

电网故障诊断的智能方法综述

边莉, 边晨源

(黑龙江科技大学电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150027)

摘要: 综述了目前应用较为广泛的基于智能技术的电网故障诊断方法, 包括专家系统、人工神经网络、贝叶斯网络、优化技术、支持向量机、模糊集理论、Petri网、信息融合技术和多智能体技术。简单介绍了这些智能方法的基本概念, 在电网故障诊断领域的研究现状, 并从实用化的角度阐释了各自的特点和存在的不足, 以及各自未来的发展情况。最后从电网故障诊断领域当前所面临的重要问题出发, 探讨了该领域今后的发展趋势。

关键词: 电网; 故障诊断; 智能技术; 研究现状; 发展趋势

Review on intelligence fault diagnosis in power networks

BIAN Li, BIAN Chen-yuan

(School of Electronic and Information Engineering, Heilongjiang Institute of Science and Technology, Harbin 150027, China)

Abstract: This paper reviews the intelligence methods that are applied widely for fault diagnosis of power networks, including expert system, artificial neural network, Bayesian network, optimization methods, support vector machine, fuzzy set theory, Petri net, information fusion of multi-data resources and multi-agent system. Their basic concepts and research status in power fault diagnosis domain are introduced. Their characteristics, disadvantages and development trends are elaborated from the aspects of practicability. Finally, this paper explores the development trend in future in the field of fault diagnosis according to the current problems in the field of grid fault diagnosis.

Key words: power network; fault diagnosis; intelligence method; research status; development trend

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0146-08

0 引言

电网故障诊断就是通过测量和分析故障后电网中电流、电压等电气量以及保护和断路器动作的开关量变化信息, 识别故障元件。良好的诊断策略对于缩短故障时间, 防止事故扩大具有重要意义^[1]。故障发生时, 监控系统采集到的大量故障信息涌入调度中心, 基于传统数学模型的诊断方法已很大程度上不能保证诊断的准确性和快速性等要求, 而相比较来说, 基于智能技术的诊断方法具有明显的优势。智能方法能够模拟、延伸和扩展人类的智能行为, 弥补数学模型诊断方法的不足, 为电网故障诊断领域开辟了新途径。因此故障诊断方法由传统技术向智能化技术方向发展是该领域未来研究的重点和热点^[2]。

本文在国内外专家学者对电网故障诊断领域研究成果的基础上, 综述了一些当前应用较为广泛的电网故障诊断的智能方法, 其中包括专家系统、神经网络、模糊集理论、Petri网等, 并相应的给出了简要的介绍, 同时分析了这些方法的特点和不足, 总结了当前电网故障诊断领域所面临的问题, 探讨了该领域在今后的发展中需要重点解决的关键问题和未来的发展趋势。

1 电网故障诊断的智能方法研究现状

1.1 基于专家系统的故障诊断方法

Feighbaum教授于1968年开发了第一个专家系统(Expert System)并且具体说明专家系统是一种智能的计算机程序, 它通过使用知识与推理过程, 求解那些需要专家的知识才能求解的高难度问题^[3]。自从70年代人们将专家系统引入到电网的故障诊断领域至今, 基于该方法的故障诊断应用较为成功。专家系统在电网故障诊断中的典型应用可以归结

基金项目: 黑龙江省青年科学基金(QC2010023); 黑龙江省普通高等学校青年学术骨干支持计划(1251G055); 黑龙江科技学院优秀青年才俊计划资助

为:首先建立故障信息知识库,并用自然语言建立产生式规则;然后基于对这一产生式规则的理解,知识工程师将知识表示成机器语言并通过人机接口储存到知识库中;故障发生时,将故障信息输入到推理机,推理机根据当前输入的故障信息,运用知识库中的知识,按一定的策略进行推理,从而识别出故障元件。

专家系统将专家的知识应用于电网故障诊断,可以保证诊断系统的实时性和有效性,但是基于知识的本质和实现故障诊断的原理没有变,因此当前专家系统还存在着不足:(1)专家知识是人为移植到计算机的,所以难以建立完备的知识库;(2)容错性差,对于保护和断路器的误动作及知识库中不包含的情况,很难给出正确的判断;(3)系统的维护难度非常大,知识库要经常根据实际情况进行更新。

