

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.020

基于临界折射纵波法的盆式绝缘子法兰螺栓松动检测

葛健¹, 王伟², 宋建成¹, 焦国勋¹, 李鹏江¹, 高晋武¹, 任鸿秋¹

(1. 太原理工大学煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室, 矿用智能电器技术国家地方联合工程实验室, 太原 030024;

2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 太原 030001)

摘要: 盆式绝缘子是GIS的关键绝缘器件,与两侧气室法兰通过螺栓进行紧固连接,当螺栓松动时会导致盆式绝缘子应力分布不均,从而影响GIS运行的安全性和稳定性。文中提出了一种基于超声临界折射纵波(L_{CR})的盆式绝缘子法兰螺栓松动检测方法,根据 L_{CR} 波在盆式绝缘子法兰表面的传播声时差来反映螺栓松动情况。结果表明,当相邻螺栓松动时, L_{CR} 波在松动螺栓之间的法兰表面声时差变化最大,且变化量大于24 ns;当不相邻螺栓松动时, L_{CR} 波在松动螺栓正对的法兰表面声时差变化最大,且声时差变化量大于10 ns,并且螺栓松动程度越大,超声传播声时差变化量越大。该检测方法可实现对盆式绝缘子法兰螺栓松动的检测,判断螺栓松动数量及位置,具有一定的工程实用价值。

关键词: 盆式绝缘子; 临界折射纵波; 斯涅尔定律; 法兰螺栓; 松动检测

Detection on Looseness of Flange Bolt of Insulating Spacer Based on Critical Refraction Longitudinal Wave Method

GE Jian¹, WANG Wei², SONG Jiancheng¹, JIAO Guoxun¹, LI Pengjiang¹,
GAO Jinwu¹, REN Hongqiu¹

(1. Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, National & Provincial Joint Engineering Laboratory of Mining Intelligent Electrical Apparatus Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China)

Abstract: Insulating spacer is the key insulation element of GIS. It is fastened and connected with the flanges of the gas compartment on both sides by bolts. The bolts, in case of loose, will lead to uneven stress distribution of insulating spacer, thus affecting both safety and stability of the insulating spacer. In this paper, a method for detecting the bolt looseness of insulating spacer flanges based on ultrasonic critically refracted longitudinal waves (L_{CR}) is proposed. The looseness of bolts is reflected in accordance with the acoustic time difference of L_{CR} wave propagation on the surface of the insulating spacer flanges. The results show that, in case of looseness of the adjacent bolts, the L_{CR} wave has the largest change in the flange surface acoustic time difference between the loose bolts, and the magnitude of variation is greater than 24 ns; While, when the non-adjacent bolts are loose, the acoustic time difference on the surface of flange of L_{CR} on the opposite side of the loose bolt is maximum and the acoustic time difference is greater than 10 ns, and the greater the bolt looseness, the greater the ultrasonic propagation acoustic time difference. The detection method can achieve the detection of the looseness of the flange bolts of the insulating spacer, judge the number and position of the loosening of the bolts and has certain engineering practical value.

Key words: insulating spacer; critically refracted longitudinal wave; Snell's law; flange bolt; looseness detection

收稿日期:2023-12-23; 修回日期:2024-02-25

基金项目:国网山西省电力公司科技项目(基于超声波的GIS盆式绝缘子应力检测关键技术研究及应用)。

Project Supported by State Grid Shanxi Electric Power Company Science and Technology Project(GIS Basin Insulator Stress Detection Based on Ultrasonic Key Technology Research and Application).

0 引言

随着国民经济的不断发展,气体绝缘组合开关(gas insulated switchgear, GIS)在特高压输电系统中起到越来越重要的作用。盆式绝缘子是GIS中最薄弱的环节,其性能优劣直接影响着GIS运行的安全性和可靠性^[1-4]。目前超过90%盆式绝缘子都是由环氧盆体和铸铝合金法兰组成,其中环氧盆体部分起绝缘和机械支撑作用,金属法兰用于支撑环氧盆体。盆式绝缘子与两侧GIS气室通过螺栓进行紧固连接^[5-8]。据国家电网公司统计,近十年来,GIS故障共发生183起,其中220 kV电压等级GIS故障发生率最高,达到56.3%^[9]。在所有故障类型中,由盆式绝缘子导致的GIS故障占比11%。螺栓松动引起盆式绝缘子受力不均而产生故障是主要原因之一。而绝缘子受力不均主要因为断路器正常和故障状态分合闸振动及检修安装时螺栓预紧不到位所致^[10-11]。这些原因会造成盆式绝缘子法兰部分应力集中,进而使环氧盆体受力不均导致变形开裂,最终导致GIS漏气、局部放电甚至绝缘子沿面闪络等故障,发生大面积停电^[12-13]。因此,对盆式绝缘子法兰螺栓松动进行检测对发现绝缘子状态异常具有一定的现实意义。

