

城市复杂环境下燃气管道穿越工程的优化设计与风险控制分析

王超 (泰安市华能城市燃气工程设计有限公司, 山东 泰安 271000)

摘要: 本文以系统化探究城市复杂环境下燃气管道穿越工程的优化设计与风险控制为目的, 采取案例法、文献资料法与实际经验法分析。简要阐释燃气管道穿越工程概念并介绍了案例工程项目后, 重点围绕燃气管道穿越工程的优化设计与风险控制深入探索。研究表明燃气管道穿越工程的设计优化中可采用“GIS+BIM”协同优化路径与工法, 同时优化结构与防护设计; 而在工程建设的风险控制上, 要从地质与环境、技术与管理、管道本体等多方面来加以落实。

关键词: 城市复杂环境; 燃气管道穿越工程; 设计优化; 风险控制

中图分类号: TU996.7 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 035-0111-03

Optimization Design and Risk Control Analysis of Gas Pipeline Crossing Engineering in Complex Urban Environments

Wang Chao (Tai'an Huaneng Urban Gas Engineering Design Co., Ltd., Tai'an Shandong 271000, China)

Abstract: This paper aims to systematically investigate the optimization design and risk control of gas pipeline crossing engineering in complex urban environments, utilizing case study, literature review, and practical experience methods. After briefly explaining the concept of gas pipeline crossing engineering and introducing a case project, it focuses on an in-depth exploration of optimization design and risk control. Research indicates that the “GIS + BIM” collaborative approach can be used to optimize the path and construction methods in the design optimization of gas pipeline crossing engineering, while simultaneously optimizing structural and protective design. Regarding risk control during engineering construction, it should be implemented from various aspects including geology and environment, technology and management, and the pipeline itself.

Keywords: Complex Urban Environment; Gas Pipeline Crossing Engineering; Design Optimization; Risk Control

燃气是气体燃料的总称, 主要包括天然气、人工燃气、液化石油气与生物质气四大类。根据《中国天然气发展报告(2025)》数据显示, 2024年全国天然气消费量同比增长7.3%, 消费结构中城市燃气占比34%、工业燃料41%, 且国内天然气产量达2465亿 m^3 。燃气管道设施是城市基础设施的重要组成部分, 其安全运行直接关系到人民群众生命财产安全^[1]。但随着城市化进程的加快, 燃气管道穿越工程项目面临着城市环境愈发复杂, 比如体现在周边建筑物密集、地下管线与地质条件复杂上。在此背景下, 特探究燃气管道穿越工程的设计与相关风险的控制, 以期在丰富现有研究成果的同时也能提供有益参考。

1 燃气管道穿越工程概述

燃气管道穿越工程是通过定向钻进或开挖等方式将燃气管道铺设至河流、铁路、公路等障碍物下方或跨越其上的施工项目^[2]。其中, 定向钻穿越是利用专业钻机设备沿着预设的线路钻进, 绕过地下障碍物后牵引管道入孔, 其优势是施工精度高、对环境的污染小、不阻碍交通且工期短; 而开挖埋管法是通过机械

或人工开挖沟槽, 敷设管道后回填夯实, 更适用于地表无障碍物、需快速施工的区域。此外, 还有盾构或顶管法, 其适用于复杂地质或大管径穿越的场景。

2 工程概况

本工程为共青团路、九女山路(共青团路至高速段)次高压A天然气管道工程及共青团路北段中压天然气管道工程, 途径岱岳区共青团路、九女山路, 项目线路长度约为7km, 管线设计压力为1.5MPa, 管径DN600, 管道沿线新建2座阀门井, 工期要求75日历天。工程项目团队召开了动员大会, 设计、施工、监理、审计、评估等参建单位负责人均参与其中, 除了围绕管道路由设计、穿越施工等内容开展了图纸会审与技术交底, 重点明确管道涉河施工方案等关键技术参数, 并针对管道定向钻穿越等重难点工程制定专项攻坚方案。案例工程的设计与施工, 严格按照相关国家标准、行业标准及地方规范, 如《城镇燃气输配工程施工及验收标准》(GB/T 51455-2023)、《油气输送管道穿越工程施工规范》(GB 50424-2015)、《城镇燃气项目规范》(GB55009-2021)。

3 城市复杂环境下燃气管道穿越工程的优化设计

3.1 “GIS+BIM”协同，优化路径与工法

基于城市复杂环境下，燃气管道穿越工程的设计核心是“安全、最小干扰、经济合理，长期可靠”。在案例工程项目设计环节，可针对相同障碍（如主干道、河流）进行多种穿越工法的对比分析，实现对工法与路径的最优化设计。实践中，可采用“GIS+BIM”协同设计方案^[3]。

首先，GIS（Geographic Information System；地理信息系统）技术用于对宏观路径的优化设计中。提前将工程项目涉及的地下管线、地质、地形、构筑物、规划限制区等多源数据整合到GIS中，自动生成最优设计路径，避让燃气管道穿越中的关键设施、管线密集区、软土地层以及生态敏感区^[4]。

