

# 人工智能算法在电能质量领域的应用

张文海, 肖先勇, 汪颖

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 系统地解决电能质量问题、实现对用户的优质供电, 是电力系统高质量发展过程中的重要问题之一。针对电能质量问题的研究, 涉及检测、识别、分析和治理控制等多个方面, 人工智能算法作为当前最具应用潜力的技术之一, 在数据分析处理、信息挖掘等方面具有较强分析能力, 在解决电能质量相关问题上得到了大量的应用。对电能质量相关研究内容和人工智能方法进行了简要介绍, 着重对近十年来人工智能算法在电能质量领域中的相关应用进行了综述和分析, 为专家学者深入研究应用人工智能算法解决电能质量问题提供了参考。

**关键词:** 电能质量; 扰动分类; 人工智能; 专家系统; 机器学习

**中图分类号:** TM71    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.19421/j.cnki.1006-6357.2020.09.001

## 0 引言

随着电网向高质量发展的转变, 新能源的大量接入以及直流技术的快速发展, 使得电力系统的电力电子化特征越发明显, 以CPU、微电子、数字化和信息化技术为核心的高科技精密设备越来越多, 在电源侧和用户侧都对电能质量水平提出了更高的要求。同时, 随着电网信息化、智能化的深入, 电能质量监测已由过去的单点监测发展为现在的系统监测, 并逐步形成了完备的电能质量监测系统构架<sup>[1]</sup>, 为发现、评估和解决电能质量问题奠定了重要的数据基础。由于监测系统的快速发展, 数据规模也日益增长, 探索快速、智能的电能质量数据分析处理方法成为目前亟须解决的重要问题。近年来, 以深度学习(deep learning)为代表的智能算法将人工智能又带入了一个新阶段, 并且随着大数据、人工智能芯片的同步发展, 为人工智能算法的应用奠定了重要的数据和平台基础。

从20世纪80年代开始, 人工智能相关算法就已经被应用在电力系统中的稳定性分析<sup>[2]</sup>、电网调控<sup>[3]</sup>、状态检修<sup>[4]</sup>、综合能源<sup>[5]</sup>等方面, 同样地, 在电能质量领域, 人工智能算法也展现出了非常强的应用潜力。在21世纪初, 文献[6]对早期的人工智能方法在电能质

量领域中的应用进行了综述, 早期的人工智能算法以模糊逻辑(fuzzy logic)、专家系统(expert system)和仿生学优化算法为主[如遗传算法(genetic algorithm)], 在当时人工神经网络(artificial neural network)尚处于初级阶段; 在随后一段时间内, 人工智能算法主要被应用于电能质量的扰动分类, 文献[7]对人工神经网络、贝叶斯分类(Bayesian classifier)、专家系统、支持向量机(support vector machine)等几种典型的模式分类方法在电能质量扰动信号分类中的应用进行了综述。

近十年来, 以机器学习(machine learning)为代表的人工智能不断发展, 如深度学习、强化学习等, 应用新方法在解决传统电能质量扰动识别方面持续拓展, 并且随着电能质量监测数据的增多, 基于人工智能算法挖掘电能质量扰动监测数据信息进行了较多探索, 也取得了不错的效果。本文结合电能质量研究问题与人工智能算法发展, 梳理了近十年来人工智能相关算法在解决电能质量问题上的一些思路, 希望能为后续人工智能算法的研究和应用提供支撑。

## 1 电能质量相关问题

电能质量用于表示任何导致用电设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率的偏差, 包括电压暂降、不平衡、谐波、电压波动等, 电能质量扰动的标准定义和限值, 在我国电能质量国家标准体系中已有完备介绍。但随着经济的转型和电网的发展, 在电源、电网和负荷

**基金项目:** 四川省应用基础研究项目(2020YJ0012)。

Supported by Sichuan Science and Technology Program (2020YJ0012) .

[引文信息] 张文海, 肖先勇, 汪颖. 人工智能算法在电能质量领域的应用[J]. 供用电, 2020, 37(9): 3-8, 16.

ZHANG Wenhai, XIAO Xianyong, WANG Ying. The application of artificial intelligence in power quality [J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(9): 3-8, 16.

侧都引入了大量的电力电子装置, 这些电力电子装置在引入了新的电能质量问题的同时, 还对其他电能质量问题非常敏感, 带来了许多新的电能质量问题, 同时随着新的技术发展也给解决传统老问题提供了新思路, 针对新背景下的电能质量问题的分析研究仍在不断深入。目前电能质量相关研究主要集中在: 电能质量扰动检测与评估, 电力扰动数据挖掘 (识别及原因推断等), 电能质量扰动对于敏感负荷及工业过程的影响分析, 电能质量扰动的治理方法研究等方面。