对于螺栓松动的检测,国内外学者进行了一些研究,应用较多的检测方法有扭矩扳手法、振动响应法、应力应变法等。扭矩扳手法由于实际工程中螺栓数量巨大且存在隐蔽部位螺栓预紧力无法检测的情况经常无法实施^[14];振动响应法基于不同螺栓预紧力下螺栓阻尼、刚度和固有频率会发生变化的原理对螺栓松动进行检测,但这种方法仅适用于螺栓松动极其严重导致结构模态参数发生明显变化的工况^[15];应力应变法通过电阻应变片测量螺栓轴向应力进而检测螺栓预紧力的变化,但是应变片的粘贴比较复杂且容易受到螺栓外观的影响^[16]。超声法较以上方法具有无损伤、高灵敏等优越性,被广泛应用于无损检测用途。其中 L_{CR} 对应力最为敏感^[17],检测精度较高,但在螺栓松动检测方面鲜有研究。

针对螺栓松动检测领域存在的问题,结合盆式绝缘子结构特征,文中基于 L_{CR} 波法,开发一种GIS盆式绝缘子法兰螺栓松动检测系统,通过测量 L_{CR} 波在盆式绝缘子法兰表面传播声时的变化量,可判断出松动螺栓的数量及位置,实现法兰螺栓松动监测。

1 超声临界折射纵波检测方法

1.1 超声临界折射纵波传播模型

根据超声波在弹性介质中的传播方向和质点的振动方向之间的关系,超声波可以被划分为横波、纵波、表面波和瑞利波等波型^[18]。当超声纵波在不同介质中倾斜入射时,会发生反射、折射和波型转换等现象^[19]。当该入射角达到第一临界角度 α 时,见图1。纵波折射角 β 将会变为 90° ,此时的纵波会沿着第二种介质的近表面传播,这种波被称为 L_{CR} 波^[20]。

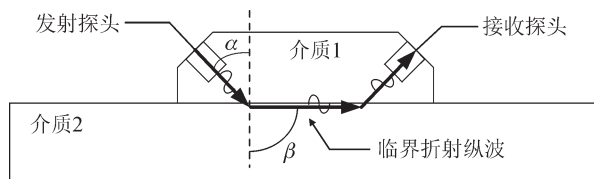


图1 临界折射纵波示意图

Fig. 1 Schematic diagram of critically refracted longitudinal wave

第一临界角 α 可以通过斯涅尔定律求解,公式为^[21]

$$\alpha = \arcsin \frac{C_{L1}}{C_{L2}} \quad (1)$$

式(1)中: C_{L1} 为第一种介质中的超声纵波传播速度; C_{L2} 为第二种介质中的超声纵波传播速度。文中第一种介质为有机玻璃楔块,超声纵波传播速度为2 700 m/s;第二种介质为盆式绝缘子铸铝合金法兰,超声纵波传播速度为6 396 m/s,由式(1)可得到第一临界角为 25° 。

根据入射角设计的探头楔块组合见图2。由于实验采用的220 kV GIS盆式绝缘子法兰宽度为45 mm,因此楔块的最大宽度为45 mm。探头使用5 MHz、6 mm的TOFD纵波探头,配合相应角度的楔块可在被检材料中产生需要的 L_{CR} 波。回波信号为窄脉冲,可以更好地反映所需特征量。



图2 探头楔块组合

Fig. 2 Probe wedge combination

1.2 声弹性效应

L_{CR} 波检测原理基于声弹性效应,当传播距离固定时, L_{CR} 波传播声时差与应力呈线性关系。

根据声弹性理论,沿应力方向传播的超声纵波

声弹性关系为^[22]

$$\rho_0 v^2 = \lambda + 2\mu + \frac{\sigma}{3\lambda + 2\mu} \cdot \left[\frac{(\lambda + \mu)(4\lambda + 10\mu + 4m)}{\mu} + \lambda + 2l \right] \quad (2)$$

式(2)中: ρ_0 为材料形变前的密度; v 为沿应力方向传播的超声纵波速度; σ 为材料所受应力(拉伸应力为正, 压缩应力为负); λ 和 μ 为 2 阶弹性常数; l 和 m 为 3 阶弹性常数。

当被测材料处于零应力状态时, 纵波速度可用式(3)表示

$$v_0 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho_0}} \quad (3)$$

将式(2)、(3)联立即可得到沿应力方向传播的纵波速度与应力的关系为

$$v^2 = v_0^2(1 + k\sigma) \quad (4)$$

式(4)中, k 为声弹性系数, 可用式(5)表示

$$k = \frac{\frac{4\lambda + 10\mu + 4m}{\mu} + \frac{2l - 3\lambda - 10\mu - 4m}{\lambda + 2\mu}}{3\lambda + 2\mu} \quad (5)$$

将式(4)中的声速对应力求导得到超声纵波速度变化量 dv 与应力变化量 $d\sigma$ 的关系为

$$\frac{d\sigma}{dv} = \frac{2}{kv_0} \quad (6)$$

当声程 L 固定时, 则声速可用式(7)表示

$$v = \frac{L}{t} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)然后对公式两端分别进行求导, 将声速变化量 dv 转化为声时差变化量 dt , 用式(8)表示为

