

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.05.003

不同接触缺陷下气体绝缘组合电器发热—振动多场耦合数值建模与分析

王扬程, 关向雨, 赵俊义, 廖景雯, 陈志鹏

(福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108)

摘要: 气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)被广泛运用于电力系统中,其内部触头是实现电气连接的关键部位也是事故多发部位,及时发现机械故障并判断故障类型对维护GIS长期平稳运行有着重要意义。为探究外部温升和振动特征与内部触头故障类型之间的对应关系,文中建立了弹簧缺失(F_1)、螺栓松动(F_2)、弹簧接触不良(F_3)、对接深度不足(F_4)4种缺陷下的GIS电—热—结构多物理场耦合数值计算模型,通过涡流场和瞬态电磁场计算得到发热功率以及瞬态电动力,将其作为载荷传递到温度场和结构场进而计算不同缺陷状态下的温升特性以及振动特性。在某GIS试验平台开展不同缺陷状态下的发热—振动试验,温升计算值与实测值误差在7.5%以内,加速度计算值与实测值误差在11.2%以内,验证了建立数值模型和触头等效的合理性。结果表明:不同接触缺陷下外壳温度分布存在差异,对接深度不足时触头温升最高,接触缺陷会从电动力分布和机械连接结构两方面改变外壳的振动特性,螺栓缺失条件下,由于机械连接刚度的变化,外壳基频振动幅值下降最为明显。文中内容为基于温升、振动信号的GIS机械故障诊断方法提供了理论依据。

关键词: 气体绝缘设备; 接触缺陷; 数值计算; 温升; 振动

Numerical Modeling and Analysis of Thermal-vibration Multi-field Coupling of GIS Under Different Contact Defects

WANG Yangcheng, GUAN Xiangyu, ZHAO Junyi, LIAO Jingwen, CHEN Zhipeng

(School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Gas insulated switchgear (GIS) is widely used in power system. The contacts inside the GIS are the key parts to achieve electrical connection and, however, also the parts prone to frequent accident. It is therefore of great significance to find mechanical faults in time and judge the types of faults for maintaining the long-term and stable operation of GIS. In order to explore the corresponding relationship between the external temperature rise and vibration characteristics and the type of the internal contact fault, in this paper a electro-thermal-structural multi-physical field coupling numerical calculation model of GIS under such four defects as spring missing (F_1), bolt looseness (F_2), weak spring contact (F_3) and insufficient docking depth (F_4) is set up. The heating power and transient electrodynamic force are obtained by the calculation of eddy current field and transient electromagnetic field, which are used as the load to transmit to the temperature field and structural field, thereby calculating the temperature rise characteristics and vibration characteristics under different defect states. The thermal-vibration test under different defect conditions is carried out on a GIS test platform. The error between the calculated value and the measured value of the temperature rise is within 7.5%, and the error between the calculated value of acceleration and the measured value is within 11.2%, which verifies the rationality of setting up numerical model and the contact equivalence. The results show that temperature distribution of the enclosure has difference under different contact

收稿日期:2025-10-08; 修回日期:2025-12-09

基金项目:福建省自然科学基金(2020J01509)。

Project Supported by Natural Science Foundation of Fujian Province(2020J01509).

defects. The temperature rise of the contact is the highest in case of insufficient docking depth. The contact defects will change the vibration characteristics of the enclosure from such two aspects as distribution of electrodynamic force and mechanical connection structure. In case of missing bolts, the fundamental frequency vibration amplitude of the enclosure decreases obviously. The contents in this paper provides a theoretical basis for mechanical fault diagnosis method of GIS based on temperature rise and vibration signal.

Key words: GIS; contact defects; numerical calculation; temperature rise; vibration

0 引言

气体绝缘组合电器(gas insulated switchgear, GIS)因其输电效率高、运行寿命长、占地面积小等优点在电力系统中得到了广泛的应用^[1-2]。随着投运时间的增加,除了放电故障与绝缘故障之外^[3],由于安装过程中装配方式不当、螺栓松动、弹簧老化等原因导致的机械故障也是威胁GIS安全的主要因素之一,因此,及时发现内部机械缺陷可有效减少事故的发生^[4]。受限于GIS的气体封闭式结构,在进行状态诊断时难以从外界直接获取内部的状态信息,目前国内外学者开展了一系列基于外部特征量的状态检测研究。

弹簧触头长期运行在电、热、力多方面因素作用的环境下,当触头接触状态劣化时,接触电阻的增大引起触头发热量增加。武汉大学孙国霞搭建了梅花触头温升计算有限元模型,分析了导体插入深度与短时负荷电流对GIS母线接头温升的影响^[5],西安交通大学刘鹏开展了GIL/GIS弹簧触头插接过程的力学仿真,基于GW模型得到接触电阻并计算了触指正常和接触不良状态下GIL的温升情况^[6],温升信号是GIS故障检测的重要依据之一。触头热量通过SF₆及腔体结构传递到外壳,最终影响外部温度场的分布情况^[7],众多学者也在设备整体温度分布方向开展了一系列研究。东亚大学的S.W.Kim计算了热传导对设备温升的影响,但仅通过换热系数对辐射和对流换热进行等效,无法反映流体的分布情况^[8],西安交通大学纽春萍研究了不同气氛下的GIS温升特性^[9],华北电力大学张森林建立了二维及三维的GIS温升计算模型,研究外壳材料、对流换热系数等因素对外壳温升的影响^[10],国网四川省电力公司的苏旭辉对不同接触状态以及不同负载电流下的GIS进行温升计算,并搭建相应试验平台对模型有效性进行了验证^[11]。

除了温升信号外,外壳的振动信号也能在某种程度上表征内部导体运行状态。GIS通流时在交变磁场中受到电磁力的作用发生振动,内部缺陷会导致外壳的振动信号畸变,因此可以通过振动法对GIS进行状态监测。在二十世纪八十年代,日本学者

Youichi Ohshita率先研究了GIS外部振动与内部触头缺陷二者之间的联系,并分析了触头处不同幅值电压的波形差异^[12];电科院的钟碧红和清华大学的钱家骊分析了局部放电故障下GIS外壳的振动波形,但并未考虑机械故障对GIS振动信号的影响^[13-14];近年来一部分学者开展了GIS振动机理方面的研究^[15-19],也有不少学者采用有限元的方法对GIS进行振动的数值建模^[20-24],但直到目前为止外壳振动信号与内部机械缺陷的关系尚不明确,特征值的选择也并不统一^[25-29]。

为了进一步明晰GIS内部导体状态与外部信号之间的联系,需要获取不同种类机械缺陷下的外壳温升振动信号。文中基于国内某GIS试验平台搭建了电磁—热—力多物理场耦合数值模型,分析了不同机械缺陷下GIS温升和振动情况,并进行对应的试验与计算结果的相互验证。

1 GIS几何结构

文中以国内某110 kV GIS试验段为原型,几何模型见图1。GIS主要由弹簧触头、导电杆、屏蔽罩、盆式绝缘子以及全封闭气室组成。为了提高运算效率,在建模时对模型进行了简化,忽略组件圆角倒角等对计算结果影响较小的细节,且不考虑接线口以及气压表接口的几何建模,几何模型参数见表1。

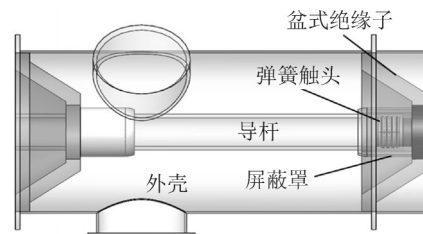


图1 GIS几何模型

Fig. 1 GIS geometric model

2 GIS发热—振动多物理场耦合数值模型

GIS运行时内部导体通有交流电,外壳处在交变磁场中由于电磁感应的作用产生涡流,电流产生的焦耳热使GIS温度上升,电流之间的电磁力则使

表1 GIS模型参数

Table 1 GIS model parameters

参数	导杆	外壳	盆式绝缘子
材料	铝6101	铝5754	环氧树脂
外径/mm	200	900	880
厚度/mm	8	8	10
密度/(g·cm ⁻³)	2.67	2.72	2.15
弹性模量/MPa	7.88×10 ⁴	7.07×10 ⁴	5.00×10 ⁴
泊松比	0.34	0.34	0.30

