基于 GIS 的公路工程沿线设施空间布局优化

冯晨琦[1]　杨　晖[2]
1. 中铁长江交通设计集团有限公司　重庆　401121
2. 重庆高速建设管理有限公司　重庆　401120

摘　要：针对山区高速公路沿线设施布局失衡、服务盲区与资源冗余并存、应急保障能力不足等问题，本文以典型山区高速为研究对象，依托 GIS 空间分析技术，结合多目标优化理论与 AHP 权重评价模型，构建一体化设施布局优化模型。通过仿真推演完成设施增补、迁移与整合优化，量化验证优化方案成效。结果表明，方案可大幅提升服务覆盖率与应急效率，兼顾经济与生态效益，可为山区公路设施规划提供科学参考。

关键词：GIS；公路工程；沿线设施；空间布局优化

引言：公路沿线设施是保障道路安全通行、提升交通服务质量的核心基础，其空间布局合理性直接影响公路运维效率与服务水平。山区公路地形复杂、生态约束严苛，现有设施多存在布局不均、适配性差等问题，传统经验式规划难以满足精细化建设需求。为破解山区公路设施配置难题，本文引入 GIS 技术与智能优化算法，开展设施空间布局优化研究，旨在构建科学高效、生态适配的设施布局体系，助力山区公路交通高质量发展。

1 相关理论与技术基础

1.1 公路沿线设施相关概述

（1）公路沿线设施分类：依据功能属性，公路沿线设施划分为养护设施（如工区、应急物资储备点）、服务设施（服务区、停车区）、安防设施（护栏、标志标线）及交通附属设施（监控、通信设备）。此分类是布局规划的基础。（2）设施布局核心原则：安全性原则为首要，确保设施设置不干扰行车视距与交通安全；服务均等化原则要求设施间距合理，保障服务公平覆盖；经济性原则强调建设运维成本集约；生态适配性原则要求设施选址避让生态敏感区，降低环境扰动。（3）设施布局核心影响因素：交通流量决定设施规模与承载需求；地形地貌制约场地选择与工程难度；人口分布影响服务需求密度；生态环境限定可建设区域；运维成本综合影响长期效益，是优化配置的关键约束[1]。

1.2 GIS 核心技术理论

（1）GIS 空间数据处理技术：包含矢量与栅格数据模型。矢量数据用于精准表达道路、设施点位等离散要素；栅格数据适于表达地形、植被等连续分布信息。数据采集后需经清洗与校正，消除误差，确保空间基准统一与属性完整。（2）GIS 空间分析技术：缓冲区分析用于识别设施影响范围；叠加分析综合多图层信息，辅助适宜性评价；网络分析用于最优路径与可达性计算；空间插值分析（如克里金法）可推演未测区域的空间属性分布，为设施布局提供连续信息支撑。（3）GIS 可视化与建模技术：通过符号化渲染、三维场景构建等手段实现空间数据直观表达。地理建模技术可将选址规则、约束条件量化为参数化流程，支撑方案的动态推演与比选，提升布局决策的科学性与可解释性。

1.3 设施布局优化核心理论模型

（1）多目标优化理论：设施布局需兼顾经济效益最大化、服务效能最优化与生态环境影响最小化。通过设定多目标权重分配策略（如加权求和法），可在不同目标间寻求均衡解，支撑科学决策。（2）设施选址优化模型：中心地理论指导设施等级体系与辐射范围划分；最小成本选址模型侧重运输与建设成本最小化；最大服务覆盖模型追求有限设施数量下服务人口或区域的最大化覆盖，三类模型分别适用于不同决策场景。（3）权重评价模型：层次分析法（AHP）通过构建递阶层次结构、专家两两比较判断，计算各影响因子的主观权重，并结合客观数据进行一致性校验，有效处理定性与定量因素，适用于复杂地形与多约束条件下的设施布局适应性评价。

2 公路工程沿线设施现状分析与 GIS 数据构建

2.1 研究区域概况与数据采集

（1）研究区域概况：研究路段为某典型山区高速，全长 120km，双向四车道，连接中心城市与沿线三县，呈“一主多支”格局。地形以中低山丘陵为主，属亚热

带湿润季风区，年均降雨量 1100mm。沿线 4 个乡镇，常住人口 18 万，农业与旅游业主导，交通需求季节性波动明显。（2）基础数据采集：路网数据源于高德开放平台及交通部门普查，含道路等级、车道数、限速等；设施点位经实地调研与卫星影像核校，涵盖服务区、养护工区、监控点；地形采用 30mASTERGDEM；交通流量来自收费站连续 12 个月观测；生态红线取自省级自然资源厅矢量图层。（3）数据预处理：剔除重复记录与冗余字段；统一坐标至 CGCS2000，实现多源空间匹配；采用均值替换与线性插值修正流量缺失值；基于四分位距法剔除异常记录，确保数据准确性与一致性，为后续空间分析奠定基础。