其次，BIM（Building Information Modeling；建筑信息模型）用于管道穿越微观设计与碰撞检测中。设计阶段，可建立燃气管道穿越工程及周围环境的3D模型，用BIM软件（如Navisworks）进行碰撞分析，直观地呈现出燃气管道与既有管线、地下结构存在的冲突，如“硬碰撞”（燃气管道与结构梁、柱间的直接冲突）、“软碰撞”（燃气管道与其他管线的间距不足，影响检修或安全距离）与“间隙碰撞”（燃气管道与电缆沟、锚索等设施的安全距离未达标）。在此基础上，生成冲突报告，后再根据报告修改燃气管道路径或标高，重复检查，实现设计优化。经“GIS+BIM”协同设计后，案例工程项目选择采用“定向钻穿越”的施工技术，以最大限度减少对交通、环境与市民生活的影响。

3.2 优化结构与防护设计

在案例工程燃气管道穿越的优化设计中，还着眼于管道结构完整性设计、防护与长期安全上。

首先，关于管道结构完整性设计。对于可能发生地层移动，如沉降、地震等区域，燃气管道的设计不应仅仅基于许用应力，而要采取“基于应变的设计方法”。即便是管道因特殊情况发生了弯曲与拉伸时，其应变水平仍处于材料延性允许范围中，防范管道发生断裂等问题。与此同时，基于GB 50028规范下，可在工程项目的燃气穿越段、燃气管道出入口等重要区域，选择使用L485M（X70）及以上级别的高韧性钢管来强化保障^[5]。

其次，关于防腐与长期安全的设计。通常会根据燃气管道穿越方式选择防腐层，而案例工程中采用了定向钻穿越，其防腐可通过构成“防腐涂层+阴极保护”联合保护体系来实现。在防腐涂层上，由于管道在回拖过程中与土壤和岩石剧烈摩擦，那么这对涂层的抗

冲击、抗磨损、抗划伤性能要求极高，可选择的采用有熔接环氧粉末、双层/三层聚乙烯、液态环氧或聚氨酯涂层。而在阴极保护上，方法有“牺牲阳极法”“外加电流法”。案例工程项目中采取了外加电流的方法，即通过直流电源和辅助阳极，强制向管道施加保护电流。最后，要重视穿越前后的检测与监测。回拖前，要对涂层进行100%电火花检漏，确保无漏点。穿越后，要检查两端管地电位。

4 城市复杂环境下燃气管道穿越工程的风险控制

4.1 地质与环境风险：加强监测勘察

在燃气管道穿越工程实践中，面临着地质与环境方面的风险，可能会导致施工中遭遇未知障碍物，顶进施工困难等。为预防控制此类风险，可采取的策略有：

首先，加强勘察，提升勘察精度。采用“地质钻探+GPR（地质雷达）+管线探测仪”联合勘察的方式，将精度尽量控制在±5cm内。提前收集现有的资料数据信息，包括市政管网图、地形图、地质图等，随后在规划的穿越路径中用电磁感应式管线探测仪进行扫描，精准标识出重要管线。沿穿越中心线及平行线布设GPR测线，再基于GPR解译出的异常区域来布置地质钻孔，获得更精准且全面的成果。

其次，制定预案。提前掌握案例工程项目中存在的不良地质段信息，制定详细的施工预案，从源头上规避风险。本项目所面临的水文地质条件复杂性，可能导致施工中出现各种风险与阻碍。因此，要定期检查与更换重要的设备设施，如定向钻机、钻杆、随钻测量系统、泥浆泵、万向节/旋转接头等，确保顺利^[6]。

最后，开展实时化监测。安排专业人员来对施工区域进行实时化沉降监测，设定预警阈值（10mm），一旦超标立刻报警并启动应急管理，对后续的施工参数合理调整。为实现智能化运维监测，还可将分布式光纤传感系统（DTS-测温，DAS-声振动传感）与管道一同敷设，实时化监测管道沿线异常问题（如温度异常）。

4.2 技术与管理风险：数据驱动决策

案例燃气管道穿越工程中采用了定向钻穿越施工，具体实践中可能发生的风险包括地质适配偏差、施工精度失控、设备失效和方案缺陷等多种，具体的防控措施如下：首先，落实三级技术交底，严格控制施工过程。施工前实施三级技术交底，即项目总工→施工员→作业人员，并利用直观的三维模型演示施工流程。随后，作业人员认真执行批准的施工方案与工艺规程，包括施工准备（现场勘察与测量方向、场地布置、设备进场、地下管线探测与合适、泥浆配置与

