

模糊不确定性条件下集装箱码头泊位分配问题

唐国磊¹, 王一鸣¹, 于倩², 赵晓艺²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 青岛国际邮轮港开发建设有限公司, 山东 青岛 266011)

摘要: 船舶到港时间和装卸作业时间具有明显的不确定性, 而三角模糊数能够通过其上、下界及其最可能值三个参数有效描述难以用精确数值描述的信息。基于此, 文章首先以最小化船舶总离港延误时间为目标, 建立集装箱码头泊位分配模糊整数规划模型; 其次, 提出基于解修复策略和跳出策略的改进多元宇宙算法求解模糊整数规划模型。最后, 通过与确定性泊位分配方案对比, 证明模糊泊位分配方案可减少总离港延误时间, 在面对不确定性更具有优势。同时, 相较于标准多元宇宙算法, 文章提出的改进多元宇宙算法在小、中、大规模试验下, 其求解速度分别提高 59.9%、44%、26.1%, 说明该算法可以有效求解泊位分配模糊整数规划模型, 为处理模糊不确定性条件下的泊位分配问题提供决策依据。

关键词: 泊位分配; 不确定性; 三角模糊数; 模糊整数规划; 多元宇宙算法

中图分类号: U691+.3 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2025.04.011

Berth allocation in container terminals under fuzzy uncertain conditions

TANG Guolei¹, WANG Yiming¹, YU Qian², ZHAO Xiaoyi²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Qingdao International Cruise Terminal Development Co., Ltd., Qingdao 266011, China)

Abstract: The arrival and handling times of vessels are subject to significant uncertainty. Triangular fuzzy numbers, characterized by upper and lower bounds and a most likely value, provide an effective means of representing such imprecise information. In this context, this paper first establishes a fuzzy integer programming model for berth allocation at container terminals, aiming to minimize the total departure delay time of vessels. An improved Multi-Verse Optimizer (MVO) algorithm is then proposed to solve the model, incorporating solution repair and breakout strategies. Comparative analysis shows that, in contrast to deterministic berth allocation schemes, the proposed fuzzy berth allocation approach demonstrates notable advantages in reducing total departure delay time and exhibits greater effectiveness in handling uncertainty. Moreover, the improved MVO algorithm achieves solution speed improvements of 59.9%, 44%, and 26.1% in small, medium, and large scale experiments, respectively, compared to the standard multi-verse optimizer. These results indicate that the proposed algorithm can efficiently solve the fuzzy integer programming model for berth allocation and offers valuable decision-making support for addressing berth allocation problems under fuzzy uncertainty.

Key words: berth allocation; uncertainty; triangular fuzzy numbers; fuzzy integer programming; multi-verse optimizer

集装箱码头泊位分配问题是在给定的泊位资源下, 根据到港船舶的预到港和离港时间等, 为其确定合理的靠泊时间和靠泊位置, 使得船舶的总离港延

误时间或总在港时间最短^[1]。在实际运营中, 受到设备故障、潮汐或上游港口调度、天气等因素的影响, 船舶到港、装卸作业等泊位分配的关键信息存在

收稿日期: 2024-09-19

基金项目: 科技部战略性国际科技创新合作重点专项(2020YFE0201200)资助

通信作者: 唐国磊(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为智能港口决策支持。E-mail: tangguolei@dlut.edu.cn

引用格式: 唐国磊, 王一鸣, 于倩, 等. 模糊不确定性条件下集装箱码头泊位分配问题[J]. 中国航海, 2025, 48(4): 93-102.

TANG G L, WANG Y M, YU Q, et al. Berth allocation in container terminals under fuzzy uncertain conditions[J]. Navigation of China, 2025, 48(4): 93-102. (in Chinese)

明显的不确定性。因此,在不确定性条件下合理分配泊位,是集装箱港口运营管理中需要考虑的问题之一。

不确定性条件下集装箱码头泊位分配研究已经取得了一定的成果。SHERAZ 等^[2]和 SCHEPLER 等^[3]将船舶到港视为随机变量建立混合整数规划模型,并提出基于布谷鸟搜索算法和迭代禁忌搜索的求解方法。XIANG 等^[4]使用 Kmeans 聚类构造作业时间不确定性集,建立数据驱动的扩展鲁棒优化模型,提出一种列约束生成算法。马梦頔等^[5]则引入分时段的船舶到港时间间隔概率分布,提出基于改进遗传算法的求解方法。唐世轩等^[6]通过量化干扰因素处理船舶的不确定到港时间,建立混合整数规划模型,并提出吱吱轮算法。宋云婷等^[7]采用爱尔朗分布函数描述船舶到港和作业时间的不确定性,建立整数规划模型,提出基于嵌入仿真的遗传算法求解方法。谢鑫等^[8]将船舶到港、装卸时间均视为随机变量,建立集装箱港口泊位分配混合整数规划模型并利用 CPLEX 求解。而针对概率分布无法描述的情况,GUO 等^[9]考虑天气条件引起的船舶装卸时间不确定性,利用神经网络推导装卸效率,建立混合整数规划模型,并提出嵌入机器学习方法的高效启发式算法来求解。林嘉宏等^[10]通过为每艘船舶设置一定的时间缓冲区方式处理不确定性,并建立相应的泊位分配模型以及基于遗传算法的启发式方法。此外,AGOSTINHO 等^[11]引入 Kantorovich 模糊集描述装卸时间不确定,建立泊位分配分布鲁棒两阶段模型,并提出分解算法求解模型。PÉREZ-CAÑEDO 等^[12-13]利用三角模糊数表示船舶到达时间和装卸时间,分别采用模糊 ε 约束方法、全模糊线性规划的词典排序方法和 GoY 方法^[14]求解模糊泊位分配模型,但仅能求解算例为 8 艘船舶的小规模。GUTIERREZ 等^[15-16]基于三角模糊数表示船舶预计到港时间和确定的装卸时间,提出泊位分配问题的全模糊线性规划模型,并利用 CPLEX 求解,但在中、大规模下无法在一小时内求得最优解。Lujan 等^[17]利用三角模糊数表示船舶预计到港、装卸、离港时间,建立泊位分配问题的模糊优化模型,并利用 CPLEX 求解,结果显示一小时内可为小规模提供最优解,但对于中、大规模无法提供最优解,并指出需要元启发式方法求解该数学模型。

