

文章编号:1006-2467(2019)01-0069-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.01.010

集装箱进出口码头泊位-堆场协同分配的动态决策

韩笑乐, 鞠留红, 钱丽娜, 陆志强

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对集装箱进出口码头泊位-堆场的调度问题,考虑船舶到港时间不确定性因素影响的资源协同分配多阶段决策过程,兼顾其鲁棒性与灵活性要求,提出基于两阶段近似的动态决策框架.在各个滚动决策点,通过信息和操作的动态分析,提出了船舶分类方法,建立基于随机场景的混合整数规划模型,其中包含固定性决策及多样本场景下的可调整预决策,并以最小化船舶总在港时间的期望值为目标.同时,针对决策逻辑设计了两阶段禁忌搜索算法以求解各个滚动决策点的优化问题,通过数值实验验证所提决策方法的有效性.

关键词: 集装箱码头; 动态决策; 调度; 不确定性

中图分类号: U 69; O 221

文献标志码: A

Dynamic Decision Making for the Integrated Allocation of Berth and Yard Resources at Import/Export Container Terminals

HAN Xiaole, JU Liuhong, QIAN Lina, LU Zhiqiang

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The multi-stage decision process of integrated resource reallocation at import/export container terminals is addressed, considering the uncertainty of vessel arrival time at operational level. To satisfy both robustness and flexibility requirement, a dynamic decision framework based on 2-stage approximation is proposed. At each decision point, the dynamics of information and operation are analyzed, based on which the vessel classification is proposed and a stochastic-scenarios-based mixed integer programming model is established. The model is to determine both the 1st-stage fixed decisions and the 2nd-stage adjustable pre-decisions, with the objective of minimizing expected dwelling time of all vessels. Dependent on such decision logic, a two-stage Tabu Search is proposed to solve the optimization problem at each decision point. Numerical experiments verify the efficiency and effectiveness of the proposed decision method, which makes better utilization of updating certain and uncertain information.

Key words: container terminal; dynamic decision-making; scheduling; uncertainty

随着海上运输业的快速发展,集装箱码头在全球物流业中的作用越来越重要.码头中泊位和堆场等核心资源的有效分配已成为提升其服务水平的关键.

键.现有文献大多将泊位和堆场视为相互独立的资源进行研究^[1-2],而在码头的实际运营过程中,泊位与堆场间存在相互联系和相互制约的关系,因此,近

收稿日期:2017-07-03

基金项目:国家自然科学基金(71502129,61473211)资助项目

作者简介:韩笑乐(1983-),男,江苏省江阴市人,博士,助理教授,研究方向为集装箱码头运营优化. E-mail:hanxiaole@tongji.edu.cn.

通信作者:陆志强,男,教授,博士生导师,电话(Tel.):021-69589803;E-mail:zhiqianglu@tongji.edu.cn.

年来不少研究者开始考虑泊位与堆场资源的协同作用^[3-4]. 另一方面,在码头的实际运营过程中还存在各种不确定性因素,其中船舶到港时间是最普遍的不可控因素^[5-6],其会导致码头作业无法准确安排、资源无法合理利用和船舶到港时间延长. Moorthy等^[5]针对船舶到港时间的不确定性,将泊位分配问题与堆场问题相结合,运用模拟退火算法进行求解; Xu等^[7]和 Zhen等^[8]在研究泊位分配问题的过程中考虑了船舶到港时间与作业时间的不确定因素; Zhen^[9]在对转运港的堆场模板进行求解的过程中考虑了时间与空间的不确定性,包括泊位位置以及在泊时间; Xiang等^[10]针对到港时间及作业时间不确定条件下的泊位分配问题,考虑经济效益及客户满意度,并采用自适应灰狼算法进行求解; Schepler等^[11]以多终端、多模式海运集装箱码头为研究对象建立了双目标模型,以最小化集装箱码头的运输时间及船舶到港时间,并采用基于混合整数规划分解的启发式算法进行滚动求解; Zhen^[12]从海运市场的不确定性出发,针对到港船舶装、卸载量的波动,研究了码头核心资源的有效分配. 在干扰环境下,为了最小化与原调度方案的偏差, Zeng等^[6]采用岸桥重调度、泊位重分配的方法解决突发的干扰问题,采用局部重搜索与禁忌搜索相结合的算法进行求解; Liu等^[13]将干扰恢复的重调度问题分为泊位位置、靠泊时间以及岸桥数量的分配和对每个岸桥具体调度的问题.

