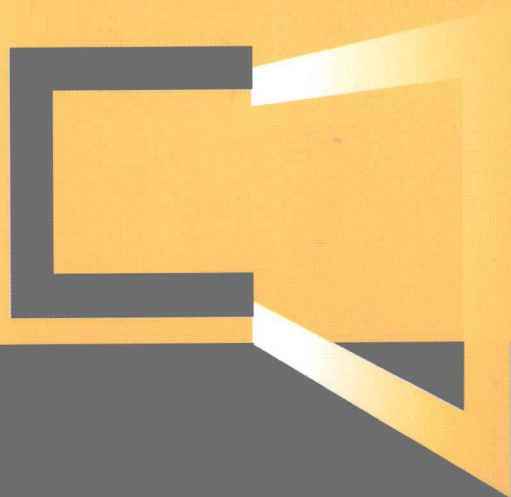


电力电子与 电气传动

【第二版】



潘孟春 张玘 单庆晓 等编著

POWER
ELECTRONICS
AND ELECTRIC
DRIVES
POWER
ELECTRONICS
AND ELECTRIC
DRIVES

国防科技大学出版社

电力电子与电气传动

(第二版)

潘孟春 张 玘 单庆晓
翁飞兵 陈棣湘 陈长明 编著

国防科技大学出版社

·长沙·

内 容 简 介

本书秉承电力电子技术是由电路、电机和控制三大学科交叉而形成的共识,对电力电子技术的内涵、发展应用作了简要介绍。从各种功率器件入手,系统介绍了电力电子技术的四大基本变换,即AC/DC、DC/DC、DC/AC、AC/AC,简要地介绍了软开关等新技术;从各种电机入手,将电力电子和传动控制结合起来介绍典型的直流调速系统和交流调速系统以及交流调速的典型控制方法;从各种常规低压电器入手,介绍典型的时序工作系统;最后考虑到部队移动电站的广泛应用,介绍了发配电知识。

本书不仅可作为电气工程和机械控制等学科的教材,也可供相关工程技术人员和部队从事相关技术工作的官兵参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子与电气传动/潘孟春等编著.—2版.—长沙:国防科技大学出版社,2009.1
ISBN 978-7-81099-592-4

I. 电… II. 潘… III. ①电力电子学—高等学校—教材 ②电力传动—高等学校—教材 IV. TM1 TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 214220 号

国防科技大学出版社出版发行
电话:(0731)4572640 邮政编码:410073
<http://www.gfkdcbs.com>
责任编辑:黄 煌 责任校对:耿 筠
新华书店总店北京发行所经销
国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:25.5 字数:605 千
2006 年 4 月第 1 版 2009 年 1 月第 2 版第 1 次印刷 印数:3001-6000 册
ISBN 978-7-81099-592-4
定价:42.00 元



前言

QIANYAN QIANYAN

策划写这本书应该说是多年前的事了，由于学历教育合训在知识传授的把握上还处于一个摸索过程，所以迟迟未能交稿。多年的教学实践和培养方案的日趋成熟成就了本书的出版。为什么要写本书呢？有以下几方面的原因：第一，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，可见有关电力电子和电气传动知识的传授对本科教育的不可缺少性。第二，客观上讲，电力电子与电气传动有着依从性，没有电力电子的发展，机械传动控制就像人没有“消化系统”一样无法正常协调地工作；没有机械传动控制，在一定程度上电力电子也就失去了发展的土壤。纵观目前已有的教科书和科技书籍，真正从这种依从性角度来介绍电力电子与电气传动相关知识的书籍几乎未见到。第三，国防科技大学不论是工程技术类还是学历教育合训类，都开设了电力电子与电气传动相关课程，但一直以来都是采用多本教材结合传授，回顾几年的教学实践，我们深感这种方式对施教和学习都有诸多不利，影响了学员的学习效果。

本书着力在知识层面和应用层面上组织内容，试图从各种功率器件入手，系统介绍电力电子技术的四大基本变换，即 AC/DC、DC/DC、DC/AC、AC/AC，简要地介绍软开关等新技术；从各种电机入手，将电力电子和传动控制结合起来，介绍典型的直流调速系统和交流调速系统以及交流调速的几种控制方法；从各种常规低压电器入手，介绍典型的时序工作系统（包括

