

不规则型泊位与岸桥集成分配问题的优化建模和算法研究

赵 姣¹, 胡 卉¹, 袁华智²

(1. 长安大学运输工程学院, 西安 710064; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 兰州 730050)

摘 要: 泊位和岸桥作为港口的有限资源, 对其进行优化分配有利于提高港口的作业效率, 加快船舶的离港时间. 由于地理条件的限制, 一些港口的泊位线不呈一条直线型, 而是呈“L”或“F”等形状, 岸桥无法在这些不连续的泊位线上自由移动, 该类泊位无法按照连续型泊位分配问题进行优化, 而按照离散泊位进行优化会极大浪费泊位线的空间. 本文针对不规则型泊位和岸桥集成分配问题, 根据船舶停靠的相对位置和时间建立了线性规划数学模型, 结合问题特性和变量关系, 提炼出三个有效不等式, 并采用 CPLEX 软件对加入不等式前后的模型分别进行求解. 针对问题规模增加后, CPLEX 求解时间较长的问题, 本文采用了粒子群算法进行求解, 并提出具有随机搜索策略的速度更新方式, 避免算法陷入局部最优. 实验结果表明, 加入有效不等式后, 模型的求解时间降低了 83.39%; 改进的粒子群算法比标准粒子群算法获得的优化解降低了 25.21%.

关键词: 不规则型泊位; 泊位分配; 岸桥分配; 集成优化; 线性规划; PSO 算法

中图分类号: U492 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2022.042001

Research on optimized modelling and algorithm of integrated allocation of irregular berth and quay crane

ZHAO Jiao¹, HU Hui¹, YUAN Hua-Zhi²

(1. School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: As the limited resources of the port, the optimal allocation of berths and quay cranes is conducive to improve the operation efficiency of the port and speed up the departure time of ships. Due to the limitation of geographical conditions, the berth lines of some ports are not linear, but show "L" or "F" shape, such as quay cranes can not free to move on these discontinuous berth, this kind of berth allocation problem cannot be optimized based on the continuous berth allocation problem, and the space of the berth line will be wasted based on the discrete berth allocation problem. For the irregular berths and quay crane integrated distribution problem, according to the relative location and time of arrived ships, a mixed linear programming mathematics models is established, three valid inequalities are extracted by analyzing the features and variable relationship, and CPLEX software is used to solve the model. With the increasing of the problem size, the solving time is increasing. Therefore, the improved particle

收稿日期: 2022-02-19

基金项目: 陕西省自然科学基金青年项目(2020JQ-399); 陕西省重点研发计划一般项目(2021GY-184); 兰州理工大学红柳优秀青年人才支持计划项目; 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102229304)

作者简介: 赵姣(1983—), 女, 辽宁沈阳人, 讲师, 博士, 主要研究方向为物流优化, 工业流程优化等. E-mail: jiaozhao@chd.edu.cn

通讯作者: 胡卉. E-mail: huhui@chd.edu.cn

swarm algorithm is proposed, a new velocity updating formula with random search strategy is used to avoid falling into local optimum. The experiment results show that the average solving time is reduced by 83.23% by adding the valid inequalities. The average result obtained by the improved particle swarm algorithm is reduced by 25.21% than that of the standard particle swarm algorithm. It is proved that the improved particle swarm optimization algorithm proposed in this paper is effective in solving the problem of irregular berth and quay crane allocation.

Keywords: Irregular berth; Berth allocation; Quay crane allocation; Integrated optimization; Linear programming; PSO algorithm

1 引言

国际物流过程中集装箱港口的运营条件、服务质量、管理水平等均会影响到港口运输物流市场的竞争实力,而泊位和岸桥等港口资源的高效利用是提升各集装箱港口核心竞争力的主要因素.通常,针对每艘到港船舶均会有一个预设的离港时间,如果未能在预计离港时间之前完成船舶装卸任务,港口将缴纳滞期金.因此,如何通过泊位、岸桥等资源的合理分配,缩短船舶在港停泊时间,以及提高港口作业效率,进而为更多船舶提供高效、快捷的靠泊装卸服务是集装箱港口运营管理过程中重点关注的问题.

针对泊位分配和岸桥分配问题,已有学者开展了大量研究,并在提升集装箱港口作业效率方面取得了较大进展^[1-5].在泊位分配问题研究方面,现有文献主要研究离散型和连续型泊位分配问题.离散型泊位分配问题是将泊位看作若干相互独立的泊位,且每个泊位在同一时间段内只能停靠一艘船,如图 1 所示.离散型泊位分配问题的研究方面,张新宇等^[1]以总等待时间最少为目标,建立了考虑两艘船的离散泊位分配问题数学模型,设计了模拟退火多种群遗传算法进行求解.郑红星等^[3]针对考虑潮汐影响的离散泊位分配问题进行了研究,并采用禁忌搜索算法进行求解. Bacalhau 等^[4]针对动态离散泊位分配问题进行研究,并针对此离散问题提出了一种混合遗传算法进行求解.泊位分配问题是提高港口运营效率的一个重要因素,与之相邻的岸桥优化问题则是确保快速装卸作业的另一个关键因素.因此,近年来,如何对有限的泊位、岸桥资源进行集成优化的问题受到国内外学者的广泛关注. Song 等^[5]针对离散泊位分配问题和岸桥调度问题进行了研究,其中所有的船舶都在调度计划开始前到达港口,每个泊位一次只能为一艘船服务,并为该问题提供一个多种方法集成的综合解决方案.

