



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划

Fundamentals of Power Electronics
(Second Edition)

电力电子技术基础 (第2版)

洪乃刚 编著
Hong Naigang

陈 坚 主审
Chen Jian



清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国



全国高等学校自动化专业系列教材
教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会牵头规划

Fundamentals of Power Electronics
(Second Edition)

电力电子技术基础
(第2版)

洪乃刚 编著
Hong Naigang

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书按《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会“以教学创新为指导思想,以教材带动教学改革”的要求编写,以典型器件为基础,以电路为重点,以分析为手段,以典型应用为归宿,介绍电力电子技术基础知识和应用。

《电力电子技术基础》第2版共分10章,前6章为基本内容,在导论中以开关交流的概念归纳了电力电子电路的拓扑共性,然后分别介绍电力电子器件和AC/DC、DC/DC、DC/AC、AC/AC四种基本变换。后4章介绍了PWM整流,软开关,开关电源,谐波分析与抑制,功率因数补偿等新技术。本书在电路分析中使用了仿真,介绍了在MATLAB平台上建立电力电子电路模型,通过模型仿真学习和分析电力电子电路的方法。

本书可作为高等学校自动化专业、电气工程及其自动化等电类专业的本科教材,也可供研究生和工程技术人员参考。本书提供PPT课件和仿真模型,需要者可在清华大学出版社网页下载。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术基础/洪乃刚编著.--2版.--北京:清华大学出版社,2015

全国高等学校自动化专业系列教材

ISBN 978-7-302-40580-1

I. ①电… II. ①洪… III. ①电力电子技术—高等学校—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第138774号

责任编辑:王一玲

封面设计:傅瑞学

责任校对:时翠兰

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:175mm×245mm 印 张:21 字 数:419千字

版 次:2008年1月第1版 2015年8月第2版 印 次:2015年8月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00元

产品编号:064862-01

出版说明

《全国高等学校自动化专业系列教材》

为适应我国对高等学校自动化专业人才培养的需要,配合各高校教学改革的进程,创建一套符合自动化专业培养目标和教学改革要求的新型自动化专业系列教材,“教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会”(简称“教指委”)联合了“中国自动化学会教育工作委员会”、“中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会”、“中国系统仿真学会教育工作委员会”和“中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科委员会”四个委员会,以教学创新为指导思想,以教材带动教学改革为方针,设立专项资助基金,采用全国公开招标方式,组织编写出版了一套自动化专业系列教材——《全国高等学校自动化专业系列教材》。

本系列教材主要面向本科生,同时兼顾研究生;覆盖面包括专业基础课、专业核心课、专业选修课、实践环节课和专业综合训练课;重点突出自动化专业基础理论和前沿技术;以文字教材为主,适当包括多媒体教材;以主教材为主,适当包括习题集、实验指导书、教师参考书、多媒体课件、网络课程脚本等辅助教材;力求做到符合自动化专业培养目标、反映自动化专业教育改革方向、满足自动化专业教学需要;努力创造使之成为具有先进性、创新性、适用性和系统性的特色品牌教材。

本系列教材在“教指委”的领导下,从2004年起,通过招标机制,计划用3~4年时间出版50本左右教材,2006年开始陆续出版问世。为满足多层面、多类型的教学需求,同类教材可能出版多种版本。

本系列教材的主要读者群是自动化专业及相关专业的大学生和研究生,以及相关领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望本系列教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者和工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的参考资料。感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并欢迎提出批评和意见。

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

2005年10月于北京

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会

顾问(按姓氏笔画):

王行愚(华东理工大学)	冯纯伯(东南大学)
孙优贤(浙江大学)	吴启迪(同济大学)
张嗣瀛(东北大学)	陈伯时(上海大学)
陈翰馥(中国科学院)	郑大钟(清华大学)
郑南宁(西安交通大学)	韩崇昭(西安交通大学)

主任委员: 吴澄(清华大学)

副主任委员: 赵光宙(浙江大学) 萧德云(清华大学)

委员(按姓氏笔画):

