第 49 卷 第 1 期：207-214　　高电压技术　　Vol.49, No.1: 207-214
2023 年 1 月 31 日　　High Voltage Engineering　　January 31, 2023
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211272

# GIS 隔离开关接触状态振动–温度联合检测方法

吴玖汕，赵壮民，杨玥坪，树　婷，孟　旋，李军浩
（西安交通大学电气工程学院电力设备电气绝缘国家重点实验室，西安 710049）

**摘　要**：气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear，GIS)中隔离开关接触状态对于设备的安全运行具有极大的影响，因此围绕 GIS 隔离开关接触状态与振动信号、温度变化的对应关系展开研究，搭建了 252 kV 三相分体式 GIS 试验平台。通过控制动静触头接触距离模拟了 3 种机械状态，测量了隔离开关在不同接触状态下的振动信号和温度信号，获得了振动和温度信号的关联关系，基于振动和温度信号的特征量联合分析，提出了隔离开关接触状态的综合检测方法。试验结果表明：正常运行时，GIS 外壳振动幅值较小，频率主要分布在 100 Hz，温升在 1 ℃左右；随着接触状态劣化，振动幅值明显增加，频谱中出现 200 Hz、300 Hz 等异常振动信号，外壳温度持续升高。研究结果表明：以振动信号的振幅、频率幅值占比和温度变化为特征量，综合分析不同接触状态下振动信号的相似度和相对温差，得到特征量间的相对系数，能够在不同电流下较好地识别 GIS 隔离开关接触状态，对现场检测具有实际意义。

**关键词**：GIS 隔离开关；振动检测；红外测温；向量相似度；相对温差

## Vibration-temperature Joint Detection Method for GIS Disconnector Connection State

WU Jiushan[1], ZHAO Zhuangmin[1], YANG Yueping[1], SHU Ting[1], MENG Xuan[1], LI Junhao[1]
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract**: The connection state of gas insulated switchgear (GIS) disconnector has a great influence on the safe operation of equipment. This paper focuses on the corresponding relationship between the connection state of GIS disconnector and the changes of vibration and temperature signals, and builds a 252 kV three-phase split GIS experimental platform. Three mechanical states are simulated by controlling the distance between the dynamic and static contact, the vibration signals and temperature signals of the disconnector under different connection states are measured, and the correlation between vibration and temperature signals is obtained. Based on the joint analysis of the characteristics of vibration and temperature signals, a comprehensive detection method for the connection state of the disconnector is proposed. The test results show that, under normal connection, the vibration amplitude of GIS shell is small, the frequency is mainly distributed at 100 Hz, and the temperature rise is about 1 ℃. With the deterioration of connection state, the vibration amplitude increases significantly, abnormal vibration signals such as 200 Hz and 300 Hz appear in the spectrum, and the shell temperature continues to increase. The research results show that the vibration signal similarity and relative temperature difference under different connection states are comprehensively analyzed by taking the amplitude, frequency amplitude ratio and temperature change of the vibration signal as the characteristic variables, thus the relative coefficient between the characteristic variables is obtained, which can better identify the connection state of GIS disconnector under different currents, and has practical significance for field detection.

**Key words**: GIS disconnector; vibration signal detection; infrared temperature measurement; similarity of vector; relative temperature difference

## 0　引言

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear，GIS)凭借诸多优点被广泛应用于变电站中，然而随着 GIS 运行时间不断增长，设备可能面临机械结构异常的问题。隔离开关是 GIS 中操作次数最频繁的单元，其作用是制造明显的断点，不具有灭弧功能。在反复操作过程中，隔离开关的触头会受到如机械闭合力的冲击和触头间的应力作用，使触头表面不断磨损，导致隔离开关接触状态发生劣化，并最终引发严重的设备放电故障[1-3]。例如 2013 年国网公司某变电站的隔离开关由于对地短路导致保护动

**基金资助项目**：国家电网有限公司科技项目 (5500-201999543A-0-0-00)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5500-201999543A-0-0-00).

作，解体检查后发现：该隔离开关操作机构的输出角度不规范，致使隔离开关合闸不到位，动静触头因为接触不良最终引发事故[4]。

目前，针对隔离开关接触状态劣化，现场可用的检测手段包括回路电阻检测法、X 射线数字成像检测法及局部放电检测等方法[5-7]。但回路电阻检测法需要设备停电检修、X 射线数字成像检测法耗时耗力，两种方法都缺乏现场实用性，缺少一套简单易操作的带电检测方法。而广泛应用于电气缺陷检测的局部放电检测方法针对接触劣化的机械类缺陷难以见效。这是因为隔离开关接触状态劣化是一个动态发展过程，在初始阶段，并不会激发明显的放电信号。但一旦出现隔离开关接触状态劣化，便会引起接触电阻增大，并在导体电流的作用下设备会发热升温；此外由于触头间存在微小间隙，在电动力的作用下会导致机械振动信号增大，所以通过检测振动信号和温升的变化能尽早发现接触状态劣化的问题，阻止缺陷的继续扩大[8-10]。围绕接触状态劣化早期阶段 GIS 隔离开关的振动、温度信号特性展开研究，获得不同物理量与接触状态之间的对应关系，对尽早发现隔离开关接触状态劣化故障具有重要的工程应用价值。

本文搭建了 252 kV 三相分体式 GIS 试验平台，在不同电流等级下，改变 GIS 隔离开关接触状态模拟实际可能出现的故障类型，分析提取振动信号和温度变化特征，提出基于振动、温度信号综合分析的 GIS 隔离开关接触状态检测方法，为现场诊断提供了理论依据。

