

新用户开发背景下天然气管道工程环境影响评估与优化设计

宋海峰（济南济华燃气有限公司，山东 济南 250300）

摘要：针对新用户开发背景下天然气管道需穿越复杂地貌与环境敏感区的挑战，构建了AHP-GIS-MCE集成的多准则环境影响评估模型，并以南山市东部新区36.5km管道工程为实例展开实证研究。通过专家判断矩阵计算各指标权重并在GIS平台实现空间量化，最终生成环境敏感性栅格图并导入最小累积阻力模型进行路径优化。结果表明，生态敏感性权重最高（0.518），低中敏感区域合计占比69.39%，优化路径有效规避高敏区，为类似工程提供了环境友好型决策依据。

关键词：天然气管道工程；环境影响评估；多准则决策；地理信息系统

中图分类号：TE832 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)034-0094-03

Environmental impact assessment and optimization design of natural gas pipeline engineering in the context of new user development

Song Haifeng (Jinan Jihua Gas Co., Jinan Shandong 250300, China)

Abstract: In response to the challenge of natural gas pipelines traversing complex geographical and environmentally sensitive areas in the context of new user development, an AHP-GIS-MCE integrated multi-criteria environmental impact assessment model was built, and empirical research was conducted on the 36.5 km pipeline project in Nanshan East New Area as an example. The weight of each index is calculated by expert judgment matrix and quantified in GIS platform. Finally, the environmental sensitivity grid map is generated and the minimum cumulative resistance model is imported to optimize the path. The results show that the weight of ecological sensitivity is highest (0.518), and the low-to-medium sensitivity areas account for 69.39% of the total. The optimization path effectively avoids high-sensitivity zones, providing an environmentally friendly decision-making basis for similar projects.

Keywords: natural gas pipeline engineering; Environmental impact assessment; Multi-criteria decision making; GIS

随着天然气主干网向未开发地带延伸，管道选线不得不穿越生态脆弱区、人口聚集带以及断层褶皱密集段，叠加的约束使施工许可难度陡增^[1]。既有环评流程侧重单体污染指标，缺少把地形、土地利用、人群分布同步纳入比对的路径，结论常滞后于现场决策。为此，研究建立AHP-GIS-MCE耦合框架，先通过一对比较排出各环境因子权重，再将遥感、地质、社会调查多源图层输入平台，生成敏感等级栅格，最终把量化结果反馈给线路比选模块，为清洁气体快速通达新区提供可落地的减量方案。

1 天然气管道工程环境影响多准则评估方法设计

1.1 基于AHP-GIS-MCE的评估

在新用户开发背景下，天然气管道工程需穿越多样地貌与人类活动密集区，环境敏感性显著增强，需构建集成AHP-GIS-MCE的多准则环境影响评估框架以实现高精度空间决策支持。该体系目标层为“管道工程环境适宜性”，准则层涵盖“生态敏感性”、“社会敏感性”与“工程地质稳定性”，指标层则具体化为距水源保护区距离、土地利用类型、居民点密度、

坡度等地表因子。所有指标因子均须在GIS平台内进行空间数据化处理，将矢量数据（如保护区边界、居民点）通过缓冲区分析或核密度分析转换为栅格图层，将高程模型（DEM）数据派生出坡度图层，并将所有栅格数据统一坐标系、分辨率及像元值分级标准^[2]。各指标因子的相对重要性，采用层次分析法（AHP）进行量化，通过构建专家判断矩阵，计算其权重向量并执行一致性比率（CR）检验，确保赋权的逻辑一致性。最终，该框架的核心是应用多准则评估（MCE）的加权线性组合（WLC）模型，在GIS环境中将各标准化后的单因子敏感性栅格图层与其AHP权重值进行乘积累加，生成一幅综合性的环境敏感性空间结构。

1.2 模型计算与分析流程设计

1.2.1 权重计算流程

权重计算流程采用层次分析法（AHP）以确保评价因子的相对重要性得到客观量化。该流程始于构建专家判断矩阵 $A=(a_{ij})n \times n$ ，其中 a_{ij} 为因子 i 相对于因子 j 的重要性标度值。随后，采用幂法或和积法计算该矩阵的最大特征根 λ_{max} 及其对应的归一化特征向

量 $W=(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, 此向量即为各评价因子的权重集。为保证判断矩阵的逻辑一致性, 必须进行一致性检验, 其核心是计算一致性比率 CR, 计算过程如式(1) :

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \div RI \quad (1)$$

式中: CI 为一致性指标; n 为判断矩阵的阶数; RI 为平均随机一致性指标, 其值由阶数 n 查表确定。当计算结果满足 $CR < 0.1$ 时, 判断矩阵被认为具有满意的一致性, 所求得的权重向量 W 有效, 可用于后续的综合评价; 若不满足, 则需调整判断矩阵直至检验通过^[3]。

