第 52 卷 第 2 期：550-559 高电压技术 Vol.52, No.2: 550-559
2026 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250404

气体绝缘组合电器内置式气体状态传感技术

陈 欢[1]，秦 妍[2]，史心悦[1]，王昊天[1]，韩旭涛[1]，李军浩[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. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司)，南京 211106）

摘 要：气体绝缘组合电器(gas-insulated switchgear，GIS)内部绝缘气体状态的异常变化会显著影响设备绝缘性能，而现有气体状态检测装置在外界环境影响下测量结果难以准确反映 GIS 内部实际气体状态。为此，该文设计了一种以微机电系统(micro electro-mechanical systems，MEMS)传感器为核心的气体状态传感单元，并将其与内置式特高频(ultra high frequency，UHF)传感器集成，实现对气体状态的内置监测。面对高压设备内部严苛电磁环境，构建了融合传感器和 GIS 全尺寸仿真计算模型，通过分析典型干扰下传感单元周围场强分布及电磁干扰耦合路径，提出了传感单元的多层结构屏蔽外壳方案。结果表明：干扰源与气体状态传感单元之间为电容性耦合和电感性耦合的叠加，呈现多模态、宽频域特征；设计的接地屏蔽外壳硅钢主体能够有效屏蔽工频电压和电流，吸收高频电磁波，顶层铝合金层能够反射大部分高频电磁波，换流气孔处的屏蔽网进一步提升了屏蔽效果；屏蔽后传感单元上的感应电压不超过±0.2 V，满足传感单元的安全运行要求。研究结果可为高压设备内置式监测以及低压单元内置高压设备后的电磁兼容设计提供参考。

关键词：气体绝缘组合电器；气体状态监测；内置式；电磁兼容；微机电系统传感器

Built-in Gas State Sensing Technology for Gas-insulated Switchgear

CHEN Huan[1], QIN Yan[2], SHI Xinyue[1], WANG Haotian[1], HAN Xutao[1], LI Junhao[1]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;
2. Nanrui Group Co., Ltd. (State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Nanjing 211106, China)

Abstract：Abnormal changes in the state of insulating gas within gas-insulated switchgear (GIS) can significantly influence the equipment's insulation performance. Existing gas state detection devices are difficult to accurately reflect the actual internal gas states due to environmental interference. To address this issue, this paper designs a gas state sensing unit centered on a micro-electro-mechanical systems (MEMS) sensor, integrated with a built-in ultra-high frequency (UHF) sensor, enabling internal monitoring of the gas states. To tackle the harsh electromagnetic environment within high-voltage equipment, a full-scale simulation model combining the composite sensor and GIS was developed to analyze the electric field distribution around the sensing unit and electromagnetic interference coupling paths under typical disturbances. Moreover, a multi-layer shielded enclosure design for the sensing unit was proposed. The results indicate that the superposition of capacitive and inductive coupling between the interference source and the gas state sensing unit presents the characteristics of multi-modal and wide frequency domain. The designed grounded shielding enclosure, with a silicon steel main body, effectively shields power-frequency voltages and currents while absorbing high-frequency electromagnetic waves. The top aluminum alloy layer reflects most high-frequency electromagnetic waves, and the shielding mesh at the airflow hole further enhances shielding performance. After shielding, the induced voltage on the sensing unit remains within ±0.2 V, meeting safety requirements for unit operation. This research provides valuable insights for built-in monitoring of high-voltage equipment and electromagnetic compatibility design for low-voltage units integrated into high-voltage systems.

Key words：gas-insulated switchgear; gas state monitor; built-in; electromagnetic compatibility; MEMS sensor

0 引言

在智能电网向高电压、大容量方向快速发展的背景下，气体绝缘组合电器(gas-insulated switchgear, GIS)作为电力系统的核心设备，其运行可靠性直接关系到电网稳定[1]。研究表明，温度、压力、湿度等 GIS 内部气体状态的异常变化会显著影响设备的绝缘性能。例如，SF_6/N_2 混合气体的击穿电压会随

基金资助项目：国家自然科学基金(U22B20118)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (U22B20118).

温度降低而减小[2-4]；低温高湿条件下绝缘子沿面凝露会导致闪络电压大幅下降[5-6]；而气体泄漏引起的压力下降更是直接降低了设备的绝缘强度[7]。

为确保 GIS 设备的绝缘可靠性，准确监测其内部气体状态至关重要。传统上，气体状态由变电站运维人员定期、定点检测和记录，但这种方法难以及时发现并处理故障[8-9]。近年来，多点分布式测温系统、数字密度继电器和复合型微水监测装置等在线监测技术在现场得到广泛应用，实现了对设备气体状态的实时监测[10-12]。然而，无论是传统方式还是现有在线监测装置，一般通过检测 GIS 设备表面温度和三通阀处的局部湿度和密度等参量来反映内部整体状态，显然对设备局部参量和整体参量的一致性要求较高。

研究发现，由于金属材料对辐射能量的高吸收率和良好的导热性能，GIS 外壳在太阳辐射下会迅速升温导致外壳温度陡升，而内部气体由于热容较大且传热机制不同，温度上升速率和峰值均低于金属外壳，因此日间外壳温度无法准确反映内部气体温度[13]。Mitsuhito Kamei 等人研究了外界环境对 GIS 密度继电器检测的影响，结果发现密度值在一天内会显著波动，且向阳面和背阴面的变化趋势不一致，主要在于校准传感器的局部温度与整体温度变化不一致[14-15]。类似地，现有电容式湿度传感器测得的相对湿度转换至标准工况时需要测点温度，内外温度的不一致可能导致偏差较大[16]。因此，现有外置式气体状态测量装置在环境影响下测量结果难以准确反映 GIS 整体气体状态。

针对上述问题，本文在分析 GIS 设备气体状态变化特征的基础上提出了一种在设备腔体内直接监测气体状态的传感技术，通过将气体状态传感单元与内置式特高频(ultra high frequency，UHF)传感器集成，实现对气体状态的内置监测。针对传感单元内置后可能受到的电磁干扰问题，重点开展了电磁屏蔽设计研究，为传感单元在复杂电磁环境下的监测提供安全保障。

1　GIS 设备气体状态变化特征

基于理想气体状态方程可知，在封闭式 GIS 气室中，当气体质量和容积恒定时，腔体内局部气体密度与温度呈负相关。实际运行过程中，由于载流导杆焦耳热效应产生的温度显著高于外壳温度，内部出现垂直方向的温度梯度，进而导致气体密度和微水含量的分层现象[17]，此时传感器采集值均为局部量，需要经过温度补偿，理想状态下温度补偿应综合考虑局部温度和平均温度，但平均温度难以获得，局部温度与整体温度变化的一致性对传感器测量值有明显影响。与三通阀处细小的气路相比，GIS 内部更大的等效热容使得其在外界太阳辐射等影响下内部气体波动更小，在内部检测气体状态显然能获得等效程度更高的气体状态参量。

