港口倒运车辆多目标优化调度方法*

周平伟[1]，王靓颖[2]，杨玉刚[1]，徐振奇[1]，陈奕成[1]，唐筱宁[3]，张冠军[4]
（1. 山东港口日照港集团有限公司，山东 日照 276826；2. 海博泰科技（青岛）有限公司，山东 青岛 266101；
3. 山东省海洋工程重点实验室，中国海洋大学，山东 青岛 266100；
4. 山东港口科技集团日照有限公司，山东 日照 276800）

摘要：针对大宗干散货港口倒运车辆调度中空驶率高、响应滞后及依赖人工经验等问题，为提升作业效率、降低运营成本并实现调度智能化，构建了一种多目标双层优化调度模型。模型上层通过班组与计划绑定，优化收益均衡、高优先级任务时效和车辆等待时间；下层执行车辆分配，以就近调度、收益最大化和分配公平性为目标，引入“重去重回”策略，将同质计划重组为闭环路径以减少空驶。基于港口实际作业数据，采用 Python 与 Gurobi 进行实验验证。结果表明：计划收益权重为 0.4~0.6 时，系统在收益公平性、高优先级任务完成率及设备配置合理性上达成平衡；公平性权重为 0.1~0.3 时，可维持 85%以上作业效率并实现负荷合理分配；相较于传统单计划调度，“重去重回”策略在 29 个实例中实现行驶路程节约 30%~44%。该模型为港口倒运作业的智能化与低成本运营提供了有效优化路径。

关键词：港口；倒运车辆；车辆调度；多目标优化；整数规划
中图分类号：U652.7+2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0066-10

Multi-objective optimization scheduling method for port transfer vehicles

ZHOU Pingwei[1], WANG Liangying[2], YANG Yugang[1], XU Zhenqi[1], CHEN Yicheng[1], TANG Xiaoning[3], ZHANG Guanjun[4]
(1. SPG Rizhao Port Group Co., Ltd., Rizhao 276826, China; 2. Hi-port-tech (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266101, China;
3. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
4. Shandong Port Technology Group Rizhao Co., Ltd., Rizhao 276800, China)

Abstract: To address the problems of high empty-load rates, delayed responses, and over-reliance on manual experience in the scheduling of shunting vehicles at bulk dry bulk cargo ports, a multi-objective bi-level optimal scheduling model is constructed to improve operational efficiency, reduce operating costs, and realize intelligent scheduling. The upper level of the model optimizes revenue equilibrium, the timeliness of high-priority tasks, and vehicle waiting time by associating work teams with operation plans. The lower level implements vehicle assignment with the objectives of proximity dispatching, revenue maximization and allocation fairness, and adopts Fully Loaded Both Ways strategy to reorganize homogeneous operation plans into closed-loop routes to reduce empty running mileage. Numerical experiments are conducted using Python and Gurobi based on actual port operation data. The results indicate that when the plan revenue weight is set between 0.4 and 0.6, the system achieves a balance among revenue fairness, the completion rate of high-priority tasks, and equipment configuration rationality. When the fairness weight ranges from 0.1 to 0.3, the system maintains an operational efficiency above 85% and realizes reasonable load distribution. Compared with traditional single-plan scheduling, Fully Loaded Both Ways strategy reduces travel distance by 30%－44% in 29 instances. The proposed model provides an effective optimization approach for the intelligent and low-cost operation of port transfer operations.

Keywords: port; transfer vehicle; vehicle scheduling; multi-objective optimization; integer programming

收稿日期：2025-11-17　　**录用日期：**2025-12-22
***基金项目：**山东省重点研发计划项目(2024CXGC010811)
作者简介：周平伟(1984—)，男，硕士，高级政工师、工程师、经济师，研究方向为智慧港口、生产管控系统。

水运工程

随着全球贸易发展及供应链整合的持续推进，现代港口货物吞吐量显著增长，其中大宗干散货运输需求的快速提升对港口内部物流效率提出了更高要求[1]。在此背景下，倒运作业作为衔接码头、堆场与集疏运环节的关键流程，其运行效率直接影响港口整体运营效能[2]。目前，港口倒运调度仍主要依赖人工经验与简单规则，难以全面感知全局状态，导致车辆空驶率高、响应滞后、资源利用不均等问题突出[3]。因此，通过智能化手段优化车辆调度、减少空驶等待、提升作业效率，已成为推动干散货港口提质增效的重要途径[4]。

在车辆调度优化领域，现有研究方法主要可分为元启发式算法与数学模型驱动。车辆调度属于非确定性多项式难问题(non-deterministic polynomial hard，NP-hard)[5]，常采用遗传算法、蚁群算法、粒子群算法及其混合形式进行求解。这些研究的核心贡献在于通过改进算法机制，如引入多目标优化[6]、混合局部搜索策略[7]、设计新型邻域结构[8]等来提升搜索效率与解的质量，有效应对了组合爆炸带来的计算挑战。在数学模型驱动的研究中，整数规划、双层规划等方法被用于构建更具解释性的调度框架。这部分研究涵盖了包括带时间窗的车辆路径问题[9]、多中心可拆分需求配送[10]以及机场地勤车辆调度[11]等多个领域。这些研究展示了严格数学模型在处理复杂约束和多层决策目标方面的优势。然而，上述方法的研究背景与港口内部倒运场景存在显著差异，其局限性在港口这一复杂垂直场景下被进一步凸显：一方面，元启发式方法往往对参数敏感，且对“公平-效率-成本”等多目标权衡的可解释性较弱；另一方面，现有数学模型多依赖于其原生场景的假设，难以有效刻画港口动态调度中特有的任务重组、设备协同及多维度作业约束等核心特征。因此，两类方法均未能充分适配港口实际业务，在场景针对性、多目标协同机理及设备配套调度等方面仍存在明显不足。

