

考虑岸桥维护的集装箱码头泊位与岸桥集成调度^{* 1}

胡鸿韬¹, 任淑珍², 胡雄¹

(1 上海海事大学物流工程学院, 上海 201306; 2 上海海事大学物流科学与工程研究院, 上海 201306)

摘要: 针对集装箱码头泊位与岸桥 2 类资源分配的问题, 以泊位和岸桥数量能够随时间动态变化为前提, 重点考虑岸桥维护操作对该类资源配置问题的影响, 提出了以最小化船舶总在港时间为目标的联合优化方法, 建立了重点考虑岸桥维护的泊位与岸桥集成调度的数学模型, 对泊位分配、岸桥调度和岸桥维护计划这 3 个相互关联的问题进行决策与分析。设计粒子群优化算法对模型进行求解, 并与 CPLEX 优化软件求解得到的结果进行对比, 以证明该算法的优越性和有效性。

关键词: 岸桥维护; 岸桥分配; 泊位调度; 粒子群优化算法

中图分类号: TP202+.7 文献标志码: A 文章编号: 1671-3133(2019)04-0014-07

DOI: 10.16731/j.cnki.1671-3133.2019.04.003

Integrated scheduling of berth allocation and quay crane assignment with maintenance activities

Hu Hongtao¹, Ren Shuzhen², Hu Xiong¹

(1 Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2 Shanghai Maritime University Logistics Research Center, Shanghai 201306, China)

Abstract: Aiming at the problem of berths and quay cranes allocation in container terminals, based on the time-dependent dynamic change of berth and quay crane quantity after considering the influence of the maintenance of equipment, in order to minimizing the total port time of vessels, makes decision and analysis on the three interrelated issues such as berth allocation, quay scheduling and shore quay maintenance plan, and establishes the mathematical model of integrated scheduling of berth and quay crane considering the maintenance activities. A Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is designed to solve the model. Compared with the results of the optimization software CPLEX, the algorithm is proved to be superior and effective.

Keywords: the maintenance of quay crane; quay crane assignment; berth allocation; PSO algorithm

0 引言

作为国家基础设施的关键组成部分, 集装箱码头在交通运输行业、现代物流领域中发挥着十分重要的作用。最大化利用自身软、硬件资源, 达到高效率进行集装箱装卸与中转作业的目的, 是集装箱码头体现竞争力的关键。岸桥是船和码头之间进行集装箱装卸作业的主要设备, 泊位也是港口资源极为重要的组成部分, 岸桥与泊位都属于码头的稀缺资源, 其相互配合作业的效率在一定程度上决定了码头的整体作业能力, 因此, 泊位及岸桥资源分配的合理性很大程度上影响了码头的运作成本和客户满意度。

目前, 国内外许多学者对泊位分配及岸桥调度问题进行了研究。其中, 针对泊位与岸桥协同分配问题, 文献[1]以船舶在港时间最小为目标, 基于免疫遗传算法, 针对某港集装箱码头泊位与岸桥协同分配问题进行了数值仿真研究; 文献[2]以质量鲁棒性和解鲁棒性为目标函数, 建立了不确定环境下连续型泊位、岸桥集成调度数学模型, 并构建了具有双层决策结构的优化算法对模型进行求解; 文献[3]面向服务性目标, 采用深度集成的方法, 针对泊位和岸桥联合调度问题建立了混合整数非线性规划模型; 文献[4]针对现有泊位、岸桥分配优化方法因未考虑二者耦合关系而引发的资源浪费或作业冲突等问题, 以船舶作

* 国家自然科学基金资助项目(71771143); 上海市教育委员会创新计划项目(14YZ111); 上海浦江计划项目(13PJC066)

业时间为耦合变量,建立了基于泊位分配子模型和岸桥分配子模型的耦合模型;文献[5]以最小化船舶总在港时间为目标,建立了连续型泊位和岸桥集成调度的数学模型,采用拆分决策对象的双层循环迭代算法对模型进行了求解;文献[6]针对不确定环境下的泊位分配问题(Berth Allocation Problem, BAP),以最小化惩罚成本为目标建立了两阶段决策模型,运用启发式算法获取了具有鲁棒性的基准调度计划和反应策略;文献[7]在连续型BAP中兼顾服务水平和调度决策的鲁棒性,引入时间缓冲的概念,并选取适当的代理目标,采用模拟退火和分支定界法对该问题进行了求解;文献[8]基于动态决策的思想,采用滚动周期和目标规划的方法建立数学模型,通过混合并行遗传算法对泊位与岸桥协同分配问题进行了求解;文献[9]提出了一种基于岸桥时变的泊位、岸桥分配模型;文献[10]提出了一种有效的泊位-岸桥联合调度计划,放宽了岸桥转移的限制,并要求船舶只有获得一定数量的岸桥才可以被操作服务。