总之,针对不确定环境下的决策有2种方式,即前摄-反应式^[8]与滚动周期式^[14]. 前摄-反应式决策预先考虑不确定性因素,注重相对较长决策期间内决策的鲁棒性;而滚动周期式决策是利用最新的信息在较短决策期间内进行滚动决策,具有更强的灵活性. 区别于现有文献,本文主要针对集装箱进出口码头的泊位-堆场资源的协同分配,并兼顾决策的鲁棒性与灵活性,借鉴针对复杂多阶段随机优化过程、基于两阶段近似的决策框架^[15],将第1阶段固定性决策与第2阶段各场景下的可调整决策进行区分与结合,提出了定制化的动态决策方法,并验证其有效性.

1 问题建模与分析

1.1 泊位-堆场资源的协同分配模型

针对集装箱进出口码头的运营特点,对问题界定如下:泊位为连续类型,船舶为动态到港;堆场空间存在总量上限,船舶出口箱及其进口箱分别需要船舶在港期间以外的预存时间和留存时间;时间轴

和泊位长度需进行离散化处理. 为描述泊位与堆场之间的相互关系,定义如下参数: $i \in V = \{1, 2, \dots, v\}$, $j \in J = \{1, 2, \dots, r\}$, $t \in T = \{1, 2, \dots, w\}$ 分别为船舶、离散化泊位区段、离散化时间区段的编号及集合; L_i , W_i , A_i 分别为船 i 的长度、装卸作业时间、到港时间; N_i^D , N_i^L , T^D , T^L 分别为船 i 的进口箱量、出口箱量、进口箱留存时间段、出口箱预存时间段; S_t 为 t 时段可用堆场容量; $\omega \in \Omega = \{1, 2, \dots, q\}$, 为场景编号及集合; M 为一个足够大的正数. 此外,定义如下决策变量: s_i , e_i , f_i , g_i , b_i 均为整数变量,分别表示船 i 的作业开始时间、作业完成时间、出口箱堆场开放开始时间、进口箱堆场留存结束时间、占用泊位的编号下界; x_u , y_u^D , y_u^L 均为 0 或 1 的变量,其值取 1 时分别表示船 i 在 t 时段在港、船 i 的进口箱和出口箱在 t 时段在港; w_{ij} , α_{ijt} 均为 0 或 1 的变量,其值取 1 时分别表示船 i 使用泊位 j 、船 i 在 t 时段占用泊位 j ; γ_u^D , γ_u^L 均为整数变量,分别表示船 i 的进口箱、出口箱在 t 时段占用堆场的资源量. 两类资源间的相互关系如图 1 所示,图中: QC 表示每个岸桥每小时处理集装箱的数量. 构建确定性环境下泊位-堆场资源协同分配的优化模型.

目标函数为

$$\min z = \sum_i (e_i - A_i) \quad (1)$$

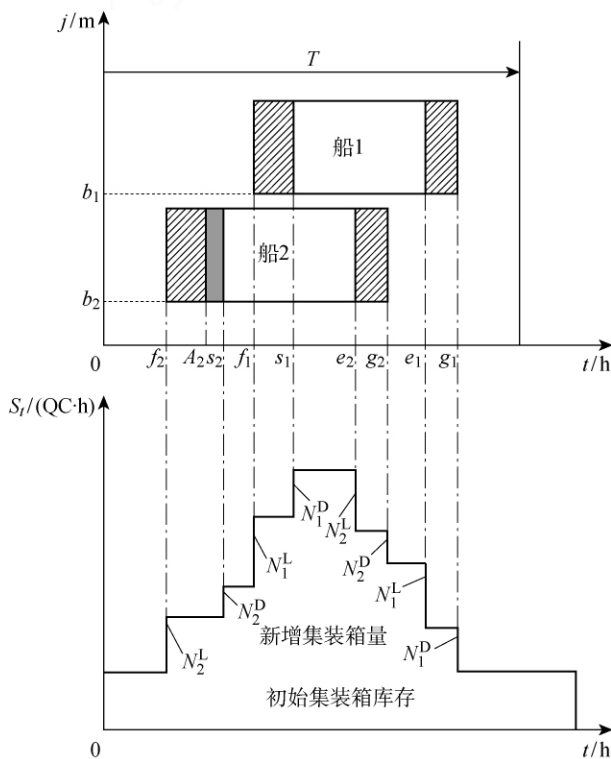


图 1 泊位-堆场资源分配的相互关系

Fig. 1 Interrelationship of berth allocation and yard allocation

约束条件分别为

$$s_i \leq tx_u + M(1 - x_u), \quad \forall i \in V, \quad t \in T \quad (2)$$

$$e_i \geq tx_u, \quad \forall i \in V, \quad t \in T \quad (3)$$

$$f_i \leq ty_u^L + M(1 - y_u^L), \quad \forall i \in V, \quad t \in T \quad (4)$$