王雄(清华大学)	方华京(华中科技大学)
史震(哈尔滨工程大学)	田作华(上海交通大学)
卢京潮(西北工业大学)	孙鹤旭(河北工业大学)
刘建昌(东北大学)	吴刚(中国科技大学)
吴成东(沈阳建筑工程学院)	吴爱国(天津大学)
陈庆伟(南京理工大学)	陈兴林(哈尔滨工业大学)
郑志强(国防科技大学)	赵曜(四川大学)
段其昌(重庆大学)	程鹏(北京航空航天大学)
谢克明(太原理工大学)	韩九强(西安交通大学)
褚健(浙江大学)	蔡鸿程(清华大学出版社)
廖晓钟(北京理工大学)	戴先中(东南大学)

工作小组(组长): 萧德云(清华大学)

(成员): 陈伯时(上海大学) 郑大钟(清华大学)
田作华(上海交通大学) 赵光宙(浙江大学)
韩九强(西安交通大学) 陈兴林(哈尔滨工业大学)
陈庆伟(南京理工大学)

(助理): 郭晓华(清华大学)

责任编辑: 王一玲(清华大学出版社)

自动化学科有着光荣的历史和重要的地位,20世纪50年代我国政府就十分重视自动化学科的发展和自动化专业人才的培养。五十多年来,自动化科学技术在众多领域发挥了重大作用,如航空、航天等,“两弹一星”的重大工程就包含了许多自动化科学技术的成果。自动化科学技术也改变了我国工业整体的面貌,不论是石油化工、电力、钢铁,还是轻工、建材、医药等领域都要用到自动化手段,在国防工业中自动化的作用更是巨大的。现在,世界上有很多非常活跃的领域都离不开自动化技术,比如机器人、月球车等。另外,自动化学科对一些交叉学科的发展同样起到了积极的促进作用,例如网络控制、量子控制、流媒体控制、生物信息学、系统生物学等学科就是在系统论、控制论、信息论的影响下得到不断的发展。在整个世界已经进入信息时代的背景下,中国要完成工业化的任务还很重,或者说我们正处在后工业化的阶段。因此,国家提出走新型工业化的道路和“信息化带动工业化,工业化促进信息化”的科学发展观,这对自动化科学技术的发展是一个前所未有的战略机遇。

机遇难得,人才更难得。要发展自动化学科,人才是基础、是关键。高等学校是人才培养的基地,或者说人才培养是高等学校的根本。作为高等学校的领导和教师始终要把人才培养放在第一位,具体对自动化系或自动化学院的领导和教师来说,要时刻想着为国家关键行业和战线培养和输送优秀的自动化技术人才。

影响人才培养的因素很多,涉及教学改革方方面面,包括如何拓宽专业口径、优化教学计划、增强教学柔性、强化通识教育、提高知识起点、降低专业重心、加强基础知识、强调专业实践等,其中构建融会贯通、紧密配合、有机联系的课程体系,编写有利于促进学生个性发展、培养学生创新能力的教材尤为重要。清华大学吴澄院士领导的《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会,根据自动化学科对自动化技术人才素质与能力的需求,充分吸取国外自动化教材的优势与特点,在全国范围内,以招标方式,组织编写了这套自动化专业系列教材,这对推动高等学校自动化专业发展与人才培养具有重要的意义。这套系列教材的建设有新思路、新机制,适应了高等学校教学改革与发展的新形势,立足创建精品教材,重视实践性环节在人才培养中的作用,采用了竞争机制,以

激励和推动教材建设。在此,我谨向参与本系列教材规划、组织、编写的老师致以诚挚的感谢,并希望该系列教材在全国高等学校自动化专业人才培养中发挥应有的作用。

吴恪迪 教授

2005年10月于教育部

《全国高等学校自动化专业系列教材》编审委员会在对国内外部分大学有关自动化专业的教材做深入调研的基础上,广泛听取了各方面的意见,以招标方式,组织编写了一套面向全国本科生(兼顾研究生)、体现自动化专业教材整体规划和课程体系、强调专业基础和理论联系实际的系列教材,自2006年起将陆续面世。全套系列教材共50多本,涵盖了自动化学科的主要知识领域,大部分教材都配置了包括电子教案、多媒体课件、习题辅导、课程实验指导书等立体化教材配件。此外,为强调落实“加强实践教学,培养创新人才”的教学改革思想,还特别规划了一组专业实验教程,包括《自动控制原理实验教程》、《运动控制实验教程》、《过程控制实验教程》、《检测技术实验教程》和《计算机控制系统实验教程》等。