## 1 试验平台搭建与信号的测量

### 1.1 试验平台

以 252 kV 三相分体式 GIS 搭建的隔离开关试验平台如图 1 所示，大电流发生器能输出 0~1500 A 可调电流，通过多股绝缘导线从 GIS 顶端套管流入，本试验施加的最大电流为 1200 A。

试验平台能同时测量 GIS 隔离开关的振动信号和温度信号，为了保证测量信号的完整准确，在隔离开关周围一共设置了 6 个测量点，如图 1 所示。测量点 1 和测量点 6 在隔离开关相邻两个气室的正上方，以隔离开关所在平面为采集面等距设置 4 个测量点，顺次编号为 2—5。选用加速度传感器采集振动信号，其灵敏度为(300/$g$) mV(其中 $g$ 为重力加速度，取值 9.8 m/s$^2$)，检测频率范围 1~4000 Hz，分辨率为 0.0001$g$，传感器将采集到的信号通过采集卡转换为电信号传输至 PC 终端，然后进行后续的数据分析处理。k 型热电偶与红外热像仪配合使用，同时监测隔离开关附近壳体的温度变化。其中 k 型热电偶误差为 0.4%，安装在 6 个测量点上；红外热像仪误差为 2%，热灵敏度小于 40 mK，安置在隔离开关近端。

为了研究 GIS 隔离开关发生机械故障时振动信号和温度信号的变化特征，通过手动调节隔离开关动触头的插入深度来改变回路电阻大小，共设置 3 种接触状态，即合闸状态、过渡状态和临界状态，动静触头接触距离的变化如图 2 模型所示。

合闸状态指隔离开关的动静触头完全闭合，接触良好；临界状态指隔离开关仅靠静触头前端的触指与动触头接触，再稍微动作就会导致回路断开，严重接触不良；而过渡状态则是控制动触头插入深度，使其介于合闸状态与临界状态之间。GIS 试验平台的具体参数如表 1 所示。

由表 1 可见，随着接触状态的劣化，回路电阻逐渐增大。调节输出电流每次增加 100 A，从 100 A 开始逐渐升至 1200 A。试验依次对 3 种接触状态下

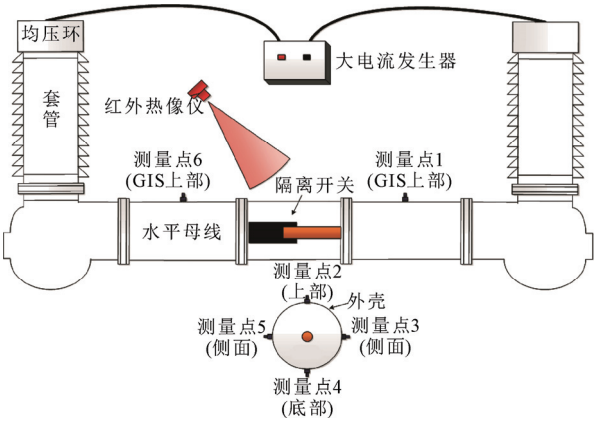



图 1 试验平台

Fig.1 Experimental platform

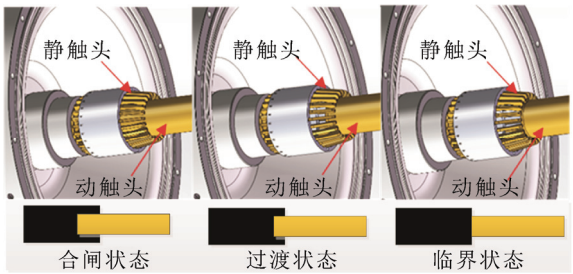



图 2 隔离开关不同接触状态

Fig.2 Different connection states of disconnector

表 1　GIS 运行参数

Table 1　GIS operation parameters

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 填充 $SF_6$ 压强/MPa | 0.45 |
| 不同接触状态的回路电阻/Ω | 合闸状态：0.0246<br>过渡状态：0.0564<br>临界状态：0.0887 |
| 可调电流范围/ A | 100~1200 |

的 GIS 施加恒定工频电流，持续通流 120 min。

### 1.2　振动信号和温度信号的分布特征

为方便后续对振动特性和温度分布特性的研究，需要确定振动信号和温度信号在隔离开关附近的分布特征。试验发现，3 种接触状态的信号分布特征基本相同，故以特征最明显的临界状态为例展开说明。

#### 1.2.1　振动信号分布特征

图 3 为 1000 A 电流下隔离开关处于临界状态时，在设置 6 个测量点上测得的振动信号时域波形。

由图 3 可知，振动信号为周期性锯齿波，信号幅值与测量位置密切相关。机械波在传递过程中经过盆式绝缘子会有一定程度的削弱，在隔离开关所在气室设置的 4 个测量点，即点 2—5 的整体振幅大于相邻两个气室所设置的测量点(即点 1 和点 6)；在同一气室内，位于隔离开关正上方(距离隔离开关最近)的测量点 2 振幅最明显，这验证了振动是由于电流在触头接触面附近发生收缩产生的电动力引起，再传递至 GIS 外壳。因此，在后续研究中主要分析在隔离开关上方的振动信号特征[11]。