为弥补上述研究缺口，深度融合港口实际业务，本文构建了一个面向干散货港口倒运场景的双层调度优化模型。该模型在理论上推动了车辆调度研究与垂直场景的紧密结合，在实践上可为港口智能化派工提供决策支持。其创新性主要体现在以下方面：上层模型围绕班组分配，以收益均衡、执行效率最大化和等待时间最小化为目标，实现班组与计划的高效匹配；下层模型负责车辆调度，以就近分配、收益最大化和作业量公平性为目标，细化车辆任务安排。此外，提出了一种“重去重回”推荐策略，通过整合货物类型相同的倒运计划，有效减少空驶里程，降低运输成本。最后，通过多组对比实验验证，所述模型相较于传统调度方式表现出显著优势。

1　港口倒运车辆调度模型构建

1.1　港口倒运概况

当前港口内部干散货倒运作业的车辆调度模式主要依托调度人员的个体经验积累及相对简化的作业规则进行任务指派与路径规划。当港口内有倒运派工计划时，港口调度人员根据经验以及班组现状为空闲班组分配倒运计划，班组接收倒运计划后，依据班组内现有的装载机和翻斗车数量，分派各个倒运车辆完成港内倒运任务，直到港内大宗干散货搬运完毕，一次倒运派工任务完成。该作业场景涉及装载机、翻斗车在多垛位间的复杂协同作业。

在港口作业复杂性持续升级、效率要求不断提高的背景下，该模式固有的局限性日益显著。调度主体难以实现对作业现场动态变化的全局性、高精度态势感知，决策过程呈现出较强的非结构化特征，缺乏基于海量数据的系统性寻优机制。

针对当前港口现状，构建模型时作出以下假设：1)装卸时间、车辆行驶速度恒定，车辆完成任务后立即投入新任务且无需休息；2)所有设备持续正常运行，无故障停机，且同类型设备工作效率相同；3)班组车辆数量固定，车辆不可跨班组共享。

1.2　倒运车辆模型第 1 层

1.2.1　约束条件

在实际场景中，港口内的一个倒运派工计划只能分派给一个班组完成，且如果计划 j 分派给班

组 i，那么班组 i 必须给计划 j 分配装载机和翻斗车，因此有如下约束：

$$\begin{cases}\sum_{i=1}^{r} y_{i,j} \leqslant 1, j = 1,2,\cdots,n \\ y_{i,j} \leqslant x_{i,j} \\ y_{i,j} \leqslant z_{i,j}\end{cases} \tag{1}$$

式中：$x_{i,j}$ 为第 i 个班组给第 j 个计划分配的翻斗车数量；$y_{i,j}$ 为 0~1 变量，当第 j 个计划分配给第 i 个班组时为 1；$z_{i,j}$ 为第 i 个班组给第 j 个计划分配的装载机数量。i 为区间 [1，r] 中的整数；j 为区间 [1，n] 中的整数；r 为班组数量；n 为计划数量。

每个班组分配给所有计划的装卸车辆之和不能超过该班组拥有的车辆总数：

$$\begin{cases}\sum_{j=1}^{n} x_{i,j} m_i \\ \sum_{j=1}^{n} z_{i,j} \leqslant l_i \\ x_{i,j} \leqslant m_i y_{i,j} \\ z_{i,j} \leqslant l_i y_{i,j}\end{cases} \tag{2}$$

式中：m_i 为第 i 个班组的翻斗车数量，l_i 为第 i 个班组的装载机数量。

在港内倒运过程中，翻斗车主要承担大宗干散货的短距离水平运输与快速卸货任务，装载车的核心职能是执行散货的初始装载作业，翻斗车的效率直接影响倒运系统吞吐量和运输车辆利用率。为尽量减少翻斗车在执行计划过程中的排队等待装车的时间，对翻斗车与装载机数量关系进行了约束：

$$\begin{cases}\frac{S_j}{t_j}\sum_{i=1}^{r} z_{i,j} - 1 \leqslant h_j \leqslant \frac{S_j}{t_j}\sum_{i=1}^{r} z_{i,j} \\ \sum_{i=1}^{r} z_{i,j} \leqslant \sum_{i=1}^{r} x_{i,j}\end{cases} \tag{3}$$

式中：h_j 为理想状态下计划 j 需要的翻斗车数量；t_j 为计划 j 装载一次花费的时间；S_j 为计划 j 路程中花费的时间。在倒运派工计划中，翻斗车的数量不能少于装载机的数量。

