

中国电气工程大典编辑委员会



CHINA ELECTRICAL

中国电气 工程大典

ENGINEERING CANON

第 2 卷

电力电子技术

主编 钱照明 汪懋生 徐德鸿
陆剑秋 陈 坚

 中国电力出版社
www.cepp.com.cn



CHINA ELECTRICAL

中国电气 工程大典

ENGINEERING CANON

中国电气工程大典编辑委员会

第 ② 卷

电力电子技术

主编 钱照明 汪樾生 徐德鸿
陆剑秋 陈 坚



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

《中国电气工程大典》是由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电学会共同组织全国电气工程各领域的著名专家、学者编纂而成的。它是一部全面系统反映电气工程各领域最新成就和技术水平的综合性工具书。《中国电气工程大典》包括现代电气工程基础、电力电子技术、电气工程材料及器件、火力发电工程、水力发电工程、核能发电工程、可再生能源发电工程、电力系统工程、电机工程、输变电工程、配电工程、船舶电气工程、交通电气工程、建筑电气工程、电气传动自动化等15卷。

本书为第2卷，电力电子技术卷。主要内容包括概论、电力电子器件、电力电子器件应用基础、基本电力电子电路、电力电子控制技术、电力电子软开关技术、电力电子多电平技术、电源技术、电力电子系统中的磁技术、电力电子技术在电力传动中的应用、电力系统中的电力电子装置、电力电子电路/系统建模及计算机仿真、电力电子电路/系统电磁兼容设计和电力电子系统集成。

本书主要供电气工程领域技术人员和管理人员使用，也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国电气工程大典. 第2卷, 电力电子技术 / 钱照明等主编; 中国电气工程大典编辑委员会编. —北京: 中国电力出版社, 2009. 6
ISBN 978-7-5083-8144-2

I. 中… II. ①钱…②中… III. ①电力工程—中国②电力电子学—中国 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 190639 号

中国电力出版社出版发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009年6月第1版 2009年6月北京第1次印刷
880mm×1230mm 1/16 63.75印张 2789千字 1插页
定价 260.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

中国电气工程大典

第②卷

电力电子技术

编辑出版人员名单

责任编辑	莫冰莹	穆智勇	丁 钊	畅 舒
	张佳音	杨 易	刘 宇	郭丽然
	刘亚南			
复审人员	张运东	贾玉兰		
封面设计	郑小平	王英磊		
版式设计	张秋雁			
责任校对	罗凤贤	刘振英		
责任印制	甄 茁			

中国电气工程大典

编辑委员会

- 主任：**陆燕荪 原机械工业部副部长、教授级高级工程师
中国机械工程学会名誉理事长
- 陆延昌 原电力工业部副部长、教授级高级工程师
中国电机工程学会理事长
- 执行主任：**周鹤良 原机械工业部电工局局长、教授级高级工程师
中国电工技术学会名誉理事长
- 宋天虎 原机械工业部科技司司长、教授级高级工程师
中国机械工程学会常务副理事长
- 副主任：**潘崇义 中国电工技术学会副理事长、教授级高级工程师
- 吴玉生 中国电机工程学会秘书长、教授级高级工程师
- 邴凤山 中国水力发电工程学会副理事长、教授级高级工程师
- 严宏强 中国动力工程学会秘书长、教授级高级工程师
- 宗 健 中国电力出版社有限公司董事长、总经理、编审

