

基于红外热成像的非接触式蒸汽管道缺陷智能检测与评估方法研究

崔凯¹, 李维桐^{1,2}, 顾永兵^{2*}, 李明飞², 马天富²

¹ 中国特种设备检验协会 北京

² 宁夏特种设备检验检测研究院 宁夏银川

【摘要】针对蒸汽管道热泄漏与壁厚减薄的安全检测难题, 研究提出基于红外热成像的非接触式智能检测方法。通过融合多源数据与先进的机器学习算法, 构建热泄漏强度、温度场分布与壁厚减薄之间的关联模型并采用自适应算法补偿环境干扰, 显著提高检测鲁棒性。创新建立包含热图特征、温度梯度及材质衰减的综合评估体系, 实现对管道缺陷的精准识别与量化分析方法。实验表明, 该方法在电站核心管路的早期缺陷预警中表现出色, 检测效率较传统方法提升 40% 以上, 成本降低约 35%。研究成果不仅为蒸汽管道安全检测提供新型技术解决方案, 对推动工业无损检测向智能化方向发展, 具有显著的工程应用价值与学术拓展空间。

【关键词】蒸汽管道; 热泄漏; 壁厚减薄; 热成像技术; 机器学习

【基金项目】宁夏回族自治区自然科学基金“移动式压力容器冲击特性及振动研究”(2023AAC03736)

【收稿日期】2025 年 1 月 16 日 **【出刊日期】**2025 年 2 月 22 日 **【DOI】**10.12208/j.jer.20250041

Research on detection technology for thermal leakage and wall thickness reduction in steam pipelines

Kai Cui¹, Weitong Li^{1,2}, Yongbing Gu^{2*}, Mingfei Li², Tianfu Ma²

¹China Special Equipment Inspection Association, Beijing

²Ningxia Special Equipment Inspection and Testing Institute, Yinchuan, Ningxia

【Abstract】To address the safety inspection challenges of steam pipeline thermal leakage and wall thickness reduction, this study proposes a non-contact intelligent detection method based on infrared thermography. By integrating multi-source data with advanced machine learning algorithms, an association model linking thermal leakage intensity, temperature field distribution, and wall thickness reduction is constructed. Additionally, an adaptive algorithm is employed to compensate for environmental interference, significantly enhancing detection robustness. An innovative comprehensive evaluation system incorporating thermal pattern features, temperature gradients, and material attenuation is established to achieve precise identification and quantitative analysis of pipeline defects. Experiments demonstrate that this method performs exceptionally in early defect warning for core pipelines in power stations, with detection efficiency improved by over 40% and costs reduced by approximately 35% compared to traditional methods. The research findings not only provide novel technical solutions for steam pipeline safety inspection but also drive the development of industrial non-destructive testing towards intelligence, possessing significant engineering application value and academic expansion potential.

【Keywords】Steam pipelines; Thermal leakage; Wall thickness reduction; Thermal imaging technology; Machine learning

1 引言

蒸汽管道作为工业热力输送的关键设备, 其长

期高负荷运行易引发热泄漏与壁厚减薄问题, 但传统检测手段在效率、精度及适用性上存在显著局限

第一作者简介: 崔凯 (1987-), 本科, 信息管理与信息系统专业, 研究方向: 特种设备检验检测行业管理研究;

*通讯作者: 顾永兵 (1988-), 工程师, 大学本科学历, 过程装备与控制工程专业, 研究方向: 化工机械设备、特种设备检验检测研究。

[1-2]。接触式检测（如超声波测厚、肥皂水检漏）需停机操作且难以适应高温环境,而非接触式技术（如超声波测漏检测）对微量泄漏及复杂工况灵敏度不足。近年来,红外热成像技术虽可通过表面温度场分析间接评估管道缺陷,但其工程化应用仍受限于环境温度、表面污损等干扰因素,且缺乏系统性量化评估标准[3-4]。

针对上述问题,研究提出基于红外热成像的非接触式检测方案,旨在构建热泄漏强度与温度异常分布、壁厚减薄量与表面温度梯度的关联模型,并通过自适应算法补偿环境干扰,最终形成可推广的工程化评估体系的方法。该研究可为蒸汽管道（如电站锅炉核心管路）提供早期缺陷预警,避免因泄漏或爆裂导致的生产事故,同时降低传统检测的经济成本与时间损耗,为高温压力管道的安全管理提供技术支撑。