1.2.2 综合敏感性计算模型

综合敏感性计算模型采用基于 GIS 的加权线性组合 (WLC) 方法, 旨在将多源异构的单因子评价图层与 AHP 确定的权重相结合, 生成一个能够全面反映研究区环境制约程度的空间分布图。该模型对每一个栅格单元执行叠加运算, 将各标准化后的因子图层的像元值与其对应的权重相乘后求和, 从而得到该单元的综合敏感性指数 S。该计算模型通过 GIS 平台的栅格计算器 (RasterCalculator) 工具实现, 其数学表达式如式(2) :

$$S = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i \quad (2)$$

式中: S 为栅格单元的综合环境敏感性指数; w_i 为第 i 个评价因子的权重, 由 AHP 计算得出; x_i 为第 i 个评价因子经过标准化处理后的栅格图层像元值; n 为评价因子的总^[4]。运算的最终成果是一幅连续的栅格表面, 其像元值越高, 表明该区域的环境敏感性越强, 管道工程建设的潜在环境影响越大, 适宜性越低。

1.2.3 路径优化算法

路径优选工作以最小累积阻力思路为框架, 把全域敏感性格网图视作费用面, 系统自动搜寻起点至终点之间穿越该面时费用总和最低的通道, 其中费用大小直接对应管线铺设对周边环境带来的整体扰动^[5]。运行流程先固定起点并输入费用面, 借助成本距离运算逐格推算自起点到任意格子的最小费用叠加值, 形成一张完整的费用叠加面; 随后在该面上从既定终点出发, 沿坡度最陡下降方向反向追踪至起点, 所得轨迹即为最小累积阻力通道, 其关键运算形式如式(3):

$$LCP = \sum_{i=1}^n C_i \cdot D_i \quad (3)$$

式中: LCP 为最小累积阻力路径; C_i 为路径上第 i 个栅格单元的阻力值 (即综合敏感性指数); D_i 为在第 i 个栅格单元上的移动距离。此算法生成的路径在空间上最大限度地规避了高敏感性区域, 是理论上

的环境最优路径方案。

2 新用户开发背景下管道工程环境影响的实证分析

2.1 项目概况与数据采集

实证验证以南山东部新区天然气输配管线为样本, 线路自南山分输站起, 至规划中的城市门站止, 全长 36.5km, 主要向新区工业园与高密度住宅区供给清洁能源。沿途地形起伏明显, 包括低山丘陵、河谷阶地与冲积平原, 并穿越基本农田、生态公益林及多个乡镇边缘, 社会与环境敏感目标密集, 属于新用户扩张背景下面临多类约束的典型管道项目。为让评估模型顺利运行, 先按多源、高精度原则采集基础资料。高程信息来自 NASAASTERGDEM V3, 栅格间距 30m, 可提取坡度与坡向; 土地利用层由 2023 年 Landsat9 影像经监督分类获得, 同样保持 30m 分辨率, 划分为耕地、林地、建设用地等 8 类; 南山市自然资源和规划局提供的 CGCS2000 矢量数据涵盖水源保护区、自然保护区界线及断裂带; 居民点、学校、医院等兴趣点通过地理信息接口爬取, 用于核密度分析以衡量人类活动强度。上述资料统一在 ArcGIS10.8 完成坐标匹配, 再经欧氏距离与缓冲区计算, 将矢量结果转为与高程数据一致的栅格, 形成后续评估所需的空间数据库。

2.2 评估计算过程与结果

2.2.1 权重计算与数据标准化

采用层次分析法对评价指标体系进行赋权, 通过构建专家判断矩阵, 利用软件计算其最大特征根与归一化特征向量, 并完成一致性检验 (所有 $CR < 0.1$), 并在 GIS 环境中对所有单因子栅格图层进行标准化处理。对坡度、距离等连续型数据采用模糊隶属度函数进行归一化; 对土地利用类型等离散型数据则根据其环境敏感程度直接赋予 1~5 级的分级评价值。各指标的最终权重分配结果见表 1。

表 1 天然气管道工程环境影响评价指标体系权重

准则层 (权重)	指标层	指标权重	组合权重
生态敏感性 (0.518)	距水源保护区距离	0.473	0.245
	土地利用类型	0.303	0.157
	植被覆盖指数 (NDVI)	0.152	0.079
	距河流距离	0.072	0.037
社会敏感性 (0.299)	居民点密度	0.539	0.161
	距交通干线距离	0.268	0.080
	距基本农田保护区距离	0.193	0.058
工程地质稳定性 (0.183)	坡度	0.637	0.117
	距地质断裂带距离	0.363	0.066