GIS发生振动。因此GIS的温升—振动计算包括电磁场、温度场、流体场和机械场的数值计算,以及各场之间的多物理场耦合计算。

2.1 GIS触头等效及缺陷设置

GIS触头结构由动触头、弹簧触指和触头座组成,触头座为V型槽结构,斜圈弹簧用于实现触头结构的电气连接。为提高计算效率,文中通过导电环模型对设备尺度的弹簧触头触指进行等效,等效后的导电环1/18模型见图2。当导电环电导率设置为 1.25×10^5 S/m时,通过100 A电流后两端压降为0.008 8 V,即1/18触头模型的电阻为 $88 \mu\Omega$,一整个弹簧触指接触电阻为 $4.89 \mu\Omega$,根据文[30]获得实测弹簧触指的接触电阻为 $4.83 \mu\Omega$,验证了弹簧触指等效的有效性。

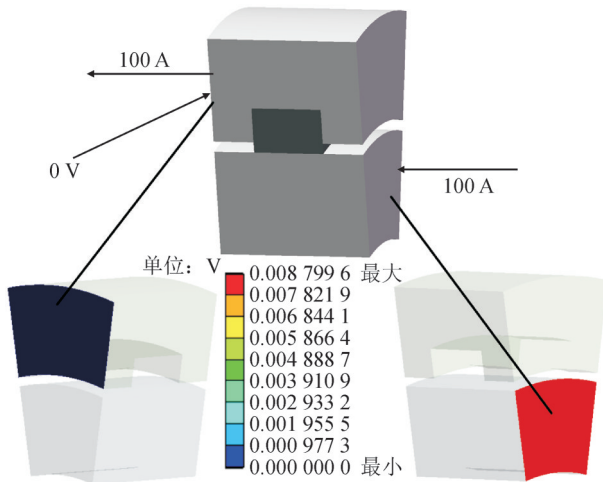


图2 1/18等效导电环模型

Fig. 2 1/18 equivalent conducting ring model

文中结合GIS实际投运情况设置了4种触头通流时常见的机械缺陷类型: F₁弹簧缺失、F₂螺栓缺失、F₃弹簧接触不良、F₄对接深度不足,缺陷设置方法见图3。

2.2 电磁场控制方程与边界条件

建立三维GIS计算模型,包含GIS回路以及外部空气域,设置负荷电流有效值为6 000 A,频率50 Hz,对各种缺陷下GIS的电磁场分布特性进行研究。根据Maxwell基本方程组,采用准静态假设,引入矢量

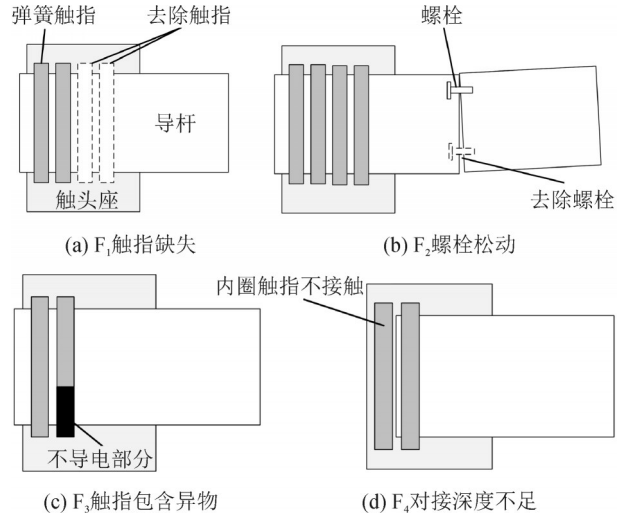


图3 故障设置

Fig. 3 Fault settings

磁位 A 、标量磁位 φ ,采用 φ - A 法求解涡流场的控制方程。GI外壳涡流区与非涡流区域内的控制方程为

$$\nabla^2 \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \mathbf{A} \right) = 0 \quad (1)$$

在GIS外壳周边设置空气域来模拟磁场的耗散,并在空气域边界施加自然边界条件

$$\mathbf{A} \Big|_{r_n} = 0 \quad (2)$$

采用棱边法(T - Ω)求解计算域内的瞬态电磁场,其中 T 为棱边元上的矢量电位,低频瞬态电磁场可描述为

$$\begin{cases} \nabla \times \frac{1}{\sigma} \nabla \times \mathbf{H} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: \mathbf{H} 为磁场强度矢量; \mathbf{B} 为磁感应强度矢量。

采用虚功法求解外壳与导体受到的电磁力得

$$\mathbf{F} = \frac{dP(s,i)}{ds} \Big|_{i=const} = \frac{\partial}{\partial s} \left[\int_V \int_0^H \mathbf{B} dH \right] dV \quad (4)$$

式(4)中: i 为电流; $P(s,i)$ 为系统的磁场储能。

2.3 流场—温度场控制方程与边界条件

将涡流场求解获得的功率损耗作为热源耦合到流场—温度场中进行计算,根据试验平台所测环境温度将数值计算模型外界温度设置为300.15 K, SF₆气体与外部空气域均设置为不可压缩气体,腔体内部SF₆气体压强为0.45 MPa,通过Fluent对GIS的流场—温度场进行求解。

GIS腔体内部流体—温度耦合换热作用可用 N - S 方程组来描述,包括连续方程、运动方程和能量方程,其控制方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u U) = \nabla(\eta \text{grad } u) + S_u - \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v U) = \nabla(\eta \text{grad } v) + S_v - \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w U) = \nabla(\eta \text{grad } w) + S_w - \frac{\partial p}{\partial z} \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla(\rho U T) = \nabla\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad } T\right) + S_T \quad (7)$$

式(5)-(7)中： ρ 为流体的密度； p 为流体压力； η 为流体的动力粘度； t 为时间； U 为流体的速度矢量； S_u 、 S_v 、 S_w 为广义源项； u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 3个方向的速度分量； λ 为导热系数； S_T 为热源； T 为温度。

流场的边界条件中，进口边界定义了流动的相关参数，出口边界处各变量的梯度为0，流固耦合边界上的位移、温度和热流量等变量应当连续。

三维温度场控制方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Phi \quad (8)$$

式(8)中： ρ 为有限元的密度； c 为有限元的比热容； T 为有限元的温度； Φ 为有限元的热源； t 为时间。

2.4 结构场控制方程与边界条件

通过瞬态电磁场计算获取GIS试验段各部件之间以及试验段与其余导电回路之间的电动力，并通过载荷的形式实现电磁场与瞬态结构场的耦合计算，瞬态结构场的基本运动方程为

$$\begin{cases} [M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \\ \gamma_i = \{x\}_i^T [M][D] \\ \{x_i\}_i^T [M]\{x_i\} = 1 \\ M_{ei} = \gamma_i^2 = \frac{\gamma_i^2}{\{x_i\}_i^T [M]\{x_i\}} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中： $[M]$ 为质量矩阵； $[C]$ 为阻尼矩阵； $[K]$ 为刚度矩阵； $\{x\}$ 为位移矢量； $\{F(t)\}$ 为力矢量； $\{\dot{x}\}$ 为速度矢量； $\{\ddot{x}\}$ 为加速度矢量； $\{\gamma_i\}$ 为模态参与因子； $[D]$ 为载荷分布向量； $\{x_i\}$ 为第 i 阶模态振型； M_{ei} 为等效模态质量。

