

基于星鸦优化算法的农村客货邮协同调度研究

杨文欣^{1,2}, 黄政祥^{1,2}, 钟志康^{1,2}, 侯 漾^{1,2}, 杨 廷^{1,2}, 刘 丹^{1,2}

(1. 长沙中车智驭新能源科技有限公司, 长沙 410083; 2. 中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘 要:为提高农村客货邮的调度效率,本文提出了一种基于星鸦优化算法(NOA)的多目标协同调度模型。该模型融合了运输成本、服务时效及资源利用率等因素,同时引入动态权重调整与高斯变异策略来提升算法性能。在湖南某农村地区开展的客货邮协同调度仿真测试结果显示,相较于对比算法中综合表现次优的改进蚁群算法,改进 NOA 的运输成本降低了约 16.1%,服务时间缩短了约 18.2%,资源利用率提高了约 8.9%。

关键词:农村客货邮;智能调度;NOA;多目标优化;动态权重分配

中图分类号:U492.2+2

文献标志码:A

DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.02.008

Research on Coordinated Scheduling of Rural Passenger-freight-post Vehicles Based on Nutcracker Optimization Algorithm

YANG Wenxin^{1,2}, HUANG Zhengxiang^{1,2}, ZHONG Zhikang^{1,2}, HOU Yang^{1,2}, YANG Ting^{1,2}, LIU Dan^{1,2}

(1. Changsha CRRC Intelligent Control and New Energy Technology Co., Ltd., Changsha 410083, China;

2. CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: To improve the scheduling efficiency of rural passenger-freight-post services, this paper proposes a multi-objective coordinated scheduling model based on the Nutcracker Optimization Algorithm (NOA). The model integrates transportation cost, service timeliness, and resource utilization, while introducing dynamic weight adjustment and Gaussian mutation strategies to enhance algorithmic performance. The simulation experiments conducted in a rural area of Hunan Province demonstrate that, compared with the Improved Ant Colony Algorithm, the second-best performing algorithm among the benchmarks, the improved NOA reduces transportation cost by approximately 16.1%, shortens service time by approximately 18.2%, and increases resource utilization by approximately 8.9%.

Key words: rural passenger-freight-post; intelligent scheduling; NOA; multi-objective optimization; dynamic weight assignment

在乡村振兴战略深入推进的背景下,农村客货邮运输作为促进城乡融合的关键环节,其调度优化问题日益受到关注。然而,受农村地域广阔、人口分布分散、需求碎片化等现实条件制约,农村客货邮运输仍面临运营成本偏高、车辆与线路利用率不足、调度响应不及时等突出问题^[1]。针对上述问题,国家相关部委在《关于加快推进农村客货邮融合发展的指导意见》中明确提出,要构建高效协同的调度机制,提升一体化服务水平^[2]。

现有研究主要聚焦于农村客货邮融合的发展路径与静态策略设计^[3],但针对动态需求环境下调度优

化的研究尚不充分。然而,传统群体智能算法,如遗传算法(Genetic Algorithm, GA)和粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO),虽然在交通调度领域得到了广泛应用^[4-6],但在多目标、动态变化频繁的农村场景中,普遍存在收敛速度慢、易陷入局部最优、参数敏感性强等问题。一些改进型算法,如改进蚁群算法(Improved Ant Colony Optimization, IACO)同样面临此类局限。

为解决上述问题,本文将星鸦优化算法(Nutcracker Optimization Algorithm, NOA)引入农村客货邮协同调度领域。NOA通过模拟星鸦群体的觅食与

收稿日期:2025-08-18。

第一作者:杨文欣(1996—),女,硕士,工程师,主要从事智慧公交平台研发相关工作。E-mail:yangwenxin_cy@crrecg.cc。

存储行为,实现了全局搜索与局部开发的兼顾,因而具备良好的多目标优化潜力^[7],可有效应对农村客货邮运输需求的动态性与多目标特征。然而,直接应用NOA仍面临收敛效率低与求解稳定性差的问题。为此,本文在NOA基础上引入动态权重调整与高斯变异机制,构建面向农村客货邮调度的多目标NOA优化模型,以综合优化运输成本、服务时间与资源利用率。