表 2 研究区环境敏感性等级划分与面积统计

敏感性等级	敏感性指数范围	面积 (km ²)	占比 (%)	空间分布特征
低敏感区	1.00-1.89	59.81	35.35	平原耕地、林地
中敏感区	1.89-2.67	57.62	34.04	丘陵地带、农村居民点外围
高敏感区	2.67-3.52	33.05	19.53	河流廊道、交通干线沿线
极高敏感区	3.52-4.88	18.75	11.08	水源保护区、城镇中心区、陡坡

权重计算结果显示，准则层中“生态敏感性”(0.518)权重值最高，表明生态要素是本工程环境制约的首要因素。在所有指标的组合权重中，“距水源保护区距离”(0.245)和“居民点密度”(0.161)位列前两位，这直接反映了水源安全与公众利益是路径选择中必须优先规避的核心敏感目标。

2.2.2 综合敏感性评价

在ArcGIS平台中，基于加权线性组合(WLC)模型，将各标准化单因子栅格图层与其对应的组合权重进行乘积累加，生成综合环境敏感性栅格图谱。为便于空间分析，采用自然断点法(Jenks)将该连续图谱划分为低、中、高、极高四个敏感性等级。各等级的面积统计与空间分布特征见表2。

综合敏感性测算显示，低敏感与中敏感地块占全域69.39%，为线路走向预留了较大可选余地；剩余30.61%落入高敏感与极高敏感范畴，虽面积比例不高，却呈明显簇状聚集。极高敏感带基本落在水源保护范围及已建城区等必须绕避的位置，高敏感带则紧贴河道、公路干线呈条带状延伸，两者共同形成选线阶段的核心空间限制。

3 基于评估结果的天然气管道工程优化设计

3.1 路由廊道划定与局部线位微调设计

在LCP模型输出的优选轴线基础上，先开展走廊带的落地化与细节布置工作。以低、中敏区为例，向左右各留300m缓冲带，为机械进场与堆料保留回旋空间；进入高敏区后，缓冲带压缩到100m，用空间刚性边界锁住摆动幅度。随后把0.2m分辨率的DOM与LiDAR点云叠进走廊，对理论轴线实施局部再调。再调过程同步校核转角不超容许应力限值，躲开扫描阶段才显现的独栋房屋、单棵大树和小面积水塘，并与既有道路及电力线维持规范间距。最终给出带CGCS2000转点坐标、整千米桩号及连续方位角的平面线位图，使宏观环境风险避让结果与施工技术规则在同一套图里闭合。

3.2 关键敏感点非开挖穿越工程设计

针对选线中必须贯穿的河道、等级公路与铁路等

线性敏感目标，非开挖作业被确定为唯一可行手段，以彻底消除对地表的扰动风险。河道区段首先被纳入评估：水平定向钻被确定为施工方式，入钻点和出钻点与堤脚的距离被设定为不少于50m；曲线段最小曲率半径取值在管道允许弯曲半径基础上再放大1.2倍；管道顶至河床底的最小覆土厚度被控制在8m以上，使冲刷作用无法触及管体。公路与铁路区段则选择顶管或夯管方式，顶推力经过详细反算，管材等级与接口构造被同步优化；地表沉降监测方案另行编制，施工期间所获数据实时反馈，保证道路与铁路的运行安全不受干扰。每一处穿越点均单独成册，图纸包含平面布置、纵断示意及关键尺寸，为后续施工提供完整依据。

4 结语

研究通过融合层次分析法与GIS空间建模手段，实现了天然气管道工程环境影响的多维度量化评估与路径优化设计。南山市实证结果显示，生态敏感性为首要制约因子，优化路径在满足技术规范的前提下显著规避了占比30.61%的高敏感区域。局部微调与非开挖穿越方案提升了工程适应性，生态恢复措施则增强了系统可持续性。本文模型适用于不同地理情境下的环境友好型选线任务，未来可引入动态数据更新机制，进一步提升实时决策能力与环境响应性。

参考文献：

- [1] 朱凯,董国庆,曲彦东,等.输氢管道技术发展现状及挑战[J].油气与新能源,2025,37(05):125-130+136.
- [2] 申芳林,魏刚,郭崇.长输天然气管道高后果区识别与隐患评估的质量优化路径研究[J].中国品牌与防伪,2025(13):129-131.
- [3] 曹雄乾.长输天然气管道高后果区识别与风险管理研究[J].石化技术,2025,32(10):123-125.
- [4] 张若诚,李昱,方学锋,等.天然气管道阀门井安全状态在线监测系统研发[J].化学工程与装备,2025(09):102-104.
- [5] 黄明辉.浅谈天然气管道安全风险及防范措施[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(17):55-57.