

## 山区高速公路施工路况感知设备选址与施工物料运输路径协同优化

刘春舵<sup>1</sup>, 袁永辉<sup>1</sup>, 王旭东<sup>1</sup>, 江泽浩<sup>2,3</sup>, 刘聪健<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup> 中海建筑有限公司 贵州贵阳

<sup>2</sup> 华中科技大学土木与水利工程学院 湖北武汉

<sup>3</sup> 国家数字建造技术创新中心 湖北武汉

**【摘要】目的** 为解决山区高速公路施工中因路况信息缺失导致的物料运输效率低、成本高问题, 提出一种结合雷视一体机布设与运输路径优化的协同优化方法。**方法** 构建双层优化模型, 上层以综合成本最小化为目标优化雷视一体机布设方案, 下层在此基础上优化运输路径以最小化运输时间, 通过迭代算法实现上下层协同优化, 并以案例验证模型的有效性和鲁棒性。**结果** 案例分析表明, 协同优化方案将平均运输时间减少 33.8%, 总成本降低 19.4%, 显著提升了运输效率和成本效益。敏感性分析显示模型对不同参数变化具有较强鲁棒性。**结论** 提出的双层优化模型通过协同优化显著降低了运输时间不确定性和工期延误损失, 为复杂施工环境下的物料运输提供了理论支持和实践参考。

**【关键词】** 山区高速公路施工; 雷视一体机选址; 运输路径优化; 双层优化模型

**【基金项目】** 湖北省自然科学基金(2024AFD410); 中海建筑有限公司科技项目(ZHJ-GZ-KJ-009); 华中科技大学与新南威尔士大学联合科研种子基金项目

**【收稿日期】** 2024 年 11 月 26 日 **【出刊日期】** 2025 年 1 月 18 日 **【DOI】** 10.12208/j.jer.20250001

### Collaborative optimization of construction road sensing equipment siting and construction material transportation paths on mountain highways

Chunduo Liu<sup>1</sup>, Yonghui Yuan<sup>1</sup>, Xudong Wang<sup>1</sup>, Zehao Jiang<sup>2,3</sup>, Congjian Liu<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>China Overseas Construction Limited, Guiyang, Guizhou

<sup>2</sup>School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei

<sup>3</sup>National Center of Technology Innovation for Digital Construction, Wuhan, Hubei

**【Abstract】Objective** To address the challenges of low transportation efficiency and high costs caused by the lack of road condition information during highway construction in mountainous areas, a collaborative optimization method integrating radar-camera device deployment and transportation route planning is proposed. **Methods** A bi-level optimization model is developed, with the upper level minimizing total costs by optimizing the deployment of radar-camera devices, and the lower level minimizing transportation time based on the deployment plan. Collaborative optimization is achieved through an iterative algorithm, and the model's effectiveness and robustness are validated through case studies. **Results** Case analysis shows that the collaborative optimization method reduces average transportation time by 33.8% and total costs by 19.4%, significantly improving transportation efficiency and cost-effectiveness. Sensitivity analysis demonstrates the model's strong robustness to parameter changes. **Conclusion** The proposed bi-level optimization model effectively reduces transportation time uncertainty and project delay costs through collaborative optimization, providing theoretical support and practical reference for material transportation in complex construction environments.

**【Keywords】** Mountainous highway construction; Perception device placement; Transportation route optimization; Bi-level optimization model

\*通讯作者: 刘聪健

## 1 研究背景

中国山区面积占国土总面积的 69%，《国家公路网规划》表明新增国家公路中有超过一半将布设在我国西部的山岭重丘地区<sup>[1]</sup>，其建设过程中由于复杂地形和不可预测的交通条件，将面临施工物料运输困难的挑战。山区高速公路施工的物料运输车辆通常需要借用现有的国道干线和乡镇道路，此外还需使用施工单位自行开辟的施工便道<sup>[2]</sup>。路况信息的缺失使得运输车辆无法根据实际路况进行路径优化，导致物料运输线路的韧性较差，进而影响施工成本。

