

集装箱码头 AGV 调度优化

柯冉绚, 任亚东

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了解决集装箱码头自动导航车 AGV (Automatic Guided Vehide) 调度优化问题, 建立以无效最短时间为原则的数学模型, 采用 Netlogo 软件模拟仿真, 比较了“作业线”和“作业面”两种调度模式, 验证所建立数学模型的合理性以及“作业面”调度模式的优越性. 在验证实验模型的基础上进行了仿真实验的应用, 通过假设, 以运载 900 TEU 为例, 设置车道数为 2 车道和 3 车道, 以及岸桥与 AGV 的配比为 1:4, 1:5, 1:6 时, 对比分析不同模拟环境下 AGV 的等待率, 实验结果是当车道数为 3 以及岸桥与 AGV 的配比为 1:6 时, AGV 的等待率为 3.71%, 为 6 种模拟情况中的最佳 AGV 和岸桥配置方式. 该结果能够在一定程度上对自动化集装箱码头的调度作业提供参考和借鉴, 提高自动化集装箱码头的作业流畅性, 更好配合越来越大型化的集装箱船装卸作业, 提升码头的作业效率和信息化水平, 实施有效的作业管理.

[关键词] AGV; 作业面; Netlogo; 模拟仿真

[中图分类号] U 691+.31

Study on Optimizing AGV Control in Container Terminals

KE Ran-xuan, REN Ya-dong

(Navigation Institute, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: This paper focuses on the optimization of AGV control in container terminals. Based on the principal of invalid shortest time, Netlogo software is used to simulate and compare two control models, ie, *operation line and operation parallel*. This paper tests and verifies the rationality of the control model based on *operation parallel*. Further to the verification of the experimental model, simulation experiments are carried out. Taking the shipment of 900 TEU for example, waiting rates of AGV under different simulated environments are compared with the assumptions of two and three lanes respectively and the ratios of crane to AGV assumed to be 1:4, 1:5 and 1:6, respectively. The experiment results show that when there are three lanes and the ratio of crane to AGV is 1:6, the waiting rate of AGV is 3.71% which is the best simulation environment among the six simulation models. The results could be practical reference to the actual control work in container terminals to a certain extent, and to help reduce equipment costs, increase the utility of equipment, smooth the operation of automatic container terminals, improve operational efficiency and informatization, carry out effective terminal management, as well as to better co-ordinate loading and discharging works of larger and larger container ships.

Keywords: AGV; control model based on *operation parallel*; Netlogo; simulation

[收稿日期] 2015-09-08

[修回日期] 2015-10-26

[基金项目] 福建省产学研重大研究项目 (2012H6015); 国际旅游局青年专家培育计划 (TYEPT201429); 福建省教育厅杰青项目

[作者简介] 柯冉绚 (1977—), 女, 副教授, 研究方向为交通运输工程、技术创新工程, E-mail: keranxuan@126.com.

0 引言

自动驾驶车 AGV（Automatic Guided Vehide）具有自动化、智能化、并行作业的特点，能够很好的满足集装箱码头的水平运输要求，AGV 的合理调度和配置一直是专家学者重点研究的方向，合理的调度模式可以提高 AGV 的利用率，减少空驶时间，提升重载率。

目前对集装箱码头的研究主要为集卡的调度问题，文献 [1] 探讨了进口集装箱装载和卸载操作时集卡的最优路径问题，同时还研究了集卡最优路径求解问题和进口集装箱在堆场上的箱位安排问题，并且运用启发式算法求解和分析了所建立的模型；文献 [2] 分析了集卡的静态调度模型和动态调度模型的优缺点，并且建立了集卡路径动态优化数学模型；文献 [3] 从集卡在码头前沿作业时出现的排队等待作业现象造成了集卡资源浪费这个角度进行研究，利用排队论的思想建立数学模型，并且利用所建立的数学模型进行了仿真模拟；文献 [4-5] 针对调度方式进行了研究，并且建立数学模型，使用优化算法进行求解。

