

电气工程
新技术丛书



智能信息处理

在电网故障诊断中的应用

何正友 杨健维 臧天磊 著



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

国家自然科学基金资助 (No. 50877068, 51207130)

四川省杰出青年基金资助 (No. 06ZQ026-012)

教育部优秀新世纪人才支持计划基金资助 (No. NCET-06-0799)

教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助 (No. 200806130004)

国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目资助 (No. 2012AA050208)

电气工程

新技术丛书

智能信息处理

在电网故障诊断中的应用

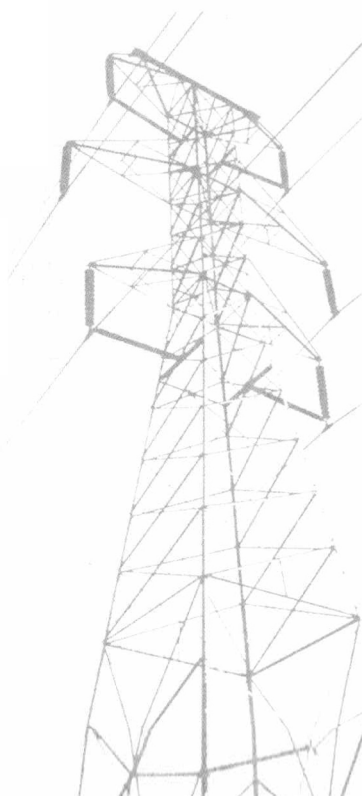
ZHINENG XINXI CHULI

ZAI DIANWANG GUZHANG ZHENDUAN ZHONG DE YINGYONG

何正友 杨健维 臧天磊 著

西南交通大学出版社

• 成 都 •



图书在版编目 (C I P) 数据

智能信息处理在电网故障诊断中的应用 / 何正友, 杨健维, 臧天磊著. —成都: 西南交通大学出版社, 2013.1

电气工程新技术丛书

ISBN 978-7-5643-2114-7

I. ①智… II. ①何…②杨…③臧… III. ①人工智能—信息处理—应用—电力系统—故障诊断 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第308610号

电气工程新技术丛书

智能信息处理在电网故障诊断中的应用

何正友 杨健维 臧天磊 著

责任编辑	李芳芳
特邀编辑	宋彦博
封面设计	孙仲民
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段111号)
邮政编码	610031
发行部电话	028-87600564 028-87600533
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	170 mm × 230 mm
印 张	16.75
字 数	299千字
版 次	2013年1月第1版
印 次	2013年1月第1次
书 号	ISBN 978-7-5643-2114-7
定 价	43.00元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

序

输配电系统具有覆盖范围广、穿越地形复杂、易受气候影响等特点，因而发生故障的概率较高。准确、高效的电力系统故障诊断对故障后的快速恢复，进而提高供电可靠性具有重要意义。

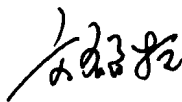
为了适应智能电网时代的信息处理要求，信息处理技术正逐渐向智能化方向发展。智能信息处理作为一种处理复杂系统信息的方法和技术，在电力系统故障元件确定、故障类型识别与故障定位（测距）等方面具有广泛的应用。

西南交通大学何正友教授带领团队长期从事输配电系统和牵引供电系统故障诊断与保护、牵引供电系统可靠性评估等方面的研究工作，取得了有价值的研究成果。近年来，他们以电力系统智能化发展为契机，取得了适应我国电力系统发展的故障诊断研究成果。本书是对这些创新成果的提炼和总结，其内容涵盖了电力系统故障诊断的信息、内容、难点与智能化方法。在电力系统故障元件确定方面，重点介绍了粗糙集与量子神经网络方法、贝叶斯与朴素贝叶斯方法、模糊与有色Petri网方法和二进制粒子群优化方法；在故障类型识别方面，重点介绍了粗神经网络方法、自适应神经模糊推理方法、混合模糊Petri网方法和行波固有频率方法；在故障定位（测距）方面，重点介绍了基于固有频率的单端行波故障测距方法和利用电气信号动态特性的动态故障测距方法。

