

基于关键资源优先的三级装卸搬运分时协调策略

陶莎^{1,2}, 胡志华², 盛昭瀚¹

(1. 南京大学 工程管理学院, 南京 210093; 2. 上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306)

摘要: 研究基于关键资源优先的单元化“装卸、搬运、装卸”三级作业链的调度问题. 在已知关键资源调度方案的条件下, 将两个非关键各作业级的调度问题分别转化为最小单位流问题, 并建立相应的0/1整数规划模型求解. 为求解大规模问题, 提出三级装卸搬运的分时协调策略. 参照宁波港码头数据, 设计面向集装箱码头的仿真算例, 实验结果验证了所提出模型和策略的有效性.

关键词: 关键资源; 单元化装卸搬运; 三级装卸搬运作业链; 分时协调策略

中图分类号: F253.4

文献标志码: A

Time-dependent coordination strategies for key resource prioritized three-stage handling operations

TAO Sha^{1,2}, HU Zhi-hua², SHENG Zhao-han¹

(1. School of Engineering and Management, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China. Correspondent: TAO Sha, E-mail: shirley_tao211@126.com)

Abstract: The problem of unitized three-stage operational chain for material handling operations with key resource priority conditions is studied, including three sub-processes: loading, unloading and transport. Based on the known scheduling scheme of the key resource, the two non-critical stage scheduling problems are converted into the minimum unit flow problem respectively, and the corresponding 0/1 integer programming models are established. In order to solve the large-scale problem, time-dependent clustering and coordination strategies are developed. In the background of real Ningbo port terminal, the numeric study is conducted to verify the effectiveness of the model and strategy.

Keywords: key material; material handling by unit; three-stage operational chain for material handling operations; time-dependent coordination strategies

0 引言

装卸和搬运是重要的物流活动, 对运输、储存、配送、包装、流通加工等物流活动进行有效联结. 在中国, 铁路运输在始发地和到达地的装卸搬运作业费大致占总物流费用的20%左右; 在中等批量的生产车间里, 消耗在原材料、工具、零件等的搬运和等待时间占总时间的近95%, 费用占全部生产费用的30%~40%. 可见, 装卸搬运是提高物流效率和质量的关键.

集装箱码头是装卸搬运活动密集的典型场所^[1]. 其装卸搬运作业主要是指集装箱的装卸搬运过程, 装

卸搬运设备主要有集卡、龙门吊、桥吊、AGV等. 目前的研究重点集中于码头装卸搬运设备优化配置、设备优化调度(包括单种设备的类型选择、数量配置调度问题^[2-3]以及多种设备数量配比和协调作业^[4-6]问题)以及装卸搬运结合储位分配的研究^[7]等问题. 研究的侧重点包含对基本问题的分析建模^[8]、算法设计^[6-7,9]和基于模拟微观行为特征的仿真研究^[10]等.

然而, 目前尚缺乏将物流存储系统中的装卸搬运作为一个新的共性问题进行的研究, 装卸搬运决策的一般性理论研究成果还非常少见. 本文研究基于关键资源优先的单元化三级作业链调度问题, 在关键资源

收稿日期: 2014-05-25; 修回日期: 2014-11-07.

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(71390520); 国家自然科学基金重点项目(71390521); 国家自然科学基金面上项目(71101088, 71471077); 国家自然科学基金青年项目(71101088); 上海市曙光计划项目(13SG48); 江苏省研究生科研创新计划项目(KYZZ_0041).

作者简介: 陶莎(1989—), 女, 博士生, 从事物流运作优化、社会科学计算实验的研究; 胡志华(1977—), 男, 副教授, 从事港航与物流管理、计算智能等研究.

