

# 考虑岸电分配的集装箱码头泊位调度优化研究

郑童<sup>1</sup>, 李俊<sup>1,2</sup>, 赵梦孺<sup>1</sup>, 肖汉平<sup>1</sup>  
(1. 武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北 武汉 430070;  
2. 天津港(集团)有限公司, 天津 300461)

**摘要:**为减少船舶在靠泊期间使用辅助发电机排放的污染气体,在岸电改造热潮下将岸电分配纳入集装箱码头泊位调度计划考虑。在传统泊位调度模型基础上,引入岸电分配相关约束和碳排放减少目标,建立包含船舶在港、岸电使用和碳排放在内的码头成本最小化为目标的数学模型。为实现问题的有效求解,提出带停滞变异策略的改进蝙蝠算法(IBA),并采用惯性权重方法更新个体寻优速度,防止算法陷入局部最优。算例研究表明:考虑岸电分配进一步提升泊位调度的难度,当船舶数量不超过25艘时,数学模型可实现精确求解且求解质量总是最优,当船舶数量增加到30艘时,数学模型则无法在限制时间内完成求解;与模型精确求解相比,IBA实现了所有算例的高效求解,其求解耗时明显少于模型,且求解结果与模型结果的最大偏差仅为2.37%;对比传统的遗传算法(GA)和基本蝙蝠算法(BA),IBA具有更好的求解性能,总能找到更高质量的解,其求解耗时优于GA,较基本蝙蝠算法平均仅约增加10s。不同码头泊位及船舶岸电改造比例匹配分析发现,在固定的码头泊位岸电改造比例下,码头成本随着船舶岸电改造比例的提升呈下降趋势,但当两者比例达到均衡时,下降趋势平缓且基本保持不变。结果表明:只有当码头泊位与船舶岸电改造比例匹配时才能实现最优成本节约,保证供需平衡才能有效避免和减少岸电资源的浪费。

**关键词:**集装箱码头;泊位调度;岸电分配;改进蝙蝠算法;停滞变异

中图分类号:U692.3

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.03.009

## Research on berth scheduling optimization of container terminal considering shore power distribution

ZHENG Tong<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1,2</sup>, ZHAO Mengru<sup>1</sup>, XIAO Hanping<sup>1</sup>

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430070, China; 2. Tianjin Port (Group) Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

**Abstract:** In order to reduce the emission of polluting gases from auxiliary generators during ship berthing, and in response to the growing adoption of shore power infrastructure, this paper incorporates the distribution of shore power into the berth scheduling plan of container terminals. Building upon the traditional berth scheduling model, relevant constraints for shore power allocation and carbon emission reduction targets are introduced, establishing a mathematical model that integrates ship-in-port activities, shore power usage, and carbon emissions. To solve the model effectively, an Improved Bat Algorithm (IBA) incorporating a stagnation mutation strategy is proposed. The inertia weight method is employed to update individual optimization speeds, preventing the algorithm from converging to local optima. Case studies show that considering shore power distribution increases the complexity of the berth scheduling problem. When the number of ships does not exceed 25, the mathematical model can be solved accurately with optimal solution quality; however, when the number

收稿日期:2024-09-27

基金项目:湖北省自然科学基金计划项目(2023AFB071)

作者简介:郑童(1998—),男,硕士研究生,研究方向为物流系统建模与优化。E-mail:850033470@qq.com

通信作者:李俊(1989—),男,博士,讲师,研究方向为物流系统建模与智能优化。E-mail:lj\_whut1989@163.com

引用格式:郑童,李俊,赵梦孺,等.考虑岸电分配的集装箱码头泊位调度优化研究[J].中国航海,2025,48(3):73-81.

ZHENG T, LI J, ZHAO M R, et al. Research on berth scheduling optimization of container terminal considering shore power distribution [J]. Navigation of China, 2025, 48(3): 73-81. (in Chinese)

increases to 30, the model cannot be solved within a reasonable time frame. In comparison, the IBA achieves efficient solutions for all test cases with significantly shorter computation times. The maximum deviation between IBA results and the exact model solutions is only 2.37%. Furthermore, compared to traditional Genetic Algorithms and the basic Bat Algorithm, IBA demonstrates superior performance in terms of solution quality and computational efficiency, with an average increase in computation time of only about 10 seconds compared to the basic bat algorithm. A matching analysis between the shore power retrofit ratio of berths and ships revealed that under a fixed dock berth retrofit ratio, terminal costs decrease as the ship retrofit ratio increases. However, once the two ratios reach equilibrium, the rate of cost reduction levels off and remains largely stable. These results indicate that optimal cost savings are achieved when the shore power retrofit ratios of berths and ships are appropriately matched. Ensuring a balance between supply and demand can effectively prevent resource waste and enhance the efficiency of shore power utilization.

**Key words:** container terminal; berth scheduling; shore power distribution; IBA; stagnant variation

集装箱船舶在码头靠泊期间使用辅助发电机排放大量污染气体,有数据表明船舶靠港大气污染物排放量占整个港口排放量的60%~80%,对环境的影响较大。船舶靠港使用岸电是减少污染气体排放的最有效措施,交通运输部发布的《港口和船舶岸电管理办法》明确规定,港口应对已建码头逐步实施岸电改造;鼓励对使用岸电的船舶实施优先靠泊、减免岸电服务费等措施。随着港口岸电改造比例的不断上升,靠港船舶也相应完成岸电改造。因此,在制定泊位调度计划时,应纳入岸电考虑。