2 理论基础与试验基础

2.1 理论基础

结合热传导与热辐射理论和数值计算方法,建立壁厚减薄量的计算模型,考虑管路材质、公称厚度、温度等因素,通过数值模拟和精密计算得到壁厚减薄量的理论计算数值。根据傅里叶定律,稳态热传导可表示为:

$$Q = -kA \frac{dT}{dy}$$

式中, Q 为单位时间热流量, k 为材料导热系数, A 为截面积, dT/dy 为温度梯度。

该公式适用于蒸汽管道的稳态传热分析,实际应用中需通过修正系数补偿对流与辐射影响。

2.2 试验基础

为解决蒸汽管道中存在的热泄漏及壁厚减薄难题,研究采用了热成像仪器,对大量管道管件的实际案例进行了拍摄与收集。通过对这些案例的深入学习和训练,机器学习算法得以掌握热泄漏与壁厚减薄的特有模式和显著特征,进而实现对此类问题的精准判别。图1与图2分别展示了管件壁厚减薄情况下的温度分布图,为算法的训练与验证提供有力支持。为准确评估蒸汽管道热泄漏和壁厚减薄的严重程度,并据此判断是否需要停止运行,研究将构建一套全面的评价指标体系。该体系将综合考虑热图的颜色分布、温度差异等多个关键维度,通过将这些信息量化为相对量和绝对量,实现对各项指标的精细化评估。结合壁厚减薄后管壁的最高温度与最低温度（如图3所示），提出的评价体系将能够准确判断蒸汽管道的热泄漏和壁厚减薄程度,为运行决策提供科学依据。

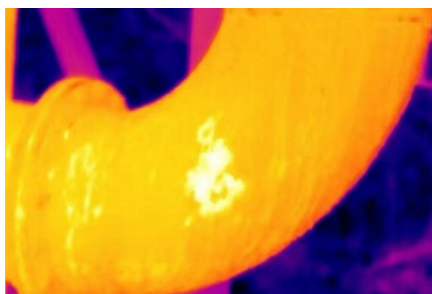


图1 弯头处壁厚减薄温度分布图

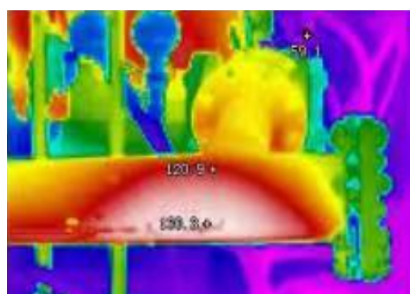


图2 三通处壁厚减薄温度分布图

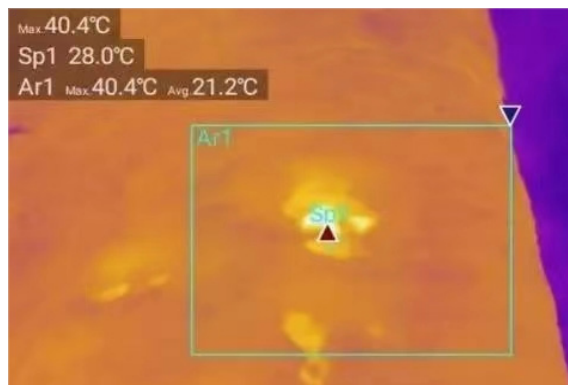


图3 壁厚减薄后管壁最高温与最低温度

3 研究内容与方法

3.1 研究内容

蒸汽管道单元在运行过程中, 若发生热泄漏或腐蚀减薄, 极易导致管路局部损坏, 甚至引发不同程度的安全事故。针对这些潜在问题, 研究将展开以下内容的研究:

(1) 利用热成像仪器对在役蒸汽管道外表面进行温度测量, 据此建立热泄漏的判别标准。同时, 构建一套全面的评价指标体系, 该体系将综合考虑温度变化、泄漏面积、泄漏量等多个核心要素, 以全面评估管道热泄漏的严重程度。此外, 还将提出一种泄漏点的标识方法, 以便快速准确地定位泄漏位置。