试验、管道预制与检验)、导向孔钻进(钻机就位与调试、钻进先导孔、随钻测量与轨迹控制、导向孔出土)、预扩孔(连接扩孔器、分级扩孔、泥浆管理与孔壁维护)以及管道回拖(连接回拖系统、管道回拖、断开)^[7]。其次,控制施工精度。采用“激光导向+惯性导航”的双系统定位,每2m记录一次轨迹数据,偏差若超过50mm,要及时调整顶进的参数,如速度、推力分配等。再者,实现信息化施工。合理运用数据采集系统,对施工中的关键设备参数,如压力、扭矩、姿态进行全面监控,一旦发现异常问题及时处理,实现数据驱动决策。最后,是对关键工序的旁站监督。针对于案例工程项目中的关键工序,可安排监理单位等主体进行旁站监督。若有异常状况,要及时进行提醒与处理,维护管道穿越工程顺利进行。

4.3 对既有设施影响风险:精准模拟与专项保护

案例燃气管道穿越工程采用了定向钻穿越施工技术,对周围土体的扰动是难以避免的。而施工引起的地层扰动,可能回影响到邻近的市政管线、地铁隧道甚至高架桥桩基,出现位移、沉降等后果。因此,要加强对既有设施影响的风险管控。首先,实施精细化数值模拟。在定向钻穿越施工前,用有限元软件(如PLAXIS、MIDAS GTS、ABAQUS)来模拟施工全过程,预测管道穿越可能对周围设施、构筑物造成的影响。其次,建立专项保护方案。基于上述数值模拟的基础上,再结合以往燃气管道穿越工程的经验来构建防护措施^[8]。防护措施的制定要联合产权单位,例如,针对邻近管线,可采用悬吊保护法、注浆保护法等;对于高架桥桩基,可采用临时托换法、隔离桩法等。最后,要构建自动化监测网络。自动化监测网络如同风险控制的“眼睛”。可在需要保护的关键设施上联合传感器,并安装性能良好的静力水准仪、测斜仪、应变计等,实现对可能发生的不均匀沉降、倾斜变形与应变的实时化监控。当然在完成监控的过程中,还要将监测数据上传到监控中心,形成可视化的曲线报告,便于工程项目负责人科学指导决策与管理。

4.4 管道本体与运营风险:全面保护与系统管理

管道本体与长期运营的风险包括多种,比如管道防腐层在施工中被划伤等,相关风险控制措施如下:首先,实现施工期的管道保护。及时检查管道防腐层的完整性,在顶进施工中要适当减少摩擦力。在管道组对与焊接环节,要使用内对口器精准对口,减少错边量。采用全自动焊(AW)来焊接,及时对每条环焊缝进行射线、超声波检测。其次,施工后进行管道内窥检测(CCTV)。将强度试验压力设置为设计压力的1.5,稳压24h,压力降 $\leq 1\%$ 表示结果为合格。

同时,定期利用漏磁检测器(MFL)或几何变形检测器对管道状态进行检查,分析是否有变形、金属损失等情况^[9]。再者,要制定严格的巡检制度。安排人员定期进行检查,比如检查燃气管道、支架等是否有物理损坏,管片是否有渗漏等,均予以详细记录。最后,要建立安全防护区。依法划定管道安全防护区,设置醒目标识,严禁开展未经审批的施工活动。同时,在安全防护区域内可布设光纤预警系统和视频监控,防患于未然。若已经出现紧急情况,要执行应急响应流程。

5 小结

综上所述,处于城市复杂环境下,燃气管道穿越工程设计面临着更多的挑战,也面临着更多未知的风险问题。在设计阶段,可采用“GIS+BIM”协同法对路径与工法进行优化,并从管道结构完整性、管道防腐与安全上进行结构与防护设计的优化。在管道穿越工程的风险控制中,主要策略包括加强监测勘察、制定预案、三级技术交底,严格控制施工过程、控制施工精度、信息化施工、精细化数值模拟、建立专项保护方案、构建自动化监测网络、管道保护与内窥检测等。相信通过构建覆盖“地质与环境—技术与管理—对既有设施影响—管道本体与运营”等多方面的风险控制体系,能有效保障燃气管道穿越工程的顺利稳定开展。

参考文献:

- [1] 江山. 顶管施工技术在燃气管道穿越城市道路中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2025(11).
- [2] 苗旭明. 燃气管道定向穿越施工技术应用研究[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2024(003):000.
- [3] 谢海波. 浅谈燃气管道工程非开挖定向穿越技术应用[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2023.
- [4] 秦睿孜. 浅谈燃气项目管道施工中的水平定向穿越施工[J]. 建筑技术研究, 2020, 3(2).
- [5] 陶雪平. 城市燃气管道非开挖定向穿越施工技术研究[J]. 中国化工贸易, 2025(17).
- [6] 刘莉. 燃气管道定向穿越施工技术研究[J]. 石油石化物资采购, 2023(4):94-96.
- [7] 刘忠举. 燃气管道工程非开挖定向穿越技术应用研究[J]. 石化技术, 2025, 32(09):127-129.
- [8] 方金水. 燃气管道工程水平定向钻穿越砂层敷设施工技术研究[J]. 新城建科技, 2024, 33(03):157-159.
- [9] 闫喜彬. 水平定向钻穿越施工技术在城市燃气管道工程中的应用[J]. 居业, 2023, (05):10-12.