图 1 显示了一个直线 GIS 试验段在电流和外界太阳辐射下内部不同位置处气体密度变化曲线[18]，其中静置时的压力和密度为参考标准值，可以看出，在负载电流和外界辐射发生变化时，导杆附近和腔体顶部密度相比静置时出现明显下降，腔体底部密度则大幅增加，而半高位置处的外壳附近密度变化程度最小，最能反映设备是否发生泄漏等故障。

2　融合感知传感器结构设计

2.1　气体状态内置监测可行性分析

从上述分析可知，GIS 腔体内半高位置气体状态参量对比整体状态差异更小，可以在此处获得更有效的气体状态监测效果。目前常用的气体状态传感器大部分功能单一且体积较大，直接内置会占据较大空间并破坏原有电场分布，而直接安装在手孔处又会替换掉其他类型监测传感器，不利于现场应用。微机电系统(micro electro-mechanical systems, MEMS)传感器具有体积小、精度高、多检测参量等优势，通过 MEMS 传感器设计的气体状态单元体积小、结构灵活，便于与其他类型内置式传感器集成安装[19]。其中，内置式圆盘型特高频传感器安装在

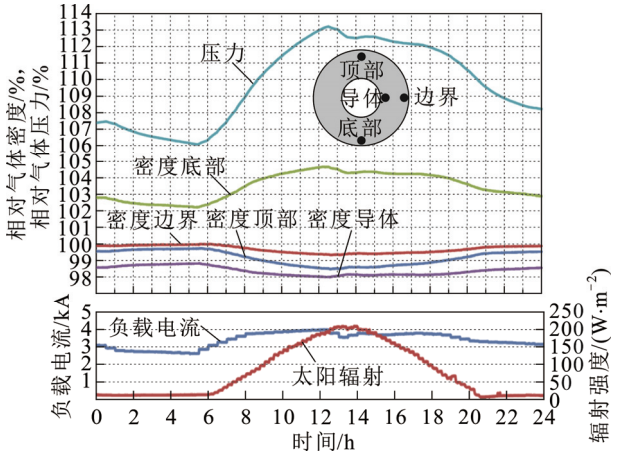


图 1　不同位置处密度随负载电流和太阳辐射强度变化曲线

Fig.1　Variation curves of density with load current and solar radiation intensity at different locations in GIS

手孔处，上圆盘天线板整体接地且有足够空间容纳其他类型传感设备，可为气体状态传感单元的内置提供基体，改造后便可实现气体状态的内置监测，本课题组已有其他类型传感器与内置式特高频传感器集成实现内置融合感知的成功案例[20-21]。

2.2 融合感知传感器结构

本文设计的内置式融合感知传感器主体结构如图 2(a)所示，其以内置式圆盘型特高频传感器为基体，集成以 MEMS 传感器为核心的气体状态传感单元。融合感知传感器基体部分分别是顶部的圆盘型天线板、中间的特高频介质层和底部的密封法兰盘，天线板与法兰连通以可靠接地，接收的局部放电电磁波信号通过馈电杆连接至同轴连接器内芯输出；在特高频天线板中间加工有一个长方体凹槽，用于放置气体状态传感单元及其屏蔽结构；同时在内部加工气体状态传感单元信号引出线通道，利用双屏蔽信号线实现传感单元的供电和数字信号传递；传感器安装法兰、特高频介质层和特高频天线板之间通过 O 型氟橡胶密封圈密封，传感单元信号线利用玻璃烧结的密封接头进行连通。

2.3 气体状态传感单元设计

气体状态传感单元的印制电路板(print circuit board，PCB)设计如图 2(b)所示，传感单元共使用 2 个 MEMS 传感器，分别为温湿度 MEMS 传感器和气体压力 MEMS 传感器，由 3.3 V 电压供电，通过集成电路总线和单总线协议与后端处理单元通讯，将采集到的气体温度、相对湿度和压力转换为密度、微水含量(即体积比，单位：μL/L)以及各标准状态参量。

气体状态传感单元中传感器需要与气体有效接触，因此 PCB 正面仅放置 2 个 MEMS 传感器，其他辅助元器件放置于背面；为提高传感单元的电磁抗干扰能力，添加了数字隔离、电源隔离和瞬变抑制二极管等元件，使得内部 MEMS 传感器与外部处理电路完全电气隔离，同时后端处理电路也包含同样的隔离元件，避免传感单元通讯双屏蔽线耦合地电位上过电压形成共模电压造成干扰；传感单元 PCB 采用 4 层电路板设计，利用中间两层金属层交叠时产生的拼接电容提供内部噪声返回通路，降低共模干扰电流。最终形成的气体状态传感单元尺寸为 25 mm×25 mm×6 mm。

融合感知传感器实物图如图 2(c)所示，经过实验室测试和校准，传感器的各项性能参数如表 1 所示，均能满足标准要求的气体状态检测范围和精度。气体状态传感单元及其屏蔽结构引入前后特高频等效高度随频率的变化曲线如图 3 所示，平均等效高度分别为 13.9 mm 和 13.3 mm。本文所设计结构本质上不会对特高频性能产生影响，但加工误差导致顶部屏蔽层边缘与天线板之间存在缝隙，从而在谐振峰处出现小幅的性能下降，不过仍完全满足标准对特高频传感器检测性能的要求。

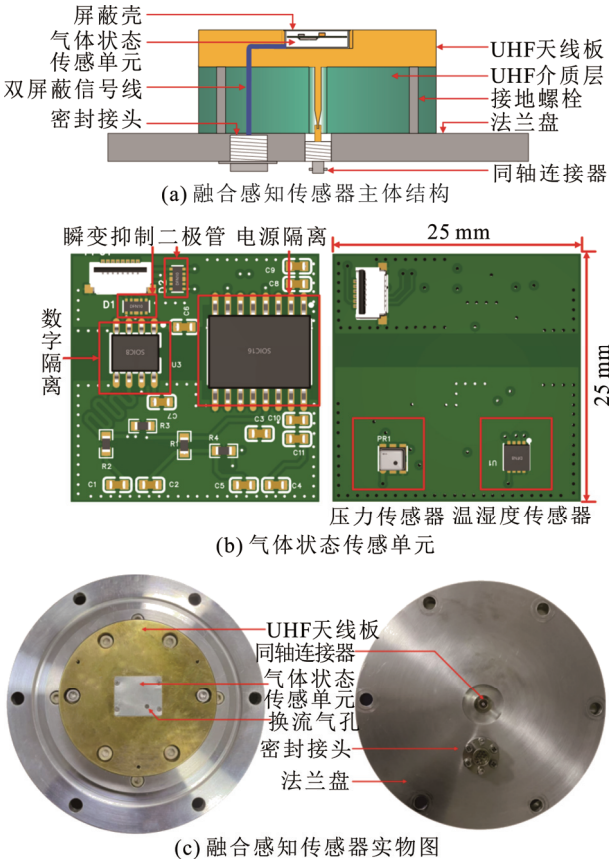


图 2 融合感知传感器各部分结构及实物图

Fig.2 Structure and physical diagram of the composite sensor

表 1 融合传感器性能参数

Table 1 Performance parameters of the composite sensor

测量参数	性能指标
温度	精度：±0.2 ℃，范围：−40~85 ℃
湿度	精度：±10 μL/L(0~10^3 μL/L)，范围：0~10^4 μL/L
压力	精度：±3 kPa，范围：0~1 MPa

