



面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century



普通高等教育“九五”国家级重点教材

电力电子技术

西安交通大学 王兆安 黄俊 主编

第 4 版

北京)
3
(4)



机械工业出版社
China Machine Press

面向 21 世纪课程教材
普通高等教育“九五”国家级重点教材

电力电子技术

第 4 版

主编 王兆安 黄俊

参编 杨 君 刘进军 杨 旭

主审 万伯任

机械工业出版社

本书是在高等教育机电类规划教材《电力电子变流技术（第3版）》（黄俊，王兆安合编，机械工业出版社，1994年）基础上修订而成的第4版，是“九五”国家级重点教材，也是教育部批准的“面向21世纪课程教材”。本书主要内容包括：各种电力电子器件；整流电路、直流斩波电路、交流电力控制电路和交交变频电路、逆变电路以及组合变流电路；PWM控制技术、软开关技术等。本书对电力电子技术的内容进行了精选，并体现了其最新发展。全书结构科学合理，层次分明，适于教学。书末附有教学实验。

本书适用于电气工程及其自动化专业、自动化专业以及引导性专业目录中的电气工程与自动化专业及其他相关专业的本科生。也可供相近专业选用或供工程技术人员参考。原采用《电力电子变流技术》作为教材的院校，可改用本书作为教材。

图书在版编目（CIP）数据

电力电子技术/王兆安 黄俊主编. —北京：机械工业出版社，2000
普通高等教育“九五”国家级重点教材，面向21世纪课程教材
ISBN 7-111-07601-X

I. 电… II. ①王… ②黄… 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（2000）第62298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：韩雪清 王小东 版式设计：冉晓华 责任校对：樊钟英
刘 辉

封面设计：姚 毅 责任印制：何全君

中国农业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001年4月第4版·第2次印刷

787mm×1092mm $\frac{1}{16}$ ·14印张·335千字

500 181—508 180册

定价：20.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
本社购书热线电话（010）68993821、68326677-2527

前 言

由黄俊主编的《半导体变流技术》作为工业电气自动化专业的全国统编教材，于1980年由机械工业出版社出版。1986年出版了第2版。在1994年出版第3版时，为了向学科名称靠拢，更名为《电力电子变流技术》，由黄俊、王兆安合编。到1999年为止，该教材先后印刷21次，累计发行量达47.7万余册，为全国高等院校普遍采用。该教材先后获国家教委优秀教材奖，机械工业部优秀教材一等奖，国家优秀教学成果二等奖。

由于电力电子技术的发展十分迅速，目前第3版教材的内容已显陈旧，急需更新内容。本教材的第4版就是在这一背景下问世的。由于本教材良好的基础和本课程的重要性，本教材第4版被教育部列为普通高等教育“九五”国家级重点教材。考虑到“电力电子技术”作为一个学科已深入人心，其核心内容就是变流技术，况且电力电子器件在本教材中也占有一定篇幅，同时本课程已由一门专业课程演变为专业基础课程，因此将第4版书名改为《电力电子技术》。这样的名称更具有基础性和普遍性，和学科名称一致，读者更容易理解。

1994年原国家教委提出并开始实施“高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划”，1996年正式批准了工科41个教改项目。1998年8月，教育部颁布了新的专业目录，把原强电各专业合并为电气工程及其自动化专业，把原工业自动化专业和自动控制专业合并为自动化专业，在同时公布的工科引导性专业目录中，又把电气工程及其自动化专业和自动化专业的一部分（实际上就是原工业自动化专业）进一步合并为电气工程与自动化专业。按照新的专业目录，本教材主要适用于电气工程及其自动化专业、自动化专业，以及引导性专业目录中电气工程与自动化专业，也可适用于其他相关专业。由于本教材属于专业基础课教材，且基础好，改革思路符合技术进步潮流及教学改革的要求，本教材已被教育部批准列为“面向21世纪课程教材”。

本教材第1版和第2版均以晶闸管整流电路为核心，第3版补充了自关断器件和PWM逆变电路等新内容，但全书格局没有根本性改变。本次修订在保持原书循序渐进、适于教学等优点的同时，对教材体系结构和内容等都进行了大幅度的更新。