## 2 人工智能发展历程及相关算法

人工智能是研究开发能够模拟、延伸和扩展人类智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科

学, 最初于1956年提出, 其发展历程大体可以分为推理期、知识期和学习期3个阶段<sup>[8]</sup>, 如图1所示。推理期主要基于逻辑或者事实归纳规则。知识期以专家知识库为基础, 以“知识库+推理机”为基础模型, 典型代表就是专家系统。然而由于知识和推理的方式对于某些行为规则不能准确描述, 因此提出了机器学习概念, 让计算机从数据中自动分析获得规律, 并利用规律对未知数据进行预测分析, 该领域也成为当前最热门的研究方向之一, 包括当前关注度最高的深度学习和强化学习均属于机器学习范畴。文献[9]对各类机器学习算法进行了详细的介绍。由于人工智能概念范围很广, 没有一种通用的方法可以应用到所有领域, 因此本节针对电能质量领域应用较多的人工智能算法进行介绍。

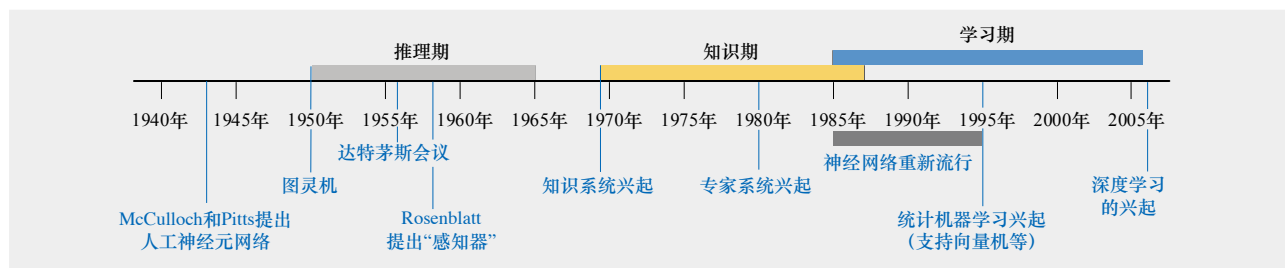


图1 人工智能发展历史

Fig.1 The development of artificial intelligence

### 2.1 专家系统

专家系统是使用人类专家推理的计算机模型来处理现实世界中需要专家作出解释的复杂问题, 其模型如图2所示, 可以认为是“知识库”和“推理机”的结合, 为构建知识库形成了知识表示、知识获取等研究问题, 而推理机又包含了机器推理、模糊推理等方式, 并先后经历了基于规则、基于框架、基于案例、基于模型和基于网络的发展阶段<sup>[10]</sup>, 该方法在早期的电能质量扰动分类中得到了广泛应用。

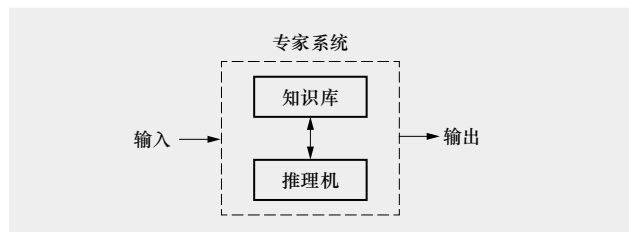


图2 专家系统简化模型

Fig.2 The simplified model for expert system

### 2.2 机器学习算法

机器学习是指从有限的观测数据中学习出具有一般性的规律, 并将这些规律应用到未观测到的样本上并实现判断的方法, 其核心在于如何基于有限数据的学习形成一个预测模型, 如图3所示<sup>[11]</sup>, 在早期的工程领域也

被称为模式识别, 其应用基础是需要大量的观测数据。

按照训练样本提供的信息以及反馈方式的不同, 机器学习算法可分为监督学习、半监督学习、无监督学习和强化学习, 其差别在于有监督式学习需要标识数据; 无监督学习不需要任何标识数据。典型监督学习算法包括决策树、朴素贝叶斯分类器、最小二乘法、逻辑回归、支持向量机、K最近邻算法、集成学习等, 非监督学习算法包括聚类算法、K-均值算法、主成分分析、SVD矩阵分解等。当前研究热点神经网络和深度学习算法, 既可以是有监督也可以是无监督, 根据其学习网络特点还可以分为堆叠自动编码器 (stacked Boltzmann machine)、卷积神经网络 (convolutional neural network)、深度置信网络 (deep belief network)、递归神经网络 (recursive neural network) 等。

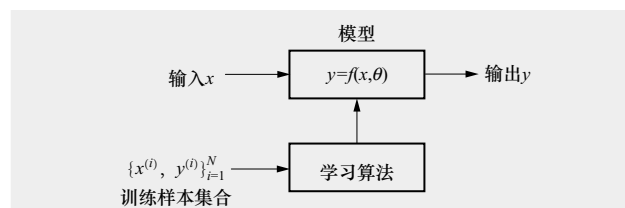


图3 机器学习简化模型

Fig.3 The simplified model for machine learning

### 3 人工智能算法在电能质量分析中的应用

电能质量研究涉及领域非常宽泛,目前人工智能算法主要应用于电能质量扰动的分类识别、电压暂降的原因识别、电力扰动数据的信息挖掘以及电能质量治理控制等方面,主要是应用专家系统或机器学习确定电能质量扰动识别分析模型、应用仿生学的优化算法求解相关优化问题、应用关联分析挖掘电力扰动内部信息、应用机器学习确定电能质量控制参数等。