2.2 公路沿线设施空间布局现状问题分析

（1）设施分布均衡性分析：基于 GIS 核密度估计与最近邻指数法，对研究路段沿线养护、服务、安防及附属设施进行空间可视化制图。结果显示，设施呈明显“城区周边密集、偏远路段稀疏”的集聚分布格局，约 65%的设施集中分布于全长 35%的路段范围内，山区段设施间距均值达 22.5km，远高于规范建议值，均衡性较差。（2）设施服务覆盖性分析：以服务设施 15 分钟车行半径与养护设施 30 分钟应急响应时间为阈值，构建缓冲区分析模型。结果表明，全线存在 4 处显著服务盲区，总长度约 18.7km；同时，在城镇临近区域出现 3 处设施重叠冗余覆盖区，平均重叠半径约 2.3km，表明资源投放的空间配置缺乏精准匹配[2]。（3）现状核心问题总结：综合以上分析，现状问题可归纳为四方面：一是设施布局与交通需求空间分布匹配度低，山区段供给不足；二是设施服务覆盖存在盲区与重叠并存的结构性矛盾；三是养护与安防设施响应时效不达标，应急保障能力薄弱；四是部分设施选址未充分考虑地形与生态约束，导致建设运维成本偏高、生态适配性差。

2.3 布局优化评价指标体系构建

（1）指标选取原则：遵循科学性（指标内涵明确、理论基础充分）、系统性（全面反映多维度影响）、可量化（指标便于采集与计算）、针对性（紧密契合公路设施布局特征）四项原则，确保指标体系兼具理论完备性与工程实用性。（2）多层级指标体系搭建：构建目标层、准则层与指标层三级架构。目标层为设施布局综合优化度；准则层设经济成本、服务能力、生态保护、安全保障四大维度。指标层涵盖建设运维成本、用地费用、日均服务车次、覆盖半径达标率、应急响应时间、生态敏感区避让率、地形适宜度、事故黑点密度等 12 项具体指标，形成层次清晰、内涵完整的评价体系[3]。（3）指标权重确定：采用层次分析法，邀请 10 位公路工程与交通规划领域专家，基于 1—9 标度法对准则层及指标层各要素进行两两比较判断，构造判断矩阵并计算各指标主观权重。经一致性检验（CR < 0.1），权重通过有效性验证。而后采用极值法对各指标原始数据进行无量纲化标准化处理，统一量纲与数量级，为后续多目标优化模型求解提供规范化输入数据。

3 基于 GIS 的公路工程沿线设施空间布局优化模型与实证

3.1 空间布局优化模型构建

（1）模型构建思路：以第 3 章识别的设施布局失衡、服务盲区并存、资源效率偏低等问题为导向，集成 GIS 空间分析与多目标优化理论，构建“数据驱动—空间约束—算法寻优”三位一体模型。核心逻辑为：在满足多类空间约束下，以综合效益最大化为目标，通过空间运算生成设施增补、迁移与保留的优化方案。（2）模型约束条件设定：依据区域特征设定五类约束。地形约束：选址坡度≤ 15°、海拔≤ 900m；生态约束：避让生态保护红线与水源保护区，避让距离≥ 500m；交通约束：服务路段日均交通量≥ 2000pcu/d；成本约束：新增设施建设总成本≤ 年度预算 1500 万元；服务半径约束：设施间距≤ 30km，养护应急响应时间≤ 45 分钟，确保约束体系兼具规范性与区域适配性[4]。（3）优化算法融合：采用 GIS 网络分析提取路网拓扑与可达性参数，构建服务覆盖网络模型。嵌入带精英策略的非支配排序遗传算法（NSGAII），以选址组合为决策变量，以服务覆盖率最大化、建设运维成本最小化、生态影响最小化为三维目标，经 200 代种群迭代，求解帕累托最优解集，供决策者按区域发展优先级遴选最终方案。

3.2 基于 GIS 的设施布局优化仿真分析

（1）设施点位优化：基于优化模型计算结果，对全线 83 处现有设施进行分类处置。筛选出低效设施（日均服务量低于阈值 30%）共 12 处，建议改造降级或合并功能；识别缺位设施区域（服务半径超标或存在盲区）共 7 处，规划新增综合服务点 3 处、应急养护点 4 处；判定不合理设施（位于生态敏感区或坡度超标）共 5 处，制定迁移方案，依托 GIS 最短路径分析确定迁移候选新址，确保迁入点位各项约束达标。（2）设施服务范围优化：以新增与迁移后设施点位为基础，重新生成 500m、1km、3km 三级服务缓冲区，通过叠置分析识别重叠冗余区域与尚未覆盖缺口。经反复迭代调整，将服务区重叠率由现状的 28%压缩至 12%以内，盲区长度由 18.7km 缩减至 3.2km，全线服务覆盖率由 72.6%提升至 96.8%，实现覆盖效能的结构性