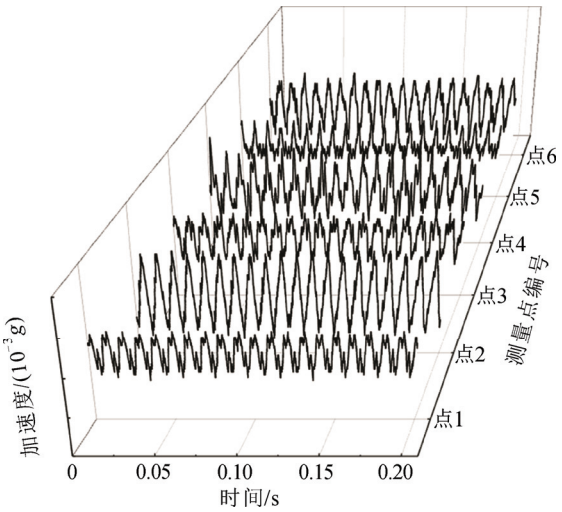



图 3　临界状态振动信号时域波形 (1000 A)

Fig.3　Time domain waveform of vibration signal under critical state(1000 A)

#### 1.2.2　温度信号的分布特征

施加恒定电流过程中每 20 min 测量一次外壳温度，GIS 隔离开关附近的温度场分布特征明显。

图 4 为 1000 A 电流下隔离开关处于临界状态时测得的红外热像图。根据热像图可知，在隔离开关正上方(点 2 附近)的温度升高最明显，而处于较低位(如位于底部点 4)的温度变化则较小，上下温度相差接近 4 ℃[12-13]。分析认为：接触故障导致触头附近产生大量热量，GIS 内部 $SF_6$ 气体受热对流上升效应的影响，处于低位的 $SF_6$ 积聚在壳体顶部的空间，使得隔离开关正上方的温度上升最快且沿筒壁四周往下温度逐渐降低，同时盆式绝缘子隔绝部分热量使得相邻两个气室的温升较低[14-15]。

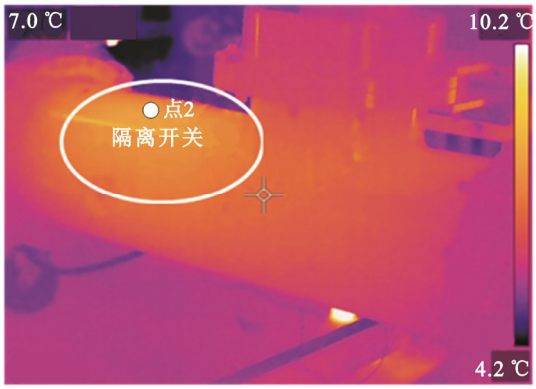



图 4　临界状态红外图像 (1000 A)

Fig.4　Infrared image under critical state(1000 A)

图 5 为仿真模拟得到 GIS 母线的横截面 $SF_6$ 气体流速示意图。由图 5 可见，壳体内温度场的形成主要是因为发热导体周围的气体受热膨胀导致密度减小，气体逐渐向上运动至筒壁顶部再沿筒壁下降，这一过程中气体不断将热量从发热导体带至外壳与

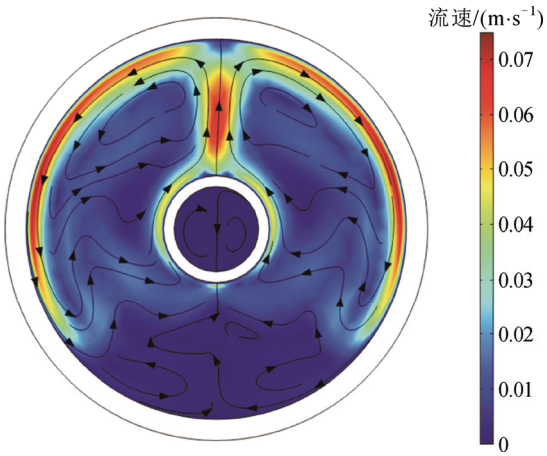



图 5　横截面 $SF_6$ 气体流速仿真

Fig.5　Simulation of cross-sectional $SF_6$ flowing velocity

外界进行热交换，直至气体重新回到底部[16]。

综上，对隔离开关不同运行状态下测量到的振动和温度信号进行处理后发现：离信号源(隔离开关)越近，振动信号幅值越大，温升越明显，且在隔离开关正上方处振动信号和温升信号最明显，所以后续的检测分析均基于此处的信号展开。

## 2 不同接触状态的振动和温度特性分析

### 2.1 隔离开关振动和发热原理

振动信号和温度变化主要受电流大小以及隔离开关接触状态两个因素的影响。同一接触状态下，电流等级越高，GIS 外壳振幅越大，温度上升越快；同一电流等级下，隔离开关接触缺陷越严重，GIS 外壳振幅也越大，温度上升越快。

电动力 $F$ 计算式为[15]

$$F=\frac{\mu_0}{4\pi}i^2\ln\left(\frac{A}{2r}\right)=\frac{\mu_0 I_0^2}{4\pi}\ln\left(\frac{A}{2r}\right)\cos^2(\omega t) \tag{1}$$

式中：$r$ 为动静触头之间接触斑点的半径；$\mu$ 为真空磁导率；$I_0$ 为电流幅值；$A$ 为触头接触面的直径；$\omega$ 为角频率；$t$ 为时间。

由式(1)可知，隔离开关的动静触头从接触良好过渡到动触头仅与弹簧触指接触这一过程中，由于触头间的接触斑点逐渐减少，导致有效导通面积减小，回路电阻增大。因此电动力增大，振动信号的幅值升高，触头附近的温度也随电阻增大而上升。

### 2.2 振动和温度特性

逐渐增大电流，测量 GIS 隔离开关不同接触状态下的振动信号和温度变化，经过处理得到 300、600、900、1200 A 电流下振动幅值以及温度变化与接触状态之间的关系见图 6。

