

自动化集装箱码头 AGV 混合配对调度优化

包晓琼^{1,2}, 鹿飞燕², 胡志华²

(1. 上海海事大学 电工电子实验中心, 上海 201306; 2. 上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306)

摘要: 为了提高自动化导引车(AGV)的作业效率和空间利用率, 针对40 ft集装箱的搬运作业问题, 采用由20 ft AGV配对搬运和40 ft AGV独立搬运的混合配对调度的新工艺, 以最小化完成时间和空载时间为目标, 建立混合整数规划模型并求解。设计算例和数据集, 研究AGV和搬运任务的数量配置、规格配置与运输时间的敏感性。实验结果说明了模型的有效性, 并为自动化集装箱码头AGV数量和规格配置、配对调度提供了参考。

关键词: 自动化集装箱码头; 混合配对调度; 自动化导引车; 混合整数规划模型

中图分类号: U691.3

DOI: 10.3963/j.issn.2095-3852.2019.03.009

装卸搬运作业常见于自动化集装箱码头中, 即码头前沿桥吊将集装箱卸载至水平运输设备, 水平运输设备衔接码头前沿和堆场, 龙门吊将集装箱装载至堆场, 故又称之为三级装卸搬运^[1]。“搬运”作为“装”和“卸”的衔接环节, 其高效运作可提高码头整体效益。自动化导引车(automatic guided vehicle, AGV), 又称无人导引车, 是自动化集装箱码头最常见的水平运输设备。在搬运作业中, 若一台40 ft AGV搬运一个20 ft的集装箱, 其装载率仅为50%, 造成资源浪费。因此, 采用由两台20 ft的AGV配对搬运40 ft的集装箱或40 ft AGV独立搬运40 ft的集装箱, 20 ft集装箱仅由20 ft AGV独立搬运的新工艺, 即为AGV混合配对调度。

新工艺的关键是配对调度, 指多辆运输设备协同搬运一个货物, HU等^[2]称此类运输问题为多车辆单任务问题(multi-vehicle and one-cargo transportation, MOVC)。MOVC常见于大件物流运输和船舶分段运输, 如JOO等^[3]考虑了配送限制的约束条件, 以最小化惩罚时间为目标建立数学模型, 并设计了基于遗传算法(GA)和自进化算法(SEA)的元启发式算法。PARK等^[4]将船舶分段运输问题转化为带有优先级约束和顺序相关初始时间的并行调度问题。MOVC对同步性提出

了更高要求, 如IOACHIM等^[5]将同步性概念应用到船舶分段运输, 并通过动态规划算法进行求解。GSCHWIND^[6]考虑节点同步装载的运输问题, 在列生成算法的基础上设计4种分支定界算法并进行比较。SALAZAR-AGUILAR等^[7]将同步弧路径问题引入除雪作业中, 设计了混合整数规划模型。ROUSSEAU等^[8]设计带有同步约束的灵活启发式算法以研究车辆动态分配问题。HU等建立混合整数规划模型, 并设计贪婪算法和改进遗传算法求解该模型。综上所述, AGV配对调度是带有同步约束的MOVC问题。

多载AGV可以提高AGV装载率和利用率, 针对此问题, GRUNOW等^[9]利用运输车辆的有效性, 提出了基于优先权调度算法和MILP模型。LEVITIN等^[10]则设计了基于LIFO规则的算法求解多载AGV最短路径。

基于此, 笔者采用由两台20 ft的AGV配对搬运一个40 ft集装箱和一台40 ft AGV独立搬运40 ft集装箱, 20 ft集装箱仅由20 ft AGV搬运的新工艺, 以研究AGV混合配对调度问题。以最小化完成时间和空载时间为目标, 建立混合整数规划模型并求解。并设计算例, 研究AGV和搬运任务的数量配置、规格配置与运输时间的敏感性, 以期优化自动化集装箱码头AGV配对调度方案

收稿日期: 2019-01-12.