这本著作结构严谨、逻辑缜密，包含大量的测试算例，内容系统而翔实，体现了作者在电网故障诊断中的智能信息处理方法方面的高水平研究成果。无论在学科发展还是在工程应用方面，书中的故障诊断智能化方法都具有重要的理论价值和应用价值，值得电气工程与自动化、控制科学与工程、信息科学与技术等专业的研习者学习、掌握和运用。期待广大读者通过阅读此著作能够更加系统、深入地掌握电力系统故障诊断智能化方法的研究历史、现状和发展动向，以更好地解决电气工程领域的科学问题。

谨以为序。

浙江大学教授、博士生导师



2012年12月18日

前 言

随着现代电力系统步入高电压、大电网和大机组时代，电网规模不断扩大，区域电网相互之间的耦合越来越紧密，联网程度的加深可以提高电网的可靠性与供电质量，但同时也带来了潜在的危险，局部电网的某些设备或线路故障可能诱发恶性连锁反应，并最终酿成大面积停电的重大事故。另外，各种自然灾害，如地震、洪灾、雪灾等都可能破坏输电线路、电力设备乃至电网，简单故障不被及时发现和处理，将可能引发连锁故障。由于影响电网安全稳定运行的因素众多，完全杜绝事故发生是不可能的，为了降低或避免事故所带来的影响，需要及时检测电网的各种故障，快速准确地分类故障。因此，研究高效的电网故障诊断方法，对及时发现电网中设备事故、处理电网故障，甚至对电网灾变的预防都是十分必要的。

近年来，电网监测与控制系统的應用日益增多，当电网发生故障时，将有大量的报警信息在短时间内涌入调度中心，尤其当发生多重故障或自动装置动作不正常时，情况将更加复杂，远远超出了运行人员的故障处理能力，易使调度员误判、漏判。为了适应各种简单和复杂事故情况下故障的快速、准确识别，迫切需要建立先进、准确、高效的自动故障诊断系统。同时，由于调度自动化水平的不断提高、故障录波专用网络的建设以及电力专用通信网络系统的不断完善，能够为电网故障诊断提供越来越全面和完备的故障综合信息，这些信息可通过各变电站的远程终端装置传送到各级电网调度中心，使得利用采集的实时信息进行电网故障诊断成为可能。

电网故障诊断主要是对各级各类保护装置产生的报警信息、断路器的状态变化信息以及电压、电流等电气量测量的特征进行分析，根据保护动作的逻辑、运行人员的经验和电气量的特征量来推断可能的故障元件、故障类型和故障位置。

基于此，本书作者将电网故障元件查找、故障类型识别和故障定位纳入电网故障诊断体系。作者对相关研究成果进一步总结和提炼，期待该成果能够为本领域技术的进一步发展提供支撑。

全书总共包括以下8章内容：

第1章简要分析了电网故障诊断的信息来源、内容以及目前研究中存在的难点，并作出了展望。

第2章介绍了基于粗糙集和量子神经网络相结合的电网故障诊断方法。

第3章分析了基于贝叶斯网络的电网故障诊断方法的应用思路，介绍了粗糙集与朴素贝叶斯、关联数据挖掘与贝叶斯相结合的电网故障诊断方法。

第4章介绍了现有的基于模糊Petri网的电网故障诊断方法，包括自适应模糊Petri网、方向性加权模糊Petri网和有色Petri网。

第5章介绍了电网故障诊断的改进优化模型，应用收敛速度快的二进制粒子群算法对优化模型进行求解。

第6章主要介绍了4种输电线路故障类型识别的方法——基于粗神经网络的故障类型识别方法、基于ANFIS的故障类型识别方法、基于混合模糊Petri网的故障类型识别方法和基于行波固有频率的故障类型识别方法，阐述了其基本原理和特点，总结了目前输电网故障类型识别所面临的问题，并指出了该领域所需解决的关键技术问题和发展趋势。

第7章给出了单相或多相线路、无损或有损输电线、线路参数与频率无关或相关等多种情况下故障行波固有频率与线路长度、边界条件三者的数学关系的推导，并提出了完善的基于固有频率的单端行波故障测距方法。