注：融合传感器对 300~400 μL/L 阶跃湿度的响应时间和恢复时间分别为 17 s 和 35 s。

3 GIS 内部典型电磁干扰分析

3.1 GIS 内部典型干扰源

GIS 设备内部电磁环境复杂，融合感知传感器

内置后气体状态传感单元的运行安全性受到挑战，有必要明晰设备内部典型电磁干扰特征与耦合方式，为传感单元的电磁屏蔽设计提供依据。

作为变电站一次设备的核心，GIS 运行中的典型干扰源主要有 3 类：一是正常运行状态下高电压和大电流产生的工频电场和工频磁场；二是开合闸暂态过程中特快速瞬态过电压(VFTO)和特快速暂态过电流形成的高频电磁辐射；三是雷电侵入波经路线传入 GIS 内部时产生的低频强电磁辐射。干扰源总体呈现多模态、宽频域特性。

3.2　GIS 与融合感知传感器仿真模型设置

为研究典型干扰下气体状态传感单元附近场强分布和干扰耦合路径，搭建了各电压等级 GIS 与融合感知传感器 1:1 仿真模型，其中 330 kV GIS 仿真模型如图 4 所示，融合传感器安装在 GIS 手孔位置，特高频天线板上平面与 GIS 外壳内壁相切，气体状态传感单元按照 PCB 实际设计导入并进行切割、元器件赋值和端口设置；模型各部分材料属性如表 2 所示。

工频电压和电流施加在中心导杆，外壳设置零电位，电压和电流值根据标准 GB/T 11022—2011 中规定的各电压等级下典型值施加[22]。

瞬态电磁场计算时，GIS 近似为一个同轴波导系统，在导杆外边界与外壳内边界之间设置电压面端口。标准 GB 311.1—2012 将电力系统中的瞬态过电压分为缓波前(操作)过电压、快波前(雷电)过电压和特快波前(快速暂态过电压(very fast transient over voltage，VFTO))3 类[23]，相比操作过电压，雷电过电压能量高、VFTO 频率高，因此将雷电过电压和 VFTO 作为激励施加在上述电压面端口，其中雷电过电压波形按照标准 GB/T 16927.1—2011 中规定的 1.2/50 μs 标准雷电冲击全波，电压值按照型式试验规定值施加[24]；由于 VFTO 会在 GIS 终端和操作机构间多次反射，形成振荡，这里为了简化计算流程，将反射叠加后的 VFTO 振荡波形直接作为激励，波形根据现场实测结果和标准 T/CEEIA 320—2018 中提出的参数要求[25]，形成了图 5 所示的 VFTO 激励，其波前时间 t_1 为 3 ns，振荡频率为 1 MHz 和 10 MHz 叠加，振荡系数 U_1/U_2 为 0.5，峰值电压 2.5 pu(1 pu 等于对应电压等级设备额定电压的相电压峰值)；两端边界处设置为完全匹配层，以消除电磁波在端面处的反射。

通过气体状态传感单元周围多个位置处电场探针和磁场探针测量仿真过程中电磁场变化，且在传感单元各走线上设置电压监视器，以监测感应电压值。

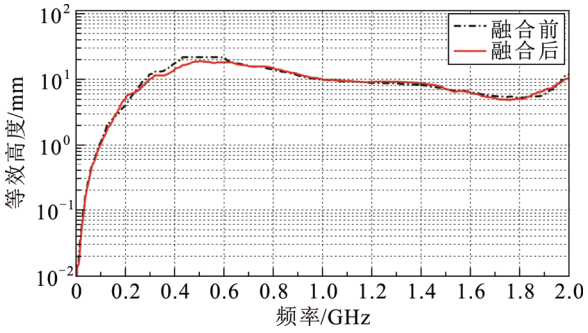


图 3　气体状态传感单元引入前后等效高度随频率变化曲线

Fig.3　Equivalent height versus frequency curves before and after the introduction of the sensing unit to the sensor

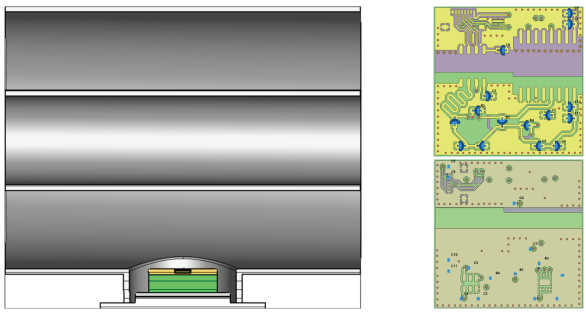


图 4　330 kV GIS 仿真模型

Fig.4　330 kV GIS simulation model

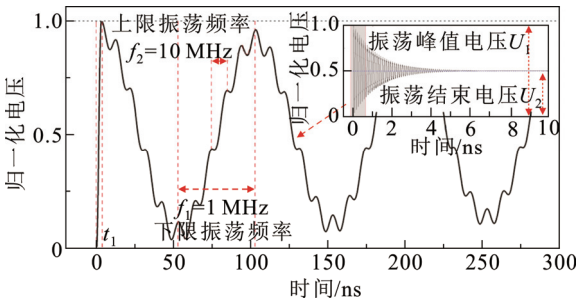


图 5　VFTO 激励波形特征

Fig.5　Waveform characterization of VFTO excitation

3.3　GIS 内典型干扰分布与耦合路径

工频电场干扰和磁场干扰典型分布特征如图 6 所示。从图 6(a)可以看出，GIS 内部的电场呈发散状，为稍不均匀场，电场强度遵循对数衰减规律，由导杆表面向接地外壳逐渐降低；干扰源与传感单元之间为电容性耦合，即中心导杆与传感单元之间存在分布电容，且传感单元存在对地分布电容，使得传感单元上出现耦合电压对设备产生干扰。

表 2 仿真参数设置

Table 2 Simulation parameter setting

部件	材料	电导率/(S·m^{-1})	相对磁导率	相对介电常数
外壳 中心导杆 安装法兰 顶层屏蔽片	铝合金	3.56×10^{7}	1.000 02	
特高频介质层	PTFE		1	2.1
特高频天线板 PCB 导电层 屏蔽网	铜	5.96×10^{7}	0.999 991	
屏蔽外壳主体	硅钢	1.69×10^{6}	1 000 (<1.4 T)	
PCB 介质层	FR4	0.004	1	3.5
MEMS 传感器	硅	10^{-12}	1	11.9
屏蔽壳绝缘层	聚酰亚胺		1	3.5
填充气体	SF_6		1	1.002 026