综上所述,已有研究证明了应用三角模糊数描述不确定船舶到港时间和装卸时间的可行性,但对高效求解模糊泊位分配模型的算法研究较少。在此基础上,本文引入元启发式算法—多元宇宙算法,基

于三角模糊数描述船舶预计到港、装卸作业时间的不确定性,建立泊位分配模糊整数规划模型,并提出改进多元宇宙算法求解模型。最后,通过对分析确定性和模糊泊位分配方案,认为考虑模糊不确定性可有效减少总离港延误时间,在面对不确定性更具有优势。同时,设计小、中、大规模试验,验证算法改进后在求解质量、效率及收敛速度上均有所提高。试验结果表明,改进多元宇宙算法可以有效处理模糊不确定性条件下的泊位分配问题。

1 问题描述

1.1 泊位分配问题

如图 1 所示,在确定性泊位分配问题中 (Deterministic Berth Allocation Problem, DBAP),任一船舶 i 的预计到港时间 $t_{i,ETA}$ 和预离港时间 $t_{i,ETD}$ 以及装卸时长 t_i 均为已知确定信息,靠泊泊位、靠泊时间 $t_{i,s}$ 和离港时间 $t_{i,E}$ 为决策变量。船舶靠泊时间应在船舶预计到港时间之后 ($t_{i,s} \geq t_{i,ETA}$),船舶在泊位上装卸作业完成后离港。若船舶不能按照预离港时间离港 ($t_{i,E} \geq t_{i,ETD}$),就发生离港延迟 ($t_{i,E} - t_{i,ETD}$),进而影响本港口后续船舶的装卸^[18],也会影响该船舶在下一港口的靠泊与装卸作业计划。因此,港航双方通常希望船舶离港延迟时间越小越好。为此,为提高服务水平,本文为最小化船舶总离港延误时间为目标,研究集装箱码头泊位分配问题。

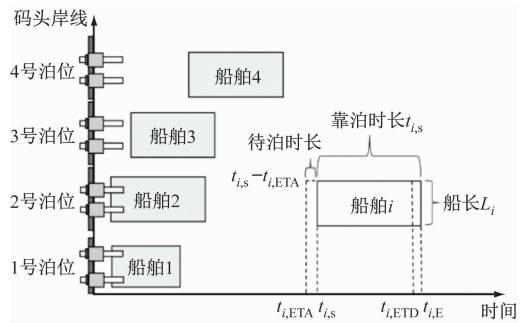
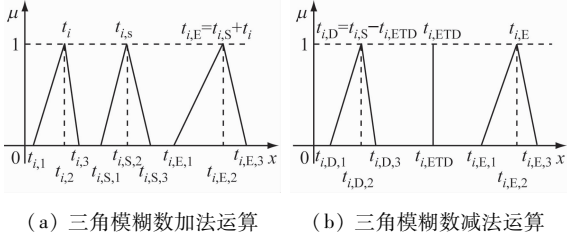


图1 确定性集装箱港口泊位分配问题
时间-空间平面图

Fig. 1 Time-space plan of deterministic berth allocation problem of container terminals

然而,受风浪流、潮汐、设备故障等因素的影响,船舶到港时间及装卸时间等存在不确定性。部分文献^[2,3,5,8]采用泊松分布、负指数分布描述不确定性,而针对概率分布无法描述,但可由历史数据获得时间参数的上下界及其最可能值的情况,可以引入三角模糊数来描述时间不确定性^[13]。如图 2 所示,在模糊性不确定性条件下,船舶 i 的到港时间为 $t_{i,ETA} = (t_{i,ETA,1}, t_{i,ETA,2}, t_{i,ETA,3})$ ($t_{i,ETA,1}$ 、 $t_{i,ETA,2}$ 和 $t_{i,ETA,3}$ 分

别表示最早、最可能和最晚到港时间);装卸作业时间为 $t_i = (t_{i,1}, t_{i,2}, t_{i,3})$ ($t_{i,1}$ 、 $t_{i,2}$ 和 $t_{i,3}$ 分别表示最短、最可能和最长装卸时间)。相应地,船舶 i 的靠泊时间、离港时间和离港延误时间也可由三角模糊数表示,即 $t_{i,S} = (t_{i,S,1}, t_{i,S,2}, t_{i,S,3})$ 、 $t_{i,E} = (t_{i,E,1}^{i,E,1}, t_{i,E,2}^{i,E,2}, t_{i,E,3}^{i,E,3})$ 和 $t_{i,D} = (t_{i,D,1}, t_{i,D,2}, t_{i,D,3})$ 。



(a) 三角模糊数加法运算 (b) 三角模糊数减法运算

注:纵坐标 μ 为隶属度(其值通常介于0和1之间;0表示完全不隶属,即完全不模糊;1表示完全隶属,即完全不模糊,中间值表示部分隶属,即部分模糊)。图3。

图2 船舶靠泊时间、离港时间和离港延误时间的三角模糊数描述

Fig.2 Triangular fuzzy numbers of vessel berthing time, departure time, and departure delay time

因此,面对模糊不确定性条件,如何合理分配泊位资源,以最小化所有船舶总离港延误时间,是集装箱港口运营管理中需要重点考虑的问题之一。

1.2 三角模糊数运算及其泊位分配甘特图

在确定与时间相关的参数或变量时,涉及到三角模糊数加法、减法、除法、排序和最大值运算。给定两个三角模糊数 $X = (x_1, x_2, x_3)$ 和 $Y = (y_1, y_2, y_3)$,各运算计算过程如下:

1) 加法运算: $X + Y = (x_1 + y_1, x_2 + y_2, x_3 + y_3)$

2) 减法运算: $X - Y = (x_1 - y_3, x_2 - y_2, x_3 - y_1)$

3) 除法运算: $X/Y = (x_1/y_3, x_2/y_2, x_3/y_1)$

4) 排序运算:

① 比较 $F_1(X) = (x_1 + 2x_2 + x_3)/4$,如果 $F_1(X) > F_1(Y)$,则 $X > Y$ 。

② 如果 $F_1(X) = F_1(Y)$,则比较 $F_2(X) = x_2$,如果 $F_2(X) > F_2(Y)$,则 $X > Y$ 。

③ 如果 $F_1 = F_2$,则比较 $F_3(X) = x_3 - x_1$ 的值,如果 $F_3(X) > F_3(Y)$,则 $X > Y$ 。

5) 最大值运算:如果 $X > Y$,则 $X \vee Y = X$,否则 $X \vee Y = Y$ 。如图3所示,令 $X = (x_1, x_2, x_3) = t_{i,S} = (t_{i,S,1}, t_{i,S,2}, t_{i,S,3})$, $Y = (y_1, y_2, y_3) = t_{k,E} = (t_{k,E,1}, t_{k,E,2}, t_{k,E,3})$,则图3中的虚线 $X \vee Y \approx (x_1 \vee y_1, x_2 \vee y_2, x_3 \vee y_3)^{[19]}$,它已被广泛应用于求解模糊问题的最优调度中。

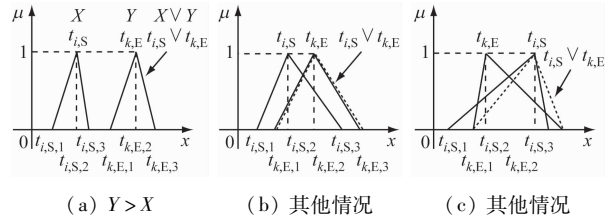


图3 三角模糊数最大值运算示意图

Fig.3 Diagram of maximum operation for triangular fuzzy numbers

为了直观地描述模糊不确定性条件下的泊位分配方案,采用三角模糊数甘特图。如图4所示,横坐标为时间轴,纵坐标为泊位序号,每艘船舶用上下两个三角形分别代表由模糊三角数表示的离泊时间和靠泊时间。三角形顶点表示最佳靠或离泊时间(发生的可能性较大),相同颜色的上下三角形之间的水平距离表示该船舶在泊位的装卸时间。由图4可知,船舶1到港时,泊位1空闲,其装卸开始时间等于其到港时间。船舶3到港时,泊位1在工作,其装卸开始时间等于船舶2的装卸结束时间。所以,船舶1在泊位1靠泊,其装卸开始时间为(0,2,4),装卸结束时间为(9,14,18);船舶3在泊位1靠泊,其装卸开始时间为(27,36,45),装卸结束时间为(39,54,69)。

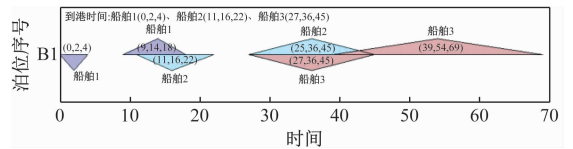


图4 泊位分配方案的三角模糊数甘特图

Fig.4 Triangular fuzzy number Gantt chart of the berth allocation scheme

2 模糊整数规划模型

基于三角模糊数表示的船舶到港时间、装卸作业时间,以最小化船舶总离港延误时间为目标,建立模糊不确定性条件下泊位分配模糊整数规划模型(Fuzzy Berth Allocation Problem, FBAP),具体为:

$$\min \sum_i t_{i,D} = \min \sum_i (t_{i,E} - t_{i,ETA})^+, \forall i \in N \quad (1)$$

$$t_{i,S} \geq t_{i,ETA}, \forall i \in N \quad (2)$$

$$t_{i,E} = t_{i,S} + t_i, \forall i \in N \quad (3)$$

$$\sum_j x_{ij} = 1, \forall i \in N, \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_i y_{ji} \leq 1, \forall i \in N, \forall j \in J \quad (5)$$

$$B_j - L_i - 2s_i + Z(1 - x_{ij}) \geq 0, \forall i \in N, \forall j \in J \quad (6)$$

$$t_{i,S} + Z(3 - x_{ij} - x_{kj} - d_{ik}) \geq t_{k,E}, \quad \forall i, k \in N, \forall j \in J \quad (7)$$

$$t_{i,S} + Z(1 - d_{ik}) \geq t_{k,S}, \quad \forall i, k \in N \quad (8)$$

$$t_i \leq \Delta t \sum_t y_{ijt}, \quad \forall i \in N, \forall t \in T, \forall j \in J \quad (9)$$

$$(t_{i,E} - t_{i,ETD})^+ = \max\{t_{i,E} - t_{i,ETD}, 0\}, \quad \forall i \in N \quad (10)$$

$$x_{ij}, d_{ik}, y_{ijt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, k \in N, \forall t \in T, \forall j \in J \quad (11)$$

相关符号说明如下: N 为船舶集合, $i, k \in N$; J 为泊位集合, $j \in J$; T 为计划期集合, $T = \{1, 2, \dots, T_{\text{end}}\}$, $t \in T$ (T_{end} 为时间段数量, 每个时间段长为 Δt_{min}); Z 为一个很大的正常数; $t_{i,ETA,2}$ 和 $t_{i,ETD,2}$ 为船舶 i 发送的预计到港时间和预离港时间; s_i 为船舶 i 的富余长度; L_i 为船舶 i 的长度; B_j 为泊位 j 的长度; $t_{i,ETA}$ 、 t_i 、 $t_{i,S}$ 、 $t_{i,E}$ 和 $t_{i,D}$ 分别为由三角模糊数表示船舶 i 的预到港时间、装卸作业时间、靠泊时间、离泊时间和离港延误时间; x_{ij} 为二元变量, 如果船舶 i 在泊位 j 上靠泊, 则该变量的值为 1, 否则为 0; d_{ik} 为二元变量, 如果船舶 i 在船舶 k 之后靠泊, 则该变量值为 1, 否则为 0; y_{ijt} 为二元变量, 如果船舶 i 在泊位 j 于时间段 $t \in T$ 靠泊, 则该变量值为 1, 否则为 0。