PLC 原理及其应用);最后考虑到部队移动电站的广泛应用,介绍了发配电知识。本书不仅可作为电气工程和机械控制等学科的教材,也可供相关工程技术人员和部队从事相关技术工作的官兵参考。

全书共分十三章。第一章绪论,介绍电力电子与电气传动的内涵以及发展和应用情况;第二章介绍几种典型的电力电子开关器件的原理、特性;第三章、第四章、第五章分别介绍 AC/DC、DC/DC、DC/AC 三大变流技术,AC/AC则在第十二章交流调速系统中介绍;第六章介绍软开关技术;第七章、第八章、第九章分别介绍直流电机、交流电机和控制电机结构、原理、特性;第十章介绍常规低压电器和可编程控制器及其应用;第十一章和第十二章分别介绍直流调速系统和交流调速系统;第十三章对发配电技术作了介绍。每章后面配有一定量习题,绝大部分是与相应章节内容紧扣的,少量题目属于启发引申类型。

本书由潘孟春、张玘、陈长明共同担任主编。绪论、第五章、第十二章由潘孟春编写,第八章由张玘编写,第二章、第四章、第六章由单庆晓编写,第三章、第九章由翁飞兵编写,第七章、第十章、第十一章由陈长明编写,第十三章由陈棣湘编写。全书由潘孟春、陈棣湘统稿。硕士生邹湘文、崔鸿作了大量的插图、习题遴选和整理工作。

本书承蒙罗飞路教授、刘蔚东副教授提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢!

本书是在许多前人的书稿的基础上编写而成的,这些书稿都已在参考文献中列出,在此一并对这些作者表示感谢。

由于作者学识有限,书中一定有很多疏漏乃至错误,恳请阅读本书的教师和同学们批评指正,以便他日更好地加以完善。

作者于长沙

2006 年 2 月



再版说明

ZAIBAN SHUOMING

《电力电子与电气传动》自 2006 年出版后，收到了很好的效果，第一次发行不仅在本校同时在全国一些兄弟院校也作为教材或参考书被采纳。为了进一步提高教材质量，作者集体回顾施教的情况，决定对原书稿进行修订并再版。单庆晓副教授承担了修订的主要工作。第二版与第一版相比，变化如下：

1. 第二章加强了器件的动态过程内容，同时增加了碳化硅器件、功率模块、功率集成电路等内容。
2. 第三章在 3.1 节增加了 3.1.1 小节单相半波可控整流电路，充实了单相全控桥式整流电路的内容。
3. 第四章充实了 4.3.1 小节的内容，增加了解析法、稳态分析法求解的过程；增加了 4.4.4 小节，主要介绍 BOOST 电路的应用；充实了 4.7.1 小节的内容；增加了 4.7.3 小节隔离型变换器电路实例。
4. 第五章增加了单相半桥逆变器和带中心抽头变压器的逆变电路。
5. 对第十章进行了适当的简化，修正了部分错误。
6. 整体上进行了纠错。
7. 从完善的角度增加了部分实验内容。

尽管我们一直在追求完美，但限于作者水平，可能在一定程度上仍存在疏忽甚至错误，敬请读者赐教以便使本书能更加完善。

作者于长沙
2009 年 1 月

第一章 绪 论

- 1.1 课程内涵 (1)
- 1.2 发展概况 (2)
- 1.3 应用范围 (3)

第二章 电力电子器件

- 2.1 概 述 (4)
 - 2.1.1 元件 (4)
 - 2.1.2 电力电子器件的特点 (5)
 - 2.1.3 电力电子器件的分类 (6)
- 2.2 功率二极管 (6)
 - 2.2.1 结构与特性 (6)
 - 2.2.2 动态特性 (8)
 - 2.2.3 主要参数 (9)
 - 2.2.4 功率二极管的种类 (10)
- 2.3 晶闸管 (11)
 - 2.3.1 结构和工作原理 (11)
 - 2.3.2 工作特性 (12)
 - 2.3.3 基本参数 (12)
 - 2.3.4 晶闸管的门极驱动 (13)
 - 2.3.5 晶闸管的保护 (14)
 - 2.3.6 其他类型晶闸管 (14)
- 2.4 门极可关断晶闸管 GTO (15)

