

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.008

## 隔离开关和盆式绝缘子故障下的GIS外壳振动特性仿真研究

张杰, 蔡新景

(沈阳工业大学电气工程学院, 沈阳 110870)

**摘要:** 研究GIS外壳的振动特性对于保证设备的稳定运行具有重要意义。文中围绕GIS隔离开关、盆式绝缘子两种故障类型进行外壳振动特性的仿真分析,搭建了盆式绝缘子完好时隔离开关触头接触不良和隔离开关正常时绝缘子含有裂纹时的仿真模型,利用有限元仿真软件计算了接触状态不同时隔离开关的振动加速度以及不同裂纹深度时盆式绝缘子的模态频率与振型。研究表明:隔离开关出现接触缺陷后,触头接触面积越小,对导体施加电流越大,隔离开关的振动加速度就越大。当盆式绝缘子出现裂纹缺陷时,GIS外壳模态频率随着裂纹深度的不断增大而逐渐下降。因此,综合以上结果表明了利用外壳的振动特性分析两种故障类型下GIS设备的运行状态具有可行性。

**关键词:** GIS隔离开关; 盆式绝缘子; 接触状态; 裂纹; 有限元; 振动特性

### Simulation Study on Vibration Characteristics of GIS Enclosure Under Fault of Disconnecter and Insulating Spacer

ZHANG Jie, CAI Xinjing

(Institute of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** It is important to study the vibration characteristics of GIS enclosure to ensure the stable operation of equipment. In this paper, the vibration characteristics simulation analysis of enclosure under the fault of disconnecter and insulating spacer of GIS is performed, and the simulation models in case of healthy insulating spacer but weak contact of disconnecter contact, and in case of normal disconnecter but cracked insulating spacer are set up. The vibration acceleration of the disconnecter with different contact states and the modal frequency and mode of the insulating spacer with different crack depth are calculated by finite element simulation software. The research shows that after occurrence contact defect of disconnecter, the smaller the contact area of the contact, the higher the current applied to the conductor, the higher the vibration acceleration of the disconnecter. In case of crack of the insulating spacer, the modal frequency of GIS enclosure is decreased gradually with the increase of crack depth. Therefore, the above results show that it is feasible to analyze the operating state of GIS equipment under the two fault types by using the vibration characteristics of the enclosure.

**Key words:** GIS disconnecter; insulation spacer; state of contact; crack; finite element; vibration characteristic

## 0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)因具有配置灵活、通电能力强、安全性能强等诸多优势被广泛应用于高压和超高压等众多领域<sup>[1-3]</sup>。但随着GIS的长时间带电运行,设备在运行过程中也会产生诸多问题从而影响设备的稳定可靠性<sup>[4]</sup>。

例如隔离开关的触头因频繁操作,致使触头在机械闭合力冲击和触头间应力的作用下产生不断磨损,导致动静触头间发生接触不良<sup>[5]</sup>,以及在运行过程中振动力的作用下,造成损伤位置开裂,最终诱发表面裂纹发展,造成盆式绝缘子损坏等故障<sup>[6]</sup>。致使变电站发生大面积停电,影响居民的正常用电,对电网供电的稳定可靠产生不利影响<sup>[7]</sup>。

振动检测法因具有抗干扰能力强、安全可靠、无需与设备回路进行电气连接等特点,正被逐渐应用于电力设备异常状态检测中,马波等人利用GIS外壳振动信号对隔离开关的接触状态进行了带电检测研究,证明了振动带电测试方法的有效性<sup>[8]</sup>。臧旭等人对三相共体式 and 分体式GIS受力振动机理进行仿真建模和现场实际模拟,验证了振动机理的正确性<sup>[9]</sup>。杨景刚等人利用振动检测法不仅分析了设备振动信号的来源,还通过实验研究了GIS通入大电流时的振动信号特征,充分证明了利用振动法可有效进行GIS设备的带电检测<sup>[10]</sup>。李凯等人研究了GIS设备的振动机理,不但对GIS设备中异常振动进行了分类研究,而且证明了利用振动模态分析方法可有效获得GIS的固有频率的结论<sup>[11]</sup>。吴旭涛等人通过研究研发出了一种GIS振动频率检测系统,发现了振动频率响应与GIS设备内部的机械运行状态存在着紧密联系,提出了一种基于振动频率响应特性的GIS机械缺陷诊断方法,为后续的诊断方法研究提供了新思路<sup>[12]</sup>。刘荣海等人利用振动检测技术比较了完好和损坏状态下的盆式绝缘子振动模态,提出了利用振动技术判断绝缘子裂纹故障的判断方法,为今后机械振动技术的检测研究提供了重要依据<sup>[13]</sup>。杨鼎革等人利用振动法研究了在不同电压等级下的盆式绝缘子有限元模型,证明了随着电压等级的提高,盆式绝缘子的模态频率越低的结果,为振动法检测裂纹缺陷提供了理论基础<sup>[14]</sup>。马朋飞等人利用振动法对盆式绝缘子的受损情况进行了实验,验证了正常与受损两种情况下的绝缘子振动信号不同,表明了利用振动信号监测GIS设备运行状态具有可行性<sup>[15]</sup>。这为今后研究更多不同故障下GIS外壳设备的振动特性提供了理论基础。

文中利用COMSOL有限元仿真软件分别对GIS隔离开关松动和盆式绝缘子存在裂纹缺陷下的两种故障情况进行仿真计算,得到两种故障下GIS外壳的模态频率与振型,分析了不同电流和不同裂纹深度时外壳振动的影响,为GIS外壳在不同故障类型中的振动特性提供参考。