当隔离开关处于合闸状态时，动静触头间接触良好，触头附近产生的振动信号非常微小。由图 6(a)可知，电流从 300 A 升至 1200 A 增大了 4 倍，对应振动信号幅值从 $0.224\times10^{-3}\,g$ 逐渐增大至 $0.573\times10^{-3}\,g$，增大了约 2.6 倍。经拟合得到合闸状态下电流 $I$(单位 kA)和加速度振幅 $A_1$(单位 $10^{-3}$ g)间的关系式为[17]

$$A_1=0.1861I^2+0.1105I+0.1733 \tag{2}$$

由式(2)可得，振幅 $A_1$ 为电流 $I$ 的二次函数，而电动力计算式(1)表明电动力 $F$ 与电流 $I$ 的二次方成正比，实际测量结果与理论推导相符。

由图 6(b)可知，GIS 外壳温度 120 min 内上升约 0.5 ℃，不同电流下的温度变化曲线近似。隔离开关接触良好时触头处发热较低，设备所处的环境

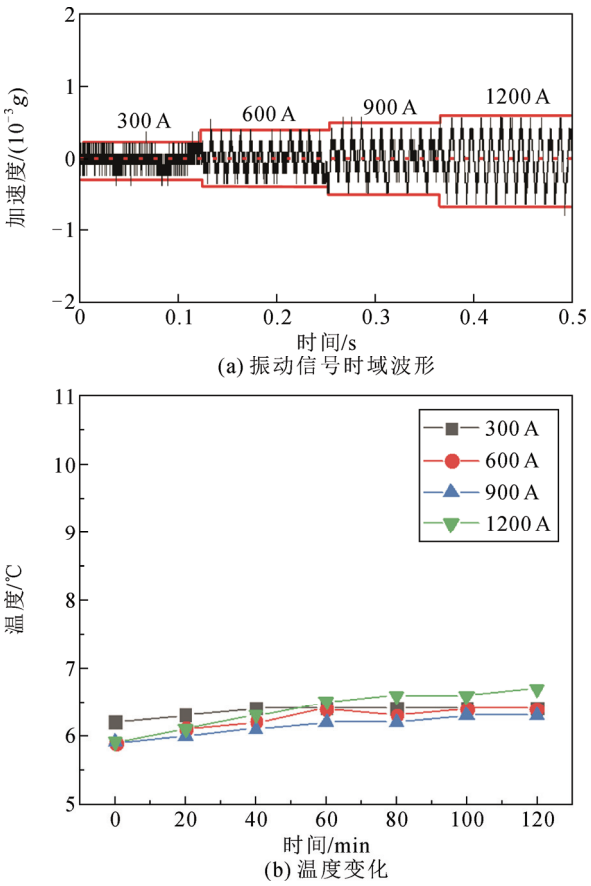



图 6 合闸状态的振动幅值和温度变化

Fig.6 Vibration amplitude and temperature variation under closing state

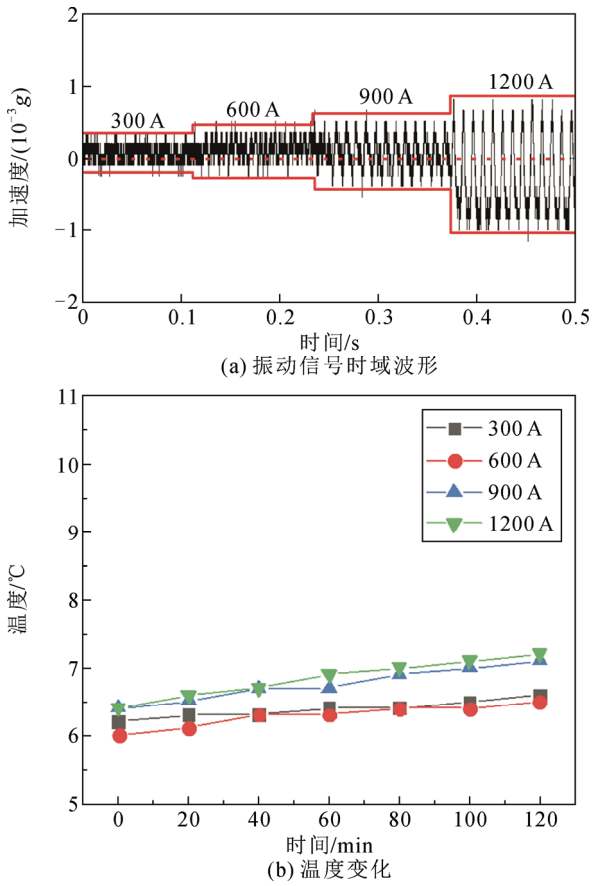
温度(起始温度)起主导作用，$SF_6$ 气体能与外界充分进行热交换，将隔离开关触头产生的热量及时排出，使得 GIS 外壳温度与环境温度基本相同[18-19]。

通过调节隔离开关动触头的插入深度，减小触头间的接触面积，测量得到过渡状态时 GIS 外壳上的振动信号和温度变化，如图 7 所示。

由图 7(a)可知，电流从 300 A 升至 1200 A，对应振动信号的幅值从 $0.368\times10^{-3}\ g$ 逐渐增大至 $0.826\times10^{-3}\,g$，增大了约 2.2 倍。经拟合得到过渡状态下电流 $I$(单位 kA)和加速度振幅 $A_2$(单位 $10^{-3}\ g$)间的关系式为

$$A_2=0.391\,7I^2-0.065\,2I+0.346\,3 \tag{3}$$

由图 7(b)可知，温度变化曲线因为电流大小不同分为两部分：电流较小时(例如 300 A、600 A)，GIS 外壳温度上升约 0.5 ℃，与合闸状态的温升相同；电流升高后(例如 900 A、1200 A)，GIS 外壳温度上升略大于 1 ℃。显然，隔离开关接触状态的劣化会导致触头处产生更多热量，且电流等级越高，温度升高越明显。

