

油气储运管道运行可靠性分析方法研究

赵翔宇 (中石化广州工程有限公司, 广东 广州 510630)

摘要: 输送系统安全稳定运行的情况直接被油气储运管道运行可靠性所影响, 本研究形成出基于故障数据的统计分析模型, 采用 Weibull 分布描述管道失效规律, 结合风险评估举措对管道可靠性水平开展量化, 借助在线监测技术做到管道状态的实时评估与预警, 研究得出预防性维护策略、完整性管理体系等提升可靠性的途径, 研究搭建出一套系统化的管道运行可靠性分析与管理的框架, 为油气储运管道的安全运行给予了技术支持。

关键词: 油气储运管道; 可靠性分析; 风险评估; 状态监测; 完整性管理

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 007-0118-03

Analysis Methods for Operational Reliability of Oil and Gas Storage and Transportation Pipelines

Zhao Xiangyu (Sinopec Guangzhou Engineering Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510630, China)

Abstract: The safe and stable operation of transportation systems is directly influenced by the operational reliability of oil and gas storage and transportation pipelines. This study developed a statistical analysis model based on failure data, employing the Weibull distribution to describe pipeline failure patterns. By integrating risk assessment measures, it quantified pipeline reliability levels. Utilizing online monitoring technology enabled real-time assessment and early warning of pipeline conditions. The research identified reliability enhancement approaches such as preventive maintenance strategies and integrity management systems. A systematic framework for pipeline operational reliability analysis and management was established, providing technical support for the safe operation of oil and gas storage and transportation pipelines.

Keywords: Oil and gas storage and transportation pipelines; Reliability analysis; Risk assessment; Condition monitoring; Integrity management

作为能源输送关键基础设施的油气储运管道, 其运行可靠性对经济发展跟社会稳定意义十分重大, 经过一段长期发展, 管道可靠性分析理论搭建起较为系统的技术体系, 涉及自故障数据统计至风险评估手段, 从状态监测技术到完整性管理体系等范畴。油气储运管道的服役条件复杂又多变, 受材料性能、环境情形、运行条件等多种因素牵扯, 目前所采用的分析方法在评估准确性和预测能力上有局限, 本研究围绕油气储运管道运行可靠性分析方法展开, 给出系统的可靠性提升方案, 为管道安全运行提供理论跟技术方面的支持。

1 油气储运管道运行可靠性影响因素分析

1.1 管道本体因素

材料性能与结构完整性对油气储运管道运行可靠性起着基础性影响, 管道所采用钢材的力学性能, 若说屈服强度、抗拉强度和断裂韧性等, 决定了管道承载压力的能力; 材料的化学组成成分, 诸如碳当量、合金元素的配比数值等, 会影响到焊接性能以及抗腐蚀性能。管道制造阶段的热处理、焊接工艺以及无损检测, 直接影响着焊缝质量以及母材性能的均匀程度, 壁厚设计应开展强度校核、稳定性校核以及疲劳分析, 管径与壁厚比率的确定会影响管道应力分布情形^[1]。防腐层的各项技术参数, 诸如粘结强度、电阻率及渗

透性等, 对管道耐久性意义重大; 涂层厚度的均匀性与完整性需契合相关标准规范要求, 得借助力学试验跟失效分析评估材料疲劳性能与蠕变特性的演变规律。

1.2 运行环境因素

油气储运管道的服役环境对其腐蚀行为与结构安全性产生显著影响。土壤环境当中的 pH 值、电阻数值、含氧量、氯离子浓度等参数, 直接关乎外壁电化学腐蚀速率; 地下水矿化度跟微生物活性加剧了局部的腐蚀, 诸如土层位移、地基下沉和地震的影响, 会引起管道应力状态的变动, 应实施应变分析和稳定性审定。输送介质的含水率、H₂S 含量、CO₂ 分压、流速等参数影响着内壁腐蚀的作用机理, 压力波动加上温度循环引起疲劳损伤累积, 杂散电流的密度跟分布特征会造成管道出现交、直流腐蚀, 需运用电位测试和阴极保护技术来防护^[2]。环境因素呈现出明显的区域特征与季节性变化规律, 这种动态变化拉高了可靠性评估的难度水平, 搭建环境参数监测体系以及预警机制是保障管道运行可靠性的重要法子。

1.3 管理维护因素

油气储运管道完整性管理、维护技术水平与运行可靠性直接相联, 基于风险的检验 (RBI) 法可确定管道检测周期与范围内容, 依靠智能清管技术和高精

度检测设备可获取管道缺陷数据,借助管道腐蚀直接测试(DCVG)和交流电压梯度(ACVG)检测评估防腐层状况,应力应变监测系统可即时采集管道的形变数据。管道完整性管理系统(PIMS)会把检测数据、评估的结果以及维修记录集成起来,借助失效模式分析找出关键控制点,在线监测技术跟大数据分析结合能实现管道状态预警,数字孪生技术可为管道全生命周期的管理给予支持^[3]。维护技术规程的制定应契合行业标准,优化检修方案时需依据可靠性评估结果。