连续型泊位分配问题则是把泊位区看作连续的一段空间,船舶可在保持安全距离的情况下临近停泊,如图 2 所示.范志强^[6]针对连续泊位分配问题进行了优化建模,并设计了遗传算法进行求解.王军等^[7]采用动态学习方法对离散泊位分配方案进行了优化. Guo 等^[8]针对考虑天气情况下的连续泊位分配问题进行研究,并设计了粒子群算法进行求解.与离散泊位分配问题类似,连续型泊位和岸桥集成优化问题已吸引了众多学者的关注. Hendriks 等^[9]研究了一种联合运营的连续泊位分配问题,在该问题中,集装箱运营商为同一港口内的多个公司提供集装箱装卸物流服务,一个泊位可以服务多艘船.吴迪等^[10]讨论了连续型泊位与岸桥集成分配问题,并设计了模拟植物生长交替进化算法进行求解. Wawrzyniak 等^[11]研究了连续型泊位和岸桥分配问题,并设计了启发式算法进行求解. Rodrigues 等^[12]针对连续型泊位和岸桥分配问题进行研究,设计了一种精确算法进行求解.

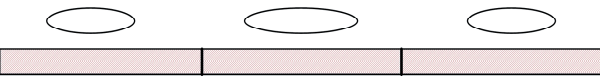


图 1 离散型泊位分配问题
Fig. 1 The discrete berth allocation problem

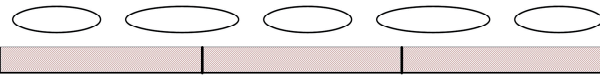


图 2 连续型泊位分配问题
Fig. 2 The continuous berth allocation problem

此外,在一些空间受限的集装箱港口(如比利时安特卫普港和新加坡港等),泊位线往往不呈一条直线,这些集装箱港口的泊位线,包含若干条直线,一条直线上包含多个泊位,即:同时包含离散和连续两种泊位分配情况,如图 3 所示.以往研究中对于空间受限的泊位分配问题研究较少. Imai 等^[13]最早针对锯齿型泊位分配问题进行了优化研究,在此基础上,Imai 等^[14]考虑了由平行泊位线

组成航道情况下的泊位分配问题. Correcher 等^[15]针对不规则布局的泊位分配问题进行研究, 并设计了启发式算法进行求解.

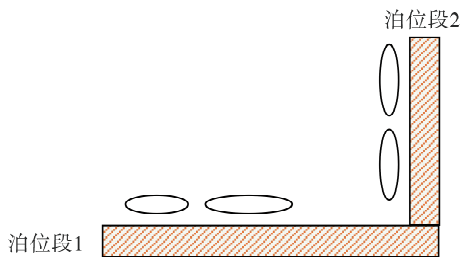


图 3 不规则型泊位分配问题

Fig. 3 The irregular berth allocation problem

针对不规则型泊位和岸桥分配问题的特点, 将一条直线上的泊位定义为一个“泊位段”, 每个泊位段有多个泊位和岸桥. 当研究的港口只有一个泊位段, 且每个泊位段内包含多个泊位时, 则该问题为连续型泊位和岸桥分配问题; 当研究的港口包含多个泊位段, 且每个泊位段内只包含一个泊位时, 则该问题为离散型泊位和岸桥分配问题. 综上, 离散和连续泊位和岸桥分配问题均可看作本文研究的不规则型泊位和岸桥分配问题的特殊情况. 因此, 已有的针对离散或连续型泊位和岸桥集成优化的方法, 并不适用于不规则型泊位和岸桥分配问题. 不管是直线型泊位或是不规则型泊位, 当船舶在分配的泊位停泊后, 均需由岸桥进行装卸作业, 岸桥分配的数量直接影响船舶的装卸效率, 因此有必要将不规则型泊位分配和岸桥分配进行集成优化. 而现有的不规则型泊位分配问题的研究, 很少同时考虑岸桥分配问题, 且未对模型进行优化, 导致建立的数学模型无法在短时间内获得最优解. 为解决上述问题, 本文首先建立了两种不规则型泊位和岸桥集成分配问题的数学模型, 并对两种数学模型的求解效果进行了比较和分析; 其次, 提炼并加入了三个有效不等式, 进一步改进了建立的数学模型; 最后, 设计了改进的粒子群算法对不规则型泊位和岸桥集成分配问题进行了求解, 从而提高不规则型泊位类型港口的作业效率, 降低运营成本.

2 问题描述与模型构建

2.1 问题描述

已知计划期内若干艘将入港船舶的长度、预计到港时间以及所需要的最大和最小岸桥数目, 所有船舶必须在到港后开始停靠泊位并进行装卸作业. 需决策每艘船的停靠泊位段, 以及在该泊位段上的

停泊位置、时间和岸桥, 使得计划期内所有船舶在港停泊时间之和最小. 某一不规则型泊位和岸桥分配结果如图 4 所示. 每个矩形左下角的“数字”表示船号. 每个矩形的左下角和左上角所在纵坐标的位置分别表示序号中对应船舶在分配到的泊位装(卸)货的开始时间和结束时间. 同样, 每个矩形的左下角和右下角对应的横坐标位置分别表示序号中对应船舶在分配到的泊位的起始位置和结束位置. 在图 4 中, 带虚线的矩形中的数字表示分配给每艘船的岸桥编号.