本教材由三大部分构成。第一部分是电力电子器件，即第1章，这部分是全书的基础，其中晶闸管部分虽仍占重要地位，但以IGBT、电力MOSFET为代表的全控型器件已成为本章的主要部分。第二部分是各种电力电子电路，包括第2~5章和第8章，这部分是全书的主体。其中第2~5章分别讲述了四大类基本变流电路，即AC/DC、DC/DC、AC/AC、DC/AC变流电路。第8章讲述了由各种基本变流电路组合而成的组合变流电路。第三部分由第6章和第7章组成，介绍对各种变流电路都适用的PWM控制技术和软开关技术。电力电子装置的应用也是十分重要的，本教材未就此单独设章，而在各相关章节中体现应用方面的内容。

教学实验在电力电子技术中占有重要地位。鉴于出版专门的实验指导书很困难，本教材后附了“教学实验”部分，以供选用。为了便于复习和参考，书末在附录A中给出了术语索引；为了使读者对电力电子学术界的情况有所了解，还在附录B中给出了与电力电子技

术有关的学术组织、学术会议及期刊的简介。

本书由王兆安、黄俊共同担任主编。绪论、第4章、第5章、第6章和结束语由王兆安编写，第1章由刘进军编写，第2章、第3章和第8章8.1节和附录由杨君编写，第7章和第8章8.2节由杨旭编写，教学实验由杨君、杨旭编写。全书由王兆安、黄俊统稿。全书大部分插图由硕士研究生张晓莉绘制，刘晓娟工程师承担了大部分文稿的计算机录入工作。

本书由西安理工大学万伯任教授主审。万伯任教授在审阅中提出了许多中肯的修改意见，在此谨致衷心的感谢。

在讨论本书的编写大纲过程中，上海大学陈伯时教授、上海交通大学陈敏逊教授、四川大学贺星钊教授、东南大学赵家璧教授、天津大学许镇琳教授、华中理工大学秦忆教授、西安理工大学徐平教授、燕山大学刘彦民教授、北京机械工程学院栗书贤教授等提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中，本书第1版和第2版的作者之一，西安交通大学葛文运教授进行了卓有成效的组织工作，提出了许多宝贵意见，审阅了全部书稿，为本书的完成作出了重要贡献，在此深表谢意。本书第1版和第2版的另外三位作者西安交通大学王溥仁教授、朱仁初教授、西北纺织工学院伍恩华教授对本书曾有过历史性的贡献，在此特致敬意。

在本书编写过程中，西安交通大学卓放副教授和裴云庆博士提出了许多宝贵的建议和意见，在此表示衷心感谢。

在本书完稿之际，对书末所附参考文献的作者也致以衷心的感谢。

“电力拖动自动控制系统”是本课程的后续课程之一。本书的编写工作是和《电力拖动自动控制系统（第3版）》（上海大学陈伯时主编，机械工业出版社出版）的编写工作同步进行的。两本教材同为“普通高等教育‘九五’“国家级重点教材”及“面向21世纪课程教材”，在编写过程中，两书作者就书中内容的衔接和配合进行了多次磋商。因此建议读者在学习本课程的后续课程“电力拖动自动控制系统”时，选用陈伯时教授的《电力拖动自动控制系统（第3版）》作为教材。

