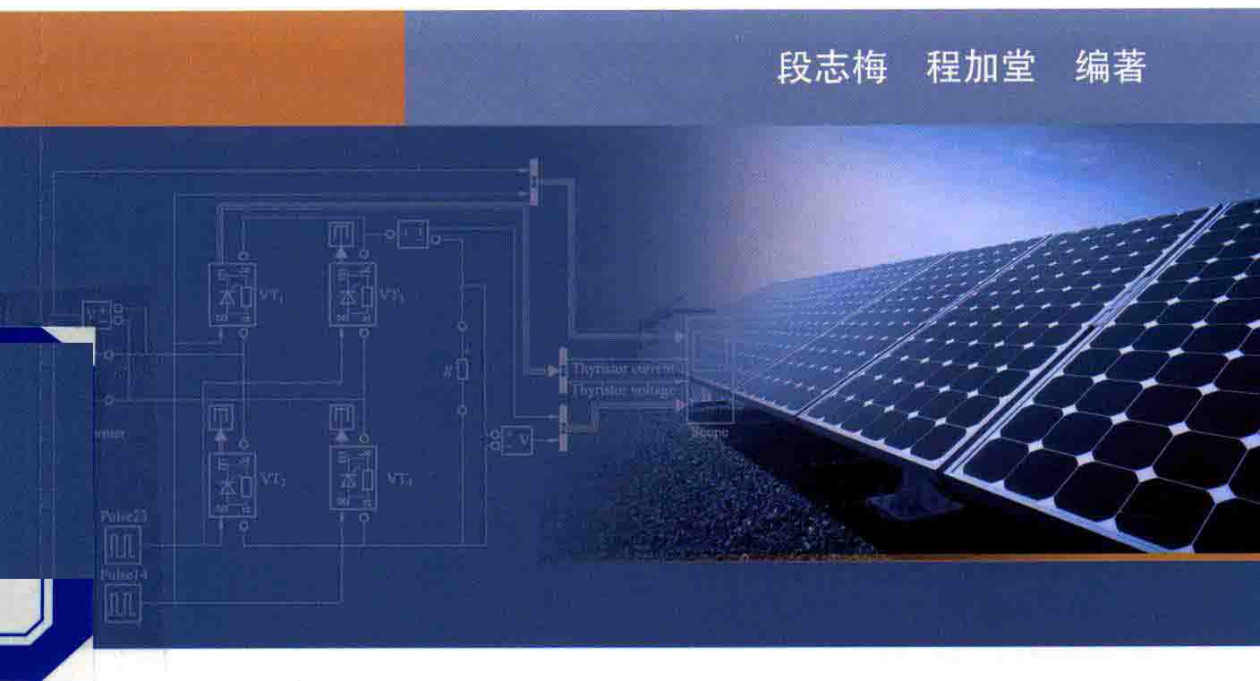


DIANLI DIANZI JISHU JICHU

电力电子技术基础

段志梅 程加堂 编著



 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

要 容 内

DIANLI DIANZI JISHU JICHU

电力电子技术基础

段志梅 程加堂 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是针对专业基础课程教学需要编写的教材,对电力电子技术的内容进行了精选,以电力电子器件、变流电路和控制技术为主线,注重基础,强调应用,并将 Matlab 仿真融入变流电路的性能分析与设计中。主要内容包括概述、电力电子器件、整流电路、无源逆变电路、直流—直流变换电路、交流—交流变换电路、PWM 控制技术、软开关技术和电力电子技术应用。内容取材丰富、结构合理、系统性强,是分析和设计电力电子电路不可或缺的基础知识。

本书适合高等院校电气工程、自动化、电力电子及相关专业的本科生阅读,也可供从事相关工作的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术基础/段志梅,程加堂编著. —北京:中国电力出版社,2017.9

ISBN 978-7-5198-0262-2

I. ①电… II. ①段… ②程… III. ①电力电子技术-高等学校-教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 005443 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:莫冰莹 (icemo@sina.com) 孙世通

责任校对:闫秀英

装帧设计:王英磊 赵姗姗

责任印制:藺义舟

印 刷:航远印刷有限公司

版 次:2017 年 9 月第一版

印 次:2017 年 9 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:17.25

字 数:417 千字

印 数:0001—2000 册

定 价:54.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前 言

电力电子技术是依靠电力电子器件实现电能的高效率变换和控制的一门学科。电力电子技术是现代社会的支撑技术，它几乎已渗透到社会的各个方面，如电力系统、交通运输、无线电通信、计算机、冶金、家电、可再生能源、混合动力汽车、环境保护、补偿控制等领域。未来 90% 的电能都将通过电力电子技术处理后再加以利用，以便提高能源利用效率，提高工业生产的效率，实现可再生能源的最大利用，电力电子技术在未来的科技发展中发挥着不可替代的作用。

