



双场桥集装箱堆场效能仿真研究*

唐国磊, 甄中函, 赵卓瑶

(大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连, 116024)

摘要: 以双场桥集装箱堆场为研究对象, 通过建立堆场作业多智能体仿真模型, 研究接力作业模式下堆场的作业效率和能耗。模拟在自动导引车和港外集卡抵达时间不确定性的条件下双场桥复杂的作业过程, 实现堆场机械功率和能耗的定量计算。通过对作业效率和能耗指标的定量分析, 探究不同工况下接力区位置对堆场效率和设备能耗的影响。结果表明: 堆场作业仿真模型可有效模拟堆场设备作业流程及其交互行为, 并得到不同工况下的效率和能耗指标值。此外, 最大效率和最小能耗对应的接力区位置不尽相同, 应根据具体工况合理设计接力区来实现效率和能耗的双目标。

关键词: 集装箱堆场; 双自动化场桥; 接力区; 智能体仿真; 能耗

中图分类号: U653.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0060-07

Simulation-based performance evaluation of container yard with twin yard cranes

TANG Guolei, ZHEN Zhonghan, ZHAO Zhuoyao

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: This study takes the container yard with twin automated yard cranes as the research object. A multi-agent-based simulation model of yard operation is established to study the efficiency and energy consumption of yard with relay mode. The model simulates the complex operation process of twin yard cranes under the uncertainty of arrival time of automatic guided vehicles and external trucks, and realizes the quantitative calculation of power and energy consumption of yard machinery. Through the quantitative analysis of the indexes of efficiency and energy consumption, the influence of the handshake area location on the yard efficiency and machinery energy consumption for different working conditions is explored. The results show that the yard operation simulation model can effectively simulate the operation process and interaction behavior of yard equipment, and obtain the index values of efficiency and energy consumption for different working conditions. In addition, the handshake area location corresponding to the maximum efficiency and minimum energy consumption are different, and the handshake area should be reasonably designed according to the specific working conditions to achieve the dual goals of efficiency and energy consumption.

Keywords: container yard; twin automated yard cranes; handshake area; agent-based simulation; energy consumption

集装箱堆场用于临时存放和转移集装箱, 是海陆运输的衔接区域。一般自动化集装箱码头堆场每个箱区配置2个相等规格的轨道式场桥, 在箱区端部分别与自动导引车和港外集卡合作完成海陆两侧存取箱作业。由于2个场桥在同一轨道上工作, 同时作业时往往会产生冲突。为此, 港

口企业通常设置接力区, 以双场桥接力的方式完成装卸任务^[1], 接力区位置影响场桥的移动范围。因此, 须探究接力作业模式下, 接力区位置对堆场效率和能耗的影响。

对于接力作业模式下的双场桥调度数学模型与求解算法, 国内外学者做了系列研究。如 Vis 和

收稿日期: 2022-09-28

*基金项目: 科技部战略性国际科技创新合作重点专项资助项目 (2020YFE0201200)

作者简介: 唐国磊 (1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为港口大数据和智能港口决策支持研究。

Carlo^[2]提出接力区概念, 并指出需确定任务由单场桥还是由双场桥执行, 以及获得场桥最优作业序列等两个关键问题; 徐豪泽^[3]以最小化系统完工时间为目标, 建立考虑接力区位置和任务序列优化的混合整数规划模型, 采用两阶段遗传算法求解; 魏亚茹等^[4]以最小化总完工时间为目标, 建立接力模式和混合模式下的双场桥调度和集装箱存储选位的数学模型, 设计遗传与蚁群融合算法求解模型; Choe 等^[5]考虑场桥作业过程中的不确定性, 提出利用遗传算法确定完工时间和延误时间最少的任务序列; Han 等^[6]和邱亚等^[7]以最小化总完工时间为目标, 分别提出固定接力区和动态接力区模式下, 双场桥优化调度混合整数规划模型, 以及基于遗传算法的求解算法。此外, 考虑系统的复杂性和随机性, Gharehgozli 等^[8]通过建立双场桥作业仿真模型, 测试不同调度策略和接力区设计对场桥完工时间和阻塞时间的影响。研究成果有利于提升接力模式下双场桥堆场的作业效率, 为自动化集装箱码头双场桥堆场调度决策提供重要依据。在“双碳”背景下, 除作业效率外, 堆场系统的能耗指标也是值得关注的。目前, 所建立的数学模型尚未考虑水平运输工具到达的不确定性以及场桥在不同运行状态的作业能耗等。

