

# 基于多智能体的集装箱码头装卸设备协同调度\*

杨鹏<sup>1,2</sup>, 孙俊清<sup>1,2</sup>, 于青<sup>1,2</sup>

(1.天津理工大学 计算机科学与技术学院, 天津 300191;  
2.天津市智能计算及软件新技术重点实验室, 天津 300191)

**摘要:** 针对集装箱装卸设备作业相互耦合的特点, 设计了基于多智能体的协同调度优化模型。首先应用带有阻塞限制的混合流水车间模型构建了调度模型, 随后应用蚁群算法得到初始方案, 最后应用多智能体的合同网机制对方案进行调整。仿真结果显示, 该调度方法具有较好的可行性。

**关键词:** 集装箱码头; 装卸设备; 集成调度; 智能体

中图分类号: TP181, TP391.7

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)17-0075-03

## Agent-based cooperative schedule of maritime terminal handling equipments

Yang Peng<sup>1,2</sup>, Sun Junqing<sup>1,2</sup>, Yu Qing<sup>1,2</sup>

(1.School of Computer Science and Technology, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China;

2.Tianjin Key Laboratory of Intelligence Computing and Novel Software Technology, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** The scheduling of handling equipments in a maritime terminal has direct influence on each other. A multi-agent based integrated scheduling model is presented to optimize the container handling system. Firstly, a no-wait hybrid flow shop model based integrated schedule model is proposed, then the initial solution is found with ant colony algorithm, and the negotiation mechanism for multi-agent system is designed to get the final result through adjusting the initial plan. Numerical experiment results show that the proposed method is feasible.

**Key words:** container terminal; handling equipments; integrated scheduling; Agent

集装箱码头在有限的作业空间上布置了多种装卸设备, 如岸桥、场桥、集卡和自动导引运输车(AGV)等, 通过这些设备间的协调作业完成码头的物流任务。在日常运作中管理者需要对装卸设备进行调度以提高作业效率, 而这些决策又常常相互影响、相互制约, 因此针对集装箱码头装卸设备的调度和协调是一个比较复杂、困难的问题。

### 1 研究现状

近年来, 国内外很多学者针对集装箱码头装卸设备调度及优化问题展开了研究。Lee<sup>[1]</sup>研究了集装箱港口中岸桥的作业顺序分配问题, 建立了考虑桥吊互不干涉约束的混合整数规划模型, 并提出了模型的启发式遗传算

法。计明军和新志宏<sup>[2]</sup>研究了基于时间最短的集卡线路优化模型, 并应用进化算法求解模型, 但未讨论集卡配置问题。这些研究取得了丰硕的成果, 但也存在有待改进和提高的方面。现有研究中构建的模型大多针对码头单个设备(或单类设备)的模型, 而忽略了作业设备的关联性, 因此调度结果的可行性相对较差。

近年来, 基于多 Agent 的复杂系统建模的最新发展, 使得开展基于多 Agent 的码头装卸设备集成优化成为可能, 如李斌和李文锋<sup>[3]</sup>应用多 Agent 方法对集装箱码头的协同生产调度问题进行了探讨, 提出了集装箱码头集成服务系统的思想。杨鹏等<sup>[4]</sup>将 Agent 方法应用于场桥间的作业协调, 但研究对象仅限于堆场的场桥作业环节。Agent 系统属于分布式自治系统, 具有高度的灵活性, 但在决策实时性方面则往往难以满足系统要求。本文应用集中式决策和多 Agent 融合的方法, 对码头装卸

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(70871090, 70772052, 60944063)、天津市自然科学基金(07JCYBJC05700, 09JCYBJC27700)、中国博士后科学基金项目(200604000688)、天津市滨海新区科技特派员科技专项(SB20080050)

# 技术与方法

## Technique and Method

设备的协同调度问题开展研究。

### 2 装卸设备调度集成建模

本文将装卸设备集成调度问题分解为存在关联性的三个问题:(1)装卸设备的集成调度建模问题;(2)集成调度模型的求解问题;(3)基于多智能体的调度方案柔性调整问题。其中问题(1)的建模过程中可以忽略装卸设备初始位置及其作业过程中的相互影响等因素;而问题(2)得到的调度结果只是初始方案(或称为粗方案);在问题(3)中需要设计设备 Agent 的避让规则以及作业任务调整规则,经过仿真、调整得到最终的细化调度方案。

#### 2.1 问题描述

集装箱码头存在岸桥作业、水平运输和场桥作业三类操作,对应设备分别为岸桥、集卡、场桥。集装箱作业需要在三类设备中依次选择完成任务,但不存在环节间的缓冲区。基于码头作业流程的特点,应用带有阻塞限制的混合流水车间模型(NWHFS)对其描述。

本文基于以下假设构建了集成调度模型:(1)由于自动导引车(AGV)在国内使用较少,因此假设装卸设备仅包括岸桥、场桥和内部集卡(如无特殊注明,以下集卡均表示内部集卡);(2)模型中仅考虑船舶的卸载作业(装船作业与此类似,仅顺序相反);(3)忽略装卸设备作业细节,同类设备能力相同,完成相同任务的耗时与设备所处位置无关。