#### 3.1 人工智能算法在电力扰动检测分类中的应用

电能质量扰动的检测识别的目标在于区分系统中正常的扰动和电能质量扰动、确定电能质量扰动的类型,针对电能质量扰动的分类识别已取得大量研究成果<sup>[12-36]</sup>。目前,单一的电能质量扰动识别已得到初步解决,现有研究主要集中在电能质量复合扰动分类上,该类扰动包含两种(含两种)以上单一扰动的电能质量扰动形式<sup>[12]</sup>,因此对于分类识别算法提出了更高的要求。

在进行电能质量扰动分类时,主要是应用人工智能算法中的机器学习算法,其识别流程见图4。在识别过程中,关键环节包括特征提取、特征选择和机器学习3个方面,研究也主要围绕这3个方面开展,其核心目标在于提升算法训练速度、减少样本依赖、提高识别准确率等。

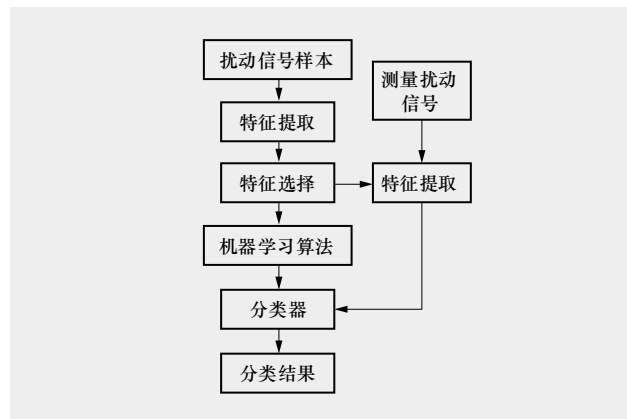


图4 基于机器学习的电能质量扰动分类识别流程

Fig.4 The flowchart of the power quality disturbance classification based on machine learning

在特征提取算法方面,包括时域、频域、时频域等各类方法,其中时频域变换方法受关注度最高,且以小波变换、S变换及其改进和组合算法为代表,近年来也提出了一些新的特征提取算法,包括压缩感知、变分模式分解等。复杂丰富的特征提取算法使得特征集呈现复杂化和高维化的趋势,但过多的特征会减慢其学习速度,并导致分类过度拟合<sup>[13]</sup>,因此考虑特征与样本之间的相关性、特征之间冗余性等,开展特征优化选择成为研究点之一,文献[14]针对特征选择方法进行了介

绍,在现有的电能质量扰动分类方法研究中,也有大量方法考虑了特征的优化选择问题<sup>[15-20]</sup>。

在现有分类识别方法中,文献[20-24]提出利用傅里叶变换、变分模态分解等方法进行特征提取,并基于决策树、神经网络、支持向量机、极限学习机等算法进行识别;在文献[25-29]主要应用小波变换及其改进方法提取扰动特征,并分别应用深度置信网络、BP神经网络、支持向量机等算法构建分类器;在文献[30-36]主要基于S变换及其改进方法提取特征,应用决策树、模糊SOM网络、学习向量量化神经网络、支持向量机等算法实现分类。

需要注意的是,本文仅针对部分电能质量扰动分类研究成果进行了列举,还有大量的研究应用不同的算法进行了尝试,随着研究的深入,电能质量扰动分类问题已逐步得到解决,现有方法效果已基本能满足实际工程应用需求,已不再是工业界关注的重点。

#### 3.2 人工智能算法扰动原因识别中的应用

除了对电能质量扰动进行分类外,还有大量研究针对特定电能质量扰动类型进行细分以及原因进行识别<sup>[37-39]</sup>,如电压暂降的原因识别(引起原因包括:故障、励磁涌流、电机启动等),其本质而言,分析方法思路与电能质量扰动的识别相似,主要也是应用人工智能算法中的机器学习方法进行推断识别。文献[37]提出利用二维变换提取暂降特征,利用深度学习混合模型进行暂降源的分类和识别;文献[38-39]均应用了深度置信网络结合深度学习开展识别,但是在特征输入时,文献[38]首先应用卷积神经网络获取信号时序和空间特征。