由于作者学识有限，本书编写时间又很仓促，书中一定有很多疏漏及错误，殷切希望采用本教材的教师和同学批评指正。

编者

2000年1月6日

于西安交通大学电气工程学院

符号说明

- A ——安培；晶闸管的阳极
 a ——调制度
 b ——晶体管基极
 BU_{cb} ——晶体管发射极开路时集电极和基极间反
向击穿电压
 BU_{co} ——晶体管基极开路时集电极和发射极间击
穿电压
 BU_{cer} ——晶体管发射极和基极间接电阻时集电极
和发射极间击穿电压
 BU_{ces} ——晶体管发射极和基极短路时集电极和发
射极间击穿电压
 BU_{cex} ——晶体管发射结反向偏置时集电极和发射
极间击穿电压
 C ——电容器；电容量；IGBT 集电极
 c ——晶体管集电极
 C_{in} ——MOSFET 输入电容
 C_{iss} ——MOSFET 漏源极短路时的输入电容
 C_{oss} ——MOSFET 共源极输出电容
 C_{rss} ——MOSFET 反向转移电容
 D ——MOSFET 漏极；畸变功率
 di/dt ——晶闸管通态电流临界上升率
 du/dt ——晶闸管断态电压临界上升率
 E ——IGBT 发射极
 E ——直流电源电动势
 e ——晶体管发射极
 e_L ——电感的自感电动势
 E_M ——电动机反电动势
 f ——频率
 G ——发电机；MOSFET 栅极；晶闸管门极；
GTO 门极；IGBT 栅极
 G_{fs} ——MOSFET 跨导
 h_{FE} ——晶体管直流电流增益
 HRI_n —— n 次谐波电流含有率
 I ——整流后负载电流的有效值
 I_1 ——变压器一次相电流有效值
 i_1 ——变压器一次相电流瞬时值
 I_2 ——变压器二次相电流有效值
 i_2 ——变压器二次相电流瞬时值
 I_{ATO} ——GTO 最大可关断阳极电流
 i_b ——晶体管基极电流
 i_c ——晶体管集电极电流
 I_c ——IGBT 集电极电流
 I_{ceo} ——晶体管集电极与发射极间漏电流
 I_{cm} ——晶体管集电极最大允许电流
 I_{cs} ——晶体管集电极饱和电流
 I_D ——流过整流管的电流有效值；MOSFET 漏极
电流
 I_d ——整流电路的直流输出电流平均值
 i_D ——流过整流管的电流瞬时值
 i_d ——整流电路的直流输出电流瞬时值
 I_{dD} ——流过整流管的电流平均值
 I_{DM} ——MOSFET 漏极电流幅值
 I_{DR} ——流过续流二极管的电流有效值
 i_{DR} ——流过续流二极管的电流瞬时值
 I_{dT} ——流过晶闸管的电流平均值
 i_e ——晶体管发射极电流
 $I_{F(AV)}$ ——电力二极管的正向平均电流
 I_{FSM} ——电力二极管的浪涌电流
 I_G ——晶闸管、GTO 的门极电流
 I_H ——晶闸管的维持电流
 I_L ——晶闸管的擎住电流
 i_o ——输出电流
 i_p ——二组整流桥之间的环流(平衡电流)瞬时值
 I_R ——整流后输出电流中谐波电流有效值
 I_T ——流过晶闸管的电流有效值
 i_T ——流过晶闸管的电流瞬时值
 $I_{T(AV)}$ ——晶闸管的通态平均电流
 I_{TSM} ——晶闸管的浪涌电流
 i^* ——指令电流
 K ——晶闸管的阴极
 K ——常数
 L ——电感；电感量；电抗器符号
 L_B ——从二次侧计算时变压器漏感
 L_p ——平衡电抗器
 M ——电动机
 m ——相数；一个周期的脉波数
 n ——电动机转速

