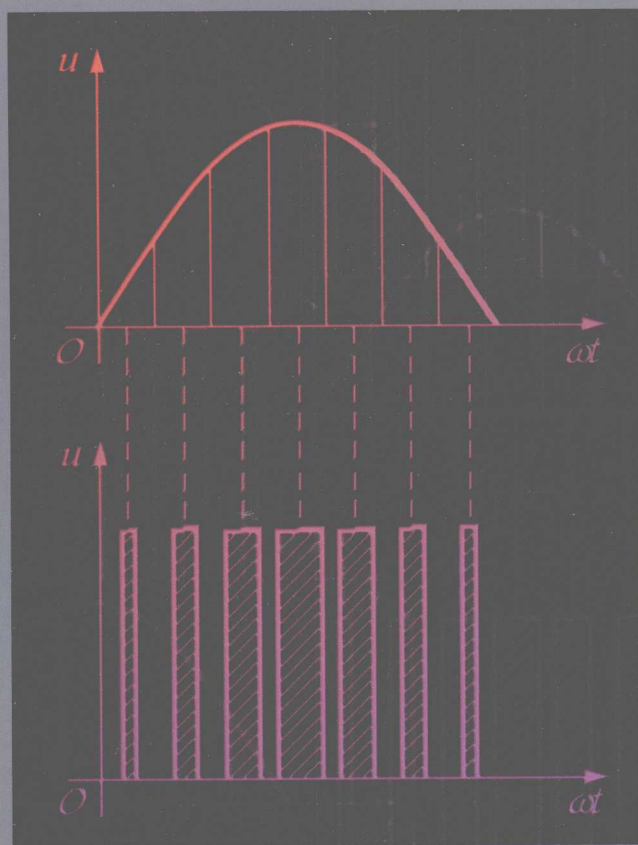


21世纪高等院校
●●●●● 自动化专业系列教材 ●●●●●

电力电子技术基础

邢岩 肖曦 王莉娜 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高等院校自动化专业系列教材

电力电子技术基础

邢岩 肖曦 王莉娜 编著



机械工业出版社

本书涉及电力电子变换系统的基本原理和分析设计方法, 主要内容包括电力半导体器件; 功率变换电路的拓扑 (DC-DC, AC-DC 和 DC-AC)、分析方法和参数设计; 开关器件的驱动和缓冲技术; 开关变换系统的调制、建模和闭环控制技术等。

本书反映了电力电子技术的最新发展, 同时又兼顾从器件、电路拓扑到整个系统的基本原理和基本方法。

本书可作为面向电气工程专业和自动化专业的本科教科书, 也可作为电力电子专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术基础/邢岩, 肖曦, 王莉娜编著. —北京: 机械工业出版社, 2008. 10

(21 世纪高等院校自动化专业系列教材)

ISBN 978-7-111-25182-8

I. 电… II. ①邢…②肖…③王… 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 147589 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 时 静 常建丽 版式设计: 张世琴

责任校对: 李秋荣 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13.5 印张 · 334 千字

0 001—4 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-25182-8

定价: 25.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379739

封面防伪标均为盗版

出版说明

自动化技术是一门集控制、系统、信号处理、电子和计算机技术于一体的综合技术，广泛用于工业、农业、交通运输、国防、科学研究以及商业、医疗、服务和家庭等各个方面。自动化水平的高低是衡量一个国家或社会现代化水平的重要标志之一，建设一个现代化的国家需要大批从事自动化事业的人才。高等院校的自动化专业是培养国家所需要的专业面宽、适应性强，具有明显的跨学科特点的自动化专门人才的摇篮。

为了适应新时期对高等教育人才培养工作的需要，以及科学技术发展的新趋势和新特点，并结合最新颁布实施的高等院校自动化专业教学大纲，我们邀请清华大学、南开大学、上海交通大学、西安交通大学、东北大学、华中科技大学、山东大学、北京科技大学等名校的知名教师、专家和学者，成立了教材编写委员会，共同策划了这套面向高校自动化专业的教材。

本套教材定位于普通高等院校自动化类专业本科层面。按照教育部颁发的《普通高等院校本科专业介绍》中所提出的培养目标和培养要求，适合作为广大大高校相关专业的教材，反映了当前教学与技术发展的主流和趋势。

