

考虑充电和等待时间的集装箱码头 AGV 调度

周小凡, 茆道方, 余芳, 高银萍

(上海海事大学物流科学与工程研究院, 上海 201306)

摘要: 为提高自动化集装箱码头自动导引小车(automated guided vehicle, AGV)作业效率和利用率, 考虑 AGV 的电量续航能力和重空载的耗电差异, 在 AGV 任务选择时综合考虑任务距离和各任务紧急程度, 并设置 AGV 充电结束条件以减少 AGV 排队等待的时间, 建立以最小化完成任务总时间为目标的 AGV 调度模型。用 Java 进行实例求解。结果表明, 对 AGV 采用多频次充电并将其允许工作电量百分比设定为 71% 时, 完成任务总时间最短, 耗电量最小, 且 AGV 利用率较高。

关键词: 自动化集装箱码头; 自动导引小车(AGV); 充电调度; 充电特性; 等待时间

中图分类号: U691.3

文献标志码: A

Scheduling of AGV in container terminals considering charging and waiting time

ZHOU Xiaofan, CHANG Daofang, YU Fang, GAO Yinping

(Institute of Logistics Science & Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to improve the work efficiency and utilization rate of AGVs (automated guided vehicles) in automated container terminals, an AGV scheduling model with the objective of minimizing the total task completion time is established. In the model, the AGV's power continuation ability and the difference of power consumption between heavy and empty conditions are considered, the task distance and the emergency degree of each task when AGV task selection are taken into account comprehensively, and the charging end condition of AGV is set to reduce the waiting time of AGVs. An example is solved by Java. The results show that, when AGVs are charged with multi-frequency and the allowable working power percentage is set to 71%, both the total task completion time and the power consumption are the least, and the utilization rate of AGVs is higher.

Key words: automated container terminal; automated guided vehicle (AGV); charging scheduling; charging characteristic; waiting time

收稿日期: 2018-07-13 修回日期: 2018-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(71602114); 上海市科学技术委员会重点项目(16040501500, 17595810300)

作者简介: 周小凡(1995—), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为集装箱自动化码头调度与优化, (E-mail) 273874197@qq.com;

茆道方(1978—), 男, 河南封丘人, 教授, 博导, 博士, 研究方向为供应链设计与运营、物流系统运作与优化, (E-mail) changdaofang@126.com

0 引言

随着全球经济的快速发展,自动化集装箱码头发展迅猛。为提高集装箱码头的自动化作业效率,各种自动化设备和技术被引入码头实际操作中,其中自动导引小车(automated guided vehicle, AGV)作为自动化集装箱码头的重要组成部分,已被广泛应用到码头水平作业中。目前,自动化集装箱码头的AGV多采用纯电力驱动,具有节能环保、智能导航、成本较低等优势^[1]。在实际作业中,为保证AGV连续工作以完成装卸任务,需要及时为AGV充电。同时,AGV在重载和空载行驶过程中耗电量不同^[2]。因此,本文对考虑充电和等待时间的集装箱码头AGV调度问题进行研究。

针对自动化集装箱码头水平运输问题,大部分学者主要对路径规划和车辆调度进行研究来提升作业效率。荀燕琴^[3]提出基于差分算法的蚁群算法研究AGV的路径规划;LI等^[4]提出人造鱼算法对AGV进行路径规划;韩晓龙等^[5]在不同调度策略下,对AGV进行调度配置仿真,寻求最优调度配置策略;CONFESSORE等^[6]将AGV调度问题转化成最小流问题,建立最小流型,利用贪婪算法和单纯形算法求解,结果表明,改进后的单纯形算法对最小化完成任务的平均时间和最大化AGV利用程度有显著效果;ANGELOUDIS等^[7]提出对AGV进行实时控制的调度方法,并得出该方法优于启发式算法的结论;泰应鹏等^[8]利用A*算法启发式地为多个AGV规划路径,解决多AGV在路径规划中的碰撞冲突问题;梁承姬等^[9]提出一种基于路段时间窗的AGV路径规划方法,有效实现了AGV的避碰;刘二辉等^[10]提出一种用于求解复杂环境下AGV路径规划问题的改进灰狼优化算法,并引入路径微调算子和邻域变异算子。查阅大量文献发现,现有论文针对AGV调度考虑充电的较少,相关论文的主要研究内容如下:张剑韬等^[11]研究了非接触式无线充电技术在AGV中的应用;HUANG等^[12]设计了非接触式AGV充电系统,该系统中AGV具有应用双输出功能,AGV沿轨道移动时可进行充电;LI^[13]考虑了电量约束下的车辆路径优化问题;FATNASSI等^[14]提出具有电池约束的AGV调度问题;傅正堂等^[2]考虑了AGV重载耗电差异,寻求最短总路径;张亚琦等^[15]给出了AGV充电与作业集成调度的混合整数规划模型,考虑充电过程对AGV实际作业的影响,分析AGV数量对运输时间的影响。综上可知,大多研究主要针对AGV的充电技术,对影响AGV充电

