



高等教育“十三五”应用型规划教材

电力电子技术

DIANLI DIANZI JISHU

主编 刘志华 刘曙光

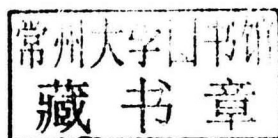


电子科技大学出版社

高等教育“十三五”应用型规划教材

电力电子技术

主 编 刘志华 刘曙光
副主编 李 刚 和晓军
曹 钰 王雪燃



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术 / 刘志华, 刘曙光主编. —成都:
电子科技大学出版社, 2017. 11
ISBN 978-7-5647-4704-6

I. ①电… II. ①刘…②刘… III. ①电力电子技术
IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 148974 号

内 容 简 介

本书是作者根据从事电力电子技术教学与科研工作的经验, 在学习、研究国内外教材及相关参考文献基础上编写而成的。

本书在内容体系的安排上, 针对本科生教学的特点, 力图避免新技术、新理论的简单罗列, 在保留一定的晶闸管相控变流内容的同时, 较为突出地反映了以全控器件为主的 PWM 理论体系, 较为系统地阐述了电力电子器件、直流-直流变换电路、直流-交流变换电路、交流-直流变换电路、交流-交流变换电路、软开关技术与多电平变化技术以及电力电子技术的应用等基本内容, 为电力电子技术的研究与应用提供了理论和技术基础。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、自动化等相关专业的本科生教材, 也可供从事电力电子技术和相关研究的工程技术人员参考。

电力电子技术

DIANLI DIANZI JISHU

刘志华 刘曙光 主编

策划编辑 刘 愚

责任编辑 刘 愚

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 北京市华审彩色印刷厂

成品尺寸 185 mm×260 mm

印 张 16.75

字 数 418 千字

版 次 2017 年 11 月第一版

印 次 2017 年 11 月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-4704-6

定 价 38.00 元

版权所有, 侵权必究

前 言

电力电子技术（电力电子学）是 20 世纪 50 年代初期诞生的技术学科。进入 21 世纪以来，电力电子技术发展尤其迅速，新思想、新理论、新技术、新方法层出不穷，日新月异。当今电力电子技术应用非常广泛，已覆盖了国民经济和社会生活的各个领域，产生了巨大的经济效益和社会效益。专家和学者们早有预言，电力电子技术与计算机技术必将成为未来科学技术发展的两大支柱。在这样的形势下，本书编者认识到，作为重要专业基础课程的教科书——《电力电子技术》一书的内容和理论体系，也到了必须修改的时候。

编者在参阅多种版本《电力电子技术》之后，认为很多版本都具有先进的编写思想和编写大纲，例如“加强基础，循序渐进，理论联系实际”的编写原则，这是要继承并发扬光大的地方。但是必须看到，在实际应用中各类电力电子变换器都采用了 PWM 控制技术，相位控制技术将逐步被淘汰，不久就要退出科技发展的历史舞台。因此，《电力电子技术》在编写思想上必须尽快转变：①一直以相位控制技术作为重点内容的理论体系必须快速转向以 PWM 控制技术为重点内容的理论体系，这是一种理论体系的更新，也是一种技术思想、技术观念的转变；②推陈出新，剔去过时的老内容，纳入新理论、新技术、新方法。为此，确定了本书编写宗旨：第一，初步建立电力电子技术的 PWM 理论体系，完成以相控整流技术、方波逆变技术为主导的理论体系转变为以 PWM 整流技术、PWM 逆变技术为主导的理论体系；第二，注意引入最新技术成果以保证本书内容的新颖性和先进性。

本书主要特点如下。

1. 重点介绍全控型电力电子器件。全控型电力电子器件的应用，才使 PWM 控制技术得以充分发挥作用。近十几年来，高频自关断电力电子开关器件蓬勃发展，功能和功率等级不断提高，在应用中显示了巨大的优越性。本书第 2 章以在应用中胜出的 P-MOSFET、IGBT、IEGT、IGCT 等全控型器件为重点进行了详细介绍。目前 SCR 器件还有一定市场，兼顾实际需要，本书第 2 章还是用了一定篇幅做了较为详细的介绍。考虑到器件发展过程的连续性和相关性，本书第 2 章中对其他一些全控型器件也做了简单介绍。