为了提升山区高速公路施工效率，解晓明等<sup>[3]</sup>基于 BIM 模型构建施工作业区域的周边环境，优化工程道路的交通导流。徐爱民等<sup>[4]</sup>针对山区高速施工过程中预制梁运输的问题，提出了山区高速公路复杂地形条件下运梁的坡度控制方法。林晓等<sup>[5]</sup>提出了山区高速公路多桥梁工程混凝土拌制供应施工组织方法，优化了运输成本。魏作标<sup>[6]</sup>等建立了基于 CPS 技术的监测系统计算和优化模型，推动公路隧道施工低碳化。张得志等<sup>[7]</sup>提出季节性运输波动下山铁路工程弃渣回收物流网络优化方法，提升了综合经济效益。林宇亮等<sup>[8]</sup>运用多准则妥协解排序法对山区施工便道方案进行优选，降低了多目标之间的决策冲突。Lu 等<sup>[9]</sup>利用仿真模型优化建筑施工物料配置策略，优化工程进度和成本。

施工物料的及时运输对于优化工程成本至关重要<sup>[10]</sup>。相比于已知路况的场景，山区高速公路施工物料运输路径规划需要在有限预算内优先考虑路况感知设备的布设问题。雷视一体机集雷达与摄像功

能于一体，能够在复杂环境中实现对交通流量、车辆速度及道路异常的全天候实时监测<sup>[11]</sup>。然而，现有研究通常将交通监测与车辆路径规划分开研究，未能形成综合优化框架，难以体现两者间的相互作用及协同优化效应。

为解决上述问题，本文提出了一个双层优化模型，将雷视一体机布设与物料运输路径规划纳入统一的优化框架。上层模型以最小化综合成本为目标，确定雷视一体机的布设方案；下层模型在已知布设方案的前提下优化路径规划，以最小化运输时间。结果表明，通过优化布设雷视一体机和物料运输路径，可降低行程时间的不确定性，从而降低施工成本。

## 2 模型建立

由于该问题包含两个相互关联的决策层次，即路况感知雷视一体机选址与施工物料运输路径优化，这两个决策层次相互依赖且目标不同，适合采用双层优化模型建模。其中，上层模型以综合成本最小化为目标，优化雷视一体机的布设方案；下层模型在既定布设方案下优化车辆路径，以最小化运输时间。上下层模型通过布设决策和路径规划的交互实现协同优化，上层决定路段行程时间感知的不确定性，下层路径选择反过来影响上层的选址决策，从而体现两者间的耦合关系并实现整体优化。

### 2.1 符号与定义

在构建双层优化模型之前，为了便于描述模型的结构和目标，需明确各变量及参数的具体含义。以下将定义模型中涉及的关键符号及其解释，为上层和下层模型的详细描述奠定基础，如表 1 所示。

表 1 建模所要用的数学符号

符号	解释
$G = (V, E)$	路网， $V$ 为节点集合， $E$ 为边集合。
$S$	施工点集合。
$K$	车辆集合。
$B$	布设雷视一体机的预算
$c_e^{\text{install}}$	在边 $e$ 上布设雷视一体机的成本。
$c_s^{\text{stop}}$	由于施工物料不足导致在施工点 $s$ 处的停工单位时间成本。
$\mu_e, \sigma_e^2$	边 $e$ 在未安装雷视一体机时的行程时间的期望和方差。
$\delta \in [0,1]$	雷视一体机安装后行程时间方差的减少比例。
$Q_k$	车辆 $k$ 的容量。
$d_s$	施工点 $s$ 所需的物料需求量。
$q_{ks}$	车辆 $k$ 配送到施工点 $s$ 的物料量。
$x_e \in \{0,1\}$	如果在边 $e$ 上安装雷视一体机，则 $x_e = 1$ ，否则为 0。
$y_{kij} \in \{0,1\}$	车辆 $k$ 是否从节点 $i$ 行驶到节点 $j$ 。

## 2.2 上层模型

上层模型的目标是最小化综合成本, 包括雷视一体机安装成本和因物料运输不确定性导致的单位工期延误成本。目标函数的数学表达式为:

$$\min_x Z^{\text{upper}} = \sum_{e \in E} c_e^{\text{install}} x_e + \sum_{s \in S} c_s^{\text{stop}} \text{Var}(T_s) \quad (1)$$