2.4.1	结构与工作原理	(15)
2.4.2	特性	(16)
2.4.3	基本参数	(16)
2.4.4	GTO 的驱动	(17)
2.5	双极型功率晶体管 GTR	(17)
2.5.1	结构与基本原理	(18)
2.5.2	基本特性与安全工作区	(18)
2.5.3	基本参数	(19)
2.5.4	功率晶体管的驱动	(20)
2.5.5	达林顿晶体管	(21)
2.6	功率场效应管 MOSFET	(21)
2.6.1	结构与基本原理	(21)
2.6.2	特性	(22)
2.6.3	基本参数	(24)
2.6.4	功率 MOSFET 的驱动与保护	(24)
2.7	绝缘栅双极型晶体管 IGBT	(25)
2.7.1	结构与基本原理	(25)
2.7.2	特性	(26)
2.7.3	基本参数与安全工作区	(27)
2.7.4	IGBT 的驱动	(28)
2.8	其他新型电力电子器件	(29)
2.8.1	其他新型电力电子开关器件	(29)
2.8.2	功率模块与功率集成电路	(30)
2.9	电力电子开关器件的驱动电路	(32)
2.10	电力电子开关器件的缓冲及保护电路	(34)
2.10.1	缓冲电路	(34)
2.10.2	保护电路	(35)
2.11	电力电子开关器件的散热设计	(38)
2.11.1	散热器的类型	(39)
2.11.2	器件的功耗计算	(39)
2.11.3	热传递模型建立	(40)
2.12	隔离型电压电流传感电路	(41)
	习题及思考题	(42)

第三章 交流一直流变换

3.1 单相可控整流电路	(44)
3.1.1 单相半波可控整流电路	(44)
3.1.2 单相桥式全控整流电路	(48)
3.1.3 单相半控桥式整流电路	(53)
3.2 三相可控整流电路	(55)
3.2.1 共阴极接法和共阳极接法	(55)
3.2.2 三相半波可控整流电路	(56)
3.2.3 三相全控桥式整流电路	(62)
3.3 晶闸管的触发电路	(68)
3.3.1 晶闸管元件对触发电路的要求	(69)
3.3.2 单结晶体管触发电路	(70)
3.3.3 集成触发电路	(82)
3.4 晶闸管电路的保护	(86)
3.4.1 过电流保护	(87)
3.4.2 过电压保护	(89)
习题及思考题	(95)

第四章 直流一直流变换

4.1 直流一直流变换电路的分类	(99)
4.2 PWM 控制的基本原理	(100)
4.3 降压型变换器	(101)
4.3.1 电流连续工作方式	(102)
4.3.2 电流临界连续	(103)
4.3.3 电压纹波问题	(104)
4.4 升压型变换器	(105)
4.4.1 电流连续方式	(106)
4.4.2 电流临界连续工作方式	(108)
4.4.3 BOOST 电路应用	(108)
4.5 升降压变换器	(109)
4.5.1 电流连续方式	(110)
4.5.2 电流临界连续工作方式	(110)
4.5.3 间断电流工作方式	(110)

4.6 库克变换器	(111)
4.7 隔离型变换电路	(113)
4.7.1 单端反激式电路 (flyback 电路)	(114)
4.7.2 单端正激式电路 (forward 电路)	(115)
习题及思考题	(117)

第五章 直流—交流变换

5.1 逆变器的类型和性能指标	(119)
5.1.1 逆变器的类型	(119)
5.1.2 逆变器性能指标	(119)
5.2 逆变器原理及拓扑结构	(120)
5.3 方波输出全桥逆变器	(122)
5.3.1 逆变器稳态性能	(123)
5.3.2 方波逆变器幅度控制	(125)
5.4 其他类型逆变电路	(125)
5.4.1 单相半桥电压型逆变电路	(125)
5.4.2 带中心抽头变压器的逆变电路	(127)
5.5 PWM 控制逆变器	(127)
5.5.1 单脉冲调制	(128)
5.5.2 正弦脉冲宽度调制 (SPWM)	(129)
5.5.3 SPWM 的实现	(131)
5.5.4 SPWM 的谐波分析	(134)
5.5.5 跟踪型 PWM 逆变器	(135)
5.6 三相全桥逆变器	(135)
5.6.1 方波控制三相全桥逆变器	(136)
5.6.2 三相 SPWM 逆变器	(138)
习题及思考题	(139)

