

谐波抑制 和无功功率补偿

王兆安 刘进军 王跃 杨君 等编著

第3版

电气自动化新技术丛书



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电气自动化新技术丛书

谐波抑制和无功功率补偿

第3版

王兆安 刘进军 王 跃 编著
杨 君 何英杰 雷万钧



机械工业出版社

抑制谐波和提高功率因数是涉及电力电子技术、电气自动化技术和电力系统的一个重大课题。随着电力电子技术的不断进步,新型有源谐波抑制技术和无功功率补偿技术得到了迅速的发展。本书主要介绍有源电力滤波器、混合型电力滤波器、静止无功补偿装置、静止无功发生器等谐波抑制和无功补偿新技术。对有关谐波和无功率的基础理论、电力电子装置的功率因数和谐波分析以及传统无功功率补偿和滤波方法也做了必要的介绍。本书叙述力求简洁,强调物理概念,注重理论联系实际。

第3版主要增加了基于时域变换的谐波和无功电流检测方法、并联注入式混合型电力滤波器以及基于多电平变流器的无功功率补偿和有源电力滤波装置等内容,也对其他主要章节进行了数据(实例)更新和文字修订。

本书可作为电力电子技术、电气自动化技术及电力系统领域的工程技术人员和研究人员的参考书,也可供上述专业范围的教师和研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

谐波抑制和无功功率补偿/王兆安等编著. —3版. —北京:机械工业出版社,2015.7

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 978-7-111-50651-5

I. ①谐… II. ①王… III. ①电力系统-谐波-研究②电力系统-无功功率-功率补偿-研究 IV. ①TM714

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第142086号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:罗莉 责任编辑:罗莉

责任校对:陈延翔 封面设计:陈沛

责任印制:李洋

中国农业出版社印刷厂印刷

2016年1月第3版第1次印刷

169mm×239mm·30.25印张·607千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-50651-5

定价:59.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

第6届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

- 主任:** 王永骥
- 副主任:** 牛新国 赵光宙 孙跃 阮毅
何湘宁 霍永进 韩芙华
- 顾问委员:** 王炎 孙流芳 陈伯时 陈敏逊
彭鸿才 尹力明
- 委员:** (按姓氏笔画为序)
- | | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 王永骥 | 王旭 | 王志良 | 牛新国 |
| 许宏纲 | 孙跃 | 刘国海 | 李永东 |
| 李崇坚 | 阮毅 | 陈息坤 | 汪镭 |
| 沈安文 | 张兴 | 张浩 | 张华强 |
| 张承慧 | 张彦斌 | 何湘宁 | 赵光宙 |
| 赵杰 | 赵争鸣 | 赵荣祥 | 查晓明 |
| 徐殿国 | 常越 | 韩芙华 | 霍永进 |
| 戴先中 | | | |
- 秘书:** 王欢 林春泉

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展，对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合，特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天，电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问，电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术，中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会，负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色：

一、本丛书是专题论著，选题内容新颖，反映电气自动化新技术的成就和应用经验，适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际，重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者，也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，难免存在不少问题和缺点，希望广大读者给予支持和帮助，并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》
编辑委员会

第6届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来，在中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会学会领导和广大作者的支持下，在前5届编辑委员会的努力下，至今已发行丛书53种55多万册，受到广大读者的欢迎，对促进我国电气自动化新技术的发展和传播起到了巨大作用。

许多读者来信，表示这套丛书对他们的工作帮助很大，希望我们再接再厉，不断地推出介绍我国电气自动化新技术的丛书。本届编委决定选择一些大家所关心的新选题，继续组织编写出版，欢迎从事电气自动化研究的学者就新选题积极投稿；同时对受读者欢迎的已经出版的丛书，我们将组织作者进行修订再版，以满足广大读者的需要。为了更加方便读者阅读，我们将对今后新出版的丛书进行改版，扩大了开本。

