

海底管道腐蚀数据处理研究

李 明 闫玉龙 刘登辉

中海石油（中国）有限公司天津分公司 天津 300000

摘 要：海底管道长期服役于复杂海洋环境，腐蚀损伤演化具有多维、非线性与时序随机特征，原始监测数据普遍存在缺失、噪声、冗余与量纲不统一等问题，严重制约腐蚀评估与预测精度。本文系统分析海底管道腐蚀机理与数据特性，构建完善的数据清洗、标准化与特征降维预处理体系，结合智能优化算法搭建腐蚀预测模型。通过工程实例验证方法可行性，精准挖掘腐蚀演化规律，可为海底管道完整性管理与安全运维提供科学的数据支撑与技术参考。

关键词：海底管道；腐蚀数据；处理方法

引言

海底管道是海洋油气资源输送的关键基础设施，其服役安全性直接关乎海洋工程稳定与生产安全。海洋高盐、富氧、微生物及复杂水文条件会诱发多类型复合腐蚀，导致管道性能持续衰减。当前腐蚀监测原始数据质量参差不齐，传统分析模型难以适配多因素耦合下的非线性腐蚀演化特征，预测结果偏差较大。为此，本文开展腐蚀数据处理与建模研究，优化数据处理流程，构建高精度预测模型，为管道腐蚀风险防控提供可靠依据。

1 海底管道腐蚀机理与数据基础分析

1.1 海底管道主要腐蚀类型及机理

（1）外部腐蚀：海底管道长期处于高盐、高湿、富氧的海洋环境中，其外部腐蚀主要以电化学腐蚀与微生物腐蚀为主导。电化学腐蚀机理在于管道金属表面与海水电解质形成原电池，因电位差异导致阳极区金属离子溶出，造成管壁均匀减薄。微生物腐蚀则是由硫酸盐还原菌等活性微生物代谢活动诱发，其产生的硫化物会加速局部阴极去极化过程，显著增大腐蚀速率。（2）内部腐蚀：输送介质中携带的 CO_2 、 H_2S 等酸性气体遇冷凝水后形成碳酸、氢硫酸等腐蚀性溶液，对管道内壁产生化学侵蚀。 CO_2 腐蚀通常表现为均匀剥蚀或台地状蚀坑，而 H_2S 腐蚀易诱发氢致开裂或硫化物应力腐蚀开裂，二者共存时会产生协同增强效应，损伤特征呈现局部片状剥落与微裂纹网交织分布^[1]。（3）局部腐蚀：点蚀起源于管壁表面钝化膜破裂，蚀孔内部处于活化状态、外部为钝态，形成小阳极大阴极的腐蚀格局，致使蚀孔迅速向纵深发展，严重时可贯穿管壁。缝隙腐蚀则发生于法兰连接、沉积物覆盖等狭窄区域，因缝隙内氧补给受阻形成氧浓差电池，导致缝隙底部优先溶解，削弱管道结构强度。

1.2 海底管道腐蚀数据来源与采集方式

（1）现场监测数据：依托水下多传感器融合系统，

利用超声测厚、漏磁内检测等技术获取管壁腐蚀深度、剩余壁厚等关键参数，数据具有高保真空间分布特征，真实反映管道服役状态。（2）实验模拟数据：基于循环盐雾槽、高温高压反应釜等设备模拟近海腐蚀环境，通过失重法、电化学测试获得腐蚀速率及损伤演化规律，为机理建模与数据补充提供基准样本。（3）历史运维数据：涵盖管道投运年限、检修维护记录、沿线温盐深流等环境因子历史台账，记录管道全生命周期腐蚀变迁轨迹，为趋势分析提供长周期背景信息。

1.3 腐蚀数据特征与现存问题分析

（1）腐蚀数据基本特征：数据呈现多维性（空间位置、环境变量、时间标签等多属性交织）、强时序性（腐蚀损伤持续累进演化）、非线性（腐蚀速率随环境波动的复杂响应）及显著随机性（海洋环境载荷的随机扰动导致数据分散）四大核心特征。（2）原始数据现存问题：现场采集环节存在数据缺失（传感器失效或通信中断所致）、异常噪声（电磁干扰与流致振动叠加）、量纲不统一（不同检测原理的数据单位各异）及冗余数据（高度相关变量重复记录）等质量问题。（3）数据问题对后续分析的影响：上述缺陷将导致腐蚀特征提取困难、机理模型参数拟合失真、评估结果偏离真实状态，严重制约腐蚀趋势预测的可靠性，进而直接影响管道完整性管理决策的科学性与有效性。

2 海底管道腐蚀数据处理方法研究

2.1 腐蚀数据清洗处理

（1）异常数据识别：采用统计阈值法依据腐蚀速率、壁厚损失等关键指标的物理合理区间设定上下边界，结合 3σ 准则（超出均值 ± 3 倍标准差的样本判为异常）以及箱线图法的四分位距准则（超出上下须边界的观测值视为离群点），从原始监测序列中系统识别因传感器故障、环境突变或人为记录误差导致的异常数据

