

电力系统智能化运维中 GIS 设备 SF₆ 气体 泄漏检测方法研究

田忠¹, 常敏², 金海勇², 贺兵²

(1. 国网湖北省电力有限公司直流公司, 湖北 宜昌 443000;

2. 上海乐研电气有限公司, 上海 201802)

摘要: 现有技术中的变电站地理信息系统 (GIS) 设备内 SF₆ 气体泄漏浓度较大, 检测精度较低, 为了提高 GIS 设备 SF₆ 气体泄漏检测能力和检测精度, 该研究设计了 TMS+XD 芯片提高巡视机器人性能, 采用离子迁移法设计 SF₆ 检测技术, 利用扫描窗口提供的 SF₆ 浓度分析离子波谱, 能够提高最佳气体填充范围寻优能力, 有力地保证变电站 GIS 设备运行安全能力, 能够根据不同环境通过自适应调节的方式改善 GIS 设备运行能力, 提高变电站 GIS 设备中 SF₆ 气体敏感度分析能力, 进而更加精准地判断气体泄漏规律; 采用差分能量检测 (DED) 算法和概率学公式掌握 SF₆ 气体泄漏浓度, 进而制定出最佳填充范围, 增加变电站 GIS 设备的安全性, 提高了变电站 GIS 设备实际运行情况; 试验表明, 该研究检测系统输出的 SF₆ 泄漏浓度为 15.8 mol/mL, 气体泄露准确度精度为 92.5%, SF₆ 气体泄漏浓度少, 检测精度高。

关键词: SF₆ 气体泄漏检测系统; 智能巡视机器人; TMS+XD 联合芯片; 离子迁移法; DED 算法

Research on SF₆ Gas Leakage Detection Method of GIS Equipment in Intelligent Operation and Maintenance of Power System

TIAN Zhong¹, CHANG Min², JIN Haiyong², HE Bing²

(1. DC Company of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Yichang 443000, China;

2. Shanghai Leyan Electric Co., Ltd., Shanghai 201802, China)

Abstract: The SF₆ gas leakage concentration in the substation geographic information system (GIS) equipment of the existing technology is relatively large, and the detection accuracy is low. To improve the detection ability and detection technology of the SF₆ gas leakage with the GIS equipment, the chip of TMX and XD is used to design and improve the performance of the patrol robot, the ion migration method is used to design the SF₆ detection technology, and the SF₆ concentration provided by the scanning window is used to analyze the ion spectrum. The operation ability of GIS equipment through the self-adaptive adjustment is improved, the sensitivity analysis ability of SF₆ gas is made better in the GIS equipment of substations, then the trade of gas leakage is judged more accurately; The differential energy detection (DED) algorithm and probability formula are adopted to master the SF₆ Gas leakage concentration, which formulates the best filling range and improves the safety and actual operation of the GIS equipment in the substation. The test shows that the SF₆ leakage concentration output by the detection system is 15.8 mol/mL, the gas leakage accuracy is 92.5%, the SF₆ gas leakage concentration is small, and the detection accuracy is high.

Keywords: SF₆ gas leakage detection system; intelligent patrol robot; TMS + XD joint chip; ion transfer method; DED algorithm

0 引言

电力设备安全大多需要使用绝缘设备, SF₆ 气体是组成绝缘设备的重要部分, 因此在电力安全检测技术中, 对 SF₆ 气体的检测效率直接关系到电力设备能否顺利进行的技术

关键。常规技术检测大多采用 SF₆ 气体传感器、SF₆ 气体检测电路等方式, 这种方法虽然在一定程度上提高了 SF₆ 气体检测水平, 但是仍旧存在一定的局限性。比如检测能力差、检测滞后等, 随着人工智能技术的飞速发展和智能巡视机器人的逐步应用, 为 SF₆ 气体检测提供了新思路。

收稿日期: 2022-04-26; **修回日期:** 2022-06-02。

作者简介: 田忠(1975-), 男, 辽宁葫芦岛人, 大学本科, 工程师, 主要从事特高压直流电气设备状态检修、数字化转型及其在线监测及电气仪器仪表等方向的研究。

引用格式: 田忠, 常敏, 金海勇, 等. 电力系统智能化运维中 GIS 设备 SF₆ 气体泄漏检测方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(10): 27-32.