将试验间隔两端设置为对称约束，瞬态结构场中的对称约束(frictionless support)仅对法向位移进行了约束，而不对其他自由度进行约束，即物体只可在该面上的法向位移强制为0，切向位移则不受限制，对称约束控制方程为

$$U_n = 0 \quad (10)$$

3 GIS数值计算结果

3.1 电磁场结果分析

触指电流密度分布云图见图4。F₁弹簧触头导

电路只有接触正常状态的一半，因此触指处电流密度为正常的2倍；F₂由于导杆螺栓缺失导致螺栓连接处电流主要通过剩余的螺栓流通，螺栓处电流密度增大；F₃触指处存在异物，因此触指存在不导电的部位，该部位电流密度为0；F₄对接深度不足的情况下只有最外圈的触指导电，触指的电流密度最大。

不同缺陷下欧姆损耗分布云图见图5，从图5可以看出各种缺陷下弹簧触头的单位体积损耗密度均远高于导杆。欧姆损耗与电流密度和电阻大小有关，GIS回路的电阻主要为触指的接触电阻，因此欧姆损耗也主要集中在触头部位，对比GIS触指处电流密度分布云图可知，F₁、F₃、F₄触指处电流密度增加使得该处欧姆损耗也相应增加；F₂电流在流经螺栓时发生收缩，该处欧姆损耗密度较高，而触头处欧姆损耗最小。

3.2 温度场结果分析

不同接触状态下导杆温度见图6，F₁故障时，导杆最高温度达到70.682℃；F₂故障时，导杆最高温度达到95.162℃；F₃故障时，导杆最高温度达到73.332℃；F₄故障时，导杆截面最高流速达到88.941℃。触头接触条件劣化(实际接触触指减少)导致发热量增加，因此F₄状态下的最高温升大于F₃，F₃温升大于F₁，F₂缺陷的螺栓缺失处出现了明显的热区，导杆的最高温度也出现在此处，这是螺栓处电流线收缩，发热功率增加导致的结果。

不同接触状态下腔体内部的流场分布见图7，腔体内部SF₆气体的初始温度较低，通流后受金属导体焦耳热的影响，气体受热并产生密度差，气体的流动方向主要从腔体中部到腔体上方，并且在腔体内壁的顶部向两侧形成回流，F₁故障时，导杆截面最高流速达到0.205 m/s；F₂故障时，导杆截面最高流速达到0.196 m/s；F₃故障时，导杆截面最高流速达到0.258 m/s；F₄故障时，导杆截面最高流速达到0.284 m/s。触头接触条件劣化导致发热量增加，劣化程度越高气体的温差越大，因而实际导电触指最少的F₄流速最高，导电触指最多的F₂流速最低。

内部气体与外壳温度场分布见图8。不同缺陷下GIS内部气体域的温度场分布见图8(a)，SF₆气体受到热对流与热辐射的影响，温度上升。由于触头的温升较高，使得屏蔽罩内气体温度较高，流速较快，而屏蔽罩外的气体温度较低，导致屏蔽罩出口处形成热流喷射的效果。

F₁故障时，导杆截面最高温度达到70.480℃；F₂故障时，导杆截面最高温度达73.738℃；F₃故障时，导杆截面最高温度达到73.079℃；F₄故障时，导杆截

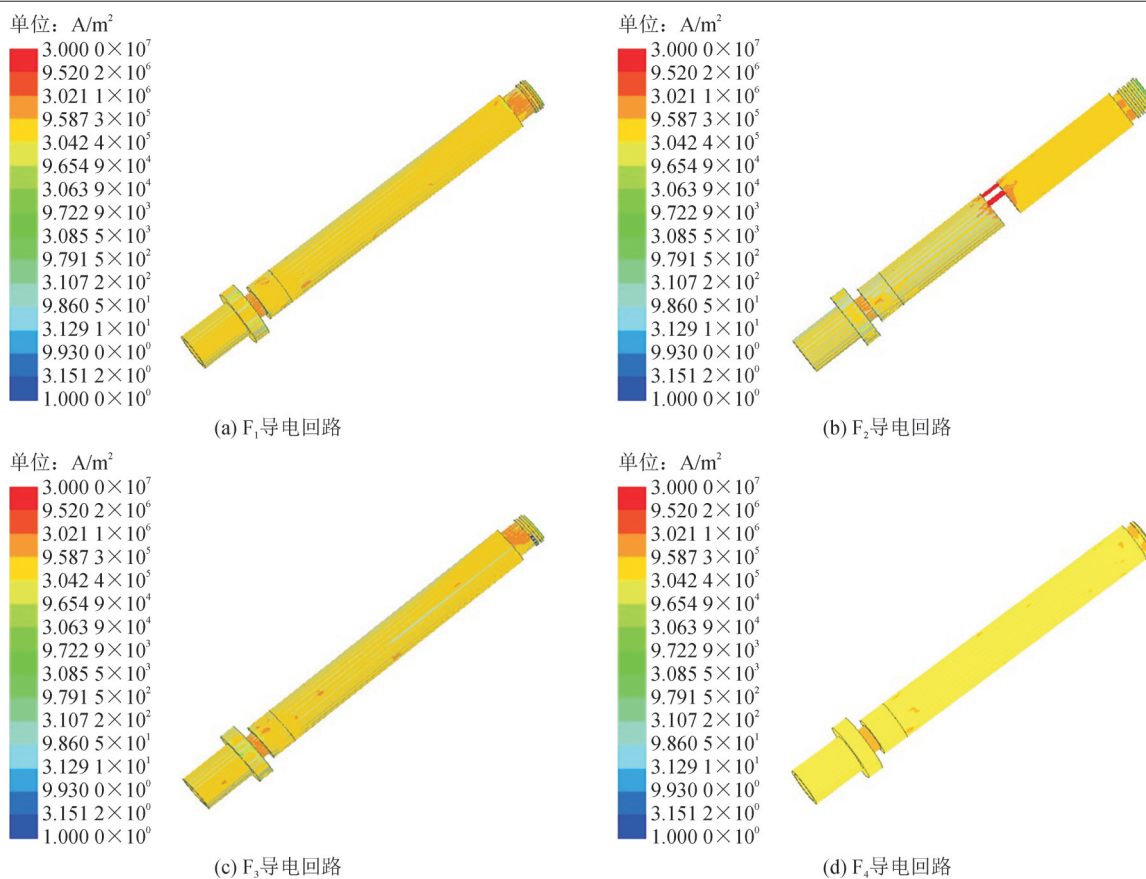


图4 GIS导体电流密度分布(6 000 A)

Fig. 4 Current density distribution of GIS conductor(6 000 A)

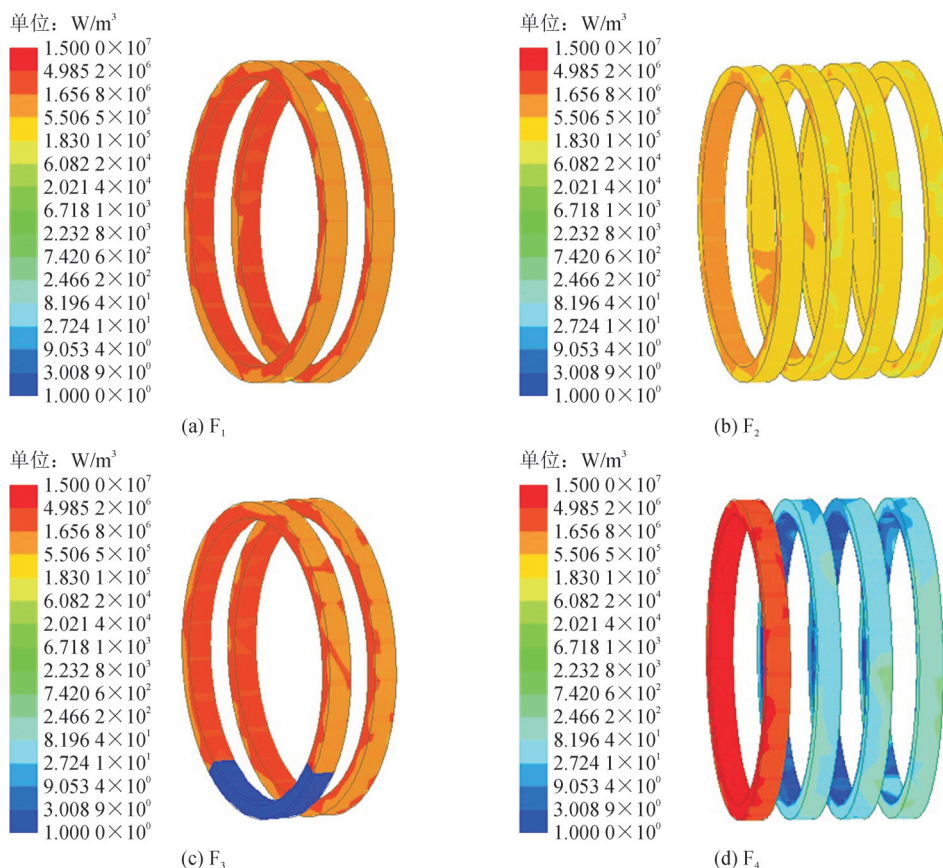


图5 GIS触指损耗分布(6 000 A)

