

低碳视角下预制构件带时间窗分批运输车辆调度优化*

高颖¹, 马冉¹, 张玉忠²

(1. 青岛理工大学管理工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 曲阜师范大学运筹学研究院, 山东 曲阜 276826)

摘要:对车辆运输调度中的碳排放问题进行研究具有重要意义。研究不同交货时间窗口下预制构件的分批次车辆调度问题并进行深入探讨,旨在寻找消耗资源最少和成本最低的运输方案。为此,构建一个多目标绿色运输调度模型,该模型以最小化运输总碳排放量、最小化运输总成本以及最小化最大运输流动时间为优化目标。采用归一化加权法,将该多目标问题转化为单目标问题模型,并设计一种改进的遗传算法。通过设定适当的交叉以及变异概率,为问题提供了可行的调度方案。另外,通过实际案例数据的模拟验证和对目标模型进行敏感性分析,证明了该算法的有效性,并为管理者在车辆运输调度优化方面提供重要的决策参考。

关键词:车辆运输调度;多目标优化;绿色低碳;预制构件;改进的遗传算法

中图分类号:O211.6;U116.1

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2025)06-0010-12

预制建筑作为一种新兴的建造方式,因具有施工效率高、环保节能等优势,正逐渐成为行业转型升级的重要方向^[1-3]。然而,由于预制建筑通常体积庞大、形状各异且对准时性要求也较高,因此对运输构件车辆的调度优化研究显得尤为重要。不合理的运输调度安排,如生产进度延误导致交货不及时或运输车辆不到位等,都可能导致施工延误,进而影响整个建筑的生产进度并产生惩罚成本。因此,本文从低碳视角出发,研究带有交货时间窗口的构件运输车辆调度问题,旨在响应环境保护政策,通过合理分配资源来节省运输时间、提高交货准时性。实现节约运输时间、提高交货准时性和降低运输总成本与碳排放量等目标^[4]。

关于小体积货物或各类运输方式的优化研究已有较为成熟的发展。例如在冷链物流运输^[5-7]、城市生活垃圾分类运输^[8-9]、铁路运输^[10]、船舶货物运输^[11]和高铁运输^[12]等领域。何胜学^[13]基于超级网络中流量守恒的概念,研究了公交车辆调度问题,并提出一种包含混生、变异和成长的进化算法求解问题。钟石泉等人^[14]考虑多车型和时间窗的约束限制,设计了改进的禁忌搜索算法对物流配送的多车场车辆调度问题进行求解。廖良才等人^[15]分析了非满载物流配送车辆调度问题,在卸货时间的范围中针对货物提早或延误到达产生的惩罚成本设置惩罚函数,并采用混合遗传算法进行优化调度。

也有学者对大体积货物运输问题进行了研究。预制构件作为大体积货物运输领域的研究热点,通常包括运输线路优化、运输时间优化、车辆数量优化等相关问题。Yin等人^[16]采用归一化加权法将流动时间和惩罚成本的双目标转为单目标的精细交货时间调度模型,考虑加入初始种群策略和自适应机制设计单亲遗传算法求解模型。Salehi等人^[17]提出具有车辆速度控制的绿色调度优化问题,权衡碳排放和运输总成本,解决绿色货车综合运输调度和驾驶员分配的问题,采用增广 ϵ -约束法求解该模型。Xiang等人^[18]提出微观层面的运输碳排放计算方法,将运输问题模拟为装箱问题(packing problem),并应用模态分析模型,根据车辆类型、路况和货物质量计算每辆车的碳排放量,最后再采用遗传算法来搜索最优解和相应碳排放值。Dan等人^[19]研究了具有交货时间窗口的预制构件车间生产和运输的问题,利用双层染色体编码方式设计遗传算法优化模型。Lin^[20]研究总结了遗传算法在车辆调度中展现出的优化潜力,为智能调度提供新思路。

总的来说,国内外的研究关注小体积货物的运输问题较多,讨论大体积货物的研究相对较少,因此对大体积货物中构件运输问题的研究就更少。本文从低碳视角出发,研究预制构件车辆运输调度问题,将现实需求转化

* 收稿日期:2025-01-08 修回日期:2025-03-01 网络出版时间:2025-05-15T17:29

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 12271295, No. 12371319);山东省自然科学基金面上项目(No. ZR2020MA028)

第一作者简介:高颖,女,研究方向为项目调度优化, E-mail: ying_st5114@163.com;通信作者简介:马冉,女,教授,博士生导师, E-mail: sungirlmr@126.com

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20250507.1635.005>

为模型的约束条件并研究具有现实意义的目标函数,考虑带有时间窗口和分批次运输的条件,以运输总碳排放量、运输总成本以及最大运输流动时间的最小化问题为目标,选择改进的遗传算法对模型进行求解,通过对案例进行数据模拟证明模型和算法的有效性。最后对目标模型进行敏感性分析,针对车辆、能源以及使用成本为管理者提供管理思路和有效建议。

1 问题描述

制造工厂 p 接收来自施工场地 i 的 n 个订单 o_{ij} ($j=1,2,\dots,n$),生产完成后由货车 a 分批次运送到施工场地 i (每辆货车能装载多个订单)。生产完成时间已知,该运输问题可类比为离线问题。制造工厂 p 与施工场地 i 之间有多条线路,任意线路的距离不同,往返运输可选择不同线路。车辆分批次调度问题类似于传统的车间调度,1 辆货车和 n 个订单问题可以看作是 1 台机器和 n 个构件的问题。每个订单 o_{ij} 都有相应的交货时间窗口。

每个订单仅需配送 1 次且仅能由货车 a 装载,直至货车 a 无法再完整装载一个完整的订单才可运输。由于货车 a 数量充足,处理同期订单集 O 时每辆货车 a 仅需往返 1 次。考虑限速、道路承载能力和货车载质量,且假设货车在任意线路的平均速度恒定并安全驾驶。同型号货车的货物装载能力相同,不同型号货车的货物装载能力不同。根据货车的装载情况,给定货车综合系数 α_a 和道路综合系数 β_l ,货车能源消耗情况与系数紧密相关。能源消耗通过给定单位距离货车 a 的满载能源消耗量和空载能源消耗量来表示。以订单数量为基准,给定单位质量订单内构件装载时间和卸货时间。货车运输开始时间与订单生产完成时间、装货时间、卸货时间和交货时间窗口有关。订单实际交货时间和约定交货时间窗之间的关系直接影响运输总费用。根据订单 o_{ij} 实际交货时间判断,若订单 o_{ij} 提早到达则有单位时间库存成本,若订单 o_{ij} 延误到达则有单位时间惩罚成本。同时,为响应环境保护政策,引入碳排放转换因子,设定碳排放额度,在接收施工现场 i 订单 o_{ij} 期间,超出碳配额部分需缴纳相应的碳排放费用,碳配额的剩余部分可按相同单价出售。

