

道路施工成本-工期-碳排智能协同优化

李三荣

(中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为解决市政道路施工设备配置在成本、工期与碳排放之间难以协同优化的问题, 构建基于全生命周期成本的施工设备配置三目标优化模型。综合设备购置与使用成本、施工效率及燃油碳排因素, 在满足工期约束与摊铺-压实能力匹配约束下, 将配置决策转化为成本-工期-碳排多目标优化问题。采用非支配排序遗传算法(NSGA-II)对不同道路宽度施工场景进行优化求解, 获得Pareto最优解集, 并引入TOPSIS对方案进行综合评价, 筛选推荐配置。结果表明, 不同道路宽度下三指标存在显著权衡: 配置规模增加可缩短工期, 但单位面积成本与碳排放量同步上升; 部分场景中工期优先与低碳优先方案一致, 说明紧凑组织与规模受限条件下效率提升不必然增加碳排放; TOPSIS推荐方案可在三指标间实现较优平衡, 为设备配置与施工组织优化提供量化决策依据。

关键词: 沥青施工; 施工设备配置; 多目标优化; 非支配排序遗传算法(NSGA-II); 碳排放

中图分类号: U415.1; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)06-0414-06

Intelligent Collaborative Optimization of Road Construction Cost - Schedule - Carbon Emissions

LI Sanrong

(CSCEC Aecom Consultants Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: To address the difficulty of achieving coordinated optimization among cost, construction duration, and carbon emissions in municipal road construction equipment configuration, a three-objective optimization model based on life-cycle cost (LCC) is developed for construction equipment allocation. The model comprehensively considers equipment purchase and operating costs, construction efficiency, and fuel-related carbon emissions. Under construction duration constraints and paving - compaction capacity matching constraints, the configuration decision-making process is formulated as a multi-objective optimization problem involving cost - time - carbon trade-offs. The NSGA-II algorithm is employed to solve the model under different road-width construction scenarios, yielding a set of Pareto-optimal solutions. Additionally, the TOPSIS method is introduced for comprehensive evaluation of the alternative solutions, enabling selection of recommended equipment configurations. The results indicate a pronounced trade-off among the three objectives across different road widths: increasing the configuration scale can shorten the construction period, but both unit-area cost and carbon emissions rise simultaneously. In certain scenarios, the time-priority and low-carbon-priority solutions coincide, suggesting that under compact organization and constrained configuration scale, improving efficiency does not necessarily increase carbon emissions. The TOPSIS-recommended configuration achieves a favorable balance among the three objectives, providing quantitative decision support for equipment allocation and construction organization optimization.

Keywords: asphalt pavement construction; equipment configuration; multi-objective optimization; NSGA-II; carbon emissions

0 引言

随着城市化进程的不断推进, 市政道路工程建设规模持续扩大, 沥青路面因行车舒适性好、施工效

率高等优势, 被广泛应用于城市道路与桥面铺装工程中^[1-2]。在市政道路沥青施工过程中, 施工设备配置方案直接影响着工程的施工工期、经济成本、施工阶段的能源消耗和碳排放水平, 是施工组织设计中的关键决策内容^[3-4]。合理的设备配置不仅有助于提高施工效率、缩短工期, 还对控制工程成本、降低施工阶段碳排放具有重要意义。

收稿日期: 2026-01-05

作者简介: 李三荣(1983—), 男, 学士, 高级工程师, 从事道路设计与管理工作。

在实际工程中,市政道路沥青施工设备配置通常依赖施工经验或以工期为单一目标进行确定,往往侧重于满足进度要求,而对设备全生命周期成本及施工过程碳排放关注不足^[5-6]。一方面,设备配置规模过小虽可降低初始成本,但易导致施工效率不足、工期延长;另一方面,盲目增加设备数量虽可缩短工期,却可能造成设备闲置、能源浪费和碳排放增加^[7]。在“双碳”目标背景下,如何在满足施工工期要求的同时,实现施工成本与碳排放的协同控制,已成为市政道路工程施工组织中亟需解决的问题^[8-10]。