已有码头岸电相关研究主要集中在岸电的减排效果、岸电政策和技术问题上。文献[1]研究码头岸电设施的发展前景,发现每减少1 t污染物的成本比处理1 t污染物的成本低得多。文献[2]通过1艘散货船上的测试案例表明使用岸电可有效减少港口污染物的排放。王宇婷等<sup>[3]</sup>建立仿真模型对某集装箱码头船舶接入岸电前后碳排放情况进行分析,结果表明船舶使用岸电后可减少碳排放。刘磊磊等<sup>[4]</sup>根据港口岸电项目的特点,通过量化碳排放的各项指标,推广岸电技术的应用。

针对集装箱码头泊位调度问题,国内外学者开展了大量研究,主要关注提高码头生产和服务效率。NISHIMURA等<sup>[5]</sup>开发一种基于遗传算法(Genetic Algorithm, GA)的启发式程序,解决了集装箱港口船舶动态泊位分配的问题。史立等<sup>[6]</sup>建立考虑潮汐影响下的连续泊位分配模型,以船舶等待时间成本为目标求解得到靠泊方案,提高泊位利用率。CORRECHER等<sup>[7]</sup>研究不规则泊位,以在港时间和总成本最小化为目标建立数学模型,利用启发式算法证明该模型可减少时间成本。焦小刚等<sup>[8]</sup>建立泊位疏浚下泊位和岸桥的动态协同调度模型,设计3种启发式算法求解,并以大小规模的算例验证算法的有效性。

随着船舶和码头岸电建设的不断深入,泊位调

度中应纳入岸电考虑,进一步加快船岸匹配能力的提升。然而,考虑岸电分配开展码头泊位调度的研究尚缺乏,已有文献大多考虑如何减少污染气体排放,少有将岸电约束考虑到泊位调度计划中,仅有少量文献针对岸电与泊位调度的综合优化研究。闵德权等<sup>[9]</sup>提出一种兼顾岸电使用成本和环境效益的岸电分配与泊位分配协同优化方案,减少岸电使用成本,提高环境效益。因此,将岸电分配纳入泊位调度考虑有待进一步研究,尤其是当船舶与码头泊位岸电改造比例不匹配时,如何制定合理的泊位调度计划来降低码头成本具有很强的理论和现实意义。

基于此,本文考虑岸电分配的集装箱码头泊位调度问题,主要工作体现在以下两点:

1) 在目标函数中加入船舶完成岸电改造但不能连接岸电产生的惩罚成本,约束条件中加入船舶使用岸电的功率约束。

2) 由于很多码头均是逐步完成岸电改造,着重分析泊位和船舶岸电改造比例不匹配时对码头作业成本的影响。

综上,本文在传统连续泊位调度问题的基础上,研究岸电分配对制定集装箱码头泊位计划的影响,建立包括船舶在港成本、岸电使用成本和碳排放成本在内的码头成本最小化为目标的数学模型,提出带停滞变异策略的改进蝙蝠算法进行求解,引入停滞变异策略防止陷入局部最优。同时,对不同泊位和船舶岸电改造比例匹配的情形进行分析。

## 1 问题描述

港口岸电是将船舶与港口电网相连接,通过电缆为船舶供电来减少船舶污染物排放和减少噪声的关键技术。由于岸电可有效地减少靠泊船舶污染气体的排放,为船舶连接岸电也更符合港口绿色发展理念,可有效地减少污染排放。

考虑岸电分配的泊位调度作业流程<sup>[10]</sup>见图1。

船舶的停泊位置和靠泊时间对岸电的使用成本和船舶排放影响很大,因此,本文在连续泊位分配问题的基础上,研究岸电分配对集装箱码头泊位计划的影响,评估泊位是否安装岸电以及到港船舶是否有能力连接岸电,保证可接岸电的船舶停靠在已完成岸电改造的泊位上,在避免岸电资源浪费的同时实现港口的节能减排。

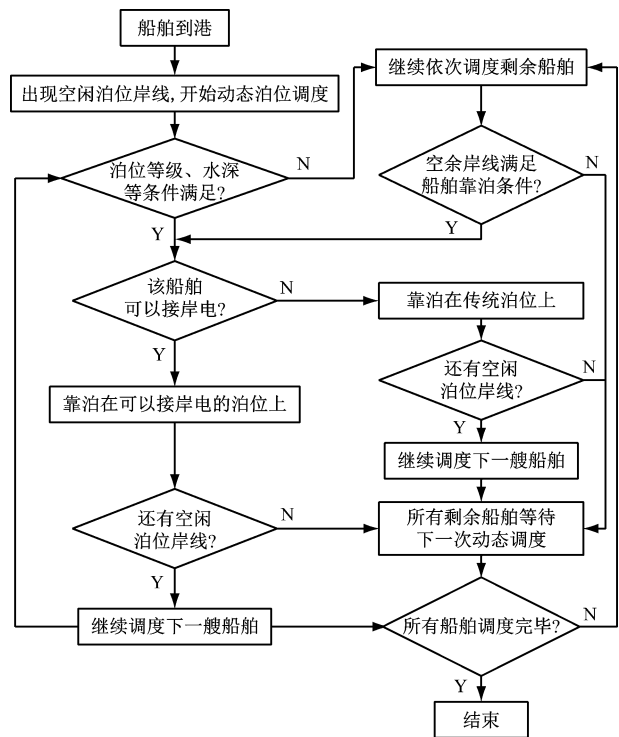


图1 考虑岸电分配的泊位调度作业流程

Fig.1 Berthing scheduling flow chart considering shore power distribution

具体来说,综合权衡码头岸电使用与作业效率保证,考虑靠泊船舶岸电分配与等待岸电使用等,以包括船舶在港成本、岸电使用成本和碳排放成本在内的码头成本最小化为目标研究考虑岸电分配的集装箱码头连续泊位调度问题。在保证岸电匹配的同时制定船舶的泊位计划,提高码头泊位岸线的利用率。

