

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.07.013

基于组分传输的开关柜触头过热示踪气体扩散特征分析

田大鹏, 李小晖, 孙永发, 杨俊俊, 庞伟生, 郑永燕, 李 亮, 齐晓霞
(国网青海省电力公司海北供电公司, 青海 海晏 812200)

摘要: 采用热敏标签和气体传感器能够为开关柜触头过热故障提供一种准确、可靠和实用的监测手段,有助于及早发现并防止触头过热可能引发的开关柜事故。为确定该监测方法中气体传感器的最优布局,文中基于组分传输理论建立了开关柜手车触头涡流—温度—流体多物理场耦合数值模型。采用导电桥模拟触头接触不良缺陷,通过求解组分传输方程来模拟过热触头表面示踪气体He在开关柜手车室内的扩散过程,从而确定气体传感器的空间布局和响应时间,并通过物理模拟试验验证了所建立的算法和模型的有效性。研究表明:开关柜内任一梅花触头出现过热故障时,热敏标签释放的示踪气体在自然对流作用下在开关柜内扩散,通过在B相触头正上方且距开关柜顶端0.5 m处安装一个气体传感器,即可在短时间内响应开关柜内各梅花触头热敏标签释放的示踪气体的浓度变化并报警。文中工作为基于热敏标签和气体传感器的开关柜手车触头过热故障监测及预警方案提供了依据,有利于开关柜设备和配电网的安全可靠运行。

关键词: 开关柜触头; 过热故障; 示踪气体; 扩散特征; 热敏标签

Analysis of Trace Gas Diffusion Characteristics for Overheating of Switchgear Cabinet Contacts Based on Components Transmission Theory

TIAN Dapeng, LI Xiaohui, SUN Yongfa, YANG Junjun, PANG Weisheng,
ZHENG Yongyan, LI Liang, QI Xiaoxia

(State Grid Qinghai Electric Power Company Haibei Power Supply Company, Qinghai Haiyan 812200, China)

Abstract: The use of thermal labels and gas sensor can provide an accurate, reliable and practical monitoring means for the contact overheating of switchgear cabinet, which helps in early detection and prevents accident of switchgear cabinet due to overheating of contact. For determining the optimal layout of the gas sensor in the monitoring method, the eddy current-temperature-fluid multiple couple numerical model of the contact of the switchgear cabinet is set up based on the component transmission theory in this paper. The conductive bridge is used to simulate the weak contact defect of the contacts, and the diffusion process of trace gas He from the overheating contact surface inside the switch cabinet is simulated by solving the gas species transportation equation, thereby the spatial layout and response time of the gas sensor are defined, and the effectiveness of the established algorithm and model is verified by physical experiment. The study results show that in case of overheating of any tulip contact in the switchgear cabinet, the trace gas released from thermal label spreads in the switchgear cabinet under natural convection process. Installation of a gas sensor directly above the contact of phase B and 0.5 m from top of the switchgear cabinet can respond to the concentration variation of trace gas from each tulip contact and make alarm in a short time. This work done in this paper has provided a basis for the overheating fault monitoring and early warning of the contact of the switchgear cabinet handcart which is based on the thermal labels and gas sensor, which is helpful for safe and reliable operation of switchgear cabinet and power distribution network.

Key words: switchgear cabinet contact; overheating fault; trace gas; diffusion characteristic; heat sensitive label

收稿日期:2026-01-22; 修回日期:2026-04-05

基金项目:国网青海省电力公司科技项目资助(52280520005K)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Qinghai Electric Power Company(52280520005K).

0 引言

中压开关柜是配电网重要的保护和控制设备^[1-5],开关柜手车动静触头装配采用多并联触指设计的梅花触头结构,断路器操作过程中可能存在诸如分合闸不到位、动静触头对中不良及机械松动等异常工况,长期过载可能引起触头抱紧弹簧松弛和触指表面氧化等,使得开关柜手车室内梅花触头接触电阻增大^[6-8]。同时开关柜相对密封的空间使得触头散热条件较差,触头过热故障可能导致放电引起开关柜爆炸事故^[9-10]。因此开展开关柜触头温升监测,对触头过热故障进行预警,避免开关柜因触头过热故障引发的设备损坏和停电事故,有助于降低开关柜触头过热故障发生几率,确保开关柜设备和配电系统的安全运行^[11-12]。

目前,常用的开关柜测温方案主要有红外测温^[13-14]、光纤光栅测温^[15-16]、无线传感器网络系统测温^[17-18],上述方法受高压开关柜封闭结构、柜内空间、运行环境、安装条件、成本等多种因素的制约,其应用受到不同程度的限制。基于热敏标签和气体感知的温升监测是一种新型温升监测方法,其原理是当触头过热时,热敏标签的胶囊破裂并释放信号气体,通过气体传感器检测所扩散的信号气体对触头过热故障进行在线监测。该方法的响应时间、灵敏度与释放信号气体在开关柜内的扩散途径、浓度分布及气体传感器布局等密切相关,为得到采用一个气体传感器就可对三相6个触头不同触头过热故障均能灵敏快速响应并预警,需掌握触头过热下开关柜空间内气体流场分布和信号气体组分传输规律,确定发生过热故障时的气体敏感点即气体传感器最优布局点,属于自然对流下的温升—流体—组分传输耦合问题。

目前关于开关柜的涡流—流体—温度多场耦合数值建模方面工作较为丰富。文[19]计算了触头的发热功率,将发热功率导入到Fluent分析模块从而获取了开关柜的内部母线、动静触头温度场以及气体流场分布情况。文[20]通过把开关柜中的触指与导体之间的接触等效为导电桥模型,并基于涡流—温度场有限元耦合模型获得了不同工况下梅花触头的温度分布。文[21-22]建立开关柜的等比模型,进行了三维温度场—流场的多物理场耦合仿真,通过仿真对开关柜的在接触故障下的温升分布特性进行分析。文[23-24]利用热电耦合模块和流场仿真模块相结合的方式对开关柜进行温度场仿真从而获取开关柜的温度场分布。文[25-26]建立了考