本套教材的特色：

1. 作者队伍强。本套教材的作者都是全国各院校从事一线教学的知名教师和相关专业领域的学术带头人，具有很高的知名度和权威性，保证了本套教材的水平和质量。
2. 观念新。本套教材适应教学改革的需要和市场经济对人才培养的要求。
3. 内容新。近20年，自动化技术发展迅速，与其他学科的联系越来越紧密。这套教材力求反映学科发展的最新内容，以适应21世纪自动化人才培养的要求。
4. 体系新。在以前教材的基础上重构和重组，补充新的教学内容，各门课程及内容的组成、顺序、比例更加优化，避免了遗漏和不必要的重复。根据基础课教材的特点，本套教材的理论深度适中，并注意与专业教材的衔接。
5. 教学配套的手段多样化。本套教材大力推进电子讲稿和多媒体课件的建设工作。本着方便教学的原则，一些教材配有习题解答和实验指导书，以及配套学习指导用书。

机械工业出版社

前 言

能源和环境是现代社会面临的重要问题，而电能是当今最重要的能源形式。在所有的动力资源中，电能使用最方便、应用最广泛。生产和生活的发展必然要增加对电力的需求，因此，节约用电、减少电力生产和使用过程对环境的破坏日益重要，这就要求我们的电能变换系统和装置有高的效率。以电能变换为研究对象的电力电子技术学科应运而生，而且发展迅速。

本书编写的初衷是作为电气工程专业和自动化专业的本科教科书，强调基本概念、分析方法和基础知识的理解和掌握，并且侧重体现新技术进展。内容的选取和编排，按照从器件、电路到系统的原则。首先在第1章介绍电力电子变换器的核心部件——电力半导体开关器件，它们的分类和特点，几种常用器件的基本工作原理和静态动态特性；第2~4章为由这些开关器件为核心构成的变换电路，包括第2章传统的不控和相控AC-DC变换电路及PWM控制的AC-DC变换电路、第3章高频脉冲宽度控制DC-DC变换器和第4章电压源型和电流源型等各类DC-AC逆变电路，着重阐述基本电路拓扑，电路的分析方法、工作原理和工作特性以及参数设计原则；第5章为保证开关管正常、安全工作的驱动、缓冲和保护电路，介绍了常用电路及其工作原理；第6章为高频脉冲宽度调制及正弦脉冲宽度调制的基本原理、实现方法和调制特性；第7章初步介绍开关变换系统的理论分析、小信号建模和闭环控制技术；第8章简要介绍了磁元件的一些基本概念和知识。

为了便于学习，每章都给出了本章概述、小结和思考题。

本书是作者在阅读分析国内外教材和科技论文资料，总结科研和教学经验的基础上编写的。其中第1章和第6章由北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院电气系王莉娜博士编写，第2、4、7章由清华大学电机系肖曦副教授编写，其余章节由南京航空航天大学航空电源航空科技重点实验室邢岩教授编写。

本书在编写过程中得到了清华大学黄立培教授的指导，在此表示衷心感谢，同时也对参考文献的作者表示感谢。

限于作者水平，文中不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

绪论	1
第 1 章 电力半导体器件	4
1.1 概述	4
1.1.1 电力半导体器件	4
1.1.2 电力半导体器件的发展历程与趋势	4
1.1.3 电力半导体器件的分类	5
1.2 二极管	6
1.2.1 电力整流器件	6
1.2.2 快恢复二极管	9
1.2.3 肖特基二极管	10
1.3 晶闸管	11
1.3.1 普通晶闸管	11
1.3.2 双向晶闸管	16
1.3.3 光控晶闸管	16
1.4 可关断器件	17
1.4.1 栅极可关断晶闸管	17
1.4.2 巨型晶体管	20
1.4.3 功率场效应晶体管	24
1.4.4 绝缘栅双极型晶体管	31
1.4.5 门极换流晶闸管	34
本章小结	35
思考题	36
第 2 章 AC-DC 变换电路	37
2.1 概述	37
2.2 不控整流电路	38
2.2.1 单相半波不控整流电路	39
2.2.2 两相半波不控整流电路	40
2.2.3 单相桥式不控整流电路	40
2.2.4 三相半波不控整流电路	41
2.2.5 三相桥式不控整流电路	42
2.2.6 不控整流电路输出电压的谐波分析	44
2.3 单相可控整流电路	48