$$e_i \geq ty_u^L, \quad \forall i \in V, \quad t \in T \quad (5)$$

$$s_i \leq ty_u^D + M(1 - y_u^D), \quad \forall i \in V, \quad t \in T \quad (6)$$

$$g_i \geq ty_u^D, \quad \forall i \in V, \quad t \in T \quad (7)$$

$$f_i = A_i - T^L, \quad \forall i \in V, \quad t \in T \quad (8)$$

$$g_i = e_i + T^D, \quad \forall i \in V, \quad t \in T \quad (9)$$

$$\sum_t x_u = e_i - s_i + 1, \quad \forall i \in V, \quad t \in T \quad (10)$$

$$\sum_t y_u^L = e_i - f_i + 1, \quad \forall i \in V, \quad t \in T \quad (11)$$

$$\sum_t y_u^D = g_i - s_i + 1, \quad \forall i \in V, \quad t \in T \quad (12)$$

$$b_i \leq jw_{ij} + M(1 - w_{ij}), \quad \forall i \in V, \quad j \in J \quad (13)$$

$$b_i + L_i - 1 \geq jw_{ij}, \quad \forall i \in V, \quad j \in J \quad (14)$$

$$\sum_{j \in J} w_{ij} = L_i, \quad \forall i \in V \quad (15)$$

$$(x_u + w_{ij} - 1)/2 \leq \alpha_{ijt} \leq (x_u + w_{ij})/2 \quad (16)$$

$$\forall i \in V, \quad j \in J, \quad t \in T$$

$$\sum_{i \in V} \alpha_{ijt} \leq 1, \quad \forall t \in T \quad (17)$$

$$\gamma_u^D = y_u^D N_i^D, \quad \forall i \in V, \quad t \in T \quad (18)$$

$$\gamma_u^L = y_u^L N_i^L, \quad \forall i \in V, \quad t \in T \quad (19)$$

$$\sum_{i \in V} (\gamma_u^D + \gamma_u^L) \leq S_t, \quad \forall t \in T \quad (20)$$

$$\sum_{i \in T} x_u \geq W_i, \quad \forall i \in V \quad (21)$$

$$s_i, e_i \in \{A_i, A_{i-1}, \dots, T\}, \quad \forall i \in V \quad (22)$$

$$f_i \in \{-T^L, T^L, \dots, 0, \dots, T\}, \quad \forall i \in V \quad (23)$$

$$g_i \in \{A_i, A_{i-1}, \dots, T\}, \quad \forall i \in V \quad (24)$$

$$b_i \in \{1, 2, \dots, J - L_i + 1\}, \quad \forall i \in V \quad (25)$$

$$x_u, y_u^D, y_u^L, w_{ij}, \alpha_{ijt} \in \{0, 1\} \quad (26)$$

$$\forall i \in V, \quad j \in J, \quad t \in T$$

目标函数(式(1))以常用的船舶总在港时间为衡量标准. 式(2)~(9)定义了与船 i 相关的各时间决策变量, 并限定其相互关系; 式(10)~(12)确保了船舶及其集装箱在港时段的连续性; 式(13)~(15)定义了船 i 的靠泊位置决策, 并确保了占用泊位区段的连续性; 式(16)~(17)基于 x_u, w_{ij} 定义了 α_{ijt} , 并且确保任意时段泊位区段的被占用量上限为 1; 式(18)~(20)基于船舶在港定义了堆场资源占用量, 并确保任意时段的堆场被占用量不超过其上限; 式(21)确保了各船的累计作业量满足集装箱装卸需求; 式(22)~(26)为决策变量的定义域.

1.2 动态性分析与船舶分类

在信息层面, 码头和船运公司对于到港时间预

估的准确性会随时间的推移而逐渐提高. 船舶的真实到达时间通常能够提前 1 d 获得; 而距离更远的船舶则只能预估到港时间的期望值, 其随机分布信息可以由场景 ω 描述.

在操作层面, 所提出的动态决策方法是基于滚动周期机制并以 1 d 作为决策点的间隔的. 定义周期 K 是从决策点 k 到决策点 $k+1$ 的时间段. 一方面, 在任意周期 K 开始时, 该周期内的到港船舶都已经确认到港时间, 周期 K 以外的后续船舶到港时间尚不确定; 而在周期 K 结束时, 周期 $K+1$ 内的到港船舶都将确认到港时间, 依次类推. 在一个决策周期内, 新的信息将不断被确认, 但已决策的计划不会被立即修改, 而必须等到下一个决策点再次更新决策. 另一方面, 对于已经离港但其进口箱仍留存在堆场, 以及尚未到港但其出口箱已预存堆场的船舶, 其到港时间不属于当前周期, 但仍会影响当前周期内的堆场占用决策.