未来的研究中将专家系统与其他智能技术相结合是一种有效的方式,取长补短,弥补专家系统本身的缺陷。文献[4]将模糊集理论与专家系统结合,通过对电压和电流值以及保护和断路器信息进行模糊推理,能够有效地改善专家系统容错性差的问题。文献[5]采用一种适用于电网故障诊断的整个协同式专家系统的结构体系,并且将其与多智能体技术相结合,克服了单一专家系统的局限性,增强了对复杂故障实时诊断的推理能力。

1.2 基于人工神经网络的故障诊断方法

人工神经网络(Artificial Neural Network)是一种模拟神经系统来进行信息处理的数学模型,主要是基于输入和输出关系建立起来的,并由大量简单的处理单元(神经元)广泛互连而形成的复杂网络系统。神经网络能够对大量的训练样本进行分析推理,得到一般规律,从而能对未知的或无法预测的故障信息进行分析判断^[6]。目前,前馈神经网络较广泛地应用于电网故障诊断领域,其中最具有代表性的是BP(Back Propagation)神经网络和径向基神经网络。

文献[7-8]给出了BP神经网络在电网故障诊断中的典型应用:将保护器和断路器的动作信息作为神经网络的输入,可能发生的故障情况作为输出,以此来建立诊断模型;通过大量的故障实例形成训练神经网络的样本集;训练过程中,网络的输入节点加输入信号,此信号向前传播,并不断根据当时的节点活化函数、连接加权系数和给定阈值进行相应计算,此过程即为学习过程;在学习结束前,若前向计算的输出与期望的输出之间存在误差,则将误差信号反向传播,调整权值和阈值,直到输出满足要求。文献[9]利用小波分时灰度矩提取故障信

息,将该信息作为概率神经网络的输入,通过概率神经网络进行模式识别,达到电网故障的自动识别。文献[10]在应用神经网络进行故障诊断时,引入了量子力学概念。文献[11]将主成分分析法融入神经网络,通过应用神经网络的多层感知器功能并结合系统输出电压值信息来识别故障类型;而且采用主成分分析法能够大量减少神经网络诊断时庞大的输入量,降低样本训练的时间,抑制噪声对诊断结果的影响。

神经网络有强大的学习能力,而且具有容错能力强、鲁棒性好、非线性映射和并行分布处理等特点。然而,神经网络还存在如下缺陷:(1)需要大量的训练样本以供学习,但获取完备优质的样本十分困难;(2)神经网络在诊断过程中被看成是“黑箱”,缺乏对自身行为的解释能力;(3)神经网络不善于处理启发式的规则。未来对基于神经网络的电网故障诊断方法的研究重点还是在选取有价值的训练样本、给予诊断过程解释能力、使适用于大规模电网故障诊断等方面。

1.3 基于贝叶斯网络的故障诊断方法

贝叶斯网络(Bayesian Network)是一种用来表示和推理不确定性知识的模型,它将概率论的相关知识及图论理论相结合,具有较为严格的理论基础,对解决复杂电网由于不确定因素引起的故障等问题具有明显作用^[12-13]。目前,利用贝叶斯网络技术进行电网故障诊断的研究还处于初期阶段,但是发展的较为迅速。文献[14]采用分层递归的思想,利用粗糙集理论对电网故障信息进行分层挖掘,达到属性优选,然后通过贝叶斯网络进行故障诊断,成功识别出故障元件。文献[15]结合监测设备的状态信息,利用贝叶斯网络实现了故障情况的提前预测。文献[16]基于元件建模,通过设置各节点的先验概率,使得故障信息经过贝叶斯网络后,得到各元件发生故障的概率,以此识别故障元件,若采用某个阈值作为判断条件,可同时对一个或多个元件的故障进行有效诊断。

贝叶斯网络的诊断模型清晰直观,对于不确定和不完备信息可以进行良好的诊断决策,然而,网络节点赋值需要大量的实际观察或统计分析方法来确定,而且贝叶斯网的训练属于NP难度问题,处理复杂问题时将变得非常困难。未来该领域的研究将主要集中在如何实现贝叶斯网络的自动建模,如何将其与信息融合理论相结合等方面。