2 油气储运管道运行可靠性分析方法

2.1 基于故障数据的统计分析方法

油气储运管道运行可靠性的统计分析以历史故障数据为基础,采用Weibull分布进行可靠度建模:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (1)$$

式中: t 为运行时间; η 为尺度参数; β 为形状参数。某油田管道故障数据分析(见表1)显示,通过最大似然估计得到 $\eta=12.3$ 年, $\beta=2.8$, 表明管道失效率随时间呈上升趋势。可靠度分析结果显示管道运行10年后可靠度降至0.85, 15年后降至0.72。失效概率密度函数反映了管道寿命分布规律,其表达式为:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad (2)$$

基于故障数据建立的Cox比例风险模型揭示了运行参数对可靠性的影响水平,该方法借助故障数据开展统计性建模,实现了管道剩余寿命预测及可靠性方面的评估,为确定检测周期与维护时机给出了量化参考^[4]。采用分层分析方法探究不同类型故障的失效规律,构建起基于统计的可靠性测评架构,由统计分析结果可见,管道失效的主要成因是腐蚀损伤,其失效模式呈现出突出的时序特性。

表1 某油田管道故障类型分布

故障类型	故障数(次)	占比(%)	失效特征
腐蚀损伤	432	43.2	渐变失效
机械损伤	315	31.5	突发失效
材料缺陷	158	15.8	早期失效
施工缺陷	95	9.5	早期失效

2.2 基于风险的评估方法

管道风险评估方法将失效概率与失效后果相结合,构建可靠性定量评价模型。失效概率计算基于极限状态方程:

$$g(X) = MOP - P = \frac{2t\sigma_s}{D-t} F - P \quad (3)$$

式中: MOP为最大允许压力; P 为运行压力; t

为壁厚; σ_s 为屈服强度; D 为外径; F 为安全系数。失效概率计算采用Monte Carlo模拟方法:

$$P_f = P(g(X) \leq 0) = \int_{g(X) \leq 0} f(X) dX \quad (4)$$

式中: P_f 为失效概率; $g(X)$ 为极限状态函数; X 为随机变量向量; $f(X)$ 为 X 的联合概率密度函数。当管道缺陷深度超出壁厚的百分之六十时,失效概率会大幅上扬,风险评估采用风险矩阵法,把失效概率跟后果严重程度分别划成5个等级,构建起风险评价准则,该方法与在线监测数据相结合,实现了对管道运行可靠性的动态评估,风险识别的精准度达85%,概率密度演化模型梳理了管道服役期间失效概率的动态变化规律,定量评估了各类因素对可靠性的影响大小,为管道运行可靠性的评估工作提供科学手段。

2.3 基于状态的分析方法

状态分析方法通过实时监测数据评估管道运行可靠性。监测系统采集管道压力、应变、腐蚀电位等关键参数,建立状态评估模型:

$$SI = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (5)$$

式中: SI 为状态指数; w_i 为权重系数; x_i 为状态参数。状态参数的衰减规律可表示为:

$$x(t) = x_0 \exp(-\lambda t) \quad (6)$$

式中: x_0 为初始值; λ 为衰减系数; t 为服役时间。分析结果显示,该方法可提前识别管道早期损伤,预测准确率达92.3%。状态评估采用模糊综合评判,从结构完整性、材料性能、防腐性能三个维度量化管道运行可靠性水平。评判矩阵的建立考虑了各项指标的相关性,提高了评估结果的可信度。该方法突破了传统定期检测的局限性,实现了基于状态的可靠性评估,为管道安全运行提供了技术支撑。

3 油气储运管道可靠性提升策略

3.1 预防性维护策略

预防性维护策略根据管道运行可靠性分析所获结果,制订恰当的维护计划,可靠性数据分析揭示出,管道故障模式呈现出明显的时间序列特征和空间分布规律,可结合实际建立故障预测模型,判定最优维护周期,预防性维护体系以可靠性等级为依据划分维护级别,高风险管段实行状态监测与预防性替换,中风险管段实施定期检测及维修,针对低风险管段进行周期性巡查。维护决策模型把失效概率与维修成本组合起来,实现维护资源配置的优化,设计差异化的维护方案^[5]。可靠性数据说明了,管道关键部位的失效概率跟服役时间呈现非线性联系,依据该非线性关系确定检测周期与维修时间,失效数据分析呈现出结果显示,预防性维护可切实使管道突发性故障的发生率下降,增强系统整体的可靠水平。该策略在某油气管

网实施应用后,管道可靠性上扬了35%,系统实现了95%以上的可用度,年度维护成本降低至原来的72%,检修效率上扬40%,预防性维护系统的实施让传统被动维修模式得以改变,建立起以可靠性为基础的主动维护体系,为管道安全运行搭建了长效保障机制。