(2) 借助热成像仪器对蒸汽管道的壁厚减薄量进行评估。通过探究管道内介质温度、公称壁厚、流体结构、材质等参数之间的相关性, 并结合图像处理、CAE 仿真、数据库处理等先进技术, 实现对管道壁厚减薄量的精确评估, 以及减薄位置的准确识别和定位。

(3) 针对不同类型和工况的管道, 对所建立的评价指标体系进行优化和定制化调整, 以提高在用管路安全评估的准确性和适用性, 确保评估结果更加符合实际运行状况。

3.2 研究方法

3.2.1 数据采集与处理

(1) 传感器选择与布置: 针对管路特性和热泄漏检测的具体需求, 选择 FOTRIC 声热成像仪采集蒸汽管道热成像数据 (红外分辨率: 640×480 , 测温范围: -20°C - 700°C , 测温精度: $\pm 1^{\circ}\text{C}$, 采集频率: 30Hz)。辅以其他必要的传感器, 如温度传感器、压力传感器等。通过科学合理地布置这些传感器,

确保能够全面覆盖管道表面的关键区域。

(2) 数据采集: 对在役管路外表面进行实时的数据采集, 密切监测管道的温度、压力、流量等关键参数与热成像仪器拍摄出的热泄漏强度-温度场分布的关联, 并将数据准确地记录和存储下来。

(3) 数据处理: 采用高斯滤波去噪, 消除采集过程中的噪声干扰, 并利用主成分分析 (PCA) 进行特征降维。分类模型方面, 选择卷积神经网络 (CNN) 算法, 自动提取图像特征, 建立管道壁厚减薄量、泄露强度与管道壁温之间的关联关系, 从而通过热成像仪判断。数据采集与处理如图 4 所示。

3.2.2 多源数据融合与机器学习算法

(1) 多源数据融合处理: 为获取更全面、准确的管道状态信息, 研究将热成像仪器与其他传感器所采集的数据进行有效融合。通过采用先进的数据融合模型或信息融合算法, 将来自不同传感器的数据整合在一起, 形成一套综合反映管道状态的数据集。这一过程能够充分利用各传感器的优势, 弥补单一传感器在信息获取上的不足。

(2) 特征提取与优选: 在融合后的数据中, 进一步提取关键特征, 如温度分布、温度差异等, 这些特征对于判断管道状态具有重要意义。同时, 利用特征选择方法, 筛选出最具代表性和区分性的特征, 以降低数据维度, 减少后续算法的计算复杂度, 提高模型的运行效率。

(3) 机器学习算法建模: 采用神经网络 (Neural Network), 构建热泄漏判别模型^[5-7]。利用预先采集到的带标签样本数据, 进行模型的训练和优化, 使其能够准确判断管道是否发生热泄漏。多源数据融合与机器学习算法如图 5 所示。

