

基于 GIS 的天然气管道系统风险评估

李 松 胡昌辉 (中原油田分公司油气储运中心, 河南 濮阳 457001)

摘要: 高效率的实现管道安全风险分级动态管控, 实现安全经济效益最大化, 是管道运营管理者们带领企业高质量发展的必答课题。笔者通过建立基于 GIS 的天然气管道系统风险评估机制, 首次提出基于风险分布的评估单元再划分原则, 可协助实现系统风险的精细化管控, 对老旧管道的风险评估管理具有参考价值。

关键词: GIS; 天然气管道; 系统风险

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 036-0151-03

Risk assessment of natural gas pipeline system based on GIS

Li Song, Hu Changhui (Zhongyuan Oilfield Branch Oil and Gas Storage and Transportation Center, Puyang Henan 457001, China)

Abstract: Efficiently implementing dynamic control of pipeline safety risk classification and maximizing safety and economic benefits is a must answer topic for pipeline operation managers to lead high-quality development of enterprises. By establishing a GIS based risk assessment mechanism for natural gas pipeline systems, the author proposes for the first time the principle of dividing assessment units based on risk distribution, which can assist in achieving refined control of system risks and has reference value for risk assessment and management of old pipelines.

Keywords: GIS; Natural gas pipelines; system risk

随着天然气管道大规模建设, 安全发展进入了一个高质量的发展阶段, 发展绝不能以牺牲人的生命为代价的价值理念深入人心。如何实现全要素管道安全风险评估、精准分级动态管控, 是管道安全管理的一个重要研究发展方向。

1 管道系统风险概述

1.1 系统危害因素

管道系统风险是指产生对管道安全运行有害的各类事件、事故的可能性和后果的综合。影响管道系统安全运行的潜在的危害因素主要包括: 腐蚀因素、第三方施工、管道交叉、工程质量、包含内腐蚀、外腐蚀、应力腐蚀开裂、制管、焊接、设备、第三方损坏、误操作、天气 9 种类型。依据现场管理经验, 结合现场地理环境、技术条件, 将高后果按管理因素纳入, 危害因素可归结为腐蚀因素、工程质量、第三方破坏、运行操作、地质灾害、场地分布、人口分布 7 类。

1.2 风险评估方法

管道风险评估是通过分析管道系统过程中, 识别可能危害管道安全运行的各种危害因素, 对事故发生概率、事故发生后果进行评估、计算风险值, 并制定风险控制措施的过程。评估对象为场站阀室、工业管道和长输管道。

根据精度高低及难易程度, 评估方法分为定性、半定量、定量三种方法, 主要包括专家评估法、安全检查表法、风险矩阵法、指标体系法、场景模型法、概率评估法等。半定量方法具有定性定量方法的两优两劣, 以风险的量化指标为基础, 对各种风险指标进

行组合计算, 给出相对的风险度量, 本文采用的半定量的方法是 KENT 评分法, 并利用中石化风险矩阵类比计算出相对风险值。

1.3 基础数据要求

理想的基础数据采集应从设计阶段即开始, 全过程、全周期结合管道实际情况, 对管道规划期、施工建设期、运行维修期不同阶段的数据进行采集, 执行标准统一、接口统一的数据编码格式, 实现全生命周期的完整性数据管理。完整性数据采集由结构化数据和非结构化数据组成, 贯穿工程施工、试运投产、运行维护阶段。

结构化数据涉及管材、焊接、检测、空间数据等; 非结构化数据涉及检测记录、检验报告、现场照片等资料。工程数据有设计资料、中心线数据、施工记录、评估报告、相关协议、施工桩号、焊口数据等, 严格按结构化格式标准统一形成电子数据和纸质数据。工程资料数据按工程竣工资料要求的格式和内容移交。管道中心线等电子数据应采用标准格式移交。

2 管道系统风险评估

2.1 管道系统调查

调查的主要目的就是收集管道各阶段的文件资料、数据资料, 并做相关数据准备, 应严格按序列连续性采集, 规范统一标准。但往往并未能很好的实现源数据标准统一, 因而需对数据进行对齐整理工作。对于后期非内检测采集的数据, 需进行后期空间数据做队列调整以及坐标修正, 并通过实校交叉验证, 避免数据采集误差导致的数据失真。

2.2 数据编译处理

基于地理信息系统,以 ArcGIS 为平台,进行空间数据分析和地图制作,完成数据点、线、面要素的组合、处理、分析,以及管道风险区的缓冲、途径行政区域的边界地图等栅格转换操作,并对偏差结果进行验证修正。最终实现多元数据的集中二维、三维显示。

2.3 评估单元划分

由于管道沿线所处各条件不尽相同,位置风险差异较大,评估单元划分越细,评价越精确,最佳的单元划分原则即是依据 7 类危害因素有较大变化的地方进行划分,也即基于风险危害因素的管道系统评估单元划分原则。