其中文献 [1] 设计出 FFT 检测方法, 利用特征分解法和紫外光谱提取环境元素, 进而分析出变电站 GIS (geographic information system) 设备中 SF₆ 冗余情况。该技术方案检测试验贴合实际标准, 具有较高的检测力度。但在运行过程中容易引起高低频噪声, 对变电站 GIS 设备造成影响, 不利于电力系统的稳定运行; 文献 [2] 利用分布式半导体激光器全面扫描变电站 GIS 设备整体结构, 能够根据扫描数据构建 CEPAS 检测系统, 进而形成采集和分析一体化处理系统, 对变电站 GIS 设备 SF₆ 泄漏具有较高的针对性, 更为全面的掌握变电站 GIS 设备气体泄漏情况。但这种方法采用的激光器成本较高, 对人体危害较大, 因此不具有普遍适用性

1 基于 MS+XD 芯片嵌入式电路设计

针对上述变电站 GIS 设备 SF₆ 泄漏检测技术存在的问题, 该研究基于智能巡视机器人研究方向, 在机器人内部加装检测系统, 通过将 TMS+XD 芯片嵌入到机器人系统中, TMS 系列单片机应用的是 8 位 CMOS 单片机, 该单片机通过设置多种存储模式、多种外围接口模式, 这种模式能够适应复杂的实时控制场合。TMS370C 系列单片机提供了通过整合先进的外围功能模块及各种芯片的内存配置^[3-5], 具有高性价比的实时系统控制。同时采用高性能硅栅 CMOS EPROM 和 EEPROM 技术实现。低工作功耗 CMOS 技术, 宽工作温度范围, 噪声抑制, 再加上高性能和丰富的片上外设功能, 使 TMS370C 系列单片机在应用过程中具有突出的技术效果。为了实现对变电站 GIS 设备环境的分析功能, 利用离子迁移法分析环境中的 SF₆ 离子, 进而掌握变电站 GIS 设备中气体情况, 离子迁移能够将电路板上的金属如铜、银、锡等在一定条件下发生离子化并在电场作用下通过绝缘层向另一极迁移而导致绝缘性能下降。离子在单位强度 (V/m) 电场作用下的移动速度称之为离子迁移率, 它是分辨被测离子直径大小的一个重要参数。空气离子直径越小, 其迁移速度就越快^[6-8]。离子迁移率是表达被测离子大小的重要参数。离子运动速度与离子直径成反比, 而离子迁移率与离子运动速度成正比, 故离子迁移率与离子直径成反比。通过差分能量检测 (DED, differential energy detection, 计算出气体泄漏对变电站 GIS 设备的影响, 制定出最优 SF₆ 填充范围, 为输配电设备安全运行提供帮助^[9-10]。TMS+XD 联合设计如图 1 所示。

本研究通过将 TMS 和 XD 芯片联合, 利用 TMS 芯片的信号调理功能和 XD 的数据分析能力对机器人扫描数据精确分析, 从而加强检测系统数据处理能力, 对后续 SF₆ 气体泄漏的分析提供数据支持, 同时更为方便算法寻优找到最佳气体填充范围, 保证变电站 GIS 设备运行的安全^[11-12], 图 1 中通过连接电路将 TMS32 芯片与 XD129 芯片连接起来, 由引脚 ET 输出电流, 通过电感和电阻串联回路, 同时与电容 C 组成并联支路, 电阻 R1 与 EA 连接电阻 R2 组成

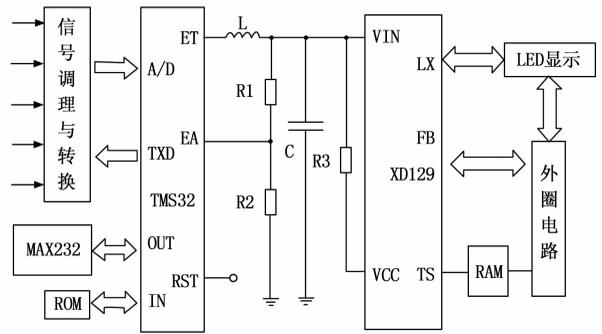


图 1 TMS+XD 联合设计电路

并联回路, 最终输入到 XD 芯片的 VIN 引脚和 VCC 引脚, 两个引脚线路通过 R3 阻隔。TMS32 芯片输入数据由信号调理与转换负责, 通过 MAX232 连接器和 ROM 进行信息采集储存。XD129 芯片完成数据分析输出, 通过 LED 显示器演示数据规律, 通过连接外圈电路, 芯片功能数据由片内 RAM 进行读取, 进而完成变电站 GIS 设备环境的分析^[13-16]。

组成芯片在运行过程中能够根据不同环境完成自适应调节, 为对变电站 GIS 设备中 SF₆ 气体的敏感度, 分析芯片功能需要更为全面, 由此建立多方位功能模块如图 2 所示。