虑不同强制对流条件下的电磁—热—流场多物理场耦合模型,通过设置入口边界条件模拟风机的作用,从而研究了不同强制对流条件下开关柜内温升的变化情况。文[27]利用Comsol软件中的共轭传热模块对高压开关柜的温度场进行仿真求解,并将温度场仿真结果与通过实验获得的红外测温数据相对比,开关柜的整体仿真误差在10%以内,从而验证了仿真模型的准确性。然而,对于开关柜内部过热下气体的组分传输过程研究尚未见报道。

为获取气体传感器在开关柜的空间优化布局,提升气体传感器的灵敏度和响应速度,文中通过几何建模和顺序载荷传递多场耦合算法,对开关柜手车室进行了电磁—流体—温度多物理耦合场模拟,得到开关柜内部触头在过热故障下的稳态温度场分布,并开启组分传输对信号气体的流动情况进行瞬态仿真。根据仿真结果获取了手车室内不同触头过热故障下气体浓度随时间的动态分布,据此确定了气体体积分数较高且响应时间最快的温升敏感点,为气体传感器的优化布局提供依据。物理模拟试验验证了算法和传感器优化布局的有效性,有助于实现对开关柜过热性故障快速、准确及可靠的监测^[28]。

1 基于热敏标签和气体感知的过热故障监测原理

热敏标签又称测温标签,其构造示意图见图1。热敏标签主要由微型胶囊层、背衬层、黏胶层及保护膜等构成。其背衬层粘贴在测温对象表面,通过黏胶层将微型胶囊层固定在背衬层上,然后在微型胶囊层上敷设一层保护膜,即构成热敏标签。此外,热敏标签还设置了示温点,通过示温点颜色变化可显示过热故障发生的温度。过热故障监测原理为:当梅花触头发生过热故障且温度达到报警阈值时,热敏标签中充有示踪气体的微型胶囊破裂并释放信号气体,释放的信号气体在质量分数差和温度差的作用下发生自由扩散。当气体传感器监测到示踪气体且达到气体质量分数报警阈值时发出报警信号。文中以氦气He作为热敏标签示踪气体,相关物性参数见表1。

2 开关柜手车室物理建模

2.1 手车室物理模型与等效

中压开关柜手车室的物理模型见图2,主要由动静梅花触头、支撑底座/轮子和外壳等部件组成。其中,梅花触头静触头由12片梅花触指、套环支架

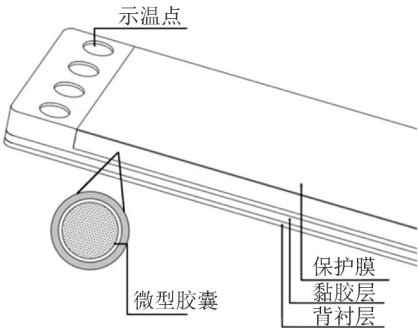


图1 热敏标签构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal sensitivity label structure

表1 氦气气体相关参数

Table 1 Parameters related to helium gas

比热容/ [J·(kg·K) ⁻¹]	粘度/ (MPa·S)	相对分子质量/ (g·mol ⁻¹)	热导率/ [W·(m·K) ⁻¹]
5 238.3	0.018 64	4	0.142 6

和抱紧弹簧构成,触指两片组成一组,套在套环支架上,呈现圆周排布^[29]。为了方便网格的划分,忽略触指上的抱紧弹簧等结构,梅花触头与静触头之间的接触电阻用一个电导率 σ 的导电桥模型进行等效,在建模中动静触头采用铝合金材料,梅花触头采用紫铜材料,开关柜内部的气体介质为空气。

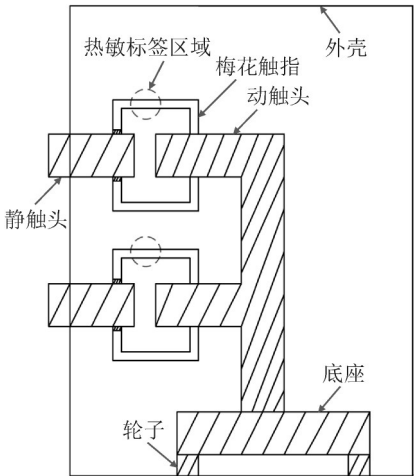


图2 开关柜手车室物理模型

Fig. 2 Physical model of handcart component of switch cabinet

2.2 物理模型网格的划分

采用 Fluent Meshing 对所建立的开关柜模型进行网格划分,为适应较为复杂的开关柜手车室结构,采用多边形网络进行求解域的划分,整体模型网格总单元数约 352 万个。其中 A 相梅花触头的网格划分情况见图 3。

2.3 多场耦合仿真模型的基本假设与边界条件设置

2.3.1 多场耦合仿真模型的基本假设

为简化多物理场耦合计算过程,需对开关柜手

车室的涡流—温度—流体仿真模型做出如下假设:

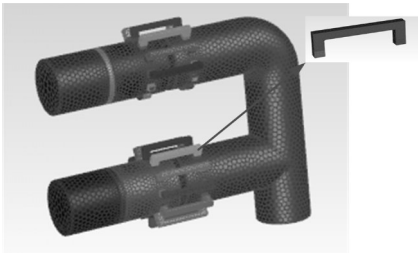


图3 梅花触头网格划分

Fig. 3 The meshing of plum blossom contact

1)涡流场。模型所在的电磁场近似为稳态场,并且忽略位移电流的影响;模型中忽略气体等非导磁材料对电磁场的影响;接触电阻等效为一个电导率 σ 的导电桥结构。

2)温度—流体场。开关柜内气体以及空气的密度与温度相关,但由于气体流速较低,模型使用的气体均视为连续不可压缩牛顿流体,模型辐射模型采用灰体漫射假设,且气体不参与辐射换热;气体的动力粘度以及导热系数均为常数;不考虑高压开关柜外部周围风速对其温度的影响;在笛卡尔坐标系下,重力加速度为y轴负方向。