调度的因素考虑较为单一,对AGV充电调度的研究还不完善,如对AGV的充电规则及充电等待问题的研究较少。总体上,本文考虑AGV的电量续航能力和重空载耗电差异,根据AGV到达剩余各任务起点的执行时间与各任务优先级的加权值进行任务选择,设置AGV充电结束条件,考虑多频次充电,缩短AGV充电等待时间,寻求约束条件下的最短完成任务总时间。

1 问题描述

某自动化集装箱码头在某时段需完成一定数量的集装箱卸船任务,其中利用AGV将集装箱从各岸桥缓存区送至对应的场桥缓存区。本文考虑AGV的电量续航能力和重空载耗电差异,对正充电的AGV设定一个允许工作电量百分比 P_0 ,当其充电量达到 P_0 且有其他AGV等待充电时,就断开充电电源投入工作,减少其他AGV的充电等待时间。港口实际作业任务的紧急情况依据货主需要集装箱离港的时间而定,本文将需要在3天内完成的集装箱离港任务按紧急程度划分为1、2、3级任务,分别代表最紧急、较紧急和不紧急任务;AGV不与岸桥绑定,AGV在进行任务选择的同时考虑AGV到达剩余各任务起点的执行时间和各任务紧急程度,对这2个量进行无量纲化处理后,分别赋予权重因子 α 和 β ,选择二者加权值最小的任务,以此完成所有卸箱任务。

图1中:AGV按照任务选择原则选择任务1后,前往任务1起点岸桥缓存区进行装箱,然后沿最短路径到达任务1终点场桥缓存区进行卸箱;完成任务1后,再按照任务选择原则选择任务2,先判断AGV剩余电量是否能使其完成任务2并返回充电站,若能则去执行任务2,否则去充电站进行充电。AGV到达充电站时,若有空闲充电桩则直接进行充电,否则等待其他正充电的AGV的电量达到 P_0 后再开始充电。若充电站无AGV等待充电,则正充电的AGV电量达到 P_0 后将继续充电直至有其他AGV前来充电或该AGV电已充满才断开充电电源

