



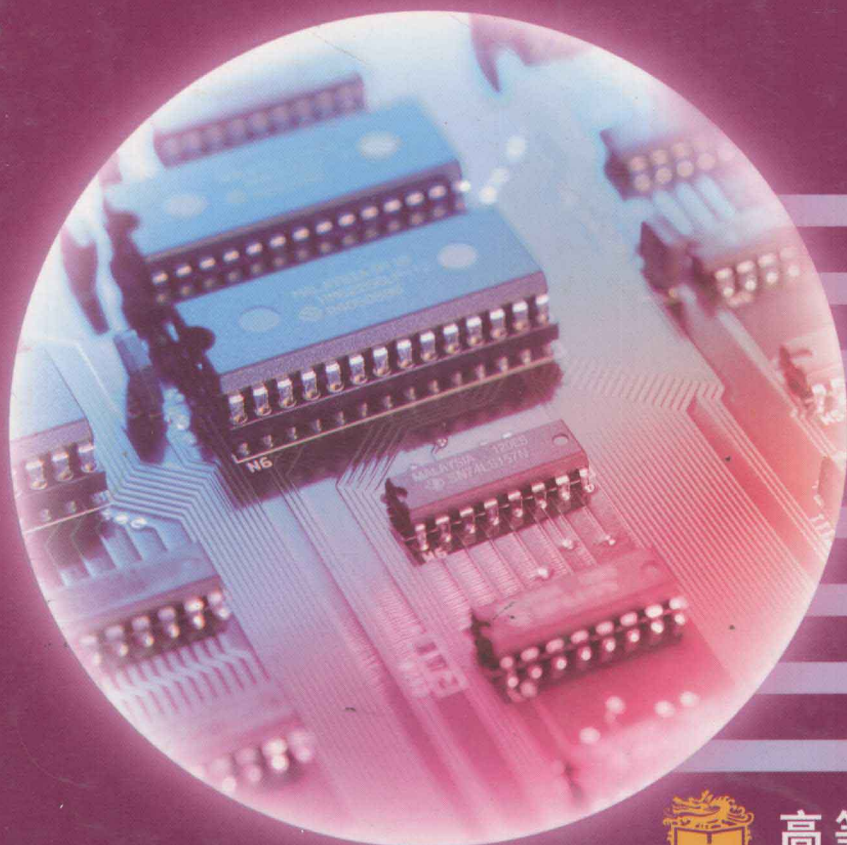
普通高等教育“十五”国家级规划教材

(高职高专教育)

电力电子技术

(第2版)

浣喜明 姚为正 编



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材
(高职高专教育)

电力电子技术

(第2版)

浣喜明 姚为正 编

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育),书中主要内容包括:电力电子器件、相控整流电路、直流变换电路、无源逆变电路、交流变换电路、软开关技术基础、电力电子装置。每章后附有思考题与习题,并在全书后给出部分习题参考答案。书中附录还列出了常用电力电子器件型号及参数供学生课程设计和工程技术人员参考。

本书适应于高等专科学校、高等职业学校、成人高校以及本科院校的二级职业技术学院和民办高校电类专业教材,也可供从事电力电子技术的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/浣喜明,姚为正编. —2版. —北京:
高等教育出版社, 2004.11

ISBN 7-04-015750-0

I. 电... II. ①浣... ②姚... III. 电力电子学-高等学校:技术学校-教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 109716 号

策划编辑 孙杰 责任编辑 李刚 封面设计 王凌波 责任绘图 郝林
版式设计 王艳红 责任校对 杨雪莲 责任印制 孔源

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京铭成印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 14.25
字 数 340 000

版 次 2001 年 6 月第 1 版
2004 年 11 月第 2 版
印 次 2004 年 11 月第 1 次印刷
定 价 18.20 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号: 15750-00

出版说明

为加强高职高专教育的教材建设工作，2000年教育部高等教育司颁发了《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》(教高司[2000]19号)，提出了“力争经过5年的努力，编写、出版500本左右高职高专教育规划教材”的目标，并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施：先用2至3年时间，在继承原有教材建设成果的基础上，充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验，解决好高职高专教育教材的有无问题；然后，再用2至3年的时间，在实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上，推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材。根据这一精神，有关院校和出版社从2000年秋季开始，积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》(草案)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(草案)编写的，随着这些教材的陆续出版，基本上解决了高职高专教材的有无问题，完成了教育部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题，将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略，抓好重点规划”为指导方针，重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设，特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订使其逐步形成精品教材；同时还要扩大教材品种，实现教材系列配套，并处理好教材的统一性与多样化、基本教材与辅助教材、文字教材与软件教材的关系，在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002年11月30日

前 言

本书第1版在2000年由高等教育出版社出版。几年来电力电子技术有了新的发展，应用成果层出不穷，在这期间我国高等教育教学改革不断深入，为了使本课程紧跟新技术和教学改革步伐，使本书不断改进和完善，第2版与广大读者见面了。

本书在第1版的基础上，根据多年来的教学实践的经验总结和广大读者的意见修订而成。本着以应用为目的，以精选内容、突出重点、便于教学为指导思想，在保证本学科知识内容体系完整的前提下，既紧跟电力电子技术的发展，反映本学科的先进技术，又遵循教育部高职高专的人才培养模式，使教材内容更具有实用性。