第8章介绍了动态条件对输电线路参数的影响，以及利用电气信号的动态特性来对传统的静态故障测距算法进行改进和扩展的动态故障测距算法，并介绍了基于线路参数修正的同杆多回输电线路故障测距算法和动态条件下T型输电线路的故障测距算法。

本书由何正友、杨健维、臧天磊合著，何正友撰写了第1，2，6~8章，杨健维撰写了第3，4章，臧天磊撰写了第5章，全书由钱清泉院士审阅。参与本书整理工作的有麦瑞坤、林圣、李小鹏、张姝、何文、叶德意、吴双、陈双、刘玉萍等，在此对付出辛勤劳动的博士、硕士研究生们表示衷心的感谢！

本书有幸得到国家自然科学基金（No. 50877068，51207130）、四川省杰出青年基金项目（No. 06ZQ026-012）、教育部优秀新世纪人才支持计划基金（No. NCET-06-0799）、教育部高等学校博士学科点专项科研基金（No. 200806130004）、国家高技术研究发展计划（863计划）项目子课题（No. 2012AA050208）和四川省科技创新苗子工程（No. 2012ZZ061）等项目的资助，同时还得到了西南交通

大学电气工程学院及国家轨道交通电气化与自动化工程技术研究中心同事的鼎力支持，特此致谢！

在本书的撰写过程中，作者参考和引用了国内外同行专家和学者的相关研究成果，在此向他们表示由衷的感谢！

对西南交通大学出版社张雪总编辑和宋彦博编辑为本书的出版所做出的努力表示由衷的感谢！

由于作者水平和经验有限，书中不当之处在所难免，欢迎读者批评指正，期待与广大读者进行深入交流。

作 者

2012 年 12 月于西南交通大学

目 录

1 电网故障诊断概述	1
1.1 电网故障诊断的信息源和诊断内容	1
1.2 难点与展望	5
参考文献	7
2 基于粗糙集与量子神经网络的电网故障诊断	10
2.1 引 言	10
2.2 粗糙集理论及其在电网故障诊断中的应用	10
2.3 量子神经网络在电网故障诊断中的应用	20
2.4 粗糙集和量子神经网络相结合的电网故障诊断方法	25
2.5 本章小结	38
参考文献	39
3 基于贝叶斯网络的电网故障诊断	41
3.1 引 言	41
3.2 贝叶斯基本理论	42
3.3 基于贝叶斯网络的电网故障诊断方法	45
3.4 本章小结	72
参考文献	72
4 基于Petri网的电网故障诊断	74
4.1 引 言	74
4.2 Petri网的理论基础	74
4.3 基于自适应模糊Petri网的故障诊断方法	77
4.4 基于方向性加权模糊Petri网的电网故障诊断方法	88
4.5 基于有色Petri网的电网故障诊断方法	94
4.6 本章小结	104

参考文献	104
5 基于二进制粒子群算法的电网故障诊断	106
5.1 引 言	106
5.2 电网故障诊断的基本优化模型	106
5.3 电网故障诊断的改进优化模型	107
5.4 粒子群算法与二进制粒子群算法	108
5.5 基于二进制粒子群算法的电网故障诊断方法	110
5.6 小 结	118
参考文献	118
6 输电线路故障类型识别	120
6.1 引 言	120
6.2 基于粗神经网络的输电线路故障类型识别方法	121
6.3 基于ANFIS的输电线路故障类型识别方法	134
6.4 基于混合模糊Petri网的输电线路故障类型识别方法	146
6.5 基于行波固有频率的输电线路故障类型识别方法	162
参考文献	173
7 基于行波固有频率的输电线路故障测距	176
7.1 引 言	176
7.2 理想单相传输线	177
7.3 理想三相输电线路	180
7.4 有损三相传输线	183
7.5 不同故障方式下行波固有频率测距算法实现	185
7.6 典型算例仿真分析	193
7.7 算法应用展望	200
7.8 本章小结	201
参考文献	201
8 动态条件下输电线路故障测距	203
8.1 引 言	203
8.2 理想单相传输线的测距原理	204

8.3 动态条件下输电线路的测距原理	206
8.4 相序变换及参数在线估计	213
8.5 动态故障测距算法与静态故障测距算法的比较	215
8.6 基于线路参数修正的同杆多回输电线路故障测距方法	219
8.7 动态条件下的T型输电线路故障测距算法	243
8.8 本章小结	254
参考文献	255