2.3.2 边界条件设置

开关柜的边界条件设置如下,空气域边界条件:设置空气域边界为模型长度的3倍。涡流场边界条件设置如下:磁场求解域边界为平行边界条件,即磁动势的切向分量在边界处设置为零;静触头与外壳交界面、动触头与底座交界面采用电绝缘边界。温度—流体场的边界条件:外部空气域的6个表面设置为压力处出口,固体域和流体域界面采用连续性边界条件。

3 接触缺陷下触头多场耦合数值建模

文中考虑到流场、温度场之间的耦合要强于电磁场、温度场之间的耦合,即同时计算流场和温度场。文中考虑在多物理场的耦合分析中采用基于有限元法(finite element method, FEM)和有限体积法(finite volume method, FVM)的间接耦合计算方法,采用间接耦合合法将涡流场产生的热源导入到流体—温度场,首先采用 FEM 进行涡流场分析,计算物理模型的焦耳热损耗和涡流损耗,然后将计算的损耗作为热源耦合到流体场,采用 FVM 进行流场—温度场计算,得到物理模型流场和温度场分布,最后加入气体组分传输模型,进行示踪气体扩散仿真分析,计算流程见图 4。

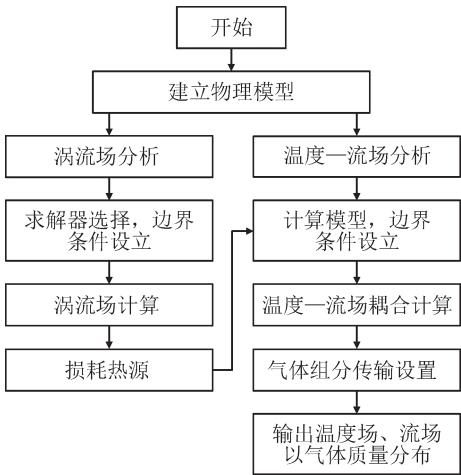


图4 开关柜多物理场间接耦合计算流程图

Fig. 4 Calculation flow chart of indirect coupling of multiple physical fields

4 热敏标签示踪气体组分传输建模

当梅花触头过热故障时,热敏标签释放的示踪气体将在手车室模型内发生扩散直至达到动态平衡。示踪气体的扩散过程主要受到质量分数差和温度差的作用,是一种自然对流条件下的连续性自由扩散,其扩散特性主要与温度、压力、质量分数、物质的性质有关,因而需要建立自然对流下的组分传输模型并在触头过热故障下激活。

4.1 组分传输数学模型

文中流体和组分传输模型采用的是 $k-\varepsilon$ 模型,对于模型而言其满足质量守恒定律、动量守恒定律以及能量守恒定律,对于气体扩散还运用到了组分输送模型。

1)质量守恒定律。梅花触指上设有热敏标签,在导电桥温度达到设定的阈值,热敏标签内微型胶囊破裂就会释放出氦气气体。氦气气体的密度与室内空气密度不同,在扩散过程中其密度不发生变化。其质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

式(1)中: ρ 为流体密度; u, v, w 为 x, y, z 3个方向的速度矢量分量。

2)动量守恒方程。由动量定理,可分别得到 x, y, z 3个方向速度分量的动量方程为

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u U) = \text{div}(\eta \text{grad} u) + S_u - \frac{\partial p}{\partial x} \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v U) = \text{div}(\eta \text{grad} v) + S_v - \frac{\partial p}{\partial y} \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w U) = \text{div}(\eta \text{grad} w) + S_w - \frac{\partial p}{\partial z} \tag{4}$$

式(2)-(4)中, u, v, w 为 x, y, z 3个方向的速度矢量分量; η 为流体的动力粘度; S_u, S_v, S_w 为动量守恒方程的广义源项; p 为流体的压力。

3)能量守恒方程。流体物质的能量守恒,其能量守恒方程式为

$$\frac{\partial \rho T}{\partial t} + \text{div}(\rho v_i T) = \text{div}\left(\frac{\lambda}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T \tag{5}$$

式(5)中: ρ 为流体密度; T 为流体温度; v_i 为流体速度; λ 为流体的导热系数; c_p 为定压比热容; S_T 为粘性耗散项。

4)组分方程。对于一个系统而言,每一种组分都遵守质量守恒定律,由此定律,可得到组分 s 的组分质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho c_s}{\partial t} + \text{div}(\rho u c_s) = \text{div}[D_s \text{grad}(\rho c_s)] + S_s \tag{6}$$

式(6)中: ρ 为密度; c_s 为组分 s 的体积浓度; D_s 为该组分的扩散系数; S_s 是离散源项和自定义源项的产生率,在仿真中,不考虑气体间反应, S_s 为零。

4.2 组分传输模型的设置

为了研究手车室内热敏标签内微型胶囊受热破裂所释放出示踪气体的扩散规律,在流体—温度场求解过程进行组分扩散分析。当流场—温度场稳定时,通过 Fluent 中的组分输送模型来实现对触头热敏标签区域的气体源添加,该模型可用于求解气体输运过程。在组分输送模型设置中,定义示踪气体的组分质量分数为1,并设置气体从触头热敏标签固定处开始组分扩散。

5 仿真结果及分析

开关柜触头结构图见图5,考虑到B、C相触头的空间结构对称性,以开关柜 A_1, A_2, B_1, B_2 处触头的单一过热故障作为分析对象,通过涡流场计算得到开关柜手车室各部件的功率损耗,作为体积热源导入流场—温度场计算,最终可以得到相应的温度、流速和示踪气体组分浓度分布。