全书内容按照电力电子器件、电力电子电路及其控制技术和电力电子装置将内容分为三部分。

第一部分内容包括常用电力电子器件(如SCR、GTO、VDMOS、IGBT、SIT、SITH、MCT、PIC等)的工作原理、特性、参数、驱动电路及保护方法，在此用了较多的篇幅叙述了全控型电力电子器件，体现了技术的先进性。

第二部分是本书的主干部分，内容安排体现了教材的基础性、科学性和知识的系统性。它包括相控整流电路、直流变换电路、无源逆变电路和交流变换电路在内的常用电力电子电路的工作原理、参数计算方法和应用范围。书中还介绍了软开关技术的基础知识。

要使电力电子电路完成各种工作任务，必须配以相应的依赖于特定控制策略和控制算法的控制电路。本书较详细地介绍了相控技术和PWM控制技术在上述各种电路中的应用。

第三部分从应用的角度出发，介绍了多种典型的电力电子装置的组成、工作原理和实际应用。

另外，书中编排了适当的例题和大量的思考题与习题，它们是正文的补充，可以帮助学生提高认识、强化记忆。在书的附录中还列出了常用电力电子器件型号及参数供学生课程设计使用和工程技术人员参考。为了便于学生学习，编者编写了复习资料；为了方便教师教学，高等教育出版社还可免费提供含有本书电子教案和全部习题解答的光盘，凡使用本教材的老师，可凭书后免费电子教案寄送单向出版社索取光盘。

本书的概述、第1章至第3章、第6章和附录由浣喜明编写，第4章、第5章、第7章由姚为正编写，全书由浣喜明统稿。

许继集团电源有限公司提供了大量的应用技术资料和产品样本，为本书的编写提供了重要帮助，在这里表示衷心的感谢，对书末所列参考文献的作者也表示衷心的感谢。

自本书第1版出版以来，得到了广大读者和同行们的关心和支持，表示衷心感谢。由于编者学识水平有限，书中一定有很多疏漏和错误之处，仍然期望使用本书的师生批评指正。

编者

2004年6月 于湖南工程学院

E-mail: hxm@hnie.edu.cn

第 1 版前言

本书是教育部高职高专规划教材。全书共分为三部分，第 1 至第 2 章介绍了常用电力电子器件(如 SR、SCR、GTO、VDMOS、IGBT、SIT、SITH 等)的工作原理、特性、参数、驱动电路及保护方法；第 3 至第 6 章详细的介绍了包括晶闸管可控整流、直流变换、逆变、交流变换等电路在内的基本电力电子电路的工作原理、计算方法和应用范围；第 7 章从应用的角度出发，介绍了开关电源、有源功率因数校正装置、不间断电源、静止无功补偿装置以及变频器等几种典型的电力电子装置的组成、工作原理和实际应用。为了便于教学，本书还编排了适当的例题和大量的习题。

本书由浣喜明和姚为正共同担任主编。概述部分、第 1 至第 4 章由浣喜明编写，第 6 至第 7 章由姚为正编写。全书由浣喜明统稿。

本书由西安交通大学王兆安教授主审。王兆安教授在审稿中提出了许多宝贵的意见，在此谨致衷心的感谢。

由于作者学识水平有限，书中一定有很多疏漏和错误之处，期望使用本书的师生批评指正。

编者

2000 年 9 月

于湖南工程学院

目 录

概述	1	1.8.5 功率模块与功率集成电路	46
第1章 电力电子器件	10	1.9 电力电子器件的驱动与保护	49
1.1 电力电子器件的基本模型	10	1.9.1 电力电子器件的换流方式	49
1.1.1 基本模型与特性	10	1.9.2 驱动电路	51
1.1.2 电力电子器件的分类	11	1.9.3 保护电路	58
1.2 电力二极管	12	1.9.4 缓冲电路	60
1.2.1 电力二极管及其工作原理	12	1.9.5 散热系统	61
1.2.2 电力二极管的特性与主要参数	13	思考题与习题	62
1.3 晶闸管	16	第2章 相控整流电路	65
1.3.1 晶闸管及其工作原理	16	2.1 整流器的性能指标	65
1.3.2 晶闸管的特性与主要参数	18	2.2 单相相控整流电路	67
1.3.3 晶闸管的派生器件	24	2.2.1 单相半波相控整流电路	67
1.4 可关断晶闸管	27	2.2.2 单相桥式相控整流电路	72
1.4.1 可关断晶闸管及其工作原理	27	2.3 三相相控整流电路	81
1.4.2 可关断晶闸管的特性与主要参数	27	2.3.1 三相半波相控整流电路	82
1.5 电力晶体管	29	2.3.2 三相桥式相控整流电路	86
1.5.1 电力晶体管及其工作原理	29	2.4 相控整流电路的换相压降	92
1.5.2 电力晶体管的特性与主要参数	30	2.5 整流电路的有源逆变工作状态	94
1.6 电力场效晶体管	34	2.5.1 有源逆变的工作原理	94
1.6.1 电力场效晶体管及其工作原理	34	2.5.2 三相半波有源逆变电路	96
1.6.2 电力场效晶体管的特性与 主要参数	35	2.5.3 三相桥式有源逆变电路	97
1.7 绝缘栅双极型晶体管	38	2.5.4 有源逆变最小逆变角 β_{\min} 的限制	97
1.7.1 绝缘栅双极型晶体管及 其工作原理	38	2.6 晶闸管相控电路的驱动控制	98
1.7.2 绝缘栅双极型晶体管的特性 与主要参数	39	2.6.1 对触发电路的要求	98
1.8 其他新型电力电子器件	42	2.6.2 晶闸管触发电路	99
1.8.1 静电感应晶体管	42	2.6.3 触发脉冲与主电路电压的同步	106
1.8.2 静电感应晶闸管	43	思考题与习题	109
1.8.3 MOS 控制晶闸管	44	第3章 直流变换电路	111
1.8.4 集成门极换流晶闸管	46	3.1 直流变换电路的工作原理	111
		3.2 降压变换电路	112
		3.3 升压变换电路	116
		3.4 升降压变换电路	119