$N$  表示全部集装箱装卸作业集合; $P$  表示具有先后关系约束的作业对集合,如果作业  $i$  先于作业  $k$ ,则  $(i, k)$  属于  $P$ ; $O$  是所有操作集合,  $O = \{O_{ij} | i=1, \dots, n, j=1, 2, 3\}$ ;  $M_{ij}$  是可以处理操作  $O_{ij}$  的设备集合,记  $\|M_{ij}\|$  表示集合中元素数量;  $E_m$  为设备  $m$  可以处理所有操作的集合;  $P_{ij}$  是操作  $O_{ij}$  的处理时间;  $e_{ijk}$  是作业  $i$  和作业  $k$  在  $j$  级的调整时间;  $S_{ij}$  为  $O_{ij}$  的开始时间。决策变量包括  $x_{ijm}$  和  $y_{ikm}$ 。如果  $O_{ij}$  由设备  $m$  处理,则  $x_{ijm}=1$ , 否则为 0; 如果在设备  $m$  上操作  $O_{ij}$ , 并且紧随操作  $O_{kj}$ , 则  $y_{ikm}=1$ , 否则为 0。决策目标为最小化完工时间,目标函数为:

$$\min \max(s_{ij} + P_{ij}) \quad (1)$$

$$s_{ij} \geq 0 \quad (2)$$

表示操作必须在 0 时刻之后开始;

$$s_{ij} + P_{ij} \leq s_{i(i+j)} \quad (3)$$

表示集装箱必须按顺序操作;

$$\sum_{m \in M_{ij}} x_{ijm} = 1 \quad (4)$$

表示每项操作必须由一项设备完成;

$$s_{ij} \leq s_{kj} \quad (i, k) \in P \quad (5)$$

表示作业  $i$  和作业  $k$  之间存在先后关系;

$$s_{k(j+1)} + e_{kj} \leq s_{ij} + Ly_{ikm} \quad (6)$$

$$s_{i(j+1)} + e_{ij} \leq s_{kj} + Ly_{ikm}, Q_{ij}, O_{kj} \in E_{jm}, x_{ijm} = x_{kim} = 1 \quad (7)$$

$i=1, 2, \dots, N, j=1, 2, 3, L$  表示充分大常数。

式(6)、(7)表示集装箱作业流程中间不存在缓冲区。

求解小规模 NWHFS 问题也比较困难,而求解较大规模 NWHFS 问题的最优解几乎不可能, NWHFS 问题已被证明是 NP-Hard 问题。本文采用蚁群算法对集成调度模型进行求解,将集装箱在码头装卸设备间的作业过程映射为蚂蚁的爬行路径。将模型映射到有向图,将每个工序的可选方案视为结点,设置结点间的路径。由于蚁群算法的应用主要在于选择概率的设计和更新函数,因此下面对这两方面进行详细介绍。蚂蚁的路径选择概率为:

$$P_{ij}^t(c) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}^t(c))^\alpha (\eta_{ij}^t)^\beta}{\sum_{s \in allowed_k} (\tau_{is}^t(c))^\alpha (\eta_{is}^t)^\beta} & j \in allowed \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中,  $\tau_{ij}^t$  表示从当前节点  $i$  指向邻域节点  $j$  路径上的信息素;  $\eta_{ij}^t$  表示集装箱  $t$  从当前节点  $i$  到邻域节点  $j$  的能见度,  $\eta_{ij}^t = 1/(d_{ij} + C_{ij}^t)$ ;  $d_{ij}$  表示集装箱从节点  $i$  到节点  $j$  的移动时间。  $allowed_k$  表示第  $k$  只蚂蚁未访问过的节点集合。信息素更新公式为:  $\tau_{ij}^t = (1-\rho)\tau_{ij}^t + \Delta\tau_{ij}^t$ 。其中  $\rho$  为挥发系数;  $\Delta\tau_{ij}^t$  为第  $k$  只蚂蚁为第  $t$  个集装箱在从节点  $i$  到下一节点  $j$  这条路径上留下的信息素。如果该集装箱经过节点  $i$  到节点  $j$  这条路径, 则  $\Delta\tau_{ij}^t = Q/L_k^t$ , 否则,  $\Delta\tau_{ij}^t = 0$ 。其中  $Q$  为常数,  $L_k^t$  是在第  $k$  只蚂蚁所确定的第  $t$  个集装箱的总移动时间。

#### 2.2 基于 MAS 的柔性调度方案

考虑将装卸设备映射为 Agent, 根据设备的特点和作业规则为 Agent 设置冲突避让规则, 应用合同网机制为设备设计作业任务调整规则。模型中共设置岸桥、场桥和集卡三类 Agent, 下面将对各类 Agent 的冲突消解机制和任务调整机制进行介绍。

##### 2.2.1 冲突消解机制

场桥 Agent 的冲突消解机制: 在仿真模型中, 为场桥 Agent 设置圆形冲突探测区, 一旦出现探测区的重叠, 则重叠的场桥 Agent 各自提出修改路径的代价函数——修改路径的移动成本。最终成本最小的 Agent 调整路径, 若成本相同, 则随机选择 Agent 调整路径。