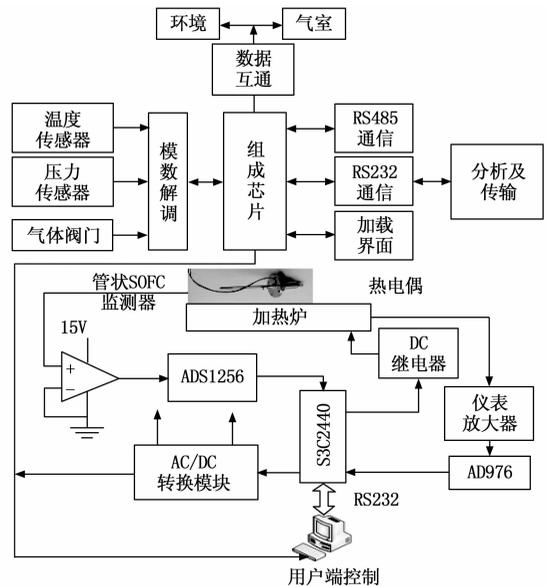


图 2 组成芯片多方位功能模块

通过对 TMS32+XD129 联合芯片的功能分析建立多方位功能模块, 以组成芯片为核心, 通过对变电站 GIS 设备环境和气室分析, 与组成芯片完成数据互通, 将传感信息通过模数解调方式输入到组成芯片中, 传感装置安装在智能巡视机器人扫描窗口^[17-18], 主要对环境中温度、气体压力和变电站 GIS 设备气体阀门进行采集。在接收模块中设置有 RS485 通信和 RS232 通信端口完成数据接收, 经过后

续分析及传输最终将结果加载到演示界面上, 便于检测 SF₆ 气体具体泄漏情况^[19]。

在设置 SOFC 监测器时, 其内装配有加热炉, 加热炉为监测器提供工作温度。K 型热电偶的输出信号由仪表放大器放大, 并用 AD976 芯片采样。比较设定点和实时工作温度 (700 °C)^[20], 以便 S3C2440 中央处理器 (CPU) 中实现的比例-积分-微分模块向直流固态继电器输出脉宽调制信号, 以控制熔炉加热, 其中 SOFC 监测器的输出信号约为 200~300 mV, 由 ADS1256 的 24 位模数转换芯片直接采样, 不加其它放大处理以避免噪声。电压跟随器用于隔离, 增加输入阻抗, 提高监测器的负载能力^[21]。数字信号以 RS232 格式封装并传输到计算机, 对数据进行处理, 识别出油中的 SF₆ 气体。

2 离子迁移法检测 SF₆ 泄漏技术

根据机器人扫描的变电站 GIS 设备环境数据, 该研究通过采用离子迁移法将设备中 SF₆ 离子浓度迁移到气体分析仪中, 从而判断气体泄漏浓度对变电站 GIS 设备运行的影响, 并记录事件发生时间, 为后续人工维护和检修提供帮助, 离子迁移技术原理如图 3 所示。

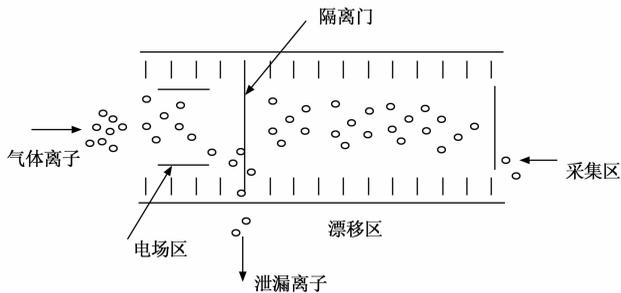


图 3 离子迁移原理图

将待检测设备中气体离子通过发射源送入离子迁移装置中, 载气离子和 SF₆ 离子在分离源的作用下发生电离反应, 形成分化性的多种离子。经过电场的作用, 气体离子通过隔离门进入漂移区, 隔离门周期性开启, 泄漏的气体离子在通过隔离门时被检测^[22-23]。带电离子在漂移区中不断碰撞, 由于气体离子的迁移速率存在差异, 因此在漂移区中完成分离, 在采集区由收集板检测。变电站 GIS 设备利用离子迁移法对泄漏的 SF₆ 气体离子进行检测, 检测框图如图 4 所示。