图 6(b)磁场分布遵循安培环路定律，方向绕中心导杆旋转，磁感应强度随距离衰减；干扰源与传感单元之间耦合为电感性耦合，即两者之间存在互感，表现为中心导杆中变化的电流在周围空间产生变化的磁场，变化的磁场又会在传感单元回路中产生感应电压，从而对设备产生干扰。

暂态电压在 GIS 腔体内激发横电磁波，轴向方向以行波特征传播，形成电场径向发散、磁场环形闭合的瞬态分布特征，与图 6 类似，不同之处在于高频下磁场因趋肤效应被限制于导体表层，表面涡流效应激发反向磁场，抑制电磁波向导体深处渗透。此时干扰源与传感单元之间为辐射耦合，在近场区表现为电容性耦合和电感性耦合叠加。

4 传感单元电磁屏蔽设计与分析

4.1 传感单元电磁屏蔽外壳

根据上述分析，气体传感单元所受电磁干扰主要来源于高压导杆与传感单元间的电容性耦合和变化磁场导致的电感性耦合，屏蔽结构需有效降低耦合电容和互感，从电磁场角度分析，这一措施表现为降低传感单元周围的电场与磁场强度。

本文所设计的气体状态传感单元屏蔽外壳结构示意图如图 7 所示。屏蔽外壳采用多层屏蔽结构：最内层为聚酰亚胺薄膜，确保传感单元与外壳金属部分之间的电气绝缘；聚酰亚胺薄膜外部为接地的硅钢屏蔽壳主体，一方面降低传感单元与中心导杆之间的分布电容，进而削弱电场，另一方面束缚工频磁场、吸收高频磁场，以降低传感单元承受的磁

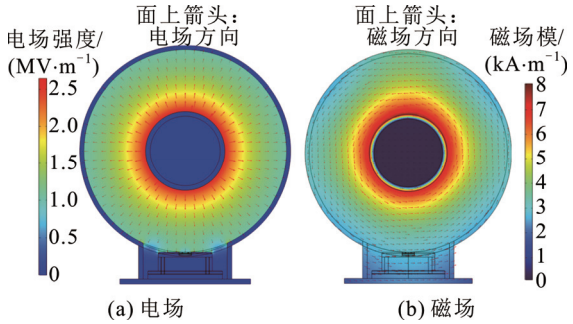


图 6 工频下电场和磁场典型分布特征

Fig.6 The typical distribution characteristics of electric and magnetic fields under power frequency

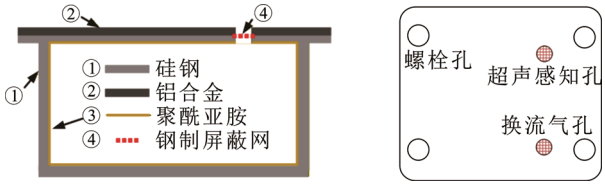


图 7 屏蔽外壳结构示意图

Fig.7 Schematic structure of the shielding enclosure

场强度；最上层为铝合金层，其涡流效应更强，能够反射更多的电磁波，且其非磁特性可有效防止高频条件下的磁饱和。

针对传感单元检测功能需求，在温湿度 MEMS 传感器正上方的屏蔽壳上加工有换流气孔，尺寸为 2 mm；为降低换流气孔引入导致电场屏蔽效果减弱的影响，在换流气孔处添加了屏蔽网，设置在两层金属结构之间，避免其脱落进入 GIS 腔体形成放电缺陷；此外，屏蔽外壳的上边缘设计有螺栓孔，用于屏蔽外壳整体固定。

4.2 工频电场屏蔽分析

本文对工频电场的屏蔽主要通过接地的屏蔽外壳和屏蔽网实现，具体屏蔽原理如图 8(a)所示，在未屏蔽时，中心导杆与气体状态传感单元之间的耦合电容为 C_{12}，传感单元的对地电容为 C_{2G}，其中 U_1 为中心导杆上电压，根据电容分压原理，传感单元上干扰电压 U_2 为式(1)。

$$U_2=\frac{U_1C_{12}}{C_{12}+C_{2G}} \tag{1}$$

当中心导杆和传感单元之间存在接地的屏蔽体时，出现 2 个电容 C_{1S} 和 C_{2S}，传感单元上的感应电压变为式(2)，此时 C_{12} 的耦合路径为屏蔽体的换流气孔，相比未屏蔽体时有效耦合路径变长，电容值变小，使得感应电压大幅降低，起到对工频电场的屏蔽作

用。屏蔽网进一步减小了 C_{12}，以降低干扰电压。

$$U_2=\frac{U_1C_{12}}{C_{12}+C_{2G}+C_{2S}} \tag{2}$$

此外，要实现对工频电场的屏蔽，屏蔽体必须可靠接地，当屏蔽体未接地或接地不可靠时，高压臂耦合电容为 C_{12}+(C_{1S}//C_{2S})，此时敏感单元上的电压相比未屏蔽时变大，屏蔽体起到相反的作用[26]。

图 8(b)和图 8(c)显示了屏蔽前后气体状态传感单元附近的电场分布，可以看出，在添加屏蔽外壳后，大部分强电场直接终止在屏蔽外壳表面，但仍有部分电场穿过换流气孔后进入屏蔽壳内，耦合在传感单元上，不添加屏蔽网时传感单元周围电场强度约 28 781 V/m，感应电压约 3.94 V，传感单元仍无法安全运行。一般 MEMS 传感器上持续感应电压不能超过±1.2 V，短时感应电压不能超过±20 V/ms[27]。

不同屏蔽条件下 MEMS 传感器上方的电场强度分布曲线如图 8(d)所示。可以看出，与仅有屏蔽壳时电场强度在孔隙处缓慢下降过程相比，屏蔽网直接将电场抑制到了一个极低值，这是因为屏蔽网的单个孔隙更小，电场会更快指向接地边缘，使得多个孔隙叠加后电场强度和感应电压也不会太高，此时传感单元上方电场强度仅为 426 V/m，传感单元上最大感应电压仅为 0.053 V。

4.3　工频磁场屏蔽分析

硅钢材质的屏蔽外壳主体主要用于屏蔽工频磁场，原理如图 9(a)，其中 H_1 表示经过传感单元的磁场强度，H_2 表示进入屏蔽外壳的磁场强度。对一个固定尺寸的材料，在未磁饱和时，其相对磁导率越大，磁阻越低，磁感线更趋向于从其中经过，因此高磁导率的屏蔽外壳会引导并集中周围的磁感线，将原本经过传感单元的大部分磁感线束缚在屏