作者简介: 包晓琼(1991-), 女, 上海人, 上海海事大学电工电子实验中心讲师, 主要研究方向为港口物流运作优化。

通讯作者: 胡志华(1977-), 男, 湖南长沙人, 上海海事大学物流研究中心教授, 主要研究方向为港航与物流运作优化、智能计算。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71871136; 71471109); 上海市科学技术委员会科研计划项目(16040501800)。

提供参考。

1 问题描述

受限于自动化集装箱码头车辆配置且集装箱装卸搬运作业密集,AGV 装载率和利用率直接影响码头整体效益。笔者采用由两台 20 ft 的 AGV 配对搬运一个 40 ft 集装箱和一台 40 ft AGV 独立搬运 40 ft 集装箱的新工艺,其关键点是配对调度。配对调度分为 3 个阶段^[11]:①选择,为搬运任务选择相应数量 AGVs;②配对并搬运,AGVs 配对成具有相应荷载能力的搬运车并将集装箱从装载点搬运到卸载点;③分离,集装箱卸载后,AGVs 自动分离,等待后续作业命令。

假设有 4 个搬运任务和 3 台 AGV。每个搬运任务对应一个集装箱,集装箱的装载位置 P_i 和卸载位置 D_i 均已知,并引入虚拟起点 S 和虚拟终点 T 。任务 1 的集装箱尺寸为 40 ft,由一台 40 ft 的 AGV 将其从装载位置 P_1 搬运至卸载位置 D_1 ;任务 2 和任务 3 的集装箱尺寸均为 20 ft,分别由一台 20 ft AGV 搬运;两台 20 ft AGV 各自完成 20 ft 搬运任务后,配对成具有 40 ft 荷载容量的运输车,将任务 4 中 40 ft 集装箱由装载位置 P_4 搬运至卸载位置 D_4 。混合配对调度示意图如图 1 所示。

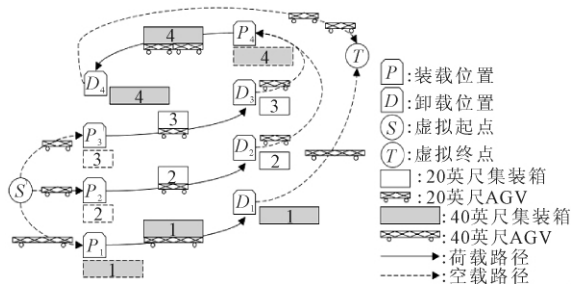


图 1 AGV 混合配对调度示意图

现有以下假设:

假设 1 集装箱尺寸及其装卸位置确定。

假设 2 AGV 尺寸、数量、位置信息及可调度时间确定。

假设 3 AGV 配对和分离操作时间忽略不计。

假设 4 不考虑交通堵塞、AGV 电量不足等不确定因素,AGV 全程无故障,匀速行驶且忽略启动时间。

2 模型构建

集合设置如下:

$I^{20} = \{1^{20}, 2^{20}, \dots, i^{20}, \dots, N^{20}\}$ 为 20 ft 搬运任务集合, i^{20} 表示搬运任务 i 的尺寸为 20 ft, 即 $i^{20} \in I^{20}$;

$I^{40} = \{1^{40}, 2^{40}, \dots, i^{40}, \dots, N^{40}\}$ 为 40 ft 搬运任务集合, i^{40} 表示搬运任务 i 的尺寸为 40 ft, 即 $i^{40} \in I^{40}$;

$I = I^{20} \cup I^{40} \cup \{S, T\}$ 为搬运任务总集合, 其中 S 与 T 分别表示虚拟起点和虚拟终点, 即 $i \in I$;

$V^{20} = \{1^{20}, 2^{20}, \dots, |V^{20}|\}$ 为 20 ft AGV 集合, v^{20} 表示第 v 台 AGV 尺寸为 20 ft, 即 $v^{20} \in V^{20}$;

$V^{40} = \{1^{40}, 2^{40}, \dots, |V^{40}|\}$ 为 40 ft AGV 集合, v^{40} 表示第 v 台 AGV 尺寸为 40 ft, 即 $v^{40} \in V^{40}$;