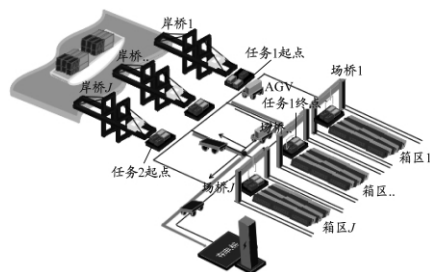


图1 AGV充电调度示意图

进入工作状态。

为完成所有集装箱装卸任务,AGV需要进行任务选择并判断是否需要充电,图2为AGV充电调度仿真流程。

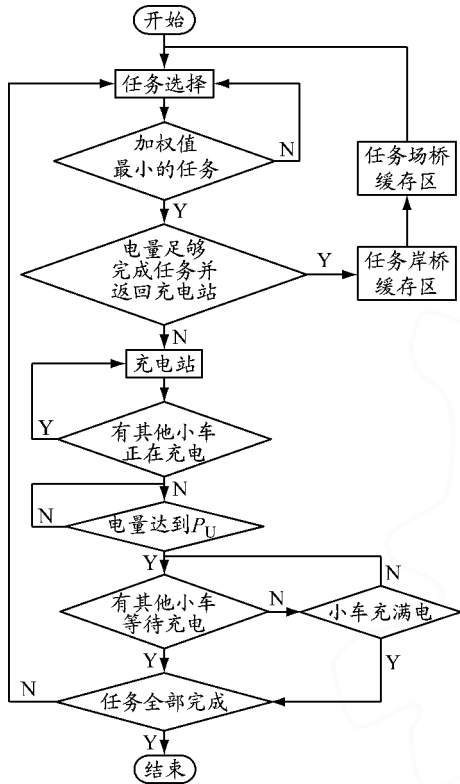


图2 AGV充电调度仿真流程

2 模型建立

2.1 符号定义

K 为任务集合, $k \in K$; L 为充电站集合, $l \in L$; V 为 AGV 集合, $v \in V$; P_L 为 AGV 需要进行充电的最低电量; Z_k 为任务 k 的紧急程度等级; B_k 为任务 k 的起点; E_k 为任务 k 的终点; $U_{i,j}$ 和 $H_{i,j}$ 分别为 AGV 从位置 i 至位置 j 的执行时间和消耗的电量; $G_{vk}(t)$ 为决策变量, 表示 AGV v 在时刻 t 执行待完成任务 k 所对应的时间等级; T_k 为决策变量, 表示 AGV v 完成任务 k 的时间; $C_v(t)$ 为决策变量, 表示 AGV v 在时刻 t 的电量; $S_v(t)$ 为决策变量, 表示 AGV v 在时刻 t 的位置; W 为决策变量, 表示待完成任务集合; $w_v(t)$ 为决策变量, 表示 AGV v 在时刻 t 按照任务选择原则需完成的加权值最小的任务; $x_{vk}(t)$ 为决策变量, 表示 AGV v 在时刻 t 到达任务 k 起点的执行时间与任务 k 紧急程度的加权值; $y_v(t)$ 为决策变量, 表示 AGV v 在时刻 t 到达各任务起点的执行时间与各任务紧急程度的最小加权值。

2.2 任务选择模型

任务选择原则依据 AGV 到达各任务起点的执

行时间、各任务的紧急程度进行设定。AGV 在完成上一任务后要选择下一执行任务, 任务选择原则为: 对该 AGV 到达剩余各任务的执行时间与各任务的紧急程度进行加权, 选择加权值最小的任务, 约束条件如下, 其中 $k \in K, v \in V$ 。

$$y_v(t) = \min x_{vk}(t) \quad (1)$$

s. t.

$$x_{vk}(t) = \alpha G_{vk}(t) + \beta Z_k \quad (2)$$

$$w_v(t) = k S_1(y_v(t) - x_{vk}(t)) \quad (3)$$

式(1)表示 AGV v 在时刻 t 的各剩余任务加权值的最小值; 式(2)表示 AGV v 在时刻 t 的各剩余任务的加权值; 式(3)表示 AGV v 在时刻 t 选择加权值最小的任务 k 作为待执行任务, 其中 $S_1(x)$ 为 0-1 函数(若 $x \geq 0$ 则取 1, 否则取 0)。

2.3 考虑充电特性和等待时间的 AGV 调度模型

在任务选择模型的基础上, 设定以下函数变量:

$S_2(x)$ 为 0-1 函数, 若 $x > 0$ 则取 1, 否则取 0;

$S_3(x)$ 为 0-1 函数, 若 $x = 0$ 则取 1, 否则取 0; $A_{vk}(t)$ 为 0-1 变量, 若 $w_v(t) = k$ 且电量满足任务 k 则取 1, 否则取 0; $M_v(t)$ 为 0-1 变量, 若在时刻 t AGV v 不充电则取 1, 否则取 0; $Q_v(t)$ 为 0-1 变量, 若在时刻 t AGV v 断开充电电源则取 1, 否则取 0。

