

李忠旭. 基于改进 FWA 与 WOA 的物流车辆调度及路径规划研究[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(10): 163-168. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 24102102

基于改进 FWA 与 WOA 的物流车辆调度及路径规划研究

李忠旭

(中国烟草总公司 北京市公司, 北京 100021)

摘要: 目前的物流车辆调度及路径规划方法并没有考虑新能源车辆的加入的特点, 车辆调度及路径规划问题求解精度也相对较低。针对此问题, 研究提出了一种基于改进烟花算法和鲸鱼优化算法的物流车辆调度及路径规划模型。该模型将新能源电动车辆的动态能耗建模引入到车辆调度问题中。以碳排放、成本最小化为目标, 并应用 2 种群优化算法对其进行求解。结果表明, 研究提出的车辆调度及路径规划模型的充电次数不超过 1 次, 行驶距离在 850 km 以内, 总成本平均值为 1 154.85 元。且碳排放量仅为 110.23 kg, 运输时间保持在规定时间内完成。研究提出的方法能够有效解决物流车辆的调度和路径规划问题, 为物流行业的可持续发展提供有力保障。

关键词: 烟花算法; 鲸鱼优化算法; 车辆调度; 路径规划; 碳排放

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)10-0163-06

Logistics vehicle scheduling and route planning based on improved FWA and WOA

LI Zhongxu

(China National Tobacco Corporation Beijing Company, Beijing 100021, China)

Abstract: The current logistics vehicle scheduling and route planning methods do not consider the characteristics of the addition of new energy vehicles, and the solution accuracy of vehicle scheduling and route planning problems is relatively low. To solve this problem, a logistics vehicle scheduling and route planning model based on improved fireworks algorithm and Whale Optimization Algorithm is proposed. This model will introduce the dynamic energy consumption modeling of new energy electric vehicles into the vehicle scheduling problem. The aim of this study is to minimize carbon emission and cost, and to solve it by using two population optimization algorithms. The results show that the charging times of the proposed vehicle scheduling and path planning model are less than 1 time, the driving distance is less than 850 km, and the average total cost is 1 154.85 yuan. Meanwhile the carbon emission is only 110.23 kg, and the transportation time is maintained within the specified time. The proposed method can effectively solve the problem of logistics vehicle scheduling and route planning, and provide a strong guarantee for the sustainable development of logistics industry.

Key words: fireworks algorithm; Whale Optimization Algorithm; vehicle scheduling; path planning; carbon emission

0 引言

现代物流行业对经济建设和人们的美好生活发挥着重要作用。在国家提出绿色、可持续发展的理念背景下, 车辆调度和路径规划具有重要意义^[1-2]。这也逐渐成为学者们研究的重点方向^[3-4]。烟花算法 (FireWorks Algorithm, FWA) 和鲸鱼优化算法 (Whale Optimization Algorithm, WOA) 皆为群智能算法, 其在车辆调度及路径规划问题中有着较为优秀

的求解效果^[5-7]。将这 2 个算法与车辆调度及路径规划结合逐渐成为新的研究热点^[8]。虽然 2 个群智能算法能够有效求解调度及路径规划问题, 但其求解质量会受到初始解的影响, 容易陷入局部最优^[9]。这种情况可考虑采用相应的改进策略, 进一步提高求解质量^[10-12]。电力作为清洁能源, 其应用领域也越来越广。但目前的物流行业主要采用电动汽车和汽油汽车混合的方式进行运输^[13-15]。为解决这类混合车辆的调度和路径规划问题, 本文提出

作者简介: 李忠旭 (1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 信息化项目建设, 人工智能, 图像识别, 数据分析。Email: w184922@163.com。

收稿日期: 2024-10-21

哈尔滨工业大学主办 ◆ 专题设计与应用

了一种基于改进 FWA 和 WOA 的物流车辆调度和路径规划模型。在电量消耗、运输成本等方面建立目标函数,通过 FWA 算法和 WOA 算法寻优求解。本文研究旨在实现物流运输中的低碳减排,节约物流成本。研究的创新性在于建立了动态的电量消耗模型,进一步细化了物流车辆调度和路径规划的优化目标。此外,研究引入精英策略,并修改适应度函数对 FWA 算法进行了改进,进一步缓解该算法易陷入局部最优的情况。