## 2 数学模型

### 2.1 模型假设

针对集装箱码头泊位调度问题的特点,考虑岸电分配等现实约束,作出以下假设。

- 1) 水道的宽度和深度满足所有船舶的航行需求,暂不考虑潮汐对船舶靠泊的影响。
- 2) 船舶到港时间已确定,暂不考虑恶劣天气等意外因素干扰。
- 3) 岸电系统满足所有船舶使用岸电的需求。

4) 已完成岸电改造的泊位只能供该泊位停靠的船舶使用岸电。

5) 初始时港口的泊位和岸电处于空闲状态。

6) 船舶连接岸电的时间忽略不计。

### 2.2 模型构建

$$F_{\min} = \sum_{i \in V} W_{i,D} \times w_p \times \varphi + \sum_{i \in V} c(d_i - s_i) + C_{MC} + C_{CW} \quad (1)$$

式(1)为最小化港口运行期间的码头成本,主要包括船舶停靠期间的碳排放成本、船舶的等待时间成本、岸电使用成本和船舶完成岸电改造后不能接岸电的惩罚成本。

约束条件:

$$b_i + l_i \leq L, i \in V \quad (2)$$

$$a_i \leq s_i \leq T, i \in V \quad (3)$$

$$b_i + l_i \leq b_j + M(1 - \alpha_{ij}), i, j \in V; i \neq j \quad (4)$$

$$s_i \leq a_j + M(1 - \beta_{ij}), i, j \in V; i \neq j \quad (5)$$

$$\alpha_{ij} + \alpha_{ji} \leq 1, i, j \in V; i \neq j \quad (6)$$

$$\beta_{ij} + \beta_{ji} \leq 1, i, j \in V; i \neq j \quad (7)$$

$$d_i = s_i + t_i, i \in V \quad (8)$$

式(2)为对船舶靠泊的约束;式(3)为时间约束,保证船舶到达港口后才分配泊位;式(4)、式(5)、式(6)和式(7)为同一泊位在同一时间内只能停靠1艘船;式(8)为船舶在操作完成后立即离开。

$$\sum_{i \in V} \sum_{b \in L} \sum_{t \in T} \gamma_{ibt} \leq 1, i \in V; b \in L; t \in T \quad (9)$$

$$d_i \leq D_i, i \in V \quad (10)$$

$$t_{on,i,k} \leq t_{on,k}, i \in V; k \in B \quad (11)$$

式(9)为每艘船舶至多靠泊停靠一次;式(10)为船舶能按照计划准时离港;式(11)保证船舶计划停泊的泊位吨位大于其自身吨位。

$$Q_1 \leq \sum_{i \in V} P_i z_{ik} \leq Q_2, i \in V \quad (12)$$

$$z_{ik} = 0, i \in V_w, k \in B \text{ or } i \in V; k \in B_w \quad (13)$$

$$z_{ik} = x_i = y_k = 1, i \in V_Y; k \in B_Y \quad (14)$$

$$W_{i,D} = l_A \times P_i \times R_i \times t_i, i \in V \quad (15)$$

$$W_{i,E} = l_A \times P_i \times t_i, i \in V \quad (16)$$

式(12)为同一时间对岸电使用功率的约束;式(13)为当泊位不配备岸电时以及船舶没有完成岸电改造2种情况下都无法使用岸电;式(14)为船舶和泊位都完成岸电改造才能使用岸电;式(15)为停泊在泊位  $k$  上的船舶柴油消耗量;式(16)为停泊在泊位  $k$  上的船舶岸电消耗量;式(17)为岸电使用费用、电柴油能源价差。

$$C_{MC} = \sum_{i \in V} C_E \cdot W_{i,E} z_{ik} - \sum_{i \in V} C_D \cdot W_{i,D} (1 - z_{ik}) \quad (17)$$

$$C_{CW} = \sum_{i \in V} \sum_{k \in B} C_i \cdot (s_i - a_i) \quad (18)$$

为减少排放,更多船舶被分配到有岸电泊位时,可能会增加其余船舶的等待时间如式(18)所示。

上述模型区别于已有研究,考虑岸电分配对泊位调度计划的影响:

1) 在目标函数中加入碳排放成本和船舶不能连接岸电产生的惩罚成本。

2) 在约束条件中加入船舶使用岸电的功率约束条件。基于此,所建立的数学模型可有效地解决考虑岸电分配的泊位调度问题,兼顾码头成本和环境效益的同时,提高码头泊位岸线利用率。

## 2.3 符号定义

### 2.3.1 参数说明

$V$  为周期  $T$  到达船舶的集合,  $V = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ ,  $n$  为到达船舶的总数;  $V_Y$  为完成岸电改造的船舶集合;  $V_W$  为没有完成岸电改造的船舶集合;  $B$  为港口中的泊位集合,  $B = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ ;  $B_Y$  为带岸电的泊位集合;  $B_W$  为不带岸电的泊位集合;  $L$  为港口岸线的长度;  $b_i$  为船舶  $i$  的靠泊位置,  $i \in V$ ;  $l_i$  为船舶  $i$  的船长,  $i \in V$ ;  $Q_1$  为港口岸电能提供的最小功率;  $Q_2$  为港口岸电能够提供的最大功率;  $C_E$  为岸电电价, 元/(kW·h);  $C_i$  为船舶  $i$  的等待时间成本, 元/h,  $i \in V$ ;  $\varphi$  为船舶辅助发电机的单位碳排放成本;  $c$  为船舶不能接岸电的单位时间惩罚成本;  $\omega_p$  为污染物的排放系数;  $T$  为船舶调度周期, d;  $W_{i,D}$  为船舶  $i$  柴油消耗量, kW·h,  $i \in V$ ;  $W_{i,E}$  为船舶  $i$  耗电量, kW·h,  $i \in V$ ;  $L_A$  为辅助发电机的负载系数;  $P_i$  为船舶辅助发动机功率, kW,  $i \in V$ ;  $R_i$  为船舶辅助发动机柴油消耗率, kg/(kW·h);  $C_{MC}$  为船舶岸电使用成本;  $C_{CW}$  为船舶等待时间;  $a_i$  为船舶  $i$  到达港口的时间,  $i \in V$ ;  $s_i$  为船舶  $i$  开始靠泊的时间,  $i \in V$ ;  $D_i$  为船舶  $i$  的预计离开时间,  $i \in V$ ;  $d_i$  为船舶  $i$  离开港口的时间,  $i \in V$ ;  $t_i$  为船舶  $i$  在偏好泊位的装卸时间,  $i \in V$ ;  $t_{on,i,k}$  和  $t_{on,k}$  为船舶吨位和泊位吨位,  $i \in V$ 。