我们诚恳地希望广大读者来函，提出您的宝贵意见和建议，以使本丛书编写得更好。

在本丛书的出版过程中，得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位提供的出版基金支持，在此我们对这些单位再次表示感谢。

第6届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会

2011年10月19日

第3版前言

《谐波抑制与无功功率补偿》这本书的第1版和第2版分别于1998年9月和2006年1月出版。该书面世以来，一直受到同行和读者的欢迎、好评和广泛引用。据2014年底中国期刊网的统计数据，该书在中文期刊论文中被同行的引用次数已超过了5000次。近年来该书已印刷了2版12次，累计印数达到27600册。作为一部专业性很强、适用面并不太宽的专著，这已经是很好的发行业绩，这反映了本书在同行和读者中有相当的需求，在学术上有重要的参考价值。

另一方面，本书第2版出版至今已近10年。这10年来，国内外相关领域的研究和技术应用发展迅速，采用先进的电力电子变流器进行谐波抑制和无功功率补偿的技术已逐渐步入成熟阶段，在工程实际中的应用越来越广，当然也带来了一些新的具有挑战性的问题。本书作者所在的研究团队——西安交通大学电力电子与新能源技术研究中心，在这10年中仍然继续坚持了以谐波抑制和无功功率补偿为主的电能质量控制技术的研究，先后又承担了国家自然科学基金、国家科技支撑计划、台达电力电子科教发展计划以及国内外企业相关研发计划等资助的多项科研课题，特别是承担了国家科技支撑计划“十一五”重点项目课题“电能质量复合控制技术及其装置”的研究任务，近年来又取得了一批新的研究成果。

为了满足同行和读者的需求，集中反映近10年来国内外谐波抑制和无功功率补偿领域的最新研究成果和应用发展情况，特别是总结整理本书作者所在科研课题组近年来在相关领域的主要研究结果，有必要在本书第2版的基础上进行相应的更新与修订。这样，本书第3版才在机械工业出版社的鼓励和支持下得以面世。

第3版大体保留了前两版的整体结构和章节框架，但在内容上做了相当的增减，大部分章节也做了全面的数据（实例）更新和文字修订。全书仍为9章，由刘进军统稿。第1章和第5章由刘进军进行了修订，何英杰为其中的5.4节提供了重要参考资料和个人意见。第6章和第8章由王跃和雷万钧进行了修订。其中，第2版第6章原有的全部内容在新版中作为6.1节出现，并命名为“基于瞬时无功功率理论的谐波和无功电流检测方法”；新增加了近年发展起来的基于时域变换的谐波和无功电流检测方法，作为6.2节，由雷万钧撰写；第2版7.3节有关基于傅里叶分析的检测方法和采用人工神经网络的检测方法在新版中调整到第6章，作为6.3节；这样，新版的第6章命名为“谐波和无功电流的检测方法”就显得更为妥

当。而第 8 章新增加了近年来获得了深入研究的并联注入式混合型电力滤波器的有关内容，作为 8.2.4 节，也由雷万钧撰写。第 2 版第 9 章是有关高功率因数变流器的内容。高功率因数变流技术在过去 20 年中取得了长足发展，其内容之丰富已远远不是 1998 年本书初次面世时可以只用一章的篇幅来简要概括其研究结果的状况。为了使重点更加突出而不致篇幅冗长，第 3 版删掉了有关高功率因数变流器的内容，而增加了基于多电平变流器的无功补偿和有源电力滤波装置的有关内容，作为新的第 9 章，由何英杰撰写。这是近年来迅速发展的技术，适用于高压大功率应用场合，特别在我国的研究和应用获得了很大的进步，在新版中加以介绍是非常必要的。

本书第 3 版增补和修订的内容大多是作者所在的研究团队近 10 年来在有关领域的文献总结工作和研究工作的结晶，作者谨向团队的教师、研究生和工作人员表示衷心的感谢。本书第 3 版的编写和出版也得到了机械工业出版社电工电子分社社长牛新国编审和孙流芳编审的悉心指导和大力支持，作者也在此向他们致以诚挚的谢意。