第六章 软开关技术

6.1 软开关的基本概念	(141)
6.2 软开关的行为	(143)
6.3 典型的软开关拓扑	(144)
6.3.1 负载型谐振变换器	(144)
6.3.2 谐振开关换流器	(145)

6.3.3 谐振直流环	(148)
习题及思考题	(149)

第七章 直流电机

7.1 直流电机的基本结构和工作原理	(150)
7.1.1 直流电机的基本结构	(150)
7.1.2 直流电机的基本工作原理	(153)
7.1.3 直流电机的铭牌和额定值	(155)
7.2 直流电机的分类及基本平衡方程式	(156)
7.2.1 直流电机的分类	(156)
7.2.2 直流发电机的基本平衡方程式	(157)
7.2.3 直流电动机的基本平衡方程式	(159)
7.3 直流发电机的基本运行特性	(160)
7.3.1 他励直流发电机的基本运行特性	(160)
7.3.2 并励直流发电机的基本运行特性	(162)
7.3.3 复励直流发电机的基本运行特性	(164)
7.4 直流电动机的机械特性	(165)
7.4.1 他励直流电动机的机械特性	(165)
7.4.2 并励直流电动机的机械特性	(169)
7.4.3 串励直流电动机的机械特性	(169)
7.4.4 复励直流电动机的机械特性	(171)
7.4.5 生产机械的机械特性	(171)
7.5 他励直流电动机的启动	(173)
7.5.1 直流电动机的启动性能的技术指标	(173)
7.5.2 直接启动	(173)
7.5.3 降压启动	(174)
7.5.4 在电枢回路中串接附加电阻启动	(174)
7.6 他励直流电动机的调速	(176)
7.6.1 改变电枢电压 U 调速	(176)
7.6.2 改变电枢回路串接附加电阻 R_{ad} 调速	(177)
7.6.3 改变主磁通 Φ 调速	(178)
7.7 他励直流电动机的制动	(178)
7.7.1 能耗制动	(179)
7.7.2 反接制动	(180)

7.7.3 回馈制动	(183)
习题及思考题	(185)

第八章 交流电机

8.1 三相异步电动机的构造	(188)
8.2 三相异步电动机的工作原理	(190)
8.2.1 旋转磁场	(190)
8.2.2 三相异步电动机转子转动的原理	(192)
8.2.3 转差率	(193)
8.3 三相异步电动机的电路分析	(193)
8.3.1 定子电路	(194)
8.3.2 转子电路	(194)
8.4 三相异步电动机的转矩与机械特性	(196)
8.5 三相异步电动机的启动	(199)
8.5.1 启动性能	(199)
8.5.2 启动方法	(200)
8.6 三相异步电动机的调速	(204)
8.6.1 变频调速	(204)
8.6.2 变极调速	(205)
8.6.3 变转差率调速	(205)
8.7 三相异步电动机的制动	(205)
8.7.1 能耗制动	(206)
8.7.2 反接制动	(206)
8.7.3 发电反馈制动	(206)
8.8 三相异步电动机的铭牌数据	(207)
8.9 三相异步电动机的选择	(211)
8.9.1 功率的选择	(211)
8.9.2 种类和型式的选择	(213)
8.9.3 电压和转速的选择	(213)
8.10 同步电动机	(214)
8.11 单相异步电动机	(215)
8.11.1 电容分相式异步电动机	(215)
8.11.2 罩极式异步电动机	(216)
习题及思考题	(217)

第九章 控制电机

9.1 伺服电动机	(219)
9.1.1 交流伺服电动机	(219)
9.1.2 直流伺服电动机	(222)
9.2 力矩电动机	(224)
9.3 测速发电机	(225)
9.3.1 直流测速发电机	(226)
9.3.2 交流测速发电机	(227)
9.4 自整角机	(229)
9.4.1 结构特点	(230)
9.4.2 控制式自整角机	(230)
9.4.3 力矩式自整角机	(233)
9.5 直线电动机	(234)
9.5.1 直线异步电动机的结构	(234)
9.5.2 直线异步电动机的工作原理	(235)
9.5.3 直线电动机的特点及应用	(236)
9.6 步进电动机	(236)
9.6.1 典型结构和工作原理	(237)
9.6.2 基本特点	(239)
习题及思考题	(241)