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{2L}{kv_0 t^2} \quad (8)$$

考虑临界折射纵波在固定声程内传播, 声速变化量较小, 式(8)可以化简为

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{kt_0}{2} = K \quad (9)$$

式(9)中, K 为应力系数。由式(9)可知, 应力的变化量与 L_{CR} 波传播声时的变化量呈线性关系。考虑盆式绝缘子法兰在使用过程中主要承受螺栓产生的压力, 因此通过测量 L_{CR} 波在盆式绝缘子法兰表面传播声时差, 可以反映法兰应力变化, 进而反映螺栓松动情况。

1.3 声时差计算方法

目前计算超声传播声时差常用方法有过零检测法、峰值法、互相关算法等^[23], 由于应力造成的声时差在 ns 级别, 采用传统的峰值法和过零检测法误差较大。互相关算法通过匹配超声发射信号和接

收信号的相似性, 从而求解声时差, 具有抗噪声能力强、计算量小等优点^[24], 其计算原理如下:

发射信号见图 3, 用 $a(t)$ 表示, 接收信号见图 4, 用 $b(t)$ 表示。

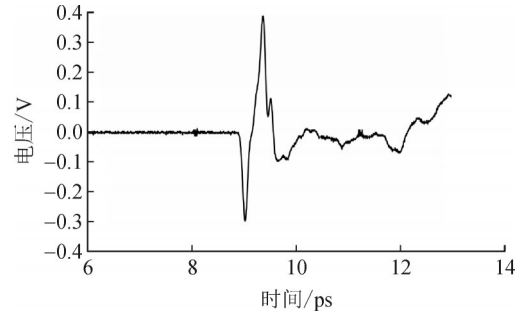


图3 超声发射信号

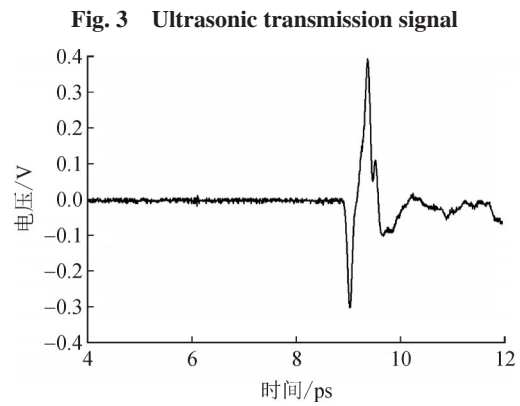


图4 超声接收信号

Fig. 3 Ultrasonic transmission signal

Fig. 4 Ultrasonic receiving signal

对发射信号和接收信号进行互相关运算

$$R_{ab}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} a(t)b(t-\tau)dt \quad (10)$$

$R_{ab}(\tau)$ 表示接收信号与参考信号之间的相似度, 计算结果见图 5。当 $t = 2.58 \mu\text{s}$ 时, 互相关函数取得最大值, t 即为超声传播声时差。

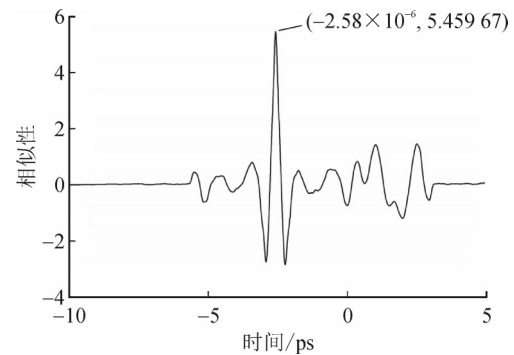


图5 互相关函数波形图

Fig. 5 Cross-correlation function waveform

2 实验及结果分析

2.1 实验方案

根据 L_{CR} 波检测方法的实验要求, 搭建的实验

平台见图6。其中,选用汕头超声公司的CTS-04UT四通道超声发射接收仪实现超声信号的输出,由于该仪器采样率只有100 MSa/s,无法满足应力检测所需时间精度,因此选用KEYSIGHT公司的DSOX2024A数字示波器进行数据采集,该型号的示波器具有最大2 GSa/s的采样频率,足以满足 L_{CR} 波检测精度的需求;使用上位机软件一方面控制发射信号脉冲宽度、增益、电压和重复频率等参数,另一方面进行互相关计算求解超声传播时间。

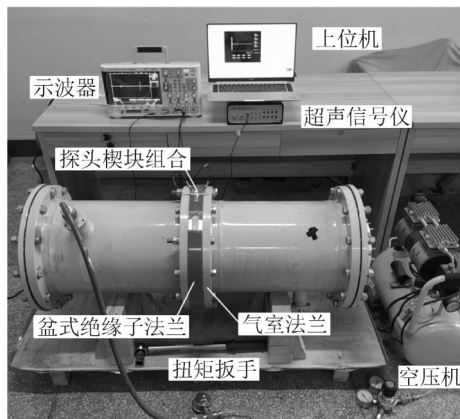


图6 超声检测系统

Fig. 6 Ultrasonic inspection system

盆式绝缘子套筒组合件由螺栓将盆式绝缘子法兰和气室法兰进行紧固,通过空气压缩机向两侧气室充气,气室内气压为0.45 MPa。根据盆式绝缘子生产厂家对法兰螺栓紧固力矩的要求,规定螺栓型号为M16、强度等级为8.8的螺栓标准扭矩为110 N·m,复测检验过程中,复测值不得低于设定力矩的90%,因此文中取螺栓松动时的力矩为99 N·m。为了更好地反映螺栓松动程度对超声传播时间的影响,添加60 N·m的螺栓扭矩作为对照组。