点,实现多准则交叉验证的异常检测。(2)异常数据修正与剔除:针对传感器零漂、信号耦合干扰等引发的孤立性瞬态跳变点,在确认其物理不可解释后予以直接剔除;对于环境剧烈波动(如风暴潮期间温盐骤变)造成的连续异常段,则依据相邻正常时段的数据演化趋势,采用局部加权回归平滑法进行修正,使修正数据既保留原始变化趋势又符合腐蚀损伤渐进累积的物理规律,避免信息失真^[2]。(3)缺失数据填补:针对随机分散的个别缺失点,采用三次样条插值充分利用邻域信息进行精准补全;对于连续较长时段的数据缺失,应用灰色预测GM(1,1)模型挖掘数据序列内在演化趋势进行外推填补;对于缺失率较高的辅助变量,则以同环境工况下历史观测值的中位数或众数填充,并同步记录缺失标识位供后续建模参考,确保填补方案与缺失程度相匹配。

2.2 腐蚀数据标准化与归一化处理

(1)数据量纲统一:针对腐蚀深度(mm)、环境温度(℃)、盐度(‰)、溶解氧浓度(mg/L)、流速(m/s)等物理单位各异的监测变量,采用Z-score标准化方法将其转换为均值为0、标准差为1的标准正态分布,从根本上消除不同量纲对后续距离度量与梯度计算的偏置影响,使各变量在统一尺度下参与建模。(2)极值归一化处理:在标准化的基础上,进一步采用Min-Max归一化方法将各变量线性映射至[0,1]闭区间,在严格保持原始数据相对大小次序与比例关系的前提下实现数值区间的全局统一,彻底消除大数值变量在特征空间中主导小数值变量的量级效应,为后续主成分分析降维及机器学习建模提供规范化的输入基础。

2.3 腐蚀数据降维与特征筛选

(1)冗余数据剔除:通过计算各环境参数间的皮尔逊相关系数矩阵,识别并剔除相关系数绝对值高于0.90的高度共线性变量对中的冗余项,同时去除与腐蚀速率相关系数绝对值低于0.05的弱相关或无关监测指标,从源头压缩数据规模,降低信息冗余度。(2)核心特征提取:采用主成分分析(PCA)将原始高维变量空间投影至低维主成分子空间,依据累计方差贡献率不低于85%的原则确定保留主成分个数,提取线性主导的腐蚀影响因子;进一步引入核主成分分析(KPCA)利用高斯径向基核函数映射变量间的非线性耦合关系,充分挖掘海洋多环境因素协同作用下对腐蚀演化的深层驱动特征^[3]。(3)特征数据集构建:综合PCA/KPCA各主成分载荷系数大小排序及腐蚀电化学机理先验知识,筛选对腐蚀速率贡献最显著的前若干项关键特征因子,剔除冗余干扰变量,构建包含核心环境参数与腐蚀响应变量配对的最优特征子

集,形成标准化的建模输入数据集。

2.4 预处理效果验证分析

(1)数据稳定性检验:对比预处理前后数据序列的方差、极差、变异系数及波动幅度等离散程度统计量,量化评估清洗及标准化对数据整体稳定性的改善效果,确保处理后数据波动特性符合腐蚀损伤渐变累积的物理认知,避免因过度平滑导致关键信息丢失。(2)数据有效性验证:以预处理前后数据分别拟合经典腐蚀速率经验模型(如DeWaard-Milliams模型),对比拟合优度 R^2 、调整 R^2 及均方根误差RMSE的变化幅度,验证预处理流程是否在有效剔除噪声与冗余的同时完整保留了原始数据所蕴含的腐蚀演化本质规律,确保最终数据集在表征腐蚀规律方面的准确性与建模适用性。

3 基于优化算法的海底管道腐蚀数据分析与建模

3.1 常用腐蚀数据分析模型对比

(1)传统统计模型:灰色GM模型通过对原始腐蚀数据进行累加生成以弱化随机扰动,挖掘系统整体演化趋势,适用于小样本、贫信息条件下的管道腐蚀短期预测场景;回归分析模型通过建立腐蚀速率与多影响因素之间的线性或对数线性显式函数关系,适用于机理相对明确、变量间线性相关性较强的腐蚀数据分析,但两者均难以有效刻画海洋多环境因素耦合驱动的复杂非线性腐蚀行为。(2)智能算法模型:支持向量机(SVM)借助核函数将低维空间的非线性映射问题转换至高维线性可分空间,在小样本条件下展现出良好的泛化性能,但大样本训练效率偏低且核函数选择缺乏统一理论指导;BP神经网络通过多层神经元的前向计算与误差反向传播机制,理论上能够以任意精度逼近复杂非线性映射关系,适用于多因素强耦合的腐蚀速率预测,然而其收敛速度较慢、易陷入局部极小值且网络结构选择依赖经验试凑,在一定程度上制约了建模精度与泛化稳定性^[4]。