1.4 基于优化技术的故障诊断方法

采用优化技术(Optimization Methods)的故障诊断方法是一种基于数学模型的求解方法。目前,国

内外学者提出了多种优化算法, 可以将其应用到电网故障诊断领域, 而且优化算法在电网规划等方面也有较好的应用^[17]。常用的优化算法包括: 遗传算法, 模拟退火算法和蚁群算法, 还有较新的算法如交叉熵算法。

优化技术应用于电网故障诊断的方法是考虑故障元件与保护器和断路器的动作关系, 将电网故障诊断问题表示为使目标函数最小化的 0-1 整数规划问题, 然后通过优化算法求解该问题的最优解。文献[18]基于小生境遗传算法, 并结合粗糙集理论, 来求取决策表约简, 从而抽出诊断规则, 提升了对不完备信息的分析能力。文献[19]通过综合利用可疑故障元件与保护和断路器误动作的情况, 构建了一个计及保护和断路器误动作的故障诊断模型, 不仅能够识别出故障元件, 也能够找出误动作的保护和断路器。文献[20]充分分析故障元件、保护和断路器动作的整体关联性以及保护和断路器误动作的情况, 通过对故障场景的整体描述, 提出了一种整体解析的诊断模型, 并利用改进二进制粒子群算法对模型求解。

基于优化技术的故障诊断方法具有严密的数学基础和理论依据, 用常规的优化算法即能够实现^[21], 而且能够在诊断信息不全面的条件下, 给出局部和全局最优的多个诊断结果。不过该方法还存在的问题是: (1)目标函数的确定比较困难; (2)优化算法的多次迭代, 导致诊断时间过长; (3)优化算法在寻优的过程中存在随机因素, 可能导致丢失最优解。所以选择更全面的诊断模型以及采用合适的优化算法来提高诊断的准确性和实时性是该领域未来研究的重要方向。

1.5 基于支持向量机的故障诊断方法

统计学习理论是一种专门研究有限样本情况下机器学习规律的理论, 为研究统计模式识别和更广泛的机器学习问题建立了一个较好的理论框架^[22]。Vapnik 等人根据对统计学习理论的研究, 提出了支持向量机(Support Vector Machine)这种全新的模式识别算法, 有效地改善了传统分类方法的缺陷, 具有充足的理论依据。它在文本分类、故障诊断、手写识别等领域中获得了较多的应用。

故障诊断问题从本质上来说就是一种分类问题^[23], 而支持向量机对于有限样本状况下的分类问题具有较强的针对性。文献[24]通过将粒子群优化算法与支持向量机相结合来进行故障诊断。由于在支持向量机算法中, 核函数参数选择的好坏直接影响到诊断结果的准确度, 而文中采用的方法能够实现参数的动态选取, 达到优化诊断结果的目的。文

献[25]采用综合型模糊向量机的诊断方法, 可以解决不确定性信息的诊断问题, 同时又能够解决分类技术中的难题。与常规支持向量机诊断方法相比较, 其诊断结果准确率更高。

支持向量机基于统计学习理论, 有效地改善了传统分类方法的缺陷, 具有充足的理论依据, 对解决有限样本的模式识别问题具有很高的适用性。下一步的研究重点在于如何改进算法, 使诊断过程快速并满足实时性的要求以及处理大电网故障诊断、参数的选择等问题。该技术在故障诊断中的应用起步较晚, 随着研究的加深, 该方法有望成为电网故障诊断领域的实用方法之一。

1.6 基于模糊集理论的故障诊断方法

美国自动控制专家 LA Zadek 于 1965 年首次提出“模糊集合”的概念, 并引入“隶属函数”来描述差异的中间过渡^[26]。模糊集理论(Fuzzy set Theory)将信息模糊化, 首先系统获取的信息组成的集合可以看成一种经典集合, 按照某种对应法则将集合中的元素映射到 $[0,1]$ 这一区间, 这样集合中的每一个元素在 0 和 1 之间都对应一个实数, 这个实数可以表明其隶属于 0 或 1 的程度, 按照以上对应法则组成的函数就是隶属度函数, 该理论就是以隶属度函数为基础建立的。在电网故障诊断领域发展的早期, 人们对专家系统应用在故障诊断领域做了较多的研究, 然而很少考虑到信息的不确定性, 从而导致诊断的不精确。文献[27]针对电力系统故障诊断问题中的不确定信息给出解决方法, 将模糊集理论应用在电网故障诊断领域, 通过将故障信息模糊化, 不仅可以减小数据信息的存储空间, 也能提升诊断精度和容错性。