国内外对于集装箱码头集卡或 AGV 调度问题的研究，主要设置以下几种目标函数：1) 行驶距离最短；2) 总作业时间最短；3) 运营成本最低；4) 配置数量最少。基于此，本文采用数学建模和仿真模拟的方法去研究 AGV 的调度，以使其达到缩短空驶时间，提高重载率的目标。通过分析“作业线”和“作业面”两种调度模式的优缺点，并且以无效作业时间最短为原则建立数学模型。基于 Netlogo 系统平台构建仿真模拟，通过运行仿真实验来验证“作业面”调度模式的优越性和所建数学模型的合理性。应用仿真实验进行实例分析，可以为集装箱码头实际调度作业提供参考^[6]。

1 调度模式分析

1.1 “作业线”调度模式

在集装箱码头中，AGV 主要服务于岸桥与堆场、堆场与堆场之间水平运输集装箱，通常采用“作业线”的调度模式，即在集装箱装载或卸载过程中，某一个 AGV 固定的为某一个岸桥服务，或者说一个岸桥由固定的几台 AGV 提供服务，直至所有的任务完成，才能重新分配新的任务为其他的岸桥服务。调度模式如图 1 所示。其特点为：1) 调度方式简单，每组 AGV 的作业路线固定，便于生产管理。2) 在现场实时调度作业时，不仅对作业变化的敏感性弱，导致调整滞后缓慢，缺乏灵活性，而且浪费人力和物力；3) 从 AGV 的装载效率上来看，其重载率为 50%，在提倡“双重效用”的趋势下，不能够提高 AGV 的利用率^[7]。

1.2 “作业面”调度模式

针对“作业线”调度模式的弊端，不少学者在不断地钻研集装箱码头的调度生产，基于“作业面”的 AGV 调度模式被提出来。此种调度模式从整体作业过程出发，兼具系统工程的思想，AGV 不再单独的固定服务于某一岸桥，也不局限于单一路线，而是动态地服务在多条任务线上，不同的装卸船舶，不同的岸桥、龙门起重机，AGV 实现了整体协同作业，很大程度上缩短了 AGV 的空驶时间和距离，调度模式如图 2 所示。

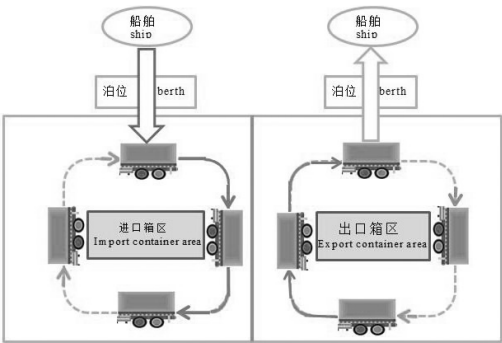


图 1 基于“作业线”调度模式流程图
Fig.1 The flow chart based on the “line” scheduling model

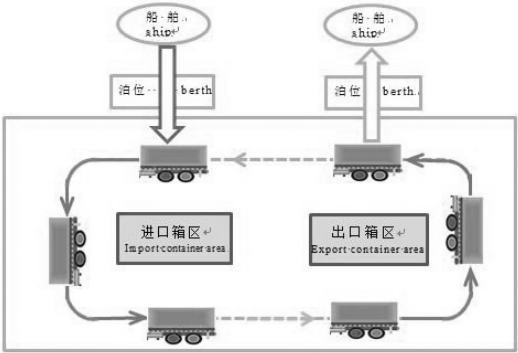


图 2 基于“作业面”调度模式流程图
Fig.2 The flow chart based on the “surface” scheduling model

其特点为: 1) AGV 的空驶距离大缩短, 有效缩短集装箱船舶在港装卸时间和等待时间; 2) AGV 被充分地利用到不同的作业线上运输集装箱, 实现了双向重载行驶, 提高 AGV 的利用率。