2. 初步建立了电力电子技术的 PWM 理论体系。PWM 控制技术在电力电子变换技术中占有十分重要的地位，在逆变器、整流器、直流斩波器、直接变换器中均可采用。实践表明，采用 PWM 控制技术，可以大幅度提高各类变换器的性能，实现其他控制方式难以实现的变换功能，根除了其他控制方式的弊端。因此，本书在各类电力电子变换器中首推 PWM 控制技术，确立 PWM 控制技术在各类变换器中的主导地位，使 PWM 控制技术成为电子技术中的核心理论之一。

3. PWM 技术首先应用于逆变器中，目前在逆变器应用基本上都采用了 PWM 控制技术，可以说 PWM 控制技术在逆变器的应用中真正确立了它的应有地位。

4. 高频化为电力电子技术应用带来了诸多好处，但是高频化又使得器件的开关损耗

增大,降低了电力电子变换器的效率,这是不被允许的。为此本书介绍了 PWM 谐振型软开关技术。这是目前电力电子技术的发展前沿之一。

5. 本书用一定的篇幅介绍方波逆变器、相控整流器的工作原理是为了保证电力电子技术理论的连续性;也是为了让读者了解方波逆变器、相控整流器存在的问题,以及采用 PWM 控制技术的必然性和必要性。

本书第 1 章介绍了电力电子研究内容、电力电子技术的发展、电力电子技术的应用;第 2 章重点介绍了晶闸管 (SCR)、门极可关断晶闸管 (GTO)、电力晶体管 (GTR)、功率场效应晶体管 (P-MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 等电力电子器件的半导体物理结构、工作原理、开关特性、主要参数、优缺点以及应用前景,以便能够在工作中正确选用这些常用的电力电子器件;第 3~6 章为本书的主体,以 PWM 控制技术为核心,分析和研究了直流-直流变换电路(直流斩波器)、直流-交流变换电路(逆变器)、交流-直流变换电路(整流器)、交流-交流变换电路(直接变换器)四类基本变换器的拓扑结构、工作原理、基本特性、谐波情况、性能指标等;第 7 章介绍了为提高高频化电力电子变换器效率而采用的 PWM 谐振型软开关技术;第 8 章结合工程实际介绍了各种组合型电力电子变换电路在各个领域中的应用。

本书可作为高等院校电气工程、电气自动化以及相关专业的本科生、研究生的教材,也可以作为工程技术人员的参考书。

本书由云南机电职业技术学院刘志华、黄山学院刘曙光担任主编,呼伦贝尔学院李刚、沈阳理工大学和晓军、酒泉职业技术学院曹钰、内蒙古科技大学王雪燃担任副主编,全书由刘志华、刘曙光统编定稿。具体编写分工如下:第 5 章、第 7 章由刘志华编写;第 8 章、教学实验由刘曙光编写;第 1 章、第 3 章由李刚编写;第 6 章由和晓军编写;第 2 章由曹钰编写;第 4 章由王雪燃编写。

由于本书编者水平有限,错误和疏漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。读者如有意订书、购书,请致电 0313-7157345。

编 者

2017 年 6 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电力电子技术研究内容	1
1.2 电力电子技术的发展	4
1.3 电力电子技术的应用	7
第 2 章 电力电子器件	11
2.1 电力电子器件的特点与分类	11
2.2 电力电子器件基础	12
2.3 功率二极管	15
2.4 晶闸管	20
2.5 门极可关断晶闸管	29
2.6 电力晶体管	31
2.7 功率场效应晶体管	34
2.8 绝缘栅双极型晶体管	39
2.9 其他新型电力电子器件	42
2.10 电力电子器件的发展趋势	43
第 3 章 直流-直流变换电路	47
3.1 概述	47
3.2 降压式变换电路	48
3.3 直流升压变换电路	53
3.4 直流升降压变换电路	56
3.5 库克电路	58
3.6 正向激励直流变换电路	61
3.7 反向激励直流变换电路	64
3.8 其他典型直流变换电路	66
第 4 章 直流-交流变换技术	73
4.1 概述	73
4.2 单相方波逆变电路	76
4.3 单相电压型方波逆变电路的输出电压控制	80
4.4 单相方波逆变电路的谐波控制	85
4.5 三相逆变电路	93
4.6 逆变器输出滤波器的设计	104
第 5 章 交流-直流变换电路	109
5.1 概述	109
5.2 单相可控整流电路	109

