

基于风险评估的天然气管道运输安全保障体系构建研究

顾 洋 (山东港华燃气集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 天然气管道运输作为能源输送的关键环节, 其安全性关乎国计民生。本研究围绕天然气管道运输, 以风险评估为核心, 剖析运输流程中的各类风险因素, 涵盖地质灾害、人为破坏、设备老化等。引入科学风险评估方法, 如故障树分析、模糊综合评价法构建风险评估模型, 精准量化风险等级。基于评估结果, 从管道设计强化、日常监测优化、应急管理完善、人员培训提升等维度全方位构建安全保障体系。通过实际案例验证体系有效性, 旨在为天然气管道运输安全运营提供坚实理论支撑与实践指南, 确保能源供应稳定、可靠。

关键词: 天然气管道运输; 风险评估; 安全保障体系; 模糊综合评价法

中图分类号: TE832 文献标识码: B 文章编号: 1674-5167 (2025) 014-0142-03

Research on the construction of natural gas pipeline transportation safety guarantee system based on risk assessment

GU Yang (Shandong Ganghua Gas Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: As a key link in energy transmission, the safety of natural gas pipeline transportation is related to the national economy and people's livelihood. This study focuses on natural gas pipeline transportation, takes risk assessment as the core, and analyzes various risk factors in the transportation process, covering geological disasters, man-made sabotage, equipment aging, etc. Scientific risk assessment methods are introduced, such as fault tree analysis and fuzzy comprehensive evaluation method to construct a risk assessment model to accurately quantify the risk level. Based on the evaluation results, a safety guarantee system was constructed from the dimensions of pipeline design strengthening, daily monitoring optimization, emergency management improvement, and personnel training improvement. The effectiveness of the system is verified through practical cases, aiming to provide solid theoretical support and practical guidance for the safe operation of natural gas pipeline transportation, and ensure the stability and reliability of energy supply.

Keywords: natural gas pipeline transportation; Risk assessment; security system; Fuzzy comprehensive evaluation method

1 天然气管道运输风险因素剖析

1.1 自然环境风险

地震、山体滑坡、泥石流等地质活动易使管道位移、断裂, 以山区管道受地震影响为例, 地壳运动瞬间强大作用力可破坏管道基础稳定性, 导致管道扭曲变形, 引发天然气泄漏。暴雨、洪水冲蚀管道周边覆土, 雷电可能击中管道附属设施造成电气故障, 在南方多雨地区, 强降雨季节河水水位上涨淹没部分管道, 长期浸泡加速管壁腐蚀。

1.2 人为风险

1.2.1 第三方施工破坏

城市建设与道路施工的快速推进过程中, 时常出现盲目作业的现象, 这给天然气管道安全带来了极大隐患。诸多施工现场, 挖掘机等大型机械在施工作业时, 由于施工单位缺乏对地下管线分布情况的精准掌握, 或是为赶工期而疏忽大意, 极易在不经意间挖断地下天然气管道。特别是城郊区域, 随着城市化进程的加快, 新建小区如雨后春笋般涌现, 不少施工场地紧邻天然气管道铺设路径。施工前倘若未能通过专业探测设备与精细的勘查流程, 精准确定管道的具体位置、走向

以及埋深等关键信息, 一旦施工机械贸然进场作业, 稍有不慎便会对管道造成不可逆的破坏。这种破坏不仅会瞬间引发天然气的大量泄漏, 造成巨大的经济损失, 还可能因天然气的易燃易爆特性, 诱发爆炸、火灾等次生灾害, 危及周边居民生命财产安全, 酿成大祸。

1.2.2 蓄意破坏

不法分子受利益驱使, 将罪恶之手伸向了天然气管道。他们趁夜色掩护, 携带专业工具盗割管道, 致使管道出现破损, 天然气大量泄漏, 不仅造成了能源的无端浪费, 还使得周边环境瞬间陷入极度危险的境地。还有些不法之徒妄图开启阀门盗窃天然气, 全然不顾这种行为可能引发的爆炸、火灾等灾难性后果, 仅仅为了一己私利, 将公众的生命财产安全抛诸脑后。

1.3 设备与技术风险

1.3.1 管道老化

服役多年的管道在长期运行过程中, 面临着内压与介质腐蚀的双重考验, 致使管壁逐渐变薄, 强度也随之下降, 这一系列问题给天然气管道运输安全带来了极大隐患。以我国早期建设的部分输气管道为例, 当时受限于材料科学技术水平以及工程建设经验, 所

选用的管材材质在抗腐蚀性能方面存在明显局限。随着时间推移，管道内部输送的天然气介质，其中含有的微量腐蚀性成分，如水蒸气、硫化氢等，持续与管壁发生化学反应，加速了管壁的腐蚀进程。

同时，由于早期天然气需求预估不足，部分管道长期处于超压运行状态。过高的内部压力使得管壁承受的应力远超设计标准，进一步加剧了管壁的疲劳损伤。日积月累之下，管壁上开始出现多处锈蚀孔洞。这些孔洞不仅削弱了管道整体的结构强度，更成为天然气泄漏的潜在突破口。一旦遭遇外部冲击，如轻微的地质变动或第三方施工震动，极易引发天然气的大规模泄漏，进而可能导致爆炸、火灾等灾难性事故，对周边环境、居民生命财产安全以及能源供应稳定性造成无法估量的损失。

