

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.03.014

基于超声波的GIS盆式绝缘子螺栓松动程度监测方法

王伟¹, 李鹏江², 李国栋¹, 董理科¹, 郑志宏¹, 芦竹茂¹, 宋建成²

(1. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 太原 030001; 2. 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, 太原 030024)

摘要: GIS中的重要组成部分盆式绝缘子主要通过法兰螺栓进行固定,但螺栓松动会导致盆式绝缘子受力不均甚至气体泄漏等问题,严重影响GIS运行的可靠性和安全性。文中提出了一种GIS盆式绝缘子法兰螺栓松动程度的超声波监测方法,利用压电传感器进行超声信号的激励与接收,并将压电传感器安装在待测螺栓所连接的法兰两侧,根据超声响应信号的能量衰减率来判断螺栓松动程度。通过实验研究了不同工况下超声响应信号能量及其衰减率的变化规律。结果表明,随着螺栓松动程度的增加,响应信号幅值逐渐下降,信号能量衰减率逐渐增大,单个螺栓松动且松动等级为3时信号能量衰减率可达40.8%;同时发现距离松动螺栓最近的压电传感器接收信号能量衰减率最大。该方法可实现GIS盆式绝缘子法兰螺栓松动程度监测,具有一定的工程应用价值。

关键词: 超声波; GIS; 盆式绝缘子; 压电传感器; 螺栓松动监测

Monitoring Method on Bolt Looseness Degree of GIS Insulating Spacer Based on Ultrasonic Wave

WANG Wei¹, LI Pengjiang², LI Guodong¹, DONG Like¹, ZHENG Zhihong¹, LU Zhumao¹,
SONG Jiancheng²

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

Abstract: The insulating spacer, an important part of GIS, is mainly fixed by flange bolts, but the looseness of bolts will cause such problems as uneven force and even gas leakage of the insulating spacer, which will seriously affect reliability and safety of GIS operation. In this paper, a kind of ultrasonic wave monitoring method for the looseness of flange bolts of GIS insulating spacer is proposed, the excitation and reception of ultrasonic signal is performed by using the piezoelectric sensor, and the piezoelectric sensor is installed on both sides of the flange connected by the bolt to be tested, and the degree of bolt looseness is judged in accordance with the energy attenuation rate of the ultrasonic response signal. The variation of ultrasonic response signal energy and its attenuation rate under different working conditions are studied through experiments. The results show that with increase of bolt looseness, the amplitude of the response signal decreases gradually and the signal energy attenuation rate gradually increases, the annentuation rate of the signal energy, in case of single bolt looseness and the looseness grade is 3, can be up to 40.8% and, at the same time, it is found that the annenuation rate of the receiving signal energy of the piezoelectric sensor which is closest to the bolt looseness is maximum. The method proposed in this paper can monitor the looseness of flange bolts of GIS insulating spacer, and has certain engineering application.

Key words: ultrasonic wave; GIS; insulating spacer; piezoelectric sensor; bolt loosening monitoring

收稿日期:2023-10-22; 修回日期:2023-12-17

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

随着中国超高压和特高压电网的高速发展, GIS以其卓越的性能被广泛应用于各级变电站中。在GIS设备中,盆式绝缘子起到了机械支撑、气室隔离以及电气绝缘等作用,是GIS设备的重要组成部分^[1-4]。

GIS在工作过程中,其盆式绝缘子会受到多种应力的作用,不可避免地产生振动。引起振动的原因有很多,如导电杆不对中、开关触头接触异常、断路器分合闸作用等。这些振动源都会影响到盆式绝缘子固定螺栓的稳定性,甚至造成螺栓松动,致使盆式绝缘子受力不均,出现变形、裂纹等现象,严重时还可能导致GIS中的SF₆泄露,造成重大电力故障^[5-7]。据统计,北方某220 kV全GIS变电站近5年共发生故障21起,其中,GIS设备漏气故障15起,漏气故障占总故障比重71%。在漏气故障中,因盆式绝缘裂纹形成的漏气12起,因螺栓松动漏气3起,分别占到漏气故障的80%和20%,追其原因大都是螺栓预紧力不均衡以及螺栓松动所导致^[8-10]。因此开展盆式绝缘子紧固螺栓松动的监测与分析具有重要的现实意义。

在螺栓松动状态监测方面,国内外学者提出了较多的监测方法,并且产生了一系列研究成果,应用较多的监测方法有超声波能量法、电阻应变片电测法、压电阻抗法、声弹性效应法等。超声波能量法是基于超声透射信号的能量值会随着螺栓工作状态的变化而变化这一特性,通过透射信号能量的变化规律达到监测螺栓工作状态的目的,但螺栓紧固件及其连接件接触面有时较为复杂,超声波在连接界面的透射波能量与界面间的接触面积、螺栓预紧力变化情况等的关系仍需进一步的研究^[11-12]。应变片电测法是将电阻应变片粘贴在螺杆表面,通过电阻应变片先测得螺杆表面的应变,然后根据螺杆表面应变来推算出螺栓预紧力,该方法测量精度较高,但易受外界条件限制^[13-14]。压电阻抗需将压电片与螺栓进行耦合粘贴,根据二者耦合阻抗的变化来反应螺栓的松动状态,但此方法仅在压电片附近有较好的检测效果,检测范围有一定限制^[15-17]。声弹性效应法是通过测量超声波在螺栓松动状态及正常工作状态下传播时间的变化情况,来确定螺栓的预紧力,但声波传播时间的变化需要用到专业的

