

基于EFPI传感器的SF₆/N₂混合气体GIS局放模式识别研究

吕泽钦, 隋浩冉, 韩世杰, 王 伟

华北电力大学高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 新能源电力系统国家重点实验室, 北京
Email: 1213446733@qq.com

收稿日期: 2021年5月3日; 录用日期: 2021年5月17日; 发布日期: 2021年6月1日

摘 要

非本征法布里帕罗干涉(Extrinsic Fabry-Perot Interferometer, EFPI)的光纤超声传感器具有灵敏度高、抗干扰能力强等优点, 将其应用于以新型SF₆/N₂混合气体作为绝缘介质的GIS内部局部放电的模式识别中, 这对于GIS绝缘状态评估具有重要意义。分别在充有0.4 MPa纯SF₆气体、20% SF₆/80% N₂混合气体、纯N₂气体的GIS腔体内设置了4种放电模型, 在单次超声脉冲波形特征参数提取的基础上, 利用支持向量机算法(Support Vector Machine, SVM)对局放超声信号进行了模式识别, 三种绝缘气体环境下的识别正确率均能达到85%以上。由于SF₆对超声波的强吸收效应, 随着SF₆气体浓度的升高, 超声波的衰减更为严重, 不同类型局部放电的识别正确率也随之降低。

关键词

SF₆/N₂混合气体, GIS, 局部放电, EFPI传感器, 支持向量机, 模式识别

Research on Partial Discharge Pattern Recognition of SF₆/N₂ Mixed Gas GIS Based on EFPI Sensor

Ze Qin Lv, Haoran Sui, Shijie Han, Wei Wang

Beijing Key Laboratory of High Voltage & EMC, State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing
Email: 1213446733@qq.com

Received: May 3rd, 2021; accepted: May 17th, 2021; published: Jun. 1st, 2021

文章引用: 吕泽钦, 隋浩冉, 韩世杰, 王伟. 基于 EFPI 传感器的 SF₆/N₂ 混合气体 GIS 局放模式识别研究[J]. 智能电网, 2021, 11(3): 189-198. DOI: 10.12677/sg.2021.113018

Abstract

Extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) optical fiber ultrasonic sensor has the advantages of high sensitivity and strong anti-interference ability. The application of it to the pattern recognition of partial discharge in the GIS with the new SF_6/N_2 mixed gas as the insulating medium is of great significance for the evaluation of the insulation state of the GIS. Four discharge models are set up in the GIS cavity filled with 0.4 MPa pure SF_6 gas, 20% $\text{SF}_6/80\%$ N_2 mixed gas, and pure N_2 gas respectively. Based on the extraction of the characteristic parameters of the single ultrasonic pulse waveform, support vector machine (SVM) was used to identify the partial discharge ultrasonic signal, and the recognition accuracy rate can reach 85% in three insulating gas environments. Due to the strong absorption effect of SF_6 on ultrasonic waves, as the concentration of SF_6 gas increases, the attenuation of ultrasonic waves becomes more serious, and the recognition accuracy of different types of partial discharges also decreases.

Keywords

SF_6/N_2 Mixed Gas, GIS, Partial Discharge, EFPI Sensor, SVM, Pattern Recognition

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

SF_6 气体作为绝缘与灭弧介质广泛应用于 GIS 设备中, 但存在温室效应和液化温度高这两个严重的环境问题。使用 SF_6/N_2 混合气体替代纯 SF_6 气体用于 GIS 设备中, 可在不显著降低绝缘性能的前提下减少 SF_6 使用量并降低绝缘气体的液化温度, 该方案具有重要的工程意义, 且已经在实际工程中得到应用[1] [2] [3]。对于以 SF_6/N_2 混合气体作为绝缘介质的 GIS 内部的局部放电进行检测与模式识别, 可对 GIS 的绝缘状况进行进一步的评估和诊断[4] [5]。

基于非本征法布里-珀罗干涉原理的 EFPI 传感器采用光纤作为传感器载体, 利用光的干涉原理来检测局部放电产生的超声波, 具有灵敏度高、绝缘性强、检测距离远、抗干扰能力强等优点[6] [7]。