2 参数定义

下面对模型及算法所用到的参数进行详细说明(表 1)。

表 1 参数与相应的定义
Tab. 1 Parameters and definitions

参数	定义
P	预制构件工厂集合
C	施工场地集合
R	线路集合
O	订单集合
D	驾驶证技能(1s)的司机集合
A	货车集合
V	货车速度等级集合
t_{ij}^{finish}	订单 o_{ij} 的生产完成时间
n_{ij}	施工场地 i 的订单 j 的数量
o_{ij}	需要送往施工场地 i 的订单 j
$o_{ij(p)}$	送往施工场地 i 取货的所有订单数量
\bar{w}_{ij}	单位订单 o_{ij} 的质量
$t_{ij(L)}$	订单装货(load)时间
$t_{ij(UL)}$	订单卸货(unload)时间
$r_{l(p,i)}$	预制构件工厂 p 送往施工场地 i 经道路 l 的线路
$s_{l(p,i)}$	预制构件工厂 p 经过道路 l 到施工场地 i 的距离

续表 1

参数	定义
$v_{l,\max}$	预制构件工厂 p 往返施工场地 i 的道路 l 的速度上限
$\tau_{l,\max}$	预制构件工厂 p 通往施工场地 i 的道路 l 的承载质量上限
$t_{j(p,i)}^{\text{start}}$	预制构件工厂 p 送往施工场地 i 的订单 j 的运输的计划开始时间
$t_{j(p,i)}^{\text{d}}$	预制构件工厂 p 送往施工场地 i 的订单 j 的计划交货时间
$t_{j,\text{down}}$	预制构件工厂 p 送往施工场地 i 的订单 j 的计划的交货时间窗口下限
$t_{j,\text{up}}$	预制构件工厂 p 送往施工场地 i 的订单 j 的计划的交货时间窗口上限
τ_a	货车 a 的实际载质量
$\tau_{a,\max}$	货车 a 的载质量上限
$v_{a(p,i)}$	预制构件工厂 p 送往施工场地 i , 装载货物的货车 a 的平均速度
$v_{a(i,p)}$	施工场地 i 返回预制构件工厂 p , 空载货车 a 的平均速度
$v_{a(p,i),\max}$	预制构件工厂 p 送往施工场地 i 货车 a 的装载货物的速度上限
$v_{a(i,p),\max}$	施工场地 i 返回预制构件工厂 p 货车 a 的空载的速度上限
c_{inv}	订单 o_{ij} 提早到达的单位时间库存(inventory)成本
c_{pen}	订单 o_{ij} 延误到达的单位时间惩罚(penalty)成本
$c_{a,\text{tra}}$	货车 a 的单位能源成本
$c_{a,d_{\text{ls}}}$	司机 d_{ls} 驾驶货车 a 的单位距离人工成本
$q_{a(p,i)}$	预制构件工厂 p 送往施工场地 i , 单位距离货车 a 满载能源消耗量
$q_{a(i,p)}$	施工场地 i 返回预制构件工厂 p , 单位距离货车 a 空载能源消耗量
γ	碳排放量转换因子
$E_{\text{carbon,up}}$	碳排放量上限值
c_{car}	接收施工现场订单期间, 超出碳排放上限需额外缴纳单位碳排放费用
d_{ls}	驾驶证技能的司机
β_l	道路 l 影响货车碳排放量的综合系数
$\alpha_a = \tau_a / \tau_{a,\max}$	货车自身影响碳排放量的综合系数
x_{ij,d_{ls},v_a}	订单 o_{ij} 通过司机 d_{ls} 以速度 v_a 驾驶货车 a 为 1, 否则为 0
y_{ijla}	订单 o_{ij} 通过道路 l 驾驶货车 a 为 1, 否则为 0
z_{ija}	订单 o_{ij} 的构件被货车 a 装载运输到施工场地 i 且无法再完整装入下一个订单 $o_{i,j+1}$ 为 1, 否则为 0

3 模型构建

通过对问题的分析建立数学模型, 并给出模型的约束分析和目标函数。

3.1 约束分析

首先规定施工现场 i 的第 g 个订单至第 h 个订单是由货车 a 装载, $\forall a \in A, j \in [g, h], g, h \in [1, n], o_{ij} \in O = [1, n]$ 。下面对问题的约束限制逐一展开分析。

若订单 o_{ij} 和订单 $o_{i,j+1}$ 能在同一辆货车装载, 那么订单 $o_{i,j+1}$ 与订单 o_{ij} 可以同时开始运输, 式(1)为运输开始时间的一般情况约束。最后 1 个订单装载完成后, 货车无需等待并立即启动, 运输开始时间为 t_{ni}^{start} , 满足式(2):

$$t_{j(p,i)}^{\text{start}} = t_{j+1,(p,i)}^{\text{start}} \geq 0, z_{ija} = 0, \quad (1)$$

$$z_{ina} = 1. \quad (2)$$

当调度方案较好时, 需满足最早运输开始时间小于交货时间窗下限; 当调度方案较差时, 运输开始时间将无需达到货车运输的一般条件。表示如下:

$$t_{j(\rho,i)}^{\text{start}} \in \left[f_{ij} + \sum_{j \in [g,h]} t_{ij(L)}, t_{j,\text{down}} \right], t_{ij}^{\text{finish}} + \sum_{j \in [g,h]} t_{ij(L)} \leq t_{j,\text{down}};$$

$$t_{j(\rho,i)}^{\text{start}} = f_{ij} + \sum_{j \in [g,h]} t_{ij(L)}, z_{ija} = 1, t_{ij}^{\text{finish}} + \sum_{j \in [g,h]} t_{ij(L)} > t_{j,\text{down}}.$$

确保订单 o_{ij} 在计划的交货时间窗口内送达及对交货时间进行约束:

$$t_{j(\rho,i)}^d \in [t_{j,\text{down}}, t_{j,\text{up}}],$$

$$t_{j(\rho,i)}^d \geq t_{ij}^{\text{finish}} + \sum_{j \in [g,h]} t_{ij(L)} + \frac{S_{l(\rho,i)}}{v_{a(\rho,i)}}.$$