## 1 振动机理及模态分析

### 1.1 GIS外壳振动机理分析

在GIS隔离开关设备中,动静触头间因发生接触不良的情况会致使电流经过触头时出现电流线收缩,导致触头间产生了电动力,触头发生相互排斥,最终造成触头的振动。

触头在接触点的电动力可表述为<sup>[16]</sup>:

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} i^2 \ln\left(\frac{D}{2a}\right) \quad (1)$$

$$a = \sqrt{\frac{F_j}{\pi\xi H_b}} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: $D$ 为触头接触面的直径; $a$ 为触头接触斑点的半径; $F$ 为触头间电动力; $F_j$ 为作用在触头上的初压; $\xi$ 为材料变形系数,在0.3~1之间; $H_b$ 为透出材料的布氏硬度; $\mu_0$ 为真空磁导率。

此外,当隔离开关发生接触不良时,动静触头会产生微小间隙,并在电动力的作用下,触头间会相互碰撞,进而产生了非线性振动。而振动信号又经过盆式绝缘子传递到GIS壳体表面,造成整个GIS设备的剧烈振动。

### 1.2 模态特性分析

模态是多种振动研究方法的基础。模态分析采用振动分解法对设备的多阶固有频率及其振型进行计算。当设备的结构发生变化时,设备本身的固有频率也将随之改变<sup>[17]</sup>。而在无应力且不考虑阻尼影响时,结构发生简谐振动时的微分方程可表述为<sup>[18]</sup>

$$([M] - \omega^2[K])\{q\} = \{0\} \quad (3)$$

式(3)中: $[M]$ 为绝缘子的结构质量矩阵; $[K]$ 为绝缘子结构刚度矩阵; $\{q\}$ 为节点位移向量。

式(3)为特征值问题,特征根为 $\omega_i^2$ ( $i$ 为1至自由度值),特征根的平方根为振动的圆频率,相应的特征向量 $q_i$ 为振动的振型。

## 2 GIS隔离开关接触状态仿真结果分析

### 2.1 仿真模型的建立

因GIS设备实际结构复杂,如按照实际结构建立模型会导致仿真计算量过大,出现结果不收敛,无法得到有效计算结果<sup>[19]</sup>。因此为减少仿真计算时间,以220 kV GIS隔离开关为研究对象,建立对称模型取其二分之一进行计算。文中主要目的是分析隔离开关触头接触不良和盆式绝缘子含有裂纹缺陷时对GIS外壳振动特性的影响,所以忽略绝缘子上的螺栓和细小孔洞等对整体结构影响不大的部分<sup>[20]</sup>。计算所得的模态振型与固有频率并未受到模型中省略部分结构的影响,与文[21]结果相符。仿真建立的GIS隔离开关模型由动静触头、外壳、母线导体和盆式绝缘子组成。利用COMSOL仿真软件对隔离开关进行模型搭建时,具体建模尺寸为:外壳总长1 000 mm,厚度10 mm;GIS外径310 mm;静触头直径220 mm;动触头直径200 mm;中心导杆直径为50 mm;盆式绝缘子外径340 mm,厚度25 mm。GIS隔离开关仿真模型见图1。

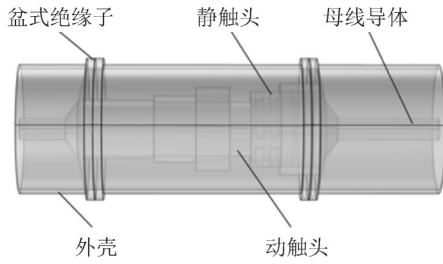


图1 GIS 隔离开关仿真模型

Fig. 1 GIS disconnector simulation model

在设置材料属性时,动静触头和触指所用材料为钨铜合金;盆式绝缘子为环氧树脂;外壳为5052型号的铝合金;导体为纯铜,且GIS隔离开关腔体内采用的是标准大气压下的空气。GIS隔离开关材料参数设置见表1<sup>[22]</sup>。

表1 隔离开关的材料参数设置

Table 1 Material parameters of the disconnector

材料	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	杨氏模量/ ( $10^9\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ )	泊松比
铜	8 960	110	0.300
钨铜	15 150	2 800	0.305
5052 铝合金	2 680	70	0.330
环氧树脂	2 400	1	0.240

在建模时,因文中主要研究GIS隔离开关触头间的接触状态和盆式绝缘子裂纹缺陷对外壳的影响,在划分网格时,对动静触头和绝缘子进行网格的细化处理,其他零件则由软件进行智能网格划分。

在仿真中将对固体力学和磁场两个物理场进行边界条件的设置。具体边界设置如下。

1)为了保证隔离开关与GIS设备中其他元件实现等效连接,将对导体两侧边界进行周期性设置,周期类型为连续性。

2)因所建的模型为截取部分GIS设备元件进行仿真,考虑到隔离开关需与其他元件相连接,因此对导体两侧边界进行相对位移的设置,参数设置为0。

3)对触头、触指和母线导体进行外部电流密度的参数设置,并对其进行电磁力的计算。最终将两个物理场进行洛伦兹耦合。此外,为了保证GIS外壳所受磁场均匀分布,所以在其周围构建一个长度为1 m的圆柱体作为空气域。

4)盆式绝缘子与外壳在实际应用中是由螺栓进行固定的,为了减少仿真的计算量,所以本文将绝缘子外法兰进行固定约束。

5)盆式绝缘子的上下表面将会受到 $\text{SF}_6$ 的压力影响,因此对盆式绝缘子设置0.4 MPa的边界载荷。

## 2.2 GIS 隔离开关的模态结果分析

通过振动理论可知,振动系统含有多阶固有频率,且有与其相对应的振型,但高阶模态频率占比

较小,对外壳的振动影响不大,因此文中利用特征频率求解器对GIS隔离开关前30阶进行模态频率的求解,为了能够更加直观的观察设备的振动状态,文中从计算结果中选取了具有代表性的前6阶模态振型,见图2。