为了研究 L_{CR} 波在法兰表面传播时间与螺栓松动位置及个数的关系,在99 N·m和60 N·m两种螺栓扭矩下分别设置了以下6种实验工况:

- 1) 工况1,所有螺栓均处于标准扭矩110 N·m;
- 2) 工况2,螺栓2松动;
- 3) 工况3,螺栓1、2松动;
- 4) 工况4,螺栓1、3松动;
- 5) 工况5,螺栓2、3松动;
- 6) 工况6,螺栓1、2、3松动。

检测区域见图7, L_{CR} 波传播方向与螺栓平行,共分为5个检测区域,区域1、3、5为螺栓正对的法兰表面,区域2、4位于区域1、3、5中间。

2.2 实验结果分析

分别测量了不同工况下盆式绝缘子5个区域的超声信号,工况1检测区域1见图8。

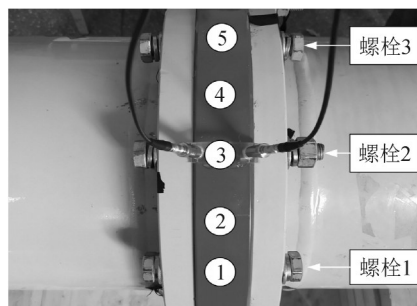
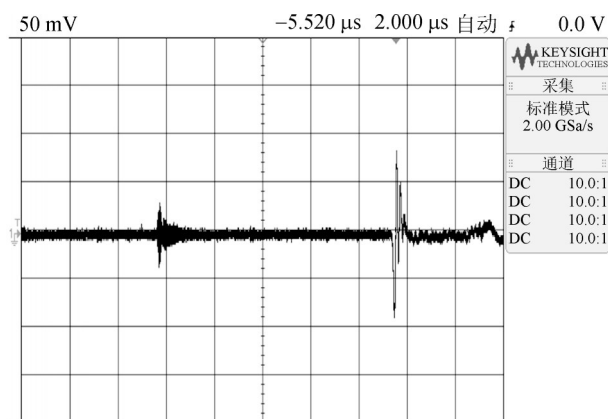
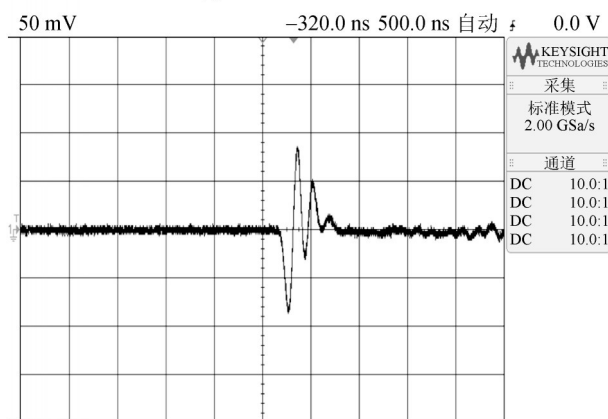


图7 检测区域

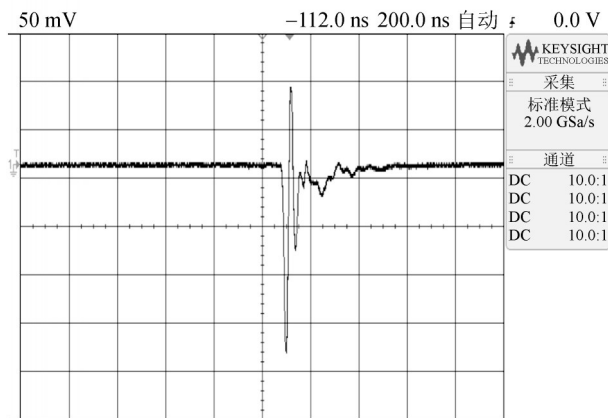
Fig. 7 Detection area



(a) 发射信号和接收信号



(b) 发射信号



(c) 接收信号

图8 超声信号

Fig. 8 Ultrasonic signal

将接收信号与发射信号进行互相关分析,得到不同工况下不同检测区域的超声传播时间。为了降低实验时噪声信号等对互相关算法造成的误差,在相同条件下对每种工况分别进行3次测试,对实验结果取平均值。

标准工况下不同检测区域的超声传播时间见图9。螺栓正对法兰区域的超声传播时间明显大于螺栓之间法兰区域的超声传播时间,这是因为螺栓正对区域由于螺栓预紧力导致法兰区域压力更大,所以传播时间更长。并且区域1、3、5超声传播时间基本相同,区域2、4超声传播时间也基本相同,说明标准工况下盆式绝缘子法兰应力分布均匀。