第十章 电器与可编程序控制器

10.1 低压电器控制系统	(243)
10.1.1 常用低压电器	(243)
10.1.2 电器控制线路中常用的基本线路	(255)
10.1.3 电器控制线路应用实例分析	(258)
10.2 可编程序控制器 (OMRON C 系列)	(266)
10.2.1 PLC 的基本结构和工作方式	(266)
10.2.2 PLC 数据存储器的分配	(272)
10.2.3 PLC 的指令系统	(274)
10.2.4 PLC 的应用	(281)
10.2.5 PLC 控制系统的开发步骤	(290)
习题及思考题	(296)

第十一章 直流调速系统

11.1	直流调速系统的共性	(298)
11.1.1	直流调速的组成及分类	(299)
11.1.2	直流调速系统的技术指标	(300)
11.2	晶闸管整流直流调速系统	(303)
11.2.1	单闭环直流调速系统	(303)
11.2.2	转速、电流双闭环直流调速系统	(311)
11.2.3	可逆直流调速系统	(314)
11.3	PWM 直流调速系统	(318)
11.3.1	PWM 直流调速系统的组成	(318)
11.3.2	PWM 直流调速系统的静动态分析及其主要特点	(323)
11.4	数字化直流调速系统	(325)
11.4.1	数字化直流调速系统的主要优点及特点	(325)
11.4.2	数字化直流调速系统的组成	(326)
11.4.3	数字化可逆直流调速系统	(327)
	习题及思考题	(328)

第十二章 交流调速系统

12.1	交—直—交变频调速系统	(330)
12.1.1	交—直—交电压型变频调速系统	(330)
12.1.2	交—直—交电流型变频调速系统	(334)
12.2	PWM 变频调速系统	(337)
12.3	交—交变频调速系统	(341)
12.4	矢量控制系统	(343)
12.4.1	矢量控制的基本概念	(343)
12.4.2	矢量控制方程及磁链观测模型	(350)
12.4.3	矢量控制变频调速系统	(352)
习题及思考题		(352)

第十三章 发配电技术

13.1 发配电原理	(354)
13.1.1 电力系统概述	(354)

13.1.2 电力系统中的基本元件·····	(358)
13.1.3 发电厂和变电所的分类·····	(362)
13.1.4 电气主接线图·····	(363)
13.2 继电保护 ·····	(369)
13.2.1 继电保护概述·····	(369)
13.2.2 计算机继电保护·····	(374)
13.3 电站实例 ·····	(376)
13.3.1 大型电厂的接线实例·····	(376)
13.3.2 中、小型电厂接线实例·····	(378)
习题及思考题 ·····	(379)

第十四章 教学实验

实验一 直流斩波电路计算机仿真 ·····	(380)
实验二 直流斩波与 IGBT 驱动、保护电路测试 ·····	(381)
实验三 三相异步电机的继电接触控制 ·····	(384)
实验四 可编程序控制器实验 ·····	(386)
参考文献 ·····	(388)

第一章 绪 论

1.1 课程内涵

电力电子与电气传动课程从字面上看似乎分成两大块，即电力电子技术部分和电气传动部分，但依据美国 W. Newell 在 1974 年对电力电子学的描述，电力电子学是由电力学（电机）、电子学（电路和器件）和控制理论三个学科交叉而形成的。“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角度来称呼的。因此从上述意义而言，无需分得那么清楚，电气传动只不过是电力电子技术的应用而已。

电力电子技术是从电子技术派生出的一门应用技术，它涉及两大内容，即功率电子器件和如何利用这些器件实现对“电力”的变换和控制（变流技术），其所变换的“电力”，功率可以大到几百兆瓦甚至吉瓦，也可以小到几瓦甚至瓦级以下。电力有交流和直流两种，如市电就是交流的，通常为 380V 和 220V；蓄电池或电瓶提供的电是直流的。各种不同的用电对象的用电要求也存在差异。如直流电机不能直接接入交流 380V 或 220V，电信程控交换机的用电规范是 DC 48V；即便是当交流电机有调速要求时，也不是直接接入交流电网，而需要中间环节如变频器；许多武器装备都是靠自身配置的专用电站来供电的。因此电力变换可分成四类：交流变直流（AC/DC）即通常所说的整流，直流变直流（DC/DC）即通常所说的斩波，直流变交流（DC/AC）即通常所说的逆变，交流变交流（AC/AC）即通常所说的交流循环。