自动化科学技术是一门应用性很强的学科,面对的是各种各样错综复杂的系统,控制对象可能是确定性的,也可能是随机性的;控制方法可能是常规控制,也可能需要优化控制。这样的学科专业人才应该具有什么样的知识结构,又应该如何通过专业教材来体现,这正是“系列教材编审委员会”规划系列教材时所面临的问题。为此,设立了《自动化专业课程体系结构研究》专项研究课题,成立了由清华大学萧德云教授负责,包括清华大学、上海交通大学、西安交通大学和东北大学等多所院校参与的联合研究小组,对自动化专业课程体系结构进行深入的研究,提出了按“控制理论与工程、控制系统与技术、系统理论与工程、信息处理与分析、计算机与网络、软件基础与工程、专业课程实验”等知识板块构建的课程体系结构。以此为基础,组织规划了一套涵盖几十门自动化专业基础课程和专业课程的系列教材。从基础理论到控制技术,从系统理论到工程实践,从计算机技术到信号处理,从设计分析到课程实验,涉及的知识单元多达数百个、知识点几千个,介入的学校50多所,参与的教授120多人,是一项庞大的系统工程。从编制招标要求、公布招标公告,到组织投标和评审,最后商定教材大纲,凝聚着全国百余名教授的心血,为的是编写出版一套具有一定规模、富有特色的、既考虑研究型大学又考虑应用型大学的自动化专业创新型系列教材。

然而,如何进一步构建完善的自动化专业教材体系结构?如何建设

基础知识与最新知识有机融合的教材? 如何充分利用现代技术, 适应现代大学生的接受习惯, 改变教材单一形态, 建设数字化、电子化、网络化等多元形态、开放性的“广义教材”? 等等, 这些都还有待我们进行更深入的研究。

本套系列教材的出版, 对更新自动化专业的知识体系、改善教学条件、创造个性化的教学环境, 一定会起到积极的作用。但是由于受各方面条件所限, 本套教材从整体结构到每本书的知识组成都可能存在一些不当甚至谬误之处, 还望使用本套教材的广大教师、学生及各界人士不吝批评指正。

吴炯 院士

2005年10月于清华大学



《电力电子技术基础》自 2008 年出版以来已经历时 7 年,经许多学校使用,主要反馈意见是:(1)内容较多,难于在 48~64 学时内讲完。(2)希望对电力电子新技术和新应用,如新能源、电压空间矢量控制、PWM 整流器等有较多的介绍。(3)许多读者对电力电子仿真技术感兴趣,要求更多地介绍这方面内容。编者认为电力电子作为电源变换和控制技术,应用广泛,技术发展很快,但是电力电子技术是自动化专业的一门技术基础课,在有限的学时内要完成这些任务是非常困难的,尤其电力电子电路的控制与具体的应用密切相关,这些应用分布在后续专业课程中,在电力电子技术课程中过多介绍将造成内容的重复,并且还不易讲清楚。一般,电力电子电路相对其控制而言,电路的变化较小,控制的手段和方法随微机技术发展日新月异。电力电子技术课程的重心在于基本变换电路,掌握这些变换的原理,应用新的控制技术,电力电子技术将有更大更广阔的创新空间。

《电力电子技术基础》第 2 版吸取读者的建议,重点对第 3 章整流器,第 5 章逆变器进行了改写,增加了第 7 章 PWM 整流器和功率因数控制。第 1 版将 PWM 整流归入第 3 章,但 PWM 控制主要在第 5 章逆变器中介绍,在第 3 章中讲 PWM 整流有困难。现在 PWM 整流器是新能源光伏发电和风力发电,电网动态无功补偿的重要技术,因此将 PWM 整流器单列一章,第 3 章以晶闸管整流器为主。现在使用晶闸管模拟触发电路已经较少,数字化触发是潮流所趋,并且触发软件已经模块化,因此第 2 版晶闸管触发以介绍触发和同步原理为主,使该章的篇幅进一步有所压缩。第 5 章逆变器主要改写了电压空间矢量控制,从三相磁场介绍空间电压矢量比较复杂,第 2 版改从正弦量的数学表示方法引入电压空间矢量,进而介绍逆变器开关状态与电压空间矢量的关系和控制,以便学生易于理解。