1 基于NOA的农村客货邮协同调度模型构建

1.1 建模思路

农村地区的客货邮协同调度涉及客运、货运与邮政资源的综合优化配置。不同时段、区域及运输需求存在差异性,基于此,本文在建模中重点考虑以下5个关键因素:

1) 时间维度调度优化。农村客货邮需求具有明显的时间差异性。可基于历史数据和预测结果,将调度周期划分为多个时段,并据此优化车辆调度策略:高峰时段保障出行与运输需求;低峰时段则减少空载,提高运营效率。

2) 站点布局与装载策略。农村地区站点分布分散,且各站点客货邮业务量极不均衡。调度模型需综合考虑站点吞吐能力与车辆装载策略(包括载重限制),以确保车辆空间合理分配,进而提升装载率并减少运力浪费^[8]。

3) 区域协同运输机制。针对各区域的运输需求差异构建区域协同机制,该机制通过划分运输片区与优化跨区调度,在降低空驶率的同时避免重复运输,从而实现整体成本最小化。

4) 乘客满意度保障。将候车时间、舒适度与安全性纳入优化目标,通过合理编排班次、控制载客密度,以避免超载或长时间等待,提升乘客出行满意度。

5) 算法优化策略。采用NOA求解上述模型,利用其全局搜索能力提升调度优化效果。目标函数设计以运输成本最小化、运营效率最大化为基础,同时提升乘客服务水平,构建多目标优化模型,实现客货邮调度中成本、效率与服务水平的多目标协同优化。

1.2 模型构建

1.2.1 假设条件

为简化问题复杂性并聚焦核心研究目标,本文在构建农村客货邮协同调度模型时,基于现实运营场景提出以下4个假设条件:

1) 车辆适配性。依据《农村客货邮融合发展适配车辆选型技术要求(试行)》^[9],本文对运营车辆提出以下要求:①物理隔离:配备符合GB 7258标准的刚性隔离装置(如隔离舱/网);②独立空间:设置专用货物/邮件存储区,满足防火防滑要求;③运力匹配:额定载质量及容积需与线路需求相匹配;④新能源占比:纯电动或插电混动车辆比例不低于30%;⑤辅助设施:配置货物固定装置及邮件分拣存储设施。

2) 站点布局。依托现有行政村邮政网点、电商服务站及客运站点,推进客货邮融合站点整合建设,实现村级服务全覆盖。各站点服务半径控制在2 km以内,确保农村居民可就近享受客货邮综合服务。

3) 运输需求。基于调研数据,邮件运输需求呈现明显的时段波动特征:早间下乡方向以快件为主,约占该方向总运量的60%;晚间进城方向以农产品为主,约占该方向总运量的45%。模型将此波动特征作为动态调度的重要依据。

4) 数据实时交互。车辆配备北斗定位与货物监测设备,站点安装智能监控系统,两者协同构成感知网络,以实现车辆轨迹、货物状态、站点作业信息的实时回传。模型基于上述信息进行全流程动态监控与异常预警,保障调度响应的及时性与可靠性。

1.2.2 目标函数

1) 设 C 为车队完成所有运输任务所需的总运行成本(单位:元)。最小化 C 的优化目标如式(1)所示。 C 值越小,说明车队运行成本越低。

$$C = \sum_{v=1}^V (c_v \cdot d_v + c_f) \quad (1)$$

式中: V 为参与运输任务的车辆总数; v 为单个车辆的索引; c_v 为车辆 v 的单位里程成本,元/km; d_v 为车辆 v 的行驶里程,km; c_f 为每辆车的固定成本,元/辆。

2) 设 T 为车队完成所有运输任务所需的总运输时间(单位:h)。最小化 T 的优化目标如式(2)所示。 T 值越小,说明车队运输效率越高。

$$T = \sum_{v=1}^V [\alpha \cdot d_v \cdot \beta(t) \cdot \gamma(\omega)] \quad (2)$$

