

# 控制与决策

## Control and Decision



### 基于仿生算法的多式联运路径规划方法综述

孙哲, 马胜男, 解相朋, 孙知信

引用本文:

孙哲, 马胜男, 解相朋, 等. 基于仿生算法的多式联运路径规划方法综述[J]. 控制与决策, 2025, 40(2): 375–386.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1615>

---

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于视觉引导多AGV系统的改进A\*路径规划算法

Improved A\* path planning algorithm for vision-guided multi-AGV system

控制与决策. 2021, 36(8): 1881–1890 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1670>

#### 移动机器人运动规划中的深度强化学习方法

Deep reinforcement learning for motion planning of mobile robots

控制与决策. 2021, 36(6): 1281–1292 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0470>

#### 基于 $\text{pm}3\sigma$ 正态概率区间分族遗传蚁群算法的移动机器人路径规划

Path planning of mobile robot based on  $\text{pm}3\sigma$  normal probability interval population division using genetic ant-colony algorithm

控制与决策. 2021, 36(12): 2861–2870 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0745>

#### 基于平衡鲸鱼优化算法的无人车路径规划

Path planning of unmanned ground vehicle based on balanced whale optimization algorithm

控制与决策. 2021, 36(11): 2647–2655 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0416>

#### 基于时空聚类求解带容积约束的选址-路径问题

Time-space cluster based location-routing problem with capacitate constraints

控制与决策. 2021, 36(10): 2504–2510 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0073>

# 基于仿生算法的多式联运路径规划方法综述

孙哲<sup>1</sup>, 马胜男<sup>1</sup>, 解相朋<sup>2</sup>, 孙知信<sup>1†</sup>

(1. 南京邮电大学 现代邮政学院, 南京 210003; 2. 南京邮电大学 物联网学院, 南京 210003)

**摘要:** 多式联运可有效提高物流企业的运作效率并降低运营成本,是现代物流的未来发展趋势之一.然而,其路径规划问题常常存在许多非线性约束,传统的精确算法在求解时也面临着模糊性、特殊性、动态性、高维性等挑战.鉴于仿生算法模拟生物系统时的智能优势在解决这一类复杂组合优化问题时具备广泛性和高效性,研究近年来基于多式联运路径规划的仿生算法,并将其分为3类:群智能算法、进化算法和基于物理的仿生算法,分别罗列了多式联运路径规划问题涉及到的特殊背景、关键特征和未来研究方向,广泛对比、分析了该问题下各仿生算法的原理、改进、优点和局限性,并为不同问题下的特殊场景提供了合适的仿生算法.最后,讨论了多式联运路径规划问题目前面临的挑战和未来的研究方向.

**关键词:** 多式联运; 路径规划; 仿生算法; 不确定性; 绿色运输; 可持续性

中图分类号: U15; TP18

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1615

引用格式: 孙哲, 马胜男, 解相朋, 等. 基于仿生算法的多式联运路径规划方法综述[J]. 控制与决策, 2025, 40(2): 375-386.

## Bio-inspired optimization-based path planning algorithms in multimodal transportation: A survey

SUN Zhe<sup>1</sup>, MA Sheng-nan<sup>1</sup>, XIE Xiang-peng<sup>2</sup>, SUN Zhi-xin<sup>1†</sup>

(1. School of Modern Post, Nanjing University of Posts And Telecommunications, Nanjing 210003, China; 2. School of Internet of Things, Nanjing University of Posts And Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Multimodal transportation can effectively improve the operation efficiency of logistics enterprises and reduce the operating costs, which is one of the future development trends of modern logistics. However, there are many nonlinear constraints on the path planning problems, and the traditional accurate algorithm also faces challenges such as ambiguity, particularity, dynamism and high dimensionality. Given the intelligent advantages of bio-inspired algorithms in simulating biological systems, they are extensive and highly efficient in solving this kind of complex combinatorial optimization problems. This paper studies the bio-inspired algorithms based on multimodal transportation path planning in recent years, and divides it into three categories: swarm intelligent algorithms, evolution algorithms and the physics-based bio-inspired algorithms, summarizes the special background, key features and future research direction, widely compares, analyzes the principle, improvement, advantages and limitations, and provides the appropriate bio-inspired algorithms for the special scenarios. Finally, the challenges and future research trends are discussed.

**Keywords:** multimodal transportation; path planning; bio-inspired algorithms; uncertainty; green transportation; sustainability

## 0 引言

多式联运是指两种或两种以上不同运输方式的联合运输.作为一种集约高效的运输组织方式,多式联运具有资源利用率高、绿色低碳、安全便捷等特点.这种运输方式既能提高物流企业的运作效率,又能降低其运营成本.2022年,国务院在《推进多式联运发展优化调整运输结构工作方案(2021—2025年)》

中部署大力发展多式联运,推动各种交通运输方式深度融合,进一步优化调整运输结构,提升综合运输效率,降低社会物流成本,促进节能减排降碳.目前,多式联运已被应用于多个领域,例如城市交通规划、定价补贴、路径规划、节点选址等.

多式联运路径规划问题规模较大,具有高约束、多模态、不连续、高维等性质,而仿生算法通过模拟在

收稿日期: 2023-11-19; 录用日期: 2024-05-07.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(62303214).

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: sunzx@njupt.edu.cn.

自然界中观察到的行为模式和物理现象可有效地解决复杂的计算任务<sup>[1]</sup>,且在保持种群多样性、避免局部最优,实现全局最优方面具有一定优势.因此,仿生算法在多式联运领域有着巨大的研究基础和前景,但

回顾许多有关多式联运的文献,没有一篇文献总结、对比、分析了基于多式联运路径规划的仿生算法.为了更直观地体现本研究的特殊性,表1汇总了现有的多式联运文献的特点.

表1 多式联运文献特点汇总

| 文献  | 年份   | 描述              | 挑战 | 特殊运输 | 路径规划 | 仿生算法 | 碳排放 | 应用 | 模型设计 |
|-----|------|-----------------|----|------|------|------|-----|----|------|
| [2] | 2019 | 单式-多式联运中的车队规划   | 有  | 无    | 无    | 无    | 无   | 有  | 无    |
| [3] | 2014 | 2005年以来多式联运规划综述 | 有  | 无    | 有    | 无    | 无   | 无  | 无    |
| [4] | 2018 | 多式联运中优化模型综述     | 有  | 无    | 无    | 无    | 无   | 无  | 有    |
| [5] | 2018 | 受干扰环境下的多式联运     | 有  | 有    | 无    | 无    | 无   | 有  | 无    |
| [6] | 2017 | 人道主义物流中的多式联运    | 有  | 有    | 有    | 无    | 无   | 有  | 无    |
| [7] | 2022 | 不同运输组合的多式联运     | 有  | 无    | 有    | 无    | 无   | 有  | 有    |
| 本文  | 2024 | 仿生算法下多式联运路径规划   | 有  | 有    | 有    | 有    | 有   | 有  | 有    |

本文大量总结、对比、分析了基于多式联运路径规划问题的仿生算法,主要工作总结如下:

- 1) 探讨多式联运路径规划问题一般目标函数、约束条件及特殊背景.
- 2) 回顾、分类了多式联运路径规划下的仿生算法;对比、分析这些算法应用的背景、优点、特点,并做出了未来展望.
- 3) 讨论多式联运路径规划问题及仿生算法面临的挑战和未来的研究方向.

1 多式联运路径规划模型

1.1 一般问题描述

有一批货物需要从起始地点 $O$ 运送到目的地 $D$ ,中间有 $n$ 个节点,可从其中选择若干个城市作为途径节点,每相连的2个节点之间存在多种运输方式.根据需求确定一条最佳运输路径和最佳运输方式.

1.1.1 问题假设

- 1) 货物的转运只能在城市节点处发生;
- 2) 节点处的设施均满足各运输方式之间的转换要求;
- 3) 货物在运输过程中不考虑运输货损;
- 4) 任意节点间货物可选择的运输方式、成本已知.

