

安全设计管道防护优化路径探索

刘文峰

国家管网集团北京管道有限公司 北京 100000

摘要：管道设施安全稳定运行是市政、化工、长输工程安全生产的重要保障。当前管道防护存在设计理念滞后、体系碎片化、场景适配性差、智能化程度偏低等突出问题，各类隐蔽性、渐进式安全隐患频发。本文依托管道全生命周期安全管控思路，从前置化设计、全周期体系、场景化策略、智能化技术四个方面构建防护优化路径，配套制度与技术保障措施，可为提升管道安全防控水平、完善行业防护体系提供参考。

关键词：安全设计；管道防护；优化路径

引言：管道运输凭借高效、稳定、低成本的优势，广泛应用于城市市政、工业化工、野外长输等多个领域，是国民经济基础设施的重要组成部分。复杂服役环境、长期运行损耗及第三方干预等因素，导致管道腐蚀、破损、泄漏等安全问题频发。现阶段管道安全防护普遍存在重运维、轻设计的短板，传统防护模式难以适配差异化工况与现代化安全管控需求。基于安全设计前置理念，深挖管道防护现存问题，系统性探索防护优化路径，对规避管道安全风险、保障设施长效稳定运行具有重要现实意义。

1 管道安全设计与防护基础理论及现存问题

1.1 管道安全设计与防护核心内涵

（1）管道安全设计定义：以风险防控为核心，在管道规划、选材、结构设计、布局设计等阶段融入安全防控要素，从源头规避安全隐患的前置性设计体系。其本质是将安全目标转化为设计参数与约束条件，实现风险的事前主动干预，而非事后被动应对。（2）管道防护核心范畴：涵盖防腐防护、防外力破坏、防渗漏防爆、老化防护、环境适配防护等多维度防护内容，贯穿管道全生命周期。各防护维度相互关联、互为补充，共同构成管道安全运行的立体化保障屏障。（3）安全设计与防护的关联性：安全设计是防护优化的基础前提，为防护措施提供科学依据与实施条件；防护优化是安全设计的落地延伸，通过动态调整与持续改进反哺设计环节。二者协同构成闭环迭代机制，共同实现管道全周期安全管控目标。

1.2 管道安全防护失效的主要类型及成因

（1）设计层面隐患：设计标准适配性不足、选材不合理、结构布局缺陷、风险预判缺失导致的先天性防护

短板，此类隐患隐蔽性强、影响范围广、后期整改难度大。（2）施工层面隐患：施工工艺不规范、防护层施工质量不达标、施工验收疏漏造成的防护体系破损，往往表现为施工期难以察觉、运行期加速劣化的渐进式损伤。（3）运维层面隐患：日常巡检不到位、老化隐患整改滞后、防护设备维护不及时、极端环境应急防护缺失，多源于管理体系不健全与信息化手段不足，易在特定工况下诱发突发性失效^[1]。

1.3 当前管道安全防护设计的现存短板

（1）设计理念滞后：普遍存在重经济性、轻安全性的设计倾向，安全设计前置性不足，风险防控多停留在合规性审查层面，缺乏系统性的风险评估与主动防控意识。（2）防维护体系碎片化：各防护模块相互独立，未形成全链条、系统化的防护设计体系，整体防控能力薄弱，且设计、施工、运阶段信息断层严重，防护设计意图难以有效传导至后续环节。（3）场景适配性不足：以通用化设计标准为主，针对复杂地质、极端气候、高危工况的专项防护设计缺失，精细化设计能力不足，难以满足差异化场景的安全需求。（4）智能化设计融入不足：传统经验化设计为主，智能监测、风险预警等新技术与防护设计融合度低，数据驱动决策机制尚未建立，安全设计缺乏动态优化能力，制约防护体系整体效能的持续提升。

2 基于安全设计的管道防护优化核心路径

2.1 前置化安全设计优化：从源头规避防护风险

（1）优化管道选材设计：根据介质特性、服役环境、工况条件，差异化选用耐腐蚀、高强度、抗老化管道材料，从材质层面提升基础防护能力。选材设计应综合考量材料力学性能、化学稳定性、使用寿命及经济