针对设备维护问题,文献[11]将生产调度与维护相联合,建立了调度与维护的联合优化模型;文献[12]结合我国动车组现行的多级非完美维护制度,建立了一种考虑故障风险的动车组部件两级非完美顺序预防性维护模型;同年,文献[12]的笔者又提出了以等周期保养与变周期简单维修相结合的方法,来确定到达更换周期的地铁车辆单台设备预防性维护策略^[13];文献[14]为有效解决流水车间生产与预防性维护的集成调度问题,提出了考虑设备衰退的基于改进人工蜂群算法的集成调度方法。文献[15]构建了考虑可及性的海上风机综合维护策略模型。

通过笔者对泊位与岸桥调度相关研究的学习,发现这些研究都是假定在岸桥不会出现故障问题的基础上进行的,这种假设明显不符合集装箱码头的实际工作情况。并且设备维护问题在生产调度、地铁和动车运营,以及风力发电机维护等方面都得到了广泛的应用,但是目前还缺少设备维护与码头相结合的研究。本文着眼于岸桥维护对码头资源调度的影响,基于对连续型、动态型泊位分配问题和岸桥分配问题同时优化决策,建立考虑岸桥维护的连续型泊位和岸桥的联合调度问题(Berth Allocation and quay Crane Assignment Problem, BACAP)数学模型,并采用粒子群算法进行求解。

1 问题描述

本文针对岸桥维护工作会导致岸桥在一定时间

内不可用的问题,以及岸桥维护时所占用位置的泊位也不可用这一实际情况,建立考虑岸桥维护的泊位和岸桥集成调度模型。本文考虑的泊位类型为动态连续泊位,为每艘船舶服务的岸桥数量会随着时间段动态变化,并且已知岸桥维护所需时间和维护较佳时间段。此外,调度开始前,所有的泊位与岸桥都处于空闲状态。本文以最小化船舶总的靠泊时间及岸桥移动次数为目标,决策最佳的岸桥维护时间段、各船舶的泊位和开始工作时间,以及为每艘船舶服务的岸桥。