为客观描述堆场作业系统的复杂性和随机性, 本文提出基于多智能体仿真技术建立双场桥堆场作业仿真模型, 准确地评估堆场系统的作业效率和能耗。该模型模拟场桥、自动导引车和港外集卡的整个作业流程及其交互过程, 实时计算各机械设备所需的机械功率和能耗, 定量分析各工况下接力区位置对堆场效率和能耗的影响, 为进一

步研究接力模式下双场桥调度优化提供参考。

1 问题描述

如图1所示, 在双场桥集装箱堆场箱区中, 自动导引车和港外集卡随机到达堆场后, 进入各自的缓冲区排队等待, 并依次前往箱区两端的输入/输出区(I/O区)与场桥进行交互作业, 最终完成装卸任务。任务属性包括运输车辆预计到达堆场时间、箱重、目标箱位(箱位由贝位、列号和层高确定, 存箱时为集装箱堆存箱位, 取箱时为集装箱所在箱位)。一般接力区位于箱区的某一贝位, 用于临时堆放集装箱, 且场桥不能穿过该区域。图2以过程线形式展现场桥完成1次任务的行驶轨迹, 其中0和20贝位分别代表海侧和陆侧的I/O区。以执行海侧存箱任务为例, 如果无需穿越接力区见图2a), 海侧场桥空载行驶至海侧I/O区提取自动导引车携带的集装箱, 再重载行驶至目标贝位(目标箱位所在贝位), 将集装箱堆放在目标箱位内。如果需要穿越接力区见图2c), 该任务被分割成2个任务: 首先由海侧场桥空载行驶至海侧I/O区提取集装箱, 重载行驶至接力区堆放; 其次由陆侧场桥空载行驶至接力区提箱; 再重载行驶至目标贝位堆放集装箱。显然, 接力区位置决定着场桥的行驶范围和距离, 影响堆场作业系统的效率和能耗。

为分析接力区的性能, 分别从效率、能耗角度引入以下评价指标: 1) 完工时间: 两场桥完成所有任务的时间; 2) 阻塞时间: 场桥因接力作业或避免冲突导致的等待时间; 3) 港内堆场设备能耗: 场桥和自动导引车的耗电量; 4) 港外集卡耗油量。