1.3.2 监测技术滞后

传统的压力、流量监测手段在天然气管道运输安全监测过程中逐渐暴露出诸多弊端。在面对微小泄漏情况时，其局限性尤为显著。由于这类监测手段通常依赖相对简单的传感器原理，对于极其细微的压力变化或流量波动敏感度欠佳，难以精准且及时地捕捉到管道中可能出现的微小泄漏点。复杂工况下，管道所处的环境千变万化，压力、温度、介质流速等参数时刻处于动态变化之中。传统监测手段固定的监测模式和有限的精度范围，使其无法适应这种复杂多变的工况需求。例如，在山地起伏较大的管道段，因地势落差导致的压力自然波动，就极易干扰对泄漏引发压力变化的判断，进而无法有效识别泄漏风险。

2 风险评估方法选取与模型构建

2.1 模糊综合评价法

2.1.1 原理与特点

考虑到天然气管道运输系统所面临风险因素的模糊性、不确定性特征极为显著，我们亟需一种科学且精准的方法，将原本抽象的定性评价巧妙地转化为具体直观的定量结果，以此来实现对风险程度更为精确的刻画。

首先，要严谨地确定评价因素集，全方位涵盖影响天然气管道安全的各类关键因素，像是管道所处的地质条件，包括土壤类型、地壳稳定性等；周边的气象环境，如降雨量、风速、雷电发生频率；还有管道自身的材质特性、服役年限，以及沿线的人口密度、第三方施工活跃度等诸多方面，确保无一遗漏。

接着，精心设定评语集，诸如“安全”“较安全”“一般”“较危险”“危险”这些具有明确区分度的等级描述，用以直观反映管道不同程度的风险状态。在此基础上，构建模糊关系矩阵，运用专业的数学方法和行业经验，梳理各评价因素与评语之间错综复杂的关

联程度。

尤为关键的是，结合科学合理的权重分配，精准衡量每个因素在整体风险评估中的相对重要性。例如，在地震频发区域，地质条件相关因素的权重就会相应提高；而在城市繁华地段，人口密度、第三方施工因素的权重则更为突出。最终通过严谨的计算流程得出综合评价向量，这一向量能够全面、精准地反映管道系统的综合风险水平，该方法尤其适用于天然气管道这般复杂系统的多因素综合评价，为后续风险管控策略的制定提供坚实依据。

2.1.2 实施流程

针对天然气管道某段线路，综合考量多种关键要素来构建因素集。地形因素不容忽视，如山地、平原、河谷等不同地貌，山地地形起伏大，管道铺设难度高，易受地质灾害威胁；平原虽相对平稳，但人口聚居可能带来更多人为干扰；河谷地带则面临洪水冲刷风险。人口密度同样关键，人口密集区一旦发生管道事故，疏散救援难度大，且第三方破坏概率高；而人口稀疏区域，虽直接人为破坏少，但巡检维护及时性可能受限。管道材质更是直接关乎管道寿命与安全性，碳钢、合金钢、复合材料等各有优劣，需依实际工况抉择。

设定“安全”“较安全”“一般”“较危险”“危险”这一涵盖全面风险梯度的评语集，用以精准衡量管道状态。随后，邀请业内资深专家，依据其深厚专业知识与丰富实践经验，对各因素在不同评语下的隶属程度打分，从而确定模糊关系矩阵。紧接着，运用层次分析法，将复杂因素分层剖析，通过两两比较各因素的相对重要性，合理确定因素权重。最终，基于模糊关系矩阵与精准权重分配，完成对天然气管道该段线路的综合评价，为后续风险管控、保障措施制定提供坚实依据。

3 基于风险评估的安全保障体系构建

3.1 管道设计优化

3.1.1 线路选址考量

结合地质勘查、气象资料，对于天然气管道的线路选址，必须慎之又慎。一方面，要精准避开那些潜藏巨大危机的地段，如地震断裂带，这里地壳活动频繁，一旦管道铺设于此，在强烈的地震冲击下，管道极易遭受毁灭性的损坏，引发天然气大规模泄漏，对周边环境与居民生命财产安全构成严重威胁；滑坡易发区同样不容忽视，山体滑坡时裹挟的巨大土石流冲击力，能够瞬间冲垮管道，使其扭曲变形甚至断裂，导致天然气输送中断。此外，洪水淹没区也是高危地带，季节性的洪水泛滥，湍急水流长时间冲刷、浸泡管道，不仅会使管道外壁的防腐层剥落，加速管壁腐蚀，还可能直接冲移管道，造成接口松动、脱节。