式中: α 为单位里程的基础时间系数,h/km; $\beta(t)$ 为动态交通流量系数; $\gamma(\omega)$ 为天气影响因子。

3) 设 U 为车队执行所有运输任务的资源平均利用率(单位:%)。最大化 U 的优化目标如式(3)所示。 U 值越大,说明车队资源利用效率越高。

$$U = \sum_{i=1}^n (p_i + g_i + m_i) / \sum_{v=1}^V Q_v \quad (3)$$

式中: p_i 、 g_i 和 m_i 分别为任务 i 的客运、货运和邮政业务量; Q_v 为车辆 v 的最大载运容量, 人/车。

1.3 约束条件及处理

为保障农村客货邮融合运输的可行性与服务质量, 模型必须考虑多种实际约束。本节从时间窗、容量及动态因素三个方面定义关键约束条件, 并给出相应的处理方式, 以确保运输方案的时效性、安全性和鲁棒性。

1) 时间窗约束。任务 i 的到达时间 a_i 须满足时间窗约束 $[t_i^s, t_i^e]$, 以确保客运班次、快递配送和货运任务的时效性。该约束的数学表达式如式(4)所示。

$$t_i^s \leq a_i \leq t_i^e \quad (4)$$

2) 容量约束。为保证运输安全, 每辆车承载的客货邮总量 Q 需满足式(5)的容量限制, 即不得超过车辆的最大载重或载客容量。其中, 车辆的适配性要求(特别是隔离装置和独立空间设置)是保障客货邮三类业务安全共存并满足容量约束的前提条件。

$$Q \geq \sum_{i=1}^n (p_i + g_i + m_i) \quad (5)$$

3) 动态约束。交通流量和天气状况对运输过程产生动态影响。本模型通过引入交通流量系数 $\beta(t)$ 和天气影响因子 $\gamma(\omega)$ 来修正时间和成本, 这两个影响因子的表达式如式(6)和式(7)所示。

$$\beta(t) = e^{-\lambda \rho(t)} \quad (6)$$

$$\gamma(\omega) = \begin{cases} 1 & \text{晴天} \\ 1.2 & \text{雨天} \\ 1.5 & \text{雪天} \end{cases} \quad (7)$$

式中: λ 为拥堵影响系数, 取值为 0.05, 该值基于湖南农村历史交通数据及模型校准确定; $\rho(t)$ 为时刻 t 的交通流量强度, 取值范围为 $[0, 1]$ 。无拥堵时 $\beta(t) = 1$, 高峰拥堵时 $\beta(t) = 0.6$ 。当遇到恶劣天气或交通拥堵时, 可在模型中动态调整相关参数或增加备用车辆来降低不利影响。

2 NOA 调度方法

2.1 算法改进

为进一步提升 NOA 的寻优性能, 本节从算法搜索策略的角度出发, 引入动态惯性权重机制与高斯变异邻域搜索两种改进方法。动态惯性权重通过线性衰减策略平衡算法的全局探索与局部开发能力; 高斯变异邻域搜索则通过随机扰动增强种群多样性, 避免算法早熟收敛。两种策略协同作用, 旨在提高算法的

收敛精度与鲁棒性。

1) 动态惯性权重机制。通过在 NOA 演化过程中引入随迭代次数线性衰减的惯性权重, 动态调整算法的搜索行为: 迭代初期惯性权重较大, 侧重全局探索; 迭代后期惯性权重较小, 侧重局部开发。该策略有效平衡了全局搜索与局部开发能力, 从而加快算法收敛速度。其中, 惯性权重 $\omega(k)$ 随次数 k 的更新策略如式(8)所示。

$$\omega(k) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot k / T_{\max} \quad (8)$$

