

考虑减载移泊的散货港口泊位与船舶集成调度^①郑红星^② 姜 雪^③ 段 爽

(大连海事大学交通运输工程学院 大连 116026)

摘 要 随着船舶的大型化和散货海运的日益繁忙,提高散货码头大型泊位的利用率并优化船舶的进出港次序,已成为影响散货港口服务水平的关键。针对一单向航道多港池的散货港口,考虑潮汐影响、进出港规则以及船舶到港时间等因素,兼顾卸载量不同的船舶减载移泊操作,构建了固定周期内以船舶在港时间最短为目标的泊位分配和船舶调度的集成优化模型,设计了融入禁忌搜索思想的改进遗传算法进行求解。在算例分析中,通过与不考虑减载和固定减载量的 2 种现有码头作业方案进行对比,验证了方案的有效性。通过与 lingo 软件求解过程进行比较,验证了算法的有效性和适用范围。

关键词 减载移泊;泊位分配;船舶调度;潮汐;改进遗传算法

0 引 言

近年来船舶大型化的趋势愈发明显,港口深水大泊位的利用越来越重要。同时,鉴于大型船舶在一些港口需乘潮进出港口,合理地调度船舶进出港逐渐引起了各方的关注。另考虑到港口中深水大泊位的稀少,一般散货港口均采用减载移泊的方式来发挥该类泊位的效能。同时,鉴于船舶进出港次序和泊位分配之间交互影响,考虑减载移泊的港口泊位分配和船舶调度的集成优化问题,是提高港口服务水平的关键问题之一,也是港口效率提升的热点问题。

现有的研究中,在船舶调度方面,江振峰等人^[1]研究了不定期船舶运输的调度优化问题,考虑运输需求的时空分布特征,以最大化承运人利益为目标建立优化模型,求解规划期内船舶的运营调度方案,并采用遗传算法求解模型。许欢等人^[2]讨论了低碳经济下的港口泊位分配模型及其算法实现,建立了船舶油耗量最小和船舶离港延迟时间最短的双目标优化模型,设计了多目标遗传算法对该模型

进行求解。柴佳祺等人^[3]研究了散货码头排船问题,根据船舶载重多少以及延迟靠泊时间 2 个指标对船舶进行排序,考虑单位岸线长度、单船延迟靠泊时间,构建连续性泊位分配优化模型,设计了启发式算法求解。Ernest 等人^[4]主要根据干散货码头现有情况,考虑潮汐和船长等因素对在锚地的船舶进行了时间与空间的排序,建立数学模型,设计了两阶段法,对模型进行分段化简,最后使用 CPLEX 进行求解。张新宇等人^[5]对双向通航港口船舶调度优化问题进行了研究,考虑船舶属性和船舶交通状况等因素,在航道与泊位协调性以及船舶调度安全性的约束下,建立双向通航港口船舶调度多目标优化模型,设计了改进遗传算法进行求解。郑红星等人^[6]研究了考虑减载移泊的散货港口船舶调度优化问题,采用减载移泊策略对船舶进行调度优化,建立最小船舶等待时间的混合整数规划模型,设计了混合算法求解。朱云龙等人^[7]等对港口业船舶进行调度优化研究,建立了船舶拖期惩罚费用最小的调度模型,自行设计启发式优化算法求解。禹鑫焱等人^[8]对自动化停车场调度问题进行了研究,与船舶

① 国家自然科学基金(71473024,71872025)资助项目。

② 男,1971 年生,博士,副教授;研究方向:物流系统优化与仿真;E-mail: zhredstar@dlmu.edu.cn

③ 通信作者,E-mail: 18018983882@163.com

(收稿日期:2019-06-13)

调度问题相似,在停车场调度问题中,为了降低自动化停车场中产生的能耗、车辆等待时间,提出基于启发式动态规划的自动化停车场调度方法,设计贪心算法求解。针对船舶调度问题,现有的研究较深入,但是研究过程中均将泊位分配方案默认为已知,未将其与船舶调度集成考虑,也没有考虑依据泊位实时情况对船舶进出港次序进行相应调整,调度方案不灵活。

在泊位分配方面,Nishimura 等人^[9]研究了关于公共泊位系统泊位调度规划的问题,考虑不同集装箱船对港口泊位的操作能力要求不同等因素,建立以船舶服务时间最小的目标规划模型,设计了抑郁遗传算法求解。刘杰^[10]对集装箱码头泊位分配问题进行了研究,分析了集装箱码头泊位分配流程,为降低船舶总在港时间,建立动态泊位分配模型,设计了改进多层编码遗传算法解决问题。曾庆成等人^[11]研究了集装箱码头中干扰事件发生后泊位分配计划的调整问题,建立了泊位分配干扰管理模型,设计了基于局部重调度与禁忌算法的仿真优化算法进行求解。张新宇等人^[12]研究了基于粒子群优化算法的船舶调度优化问题,对船舶进行了合理化的泊位分配,考虑航道限制及安全航距等问题,建立模型,设计了粒子群启发式算法求解。唐伟祎^[13]对船厂码头泊位调度优化问题进行了研究,对船厂码头进行了多层次泊位分配,综合考虑各调度优化目标,建立泊位调整决策模型,设计了改进遗传算法求解。童珊^[14]在研究集装箱港口泊位分配问题时,考虑了船舶优先权的限制,根据船舶到达情况以及船舶所需靠泊作业时间等因素,建立了以船舶在港时间最小为目标的连续布置泊位分配模型,设计了遗传算法进行求解。王军等人^[15]对动态情况下的泊位调度方案进行了研究,考虑船舶在泊时间受水文气象等多种复杂因素的影响,采用动态学习方法对在泊时间计算函数进行更新,对泊位调度方案进行优化,设计包含船舶在泊时间动态学习及泊位调度方案优化的并行算法求解。针对泊位分配问题,参考文献中大多仅考虑泊位利用率,忽略了实际作业过程中船舶进出港时的各种(船舶会遇和潮汐等)现实约束,这可能导致实际作业过程中某些船舶无法按时

