

天然气长输管道穿跨越工程施工技术与风险管控

张 强（陕西省燃气设计院有限公司，陕西 西安 710000）

摘要：在能源结构转型中，天然气长输管道至关重要，其穿跨越工程是建设重难点。施工涉及定向钻、顶管、悬索与桁架等技术，需适配地质条件并优化设计。施工面临地质水文、工艺设备、第三方破坏及人为操作等风险。管控措施涵盖施工前风险评估与方案优化、施工中动态监控及应急管理、竣工后维护与长期监测，以此保障工程安全与可靠。

关键词：天然气长输管道；穿跨越工程；施工技术；风险管控；设计优化

中图分类号：TE832 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)028-0115-03

Construction Technology and Risk Management of Natural Gas Long-Distance Pipeline Crossing Projects

Zhang Qiang(Shaanxi Gas Design Institute Co.,Ltd.,Xi'an Shaanxi 710000,China)

Abstract: In the energy transition, long-distance natural gas pipelines play a vital role, with their cross-regional engineering being a key challenge in construction. The project involves technologies such as directional drilling, pipe jacking, suspension cables, and truss systems, requiring adaptation to geological conditions and optimized design. Construction risks include hydrogeological hazards, equipment failures, third-party interference, and human errors. Control measures encompass pre-construction risk assessment and plan optimization, real-time monitoring and emergency response during construction, as well as post-completion maintenance and long-term monitoring to ensure project safety and reliability.

Keywords: natural gas long-distance pipeline;crossing project;construction technology;risk management; design optimization

天然气作为清洁能源，在我国能源结构转型中地位关键，长输管道是跨区域输送的核心载体。穿跨越工程需穿越河流、山脉等复杂地形，是管道建设的重难点，施工受地质水文条件制约大，涉及多专业技术，任一环节疏漏都可能引发安全事故，威胁能源供应稳定。设计的合理性决定后续施工可行性与风险抵御能力，系统研究其施工技术、识别风险并有效管控，可为保障天然气输送安全、推动能源行业高质量发展提供支撑。

1 天然气长输管道穿跨越工程施工技术与设计要点

1.1 定向钻穿越施工技术及设计适配性

定向钻穿越施工技术是城市燃气长输管道非开挖穿越的核心，借助精准导向系统控制钻头轨迹，实现管道在各类复杂地层中的水平定向穿越，技术可应用于城市建成区、河流、铁路及公路等敏感区域，能有效减少对地表各类构筑物和周边生态环境的实际扰动。设计需基于详细地质勘察针对性开展：富水砂层区域设计钻头出水点与泥浆循环系统匹配参数，数值模拟确定泥浆黏度梯度；软硬互层地层预设导向孔曲率半径渐变方案，避免管道应力集中。施工前需勘察土层分布、地下水位及障碍物位置，选定适配钻头与钻进参数。导向孔施工时，高精度陀螺仪与地面跟踪系统实时监测钻头姿态，调整泥浆配比控孔壁稳定，富水砂层添加膨润土护壁^[1]。扩孔按梯度进行，确保

孔道与管道外径匹配防坍塌；回拖阶段计算摩擦力与浮力，合理设置设备及牵引参数。城市工程中需关注与既有管线安全距离，借三维探测建地下空间模型避现有设施，降低冲突风险（流程见图1）。

