

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.06.012

GIS 开关操作外壳振动分布特性仿真研究

吴旭涛, 马云龙, 李秀广, 何宁辉

(国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 银川 750002)

摘要: GIS设备为全封闭结构,传统的GIS设备故障诊断的方法有很多,但是对于故障的定位和处理较为困难。文中提出利用开关操作作为激励源,通过设备外壳表面的振动信号检测GIS设备故障的思路。根据110 kV GIS设备的结构,采用有限元分析软件,建立了设备的仿真模型,并考虑了螺栓连接方式、振动传递衰减等诸多因素,对GIS开关操作时设备外壳的振动特性进行研究。结果表明,壳体部位比临近实心结构处的振动加速度峰值更高,螺栓松动缺陷的存在会减弱连接部位振动加速度峰值的差距,设备内部存在异物时对所在位置附近的振动特性有轻微的影响。

关键词: GIS故障诊断;有限元仿真;振动特性;螺栓松动;异物

Simulation Study on Vibration Distribution Characteristics of GIS Switch Operation Shell

WU Xutao, MA Yunlong, LI Xiuguang, HE Ninghui

(Power Research Institute of the State Grid Ningxia Power Company Limited, Yinchuan 750002, China)

Abstract: GIS equipment is enclosed. Although there are many traditional fault diagnosis methods for GIS equipment, it is difficult to locate and handle the faults. This paper proposes the idea of using the switch operation as the excitation source to detect the GIS equipment failure through the vibration signal on the surface of the equipment enclosure. According to the structure of the 110 kV GIS equipment, the simulation model of the equipment is established by using the finite element analysis software. Considering the bolt connection mode, vibration transmission attenuation and many other factors, the vibration characteristics of the equipment during the operation of the GIS switch are studied. The results show that the vibration acceleration peak value of the shell is higher than that of the nearby solid structure. The existence of the bolt loosening will reduce the gap between the vibration acceleration peak of the joint. The existence of foreign objects inside the device has a slight effect on the vibration characteristics near the location.

Key words: GIS fault diagnosis; finite element simulation; vibration characteristics; bolt loosening; foreign objects

0 引言

GIS设备作为变电站的重要组成部分,具有故障率低、安全性高、占地面积小、维护工作量小等优点^[1-4],目前在电力系统中得到了广泛的应用。然而,在GIS设备的生产、装配和运行等过程中,可能会存在有一些缺陷,例如断路器气室、隔离开关气室、母线筒内部存在异物、连接松动以及导体接触缺陷,从而影响到电力系统的安全运行^[5-10]。

GIS设备的故障诊断方法有很多,包括测量局部放电量,分析气体由于放电分解产生的物质,通过设备内置光学传感器检测电弧强度等^[11-16]。由于GIS设备为全封闭结构,难以对设备的内部状态直接进行检查,因此一旦GIS设备内部存在故障,对故障的定位和处理都较为困难^[17-18]。断路器中操动机构的动作会引起机械振动,使振动信号沿设备各元件外壳表面传递。GIS设备状态的变化会引起其壳体表面振动信号的变化,该信号承载有设备状态的

收稿日期:2020-02-07; 修回日期:2020-04-09

基金项目:国网宁夏电力有限公司科技项目(5229DK190006)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Ningxia Power Company Limited Project(5229DK190006).

信息,对一系列的振动信号进行提取,有助于对GIS设备的故障诊断^[19-21]。目前,针对GIS设备操动产生的振动信号分析研究较少,因此通过外壳振动信号特征得到GIS设备状态便具有重要的意义。

文中针对GIS开关操作外壳振动特性的设备缺陷检测进行试验研究,结合GIS设备的结构,选用有限元仿真软件构建GIS设备三维仿真模型,通过仿真断路器操动的过程,对开关操作作为振动激励源时与之相连的GIS腔体外壳振动信号特征进行仿真与分析,并通过改变仿真模型的参数,探究在螺栓松动与存在异物两种缺陷条件下,振动信号传递过程的变化。

1 GIS设备结构

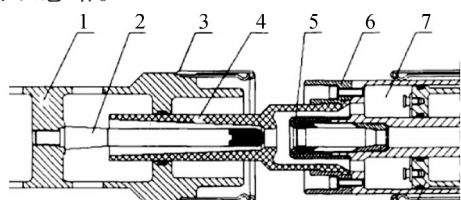
GIS设备主要由断路器、隔离开关、电流互感器、电压互感器、母线等主要元件组成,外部为金属外壳,内充以绝缘气体。GIS设备布局示意图见图1。在GIS设备的结构设计上,不但需要考虑到设备的机械性能,而且为了实现设备的功能,需要考虑其电气性能。文中的目的是得到GIS设备开关操作时所产生的振动响应特征,因此在考虑GIS的总体结构时,忽略了电气性能部分的结构,保留了机械结构方面的主要部分。



图1 GIS设备布局示意图

Fig. 1 Layout diagram of GIS equipment

断路器内部灭弧室的结构见图2。其包括有静触座、弧静触头、主静触头、喷口、弧动触头、主动触头、压气室、活塞、压气缸。灭弧室主要用于限制电弧的位置并加速电弧的熄灭,是实现断路器电气功能的重要部件,但文中重点关注各部分的机械特性,因此喷口、弧静触头、弧动触头等部分在构建模型中可以忽略。