式(1)表示最小化用三角模糊数表示的所有船舶的总离港延误时间; 式(2)保证船舶 i 到港之后才能装卸作业; 式(3)保证船舶 i 的离泊时间为装卸开始时间与装卸作业时间之和, 由三角模糊数加法运算确定; 式(4)要求每一艘船舶 i 只能停靠一个泊位; 式(5)保证在同一时段 t 上泊位 j 最多只能有一艘船舶停靠; 式(6)保证泊位必须满足长度要求; 式(7)保证若两艘船舶 i, k 靠泊在同一泊位 j , 则后靠泊船舶 i 的靠泊时间应晚于前靠泊船舶 k 的离泊时间; 式(8)保证先后靠泊的两艘船舶 i, k 之间的时间关系; 式(9)保证船舶 i 所占用的时间段必须满足

$$x_{i,j} = \begin{cases} X_j + T \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j) & r_3 < 0.5 \text{ 且 } r_2 < W \\ X_j - T \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j) & r_3 \geq 0.5 \text{ 且 } r_2 < W \\ x_{i,j} & r_2 \geq W \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中, X_j 为当前最优宇宙的第 j 个物质, lb_j 、 ub_j 分别为第 j 个变量的下界和上界, r_2 、 r_3 、 r_4 为 $[0, 1]$ 范围间的随机数。 W 为虫洞存在概率, T 为旅行距离率, 表示物质朝着当前最优宇宙移动的步长。 W 和 T 更新规则具体如下:

$$W = W_{\text{min}} + l \times \left(\frac{W_{\text{max}} - W_{\text{min}}}{L} \right) \quad (14)$$

$$T = 1 - \frac{l^{1/p}}{L^{1/p}} \quad (15)$$

其装卸时间要求; 式(10)定义船舶 i 的离港延误时间; 式(11)表示决策变量 x_{ij} 和辅助变量 y_{ijt} , r_{ik} 为二元变量。

3 改进多元宇宙优化算法

多元宇宙优化算法 (Multi-Verse Optimizer, MVO) 模拟宇宙中的物质在黑洞、白洞和虫洞共同作用下的膨胀或收缩行为, 是基于多元宇宙理论的群智能优化算法, 成功应用于函数优化、工程设计^[20] 和模糊柔性作业车间调度问题^[21], 结果显示该算法在处理模糊问题时表现出色。基于此, 本文引入 MVO 算法求解泊位分配模糊整数规划模型。

3.1 标准多元宇宙算法 (MVO)

对于 d 维优化问题, 在 MVO 算法中, 初始化一组初始宇宙群 $U = (x_{i,j})_{n \times d}$, n 为宇宙数量, d 为宇宙中物质的数量, $x_{i,j}$ 为第 i 个宇宙中的第 j 个物质。宇宙群代表问题的可行解集合, 宇宙代表问题的可行解, 宇宙中的物质代表解的分量, 宇宙的膨胀率代表解的适应度函数值。

MVO 通过白洞/黑洞隧道和虫洞对初始宇宙群进行循环迭代, 具体为:

1) 每个宇宙个体的膨胀率不同, 宇宙个体中的物质通过轮盘赌选择机制制造的白洞/黑洞隧道进行物质交换:

$$x_{i,j} = \begin{cases} x_{k,j} & r_1 < N(U_i) \\ x_{i,j} & r_1 \geq N(U_i) \end{cases} \quad (12)$$

式中, $x_{k,j}$ 为由轮盘赌选择机制选出的第 k 个宇宙的第 j 个物质, r 为 $[0, 1]$ 范围间的随机数, $N(U_i)$ 为第 i 个宇宙的归一化膨胀率。

2) 在不考虑膨胀率的情况下, 宇宙个体为了实现局部改变和改进自身膨胀率会根据式(13)激发内部物质通过虫洞向当前最优宇宙移动:

式(14)~(15)中, l 为当前迭代次数, L 为最大迭代次数, W_{min} 和 W_{max} 分别为虫洞存在概率最小值和最大值, p 为开采精度。

3.2 改进多元宇宙算法 (IMVO)

泊位分配问题解空间是整数且是离散的, 在局部搜索过程中, T 与随机数 r_4 的乘积一般小于 0.5, 导致正在移动的宇宙过快地被当前最优宇宙所同化, 宇宙种群早熟收敛^[22-23], 易陷入局部最优。为此, 改进 MVO 的 T 更新规则和物质移动规则, 并引

入解修复策略和跳出策略,形成改进多元宇宙算法(Improved MVO, IMOV),其伪代码见表1。基于IMVO算法求解FBAP的具体步骤如下:

1) 初始化宇宙群 U , 设置重要参数(W_{\min} 、 W_{\max} 、 L 、 p)。

2) 计算每个宇宙的目标函数值和膨胀率,并确定当前最优宇宙。

$$x_{i,j} = \begin{cases} X_j + T \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j), & r_3 < 0.5 \text{ 且 } r_2 < W \\ X_j - T \times ((ub_j - lb_j) \times r_4 + lb_j), & r_3 \geq 0.5 \text{ 且 } r_2 < W \\ |x_{i,j} - x_{k,j}| \cdot e^k \cdot \cos(2\pi k), & r_2 \geq W \end{cases} \quad (16)$$