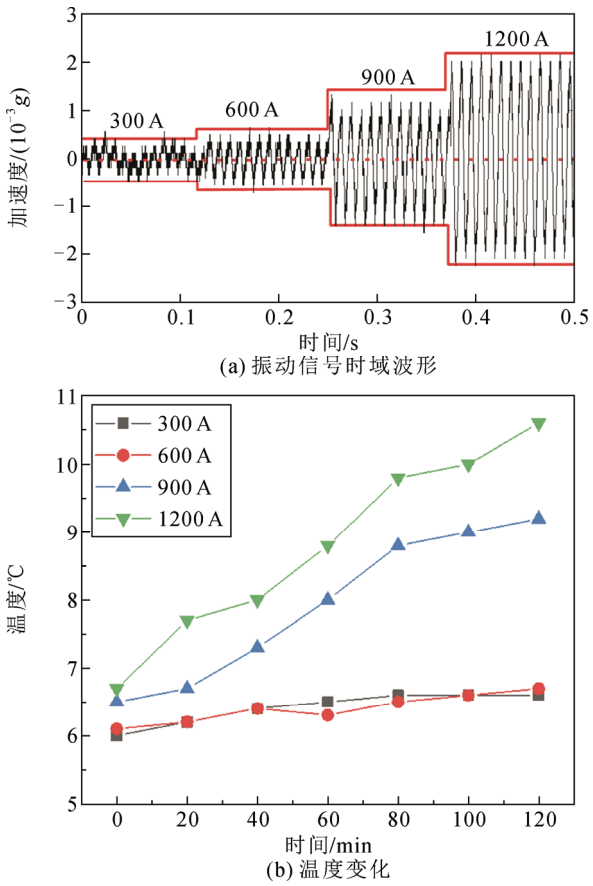



(a) 振动信号时域波形

(b) 温度变化

图 7　过渡状态的振动幅值和温度变化

Fig.7　Vibration amplitude and temperature variation under transition state




(a) 振动信号时域波形

(b) 温度变化

图 8　临界状态的振动幅值和温度变化

Fig.8　Vibration amplitude and temperature variation under critical state

图 8 为隔离开关处于临界状态时，在不同电流下测得的振动信号和温度变化。

由图 8(a)可知，隔离开关接触状态严重劣化，振动信号的幅值从 0.429×$10^{-3}$ $g$ 增至 2.021×$10^{-3}$ $g$，增大约 4.7 倍。经拟合得到临界状态下电流 $I$(单位 kA)和加速度振幅 $A_3$(单位 $10^{-3}$ g)间的关系式为

$$A_3 = 1.2641I^2 - 0.0782I + 0.3168 \tag{4}$$

由图 8(b)可知，电流较小时(例如 300、600 A)，GIS 外壳温度上升约 0.7 ℃，温升与前两种状态接近；但在电流升高后，温度曲线陡增，900 A 电流下 GIS 外壳温度在 120 min 内上升约 3 ℃，1200 A 电流下温度上升约 5 ℃，且温度还在持续升高，发热问题严重威胁着设备的安全运行。如果在热故障下继续运行，极易引发设备事故[20]。

对以上试验数据分析表明：隔离开关的接触状态与振动和温度信号间具有明显对应关系，根据这一特性，可以将振动和温度信号的变化特征作为设备现场检测的判断依据。

## 3　基于振动和温度信号特征的 GIS 隔离开关状态联合检测方法

### 3.1　振动信号的相似度

隔离开关接触状态劣化除了导致振幅增大外，也会使对应时域信号在频谱中的频率分布、幅值发生变化。相关研究证明，GIS 发生机械故障时产生的振动主要由低频信号构成，集中在 0~1000 Hz 之间[21-22]。图 9 为 1000 A 电流下隔离开关不同接触状态的振动信号频谱图，可以看出振动信号的频率以 100 Hz 基频分量为主，但随着接触状态的劣化，还会有 200、300 Hz 等倍频分量产生。

通过比较隔离开关正常状态和缺陷状态下振动信号频率幅值占比的相似程度，研究频率特征与不同接触状态间的对应规律[23]。

统计 100、200、…、1000 Hz 频率的幅值 $A_x$，计算出各频率的幅值平方占 100~1000 Hz 幅值平方之和的百分比，将其作为特征量，占比计算式为

$$P_{fx} = A_x^2 \Big/ \sum_{y=100}^{1000} A_y^2 \tag{5}$$

选取 10 组隔离开关正常运行状态下的振动信号，计算出各组信号的频率幅值占比，取平均值后建立典型特征向量 $\boldsymbol{A}$。

$$\boldsymbol{A}=[p_{100}\quad p_{200}\quad \cdots\quad p_{1000}] \tag{6}$$

式中 $p_{100}$ 表示振动信号在 100 Hz 频率处的幅值占比，再计算出 $\boldsymbol{A}$ 的数学期望 $\overline{A}$。同理可得到待测信号 $\boldsymbol{B}$ 和对应的数学期望 $\overline{B}$。

计算向量 $\boldsymbol{A}$ 与向量 $\boldsymbol{B}$ 的相似程度，引入了皮尔逊相关系数 $r$ 计算式

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{10}\left(A_i-\overline{A}\right)\left(B_i-\overline{B}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{10}\left(A_i-\overline{A}\right)^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{10}\left(B_i-\overline{B}\right)^2}} \tag{7}$$