式中: $\omega_{\max}$ 和 $\omega_{\min}$ 分别为惯性权重的初始最大值和最小值; $T_{\max}$ 为最大迭代次数。

由式(8)可知, 随着迭代次数 k 从 0 增加至 $T_{\max}$, $\omega(k)$ 将从 $\omega_{\max}$ 线性递减至 $\omega_{\min}$ 。该变化趋势使得 NOA 在初期保持较大的惯性权重, 侧重于全局探索; 而 NOA 在后期保持较小的惯性权重, 侧重于局部开发, 从而实现两者间的有效平衡。

2) 高斯变异邻域搜索。为增强算法的局部搜索能力并避免陷入局部最优, 在每代迭代中引入高斯随机变异机制, 通过对个体解施加随机扰动来丰富种群多样性。个体位置的更新方式如式(9)所示。

$$x_i^{t+1} = x_i' + c_1 \cdot (x_{\text{gbest}} - x_i') + c_2 \cdot (x_{\text{lbest}} - x_i') + \sigma \cdot N(0, 1) \quad (9)$$

式中: x_i^{t+1} 为第 $t+1$ 代中个体 i 的新位置; x_i' 为当前个体 i 的位置; c_1 和 c_2 均为学习因子, 分别控制全局最优解 x_{gbest} 和邻域最优解 x_{lbest} 的引导强度; σ 为高斯变异系数; $N(0, 1)$ 为标准正态分布随机数。

本文在位置更新过程中引入高斯变异项 $\sigma \cdot N(0, 1)$, 通过施加随机扰动, 有效提升种群多样性和局部搜索精度。

2.2 算法流程

综合上述改进, NOA 用于客货邮调度优化的流程如下:

1) 初始化种群。具体步骤如下:

①参数设置: 设定种群规模(即星鸦数量) $N = 50$; $T_{\max} = 300$; $c_1 = 0.8$, $c_2 = 0.2$; $\omega_{\max} = 0.4$, $\omega_{\min} = 0.9$; $\sigma = 0.1$ 。

②生成初始解: 采用基于任务优先级的编码策略, 在随机生成调度解时优先满足乘客出行和紧急配送需求, 从而确保每个解均为可行的客货邮运输调度方案(包括车辆路径规划和任务分配)。具体实现方式为: 随机生成 N 个初始解, 每个解对应一种可行的调度安排。

2) 适应度计算。为每个初始解 x_i 计算适应度值 f_i 。根据式(1)~(3), 采用加权求和的方法将运输成本、运输时间和资源利用率三项指标归一化, 再通过加权求和得到每个初始解的适应度值。权重系数 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 代表不同优化目标的相对优先级(可根据实际需求动态调整, 例如高峰时段提高时间权重, 平峰时段提高成本权重)。

3) 确定初始最优解。全局最优解与邻域最优解的具体确定方式如下:

①全局最优解: 在初始种群中选取适应度值最小(即综合评价最优)的解作为全局最优解 x_{gbest} 。

②邻域最优解: 为种群中每个个体划定一个初始邻域(例如随机选取其他5个个体), 在邻域内找到适应度最优的解, 作为该个体的邻域最优解 x_{lbest} 。

4) 迭代优化过程。重复以下6个迭代步骤, 从第1代进行到第 T_{max} 代或满足终止条件为止。

①位置更新: 根据改进的位置更新式(9), 计算每个个体的新位置 x_i^{t+1} 。

②适应度评估: 计算每个个体新位置对应的适应度值 f_i 。

③解的选择: 对于每个个体, 若新解的适应度优于原解($f_i < f_i'$), 则用新解替换原解。

④更新邻域最优: 若某个体的当前解优于其所在邻域的当前最优解 x_{lbest} , 则将该邻域的最优解更新为当前解。

⑤更新全局最优: 每代迭代结束后, 比较所有邻域最优解与当前全局最优解的适应度值, 若发现更优解则更新全局最优解 x_{gbest} 及其适应度。

⑥动态调整惯性权重: 将当前迭代次数代入式(8), 计算得出对应的惯性权重, 从而在算法运行过程中实现全局与局部搜索的动态平衡。

5) 终止条件。当迭代次数达到 T_{max} 或适应度值连续若干代收敛(变化幅度低于阈值)时, 停止迭代并输出全局最优解 x_{gbest} 作为最终的调度方案。