针对上述问题,本文以市政道路沥青施工阶段为研究对象,综合考虑施工设备的全生命周期成本、施工效率及燃油碳排放因素,构建了成本-工期-碳排三目标协同优化的施工设备配置模型。在满足工期约束及摊铺-压实工序能力匹配约束的前提下,采用非支配排序遗传算法(NSGA-II)对不同道路宽度施工场景下的设备配置方案进行优化求解,获得 Pareto 最优解集,并引入 TOPSIS 方法对多方案进行综合评价,筛选具有工程适用性的推荐配置方案。研究成果可为市政道路沥青施工阶段设备配置与施工组织优化提供定量决策参考。

1 施工机械与工程配置

结合市政道路沥青面层施工的工艺流程和工程实践,本文将施工机械配置重点聚焦于摊铺设备和压实设备这 2 类对施工质量、进度及能耗影响最为显著的核心机械。在设备选型方面,综合考虑设备的适用工况、生产能力及工程应用的代表性,构建了由多型号摊铺机与双钢轮压路机组成的施工机械备选库。其中,摊铺设备选取了 ABG8820B、SMP90C-6 及 Hamm HD128 等常见中大型沥青摊铺机型号,覆盖不同作业宽度与生产能力区间;压实设备则选取 Dynapac CC624 与 Dynapac CC524 等双钢轮压路机,以满足不同施工强度和配套需求。为反映施工组织 and 现场管理对设备实际效能的影响,在配置过程中引入设备有效利用率参数,以更加贴近真实工程条件。

在工程配置层面,施工方案由“设备型号选择”和“设备数量配置”共同决定,通过对摊铺机与压路机数量的协同组合,实现施工能力在摊铺与压实工序之间的合理匹配,避免因工序不协调造成的效率损失。针对不同道路宽度条件下的施工场景,本文分别设置多种施工规模参数,形成具有可比性的多

场景设备配置方案。在此基础上,从经济性、工期可控性及低碳排放等工程目标出发,对不同机械配置组合进行系统评估,为后续多目标优化求解和综合决策提供统一、规范的施工机械配置基础。

2 三目标优化模型与 NSGA-II 求解方法

2.1 全生命周期成本模型

2.1.1 设备全生命周期成本构成

为实现市政道路沥青施工设备的全生命周期经济决策,在设备配置和调配方案确定前,需建立设备全生命周期成本(Life Cycle Cost, C_{LC})模型。设备全生命周期成本通常由购置(或租赁)成本 C_{buy} 、使用成本(燃油、人工、易损耗件等) C_{use} 、维护维修成本(含保养、故障维修及停机损失) C_{maint} 以及残值回收价值 C_{res} 构成,其表达式为:

$$C_{LC}(x) = C_{buy}(x) + C_{use}(x) + C_{maint}(x) - C_{res}(x) \quad (1)$$

式中: x 为设备配置方案(即各类设备数量组合)。

考虑工程可比性,为衡量不同设备组合在同一工程条件下的经济性,引入单位面积成本指标 $C_u(x)$:

$$C_u(x) = C_{LC}(x) / S \quad (2)$$

式中: S 为施工总面积, m^2 。

本文以部分常用筑路机械设备为例进行研究,其具体型号及参数见表 1。

表 1 设备关键性能参数表

设备类型	型号	额定作业效率 / ($m^2 \cdot h^{-1}$)	燃油消耗 率 / ($L \cdot h^{-1}$)	购置成本 / 万元
摊铺机	ABG8820B	1 800	12.5	320
摊铺机	SMP90C-6	1 500	11.2	280
摊铺机	Hamm HD128	1 200	10.5	260
双钢轮 压路机	Dynapac CC624	800	8.5	180
双钢轮 压路机	Dynapac CC524	600	7.2	150

2.1.2 面向项目周期的 C_{LC} 折算方法

上述 C_{LC} 为设备在全寿命周期内的成本总和,而本文研究对象为单一市政道路沥青施工项目,设备仅在项目施工周期内投入使用。若直接将全寿命 C_{LC} 折算为单位面积成本,易造成成本指标偏大,影响工程决策合理性。