2.3.1	单相桥式全控整流电路	48
2.3.2	单相桥式半控整流电路	55
2.4	三相可控整流电路	56
2.4.1	三相半波可控整流电路	57
2.4.2	三相桥式全控整流电路	60
2.5	PWM 整流电路	65
2.5.1	PWM 整流电路分类与结构	65
2.5.2	PWM 整流电路基本控制原理	68
	本章小结	72
	思考题	73
第 3 章	DC-DC 变换电路	75
3.1	概述	75
3.2	单管非隔离变换电路	78
3.2.1	Buck 变换器	78
3.2.2	Boost 变换器	82
3.2.3	升降压式变换器	86
3.2.4	6 种基本拓扑的比较	87
3.3	单管隔离式变换电路	87
3.3.1	单端反激变换器	87
3.3.2	单端正激变换器	90
3.4	多管变换电路	91
3.4.1	推挽变换器	91
3.4.2	半桥变换器	93
3.4.3	全桥变换器	94
3.4.4	隔离式 DC-DC PWM 变换器比较	95
3.5	双向 DC-DC 变换器	95
3.6	软开关变换器	98
3.6.1	准谐振变换器	98
3.6.2	ZVS-PWM 和 ZCS-PWM 变换器	100
3.6.3	ZT-PWM 变换器	101
3.6.4	移相控制全桥变换器	102
3.6.5	有源钳位软开关变换器	103
3.6.6	广义软开关 PWM 技术	104
	本章小结	104
	思考题	105
第 4 章	DC-AC 变换电路	107
4.1	概述	107
4.2	电压型 DC-AC 变换电路	109
4.2.1	电压型单相逆变电路	109
4.2.2	电压型三相全桥式逆变电路	112
4.3	电流型 DC-AC 变换电路	115

4.3.1	电流型单相桥式逆变电路	115
4.3.2	电流型三相桥式逆变电路	116
4.4	谐振式逆变电路	118
4.4.1	电压型串联谐振逆变电路	119
4.4.2	电流型并联谐振逆变电路	120
4.5	DC-AC 变换的多重化技术	123
4.5.1	电压型逆变器的多重化	123
4.5.2	电流型逆变器的多重化	125
4.5.3	多电平逆变器	127
4.6	变频器	130
4.6.1	变频器的构成及基本功能	130
4.6.2	变频器调速的基本控制原理	132
4.7	软开关技术在 DC-AC 变换中的应用	134
	本章小结	136
	思考题	137
第 5 章 开关管的驱动、缓冲和保护电路 138		
5.1	概述	138
5.2	驱动电路	139
5.2.1	晶闸管的触发电路	139
5.2.2	双极性晶体管的驱动	140
5.2.3	MOSFET 和 IGBT 的驱动	142
5.2.4	驱动电路中的隔离技术	143
5.3	缓冲电路	144
5.3.1	RCD 关断缓冲电路	144
5.3.2	RLD 开通缓冲电路	147
5.3.3	组合缓冲电路	149
5.3.4	无损缓冲电路	149
5.4	保护电路	151
5.4.1	过电流保护	151
5.4.2	过电压保护	151
5.4.3	过热保护	151
	本章小结	152
	思考题	152
第 6 章 脉冲宽度调制技术 154		
6.1	概述	154
6.2	正弦 PWM	154
6.2.1	SPWM 原理	154
6.2.2	SPWM 波形的生成方法	155
6.2.3	SPWM 波形的软件生成方法	159
6.2.4	SPWM 波形的电子电路生成方法	161
6.2.5	SPWM 波形的谐波分析	162

6.2.6 SPWM 模式优化技术	165
6.3 空间矢量脉宽调制	167
6.4 跟踪型 PWM	170
6.4.1 单相电流跟踪型 PWM	170
6.4.2 三相电流跟踪型 PWM	170
6.5 减小谐波的措施	172
本章小结	173
思考题	174
第 7 章 电力电子控制	175
7.1 概述	175
7.2 电力电子变换的理论基础	175
7.2.1 开关函数及其应用	175
7.2.2 坐标变换	177
7.2.3 状态空间平均法	180
7.2.4 频域模型	182
7.3 电压与电流的闭环控制	183
7.3.1 单闭环控制	184
7.3.2 双闭环控制	189
7.4 数字控制系统	193
7.4.1 数字控制系统简介	193
7.4.2 数字控制系统的构成	193
7.4.3 数字控制系统的处理器	194
本章小结	196
思考题	197
第 8 章 磁元件	198
8.1 概述	198
8.2 高频磁心的基本特性和参数	198
8.3 磁材料	201
8.4 磁心的工作状态	203
8.4.1 双向对称磁化	203
8.4.2 单向磁化	204
8.4.3 单向局部磁化	205
8.5 功率变压器和电感	206
8.5.1 变压器的激磁电感与漏电感	206
8.5.2 电感	206
8.5.3 变压器和电感的设计	207
本章小结	207
思考题	207
参考文献	208

绪 论

0.1 电力电子技术的定义和研究内容

电力电子技术是一种能量（功率）处理技术。它应用电力半导体器件和储能元件（电感、电容）组成电力电子变换器的功率级主电路，再配合适当的控制，对电能进行变换，包括电压、电流、频率和波形等方面的变换，以达到使电能更好地符合各种不同用电设备的要求。电能变换的形式包括如下几种：

