

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)02-0069-05

融合多源数据的 GIS 内部缺陷三维可视化方法

高飞¹, 朱正一², 陈大鹏³, 杨欢欢³, 桑 榭³

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国网上海市电力公司, 上海 200122;

3. 南京优能特电力科技发展有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要:针对现有的超高频检测和超声波检测等方法存在缺陷定位难的问题,为实现对设备内部结构和工作状态的全面监测和评估,研究通过有限元软件搭建气体绝缘金属封闭开关设备三维模型分析内部缺陷,结合 X 光射线成像信号和光纤传感器数据进行分析。结果表明改进方法的均方根误差为 0.001 1,信噪比为 7.943,处理后的信号平滑且保留了局部特征,去噪效果显著。同时,模型和数字射线成像清晰显示了设备内部缺陷,验证了可视化检测的有效性。这显著提高了设备检修效率,为 GIS 设备的检测提供了坚实的技术支撑。

关键词:GIS; 内部缺陷; 有限元; DR 成像; 可视化; 检测

中图分类号: TP399

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)02-0069-05

A 3D visualization method for internal defects in GIS with multi-source data fusion

GAO Fei¹, ZHU Zhengyi², CHEN Dapeng³, YANG Huanhuan³, SANG Shen³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200122, China;

3. Nanjing Unitech Electric Power Technology Development Co., Ltd., Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: At present, existing methods such as ultra-high frequency detection and ultrasonic detection have the problem of difficult defect localization. In order to achieve comprehensive monitoring and evaluation of the internal structure and working status of the equipment, a three-dimensional model of gas insulated metal-enclose switchgear is constructed using finite element software to analyze internal defects, combined with X-ray imaging signals and fiber optic sensor data for analysis. The results show that the root mean square error of the improved method is 0.001 1, the signal-to-noise ratio is 7.943, the processed signal is smooth and retains local features, and the denoising effect is significant. At the same time, the model and digital X-ray imaging clearly display the internal defects of the equipment, verifying the effectiveness of visual inspection. This significantly improves the efficiency of equipment maintenance and provides solid technical support for the detection of GIS equipment.

Keywords: GIS; internal defects; finite element analysis; DR imaging; visualization; detection

在电力系统中,气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated metal-enclose switchgear, GIS)具有占用空间小、安全稳定性高、设备维护周期长、受外界环境干扰小等优点,因此被广泛应用于各级变电站。GIS 设备内部缺陷包括机械部件故障、局部放电、绝缘子击穿、气体泄漏等方面。其中断路器、隔离开关、接地开关等机械部件的故障,如机械卡阻、接触不良、弹簧疲劳等,会导致设备的性能下降和运行不稳定。这些内部缺陷会对 GIS 设备的安全性能和可靠性造成不好的影响,因此对 GIS 设备的定期检测、维护和检修至关重要,以确保设备的正常运行和安全生产。为了检测 GIS 设备故障,杨为的团队^[1]搭建了一种轻量级神经网络模型解决现场数据不足的问题,结果表明

该方法准确率达到 98.7%。此外,GIS 设备涉及大量传感器和监测装置,可用于实时监测设备运行状态、温度、电流负载等信息。Mudhigollam 等^[2]针对 GIS 设备的热分析,利用电流传感器和隔离开关优化设备,结果表明该方法精度提升了 3.3%。但当前的技术不能直观展示缺陷位置,也不能定量分析缺陷性质。为了解决这一问题,需要开展对 GIS 设备内部缺陷的准确分析和监测,以提高设备的运行效率和安全性^[3]。因此,研究通过有限元软件搭建 GIS 设备三维模型分析内部缺陷,并融合 X 光数据源和改进阈值小波去噪处理信号。研究旨在提高识别和定位设备内部缺陷的准确性,提高设备运行的安全性和稳定性。研究创新性地综合利用有限元分析、X 光成像和信号处理技

收稿日期:2024-07-23;录用日期:2024-08-13

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5500-202355183A-1-1-ZN)

作者简介:高飞(1982—),男,博士,教授级高级工程师,研究方向:电力设备智能巡视与状态评估。

引用本文:高飞,朱正一,陈大鹏,等.融合多源数据的 GIS 内部缺陷三维可视化方法[J].自动化技术与应用,2026,45(2):69-72,178.(GAO Fei, ZHU Zhengyi, CHEN Dapeng, et al. A 3D visualization method for internal defects in GIS with multi-source data fusion[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(2):69-72,178.)