1—静触座; 2—弧静触头; 3—主静触头; 4—喷口;
5—弧动触头; 6—主动触头; 7—压气室。

图2 灭弧室工作原理示意图

Fig. 2 Working principle diagram of interrupter

由于动触头部分固定在地面,而静触头固定于断路器壳体顶端,在动静触头发生碰撞时,GIS设备壳体上的振动来源主要是静触头所连接断路器顶端的振动和静触头引出的导杆与盆子连接处的振动,因此断路器下半部分的振动幅度远小于其上半部分。模型构建中仅需要考虑GIS设备的上半部分,同样能够反映开关操作时的振动传递过程。

2 GIS设备建模构建

GIS设备仿真模型的构建共包含以下4个部分。首先,对室内GIS构建几何仿真模型;然后,对模型进行前处理,包括划分网格、赋予材质、定义接触、施加约束、载荷等内容;利用求解器计算建立好的仿真模型;最后,对模型进行后处理,得到实验数据。

2.1 构建几何仿真模型

根据GIS设备结构,依据前文所述内容进行改动和简化,建立的GIS设备仿真模型见图3。

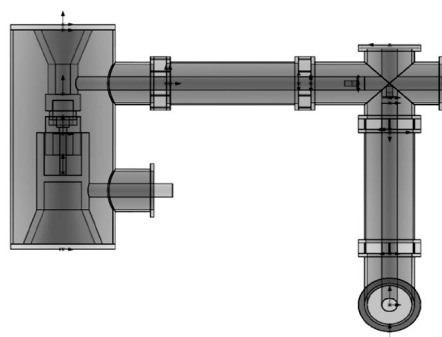


图3 GIS设备仿真模型

Fig. 3 Simulation model of GIS

模型中,断路器直径0.8 m,高2 m,动触头连接的导杆距离地面0.5 m,静触头连接的导杆距离地面1.5 m,盆子直径0.5 m,导杆直径0.125 m。

灭弧室部分重点考虑机械性能部分,在几何仿真模型中断路器包含有壳体、静触头、动触头以及动触头底座4个部分,动、静触头采用了类似于图2中所示的插入式结构,触头部分的几何仿真模型见图4。

2.2 对仿真模型划分网格

尽管已经对各部件添加了约束,使各部件按实际位置组装起来,但是有些部分的连接关系仍需做进一步的调整,可以通过布尔运算将部件的几个部分连接起来,使网格划分后两部分连接处的网格保持一致,各部分通过这种方式形成一个整体。

由于仿真中需要考虑螺栓紧固的问题,在盆式绝缘子与GIS壳体的连接处设置螺栓孔位。划分网格时,螺栓孔位比其他部分的尺寸小,因此首先对孔位的内壁细化网格,然后再对其他各部分划分网

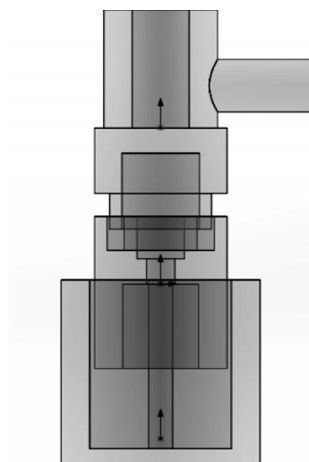


图4 触头仿真模型

Fig. 4 Simulation model of contact

格,避免错误划分网格。盆式绝缘子与壳体通过螺栓进行连接,模型中将连接盆式绝缘子与壳体的螺栓孔壁上网格各点与一点相连,使以上各点之间保持恒定的相对位移,从而模拟现实中螺栓紧固后的状况。盆式绝缘子与GIS壳体连接的螺栓分布情况见图5,螺栓仿真模型见图6。

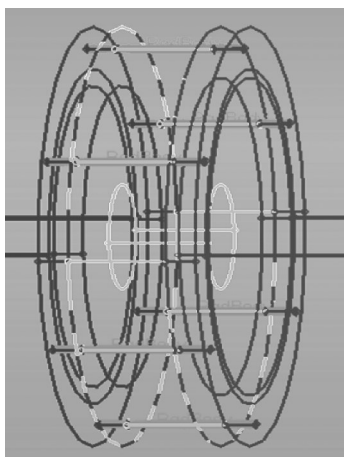


图5 螺栓分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of bolt distribution

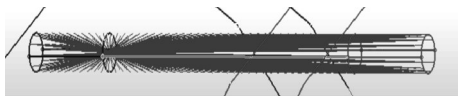


图6 螺栓仿真模型

Fig. 6 Simulation model of bolt

2.3 仿真模型的前处理

仿真模型的前处理工作包含赋予材料、定义接触、施加约束、载荷,质量缩放和振动衰减等,各部分具体内容如下。

模型中导杆的材料为铝,盆式绝缘子的材料为环氧树脂,其余各部分的材料为钢,各种材料参数见表1。

断路器的合闸时间往往低于100 ms,其合闸速度在2~2.5 m/s,刚合速度约为4 m/s,动静触头开距

表1 仿真模型材料参数表

Table 1 Material parameter table of simulation model

材料	质量密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量/ GPa	泊松比	屈服强度/ MPa
钢	7.9×10^3	206	0.30	235
铝	2.7×10^3	70	0.33	180
环氧树脂	1.5×10^3	7	0.24	65