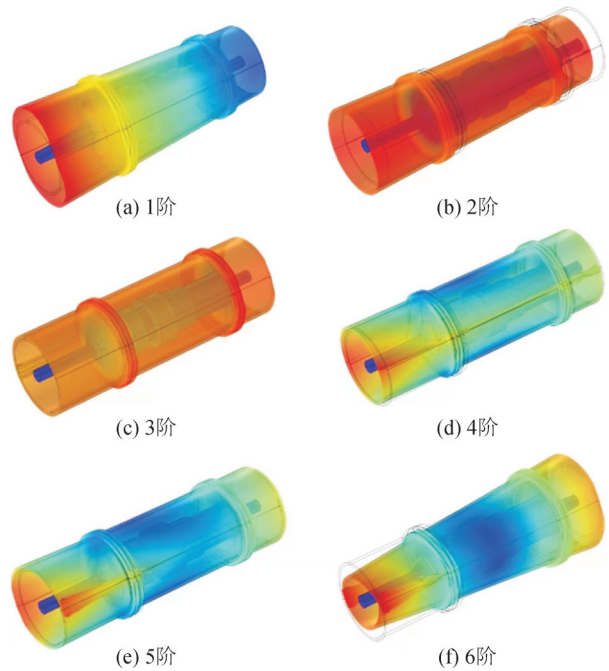


图2 GIS 隔离开关模态振型

Fig. 2 Mode shapes of GIS disconnector

文中主要研究隔离开关触头接触不良时对GIS外壳振动特性造成的影响,所以对动静触头接触正常、接触不良和严重接触不良情况下进行重点研究。因此文中将接触面积设置为4种接触比,其中包括0(动静触头完全不接触)、1(动静触头紧密接触)、0.8、0.3接触比(隔离开关触指与动触头接触时相对整个动触头所占的接触面积,即接触不良程度逐渐增加)。GIS隔离开关接触比为1时前30阶模态频率见表2。

表2 GIS 隔离开关接触比为1时前30阶模态频率

Table 2 First thirty mode frequencies when GIS disconnector at contact ratio with one

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	34.256	11	242.190	21	453.490
2	40.893	12	249.870	22	483.020
3	43.678	13	268.420	23	492.780
4	63.749	14	307.590	24	500.980
5	98.044	15	347.830	25	518.640
6	119.230	16	374.250	26	524.270
7	131.230	17	394.940	27	549.690
8	155.600	18	416.530	28	573.790
9	170.850	19	439.790	29	617.280
10	204.720	20	440.310	30	637.350

由表2可知, GIS 模态频率随着阶数的增加, 振动幅度也明显加大。同时, 通过图2可知, 颜色越深, 振动幅度越大, 形变量也变大, 而 GIS 设备的振动信号以 100 Hz 倍频分量为主, 固有频率在 119.23 Hz 时, 整个 GIS 隔离开关的形变量最大, 这与文[23]中的分析结果一致。因此, 在对设备实际运行维护中需要时刻掌握 GIS 设备的频率与形变量的变化趋势, 这样才能保证设备的安全稳定运行。

GIS 隔离开关在 0.8、0.3 接触比下的模态频率见表 3、4。与表 2 模态频率相比, 0.8、0.3 接触比的第 1 阶模态频率比隔离开关正常时的频率上升了约为 2.7%、3.2%。基于以上数据分析可知随着触头接触不良程度明显增加, 隔离开关的模态频率也随之上升。因此, 利用振动信号的差异可以判断隔离开关触头间发生接触故障时 GIS 外壳振动特性发生的变化, 为正确判断设备的故障类型提供了重要依据。

表 3 GIS 隔离开关 0.8 接触比时前 30 阶模态频率

Table 3 First thirty-order modal frequencies of GIS disconnector at contact ratio with 0.8

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	35.184	11	245.070	21	454.430
2	40.976	12	250.780	22	483.030
3	44.223	13	270.450	23	493.650
4	64.690	14	309.190	24	501.770
5	98.271	15	349.420	25	520.350
6	119.330	16	380.320	26	524.480
7	132.860	17	395.010	27	549.690
8	156.500	18	416.630	28	573.800
9	172.190	19	440.330	29	629.160
10	207.970	20	441.180	30	640.150

表 4 GIS 隔离开关 0.3 接触比时前 30 阶模态频率

Table 4 First thirty-order modal frequencies of GIS disconnector at contact ratio with 0.3

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	35.336	11	245.010	21	453.080
2	40.849	12	249.540	22	483.020
3	44.156	13	269.620	23	492.800
4	64.694	14	307.590	24	501.090
5	97.741	15	347.680	25	518.200
6	118.760	16	381.320	26	524.230
7	133.080	17	395.000	27	549.600
8	155.890	18	416.560	28	573.790
9	171.680	19	439.890	29	632.080
10	208.430	20	440.310	30	637.020

### 2.3 接触不良时触头处振动特性结果分析

文中为了更加全面地研究隔离开关的动静触

头与外壳二者之间的振动情况, 将在仿真中对二者进行分别研究。并在研究过程中对隔离开关施加 1 500、2 000、2 500、3 000 A 4 种不同电流。

文中选取了 GIS 隔离开关在  $t=0.011$  s 时刻, 接触面积为 0.8 接触比、0.3 接触比下施加不同电流时触头振动加速度大小情况见图 3、4。由图 3、4 可知, 触头在接触比为 0.3 时振动加速度为  $0.4 \text{ m/s}^2$  明显大于接触比为 0.8 时  $0.35 \text{ m/s}^2$  的加速度, 可见随着接触面积的减小, 其振动加速度幅度具有明显增大的趋势。此时振动信号在动静触头处的加速度最大, 并随着振动的传递, 振动信号向两边呈递减振动。

