

# 电力设备故障声学检测技术综述及展望

张 灏

(国网四川省电力公司,四川 成都 610041)

**摘要:**随着电力系统智能化水平的提高,使得电力系统关键设备运行健康状态的检测要求不断提高。声学检测技术因具有无损检测、准确性高、应用前景广泛及定位方便等特性而成为电力系统故障检测技术领域内的研究热点。首先,阐述了声学检测技术的机理,并且总结了声学检测技术在电力系统中的应用架构;其次,分别从声源信号采集、故障诊断、故障定位及典型应用场景等方面综述了电力设备故障声学检测技术的关键问题与研究现状;最后,分析了电力设备故障声学检测技术的局限性,并提炼出声学检测技术可能的四大研究方向。

**关键词:**声学检测;故障检测;电力系统;电力设备

**中图分类号:**TM 83 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)04-0060-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20220412

## Review on Acoustic Detection Technology for Power Equipment Fault and Its Prospect

ZHANG Xian

(State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** With the development of intelligent power system, the detection requirements of the operation state of key equipment in power system are increasing. Acoustic detection technology has become a research hotspot in the field of power system fault detection because of its non-destructive detection, high accuracy, wide application prospect and convenient location. Firstly, the mechanism of acoustic detection technology is described, and the application architecture of acoustic detection technology in power system is summarized. Secondly, the key problems and research status of acoustic detection technology for power equipment fault are summarized from the aspects of sound source signal acquisition, fault diagnosis, fault location and typical application scenarios. Finally, the limitations of acoustic detection technology for power equipment fault are analyzed, and four possible research directions of acoustic detection technology are extracted.

**Key words:** acoustic detection; fault detection; power system; power equipment

## 0 引言

电力系统的安全稳定运行关乎民生国计,电力系统设备不可避免会发生各种形式的故障,毫无预警的电力事故可能造成严重的社会影响,因此加强电力设备的状态检测具有重大意义。为了适应电力系统不断智能化及电力系统不断提高的检测要求,无损检测技术受到越来越广泛的关注。声学检测技术作为无损检测的典型代表,具有检测精度高、准确性强、定位方便等优势。国内外学者已开展若干研究,研究的方向主要涉及声学检测技术中信号采集、

故障诊断、故障定位以及声学检测系统的研发应用等方面。

文献[1]概述了声学检测技术在电力设备绝缘状态诊断、电力设备故障识别、电力设备局部放电定位等电力领域的应用概况和发展前景,表明声学检测技术的不断完善与发展将在电力系统中具有更重要的作用;但声学传感技术、声信号数据分析方法、故障声源定位方法等作为限制声学检测在电力系统中发展的关键技术在该文中缺少对应的评述。文献[2]研究绝缘子不同放电类型的声发射信号特征,利用主成分分析法提取声学信号时域特征,采用可靠性指标进行故障模式识别,提高了模式识别的

效率和准确性,为电力设备异常放电类型的识别奠定了一定的基础。文献[3]介绍了国内基于超声波检测的电力变压器故障定位技术研究进展,研究表明超声波传感器阵列比单个探头具有更好的定位能力,主要阐述了数学算法对于定位技术优化和超声波传感器阵列结构优化的发展现状。

电力设备的声学检测技术正处于飞速发展的阶段,其关键技术及工程应用方面还有待完善。现有的文献报道通常单独介绍不同的声学检测技术原理、声学检测技术在不同的场景下的应用,较少有系统性的综述声学检测技术的报道。此外,对于声学检测技术在电力系统的典型应用场景、主要难点和未来可能的研究方向鲜有文献报道。

鉴于此,首先,介绍声学检测应用于电力系统的基本原理及架构;然后,从故障信号采集、故障信号诊断、故障源定位及典型的应用等方面对相关研究成果进行系统的梳理;最后,提出目前电力系统中的声学检测技术存在的问题以及可能的解决思路,为声学检测技术在电力系统中的应用发展提供有益的借鉴。