基于上述动态性分析, 在各个滚动决策点 k 上, 将待决策船舶分为 3 类, 其信息和操作特性表述如下:

(1) A 类. 在决策点 k 已经开始但未完成作业, 包括某些在周期 $K-1$ 前到港和在周期 $K-1$ 内到港. A 类船舶不需要进行决策, 直接按照已有计划继续作业.

(2) B 类. 在决策点 k 尚未开始作业但会在周期 K 内到达. 对 B 类船舶引入 0 或 1 的决策变量 u_i 作为延迟判定因子, 因其中某些船会在周期 K 内开始作业 ($u_i=1$, 归入 B1 子类), 某些船会延迟到下一周期重新做出决策 ($u_i=0$, 归入 B0 子类). B0 类船舶需要决策其资源分配并予以执行, 而 B1 类船舶则与 C 类船舶进行同样操作.

(3) C 类. 在周期 $K+1$ 至 $K+[T^L/24 \text{ h}]$ 内到达. C 类船舶与 B1 类船舶一起可决策场景 ω 下的资源分配, 但其在周期 K 内不需要执行, 并保留在周期 $K+1$ 内调整的权利.

2 决策框架与优化算法

2.1 基于两阶段近似的动态决策框架

基于以上分析与分类, 在场景 ω 下扩充参数和决策变量, 构建基于两阶段近似的动态决策框架. 定义参数如下: T_k, T_{k+1} 分别为周期 K 和周期 $K+1$ 的开始时间; V^A, V^B, V^C 分别为 3 类船舶的子集; $A_{i,\omega}$ 为场景 ω 下船 i 的到港时间, 即场景 ω 下的实际到港时间, 且 $A_{i,\omega} = A_i, \forall i \in V^A \cup V^B, \omega \in \Omega; s_i^R, b_i^R, f_i^R (i \in V^A)$ 分别为 A 类船 i 的实际作业开始时间、

实际出口箱堆场开放开始时间、实际泊位位置. 定义相应的决策变量 $s_{i,\omega}$ 、 $e_{i,\omega}$ 、 $f_{i,\omega}$ 、 $g_{i,\omega}$ 、 $b_{i,\omega}$ 均为整数变量, 分别表示场景 ω 下船 i 的作业开始时间、作业完成时间、出口箱开放开始时间、进口箱留存结束时间、占用泊位的编号下界; $x_{i,t,\omega}$ 、 $y_{i,t,\omega}^D$ 、 $y_{i,t,\omega}^L$ 均为 0 或 1 的变量, 其值取 1 时分别表示场景 ω 下船 i 在 t 时段在港、船 i 的进口箱和出口箱在 t 时段在港; $w_{ij,\omega}$ 、 $\alpha_{ijl,\omega}$ 均为 0 或 1 变量, 其值取 1 时分别表示场景 ω 下, 船 i 使用泊位 j 、船 i 在 t 时段占用泊位 j ; $\gamma_{i,t,\omega}^D$ 、 $\gamma_{i,t,\omega}^L$ 均为整数变量, 分别表示场景 ω 下, 船 i 的进口箱、出口箱在 t 时段占用堆场的资源量. 另外, 如前所述, 对

于 B 类船舶, 有 $u_i \in \{0, 1\}$, $\forall i \in V^B$.

各决策点 k 的两阶段近似优化模型的逻辑架构如图 2 所示. 其中, 将现有参数作为第 1 阶段的确定信息和第 2 阶段不确定场景下的随机参数. 在决策对象中, 第 1 阶段的固定性决策 ξ_k 需要在本周期内执行, 而第 2 阶段的可调整决策 $\xi_{k+1,\omega}$ 用于辅助评估第 1 阶段决策的预决策, 不需要在本周期内执行, 后续周期随着信息的不断更新而确认, 仍可做出相应地调整. 因此, 决策点 k 的目标函数也包括了第 1 阶段的固定成本 $z(\xi_k)$, 以及第 2 阶段各场景下可调整成本的期望值 $E_\Omega[z(\xi_{k+1,\omega} | \xi_k)]$.

