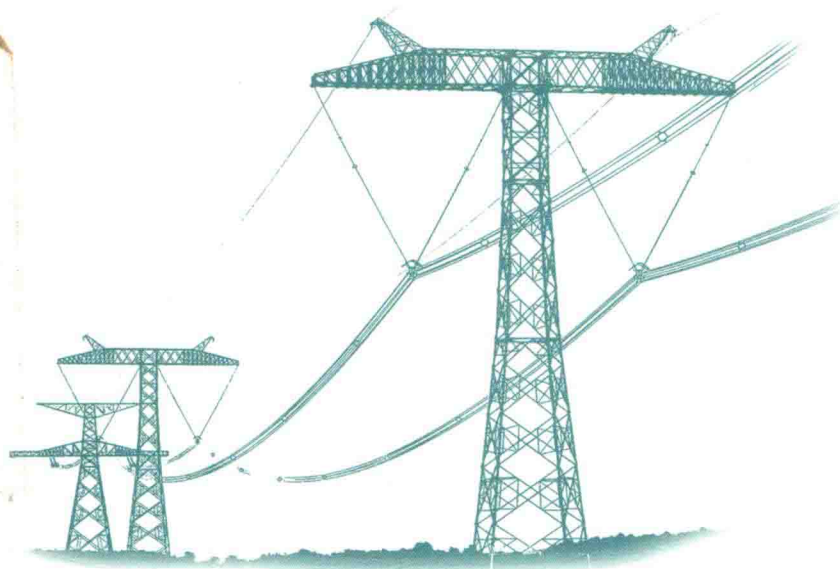




国家电网公司
电力科技著作出版项目

输电线路参数辨识

郝玉山 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

输电线路参数辨识

郝玉山 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书围绕输电线路参数及其辨识展开。主要内容包括：关于输电线路参数及辨识的概述、理论模型和理论参数，辨识参数的理论基础、辨识参数的理论突破、辨识全参数、辨识稳态参数、互感影响及处理方法、辨识参数的工艺过程、现场实例和大范围验证、参数影响电网计算的定量分析。将过程控制、误差分析与生产工艺相结合是本书的一大特点。

本书可供从事电力调度控制运行、研究的工程技术人员研读，也可作为电力、自动化等专业师生学习和参考。

图书在版编目（CIP）数据

输电线路参数辨识 / 郝玉山著. —北京：中国电力出版社，2017.9
ISBN 978-7-5198-0227-1

I. ①输… II. ①郝… III. ①输电线路—参数分析 IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 003072 号

出版发行：中国电力出版社

地 址：北京市东城区北京站西街 19 号（邮政编码 100005）

网 址：<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑：王 晶（010-63412341） 安 鸿

责任校对：马 宁

装帧设计：张俊霞 张 娟

责任印制：邹树群

印 刷：三河市万龙印装有限公司

版 次：2017 年 9 月第一版

印 次：2017 年 9 月北京第一次印刷

开 本：710 毫米×980 毫米 16 开本

印 张：14.5

字 数：209 千字

印 数：0001—2000 册

定 价：98.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

序一

电网元件参数对电网运行至关重要，不仅关系电网的离线分析、在线计算，更是影响电网安全分析和经济运行的重要数据和信息。多年来，学界和企业界往往对电网元件参数的重要性估计不足、关注不够，如对于输电线路的重要参数研究欠深入。自 1970 年以来，国内外有关电网运行与管理专业人士都知道潮流计算与遥测数据时有不符，多将解决问题的重点聚集于算法研究，如状态估计、优化潮流、随机潮流等，但收效有限。

《输电线路参数辨识》是一本详尽的、系统的关于输电线路参数研究的专著。本书从输电线路的参数理论开始，指出了国内外理论参数都少有计划及铁塔的影响而使数值偏小，同时实测参数受工频影响而使误差偏大。故该专著提出辨识线路参数课题。并且，与以往采用附加小信号的辨识方法不同，该书改进后的方法是直接将故障数据和运行数据用于辨识参数，从而，能够有效地减弱干扰的影响，使辨识参数的精度显著提高。