本文分别以充有 0.4 MPa 纯 SF_6 气体、20% $\text{SF}_6/80\%$ N_2 混合气体、纯 N_2 气体的 GIS 腔体内的局部放电为研究对象, 通过检测局部放电产生的超声波对其内部的绝缘缺陷进行模式识别。在上述充有不同绝缘气体的 GIS 腔体内设置了 4 种典型的放电模型, 利用 EFPI 超声检测系统检测放电模型产生的超声信号。在提取单次脉冲波形特征参数的基础上, 利用支持向量机算法(SVM)对局放超声信号进行模式识别。在三种工作环境下, 识别正确率均能达到 85%以上。由于 SF_6 对超声波的强吸收效应, 随着 SF_6 气体的浓度升高, 超声波的衰减更为严重, 局放类型的识别正确率也随之降低。

2. EFPI 超声检测系统的工作原理

EFPI 超声检测系统的工作原理如图 1 所示[8] [9]。当传感器探头接收到局部放电产生的超声信号时, 超声波产生的压力作用在传感器探头的膜片上, 将引起膜片振动, 导致由光纤端面 and 硅膜片的内表面构成的 F-P 干涉腔的腔长发生改变, 使得传感器探头返回的干涉光的相位和强度随之不断改变, 干涉光经过光电放大器后便得到了放大增益的电信号, 以此来获得该局部放电超声信号所包含的所有信息[10] [11] [12]。

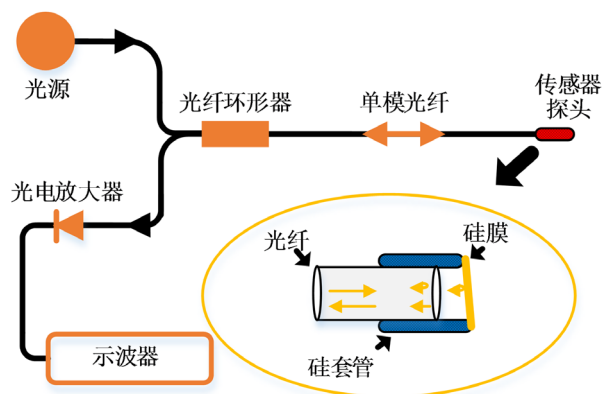


Figure 1. Schematic diagram of EFPI ultrasonic detection system
图 1. EFPI 超声检测系统原理图

3. GIS 局部放电检测实验平台

本文搭建的 GIS 局部放电检测实验平台由升压系统、4 种典型的放电模型、EFPI 超声检测系统、以及分别充有 0.4 MPa 纯 SF_6 气体、20% SF_6 /80% N_2 混合气体、纯 N_2 气体的 GIS 实验腔体四部分组成，如图 2 所示。

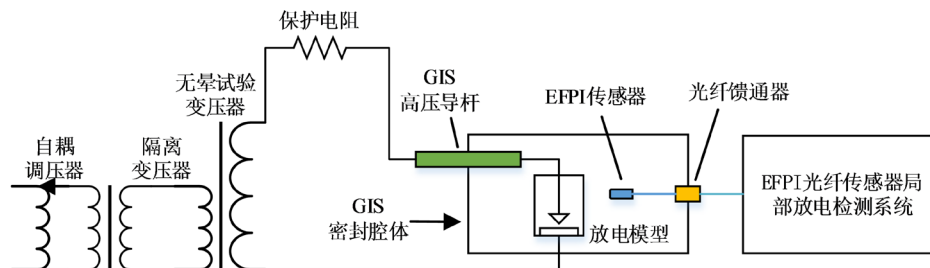


Figure 2. GIS partial discharge detection experimental platform
图 2. GIS 局部放电检测实验平台

3.1. 放电模型

GIS 的缺陷类型主要包括尖刺放电、自由金属颗粒放电、悬浮电位金属体放电、绝缘子沿面放电[13]。文中建立了 4 种放电模型，模拟以上 4 种绝缘缺陷产生的局部放电，包括：尖端放电、金属颗粒放电、悬浮放电与沿面放电。