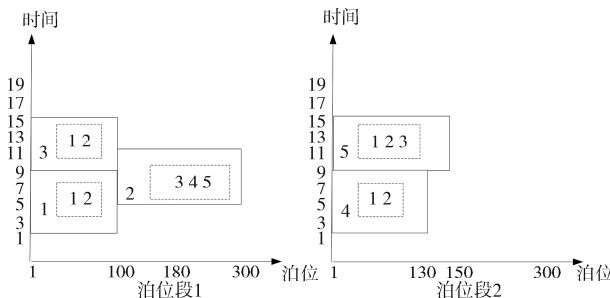


图 4 不规则型泊位和岸桥分配方案

Fig. 4 An example of the irregular berth and quay crane allocation plan

2.2 数学模型

考虑船舶之间的相对位置和服务时间, 基于以下参数和决策变量建立不规则泊位和岸桥集成分配问题的数学模型.

已知参数如下, T 为计划期内时间单位的集合, $T = \{1, \dots, K\}$, 其中 K 是计划期间的的时间单位总数; Ω 为计划期内来港船舶的集合, $\Omega = \{1, \dots, N\}$, 其中 N 为计划期内来港船舶总数; Ψ 为泊位段集合, $\Psi = \{1, \dots, M\}$, 其中 M 是泊位段的总数; Q_j 为泊位段 j 的岸桥数; P_{ijc} 为船 i 在泊位段 j 上分配 c 台岸桥时的卸载时间; l_i 为船 i 的长度; L_j 泊位段 j 的长度; ϵ_i 为可用于 i 船的港口岸桥的最大数量; θ_i 为可用于 i 船的港口岸桥的最小数量; r_i 为船 i 的到达时间.

我们将决策变量定义如下, $z_{ij}^x = 0, 1$ 表示如果船 i 和船 i' 在同一个泊位段 j 上, 并且船 i 在船 i' 的左侧, 则 $z_{ij}^x = 1$, 否则 $z_{ij}^x = 0$; $z_{ij}^y = 0, 1$ 表示如果船 i 和船 i' 在同一个泊位段 j 上, 并且船 i 在船 i' 的下方, 则 $z_{ij}^y = 1$, 否则 $z_{ij}^y = 0$; $y_{ij} = 0, 1$ 表示如果船 i 在泊位段 j 上进行装卸作业, 则 $y_{ij} = 1$, 否则 $y_{ij} = 0$; $m_{ijc} = 0, 1$ 表示如果在泊位段 j 分配给船 i 的岸桥数为 c , 则 $m_{ijc} = 1$, 否则 $m_{ijc} = 0$; x_{ij}^s 表示船 i 在泊位段 j 上的起始停泊位置; x_{ij}^e 表示船 i 在泊

位段 j 上的开始卸载时间; x_{ij}^x 表示船 i 在泊位段 j 上的开始岸吊号; D_i 表示船 i 的离港时间.

建立不规则型泊位和岸桥集成分配问题的数学模型:

$$\min \sum_{i=1}^N (D_i - r_i) \quad (1)$$

$$x_{ij}^x - (z_{ij}^x - 1)M \geq x_{ij}^x + l_i, \quad \forall i \in \Omega, i' \in \Omega \setminus \{i\}, j \in \Psi \quad (2)$$

$$x_{ij}^y - (z_{ij}^y - 1)M \geq x_{ij}^y + P_{ijc}, \quad \forall i \in \Omega, i' \in \Omega \setminus \{i\}, j \in \Psi \quad (3)$$

$$z_{ij}^x + z_{ij}^y + z_{ij}^z + z_{ij}^w \geq 1, \quad \forall i \in \Omega, i' \in \Omega \setminus \{i\}, j \in \Psi \quad (4)$$

$$z_{ij}^x + z_{ij}^y \leq 1 + M(2 - y_{ij} - y_{i'j}), \quad \forall i \in \Omega, i' \in \Omega \setminus \{i\}, j \in \Psi \quad (5)$$

$$z_{ij}^y + z_{ij}^z \leq 1 + M(2 - y_{ij} - y_{i'j}), \quad \forall i \in \Omega, i' \in \Omega \setminus \{i\}, j \in \Psi \quad (6)$$

$$x_{ij}^y + m_{ijc} \cdot P_{ijc} = D_i, \quad \forall i \in \Omega, j \in \Psi \quad (7)$$

$$x_{ij}^z + c \cdot m_{ijc} \leq x_{ij}^z + M(1 - z_{ij}^z), \quad \forall i \in \Omega, j \in \Psi \quad (8)$$

$$x_{ij}^z + c \cdot m_{ijc} \leq Q_j, \quad \forall i \in \Omega, j \in \Psi \quad (9)$$