## 1 电力系统声学检测原理

### 1.1 电力设备异响机理

电力系统中的电力设备异响主要有两大类<sup>[4-5]</sup>:1)电力设备机械振动异常引起的异响;2)电力设备异常放电引起的异响。

电力设备机械振动引起的异常声响通常是由于设备过负荷、设备组件松动或老化、设备潜在缺陷、运输及安装不当的情况下,设备受到的电磁力导致设备产生异常振动,进而通过设备的机械结构和空气传导,形成异响。如电力变压器的铁芯松动异响、风扇异响等都属于电力设备的机械振动异响。

电力设备放电所致异响的激励源类型比较多,激励源主要包括电晕放电、局部放电、沿面放电、微粒放电等。例如,电晕放电导致的异响通常是由于电力设备高压端表面不均匀而导致电场畸变引起。畸变的电场将电离附近的空气而产生等离子体,在空气的电离过程中部分能量以声音的形式向外传递产生异响。

不同电力设备不同异常作为激励源所产生的声信号各具特点,且电力设备故障类型和其激励产生的声音信号通常具有强对应关系,因此通过检测声音信号对电力设备运行状态进行监测,保证电力

系统正常运行,具有较强的技术可行性。

### 1.2 声学检测系统架构

声学检测技术与电力设备故障检测技术中的超高频检测、红外检测、光学检测等技术的本质区别在于所采集和分析的信号不同,但是基本应用架构有着共通之处。声学检测技术在电力系统中应用的具体解决方案架构一般如图1所示。

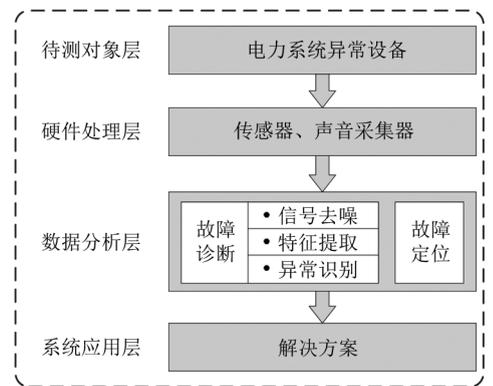


图1 电力系统声学检测应用架构

图1中,声学检测在电力设备故障检测的应用架构主要包括待测对象层、硬件处理层、数据分析层,各层通过数据交互,为系统应用层提供故障处理解决方案及依据。待测对象层主要为电力系统中需要检测的关键设备;硬件处理层主要功能为高保真地采集待测对象的声音信号;数据分析层主要是通过声音信号的识别,从而实现系统设备故障诊断及故障定位。

## 2 电力设备异常声信号采集

声信号精确采集是声学检测在电力系统的应用基础。声音传感器作为可将声音信号转换为电信号的测量元件,是可准确进行电力设备异常信号声学检测的先决条件。根据有效检测频率可将声音传感器分为噪声传感器和超声波传感器两大类,噪声传感器有效检测频率为20 Hz~20 kHz,超声波传感器有效检测频率大于20 kHz,可从物理上滤除人耳可听范围的背景声信号,具有较强的抗干扰能力。

声音传感器阵列技术比传统的单一声传感器检测具有更高的检测精度,更能实现电力设备故障的精确定向<sup>[6]</sup>。文献[7]针对电力变压器中局部放电难以准确定位的问题,引入相控阵列技术,研制了16×16阵元的平面超声波传感器相控阵列用以故障检测与定位,但阵元数量较多。文献[8]研发了一种用于电力设备局部放电检测的复合式声传感器,通

过应用高阶积量处理技术,对十字形超声阵列传感器进行虚拟扩展使其具有 61 阵元的阵列性能,从而提高了超声阵列孔径和方向性锐度,将定位的相对误差减小为 5%,为阵列技术在电力设备故障检测领域的实用化提供了可能性。