书中给出的采样频率上限和稳态处理遥测数据技术是辨识参数精确度提升的关键。奈奎斯特证明了采样频率存在下限，被称为“采样定理”；本书则进一步给出了采样频率同样存在上限的证明，从而使“采样定理”得到完善。同时本书作者对采样定理的完善和发展得到了实践数据的支持，有重要实用价值。在稳态处理技术方面，本书利用统计数学，解决了遥测坏数据问题，从而显著提升了参数的可信度，巧妙地解决了多年来状态估计的输入数据与实际采集数据互相混淆不清的难题。

深入浅出、理论指导实践是本书的一大特点。本书理论推导的层次递进、条理清晰、逻辑严密，有效解决了遥测坏数据和高级参数辨识领域多年来存在的难题。

值得一提的是，本书实践验证也很充分，通过故障数据和遥测数据两个途径辨识参数，以及经过故障定位、短路电流、状态估计和潮流计算等多方面验证，进一步验证了辨识参数的正确性和合格的精准度。

此外本书还将误差分析用于生产线工艺中，而生产线工艺相关问题是国内工业转型升级急需解决但尚研究不多的“中间地带”。本书为从事相关工作的工程师、工科学生和研究生在理论提高和技能提高方面将起到有力的推进作用。

本书是作者多年刻苦钻研而形成的研究成果，相信书中介绍的方法和结论会引起电力行业的有关专家和领军者的重视，在我国大电网的安全稳定运行方面起到积极的作用。

本书是国内外近年来不可多得的好书，推荐工科学生、研究生、从事电力行业的工程师和研究者阅读参考，相信读者同我一样会有所收获。

卢 强

2017 年 1 月于北京

序二

随着国民经济的快速发展和人民生活水平的大幅提高,我国电力系统高速发展,截至 2016 年底,全国发电装机总容量达 16.457 5 亿 kW,其中风电装机容量达 1.4864 亿 kW、光伏装机容量达 7742 万 kW,成为世界上装机规模最大、电压等级最高、年发电量最大、风电和光伏装机最多的特大电网。现代大电网的安全稳定经济运行,高度依赖于电网分析和运行控制,电网结构和元件参数是电网分析和运行控制的重要基础,其准确性直接影响分析结果和控制行为,影响电力系统的安全稳定经济运行。

2003 年北美“8·14”停电事故后,各国电网都积极研究在线安全稳定分析技术。2004 年国家电网公司立项进行在线安全稳定分析技术研究,在研究中发现,TA/TV 量测数据、SCADA 的实时数据、状态估计后的数据、在线分析用的初始潮流、离线分析用的初始潮流等的模型数据存在一定偏差,对常规潮流计算影响还不明显,但对在线稳定分析则问题非常突出。该问题涉及多个专业、诸多方面、众多环节,非常复杂,属于多年的老大难问题。经过全系统十余年的艰苦努力,偏差大幅缩小,取得巨大进步,但一直没有找到深入机理的原因。直到得悉郝玉山老师已经多年研究输电线路参数辨识问题,并经过多次技术交流切磋,才茅塞顿开,看到了曙光。其以下几项研究成果,有利于解决上述问题,印象十分深刻:

第一,输电线路参数与实测方法、线路铁塔结构、地线复合光缆(OPGW)逐塔接地方式、同塔并架多回线路等具有相关性,都对线路参数测量结果有较大影响。

第二,输电线路参数属于稳态参数,如果测量采样频率过高,非但不能提高稳态数据精度,反而因为无意间引入了少量瞬时数据,会严重影响稳态数据。归纳推导出的“采样频率上限”定理,是对奈奎斯特“采样定理”的重要扩展,适应于电网自动化秒级稳态数据采集,对继电保护涉及的机电暂态和电磁暂态数据采集的适应性还在进一步验证。

