

基于薄膜传感器的油气泄漏检测及孪生系统研究

袁捷^{1,2}, 王杰峰¹, 董若烟¹

(1. 贵州电网有限责任公司信息中心, 贵州 贵阳 550002; 2. 东北电力大学, 吉林 吉林 132011)

摘要: 针对传统乙炔传感器检测限高, 检测灵敏度低, 响应温度高的问题, 制备了一种新型薄膜传感器用于乙炔的检测。试验结果表明, 在响应温度为 90 °C 条件下, 薄膜传感器对乙炔的响应时间和恢复时间分别为 172 s 和 164 s, 乙炔浓度与薄膜传感器的电阻存在线性关系, 在不同乙炔浓度条件下多次重复检测, 传感器的响应值不发生变化, 在多种气体中, 对乙炔的响应值最高; 运行 30 d 后, 传感器的检测性能依旧稳定, 整体表现出良好的检测性能。将其用于变压器数字孪生油气故障诊断系统, 可以准确检测出变压器中乙炔含量的变化。

关键词: 数字孪生系统; 乙炔检测; 气敏传感器; 检测性能

中图分类号: TM407; TQ150.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-5922(2024)04-0185-04

Research on oil and gas leakage detection and twin system based on thin film sensors

YUAN Jie^{1,2}, WANG Jiefeng¹, DONG Ruoyan¹

(1. Information Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. Northeast Electric Power University, Jilin 132011, Jilin China)

Abstract: In order to solve the problems of high detection limit, low detection sensitivity and high response temperature of traditional acetylene sensor, a new thin film sensor for acetylene detection was prepared. The test results showed that the response time and recovery time of the thin-film sensor to acetylene were 172 s and 164 s, respectively, under the condition of 90 °C, and there was a linear relationship between the acetylene concentration and the resistance of the thin-film sensor. The response value of the sensor did not change when repeated under different acetylene concentrations, and the highest response value to acetylene was the highest among multiple gases. After 30 days of operation, the detection performance of the sensor was still stable, and the overall detection performance was good. It was used in the transformer digital twin oil and gas fault diagnosis system, which could accurately detect the change of acetylene content in the transformer.

Key words: digital twin system; acetylene detection; gas detector; detection performance

关于变压器故障诊断多需要依靠专业人员的经验判断, 不仅效率低下, 准确度还有待提升。对变压

收稿日期: 2023-07-21; 修回日期: 2024-01-24

作者简介: 袁捷(1974-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 电力系统大数据场景分析和展示; E-mail: yuanjie@gz.csg.cn。

引文格式: 袁捷, 王杰峰, 董若烟. 基于薄膜传感器的油气泄漏检测及孪生系统研究[J]. 粘接, 2024, 51(4): 185-188.

器故障进行准确诊断对变压器的使用有重要意义。针对此问题,部分学者也进行了很多研究,如提出深度学习融合线性预测倒谱系数(LPCC)和梅尔频率倒谱系数(MFCC)组合特征的轨道交通变压器故障诊断方法用于轨道变压器的故障诊断^[1]。提出一种多策略改进海洋捕食者算法(MPA)与混合核极限学习机(HKELM)的变压器故障辨识方法^[2]。提出一种基于改进粒子群极限学习机算法(RM-MPSO-ELM)的变压器故障自动化诊断技术用于实现变压器故障自动化诊断^[3]。基于此,试验以文献[4]和文献[5]的方法,制备出一种高精度传感器,并将其用于变压器数字孪生油气故障系统,实现对变压器故障的实时诊断。

1 试验部分

1.1 材料与设备

主要材料:硫酸(AR,彩杰化工);氢氧化钠(AR,坤丰化工);纳米二氧化锡(AR,温纶金属材料);氧化石墨烯(AR,粤创新材料);纳米银(AR,康琼生物医药)。

主要设备:JM-23D-40型超声机(科伟达超声设备);DHG-9203A型电热烘箱(永联机械设备);GPD-4303S型稳压电源(华清仪器仪表);34970A型测量仪器(永利电子仪器)。