将工况2-6不同检测区域超声传播时间与标准

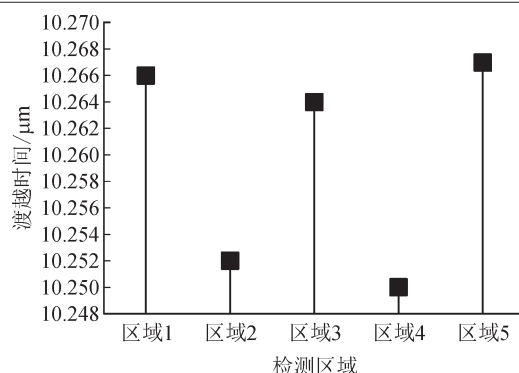


图9 标准工况超声传播时间

Fig. 9 Ultrasonic propagation time under standard conditions

工况传播时间做差进行对比分析,松动螺栓扭矩为 $99\text{ N}\cdot\text{m}$ 的超声传播声时差见图10。

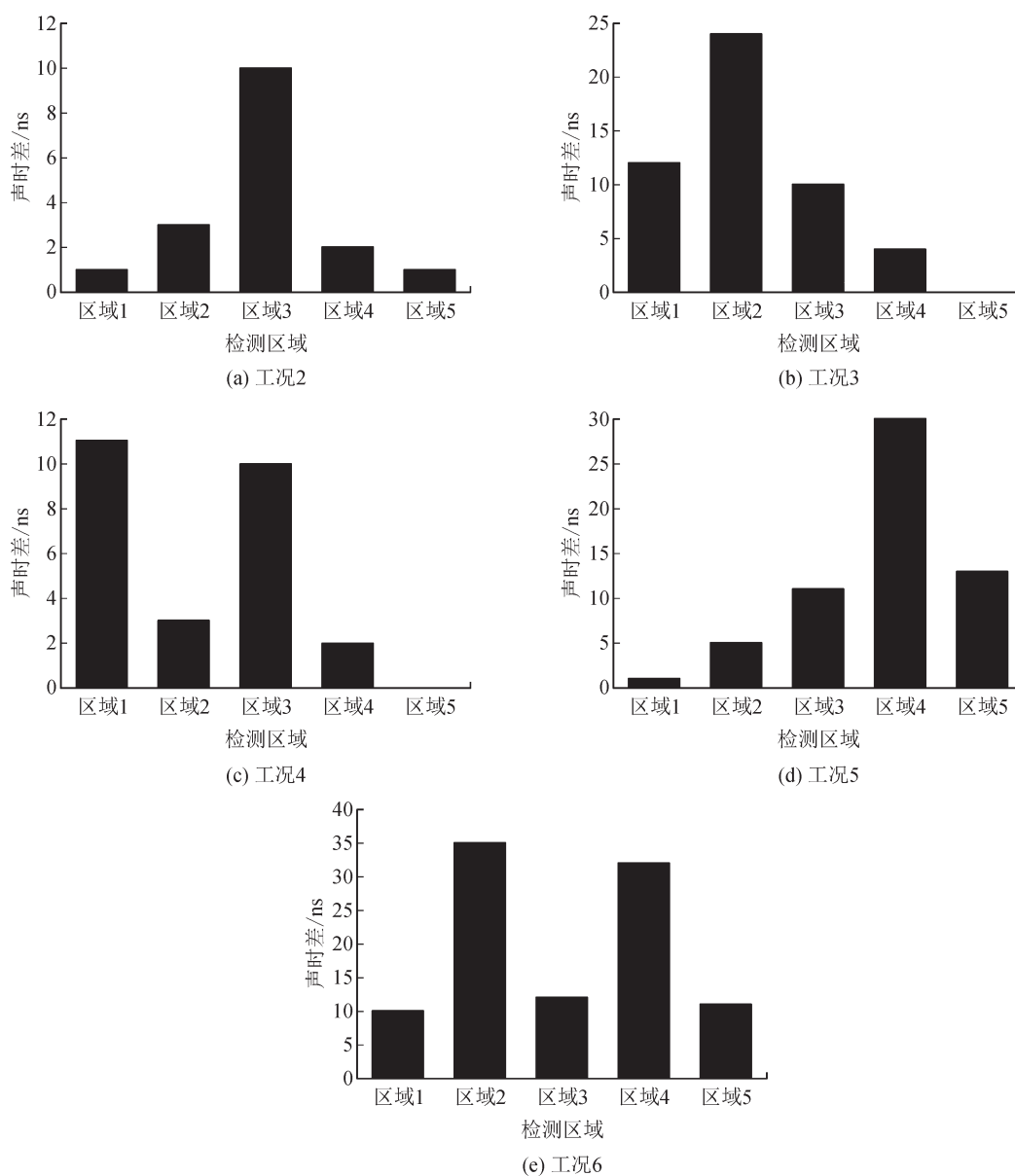


图10 不同工况声时差($99\text{ N}\cdot\text{m}$)

Fig. 10 Sound time difference in different working conditions($99\text{ N}\cdot\text{m}$)

由图10(a)可以看出,当单个螺栓松动时,松动螺栓正对法兰区域声时差变化最大,距离松动螺栓越远,声时差变化越小,这是因为法兰表面应力主要是由螺栓预紧力导致的,并且单个螺栓对法兰应力影响范围较小,距离松动螺栓越远,声时差变化越小;由图10(b)和图10(d)可以看出,当相邻两个螺栓松动时,两个松动螺栓中间区域法兰声时差变化最大,松动螺栓正对法兰区域声时差变化次之,这是因为当相邻两个螺栓松动时,松动螺栓中间区域应力变化量最大,因此声时差变化最大;由图10(c)可以看出,当两个不相邻螺栓松动时,这两个螺栓正对法兰区域声时差变化较大,而螺栓旁边区域声时差变化较小;由图10(e)可以看出,当3个螺栓松动