$$\sum_{j \in \Psi} y_{ij} = 1, \quad \forall i \in \Omega \quad (10)$$

$$x_{ij}^x + l_i - 1 \leq L_j, \quad \forall i \in \Omega, j \in \Psi \quad (11)$$

$$x_{ij}^y \geq r_i, \quad \forall i \in \Omega, j \in \Psi \quad (12)$$

$$\theta_i \leq \sum_{j \in \Psi} \sum_{c=1}^{Q_j} bm_{ijc} \leq \varepsilon_i, i \in \Omega, j \in \Psi \quad (13)$$

$$D_i \leq K \forall i \in \Omega \quad (14)$$

$$y_{ij}, z_{ij}^x, z_{ij}^y \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \Omega, i' \in \Omega \setminus \{i\}, j \in \Psi \quad (15)$$

$$D_i \geq 0, x_{ij}^x \geq 0, x_{ij}^y \geq 0, m_{ijc} \geq 0, \quad \forall i \in \Omega, j \in \Psi \quad (16)$$

约束条件(2)和(3)与 z_{ij}^x 和 z_{ij}^y 的定义有关. 当 z_{ij}^x 或 $z_{ij}^y = 1$ 时, 约束条件(4)和(5)分别表示了它们定义上的要求. 反之, 由于这个不等式总是可以满足的, 因此这两个约束就失去了它们的作用. 当两艘以上船同时占用某个长度段时, 就造成了各船之间的重叠现象. 这种情况可以表示为 $z_{ij}^x + z_{ij}^y + z_{ij}^z + z_{ij}^w = 0$, 这就违反了约束条件(4). 约束条件(5)和(6)表示同一泊位段上的两艘船之间的位置关系. 约束条件(6)确保每艘船在某个泊位段进行装卸时, 所占用的泊位段长度必须连续. 约束条件(7)保证每艘船必须在不间断的连续时间段内在某一泊位段上进行装卸操作. 该约束即表明不允许泊位段变更的情况发生. 约束条件(8)和(9)保证为每艘船服务的岸桥必须是同一个泊位段上

的相邻岸桥; 约束条件(10)确保一艘船必须且只能在一个泊位段上进行装卸操作. 约束条件(11)表明每艘船只有整个船身都完全进入了港口后才可以开始它的装卸操作. 约束条件(12)保证每艘船在到达港口后才可以开始装卸操作. 约束条件(13)定义了可分配给每艘船的最大和最小港口岸桥数量. 约束条件(14)保证了所有到港船舶均需在计划期内服务结束. 约束条件(15)和(16)为变量约束.

2.3 有效不等式

为进一步提高 2.2 部分不规则型泊位和岸桥集成分配问题数学模型的求解效果, 结合问题特性和变量关系, 提炼出该模型的三个有效不等式如下.

$$x_{ij}^x + M(1 - y_{ij}) \geq 0, \quad \forall i \in \Omega, j \in \Psi \quad (17)$$

$$x_{ij}^y + M(1 - y_{ij}) \geq 0, \quad \forall i \in \Omega, j \in \Psi \quad (18)$$

$$x_{ij}^z + M(1 - y_{ij}) \geq 0, \quad \forall i \in \Omega, j \in \Psi \quad (19)$$

约束条件(17)~(19)分别建立了 x_{ij}^x 、 x_{ij}^y 和 x_{ij}^z 与 y_{ij} 之间的相互关系, 即: 只有当船舶 i 被分配给泊位段 j 停靠时, 才会在该泊位段上分配停泊位置、停泊时间以及对应的装卸岸桥.

3 算法设计

粒子群算法是由 Eberhart 等^[16]提出的一种基于种群的智能优化算法. 由于其收敛快速以及需要设置的参数较少等特点, 粒子群算法已经得到了广泛的应用^[17-19]. 在粒子群算法中, 种群由若干粒子组成, 且每个粒子在每次迭代中都有一个位置和速度向量, 位置决定解的质量, 而速度决定粒子在下一代的移动方向. 粒子的速度和位置更新公式如下.

$$v_{ik}^{t+1} = v_{ik}^t + c_1 r_1 (x_{pbest_{ik}}^t - x_{ik}^t) + c_2 r_2 (x_{gbest_{ik}}^t - x_{ik}^t) \quad (20)$$

$$x_{ik}^{t+1} = x_{ik}^t + v_{ik}^t \quad (21)$$

在式(20)和式(21)中, v_{ik}^t 和 x_{ik}^t 分别表示第 i 个粒子在第 t 次迭代中, 第 k 维的速度和位置值. c_1 和 c_2 是学习因子, r_1 和 r_2 是在区间 $[0, 1]$ 随机产生的值. $x_{pbest_{ik}}^t$ 是直到第 t 次迭代, 第 i 个粒子找到的最好位置中第 k 维的位置值. $x_{gbest_{ik}}^t$ 代表直到第 t 次迭代, 所有粒子找到的最好位置中第 k 维的位置值. 可以看出, 粒子群算法的迭代主要向每个粒子的最好位置, 以及整个种群的最好位置学习, 导致算法的收敛较快, 但是容易陷入局部最优, 为了避免陷入局部最优, 在算法迭代过程中的粒子速度更新过程中, 从种群中随机选出粒子 a 和 b , 并让算法向

每个粒子的最好位置,以及整个种群的最好位置学习的同时也向随机粒子学习,并将式(20)作如下更新:

$$v_{ik}^{t+1} = \omega^t v_{ik}^t + c_1 r_1 (x_{pbest_{ik}}^t - x_{ik}^t) + c_2 r_2 (x_{gbest_{ik}}^t - x_{ik}^t) + c_3 r_3 (x_{ik}^t - x_{ik}^t) \quad (22)$$

在式(22)中, c_3 为随机学习因子, x_{ik}^t 和 x_{ik}^t 分别表示第 a 和第 b 个粒子在第 t 次迭代中,第 k 维的位置值.