2 模型建立

2.1 模型假设

为了更好地研究考虑岸桥维护活动下的泊位、岸桥分配问题,假设条件如下。

1) 船舶都会按计划时间到港,不会出现船舶延迟到达的情况。

2) 每艘船舶到港所停靠的泊位都是符合泊位计划安排的,不会出现偏离计划泊位的情况。

3) 有一定数目的岸桥可供到港船舶分配,每艘船舶的最少、最多岸桥分配数目以及岸桥工作任务量均已知,给船舶安排的岸桥数目在最少、最多岸桥分配数目之间。

4) 岸桥维护时间段包括最早维护时间、最晚维护时间及维护工作所需时间,这3个时间都是已知的。

5) 需要进行维护的岸桥是已知的,进行维护活动的岸桥不能为船舶提供服务,对应的泊位不能供船舶靠泊。

6) 岸桥维护时必须回到原始位置,岸桥的初始位置对应相应的泊位段,即岸桥1在100~200 m的泊位段,岸桥2在200~300 m的泊位段,以此类推。

7) 同一时间段内,每台岸桥最多为一艘船舶提供服务工作,对所有船舶进行服务的岸桥总数量不能超过岸桥的总数量。

8) 岸桥不能出现“穿越”现象,换言之,各个岸桥的相对位置保持不变。

9) 不同船舶所占用的泊位在时间、空间上不能出现重叠现象。

2.2 模型参数

根据前文的研究,与模型相关的具体参数含义如下。

V 为船舶数量的集合 $V = \{1, 2, \dots, i, \dots, p\}$, $\forall i, j \in V, i \neq j$ 。

Q 为岸桥数量的集合 $Q = \{1, 2, \dots, k, \dots, q\}$ 。

Q_1 为需要维护活动的岸桥数量集合, $Q_1 = \{q_1, q_2, \dots, k, \dots, q_n\}$ 。

H 为工作时间的集合 $H = \{1, 2, \dots, t, \dots, t_0\}$ 。

M 为一个很大的正整数。

L 为码头泊位总长度。

l_i 为船舶 i 的长度, 包括船的实际长度和两船间的安全距离。

r_i 为船舶 i 的到港时间。

C_i 为船舶 i 的服务结束时间。

F_i 为船舶 i 的作业量。

$q_{\min}^{i,t}, q_{\max}^{i,t}$ 分别为在时间段 t 内可以安排给船舶 i 的最少、最多岸桥数量。

$q^{i,t}$ 为在时间段 t 内给船舶 i 安排的岸桥总数量。

σ_k 为岸桥 k 的维护活动所需时间。

δ_k^0, δ_k^1 为岸桥 k 的最早、最晚维护时间 $\delta_k^0 \in H, \delta_k^1 \in H$ 。

决策变量如下。

S_i 为船舶 i 被开始服务的时间。

b_i 为船舶 i 的泊位起始位置。

δ_k 为岸桥 k 的维护时间, 是决策变量 $\delta_k \in [\delta_k^0, \delta_k^1]$ 。

$$x_{ij} (\forall i, j \in V, i \neq j) = \begin{cases} 1 & \text{如果船舶 } i \text{ 的泊位位置在} \\ & \text{船舶 } j \text{ 泊位位置的前面} \\ & \text{(左边) 则取 1} \\ 0 & \text{其他则取 0} \end{cases}$$

$$y_{ij} (\forall i, j \in V, i \neq j) = \begin{cases} 1 & \text{如果船舶 } i \text{ 的服务完成时} \\ & \text{间早于船舶 } j \text{ 的开始服} \\ & \text{务时间 则取 1} \\ 0 & \text{其他则取 0} \end{cases}$$

$$W_{it} (\forall i \in V, \forall t \in H) = \begin{cases} 1 & \text{如果船舶 } i \text{ 在时间段 } t \\ & \text{内被服务 则取 1} \\ 0 & \text{其他则取 0} \end{cases}$$

$$Y_{ikh} (\forall i \in V, \forall k \in Q, \forall t \in H) = \begin{cases} 1 & \text{如果船舶 } i \\ & \text{在时间段 } t \\ & \text{内被岸桥} \\ & \text{ } k \text{ 服务,} \\ & \text{则取 1} \\ 0 & \text{其他则取 0} \end{cases}$$

$$\varphi_{ik} (\forall i \in V, \forall k \in Q_1) = \begin{cases} 1 & \text{如果船舶 } i \text{ 位于需要} \\ & \text{维修活动的岸桥 } k \\ & \text{的前面 则取 1} \\ 0 & \text{其他则取 0} \end{cases}$$

$$\varepsilon_{kt} (\forall k \in Q_1, \forall t \in H) = \begin{cases} 1 & \text{如果岸桥 } k \text{ 在时间段} \\ & \text{ } t \text{ 内需要进行维修} \\ & \text{则取 1} \\ 0 & \text{其他则取 0} \end{cases}$$

2.3 基本模型

目标函数为:

$$\min \sum_{i=1}^v (C_i - r_i) \quad (1)$$

约束条件为:

$$b_i + l_i \leq b_j + M(1 - x_{ij}) \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (2)$$

$$b_i + l_i \geq b_j - Mx_{ij} \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (3)$$

$$b_i + l_i \leq L \quad \forall i \in V \quad (4)$$

$$S_i \geq r_i \quad \forall i \in V \quad (5)$$

$$S_i + \sum_{t=1}^{t_0} W_{it} - 1 = C_i \quad \forall i \in V \quad (6)$$

$$(t+1)W_{it} \leq C_i \quad \forall i \in V, \forall t \in H \quad (7)$$

$$tW_{it} + t_0(1 - W_{it}) \geq S_i \quad \forall i \in V, \forall t \in H \quad (8)$$

$$C_i + 1 \leq S_j + M(1 - y_{ij}) \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (9)$$

$$C_i + 1 \geq S_j - My_{ij} \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (10)$$

$$W_{it} + W_{jt} \leq 1 + x_{ij} + x_{ji} \quad \forall i, j \in V, \forall t \in H, i \neq j \quad (11)$$