高精度精密仪器进行测量,易受外部环境干扰,很难应用到现场应用中^[18-21]。

上述螺栓松动状态监测方法多适用于连接板状结构的螺栓,还不能直接应用于盆式绝缘子固定螺栓的状态检测,且当前国内外对于GIS盆式绝缘子法兰螺栓松动监测的研究鲜有报道。文中通过实验对盆式绝缘子法兰螺栓松动监测方法进行了研究,提出了基于超声波的252 kV GIS盆式绝缘子法兰螺栓松动程度监测方法,通过超声信号能量衰减率可对螺栓松动程度进行判断。

1 法兰螺栓监测原理

1.1 超声波的声学特性

超声波在介质中传播时,传播介质受到的压强称为声压,用 p 表示,单位是Pa。声压一般呈余弦特性,余弦波声压可由式(1)表示

$$p = p_m \cos(\omega t + \varphi) = \rho c A \omega \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

式(1)中: p_m 为声压极大值; ω 为圆频率; φ 为介质质点振动相位角; ρ 为介质密度; c 为声波传播速度; A 为振幅。

在单位时间内,与声波传播方向垂直的通过单位面积的声波能量值称为声强,用 I 表示,单位为W/cm²。纵波的声强为

$$I = \frac{1}{2} \rho c A^2 \omega^2 = \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{\rho c} = \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{Z} \quad (2)$$

式(2)中, Z 为声特性阻抗。

由式(2)可得声强与声压的平方成正比,由式(1)可知,超声波声压远大于普通声波声压。因此,超声波的高频特性使得其传播能量远大于普通声波,利于声波信号的检测。

1.2 超声波的发射与接收

超声波的发射与接收是利用压电材料既可作激发器又可作传感器这一特点实现的。将压电传感器安装在待检测工件两侧,给一个压电传感器施加高频激励信号,另一个压电传感器即可接收到超声响应信号。该方法响应速度快、滤波目的明确、检测精度较高,在多种复杂工况下均可使用。螺栓连接工件形式较多,且螺栓的工作环境复杂,这一方法对于检测螺栓松动状态较为合适。

压电材料既可以发射超声波又可以接收超声波得益于压电材料的压电效应这一特殊属性,压电效应包含正压电效应和逆压电效应两种。压电效

应实际是机械能与电能之间的相互转化过程,其原理见图1。压电材料受到外力作用时将发生形变,此时压电材料两个电极表面将产生感应电荷并产生极化电场,且电场强度正比于压电材料所受外力大小,这种机械能转换为电能的过程称为正压电效应;在压电材料两个电极表面施加电压时,会使压电材料内部的正负电荷发生移动,压电材料内部会产生应变,且应变大小与电极表面所施加电压的大小成正比,这种电能转化为机械能的过程称为逆压电效应^[22]。

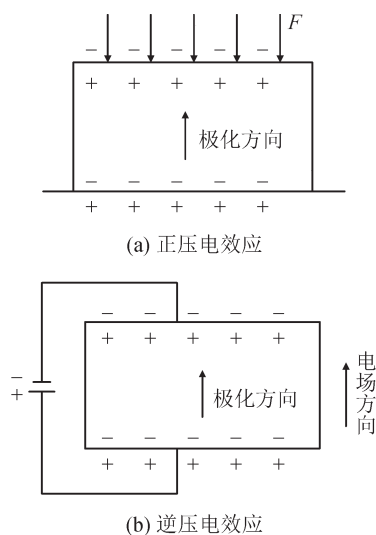


图1 压电效应示意图

Fig. 1 Schematic diagram of piezoelectric effect

1.3 超声波监测法兰螺栓松动原理

实际工程中,任何物体的表面都不是绝对光滑的,在微观条件下,物体的表面存在着高低不平的微凸体,见图2。两物体实际接触面积的大小取决于接触面间微凸体接触面积的大小。超声波传播到两物体接触面时,透射波能量值取决于两物体实际接触面积的大小^[23]。

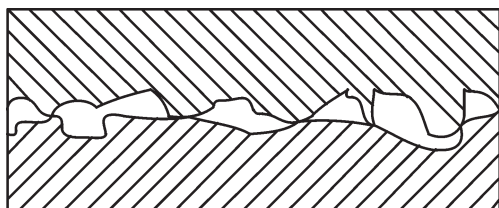


图2 接触体表面微观形貌

Fig. 2 Micro-topography of contact surface

同时,由接触力学可知,两物体实际接触面积的大小会随着接触面间压力大小的变化而变化^[24],而盆式绝缘子法兰间接触压力的大小由螺栓扭矩的大小所决定。因此,当盆式绝缘子法兰螺栓扭矩变化时,法兰间接触压力将产生变化,从而引起法

兰间实际接触面积改变,当在待测螺栓所连接的法兰两侧布置压电传感器时,压电传感器接收到的超声波透射信号幅值也将发生变化,通过对比法兰螺栓标准扭矩下的超声波透射信号幅值,可达到判断螺栓松动状态的目的。

