

天然气长输管道建设项目施工安全风险动态评估与管控体系研究

刘玉林（济南市华通燃气工程有限公司，山东 济南 250014）

摘要：天然气长输管道建设工程因施工环境复杂、风险因素动态演变，对安全管理提出极高要求。本研究基于系统工程理论，构建包含风险识别、动态评估、分级预警与精准管控的全流程安全管理体系。通过剖析施工阶段人、物、环境、管理四类核心风险因素的动态演化规律，集成层次分析法与模糊综合评价法建立量化评估模型，并结合物联网监测技术设计智能化管控方案。以某跨省天然气管道工程为实证对象，验证了评估模型的科学性与管控措施的有效性，为提升长输管道施工安全管理的精细化水平提供理论支撑与实践路径。

关键词：天然气长输管道；施工安全；动态风险评估；层次分析法；智能管控体系

中图分类号：TE88；TU996.7 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)032-0106-03

Research on Dynamic Assessment and Control System of Construction Safety Risks in Natural Gas Long distance Pipeline Construction Projects

Liu Yulin (Jinan Huatong Gas Engineering Co., Ltd., Jinan Shandong 250014, China)

Abstract: The construction of natural gas long-distance pipelines requires extremely high safety management due to the complex construction environment and dynamic evolution of risk factors. This study is based on the theory of systems engineering and constructs a full process safety management system that includes risk identification, dynamic assessment, graded warning, and precise control. By analyzing the dynamic evolution laws of the four core risk factors of people, things, environment, and management during the construction phase, integrating the Analytic Hierarchy Process and Fuzzy Comprehensive Evaluation Method to establish a quantitative evaluation model, and combining IoT monitoring technology to design an intelligent control plan. Taking a cross provincial natural gas pipeline project as the empirical object, the scientificity of the evaluation model and the effectiveness of the control measures were verified, providing theoretical support and practical path for improving the refinement level of safety management in long-distance pipeline construction.

Keywords: natural gas long-distance pipeline; Construction safety; Dynamic risk assessment; Analytic Hierarchy Process; Intelligent control system

作为国家能源基础设施的重要组成部分，天然气长输管道工程具有线路绵长、地形地貌复杂、施工工艺多元的显著特征。

构建覆盖施工全过程的动态风险评估与管控体系，成为破解长输管道建设安全管理难题的关键路径。本文结合风险管理理论与工程实践，提出融合定性分析、定量评估与智能监控的一体化解决方案。通过建立基于贝叶斯网络的动态风险评估模型，集成北斗形变监测、无人机巡检、物联网传感器等智能终端，实现风险因素的实时感知与量化评估。同时引入PDCA循环管理机制，构建“风险识别—动态评估—分级管控—效果反馈”的闭环管理体系，旨在为行业提供可复制的安全管理方式。

1 施工安全风险因素的动态特征分析

基于事故致因理论与现场调研，长输管道施工安全风险可归纳为四大维度：

①人的不安全行为：主要表现为特种作业人员无证上岗、安全技术交底不到位导致的违规操作，以及

因疲劳作业、安全意识薄弱引发的误操作。

②物的不安全状态：涵盖施工设备故障（如起重机钢丝绳断裂）、材料质量缺陷（如管道防腐层厚度不达标）、临时设施隐患（如管沟支撑结构失效）等。检测数据显示，设备完好率低于90%的施工现场，安全隐患发生率较达标现场高3.2倍。

③环境风险因子：包括自然环境风险（高烈度地震区的管沟塌方、季节性洪水对穿越工程的冲刷）与施工环境风险（多工序交叉作业的协调混乱、夜间施工照明不足导致的误判）。特别是高后果区（如人口密集区、水源保护区）的施工风险，往往具有连锁性与高破坏性。在高烈度地震区，地震引发的地质变动会使管沟基础松动，导致管道变形甚至破裂；而在穿越河流的施工中，洪水可能冲毁临时围堰，破坏施工设备，威胁施工人员生命安全。在施工环境方面，多工种交叉作业时，若未合理规划施工顺序与区域，极易出现机械碰撞、人员误伤；夜间施工时，照明盲区会使操作人员无法准确判断设备运行状态与周边环

境，某项目就因夜间照明不足，挖掘机误触地下电缆，造成大面积停电与设备损坏。

④管理体系漏洞：体现在安全管理制度执行不到位（如隐患排查流于形式）、监理监督缺位（关键工序旁站制度落实率不足）、应急响应机制滞后（应急预案与现场实际脱节）等方面。某事故调查报告显示，83%的重大事故存在管理体系缺陷。部分项目虽制定了详细的安全管理制度，但在实际执行中，隐患排查仅停留在表面，未能深入分析问题根源；监理人员在关键工序施工时，未严格执行旁站制度，导致焊接质量不达标、管道连接不牢固等问题未被及时发现。

