

管道冲蚀风险三层递进式预测体系

王超凡 崔铭伟 封子艳 隋宇杰 刘近建
山东航空学院

DOI:10.32629/jsse.v3i4.17867

[摘要] 本文系统阐述了管道冲蚀风险评价的三种主要方法——定性、半定量与定量评价方法,分析了各自的特点与适用性,并指出传统风险评估方法在预见性和可靠性方面的局限。为提升冲蚀风险管理的主动性与精准性,提出了一种以计算流体力学(CFD)为核心、结合传统经验方法的“三层递进式”预测体系。该体系通过经验驱动层初步筛选风险点,CFD快速验证层进行机理确认,CFD精准诊断层实现精准预测与运维决策,形成了从宏观到微观、从经验到机理的闭环管理流程。文章进一步分析了该体系在效率与精度平衡、经验与机理融合、决策支持等方面的优势,同时也指出了其在系统构建复杂性、经验基础依赖性和模型精度妥协等方面的潜在局限,为石化行业管道冲蚀风险预测与管理提供了系统化的工程解决方案。

[关键词] CFD; 冲蚀; 管件; 预测体系

中图分类号: TU81 **文献标识码:** A

A three-level progressive prediction system for pipeline erosion risks

Chaofan Wang Mingwei Cui Ziyang Feng Yujie Sui Jinjian Liu
Shandong University of Aeronautics

[Abstract] This article systematically elaborates on the three main methods for evaluating pipeline erosion risks—qualitative, semi-quantitative, and quantitative evaluation methods. It analyzes the characteristics and applicability of each method, and points out the limitations of traditional risk assessment methods in terms of predictability and reliability. To enhance the accuracy of erosion risk management, a "three-level progressive" prediction system centered on Computational Fluid Dynamics (CFD) and combined with traditional empirical methods is proposed. This system initially screens risk points through the empirical-driven layer, verifies the mechanism quickly through the CFD rapid verification layer, and achieves precise prediction and operation decision-making through the CFD precise diagnosis layer, forming a closed-loop management process from macro to micro and from experience to mechanism. The article further analyzes the advantages of this system in terms of efficiency and accuracy balance, integration of experience and mechanism, and decision support. At the same time, it also points out its potential limitations in system construction complexity, dependence on empirical basis, and compromise in model accuracy, providing a systematic engineering solution for pipeline erosion risk prediction and management in the petrochemical industry.

[Key words] CFD; Erosion; Pipe fittings; Prediction system

引言

国内外的管道风险评估方法随着时代的需求以及技术的发展在不断改进,管道风险评估技术有了很大的发展,但是在大多数情况下仍然遵循着传统风险评估技术的发展路径:基于专家对外在风险的认知程度,借助事故概率统计方法,在有限的数据库基础上对整个系统进行风险评估,这需要评估者有较强的专业背景,但由于不同专家的经验与认知程度有所不同,因此传统风险评估方法结果的可靠性有时得不到保证,评估效率较低。

1 冲蚀风险评价

根据对风险结果的量化程度,风险评价方法可以分为定性评价方法、半定量评价方法和定量评价方法。

1.1 定性评价方法

定性分析法一般是基于历史资料并结合专家经验,估计评价对象所处的风险程度,进而根据事故后果确定预防措施,同时根据专家评估对各风险因素对管道失效的影响程度大小给予评判。常见的定性分析方法包括安全检查表法、因果分析法、预

先危险性分析法、故障类型和影响分析、危险与可操作性分析等。定性分析方法不需建立精确的数学模型和计算方法,在实践中简单易行。

1.2 半定量评价方法

传统的管道半定量风险分析是采用评分制,根据待评估管道存在的风险因素对管道失效可能性以及管道失效后果进行打分,再进一步计算管段风险值^[1]。肯特法^[2]是油气管道风险评估领域使用最早且应用最广泛的半定量风险评价方法,在使用时需要有确切的管段工况数据为基础,且风险因素的权重及打分结果依赖于专家对实际情况的主观评判。当前很多管道企业的风险评价软件都是基于肯特法的原理实现的。如今半定量风险评价法也有许多创新突破,依靠数学模型将定性表达转化为量化的评价结果,实现定性方法与定量方法的有效结合。例如利用层次分析法^[3](AHP)、AHP与逼近理想解排序法相结合的方法、模糊综合评价法^[4]、AHP-熵权法与模糊数学法相结合的方法等,在确定管道各风险因素权重的基础上,实现管道的风险评估。也有学者在大量历史数据的基础上将专家经验与贝叶斯网络结合进行管道的失效概率评估。