1.4 法兰螺栓松动程度指标的确定

在超声波的传播过程中,超声波的能量是通过弹性介质进行传递的,弹性介质中的质点会在各自的平衡位置反复振动,质点的振动使得介质的每一部分具有动能,同时质点振动使得介质产生形变又具有势能,因此超声波传播的过程同时伴随着能量的传递。超声波能量在一个振动周期里的平均值就是超声波的平均能量密度,见式(3)

$$\bar{w} = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega_1^2 \quad (3)$$

式(3)中: $\bar{w}$ 为一个周期内超声波的平均能量密度; ρ 为材料的密度; A 为质点振动的振幅; ω_1 为波角频率。

由超声波的能量频率密度计算公式得知,材料密度为常数,即盆式绝缘子环氧部分以及金属法兰部分的材料密度均为常数,且实验过程中超声波波动频率可认为是不变的,因此可以通过超声信号幅值的平方和来反映超声波的能量。超声信号能量可以用下式计算

$$E = \sum_{i=1}^N v_i^2 \quad (4)$$

式(4)中: E 为采样信号能量; N 为采样信号长度; v_i 为采样信号的第 i 个点。

法兰螺栓处于不同松动程度时,超声信号的能量值也不同,螺栓松动程度越大,超声信号能量值越小,故可以通过超声信号能量衰减率来反映螺栓松动程度。超声信号能量可用式(4)计算,超声信号能量的衰减率可表示为

$$R_e = \frac{E_0 - E}{E_0} \times 100\% \quad (5)$$

式(5)中: E_0 为螺栓标准状态下超声响应信号的能量; E 为螺栓松动状态下超声响应信号的能量。

盆式绝缘子法兰螺栓出现松动将引起法兰间接触应力下降,进而导致法兰间实际接触面积下降,此时压电传感器接收到的超声信号能量将下降,且螺栓松动程度越大,超声信号能量下降越多,由式(5)可知,超声信号能量下降时,超声信号能量衰减率将增大,故可通过超声信号能量衰减率对螺栓松动程度进行判断。

文中利用压电传感器即压电片进行超声信号的发射与接收,将接收到超声信号的能量衰减率作为衡量法兰螺栓松动程度的技术指标,根据超声信号能量衰减率的大小实现螺栓松动程度的判断。

2 实验研究

2.1 实验方案

实验所用盆式绝缘子由环氧树脂和氧化铝浇铸而成,盆式绝缘子外法兰最大直径为450 mm,高度为120 mm,法兰厚度为40 mm,盆式绝缘子环氧树脂部分最大直径为375 mm。固定盆式绝缘子的紧固件为强度等级8.8的M16六角螺栓及与该螺栓匹配的垫圈。盆式绝缘子两侧的铝合金气室长度为500 mm,气室法兰最大直径为450 mm,厚度为30 mm。压电传感器选用PZT-5H压电片,其直径为12 mm,厚度为2 mm,单面电极引线,用超声耦合剂将压电片粘贴在法兰表面。

实验中采用1个压电片激励超声信号,3个压电片接收超声信号的方式。发射端压电片及接收端压电片的位置见图3。

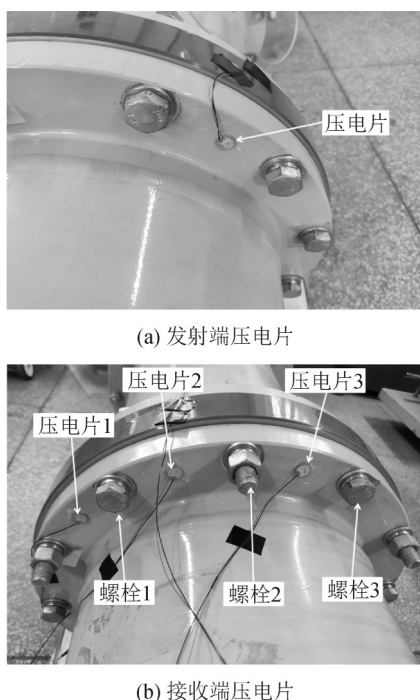


图3 压电片在法兰上的位置

Fig. 3 The position of the piezoelectric sheet on the flange

实验平台见图4,实验过程中采用CTS-04UT超声信号仪进行信号的发射与采集,上位机控制输出激励信号,激励信号以幅值为300 V的脉冲信号施加到发射端压电片上,3个接收端压电片的超声信号通过超声信号仪进行采集。为了模拟GIS正常工作时的状态,需要向盆式绝缘子两侧气室充气加

压,考虑到SF₆对人体的危害性及对环境的污染性,实验通过空气压缩机向两侧气室内充气,气室内气压为GIS常规工作气压0.45 MPa。

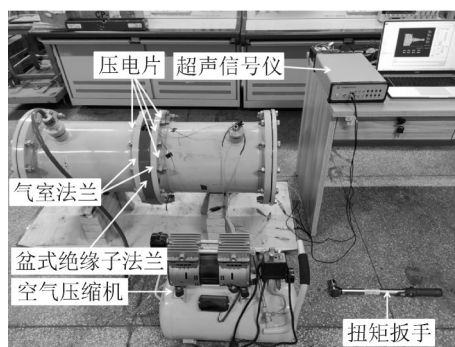


图4 实验装置及试件

Fig. 4 Experimental device and test piece

根据盆式绝缘子生产厂家对法兰螺栓紧固力矩的要求,螺纹规格M16、强度等级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扭矩的90%,故此处取螺栓松动时的扭矩为99 N·m。文中在此基础上,添加了两种螺栓松动程度情况,螺栓扭矩值分别为标准扭矩值的80%和70%,扭矩值大小分别为88 N·m和77 N·m。根据螺栓松动程度及松动数量的不同,设置了如下几种工况。