此外,学者在声传感器阵列排布对检测准确率和定位效果等方面的影响也进行了诸多研究。文献[9]对不同的声传感器阵列排布的声学性能进行了定量评估,对比分析了 3×3 的平面阵和 9 个阵元均匀圆环阵的声源定位效果,采用声源定向的准确度作为评价指标对声传感器阵列排布的性能差异进行定量评价,研究结果表明在阵元数量一致的情况下,均匀圆环阵列具有更优的声学检测性能。文献[10]基于降维技术优化了圆环形局部放电超声阵列传感器的稀疏结构,计算时将二维阵列分解为多组一维阵列,采用遗传算法执行直线阵搜索,最后还原为二维圆形阵列计算其检测性能,提高了稀疏阵列检测的成功率和准确度。

## 3 电力设备故障声信号分析与诊断

### 3.1 信号去噪

虽然电力系统中的声学信号可反映电力设备的异常运行状态,但是通常也伴随着噪声污染,影响检测结果的准确性。除了电力设备产生的异响外,工作人员运维时走动、巡视车运行、电力设备周围环境等都会产生干扰噪声。

如何去除噪声污染是声学检测技术准确检测的关键。除在硬件设计过程中加入滤波环节以外,还可通过数据处理进行去噪,已有研究表明小波去噪是最常用的方法<sup>[11]</sup>。

小波去噪的质量受到小波基、小波分解层数及阈值设定的限制,目前大多数学者仅仅对其中某一影响因素进行优化,不一定能达到最优的去噪效果<sup>[12]</sup>。文献[13]定义了适用于气体绝缘金属封闭输电线路的声发射小波去噪复合评价指标,并提出一种最优小波去噪算法;该算法通过小波基、分解层数、阈值等自适应选择,实现最优化去噪效果的目的。文献[14-15]基于离散小波变换统计与能量分析技术,使用小波数学形态联合降噪算法对信号进行预处理,利用快速傅里叶变换与均方根技术优化的 Morlet 小波参数,结合改进组合的神经网络算法建立了滚动轴承故障振动信号模型。

### 3.2 特征提取

电力系统中不同设备的不同故障类型对应有不同的声音信号特征。为了准确地进行故障的分析与定位,电力设备的故障特征提取方法显得尤为重要。

电力设备异常情况的声音信号特征提取方法包括统计特征法、小波分析法、指纹特征法等<sup>[16]</sup>。小波分析法具有能够从极强背景干扰中检测微弱信号与提取时-频结构信息中“指纹”特征的能力<sup>[17]</sup>。文献[18]通过对电力设备多种典型缺陷模型数据的统计,提出一种改进的小波分析方法,重新定义了充分利用小波变换域提供的时-频结构信息的特征量。文献[19]提出基于风电机组叶片裂纹声发射信号优化的小波重分配尺度谱裂纹扩展识别方法,利用最小香农熵优化小波基函数的带宽参数,克服了小波重分配尺度谱的时频分辨率不能同时达到最佳的困难。文献[20]提出了自适应白噪声完备经验模态分解算法以实现电力设备放电故障异常声信号的特征提取。首先,对信号进行分解得到若干个本征模态函数;然后,求取各峭度值;最后,选取合适的峭度值对信号进行重构,提取放电故障的特征量。但是该方法仅针对变压器的放电故障进行测试,不具有普适性。

### 3.3 异常识别

随着人工智能技术的不断发展,人工智能算法不断被应用于电力设备故障声学检测技术的故障识别方面。神经网络<sup>[21]</sup>、支持向量机<sup>[22]</sup>等人工智能算法在电力设备故障声学检测技术应用较多。

人工神经网络是最常见的应用于电力设备缺陷识别的方法,将所提取到的特征量作为网络的输入,利用已知的缺陷样本改变网络中的各层神经元的权重来完成学习。最后,设定权重进行电力设备缺陷类型识别,但是训练过程中存在所需样本基数大且容易局部收敛问题<sup>[23]</sup>。应用于电力设备故障声学检测的人工神经网络主要有 BP 神经网络、学习向量量化(learning vector quantization, LVQ)、自适应共振理论(adaptive resonance theory, ART)等<sup>[24]</sup>。