5.3	三相可控整流电路	121
5.4	整流电路的有源逆变工作状态	140
5.5	整流电路的谐波和功率因数	146
5.6	PWM 整流电路及有源功率因数校正技术	148
第 6 章	交流-交流变换电路	158
6.1	交流电力控制电路	158
6.2	直接交流-交流变换电路	177
6.3	间接交流-交流变换电路	190
第 7 章	软开关技术与多电平变换技术	198
7.1	软开关技术	198
7.2	多电平变换技术	206
第 8 章	电力电子技术的应用	211
8.1	晶闸管直流电动机系统	211
8.2	变频器和交流调速系统	218
8.3	不间断电源	223
8.4	开关电源	225
8.5	功率因素校正技术	230
8.6	电力电子技术在电力系统中的应用	234
8.7	电力电子技术在可再生能源发电系统中的应用	242
8.8	电力电子技术在微电网中的应用	245
教学实验		248
实验 1	锯齿波同步移相触发电路实验	248
实验 2	单相桥式半控整流电路实验	249
实验 3	单相桥式全控整流电路实验	251
实验 4	三相桥式全控整流及有源逆变电路实验	253
实验 5	单相交流调压电路实验	255
实验 6	直流斩波电路的性能研究	256
参考文献		259

第 1 章 绪 论

本章重难点

- 本章重点
 1. 弄清电力电子技术的内涵；
 2. 了解电力电子技术的发展历程；
 3. 熟悉电力电子技术的主要应用。
- 本章难点
 1. 电力变换的种类；
 2. 电力电子技术与电子学的关系。

1.1 电力电子技术研究内容

电力电子技术是一门融合了电力技术、电子技术和控制技术的交叉学科，是使用电力电子器件、电路理论和控制技术对电能进行处理、控制和变换的技术。它既是电子学在强电或电工领域的一个分支，又是电工学在弱电或电子领域的一个分支，或者说强弱电相结合的学科。

通常所用的电力有交流和直流两种。从公用电网直接得到的电力是交流，从蓄电池和干电池得到的电力是直流。从这些电源得到的电力往往不能直接满足要求，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）。交流变直流称为整流，直流变交流称为逆变。直流变直流是指一种电压（或电流）的直流变为另一种电压（或电流）的直流，可用直流斩波电路实现。交流变交流可以是电压或电流的变换，称作交流电力控制，也可以是频率或相数的变换。进行上述电力变换的技术称为变流技术。电力变换的分类如表 1－1 所示。

表 1－1 电力变换的分类

输入 输出	交流（AC）	直流（DC）
	整流	直流斩波
直流（DC）	交流电力控制、变频、变相	逆变

通常把电力电子技术分为电力电子器件制造技术和变流技术两个分支。变流技术也称为电力电子器件的应用技术，它包括用电力电子器件构成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。

如果没有晶闸管、电力晶体管、IGBT 等电力电子器件，也就没有电力电子技术，而电力电子技术主要用于电力变换。因此可以认为，电力电子器件的制造技术是电力电子技术的基础，而变流技术则是电力技术的核心。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。

电力电子学（power electronics）这一名称是在 20 世纪 60 年代出现的（比晶闸管的出现晚）。1974 年，美国学者 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、电子学和控制理论三个学科交叉而形成的。这一观点被全世界普遍接受。

“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，其实际内容并没有很大的不同。

电力电子技术和电子学的关系是显而易见的，如图 1-1 所示。信息电子学可分为电子器件和电子电路两大分支，这分别与电力电子器件和电力电子电路相对应。电力电子器件的制造技术和用于信息变换的电子器件制造技术的理论基础（都是基于半导体理论）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，这成为电力电子技术区别于信息电子技术的一个重要特征。