3.1 解的表示和初始解的生成

由于离散和连续泊位和岸桥分配问题均可看作本文研究的不规则型泊位和岸桥分配问题的特殊情况,即:当研究的港口只有一个泊位段,且每个泊位段内包含多个泊位时,则该问题为连续型泊位和岸桥分配问题;当研究的港口包含多个泊位段,且每个泊位段内只包含一个泊位时,则该问题为离散型泊位和岸桥分配问题. 因此,不同于离散型泊位和岸桥分配问题的粒子群算法,针对不规则泊位和岸桥分配问题进行研究,同一时段内,每个泊位段不只停留一艘船,而是可以停留多艘船,在粒子群算法解码过程中,不仅需要决策船舶的停靠泊位,还需要决策船舶在分配的泊位段上的具体停泊位置;不同于连续型泊位和岸桥分配问题的粒子群算法,针对不规则泊位和岸桥分配问题进行研究,不仅包含一个泊位段,而是每个泊位段均需决策哪些船舶在该泊位段上停泊,以及具体的停泊位置. 即:不规则型泊位和岸桥集成调度问题需要决策每艘船停靠的泊位段,以及在该泊位段上的停泊位置、停泊时间和分配的岸桥号. 首先采用粒子群算法进行泊位段的分配和岸桥数目的分配,然后再设计启发式对船舶的停泊位置和停泊时间进行分配,从而得到不规则型泊位和岸桥集成分配问题的优化方案.

定义 1 $N=|\Omega|$,代表需要停靠的船舶数目,用一个 $2N$ 维的序列表示一个解. 其中第一个 N 维代表为相应的船舶分配的泊位段的编号,每一维的值都是 0 到 M 之间的一个实数值. 第 k 维的值 X_k 表示船舶 i 被分配给泊位段 $\lceil X_i \rceil$ 停泊并进行装卸作业. 第二个 N 维代表每艘船被分配的岸桥数目,每一维的值都是 0 到 $q' = \min(\epsilon_i, Q_j)$ 之间的一个实数值,其中 Q_j 为泊位段 j 上的岸桥数量, ϵ_i 为船舶 i 的最大服务岸桥数量. 第 $N+k$ 维的值 X_{k+N} 表示船舶 i 在对应的泊位段上被分配的岸桥数量. 图 5 中为 3 个泊位段,每个泊位段有 3 台岸桥,到港 5 艘船的粒子群算法初始解. 第一个 N 维代表

为每艘船舶分配的泊位段的编号,将图中前 5 个随机生成的实数向上取整,得到 1~5 号船舶的停靠泊位段分别为 1,3,2,2,1;第二个 N 维代表每艘船被分配的岸桥数目,将图中后 5 个随机生成的实数向上取整,得到 1~5 号船舶的分配的岸桥数量分别为 1,3,2,3,2. 分配每艘船舶所在的泊位段后,将每个泊位段上的船舶按照到达时间从小到大进行排序,依次计算每艘船的停泊位置和停泊时间,以及分配的岸桥. 每一艘船舶分配停泊位置和岸桥后,计算该泊位段当前剩余空闲长度和空闲岸桥数量,当剩余泊位段长度不满足下一艘船的长度要求,或者剩余岸桥数目少于下一艘船所需要的最小岸桥数目时,计算当前占用该泊位段的所有船舶服务结束时间,当占用该泊位段的所有船舶服务结束后,下一艘船开始接受服务.

采用随机的方式产生初始解以保证解的多样性. 每一个粒子的第一个 N 维在 0 到 M 之间随机产生,第二个 N 维在 0 到 Q_j 之间随机产生.

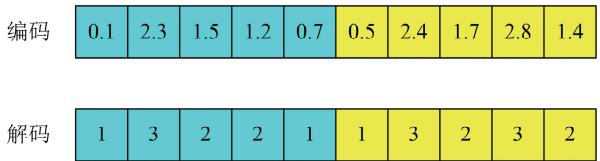


图 5 粒子编码和解码示意图
Fig. 5 Particle coding and decoding diagram

3.2 适值计算及算法终止条件

适应度值根据原始目标函数值计算,一个粒子对应的适应度值为:计划期内所有到港船舶在港停泊时间之和.

判断当前迭代次数是否达到最大迭代次数(Max_iteration),若是,停止迭代,选择适应度值最小的粒子所对应的解作为不规则型泊位和岸桥集成分配问题的优化解输出;否则,继续进行迭代,直到达到最大迭代代数为止.

3.3 粒子群求解过程

基于上述描述,下面给出粒子群算法求解不规则型泊位和岸桥集成分配问题的过程.