(3)组合优化模型:多算法融合模型通过将传统统计模型的可解释性优势与智能算法的非线性拟合能力有机结合,可有效弥补单一模型在泛化性能或拟合精度上的固有缺陷,同时引入遗传算法、粒子群优化等全局搜索策略对模型超参数进行协同优化,在海管腐蚀多源异构数据的联合建模中展现出更强的鲁棒性、自适应能力与预测准确性。

3.2 优化腐蚀数据分析模型构建

(1)模型参数初始化:基于预处理后的标准特征数据集,明确模型输入变量(环境温度、盐度、溶解氧浓度、流速、运行年限等)与输出变量(腐蚀速率或壁厚损失率),通过统计分布分析设定各核心参数的初始阈

值区间与全局搜索边界,为后续参数优化提供合理的起始空间。(2)模型结构优化:针对传统BP神经网络对初始权值敏感且易陷局部极值的缺陷,引入遗传算法的种群全局搜索机制进行权值与阈值预训练,获得近似最优解后再交由BP算法精细调优;同时采用自适应学习率策略根据迭代误差动态调整更新步长,加速收敛并提升拟合精度。(3)模型训练与调试:将预处理数据集按7:3比例划分为训练集与独立测试集,训练集用于参数学习,测试集用于泛化能力评估;采用K折交叉验证策略监控训练过程以避免过拟合,并依据验证误差变化动态调整隐层节点数、学习率及正则化系数等超参数,完成模型的充分迭代训练与精细调试^[5]。

3.3 模型结果分析与腐蚀规律挖掘

(1)模型精度评价:采用平均绝对误差(MAE)衡量预测值对实测值的平均偏离程度,均方根误差(RMSE)放大较大偏差的惩罚效应以反映预测波动性,决定系数(R^2)表征模型对腐蚀速率总变异的解释程度,三者综合评判优化模型的预测精度与可靠水平。

(2)腐蚀影响因素分析:基于优化模型训练完成后的权值分配矩阵或特征重要性排序指标,量化海水盐度、温度、溶解氧含量、流速及管道运行年限等关键因子对腐蚀速率的贡献权重,识别主控驱动因素并分析其正负效应方向及交互协同强度。(3)管道腐蚀演化规律分析:基于模型时序预测结果与实测历史轨迹的逐期对比,挖掘腐蚀速率随运行年限的累积递增趋势,揭示由季节性温度波动、风暴潮引发的短期环境冲击导致的周期性波动特征,归纳不同服役阶段下的腐蚀演化阶段模式。

3.4 工程实例验证与应用分析

(1)工程案例数据选取:选取我国某海域在役海底管道连续12个月的现场综合监测数据,涵盖超声测壁厚损失序列、多参数环境记录仪采集的温盐深流数据及运行压力工况记录,构建工程验证的完整输入样本集。

(2)模型预测结果与实测数据对比:将优化模型输出的腐蚀速率预测值与同期漏磁内检测及超声抽检所得的实测壁厚损失数据进行逐点位、逐时段的系统比对,通过误差分布直方图与相关性散点图直观呈现偏差程度,以定量统计指标综合验证优化模型在真实工程环境下的适用边界与预测可信度。(3)工程应用建议:基于腐蚀影响因素分析与演化规律挖掘结论,识别管道沿线高风险管段的空间分布及腐蚀加速敏感季节窗口,据此提出差异化运维策略(如重点区段加密检测频次、季节性调整缓蚀剂注入速率、优化清管作业周期安排),并建议构建动态腐蚀预警阈值体系,为海底管道完整性管理提供数据驱动的防护优化与科学决策依据。

结束语

本文梳理了海底管道腐蚀机理与数据缺陷,建立了标准化腐蚀数据预处理流程,构建出优化组合腐蚀预测模型,有效提升了腐蚀速率预测精度,明确了核心环境因子的腐蚀驱动作用。研究完善了海管腐蚀数据分析体系,解决了原始数据质量差、建模拟合度低的问题。后续可进一步优化算法适配多海域工况,构建全周期动态腐蚀预警系统,赋能海洋管道智能化运维发展。

参考文献

- [1] 骆正山,吕海鹏,骆济豪.基于MWIWOA-SVM的海底长输管道腐蚀速率预测[J].油气储运,2025,44(05):551-559.
- [2] 王嘉琦,张宏,刘健.海底管道腐蚀监测数据异常识别与修复方法[J].海洋工程,2024,42(04):138-146.
- [3] 陈龙,黄天立.基于贝叶斯推断的海底管道腐蚀损伤动态数据更新与评估[J].工程力学,2023,40(11):201-210.
- [4] 李昊,王鹏.基于特征降维的海底管道腐蚀影响因子数据处理方法[J].腐蚀与防护,2023,44(08):62-68.
- [5] 赵泽宇.海底点蚀管道检测数据预处理及腐蚀演化规律分析[J].石油工程建设,2022,48(06):22-27.