优先的条件下,将两非关键各作业级的调度问题分别转化为最小单位流问题;为满足大规模问题求解的实际需求,进一步提出三级装卸搬运的分时协调策略;最后,参照宁波港码头真实参数,设计面向集装箱码头的装卸搬运作业仿真算例,以验证模型和策略的有效性。

1 问题描述

三级装卸搬运作业链完成“装卸→搬运→装卸”的物流作业。装货和卸货发生在装卸作业区,搬运则将两个区域连接起来,形成三级装卸搬运作业链,具体参见文献[1]。本文研究单元化三级装卸搬运作业链,即货物独占装卸和搬运设备,适用于集装箱堆场和标准件仓储等典型物流作业环境。优化设备数量配比并合理安排设备作业序列,使各级设备流畅衔接地高效完成作业任务,是优化装卸搬运作业链的关键。

在实际背景中,三级装卸搬运的各级作业设备往往存在地位差异。以港口码头为例,桥吊、集卡、龙门吊协调作业构成的三级装卸搬运作业链,桥吊成本高、数量少、作业时间长,是影响码头作业效率的关键,因此为关键设备资源。关键设备资源所在的作业级称为关键作业级(简称关键级),关键级优先是指其他非关键资源服从并配合关键资源的调度。本文设关键级为装卸级,这是由于搬运级的设备(如传送装置、集卡等)灵活快捷、成本相对低等特点使其难以成为关键资源。

基于关键资源优先的三级装卸搬运集成优化问题可以简述为:已知一定量的作业任务和关键级调度计划,合理调度非关键作业级设备,达到既满足关键作业级调度计划的实现,又达到自身环节的目标(如设备使用数最少)。

模型建立基于以下假设:

假设1 任务装卸位信息确定,考虑“卸→搬运→装”和“装→搬运→卸”同时进行的多级装卸搬运任务。

假设2 关键级唯一,且关键级作业计划确定,并确保实现。

假设3 装卸设备的装卸操作时间为恒定,运输设备需在装卸设备的装卸操作开始之前就位等候。

假设4 设备速度恒定,启动时间忽略不计。

假设5 装卸设备在所属装卸作业区内部活动,装卸设备和搬运设备具有明确的分工,搬运设备只有与装卸设备合作才能完成装货和卸货任务。

2 数学模型

已知关键级的调度计划,即各任务作业顺序和时间。基于假设2,为确保关键级作业计划实现,可计算

两非关键级的任务开始作业时间参数。在服从关键级作业调度的条件下,分别构造可达矩阵,建立最小单位流模型。不妨引入 $s \in \{1, 2, 3\}$ 分别表示3个作业级:装卸、搬运、装卸,令 $s = 1$ 为关键级。此外,定义其他已知的集合和参数。集合 $J = \{1, 2, \dots, N^J\}$, $a, b \in J$ 表示实际任务集合; $J' = \{SN, 1, 2, \dots, N^J, EN\}$, $a, b \in J'$ 表示包含虚拟起点、终点的任务集合;参数 $S_{a \in J}^1$ 表示关键级各任务的开始作业时刻; $T_{a \in J}^2$ 表示 a 任务的搬运运输时间; $\tau_{a, b \in J}^2$ 表示 a, b 两任务之间搬运级设备移动时间,包含 a 任务起点、终点两作业位之间的搬运时间 $T_{a \in J}^2$ 、 a 被后续作业设备操作时间和搬运设备在任务 a 终点作业位与任务 b 起点作业位之间的移动时间3个部分; $\tau_{a, b \in J}^3$ 表示第3级设备在 a, b 任务的作业位之间的移动时间;定义布尔参数 $E_{a \in J}$ 表示各任务的作业方向,如果是“卸($s = 1$)→搬运→装”,则 $E_{a \in J} = 1$,如果反方向作业,则 $E_{a \in J} = 0$;定义装卸操作时间参数 α 和 β 分别为第1级和第3级设备的装卸操作时间,由假设3,装卸操作时间等于搬运设备的预先等待时间。

可根据已知参数进一步计算非关键作业各级的时间参数。根据关键级优先的要求,在符合关键级调度的条件下,分别构造出非关键作业级任务的可达矩阵。该可达矩阵对应的有向图是从虚拟发点到虚拟收点的有向网络流图。

定义以下计算参数。

$$1) S_{a \in J}^{s=2,3}. \text{第 } s \text{ 级的各任务作业开始时刻,表示为}$$

$$S_{a \in J}^s = \begin{cases} S_{a \in J}^1, & s = 2, E_a = 1; \\ S_{a \in J}^1 + \alpha + T_{a \in J}^2 - \beta, & s = 3, E_a = 1; \\ S_{a \in J}^1 - \alpha - T_{a, J}^2 - \beta, & s = 2 \text{ or } 3, E_a = 0. \end{cases} \quad (1)$$