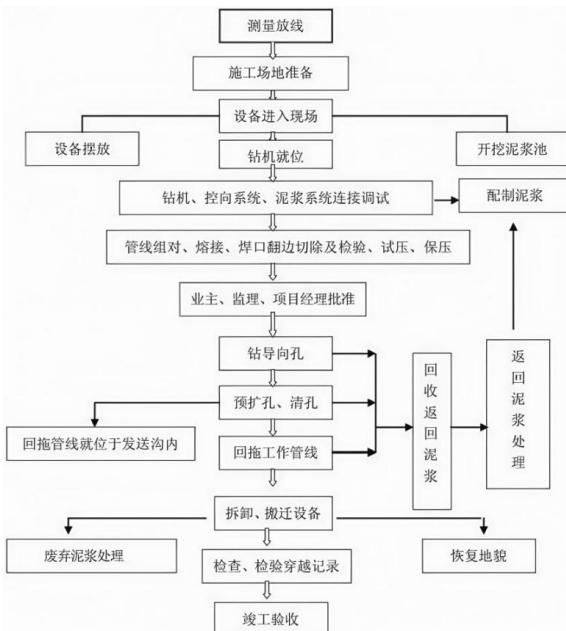


图 1 定向钻穿越施工流程

1.2 顶管穿越施工技术及结构设计

顶管技术在燃气管道穿越密集建筑群或复杂地质区域优势显著，通过液压千斤顶推动管节在预制工作

井内顶进形成连续管道，有泥水平衡、土压平衡等方式，前者适用于高水位地层，可平衡压力减少沉降。设计需完成三项重点：工作井结构设计，依顶进长度与地质承载力算井壁厚度，有限元法验后背墙抗推力；管节接口用遇水膨胀橡胶圈与金属止水带组合，1.5倍工作压力测试密封；顶进轴线设多级纠偏预留量，每100m偏差允许值≤50mm。施工前浇筑钢筋混凝土工作井与接收井，设置后背墙与导轨，保障顶进轴线精度达标，大直径燃气管道采用分节预制、现场拼装方式，管节接口处设置密封止水带，确保燃气输送过程中的气密性^[2]。城市环境里，顶管技术需重点控制施工引起的地层位移，监测井周土体沉降速率可调整顶进速度与压力参数，穿越既有建筑物基础，预先设置加固桩或注浆帷幕，避免结构出现开裂情况。

1.3 跨越工程悬索与桁架施工技术

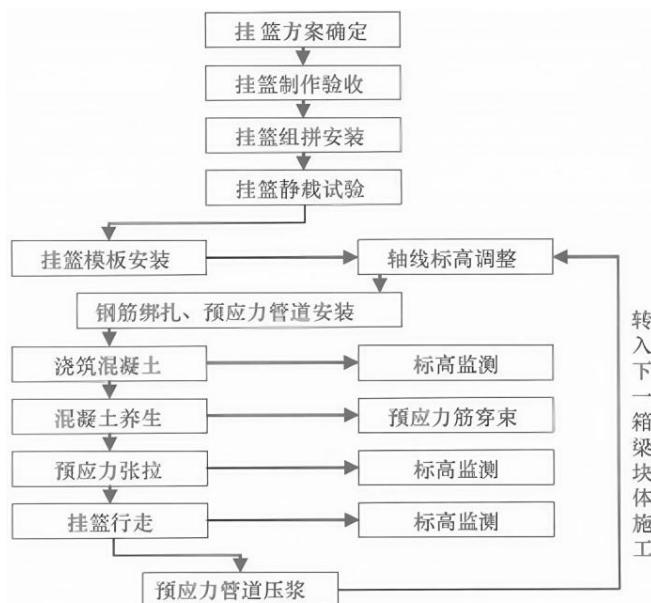


图2 桥梁悬壁浇筑无主桁架体内斜拉挂篮施工工法

悬索与桁架施工技术常用于燃气管道跨越河流、峡谷等大型障碍，结构设计需兼顾强度、刚度与稳定性。悬索结构设计需优化主缆线形，用抛物线方程计算初始张力，考虑温度对垂度的影响系数（-0.0012/℃）；索塔基础采用桩基承台，单桩承载力经静载试验验证，安全系数不小于2.5；锚碇结构需计算土体抗拔力，重力式锚碇混凝土强度不低于C40。桁架结构设计要验算节点疲劳强度，地震烈度7度及以上区域设抗震支撑节点，位移允许值为L/200（L为跨度）。悬索系统包含主缆、索塔、锚碇及管道承重架，主缆预张拉成抛物线形，吊索传递荷载，索塔基础用深桩或沉井抵御推力与荷载；桁架由型钢組成格构式结构，管道支架固定于上弦或腹杆，适合中等跨度。施工需精确放样，主缆架设用空中牵引法，