模糊集理论的特点就是可以处理信息的不确定性, 然而基于模糊集理论的故障诊断方法还面临着一些弊端: (1)隶属函数的建立没有一个明确的标准; (2)可维护性差, 当电网结构发生变化时, 模糊知识库和隶属度也要做相应的变化; (3)大规模电网的模糊诊断模型建立困难。在实际应用中, 常常将模糊集理论与其他智能方法相结合(如专家系统、神经网络、Petri 网等), 用来分析不确定性信息对诊断系统的影响, 提升诊断精度, 增强系统的容错性。

1.7 基于 Petri 网技术的故障诊断方法

Petri 网是德国科学家 Carl Adam Petri 于 1960~1965 年提出的一种数学模型, 它利用目标系统中元件之间的关系来构建有向图的组合模型, 从而能够准确地表示离散事件发生的顺序、并发和冲突的关系。印度学者 Jenkensl 和 Khincha 在 1992

年首先将 Petri 网技术应用于电网的建模中^[28],在这之后 Petri 网在电力系统的很多领域中得到了应用,并显示出了其良好的应用前景。电网的故障可看成是离散事件,而 Petri 网是对离散事件组成的系统进行建模和分析的理想工具。文献[29]在传统 Petri 网技术的基础上,提出了神经 Petri 网和模糊神经 Petri 网这两种诊断模型。文献[30]改进了传统容错 Petri 网故障诊断模型,沿可疑故障元件的蔓延支路建模,这样在网络拓扑发生变化时,可以快速准确地做出调整,不用修正关联矩阵,提升了诊断速度,而且引入保护装置虚拟库所,使改进后的模型更加简洁直观。

Petri 网方法能够定性或定量地对系统中事件发生的各种过程采取准确的分析,同时还具有图形化的结构表示等优点,是对离散事件进行动态建模和分析的有效方法^[31-32],不过还有一些尚需深入的问题存在,主要是:(1)系统网络拓扑的扩大,易导致建模时发生信息组合爆炸的情况;(2)电网多重故障时,诊断结果不够理想;(3)对于保护和断路器拒动或误动时产生的错误信息不能很好地分析识别。未来的研究中,将高级的 Petri 网用于复杂电网的故障诊断是一种有效的措施,文献[33]采用方向性加权模糊 Petri 网的方法来进行电网的故障诊断。文献[34]介绍了有色 Petri 网,可利用颜色表示相同功能或相同类型的资源,简化了诊断模型。文献[35]将有色 Petri 网应用到电网的故障诊断,取得了良好的诊断效果。

1.8 基于信息融合技术的故障诊断方法

信息融合(Information fusion)技术实际上是一种多源信息的综合技术,通过对来自不同数据源的信息进行分析和智能化合成,获得被测对象及其性质的最佳一致估计,从而产生比单一信息源更精确、更完全的估计和决策^[36-37]。目前,采用该方法的电网故障诊断已显示出了明显的优势,文献[38]利用改进 D-S 证据理论的多数据源信息融合故障诊断方法,分别运用小波分析理论和模糊 Petri 网技术对电气量和开关量信息进行特征提取,然后利用改进 D-S 证据理论将两方面的信息融合作为诊断依据。文献[39]采用结合模糊积分理论的信息融合技术,基于电网元件建立神经网络模型,通过融合神经网络得到的初级诊断结论进行故障诊断,有效地克服了神经网络样本获取困难的问题,且能够并行运算,提升诊断速度。文献[40]提出结合小波神经网络和证据理论的信息融合技术的故障诊断方法,利用小波神经网络进行数据层的故障分析,在决策层利用各种冗余和互补的故障信息构建信息融合框架。