$$x_{ij} + x_{ji} + y_{ij} + y_{ji} \geq 1 \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^v Y_{ikt} \leq 1 \quad \forall k \in Q, \forall t \in H \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^q Y_{ikt} = q^{i,t} \quad \forall i \in V, \forall t \in H \quad (14)$$

$$q_{\min}^{i,t} \leq q^{i,t} \leq q_{\max}^{i,t} \quad \forall i \in V, \forall t \in H \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^v q^{i,t} \leq q \quad \forall t \in H \quad (16)$$

$$\sum_{t=1}^{t_0} q^{i,t} = F_i \quad \forall i \in V \quad (17)$$

$$M(-W_{it}) \leq q^{i,t} \leq MW_{it} \quad \forall i \in V, \forall t \in H \quad (18)$$

$$k+1 \leq h + M(3 - Y_{ikh} - Y_{jkh} - x_{ij}) \quad k \neq h \\ \forall k, h \in Q, \forall i, j \in V, \forall t \in H, i \neq j \quad (19)$$

$$Y_{i,k-1,t} - Y_{ikh,t} + Y_{i,h,t} \leq 1 \quad \forall i \in V, \forall k \in [2, q] \\ \forall h \in [k+1, q], \forall t \in H \quad (20)$$

$$Y_{ikh,t} \leq M(2 - W_{it} + \varphi_{ik} - \varepsilon_{kt}) \quad \forall i \in V \\ \forall k \in Q_1, \forall h \in [1, k-1], \forall t \in H \quad (21)$$

$$Y_{ikh,t} \leq M(3 - W_{it} - \varphi_{ik} - \varepsilon_{kt}) \quad \forall i \in V \\ \forall k \in Q_1, \forall h \in [k+1, q], \forall t \in H \quad (22)$$

$$\delta_k^0 \leq \delta_k \leq \delta_k^1 \quad \forall k \in Q_1, \forall \delta_k^0, \delta_k, \delta_k^1 \in H \quad (23)$$

$$\delta_k \leq t\varepsilon_{kt} \leq \delta_k + \sigma_k \quad \forall t \in [\delta_k^0, \delta_k^1], \forall k \in Q_1 \quad (24)$$

$$Y_{ikh,t} \leq M(1 - \varepsilon_{kt}) \quad \forall i \in V, \forall k \in Q_1, \forall t \in H \quad (25)$$

$$100k - b_i \leq M(2 - \varepsilon_{kt} - W_{it} + \varphi_{ik}) \\ \forall i \in V, \forall k \in Q_1, \forall t \in H \quad (26)$$

$$b_i + l_i - 100(k-1) \leq M(3 - \varepsilon_{kt} - W_{it} - \varphi_{ik})$$

$$\forall i \in V \quad \forall k \in Q_1 \quad \forall t \in H \quad (27)$$

本节研究的基本模型是一个混合整数规划模型,其中式(2)和式(3)为船舶*i*与船舶*j*在被服务时,有无前后位置关系,并且对前后位置关系进行定义;式(4)确保了船舶靠泊时不超出泊位总长度;式(5)为任意一艘船舶开始被服务时间不小于其靠港时间与准备时间的总和;式(6)为开始服务时间、作业持续时间与工作结束时间的关系;式(7)和式(8)分别为船舶作业所经历的工作时间段与开始工作时间、结束工作时间的关系;式(9)和式(10)为船舶*i*与船舶*j*在被服务时,有无时间上的前后关系,并且对时间前后关系进行了定义;式(11)为同一工作时间内被服务的不同船舶,其一定存在泊位位置的前后关系;式(12)为任意两艘船舶一定存在泊位位置前后关系、作业时间先后关系或者两者同时存在,避免同一工作时间内泊位位置发生冲突;式(13)为在同一工作时间内任意岸桥最多只能对一艘船进行服务;式(14)为在任一工作时间内给每艘船舶安排的岸桥数量;式(15)为在任一工作时间内,任一船舶被分配的岸桥数量在其定义的最少岸桥数量与最多岸桥数量之间;式(16)为任一工作时间内,所用岸桥总数不超过现有岸桥数量;式(17)定义了船舶作业量与为其服务岸桥数量的关系;式(18)确保了船舶在没有被安排作业时不能被分配岸桥;式(19)为同一工作时间内,不同的岸桥服务不同的船舶,岸桥不能出现“穿越”现象;式(20)为在同一工作时间内,不同岸桥服务同一艘船舶的工作情况;式(21)和式(22)为在同一工作时间内,需要维护的岸桥对于其他岸桥产生的影响;式(23)为岸桥维护时间在规划的较优时间区间内;式(24)为维护工作所经历的时间段与维护时间之间的关系;式(25)为岸桥被维护时不能为其安排工作;式(26)和式(27)确保了船舶作业时间段与岸桥被维护的工作时间段相同时,被维护的岸桥位置与船舶泊位位置不冲突。

