

WILEY

智能电网 关键技术研究与应用丛书

智能电网的 电力系统信号处理

Power Systems Signal
Processing for Smart Grids

[荷兰] 保罗·费尔南多·里贝罗 (Paulo Fernando Ribeiro)

[巴西] 卡洛斯·奥古斯托·杜凯 (Carlos Augusto Duque)

[巴西] 保罗·马尔西奥·达西尔韦拉 (Paulo Márcio da Silveira)

[巴西] 奥古斯托·圣地亚哥·塞奎拉 (Augusto Santiago Cerqueira)

著

孟永庆 等译

非
外
借



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

智能电网关键技术研究与应用丛书

智能电网的电力系统信号处理

[荷兰] 保罗·费尔南多·里贝罗 (Paulo Fernando Ribeiro)

[巴西] 卡洛斯·奥古斯托·杜凯 (Carlos Augusto Duque)

[巴西] 保罗·马尔西奥·达西尔韦拉 (Paulo Márcio da Silveira)

[巴西] 奥古斯托·圣地亚哥·塞奎拉 (Augusto Santiago Cerqueira)

著

孟永庆 等译



机械工业出版社

本书主要介绍了信号处理技术在电力系统中的应用,并在智能电网环境中扩展了它的应用。全书分为以下3个部分:首先,描述了未来智能电网背景下,不同的电力系统应用中使用信号处理的目的,提供了电力系统事件和现象的综合清单,介绍了信号采集实现过程及其产生的问题;其次,介绍了用于信号处理的数学理论和基本概念以及相应算法,包括离散变换、数字信号处理方法、时变方法、估计算法等;最后,本书从频域和时域两方面介绍信号处理技术在未来智能电网中的基本应用过程,包括参数分析、信号分解、模式识别、信号检测,并针对电力系统中时变谐波和不对称、不平衡问题,给出了具体的应用实例。

本书适合从事智能电网和信号处理技术研究的科研工作人员或企业研发人员阅读,也可以作为电气信息工程类及相关专业的高年级本科生、研究生和教师的参考用书。

Copyright © 2014 John Wiley and Sons Ltd

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from English language edition, entitled Power Systems Signal Processing for Smart Grids, ISBN: 978-1-119-99150-2, by Paulo Fernando Ribeiro, Carlos Augusto Duque, Paulo Márcio da Silveira and Augusto Santiago Cerqueira, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2014-2536 号。

图书在版编目(CIP)数据

智能电网的电力系统信号处理/(荷) 保罗·费尔南多·里贝罗等著;孟永庆等译. —北京:机械工业出版社,2018.9

(智能电网关键技术研究与应用丛书)

书名原文:Power Systems Signal Processing for Smart Grids

ISBN 978-7-111-60696-3

I. ①智… II. ①保…②孟… III. ①智能控制-电力系统-信号处理
IV. ①TM71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 189813 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:顾谦 责任编辑:顾谦

责任校对:郑婕 封面设计:鞠杨

责任印制:孙炜

北京玥实印刷有限公司印刷

2018 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·23.25 印张·465 千字

0 001—2 500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-60696-3

定价:129.00 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

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

随着信息科学和计算机技术的迅猛发展,信号处理技术的理论和方法也得到了飞速发展,其应用已经涉及包括电力工业在内的许多工程领域。智能电网作为未来电力系统的理想解决方案,受到了越来越多人的关注。在我国建设坚强智能电网的大背景下,信号处理技术在电力系统中的应用必将会越来越广泛。