3.5 库克变换电路	121	5.1.2 三相交流调压电路	158
3.6 带隔离变压器的直流变换器	124	5.2 交流调功电路	160
3.6.1 反励式变换器	124	5.3 交流电力电子开关	161
3.6.2 正励式变换器	125	5.4 交-交变频电路	163
3.6.3 推挽式变换器	126	5.4.1 单相输出交-交变频电路	163
3.6.4 半桥式变换器	126	5.4.2 三相输出交-交变频电路	166
3.6.5 全桥式变换电路	127	5.4.3 交-交变频电路输出频率 上限的限制	167
3.7 直流变换电路的 PWM 控制技术	128	5.4.4 交-交变频电路的优缺点	167
3.7.1 直流 PWM 控制的基本原理	128	思考题与习题	168
3.7.2 直流变换电路的 PWM 控制技术	129	* 第 6 章 软开关技术基础	169
思考题与习题	131	6.1 软开关的基本概念	169
第 4 章 无源逆变电路	132	6.1.1 软开关及其特点	169
4.1 逆变电路的性能指标与分类	132	6.1.2 软开关的分类	170
4.1.1 逆变电路的性能指标	132	6.2 基本的软开关电路	171
4.1.2 逆变电路的分类	133	6.2.1 准谐振变换电路	171
4.2 逆变电路的工作原理	133	6.2.2 零开关 PWM 变换电路	172
4.3 电压型逆变电路	134	6.2.3 零转换 PWM 变换电路	175
4.3.1 电压型单相半桥逆变电路	134	思考题与习题	177
4.3.2 电压型单相全桥逆变电路	136	第 7 章 电力电子装置	178
4.3.3 电压型三相桥式逆变电路	139	7.1 开关电源	178
4.3.4 电压型逆变电路的特点	141	7.1.1 开关电源的工作原理	178
4.4 电流型逆变电路	142	7.1.2 开关电源的应用	180
4.4.1 电流型单相桥式逆变电路	142	7.2 有源功率因数校正	183
4.4.2 电流型三相桥式逆变电路	143	7.2.1 有源功率因数校正技术的原理	183
4.4.3 电流型逆变电路的特点	143	7.2.2 PFC 集成控制电路 UC3854 及其应用	184
4.5 逆变电路的 SPWM 控制技术	144	7.3 不间断电源	186
4.5.1 SPWM 控制的基本原理	144	7.3.1 UPS 的分类	187
4.5.2 单极性 SPWM 控制方式	145	7.3.2 UPS 中的整流器	188
4.5.3 双极性 SPWM 控制方式	145	7.3.3 UPS 中的逆变器	189
4.5.4 三相桥式逆变电路的 SPWM 控制	146	7.3.4 UPS 的静态开关	190
4.5.5 SPWM 控制的逆变电路的优点	148	7.4 静止无功补偿装置	191
4.6 负载换流式逆变电路	148	7.4.1 晶闸管控制电抗器(TCR)	191
4.6.1 并联谐振式逆变电路	148	7.4.2 晶闸管投切电容器(TSC)	192
4.6.2 串联谐振式逆变电路	150	7.4.3 静止无功发生器(SVG)	195
思考题与习题	151	7.5 变频调速装置	197
第 5 章 交流变换电路	153	7.5.1 变频调速的基本控制方式	197
5.1 交流调压电路	153		
5.1.1 单相交流调压电路	153		

7.5.2 变频调速装置的分类	198	部分习题参考答案	201
7.5.3 SPWM 变频调速装置	199	附录	203
思考题与习题	200	参考文献	213

概 述

将电子技术和控制技术引入传统的电力技术领域,利用半导体电力开关器件组成各种电力变换电路实现电能的变换和控制,构成了一门完整的学科,该学科被国际电工委员会命名为电力电子学(Power Electronics)或称为电力电子技术。它是一门综合了电子技术、控制技术和电力技术的新兴交叉学科。图 0.1.1 形象地描述了电力电子技术这一学科的构成和它与其他学科的关系。

电力电子技术包括电力电子器件、电力电子电路和控制技术三个部分,它的研究任务是电力电子器件的应用、电力电子电路的电能变换原理、控制技术以及电力电子装置的开发与应用。

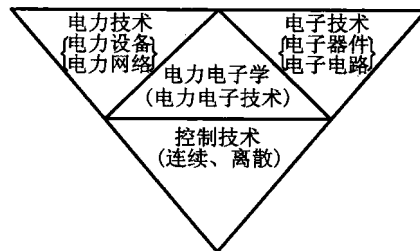


图 0.1.1 电力电子技术学科的构成

1. 电力电子技术的发展

(1) 电力电子器件的发展

电力电子技术的发展取决于电力电子器件的研制与应用。电力电子器件是电力电子技术的基础,也是电力电子技术发展的动力,电力电子技术的每一次飞跃都是以新器件的出现为契机的。