3 小规模算例

对于小规模的问题,本文采用 CPLEX 优化软件对其进行求解。

3.1 参数设定

假设有 6 艘船舶(V1~V6);7 台岸桥并依次编序号(岸桥 1~岸桥 7);泊位离散成 8 个部分,工作时段离散成 10 个部分,泊位每一部分长度为 100 m,工作时段每一段为 4 h,各时间点采用顺序编号代

替(0~10),各船舶的相关数据如表 1 所示。需要维护的是岸桥 2 和岸桥 5;岸桥 2 的最早维护时间为 3,维护截止时间为 7;岸桥 5 的最早维护时间为 5,维护截止时间为 9;在 [3,7]和 [5,9]这 2 个工作时间段内,岸桥 2 和岸桥 5 是无法安排工作的。

表 1 各船舶的相关数据

船舶	到港时间	船长/ m	工作量/ h	最少岸桥/ 台	最多岸桥/ 台
V1	0	400	12	1	4
V2	0	200	6	1	2
V3	3	300	6	1	3
V4	5	400	12	1	4
V5	2	300	8	1	3
V6	2	200	6	1	2

注:船舶的工作量为一艘船舶只有一台岸桥服务所需的时间

3.2 结果分析

泊位与岸桥动态配置结果对比图如图 1 所示。图 1 中 V1~V6 依次表示 6 艘船舶,船舶前的数字表示在这个时间段给船舶安排的特定岸桥的编号。

图 1a 所示为考虑岸桥维护,图 1b 所示为未考虑岸桥维护。从时间角度观察分析,岸桥的维护活动会增加工作时段,通过式(1)计算可得到考虑岸桥维护活动目标函数值为 36,未考虑岸桥维护活动为 29,船舶相应的靠港时间也会增加;从泊位位置角度观察分析,在岸桥的维护活动时间区间(工作时段)内,一方面岸桥相对应的泊位位置是不能安排给船舶停泊的,另一方面岸桥的维护活动还会影响船舶服务工作的开始时间,这就会改变各艘船舶原先相应的泊位位置安排;从岸桥分配角度观察分析,需要维护的岸桥在维护活动时间区间里,不能安排给船舶进行服务工作,这会改变原先对船舶安排的岸桥数量和特定的工作岸桥。通过实验结果对比,充分证明了考虑岸桥维护活动对岸桥与泊位动态配置的重要性。

4 粒子群算法求解

4.1 粒子编码方式

根据本文数学模型的特点,在利用粒子群算法优化进行求解的过程中,选择如下编码方式。粒子示例如图 2 所示,每个粒子分为两段,前半段长度是船的总数,任一位置取值范围为 $[1, L+1-l_i]$ 之间的随机整数,表示初始生成的各船舶起泊位置段的值;后半段长度也是船的总数,任一位置取值范围为 $[r_i, t+1-F_i]$,即船到港时间与船最晚开始工作时间之间的随机数,表示初始生成的各船舶起泊时间段的值。此编码得