步骤 1:初始化种群中的所有粒子,得到泊位和岸桥分配方案. 迭代次数设为 1.

步骤 2:对于每一个粒子,根据分配的泊位段和岸桥数目,计算每艘船所在泊位段的停泊位置、停泊时间以及服务岸桥号.

步骤 3:计算每个粒子的适应度值.

步骤 4:更新每个粒子的最好位置值以及种群

的最好位置值.

步骤 5:根据式(22)和式(21)更新每一个粒子的速度和位置值.

步骤 6:如果达到最大迭代次数,算法停止;否则,转到步骤 2.

4 计算实验

4.1 算例产生

采用 CPLEX 12.5 软件求解不规则型泊位和岸桥集成分配问题的最优解,但对船舶数较多问题的求解时,CPLEX12.5 无法在 1 h 内获得问题的可行解,因此采用 C++ 编码的 PSO 算法,所有实验在一台 cpu 3.2 GHz, 4 GB 内存的计算机上进行. 结合港口实际情况和文献[20]的数据,设定每个泊位段长度为 300 m,岸桥数目为 5 台,到港船舶的长度在 $l_i = U[80, 300]$, $i = 1, 2, \cdots, N$. 每艘船舶的到港时间和一台岸桥的服务时间分别服从 $[1, 100]$ 和 $[10, 60]$ 的均匀分布. 服务每艘船舶的最大和最小岸桥数目为 $\epsilon_i = l_i/50$, $\theta_i = 1 + 0.3\epsilon_i$. 将每个泊位段均看作 50 m 为 1 个单位长度,同时将船舶也看作 50 m 为 1 个单位长度,将实际泊位段和船舶长度转换为若干单位长度,从而针对不规则型泊位和岸桥集成分配问题进行求解,最后将求解到的结果再乘以 50 转化为泊位段和船舶的实际长度,既加快了 CPLEX 的求解时间,同时也基本不影响原问题的优化结果.

4.2 计算结果

采用 CPLEX 软件求解泊位段为 2,船舶数为 5 的 8 个算例,针对原模型(记为 M)和加入有效不等式后的模型(记为 M')的求解结果如表 1 所示,其中,Gap = (模型 M 求解时间-模型 M' 求解时

间) $\times 100\%$ /模型 M 求解时间. 针对加入有效不等式前后的模型进行求解均获得了最优解,从表 2 可以看出,加入有效不等式后,模型的平均求解时间减少了 83.39%.

表 1 加入有效不等式前后 CPLEX 求解模型 M 的结果对比
Tab.1 The comparison on the results of model 2 before and after added valid inequalities solved by CPLEX

泊位段数	船舶数	目标函数值		求解时间/s		Gap/%
		模型 M	模型 M'	模型 M	模型 M'	
3	8	122	122	15.78	0.57	96.39
	9	136	136	28.46	0.82	97.12
	10	164	164	42.38	3.48	91.79
	11	197	197	52.78	5.26	90.03
	12	206	206	1145.63	131.58	88.51
	13	223	223	1397.94	117.78	91.57
	14	233	233	3457.86	760.44	78.01
	15	/	/	/	/	/
均值		183	183	1513.55	253.77	83.39

以船舶数目为 8 的算例为例,该算例中的已知数据见表 2,不规则型泊位和岸桥集成分配的优化方案如图 6 所示. 船舶 3,4 和 6 被分配到泊位段 1;船舶 2 和 5 被分配到泊位段 2;船舶 1,7 和 8 被分到泊位段 3. 在泊位段 1 中,船舶 6 最先到达,岸桥 1 和 2 为其进行装卸作业,开始和结束时间分别为 2 和 19,停泊位置从 1 到 150;岸桥 1 为船舶 3 进行装卸作业,开始和结束时间分别为 22 和 31,停泊位置从 51 到 150;岸桥 3 和 4 为船舶 4 进行装卸作业,开始和结束时间分别为 12 和 31,停泊位置从 151 到 300.

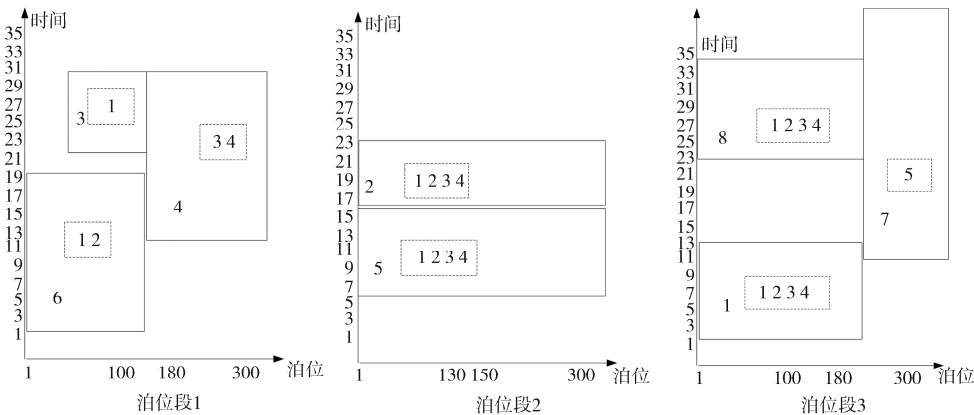


图 6 不规则型泊位和岸桥分配方案
Fig.6 An example of the irregular berth and quay crane allocation plan