- 1)工况0:标准工况(无螺栓松动)。
- 2)工况1:螺栓1松动,扭矩值99 N·m。
- 3)工况2:螺栓1松动,扭矩值88 N·m。
- 4)工况3:螺栓1松动,扭矩值77 N·m。
- 5)工况4:螺栓1、2松动,扭矩值99 N·m。
- 6)工况5:螺栓1、2松动,扭矩值88 N·m。
- 7)工况6:螺栓1、2松动,扭矩值77 N·m。
- 8)工况7:螺栓1、2、3松动,扭矩值99 N·m。
- 9)工况8:螺栓1、2、3松动,扭矩值88 N·m。
- 10)工况9:螺栓1、2、3松动,扭矩值77 N·m。

其中单个螺栓松动情况为工况1-3,两个螺栓松动情况为工况4-6,3个螺栓松动情况为工况7-9。为了降低实验时的随机噪声干扰,在相同条件下对每种工况分别进行了3次测试,测试数据结果取平均值。

2.2 实验结果与分析

为了探究螺栓不同松动程度下超声信号的变化规律,提取了工况1、工况4、工况5、工况9下压电片2所接收到的响应信号,见图5。

从图5中可以看出,螺栓松动时,压电片2的响

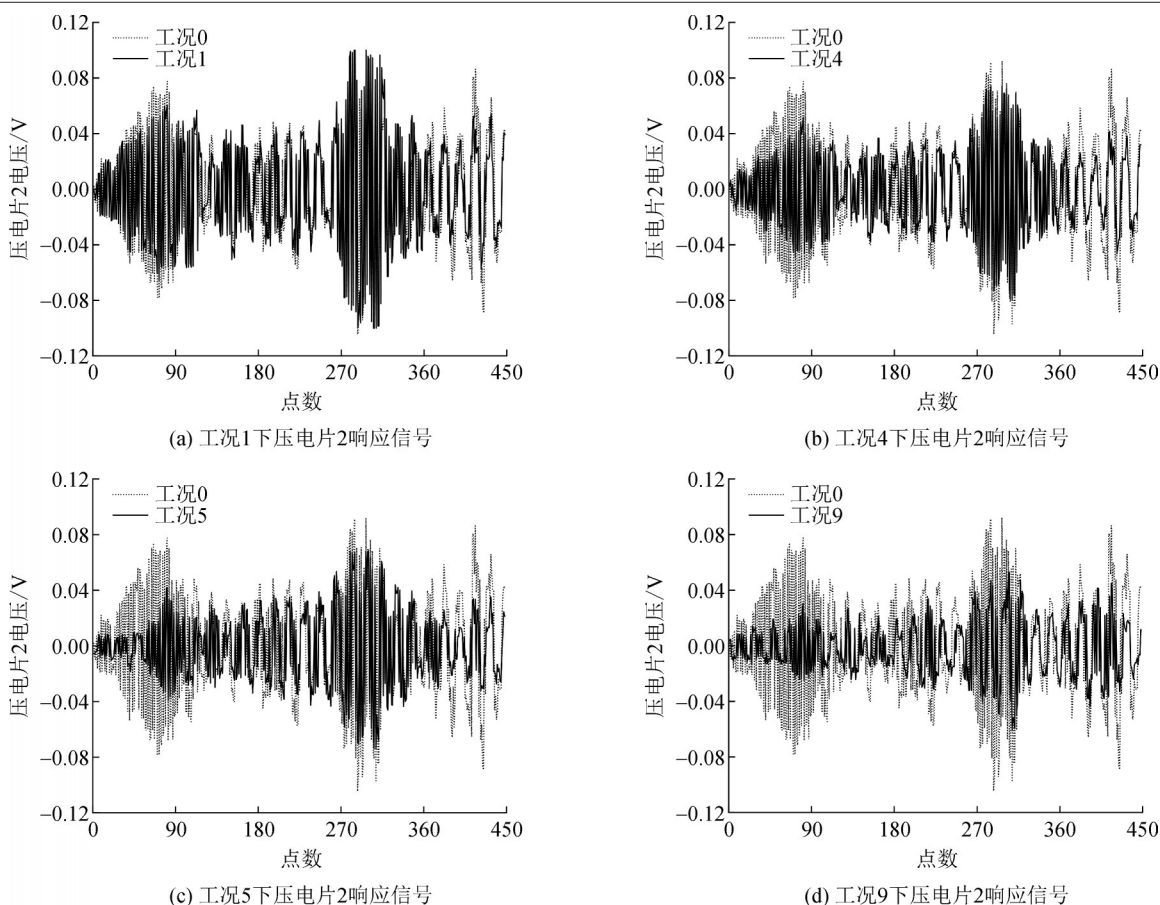


图5 不同工况下压电片2的响应信号

Fig. 5 Response signal diagram of piezoelectric sheet 2 under different working conditions