在作业中，装载机在垛位时要满足安全间距。

$$\sum_{i=1}^{r} z_{i,j} \leqslant \frac{c_j}{L} \tag{4}$$

式中：c_j 为第 j 个计划的垛长；L 为装载机的安全间距。

为提升港内翻斗车综合利用率，尽可能使每一辆翻斗车都处于倒运计划中，对翻斗车数量施加如下约束条件：

$$\sum_{i=1}^{r} x_{i,j} + \delta_j^1 - \delta_j^2 = h_j \tag{5}$$

式中：δ_i^1、δ_j^2 为实际安排的翻斗车数量和理想情况的偏差。

1.2.2 目标函数

针对第 1 层模型中计划与班组的关系，设计了 3 个目标函数，分别是 obj1、obj2 和 obj3，具体描述如下。

obj1：

$$\min f_1 = \frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r}\left(\frac{1}{m_i}\sum_{j=1}^{n} y_{i,j} v_j - \frac{1}{r}\sum_{i=1}^{r}\frac{1}{r}\sum_{j=1}^{n} y_{i,j} v_j\right)^2 \tag{6}$$

式中：v_j 表示计划 j 的价值。该目标函数旨在最小化计划收益的方差，使得收益在各个班组之间尽可能均匀分配。

obj2：

$$\max f_2 = \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{a_j q_j S_j}\left(\sum_{i=1}^{r} x_{i,j}\right) W_j \tag{7}$$

式中：a_j 为计划 j 的优先级；q_j 为计划 j 的作业量；S_j 为计划 j 路程中花费的时间；W_j 为翻斗车装载计划 j 的货物载质量。该目标函数旨在优先分配优先级更高的计划，使得计划的执行时间最短。

obj3：

$$\min f_3 = \sum_{j=1}^{n} (\delta_j^1 + \delta_j^2) \tag{8}$$

该目标函数使安排的翻斗车的数目尽可能地接近最理想的情况，即翻斗车和装载机配套使用效率尽可能地高。

最终得到的目标函数式为：

$$\min F_1 = w_1 f_1 - w_2 f_2 + w_3 f_3 \tag{9}$$

式中：w_1 为对应最小化计划收益的权重系数；w_2 为对应计划时间最短的权重系数；w_3 为对应翻斗车和装载机配套使用效率最大化的权重系数。

水运工程

1.3　倒运车辆模型第 2 层

1.3.1　约束条件

约束每个计划只在班组内派车：

$$\begin{cases} f_{i,k,j} \leqslant y_{i,j} & \forall k \in \{1,\cdots,m_i\},\forall i,\forall j \\ g_{i,k,j} \leqslant y_{i,j} & \forall k \in \{1,\cdots,l_i\},\forall i,\forall j \end{cases} \tag{10}$$

式中：$f_{i,k,j}$ 和 $g_{i,k,j}$ 为 0~1 变量，分别表示班组 i 中的第 k 辆翻斗车或装载机是否分配给计划 j。

确保一辆装卸设备只能服务一个计划，有如下约束：

$$\begin{cases} \sum_{j=i}^{n} f_{i,k,j} \leqslant 1 \\ \sum_{j=1}^{n} g_{i,k,j} \leqslant 1 \end{cases} \tag{11}$$

计划分配的装卸设备数量等于该计划在第 1 层模型中分配的数量：

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{m_i} f_{i,k,j} = x_{i,j} \\ \sum_{k=1}^{l_i} g_{i,k,j} = z_{i,j} \end{cases} \tag{12}$$

1.3.2　目标函数

针对第 2 层模型中的优化目标，设计了 3 个目标函数，分别是 obj4、obj5 和 obj6，具体描述如下。

obj4：

$$\min f_4 = \sum_{i=1}^{r}\sum_{k=1}^{l_i}\sum_{j=1}^{n} b_{i,k,j} g_{i,k,j} \tag{13}$$

式中：$b_{i,k,j}$ 为班组 i 中的第 k 辆装载机从当前位置前往计划 j 花费的时间。最小化该目标函数，使装载机的分配时间消耗最小。

obj5：

$$\min f_5 = \sum_{k=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} c_{i,k,j} f_{i,k,j} \tag{14}$$

式中：$c_{i,k,j}$ 表示班组 i 中的第 k 辆翻斗车从当前位置前往计划 j 花费的时间。最小化该目标函数，使翻斗车的分配时间消耗最小。

obj6：

$$\min f_6 = \sum_{i=1}^{r}\frac{1}{m_i}\sum_{k=1}^{m_i}\left[e_{i,k} + \sum_{j=1}^{n} v_j f_{i,k,j} - \frac{1}{m_i}\sum_{k=1}^{m}\left(e_{i,k} + \sum_{j=1}^{n} v_j f_{i,k,j}\right)\right]^2 \tag{15}$$