电力电子技术广泛应用于电气工程中，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，这里可用“电工科学”或“电气工程”取而代之。各种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领域中。因此，无论是国内还是国外，通常把电力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，是电气工程这一相对古老学科活力的重要源泉。

在我国的学科分类中，电气工程是一个一级学科，它包含了五个二级学科，即电力系统及其自动化、电机与电器、高电压与绝缘技术、电力电子与电力传动、电工理论与新技术。其中，电力电子与电力传动是由电力电子技术和电力传动自动化两个二级学科合并而成的。由于现代电力传动主要采用的是电力电子技术，因此将二者合并是有其道理的。

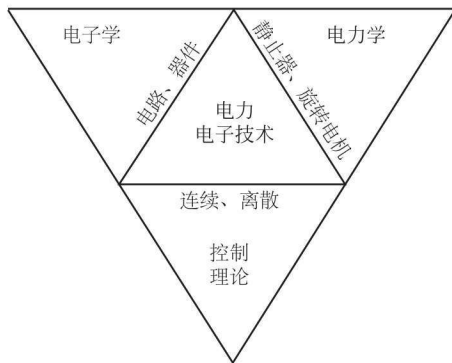


图 1-1 描述电力电子学的倒三角形

图 1-2 所示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。从图 1-2 所示的大三角形来看，和电气工程关系密切的其他学科主要是信息科学和能源科学。这里所说的信息科学是广义的信息科学，也就是所谓的弱电，即电子信息工程（也包括通信，但可以不包括计算机科学和工程）。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）处理信息。因此，二者既有所不同，

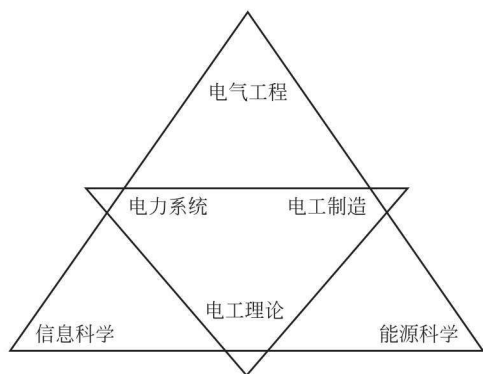


图 1-2 电气工程的双三角形描述

但又同根同源。而且，电气工程的发展越来越依赖于电子信息技术的进步。在美国及其他发达国家，大学中的电气工程系已经完全包含了电子信息技术的内容，甚至电子信息技术已经“喧宾夺主”，成了电气工程的主题。无论如何，电气工程与电子信息工程二者你中有我、我中有你，相互融合，这已成为科学技术发展的一种必然趋势。

但是，如果从应用领域看，电气工程则又和能源科学密切相关。电能是能源的一种，而且使用、输送和控制最为方便的能源，也是人类研究较为充分的一种能源。在可以预见的将来，还没有一种能源有可能取代电能。而人类在任何时候都不可能离开能源，能源为人类提供动力，是人类永恒的研究对象。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。正因为电气工程和能源科学有如此密切的关系，国家在划分专业或行业时，常常把电力和动力放在一起。

如图 1-2 所示的小三角形所描述的电气工程内部结构中，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。电气装备的应用则是指上述设备和装置的应用。电力系统的运行主要包括电力网的运行和控制、电气自动化以及各种电气装备和系统的运行等方面。当然，制造和运行是不可能截然分开的，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依靠良好的设备。

在电气工程的五个二级学科中，电力电子技术处于十分特殊的地位。电力电子技术和其他几个二级学科的关系都十分密切，甚至可以说，其他几个二级学科的发展都有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，才使得电气工程始终保持着强大的活力。

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。

另外，控制理论是自动化技术的理论基础，二者密不可分，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。

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。可以预见，在 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。有人预言,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。通常把计算机的作用比作人的大脑。那么,可以把电力电子技术比作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”变成适合于人们使用的“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,还可比作人的肌肉和四肢,使人能够运动和从事劳动。只有聪明的大脑,没有灵巧的四肢甚至不能运动的人是难以从事工作的。可见,电力电子技术在 21 世纪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