1.1.2 相关参数说明

$V$ : 多式联运网络中的节点集;  
 $i, j (i, j \in V, i \neq j)$ : 城市节点;  
 $k, l (k \neq l)$ : 运输方式;  
 $Q$ : 货物总质量;  
 $d_{ij}^k$ : 货物选择运输方式 $k$ ,从节点 $i$ 到 $j$ 的运输距离(km);  
 $x_{ij}^k$ : 决策变量,货物从节点 $i$ 到 $j$ 是否选择运输方

式 $k$  (如果是,则 $x_{ij}^k = 1$ ,否则 $x_{ij}^k = 0$ );  
 $y_i^{kl}$ : 0-1变量,货物是否在节点 $i$ 由运输方式 $k$ 转换为 $l$  (如果是,则 $y_i^{kl} = 1$ ,否则 $y_i^{kl} = 0$ );  
 $c_i^{kl}$ : 货物在 $i$ 点由运输方式 $k$ 转换为 $l$ 的单位换装成本(元/h);  
 $c_{ij}^k$ : 货物以运输方式 $k$ 从节点 $i$ 到 $j$ 的单位运输成本;  
 $t_i^{kl}$ : 货物在 $i$ 点由运输方式 $k$ 转换为 $l$ 所需的换装时间(h);  
 $t_{ij}^k$ : 货物以运输方式 $k$ 从节点 $i$ 到 $j$ 的运输时间;  
 $T_D$ : 货物实际到达时间;  
 $[T_1, T_2]$ : 货物到达的承诺时间窗.

1.2 一般目标函数及约束条件

针对不同运输环节,多式联运路径规划的数学模型存在差异性,但也存在着高度的相似性.

1.2.1 目标函数

多式联运路径规划问题中常见目标函数包括:运输成本最小,碳排放量最少,运输时间最短.

- 1) 总运输成本最小:文献[8]的运输成本主要由节点间的运输成本之和、节点上运输方式转换的中转成本之和两者构成,即

$$C = Q \left( \sum_{i,j \in V} \sum_{k \in K} c_{ij}^k d_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{i \in V} \sum_{k,l \in K} c_i^{kl} y_i^{kl} \right). \quad (1)$$

- 2) 碳排放量最小:文献[9]建立了模糊需求和模糊运输时间下低碳成本多式联运路径优化模型.以三角模糊表示模糊运量( $\tilde{q}$ ),并分别与运输、转运途中的碳排放成本的乘积之和表示碳排放,即

$$E = \tilde{q} \left( \sum_{i,j \in V} \sum_{k=1}^K e_{ij}^k d_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{i=1}^V \sum_{k,l \in K} e_i^{kl} t_i^{kl} y_j^{kl} \right). \quad (2)$$

其中:  $e_{ij}^k$  表示货物以运输方式  $k$  从节点  $i$  到节点  $j$  的单位碳排放成本;  $e_i^{kl}$  表示货物在  $i$  点, 由运输方式  $k$  转换为  $l$  的碳排放成本。

3) 总运输时间最小: 文献[10]将一般的多式联运路径优化模型扩展为随机机会约束规划模型。以在途时间、换装时间、中转节点等待时间( $w_{ij}^k$ )之和表示总运输时间, 有

$$T = \sum_{i,j \in V} \sum_{k \in K} t_{ij}^k x_{ij}^k + \sum_{i \in V} \sum_{k,l \in K} t_i^{kl} y_i^{kl} + \sum_{i,j \in V} \sum_{k \in K} w_{ij}^k x_{ij}^k. \quad (3)$$

### 1.2.2 一般约束条件

针对特殊的应用场景, 多式联运路径规划中约束条件通常具有特殊性。但一般多式联运路径规划问题中常考虑以下几种约束条件:

1) 运输路线完整性。文献[11]以两段不同运输方式的决策变量之积等于中间转运节点( $n$ )的0-1变量来确保运输路线的完整性, 即

$$x_{in}^k \cdot x_{nj}^l = y_n^{kl}. \quad (4)$$

2) 节点间仅存在一种运输方式。不同的运输节点之间, 仅使用一种特定的运输方式, 可确保运输的高效性和可控性, 避免混合多种运输方式可能带来的复杂性和延误。文献[12]通过下式表示:

$$\sum_{k=1}^K x_{i,i+1}^k = 1. \quad (5)$$

3) 节点间仅转运一次。节点间的转运需消耗一定的转运成本和时间, 因此多式联运中节点之间的转运次数一般设置为0、1次。文献[12]将其表示为

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K y_i^{kl} = 1, \quad k \neq l. \quad (6)$$

4) 转运时的容量约束。在转运节点, 必须满足货物转运所需的储存空间、装卸设备和其他资源的容量要求, 这样可以避免因节点容量不足而导致的货物堆积、延误和运输不畅, 从而保证货物能够在转运过程中顺利流转。文献[13]通过下式表示约束:

$$Q' y_i^{m,n} \leq q_i, \quad \forall i \in N, \quad \forall m, n \in M. \quad (7)$$

其中:  $Q'$  为运输需求量,  $y_i^{m,n}$  为决策变量,  $q_i$  为节点  $i$  的最大转运量。

5) 满足时间窗约束。在运输高时效性货物的途中, 要求货物运输必须在预定的时间窗口内完成。文献[14]中要求运到时间满足模糊时间窗约束,  $\varepsilon$  为非负无量纲模糊运到时间系数, 约束如下所示:

$$T_D \leq T_2 + \varepsilon(T_1 + T_2)/2. \quad (8)$$

### 1.2.3 特殊约束条件

根据场景不同, 约束条件具有特殊性, 以下列出几个不同场景下的特殊约束条件:

1) 文献[13]在研究疫情环境下, 应急物资的多式联运中定义风险约束如下:

$$\sum_{i \in V} r_i \leq R'. \quad (9)$$

其中:  $r_i$  表示节点  $i$  的疫情感染风险值,  $R'$  表示允许的最大风险值。

2) 文献[15]研究需求与时间双重不确定条件下的低碳多式联运, 下式约束了需求不确定性, 限制了每个可行解与场景  $s$  最优值的接近程度:

$$C_S(x) \leq (1 + \alpha) C_S^*. \quad (10)$$

其中:  $C_S(x)$  表示情境  $s$  下允许的目标函数值;  $C_S^*$  表示情境  $s$  下确定性问题的最优目标函数, 且  $C_S^* > 0$ ;  $\alpha$  表示允许的目标函数值与最优目标函数值之间的最大偏差, 若  $\alpha = 0$ , 则代表这是一个确定性需求。

3) 文献[16]在研究危险货物运输时, 要求危险物品在相应的释放瞬间开始装载, 其约束定义如下:

$$\sum_{m \in S_{ij}} x_{ijm}^p \leq 1, \quad \forall p \in P, \quad \forall (i, j) \in V. \quad (11)$$

其中:  $S_{ij}$  表示公铁联运网络中的服务站点;  $P$  表示运输订单集; 如果在节点  $i$  与  $j$  之间, 于服务站点  $m$  进行订单  $p$  的运输, 则  $x_{ijm}^p = 1$ , 否则  $x_{ijm}^p = 0$ 。

4) 文献[17]研究模糊洲际公路-铁路路线模型, 定义洲际列车容量约束如下:

$$\sum_{l \in V_{dd}} \alpha_{ljk n} d_{lk}^h + \sum_{i \in V_{dr}} \beta_{ijk n} d_{ik}^r \leq \bar{e}, \quad \forall j \in V_{DMS}, \quad k \in V_{FMS}, \quad n \in N. \quad (12)$$

约束条件(12)保证来自国内公路站点  $V_{DMS}$  和国内铁路站点  $V_{FMS}$  的集装箱数量不超过洲际列车的容量。其中:  $\bar{e}$  为洲际列车的容量;  $\alpha_{ljk n} = 1$  表示  $j$  属于国内多式联运站点, 且在第  $n$  个铁路站点的运输需求量, 否则,  $\alpha_{ljk n} = 0$ 。

5) 文献[10]在考虑随机机会约束的多式联运时, 机会约束条件定义如下:

$$Pr\{T_1 \leq T \leq T_2\} \geq \alpha. \quad (13)$$

该约束表示在规定时间内交付货物的概率不小于  $\alpha$  (准时率), 准时率越高, 方案运输服务水平越高。

数学模型构建后, 快速有效求解问题成为一道难题。传统算法难以胜任, 而仿生算法为路径规划提供了新思路, 能够应对复杂的多式联运网络和动态环境, 为寻找全局最优路径和节点间最优运输方式提供

了更灵活、自适应的方式.