非关键级的任务开始作业时刻均由关键级作业参数计算得到,体现关键级的优先性。第2级和第3级任务开始作业时刻需要根据任务作业方向 $E_{a \in J}$ 而定。式(1)还体现了多级装卸搬运的相邻两级之间的无延迟的作业连贯性。

2) $R_{a, b \in J'}^s \in \{0, 1\}$. 第 s 级的可达矩阵。 $R_{a, b \in J'}^s$ 表示在不违背关键级作业计划的条件下,第 s 级设备是否可以作业任务 a 之后再作业任务 b 。若 $R_{a, b \in J'}^s = 1$,则表示第 s 级设备可以作业任务 a 之后再作业任务 b ;反之亦然。计算如下:

$$R_{a, b \in J'}^s = \begin{cases} 1, & a = SN, b \in J; \\ 1, & b = EN, a \in J; \\ 1, & S_{a \in J}^s + (3 - s) \cdot \alpha + (2 - s) \cdot \beta + \tau_{a, b \in J}^s \leq S_{b \in J}^s; \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (2)$$

如此构成的可达矩阵描述了任意两任务构成的作业顺序的可行性.

从虚拟任务 SN 可以作业任意实际任务, 是网络图的发点; 类似的, 虚拟任务 EN 是网络图的收点; 规定所有任务都不可达本身, SN 和 EN 之间均不可达; 当设备到达任务 b 的时刻不大于 b 的开始时刻 $S_{b \in J}^s$ 时, 网络图有弧 (a, b) , $R_{a, b \in J'}^s = 1$; 反之则为 0.

基于网络流思想, 建立第 s 级作业调度数学模型. 第 2 级和第 3 级作业调度模型的通用模型 ($s = 2, 3$) 为

$$\min f_1^s = \sum_{b \in J'} x_{SN, b}^s \quad (3)$$

$$\text{s.t. } x_{a, b}^s \leq R_{a, b}^s, \forall a, b \in J; \quad (4)$$

$$\sum_{a \in J'} x_{a, b}^s = \sum_{a \in J'} x_{b, a}^s = 1, \forall b \in J; \quad (5)$$

$$\sum_{b \in J'} x_{SN, b}^s = \sum_{a \in J'} x_{a, EN}^s. \quad (6)$$

均是将作业调度问题转化为最小单位流问题. 两作业级的模型是相互独立的、完整的模型.

0/1 决策变量 $x_{a, b \in J'}^s = 1$ 表示第 s 级设备作业完任务 a 之后作业任务 b , 反之亦然. 上述模型表达的问题即是从发点到收点的经过所有中间点可行流流量最小化问题. 从发点到收点的一条流的含义是: 一台设备从虚拟起点出发, 作业中间流经的任务, 最后到虚拟收点的作业序列. 因此模型的最优解表示, 在关键设备调度计划满足的前提下, 第 s 阶段达到设备使用数量最少目标的作业方案. 约束 (4)~(6) 的实际含义为确保关键设备调度计划满足的流量限制条件, 经过弧上流只能是单位流, 并且收发平衡, 即发点的输出量等于收点的输入量. 目标 (3) 实际含义为作业设备使用数量最小化. 此外可以考虑其他目标

$$\min f_2^s = \omega_1^s \cdot \left(\sum_{b \in J'} x_{SN, b}^s \right) + \omega_2^s \cdot \left(\sum_{a, b \in J} x_{a, b}^s \cdot \tau_{a, b}^s \right); \quad (7)$$

$$\min f_3^s = \sum_{a, b \in J'} x_{a, b}^s \cdot c_{a, b}^s. \quad (8)$$

式 (7) 表示总成本最小化, 总成本包含固定成本和可变成本, ω_1^s 和 ω_2^s 分别是单个设备的启动成本和单位时间的运输成本. 式 (8) 表示设备总等待时间最小化, $c_{a, b}^s$ 是第 s 级的两任务之间的设备等待时间, 表示为

$$c_{a, b}^s = \begin{cases} \max\{0, S_b^s\}, & a = SN, b \in J; \\ S_b^s - S_a^s - [(3-s) \cdot \alpha + (2-s) \cdot \beta + \tau_{a, b}^s], & a, b \in J; \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (9)$$

对模型的解 $x_{a, b \in J'}^s$ 作简单换算, 可以计算设备使用数量 NE^s , 以及每台设备的任务作业顺序 $P_i^s, i \in$

$\{1, 2, \dots, NE^s\}$, 直观表示设备作业方案. 这里不再赘述.