Fig. 5 Power loss distributions on contact elements under 6 000 A current

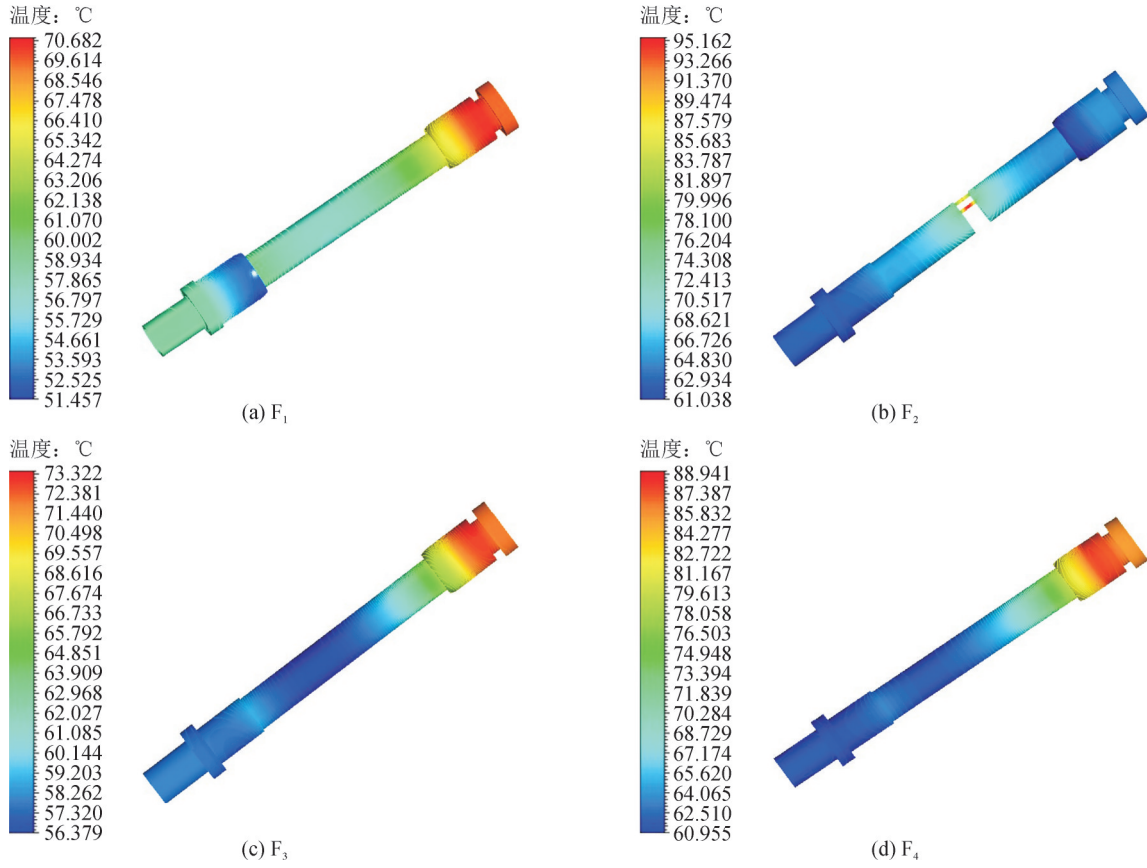


图6 GIS导杆温度场分布

Fig. 6 GIS conductive rod temperature field distribution

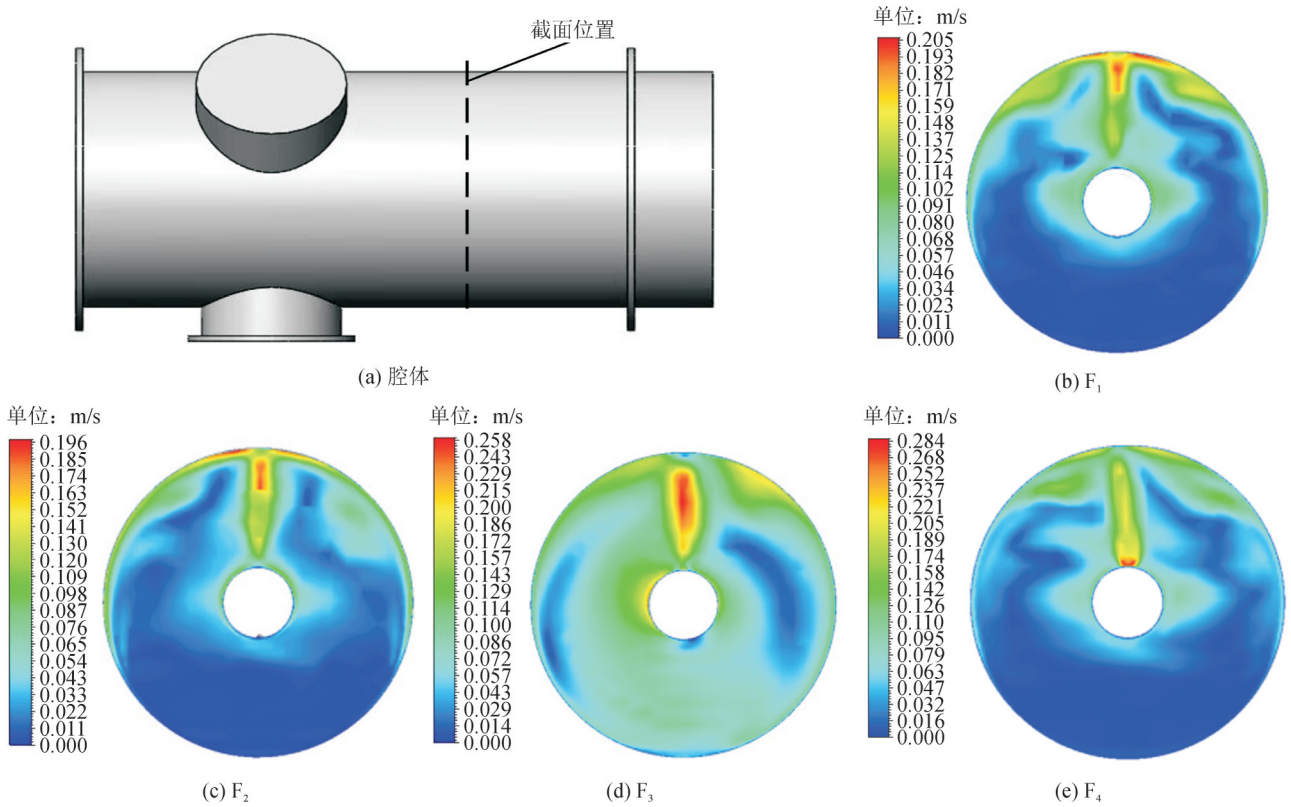
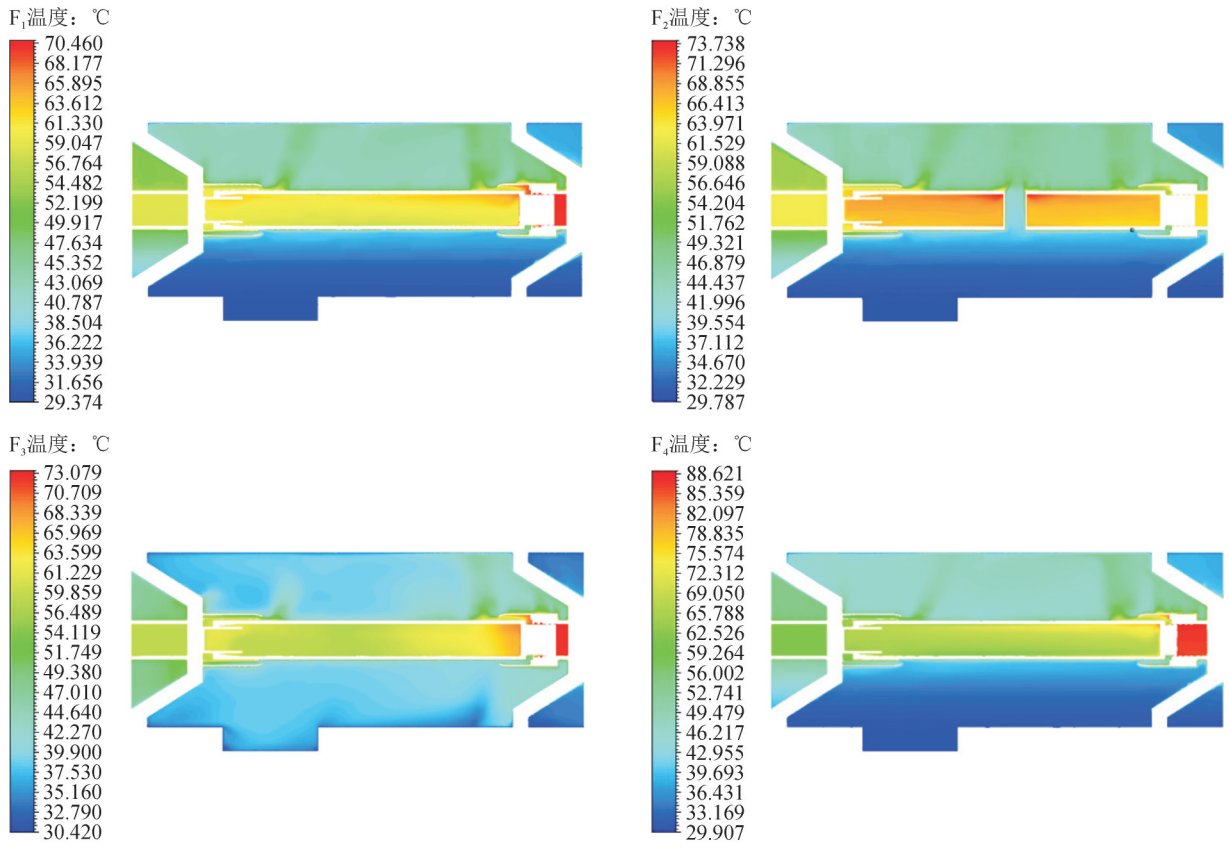
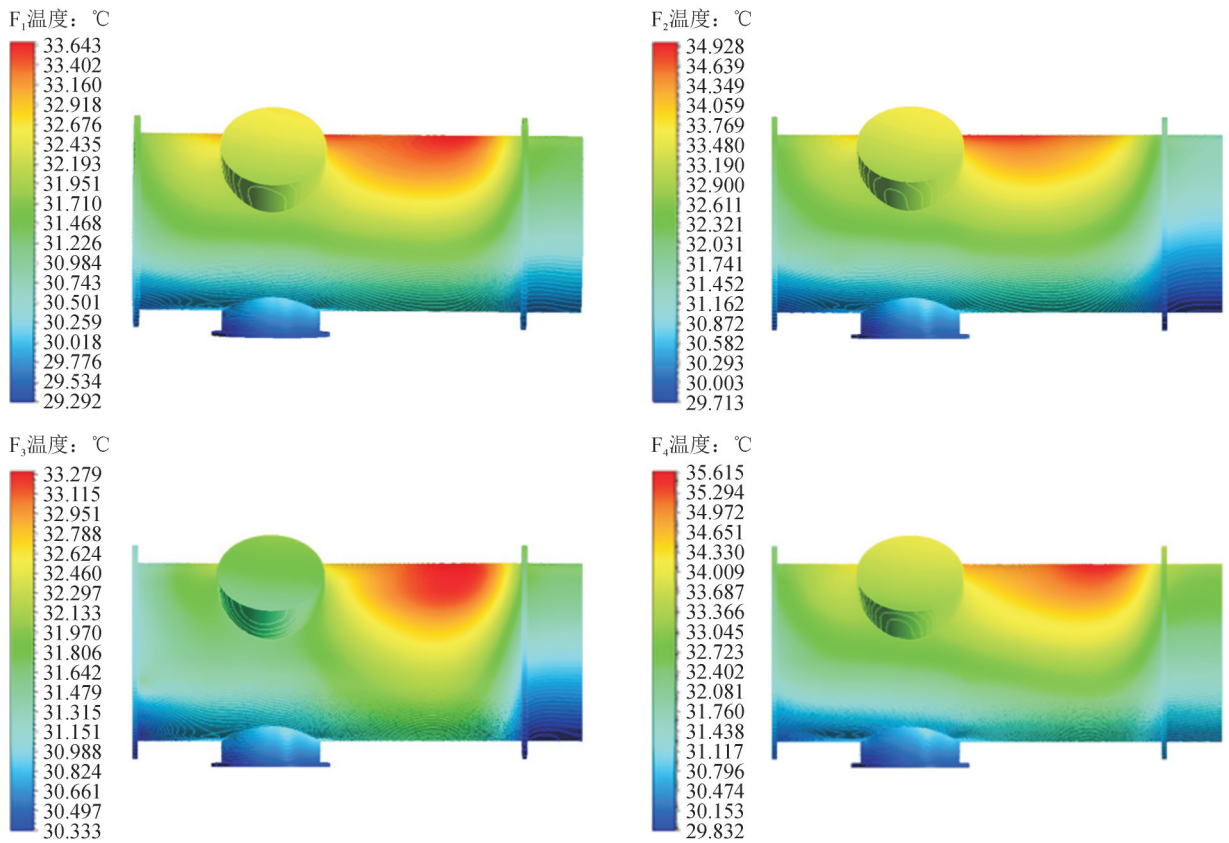


图7 不同缺陷下的GIS流场分布

Fig. 7 GIS flow field distribution under different defects



(a) 内部气体域温度分布



(b) 外壳温度场分布

图8 内部气体与外壳温度场分布

Fig. 8 Distribution of internal gas and shell temperature field

面最高温度达到88.621℃。最高温度均出现在弹簧触头内SF₆气体域,这是由于该处触指发热的原因;F₂导杆内部气体温度大于其他3种工况,因为导杆中部的螺栓电流产生了大量的热量。