1 电网故障诊断概述

1.1 电网故障诊断的信息源和诊断内容

1.1.1 电网故障信息来源分析

传统意义上的调度自动化系统是指作为电网静态安全分析基础的 SCADA/EMS 系统。自 20 世纪 90 年代中期以来,随着技术的进步和发展,基于 GPS 的同步相量测量单元(Phasor Measurement Unit, PMU)逐步得到应用,以 PMU 数据为应用基础的广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)在国内外得到广泛研究和推广应用,主要用于电网动态安全监视和控制。进入 21 世纪后,以集成继电保护和故障录波器为主的电网故障信息处理系统开始步入具体应用阶段。该系统的信息具有准实时性,正常时没有或者有很少信息,而在电网发生故障时会产生大量信息。图 1.1 说明了电网信息采集与传送的具体情况^[1]。

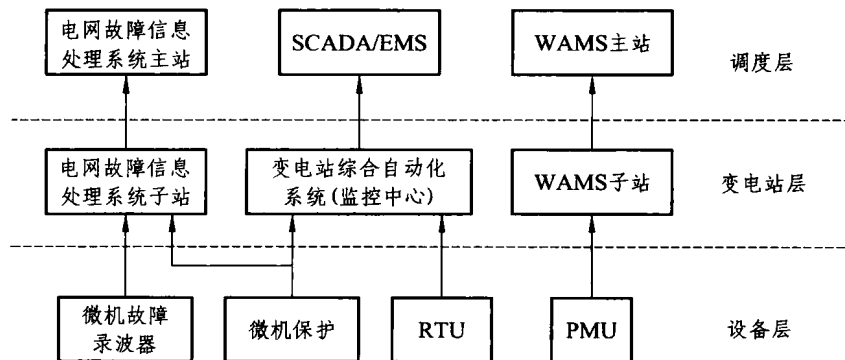


图 1.1 电网故障信息来源示意图

可见,调度中心可以获得的信息主要有:WAMS 系统提供的实时同步相量信息,SCADA 系统提供的完整断路器和隔离刀闸信息、继电保护信息、

遥测信息以及电网故障信息处理系统提供的完整继电保护信息和各厂站的故障录波联网信息等。

电网故障诊断需要使用三类信息：保护配置信息、设备邻接信息和故障信息。

1. 保护配置信息

保护配置信息是指电网中各设备受哪些保护装置的保护，每台保护装置由哪几种继电器组成，以及这些继电器的投退状态与动作范围。保护配置信息是电网故障诊断的主要依据之一，当组成电网的一次设备确定后，保护配置也随之确定，可从 SCADA 系统的数据库中直接读取。