式中：$e_{i,k}$ 为班组 i 中的第 k 辆翻斗车的历史收入。该目标函数通过最小化翻斗车任务量的差异，实现任务的公平分配。

最终得到的目标函数式为：

$$\min F_2 = w_4 f_4 + w_5 f_5 + w_6 f_6 \tag{16}$$

式中：w_4 对应最小化装载机分配时间的权重系数；w_5 为对应最小化翻斗车分配时间的权重系数；w_6 为对应最小化翻斗车任务量的差异的权重系数。

1.4　“重去重回”推荐算法

传统调度模式中，作业计划往往独立执行，即单个计划从起点到终点完成运输后，车辆空驶返回起点。这一过程中“空驶距离”占比过高，不仅增加了燃油消耗与车辆损耗，还降低了运输效率。针对这一问题，提出了一种“重去重回”推荐算法。在满足货物类型匹配的前提下，“重去重回”推荐算法将两个独立作业计划组合为“重去重回”闭环路径，通过共享运输资源减少空驶距离，见图 1。对比单独执行两个计划的倒运，“重去重回”策略节约了单个计划内空跑的路程。

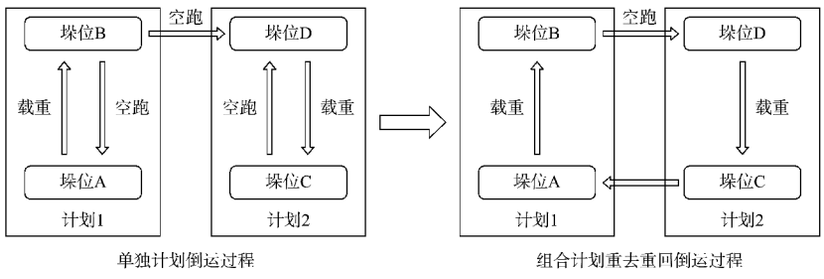


图 1　不同倒运方式对比

Fig. 1　Comparison of different transfer modes

水运工程

1.5　模型总体框架

将“重去重回”推荐算法与倒运车辆双层模型相结合，该港口车辆调度模型的整体框架见图 2。当计划信息判断为倒运派工任务，则通过“重去重回”推荐算法将两个独立的作业计划组合，再通过双层派工模型为班组分配计划，并对计划分配一定数量的装载机和翻斗车。最终根据模型派工计划展开港口作业，实现自动化倒运派工流程。

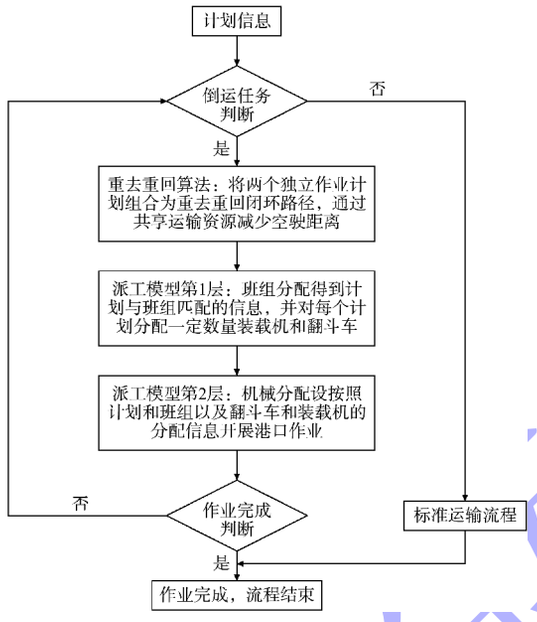


图 2　港口车辆调度模型整体框架

Fig. 2　Overall framework of port vehicle scheduling model

2　实验结果与分析

实验所有代码均使用 Python 3.9 编写，其中模型构建与优化求解调用 Gurobi 10.0.1 数学规划求解器，数据处理与分析依托 pandas、NumPy 等科学计算库完成。实验运行于 Windows 10 操作系统，硬件配置为 Intel Core i5-9400 处理器、8 GB 内存。

2.1　算例介绍

为全面验证模型性能，实验基于国内某大型干散货港口多个实际作业港区的倒运记录，构建了基准数据集。数据已进行严格的脱敏与标准化处理，包括隐去具体标识、对计划与垛位进行重新编码。原始生产数据字段较多，此处仅列出与调度优化直接相关的关键字段，见表 1。数据覆盖了港口主要的干散货种(如铁矿、煤炭、石油焦)，并通过分层抽样确保各类货物的比例与实际作业分布一致。

考虑到港口内部不同港区在垛位布局、设备配置及任务规模上存在结构性差异，区分不同港区或相同港区不同资源配置，构建了 5 组实验数据集，见表 2。垛位及装卸车辆数据将从港口生产系统中实时调取。

表 1　计划任务信息

Tab. 1　Scheduled task information

计划名	货种	作业量/t	起点	终点	载质量/t	价值/元	单次距离/km
计划 1	石油焦	3000	西 12-5-19	南 4-0-1	30.0	12 510.00	6.5
计划 2	铁矿	4 230	南散 3-22	N12D-04	40.5	2 834.10	1.0
计划 3	焦炭	300	南煤 2-85	西 11G-J1	30.0	1 020.00	5.5
计划 4	焦炭	20	西 13F-J1	西 15-2-8	30.0	39.40	2.0
计划 5	焦炭	200	西 11G-J1	南煤 2-5	30.0	680.00	5.5
计划 6	铁矿	500	南矿 6-1	南矿 1-8	55.0	335.00	1.0
计划 7	铝矾土	15 000	南矿 6-8	南铁 2-10	34.5	26 400.00	2.5
计划 8	铁矿	500	南散 5-9AK	南铁 12-5AK	55.0	1 045.00	5.5
计划 9	煤炭	30	南煤 10-2-4	南煤 3-1-3	30.0	47.40	1.0
计划 10	铁矿	2 000	南散 3-17	南散 6-4	40.5	1 340.00	1.0