离子迁移检测技术能够将变电站 GIS 设备中 SF₆ 气体迁移到分析仪中, 通过电力设备允许泄漏 SF₆ 气体浓度调整变电站 GIS 设备阀门通道, 更为有利于设备的安全操作^[24]。离子迁移技术在运行过程中通过分析变电站 GIS 设备中 SF₆ 泄漏数据, 对采集的数据信息进行波形转换, 由此形成电力正波, 该研究采集的气体泄漏以方波形式为例, 之后对电力正波进行变电站 GIS 设备环境分析, 根据分析的气体波谱和光声信号建立图形样式, 进而建立传感波形,

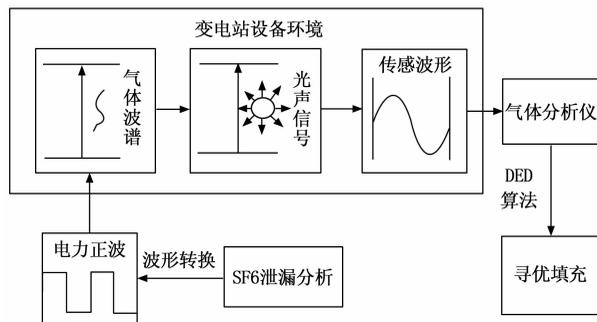


图 4 离子迁移检测框图

电力正波转换的波形一般为正弦或者余弦波形, 波形数据主要来源为 SF₆ 泄漏离子, 通过波形传输到气体分析仪中, 最终通过 DED 算法完成寻优填充操作^[25]。

离子迁移法充分运用了现代波形控制系统和光声感应技术, 通过多个技术功能实现 SF₆ 泄漏气体的离子分析和波形转换, 最终以离子的形式编入算法程序中, 实现变电站 GIS 设备气体泄漏的检测, 为输电系统的稳定奠定基础。

3 DED 算法模型

差分能量检测 (DED, differential energy detection) 算法通过划定的 SF₆ 填充标准对比变电站 GIS 设备内部气体存量, 根据比较结果与预设填充范围判断变电站 GIS 设备状态, 若检测的外界环境 SF₆ 浓度超过预设值, 则表示气体泄漏过大, 发出停机指令; 否则认为内部 SF₆ 浓度处于正常范围^[26]。差分能量检测的原理是这样的, 由于大多数现代密码设备大部分都是通过半导体逻辑门实现的, 半导体逻辑门在架构上通过晶体管构成。当电荷被施加到晶体管的栅极或从栅极移除时, 电子流过硅衬底, 这种电子流消耗能量并产生电磁辐射。

根据机器人扫描窗口数据和离子迁移输出波形分析 SF₆ 气体函数, 则气体检测数学模型表示为:

$$\begin{cases} H_0: y(t) = n(t) \\ H_1: y(t) = h \cdot x(t) + n(t) \end{cases}; t = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式 (1) 中, H_0 表示预设 SF₆ 气体浓度值, H_1 表示机器人检测变电站 GIS 设备内部 SF₆ 浓度, $y(t)$ 表示气体表达函数模型, $n(t)$ 表示内部气体存量, h 表示泄漏气体变化系数, $x(t)$ 表示 SF₆ 泄漏变量函数。

通过公式 (1), 基于气体表达函数模型能够将气体检测作为数据向量量化表示, 将数据信息通过数据量化的方式表达出来。

DED 算法中对变电站 GIS 设备能量的差分计算公式为:

$$Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i(t)]^2 \quad (2)$$

式 (2) 中, Y 表示 DED 算法中能量检测函数, N 表示所需检测设备数量, $y_i(t)$ 表示单体设备检测能量函数。通过公式 (2) 的差分计算, 能够实现 GIS 设备能量的差分计

算, 将这些数据信息通过差分公式计算的方式计算出来。

将差分函数与变电站 GIS 设备 SF₆ 气体检测模型函数集合处理, 对检测变电站 GIS 设备中 SF₆ 气体模型函数简化如下:

$$\begin{cases} H_0: Y \leq \lambda \\ H_1: Y > \lambda \end{cases}; t = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

其中: λ 表示气体标准差分能量值。

通过公式 (3), 能够将变电站 GIS 设备中 SF₆ 气体模型函数通过简化的方式实现, 进一步提高数据计算能力。

根据变电站 GIS 设备运行中可能出现的 SF₆ 气体泄漏故障, 通过 DED 算法估算气体运行时间, 根据填充气体量估算实际效率。

$$Y \sim \begin{cases} \chi_{2m}^2, & H_0 \\ \chi_{2m}^2(2\gamma), & H_1 \end{cases} \quad (4)$$