第三，通过对调度端 SCADA 实时数据流的“稳态化”处理，可以提高电网分钟级稳态数据的精确度和稳定度，与传统的潮流计算和状态估计方法相比，能提供更接近真实的电网实测潮流。

第四，将电网扰动前后稳定运行时的基态潮流数据与扰动时的故障录波数据和同步相量测量装置（PMU）数据相结合，进行比对分析，可对输电线路参数做更为精准的辨识。

这些成果已经在河北、宁夏等电网进行了工程化实施，取得了很好的效果。《输电线路参数辨识》一书正是对其理论成就和工程实践的系统性总结，物理概念清晰、数学功底深厚、理论推导严谨、方法另辟蹊径、经过实践验证，对于改善电网输电参数和运行数据的质量具有重要实用价值和理论创新，对于保障我国大电网的安全稳定经济运行、促进大规模可再生能源的有效消纳，具有积极意义。

该书为近年少见的好书，相信该书的出版将会引起业界专家学者的关注和讨论，也会促进世界电力系统参数辨识技术和数据处理技术的进一步发展。

辛耀中

2017 年 2 月 17 日于北京

前言

过去的研究普遍认为输电线路参数已知且误差不大，由于国家电力调度控制中心（简称国调中心）考核状态估计合格率，河北省调要解决双回线路的状态估计与遥测数据不符的问题，引起作者对线路参数的重视并开始研究。

考虑到理论参数不能计及大地电阻等因素，国内线路采用实测参数。实测参数分为工频实测和异频实测两种。由于架空线路的天线效应，实测参数受工频干扰严重。

架空线路受工频干扰是不可回避的，为了提高参数精度，应该加大注入信号的功率或加大异频实测的频偏，但受设备体积的限制而不可行；或者采用运行数据，如故障录波、遥测数据，信号强度高，干扰可以忽略，需要辨识参数技术。

与以往的辨识不同，本书辨识参数的输入不是附加小幅度的伪随机信号，而是直接采用实测的运行数据，甚至是更大的故障信号，让辨识参数回避干扰的影响。

辨识作为一种建模手段，自动控制专业对其已研究多年，成果却只有3阶以下低阶系统的成功案例，而高阶系统的辨识参数误差太大。要辨识输电线路参数，一则需要辨识高阶动态参数；二则遥测有坏数据，所以，对输电线路参数的辨识需要有所突破。

作者在读博期间发现了高阶动态参数的辨识误差在于采样频率太快，并给出采样频率上限的经验公式，成功辨识出发电机的3阶调速系统的参数和3阶励磁系统的参数。要辨识线路的高阶动态参数，还需继续挖潜。经过作者多年的努力，理论推导出采样频率上限，发明了满足采样频率上下限的采样数据处理专利方法，为辨识高阶动态参数准备好条件，成为本书交代的第一个理论突破。

作者在研究反窃电计算时，发现了遥测坏数据的机理，发明了稳态处理

专利技术，能够剔除遥测坏数据，为辨识稳态参数准备好条件，成为本书交代的第二个理论突破。

本书围绕辨识线路的动态参数和稳态参数及其验证展开。第1章介绍线路参数的现状和问题，线路采用实测参数，受工频干扰影响严重，提出辨识参数的思路。第2章介绍国内外线路的理论参数，国内理论参数偏小。第3章准备基础知识和辨识算法，算法是现成的，关键在于输入数据的处理。第4章交代数据处理方面的两个理论突破，一是推导采样频率上限、提出满足采样频率上下限的采样数据处理方法；二是介绍遥测坏数据机理，提出稳态处理方法。第5章由故障录波数据辨识线路全参数的理论推导和仿真验证，附带给出了利用录波电压和本线路参数计算短路电流的方法，误差分析了辨识全参数的精度为5%。第6章理论推导了由遥测数据辨识线路稳态参数的公式，通过反例说明状态估计合格是参数准确的必要条件而非充分条件，作为充分条件还需要事先确定连接全网节点树枝的支路阻抗。第7章补充互感影响及同杆并架双回线的参数辨识。第9章前两节给出现场实例验证，由故障录波数据辨识线路全参数、过渡电阻和故障位置，用户检验故障定位精度2%、短路电流精度5%，验证了辨识的全参数精度5%；由SCADA遥测数据辨识线路的稳态参数，通过双回同杆并架线路和局部电网的状态估计验证，能够有效抑制局部电网状态估计的有偏误差，与在线稳态处理程序配合，能够解决状态估计误差和母线功率不平衡的问题。