作者

第2版前言

1998年9月《谐波抑制和无功功率补偿》一书问世以来,受到了同行读者的欢迎和好评。科技期刊论文对该书的引用次数已经超过300次。几年来,该书已印刷了4次,累积印数达到1万册。作为一部专业性很强、适用面并不太宽的专著,这个发行业绩还是很好的。

《谐波抑制和无功功率补偿》一书出版6年多来,对谐波抑制和无功补偿技术的研究逐渐形成了热潮,社会对这一技术需求的呼声也越来越高。以本书作者为主的课题组在该书出版后,持续地进行着谐波抑制和无功补偿技术的研究,除完成了国家自然科学基金重点项目“复杂供用电系统谐波基础理论及其综合防治研究”(编号为59737140)外,还培养了数名博士和一批硕士,相继取得了一些新的研究成果。

近年来,人们对无源滤波技术的缺点认识越来越清楚,有源滤波技术虽然已被不少用户所认识并接受,但其发展速度不如预想的那样快。而由无源电力滤波器和有源电力滤波器组成的混合电力滤波器却因此而受到了人们的青睐并且得到了很大的发展。所以,有必要将这部分新的内容补充到书中。本书第2版增加了第8章“混合型电力滤波器”,在第7章添加了“有源电力滤波器的谐波电流检测方法”,“串并联型有源电力滤波器”两小节,对其他小节进行了补充和修改,并去掉了有关混合电力滤波器的内容,原第8章“高功率因数变流器”相应地变为第9章。此外,对原书的第5章也进行了必要的修改和补充,其他各章内容变化不大。本书新增的第8章由王跃博士撰写,其他各章作者未变。

西安交通大学卓放教授、肖国春副教授为本书部分内容提供了参考资料,在此表示谢意。

本书第2版的编写和出版,是在机械工业出版社电工电子分社社长牛新国编审和孙流芳编审的指导和支持下完成的。没有他们的鞭策和鼓励,本书第2版的编写任务是不可能完成的。在此,谨对他们致以深切的感谢。

本书的许多研究工作还得到了台达电力电子科教发展基金的资助,谨致衷心的感谢。

作者

第 1 版前言

近年来，随着全球工业化进程的不断加快，对地球环境的污染和破坏也空前加剧。为此，在全世界范围内掀起了环境保护的热潮。电力系统也是一种“环境”，也面临着污染，公用电网中的谐波电流和谐波电压就是对电网环境最严重的一种污染。

电力电子装置是公用电网中最主要的谐波源，随着电力电子装置的应用日益广泛，电网中的谐波污染也日趋严重。另外，大多数电力电子装置功率因数很低，也给电网带来额外负担，并影响供电质量。因此，抑制谐波和提高功率因数已成为电力电子技术、电气自动化技术及电力系统研究领域所面临的一个重大课题，正在受到越来越多的关注。

设置无功补偿电容器和 LC 滤波器是传统的补偿无功功率和谐波的主要手段，已获得了广泛的应用。有关这方面已有较多的著作进行了详细的论述。但这种无源补偿装置的补偿性能较差，难以对变化的无功功率和谐波进行有效的补偿。晶闸管获得广泛应用后，以晶闸管控制电抗器（TCR）为代表的静止无功补偿装置（SVC）有了长足的发展，可以对变化的无功功率进行动态补偿。近年来，随着以 GTO 晶闸管、BJT 和 IGBT 为代表的全控型器件向大容量化、高频化方向的不断发展，采用电力电子技术的各种有源补偿装置发展很快。主要用于补偿无功功率的静止无功发生器（SVG）比起 TCR 有更为优越的性能。主要用于补偿谐波的有源电力滤波器的研究十分活跃，这种滤波器比 LC 滤波器有更优越的补偿性能，技术上已经成熟，在国外已有许多工业应用实例。