5) 引入非线性收敛因子^[24],在迭代前期以较快的迭代趋势进行全局探索,迭代后期以较慢的迭代趋势进行局部开发。改进的 T 更新规则为:

$$T = 2 \exp \left(- \left(\frac{4l}{L} \right)^2 \right) \quad (17)$$

6) 为防止物质交换和移动过程中出现不可行解,即一艘船舶分配给两个泊位或没有泊位分配给该船舶,通过式(4)~(6)对出现的不可行解进行修复。

7) 为防止陷入局部最优,即如果多次迭代最优

3) 归一化每个宇宙的膨胀率,并根据式(12)进行物质交换。

4) 如果存在虫洞,黑洞穿越虫洞在最优宇宙周围以 T 进行探索成为白洞;反之,黑洞基于已经穿越的白洞进行螺旋式星系公转^[24]。改进物质移动规则具体如下:

目标函数值不变,则跳出当前最优宇宙邻域,重新探测和开采最优宇宙,并在新的最优宇宙邻域继续搜索。

8) 如果经过物质交换与移动更新后的最优宇宙对应的目标函数比当前最优宇宙小,则将其更新为当前最优宇宙并进入下次循环,否则直接进入下次循环。

9) 待迭代次数达到最大迭代次数时,输出最优目标函数值、最优泊位分配方案,以及每艘船舶的最优装卸开始、装卸结束和离港延误等时间参数。

表1 IMVO 伪代码

Tab.1 IMVO pseudo-code

算法:	IMVO
输入:	船舶各已知信息、已知公式及目标函数、最大迭代步数等算法参数
输出:	最佳宇宙、最佳宇宙膨胀率、最优泊位分配方案
1:	初始化宇宙群(三角模糊数运算)
2:	设置虫洞存在概率 W 最大值和最小值、宇宙群数量 P 、开采精度 p 及最大迭代次数 L
3:	while l : = 1 to L do
4:	W (根据式(14)计算)、 T (根据式(17)计算)
5:	for i : = 1 to P do
6:	根据式(1)计算每个宇宙的目标函数及膨胀率
7:	If(当前宇宙膨胀率 < 最佳宇宙膨胀率)
8:	Bestuniverse Inflation rate ← Inflationrates(i)
9:	Best universe ← Universe(i)
10:	end if
11:	end for
12:	宇宙排序、归一化宇宙膨胀率 N (三角模糊数运算)
13:	轮盘赌机制选择白洞
14:	for i : = 1 to P do
15:	r_1, r_2, r_3 (0-1之间的随机数)
16:	根据式(12)进行物质交换
17:	根据式(16)进行物质移动
18:	解修复策略(通过约束(4)~(6)对局部搜索中出现的不可行解进行修复)
19:	end for
20:	If(多次迭代最优宇宙不变)
21:	Breakout to new universe ← Bestuniverse
22:	end if(跳出策略)
24:	end while

4 应用实例

为了验证 FBAP 模型的适用性以及 IMVO 算法求解泊位分配问题有效性,分别设计小、中和大规模 3 组试验及相应多元宇宙算法参数取值,详见表 2。

表 2 小、中、大规模试验多元宇宙算法参数

Tab. 2 Experimental multi-verse optimizer parameters for small, medium and large-scale experiments

试验规模	码头规模		规划期/天	多元宇宙算法主要参数	
	泊位数量/个	船舶数量/艘		宇宙数量/个	最大迭代次数/次
小规模	3	11	3	20	200
中规模	3	20	5	200	500
大规模	7	56	7	400	1 000

注:虫洞存在概率最大值、虫洞存在概率最小值和开采精度分别为 1、0.2 和 6。

4.1 确定性与模糊泊位分配方案对比

以小规模试验为例,分析模糊靠泊方案面对不确定性条件的有效性和适用性,其船舶相关数据见表 3。表 4 列出确定性 (DBAP) 与模糊不确定性 (FBAP) 条件下泊位分配方案。DBAP 假设船舶到港时间为确定值,如有一艘船舶延误到港,泊位分配

MVO 和 IMVO 算法均在 MATLABR2023a 中编码实现,试验计算机参数为 i7-9750H、2.6 GHz CPU 和 16 GB RAM,所有试验单位时间段取 $\Delta t = 30 \text{ min}$,且均运行 30 次。

计划将失效。例如,按照 DBAP 计划,船舶 6 和船舶 9 将停泊在泊位 3,其预计装卸开始时间分别为 53 和 88。但船舶 6 实际到港时间为 56,其离港时间将延迟至 91,导致船舶 9 不能按照分配的时间靠泊。对于数量更多的船舶,船舶的延误使靠泊计划更加不稳定。

表 3 小规模试验到港船舶预到、离港时间和装卸时间信息表

Tab. 3 The expected times of arrival, departure and handling for small-scale experiment

船舶序号	装卸所需时间段 (三角模糊数)	预到港时间段 (三角模糊数)	预离港时间段	实际到港时间段	延误状态
1	(32,35,38)	(0,1,4)	(36,36,36)	1	准点
2	(27,30,32)	(1,3,5)	(33,33,33)	5	延误
3	(15,18,20)	(10,14,16)	(32,32,32)	11	提前
4	(19,21,24)	(16,19,22)	(40,40,40)	19	准点
5	(15,18,21)	(22,24,27)	(42,42,42)	22	提前
6	(32,35,38)	(48,53,56)	(88,88,88)	56	延误
7	(32,35,38)	(62,64,68)	(99,99,99)	64	准点
8	(20,23,25)	(71,74,77)	(97,97,97)	71	提前
9	(20,23,25)	(79,82,84)	(105,105,105)	84	延误
10	(19,21,24)	(85,88,91)	(109,109,109)	91	延误
11	(22,26,30)	(109,113,115)	(139,139,139)	110	提前