讨论关于交货期窗口会存在延误的情况。

若订单 $g-1$ 在上一辆货车装载并已经离开,且订单 $g, g+1, \dots, h-1, h$ 在同一辆货车等待未离开。当订单 $h+1$ 到达,货车即达到运输条件。但等待订单 $h+1$ 会使得订单 $g, g+1, \dots, h-1, h$ 的运输开始时间大于最大交货期窗口下限,导致多个订单的延误而产生较大的惩罚费用。因此选择订单 h 装载后启程货车 a ,此种情况约束信息如下:

$$z_{iha} = 1, \text{如果 } z_{i,g-1,a} = 1, z_{iga} = z_{i,g+1,a} = \dots = z_{iha} = 0 \text{ 且 } t_{ij}^{\text{finish}} + \sum_{j \in [g,h+1]} t_{ij(L)} > \max \{t_{g,\text{down}}, t_{g+1,\text{down}}, \dots, t_{h,\text{down}}\}.$$

为减少订单 o_{ij} 延误交货的情况,结合交货时间窗的最值来判断。 $z_{i,g-1,a} = z_{iha} = 1$ 且 $z_{iga} = z_{i,g+1,a} = \dots = z_{i,h-1,a} = 0$,有:

$$t_{j(\rho,i)}^{\text{start}} = \min \left\{ t_{j,\text{up}} - \frac{S_{l(\rho,i)}}{v_{a(\rho,i)}} \right\}, \text{如果 } \max \{t_{j(\rho,i)}^d\} \leq \min \{t_{j,\text{up}}\},$$

$$t_{j(\rho,i)}^{\text{start}} = \max \left\{ z_{ija} \left(t_{ij}^{\text{finish}} + \sum_{j \in [g,h]} t_{ij(L)} \right) \right\}, \text{如果 } \max \{t_{j(\rho,i)}^d\} > \min \{t_{j,\text{up}}\}.$$

3.2 目标函数

通过对问题和约束条件的深入分析,为响应环境保护政策、降低运营成本以及提升运输效率来满足市场需求,明确优化问题的核心目标为 3 个关键的目标函数,即最小化运输总碳排放量、最小化运输总成本和最小化运输流动时间。这些目标函数相互关联,共同构成优化模型的基础,为后续模型的构建和求解提供明确依据:

$$\min E_{\text{carbon,总运输}} = \gamma \sum_{o_{ij} \in O} \sum_{r_l \in R} \sum_{a \in A} \sum_{v_a \in V} \sum_{d_{ls} \in D} x_{ij,d_{ls},v_a} y_{ijla} E_q,$$

$$\min C_{\text{cost,总运输}} = C_{\text{能源}} + C_{\text{司机}} + C_{\text{额外}},$$

$$\min t_{\text{max}} = \sum_{o_{ij} \in O} \sum_{r_l \in R} \sum_{a \in A} \sum_{v_a \in V} \left(\frac{S_{l(\rho,i)}}{v_{a(\rho,i)}} + \frac{S_{l(i,\rho)}}{v_{a(i,\rho)}} + t_{ij(L)} + t_{ij(UL)} \right).$$

其中:

$$E_q = \alpha_a \beta_l q_{a(\rho,i)} s_{l(\rho,i)} + \alpha'_a \beta'_l q_{a(i,\rho)} s_{l(i,\rho)},$$

$$C_{\text{司机}} = \sum_{o_{ij} \in O} \sum_{d_{ls} \in D} \sum_{a \in A} \sum_{v_a \in V} x_{ij,d_{ls},v_a} c_{a,d_{ls}} (s_{l(\rho,i)} + s_{l(i,\rho)}), C_{\text{能源}} = \sum_{o_{ij} \in O} \sum_{r_l \in R} \sum_{a \in A} y_{ijla} z_{ija} c_{a,\text{tra}} E_q,$$

$$C_{\text{额外}} = C_{\text{碳排放}} + C_{\text{惩罚}} + C_{\text{提早}} =$$

$$c_{\text{car}} (E_{\text{carbon,总}} - E_{\text{carbon,up}}) + \sum_{o_{ij} \in O} \left(\sum_{t_{j,\text{up}}} c_{\text{pen}} |t_{j(\rho,i)}^d - t_{j,\text{up}}| + \sum_{t_{j,\text{down}}} c_{\text{inv}} |t_{j,\text{down}} - t_{j(\rho,i)}^d| \right).$$

3.3 优化模型

基于对参数符号的定义,为响应环境保护政策并降低资源消耗,建立数学模型,该模型考虑低碳视角下时间窗口和分批次运输预制构件的车辆调度问题,旨在使运输总碳排放量、运输总成本及最大运输流动时间最小化。因此,建立的模型如下:

$$f_1 = \min E_{\text{carbon,总运输}} = \gamma \sum_{o_{ij} \in O} \sum_{r_l \in R} \sum_{a \in A} \sum_{v_a \in V} \sum_{d_{ls} \in D} x_{ij,d_{ls},v_a} y_{ijla} E_q; \quad (3)$$

$$f_2 = \min C_{\text{cost,总运输}} = C_{\text{能源}} + C_{\text{司机}} + C_{\text{额外}}; \quad (4)$$

$$f_3 = \min t_{\text{max}} = \sum_{o_{ij} \in O} \sum_{r_l \in R} \sum_{a \in A} \sum_{v_a \in V} \left(\frac{S_{l(\rho,i)}}{v_{a(\rho,i)}} + \frac{S_{l(i,\rho)}}{v_{a(i,\rho)}} + t_{ij(L)} + t_{ij(UL)} \right). \quad (5)$$

$$\text{s. t. } \sum_{d_{ls} \in D} \sum_{v_a \in V} x_{ij,d_{ls},v_a} \leq 1, \forall o_{ij} \in O, a \in A, i \in C; \quad (6)$$

$$\sum_{r_l \in R} y_{ijla} \leq 1, \forall o_{ij} \in O, a \in A, i \in C; \tag{7}$$

$$\sum_{j \in [g, h]} z_{ija} \leq 1, \forall o_{ij} \in O, a \in A, i \in C; \tag{8}$$

$$\begin{cases} v_{a(p,i)} \leq v_{a(p,i), \max}; \\ v_{a(p,i)} \leq v_{l, \max} \end{cases}; \tag{9}$$

$$\begin{cases} v_{a(i,p)} \leq v_{a(i,p), \max}; \\ v_{a(i,p)} \leq v_{l, \max} \end{cases}; \tag{10}$$

$$\sum_{j=g}^h \bar{w}_{ij} o_{ij(p)} z_{ija} \leq w_{l, \max}, \forall o_{ij} \in O, a \in A, i \in C; \sum_{j=g}^h \bar{w}_{ij} o_{ij(p)} z_{ija} \leq w_{a, \max}, \forall o_{ij} \in O, a \in A, i \in C。$$