3 三级装卸搬运的分时协调策略

由于规划求解器能力限制, 模型难以求解大规模问题. 考虑时间维度, 各级任务按一定的规则根据时间特征进行划分, 提出三级装卸搬运的分时协调调度策略. 分时协调策略包括分时策略和协调策略.

3.1 分时策略

时间的有序性决定任务的有序性, 因此以开始作业时间为特征的各任务集合是一个时间有序样本集合. 作业级作业时间的划分问题 (时段划分数为 Γ) 可以转化为时间有序的任务样本的聚类问题. 将任务样本按时间特征从小到大排列, 在此基础上, 采用有序样本聚类方法对排列的样本保持原顺序地分割, 直观上将整体时间过程分为几个阶段, 达到分时的目的. 由于时间特征的无差异性, 分时策略具有一般性, 不受作业性质、作业环境等因素的影响. 本节介绍一般性的分时策略, 已知某作业级的各个任务作业开始时间 $S_{a \in J}^s, J$ 是任务集合.

采用的统计学中有序样本聚类的最优分割法. 最优分割法的聚类步骤如下:

Step 1 定义样本分法. 定义 $b(n, k)$ 表示将 n 个有序样本分成 k 类的某种分法, 通常记分法 $b(n, k)$ 为

$$\begin{cases} C_1 = \{i_1, i_1 + 1, \dots, i_2 - 1\}, \\ C_2 = \{i_2, i_2 + 1, \dots, i_3 - 1\}, \\ \vdots \\ C_k = \{i_k, i_k + 1, \dots, i_{k+1} - 1\}. \end{cases}$$

其中 $i_1 = 1 < i_2 < \dots < i_k < i_{k+1} - 1 = n$, 即 $i_{k+1} = n + 1$.

Step 2 定义类的直径. 设某类 C 包含样本 $\{i, i + 1, \dots, j\}, i < j$, 记为 $C = \{i, i + 1, \dots, j\}$. 定义符号 $D_{i, j \in J''}$ 表示类的直径, 表示为

$$D_{i, j} = \sum_{l=i}^j \left(S_l^s - \frac{\sum_{t=i}^j S_t^s}{j - i + 1} \right)^2. \quad (10)$$

从式 (10) 可以看出, 类直径本质就是样本方差和, 是类的均值 $\sum_{t=i}^j S_t^s / (j - i + 1)$.

Step 3 定义损失函数. 定义某种分类法的损失函数 $L[b(n, k)]$, 表示为

$$L[b(n, k)] = \sum_{t=1}^k D(i_t, i_{t+1} - 1), \quad (11)$$

其值越小表示各个类的距离越小, 分类越合理. 因此需要寻找一种分类方法, 使得损失函数最小, 不妨记

为 $b^*(n, k)$.

最优分割法的核心部分基于动态规划思想的递推公式, 表示为

$$\begin{cases} L[b^*(n, 2)] = \min_{2 \leq j \leq n} \{D(1, j-1) + D(j, n)\}, \\ L[b^*(n, k)] = \min_{k \leq j \leq n} \{L[b^*(j-1, k-1)] + D(j, n)\}. \end{cases} \quad (12)$$

将任务按开始作业时间排序, 得到新的任务集合, 即有序样本. 记为 $J'' = \{1, 2, \dots, N^J\}$, 满足 $\forall i \in J', i < N^J, S_i^s \leq S_{i+1}^s$. 设置时段划分数为 Γ , 按照式(12), 求最优分类 $b^*(N^J, \Gamma)$, 使损失函数达到最小.