另一种抑制谐波和提高功率因数的方法是开发新型高功率因数整流器。这种整流器除具有负载所要求的性能外，不产生谐波，且具有很高的功率因数。

有关 SVG、有源电力滤波器和高功率因数整流器等有源谐波和无功补偿装置，近年已有大量论文发表，与之相关的理论，如瞬时无功功率理论也取得了突破性的成就，但目前尚未见到有关专著问世。十余年来，作者在这一领域进行了许多研究工作，曾承担了多项国家自然科学基金项目（编号为 59077308、59477020、69072915）及国家攻关项目，1998 年又承担了国家自然科学基金重点项目“复杂供用电系统谐波基础理论及其综合防治研究”（编号为 59737140）。在参阅大量文献的基础上，作者结合多年的研究成果写成本书，以期对我国公用电网的谐波抑制

和无功补偿做出贡献。同时，本书也是上述国家自然科学基金重点项目研究工作的一部分。

本书除上述内容外，还包括谐波和无功补偿的基础理论、电力电子装置的功率因数和谐波分析等内容。对无功补偿电容器和 LC 滤波器也进行了简要的论述。

本书由王兆安、杨君和刘进军合作撰写。王兆安拟订了本书的大纲并编写了第 1、2 和 8 章，杨君编写了第 4、6 和 7 章，刘进军编写了第 3 和 5 章。全书由王兆安统稿。西安交通大学葛文运教授对本书进行了仔细的审阅，提出了许多宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中得到了本丛书编委副主任委员、天津电气传动设计研究所喻士林教授级高级工程师的鼎力支持和指导，东南大学戴先中教授审阅了本书大纲并提出中肯的修改建议，作者深表谢意。

博士研究生董晓鹏和杨旭为本书部分内容提供了参考资料，部分插图由硕士研究生吴东、高军、胡军飞和王建军绘制，刘晓娟工程师完成了本书的部分计算机录入工作，在此表示谢意。

另外，本书能顺利出版，有赖于电气自动化新技术丛书编委会和机械工业出版社的支持和帮助，在此致以深切的感谢。

本书的许多研究工作都是在国家自然科学基金委员会的资助下完成的，谨致衷心的感谢。

作者
于西安交通大学

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言	
第6届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话	
第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	
第1章 绪论	1
1.1 谐波问题及研究现状	1
1.2 谐波抑制	3
1.3 无功补偿	5
1.4 本书内容概述	7
第2章 谐波和无功功率	9
2.1 谐波和谐波分析	9
2.1.1 谐波的基本概念	9
2.1.2 谐波分析	11
2.1.3 公用电网谐波电压和谐波电流限值	13
2.2 无功功率和功率因数	16
2.2.1 正弦电路的无功功率和功率因数	16
2.2.2 非正弦电路的无功功率和功率因数	17
2.2.3 无功功率的时域分析	19
2.2.4 三相电路的功率因数	20
2.2.5 无功功率的物理意义	20
2.2.6 无功功率理论的研究及进展	22
2.3 谐波和无功功率的产生	23
2.4 无功功率的影响和谐波的危害	29
2.4.1 无功功率的影响	29
2.4.2 谐波的危害	30
2.4.3 谐波引起的谐振和谐波电流放大	30
2.4.4 谐波对电网的影响	33
2.4.5 谐波对旋转电机和变压器的危害	33
2.4.6 谐波对继电保护和电力测量的影响	35
2.4.7 谐波对通信系统的干扰	36
第3章 电力电子装置的功率因数和谐波分析	39