表 2 船舶数为 8 的算例已知参数

Tab. 2 The known parameters of the case with 8 ships

船舶 编号	长度 /m	到达时 间/时	服务时间/h	最大岸 桥数/个	最小岸桥 数/个
1	200	2	48,24,16,12,9	4	2
2	300	15	35,17,11,8,7	4	2
3	100	22	10,5,3,2,2	1	1
4	150	12	40,20,13,10,8	2	1
5	300	5	46,23,15,11,9	4	2
6	150	2	37,18,12,9,7	2	1
7	100	12	38,19,12,9,7	1	1
8	200	23	48,24,16,12,9	4	2

表 3 改进 PSO 算法不同迭代次数的结果

Tab. 3 The results of improved PSO with different iterations

泊位段数	船舶数	最大迭代代数	
		800	1000
3	8	125	125
	9	139	139
	10	166	166
	11	205	205
	12	220	215
	13	241	229
	14	242	239
	均值	191.14	188.29

表 3 和表 4 为不同迭代代数和随机学习因子参数设置下的求解结果,可以看出当迭代代数为 1000 代,学习因子 c_3 取 1.5 时,PSO 算法的求解结

果更优,因此,将迭代代数设置为 1000 代,随机学习因子设置为 1.5.

表 4 改进 PSO 随机学习因子参数设置

Tab. 4 The random learning factor setting of improved PSO

泊位段数	船舶数	随机学习因子		
		$c_3=1.0$	$c_3=1.3$	$c_3=1.5$
3	8	125	125	125
	9	141	139	139
	10	175	172	166
	11	221	205	205
	12	243	230	215
	13	241	229	229
	14	272	251	239
	均值	202.57	193	188.29

表 5 为标准粒子群算法、改进粒子群算法以及 CPLEX 求解结果的对比,偏差 $1=(\text{SPSO}-\text{IPSO})\times 100\%/\text{IPSO}$;偏差 $2=(\text{IPSO}-\text{CPLEX})\times 100\%/\text{CPLEX}$. 从实验结果可以看出,改进前后粒子群算法求解结果偏差的最大值为 25.52,在所有实验中,偏差的平均值为 16.62. 随着船舶数量的增加,偏差呈现逐渐增大的趋势. 改进粒子群算法的求解结果与 CPLEX 算法求解结果的最大偏差为 4.37%,平均偏差为 2.89%,而 CPLEX 软件的平均求解时间为 253.77,改进粒子群算法的平均求解时间仅为 0.39 s,证明了设计的粒子群算法的有效性.

表 5 标准 PSO、改进 PSO 和 CPLEX 结果对比

Tab. 5 The comparison on the results of improved PSO, standard PSO and CPLEX

泊位段数	船舶数	目标函数值			求解时间/s			偏差 1/%	偏差 2/%
		SPSO	IPSO	CPLEX	SPSO	IPSO	CPLEX		
3	8	137	125	122	0.266	0.280	0.57	9.60	2.46
	9	139	139	136	0.297	0.302	0.82	0	2.21
	10	203	166	164	0.312	0.324	3.48	22.29	1.22
	11	223	205	197	0.344	0.346	5.26	8.78	4.06
	12	253	215	206	0.359	0.355	131.58	17.67	4.37
	13	282	229	223	0.516	0.531	117.78	23.14	2.69
	14	300	239	233	0.773	0.578	760.44	25.52	2.58
	均值	219.57	188.29	183	0.41	0.39	253.77	16.62	2.89

为了验证本文改进粒子群算法在求解较大规模问题时的有效性,分别采用标准 PSO 和改进 PSO 对不同规模的问题进行求解,结果如表 6 所示,表中偏差 = $(\text{SPSO}-\text{IPSO}) \times 100\% / \text{IPSO}$,每个规模的结果均为 10 组同规模算例求解所得的平均值. 可以看到,在各个规模下,改进 PSO 的结果均优于标准 PSO 的结果,证明了改进 PSO 在求解较大规模问题时的有效性.

表 6 标准 PSO 和改进 PSO 结果对比
Tab. 6 The comparison on the results of improved PSO and standard PSO

泊位段数	船舶数	目标函数值		求解时间/s		偏差/%
		SPSO	IPSO	SPSO	IPSO	
3	21	300.34	214.88	0.88	0.89	28.45
	22	307.93	207.53	0.97	0.96	32.60
	23	336.92	244.93	1.06	1.04	27.30
	24	373.54	249.47	1.11	1.12	33.21
	25	397.87	263.20	1.13	1.17	33.85
	26	456.05	295.33	1.23	1.25	35.24
	27	461.64	300.75	1.28	1.29	34.85
	28	519.09	324.44	1.37	1.37	37.50
	29	596.14	382.06	1.48	1.42	35.91
	30	648.32	394.94	1.52	1.52	39.08
均值		439.78	287.75	1.20	1.20	33.80

综上,在模型中加入有效不等式后,模型的求解时间明显减少. 在所有算例中,改进粒子群算法的求解结果均优于标准粒子群算法的求解结果,这是由于标准粒子群算法容易陷入局部最优,加入随机学习因子后,增加了粒子寻优的范围,更容易找到优化解. 从表 5 和表 6 可以看出,改进粒子群算法相比标准粒子群算法,在求解质量上分别提高了 16.62%和 33.80%,即:针对全部 17 个算例,求解质量平均提高了 25.21%.