## 2 基于多式联运路径规划的仿生算法应用

仿生算法是一种启发式优化算法,它模拟了生物进化、群体智能和自然选择等过程,通过不断迭代、演化和适应,能够搜索问题空间中的最优解,为解决

复杂问题提供一种高效而强大的方法.近年来,有关仿生算法的文献数量持续增加,同时,越来越多的仿生算法被提出.本文将基于多式联运路径规划的仿生算法分为群智能算法、进化算法和基于物理的算法,如图1所示.

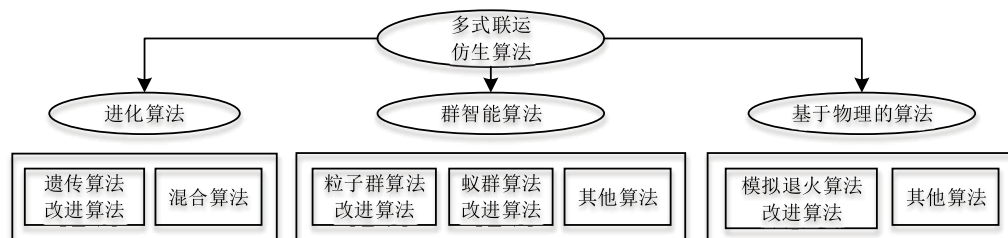


图1 多式联运仿生路径规划算法的分类层次

### 2.1 群智能算法

基于多式联运路径规划的群智能算法有常见的粒子群算法及其改进算法,蚁群算法及其改进算法,以及其他群智能算法和混合算法.

#### 2.1.1 粒子群算法(PSO)及其改进算法

粒子群优化算法利用群体个体之间的协作和信息共享来寻找最优解.每个粒子在搜索空间中寻找个体极值,并与整个群体共享,并将其中最优的个体极值作为全局最优解.所有粒子根据个体极值和全局最优解调整各自的速度和位置.

文献[18]建立一个二维数组编码,行表示每个任务的起始传输顺序,列表示各任务下的运输路径,然后引入交换算子和3个不同的操作符改变编码,增强算法的搜索能力.文献[19]设计了一种基于约束满足和自适应搜索状态的惯性权重动态调整的粒子群算法;文献[20]自适应地动态调整粒子的惯性权重,以调整单个粒子到最优值的距离与所有粒子到最优值的平均距离的比值.同时,为了防止精英粒子落入局部最优,利用柯西分布对精英粒子加入扰动使其突变,提高算法的搜索性能.文献[21]利用基于线性递减权值的粒子群优化算法解决数据层面的类别不平衡问题,修正模型预测结果.文献[22]引入搜索空间边界限制粒子的搜索空间,同时,为了保持粒子的变化,增加了随机搜索过程,若变化低于某个阈值,则给出更新惯性权值的自适应规则,以平衡粒子局部搜索和全局搜索的能力.

#### 2.1.2 蚁群算法(ACO)及其改进算法

蚁群算法源于蚂蚁觅食过程.蚂蚁觅食时,在经过的路径上释放信息素,其浓度与路径长度成反比.蚂蚁对信息素具有感知能力,它们会沿着信息素浓度较高路径行走,留下信息素,形成正反馈机制,一

段时间后,整个蚁群就会沿着最短路径到达食物源.

文献[23]将机器学习纳入蚁群优化算法,构建机器学习-最大最小蚂蚁系统(ML-MMAS)学习信息素函数,直接产生显著的信息素路径,使算法不必从头开始初始化和更新信息素路径.文献[24]应用蒙特卡罗模拟来处理网络中的随机传输时间,结合历史数据和数据挖掘算法生成的数据集来加速模拟中对非主导解的搜索.文献[25]中,利用处理器的并行计算能力来进行蚁群算法的路由选择.文献[26]将次优路径抑制因子引入蚁群的信息素更新公式,充分发挥不同层级蚁群在搜索过程中的协作优势,避免陷入局部最优.文献[27]比较和评价多目标蚁群算法(MOACO)与多信息素蚁群优化算法(MPACO)在不同初始参数运行下的收敛性、多样性等各项指标.文献[28]针对双目标多式联运问题,改进蚁群算法,有效生成了一组路线选择的帕累托解.

#### 2.1.3 其他群智能算法及混合算法

文献[29]提出具有自适应 $t$ 分布的麻雀搜索算法(ATDSSA),将迭代次数作为 $t$ 分布的自由度参数来干扰麻雀位置.初始迭代中, $t$ 分布于柯西分布的突变具有较好的全局搜索能力;后期迭代中, $t$ 分布变化的自由度增加,具有良好的局部搜索能力.文献[30]中,改进的灰狼优化算法(GWO)包括构造阶段和改进阶段,改进阶段中,设计了一种移动策略来更新灰狼位置.文献[31]针对量子细菌觅食(QBF)划分的不平衡,提出一种带容量约束的量子细菌觅食方法(QBFwCC),并根据容量约束构建了“直升机-车辆”医疗材料联合运输网络结构.文献[32]介绍了一种新的萤火虫算法(BFA)位置更新方法,采用二进制操作方法和局部可行处理方法,纠正了不可行解,消除冗余标签,使该算法适合求解离散问题.文献

[33]提出一种混合多目标salp群算法和正弦余弦算法(HMSSA-SCA). 文献[34]在PSO中引入了突变和交叉两个差异进化算子,增加了个体的多样性,避免PSO陷入局部最优状态;另外,从PSO中去除粒子的速度,以减少更多参数对算法的影响. 文献[35]通过遗传算法选取前20%个体产生初始解,为了保证种群的多样性,随机选取后80%中的个体作为新一代个体,并以此作为蚁群算法的初始信息素,之后利用蚁群算法的正反馈机制寻找最优解.

## 2.2 进化算法

进化算法是受生物进化理论启发的优化算法,它模拟了自然界生物种群进化的过程,通过模拟进化过程中的选择、交叉和变异等操作搜索最优解,具有全局搜索能力,可有效应用于复杂问题空间.

### 2.2.1 遗传算法(GA)及改进算法

遗传算法是一种随机全局搜索优化方法. 算法步骤包括编码、初始化种群、设计适应度函数、选择、交叉和变异操作. 通过这些操作,种群进化到搜索空间中越来越好的区域,最终收敛到最优解.

文献[36]设计一种具有变领域搜索操作和动态灾变机制的多种群遗传算法,增强算法寻优能力和稳定性. 文献[37]基于传统的遗传算法求解同步化的多式联运模型来及时调整运输计划,应对不确定性,从而降低运输成本. 文献[38]采用两部分遗传算法为每个部分提供了不同的染色体、交叉和突变操作,且后一部分使用前一部分的输出作为输入以提升算法性能. 文献[39]中,采用插入启发式算法构造初始种群,提高初始解的优性;另外,在算法交叉和突变过程中,为了减少适应性强的后代的损失,遗传算法的蜂王进化操作和交叉操作优势互补. 文献[15]中设计了一种基于蒙特卡罗抽样的灾难性自适应遗传算法(CA-GA),并验证了其有效性. 文献[40]设计了一种切实可行的自适应遗传算法来有效寻求最优解. 文献[41]详细介绍了遗传算法的编码方法、适应度函数、遗传算子和操作参数等步骤来求解多式联运的可持续性问题.