1.3 定量评价方法

定量风险评价技术通常需要以大量设计、施工及运行资料为研究基础,再采用数学方法进行深入统计和分析^[5],同时结合各种物理模型、经验模型、可靠性技术等知识,得到管道失效概率、失效后果、风险程度的具体数值,完成管道风险的定量评价和决策^[6]。其中,失效概率的计算是管道定量风险评价的热点和难点,如今很多学者尝试将很多较高级的数学算法应用于管道的失效概率计算中。

针对上述三种风险评价方法,从评价结果的准确性来看,定量评价方法最好,半定量评价方法次之,定性评价方法受到专家知识专业性、因素权值分配合理性等较多不确定性因素影响,评价结果的可靠性相对较弱。

2 建立冲蚀风险三层递进式预测体系

风险评价本质上属于对已发生事件的解释,其在预见未来动态风险方面存在固有的局限性。为实现从被动评估到主动防控的策略转变,需要将风险管理关口前移,进一步从管网现状评价延伸至管网的预测。

2.1 API RP 14E

API RP 14E(API Recommended Practice 14E)由美国石油学会发布,是石油、天然气和石化工业中广泛使用但又备受讨论的经典准则^[7],其核心贡献在于提出了一个基于流体密度的极限流速计算公式,即 $V_e = C \sqrt{\rho}$,其中 V_e 为最大允许流速, ρ 为操作条件下的流体密度, C 为基于行业经验确定的常数^[8]。该准则通过限制流体动能来预防因流速过高导致的纯粹冲蚀及其与腐蚀过程的协同加速作用,因其形式简洁、参数易于获取,在项目初期管道口径筛选及工艺方案比选中曾被广泛用作快速评估工具^[9]。

尽管API RP 14E提供了基于流体密度的极限流速计算公式,

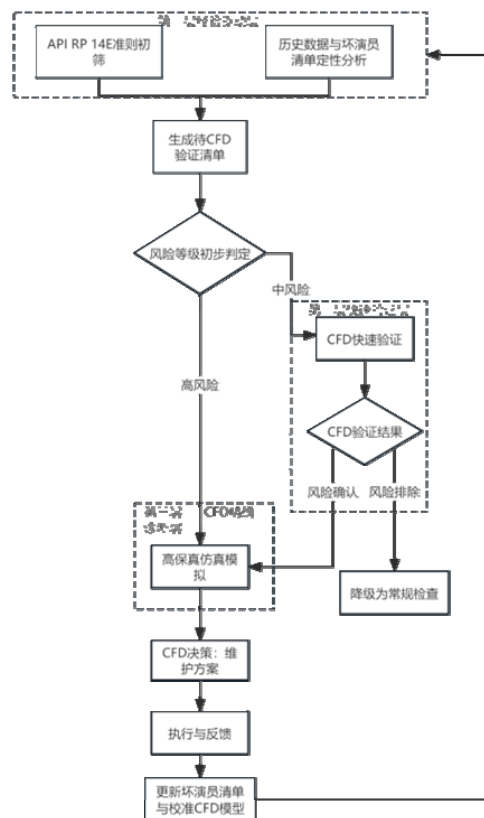
但缺乏对冲蚀微观机制的定量描述。因此,API RP 14E通常用于初步设计和风险筛查^[11]。在工程应用中需结合其他更具物理基础的手段,以实现更精确的冲蚀预测和风险管理,提升设备管理效率。

