

压力容器气密性故障检测方法研究

陈炳荣

潍坊市特种设备检验研究院

摘要: 本文提出了一种基于压电传感器和支持向量数据描述 (SVDD) 模型的压力容器气密性故障诊断方法。该方法通过压电传感器采集气密性信号, 结合 SVDD 算法进行故障检测与定位, 并通过优化诊断窗宽和特征提取提升微小泄漏的识别精度与实时性。试验结果表明, 该方法具有高灵敏度、较强的实时性和广泛的应用潜力, 为压力容器的安全运行提供了可靠支持。

关键词: 压力容器; 气密性检测; 压电传感器; 支持向量数据描述 (SVDD)

压力容器的气密性对设备安全至关重要, 传统检测方法存在误差和安全隐患。随着传感技术和智能算法的发展, 基于传感器数据的智能诊断方法成为研究热点。压电传感器提供高精度信号采集, 而支持向量机 (SVM) 等算法在故障识别中表现出色。本文结合压电传感器和 SVDD 算法, 提出了一种新型气密性故障诊断方法, 旨在提升检测的准确性、实时性和工程应用性。

1 压力容器气密性检测仪表设计

1.1 压力容器气密性检测原理

压力容器在运行过程中, 由于焊接缺陷、腐蚀磨损或材料老化, 易出现气密性失效的风险。为实现泄漏检测, 本设计采用压电传感器基于正压电效应的工作原理, 将压力容器泄漏射流的动能转化为电信号, 从而精准捕捉泄漏信号特征, 实现气密性状态的监测与评估。压电传感器感知泄漏射流原理如图 1 所示。该方法具有灵敏度高、响应速度快的优点, 能够有效满足压力容器在线检测的需求^[1]。

1.2 气密性检测仪表设计

气密性检测仪表作为实现压力容

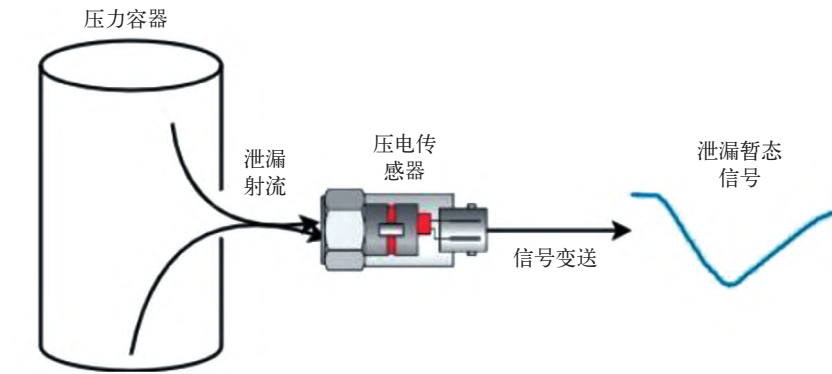


图 1 压电传感器感知泄漏射流原理

器气密性在线检测的核心装置, 整体设计包括硬件与软件两大部分, 旨在构建一套具备高精度、高可靠性与实时性的检测系统。硬件部分负责前端信号的感知与调理, 软件部分则实现数据的采集、分析与可视化, 二者协同工作, 保障检测仪表在复杂工况下的稳定运行与高效检测。

1.2.1 硬件设计

硬件设计部分围绕压电式压力传感器、压电信号调理模块与数据采集诊断传输模块展开, 构成完整的前端信号链路。压电式压力传感器负责将泄漏引起的微弱压力脉动转化为电信号, 调理模块对信号进行滤波、放大与标准化处理, 确保信号的质量与稳定性。数据采

集诊断传输模块以 STM32F407ZG 为核心, 实现高精度数据采集与高速无线传输, 配合金属防护外壳与 3D 打印防风罩, 提升设备的抗干扰能力与环境适应性, 为后续软件分析提供高质量数据支撑。

1.2.2 软件设计

软件设计部分包括检测仪表端与监控机端的双向功能开发。前者主要完成数据的实时采集、预处理与无线传输; 后者则实现数据接收、分析与图形化展示, 形成完整的监测闭环。通过高效的数据管理与智能化的信号分析算法, 软件系统能够对压力容器的气密性状态进行实时判断与预警, 提升检测效率与系统可靠性, 满足工程实际应用需求。

2 模拟压力容器泄漏射流试验及信号特征分析

2.1 压力容器泄漏射流模拟试验

本部分通过搭建模拟试验平台，结构如图 2 所示，模拟压力容器在不同工况下发生泄漏射流的物理过程，采用高速摄像、声发射、压力传感器等手段获取泄漏过程中产生的各类信号数据。试验过程中，调节泄漏孔径、压力参数和气体种类，系统性观察泄漏射流的形态演变与信号响应特性，为后续信号特征分析与检测方法研究提供基础数据支撑^[2]。

2.2 压力容器气密性检测信号的诊断窗宽和特征提取方法选择

在压力容器泄漏射流检测中，如何合理设置诊断窗宽与选用合适的特征提取方法对信号分析结果有重要影响。针对不同泄漏工况下采集的信号特性，结合时域等分析手段，研究最优诊断窗宽与步距参数，确保信号特征的完整性与时效性，从而为后续异常检测与分类识别奠定基础。