- n_N ——电动机额定转速
 N ——线圈匝数
 N ——负(组)、三相电源中性点
 P ——功率;有功功率
 P ——正(组)
 p ——极对数
 P_{CM} ——IGBT 集电极最大耗散功率
 P_{cM} ——晶体管集电极最大耗散功率
 P_d ——整流电路输出直流功率
 P_G ——直流发电机功率
 P_M ——直流电动机反电动势功率
 P_R ——电阻上消耗的功率
 P_{SB} ——晶体管二次击穿功率
 Q ——无功功率
 R ——电阻器;电阻
 R_B ——从变压器二次侧计算的变压器等效电阻
 R_M ——直流电动机电枢电阻
 S ——视在功率(表观功率)
 S ——MOSFET 源极;功率开关器件
 S_r ——电力二极管的恢复系数
 t ——时间
 t_d ——晶体管、GTO 开通时的延迟时间;电力二极管关断延迟时间
 $t_{d(\alpha)}$ ——MOSFET、IGBT 开通时的延迟时间
 $t_{d(off)}$ ——MOSFET、IGBT 关断时的延迟时间
 t_f ——晶体管、GTO、MOSFET 关断时的下降时间;电力二极管电流下降时间
 t_{fr} ——电力二极管正向恢复时间
 t_{gr} ——晶闸管正向阻断恢复时间
 t_{gt} ——晶闸管的开通时间
 THD_i ——电流谐波总畸变率
 T_{JM} ——电力二极管、晶体管的最高工作结温
 t_{off} ——晶体管、GTO、MOSFET、IGBT 的关断时间
 t_{on} ——晶体管、GTO、MOSFET、IGBT 的开通时间
 t_q ——晶闸管的关断时间
 t_r ——晶闸管、晶体管、GTO、MOSFET 开通时的上升时间
 t_{rr} ——电力二极管反向恢复时间;晶闸管反向阻断恢复时间
 t_s ——晶体管、GTO 关断时的储存时间
 t_t ——GTO 关断时的尾部时间
 t_δ ——并联谐振逆变电路触发引前时间
 $U、V、W$ ——逆变器输出端
 U ——整流电路负载电压有效值
 U_1 ——变压器一次相电压有效值
 u_1 ——变压器一次相电压瞬时值
 U_{1L} ——变压器一次线电压有效值
 U_2 ——变压器二次相电压有效值
 U_{2L} ——变压器二次线电压有效值
 u_c ——载波电压
 U_{ces} ——晶体管饱和时集电极和发射极间的管压降
 U_{CES} ——IGBT 最大集射极间电压
 u_{co} ——控制电压
 U_d ——整流电路输出电压平均值;逆变电路的直流侧电压
 u_D ——整流管两端电压瞬时值
 u_d ——整流电路输出电压瞬时值
 u_{DR} ——续流二极管两端电压瞬时值
 U_{DRM} ——晶闸管的断态重复峰值电压
 U_{DS} ——MOSFET 漏极和源极间电压
 U_{da} ——触发角为 α 时整流电压平均值
 $U_{d\beta}$ ——逆变角为 β 时逆变电压平均值
 U_F ——电力二极管的正向电压
 U_{FP} ——电力二极管的正向电压过冲
 u_g ——晶闸管门极电压瞬时值
 u_{GE} ——IGBT 栅极和发射极间电压
 $u_{GE(th)}$ ——IGBT 的开启电压
 U_{GS} ——MOSFET 栅极和源极间电压
 U_i ——斩波电路输入电压
 u_k ——整流变压器的阻抗电压
 u_L ——电抗器两端电压瞬时值
 U_n ——整流电路输出电压中的 n 次谐波电压有效值
 U_{nm} ——整流电路输出电压中的 n 次谐波电压最大值
 U_o ——斩波电路输出电压
 u_r ——信号波电压
 U_R ——整流电路输出电压中谐波电压有效值

- U_{RP} ——电力二极管的反向电压过冲
 U_{RRM} ——电力二极管、晶闸管的反向重复峰值电压
 u_s ——同步电压
 U_T ——MOSFET 的开启电压
 U_{TO} ——电力二极管门槛电压
 U_{TM} ——晶闸管的通态（峰值）电压
 U_{UN} ——逆变电路负载 U 相相电压有效值
 U_{UV} ——逆变电路负载 U 相和 V 相间线电压有效值
V——晶体管；IGBT；电力 MOSFET
VD——整流管
 VD_R ——续流二极管
VS——硅稳压管
VT——晶闸管；GTO
X——电抗器的电抗值
 X_B ——从二次侧计算时的变压器漏抗
 X_p ——平衡电抗器的电抗
Z——复数阻抗
 Z_1 ——基波阻抗
 Z_n —— n 次谐波的阻抗
 α ——晶闸管的整流触发角；晶体管共基极电流放大系数；用于斩波电路表示器件导通占空比
 β ——晶闸管的逆变角；晶体管电流放大系数
 β_{min} ——最小逆变角
 β_{off} ——GTO 电流关断增益
 δ ——晶闸管的停止导电角；并联谐振逆变电路触发引前角
 γ ——换相重叠角；纹波因数；输出电压比
 θ ——晶闸管的导通角
 φ ——位移因数角；相位滞后角
 ω ——角频率
 ω_c ——载波角频率
 ω_r ——信号波角频率
 ν ——基波因数