而对于 FBAP,即使有船舶延误到港,泊位分配计划依然有效。以分配到泊位 2 的船舶 6 和船舶 9 为例,如图 5 所示,船舶 6 最佳装卸开始时间 53,允许早到和延误的时间分别为 5 和 3,即船舶可在时间间隔(48,56)内开始装卸作业,其装卸作业时间为(32,35,38),故可在时间间隔(80,94)内结束装

卸作业,其最佳的装卸结束作业时间为 88;船舶 6 离港后,船舶 9 靠泊,其最佳的装卸开始时间为 88,允许早到和延误的时间分别为 8 和 6,即船舶可在时间间隔(80,94)内开始装卸作业,其装卸作业时间为(20,23,25),故可在时间间隔(100,119)内结束装卸作业,其最佳的装卸结束作业时间为 111。

表 4 确定性与模糊不确定性条件下泊位分配方案对比表

Tab. 4 The berth allocation schemes under deterministic and fuzzy uncertainty conditions

船舶序号	确定性 (DBAP)			不确定性 (FBAP)		
	泊位	靠泊时间	离泊时间	泊位	靠泊时间	离泊时间
1	3	1	36	2	(0,1,4)	(32,36,42)
2	2	3	33	3	(1,3,5)	(28,33,37)
3	1	14	32	1	(10,14,16)	(25,32,36)
4	2	33	54	1	(25,32,36)	(44,53,60)
5	1	32	50	3	(28,33,37)	(43,51,58)
6	3	53	88	2	(48,53,56)	(80,88,94)
7	2	64	99	3	(62,64,68)	(94,99,106)
8	1	74	97	1	(71,74,77)	(91,97,102)
9	3	88	111	2	(80,88,94)	(100,111,119)
10	1	97	118	1	(91,97,102)	(110,118,126)
11	3	113	139	3	(109,113,115)	(131,139,145)

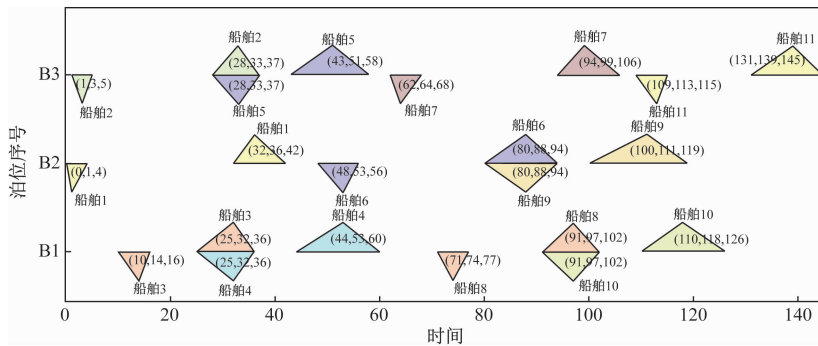


图 5 小规模试验最优泊位分配三角模糊数甘特图

Fig. 5 Triangular fuzzy number Gantt chart of optimal berth allocation for small-scale experiment

在此情况下,即使船舶 6 延误到港,如表 3 所示,实际到港时间为 56,该船舶也可在模糊泊位分配方案计划的时间间隔(80,94)内结束装卸作业,而船舶 9 也能在计划的时间间隔(80,94)内开始装卸作业。

综上所述,FBAP 模型考虑以三角模糊数描述时间的不确定性,船舶到港时间和装卸时间可以在一个时间间隔内灵活调整。这种时间弹性使得当船舶因天气等原因提前或延误时,后续的船舶仍然可以在分配时间段内完成靠泊和装卸,减少了因延误而产生的连锁效应,因此,FBAP 在面对不确定性时更具有优势。值得注意的是,三角模糊数上、下界及其最可能值的取值也会影响到泊位分配方案。在管理实践中,应根据港口运营特征,应用大数据和机器学习技术,综合考虑历史和实时数据以及气象预报等信息,合理选取三角模糊数参数取值。

表 5 为确定性与模糊不确定性泊位分配方案对应的离港时间与延误时间。11 艘船舶中,船舶 1、4、

7 实际到港时间与预计到港时间基本相同,船舶 2、6、9、10 出现延误,船舶 3、5、8、11 则提前到达。在 DBAP 下,船舶实际离港时间与延误时间波动较大,船舶 4 的延误时间达到了 16,而 FBAP 能够在延误和提前情况同时发生时,提供更具灵活性的分配方案,总离港延误时间减少了 17.1%。同时,对比表 4 和 5 可得,实际的靠泊情况是最初得到的模糊泊位分配方案(见表 4)的子集。综上所述,FBAP 在处理不确定性时能有效减少船舶离港延误时间,当船舶实际到港时间与预计不符的情况下,模糊泊位分配方案表现出更强的适应性。

4.2 改进多元宇宙算法性能分析

为验证求解算法性能,本文分别应用 CPLEX 优化求解器、MVO 和 IMVO 求解小、中、大规模试验,试验时间设置为 60 min,并记录各规模对应的最优值、最差值和平均值,及收敛性能和平均运行时间,结果见表 6、表 7 与图 6。

表5 确定性与模糊不确定性泊位分配方案对应的离港时间与延误时间对比

Tab.5 The departure times and delay times for deterministic and fuzzy berth allocation schemes

船舶	预到港时间	实际到港时间	预离港时间段	装卸时间	模糊不确定性(FBAP)		确定性(DBAP)	
					离港时间	延误时间	离港时间	延误时间
1	1	1	36	35	36	0	36	0
2	3	5	33	30	35	2	35*	2
3	14	11	32	18	29	0	32	0
4	19	19	40	21	50	10	56*	16
5	24	22	42	18	53	11	50	8
6	53	56	88	35	91	3	91*	3
7	64	64	99	35	99	0	99	0
8	74	71	97	23	94	0	97	0
9	82	84	105	23	114	9	114*	9
10	88	91	109	21	115	6	118	9
11	113	110	139	26	136	0	140*	1
合计						41		48