3.1.2 管道材质升级

选用高强度、耐蚀新型合金管材，这类管材在研发过程中充分考虑了天然气管道运输的复杂工况需求，其具备卓越的机械性能，能够承受高压环境下的内应力冲击，极大降低了因管材强度不足引发的破裂风险。对于高硫天然气输送管道而言，由于高硫天然气具有极强的腐蚀性，普通管材难以抵御其侵蚀，采用内壁衬里技术则能有效解决这一难题。内壁衬里材料通常选用具有特殊化学稳定性的高分子聚合物或耐腐蚀金属涂层，它们如同管道内壁的“防护盾”，不仅可以隔绝高硫天然气与管材基体的直接接触，还能在管壁表面形成一层致密的保护膜，阻止腐蚀介质的渗透，进而显著增强管道的抗腐蚀性能，有效延长管道的使用寿命，确保天然气的安全、稳定输送。

3.2 日常监测强化

安装分布式光纤传感器，以此搭建起管道的“神经感知网络”。这种传感器具备超高的灵敏度，能够精准且实时地捕捉管道在运行过程中所产生的细微应变，无论是因内部压力变化引发的微小形变，还是外部冲击造成的受力改变，都逃不过它的“监测慧眼”。与此同时，它对温度的监测同样精准高效，能够即时察觉温度的异常波动，无论是周边环境温度骤变，还是管道内部介质流动导致的温度差异，都能被迅速反馈。此外，对于管道运行时产生的振动情况，它也能精确感知，一旦有异常振动出现，便可立即发出预警信号。

在利用卫星遥感技术监控管道沿线地质变化方面，借助高分辨率卫星影像，如同为管道沿线披上一层“透视外衣”。能够清晰地观测到山体的细微位移、土壤的松动迹象以及河流的改道趋势等地质动态信息。卫星按照既定轨道周期性地对管道区域进行扫描，所获取的数据通过高速稳定的通信链路，与分布式光纤传感器收集到的信息一同，实时、不间断地传输至监控中心。监控中心内，专业人员借助智能化分析软件，对海量数据进行快速梳理、深度剖析，一旦发现任何潜在的安全隐患，便能即刻启动相应预案，真正实现对天然气管道运输的全方位、全天候无死角监测，为管道的安全运行筑牢坚实防线。

3.3 应急管理完善

3.3.1 应急预案制定

涵盖泄漏、爆炸等各类可能出现的事故，详细制定与之对应的应急响应流程，对每个流程中的各个环节、各参与主体都要予以明确，确保各部门职责清晰，分工明确，杜绝推诿扯皮现象。同时，充分考虑到管道运输过程中不同地段、不同时段所面临的不同风险等级，提前预设好精准且具有针对性的处置方案，做

到一事一策、精准防控。不仅如此，为了保证这些预设方案在关键时刻能够真正发挥作用，还需定期组织实战演练，模拟各种突发状况，让各部门工作人员熟悉应急流程，熟练掌握处置技巧，以此确保在遭遇实际事故时，能够迅速启动应急响应机制，各部门协同作战，有序开展救援、抢险、抢修等各项工作，最大程度降低事故损失。

3.3.2 应急资源储备

在管道沿线合理布局抢险救援物资仓库是应急管理的关键一环。首先，要依据管道所经区域的地形地貌、人口分布以及过往事故风险点分布情况，进行科学选址。对于山区等交通不便、地质灾害频发地段，物资仓库应尽量靠近主干道且处于地势相对较高、地质稳定之处，以确保在紧急情况下物资能够顺利调配，不受山体滑坡、泥石流等灾害阻碍。

仓库内储备的堵漏器材必须种类齐全，涵盖适用于不同管径、不同压力等级管道泄漏的各种型号，如钢带拉紧式堵漏工具、注胶式堵漏设备等，确保能迅速应对各类泄漏状况。消防设备除常规灭火器、消防水车外，还应配备针对天然气火灾特性的干粉灭火装置、泡沫灭火系统，满足扑灭初期火灾及大面积火情的需求。应急照明设施要具备高亮度、长续航、防水防尘等性能，保障夜间或地下管道抢险时现场光线充足。同时，与周边专业救援队伍建立紧密联动机制至关重要。与消防部门定期开展联合演练，熟悉彼此战术、装备，实现信息互通，一旦发生事故能迅速协同作战；与工程抢险队伍保持密切联系，确保在管道抢修、道路清障等方面高效配合；与医疗急救单位联动，提前规划救援路线，保障受伤人员能第一时间得到救治，全方位保障应急救援及时高效。

4 结论

本研究构建基于风险评估的天然气管道运输安全保障体系成效显著。通过深入剖析天然气管道运输流程，精准识别出自然环境、人为、设备与技术等多方面风险因素，如地质灾害、第三方施工破坏、管道老化等。运用故障树分析、模糊综合评价法等科学手段量化评估风险等级，进而针对性地从管道设计、日常监测、应急管理、人员培训提升等维度协同发力。经实例验证，切实保障了管道安全，有效提升天然气管道运输安全韧性，为行业发展筑牢根基。

参考文献：

- [1] 冯庆善. 天然气管道风险评估技术研究 [J]. 天然气工业, 2006, 26(2):112-114.
- [2] 帅健, 王晓霖. 油气管道完整性管理技术及其进展 [J]. 石油化工高等学校学报, 2006, 19 (3):88-91.