### 2.2.2 混合算法

文献[42]在解决考虑碳排放的多运输任务和运输模式问题时,第1阶段采用基于floyd的 $K$ 短路算法寻找 $K$ 个运输路径,第2阶段使用遗传算法将运输模式分配给 $K$ 个传输路径. 文献[43]在遗传算法中引入模拟退火算法非优解的保留策略,让进化得到的子种群和其领域中的潜在优秀个体再次组合,进一步增强了算法的局部搜索能力,还保持了遗传算

法自身较强的全局搜索特性. 文献[44]为平衡运输成本与碳排放量,提出一种ANFIS+GA+SVD算法,算法通过奇异值分解(SVD)对历史运输数据进行预处理,有效降低了维数,提高了数据集的质量. 随后构建一个自适应模糊神经网络(ANFIS)模型,利用距离、速度、时间等因素来预测每种运输方式的二氧化碳排放量,然后用遗传算法优化,遵循运输约束的同时最小化二氧化碳排放.

## 2.3 基于物理的仿生算法

基于物理的仿生算法分为模拟退火算法及其改进算法、重力搜索算法及其改进算法和其他算法.

### 2.3.1 模拟退火算法(SA)及其改进算法

模拟退火算法受启发于固体退火过程,固体在高温下加热后会逐渐冷却并达到稳定的能量状态. 类比于此,在高温时,算法根据Metropolis准则接受较差的解以避免陷入局部最优,随着温度的降低,逐渐减少接受较差解的概率,最终收敛到全局最优解.

文献[45]在模拟退火算法中,采用工位分配列表方式表示解,较大程度地缩短了解码过程. 文献[46]借鉴遗传算法和变邻域方法改进模拟退火算法,改进后的SA减少了迭代次数并获得更好的解. 文献[47]结合SA与多启动策略的优点,提出了多启动模拟退火算法(MSA). 文献[48]提出一种多目标存档模拟退火算法(AMOS),档案由硬限制和软限制控制,当存档大小达到软限制时,便应用集群将大小减少到硬限制. 文献[49]提出了将基于种群的模拟退火算法(PBSA)与精确算法相结合的混合方法,首先生成一组可行解并计算其适应度值,当不满足准则时,使用一系列启发式方法为每个解建立邻域,由PBSA得到的最佳解可作为精确方法的一个很好的初始解.

### 2.3.2 其他算法

文献[11]根据烟花算法参数较少、执行过程简单,以及在解决高维复杂优化问题上具有一定优势的特点,改进了烟花算法. 文献[50]基于PSO的优化结构,引入了GSA中天体间引力相互作用存在的核心机制,以此来提高混合算法的整体优化性能. 文献[51]针对GSA因多样性迅速降低而导致收敛过早的现象,利用混沌动力学的破坏策略显著增强了GSA的搜索能力. 针对模型的随机性和多目标性,文献[52]提出了一种基于帕累托优势法的多目标烟花算法,在多式联运问题中可选择较优解. 文献[53]提出了一种多模态游牧算法(MNA)来优化增广拉格朗日函数(ALF). 文献[54]采用Box-Cox变换来建立区域、国际间的货运模式选择模型,并提出了一种具有回溯



能力的爬山元启发式算法,快速识别在多变量必须转换时使用的Box-Cox参数.文献[55]设计了一个改进的变量邻域搜索(VNS)过程,将VNS嵌入到多目标混合微分进化算法(DE)中,开发了一个可生成高质量解的MOMVDE-VNS算法.文献[56]在研究城际多式联运网络中的上门送货路径规划时,引入改进的涟漪扩散算法,算法仅通过一次迭代即可找到全局最优路径.

3 仿生算法在多式联运中的对比和分析

仿生算法作为一类受生物学启发的优化算法,在多式联运中展现出独特的优势和特点.通过分析、对比不同仿生算法在多式联运中的表现,可以深入了解其适用性和效果,为实际应用提供参考和指导.

本文对比、分析了基于多式联运路径规划的仿生算法.表2分析、比较了各个仿生算法的优势、局限及未来研究方向;表3总结了各个仿生算法的改进、

表2 分析、比较仿生算法优势、局限性和未来研究方向

| 算法                          | 优势                                      | 局限性或未来研究方向                                   | 目标数 |
|-----------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|-----|
| PSO <sup>[35]</sup>         | 达到了良好的求解精度,提高搜索能力和收敛速度                  | 可对应急后勤规划问题进一步考虑区间性、多面性、模糊或随机等不确定性            | 单目标 |
| PSO-AIW <sup>[19]</sup>     | 避免陷入局部最优,具有较好的收敛性和鲁棒性,在处理大数据方面具有更大的优势   | 进一步考虑拥堵时间和拥堵机会成本对多式联运方式选择的影响                 | 多目标 |
| IPSO <sup>[20]</sup>        | 收敛速度快,求解精度良好                            | 可以参考相关企业确切的运输时间                              | 单目标 |
| ML-MMAS <sup>[23]</sup>     | 提高了搜索速度                                 | 开发高效的算法,在集成网络中搜索最佳旅行路线                       | 单目标 |
| DD-MSAC <sup>[24]</sup>     | 得到的非支配解集具有更好的多样性                        | 将碳减排添加到多目标优化框架中                              | 多目标 |
| PACO <sup>[25]</sup>        | 找到有效路径的概率大幅增加,时间利用率和资源利用率也较高            | 该算法将应用于多核系统上的大型网络,其中将有更多线程可用                 | 单目标 |
| MCACO <sup>[27]</sup>       | 在双目标问题中,该算法在运行时间、解决方案变化和收敛趋势方面具有良好的表现   | 可与其他算法结合使用,以增强算法性能                           | 多目标 |
| DDACO <sup>[28]</sup>       | 解决方案具有有效性和可行性                           | 没有使用实际的多式联运路线数据来验证该方法,未来需开发更先进的多式联运路径规划模型和方法 | 多目标 |
| ATDSSA <sup>[29]</sup>      | 在较短时间内可获得高质量的解决方案,有效地平衡了SSA的局部和全局搜索能力   | 缺乏对ATDSS的收敛性进行理论分析,应多考虑交通网络中存在的许多不确定性        | 多目标 |
| GWO <sup>[30]</sup>         | 能够在合理的时间内以较高的精度解决问题                     | 运行时间相对较长                                     | 多目标 |
| BFA <sup>[32]</sup>         | 可在相对合理的时间内有效地搜索到全局最优或次优解,算法稳定,收敛能力好     | 尝试提高算法的性能(例如与其他方法结合)                         | 单目标 |
| QBFwCC <sup>[31]</sup>      | 可以高效地为问题找到最优解                           | 进一步研究如何根据灾害情况确定最佳紧急过境点数量,如何克服公司医疗援助点数量的不平衡.  | 单目标 |
| HMSSA-SCA <sup>[33]</sup>   | 算法性能好,可以快速地收敛到最优解                       | 在救灾物资发放中考虑灾前灾害震级预测                           | 多目标 |
| MHDP <sup>[34]</sup>        | 该算法可以高效地求解模型,生成双目标应急调度问题的最优解            | 还需要开发一个能够实时调度的强大系统                           | 多目标 |
| Two-part GA <sup>[38]</sup> | 具有良好的性能,良好的鲁棒性                          | 可以考虑不同形式的车辆路线(例如接送和开放参观)、特殊产品运输(如危险产品)等      | 单目标 |
| QBGA <sup>[39]</sup>        | 算法具有较强的搜索能力、收敛速度                        | 考虑冷链物流中列车和水运运输路线安排和多阶段物料动态分布优化问题             | 单目标 |
| CA-GA <sup>[15]</sup>       | 较传统的遗传算法,具有较优解                          | 分析双重不确定性下运输时间约束能力及影响机制                       | 单目标 |
| AGA <sup>[40]</sup>         | 具有较好的稳定性,收敛速度更快,收敛精度高                   | 将探索一些精确算法或启发式算法,以便找到问题更有效的解决方案               | 单目标 |
| GA-SA <sup>[43]</sup>       | 全局、局部搜索能力强,计算过程高效                       | 可以考虑应急物资连续消耗的形态和规律,进一步研究每个阶段模型之间的影响          | 多目标 |
| ISA <sup>[45]</sup>         | 可以更快速、准确地解决节点定位问题                       | 预测地铁站内自动取物柜的建设重要性将减轻                         | 单目标 |
| AMOS <sup>[48]</sup>        | 该算法具有较高的效率和搜索速度                         | 与其他先进的方法技术作进一步比较并改善解决方案,例如开发和集成机器学习方法        | 多目标 |
| IFWA <sup>[11]</sup>        | 提高了运行速度和收敛速度                            | 研究基于不同时间窗的商品多式联运路径优化问题                       | 多目标 |
| PBSA <sup>[49]</sup>        | 解质量高,鲁棒性强                               | 可以研究易腐产品的多式联运,并处理其他不确定性问题,如需求和时间             | 单目标 |
| MFWA <sup>[52]</sup>        | 可获得高质量的可行解决方案                           | 需要更多的实验来验证其鲁棒性                               | 多目标 |
| HCMA <sup>[54]</sup>        | 可有效产生稳定的结果,计算、收敛速度快                     | 存在风险,迫使模型产生预期和显著的估计,使模型远离坚实的统计基础             | 单目标 |
| MOMVDE-VNS <sup>[55]</sup>  | 收敛性能好,鲁棒性强,全局、局部搜索能力强                   | 研究具有预算不确定性的鲁棒优化模型                            | 多目标 |
| IRSA <sup>[56]</sup>        | 算法具有可行性和有效性,具有较高的解决效率,在可接受的时间范围内找到全局最优解 | 许多城市会出现交通拥堵现象,未来将继续研究多模态不确定性的多式联运网络规划路径      | 单目标 |