目 录

前言	
符号说明	
绪论	1
第1章 电力电子器件	8
1.1 电力电子器件概述	8
1.2 不可控器件——电力二极管	11
1.3 半控型器件——晶闸管	15
1.4 典型全控型器件	21
1.5 其他新型电力电子器件	32
1.6 电力电子器件的驱动	33
1.7 电力电子器件的保护	37
1.8 电力电子器件的串联和并联使用	40
习题及思考题	42
第2章 整流电路	43
2.1 单相可控整流电路	43
2.2 三相可控整流电路	51
2.3 变压器漏感对整流电路的影响	59
2.4 电容滤波的不可控整流电路	61
2.5 整流电路的谐波和功率因数	66
2.6 大功率可控整流电路	73
2.7 整流电路的有源逆变工作状态	79
2.8 晶闸管直流电动机系统	84
2.9 相控电路的驱动控制	90
习题及思考题	97
第3章 直流斩波电路	100
3.1 基本斩波电路	100
3.2 复合斩波电路和多相多重斩波电路	108
习题及思考题	111
第4章 交流电力控制电路和交交变频电路	112
4.1 交流调压电路	112
4.2 其他交流电力控制电路	119
4.3 交交变频电路	121
4.4 矩阵式变频电路	127
习题及思考题	131
第5章 逆变电路	132
5.1 换流方式	132
5.2 电压型逆变电路	135
5.3 电流型逆变电路	140
5.4 多重逆变电路和多电平逆变电路	146
习题及思考题	149
第6章 PWM控制技术	150
6.1 PWM控制的基本原理	150
6.2 PWM逆变电路及其控制方法	152
6.3 PWM跟踪控制技术	162
6.4 PWM整流电路及其控制方法	165
习题及思考题	169
第7章 软开关技术	170
7.1 软开关的基本概念	170
7.2 软开关电路的分类	171
7.3 典型的软开关电路	173
习题及思考题	178
第8章 组合变流电路	179
8.1 间接交流变流电路	179
8.2 间接直流变流电路	185
习题及思考题	191
结束语	192
教学实验	193
附录A 术语索引	202
附录B 与电力电子技术有关的学术组织、学术会议及期刊	211
参考文献	214

绪 论

什么是电力电子技术？它的发展经历了哪些阶段？目前主要应用在哪些领域？对这些问题的初步说明将使读者对电力电子技术有一个大致的了解。对本教材编写指导思想和基本内容的说明有助于读者更好地学习这门课程。

1. 什么是电力电子技术

电子技术包括信息电子技术和电力电子技术两大分支。通常所说的模拟电子技术和数字电子技术都属于信息电子技术。电力电子技术是应用于电力领域的电子技术。具体地说，就是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。目前所用的电力电子器件均用半导体制成，故也称电力半导体器件。电力电子技术所变换的“电力”，功率可以大到数百 MW 甚至 GW，也可以小到数 W 甚至 1W 以下。信息电子技术主要用于信息处理，而电力电子技术则主要用于电力变换。

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的，从蓄电池和干电池得到的电力是直流的。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。如表 0-1 所示，电力变换通常可分为四大类，即交流变直流、直流变交流、直流变直流和交流变交流。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力的变换，称做交流电力控制，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。

表 0-1 电力变换的种类

	输入	交流	直流
输出			
	直流	整流	直流斩波
	交流	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 60 年代出现的。1974 年，美国的 W.Newell 用图 0-1 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

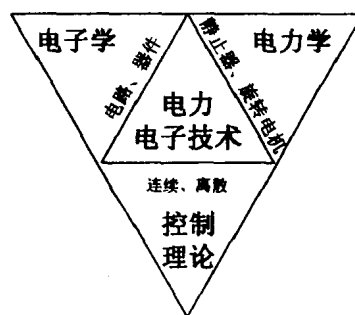


图 0-1 描述电力电子学的倒三角形

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 0-1 所示，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，这说明两者同根同源。电力电子电路和电子电路的许多分析方法也是一致的，只是两者应用目的不同，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，这是电力电子技术的一个重要特征。

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动力学的主要关系。“电动力学”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。