委 员：（按姓氏笔画排列）

丁 杰	卜广全	于 龙	于坤山	于 明	于新颖	马小亮	马文忠	马伟明	马伟斌
马旭东	马济泉	马晓茜	马隆龙	丰镇平	王之杰	王为民	王正鸣	王占奎	王永骥
王成山	王兆安	王志峰	王作民	王国海	王明渝	王金元	王学伟	王泽忠	王建生
王建华	王绍武	王春华	王厚余	王炳忠	王 勇	王素英	王振铭	王 乘	王维洲
王景芹	王 强	王锡凡	王新新	王黎明	王德宽	王赞基	文习山	文劲宇	方晓燕
方 磊	尹天文	邓长胜	孔 力	孔伯汉	孔昭年	石萍萍	卢 强	卢澎湖	叶奇蓁
田东强	田培斌	史进渊	史毓珍	白少林	白俊光	白晓民	白继彬	冯江华	司马文霞
邢馥吏	戎一农	吕征宇	吕鸿达	朱庆明	朱英浩	朱宝田	朱晓明	朱家驹	朱耀泉
仲明振	任兆宏	任修明	任俊生	危师让	邬 雄	刘大明	刘广峰	刘卫宁	刘友梅
刘公直	刘文华	刘平安	刘 伟	刘仲儒	刘希清	刘 杰	刘尚明	刘国林	刘泽洪
刘建飞	刘建明	刘屏周	刘瑛岩	刘德志	齐剑波	关志成	江秀臣	江哲生	池 涌
汤 涌	汤蕴林	祁恩兰	许江宁	许忠卿	许洪华	阮江军	阮新波	阮 毅	孙才新
孙凤杰	孙成群	孙 林	孙牧海	严宏强	严陆光	严俊杰	严 萍	苏秀革	杜正春
杜毅威	杨玉岗	杨守权	杨寿敏	杨其国	杨奇逊	杨奇娟	杨怡元	杨俊智	杨 耕
杨维迅	杨 雯	杨道刚	杨德才	李 卫	李文健	李永东	李成榕	李 旭	李兴源
李安定	李 农	李若梅	李杰仁	李宝树	李定中	李 奎	李彦明	李晓明	李颂哲
李朗如	李培植	李盛涛	李崇坚	李道本	李道林	李 鹏	李 新	李肇林	李耀星
邴凤山	肖立业	肖昌汉	肖辉乾	肖湘宁	肖耀荣	吴正国	吴创之	吴运东	吴志坚
吴国平	吴质根	吴晓波	吴培豪	邱爱慈	何木云	何阿平	何金良	何梓年	何湘宁
何瑞华	佟为明	余 志	余贻鑫	邹云屏	邹金昌	邹孟奇	应百川	辛德培	辛耀中
汪继强	汪集暘	汪樨生	汪德良	沈小宇	沈 江	沈 兵	沈邱农	沈梁伟	宋文武
宋汉武	宋哲仁	迟 速	张艺滨	张文才	张玉花	张业广	张乔根	张仲超	张兆鹤
张伯明	张冶文	张启平	张 波	张 亮	张洪钟	张祖平	张勇传	张晓江	张晓锋
张 敏	张 望	张景洲	陆永平	陆宠惠	陆俭国	陆剑秋	陆祖良	陆家榆	陆嘉明
陈汉民	陈伟根	陈 仲	陈众励	陈庆国	陈 坚	陈伯时	陈国柱	陈治明	陈建飏
陈 星	陈思铸	陈 勇	陈哲良	陈恩鉴	陈雪梅	陈清泉	陈超志	陈敬超	陈辉明
陈黎平	陈德昌	陈德胜	陈德桂	邵 岚	苟锐锋	林云生	林公舒	林集明	易学勤
罗永浩	罗景华	金如麟	周小谦	周以国	周双喜	周 平	周仲仁	周远翔	周孝信
周建中	周思刚	周家启	周 娟	周锡生	郑小康	郑云之	郑永红	郑克文	郑明光
宗建华	宓传龙	孟庆东	赵玉文	赵光宙	赵 伟	赵红一	赵昌宗	赵治华	赵宗让
赵荣祥	赵相宾	赵 洁	赵 敏	赵婉君	赵 琨	赵 毅	赵黛青	荣命哲	胡方荪



胡安	胡学浩	胡振岭	胡鉴清	段善旭	段献忠	侯子良	俞忠德	俞智斌	饶芳叔
施围	施鹏飞	洪元颐	姚本荣	姚尔昶	姚家祎	姚福生	贺建华	贺益康	贺湘琨
贺德馨	骆仲泱	秦和	秦裕碧	袁余军	袁建生	袁建敏	都兴有	耿英三	莫会成
贾东旭	夏立	夏祥贵	顾四行	顾国彪	钱昌燕	钱宝良	钱照明	倪维斗	徐元辉
徐凤刚	徐永法	徐兆丰	徐国政	徐洪海	徐殿国	徐铕	徐德鸿	殷禄祺	奚大华
高子瑜	高文胜	高庆国	高京生	高理迎	高培庆	郭天兴	郭国顺	郭保良	郭洁
郭振岩	郭灏	唐任远	唐炬	唐春潮	陶星明	黄少锋	黄仁乐	黄妙庆	黄其励
黄国治	黄学清	黄宝生	黄晓丽	黄崇祺	黄景湖	梅生伟	曹一家	曹惠彬	戚庆成
崔志强	崔翔	康勇	章名耀	章定邦	梁维宏	梁维燕	梁曦东	彭宗仁	葛大麟
葛少云	葛诗慧	葛蓉生	葛溪亭	葛增茂	董卫国	蒋洪德	蒋善定	韩民晓	韩英铎
惠世恩	覃大清	程天麟	程钧培	程时杰	程树康	程浩忠	傅书遏	焦依	焦树建
舒惠芬	曾文星	曾正中	曾明富	曾南超	曾雁鸿	曾嵘	游亚戈	谢开贵	谢秋野
雷银照	雷清泉	满慧文	蔡崇积	管瑞良	廖胜松	廖瑞金	缪鸿兴	黎晓晖	颜渝坪
薛以太	戴先中	戴庆忠	戴慧珠	魏光辉					