通过公式 (4), 能够将填充气体量估算实际效率通过数据表达的形式体现出来, 以提高数据计算能力, 公式 (4) 中的 Y 表示 DED 算法中能量估算函数, χ_{2m}^2 表示变电站 GIS 设备运行中气体泄漏预算, H_0 表示预设 SF₆ 气体浓度值, H_1 表示机器人检测变电站 GIS 设备内部 SF₆ 浓度, γ 表示气体标准差分能量值。

根据式 (4) 中 SF₆ 气体泄漏对变电站 GIS 设备运行效率估计值, 利用概率学公式判断存在差分能量情况下气体泄漏概率:

$$P_d = Pr\{Y > \lambda \mid H_1\} = \frac{\Gamma(m, \lambda/2)}{\Gamma(m)} \quad (5)$$

式 (5) 中, 概率公式通过将气体泄漏数据信息转换为对比泄露函数表示, 能够直观体现出差分能量情况下气体泄漏几率, 便于用户发现并评估差分能量数据信息, 其中 P_d 表示变电站 GIS 设备 SF₆ 气体泄漏概率, Pr 表示气体差分能量集, Γ 表示非完全可控变量, m 表示变电站 GIS 设备气体显示量。

经过概率和估算了解变电站 GIS 设备可能出现气体泄漏情况, 实际运行中 SF₆ 气体泄漏和填充规律如下:

$$P_f = Pr\{Y > \lambda \mid H_0\} = Q_m(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \quad (6)$$

式 (6) 中, P_f 表示实际运行中变电站 GIS 设备 SF₆ 气体量值, Pr 表示变电站 GIS 设备运行过程中 SF₆ 计量方式, Y 表示总气体填充量, λ 表示气体变化系数, H_0 表示变电站 GIS 设备初始气体常量, Q_m 表示 SF₆ 对变电站 GIS 设备运行影响效率。

通过 DED 算法对变电站 GIS 设备 SF₆ 气体泄漏浓度估算概率和实际运行中气体泄漏影响^[27-28], 使检测系统更为精确了解变电站 GIS 设备实际运行状况, 对 SF₆ 气体室外和室内浓度比较给予参考价值, 提高本研究检测系统对 SF₆ 气体运行的可行性。

4 试验结果与分析

实验室配置采用 i8 系列双核计算机, 采用 64+256 GB

储存方式。现场实验环境设置, 对 DL/T537 系列变电站 GIS 设备进行检测; 变电站 GIS 设备电压等级 6~35 kV, 设备参数精度为 96%, 算法推算误差不超过 0.5%。在此环境下进行实验, 参数配置如表 1 所示。

表 1 环境参数与配置软件

实验环境	类型	参数
采集装置	智能巡视机器人	多扫描窗口
变电站型号	DL/T537	6~35 kV
计算机	I8 双核 CPU	64+256 GB
运算程序	DED 算法程序	AutoNest
仿真软件	Multisim10.0	

基于上述硬件试验环境, 搭接试验模拟环境, 在模拟环境中, 实验架构如图 5 所示。

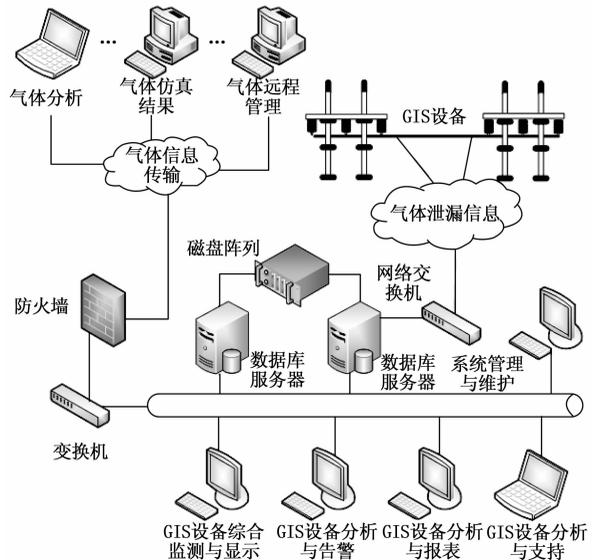


图 5 实验架构示意图

在图 5 中, 通过构建 GIS 设备检测环境, 通过本研究的方法对设备泄露的气体进行模拟, 以实时观测 GIS 设备运行信息。试验过程中通过 5 个小时的观察, 人为设置故障标准值, 将这些数据信息通过数据库服务器或者其他存储空间内实现信息存储和计算, 再将这些数据信息与标准值进行比较。