- (1) DC-DC 变换，将某一数值的直流电压变换为另一数值的直流电压。
- (2) AC-DC 变换，将交流电压变换为某一数值的直流电压，也称为正变换或整流。
- (3) DC-AC 变换，将直流电压变换为某种波形、某一频率和某一电压的交流电，称为逆变，通常简称为逆变。
- (4) AC-AC 变换，将一种波形、频率、电压的交流电变换为另一种波形、频率、电压的交流电，实现交—交变压、变频（Cyclo-conversion）。AC-AC 变换也可以由整流和逆变电路组成 AC-DC-AC 变换。

电力电子学（Power Electronics）这一名称是在 20 世纪 60 年代出现的。1974 年，美国的 W. Newell 用如图 0-1 所示的倒三角形对电力电子学进行了描述，认为电力电子学是由电力学、电子学和控制理论三个学科交叉而形成的。这一观点被全世界普遍接受。

如图 0-1 所示，电力电子器件的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或类似的。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和工作状态有所不同，前者用于电力变换和控制，后者用于信息处理；在信息电子技术中，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，半导体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。

图 0-1 中“电力学”的含义是功率的处理。电力电子技术广泛用于电力和电气工程中，如高压直流输电、静止无功补偿、电力机车牵引、交直流电力传动、电加热和高性能交直流电源等，电力电子变换实际上是对功率传递过程的变换。通常把电力电子技术归属于电气工程学科。

电力电子变换系统的一个重要特点就是弱电控制强电，为了实现稳压或稳流等输出特性要求，需要反馈闭环控制。电力电子变换器功率电路有很强的时变、非线性特性，其建模分析和控制综合以自动控制理论和技术为基础。

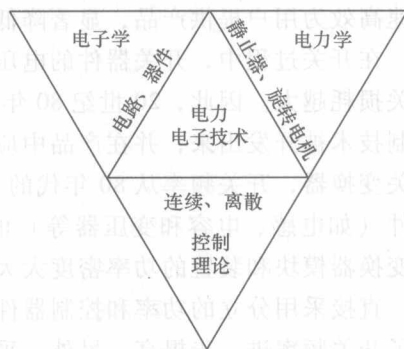


图 0-1 描述电力电子学的倒三角形

0.2 电力电子技术发展的历史和趋势

电力电子技术的发展,首先取决于电力半导体器件的进步。1957年美国通用电气公司研制出第一只晶闸管,带来了电力电子学的革命;在随后的20年里,它的额定值及特性的提高和改进,开创了传统的晶闸管及其应用的电力电子技术发展的新纪元。

20世纪70年代中期,自身兼有开通和关断功能的全控型器件,包括可关断晶闸管(GTO)、大功率晶体管(GTR)、功率场效应晶体管(Power MOSFET)、绝缘栅功率晶体管(IGBT)、MOS控制晶闸管(MCT)等的发展与广泛应用,使电力电子技术进入了“全控型器件”的阶段。而80年代电力半导体器件从双极型器件发展到MOS型器件,功率场效应晶体管和绝缘栅双极型晶体管的应用,显著改善了电力电子变换器的性能,使变换器有可能实现高频化,并大幅度降低开关损耗和导通损耗,电路也更为简单。

20世纪80年代,将功率器件与驱动、智能控制、保护和逻辑电路等集成封装,称为智能功率模块(IPM),或智能功率集成电路(Smart Power IC)。

将IPM的设计观念推广到更大容量、更高电压的集成电力电子电路,并提高了集成度,称为集成电力电子模块(IPEM)。将功率器件与电路、控制以及检测、执行等元件集成封装,得到标准的、可制造的模块,既可用于标准设计,也可用于专用、特殊设计,优点是可快速高效为用户提供产品,显著降低成本,提高可靠性。

在开关过程中,开关器件的电压和电流波形有交叠,因而开关损耗大。开关频率越高、开关损耗越大。因此,20世纪80年代以来,软开关技术成为研究的热点,新的电路拓扑和控制技术被开发出来,并在产品中应用。如移相全桥变换器、准谐振变换器等,kW等级的开关变换器,开关频率从80年代的二三十千赫兹提高到现在的几十万赫兹。变换器中无源器件(如电感、电容和变压器等)的体积、重量随开关频率的提高而迅速下降,使整个电源变换器模块和装置的功率密度大大提高。

直接采用分立的功率和控制器件开发开关电源的设计方法,造成引线寄生电感较大,阻碍了开关频率进一步提高。另外,采用分立的电力电子产品的制造特点是:非标准件多、劳动强度大、设计周期长、成本高、可靠性低等。集成功率电子系统和集成电力电子模块可以从根本上减小封装寄生参数、提高变换性能,并且实现电力电子产品的标准化、模块化、规模生产、降低成本等目标。集成功率电子模块所用技术包括高电压功率半导体器件和低电压控制、检测IC安装在同一基片上;用平面金属化技术等取代连接导线;无源元件和有源元件的集成技术;CAD软件的集成技术,多科目设计技术,包括EMC设计、机械设计、热设计;将测量、命令、控制、通信等装置提升到系统级;应用分布式数字控制技术以减少信号线联结等。因此,集成功率电子模块将使现代电力电子产品的制造技术得到广泛应用。世界发达国家对开展集成功率电子模块的研究十分重视,美国海军在20世纪90年代中期就制定了电力电子集成模块计划。