术,实现对 GIS 设备内部缺陷的全面监测和评估。通过建立准确的三维模型和使用先进的数据处理方法,为 GIS 设备的安全运行提供可靠的支持和保障。

1 有限元与 DR 成像构建 GIS 模型

1.1 有限元软件搭建 GIS 设备 3D 模型

GIS 由断路器、隔离开关、接地开关、互感器、避雷器、母线、连接件和出线终端等组成,这些设备或部件全部封闭在金属接地的外壳中^[4]。由于在实际运行时 GIS 设备具有较复杂的内部结构,为了获得有效结果,研究通过 COMSOL Multiphysics 有限元软件搭建了一种 GIS 设备 3D 模型,如图 1 所示。

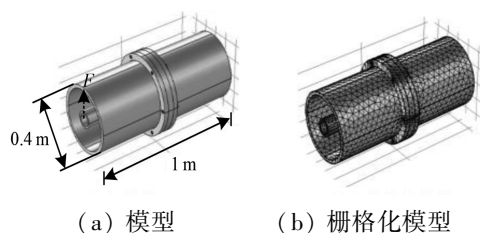


图 1 GIS 设备 3D 模型

Fig. 1 3D model of GIS equipment

图 1(a)中,模型外壳的直径为 0.4 m,厚度为 0.02 m,总长度为 1.0 m,导杆的厚度和外半径分别为 0.01 m 和 0.05 m。而盆式绝缘子的倾斜角为 45°,厚度为 0.02 m。图 1(b)中,由于金属部件螺栓较小,因此将此模型栅格化。为了提高计算速度和准确性,研究剖分该部件。完成模型简化和栅格化之后,设定计算的方向,并将设备模型的计算区域和单元数量进行设计,避免栅格过大过小^[5]。根据设定的模型边界条件,确定电导率、温度、磁导率、速度等。建立单元矩阵,从而获取矩阵方程,在随机法求解方程,获得各个单元近似解。在 GIS 设备正常运作时,导杆所受各个方向的电磁力大小相等且相互抵消,因此导杆的合力为 0。由于电磁力平衡,导杆不会产生振动。原因在于导杆和外壳之间的电磁相互作用非常强,在此作用下,产生相同的感应电流,这进一步稳定了导杆^[6]。GIS 设备在出现导杆不对中缺陷时,由于电场力的不平衡导致导杆和外壳的振动。这种振动对设备的正常运行造成影响,因此需要特别注意导杆的安装和对中。假设所受电场力不平衡,在外加电压 U 的情况下,受力单位面积 S 的导杆产生的作用力 F ,公式为

$$F = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S U^2}{2l^2} \quad (1)$$

式中, l 为导杆之间的距离, ϵ_0 和 ϵ_r 分别为绝对和相对介电常数。这种情况可能会导致 GIS 设备的不稳定或损坏,因此需要及时修复或维护^[7]。GIS 内部的振动监测选择分布式光纤传感器,这是采用独特的分布式光纤探测技术,对沿光纤传输路径上的空间分布和随时间变化信息进行测量或监控的传感器。这能够实现对设备内部各个位置的连续监测,覆盖范围广,能够捕捉到细微的振动信

号变化。同时,光纤传感器具有较高的灵敏度和响应速度,可以快速、准确地获取振动信号,为后续的数据处理提供高质量的原始数据。该传感器将传感光纤沿场排布,可以同时获得被测场的空间分布和随时间的变化信息^[8-9]。内部缺陷产生的振动,研究将长度 L 的光纤等分为 M ,由于脉冲光存在较多散射点,设定每段含有散射点 N 个,则电场强度 E ,公式为

$$E = E_0 e^{-\beta(m-1)l} \sum_{i=1}^N a_i^m e^{j\phi} \quad (2)$$

式中, l 为每段光纤的长度, E_0 为入射光的电场强度, a_i^m 和 ϕ 为任意第 m 段内第 i 个散射点的随机幅度和随机相位, β 为光纤的衰减系数。信号的采集具体步骤为首先由具有很窄频谱宽度的光源产生的纯净且稳定的光信号,转换为脉冲形式,也就是指一段时间内的光信号,然后是间隔一段时间的无光信号。将进入的脉冲形式光信号定向到指定的输出端口进入光纤,这段光纤用作传感器。当脉冲光在光纤中传播时,会遇到光纤中的不均匀性或微小杂质,这些杂质会使光线向各个方向散射,这种散射的光信号会沿着光纤反方向传播回到光源。这种技术利用瑞利散射和脉冲光在光纤中的传播,以此监测和定位光纤中任何可能的扰动。瑞利散射的光强 $I(\theta)$,公式为