本书是作者根据多年的教学经验，遵循编写教材的规律，并在参考大量文献的基础上，对电力电子技术的内容进行了精选，重点介绍电力电子技术的基础知识，突出电力电子应用技术所占比重，引入 Matlab 对基本的电力电子电路进行仿真分析，供读者进一步加深对电力电子电路工作原理的理解和定量分析方法的掌握。全书共 9 章，主要内容包括概述、电力电子器件、整流电路、无源逆变电路、直流—直流变换电路、交流—交流变换电路、PWM 控制技术、软开关技术和电力电子技术应用，各章均有代表性的例题。以通俗性和实用性为主，便于读者加深理解和灵活运用。

本书力求概念清晰、内容层次分明，注重基础，突出重点。作为一门工程技术，具有理论基础与应用技术并重的特点。本书适用于高等学校电气工程、自动化、电力电子及相关专业的本科生学习，也可供从事相关工作的技术人员参考。

本书第 1 章、第 7 章、第 8 章由程加堂编写，第 2~6 章、第 9 章由段志梅编写，全书由段志梅统稿。

本书在编写过程中参阅了大量的图书资料，在此对参考文献中的作者表示衷心的感谢。本书配套免费电子课件，请需要的读者发邮件至 704424481@qq.com 索取。

限于作者水平，书中难免存在缺点和错误，敬请读者批评指正。

作 者

2016 年 12 月

目 录

前言	
1 概述	1
1.1 电力电子技术基本概念	1
1.2 电力电子技术的发展史与发展趋势	3
1.3 电力电子技术的应用	5
习题	7
2 电力电子器件	8
2.1 概述	8
2.2 不可控器件—电力二极管	9
2.3 半控型器件—晶闸管	14
2.4 典型全控型器件	20
2.5 新型电力电子器件和功率模块	32
2.6 电力电子器件使用时应注意的问题	35
习题	45
3 整流电路	47
3.1 概述	47
3.2 单相可控整流电路	48
3.3 三相可控整流电路	63
3.4 不可控整流电路	76
3.5 交流侧电感对可控整流电路换相的影响	80
3.6 整流电路的谐波和功率因数	83
3.7 其他类型的整流电路	89
3.8 整流电路的有源逆变	97
3.9 整流电路的 Matlab 仿真	102
习题	110
4 无源逆变电路	114
4.1 概述	114
4.2 电压型逆变电路	117
4.3 电流型逆变电路	128

4.4	逆变电路的多重化和多电平化	135
4.5	逆变电路的 Matlab 仿真	139
	习题	144
5	直流—直流变换电路	146
5.1	概述	146
5.2	基本直流斩波电路	147
5.3	其他直流斩波电路	157
5.4	隔离型直流—直流变换电路	159
5.5	直流—直流变换电路的 Matlab 仿真	168
	习题	175
6	交流—交流变换电路	176
6.1	概述	176
6.2	交流调压电路	176
6.3	其他交流电力控制电路	186
6.4	交—交变频电路	188
6.5	交流—交流变换电路的 Matlab 仿真	194
	习题	198
7	PWM 控制技术	200
7.1	PWM 的基本工作原理	200
7.2	SPWM 波的采样规则	203
7.3	PWM 逆变电路	205
7.4	PWM 逆变电路的 Matlab 仿真	211
	习题	216
8	软开关技术	217
8.1	软开关基本工作原理	217
8.2	基本的软开关电路	220
8.3	软开关电路的 Matlab 仿真	226
	习题	231
9	电力电子技术应用	232
9.1	一般工业	232
9.2	交通运输	238
9.3	电力系统	243
9.4	装置电源	250
9.5	照明	254

9.6 环境保护	258
9.7 新能源	259
参考文献	266

附 录

附录A 常用单位换算表

A.1 长度单位换算表

A.1.1 长度单位换算表

本附录中长度单位换算表，是根据《国际单位制》(SI)中长度单位换算关系编制的。表中长度单位换算关系，是根据《国际单位制》(SI)中长度单位换算关系编制的。表中长度单位换算关系，是根据《国际单位制》(SI)中长度单位换算关系编制的。