2.2 历史数据分析与“坏演员”清单

通过对历史数据的分析,识别高风险管件并纳入“坏演员”清单,推动从被动维护向基于风险的预测性管理转变,提升安全性和经济性。总结而言,“坏演员”清单是基于工厂自身运行历史最真实、最直接的风险数据库,对于提升石化厂管网的本质安全水平具有不可替代的作用^[10]。

2.3 冲蚀风险三层递进式预测体系

仅依赖API RP 14E准则和历史“坏演员”清单无法充分应对在工程实践中的冲蚀风险,其经验性和滞后性导致管道冲蚀情况机理不清和预测精度不足^[12]。CFD技术的进步为冲蚀过程的精准预测提供了新可能,然而高保真的CFD模拟计算成本高,难以快速评估管网内所有管件。为此,本文提出了一个以CFD为核心,结合传统经验方法的三层递进式冲蚀风险预测和管理体系。该体系通过经验驱动层高效筛选目标,利用CFD快速验证层进行机理确认,最后通过CFD精准诊断层做出运维决策,形成宏观到微观、经验到机理的闭环管理流程。体系结构可概括为一个包含三个层级、一个核心与一个闭环的框架,其工作流程如图一所示:



图一 三层递进式预测体系流程图

第一层为经验驱动层。该层是管道冲蚀预测的基础,通过定量计算与定性分析识别潜在冲蚀风险点,从而为CFD分析提供目标。结合API RP 14E准则和历史数据,通过计算流速与极限允许流速之比进行初步风险标记。利用“坏演员”清单对比历史案例,并结合API的量化指标和历史经验,形成待CFD验证清单,且为其设定一个“初步风险等级(中或高)”,目的是在管网大量的管件中初步筛选出一部分风险程度较高的管件,确保CFD资源集中于高风险环节,提升体系效率。

第二层CFD快速验证层是该体系的核心。该层负责对第一层筛选出的目标进行机理验证和风险确认。通过CFD模拟,快速对大量候选目标进行流场验证,采用参数化CFD模板和自动化网格生成等工具^[13],验证第一层的判断,并可能揭示局部高冲蚀速率区域或推翻第一层某些经验判断,从而调整相关管件的风险等级。

第三层为CFD精准诊断层,该层对通过第一层筛选且在第二层验证时为高风险的管件进行高保真的模拟分析,以准确模拟管件的真实冲蚀速率和分布,并制定运维决策。通过CFD模拟实验进行高保真度的模拟计算和细致的网格划分,评估在不同改进方案或操作条件下的冲蚀情况,量化对比分析运维决策方案的优劣。这使得维护活动从传统的按时检修或事后处理转变为基于精准预测的主动管理,大幅提升管件的安全性,降低管路系统的全生命周期成本。

3 体系的优势与局限

该经验-验证-诊断三层递进式管道冲蚀预测体系是一种分层筛选、逐级聚焦的工程解决方案,适用于石化厂管线冲蚀的风险预测,该体系也存在一些优势与不足。

3.1 核心优势

(1) 效率与精度的最优平衡。效率与精度的平衡是本体最突出的特点。它避免了直接对管网内所有管件进行高成本CFD模拟分析,通过经验层快速过滤大量低风险对象,将CFD计算资源集中在最值得关注的中风险、高风险管件上,实现了工程实践上的效率与精度的平衡。

(2) 经验与机理的深度融合。该体系并非用CFD完全取代经验方法,而是让两者协同工作。第一层的经验判断(API准则、历史案例)为CFD分析提供了有根据的假设和目标;第二、三层的CFD分析则对经验假设进行物理机理层面的验证与修正,克服了纯经验方法可能存在的误判,形成了经验引导,机理证实的良性循环。

(3) 风险管控的闭环与决策支持。该体系构建了一个从初步筛查→快速验证→精准诊断→运维决策的完整闭环。第三层的输出可直接服务于维修、改造或操作参数的调整,将分析结果转化为可执行的、量化的行动指令,提升了风险管理的科学性和主动性。