放电模型的结构如图 3 所示。放电模型的导电材质采用黄铜，绝缘材质采用环氧树脂。其中，在金属颗粒放电模型的电极间放置大小形状不一的金属铝球来模拟金属颗粒，并设置了一个环氧树脂罩以防自由金属球在电场中高速运动或碰撞时脱离放电模型。悬浮放电模型电极间的环氧树脂套用来支持悬浮金属体，并可调整悬浮金属体与电极之间的距离。

3.2. GIS 实验腔体

GIS 实验腔体为平高集团生产的 220 kV GIS 上的一段，腔体内的 EFPI 传感器通过光纤馈通器与外部的检测系统连接。光纤馈通器可以根据需要组装到不同尺寸的法兰上，其两端均为 FC/APC 接口，用于连接内部的传感器和外部的检测系统，用装好光纤馈通器的法兰替换掉腔体上的观察窗，可以很方便的实现 EFPI 传感器的置入，如图 4 所示。

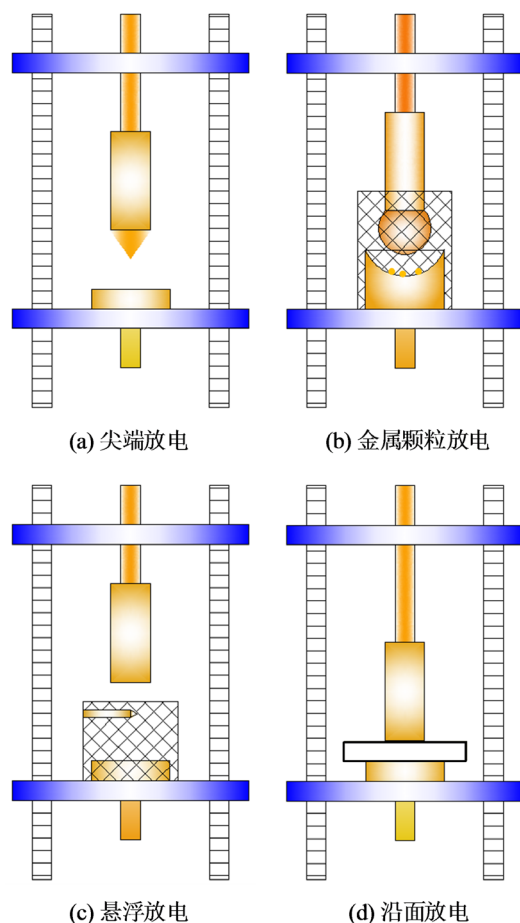


Figure 3. Partial discharge model of insulation defect in GIS
图 3. GIS 绝缘缺陷局部放电模型

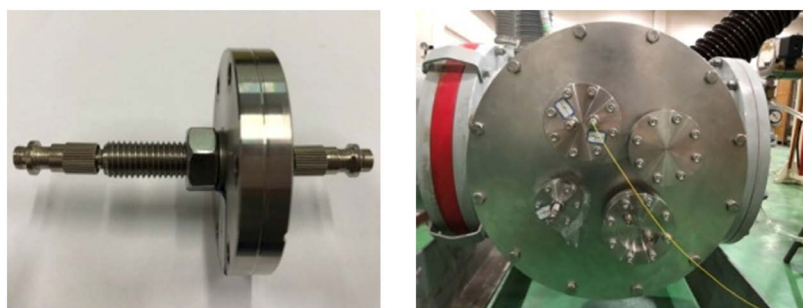


Figure 4. Optical fiber feed through and sensor placement diagram
图 4. 光纤馈通器及传感器置入图