支持向量机适合用于解决样本较少、数据维度高、非线性等问题,但是难以确定规则化系数,预测的结果不具备统计意义。文献[25]采用相关向量机(relevance vector machine)有效地解决了上述问题,同时还以概率形式输出最终结果,提高了电力设备故障的识别率。文献[26]提出一种多特征融合与改进量子粒子群优化的相关向量机

(relevance vector machine)融合声音检测算法,进行断路器机械故障的识别,解决单一特征识别故障的低准确性和低稳定性问题。

### 3.4 故障定位

随着电力系统的不断发展,电力设备故障准确定位的要求也不断被提高。目前,基于声学信号的故障定位技术可大致分为延时定位、衰减定位、声电联合定位、基于传感器阵列的定位技术等。

延时定位通过在待测设备的不同位置布置多个声传感器,利用声音到达不同传感器的时差乘以波速等于传感器与距离声源坐标距离之差的原理,求得声源的三维坐标<sup>[27]</sup>。衰减定位通过声信号能量和传播距离的指数衰减模型,反推求得故障声音位置<sup>[28]</sup>。

基于阵列传感器的定位技术采集声源信号到各声音传感器的相位差与方向角度,利用波速成型算法等阵列信息处理技术进行声源位置的确定。文献[29]提出一种变压器局部放电的超声窄带阵列信号波达方向估计算法,并提出了一种基于多平台侧向定位原理及优化全局搜索的变压器局部放电超声阵列定位方法,大量试验表明算法定位成功率高,且故障定位精度小于10 cm。

声电联合定位中电磁波信号为光速传播,达到传感器的时间可视为0,声传感器和电传感器之间的信号延时即为声源信号传到检测点的时间,利用声信号传播速度乘以传播时间即可找到声源位置。文献[30]提出应用于气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)的声电联合定位方法,首先,利用特高频定位法定位声源位置的大致范围;然后,结合特高频与超声波进行二次定位,精确定位声源的确切位置,有效排除了现场干扰并提高了局部放电的定位准确性。文献[31]通过对基于超声波传感器和特高频传感器的声电联合定位的建模、求解完成GIS盆式绝缘子的局部放电定位,相对于常规的基于到达时差(time difference of arrival, TDOA)的声电联合定位法的检测精度有所提高。

## 4 声学检测技术在电力系统的应用

### 4.1 噪声检测

噪声检测在电力设备的变压器、电抗器、断路器等关键电力设备的机械振动、谐波引起的谐振、典型放电故障检测中应用广泛。

文献[32]基于GIS机械故障时振动产生的噪

声信号辐射的声场变化特性,采用具有方向性的声传感器探头设计GIS声场测量的声成像系统,并验证了系统的检测性能,对GIS设备安全稳定运行具有十分重要的意义。文献[33]开发了基于web技术的变压器噪声监测系统,主要实现对监测信号的查询与显示交互功能,缺少对异常信号的分析。文献[34]利用.NET技术开发了一套用于变压器振动噪声检测的综合分析系统,该系统可采集变压器稳态与短路冲击下的噪声信号,采用不同的分析方法提取噪声特征量,为全面评估变压器运行状态提供了可靠参考。文献[35]搭建了基于声音阵列传感器的电力变压器铁芯振动声成像检测试验平台,得到了图像特征值和铁芯不同松动程度的变化规律。

### 4.2 超声检测

超声波检测技术的有效检测频率较高,因而具有低频干扰信号噪声抑制能力,而被广泛应用于电力变压器、GIS、断路器等电力系统关键设备的放电故障的检测。典型的放电故障有局部放电、沿面放电、微粒放电等。