电力电子仿真是读者比较关心的内容,仿真对学习和研究都有很大帮助,本书第 1 版使用的电力电子模型是 Version2 版本,第 2 版已采用 Version3,可以在 MATLAB7.1 以上的新版本上运行。本书的仿真仅是部分电力电子电路的仿真举例,有更多需要的读者可参考笔者所著《电力电子、电机控制系统建模和仿真》和《电力电子电机控制系统仿真技

术》两书。

从教学出发,电力电子器件,交流-直流变换,直流-直流变换,直流-交流变换,交流-交流变换是本课程重点,建议教学以本书前6章为重点,后4章根据专业方向和学时适当选讲。本书提供PPT课件和书中仿真举例的模型,需要者可在清华大学出版社网页下载。

本书在编写过程中参考了许多专家学者的教材和著作,对他们在电力电子技术方面的贡献,编者由衷地表示敬佩和感谢,也感谢众多读者对本书的建议,感谢清华大学出版社王一玲编辑对本书出版的指导和帮助。

作者

2015年4月



教育部高等学校自动化专业教学指导分委员会联合四个自动化教育学会,以教学创新为指导思想,以教材带动教学改革,组织编写《全国高等学校自动化专业系列教材》。本书按编审委员会对《电力电子技术》提出的要求编写,这些要求可概括为:要体现系列教材的“先进性、创新性、适用性”。以典型器件为基础,以电路为重点,以分析为手段,以典型应用为归宿,要求涵盖效率与节能,软开关,谐波分析与抑制,功率因数与校正,开关电源,电能质量控制与管理,以及电力电子电路的仿真等内容。

电力电子技术是一门研究电能变换和控制的科学,它和现代计算机技术结合并同步发展,极大地丰富了自动化的内涵和意义。电力电子技术列入自动化专业教学计划仅有 30 余年历史,教学内容已从单一的可控硅整流到现在的四大变换及其广泛的应用,变化之大、发展之快、应用之广,新技术和知识点多是该课程的特点。电力电子技术定位为自动化专业的技术基础课,在有限的学时内要全面掌握电力电子技术的基础和新技术是困难的,现在许多学校在该课后还开设了现代电力电子、新电源等选修课程,因此本书以基本变换为重心,以软开关、组合电路等新技术为拓展,定名本书为《电力电子技术基础》。

本书按 48 学时要求编写,共分 9 章。为解决内容与学时之间的矛盾,《电力电子技术基础》将教学内容分为主讲和选讲两部分,以前 6 章(器件、AC/DC、DC/DC、DC/AC、AC/AC 四种主要变换)为主讲内容,后 3 章为选讲内容,前 6 章中带“*”的章节也可以选讲,如此安排使教学有一定的弹性,以满足不同教学要求和对象的需要。

电力电子电路属于开关电路,具有开关非线性的特征。研究电力电子电路常采用波形分析和分段处理的方法,除这些方法外,本书还引入了仿真。仿真是现代电子电路研究分析和设计的重要手段,仿真不需要物质的仪器设备,在电脑上进行电路的分析和研究,本教材在每章后都有仿真举例。教材主要使用 MATLAB 软件, MATLAB 的功能较强,在控制理论课程中已经经常使用,对后续课程电力拖动自动控制系统和电力系统等 MATLAB 也是很好的仿真软件,采用 MATLAB 有利于课程间的衔接。根据我们的实践,在课程中引入仿真后,调动了学生的学习兴趣,尤其是为他们的新想法和新设计提供了一个检验的平台,对学生的创新教

育和能力培养可起很好的作用。我们也将仿真应用到课程设计中,用仿真检验设计,取得了较好的效果。仿真宜以上机为主,建议讲授中以一二次演示,重点在介绍仿真的步骤和方法,其他以学生上机自学教师指导为主。

电力电子技术有很强的应用性,在教学中常有电路多、复杂难学的反映,为此本教材在导论中安排了“开关变流的概念”一节,以一个开关到 $m \times n$ 个开关的电路归纳了各种变流电路在拓扑结构上的共性,介绍了开关电路整流和逆变,调压和变频的基本原理,相控和斩控的概念,为后面电路的学习作先导。除此之外,本书在编写中还考虑了如下几点:

1. 从应用的角度介绍电力电子器件。以常用的晶闸管、MOSFET、IGBT 为主,对器件的结构和原理以及新型器件仅作简要介绍,着重于器件的外特性和驱动控制。

2. 突出全控型器件电路,紧缩半控型和不控型器件电路内容。因为晶闸管整流器应用很广泛,第3章仍以晶闸管电路为主,但增加了 PWM 整流,其他各章都以全控器件为主。

3. 谐波和功率因数是绿色、环保用电的重要指标,谐波治理和功率因数提高与电力电子技术密切相关,因此将谐波和功率因数单列一章,对谐波和功率因数的定义,危害和治理作了较系统的介绍,供选学。

4. 增加开关电源和电子镇流器等电力电子新应用。开关电源作为一种新型电源,在仪器仪表,新能源,新光源中大量应用,开关电源和电子镇流器是基本变流电路的级联,因此综合在第8章变流电路的组合中介绍。将变流电路的串并联和级联组合为一章,目的是引导学生开拓视野和思路,运用变流技术开发变流电路的新应用。

5. 每章后都有小结和习题,习题除练习和思考题外,增加了部分实践和仿真题,并提出了网络检索的要求,希望引导学生要善于观察周围环境,将学习的变流技术知识与日常生活、生产联系起来,通过上网获取更多的积极有益的知识。

全书由洪乃刚编写,华中科技大学陈坚教授主审,陈坚教授以严谨的治学态度,对本书提出了许多重要的建议和修改意见。安徽工业大学黄松清副教授审阅了本书的前5章,郑诗程副教授审阅了后4章,研究生董德智、丁文鹏、徐杰、汤代斌为本书作了部分仿真和资料工作,编者对他们的指导和帮助表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,重点参考了王兆安、黄俊主编《电力电子技术》,陈坚编著《电力电子学》,林渭勋著《现代电力电子电路》等著作,在出版过程中得到陈伯时教授,萧德云教授,清华大学出版社王一玲主任等的关心和支持,在此谨表感谢。

关于本书中仿真电路的模型可登录安徽工业大学主页的精品课程网站下载, www.ahut.edu.cn/精品课程/电力电子技术。对本书存在的漏误和不到之处,敬请各位读者批评指正,联系邮箱 hongnaigang@ahut.edu.cn。

作者

2007年4月15日于安徽工业大学

第 1 章 导论	1
1.1 电力电子技术的发展史	1
1.2 开关变流的概念	2
1.2.1 基本开关变流电路	3
1.2.2 开关变流电路的开关模式	7
1.2.3 开关变流器的开关器件	11
1.3 电力电子技术的应用	12
1.4 学习方法	16
1.5 电力电子电路的仿真	16
1.5.1 MATLAB/Simulink 仿真平台	17
1.5.2 仿真的数值算法	21
1.5.3 示波器(Scope)的使用和数据保存	22
1.5.4 Simulink 模块库	24
小结	25
思考题	26
实践题	26
第 2 章 电力电子器件	27
2.1 电力二极管	28
2.2 晶闸管类器件	30
2.2.1 晶闸管	30
2.2.2 双向晶闸管	34
2.2.3 门极可关断晶闸管 GTO	35
2.2.4 其他晶闸管类器件	36
2.3 全控型电力电子器件	37
2.3.1 电力晶体管 GTR	38
2.3.2 电力场效应晶体管	38
2.3.3 绝缘栅双极型晶体管 IGBT	41
2.3.4 其他新型全控型器件和模块	43