表 2　倒运计划数据集信息

Tab. 2　Information of transfer plan dataset

数据集	港区	计划数量/个	垛位数量/个	翻斗车数量/辆	装载机数量/辆
DS1	01	60	989	103	41
DS2	02	62	986	101	47
DS3	01	56	993	300	53
DS4	01	52	994	20	42
DS5	02	52	990	200	50

2.2　不同调度目标下的实验结果

为验证所提港口调度优化模型在真实场景下的有效性，并深入探究其在不同核心运营目标导向下的适应性与性能差异，实验将以港口调度需求为优先目标，分别设定不同调度目标下的实验参数，对所提算法进行多目标、多维度的评估与对比分析，旨在为港口管理者在不同运营策略下应用该算法提供实证依据与决策参考。

2.2.1　第 1 层倒运车辆模型实验结果与分析

在实际倒运作业中，若港口以计划收益均衡分配为最大目标，则设置其他目标权重平等，观察 w_1 权重对优化结果的影响，见表 3。该表展示了当港口调度以计划收益均衡分配为核心优化目标时，权重系数 w_1 对优化结果的影响。在固定其他目标权重相等的前提下，随着收益均衡性目标权重从 0.9 逐步降低至 0.4，目标函数值呈现持续下降趋势，表明降低收益均衡性目标的优先程度有助于提升整体调度方案的优化效能。当 w_1 取值 0.9 时，Gap 值高达 112.96%，显示过度强调班组间收益均衡将严重削弱求解质量，导致解方案显著偏离全局最优。

表 3　最优均衡分配收益方案实验结果

Tab. 3　Experimental results of optimal and balanced benefit allocation scheme

参数组合	w_1	w_2	w_3	目标函数值	Gap 值/%
组合 1	0.90	0.05	0.05	−0.118 5	112.96
组合 2	0.80	0.10	0.10	−0.391 5	28.91
组合 3	0.70	0.15	0.15	−0.492 7	53.67
组合 4	0.60	0.20	0.20	−0.908 3	11.15
组合 5	0.50	0.25	0.25	−1.103 8	14.31
组合 6	0.40	0.30	0.30	−1.451 9	4.28

实验结果揭示出多目标调度中的关键权衡关系，尽管收益均衡是核心目标，但赋予其过高权重将抑制其他关键性能指标的优化空间。当 w_1 权重控制在 0.4～0.6 之间时，系统可在收益分配公平性、高优先级计划执行时效性以及设备资源配置合理性三者间取得较优平衡，此时综合目标函数值与求解质量均达到理想水平。

港口调度中，通常会有一些优先级高的货物需要优先处理，则需要最优优先级方案来进行倒运调度，当模型以 w_2 权重优先时，实验结果见表 4。

表 4　最优优先级方案实验结果

Tab. 4　Experimental results of optimal priority scheme

参数组合	w_1	w_2	w_3	目标函数值	Gap 值/%
组合 7	0.05	0.90	0.05	−4.010 9	1.90
组合 8	0.10	0.80	0.10	−4.126 6	0.61
组合 9	0.15	0.70	0.15	−3.309 1	6.76
组合 10	0.20	0.60	0.20	−2.985 5	10.74
组合 11	0.25	0.50	0.25	−2.185 4	15.47
组合 12	0.30	0.40	0.30	−1.968 2	16.16

表 4 的实验结果揭示了最优优先级方案的调度规律。当模型赋予优先级过高权重时，如组合 7 的 $w_2 = 0.9$，虽然目标函数值和 Gap 值表现良好，表明系统能有效保障紧急货物的快速周转，但过度倾斜的权重配置可能挤压其他运营需求的优化空间。

当 w_2 微调至 0.8 时，目标函数值进一步优化至−4.126 6，同时 Gap 值降至最低，为 0.61%。这说明保留 10%～20%的权重分配给收益均衡性和翻斗车配置优化，反而能更全面提升调度效能。该现象也说明港口在优先处理货物时，需同步考虑班组间任务分配的公平性及设备利用率，避免因资源过度集中引发其他环节的拥堵。

综上所述，第 1 层模型通过权重配置实现了多目标调度的场景化适配，组合 6 与组合 8 分别定义了收益均衡模式与优先级模式的最优实践，为港口决策提供了数据驱动的选择依据。

水运工程

2.2.2　第 2 层倒运车辆模型实验结果与分析

在倒运班组分派车辆时，需要考虑两个核心目标，一种是以速度为基准的最优速度方案，一种是考虑任务分配公平性的方案，实验验证见表 5。不同参数组合下的目标函数变化趋势见图 3。