3.1	阻感负载整流电路的功率因数和谐波分析	39
3.1.1	忽略换相过程和直流侧电流脉动时的情况	40
3.1.2	计及换相过程但忽略直流侧电流脉动时的情况	49
3.1.3	计及直流侧电流脉动时的情况	55
3.1.4	阻感负载整流电路的非特征谐波	60
3.2	整流电路带滤波电容时的功率因数和谐波分析	63
3.2.1	电容滤波型桥式整流电路的功率因数和谐波分析	64
3.2.2	感容滤波型桥式整流电路的功率因数和谐波分析	71
3.3	交流调压电路的功率因数和谐波分析	76
3.3.1	移相控制单相交流调压电路的功率因数和谐波分析	77
3.3.2	移相控制三相交流调压电路的功率因数和谐波分析	83
3.3.3	通断控制交流调压电路的功率因数和谐波分析	92
3.4	周波变流电路的功率因数和谐波分析	95
3.4.1	用开关函数法对输入电流进行谐波分析	96
3.4.2	输入电流中的谐波频率和谐波含量	99
3.4.3	输入电流中的基波分量和输入端功率因数	102
第4章	无功补偿电容器和 LC 滤波器	106
4.1	无功补偿电容器	106
4.1.1	并联电容器补偿无功功率的原理	106
4.1.2	并联电容器补偿无功功率的方式	107
4.1.3	并联电容器补偿容量的计算	108
4.1.4	并联电容器的放电回路和自动投切	109
4.1.5	并联电容器和谐波的相互影响	111
4.2	LC 滤波器	113
4.2.1	LC 滤波器的结构和基本原理	114
4.2.2	LC 滤波器的设计准则	116
4.2.3	单调谐滤波器的设计	119
4.2.4	高通滤波器的设计	124
第5章	静止无功补偿装置	126
5.1	无功功率动态补偿的原理	127
5.2	晶闸管控制电抗器 (TCR)	132
5.2.1	基本原理	132
5.2.2	主要联结方式和配置类型	133
5.2.3	控制系统	135
5.2.4	动态性能和动态过程分析	140
5.3	晶闸管投切电容器 (TSC)	141
5.3.1	基本原理	141
5.3.2	投入时刻的选取	142

5.3.3	控制系统	144
5.3.4	动态过程分析	145
5.4	采用全控型器件的静止无功发生器 (SVG)	146
5.4.1	基本原理	147
5.4.2	控制方法	150
5.4.3	应用实例	156
5.4.4	发展趋势	162
第6章	谐波和无功电流的检测方法	168
6.1	基于瞬时无功功率理论的谐波和无功电流检测方法	168
6.1.1	三相电路瞬时无功功率理论	168
6.1.2	基于瞬时无功功率理论的谐波和无功电流的实时检测	173
6.1.3	瞬时无功功率理论的其他应用	192
6.2	基于时域变换的谐波与无功电流检测方法	196
6.2.1	基于时域变换的电流检测算法的基本原理	196
6.2.2	在三相四线制系统中的电流检测方法	200
6.2.3	在单相系统中的电流检测方法	201
6.2.4	电流检测中低通滤波器设计	202
6.2.5	仿真及实验研究	203
6.3	其他谐波和无功电流检测方法	211
6.3.1	基于傅里叶分析的电流检测方法	211
6.3.2	采用人工神经网络的电流检测方法	213
第7章	有源电力滤波器	216
7.1	有源电力滤波器的基本原理	216
7.2	有源电力滤波器的系统构成和主电路形式	217
7.2.1	单独使用的有源电力滤波器的系统构成	218
7.2.2	有源电力滤波器的主电路形式	220
7.3	并联型有源电力滤波器	223
7.3.1	指令电流运算电路	224
7.3.2	电流跟踪控制电路	226
7.3.3	主电路设计	229
7.3.4	直流侧电压的控制	233
7.3.5	并联型有源电力滤波器的控制方式	236
7.3.6	并联型有源电力滤波器的稳定性分析	241
7.4	串联型有源电力滤波器	244
7.4.1	串联型有源电力滤波器的结构和基本原理	244
7.4.2	检测负载谐波电压控制方式	246
7.4.3	复合控制方式	252
7.4.4	串联型和并联型有源电力滤波器的简要对比	258