$$I(\theta) = I_0(1 + \cos^2 \theta) \quad (3)$$

式中, I_0 为与光纤入射光垂直的瑞利散射光光强。将检测到的缺陷信息以三维形式呈现出来,实现 GIS 设备内部缺陷的可视化。设备的缺陷区域以直观的方式展示出来,以帮助用户更好地理解和分析缺陷情况。

1.2 DR 成像及数据处理

考虑到 GIS 设备的重要性,为了避免设备被损伤,研究选取 X 射线成像技术作为 GIS 设备的可视化工具进行内部缺陷检测。X 射线成像技术不需要中断电力系统的运行,就可以检查设备的内部状况。X 射线能够穿透 GIS 设备的外壳,对其内部进行成像,从而提供详细的内部结构信息。X 射线是通过高速电子撞击金属靶材产生的,电子在高电压下被加速,撞击金属时产生 X 射线,其能量受到加速电子的电压影响^[10]。由于 GIS 设备本身的密度和厚度,吸收 X 射线也因此有一定差别,此时会影响设备内部 X 射线透照图像明暗不清晰。为了提高成像速率,研究选择数字射线成像(digital radiography, DR)^[11]。DR 成像是一种利用数字传感器替代传统胶片的 X 射线成像技术,其工作过程示意图,如图 2 所示。

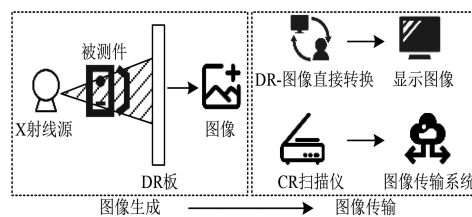


图 2 DR 成像过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of DR imaging process

图2中,被测件在X射线源作用下,通过DR板和CR扫描仪,直接转换成图像,随后传输至系统中。该成像系统设定的工作电压为5~300 kV,定向发射线束方式,持续额定功率为900 W,管电流为0.5~6.0 mA,出射线束为40°×60°,焦点尺寸3.0 mm。该方法形成的图像清晰度较好,并且可以很快成像,便于保存,不受设备厚度和密度的影响。为了评估GIS运行设备状态,研究以东南沿海某500 kV变电站220 kV GIS设备为例,现场采集振动信号和温度信号^[12]。试验设备主要有GIS电接触状态带电检测设备、温度变送器和振动传感器。检测点分别在GIS断路器外壳的上部、下部和侧面。在进行实验前需要对变电站GIS厂家、GIS负荷情况和运行时间进行记录,之后根据步骤完成信息采集。同时需要在同一检测点采集5次,

以此保证结果准确性,实时测量GIS设备固定位置的振动信号和壳体温度。数据采集之后需要备份,接着上传至存储设备中,在计算机实现数据交换功能^[13-14]。选取的研究设备部分指标数据,如表1、2所示。

表1 GIS设备数据

Tab.1 GIS equipment data

评价指标	实测值	劣化类型
主回路电阻(μΩ)	38	正劣化
振动加速度幅值(m/s ²)	0.22	正劣化
温升值(℃)	4.1	正劣化
SF ₆ 气体压力(MPa)	0.492	正劣化
相对电磨损程度	0.41	正劣化

表2 结构部件数据

Tab.2 Structural component data

评价指标	密度/(kg·m ⁻³)	屈服强度/MPa	泊松比	弹性模量/GPa	材料
外壳、导杆	7 900	235	0.30	0.6	铝
盆式绝缘子	1 500	65	0.24	7.0	环氧树脂
螺栓	2 700	180	0.33	70.0	钢

收集GIS设备的X射线成像数据和传感器数据,对收集到的数据进行去除噪声预处理,以确保数据的质量和一致性。针对采集到的信号,为了提高对其预处理的效率,研究选择改进阈值小波去噪方法^[15]。该改进函数 \hat{w} 的数学表达式为

$$\hat{w} = \begin{cases} w - \frac{\lambda^2}{3w} - \frac{\text{sgn}(w)}{3e^{(|w|-\lambda)}}, & |w| \geq \lambda \\ \frac{w}{3}e^{(|w|-\lambda)}, & |w| < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