抵达分配好的泊位;且文献大多忽略了航道通行限制和船舶进出港规则的约束,这将导致实际作业过程中因作业完毕的船舶不能及时出港而造成船舶在港滞留时间过长,或因目标泊位可用但船舶无法及时入港而造成泊位大段时间空闲等情况的发生。

上述国内外关于泊位分配问题的研究在提高港口效率、减少船舶在港滞留时间方面都有不同着重,旨在降低船舶在港滞留时间,给出合理的船舶调度或者泊位分配方案。但是现有研究主要集中在单方面的船舶调度或是泊位分配,罕有将两者集成考虑的文献。然而在现实情况中,在单向航道的港口中,船舶调度与泊位分配交错影响着船舶在港滞留时间,为最小化船舶在港滞留时间,需将泊位分配及船舶调度进行集成优化。例如单独考虑船舶进出港,可能出现船舶进到港池而泊位不能使用,只考虑泊位分配,而船舶却不能按期进港等。除上述研究外,经唐山港、曹妃甸港等港口调研发现,大型散货船满载时吃水较深,需在特定的深水大泊位进行卸载,此时大多数港口现有深水大泊位数量不能及时满足所有抵港大型散货船的作业需求。

综上,不同于以往的研究,本文研究固定计划期内考虑潮汐影响的泊位分配与船舶调度集成优化方案,并在船舶调度过程中重点关注减载移泊过程,通过合理地减载移泊过程,为后续抵港大型散货船适时提供可用泊位。在减载作业过程中,兼顾紧后船舶到达时刻来择优选取减载方案,最终给出最佳的泊位分配方案、船舶进出港次序以及减载移泊方案。

1 问题描述

离散型泊位散货港口海侧的主要组成部分包括锚地、航道以及若干港池,根据泊位的水深以及泊位上配备装卸设备的不同,泊位又分为可服务大型船舶的深水大泊位和普通泊位,港口的港池以及泊位分布情况示意图如图 1 所示。

港口包括的若干港池中,都拥有上述 2 种泊位,根据服务船型的不同,对泊位进行了编号。由于不同船舶所需作业时间的不同、潮汐以及单向航道等影响因素,不同的船舶进出港需满足一些约束,例如

大型散货船吃水较深,需乘潮进出港,为了安全,大型散货船的紧后进港船舶不为大型船。船舶卸载作业时,针对大型散货船在深水大泊位减载至满足普通泊位作业要求后,才可将其进行移泊。据实际调

查可知,大多数散货港口中大型散货船的比重在 20% 左右,且均需乘潮进出港,而大型深水泊位非常有限。

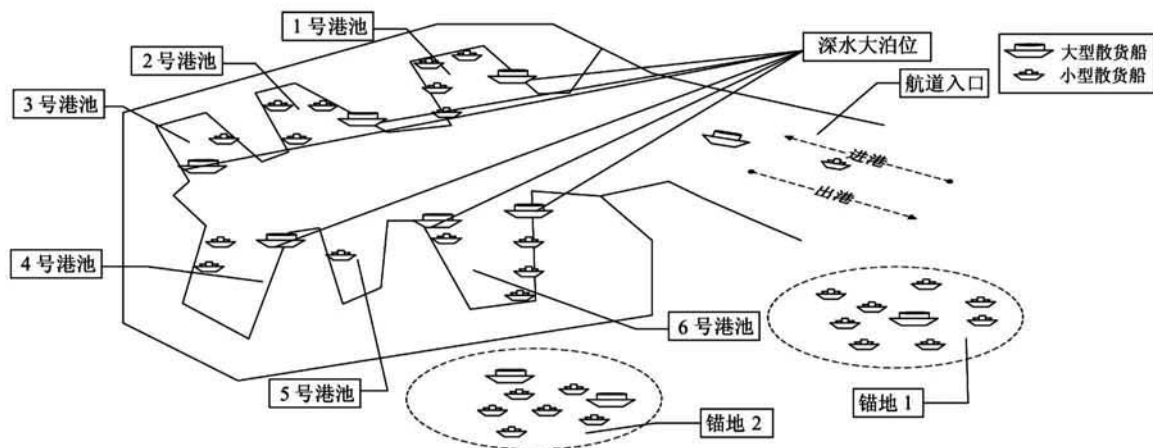


图 1 港池以及泊位分布情况示意图

本文的问题可描述为:根据数据分析以及船舶到达情况可获知以下信息,包括一个散货港口 48 h 内的各类散货船的到达情况和到达时刻,不同装载量的船舶所需要的卸载作业时间,移泊船舶的耗时情况等信息,考虑潮汐对于大型散货船进出港的影响,船舶的进出港规则(大型散货船的紧前、紧后进出港船舶不为大型散货船)等限制约束,以 48 h 内所有船舶的总在港时间最小为目标,研究考虑减载移泊的散货港口泊位分配与船舶调度集成优化问题,最终给出船舶进出港的最佳次序和船舶的合理泊位分配方案,以及抵港大型散货船包括减载方案、移泊时刻和移泊位置的最优减载移泊方案。

2 减载移泊调度模型

本文中的泊位分配和船舶调度问题可看作是一种二层级泊位分配问题。不同属性的船根据其预计达到时间以及泊位现状进行初级泊位分配,在此基础上,对个别船舶进行减载移泊操作,根据实时泊位状态进行二级泊位分配,为移泊船舶提供泊位分配方案。