电力系统故障诊断主要考虑的电力系统元件为输电线路、变压器和母线。下面简单介绍这三种元件的继电保护原理^[1, 2]。

继电保护有多种实现方式，通常的继电保护系统为三段式：Ⅰ段是主保护，Ⅱ段是第一后备保护，Ⅲ段是第二后备保护。

现以图 1.2 所示电力系统的一个简单模型来说明继电保护原理。

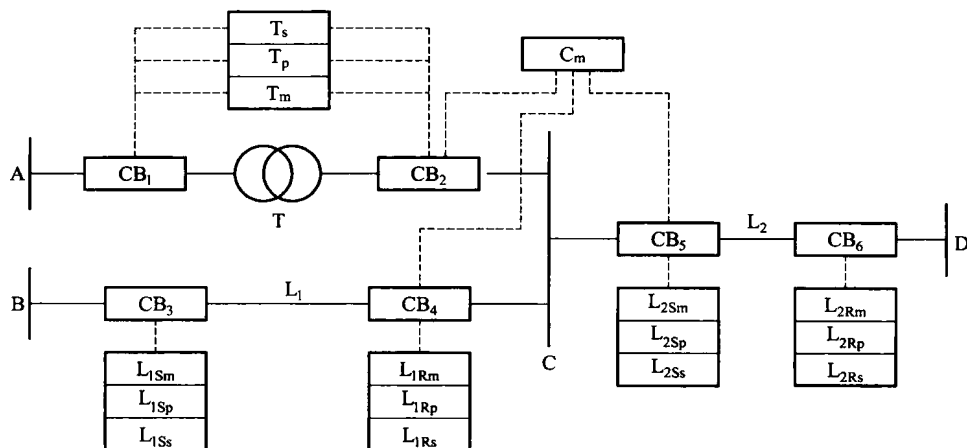


图 1.2 简单电力系统继电保护模型

m—主保护（Ⅰ段）；p—第一后备保护（Ⅱ段）；s—第二后备保护（Ⅲ段）；

S—线路左端出口保护；R—线路右端出口保护

电力线路保护主要有电流保护、距离保护和高频保护三种类型，以下从三段式角度分析。图 1.2 中线路 L_1 和 L_2 的继电保护为三段式保护，以 L_1 左端保护 L_{1Sm} 、 L_{1Sp} 和 L_{1Ss} 为例，其中 L_{1Sm} 是主保护，它只保护线路本身，其保护范围一般是线路 L_1 的 80%； L_{1Sp} 是第一后备保护，它保护线路全长，是

主保护 L_{1Sm} 的后备保护, 当主保护未动作时, 该保护动作, 从而切除故障; L_{1Ss} 是第二后备保护, 它一般在相邻的元件故障下动作, 当相邻元件 (如母线 C) 故障且其保护未动作时, L_{1Ss} 作为后备保护动作, 从而切除故障。三段式保护动作后都触发同一个断路器 CB_3 跳闸。

母线保护主要有电流差动保护和电流比相式保护两种类型, 一般只有主保护, 仅保护母线本身。图 1.2 中 C_m 是母线保护, 当母线 C 故障时, 主保护 C_m 动作, 触发断路器 CB_2 , CB_4 和 CB_5 跳闸。

变压器保护主要有纵差动保护、电流保护和电压保护三种类型。变压器保护一般也为三段式。图 1.2 中变压器 T 的三段式保护分别为 T_m , T_p 和 T_s 。其中主保护 T_m 和第一后备保护 T_p 只保护变压器 T 本身; 当变压器 T 故障且主保护未动作时, 第一后备保护动作; 第二后备保护 T_s 在相邻元件故障时动作, 当相邻元件 (如母线 C) 故障下的保护未动作时, 则 T_s 动作。各个保护 (T_m , T_p 和 T_s) 动作都触发断路器 CB_1 和 CB_2 跳闸。

2. 设备邻接信息

设备邻接信息是指本设备与邻接设备连接的具体路径。邻接设备是指与本设备具有电气连接关系的其他一次设备。

邻接信息在故障诊断过程中之所以重要, 是因为一个设备的故障信息不完全体现在它自身的断路器与保护动作信号中, 在很多情况下, 它会蕴涵在邻接设备的故障信息中。出于可靠性的考虑, 相邻元件间后备保护的動作范围需要相互重叠, 以防止保护或断路器拒动而造成故障无法切除。因此, 电网中各元件除了装设有动作于自身故障的保护之外, 还具有能够反映邻接设备故障的后备保护。

3. 故障信息

故障信息是指断路器位置变化信息与保护动作信息, 由 SCADA, RAMS 系统提供。本书介绍的故障诊断方法主要利用的是断路器跳闸、保护动作和故障录波信息。

(1) 断路器信息

SCADA 系统能够采集较为完备的遥信变位信息, 包括断路器变位信息和部分继电保护信息。断路器变位信息属于一级遥信信息, 实时性强, 在电网发生故障后, 能够迅速传送至调度中心。电网故障诊断可首先利用来自 SCADA 系统的断路器跳闸信息来判断故障区域。

(2) 保护信息

SCADA 系统并不能上传完备的继电保护动作信息,这给故障诊断带来了极大的不便。随着电网故障信息处理系统的建设和应用,其采集的保护动作信息,较 SCADA 系统上传的信息更丰富,数据具有准实时性。因此,电网故障诊断可进一步利用来自电网故障信息处理系统的保护信息,根据元件、保护和断路器之间的逻辑关系,对电网故障作出准确的诊断。