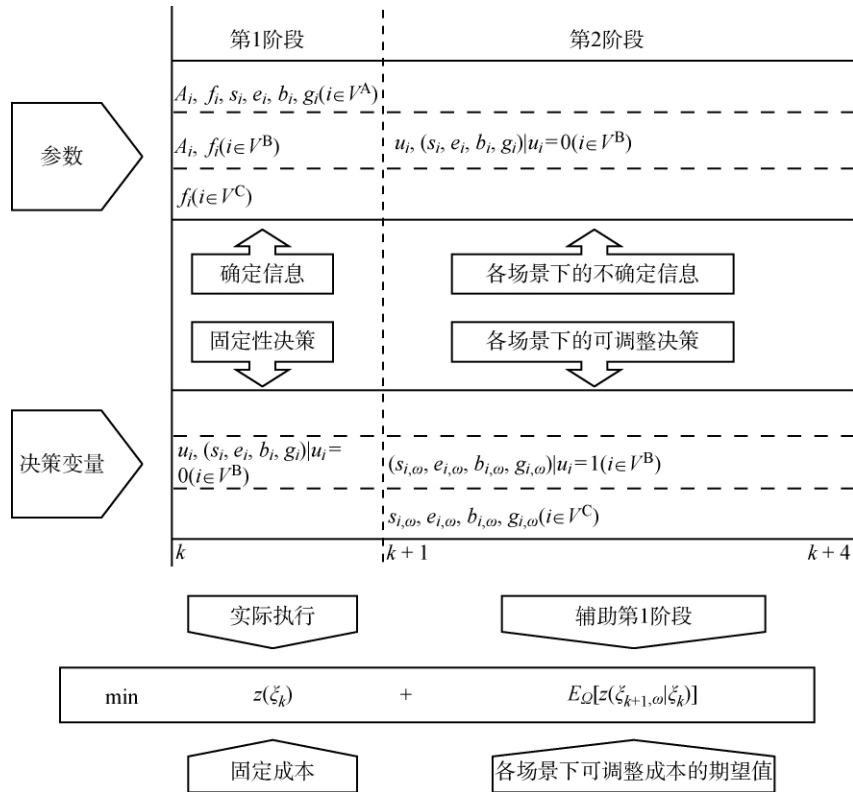


图 2 两阶段近似优化模型的逻辑架构

Fig. 2 Logic structure of two-stage approximation model

目标函数沿用式(1)的船舶总在港时间, 但综合第 1 阶段的固定性时间以及第 2 阶段各场景下的可调整期望时间, 即

$$\min z = \sum_{i,\omega} (e_{i,\omega} - A_{i,\omega}) / \Omega \quad (27)$$

约束条件的数学表述可通过泊位-堆场资源协同分配模型的约束在各场景 ω 下扩充得到. 另外, 对于 A 类船舶和决策所得的 B0 类船舶, 还需增加以下约束, 以确保各场景下决策的一致性:

$$s_{i,\omega} = s_i^R, \quad \forall i \in V^A, \quad \omega \in \Omega \quad (28)$$

$$f_{i,\omega} = f_i^R, \quad \forall i \in V^A, \quad \omega \in \Omega \quad (29)$$

$$b_{i,\omega} = b_i^R, \quad \forall i \in V^A, \quad \omega \in \Omega \quad (30)$$

$$-Mu_i \leq s_{i,\omega} - s_{i,1} \leq Mu_i \quad (31)$$

$$\forall i \in V^B, \quad \omega \in \Omega$$

$$M(u_i - 1) \leq s_{i,\omega} - T_{k+1} \leq Mu_i \quad (32)$$

$$\forall i \in V^B, \quad \omega \in \Omega$$

$$-Mu_i \leq b_{i,\omega} - b_{i,1} \leq Mu_i \quad (33)$$

$$\forall i \in V^B, \quad \omega \in \Omega$$

2.2 各决策点的两阶段禁忌搜索

由于各决策点的两阶段近似优化模型包含随机场景, 在实际算例规模下很难使用商用求解软件(如 Cplex 软件)直接求解, 所以本文基于图 2 的逻辑架构提出两阶段禁忌搜索(TS)算法, 其框架如图 3 所示. 其中, 外层 TS1 和内层 TS2(ω)分别搜索第 1 阶