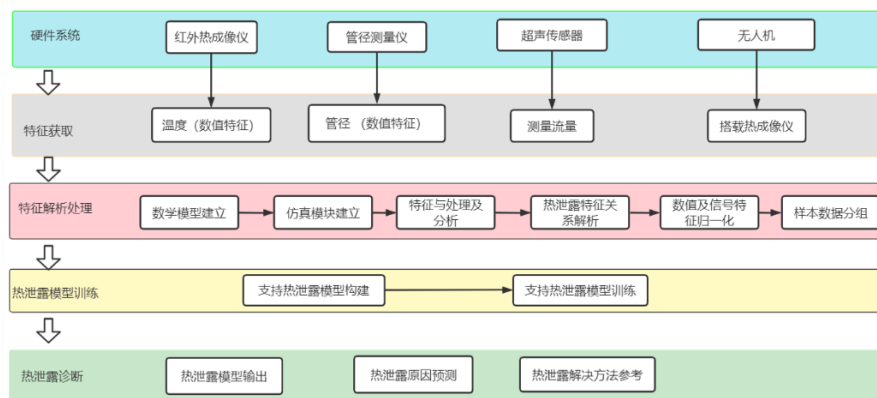


图 4 数据采集与处理

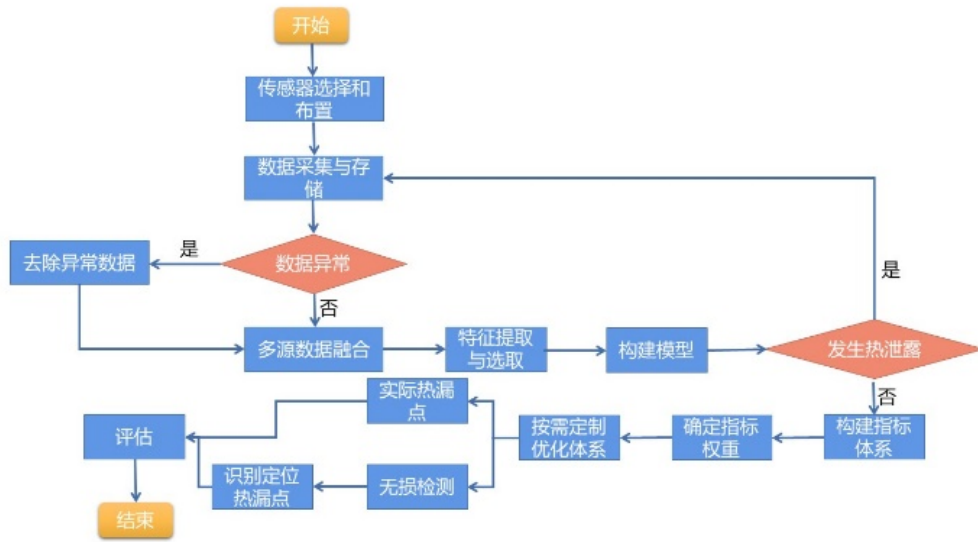


图5 多源数据融合与机器学习算法

3.2.3 评价指标体系的优化与定制化

针对不同类型和工况的管道, 研究将对评价指标体系进行针对性的优化和定制化处理。根据各类管道的独特特点以及具体应用场景的实际需求, 对指标体系进行必要的调整和扩展, 以确保评估结果的准确性和适用性得到进一步提升^[8-9]。这一过程将充分考虑管道的差异性, 确保评价指标体系能够更加精准地反映管道的实际状态。评价指标体系的优化与定制化如图6所示。

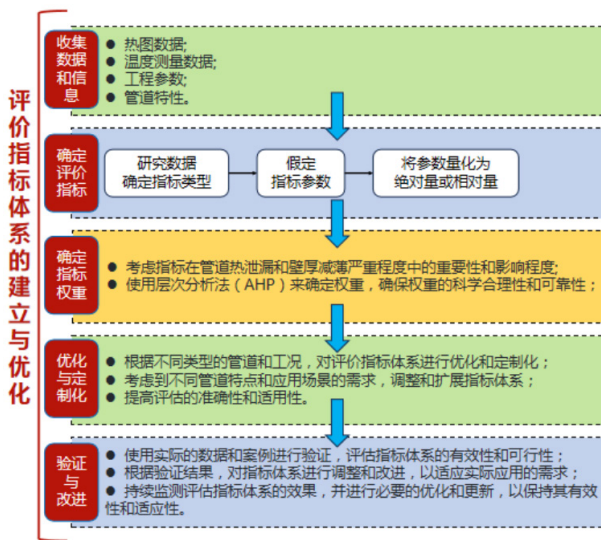


图6 评价指标体系的优化与定制化

3.2.4 泄漏点标识方法的研究

(1) 热成像仪器无损检测技术: 研究利用热成

像仪器对管道进行非破坏性的检测, 获取管道表面的热分布图像。通过对这些热图的深入分析和处理, 提取出热泄漏点的特征信息, 为后续的精确定位提供有力依据。

(2) 图像处理与模式识别技术应用: 为了准确识别和定位热泄漏点, 研究采用先进的图像处理算法和模式识别技术。通过边缘检测、目标检测、特征匹配等方法, 对热图进行细致的处理和分析, 实现对热泄漏点的精确识别和定位。

(3) 定位结果验证与精确化处理: 为确保定位结果的准确性, 研究对定位结果进行验证和精确化处理。通过与实际泄漏点位置的对比, 评估定位的准确性和误差范围。对于误差较大的情况, 采取进一步的优化和校正措施, 不断提高定位的精确度和可靠性, 以满足实际应用的需求。