本附录中长度单位换算表，是根据《国际单位制》(SI)中长度单位换算关系编制的。表中长度单位换算关系，是根据《国际单位制》(SI)中长度单位换算关系编制的。表中长度单位换算关系，是根据《国际单位制》(SI)中长度单位换算关系编制的。

A.2 面积单位换算表

本附录中面积单位换算表，是根据《国际单位制》(SI)中面积单位换算关系编制的。表中面积单位换算关系，是根据《国际单位制》(SI)中面积单位换算关系编制的。表中面积单位换算关系，是根据《国际单位制》(SI)中面积单位换算关系编制的。

本附录中面积单位换算表，是根据《国际单位制》(SI)中面积单位换算关系编制的。表中面积单位换算关系，是根据《国际单位制》(SI)中面积单位换算关系编制的。表中面积单位换算关系，是根据《国际单位制》(SI)中面积单位换算关系编制的。

A.3 体积单位换算表

本附录中体积单位换算表，是根据《国际单位制》(SI)中体积单位换算关系编制的。表中体积单位换算关系，是根据《国际单位制》(SI)中体积单位换算关系编制的。表中体积单位换算关系，是根据《国际单位制》(SI)中体积单位换算关系编制的。

本附录中体积单位换算表，是根据《国际单位制》(SI)中体积单位换算关系编制的。表中体积单位换算关系，是根据《国际单位制》(SI)中体积单位换算关系编制的。表中体积单位换算关系，是根据《国际单位制》(SI)中体积单位换算关系编制的。

概 述

1.1 电力电子技术基本概念

1.1.1 电力电子技术的概念

1. 电子技术与电力技术的关系

电子技术包括信息电子技术和电力电子技术，信息电子技术包括模拟电子技术和数字电子技术，是用来对信息进行处理的技术，属于弱电范畴。电子技术一般是指信息电子技术。

2. 什么是电力电子技术

电力电子技术是应用于电力领域的电子技术，具体来说就是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。目前电力电子器件均用半导体制成，故也称电力半导体器件。电力电子技术主要用于电力变换。电力电子技术变换的“电力”，可大到数百兆瓦甚至吉瓦，也可小到数瓦甚至1W以下。

3. 电力变换

电力有交流和直流两种。从公用电网直接获得的电力是交流，从蓄电池和干电池获得的电力是直流。

实际应用中，从公用电网和电池获得的电力往往不能直接满足实际要求，需要进行电力变换。

电力变换通常可分为四大类，即交流变直流（AC-DC）、直流变交流（DC-AC）、直流变直流（DC-DC）和交流变交流（AC-AC）。能进行上述电力变换的技术称为变流技术。

能把交流电变成直流电（AC-DC）的电路称为整流电路，而把直流电变成交流电（DC-AC）的电路是整流电路的逆过程，称为逆变电路。直流变直流（DC-DC）的电路是指把某种数值的直流电压（或电流）变为另一种数值的直流电压（或电流）。交流变交流（AC-AC）的电路可以实现变换交流电的电压、频率、相数、功率等。

1.1.2 电力电子技术的两大分支

电力电子技术包含电力电子器件制造技术和变流技术（也称为电力电子器件的应用技术）两大分支。

变流技术包括用电力电子器件构成的各种电力变换电路和对这些电路进行控制的技术，以及由这些电路构成电力电子装置和电力电子系统的技术。“变流”不只指交直流之间的变换，也包括上述的直流变直流和交流变交流的变换。

电力电子器件的制造技术是电力电子技术的基础，其理论基础是半导体物理。变流技术是电力技术的核心，其理论基础是电路理论。



1.1.3 电力电子技术的相关学科

1. “电力电子技术”和“电力电子学”的关系

“电力电子学”和“电力电子技术”在内容上没有很大的不同，只是分别从学术和工程技术这两个不同的角度来称呼。1974年，美国的W. Newell用图1-1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、电子学和控制理论这3个学科交叉而形成的，这一观点被全世界普遍接受。

(1) 电力电子技术和电子学的关系。电子学包含电子器件和电子电路两大分支，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都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，这说明二者同根同源。

电力电子电路和电子电路的许多分析方法也是一致的，只是二者应用目的不同，前者用于电力变换和控制，后者用于信息处理。广义而言，电子电路中的功率放大和功率输出部分也可算做电力电子电路。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中，其电源部分都是电力电子电路。