序

电气工程包括发电工程、输配电工程和用电工程，是为国民经济发展提供电力能源及其装备的战略性产业，是国家工业化和国防现代化的重要技术支撑，是国家在世界经济发展中保持自主地位的关键产业之一。电气工程的产业关联度高，对从原材料工业、机械制造业、装备工业以及电子、信息等一系列产业的发展均具有推动和带动作用，对提高整个国民经济效益，促进经济社会可持续发展，提高人民生活质量有显著影响。

经过改革开放 30 年来的发展，我国电气工程已经形成了较完整的科研、设计、制造、建设、运行体系，成为世界电力工业大国之一。至 2007 年底，我国发电装机容量达 7.13 亿 kW，三峡水电及输变电工程、百万千瓦级超超临界火电工程、百万千瓦级核电工程，以及正在建设的交流 1000kV、直流 ±800kV 特高压输变电工程等举世瞩目；大电网安全稳定控制技术、新型输电技术的推广，大容量电力电子技术的研究和应用，风力发电、太阳能光伏发电等可再生能源发电技术的产业化及规模化应用，超导电工技术、脉冲功率技术、各类电工新材料的探索与应用取得重要进展。特别是进入 21 世纪以来，电气工程领域全面贯彻科学发展观，新原理、新技术、新产品、新工艺获得广泛应用，拥有了一批具有自主知识产权的科技成果和产品，自主创新已成为行业的主旋律。我们的电气工程技术和产品，在满足国内市场需求的基础上已经开始走向世界。

电气工程技术的快速发展和巨大成就，要求对原有知识的不断更新，广大电气工程领域的工作者们对新的知识愈加渴求。在原机械工业部陆燕荪、电力工业部陆延昌两位老部长的倡议和领导下，由中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个全国性学会，联合组织了电气工程各领域近 2000 位专家和学者，历



时4年多，编撰的《中国电气工程大典》现在出版了。这套内容新颖实用的巨著是电气工程领域一项重要的基础性工作，也是我国电气工程技术人员对社会的一项公益性奉献。这部鸿篇巨著不仅具有电气工程技术的知识魅力，同时也具有鲜明的时代特色，相信会为广大读者营造一个开卷有益的氛围。

电能作为目前使用最方便的二次能源，在推动社会进步、促进科学技术发展和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。随着社会的不断进步和人民生活水平的不断提高，电气工程任重而道远，需要依靠科技进步，并用更新的科学知识武装每一位电气工作者，所以，希望这套著作能对电气工程的教学、科研、设计和管理人员有所裨益。

徐匡迪

二〇〇八年八月十二日





前 言

电的产生和应用是人类有史以来最伟大的科学技术成就之一。电力作为目前最清洁和使用最方便的二次能源，在推动社会发展、促进科学技术进步和提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。一个多世纪以来，电气技术的不断发展，电力生产及应用的日益增长，迅速改变了人类社会的面貌，也深深影响着人们的生活方式。电气化的程度已成为国家文明程度的重要标志之一。