#### 3.3 人工智能算法在扰动信息挖掘中的应用

电能质量扰动数据中除包含了“电能质量”信息外,还包含了大量系统状态和设备状态等信息,因此阿尔伯塔大学Wilson XU教授在2013年提出了电力扰动数据分析学<sup>[40]</sup>,提出基于电能质量扰动数据开展其他方面的应用,如分析电能质量对设备状态的影响、发现设备异常运行状态等<sup>[41]</sup>。文献[42]融合电力设备故障统计数据与电能质量监测数据进行多维度的数据关联分析,发现了电能质量数据与电容/电抗器故障之间的关联关系;文献[43]基于聚类分析,发掘不同地区、不同行业的电能质量统计特性,取得了一定效果;文献[44]提出应用多隐马尔科夫模型实现了考虑天气因素的电能质量水平的预测;文献[45]从系统角度探讨了数据挖掘技术在电能质量监测数据中的应用思路和场景,分析了电能质量指标与环境、气象等方面之间的关联关系;文献[46-47]分别应用支持向量机和限制玻尔兹曼机-堆叠自动编码器算法识别电力扰动中的电缆早期故障扰



动,实现对电缆的状态感知和故障预警;文献[48]围绕利用电能质量数据辅助电能质量以外领域进行决策支持的研究现状进行了概述。随着电能质量监测系统向中低压系统的扩展和完善,基于电能质量数据进行数据挖掘,扩展电能质量数据应用价值,已成为当前研究热点之一,将为辅助解决规划、运检等方面的问题提供重要参考。

### 3.4 人工智能算法在电能质量治理控制中的应用

在电能质量治理方面,主要是基于人工智能算法在电力电子控制中的应用,从而实现对电能质量的治理,近年来,基于人工智能算法的控制方法也被大量尝试应用于相关控制中,包括强化学习、神经网络、模糊逻辑等方法。文献[49]提出应用神经网络进行统一电能质量控制器的控制;文献[50]设计了基于强化学习的配电静止无功补偿器的在线控制模块,用于提升微电网电能质量水平;文献[51]提出结合自适应神经网络的模糊推理系统和模型参考自适应系统,可实现统一电能质量调节器的自适应控制;文献[52]提出将粒子群优化算法和人工神经网络算法相结合,以实现对接管控制电抗器的控制,提升电能质量;文献[53]提出应用模糊逻辑控制实现电压恢复器的动态控制;文献[54]提出应用最小均方算法的神经网络结构用于提升配网电能质量水平;文献[55]提出基于delta-bar-delta神经网络控制方法,用于提升含光伏系统的配电网电能质量水平。针对不同的应用场景和控制目标,已有许多人工智能算法被提出并被应用在电能质量控制系统中,但该类研究思路尚未被学术界和工业界所广泛接受,在未来研究中,提出完备的控制理论框架,证明并验证该类方法的鲁棒性和稳定性尚需进一步的完善。

### 3.5 其他方面的应用

在电能质量研究领域的其他方面,文献[56]提出应用机器学习算法确定电能质量的最优监测点;文献[57]应用专家系统确定电能质量最优治理措施,解决三相交流系统微电网中的电能质量问题;文献[58]提出应用FSOM神经网络算法对缺失电能质量数据进行修复;文献[59]提出应用深度学习算法进行电压暂降的估计。在实际研究中<sup>[60-66]</sup>,人工智能算法在电能质量领域的应用远不止于此,其更多的应用可行性和实用性尚值得进一步的确定。

## 4 结语

本文针对电能质量研究领域涉及的人工智能算法应用较多的方向进行了梳理,着重对人工智能算法在电能质量扰动分类、扰动原因推断识别、数据挖掘、电能质量治理控制等方面的应用进行了介绍,结论如下:

1) 人工智能算法在电能质量领域的应用主要基于专家系统和机器学习算法,并主要应用于电能质量扰动分类和数据挖掘中。

2) 基于人工智能算法的电能质量扰动分类已提出了大量方法,该方面的研究已逐渐趋于成熟,不再是工业界关注的重点。未来基于人工智能算法挖掘电能质量数据在设备状态监测等方面的应用将是未来研究热点。

3) 人工智能算法以数据为基础,需要进行大量的训练,在实际应用中,方法的稳定性和可靠性需进一步的验证。同时,实际系统中并非所有的案例都有大量样本,研究适用于小样本的机器学习算法是下一步亟须解决的问题。