### 2.3.2 决策变量

$x_i$  为 0~1 变量, 当  $x_i = 1$ , 表示该船舶  $i$  已完成岸电改造, 否则,  $x_i = 0$ ,  $i \in V$ ;  $y_k$  为 0~1 变量, 当  $y_k = 1$ , 表示该泊位  $k$  配备岸电, 否则,  $y_k = 0$ ,  $k \in B$ ;  $z_{ik}$  为 0~1 变量, 当  $z_{ik} = 1$ , 表示船舶  $i$  停靠在泊位  $k$  上使用岸电, 否则,  $z_{ik} = 0$ ,  $i \in V, k \in B$ ;  $\alpha_{ij}$  为 0~1 变量, 当  $\alpha_{ij} = 1$ , 表示船舶  $i$  的位置在船舶  $j$  的左侧, 否则,  $\alpha_{ij} = 0$ ,  $i, j \in V$ ;  $\beta_{ij}$  为 0~1 变量, 当  $\beta_{ij} = 1$ , 表示船舶  $i$  在船舶  $j$  之前靠泊, 否则,  $\beta_{ij} = 0$ ,  $i, j \in V$ ;  $\gamma_{ibt}$  为 0~1 变量, 当  $\gamma_{ibt} = 1$ , 表示船舶  $i$  在  $t$  时停在  $b$  位置, 否则

$$\gamma_{ibt} = 0, i \in V, b \in L, t \in T.$$

## 3 改进蝙蝠算法

### 3.1 蝙蝠算法

蝙蝠算法 (Bat Algorithm, BA) 由 YANG<sup>[11]</sup> 提出。蝙蝠在寻找猎物时, 在位置  $x_i$  以速度  $v_i$  随机飞行, 其具有静态的频率  $f_{\min}$ , 变化的波长  $\lambda$ , 响度  $A_0$ 。频率变化范围为  $f_{\min}$  到  $f_{\max}$ , 响度一般在  $A_0$  和  $A_{\min}$  之间变化, BA 的公式为

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \times \pi \quad (19)$$

$$v_{i,t+1} = v_{i,t} + (x_{i,t} - x_*) \times f_i \quad (20)$$

$$x_{i,t+1} = x_{i,t} + v_{i,t} \quad (21)$$

$$A_{i,t+1} = \eta A_{i,t}, r_{i,t+1} = r_{i,0} [1 - \exp(-\mu t)] \quad (22)$$

$$A_{i,t} \rightarrow 0, r_{i,t} \rightarrow r_{i,U}, \text{ as } t \rightarrow \infty \quad (23)$$

式(19)~式(23)中:  $\pi \in [0, 1]$ ;  $x_*$  为当前种群中的全局最优解;  $r$  为脉冲发射率;  $\eta$  和  $\mu$  为常数,  $0 < \eta < 1, \mu > 0$ 。

选择全局最优解后, 当前种群中每一个局部最优解都用式(24)更新位置。

$$x_{\text{new}} = x_{\text{old}} + \varepsilon A_i \quad (24)$$

式(24)中:  $\varepsilon \in [0, 1]$ 。

### 3.2 算法改进

BA 主要依赖于个体之间的相互作用进行搜索。一旦某个个体陷入早熟, 可能会吸引其他个体迅速聚集在其周围, 导致算法陷入局部最优。为克服 BA 的不足, 本文在文献[12]的基础上, 在 BA 的初始化种群上选择具有高质量的个体, 采用惯性权重对蝙蝠的速度进行更新, 并引入停滞变异策略防止算法陷入局部最优解。

#### 3.2.1 基于免疫浓度的混沌初始化

1) 混沌映射。本文采用具有较好结果的立方映射<sup>[13]</sup>初始化, 有

$$y(x+1) = 4y(x)^3 - 3y(x) \quad (25)$$

式(25)中:  $-1 \leq y(x) \leq 1, x = 1, 2, \dots, N_1$ 。

2) 初始化种群。在免疫算法<sup>[14]</sup>中, 通过对抗体的浓度进行调控, 可实现对个体的选择和生存概率进行动态调整, 以获得更优质的解, 抗体浓度的计算公式为

$$c_u = \frac{\sum_{v=1}^{N_1} A_{uv}}{N_1} \quad (26)$$

式(26)中:  $N_1$  为混沌映射的种群规模;  $A_{uv}$  为抗体  $u$  和  $v$  的亲密度,  $A_{uv}$  计算公式为

$$A_{uv} = \frac{1}{\left[1 + \sqrt{\sum_{i=1}^D (u_i - v_i)^2}\right]} \quad (27)$$