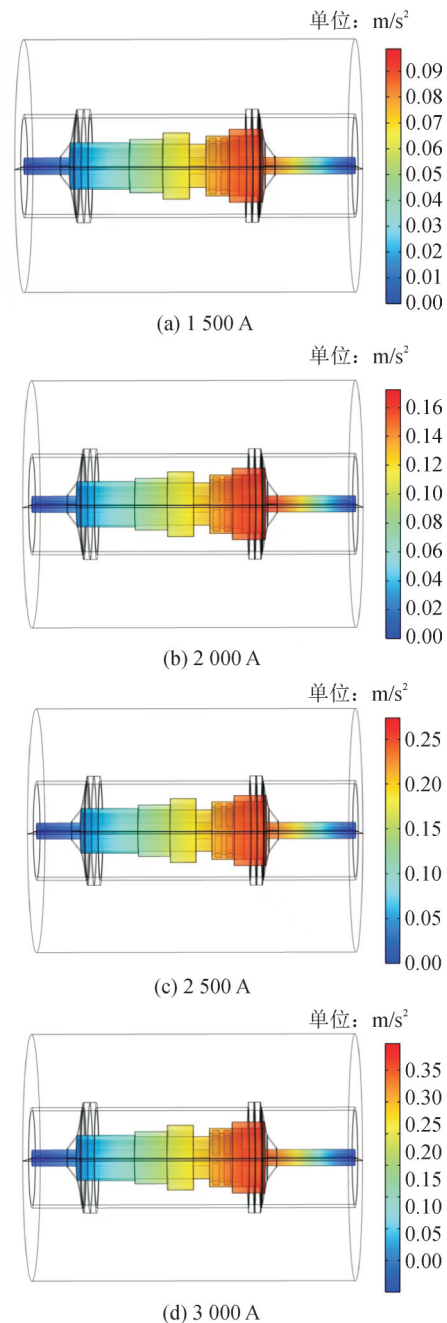


图 3 0.8 接触比下施加不同电流时触头的振动加速度  
Fig. 3 Vibration acceleration of contacts when different currents are applied at contact ratio with 0.8

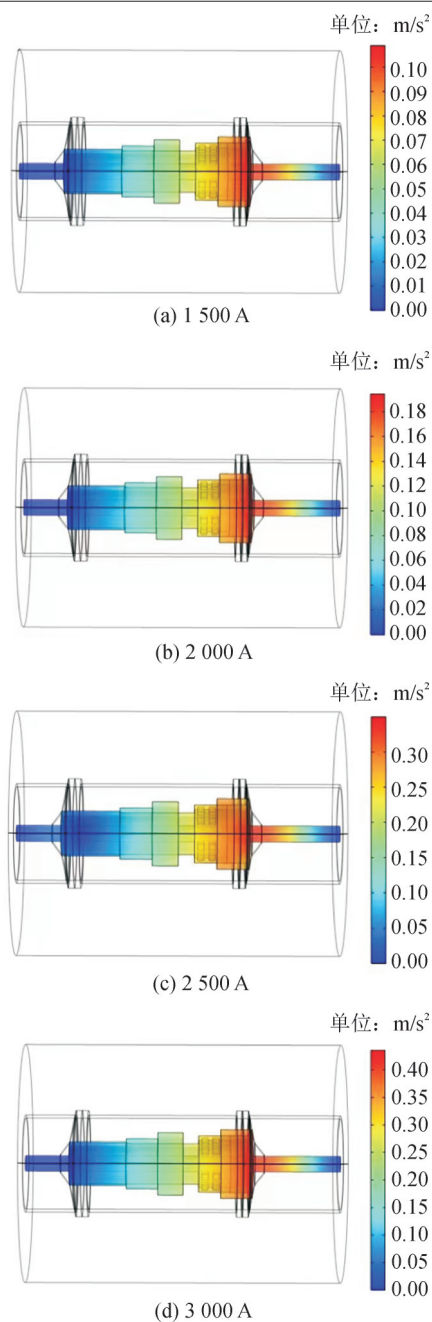


图4 0.3接触比下施加不同电流时触头振动加速度  
Fig. 4 Contact vibration acceleration with different current applied at contact ratio with 0.3

触头为0.8、0.3接触比时加速度与时间曲线变化见图5、6。由图5、6可知, GIS隔离开关的触头振动加速度大小是随着电流的增大呈递增趋势变化的, 且加速度的变化曲线有明显的周期性变化。

将图5、6对比可知, 触头为0.3接触比电流为3 000 A时振动加速度为0.4 m/s<sup>2</sup>比0.8接触比时的0.35 m/s<sup>2</sup>高了0.05 m/s<sup>2</sup>。由此可知, 在对触头施加同等电流情况下严重接触不良状态的加速度整体上升了约14%。当对0.3接触比通入不同电流时, 电

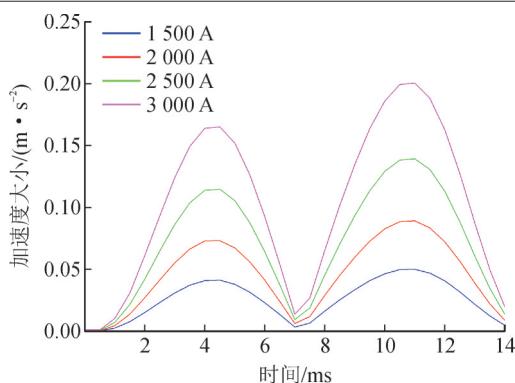


图5 0.8接触比时加速度随时间变化曲线  
Fig. 5 Acceleration curve with time at contact ratio with 0.8