假设在完成已知任务期间无其他船进港, 不考虑缓存区容量限制、AGV 在运输过程中和在堆场内的等待时间和 AGV 到达充电站进行充电的操作时间。以完成任务总时间最短为目标, 建立自动化集装箱码头 AGV 调度模型, 模型的目标函数和约束条件如下, 其中 $k \in K, v \in V$ 。

$$\min \max T_k \quad (4)$$

s. t.

$$\sum_v (1 - M_v(t)) \leq L \quad (5)$$

$$\sum_t \sum_v A_{vk}(t) = 1 \quad (6)$$

$$M_v(t) - A_{vk}(t) \geq 0 \quad (7)$$

$$A_{vk}(t) = S_1(C_v(t) - H_{S_v(t), B_{w_v(t)}} - H_{B_{w_v(t)}, E_{w_v(t)}} - P_L) S_3(w_v(t) - k) \quad (8)$$

$$Q_v(t) = S_1(C_v(t) - P_U) S_2\left(\sum_v M_v(t)\right) \quad (9)$$

$$M_v(t) = S_1\left(C_v(t) - H_{S_v(t), B_{w_v(t)}} - H_{B_{w_v(t)}, E_{w_v(t)}} - P_L\right) \quad (10)$$

$$T_k = \sum_t \sum_v A_{vk}(t) \left(t + U_{S_v(t), B_{w_v(t)}} + U_{B_{w_v(t)}, E_{w_v(t)}}\right) \quad (11)$$

式(4)表示完成任务总时间最短;式(5)限定在时刻 t 需要充电的AGV数量不大于充电桩的数量;式(6)限定每个任务只能被完成一次且都要被完成;式(7)限定AGV在充电期间不能被分配任务;式(8)限定当在时刻 t AGV v 需执行任务 k ,且电量满足AGV v 能完成任务 k 且能返回充电站 l 时,AGV v 前去执行任务 k ;式(9)表示若有AGV前往充电站充电,则在充电的AGV电量达到 P_U 后可结束充电进入工作状态;式(10)表示若AGV在时刻 t 能够完成目标任务则无须充电,否则必须前往充电站充电;式(11)为任务 k 结束时间。

3 算例分析

在求解模型时,根据港口的实际工作状态设定AGV的重载和空载运行速度分别为20、25 km/h,在该工作区域有2个岸桥、6个场桥、8辆可用AGV和1 000 TEU集装箱卸船任务,其中2个岸桥各500 TEU集装箱卸船任务。在AGV进行任务选择时,对各AGV到达各剩余任务起点的执行时间与各任务的紧急程度进行加权。由于港口实际作业过程中优先考虑任务的紧急程度,且分析得出在 α 、 β 取值不同的情况下AGV充电限制对完成任务总时间的影响相同,因此设定 $\alpha = 0.4$ 、 $\beta = 0.6$ 。在实际操作过程中,AGV必须预留能够返回充电站的电量,参考文献[2]设定AGV在完成一项任务时至少要保留10%的最低电量使其能够返回充电站。岸桥与场桥之间的距离见表1,岸桥与场桥之间的任务数量见表2,可用的8辆AGV初始电量见表3。

表1 岸桥与场桥之间的距离 m

岸桥	场桥					
	1	2	3	4	5	6
1	700	650	650	950	1 130	1 350
2	850	650	650	800	980	1 200

表2 岸桥与场桥之间的任务数量 TEU

岸桥	场桥					
	1	2	3	4	5	6
1	88	70	150	90	50	52
2	105	96	80	100	74	45

表3 AGV初始电量

AGV	1	2	3	4	5	6	7	8
初始电量/%	68	71	66	83	62	78	88	91

设定 P_U 在50%~100%范围内取值。在求解时将Java作为编程语言,基于Java编程语言面向对象的特性,将模型中的AGV、场桥、岸桥、充电站和任务抽象为实体对象,并以工厂模式创建不同的工厂生产不同的对象实例。在生产实例时以读取配置文件的方式为不同的实例赋值。AGV实例创建完后以模型中的算法进行任务接受、执行、完成和充电。在任务执行期间记录每辆AGV的任务执行时间,当所有AGV都完成任务后再计算用时最长的一辆AGV的用时,即得到完成所有任务所需的时间。