式中 $A_i$、$B_i$ 表示向量 $\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$ 中第 $i$ 个数。

皮尔逊计算式先计算两个向量内部数据之间的差值，再计算向量之间的相关系数，衡量的是两向量的趋势。计算结果综合考虑了数据与数据之间以及数据内部的关系，对现场检测结果更具有实际意义。

实际得到的相关系数 $r$ 取值范围从−1 到 1，从工程应用角度，对 $r$ 进行数学计算得

$$r_1=|r| \tag{8}$$

一般认为，$r_1$ 在 0~0.4 之间为弱相关，$r_1$ 在 0.4~0.8 之间为较强相关，$r_1$ 在 0.8~1 之间为强相关。$r_1$ 越接近 1，两组数据相似度越高，待测数据所表示的接触状态与隔离开关正常运行状态越接近。

由此得到不同电流等级下隔离开关故障状态与正常状态的振动信号相似度的统计见图 10。

由图 10 可见，当电流小于 800 A 时故障状态与正常工作状态的相似度较低，说明隔离开关接触状态改变对振动信号各低频分量幅值的影响较大，通过振动检测可较明显地分辨出 GIS 隔离开关是否存在接触缺陷。随着电流升高，不同接触状态的相似度大于 0.8，此时需要对比时域波形特征，甚至对比其余相 GIS 的数据才能判断待测设备的运行状态。

### 3.2 温度信号的相对温差

电流制热型设备(如 GIS)通常采用相对温差法确定热故障点，将设备的过热缺陷分为一般缺陷(相对温差 0.2~0.7)，严重缺陷(0.7 以上)和危急缺陷(设备最高温度超过最高允许温度)3 类[24]。

相对温差 $\delta_t$ 指两个对应测量点之间的温升之差与其中较高温度点的温升之比的百分数。计算式为

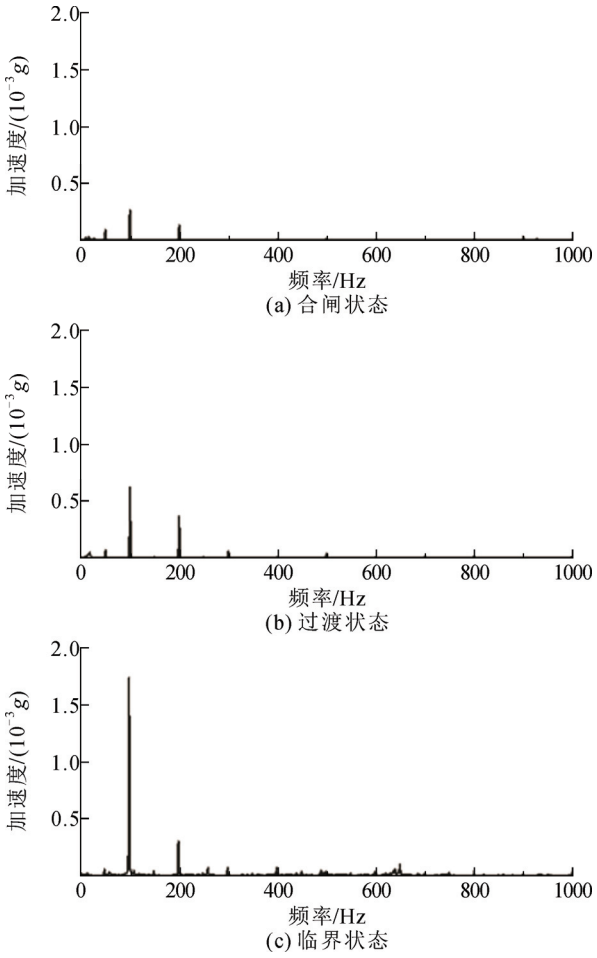



图 9 不同接触状态振动信号频谱 (1000 A)

Fig.9 Spectrum of vibration signals under different connection states (1000 A)

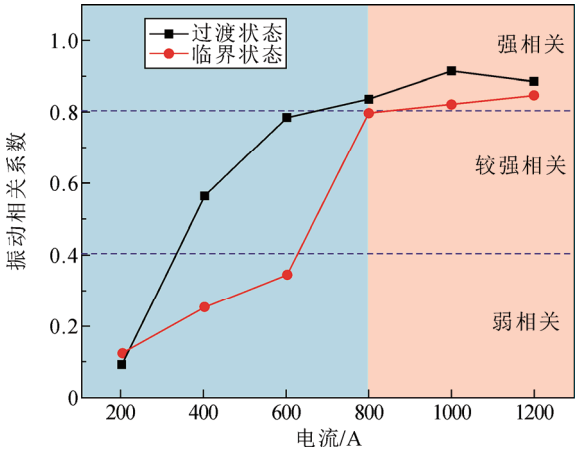



图 10 故障状态和正常状态的相似度

Fig.10 Similarity between fault state and normal state

$$\delta_t=\frac{\tau_1-\tau_2}{\tau_1}\times 100\% \tag{9}$$

式中：$\tau_1$ 为发热点温升；$\tau_2$ 为正常相对应点的温升。

以正常状态的温升作为参照，得到不同电流等级下故障状态的相对温差折线统计图见图 11。

由图 11 可知，负荷电流较小时，故障状态的相对温差小于 0.7，为一般热缺陷；电流升至 400 A 以上，故障点发热严重，故障状态与正常状态的温度相差较大，相对温差值超过 0.7，达到严重过热缺陷。相对温差统计图揭示了温度变化与隔离开关接触状态之间的对应关系。作为一种非接触式测温方式，红外测温技术能快速发现设备发热点，但测量结果一定程度上易受负荷电流、环境温度等因素的影响。