3.2 协调策略

分时策略每个独立时间段的调度作业在时间上有一定的先后顺序, 因此需要建立相邻时间段上的设备作业协调机制, 将各时间段上的设备调度综合和连贯起来. 假设时段集合为 $\Omega = \{1, 2, \dots, \Gamma\}, t \in \Omega$. 已知各个时段的设备最优调度方案, 设某 $t \in \Omega$ 时段的调度方案的设备使用数为 $N_{t \in \Omega}$, 则定义该时段设备集合为 $E_t = \{1, 2, \dots, N_t\}, e_t \in E_t, t \in \Omega$. 定义已知参数符号 $P_t^{e_t}$ 是 t 时段设备 e_t 的作业序列. 各设备开始作业时刻和任务编号分别为 ST_{e_t} 和 $SJ_{e_t} \in J$, 各设备最后作业完成时刻和任务编号分别为 ET_{e_t} 和 $EJ_{e_t} \in J$, 任务间的运输时间为 $\tau_{a, b \in J}$. 第1时段到 t 时段合并后的总调度方案为 $H_{t \in \Omega}^{e \in E'}$, 其中时段方案合并之后的使用设备集合为 $E' = \{1, 2, \dots, N^{E'}\}, e \in E'$. 显然, 当 $t = \Gamma$ 时, $H_{\Gamma}^{e \in E'}$ 为所有任务调度的总体方案. 定义合并1时段到 t 时段后的总调度方案的各设备最后作业完成时刻和任务编号分别为 $ET_{e \in E'}$ 和 $EJ_{e \in E'}$.

设计最小时差法协调相邻时段上的设备作业方案, 使得设备得以重复利用, 最终得到总的调度方案. 该方法的思路是在时间条件满足的前提下, 将前后时

间段联系最紧密的设备调度方案衔接在一起, 由同一个设备完成. 联系紧密程度由时差大小衡量. 定义时间差变量 $\delta_{e_1, e_2}, e_1, e_2 \in E_t \cup E'$ 表示两设备作业时段间的时间差.

算法1 最小时差协调算法.

输入: $E_t, P_t^{e_t}, ST_{e_t}, SJ_{e_t}, EJ_{e_t}, ET_{e_t}, \tau_{a, b}, a, b \in J, e_t \in E_t, t \in \Omega$;

输出: $E', H_{\Gamma}^{e \in E'}$.

Step 1: 令 $t = 1, E' = E_t, H_{\Gamma}^e = P_t^{e_t}, ET_e = ET_{e_t}, EJ_e = EJ_{e_t} \in J$.

Step 2: 判断 $t \geq \Gamma$, 若成立, 则算法结束, 输出 $H_{\Gamma}^{e \in E'}$; 否则, 转入 Step 3.

Step 3: 对于 $\forall e \in E', e_{t+1} \in E_{t+1}$, 计算时间差 $\delta_{e, e_{t+1}} = ST_{e_{t+1}} - ET_e - \tau_{EJ_e, SJ_{e_{t+1}}}$, 寻找 $e^* \in E', e_{t+1}^* \in E_{t+1}$ 使得条件公式 $\delta_{e^*, e_{t+1}^*} = \min(\delta_{e, e_{t+1}} | \delta_{e, e_{t+1}} \geq 0)$ 成立. 若存在 e^*, e_{t+1}^* , 则转入 Step 4; 否则, 转入 Step 5.

Step 4: $H_{\Gamma}^* = H_{\Gamma}^* \oplus P_t^{e_{t+1}^*}$, 令 $E_{t+1} \setminus \{e_{t+1}^*\}$, 转入 Step 3.

Step 5: 合并集合 $E' = E' \cup E_{t+1}$, 并对新添元素的集合 E' 修正参数 $ET_{e \in E'}, EJ_{e \in E'} \in J, H_{\Gamma}^{e \in E'}$. 令 $t = t + 1$, 转入 Step 2.

Step 4 中出现的运算符 \oplus 表示向量连接, 例如向量 $a = [1, 2], b = [5, 6], a \oplus b = [1, 2, 5, 6]$.

4 算例仿真

4.1 码头参数与集合设置

以码头装卸搬运作业为例. 港口背景下的典型装卸搬运是“桥吊-集卡-龙门吊”构成的集装箱装卸搬运作业链. 考虑桥吊、龙门吊和集卡的作业成本比率为20:5:1, 令桥吊装卸作业级为关键级, 集卡搬运级和龙门吊装卸级分别是三级装卸搬运的第2级和第3级. 以宁波港为原型, 设定港口参数, 如图1所示.