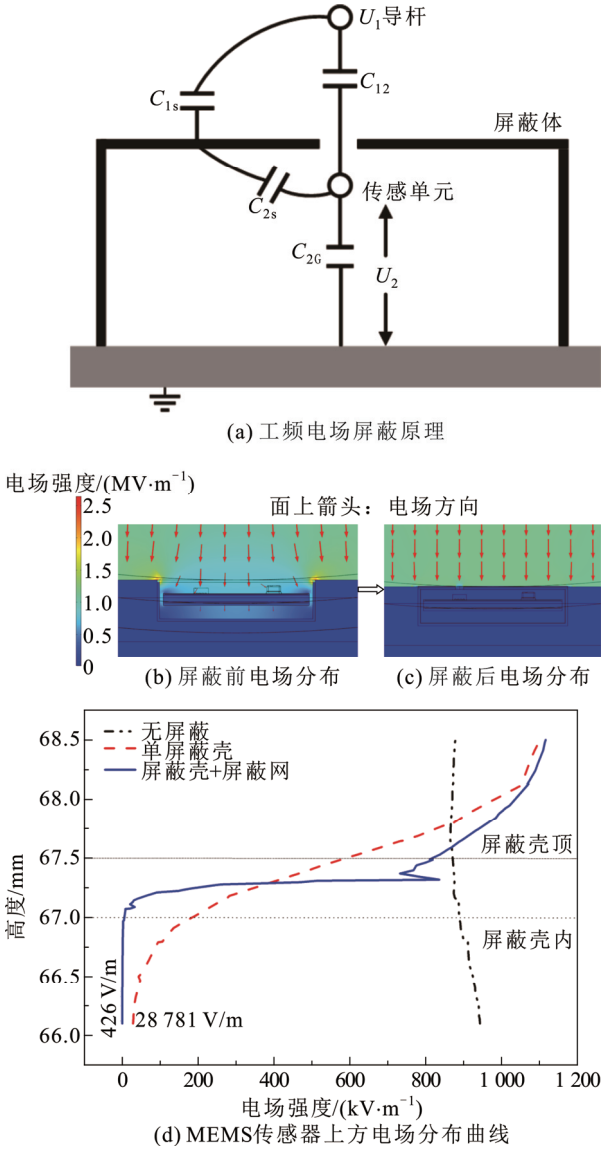


图 8　工频电场屏蔽原理及特征

Fig.8　The shielding principle and results of power frequency electric fields

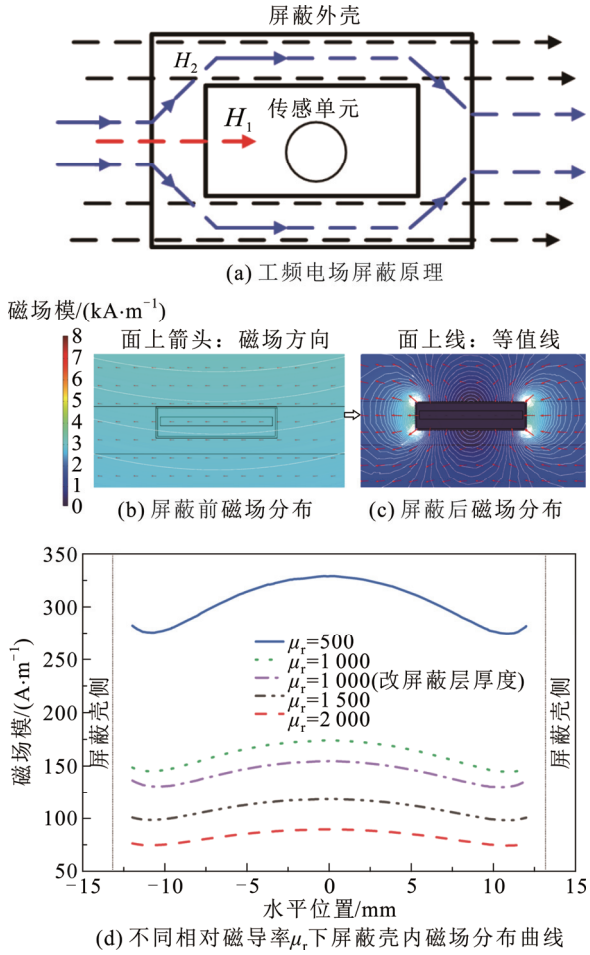


图 9　工频磁场屏蔽原理及特征

Fig.9　The shielding principle and results of power frequency magnetic fields

蔽外壳金属层中，从而降低敏感单元上的磁通密度，起到磁场屏蔽效果[28]。

图 9(b)和图 9(c)显示了屏蔽前后磁场分布特征，可以看出，与未屏蔽(或屏蔽壳为非磁性材料)时相比，原本直接穿过传感单元的工频磁场磁感线集中从屏蔽外壳的一侧进入，再从另一侧返回，磁感线主要集中在屏蔽壳金属层内，使得壳体内部磁场强度大幅下降，从而起到对工频磁场的屏蔽作用，屏蔽前传感单元周围磁场强度高达 2 822 A/m，屏蔽后磁场强度仅为 174 A/m。

图 9(d)显示了不同相对磁导率屏蔽外壳对磁场屏蔽后，传感单元上不同水平位置处的磁场强度，可以看出，相对磁导率越高，屏蔽壳内部磁场强度越低，但相对磁导率提升带来的屏蔽效能提升有限；同时，在相同相对磁导率下，增加屏蔽壳厚度也不能带来屏蔽效能的明显提升。

4.4 暂态电磁场屏蔽分析

屏蔽外壳对暂态电磁场屏蔽原理如图 10 所示，主要为 3 个过程：对表面电磁波的反射、传播路径上电磁波的阻碍和泄漏进壳体内部电磁波的吸收。这里为了更清晰的分析对暂态电磁场的屏蔽过程，根据电磁波在金属内部传播时遇到的对电磁场的阻碍程度，引入式(3)计算屏蔽外壳的波阻抗 Z_C。

$$Z_C = \frac{1+\mathrm{j}}{\sigma\delta} = (1+\mathrm{j})\sqrt{\frac{\omega\mu_0\mu_r}{2\sigma}} \tag{3}$$

式中：j 为虚数单位；σ 为导体的电导率，S/m；δ 为趋肤深度，表示电磁波在导体中的穿透深度；ω 为电磁波的角频率；μ_0 为真空磁导率。

首先当外部介质中传播的电磁波到达屏蔽外壳表面时，由于交界面阻抗不匹配引起电磁波的折射和反射，其中反射率主要决于交界面两边材料的波阻抗差异，数值差异越大，电磁波反射越多。根据式(3)可以看出，频率一定时，导体波阻抗与 μ_r/σ 成正相关，气体介质的波阻抗远大于导体波阻抗，因此具有越高电导率或越低磁导率的材料反射率越大[29-30]，顶层铝合金层能够反射大部分电磁波，同时由于铝合金层的非磁性特征，高频下完全不用考虑内部的磁饱和。

剩余的一部分电磁波折射进导体内部并不断衰减，可以用趋肤深度表示，按照雷电全波最小频率计算，铝合金和硅钢片中的趋肤深度分别约为 0.84 mm 和 0.12 mm，本文中铝合金层和硅钢层的厚度分别为 0.2 mm 和 0.3 mm，完全能够满足对折射进壳体内部电磁波的屏蔽。