约为0.16 m。仿真模型中动静触头间距为0.05 m,按照80 ms的合闸时间,0.16 m的触头开距,以及4 m/s的刚合速度,设置动触头初速度为3.32 m/s,加速度为 50 m/s^2 。

另外,由于模型本身较大,所需仿真计算时间很长,通过对模型整体进行质量缩放,在保证计算结果准确的前提下,大幅减少仿真计算所需的时间。质量缩放会对仿真结果造成一定的影响,通过关键字控制质量缩放的程度,可以尽可能减少该部分的影响。质量缩放前后的时域波形情况分别见图7、8。可看出二者在整体波形上差别较小,质量缩放对仿真计算结果基本没有影响。

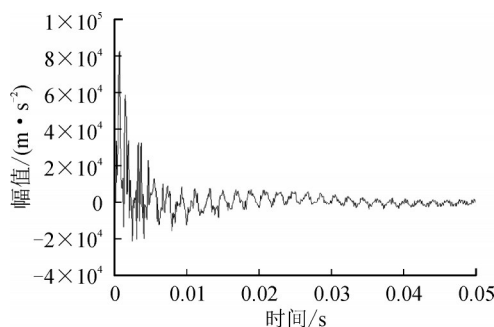


图7 质量缩放前的时域波形

Fig. 7 Time-domain waveform before mass scaling

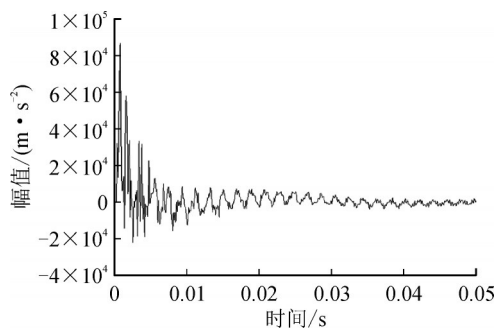


图8 质量缩放后的时域波形

Fig. 8 Time-domain waveform after mass scaling

以上仿真模型中断路器动作之后,GIS外壳上某点位的 $d-t$ 、 $v-t$ 和 $a-t$ 曲线见图9。图9中的振动信号在经过0.5 s之后幅值并没有衰减,不符合实际的GIS外壳振动特性。在实际测量中,该过程在0.1 s内即可从振动峰值降至峰值的10%,见图10。因此,仿真过程中应该考虑到振动信号传递过程中的衰减问题。

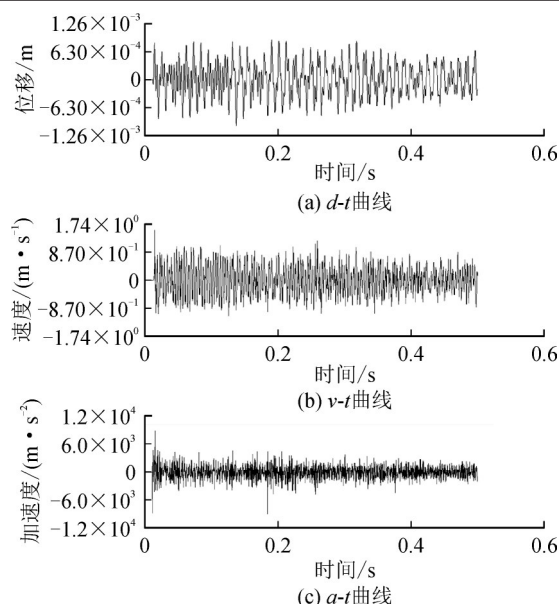


图9 断路器动作后某点位 $d-t$ 、 $v-t$ 及 $a-t$ 曲线

Fig. 9 Curves of $d-t$, $v-t$ and $a-t$ after the operation of circuit breaker at a certain point

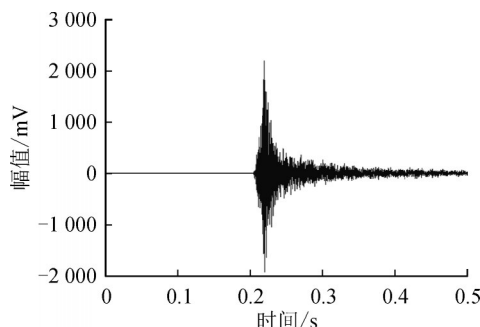


图10 实际测量中断路器外壳振动特性

Fig. 10 Actual measurement of vibration characteristics of circuit breaker

仿真模型中元件的质量阻尼参数用于抑止低频的结构振动模式,此外它有抑制刚体模式的效应。因此,对仿真模型中该参数进行修改,使振动过程中的能量衰减。

通过调整参数中 SF (scale factor for load curve)的值,改变该衰减曲线的比例因数,从而影响各部分的衰减特性。将 SF 分别取值为50和100时,在断路器外壳上选取某一点位得到外壳振动的加速度特性,仿真结果见图11、12。