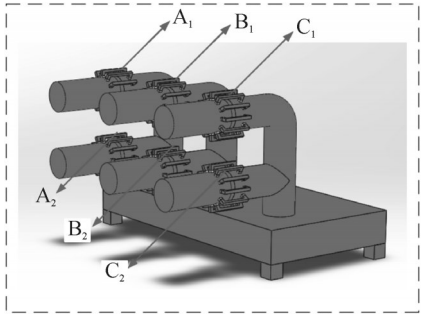


图5 开关柜触头结构图

Fig. 5 Contact structure diagram of switch cabinet

5.1 触头温升计算结果与分析

开关柜不同位置触头发生过热故障时的触头温升分布云图见图6。手车室内部的触头温升是由梅花触指与静触头的接触部位的焦耳热产生的,使得触头的接触部位首先发生过热,接触点对接触部

位周围的流体加热,流体吸收热能后转换为上升的动能在内部流动。当触头接触电阻增大过热时,接触部位温度可达到约400 K,因此,热敏标签内微型胶囊会在高温下破裂而释放氦气气体并在手车室内部发生扩散。

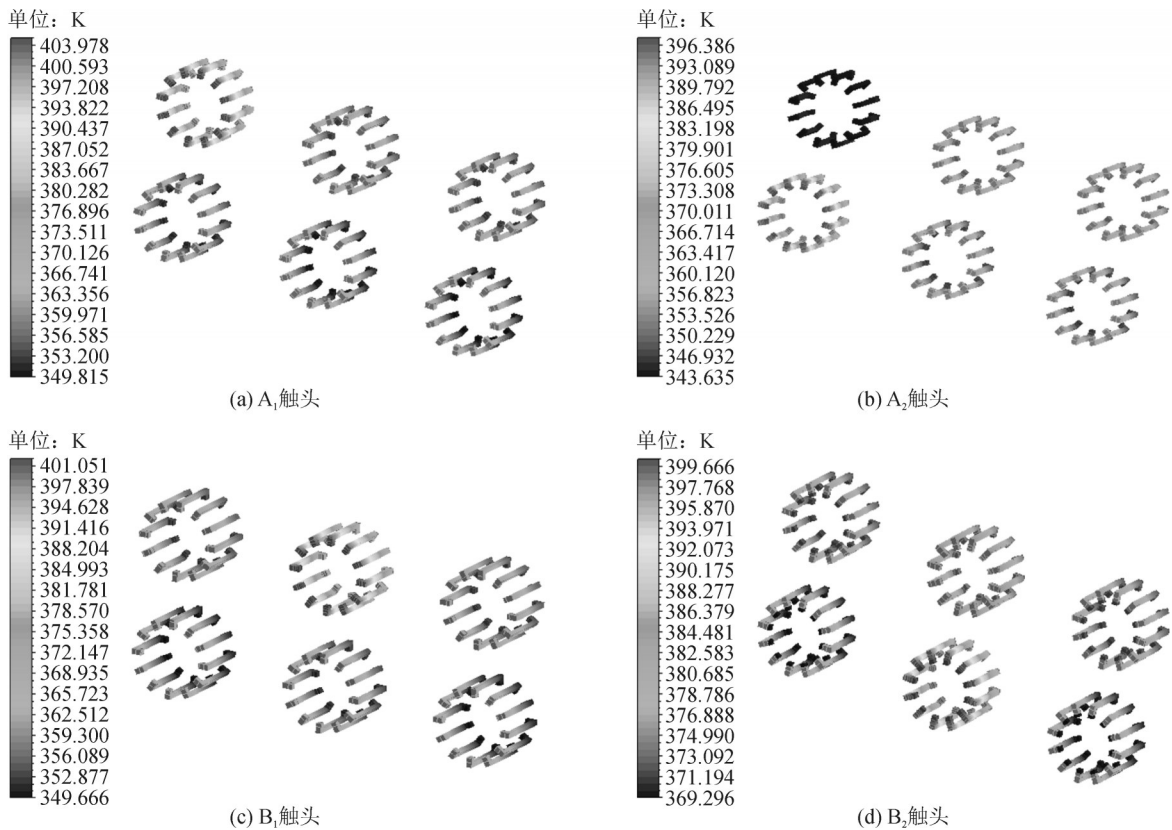


图6 触头温升分布图

Fig. 6 Contact temperature rise distribution

5.2 示踪气体扩散和体积分数分布

A₁、A₂、B₁、B₂单一触头过热故障时,开关柜手车室内示踪气体在不同时刻的气体质量分数云图见图7-10。由图7-10可见,当A₁、B₁、B₂单一触头过热故障且温度达到预警值时,微型胶囊破裂释放示踪气体并开始在手车室内部流动。随着温度升高,热气流带动示踪气体在自然对流作用下向上流动抵达开关柜体内壁面,随后一部分气流沿着

内壁面流动扩散至整个上壁面,经过上壁面后再向下扩散。由图8可见,当A₂处发生触头单一过热故障时,受到B相触头温升的影响,气流方向发生变化,示踪气体不再沿竖直方向移动,而是沿B相触头竖直的方向流动。由于A相和C相具有空间对称性,触头C₁、C₂发生过热故障时的气体质量分布分别与触头A₁、A₂发生过热故障时的气体质量分布相同。