表3 总结仿生算法的改进、应用和环境

| 分类                   | 类别                                                            | 算法                                   | 改进与应用                                                               | 环境                                                          | 使用算法             |       |
|----------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------|-------|
| 群智能<br>算法            | 粒子群<br>算法改进<br>算法                                             | PSO <sup>[18]</sup>                  | 采用二维矩阵编码改进模型,引入交换算子提升算法的搜索能力                                        | Python                                                      | PSO、GA           |       |
|                      |                                                               | PSO-AIW <sup>[19]</sup>              | 利用改进的自适应惯性权重粒子群算法解决问题                                               | Matlab                                                      | PSO              |       |
|                      |                                                               | IPSO <sup>[20]</sup>                 | 分析、整合了多式联运和冷链物流的特点,利用改进的PSO优化路径                                     | Matlab                                                      | 改进PSO            |       |
|                      |                                                               | GH-PSO <sup>[22]</sup>               | 引入空间边界限定搜索范围,同时为确保粒子位置变化的多样性,添加一个随机搜索程序                             | —                                                           | PSO、贪婪<br>算法     |       |
|                      | 蚁群算法                                                          | DD-MSAC <sup>[24]</sup>              | 提出一种基于数据驱动的多目标模拟蚁群算法,并结合历史数据和数据挖掘算法生成的数据集提高模拟中对非主导解的搜索速度            | Matlab                                                      | ACO              |       |
|                      |                                                               | PACO <sup>[25]</sup>                 | 结合处理器的并行计算能力和蚁群算法来求解最优路径                                            | Java                                                        | ACO              |       |
|                      |                                                               | MPACO <sup>[27]</sup>                | 为解决多目标(3个)问题,以3个种群和3个信息矩阵初始化种群                                      | C#                                                          | ACO              |       |
|                      |                                                               | DDACO <sup>[28]</sup>                | 从节能和风险的角度提出一个基于 AND/OR 的双目标多模态运输路径序列优化问题,并设计了一个双目标离散蚁群来求解该模型        | Matlab                                                      | ACO              |       |
|                      | 其他算法                                                          | ATDSSA <sup>[29]</sup>               | 将迭代次数作为 $t$ 分布的自由参数来干扰麻雀位置,初期和后期迭代中,分别增强了算法的全局搜索能力和局部搜索能力           | Matlab                                                      | SSA              |       |
|                      |                                                               | GWO <sup>[30]</sup>                  | 引入改进阶段以更新灰狼种群                                                       | Python                                                      | GWO              |       |
|                      |                                                               | QBFwCC <sup>[31]</sup>               | 针对量子细菌觅食(QBF)划分中剩余容量的不平衡问题,提出了一种改进的划分方法(基于容量约束的量子细菌觅食(QBFwCC))      | Matlab                                                      | QBF              |       |
|                      |                                                               | BFA <sup>[32]</sup>                  | 通过二元运算方法更新萤火虫位置,并引入局部可行的处理方法,使算法更适合离散问题                             | Matlab                                                      | FA               |       |
|                      | 混合算法                                                          | HMSSA-SCA <sup>[33]</sup>            | 将具有较强竞争力和灵活性的多目标樽海鞘群算法(MSSA)结合收敛性较强的正弦余弦算法(SCA),以提高算法收敛速度           | Matlab                                                      | SSA、SCA          |       |
|                      |                                                               | MHDP <sup>[34]</sup>                 | 结合DE较强的优化能力和PSO计算效率高、不易陷入局部最优的优点,设计集成DE和PSO的MHDP来解决所提出的问题           | Matlab                                                      | DE、PSO           |       |
|                      |                                                               | ACO-GA <sup>[35]</sup>               | 融合了ACO的正反馈机制和GA强大的全局搜索能力                                            | Python                                                      | ACO、GA           |       |
| 进化<br>算法             | 遗传算法                                                          | GA <sup>[37]</sup>                   | 利用轮盘赌选择更新当前最优和历史最优,并采用单点交叉法随机寻找城市节点和交通方式的交叉点                        | Matlab                                                      | GA               |       |
|                      |                                                               | Two-part GA <sup>[38]</sup>          | 基于具有时间窗和模糊需求的多式联运,提出两阶段遗传算法                                         | Matlab                                                      | GA               |       |
|                      |                                                               | QBGA <sup>[39]</sup>                 | 设计一种插入启发式算法构建初始种群,同时将蜂王进化策略与交叉操作互补,以改进精英保留策略,进而提升算法性能               | Matlab                                                      | GA               |       |
|                      |                                                               | CA-GA <sup>[15]</sup>                | 为防止算法过早收敛,提高全局搜索性能,设计一种基于蒙特卡罗的灾难性自适应遗传算法                            | Matlab                                                      | GA               |       |
|                      |                                                               | AGA <sup>[40]</sup>                  | 通过自适应调整交叉和突变概率来改进传统遗传算法                                             | Matlab                                                      | GA               |       |
|                      | 混合算法                                                          | $K$ short circuit-GA <sup>[42]</sup> | 问题的第1阶段采用基于floyd的 $K$ 短路算法寻找 $K$ 个运输路径,第2阶段使用遗传算法将运输模式分配给 $K$ 个传输路径 | Matlab                                                      | $K$ 短路算<br>法和GA  |       |
|                      |                                                               | GA-SA <sup>[43]</sup>                | 利用遗传算法对初始种群进行筛选,使用“轮盘赌选择法”对问题进行改进,然后利用模拟退火加快寻求最优个体的速度               | Matlab                                                      | GA、SA            |       |
|                      |                                                               | ANFIS-GA-SVD <sup>[44]</sup>         | 通过SVD对历史运输数据进行预处理,随后利用 ANFIS 预测运输模式,最后使用遗传算法优化问题                    | Python                                                      | ANFIS、<br>GA、SVD |       |
|                      | 基于物<br>理的仿<br>生算法                                             | 模拟退火<br>算法                           | ISA <sup>[45]</sup>                                                 | 根据模型特点,采用变领域算法和遗传算法中的交叉组合改进SA中新解产生的部分                       | Matlab           | SA    |
|                      |                                                               |                                      | AMOS <sup>[48]</sup>                                                | 算法中的解由硬限制和软限制控制,在搜索过程中非主导的解决方案存储在归档中,当大小达到软限制时,应用集群将其减少到硬限制 | Google App       | 多目标SA |
| PBSA <sup>[49]</sup> |                                                               |                                      | 提出基于种群的模拟退火(PBSA)算法,并将PBSA与精确方法相结合来提升算法的解决能力                        | Matlab                                                      | SA               |       |
| 其他算法                 |                                                               | IFWA <sup>[11]</sup>                 | 设计基于中俄双边贸易的多式联运路径优化模型的改进烟花算法                                        | Matlab                                                      | FWA              |       |
|                      |                                                               | MFWA <sup>[52]</sup>                 | 采用多目标烟花算法求解多式联运路径规划问题                                               | Visual Studio                                               | 多目标FWA           |       |
|                      |                                                               | HCMA <sup>[54]</sup>                 | 提出了一种具有回溯能力的爬山元启发式算法,使算法并不局限于在最陡的方向搜索,而是探索了所有坡度增加的方向                | R studio                                                    | HCA              |       |
| IRSA <sup>[56]</sup> | 带增强策略的涟漪算法仅通过一次迭代就可找到全局最优路径,采用一种缩减搜索空间的方法来加快计算过程,找到 $k$ 条最优路径 | Python                               | RSA                                                                 |                                                             |                  |       |