至此，输电线路的参数辨识研究已完成。

本书还介绍了提高参数辨识可靠性的生产工艺技术。作为另一条主线，在第3章基础知识中回顾误差定义、误差分析。第8章介绍参数辨识生产线和生产工艺文件，将辨识参数作为产品生产，以提高辨识参数质量和可靠性。第9章第3节介绍一个省级电网220kV线路的辨识参数全过程，全面验证了辨识参数精度5%。第10章统计现有参数的误差，现有电抗参数偏小20%~36%，电磁场分析表明参数偏小的原因是没有计及铁塔的损耗，每个铁塔消耗有功功率4.4kW和无功功率2.3kVA；误差分析出遥测数据和参数误差对状态估计、潮流计算、短路电流计算和稳定计算的误差传递，电抗误差将1:1地传递到稳定极限，偏小的参数造成稳定极限虚增20%~36%，于是，找到了影响电网稳定的重大隐患，应当引起业内足够的重视。

发展特高压大电网，解决电网稳定问题愈发重要。既然已经得知电网稳定的重大隐患在于现有参数偏小，所以，在国调中心的倡议下，作者加紧完成本书，将研究成果集中地呈现在本书中，为尽早消除电网稳定隐患做出贡献。

在课题研究和本书的撰写过程中，首先感谢原国家电力调度控制中心副主任辛耀中几年来的指导和鼓励；感谢国网河北电力公司科技信息部原主任李海生对本研究的首次应用给予的支持；感谢国家电力调度控制中心陶洪铸处长、严亚勤博士的支持；感谢国网河北电力公司、国网宁夏电力公司和国网天津电力公司，感谢赵自刚、贺文、赵春雷、耿多、贾京华、杨兴宇、曹树江、习新魁、马军、田炯、翟万生、施佳锋等人的精诚合作；感谢中国电力科学研究院、南瑞高科公司、科东公司和清华高科公司相关人员的技术支持；感谢中国南方电网电力调度控制中心、山西省电力调度控制中心、山东省电力调度控制中心、北京市电力调度控制中心、辽宁省电力调度控制中心和湖南省电力调度控制中心给予的帮助与关注；感谢河北电力科学研究院、北京电力科学研究院的支持；感谢杨立峰、马晋涛帮助查找北美地区的线路塔型及参数资料；感谢中国风能协会副理事长马学禄多年来的支持与讨论，使作者认识到建模对大数据、制造业转型升级的重要性；感谢三川电力设备有限公司员工的艰苦努力。

感谢电力泰斗清华大学教授卢强院士，原国家电力调度控制中心副主任、教授级高级工程师辛耀中在百忙中抽出时间为本书作序；感谢中国航天科技集团公司科学技术委员会主任包为民院士，华北电力大学原校长刘吉臻院士，加拿大哥伦比亚水电公司专家级高级工程师、IEEE 高级会员姚子文博士为本书撰写推荐意见。