最终得到的完成任务总时间和总充电次数见表4,不同 P_U 值对应的完成任务总时间的具体变化见图3。从图3可以看出,改变 P_U 能够影响AGV完成所有任务的时间:当 P_U 在50%~60%范围内取值时,由于总充电次数均为12次,因此当 P_U 取值不断增大时,每辆AGV的充电时间增加,使得完成任务总时间不断增加;当 P_U 在67%~88%范围内取值时,完成任务总时间较短,且在 P_U 为71%时完成任务总时间最短,比AGV到达充电站一直充至满电再进入工作状态的充电方式耗时少,因此可采用多频次充电的方法对AGV进行合理的充电设置。

表4 完成任务总时间和总充电次数

P_U /%	50	55	60	65	70	75
完成任务总时间/h	9.04	9.11	9.16	9.04	8.87	8.91
总充电次数	12	12	12	9	8	8
P_U /%	80	85	90	95	100	
完成任务总时间/h	8.94	8.97	9.01	9.04	9.07	
总充电次数	8	8	8	8	8	

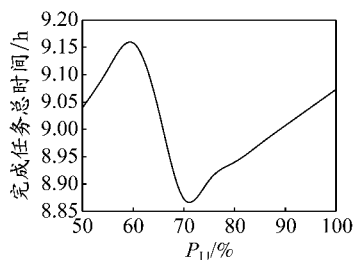


图3 不同 P_U 值对应的完成任务总时间

由于不仅要考虑完成任务总时间最短,还要考虑AGV的利用率和耗能情况,所以分析当 P_U 在67%~87%范围内取值时AGV的总充电时间和总等待充电时间,以比较AGV的利用率和耗电情况,分析后可得图4。

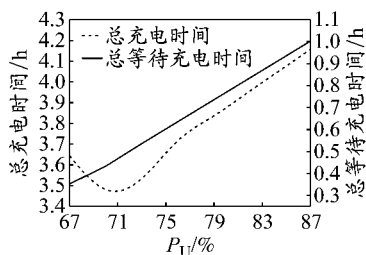


图4 AGV总充电时间和总等待充电时间分布

从图4可以看出:当 P_U 在67%~87%范围内取值时,AGV的总等待充电时间随着 P_U 的增大而增加,即AGV处于空闲状态的时间随之增加,AGV利用率下降;当 P_U 在67%~71%范围内取值时,AGV的总充电时间下降,当 P_U 在71%~87%范围内取值时,AGV的总充电时间增加,即AGV在完成任务的过程中耗电总量增加,在71%时总充电时间最短即耗电量最小。

综上可知,当 $P_U = 71\%$ 时,完成任务总时间最短、耗电量最小,且AGV利用率较高,能够避免一定程度的资源浪费。分析在 $P_U = 71\%$ 时,各辆AGV的充电及等待充电情况,具体数据见图5。

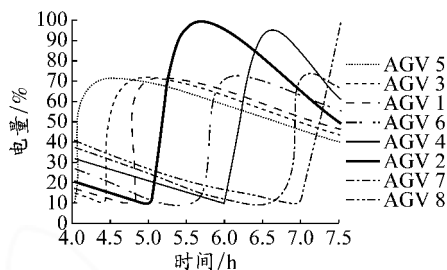


图5 各辆AGV充电及等待充电时间图

从图5可以看出8辆AGV的充电顺序和电量峰值,其中:AGV 2、8充满电后离开,AGV 4在电量充至94%时因有其他AGV前来充电而结束充电,剩余5辆AGV在电量充至71%时因有其他AGV等待充电,便结束充电开始接受任务;共有5辆AGV在充电站存在排队等待的情况,共等待26 min,等待率为4.88%,等待率相对较低。

参考文献:

- [1] 谢旦岚,俞海宏,陈靖,等. 自动化物流设备充电模式的仿真优化研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(9): 2213-2220.
- [2] 傅正堂,胡志华,宗康. 集装箱码头AGV电量不饱满状态下的调度优化[J]. 大连海事大学学报, 2017, 43(3): 58-62. DOI: 10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2017.03.010.
- [3] 荀燕琴. 基于群体智能优化的AGV路径规划算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [4] LI Guangqiang, LIU Qi, YANG Yawei, et al. An improved differential evolution based artificial fish swarm algorithm and its application to AGV path planning problems[C]//Proceedings of the 36th Chinese Control Conference, Dalian: IEEE Computer Society, 2017: 2556-2561.