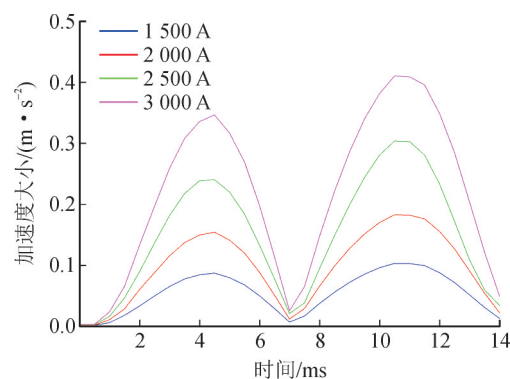


图6 0.3接触比时加速度随时间变化曲线  
Fig. 6 Acceleration curve with time at contact ratio with 0.3

流为1 500 A加速度为0.1 m/s<sup>2</sup>; 电流为2 000 A加速度为0.18 m/s<sup>2</sup>; 电流为2 500 A加速度为0.3 m/s<sup>2</sup>。可见在接触状态相同时, 导体通入电流的增加, 振动信号也随之增加, 这与文[24]结果一致。由此证明了触头处接触面积越小, 施加电流越大, 振动幅度也越大。

#### 2.4 接触不良时GIS外壳振动特性结果分析

GIS外壳在 $t=0.011$  s时, 0.8、0.3接触比下施加不同电流时的振动加速度情况见图7、8。从图7、8可以看出, 外壳的振动分布集中于壳体的中间部分, 且与动静触头相连部分振动幅度明显高于壳体的其他部分。

虽然外壳振动的加速度随着电流的上升具有明显的增加, 但振动信号的传递是经过盆式绝缘子从而进一步传递到GIS外壳上的, 所以与图3、4相比较可知, 外壳的振动信号明显低于触头处的振动加速度。隔离开关中触头与外壳在不同接触状态时其振动加速度与电流之间的关系见图9。

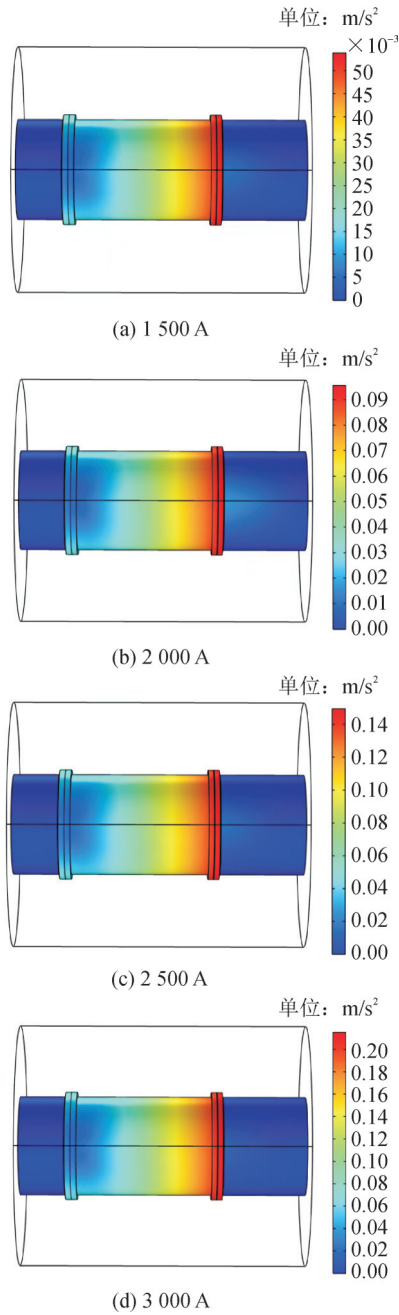


图7 0.8接触下施加不同电流时外壳的振动加速度  
Fig. 7 Vibration acceleration of the shell when different currents are applied at contact ratio with 0.8

### 3 GIS盆式绝缘子裂纹仿真结果分析

文中除研究了隔离开关对GIS外壳振动特性的影响外,还求解了隔离开关处于完好时盆式绝缘子对GIS外壳振动特性的影响。正常状态下GIS盆式绝缘子的前30阶模态频率见表5。

同时,为了更好地研究盆式绝缘子出现不同深度的裂纹时对整个GIS外壳振动信号产生的影响。文中在隔离开关接触良好时选取了3种不同深度的裂纹进行模态频率的计算。盆式绝缘子裂纹位置

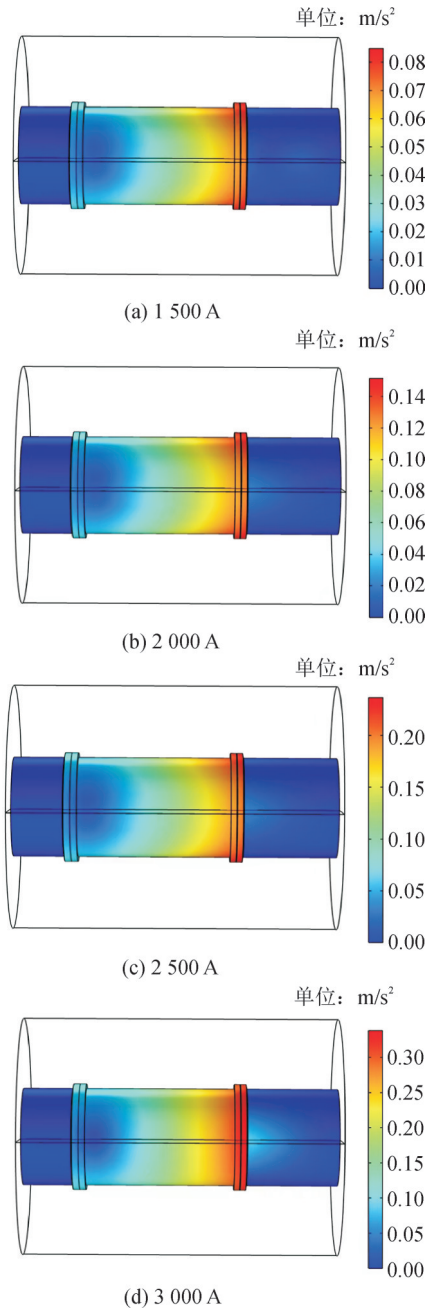


图8 0.3接触比下施加不同电流时外壳的振动加速度  
Fig. 8 Vibration acceleration of the shell when different currents are applied at contact ratio with 0.3