3 实验与结果分析

3.1 数据来源

为验证所提模型与算法的有效性, 选取湖南省某偏远农村地区的客货邮运输网络作为研究对象, 其中部分参数通过仿真生成。具体参数与场景设置如下:

1) 线路数据。该网络覆盖25个行政村的客货邮服务站点, 各站点服务半径不超过2 km, 包含城际

客运线路、货运集散点及邮政驿站, 线路总里程约为58.7 km。

2) 动态需求数据。数据基于近30天订单数据构建, 反映不同时段的客运、货运及快递需求分布。具体特征为: 早间下乡类快件约占每日总量的60%, 晚间进城农产品运单占比约45%。每笔订单均包含时效、重量、体积等信息。

3) 车辆参数。车队中新能源车辆占比为35%。所有车辆均为客货两用型, 单车载客人数为35人, 额定载重为5 t, 货物容积为5 m³, 单位里程运营成本为2元/km。

4) 环境数据。考虑交通与天气因素, 设定不同天气条件下的流量系数: 晴天为1.0, 雨天为1.2, 雪天为1.5。根据历史气象记录, 上述天气类型的出现天数比例分别为70%、25%、5%。

3.2 线路客货邮特征

为全面了解研究线路的客货邮需求特征, 基于上述数据对客运、货运和邮政需求的时空分布进行了统计分析。

1) 站点客流特征。如图1所示, 早间(8:00–10:00)为进城客流高峰, 峰值约180人/h; 晚间(16:00–18:00)为货运高峰, 货运量呈现“双峰”分布, 上午(11:00)和傍晚(17:00)货运量分别达到0.40 t/h和0.45 t/h。整体而言, 客流与货运高峰时段相互错开, 体现出时间上的互补特性。

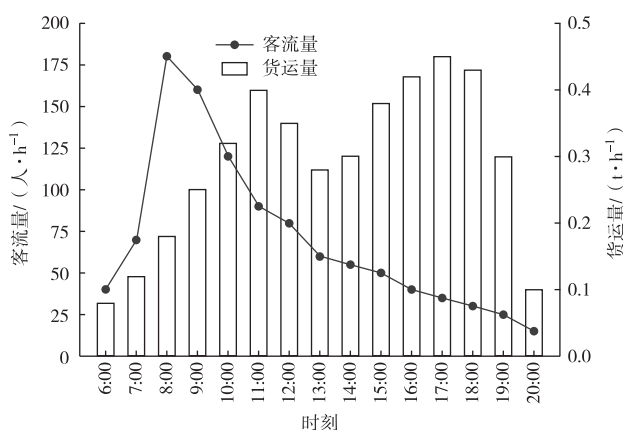


图1 站点客流与货运需求特征

2) 驿站快递收发特征。如图2所示, 农村邮政驿站的快递业务呈现显著时段分化特征。具体数据如下: 快递收件主要集中在10:00–12:00, 该时段收件量占日总量的50%, 日均240件, 其中40%为农产品; 发件高峰则出现在16:00–18:00, 占日总量的

40%,日均 180 件,农产品占比近半。

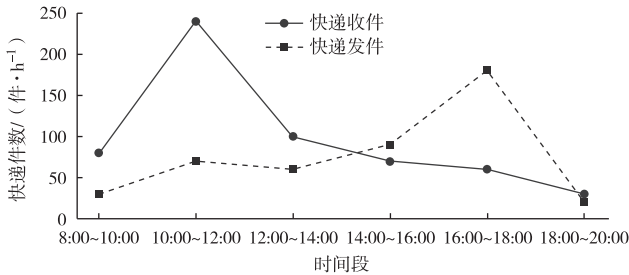


图 2 驿站快递收件与发件特征

3) 时空相关性分析。如图 3 所示,站点分布呈现典型的“中心-边缘”结构:核心站点(1 和 5)集中了 60%的客货邮业务,边缘站点(20 和 25)则以农产品运输为主。时间维度上,早高峰(7:00-9:00)的需求强度达到其他时段的 2.3 倍,这表明需求在时间上的高度集中。

