 三相可控整流电路	109
4.4 整流电路的有源逆变工作状态	127
4.5 整流电路的谐波和功率因数	133
4.6 PWM 整流电路及有源功率因数校正技术(APFC)	135
本章小结	142
思考题与习题	143
第5章 交流—交流变换电路	146
5.1 交流电力控制电路	146
5.2 直接交流—交流变换电路	166
5.3 间接交流—交流变换电路	180
本章小结	186
思考题与习题	186
第6章 软开关技术与多电平变换技术	188
6.1 软开关技术	188
6.2 多电平变换技术	197
本章小结	201

附录 1	电力电子电路常用磁性元件的设计	202
附录 2	调光台灯的设计制作——AC/AC 单相交流变换电路应用专题	217
附录 3	利用 Buck-Boost 电路实现直流电源极性变换——DC/DC 变换 电路应用专题	220
附录 4	小功率反激式开关稳压电源设计——不控型 AC/DC 和隔离 DC/DC 变换电路综合应用专题	224
附录 5	高功率因数荧光灯电子镇流器设计——PWM 型 AC/DC 和 DC/AC 变换电路综合应用专题	232
附录 6	简易小功率 UPS 电源系统设计——不控型 AC/DC、隔离 DC/DC 与 SPWM 型 DC/AC 电路综合设计专题	242
附录 7	电力电子仿真技术——ORCAD/PSpice 软件介绍	250

第 1 章 电力电子器件及其应用

内容提要:本章教学的重点在于认识常用电力电子器件,了解器件的基本工作特性;树立器件具有开关时间、开关过程具有动态损耗、导通状态具有静态损耗的基本概念;掌握利用器件安全工作区的概念合理选择器件的方法;了解典型驱动电路、缓冲吸收电路的基本结构、基本功能和基本设计方法。

1.1 电力电子器件概述

电力电子技术的基础是由电力电子器件、电力电子电路和电力电子系统控制三个层次构成的。电力电子器件技术分为电力电子器件制造技术和电力电子器件应用技术,它是整个电力电子学的基础。现代电力电子器件有时也包括介电材料和磁性材料构成的电容、电感元件,但通常特指电力半导体器件。

电力电子电路一般利用电力电子器件的开关特性,理想的功率开关器件应具有以下特性:阻断状态能承受高电压而漏电流很小;导通状态具有高电流密度和低导通压降;开关状态转换速度快,并能够承受高的 di/dt 、 du/dt ;器件控制的功率小,抗干扰能力强等。依据电力电子器件的控制特性不同,习惯上分为不控型、半控型、全控型三种类别。常用的电力电子器件分类如表 1-1 所示。

表 1-1 常用的电力电子器件分类

类 别	不控型	半控型	全控型
常用器件	功率二极管、功率稳压二极管、瞬变尖峰电压抑制二极管	普通晶闸管、双向晶闸管	GTR、P-MOSFET、IGBT、GTO
特点及应用	二极管利用单向导电性控制电流方向;稳压器件用来控制电压幅度;瞬变尖峰电压抑制二极管的特性类似稳压管,常用于功率器件的尖峰电压抑制	可以用脉冲控制其开通,一旦开通不能用控制极关断;常用于交流回路的功率控制	可以利用控制极控制器件开通和关断;广泛应用于各种现代电力电子系统中

电力电子器件按照控制参量的特征,可以分为电流控制型器件和电压控制型器件,如晶闸管、门极可关断晶闸管、电力晶体管等属于电流控制型器件,功率场效应管和绝缘栅双极

晶体管属于电压控制型器件。

电力电子器件发展非常迅速,品种也非常多,其中最常用的主要有功率二极管、普通晶闸管(SCR)、双向晶闸管(TRIAC)、门极可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(BJT 或称 GTR)、功率场效应管(P-MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)以及新型的功率集成模块(PIC)、智能功率模块(IPM)等。与电力电子器件相配套的各种专用集成控制驱动电路和保护电路发展得也很快,并已经大量使用,这些成果正推动着电力电子装置的迅速发展。

1.2 功率二极管

1.2.1 功率二极管的主要类型

1. 普通二极管(General Purpose Diode)

普通二极管又称为整流二极管(Rectifier Diode),多用于开关频率不高(1kHz 以下)的整流电路中。其反向恢复时间较长,一般在 $5\mu\text{s}$ 以上,这在开关频率不高时并不重要;正向电流定额和反向电压定额可以达到很高,分别可达数千安和数千伏以上。

2. 快速恢复二极管(Fast Recovery Diode, FRD)

快速恢复二极管可分为快速恢复和超快速恢复两个等级。其中前者反向恢复时间为数百纳秒或更长;后者则在 100ns 以下,甚至达到 20~30ns。工艺上通常分为 PN 结构和 PIN 结构;采用外延型 PIN 结构的快速恢复外延二极管(Fast Recovery Epitaxial Diodes, FRED),其反向恢复时间比较短(可低于 50ns),正向压降也很低(0.9V 左右),但其反向耐压多在 1200V 以下。