其中试验过程中, 通过对变电站 GIS 设备运行中 SF₆ 泄漏问题进行研究, 根据智能机器人扫描环境数据进行分析, 通过检测系统对扫描数据分析。分析检测系统对变电站 GIS 设备实际运行过程中 SF₆ 气体的泄漏浓度和精确度, 精确度计算公式为:

$$\text{精确度} = \frac{|\text{测量值} - \text{真实值}|}{\text{真实值}} * 100\% \quad (7)$$

将计算结果汇总数据表, 为了提高数据计算的精度, 分别将气体泄漏检测数据分门别类, 通过 SF₆ 泄漏浓度分别通过不同的方法进行计算, 最终显示 SF₆ 气体泄漏检测

能力测试表如表 2 所示。

表 2 气体泄漏检测能力测试表

检测方式	变电站等级 /kV	SF ₆ 泄漏浓度 / (mol/mL)	精确度 / %
本设计	20	15.8	92.5
FFT 检测方法	20	31.7	89.1
CEPAS 系统	20	34.4	83.6

通过表 2 分析, 该研究设计的气体泄漏检测系统采用 DL/T537 系列变电站 GIS 设备, 容量范围为 6~35 kV, 实验中采用 20 kV 变电站, 检测系统输出的 SF₆ 泄漏浓度为 15.8 mol/mL, 精确度为 92.5%; 文献 [1] 方法采用的 FFT 检测方法采用 15 kV 变电站 GIS 设备, 运行中检测的 SF₆ 泄漏浓度为 31.7 mol/mL, 精确度为 89.1%; 文献 [2] 方法设计的 CEPAS 检测系统采用 10 kV 容量变电站 GIS 设备, 运行中检测的 SF₆ 泄漏浓度为 34.4 mol/mL, 精确度为 83.6%。由此看出该研究对变电站 GIS 设备中 SF₆ 泄漏检测方法具有较高可行性。

利用仿真软件显示 3 种气体检测系统对变电站 GIS 设备运行中 SF₆ 泄漏浓度检测的变化曲线, 利用 Multisim 软件模拟 SF₆ 泄漏模型, 在 20 kV 变电站中进行试验, 输入频率为 30 kHz, 锯齿波和正弦波正负为 1, 光强为 14.0 cd, 气体浓度为 50 mol/mL, 气压为 1 kPa, SF₆ 泄漏检测仿真模型如图 6 所示。

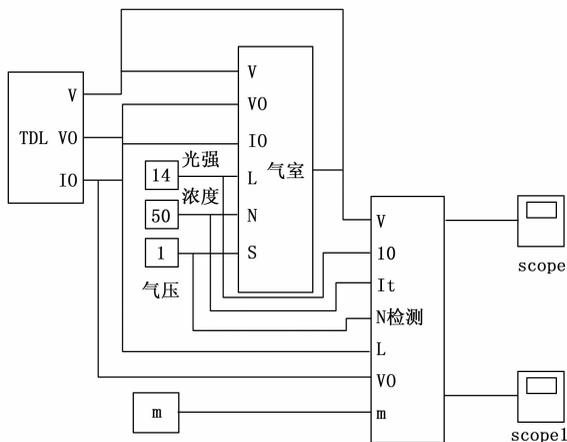


图 6 SF₆ 泄漏检测仿真模型

在图 6 的泄漏检测仿真模型中, 用户可以根据变电站运行时间变化, 在此期间泄漏的 SF₆ 浓度进行统计, 通过 5 个小时的试验, 将不同的数据通过曲线图表示出来。在试验过程中通过 FFT 检测方法、CEPAS 检测系统进行对比分析, 在试验过程中, 分别将不同的方法在同一图像中绘制出, 仿真出规律性曲线分析各系统性能, 如图 7 所示。

图 7 中, 本研究对变电站 GIS 设备泄漏浓度影响具有明显作用, 变电站 GIS 设备中 SF₆ 泄漏浓度随运行时间变化有所升高, 但整体变化相对较为稳定, 最低泄漏浓度为