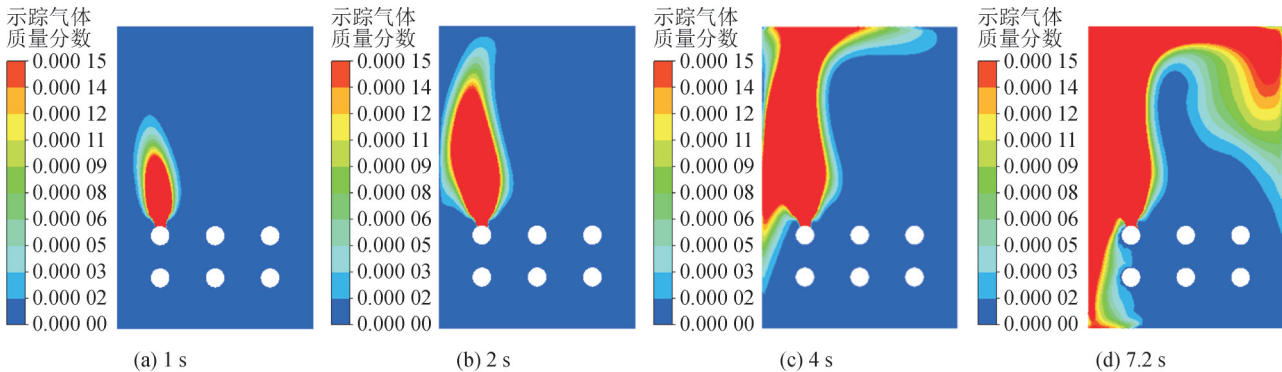


图7 不同时刻的气体质量分布(A₁)

Fig. 7 Gas mass distribution at different times(A₁)

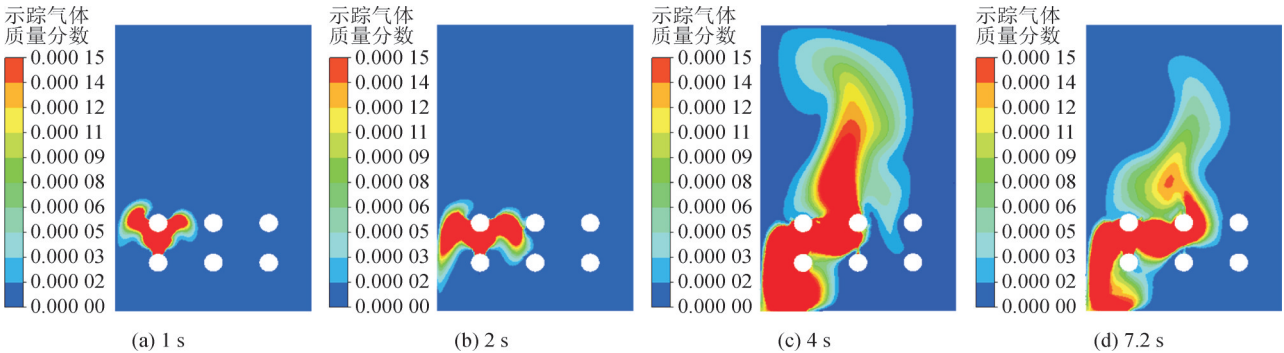


图8 不同时刻的气体质量分布(A₂)

Fig. 8 Gas mass distribution at different times(A₂)

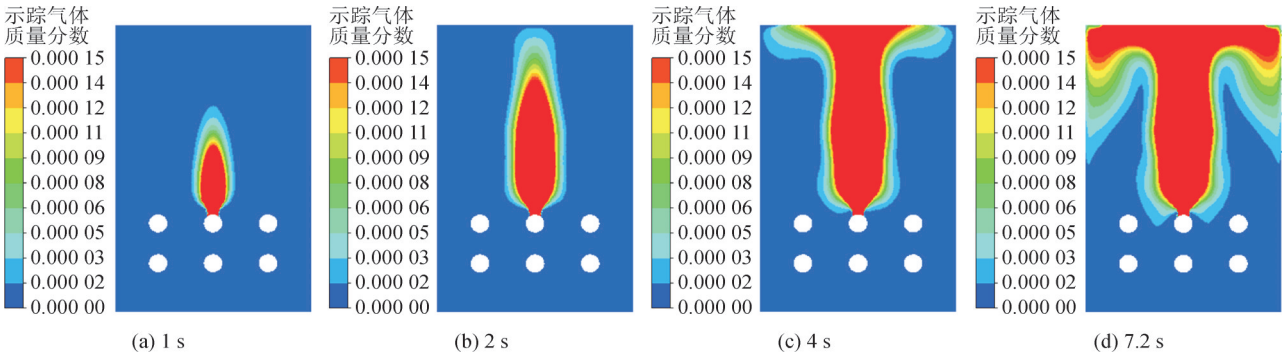


图9 不同时刻的气体质量分布(B₁)

Fig. 9 Gas mass distribution at different times(B₁)

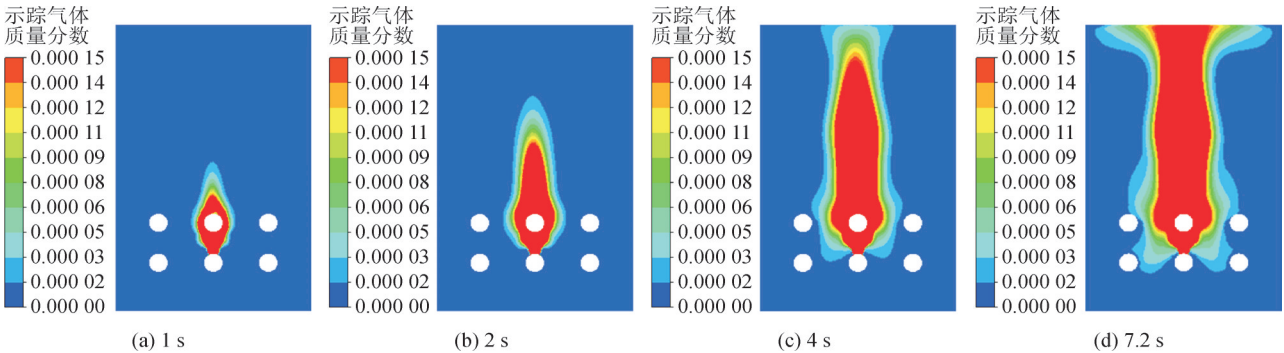


图10 不同时刻的气体质量分布(B₂)

Fig. 10 Gas mass distribution at different times(B₂)