在信息电子技术中，半导体器件既可工作在放大状态，也可工作在开关状态；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。

(2) 电力电子技术与电力学的关系。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。

“电力学”这个术语在我国已不太应用，可用“电工科学”或“电气工程”取代之。

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的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，是保持电气工程活力的重要源泉。

(3) 电力电子技术与控制理论的关系。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，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。

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元件和重要支撑技术。

2. 我国电力电子与电气工程的关系

在我国的学科分类中，电力电子与电力传动是电气工程的一个二级学科。图1-2用两个三角形对电气工程进行了描述，其中大三角形描述了电气工程一级学科和其他学科的关系，小三角形则描述了电气工程一级学科内各二级学科的关系。

从大三角形来看，信息科学和能源科学与电气工程有密切的关系。信息科学即电子信息工程（包括通信，但可以不包括计算机科学和工程），也就是所谓的弱电。电气工程研究的主要是电能，而信息科学则是研究（如何利用电磁来）处理信息。二者有所不同，但又同根



图 1-1 描述电力电子学的倒三角形

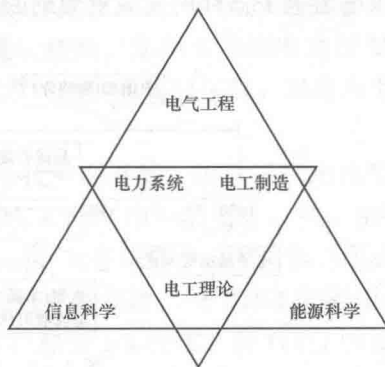


图 1-2 电气工程的双三角形描述

同源，而且电气工程的发展越来越依赖于电子信息技术的进步。从应用领域看，电气工程又和能源科学密切相关。电能是能源的一种，且是使用、输送和控制最为方便的能源。人类在任何时候都不可能离开能源，能源为人类提供动力，是人类的研究对象。因此，人类如果关注能源，就必须关注电能，也就必须关注电气工程。正因为这个密切的关系，国家在划分专业或行业时，常常把电力和动力放在一起。

小三角形所描述的电气工程内部结构，电工理论是电气工程的基础，主要包括电路理论和电磁场理论，这些理论是物理学中的电学和磁学的发展和延伸。电气装备制造既包括发电机、电动机、变压器等电机设备的制造，也包括开关、用电设备等电器设备的制造，还包括电力电子设备的制造、各种电气控制装置的制造以及电工材料、电气绝缘等内容。电气设备在制造时必须考虑其运行，而电力系统是由各种电气设备组成的，系统的良好运行当然是依靠良好的设备。

在电气工程的二级学科中，电力电子技术处于十分特殊的地位。其他几个二级学科的发展都依赖于电力电子技术的发展，正是由于电力电子技术的迅速发展，才使电气工程始终保持强大的活力。

3. 21 世纪电力电子技术的前景

电力电子技术是 20 世纪后半叶诞生和发展的一门崭新的技术。21 世纪，电力电子技术仍将以迅猛的速度发展，以计算机为核心的信息科学将是 21 世纪起主导作用的科学技术之一，电力电子技术和运动控制一起，将和计算机技术共同成为未来科学技术的两大支柱。把计算机的作用比做大人的大脑。那么，可以把电力电子技术比做大人的消化系统和循环系统。消化系统对能量进行转换（把电网或其他电源提供的“粗电”变成适合于使用的“精电”），再由以心脏为中心的循环系统把转换后的能量传送到大脑和全身。电力电子技术连同运动控制一起，还可比做大人的肌肉和四肢，使人能够运动和从事劳动。电力电子技术在 21 世纪中将会起着十分重要的作用，有着十分光明的未来。

1.2 电力电子技术的发展史与发展趋势

1.2.1 电力电子技术的发展史

电力电子器件的发展对电力电子技术的发展起着决定性的作用，因此，电力电子技术的



发展史是以电力电子器件的发展史为纲的。电力电子技术的发展史如图 1-3 所示。

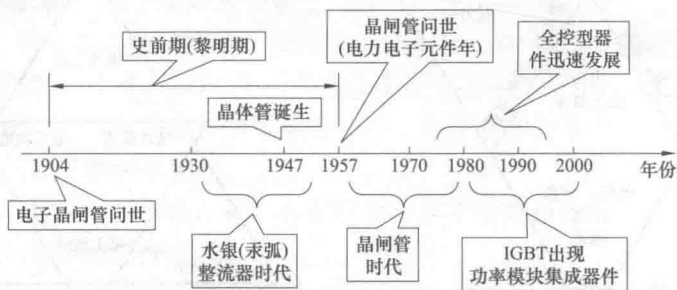


图 1-3 电力电子技术发展史

电力电子技术的诞生是以 1957 年美国通用电气公司研制出的第一个晶闸管为标志，晶闸管出现前，用于电力变换的电子技术已经存在了，晶闸管出现前的时期可称为电力电子技术的史前期或黎明期。