1.2 薄膜传感器的制备

(1)将叉指电极依次在硫酸溶液和氢氧化钠溶液进行浸泡,浸泡时间为20 min;

(2)将浸泡后的电极放入超声机中,通过蒸馏水进行超声的洗涤,洗涤时间为20 min;

(3)取出电极元件,氮气吹干,继续浸入PDAA的水溶液中浸泡,浸泡时间为10 min。取出电极元件后用去离子水进行冲洗,然后置于阴凉通风处自然晾干;

(4)将干燥后的元件浸入PSS溶液中进行组装,组装时间为10 min。组装完成后用去离子水冲洗并自然晾干;

(5)重复步骤(3)、(4),得到自组装的(PDAA/PSS)₂前导层;

(6)将前导层依次浸入纳米二氧化锡悬浊液和氧化石墨烯水溶液中进行自组装,自组装时间分别为15 min。取出自组装器件后用去离子水冲洗后,通过氮气吹干,得到薄膜传感器;

(7)在薄膜传感器表面沉积一层活性纳米银离子,得到SnO₂-GO-SnO₂-Ag薄膜传感器;

(8)将制备的薄膜传感器置于电热烘箱中进行高温热还原,还原温度和时间分别为200℃和4 h,得到导电能力较强的薄膜传感器。

1.3 性能测试

通过GPD-4303S稳压电源提供加热电压,34970A

测量仪器对数据进行采集。在密闭气室中通入不同浓度的乙炔,对薄膜传感器的电阻响应值进行测试。通过电阻变化率对薄膜传感器的气敏响应进行表征^[6-7]。电阻变化率表达式为:

$$S = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R_0 - R_g}{R_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S 为电阻变化率,%; R_g 、 R_0 分别为乙炔、空气中的薄膜传感器电阻值,Ω。

2 结果与讨论

2.1 最佳响应温度的确定

薄膜传感器在不同温度条件下对乙炔的响应灵敏度也有一定差异。温度对薄膜传感器乙炔响应灵敏度的影响如图1所示。

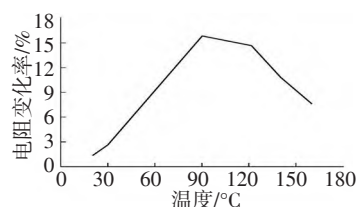


图1 响应温度优化

Fig. 1 Response temperature optimization

由图1可知,随温度的增加,薄膜传感器灵敏度表现出先增加后降低的变化趋势。当响应温度达到了90℃时,薄膜传感器对乙炔的灵敏度最高,此时薄膜传感器电阻变化率约为16.5%。因此在后续试验中,选择适合的薄膜传感器响应温度为90℃。

2.2 响应恢复特性

通过薄膜传感器对乙炔气体的响应-恢复曲线对其响应恢复特性进行研究,结果如图2所示。

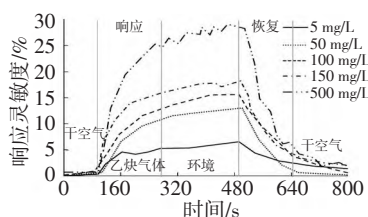


图2 响应-恢复曲线

Fig. 2 Response recovery curve

由图2可知,乙炔的响应时间和恢复时间分别为172 s和164 s,表现出良好的响应恢复性能,在乙炔质量浓度为100 mg/L的条件下,薄膜传感器的响应灵敏度约为10.16%。