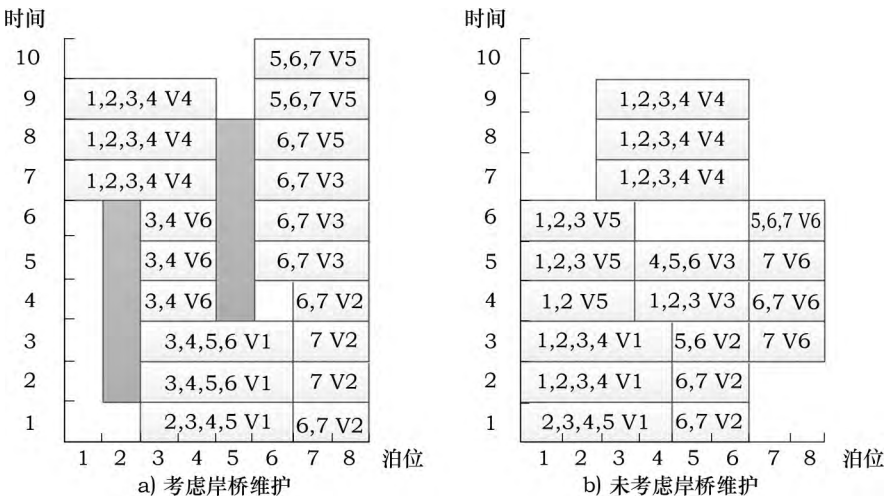


图 1 泊位与岸桥动态配置结果对比图

到的不可行解较多,其解决方案为对于任意船舶,基于起泊时间段和起泊位置段,可得到船舶最早工作结束时间和船尾所占泊位位置;对于任意 2 艘船舶,舍去有交叉部分的值。最后,对粒子进行解码处理,即对于任意一个粒子,前半段位置数值向下取整后,乘以 100 得到起泊位置,如图 2 中随机值一行,其中 5、3、6、1、6、3 分别代表船舶 V1 ~ V6 的起泊位置,然后对每艘船泊位前后进行排序;后半段位置的数值向下取整为起泊时间,其中 10、1、5、8、2、4 分别代表船舶 V1 ~ V6 的起泊时间段,然后对每艘船作业顺序进行排序。

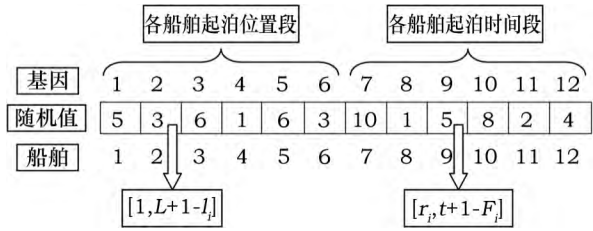


图 2 粒子示例

4.2 参数设定

在本文实验算例中,时间周期为 14 天 $t_0 = 84$,分别用 10、20 和 30 艘船舶这 3 种不同数据规模的数据进行实验,其中岸桥数、泊位数、岸桥维护计划与本文第 3.1 节小规模算例相同。在不同数据规模下,船到港时间为成指数分布的随机数列,平均到达间隔时间

为 1 个工作时间段。各船型 20 % 装载量在 300 ~ 800 TEU 之间,80 % 装载量在 800 ~ 4 000 TEU 之间,岸桥工作效率为 50 TEU/h。

实验对于 3 种不同规模问题的粒子个数分别为 $N = 50, 75, 100$,最大迭代次数 $\lambda_{\max} = 200$,由于粒子群算法计算存在着随机误差,所以为了减小这种随机误差,每个算例都运行 20 次,记录其平均值。将平均运算时间和平均最优适应度值(平均最小船舶在港时间)作为其最后结果,不同规模问题数据实验结果如表 2 所示,表 2 中最优适应度值差异表示粒子群算法求得的适应度值与 CPLEX 软件精确求解的差距。

4.3 实验结果分析

从表 2 中可以看出,当船舶数量较小时,CPLEX 软件很快就能计算出结果,但是随着数量的增加,CPLEX 软件求解时间越来越长,当船舶数量达到 30 个时,CPLEX 软件无法在可接受的时间内(该时间为企业根据自身需求设定)得到最优解。与此同时,观察粒子群算法的性能,随着船舶数量的增加,粒子算法的求解时间并没有随着船舶数量的增加而剧烈变化;并且 CPLEX 软件求得的最优值与粒子群算法的最优值差别并不是很大,最大差别也仅仅只有 6.58 % (算例 23),最终算例最优值平均相差 2.485 %,因此通过对规模问题结果分析论证了粒子群算法的有效性。

表 2 不同规模问题数据实验结果

算例编号	船舶数量	CPLEX 软件		粒子群算法		最优适应度值差异 /%
		运行时间 /s	最优解	运行时间 /s	最优适应度值	
1	10	49.31	38	40.59	39	2.63
2	10	53.56	39	48.47	40	2.56
3	10	34.22	46	25.58	48	2.17

表 2(续)