时,松动螺栓中间区域法兰声时差变化最为明显。

松动螺栓扭矩为 $60\text{ N}\cdot\text{m}$ 时不同工况的超声传播声时差见图11,其声时差变化规律与图10相似,但是松动螺栓正对的法兰区域以及松动螺栓中间区域声时差明显增大,说明螺栓松动程度越大,盆式绝缘子法兰应力分布不均越严重,进而导致超声传播声时差变化量越大。为了进一步清晰地反映螺栓松动情况,以螺栓扭矩为 $99\text{ N}\cdot\text{m}$ 时螺栓正对的法兰区域以及松动螺栓中间区域的超声传播声时差作为检测阈值。由图10可以看出,当有螺栓松动时,松动螺栓正对的法兰区域声时差变化量均大于 10 ns ,当相邻螺栓松动时,松动螺栓之间的法兰区域声时差变化量均大于 24 ns 。

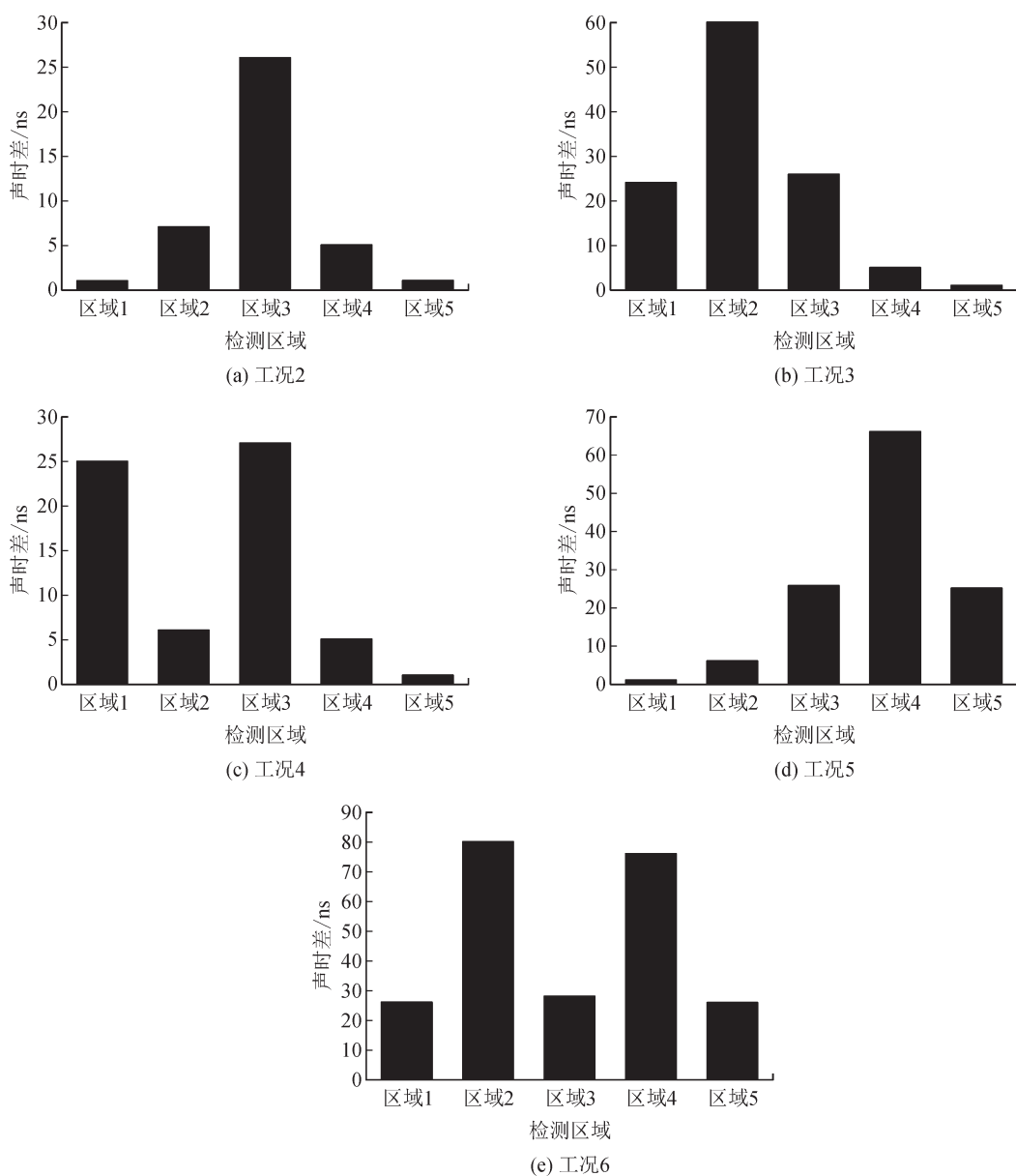


图11 不同工况声时差($60\text{ N}\cdot\text{m}$)