$V = V^{20} \cup V^{40}$ 为 AGV 总集合, 即 $v \in V$ 。

参数设置为: P_i 为任务 i 的装载位置 (P_i^x, P_i^y); D_i 为任务 i 的卸载位置 (D_i^x, D_i^y); S_i 为任务 i 中集装箱的尺寸, 可推导出此任务所需 AGV 的数量; Y_v 为第 v 辆 AGV 的尺寸, 可推导出此 AGV 的荷载能力; T_{D_i, P_j} 为点 i 到点 j 的运输时间, 取决于两点间的距离; T_i 为任务 i 的操作时间, 即任务 i 从装载位置 P_i 搬运到卸载位置 D_i 的时间; R_v 为第 v 辆 AGV 可调度时刻; L_v 为第 v 辆 AGV 在 R_v 时刻的初始位置 (L_v^x, L_v^y); A_i 为任务 i 的准备时间; M 为足够大的常数, 由 T_{ij} 和 T_i 决定。

决策变量设置为: $x_{ijv} \in \{0, 1\}$, 1 表示第 v 辆 AGV 先搬运任务 i 后紧接着搬运任务 j , 否则为 0, $v \in V$; $y_{iv} \in \{0, 1\}$, 1 表示搬运任务 i 分配给第 v 辆 AGV 搬运, 否则为 0; $y_i^{20} \in \{0, 1\}$, 1 表示任务 i 由 20 ft AGV 搬运, 否则为 0; $y_i^{40} \in \{0, 1\}$, 1 表示任务 i 由 40 ft AGV 搬运, 否则为 0; z_i 表示任务 i 的可操作时刻。

目标函数及约束条件如下:

$$\min f = (f^{\text{Makespan}}, f^{\text{Empty}}) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } f^{\text{Empty}} = \sum_{i, j \in I, v \in V} x_{ijv} T_{D_i, P_j} \quad (2)$$

$$f^{\text{Makespan}} \geq z_i, \forall i \quad (3)$$

$$f \geq 0, z_i \geq 0, \forall i \quad (4)$$

$$z_i \geq A_i, \forall i \quad (5)$$

$$z_i \geq R_v + T_{L_v, P_i} + T_i, \forall i, v \quad (6)$$

$$z_j + (1 - x_{ijv}) M \geq z_i + T_j + T_{D_i, P_j}, \forall i \neq j, v \quad (7)$$

$$\sum_{j \in I} (x_{jiv} - x_{iiv}) = y_{iv}, \forall i, v \quad (8)$$

$$\sum_{j \in I} (x_{ijv} - x_{iiv}) = y_{iv}, \forall i, v \quad (9)$$

$$x_{ijv} + x_{jiv} \leq 1, \forall v \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I \setminus \{S\}} x_{S, i, v} = 1, \forall v \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I \setminus \{T\}} x_{i, T, v} = 1, \forall v \quad (12)$$

$$y_i^{20} + y_i^{40} = 1, \forall i \in I^{40} \quad (13)$$

$$y_i^{20} \geq \sum_{v \in V^{20}} y_{iv} - 1, \forall i \in I^{40} \quad (14)$$

$$y_i^{40} \geq \sum_{v \in V^{40}} y_{iv}, \forall i \in I^{40} \quad (15)$$

$$\sum_{v \in V^{20}} y_{iv} = 1, \forall i \in I^{20} \quad (16)$$

式(1)为目标函数,表示最小化完成时间和空载时间;式(2)为各 AVG 的空载时间之和;式(3)~式(7)规定搬运任务的完成时间;式(8)~式(10)为作业流约束,即入度与出度相等;式(11)和式(12)表示虚拟起点和虚拟终点分别是初始任务和末任务;式(13)~式(15)规定了 40 ft 集装箱的 AGV 分配方案;式(16)表示 20 ft 集装箱仅分配一台 20 ft AGV,否则任务不能被处理,