本书主要讨论了信号处理技术的原理、方法及其在电力系统中的应用。全书共分为13章:第1章对智能电网背景下信号处理技术在电力系统中的应用做了一个概括;第2章介绍了电力系统中的信号及其处理的原理;第3章对互感器进行了详细讲解;第4章介绍了电力系统信号处理的分析和合成中必不可少的离散变换;第5章涵盖了电力系统信号处理过程的基本技术;第6章介绍了多速率和采样频率变化的系统;第7章给出了一些实际应用的算法;第8章介绍了频谱分析、参数和非参数频谱估计的基本概念;第9章介绍了在电力系统中应用的基于滤波器组和小波变换的时间—频率分解统一方法;第10章介绍了模式识别;第11章介绍了基于贝叶斯方法的检测理论的基本内容,并讨论了高斯白噪声的确定性信号检测;第12章讨论了小波分析的应用,确定了在生成和加载剖面上的波动模式;第13章介绍了基于SW-DFT的时变分解方法的应用实例。

全书共有13章,其中文前、第1章和第2章由西安交通大学的孟永庆翻译,第3章和第4章由西北政法大学外国语学院俞婷翻译,第5~13章由西安交通大学的硕士生刘勃、白森戈、尚朔南、李慧璇、任玮、刘洪雪、高欣和李斯佳翻译,韩露、尹翠娴、方国华、于建洋、潘茜茜和李凯凯也参与了部分内容的翻译工作。全书由孟永庆统稿。

由于时间仓促加之经验不足,书中译文难免存在不妥之处,请读者谅解,并提出宝贵意见与建议。

译者

2018年7月10日

原书前言

本书是由那些对电力系统 (PS) 和信号处理 (SP) 有共同兴趣、专业知识和激情的朋友之间的合作而写出来的。一般而言, 它是由应用于电能质量 (PQ) 和电力系统的 SP 项目所演进的结果。

目前, 与应用程序的交叉使用和 SP 对系统性能进行分析和诊断的应用的相关的计算能力快速增长, 并导致了新的方法、理论和模型的空前发展。

作者已经认识到了 SP 更广泛应用的潜力, 特别是在目前智能电网 (SG) 技术运用下的电力系统现代化全面发展。

电网日益复杂, 需要进行密集、全面的信号监测, 然后进行必要的信号处理, 以进行表征、识别、诊断和保护, 以及对某些现象和事件的性质进行更准确的调查。SP 也可以用于预测和预期系统行为。

电气工程 SP 是一种重要的工具, 用于澄清、分离、分解和揭示电力系统操作的复杂物理现实的不同方面和维度, 在这种情况下, 不同的现象通常是复杂的、本质上的聚合而不能简单地解决。

SP 可以通过电气系统的分析性来获得, 它有助于揭示和描述电参数、系统现象和事件的多样性、统一性、意义和内在目的。

随着电网变得越来越复杂, 建模和仿真变得越来越不能够捕捉到电网中众多独立和相互交织的元器件的影响。SP 处理的是实际的系统, 而不是建模抽象或减小影响 (尽管它可能与模拟相关联), 因此, 可以通过多种分析工具来阐明整体的各个方面。因此, SP 允许工程师检测和测量电网的行为和本质。

今天, 绝大多数模拟信号都被转换成数字信号。在电力系统的环境中, 这种转换是由大量的二次智能数字设备完成的, 这些数字设备执行控制、计量、保护、监督或与系统的其他组件进行通信的任务。此外, 这种智能设备的质量也因其执行数字信号处理 (DSP) 的能力而增强。

DSP 用来描述数学、算法和技术, 将信号转换成一个方便的数字形式后, 通过数学、算法和技术对信号进行处理, 以满足各种各样的需求, 如增强的视觉图像、识别和发出声音以及压缩数据以便于存储和传输^[1]。

本书的目的是进一步促进 DSP 在电力系统中的使用, 并在智能电网的环境中扩展它的应用, 介绍、讨论和应用典型和期望的系统条件的各种技术。图 1 给出了在传统和智能电网的电力系统环境中典型的电力系统信号波形的伽马射线样本。

第 1 章描述了在未来智能电网的背景下, 在不同的电力系统应用中使用信号处理的目的, 提供诊断解决方案和相关性所需的各种数字测量和数据分析技术。

第 2 章提供了电力系统事件和现象的综合清单, 包括时变的电压和电流信号, 描述了这些信号的幅值、相位和波形。很明显, 许多信号可以用一个数学表达式来表示 (例如, 直流衰减、故障、波形畸变)。