如果 $z_{i, g-1, a} = z_{i, h, a} = 1$ 且 $z_{i, g, a} = z_{i, g+1, a} = \dots = z_{i, h-1, a} = 0, g, h \in [1, n]$;

$$E_{\text{carbon, 总运输}} \leq E_{\text{carbon, up}}; \tag{12}$$

$$\sum_{o_{ij} \in O} \sum_{a \in A} z_{ija} n_{ij} = o_{ij(p)}; \tag{13}$$

$$t_{j(p,i)}^{\text{start}}, t_{j(p,i)}^{\text{d}} \geq 0, \forall o_{ij} \in O, p \in P, i \in C; \tag{14}$$

$$n_{ij}, w_a \geq 0, \forall o_{ij} \in O, a \in A, i \in C; \tag{15}$$

$$x_{ij, d_{ls}, v_a} = \{1, 0\}, \forall o_{ij} \in O, a \in A, v_a \in V, d_{ls} \in D, i \in C; \tag{16}$$

$$y_{ijla} = \{1, 0\}, \forall o_{ij} \in O, a \in A, r_l \in R, i \in C; \tag{17}$$

$$z_{ija} = \{1, 0\}, \forall o_{ij} \in O, a \in A, i \in C。 \tag{18}$$

其中:式(3)为最小化运输总碳排放量目标函数;式(4)为最小化运输总成本目标函数;式(5)为最小化最大运输流动时间目标函数;式(6)为订单 o_{ij} 只能选择 1 位司机 d_{ls} 以一种均匀车速 v_a 驾驶货车 a ;式(7)为订单 o_{ij} 只能通过 1 条线路 r_l 驾驶货车 a ;式(8)为订单 o_{ij} 被货车 a 完整装载且无法再完整装订单 $o_{i, j+1}$, 且达到运输条件并运输到施工场地 i ;式(9)、(10)为限速约束, 货车往返任意线路的速度不得超过道路限速及货车限速;式(11)为货车承载能力约束, 任意一辆货车 a , 装载所有订单总质量不得超过货车承载上限, 同时也不得超过道路的承载能力上限;式(12)为碳排放约束, 设置碳排放最大值来限制碳排放总量, 超出部分需额外缴纳费用, 若有剩余碳排放配额则可出售;式(13)为所有订单都被运送到施工场地 i ;式(14)为车辆运输的开始时间和交付时间都不小于 0 时刻;式(15)为订单总量和货车 a 实际载质量都不小于 0;式(16)为司机 d_{ls} 以速度 v_a 驾驶货车 a 的决策变量值;式(17)为道路决策变量值;式(18)为达到运输条件的决策变量值。

4 改进的遗传算法

已有的研究表明, 遗传算法在车辆调度问题中展现出较大的优化潜力^[20], 针对本文所考虑的问题, 下面将介绍一种改进的遗传算法, 用于求解所建立的车辆调度模型。算法的流程图、改进的遗传算法编码设计图和算法纠错举例分别如图 1~3 所示。

4.1 随机生成初始种群

1) 适应度值计算。通过

$$F(f_1, f_2, f_3) = \sum_{i=1}^3 \omega_i \frac{f_i - f_{i, \min}}{f_{i, \max} - f_{i, \min}}$$

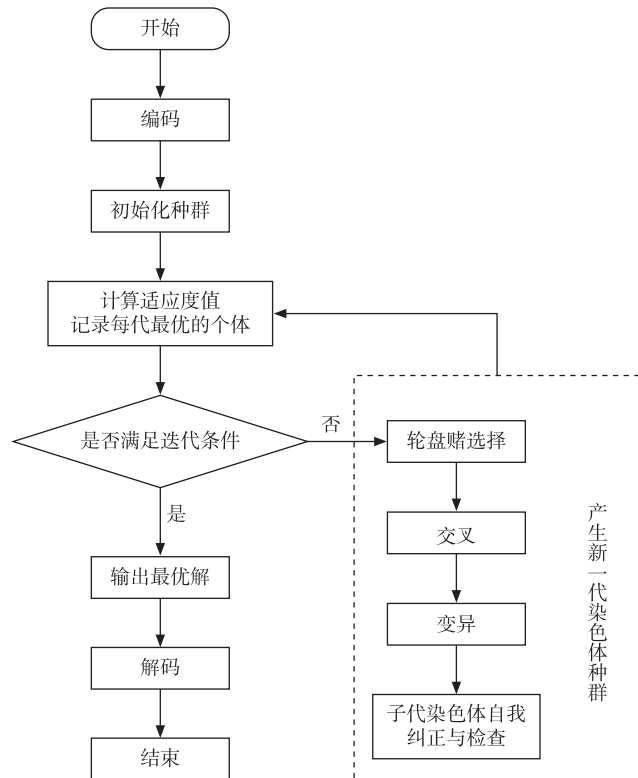


图 1 改进的遗传算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the improved genetic algorithm