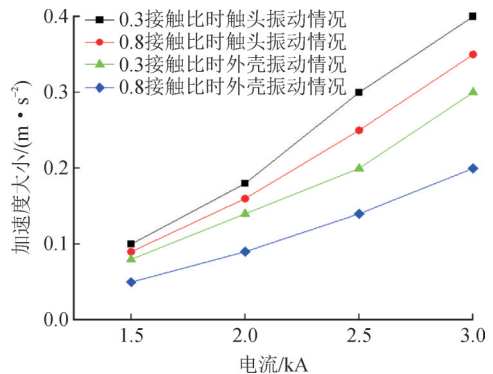


图9 不同接触状态下加速度与电流的关系  
Fig. 9 Relation between acceleration and current at different contact states

表5 正常状态下GIS盆式绝缘子前30阶模态频率

Table 5 First thirty modal frequencies of GIS basin insulator under normal condition

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	18.827	11	417.680	21	676.870
2	18.829	12	433.050	22	721.410
3	146.610	13	433.150	23	721.500
4	146.610	14	460.160	24	829.900
5	284.840	15	460.190	25	829.990
6	407.130	16	657.130	26	840.300
7	407.140	17	657.250	27	840.600
8	407.680	18	661.040	28	881.510
9	407.710	19	661.140	29	881.590
10	417.410	20	676.740	30	893.820

表8 GIS盆式绝缘子存在裂纹C时的前30阶模态频率

Table 8 The first thirty mode frequencies of GIS basin insulator with crack C

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	18.467	11	417.600	21	663.970
2	19.470	12	433.180	22	709.990
3	146.420	13	434.180	23	710.620
4	148.540	14	460.080	24	813.330
5	279.300	15	461.200	25	815.480
6	406.300	16	657.190	26	829.590
7	406.330	17	658.310	27	831.880
8	407.190	18	661.020	28	880.670
9	409.200	19	663.100	29	881.710
10	416.400	20	662.240	30	882.980

选用靠近金属外壳处的裂纹,3种裂纹的长和宽均保持相同,仅改变不同裂纹的深度。其中,宽设置为5 mm,长为45 mm,深度分别取整个绝缘子厚度的1/4、1/2和贯穿性裂纹,尺寸为2.5、5、10 mm。GIS盆式绝缘子存在裂纹A-C时前30阶模态频率见表6-8。

表6 GIS盆式绝缘子存在裂纹A时的前30阶模态频率

Table 6 The first thirty mode frequencies of GIS basin insulator with crack A

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	18.652	11	417.700	21	678.410
2	19.656	12	433.180	22	732.050
3	146.520	13	434.280	23	734.610
4	148.640	14	460.170	24	826.360
5	282.090	15	462.290	25	828.620
6	407.020	16	657.220	26	836.080
7	408.050	17	659.300	27	838.400
8	409.180	18	661.030	28	881.670
9	410.210	19	663.140	29	883.720
10	417.430	20	677.170	30	888.590

表7 GIS盆式绝缘子存在裂纹B时的前30阶模态频率

Table 7 The first thirty mode frequencies of GIS basin insulator with crack B

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	18.477	11	417.670	21	664.890
2	19.478	12	433.100	22	710.140
3	146.500	13	434.200	23	712.200
4	148.620	14	460.100	24	814.350
5	279.310	15	462.220	25	816.620
6	406.310	16	657.220	26	831.580
7	407.340	17	659.290	27	833.840
8	408.180	18	661.010	28	881.650
9	409.210	19	663.130	29	883.710
10	417.400	20	664.750	30	884.140

通过表5-8比较可知,在盆式绝缘子裂纹缺陷

中,A裂纹的第1阶模态频率相较于正常状态的第1阶频率下降了约0.9%,B裂纹的第1阶模态频率下降了约1.8%,C裂纹的第1阶模态频率下降了约1.9%。

GIS盆式绝缘子存在裂纹缺陷时前30阶的模态频率变化见图10。

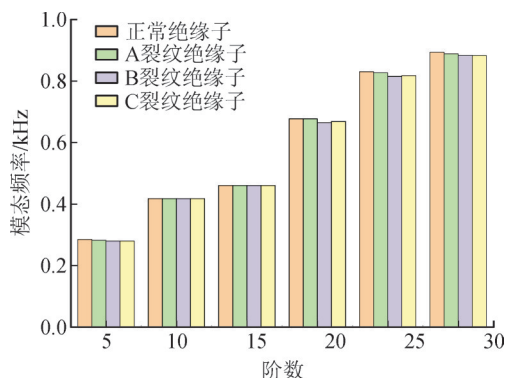


图10 GIS盆式绝缘子存在裂纹缺陷时前30阶的模态频率变化曲线

Fig. 10 The modal frequency change curve of the first 30 orders when the GIS basin insulator has crack defects

由图10可知,模态频率降低的范围主要是700~1 000 Hz,且随着裂纹深度的不断增大,频率也随之下降。由此可以证明盆式绝缘子裂纹缺陷随着裂纹深度的增加对GIS外壳的振动是具有影响的。