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。另外，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。

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，这是毫无疑问的。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做大人的大脑，那么，可以把电力电子技术比做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 世纪中将会起着十分重要的作用，有着十分光明的未来。

2. 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。

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，从而开了电子技术之先河。后来出现了水银整流器，它把水银封于管内，利用对其蒸气的点弧可对大电流进行控制，其性能和晶闸管很相似。在30年代到50年代，是水银整流器发展迅速并大量应用的时期。它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一段时期内，所使用的电路形式仍然是这些形式。

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而沿用至今。

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，使之很快就取代了水银整流器和旋转变流机组，并且其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。

晶闸管是通过对门极的控制能够使其导通而不能使其关断的器件，因而属于半控型器件。对晶闸管电路的控制方式主要是相位控制方式。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局限。

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。全控型器件的特点是，通过对门极（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。

和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。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、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。

在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）。目前功率集成电路的功率都还较小，但这代表了电力电子技术发展的一个重要方向。

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。从理论上讲, 采用软开关技术可使开关损耗降为零, 可以提高效率。另外, 它也使得开关频率可以进一步提高, 从而提高了电力电子装置的功率密度。

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中也有着广泛的应用。以下分几个主要应用领域加以叙述。

(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, 交流调速技术大量应用并占据主导地位。大至数千 kW 的各种轧钢机, 小到几百 W 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。

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中采用整流装置, 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工具, 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。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。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，所以说信息电子技术离不开电力电子技术。

(5) 家用电器 照明在家用电器中占有十分突出的地位。由于电力电子照明电源体积小、发光效率高、可节省大量能源，通常被称为“节能灯”，它正在逐步取代传统的白炽灯和日光灯。

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。

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 不间断电源 (UPS) 在现代社会中的作用越来越重要，用量也越来越大。目前，UPS 在电力电子产品中已占有相当大的份额。

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 W 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、恒频交流电源和变频交流电源，因此也可以说，电力电子技术研究的也就是电源技术。

电力电子技术对节省电能有重要意义，特别在大型风机、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，因此它也被称为是节能技术。

4. 本教材的内容简介和使用说明

本教材的内容可分为三大部分。

第一部分是电力电子器件，即第1章。这部分内容是全书的基础，主要介绍各种电力电子器件的基本结构、工作原理、主要参数、应用特性，以及驱动、缓冲、保护、串并联等器件应用的共性和基础性问题。本章内容是以器件的应用为目的而展开的，基本上不涉及器件的制造工艺。在各种器件中，以晶闸管、IGBT、电力MOSFET三种目前应用最为广泛的器件为本书的重点。

第二部分是各种电力电子电路，包括第2~5章和第8章。这部分内容是全书的主体，其中第2~5章是各种基本电路，是按表0-1的分类展开的。第8章是各种基本电路的组合。电力电子电路种类繁多，本教材力求避免对各种电路的机械罗列。科学的分类对正确把握各种电路的共性和个性有很大的帮助。另外，在内容的介绍中，突出共同的分析方法对理解电路的工作原理十分有益。例如，电力电子电路是非线性的，但当电路中各开关器件通断状态一定时，又可按线性电路来分析。这一基本分析方法对各种电力电子电路都是适用的。

第三部分由第6、7两章构成，分别介绍了脉宽调制（PWM）技术和软开关技术。PWM控制技术中没有新的电路拓扑出现，但由于采用了这一新的控制方法，使电力电子电路的性能有了很大的改善，一些以前难以实现的控制策略借助这一技术而得以实现。PWM控制方法对电力电子技术的发展产生了深刻的影响，它适用于表0-1中所列的各种电力变换电路，这也是将其单独列为一章的重要原因。软开关技术是近年出现的一种新技术，它对提高工作频率，提高功率密度，提高效率都有重要意义。软开关电路一般并不改变原来的基本电路，而是在其基础上附加了一些电路，从而实现软开关。软开关技术也适用于各种电力电子电路，第7章将介绍这一技术的基本内容。