### 3.3 基于振动信号和温度信号的联合检测方法

前文分别介绍了通过振动和温度信号来判断隔离开关是否存在缺陷。然而，现场的复杂环境以及各种外在干扰，使得用单一检测手段来判断是否存在机械缺陷变得困难。针对 GIS 现场检测的有效改进方法是同时使用振动和温度检测方法来综合判断隔离开关的运行状态。

定义相对系数 $\varepsilon$ 为

$$\varepsilon = (1 - r_1) + \delta_t \tag{10}$$

计算得到相对系数 $\varepsilon$ 曲线如图 12 所示。过渡状态和临界状态大致以 1.0 为界限上下分布，构成两条逐渐减小并最终趋于稳定的平滑曲线：过渡状态所代表的曲线 $\varepsilon$ 在 0.2~1.0 范围之间，而临界状态所代表的曲线整体 $\varepsilon$ 在 1.0 以上，分隔明显。图 12 表明，综合振动信号与温度信号的特征量，通过比较检测信号的相对系数值是否处于正常范围内即可判断 GIS 隔离开关的实际运行状态。在实验室中已经多次模拟故障运行，试验结果验证均能较好地与上述结论相对应。

以上分析说明，基于振动和温度原理的 GIS 隔离开关运行状态联合检测方法用于故障检测具有较高的可行性。为能更好地检测现场运行的 GIS 隔离开关，应建立每台设备的振动和温度信号的数据库，通过与数据库的历史数据进行对比，就能快速评估 GIS 隔离开关的运行状态。

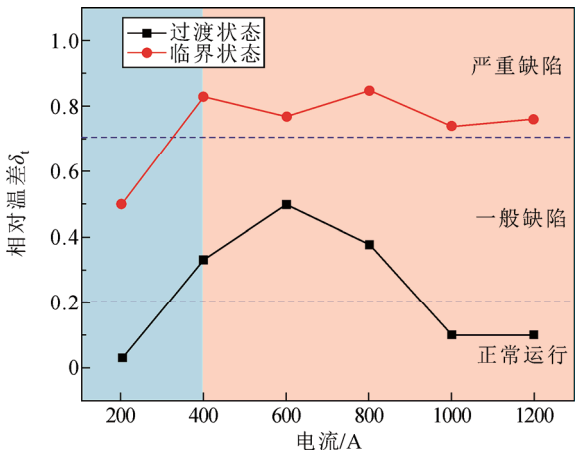



图 11 故障状态和正常状态的相对温差

Fig.11 Relative temperature difference between fault state and normal state

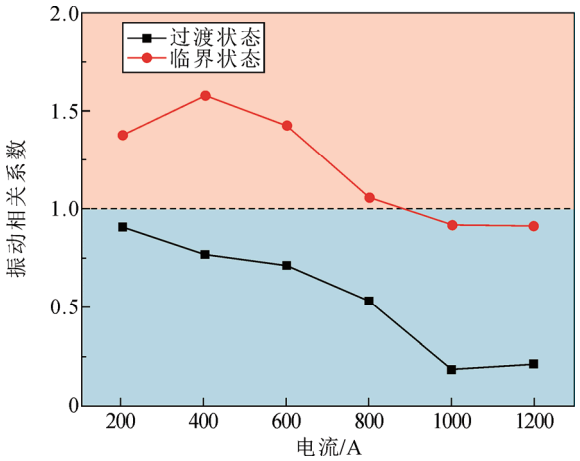



图 12 相对系数

Fig.12 Correlation coefficient

## 4 结论

1）负荷电流大小和缺陷的严重程度影响 GIS 振动信号的振幅以及频率幅值占比，在隔离开关正上方测量点的振动信号特征最明显。

2）负荷电流大小和缺陷的严重程度影响 GIS 表面温度分布，隔离开关所在气室的温度整体上升，在隔离开关上方区域的温度上升最高。

3）以振动信号频率幅值占比的相似度和温度信号的相对温差作为特征量，只能在一定范围内表征隔离开关的接触状态。综合两个特征量得到的相对系数，在各电流等级下能较好地判断 GIS 隔离开关的运行状态是否正常：以 1.0 为界限，当相对系数>1.0 时，可认为存在严重机械故障；当相对系数在 0.2~1.0 之间时，可认为存在一般接触不良缺陷。

## 参考文献 References

[1] OKUBO H, BEROUAL A. Recent trend and future perspectives in electrical insulation techniques in relation to sulfur hexafluoride ($SF_6$) substitutes for high voltage electric power equipment[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(2): 34-42.

[2] LI C, HE J L, HU J, et al. Switching transient of 1 000 kV UHV system considering detailed substation structure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 112-122.

[3] 杨 哲，张倩然，高 阳，等. GIS 机械故障振动检测研究综述[J].

