第 52 卷 第 4 期：1969-1982 高电压技术 Vol.52, No.4: 1969-1982
2026 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251275

基于超声-气体融合感算的空气开关柜放电故障诊断方法

李浩源[1]，刘　洋[2]，朱　颖[1]，褚继峰[1]，杨爱军[1]，荣命哲[1]
（1. 电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049;
2. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院，西安 710100）

摘　要：空气开关柜在中低压配电领域用量巨大，然而绝缘故障却层出不穷。为实现空气开关柜绝缘故障的有效监测，提出了一种基于超声与气体传感器信号融合感知的放电故障监测方法。首先，设计了集成超声与气体传感器的放电故障监测装置，搭建了空气放电故障模拟平台，进行了放电分解气体在放电腔室内的扩散仿真，提出了放电监测装置部署于开关柜下部的最佳部署策略；然后，将放电监测装置部署于上、中、下 3 种位置，进行电晕放电、电弧放电、绝缘子表面污秽放电 3 种故障类型的放电实验，获取放电监测装置响应信号，对仿真结果进行验证；最后，提出基于滑动时间窗的超声信号预警方法，构建基于分类与回归树(classification and regression tree，CART)的放电故障识别算法，完成感算一体放电监测装置设计，实现对多种故障类型的精准分类，识别准确率高达 96.67%，该研究有望在空气开关柜放电监测领域开展大规模应用。

关键词：空气放电；气体分解物；超声信号；感算一体；决策树

Discharge Fault Diagnosis Method for Air-insulated Switchgear Based on Integrated Ultrasonic-gas Sensing and Computing

LI Haoyuan[1], LIU Yang[2], ZHU Ying[1], CHU Jifeng[1], YANG Aijun[1], RONG Mingzhe[1]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710100, China)

Abstract：Air switchgear is widely used in medium- and low-voltage power distribution systems; however, insulation failures occur frequently. To address this issue, this study proposes a discharge fault monitoring method based on the fusion of ultrasonic and gas sensor signals. A discharge monitoring device integrating ultrasonic and gas sensors was developed, along with an air discharge fault simulation platform. The diffusion behavior of discharge-generated gases within the discharge chamber was simulated, and an optimal deployment strategy was determined, namely ,deploying the monitoring device at the bottom of the switchgear. Subsequently, the device was installed at the upper, middle, and lower positions to conduct experiments on following three types of discharge faults: corona discharge, arc discharge, and surface contamination discharge on insulators. Sensor response signals were collected to validate the simulation results. Furthermore, an early warning method based on a sliding time window for ultrasonic signals was introduced, and a discharge fault identification algorithm using a classification and regression tree (CART) was developed.A discharge monitoring device for sensing and computing was realized, achieving accurate classification of multiple fault types with a recognition accuracy of 96.67%. This research holds strong potential for large-scale application in the field of discharge monitoring for air switchgear.

Key words：air discharge; gas decomposition products; ultrasonic signals; integrated sensing and computing; decision tree

基金资助项目：智能电网重大专项(2030)资助(2026ZD0813800)；西安市科学技术协会青年人才托举计划(0959202513030)；电工材料电气绝缘全国重点实验室(EIPE23111；EIPE23408；EIPE23314)。
Project supported by Smart Grid-National Science and Technology Major Project(2026ZD0813800), Youth Talent Support Program of Xi'an Association for Science and Technology (0959202513030), State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (EIPE23111, EIPE23408, EIPE23314).

0 引言

开关柜是配网系统中的核心设备，承担着控制和保护输电线路、维护电力系统安全稳定运行的重要功能[1]。尽管开关柜运行稳定性较好，然而在其长期运行过程中，内部绝缘难免出现劣化，一旦发生绝缘故障，就会对电力系统的稳定运行造成影响，甚至引发重大安全事故[2-3]。根据我国电力系统运行统计数据，开关柜由于绝缘故障引发的故障数占故障总数的 34.8%，成为占比最高的故障类型[4]。开关柜放电故障是绝缘故障的早期征兆，因此，监测开关柜内的放电现象能够提前发现潜在的绝缘问题，避免严重故障发生。

对开关柜内放电故障进行实时监测，已经成为开关柜故障预防的关键手段。然而，传统的监测手段如脉冲电流法存在难以在线监测的问题，不能实现对放电故障的及时报警，而目前特高频法的干扰辨识能力和抗干扰水平远不能适应现场复杂的电磁干扰环境，存在很大的误报警、漏报警风险[5-6]。气体组分分析法作为有效的放电在线监测手段，近年来受到广泛关注[7-10]。空气开关柜发生放电故障时，开关柜中的绝缘空气会发生分解，产生放电特征气体且放电故障类型决定了特征气体组分与含量[11]。因此基于气体组分分析的放电监测方法成为研究热点。周磊等对空气放电分解产物进行分析，发现放电稳定分解产物包括 NO_2 和 CO，在金属突出物缺陷下，产生的 CO 和 NO_2 组分产量随着放电时间的变大均呈现先线性后饱和的增长规律，随着放电量的增加均呈现线性增长趋势[12]。张振宇等选用 CO、NO_2 和 NO 作为特征分解气体，建立 BP 神经网络空气柜放电故障识别模型，验证了气体组分分析法实现放电故障识别的可行性[13]。然而，上述方法都依赖于大型精密气体分析设备，成本高且难以满足电力设备在线监测的需求[14-15]。Qipeng Tan 等将电化学气体传感器应用于空气放电故障监测领域，通过气体传感信号获得特征气体浓度，建立随机森林故障识别算法[16]。王琼苑等构造了半导体气体传感器微型阵列，获得了不同放电故障下的差异性响应信号，并结合机器学习算法实现放电故障识别，准确率高达 84.88%[17]。然而上述研究均依赖于使用气泵将分解气体通入传感器来获取响应，对放电故障在线监测研究相对欠缺。此外，放电分解物从产生到扩散需要一定的过程，因此气体组分分析法响应速度较慢。

当空气柜内放电故障发生时会产生电流脉冲，电流脉冲使得绝缘空气局部瞬间受热膨胀然后迅速冷却收缩，介质的上述变化过程形成超声波[18-21]。因此，超声监测也是电力设备放电监测的有效手段。但是超声放电监测方法抗干扰能力弱，容易受到外部环境及设备运行过程中的声音干扰，造成对开关柜放电故障的误报警。孙振华等采集了开关柜内放电信号以及非放电信号，提出了一种基于频谱分析的超声放电监测抗干扰方法[22]。Xuejun Chen 等提出了一种基于 GMC 和小波变换的局部放电超声信号去噪方法，实现了在噪声环境下对放电信号的提取[23]。宫成明等采用奇异值结合 CEEMDAN 阈值去噪方法，在去除噪声的同时保留了信号完整度[24]。但是由于声音干扰信号的复杂性和随机性，上述方法难以完全避免超声放电监测的误报警问题。

超声监测虽然具备响应速度快的优势，但易受环境噪声干扰，有较大的误报警风险；气体组分分析法能反映丰富的放电信息，具有较强的抗干扰能力，但存在响应滞后的问题。面对空气开关柜复杂的运行环境，使用单一超声和气体组分分析的方法难以满足放电监测实时性和可靠性的需求。因此，本文提出了一种超声-气体融合的空气开关柜放电故障诊断方案，设计了感算一体放电故障监测装置，搭建了放电故障模拟平台，进行放电腔体内的气体扩散仿真，探究放电故障监测装置在开关柜内的最佳部署位置。将放电监测装置部署于放电腔体中，进行了不同放电类型、不同电压等级的 15 种空气放电实验，根据装置在不同部署位置响应信号差异性，对仿真结果进行验证。最后，提出了气体超声融合诊断的放电监测方案，突出了超声放电监测实时性的优势，利用气体组分法的强抗干扰能力避免了误报警情况，采用 CART 决策树故障诊断算法，实现了对不同放电故障的有效识别。

1 实验设计

1.1 放电故障监测装置研发

1.1.1 双参量感知模块构建

空气放电特征气体选用稳定分解产物 NO_2 和 CO。针对 NO_2 气体，本团队曾基于 In_2O_3 材料合成 NO_2 气体传感器[25]，制备流程如图 1(a)所示。针对 CO 气体，电化学器件对 CO 具有较好的选择性和灵敏度，因此选用电化学 CO 气体传感器[26]，构建