#### 4 结论

1)随着隔离开关接触程度的不断变化,动静触头处的间隙明显增大,触头间所受到的电磁力作用也随之增强<sup>[25-28]</sup>,致使隔离开关的模态频率也明显上升,整个GIS设备也发生较大的形变。

2)当对GIS隔离开关施加不同大小的电流时,动静触头处接触面积越小,施加的电流越大,动静触头和GIS外壳的振动幅度也越大,此时触头处的

振动加速度最大,振动信号向两边呈递减振动。此外,GIS外壳处振动加速度因需要经过盆式绝缘子的传递,所以其加速度明显小于触头处加速度,且振动信号主要集中于外壳中间部分。

3)当盆式绝缘子裂纹存在不同深度的裂纹时,随着深度的增加,模态频率总体呈下降趋势。

4)通过对隔离开关不同接触状态和盆式绝缘子裂纹缺陷两种故障进行仿真,证明了研究不同故障类型下GIS外壳振动特性对考虑多因素下影响GIS设备外壳振动的缺陷识别具有重要理论意义。

## 参考文献:

- [1] 冯俊宗,孙利雄,陈维维,等. 不同运行状态下GIS隔离开关的振动特性[J]. 高电压技术,2021,47(12):4314-4322.  
FENG Junzong, SUN Lixiong, CHEN Weiwei, et al. Vibration characteristics of GIS isolating switch under different operating conditions[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12):4314-4322.
- [2] 周秀,吴旭涛,田天,等. GIS隔离开关温度分布特性的试验研究[J]. 电工电能新技术,2023,42(6):71-78.  
ZHOU Xiu, WU Xutao, TIAN Tian, et al. Experimental research on temperature distribution characteristics of GIS disconnecter[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(6):71-78.
- [3] 吴玖汕,赵壮民,杨玥坪,等. GIS隔离开关接触状态振动—温度联合检测方法[J]. 高电压技术,2023,49(1):207-214.  
WU Jiushan, ZHAO Zhuangmin, YANG Yueping, et al. Vibration-temperature joint detection method for GIS disconnecter connection state[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1):207-214.
- [4] 卞超,张正东,赵科,等. 基于有限元的GIS母线不对中机械振动特性研究[J]. 高压电器,2020,56(6):72-79.  
BIAN Chao, ZHANG Zhengdong, ZHAO Ke, et al. Study on mechanical vibration characteristics of GIS bus misalignment based on FEM[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6):72-79.
- [5] 刘媛,杨景刚,贾勇勇,等. 基于振动原理的GIS隔离开关触头接触状态检测技术[J]. 高电压技术,2019,45(5):1591-1599.  
LIU Yuan, YANG Jinggang, JIA Yongyong, et al. Connection state diagnosis method of GIS disconnecter based on mechanical vibration[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5):1591-1599.
- [6] 韩帅,高飞,廖思卓,等. GIS盆式绝缘子表面缺陷及其诊断方法研究综述[J]. 绝缘材料,2022,55(2):12-22.  
HAN Shuai, GAO Fei, LIAO Sizhuo, et al. Review on surface defects and diagnosis methods of basin-type insulator in GIS[J]. Insulating Materials, 2022, 55(2):12-22.
- [7] 高晋武,宋建成,王伟,等. 基于超声导波能量的盆式绝缘子裂纹检测方法研究[J]. 高压电器,2023,59(6):165-171.  
GAO Jinwu, SONG Jiancheng, WANG Wei, et al. Research on crack detection method of basin insulator based on ultrasonic guided wave energy[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6):165-171.
- [8] 马波,吴旭涛,李秀广,等. 基于振动信号的GIS隔离开关接触状态带电检测技术研究[J]. 电网分析与研究,2019,47(12):73-77.  
MA Bo, WU Xutao, LI Xiuguang, et al. Contact status live detection of GIS disconnecter based on vibration signal[J]. Power Grid Analysis & Study, 2019, 47(12):73-77.
- [9] 臧旭,孙诚斌,张甜谨,等. GIS正常运行与松动故障下的振动机理[J]. 电机与控制应用,2022,49(6):76-82.  
ZANG Xu, SUN Chengbin, ZHANG Tianjin, et al. Vibration mechanism of GIS under normal operation and looseness fault[J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(6):76-82.
- [10] 杨景刚,刘媛,宋思齐,等. GIS设备机械缺陷的振动检测技术研究[J]. 高压电器,2018,54(11):86-90.  
YANG Jinggang, LIU Yuan, SONG Siqi, et al. Research on vibration detection technology of GIS mechanical defects[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11):86-90.
- [11] 李凯,许洪华,陈冰冰,等. GIS振动机理及固有频率研究[J]. 电测与仪表,2017,54(3):14-18.  
LI Kai, XU Honghua, CHEN Bingbing, et al. Research on vibration mechanism and natural frequency in GIS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(3):14-18.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 杨鼎革,叶晓林,牛博,等. GIS盆式绝缘子模态特征仿真研究[J]. 高压电器,2020,56(6):26-31.  
YANG Dingge, YE Xiaolin, NIU Bo, et al. Simulation research on modal characteristics of GIS basin insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6):26-31.
- [15] 马朋飞,史腾飞,刘荣海,等. GIS盆式绝缘子振动检测研究[J]. 云南电力技术,2017,45(4):38-42.  
MA Pengfei, SHI Tengfei, LIU Ronghai, et al. Research on vibration detection of GIS basin insulator[J]. Yunnan Electric Power, 2017, 45(4):38-42.
- [16] 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 Jianguang, et al. Research of GIS bus loose contact fault diagnosis techniques based on mechanical vibration[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11):99-104.
- [17] 王克胜,赵彦平,原帅,等. 基于电场计算及模态分析的220 kV GIS盆式绝缘子裂纹缺陷检测方法研究[J]. 电网与清洁能源,2021,37(8):32-38.  
WANG Kesheng, ZHAO Yanping, YUAN Shuai, et al. The crack defect detection method of 220 kV GIS basin-type insulators based on electric field calculation and modal analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8):32-38.
- [18] 于卓琦,高晋文,王克胜,等. 基于模态分析的GIS盆式绝缘子