其中,  $\text{Var}(T_s)$  为施工点  $s$  的物料到达时间的方差, 取决于下层模型的路径选择和上层的雷视一体机布设方案。

上层模型的变量范围约束条件为:

$$x_e \in \{0,1\}, \quad \forall e \in E \quad (2)$$

同时需要满足预算限制:

$$\sum_{e \in E} c_e^{\text{install}} x_e \leq B \quad (3)$$

## 2.3 下层模型

下层模型在给定雷视一体机布设方案的情况下, 规划车辆的运输路径, 以最小化总运输时间, 目标函数的数学表达式为:

$$\min_y Z^{\text{lower}} = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} E(\tau_{ij}) y_{kij} \quad (4)$$

其中:  $E(\tau_{ij})$  为从节点  $i$  到节点  $j$  的期望行程时间, 受雷视一体机布设影响。

下层模型满足如下的约束条件:

车辆流平衡约束, 对于车辆  $k$  和节点  $i$ , 路径必须连续

$$\sum_{j \in V} y_{kij} - \sum_{j \in V} y_{kji} = \begin{cases} 1, & \text{if } i = o_k \\ -1, & \text{if } i = d_k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $o_k$  和  $d_k$  分别为车辆  $k$  的出发点和目的地。车辆流量约束, 确保施工点的物料需求被满足:

$$\sum_{k \in K} q_{ks} = d_s, \quad \forall k \in K \quad (6)$$

行驶路径与物料配送关系约束: 如果车辆  $k$  向施工点  $s$  配送物料, 则车辆必须经过该施工点。

$$q_{ks} \leq M \cdot \sum_{j \in V} y_{kij} \quad \forall k \in K, s \in S \quad (7)$$

其中,  $M$  为一个足够大的常数, 确保了配送量  $q_{ks}$  仅在路径变量  $y_{kij}$  为 1 时取正值, 避免车辆在未经过施工点的情况下分配物料量。

同时还满足变量取值范围约束:

$$y_{kij} \in \{0,1\}, \quad \forall k \in K, (i,j) \in E \quad (8)$$

$$q_{ks} \geq 0, \quad \forall k \in K, s \in S \quad (9)$$

## 2.4 上下层的交互关系

上下层模型通过雷视一体机布设与路径规划的互动实现协同优化。下层模型根据各路段的行程时间期望  $\mu_e$  和方差  $\sigma_e^2$  进行路径选择, 雷视一体机布设能够降低路段的行程时间方差 ( $\delta$  表示方差减少比例), 从而提升路况感知的准确性, 使车辆更倾向于选择这些路段, 减少运输时间的不确定性。

具体来说, 在未安装雷视一体机的路段上, 路段行程时间的感知呈正态分布:

$$\tau_e \sim N(\mu_e, \sigma_e^2) \quad (10)$$

雷视一体机安装后, 路段行程时间的感知方差减少了  $\delta$  的比例:

$$\tau_e \sim N(\mu_e, (1-\delta)\sigma_e^2) \quad (11)$$

施工点  $s$  的物料到达时间方差为:

$$\text{Var}(T_s) = \sum_{e \in P_s} \sigma_e^2(x_e) \quad (12)$$

其中,  $P_s$  为车辆到达施工点  $s$  的路径上的边集合,  $\sigma_e^2(x_e)$  依赖于雷视一体机的布设情况, 表达式如下:

$$\sigma_e^2(x_e) = \begin{cases} \sigma_e^2, & \text{如果 } x_e = 0 \\ (1-\delta)\sigma_e^2, & \text{如果 } x_e = 1 \end{cases} \quad (13)$$

## 3 求解算法

由于协同优化模型的双层结构, 且下层为整数规划问题, 使得直接求解具有较高的计算复杂度。为此, 本文提出了迭代求解的思路。首先初始化雷视一体机布设方案, 求解下层车辆路径规划问题。随后基于下层求解结果, 计算上层目标函数值, 更新雷视一体机布设方案。最后重复上述过程, 直至上层目标函数收敛或达到预设迭代次数。具体步骤如下:

步骤 1: 初始化雷视一体机布设方案

在初始阶段, 对路段的雷视一体机布设方案  $x_e$  进行赋值, 通常采用基于经验的初始布设方案或随机分布, 以确保初始解的多样性。

步骤 2: 求解下层路径规划模型

在给定的雷视一体机布设方案下, 优化车辆的路径选择, 最小化总期望运输时间。路径规划需满足车辆流平衡约束、物料需求满足约束以及车辆容量约束, 通过启发式算法求解得到路径方案。

步骤 3: 计算上层模型目标值

根据路径规划结果, 结合车辆在各路段的行程

时间方差 $\sigma_e^2(x_e)$ , 计算施工点的物料到达时间方差 $\text{Var}(T_s)$ 和综合成本 $Z^{\text{upper}}$ 。

步骤 4: 更新雷视一体机布设方案

通过优化算法的更新规则, 进一步调整雷视一体机布设位置 $x_e$ , 优化上层目标函数。

步骤 5: 迭代求解上下层模型

在每次上层模型更新后, 重新求解下层路径规划问题, 将结果反馈到上层模型, 逐步优化摄像头布设与路径规划方案, 直至上层模型的综合成本 $Z^{\text{upper}}$ 收敛或达到预设的迭代次数。

步骤 6: 收敛条件

当上层目标函数值的变化幅度小于预设阈值 $\epsilon$ 或达到最大迭代次数 $N_{\text{max}}$ 时, 算法停止迭代, 输出当前的雷视一体机布设方案 $x_e^*$ 及车辆路径规划方案 $y_{kij}^*$ 作为最优解。

4 案例分析

4.1 案例概况

雷山—榕江高速公路是中国贵州省黔东南苗族侗族自治州境内连接雷山县与榕江县的高速公路, 桥隧比高达 78%, 根据施工计划, 存在多个分布同时施工, 且每个分部对施工物料有从外部运输要求, 如图 1 所示。

本项目基于雷榕高速周围路网的拓扑结构, 通过雷视一体机进行路况感知, 通过可变情报板进行

路径规划, 构建了基于 GIS 孪生的物料供应链调度系统, 如图 2 所示。

在本研究的案例分析中, 设定单位时间延误成本设为每分钟 0.5 万元, 雷视一体机布设成本为每台 5 万元, 运输车辆最大速度为 60 公里/小时, 最大运输重量为 20 吨, 施工点每日物料需求量为 100 吨, 这些参数均基于实际施工环境和行业标准设定, 用于确保模型的合理性和结果的可行性。

4.2 优化效果

对比了三种方案以评估模型的优化效果。方案一: 不布设雷视一体机, 将运输长度最短路径作为物料运输车辆固定运输路径, 作为基准方案。方案二: 优化雷视一体机的选址, 将运输时间最短路径作为物料运输车辆固定运输路径。方案三: 雷视一体机选址与施工物料运输路径双层协同优化。通过对这三种方案的比较, 分析协同方案在降低总成本和提升运输效率方面的显著效果, 如表 2 所示。

通过对三种方案的对比分析发现, 协同优化方案在降低运输时间、减少工期延误损失和控制总成本方面表现最佳, 相比未优化方案, 协同优化方案将平均运输时间减少了 33.8%, 总成本降低了 19.4%。该方案充分利用了雷视一体机提供的实时路况感知能力, 与路径优化策略相结合, 显著提升了运输效率并有效降低了不确定性。