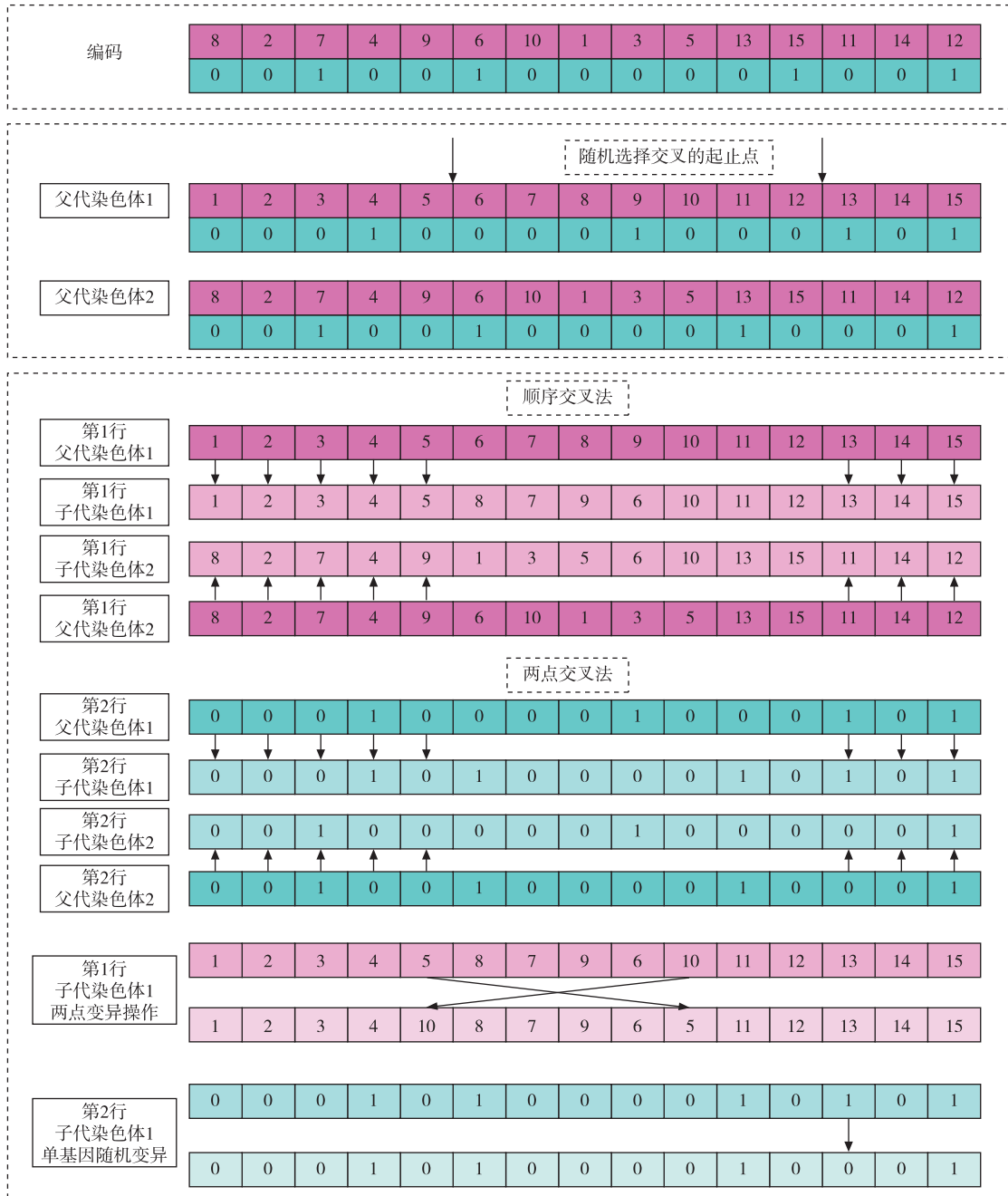


图 2 改进的遗传算法编码设计图

Fig. 2 Improved genetic algorithm encoding design diagram

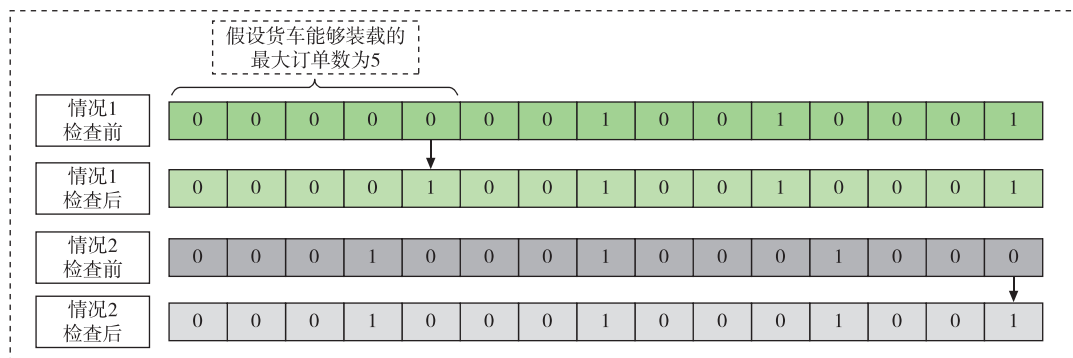


图 3 子代染色体纠错举例

Fig. 3 Example of offspring chromosome error correction

进行归一化加权计算,式中: f_i 为目标函数值, w_i 为目标函数权重值, $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$ 。此式子用于评估染色体适应度值,以确定订单和货车分配方案。目标函数值越小,适应度越高。

2) 精英策略。计算个体的优异值:

$$F_j = \sum_{j \in O} f_j, P_j = \frac{f_j}{F_j}。$$

设定适应度值的评价标准,将满足适应度标准值的个体视为优异个体,并直接进入下一代,其他个体则通过轮盘赌选择方法进行进化。

4.2 遗传算子

1) 选择。其他个体将通过轮盘赌选择方法进行进化。

2) 交叉。在父代种群中随机选择 2 条染色体,采用不同的交叉操作执行。基因段与父代染色体遗传方式相同。本文使用 $2 \times n$ 的基因矩阵来表示。染色体上部分表示订单基因,不可重复,采用顺序交叉操作。随机选择 2 条父代染色体基因片段起始和终止位置,复制到子代染色体再对缺少的基因进行补充。染色体下部分表示车辆运输基因,可重复,采用两点交叉操作。随机设置 2 个交叉点交换基因片段,得到 2 条子代染色体。从而创建子代染色体。

3) 变异。染色体产生自发的随机变化,交叉后的子代染色体也可存在变异。同样,染色体上部分基因不可重复,即随机选择 2 个基因位置互换;染色体的下部分基因可重复,该部分基因将会随机选择一个位置,基因在变化范围内随机变化。

5 案例分析

为验证本文所提出模型和算法的有效性,给定实际案例的部分信息(表 2 和表 3)进行验证。某预制工厂收到来自施工现场 1 的 5 个订单,结合第 3 部分给出的相关模型,利用第 4 部分求解货车的装载方案并得到相关结果。实验采用 Python 3.8 编程,在处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-7500U CPU @ 2.70 GHz 2.90 GHz、内存为 8 GB 的个人计算机上运行。

表 2 案例的参数信息 1

Tab. 2 Parameter information of the case 1

参数	订单编号									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
交付时间窗口/h	[72,73]	[72,73]	[78,79]	[78,79]	[78,79]	[78,79]	[96,97]	[96,97]	[96,97]	[102,103]
生产完成时间/h	73	73	73	79	79	73	79	79	97	97
单位时间提早惩罚成本/(元·h ⁻¹)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
单位时间延后惩罚成本/(元·h ⁻¹)	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
订单质量/t	11.1	5.80	6.50	8.35	6.56	7.55	9.8	6.5	7.1	10.3
单位质量装(卸)货时间/(h·t ⁻¹)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

5.1 实验结果

为验证改进遗传算法的有效性以及在模型构建中的应用,设定交叉概率为 0.75,变异概率为 0.05,通过这些参数设置以及算法优化,随机生成可行的调度方案(表 4)。 f_1 的最小值为方案 1 的 247.472 7 kg, f_2 的最小值为方案 2 的 4 878.688 0 元, f_3 的最小值为方案 3 的 100.389 5 h。此外,在可行调度方案得到综合较优解(表 5)。