(下转第13页)

上述结果是在 $\alpha = 0.4, \beta = 0.6$ 时计算得出的。改变 α, β 的值,得到如图6所示的结果:随着AGV到达各任务起点的执行时间的权重 α 的增加(即优先考虑执行近距离任务),完成任务

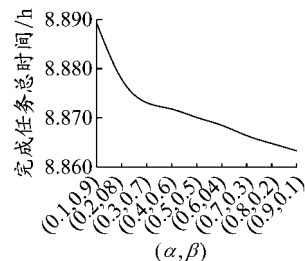


图6 不同权重下的完成任务总时间

总时间会减少,但对任务的紧急程度满足度较低。此处是在完成1 000 TEU集装箱卸船任务的情况下进行分析的,在港口实际工作中可根据实际情况设定任务选择原则。

本文在为AGV选择任务时,既考虑AGV到达各任务起点的执行时间又考虑各任务的紧急程度,综合选择最佳的任务分配方案,避免一味追求时间效率而忽略任务紧急程度的情况,也避免只注重任务优先级而造成AGV效率过低、时间成本费用增加的情况。

对AGV的充电电量设定不同的限制值进行比较,结果表明 $P_U = 71\%$ 为最佳限制值,可避免AGV在充电站等待时间过长,也使完成任务总时间最短。

4 结束语

自动化集装箱码头自动导引小车(AGV)调度问题是影响码头作业效率的重要因素,本文在自动化集装箱码头AGV的调度过程中考虑了AGV的电量续航能力和重空载耗电差异,同时考虑任务的紧急情况和完成任务总时间,比较贴近实际,具有现实意义。运用Java进行案例分析,结果表明:采用多频次充电的方法对AGV充电电量设定合理的限制值,既可以减少完成任务总时间又可以提高AGV利用率,并使耗电量减少。然而,本文未考虑AGV运输过程中的路径冲突问题和充电站的数量问题,且只考虑了完成卸船任务未考虑边装边卸情况,接下来会对此做进一步研究。