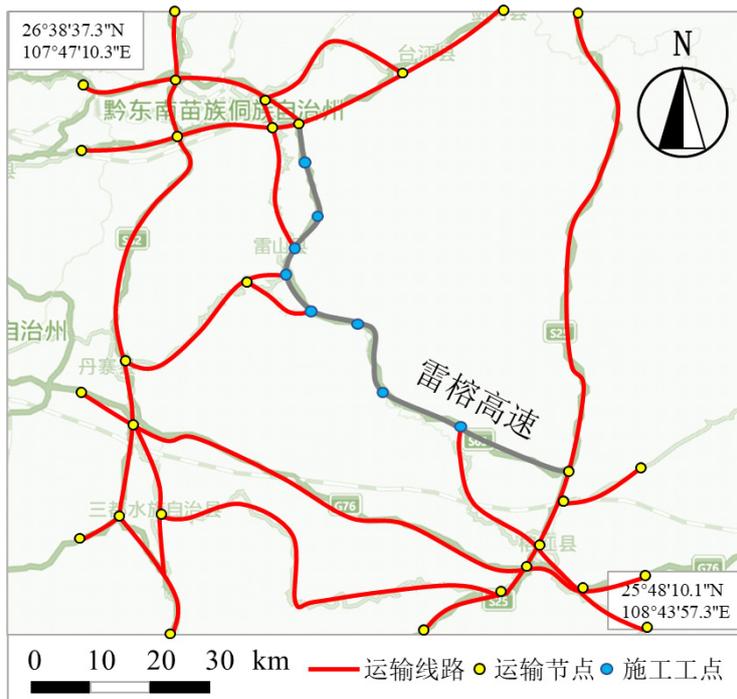


图 1 贵州雷榕高速施工物料运输路网情况

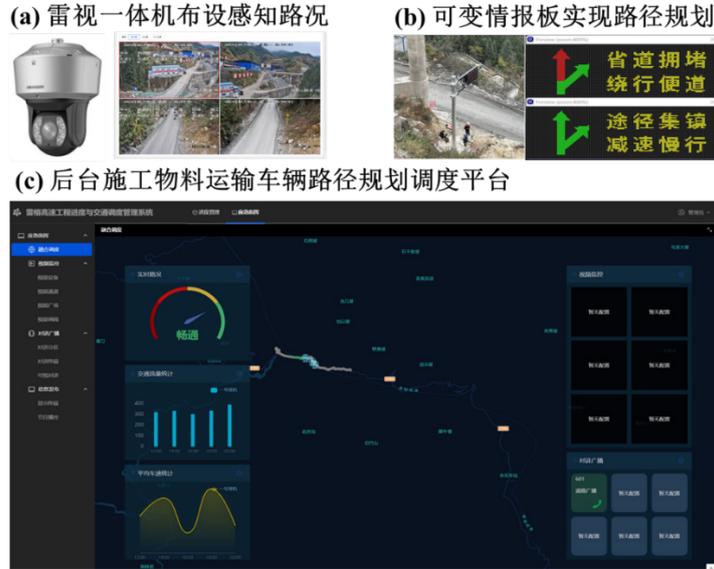


图 2 路况感知与路径规划场内外设备与平台界面

### 4.3 敏感性分析

为了进一步验证模型的鲁棒性和优化效果，我们对关键参数进行了敏感性分析，包括雷视一体机的单位成本、单位工期延误成本以及雷视一体机对运输时间感知方差减少比例 ( $\delta$ )，通过逐步调整这些参数，并保持其他参数不变，得到总成本和优化效果的影响。

结果表明，在联合优化方案中，由于路径规划的优化能够部分抵消安装成本的增加，总成本上升幅度相对较小，说明雷视一体机布设与路径优化的协同作用有效控制了综合成本。

单位工期延误成本对模型的敏感性较高。当单位工期延误成本增加时，联合优化方案相较于其他方案表现出更好的应对能力，能够通过有效的雷视一体机布设和路径优化减少物料延误的风险，显著降低停工时间，从而减少总成本。

$\delta$  值反映了雷视一体机对行程时间估计不确定性的改善效果。随着  $\delta$  值的增大，雷视一体机的路况感知能力提高，行程时间方差显著减小，总体运输时间进一步缩短。在较高的  $\delta$  值下，雷视一体机

布设的效果更为显著，尤其是在复杂交通条件下，能明显提升运输效率。

综上所述，敏感性分析表明，本研究提出的联合优化方案在应对不同成本变化和不确定性因素时具有较强的鲁棒性，并且能够在各种条件下显著降低总成本和提高运输效率。

### 5 总结与展望

本文针对山区高速公路施工过程中物料运输路径和路况感知优化的问题，提出了双层优化模型，将雷视一体机布设与车辆路径规划结合在一个综合框架内，显著提高了运输效率并降低了成本，得出如下结论：