Fig. 11 Sound time difference in different working conditions($60\text{ N}\cdot\text{m}$)

从以上分析可以看出,在实际检测过程中,若仅有一个螺栓正对的法兰区域声时差变化最明显,且声时差变化量大于10 ns,则说明只有单个螺栓松动;若多个螺栓正对的法兰区域声时差变化较为明显,且声时差变化量大于10 ns,而松动螺栓旁边区域的声时差变化很小,则说明此时几个不相邻螺栓松动;若几个相邻螺栓之间的法兰区域声时差变化最大,且变化量大于24 ns,并且螺栓正对的法兰区域声时差变化量次之,且声时差变化量大于10 ns,则说明这几个相邻螺栓松动。通过测量盆式绝缘子法兰不同区域的超声传播时间,与标准螺栓预紧力下法兰区域传播时间进行对比分析,可以初步判断螺栓松动位置和个数,验证了通过 L_{CR} 法对螺栓松动状态进行监测的可行性。

3 结论

针对GIS盆式绝缘子螺栓松动的问题,文中采用 L_{CR} 波法研究了不同螺栓松动情况下盆式绝缘子法兰表面超声传播声时差的规律,得到如下研究结论:

1)当所有螺栓均处于标准预紧力时,盆式绝缘子法兰应力分布均匀;当盆式绝缘子法兰螺栓松动时, L_{CR} 波在法兰表面的传播时间会发生变化,根据这一特点,文中提出了使用超声传播声时差这一指标来衡量法兰螺栓松动情况。

2)盆式绝缘子法兰螺栓松动数量和松动位置对超声传播声时差影响显著,当相邻螺栓松动时, L_{CR} 波在松动螺栓中间区域对应的法兰表面声时差变化最大;当不相邻螺栓松动时, L_{CR} 波在松动螺栓正对的法兰表面声时差变化最大。

3)螺栓松动程度对超声传播声时差影响显著,当螺栓松动数量固定时,螺栓松动程度越大,超声传播声时差变化量越大。实际检测中,为了更好地表征螺栓松动,可以使用螺栓扭矩为99 N·m时螺栓正对的法兰区域以及松动螺栓中间区域的超声传播声时差作为检测阈值。

参考文献:

- [1] 姜文涛,刘荣海,杨迎春,等. 基于有限元分析和DR检测的110 kV GIS ZF4-126型环氧树脂支撑绝缘杆缺陷分析[J]. 电瓷避雷器,2020(1):228-233.
JIANG Wentao, LIU Ronghai, YANG Yingchun, et al. Defect analysis of 110 kV GIS ZF4 - 126 epoxy resin support insulation rod based on finite element analysis and DR testing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1): 228-233.
- [2] 刘通,李洪涛,刘建军,等. 一起GIS盆式绝缘子应力开裂导致绝缘击穿故障[J]. 高压电器,2020,56(2):240-245.
LIU Tong, LI Hongtao, LIU Jianjun, et al. Insulation breakdown fault caused by stress crack of GIS basin-type insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 240-245.
- [3] 刘荣海,臧春艳,杨迎春,等. 盆式绝缘子开裂故障的无损检测技术研究[J]. 高压电器,2019,55(3):139-143.
LIU Ronghai, ZANG Chunyan, YANG Yingchun, et al. Non-destructive testing technology of the cracking failure of the basin-type insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(3): 139-143.
- [4] 谢俊文. SF₆气体变压器用盆式绝缘子出厂试验研究[J]. 电瓷避雷器,2018(6):150-154.
XIE Junwen. Experimental research on basin-type insulator used in SF₆ gas insulated transformer[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(6): 150-154.
- [5] 丁兆帅,吴文海,戴通令,等. 800 kV盆式绝缘子密封性能有限元分析[J]. 高压电器,2021,57(1):62-67.
DING Zhaoshuai, WU Wenhui, DAI Tongling, et al. Finite element analysis on sealing performance of 800 kV insulating spacer[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 62-67.
- [6] 王超,李文栋,陈泰然,等. 550 kV GIS盆式绝缘子小型化设计(一):几何形状优化[J]. 电工技术学报,2022,37(7):1847-1855.
WANG Chao, LI Wendong, CHEN Tairan, et al. Compact design of 550 kV basin - type spacer in gas insulated switchgear(part I) —structure optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1847-1855.
- [7] 李文栋,王超,陈泰然,等. 550 kV GIS盆式绝缘子小型化设计(二):介电分布优化[J]. 电工技术学报,2022,37(11):2743-2752.
LI Wendong, WANG Chao, CHEN Tairan, et al. Compact design of 550 kV basin-type spacer in gas insulated switchgear(part II)—dielectric distribution optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2743-2752.
- [8] 葛志成,董冠良,林琛,等. 500 kV GIS盆式绝缘子故障原因分析与处理[J]. 吉林电力,2019,47(4):47-49.
GE Zhicheng, DONG Guanliang, LIN Chen, et al. Cause analysis and treatment of 500 kV GIS basin insulator fault[J]. Jilin Electric Power, 2019, 47(4): 47-49.
- [9] 张赛鹏,黄涛,董洪达,等. 高压断路器SF₆气体泄漏故障分析及处理[J]. 吉林电力,2019,47(2):45-47.
ZHANG Saipeng, HUANG Tao, DONG Hongda, et al. Analysis and treatment of SF₆ gas leakage fault of high voltage circuit breaker[J]. Jilin Electric Power, 2019, 47(2): 45-47.