2 评估指标体系的构建

在准则层下细分具体评估指标：①人的因素：重点考察特种作业人员持证上岗率（通过证件核查系统实时统计）、安全培训考核合格率（理论考试与实操测试双重达标率）、违规操作频次（基于现场视频监控记录）等指标；②物的因素：涵盖施工设备完好率（定期巡检的设备正常运行比例）、焊接一次合格率（射线检测一次通过的焊口占比）、材料进场检验合格率（第三方检测机构出具的报告数据）等量化指标；③环境因素：包括高后果区风险等级（根据人口密度、环境敏感程度划分的I-III级区域）、恶劣天气应对能力（暴雨、大风预警响应时间与措施落实率）、地质灾害监测覆盖率（边坡位移、地下水位监测点布置密度）；④管理因素：聚焦安全技术交底覆盖率（各工序交底记录完整率）、隐患整改闭环率（从发现到验收的整改完成比例）、应急演练有效性（通过桌面推演与实战演练评估响应速度）。

3 智能化风险管控体系的设计与应用

3.1 全域感知的风险预警机制

①分级预警标准：建立科学的四级动态预警体系，通过量化综合评估得分进行风险分级管理。其中，蓝色预警（低风险）对应综合得分0-0.3，表明风险处于可控范围，需持续加强日常巡检；黄色预警（一般风险）对应0.3-0.6，提示需增加检查频次并采取针对性防范措施；橙色预警（较高风险）对应0.6-0.8，此时必须立即启动专项管控方案，组织专家现场研判，调配优势资源降低风险；红色预警（高风险）对应0.8-1.0，触发该等级预警后，现场需立即停工整改，全面排查隐患，经多方验收合格后方可复工。同时，各级预警均配套详细的应急处置流程和责任分工表，确保响应机制高效运转。

②智能监测技术：管道硬件部署：在施工现场关键区域部署高精度监测设备，构建全方位三维监测网络。其中，边坡位移监测雷达采用毫米级定位技术（精

度 $\pm 2\text{mm}$ ），实时捕捉边坡微小形变，提前识别滑坡风险；管道应力传感器嵌入焊接接头，以100Hz采样频率动态采集应变数据，精准分析管道受力状态；多参数气象站配备风速、降雨量、温湿度等传感器，通过4G/5G网络实时传输气象参数，为极端天气下的施工安全提供数据支撑。

③管道平台开发：基于BIM+GIS技术开发施工管理平台，深度集成风险评估模型与实时监测数据。平台通过数字孪生技术构建1:1施工现场三维模型，自动将风险评估结果映射生成可视化风险热力图，以红、橙、黄、蓝四种颜色直观标注各施工段风险等级。同时，平台支持移动端APP实时同步数据，当监测指标超过阈值时，自动触发分级预警机制，通过短信、弹窗等方式向相关责任人推送预警信息，并附带风险位置、严重程度及处置建议，实现“监测-评估-预警-处置”全流程闭环管理。

3.2 全链条的过程管控措施

3.2.1 人的行为精准管控

推行“安全积分银行”制度，将正确佩戴防护用品、主动报告隐患等行为转化为积分，可兑换培训资源或物质奖励；违规行为（如未系安全带）扣除积分并暂停作业资格，直至通过安全复训。某管道项目实施后，违规次数较之前下降65%。

建立“工序风险知识库”，利用AR技术在施工现场实时推送当前工序的风险点与操作要点，例如管沟开挖时自动弹出“注意地下水位监测”“按设计坡度放坡”等提示信息。

实施“双盲”应急演练（不预先通知时间与场景），重点检验有限空间作业救援、管道突发泄漏处置等场景的响应能力，每年演练不少于4次，覆盖率达100%。

3.2.2 物的状态智能管控

构建管道设备全生命周期管理系统，为起重机、焊接机等关键设备安装智能芯片，实时记录运行参数（如焊接电流、电压、持续时间），超出额定工况自动报警并锁定设备。设备巡检周期从7天缩短至实时监控，完好率提升至98%以上。

建立管道焊接“数字孪生”模型，输入焊工信息、焊接参数、环境数据，模拟焊缝成形过程，提前预警未熔合、夹渣等缺陷。某项目应用后，焊接一次合格率从85%提升至94%。

穿越工程采用“北斗+导向雷达”组合定位系统，实时监测顶管轴线偏差（控制在 $\pm 5\text{cm}$ 以内），回拖过程中动态调整泥浆配比，将回拖力波动幅度控制在设计值的 $\pm 10\%$ 范围内。

3.2.3 环境与管理协同管控

高后果区施工前，联合地质勘察单位开展三维地震勘探与数值模拟，制定“一标段一方案”，例如在断层带采用柔性接口管道，在水源保护区设置双重防渗墙。建立管道“三方联检”机制（业主代表、总监理工程师、施工项目经理每日联合巡查），运用智能巡检系统实时上传隐患照片，规定一般隐患24h内整改、重大隐患4h内响应，整改完成率纳入参建单位信用评价。引入安全生产责任保险（安责险）联动机制，保险机构定期派专家参与风险评估，根据隐患整改成效浮动保费，形成“风险共担、管理共促”的良性循环。