(4) 灵活性与可扩展性。三层架构具有良好的灵活性。可以根据管线的重要性、数据的完备性和计算资源的实际情况,调整各层的判断阈值或模拟深度。

3.2 潜在局限

(1) 系统构建复杂性 with 高初始成本。该体系的构建对于缺乏历史数据构建“坏演员”清单等工作内容的石化企业,建立一个体系需要投入大量前期工作,包括整合历史数据构建“坏演员”清单以及开发参数化CFD模板等工作。

(2) 第一层经验基础的依赖性。该体系第二层和第三层所模拟分析的管件均来自于第一层CFD待验证清单。如果“坏演员”清单不完整或更新不及时,或API准则的阈值设置不合理,可能会导致CFD待验证清单缺项或出现错误,从而影响第二层快速验证的效率。

(3) 快速验证层的精度妥协。第二层采用的简化CFD模型(如稳态计算、较粗网格)虽然高效,但其预测的冲蚀速率绝对值可能精度有限。它更擅长进行相对风险的比较和流场趋势的判断,而非提供绝对的速率数据预测。其价值更多在于“筛选”而非“定量的精准预测”。

4 结语

综上所述,本文提出的“经验-验证-诊断”三层递进式管道冲蚀风险预测体系,在继承传统经验方法的基础上,深度融合了CFD技术的机理分析优势,实现了从被动评估向主动预测与防控的战略转型。该体系不仅提升了风险识别的效率与精度,也为管道的全生命周期管理提供了科学依据与决策支持。尽管在系统构建和模型精度方面仍存在一定挑战,但随着数据积累、模型优化与智能技术的发展,该体系有望在更广泛的工业场景中推广应用,推动管道安全管理迈向更高水平的智能化与精准化。未来研究可进一步探索多物理场耦合、机器学习辅助优化等方向,持续完善管道冲蚀风险预测的理论基础与实践路径。

参考文献

- [1] 赵俊翔. 考虑拓扑结构影响的城市燃气管网运行安全风险评价模型研究[D]. 北方工业大学, 2025.
- [2] 季成, 庞贵良, 张圣柱, 等. 基于权重折衷的肯特评分法及其在油气管道评价中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(S1): 92-97.
- [3] 张博文, 王海更, 张俊, 等. 定量识别油田优势渗流通道的AHP-熵值法复合模型[J]. 广东石油化工学院学报, 2025, 35(4): 12-15.
- [4] 王英, 郭钰, 冉光林. 油田基础建设项目施工安全模糊综合评价研究[J]. 化工安全与环境, 2025, 38(09): 19-23+27.
- [5] 苟梦蛟. 城市掺氢天然气管道泄漏安全评价[D]. 西安石油大学, 2024.
- [6] 段安琪. 腐蚀海底管道安全评价方法的研究[D]. 中国石油大学(华东), 2017.
- [7] 吕昕倩, 汪威, 张晓阳, 等. 国外标准中文版转化探讨及建议——以API标准为例[J]. 标准科学, 2023, (11): 82-85+92.
- [8] 庄君, 侯学瑞. 美国石油学会陆上危险液体管道应急准备与响应标准的先进性研究[J]. 石油工业技术监督, 2018, 34(2): 25-28. 11.

[9] 齐卫, 马伟平. 美国石油学会(API)管道标识标准先进性研究[J]. 石油工业技术监督, 2014, 30(06): 35-37.

[10] 吴鹏. 车-路-管耦合作用下聚乙烯燃气管道力学响应及安全评价研究[D]. 西南石油大学, 2023.

[11] 过前宇. 天然气管道第三方破坏和自然灾害监测预警系统构建研究[D]. 浙江海洋大学, 2023.

[12] 肖荣鸽, 戴政, 靳文博, 等. 油气管道剩余强度评价方法对

比研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(24): 61-64+73.

[13] 邢鑫磊. 基于机器学习的输油气管道应力预测模型及应用[D]. 西安石油大学, 2025.

作者简介:

王超凡(1999--), 男, 汉族, 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向: 安全技术与应急管理。