1 基于改进 FWA 和 WOA 的物流车辆调度和路径规划模型构建

1.1 混合动力物流车辆调度及路径规划问题建模

为优化物流运输过程中的能源消耗和运输成本,研究提出了基于改进 FWA 和 WOA 的物流车辆调度和路径规划模型。为了更准确地模拟实际物流运输过程中的复杂情况,在模型中引入了多个关键因素。首先,考虑车辆的能耗情况和充电需求,以此确保在规划路径时能够合理安排充电时间,避免因电量不足导致的运输中断。在对物流运输中的电动车能耗进行计算时,需要考虑外界气温、坡度以及速度等外界因素的影响。为此,研究在建立调度问题的数学模型之前,先对电动车辆的电量消耗情况进行计算。研究发现,传统的动力学公式并不适用于电能消耗的计算过程^[16-17]。为此,研究针对电动车的特点,考虑不同温度情况下车辆中空调的使用情况,计算得到车辆内部附属设备产生的电量消耗。且在公式中,研究引入经过函数拟合后得到的各类相关参数数值,具体计算公式如下:

$$E_t = \begin{cases} 0.3392 - 5.238 \times 10^{-3}T - 1.078 \times 10^{-4}T^2 + 1.047 \times 10^{-5}T^3 + \\ 3.955 \times 10^{-7}T^4 - 1.362 \times 10^{-8}T^5 - 3.109 \times 10^{-10}T^6, & T < 22 \\ 0.4211 - 1.627 \times 10^{-2}T + 4.229 \times 10^{-4}T^2, & T \geq 22 \end{cases} \quad (1)$$

其中, T 表示当日气温, E_t 表示温度影响下的能耗。空调使用的能耗计算方法可表示为:

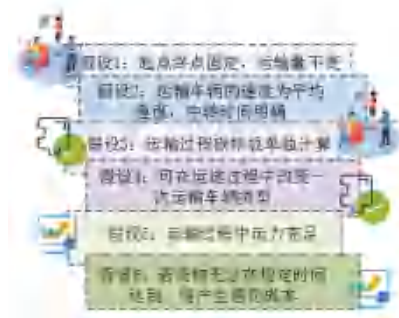
$$E_c = \frac{y_{ij}}{v} \cdot C_B \quad (2)$$

其中, E_c 表示空调使用的能耗; y_{ij} 表示运送 2 个地点的距离; C_B 表示空调功率。在当日温度为 $10^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 之前时,车辆的电力能耗只考虑 E_t , 而其他温度条件下,需要将其与 E_c 相加。在建立了能耗模型之后,研究将其引入到车辆调度模型当中。

研究在调度过程中考虑的目标函数为车辆行驶费用、固定成本、充电费用最小化。具体公式见下式:

$$\min Z = \sum_{i \in S_1} \sum_{j \in S_1} \sum_{k \in V_e} x_{i,j,k} \cdot y_{ij} \cdot P_e + \sum_{i \in S_2} \sum_{j \in S_2} \sum_{k \in V_f} x_{i,j,k} \cdot y_{ij} \cdot P_f + P_c \quad (3)$$

其中, Z 表示运输过程的总成本; P_f 和 P_e 分别表示行驶成本和固定成本; $x_{i,j,k}$ 表示取 0 和 1 的正整数,当车辆经过该点则取值为 1,否则为 0; V_e 和 V_f 分别表示电动车集合和燃油车集合; P_e 表示充电费用,该费用可结合用电能耗进行计算; S_1 和 S_2 分别表示电量和燃油量。调度过程的约束包括电量约束、客户点访问约束和载重约束。在物流车辆的路径规划建模过程中,研究确定 6 个假设,以及 2 个目标函数,具体如图 1 所示。



(a) 假设



(b) 目标函数

图 1 路径规划模型的假设以及目标函数

Fig. 1 The assumptions of the path planning model as well as the objective function