2.3 选择性试验

固定气体质量浓度为150 mg/L,通过对薄膜传感器在不同其他环境下响应值的测定,表征薄膜传感器的选择性,结果如图3所示。

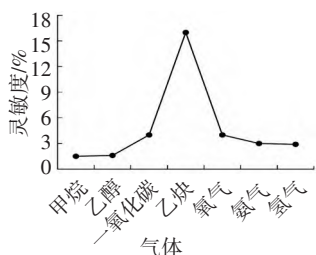


图3 选择性试验结果
Fig. 3 Selective test results

由图3可知,在本试验选择的7种气体中,薄膜传感器对乙炔的灵敏度最高,表现出良好的选择性。

2.4 检测性能对比

将本试验制备的薄膜传感器与其他文献制备的乙炔传感器检测性能进行对比,结果如表1所示。

表1 检测性能对比

Tab. 1 Comparison of detection performance

| 项目 | 测量范围 mg·L ⁻¹ | 加热温度 ℃ | 响应值 (R _a /R _g) |
|--|----------------------------|-----------|--|
| SnO ₂ -rGO-SnO ₂ -Ag | 5~500 | 90 | 29.15 |
| Ni-ZnO | 100~2 000 | 250 | 17 |
| SnO ₂ | 200~1 000 | 300 | 6.3 |
| Sm ₂ O ₃ -SnO ₂ | 10~4 000 | 180 | 6.38 |

由表1可知,本试验制备的薄膜传感器工作温度和检测下限均低于其余气敏材料,表现出良好的检测性能^[15-17]。另外,本试验制备的薄膜传感器还具备工艺简单,成本低和体积小的优点,整体性能良好。

2.5 实际应用效果

2.5.1 数字孪生的总体架构

通过数字孪生系统搭建物理实体与虚拟仿真的桥梁,实时直观的对现实中实体状态进行模拟,实现变压器在线监测和故障诊断。数字孪生变压器故障诊断系统总体架构如图4所示。

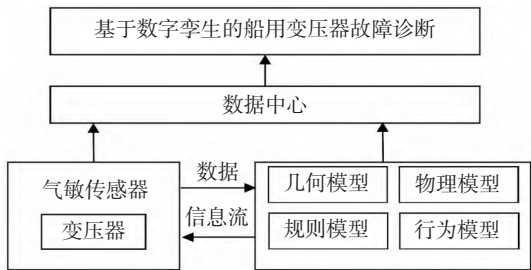


图4 故障诊断总体架构

Fig. 4 Fault diagnosis summary architecture

由图4可知,数字孪生系统的总体架构主要包括物理实体、数字孪生体、数据中心、故障诊断体系。通过变压器内部的传感器对其状态的物理数据进行提取,然后进行变压器数字孪生体的实时动态更新,建立变压器数字孪生体,通过油中气体数据变化情况,对变压器的运行状态进行模拟,实现变压器的实时监控和故障诊断^[8]。通过数字孪生体的故障诊断模型