2.1 符号说明

2.1.1 已知变量

M 为足够大的正整数; TA_i 为船 i 到达港口的时

刻; Q_i 为 i 船的载货量; N 为潮汐时段的总段数; a_n 为第 n 个潮汐时段的开始时刻; b_n 为第 n 个潮汐时段的结束时刻; $L_{bb'}$ 为泊位 b 到 b' 的距离(针对移泊船舶参数, b 为船舶初始作业泊位, b' 为减载后的移泊位置); v_i 为 i 船在港口的航速; D_i 为 i 船的吃水; D_0 为大型散货船小型散货船的吃水界限; D_b 为泊位 b 的水深; $D_{b'}$ 为移泊泊位 b' 的水深; $D_{bb'}$ 为泊位 b 到移泊泊位 b' 的距离(针对移泊船舶参数, b 为船舶初始作业泊位, b' 为减载后的移泊位置); $L_{s_{ij}}$ 为 i 船与 j 船之间航行的安全航距(针对船舶编号参数, i, j 皆为本周期到达船舶); $tm_{i,b}$ 为船 i 从锚地到港池 b 泊位所需时段; $tm_{i,bb'}$ 为船 i 从港池 b 泊位移动到 b' 泊位所需时段(针对移泊船舶参数, b 为船舶初始作业泊位, b' 为减载后的移泊位置); $t_{i,b}$ 为船 i 在 b 泊位作业的时段; $t_{i,bb'}(t_{j,bb'})$ 为船 $i(j)$ 在 b 泊位作业后在 b' 泊位作业的时段(针对移泊船舶参数, b 为船舶初始作业泊位, b' 为减载后的移泊位置,针对船舶编号参数, i, j 皆为本周期到达船舶); tm_i 为船舶 i 从锚地到港池入口的时段; p_i 为船舶 i 的卸载效率; H_i 为船舶 i 为大船即为 1, 否则为 0; S 为船舶数集合; B 为泊位数集合。

2.1.2 中间变量

$TL_i(TL_j)$ 为船舶 $i(j)$ 的离港时刻(针对船舶编

号参数, i, j 皆为本周期到达船舶); $\gamma_{i,b}$ 为船舶 i 从最后作业的 b 泊位离开到港池出口所用的时段; $Q_{i,b}(Q_{i,b'})$ 为船舶 i 在泊位 $b(b')$ 的减载量(针对移泊船舶参数, b 为船舶初始作业泊位, b' 为减载后的移泊位); t_{di} 为船舶出港等待潮汐时间; $T1$ 为泊位可用开始时刻; $T2$ 为泊位可用结束时刻。

$$\begin{aligned} A_{T1,b} &= \begin{cases} 1 & T1 \text{ 时刻起泊位 } b \text{ 可用} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \\ A_{T2,b} &= \begin{cases} 1 & T2 \text{ 时刻起泊位 } b \text{ 不可用} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \\ Z_{i,n} &= \begin{cases} 1 & i \text{ 在第 } n \text{ 个潮汐时段开始操作} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \\ U_{i,n} &= \begin{cases} 1 & i \text{ 在第 } n \text{ 个潮汐时段离港} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \\ Y_{ij,b} &= \begin{cases} 1 & i \text{ 为 } j \text{ 紧前在泊位 } b \text{ 作业的船舶} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \\ x_{ij} &= \begin{cases} 1 & \text{船舶 } i \text{ 在 } j \text{ 紧前入港} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \\ N_i &= \begin{cases} 1 & i \text{ 船需要移泊} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \end{aligned}$$

2.1.3 决策变量

P_i 为 i 船的减载率 $Ts_{i,b}(Ts_{j,b})$ 为船舶 $i(j)$ 开始在泊位 b 作业的时刻(针对船舶编号参数, i, j 皆为本周期到达船舶)。

$$\begin{aligned} x_{i,b} &= \begin{cases} 1 & i \text{ 船在泊位 } b \text{ 作业} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \\ x_{i,b'} &= \begin{cases} 1 & i \text{ 船移泊到泊位 } b' \text{ 作业} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \\ \min F &= \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} \sum_{b \in B} Ts_{i,b} x_{i,b} + \frac{D_{bb'}}{v_i} N_i x_{i,b} x_{i,b'} \\ &\quad + \frac{Q_i}{p_i} + \frac{Ls_{ij}}{v_i} x_{ij} + \gamma_{i,b} x_{i,b} - TA_i + t_{di} H_i \end{aligned} \quad (1)$$

$$Ts_{i,b} - tm_{i,b} \geq TA_i, \forall i \in S, \forall b \in B \quad (2)$$

$$Ts_{i,b} - a_n \geq M(3 - Z_{i,n} - x_{i,b} - H_i), \quad \forall i \in S, \forall b \in B \quad (3)$$

$$b_n - Ts_{i,b} \geq M(3 - Z_{i,n} - x_{i,b} - H_i), \quad \forall i \in S, \forall b \in B \quad (4)$$

$$\sum_{n=1}^N Z_{i,n} = 1, \forall i \in S \quad (5)$$

$$b_n - (TL_{i,b} - \gamma_{i,b}) \geq M(3 - U_{i,n} - x_{i,b} - H_i), \quad \forall i \in S, \forall b \in B \quad (6)$$

$$TL_{i,b} - \gamma_{i,b} - a_n \geq M(3 - U_{i,n} - x_{i,b} - H_i), \quad \forall i \in S, \forall b \in B \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^N U_{i,n} = 1, \forall i \in S \quad (8)$$

$$D_b - D_i \geq M(1 - x_{i,b}), \forall i \in S, \forall b \in B \quad (9)$$

$$D_{b'} - D_i(1 - P_i) \geq M(3 - N_i - H_i - x_{i,b'}), \quad \forall i \in S, \forall b' \in B \quad (10)$$

$$Ts_{j,b} - \left(Ts_{i,b} + \frac{Q_{i,b}}{p_i}\right) \geq M(3 - x_{i,b} - x_{j,b} - Y_{ij,b}), \quad \forall i, j \in S, \forall b \in B \quad (11)$$

$$Q_i - Q_{i,b} = M(1 - x_{i,b} + N_i), \forall i \in S, \forall b \in B \quad (12)$$

$$Q_i - Q_{i,b} - Q_{i,b'} = M(3 - x_{i,b} - x_{i,b'} - N_i), \quad \forall i \in S, \forall b, b' \in B \quad (13)$$

$$T1 - T2 - \frac{Q_{i,b}}{p_i} \geq M(3 - A_{T1,b} - A_{T2,b} - x_{i,b}), \quad \forall i \in S, \forall b \in B \quad (14)$$

$$T1 - Ts_{i,b} \geq M(2 - A_{T1,b} - x_{i,b}), \quad \forall i \in S, \forall b \in B \quad (15)$$

$$Ts_{i,b} - T2 \geq M(2 - A_{T2,b} - x_{i,b}), \quad \forall i \in S, \forall b \in B \quad (16)$$