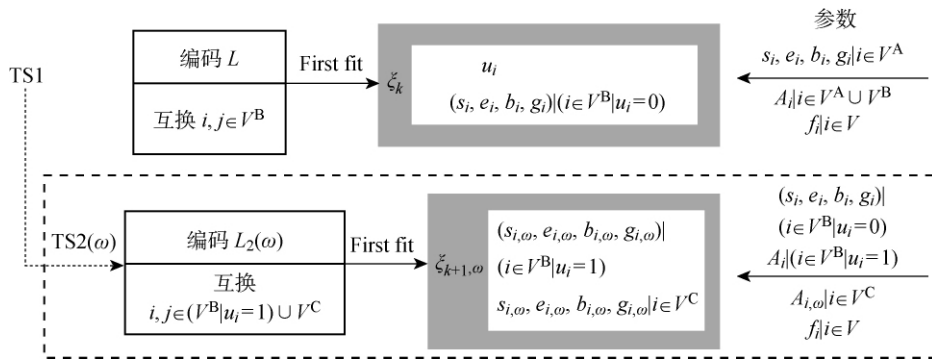


图 3 两阶段禁忌搜索算法的框架

Fig. 3 Framework of two-stage tabu search

段的固定性决策 ξ_k 和第 2 阶段各场景 ω 下的可调整决策 $\xi_{k+1, \omega}$. 在编码和搜索中, 均采用待决策船舶优先级来编码; 邻域生成通过互换 (Swap) 操作进行, 禁忌对象为上一步移动的互换操作, 禁忌次数在禁忌上限与禁忌下限之间随机生成, 并循环进行禁忌搜索直至最大循环次数. 在解码和评价中, 均采用首个适合 (First fit) 的解码方式, 按照当前优先级的顺序, 依次为船舶分配最早可用的资源; 以 TS1 层的当前决策作为 TS2(ω) 层的输入, TS2(ω) 层的当前决策则用于 TS1 层的评价.

在解码过程中, B 类船舶自然地划分为 2 类: 若能够在当前决策周期内安排并开始作业, 则为 B0 类; 否则, 将被延迟到下一个周期重新决策, 即为 B1 类. 这种分类作为第 1 阶段的固定性决策, 是在解码过程中自然区分的. 相较于显式指定类别, 这种隐式指定降低了不可行解或较差解出现的可能性. 若指定太多的 B0 类船舶, 则部分 B0 类船舶可能无法被安排在周期 K 而造成不可行解; 反之, 则可能导致周期 K 的资源利用不足与浪费.

3 数值实验与结果

本文基于 Zhen 等^[16]研究中的参数配置生成随机算例. 生成小、中、大 3 种问题规模, 对应的每周到港船舶数 V 分别为 20、30、40. 考虑到进、出口港与中转港运营的差异性, 设置堆场的名义利用率约为 50%, 即小、中、大问题规模下的堆场容量分别为 27 000、39 000、54 000 TEU, 并设置各船的进口箱占比服从均匀分布, 即 $U[0.2, 0.8]$.

按照本文所提出的动态决策框架依次进行连续 7 个周期的决策. 其中, C 类船舶的到港时间延迟量服从分布 $U[0, 10]$ h, 依此生成样本规模为 30 的场景池, 即 $|\Omega| = 30$; 船舶真实到港时间独立于所生成的场景. 在小、中、大问题规模下, 分别生成 10 个随

机算例. 对于每个算例, 设计如下 4 个对比实验:

实验 1 (Cplex 软件) 在确定性环境下, 基于完全后验信息, 使用 Cplex 软件单次求解第 1 阶段优化模型, 包含 7 个周期.

实验 2 (禁忌搜索) 在确定性环境下, 基于完全后验信息, 使用简化的动态决策框架, 即单次求解两阶段近似优化模型, 其中两阶段禁忌搜索的第 1、第 2 阶段决策区间分别包含第 1 个周期及 6 个后续决策周期.

实验 3 (动态决策) 在不确定性环境下, 基于随机场景信息, 使用动态决策框架, 即按照周期滚动求解两阶段近似优化模型, 在各周期中采用两阶段禁忌搜索.

实验 4 (前摄-反应决策) 在不确定性环境下, 基于无延迟的准点到港信息, 采用实验 2 的方法生成初始计划, 并采用右移 (Right-shift) 策略应对执行过程中的实际延迟.

在 C# (Visual Studio 2013) 语言环境下编程, 测试平台为 Intel Xeon E5-1650 v3 处理器, 主频为 3.50 GHz, 内存 16 GB. 实验结果见表 1. 其中: $z_1 \sim z_4$ 表示各项实验中 1 周内到港船舶的实际总在港时间; $t'_1 \sim t'_4$ 分别为 4 个实验的计算时间; $p_1 \sim p_3$ 为不同实验下 z 值的差别, $p_1 = (z_2 - z_1)/z_1$, $p_2 = (z_3 - z_1)/z_1$, $p_3 = (z_4 - z_3)/z_4$; “*” 的值表示 Cplex 软件在 5 h 内所得最好低界值, 否则, 为精确解. 由表 1 可见, 实验 1 是尝试在完美信息下的精确求解, 但其在实际决策中无法实现, 所得最优解或低界值可作为其他实验的对比对象. 虽然大部分算例能够获得最优解, 但其运算时间较长, 在每周到港船舶数分别为 20、30、40 条件下的平均计算时间分别为 85、136 和 191 min.