(3) 录波信息

当系统发生复杂故障且伴随关键信息畸变时,基于断路器和继电保护动作信息的诊断方法已经不能取得令人满意的结果。随着电网故障信息处理系统的建立和故障录波数据的联网共享,丰富的录波信息提供的故障状态下的暂态数据,为电力系统故障分析及对各种保护动作行为评价提供了重要依据。

1.1.2 电网故障诊断的内容

电网发生故障时,反映该故障的首先是电网各节点电压、各支路电流等电气量的变化,其次是保护装置依据电气量信息对故障进行判断而生成的保护动作信息,最后是由保护跳开相应的开关隔离故障后的断路器动作信息。也就是说,电网故障诊断可以利用的信息包括:开关信息、保护信息以及电气量信息等。电网故障诊断就是依据这些故障信息,借助故障信息知识库,采用某种诊断机制来确定电网故障设备,如图 1.3 所示^[2, 3]。

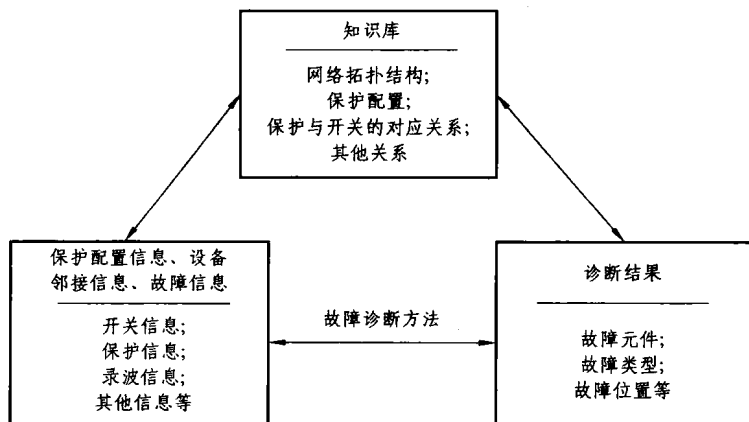


图 1.3 电网故障诊断体系示意图

电网故障诊断的研究内容主要包括：故障元件识别、故障类型识别和故障定位。

1. 故障元件识别

电网故障诊断的重要内容之一就是当电网发生故障时，快速准确地进行故障元件的识别。故障元件的识别主要是利用检测到的故障信息来识别故障元件以及判别误动、拒动装置。目前，随着数学和人工智能科学理论的发展，涌现出众多电网故障元件识别的方法。如何提高识别速度和准确度一直是研究者所关注的话题，并且故障元件识别方面的研究仍停留在理论探索阶段，实用化方面一直没有太大的进展。

2. 故障类型识别

故障类型识别是输电线路保护中自动重合闸的一个重要依据。快速、可靠地识别故障类型对于保护线路和处理故障具有重要意义。故障类型的识别主要是从故障录波信息中提取故障特征，并对特征进行分析、识别，给出故障类型。

3. 故障定位

高压输电线路分布范围广，沿途地形复杂，在经过山区或森林覆盖地区时，由于风吹、雷雨等气候条件影响，高压输电线路易发生风偏短路、树枝放电短路等故障，严重危及电力系统的安全、稳定运行。同时，继电保护装置的快速动作使大部分故障线路没有明显的损坏痕迹，因此导致对输电线路故障的查找变得极其困难。输电网的故障定位是指利用故障后输电线路电气量所包含的丰富故障信息来确定故障位置。快速、准确的故障定位能够节省故障巡线所耗费的大量人力和物力，同时有助于发现线路薄弱环节，及时处理故障和修复线路，提高供电可靠性，减少停电损失。

1.2 难点与展望

受系统规模、复杂程度和不确定性等因素的限制，输电网故障诊断难以通过建立常规的数学模型来进行研究，基于智能化理论来实现故障诊断是必

然,其实用化前景也比较明朗^[2]。虽然随着电网建设的发展,以及计算机技术、网络技术、数学理论和智能科学理论的发展,不断有新的电网故障诊断方法出现,但从电网故障诊断理论研究和应用的深度、广度可以清楚地看出,其研究仍停留在理论和模型的探索阶段^[4],依然面临着一些亟待解决的问题:

① 信息的不确定性问题。目前研究的输电网故障诊断方法在信息完全正确可信且完备的基础上可以得出正确的诊断结果,但在处理故障信息不确定和不完备的情况时容错性较差。

② 故障诊断方法的选取问题。现有输电网故障诊断方法存在一些固有的缺陷,如专家系统的知识库构造、维护问题,人工神经网络的学习训练速度问题, Petri 网的大型电网建模问题,贝叶斯网络的规则约简问题,优化方法中目标函数的建立问题等。各种诊断方法都具有各自的优缺点,多种智能方法相结合应用是实现电网故障诊断的一个发展趋势。加之,现有故障诊断策略大都偏重于利用单个诊断对象的局部信息,未能从电网全局来实施诊断,很难提供运行、检修人员可以直接采用的辅助决策结论。

③ 故障特征的有效提取问题。利用海量录波数据进行故障诊断的关键在于故障特征的有效提取,因为故障特征是表征一种故障区别于其他故障的信息依据,它直接关系到故障诊断的准确性和可靠性。因此,故障特征的有效提取仍是电力系统故障诊断的瓶颈。

④ 故障定位中的动态过程处理问题。电力系统中运行的发电机组有时在扰动下会发生转子之间的相对摇摆,输电线上的功率也会发生相应振荡,其振荡的频率很低,一般为 $0.2 \sim 2.5$ Hz,故称为低频振荡。在长距离、重负荷输电线上以及采用现代快速、高顶值倍数的励磁系统的条件下,低频振荡更容易发生。系统低频振荡一旦发生,可能会持续一段时间后消失,也可能振荡幅值保持增长,破坏系统的稳定性。在动态条件下(如低频振荡、频率偏移等情况),对基于同步相量测量技术的高压输电线路故障测距算法进行研究,具有重要的意义。

本书在简要分析电网故障诊断的信息来源、输电网故障信息特征以及故障诊断难点的基础上,以故障元件识别、故障类型识别和故障定位为主线,介绍各种智能信息处理方法在电网故障诊断中的应用,具体如下:

① 介绍基于量子神经网络、贝叶斯网络、Petri 网(包括自适应模糊 Petri 网、方向性加权模糊 Petri 网、有色 Petri 网)和二进制粒子群算法的电网故障元件识别方法。

② 介绍几种输电线路故障类型识别的方法:基于粗神经网络的故障类

型识别方法、基于 ANFIS 的故障类型识别方法、基于混合模糊 Petri 网的故障类型识别方法和基于行波固有频率的故障类型识别方法。

③ 介绍基于行波固有频率和动态相量测量的行波故障测距方法。

参考文献

- [1] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 3 版. 北京: 中国水利电力出版社, 1994.
- [2] Sang W M, Jong K P, Kwang H K, et al. A fuzzy relation based fault section diagnosis method for power systems using operating sequences of protective devices[C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2001, 2: 933-938.
- [3] 李超文. 基于改进模型和二进制粒子群算法的电网故障诊断研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [4] 毛鹏, 许扬, 蒋平. 输电网故障诊断研究综述及发展[J]. 继电器, 2005, 33(22): 79-86.
- [5] 林圣, 何正友, 钱清泉. 输电网故障诊断方法综述与发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 38(4): 140-150.
- [6] 郭创新, 朱传柏, 曹一家, 等. 电力系统故障诊断的研究现状与发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 98-103.
- [7] 毕天姝, 倪以信, 杨奇逊. 人工智能技术在输电网故障诊断中的应用述评[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(2): 11-16.
- [8] Park Y M, Kim G W, Sohn I M. A logic based expert system for fault diagnosis of power system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 363-369.
- [9] Styvaktakis E, Bollen M H J, Gu I Y H. Expert system for classification and analysis of power system events[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 17(2): 423-428.
- [10] Zhao Wei, Bai Xiaomin, Wang Wenping, et al. A novel alarm processing and fault diagnosis expert system based on BNF rules[C]//Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Asia and Pacific, 2005: 1-6.
- [11] Su Yu, Zhao Hai, Su Weiji, et al. Fuzzy reasoning based fault diagnosis expert