$$\begin{aligned} T1 - T2 - \frac{Q_i(1 - P_i)}{p_i} \\ \geq M(5 - N_i - H_i - A_{T1,b} - A_{T2,b} - x_{i,b}), \quad \forall i \in S, \forall b \in B \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} T1 - Ts_{i,b} - \frac{Q_{i,b}}{p_i} - \frac{L_{bb'}}{v_i} \\ \geq M(5 - N_i - H_i - x_{i,b'} - A_{T2,b} - x_{i,b}), \quad \forall i \in S, \forall b, b' \in B \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} Ts_{i,b} + \frac{Q_{i,b}}{p_i} + \frac{L_{bb'}}{v_i} - T1 \\ \geq M(5 - N_i - H_i - x_{i,b'} - A_{T2,b} - x_{i,b}), \quad \forall i \in S, \forall b, b' \in B \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} TL_j - \gamma_{j,b} - t_{j,bb'} - tm_{j,bb'} - t_{j,b} - (TL_i - \gamma_{i,b} - t_{i,bb'} \\ - tm_{i,bb'} - t_{i,b}) \geq M(5 - N_i - H_i - N_j - H_j - x_{ij}), \quad \forall i, j \in S, \forall b, b' \in B \end{aligned} \quad (20)$$

$$TL_j - TL_i \geq M(1 - x_{ij}), \forall i, j \in S \quad (21)$$

$$Ts_j - \left(Ts_i + \frac{Ls_{ij}}{v_i} \right) \geq M(1 - x_{ij}), \forall i, j \in S \quad (22)$$

$$TL_j - \gamma_{j,b} - tm_{j,bb'} - (TL_i - \gamma_{i,b} - tm_{i,bb'}) \geq M(1 - x_{ij}), \quad \forall i, j \in S, \forall b, b' \in B \quad (23)$$

$$TL_j - \gamma_{j,b} - tm_j - (TL_i - \gamma_{i,b} - tm_i) \geq M(1 - x_{ij}), \quad \forall i, j \in S, \forall b \in B \quad (24)$$

$$M \left(2 - \frac{|D_i - D_0|}{D_i - D_0} \frac{|D_j - D_0|}{D_j - D_0} \right) \geq M \left(\frac{|D_j - D_0|}{D_j - D_0} + 1 - x_{ij} \right), \quad \forall i, j \in S \quad (25)$$

$$TL_i = Ts_{i,b}x_{i,b} + N_i x_{i,b} x_{i,b'} \frac{D_{bb'}}{v_i} + \frac{Q_i}{p_i} + \frac{x_{ij} Ls_{ij}}{v_i} + \gamma_{i,b} x_{i,b} + t_{di} H_i, \quad \forall i, j \in S, \forall b, b' \in S \quad (26)$$

$$A_{T1,b}, A_{T2,b}, N_i, Y_{ij,b}, x_{ij}, Z_{i,n}, U_{i,n}, x_{i,b} \in \{0,1\} \quad (27)$$

$$Ts_{i,b}, Q_{i,b}, P_i, \gamma_{i,b}, TL_i \geq 0$$

上述模型中,目标函数为一固定周期内船舶总在港时间最小(其中每艘船的在港停留时间为船舶入港时刻开始加上等待进港潮汐时段、锚地入口行驶时段、入口泊位行驶时段、在初始泊位作业时段、移泊时段、移泊后作业时段、等待出港潮汐时段、泊位到出口作业时段、安全行距等在港时间,最后减去船舶的抵港时刻)。约束条件中,式(2)为开始操作时间晚于到达港口时间。式(3)~(8)为潮汐进出港规则,大型散货船的进出港都要在潮汐时段结束并且每艘大型船舶只能选择一个潮汐时段进出港。式(9)~(10)为港池水深与船舶吃水限制,船舶的作业泊位满足该船的吃水要求,减载后的船舶移泊泊位的水深满足此时该船的吃水。式(11)表示同泊位作业的紧后船舶开始作业时刻晚于紧前船舶结束时间,即为紧前操作限制。式(12)~(13)保证船舶在作业泊位的卸载量与其装载量相等,且有减载移泊操作的船舶在前后 2 个泊位的卸载量满足船舶在此港的卸载要求。式(14)~(16)表示船舶 i 在选择泊位作业时要保证泊位处于可用状态并且在可用时段内,船舶可以完成卸载操作。式(17)~(19)表示移泊船舶 i 在移泊时选择的移泊泊位是可用的,且保证在泊位可用时间段内能将剩余货卸载完

成。式(20)~(24)为安全航距,紧前紧后两艘船进出港或在港池内移动时保持安全航距,在同一泊位作业的 2 艘船需保持安全航距,且当其抵达泊位时,紧前作业船舶已作业完毕移出。式(25)为根据港口的一般作业规则,大型散货船紧前紧后船舶不为大船。式(26)表示船舶离港时刻是其开始操作时刻、操作时段、移泊时段、进出港移动时段以及出港时刻等待潮汐时段的加和。

3 求解算法

综合已有文献,关于船舶调度问题大多采用启发式算法求解(如文献[1-3,5,6,8]),在泊位分配问题的研究中大都采用遗传算法(如文献[9,10,13,14])求解,但考虑船舶调度和泊位分配集成问题的复杂性,且该问题属于 NP Hard 问题,此时单纯的采用遗传算法解决问题的效率较低,受文献[6,11]等文献的启发,本文设计了融入禁忌搜索思想的改进遗传算法,即在遗传算法中引入禁忌表来提高求解效率。

本文的改进遗传算法主要包括 5 大部分,分别是:根据初始种群生成策略生成初始种群;解的排序与选择,组成配对组;配对组进行交叉、变异等操作产生新种群;对不可行解以及较差解进行基因修复;引入禁忌表避免算法陷入局部最优。5 个部分的具体流程分别在 3.1~3.5 节中进行了详细解释。除此之外,算法中对最优解进行了 2 次筛选操作,通过逻辑梳理对最优解进行记录与选择,得到更全面更优化解的集群并为禁忌表的更新提供便利。综上,运用此改进遗传算法,对模型进行求解得到优化结果。算法流程为首先根据港口船舶泊位的现实情况生成初始种群,其次对初始种群中的解进行排序选择形成配对组,之后对配对组进行交叉变异等操作生成新种群,然后对新种群进行基因修复,对修复后的解进行筛选得到较为全面的解,接着基于禁忌搜索思想对新种群进行筛选(若新种群的最优解曾在之前的迭代中存在,则选择次一级最优解),不断更新禁忌表。以此框架进行多次迭代,算法流程如图 2 所示。