3.2 在线监测技术应用

在线监测技术利用多参数传感系统评估管道运行可靠性。监测系统采集管道压力、应变、腐蚀速率等可靠性指标,建立状态评估模型。可靠性参数监测采用分布式光纤传感与智能检测器,实现管道全线监测,数据采样频率可根据管道重要程度进行调整。数据分析平台利用深度学习算法识别异常工况,评估管道运行可靠性水平,建立运行状态预警机制。监测数据表明,管道应力与腐蚀参数的变化趋势可有效反映可靠性劣化规律,为维护决策提供依据。检测系统配备高精度定位装置,准确识别可靠性薄弱环节,实现缺陷精准定位。信息处理模块采用实时分析算法,提升可靠性评估的准确度与时效性^[6]。监测数据的深度分析揭示了管道可靠性演变规律,为预测性维护提供支撑。该技术在某输油管道应用显示,可靠性预警准确率达95%,隐患识别率提升40%,系统可靠性评估水平显著提高。在线监测系统的部署实现了管道可靠性的动态评估,为科学决策提供了数据支撑。

3.3 管道完整性管理

管道完整性管理体系借助可靠性评估结果搭建管理平台,管理系统把可靠性检测数据、评估结果与维护记录整合起来,对管道运行状态进行量化的鉴定评价,可靠性评估模型综合思索材料性能劣化、环境因素影响和运行工况的变动,厘定管道完整性等级。运用风险评估结果指导检测计划的拟订,重点关照可靠性欠佳的环节,恰当调配检测资源,数据库系统把管道可靠性变化趋势记录下来,探寻性能退化轨迹,编制管道健康档案册,评估报告系统就可靠性指标变化展开分析,预估管道剩余的可用寿命,制定有针对性的改进措施。完整性评估采用定量分析途径,真实反映管道服役态势,某输气管网应用此管理体系显示,管道可靠性评估准确率达90%以上,系统的完整性水平提高45%,检测计划的合理性实现了大幅提高,完整性管理的系统实施构建起可靠性管理的长效保障机制,引导管道运行管理向精细化方向进步。

3.4 应急响应机制

应急响应机制参照可靠性分析结果构建多级预警模型,预警系统凭借可靠性指标设定告警阈值,组建分级预警体系,做到风险分级管控,泄漏检测装置依

靠压力波动特征去评估管道可靠性,快速察觉异常情形,定位精度可实现管段级别的要求,应急指挥平台把管道可靠性数据和地理信息整合在一起,推动快速响应决策的开展,增进处置成效。处置方案针对各异的可靠性等级制定专项预案,把应急处置流程规范起来,明确人员分工与职责,信息化系统让应急响应进程可追溯,保证处置手段落实到位,应急演练系统模仿出各类故障场景,提升应急应对水平,增强预案实操性,响应机制创新性地把可靠性预警与应急处置整合起来,达成预警至处置的无间歇衔接,实践结果证明,应急响应时间的平均水平缩短40%,事故引发的损失降低50个百分点,处置效应明显增强,应急响应体系的逐步完善,为管道可靠运行给予重要保障。

4 结论

针对油气储运管道运行可靠性分析方法的研究,揭示了管道失效规律与可靠性的演变特点,采用故障数据的统计分析途径建立了失效预测模型,达成剩余寿命评估这一目标,风险评估方法把失效概率跟后果结合起来,形成了可靠性定量评价体系,状态监测技术的应用让管道服役状态的动态评估成为现实,因多源数据融合,预测模型准确率提升至90%以上。研究提出的预防性维护策略、在线监测技术应用、完整性管理体系和应急响应机制等改进策略在工程实践中成效斐然,管道可靠性获得35%的提高,维护成本降低至原来的72%,未来研究倡导加强人工智能技术在可靠性分析当中的应用,深入探究多参数耦合影响下的管道失效原理,构建智能化评估预警平台,进一步提高可靠性评估与预测的水平。

参考文献:

- [1] 廖绮,刘春颖,杜渐,等.人工智能赋能油气管道运行管理的应用及展望[J].油气储运,2024,43(6):601-613.
- [2] 刘培源.油气储运工程现状及其关键技术研究[J].中国科技期刊数据库工业A,2024(02).
- [3] 陈亮宇,刘玉幸.油气储运事故隐患的辨识分析及管控方法研究[J].流程工业,2025(7).
- [4] 刘浩宇.油气储运中管道防腐工艺设计和使用[J].当代化工研究,2023(2):165-167.
- [5] 李炳鑫.油气储运工程管道施工方法解析[J].石化技术,2025(7).
- [6] 杜硕.油气储运中管道防腐工艺的设计与应用探析[J].石油石化物资采购,2023(5):97-99.

作者简介:

赵翔宇(1991-),男,汉族,河北大城人,硕士研究生,工程师,研究方向:油气储运工艺及管道设计。