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主线的。如图 1-3 所示为电力电子技术的发展历程。

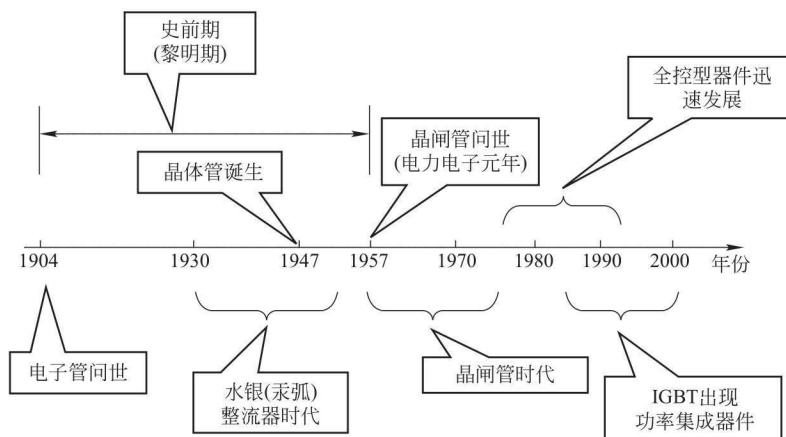


图 1-3 电力电子技术的发展历程

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个晶闸管为标志的。但在晶闸管出现以前,用于电力变换的电子技术就已经存在了。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,从而开启了电子技术用于电力领域的先河。后来出现了水银整流器,它把水银封于管内,利用对其蒸气的电弧可对大电流进行控制,其性能和晶闸管已经非常相似。当然,水银整流器所用的水银对人体有害,而且,水银整流器的电压降落也很高,很不理想。20 世纪 30 年代至 50 年代,是水银整流器发展迅速并大量应用的时期。在这一时期,水银整流器广泛用于电化学工业、电气铁道直流变电所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长一段时期内,所使用的电路仍然是这些形式。

在这一时期,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-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沿用至今。

1947年，美国著名的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。晶闸管出现后，由于其优越的电气性能和控制性能，很快就取代了水银整流器和旋转变流机组，并且应用范围迅速扩大。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）的迅速发展也给晶闸管的发展提供了用武之地。电力电子技术的概念和基础就是由于晶闸管及晶闸管变流技术的发展而确立的。

晶闸管是通过门极的控制使其导通而不能使其关断的器件，属于半控型器件。对晶闸管电路的控制方式主要是相位控制方式，简称相控方式。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。

20世纪70年代后期，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。这些器件都属于全控型器件，其特点是通过门极（基极、栅极）的控制既可使其开通又可使其关断。此外，这些器件的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。

与晶闸管电路的相位控制方式相对应，采用全控型器件的电路的主要控制方式为脉冲宽度调制（PWM）方式。相对于相位控制方式，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位置，它在逆变、直流斩波、整流、交流-交流控制等所有电力电子电路中均可应用。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。

在20世纪80年代后期，以绝缘栅极双极型晶体管（IGBT）为代表的复合型器件异军突起。IGBT属于全控型器件，它是MOSFET和BJT的复合。它把MOSFET的驱动功率小、开关速度快的优点和BJT的通态压降小、载流能力大、可承受电压高的优点集于一身，性能十分优越，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。其中IGCT也取得了相当的成功，已经获得大量应用。

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、保护电路和电力电子器件集成在一起，构成电力电子集成电路（PIC）。目前，电力电子集成电路的功率都还较小，电压也较低，它面临着电压隔离（主电路为高压，而控制电路为低压）、热隔离（主电路发热严重）、电磁干扰（开关器件通断高压大电流，它和控制电路处于同一芯片）等几大难题，但这代表了电力电子技术发展的一个重要方向。

目前，电力电子集成技术的发展十分迅速，除以PIC为代表的单片集成技术外，电力电子集成技术发展的焦点是混合集成技术，即把不同的单个芯片集成封装在一起。这样，虽然功率密度不如单片集成，但却为解决上述几大难题提供了很大的方便。这里，封装技术就成了关键技术。除单片集成和混合集成外，系统集成也是电力电子集成技术的一个重要方面，特别是对于超大功率集成技术更是如此。