3.3. 不同绝缘气体环境下局部放电的时域波形

分别在 GIS 实验腔体内充入 0.4 MPa 不同的绝缘气体并连接设置上述绝缘缺陷放电模型，随着 SF_6 气体浓度的升高，放电模型的放电起始电压增大，四种放电模型在纯 SF_6 气体环境下产生稳定放电的放电电压为 25 kV，在 20% SF_6 /80% N_2 混合气体中产生稳定放电的放电电压为 23 kV，在纯 N_2 气体环境下产生稳定放电的放电电压为 15 kV。光电放大器的增益选为 40 dB，EFPI 超声传感器检测到的不同放电模型产生的放电超声信号的时域波形如图 5 所示。

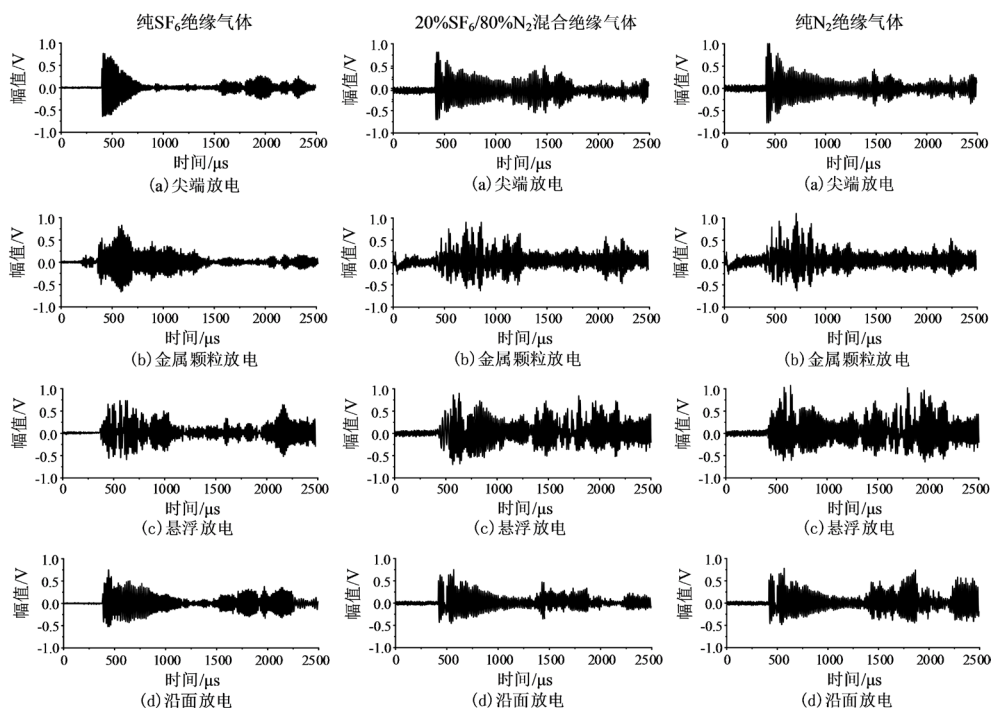


Figure 5. Time-domain waveforms of partial discharges in different insulating gas environments detected by EFPI ultrasonic sensor

图 5. EFPI 超声传感器检测到的不同绝缘气体环境下局部放电的时域波形

从图 5 可以看出, 在相同的放大增益下, 由于 SF_6 对超声波的强吸收效应, 随着 SF_6 气体浓度升高, EFPI 超声检测系统检测到的局部放电超声信号的幅值降低, 超声波在 SF_6 气体中的衰减更为严重。

4. 超声信号特征参数提取

基于放电信号二维统计谱图的构造进行故障分类, 是传统的模式识别方法[14]。但是, 局部放电产生的超声信号具有时延、宽脉宽和多次放电等特点, 使得我们很难再用传统的方法对其进行模式识别。

因此本文采取了一种更接近局部放电放电机理的方法, 即结合单次超声脉冲波形的波形特征, 提取相应特征参数。单次超声信号的波形特征包括了很多的特征参数, 我们选取了如下 5 个参数: 上升时间 T_r 、持续时间 T_d 、幅值 $V_{\max}$ 、能量 E 和振铃计数 C , 如图 6 所示, 特征参数的具体定义见文献[15]。不同局部放电故障类型的原始超声信号经 LabVIEW 程序提取特征参数后, 可以形成特征数据库, 有待后续的故障类型模式识别。