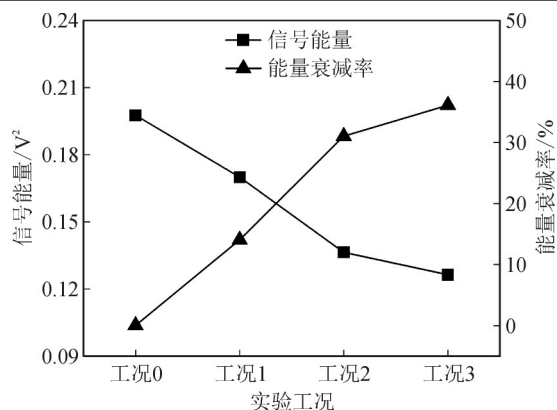
应信号幅值出现明显变化,且螺栓松动程度的不同,压电片2响应信号幅值的下降程度也有所区别。图5(a)中工况1下压电片2的响应信号幅值同标准工况相比差别不大,仅有部分区域的信号幅值小于标准工况下的信号幅值。这是因为工况1下仅有一个螺栓松动,且螺栓处于最小松动程度的情况。反之,图5(d)中工况9下压电片2的响应信号幅值远远小于标准工况下的响应信号幅值。这是因为工况9下松动螺栓的数目较多,且螺栓处于最大松动程度的情况,预紧扭矩仅为标准预紧值的70%。图5(b)、(c)中螺栓的松动数量相同,松动程度不同,工况5下螺栓的松动程度大于工况4中的螺栓,故工况5下螺栓的响应信号幅值变化幅度较大,信号幅值远小于标准工况下的信号幅值,同时也小于工况4下螺栓的信号幅值。上述螺栓松动后信号幅值下降的原因相同,是因为螺栓出现松动现象时,螺栓与法兰间的接触应力下降,法兰间的接触应力也随之下降,此时法兰间接触面的实际接触面积将减小,导致超声透射信号的幅值将下降,当螺

栓松动程度增加时,这种现象将更加明显。

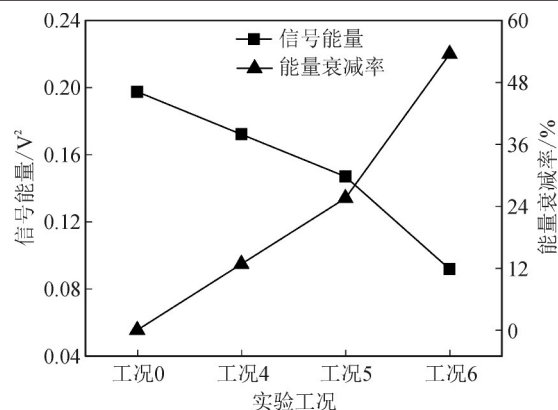
为了进一步分析螺栓松动程度对超声响应信号的影响,对9种工况下压电片1、压电片2及压电片3所接收到超声信号的能量及其衰减率进行了计算,结果见图6-8。

从图6中可以看出,随着螺栓松动程度的增加,压电片1、压电片2及压电片3的响应信号能量均不断下降。同时发现,相同工况下,压电片2的响应信号能量大于压电片1及压电片3。这是因为压电片2距离激励信号源更近,故响应信号能量更大。另外,3个压电片的响应信号能量衰减率均随着螺栓松动程度的增大而增加。这是因为螺栓松动程度增加后,螺栓与气室法兰间接触应力将下降,盆式绝缘子法兰与气室法兰间的接触应力也随之下降,法兰间的实际接触面积将减小,导致透射信号能量减小,从而带来响应信号能量衰减率的增加。

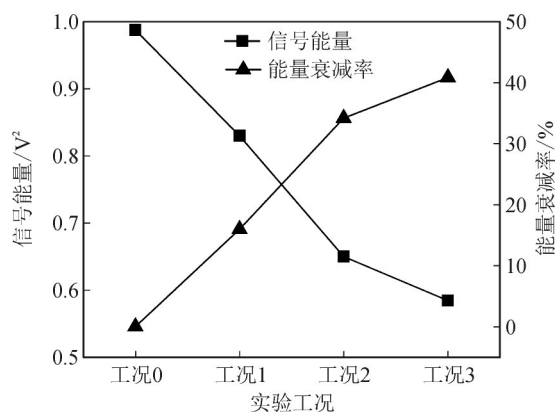
图7、8中响应信号能量及衰减率的变化规律同图6相似,但响应信号能量衰减率大于后者。图6中压电片1-3上响应信号能量衰减率均在工况3下