特以此书献给我的恩师华北电力大学杨以涵教授和我的父亲郝庆周！

作者真心欢迎广大读者，尤其是电网调度工作者，多提质疑或问题；欢迎合作，与作者一起将参数辨识技术推广应用，取得实际应用成效。

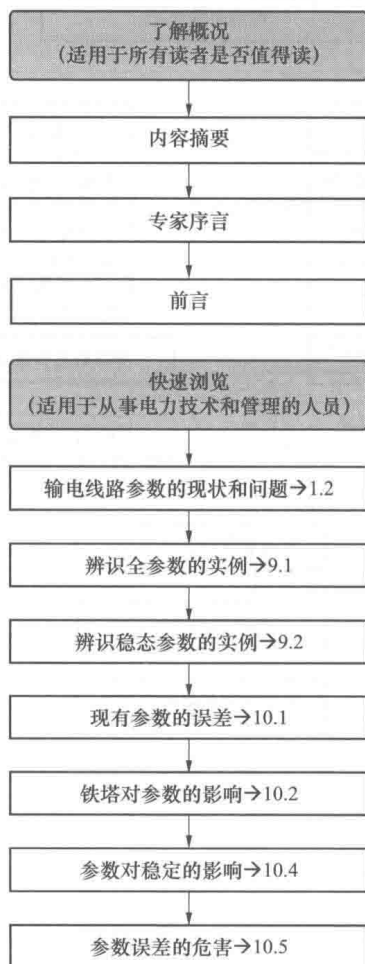
郝玉山

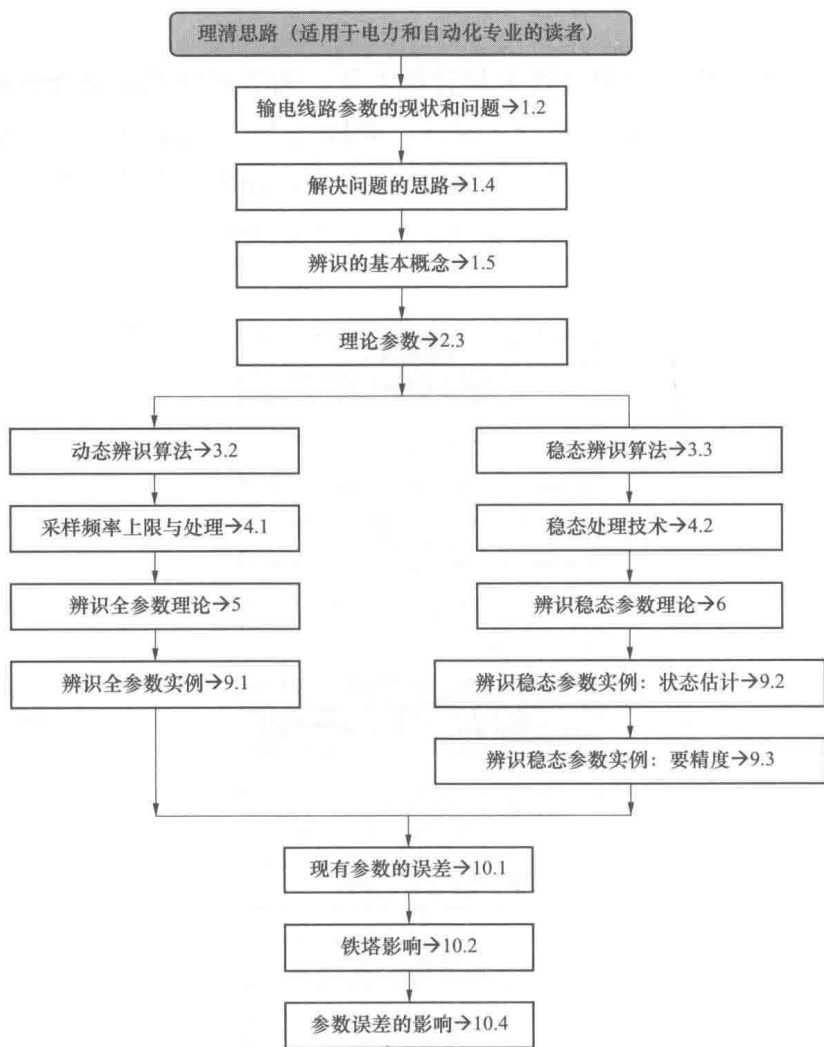
2017年5月于保定

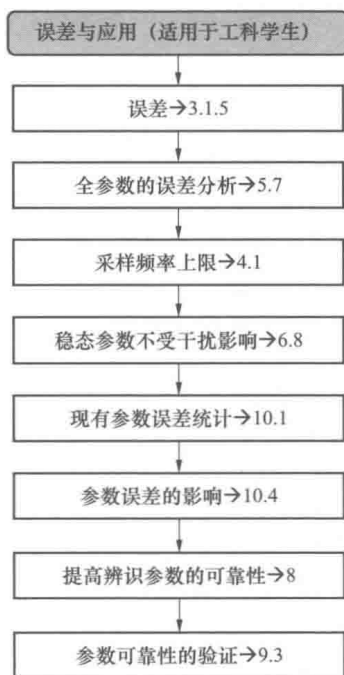
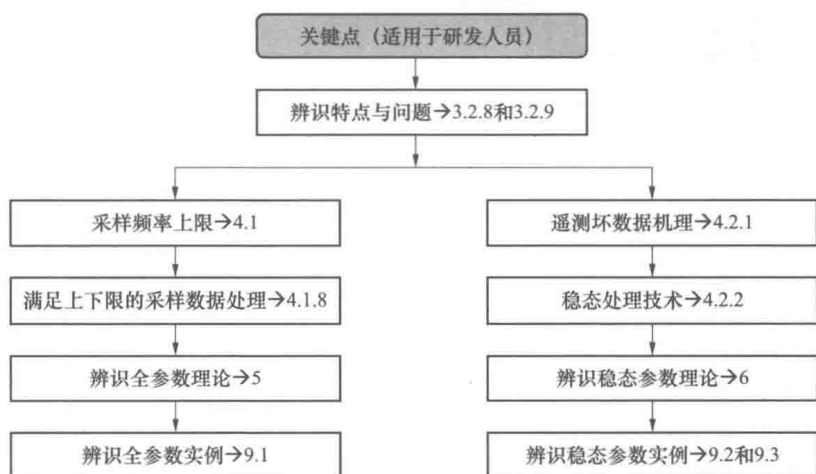
阅读说明

本书主要面向电网调度技术和管理人员，为了同时满足研发人员研读，理论较强的章节在标题后用“*”标注，即标注“*”的章节，工程技术管理人员可以跳过。文中黑体符号均为矩阵，表示具体数值的均用英文大（小）写字母，如“ **R** ”表示电阻矩阵，“ r ”表示电阻数值。

建议阅读顺序如下：







目 录

序一	
序二	
前言	
阅读说明	

第 1 章 关于输电线路参数及辨识的概述	1
1.1 线路参数在电网稳定中的作用	2
1.2 国内线路参数的来源	4
1.3 国外线路参数的现状	10
1.4 线路参数的研究历史	10
1.5 解决线路参数误差的思路	11
1.6 辨识的基本概念	12
本章小结	13
第 2 章 理论模型和理论参数	14
2.1 均匀传输线的模型	14
2.2 三相电力线路的数学模型	16
2.3 国内外理论参数	29
本章小结	30
第 3 章 辨识参数的理论基础	32
3.1 相关基础知识	32
3.2 动态辨识算法	48
3.3 稳态参数辨识方法	54
3.4 辨识参数的理解	57
本章小结	58
第 4 章 辨识参数的理论突破	60
4.1 采样频率上限及采样数据处理	60