当 SF 取值为50时,在0.11s时振动加速度衰减至峰值的10%,而在 SF 取值100时,在0.07s时振动加速度衰减至峰值的10%。 SF 的取值越大,则振动加速度衰减越快,通过调节 SF 的数值,可以在振动衰减程度这一方面将仿真结果调整至与实测结果保持一致。

以上就是模型构建的前处理过程,将文件保存

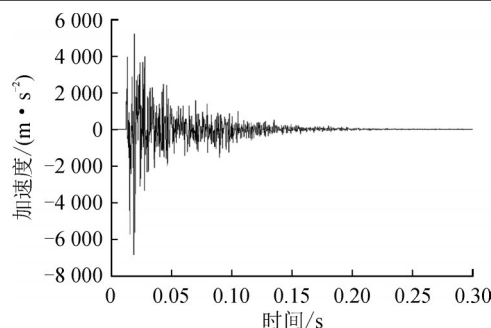


图11 $SF=50$ 时断路器外壳振动特性

Fig. 11 Vibration characteristics of circuit breaker when SF is 50

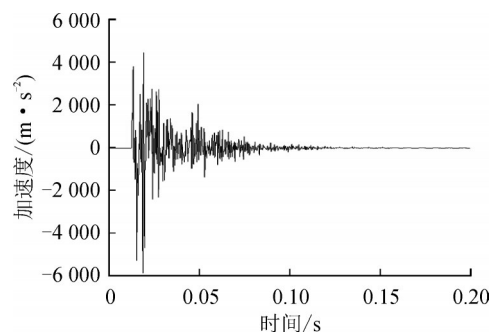


图12 $SF=100$ 时断路器外壳振动特性

Fig. 12 Vibration characteristics of circuit breaker when SF is 100

后通过求解器对模型进行计算分析,得到断路器合闸过程外壳振动信号的特征。

2.4 故障条件下的参数调整

故障条件包括对螺栓松动以及内部存在异物等情况进行仿真分析。构建仿真模型时,使螺栓孔壁各点保持同样的相对位移。它的每一项代表一处螺栓连接,删除其中的一项或几项可以模拟该点位螺栓松动的效果。通过在管壁内部添加圆柱体物块,并对该物块施加重力,模拟GIS设备内部存在异物的状况。

3 无缺陷时的振动信号特征

为了展现振动信号的传递过程,在GIS壳体及内部选取不同的点位,获得各点处的时域波形曲线。根据不同路径各采集点位的振动情况,得到以下结果。

3.1 路径1:静触头表面至第1个盆式绝缘子

选取断路器内部静触头表面至第1个盆式绝缘子路径上的点位进行采集,展示触头碰撞后振动从静触头到盆式绝缘子的传递过程。点位采集路径见图13。前14个点位位于图中路径的竖直方向,而15至38号点位位于图中路径的水平方向。

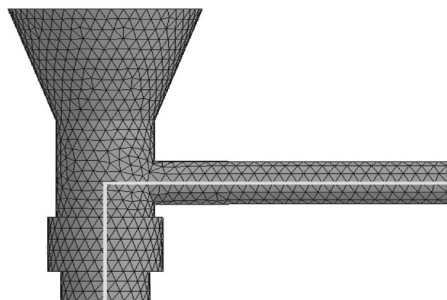


图13 路径1采集点位分布情况

Fig. 13 Distribution of collection points on path one

采集到的时域信号包括位移、速度和加速度信号。对起点和终点处的位移信号进行傅里叶分析,可以得到的频谱图见图14。无论是起点还是终点,频率主要分布在200 Hz附近,终点比起点的频率分布更分散,800 Hz以下出现有较多其他的频率分量。二者在800 Hz以上均没有较大的频率分布。

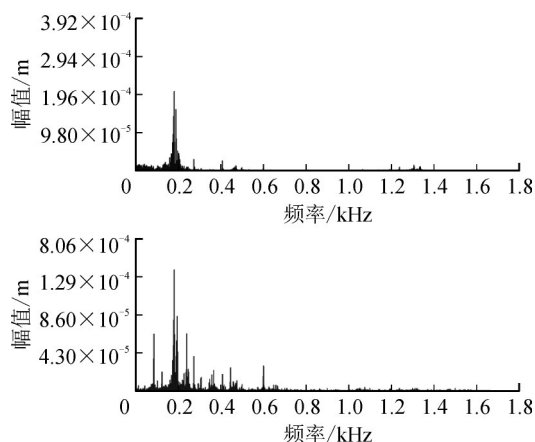


图14 起点及终点处位移信号频谱图

Fig. 14 The frequency spectrum of the displacement signal at the start and the end