第 3 章描述了与电压变压器、电流互感器、模拟滤波器和模拟—数字转换器有



关的不同方面。这些元器件是噪声和误差的来源，并施加了速度限制。由于电力系统信号采集系统缺乏信息，本章阐述了在一般信号处理文献中普遍忽略的一些重要要求。

第4章介绍了电力系统信号处理的分析和合成中必不可少的离散变换。本章描述了离散时间傅里叶变换 (DTFT)、离散傅里叶变换 (DFT) 和 z 变换以及连续变换的概要。尽管这些变换在一些教科书中得到了广泛的提及，但是作者的重点是将这些变换在特定的和通用的电力系统中的应用。

第5章涵盖了电力系统信号处理的基本方面。其中包括数字信号运算符 (延时、加法器、乘法器)、数字信号运算 (调制、滤波、相关和卷积)、有限脉冲响应滤波器和无限脉冲响应滤波器。本章将使用几个电力系统应用程序来说明或解释这些概念。

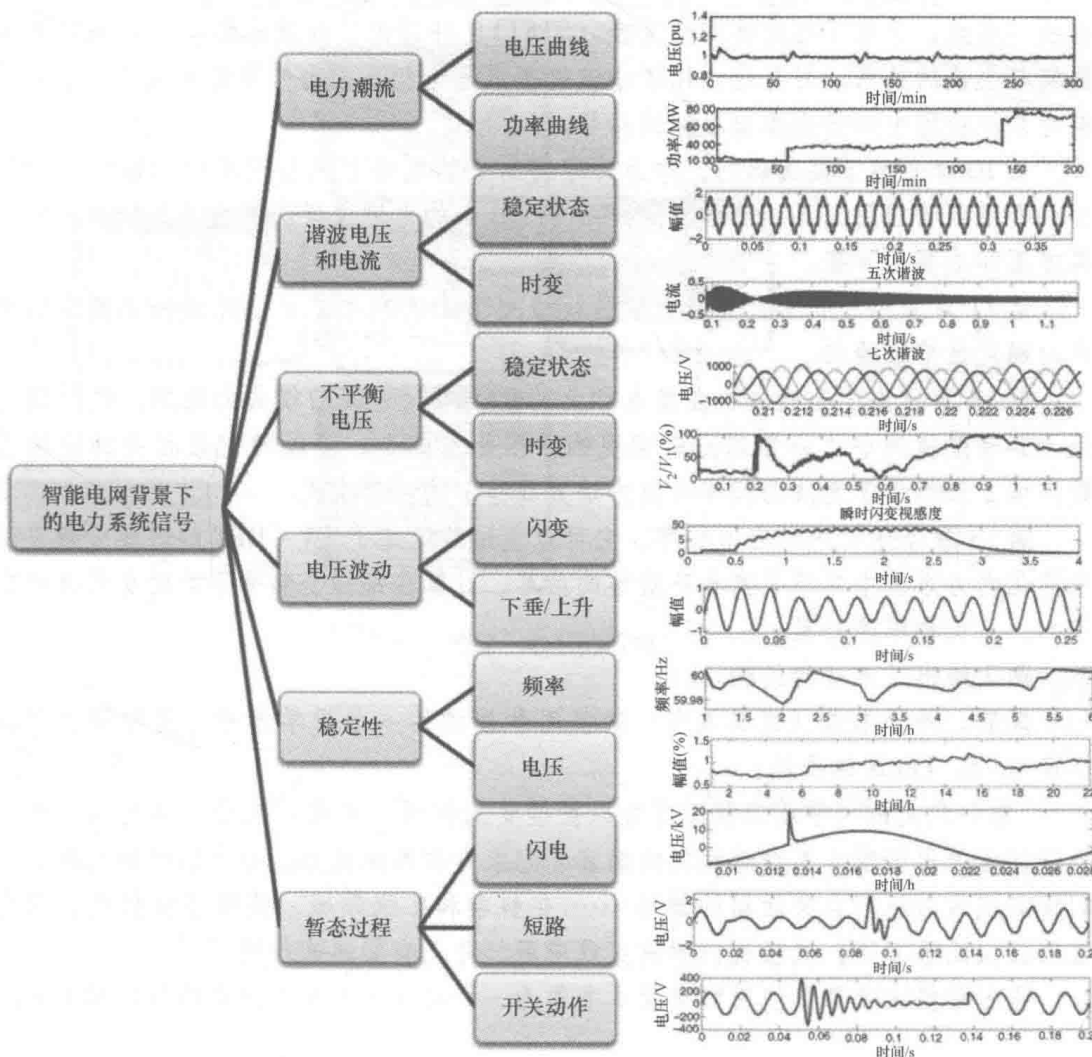


图1 电力系统在智能电网背景下的电力系统信号



第6章介绍了多速率和采样频率变化的方法,这是电力系统中用来改变采样频率或分析信号的一种常见的时变方法。这样的例子就是使用滤波器组或小波变换(滤波器组和小波变换将在第9章中介绍,但在第6章中介绍了实现这些结构的数字原则)。此外,本章还讨论了电力系统应用的离线和实时频率变化。

在第7章中,重点是算法,它能够估计诸如相量、频率、RMS(方均根)、谐波和瞬变(衰减指数)等参数,用于实时和离线应用。本章给出了估计理论的基本概念,包括克拉美罗界(CRLB)、MVU估计量、BLUE和LSE估计量。智能电网环境是一种高复杂性的电信号,需要正确、准确地测量。