因此,本文将设备全寿命周期成本按项目实际占用时间进行折算。假设设备设计使用年限为 Y 年,对应总使用天数为 $365Y$,该项目施工工期为 T 天,则项目期内设备成本占比系数 λ 为:

$$\lambda = \frac{T}{365Y} \quad (3)$$

相应地,项目期内设备成本 $C_{LC,p}(x)$ 可表示为:

$$C_{LC,p}(x) = \lambda \cdot C_{LC}(x) \quad (4)$$

则单位面积项目期成本 $C_u(x)$ 为:

$$C_u(x) = C_{LC,p}(x)/S \quad (5)$$

通过上述折算方法,可有效提高成本评价结果的工程适用性和可比性。

2.2 工期-碳排-成本三目标协同建模

市政道路沥青施工设备配置不仅要满足经济性要求,还需兼顾工期效率与低碳目标。因此,构建成本-工期-碳排三目标协同优化模型,将设备组合决策转化为多目标优化问题。

2.2.1 工期模型

施工工期主要受设备配置和综合作业能力影响。设第 i 类设备的额定作业效率为 $q_i(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,设备利用率为 η_i ,设备数量为 n_i ,则系统综合作业能力 Q 为:

$$Q = \sum_{i=1}^m n_i q_i \eta_i \quad (6)$$

相应的施工工期 $T(x)$ 可表示为:

$$T(x) = \frac{S}{Q} \quad (7)$$

式中: $T(x)$ 为施工工期, h 或 d ; m 为设备类型数量。

设备有效利用率 η_i 并非固定值,受施工组织管理水平、现场作业条件(如场地平整度、物料供应及时性)等因素影响。为提升工期预测精准度,新增敏感性分析说明:选取 η_i 常见取值区间(0.6、0.7、0.8、0.9),以宽度为 15~25 m 的中幅道路综合均衡方案为例, η_i 每提升 0.1,工期平均缩短 10%~12%;实际工程中可参考企业过往同类项目利用率统计数据确定,避免单一固定值导致的预测偏差。

2.2.2 碳排放核算模型

施工阶段碳排放主要来源于施工机械的燃油消耗。本文采用燃油消耗系数法对施工过程碳排放进行估算。本研究重点关注燃油驱动的核心施工设备碳排放,因其占施工阶段直接碳排放的主要部分。电力消耗碳排放相对较小且与设备配置方案关联较弱,故未纳入本模型。

设第 i 类设备单位时间燃油消耗率为 $g_i, \text{L/h}$;作业时间为 h_i, h ;柴油碳排放系数为 α ,其值可依据相关标准或文献确定,柴油一般取 $2.63 \text{ kgCO}_2/\text{L}$;则施工过程总碳排放量 $E(x)$ 为:

$$E(x) = \sum_{i=1}^m g_i h_i \alpha \quad (8)$$

为便于不同施工方案间的对比,引入单位面积碳排放指标:

$$E_u(x) = \frac{E(x)}{S} \quad (9)$$

式中: $E_u(x)$ 为单位面积碳排放量, kgCO_2/m^2 。

2.2.3 怠速与等待碳排修正

在实际施工过程中,设备除正常作业外,还存在等待、怠速等非作业状态,其燃油消耗同样会产生碳排放。若仅考虑作业阶段碳排放,易导致工期目标与碳排目标高度重合,削弱多目标优化的实际意义。

