

基于在线监测数据的长输管道腐蚀速率预测模型研究

王云超 王国峰 邢玉晋 (国家管网集团北方管道有限责任公司郑州输油气分公司, 河南 南阳 474500)

摘要: 研究油气长输管道腐蚀速率的目的在于通过可量化的指标来精准掌握和预测管道发生腐蚀的程度和速度, 以为提高管道安全预警能力和运维管理水平提供依据。文章围绕在线监测数据下搭建预测长输管道腐蚀速率模型的途径展开分析和研究。结果表明, 具体采取多维度评价指标体系构建、交叉验证与泛化性能测试、现场部署与工程应用反馈等预测模型, 能动态跟踪和精准预判腐蚀速率, 从而推动长输管道腐蚀实现智能化防护和运维的目标。

关键词: 在线监测; 监测数据; 长输管道; 腐蚀速率; 预测模型

中图分类号: TE988.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 011-0108-03

Research on corrosion rate prediction model of long-distance pipelines based on online monitoring data

Wang Yunchao, Wang Guofeng, Xing Yujin (National Pipeline Group Northern Pipeline Co., Ltd. Zhengzhou Oil and Gas Transmission Branch, Nanyang Henan 474500, China)

Abstract: The purpose of studying the corrosion rate of long-distance oil and gas pipelines is to accurately grasp and predict the degree and speed of pipeline corrosion through quantifiable indicators, so as to provide a basis for improving pipeline safety early warning capabilities and operation and maintenance management levels. This article analyzes and researches ways to build a model for predicting the corrosion rate of long-distance pipelines based on online monitoring data. The results show that specific prediction models such as multi-dimensional evaluation index system construction, cross-validation and generalization performance testing, on-site deployment and engineering application feedback can dynamically track and accurately predict the corrosion rate, thus promoting the goal of intelligent protection and operation and maintenance of long-distance pipeline corrosion.

Keywords: online monitoring; monitoring data; long-distance pipeline; corrosion rate; prediction model

油气长输管道可能会因土壤环境、介质成分、运行工况等多因素的影响而出现管道腐蚀问题。基于物联网和在线监测技术获得的多维度实时监测数据, 可为深入探究腐蚀问题的成因和制定维护计划提供科学支持。

1 数据预处理与特征工程构建

1.1 原始数据清洗与异常值剔除

为保障预测长输管道腐蚀速率模型的精准性, 既要留存真实腐蚀演化信息, 更应去除在线监测数据中的冗余记录, 为将来特征工程和模型训练提供高质量的数据集。一方面, 在识别异常数值的过程中, 选择使用融合统计学和工程阈值的判定机制, 理论共识如下:

$$|x_i - \mu| > 3\sigma$$

其中 x_i 为监测样本值, μ 为样本序列均值, σ 为样本标准差。另一方面, 在处理异常数值的过程中, 落实了识别、校验、修正、去除的策略, 显著提高数据集完整性、一致性、准确性的同时, 清晰表现出腐蚀速率和环境因子之间的关联性。

1.2 多源特征提取与相关性分析

精准提取和深入分析关联性多源特征, 对于联结

清洗以后的数据和预测模型意义重大。具体而言, 长输管道在线监测体系中, 涉及环境类、运行类、电化学类、介质属性类多维度的数据, 在提取其中特征的过程中, 应始终坚守融合机理驱动和数据驱动的原则, 在时序监测序列下, 提取出均值、方差、极值、变化率等特征。尤其是紧密融合关于管道材质、壁厚、服役年限等静态属性的特征, 创建出涵盖初始特征的训练集。此外, 在相关性分析的过程中, 应设置相匹配的阈值, 在其中留存高度适配腐蚀速率的特征变量, 去除冗余的耦合特征。同时, 围绕腐蚀电化学机理和管道服役情况进行校验, 确保筛选出的特征, 符合腐蚀烟花在物理层面的逻辑, 从源头上规避伪相关的干扰风险^[1]。

1.3 时序数据重构与标准化处理

为了大幅提高模型促进腐蚀演化规律的拟合能力, 应落实结构化重构和尺度统一化的手段, 确保能满足预测模型中输入格式的需求。在重构时序数据的过程中, 实时监测历史特征后, 搭建特征时序的架构, 精准对接后续时刻服饰率标签值的同时, 还能拥有监督式学习样本集。尤其是在对训练集、验证集、测试

集可续而划分以后,可以保证样本分布在时序层面的一致性和独立性,从源头上规避数据泄漏和样本重复干扰的风险。同时,在整个处理的过程中,应坚持训练集参数迁移的原则,围绕训练集对标准化统计的参数进行精准计算,并协同应用在验证集和测试集中,切实保障数据处理的独立性和模型泛化能力。