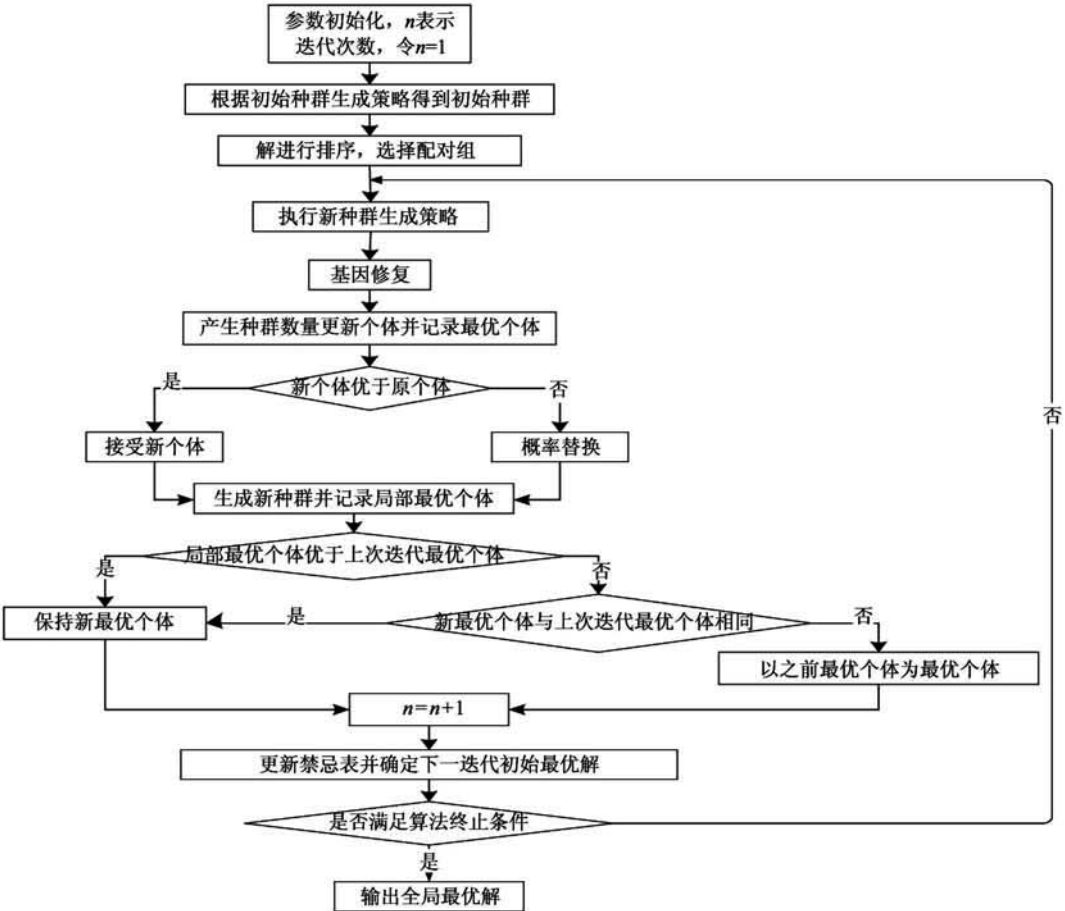


图2 算法流程图

3.1 染色体编码与初始种群生成策略

根据船舶抵港时刻先后进行编号, 考虑船舶初

始作业位置, 船舶减载量以及船舶移泊位置等信息进行多层编码, 编码情况如图3所示。

	①			③			②		
第1层编码	6		7	3		5	10	8	船舶抵港编号
第2层编码	3		2	3		7	4	6	船舶预计作业位置
第3层编码	1		1	1		0	0	0	船舶是否进行移泊
第4层编码	1		1	2		0	0	0	船舶减载量
第5层编码	12		13	17		0	0	0	船舶移泊位置

图3 5层染色体编码

例如①抵港船舶6 预计在泊位3 作业减载量选择1, 移泊位置为12;②抵港船舶8 预计在泊位6 作业减载量选择0, 此时不移泊, 所以移泊位置为0;③与①选择的预计作业泊位相同, 此时为了保证不冲突, 选择其中之一在锚地等待。对预计抵港散货船分别编码, 将船舶与泊位进行匹配。

根据多层染色体编码设计, 由于船舶预计作业位置、船舶移泊与否以及移泊船舶减载量等因素协同影响着船舶的总在港滞留时间, 制定如下生成策略。

步骤1 初始化相关参数, P 表示第1层编码船舶数量, Q 表示第2层编码可选择泊位数量, t 表示种群内个体序号, $t = 1$;

步骤2 随机在 P 中选择一个随机整数, 从而生成 t 的第1行, 根据第1行 P 的船舶基础信息, 根据其吃水要求, 在 Q 中随机选择一个满足作业要求的整数, 生成为 t 的第2行;

步骤3 根据第1行 P 的船舶基础信息, 当其为大型散货船时, 随机生成 $[0, 1]$ 整数, 0 表示不进行移泊操作, 1 表示进行移泊操作, 从而生成 t 的第

3 行;

步骤 4 当 t 的第 3 行为 0 时, t 的第 4 行为 0, 表示其不进行减载移泊操作; 当 t 的第 3 行为 1 时, 随机生成 $(0,1)$ 区间内的随机数 a , $a \leq 0.5$ 时, a 的第 4 行取值为 1, 表示其减载量为第 1 种情况; $a > 0.5$ 时, t 的第 4 行取值为 2, 表示其减载量为其他情况;

步骤 5 当 t 的第 3 行与第 4 行为 0 时, 其第 5 行为 0; 当 t 的第 3 行与第 4 行不为 0 时, 随机在 Q 中选择一个整数, 生成为 t 的第 5 行;