因此,本文在碳排模型中引入怠速碳排放修正项 $E_{idle}(x)$ 。设备怠速燃油消耗率为作业状态的 β 倍,则总碳排放量可修正为:

$$E(x) = E_{work}(x) + E_{idle}(x) \quad (10)$$

$$E_{idle}(x) = \sum_{i=1}^m \beta g_i h_{idle,i} \alpha \quad (11)$$

式中: h_{idle} 为等待、怠速等非作业时间, h 。

该修正使设备冗余配置在降低工期的同时,可能增加怠速碳排放,从而在工期与低碳目标之间形成真实权衡关系。

2.3 三目标协同优化模型构建

2.3.1 目标函数

假设设备系统由 m 类关键设备构成,则决策变量为各类设备数量:

$$x = \{n_1, n_2, \dots, n_m\}, n_i \in Z^+ \quad (12)$$

式中: n_i 表示第 i 类设备数量(如摊铺机、压路机、洒布车、运输车辆等)。

(1) 目标 1: 单位面积全生命周期成本最小。单位面积全生命周期最小成本 $\min f_1(x)$ 为:

$$\min f_1(x) = C_u(x) = \frac{C_{buy}(x) + C_{use}(x) + C_{maint}(x) - C_{res}(x)}{S} \quad (13)$$

(2) 目标 2: 工期最小。设备配置影响施工效率,工期可由施工总面积与综合作业能力确定。设第 i 类设备额定作业效率为 $q_i, \text{m}^2/\text{h}$;设备利用率为 η_i ,则综合施工能力为 $\sum_{i=1}^m n_i q_i \eta_i$,相应工期 $\min f_2(x)$ 为:

$$\min f_2(x) = T(x) = \frac{S}{\sum_{i=1}^m n_i q_i \eta_i} \quad (14)$$

式中 $T(x)$ 的单位可用 d 表示,以适配工程管理表达。

(3) 目标 3: 单位面积碳排放量最小。施工碳排放量主要来源于设备单位时间燃油消耗。采用系数法估算碳排放量。设第 i 类设备燃油消耗率为

$g_i, \text{L/h}$; 作业时间为 h_i, h ; 柴油碳排放系数为 α (柴油一般取 $2.63 \text{ kgCO}_2/\text{L}$); 则总碳排放量 $\min f_3(x)$ 为:

$$\min f_3(x) = E_u(x) = \frac{\sum_{i=1}^m n_i h_i g_i \alpha}{S} \tag{15}$$

2.3.2 约束条件

为保证方案可实施性,引入如下关键约束:

(1)工期约束。表达式为:

$$T(x) \leq T_{\max} \tag{16}$$

式中: $T_{\max}$ 为工程计划允许最大工期。

(2)工序能力匹配约束(摊铺-压实匹配)。为防止出现“摊铺能力大于压实能力”而导致施工阻塞,设摊铺系统效率为 Q_p , 压实系统效率为 Q_y , 则:

$$Q_p = n_p q_p \eta_p, Q_y = n_y q_y \eta_y \tag{17}$$

$$Q_p \leq Q_y \tag{18}$$

式中: n_p, n_y 分别为摊铺设备和压实设备数量。

(3)设备数量边界约束。表达式为:

$$n_i^{\min} \leq n_i \leq n_i^{\max} \tag{19}$$

设备数量上下限可依据企业设备资源、施工经验和项目条件设定。

(4)预算约束。考虑企业资金约束,引入:

$$C_{\text{buy}}(x) \leq B_{\max} \tag{20}$$

式中: $B_{\max}$ 为最大购置/租赁预算。

$B_{\max}$ 取值标准明确如下: a. 参考项目总投资估算,设备预算占沥青施工项目总投资的 15%~20%; b. 结合当地建设工程价格信息中的设备租赁/购置定额,按预估设备数量区间测算; c. 匹配企业年度设备投入预算及项目优先级,如: 25~35 m 宽幅道路项目总投资 1 000 万元,按 18% 比例分配设备预算,即 $B_{\max} = 180$ 万元。

2.4 基于 NSGA- II 的多目标优化求解

针对设备配置问题多目标、离散决策变量及多约束的特性,传统单目标优化方法难以提供多方案决策集,因此本文采用非支配排序遗传算法 NSGA-II 来求解上述三目标问题。该算法先将设备数量组合 x 作为个体染色体进行整数编码,随机生成满足约束条件的初始种群 P_0 , 再对种群内每个个体计算三目标函数值 $f_1(x), f_2(x), f_3(x)$ 并进行约束可行性判断; 随后通过非支配排序获得不同等级的非支配解集,在同一等级中计算拥挤距离以保持解集多样性; 接着采用锦标赛选择、整数交叉与整数变异策略生成子代种群 Q_1 并处理不可行解,之后合并父代与子代种群,按非支配等级和拥挤距离筛选形成下一代种群并迭代至满足终止条件; 最终输出 Pareto 最优解