① 半导体整流管(SR)

自从 20 世纪初 Grzetz 发明汞弧整流管单相桥式整流器以来,用于功率变换的主要器件是汞弧整流管和硒整流器。1947 年美国的贝尔实验室发明了晶体管,引发了电子技术的一场革命。以此为基础,美国在 1956 年研制出了最先用于电力领域的半导体器件——硅整流二极管(Semiconductor Rectifier, SR),又称为电力二极管(Power Diodes, PD)。普通的电力二极管因其正向通态压降(1 V 左右)远比汞弧整流器(10 ~ 20 V)小而取代汞弧整流器,大大提高了整流电路的效率。普通整流管通常应用于 400 Hz 以下的不可控整流电路。随着在生产工艺上以缩短整流管的正反向恢复时间来降低整流管的开关损耗为目的的研究取得成功,开发出了快恢复整流管和肖特基整流管,并应用于中频(10 kHz 以下)和高频(10 kHz 以上)整流的场合。20 世纪 80 年代中后期,为了进一步减少低压高频开关电源中电力半导体器件的管压降和损耗,同步整流管也应运而生。

② 晶闸管(SCR)及其派生器件

1957 年美国通用电气公司(GE)发明了普通反向阻断型可控硅整流管(Silicon Controlled Rectifier, SCR),以后称为晶闸管(Thyristor)。它标志着电力电子技术的诞生。经过工艺完善和应用开发,到了 20 世纪 70 年代,晶闸管已形成了从低压小电流到高压大电流的系列产品。以晶闸管为主要器件的电力电子技术很快在电化学工业、铁道电气机车、钢铁工业(感应加热)、电力

工业(直流输电、无功补偿)中获得了广泛的应用。

晶闸管(SCR)自问世以来到目前为止其功率容量提高了近 3 000 倍, 现在许多国家已能生产 8 kV/4 kA 的晶闸管。近十几年来, 随着自关断器件的飞速发展, 晶闸管的应用领域有所缩小, 但是, 由于晶闸管具有高电压、大电流特性, 因此它在 HVDC、静止无功补偿(SVC)、大功率直流电源及超大功率和高压变频调速应用方面仍占有十分重要的地位。预计在今后若干年内, 晶闸管仍将在高电压、大电流应用场合得到继续发展。然而, 由于晶闸管是只能通过门极(栅极)电压控制其导通而不能控制其关断的半控型器件, 这就使它的应用范围受到了极大的限制。

从 20 世纪 70 年代开始, 在其以后的近 30 年时间里, 世界各国相继开发出如下所列的一系列晶闸管的派生器件。

- 晶闸管的派生器件
- 不对称晶闸管(ASCR)
 - 逆导晶闸管(RCT)
 - 双向晶闸管(TRIAC)
 - 光控晶闸管(LASCR)
 - 快速晶闸管
 - 高频晶闸管
 - 可关断晶闸管(GTO)
 - 集成门极换流晶闸管(IGCT)
 - MOS 栅控晶闸管(MCT)

在这些派生器件中, MOS 栅控晶闸管(MCT)是由美国 HARRIS 公司发明的。原来希望它能够取代 GTO 和 IGBT 器件用于电力系统, 后来因其结构及工艺复杂, 合格率偏低, 成本太高, 又没能达到期望的 4 500 V/2 000 A 水平, 因此就停止了开发投产, 这表明 MCT 器件已经被正式淘汰了。集成门极换流晶闸管(IGCT)是由瑞士 ABB 公司和日本三菱公司合作开发的, 其容量可达 4 500 V/4 000 A, 工作频率可达数千赫, 已成功应用于中压变频器、电力机车牵引驱动和高压直流输电等领域, 这是一种极具发展潜力的高电压、大电流的电力半导体器件。可关断晶闸管(GTO)的容量可达 6 000 V/6 000 A, 工作频率在 500 Hz 以下, 因此它在低频、高电压、大电流应用领域具有优势。可以说, GTO 和 IGCT 两种自关断器件, 加上高电压、大电流的晶闸管器件就成为今天“灵活交流输电系统”(FACTS)中关键的应用器件。晶闸管的其余派生器件随着高频 PWM 变流技术的迅猛发展已有逐步被淘汰的趋势。尽管如此, 晶闸管还是被称为电力半导体器件发展过程中的第一代发展平台。所谓发展平台, 是指这种器件具有渗透性(应用领域广泛)、长期性(生命周期长)及派生性(派生的器件多)等特点。

由晶闸管及其派生器件构成的各种电力电子系统在工业应用中主要解决了传统的电能变换装置中所存在的能耗大和装置笨重的问题, 因而大大地提高了电能的利用率, 同时也使工业噪声得到了一定程度的控制。

③ 功率晶体管(GTR)

1947 年美国贝尔实验室发明了晶体管, 经过二十多年的努力, 用于电力变换的功率晶体管(Giant Transistor, GTR)才进入到工业应用领域。到 20 世纪 80~90 年代, GTR 已被广泛应用于中小功率的电路中。GTR 是全控型器件, 驱动信号可控制其开通也可控制其关断, 它的工作频率比晶闸管高, 可达到 10~20 kHz。脉冲宽度调制(PWM)技术在 GTR 变换电路中的应用使得