根据抗体的适应度和浓度的共同作用可确定其在初始群体中的最优选择。在极小化问题中,抗体  $u$  的目标值  $p_u$  为

$$p_u = \theta \cdot c_u + (1 - \theta) \cdot \frac{f(u)}{\sum_{i=1}^{N_1} f(i)} \quad (28)$$

式(28)中: $f(u)$ 为抗体  $u$  的目标函数值, $\theta$ 取 0.5,在  $N_1$  个抗体中,根据式(28)计算每个抗体的目标值  $p_u$  并进行排序,选择综合目标值最优的抗体作为初始种群。

### 3.2.2 惯性权重改进

由于传统 BA 易陷入局部最优,采用惯性权重对蝙蝠的速度更新进行约束实现算法改进。具体来说,将式(20)改进为

$$v_{i,t+1} = \omega v_{i,t} + (x_{i,t} - x_*) \times f_i \quad (29)$$

$$\omega = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times \frac{h}{H} \quad (30)$$

式(29)~式(30)中: $\omega$ 为惯性权重系数; $\omega_{\max}$ 和  $\omega_{\min}$ 为惯性权重的最大值和最小值; $h$ 为当前的迭代次数; $H$ 为允许的最大迭代次数。

### 3.2.3 停滞变异策略

为进一步实现算法优化,引入一种停滞变异策略。设定一个停滞阈值  $\delta$ ,当连续  $\delta$  代的最优解未发生变化时,在局部搜索过程中引入个体维度的变异,变异维度的个体数量为

$$N = \text{int} \left( \frac{N \cdot f(x_i)}{\sum_{j=1}^N f(x_j)} \right) \quad (31)$$

式(31)中: $N$ 为维度数量; $\text{int}(\cdot)$ 为取整函数。

变异个体  $i$  的第  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, N$ ) 维变异公式为

$$x_{ik} = x_{ik,\min} + (x_{ik,\max} - x_{ik,\min}) \cdot R \quad (32)$$

式(32)中: $x_{ik,\max}$ 和  $x_{ik,\min}$ 为  $x_i$  在维度  $k$  的最大值和最小值; $x_{ik}$ 为第  $i$  个个体的第  $k$  维; $R \in [0, 1]$ 。

## 3.3 算法流程

根据以上描述,改进蝙蝠算法(Improved Bat Algorithm, IBA)的具体步骤描述如下。

1) 产生初始化种群:种群规模  $N$ 、最大迭代次数  $k$ 、回声频率  $f_{\max}$  与  $f_{\min}$  和惯性权重值。

2) 将初始化种群按照式(19)、式(21)和式(29)生成新的位置和速度。

3) 对于每个子群体,生成一个随机数  $rand \in (0, 1)$ 。如果  $rand > r_i$ ,则根据式(24)在最优解  $x_*$  附近生成一个局部解。如果连续多代没有得到更新,则利用式(31)和式(32)产生新的局部解。

4) 在每个群体中生成另一个随机数  $rand$ 。如果  $rand < A_i$ ,则将新解替换为当前个体的位置。根据式(22)更新个体的  $A_i$  和  $r_i$ 。

5) 判断生成的新解是否比全局最优解  $x_*$  小,如果是,则更新全局最优解。

6) 如未达到结束条件,重复步骤2)~步骤6),直至算法的最大迭代次数。

7) 输出最优解。

根据以上步骤,IBA 的优化流程见图2。

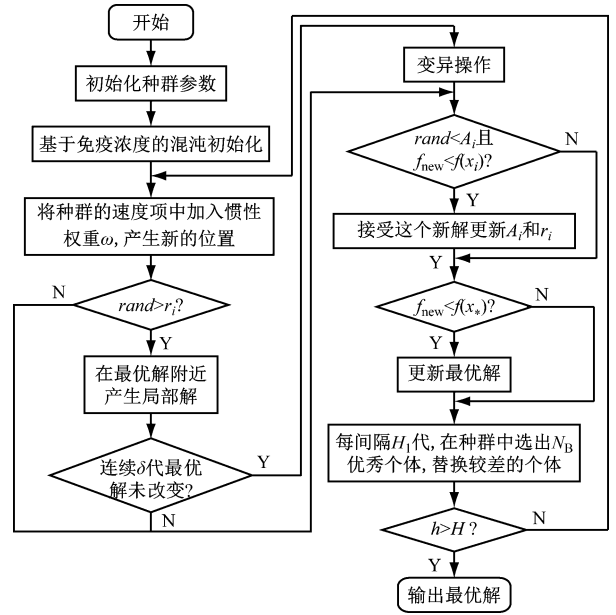


图2 IBA 优化流程

Fig. 2 Optimization process of IBA

## 4 算例分析

### 4.1 算例描述

为验证泊位调度模型和所提算法的有效性,采用 Python 3.10 对所建模型进行试验分析。选取北方某港的集装箱码头为研究对象,该码头连续泊位岸线总长为 1 500 m,选择 20 艘船舶进行算例研究,到港船舶参数<sup>[9]</sup>见表 1。

经查询<sup>[9]</sup>,1 艘船舶的最大辅机功率为 2 700 kW,辅机负载系数 0.50,CO<sub>2</sub> 的排放系数为 0.31。根据中国燃料市场价格,柴油的平均价格为 3 805.20 元/t,岸电使用费 0.95 元/(kW·h),锚地等待时间成本 0.05 元/t/h,CO<sub>2</sub> 排放成本 0.21 元/kg,完成岸电改造的船舶无法使用岸电的惩罚成本为 10/h。