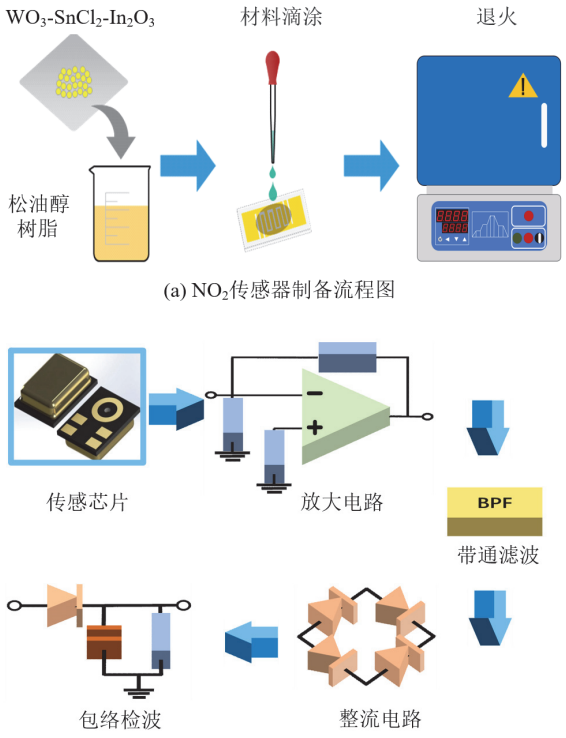
电化学气体传感器与半导体气体传感器的多模态气体传感阵列。目前超声传感器主要包括接触式[27]和空气传导式[28]。本文选用空气传导式传感模块，该类型传感器具有更高的监测灵敏度，并且不需要和开关柜直接接触，安全性更好[29]。超声传感模块原理如图 1(b)所示，包括超声传感器、放大电路、带通滤波电路、整流电路以及包络检波电路。超声传感器将放电产生的超声信号转换为电信号，由于超声信号比较微弱，因此首先需要将电信号进行信号放大。为减小环境噪声干扰，使用通带为放电声波频段的带通滤波电路滤除环境噪声。模拟信号采集电路只能接收单极性信号，因此设计整流电路进行信号转换[30]。包络检波电路用于提取超声信号的幅值轮廓信息。

1.1.2　双参量放电监测装置

双参量放电监测装置如图 2 所示，多模态气体传感阵列以及超声模块将气体和超声信号转换为模拟信号，模数转换模块将模拟信号转换成数字信号后传递给单片机，单片机将信号通过 RS485 信号的模式向外传输。同时加入电磁兼容(electromagnetic compatibility，EMC)保护电路设计，保证装置能够在开关柜复杂的电磁环境中正常运行。装置通过磁吸安装于开关柜内壁上，安装快速方便，不影响空气开关柜的正常运行。

1.2　空气放电故障模拟平台

空气放电故障模拟平台如图 3 所示，主要包括调压器、隔离滤波器、变压器、保护电阻、放电腔室和放电电极。调压器输出可调 220 V 交流电，经隔离滤波器处理后输入升压变压器得到放电电压。高压侧加入保护电阻来限制放电腔体中因电极间隙击穿形成的短路电流幅值。在放电腔室中设置放电电极，电极的一端接入高压，另一端经开关柜外壳接地。通过更换不同的放电电极模拟不同类型放电故障，而调节施加电压的幅值可实现对放电严重程度的控制[31]。本文模拟了开关柜内的金属突出物缺陷和绝缘子表面污秽缺陷，金属突出物缺陷是由开关柜设备中尖角或毛刺等金属杂质引起的，使用针板电极来模拟[32]。绝缘子表面污秽缺陷是由固体绝缘材料表面附着的金属微粒引起的，使用板电极加上带铜颗粒的环氧树脂来模拟，环氧树脂与 2 个板电极表面相接，使用环氧树脂胶粘贴铜颗粒在环氧树脂的侧面来模拟金属颗粒污秽[33]。使用不同放电电极模拟不同严重程度、不同类型的放电故障。

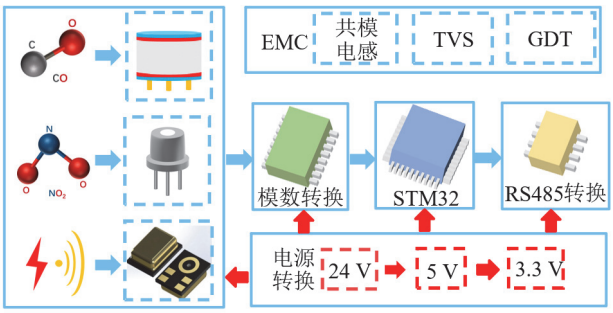


(a) NO_2传感器制备流程图

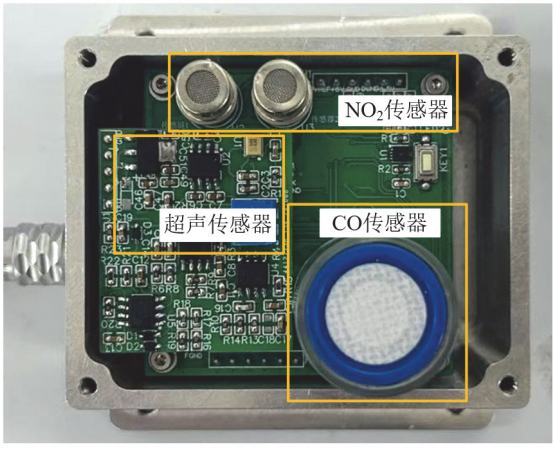
(b) 超声传感模块原理图

图 1　双参量感知模块

Fig.1　Dual-parameter sensing module



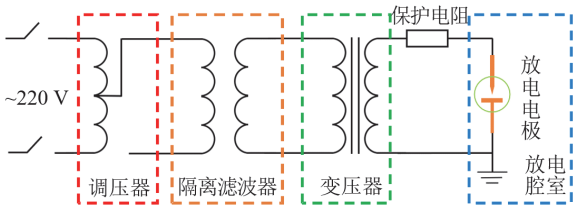
(a) 双参量放电监测装置原理图



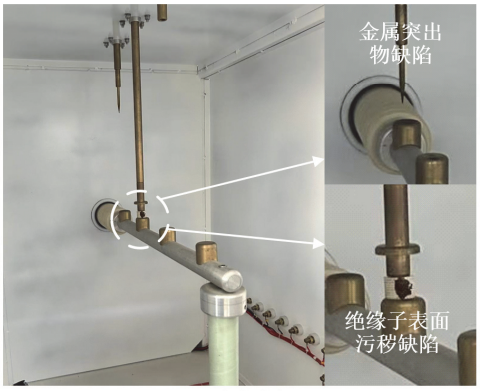
(b) 双参量放电监测装置实物图

图 2　双参量放电监测装置

Fig.2　Dual-parameter discharge monitoring device



(a) 空气放电故障模拟平台原理图



(b) 放电电极

图 3 空气放电故障模拟平台

Fig.3 Platform for air discharge fault simulation

为记录放电电压和电流波形，分别将高压探头(Tektronix P6015A)和电流探头(CT6701)与示波器相连，得到电晕、电弧和绝缘子污秽放电的放电波形如图 4 所示。电晕放电使用针板电极，此时的针板电极间隙未击穿，由于针板产生的不均匀电场发生电晕放电，电压呈工频变化，电流尖刺集中在电压负半周期峰值处。电弧放电过程中针板电极间隙击穿，电压幅值低，但是由于电流未超过继电器保护阈值，放电过程一直持续，电流呈工频变化，峰-峰值约为 500 mA。绝缘子表面污秽放电电压呈工频变化，电流尖刺集中在电压上升阶段。

为探究放电监测装置在开关柜中最佳部署位置，在放电腔体内设置上部、中部和下部 3 个部署点位，上部部署点位与放电电极的水平距离为 300 mm，垂直方向位于放电电极上方 390 mm 处；中部部署点位与放电电极的水平距离为 300 mm，垂直方向与放电电极齐平；下部部署点位与放电电极的水平距离为 300 mm，垂直方向位于放电电极下方 390 mm 处。实验条件设置如表 1 所示，电晕放电设置 10 kV 和 13 kV 这 2 种放电电压，放电时间设置为 20 min，电弧放电击穿电压为 15 kV，电弧放电发生后立即手动降压直至停止放电，绝缘子表面污秽放电设置 5.5 kV 和 6 kV 这 2 种放电电压，放电时间设置为 20 min。

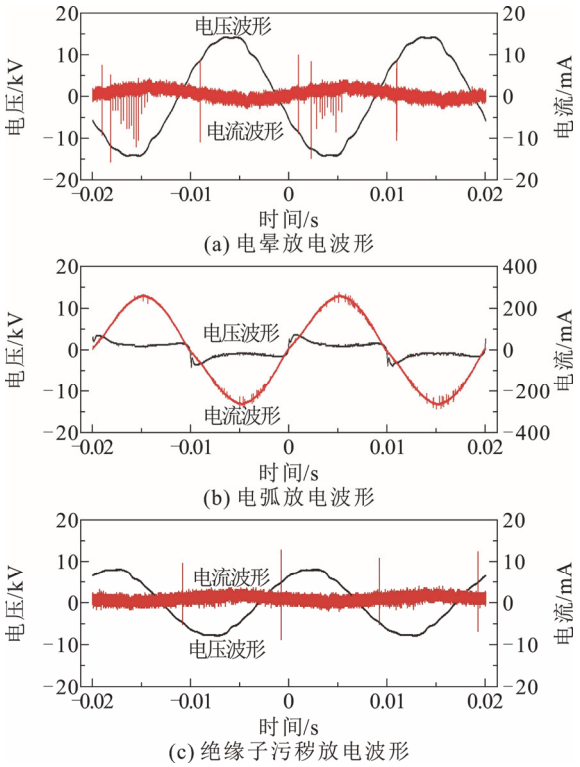


图 4 空气放电电压电流波形

Fig.4 Voltage and current waveforms of air discharge

表 1 实验条件设置

Table 1 Experimental conditions setup

放电类型	放电电压/kV	部署位置
电晕放电	13	下
	10	下
	13	中
	10	中
	13	上
	10	上
电弧放电	15	下
	15	中
	15	上
绝缘子污秽放电	5.5	下
	6	下
	5.5	中
	6	中
	5.5	上
	6	上