表 5　第 2 层倒运车辆模型实验结果

Tab. 5　Experimental results of the second-layer transfer vehicle model

参数组合	w_4	w_5	w_6	目标函数值
组合 13	0.50	0.50	0	84.001 0
组合 14	0.45	0.45	0.10	99.425 2
组合 15	0.40	0.40	0.20	121.049 3
组合 16	0.35	0.35	0.30	135.223 5
组合 17	0.30	0.30	0.40	153.797 7
组合 18	0.25	0.25	0.50	176.621 8
组合 19	0.20	0.20	0.60	190.546 0
组合 20	0.15	0.15	0.70	208.020 2
组合 21	0.10	0.10	0.80	228.994 3
组合 22	0.05	0.05	0.90	246.368 5
组合 23	0	0	1.00	265.242 7

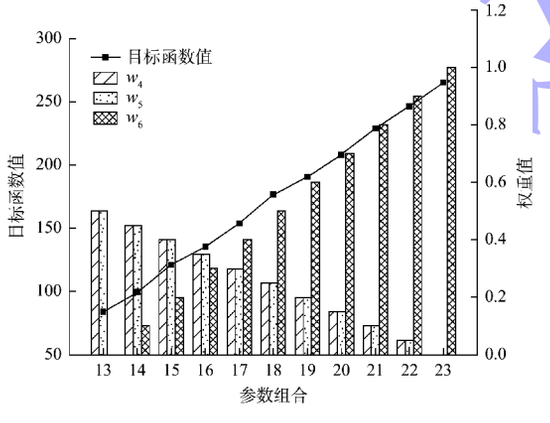


图 3　不同参数组合下的目标函数变化趋势

Fig. 3　Variation trend of objective function under different parameter combinations

表 5 和图 3 的实验结果清晰地揭示了模型中速度优化与任务公平性之间的本质性权衡。当模型完全聚焦于设备时间效率目标时，目标函数值达到最低。然而随着任务公平性权重 w_6 的提升，目标函数值呈现持续单调上升趋势。这种变化规律反映出过度追求车辆任务量的均衡分配虽可避免班组间任务负荷差异，但将导致系统总作业时间成本增长超过两倍，严重削弱港口整体周转效能。值得注意的是，当公平性权重 w_6 处于 0.1~0.3 之间时，目标函数值增长相对平缓。这表明在速度优先的框架下引入适度公平性约束，对作业效率的负面影响处于可控范围。

该实验结果对实际调度决策具有直接指导意义，在船舶集中到港的高压作业期，应采用组合 13 模式，最大限度压缩设备时间成本以缓解拥堵；而在常态化运营阶段，推荐采用组合 14~16，在保留 85%以上时间效率的同时，防范资源分配失衡风险。这种分层策略与首级调度模型形成呼应，港口资源分配需根据场景特征动态调整核心目标权重，在速度与公平的博弈中寻求最优平衡点。

2.3　“重去重回”策略重要性分析

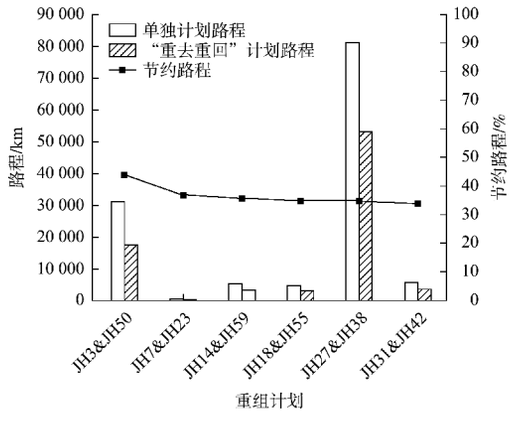
为了展示模型中重去重回策略的有效性，展示了 5 个数据集经“重去重回”策略处理后的结果，见表 6。结果表明，与单独执行各个计划相比，使用“重去重回”策略重组绑定计划能够不同程度地减少车辆行驶路程，在 29 个实例中均节约 30%以上的路程。

具体而言，所有计划在经过“重去重回”处理后，计划路程均低于单独计划路程，空跑路程也相应减少，见图 4。在节约路程百分比上，不同计划的表现虽有差异，但整体呈现出良好的节约态势。DS1 中 JH3 与 JH50 的计划节约 44%，DS5 中 JH5 与 JH17 的计划节约 43%，这类表现突出的计划印证了“重去重回”的优化潜力；多数计划的节约百分比稳定在 35%左右，体现出该处理方式在不同场景下的稳定性。

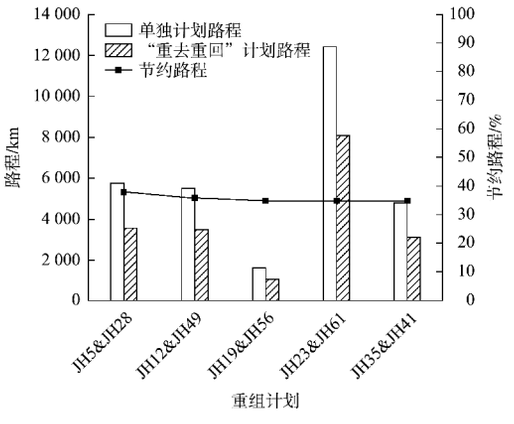
表 6　不同数据集经“重去重回”处理的计划结果

Tab. 6　Scheduling results of different datasets under the Fully Loaded Both Ways strategy