DU

### 参考文献

- [1] 张逸,林焱,吴丹岳. 电能质量监测系统研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 138-147.  
ZHANG Yi, LIN Yan, WU Danyue. Research status and development trend of power quality monitoring system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 138-147.
- [2] 汤奕,崔晗,李峰,等. 人工智能在电力系统暂态问题中的应用综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 2-13.  
TANG Yi, CUI Han, LI Feng, et al. Review on artificial intelligence in power system transient stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 2-13.
- [3] 闪鑫,陆晓,霍明玉,等. 人工智能应用于电网调控的关键技术分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 49-57.  
SHAN Xin, LU Xiao, ZHAI Mingyu, et al. Analysis of key technologies of artificial intelligence applied to power grid regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 49-57.
- [4] 刘云鹏,许自强,李刚,等. 人工智能驱动的数据分析技术在电力变压器状态检修中的应用综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 337-348.  
LIU Yunpeng, XU Ziqiang, LI Gang, et al. Review on applications of artificial intelligence driven data analysis technology in condition based maintenance of power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 337-348.
- [5] 杨挺,赵黎媛,王成山. 人工智能在电力系统及综合能源系统中的应用综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 2-14.  
YANG Ting, ZHAO Liyuan, WANG Chengshan. Review on application of artificial intelligence in power system and integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 2-14.
- [6] ANIS IBRAHIM W R, MORCOS M M. Artificial intelligence and advanced mathematical tools for power quality applications: a survey[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(1): 668-673.
- [7] 方群会,刘强,周林,等. 模式分类方法在电能质量扰动信号分类中的应用综述[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 31-36.  
FANG Qunhui, LIU Qiang, ZHOU Lin, et al. A survey on application of pattern classification in power quality disturbance signals classification[J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 31-36.
- [8] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 10-13.
- [9] 程乐峰,余涛,张孝顺,等. 机器学习在能源与电力系统领域的应用和展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 15-43.  
CHENG Lefeng, YU Tao, ZHANG Xiaoshun, et al. Application and prospect of machine learning in the field of energy and power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 15-43.
- [10] 张煜东,吴乐南,王水花. 专家系统发展综述[J]. 计算机工程与