2 分解气体扩散仿真

2.1 开关柜扩散仿真模型建立

为给传感器的部署位置提供参考，本文根据放电腔室结构，采用 Ansys 仿真软件建立了如图 5 所示的仿真模型。模型长 996 mm，宽 600 mm，高 800 mm，内部设有针板电极。为了保证仿真与实验结果的一致性，将产气源设置在针尖处。采用组分

运输模型，气体为不可压缩气体，近壁面处理使用标准壁面函数，壁面边界条件设置为无滑移，重力加速度设置为 9.81 m/s^2。求解方案采用 simple，对于空间离散方案，梯度计算采用基于网格单元的最小二乘法，离散格式采用 1 阶迎风格式。仿真步长设置定步长，值为 0.1 s，步数为 600 步，即仿真 0~1 min 的气体扩散情况。产气源形状设置为圆形，半径为 0.05 mm，入口边界条件设置为速度入口，则产气源的产气体积流量为：

$$Q_1 = Sv = \pi r^2 v \tag{1}$$

式中：Q_1 为产气源的产气体积流量；S 为产气源的面积；v 为产气速度；r 为产气源半径。

针对产气速度设置，在参考文献[16]中，放电腔体的尺寸约为 800 mm×500 mm×1 200 mm，在针板放电条件下，放电时间为 18 h，腔体中的分解气体体积分数约为 20×10^{-6}，参考文献中的平均产气体积流量为：

$$Q_2 = \frac{CV}{t} = \frac{20\times10^{-6}\times800\times500\times1\,200\,\text{mm}^3}{18\times3\,600\,\text{s}} = 0.148\ \text{mm}^3/\text{s} \tag{2}$$

式中：Q_2 为参考文献中的平均产气体积流量；C 为分解气体体积分数；V 为放电腔体体积；t 为放电时间。

参考文献[16]中放电电压为 8 kV，本文设置针板电极电晕放电电压为 10 kV 和 13 kV，而产气速率随放电电压的增加会成倍增加[34]。因此，本文仿真中设置分解气体产气速度为 0.1 m/s 和 0.5 m/s，对应的产气体积流量分别为 0.785 mm^3/s 和 3.925 mm^3/s。

2.2　仿真结果分析

图 6 显示了 NO_2 的产气速度为 0.1 m/s 和 0.5 m/s 时 NO_2 在开关柜内的扩散情况。当产气速度为 0.1 m/s 时，NO_2 在 60 s 内尚未下沉，开关柜中部的气体浓度最高；当产气速度为 0.5 m/s 时，NO_2 气体在产气源处下沉，开关柜下部的气体浓度最高。这一现象的原因在于，产气源位于开关柜的中部位置，NO_2 的相对分子质量大于空气，当 NO_2 气体足够多时，受到重力的影响，该气体会下沉；当 NO_2 气体较少时，NO_2 的扩散更多的受开关柜中空气流动的影响，因而在开关柜的中部聚集。

图 7 显示了 CO 的产气速度为 0.1 m/s 和 0.5 m/s 时 CO 在开关柜内的扩散情况。由于 CO 的相对分子质量与空气的平均相对分子质量基本相同，2 种产气速度下，CO 均从放电点向四周均匀扩散。在

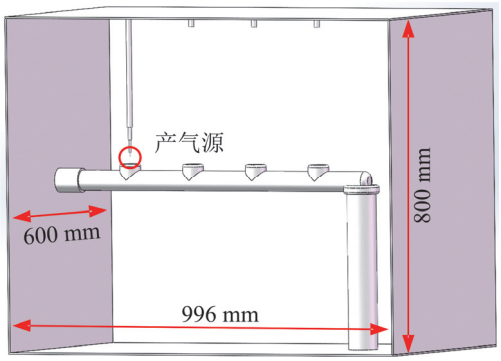
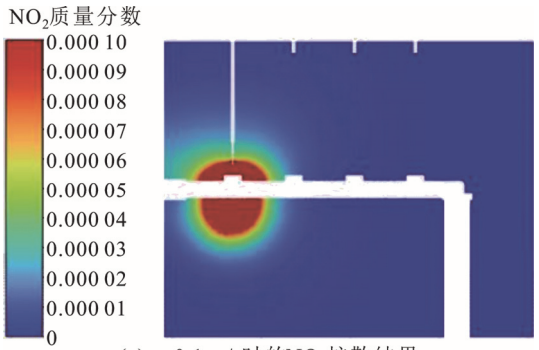
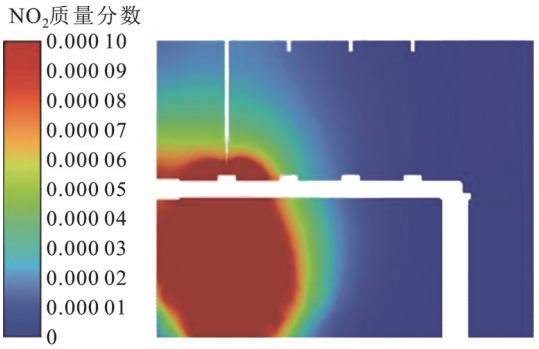


图 5　扩散仿真模型

Fig.5　Diffusion simulation model



(a) v=0.1 m/s时的NO_2扩散结果



(b) v=0.5 m/s时的NO_2扩散结果

图 6　NO_2 扩散仿真结果

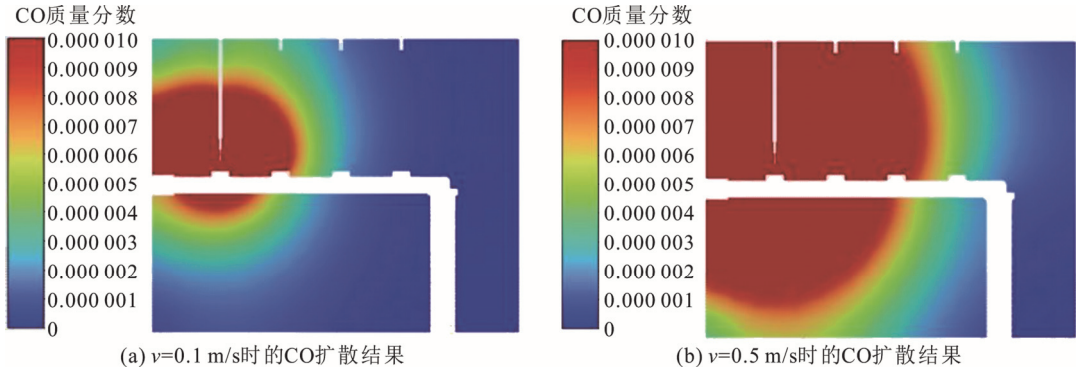
Fig.6　Simulation results of NO_2 diffusion

对开关柜内部 NO_2 与 CO 的浓度进行监测时，要综合考虑分解气体分布情况，NO_2 气体在放电故障轻微时，更倾向于在放电点附近聚集，但是随着放电加剧和时间累计，NO_2 会更倾向于向下部聚集。CO 气体分子质量和空气相近，因此 CO 在开关柜中趋向均匀分布，随着气体扩散，下部也有较好的监测效果，因此，开关柜下部为放电监测装置的最佳部署位置。