对起点和终点处的速度和加速度信号进行傅里叶分析,可以得到的频谱图见图15、16。

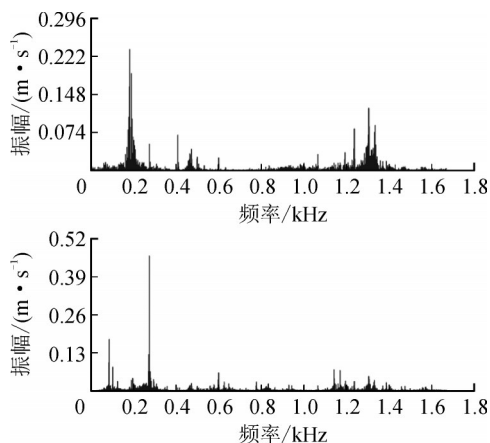


图15 起点及终点处速度信号频谱图

Fig. 15 The frequency spectrum of the velocity signal at the start and the end

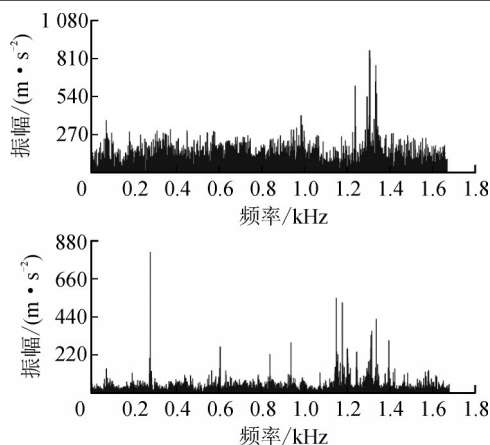


图16 起点及终点处加速度信号频谱图

Fig. 16 The frequency spectrum of the acceleration signal at the start and the end

速度信号的频谱分布虽然相对集中,但是在起点和终点处的频谱分布有较大差异,起点处的频谱分布在180 Hz附近与1300 Hz附近,而终点处在270 Hz附近的频率幅值较大,更高频段的频率分布较少。加速度信号的频谱分布,起点和终点处均较为杂乱,难以发现相似点,终点处在270 Hz频率处有较高幅值,两点在1300 Hz频段附近均有分布。

统计该路径上所有点位的加速度峰值,见图17。图17中起点处加速度较大为 $6.6 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ 。在第10点位附近为静触头较突出的部位,该部位为实心结构,出现了较大的加速度峰值 $7 \times 10^4 \text{ m/s}^2$,其两侧出现了较大的加速度峰值变化。15号点位之后位于延伸出来的导杆之上,加速度的峰值变化小,相对比较稳定。

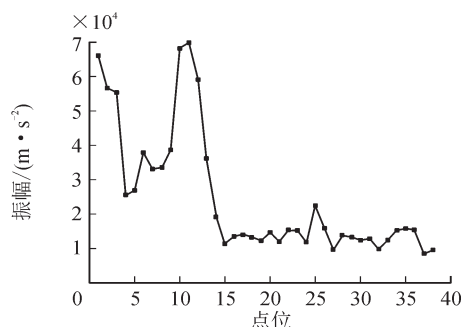


图17 路径1各点加速度峰值分布

Fig. 17 Distribution of peak acceleration at points on path one

3.2 路径2:盆式绝缘子表面及两侧GIS壳体表面

选取盆式绝缘子表面及其两侧GIS壳体表面上的点位,沿壳体的上、中、下3组路径进行采集,展示触头碰撞后GIS外壳上的振动情况。点位采集路径见图18。

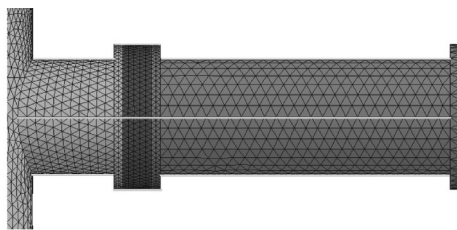


图 18 路径 2 采集点位分布情况

Fig. 18 Distribution of collection points on path two

统计各路径上所有点位的加速度峰值,可以得到图 19。

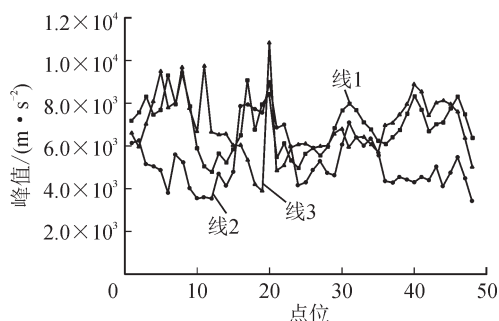


图 19 路径 2 各点加速度峰值分布

Fig. 19 Distribution of peak acceleration at points on path two

图 19 线 2 为中部路径的加速度峰值曲线,与线 1 的上部和线 3 的下部趋势变化有较为明显的差异。上部和下部两条曲线的趋势相近,但在第 13 点位与第 22 点位区间有较大差异,该处为盆式绝缘子。在上部路径,13 号点位处的加速度峰值为 $5\,657\text{ m/s}^2$,22 号点位处的加速度峰值为 $6\,136\text{ m/s}^2$ 。在下部路径,13 号点位处的加速度峰值为 $6\,521\text{ m/s}^2$,22 号点位处的加速度峰值为 $5\,055\text{ m/s}^2$ 。

4 存在螺栓松动缺陷时的振动信号特征

通过改变仿真模型中模拟螺栓紧固相关关键字的设置,分别对存在有 1、2、3 处螺栓松动的情况进行仿真计算。3 种条件下,采集盆式绝缘子上一点的振动情况,得到该点处的位移信号,对信号曲线进行傅里叶分析,与无缺陷条件下的频谱进行对比,能够得到的结果见图 20。