- 应用, 2010, 46 (19): 43-47.
- ZHANG Yudong, WU Yuenan, WANG Shuihua. Survey on development of expert system [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46 (19): 43-47.
- [11] 邱锡鹏. 神经网络与深度学习 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 26-27.
- [12] 刘志刚, 张巧革, 张杨. 电能质量复合扰动分类的研究进展 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (13): 146-153.
- LIU Zhigang, ZHANG Qiaoge, ZHANG Yang. Review of power quality mixed disturbances identification [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41 (13): 146-153.
- [13] 张俐, 王枫. 基于最大相关最小冗余联合互信息的多标签特征选择算法 [J]. 通信学报, 2018, 39 (5): 111-122.
- ZHANG Li, WANG Cong. Multi-label feature selection algorithm based on maximum correlation minimum redundancy joint mutual information [J]. Journal of Communications, 2018, 39 (5): 111-122.
- [14] 姚旭, 王晓丹, 张玉玺, 等. 特征选择方法综述 [J]. 控制与决策, 2012, 27 (2): 161-166, 192.
- YAO Xu, WANG Xiaodan, ZHANG Yuxi, et al. Summary of feature selection methods [J]. Control and Decision, 2012, 27 (2): 161-166, 192.
- [15] LEE C, SHEN Y. Optimal feature selection for power-quality disturbances classification [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26 (4): 2342-2351.
- [16] RAY P K, MOHANTY S R, KISHOR N, et al. Optimal feature and decision tree-based classification of power quality disturbances in distributed generation systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5 (1): 200-208.
- [17] KHOKHAR S, ZIN A A M, MEMON A P, et al. A new optimal feature selection algorithm for classification of power quality disturbances using discrete wavelet transform and probabilistic neural network [J]. Measurement, 2017 (95): 246-259.
- [18] 何顺帆, 李开成, 蔡得龙, 等. 电能质量扰动数据特征的最优分辨率提取 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38 (21): 6223-6232, 6484.
- HE Shunfan, LI Kaicheng, CAI Delong, et al. Extraction of optimal resolution of power quality disturbance data features [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (21): 6223-6232, 6484.
- [19] 瞿合祚, 刘恒, 李晓明, 等. 一种电能质量多扰动分类中特征组合优化方法 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37 (3): 146-152.
- QU Hezuo, LIU Heng, LI Xiaoming, et al. An optimization method of feature combination in power quality multi-disturbance classification [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37 (3): 146-152.
- [20] 黄南天, 彭华, 蔡国伟, 等. 电能质量复合扰动特征选择与最优决策树构建 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (3): 776-786.
- HUANG Nantian, PENG Hua, CAI Guowei, et al. Power quality compound disturbance feature selection and optimal decision tree construction [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (3): 776-786.
- [21] BORGES F A S, FERNANDES R A S, SILVA I N, et al. Feature extraction and power quality disturbances classification using smart meters signals [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12 (2): 824-833.
- [22] 黄建明, 瞿合祚, 李晓明. 基于短时傅里叶变换及其谱峭度的电能质量混合扰动分类 [J]. 电网技术, 2016, 40 (10): 3184-3191.
- HUANG Jianming, QU Hezuo, LI Xiaoming. Power quality mixed disturbance classification based on short-time Fourier transform and its spectral kurtosis [J]. Power System Technology, 2016, 40 (10): 3184-3191.
- [23] ZHAO C, LI K, LI Y, et al. Novel method based on variational mode decomposition and a random discriminative projection extreme learning machine for multiple power quality disturbance recognition [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15 (5): 2915-2925.
- [24] BAGHERI A, GU I Y H, BOLLIN M, et al. A robust transform-domain deep convolutional network for voltage dip classification [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33 (6): 2794-2802.
- [25] 王玥, 肖斐, 艾芊, 等. 基于深度置信网络的电能质量扰动事件分类 [J]. 供用电, 2019, 36 (1): 40-45, 53.
- WANG Yue, XIAO Fei, AI Qian, et al. Classification of power quality disturbance events based on deep belief network [J]. Distribution & Utilization, 2019, 36 (1): 40-45, 53.
- [26] ERISTI H, DEMIR Y. Automatic classification of power quality events and disturbances using wavelet transform and support vector machines [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6 (10): 968-976.
- [27] 姚建刚, 郭知非, 陈锦攀. 基于小波和BP神经网络的电能扰动分类新方法 [J]. 电网技术, 2012, 36 (5): 139-144.
- YAO Jiangang, GUO Zhifei, CHEN Jinpan. A new method for classification of power disturbance based on wavelet and BP neural network [J]. Power System Technology, 2012, 36 (5): 139-144.
- [28] 张巧革, 刘志刚, 朱玲, 等. 基于多标签Rank-WSVM的复合电能质量扰动分类 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 33 (28): 114-120.
- ZHANG Qiaoge, LIU Zhigang, ZHU Ling, et al. Classification of compound power quality disturbances based on multi-label Rank-WSVM [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 33 (28): 114-120.
- [29] HAFIZ F, SWAIN A, NAIK C, et al. Identification of power quality events selection of optimum base wavelet and machine learning algorithm [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2019, 13 (2): 260-271.
- [30] 黄南天, 徐殿国, 刘晓胜. 基于S变换与SVM的电能质量复合扰动识别 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (10): 23-30.
- HUANG Nantian, XU Dianguo, LIU Xiaosheng. Power quality compound disturbance recognition based on S transform and SVM [J]. Journal of Electrical Engineering, 2011, 26 (10): 23-30.
- [31] KUMAR R, SINGH B, SHAHANI D T, et al. Recognition of power-quality disturbances using S-transform-based ANN classifier and rule-based decision tree [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2015, 51 (2): 1249-1258.
- [32] 徐艳春, 高永康, 李振兴, 等. 基于VMD初始化S变换的混合动力系统电能质量扰动检测与分类 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (16): 4786-4798, 4980.
- XU Yanchun, GAO Yongkang, LI Zhenxing, et al. Detection and classification of power quality disturbance in hybrid power system based on VMD initial S transformation [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (16): 4786-4798, 4980.
- [33] 尹柏强, 何怡刚, 朱彦卿. 一种广义S变换及模糊SOM网络的电能质量多扰动检测和识别方法 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (4): 866-872.
- YIN Boqiang, HE Yigang, ZHU Yanqing. A method for detection and recognition of power quality multiple disturbance based on generalized S transform and fuzzy SOM network [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (4): 866-872.
- [34] 徐志超, 杨玲君, 李晓明. 基于聚类改进S变换与直接支持向量机的电能质量扰动识别 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35 (7): 50-58, 73.
- XU Zhichao, YANG Lingjun, LI Xiaoming. Power quality disturbance recognition based on clustering improved S transform and direct support vector machine [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35 (7): 50-58, 73.
- [35] 李建阔, 林海军, 梁成斌, 等. 基于双分辨率S变换和学习向量量化神经网络的电能质量扰动检测方法 [J]. 电工技术学报, 2019, 34 (16): 3453-3463.
- LI Jianmin, LIN Haijun, LIANG Chengbin, et al. Power quality disturbance detection method based on double resolution S transform and learning vector quantization neural network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34 (16): 3453-3463.
- [36] 黄南天, 张卫辉, 蔡国伟, 等. 采用改进多分辨率快速S变换的电能质量扰动识别 [J]. 电网技术, 2015, 39 (5): 1412-1418.
- HUANG Nantian, ZHANG Weihui, CAI Guowei, et al. Power quality disturbance recognition using improved multi-resolution fast S-transform [J]. Power System Technology, 2015, 39 (5): 1412-1418.
- [37] ZHENG Z, QI L, WANG H. Recognition method of voltage sag causes based on two-dimensional transform and deep learning hybrid model [J]. IET Power Electronics, 2020, 13 (1): 168-177.
- [38] 郑智聪, 王红, 齐林海. 基于深度学习模型融合的电电压暂降源识别方法 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (1): 97-104, 324.
- ZHENG Zhicong, WANG Hong, QI Linhai. Voltage sag source recognition method based on deep learning model fusion [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (1): 97-104, 324.
- [39] 李丹奇, 梅飞, 张震宇, 等. 基于深度置信网络的电压暂降特征提取及源辨识方法 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44 (4): 150-160.
- LI Danqi, MEI Fei, ZHANG Chenyu, et al. Method for extracting