(1) 双层优化模型通过协同优化有效降低了运输时间不确定性和工期延误损失。协同优化方案相比未优化方案平均运输时间减少了 33.8%，总成本降低了 19.4%。

(2) 雷视一体机通过降低路径行程时间的方差，为路径规划提供了更准确的实时信息，显著减少了运输时间的不确定性，为复杂施工环境下的智能调度奠定了基础。

表 2 不同方案下的优化效果

方案	平均运输时间 (分钟)	工期延误损失成本 (万元)	雷视一体机布设成本 (万元)	总成本 (万元)
未优化方案	68	33	0	139
单一优化方案	53	26	20	126
协同优化方案	45	20	35	112

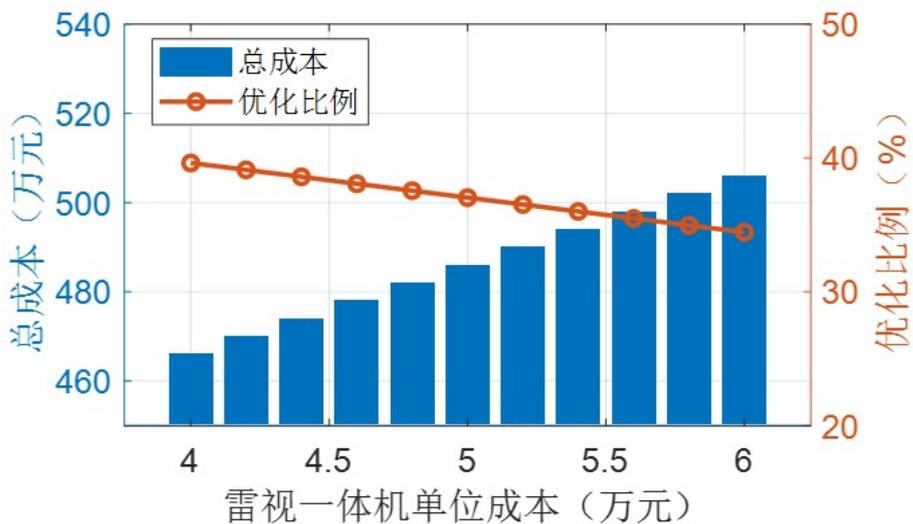


图3 雷视一体机成本敏感性

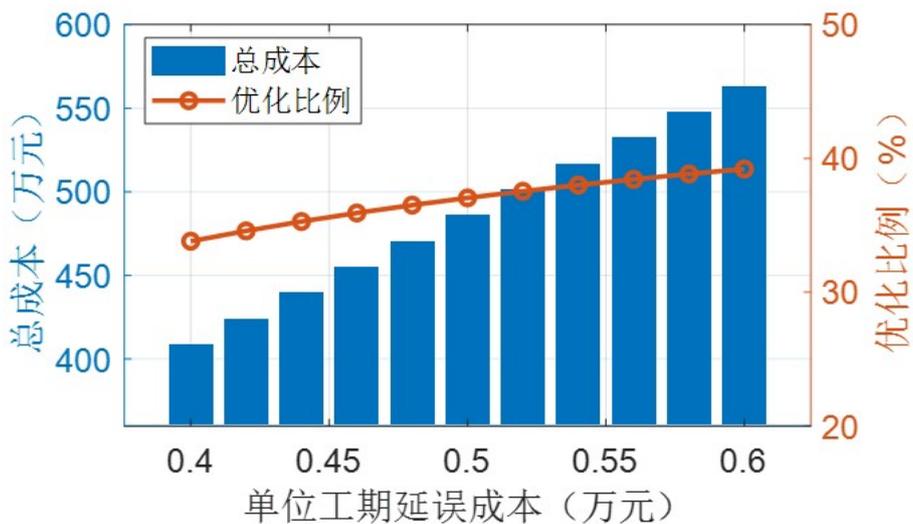


图4 单位工期延误成本

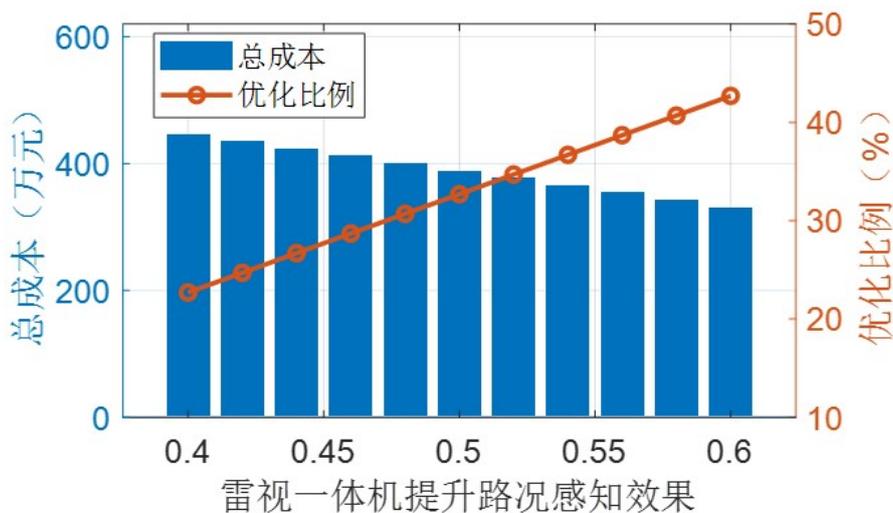


图5 雷视一体机提升路况感知效果

(3) 案例分析验证了模型的适用性和优化效果, 为类似场景下的施工调度与运输规划提供了重要的理论支持和实践参考。

在未来的研究中, 可以考虑针对突发事件和多阶段施工场景, 开发实时优化和动态调度方法, 提升物料运输的灵活性和响应速度。同时, 可以探索更高效的求解算法, 例如结合元启发式算法与深度学习技术, 解决更大规模和更复杂的优化问题。

### 参考文献

- [1] 张蕊. 交通运输部解读国家公路网规划: 高速公路建设改造需求 5.8 万公里[N]. 每日经济新闻, <https://www.nbd.com.cn/articles/2022-07-26/2378892.html>.
- [2] 杨永红, 朱冠儒, 王醇, 等. 公路施工便道圆曲线半径与加宽设计指标[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(03): 43-53.
- [3] 解晓明. BIM 技术在山区公路工程项目全寿命周期管理中的应用[J]. 公路工程, 2018, 43(4): 296-300.