2 仿真模型的建立

在建立模型之前对时间参数进行定义: m 为进口箱区的数量; n 为出口箱区的数量; k 为进口泊位的数量; l 为出口泊位的数量; C_i 为计划在进口箱区 i 堆存的进口集装箱数量; D_j 为计划在出口箱区 j 出口的出口集装箱数量; B_a 为通过进口泊位 a 进口的进口集装箱数量; H_b 为通过出口泊位 b 出口的出口集装箱数量. AGV 在每个阶段所使用的时间以“ t ”表示, 标注在作业流程图上, 如图 3 所示。

决策变量:

X_{aijb} 为 AGV 在一条“作业面”路径上的行走次数, 即在: 进口泊位 $a \rightarrow$ 进口箱区 $i \rightarrow$ 出口箱区 $j \rightarrow$ 出口泊位 b 的行走次数; Y_{ai} 为 AGV 单独运输进口箱的行走次数, 即在路径, 进口泊位 $a \rightarrow$ 进口箱区 $i \rightarrow$ 进口泊位 a 的 AGV 行走次数; Z_{jb} 为 AGV 单独运输出口集装箱的行走次数, 即在路径, 出口泊位 $b \rightarrow$ 出口箱区 $j \rightarrow$ 出口泊位 b 的 AGV 行走次数。

本文求解的目标是: 在“作业面”和“作业线”作业模式下, 考虑岸桥和堆场龙门吊的作业时间, 规划 AGV 的运输路线, 基于无效作业时间最短的运输方式, 建立如下数学模型。

基于“作业面”调度模式下的求解最短无效作业时间 F_1 为:

$$F_1 = \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^k \sum_{b=1}^l [(T_w + T_u) \times X_{aijb}]. \quad (1)$$

其中: AGV 在“作业面”调度模式下的平均等待时间 $T_w = t_a + t_b + t_i + t_j$; AGV 在“作业面”调度模式下的空载行驶时间 $T_u = t_{ab} + t_{ij}$ 或 $T_u = t_{ba} + t_{ji}$ 。

基于“作业线”调度模式下求解的最短无效作业时间 F_2 :

$$F_2 = \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^k \sum_{b=1}^l [(T_{w1} + T_{u1}) \times Y_{ai} + (T_{w2} + T_{u2}) \times Z_{jb}]. \quad (2)$$

约束条件为: $X_{aijb}, Y_{ai}, Z_{jb} \in Z$ 。

计划堆存在进口箱区 i 的集装箱必须全部由 AGV 从进口泊位运输到进口箱区

$$\sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^k \sum_{b=1}^l X_{aijb} + \sum_{a=1}^k Y_{ai} = C_i, i = 1, 2, \dots, m; \quad (3)$$

计划从出口箱区 j 出口的集装箱必须全部由出口箱区 j 运输到出口泊位

$$\sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^k \sum_{b=1}^l X_{aijb} + \sum_{b=1}^l Z_{jb} = D_j, j = 1, 2, \dots, n; \quad (4)$$

计划从进口泊位 a 进口的集装箱必须全部由 AGV 从进口泊位运输到进口箱区

$$\sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^k \sum_{b=1}^l X_{aijb} + \sum_{i=1}^m Y_{ai} = B_a, a = 1, 2, \dots, k; \quad (5)$$

计划从出口泊位 b 出口的集装箱必须全部由 AGV 从出口箱区运输到出口泊位^[8]

$$\sum_{j=1}^n \sum_{a=1}^k \sum_{b=1}^l X_{aijb} + \sum_{j=1}^n Z_{jb} = H_b, b = 1, 2, \dots, l. \quad (6)$$