经临时支架调垂度，张拉时监测索塔变形与主缆应力以达设计张力^[3]。桁架采取分段吊装、高空对接，控制轴线偏差，通过焊接或高强螺栓保证节点强度。城市工程中，跨越结构需满足抗震抗风要求，结合气象数据模拟风荷载，设阻尼器减振动，管道与支撑间装绝缘装置防电化学腐蚀。桥梁悬壁浇筑无主桁架体内斜拉挂篮施工工法见图2。

2 天然气长输管道穿跨越工程施工风险识别

2.1 地质与水文条件风险

地质与水文条件是天然气长输管道穿跨越工程的核心风险源。复杂地层易引发多重险情：软土地层定向钻施工易因孔壁失稳导致塌孔及地表塌陷，危及周边建筑安全；硬岩地层会加剧钻头磨损，降低导向精度，增加管道就位难度。地下水位变化影响显著，高水位地层顶管施工若泥水压力失衡，可能引发涌水涌砂，破坏地层平衡。设计阶段若误判地质数据，如岩溶区采用浅基础设计，易导致后期不均匀沉降。断层破碎带存在地层滑动风险，可能造成管道接口开裂引发泄漏；浅层孤石、建筑垃圾等障碍物会卡滞钻头或划伤管道，影响施工进度与完整性。水文方面，河流穿越需应对水流冲刷与河床演变，洪水期可能导致跨越结构基础裸露，大幅削弱承载能力。

2.2 施工工艺与设备风险

施工工艺与设备运行异常是工程风险的关键诱因。定向钻施工中，扩孔直径与管道不匹配、回拖速度过快易致孔道坍塌、管道变形；泥浆配比失衡会引发孔壁失稳或沉渣堆积，影响回拖质量。设计参数与工艺匹配不足存隐患，如回拖力计算未计入管道弯曲段附加阻力，可能导致设备选型偏小。顶管施工时，千斤顶行程控制偏差会造成管道轴线偏移，超过允许误差则使管道承受附加应力，埋下长期破裂隐患；导向系统精度不足可能导致管道轨迹偏离设计，与既有地下设施冲突。顶管机刀盘磨损、液压系统故障会引发施工停滞，增加工期与成本。跨越工程中，主缆张拉工艺缺陷会导致结构应力不均，桁架焊接质量不合格会降低承载能力，极端情况引发结构失稳。设备维护缺位会加剧故障，如定向钻机动力头密封失效可能造成泥浆泄漏，污染周边土壤与水体。

2.3 第三方破坏与人为操作风险

第三方破坏与人为操作失误对城市燃气穿跨越工程构成直接威胁。城市区域人员密集、环境复杂，风险概率较高。外部施工干扰是主要第三方风险，周边工地钻探、开挖可能误触管道，尤其管道走向不明时，机械挖掘易致破损；地下空间开发中，新建管线与既有管道交叉施工若协调不足，可能引发碰撞或挤压。设计阶段若未设明显走向标识或警示带埋深不足（规

范 $\geq 0.5\text{m}$ ），会加大第三方误操作风险。人为操作风险贯穿施工全程：导向孔施工时，操作人员误判地质变化可能导致轨迹偏差；顶管作业中，注浆压力调整不当会引发地面隆沉；焊接工序不规范可能使接口出现未熔合、气孔等缺陷，成为运行期泄漏隐患。管理人员交底不清、监管缺位会纵容违规操作，放大风险后果；跨越工程中，吊装指挥失误可能造成构件坠落，危及施工人员安全与结构完整性。

3 天然气长输管道穿跨越工程风险管控措施

3.1 施工前风险评估与方案优化

施工前风险评估与方案优化是城市燃气穿跨越工程风险管控基础，需建立系统化评估体系，开展全面现场勘察，采用地质雷达、声波探测等技术手段，细致掌握地下管线具体分布、地层物理力学性质及水文详细参数，结合城市规划资料，精准识别施工区域的敏感点与各类限制条件，依据勘察数据构建风险矩阵，对地质、工艺、环境等风险进行量化分级，明确风险等级与实际影响范围，高风险区域要制定专项防控措施，穿越软土地层时增加护壁泥浆的试验次数，优化配比具体参数；跨越河流量算不同水位工况下的结构受力情况，强化基础防护设计细节。设计方案优化需引入多目标决策模型，从安全系数、施工难度、全生命周期成本三个维度进行方案比选，如定向钻与顶管方案的选择，需计算不同地层条件下的风险成本系数。方案优化注重多技术比选，定向钻与顶管方案结合工期、地层及成本选定。超千米工程需专项可研，引入BIM建三维模型模拟施工，提前发现问题并优化组织设计，经专家评审安全措施与技术参数，确保符合安全及环保要求。