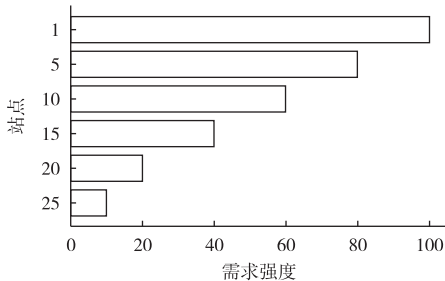


图 3 时空相关性分析——站点需求分布

4) 动态约束影响。由图 4 可知,在雨雪等恶劣天气条件下,运输时间增加 18%~35%,成本上升 12%~20%。这表明天气和道路状况对调度影响显著,因此需将这两者纳入动态建模中。

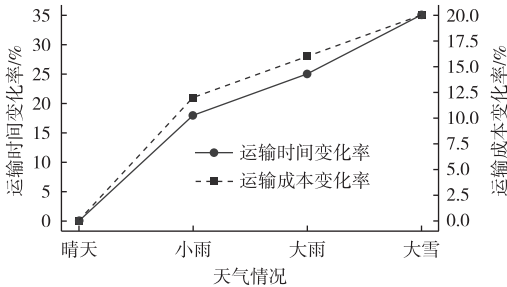


图 4 天气对运输的影响

3.3 模型求解及分析

为验证本文所提改进 NOA 在求解低碳物流调度问题上的有效性与优越性,本节依次开展模型及算法参数设置、对比测试与消融测试:首先完成模型与算法参数输入与仿真环境配置;其次,将改进 NOA 与

GA、PSO、IACO 及原始 NOA 进行对比测试,以检验改进 NOA 的寻优能力;进而通过消融实验分析动态惯性权重与高斯变异策略的贡献;最后,从收敛性、动态响应能力及实际可行性等角度对测试结果展开讨论,综合评价算法的应用价值。

1) 模型及算法参数输入。仿真参数主要依据 2.2 节 1) 中①的参数设置进行初始化。其中,为响应不同时段优化需求,引入动态权重机制:早高峰以运输时间为优化重点(权重 0.6),平峰时段侧重成本控制(权重 0.5)。其余算法参数(如种群规模、迭代次数等)均按 2.2 节设定。

2) 对比测试结果。将改进 NOA 与 GA、PSO、IACO 进行对比测试,各算法独立运行 20 次后取平均值,结果见表 1。由表 1 可知,改进 NOA 在运输成本、服务时间及资源利用率三项指标上均表现最优。相较于对比算法中综合表现次优的 IACO,改进 NOA 的运输成本降低了约 16.1%,服务时间缩短了约 18.2%,资源利用率提升了约 8.9%。

表 1 算法对比测试结果

算法	运输成本/元	服务时间/h	资源利用率/%
GA	18 05	6.2	78.5
PSO	1 720	5.8	82.3
IACO	1 680	5.5	85.1
原始 NOA	1 650	5.9	81.4
改进 NOA	1 410	4.5	92.7

3) 消融测试分析。为评估动态惯性权重与高斯变异两种改进策略对算法性能的贡献,设计消融测试,结果见表 2。通过逐步添加策略的对比结果可知:单一策略均能有效提升算法性能,而联合应用两种策略(即改进 NOA)取得了最佳效果。这表明两种策略具有协同作用,共同确保了算法的全局搜索与局部开发能力。

表 2 消融测试结果

算法变体	运输成本/元	服务时间/h	资源利用率/%
原始 NOA	1 650	5.9	81.4
仅惯性权重	1 565	5.4	86.2
仅高斯变异	1 510	5.1	88.9
改进 NOA	1 410	4.5	92.7