直流线性电源迅速被高频开关电源取代。GTR 也曾被应用于中小功率电动机变频调速(目前已被 MOSFET 或 IGBT 取代)、不间断电源(UPS)(已被 IGBT 管取代)等工业领域。但是因为 GTR 存在着电压耐量不高、电流容量较小、存在二次击穿、不易并联以及开关频率偏低等问题,它的应用范围受到了限制。

④ 功率场效晶体管(MOSFET)

在 20 世纪 70 年代后期,功率场效晶体管(Power MOSFET)开始进入实用阶段,进入 80 年代,在降低器件的导通电阻、消除寄生效应、扩大电压和电流容量以及驱动电路集成化等方面进行了大量的研究,取得了很大的进展。在功率场效晶体管中,应用最广泛的是电流垂直导电结构的器件(VDMOS)。VDMOS 是一种场控可关断器件,具有工作频率高、开关损耗小、安全工作区宽、输入阻抗高、易并联等优点,目前广泛应用于高频开关电源、计算机电源、航空电源、小功率 UPS 以及小功率(单相)变频器等领域。

⑤ 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)

在二十几年前,电力半导体器件较为引人注目的成就之一就是开发出双极型复合器件。目前被认为最具有发展前途的是 1983 年由美国 GE 公司发明的绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor,IGBT)。IGBT 实现了器件高电压、大电流参数同其动态参数之间最合理的折中,因而兼有 MOS 器件和双极型器件的突出优点,目前 IGBT 容量可达 4 500 V/1 200 A、3 300 V/1 500 A。IGBT 取代功率晶体管(GTR)早已成为事实,目前 IGBT 正成为高电压、大电流应用领域中 GTO 和 IGCT 的潜在竞争者,这却是未曾预料的。值得关注的是,美国 IR 公司开发了 WAPP 系列 IGBT,美国 APT 公司开发了 GT 系列“霹雳(Thunderbolt)型”IGBT,目前已有 600 V/100 A 及其以下的此类 IGBT 商品,其硬开关工作频率已高达 150 kHz,而软开关工作频率可达 300 kHz,它的电流密度是相同电压等级的功率 MOSFET 管的 2.5 倍。这种 IGBT 器件的体积比 MOSFET 管小,成本也比较低,所以它正在越来越广泛地应用在高频开关电源中,越来越成为 MOSFET 管强有力的竞争者。另外,逆导型 IGBT 和双向型 IGBT 也正在研制中。

在 10 年前,IGBT 出现在电力电子技术领域中,尽管当时它表现出了很好的综合性能,但是许多人仍难以相信这种器件在大功率领域中的生命力。现在 IGBT 器件显示了巨大的发展前途,它集 MOSFET 的驱动功率小、开关速度快和 GTR(或 GTO)载流能力大的优点于一身,在大容量、高频率的电力电子电路中表现出非凡的性能,形成了一个新的器件应用发展平台。

⑥ 功率集成电路(PIC)和智能功率模块(IPM)

多年来,为了提高电力电子装置的功率密度以减小体积,一般把多个大功率器件组成的各种单元与驱动、保护、检测电路集成一体,构成功率集成电路(PIC)。制造具有各种不同功能的功率集成电路的最大优势是减少引线,提高可靠性,其经济效益也明显增加。PIC 使用方便、性能可靠,代表着电力电子器件的发展方向。

另外,高电压功率集成电路(HVIC)都已形成各种实用系列,它们实际上都是一种微型化的功率变换装置,应用起来可靠而方便,但是功率都不是很大。

随着微电子技术的发展,20 世纪 80 年代诞生了智能功率模块(Intelligent Power Module,IPM),将具有驱动、保护、诊断功能的 IC 与电力半导体器件集成在一个模块中,并可用于 10 ~ 100 kW 功率等级的电力电子系统中。由于不同元器件、电路、集成芯片的封装或相互连接产生的寄生参数已成为影响电力电子系统性能的关键问题,所以采用 IPM 可以减少设计工作量,

使生产自动化,提高系统品质、可靠性和可维护性,缩短设计周期,降低成本。目前,三相六管封装的 IPM 容量可达到 1 200 V/600 A,单相桥臂两管封装的 IPM 容量可达到 1 200 V/2 400 A。大功率 IPM 已成为电力电子技术领域的一个研究重点。

随着分布式电源系统(DPS)的发展,美国海军研究所提出了集成电力电子模块(PEBB)开发计划来设计舰艇的 DPS。PEBB 的功能是把一台电力电子系统的所有硬件都以芯片形式封装在一个模块内,从而使系统的体积达到最小,所有引线减至最少,寄生电感、电容降到最低,可靠性大为提高。IPM 是单层单片集成的,而 PEBB 具有电压高、电流大的特点,属于多层多片集成,它的结构更复杂,由于采用多方向散热,因此热设计也更复杂。可以预计,到 2010 年可做出单元功率达 1 000 kW 等级的电力电子集成系统。