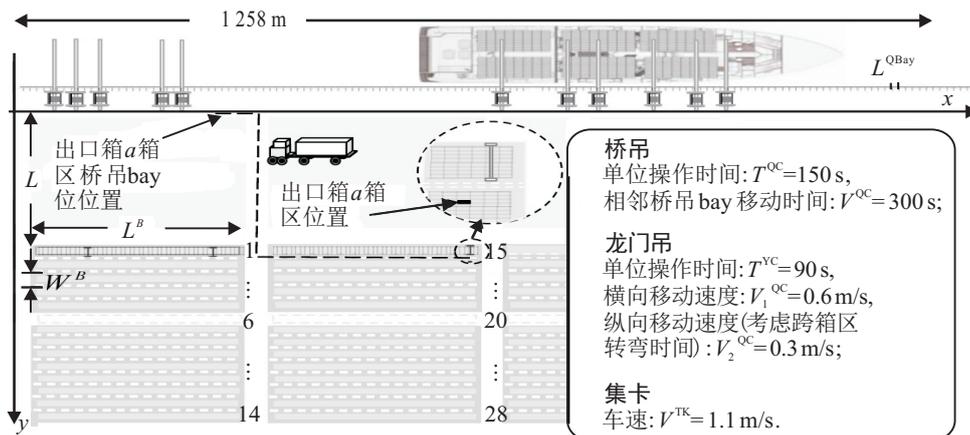


图1 港口分布示意图

由于数学模型中介绍的部分已知参数在实际港口背景下无法直接获得, 为了设计更贴近实际的算例, 先给出港口背景下的集合和原始参数, 通过计算获得数学模型需要的已知参数. 新增集合和参数: 堆场箱区编号集合 $B = \{1, 2, \dots, N^B\}, m \in B$, 共 56 个箱区, 箱区编号从左至右, 从上至下依次编号 (见图 1). 根据实际数据, 图 1 中横向通道宽度约等于一个箱区, 因此, 为计算方便, 添加虚拟箱区, 编号为 6, 20, 34, 49. 堆场 bay 位编号集合 $I^{Bay} = \{1, 2, \dots, N^{Bay}\}, i \in I^{Bay}$, 每个箱区可以摆放的集装箱 bay 数为 $N^{Bay} = 45$ 个, 编号从左到右为 1~45 (见图 1). 桥吊 bay 集合 $I^{Qbay} = \{1, 2, \dots, N^{Qbay}\}, k, k_1, k_2 \in I^{Qbay}$, 海岸线长度为 1258 m, 假定将对船舶上 bay 的定位对应为该海岸线范围内的绝对定位, 设置总 bay 位数 $N^{Qbay} = 220$, 岸线从左至右依次编号, 称为桥吊 bay. 桥吊编号集合 $G = \{1, 2, \dots, N^G\}, n \in G$, 桥吊共 16 台, 在岸线前沿并排相互不能逾越. 每个桥吊都对应负责的桥吊 bay 编号集合, 桥吊按一定的顺序作业集装箱, 作业顺序确定. 桥吊必须全部完成其负责的一个 bay 的作业才能转换到下一个 bay, 相邻 bay 之间的移动时间是 $v^{QC} = 300$ s.

已知任务的箱区编号 $P_{a \in J}^Y \in B$; 箱区 bay 位编号 $P_{a \in J}^{Bay} \in I^{Bay}$; 任务的桥吊 bay 编号 $P_{a \in J}^{QBay} \in I^{QBay}$; 参数 $E_{a \in J} = 1$ 表示任务是进口箱, 任务经历“桥吊卸、集卡搬运、龙门吊装”的作业, 反之, 出口箱值为 0; 每个桥吊 bay 由桥吊 $Q_{k \in I^{QBay}}$ 负责. 另外, 设置参数桥吊和龙门吊的操作时间分别为 $\alpha = 150$ s 和 $\beta = 90$ s; 桥吊作业前沿到堆场箱区的距离 $L = 160$ m; 桥吊 bay 位的长度 $L^{Qbay} = 5.7$ m; 箱区长度和宽度为 $L^B = 256.5$ m 和 $W^B = 25$ m; 相邻左右两个箱区距离 $L^M = 36$ m; 箱区 bay 位的长度 $L^{bay} = 5.5$ m; 将同一竖列的所有箱区视为一个 zone, 则图 1 共有 4 个 zone, 定义集合 $Z = \{1, 2, \dots, 4\}, z \in Z$, 每个 zone 有包括虚拟箱区共 $N^{ZB} = 14$ 个箱区. 设备参数见图 1, 不再赘述.