4 研究方法、技术路线的可行性和先进性分析

4.1 可行性分析

(1) 通过将热成像仪器与其他传感器的数据进行有效融合, 并借助机器学习算法进行深入分析和建模。机器学习算法能够从海量数据中自动学习并提取关键特征, 进而建立准确的判据模型, 以实现热泄漏和壁厚减薄的精准判别, 显著提高判别的准确性。

(2) 该方法构建一套全面的评价指标体系, 体系从热图的颜色分布、温度差异等多个维度进行量

化评估,并综合考虑各指标的权重,以全面、客观地反映管道热泄漏的严重程度及检修需求。

(3) 利用热成像仪器进行无损检测,并结合先进的图像处理和模式识别技术,实现对热泄漏点的准确识别和定位。这种方法不仅避免了破坏性检测带来的风险,还显著提高了检测的效率和准确性。

(4) 根据不同类型的管道和工况特点,对评价指标体系进行优化和定制化,以确保评估结果的准确性和适用性,使其更加符合实际应用需求^[10]。

4.2 先进性分析

(1) 研究综合应用多种传感器和热成像仪器的数据,通过数据融合和机器学习算法,实现对热泄漏和壁厚减薄发生与否的准确判断,能够显著提高判别的准确性和可靠性。

(2) 研究建立一套全面的评价指标体系,从多个维度对热图进行量化分析,使得评估结果更加全面、客观,为管道的安全评估提供科学依据。

(3) 研究引入图像处理和模式识别技术,结合热成像仪器可以实现对泄漏点和壁厚减薄的无损检测和准确识别定位,该方法在电站核心管路的早期缺陷预警中表现出色,检测效率较传统方法提升 40% 以上,成本降低约 35%。

5 讨论与建议

研究提出的热泄漏判据和评价指标体系,凭借其客观、全面的特性,能够精确评估蒸汽管道的安全状态,为管道的安全管理提供了有力支持。同时,泄漏点标识方法的研究为实现管道内部热泄漏点的非破坏性检测开辟了新的路径,极大地提升了检测的便捷性和准确性。

研究提出一种基于热成像技术的蒸汽管道热泄漏与壁厚减薄非接触式检测方法。通过融合多源数据、应用机器学习算法,建立准确的热泄漏判据和全面的评价指标体系,实现对蒸汽管道安全状态的精准评估。这一方法不仅为蒸汽管道的安全运行提供了科学依据,也为相关技术的发展提供了有力支撑,具有重要的理论和实践价值。尽管本研究提出的方法在检测精度方面优于传统方法,但仍存在一定局限性。例如,在高湿度环境下,热成像信号可能

受到干扰,影响检测效果。因此,未来可考虑融合多传感器信息(如超声波、光学成像)以提高检测的稳定性。

参考文献

- [1] 张杨,林超,吴洁.浅论输送管道泄漏检测及其方法[J].中国石油和化工标准与质量,2011,31(09):221.
- [2] 陈春刚,王毅,杨振坤.长输油气管道泄漏检测技术综述[J].石油与天然气化工,2002,(01):52-54+0.
- [3] 晏泽晨,陈婷,金波,等.加氢裂化高压管道监测技术探讨[J].化工管理,2024,(13):67-69.
- [4] 徐火力.红外热像检测技术在热力管道年度检查中的应用[J].能源与环境,2019,(01):38-39.
- [5] 郭燕,丁亚军,钱盛友,等.基于 BEMD 与随机森林算法的 HIFU 治疗无损测温方法[J].测试技术学报,2018,32(06):487-492.
- [6] 郭龙,郭文文.基于 SVR 和随机森林模型的动力煤高位发热量预测研究[J].能源工程,2024,44(01):35-42.
- [7] 岳仁田,韩娜,赵巍飞.基于练习数据的管制席健康状态聚类分析及预测[J].安全与环境学报,2020,20(05):1782-1787.
- [8] 曹丽斐,苏义坤,王富强,等.工业化建筑标准体系项目评估指标体系[J].土木工程与管理学报,2019,36(03):164-169+176.
- [9] 钱淑霞,于彦华,吴春岩,等.地方农业院校专业评估指标体系构建的探索与实践[J].黑龙江畜牧兽医,2016, (02):16-18.
- [10] 梁磊,李永树.基于 GIS 的动态指标管理在管道风险评价中的应用[J].油气储运,2012,31(01):13-16+81-82.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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