2.4 评估单元计算

采用半定量的方法,对 7 类危害因素进行赋值评分。整理计算基于 GIS 空间坐标的管道系统风险分布图,利用数据源标准化处理,得到归一化数据,并绘制风险分布图,进而依据计算评估结果,也即相对风险值区间对管道系统进行风险管段划分。

2.5 系统风险分布

风险分布图分为单因素风险分布和综合因素风险分布两类,就单一因素而言,就是依据危害因子评估计算结果,结合管道空间数据形成空间相对风险分布。综合因素风险分布为多因素风险的叠加效应,即系统风险分布。单因素相对风险分布能助力精准的确定风险管控措施,系统风险分布图需要采取多种管控措施方能达到预期目标。

3 管道系统风险管控

3.1 系统风险管控边界

管道系统实现风险段划分后,需进行综合因素评估单元再划分,更重要的是再划分评估单元需为管控措施的高效实施提供支撑,最为关键的无疑为管控单元边界的界定问题。要实现明确的管控措施制定,必须进行必要的定量分析,明确管控单元边界。

①风险段管控边界界定:对管道段进行量化评价时,能够根据 GB32167—2015《油气输送管道完整性管理规范》输气管道潜在影响半径计算公式进行计算,计算公式如下所示。

$$r = 0.09961d\sqrt{p}$$

式中: d , 管道直径, mm; P , 最大允许操作压力 (MAOP), MPa; r , 受影响区域半径, m。

需说明的是,依据王新等人的研究^[2],简化公式计算出的潜在影响半径既不是管道破裂时的安全距离,也不是死亡半径,而是一个中间值。并且只能计算管道发生破裂时人员 1% 概率死亡的潜在影响半径。故确定安全距离时,还需进一步考虑其他因素的定向

影响。依据朱沫等人的研究结果^[3]表明,管道的泄漏衰减因子不受管道压力影响,但会随管径的减小而减小,因而对于老旧小管径管道管理,不考量安全管理成本增加,可采用修正后的公式计算。

②风险点管控边界界定:当对管道点进行定量分析时,按刘鹏等人建立模型^[4],若管道为小孔泄漏,可按连续泄漏源采用高斯烟羽模型模拟计算浓度分布;若管道断裂,气体将迅速泄放,可按高斯烟团模型模拟计算浓度分布。

A. 高斯烟羽模型

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

式中: Q , 泄漏速率, m^3/s ; C , 泄漏气体的浓度, kg/m^3 ; u , 平均风速, m/s ; σ_y , 气体的侧向扩散系数, m ; σ_z , 气体的纵向扩散系数, m ; z , 距离地面的高度, m ; H , 泄漏源距离地面的高度, m 。

B. 高斯烟团模型

$$C(x, y, z, t) = \frac{m}{(2\pi)^{3/2}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-ut)^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right]\right\} \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} \quad (2)$$

式中: Q 为泄漏速率, m^3/s ; C 为泄漏气体浓度, kg/m^3 ; u 为平均风速, m/s ; σ_y 为气体横向扩散系数, m ; σ_z 为气体纵向扩散系数, m ; z 为距地面高度, m ; H 为泄漏源距地面高度, m 。

③风险段与风险点的叠合:风险点事件具有风险段事件的表征性,采用潜在影响半径计算结果需通过风险点计算结果叠合验证。选取风险管段最高风险值位置采用高斯模型计算管控边界同潜在影响半径值对比,取较大的值为控制边界。

3.2 风险管段的管控

高后果区发生泄漏将危及公共安全以及引发环境污染,针对高后果区实施管道完整性管理方案。高后果区是动态变化的,随着管道周边人员及环境变化,其位置及规模会发生变化。不同区域类型高后果区,应建立网格化管理体系,针对其采取“一区一案”管控措施,包括定期巡查、目视化管理、保护宣传、泄漏后果定量分析等内容。高后果区参照基于风险评价计算结果再划分的风险管段,应根据风险管道级别由高风险到低风险分级管控,可参照高后果区管理要求,制定管道“一段一策”整治管控方案,明确责任人、具体措施、资金保障、完成时限等内容,采取监测监控运行、制定针对性的检维修计划实施整改,落实常态化巡查管控等措施,确保实现风险降值目标。具体管控内容可参考如下。

①开展风险管段辨识,建立风险管段档案。为减轻工作重复度,辨识周期可同高后果区时间同步,识

别周期不超过 18 个月,当管道系统发生变化时,应及时进行评估更新,并指定专员定期排查与更新。

②开展管道分级管控,“一段一案”管理。对于识别出的中高风险管段,每一断均应编制风险评价报告,并结合实际制定现场处置方案,细化应急联络、警戒疏散、应急处置等措施,尤其是夜间应急处置。