图 4 为货车箱体装载货物直观示意图,为本文分析提供视觉支持。三目标函数权衡对比过程如图 5 所示。图 5 形成明显的曲面,解集能够有效揭示 3 个目标间的优异权衡,形成一个紧凑且多样化的前沿,不仅为决策者提供清晰的决策思路,也展示了改进后的遗传算法在多目标优化问题求解中的有效性。

表 3 案例的参数信息 2

Tab. 3 Parameter information of the case 2

车型	线路	距离/ km	道路限速/ (km · h ⁻¹)	满载 货物 质量/ t	空载单 位距离 耗油量/ (L · km ⁻¹)	满载单 位距离 耗油量/ (L · km ⁻¹)	单位能 源成本/ (元 · L ⁻¹)	单位距 离人工 成本/ (元 · km ⁻¹)	柴油的二氧 化碳排放 转换因子/ (kg · L ⁻¹)	碳排 放上 限值/ kg	碳排放的 单位售卖或 购买费用/ (元 · t ⁻¹)
A	R ₁	50.1	50								
	R ₂	51.2	55	32	0.20	0.50		11			
	R ₃	56.6	65				9		2.68	75.00	86.88
B	R ₁	50.1	50								
	R ₂	51.2	55	18	0.16	0.42		9			
	R ₃	56.6	65								

表 4 单目标最优方案

Tab. 4 Single-objective optimal solution

装载方案	订单具体信息	选择货车类型	选择线路	f ₁ /kg	f ₂ /元	f ₃ /h
方案 1	1,2,3 和 6	A	R ₁			
	4,5 和 7	A	R ₁	247.472 7	5 400.414 3	102.828 0
	8,9 和 10	A	R ₁			
方案 2	1,2,3 和 6	A	R ₁			
	4,5,7 和 8	A	R ₁	260.110 7	4 878.688 0	101.788 0
	9 和 10	B	R ₁			
方案 3	1,2,3 和 6	A	R ₃			
	4,5,7 和 8	A	R ₃	298.337 1	6 435.724 3	100.389 5
	9	B	R ₃			
	10	B	R ₃			

表 5 多目标最优方案

Tab. 5 Multi-objective optimization solution

装载方案	订单具体信息	选择货车类型	选择线路	f ₁ /kg	f ₂ /元	f ₃ /h
方案 1	1,2,3 和 6	A	R ₁			
	4,5 和 7	A	R ₁	247.472 7	5 400.414 3	102.828 0
	8,9 和 10	A	R ₁			
方案 2	1,2,3 和 6	A	R ₁			
	4,5,7 和 8	A	R ₁	264.075 8	5 797.691 0	100.652 0
	9	B	R ₁			
方案 3	10	B	R ₁			
	1,2,3 和 6	A	R ₁ 和 R ₂			
	4,5,7 和 8	A	R ₁ 和 R ₂	266.198 3	5 829.203 4	100.580 9
	9	B	R ₁ 和 R ₂			
	10	B	R ₁ 和 R ₂			

图 6 的箱线图则从统计学角度出发描述不同目标函数的优化结果。不难观察到,第 1 个为运输总碳排放量的目标函数和第 2 个为运输总成本费用的目标函数,中间值均接近箱体中下侧且解集范围较小,表明数据分布集中于较小值,优化结果较好,进一步证实优化解倾向于低的目标函数值,符合的目标最小化优化,即算法能够有效地找到性能更优的解。第 3 个目标函数为运输流动时间的箱体较长,表明运输流动时间数据中间 50% 的值变化范围相对较大,意味在降低运输流动时间方面有较大的优化空间。

综上所述,上述分析验证了本文的研究结果改进了遗传算法的有效性,且通过详细的图表分析,为多目标优化问题提供了更加深入的见解和实用的解决方案。这些发现对于实际的物流和调度问题具有重要的指导意义。