集,为不同决策偏好提供可选配置方案。若需单一推荐方案,可通过加权法或 TOPSIS 综合评价,从 Pareto 解集中确定最优配置方案 x^* 。

3 结果与讨论

3.1 NSGA-II 多目标优化求解结果概述

基于前文构建的市政道路沥青施工设备配置成本-工期-碳排三目标协同优化模型,采用 NSGA-II 算法对不同道路宽度施工场景进行了求解分析。针对 10~15、15~25、25~35 m 这 3 类典型道路宽度工况,分别独立运行优化程序,在满足工期约束及摊铺-压实能力匹配约束的前提下,均成功获得稳定的 Pareto 非支配解集。

计算结果表明,在 3 类施工场景下,NSGA-II 算法均收敛至规模适中的 Pareto 解集,各场景获得的非支配解数量均为 40 个。这说明所构建的多目标优化模型具有良好的可行性和稳定性,NSGA-II 算法能够在离散设备配置决策空间中有效搜索多种性能互不支配的施工方案,为后续多偏好决策分析提供了充分的解集基础。

3.2 不同施工场景下的 Pareto 前沿特征分析

从 Pareto 解集的整体分布特征来看,不同施工场景下的设备配置方案在单位面积成本、施工工期和单位面积碳排放量三指标之间均存在明显的权衡关系。

中幅道路施工场景下成本-工期-碳排三目标 Pareto 前沿分布见图 1。

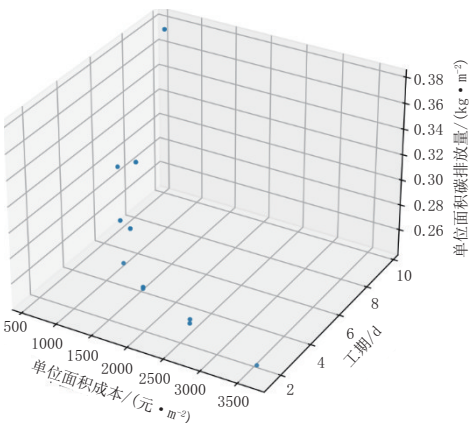


图1 中幅道路施工场景下成本-工期-碳排三目标 Pareto 前沿分布

在保证施工组织可行的前提下,随着施工效率的提高(工期缩短),需要配置更多施工设备以提升系统作业能力,进而导致单位面积成本和碳排放水平整体呈上升趋势;反之,当设备配置规模较小时,虽然单位面积成本较低,但施工工期明显延长。

进一步对不同道路宽度场景进行对比分析,可以发现在 10~15 m 窄幅道路施工条件下,由于施工系统规模较小、设备配置数量受限、施工组织相对紧凑,工期目标与碳排目标在部分方案中表现一致,二者并未形成明显冲突。而在 15~25 m 及 25~35 m 道路施工场景中,随着施工面积和作业强度的增加,为满足工期约束条件,需相应增加摊铺及压实设备数量,而设备配置规模扩大使得单位面积成本和碳排放水平同步上升,成本、工期与碳排之间的权衡关系更加突出,Pareto 解集在三目标空间中的分布范围随之扩大。

上述分析表明,在市政道路沥青施工设备配置问题中,施工效率、经济性与低碳目标之间存在内在制约关系,单一目标优化方法难以满足工程综合决策需求。采用多目标优化方法能够更全面地刻画不同设备配置方案的性能差异,为施工组织方案比选提供更加合理的决策依据。