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。另外，它也使得开关频率得以进一步提高，从而提高了电力电子装置的功率密度。

展望未来，随着具有高可靠性的集成电力电子模块 IPEM（integrated power electronic modules）技术以及具有导通损耗小、耐压高、高结温等的特点的硅（silicon）等新一代器件的应用，电力电子技术将会发生新一轮革命性的变化，从而带动国民经济及装备技术水平的飞速发展。

电力电子技术发展过程中的重要事件如下：

- 1803 年，整流器的发明；
- 1876 年，硒整流器的发明；
- 1896 年，单相桥式整流电路的发明；
- 1896 年，三相桥式整流电路的发明；
- 1902 年，水银整流器的发明；
- 1903 年，相控整流原理的提出；
- 1911 年，金属封装水银整流器的发明；
- 1922 年，周波变换器原理的提出；
- 1923 年，电子晶闸管的发明；
- 1924 年，斩波器原理的提出；
- 1925 年，逆变器换流原理的提出；
- 1926 年，热阴极电子晶闸管的发明；
- 1931 年，铁路牵引用周波变换器的发明；
- 1933 年，引燃管的发明；
- 1935 年，高压直流输电系统的提出；
- 1939 年，电机驱动概念的引入；
- 1942 年，200 MW 25/60 Hz 功率变换器的发明；
- 1953 年，100 A 锗功率二极管的发明；
- 1954 年，硅功率二极管的发明；
- 1957 年，半导体晶闸管的发明；
- 1958 年，半导体晶闸管的商业化；
- 1961 年，小功率可关断晶闸管（GTO）的发明；
- 1964 年，三端双向可控开关元件用于直流电机驱动理论的提出；
- 1965 年，光激硅可控整流器的发明；
- 1967 年，用于高压直流输电系统的晶闸管的发明；
- 1970 年，500 V/20 A 巨型晶体管（BJT）的发明；
- 1971 年，磁场定向原理的提出（矢量控制）；
- 1973 年，用周波变换器实现的无齿轮传动球磨机的发明；
- 1975 年，300 V/400 A 巨型晶体管（GTR）的发明；

1978 年, 100 V/25 A 功率场效应管 (MOSFET) 的发明;

1979 年, 采用微处理器实现矢量控制的晶体管逆变器 (LEONHARD) 的发明;

1980 年, 矩阵变换器的发明; 4 kV/1.5 kA 光触发晶闸管的发明; 开关磁阻电机的发明;

1981 年, 2500 V/1000 A GTO 的发明; 周波变换器实现的球磨机驱动的成功;

1982 年, CUK 变换器的发明;

1983 年, IGBT 变换器的发明;

1983 年, 谐振链 DC-DC 变换器的发明;

1986 年, 柔性输电概念的提出;

1987 年, 双向 PWM RECTIFIER-INVERTER 系统的实现;

1987 年, 场控晶闸管 (MTC) 的发明; 电力系统有功功率控制器 (APLC) 的发明; 直接转矩控制理论的提出;

1989 年, 85MW 变速泵储能系统的完成; 准谐振变换器的发明;

1990 年, “SMART” 功率驱动的实现;

1991 年 80Mvar 静止无功功率补偿器 (SVC) 的发明;

1992 年, 6 kV/2.5 kA, 300 MW 直流输电的成功;

1993 年, 模糊逻辑神经网络在电力电子学及电力传动上的应用;

1994 年, 1 MV·A IGBT 不停电电源 (UPS) 的发明; 38 MV·A GTO 牵引逆变器的发明; 400 MV 变速泵储能系统的完成;

1995 年, 3 电平 GTO/IGBT 逆变器在球磨机传动中的应用 (15/1.5MV·A); 100 Mvar 静止无功补偿装置 (TVA) 的发明;

1997 年, IGCT 概念的提出和商业化;

1998 年, 5 MW 3 电平直接转矩控制变换器的实现; 1 MW 50 kHz 电流型感应加热逆变器的运行;

1998 年, 300 MW GTO 高压输电变换系统的完成; 6.5 kV 双向晶闸管 (BCT) 的发明;

1999 年, 6.5 kV/600 A IGBT 模块在 300 V 直流系统中成功替代 GTO; 双向 MOS 开关 (MBS) 的发明;