3　放电响应信号分析

3.1　电晕放电

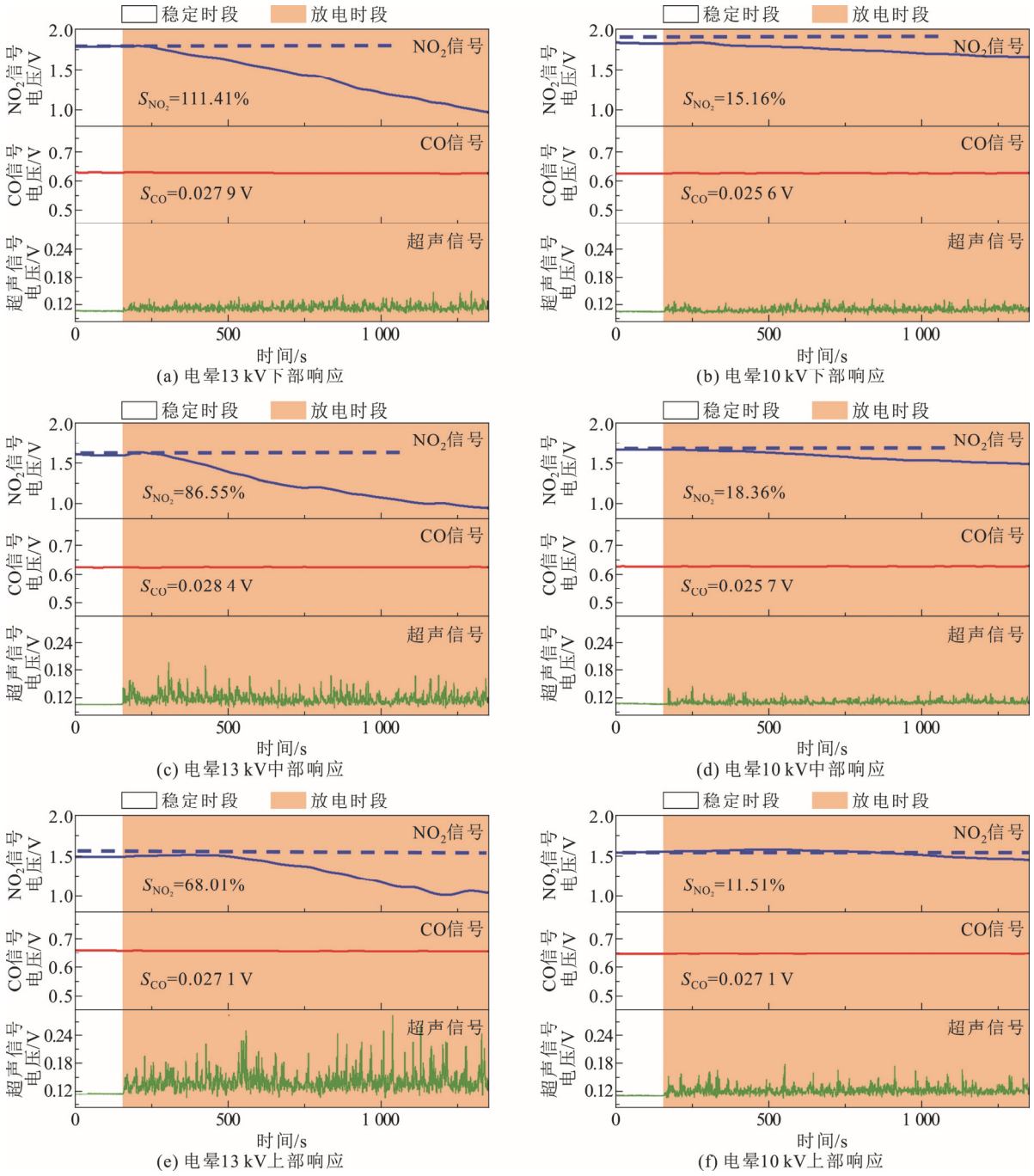
双参量放电监测装置对电晕放电的响应特性曲线如图 8 所示。根据分压定理，将 NO_2 传感器输



(a) v=0.1 m/s时的CO扩散结果　(b) v=0.5 m/s时的CO扩散结果

图 7　CO 扩散仿真结果

Fig.7　Simulation results of CO diffusion



(a) 电晕13 kV下部响应　(b) 电晕10 kV下部响应

(c) 电晕13 kV中部响应　(d) 电晕10 kV中部响应

(e) 电晕13 kV上部响应　(f) 电晕10 kV上部响应

图 8　电晕放电响应曲线

Fig.8　Curve of corona discharge response

出的电压信号转换为传感器电阻值，NO_2 半导体传感器的响应值定义为：

$$S_{NO_2}=\frac{R_g-R_a}{R_a}\times 100\% \tag{3}$$

式中：S_{NO_2} 为 NO_2 传感器的响应值；R_a 为传感器在空气中稳定的电阻值；R_g 为传感器在 NO_2 分解气体中的电阻值。

对于 CO 电化学传感器，经过信号调理电路后，其输出与 CO 体积分数成正比的电压信号，其响应值定义为：

$$S_{CO}=U_g-U_a \tag{4}$$

式中：S_{CO} 为 CO 传感器的响应值；U_a 为传感器在空气中输出的电压值；U_g 为传感器在 CO 分解气体中输出的电压值。

本文对 NO_2 传感器基线信号进行计算，其噪声相对标准差为 1.62%，根据信噪比为 3 的检测限判断原则[35-36]，选取 NO_2 传感器电阻值变化 5%的时刻作为气体传感器的响应时间。由实验结果可知，对于相同部署位置，放电电压等级从 10 kV 提升至 13 kV，NO_2 传感器响应值均有较大提升。对于不同部署位置，13 kV 放电条件下，由于 NO_2 分子质量大于空气，会向下沉积，因此下部的响应值大于中部和上部。而对于 10 kV 的放电，放电程度较为微弱，NO_2 浓度低，气体扩散受空气流动的影响较大，放电点位于中部，因此放电腔体中部的 NO_2 浓度最高，该规律与仿真结果一致。空气放电中，CO 的产生主要来源于 CO_2 在高速电子轰击下的分解[37]，反应机理可表示为：

$$CO_2\rightarrow CO+O \tag{5}$$

空气中 CO_2 的体积分数仅约为 0.03%，其值较低，因此是否能检测到 CO 与放电能量密切相关。电晕放电能量较低，电子平均能量不足以显著分解 CO_2 分子，导致生成的 CO 浓度较低，低于传感器的检测下限。因此电化学 CO 传感器输出电压几乎没有变化。由于气体扩散需要时间，NO_2 传感器最快的响应时间在放电发生后 150 s，响应时间较慢，而超声传感器在放电发生时能够立即发生反应，响应速度快。

3.2　电弧放电

双参量放电监测装置对电弧放电的响应特性曲线如图 9 所示。由实验结果可知，电弧放电能量较高，产生的分解物浓度较高，NO_2 气体传感器的响应值大于电晕放电。由于 NO_2 浓度较大，气体沉积明显，下部位置的响应值大于中部和上部，NO_2 传感器最快响应时间在放电发生后 130 s。电弧放电下，放电能量更高，放电通道中高能电子与 CO_2 的碰撞频率和能量均增加，CO_2 分子更易发生分解反应，产生明显的 CO，因此电化学 CO 传感器也出现响应，在上部的响应值最大，中部和下部也有明显响应。超声传感器在电弧放电时产生剧烈响应，响应峰值大于电晕放电，可以迅速对电弧放电做出