外壳温度分布见图8(b),由于气体的流动触头正上方出现了明显的热区,F₄外壳热区温度最高,F₂由于螺栓的缺失产生了更多的焦耳热,因此外壳热

区温度也大于F₃、F₁;F₁、F₃最高温度相近,但可以看出F₃热区范围比F₁广。

3.3 瞬态结构场结果分析

通导体在交变磁场的作用下会受到电磁力的作用,不同缺陷下电动力密度分布矢量图见图9。F₂缺陷状态下螺栓连接处所受电动力较大,这是该处电流线汇集所致。

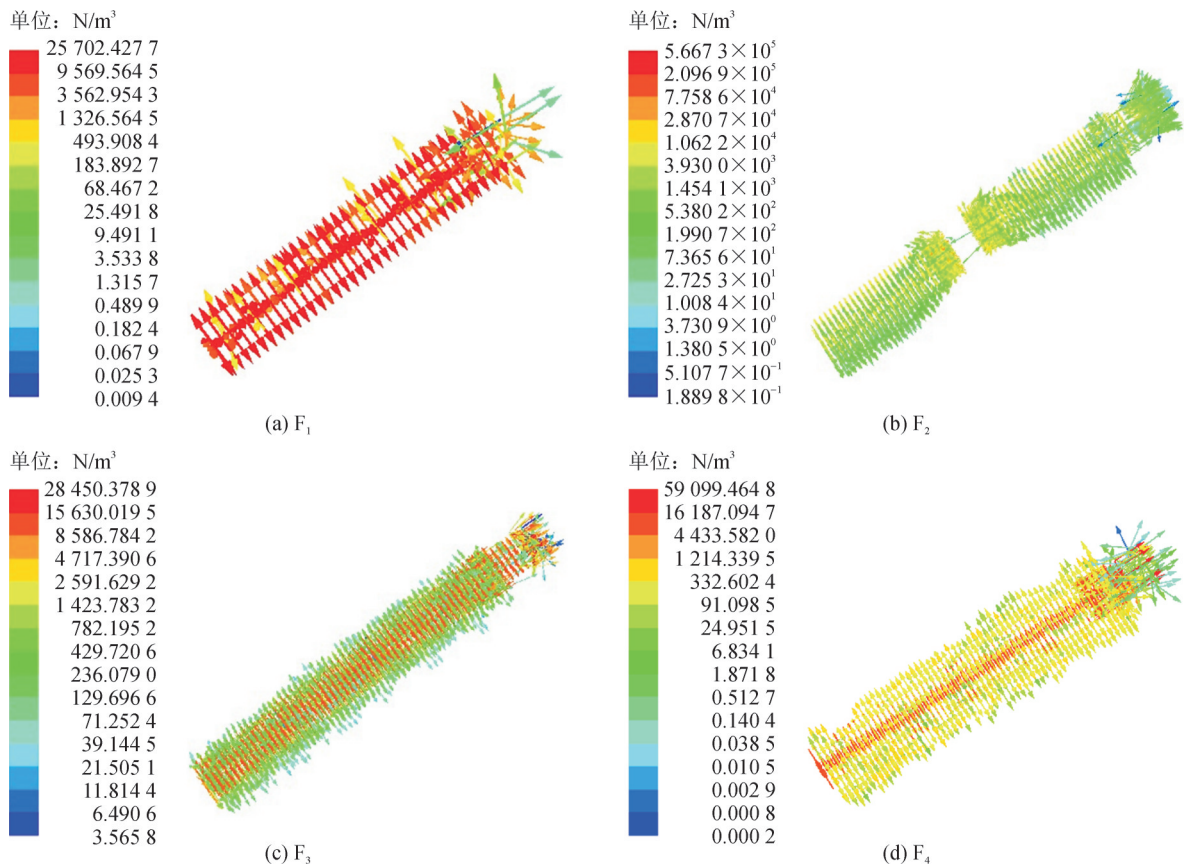


图9 6000 A 电流下不同缺陷电动力云图

Fig. 9 Electrodynamic cloud images of different defects under 6000 A current

选取同一时刻(0.03 s)不同缺陷下外壳的振动加速度分布云图见图10。F₁、F₃、F₄故障下,加速度峰值均位于外壳内侧面,F₂由于螺栓松动导致连接处上下电流不等,因此加速度峰值点出现在外壳的上侧。

4 GIS原型物理试验

4.1 试验方案及缺陷设置

GIS原型物理试验平台见图11。大电流发生装置包含电源、穿心变压器(TC)和调压器(TA),通过热电偶测量GIS内部的温升数据,通过固定在外壳的加速度传感器测量GIS外壳的振动数据,为减小互感器产生的磁场对传感器的影响,加速度测点选择在远

离互感器侧,测量外壳内侧水平方向上的加速度。

在导体、弹簧触头侧安装热电偶测试通流时的温升,为了防止通流时焦耳热带来的高温融化固定胶带,采用耐高温的铁氟龙胶带固定热电偶。测试加速度时需保证传感器与待测表面牢固接触,因此采用钢抱箍的形式来实现传感器与GIS外壳的接触,同时为了避免GIS外壳环流对传感器的干扰,采用陶瓷螺栓对加速度传感器进行固定,从而实现加速度传感器与GIS外壳的电气绝缘。

本次试验的负荷电流为6000 A,分别进行弹簧缺失、螺栓松动、弹簧接触不良、对接深度不足4种接触缺陷下的温升振动试验。参照数值计算模型的缺陷设置方法,去除两个弹簧触指模拟弹簧缺失,在导杆中部的螺栓连接处取出下端4根螺栓模

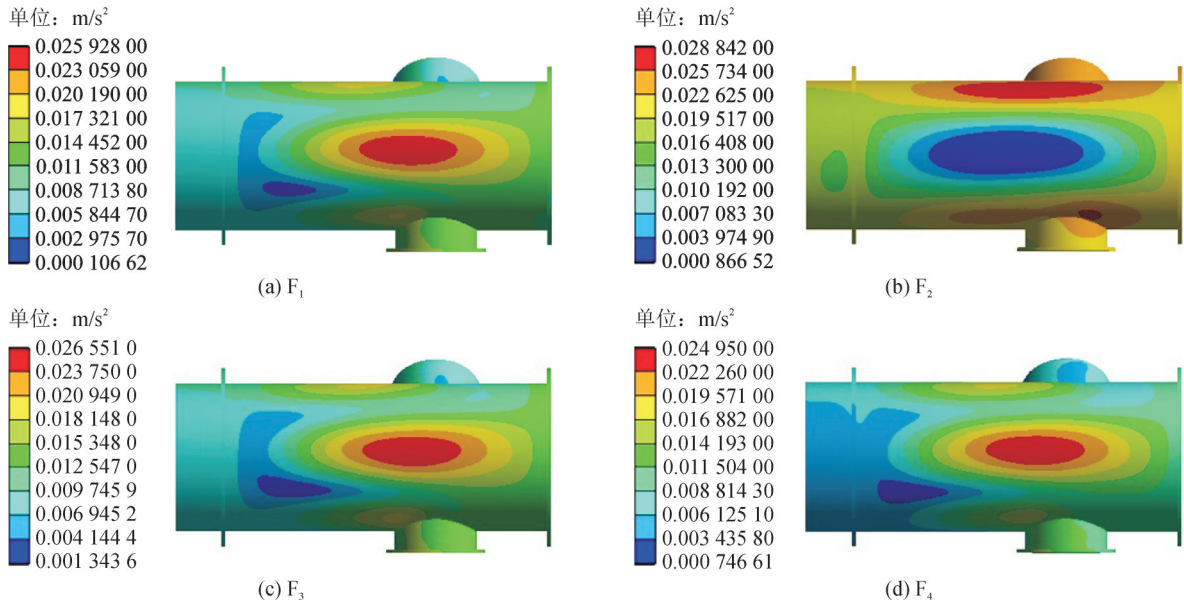


图 10 6 000 A 电流下不同缺陷加速度云图

Fig. 10 Acceleration cloud image of different defects under 6 000 A current

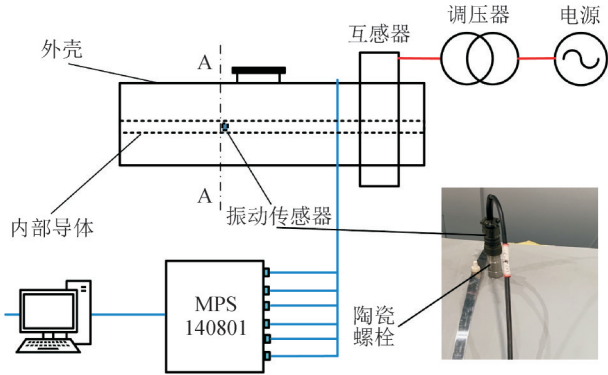


图 11 GIS 原型试验平台接线

Fig. 11 Wiring of GIS prototype test platform

拟螺栓松动, 将不导电的分解物放置在静触头凹槽处模拟弹簧接触不良缺陷, 导杆不完全插入模拟对接深度不足。每种工况通流试验进行时间为 6 h, 每组试验结束后等待罐体冷却至室温, 抽出内部气体后打开腔体, 完成新的缺陷设置后开始下一组试验。