5.3 气体传感器测点布局

通过分析图7-10所示气体质量分布云图可确定气体传感器最优空间布局。当B₁、B₂触头发生过热故障时,示踪气体向B相触头(B₁、B₂)的正上方流动;当A₁(C₁)触头发生过热故障时,示踪气体向正上方流动,经过上壁面后再向下扩散,在B相触头正上方可检测到示踪气体He。当A₂(C₂)触头发生过热故障时,示踪气体经B相触头向正上方扩散,在B相正上方处也可检测到示踪气体He。因此,将气体传感器布置在B相触头正上方且距离开关柜顶端0.5 m处,即可保证触头A₁、A₂、B₁、B₂、C₁、C₂之任一触头发生过热故障时,气体传感器均可快速、灵敏地对示踪气体做出响应,在较短时间内发现触头过热故障并报警。

6 气体传感器测点布局试验验证

为验证上述气体传感器测点及响应时间的仿真结果,文中进行了物理模拟试验。试验方案见图11。图11(a)中,在断路器梅花触头上缠绕加热电阻丝来模拟梅花触头过热故障。同时,在加热电阻丝表面安装热电偶温度传感器以监测梅花触头温度。图11(b)中,热敏贴片粘贴在梅花触头表面。气体传感器按仿真得到的测试点布局,示踪气体的报警浓度设定值为150 μL/L。由于试验过程中无法观察热敏贴片胶囊动作(破裂)情况,因此,文中将响应时间定义为温度达到报警阈值至气体传感器动作的时间。

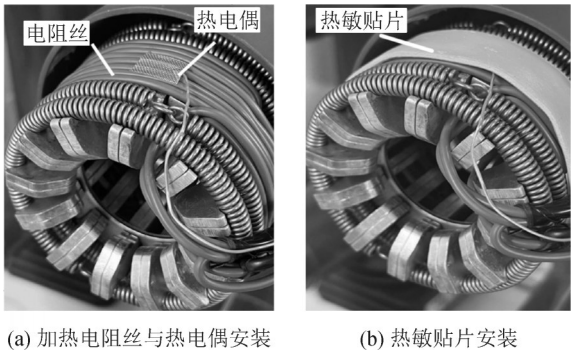


图 11 开关柜触头过热试验接线图

Fig. 11 Wiring diagram of switch cabinet contact overheating test

试验过程中首先将试验用高压断路器推入试验柜体内;接通电源对电阻丝加热,通过热电偶温度测试仪监测梅花触头温度变化;当梅花触头温度达到报警阈值时,开始计时;当气体传感器动作时,则停止计时并计算响应时间。气体传感器响应时间仿真与试验结果对比见表2。

表 2 气体传感器响应时间仿真与试验结果对比

Table 2 Comparison of gas sensor response time between simulation and test results

触头	响应时间(仿真)/s	响应时间(试验)/s
A ₁	7.5	12.82
A ₂	6.9	10.60
B ₁	3.8	5.12
B ₂	5.4	8.58

由表2可见,根据仿真结果布置的气体传感器测点,触头A₁、A₂、B₁、B₂发生过热性故障时气体传感器均动作并报警。各触头过热故障的响应时间依次为 $t_{B1} < t_{B2} < t_{A2} < t_{A1}$,其规律与仿真结果一致。结合仿真结果分析如下:A₁过热故障时,示踪气体He需要经上壁面向下扩散,才能被传感器检测到,气体扩散路径最长;A₂过热故障时,受到B相触头温升的影响,示踪气体He流动方向不再垂直向上,而是经过A₁、B₁再向上扩散,气体扩散路径相对A₁过热故障略短;B₁过热故障时,示踪气体He直接向上流动,气体扩散路径最短;B₂过热故障时,示踪气体He经B₁向上流动,气体扩散路径相对B₁过热故障略长。此外,仿真与试验得到的响应时间存在差异,其主要原因是:仿真试验所施加的示踪气体He的气体量热敏贴片所有胶囊破裂释放的气体量,而模拟过热故障试验时,热敏贴片胶囊并未全部破裂,因此,所释放的示踪气体He的气体量相对较少,导致传感器测试点处示踪气体He的浓度达到报警浓度阈值的时间增长而导致响应时间增长。试验结果表明,按气体传感器测点布局仿真结果布局气体

传感器,利用一个气体传感器就能够实现对任一触头过热故障的实时可靠报警,验证了文中算法和传感器优化布局的有效性。

7 结语

文中建立了涡流—温度—流体多场耦合数值模型。通过仿真获取了开关柜触头在过热故障条件下的触头温度场分布。在此基础上,设置组分传输模型,获取了不同故障条件下示踪气体He的质量分数分布,并获得了气体传感器的最优空间布局。由仿真结果确定了气体传感器布局方案,即在B相触头正上方且距离开关柜顶端0.5 m处安装一个气体传感器对开关柜进行过热故障监测。通过物理模拟试验对气体传感器布局方案进行了对比验证。结果表明,采用该传感器布局方案能可靠地实现对任一触头过热故障的实时报警,且均有较好的灵敏度和响应速度。

文中的研究成果为基于热敏标签和气体传感器的开关柜过热故障监测方案设施提供了理论和技术参考,对于开关柜的安全运行具有现实意义。

参考文献:

[1] 陈 涛. 试论智能配电网中智能中压开关柜关键技术设计[J]. 电工技术, 2019(6):28-30.
Chen Tao. Discussion on key technology design of intelligent medium voltage switchgear in smart distribution network[J]. Electric Engineering, 2019(6):28-30.

[2] 李 美,王小华,苏海博,等. 中压开关柜状态在线监测装置电磁兼容性研究[J]. 高压电器, 2011, 47(4):69-74.
Li Mei, Wang Xiaohua, Su Haibo, et al. Research of electromagnetic compatibility of condition on-line monitoring device for medium voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4):69-74.