采用信息融合技术将开关量与电气量等来自不

同数据源的信息综合利用,可以极大地提高诊断系统的实时性和准确性,有效地避免由于故障信息的不确定性而导致的错误诊断^[41]。信息融合技术在今后的研究中,重点将放在解决如何选取合适的信息融合方法以及如何在实际中融合更多方面的信息,这会使得电网故障诊断水平上升到一个新高度。

1.9 基于 MAS 的故障诊断方法

多智能体(Multi-Agent System, MAS)技术是分布式人工智能技术的重要分支,它是一种将计算机、网络和分布式思想相结合的软件工程技术,能够将目标问题转变成在逻辑上或物理上分离的多个 Agent,可分别针对每个 Agent 来解决问题,而且各个 Agent 之间相互协调信息得到最终结果,节约了数据和资源。文献[42]将 MAS 技术应用于电网的故障诊断中,先将诊断系统智能分解,再通过软件技术来协调各 Agent 中的信息并得出诊断结果,满足了准确性和实时性的要求。文献[43]提出一种基于智能识别系统的 MAS 技术(MAS-IIS),MAS-IIS 实现了控制过程的在线自适应识别和实时的进行离线故障诊断,同时可以适应和克服大规模电网的复杂性。文献[44]将诊断系统划分为 6 个 Agent 模块,诊断 Agent 作为整个诊断系统的核心,完成了将开关量诊断 Agent 和电气量诊断 Agent 提取的故障信息进行融合,提升了诊断系统的精确性。

MAS 诊断系统作为分布式的诊断系统,具有良好的可扩展性、鲁棒性和启发性,适应电网地域分布性以及诊断任务的复杂性等要求^[45-46],通过协调合作的方式进行工作,可以实时地求解复杂过程的大规模任务。在下一步的研究中,如何处理各个 Agent 在社会层次上的知识和行为,协调不同目标的多个 Agent 的行为,使其联合起来解决问题是 MAS 技术研究的关键问题。

2 当前面临的主要问题及未来发展趋势

目前,电网故障诊断领域所面临的主要问题是:(1)各种诊断方法在处理不确定和不完备信息时容错性差,而且直到现在对于该问题仍没有给出明确的解决方式^[47];(2)像前文所介绍的,这些智能方法本身还存在应用的限制和缺陷,而且在目前的实际应用中,大部分电网故障诊断还是只基于一种智能方法;(3)电网的运行方式和网络拓扑结构的变化对故障诊断结果有明显的影响;(4)电网智能故障诊断实用化的研究还不够。

从当前电网故障诊断领域所面临的问题出发,今后的研究重点可以分为以下几个方面:

(1) 基于多种智能方法融合的诊断方法研究。

目前电网故障诊断的实际应用中,多数还是采用一种智能方法,其中应用较多的是专家系统和优化技术^[48]。将多种智能技术融合,取长补短,并在电网故障诊断领域中适时地引入最新的技术,这是未来故障诊断发展的重要趋势。

(2) 基于多数据源信息融合技术的诊断方法研究。目前电网故障诊断系统所采用的智能技术大多是利用开关量信息。相比较来说在精确性、容错性等方面,电气量有着更大的优势。将不同数据源的开关量和电气量的信息融合,充分利用多数据源的故障信息,能够使诊断结果更加精确。

(3) 基于分布式智能技术的故障诊断研究。采用分布式的故障诊断方法能够将大电网分区后进行分布式故障诊断,有效地解决了面向大电网故障诊断的难题^[32]。中国电科院的专家 2007 年利用贝叶斯网络的诊断方法,以含有不确定性故障信息的大型系统作为平台,进行了 MAS 协同诊断问题的研究,并取得了很好的诊断结果^[48]。

(4) 在线电网故障诊断实用化的研究。目前,国内外的专家学者在电网故障诊断理论上的研究已经取得了众多成果,但在实用化研究的方面还十分欠缺。因此在未来的研究中,如何从实用化的角度出发,将理论应用到实际,仍然是一个重要的研究课题^[49-50]。故障诊断预处理功能是整个实用化的故障诊断系统的入口,为后续的运行提供保证,因此对故障诊断预处理功能的研究也是推进电网故障诊断实用化的重要一步。