### 4.2 算例分析

构建的模型和算法均采用 Python 语言编程实现,其中模型精确求解基于 Gurobi 10.0 完成。所有

表1 到港船舶参数  
Tab.1 Arrival ship parameters

船舶编号	船长/m	偏好泊位/m	功率/kW	到港时刻	离港时刻	装卸时间/min	滞期成本/元	是否完成岸电改造
1	200	50	2 400	00:00	07:20	310	27	是
2	250	900	2 000	00:30	08:30	350	15	否
3	300	1 000	2 700	00:40	10:40	560	35	是
4	150	360	900	05:00	13:10	440	28	是
5	300	800	2 800	05:30	12:40	400	19	否
6	220	400	1 800	05:40	12:50	160	33	否
7	150	1 100	850	08:10	18:30	330	15	是
8	300	600	3 000	08:30	18:40	400	21	否
9	200	100	2 000	11:20	18:50	500	25	是
10	210	1 000	1 900	13:10	22:20	350	15	是
11	250	700	2 400	15:30	21:30	370	11	否
12	300	30	2 900	16:00	02:10	300	21	是
13	250	400	2 200	20:30	04:25	200	41	否
14	250	1 000	2 300	09:20	20:40	500	13	是
15	200	100	1 800	21:20	07:30	400	29	否
16	350	150	3 200	22:20	07:40	200	21	是
17	300	80	3 000	23:00	08:00	270	30	否
18	200	900	1 800	23:30	08:20	200	14	是
19	270	200	2 500	00:30	08:40	230	20	是
20	350	260	3 100	01:10	09:00	330	28	否

算例配置为 AMD Ryzen 5 2500U with Radeon Vega Mobile Gfx 2.00 GHz 处理器,内存为 8 GB 的笔记本电脑上进行求解,IBA 算法参数见表 2。

表2 IBA 算法参数  
Tab.2 IBA algorithm parameters

参数	数值	备注
$N$	100.0	种群规模
$T/\text{次}$	300.0	最大迭代次数
$f_{\max}$	1.0	最大频率
$f_{\min}$	0	最小频率
$A_{\max}$	1.0	最大响度
$A_{\min}$	0	最小响度
$r_0$	0.9	脉冲发生率

为更好地验证 IBA 的可行性,设置不同船舶数量的算例集,将所设计的 IBA、基本 BA 与 GA 和 Gurobi 求解模型的结果进行对比,将求解时间限制为 600 s,记录不同算法的最优解和运行时间,得到不同方法求解目标函数值和求解时间分别见图 3 和图 4。

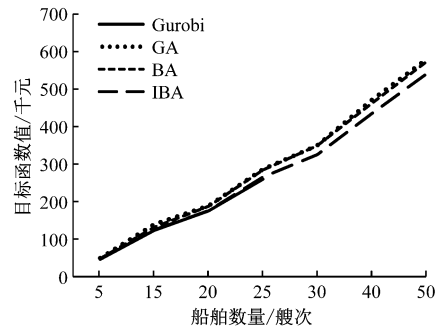


图3 不同方法求解目标函数值

Fig.3 Objective function values of different methods

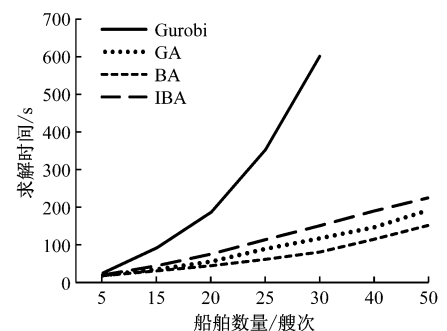


图4 不同方法求解时间

Fig.4 Solving time of different methods

1) 模型可在 600 s 限制时间内求得小规模算例问题,其结果总是优于所有算法(GA、BA、IBA),表明模型在求解中小规模问题的有效性与正确性,但其求解耗时总是最长,且随着算例规模的增大而显著增加。当求解较大规模的算例时,模型已无法完成求解,但所有算法均可在可接受时间内完成求解。与传统的 GA 相比,BA 及 IBA 均找到了更好的结果,特别是 IBA,其与模型精确解的偏差明显优于 BA 和 GA,说明算法改进的有效性。

2) 在解的质量上,当模型可精确求解时,其结果总是最优,而 IBA 求解结果与其偏差很小,最大仅为 2.37%,明显优于 GA 与 BA 对应结果。对于所有算例而言,IBA 求解结果也总是优于 GA 与 BA,进一步说明改进算法的有效性。在求解时间方面,3 种不同算法的求解耗时差距不大,BA 总是耗时最短,但优势较小。IBA 通过改进 BA 得到,增加寻优流程,因此求解耗时的少量增加。综合来看,IBA 具有更好的求解性能,总能找到更高质量的解,且求解耗时在可接受范围之内。

为进一步说明算法改进带来的求解耗时增加和结果质量提升之间的经济性,基于 IBA 和 BA 求解结果,计算算法改进前后目标函数值的优化幅度以

及求解时间的增加幅度,IBA 由于增加寻优流程,求解时间相比于 BA 有较小幅度地增加。但由于 IBA 耗时最大仅为 224.8 s,因此,从具体时间来说,增加的求解耗时并不长,相差均约在 10 s。而对于目标函数值而言,其优化幅度总是大于求解时间的增加幅度,且由于其数值较大,因此带来的成本节约很可观,体现出很好的经济性。综上,算法改进带来的额外计算开销很小,但却可找到成本节约更多的方案,进一步体现出 IBA 改进策略的有效性。