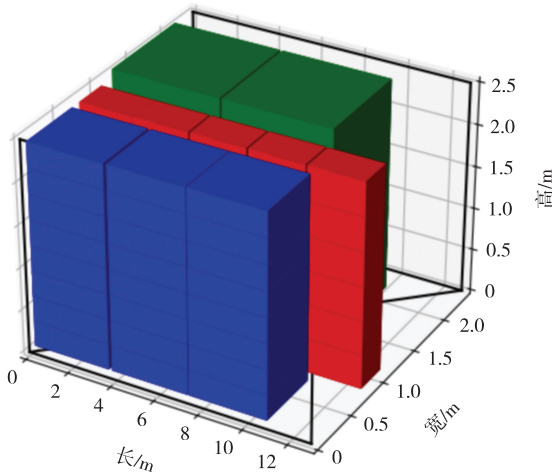


图 4 货车车厢的装载示例

Fig. 4 Loading example of a truck compartment

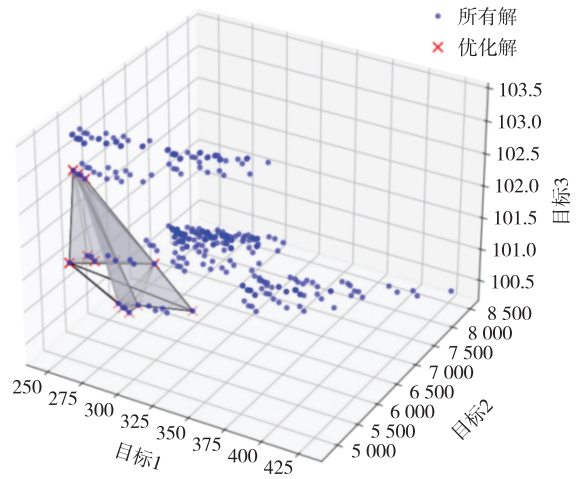


图 5 三目标的 Pareto 图

Fig. 5 Three-objective Pareto chart

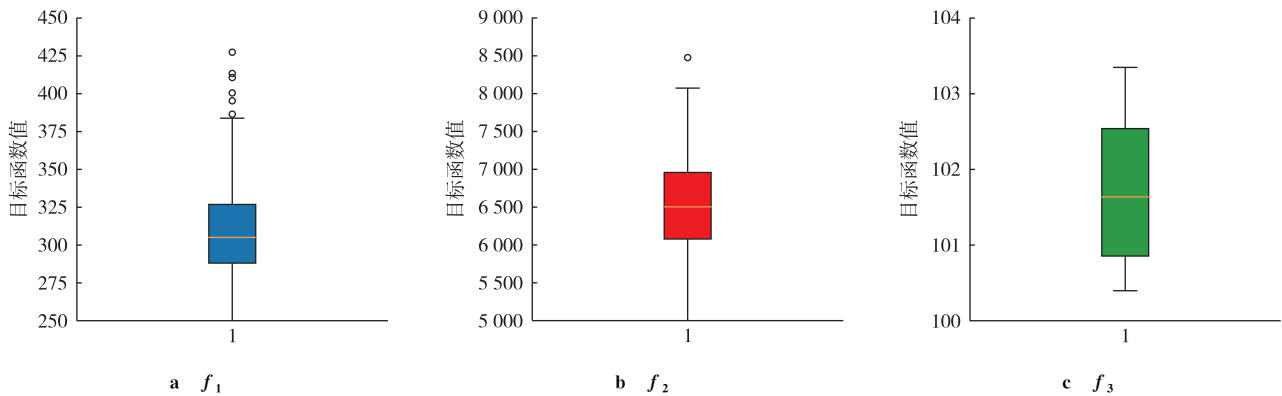


图 6 目标函数的箱线图

Fig. 6 The box plot of the objective function

5.2 敏感性分析

下面采用敏感性分析方法深入探究运输碳排放量、运输总成本以及运输总流动时间这 3 个关键因素对多目标优化模型输出的影响程度。通过系统调整每个目标函数的权重并观察对模型输出的影响,得到 3 组敏感性分析图(图 7)。这些图直观地展示权重变动对综合目标函数值的影响。

在进行敏感性分析时,在可行解集中随机抽取 6 组数据并优化,在保证目标函数权重总和不变的前提下,对单一权重进行调整。通过对比同组数据在图 7 中的增减变化趋势满足增幅与降幅等同关系。

分析结果显示,对 w_3 进行上下各 15% 的调整,可以观察到目标函数值在整体上呈现增加趋势,表明在决策过程中适当降低对运输流动时间的重视程度。同样地,对 w_2 进行上下各 15% 的调整时,目标函数值整体变化

趋势不明显,表明在决策过程中的运输总成本的权重比重敏感度较小,可调节性能较小。然而,对 w_1 进行上下各 15% 的调整时,目标函数值在整体呈现降低趋势且敏感度较其他两者较大,表明增加二氧化碳排放量的权重比重较为合理,在决策过程中应适当增加对二氧化碳排放的重视程度。

以上分析表明,本文采用的归一化加权方法有效地揭示了 3 个目标之间的影响差异,并通过结果数据的整体判断突出各目标的重要性。实践过程中应根据实际情况或需要达到的目标来进行分析求解并分配权重。该分析不仅为理解和优化多目标决策过程的权重分配提供重要的理论依据,也为实践提供有力支持。

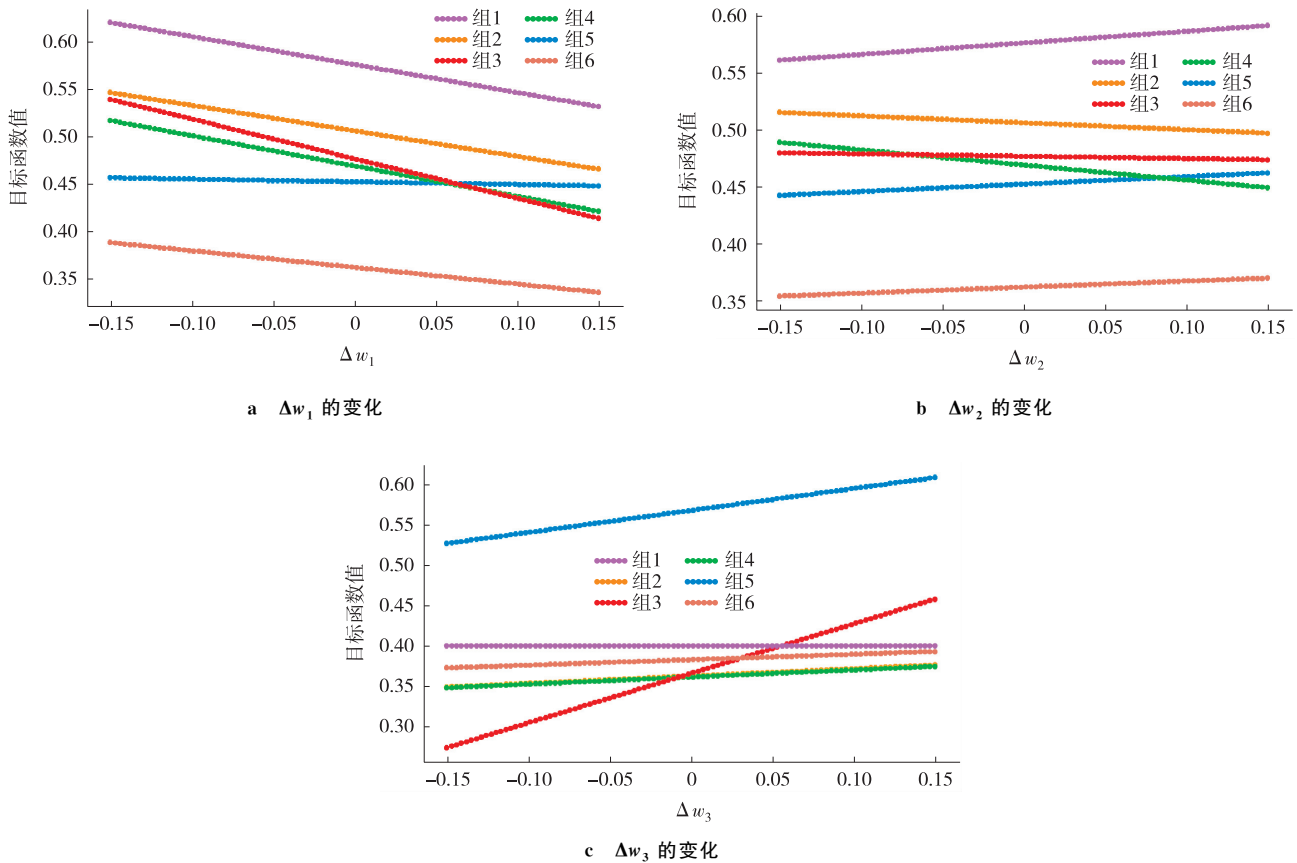


图 7 目标函数对权重 w_i 变化的响应

Fig. 7 The response of the objective function to changes in the weight w_i

6 总结与展望

本文采用改进的实际案例信息进行模拟验证,研究低碳视角下预制构件带时间窗分批运输的车辆调度问题。建立了最小化运输总碳排放量、最小化最大运输流动时间和最小化运输总成本为目标函数的车辆调度模型,并采用改进的遗传算法进行求解。为验证模型和算法的有效性,给出箱线图和三维的 Pareto 图,以权衡运输总碳排放量、运输总成本以及最大运输流动时间之间的联系。最后,通过改变权重对每个目标函数进行敏感性分析。所得到的结果为管理者在安排车辆运输问题时提供思路和参考意见。未来的研究可尝试更深入地探讨车辆调度的问题,考虑现实中的不确定性因素,进一步探索不同权重分配对其他目标函数值的影响,以及如何在多目标优化中实现更有效的目标平衡,使问题的求解更加贴现实。

参考文献:

[1] JAILLON L, POON C S. The evolution of prefabricated residential building systems in Hong Kong: a review of the public and the private sector[J]. Automation in Construction, 2009, 18(3): 239-248.
 [2] LI C Z, HU M C, XIAO B, et al. Mapping the knowledge domains of emerging advanced technologies in the management of prefabricated construction[J]. Sustainability, 2021, 13(16): 8800.