一直处于等待状态。

3 算例分析

以 6 台 AGV 完成 16 个搬运任务(包含虚拟起点和虚拟终点且每个任务仅包含一个集装箱)为基本算例来验证模型的实用性,其中按照 1:2 比例设置 40/20 ft 的 AGV,按照 1:1 比例设置 20/40 ft 搬运任务。已知参数设置如下: P_i^x, D_i^x, L_v^x 由均匀分布 $U[1, 5\ 300]$ 生成; P_i^y, D_i^y, L_v^y 由均匀分布 $U[1, 900]$ 生成; A_i 和 R_v 均由均匀分布 $U[1, 50]$ 生成; S_i 和 Y_v 为 1 和 2 的随机数。具体参数如表 1 和表 2 所示。

算例有 6 台 AGV 和 16 个搬运任务(包含虚

表 1 搬运任务参数值

任务编号	P_i^x	P_i^y	D_i^x	D_i^y	S_i	A_i	任务编号	P_i^x	P_i^y	D_i^x	D_i^y	S_i	A_i
0	5 160	336	1 175	698	1	0	8	1 175	698	4 857	992	1	0
1	5 125	196	3 972	622	2	0	9	5 109	748	4 597	110	2	0
2	1 163	208	1 263	5	1	0	10	4 101	76	2 092	827	1	0
3	3 160	898	2 626	788	2	0	11	230	408	5 160	336	2	0
4	2 607	6	3 964	933	1	0	12	1 263	5	65	540	1	0
5	645	427	266	444	2	0	13	1 836	630	2 239	131	2	0
6	2 203	394	1 292	560	1	0	14	1 175	689	4 857	992	1	0
7	629	697	3 105	852	2	0	15	1 175	689	4 150	521	1	0

表 2 AGV 参数设置

AGV 编号	L_v^x	L_v^y	R_v	Y_v	AGV 编号	L_v^x	L_v^y	R_v	Y_v
1	864	203	8	2	6	3 379	493	2	1
2	3 709	577	9	1	7	473	408	6	1
3	5 178	79	2	2	8	1 158	280	9	1
4	1 737	673	6	1	9	2 617	307	0	1
5	5 144	516	8	1	10	1 770	203	1	1

拟起点和虚拟终点),任务完成时间和 AGV 空载时间分别为 16 413 和 34 651,作业衔接序列如表 3 所示。第 1 台和第 3 台 AGV 为 40 ft,其余 AGV 的尺寸为 20 ft。20 ft 和 40 ft 集装箱比例设置为 1:1,其中 20 ft 集装箱编号分别为 2、4、6、8、12 和 14,40 ft 集装箱编号分别为 1、3、5、7、9、11 和 13。第 1 台 40 ft AGV 先后独立完成 40 ft 搬运任务 7、13 和 9;第 3 台 40 ft AGV 独立完成第 3 个 40 ft 搬运任务;第 2 台和第 4 台 20 ft AGVs 配对完成第 5 个 40 ft 搬运任务;第 4 台和第 6 台 20 ft AGVs 配对完成第 1 个 40 ft 搬运任务;第 5 个和第 6 个 20 ft AGVs 配对完成第 11 个 40 ft 搬运任务。20 ft 集装箱均由 20 ft AGV 独立搬运。

应用 GUROBI 求解器并使用 PYTHON 语言编译求解模型,得到 AGV 配对调度时序图时间和

表 3 AGV 作业衔接序列

编号	作业衔接序列	编号	作业衔接序列
1	7-13-9	4	1-5-14
2	10-5-4	5	11-2-6
3	3	6	1-11-8-6

空载时间。AGV 配对时序图如图 2 所示,矩形区域中的数字表示第 v 台 AGV 参与完成第 i 个搬运任务,矩形的长度表示运输时间的长短。

4 实验

为进一步分析搬运任务、AGV 的规格、数量和运输时间变化对结果的影响,在 16 个搬运任务和 6 台 AGV 算例的基础上设计 4 组实验场景,场景描述及参数调整如下:

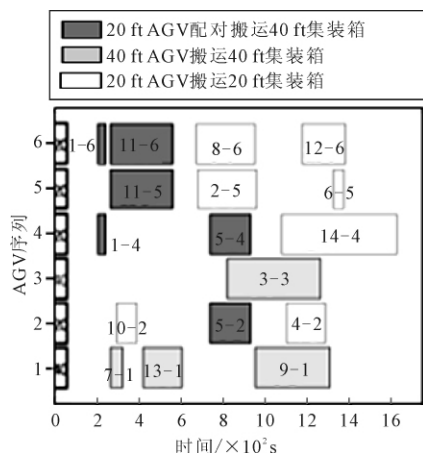


图2 AGV 配对时序图

(1) 实验场景 1 分析 AGV 规格配置对结果的影响。搬运任务和 AGV 数量等参数保持不变,在原有 2:1 配置比例基础上,按照 [1:5, 1:2, 1:1, 5:1] 调节 40/20AGV 规格。搬运任务完成时间和 AGV 空载时间变化如图 3 所示,可以看出 AGV 空载时间对不同规格 AGV 配置比例的敏感性较低,而 AGV 配置比例对任务完成时间的影响较大。随着 40 ft AGV 配置数量的减少,任务完成时间不断减小,当 40/20 的 AGV 配置比例为 2:1 时,任务完成时间达到最小,且完成时间和空载时间之和最小。因此,当搬运任务数量和 AGV 数量已知时,可通过调整 AGV 规格配置比例,优化调度方案以减少搬运任务的完成时间和 AGV 空载时间。

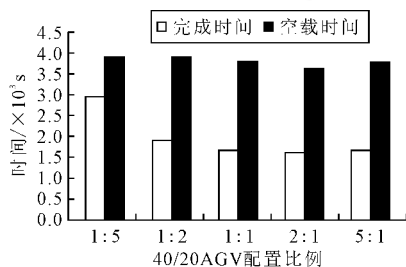


图3 AGV 配置比例对结果的影响

(2) 实验场景 2 分析集装箱规格配置对结果的影响。搬运任务和 AGV 数量等参数保持不变,在原有 1:1 的基础上,按照 [1:6, 2:5, 1:1, 5:2, 6:1] 调节 40/20 集装箱规格。搬运任务完成时间和 AGV 空载时间变化如图 4 所示,可以看出任务完成时间对不同规格集装箱配置比例的敏感性很低,基本没有受到影响。而随着配置比例的变化,AGV 空载时间波动变化,当 40/20 集装箱配置比例为 1:1 时,空载时间和完成时间之和最小。因此,在 AGV 数量和配置比例已知,且搬运任务数

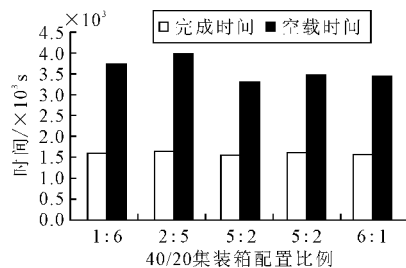


图4 集装箱配置比例对结果的影响

量确定的条件下,调整集装箱配置比例可减少任务完成时间和 AGV 空载时间。

(3) 实验场景 3 分析集装箱数量变化对结果的影响。保持 40/20 集装箱规格配置比例 1:1 不变,按照 -50%, -25%, 25%, 50% 调节集装箱数量。搬运任务完成时间和 AGV 空载时间的变化如图 5 所示,可以看出随着集装箱数量的增加,搬运任务完成时间持续上升,而 AGV 空载时间呈波动变化。可见 AGV 空载时间对集装箱数量变化的敏感性较强,而搬运任务完成时间对集装箱数量变化的敏感性较低。

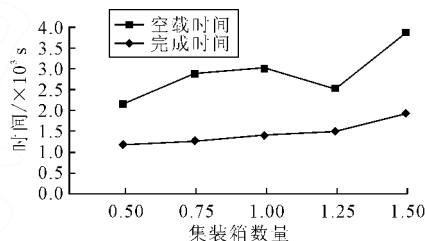


图5 集装箱数量变化对结果的影响

(4) 实验场景 4 分析运输时间变化对结果的影响。保持其他参数不变,按照 -75%, -50%, -25%, 25%, 50%, 75% 调节运输时间。搬运任务完成时间和 AGV 空载时间的变化如图 6 所示,可以看出随着运输时间的增加,完成时间和空载时间均呈上升趋势,且空载时间上升幅度大于完成时间。可见对于运输时间的变化,空载时间的敏感性较强,完成时间的敏感性相对较低。