文献[36]利用超声波检测仪与常规脉冲电流检测仪搭建了交流运行电压下GIS故障实验检测系统,对金属微粒的运动行为、局部放电及危害程度进行研究。文献[37]研发了基于无线通信的声电联合检测定位系统,主要用于GIS交流耐压试验全过程的局部放电和闪络放电的检测。

### 4.3 声发射检测

声发射检测主要应用领域包括电力设备绝缘健康状态、机械健康状态及局部放电故障的检测等。

文献[40-42]从实验产生的有效声发射信号特性、故障检测系统研发和叶片损伤的定位技术等方面,阐明了声发射技术在风电机组叶片故障检测的多种应用,但是对风电机组叶片不同裂纹发生阶段产生的信号特征量的分析和归纳较少。文献[43]研发了一种光纤声发射传感器,并且利用光纤声发射传感器的光栅体积小、重量轻、灵敏度高和抗电磁干扰的特点,研制了一套应用于变压器局部放电的在线监测系统。波兰的T.Boczar研制了基于声学检测法的变压器局部放电故障专家系统,主要包括测量子系统、处理分析子系统、知识库和故障分类子系统,并开展大量的声发射实验,实验结果表明该系统具有较高的检测可靠性<sup>[44]</sup>。

## 5 声学检测的关键问题及研究思路

声学检测技术在电力系统中具有良好的发展前

景。为了能够更好地适应电力系统智能化发展检测要求,声学检测技术的检测有效性及故障定位精确性等方面有待进一步研究。

### 1) 传感器阵列及算法优化

目前,电力系统声学检测技术的发展瓶颈在于定位准确性有待提高和直观交互性较差。综合研究声传感器阵列的排布规律及信号处理算法,减小声传感器在电力系统应用中的检测误差,提高电力设备故障定位的准确率。一方面研究声传感器阵列的最优排布,提高检测精度并减少阵元数目降低成本;另一方面深度优化基于阵列信号处理技术的电力设备故障定位或者声学成像处理算法。

### 2) 声场仿真技术的发展

随着计算机技术的快速发展,基于声学检测的仿真分析技术具有较好的发展潜力。未来基于声学检测的仿真分析技术可更准确地描述声场,更精准地分析声波组成成分,可对声传感器的设计、故障诊断分析等方面起到理论指导作用。研究声场理论,构建适应多种环境的电力设备故障声场分析模型,利用 Matlab 等软件对声场进行仿真并给出可视化结果,从而使得电力设备故障声信号分析或预测难度得到极大简化。

### 3) 故障诊断技术的发展

电力系统中的电力设备不仅种类多且运行环境复杂,给基于声信号的电力设备故障诊断带来一定困难,因此有必要更深入地研究软件、硬件处理层面的抗干扰能力、信号高保真能力以及提高去除干扰噪声信号的能力;故障特征的选择与提取是电力设备故障声学检测技术缺陷识别的前提条件,需提高电力设备故障声信号特征提取的智能化水平,建立更丰富的特征数据库,优化特征提取方法的自适应性。

### 4) 故障定位技术

为提高电力设备故障定位的准确性及精度,提高电力设备故障检测的效率,基于传感器阵列技术及阵列信号处理方法的定位技术是未来一段时间内声学检测故障定位技术发展的重点方向,主要包括阵列信号处理方法的优化、新方法的提出及人工智能算法的应用等。

## 6 结 论

推进以电力设备故障声学检测技术为代表的无损检测技术的发展,是适应智能电网及电力系统智

能化发展的重要举措。声学检测技术具有与设备无直接电气连接、可实时在线监测、定位准确等优点,为解决电力系统关键电气设备的状态检修提供重要支撑,具有广阔的应用研究前景。

前面主要针对电力设备中故障声学检测技术的基本原理、故障分析诊断及典型的应用等方面,综述了声学检测技术的研究现状和关键问题,并对后续可能的研究方向与思路进行探讨。希望可以为声学检测技术在电力系统故障检测方面的发展提供有益参考,不断推进电力系统设备故障检测技术的发展。