7.5	串并联型有源电力滤波器	259
7.5.1	UPQC 的结构和基本工作原理	259
7.5.2	UPQC 的补偿电压和电流指令生成方法	261
7.5.3	UPQC 的补偿结果	261
第 8 章	混合型电力滤波器	267
8.1	混合型电力滤波器的系统构成	267
8.1.1	并联混合型电力滤波器的系统构成	267
8.1.2	串联混合型电力滤波器的系统构成	271
8.2	并联混合型电力滤波器	272
8.2.1	直流并联混合型电力滤波器	272
8.2.2	APF 与 PF 串联后与电网并联的交流混合型电力滤波器	277
8.2.3	一种新型交流并联混合型电力滤波器	281
8.2.4	并联注入式混合型电力滤波器	297
8.3	串联混合型电力滤波器	314
8.3.1	串联混合型电力滤波器的系统构成及工作原理	314
8.3.2	有源装置的容量估算	316
8.3.3	串联混合型电力滤波器的控制方法	319
8.3.4	串联混合型电力滤波器的补偿特性	320
第 9 章	基于多电平变流器的无功补偿和有源电力滤波装置	328
9.1	多电平无功补偿和有源电力滤波器拓扑结构	329
9.2	串联 H 桥静止无功发生器	333
9.2.1	工作原理和数字模型	334
9.2.2	直流侧电压控制方法	371
9.2.3	实验结果及分析	387
9.3	混合型串联 H 桥多电平有源电力滤波器	395
9.3.1	高低压模块直流侧电压及门槛电压选取原则	396
9.3.2	直流侧电压均衡控制	400
9.3.3	实验结果及分析	412
9.4	中点钳位型三电平有源电力滤波器	417
9.4.1	工作原理和数学模型	418
9.4.2	SVPWM 工作原理	420
9.4.3	中点电位分析	425
9.4.4	直流母线电压控制	440
9.4.5	实验结果及分析	448
参考文献	452

第1章 绪 论

谐波抑制和无功功率补偿（以下简称无功补偿）是涉及电力电子技术、电力系统、电气自动化技术、理论电工等领域的重大课题。由于电力电子装置的应用日益广泛，使得谐波和无功问题引起人们越来越多的关注。同时，也由于电力电子技术的飞速进步，在谐波抑制和无功补偿方面也取得了一些突破性的进展。本章首先介绍谐波及无功问题的研究历史和现状，并扼要叙述谐波抑制和无功补偿的主要手段，然后介绍编写本书的基本指导思想和各章主要内容。

1.1 谐波问题及研究现状

“谐波”一词起源于声学。有关谐波的数学分析在 18 世纪和 19 世纪已经奠定了良好的基础。傅里叶等人提出的谐波分析方法至今仍被广泛应用。

电力系统的谐波问题早在 20 世纪 20 年代和 30 年代就引起了人们的注意。当时在德国，由于使用静止汞弧变流器而造成了电压、电流波形的畸变。1945 年 J. C. Read 发表的有关变流器谐波的论文是早期有关谐波研究的经典论文^[1]。

到了 20 世纪 50 年代和 60 年代，由于高压直流输电技术的发展，发表了有关变流器引起电力系统谐波问题的大量论文。E. W. Kimbark 在其著作中对此进行了总结^[2]。70 年代以来，由于电力电子技术的飞速发展，各种电力电子装置在电力系统、工业、交通及家庭中的应用日益广泛，谐波所造成的危害也日趋严重，因而世界各国都对谐波问题予以充分的关注。国际上召开了多次有关谐波问题的学术会议，不少国家和国际学术组织都制定了限制电力系统谐波和用电设备谐波的标准和规定。