式中, λ 为阈值, w 为原始系数。该方法可以处理小于阈值的小波系数,在较高还原信号的同时保留了低能量信号。

2 GIS缺陷3D可视化方法性能分析

研究选择Intel Core i7-9750H 2.6 GHz处理器,操作系统为Intel Core i7-9750H 2.6 GHz,ERESCO65MF4型号的X射线数字成像系统,该系统灵敏度为1%~2%,系统分辨率为16~40 Lp/cm。研究对比不同方法处理Daubechies小波系列中的db4小波,获得的振动信号去噪情况,如图3所示。

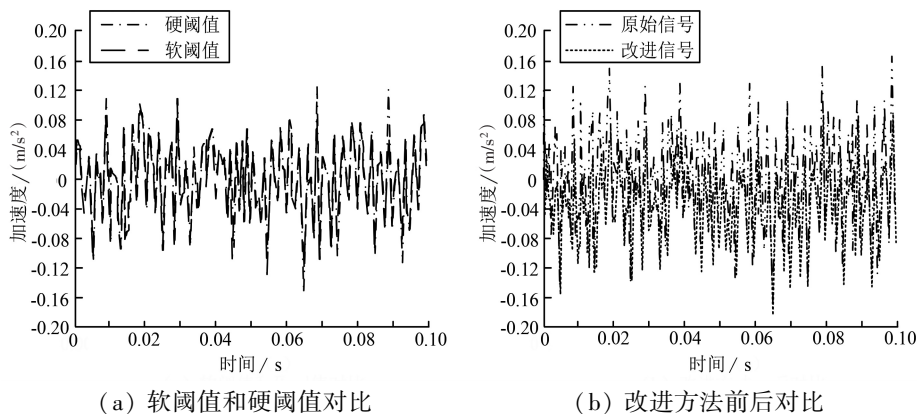


图3 不同方法处理振动信号变化对比

Fig.3 Comparison of changes in vibration signal processing using different methods

图3(a)中,软阈值处理后的信号具有较好的平滑度,在0.10 s时间内加速度最大为0.158 m/s²。硬阈值法对信号的局部特征处理能力更强,在0.10 s时间内加速度最大为0.132 m/s²。两种方法得到的信噪比(signal to noise ratio, SNR)分别为5.457、5.486,均方根误差(root mean squared error, RMSE)分别为0.001 5、0.001 4,结果均相差不大。图3

(b)中,改进方法的RMSE和SNR分别为0.001 1和7.943,在0.10 s时间内加速度最大为0.152 m/s²。改进方法后的信号保证了信号的平滑度并保留局部特征,具有较好的去噪效果。对比之下,改进方法在信号处理中取得较好的效果。为了验证X射线对GIS设备内部的尖端缺陷和悬浮缺陷的影响,GIS设备中设置尖端和悬浮缺陷,分别加压到30 kV

和 66 kV,通过脉冲电流检测局部放电。X 射线功率均为 300 kV×3 mA,间隔 5 min 记录检测数据,同时选择微水检测仪和气体分解物检测仪分析 SF₆ 气体。这两种缺陷在 X 射线照射前后脉冲电流检测结果,如表 3、4 所示。

表 3 缺陷放电量随照射时间的变化

Tab. 3 Variation of defect discharge with irradiation time

缺陷类型	视在放电量(pC)			
	0 min	5 min	10 min	15 min
尖端缺陷	19.8	14.8	16.2	12.1
悬浮缺陷	5 750	4 695	3 903	-

表 4 缺陷区域 SF₆ 气体分解产物检测结果

Tab. 4 Detection results of SF₆ decomposition products in the defect area

照射情况	缺陷类型	SF ₆ 气体分解产物含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)			
		SO ₂	H ₂ S	微水(H ₂ O)	CO
照射前	尖端缺陷	0	0	182	16
	悬浮缺陷	0	0	179	18
照射后	尖端缺陷	0	0	186	18
	悬浮缺陷	0	0	182	17