3 仿真模拟

本文基于 Netlogo 平台对 AGV 调度模式进行仿真模拟, 并将所建立模型的数学思想运用到仿真模

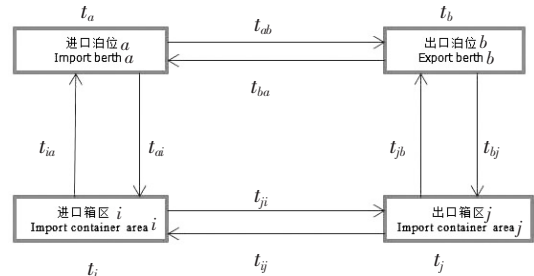


图 3 作业流程图

Fig.3 Operation flow chart

拟中，进而建立实验模型。

3.1 仿真实验一

下面从基于无效作业时间最短对“作业线”和“作业面”调度模式运行仿真模拟，此实验是针对在初始条件一致的情况下，比较两种调度模式的优劣程度。在本实验中设置的试验参数如表 1 所示：

表 1 实验变量取值
Tab.1 The experimental variable values

变量 Variable	集装箱个数 Container number /TEU	AGV 数量 AGV number /台	AGV 速度 Speed-limit $/(m \cdot s^{-1})$	加速度 Acceleration $/(m \cdot s^{-2})$	减速度 Deceleration $/(m \cdot s^{-1})$	装卸效率 Loading & discharging rate $/(move \cdot h^{-1})$
取值 Valua	900	12	0.20	0.075	0.060	30

3.1.1 基于“作业线”的模拟过程

- 1) 在模拟界面上，根据表 1 的变量取值设置参数。
- 2) 记录模拟中导出的数据和图形，如图 4、图 5 所示。图 4 为基于“作业线”调度方式 AGV 的平均等待时间，图 5 为等待时间之和。

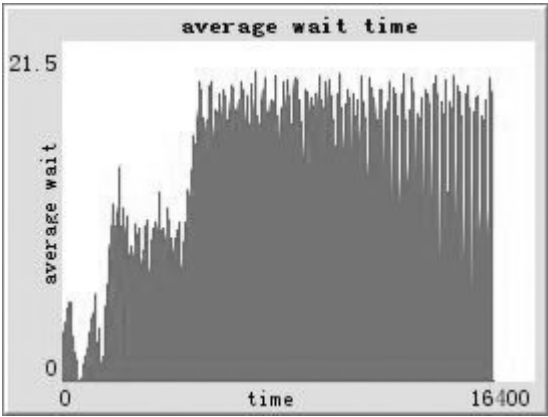


图 4 平均等待时间
Fig.4 Average waiting time

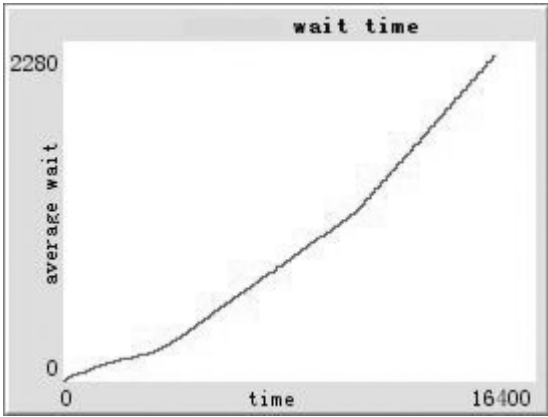


图 5 等待时间之和
Fig.5 The sum of waiting time

3.1.2 基于“作业面”的模拟过程

- 1) 为了与“作业线”调度作业进行比较，其设计参数也是按照表 1 的变量参数进行设置，把 change? 按钮调整为 on 状态，形成“作业面”调度的参数设置。
- 2) 记录模拟中导出的数据和图形如图 6、图 7 所示。图 6 所示为基于“作业面”调度方式 AGV 的平均等待时间，图 7 所示为等待时间之和。

3.1.3 结果分析

通过分析比较图 5 和图 7 可知，在相同的作业时间内，基于“作业线”调度模式的等时间之和为 2280 (ticks)，而基于“作业面”的等待时间时间之和为 1520 (ticks)，从而得知基于“作业面”调度模式要比基于“作业线”调度模式的作业等待时间少 760 (ticks)，生产作业效率提高了 33.3%。在集装箱码头设备数量一定的情况下，基于“作业面”调度模式能够使生产效率得到很大程度的提高，由此可以验证这种调度模型是合理并且可行的。