我国对谐波问题的研究起步较晚。吴竞昌等人 1988 年出版的《电力系统谐波》一书是我国有关谐波问题较有影响的著作^[3]。夏道止等 1994 年出版的《高压直流输电系统的谐波分析与滤波》是有关电力系统谐波分析的代表性著作^[4]。此外，唐统一等人和容健纲等人分别独立翻译了 J. Arrillaga 等的《电力系统谐波》一书^[5,6]，也在国内有较大的影响。

谐波研究具有重要的意义，首先是因为谐波的危害十分严重。谐波使电能的生产、传输和利用的效率降低，使电气设备过热、产生振动和噪声，并使绝缘老化，使用寿命缩短，甚至发生故障或烧毁。谐波可引起电力系统局部并联谐振或串联谐振，使谐波含量放大，造成电容器等设备烧毁。谐波还会引起继电保护和自动装置误动作，使电能计量出现混乱。对于电力系统外部，谐波对通信设备和电子设备会

产生严重干扰。

谐波研究的意义，还在于其对电力电子技术自身发展的影响。电力电子技术是未来科学技术发展的重要支柱。有人预言，电力电子连同运动控制将和计算机技术一起成为 21 世纪最重要的两大技术^[7]。然而，电力电子装置所产生的谐波污染是阻碍电力电子技术应用的主要障碍之一，它迫使电力电子领域的研究人员必须对谐波问题进行更为有效的研究。

谐波研究的意义，更可以上升到治理环境污染、维护绿色环境的层面来认识。对电力系统这个环境来说，无谐波就是“绿色”的主要标志之一^[8,9]。在电力电子技术领域，要求实施“绿色电力电子”的呼声也日益高涨。目前，对地球环境的保护已成为全人类的共识。对电力系统谐波污染的治理也已成为电工科学技术界所必须解决的问题。

有关谐波问题的研究可以划分为以下四个方面：

- 1) 与谐波有关的功率定义和功率理论的研究；
- 2) 谐波分析以及谐波影响和危害的分析；
- 3) 谐波的补偿和抑制；
- 4) 与谐波有关的测量问题和限制谐波标准的研究。

当电压或电流中含有谐波时，如何定义各种功率是一个至今尚未得到圆满解决的问题。如何使定义科学严谨，又能满足各种工程和管理需要，还有许多问题需要研究。本书将不在这一问题上展开讨论，但在 2.2 节中将对研究现状作简要介绍，在 6.1.1 节中将介绍对谐波补偿有很大实用价值的瞬时无功功率理论。

谐波分析包括谐波源分析和电力系统谐波分析。在电力电子装置普及以前，变压器是主要的谐波源。目前变压器谐波已退居次要的地位，各种电力电子装置成为最主要的谐波源。在电力电子装置的谐波分析中，对电容滤波整流电路等的研究还不充分。在本书第 3 章中，将对各种电力电子电路进行谐波分析。

电力系统的谐波分析是以电力系统为对象，当系统中有一个或多个谐波源时，就要计算和分析系统中各处的谐波电压和谐波电流的分布情况。高压直流输电工程的建立及静止无功补偿装置（Static Var Compensator, SVC）的应用有力地推动了这方面研究工作的进展，我国学者夏道止在这一领域的研究在国际上产生了广泛的影响^[4,10-13]。其研究的主要特点是把交直流电力系统一直作为一个整体统一求解，使得分析结果更为准确。目前这一领域还有一些问题有待进一步研究解决^[4,14,15]，例如，当系统的谐波源为时变或同时存在多个谐波源时，如何进行建模和分析；如何计算或估计负载及系统的等效谐波阻抗；如何对待背景谐波等。有关电力系统谐波分析的问题已超出了本书的讨论范围，有兴趣的读者可参阅参考文献 [3, 4] 和有关论文。

在谐波危害及影响的分析方面有关文献已很多^[3-5,16]，但随着谐波源种类和