对油中气体变化进行分析,诊断出变压器故障状态,并将诊断结果上传至系统,界面会对诊断结果和检修方案进行显示。

2.5.2 故障诊断流程

本试验设计的故障诊断系统主要分为设备层、中间层和应用层,整体框架如图5所示。

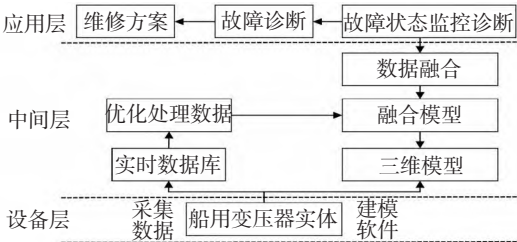


图5 故障诊断系统框架

Fig. 5 Fault diagnosis system framework

设备层为变压器实体,中间层为数据的处理过程,应用层为设备管理的前端,实现变压器状态可视化。

完成故障诊断系统框架设计后,进一步对数字孪生故障诊断流程进行设计,结果如图6所示。

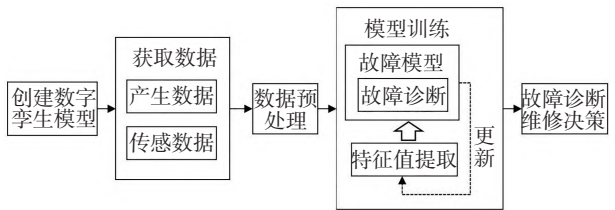


图6 数字孪生故障诊断流程

Fig. 6 Digital twin fault diagnosis process

根据系统内部的孪生数据进行故障诊断,包括机器学习算法、状态数据、故障数据等。通过维修方案对故障进行解决,若故障得到有效解决,则对应的维修方案可行。若故障未能得到解决,系统会将仿真结构反馈给孪生数据进行分析,直至找到变压器故障的根本原因,在此过程实现了系统的更新,对数字孪生系统精度有提高作用。同时在数据不断更新的过程中,系统也在不断优化。

2.5.3 故障诊断结果

当数据进入数字孪生体故障诊断模型中,诊断结果为故障状态时,系统会发出警报,并显示具体故障原因,并给出故障诊断结果。用户可根据诊断结果及时对故障进行处理,避免发生一些严重的结果。

3 结语

(1)在响应温度为90℃时,薄膜传感器对乙炔具备较好的响应效果,其电阻变化率约为16.5%。

(2)在乙炔浓度为5、150、500 ppm的条件下,通过薄膜传感器进行多次重复检测,电阻响应不发生明显改变,表现出较好的重复性能。乙炔的响应时间和恢复时间分别为172 s和164 s,表现出良好的响应恢复性能;

(3)在所有气体浓度为150 ppm的条件下,薄膜传感器对乙炔的响应值最高。运行30 d后,薄膜传感

器对乙炔的响应不发生变化,表现出良好的选择性;

(4)将薄膜传感器与其他文献制备的传感器进行对比,薄膜传感器工作温度和检测下限均低于其余气敏材料,表现出良好的检测性能。将薄膜传感器用于变压器数字孪生油气故障诊断系统中,可以准确检测出变压器中乙炔含量的变化,用于变压器油气故障的诊断。

【参考文献】

- [1] 陈奇志,赵沛舟,赵海全,等.基于深度学习的轨道交通变压器故障诊断方法[J].自动化与信息工程,2023,44(3):46-51.
- [2] 谢国民,刘东阳,刘明.多策略改进MPA算法与HKELM的变压器故障辨识[J].电子测量与仪器学报,2023,37(4):172-182.
- [3] 李铁,赵召,董利,等.基于RM-MPSO-ELM的变压器故障自动化诊断技术[J].自动化技术与应用,2023,42(4):25-28.
- [4] 殷乃良.NMOs修饰石墨烯气敏传感器及其变压器故障特征气体检测研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.
- [5] 严志剑.船用变压器数字孪生建模及故障诊断方法研究[D].镇江:江苏科技大学,2022.
- [6] 金嘉伟,李国臣,张冶,等.TiO₂薄膜型气敏传感器研究进展[J].材料工程,2020,48(10):28-38.
- [7] 曹冠龙,李铁,潘国峰,等.掺杂金属氧化物半导体气敏传感器性能的研究进展[J].光电技术应用,2020,35(6):15-22.
- [8] 曾吉阳,荣茜,邓细宇,等.WO₃气敏传感材料及器件的研究进展[J].功能材料,2020,51(12):12065-12071.
- [9] 罗颖,曾冈,江虹,等.气敏传感器测试平台设计[J].仪表技术与传感器,2021(8):73-76.
- [10] 李贤良,唐毅博,詹江杨,等.光纤光栅传感器在变压器多参量智能监测中的应用研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(6):154-160.
- [11] 吴钊峰,沈超,张炜钰,等.棉纤维在气敏传感领域的应用研究[J].新疆大学学报(自然科学版)(中英文),2023,40(2):191-195.
- [12] 朱鹏升,邓宗明,汤云扬,等.WO₃基的气敏传感器的研究现状及气敏性能提升的机理分析[J].云南大学学报(自然科学版),2023,45(2):456-464.
- [13] 邓祥力,朱慧,刘世明,等.适用于变压器保护的数字孪生建模技术研究[J].电网技术,2022,46(12):4982-4993.
- [14] 荆澜涛,董雪情,杨超,等.面向数字孪生应用的变压器温度场有限元降阶建模方法研究[J].高电压技术,2023,49(6):2408-2419.
- [15] 桂阳海,涂远生,田宽,等.基于ZnO的超快恢复三乙胺气敏传感器[J].半导体技术,2022,47(9):692-698.
- [16] 余江涛,赵修旻,蒋婧婧,等.基于光纤传感器的变压器油在线监测[J].电子器件,2022,45(5):1235-1239.
- [17] 陈秀武,马耀通.Sb~(3+)修饰的SnO₂/SnS蜂巢状TEA气敏传感器性能研究[J].西北师范大学学报(自然科学版),2021,57(6):45-49.
- [18] 杨敏,朱瑞林,黄秋萍,等.NiWO₄纳米材料的湿法合成及新型气敏传感器性能研究[J].合成化学,2021,29(10):844-849.
- [19] 郝西伟,申晨,景龔,等.电离式三电极碳纳米管乙炔传感器[J].微纳电子技术,2021,58(9):796-803.
- [20] 任海波,沈湘凌,田宇龙,等.纤维素基气敏传感器的制备及其应用研究进展[J].中国造纸,2022,41(8):117-126.