性,建立多因素加权评价模型,确保材料选择既满足当前工况要求,又具备一定的性能冗余以应对极端工况冲击。同时应关注材料间的相容性,避免因电化学腐蚀、热膨胀系数差异等因素引发次生防护缺陷。(2)优化结构与布局设计:优化管道管径、壁厚、敷设方式设计,规避应力集中、外力撞击、积水腐蚀等风险,完善管道缓冲、泄压、防渗结构设计。结构设计应采用有限元分析等手段对关键节点进行应力校核,合理设置补偿器、支吊架等附属设施,消除热胀冷缩、地基沉降等引发的附加应力隐患。布局设计应统筹考虑沿线地形地貌、水文地质条件及既有构筑物分布,合理预留安全间距与施工维护通道,降低外部干预风险^[2]。(3)完善前置风险设计预判:建立管道设计阶段风险评估体系,针对地质灾害、极端天气、人为破坏等风险,提前嵌入对应防护设计方案。体系构建应涵盖风险源辨识、失效概率分析、后果严重度评估三个核心模块,形成风险矩阵与防控策略表,将评估结论直接转化为设计输入条件。通过失效模式与影响分析(FMEA)、故障树分析(FTA)等工具,系统识别设计阶段潜在薄弱环节,确保各类风险因素在设计源头即得到有效控制。

2.2 全周期防护体系优化:打通设计与运维衔接壁垒

(1)施工阶段防护落地优化:依托安全设计标准,规范防护层施工、防腐处理、接口密封等关键工艺,建立施工全过程防护质量核查机制。重点强化设计交底环节,确保设计意图、关键控制参数及验收标准准确传导至施工与监理各方。推行首件验收与样板引路制度,对各防护专项工艺实施标准化示范,合格后方可批量施工,最大限度减少施工偏差对设计防护效果的削弱。(2)运维阶段防护动态优化:结合设计参数制定差异化运维方案,建立管道老化、腐蚀、破损动态监测机制,实现防护隐患精准整改。运维方案应依据设计使用寿命、环境腐蚀性等级、应力水平等因素,合理设定巡检频次、检测方法与维护周期。构建设计-运维双向信息反馈机制,将运维阶段发现的防护缺陷、异常劣化趋势及时溯源至设计环节,推动设计标准与方法的持续改进。(3)老旧管道防护改造优化:针对存量老旧管道设计缺陷,制定针对性加固、防腐、改造方案,补齐先天性防护短板。改造前应开展全面检测评估,明确缺陷类型、严重程度及剩余寿命,依据现行设计规范与新技术成果,择优选取内衬修复、外加固补强、局部更换等改造方式,实现防护能力与安全标准的同步提升^[3]。

2.3 场景化防护策略优化:适配差异化服役场景

(1)城市市政管道防护优化:针对人口密集、施工

频繁场景,优化防挖掘破坏、防渗、降噪防护设计,提升公共安全防护能力。设计应重点强化管道埋深、警示标识及防护盖板等防外力破坏措施,加密人口稠密区管线走向标识与智能预警桩布设,降低第三方施工误损概率。同时建立与城市地下空间规划相协调的防护设计体系,统筹考虑相邻管线及地下构筑物的相互影响。(2)工业化工管道防护优化:针对高危介质、高压工况,强化防爆、防腐、耐高温、应急泄压防护设计。设计应依据介质爆炸极限、闪点、毒性等特性参数,合理设定安全泄放装置规格与设置间距,并配备快速切断与隔离系统。建立泄漏扩散模拟模型,优化通风、围堰及应急收集设施布局,确保事故状态下危害物浓度与扩散范围得到有效控制^[4]。(3)野外长输管道防护优化:针对复杂地质、极端气候、偏远环境,优化防地质灾害、防冻、防盗挖、远程监测防护体系。设计应结合沿线地震动参数、冻土深度、滑坡崩塌分布等数据,差异化设置抗变形结构、保温伴热及锚固设施。依托地理信息系统与卫星遥感技术,建立管道沿线风险区段分级台账,实现高风险点重点设防、一般区段标准防控的分级防护设计。

2.4 智能化防护技术优化:赋能安全设计升级

(1)融入BIM可视化设计:依托BIM技术实现管道防护设计可视化建模,精准排查设计漏洞,优化防护布局。通过三维协同平台,集成地质、水文、构筑物等多源信息,实现防护层厚度、防腐范围、监测点位的精准设计与自动校核。利用碰撞检查与虚拟漫游功能,在设计阶段发现并消除空间冲突、盲区死角等隐性缺陷,提升防护方案的科学性与完整性。(2)搭建智能监测防护体系:结合传感器、大数据、物联网技术,将实时监测、风险预警、智能研判功能融入管道防护设计。设计阶段应统筹规划传感器类型、安装位置、通信组网与供电方式,确保监测系统与管道本体同步设计、同步施工、同步投运。建立基于人工智能的风险识别模型,对压力骤变、泄漏声波、异常振动等特征信号进行实时判别,实现早期预警与辅助决策^[5]。(3)构建数字化防护设计数据库:积累不同场景管道防护设计参数与运维数据,迭代优化安全设计标准。数据库应涵盖材料性能、腐蚀速率、失效案例、修复记录等全要素信息,通过大数据挖掘揭示防护失效规律与设计薄弱环节。建立数据驱动的标准更新机制,将工程实践反馈转化为设计规范的修订依据,推动防护设计从经验主导向数据驱动持续演进。