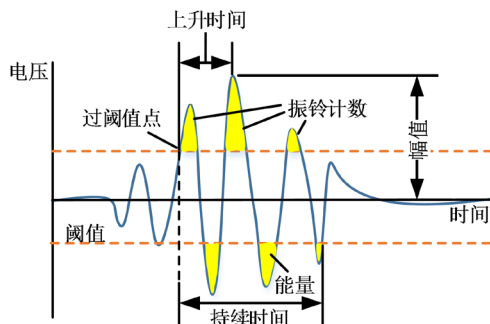


Figure 6. Different characteristic parameters of single ultrasonic pulse signal

图 6. 单次超声脉冲信号的不同特征参数

5. 基于支持向量机的局部放电模式识别

支持向量机算法(SVM)是目前模式识别领域比较常用, 且发展较为成熟的算法。在超声信号特征参数提取的基础上, 本文将其应用于不同绝缘介质工作环境下 GIS 局部放电的故障类型判别中。结果表明, 在三种绝缘气体环境下, 支持向量机的模式识别正确率均能达到 85%以上, SF_6 气体对超声波的强吸收效应会导致故障识别率的降低。

5.1. 支持向量机概述

支持向量机(SVM)是建立在统计学基础上理论, 能较好地解决小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题, 已成为机器学习界的研究热点之一, 并成功地应用于模式识别、函数逼近和时间序列预测等方面。

5.1.1. 支持向量机基本思想

支持向量机的基本思想是在样本空间或特征空间构造出最优超平面, 使得超平面与不同类样本之间的距离最大, 从而达到最大的泛化能力[16], 以如图 7 的两类线性可分的情况来说明。

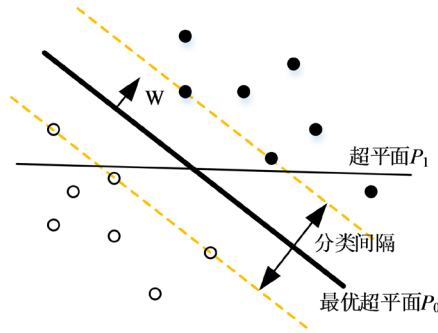


Figure 7. Linear segmentation of two types
图 7. 两类线性分割

如图 7 所示, 空心点与实心点分别代表两类特征向量样本, 其线性可分, 两条平行虚线之间的间隔为分类间隔, 当分类间隔达到最大时, 与他们平行并且处于中间的超平面即为最优超平面 P_0 , 该超平面所对应分类线可以准确地将两类特征向量样本进行划分, 并且使得分类间隔达到最大。

分类线方程为:

$$\omega x + b = 0 \quad (1)$$

$$\omega \in R^m, b \in R$$

该分类线的分类间隔为 $2/\|\omega\|$, 当分类间隔达到最大时, $\|\omega\|^2$ 最小, 因此可以通过求极小值的方法来计算最优超平面。

这里的约束条件为:

$$\begin{aligned} y_i(\omega x_i + b) - 1 &\geq 0 \\ i &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

该约束优化问题可以用 Lagrange 方法求解, 令:

$$L(\omega, b, a) = \frac{1}{2}\|\omega\|^2 - \sum_{i=1}^m [\alpha_i (\omega x_i + b) - 1] \quad (3)$$

其中 $\alpha_i \geq 0$ 为每个样本的拉氏乘子, 由 L 分别对 b 和 ω 导数为 0, 可以导出:

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i y_i = 0 \quad (4)$$

$$\omega = \sum_{i=1}^m \alpha_i y_i x_i \quad (5)$$

因此,解向量有一个由训练样本集的一个子集样本向量构成的展开式,该子集样本的拉氏乘子均不为0,即支持向量。拉氏乘子为0的样本向量的贡献为0,对选择分类超平面是无意义的。于是就从训练集中得到了描述最优分类超平面的决策函数即支持向量机,它的分类功能由支持向量决定。这样决策函数可以表示为:

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^m \alpha_i y_i (x + x_i) + b\right) \quad (6)$$