表4 总结、比较仿生算法性能、特殊背景、运输方式

| 算法                                  | 多样性 | 解质量 | 搜索能力 | 特殊背景        | 运输方式       | 发表时间 |
|-------------------------------------|-----|-----|------|-------------|------------|------|
| PSO-AIW <sup>[19]</sup>             | 好   | —   | —    | 拥堵信息        | 公、铁、水      | 2014 |
| MFWA <sup>[52]</sup>                | 一般  | 好   | —    | 多目标问题       | 未说明        | 2017 |
| Two-part GA <sup>[38]</sup>         | —   | 好   | —    | 时间窗和模糊需求    | 公、铁、水      | 2018 |
| PACO <sup>[25]</sup>                | —   | 好   | —    | 在真实网络上研究参数  | 公、铁、空      | 2019 |
| ACO-GA <sup>[35]</sup>              | 好   | 好   | —    | 多目标问题       | 公、铁、水      | 2019 |
| DDACO <sup>[28]</sup>               | —   | 好   | 一般   | 能源消耗和信息熵    | 公、铁、水      | 2020 |
| QBFwCC <sup>[31]</sup>              | —   | 好   | —    | 医疗救助物资和新冠疫情 | 公、空        | 2021 |
| HCMA <sup>[54]</sup>                | 一般  | 好   | 好    | 缺乏解释因素的信息   | 公、铁、水      | 2021 |
| CA-GA <sup>[15]</sup>               | 好   | —   | 好    | 需求和时间双重不确定性 | 公、铁、水      | 2021 |
| GWO <sup>[30]</sup>                 | —   | 好   | 一般   | 新冠疫情        | 公、铁、空      | 2022 |
| HMSSA-SCA <sup>[33]</sup>           | 好   | —   | —    | 需求不确定性      | 救援直升机、车辆   | 2022 |
| K short circuit -GA <sup>[42]</sup> | 一般  | —   | 好    | 碳排放         | 公、铁、水      | 2022 |
| IPSO <sup>[20]</sup>                | —   | 好   | —    | 冷链物流        | 公、铁、空      | 2022 |
| PSO <sup>[18]</sup>                 | —   | 一般  | 好    | 多任务应急物流规划   | 公、铁        | 2022 |
| MNA <sup>[53]</sup>                 | 一般  | 好   | —    | 航空和城际高速铁路   | 高铁、航空      | 2022 |
| IFWA <sup>[11]</sup>                | —   | —   | —    | 中俄商品运输      | 公、铁、水      | 2022 |
| GA <sup>[41]</sup>                  | —   | 好   | —    | 可持续性多式联运    | 公、铁、水      | 2022 |
| GA-SA <sup>[43]</sup>               | —   | —   | 好    | 多阶段应急救援     | 直升机、汽车、无人机 | 2023 |
| DD-MSAC <sup>[24]</sup>             | 好   | 好   | —    | 随机运输时间      | 公、铁、水      | 2023 |
| QBGA <sup>[39]</sup>                | —   | —   | 好    | 冷链物流和碳排放    | 公、铁、水      | 2023 |
| AGA <sup>[40]</sup>                 | —   | 好   | —    | 碳排放         | 公、铁        | 2023 |
| GA <sup>[37]</sup>                  | —   | 好   | —    | 同步多式联运      | 公、铁、水      | 2023 |
| ISA <sup>[45]</sup>                 | —   | 好   | 好    | 地面-地下物流配送模式 | 地铁         | 2024 |
| MOMVDE-VNS <sup>[55]</sup>          | 好   | —   | 好    | 风险规避、随机需求   | 自行车、卡车     | 2024 |
| IRSA <sup>[56]</sup>                | —   | 好   | 一般   | 城际上门多式联运    | 地铁、公交车、步行  | 2024 |
| ANFIS-GA-SVD <sup>[44]</sup>        | 一般  | 好   | —    | 平衡经济和环境问题   | 公、铁、空、海    | 2024 |
| ATDSSA <sup>[29]</sup>              | —   | 好   | 好    | 需求、时间模糊,低碳  | 公、铁、海      | 2024 |

应用及运行环境;表4对比了各个仿生算法之间的性能,包括多样性、求解精度、搜索能力,特殊背景以及文献中的运输方式和发表年份.表2~表4中,“—”表示信息未在相应的文献中指定.

4 挑战和未来研究方向

4.1 面临挑战

目前,多式联运路径规划中仍面临以下挑战:

1) 环境的动态性和不确定性. 交通流量、道路状况、天气等因素的变化都会影响路径规划方案,当前文献中多采用三角、梯形模糊来表示运输过程中需求、时间等不确定性. 虽然简单、灵活、适用范围广泛,但仍可能导致信息的缺失,无法捕捉到更复杂的不确定性分布,同时在决策过程中可能降低模糊推理的准确性和可靠性. 针对这一难题,如何开发具有实时更新和动态调整能力的算法,设计考虑不确定性因素的概率建模和风险分析方法将成为一大挑战.

2) 多目标的多样性和冲突性. 有关多式联运路径优化的研究越来越多地关注于多目标优化. 但这

些目标可能存在冲突,难以权衡. 目前使用多目标优化算法来解决这一挑战,例如NSGAI、MOACO等,这些算法能够搜索出帕累托最优解集且具有灵活性,但同时存在计算复杂度高、解的多样性难以量化、参数选择困难等问题,解决这一挑战需要研究多目标优化算法和冲突解决方法,以找到一组平衡的解决方案.

3) 算法的适应性和复杂性. 由于问题的复杂性,一般算法在解决多式联运路径规划问题时可能面临效率低下和求解速度慢的问题. 算法的优异性需满足:始终能够在真实世界的静态情况下确定适当的路径及运输工具;解决方案能够自适应环境的变化;支持和深化所选择的算法;在复杂性、数据存储和处理时间方面尽可能地简单. 当前算法仍存在一定缺陷,如何设计高效的仿生算法和优化技术,以加速求解过程并提高算法的效率成为一大挑战.

4) 客户需求的多样性. 客户需求的多样性意味着物流运输需要考虑不同类型、规模和特点的货物,

以及各种不同的交付要求和时间限制. 这种多样性增加了路径规划的复杂性, 需要系统能够快速响应并提供个性化的解决方案. 其次, 客户需求的多样性也反映在运输模式和服务水平上的差异. 有些客户可能更看重运输成本的节约, 而有些客户则更注重运输时间的保障, 还有一些客户可能更重视运输安全和可靠性. 路径规划需要在不同的需求之间进行平衡和权衡, 以满足客户的多样化需求.

5) 场景的分散性和综合性. 多式联运路径规划在城市物流、国内长途运输和国际运输等不同场景下面临不同需求和挑战. 城市物流需考虑交通拥堵、准时性和灵活性; 国内长途运输综合考虑成本、时效、天气和路况; 国际运输需处理跨境手续、航线选择等复杂问题. 各场景下的路径规划都需要对应的策略来满足特定的运输需求和解决方案, 以减少运输成本和时间, 同时提高运输的可靠性和效率.

## 4.2 未来研究方向

多式联运路径规划拥有以下未来研究方向:

1) 多式联运绿色化. 随着全球对气候变化和环境保护的日益关注, 绿色物流成为不可忽视的趋势. 现如今电动车、氢燃料电池车等新能源车辆的发展势头迅猛, 其推广和普及将大幅减少运输过程中的尾气排放, 多式联运路径规划将积极考虑电动车辆的基础设施建设、选址、充电时长等因素, 确保电动化运输的顺畅实施. 另外, 通过优化物流运输路线、减少空载率、提高装载率等措施, 减少能源消耗和排放; 推动物流包装的可循环和再降解, 积极促进碳中和和循环经济的发展, 实现资源的最大化利用.