1904 年出现了电子管，它能在真空中对电子流进行控制，并应用于通信和无线电，从而开了电子技术用于电力领域的先河。

后来出现了水银整流器，其性能和晶闸管很相似。20 世纪 30 年代到 50 年代，水银整流器发展迅速并大量被应用。它广泛用于电化学工业、电气铁道直流变电站以及轧钢用直流电动机的传动，甚至用于直流输电。这一时期，各种整流电路、逆变电路、周波变流电路的理论已经发展成熟并广为应用。在晶闸管出现以后的相当一段时期内，所使用的电路形式仍然是这些形式。这一时期，把交流变为直流的方法除水银整流器外，还有发展更早的电动机一直流发电机组，即变流机组。和旋转变流机组相对应，静止变流器的称呼从水银整流器开始而沿用至今。

1947 年美国贝尔实验室发明了晶体管，引发了电子技术的一场革命，最先用于电力领域的半导体器件是硅二极管。

1.2.2 电力电子技术的发展趋势

(1) 晶闸管。1957 年晶闸管出现后，由于其优越的电气性能和控制性能，使之很快就取代了水银整流器和旋转变流机组，并且应用范围也迅速扩大。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）的迅速发展也有力地推动了晶闸管的进步。电力电子技术的概念和基础就是由晶闸管及晶闸管变流技术的发展而确立的。

晶闸管是通过控制门极，使其能够导通而不能关断的器件，因而属于半控型器件。

晶闸管电路的控制方式主要是相位控制方式，晶闸管的关断通常依靠电网电压等外部条件来实现，这就使得晶闸管的应用受到了很大的局限。

(2) 全控型器件。20 世纪 70 年代后期开始，以门极可关断晶闸管（GTO）、电力双极型晶体管（BJT）和电力场效应晶体管（Power-MOSFET）为代表的全控型器件迅速发展。全控型器件的特点是通过控制门极（基极、栅极）的控制，既可使其开通又可使其关断，开关速度普遍高于晶闸管，可用于开关频率较高的电路。这些优越的特性使电力电子技术的面貌焕然一新，把电力电子技术推进到一个新的发展阶段。

和晶闸管电路的相位控制方式相对应，采用全控型器件电路的主要控制方式为脉冲宽度

调制 (PWM) 方式, 可称之为斩波控制方式, 简称斩控方式。PWM 控制技术在电力电子变流技术中占有十分重要的地位, 它在逆变、斩波、整流、变频及交流电力控制中均可应用。它使电路的控制性能大为改善, 使以前难以实现的功能也得以实现, 对电力电子技术的发展产生了深远的影响。

(3) 复合型器件和功率集成电路。20 世纪 80 年代后期开始, 出现了以绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 为代表的复合型器件, IGBT 是 MOSFET 和 BJT 的复合, 属于全控型器件。它把 MOSFET 驱动功率小、开关速度快的优点和 BJT 通态压降小、载流能力大的优点集于一身, 性能十分优越, 使之成为现代电力电子技术的主导器件。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必要的辅助元件做成模块的形式, 这给应用带来了很大的方便。后来又把驱动、控制、保护电路和功率器件集成在一起, 构成功率集成电路 (PIC)。目前经常使用的智能化功率模块 (IPM), 除了集成功率器件和驱动电路以外, 还集成了过电压、过电流和过热等故障检测电路, 并可将监测信号传送至 CPU, 以保证 IPM 自身不受损害。目前其功率集成电路模块的功率都还较小, 但代表了电力电子技术发展的一个重要方向。

(4) 软开关技术。随着全控型电力电子器件的不断进步, 电力电子电路的工作频率也不断提高, 同时, 电力电子器件的开关损耗也随之增大。为了减小开关损耗, 软开关技术便应运而生, 零电压开关 (ZVS) 和零电流开关 (ZCS) 就是软开关的最基本形式, 理论上讲采用软开关技术可使开关损耗降为零, 可以提高效率, 也使得开关频率可以进一步提高, 从而提高了电力电子装置的功率密度。