由图 1 可知,在路径规划过程中,研究假设单独计算每个站点的转运费,只考虑运输过程的碳排放成本。此外,若无法在规定时间内到达目的地会带来存储费用和罚款费用。基于此,研究将运输过程的成本、时间成本以及碳排放成本的最小化作为目标函数。时间成本可由下式计算求得:

$$\min T' = \sum_{i \in C'} \sum_{(m,l) \in M} x_{i,j,k} (t_{i,i+1}^{(m)} + t^{ml} + wt_i) \quad (4)$$

其中, T' 表示时间成本; $t_{i,i+1}^{(m)}$ 表示 2 个不同地

点的运输成本; t^{ml} 表示货物转运的时间成本; w 表示等待时间之和; t_i 表示货物产生的时间成本; m 表示燃油车运输方式; l 表示电动车运输方式。运输成本包括转运方式带来的转运成本、运输过程中的电量和燃油能耗产生的成本以及超过时间窗内产生的时间惩罚成本。碳排放成本的目标函数定义如下:

$$\min \tilde{C} = \sum_{i \in C'} \sum_{(m) \in M} co \cdot d \cdot x \tag{5}$$

其中, C' 表示城市节点集合; \tilde{C} 表示碳排放成本; co 表示每行驶 1 km 的碳排放量; d 表示运输距离; x 表示运输节点数量。

1.2 基于改进 FWA 和 WOA 的调度优化和路径规划

在建立了车辆调度及路径规划问题的数学模型之后,就需要利用算法对模型的目标函数进行求解,得到最佳的调度和路径规划方案。FWA 算法利用爆炸算子和变异算子增强算法在领域搜索和扩大种群多样性的能力^[18-20]。为此,研究将其应用到调度问题的求解当中。研究发现,常规的 FWA 算法收敛速度并不快,且计算过程中需要大量的资源。针对此问题,研究通过引入精英策略,并修改适应度函数对其进行改进。改进的 FWA 算法的车辆调度求解过程如图 2 所示。

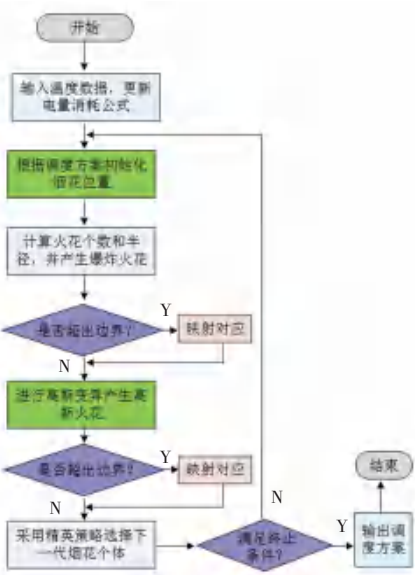


图 2 改进的 FWA 算法的车辆调度求解过程

Fig. 2 Vehicle scheduling solution process for the improved FWA algorithm

由图 2 可知,研究在种群初始化阶段根据初始化的车辆调度方案确定烟花位置。稍后计算每个烟花的适应度,根据适应度计算火花个数以及火花半径,产生爆炸火花。然后判断是否超过边界,若超过

边界进行映射。此后通过变异操作产生高斯火花,再次判断是否超出边界,若没有超出利用精英策略选择下一代烟花个体。精英选择策略的选择过程用下式将来描述:

$$P(x_i) = \frac{f(x_i) - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \tag{6}$$

其中, $P(x_i)$ 表示候选概率, f_{\min} 和 f_{\max} 分别表示个体适应度的最小值和最大值。研究通过计算概率将各个种群个体进行排序,进而选择最佳的个体用于后续求解过程中。研究对算法的适应度计算方式进行改进,以更加贴合车辆调度问题。改进后的适应度函数定义公式为:

$$f_i = \frac{P_i}{1 + \varepsilon_i} \tag{7}$$

其中, P_i 表示车辆调度任务的总收益; ε_i 表示调度过程中产生惩罚值; f_i 表示改进方法计算的适应度。此外,研究利用 WOA 算法对物流车辆运输过程中的路径规划问题进行求解。基于 WOA 算法的路径规划问题求解流程如图 3 所示。