3.3 不同决策偏好下的设备配置方案对比

为便于工程决策,在每个施工场景的 Pareto 解集中,分别选取 4 类具有代表性的设备配置方案:成本优先方案、工期优先方案、低碳优先方案和基于 TOPSIS 的综合均衡方案,其主要性能指标如表 2 所示。

表 2 不同道路宽度施工场景下的 Pareto 推荐设备配置方案

道路宽度/m	决策偏好	摊铺机		压路机		单位面积成本/ (元·m ⁻²)	工期/d	单位面积碳排放量/ (kgCO ₂ ·m ⁻²)
		型号	数量	型号	数量			
10~15	成本优先	Hamm HD128	1	Dynapac CC524	3	882.0	6.50	0.376
10~15	工期优先	ABG 8820B	4	Dynapac CC624	7	5 451.5	1.02	0.249
10~15	低碳优先	ABG 8820B	4	Dynapac CC624	7	5 451.5	1.02	0.249
10~15	综合均衡	SMP90C-6	2	Dynapac CC624	4	2 003.5	2.44	0.263
15 - 25	成本优先	Hamm HD128	2	Dynapac CC524	2	588.0	9.76	0.376
15 - 25	工期优先	ABG 8820B	4	Dynapac CC624	7	3 634.3	1.52	0.249
15 - 25	低碳优先	ABG 8820B	4	Dynapac CC624	7	3 634.3	1.52	0.249
15 - 25	综合均衡	Hamm HD128	3	Dynapac CC524	3	992.0	4.88	0.321
25 - 35	成本优先	Hamm HD128	1	Dynapac CC524	3	441.0	13.01	0.376
25 - 35	工期优先	ABG 8820B	4	Dynapac CC624	7	2 725.8	2.03	0.249
25 - 35	低碳优先	ABG 8820B	4	Dynapac CC624	7	2 725.8	2.03	0.249
25 - 35	综合均衡	SMP90C-6	2	Dynapac CC624	4	1 001.8	4.88	0.263

由表 2 可见:

(1)在 10~15 m 窄幅道路施工场景下,成本优先方案的施工工期为 6.50 d,明显高于其他方案,但其设备配置规模较小,适用于工期要求相对宽松的工程;工期优先方案与低碳优先方案在该场景下表现一致,工期最短(约 1.02 d),同时单位面积碳排放量最低,说明在设备规模受限的条件下,提升施工效率并未引入明显的额外碳排;TOPSIS 综合方案的工期为 2.44 d,在成本与碳排之间取得了较为均衡的折中。

(2)在 15~25 m 中幅道路施工场景下,成本优先方案工期延长至 9.76 d,而工期优先与低碳优先方案的工期为 1.52 d,单位面积碳排放量同样保持在较低水平。TOPSIS 推荐方案工期为 4.88 d,相较工期优先方案有所延长,但显著降低了设备配置规模带来的成本压力。

(3)在 25~35 m 宽幅道路施工场景下,前述中幅道路施工场景的表现得到了进一步强化。成本优先方案的施工工期达到 13.01 d,而工期优先与低碳优

先方案的工期为 2.03 d。TOPSIS 综合方案在工期(4.88 d)和单位面积碳排放量(0.263 kgCO₂/m²)之间取得了相对平衡,体现出较强的工程适用性。

总体来看,随着道路宽度增加,成本优先方案的工期劣势愈加明显,而工期优先方案虽然施工效率最高,但其潜在的设备冗余风险和成本压力不容忽视。

3.4 TOPSIS 综合推荐方案及工程适用性分析

在 Pareto 解集基础上,引入 TOPSIS 多属性决策方法,对成本、工期和碳排 3 项指标分别赋予 0.4、0.3、0.3 的权重,以反映工程实践中对经济性的相对重视程度。计算结果表明,在 3 类施工场景下,TOPSIS 方法均能够稳定筛选出综合性能较优的设备配置方案。

与极端偏好的单一目标方案相比,TOPSIS 推荐方案在任何单一指标上均未达到最优,但在 3 项指标之间实现了更为合理的平衡。该类方案既避免了成本优先方案中工期过长的的问题,也规避了工期优先方案中设备配置过度、潜在碳排和经济负担上升