- voltage sag feature and source identification based on deep belief network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (4): 150-160.
- [40] 徐文远, 雍静. 电力扰动数据分析学——电能质量监测数据的新应用 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33 (19): 93-101, 15.
- XU Wenyuan, YONG Jing. Power disturbance data analysis-new application of power quality monitoring data [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33 (19): 93-101, 15.
- [41] Power Quality Subcommittee Working Group on Power Quality Data Analytics. Electric signatures of power equipment failures [R/OL]. [2020-06-15]. [http://grouper.ieee.org/groups/td/pq/data/downloads/Signatures\\_Equipment\\_Failures\\_Aug2015.pdf](http://grouper.ieee.org/groups/td/pq/data/downloads/Signatures_Equipment_Failures_Aug2015.pdf).
- [42] 钟庆, 陈伟坤, 许中, 等. 设备故障统计数据与电能质量监测数据的关联分析 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37 (6): 29-34, 45.
- ZHONG Qing, CHEN Weikun, XU Zhong, et al. Correlation analysis of equipment failure statistics and power quality monitoring data [J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2016, 37 (6): 29-34, 45.
- [43] 钟庆, 刘峰, 王钢, 等. 电能质量监测数据中间距离法聚类分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28 (8): 69-73.
- ZHONG Qing, LIU Feng, WANG Gang, et al. Cluster analysis of power quality monitoring data with intermediate distance method [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28 (8): 69-73.
- [44] XIAO F, AI Q. Data-driven multi-hidden markov model-based power quality disturbance prediction that incorporates weather conditions [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34 (1): 402-412.
- [45] 林顺富, 谢潮, 汤波, 等. 数据挖掘在电能质量监测数据分析中的应用 [J]. 电测与仪表, 2017, 54 (9): 46-51.
- LIN Shunfu, XIE Chao, TANG Bo, et al. Application of data mining in data analysis of power quality monitoring [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54 (9): 46-51.
- [46] CHANG G W, HONG Y, LI G. A hybrid intelligent approach for classification of incipient faults in transmission network [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34 (4): 1785-1794.
- [47] WANG Y, LU H, XIAO X, et al. Cable incipient fault identification using restricted boltzmann machine and stacked autoencoder [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14 (7): 1242-1250.
- [48] 张宇帆, 艾芊, 肖斐, 等. 数据驱动电能质量分析现状及其支撑技术与展望 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38 (11): 187-196.
- ZHANG Yufan, AI Qian, XIAO Fei, et al. Present situation, supporting technologies and prospect of data driven power quality analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38 (11): 187-196.
- [49] VADIRAJACHARYA K, PROMOD A, OAM G H. Performance investigation of neural-network-based unified power-quality conditioner [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26 (1): 431-437.
- [50] BAGHERI M, NURMANOVA V, ABEDINIA O, et al. Enhancing power quality in microgrids with a new online control strategy for DSTATCOM using reinforcement learning algorithm [J]. IEEE Access, 2018 (6): 38986-38996.
- [51] SENTHILKUMAR A, RAJ P A. ANFIS and MRAS-PI controllers based adaptive-UPQC for power quality enhancement application [J]. Electric Power Systems Research, 2015 (126): 1-11.
- [52] ALKAYYALI M, GHAEJ B. Hybrid PSO-ANN algorithm to control TCR for voltage balancing [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14 (5): 863-872.
- [53] MALLICK N, MUKHERJEE V. Interval type 2 fuzzy logic controlled advanced dynamic voltage restorer for voltage sag alleviation [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13 (14): 3020-3028.
- [54] AGARWAL R K, HUSSAIN I, SINGH B. Application of LMS-based NN structure for power quality enhancement in a distribution network under abnormal conditions [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2018, 29 (5): 1598-1607.
- [55] SHUKL P, SINGH B. Delta-bar-delta neural-network-based control approach for power quality improvement of solar-PV-interfaced distribution system [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16 (2): 790-801.
- [56] ALI S, WU K, WESTON K, et al. A machine learning approach to meter placement for power quality estimation in smart grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7 (3): 1552-1561.
- [57] MOREIRA A C, PAREDES K M, SOUZA W A, et al. Intelligent expert system for power quality improvement under distorted and unbalanced conditions in three-phase AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9 (6): 6951-6960.
- [58] 杨挺, 何周泽, 赵东艳, 等. 基于FSOM神经网络的电能质量数据缺失修复算法 [J]. 电网技术, 2020, 44 (5): 1941-1949.
- YANG Ting, HE Zhouze, ZHAO Dongyan, et al. Algorithm for repairing missing power quality data based on FSOM neural network [J]. Power System Technology, 2020, 44 (5): 1941-1949.
- [59] LIAO H, MILANOVIC J V, SHENFIELD A. Voltage sag estimation in sparsely monitored power systems based on deep learning and system area mapping [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33 (6): 3162-3172.
- [60] 谢善益, 肖斐, 艾芊, 等. 基于并行隐马尔科夫模型的电能质量扰动事件分类 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47 (2): 80-86.
- XIE Shanyi, XIAO Fei, AI Qian, et al. Parallel hidden Markov model based classification of power quality disturbance events [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47 (2): 80-86.
- [61] YANG L, PENG J, WANG T X, et al. Compliance verification and probabilistic analysis of state-wide power quality monitoring data [J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1 (3): 391-395.
- [62] 马嘉秀, 徐伟浓, 何复兴, 等. 基于WT和SVM的电能质量分类识别方法 [J]. 智慧电力, 2019, 47 (3): 16-22, 37.
- MA Jiaxiu, XU Weinong, HE Fuxing, et al. A novel power quality classification and identification method based on WT and SVM [J]. Smart Power, 2019, 47 (3): 16-22, 37.
- [63] 许立武, 李开成, 罗奕, 等. 基于不完全S变换与梯度提升树的电能质量复合扰动识别 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47 (6): 24-31.
- XU Liwu, LI Kaicheng, LUO Yi, et al. Classification of complex power quality disturbances based on incomplete S-transform and gradient boosting decision tree [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47 (6): 24-31.
- [64] 邓焱, 徐栋杰, 刘文泽. 基于支持概率距离的电能质量综合评估方法 [J]. 广东电力, 2017, 30 (9): 63-69.
- DENG Yan, XU Dongjie, LIU Wenzhe. Comprehensive evaluation method for power quality based on support probability distance [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30 (9): 63-69.
- [65] 林爽, 秦萃丽. 模糊层次分析法在电能质量综合评估中的应用研究 [J]. 电网与清洁能源, 2018, 34 (1): 72-77, 83.
- LIN Shuang, QIN Cuili. Application of fuzzy analytic hierarchy process in comprehensive evaluation of power quality [J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34 (1): 72-77, 83.
- [66] 谭秀美, 肖先勇, 张逸, 等. 基于敏感过程运行状态的事件型电能质量扰动损失评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46 (6): 84-89.
- TAN Xiumei, XIAO Xianyong, ZHANG Yi, et al. Assessment of economic loss caused by event power quality disturbances based on sensitive process running states [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46 (6): 84-89.