改革开放 30 年来，我国科学技术取得了突飞猛进的发展，科技创新已成为国家发展的重要战略。在电气工程领域，新原理、新技术、新工艺、新材料得到了广泛应用，涌现出一大批具有自主知识产权的科研成果和产品。三峡电站的建设，大容量高效清洁超临界和超超临界压力机组的迅速发展，特高压交直流输电技术和灵活交流输电技术的发展和运用，先进的核能发电厂及可再生能源发电厂的成功建造，大电网智能化动态稳定监控系统和信息管理系统的广泛应用，具有先进水平的电气装备制造业的高速发展，大容量电能变换与节能节电技术，风力发电、太阳能光伏发电等资源节约、环境友好的新技术的大量应用，计算机和信息网络技术在电气领域的普及，明显改变着电气工程领域技术发展状况。超导电工技术、脉冲功率技术，纳米材料、永磁材料、有机硅材料等各类电工新技术和新材料的探索与应用，都充分展示了中国电气工程领域所取得的骄人业绩，引起了世界的高度关注。其中许多科研成果和产品，已达到国际先进水平。

电气工程从业人员多，涉及面广，技术进步快，科研成果多，许多科研成果需要总结和积累，许多新的知识需要普及和传播。盛世修典，素有遗风。为反映电气工程领域最新的发展成就，总结已有的科研成果，传播工程领域最新的科学技术知识，中国电工技术学会、中国机械工程学会、中国电机工程学会、中国动力工程学会和中国水力发电工程学会五个学会，联合组织了电气工程各领域的约 2000 位专家和学者，编撰了《中国电气工程大典》。



本套书的编写工作于2004年开始启动，编委会多次召开工作会议，精心组织，按照“取材突出新原理、新技术、新工艺、新材料；内容体现新颖性、先进性、实用性；表达力求简明扼要、深入浅出、直观易懂”的原则，反复讨论并修改编写大纲，确定编写内容。经过4年磨砺，数易其稿，终于付梓出版。《中国电气工程大典》共15卷约5000万字，包括《现代电气工程基础》、《电力电子技术》、《电气工程材料及器件》、《火力发电工程》、《水力发电工程》、《核能发电工程》、《可再生能源发电工程》、《电力系统工程》、《电机工程》、《输变电工程》、《配电工程》、《船舶电气工程》、《交通电气工程》、《建筑电气工程》和《电气传动自动化》。

所有组织者和编著者都把编撰本套书当作电气工程领域建设的一项重要的基础性工作，他们认真负责，辛勤耕耘，倾注了大量心血。本套书在编写出版过程中，得到参与编写的各科研院所、企业、高等院校等单位的大力支持，还得到业内有关院士和专家、学者的热心帮助。正是大家的积极参与和无私奉献，才使得这部大典能顺利编写出版，编委会对他们的奉献和支持表示衷心感谢。

这部鸿篇巨著，涉及电气工程设计制造、建设施工、生产运行、科研教学、工程管理等领域，总结了改革开放30年来电气工程各领域的技术发展与成功经验，展示了各专业领域的最新技术数据、设计经验、科技成果和发展动态，汇集了国内外相关的先进理念和成熟经验，体现了科学性、先进性和实用性的结合，是一套可供电气工程领域专业技术人员和管理人员使用的综合性工具书，也可供高等院校相关专业师生参考。

《中国电气工程大典》的编撰出版工作涉及面广，参与人员多，写作难度大。尽管编撰人员尽心尽力，倾注了无数心血，但书中难免存在缺点和不足之处，恳请读者指正。

中国电气工程大典编辑委员会主任

陆燕荪 陆延昌





本卷前言

早在 1974 年, 美国著名学者 W. Newell 就明确地指出了, 电力电子学是由电气工程与技术、电子科学与技术和控制理论三个学科交叉而成的, 电力电子学的发展历程充分证明了上述论断的正确性。

1948 年肖克莱等人发明了晶体三极管 (transistor), 开创了半导体电子学的新时代。目前广泛应用的电力电子器件如 SCR、GTO、MOSFET 和 IGBT 等都源自晶体三极管的发展, 因此晶体三极管的诞生标志着电力电子学科发展基础的建立。1956 年 Mall 首次提出了 PNP 开关的概念, 1957 年首只商业化的晶闸管问世, 它特有的电导调制功能开辟了高压大功率固态开关器件的先河, 促使电力电子技术得到迅速的发展和应用。随后, 伴随着微电子技术的飞速发展, 电力电子器件经历了从结型电流控制功率器件, 如晶闸管、功率 GTR、GTO 到场控功率器件, 如功率 MOSFET、IGBT 及 20 世纪 90 年代智能功率模块的发展历程。大功率、高频化、高效率、驱动场控化、集成化、采用宽禁带半导体材料已成为当前功率器件发展的重要特征。