综上所述,电力半导体器件经过了五十多年的发展,器件制造技术水平不断提高,已经历了以硅整流管(SR)、晶闸管(SCR)、可关断晶闸管(GTO)、巨型晶体管(GTR)、功率 MOSFET、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为代表的分立器件时期,现在已发展到由驱动电路、控制电路、传感电路、保护电路、逻辑电路等集成在一起的高度智能化的 PIC 和 IPM 时期。电力半导体器件实现了器件与电路的集成,强电与弱电、功率流与信息流的集成,成为机和电之间的智能化接口,它是机电一体化基础单元。按照其控制特性来说,电力半导体器件可分为以硅整流管(SR)为代表的不可控器件,以晶闸管(SCR)为代表的只能通过门极电压控制其开通而不能控制其关断的半控型器件和以可关断晶闸管(GTO)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)为代表的既能控制其开通又能控制其关断的全控型器件三大类。在器件的控制模式上,电力半导体器件已经从电流型控制模式发展到电压型控制模式,这不仅大大降低了门极的控制功率,而且大大提高了器件导通与关断的转换速度,从而使器件的工作频率由工频→中频→高频不断提高。在电力电子技术走向智能化、高频化、大功率化、模块化、绿色化的进程中,作为其基础的新型电力半导体器件不断涌现,为电力电子技术的发展做出新的贡献。电力电子器件已经与计算机控制技术相结合,在各行各业发挥了重要作用,给电力电子技术注入了强大的生命力。

(2) 电力电子电路及其控制技术的发展

电力电子电路的根本任务是实现电能变换和控制。完成电能变换和控制的电路称为电力电子电路,这是电力电子技术的主要内容,其基本形式可分为如下四种:

① 整流电路

将交流电能转换为直流电能的电路称为整流电路,也称为 AC/DC 变换电路。完成整流任务的电力电子装置称为整流器。对晶闸管组成的整流器实施相移控制技术可将不变的交流电压变换为大小可控的直流电压,即实现相控整流。晶闸管相控整流能取代传统的直流发电机组,实现直流电机的调速,广泛应用于机床、轧钢、造纸、纺织、电解、电镀等领域。但是,晶闸管相控整流电路的输入电流滞后于电压,其滞后角随着触发延迟角 α 的增大而增大,输入电流中谐波分量相当大,因此功率因数很低。把逆变电路中的 SPWM 控制技术用于整流电路,就形成了 PWM 整流电路。通过对 PWM 整流电路的适当控制,可以使其输入电流非常接近正弦波,且和输入电压同相位,功率因数近似为 1。这种整流电路也可以称为高功率因数整流器,其应用前景十分广泛。

② 直流变换电路

将直流电能转换为另一固定电压或可调电压的直流电能的电路称为直流变换电路。它的基

本原理是利用电力开关器件周期性的开通与关断来改变输出电压的大小，因此也称为开关型 DC/DC 变换电路或称直流斩波器。直流变换技术广泛地应用于无轨电车、地铁列车、蓄电池供电的机动车辆的无级变速电动汽车的控制，从而获得加速平稳、快速响应的性能，同时收到节约电能的效果。特别要提出的是，20 世纪 80 年代以来兴起的采用直流变换技术的高频开关电源的发展最为迅猛，由于它具有体积小、重量轻、效率高优点；因此它在工业、军事和日常生活中均有着广泛的应用，为计算机、通信、消费电子等类产品提供可靠的直流电源。

③ 逆变电路

将直流电能变换为交流电能的电路称为逆变电路，也称为 DC/AC 变换电路。完成逆变的电力电子装置称为逆变器。如果将逆变电路的交流侧接到交流电网上，把直流电逆变成同频率的交流电反送到电网去，称为有源逆变。它用于直流电机的可逆调速、绕线转子异步电动机的串级调速、高压直流输电和太阳能发电等方面。如果逆变器的交流侧直接接到负载，即将直流电逆变成某一频率或可变频率的交流电供给负载，则称为无源逆变，它在交流电动机变频调速、感应加热、不间断电源等方面应用十分广泛，是构成电力电子技术的重要内容。

④ 交流变换电路

把交流电能的参数(幅值、频率)加以变换的电路称为交流变换电路，也称为 AC/AC 变换电路。根据变换参数的不同，交流变换电路可以分为交流调压电路和交-交变频电路。交流调压电路维持频率不变，仅改变输出电压的幅值，它广泛应用于电炉温度控制、灯光调节、异步电动机的软启动和调速等场合。交-交变频电路也称为直接变频电路(或周波变流器)，是不通过中间直流环节而把电网频率的交流电直接变换成不同频率的交流电的变换电路，它只能降频、降压，主要用于大功率交流电动机调速系统。除此之外，还有采用全控型器件加 PWM 控制的交流变换器(又称为交流斩波器)，目前，由于成本太高，一般很少使用。

⑤ 电力电子控制技术

要让电力电子电路完成各种工作任务，必须为功率变换主电路配备提供门极驱动信号的控制电路。门极驱动信号的产生依赖于特定的控制策略和控制算法。最常用的是相控方式，即采用延时脉冲控制功率器件导通的相位。它在中控型器件的整流、逆变、交流调压等电路中获得了广泛的应用。除此之外，在大量采用全控型器件的电力电子电路中，为了减小输出电能中的谐波分量，在电力变换装置中要大量应用通信工程中脉冲宽度调制(PWM)理论。所谓 PWM 技术就是利用电力半导体器件的开通和关断产生一定形状的电压脉冲序列，经过低通滤波器后来实现电能变换的一种技术。在电力电子技术中，采用 PWM 控制技术可有效地控制和消除谐波，提高装置的功率因数，能同时实现变频变压，成为了功率变换电路中的核心控制技术，被广泛应用到整流、斩波、逆变、交-交变换等电路。同时，脉冲幅度调制(PAM)和脉冲频率调制(PFM)也得到了较多的应用。