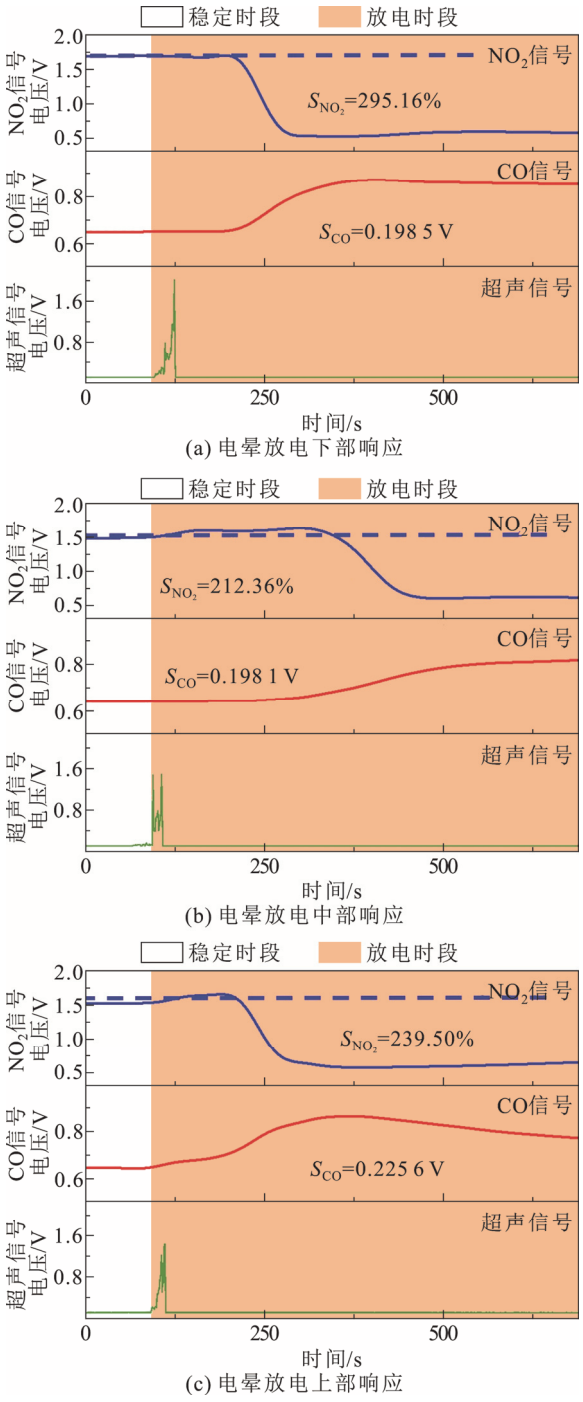


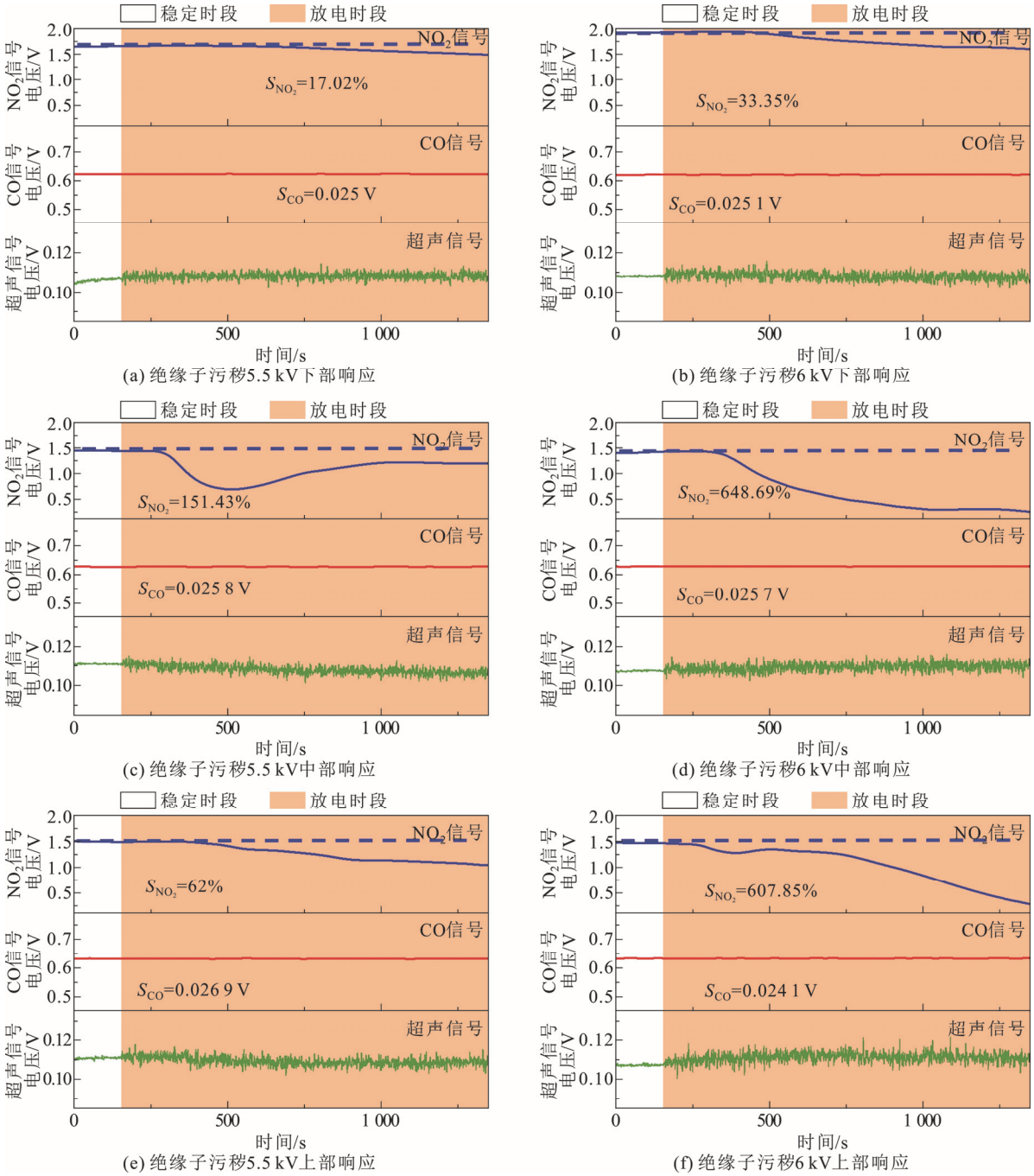
图 9　电弧放电响应曲线

Fig.9　Curve of arc discharge response

报警。

3.3 绝缘子污秽放电

双参量放电监测装置对绝缘子污秽放电的响应特性曲线如图 10 所示，由实验结果可知，随着放电电压的升高，产生的分解物浓度随之升高，6 kV 下 NO_2 气体传感器的响应值均大于 5.5 kV 下的响应值。在绝缘子污秽放电过程中，空气中的氧分子在高能电子作用下生成单氧原子。这些单氧原子与氧分子重新结合，形成臭氧。臭氧主要作用点位为环氧树脂的交联结构，并且其交联结构会出现更多的开断点位，出现较多的小分子产物。其中，HCHO(甲醛)含量大于其他分解产物，成为放电作用下的主要分解产物[38]。由于 HCHO 的分子质量与空气平均分子质量接近，该气体易在放电腔体中部聚集，对 NO_2 传感器造成干扰，使得中部位置的响应值高于上部和下部。NO_2 传感器最快响应时间在放电发生后 124 s。绝缘子污秽放电能量低，生成的 CO 浓度较低，低于传感器的检测下限，电化学 CO 传感器没有响应。由于放电电压较小和电极影响，超声传感器的响应也相应减小。



(a) 绝缘子污秽5.5 kV下部响应　(b) 绝缘子污秽6 kV下部响应

(c) 绝缘子污秽5.5 kV中部响应　(d) 绝缘子污秽6 kV中部响应

(e) 绝缘子污秽5.5 kV上部响应　(f) 绝缘子污秽6 kV上部响应

图 10　绝缘子污秽放电响应曲线

Fig.10　Curve of insulator pollution discharge response

4　空气放电故障诊断

4.1　基于滑动时间窗的超声信号报警方案

首先建立如图 11 所示的滑动时间窗，设定起始时刻为 t_0，终止时刻为 t_1，时间窗长度 $\Delta t = t_1 - t_0$。随着监测时间的增加，时间窗以固定的步长向后滑动更新，滑动步长为 t，滑动后时间窗起始时刻为 t_0+t，终止时刻为 t_1+t，时间窗长度不变。本文中设定的滑动步长为 1 s，即每秒更新 1 次监测窗口，以保证装置具备较高的响应速度。

放电故障发生前后，超声信号在波动性方面具有显著差异，因此使用时间窗内信号的方差作为特征参数。选取某一已知无放电的窗口作为参考窗口，计算其信号方差作为方差标准值。如果任意滑动窗口内方差大于放电阈值，则认为当前窗口内存在异常波动趋势，为了避免瞬时噪声引起误判，本文引入连续性判断机制，放电故障判定标准为：

$$D(X_{i+j}) > kD(X_{\text{ref}}),\quad \forall j \in [0, N-1] \tag{6}$$

式中：$D(X_{i+j})$为实时滑动窗口方差；$D(X_{\text{ref}})$为方差标准值；k 为放电监测阈值系数；N 为连续判断窗口数量；i 为开始监测到有放电可能的时刻。

4.2　基于 CART 决策树的放电故障识别

分类与回归树(classification and regression tree，CART)算法适用于处理离散与连续数据，CART 决策树以基尼指数作为属性选择度量，基尼指数衡量了信息的混乱程度，数值越小表示数据越有序，确定性越高，对于样本集合 D，其基尼指数为：

$$g_{\text{Gini}}(D) = 1 - \sum_{i=1}^{m} p_i^2 \tag{7}$$

式中：$g_{\text{Gini}}(D)$为样本集合 D 的基尼指数；m 为样本集合 D 中的样本类别数量；p_i 为第 i 类样本在样本总量中所占的比例。

对于特征值 A，对样本的属性取值排序后，将相邻取值的中点设置为分割点 T，将样本集合划分为 D_1 和 D_2 这 2 个样本集合，则分割点划分原样本集合 D 后的基尼指数为：

$$g_{\text{Gini}}(A,T,D) = \frac{|D_1|}{|D|} g_{\text{Gini}}(D_1) + \frac{|D_2|}{|D|} g_{\text{Gini}}(D_2) \tag{8}$$

式中：$g_{\text{Gini}}(A,T,D)$为分割点划分原样本集合 D 后的基尼指数；$g_{\text{Gini}}(D_1)$为样本集合 D_1 的基尼指数；$g_{\text{Gini}}(D_2)$为样本集合 D_2 的基尼指数。

分割点 T 划分集合 D 的基尼增益 Δg_{Gini} 为：

$$\Delta g_{\text{Gini}} = g_{\text{Gini}}(D) - g_{\text{Gini}}(A,T,D) \tag{9}$$

在所有可能的划分中，基尼增益越大，代表根据该特征和分割点进行划分对纯度提高的效果越好，因此选择基尼增益最大的组合作为最优特征和最优划分点。对划分后的集合递归调用以上步骤，完成 CART 决策树的构建。