新型电力电子器件的出现, 总是带来一场电力电子技术的革命, 功率变换技术和电力电子电路拓扑的发展总是和电力电子器件的发展紧密相关、相辅相成的。针对每一种电力电子器件, 人们提出了众多的功率变换电路拓扑, 如缓冲吸收、谐振开关、软开关、多重化等; 在控制技术方面提出了相控、PWM 控制和以状态空间平均法为代表的动态建模理论; 在仿真手段方面出现多种商用软件, 如 PSpice、Saber、Simplis 等。

电力电子技术是依靠电力电子开关器件实现电能的高效率的变换与控制的一门学科。电力电子技术是现代社会的支撑技术。时至今日, 它几乎已渗透到社会的各个方面: 如电力系统、交通运输、航空航天、互联网、无线电通信与电视、计算机、冶金、石化、汽车电力电子应用技术、电话、空调与制冷、成像、家







电、保健、农业机械化、激光、核能利用、国防军工科技、新材料制造等领域，已形成了全球数千亿元的电力电子产品市场，支撑着数万亿元的电工、电子产品市场。电力电子技术在推动科学技术和经济的发展以及国防建设中发挥着越来越重要的作用。

当今世界正面临能源、环境保护的双重压力，特别是正在崛起的发展中国家面临着史无前例的严峻挑战。温室气体排放已引起了国际社会的普遍关注，发达国家的长期工业化过程是造成温室气体历史问题的主要原因。通过国际社会的努力，2005年京都议定书即《联合国气候变化框架公约》正式生效，京都议定书将对世界经济的发展产生深远的影响。扩大可再生能源应用比例和大力采用节能技术是实现京都议定书的目标十分关键和有效的措施。国际社会正积极推广可再生能源（包括小水电、风力发电技术、光伏发电、生物质发电、燃料电池发电等）和节能技术，以减少温室气体排放。

根据美国国家电力科学研究院的报告，纯电动汽车与燃油汽车的一次能源利用率之比为1:0.6。因此发展电动汽车不但可以提高能源的利用率，同时也可以减少温室气体和有害气体的排放。将燃油驱动和电驱动相结合的混合动力汽车已经问世，可减少油耗50%。

另外，伴随可再生能源的应用和推广，国际上正酝酿着一场传统电力系统的革命，即发展柔性电力系统、分布式供电系统和新型电力市场管理。这不但可以大幅度地减少传统电力系统中发电、输电、配电和用电的能耗，同时有利于能源多样化的实施，有利于采用再生能源和环保发电技术，有利于国家能源安全，并进一步提高了电力系统运行的安全性。从技术层面来讲，新型电力市场的引入将出现按时、按质论价的电能供应方式，从而降低发电成本并促进电力品质的改善。各类并联、串联和综合电力电子补偿控制技术，如静止无功补偿装置（SVC）、静止无功发生器（SVG）、动态电压恢复器（DVR）、各类串联补偿器、电力有源滤波器（APF）、电力电子限流器、发电机新型励磁系统、电力储能装置、微型燃气发电机（MICRO GAS TURBO）、直流输电（HVDC）、异步接点背靠背装置（BTB）、统一潮流控制器（UPFC）、UPS、统一电能质量控制器（UPQC）等的应





用,使电力电子技术在电力系统中的应用已经扩展到发电、输电、配电和用电各个领域,使传统电力系统成为控制快捷、精密灵活的柔性电力系统,确保并进一步提高整个电力系统的安全、经济、高效、优质运行,促使传统电力系统发生革命性的变革。与此同时,也将使电力电子技术在更高层次上得到进一步的发展。

如上所述,电力电子技术已经渗透到现代社会的各个方面,未来 90% 的电能都将通过电力电子技术处理后再加以利用,以便提高能源利用的效率、提高工业生产的效率、实现可再生能源的最大利用。电力电子技术在推进 20 世纪人类科技发展中已经发挥了重要的作用,它将在建设未来和平、环保、和谐的世界中发挥不可替代的作用。

本卷力求对电力电子器件、电路、装置、应用诸方面的基础和最新发展进行了较全面的阐述,供从事电力电子技术的工程技术研究人员、大专院校师生和有关电力电子应用领域的工程技术研究人员参考。