电力电子变换中的控制方式和实现技术,从初期的电压型控制到电流型控制和单周期控制等,数字信号处理器技术使得现代控制理论和方法得以应用,开关变换系统的控制监控更为灵活,可靠性和智能化不断改善。

0.3 电力电子技术的应用

电力电子技术在工业生产和日常生活中应用广泛，大到电力传输，小到计算机、手机等无所不在。典型应用如下：

1) 日常消费品中的开关电源。人类日常生活中的电力通常来源于民用电网（交流），而用电装置直接需要的可能是直流电源。这就需要电力电子变换器（俗称开关电源）来转换。如手机中的稳压电源、手机电池充电器等也都是开关电源。洗衣机、空调和冰箱中的电机广泛使用变频器驱动，改善了电器的性能同时又节能。

2) 通信和计算机设备的开关电源。如个人计算机中的集成电路由 5V DC 和 3.3V DC 等供电，硬盘驱动器由 12V DC 等供电，所以计算机开关电源就是将市电转换成 5V DC、12V DC 等低压直流输出。计算机服务器、通信设备中更是大量使用很多种类的开关电源。信息技术的迅速发展是支撑电力电子科学和产业进步的重要基础。

3) 为高性能用电设备供电的不间断电源（UPS）。在停电时将蓄电池的直流电压转换为正弦交流电压，而在市电正常时一方面给蓄电池充电、另一方面将市电电能变换为纯净的正弦交流电压给负载供电。

4) 风能、太阳能并网发电系统中的变换器，将直接发出的不稳定的直流或交流电变换为与电网同频、同相和同幅的电压后再送入电网。

5) 电力系统中的无功补偿器、谐波补偿器，以及应用于高压直流远距离输电中的整流器和逆变器。

目前发达国家的电能已有 80% 经过电力电子技术处理，节能效果达 15% ~ 40%，有文献预计到 2050 年经过处理再应用的电能将达到 95%。通过电力电子技术对电能的处理，使电能的使用更加合理、高效和环保，实现电能使用最佳化。

第1章 电力半导体器件

本章在对电力半导体器件的特征、发展历程和趋势、分类等问题作简要概述的基础上，重点介绍了常用电力半导体器件的基本结构、工作原理、基本特性、主要参数以及选择和使用时应注意的一些问题。

1.1 概述

1.1.1 电力半导体器件

电力半导体器件是电力电子技术的基础，是电力电子技术弱电控制强电的纽带，是电力电子装置的核心，因而掌握各种常用电力半导体器件的特性和正确使用方法是学好电力电子技术的基础。

电力半导体器件的基本特征有：

- 1) 电力半导体器件所能处理的电功率一般都远大于处理信息的电子器件，一般小至毫瓦级，大至兆瓦级。
- 2) 电力半导体器件一般工作在开关状态，因此，电力半导体器件的开关特性（也就是动态特性）和参数，是电力半导体器件特性中很重要的方面。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。
- 3) 由于处理的电功率较大，电力半导体器件的功率损耗通常远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。
- 4) 在实际应用当中，电力半导体器件往往需要由信息电子电路来控制，而且两者之间应采取一定的隔离措施。

1.1.2 电力半导体器件的发展历程与趋势

第一代电力半导体器件主要是可控硅晶闸管（Silicon Controlled Rectifier, SCR）。SCR是通过对门极的控制能够使其导通而不能使其关断的半控型开关器件。它的关断通常依靠电网电压等外部条件来实现，这就使得它在交流传动和变频电源的应用中受到限制，如果不附加强迫换流电路，就无法应用。换流电路体积大、重量重、线路复杂，且关断时间较长、效率低，开关损耗大，加之SCR工作频率低，因而限制了它的应用范围。

20世纪70年代以后陆续出现的电力晶体管（Giant Transistor, GTR）、门极可关断晶闸管（Gate Turn-Off thyristor, GTO）、静电感应晶体管（Static Induction Transformer, SIT）、静电感应晶闸管（Static Induction Thyristor, SITH）、金属氧化物半导体场效应晶体管（Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET）和绝缘栅极晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）等，统称为第二代电力半导体器件，它们的共同特点是，通过门极既能控制其导通，又能控制其关断的全控型开关器件。由于不需要换流电路，故体积、重量