2) 实时路径规划与动态调整. 随着物流系统的复杂化和动态化, 传统的静态路径规划方法已经无法满足实际应用中的需求, 客户订单的动态变化可能导致运输线路的频繁调整, 给多式联运中带来更多的不确定性. 未来研究可以探讨如何通过合理的路径规划和动态调整来灵活实现订单的拼单和对接, 以提高运输效率和降低成本.

3) 跨领域的整合与创新. 在技术上, 多式联运将促进物联网、人工智能、大数据等技术的融合应用. 例如, 利用物联网技术实现各种交通模式之间的实时信息传输和智能调度, 通过人工智能算法优化运输路径和资源利用, 以及利用大数据分析提升运输效率和安全性. 此外, 多式联运的发展不仅要考虑经济效益和技术可行性, 还要考虑环境以及社会的可持续性发展. 因此, 跨领域整合需要综合考虑多领域的因素, 寻求最优的平衡点.

4) 路径规划无人化. 随着自动驾驶技术、人工智能和物联网的不断进步, 无人化系统将变得更加智能和高效. 未来将聚焦于高速公路和城市道路的无人化技术, 以实现无人驾驶车辆在复杂道路环境下的安全、高效运行. 无人化车辆编队技术也是研究的重点, 通过有头车引领其他车辆, 实现车队的自组织与协同行驶, 提高道路利用效率, 推动多式联运路径规划向智能化、自动化方向发展.

5) 多式联运下的数字要素. 数字化时代的信息技术日益更新, 如何有效保护和充分利用数据资源, 成为多式联运路径规划研究中的一大风向标. 数字要素智能化在多式联运中的未来发展需要加强数据标准化和规范化工作, 确保数据的准确性和可靠性. 例如在运输过程中, 数字要素智能化如何实现实时监控车辆位置、货物状态和交通情况, 然后通过数据分析和预测技术, 优化运输网络设计, 提前发现潜在问题并采取措施, 提高运输安全性和可靠性.

## 5 结论

在全球化、可持续性、技术进步和需求多样化等多个因素的推动下, 多式联运逐渐发展壮大, 为物流和货物运输领域带来了更多的灵活性和效率. 针对多式联运路径规划问题的复杂性, 以及仿生算法优秀的适应性和效率, 本文将基于多式联运路径规划问题的仿生算法分为3类: 群智能算法、进化算法和基于物理的仿生算法. 本文总结了各算法的应用场景、优点和未来改进方向, 便于根据既定的应用场景轻松选择合适的仿生算法. 最后, 总结了多式联运路径规划问题所面临的挑战, 以及未来的研究方向. 未来, 可预计出智能优化算法将更成功地解决工程、医学、空间探索等领域的问题.

## 参考文献(References)

- [1] Del Ser J, Osaba E, Molina D, et al. Bio-inspired computation: Where we stand and what's next[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2019, 48: 220-250.
- [2] Baykasoğlu A, Subulan K, Taşan A S, et al. A review of fleet planning problems in single and multimodal transportation systems[J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2019, 15(2): 631-697.
- [3] SteadieSeifi M, Dellaert N P, Nuijten W, et al. Multimodal freight transportation planning: A literature review[J]. *European Journal of Operational Research*, 2014, 233(1): 1-15.
- [4] Agamez-Arias A D M, Moyano-Fuentes J. Intermodal transport in freight distribution: A literature review[J]. *Transport Reviews*, 2017, 37(6): 782-807.

- [5] Beuthe M, Jourquin B, Urbain N. Estimating freight transport price elasticity in multi-mode studies: A review and additional results from a multimodal network model[J]. *Transport Reviews*, 2014, 34(5): 626-644.
- [6] Ertem M A, İşbilir M, Şahin Arslan A. Review of intermodal freight transportation in humanitarian logistics[J]. *European Transport Research Review*, 2017, 9(1): 10.
- [7] Archetti C, Peirano L, Speranza M G. Optimization in multimodal freight transportation problems: A survey[J]. *European Journal of Operational Research*, 2022, 299(1): 1-20.
- [8] 邱叶, 胡军红, 郭缙烨, 等. 不确定需求下考虑货物时间价值的多式联运路径选择方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(3): 994-1003.  
(Qiu Y, Hu J H, Guo J Y, et al. Multimodal transport path selection method considering time value of goods under uncertain demand[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(3): 994-1003.)
- [9] 冯芬玲, 孔祥光, 吴庆芳. 考虑风险的国际集装箱多式联运路径选择研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(10): 2761-2768.  
(Feng F L, Kong X G, Wu Q F. Research on the route selection of international container multimodal transportation considering risk[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(10): 2761-2768.)
- [10] 陈维亚, 龚浩, 方晓平. 考虑运输碳税与质量承诺的多式联运路径优化[J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19(1): 34-41.  
(Chen W Y, Gong H, Fang X P. Multimodal transportation route optimization considering transportation carbon tax and quality commitment[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2022, 19(1): 34-41.)
- [11] 万杰, 龙云飞, 陈星瀚. 基于改进烟花算法的中俄商品多式联运路径优化[J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 2022, 55(3): 291-298.  
(Wan J, Long Y F, Chen X H. Optimization of multimodal transport route of Chinese and Russian commodities based on improved fireworks algorithm[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2022, 55(3): 291-298.)
- [12] 刘松, 舒文, 彭勇, 等. 双重不确定下应急物资多式联运可靠路径优化[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2023, 23(1): 58-66.  
(Liu S, Shu W, Peng Y, et al. Optimization of reliable routes for multimodal transport of emergency supplies under dual uncertainty[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2023, 23(1): 58-66.)
- [13] 尹传忠, 方颖蓉, 武中凯, 等. 随机机会约束的多式联运多目标优化[J]. *铁道科学与工程学报*, 2021, 18(6): 1595-1603.  
(Yin C Z, Fang H R, Wu Z K, et al. Multi-objective optimization for multimodal transport based on stochastic chance-constrained programming[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18(6): 1595-1603.)
- [14] 唐少虎, 刘小明, 朱伟, 等. 基于多学科设计优化的路网交通分布式协同控制[J]. *控制与决策*, 2019, 34(9): 1867-1875.  
(Tang S H, Liu X M, Zhu W, et al. Distributed cooperative control of road network traffic based on multidisciplinary design optimization[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(9): 1867-1875.)
- [15] Zhang X, Jin F Y, Yuan X M, et al. Low-carbon multimodal transportation path optimization under dual uncertainty of demand and time[J]. *Sustainability*, 2021, 13(15): 8180.
- [16] Sun Y, Li X Y, Liang X, et al. A Bi-objective fuzzy credibilistic chance-constrained programming approach for the hazardous materials road-rail multimodal routing problem under uncertainty and sustainability[J]. *Sustainability*, 2019, 11(9): 2577.
- [17] Lu Y, Lang M X, Sun Y, et al. A fuzzy intercontinental road-rail multimodal routing model with time and train capacity uncertainty and fuzzy programming approaches[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 27532-27548.
- [18] Liu H B, Song G P, Liu T Y, et al. Multitask emergency logistics planning under multimodal transportation[J]. *Mathematics*, 2022, 10(19): 3624.
- [19] Huang X L, Chen Y T. An optimization model for multimodal transportation decisions based on congestion information[C]. *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Shenyang, 2014: 610-615.
- [20] Zheng C J, Sun K, Gu Y H, et al. Multimodal transport path selection of cold chain logistics based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 2022, 2022: 5458760.
- [21] 孙全明, 曲志坚, 任崇广. 基于粒子群优化和LightGBM的情景感知多式联运推荐[J]. *电子学报*, 2021, 49(5): 894-903.  
(Sun Q M, Qu Z J, Ren C G. Context-aware multi-modal transportation recommendation based on particle swarm optimization and LightGBM[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(5): 894-903.)
- [22] Zukhruf F, Frazila R B, Burhani J T, et al. Developing an integrated restoration model of multimodal transportation network[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, 110: 103413.
- [23] He P L, Jiang G Y, Lam S K, et al. ML-MMAS: Self-learning ant colony optimization for multi-criteria