2 腐蚀速率预测模型架构设计

2.1 基础预测模型选型与构建

为能精准拟合长输管道腐蚀速率,应科学选择和搭建基础预测模型,为将来模型融合和性能优化提供支持^[2]。具体来说,在选择模型的过程中,应对数据特征、拟合精度、计算复杂度、泛化能力综合考虑,并参考创数管道腐蚀系统的特征,选择极具代表性的机器学习和深度学习模型作为基础架构。此外,在搭建模型的过程中,利用预处理以后的标准化时序样本,完成分配训练集、验证集、测试集的任务。同时,参照模型的特征,将神经网络中隐藏层节点数、激活函数类型进行初始化,为全面优化对比选型、模型融合、超参数提供依据,最大程度上保障腐蚀速率预测的精准性和鲁棒性。

2.2 模型融合机制与结构优化

全面优化模型融合机制和结构,能大幅提高腐蚀速率预测模型的性能,真正实现协同提升预测结果的稳定性和准确性目标。首先,面对深度学习时序模型中产生的梯度消失、训练收敛缓慢等问题,依托自注意力机制,增加关键时序特征的权重,结合腐蚀突变阶段中高效数据信息,在严格控制冗余时序干扰问题的同时,确保模型拟合能力和泛化性能之间的平衡性。其次,参照管道腐蚀情况下动态变化的特征,应设计出自适应结构的调整模块,结合在线监测数据分布漂移的情况,对融合权重和模型结构参数进行实时更新,全面守护预测模型的长期性和有效性。最后,采取正向结构改进和反向误差传播的方式,对寻优途径持续更新,在大幅提高模型计算效率的同时,显著增强预测精准度和抗干扰能力。

2.3 超参数自适应寻优与调参

当前寻优和调参超参数,既能提高腐蚀速率预测模型拟合精度、泛化能力、运算效率,又能利用智能化算法,寻求最优的模型超参数空间。在自适应寻优的过程中,将模型预测误差、决定系数等性能指标作为目标函数,应制定参数优化模型,减少搜索参数成本的同时,满足复杂化超参数空间寻优需求。此外,依托模型的特征,对重要超参数和次要超参数进行划分,并设置科学合理的取值范围和搜索途径,从源头规避数据分布差异后产生的过度拟合风险,切实保障

参数优化的稳定性。同时,依托时序预测模型的动态化特征,制定自适应的更新机制,紧紧围绕在线监测数据的分布漂移和工况变化,定期优化超参数寻优流程,切实保障模型参数和数据特征的适配性^[3]。

3 模型验证与工程应用效能评估

3.1 多维度评价指标体系构建

为从源头上规避单一误差指标评价的片面性风险,应全面量化和评测长输管道腐蚀速率预测模型,一直坚持数值精度、时序拟合、工程实用的原则,制定涵盖回归误差指标、时序拟合指标、工程风险指标的层级化体系,为模型选型、优化参数、部署工程可以量化的决策参考依据。一方面,选择实用回归类误差指标,精准校验基础数值,清晰呈现出模型预测值和真实值之间的偏差程度。并且紧紧围绕时序拟合指标,结合监测数据在时间层面的序列化特征,确保能精准评估模型跟踪腐蚀速率趋势和突变点的能力。另一方面,紧密融合工程风险类别的指标,将预测误差风险,转变成运维管道安全的风险等级,精准对接学术评估和工程应用,满足模型算法学术评测要求的同时,高度契合现场工程决策的真实标准,从源头上规避安全预警失效的风险。

在线监测和预测天然气长输管道干线腐蚀速率的过程中,安装了可以监测腐蚀电位、介质pH值、土壤电阻率、运行温度、压力类别的在线监测传感器,并围绕数值精度、时序拟合、工程实用维度的指标体系,对收集的数据进行精准计算和深入分析。在数值精度指标维度,选择适用了平均绝对误差、均方误差、均方根误差、决定系数指标,计算公式则参照回归评估标准。在时序拟合指标维度,将动态时间规整度、趋势吻合度、突变点识别准确率作为指标,并围绕时序数据时间的依赖性进行评估,有效化解传统模型落后和突变点落后的问题。在工程风险指标维度,参照有关油气输送管道完整性管理规范体系,将预测偏差数据,转变成腐蚀余量偏差值、安全预警误报率、运维决策偏差等级的指标,并且对管道设计的最小腐蚀余量进行严格控制。尤其是面对一些盐碱地段和高腐蚀区域,模型预先启动了速率超标的预警,恰好符合现场检测的结果。实践证明,在落实多维度指标体系以后,对模型性能进行了全方位的优化,在算法层面验证高精度拟合能力的同时,还清晰呈现出了管道安全运维的效果,证实了多维度评价指标体系的科学性和实用性。

3.2 交叉验证与泛化性能测试

在未知工况和异质数据下,为能精准验证长输管道腐蚀速率预测模型能力的稳定性,可以采取交叉验证和泛化性能测试的方式,始终坚持机器学习泛化和

时间序列数据独立性的原则，从源头上规避以往验证方式重复拟合、评估偏差等问题。具体来说，在交叉验证的过程中，选择使用时序有序分割的方式，确保训练集和验证集在时间层面的关系，确保能符合管道腐蚀数据面对时序的依赖性，在重复验证以后，规避单次划分的偶然误差风险，参照平均指标和方差，对模型的稳定性进行精准衡量。此外，在测试泛化性能的过程中，应围绕数据分布、工况环境、时间跨度维度进行设计，参照分布外数据、跨地段数据、跨周期数据，有序开展独立测试工作，协同验证模型的稳定性和泛化性^[4]。