3 安全设计管道防护优化落地保障与效果展望

3.1 制度规范保障优化落地

(1) 完善管道安全设计标准体系: 结合行业发展需求, 细化不同场景管道安全防护设计规范, 弥补通用标准的适配短板。针对城市密集区、化工园区、野外长输等典型场景, 制定差异化的设计参数与防护要求, 形成覆盖全场景、全介质、全工况的标准化体系, 为防护优化提供科学的制度依据。(2) 建立全流程监管机制: 构建设计审核、施工督查、运维考核、整改溯源的全链条监管体系, 保障防护优化方案落地。在设计阶段引入第三方独立审查, 施工阶段实施关键节点强制检查, 运维阶段建立防护绩效年度评估制度, 实现防护优化从方案到执行的闭环管理。强化安全责任追究制度, 形成设计终身负责制与运维定期考核相结合的责任链条。(3) 健全人员培训体系: 强化设计、施工、运维人员的安全防护专业能力, 提升全员安全设计与防护管控意识。建立分层分类的课程体系, 定期开展典型案例复盘与应急实战演练, 将防护优化理念融入各岗位职责与考核指标, 确保制度规范在执行层面得到有效落实。

3.2 技术与资源保障支撑

(1) 强化核心技术研发与应用: 加大新型防护材料、智能防护设备、数字化设计技术的研发投入与落地推广。重点突破高性能防腐涂层、自修复材料、光纤传感监测等关键技术瓶颈, 建立产学研用协同创新机制, 加速科研成果向工程应用的转化效率。(2) 建立常态化技术迭代机制: 结合管道安全事故案例、运维数据, 持续优化防护设计方案与技术体系。搭建行业安全数据共享平台, 定期发布防护设计典型案例与风险预警信息, 通过失效分析驱动设计改进, 形成“案例积累—问题识别—方案优化—标准更新”的良性循环。(3) 完善物资与资金保障: 建立管道防护物资储备机制, 保障防护改造、设备更新、技术升级的资金投入。将管道安全防护经费纳入项目全生命周期预算管理, 设立专项维护基金, 探索多元化资金筹措渠道, 确保防护优化措施的持续稳定推进。

3.3 优化效果预期与应用展望

(1) 安全效益预期: 有效降低管道安全隐患发生率, 大幅减少泄漏、爆炸等安全事故, 提升管道服役安

全性与稳定性。通过设计源头防控与全周期防护优化协同发力, 实现高风险隐患早期识别率显著提升、防护失效事件明显下降的安全目标, 为公共安全与环境保护提供坚实保障。(2) 经济效益预期: 延长管道使用寿命, 降低运维整改成本, 减少安全事故造成的经济损失, 提升工程综合效益。防护优化虽在前期增加一定投入, 但通过减少事故损失、延长大修周期、降低非计划停机频次, 可在管道全生命周期内实现显著的成本节约与投资回报。(3) 未来发展展望: 展望智能化、数字化、绿色化管道安全防护设计的发展趋势, 提出后续研究与优化方向。未来防护设计将向感知智能化、决策数字化、材料绿色化方向深度演进, 建议后续重点开展多源数据融合风险预警模型、低碳环保防护材料、数字孪生驱动的防护设计优化等方向的研究, 推动管道安全防护体系从“经验决策”向“智慧防控”全面跃升。

结束语

本文系统梳理了管道安全设计与防护工作的现存问题, 围绕源头防控、全周期管控、场景适配、智能赋能建立完整的防护优化体系, 同时从制度、技术、资源层面搭建落地保障机制。相关优化方案可有效弥补管道先天设计缺陷与后期防护漏洞, 降低安全事故发生率。未来将聚焦数字化与绿色化方向, 持续迭代防护技术与设计标准, 推动管道安全管控向智慧化、精细化方向升级。

参考文献

- [1] 王磊, 张健, 李阳. 长输管道安全防护设计优化及风险防控研究 [J]. 石油工程建设, 2023, 49(02): 45-50.
- [2] 刘佳伟, 陈峰, 周宇航. 市政压力管道安全设计缺陷与防护优化策略 [J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(05): 189-195.
- [3] 赵博文, 吴浩. 复杂工况下油气管道综合防护设计优化研究 [J]. 油气储运, 2022, 41(09): 1025-1031.
- [4] 孙铭泽, 田雨. 基于风险分级的管道安全防护设计优化方法 [J]. 安全与环境学报, 2023, 23(06): 256-262.
- [5] 陈浩宇. 管道工程安全设计要点及防护体系优化路径 [J]. 工程技术研究, 2025, 10(08): 136-138.