编者



目 录

序	
前言	
本卷前言	
第 1 篇 概论	1
1 电力电子的涵义和任务	3
2 电力电子的发展与展望	3
3 电力电子的主要应用及其重要性	4
3.1 可再生能源发电	4
3.2 分布式发电	4
3.3 电能质量控制	5
3.4 电力牵引和电机驱动	5
3.5 现代国防和前沿科学研究	5
4 电力电子技术目前在我国的发 展、应用现状和存在的问题	5
参考文献	7
第 2 篇 电力电子器件	9
第 1 章 概述	11
1 电力电子器件发展过程	11
2 电力电子器件的几个重要概念	11
3 电力电子器件的种类	12
4 电力电子器件的应用领域	13
5 电力电子器件与节能	13
6 电力电子器件与微电子器件	14
第 2 章 双极型电力电子器件	15
1 基础概念	15
1.1 电力半导体分立器件外形	15
1.2 电热参数的管壳额定概念	15
1.3 特性曲线	17
1.4 器件参数间的相互关系	18
2 普通整流管	19
2.1 器件结构和基本特性	19
2.2 额定值与特性值	20
2.3 电热特性计算公式	20
2.4 电流额定	21
2.5 应用导则	21
3 快速软恢复二极管	22
3.1 器件特点	22
3.2 反向恢复过程	22
3.3 应用导则	22
4 电力晶体管	22
4.1 器件结构和基本特性	22
4.2 额定值与特性值	24
4.3 应用导则	24
5 绝缘栅双极晶体管	25
5.1 器件结构和基本特性	25
5.2 额定值与特性值	27
5.3 应用导则	27
6 普通晶闸管	28
6.1 器件结构和基本特性	28
6.2 额定值与特性值	29
6.3 应用导则	30
7 快速晶闸管	31
7.1 器件特点	31
7.2 开关过程	31
7.3 应用导则	31
8 双向晶闸管	31
8.1 器件结构和基本特性	31
8.2 额定值与特性值	32
8.3 应用导则	32
9 逆导晶闸管	32
9.1 器件结构和基本特性	32
9.2 额定值与特性值	33
9.3 应用导则	33
10 光控晶闸管	33
10.1 器件结构和基本特征	33
10.2 额定值与特性值	33
10.3 应用导则	34
11 门极可关断晶闸管	34
11.1 器件结构和基本特性	34
11.2 额定值与特性值	36
11.3 应用导则	36
12 集成门极换向晶闸管	37
12.1 器件结构和基本特性	37
12.2 额定值与特性值	37
12.3 应用导则	38
第 3 章 场控型电力电子器件	39
1 功率 MOSFET	39
1.1 功率 MOSFET 的结构	39
1.2 功率 MOSFET 的工作特性	40
1.3 功率 MOSFET 安全工作区	43
1.4 MOSFET 栅极驱动	44
1.5 功率 MOSFET 可靠性	44
1.6 功率 MOSFET 并联应用	45
2 绝缘栅双极型晶体管 IGBT	45
2.1 IGBT 结构和工作原理	46
2.2 IGBT 的工作特性	46
2.3 NPT 型 IGBT 特性	49
2.4 IGBT 的擎住效应和安全工作区	50
2.5 IGBT 栅极驱动	50
2.6 IGBT 功率模块	51
第 4 章 电力电子专用控制集成电路、微控制器 和系统芯片 (SOC)	53
1 电力电子器件驱动与保护集成电路	53
1.1 晶闸管的触发和保护电路	53
1.2 可关断晶体管 (GTO) 的门极控制和过电 流保护电路	54
1.3 电力晶体管 (GTR) 的驱动和保护电路	54
1.4 功率场效应晶体管 (Power MOSFET) 的驱 动和保护电路	55
1.5 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 的门极驱动和	