第8章涵盖了频谱分析、参数和非参数频谱估计的基本概念,讨论了参数估计中常见的误差,包括混叠、扇形损失和频谱泄漏。在讨论的参数方法中,有Prony、Pisarenko、MUSIC和ESPRIT的方法。

第9章介绍了对电力系统应用基于滤波器组和小波变换进行的时间-频率分解的统一观点,介绍了短时傅里叶变换(STFT),并讨论了滤波器组理论的基本原理及其与小波的关系。另外还介绍了小波的基本理论和相关的信号处理技术,给出了电力系统应用中如何选择母小波的指导。

第10章介绍了模式识别,作为对即将到来的电力智能电网环境的操作和控制的一个重要的启用工具。本章重点介绍了为未来的电网提供必要的工具所需要的主要方面和必要的步骤。

第11章介绍了利用贝叶斯框架进行检测理论的基本方面,并讨论了高斯白噪声的确定性信号检测。

第12章讨论了小波分析在发电和负荷曲线中确定波动模式的应用。这是通过基于其有效值的小波分量滤波来实现的,在此基础上,可以确定最相关的比例因数。该方法揭示了无法用频率分解方法直观显示的波动模式。

第13章描述了一个应用程序,它可以通过使用基于SW-DFT的时变分解方法来简化电力系统中对不平衡和不对称的估算,计算在每一个频率下的时变谐波和它们的正、负和零序分量。

图2给出了本书的结构。

最后,关于本书(或其他书)的使用和接受的一些哲学思考,是改编于英国作家C. S. Lewis的作品:

“诸如此类的科学或工程工作可以被接受或使用。当我们接受它的时候,我们根据作者提出的模式来锻炼我们的感官、想象力和其他能力。当我们使用它时,我们将它视为对我们自身活动的辅助……在科学和工程领域,使用不如接受,因为使用仅仅能够方便,减轻我们的研究或应用,并没有其他的作用。”^[2]