4.2 算例仿真实验

设一艘长约 300 m 的中型货轮船舶靠泊, 待作业

2000 个进出口箱, 启动 6 台桥吊作业, 采用先卸船后装船的实际操作原则. 生成 2000 个进口出口箱的参数数据, 截取片段如表 1 所示, 吊桥 bay 分配方案如表 2 所示.

表 1 2000 个进口出口箱的参数数据

序号	堆场箱区	堆场箱区 Bay	桥吊 Bay	装=0, 卸=1
1	29	33	123	0
2	29	27	126	0
3	40	20	145	1
4	30	8	118	0
5	16	42	104	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1999	45	28	147	0
2000	42	6	135	1

表 2 吊桥分配方案

吊桥编号	桥吊 Bay 号	吊桥编号	桥吊 Bay 号
1	[100,108]	4	[125,133]
2	[109,116]	5	[134,141]
3	[117,124]	6	[142,150]

根据港口原始参数, 计算数学模型所需的已知参数. 实验在 CPU 为英特尔酷睿 i3-380 M、内存为 2 GB、Windows 7 操作系统的计算机平台上进行, 参数计算和处理通过运行 Matlab 程序进行, 采用 Lingo 软件实现求解最小流 0/1 整数规划模型.

令时段划分数 $\Gamma = 5$. 由于分时策略的方法步骤 Spss 里面没有相应函数模块, 运用 Matlab 软件编程实现分时策略, 最终划分时间为 5 个时段. 各时段中任务按原编号提取总体可达矩阵中对应的行和列, 得到新的子阵并代入模型, 采用 Lingo 求解器平均耗时 7.3 s, 解得分时调度结果. 以使用设备数最小化为目标, 以龙门吊为例, 结果汇总如表 3 所示. 截取龙门吊的调度方案的部分结果如表 4 所示.

表 3 不同时段龙门吊使用数

时段编号	时段/h	任务数	龙门吊数
1	(0,3.26]	416	26
2	(3.26,6.35]	407	23
3	(6.35,9.93]	431	23
4	(9.93,12.6]	357	24
5	(12.6,17.5]	389	22

表 4 第 1 时段内以设备使用最少为目标的龙门吊的调度方案数据片段

龙门吊	第 1 时段的龙门吊作业任务顺序
1	696 → 699 → 861 → 437
2	855 → 199 → 9 → 208 → 210 → 213 → 569 → 33 → 36 → 235 → 418 → 741 → 245 → 428 → 598 → 917 → 920 → 921
3	541 → 545 → 704 → 13 → 712 → 561 → 399 → 26 → 403 → 727 → 889 → 733 → 734 → 900 → 904 → 592 → 594 → 435 → 604 → 763
⋮	⋮
25	8 → 387 → 17 → 395 → 562 → 22 → 880 → 570 → 408 → 577 → 44 → 743 → 753 → 755 → 602 → 606
26	205 → 388 → 394 → 716 → 721 → 41 → 43 → 589 → 427 → 912 → 600 → 260 → 65 → 265

表 5 龙门吊协调调度方案

时段	各时段龙门吊作业衔接顺序
1	1 → 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 7 → 8 → 9 → 10 → 11 → 12 → 13 → 14 → 15 → 16 → 17 → 18 → 19 → 20 → 21 → 22 → 23 → 24 → 25 → 26
2	23 → 18 → 14 → 5 → 16 → 4 → 11 → 12 → 2 → * → 17 → 7 → 3 → * → 1 → 10 → 22 → 20 → 9 → * → 15 → 13 → 8 → 21 → 19 → 6
3	5 → 22 → 1 → 21 → 20 → 9 → 18 → 8 → 11 → * → 16 → 2 → 7 → 12 → 14 → 6 → 13 → 15 → * → 17 → 3 → 23 → 10 → 19 → 4
4	17 → 4 → 22 → 1 → 12 → 6 → 15 → 2 → 8 → * → 14 → 10 → 5 → 23 → 16 → 13 → 20 → 7 → 24 → 21 → 19 → 3 → 9 → 18 → 11
5	1 → 14 → 7 → * → 16 → 11 → * → 17 → 12 → * → 18 → 21 → 3 → * → 2 → 22 → 10 → 5 → 9 → 8 → 6 → 4 → 15 → 13 → 19 → 20