实验 2 与实验 1 采用完全相同的信息进行后验优化, 但其简化了所提动态决策框架下的两阶段禁

表 1 数值实验结果
Tab. 1 Results of numerical experiments

V	算例	实验 1		实验 2			实验 3				实验 4	
		z_1/h	t_1'/min	z_2/h	t_2'/min	$p_1/\%$	z_3/h	t_3'/min	$p_2/\%$	$p_3/\%$	z_4/h	t_4'/min
20	1	86	5	86	0	0	86	0	0	9	95	0
	2	106*	300	137	1	29	137	0	29	1	139	2
	3	70	2	70	0	0	70	0	0	10	78	0
	4	102*	300	113	0	11	114	0	12	14	133	0
	5	77	1	77	0	0	77	0	0	3	79	0
	6	81	4	81	0	0	82	0	1	4	85	0
	7	96	11	96	0	0	96	0	0	0	96	0
	8	80	12	80	0	0	81	0	1	0	81	0
	9	89	3	89	0	0	89	0	0	1	90	0
	10	105	213	105	0	0	106	0	1	21	135	0
	平均	89	85	93	0	4	94	0	4	7	101	0
30	1	116	92	118	1	2	119	1	3	8	130	2
	2	112*	300	123	4	10	123	1	10	2	125	43
	3	102	93	102	0	0	102	0	0	18	124	1
	4	118*	300	129	3	9	130	1	10	-1	129	5
	5	104	148	104	1	0	104	0	0	2	106	2
	6	109	25	109	1	0	109	1	0	3	112	3
	7	109	38	109	0	0	109	1	0	3	112	1
	8	110	47	110	1	0	110	0	0	1	111	3
	9	109	18	109	0	0	109	0	0	1	110	1
	10	105*	300	108	1	3	108	0	3	0	108	2
	平均	109	136	112	1	2	112	0	3	4	117	6
40	1	143	222	143	14	0	144	3	1	10	160	32
	2	142*	300	147	26	4	147	3	4	1	148	58
	3	130*	300	131	3	1	131	2	1	8	143	4
	4	142*	300	149	21	5	149	2	5	0	149	23
	5	130	59	130	10	0	130	2	0	5	137	12
	6	141	150	141	4	0	142	15	1	2	145	4
	7	142*	300	148	5	4	149	37	5	-1	148	7
	8	132	9	132	9	0	132	5	0	4	137	11
	9	150	139	150	9	0	150	3	0	3	155	7
	10	133	127	133	2	0	133	3	0	4	139	3
	平均	139	191	140	10	1	141	7	2	4	146	16

忌搜索,各规模下的 p_1 的均值均在 4% 以内,其 z_2 值与实验 1 中 Cplex 软件的最优解或低界值很接近,从而验证了禁忌搜索算法的有效性,且其运算时间具有显著优势.

实验 3 采用所提出的动态决策框架,在各规模下的 p_2 的均值分别为 4%、3% 和 2%,可见第 2 阶段决策中针对已知的随机场景信息做出可调整决

策,可以有效应对不确定性因素的影响,获得更好的第 1 阶段固定决策,从而增强多阶段决策的后验优化.

实验 4 采用与实验 3 相同的不确定性环境,并用典型的前摄-反应决策方式. 相比而言,动态决策框架所获在各规模下的 p_3 的均值分别为 7%、4% 和 4%,可见其充分利用了已知随机场景信息的必

要性和有效性.

为了验证在更大规模下数值实验的效果,本文在 $V=50,60$ 的条件下进行数值实验,所得结果见表 2. 其中, $p_4 = (z_3 - z_2)/z_2$.

由于 Cplex 软件在 $V=40$ 时已经出现较多算例无法在可接受时间内求得精确解的问题,所以在更大规模下不进行实验 1 的求解. 实验 2 是基于完全后验信息下采用所提出的简化两阶段禁忌搜索算法进行求解的,由表 1 可见其与实验 1 所求的解足够接近,因此,在更大规模下以实验 2 作为对比

对象.

在 $V=60$ 时,实验 3 在不确定环境下采用所提出的动态决策框架进行求解,所得结果与实验 2 的结果基本一致,其 p_4 值均为 0;而实验 4 与实验 3 的不确定环境相同,采用前摄-反应决策方式,相对而言,所提出的动态决策框架(实验 3)在 $V=50,60$ 下对 z 的改善程度(p_3 值)分别为 7%和 4%.

对更大规模的实验数据进行分析表明,所提出的基于随机场景的动态决策框架及两阶段禁忌搜索算法能够在各规模下有效地应对不确定性因素.