(a) 压电片1



(b) 压电片2

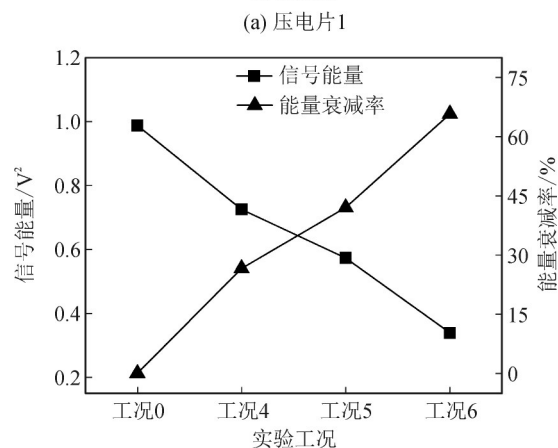


(c) 压电片3

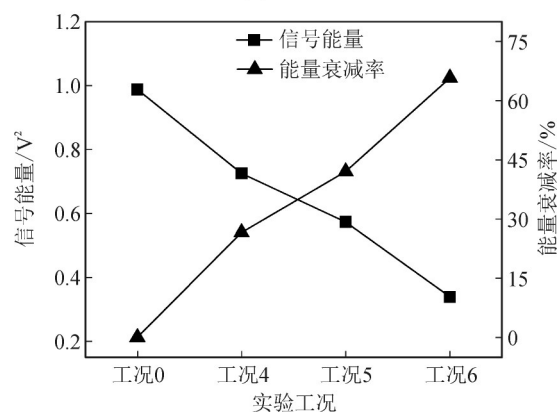
图6 工况1-3下压电片信号能量及衰减率

Fig. 6 Piezoelectric signal energy and attenuation rate under working conditions 1-3

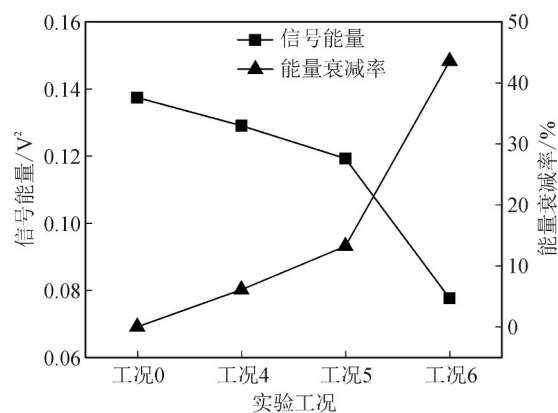
达到了最大,信号能量衰减率分别为36.1%、40.8%、21.7%。图7中也存在相同的规律,压电片1-3上响应信号能量衰减率在工况4下为12.8%、26.6%、6.1%,在工况5下为25.6%、42.0%、13.2%,在工况6下达到了53.5%、65.7%、43.6%。可以发现3个压电片上信号能量衰减率均不断增大。从图8中可以发现,工况9下压电片信号能量衰减率达到了最大,3个压电片接收信号的能量衰减率达到了71.9%、79.1%、65.3%。这是因为工况9下螺栓松动数量最



(a) 压电片1



(b) 压电片2



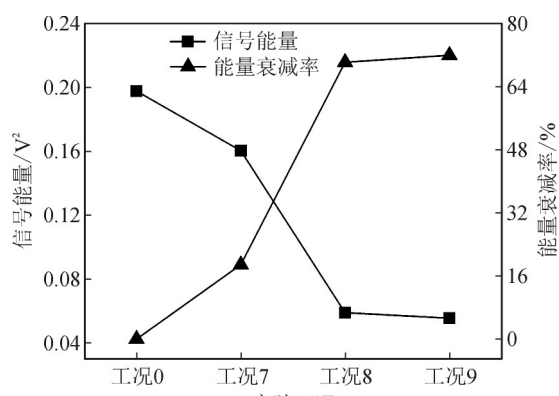
(c) 压电片3

图7 工况4-6下压电片信号能量及衰减率

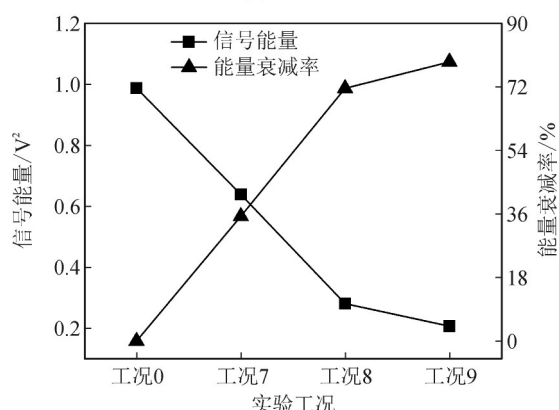
Fig. 7 Piezoelectric signal energy and attenuation rate under working conditions 4-6

多,且螺栓松动程度最大,故该工况下压电片接收到超声信号的能量衰减率达到了最大。另外可以发现,在所有工况下,压电片2上的超声响应信号能量均大于压电片1和压电片3,且超声响应信号能量衰减率也大于压电片1及压电片3上的信号能量衰减率。这是因为压电片2距离激励信号源最近,故接收到的信号能量值更大,同时对信号能量的变化更敏感。从以上分析可以看出,通过超声信号能量衰减率的变化规律可以判断盆式绝缘子法兰螺栓