对于训练集为非线性情况时,即碰到难以线性分类的问题,待分类样本可以通过选择适当的非线性变换映射到某个高维的特征空间,使得在目标高维空间的这些样本线性可分,从而转化为线性可分问题。Cover定理表明,通过这种非线性转换将非线性可分样本映射到足够高维的特征空间,非线性可分的样本将以极大的可能性转化为线性可分。如果这个非线性转换为 $\phi(x)$,则超平面决策函数式可重写为:

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^m \alpha_i y_i \phi(x) \phi(x_i) + b\right) \quad (7)$$

5.1.2. 支持向量机实现多分类

基本的支持向量机仅能解决两类分类问题。一些学者从两个方向研究用支持向量机解决多类分类问题:一个方向是对支持向量机的分类能力进行扩展,使其本身具有多分类能力;另一方向则利用多个两类分类器进行组合,将多分类问题转化为多次二分类问题,再对多次二分类结果进行投票处理,得到最终的分类结果[17]。

本文解决的是四分类的模式识别问题,采取上述第二种方法,一共可构造出6个两类分类器。对特征样本空间依次进行6次二分类后,进行组合类投票,得票最多的类别即为该特征向量样本所属的类别。

5.2. 支持向量机实现局放模式识别

本文分别在充有0.4 MPa纯SF₆气体、20% SF₆/80% N₂混合气体、纯N₂气体三种绝缘介质的GIS实验腔体内部,设置了4种绝缘缺陷局部放电模型。在每一种绝缘气体工作环境下,检测并记录了300(75×4)组局部放电超声信号,并在此基础上提取了300组特征向量,组建形成了特征参数数据库,选取其中的200(50×4)组对支持向量机算法进行训练,再将训练后的算法用于100(25×4)组测试样本的模式识别。纯SF₆气体环境下的测试样本识别效果图和分类误差图见图8,20% SF₆/80% N₂混合气体环境下的测试样本识别效果图和分类误差图见图9,纯N₂气体环境下的测试样本识别效果图和分类误差图见图10。

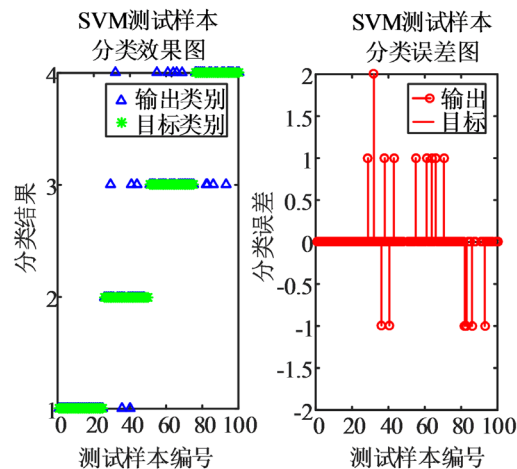


Figure 8. Pattern recognition effect diagram and classification error diagram in pure SF₆ gas environment
图 8. 纯 SF₆ 气体环境模式识别效果图与分类误差图

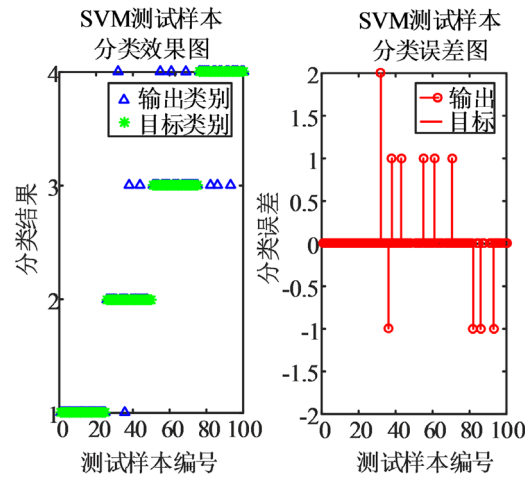


Figure 9. Pattern recognition effect diagram and classification error diagram in 20% SF₆/80% N₂ mixed gas environment
图 9. 20% SF₆/80% N₂ 混合气体环境模式识别效果图与分类误差图

