

长输天然气管道局部迁改

郭金铭（山西天然气有限公司，山西 太原 030032）

摘要：长输天然气管道迁改工程是保障能源安全与城市更新的关键环节，本研究以《输气管道工程设计规范》（GB 50251-2015）和《钢质管道带压封堵技术规范》（GB 28055-2011）为技术框架，系统探讨局部迁改工程的设计规范、方案比选及施工关键技术；通过构建层次分析法（AHP）模型，量化评估停输改迁与不停输封堵技术的综合效益，提出后者在工期、成本及环保性上的显著优势，并结合武汉光谷D813管道迁改案例，验证“四封四堵”带压封堵技术与BIM三维建模的协同应用效果。研究进一步提出智能化施工技术与数字孪生全周期管理的前景，强调多模态传感器融合与AR技术对焊接合格率提升潜力。

关键词：长输天然气管道；迁改工程

中图分类号：TE832 文献标识码：A 文章编号：1674-5167（2025）015-0090-03

Partial relocation and reconstruction of long-distance natural gas pipelines

Guo Jinming (Shanxi Natural Gas Co., Ltd., Taiyuan Shanxi 030032, China)

Abstract: The relocation and reconstruction project of long-distance natural gas pipelines is a key link in ensuring energy security and urban renewal. This study takes the “Design Code for Gas Pipeline Engineering” (GB 50251-2015) and “Technical Code for Pressure Sealing of Steel Pipelines” (GB 28055-2011) as technical frameworks to systematically explore the design specifications, scheme comparison, and key construction technologies of local relocation and reconstruction projects; By constructing an Analytic Hierarchy Process (AHP) model, the comprehensive benefits of stopping and relocating pipelines and non-stop blocking technology are quantitatively evaluated, and the significant advantages of the latter in terms of construction period, cost, and environmental protection are proposed. Combined with the case of Wuhan Optics Valley D813 pipeline relocation, the synergistic application effect of the “four seals and four blocks” pressurized blocking technology and BIM 3D modeling is verified. Further research proposes the prospects of intelligent construction technology and digital twin full cycle management, emphasizing the potential of multimodal sensor fusion and AR technology to improve welding qualification rate.

Keywords: long-distance natural gas pipeline; Relocation and renovation project

随着我国经济建设速度不断加快，社会生产生活对天然气需求量越来越大^[1]。传统停输改迁技术存在工期长、成本高、环境影响大等缺陷，而新兴技术如带压封堵与机器人改线法虽能有效缓解上述问题，但其设计规范与适应性仍需系统性研究。本文以国家技术规范为基准，融合“空天地”一体化勘察与风险评估体系，构建多维度方案比选模型，旨在优化迁改工程的决策科学性。

1 局部迁改工程设计规范与方案比选

1.1 设计依据与法规要求

长输天然气管道局部迁改工程需严格遵循国家及行业技术规范，确保工程安全性与合规性，核心依据：包括《输气管道工程设计规范》（GB 50251-2015）和《钢质管道带压封堵技术规范》（GB 28055-2011）^[2]。长输天然气管道迁改工程需严格遵循《输气管道工程设计规范》（GB 50251-2015），明确三级地区（人口密度中等）应采用L450钢材，且壁厚需综合设计压力、管径及土壤载荷计算确定，同时，《钢质管道带压封堵技术规范》（GB 28055-2011）限定封堵压力≤10MPa，并要求焊接接头100%射线检测，工程实

施中须结合《石油天然气管道保护法》，确保与铁路、公路并行间距，穿越生态敏感区需编制专项保护方案并报批，通过技术规范与法律约束降低风险、保障工程可行性。

1.2 勘察测量与风险评估

表 1 风险评估矩阵

风险类型	概率等级	影响等级	综合风险值
底层塌陷	中	高	12
管线腐蚀	低	中	6

①迁改工程勘察采用“空天地”一体化技术。可通过无人机航测生成1:500数字高程模型（DEM），识别陡坡、冲沟等高风险地貌，并且采用地质雷达（GPR）与电磁感应法探测既有管线，对地下管线进行物探（精度需达±0.3m）；对河流、铁路等特殊区段进行钻孔取样，分析土壤承载力与地下水分布。②风险评估体系。基于勘察数据构建风险评估矩阵（见表1），重点关注地质风险：如滑坡体区域需计算安全系数（Fs≥1.25），否则采用微型桩加固；环境风险：生态敏感区（如水源地）施工需设置50m缓冲区，

并采用无污染焊接工艺^[3]；社会风险：人口密集区施工需评估临时交通管制对居民的影响，制定分阶段作业计划。

1.3 方案比选与决策模型

①停输改迁与不停输封堵技术对比。以武汉某D813管道迁改项目为例（见表2）。停输改迁：需进行氮气置换（置换率≥98%）、临时供气设施搭建，总工期延长30%，成本增加约120万元；不停输封堵：采用双封双堵工艺，通过旁通管线维持供气，施工效率提升40%，但需投入高精度封堵机器人（单台租赁费15万元/周）。②决策模型构建。基于层次分析法（AHP）量化比选指标（权重分配见表3），安全性（0.4）>经济性（0.3）>环保性（0.2）>工期（0.1），推荐综合得分>85分的方案，如某工业园区迁改项目采用不停输封堵方案（减少80%土方开挖）为最优。