[3] 王 浩,白 张,吴劲松,等. 高海拔地区中压充气式开关柜温升特性研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(11):88-94.
Wang Hao, Bai Zhang, Wu Jinsong, et al. Research on temperature rise characteristics of medium voltage gas-filled switchgear in high altitude areas[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(11):88-94.

[4] 王 真,刘子全,路永玲,等. 基于RFID传感器和深度学习的开关柜故障诊断研究[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(2):179-185.
Wang Zhen, Liu Ziquan, Lu Yongling, et al. Fault detection in switchgear based on RFID sensors and deep learning[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2):179-185.

[5] 盛连军,周超杰,陈 侃,等. 基于I-GWO改进RF的开关柜状态诊断算法[J]. 智慧电力, 2025, 53(1):38-44.
Sheng Lianjun, Zhou Chaojie, Chen Kan, et al. Switchgear condition diagnosis algorithm based on I-GWO improved random

- forest[J]. Smart Power, 2025, 53(1):38-44.
- [6] 阮江军,黎 鹏,黄道春,等.中压开关柜内部短路燃弧热-力效应研究综述[J].高电压技术,2018,44(10):3340-3351.
Ruan Jiangjun, Li Peng, Huang Daochun, et al. Review on thermal-mechanical effects research of MV switchgear due to internal short circuit arcing[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3340-3351.
- [7] 张立峰,黄梓亮,张泽展.电力高压开关柜绝缘事故原因分析及对策[J].通信电源技术,2018,35(4):249-250.
Zhang Lifeng, Huang Ziliang, Zhang Zezhan. Analysis on the causes and countermeasures of insulation accident in power voltage switchgear[J]. Telecom Power Technologies, 2018, 35(4): 249-250.
- [8] 何应晖.智能配电网中智能中压开关柜关键技术设计研究[J].通信电源技术,2019,36(6):82-83.
He Yinghui. Research on key technology design of intelligent medium voltage switchgear in intelligent distribution network[J]. Telecom Power Technologies, 2019, 36(6):82-83.
- [9] 徐敏捷.中压开关柜内组件温度场分析及监测系统开发[D].重庆:重庆大学,2014.
Xu Minjie. Temperature field analysis of components in medium voltage switch cabinet and development of its monitoring system [D]. Chongqing:Chongqing University, 2014.
- [10] 王小华,苏 彪,荣命哲,等.中压开关柜在线监测装置的研制[J].高压电器,2009,45(3):52-55.
Wang Xiaohua, Su Biao, Rong Mingzhe, et al. Development of on-line monitoring system of medium voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(3):52-55.
- [11] 孙尚鹏,相中华,吴 强,等.弧触头烧蚀程度对灭弧室内短路开断过程多物理场的影响[J].电测与仪表,2024,61(6):103-110.
Sun Shangpeng, Xiang Zhonghua, Wu Qiang, et al. Influence of arc contact ablation degree on multi-physical field of short-circuit breaking process in arc extinguishing chamber[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6):103-110.
- [12] 刘昱轩,徐志钏,胡伟涛,等.基于多特征量的GIS触头温度预测方法[J].电力工程技术,2024,43(1):212-219.
Liu Yuxuan, Xu Zhiniu, Hu Weitao, et al. GIS contact temperature prediction method based on multiple parameters[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(1):212-219.
- [13] 姜亚军,张 杰,张丽娟,等.基于红外传感技术的开关柜在线测温系统设计[J].电工电气,2020(1):45-48.
Jiang Yajun, Zhang Jie, Zhang Lijuan, et al. Design of on-line temperature measuring system for switchgear based on infrared sensing technology[J]. Electrotechnics Electric, 2020(1):45-48.
- [14] 李 铜,李江波,王书平,等.高压开关柜内设备红外测温技术示范研究[J].现代工业经济和信息化,2016,6(15):39-40.
Li Tong, Li Jiangbo, Wang Shuping, et al. High voltage switchgear cabinet equipment Infrared temperature measurement technique demonstration[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2016, 6(15):39-40.
- [15] 廖志军.基于光纤光栅的高压开关柜温度在线监测技术研究[D].西安:西安工程大学,2015.
Liao Zhijun. Study of temperature on-line monitoring technique for high voltage switchgear based on fiber Bragg grating[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2015.
- [16] 张梦莹.基于光纤光栅电力开关设备关键位置温度在线监测与仿真研究[D].河北:河北地质大学,2022.
Zhang Mengying. Research on on-line monitoring and simulation of temperature at key locations of power switch equipment based on fiber Bragg grating[D]. Hebei:Hebei GEO University, 2022.
- [17] 陈新岗,赵 唐,余 兵,等.基于声表面波和ZigBee的高压开关柜电缆室温度监测[J].高压电器,2018,54(8):48-54.
Chen Xingang, Zhao Tang, Yu Bing, et al. High voltage switch cabinet cable chamber temperature monitoring based on acoustic surface wave and ZigBee[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 48-54.
- [18] 张青山,段建东,叶 兵,等.基于ZigBee的开关柜触头温度在线监测预警系统[J].高压电器,2015,51(4):29-35.
Zhang Qingshan, Duan Jiandong, Ye Bing, et al. Online temperature monitoring/warning system based on ZigBee for switchgear contacts[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4):29-35.
- [19] 刘四军,韩 威,张海星,等.高压开关柜温度流体场仿真及散热优化研究[J].高压电器,2020,56(10):63-69.
Liu Sijun, Han Wei, Zhang Haixing, et al. Research on temperature fluid field simulation and heat dissipation optimization of high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10):63-69.
- [20] 冀立鹏,甄 利,刘宏亮,等.基于磁场-温度场耦合的高压开关柜触头有限元数值计算[J].中国测试,2022,48(6):8-12.
Ji Lipeng, Zhen Li, Liu Hongliang, et al. Finite element numerical calculation of butt contact in high voltage switchgear based on magnetic-temperature field coupling[J]. China Measurement & Testing Technology, 2022, 48(6):8-12.
- [21] 彭 涛,唐炳南,赵莉华,等.中压开关柜典型接触故障下的温升特性研究[J].高电压技术,2021,47(12):4331-4340.
Peng Tao, Tang Bingnan, Zhao Lihua, et al. Study on the temperature rise characteristics of medium-voltage switchgear under typical contact failure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12):4331-4340.
- [22] 苏 毅,谢植飏,李 路,等.基于多物理场耦合的空气型开关柜发热故障温升仿真分析[J].高压电器,2020,56(11):1-7.
Su Yi, Xie Zhibiao, Li Lu, et al. Temperature rise simulation analysis of air switchgear heating fault based on coupling of multiphysical field[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(11):1-7.
- [23] Wang Lijun, Zheng Wensong, Wang Lihua, et al. Electromagnetic-thermal-flow field coupling simulation of 12 kV medium-voltage switchgear[J]. IEEE Transactions on Components Packaging and Manufacturing Technology, 2016, 6(8):1208-1220.
- [24] Wang Lihua, Wang Lijun, Li Xiaolin, et al. Multi physical field simulation of medium voltage switchgear and optimal design[C]//27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), 2016:1-4.
- [25] 王增彬,王 睿,姚聪伟,等.强制对流散热对开关柜温升影响规律的仿真研究[J].高电压技术,2021,47(3):1064-1074.
Wang Zengbin, Wang Rui, Yao Congwei, et al. Simulation study on the influence of forced convection heat dissipation on