对于动态性能和稳态精度要求较高的场合，还必须广泛采用自动控制技术和理论。例如对线性负载常采用比例积分微分(PID)控制方法；对非线性负载(如交流电机)常常采用矢量控制方法。

为了提高电力电子装置的功率密度，必须提高功率器件的开关频率，同时器件的开关损耗也随之加大。减小开关损耗和提高效率是电力电子技术的重要问题。如果在电力电子变换电路中采取一些措施，例如改变电路结构和控制策略，使开关器件被施加驱动信号，而在开通过程中其端电压为零，这种开通称为零电压开通；如果使开关器件在撤除其驱动信号后的关断过程

中其承载的电流为零，这种关断称为零电流关断。零电压开通和零电流关断是软开关的最理想的状态，其开关过程中无开关损耗。如果开关器件在开通过程中端电压很小，在关断过程中其电流也很小，这种开关过程的功率损耗不大，称为软开关。近年来软开关技术在电力电子系统设计获得了广泛的应用。

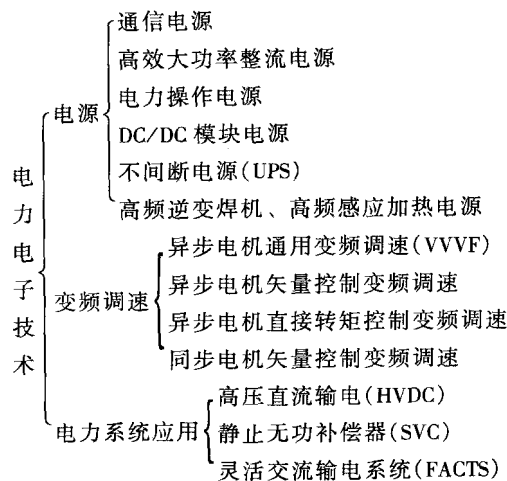
针对生产生活提出的实际问题，选择合适的电力电子电路，并采用传感技术、现代控制理论、微处理器、CPLD、DSP 以及大规模集成电路实现特定的控制方式，能组成完成特定任务的电力电子装置。

以 20 世纪 50 年代发展起来的晶闸管及其派生的 GTO 器件、功率整流管(SR)和 GTR 等为 基础所形成的电力电子技术，称为传统电力电子技术。这一发展时期比较典型的电路结构有不可控整流电路、相控整流电路、逆变电路以及交流变换电路等形式。由于上述器件的工作频率较低，控制不方便，因而均无法方便地实施高频 PWM 技术。另外，由上述器件(SCR、GTO、SR、GTR)构成的电力电子装置或系统，在消除电网侧的电流谐波、改善电网侧的功率因数、逆变器输出波形控制、减少环境噪声污染、进一步提高电能利用率、降低原材料消耗以及提高系统的动态性能等方面都遇到了困难，可以说，利用基于传统低频技术的传统电力电子技术处理电能变换问题不是一种理想的办法。

从 20 世纪 80 年代末期发展起来的以功率场控自关断器件 MOSFET 和 IGBT 为代表的集高频、高电压和大电流于一身的功率半导体复合器件的问世，改变了人们长期以来用低频技术处理电能变换问题的习惯，转入到以高频处理电能变换问题的新阶段，这表明传统电力电子技术已经进入现代电力电子技术时代。也就是说，高频现代电力电子技术使电能转换尤其是频率变换能更加自如控制，并有效地实现了绿色用电与高效、节能的电能变换，从而开创了人类绿色供用电的美好明天。

2. 电力电子技术的应用领域

电力电子技术在一一般工业系统、交通系统、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统以及日常生活中得到了广泛的应用，其应用范围概括如下：



(1) 高频开关电源

电力电子技术应用在各种电源系统中，开关电源技术处于核心地位。传统的电源体积庞大

而笨重,如果采用高频开关电源技术,其体积和重量都会大幅度下降,而且可极大提高电源利用效率、节省材料、降低成本。高频开关电源技术是各种大功率开关电源(通信电源、逆变焊机、高频加热电源、激光器电源、电力操作电源等)的核心技术,在电动汽车和变频传动中通过开关电源改变用电频率,可达到近于理想的负载匹配和驱动控制。

① 通信电源

开关电源技术的迅速发展极大地推动了通信产业的发展。高频小型化的开关电源已成为现代通信供电系统的主流。目前在程控交换机使用的电源中,传统的相控式稳压电源已被高频开关电源取代,高频开关电源通过 MOSFET 或 IGBT 的开关工作,开关频率一般控制在 50 ~ 100 kHz 范围内,实现高效率和小型化。近几年,开关电源的功率容量不断扩大,单机容量已从 48 V/12.5 A、48 V/20 A 扩大到 48 V/100 A。随着通信技术的发展,对电源的要求也越来越高,目前电源模块采用高频 PWM 技术和软开关技术,开关频率高达 500 kHz,功率密度达 5 ~ 20 W/in³。

② 高频逆变式焊机电源

这是一种高性能、高效、省材的新型焊机电源,代表了当今焊机电源的发展方向。逆变焊机电源大都采用交流—直流—交流—直流(AC—DC—AC—DC)变换的方法。50 Hz 交流电经全桥整流变成直流,IGBT 组成的 PWM 高频变换部分将直流电逆变成 20 kHz 的高频矩形波,经高频变压器耦合,整流滤波后成为稳定的直流,供电焊机使用。