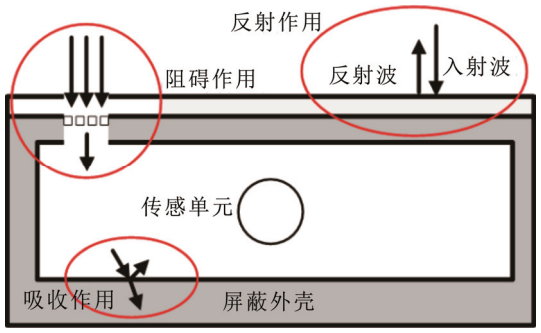


图 10 电磁场屏蔽原理

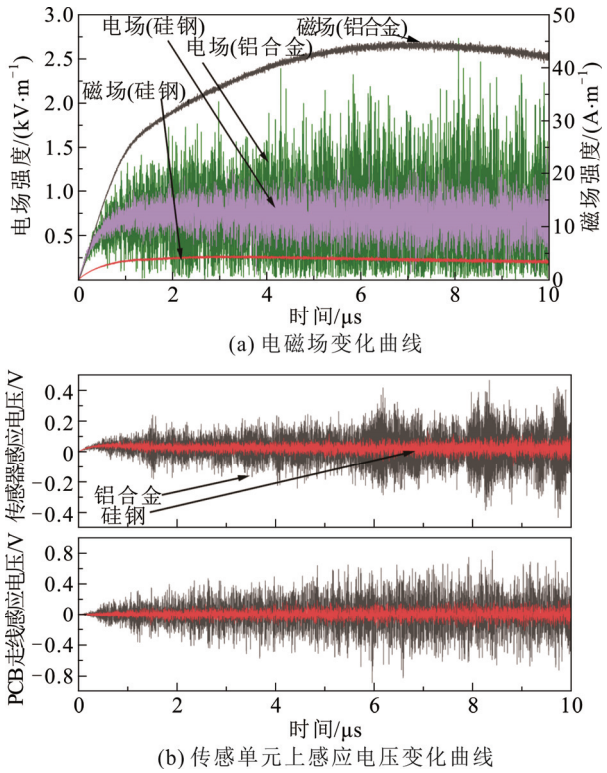
Fig.10 The principle of electromagnetic field shielding

由于换流气孔的存在，部分电磁波会通过屏蔽壳上的换流气孔进入屏蔽壳内部。根据缝隙天线效应[31]，当孔隙的线性尺寸接近电磁波的半波长时，孔隙会形成类似缝隙天线结构，导致腔体内部谐振并大幅增强电磁波的穿透能力，本文暂态电压激发的电磁波波长远大于换流气孔和屏蔽网孔尺寸，此时屏蔽网孔阻碍电磁波传播的作用仍旧有效，因此屏蔽网能够降低泄漏进屏蔽壳内的电磁场。

经过屏蔽网衰减后的电磁波最终进入屏蔽壳内部，对传感单元形成干扰，从上述分析可知，金属高反射率导致电磁波在壳体内边界不断反射叠加形成二次干扰。根据式(3)可知，相对磁导率高、电导率低的硅钢材料对泄漏电磁波的反射率更低、吸收能力更强，因此屏蔽外壳主体采用了硅钢材质以降低内部电磁场的反射。

仿真获得了雷电过电压下不同材质屏蔽外壳内部电场、磁场随时间的变化曲线，结果如图 11(a)所示。可以看出，屏蔽壳内部的电场和磁场在电压上升阶段基本和雷电过电压波形一致，但是随着时间推进，内部电磁波不断反射，导致内部电磁场出现较大的波动，其中由于高频近场时电场起主导作用，电场曲线波动程度更大。在屏蔽外壳材质变为硅钢后，电场的波动幅值出现明显下降，更多的电磁波进入壳体内部消耗而不是被反射。

图 11(b)显示了传感单元 MEMS 传感器和 PCB 走线上的感应电压变化曲线，可以看出，MEMS 传感器上电压发展趋势与雷电波基本一致，但 PCB 走线上感应电压缓慢增加，这是因为 PCB 走线上有大量的电容元件，能够有效抑制初始阶段快速的电压升高；当屏蔽外壳主体为硅钢时，电场波动下降，磁场幅值降低，使得 MEMS 传感器和 PCB 走线上

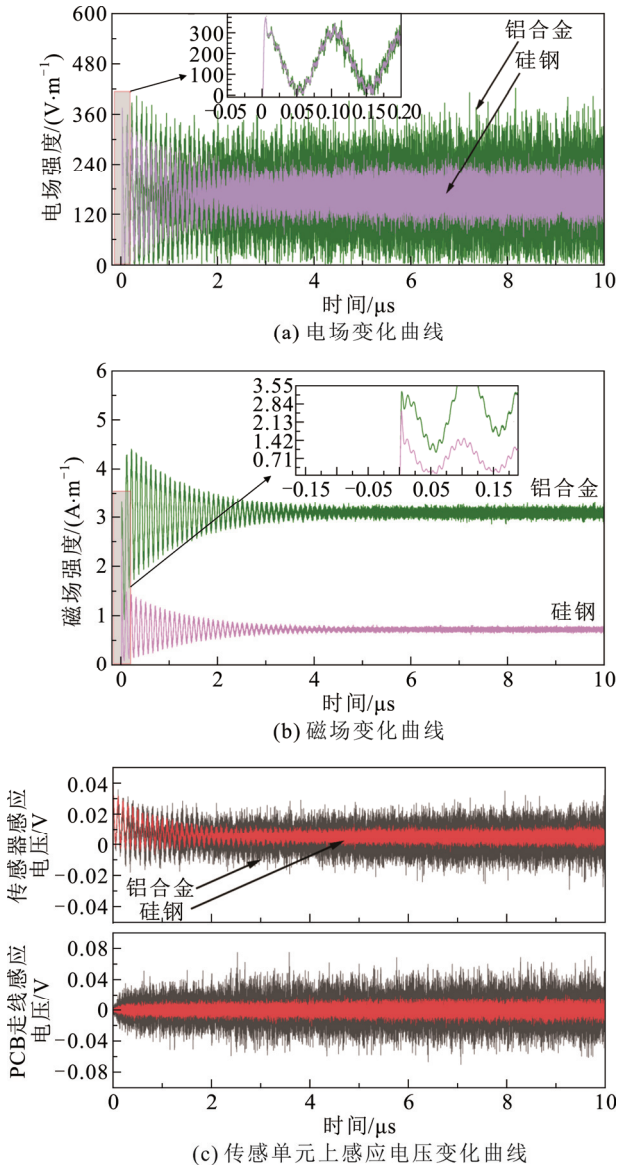


(a) 电磁场变化曲线

(b) 传感单元上感应电压变化曲线

图 11　雷电激励下不同材料屏蔽壳屏蔽效果

Fig.11　Shielding effect of enclosures with different material under lightning excitation