1.3 电力电子技术的应用

1.3.1 一般工业

工业中大量应用各种交直流电动机。直流电动机有良好的调速性能, 给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。近年来, 由于电力电子变频技术的迅速发展, 使得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。大至数百万瓦的各种轧钢机, 小到几百瓦的数控机床的伺服电机, 以及矿山牵引等场合都广泛采用电力电子交直流调速技术。一些对调速性能要求不高的大型鼓风机等近年来也采用了变频装置, 以达到节能的目的。还有些不调速的电机为了避免启动时的电流冲击而采用了软启动装置, 这种软启动装置也是电力电子装置。

电化学工业大量使用直流电源, 电解铝、电解食盐水等都需要大容量整流电源。电镀装置也需要整流电源。

电力电子技术还大量用于冶金工业中的高频、中频感应加热电源、淬火电源及直流电弧炉电源等场合。

1.3.2 交通运输

电气化铁道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。在未来的磁悬浮列车中, 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。

电动汽车的发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、船舶需要很多不同要求的电源，因此航空和航海都离不开电力电子技术。

如果把电梯也算做交通运输，那么它也需要电力电子技术。以前的电梯大都采用直流调速系统，而近年来交流变频调速已成为主流调速方式。

1.3.3 电力系统

电力电子技术在电力系统中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%以上的电能至少经过一次以上电力电子变流装置的处理。电力系统在通向现代化的进程中，电力电子技术是关键技术之一。毫不夸张地说，如果离开电力电子技术，电力系统的现代化就是不可想象的。

直流输电在长距离、大容量输电时有很大的优势，其送电端的整流阀和受电端的逆变阀都采用晶闸管变流装置。近年发展起来的柔性交流输电（FACTS）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（TCR）、晶闸管投切电容器（TSC）都是重要的无功补偿装置。近年来出现的静止无功发生器（SVG）、有源电力滤波器（APF）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、闪变等情况中，以进行电能质量控制，改善供电质量。在变电站中，给操作系统提供可靠的交直流操作电源，给蓄电池充电等都需要电力电子装置。

1.3.4 电子装置电源

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用晶闸管作为整流电源，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、微型计算机内部的电源现在也都采用高频开关电源。在大型计算机等场合，常常需要不间断电源（Uninterruptible Power Supply, UPS）供电，不间断电源实际就是典型的电力电子装置。采用电力电子技术的照明电源，变频空调、电视机、音响设备、家用计算机等电子设备的电源部分也都需要电力电子技术。此外，有些洗衣机、电冰箱、微波炉等电器也应用了电力电子技术。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，电力电子技术广泛用于装置电源，使得它和我们的生活变得十分贴近。

1.3.5 环境保护

大气污染是我国现阶段重要的环境污染之一，治理污染已成为推动经济增长、改善人民生活水平的重要手段。电力电子技术作为一种高新技术为大气污染治理提供了很好的机遇，当前我国电力电子技术在大气污染治理中的应用主要是高压静电除尘法，该方法是利用高压电场的静电力，使粉尘荷电产生定向运动而从气体中分离得到净化的方法，在实现粉尘与气流分离的过程中，静电除尘器可分离的粒度范围为 $0.02\sim 200\mu\text{m}$ ，除尘效率为 $80\%\sim 90\%$ 。随着电力电子技术的迅猛发展，具有控制方便、灵敏度和精度高等优点的电力电子技术将成为影响静电除尘器除尘效果的重要技术。

另外,工业排放的可吸附颗粒物、装修房间排放的甲醛、室内地毯排放的 VOC 污染物以及厨房排放的油烟等是室内环境污染的主要来源。解决室内环境的污染问题,也可采用电力电子技术实现的空气净化器,能有效地改善室内空气质量。空气净化器的直流高压电源部分也离不开电力电子技术,在家庭、医院和宾馆等多种场合获得广泛的应用。

1.3.6 新能源

传统的发电方式是火力发电、水力发电以及后来兴起的核能发电。能源危机后,各种新能源、可再生能源及新型发电方式越来越受到重视。其中太阳能发电、风力发电的发展较快,燃料电池更是备受关注。太阳能发电和风力发电受环境的制约,发出的电力质量较差,常需要储能装置缓冲,需要改善电能质量,这就需要电力电子技术。当需要和电力系统联网时,也离不开电力电子技术。