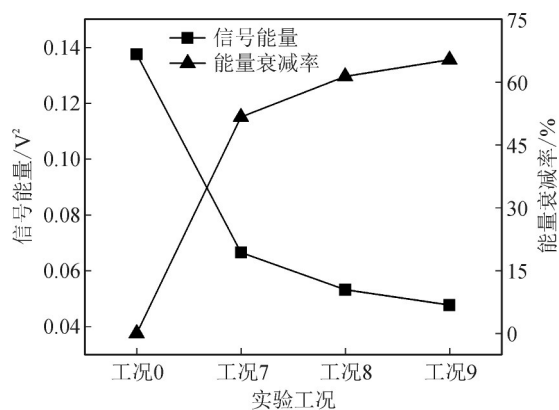
松动程度。



(a) 压电片1



(b) 压电片2



(c) 压电片3

图8 工况7-9下压电片信号能量及衰减率

Fig. 8 Piezoelectric signal energy and attenuation rate under working conditions 7-9

为了进一步表示螺栓松动程度与超声信号能

量衰减率间的关系,对二者间进行了定量关联,不同压电片在不同工况下所接收超声信号能量及衰减率见表1-3。

为了较好地将螺栓松动程度与超声信号能量衰减率进行定量关联,将实验中螺栓松动时的3种扭矩值即99、88、77 N·m分别对应3种螺栓松动程度等级即1级松动、2级松动、3级松动。由表1-3可知,当螺栓1的松动等级为1级松动、2级松动和3级松动时,由压电片2所计算出的超声信号能量衰减率分别为15.9%、34.2%、40.8%;当螺栓1、2的松动等级为1级松动、2级松动和3级松动时,由压电片2所计算出的超声信号能量衰减率分别为26.6%、42.0%、65.7%;当螺栓1、2、3的松动等级为1级松动、2级松动和3级松动时,由压电片2所计算出的超声信号能量衰减率分别为35.3%、71.6%、79.1%。以上分析表明,螺栓松动程度与超声信号能量衰减率可进行定量关联,故可通过超声信号能量衰减率对螺栓松动程度进行判断。

3 结论

针对GIS盆式绝缘子法兰螺栓松动问题,文中对超声信号能量及衰减率与盆式绝缘子法兰螺栓松动程度之间的关系进行了理论分析与实验研究,得到如下研究结论:

1)透射过法兰接触面的超声信号能量会随着盆式绝缘子法兰螺栓的松动而减小,根据这一特点,文中提出了超声透射信号能量衰减率这一技术指标,并用于盆式绝缘子法兰螺栓松动程度监测。

2)盆式绝缘子法兰螺栓松动程度是影响超声响应信号能量衰减率的主要因素,当螺栓松动数量一定时,螺栓松动程度越大,超声响应信号能量衰减率就越大。

3)超声信号激励源与超声信号接收端压电片间

表1 工况1-3下压电片信号能量及衰减率数据

Table 1 Piezoelectric signal energy and attenuation rate data under working conditions 1-3

压电片编号	工况1		工况2		工况3	
	信号能量/V²	衰减率/%	信号能量/V²	衰减率/%	信号能量/V²	衰减率/%
压电片1	0.169	14.0	0.136	31.0	0.126	36.1
压电片2	0.829	15.9	0.649	34.2	0.584	40.8
压电片3	0.126	8.0	0.125	8.7	0.107	21.7

表2 工况4-6下压电片信号能量及衰减率数据

Table 2 Piezoelectric signal energy and attenuation rate data under working conditions 4-6

压电片编号	工况4		工况5		工况6	
	信号能量/ V^2	衰减率/%	信号能量/ V^2	衰减率/%	信号能量/ V^2	衰减率/%
压电片1	0.172	12.8	0.147	25.6	0.092	53.5
压电片2	0.725	26.6	0.573	42.0	0.338	65.7
压电片3	0.130	6.1	0.119	13.2	0.078	43.6

表3 工况7-9下压电片信号能量及衰减率数据

Table 3 Piezoelectric signal energy and attenuation rate data under working conditions 7-9

压电片编号	工况7		工况8		工况9	
	信号能量/ V^2	衰减率/%	信号能量/ V^2	衰减率/%	信号能量/ V^2	衰减率/%
压电片1	0.160	18.9	0.059	70.2	0.055	71.9
压电片2	0.639	35.3	0.281	71.6	0.201	79.1
压电片3	0.066	51.6	0.053	61.3	0.048	65.3

的距离也是影响超声信号能量衰减率的重要因素,相同条件下,距离激励源较近的压电片对超声信号能量衰减率的变化更敏感,即由该压电片所接收到的超声信号计算出的衰减率更大。

参考文献:

- [1] 张书琴,张克选,岳宝强,等. GIS的异响振动及其时变力分析[J]. 高压电器,2020,56(10):155-160.
ZHANG Shuqin, ZHANG Kexuan, YUE Baoqiang, et al. Analysis on abnormal vibration and its time-varying force of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10):155-160.
- [2] 丁登伟,高文胜,刘卫东. GIS结构尺寸对局部放电特高频信号的影响[J]. 电网技术,2013,37(10):2850-2854.
DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Influence of structure dimension of GIS on UHF signal of partial discharge[J]. Power System Technology, 2013, 37(10):2850-2854.
- [3] 王彦彪,陈振勇,郭文萍,等. 基于双注意力机制优化CNN架构的GIS局部放电模式识别[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(2):22-29.
WANG Yanbiao, CHEN Zhenyong, GUO Wenping, et al. PD pattern recognition for GIS based on CNN architecture optimized by the double attention mechanism[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 22-29.
- [4] 吴旭涛,李秀广,何 聪,等. 750 kV GIS设备振荡型冲击耐压试验及仿真研究[J]. 高压电器,2018,54(11):136-140.
WU Xutao, LI Xiuguang, HE Cong, et al. Oscillatory impulse test and simulation for 750 kV GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11):136-140.
- [5] 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.