2.4	电力电子器件的驱动和保护	44
2.4.1	电力电子器件的驱动	44
2.4.2	电力电子器件的保护	46
2.4.3	电力电子器件的串并联	49
2.5	MATLAB 的电力电子器件模型	49
2.5.1	电力电子器件模型和参数	50
2.5.2	桥式电路模块	51
2.5.3	驱动单元	53
	小结	55
	练习和思考题	55
	实践题	56
第3章	交流-直流变换——整流器	57
3.1	单相可控整流电路	58
3.1.1	单相半波可控整流电路	58
3.1.2	单相桥式全控整流电路	63
3.1.3	单相桥式半控整流电路	69
3.1.4	单相全波可控整流电路	72
3.2	三相可控整流电路	73
3.2.1	三相半波可控整流电路	73
3.2.2	三相桥式可控整流电路	78
3.3	不控整流电路和电容性负载	84
3.3.1	带电容滤波的单相不控整流电路	84
3.3.2	带电容滤波的三相不控整流电路	86
3.4	整流电路反电动势负载	89
3.4.1	$R-E$ 负载	89
3.4.2	$R-L-E$ 负载	90
3.4.3	直流电动机负载时的工作特性	92
*3.5	全控整流电路的有源逆变工作状态	96
3.5.1	逆变和有源逆变	96
3.5.2	全控整流电路的有源逆变状态	97
3.5.3	换相重叠角和最小逆变角限制 β_{\min}	99
3.5.4	有源逆变的应用	101
3.6	晶闸管整流电路触发控制	105
3.7	整流电路的仿真	107
	小结	113

练习和思考题	113
实践和仿真题	115
第 4 章 直流-直流变换——直流斩波器	116
4.1 直流降压斩波电路	116
4.2 直流升压斩波电路	118
4.3 直流升降压斩波电路	121
4.3.1 Buck-Boost 降压-升压斩波电路	121
4.3.2 Cuk 斩波电路	122
4.4 桥式直流斩波调压电路	123
4.4.1 半桥式电流可逆斩波电路	124
4.4.2 全桥式可逆斩波电路	125
4.5 斩波电路的驱动控制	130
4.6 直流斩波电路的仿真	131
4.6.1 直流降压斩波器仿真	131
4.6.2 直流升压斩波器仿真	133
小结	134
练习和思考题	134
仿真题	134
第 5 章 直流-交流变换——逆变器	135
5.1 逆变电路分类和调制方式	135
5.2 单相电压型逆变器	136
5.2.1 电压型单相半桥式逆变器	136
5.2.2 电压型单相全桥式逆变器	138
5.2.3 单相电压型全桥式逆变器的 SPWM 控制	139
5.2.4 SPWM 调制方式和数字化生成	143
5.3 单相电流型逆变器	145
5.3.1 晶闸管单相电流型逆变器	145
5.3.2 电流跟踪型逆变器	146
5.4 三相电压型 PWM 逆变器	148
5.4.1 电压型三相 SPWM 逆变器	148
*5.4.2 其他电压型三相逆变器的 PWM 控制	150
*5.5 电压空间矢量控制逆变器 SVPWM	154
5.5.1 电压空间矢量	154
5.5.2 逆变器开关状态与空间电压矢量轨迹	155

5.5.3	零矢量作用	157
5.5.4	圆形电压空间矢量轨迹偏差控制	158
5.5.5	正多边形 SVPWM 控制	158
*5.6	多电平逆变器	162
5.6.1	三电平的形成	162
5.6.2	三相三电平逆变器的电压空间矢量	163
5.7	三相电流型逆变器	165
5.7.1	方波型三相电流源型逆变器	165
5.7.2	无换向器电动机调速系统	167
5.7.3	电流滞环控制三相逆变器	169
5.8	逆变电路的仿真	169
	小结	173
	练习和思考题	174
	仿真题	174
第6章	交流-交流变换——交流调压和交-交变频器	175
6.1	交流无触点双向开关	175
6.2	单相交流调压原理	176
6.2.1	相控式单相交流调压	176
6.2.2	斩控式单相交流调压	179
6.3	三相交流调压电路	181
6.3.1	三相相控式交流调压	181
6.3.2	三相斩控式交流调压	184
6.4	其他交流调功电路及其应用	185
6.5	交-交变频器	186
6.5.1	单相交-交变频原理	187
6.5.2	交-交变频的调制方式	187
6.5.3	交-交变频器的工作特性	189
6.5.4	三相交-交变频电路	191
*6.6	矩阵式变频器	193
6.7	交流调压电路的仿真	194
	小结	197
	练习和思考题	198
	实践和仿真题	198
第7章	PWM 整流器和功率因数控制	199
7.1	单相桥式不控整流器的单位功率因数校正(APFC)	199