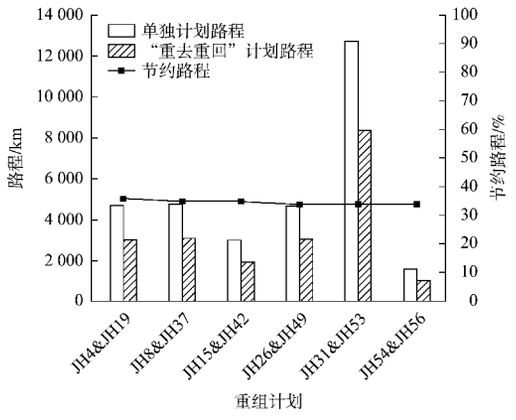
数据集	计划 1	计划 2	单独计划路程/km	“重去重回”计划路程/km	单独计划空跑路程/km	“重去重回”空跑路程/km	节约路程/%
DS1	JH3	JH50	31 169. 09	17 453. 55	13 715. 55	581. 50	44
	JH7	JH23	422. 91	266. 27	193. 46	36. 82	37
	JH14	JH59	5 277. 43	3 403. 42	2 356. 72	482. 70	36
	JH18	JH55	4 793. 30	3 107. 30	2 114. 65	428. 65	35
	JH27	JH38	81 250. 39	53 157. 50	37 457. 20	9 364. 30	35
	JH31	JH42	5 723. 84	3 720. 65	2 554. 42	551. 23	34
DS2	JH5	JH28	5 749. 97	3 550. 80	2 592. 99	393. 82	38
	JH12	JH49	5 476. 25	3 478. 85	2 456. 13	458. 72	36
	JH19	JH56	1 618. 06	1 046. 07	713. 03	141. 05	35
	JH23	JH61	12 416. 63	8 102. 21	5 503. 31	1 188. 90	35
	JH35	JH41	4 774. 70	3 103. 10	2 105. 35	433. 75	35
DS3	JH4	JH19	4 691. 37	3 024. 25	2 063. 68	396. 56	36
	JH8	JH37	4 751. 14	3 104. 44	2 102. 57	455. 87	35
	JH15	JH42	2 998. 48	1 935. 14	1 346. 24	282. 90	35
	JH26	JH49	4 656. 09	3 060. 06	2 046. 04	450. 02	34
	JH31	JH53	12 706. 19	8 370. 45	5 699. 10	1 363. 35	34
	JH54	JH56	1 584. 98	1 040. 83	694. 99	150. 84	34
DS4	JH3	JH17	5 749. 97	3 550. 80	2 592. 99	393. 82	38
	JH6	JH19	4 691. 37	3 024. 25	2 063. 68	396. 56	36
	JH8	JH39	4 960. 67	3 198. 67	2 198. 34	436. 34	36
	JH12	JH45	1 611. 96	1 051. 43	706. 98	146. 46	35
	JH24	JH50	12 416. 63	8 102. 21	5 503. 31	1 188. 90	35
	JH28	JH41	3 844. 34	2 509. 07	1 644. 67	309. 40	35
	JH31	JH52	4 656. 09	3 060. 06	2 046. 04	450. 02	34
DS5	JH5	JH17	537. 30	304. 10	238. 60	5. 50	43
	JH9	JH26	539. 86	324. 75	251. 93	36. 82	40
	JH13	JH50	7 694. 82	4 659. 4	3 565. 41	529. 99	39
	JH21	JH38	4 940. 32	3 067. 21	2 101. 16	228. 06	38
	JH31	JH42	4 817. 25	3 153. 00	2 143. 12	478. 88	35



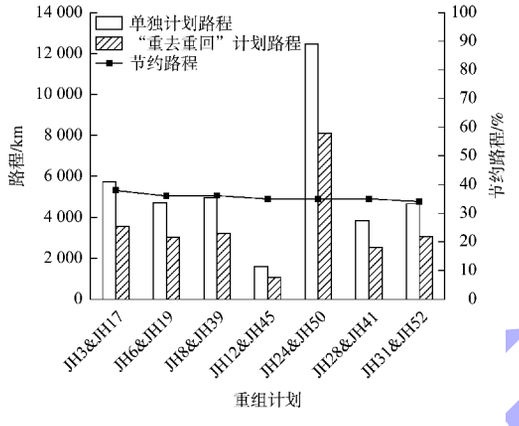
a) DS1重组计划路程对比



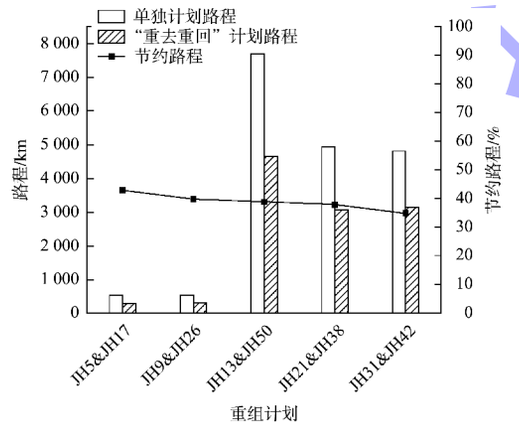
b) DS2重组计划路程对比



c) DS3重组计划路程对比



d) DS4重组计划路程对比



e) DS5重组计划路程对比

图 4　不同数据集中重组计划路程对比

Fig. 4　Comparison of travel distances of reconstructed plans in different datasets