### 参考文献

- [1] 项添春,房向阳,干耀生,等.声学检测技术在电力系统中的应用概况及前景[J].华北电力技术,2007(11):7-10.
- [2] 王成江,李光.基于声发射技术的绝缘子放电识别用特征量研究[J].电力自动化设备,2012,32(7):143-148.
- [3] 王建元,梁惠娟,康爱民.国内电力变压器局部放电超声波定位研究进展[J].东北电力大学学报,2019,39(2):10-14.
- [4] Weidong WU, Zhengyang WU, Shouchun GUO, et al. Design of sound monitoring and fault diagnosis system for dry-type transformers [J]. 2021 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 770 012002.
- [5] 刘媛,贾勇勇,杨景刚,等.一起 220 kV GIS 设备异响缺陷分析与处理[J].高压电器,2020,56(2):246-251.
- [6] 王国利,杜非,潘伟,等.用于变压器中局部放电定向的超声阵列 RSS 改进算法[J].高电压技术,2019,45(8):2509-2514.
- [7] 李继胜,李军浩,罗勇芬,等.用于电力变压器局部放电定位的超声波相控阵传感器的研制[J].西安交通大学学报,2011,45(4):93-99.
- [8] 辛晓虎,李继胜,纪海英,等.用于变压器中局部放电定位的十字形超声阵列传感器研究[J].中国电机工程学报,2013,33(21):154-162.
- [9] 谢庆,程述一,耿江海,等.基于定向准确度的局部放电超声阵列传感器声学性能定量评价[J].中国电机工程学报,2014,34(6):965-970.
- [10] 刘丹,孔静,谢庆,等.基于降维技术的 CRPDUAS 稀疏结构优化设计[J].高压电器,2016,52(10):80-85.
- [11] 李红玲,文习山,舒乃秋,等.小波变换去噪在绝缘子污秽放电声发射监测中的应用[J].电力系统保护与控制,2010,38(6):56-59.
- [12] 李化,杨新春,李剑,等.基于小波分解尺度系数能量最大原则的 GIS 局部放电超高频信号自适应小波去噪[J].电工技术学报,2012,27(5):84-91.
- [13] 律方成,张瑜,董蒙,等.基于复合评价指标的金属微