注：*表示因船舶延误出现与确定性泊位分配计划不一致的情况。

表6 CPLEX 优化求解器、MVO 和 IMVO 优化结果对比表 (CPLEX 试验时间设置为 60 min)

Tab.6 Comparison table of optimization results for CPLEX, MVO, and IMVO
(with CPLEX experimental time set to 60 minutes)

规模	算法	最优值	平均值	最差值	平均运行时间/s
小规模	CPLEX		—	—	—
	IMVO	(6,37,105)	(6,37,105)	(6,37,105)	1.21
	MVO				2.29
中规模	CPLEX		—	—	—
	IMVO	(195,327,559)	(203.7,335.1,564.2)	(202,345,562)	95.35
	MVO	(208,328,561)	(202.4,343.2,570.6)	(201,363,559)	163.11
大规模	CPLEX		—	—	—
	IMVO	(118,297,727)	(127.7,325.8,784.4)	(157,351,783)	1 836.15
	MVO	(133,336,805)	(163.9,376.6,843.9)	(206,420,848)	2 518.89

表7 小、中、大规模试验最优结果收敛数据对比 (CPLEX 试验时间设置为 60 min)

Tab.7 Comparison of convergence data of optimal results for small, medium and large-scale experiments
(with CPLEX experimental time set to 60 minutes)

规模	算法	最优值(三角模糊数)	收敛代数	运行时间/s
小规模	CPLEX		—	—
	IMVO	(6,37,105)	41	0.97
	MVO		101	2.42
中规模	CPLEX	(195,327,559)	—	—
	IMVO	(195,327,559)	117	89.19
	MVO	(208,328,561)	242	159.27
大规模	CPLEX	—	—	—
	IMVO	(118,297,727)	499	1 828.33
	MVO	(133,336,805)	681	2 473.42

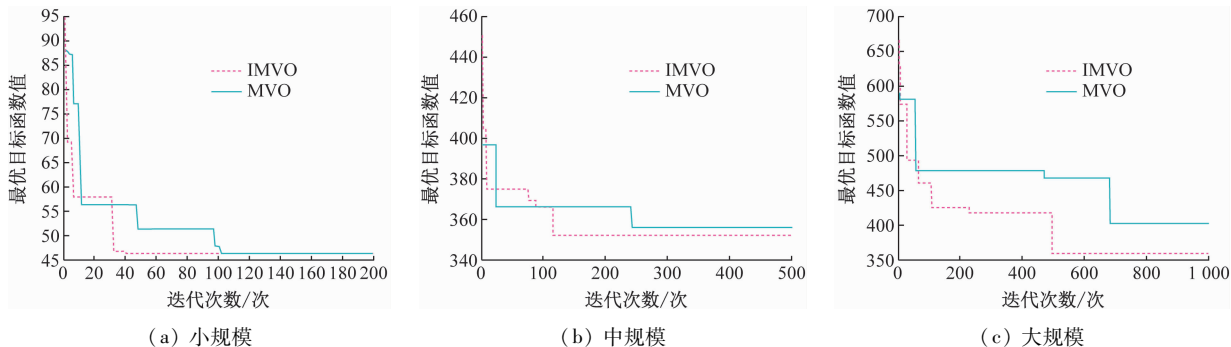


图6 IMVO与MVO最优目标函数收敛图(小、中、大规模)

Fig. 6 Convergence plots of IMVO and MVO optimal objective functions (small, medium and large scales)

由表6可知,在60 min的试验时间内,CPLEX可为小、中规模试验提供最优解,但对于大规模实例无法提供最优解,而IMVO和MVO均可在一小时内求得小、中、大规模最优解。

对于小规模试验,IMVO和MVO均能获得最优值,但IMVO所需时间更短;对于中、大规模试验,IMVO在求解质量及寻优时间上均优于MVO,且随着试验规模的扩大,IMVO在求解质量及速率上均比MVO更有优势。例如,大规模试验IMVO对应的最优值为(118, 297, 727),平均运行时间为183 6.15 s;而MVO对应的最优值为(133, 336, 805),平均运行时间为251 8.89 s。

由表7和图6可知,随着迭代次数增加,所求目标函数逐渐趋于稳定。对于小规模试验,MVO和IMVO算法可以获得相同的最优解,而IMVO的收敛代数和寻优速率均优于MVO,其中寻优速率提高了59.9%;对于中、大规模试验,IMVO在最优解质量、寻优速率和收敛代数上均优于MVO,寻优速率分别提高44%、26.1%。由此可见,随着试验规模的扩大,IMVO在收敛代数和寻优效果上均优于MVO,说明了算法改进后的IMVO在多场景规模下的适用性和有效性。

5 结语

针对船舶到港时间和装卸时间等存在的模糊不确定性,本文建立了基于三角模糊数的集装箱码头泊位分配模糊整数规划模型,并提出基于解修复策略和跳出策略的改进多元宇宙算法求解模型,为集装箱港口泊位分配问题提供了一种新的研究思路和方法。通过本文研究得出结论如下:

一是模糊不确定性条件下集装箱码头泊位分配优化模型,充分利用时间的模糊不确定性,较确定性泊位分配方案可有效减少离港延误,在面对不确定性更具有优势。

二是基于解修复策略和跳出策略的改进多元宇宙算法可有效提高求解质量、收敛性能等,在小、中、

大规模试验下求解速度分别提高59.9%、44%、26.1%。

三是相较于CPLEX求解器,改进多元宇宙算法在处理中、大规模问题时具有优势,可有效处理大规模模糊泊位分配问题。

尽管本文提出的改进多元宇宙算法求解模糊泊位分配问题具有一定优势,但仍有一些不足之处,未来可继续改进:

一是改进多元宇宙算法在处理大规模问题时寻优速率仍有待提高,未来可考虑结合其他优化算法(如遗传算法、粒子群优化算法等),设计合适的混合优化算法,进一步提高求解效率。