3　结论

1）所构建的双层多目标优化模型在多项调度目标间取得了有效平衡。当计划收益权重设定为 0.4～0.6 时，系统能够在收益公平性、高优先级任务完成率与设备配置合理性之间达成较优均衡。而公平性权重处于 0.1～0.3 之间时，模型可维持 85%以上的作业效率，同时实现装卸设备负荷的合理分配。

2）提出的“重去重回”策略具有显著的节能降耗效果。基于 29 组实际作业数据的仿真结果表明，该策略平均可节约行驶路程 34.2%，最高节约比例达 44%。这一结果验证了策略在降低空驶率与运输成本方面的稳定性。

3）本文研究在模型的动态适应性方面仍存在一定局限性。当前模型基于车辆状态稳定、作业距离固定等假设，尚未纳入设备故障、天气干扰及突发高优先级任务等现实扰动因素。因此，模型在高度动态环境下的鲁棒性与实时响应能力仍有待进一步验证与加强。

4）未来研究可从 3 方面展开。一是引入实时数据采集与动态更新机制，提升调度系统对现场扰动的适应性；二是结合强化学习与预测控制方法，实现调度策略的在线自主优化；三是将模型拓展至多货类混合调度、多码头协同作业等复杂场景，以提升港口物流系统的整体智能化水平与综合效益。

参考文献：

[1] 郭玉洁. 散杂货港口驳船与车辆作业协同调度研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
GUO Y J. Research on cooperative scheduling of barge and vehicle operation in bulk cargo port [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[2] 艾涛. 面向卸船作业过程的散杂货港口泊位与堆场协同调度优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2024.
AI T. Research on cooperative scheduling optimization of berth and yard in bulk cargo port for ship unloading operations[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2024.

[3] 林玮铿. 散杂货港口卸船作业车辆调度系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
LIN W K. Research on vehicle scheduling system for ship unloading operation in bulk cargo port[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

[4] 李林, 张钊, 范垂荣, 等. 干散货码头数字孪生综合管控平台架构与实践[J]. 水运工程, 2024(1): 189-195.
LI L, ZHANG Z, FAN C R, et al. Architecture and practice of digital twin integrated management and control platform for dry bulk terminals [J]. Port & waterway engineering, 2024(1): 189-195.

[5] 刘强, 王潇, 陈浩, 等. 基于邻域搜索的黄骅港煤炭堆场自动化卸车方案[J]. 水运工程, 2023(11): 59-64.
LIU Q, WANG X, CHEN H, et al. Automatic unloading solution based on neighborhood searching for coal cargo yard in Huanghua Port[J]. Port & waterway engineering, 2023(11): 59-64.

[6] 刘建辉, 王琼. 基于多目标蚁群算法的多配送中心应急物资配送车辆调度优化方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2025, 55(2): 631-638.
LIU J H, WANG Q. Optimization method for emergency material delivery vehicle scheduling in multiple distribution centers based on multi-objective ant colony algorithm [J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2025, 55(2): 631-638.

[7] 阎哲, 汪民乐, 汪江鹏, 等. 基于混合遗传算法的海军航空兵场站物资配送车辆调度智能优化[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(12): 3908-3914.
YAN Z, WANG M L, WANG J P, et al. Intelligent optimization of vehicle scheduling for material distribution in naval aviation station based on hybrid genetic algorithm [J]. Systems engineering and electronics, 2023, 45(12): 3908-3914.

[8] FEI R, WANG Z, LI J, et al. A multivariate migrating birds optimization algorithm based on disjunctive graph neighborhood for scenic spot vehicle scheduling [J]. Applied soft computing, 2024, 163: 111870.

[9] ELGHARABLY N, EASA S, NASSEF A, et al. Stochastic multi-objective vehicle routing model in green environment with customer satisfaction[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2023, 24(1): 1337-1355.

[10] 徐东洋, 吕闯, 王利娟. 带软时间窗的多商品需求可拆分两阶段车辆路径问题研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2024, 41(2): 75-87.
XU D Y, LYU C, WANG L J. Multi-commodity two-echelon vehicle routing problem with split delivery and soft time windows [J]. Journal of Chongqing Normal University(natural science), 2024, 41(2): 75-87.

[11] 田琼, 陈晓静, 郭蕊. 绿色与数智化运营下机场地勤车辆调度优化[J]. 工程管理科技前沿, 2025, 44(2): 25-32.
TIAN Q, CHEN X J, GUO R. Optimization of ground service vehicle scheduling in airports for green and digital operations[J]. Frontiers of science and technology of engineering management, 2025, 44(2): 25-32.

(本文编辑　王传瑜)

水运工程

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司等以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费，所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部