3.3 全场景的应急管理体系

①预案体系优化：针对长输管道施工的典型风险场景，编制《穿越河流泄漏应急预案》《高边坡坍塌专项处置方案》等12项专项预案，每季度结合最新风险评估结果动态修订，确保预案针对性。②应急资源布局：以施工现场为中心，在50km半径内建立三级应急储备点，一级储备点配备大型抢险设备（如管道封堵器、应急发电车），二级储备点储备常用物资（如消防沙、堵漏胶），三级储备点配置急救箱与通讯设备，实现“黄金1小时”应急响应圈。③政企联动机制：与地方应急管理局、生态环境局、医疗机构建立数据直连通道，突发事故时自动同步现场位置、风险类型、人员伤亡等信息，确保30min内启动跨部门应急响应，如某项目在模拟泄漏事故演练中，政府环保部门接警后28min到达现场开展水质监测。

4 工程案例验证与效果分析

4.1 项目概况与实施背景

某省级天然气管道工程全长326km，宛如一条蜿蜒的“能源动脉”，穿越地形复杂的广袤区域，途经山地、平原、水域三类典型地貌。其中，12处高后果区犹如悬在头顶的“达摩克利斯之剑”，涉及人口密集的城镇、重要交通枢纽以及生态敏感区；5次大型河流穿越面临着河床地质条件复杂、水下作业风险高的挑战，如长江某段穿越处，水流湍急，河床下伏卵石层，施工难度极大；3次高速公路顶管施工则对精度控制和交通疏导提出严苛要求，稍有不慎就可能影响高速公路的正常通行。

施工高峰期，项目现场呈现出一派繁忙景象，1500名建设者各司其职，300余台套机械设备轰鸣运转。整个工程工期长达20个月，时间紧、任务重。项目启动初期，传统安全管理模式弊端尽显，风险识别依赖人工巡查与经验判断，难以提前发现潜在隐患，暴露出风险识别滞后、管控措施针对性不足等问题。前3个月内，因风险管理不到位，累计发生未遂事故7起，

涵盖高空坠落、机械伤害、坍塌等多种类型，安全管理水平形势严峻，亟待构建新的风险评估与管控体系。

4.2 动态评估体系应用过程

①初始评估与方案定制：管道施工准备阶段，通过层次分析法确定管理因素（0.38）、环境因素（0.29）为首要风险维度，据此制定《高后果区施工专项管控方案》《雨季施工安全保障措施》等文件。②施工期动态管控：在K180+500-K185+200段石方爆破开挖时，连续两日监测到边坡振动值超标（0.8cm/s，超过安全阈值0.5cm/s），管道评估系统自动升级风险等级至橙色，现场立即暂停爆破作业，增加预应力锚索支护，36h内振动值降至0.3cm/s，恢复安全施工。③定向钻穿越某河流时，回拖力监测曲线出现异常波动（超过设计值15%），管道系统触发橙色预警，现场及时调整泥浆黏度（从35s提升至42s），回拖力逐步稳定，避免了钻杆断裂事故。④效果量化分析：与同区域同类工程对比，应用动态评估与管控体系后，该项目施工阶段安全隐患发现率提升40%，整改周期缩短55%，未遂事故发生率下降82%，实现“零重伤、零死亡”的安全目标。第三方检测显示，管道焊接一次合格率达93.7%，防腐层电火花检漏达标率100%，关键质量指标均优于行业标准。

5 结论

构建了适用于长输管道施工的动态风险评估模型，解决了传统管道静态评估对复杂环境适应性不足的问题，评估结果与实际风险吻合度达89%；设计了包含智能监测、分级预警、精准管控的一体化安全管理体系，实现风险识别从经验判断到数据驱动、管控措施从粗放应对到精准施策的转变；工程实践表明，该体系显著提升了管道施工安全管理效能，为同类项目提供了可复制的“评估-预警-管控-应急”全流程解决方案。

参考文献：

- [1] 张伟, 刘畅. 模糊层次分析法在长输管道施工风险评估中的应用 [J]. 石油工程建设, 2022, 48(4):78-83.
- [2] 陈海涛, 杨立新. 物联网技术在管道施工安全监测中的应用研究 [J]. 天然气工业, 2024, 44(2):121-128.
- [3] 吴敏, 赵亮. 基于BIM的施工安全动态管理系统开发与应用 [J]. 工程管理学报, 2023, 37(3):112-116.
- [4] 徐康, 杨张虎. 天然气长输管道建设项目施工期生态环境影响与生态修复方法分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(09):136-138+141.
- [5] 吴江涛. 天然气长输管道施工的风险因素与安全控制 [J]. 化工管理, 2025(13):8-10.