- [3] 张铭良. 装配式住宅施工技术要点及新兴应用[J]. 住宅与房地产, 2024(11): 68-70.
ZHANG M L. Key points and emerging applications of prefabricated residential construction technology[J]. Housing and Real Estate, 2024(11): 68-70.
- [4] 吴乐茵. “双碳”目标下 X 公司装配式建筑项目战略成本管理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
WU L Y. Research on strategic cost planning of prefabricated construction projects of X company under double carbon objectives [D]. Changchun: Jilin University, 2024.
- [5] 刘志硕, 李秋雨, 陈哲. 带硬时间窗的冷链电动车辆路径问题研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2023, 40(1): 53-60.
LIU Z S, LI Q Y, CHEN Z. Research on electric vehicle routing problem with time windows for cold chain[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2023, 40(1): 53-60.
- [6] 宋美娴. 冷链物流中带时间窗与能量消耗的车辆路径问题研究[D]. 聊城: 聊城大学, 2020.
SONG M X. Research on vehicle routing problem with time window and energy consumption in cold chain logistics [D]. Liaocheng: Liaocheng University, 2020.
- [7] 孙翊航. 考虑拥堵与低碳的冷链物流车辆路径问题研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
SUN Y H. Research on vehicle routing problem of cold chain logistics considering congestion and low carbon[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022.
- [8] 付文静. 城市生活垃圾分类收运系统的电动车辆调度及路径优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
FU W J. Electric vehicle scheduling and routing optimization for urban municipal waste collection and transportation system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [9] LI H M, TIAN Y, LI Z L, et al. Life-cycle economic and environmental impacts of municipal solid waste reverse logistics in residential areas[J]. Waste Management, 2023, 164: 200-208.
- [10] YU B, WU S H, YAO B Z, et al. Dynamic vehicle dispatching at a transfer station in public transportation system[J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(2): 191-201.
- [11] 陈旖旎. 船舶舾装件自动化仓储多 AGV 运输调度优化研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2022.
CHEN Y N. Research on multi-agvs scheduling in automated ship outfitting items warehouse[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2022.
- [12] 任佳玲, 李治鲜, 袁媛. 高铁时代下货物公铁联运发展探讨[J]. 中国储运, 2024(11): 140-141.
REN J L, LI Z X, YUAN Y. Discussion on the development of combined transport of goods by road and rail in the era of high-speed rail[J]. China Storage & Transport, 2024(11): 140-141.
- [13] 何胜学. 基于超级时空网络的公交车辆调度模型及 3M 进化算法[J]. 运筹学学报, 2023, 27(3): 68-82.
HE S X. Transit vehicle scheduling model and 3M evolutionary algorithm based on super spatiotemporal network[J]. Operations Research Transactions, 2023, 27(3): 68-82.
- [14] 钟石泉, 贺国光. 多车场有时间窗的多车型车辆调度及其禁忌算法研究[J]. 运筹学学报, 2005, 9(4): 67-73.
ZHONG S Q, HE G G. Study on multi-depot vehicle scheduling problem with time windows and multi-type vehicle limits and its tabu search algorithm[J]. Operations Research Transactions, 2005, 9(4): 67-73.
- [15] 廖良才, 王栋, 周峰. 基于混合遗传算法的物流配送车辆调度优化问题求解方法[J]. 系统工程, 2008, 26(8): 27-31.
LIAO L C, WANG D, ZHOU F. Solving method of the optimization problem of logistic distribution vehicle scheduling based on hybrid genetic algorithm[J]. Systems Engineering, 2008, 26(8): 27-31.
- [16] YIN J, HUANG R, SUN H, et al. Multi-objective optimization for coordinated production and transportation in prefabricated construction with on-site lifting requirements[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 189: 110017.
- [17] SALEHI M, JALALIAN M, VALI SIAR M M. Green transportation scheduling with speed control: trade-off between total transportation cost and carbon emission[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 113: 392-404.
- [18] XIANG Y M, MA K H, MAHAMADU A M, et al. Embodied carbon determination in the transportation stage of prefabricated constructions: a micro-level model using the bin-packing algorithm and modal analysis model[J]. Energy and Buildings, 2023, 279: 112640.
- [19] DAN Y R, LIU G W. Integrated scheduling optimization of production and transportation for precast component with delivery time window[J]. Engineering, Construction and Architectural Management, 2024, 31(8): 3335-3355.
- [20] LIN J J. A GA-based multi-objective decision making for optimal vehicle transportation[J]. Journal of Information Science & Engineering, 2008, 24: 237-260.

Operations Research and Cybernetics**Optimization of Prefabricated Component Batch Transportation Vehicle Scheduling with Time-Windowed under a Low-Carbon Perspective**GAO Ying¹, MA Ran¹, ZHANG Yuzhong²

(1. Department of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong 266520;

2. Department of Operations Research, Qufu Normal University, Qufu Shandong 276826, China)

Abstract: The study of carbon emissions in vehicle transportation scheduling is of significant importance. It explores the problem of batched vehicle scheduling for prefabricated components under different delivery time windows, aiming to find a transportation plan that consumes the least resources and incurs the lowest cost. To achieve this, a multi-objective green transportation scheduling model is developed, with the objectives of minimizing total carbon emissions, total transportation cost, and the maximum transportation lead time. By employing the normalization and weighting method, the multi-objective problem is transformed into a single-objective problem model. An improved genetic algorithm is designed, and appropriate crossover and mutation probabilities are set to provide feasible scheduling solutions. Additionally, simulation validation using actual case and sensitivity analysis of the comprehensive objective model demonstrate the effectiveness of the algorithm and provide important decision-making references for managers in optimizing vehicle transportation scheduling.

Keywords: vehicle transportation scheduling; multi-objective optimization; green and low-carbon; prefabricated components; improved genetic algorithm

(责任编辑 黄颖)