综合上述测试结果,可得出以下结论:① 改进

NOA 具有优越的全局搜索能力。如图 5 所示, 该算法在收敛速度和稳定性方面均优于对比算法, 且能有效避免陷入局部最优, 验证了该算法在复杂优化问题中的高效性。②改进 NOA 中的动态权重机制能够有效响应实时变化。该机制使调度方案可根据时段需求动态调整, 仿真结果显示, 早高峰发车频率提升了 25%, 资源利用率达到了 92.7%, 这证明了该算法在动态环境下的适应性。③改进 NOA 生成的调度方案具有良好的实际应用价值。相比原始 NOA 生成的调度方案, 该方案使日均空驶里程减少了 38 km, 新能源车辆利用率提升了 20%, 为绿色运输发展提供了有效支撑。

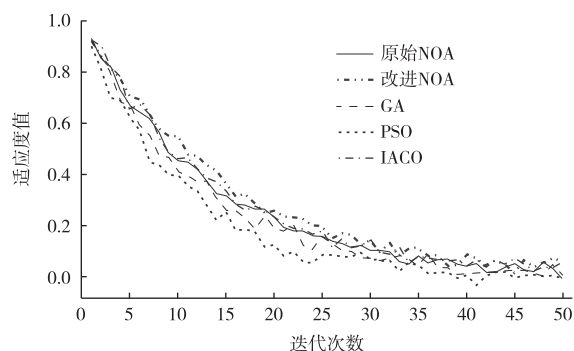


图5 算法收敛曲线对比

4 结束语

针对农村客货邮调度中多源需求融合难、动态约束响应慢的问题, 本文提出了一种基于改进 NOA 的多目标协同调度方法。该方法通过动态权重机制适配不同时段优先级, 并借助高斯变异提升全局搜索能力。基于湖南省某农村区域的仿真结果表明, 改进 NOA 在多目标优化上表现均衡, 显著降低了运输成本与服务时间, 同时提高了运力利用率, 验证了模型

的有效性与实用性。后续研究将融合智能感知、低碳策略与区域协同平台, 推动农村运输系统向智慧绿色方向转型。

参考文献:

- [1] 黄新宇. 乡村振兴背景下农村客货邮融合发展研究——基于湖南省的实践探索[J]. 价格理论与实践, 2022(3): 46-50.
- [2] 交通运输部, 工业和信息化部, 公安部, 等. 关于加快推进农村客货邮融合发展的指导意见[EB/OL]. (2023-12-23)[2025-08-10]. https://xxgk.mot.gov.cn/jigou/ysfws/202401/t20240102_3979968.html.
- [3] 郭放, 曹莹, 朱永明, 等. 不确定环境下农村地区客货邮融合协同运输策略研究[J]. 包装工程, 2024, 45(15): 207-214.
- [4] 鲁芳, 黄彬, 闫蕾朵. 客货邮融合下城乡客运车辆调度双层优化方法[J]. 工业工程, 2023, 26(4): 96-103.
- [5] 宋翠颖, 王鹤玲, 田泽尚, 等. 需求响应式公交车辆调度模型和算法研究综述[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(4): 31-44.
- [6] 翁剑成, 乔润童, 王茂林, 等. 考虑场景差异性的混合车型公交调度优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(4): 176-187.
- [7] ABDEL-BASSET M, MOHAMED R, MOHAMED J, et al. Nutcracker optimizer: a novel nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization and engineering design problems[J]. Knowledge-Based Systems, 2023(262): 110248.
- [8] 沈子康, 靳文舟, 郑亚晶. 站点可变型需求响应式公交车辆调度优化研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2024, 41(6): 691-702.
- [9] 交通运输部. 交通运输部办公厅关于印发《农村客货邮融合发展适配车辆选型技术要求(试行)》的通知[EB/OL]. (2024-01-18)[2025-08-10]. https://xxgk.mot.gov.cn/jigou/ysfws/202401/t20240129_3997794.html.