temperature rise of switchgear[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3):1064-1074.

[26] 杨永通, 彭彦卿, 袁传镇, 等. 基于有限元分析的开关柜温度场研究与优化[J]. 高压电器, 2019, 55(10):81-86.

Yang Yongtong, Peng Yanqing, Yuan Chuanzhen, et al. Research and optimization of temperature rise of switch cabinet based on finite element analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 81-86.

[27] 邓长征, 杨楠, 邓海峰, 等. 基于Comsol的10 kV高压开关柜温度场仿真分析[J]. 电工材料, 2020(1):32-36.

Deng Changzheng, Yang Nan, Deng Haifeng, et al. Simulation and analysis of temperature field of 10 kV high voltage switchgear based on Comsol[J]. Electrical Engineering Materials, 2020(1): 32-36.

[28] 冯子毅, 马恒瑞, 王红霞, 等. 基于多类型传感器的变电站火灾预警技术研究综述[J]. 智慧电力, 2024, 52(10):103-111.

Feng Ziyi, Ma Hengrui, Wang Hongxia, et al. A research review of substation fire prevention and control technology based multi-type sensors[J]. Smart Power, 2024, 52(10):103-111.

[29] 马建鹏, 桑嘉茅, 张国梁. 手车断路器梅花触头部位发热原因与对策[J]. 电子技术, 2021, 50(3):182-183.

Ma Jianpeng, Sang Jiaqi, Zhang Guoliang. Causes and countermeasures of heating at plum blossom contact of handcart circuit breaker[J]. Electronic Technology, 2021, 50(3):182-183.

田大鹏(1973—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化(E-mail:13997236979@163.com)。

李小晖(1984—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护(E-mail:286415319@qq.com)。

孙永发(1984—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化(通信作者)(E-mail:83717101@qq.com)。

杨俊俊(1987—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护(E-mail:137854685@qq.com)。

庞伟生(1975—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化(E-mail:pwsheng2712@what.sgcc.com.cn)。

郑永燕(1984—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化(E-mail:13619705896@139.com)。

李亮(1985—), 男, 本工师, 主要研究方向为输变电设备巡检(E-mail:hb13619705657@163.com)。

齐晓霞(1988—), 女, 本工师, 主要研究方向为电力调度(E-mail:7943153879@qq.com)。

(上接第 128 页)

研究[J]. 高压电器, 2015, 51(3):8-14.

Niu Chunping, Qiang Ruochen, Rong Mingzhe, et al. Simulation and experimental research on temperature rise of spring contact in steady state[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3):8-14.

[23] 吴晓文, 舒乃秋, 李洪涛, 等. 基于流体多组分传输的气体绝缘母线温度场数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33):141-147.

Wu Xiaowen, Shu Naiqiu, Li Hongtao, et al. Thermal field calculation and analysis of gas insulated busbars based on fluid multiple species transport[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(33):141-147.

[24] 刘超, 阮江军, 黄道春, 等. 考虑接触电阻下的电缆接头热点温度[J]. 高电压技术, 2016, 42(11):3634-3640.

Liu Chao, Ruan Jiangjun, Huang Daochun, et al. Hot spot temperature of cable joint considering contact resistance[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11):3634-3640.

[25] 吴吉, 王增彬, 吕鸿, 等. 考虑气流场影响的GIS温升计算与实验研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(3):815-823.

Wu Ji, Wang Zengbin, Lyu Hong, et al. Calculation of GIS temperature rise considering effect of gas flow and experimental study[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3):815-823.

[26] 尹雨晨, 雷辉, 曾一兵, 等. 绝缘高辐射散热涂层配方设计及性能研究[J]. 涂料工业, 2016, 46(7):7-11.

Yin Yuchen, Lei Hui, Zeng Yibing, et al. Formulation design and properties of insulating coating with high radiation and heat dissipation[J]. Paint & Coatings Industry, 2016, 46(7):7-11.

[27] 陈德敏, 王昭, 许浩文, 等. 电力开关柜散热涂层的制备及其性能研究[J]. 涂料工业, 2023, 53(5):35-41.

Chen Demin, Wang Zhao, Xu Haowen, et al. Preparation and performance study of heat dissipation coatings for power switchgear[J]. Paint & Coatings Industry, 2023, 53(5):35-41.

郑毅(1989—), 女, 高级工程师, 长期从事电力电子设备的设计研究(通信作者)(E-mail:zhengy_br@nrec.com)。