电气传动的核心内容就是电机控制，包括电机时序控制和连续控制。时序控制是指基于常规低压电器或可编程控制器（PLC）所实现的控制；连续控制是指基于电力变换和控制理论（连续、离散）所实现的电机控制。

电力电子装置广泛应用于高压直流输电、静止无功补偿、电解、电加热、高性能交直流电源等电气工程中。电气化机车、交直流传动如数控机床、炮塔随动系统等本身就是典型的电气工程对象，其核心就是电力电子与电机控制。因此本课程属于电气工程学科，而且是电气工程最活跃的分支，它推动了电气工程学科的不断发

展。尽管电力电子技术“年龄”较轻，它诞生于 20 世纪后半叶，但经过这段短暂时间的发展，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。如果将计算机比作人的大脑，那么电力电子技术比作人的消化系统和循环系统。

1.2 发展概况

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,电力电子器件的发展推动着电力电子技术的发展。

1947年,贝尔实验室发明了晶体管,引发了电子技术的一场革命,半导体硅二极管开始应用于电力领域,直接催化了电力电子技术的产生。1956年,美国贝尔实验室发明了晶闸管,1957年美国通用电气公司生产出第一只晶闸管,1958年晶闸管商业化,其优越的电气和控制性能开辟了电力电子技术迅速发展的崭新时代。水银整流器和旋转变流机组很快被晶闸管取代,其应用范围也迅速扩大。

在后面的章节我们将会知道,晶闸管尽管有较优越的性能,但它只是半可控器件,即只能控制其导通,其关断只能随交流电源的过零自然完成,因此限制了电力电子技术的应用。相位控制方式通常用于整流电路。

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。它们的开和关状态可任意控制,与之相适应的控制方式为PWM(脉宽调制)控制,这种控制方式为计算机和数字技术在电力电子技术领域的应用提供了很好的途径,进一步促进了电力电子技术的快速发展,而且这些器件的工作速度(通常称为开关频率)普遍高于晶闸管,电力电子技术进入一个新的发展阶段,但是它们仍然不能同时满足大容量和较高频率的实际需求。

80年代后期,人们利用复合工艺将各具优势的器件复合在一起,推出了一系列性能更加优越的器件,如IGBT、IGCT、MCT等。IGBT(绝缘栅双极晶体管)是MOSFET和BJT的复合体,它结合了MOSFET驱动功率小、开关速度高的优点和BJT通态压降小、载流能力大的优点。其应用占据了电力电子器件的主导地位;IGCT(集成门极换流晶闸管)和MCT(MOS控制晶闸管)都是MOSFET和GTO的复合体。ETO(emitter turn off thyristor,发射极关断晶闸管)可看成是GTO的改良版,也是MOSFET和GTO的复合体,它是美国乔治那技术学院电力电子系统中心研制的,目前出品的型号为ETO4060,其额定容量可达6kV/4kA,是世界上容量最大的MOS控制型电力电子器件,它不仅秉承了GTO的大功率特性,也改善了其开关能力和控制特性。

20世纪末,国际电力电子学界普遍认为,电力电子集成技术成为阻碍电力电子技术发展的障碍,同时也成为拓展电力电子技术发展最有希望的出路,即所谓“成也萧何,败也萧何”。

电力电子集成的概念已有近20年的历史了。早期的思路是单片集成,体现了片内系统的概念,即将主电路、驱动、保护和控制电路等全部制造在同一硅片上。但实践证明,由于高压、大电流的主电路元件和低压、小电流电路元件的制造工艺差别较大,加上高压隔离和传热的问题,单片集成思想很难得到普遍应用。1977年前后,美国政府、军方及电力电子技术领域一些著名专家共同提出了电力电子积木(power electronic building block, PEBB)的概念,明确了电力电子技术集成化的方向。现在广泛使用的功率模