表 2 大规模下的数值实验结果
Tab. 2 Results of large scale numerical experiments

V	算例	实验 2		实验 3				实验 4	
		z_2/h	t'_2/min	z_3/h	t'_3/min	$p_4/\%$	$p_3/\%$	z_4/h	t'_4/min
50	1	179.0	54	179.0	15	0	11	201.0	60
	2	182.0	116	179.0	10	-2	2	183.0	154
	3	167.0	76	168.0	24	1	6	179.0	111
	4	188.0	160	187.0	48	-1	24	245.0	201
	5	158.0	38	158.0	13	0	8	171.0	59
	6	174.0	48	174.0	11	0	1	176.0	57
	7	175.0	10	175.0	103	0	5	185.0	9
	8	165.0	22	165.0	11	0	6	175.0	38
	9	183.0	14	183.0	13	0	2	186.0	15
	10	174.0	23	174.0	17	0	5	183.0	30
	平均	174.5	56	174.2	27	0	7	188.4	73
60	1	205.0	304	205.0	236	0	11	231.0	293
	2	209.0	633	209.0	66	0	1	211.0	859
	3	203.0	345	203.0	96	0	7	218.0	771
	4	216.0	562	216.0	144	0	2	220.0	672
	5	182.0	167	182.0	54	0	4	190.0	224
	6	201.0	109	201.0	99	0	3	207.0	136
	7	205.0	116	205.0	153	0	0	206.0	97
	8	201.0	276	201.0	55	0	4	209.0	393
	9	199.0	99	199.0	43	0	2	204.0	85
	10	209.0	290	209.0	75	0	5	221.0	306
	平均	203.0	290	203.0	102	0	4	212.0	384

4 结语

本文针对集装箱进出口码头泊位-堆场的调度问题,提出多阶段随机决策过程的两阶段近似、设计兼顾鲁棒性与灵活性的动态决策框架. 一方面,通过判断并延迟 B1 类船舶的决策,充分发挥了准确信息的作用;另一方面,通过随机场景下的第 2 阶段可

调整决策,充分利用了最新获得的不确定性信息. 同时,通过数值实验中的不同策略对比,验证了所提方法的有效性. 后续研究将考虑更复杂的不确定性环境,如装卸载箱量和天气等影响的因素.

参考文献:

[1] BIERWIRTH C, MEISEL F. A follow-up survey of

- berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals [J]. **European Journal of Operational Research**, 2015, 244(3): 675-689.
- [2] CARLO H J, VIS F A, ROOERGEN K J. Storage yard operations in container terminals: Literature overview, trends, and research directions[J]. **European Journal of Operational Research**, 2014, 235(2): 412-430.
- [3] JIN J G, LEE D H, HU H. Tactical berth and yard template design at container transshipment terminals: A column generation based approach[J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2015, 73: 168-184.
- [4] TAO Y, LEE C Y. Joint planning of berth and yard allocation in transshipment terminals using multi-cluster stacking strategy[J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2015, 83: 34-50.
- [5] MOORTHY R, TEO C P. Berth management in container terminal: The template design problem[J]. **Operations Research Spectrum**, 2006, 28(4): 495-518.
- [6] ZENG Q, YANG Z, HU X. Disruption recovery model for berth and quay crane scheduling in container terminals[J]. **Engineering Optimization**, 2011, 43(9): 967-983.
- [7] XU Y, CHEN Q, QUAN X. Robust berth scheduling with uncertain vessel delay and handling time[J]. **Annals of Operations Research**, 2012, 192(1): 123-140.
- [8] ZHEN L, LEE L H, CHEW E P. A decision model for berth allocation under uncertainty[J]. **European Journal of Operational Research**, 2011, 212(1): 54-68.
- [9] ZHEN L. Yard template planning in transshipment hubs under uncertain berthing time and position[J]. **Journal of the Operational Research Society**, 2013, 64(9): 1418-1428.
- [10] XIANG X, LIU C C, MIAO L X. A bi-objective robust model for berth allocation scheduling under uncertainty[J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2017, 106: 294-319.
- [11] SCHEPLER X, BAILEY S, MICHEL S, *et al.* Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port[J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2017, 100: 38-62.
- [12] ZHEN L. Container yard template planning under uncertain maritime market[J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2014, 69: 199-217.
- [13] LIU C C, ZHENG L, ZHANG C R. Behavior perception-based disruption models for berth allocation and quay crane assignment problems[J]. **Computers & Industrial Engineering**, 2016, 97: 258-275.
- [14] CHANG D, JIANG Z, YAN W, *et al.* Integrating berth allocation and quay crane assignments[J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2010, 46(6): 975-990.
- [15] ZHANG G M, SMILOWITZ K, ERERA A. Dynamic planning for urban drayage operations[J]. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, 2011, 47(5): 764-777.
- [16] ZHEN L, CHEW E P, LEE L H. An integrated model for berth template and yard template planning in transshipment hubs[J]. **Transportation Science**, 2011, 45(4): 483-504.