由于电焊机电源的工作条件恶劣,频繁处于短路、燃弧、开路交替变化之中,因此高频逆变式电焊机电源的工作可靠性问题成为关键问题,也是用户最关心的问题。采用微处理器作为脉冲宽度调制(PWM)的相关控制器,通过对多参数、多信息的提取与分析,达到预知系统各种工作状态的目的,进而提前对系统做出调整和处理,解决了目前大功率 IGBT 逆变电源可靠性低的问题。随着 IGBT 大容量模块的商用化,这种电源有着广阔的应用前景。

国外逆变焊机的参数已经可以达到如下水平:额定焊接电流 300 A,负载持续率 60%,全载电压 60 ~ 75 V,电流调节范围 5 ~ 300 A,重量 29 kg。

③ 高压直流电源

大功率开关型高压直流电源广泛应用于静电除尘、水质改良、医用 X 光机和 CT 机等大型设备。它的电压高达 50 ~ 159 kV,电流达到 0.5 A 以上,功率可达 100 kW。

自从 20 世纪 70 年代开始,日本的一些公司开始采用逆变技术,将市电整流后逆变为 3 kHz 左右的中频然后升压。进入 80 年代,高频开关电源技术迅速发展,德国西门子公司将电源的开关频率提高到 20 kHz 以上,并将干式变压器技术成功地应用于高频高压电源,取消了高压变压器油箱,使变压器系统的体积进一步减小。

国内也对静电除尘高压直流电源进行了研制。市电经整流变为直流,采用全桥零电流开关串联谐振逆变电路将直流电压逆变为高频电压,然后由高频变压器升压,最后整流为直流高压。在电阻负载条件下,输出直流电压达到 55 kV,电流达到 15 mA,工作频率为 25.6 kHz。

④ 分布式高频开关电源供电系统

分布式高频开关电源供电系统采用小功率模块和大规模控制集成电路作为基本部件,利用最新理论和技术成果,组成积木式、智能化的大功率供电电源。

20 世纪 80 年代初期,对分布式高频开关电源供电系统的研究基本集中在变换器并联技术

的研究上。80年代中后期，随着高频功率变换技术的迅速发展，各种变换器拓扑结构相继出现，结合大规模集成电路和功率元器件技术，使中小功率装置的集成成为可能，从而迅速地推动了分布式高频开关电源供电系统研究的展开。自20世纪80年代后期开始，这一方向已成为国际电力电子学界的研究热点，论文数量逐年增加，应用领域不断扩大。

分布供电方式具有节能、可靠、高效、经济和维护方便等优点，已被大型计算机、通信设备、航空航天、工业控制等系统逐渐采纳，也是超高速型集成电路的低电压电源(3.3 V)最为理想的供电方式。在大功率场合，例如电镀、电解电源、电力机车牵引电源、中频感应加热电源、电动机驱动电源等也有广阔的应用前景。

(2) 不间断电源(UPS)

不间断电源(UPS)是计算机、通信系统以及要求提供不能中断电力场合所必需的一种高可靠性的电源。交流市电输入经整流器变成直流，一部分能量给蓄电池组充电，另一部分能量经逆变器变成交流电，经转换开关送到负载。为了在逆变器故障时仍能向负载提供能量，备用电源通过电源转换开关来实现供电。

现代UPS普遍采用了脉宽调制技术和功率MOSFET、IGBT等电力电子器件，降低了电源的噪声，提高了效率和可靠性。引入微处理器技术可以实现对UPS的智能化管理，进行远程维护和远程诊断。

目前在线式UPS的最大容量可达到600 kV·A。超小型UPS发展也很迅速，已经有0.5 kV·A、1 kV·A、2 kV·A、3 kV·A等多种规格的产品。

(3) 变频器

变频器主要用于交流电机的变频调速，其在电气传动系统中占据的地位日趋重要，已获得巨大的节能效果。变频器主电路均采用交流—直流—交流方案。工频电源通过整流器变成固定的直流电压，然后由大功率晶体管或IGBT组成的PWM高频变换器将直流电能逆变成电压、频率可变的交流电能输出，电源输出波形近似于正弦波，用于驱动交流异步电动机实现无级调速。

国际上400 kV·A的变频器系列产品已经问世。

20世纪80年代初期，日本东芝公司最先将交流变频调速技术应用于空调器中，至1997年，其市场占有率已达到70%以上。变频空调具有舒适、节能等优点。国内于20世纪90年代初期开始研究变频空调，1996年引进生产线生产变频空调，逐渐形成变频空调开发生产热点，到2000年已形成高潮。在变频空调的电源中，优化控制策略，精选功能组件，这是它的发展方向。

(4) 静止无功补偿装置与电力有源滤波器

利用高电压、大电流电力电子器件组成的无触点开关克服了传统的有触点开关在高频率操作情况下由触点的磨损造成机械寿命短和可靠性差的缺陷，具有无电弧、无噪声、无机械磨损、寿命长、操作频率高、开关损耗小、易控制等特点，这是理想的无触点开关。

在电力系统中，电压是衡量电能质量的一个重要指标。为了满足电力系统的正常运行和用电设备对使用电压的要求，必须对电力系统进行无功补偿和谐波抑制。利用无触点开关构成的晶闸管控制电抗器(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动态无功