③完善政企联动机制,加强应急联动管理。及时中高风险管道沿线政府、村委及易燃易爆场所等单位建立应急联络沟通机制,定期组织开展联合应急演练,通过演练检验现场处置方案的科学性和可行性,提升综合性应急联动能力^[5]。

④加强安全标识管理,提升风险警示力度。完善高风险区应急逃生路线,设置危险告知机制,加密设置地面警示标识,设立风险告示牌,重点强化突发情况的应急程序,并定期加强应急疏散知识的宣传培训,确保应急时刻能最短时间内作出应急响应。

⑤加强智能技术应用,实现高频加密巡查。依据评估结果和制定的管控方案,制定巡护方案,加强技防为主,人防为辅的执行力度,将人员的经历放在沟通协调、预防教育等方面,立足全面实现无障碍联动管控,加强第三方施工管理,及时管控高风险段管道信息,严格执行施工管理要求,对施工实施全过程管理,加强科技投入,实施光纤预警技防措施,动态识别第三方施,跟踪异常和变化信息,实现闭环管理。

⑥加强日常运行管理,提升运维质量保障。加强腐蚀管控和管道埋深监测,加密对高风险段内管道阴极保护电位测试,制定相应的工作实施计划。通过对特位置电位、通电点、自然点位等测试,检查是否存在杂散电流干扰。根据测试数据进行分析,对存在的异常情况及时处理,对管道埋深进行探测,及时处理段浅埋管道,保证保护系统正常运行,确保本质安全^[6]。

⑦加强本质安全管理,开展管道内外检测。定期对管道开展防腐,对于发现的缺陷点及时进行修复,并加强对管道本体、附属设施和周边环境本质安全的维保质量把控,实现全资产全生命周期管理。

⑧采取降压监控运行,局部更换管段措施。对于检测评估的高风险管段,检测结果判定必须整改加强保护的,降压使用影响管道系统的,可考虑采用局部更换管段措施,保障管道系统整体风险不因局部风险点大幅度降低。

4 系统风险评估应用

4.1 某管道系统空间数据

某管道工程采集焊口数据共 8000 余条,但原始管材数据不全,因此后期定检采集了管顶的经纬度、高程和埋深测量数据。全线 100km 长管道进行近 2000

处空间数据采集,对三桩埋设、焊口数据、工程结算数据进行核验,完成了管材交叉验证,并修正绘制了管道焊口坐标图;保障了数据源的匹配性和真实性。

4.2 某管道系统风险分布

某管道系统依据基于空间坐标选择的 700 多个关键点位,对管道系统工程进行风险计算,得出每个点的风险值,并对相近点之间做差值计算,得到连续性风险分布图。

4.3 某管道风险管控效果

某管道系统风险管控目标设定了过程指标:基础数据完整性、数据采集完成率、风险评价覆盖率、风险排查完成率、高风险管段长度。结果性指标管道设备失效次数、非计划停机次数、管道平均风险值。评估后类比中石化风险矩阵风险值为 10,整体风险可控。按设备长周期、经济运行机制,强化规范设备维护保养,加强配套物资管理,建立物资物料库,细化物资“购-备-消”环节管理,保障物尽其用,完成管道日常巡护、管道附属设施检维;保障仪器仪表等定期应检尽检等措施,持续保障管道系统处于低风险水平。

随着《油气长输管道企业老旧管道安全风险排查评估指南(试行)》的发布,老旧管道的安全风险分级治理与管控必将进一步规范化。但企业如何高效率的实现管道安全风险分级动态管控,实现安全经济效益最大化,是管道运营管理者们带领企业高质量发展应面对的课题。本文采用基于 GIS 的风险评估机制,强化风险立体管控,实现快速准确地动态确定、管控管道风险,对管道安全管理具有参考意义。

参考文献:

- [1] 王金柱,王泽根,段林林.基于 GIS 的天然气管道风险评价体系[J].油气储运,2009,(9):18-22
- [2] 王新,张华兵.输气管道潜在影响半径计算公式问题讨论[J].管道保护,2018,(7):12-13.
- [3] 何沫,廖柯熹.输气管道潜在影响区模型关键参数取值讨论[J].当代化工,2015,(3):608-611.
- [4] 刘鹏,黄维和,李玉星等.基于 GIS 的天然气管道泄漏后果定量分析[J].管道保护,2019,(4):56-56.
- [5] 潘鹏飞,天然气长输管道高后果区辨识及管控措施探讨[J].当代化工研究,2020,(16):23-23.
- [6] 付志明,长输天然气管道高后果区识别及管控措施[J].化工设计通讯,2021,(12):10-10.

作者简介:

李松(1987-),男,汉族,云南昆明人,油气储运工程师、注册安全工程师,主要从事油气储运、安全运营方向的技术研究工作。