2.2.1 检测信号的诊断窗宽和步距分析

通过对试验获取的泄漏信号数据进行分段分析，系统研究不同窗宽与步距设置对信号特征捕捉效果的影响。采用对比分析的方法，评估在各类泄漏情况下，不同参数组合下信号特征的显著性与鲁棒性，确定最优的诊断窗宽与步距范围，以提升后续特征提取与分类识别的准确性与效率。

2.2.2 压力容器泄漏射流检测异常信号特征提取和分析

针对压力容器泄漏射流过程中出

现的异常信号，采用多种特征提取方法进行分析，包括幅值、频谱特性、小波包能量熵等多维特征参数，挖掘信号中的异常模式与泄漏特征。通过对比正常与异常工况下信号特征的差异，提炼具有代表性的特征指标，提升异常检测与状态识别的可靠性。

2.2.3 特征归一化

为消除不同工况与信号采集条件下数据尺度差异对分析结果的影响，采用归一化处理对提取的特征参数进行统一化处理。通过最大最小值归一化、Z-score 标准化等方法，确保各类特征在同一量纲下具备可比性，提高后续数据分析、特征融合与智能分类的准确性与稳定性。

3 基于 SVDD 的压力容器气密性诊断模型研究

3.1 支持向量数据描述 (SVDD) 诊断原理

支持向量数据描述 (SVDD) 是一种基于小样本学习的数据驱动方法，其通过在特征空间中构建最小球体将正常数据包围，实现对样本空间最优描述。在压力容器气密性诊断中，SVDD 能有效应对故障样本稀缺问题，通过建模正常工况下气密性特征数据，检测偏离该特征域异常数据，从而实现对气密性故障的识别与诊断。该方法具有良好的鲁棒性和泛化能力，能适应复杂多变的工况环境，确保诊断结果的准确性与可靠性^[3]。

3.2 核函数选择

核函数是 SVDD 将输入数据映射

至高维特征空间以实现非线性分类的关键工具，直接影响模型的描述能力与分类效果。针对压力容器气密性诊断中数据分布复杂、特征维度高的特点，本文选择了高斯径向基函数 (RBF) 作为核函数，以其优越的非线性拟合能力增强模型对边界样本的刻画。同时，结合试验对比分析了多种核函数对模型性能的影响，验证了 RBF 核函数在气密性故障诊断中的优越性。

3.3 SVDD 参数优化计算

为了提升 SVDD 模型在气密性诊断中的识别精度与泛化能力，参数优化是必不可少的步骤。SVDD 模型的主要参数包括惩罚因子 C 与核函数宽度 σ ，二者对模型的边界拟合与异常检测性能具有决定性作用。通过引入基于交叉验证的网格搜索方法，本文系统性地优化了模型参数，确保 SVDD 在保持高检测精度的同时具备良好的鲁棒性。

3.3.1 参数优化衡量指标

参数优化过程中，本文选取了分类准确率、检测率 (灵敏度) 与误警率 (特异度) 作为主要衡量指标，以全面评估 SVDD 模型在气密性故障诊断中的性能表现。通过平衡检测率与误警率，优化模型在实际应用中的适应性，确保其既能有效识别故障，又能避免过多误报，从而实现高可靠性的诊断效果。

3.3.2 参数选择

在具体参数选择上，本文采用网格搜索与交叉验证相结合的方法，系统性地调整惩罚因子 C 与核函数宽度 σ 的取值范围，以寻找最优参数组合。通过大量试验验证，最终确定了最优参数，使得 SVDD 模型在压力容器气密性诊断任务中达到了最优的识别性能与泛化效果，为后续的故障诊断模型构建奠定了基础。

3.4 气密性故障诊断模型

基于上述 SVDD 诊断原理与优化方法，本文构建了压力容器气密性故障诊断模型。该模型以正常工况下的气

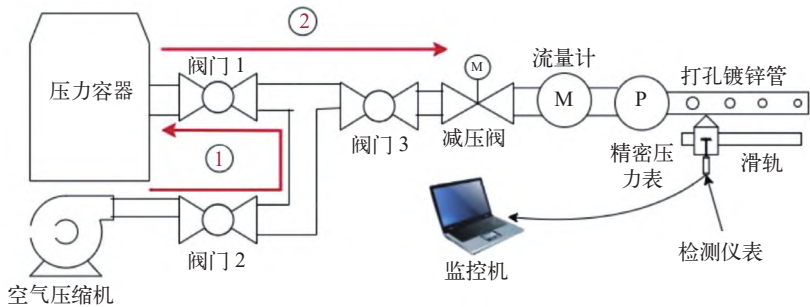


图 2 模拟试验平台整体结构图

密性检测数据为训练样本,通过 SVDD 算法建立数据描述模型,实现对运行状态的实时监测与故障检测。当检测数据超出正常描述边界时,即判定为气密性异常,实现高效、准确的故障识别。该模型在小样本、非线性工况下表现出良好的诊断能力,具有实际工程应用价值。