表 3、4 中,在尖端缺陷和悬浮缺陷情况下,X 射线长时间照射,SF₆ 气体检测结果 SO₂ 和 H₂S 照射前后均为 0,这两种缺陷都没有导致 SF₆ 气体中 SO₂ 和 H₂S 的生成。在 X 射线照射后,尖端缺陷和悬浮缺陷区域的视在放电量未出现明显增加。这表明 X 射线照射并未引起局部放电现象的显著增加,从而证明了 X 射线对 GIS 设备内部缺陷的影响较小。研究设计检测系统的设定电压为 140~260 kV,电流为 2 mA,曝光时间为 3 m,焦距为 1 000 mm。针对 GIS 本体结构的缺陷,不同缺陷的模拟情况和 X 射线成像效果,如图 4 所示。

图 4(a)中,假设安装运行时螺栓松动掉落在设备内部情况,研究将铝片包裹的螺栓置于 GIS 内部,螺栓位置和铝片结果均被检测出。图 4(b)中,装置内设计 30 mm 长且 3 mm 直径的带电金属导体,其成像效果能够显示出尖端缺陷的明显成像效果。图 4(c)中,导杆不对中安装的状态和程度能够被成像结果清晰显示。图 4(d)中,GIS 内隔离开关操作不到位的程度和位置情况也能被明显显示出来。因此,该模拟和检测系统具有可行性。针对金属装配件中单个螺栓缺陷的情况,对比无缺陷的情况,参考位置的加速度时域图和频谱图,如图 5 所示。

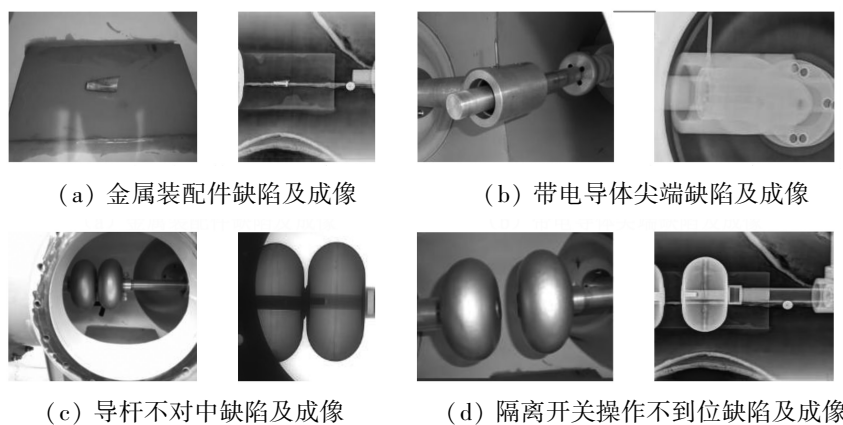


图 4 不同缺陷情况和成像效果对比

Fig. 4 Comparison of different defect conditions and imaging effects

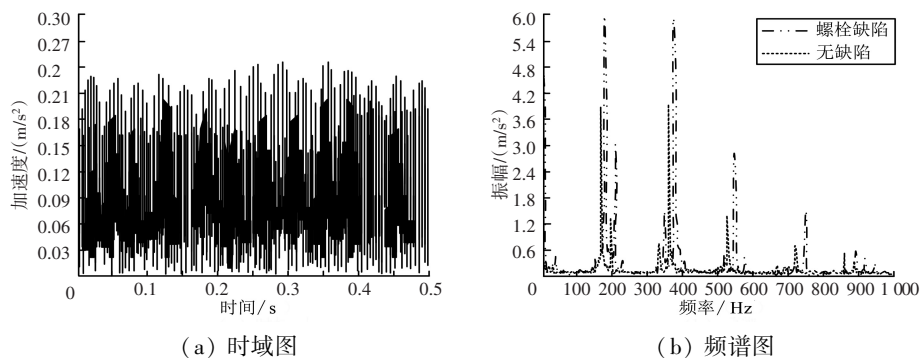


图 5 螺栓缺陷的时域和频谱变化对比

Fig. 5 Comparison of time domain and spectral changes of bolt defects

图 5(a)中,在 0.5 s 内,该缺陷的加速度大小变化随着时间增加而存在增加的情况。图 5(b)中,螺栓缺陷情况下,当频率为 170 Hz 时,振幅最高,为 6.0 m/s²,200 Hz 时振

幅出现较大波动变化,370 Hz 时振幅为 2.8 m/s²。原因在于螺栓缺陷导致加速度数据的波动。

(下转第 178 页)