二是船舶预计到港时间和装卸作业时间的三角模糊数上、下界及其最可能值的取值会影响到泊位分配方案。在管理实践中,应根据港口运营特征,应用大数据和机器学习技术,综合考虑历史和实时数据以及气象预报等信息,合理选取模糊数的形式及其参数取值,进一步提高泊位分配方案的适应性。

参考文献

- [1] STAHLBOCK R, VOB S. Operations research at container terminals: a literature update [J]. OR Spectrum, 2008, 30(1): 1-52.
- [2] SHERAZ A, P. M M, HERODOTOS H. Enhanced berth allocation using the cuckoo search algorithm [J]. SN Computer Science, 2022, 3(4): 325-340.
- [3] SCHEPLER X, ABSI N, FEILLET D, et al. The stochastic discrete berth allocation problem [J]. EURO Journal on Transportation and Logistics, 2019, 8(4): 363-396.
- [4] XIANG X, LIU C C. An expanded robust optimisation approach for the berth allocation problem considering uncertain operation time [J]. Omega, 2021, 103: 102444.
- [5] 马梦颀. 集装箱船舶抵港时间不均匀性与泊位调度优化研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.

- ships and berth scheduling optimization [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [6] 唐世轩, 金建钢, 卢春霞, 等. 考虑多种类干扰事件的集装箱码头泊位分配问题[J]. 大连海事大学学报, 2021, 47(4): 30-38.
TANG S X, JIN J G, LU C X, et al. Berth allocation problem of container terminal considering multiple types of interference events[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2021, 47(4): 30-38. (in Chinese)
- [7] 宋云婷, 王诺. 基于时间不确定的集装箱码头靠泊计划优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(4): 224-230.
SONG Y T, WANG N. Optimization of container terminal berthing plan based on time uncertainty[J]. Transportation Systems Engineering and Information, 2020, 20(4): 224-230. (in Chinese)
- [8] 谢鑫, 胡志华. 抵港和装卸时间不确定情况下的离散泊位分配问题[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2013, 47(6): 813-818.
XIE X, HU Z H. Discrete Berth Allocation Problem under uncertain arrival and handling time [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2013, 47(6): 813-818. (in Chinese)
- [9] GUO L M, WANG J, ZHENG J. Berth allocation problem with uncertain vessel handling times considering weather conditions [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 158: 107417.
- [10] 林嘉宏. 不确定环境下泊位与岸桥的协同调度研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
LIN J H. Research on berth and quay crane collaborative scheduling in uncertain environments [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014. (in Chinese)
- [11] AGOSTINHO A, FILIPE R. Distributionally robust optimization for the berth allocation problem under uncertainty [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2022, 164: 1-24.
- [12] PÉREZ-CAÑEDO B, VERDEGAY J L, ROSETE A, et al. Fully fuzzy multi-objective Berth Allocation Problem [C] // Hybrid Artificial Intelligent Systems, November 11-13, 2020, Gijón, Spain. Cham: Springer, 2020, 12344: 261-272.
- [13] PÉREZ-CAÑEDO B, VERDEGAY J L, ROSETE A, et al. A multi-objective berth allocation problem in fuzzy environment[J]. Neurocomputing, 2022, 500: 341-350.
- [14] YANG X P, CAO B Y, LIN H T, Multi-objective fully fuzzy linear programming problems with triangular fuzzy numbers[C] // Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, August 19-21, 2014, Xiamen, China. Piscataway: IEEE, 2014: 171-177.
- [15] GUTIERREZ F, LUJAN E, ASMAT R, et al. Fully fuzzy linear programming model for the Berth Allocation Problem with two quays [C] // Uncertainty Management with Fuzzy and Rough Sets, January 23, 2019, Cham, Switzerland. Cham: Springer, 2019, 377: 87-113.
- [16] GUTIERREZ F, LUJAN E, ASMAT R, et al. Fuzziness in the berth allocation problem [C] // Recent Advances in Computational Optimization: September 19, 2018, Cham, Switzerland. Cham: Springer, 2018, 795: 149-174.
- [17] LUJAN E, VERGARA E, RODRIGUEZ-MELQUIADES J, et al. A Fuzzy Optimization Model for the Berth Allocation Problem and Quay Crane Allocation Problem (BAP + QCAP) with n Quays [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(2): 152-167.
- [18] SALHI A, ALSOUFI G, YANG X. An evolutionary approach to a combined mixed integer programming model of seaside operations as arise in container ports. [J]. Annals of operations research, 2019, 272 (1-2): 69-98.
- [19] SAKAWA M, MORI T. An efficient genetic algorithm for job-shop scheduling problems with fuzzy processing time and fuzzy due date [J]. Computers & Industrial Engineering, 1999, 36(2): 325-341
- [20] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, HATAMLLOU A. Multi-verse optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization [J]. Neural Computing and Applications, 2016, 27(2): 495-513.
- [21] LIN J, ZHU L, WANG Z. A hybrid multi-verse optimization for the fuzzy flexible job-shop scheduling problem [J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 127: 1089-1100.
- [22] 张强, 姜慧清, 王颖, 等. 基于离散多元宇宙算法求解车辆路径问题 [J]. 电子科技大学学报, 2021, 50(6): 890-898.
ZHANG Q, JIANG H Q, WANG Y, et al. Solving vehicle routing problem with discrete multi-verse algorithm [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2021, 50(6): 890-898. (in Chinese)
- [23] SAYED G I, DARWISH A, HASSANIEN A E. A new chaotic multi-verse optimization algorithm for solving engineering optimization problems [J]. Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, 2018, 30(2): 293-317.
- [24] 刘小龙. 改进多元宇宙算法求解大规模实值优化问题 [J]. 电子与信息学报, 2019, 41(7): 1666-1673.
LIU X L. Solving large-scale real-value optimization problems with an improved multi-verse algorithm [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(7): 1666-1673. (in Chinese)