改善。（3）布局方案量化输出：生成优化后设施空间分布图谱一套（比例尺 1:50000），标注保留（61 处）、迁移（5 处）、新增（7 处）、合并（10 处）四类设施空间位置及属性信息。配套输出设施点位坐标表、服务覆盖范围矢量图层、各设施对应建设成本估算明细表，形成包含图文、矢量与属性数据的多源成果包，为后续方案审议与施工设计提供精准数据支撑。

3.3 优化方案效果评价与对比分析

（1）优化前后指标对比：从四大维度进行量化对比。服务覆盖率由 72.6% 升至 96.8%，应急响应平均时间由 39.7 分钟降至 28.4 分钟；建设运维年度总成本由 1280 万元调整为 1350 万元，增幅仅 5.5% 但服务效能提升 33%；生态敏感区避让率由现状 82% 提升至 100%；设计通行效率（基于路段服务水平）由 0.68 升至 0.85，接近一级服务水平阈值，综合效益改善显著。（2）方案可行性验证：结合研究区域实际路况、地形地质条件及地方交通发展规划，逐项复核新增设施选址的地质承载力、用地审批条件与施工便道接入可行性。经与地方自然资源局、交通局初步对接，7 处新增选址中 6 处符合土地利用总体规划，1 处需微调，迁移设施新址均不涉及征地拆迁难点，总体落地性较强，具备工程实施基础。（3）优化方案优势总结：方案的系统性优势集中体现在三方面：一是实现了 GIS 空间分析从可视化展示向决策推演的功能跃升，将定性选址经验转化为定量优化流程；二是多目标模型有效平衡了经济、服务与生态之间的内在冲突，提供了可供选择的帕累托方案集；三是全套优化逻辑与数据成果可迁移至同类山区公路设施布局规划，具备较强的复制推广价值，彰显了 GIS 技术赋能设施布局优化的核心应用成效。

3.4 公路沿线设施布局优化实施建议

（1）设施规划建设优化建议：新建服务设施选址应优先保障应急响应半径达标，同步配套新能源补给、无障碍通行等现代功能模块；养护设施采取“中心站 + 巡查点”分级配置模式，降低单点建设规模；安防设施在事故黑点与连续纵坡路段加密布设，实现设施功能与路段风险等级精准匹配。各类设施建设标准应参照最新公路工程相关规范，并结合山区实际进行差异化适度调整。（2）运维管理优化建议：构建基于 GIS 的智能化设施管理平台，集成设施位置、运维记录、实时状态监测等多元信息，实现“一张图”动态管控。利用 GIS 移动终端开展日常巡检与养护任务派发，依托空间数据库定期生成设施运行评估报告，及时预警效能退化设施，形成“监测—评估—维护”闭环管理流程，全面提升长效运维能力[5]。（3）长效规划管控建议：建立“年度评估、三年滚动”的动态布局优化机制，每年依据交通流量变化、路网结构演变与区域发展规划更新基础数据库，每三年开展一轮设施布局适应性复评。预留规划弹性空间，对新增设施选址地块实施空间预控，确保未来交通需求增长与设施供给能力保持动态平衡，为公路沿线设施的可持续发展提供制度保障。

结束语

本文结合 GIS 空间分析与多目标优化算法，完成山区公路沿线设施布局现状研判、模型构建、方案优化与成效验证，有效解决了设施布局失衡、服务效能不足等核心问题。优化方案实现了服务、经济、生态与安全效益的协同提升，落地可行性较强。研究形成的量化优化流程与技术体系，可适配同类山区公路规划场景，后续可完善动态迭代机制，持续提升公路设施智能化规划与长效运维水平。

参考文献

[1] 朱志豪. 基于 GIS 空间分析的公路沿线便民服务设施布局优化 [J]. 交通科技,2025,21(04):156-160.

[2] 黄俊, 林泽宇. 基于 GIS 多准则决策的公路安防设施空间布局优化 [J]. 工程勘察,2024,52(11):67-72.

[3] 廖文彬. 智慧交通背景下基于 GIS 的公路设施空间规划优化 [J]. 道路交通与安全,2024,24(03):45-50.

[4] 李岩, 陈永锋, 张军. 基于 GIS 的公路沿线公共服务设施空间布局优化研究 [J]. 公路交通科技,2023,40(06):189-196.

[5] 张鹏程, 吴睿. 基于 GIS-AHP 的山区公路沿线设施布局适宜性评价 [J]. 公路,2022,67(09):178-183.