5 结 论

本文研究了集装箱港口不规则型泊位和岸桥集成分配问题. 针对该问题,我们建立了线性规划数学模型,并通过 CPLEX 软件进行求解;针对问题规模增加,求解时间变长的问题,在模型中加入三个有效不等式,使模型的求解时间降低了 83.23%. 针对船舶数目增加后,CPLEX 软件无法

在可接受时间内求解的情况,本文提出了粒子群算法进行求解. 实验结果证明,改进粒子群算法相比标准粒子群算法,求解质量提高了 25.21%,证明了本文设计的改进粒子群算法在求解不规则型泊位和岸桥分配问题时的有效性.
本文的研究为针对计划期内所有船舶到港时间不再发生变化的情况,且只考虑了岸桥进行贝位作业的分配,未考虑岸桥进行对应贝位装卸作业的先后顺序安排,未来将针对船舶到达时间不确定的不规则泊位和岸桥集成调度问题进行建模和优化研究.

参考文献:

[1] 张新宇,林俊,郭子坚. 基于模拟退火多种群遗传算法的港口船舶调度优化[J]. 中国航海, 2016, 39: 26.

[2] 晋春,毛罕平,马国鑫,等. 基于改进遗传算法的温室环境动态优化控制[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2022, 43: 169.

[3] 郑红星,吴云强,邵思杨,等. 考虑潮汐影响的泊位分配与船舶调度集成优化[J]. 信息与控制, 2020, 49: 95.

[4] Bacalhau E T, Casacio L, Azevedo A T. New hybrid genetic algorithms to solve dynamic berth allocation problem [J]. Expert Syst Appl, 2021, 167: 1.

[5] Song L, Cherrett T, Guan W. Study on berth planning problem in a container seaport: using an integrated programming approach [J]. Comput Ind Eng, 2012, 62: 119.

[6] 范志强. 连续泊位分配问题研究:模型优化与计算分析[J]. 工业工程与管理, 2016, 21: 81.

[7] 王军,郭力铭,杜剑,等. 基于动态学习的泊位调度方案优化[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18: 197.

[8] Guo L M, Wang J, Zheng J F. Berth allocation problem with uncertain vessel handling times considering weather conditions [J]. Comput Ind Eng, 2021, 158: 107417.

[9] Hendriks M P M, Armbruster D, Laumanns M, et al. The strategic allocation of cyclically calling vessels for multi-terminal container operators [J]. Flex Serv Manuf J, 2012, 24: 248.

[10] 吴迪,王诺,林婉妮,等. 泊位-岸桥联合分配模型的模拟植物生长交替进化算法[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18: 199.

[11] Wawrzyniak J, Drozdowski M, Sanlaville E. Selec-

ting algorithms for large berth allocation problems [J]. *Eur J Oper Res*, 2020, 283: 844.

[12] Rodrigues F, Agra A. An exact robust approach for the integrated berth allocation and quay crane scheduling problem under uncertain arrival times [J]. *Eur J Oper Res*, 2021, 295:499.

[13] Imai A, Nishimura E, Hattori M, *et al.* Berth allocation at indented berths for mega-containerships [J]. *Eur J Oper Res*, 2007, 179: 579.

[14] Imai A, Nishimura E, Papadimitriou S. Marine container terminal configurations for efficient handling of mega-containerships [J]. *Transport Res E-Log*, 2013, 49: 141.

[15] Correcher J F, Bossche T V, Alvarez-valdes R, *et al.* The berth allocation problem in terminals with irregular layouts [J]. *Eur J Oper Res*, 2019, 272: 1096.

[16] Eberhart R C, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory [C]// *Proceeding of 6th International Symposium on Micromachine and Human Science*. Japan: IEEE, 1995.

[17] 胡章芳, 程亮, 张杰, 等. 多约束条件下基于改进遗传算法的移动机器人路径规划[J]. *重庆邮电大学学报: 自然科学版*, 2021, 33: 999.

[18] 周润, 龙伟, 李炎炎, 等. 面向绿色再制造系统的 AGV 路径规划研究[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2019, 56: 883.

[19] 张冬青, 郭钊侠, 张殷杰. 考虑时空相关随机行驶时间的车辆路径问题模型与算法[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2021, 58: 067001.

[20] Zhang C R, Zheng L, Zhang Z H, *et al.* The allocation of berths and quay cranes by using a sub-gradient optimization technique [J]. *Comput Ind Eng*, 2010, 58: 40.

引用本文格式:

中 文: 赵姣, 胡卉, 袁华智. 不规则型泊位与岸桥集成分配问题的优化建模和算法研究 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2022, 59: 042001.

英 文: Zhao J, Hu H, Yuan Z H. Research on optimized modelling and algorithm of integrated allocation of irregular berth and quay crane [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2022, 59: 042001.