- 裂纹缺陷检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(16): 23-27.
- YU Zhuoqi, GAO Jinwen, WANG Kesheng, et al. Research on crack defect detection method for GIS basin-type insulators based on modal analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(16): 23-27.
- [19] 徐志钮, 郭一帆, 李先锋, 等. 机械缺陷对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.
- [20] 王昕宇. 基于振动信号的GIS电接触故障特性的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- WANG Xinyu. Study of electrical contact fault characteristics of GIS based on vibration signals[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [21] 于卓琦. 裂纹缺陷对GIS盆式绝缘子的影响及检测方法研究[D]. 长春: 东北电力大学, 2021.
- YU Zhuoqi. Influence of crack defect in GIS basin insulator and its detection method[D]. Changchun: Northeast Electric Power University, 2021.
- [22] 苏旭辉, 龙伟, 任成君, 等. GIS隔离开关不同接触状态下的温升特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 121-128.
- SU Xuhui, LONG Wei, REN Chengjun, et al. Study on temperature rise characteristics of GIS disconnecter under different contact conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 121-128.
- [23] 曹双鹏. 基于多传感融合的GIS内隔离开关故障诊断方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2021.
- CAO Shuangpeng. Research on fault diagnosis method of disconnecter in GIS based on multi-sensor fusion[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Engineering, 2021.
- [24] 郝金鹏. 外壳振动信号在GIS故障诊断中的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- HAO Jinpeng. Research on the application of shell vibration signals in GIS fault diagnosis[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [25] 李国栋, 俞华, 刘宏, 等. GIS设备内外部紧固松动机械缺陷振动特性对比分析研究[J]. 高压电器, 2024, 60(5): 12-19.
- LI Guodong, YU Hua, LIU Hong, et al. Comparative analysis and research on vibration characteristics of internal and external fastening loose mechanical defects of GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(5): 12-19.
- [26] 王扬程, 关向雨, 陈志鹏, 等. 基于结构声强法的GIS机械振动传递特性[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5162-5171.
- WANG Yangcheng, GUAN Xiangyu, CHEN Zhipeng, et al. Energy transfer characteristics of GIS mechanical vibration based on structural intensity method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5162-5171.
- [27] 岳嵩, 朱勇, 何龙寿, 等. 基于改进动态电弧模型的GIS快速暂态过电压特性研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(8): 114-120.
- YUE Song, ZHU Yong, HE Longshou, et al. Research on characteristics of very fast transient overvoltage in GIS based on an improved dynamic arc model[J]. Smart Power, 2025, 53(8): 114-120.
- [28] 周秀, 吴旭涛, 田天, 等. 基于机-热-电多参量信号特征的GIS隔离开关状态评估方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 220-228.
- ZHOU Xiu, WU Xutao, TIAN Tian, et al. Condition assessment method of GIS disconnecter based on vibration-thermal-electrical multi-parameter signal characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1): 220-228.
- 张杰(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为开关设备关断、绝缘性能及智能化(通信作者)(E-mail: zhangjiezd@163.com)。
- ~~~~~
- (上接第53页)
- 烧蚀特性[J]. 高压电器, 2024, 60(4): 1-9.
- BO Xianglai, LIU Siyuan, XIE Hongtao, et al. Vacuum arc ignition and ablation characteristics of CuCr55 electrode contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(4): 1-9.
- [45] 赵启, 韩金儒, 刘伟, 等. 真空灭弧室CuCr触头抗电弧烧蚀和抗熔焊研究与改进[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 1-10.
- ZHAO Qi, HAN Jinru, LIU Wei, et al. Research and improvement on resistance to arc ablation and melt welding of CuCr contacts in vacuum interrupter chamber[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 1-10.
- [46] 韩智云, 王梦溪, 任瀚文, 等. 石墨烯/铜钨合金触头电弧烧蚀的固-液相变动力学模拟与烧蚀程度微观表征[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8490-8501.
- HAN Zhiyun, WANG Mengxi, REN Hanwen, et al. Kinetic simulation of the solid-liquid phase transition and the microscopic characterization of the electric arc ablation of graphene/copper-tungsten alloy contacts[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8490-8501.
- [47] 任瀚文, 杨亚腾, 卞国荣, 等. 燃弧冲击下石墨烯改性铜钨合金触头的烧蚀损伤特性与增强机理[J/OL]. 电工技术学报: 1-13 [2025-12-06]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250508>.
- REN Hanwen, YANG Yateng, BIAN Guorong, et al. Ablative damage characteristics and enhancement mechanism of graphene-modified copper-tungsten alloy contacts under arc impact[J]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-13 [2025-12-06]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.250508>.
- [48] CHANG Yanli, ZHENG Wei, ZHOU Zhiming, et al. Preparation and performance of Cu-Cr contact materials for vacuum switches with low contact pressure[J]. Journal of Electronic Materials, 2016, 45(11): 5647-5654.
- 丁璨(1982—), 男, 博士, 讲师, 主要从事高压开关电器的实验、仿真及理论计算(E-mail: dingcan@ctgu.edu.cn)。
- 王广凯(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事高压开关电器烧蚀和磨损的仿真和理论计算(通信作者)(E-mail: wangguangkai@ctgu.edu.cn)。