#### 4.3 岸电改造比例分析

由于码头泊位岸电改造的成本比较高,1 条岸线的成本可达到约 2 500<sup>[15]</sup> 万元,很多码头都是逐步完成泊位的岸电改造,导致出现船舶和泊位的岸电改造比例不匹配的情况。基于以上实际场景,将码头泊位的岸电改造比例依次设置为 40%、60%、80% 和 100% 来进行分析。将船舶数量设置为 10~50、船舶岸电改造比例设置为 0~100%,按照 20% 的比例梯度进行试验,对码头泊位岸电改造比例和船舶岸电改造比例之间的匹配关系进行分析。采用 IBA 对所有算例求解得到的结果见表 3。为更直观地显示数据的变化趋势,将表 3 中结果绘制见图 5~图 8。

表 3 泊位岸电改造与船舶岸电改造比例对比分析

Tab. 3 Comparative analysis of shore power transformation proportion between berth and ship

泊位岸电改造比例/%	船舶岸电改造比例/%	船舶数量/艘次				
		10	20	30	40	50
40	0	207 401.9	308 722.9	425 051.2	532 303.6	622 450.3
	20	156 764.5	236 337.6	343 646.7	435 326.3	536 737.4
	40	121 053.3	191 317.5	275 188.8	384 286.9	479 356.6
	60	112 136.2	181 974.0	267 305.5	371 645.1	462 985.7
	80	110 344.1	174 423.6	260 051.2	361 293.5	457 179.8
	100	110 187.4	170 974.9	258 094.6	358 233.6	454 151.6
60	0	217 401.9	308 722.9	425 051.2	532 303.6	622 450.3
	20	166 764.5	236 337.6	343 646.7	435 326.3	536 737.4
	40	131 053.3	191 317.5	275 188.8	384 286.9	479 356.6
	60	100 136.2	161 974.2	242 305.5	341 645.1	448 985.7
	80	99 344.1	151 423.6	231 051.2	331 293.5	447 179.8
	100	99 017.4	150 974.9	230 094.6	329 233.6	445 151.6
80	0	217 401.9	308 722.9	425 051.2	532 303.6	622 450.3
	20	166 764.5	236 337.6	343 646.7	435 326.3	536 737.4
	40	131 053.3	191 317.5	275 188.8	384 286.9	479 356.6
	60	110 136.2	161 974.2	242 305.5	337 645.1	448 985.7
	80	95 044.1	141 423.6	215 051.2	310 293.5	421 019.8
	100	94 917.4	140 974.9	214 094.6	310 033.6	420 151.6
100	0	217 401.9	308 722.9	425 051.2	532 303.6	622 450.3
	20	166 764.5	236 337.6	343 646.7	435 326.3	536 737.4
	40	131 053.3	191 317.5	275 188.8	384 286.9	479 356.6
	60	110 136.2	161 974.2	242 305.5	337 645.1	445 985.7
	80	95 044.1	141 423.6	215 051.2	310 293.5	410 219.8
	100	87 917.4	129 824.9	190 094.6	280 033.6	380 151.6

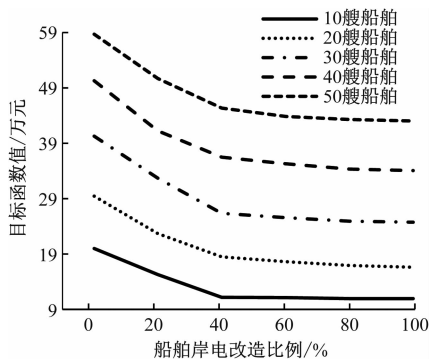


图5 泊位岸电改造比例为40%结果

Fig. 5 The proportion of shore power transformation in berth is 40%

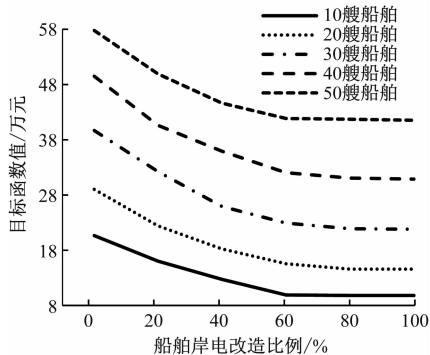


图6 泊位岸电改造比例为60%结果

Fig. 6 The proportion of shore power transformation in berth is 60%

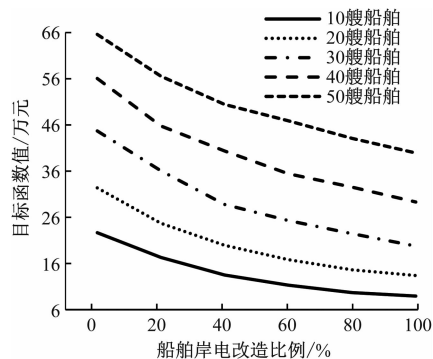


图7 泊位岸电改造比例为80%结果

Fig. 7 The proportion of shore power transformation in berth is 80%

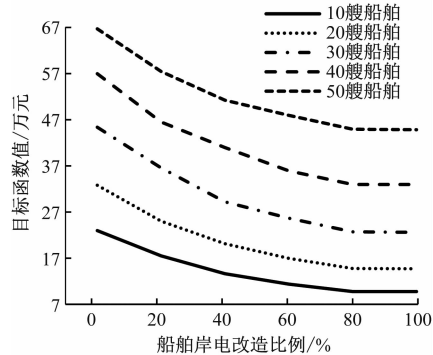


图8 泊位岸电改造比例为100%结果

Fig. 8 The proportion of shore power transformation in berth is 100%

由表3、图5~图8可知:不管在哪种码头泊位岸电比例下,码头成本总是随着船舶岸电改造比例的增加而减少,这是由于船舶使用岸电有效减少碳排放成本,且该变化趋势与进港靠泊船舶的数量无关;当船舶岸电改造比例小于泊位岸电改造比例时,随着船舶岸电改造比例的提升,码头成本下降的趋势明显;当船舶岸电改造比例上升到与泊位岸电改造比例一致时,码头成本下降趋势平缓且基本保持不变。这是由于受到码头泊位岸电使用的限制,到港船舶虽然完成岸电改造,但想停靠到有岸电的泊位上时必须先在锚地等待其他船舶离港后方可进港靠泊,此时碳成本的降低换来等待成本的增加,从而带来了码头成本下降趋势平缓。因此,只注重环境效益而不重视作业效率并不总是最佳选择,强制船舶使用岸电并不总是最优选择,只有当码头泊位与船舶岸电改造比例匹配时才能实现最优成本节约。同时,码头应根据船舶岸电的改造情况逐步完成岸电改造,保证供需平衡,避免和减少岸电资源的浪费。