4.2 试验结果与数值计算结果对比

为了进一步明晰 GIS 内部机械缺陷与温升—振动之间的联系并验证多物理场数值计算结果的有效性, 提取触头侧热电偶所测温度与振动传感器所测加速度与数值模型计算结果进行对比。

以 6 000 A 电流为例, 不同机械缺陷下的弹簧触头处测点的温度信息实测值与计算值见表 2。GIS 不同的机械缺陷导致其温度分布存在差异, 测点处温升从高到低分别为: F_4 、 F_3 、 F_2 、 F_1 , 实测数据与仿真数据在不同机械缺陷下的触头温升变化规律

相同, 温升计算值与实测值误差在 7.5% 以内。

表 2 不同缺陷下 GIS 触头温度实测值与计算值对比

Table 2 Comparison between measured and calculated values of GIS contact temperature with different defects

缺陷类型	计算值/ $^{\circ}C$	实测值/ $^{\circ}C$	误差/%
F_1	65.7	61.1	7.5
F_2	65.9	61.5	7.2
F_3	68.9	65.5	5.2
F_4	73.9	70.7	4.5

同样以 6 000 A 试验电流为例, 提取不同缺陷下 GIS 外壳测点处加速度的计算值与实测值, 获取加速度的时域以及频域分布见图 12。

不同工况下的加速度波形基频均为 100 Hz, 各种工况的振动基频幅值从大到小排列依次为 F_3 、 F_1 、 F_4 、 F_2 。将不同缺陷下加速度基频幅值的数值分析结果与实测值进行对比见表 3, 各种缺陷下加速度误差均在 11.2% 以内。

4.3 不同接触缺陷下的发热振动特性分析

F_1 触头测点处温升最低; F_2 由于螺栓处电流发生收缩产生了更多的焦耳热, 温度略高于 F_1 ; F_3 中不导电杂质的存在使得实际导电弹簧触指圈数为 1.75 圈, 相比于 F_1 、 F_2 温度进一步增高; F_4 对接深度的不足导致只有最外侧的一圈触指流过电流, 此时弹簧触指的电流密度在 4 种缺陷中最大, 功率损耗最高, 因此 F_4 触头处温升在 4 种缺陷中最高。

当腔体处于不同缺陷状态时, GIS 电磁力分布以及几何结构均存在差异, 二者共同作用下导致外壳振动特性发生改变。 F_1 、 F_3 、 F_4 几何结构相似, 加速度基频幅值相差较小, 其中 F_3 缺陷状态下触指处

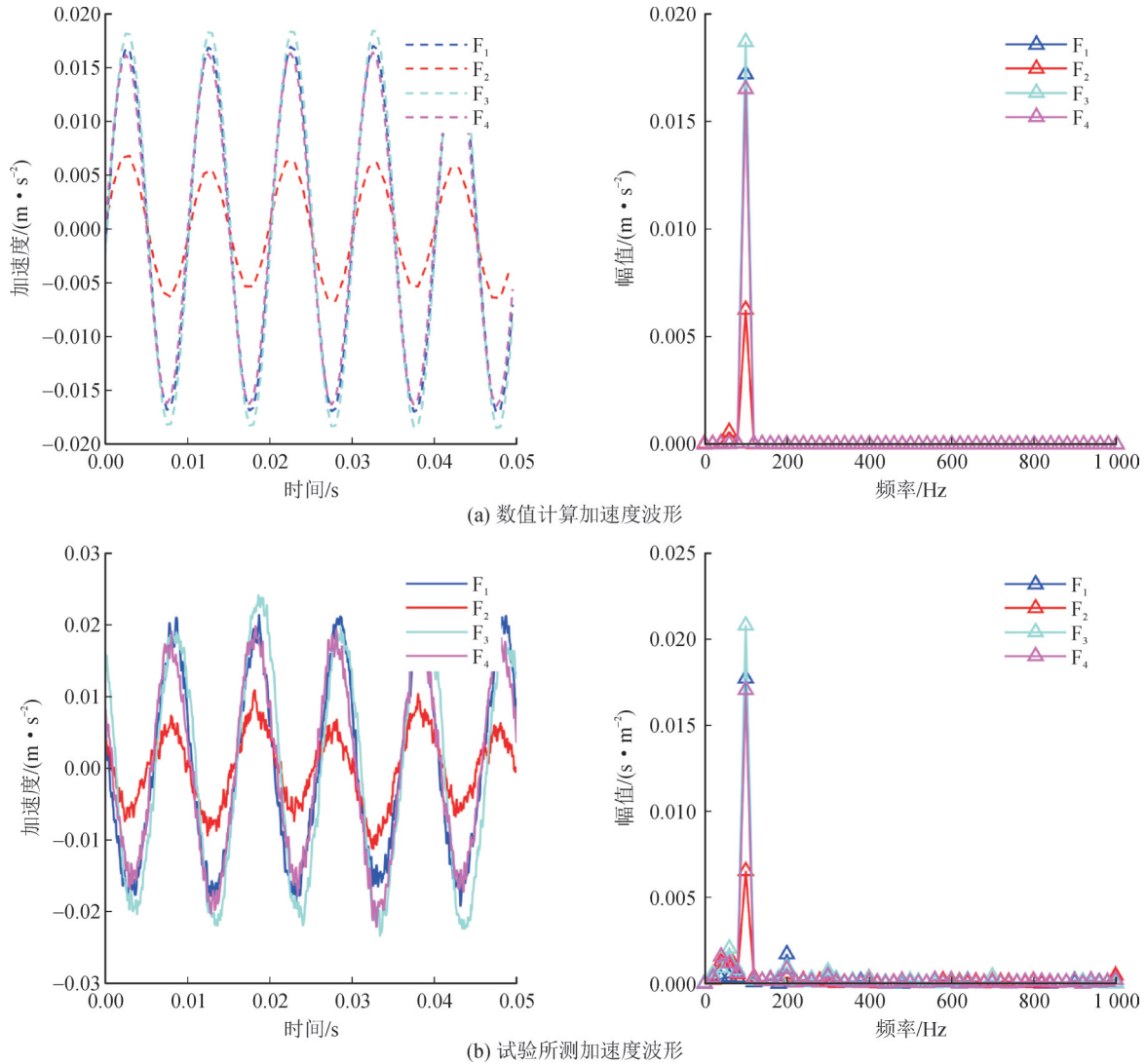


图 12 试验与仿真外壳振动加速度波形

Fig. 12 Vibration acceleration waveform of shell under test and simulation

表 3 不同缺陷下 GIS 加速度实测值与计算值对比

Table 3 Comparison of measured GIS acceleration values and calculated values under different defects

缺陷类型	计算值/(m·s ⁻²)	实测值/(m·s ⁻²)	误差/%
F ₁	0.017 7	0.017 2	2.8
F ₂	0.006 5	0.006 3	3.1
F ₃	0.020 8	0.018 7	11.2
F ₄	0.017 1	0.016 5	3.6

不导电杂质使得触头受力不均,因此振动加速度基频幅值最大;F₂导杆螺栓松动导致连接处连接刚度下降,触头振动信号在传递过程中严重削弱,因此F₂缺陷状态下外壳加速度基频幅值出现了明显的下降。

不同缺陷下外壳温升与振动特征总结见表4。F₁(弹簧缺失)外壳温升与F₃(弹簧接触不良)相近,但F₁外壳加速度基频幅值小于F₃,可以通过加速度基频幅值分辨F₁、F₃;当外壳振动加速度基频幅值出现了明显的下降,则内部导体可能存在F₂(螺栓缺失)