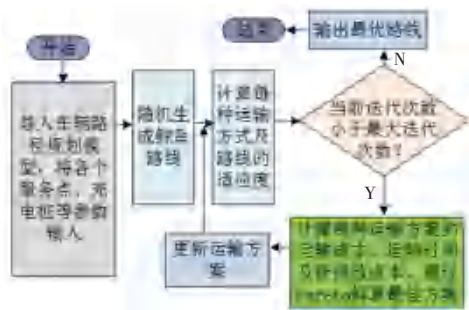


图 3 基于 WOA 算法的路径规划问题求解流程

Fig. 3 The solving process of the path planning problem based on the WOA algorithm

由图 3 可知,WOA 算法模拟了座头鲸的捕食行为,通过螺旋更新和包围捕食两种机制来寻找最优解。针对路径规划问题,研究将运输成本、时间成本以及碳排放量等因素纳入 WOA 算法的适应度评价中。为进一步优化 WOA 算法,研究采用惯性权重以及 Kent 映射策略对其进行优化,以提高算法的全局搜索能力和收敛速度。惯性权重在算法的不同阶段对搜索步长进行调整,从而在探索和开发之间找到更好的平衡。Kent 映射策略可以将超出解空间边界的解映射回合法解空间内,避免算法在搜索过程中因越界而陷入无效循环。此外,针对路径规划问题中可能存在的容量限制、时间窗口要求等复杂约束,研究在适应度函数中引入相应的惩罚项。

2 基于改进 FWA 和 WOA 的车辆调度规划模型性能分析

2.1 基于改进 FWA 的车辆调度规划模型性能分析

实验分为仿真实验以及实际应用实验两种。仿真实验中,研究借助 Matlab 对其进行仿真实现,研究选取 Solomon 算例中的 C1、R1 和 RC1 类型数据集中的 234 组作为仿真过程中的测试集。为验证研究提出的 FWA 改进方法的有效性,研究将改进前后的算法以及多种其他的优化算法同时对车辆调度模型进行求解。对比算法包括研究提出的改进 FWA(I-FWA)、常规 FWA、遗传算法(Genetic Algorithm,GA)、粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization,PSO)。在仿真实验中,各算法的运行参数均经过细致的调试,以确保实验的公平性和可比性。4 种算法计算得到的成本值以及运行时间如图 4 所示。

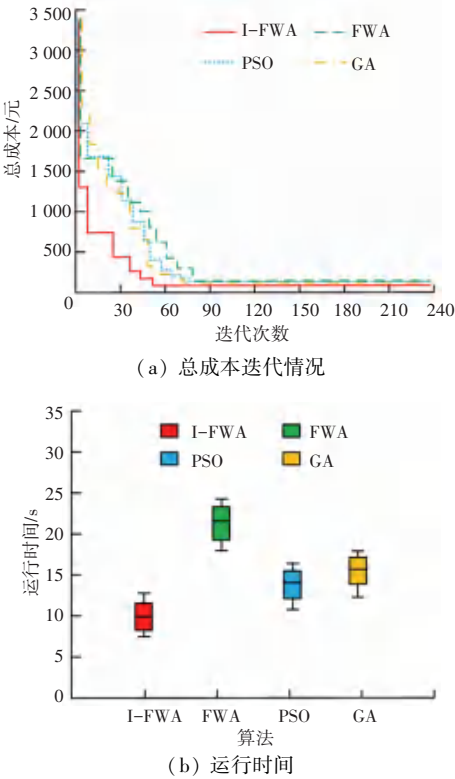


图 4 4 种调度模型求解算法的求解效果对比
Fig. 4 Comparison of the four scheduling model solving algorithms

由图 4(a)可知,随着迭代次数的增加,各个算法的总成本值也逐渐下降。在迭代至 50 次时,I-FWA 算法目标值为 521.41。在图 4(b)中,I-FWA 的运行时间为 10.88 s,常规 FWA、GA、PSO 算法的运行时间分别为 23.55 s、16.72 s 和 14.21 s。这表明,I-FWA 算法在求解过程中进行了额外的计算。

研究将环境因素引入到了车辆调度中,为检验研究建立的基于改进 FWA 的物流混合车辆调度方法的有效性,研究在不同温度情况下对求解得到的车辆调度方案进行记录,并对比目前较为流行的车辆调度模型。对比模型包括文献[21]、文献[22]中的调度模型,对比结果如图 5 所示。