的风险,更符合市政道路工程中“工期可控、成本可承受、碳排可约束”的综合决策需求。

因此,TOPSIS综合推荐方案可作为实际工程中优先考虑的设备配置方案,为施工组织和资源调配提供定量决策支持。

3.5 成本-工期-碳排权衡机理与方法优势讨论

从优化结果可以看出,摊铺与压实工序之间的能力匹配约束在施工系统中起到了关键作用。由于系统综合施工能力受限于摊铺与压实能力中的较小值,单纯增加某一类设备数量并不能无限制地提升施工效率,反而可能导致设备等待和资源浪费。这也是在部分场景下,工期优先方案与低碳优先方案出现重合的重要原因。

此外,随着设备配置规模的增加,施工工期缩短所带来的效率提升往往伴随着单位面积成本和碳排放水平的上升,形成典型的多目标冲突关系。NSGA-II算法通过非支配排序机制有效刻画了这一冲突,为不同决策偏好提供了多样化的可选方案。

综上,本文提出的基于NSGA-II的多目标优化方法能够在考虑工程约束条件的前提下,实现市政道路沥青施工设备配置方案在成本、工期与碳排目标之间的协同优化,相比传统经验配置或单目标优化方法,具有更强的系统性、灵活性和工程适用价值。

4 结 语

(1)针对市政道路沥青施工中设备配置方案难以同时兼顾成本、工期与碳排的问题,构建了基于全生命周期成本的多目标优化模型,并采用NSGA-II算法对不同道路宽度施工场景进行了求解分析,验证了模型在典型工程条件下的可行性。

(2)优化结果表明,施工设备配置中成本、工期与碳排之间存在明显权衡关系。随着设备配置规模

增加,施工工期可有效缩短,但单位面积成本和碳排放水平同步上升,单一目标配置方案难以满足工程综合需求。

(3)在部分施工场景下,工期优先方案与低碳优先方案表现一致,说明在设备规模受限、施工组织紧凑的条件下,提高施工效率并不必然导致碳排放增加,摊铺与压实工序能力匹配对施工系统整体性能具有重要影响。

(4)基于Pareto解集引入TOPSIS方法来筛选综合推荐方案,能够在成本、工期与碳排指标之间取得较为合理的平衡,为市政道路施工设备配置与施工组织优化提供了定量决策依据。

(5)研究成果可为市政道路工程在施工组织设计阶段开展设备配置与低碳施工方案比选提供参考,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 管振栋.市政道路沥青施工中设备全生命周期管理与经济优化研究[J].城市道桥与防洪,2025(11):274-277.
- [2] 李贺.复合式沥青路面层状结构低碳新技术研究[J].交通节能环保,2025,21(5):56-59.
- [3] 俞克雄.绿色施工技术在市政道路桥梁建设中的应用与发展[J].居业,2025(6):74-76.
- [4] 蔡彬清,闫丹阳,陈石玮.城市道路建造过程碳排放影响因素与减排策略研究——基于Fuzzy ISM-SD分析[J].建筑经济,2025,46:76-83.
- [5] 李群峰,高忼,汪鸣泉.城市道路施工阶段碳排放估算模型方法及应用[J].中国市政工程,2025,(1):107-112;149-150.
- [6] 李群峰,高忼,汪鸣泉.城市道路施工阶段碳排放因子与估算方法研究[J].建筑科技,2024,8(7):31-35.
- [7] 李金格.区域公路路基低碳优化研究[D].西安:西安工业大学,2024.
- [8] 肖秋明,郑婵娟.考虑碳排放的市政道路绿色施工评价研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(2):113-121.
- [9] 李世文,张玉龙,李增源,等.公路隧道施工工期碳排放计算模型[J].施工技术(中英文),2023,52(18):16-22.
- [10] 张月,杨艺鑫,王长祥.厦门市综合管廊全生命周期规划设计技术对管廊建设综合效益的影响[J].给水排水,2020,56(增刊1):933-937;941.