- [6] 徐志钊,郭一帆,李先锋,等. 缺陷对GIS外壳振动影响[J]. 电力工程技术,2022,41(5):156-164.
XU Zhiniu, GUO Yifan, LI Xianfeng, et al. Influence of mechanical faults on the vibration of GIS shell[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5):156-164.
- [7] 丁登伟,何 良,龙 伟,等. GIS设备运行状态下振动机理及检测诊断技术研究[J]. 高压电器,2019,55(11):93-99.
DING Dengwei, HE Liang, LONG Wei, et al. Analysis on vibration mechanisms and detection diagnosis technology of GIS in operating condition[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11):93-99.
- [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] 马志强,赵艳涛,张 垒,等. GIS用550 kV/8 000 A大电流高压绝缘套管设计研究[J]. 电瓷避雷器,2022(3):201-208.
MA Zhiqiang, ZHAO Yantao, ZHANG Lei, et al. Design and research of 550 kV/8 000 A large current and high voltage insulating bushing for GIS[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(3):201-208.
- [10] 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.

- [11] HUO L, CHEN D, KONG Q, et al. Smart washer - a piezoceramic - based transducer to monitor looseness of bolted connection[J]. Smart Material Structures, 2017, 26(2):025033.
- [12] YANG J, CHANG F K. Detection of bolt loosening in C-C composite thermal protection panels: II. Experimental verification[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(2):591.
- [13] 王涛, 刘佳来, 李友荣, 等. 基于结构界面波能损耗的螺栓联接结构健康监测[J]. 机械设计与制造, 2017(6): 54-57.
WANG Tao, LIU Jialai, LI Yourong, et al. The health monitoring of bolt connection structure based on wave energy loss of structural interface[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(6): 54-57.
- [14] 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.
- [15] 揭小落, 肖黎, 屈文忠. 载荷影响下的机电阻抗协整结构损伤识别方法[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(3): 526-534.
JIE Xiaola, XIAO Li, QU Wenzhong. Tructural damage identification under load based on electromechanical impedance co - integration[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(3): 526-534.
- [16] 杜飞, 徐超. 螺栓连接松动的导波监测技术综述[J]. 宇航总体技术, 2018, 2(4): 13-23.
DU Fei, XU Chao. A review on bolt preload monitoring using guided waves[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(4): 13-23.
- [17] 詹阳磊, 肖黎, 屈文忠. 温变工况下的EMI螺栓松动损伤识别[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(6): 821-827.
ZHAN Yanglei, XIAO Li, QU Wenzhong. Detection of bolt looseness damage under changing temperature condition by using EMI method[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(6): 821-827.
- [18] 齐艳华, 黄庆涛, 袁博, 等. 机械装备螺栓连接状态测试技术研究现状[J]. 航空制造技术, 2019, 62(5): 63-70.
QI Yanhua, HUANG Qingtao, YUAN Bo, et al. Research status of testing technology for bolted state of mechanical equipment[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(5): 63-70.
- [19] 吴旭涛, 赵晋飞, 马云龙, 等. 基于多频激励下振动响应的GIS机械缺陷诊断方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(4): 108-115.
WU Xutao, ZHAO Jinfei, MA Yunlong, et al. Mechanical defect diagnosis technology of GIS based on vibration response under multiple frequency excitation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(4): 108-115.
- [20] 贾雪, 王雪梅, 甘文成, 等. 声弹性效应螺栓轴向应力标定试验研究[J]. 中国测试, 2018, 44(3): 23-27.
JIA Xue, WANG Xuemei, GAN Wencheng, et al. Research on calibration of bolt's axial stress based on acoustoelastic effect[J]. China Measurement & Testing Technology, 2018, 44(3): 23-27.
- [21] 李栋, 朱晓磊, 陆晓峰. 超声纵横波螺栓载荷在线检测方法研究[J]. 中国测试, 2019, 45(10): 40-44.
LI Dong, ZHU Xiaolei, LU Xiaofeng. On line detection method of bolt load based on ultrasonic longitudinal and transverse waves[J]. China Measurement & Testing Technology, 2019, 45(10): 40-44.
- [22] AMIRI O, SALAR K, OTHMAN P, et al. Purification of wastewater by the piezo - catalyst effect of PbTiO3 nanostructures under ultrasonic vibration[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, (394): 122514.
- [23] YANG J, CHANG Fk. Detection of bolt loosening in C - C composite thermal protection panels: II. Experimental verification[J]. Smart Materials & Structures, 2006, 15(2): 591-599.
- [24] 刘波. 曲轴参数化建模和有限元分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
LIU Bo. The crankshaft parametrical model and FEA technology[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
- 王伟(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事高压与大型设备故障诊断、在线识别等方面的研究(E-mail: 604186127@qq.com)。
- 宋建成(1957—), 男, 博士, 教授, 研究方向为高电压与绝缘技术、电力设备寿命评估、电气工程学科矿用智能电器等(通信作者)(E-mail: sjc6018@163.com)。