- [5] WINTER T. Online and real-time dispatching problems [D]. Berlin: Technical University of Braunschweig, 1999.
- [6] CHO D W. Development of a methodology for containership load planning [D]. Oregon: Oregon State University, 1984.
- [7] BOTTER R C, BRINATI M A. Stowage container planning: a model for getting an optimal solution [C] // 7th International Conference on Computer Applications in the Automation of Shipyard Operation and Ship Design. IFIP Transactions B: Computer Applications in Technology, 1992: 217-229.
- [8] AVRIEL M, PENN M. Exact and approximate solutions of the container ship stowage problem [J]. Computers & Industrial Engineering, 1993, 25: 271-274. DOI: 10.1016/0360-8352(93)90273-Z.
- [9] AVRIEL M, PENN M, SHPIRER N, *et al.* Stowage planning for container ships to reduce the number of shifts [J]. Annals of Operations Research, 1998, 76: 55-71. DOI: 10.1023/A:1018956823693.
- [10] AMBROSINO D, SCIAMACHEN A, TANFANI E. Stowing a containership: the master bay plan problem [J]. Transportation Research A, 2004, 38(2): 81-99. DOI: 10.1016/j.tra.2003.09.002.
- [11] SCIAMACHEN A, TANFANI E. A 3D-BPP approach for optimizing stowage plans and terminal productivity [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 183: 1433-1446. DOI: 10.1016/j.ejor.2005.11.067.
- [12] PACINO D, DELGADO A, JENSEN R M, *et al.* Fast generation of near-optimal plans for eco-efficient stowage of large container vessels [C] // Proceedings of the Second International Conference on Computational Logistics, 2011. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, ICCL'11: 286-301. DOI: 10.1007/978-3-642-24264-9_22.
- [13] DELGADO A, JENSEN R M, JANSTRUP K, *et al.* A constraint programming model for fast optimal stowage of container vessel bays [J]. European Journal of Operational Research, 2012, 220: 251-261. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.01.028.
- [14] ZHAO Ning, MI Weijian, MI Chao, *et al.* Study on vessel slot planning problem in stowage process of outbound containers [J]. Journal of Applied Sciences, 2013, 13(20): 26-43. DOI: 10.3923/jas.2013.4278.4285.
- [15] PARREÑO F, PACINO D, ALVAREZ-VALDES R. A GRASP algorithm for the container stowage slot planning problem [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2016, 94: 141-157. DOI: 10.1016/j.tre.2016.07.011.
- [16] SHEN Yifan, ZHAO Ning, XIA Mengjue, *et al.* A deep Q-learning network for ship stowage planning problem [J]. Polish Maritime Research, 2017, 24(s1). DOI: 10.1515/pomr-2017-0111.
- [17] COHEN M W, COELHO V N, DAHAN A, *et al.* Container vessel stowage planning system using genetic algorithm [C] // European Conference on the Applications of Evolutionary Computation. Springer, Cham: Applications of Evolutionary Computation, 2017: 557-572. DOI: 10.1007/978-3-319-55849-3_36.
- [18] HELO P, PAUKKU H, SAIRANEN T. Containership cargo profiles, cargo systems, and stowage capacity: key performance indicators [J]. Maritime Economics & Logistics, 2018: 1-21. DOI: 10.1057/s41278-018-0106-z.
- [19] BROWNE C B, POWLEY E, WHITEHOUSE D, *et al.* A survey of Monte Carlo tree search methods [J]. IEEE Transactions on Computational Intelligence & AI in Games, 2012, 4(1): 1-43. DOI: 10.1109/TCIAIG.2012.2186810.

(编辑 贾裙平)

(上接第5页)

- [5] 韩晓龙, 樊加伟. 自动化港口 AGV 调度配置仿真分析 [J]. 重庆交通大学学报, 2016, 35(5): 151-154, 164. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2016.05.29.
- [6] CONFESSORE G, FABIANO M, LIOTTA G. A network flow based heuristic approach for optimising AGV movements [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2011, 24(2): 405-419. DOI: 10.1007/s10845-011-0612-7.
- [7] ANGELOUDIS P, BELL M G H. An uncertainty-aware AGV assignment algorithm for automated container terminals [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2010, 46(3): 354-366.
- [8] 泰应鹏, 邢科新, 林叶贵, 等. 多 AGV 路径规划方法研究 [J]. 计算机科学, 2017, 44(11A): 84-87.
- [9] 梁承姬, 沈珊珊, 胡文辉, 等. 基于路段时间窗考虑备选路径的 AGV 路径规划 [J]. 工程设计学报, 2018, 25(2): 200-208. DOI: 10.3785/j.issn.1006-754X.2018.02.011.
- [10] 刘二辉, 姚锡凡, 刘敏, 等. 基于改进灰狼优化算法的 AGV 路径规划及其实现原型平台 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(6): 1455-1467.
- [11] 张剑韬, 朱春波, 陈清泉. 应用于 AGV 的非接触式无线充电技术研究 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(S1): 100-104.
- [12] HUANG Shyh-Jier, DAI Shuo-Huei, SU Jun-Li, *et al.* Design of a contactless power supply system with dual output capability for AGV applications [C] // IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics, Nagoya: IEEE, 2017: 1-3.
- [13] LI Jing-Quan. Transit bus scheduling with limited energy [J]. Transportation Science, 2014, 48(4): 521-539.
- [14] FATNASSI E, CHAOUACHI J. Scheduling automated guided vehicle with battery constraints [C] // International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics, Miedzyzdroje: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2015: 1010-1015.
- [15] 张亚琦, 杨斌, 胡志华, 等. 自动化码头 AGV 充电与作业的集成调度研究 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 53(18): 257-262, 270.

(编辑 赵勉)