作者希望读者都能使用和接受本书作为一个有价值的发人深省的指南和工具。

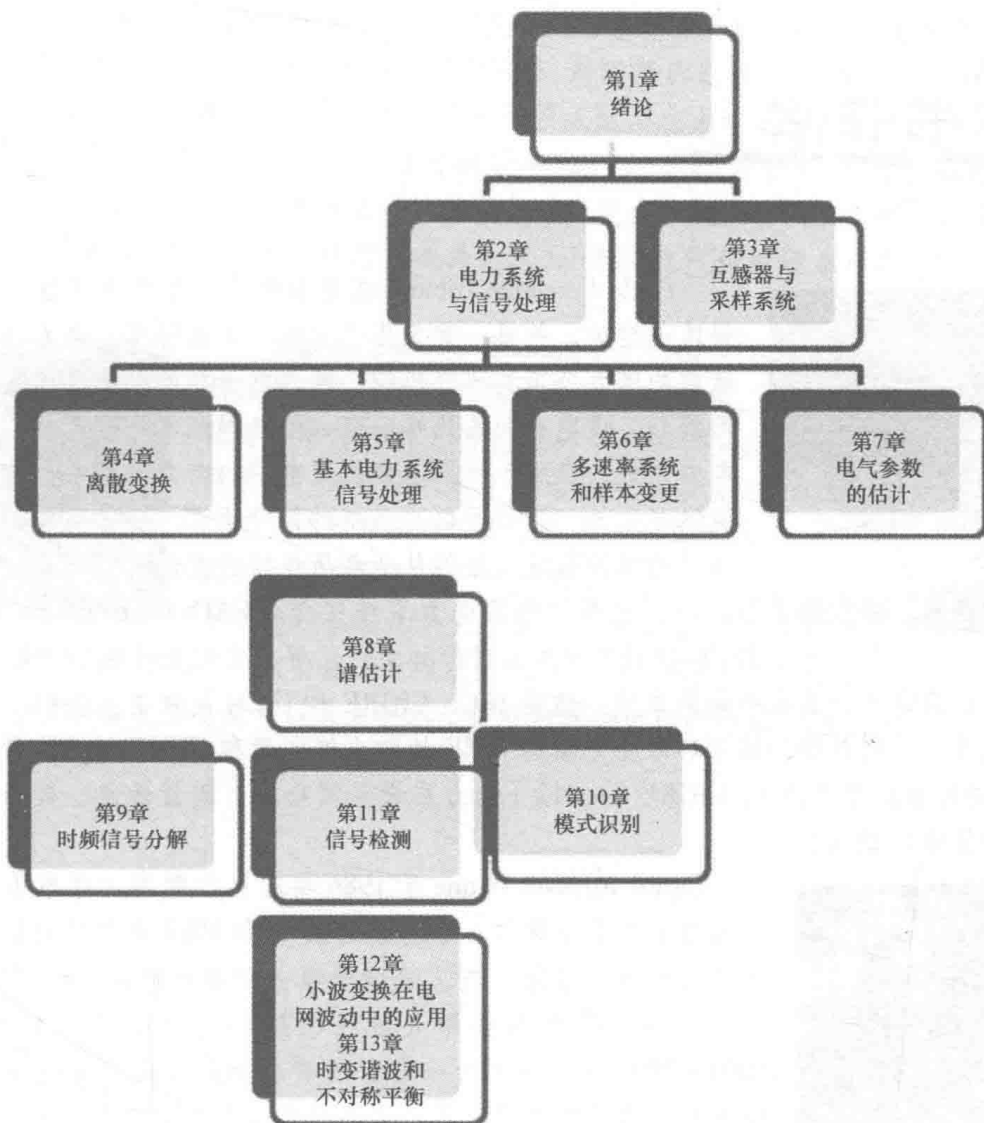


图2 本书的结构

参考文献

1. Smith, S.W. (1997) *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, California Technical Publishing.
2. Lewis, C.S. (1961) *An Experiment in Criticism*, Cambridge University Press.