## 5 结束语

本文考虑岸电分配对集装箱码头泊位调度问题

进行研究,建立包含船舶在港成本、岸电使用成本和碳排放成本在内的码头成本最小化为目标的数学模型。为实现问题高效寻优,针对BA易陷入局部最优,提出带停滞变异策略的IBA进行求解。以某集装箱码头到港船舶数据进行试验,将IBA、BA与GA以及Gurobi精确求解模型结果进行对比,验证所建模型和改进算法的有效性。同时,通过对船舶岸电改造比例进行灵敏度分析发现,当船舶和泊位的岸电改造比例不平衡时不可强制使用岸电,船舶岸电改造和泊位的岸电改造要协同并进,避免造成岸电资源的浪费。后续研究中,可考虑岸桥、场桥和自动化导引车等其他作业资源的协同调度优化,提高码头的整体作业效率。

## 参考文献

- [1] ZIS T P. Prospects of cold ironing as an emissions reduction option [J]. Transportation Research Part A, 2019, 119:82-95.
- [2] DANIEL H, TROVO J, WILLIAMS D. Shore power as a first step toward shipping decarbonization and related policy impact on a dry bulk cargo carrier [J].

- eTransportation, 2022(11):312-319.
- [3] 王宇婷,唐国磊,于菁菁,等. 船舶岸电系统在集装箱码头的应用[J]. 水运工程,2017(9):104-107.  
WANG Y T, TANG G L, YU J J, et al. Application of ship shore power system in container terminal [J]. Marine Traffic Engineering, 2017(9):104-107.
- [4] 刘磊磊,郭旭,丁健,等. 船舶岸电温室气体自愿减排方法学研究[J]. 水道港口, 2019, 40(4):445-449.  
LIU L L, GUO X, DING J, et al. Methodological study on voluntary greenhouse gas emission reduction of ship shore power station[J]. Waterway Port, 2019, 40(4):445-449.
- [5] NISHIMURA E, IMAI A, PAPADIMITRIOU S. Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 131(2):282-292.
- [6] 史立,管明静,郭金鑫. 考虑潮汐因素的连续泊位和岸桥集成分配研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2018, 37(4):116-120.  
SHI L, GUAN M J, GUO J X. Study on continuous berths and integrated quay and bridge allocation considering tidal factors [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2018, 37(4):116-120. (in Chinese)
- [7] CORRECHER J F, BOSSCHE V D, ALVAREZ-VALDES R, et al. The berth allocation problem in terminals with irregular layouts [J]. European Journal of Operational Research, 2019, 272(3):1096-1108.
- [8] 焦小刚,郑斐峰,徐寅峰. 考虑泊位疏浚的连续型泊位和动态岸桥联合调度[J]. 运筹与管理, 2020, 29(2):47-57.  
JIAO X G, ZHENG F F, XU Y F. Continuous berths and dynamic shore-bridge combined scheduling considering berth dredging[J]. Operation research and management, 2020, 29(2):47-57. (in Chinese)
- [9] 闵德权,张志铎,张伟航. 基于港口环境效益的岸电与泊位联合分配优化研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(1):83-89.  
MIN D Q, ZHANG Z D, ZHANG W H. Research on optimization of shore power and berth allocation based on port environmental benefits [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2023, 42(1):83-89. (in Chinese)
- [10] 李俊,刘志雄,张煜. 件杂货码头连续泊位调度与货场分配[J]. 交通运输系统工程与信息,2020,20(1):175-182.  
LI J, LIU Z X, ZHANG Y. Continuous berth scheduling and yard allocation in cargo terminal[J]. Transportation systems engineering and information, 2020, 20(1):175-182. (in Chinese)
- [11] YANG X S. A new metaheuristic bat inspired algorithm [C]. Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010). Berlin Heidelberg: Springer Publications,2010:65-74.
- [12] 李广强,张肇宝,徐晨. 一种改进的并行蝙蝠算法[J]. 计算机应用与软件,2021,38(8):259-266.  
LI G Q, ZHANG Z B, X C. An improved parallel bat algorithm [J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(8):259-266. (in Chinese)
- [13] 冯艳红,刘建芹,贺毅朝. 基于混沌理论的动态种群萤火虫算法[J]. 计算机应用,2013,33(3):796-799.  
FENG Y H, LIU J Q, HE Y Z. Dynamic population firefly algorithm based on chaos theory [J]. Computer Application, 2013,33(3):796-799.
- [14] 康锰,许峰. 多进化策略自适应免疫多目标进化算法[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2019,39(5):43-47.  
KANG M, XU F. Multi-evolutionary strategy adaptive immune multi-objective evolutionary algorithm [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 39(5):43-47. (in Chinese)
- [15] 强新星. 沿海船舶靠港使用岸电现状分析与使用率提升对策研究—以M港为例[J]. 交通建设与管理, 2023(5):132-134.  
QIANG X X. Analysis of the current situation of coastal ships using shore power at port and research on countermeasures to improve its utilization rate—a case study of Port M [J]. Traffic construction and management, 2023(5):132-134. (in Chinese)