为了合理地利用水力发电资源,近年来抽水储能发电站受到重视。其中的大型电动机的启动和调速都需要电力电子技术。超导储能是未来的一种储能方式,它需要强大的直流电源供电,这也离不开电力电子技术。核聚变反应堆在产生强大磁场和注入能量时,需要大容量的脉冲电源,这种电源就是电力电子装置。科学实验或某些特殊场合,常常需要一些特种电源,这也是电力电子技术的用武之地。

以前电力电子技术的应用偏重于中、大功率。现在,在 1kW 以下,甚至几十瓦以下的功率范围内,电力电子技术的应用也越来越广,其地位也越来越重要。这已成为一个重要的发展趋势,值得引起人们的注意。

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存在的巨大魅力。这也激发了一代又一代的学者和工程技术人员学习、研究电力电子技术并使其飞速发展。

习题

1. 什么是电力电子技术?
2. 什么是变流技术? 包含哪几种电力变换?
3. 电力电子技术有哪几个分支?
4. 电力电子技术与电力学、电子学、控制理论有何关系?
5. 简述电力电子技术的发展经历了哪几个关键时期?
6. 请列举出你所了解的电力电子装置。

电力电子器件

电力电子器件是电力电子电路的基础。掌握常用电力电子器件的特性和正确使用方法是学习电力电子技术的基础。

2.1 概述

2.1.1 电力电子器件的概念

电力电子器件是指可直接用于处理电能的主电路中,实现电能的变换和控制的电子器件。电力电子器件一般指电力半导体器件,目前它所采用的主要材料仍然是单晶硅,但由于电压等级和功率要求不一样,制造工艺也有所不同。

2.1.2 电力电子器件的特征

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

(1) 电力电子器件所能处理的电功率较大,其承受电压和电流的能力是其最重要的参数。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) 电力电子器件一般都工作在开关状态。因为电力电子器件处理的电功率较大,使器件工作于开关工作状态可减小器件本身的损耗,高效地完成对电能的变换和控制。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。

器件的开关状态是指器件导通时相当于开关闭合,导通时(通态)阻抗很小,接近短路,管压降接近于零,而电流由外电路决定;器件阻断时相当于开关断开,阻断时(断态)阻抗大,接近于断路,电流几乎为零,而管子两端的电压由外电路决定。

(3) 电力电子器件需要由信息电子电路来控制 and 驱动。在实际应用中,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和关断,需要一定的中间电路对这些信号进行适当地放大。

(4) 电力电子器件必须安装散热器。电力电子器件尽管工作在开关状态,但是器件自身的功率损耗通常远大于信息电子器件,因而为了防止因损耗散发的热量导致器件温度过高而损坏,不仅在封装上比较讲究散热设计,而且在其工作时都还需要安装散热器。

电力电子器件的损耗主要包括通态损耗、断态损耗和开通损耗、关断损耗。

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降压,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互作用,就形成了电力电子器件的通态损耗和断态损耗。

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。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原因。当电力电子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。

2.1.3 电力电子器件的分类

电力电子器件种类繁多，对其可从以下几个角度进行分类。

1. 根据电力电子器件的可控程度分

(1) 不可控型器件。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，其本身不具备可控开关能力。是无控制端的二端器件。常用的不可控器件是电力二极管（PD 或 SR）。

(2) 半控型器件。通过在器件的控制端施加控制信号只能控制其导通而不能控制其关断，器件的关断完全由其在主电路中承受的电压和电流决定。是具有控制端的三端器件。常用的半控器件有晶闸管（SCR）和晶闸管的大部分派生器件。

(3) 全控型器件。通过在器件的控制端施加控制信号既可以控制其导通，又可以控制其关断。是具有控制端的三端器件。常用的全控型器件有绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、电力场效应晶体管（Power MOSFET）、电力晶体管（GTR）、门极可关断晶闸管（GTO）。

2. 根据器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况分

(1) 单极型器件。由一种载流子参与导电的器件称为单极型器件。常见的单极型器件有电力场效应晶体管（Power MOSFET）、静电感应晶体管（SIT）等。

(2) 双极型器件。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。常见的双极型器件有电力二极管（PD 或 SR）、电力晶体管（GTR）、晶闸管（SCR）、门极可关断晶闸管（GTO）、静电感应晶闸管（SITH）等。

(3) 复合型器件。由单极型器件和双极型器件集成混合而成的器件称为复合型器件。常见的复合型器件有绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、MOS 控制晶闸管（MCT）等。