- [4] 徐爱民, 曾永旺, 贺国京, 等. 山区高速公路复杂地形条件下梁板运输安全施工技术分析[J]. 公路工程, 2015, 40(04): 78-80.
- [5] 林晓, 黄建阳. 山区高速公路多桥梁工程混凝土拌制供应施工组织与控制[J]. 公路, 2014, 59(11): 118-122.
- [6] 魏作标, 夏立爽, 刘志强. 山区高速公路隧道施工碳排放监控技术应用[J]. 公路交通科技, 2022, 39(S2): 339-344.
- [7] 张得志, 罗湘钰, 李翔, 等. 季节性运输波动下山区铁路工程弃渣回收物流网络优化[J/OL]. 铁道科学与工程学报, 1-12[2024-11-26].
- [8] 林宇亮, 左伟俊, 邢浩, 等. 基于组合赋权-VIKOR 法的山区施工便道方案优选模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(02): 445-456.
- [9] Lu H, Wang H, Xie Y, et al. Study on construction material allocation policies: A simulation optimization method[J]. Automation in Construction, 2018, 90: 201-212.
- [10] Liu J, Lu M. Constraint programming approach to optimizing project schedules under material logistics and crew availability constraints[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2018, 144(7): 4018049.
- [11] 庄绪彩, 孙希滕, 张宁, 等. 基于主客观组合赋权评价技术的雷视一体机安装方案优选[J]. 山东大学学报(工学版), 2023, 53(04): 37-47.

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