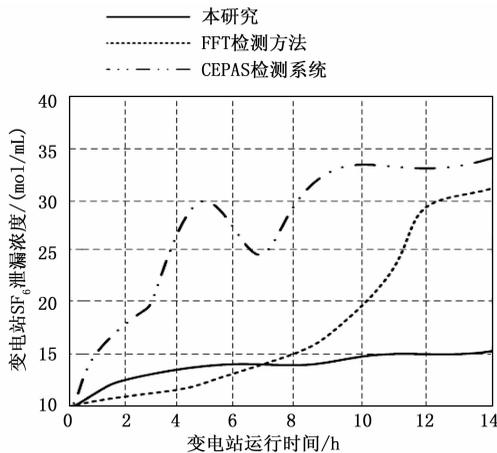


图 7 检测的变电站 GIS 设备 SF₆ 泄漏浓度

10 mol/mL, 在变电站 GIS 设备运行时间为 10 h 达到最高泄漏浓度为 15 mol/mL; 文献 [1] 方法采用的 FFT 检测方法变电站 GIS 设备中 SF₆ 泄漏浓度随运行时间变化增加幅度较大, 最低泄漏浓度为 10 mol/mL, 在变电站 GIS 设备运行时间为 14 h 达到最高泄漏浓度为 32 mol/mL; 文献 [2] 方法设计的 CEPAS 检测系统变电站 GIS 设备中 SF₆ 泄漏浓度随运行时间变化波动较大, 运行时间 0~5 h 持续增加, 此时泄漏浓度为 30 mol/mL, 6~10 h 期间呈波动状态, 最终在 10 h 泄漏浓度最大为 34 mol/mL。通过上述对比方法, 可以看出文献 [1] 方法和文献 [2] 方法在检测气体泄露时, 明显具有突出的技术进步性, 但与该研究的对比方法相比, 该研究方法最低泄漏浓度仅仅为 10 mol/mL, 明显低于文献 [1] 方法和文献 [2] 方法说明该研究方法具有突出的技术进步性。

在经过几个小时的试验, 为了突出本研究的检测精度, 将这些不同信息汇成精度曲线, 进一步完成对比实验, 根据计算机处理结果进行仿真对比, 得到系统精确度曲线对比如图 8 所示。

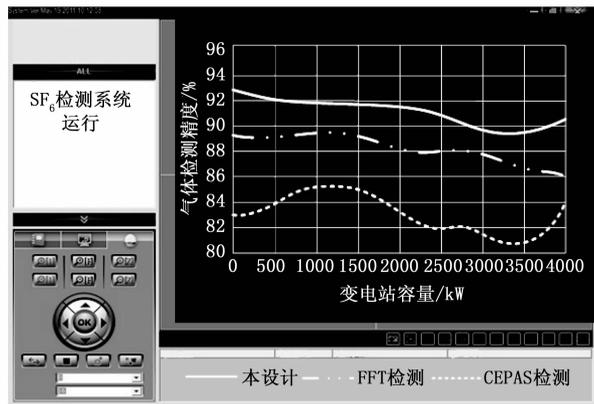


图 8 系统精确度曲线

通过对比发现 3 种检测方法随变电站 GIS 设备容量变化精度变化较大, 本研究降低幅度较小, 最高精度为

92.5%，在变电站 GIS 设备容量为 3 500 kW 达到最低，此时为 89%；文献 [1] 方法设计的 FFT 检测方法与本研究变化规律相似，但整体精度相对较低，最高精度为 89.1%，在变电站 GIS 设备容量为 4000 kW 达到最低，此时为 86%；文献 [2] 方法设计的 CEPAS 检测系统呈波动性变化，在容量为 1 200 kW 时达到波峰，此时最高精度为 85.5%，在变电站 GIS 设备容量为 3 300 kW 达到波谷，此时精度最低为 82.6%。

综上所述，本设计对变电站 GIS 设备中 SF₆ 气体的检测具有明显效果，根据实验表明本研究检测的 SF₆ 泄漏浓度最低，在运行过程中精确度最高，体现出本设计检测方法的优越性。

5 结束语

该研究对变电站 GIS 设备中 SF₆ 气体泄漏检测方法进行研究，通过智能机器人和检测技术配合完成气体泄漏的检测研究，设计联合性 TMS+XD 处理芯片加强机器人的感知能力，采用离子迁移检测 SF₆ 泄漏技术，对变电站 GIS 设备环境中含有的 SF₆ 离子进行频谱和波形变换，方便判断变电站 GIS 设备内部具体 SF₆ 变化规律。利用 DED 算法比较变电站 GIS 设备运行中内外 SF₆ 气体离子的浓度，通过对气体检测系统进行测试，将结果记录分析汇总为 SF₆ 气体泄漏检测能力测试表，发现检测方法变电站 GIS 设备中泄漏 SF₆ 气体最少，检测精度最高，虽然如此，实验过程中仍存在一些问题，对变电站 GIS 设备气体泄漏修复程序繁琐等问题仍待解决。

参考文献：

[1] 刘劲松, 禹晋云, 王 飞, 等. 变电站 GIS 设备 SF₆ 泄漏检测与智能机器人应用结合 [J]. 信息技术, 2020 (1): 54-57.