收稿日期: 2020-07-01; 修回日期: 2020-07-15

#### 作者简介:

张文海 (1989—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为电力扰动及其主动应用。

肖先勇 (1968—), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为电能质

量与优质供电。

汪颖 (1981—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量与优质供电。

(下转第 16 页 continued on page 16)



- 的应用 [J]. 电网技术, 2017, 41 (3): 1022-1028.
- LI Chenyi, YANG Jiali, XU Yonghai, et al. Application of comprehensive fuzzy evaluation method on recognition of voltage sag disturbance sources [J]. Power System Technology, 2017, 41 (3): 1022-1028.
- [21] 李夏林, 刘雅娟, 朱武. 基于配电网的复合电压扰动源分类与识别新方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45 (2): 131-139.
- LI Xialin, LIU Yajuan, ZHU Wu. A new method to classify and identify composite voltage sag sources in distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45 (2): 131-139.
- [22] 汪颖, 王欢, 张姝. 基于优化极限学习机的电压暂降源识别方法 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44 (9): 135-145.
- WANG Ying, WANG Huan, ZHANG Shu. Recognition method of voltage sag source based on optimized extreme learning machine [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (9): 135-145.
- [23] 张伟. 基于S变换和RBF神经网络的电气化铁路电压暂降识别研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.

收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-07-15

#### 作者简介:

马明 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能质量、无功电压和新能源并网。

陈春林 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量与优质供电。

### Identification Method of Voltage Sag Source Based on BP-AdaBoost

MA Ming, CHEN Chunlin

(Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** Accurate identification of voltage sag sources is critical to managing voltage sag problems and improving power quality. A voltage sag source identification method based on BP-AdaBoost network is proposed in this paper. By directly extracting the time-domain features of the original waveform and the time-frequency domain features after S-transform, a recognition feature vector is constructed. AdaBoost algorithm is used to integrate and optimize the strong classifier for the single classifier, such as the classification accuracy and over-fitting. The BP neural network is selected as the basic classifier, and the strongest network parameters are obtained through a large amount of data training, and the BP-AdaBoost sag source identification model is obtained. The effectiveness of the proposed sag source identification model is verified by the simulation data and measured data. It is proved that the proposed method has high identification accuracy and has a bright future in industrial application prospects.

**Key words:** voltage sag; sag source identification; integrated learning; AdaBoost; confusion matrix

(上接第 8 页 continued from page 8)

### The Application of Artificial Intelligence in Power Quality

ZHANG Wenhai, XIAO Xianrong, WANG Ying

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** It is one of the important problems for the high quality development of power system to solve the power quality problem and realize the high quality power supply. The research on power quality involves many aspects such as detection, identification, analysis and mitigation. As one of the most potential technologies and application method, artificial intelligence algorithm has strong ability in data analysis and processing, information mining and etc. It has been widely used to solve power quality related problems. This paper mainly introduces the power quality research area and artificial intelligence methods and focuses on the application of artificial intelligence algorithm in power quality field in recent ten years, which provides a reference for the in-depth artificial intelligence algorithm to solve power quality problems.

**Key words:** power quality; disturbance classification; artificial intelligence; expert system; machine learning