3 结语

采用智能方法的电网故障诊断是该领域发展过程中新的思路,并且目前已取得大量实质性成果。本文综述了目前较受关注的电网故障诊断的智能方法,相应介绍了这些方法的特点以及所存在的问题和近年来的研究成果,并指出当前电网故障诊断领域所面临的问题,如实用化不足,处理不确定信息容错性差等,最后探讨了电网故障诊断领域未来的发展趋势。这些智能方法有些还处于理论阶段,而且都有各自的弊端,因此需要在实际工程应用中不断完善,提升电网故障诊断的智能化水平。

参考文献

[1] 梅念, 石东源, 李银红, 等. 计及信息畸变影响的电网故障诊断分级优化方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 178-185.
 MEI Nian, SHI Dong-yuan, LI Yin-hong, et al. Power system fault diagnosis based on gradual optimization in

consideration of alarm information aberrance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 178-185.
 [2] 李红卫, 杨东升, 孙一兰, 等. 智能故障诊断技术研究综述与展望[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(2): 632-637.
 LI Hong-wei, YANG Dong-sheng, SUN Yi-lan, et al. Study review and prospect of intelligent fault diagnosis technique[J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(2): 632-637.
 [3] Joseph Giarratano. 专家系统原理与编程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 20-23.
 [4] Lee H J, Park D Y, Ahn B S, et al. A fuzzy expert system for the integrated fault diagnosis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(2): 833-838.
 [5] 赵伟, 白晓民, 丁剑, 等. 基于协同式专家系统及多智能体技术的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 1-8.
 ZHAO Wei, BAI Xiao-min, DING Jian, et al. A new fault diagnosis approach of power grid based on cooperative expert system and multi-agent technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 1-8.
 [6] 胡守仁, 余少波, 戴葵. 神经网络导论[M]. 长沙: 国防科技出版社, 1992: 2-3.
 [7] 鄂加强. 智能故障诊断及其应用[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2006: 64-65.
 [8] 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.
 GUO Chuang-xin, ZHU Chuan-bai, CAO Yi-jia, et al. State of arts of fault diagnosis of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 98-103.
 [9] 罗毅, 程宏波, 吴浩, 等. 一种基于小波分时灰度矩与概率神经网络的电网故障诊断方法[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2012, 24(1): 121-126.
 LUO Yi, CHENG Hong-bo, WU Hao, et al. A novel method of power system's fault diagnosis based on wavelet time-division gray moment and probability neural network[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2012, 24(1): 121-126.