算例编号	船舶数量	CPLEX 软件		粒子群算法		最优适应度值差异 /%
		运行时间 /s	最优解	运行时间 /s	最优适应度值	
4	10	35.94	39	28.67	39	0
5	10	49.71	44	40.09	45	2.27
6	10	43.96	42	38.37	42	0
7	10	34.62	45	25.98	46	2.22
8	10	25.94	36	28.27	36	0
9	10	32.73	39	26.25	39	0
10	10	39.18	44	33.37	45	2.27
10 艘船舶平均值			41.2		41.8	1.412
11	20	54.26	57	55.89	58	1.75
12	20	55.49	60	48.72	60	0
13	20	62.37	61	46.52	63	3.28
14	20	79.81	61	53.73	64	4.92
15	20	69.17	59	50.90	60	1.69
16	20	73.69	57	58.73	58	1.75
17	20	69.13	63	50.95	66	4.76
18	20	73.65	61	58.74	63	3.28
19	20	54.22	54	55.85	56	3.7
20	20	55.49	59	48.76	60	1.69
20 艘船舶平均值			59.2		60.8	2.682
21	30	2057.14	76	90.52	79	3.95
22	30	1361.38	79	97.43	79	0
23	30	979.86	76	93.78	81	6.58
24	30	1974.37	78	99.41	81	3.85
25	30	3074.31	77	109.43	80	3.9
26	30	--	74	99.32	75	1.35
27	30	3840.43	71	89.37	73	2.82
28	30	--	76	90.58	78	2.63
29	30	961.36	70	97.44	74	5.71
30	30	1479.89	71	93.77	73	2.82
30 艘船舶平均值			74.8		77.3	3.361
总平均值						2.485

5 结语

集装箱码头泊位与岸桥联合调度问题是集装箱码头最常见的问题之一,调度方案受到岸桥和泊位的影响,岸桥维护影响了岸桥使用率,提高岸桥利用率,是增强集装箱码头连续作业能力的关键因素之一。本文研究了考虑岸桥维护的岸桥与泊位协同调度优化问题,以最小化船在港时间为目标,建立了线性规划模型。通过对小规模算例分析,利用 CPLEX 软件求得小规模卸箱作业的精确解。同时对于大规模问题,CPLEX 软件求得结果与粒子群算法求得的解进行比较,验证粒子群算法的有效性。

本文只考虑了在已知船舶到港时间及岸桥维护较优时间的前提下进行泊位与岸桥的协同调度问题,没有充分考虑船舶的偏好靠泊位置和岸桥移动增加的成本及其他随机因素的影响,因此,本文问题还有待进行更深一步的研究。

参考文献:

- [1] 韩骏,孙晓娜,靳志宏. 集装箱码头泊位与岸桥协调调度优化[J]. 大连海事大学学报, 2008(2): 117-121.
- [2] 张振毓,陆志强,韩笑乐. 基于前摄-反应的泊位岸桥鲁棒性集成调度[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(5): 1181-1190.
- [3] 杜玉泉,陈秋双,姬晓涛. 面向服务的泊位和岸桥联合调度[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(9): 2051-2060.
- [4] 杨春霞,王诺,杨华龙. 集装箱码头泊位-岸桥分配耦合优化[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(10): 2270-2277.
- [5] 桂小娅,陆志强,韩笑乐. 集装箱码头连续型泊位与岸桥集成调度[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(2): 226-229, 235.
- [6] ZHEN L, LEE L H, CHEW E P. A decision model for berth allocation under uncertainty[J]. European Journal of Operational Research, 2011, 212(11): 54-68.
- [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.

(下转第 32 页)

由图 8b 可以看出: 该算法可以根据模型三角面片法向矢量自适应调整分层厚度, 法向矢量的 Z 向量越大, 分层越密。对模型具体特征进行分析, 其中以正平行面 a 为例, 根据分层高度搜索分层平面, 发现在 a 的 Z 坐标 $h_a = 64 \text{ mm}$ 处恰好有一分层平面, 图 9a 所示为此分层平面所切的轮廓线, 图 9b 所示为特征 a 处未加修正的轮廓线, 可以看出图 9a 中只把平行面与分层平面的交线去除, 保证了平行面 Z 轴高度的准确, 从而验证了该分层算法的可行性。