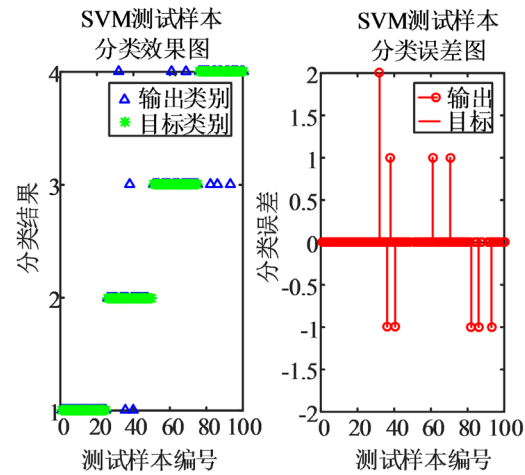


Figure 10. Pattern recognition effect diagram and classification error diagram in pure N₂ gas environment
图 10. 纯 N₂ 气体环境模式识别效果图与分类误差图

从效果图与分类误差图可以看出, 在由 EFPI 超声检测系统检测到的局放超声信号形成的特征数据库的基础上, 纯 N₂ 气体环境下的 GIS 内部局部放电模式识别率最高, 纯 SF₆ 气体环境下的识别率最低, 20% SF₆/80% N₂ 混合气体环境下的识别率略低于纯 N₂ 气体环境, 高于纯 SF₆ 气体环境。表 1~3 分别列出了三种绝缘气体环境下不同绝缘缺陷模型放电超声信号的识别正确率。

Table 1. Recognition accuracy in pure SF₆ gas environment
表 1. 纯 SF₆ 气体环境识别正确率

识别结果	尖端	金属颗粒	悬浮	沿面	识别率
尖端放电	25				100%
金属颗粒	2	19	3	1	76%
悬浮放电			20	5	80%
沿面放电			4	21	84%

Table 2. Recognition accuracy in 20% SF₆/80% N₂ mixed gas environment**表 2.** 20% SF₆/80% N₂ 混合气体环境识别正确率

识别结果	尖端	金属颗粒	悬浮	沿面	识别率
尖端放电	25				100%
金属颗粒	1	21	2	1	84%
悬浮放电			22	3	88%
沿面放电			3	22	88%

Table 3. Recognition accuracy in pure N₂ gas environment**表 3.** 纯 N₂ 气体环境识别正确率

识别结果	尖端	金属颗粒	悬浮	沿面	识别率
尖端放电	25				100%
金属颗粒	2	21	1	1	84%
悬浮放电			23	2	92%
沿面放电			3	22	88%

从表 1~3 可以得出:

1) 三种绝缘气体环境下的 GIS 内部绝缘缺陷局部放电模式识别正确率均达到 85%以上, 且在纯 N₂ 和 20% SF₆/80% N₂ 混合气体环境下的识别正确率达到 90%。

2) 尖端放电的识别正确率在三种绝缘气体环境下均能达到 100%, 由此可见其特征参数与其余三种放电模式差距较大。

3) 悬浮放电与沿面放电之间存在相对数量较多的误诊断, 由此可见这 2 类局部放电超声信号所提取的特征参数是相似的。

4) 金属颗粒放电的识别正确率相对较低, 由于金属铝球在电场中的运动与碰撞没有规律且放电形式多样, 造成特征参数较为混乱, 从而降低了识别正确率。

6. 结论

在分别充有 0.4 MPa 纯 SF₆ 气体、20% SF₆/80% N₂ 混合气体、纯 N₂ 气体三种绝缘气体的 GIS 实验腔体内, 设置了 4 种绝缘缺陷局部放电模型, 包括尖端、金属颗粒、悬浮和沿面 4 种局部放电形式, 利用 EFPI 超声传感器测量不同类型局部放电产生的超声信号, 结合波形特征对单次超声信号脉冲进行了特征参数提取, 利用支持向量机算法对不同故障类型进行了模式识别, 结论如下:

1) 开发的 EFPI 光纤超声局部放电检测系统可以对不同绝缘气体环境下 GIS 中的尖端、金属颗粒、悬浮和沿面 4 种典型的绝缘缺陷局部放电模型的放电超声信号进行检测, 并开展后续实验研究。

2) 提取的超声脉冲信号的特征参数数据库, 能够支持向量机算法进行训练, 再将其应用于测试样本的模式识别, 在三种绝缘气体环境下均能达到 85%以上的识别率, 且在纯 N₂ 和 20% SF₆/80% N₂ 混合气体环境下的识别正确率达到 90%。

3) 由于 SF₆ 对超声波的强吸收效应, 随着 SF₆ 气体的浓度升高, 超声波的衰减更为严重, 不同绝缘缺陷产生的局放超声信号的识别正确率也随之降低。

4) 尖端放电的识别正确率最高, 金属颗粒放电的识别正确率最低, 悬浮放电与沿面放电之间存在数量较多的相互误诊断, 识别正确率与绝缘气体环境、放电形式以及特征参数的相似性存在较大相关性。

基金项目

国家自然科学基金项目(51577063)。

参考文献

- [1] 李兴文, 赵虎. SF₆ 替代气体的研究进展综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1695-1701.
- [2] 张晓星, 田双双, 肖淞, 李伟. SF₆ 替代气体研究现状综述[J]. 电工技术学报, 2018, 33(12): 2883-2893.
- [3] 周安春, 高理迎, 冀肖彤, 张民. SF₆/N₂ 混合气体用于 GIS 母线的研究与应用[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3429-3435.
- [4] 周波, 胡与非, 杨新春, 郭超, 杨红权, 刘彦琴, 等. 特高频及超声波法在 GIS 设备带电检测中的应用[J]. 高压电器, 2019, 55(1): 54-58.
- [5] 宋辉, 代杰杰, 李喆, 罗林根, 盛戈峰, 江秀臣. 运行条件下 GIS 局部放电严重程度评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 1231-1240.
- [6] 宋树. 基于光纤 FP 传感器的变压器局放定位方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [7] Gao, C., Yu, L., Xu, Y., Wang, W., Wang, S. and Wang, P. (2019) Partial Discharge Localization Inside Transformer Windings via Fiber-Optic Acoustic Sensor Array. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **34**, 1251-1260. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2018.2880230>
- [8] 王伟, 王赞, 吴延坤, 杜家振, 李富平. 用于油中局部放电检测的 Fabry-Perot 光纤超声传感技术[J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 814-821.
- [9] Wang, W., Wu, Y.K., He, D.X. and Wang, Z. (2012) Method of EFPI Fiber Sensor in Partial Discharge Detection. *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, Zhangjiajie, 5-6 March 2012, 407-410. <https://doi.org/10.1109/CDCIEM.2012.103>
- [10] Wang, X.D., Li, B.Q., Roman, H.T., Russo, O.L., Chin, K. and Farmer, K.R. (2006) Acousto-Optical PD Detection for Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **21**, 1068-1073. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.861242>
- [11] 姚维强, 司文荣, 吕佳明, 李浩勇, 吴旭涛, 李秀广, 等. EFPI 光纤超声传感器及其潜在局放检测应用综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 1855-1866.
- [12] 王鹏, 王伟, 于雷, 王世杰, 高超飞. 基于 EFPI 传感器的立体形阵列传感器对局放测向的仿真分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(20): 24-30, 96.
- [13] 唐志国, 唐铭泽, 李金忠, 王健一, 汪可, 吴超. GIS 设备局部放电类型表观相似性及模式识别准确性的探讨[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2479-2485.
- [14] 崔乐. 变压器局放超声信号特征参数提取与处理方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [15] 杜家振. 基于光纤超声法的变压器局部放电故障诊断[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [16] 周润景. 模式识别与人工智能(基于 MATLAB) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- [17] 律方成, 金虎, 王子建, 张波. 基于主成分分析和多分类相关向量机的 GIS 局部放电模式识别[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 225-231.