等导致导杆连接刚度下降的缺陷;加速度幅值增大则代表导体可能出现了F₃(弹簧接触不良)等使导杆受力不均的缺陷;F₄(对接深度不足)的外壳温升在4种缺陷中最高,如果外壳出现了较高的温升应优先考虑对接深度不足带来的触头严重接触不良。

表 4 不同缺陷下 GIS 外壳温升与振动特征

Table 4 Temperature rise and vibration characteristics of GIS shell under different defects

故障类型	不同故障下外壳温升与振动特征
F ₁	外壳温升与F ₃ 相近,低于F ₂ 、F ₄ ,加速度基频幅值仅小于F ₃
F ₂	外壳温升大于F ₁ 、F ₃ ,小于F ₄ ,加速度幅值明显小于其他3种缺陷
F ₃	外壳温升与F ₁ 相近,低于F ₂ 、F ₄ ,加速度基频幅值在4种缺陷中最大
F ₄	外壳与触头温升在4种缺陷中最高,加速度基频幅值小于F ₃ 、F ₁ ,大于F ₂

5 结论

文中建立了不同机械缺陷下的GIS发热—振动多物理场耦合数值计算模型, 获取了不同缺陷下GIS的温升—振动分布特性, 搭建了相应的试验平台, 开展不同机械缺陷类型下的通流实验, 得到以下结论:

1) GIS通流后, 内部SF₆气体受金属导体焦耳热的影响, 气体温度上升并产生密度差, 密度较低的气体向上流动造成壳体顶部出现热区, 并且在腔体内壁的顶部向两侧形成回流。由于触头的温升较高, 使得屏蔽罩内气体温度较高流速较快, 而屏蔽罩外的气体温度较低, 导致屏蔽罩出口处形成热流喷射的效果。

2) GIS不同的机械缺陷导致其温度分布存在差异, 触头温度与触头接触状态密切相关, 对接深度不足时出现了最高的温升。

3) 不同的机械缺陷类型会影响GIS通流时电磁力的分布情况, 且机械缺陷会改变GIS本身的几何结构, 在二者共同作用下, 不同缺陷GIS外壳振动特性存在差异, 螺栓缺失时外壳的基频振动出现了明显的下降。

参考文献:

- [1] 徐剑浩. 气体绝缘金属封闭开关设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
XU Jianhao. Gas insulated metal enclosed switchgear[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.
- [2] 韩先才, 孙 昕, 陈海波, 等. 中国特高压交流输电工程技术发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4371-4386.
HAN Xiancai, SUN Xin, CHEN Haibo, et al. The overview of development of UHV AC transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4371-4386.
- [3] 贺 春, 何 金, 朱旭亮, 等. 35 kV C-GIS环氧树脂外锥套管残余应力检测研究[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 38-43.
HE Chun, HE Jin, ZHU Xuliang, et al. Study on residual stress detection of external conical epoxy bushing of 35 kV C-GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 38-43.
- [4] 王旭鹏. GIS设备振动状态检测及隔离开关接触不良缺陷识别方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
WANG Xupeng. Research on GIS equipment vibration state detection and isolation switch contact defect recognition method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [5] 孙国霞, 关向雨, 金向朝, 等. 基于多场耦合计算的气体绝缘开关设备母线接头过热性故障分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3445-3451.
SUN Guoxia, GUAN Xiangyu, JIN Xiangchao, et al. Temperature rise calculation and overheating fault analysis of gas insulated

- switchgear bus connector based on coupled field theory[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3445-3451.
- [6] 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.
- [7] 刘 鹏, 谢 韬, 靳守锋, 等. GIS/GIL滑动触头电连接部件过热故障机制仿真分析[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 2090-2100.
LIU Peng, XIE Tao, JIN Shoufeng, et al. Simulation and analysis of overheating fault mechanism of GIS/GIL sliding contact electrical connection[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2090-2100.
- [8] KIM S W, KIM H H, HAHN S C, et al. Coupled finite-element-analytic technique for prediction of temperature rise in power apparatus[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 921-924.
- [9] 纽春萍, 矫璐璐, 王小华, 等. 基于多场耦合的环保型GIS热特性分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3765-3772.
NIU Chunping, JIAO Lulu, WANG Xiaohua, et al. Thermal characteristics analysis of environmentally friendly GIS based on multi-field coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3765-3772.
- [10] 张森林. GIS接触电阻与温升关系研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
ZHANG Senlin. Research on the relationship between GIS contact resistance and temperature rise[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [11] 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.
- [12] OHSHITA Y, HASHIMOTO A, KUROSAWA Y. A diagnostic technique to detect abnormal conditions of contacts measuring vibrations in metal enclosures of gas insulated switchgear[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(4): 2090-2094.
- [13] 郭碧红, 张汉华. 利用GIS外壳典型振动的频率特性检测内部潜伏性故障[J]. 电网技术, 1989, 13(2): 44-50.
GUO Bihong, ZHANG Hanhua. Prediction of internal faults of GIS by frequency spectrum of typical vibration on the enclosure[J]. Power System Technology, 1989, 13(2): 44-50.
- [14] 钱家骊, 沈 力, 刘卫东, 等. GIS的壳体振动现象及其检测[J]. 高压电器, 1990, 26(6): 3-9.
QIAN Jiali, SHEN Li, LIU Weidong, et al. Shell vibration phenomenon and its detection in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 1990, 26(6): 3-9.
- [15] 丁屹林, 郝 建, 钟 尧, 等. 超高压GIL设备振动模式及振动特性分析研究[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2810-2820.
DING Yilin, HAO Jian, ZHONG Yao, et al. Analysis of vibration modes and vibration characteristics of ultra-high voltage GIL equipment[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2810-2820.
- [16] 钟 尧, 郝 建, 丁屹林, 等. GIS设备典型机械缺陷的非线性振动行为表征参量分析和诊断模型研究[J]. 中国电机工程学

- 报, 2022, 42(19): 7248-7260.
- ZHONG Yao, HAO Jian, DING Yilin, et al. Research on nonlinear vibration behavior characterization parameters and diagnosis model of typical mechanical defects in GIS equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7248-7260.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 蒋玲, 曲全磊, 王志惠, 等. 高温差工况下长母线GIS设备振动特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(11): 144-151.
- JIANG Ling, QU Quanlei, WANG Zhihui, et al. Study on vibration characteristics of long-busbar GIS equipment in large temperature difference conditions[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(11): 144-151.
- [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] 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]. Jiangsu Electrical Engineering, 2022, 41(5): 156-164.
- [22] 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.
- 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.
- [23] WANG Wenxi, HUA Xugang, WANG Xiuyong, et al. Vibration analysis and experimental study of GIS busbar enclosure under electric force[J]. Shock and Vibration, 2022(1): 3055139.
- [24] LIAO Xuejing, SU Xuhui, REN Chengjun, et al. Research on circulating current characteristics and the vibration mechanism on the GIS enclosure[C]//2019 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Guangzhou: IEEE, 2019: 619-622.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 朱晨, 周鸿铃, 乔胜亚, 等. 一起基于声学成像技术的GIS电压互感器异响故障分析[J]. 变压器, 2024, 61(7): 67-72.
- ZHU Chen, ZHOU Hongling, QIAO Shengya, et al. Abnormal noise fault analysis of GIS voltage transformer based on acoustic imaging technology[J]. Transformer, 2024, 61(7): 67-72.
- [29] 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.
- [30] 黎斌. SF₆高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- LI Bin. SF₆ high voltage electrical apparatus design[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- 王扬程(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为GIS状态监测(E-mail: 1085356630@qq.com)。
- 关向雨(1986—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电气设备状态检测与故障诊断、电力设备多场耦合数值仿真技术、电弧与电接触等(通信作者)(E-mail: xiangyuguan1986@163.com)。