- [10] 刘超, 何正友, 杨健维. 基于量子神经网络的电网故障诊断算法[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 56-60.
LIU Chao, HE Zheng-you, YANG Jian-wei. A quantum neural network based fault diagnosis algorithm for power grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 56-60.
- [11] Khomfoi S, Tolbert L M. Fault diagnosis system for a multilevel inverter using a principal component neural network[C] // Power Electronics Specialists Conference, 37th IEEE, 2006: 1-7.
- [12] 周曙, 王晓茹, 钱清泉. 基于贝叶斯网的分布式电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 76-81.
ZHOU Shu, WANG Xiao-ru, QIAN Qing-quan. Bayesian networks based distributed fault diagnosis approach for power grids[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 76-81.
- [13] WANG Yan, GENG Lan-qin. Bayesian network based fault section estimation in power systems[C] // Proceedings of TENCON IEEE. 2006: 1-4.
- [14] 宋功益, 王晓茹, 周曙. 基于贝叶斯网的电网多区域复杂故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 20-25.
SONG Gong-yi, WANG Xiao-ru, ZHOU Shu. Research on complex faults diagnosis of multi-area power network based on Bayesian networks[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 20-25.
- [15] Teive R C G, Coelho J, Camargo C B, et al. A Bayesian network approach to fault diagnosis and prognosis in power transmission systems[C] // Intelligent System Application to Power Systems, 16th International Conference on, 2011: 1-6.
- [16] 何小飞, 童晓阳, 周曙. 基于贝叶斯网络和故障区域识别的电网故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 29-34.
HE Xiao-fei, TONG Xiao-yang, ZHOU Shu. Power system fault diagnosis based on Bayesian network and fault section location[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 29-34.
- [17] 赵书强, 李勇, 王春丽. 基于可信性理论的输电网规划方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 166-171.
ZHANG Shu-qiang, LI Yong, WANG Chun-li. Transmission network expansion planning based on credibility theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 166-171.
- [18] 张志毅, 袁荣湘, 杨同忠, 等. 基于粗糙集和小生境遗传算法的电网故障诊断规则提取[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 158-163.
ZHANG Zhi-yi, YUAN Rong-xiang, YANG Tong-zhong, et al. Rule extraction for power system fault diagnosis based on the combination of rough sets and niche genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 158-163.
- [19] 郭文鑫, 文福拴, 廖志伟, 等. 计及保护和断路器误动与拒动的电力系统故障诊断解析模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 6-10.
GUO Wen-xin, WEN Fu-shuan, LIAO Zhi-wei, et al. An analytic model for power system fault diagnosis with malfunctions of protective relays and circuit breakers taken into account[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 6-10.
- [20] 刘道兵, 顾雪平, 李海鹏. 电网故障诊断的一种完全解析模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 85-92.
LIU Dao-bing, GU Xue-ping, LI Hai-peng. A complete analytic model for fault diagnosis of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 85-92.
- [21] 王家林, 夏立, 吴正国, 等. 电力系统故障诊断研究现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 210-216.
WANG Jia-lin, XIA Li, WU Zheng-guo, et al. State of arts of fault diagnosis of power systems[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 210-216.
- [22] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer, 1999.
- [23] ZHAN Hua-qun. Application of rough set and support vector machine in fault diagnosis of power electronic circuit[C] // The 2nd IEEE International Conference, 2010: 289-292.
- [24] 张树团, 张晓斌, 雷涛, 等. 基于粒子群算法和支持向量机的故障诊断研究[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(11): 1573-1574.
ZHANG Shu-tuan, ZHANG Xiao-bin, LEI Tao, et al. Research on fault diagnosis based on PSO and SVM[J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(11): 1573-1574.
- [25] 刘冠军, 苏永定, 潘才华. 基于综合型模糊支持向量

- 机的故障诊断方法及应用[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(7): 1363-1367.
- LIU Guan-jun, SU Yong-ding, PAN Cai-hua. Fault diagnosis method based on integrated fuzzy support vector machine and its application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(7): 1363-1367.
- [26] 刘普寅, 吴孟达. 模糊理论及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [27] Chang C S, Chen J M, Liew A C, et al. Power system fault diagnosis using fuzzy sets for uncertainties processing[C] // Intelligent Systems Applications to Power Systems, International Conference on, 1996: 333-338.
- [28] Jenkins L, Khincha H P. Deterministic and stochastic Petri net models of protection schemes[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(1): 84-90.
- [29] Binh P T T, Tuyen N D. Fault diagnosis of power system using neural Petri net and fuzzy neural Petri net[C] // Power India Conference, 2006.
- [30] 熊国江, 石东源. 容错 Petri 网电网故障诊断改进模型[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(1): 11-15.
- XIONG Guo-jiang, SHI Dong-yuan. Improved fault-tolerant Petri nets for fault-diagnosis power grids[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(1): 11-15.
- [31] Lo K L, Ng H S, Trecat J. Power systems fault diagnosis using Petri nets[J]. Generations, Transmissions and Distributions, IEEE Proceedings, 1997, 144(3): 231-236.
- [32] 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, 2010, 38(4): 140-150.
- LIN Sheng, HE Zheng-you, QIAN Qing-quan. Review and development on fault diagnosis in power grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 140-150.
- [33] 杨健维, 何正友, 臧天磊. 基于方向性加权模糊 Petri 网的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 42-49.
- YANG Jian-wei, HE Zheng-you, ZANG Tian-lei. Power system fault-diagnosis method based on directional weighted fuzzy Petri nets[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 42-49.
- [34] Ouchi Y, Eiichiro, Tazaki. Learning and reasoning method using fuzzy coloured Petri nets under uncertainty[C] // Systems Man and Cybernetics, Computational Cybernetics and Simulation, 1997 IEEE International Conference on, 1997, 4: 3867-3871.
- [35] 曾庆锋, 何正友, 杨健维. 基于有色 Petri 网的电力系统故障诊断模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 28(14): 5-11.
- ZENG Qing-feng, HE Zheng-you, YANG Jian-wei. Fault diagnosis model of electric power systems based on coloured Petri net[J]. Power System Protection and Control, 2010, 28(14): 5-11.
- [36] 刘同明, 夏祖勋, 解洪成. 信息融合技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 12-13.
- [37] Bdeworth Mark B, Obrein J. The omnibus model—a new model of data fusion[J]. IEEE Aerospace and Electronic System Magazine, 2000, 15(4): 30-38.
- [38] 郭创新, 彭明伟, 刘毅. 多数据源信息融合的电网故障诊断新方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(31): 1-7.
- GUO Chuang-xin, PENG Ming-wei, LIU Yi. Novel approach for fault diagnosis of the power grid with information fusion of multi-data resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(31): 1-7.
- [39] 郭创新, 游家训, 彭明伟, 等. 基于面向元件神经网络与模糊积分融合技术的电网故障智能诊断[J]. 电工技术学报, 2010, 29(9): 183-190.
- GUO Chuang-xin, YOU Jia-xun, PENG Ming-wei, et al. A fault intelligent diagnosis approach based on element-oriented artificial neural networks and fuzzy integral fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 29(9): 183-190.
- [40] FENG Deng-chao, Dias Pereira J M. Study on information fusion based on wavelet neural network and evidence theory in fault diagnosis[C] // Electronic Measurement and Instruments, 8th International Conference on, 2007: 3522-3526.
- [41] 郭创新, 高振兴, 刘毅, 等. 采用分层多源信息融合的电网故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 2976-2983.
- GUO Chuang-xin, GAO Zhen-xing, LIU Yi, et al.