(a) 电场变化曲线

(b) 磁场变化曲线

(c) 传感单元上感应电压变化曲线

图 12　VFTO 激励下不同材料屏蔽外壳屏蔽效果

Fig.12　Shielding effect of enclosures different material under VFTO excitation

感应电压降低。

图 12 显示了 VFTO 作用下的电磁场变化和感应电压变化曲线，可以看出，与雷电压作用下的结果相比，整体变化趋势一致，屏蔽外壳为硅钢时，后续电场波动降低，磁场幅值变小；图 12(b)显示了磁场变化在初始阶段的不同，表现为在 VFTO 的第一个上升沿时，外壳相对磁导率的变化并没有改变磁场上升沿的斜率，主要是波前时间短，此阶段仍是电磁波传播阶段，尚未发生反射，但在下一个波形振荡时，高磁导率屏蔽壳下磁场为低值；图 12(c)显示了初始阶段 MEMS 传感器上感应出较高电压，根据电磁感应定律，电路中感应电动势的大小与穿过电路的磁通量成正比，VFTO 第一个上升沿频率高，感应电动势更高，后随着时间逐渐下降。

4.5　电磁场整体屏蔽效果

在不同干扰源下，仿真获得了不同电压等级 GIS 传感单元上最大感应电压和承受的最大场强度，如图 13 所示。从图 13(a)和图 13(b)可以看出，气体状态传感单元周围工频电场均在 120 V/m 以下，工频磁场均在 200 A/m 以下，稳态运行时传感单元上电压不会超过±0.1 V；从图 13(c)可以看出，暂态干扰下电场强度不会超过 1 500 V/m，磁场强度不会超过 5 A/m，传感单元上暂态电压不会超过±0.2 V；完全能够满足传感单元内置后的安全性。

在 252 kV GIS 实体上安装融合传感器进行各类型试验，传感单元均正常工作。

5　结论

1）现有外置式气体状态监测方式容易受到环境影响，测量值与内部实际气体状态变化不一致，难以用于准确的绝缘状态分析；直接监测内部气体状态的准确性更高。

2）基于 MEMS 传感器设计的气体状态传感单

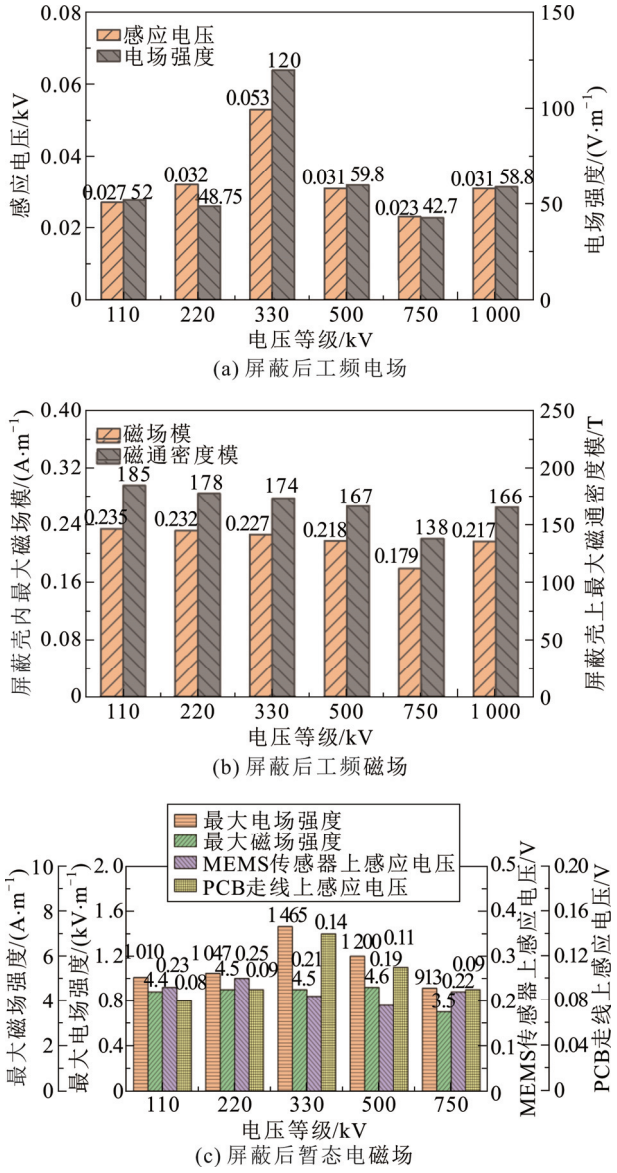


图 13 各电压等级下电磁场屏蔽效果

Fig.13 Electromagnetic field shielding results at different voltage levels

元可以监测多个气体状态参量，且通过与内置式特高频集成实现了气体状态的内部监测，融合感知传感器结构简单、密封可靠，性能参数满足监测要求。

3）GIS 设备内部电磁干扰呈多模态、宽频域特征，电磁干扰耦合路径为电容性耦合和电感性耦合。

4）设计的屏蔽外壳为多层结构，其中接地硅钢主体结构能够有效屏蔽工频电场、工频磁场以及吸收高频电磁场，顶层铝合金层能够反射大部分干扰电磁波，换流气孔处的屏蔽网进一步提升了屏蔽效果；仿真结果表明在各电压等级 GIS 下传感单元上感应电压均不超过±0.2 V，能够在内部安全运行。

参考文献 References

[1] 全球能源互联网发展合作组织. 全球能源互联网发展战略白皮书[R]. 北京：全球能源互联网发展合作组织，2024：10-36.
Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. Global energy interconnection development strategy white paper[R]. Beijing, China: GEIDCO Press, 2024: 10-36.

[2] LI H, ZHENG Y, ZHANG P F, et al. Effect of temperature on insulation properties of SF_6/N_2 mixed gas under AC voltage[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2020, 48(4): 914-920.

[3] 李军浩，史心悦，韩旭涛，等. 气体状态对 SF_6 气体中局部放电的影响研究[J]. 高压电器，2023，59(11)：15-23.
LI Junhao, SHI Xinyue, HAN Xutao, et al. Influence of gas state on partial discharge in SF_6 gas[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11): 15-23.

[4] 李 星，许 渊，丁登伟，等. 温度对 GIS 绝缘子表面金属异物局部放电及闪络特性的影响[J]. 中国电机工程学报，2022，42(1)：406-414.
LI Xing, XU Yuan, DING Dengwei, et al. Influence of temperature on partial discharge and flashover characteristics of metal particle on GIS insulator surface[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 406-414.

[5] 马径坦，张乔根，游浩洋，等. SF_6 电气设备中微水对固体绝缘材料闪络电压的影响[J]. 高电压技术，2018，44(6)：1822-1827.
MA Jingtan, ZHANG Qiaogen, YOU Haoyang, et al. Influence of moisture on flashover voltage of solid insulating materials in SF_6 electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1822-1827.

[6] ZHANG X X, XIAO S, ZHANG J, et al. Influence of humidity on the decomposition products and insulating characteristics of CF_3I[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 819-828.

[7] 杨 哲，胡刚正，石秉恒，等. SF_6 气体绝缘变压器有载开关仓室密度计异常分析及处理[J]. 农村电气化，2021(11)：72-73.
YANG Zhe, HU Gangzheng, SHI Bingheng, et al. Analysis and management of densitometer abnormality in OLTC (on load tap chagger) bunker of SF_6 gas insulated transformer[J]. Rural Electrification, 2021(11): 72-73.