3.2 仿真实验二

为了更好地求解基于“作业面”调度模式，以无效作业时间最短为原则建立的数学模型，应用一个具体的实例进行求解。

已知实例的具体要求如下：

- 1) 某集装箱码头的海测岸线长为 500 m，每隔 70 m 设置一个岸桥，共设置 3 个岸桥；
- 2) 某集

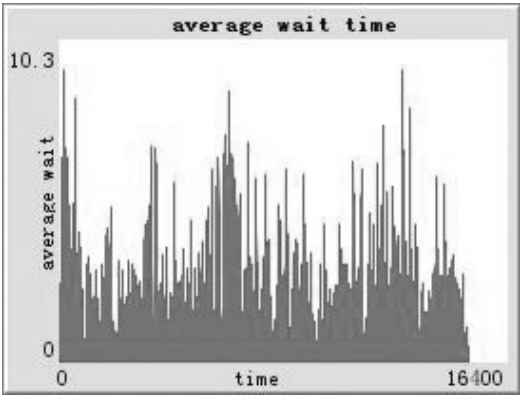


图 6 平均等待时间

Fig.6 Average waiting time

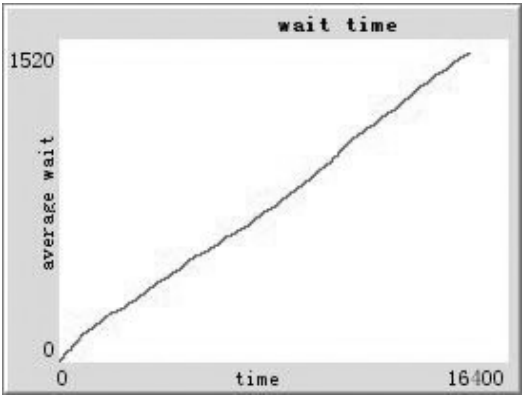


图 7 等待时间之和

Fig.7 The sum of waiting time

装箱船舶靠泊装卸的集装箱的总数量为 900 TEU，其中 450 个为装载集装箱，450 个为卸载集装箱；3) 每一岸桥配有 5 辆 AGV 为其服务；4) AGV 的车身长为 15 m，运行速度为 5 m/s；5) 岸桥和龙门吊的装卸效率为 30 move/h；6) 在码头前沿的模拟界面上设置两个车道，其中第 1 车道 AGV 数量为 8 台，第 2 车道 AGV 数量为 7 台；7) 在等待岸桥作业时，两个车道的 AGV 具有不同时等待同一岸桥的交通优先设置。

根据上述条件，可以设置变量的参数，如表 2 所示。

表 2 实验变量参数
Tab.2 The experimental variable values

变量 Variable	AGV 数量 AGV number		AGV 速度 Speed-limit /(m · s ⁻¹)	加速度 Acceleration /(m · s ⁻²)	减速度 Deceleration /(m · s ⁻¹)	装卸效率 Loading & discharging rate /(move · h ⁻¹)	集装箱数量 Container number
	lane 1	lane 2					
取值 Value	8	7	0.20	0.075	0.060	30	900