步骤 6 令 $t = t + 1$, 当 t 大于种群规模 T 时, 则结束, 否则令 $i = 1$ 执行步骤 2。

3.2 解的排序与选择

本文采用轮盘赌选择优胜个体, 对其进行交叉变异等操作生成下一代, 具体步骤如下。

步骤 1 根据个体的适应度值在整个群体的适应度总和中所占的比例, 按从小到大进行排序;

步骤 2 按排序将比值逐一叠加, 如排位第 2 的值变为其本身的值与排位第 1 的值之和, 以此类推更新排序数组;

步骤 3 产生一个 $[0,1]$ 之间均匀随机数, 根据该随机数在排序中的位置确定对应的个体, 将其作为父代个体;

步骤 4 个体被选后, 重复步骤 2 选择新的父代个体, 将 2 个个体组成交配对, 以供后面的交叉操作;

步骤 5 重复步骤 2 ~ 4 操作, 直至操作次数等于种群规模。

3.3 新个体生成策略

每次迭代, 对根据适应度评估选择出的每对交配对进行如下操作, 生成新个体。

步骤 1 产生一个 $[0,1]$ 之间均匀随机数, 若该随机数小于交叉概率, 则进行步骤 2, 否则进行步骤 3;

步骤 2 若该随机数小于变异概率, 则进行步骤 5, 否则进行步骤 4;

步骤 3 保持原染色体, 直接遗传到下一代;

步骤 4 交叉为选取最优个体的第 2 层至第 5 层的部分染色体片段, 与交配对另一染色体对应部

分进行交叉, 形成新的染色体;

步骤 5 变异为任选一染色体, 针对其第 2 层船舶预计作业泊位或第 5 层移泊船舶移泊位置进行变异操作, 替换为其他泊位编号。

3.4 基因修复

在新个体生成的过程中可能存在下述情况: (1) 大型散货船初始分配泊位为浅水区泊位, 船舶无法靠泊操作; (2) 小型散货船进行移泊操作。针对这 2 种情况要进行基因修复, 使不可行解或较劣解变为可行解, 具体步骤如下。

步骤 1 针对任意个体, 当针对第 1 层编码船舶状态为大型船时, 当第 2 层编号对应的泊位水深满足船舶吃水时, 则转到步骤 2, 否则转到步骤 3;

步骤 2 针对任意个体, 当针对第 1 层编码船舶状态为小型船时, 当第 3 层编码为 0, 则转到步骤 5, 否则转到步骤 4;

步骤 3 在深水泊位编号中任选其一替换第 2 层编码原编号, 转到步骤 2;

步骤 4 将此个体第 3 层编码至第 5 层编码都设置为 0, 转到步骤 5;

步骤 5 输出新生成的个体。

3.5 禁忌表

为避免同一个体多次出现, 把个体的适应度值设为禁忌对象, 设置短禁忌表和禁忌表, 分别为 $Ta \times 1$ 与 $TA \times 1$ 的矩阵, TA 为禁忌表长度, Ta 为短禁忌表长度, 每次迭代完成重复下述步骤。

步骤 1 当迭代次数小于 Ta , 在短禁忌表依次前 1 行替换后 1 行, 根据适应度值排序, 将在短禁忌表中未出现过的适应度值置于第 1 行, 更新短禁忌表, 并把此适应度值对应的个体作为下次迭代的初始最优个体;

步骤 2 当迭代次数大于 Ta , 根据适应度值从小到大的顺序选择对应个体, 若此适应度值在短禁忌表中存在, 即被标记时, 选择次一级最优适应度值, 直至该适应度值未被标记。根据此适应度值在长禁忌表中出现的次数, 记录 $m = m + 1$, 当 $m > M$, 即容忍的最多出现次数时, 重新选取个体;

步骤 3 以短禁忌表的最后一行作为长禁忌表的第 1 行, 从第 2 行开始前一行替换后一行, 不断更

新禁忌表,并把第 1 行的适应度值对应的个体作为下次迭代的初始最优个体。

4 算例分析

设定某单向航道散货港口拥有 4 大港池,各港池内分别拥有 9、8、7、8 个离散型泊位,依次编号为 $B = \{1, 2, \dots, 32\}$,其中 1、24、32 泊位为大型泊位,水深为 20 ~ 30 m,为大型散货船提供减载移泊服务,其余为小型泊位水深为 12 ~ 20 m。根据离航道入口距离,分别编号港池为 1、2、3、4,其中 1 ~ 9 号泊位位于 1 号港池,10 ~ 17 号在 2 号港池,18 ~ 24 在 3 号港池,25 ~ 32 在 4 号港池。

由于船舶大小不同,船舶卸载时,提供的卸载舱

口不同,此时会产生不同的卸载率,综合来看大型散货船卸载率为 0.83 万吨/h,中小型船舶减载率为 0.5 万吨/h;大型散货船的减载量可选择 70% 或者 85%。

从锚地区域开始计算,船舶由锚地航行至航道入口入口的时间为 1 h;船舶从港池入口到泊位,泊位到航道出口;泊位到泊位等各个航行时间在 0.2 ~ 0.5 h 区间内。

据唐山港、曹妃甸港等地的调研数据可知,船舶的卸载周期一般在 24 ~ 48 h 之间,本文以 48 h 作为 1 个调度周期,周期内共有 4 个潮汐时段,乘潮船舶所占比重为 13%,船舶间的安全航行距离为 50 min,整个周期中船舶的到达时刻以及船舶的基础信息、乘潮情况如表 1 所示。