本书作者



Paulo Fernando Ribeiro 在曼彻斯特大学电气工程专业取得博士学位，并且一直工作于学术、工业管理、电力系统领域内的电力公司和研究机构、电力电子和电力质量工程、电网规划、供电企业的战略研究、输电和配电系统建模、空间电力系统、应用于可再生能源发电中的电力电子学、柔性交流输电系统、应用于电力系统的信号处理、超导磁储能系统和智能电网领域。他的从业经历包括在美国、欧洲和巴西的

大学任教，并在佛罗里达州立大学的高级电力系统中心（CAPS）、EPRI 和 NASA 担任研究职位。他是 IEEE 和 IET 的杰出讲师和会士，并且已经写了超过 200 篇同行评议的论文、技术书籍的章节。他是 IEC、CIGRE 和 IEEE 技术委员会的一名活跃成员，分别是谐波概率和时变方面的 IEEE 特别小组主席和 IEC 77A 工作第 9 组（电能质量测量方法）、CIGRE C4.112（电力质量监测指南：测量地点、数据的处理和显示）的成员。



Carlos Augusto Duque 于 1986 年在巴西联邦大学取得了电气工程专业学士学位，分别于 1990 年和 1997 年在里约热内卢的天主教大学取得电气工程理学硕士和博士学位。自 1989 年起，他一直是巴西联邦大学（UFJF）电子工程系的教授。2007~2008 年，他作为一名访问学者加入了佛罗里达州立大学高级电力系统中心。他的主要研究工作是在电力系统的信号处理领域，包括电力质量协同处理器的开发、时变谐波分析仪

和用于同步估算的信号处理。他目前是应用于电力系统、UFJF 的信号处理研究小组的负责人和巴西国家能源研究所的联合研究员。他已经写了超过 120 篇同行评议的论文和技术书籍的章节，并且是几项专利的作者。



Paulo Márcio da Silveira 于 2001 年在圣卡塔琳娜联邦大学获得电子工程专业的 DSc（理学博士）学位。他拥有电力系统设备、变电所、保护和电能质量问题、电力系统研究的运行和装置的开发以及应用于电力应用程序的电能质量监控算法的工业设计、学术和研究经验。他从事故障识别、故障定位、保护继电器、电能质量和能量计量等方面的传输以及配



电系统建模、监测、测量和信号处理的研究。他曾在电力质量和电力系统保护方面担任顾问，通过巴西电力管理机构（ANEEL）对不同的巴西公用事业进行研究。在 2007 年，Silveira 博士在美国塔拉哈西的佛罗里达州立大学的高级电力系统中心作访问研究员，当时他正在进行实时数据模拟。他是巴西伊塔朱巴联邦大学（UNIFEI）的副教授，他同时也是电力系统保护研究生课程的协调员、智能电网研究中心（CERIn）的电气兼容性的协调员以及 UNIFEI 电气和能源系统研究所的负责人。



Augusto Santiago Cerqueira 于 2002 年在巴西里约热内卢联邦大学获得了电气工程专业的 DSc 学位。2004 年，他在巴西联邦大学（UFJF）开始他的学术和研究活动，目前他是一名副教授。他的学术和研究活动主要涉及电子仪器、数字信号处理、电力系统的计算智能和实验高能物理学。他参与并协调了与电能质量问题相关的研究项目，应用信号处理和计算智能技术来进行电力质量监测和诊断。他是欧洲核子研究中心（欧洲核子研究组织）大型强子对撞机的 UFJF 小组的协调员，该小组负责对实验高能物理仪器、信号处理以及主要用于信号探测和估计的计算智能进行研究。

配合本书的网站

为了配合本书，已经建立了两个网站，这两个网站包含了附加的典型非线性负载波形的 MATLAB® 文件。这些可以通过不同的技术进行信号处理以获得进一步的理解。两种基于 MATLAB® 的时变谐波分解技术也可以在网站上进行波形处理。