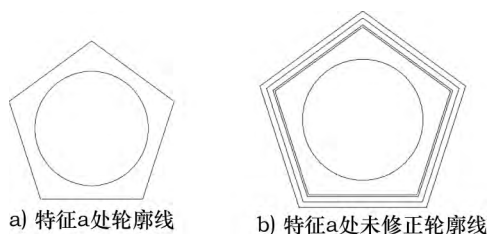


图9 特征处分层

5 结语

分层算法是快速成型中的关键技术, 对成型件的精度起到关键作用。本文提出了基于自适应分层算法与考虑模型特征相结合的分层算法, 该算法可以改善现有分层算法在保证成型件特征位置准确性方面存在的不足, 经实验验证, 该算法不仅可以根据 STL 模型的法向矢量自适应调节分层厚度, 显著减小阶梯效应, 还可以较好地识别特征所在位置, 并根据特征种类做出相应处理, 保证模型特征位置的准确, 因此具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 谢卓. 熔融沉积成型精度分析及工艺参数研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [2] 贺强, 程涵, 杨晓强. 面向 3D 打印的三维模型处理技术研究综述[J]. 制造技术与机床, 2016(6): 54-57, 61.
- [3] 王静亚, 方亮, 郝敬宾. STL 模型特征面片自适应分层算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(6): 2361-2364, 2368.
- [4] TATA K, FADEL G, BAGCHI A. Efficient slicing for layered manufacturing[J]. Rapid Prototyping Journal, 1998, 4(4): 151-167.
- [5] 丘宏扬, 陈松茂, 刘斌. 快速成形系统中 STL 文件切片算法的研究[J]. 锻压技术, 2005(4): 35-39.
- [6] 周满元. 一种非均匀自适应分层方法[J]. 计算机工程与应用, 2005(3): 72-74, 104.
- [7] 孙建平, 曹志清, 张爱军. FDM 自适应分层层厚范围研究[J]. 机械设计与制造, 2006(12): 29-30.
- [8] 刘大伟, 王苏洲. 3D 打印中一种快速分层处理算法的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2017(9): 50-54, 58.
- [9] 胡德洲, 李占利, 李涤尘, 等. 基于 STL 模型几何特征分类的快速分层处理算法研究[J]. 西安交通大学学报, 2000(1): 37-40, 45.
- [10] 杨光, 刘伟军, 王维, 等. STL 格式文件拓扑重建及快速切片算法研究[J]. 现代制造工程, 2009(10): 32-35.
- [11] 巢海远, 刘景, 童晶, 等. 一种处理带有边界的非封闭 STL 模型的切片算法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(10): 2587-2595.

作者简介: 丁承君, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为物联网及移动机器人智能控制、嵌入式计算机系统。

李瑶, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为移动机器人智能控制、嵌入式计算机系统。

E-mail: liyao_hebut@163.com

收稿日期: 2018-01-18

(上接第 19 页)

- [8] CHANG Daofang, JIANG Zuhua, YAN Wei, et al. Integrating berth allocation and quay crane assignments[J]. Transportation Research Part E, 2010, 46(6): 975-990.
- [9] IRIS C, PACINO D, ROPKE S, et al. Integrated Berth Allocation and Quay Crane Assignment Problem: Set partitioning models and computational results[J]. Transportation Research Part E, 2015(81): 75-97.
- [10] IMAI A, CHEN H C, NISHIMURA E, et al. The simultaneous berth and quay crane allocation problem[J]. Transportation Research Part E, 2008, 44(5): 900-920.
- [11] 蒋凯丽, 陆志强, 崔维伟. 考虑周期预防性维护的两阶段混合流水线调度[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(3): 616-623.
- [12] 王红, 熊伟, 杜维鑫, 等. 考虑故障风险的动车组部件预防性维护优化建模[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 123-129.

- [13] 王红, 刘志龙, 杜维鑫, 等. 基于多种维护方式的地铁车辆设备预防性维护策略及维护模型[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(4): 108-114.
- [14] 周炳海, 刘子龙. 考虑衰退的流水车间生产与预防性维护集成调度方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(5): 1272-1278.
- [15] 郑小霞, 赵华, 刘璐洁, 等. 考虑可及性的海上风机综合维护策略[J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3030-3036.

作者简介: 胡鸿韬, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究领域为供应链, 以及生产与物流系统建模、港口仿真优化研究。

任淑珍, 硕士研究生, 主要研究领域为港口物流。

胡雄, 教授, 博士研究生导师, 主要研究领域为设备和设施的状态监控预报、故障诊断与安全评估, 以及设备维修管理系统的教学、实验室建设和科研工作。

E-mail: 1028371896@qq.com

收稿日期: 2018-01-23