- 粒声发射信号最优小波去噪及其特征提取[J].高压电器,2017,53(11):1-8.
- [14] J XIANG, Simon WATSON. Practical condition monitoring techniques for offshore wind turbines [C]. EWEC 2008 conference proceedings, Brussels Expo., Belgium, PO. 2008, 195:1-8.
- [15] 郭艳平.面向风力发电机组齿轮箱滚动轴承故障诊断的理论与方法研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- [16] Zheng ZHONG, Kexiong TAN. Partial discharge recognition based on pulse waveform using time domain data compression method [C] // Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No. 00CH36347), IEEE, 2000: 483-486.
- [17] 曹浩,黄韬,周舟,等.基于主成分分析法的变压器直流偏磁声学异常检测[J].湖南电力,2021,41(5):1-6.
- [18] 淡文刚,陈祥训,郑健超.采用小波分析与神经网络技术的局部放电统计识别方法[J].中国电机工程学报,2002,22(9):1-5.
- [19] 陈长征,赵新光,周勃,等.风电机组叶片裂纹故障特征提取方法[J].中国电机工程学报,2013,33(2):112-117.
- [20] 舒畅,金潇,李自品.基于 CEEMDAN 的配电变压器放电故障噪声诊断方法[J].高电压技术,2018,44(8):2603-2611.
- [21] 缪希仁,吴晓梅,石敦义,等.采用 HHT 振动分析的低压断路器合闸同期辨识[J].电工技术学报,2014,29(11):154-161.
- [22] 赵书涛,张佩,申路,等.高压断路器振声联合故障诊断方法[J].电工技术学报,2014,29(7):216-221.
- [23] 李燕青,陈志业,律方成,等.超声波法进行变压器局部放电模式识别的研究[J].中国电机工程学报,2003,23(2):108-111.
- [24] Gulski E, Krivda A. Neural networks as a tool for recognition of partial discharges [J]. IEEE transactions on electrical insulation, 1993, 28(6):984-1001.
- [25] 尹金良,朱永利,俞国勤.基于多分类相关向量机的变压器故障诊断新方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(5):77-82.
- [26] 孙曙光,于晗,杜太行,等.基于多特征融合与改进 QPSO-RVM 的万能式断路器故障振声诊断方法[J].电工技术学报,2017,32(19):107-117.
- [27] 周电波,丁登伟,盖世诚,等.基于超声波诊断的 GIS 设备异常分析方法[J].中国电力,2018,51(4):53-60.
- [28] 张宇,卢文秀,褚福磊.基于声发射衰减特性的故障行星轮定位研究[J].振动与冲击,2017,36(3):14-19.
- [29] 谢庆.基于空间谱估计的变压器局放超声阵列定位方法研究[D].北京:华北电力大学,2010.
- [30] 刘君华,姚明,黄成军,等.采用声电联合法的 GIS 局部放电定位试验研究[J].高电压技术,2009,35(10):2458-2463.
- [31] 马跃虎,田禄,牛勃. GIS 盆式绝缘子局部放电缺陷定位分析[J].内蒙古电力技术,2019,37(2):24-29.
- [32] 李秀广,吴旭涛,师愉航,等.基于声学成像的 GIS 机械故障带电检测系统[J].高压电器,2019,55(5):42-46.
- [33] Ting-Ting HE, Jing-Di WANG, Jie GUO, et al. A Vibration Based Condition Monitoring System for Power Transformers [C] // 2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE, 2009:1-4.
- [34] 何苗忠,王丰华,钱国超,等.基于.NET 框架的变压器振动噪声综合分析系统设计与开发[J].电力系统自动化,2017,41(1):150-154.
- [35] 司文荣,傅晨钊,徐鹏,等.基于声学成像及图像处理的变压器铁心松动检测研究[J].高压电器,2021,57(11):180-186.
- [36] 季洪鑫.交流运行电压下 GIS 中金属颗粒运动行为及放电特征[D].北京:华北电力大学,2017.
- [37] 白尧,陈敏,汪涛,等. GIS 交流耐压试验局部放电和闪络放电同步检测及定位技术研究[J].高电压技术,2018,44(S1):161-163.
- [38] Denja LEKOU, P VIONIS, PA JOOSSE et al. Full-scale blade testing enhanced by acoustic emission monitoring [C]. Processings of the European Wind Energy Conference CEWE(2003), Madrid, Spain, 2003.
- [39] Joshua PAQUETTE, JO Shuavan DAM, Scott HUGHES. Structural Testing of 9m Carbon Fiber Wind Turbine Research Blades [C] // the AIAA 2007 Wind Energy Symposium, Reno, Nevada, USA, 2007.
- [40] Kirikera G R, Shinde V, Schulz M J, et al. A Structural Neural System for Real-time Health Monitoring of Composite Materials [J]. Structural Health Monitoring, 2008, 7(1):65-83.
- [41] 马宾,徐健.一种用于变压器局部放电在线监测的光纤声发射传感器实验研究[J].光谱学与光谱分析,2017,37(7):2273-2277.
- [42] 林介东,胡平.声发射技术测量变压器局部放电的现状与进展[J].广东电力,2005,18(1):12-15.
- [43] 廖传军,李学军,刘德顺.小波再分配尺度谱在声发射信号特征提取中的应用[J].机械工程学报,2009,45(2):273-279.
- [44] Tomasz BOCZAR, Andrzej CICHON, Sebastian BORUCKI. Diagnostic expert system of transformer insulation systems using the acoustic emission method [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(2):854-865.

#### 作者简介:

张 灏(1968),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电网经营管理及综合风险评估。

(收稿日期:2022-03-04)