- [10] 李永飞,姜映烨,郝留成,等. 1 100 kV GIS 盆式绝缘子气泡缺陷下的有限元应力分析[J]. 绝缘材料, 2020, 53(7): 57-61.
LI Yongfei, JIANG Yingye, HAO Liucheng, et al. Finite element stress analysis on 1 100 kV GIS basin insulators with bubble defects[J]. Insulating Materials, 2020, 53(7): 57-61.
- [11] 庄 丞,袁传镇,曾建斌. 表面应力分布对 252 kV GIS 盆式绝缘子机械性能影响的研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(2): 183-188.
ZHUANG Cheng, YUAN Chuanchen, ZENG Jianbin. Study on influence of surface stress distribution on mechanical properties of 252 kV GIS basin insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(2): 183-188.
- [12] 赵洪山,高玉峰. 基于振动特征估计的 GIS 设备故障检测与分析[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 114-120.
ZHAO Hongshan, GAO Yufeng. Fault detection and analysis of GIS based on vibration characteristic estimation [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 114-120.
- [13] 王永强,胡芳芳,李长元,等. 典型内部缺陷下 GIS 盆式绝缘子有限元应力分析[J]. 绝缘材料, 2017, 50(1): 78-83.
WANG Yongqiang, HU Fangfang, LI Changyuan, et al. Finite element stress analysis on GIS basin-type insulator with internal defect[J]. Insulating Materials, 2017, 50(1): 78-83.
- [14] 滕 冠. 高强度螺栓的紧固分析[J]. 装备制造技术, 2009 (4): 163-165.
TENG Guan. Fastening analysis of high-strength bolts[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009(4): 163-165.
- [15] DAHAK M, TOUAT N, KHAROUBI M. Damage detection in beam through change in measured frequency and undamaged curvature mode shape[J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2019, 27(1): 89-114.
- [16] 张忠伟,王峻青,史雄飞,等. 植入应变片式智能螺栓预紧力测量系统的研究与应用[J]. 质量与可靠性, 2020(3): 31-34.
ZHANG Zhongwei, WANG Junqing, SHI Xiongfei, et al. Research and application of inserted intelligent bolt pre-tightening force measurement system implanted with strain gauge[J]. Quality and Reliability, 2020(3): 31-34.
- [17] 田方园,郝艳捧,邹舟谔奥,等. 环氧复合绝缘表面微裂纹检测的超声临界折射纵波法[J]. 广东电力, 2019, 32 (12): 106-112.
TIAN Fangyuan, HAO Yanpeng, ZOU Zhouyi' ao, et al. Ultrasonic LCR method detecting micro-cracks on the surface epoxy composite insulation[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(12): 106-112.
- [18] 宋文涛. 残余应力超声无损检测与调控技术研究[D]. 北京:北京理工大学, 2016.
SONG Wentao. Study on technology of ultrasonic nondestructive testing and regulation of residual stress[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [19] 杨顺民. 临界折射纵波检测残余应力的关键影响因素研究[D]. 太原:中北大学, 2019.
YANG Shunmin. Research on key influencing factors for residual stresses measurement with critically refracted longitudinal waves[D]. Taiyuan: University of North, 2019.
- [20] 张 闯,王 标,刘素贞,等. 用于铝板声弹性系数标定的电磁加载装置设计[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 4139-4149.
ZHANG Chuang, WANG Biao, LIU Suzhen, et al. Design of electromagnetic loading device for the calibration of acoustic elastic coefficient of Aluminum plate[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (19): 4139-4149.
- [21] WANG Wei, ZHANG Yumin, ZHOU Yufeng, et al. Plane stress measurement of orthotropic materials using critically refracted longitudinal waves[J]. Ultrasonics, 2019(94): 430-437.
- [22] 邓 亚. 超声波法检测 6061-T6 铝合金残余应力的研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
DENG Ya. Research on residual stress measurement of 6061-T6 Aluminum alloy by ultrasonic method[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [23] 金中薇,姜明顺,隋青美,等. 基于广义互相关时延估计算法的声发射定位技术[J]. 传感技术学报, 2013, 26(11): 1513-1518.
JIN Zhongwei, JIANG Mingshun, SUI Qingmei, et al. Acoustic emission localization technique based on generalized cross-correlation time difference estimation algorithm [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26 (11): 1513-1518.
- [24] 周 凯,饶显杰,汪先进,等. 基于距离的互相关算法在电力电缆局部放电定位中的应用[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2946-2954.
ZHOU Kai, RAO Xianjie, WANG Xianjin, et al. Application of cross-correlation algorithm based on distance in partial discharge location of power cable[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2946-2954.
- 葛 健(1997—),男,硕士研究生,研究方向为高电压与绝缘技术(通信作者)(E-mail: 1169214120@qq.com)。