从结果中能够看出,随着螺栓松动缺陷的增加,800 Hz 范围内的频率分布较为相似,而 1 000 Hz 至 1 400 Hz 范围内的频率有所增加。1 处松动时在 1 300 Hz 附近的频率分布相对无缺陷时较大,2 处松动时能够观察到 1 305 Hz 出现有较大幅值,3 处松动时在 1 200 Hz 至 1 400 Hz 的频率分布相对较大。

第 3 节中,路径 2 的上部和下部两条曲线的趋势相近,因此选取上部路径,截取出现螺栓松动的盆式绝缘子附近的部分路径,对比 3 种条件及无缺

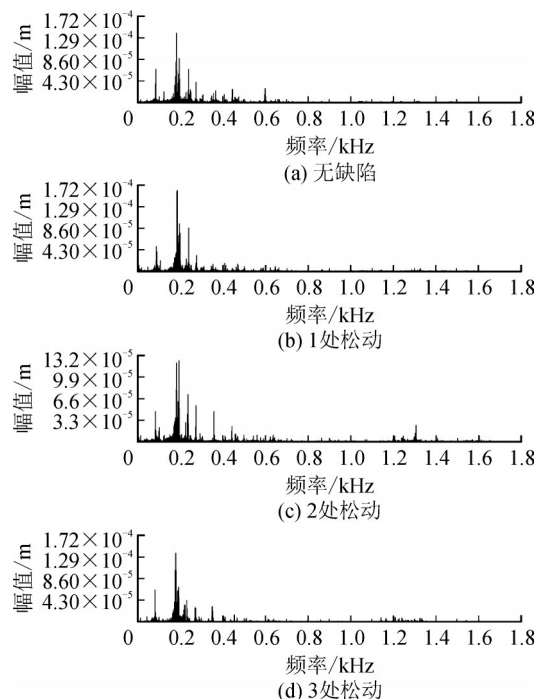


图 20 不同程度缺陷下某点位位移信号频谱图

Fig. 20 The frequency spectrum of the displacement signal at a certain point under different degrees of defects

陷条件下各点位的加速度峰值情况,见图 21。图 21 中 3 条曲线的总体变化趋势相近,且加速度峰值的范围也没有较大差异。

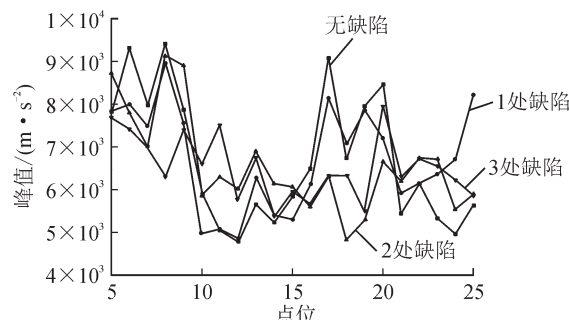


图 21 不同程度缺陷下路径 2 上部各点加速度峰值分布

Fig. 21 Distribution of peak acceleration at points on the upper part of path two under different degrees of defects

图 21 中第 13 点至第 22 点为盆式绝缘子上的点位。在无缺陷时,盆式绝缘子两端的加速度峰值比有缺陷时的加速度峰值小,而盆式绝缘子中间的峰值情况恰好相反。这表明在无缺陷条件下,盆式绝缘子表面的加速度峰值存在较大的变化,而缺陷的出现会减少该处的振动变化,使盆式绝缘子表面加速度的峰值趋于稳定。

5 GIS 内部存在异物时的振动信号特征

对 GIS 内部存在异物的情况进行仿真计算,并采集异物所在点位附近的计算结果。选取异物所在位置壳体的外部点位,对比存在异物前后,该点

位的位移曲线的频谱图,见图22。

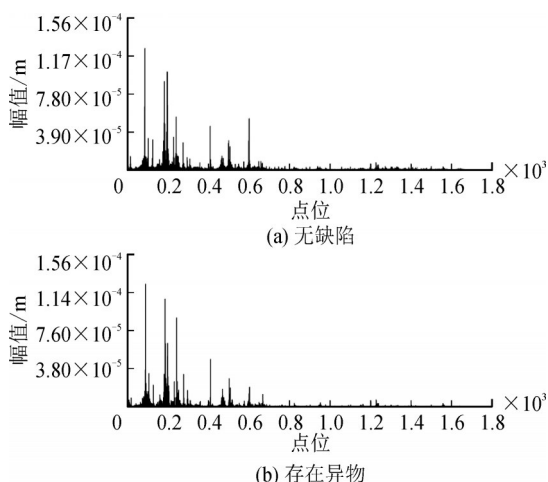


图22 存在异物前后位移信号频谱图

Fig. 22 The frequency spectrum of the displacement signal before and after the presence of foreign matter

对比存在缺陷前后的频谱图,在86、182、196 Hz等800 Hz以下的频率有相似的分布情况,而800 Hz以上频率只有极少的频率分布。无缺陷条件下的频率幅值相对较大,86 Hz处的幅值达到 1.23×10^{-4} m,存在异物时的幅值为 1.20×10^{-4} m。