3.2 施工过程动态监控与应急管理

施工过程动态监控与应急管理保障工程安全实施，建立实时监测系统，连续采集定向钻施工孔内压力、顶管顶力、管道位移等参数，借物联网技术传数据至中控平台，凭预设阈值实现异常预警，地层沉降监测布设精密水准点与测斜仪，重点监控穿越区域周边建筑物、道路及管线变形情况，沉降速率超过限值立即启动预警机制，调整施工参数^[4]。针对设计阶段预设的风险控制点，如悬索跨越主缆张力阈值（设计值的1.1倍），需在施工中设置自动报警装置。设备状态监控通过安装振动传感器与温度监测装置，实时掌握钻机、顶管机等关键设备运行状态，提前发现机械故障征兆。应急管理需制定分级响应预案，明确险情处置流程与责任分工，针对塌孔、涌水、燃气泄漏等事故储备止水材料、封堵设备及通讯器材等物资，定期开展实战演练，提升施工人员应急能力，演练涵盖管道泄漏检测、火源控制、人员疏散等场景。城市

中心施工时，与公安、消防、燃气管理部门建立联动机制，保障应急资源快速调配。

3.3 竣工后维护与长期监测机制

竣工后的维护与长期监测是保障城市燃气穿跨越工程长期安全运行的必要措施，工程验收阶段需开展全面检测工作，采用超声探伤、水压试验等专业手段，细致检验管道焊缝质量与整体耐压性能；对跨越结构进行严格的载荷试验，精准验证结构实际承载能力，同步建立完整的工程档案，详细记录施工参数、各项检测数据及隐蔽工程具体情况，为后期维护工作提供可靠依据。档案中需特别标注设计阶段设定的关键维护指标，如管道防腐层破损率允许值（ $\leq 0.1\%/\text{km}$ ）、悬索结构挠度限值（L/800）。日常维护应制定系统的周期性检查计划，定向钻穿越段需定期检测管道防腐层的完整程度，借助阴极保护系统持续监测管道腐蚀状态；顶管段重点检查接口密封性能，防止地下水渗入影响管道运行，跨越工程需重点检查主缆张力变化、索塔变形幅度及桁架节点连接状况，及时紧固松动构件，更换老化吊索以保障结构稳定，长期监测系统应结合城市智慧燃气平台建设，在关键位置安装光纤传感器与压力变送器，实时监测管道应变、压力及泄漏情况，一旦数据出现异常立即自动触发报警机制^[5]。

4 结语

天然气长输管道穿跨越工程是城市燃气供应的关键环节，其施工技术与风险管控关乎能源安全与公共利益。定向钻等技术需适配地质水文条件，设计优化是全流程核心，可从源头降风险、提韧性。从前期方案优化到后期长期监测的全流程管理，构建起城市燃气管道穿越工程的安全屏障，未来需持续推动技术创新与管理升级，将穿跨越工程安全融入城市整体风险治理体系，为城市燃气可持续供应提供坚实保障。

参考文献：

- [1] 徐佳. 长输天然气管道运行的安全风险与对策研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(10):38-40.
- [2] 杜保健. 天然气长输管道全自动焊接质量的影响因素及管控措施[J]. 油气田地面工程, 2025, 44(05):41-46.
- [3] 郁腾达. 长输天然气管道工程施工过程中的质量动态监控[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(07):7-9.
- [4] 安志强. 基于天然气长输管道的防腐与防护策略分析[J]. 石化技术, 2023, 30(12):91-93.
- [5] 姚飞. 油气长输管道安装工程中的监理质量控制分析[J]. 新型工业化, 2022, 12(10):38-41.

作者简介：

张强（1988—），男，汉族，陕西凤翔人，本科，工程师，燃气（城市燃气/输配/站场）/设计院。