为了便于读者学习，在每章的最后都有一段小结，对全章的要点和重点进行总结。仔细阅读小结内容，有助于读者从总体上把握全章内容。

本教材在编写时力求体现科学性、先进性、系统性、实用性，并且循序渐进，宜于教学。与前几版教材相比，本教材完成了以晶闸管电路为主体内容向以采用全控型器件的电路为主体内容的转移。

电力电子技术既是一门技术基础课程，也是实用性很强的一门课程。因此，电力电子装置的应用是十分重要的。由于篇幅所限，本教材没有把电力电子技术的应用专门列为一章或几章，而是把其渗透在各章之中。读者在学习时应在掌握各种电路基本原理的基础上，对其应用予以足够的重视。

电力电子技术有很强的实践性，因此实验在教学中占据着十分重要的位置。本教材正文后附有“教学实验”部分，精选了5个最基本的，也有较高实用价值的实验。有条件的院校最好让学生全部做完5个实验，条件不具备的至少做3个实验，以使学生对电力电子装置有一定的感性认识，并锻炼学生的动手能力。

术语在一门课程的学习中起着“纲”的作用。为使读者方便地查阅术语的涵义，书末附有“术语索引”。

本教材的课内教学学时为 48~56 学时（包含实验，每个实验 2 学时），本课程设置学时较少的院校，课堂教学内容可适当删减。

在学习本课程前，学生应学过“电路”和“电子技术基础”两门课程，并已基本掌握示波器等电子仪器的使用方法。“电力拖动自动控制系统”是本课程的后续课程之一，对电力拖动有兴趣的同学可以选学这门课程。

第 1 章 电力电子器件

就像我们在学习电子技术基础时，晶体管和集成电路等电子器件是模拟和数字电子电路的基础一样，电力电子器件则是电力电子电路的基础。因而掌握各种常用电力电子器件的特性和正确使用方法是我们学好电力电子技术的基础。本章将在对电力电子器件的概念、特点和分类等问题作简要概述之后，分别介绍各种常用电力电子器件的工作原理、基本特性、主要参数以及选择和使用中应注意的一些问题。

1.1 电力电子器件概述

1.1.1 电力电子器件的概念和特征

在电气设备或电力系统中，直接承担电能的变换或控制任务的电路被称为主电路 (Power Circuit)。电力电子器件 (Power Electronic Device) 是指可直接用于处理电能的主电路中，实现电能的变换或控制的电子器件。同我们在学习电子技术基础时广泛接触的处理信息的电子器件一样，广义上电力电子器件也可分为电真空器件和半导体器件两类。但是，自 20 世纪 50 年代以来，除了在频率很高（如微波）的大功率高频电源中还在使用真空管外，基于半导体材料的电力电子器件已逐步取代了以前的汞弧整流器 (Mercury Arc Rectifier)、闸流管 (Thyratron) 等电真空器件，成为电能变换和控制领域的绝对主力。因此，电力电子器件目前也往往专指电力半导体器件。与普通半导体器件一样，目前电力半导体器件所采用的主要材料仍然是硅。

由于电力电子器件直接用于处理电能的主电路，因而同处理信息的电子器件相比，它一般具有如下的特征：

1) 电力电子器件所能处理电功率的大小，也就是其承受电压和电流的能力，是其最重要的参数。其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) 因为处理的电功率较大，所以为了减小本身的损耗，提高效率，电力电子器件一般都工作在开关状态。导通时（通态）阻抗很小，接近于短路，管压降接近于零，而电流由外电路决定；阻断时（断态）阻抗很大，接近于断路，电流几乎为零，而管子两端电压由外电路决定；就像普通晶体管的饱和与截止状态一样。因而，电力电子器件的动态特性（也就是开关特性）和参数，也是电力电子器件特性很重要的方面，有些时候甚至上升为第一位的重要问题。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。正因为如此，也常常将一个电力电子器件或者外特性像一个开关的几个电力电子器件的组合称为电力电子开关，或称电力半导体开关。作电路分析时，为简单起见也往往用理想开关来代替。广义上讲，电力电子开关有时候也指由电力电子器件组成的在电力系统中起开关作用的电气装置，这在第 4 章中将有适当的介绍。

3) 在实际应用当中，电力电子器件往往需要由信息电子电路来控制。由于电力电子器