表 1 船舶的基础信息表

船舶 编号	到达 时刻	载重量 (万吨)	吃水 (m)	是否需要 乘潮	船舶 编号	到达 时刻	载重量 (万吨)	吃水 (m)	是否需要 乘潮
1	0	20	20	1	31	18	7	17	0
2	0	13	18	0	32	18	7	17	0
3	1	18	22	1	33	19	8	18	0
4	1	10	16	0	34	20	6	16	0
5	2	10	16	0	35	22	5	15	0
6	2	8	17	0	36	23	5	15	0
7	3	20	20	1	37	24	22	22	1
8	4	11	17	0	38	26	6	16	0
9	5	8	17	0	39	27	6	16	0
10	5	9	16	0	40	28	23	23	1
11	6	9	15	0	41	28	7	17	0
12	6	7	17	0	42	30	7	17	0
13	6	7	16	0	43	30	8	18	0
14	7	7	16	0	44	32	6	16	0
15	7	8	17	0	45	32	5	15	0
16	8	5	15	0	46	34	5	15	0
17	8	25	23	1	47	34	5	15	0
18	10	9	18	0	48	36	5	15	0
19	11	8	17	0	49	37	7	17	0
20	12	8	17	0	50	40	6	16	0
21	12	7	16	0	51	40	6	16	0
22	13	7	16	0	52	40	7	17	0
23	13	5	15	0	53	41	12	18	0
24	14	6	16	0	54	41	10	18	0
25	15	20	21	1	55	41	7	17	0
26	16	6	16	0	56	42	6	16	0
27	16	7	17	0	57	42	6	16	0
28	16	7	17	0	58	42	5	15	0
29	17	8	18	0	59	42	5	15	0
30	17	24	23	1	60	42	11	17	0

注: 1 表示乘潮,0 表示不乘潮

4.1 解决方案

应用本文模型与算法,运用 Matlab R2014a 软件进行本文算法的编程实现,设定遗传算法相关参数:种群规模为 50,迭代次数为 1 500 次, P_1 和 P_2

分别取值 0.9 和 0.1,文中实验都运行在 3.1 GHz Intel Core 2 CPU 和 4 GB 内存的双核计算机上。运行收敛图如图 4 所示。

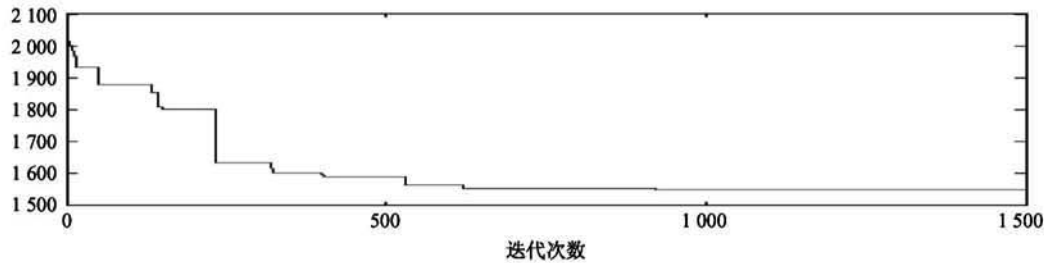


图 4 算法运行收敛图

优化方案结果为此情况 60 艘船总在港时间为 1 549 h,船舶进出安排如下。
1-2-4-5-6-7-8-11-12-14-15-16-18-17-20-22-27-

28-3-32-33-21-34-26-30-13-35-38-9-23-29-41-43-45-
39-36-42-46-24-19-47-48-49-50-25-51-53-52-55-56-10-
54-57-59-37-60-44-31-58-40。分配方案如图 5 所示。

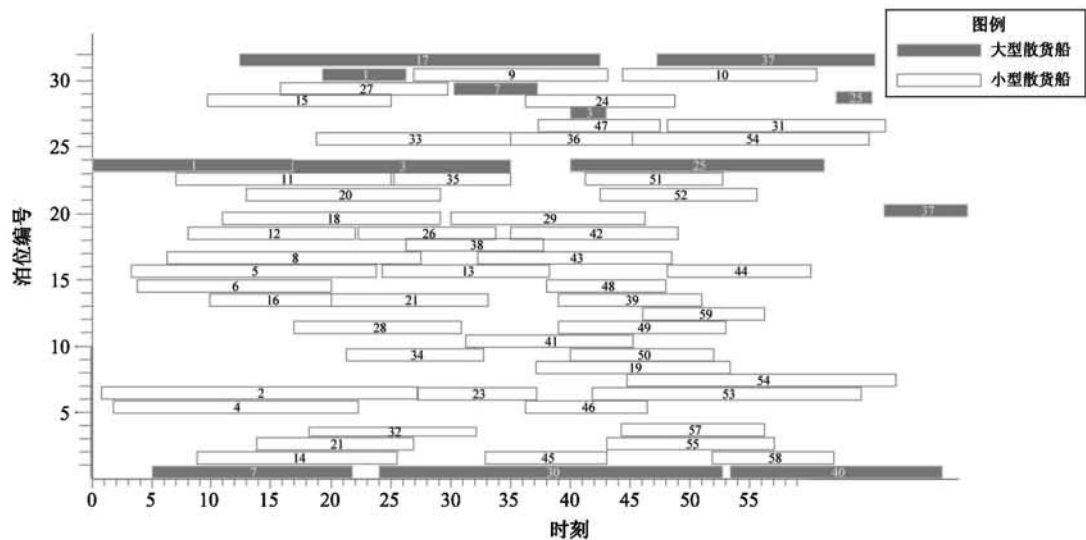


图 5 船舶作业分配方案

4.2 对比方案

分别设计不考虑移泊以及不考虑变换减载量的解决方案,验证方案的可行性。除了本文的减载移泊分配方案(方案 1)外,设计方案 2 为 1 次移泊,船舶卸载至 70% 选择移泊与否;方案 3 为先到先服务,船舶不移泊。方案对比结果如表 2 所示。

由表 2 可知,本文方案相较于方案 2 的平均优化率为 0.060832,相较方案 3 的平均优化率为

0.130110,表明了减载移泊的重要性。另相较于固定减载量,灵活地对减载量进行不同的选择,可更有效地降低船舶在港滞留时间。综上,本文方案可在较大程度上减少船舶在港滞留时间,优化效果较好。