[2] 范海芳. SF₆ 气体泄漏在线监测报警系统研究 [J]. 中国新技术新产品, 2019 (5): 26-27.

[3] 丁 伟, 权利刚, 王永利, 等. 变电站 GIS 设备组合电器智能巡检装置的研制与应用 [J]. 自动化应用, 2019 (10): 140-142.

[4] 黄为民, 熊卫华, 房体强, 等. 基于 LoRa 与机器视觉的 SF₆ 密度表读数采集系统 [J]. 计算机系统应用, 2020, 29 (12): 110-114.

[5] GOERITNO A. Preliminary evaluation for the performance of circuit breaker mediated by SF₆ gas [J]. Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2020, 13 (1): 35-38.

[6] 罗 洋, 董汉彬, 王嘉易, 等. 六氟化硫气体泄漏成像仪检测方法应用研究 [J]. 四川电力技术, 2020, 266 (2): 66-69.

[7] 李 晴. 地铁变电所设置 SF₆ 气体监测装置的应用分析 [J]. 山西建筑, 2019, 45 (4): 149-150, 220.

[8] 杨 芮, 赵建勇, 石 磊, 等. 全封闭组合电器室 SF₆ 气体泄漏分布规律与气体检测布置策略 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (9): 99-107.

[9] 范海芳. GIS 设备中 SF₆ 气体泄漏检测研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2019 (2): 11-12.

[10] APOLLONOV V V, KAZANTSEV S Y. Self-organization of gas-discharge plasma in SF₆ and related gas mixtures [J]. Technical Physics Letters, 2019, 45 (5): 443-445.

[11] 杨师童. 全封闭组合电器 (GIS) SF₆ 气体微水超标处理 [J]. 环球市场, 2019 (7): 130.

[12] 戴美胜. 变电站 GIS 设备 SF₆ 断路器的运行维护要求及异常处理方法研究 [J]. 科学技术创新, 2020 (5): 173-174.

[13] 刘亚东, 王恒超, 田润钰. SF₆ 断路器气体泄漏分析与预防 [J]. 农村电工, 2019, 27 (1): 44.

[14] 陈奕群. SF₆ 气体现场回收处理技术研究 [J]. 中国设备工程, 2019, 421 (10): 182-183.

[15] 翟向红. 浅析 SF₆ 断路器液压操作机构常见故障的原因及处理方法 [J]. 百科论坛电子杂志, 2019 (21): 346.

[16] 郎宪明, 李 平, 曹江涛, 等. 长输油气管道泄漏检测与定位技术研究进展 [J]. 控制工程, 2018, 25 (4): 621-629.

[17] 何怡刚, 苏蓓蕾, 李 兵, 等. 基于 AJAFSA-SVM 温度补偿算法的 SF₆ 泄漏检测方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018 (8): 8-10.

[18] 汪 理, 章 达. 杂散电流一体化智能综合监控分析系统的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 81-85.

[19] 魏裕阳, 马 凯, 吴 响, 等. 差分隐私 DNA 模体识别安全共享平台的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (12): 234-237.

[20] 侯学青, 李 斌, 姚 蜜, 等. 现场服务型标准表法气体流量标准装置的研制 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (1): 288-294.

[21] 刘 恺, 赵先锋, 包月青. 基于 STM32F 和极限学习机在火灾检测中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (8): 31-35.

[22] 徐 源, 邢兰昌, 张树立. 基于多通道声发射检测系统的管道气体泄漏位置定位方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (4): 36-40.

[23] 张立群. 基于 TDLAS 的矿用激光一氧化碳检测系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (7): 61-66.

[24] 陈 庆, 何新霞, 张 政, 等. 基于 PLC 的石油催化裂化车间安全巡检小车设计 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (6): 53-56.

[25] 凌志勇, 唐名锋, 张 康, 等. 基于改进 D~* Lite 算法的电缆沟巡检机器人系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (9): 187-190, 201.

[26] 李 麟, 潘 云. 基于 ZigBee 架构的疗养院智能安防系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (11): 148-152.

[27] 王 闯, 姚金杰, 樊亚红, 等. 基于雷达及北斗定位的车内防遗监测系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (9): 32-36.

[28] 郭东歌, 陈海永, 贾林涛, 等. 车载激光甲烷遥测系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (7): 9-13.