请访问 <http://www.ufjf.br/pscope-eng/digital-signal-processing-to-smart-grids/>

密码: dspsgrid

或者 http://www.wiley.com/go/signal_processing

欢迎读者们为信号和 MATLAB® 脚本发送额外的波形，波形将包含在 Paulo Fernando Ribeiro 教授的 pfribeiro@ieee.org 的数据库中。

原书致谢

作者想要感谢博士生 Tulio Carvalho、Mauro Prates、Leandro Manso、Ballar Asare - Bediako、Vladimir-Ćuk 和 Pedro Machado，他们提供了宝贵的支持，并提供了本书中使用的模拟、插图和实验方面的意见、建议和帮助。还要感谢德累斯顿大学的 Jan Meyer 博士对第 3 章的建议和贡献、Jasper Frunt 博士对第 12 章的贡献以及 Tulio Carvalho 和 Totis Karaliolios 对第 13 章的贡献。还要感谢 Adriana S. Ribeiro 夫人对所有章节的校对和有用的编辑建议。

作者特别感谢巴西电力科学与技术研究所 (INERGE) 的赞助，Paulo Ribeiro 教授在本书的编写过程中是访问研究教授。作者也感谢巴西联邦大学、伊塔朱巴联邦大学、荷兰埃因霍温科技大学、CNPq 组织和巴西 FAPEMIG 基金会。

作者们要感谢他们的妻子和家庭在过去几年的支持，几年来他们一直坚持不懈，并且发展、更新和完善了新的理念、思想和实验。

目 录

译者序

原书前言

本书作者

配合本书的网站

原书致谢

第1章 绪论	1
1.1 简介	1
1.2 未来电网	2
1.3 动力和目标	3
1.4 信号处理框架	5
1.5 小结	8
参考文献	9
第2章 电力系统与信号处理	10
2.1 简介	10
2.2 动态过电压	11
2.2.1 持续过电压	11
2.2.2 雷击过电压	12
2.2.3 操作过电压	14
2.2.4 电容器组切换	16
2.3 故障电流与直流分量	19
2.4 电压跌落与电压骤升	23
2.5 电压波动	25
2.6 电压、电流不平衡	26
2.7 谐波与间谐波	27
2.8 电力变压器的励磁涌流	37
2.9 变压器过励	40
2.10 互感器的暂态过程	41
2.10.1 电流互感器饱和（保护措施）	41
2.10.2 电容式电压互感器暂态	46
2.11 铁磁谐振	49



2.12	频率波动	49
2.13	其他现象与对应信号	50
2.14	小结	50
	参考文献	51
第3章	互感器与采样系统	52
3.1	简介	52
3.2	感应式电压互感器	53
3.3	电容式电压互感器	56
3.4	电流互感器	58
3.5	非传统互感器	62
3.5.1	电阻分压型电压互感器	62
3.5.2	光学电压互感器	63
3.5.3	罗氏线圈	63
3.5.4	光学电流互感器	64
3.6	模-数转换处理	66
3.6.1	监测与控制	67
3.6.2	保护	69
3.6.3	电能质量	69
3.7	噪声的数学模型	70
3.8	采样与抗混叠滤波	71
3.9	电力系统工程中的采样频率	73
3.10	智能电网的背景与结论	73
	参考文献	74
第4章	离散变换	75
4.1	简介	75
4.2	用傅里叶级数表示周期信号	75
4.2.1	级数系数的计算	78
4.2.2	指数傅里叶级数	79
4.2.3	指数系数和三角系数的关系	80
4.2.4	电力系统中的谐波	81
4.2.5	傅里叶级数的性质	83
4.3	傅里叶变换	84
4.3.1	简介与实例	84
4.3.2	傅里叶变换的性质	88