[8] 中国电工技术学会. GIS 设备红外热成像检测现场应用导则：T/CES 113—2022[S]. 北京：中国电工技术学会，2016.
China Electrotechnical Society. Application guidelines for on-site infrared detection of GIS: T/CES 113—2022[S]. Beijing, China: China Electrotechnical Society, 2022.

[9] 国家能源局. 气体绝缘金属封闭开关设备运行维护规程：DL/T 603—2017[S]. 北京：国家能源局，2017.
National Energy Administration. Regulation of operation and maintenance for gas-insulated metal-enclosed switchgear: DL/T 603—2017[S]. Beijing, China: National Energy Administration, 2017.

[10] 陈 强，李庆民，丛浩熹，等. 基于多点分布式光纤光栅的 GIS 隔离开关触头温度在线监测技术[J]. 电工技术学报，2015，30(12)：298-306.
CHEN Qiang, LI Qingmin, CONG Haoxi, et al. On-line temperature monitoring for GIS disconnecting switch contacts based on multipoint-distributed fiber Bragg grating[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 298-306.

[11] 韩德斌，肖少阳，张超群，等. 变电站 GIS 结构健康状况在线监测[J]. 东北电力技术，2021，42(10)：1-4.
HAN Debin, XIAO Shaoyang, ZHANG Chaoqun, et al. On-line monitoring of GIS structure health status in substation[J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(10): 1-4.

[12] 樊小鹏，周永言，李 丽，等. SF_6 微水含量在线自动检测技术的研发[J]. 广东电力，2016，29(2)：59-63.
FAN Xiaopeng, ZHOU Yongyan, LI Li, et al. Research and development of online automatic detection technology for SF_6 micro-water

content[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(2): 59-63.

[13] 陈　强，李庆民，丛浩熹，等. 引入多重边界条件的 GIS 母线温度分布多场耦合计算及影响因素分析[J]. 电工技术学报，2016，31(17)：187-195.
CHEN Qiang, LI Qingmin, CONG Haoxi, et al. Numerical calculation and correlative factors analysis on temperature distribution of GIS bus bar based on coupled multi-physics methodology combined with multiple boundary conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 187-195.

[14] KAMEI M, TAKAI O. Influence of sensor information accuracy on condition-based maintenance strategy for GIS/GCB maintenance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 625-631.

[15] TATEMI M, INAMI H, ROKUNOHE T, et al. Study on field demonstration of high-sensitivity SF_6 leakage detection method for gas insulated switchgear[J]. Electrical Engineering in Japan, 2021, 214(1): 35-41.

[16] 王　琦，郭　洁，邱毓昌，等. 周围空气温度对 SF_6 断路器中气体水分含量的影响[J]. 高压电器，2004，40(3)：208-209.
WANG Qi, GUO Jie, QIU Yuchang, et al. Influence of environmental temperature on moisture content in the SF_6 circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(3): 208-209.

[17] CHEN H, WANG H T, GAO Y T, et al. Study on the temperature distribution characteristics of SF_6 gas in GIS based on multi-physical field coupling[C]//2023 IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Shanghai, China: IEEE, 2023: 1-4.

[18] GRABER L. Improving the accuracy of SF_6 leakage detection for high voltage switchgear[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(6): 1835-1846.

[19] ASRI M I A, HASAN N, FUAAD M R A, et al. MEMS gas sensors: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(17): 18381-18397.

[20] 韩旭涛，刘泽辉，李军浩，等. 基于光电复合传感器的 GIS 局放检测方法研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(22)：6760-6768.
HAN Xutao, LIU Zehui, LI Junhao, et al. Study on PD detection method in GIS based on the optical and UHF integrated sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6760-6768.

[21] WANG H T, ZHANG X R, HAN X T, et al. A novel composite sensor for overvoltage and UHF partial discharge measurement in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 5476-5479.

[22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求：GB/T 11022—2011[S]. 北京：中国标准出版社，2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards: GB/T 11022—2011[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2012.

[23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 绝缘配合　第 1 部分：定义、原则和规则：GB/T 311.1—2012[S]. 北京：中国标准出版社，2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Insulation co-ordination-part 1: definitions, principles and rules: GB/T 311.1—2012[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2013.

[24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 高电压试验技术　第 1 部分：一般定义及试验要求：GB/T 16927.1—2011[S]. 北京：中国标准出版社，2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. High-voltage test techniques-part 1: general definitions and test requirements: GB/T 16927.1—2011[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2012.

[25] 中国电器工业协会. 高海拔特快速暂态过电压(VFTO)试验技术导则：T/CEEIA 320—2018[S]. 北京：中国电器工业协会，2011.
China Electrical Equipment Industry Association. Application guidelines of very fast transient overvoltage (VFTO) test technology in high altitude: T/CEEIA 320—2018[S]. Beijing, China: China Electrical Equipment Industry Association, 2011.

[26] 梁振光. 电磁兼容原理、技术及应用[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，2017.
LIANG Zhenguang. Principle, technology and application of electromagnetic compatibility[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Machine Press, 2017.

[27] Sensirion. Datasheet SHT3x digital[EB/OL].[2025-05-08]-version 0.93]Switzerland: Sensirion. https: //sensirion. com/cn.

[28] 史晓宁. 基于屏蔽室法的材料电磁屏蔽效能的简易测试方法及影响因素分析[D]. 保定：华北电力大学，2015.
SHI Xiaoning. Measurement and influence factors for shielding effectiveness of material based on shielding enclosures method[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2015.

[29] 赵灵智，胡社军，何琴玉，等. 电磁屏蔽材料的屏蔽原理与研究现状[J]. 包装工程，2006，27(2)：1-4，15.
ZHAO Lingzhi, HU Shejun, HE Qinyu, et al. Shielding principle and research progress of electromagnetic shielding materials[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(2): 1-4, 15.

[30] 孔　静，高　鸿，李　岩，等. 电磁屏蔽机理及轻质宽频吸波材料的研究进展[J]. 材料导报，2020，34(9)：9055-9063.
KONG Jing, GAO Hong, LI Yan, et al. Research progress of electromagnetic shielding mechanism and lightweight and broadband wave-absorbing materials[J]. Materials Reports, 2020, 34(9): 9055-9063.

[31] 吕善伟，任济时，方　愔. 波导缝隙天线耦合特性的研究[J]. 电子学报，1985，13(5)：92-101.
LÜ Shanwei, REN Jishi, FANG Yin. Study of coupling properties of slotted antenna in a rectangular waveguide[J]. Acta Electronica Sinica, 1985, 13(5): 92-101.



陈　欢
1999—，男，博士生
主要从事电力系统在线监测及故障诊断的研究
E-mail: chenhuan0616@stu.xjtu.edu.cn

CHEN Huan
Ph.D. candidate



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@xjtu.edu.cn

LI Junhao
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-03-28　在线出版日期　2025-07-14　　编辑　卫李静