选取第3节路径3中的上部、下部两条路径,采集路径上各点位的加速度峰值情况,对比存在缺陷前后各点位的加速度峰值情况,上部路径各点位加速度峰值情况见图23,下部路径各点位加速度峰值情况见图24。

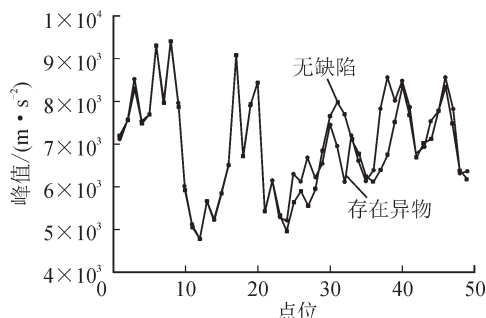


图23 存在异物前后路径2上部各点加速度峰值分布

Fig. 23 Distribution of peak acceleration at points on the upper part of path two before and after the presence of foreign matter

仿真模型中异物所在位置在第35点位。从两条路径加速度峰值来看,异物所在位置附近的加速度峰值均受到了影响,而远离异物的路径两侧,存在缺陷前后的加速度峰值较为一致。

两条路径上,存在异物对加速度峰值有相反的影响。在上部路径,32号点位处,无异物时的加速度峰值为 $7\,697\text{ m/s}^2$,存在异物时为 $6\,090\text{ m/s}^2$;38号点位处,无异物时的加速度峰值为 $6\,754\text{ m/s}^2$,存在异物时为 $8\,550\text{ m/s}^2$ 。在下部路径,32号点位处,无

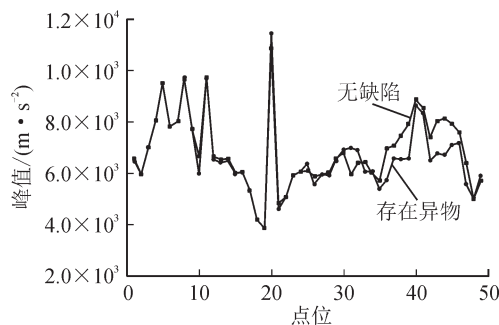


图24 存在异物前后路径2下部各点加速度峰值分布

Fig. 24 Distribution of peak acceleration at points on the lower part of path two before and after the presence of foreign matter

异物时的加速度峰值为 $6\,415\text{ m/s}^2$,存在异物时为 $6\,896\text{ m/s}^2$;38号点位处,无异物时的加速度峰值为 $7\,466\text{ m/s}^2$,存在异物时为 $6\,550\text{ m/s}^2$ 。

6 结语

文中研究了GIS开关操作时设备外壳的振动特性,利用有限元仿真软件对无缺陷条件、螺栓松动缺陷与存在异物时设备外壳表面振动特性进行分析。文中根据110 kV GIS设备的结构,考虑了螺栓连接,振动传递衰减等因素,构建了GIS设备仿真模型。结果表明,设备中壳体结构处的振动信号加速度峰值比临近部位实心结构处的加速度峰值要高,同一壳体的振动信号加速度峰值相近。在无缺陷条件下,盆式绝缘子附近的加速度峰值存在较大的变化,而螺栓松动缺陷的出现会减少该处的振动变化,使盆式绝缘子表面加速度的峰值趋于稳定。设备内部存在异物时,其所在位置附近的加速度峰值会受到轻微影响,而对较远距离处的影响较小。文中的研究内容对于GIS设备故障诊断、保障电力系统安全运行具有重要意义。

参考文献:

- [1] 张书琴,张克选,高延峰,等. GIS现场验收及运行中若干问题的研究[J]. 高压电器,2017,53(5):193-199.
ZHANG Shuqin, ZHANG Kexuan, GAO Yanfeng, et al. Some problems research of GIS on-site acceptance and in operation[J]. High Voltage Apparatus,2017,53(5):193-199.
- [2] 丁登伟,高文胜,刘卫东. 采用特高频法的GIS典型缺陷特性分析[J]. 高电压技术,2011,37(3):706-710.
DING Dengwei, GAO Wensheng, LIU Weidong. Analysis on the typical partial discharge using UHF detection method for GIS[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 706-710.
- [3] 李晓峰,甄利,周新伟,等. 220 kV 气体绝缘开关设备(GIS)耐压击穿故障分析[J]. 中国电力,2010,43(1):43-45.