4.2 稳态处理技术	66
本章小结	70
第 5 章 辨识全参数	72
5.1 故障录波数据	72
5.2 处理故障录波数据	73
5.3 辨识单相短线路参数	73
5.4 辨识故障上游线路的全参数	77
5.5 辨识故障线路的全参数	82
5.6 由故障录波电压和全参数计算短路电流	87
5.7 全参数的误差分析和检验	89
5.8 辨识全参数的步骤	90
5.9 仿真检验模型和辨识算法	92
本章小结	98
第 6 章 辨识稳态参数	99
6.1 遥测数据及其处理	99
6.2 线路的稳态模型	100
6.3 辨识线路的稳态参数	101
6.4 由状态估计检验辨识参数	102
6.5 稳态参数的检验	119
6.6 母线平衡与修正 TV、TA 误差	121
6.7 辨识线路稳态参数的步骤	124
6.8 辨识的稳态参数受工频干扰的影响可以忽略	124
本章小结	126
第 7 章 互感影响及处理方法	127
7.1 双回线的理论模型和理论参数	127
7.2 辨识双回线的全参数	131
7.3 全参数仿真算例	133
7.4 稳态参数仿真算例	135
7.5 关于部分互阻抗的两回线路	138
本章小结	138

第 8 章 辨识参数的工艺过程	140
8.1 生产工艺过程的简介	140
8.2 辨识参数的生产线	143
8.3 全参数辨识生产线的设计	148
8.4 稳态参数生产线的设计	154
8.5 辨识参数全面的检验	157
8.6 为辨识生产线配套工艺文件	158
8.7 为辨识生产线配套设备	158
8.8 生产线调试与调整	159
本章小结	160
第 9 章 现场实例和大范围验证	161
9.1 由故障录波辨识线路全参数和现场验证	161
9.2 由遥测数据辨识线路的稳态参数和检验	166
9.3 辨识 HB 省全网线路参数的验证	180
本章小结	184
第 10 章 参数影响电网计算的定量分析	186
10.1 现有线路参数的误差	186
10.2 铁塔对线路参数的影响	192
10.3 线路不同参数间的关系	197
10.4 参数误差对电网计算的影响	197
10.5 参数误差的危害	200
本章小结	200
附录 A 调度主站采用稳态处理的建议	201
附录 B 辨识的过渡电阻波形	203
参考文献	204
关键词索引	210
后记	213

关于输电线路参数及 辨识的概述

电网的重要任务之一是提高电网的稳定运行水平,因为国外电网失稳所造成的大面积停电事故时有发生,例如,1965年11月9日美国东部七个州大面积停电,影响四千万人口用电,经济损失达上亿美元;1996年7月2日美国西部15个州大面积停电,1998年1月美国东部三个州大面积停电;2003年8月14日的美国和加拿大(简称美加大)停电,3min内损失负荷6180万kW,造成美国东北部八个州和加拿大东部两个省的大面积停电,影响五千万人口用电,经济损失高达上百亿美元;2005年9月12日美国洛杉矶大面积停电,2008年2月26日美国佛罗里达州大面积停电;2005年8月18日印度尼西亚大面积停电,影响上亿人口用电;2006年11月4日欧洲大面积停电,损失负荷1600万kW,影响上千万人口用电;2009年11月11日巴西和巴拉圭大面积停电,造成12个州停电;2012年7月30日印度大面积停电,影响3.7亿人口用电,次日,再次大停电,影响6.7亿人口用电;2013年9月3日委内瑞拉大面积停电,影响18个州的用电。经事故后分析,这些大面积停电都是电网失稳的结果。

国内电网失稳情况在2000年之前较多,如1994年“5·25”粤东、1995年“9·7”云南、1995年“12·15”粤北等,美加大停电后引起国内的高度重视^[1],加快了电网建设,电网事故偶发,如2004年“6·18”河南、2005年“9·26”海南、2006年“7·1”豫西等停电事故。尽管失稳事故偶发,考虑到大面积停电严重的危害性,电网失稳事故还是引起国家的高度重视,国务院办公厅于2015年11月13日下发了“国家大面积停电事件应急预案”