本文使用 NO_2气体传感器、CO 气体传感器以及超声传感器对正常运行和放电故障状态下的信号进行采集。对每种传感器前 900 s 的响应曲线分别进行了特征提取。根据不同位置响应结果，开关柜下部为最佳部署位置。因此，将装置部署于下部，增加放电电压工况，补充电晕放电 11、12 kV 放电实验。将装置部署于下部采集的 1 类无故障样本和 7 类不同类型的放电故障样本作为训练样本，标签对应关系如表 2 所示。

采用加权组合与随机噪声扰动的方法将样本进行扩充，考虑到训练过程中样本划分的随机性，本文采用 5 折交叉验证的方法评估模型性能，构建超声-气体联用 CART 决策树如图 12 所示。

同时单独使用气体信号和超声信号分别进行模型训练，构建气体 CART 决策树诊断模型与超声 CART 决策树诊断模型。使用独立的 30 组样本用于不同模型的测试，故障识别混淆矩阵结果如图 13 所示，超声-气体联用故障识别准确率为 96.67%，

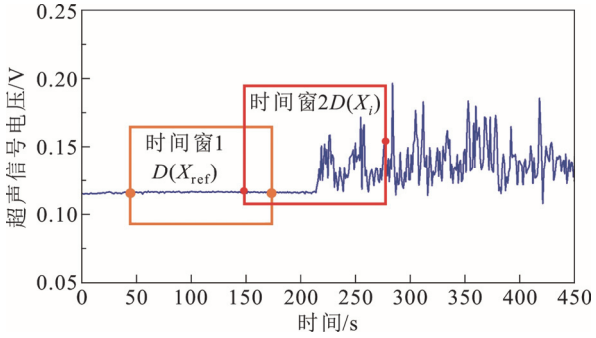


图 11　滑动时间窗示意图

Fig.11　Diagram of sliding time window

表 2　训练样本标签设置

Table 2　Label assignment for fault diagnosis samples

放电类型	放电电压/kV	部署位置	故障标签
无故障		下	0
电晕放电	10	下	1
	11	下	2
	12	下	3
	13	下	4
电弧放电	15	下	5
绝缘子污秽放电	5.5	下	6
	6	下	7

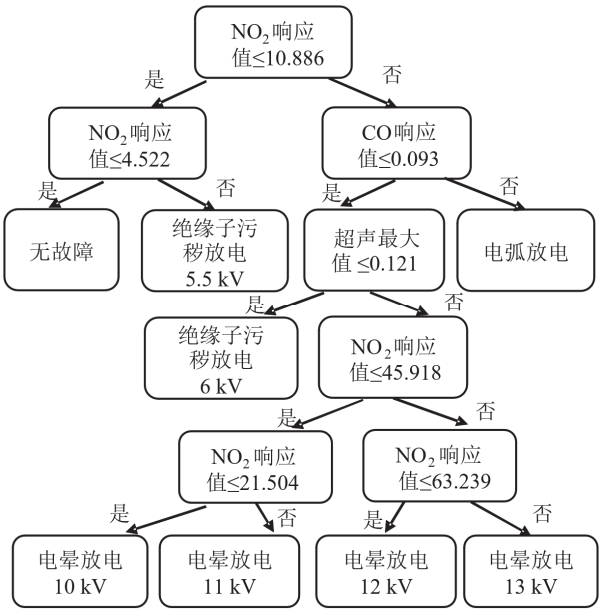


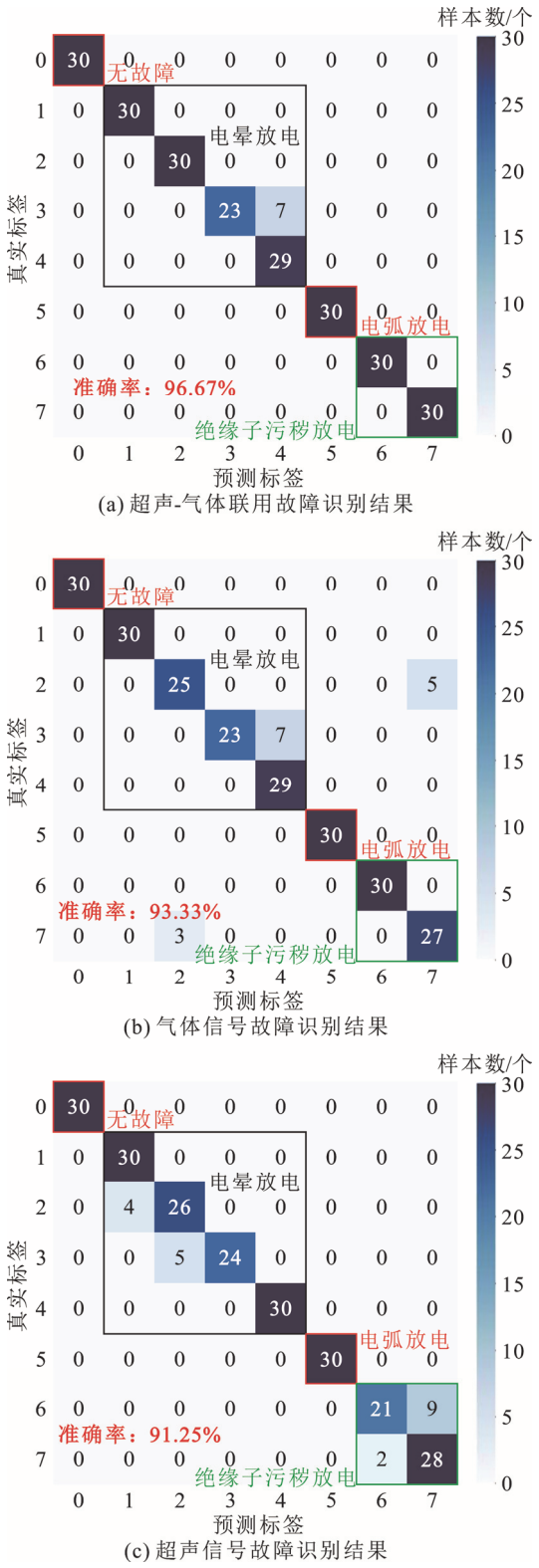
图 12 超声-气体联用 CART 决策树诊断模型

Fig.12 Diagnostic model of ultrasound-gas combined CART decision tree

高于单独气体信号故障识别准确率 93.33%和单独超声信号故障识别准确率 91.25%，有较好的故障识别能力，并且能够区分正常情况和放电故障，有效避免超声信号抗干扰差引发的误报警。

4.3 感算一体放电故障监测方案设计

由空气放电实验结果可知，气体传感器面对不同类型的放电故障时表现出不同的响应结果，能够实现放电故障的感知和故障类型识别。然而，由于气体扩散需要时间，如果仅用气体传感器进行放电监测，最快响应时间均在 2 min 之后，难以满足放电故障快速响应的需要。超声传感器能够快速感知开关柜放电时的声音信号，实现放电故障快速报警，但是由于空气开关柜运行环境的复杂性，超声传感器抗干扰性较差，仅用超声传感器面临着较大的误报警风险。基于以上原因，本文提出一种气-声融合感知的感算一体空气放电诊断方案，流程图如图 14 所示。将基于滑动时间窗的超声信号报警方案以及 CART 决策树故障诊断模型嵌入至单片机中，装置实时采集与输出传感器信号，同时设置放电标志位 F_1 以及诊断标志位 F_2。建立双参量时间窗，随着数据采集更新不断向后滑动，并实时计算窗口内超声方差，当监测到超声方差连续大于放电阈值时，装置判定可能存在放电现象，触发初步报警，将放电标志位 F_1 设置为 1。在报警触发后，装置存储 900 s



(a) 超声-气体联用故障识别结果

(b) 气体信号故障识别结果

(c) 超声信号故障识别结果

图 13 故障识别混淆矩阵

Fig.13 Fault identification confusion matrix

内气体以及超声信号，计算 CART 决策树故障诊断模型所需特征属性，该特征属性输入决策树模型中，单片机输出诊断标志位 F_2，如果 F_2=0，则说明发生误报警，将 F_1 设置为 0，重复滑动时间窗步骤。如