较 SCR 有大幅度下降。此外，这些器件的开关速度普遍高于 SCR，可用于开关频率较高的电路。

第三代电力半导体器件问世于 20 世纪 80 年代中期的智能功率集成电路（Smart Power Integrated Circuit, SPIC）和高压集成电路（High Voltage Integrated Circuit, HVIC），它们的特点是，把功率器件和驱动电路、控制电路以及保护电路、诊断电路等多功能单元集成起来，逐步增加其智能程度与功率输出水平，促进驱动、伺服、步进等运动控制进一步小型化、快速化和精密化，在汽车、机器人、数控机床、柔性加工系统及航空、航天上得到广泛的应用。它是机电一体化基础元件。

电力半导体器件的发展历程如图 1-1 所示。

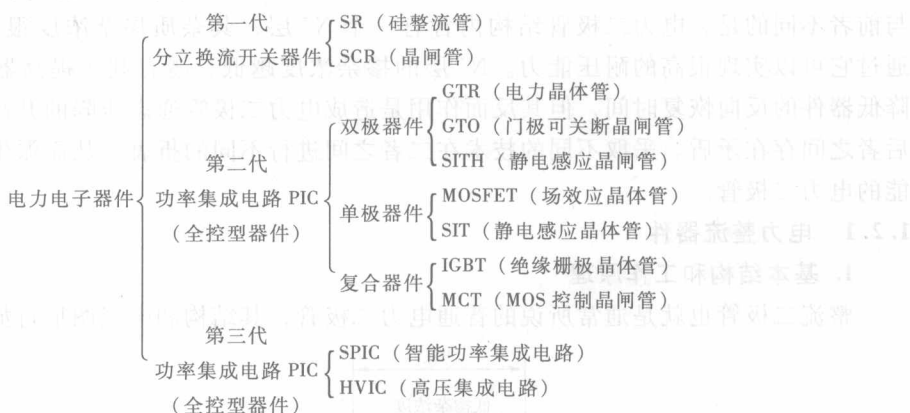


图 1-1 电力半导体器件的发展历程

1.1.3 电力半导体器件的分类

按照电力半导体器件能够被门极（有时称为基极）所控制的程度，可以将电力半导体器件分为 3 类：

1) 不控型：不能用控制信号来控制其通断的电力半导体器件。这类器件主要就是电力二极管，它只有两个端子，不需要驱动电路，器件的导通和关断完全由其承受的电压和电流决定。

2) 半控型：通过门极控制信号可以控制其导通而不能控制其关断。这类器件主要是指晶闸管及其大部分派生器件，器件的关断完全是由其承受的电压和电流来决定。

3) 全控型：通过门极控制信号既可以控制其导通，又可以控制其关断，有时也被称为自关断器件。这类器件品种很多，目前常用的有绝缘栅双极晶体管（IGBT）和电力场效应晶体管（Power MOSFET），以及在处理兆瓦级大功率场合常使用的门极可关断晶闸管（GTO）。

按照门极控制信号的性质又可以将电力半导体器件（电力二极管除外）分为两类：

1) 电流控制型：通过门极注入或者抽出电流来控制其导通或者关断的器件，如普通晶闸管、GTR 和 GTO 等。

2) 电压控制型：通过在门极施加一定的电压信号就可以控制其导通与关断的器件，静态时几乎没有门极电流。由于电压控制型器件实际上是通过门极电压在器件内部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，所以电压控制型器件又被称为场控器件，或者场效应器件，如 MOSFET、IGBT 等。

- 按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况可分为3类：
- 1) 单极型器件：由一种载流子（电子或者空穴）参与导电，如 MOSFET。
 - 2) 双极型器件：由电子和空穴两种载流子参与导电，如二极管、SCR、GTR、GTO 等。
 - 3) 复合型器件：由单极型器件和双极型器件混合而成的器件被称为复合型器件，如 IG-BT、GCT 等。

1.2 二极管

与信息电子电路中的二极管一样，电力电子技术领域的二极管也是以 P-N 结为基础的。与前者不同的是，电力二极管结构内含有一个 N^- 层，其杂质掺杂浓度很低，电阻率很高，通过它可以实现很高的耐压能力。 N^- 层的掺杂浓度越低，越有利于提高器件的耐压能力和降低器件的反向恢复时间，但其反面作用是造成电力二极管通态压降的升高。因此，前者与后者之间存在矛盾。采取不同的技术在二者之间进行不同的折衷，从而派生出了具有不同性能的电力二极管。