4.4	采样定理	89
4.5	离散时间傅里叶变换	92
4.5.1	DTFT 对	93
4.5.2	DTFT 的性质	93
4.6	DFT	95
4.6.1	采样傅里叶变换	98
4.6.2	DFT 定理	99
4.7	递归 DFT	99
4.8	DFT 的滤波解释	102
4.8.1	DFT 滤波器的频率响应	104
4.8.2	非同步采样	105
4.9	z 变换	107
4.9.1	有理 z 变换	109
4.9.2	有理传递函数的稳定性	111
4.9.3	一些常用的 z 变换对	111
4.9.4	z 变换的性质	112
4.10	小结	113
	参考文献	113
第 5 章	基本电力系统信号处理	114
5.1	简介	114
5.2	线性时不变系统	114
5.2.1	LTI 系统的频率响应	117
5.2.2	线性相位 FIR 滤波器	118
5.3	基本数字系统和电力系统应用	120
5.3.1	移动平均系统：应用	120
5.3.2	RMS 估计	121
5.3.3	梯形积分和双线性变换	123
5.3.4	微分滤波器：应用	125
5.3.5	简单微分器	128
5.4	电力系统应用中的参数滤波器	129
5.4.1	滤波器规格	130
5.4.2	一阶低通滤波器	131
5.4.3	一阶高通滤波器	131
5.4.4	带阻 IIR 数字滤波器（陷波滤波器）	131
5.4.5	时域中的总谐波畸变率	135



5.4.6 利用陷波滤波器进行信号分解	136
5.5 参数陷波 FIR 滤波器	137
5.6 用 MATLAB®设计滤波器 (FIR 和 IIR)	138
5.7 正弦和余弦 FIR 滤波器	139
5.8 智能电网的背景与结论	140
参考文献	140
第 6 章 多速率系统和样本变更	141
6.1 简介	141
6.2 采样速率变更的基本模块	141
6.2.1 频域演绎	142
6.2.2 频域中的向上采样器	142
6.2.3 频域中的向下采样器	142
6.3 插入器	144
6.3.1 插入器的输入、输出的关系	145
6.3.2 多速率系统的时变系统和其 Noble 恒等式	145
6.4 抽取滤波器	147
6.4.1 简介	147
6.4.2 抽取滤波器的输入、输出关系	147
6.5 分级采样率的改变	148
6.5.1 使用 MATLAB®重新采样	148
6.6 实时采样率的改变	149
6.6.1 样条插值	150
6.6.2 三次 B 样条插值	152
6.7 小结	155
参考文献	155
第 7 章 电气参数的估计	156
7.1 简介	156
7.2 估计理论	156
7.3 最小二乘估计	158
7.3.1 线性最小二乘法	159
7.4 频率估计	161
7.4.1 基于过零点的频率估计 (IEC 61000-4-30)	161
7.4.2 基于过零点的短期频率估计	164
7.4.3 基于旋转相量的频率估计	166



7.4.4 改变 DFT 窗口大小	168
7.4.5 基于 LSE 的频率估计	170
7.4.6 IIR 陷波滤波器	171
7.4.7 小系数和/或小计算误差	171
7.5 相量估计	172
7.5.1 简介	172
7.5.2 锁相环结构	174
7.5.3 卡尔曼滤波估计	176
7.5.4 使用卡尔曼滤波器来进行相量估计的例子	178
7.6 直流分量存在下的相量估计	179
7.6.1 直流衰减信号的数学模型	180
7.6.2 模拟方法	180
7.6.3 最小二乘估计器	181
7.6.4 改善 DTFT 的估计算法	182
7.7 小结	188
参考文献	188
第8章 谱估计	190
8.1 简介	190
8.2 谱估计	190
8.2.1 对频谱泄漏的理解	191
8.2.2 频域插值: 单频信号	194
8.3 窗函数	198
8.3.1 频域窗	198
8.4 频域插值: 多频信号	202
8.5 间谐波	202
8.5.1 典型间谐波源	205
8.5.2 IEC 61000-4-7 标准	208
8.6 基于 IEC 标准的间谐波检测和估计	211
8.7 频谱估计的参数法	214
8.7.1 Prony 法	214
8.7.2 信号和噪声子空间技术	219
8.8 小结	226
参考文献	226