3. 肖特基二极管

以金属和半导体接触形成的势垒为基础的二极管称为肖特基势垒二极管(Schottky Barrier Diode, SBD),简称为肖特基二极管。自 20 世纪 80 年代以来,由于工艺的发展,肖特基二极管在电力电子电路中广泛应用。肖特基二极管的优点是:反向恢复时间很短(10~40ns),正向恢复过程中也不会有明显的电压过冲;在反向耐压较低的情况下,其正向压降也很小(通常在 0.5V 左右),明显低于快速恢复二极管(通常在 1V 左右或更大),其开关损耗和正向导通损耗都比快速恢复二极管要小。肖特基二极管的弱点是,当反向耐压提高时其正向压降也会高得不能满足要求,因此多用于 200V 以下的低压场合。同时,由于反向漏电流较大且对温度敏感,反向稳态损耗不可忽略,而且必须严格限制其工作温度。

1.2.2 功率二极管的工作特性

从外形上看,功率二极管主要有螺栓型和平板型两种封装,如图 1-1 所示。

1. 功率二极管的静态伏安特性

功率二极管的静态伏安特性类似于模拟电子技术中介绍的小功率二极管的伏安特性,当功率二极管阳极 A 和阴极 K 间的电压 U_F 达到一定值(门槛电压 U_{TO})时,正向电流 I_F 明显增加,处于稳定导通状态。当功率二极管阳极 A 和阴极 K 间承受反向电压时,只有微小的反向漏电流,一旦反向电压超过一定值(反向击穿电压 U_B)时,二极管发生雪崩击穿。完整的功率二极管的静态伏安特性如图 1-2 所示。

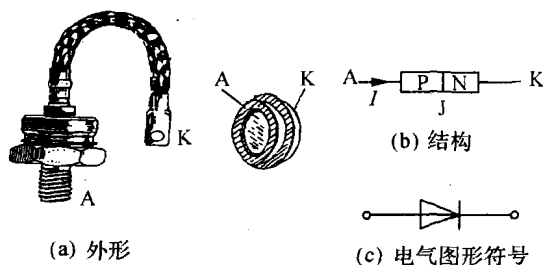


图 1-1 电力二极管的外形、结构和电气图形符号

第Ⅰ象限为正向特性区,表现为正向导通状态。当加上小于 0.5V (U_{TO}) 的正向电压时,二极管只流过微小的正向电流。当正向阳极电压超过 0.5V 时,正向电流急剧增加,曲线呈现与纵轴平行的趋势。此时,阳极电流的大小完全由外电路决定,二极管只承担一个很小的管压降 $U_{\text{F}} = 0.4 \sim 1.2\text{V}$ 。二极管导通后流过的电流与产生的管压降形成通态损耗,表现为二极管发热。

第Ⅲ象限为反向特性区,表现为反向阻断状态。当二极管加上反向电压时,开始只有极小的反向漏电流,曲线呈现与横轴平行。随着电压增加,反向电流有所增大。当反向电压增加到一定程度时,漏电流就开始急剧增加,此时必须对反向电压加以限制,否则二极管将因反向电压被击穿而损坏。由于功率二极管的通态压降和反向漏电流数值都很小,在实际电路分析时通常忽略不计。

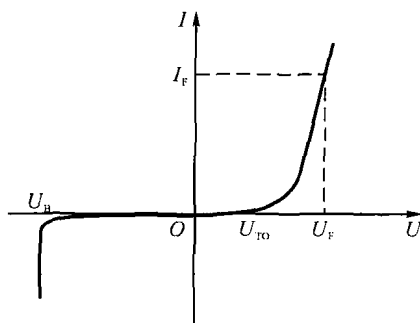


图 1-2 功率二极管伏安特性

2. 功率二极管的动态特性

由于结电容的存在,功率二极管在零电压偏置、正向偏置和反向偏置三种状态转换时,必然经历一个暂态过程用于 PN 结带电状态的调整。这个过程功率二极管伏安特性随时间变化,通常称为动态特性。

(1) 功率二极管的开通过程

功率二极管的开通需一定的过程,初期出现较高的瞬态压降,过一段时间后才达到稳定,且导通压降很小。上述现象表明大功率二极管在开通初期呈现出明显的电感效应,无法立即响应正向电流的变化。图 1-3(a) 所示为功率二极管由零偏置转为正向偏置开通过程中的管压降和正向电流的变化曲线。由图可见,在正向恢复时间 t_{fr} 内,正在开通的功率二极管上承受的峰值电压 U_{FP} 比稳态管压降高得多,有时可达几十伏。

功率二极管开通时呈现的电感效应与器件内部机理、引线长度、器件封装所采用的材料有关。在电力电子电路中作为快速开关器件使用时,应考虑功率二极管正向恢复时间的影响。