1.2.1 电力整流器件

1. 基本结构和工作原理

整流二极管也就是通常所说的普通电力二极管，其结构和电气图形符如图 1-2 所示。

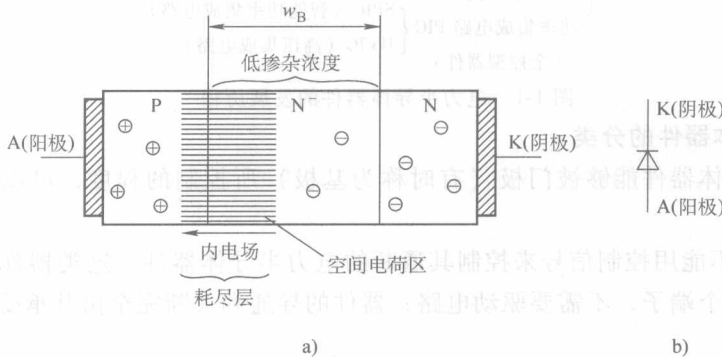


图 1-2 电力二极管

a) 物理结构 b) 电气图形符

图 1-2 中，N 型半导体是 5 价的磷掺杂在硅晶体中，磷在以 4 价为主体的硅结构元的连接中，有多出的电子。而 P 型半导体是在硅晶体中掺杂了 3 价的硼，3 价的硼在以硅为主体的结构元连接中，缺少电子，即有电子空穴。电子在 N 型半导体中是多子，空穴是少子，P 型半导体的情况则相反。当这两种晶体紧密结合时，N 型半导体中多出的电子向缺少电子的 P 型半导体中扩散。这样，在结合面附近，每个结构元的价和电子数正好达到平衡，每个原子周围的价和电子平稳，不能任意移动。这就是不导电时的 P-N 结。这个区域按所强调的角度不同，被称为耗尽层、阻挡层、空间电荷区或势垒区。

N 型区和 P 型区半导体原本呈现电中性，而在耗尽层的 P 区部分因为吸收了 N 区扩散来的电子（负电荷）而呈现阴性，而耗尽层的 N 区部分因为吸收了 P 区扩散来的空穴（正电荷）则呈现阳性，从而建立电场，方向由 N 区指向 P 区，这个电场被称为内电场或自建电场。自建电场的方向阻止扩散运动，又吸引对方区内的少子向本区运动，这就是所谓的漂

移运动。扩散运动和漂移运动最终达到动态平衡。

当整流二极管外加反向偏置电压（外加电压的正端接 N 区，负端接 P 区）时，外加电场与内电场方向相同，内部耗尽层变宽，P-N 结反偏，阻值很大，二极管处于反向截止状态，仅有因少子漂移运动而形成的漏电流，因为少子浓度非常低，所以反向漏电流非常微小，一般仅为微安数量级，可以忽略。外部电压几乎全部降落在耗尽层。

当外加正向电压（外加电压的正端接 P 区，负端接 N 区）时，外加电场与内电场方向相反，内部耗尽层变窄，但 P-N 结依旧处于截止状态，只有微小的正向漏电流，一般仅为微安数量级，可以忽略。当外加电压逐步升高时，内电场将逐步削弱，直到内电场消失（此时阳极与阴极间的电压对应为门槛电压 U_{T0} ），P-N 结导通，电流迅速增大。这就是二极管的单向导电性。在二极管导通之前，N⁻ 区电阻很高，电压几乎全部降落在 N⁻ 区。当二极管导通，正向电流较大时，空穴穿过的 P-N 结进入 N⁻ 区，并在 N⁻ 区得到积累，浓度将很大，为了维持半导体电中性的条件，其多子（电子）浓度也相应大幅度增加，使得其电阻率明显下降，这就是电导调制效应。电导调制效应使得 N⁻ 区在正向电流较大时压降仍然很低，此时 N⁻ 区表现为低阻态。

整流模块是把两个或两个以上的分立整流二极管集成封装在一个绝缘外壳内。它有多种组合，如二合一、三合一、四合一、六合一等模块，而且每一种组合模块内部又有多种联接结构。整流模块的性能、参数决定于其内部集成二极管的参数。下面仍以普通整流二极管为主来介绍其工作特性和参数等。

2. 整流二极管的工作特性

二极管的 N⁻ 区呈现电容效应，当外加电压变化时，它需要一定的时间来调整其带电状态，故二极管在零偏置（外加电压为零）、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。

二极管 N⁻ 区为低掺杂高阻率区，在二极管阻断的情况下，呈现出较高的电阻特性。但是在二极管导通的状态下，由于电导调制效应，电阻率显著下降，呈现为低阻状态。

因此，在分析二极管的工作特性时，不能忽略二极管内部等效电容和电导调制效应的作用，有时两者同时起作用。

(1) 静态特性

电力二极管的静态特性主要是指其伏安特性，如图 1-3 所示。在允许的电压范围内：当电力二极管的正向电压大于门槛电压 U_{T0} 时，正向电流才开始明显增加，并逐渐进入导通状态；当电力二极管承受反向电压时，只有少子引起的微小的反向漏电流。