4.3 算法有效性验证

为了验证算法有效性,利用 lingo 求得精确解,并与本文的算法结果进行对比,不同规模的算法实验结果如表 3 所示。

表 2 方案对比结果

实验次数	方案 1	方案 2	方案 3	对比方案 2 优化率	对比方案 3 优化率
1	1 549	1 603	1 707	0.033687	0.092560
2	1 505	1 650	1 707	0.087879	0.118336
3	1 497	1 677	1 710	0.107335	0.124561
4	1 596	1 658	1 829	0.037394	0.127392
5	1 537	1 607	1 767	0.043559	0.130164
6	1 611	1 597	1 810	-0.008770	0.109945
7	1 501	1 690	1 718	0.111834	0.126310
8	1 511	1 681	1 877	0.101130	0.194992
9	1 523	1 605	1 771	0.051090	0.140034
10	1 482	1 625	1 818	0.088000	0.184818
11	1 494	1 596	1 856	0.063910	0.195043
12	1 622	1 696	1 721	0.043632	0.057525
13	1 645	1 677	1 719	0.019082	0.043048
14	1 582	1 626	1 837	0.027060	0.138813
15	1 577	1 685	1 780	0.064095	0.114045
16	1 492	1 628	1 786	0.083538	0.164614
17	1 514	1 693	1 870	0.105729	0.190374
18	1 615	1 676	1 837	0.036396	0.120849
19	1 623	1 613	1 735	-0.006200	0.064553
20	1 481	1 695	1 772	0.126254	0.164221
均值	1 548	1 649	1 781	0.060832	0.130110

表 3 算法比较结果

船数	泊位数	本文算法		lingo		偏差
		目标函数(h)	运行时间(s)	目标函数(h)	运行时间(s)	Gap
15(13-2)	7(6-1)	437	39.8	405	1 174	7.90%
23(20-3)	11(10-1)	634	52.3	612	3 296	5.07%
30(26-4)	15(14-1)	808	64.6	783	4 778	3.19%
38(33-5)	19(17-2)	993	86.4	942	6 624	5.41%
46(40-6)	23(21-2)	1 183	120.7	Out of memory		-
53(28-7)	26(24-2)	1 362	165.9			-
60(52-8)	32(29-3)	1 549	181.2			-
均值	-	-	-	-	-	5.39%

由表 3 可知,当船舶与泊位数量按比例增加时,相比于 lingo 解的目标函数值,本文算法的优化结果偏差都在 10% 以内;且很多算例中 lingo 的运行时间过长,甚至无法在有效的时间内给出结果,而本文算法的运行时间均在 3 min 左右。综上,本文设计的算法可在较短时间内得到较好的优化解,尤其是适用于中大规模的算例求解。

5 结 论

针对散货码头深水大泊位数量不足,大型散货船的在港滞留时间过长等问题,本文对散货港口泊位分配与船舶调度进行集成优化研究,并给出了优化的减载移泊方案,有效地降低了所有船舶在港滞留时间。结果表明,在不增加大泊位数量的前提下,合理地设计减载移泊方案,并将泊位分配与船舶进

出港优化集成为一体,可有效提高码头的服务水平。

考虑问题的特点,设计了可规避不可行解的编码方案,并在遗传算法中嵌入禁忌表来有效地跳出局部最优解,为解决此类问题的算法提供思路。

考虑到船舶到港时间具有不确定性,进一步的研究可考虑船舶动态到港的情况下港口泊位分配与船舶调度的集成优化问题。

参考文献

- [1] 江振峰,陈东旭,杨忠振,等. 基于运输需求时/空特征的不定期船舶运输的调度优化[J]. 交通运输工程学报,2019,19(3):157-165
- [2] 许欢,刘伟,刘诗. 低碳经济下的港口泊位分配模型及其算法实现[J]. 计算机工程与应用,2014,50(6):219-225
- [3] 柴佳祺,李锋,宓为建,等. 基于启发式算法的散货码头排船问题研究[J]. 中国工程机械学报,2015,13(1):22-28
- [4] Ernst A T, Oğuz C, Singh G, et al. Mathematical models for the berth allocation problem in dry bulk terminals[J]. Springer, 2017, 20(5):459-473
- [5] 张新宇,李瑞杰,林俊,等. 双向通航港口船舶调度优化模型与算法[J]. 中国航海,2018,41(2):36-40
- [6] 郑红星,刘保利,张润,等. 考虑减载移泊的散货港口船舶调度优化[J]. 交通运输工程学报,2018,18(5):152-164
- [7] 朱云龙,罗焕佐,薛劲松,等. 港口业船舶优化调度模型设计[J]. 高技术通讯,2000,10(7):79-81
- [8] 禹鑫焱,卢靛,朱熠琛,等. 基于启发式动态规划的自动化停车场调度方法[J]. 高技术通讯,2019,29(4):352-361
- [9] 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
- [10] 刘杰. 集装箱码头泊位动态分配优化研究[D]. 广州:华南理工大学经济与贸易学院,2012:17-35
- [11] 曾庆成,张倩. 集装箱泊位分配干扰管理仿真优化模型与算法[J]. 中国科技论文在线,2009,4(10):742-746
- [12] 张新宇,林俊,郭子坚,等. 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(1):26-30
- [13] 唐伟伟. 船厂码头泊位调度优化研究[D]. 广州:华南理工大学土木与交通学院,2015:12-46
- [14] 童珊. 基于船舶优先权的集装箱港口泊位分配问题[J]. 交通运输工程与信息学报,2012,10(1):105-110
- [15] 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(5):197-203

Bulk port berth and ship integrated scheduling considering load shedding

Zheng Hongxing, Jiang Xue, Duan Shuang

(College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026)

Abstract

With the increasing size of ships and the bustle of bulk cargoes, increasing the utilization rate of large berths at bulk terminals and optimizing the order of ship entering and exiting the port has become the key to affect the service level of bulk cargo ports. For the bulk cargo port of a one-way channel multi-port pool, considering the factors such as the impact of tides, the rules of entry and exit, and the arrival time of ships, and taking into account the ship-loading and mooring operations of different unloading ships, the integrated optimization model of berth allocation and ship scheduling with minimum time is designed in a fixed period, and an improved genetic algorithm integrated with tabu search idea is designed. In the analysis of the example, the effectiveness of the scheme is verified by comparing with the existing two terminal operation schemes without considering the load shedding and the fixed load shedding. The effectiveness and scope of application of the algorithm is verified by comparing with the lingo software solution process.

Key words: load shedding, berth allocation, ship scheduling, tide, improved genetic algorithm