- Hierarchical fault diagnosis approach for power grid with information fusion using multi-data resources[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 2976-2983.
- [42] Lekkas G P, Avouris N M, Papakonstantinou G. Development of distributed problem solving system for dynamic environments[J]. IEEE Trans on System Man and Cybernetics, 1995, 25(3): 400-414.
- [43] Heo J S, Lee K Y. A multi-agent system-based intelligent identification system for power plant control and fault-diagnosis[C] // Power Engineering General Meeting, 2006.
- [44] 徐岩, 张锐, 霍福广. 基于 MAS 信息融合的电网故障诊断[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(9): 24-28.
XU Yan, ZHANG Rui, HUO Fu-guang. Power grid fault diagnosis approach based on MAS data fusion[J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(9): 24-28.
- [45] 刘思华. 电网故障诊断方法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [46] 陈铁军, 宁美凤. 电网自愈控制中故障实时监测及诊断研究[J]. 自动化仪表, 2013, 34(1): 14-17.
CHEN Tie-jun, NING Mei-feng. Study on real time fault monitoring and diagnostic in self-healing control of power grid[J]. Process Automation Instrumentation, 2013, 34(1): 14-17.
- [47] 董明. 具有高容错能力的电力系统故障诊断的解析模型与方法[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [48] 李再华, 刘明昆. 电力系统故障的智能诊断综述[J]. 电气技术, 2010, 11(8): 21-24.
LI Zai-hua, LIU Ming-kun. Review of intelligence fault diagnosis in power system[J]. Electrical Engineering, 2010, 11(8): 21-24.
- [49] 张东英, 朱元林, 辛光明. 电网故障诊断系统在线运行状况分析及其改进措施[J]. 现代电力, 2011, 28(3): 17-21.
ZHANG Dong-ying, ZHU Yuan-lin, XIN Guang-ming. On-line operation state analysis on fault diagnosis system of power network and its improved measures[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(3): 17-21.
- [50] 刘道兵, 顾雪平, 赵洁琼. 地区电网故障恢复的实用化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 48-52.
LIU Dao-bing, GU Xue-ping, ZHAO Jie-qiong. Practical research of fault restoration for the regional power grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 48-52.

收稿日期: 2013-05-12; 修回日期: 2013-09-09

作者简介:

边莉 (1978-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为人工智能、阵列信号处理; E-mail: branran@163.com

边晨源 (1989-), 男, 通讯作者, 硕士研究生, 研究领域为电力系统智能故障诊断。