(上接第176页)

【参考文献】

- [1] 宋育红.基于UG软件的复杂型腔数控编程与铣削加工仿真研究[J].粘接,2020,42(4):176-179.
- [2] 杨英歌,程会民,赵泽辉,等.基于AdvantEdge FEM的薄壁外壳体零件仿真分析[J].新技术新工艺,2021,406(10):26-32.
- [3] 王凌云,黄红辉,RAE W. WEST, et al.薄壁曲面零件铣削加工变形的有限元模型[J].中南大学学报(英文版),2018,25(5):1107-1115.
- [4] 陈晓雨,王仲民,张本松.7075铝合金薄壁件高速切削变形仿真分析[J].佳木斯大学学报:自然科学版,2021,39(1):77-81.
- [5] 周冬生,杨巍,王珉,等.航空结构件加工变形快速评价方法[J].机械制造与自动化,2021,50(1):61-65.
- [6] 吴竹溪,秦国华.基于进化神经网络的薄壁件加工变形预测与抑制方法[J].南昌航空大学学报:自然科学版,2020(3):80-87.
- [7] 秦国华,郭翔翔,王华敏,等.飞机整体结构件的“加工变形-疲劳寿命”多目标结构优化方法[J].工程力学,2021,38(8):222-236.
- [8] 徐飞飞,刘其广,吕杰,等.薄壁结构件毛坯去应力分析与铣削加工变形有限元模拟研究[J].机械科学与技术,2024,43(1):96-102.
- [9] 童勇智,王逢涛,金许涛,等.空间圆角铣削加工技术[J].金属加工(冷加工),2023(11):56-59.
- [10] 佛新岗.基于UG和VERICUT的维纳斯四轴数控加工研究[J].机床与液压,2021,49(12):64-67.
- [11] 岳彩旭,张俊涛,刘献礼,等.薄壁件铣削过程加工变形研究进展[J].航空学报,2022,43(4):99-124.
- [12] 刘禹,孟冬.VERICUT程序优化在某安装槽加工中的应用[J].新技术新工艺,2020(11):11-15.
- [13] 国凯,武冲,孙杰.航空整体结构件数控加工变形预测及控制技术进展[J].航空制造技术,2022,65(21):112-127.
- [14] 明伟,岳彩旭,陈志涛,等.航空结构件铣削变形及其控制研究进展[J].航空制造技术,2022,65(3):108-117.
- [15] 于翀,宋昊.航空结构件孔边裂纹监测技术研究综述[J].航空科学技术,2021,32(12):1-17.