3. 根据驱动信号的不同分

(1) 电流驱动型。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。常见的电流驱动型电力电子器件有电力晶体管（GTR）、晶闸管（SCR）和晶闸管的大部分派生器件。

(2) 电压驱动型。通过在控制端和公共端之间施加一定的电压信号来实现导通或者关断的控制，这类电力电子器件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。常见的电压驱动型电力电子器件有电力场效应晶体管（Power MOSFET）、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、静电感应晶体管（SIT）、静电感应晶闸管（SITH）、MOS 控制晶闸管（MCT）等。

2.2 不可控器件—电力二极管

电力二极管（Power Diode, PD）自 20 世纪 50 年代初期就开始应用，当时也被称为半导体整流器（Semiconductor Rectifier, SR）。虽然是不可控制器件，但其结构和原理简单、



工作可靠，直到现在仍然大量应用于电气设备中。尤其是快速恢复二极管和肖特基二极管，应用于中、高频率整流和逆变等装置中，具有不可替代的地位。

2.2.1 电力二极管的结构和工作原理

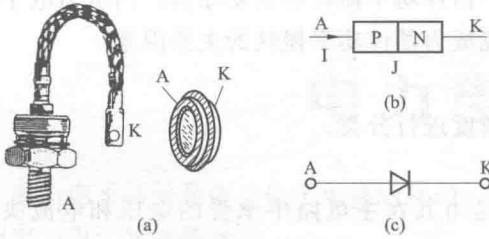


图 2-1 电力二极管

(a) 外形；(b) 基本结构；(c) 电气图形符号

1. 结构

电力二极管的基本结构和工作原理与信息电子电路中的二极管是一样的，都是以半导体 PN 结为基础的单向导电器件。实际上电力二极管是由一个面积较大的 PN 结和两端引线以及封装组成。电力二极管的外形、基本结构和电气图形符号如图 2-1 (a)、(b)、(c) 所示。从外形上看，电力二极管可以有螺栓型、平板型两种封装（一般情况下，200A 以下的管子采用螺栓型，200A 以上则采用平板型）。

电气图形符号中的 A 为阳极，K 为阴极。

2. 工作原理

(1) PN 结的导电原理。将一块单晶硅的一侧掺入杂质制作成 P 型半导体，另一侧掺入杂质制作成 N 型半导体，在二者的交界处就形成一个 PN 结，如图 2-2 (a) 所示。

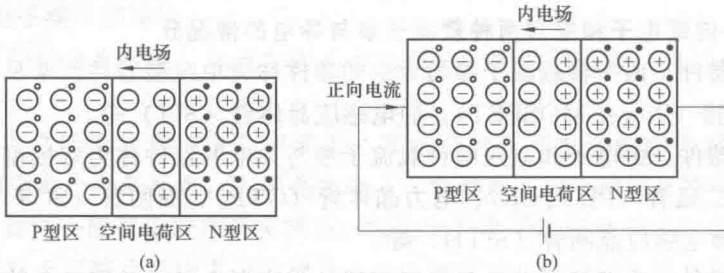


图 2-2 PN 结的形成及单向导电原理

(a) PN 结的形成；(b) PN 结的单向导电原理

当 PN 结外加正向电压（正向偏置），如图 2-2 (b) 所示，电压正极接 P 区、负极接 N 区时，外加电场与 PN 结内电场方向相反，促进多子的扩散运动，抑制少子的漂移运动，使 PN 结内部空间电荷区变窄，而在外电路上则形成自 P 区流入而从 N 区流出的电流，称之为正向电流 I_F （电流的大小主要由电源电压和外电路决定），PN 结表现为低阻态，称为 PN 结的导通。

当 PN 结加反向电压（反向偏置）时，外加电场与 PN 结内电场方向相同，促进少子的漂移运动，抑制多子的扩散运动，使 PN 结内部空间电荷区变宽，而外电路则形成自 N 区流入而从 P 区流出的电流，称之为反向漏电流 I_R ，由于少子的浓度很低，一般 I_R 很小，仅为微安数量级。因此，反向偏置的 PN 结呈现高阻态，几乎没有电流流过，被称为反向截止状态。

这就是 PN 结的单向导电性，即正偏导通，反偏截止。电力二极管的基本工作原理就在于 PN 结的单向导电这个主要特征。

PN 结具有承受一定的反向电压的能力，但当施加的反向电压超过其承受能力，反向电流将会急剧增大，破坏 PN 结反向偏置的截止状态，称为反向击穿。反向击穿按照机理不同