岸桥 Agent 的冲突消解机制: 岸桥仅能够在岸边做一维移动, 岸桥 Agent 也具备冲突探测区, 当岸桥 Agent 发生移动冲突, 则选择外侧岸桥 Agent 向外侧移动等待。

在天津地区集装箱码头的调研过程中了解到, 由于验放闸口的入场集卡数量控制功能, 国内码头集卡作业中极少出现冲突或死锁, 因此模型中假设集卡 Agent 不存在冲突问题。

## 技术与方法 Technique and Method

### 2.2.2 装卸任务调整机制

在模型中为装卸设备 Agent 设置:忙碌、空闲和冲突等待状态。当 Agent 正在固定位置执行装卸任务或向目标工位移动,其状态为忙碌;当 Agent 完成其全部装卸任务序列,其状态为空闲;当 Agent 被其他 Agent 阻挡,其状态为冲突等待。

当系统中出现处于空闲或冲突等待状态的 Agent,则忙碌状态的设备 Agent 将对尚未完成的任务进行招标。由空闲和冲突等待状态 Agent 及其自身竞标,竞标的报价函数为完成该装卸任务的移动时间。最终任务分配给报价最低的 Agent,该 Agent 将其状态置为忙碌,原有 Agent 从其任务序列中删除该任务。

### 3 仿真结果

为了检验本文的调度方法,本文参考天津某码头布局方式、管制习惯和参考文献[5]提供的装卸设备参数进行仿真实验,仿真采用的软件为 NetLogo。应用 Agent 方法进行调度方案修正的记为 A 试验;未采用 MAS 方法修正调度方案的记为 B 试验。为了确保 B 试验能够完成全部装卸任务,为其设置了简单的冲突处理机制。仿真结果如图 1、图 2 所示。

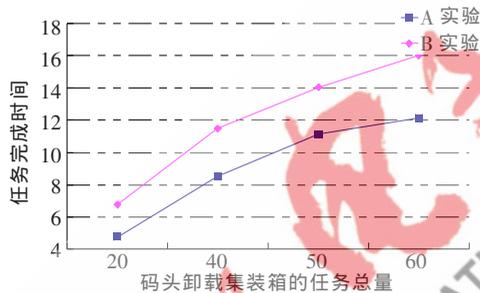


图 1 任务完成时间比较

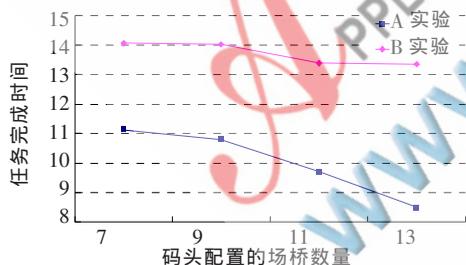


图 2 调度结果比较

图 1 中由于装卸设备之间缺乏有效的协调机制, B 的总任务完成时间随任务量的增长而显著增加;由于 A 中采用了协商机制,具备冲突消解措施,任务完成时间并未显著增长。图 2 中卸载的集装箱数量为 60。在 A 实验中,采用了基于 Agent 的冲突条件和任务再分配机制,因此,装卸设备间存在协作和协调关系,能够有效发挥装卸设备的潜力;而由于设备移动路径冲突的存在,并且缺乏任务分配平衡机制,因此

B 实验中,总完工时间并未随装卸设备数量的增加而显著降低。

在本文的研究中,MAS 模型仅用于最初调度方案的调整和优化,如果初始方案不可行度较高,则最终调整方案的结果也较差。今后将考虑根据 Agent 仿真结果构建禁忌表,在 Agent 仿真结果的基础上应用算法再优化,并且还要考虑装卸设备作业时间不确定性等方面的因素,使得模型更加真实地反映集装箱码头的操作进程。

### 参考文献

- [1] LEE D H, Wang Huiqiu, Miao Lixin. Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals [J]. Transportation Research part E, 2008, 44:124-135
- [2] 计明军,靳志宏.集装箱码头集卡与岸桥协调调度优化[J].复旦学报,2007(8):476-480.
- [3] 李斌,李文锋.基于 MAS 的集装箱码头物流系统协同生产调度体系 [J]. 计算机集成制造系统,2011,11(17):2502-2513.
- [4] 杨鹏,柴小燕,孙俊清.集装箱码头场桥协同调度研究 [J]. 计算机工程与应用,2011,47(1):231-234
- [5] 张煌,王少梅.基于遗传算法的泊位连续化动态调度研究 [J]. 系统仿真学报,2007,19(10):2161-2164.

(收稿日期:2012-03-22)

### 作者简介:

杨鹏,男,1977 年生,博士,讲师,主要研究方向:物流供应链管理,复杂系统建模。

孙俊清,男,1964 年生,博士,教授,主要研究方向:运筹学与控制论。

于青,女,1968 年生,博士,教授,主要研究方向:模式识别、数据挖掘。