保护电路	55	4.2 MCM-L 工艺过程	97
2 脉宽调制 PWM 控制集成电路	55	4.3 MCM-L 材料	98
2.1 PWM 控制集成电路的基本组成和控制原理	55	5 MCM 互连技术	99
2.2 典型 PWM 控制集成电路	56	5.1 芯片和基板的粘合	100
3 脉频控制 PFM 控制集成电路	59	5.2 芯片互连技术	101
3.1 集成 PFM 控制器的控制原理	59	6 多芯片模块封装考虑因素	105
3.2 典型 PFM 控制集成电路	60	6.1 封装效率	105
4 功率因数校正 PFC 控制集成电路	61	6.2 机械设计考虑	106
4.1 功率因数校正控制集成电路的原理、功能和构成	61	6.3 电性能设计考虑	106
4.2 用于预调节的 PFC 控制器	61	6.4 热设计考虑	107
4.3 PFC-PWM 复合控制器	62	6.5 封装环境考虑	107
5 电源与电源管理集成电路	62	第 7 章 宽禁带半导体电力电子器件	108
5.1 线性调整电源芯片	62	1 电力电子器件的材料优选	108
5.2 电源电压监测与控制芯片	63	1.1 低频功率 MOS 的材料优选因子	108
5.3 电源输出控制管理芯片	64	1.2 高频功率 MOS 的材料优选因子	110
5.4 基准源集成电路	65	1.3 适合于电力电子器件的其他材料优选因子	110
5.5 电池充电和管理集成电路	67	2 碳化硅电力电子器件	111
5.6 热插拔控制集成电路与功率开关	69	2.1 研发进展概述	111
5.7 照明与显示控制集成电路	71	2.2 碳化硅肖特基势垒二极管 (SBD)	112
6 新型电力电子集成芯片的发展与展望	74	2.3 碳化硅场效应器件	112
6.1 智能化功率集成电路	74	2.4 碳化硅 IGBT	114
6.2 典型电源类 SOC 集成电路	74	2.5 碳化硅双极型器件	114
第 5 章 电力电子模块	76	2.6 碳化硅功率模块	116
1 模块发展现状	76	3 其他宽禁带半导体电力电子器件	116
2 典型集成模块封装工艺	78	4 问题与展望	117
2.1 封装流程	78	第 8 章 电力电子技术的相关电子器件	118
2.2 封装结构	79	1 太阳电池	118
3 基板技术	79	1.1 太阳能常识	118
3.1 金属绝缘基板	79	1.2 太阳电池原理	119
3.2 陶瓷基板	80	1.3 太阳电池的特征参数	120
4 互连技术	81	1.4 太阳电池的效率	120
4.1 引线键合互连工艺	81	1.5 太阳电池的分类	121
4.2 双面焊接互连工艺	82	1.6 太阳电池的基本制造工艺	121
4.3 沉积金属化工艺	83	1.7 光伏系统	121
4.4 压接互连工艺	84	1.8 光伏技术的现状与前景	122
5 封接技术	87	2 高亮度 LED	123
6 模块热电设计	87	2.1 LED 原理	123
6.1 热管理设计	87	2.2 LED 的发光效率	124
6.2 电磁设计	88	2.3 LED 的电源及其控制电路	124
第 6 章 多芯片封装	90	2.4 产业概况	125
1 MCM 技术的特点和分类	90	3 半导体热效应器件	125
2 MCM-C 技术	91	3.1 塞贝克效应与温差发电器件	125
2.1 厚膜混合工艺 (Multilayer Thick Film)	91	3.2 珀耳帖效应与半导体制冷	126
2.2 高温共烧工艺 (High Temperature Cofired MCM-C)	91	4 电力电子技术中的敏感元器件	126
2.3 低温共烧工艺 (Low Temperature Cofired MCM-C)	92	4.1 霍尔效应与霍尔电流传感器	127
2.4 MCM-C 的发展	92	4.2 磁阻效应与磁敏电阻	127
3 MCM-D 技术	92	4.3 压敏电阻与过电压保护	128
3.1 MCM-D 工艺材料	92	第 9 章 电力电子器件发展趋势	129
3.2 MCM-D 工艺过程	94	1 新的电力电子器件结构	129
3.3 MCM-D 工艺的应用	96	1.1 采用超级结技术的功率 MOSFET—COOL MOS	129
4 MCM-L 技术	97	1.2 采用新结构和新工艺的 IGBTs-NPT, FSNPT, 沟槽型 IGBTs, IEGT	130
4.1 MCM-L 定义和特点	97	2 宽带隙半导体材料和器件	131
		2.1 碳化硅材料	131
		2.2 SiC 功率二极管	132