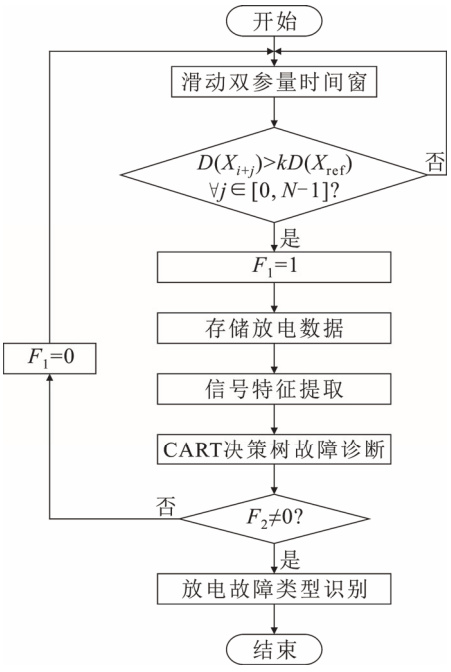


图 14　空气放电故障感算一体诊断流程图

Fig.14　Flowchart of the air discharge fault sensing-computing integrated diagnostic scheme

果 $F_2\neq0$，则说明发生放电故障，根据 F_2 结果完成放电故障类型诊断。双参量感算一体放电监测装置实时故障诊断结果如图 15 所示。本文设计双参量感算一体放电监测装置，依托超声传感器，实现对空气开关柜放电故障的快速报警，结合超声和气体信号，使用 CART 决策树故障识别模型对正常状态和不同类型放电故障能够有效区分，解决放电故障误报警隐患，提升了故障诊断的准确性与可靠性。

5　结论

1）设计了一种融合超声与气体传感器的放电故障监测装置，在不同放电故障下传感器的响应信号存在明显差异，可以作为绝缘故障诊断依据。通过气体扩散仿真和实验验证，确定了气体传感器的最佳部署策略，部署于开关柜下部具有较好的监测效果。

2）提出了基于滑动时间窗的超声信号初步报警方案，使用时间窗内超声信号方差作为特征参数，引入连续性放电故障判断机制，能够实现放电故障的快速响应。进一步融合气体与超声信号，提出基于 CART 决策树的放电故障识别方法，有效减少了误报警的发生，在本文实验样本中，故障识别准确率高达 96.67%。

3）将基于滑动时间窗的超声信号报警方案以及 CART 决策树故障诊断模型嵌入至单片机中，提出了感算一体放电故障监测方案，实现了感算一体放电装置设计，能够对空气放电故障快速响应，对正常状态和放电故障进行有效区分，提升了故障诊断的准确性与可靠性，有望在空气开关柜放电监测领域开展大规模应用。

参考文献　References

[1] 陈榆炜，王来力. 开关柜局部放电带电检测技术的应用研究[J]. 自动化应用，2024，65(12A)：201-203.
CHEN Yuwei, WANG Laili. Research on the application of partial discharge live detection technology in switchgear[J]. Automation Application, 2024, 65(12A): 201-203.

[2] 张　力，李　军，张林元，等. 开关柜局部放电检测技术应用及研究现状[J]. 科技创新与应用，2022，12(26)：172-175.
ZHANG Li, LI Jun, ZHANG Linyuan, et al. Application and research status of switchgear partial discharge detection technology[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(26): 172-175.

[3] 胡哲康. 高压开关柜局部放电检测技术及其应用研究[D]. 武汉：华中科技大学，2022.
HU Zhekang. Research on partial discharge detection technology and application in high voltage switchgear[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2022.

[4] 孙玮祎. 10 kV 配网开关柜局部放电超声波信号特征与模式识别研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2022.
SUN Weiyi. Research on ultrasonic signal characteristics and pattern recognition of partial discharge in 10 kV distribution network switchgear[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2022.

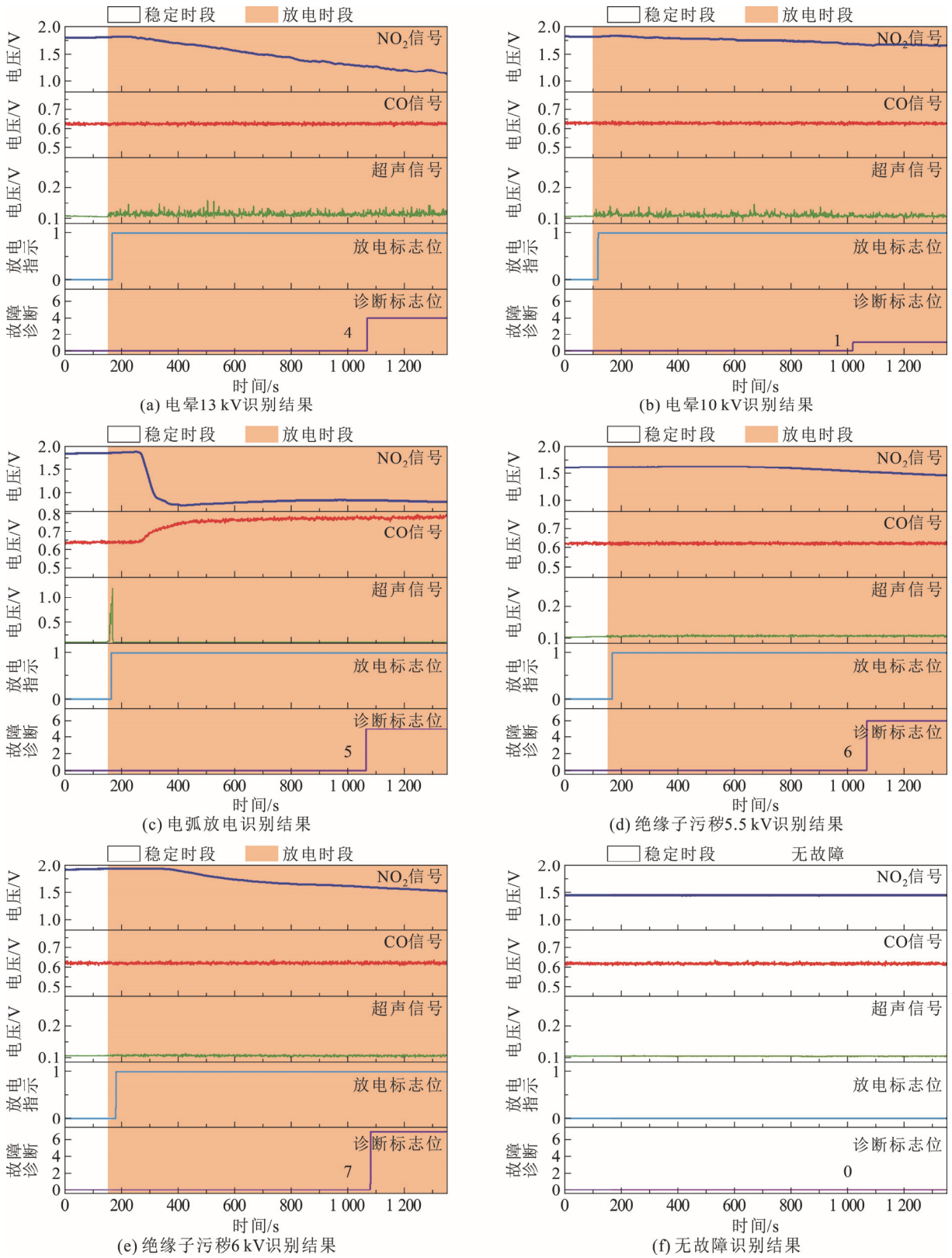
[5] 唐志国，蒋佟佟. 变电站特高频局放监测的电磁干扰特征影响因素[J]. 电网技术，2018，42(4)：1350-1358.
TANG Zhiguo, JIANG Tongtong. Research on influencing factors of electromagnetic interferences for UHF PD detection in substations[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1350-1358.

[6] 李　星，丁登伟，许　渊，等. 特高频-超声波法联合的 GIS/GIL 局部放电信号降噪与缺陷定位[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2384-2393.
LI Xing, DING Dengwei, XU Yuan, et al. Signal Denoising and defect localization for GIS/GIL partial discharge based on ultra-high frequency and ultrasound method united[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2384-2393.

[7] 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.

[8] CHU J F, DENG Z L, PAN J B, et al. Parameter optimization of semiconductor gas sensor under AC impedance measurement[J]. ACS Sensors, 2024, 9(10): 5561-5569.

[9] 杨爱军，潘健彬，王琼苑，等. 电力嗅觉传感原理与关键技术研究综述[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3339-3353.
YANG Aijun, PAN Jianbin, WANG Qiongyuan, et al. Review on sensing principles and key technologies of electric olfaction[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3339-3353.



(a) 电晕13 kV识别结果　(b) 电晕10 kV识别结果

(c) 电弧放电识别结果　(d) 绝缘子污秽5.5 kV识别结果

(e) 绝缘子污秽6 kV识别结果　(f) 无故障识别结果

图 15　感算一体装置故障识别结果

Fig.15　Sensing-computing integrated device fault identification results

[10] 申　珣，褚继峰，杨爱军，等. 基于反应磁控溅射 SnO_2 薄膜的氢气传感器制备工艺与性能测试[J]. 高电压技术，2025，51(7)：3201-3212.
SHEN Xun, CHU Jifeng, YANG Aijun, et al. Preparation technology and performance test of SnO_2-based hydrogen sensor prepared by reactive magnetron sputtering[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(7): 3201-3212.