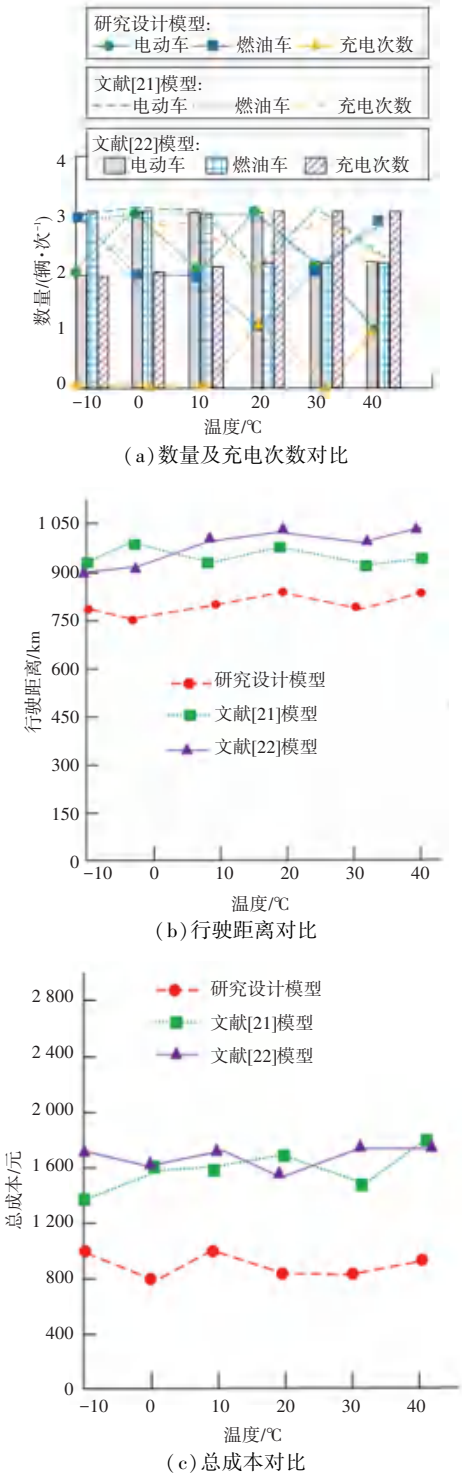


图 5 不同温度下各调度模型的调度效果对比
Fig. 5 Comparison of the scheduling effect of each scheduling model at different temperatures

由图 5 可知,研究提出的调度模型的充电次数不超过 1 次,行驶距离在 850 km 以内,总成本平均值为 1 154.85 元,燃油车数量和电车数量保持在 2~3 之间波动。相比之下,研究提出的调度模型通过优化调度策略,成功地将燃油车数量和电车数量控制在合理范围内,同时保持了较低的充电次数和