4 压力容器气密性故障检测方法的有效性测试

4.1 诊断模型性能测试

4.1.1 测试指标

为了客观评价检测方法的故障诊断性能,选取准确率 (Accuracy)、召回率 (Recall)、F1 值 (F1-score)、ROC 曲线及 AUC 值等经典评估指标。其中,准确率反映了模型整体分类正确的比例;召回率衡量了模型对实际泄漏故障的检出能力;F1 值综合考虑了检测的精确性与全面性;ROC 曲线则通过不同阈值下的真阳性率与假阳性率变化,直观展示模型的区分能力;AUC 值作为 ROC 曲线下的面积,量化检测模型的总体性能。这些指标将从不同侧面反映所提检测方法的实际诊断效果,确保评估结果的全面性与权威性。

4.1.2 不同压力容器工况下模型的诊断结果

为了验证检测方法的适应性及鲁棒性,在多种压力容器工况下可进行仿真与试验测试,包括不同工作压力、环境温度、气体介质,以及不同泄漏孔径与位置的组合工况。可通过对比分析各工况下的检测结果,评估方法在复杂环境下的性能稳定性。试验结果表明,所提出的检测方法在高压、低温、气流干扰等不利工况下依然能够保持较高的诊断准确率与召回率,具备良好的环境适应能力,能够有效应对多变的实际应用场景,方法有效性在线测试场景如图 3 所示。

4.2 最小可检测泄漏量

为了量化检测方法的灵敏度,以

逐步降低泄漏量的方式,评估其最小可检测泄漏量 (Minimum Detectable Leak Rate, MDLR)。通过在标准测试容器上施加微小泄漏,结合高灵敏度传感器与本检测方法进行比对,确定在不影响检测准确性的前提下,方法能够识别的最小泄漏量级别。测试结果表明,所提出的方法在微泄漏场景下依然具备良好的响应能力,最小可检测泄漏量达到 $10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$,优于传统声发射检测与气泡法,显著提升了压力容器早期泄漏故障的识别能力,为设备的超前预警提供了技术保障。

4.3 检测方法实时性分析

针对实际工程对检测效率的要求,可从数据采集、特征提取、模型推理与故障判定等环节出发,分析检测方法的实时性表现。通过优化算法流程与硬件加速,检测系统在保证高检测精度的同时,实现了毫秒级响应速度,单次检测周期控制在 500 ms 以内,能够满足大多数工业压力容器在线检测的实时性需求。此外,在动态变化的工况下,检测方法具备良好的数据流处理能力与时序响应性能,能够实现故障的即时预警与快速反馈,为实际生产安全提供有力支撑^[4]。

4.4 检测方法定源能力分析

压力容器泄漏不仅需要检测,还需快速准确定位泄漏源。可通过模拟容器不同部位的泄漏故障,测试检测方法的定源能力。通过空间分布特征分析与多传感器数据融合,检测方法能够实现对接点的精确定位,误差范围控制在 $\pm 5 \text{ cm}$ 以内,显著优于传统声学定位方法。此外,面对多点同时泄漏与复杂背景噪声干扰,检测方法依然具备良好的抗干扰性与溯源能力,能够有效区分各类典型泄漏源,为故障排查与维护检修提供高效的技术支持。

4.5 检测方法普适性验证

为验证检测方法的通用性,可通过不同类型 (如储气罐、反应釜、换热

器等)、不同结构参数 (如容积、壁厚、材料种类) 的压力容器进行测试,评估方法在多样化应用场景下的适应能力。测试结果显示,所提出的方法无需针对不同设备进行复杂的参数重标定,仅通过少量样本即可完成模型迁移与适应,具备良好的普适性与工程推广价值,能够广泛应用于石化、电力、航空以及冶金等多个行业领域的压力容器气密性故障检测任务中^[5]。

5 结论

本研究针对压力容器气密性检测问题,设计了一种基于压电传感器和 SVDD 模型的故障诊断方法。通过模拟试验与信号特征分析,提出了优化的诊断窗宽和特征提取方法,结合 SVDD 算法实现了对压力容器气密性故障的准确识别与实时监测。试验结果表明,该方法在各种工况下具备良好的诊断性能,能够有效识别微小泄漏并快速定位泄漏源,具备高灵敏度、实时性与普适性,具有较强的工程应用前景,能够为容器的安全运行提供技术保障。

参考文献:

- [1] 吴震. 基于温度特征的核电站压力容器气体泄漏检测方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
- [2] 青旭强, 范旭辉. 基于 SVDD 的压力容器气密性诊断模型应用探究 [J]. 中国新技术新产品, 2024(04):35-37.
- [3] 李彬楠. 试论化工设备压力容器规范设计及发展 [J]. 当代化工研究, 2023(17):147-149.
- [4] 管星星, 冯斐斐. 压力容器设计过程中的常见问题及防范对策 [J]. 石化技术, 2023,30(07):200-202.
- [5] 丁正龙. 基于计算机视觉的密封容器气密性检测研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.