- LI Xiaofeng, ZHEN Li, ZHOU Xinwei, et al. Analysis of withstanding voltage test on 220 kV gas-insulated metal-enclosure switchgear (GIS)[J]. Electric Power, 2010, 43(1): 43-45.
- [4] 刘永, 印华, 姚强, 等. 气体分析技术在GIS故障定位和故障类型判断中的应用[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 132-134.
- LIU Yong, YIN Hua, YAO Qiang, et al. The application of gas analysis technology to fault location and fault diagnosis of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3): 132-134.
- [5] 马宏明, 周涛涛, 彭诗怡, 等. 一起220 kV SF₆断路器合闸不到位故障及分析[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 224-230.
- MA Hongming, ZHOU Taotao, PENG Shiyi, et al. Failure analysis of a 220 kV SF₆ circuit breaker closing not in place [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7): 224-230.
- [6] 连杰, 李钧. 363 kV GIS断路器振动引起螺栓松动问题分析[J]. 西北水电, 2013(2): 62-64.
- LIAN Jie, LI Jun. Analysis on bolt loose by vibration of 363 kV GIS circuit breaker[J]. Northwest Water Power, 2013 (2): 62-64.
- [7] 李超, 陶蓉. 一起126 kV GIS设备故障后的检测实例分析[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 145-149.
- LI Chao, TAO Rong. Fault detection example of 126 kV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 145-149.
- [8] 程炯, 杨世贵, 程航. GIS在换流站中的应用及典型故障分析[J]. 电力技术, 2009(11): 55-61.
- CHENG Jiong, YANG Shigui, CHENG Hang. Application and typical fault analysis for GIS in converter station[J]. Electric Power System Equipment, 2009(11): 55-61.
- [9] 卫昕卓, 邓宏伟, 陈燕南, 等. GIS隔离开关用绝缘拉杆含异物及缺陷时的电场分析[J]. 高压电器, 2016, 52(04): 103-110.
- WEI Xinzhuo, DENG Hongwei, CHEN Yannan, et al. Electric field analysis of insulated pull rod with different particles and defects in GIS disconnect switch[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 103-110.
- [10] 高树国, 刘海峰, 潘瑾, 等. 一起GIS内部部件松动故障的在线检测与诊断[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 56-58.
- GAO Shuguo, LIU Haifeng, PAN Jin, et al. On-line detection and diagnosis for a component loosening fault in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 56-58.
- [11] SUEHIRO J, ZHOU G B, HARA M. Detection of partial discharge in SF₆ gas using a carbon nanotube-based gas sensor [J]. Sensors and Actuators, B. Chemical, 2005, 111/112(2): 164-169.
- [12] 季严松, 王承玉, 杨韧, 等. SF₆气体分解产物检测技术及其在GIS设备故障诊断中的应用[J]. 高压电器, 2011, 47(2): 100-103.
- JI Yansong, WANG Chengyu, YANG Ren, et al. Measuring technique of SF₆ decomposition products and its application to fault diagnosis of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(2): 100-103.
- [13] 韩旭涛, 刘泽辉, 李军浩, 等. 基于光电复合传感器的GIS局放检测方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6760-6769.
- HAN Xutao, LIU Zehui, LI Junhao, et al. Study on PD detection method in GIS based on the optical and UHF integrated sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (22): 6760-6769.
- [14] 金立军, 张明锐, 刘卫东. GIS局部放电故障诊断试验研究[J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 88-92.
- JIN Lijun, ZHANG Mingrui, LIU Weidong. Examination and research on the partial discharge fault diagnostics in gas insulated switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(11): 88-92.
- [15] 李珏龙, 钱勇, 叶海峰, 等. 基于超高频信号包络的GIS局放特征提取方法研究[J]. 华东电力, 2013, 41(1): 96-99.
- LI Juelong, QIAN Yong, YE Haifeng, et al. Distilling method of GIS partial discharge features based on UHF signal-envelope[J]. East China Electric Power, 2013, 41 (1): 96-99.
- [16] 金立军, 刘卫东, 钱家骊. GIS绝缘配合中的故障分析及诊断和检测技术[J]. 中国电力, 2002(3): 56-59.
- JIN Lijun, LIU Weidong, QIAN Jiali. The failure analysis and diagnostic and detection technology of insulation coordination in GIS[J]. Electric Power, 2002(3): 56-59.
- [17] 罗红涛, 黄文武, 邹洪民, 等. GIS内部潜伏性故障案例分析[J]. 中国电力, 2014, 47(7): 86-90.
- LUO Hongtao, HUANG Wenwu, ZOU Hongmin, et al. Case study on GIS internal latent fault[J]. Electric Power, 2014, 47(7): 86-90.
- [18] 王薇, 张燕涛, 苏煜, 等. 组合电器(GIS)母线保护动作事故处理[J]. 电网与清洁能源, 2008(9): 17-19.
- WANG Wei, ZHANG Yantao, SU Yu, et al. Fault treatment of busbar protection device operation on GIS[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2008 (9): 17-19.
- [19] 杨鼎革, 杨韧, 汪金星, 等. 带气动操机构GIS断路器振动特性测试及改进[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 189-194.
- YANG Dingge, YANG Ren, WANG Jinxing, et al. Test and improvement of vibration characteristics of GIS circuit breaker with pneumatic mechanism[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 189-194.
- [20] RUNDE M, SKYBERG B, OHLEN M. Vibration analysis for periodic diagnostic testing of circuit-breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 11(4): 1816-1823.
- [21] 黄清, 魏旭, 许建刚, 等. 基于振动原理的GIS母线触头松动缺陷诊断技术研究[J]. 高压电器, 2017, 53(11): 99-104.
- HUANG Qing, WEI Xu, XU Jiangang, et al. Research of GIS bus loose contact fault diagnosis techniques based on mechanical vibration[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53 (11): 99-104.

吴旭涛(1971—), 男, 教授级高工, 主要从事电气设备状态检测及故障诊断工作。