行驶距离,从而实现了更好的经济效益和环保效果。

2.2 基于改进 WOA 的车辆调度规划模型性能分析

研究在传统 WOA 算法的基础上对其进行了改进。为验证该算法的改进效果,研究将改进前后算法的运输费用、碳排放、运输时间迭代情况进行对比。对比结果如图 6 所示。

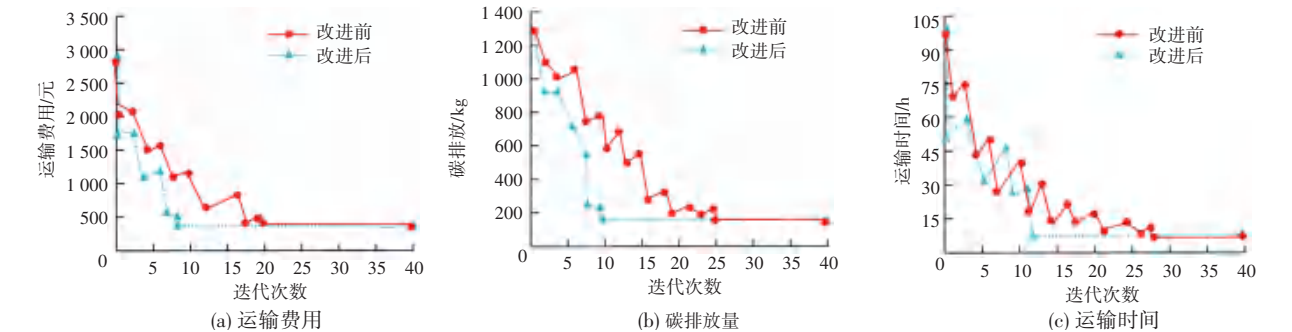


图 6 改进前后 WOA 算法的训练迭代情况对比

Fig. 6 Comparison of training iterations of WOA algorithm before and after improvement

由图 6 可知,改进后 WOA 算法迭代至 8 次即达到最低运输费用,为 456.78 元,而传统 WOA 算法在迭代至 20 次时才收敛。在碳排放方面,改进后的 WOA 算法在迭代至 10 次时即达到最低碳排放值、为 123.45 kg,而传统 WOA 算法在迭代至 25 次时才收敛。改进后的 WOA 算法在迭代至 12 次时即达到最短运输时间、为 12.5 h,而传统 WOA 算法在迭代至 28 次时才达到相近的运输时间。

2.3 综合性能评试分析

研究基于改进 FWA 和 WOA 算法建立了物流车辆路径规划模型。为检验研究提出的路径规划模型 1 的规划效果,研究将其与文献[23]中的路径规划模型 2、文献[24]中的路径规划模型 3、文献[25]

中的路径规划模型 5 进行了对比。实验过程中,研究将各个模型投入 A 工厂生产 A 产品的物流运输中,并规定运输时间如果超过规定时间,每超过 1 h 罚款 2 000 元。对比指标包括碳排放量、运输距离、运输成本、运输时间。5 种模型的调度性能对比结果见表 1。

分析表 1 可知,研究提出的模型 1 的碳排放量仅为 110.23 kg,运输距离为 820 km,明显优于其他模型。模型 1 的运输成本为 4 000 元,是 5 种模型中最低的,而且其运输时间仅为 11.5 h,没有产生任何罚款。结果表明,研究提出的模型能够有效降低碳排放和运输成本,还能在保证运输效率的同时减少运输时间。

表 1 5 种物流车辆路径规划模型的调度性能对比

Table 1 Comparison of the scheduling performance of the five logistics vehicle path planning models

模型	碳排放量/kg	运输距离/km	运输成本/元	运输时间/h	罚款/元
1	110.23	820	4 000	11.5	0
2	135.45	900	4 500	12.0	1 000
3	120.34	850	4 350	11.8	500
4	140.12	920	4 600	12.2	1 400
5	125.67	860	4 400	11.9	700

3 结束语

针对目前混合能源驱动模式车辆的物流运输工作中存在调度困难、规划路径经济成本高的问题,研究提出了一个基于改进 FWA 和 WOA 算法的物流

车辆调度及路径规划模型。该模型将电动车辆的电量耗能进行动态计算,并将其引入到问题建模当中。将成本及碳排放作为目标函数进行优化。结果表明,研究改进后的 FWA 算法迭代至 50 次即达到最佳的调度成本值,且其运行时间仅为 10.88 s,相较

于其他优化算法明显更低。改进后的 WOA 算法相较于改进前的收敛速度得到了明显提升,迭代减少了至少 10 次。在车辆路径规划过程中,模型 1 的碳排放量仅为 110.23 kg,相较于另外 3 个模型分别降低了 25.22 kg、10.11 kg 和 29.89 kg。模型 1 的运输距离仅为 820 km。运输成本方面,模型 1 为 4 000 元,且运输过程没有因超时产生任何罚款。在此后的研究中可将道路实际情况考虑到路径规划当中,进一步提高对物流车辆及路径的管理效率,降低运营成本。

参考文献

[1] 滕志军,李哲,王幸幸,等. 无线传感器网络中基于 μ 律爆炸算子的烟花虚拟力混合覆盖策略[J]. 控制理论与应用, 2023, 40(5):817-824.