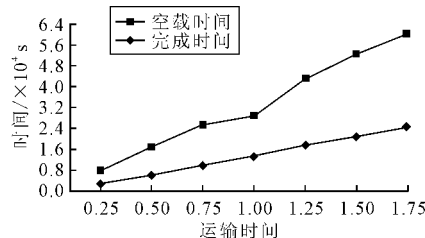


图6 运输时间变化对结果的影响

5 结论

为了提高自动化导引车的空间利用率,针对

40 ft 集装箱搬运问题,采用由两台 20 ft AGV 配对搬运和一台 40 ft AGV 独立搬运的混合配对调度新工艺,以最小化完成时间和空载时间为目标,建立混合整数规划模型并求解。实验结果表明,任务完成时间对运输时间敏感性较低,而空载时间对运输时间敏感性较高。通过调整 AGV 和搬运任务的数量和规格,可获得合理的配置参数和配对调度方案,模型具有良好的可行性。

参考文献:

- [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.
- [2] HU Z H, WEI C. Synchronizing vehicles for multi-vehicle and one-cargo transportation [J]. Computers and Industrial Engineering, 2018(119): 36-49.
- [3] JOO C M, KIM B S. Block transportation scheduling under delivery restriction in shipyard using meta-heuristic algorithms [J]. Expert Systems with Applications, 2014,41(6): 2851-2858.
- [4] PARK C, SEO J. A GRASP approach to transporter scheduling and routing at a shipyard [J]. Computers and Industrial Engineering, 2012,63(2): 390-399.
- [5] IOACHIM I, DESROSIERS J, SOUMIS F, et al. Fleet assignment and routing with schedule synchronization constraints [J]. European Journal of Operational Research, 1999,119(1): 75-90.
- [6] GSCHWIND T. A comparison of column-generation approaches to the synchronized pickup and delivery problem [J]. European Journal of Operational Research, 2015,247(1): 60-71.
- [7] SALAZAR-AGUILAR M A, LANGEVIN A, LAPORTE G. Synchronized arc routing for snow plowing operations [J]. Computers and Operations Research, 2012,39(7): 1432-1440.
- [8] ROUSSEAU L M, GENDREAU M, PESANT G. The synchronized dynamic vehicle dispatching problem [J]. INFOR: Information Systems and Operational Research, 2013,51(2): 76-83.
- [9] GRUNOW M, GUNTHER H, LEHMANN M. Dispatching multi-load AGVs in highly automated seaport container terminals [J]. OR Spectrum, 2004,26(2): 211-235.
- [10] LEVITIN G, ABEZGAOUZ R. Optimal routing of multiple-load AGV subject to LIFO loading constraints [J]. Computers and Operations Research, 2003,30(3): 397-410.
- [11] 包晓琼,胡志华,高超峰,等. 智能自动化导引车配对调度的混合整数规划模型 [J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2016(4): 96-103.

Optimization of AGV Hybrid Pairing Scheduling for Automated Container Terminals

BAO Xiaoqiong, LU Feiyan, HU Zhihua

Abstract: In order to improve the efficiency and space utilization of the automated guided vehicle (AGV), a new process of hybrid pairing scheduling with 20 ft AGV paired handling and 40 ft AGV independent handling is adopted for the handling of 40ft containers to minimize the completion time and no load. A hybrid integer programming model is built and solved with the goal of minimizing completion time and dead time. It designs examples and data sets to study the quantitative configuration, specification, and transit time sensitivity of AGV and handling tasks. The experimental results illustrate the effectiveness of the model and provide a reference for the number and specification configuration and pairing scheduling of automated container terminals.

Key words: automated container terminal; hybrid pairing scheduling; automatic guided vehicle; mixed integer programming model

BAO Xiaoqiong: Lect.; Electrical and Electronics Experimental Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China.