记录模拟中导出的数据和图形，如图 8、图 9 所示。

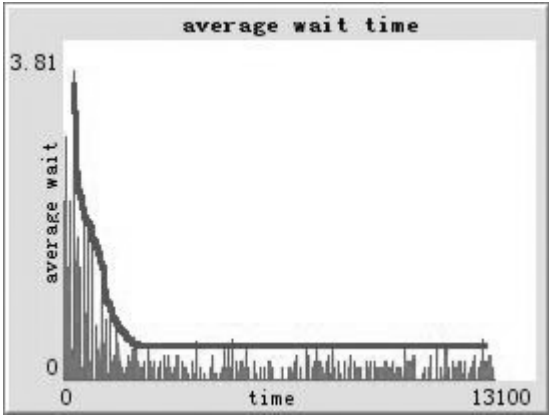


图 8 平均等待时间

Fig.8 Average waiting time

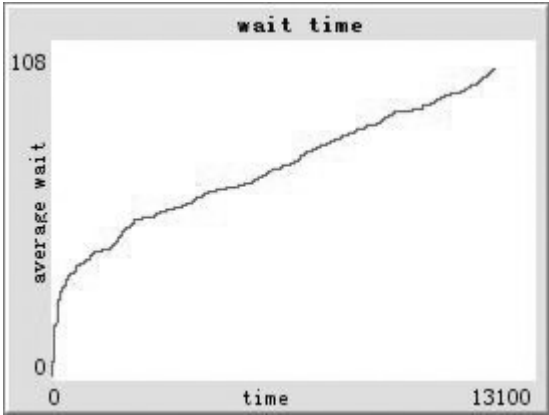


图 9 等待时间之和

Fig.9 The sum of waiting time

由图 8、图 9 得知，所构建的“作业面”调度模式下的数学模型的目标函数能够很快收敛，得到 AGV 最短的等待时间。由模拟实验导出收敛值为 1.25 (ticks)，这样就保证了整体作业时间最短，各辆 AGV 能够顺利完成任务，提高集装箱码头的工作效率。

3.3 实验模型的应用

基于实验平台，在模拟场景中设置不同的车道数，以及不同的岸桥与 AGV 的配比，在运载相同

数量的集装箱情况下来研究 AGV 的等待率，可以为实际的调度生产提供决策支持. 表 4 为 2 车道设置的初始参数，表 4 为 3 车道设置的初始参数.

表 3 二车道设置的初始参数				表 4 三车道设置的初始参数			
Tab.3 Initial parameters set in two lanes			台	Tab.4 Initial parameters set in three lanes			台
配比	AGV 的个数 AGV number			配比	AGV 的个数 AGV number		
Propoution	第 1 车道 lane 1	第 2 车道 lane 2		Propoution	第 1 车道 lane 1	第 1 车道 lane 2	第 1 车道 lane 3
1:4	6	6		1:4	4	4	4
1:5	8	7		1:5	5	5	5
1:6	9	9		1:6	6	6	6

3.4 实验结果分析

在做完 2 车道和 3 车道的对比实验以后，将实验结果汇总，并且进行分析，如表 5 所示.

表 5 实验结果汇总									
Tab.5 The summary results of the experiment									
车道数	参数	1:4	1:5	1:6	车道数	参数	1:4	1:5	1:6
Number of lane	Parameter				Number of lane	Parameter			
2 车道 Two lanes	等待时间				3 车道 Three lanes	等待时间			
	Waiting time /tick	1 420	1 290	1 050		Waiting time /tick	1 340	1 060	845
	总运行时间					总运行时间			
	Total running time /tick	33 375	27 300	23 250		Total running time /tick	32 625	26 700	22 750
	等待率/%					等待率/%			
	Waiting rate	4.3	4.7	4.51		Waiting rate	4.1	3.97	3.71

对表 6 的数据进行分析:

- 1) 当模拟界面内设置 2 车道时，通过仿真模拟的运行，可以得出当 AGV 与岸桥的配比为 1:4 时，AGV 的等待率最小为 4.3%，但是等待时间和总运行时间要高于其他两种配比. 综合考虑，当岸桥与 AGV 配比为 1:6 时，总运行时间和等待时间最短，等待率为 4.51%，在合理的范围之内.
- 2) 当模拟界面内配置 3 车道时，等待时间、总运行时间以及等待率随 AGV 与岸桥的配比的增加而减少，这说明 AGV 的调度作业效率逐渐提高. 当 AGV 与岸桥的配比为 1:6 时，AGV 的等待率最低为 3.71%.
- 3) 对比 2 车道和 3 车道的整体效率时，可以得出 3 车道的等待率要比 2 车道的等待率普遍都有降低，降低的比率为 4.65% ~ 17.7%. 总运行时间方面，3 车道要比 2 车道的运行时间略短，这是因为增加了一个车道，使得 3 车道的 AGV 速度比 2 车道的快，AGV 的等待率降低，使得整体作业效率提高.
- 4) 在 2 车道模拟情况中，当岸桥与 AGV 配比为 1:5 时的等待率比配比为 1:6 时的等待率高，这是由于系统仿真模拟执行时，数据输出具有波动性，但是整体会收敛于某一稳定的值.
- 5) 在 2 车道的实验分析中，发现当岸桥与 AGV 的配比为 1:4 时的等待率小于其他两种配比情况，这是因为在 2 车道中，每个车道分配的 AGV 数量少于其他两种配比的情况，自然每辆 AGV 的加速度会增加，使得等待率降低.
- 6) 在实际调度生产中，从等待效率方面考虑，可以选择 3 车道和岸桥与 AGV 的配比为 1:6 的情况作为决策支持.

4 结束语

以集装箱码头的 AGV 调度为研究对象, 合理考虑 AGV 的调度模式, 借鉴前人所建立的数学模型, 进行改进规划, 规划后的模型为基于无效作业时间最短的数学模型, 采用 Netlogo 软件进行仿真模拟和实例求解, 通过仿真应用, 为 AGV 的调度决策提供一定的参考依据。

本文中仿真分析只针对等待率方面去考虑 AGV 的调度, 为了更全面的研究集装箱码头 AGV 调度, 下一步可以将集装箱码头的等待效率与集装箱码头的运行成本相结合, 用以分析集装箱码头的作业效率。

在对研究集装箱码头的 AGV 调度方法上, 使用具有仿真模拟功能的 Netlogo 软件, 为 AGV 的调度研究提供一种可行的方法支持。将来在研究集装箱码头的 AGV 调度时, 可以适当增加变量, 不断丰富仿真模拟的内容, 让仿真界面的设置更贴近现实, 适当增加数据输出框, 可以更全面、更准确的去研究调度问题。

集装箱码头的资源配置, 包括硬件设备的资源配置, 与码头的生产效率密切相关。通过研究岸桥和 AGV 的配比, 模拟不同情况下的作业时间和等待时间, 得出比较适合的配比, 从而达到集装箱码头的资源配置优化, 在保障生产效率的情况下, 提高码头的效益。本研究在集装箱码头运营方面, 具有实践意义。

[参 考 文 献]

- [1] MARTIN GRUNOW. Hans-Otto Günther, Matthias Lehmann. Strategies for dispatching AGVs at automated seaport container terminals. *OR Spectrum*, 2006, 28(4): 587-610. DOI:10.1007/S00291-006-0054-3.
- [2] ETSUKO NISHIMURA, Akio Imai, Stratos Papadimitriou. Yard trailer routing at a maritime container terminal. *Transportation Research Part E*, 2005, 41(1): 53-76.
- [3] 赵悦琼, EVANG ELOS KAISAK. 集装箱码头集卡的一种调度模型与仿真. *物流工程管理*, 2014(9): 108-109.
- [4] 陈方鼎. 基于群体智能算法的集装箱码头集卡调度研究. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [5] 徐远琴, 韩晓龙. 集装箱码头集卡动态调度模型优化. *武汉理工大学学报 (信息与管理工程版)*, 2013(3): 358-360.
- [6] 任亚东. 集装箱码头 AGV 调度研究. 厦门: 集美大学, 2014.
- [7] 康志敏, 吴洪明. 港口集装箱码头集卡优化调度研究. *物流工程与管理*, 2011, 33(2): 59-61.
- [8] 王军, 许晓雷. 集装箱码头集卡作业的路径选择. *大连海事大学学报*, 2011, 37(2): 25-27.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)