2000 年, 反向阻断性 IGBT 的发明; 用 3 电平 IGCT 逆变器实现的 45 MV·A 动态电压补偿器 (DVR) 的完成; 矩阵变换器模块的发明;

2001 年, 4H-SiC 芯片制作非对称 GTO 的成功实现;

2003 年, 碳化硅 GCT (SIGCT) 高压模块的成功研制。

1.3 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、新能源系统等, 在照明、空调等家用电器及其他领域也有着广泛的应用。下面介绍其主要应用领域。

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,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。近年来,由于电力电子变频技术的迅速发展,使得交流电动机的调速性能可与直流电动机相媲美,交流调速技术逐渐大量应用并占据了主导地位。大至数千千瓦的各种轧钢机,小到几百瓦的数控机床的伺服电动机,以及矿山牵引等场合都广泛采用电力电子交流调速技术。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。还有些并不特别要求调速的电动机,为了避免起动时的电流冲击而采用了软起动装置,这种软起动装置也是电力电子装置。由于电动机的应用十分广泛,其所消耗的电力甚至达到了发电厂所发电力的60%以上,以至于有人认为,电力传动是电力电子技术的“主战场”。

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或中频感应加热电源、淬火电源及直流电弧炉电源等场合。

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。在磁悬浮列车中,电力电子技术更是一项关键技术。除牵引电动机传动外,车辆中的各种辅助电源也都离不开电力电子技术。

电动汽车的电动机依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动机,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和驱动,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。

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。在电力系统通向现代化的进程中,电力电子技术是关键技术之一。可以毫不夸张地说,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,而轻型直流输电则主要采用全控型的IGBT器件。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。近年来出现的采用全控型器件(如IGBT)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。

在变电所中,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。

4. 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、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，由于高频开关电源体积小、重量轻、效率高，现在已逐渐取代了线性电源。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。在使用大型计算机等设备的场合，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。

5. 家用电器

照明在家用电器中占有十分突出的地位。电力电子照明电源体积小、发光效率高、可节省大量能源，通常采用电力电子装置的光源被称为“节能灯”，它正在逐步取代传统的白炽灯和荧光灯。

变频空调器是家用电器中应用电力电子技术的典型例子。电视机、音响设备、家用计算机等电子设备的电源部分也需要电力电子技术。此外，不少洗衣机、电冰箱、微波炉等家用电器也应用了电力电子技术。

电力电子技术广泛用于家用电器使得它和我们的生活变得十分贴近。

6. 其他

除上述用途外，还有许多领域都离不开电力电子技术。

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，这些都必须采用电力电子技术。

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。其中风力发电、太阳能发电的发展最为迅速，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，更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，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1 kW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的存在和巨大魅力。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。

电力电子装置提供给负载的是各种不同的直流电源、恒频交流电源以及变频交流电源，因此也可以说，电力电子技术研究的就是电源技术。

电力电子技术对节省电能有重要意义。特别是在大型风机、水泵采用变频调速方面，在使用量十分庞大的照明电源等方面，电力电子技术的节能效果十分显著，因此它也被称为节能技术。



本章小结

电力电子技术诞生于晶闸管产生的 1957 年，经过半个多世纪，电力电子技术取得了迅速的发展。就电力电子器件而言，早已从半控型的晶闸管进入以 IGBT、电力 MOSFET 为代表的全控型器件的时代。至今，电力电子技术仍十分活跃，是电气工程领域最为活跃的分支，它给电气工程领域带来了天翻地覆的变化，令电气工程的面貌焕然一新。可以说，如果没有电力电子技术，电气工程发展到现在的水平是不可能的。

本书的第 1 章绪论中，介绍了电力电子技术的内涵、电力电子技术的发展历程和电力电子技术的应用等内容。这使得初次接触电力电子技术的读者在深入本课程前，对电力电子技术的轮廓有了一个大致的了解。



思考题与习题

1. 简述电力电子技术的内涵。
2. 电力变换的种类有哪些？
3. 简述电力电子技术的发展历程以及发展过程中的重要事件。
4. 电力电子技术的主要应用有哪些？