山东工业技术，2015(17)：261-263.
YANG Zhe, ZHANG Qianran, GAO Yang, et al. Summary of key research on GIS mechanical fault detection[J]. Shandong Industrial Technology, 2015(17): 261-263.
[4] 张秀斌，温定筠，彭 鹏，等. 110 kV GIS 隔离开关故障原因分析及反事故措施研究[J]. 电工技术，2014(6)：51-52.
ZHANG Xiubin, WEN Dingyun, PENG Peng, et al. Analysis on fault causes of 110 kV GIS disconnector and study on countermeasures[J]. Electric Engineering, 2014(6): 51-52.
[5] 李军浩，韩旭涛，刘泽辉，等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术，2015，41(8)：2583-2601.
LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
[6] 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 disconnector based on mechanical vibration[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1591-1599.
[7] 李军浩，车 斌，韩旭涛，等. 特高压气体绝缘组合开关设备现场冲击耐压试验及局部放电测量[J]. 高电压技术，2015，41(11)：3659-3665.
LI Junhao, CHE Bin, HAN Xutao, et al. Field impulse withstand test and partial discharge detection for ultra high voltage gas insulated switchgear equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3659-3665.
[8] 常 广，张振乾，王 毅. 高压断路器机械故障振动诊断综述[J]. 高压电器，2011，47(8)：85-90.
CHANG Guang, ZHANG Zhenqian, WANG Yi. Review on mechanical fault diagnosis of high-voltage circuit breakers based on vibration diagnosis[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 85-90.
[9] 胡伟涛，隋少臣，韩建波. 红外检漏成像仪在 $SF_6$ 电气设备状态检修中的应用[J]. 高压电器，2010，46(10)：90-92，96.
HU Weitao, SUI Shaochen, HAN Jianbo. Application of gas find IR-LW in condition-based maintenance of $SF_6$ electrical equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 90-92, 96.
[10] 丛浩熹，行晋源，李庆民，等. 有屏蔽罩结构的 GIS 触头温度红外在线监测技术[J]. 电力自动化设备，2014，34(9)：148-153.
CONG Haoxi, XING Jinyuan, LI Qingmin, et al. Infrared online temperature monitoring technology for shielded GIS contacts[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 148-153.
[11] 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.
[12] 师晓岩，查 玮，孙 福，等. UHV GIS 内部温度场的红外热诊断技术[J]. 高电压技术，2007，33(6)：16-20.
SHI Xiaoyan, ZHA Wei, SUN Fu, et al. Inner temperature distribution of UHV GIS using infrared thermo-diagnosis technology[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 16-20.
[13] 武胜斌，郑 研，陈志彬. 基于红外测温技术的 GIS 导体温度在线监测的方案[J]. 高压电器，2009，45(4)：100-102，110.
WU Shengbin, ZHENG Yan, CHEN Zhibin. An on-line monitoring scheme of conductor temperature in GIS based on infrared temperature measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 100-102, 110.
[14] 李 玲，吴晓文，李洪涛，等. 气体绝缘母线热计算及其影响因素分析[J]. 电工技术学报，2012，27(9)：264-270.
LI Ling, WU Xiaowen, LI Hongtao, et al. Thermal field calculation and influencing parameters analysis of gas insulated busbars[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 264-270.
[15] 王增彬，刘姝嫔，周宏扬，等. GIS 盆式绝缘子温度多物理场仿真方法[J]. 高电压技术，2019，45(12)：3820-3826.
WANG Zengbin, LIU Shupin, ZHOU Hongyang, et al. Multiphysics simulation method for GIS epoxy spacer temperature[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3820-3826.
[16] 侯国斌，傅明利，邓晓峰，等. GIS 温升的多物理场仿真与实验及热通量分布特性[J]. 高电压技术，2019，45(7)：2322-2328.
HOU Guobin, FU Mingli, DENG Xiaofeng, et al. Multi-physics coupling simulation and experiment of temperature rise in GIS and heat flux distribution characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2322-2328.
[17] 吴 邦. 基于振动信号的气体绝缘组合电器机械缺陷诊断技术研究[D]. 西安：西安交通大学，2018：7-9.
WU Bang. Research on diagnosis technology of GIS mechanical defects based on vibration signal[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2018: 7-9.
[18] 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.
[19] 朱建军，王赟中，崔绍平，等. 红外技术诊断高压电气设备内部缺陷[J]. 高电压技术，2004，30(7)：34-36.
ZHU Jianjun, WANG Yunzhong, CUI Shaoping, et al. The application of infrared diagnosis technology in diagnosis of the high voltage electrical equipment internal defect[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(7): 34-36.
[20] 李玉杰，李洪涛，宋思齐，等. 基于红外的 GIS 内部导体温度检测技术研究[J]. 电力工程技术，2019，38(2)：142-146.
LI Yujie, LI Hongtao, SONG Siqi, et al. Temperature detection of internal conductor in GIS based on infrared thermal imaging[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 142-146.
[21] 齐卫东，牛 博，胡德贵，等. 基于有限元的 GIS 水平母线外壳振动仿真研究[J]. 高压电器，2018，54(6)：46-52，59.
QI Weidong, NIU Bo, HU Degui, et al. Vibration simulation of GIS horizontal bus shell based on FEM[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6): 46-52, 59.
[22] 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.
[23] 武立平，杨 柳，李 刚，等. 基于振动信号特征矩阵相似度的变压器机械故障诊断技术研究[J]. 高压电器，2019，55(11)：211-217.
WU Liping, YANG Liu, LI Gang, et al. Improved mechanical fault diagnosis technology of transformer based on similarity of vibration signal characteristic matrix[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 211-217.
[24] 陈宝怡. 红外诊断技术在高压断路器内部发热故障中的应用[J]. 高压电器，2011，47(5)：92-95，99.
CHEN Baoyi. Application of infrared diagnostic technology in high voltage circuit breaker internal heat fault[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(5): 92-95, 99.



WU Jiushan

**吴玖汕**
1996—，男，硕士生
主要从事电力设备状态诊断的研究工作
E-mail: 1967998119@qq.com



LI Junhao
Ph.D., Professor
Corresponding author

**李军浩**(通信作者)
1980—，男，博士，教授，博导
主要从事高电压电力设备故障诊断和局部放电检测新技术研究
E-mail: junhaoli@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期 2021-07-29 修回日期 2021-10-12 编辑 卫李静