在交叉验证和泛化性能测试原油长输管道腐蚀速率预测模型的过程中，布置大量在线监测站，只为能对腐蚀电位、土壤含水量、电阻率、介质温度等数据进行详细收集，并借助预测模型进行精准测试。在交叉验证环节，选择使用时序5折交叉验证的方式，秉承时间先后的原则，将数据细化成多个互斥子集，按照顺序选择连续时序子集作为验证集，其他则作为训练集，从源头上规避数据泄露和时序混乱的风险。指标标准差中显示指标的波动较小，证实整个训练过程非常稳定且可靠。在测试泛化性能环节，增设了跨环境、跨时间、分布外的独立测试集。一是从未训练过的盐碱地监测站数据，发现此区域土壤腐蚀性相较于训练集的农田区域较高。二是训练集落后的后续时序数据，真实模拟出了长期运行的数据场景。三是在极端情况下的数据，其中涉及管道压力波动、强降雨后土壤含水率大幅提升等异常工况。上述测试数据中的泛化误差，均满足现场应用中的要求。因此，在泛化测试以后，证实模型可以满足不同土壤环境、时间退役、极端工况下的需求，彰显出交叉验证和泛化性能测试方案的科学性、实用性。

3.3 现场部署与工程应用反馈

为了保障腐蚀速率预测模型和各个工程施工流程之间的适配性，应在现场落实边缘端实时推理、云端模型更新、现场多维度反馈体系^[5]。一方面，在现场部署的过程中，引进分布式边缘计算架构，并在管道监测位置，布置相匹配的边缘网关，有序开展轻量化模块推理工作，确保能满足现场毫秒级响应预警的需求。并且在数据链路层面，参照工业通信协议标准，确保能加密传输和双向交互监测数据、预测结果、预警指令。另一方面，制定结合定量和定性的评价体系，实时反馈有关预警准确率、漏误报率、运维效率提升幅度等指标，并同步关于工况适配性、操作边界性、现场兼容性等实操维度，落实增量学习和参数微调，有效化解实验室模型和现场复杂工况之间的脱节问题，

最大程度上保障模型在现场运行的精准性和可靠性。

在成品油长输管道腐蚀速率预测模型现场部署的过程中，沿着冲积平原、风化丘陵、滨海盐渍区域创建在线监测站，详细收集有关腐蚀电位、土壤电阻率、含水率、介质温度、管体压力类别等参数，并引进边缘网关轻量化推理和云端平台管理优化的架构，将全面优化以后的统合模型，迁移至现场边缘计算单元，并且精准对接管道内部的监控系统和运维管理平台，自动生成量化对比表。在预警性能层面，实验室模型预警的准确率较高，结合现场所反馈的盐渍土腐蚀特征数据，全面优化模型增量以后，预警准确率相较于以往有了大幅提升，高度契合管道安全预警工程中的标准。在运维效能层面，率先采用人工巡检的方式，对管道腐蚀程度进行监测，而在部署模型以后，能实现自动预警和精准定位的目标，自安舒缩短响应高腐蚀区域预警响应的周期。在模型精度层面，围绕现场反馈的工况扰动数据，对特征权重进行了全面优化。

4 结束语

综上所述，在搭建多模型融合和自适应预测架构后，还制定了相匹配的评估机制，使长输管道完整性管理中智能化技术的应用愈加丰富。展望未来，高效利用数字孪生、多模态数据融合、增量在线学习技术，能紧密融合管道材质、地质结构、第三方扰动等多维度信息，搭建出相匹配的腐蚀预测和健康管理系统，最大程度上保障管控长输管道运行安全的智能化和精细化水平。

参考文献：

- [1] 邓贺鑫. 深基坑邻近天然气长输管道垂直位移监测方法[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2023, 39(04): 419-425.
- [2] 郝清源, 田甜, 高静, 等. 天然气长输管道项目大气环境影响评价在新旧导则下的比对分析[J]. 油气田环境保护, 2021, 31(03): 51-54.
- [3] 闻小虎, 魏晓静, 葛鹏莉, 仲凤呈, 高多龙. 关于油田集输管道腐蚀监测与防护措施的思考[J]. 清洗世界, 2022, 38(09): 161-163.
- [4] 吴九虎, 孟琛翔, 徐国鸿, 刘江江, 郭胜. 长输管道腐蚀监测技术应用分析[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(11): 83-85.
- [5] 陈潜, 黄伟, 张昌会, 管奥成, 张宸, 叶晓芄. 基于物理引导的集输管道内腐蚀速率预测及可解释性分析[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2025, 45(03): 720-730.

作者简介：

王云超(1987-), 男, 汉族, 河南省邓州市人, 专科, 研究方向: 长输油气管道的日常管理、运行维护等工作。