实验结果表明,分时策略可以大大降低模型的计算效率.当提高计算规模至2000时,Lingo求解器内存限制(只能求解500左右规模的问题),无法求解;而分时协调策略只需增加划分时段,即可将每一时段的任务数量限制在其求解能力范围之内.

执行算法2的时间协调策略,将各个时段设备调度方案衔接,龙门吊协调调度结果如表5所示.例如,龙门吊4的总体作业顺序是合并第1时段4号龙门吊、第2时段5号龙门吊、第3时段21号龙门吊和第4时段1号龙门吊的作业方案(*表示无设备).设备作业顺序需结合如表4所示的各时段内龙门吊的具体运作方案结果,最终得到总的调度方案.将5个时段通过协调机制合并方案后,龙门吊总使用数为26台.协调策略使设备在时段之间的等待时间最少,并得到充分利用.

5 结 论

本文针对关键资源优先的一般性三级装卸搬运作业链的集成调度问题,将作业链分级并将非关键各作业级的调度问题转化为最小流单位问题,建立了相应的数学模型,并求解;切实考虑实现大规模问题快速有效求解的难题,进一步提出了分时协调策略;基于时间特征对任务分类,并构建了最小时差法的协调机制,将各时段调度方案有效衔接.所提出的模型不仅具有提高物流效率、降低物流成本的现实意义,同时对于一般性装卸搬运问题的基础性研究具有一定的理论意义.以宁波港码头为背景设计算例,实验结果表明所提出的模型和策略可在合理的时间内完成运算过程,并可获得合理的设备调度方案,具有良好的可行性.

参考文献(References)

- [1] 陶莎,胡志华.单元化三级装卸搬运作业链集成优化的三层进化算法[J].系统工程理论与实践,2014,34(8):1971-1985.
(Tao S, Hu Z H. A three-stage evolutionary algorithm for three-stage unit material handling operations[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2014, 34(8): 1971-1985.)
- [2] Ng W C, Mak K L. Yard crane scheduling in port container terminals[J]. Applied Mathematical Modeling, 2005, 29(3): 263-276.
- [3] 靳志宏,李娜.基于泊位计划的集装箱码头岸桥动态调度优化[J].交通运输系统工程与信息,2011,11(3):58-64.
(Jin Z H, Li N. Optimization of quay crane dynamic scheduling based on berth schedules in container terminal[J]. J of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(3): 58-64.)
- [4] Cao J X, Shi Q X, Lee D H. Integrated quay crane and yard truck schedule problem in container terminals[J]. Tsinghua Science & Technology, 2010, 15(4): 467-474.
- [5] Cao J X, Lee D H, Chen J H, et al. The integrated yard truck and yard crane scheduling problem: Benders' decomposition-based methods[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2010, 46(3): 344-353.
- [6] Chen L, Langevin A, Lu Z Q. Integrated scheduling of crane handling and truck transportation in a maritime container terminal[J]. European J of Operational Research, 2013, 225(1): 142-152.
- [7] Yang C, Wang X, Li Z. An optimization approach for coupling problem of berth allocation and quay crane assignment in container terminal[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 63(1): 243-253.
- [8] Nossack J, Pesch E. A truck scheduling problem arising in intermodal container transportation[J]. European J of Operational Research, 2013, 230(3): 666-680.
- [9] Lu Z Q, Han X L, Xi L F, et al. A heuristic for the quay crane scheduling problem based on contiguous bay crane operations[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(12): 2915-2928.
- [10] He J L, Zhang W M, Huang Y F, et al. A simulation optimization method for internal trucks sharing assignment among multiple container terminals[J]. Advanced Engineering Informatics, 2013, 27(4): 598-614.

(责任编辑:齐霖)