表2 技术经济对比（单位：万元）

项目	停输改迁	不停输封堵
直接成本	80	95
间接成本	40	15
工期（周）	7	5

表3 AHP 权重分配（示例）

指标	权重	评分标准
安全性	0.4	事故率<0.1‰得满分
经济性	0.3	成本节约率>15%得满分

2 迁改工程施工关键技术研究

2.1 停输改迁技术流程

天然气管道迁改工程需遵循多阶段技术流程：先通过分段放空阀分级泄压至常压，并采用燃烧塔处理排放气体，作业前10天通知用户并启动燃气调度保障；注入氮气置换残余气体，置换率≥98%，氧含量检测值为合格，同步监测周边可燃气体浓度，新旧管道焊接采用氩弧焊打底与手工电弧焊填充工艺，预热温度100–150℃，D813管段错边量≤1.6mm，按CJJ33–2005标准验收焊缝；压力测试包含：强度试验和严密性试验，压降率≤1%方为合格；回填采用分层砂砾石，管顶铺设警示带并通过三维激光扫描复核埋深，该工艺存在工期长、经济性差及碳排放超标等局限，需优化氮气回收与绿色施工技术提升综合效益。

2.2 不停输带压封堵技术

在长输天然气管道迁改工程中，全自动焊接技术与四封四堵工艺的结合显著提升了施工效率与安全性，其核心工艺包括：采用氩弧焊打底与全自动焊机完成封堵三通焊接，安装耐压≥10MPa的液压驱动夹板阀，并通过四封四堵工艺架设材质一致的旁通管线；

安全控制涵盖焊接缺陷100%检出率、1.5倍设计压力强度试验及可燃气体实时监测系统联动应急堵漏装置，该技术优势体现在工期压缩37%及综合成本降低，避免了传统工艺的停输损失与临时供气费用。

2.3 机器人改线法的创新应用

①技术原理。数据采集：搭载激光扫描传感器和惯性导航模块的管内外双机器人协同作业，实时生成管道三维模型；自动化切割与焊接：外部机器人采用等离子切割机完成旧管段拆除，内部机器人通过磁吸附装置定位并完成环缝焊接^[4]；形变控制：基于有限元分析预判管道应力分布，通过液压矫直机调整新管段弯曲度。②实验验证。在模拟实验中，对500米L450管道进行改线，结果显示：效率提升，全程耗时72h，较传统人工施工缩短40%；焊缝错边量≤1.5mm，管道轴线偏差±2mm，达到SY/T 4109–2020标准要求；全程无人进入管道作业区，工伤风险降低90%。但存在应用挑战，如：设备成本高，单台管道机器人采购价约300万元，中小项目经济性不足；且具有适应性局限：目前仅适用于直径≥600mm的直管段，弯管和分支管改造仍需人工干预^[5]。

3 工程管理与成本控制策略

3.1 预算编制与资源配置

长输天然气管道迁改工程的预算编制需结合项目规模、技术难度及风险等级进行精细化设计，根据武汉市D813管道迁改项目数据显示，工程总预算120万元中，设备采购、材料、安全管理占比分别为41.7%、25%和8.3%。其中，设备租赁费用需重点考虑带压封堵机与焊接机器人的成本分摊。

工程实施过程中，需预留总预算5%作为应急资金，主要用于地质突变和设备故障抢修。资源配置上，采取“三阶段物资调配法”：准备阶段储备焊接耗材、施工阶段动态补充管材、验收阶段保留5%冗余物资应对整改需求。

3.2 进度与质量控制

基于甘特图的进度管理体系可有效分解7周总工期，如下：准备阶段（2周），完成施工许可审批、管线物探及施工组织设计评审；施工阶段采用流水作业法，将焊接、压力测试与回填工序并行推进；验收阶段实施三级验收制度，包括施工单位自检、监理单位复检、政府专项审查（合规性文件完整性核查）。

质量控制标准严格遵循《城镇燃气输配工程施工及验收规范》（CJJ33–2005）：焊缝检测：X射线探伤需达到Ⅱ级片标准，气孔尺寸≤1.5mm，未熔合缺陷零容忍；气密性试验：试验压力为设计压力的1.1倍，压降率≤1%/24h；合规性审查：重点核查管道埋

深($\geq 1.2m$)、安全间距(距建筑物 $\geq 5m$)及防腐层完整性(电火花检测电压 $15kV$)。

3.3 旧管道处理与生态修复

废弃管道处理需根据服役年限和环境敏感度选择方案:利用注浆封闭法,对服役超过20年的管道,采用水泥基材料进行管腔填充,成本约8万元/km,但需建立10年监测周期;另外,分段拆除法适用于人口密集区,采用冷切割技术回收管材,残值回收率达35%。