[2] 陈瑞,沈鑫,万得胜,等. 面向绿色节能的智能网联电动车调度方法[J]. 计算机科学, 2023, 50(12):285-293.

[3] 王素欣,熊珺恺,王雷震,等. 多需求点间车辆调度模型及优化算法混合求解研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(8):194-204.

[4] PERUMAL S S G, LUSBY R M, LARSEN J. Electric bus planning & scheduling: A review of related problems and methodologies[J]. European Journal of Operational Research, 2022, 301(2): 395-413.

[5] 关燕鹏,李子鸣,贾新春. 基于多维度变异学习与收敛归优的鲸鱼优化算法[J]. 计算机应用研究, 2023, 40(9):2674-2680.

[6] YADAV A M, TRIPATHI K N, SHARMA S C. A bi-objective task scheduling approach in fog computing using hybrid fireworks algorithm[J]. The Journal of Supercomputing, 2022, 78(3): 4236-4260.

[7] 乔志敏,柯良军,李永伟,等. 基于免疫烟花算法的交通信号控制问题建模与优化[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2023, 46(4):1-12.

[8] 刘亚平,张惠珍,张莉,等. 带时间窗同时送取货选址路径问题及其烟花算法求解[J]. 计算机应用, 2022, 42(7):2292-2300.

[9] 赵晶,祝锡晶,孟小玲,等. 改进鲸鱼优化算法在机械臂时间最优轨迹规划的应用[J]. 机械科学与技术, 2023, 42(3):388-395.

[10] 李广强,董文超,朱大庆,等. 基于改进鲸鱼优化算法的 AUV 三维路径规划[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(7):2170-2182.

[11] 聂庆慧,龙秀,江梁,等. 多约束条件下城市道路环卫车优化配置与路径规划[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(5): 273-284.

[12] 吴会咏,靳舒春,安雪洁. 基于改进鲸鱼算法优化神经网络的飞机空气循环系统建模及故障分析[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(2):27-36.

[13] 张凯月,温海骏,陈跃鹏,等. 新冠疫情期间应急物资车辆路径优化方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(6):2518-2525.

[14] 孙林,黄金旭,徐久成,等. 基于自适应鲸鱼优化算法和容错邻域粗糙集的特征选择算法[J]. 模式识别与人工智能, 2022, 35(2):150-165.

[15] 张欣,李仁伟. 基于烟花算法的平面视觉图像分块像素点压缩模型[J]. 现代电子技术, 2023, 46(19):61-64.

[16] 丁艺鼎,蒋名亮,徐力刚,等. 基于鲸鱼优化算法的长短期记忆模型水库洪水预报[J]. 湖泊科学, 2024, 36(1):320-332.

[17] 刘俊麟,郝勇,刘春艳,等. 基于烟花算法的 BP 神经网络预测含根土抗剪强度[J]. 草业学报, 2023, 32(12):77-89.

[18] 李家豪,王青于,范玥霖,等. 鲸鱼优化算法-双向长短期记忆神经网络用于断路器机械剩余寿命的预测研究[J]. 高电压技术, 2024, 50(1):250-262.

[19] 张颖,杨广媛. 基于 FW-PSO 算法优化无线传感网络拓扑结构的方法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(2):396-403.

[20] 黄开启,刘展飞,陈卿,等. 基于烟花灰狼算法的冗余机械臂运动学逆解[J]. 机床与液压, 2023, 51(15):141-147.

[21] 靳文舟,杜昊,巫威眺. 基于 ALNS-TS 算法的半灵活型需求响应公交调度问题[J]. 深圳大学学报(理工版), 2023, 40(4): 425-434.

[22] 阎哲,汪民乐,汪江鹏,等. 带时间窗的海军航空兵场站特种保障车辆调度问题[J]. 现代防御技术, 2022, 50(6):117-123.

[23] 张岚,赵芳. 考虑车辆均衡性约束的物流多路径配送仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(4):145-148.

[24] 徐小峰,林姿汝,周鹏. 多油品供给受限下多油库被动配送车辆路径问题研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(5):157-165.

[25] 王晓燕,牛晶,刘挺. 基于改进烟花算法的室内服务机器人路径规划[J]. 现代电子技术, 2022, 45(12):182-186.