[11] 姜飞宇，张荣嵘，王淑颖，等. 空气绝缘电气设备气体放电分解产

物检测研究[J]. 江西电力，2024，48(6)：12-16，24.
JIANG Feiyu, ZHANG Rongrong, WANG Shuying, et al. Research on gas discharge decomposition products detection in air-insulated electrical equipment[J]. Jiangxi Electric Power, 2024, 48(6): 12-16, 24.

[12] 周　磊. 开关柜故障特征气体组分分析研究[D]. 重庆：重庆大学，2016.
ZHOU Lei. The analysis and research of switchgear characteristic gas composition[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2016.

[13] 张振宇，晋　涛，王天正，等. 基于气体检测的空气开关柜绝缘缺陷识别[J]. 武汉大学学报(工学版)，2021，54(8)：761-768.
ZHANG Zhenyu, JIN Tao, WANG Tianzheng, et al. Insulation defect recognition of air switchgear based on gas detection[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(8): 761-768.

[14] TANG J, ZENG F P, ZHANG X X, et al. Relationship between decomposition gas ratios and partial discharge energy in GIS, and the influence of residual water and oxygen[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(3): 1226-1234.

[15] LUO Z C, HAN F Y, TANG B, et al. Optical properties and decomposition mechanisms of SF_6 at different partial discharge determined by infrared spectroscopy[J]. AIP Advances, 2018, 8(6): 065107.

[16] TAN Q P, ZHANG T D, WU S C, et al. Diagnosis of partial discharge based on the air components for the 10 kV air-insulated switchgear[J]. Sensors, 2022, 22(6): 2395.

[17] 王琼苑，褚继峰，李秋霖，等. 基于微型气体传感阵列的空气绝缘设备放电故障识别[J]. 电工技术学报，2023，38(23)：6494-6502.
WANG Qiongyuan, CHU Jifeng, LI Qiulin, et al. Miniature gas-sensing array employed for the discharge fault diagnosis of air-insulated equipment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(23): 6494-6502.

[18] 杨应仓，张斌山，陈俊德，等. 局部放电理论及其检测方法研究[J]. 中国设备工程，2025(4)：18-20.
YANG Yingcang, ZHANG Binshan, CHEN Junde, et al. Research on partial discharge theory and its detection methods[J]. China Plant Engineering, 2025(4): 18-20.

[19] 关　宇，董　明，王腾腾，等. 基于改进降噪自编码器与稠密连接网络的局部放电声信号模式识别[J]. 高电压技术，2025，51(1)：478-487.
GUAN Yu, DONG Ming, WANG Tengteng, et al. Partial discharge acoustic pattern recognition based on improved denoising autoencoder and DenseNet[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 478-487.

[20] 袁燕岭，高　岭，张占新，等. 电缆局放检测用柔性压电超声传感器的灵敏度优化[J]. 高电压技术，2025，51(2)：652-659.
YUAN Yanling, GAO Ling, ZHANG Zhanxin, et al. Sensitivity optimization of flexible piezoelectric ultrasonic sensor for cable partial discharge detection[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2): 652-659.

[21] 颜　育，姚露露，吴　明，等. 电缆局部放电超声检测用高灵敏度柔性 PZT 压电超声传感器[J]. 高电压技术，2025，51(7)：3225-3233.
YAN Yu, YAO Lulu, WU Ming, et al. Highly sensitive flexible PZT piezoelectric ultrasonic sensor for cable partial discharge ultrasonic detection[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(7): 3225-3233.

[22] 孙振华，冯金茏，欧阳力，等. 开关柜超声波局放检测抗干扰方法研究[J]. 湖南电力，2016，36(2)：46-49.
SUN Zhenhua, FENG Jinlong, OUYANG Li, et al. Research on anti-interference methods of switchgear ultrasonic PD detection[J]. Hunan Electric Power, 2016, 36(2): 46-49.

[23] CHEN X J, MA L, ZHANG L, et al. De-noising of partial discharge ultrasonic signal of insulation bar in large motor based on GMC-wavelet[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 73(6): 368-377.

[24] 宫成明. 电力设备局部放电超声波检测及降噪方法研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2022.
GONG Chengming. Research on ultrasonic detection and noise reduction method of partial discharge in power equipment[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2022.

[25] WANG Q Y, LI H Y, CHU J F, et al. Real-time monitoring of air discharge in a switchgear by an intelligent NO_2 sensor module[J]. ACS Sensors, 2023, 8(12): 4646-4654.

[26] 郭孟星. CO 电化学传感器电解质材料制备及其传感性能研究[D]. 郑州：郑州大学，2018.
GUO Mengxing. Study on the ionic liquid electrolyte material synthesis and sensing performance of CO electrochemical sensor[D]. Zhengzhou, China: Zhengzhou University, 2018.

[27] 荆　琳. 变压器局部放电过程超声监测应用[J]. 中国特种设备安全，2021，37(5)：75-78.
JING Lin. Ultrasound monitoring of transformer partial discharge process[J]. China Special Equipment Safety, 2021, 37(5): 75-78.

[28] 涂馨予，楼成淦，金杭超，等. 一种空气耦合超声换能器研制[J]. 压电与声光，2023，45(6)：892-897.
TU Xinyu, LOU Chenggan, JIN Hangchao, et al. Research and development of an air-coupled ultrasonic transducer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2023, 45(6): 892-897.

[29] 王　非. 开关柜局部放电监测及放电类型识别研究[D]. 南京：南京信息工程大学，2024.
WANG Fei. Research on partial discharge monitoring and discharge type identification of switchgear[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Information Science and Technology, 2024.

[30] 姚龙超. 局部放电超声检测系统研制[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2021.
YAO Longchao. Development of partial discharge ultrasonic testing system[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2021.

[31] 杜彦强，毕海涛，师　政，等. 252 kV GIS 局部放电试验仿真平台设计研究[J]. 东北电力技术，2018，39(6)：13-15.
DU Yanqiang, BI Haitao, SHI Zheng, et al. Study on 252 kV GIS partial discharge test simulation platform design[J]. Northeast Electric Power Technology, 2018, 39(6): 13-15.

[32] 张晓星，周　磊，裘吟君，等. 针-板缺陷开关柜局部放电与空气分解组分的关联特性[J]. 高电压技术，2016，42(12)：3948-3954.
ZHANG Xiaoxing, ZHOU Lei, QIU Yinjun, et al. Correlation character between switch gear's partial discharge quantity and air decomposition components under needle-plate defect model[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3948-3954.

[33] 范　超. 绝缘表面污秽颗粒积聚特性及其对闪络电压影响的研究[D]. 成都：西南交通大学，2020.
FAN Chao. Study on the accumulation characteristics of filthy particles on the surface of insulating materials and its inflyence on flashover voltage[D]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University, 2020.

[34] TAN Q P, SONG B, WANG L N, et al. Study on characteristics gases of metal protrusions partial discharge in 10-kV air-insulated switchgear[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2023, 17(6): 221-229.

[35] 高立红，姜振邦，郑洪国，等. 离子色谱法同时测定脱硫液中 8 种有机胺类物质[J]. 色谱，2024，42(5)：452-457.
GAO Lihong, JIANG Zhenbang, ZHENG Hongguo, et al. Simultaneous determination of eight organic amines in desulfurization solution by ion chromatography[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2024, 42(5): 452-457.

[36] 白慧萍，王春琼，曹秋娥. 基于石墨烯信号放大策略的胆固醇分子印迹电化学传感器研究[J]. 分析化学，2017，45(10)：1535-1541.
BAI Huiping, WANG Chunqiong, CAO Qiue. Molecularly imprinted electrochemical sensor for determination of cholesterol based on signal amplification of graphene[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2017, 45(10): 1535-1541.

[37] GUI Y G, ZHANG X X, ZHANG Y, et al. Study on the characteristic decomposition components of air-insulated switchgear cabinet under partial discharge[J]. AIP Advances, 2016, 6(7): 075106.

[38] 张星宇，张小明，陈雅琦，等. 复合绝缘子芯棒环氧树脂材料裂解机理研究[J]. 电气技术，2022，23(2)：1-6，25.
ZHANG Xingyu, ZHANG Xiaoming, CHEN Yaqi, et al. Study on pyrolysis mechanism of epoxy resin for composite insulator core rod[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(2): 1-6, 25.



李浩源
2000—，男，博士生
主要从事电力设备在线监测的研究工作
E-mail: lhy359759@stu.xjtu.edu.cn

LI Haoyuan
Ph.D. candidate



褚继峰(通信作者)
1993—，男，博士，助理教授
主要从事化学与光学传感技术、电力设备智能运维技术和储能安全预警技术方面的研究工作
E-mail: jfchu93@xjtu.edu.cn

CHU Jifeng
Ph.D.
Corresponding author

收稿日期 2025-08-26 修回日期 2025-12-04 编辑 曾文君