- journey planning[J]. *Information Sciences*, 2022, 609: 1052-1074.
- [24] Peng Y, Gao S H, Yu D, et al. Multi-objective optimization for multimodal transportation routing problem with stochastic transportation time based on data-driven approaches[J]. *RAIRO—Operations Research*, 2023, 57(4): 1745-1765.
- [25] Katona G, Lénárt B, Juhász J. Parallel ant colony algorithm for shortest path problem[J]. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2019: 63(1): 243-254.
- [26] 张恒, 何丽, 袁亮, 等. 基于改进双层蚁群算法的移动机器人路径规划[J]. *控制与决策*, 2022, 37(2): 303-313.  
(Zhang H, He L, Yuan L, et al. Mobile robot path planning using improved double-layer ant colony algorithm[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(2): 303-313.)
- [27] Farooqi H, Mesgari M S. Performance comparison between the multi-colony and multi-pheromone ACO algorithms for solving the multi-objective routing problem in a public transportation network[J]. *Journal of Navigation*, 2016, 69(1): 197-210.
- [28] Wang Z Z, Zhang M H, Chu R J, et al. Modeling and planning multimodal transport paths for risk and energy efficiency using AND/OR graphs and discrete ant colony optimization[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 132642-132654.
- [29] Zhang H Z, Huang Q, Ma L, et al. Sparrow search algorithm with adaptive t distribution for multi-objective low-carbon multimodal transportation planning problem with fuzzy demand and fuzzy time[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 238: 122042.
- [30] Li C, Han P X, Zhou M, et al. Design of multimodal hub-and-spoke transportation network for emergency relief under COVID-19 pandemic: A meta-heuristic approach[J]. *Applied Soft Computing*, 2023, 133: 109925.
- [31] Ning T, Duan X D, An L. Study on the strategy of multimodal transportation of medical aid materials for public health emergencies: A case study basing on COVID-19[J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2021, 16(4): 1244-1253.
- [32] Lin M G, Liu F J, Zhao H H, et al. A novel binary firefly algorithm for the minimum labeling spanning tree problem[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2020, 125(1): 197-214.
- [33] Wan M R, Ye C M, Peng D J. Multi-period dynamic multi-objective emergency material distribution model under uncertain demand[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 117: 105530.
- [34] Tian G D, Ren Y P, Zhou M C. Dual-objective scheduling of rescue vehicles to distinguish forest fires via differential evolution and particle swarm optimization combined algorithm[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, 17(11): 3009-3021.
- [35] 万杰, 魏爽. 基于混合算法的多目标多式联运路径选择问题研究[J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 2019, 52(3): 285-292.  
(Wan J, Wei S. Multi-objective multimodal transportation path selection based on hybrid algorithm[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2019, 52(3): 285-292.)
- [36] 陈雨蝶, 干宏程, 程亮. “双碳”背景下联合配送冷链物流模型及其求解算法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(7): 1951-1959.  
(Chen Y D, Gan H C, Cheng L. Cold chain logistics model based on joint distribution and its optimization algorithm under the background of double carbon[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(7): 1951-1959.)
- [37] Xu X Y, Wang H Y, Deng P Z. Exploring the optimization of synchromodal transportation path under uncertainties[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(3): 577.
- [38] Fazayeli S, Eydi A, Kamalabadi I N. Location-routing problem in multimodal transportation network with time windows and fuzzy demands: Presenting a two-part genetic algorithm[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 119: 233-246.
- [39] Liu S C. Multimodal transportation route optimization of cold chain container in time-varying network considering carbon emissions[J]. *Sustainability*, 2023, 15(5): 4435.
- [40] Li H F, Wang Y. Hierarchical multimodal hub location problem with carbon emissions[J]. *Sustainability*, 2023, 15(3): 1945.
- [41] Okyere S, Yang J Q, Adams C A. Optimizing the sustainable multimodal freight transport and logistics system based on the genetic algorithm[J]. *Sustainability*, 2022, 14(18): 11577.
- [42] Zhang Z J, Li D C, Meng J J, et al. Multi-objective multimodal transport path optimization model and algorithm considering carbon emissions[C]. *The 2nd International Conference on Algorithms, High Performance Computing and Artificial Intelligence*. Guangzhou, 2022: 80-84.
- [43] 袁瑞萍, 王伟, 李俊韬, 等. 不确定性条件下多阶段应急物资多式联运调度研究[J]. *运筹与管理*, 2023, 32(6): 33-39.  
(Yuan R P, Wang W, Li J T, et al. Multi-stage emergency materials scheduling based on multimodal transportation under uncertainty[J]. *Operations Research and Management Science*, 2023, 32(6): 33-39.)
- [44] Aljanabi M R, Borna K, Ghanbari S, et al. SVD-based adaptive fuzzy for generalized transportation[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2024, 94: 377-396.

- [45] 毛照昉, 王威, 方侃, 等. 基于模拟退火算法的人机协同装配线平衡问题研究[J]. 控制与决策, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1068.  
(Mao Z F, Wang W, Fang K, et al. Research on the human-robot collaborative assembly line balancing problem based on simulated annealing algorithm[J]. Control and Decision, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1068.)
- [46] Zhang H Y, Zhang J, Zheng C J, et al. Node location of bi-level urban metro-based ground-underground logistics distribution[J]. Multimodal Transportation, 2024, 3(1): 100119.
- [47] Yang K, Yang L X, Gao Z Y. Planning and optimization of intermodal hub-and-spoke network under mixed uncertainty[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 95: 248-266.
- [48] Heilig L, Lalla-Ruiz E, Voß S. Multi-objective inter-terminal truck routing[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2017, 106: 178-202.
- [49] Abbassi A, El hilali Alaoui A, Boukachour J. Robust optimisation of the intermodal freight transport problem: Modeling and solving with an efficient hybrid approach[J]. Journal of Computational Science, 2019, 30: 127-142.
- [50] Pan K, Liang C D, Lu M. Optimal scheduling of electric vehicle ordered charging and discharging based on improved gravitational search and particle swarm optimization algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 157: 109766.
- [51] Aditya N, Mahapatra S S. Switching from exploration to exploitation in gravitational search algorithm based on diversity with Chaos[J]. Information Sciences, 2023, 635: 298-327.
- [52] Mnif M, Bouamama S. Firework algorithm for multi-objective optimization of A multimodal transportation network problem[J]. Procedia Computer Science, 2017, 112: 1670-1682.
- [53] Jiang Y S, Chen S W, an W Y, et al. Demand-driven train timetabling for air and intercity high-speed rail synchronization service[J]. Transportation Letters, 2023, 15(4): 321-335.
- [54] Jourquin B. Mode choice in strategic freight transportation models: A constrained Box-Cox meta-heuristic for multivariate utility functions[J]. Transportmetrica A: Transport Science, 2022, 18(3): 1325-1345.
- [55] Wu W T, Li Y. Pareto truck fleet sizing for bike relocation with stochastic demand: Risk-averse multi-stage approximate stochastic programming[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2024, 183: 103418.
- [56] Yang R X, Li D W, Han B M, et al. Door to door space-time path planning of intercity multimodal transport network using improved ripple-spreading algorithm[J]. Computers & Industrial Engineering, 2024, 189: 109996.

## 作者简介

孙哲(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为智能优化算法、欠驱动系统控制与优化、物流机器人控制, E-mail: zhesunny@njupt.edu.cn;

马胜男(2001—), 女, 硕士生, 主要研究方向为智能优化算法、物流运输网络调度及优化, E-mail: 1223096922@njupt.edu.cn;

解相朋(1982—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为智能模糊建模、控制和滤波设计, E-mail: xiexp@njupt.edu.cn;

孙知信(1964—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为物联网技术及应用、区块链技术及应用, E-mail: sunzx@njupt.edu.cn.