2.3 SiC 功率开关器件	133	2 电力电子器件并联	169
3 功率集成芯片和集成模块	134	2.1 并联器件电流分配	169
3.1 智能功率管理集成电路和 PSOC	134	2.2 并联器件均流	169
3.2 功率集成模块	134	2.3 MOSFET 和 IGBT 并联应用	170
参考文献	139	第 6 章 电力电子器件散热技术	172
第 3 篇 电力电子器件应用基础	143	1 基本概念	172
第 1 章 概述	145	1.1 器件发热	172
第 2 章 电力电子器件门极驱动技术	146	1.2 器件散热	172
1 晶闸管的门极触发特性	146	2 散热方式	174
1.1 晶闸管的门极伏安特性	146	2.1 自然空气对流冷却	174
1.2 晶闸管的门极触发要求	146	2.2 强迫空气冷却	174
2 晶闸管的门极触发电路	146	2.3 循环水冷却	174
2.1 晶闸管触发脉冲的参数	146	2.4 流水冷却	175
2.2 晶闸管触发电路	147	2.5 循环油冷却	175
3 门极可关断晶闸管驱动电路	150	2.6 油浸自冷却	175
3.1 GTO 的门极驱动要求	150	2.7 沸腾冷却	175
3.2 GTO 的门极驱动电路	150	3 器件工作损耗及结温计算	175
4 MOSFET 和 IGBT 的门极特性	152	3.1 器件损耗功率计算	175
4.1 MOSFET 和 IGBT 的门极电气参数	152	3.2 器件结温计算	176
4.2 MOSFET 和 IGBT 门极驱动的要求	153	4 散热器的选配	178
5 MOSFET 和 IGBT 分立元件驱动电路	154	4.1 散热器的选配方法	178
5.1 推挽图腾结构射极跟随驱动电路	154	4.2 散热器安装原则	178
5.2 光电耦合器隔离的分立元件驱动电路	154	4.3 散热器的机械尺寸和互换性	178
5.3 脉冲变压器隔离耦合的分立元件驱动电路	154	4.4 散热器绝缘件和紧固件	178
6 MOSFET 和 IGBT 集成式驱动电路	154	4.5 电力电子器件常用散热器	179
6.1 图腾推挽驱动器	155	参考文献	188
6.2 光耦隔离的驱动集成电路	155	第 4 篇 基本电力电子电路	189
6.3 带过电流保护的驱动集成电路	156	第 1 章 概述	191
6.4 浮地驱动集成电路	158	第 2 章 直一直变换电路	192
第 3 章 电力电子器件保护技术	159	1 直流降压变换电路 (Buck 电路)	192
1 常见故障类型及保护方法	159	1.1 基本电路	192
2 过电流保护	159	1.2 电感电流连续导通模式 (CCM)	192
2.1 过电流原因与分类	159	1.3 电感电流断续导通模式 (DCM)	192
2.2 过电流检测	159	2 直流升压式变换电路 (Boost 电路)	192
2.3 过电流保护电路	159	2.1 基本电路	192
3 过电压保护	159	2.2 电感电流连续导通模式 (CCM)	193
4 电流、电压的动态上升率抑制	160	2.3 电感电流断续导通模式 (DCM)	193
4.1 di/dt 抑制电路	160	3 升降压式变换电路 (Buck-Boost 电路和 Cuk 电路)	193
4.2 du/dt 抑制电路	160	3.1 Buck-Boost 电路	193
5 过热保护	160	3.2 Cuk 电路	194
第 4 章 缓冲与吸收技术	161	4 升降压式变换电路 (Sepic 电路和 Zeta 电路)	195
1 缓冲/吸收电路	161	4.1 Sepic 电路	195
1.1 吸收电路的基本原理	161	4.2 Zeta 电路	195
1.2 吸收电路的参数设计	162	5 双向直一直变换电路	195
1.3 钳位电路	164	6 隔离型直一直变换电路中的变压器及其等效电路	195
2 缓冲/吸收技术应用	164	7 正激式变流器	196
2.1 单端变流器吸收电路	164	7.1 单管正激式变流器	196
2.2 桥式电路吸收与钳位电路	165	7.2 双管正激式变流器	196
第 5 章 电力电子器件串并联技术	166	8 推挽隔离 Buck 变流器	197
1 电力电子器件串联	166	9 反激式变流器	197
1.1 串联器件电压分配	166	10 全桥和半桥隔离 Buck 变流器	198
1.2 串联器件的静态均压	166	第 3 章 整流电路	199
1.3 串联器件的动态均压	166	1 不控整流电路	199
1.4 晶闸管串联应用	167		
1.5 IGBT 串联应用	168		