(2) 动态特性

典型的电力二极管开关波形如图 1-4 所示。在第（1）时段，二极管承受反向电压，二极管处于反向截止状态，只有少子引起的微小而数值恒定的反向漏电流，可忽略不计。

从第（2）时段开始，二极管外加电压突然由反向变为正向，二极管电流开始上升，并最终稳定在某一正值。由于等效结电容的存在，二极管电压并不会立即变为正值，而是首先

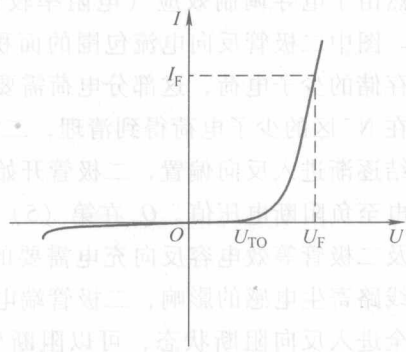


图 1-3 电力二极管的静态特性

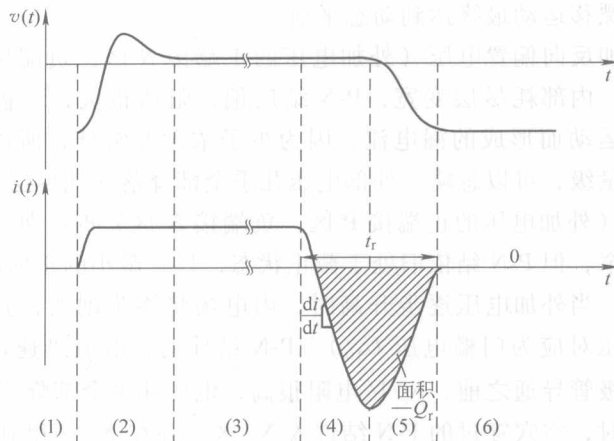


图 1-4 典型的电力二极管开关波形

释放完毕储存的负电荷，然后进行正向充电，此时电压变为正，并慢慢上升，二极管结开始正向偏置。在此过程中，二极管电压最大可能会达到几伏，甚至是十几伏。在某种程度上，这就反映了低掺杂 N^- 区的高阻特性。正向偏置的 $P-N^-$ 结继续向 N^- 区注入少子（空穴）。随着 N^- 域中少子的不断增加，电导调制效应使得 N^- 区的等效电阻下降，从而正向压降下降。最终二极管达到平衡，即少子注入率和结合率相等。在第（3）时段，二极管正向导通，正向压降由二极管的静态伏安特性决定。这就是二极管由反向截止到正向导通的动态过程。

从第（4）时段开始，二极管外加电压突然由反向变为正向，二极管电流开始下降，并渐变为负，其下降速率由反向电压大小和电路中的电感决定。而由于电导调制效应，管压降基本没有变化。此时，由于在 N^- 区仍储存有大量少子，二极管并没有恢复反向阻断能力，仍然由于电导调制效应（电阻率较低），在外加反向电压的作用下，形成了较大的反向电流。图中二极管反向电流包围的面积通常被称为恢复电荷 Q_r 。 Q_r 在第（4）时段中的部分为存储的少子电荷，这部分电荷需要抽出才能进入截止。在第（4）时段的末尾，大部分储存在 N^- 区的少子电荷得到清理，二极管的电导调制效应变弱，二极管电流开始减小，二极管结逐渐进入反向偏置，二极管开始阻断反向电压。在第（5）时段，耗尽层的等效电容被充电至负阻断电压值。 Q_r 在第（5）时段的部分为用于二极管内剩余少子再结合需要的电荷以及二极管等效电容反向充电需要的电荷。在第（5）时段过程中，二极管电流快速下降，受线路寄生电感的影响，二极管端电压可能会出现负尖峰。在第（5）时段的末尾，二极管完全进入反向阻断状态，可以阻断外部所加的反向电压。时段（4）的时间称为延迟时间 t_d ，时段（5）的时间称为下降时间 t_f ， $(t_d + t_f)$ 称为反向恢复时间 t_r 。在时段（6）中，二极管工作在截止状态。

3. 整流二极管的反向击穿

$P-N$ 结具有一定的反向耐压能力，但当施加的反向电压过大，反向电流就会突然增大，此时 $P-N$ 结处于反向击穿状态。反向击穿分为电击穿和热击穿，电击穿包括雪崩击穿和齐纳击穿。 $P-N$ 结热击穿后电流很大，电压又很高，消耗在结上的功率很大，容易使 $P-N$ 结发热，把 $P-N$ 结烧毁。热击穿是永久性破坏。