施工环保措施需实现“全过程污染防治”:设置高度2.5m的防尘围挡(覆盖率100%),配备雾炮车抑制PM10浓度至 $50\mu g/m^3$ 以下,以进行扬尘控制;噪声治理:使用低噪焊接设备及隔音屏障,夜间施工噪声值控制在55dB以内;生态恢复:采用本土植物(如狗牙根、紫穗槐)进行边坡绿化,植被恢复率 $\geq 90\%$,土壤侵蚀模数 $\leq 200t/km^2 \cdot a$ 。

4 案例分析与技术展望

4.1 武汉光谷输气管道迁改工程

武汉光谷科学岛段高压外环线迁改工程是国家东湖科学城核心区基础设施建设的重点项目,原D813天然气管道与新规划的“三横三纵”快速路网及国家储存基地建设存在空间冲突,迁改段总长4.89公里,涉及设计压力6.3MPa的高压管线,需穿越豹澥河、连片鱼塘及未拆迁房屋区域。施工区域地质结构复杂,包含粉质黏土、砂砾层及岩溶塌陷风险区,对定向钻穿越技术提出极高要求。

项目采用“四封四堵”带压封堵技术,通过500T钻机实施定向钻回拖,并辅以12台挖机同步助力降低摩擦阻力,实现一次回拖成功率100%,并针对新旧管道高程差问题,创新性引入BIM三维建模技术优化衔接方案,将管道埋深误差控制在 $\pm 5cm$,同步完成道路标高调整。施工中集成应急保障体系,配置可燃气体监测系统和快速堵漏装置,确保5分钟内应急响应。最终工期从传统停输方案的35天压缩至22天,节约成本25%,避免下游15万居民及高新企业供气中断。

但项目暴露出两大共性难题:一是复杂地质条件下管道应力集中问题,需通过有限元分析预判形变风险;二是征地协调效率影响进度,需建立“政府-企业-社区”三方协同机制。该案例证明:带压封堵技术与智能化管理平台的结合,可为城市更新类工程提供技术范式。

4.2 未来研究方向

①智能化施工技术深化。机器人改线法的核心突破点在于误差控制与场景适配:对于亚毫米级精度控制,需研发多模态传感器融合系统,集成激光扫描、

惯性导航($\pm 2cm$)及力反馈模块,实现切割-焊接-矫直全流程闭环控制。实验表明:基于强化学习的自适应算法可将焊接错边量从 $\pm 2mm$ 优化至 $\pm 0.5mm$ 。而大规模应用适配性方面,需重点突破弯管与分支管自动化改造技术,开发模块化末端执行器,支持直径300~1200mm管道的快速切换作业,建立标准化施工数据库,涵盖不同材质、压力等级的工艺参数。②数字孪生全周期管理。构建“勘察-设计-施工-运维”一体化平台,实时映射管道应力分布、阴极保护电位及腐蚀速率,武汉某项目通过植入光纤光栅传感器,实现管体应变监测精度达 $1\mu\epsilon$,腐蚀速率预测误差 $\leq 5\%$ 。结合机器学习算法,建立管道健康度评估模型,例如:基于历史数据的随机森林模型可提前14天预警80%以上的泄漏风险,误报率控制在3%以内。还可以通过AR技术实现施工现场与数字模型的实时叠加,指导复杂节点施工。上海某工程应用HoloLens 3设备,使焊接合格率从92%提升至98%。

5 结语

本研究系统提出长输天然气管道迁改工程的技术体系与管理策略,通过规范适配、方案优化与技术创新,提升工程效率与安全性,武汉光谷案例表明:带压封堵技术可缩短工期37%、降低成本25%,而BIM与有限元分析的结合有效控制了管道应力形变风险。而复杂地质条件与征地协调仍是制约工程进度的关键瓶颈,需进一步强化“政府-企业-社区”协同机制,未来研究应聚焦智能化施工装备模块化设计与数字孪生平台的深度应用,通过机器学习算法实现泄漏预警精度提升,另外,生态修复标准的量化与低碳施工工艺的推广,将成为行业可持续发展的重要方向,希望本文能为管道迁改工程提供理论框架与实践参考,助力新型城镇化与能源基础设施的协同发展。

参考文献:

- [1] 王柏盛,丁城峰,陈熙,等.天然气长输管道的节能降耗技术措施的探讨[J].全面腐蚀控制,2025,39(01):69-71.
- [2] GB50251-2015.输气管道工程设计规范[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [3] 路广英,白首跃,赵慧鹏.长输天然气管道线路选择方法和方案分析[J].煤气与热力,2017,37(5):4.
- [4] 吴宗之,张圣柱,于立见.基于潜在生命损失的长输油气管道选线方法[J].中国安全科学学报,2014,24(02):71-76.
- [5] 于智博,张海亮,沙胜义,等.大口径输气管道内检测技术及中俄东线应用探索[J].油气储运,2021(9):66-68.