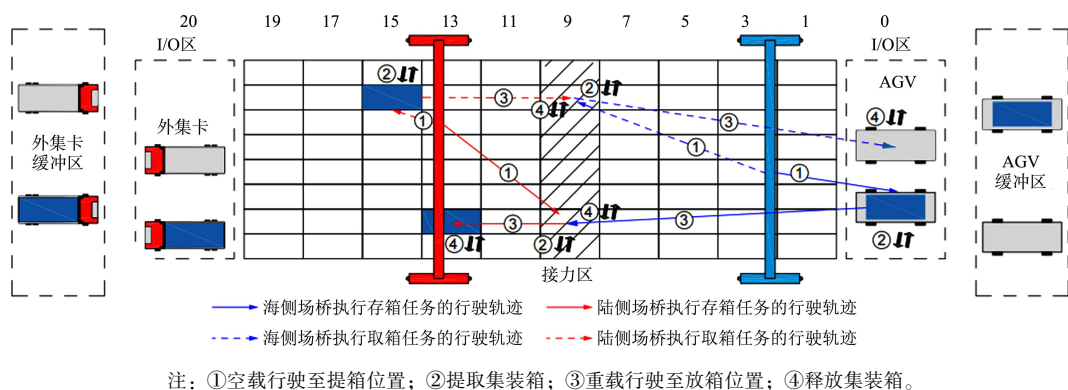


图1 接力模式下双场桥集装箱堆场作业情况

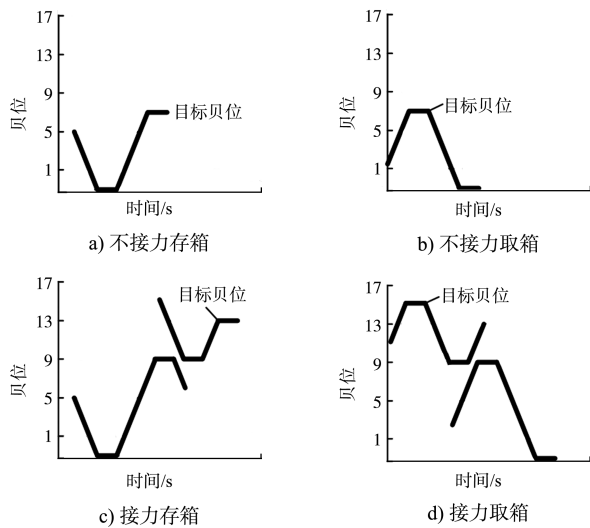


图2 场桥行驶轨迹

受港内交通和港外综合因素的影响，水平运输工具到达时间具有不确定性^[9]。在作业过程中，双场桥作业时需保持1贝以上的安全间距，遵循复杂的双场桥接力作业规则，各环节作业时间也具有不确定性^[10]。此外，机械设备的功率和能耗则与其加减速状态、箱重和箱位等因素有关^[11]。由此可见，堆场系统具有动态性和随机性，难以用传统的数学模型描述。因此，本文引入多智能体仿真技术，通过建立堆场作业仿真模型，模拟场桥、自动导引车和港外集卡的作业流程和交互过程，客观准确地评估接力作业模式下，双场桥堆场的工作效率和能耗。

2 仿真模型

2.1 主智能体

主智能体作为管理型智能体，实现堆场箱区

和其他智能体的初始化，具体流程为：首先，根据仿真参数初始化堆场箱区，创建并初始化海陆侧场桥、自动导引车和港外集卡智能体群；其次，根据随机生成的装卸作业任务，向自动导引车和港外集卡发送开始作业指令；再次，根据随机到达的任务序列，确定海陆场桥的任务顺序，激活场桥开始装卸作业；最后，当全部任务完成时，统计输出完工时间、阻塞时间、港内堆场设备能耗和港外集卡耗油量指标值。此外，主智能体实时判断场桥作业过程中是否发生冲突，并采取相应的避让措施。

2.2 场桥智能体

场桥智能体由大车智能体和小车/吊具智能体组成，分别实现场桥移动与装卸作业，逻辑流程见图3a)、b)。首先，大车收到主智能体指令后，依次进入开始作业、接收任务状态，获得当前任务并判断任务类型。如果该任务是第2个子任务，大车先进入接力区旁、等待任务到达状态后移至接力区，否则直接移至吊箱位置，并等待运输车到达。当运输车辆到达后，大车进入起吊状态，激活小车/吊具智能体开始装卸作业。当智能体小车/吊具起吊完成后，大车移至放箱位置，向小车/吊具智能体发送放箱指令，待其释放集装箱后进入本次任务完成状态等待下次循环。待场桥完成所有任务后结束仿真，更新主智能体统计指标值。如场桥行驶时遇到冲突，非优先场桥会收到主智能体避让指令。此时，移至安全区域等待，待优先场桥离开作业区域后恢复作业。

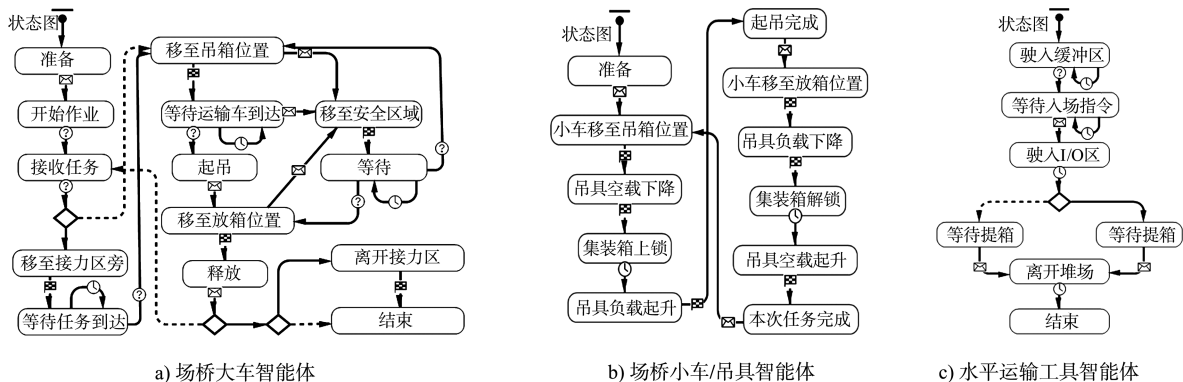


图3 智能体状态

在仿真运行过程中, 场桥智能体时刻计算各机构(包括大车、小车和吊具)的电网输入功率。场桥机构功率的计算过程为^[11-12]:

1) 电机输出功率 P_2 按下式, 其计算过程见表 1。

$$P_2 = Fv/1\ 000n \quad (1)$$

式中: v 为机构运行速度, m/s; F 为不同运行状态下

各机构的荷载组合值, N; n 为运行机构的电机数量。

2) 负载系数 β 为:

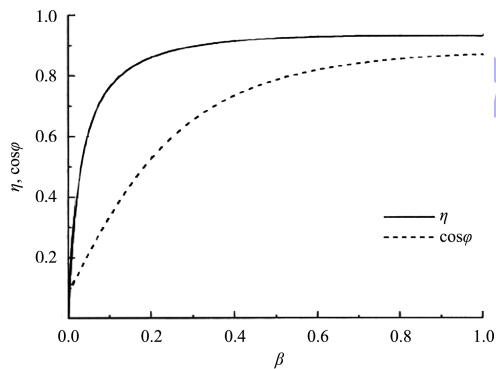
$$\beta = P_2/P_N \quad (2)$$

式中: P_N 为机构额定功率。

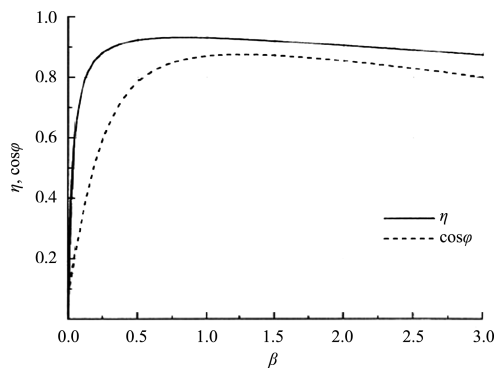
根据图 4 得到 β 对应的电机工作效率 η 和功率因数 $\cos\varphi$ 。

表 1 场桥不同运行状态下的荷载组合

机构	序号	状态	荷载组合	荷载
大车 小车	1	加速	$F = F_f + F_a$	1) 水平摩擦力 F_f : 由自重与集装箱质量产生的摩擦力。 2) 水平惯性荷载 F_a : 加减速时在起重机中引起的载荷。 $F_f = P_{G\Sigma} \frac{\mu d + 2k}{D} C_f, F_a = \phi_5 m a_x$ 式中: $P_{G\Sigma}$ 为自重; μ 为车轮轴承摩擦系数; D 为车轮踏面直径; d 为车轮轴径; k 为车轮滚动摩擦系数; C_f 为附加摩擦阻力系数; ϕ_5 为动载荷系数; m 为机构和 集装箱总质量; a_x 为机构在各自轨道的加速度或减速度。
	2	匀速	$F = F_f$	
吊具	1	加速起升	$F = F_i + F_d + F_a$	1) 冲击载荷 F_i : 当吊具与集装箱离开地面起升时, 场桥自身质量受到起升冲击而出现的动力响应。 2) 动载载荷 F_d : 当吊具与集装箱突然被提升离地或减速时, 惯性力将产生附加的动载荷作用。 3) 竖向惯性荷载 F_a : 由吊具加减速在场桥中引起的载荷。
	2	匀速起升	$F = m_{hc} g$	4) 摩擦力 F_f : 当吊具下降时绳索与轴承的摩擦阻力。 $F_i = \phi_1 m_{hc} g, F_d = \phi_2 m_{hc} g, F_a = \phi_5 m_{hc} a_z, F_f = 0.5 m_{hc} g$ 式中: m_{hc} 为吊具和集装箱总质量; a_z 为吊具在竖直方向的加速度或减速度; ϕ_1 为起升冲击系数; ϕ_2 为起升动载系数。
	3	减速下降	$F = F_d + F_a - F_f$	
	4	匀速下降	$F = F_f$	



a) $P_2 \leq P_N$



b) $P_2 \leq 3P_N$

图 4 电机的效率和功率因数曲线

3) 电机输入功率 P_1 :

$$P_1 = P_2/\eta \times 100\% \quad (3)$$

4) 根据式(4)得到无功功率 Q_1 :

$$\cos\varphi = P_1/\sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (4)$$

5) 综合功率损耗为 $\sum P_c$:

$$\sum P_c = P_1 - P_2 + K_Q Q_1 \quad (5)$$

式中: K_Q 为无功经济当量因数, kW/kvar, 取 0.06。

6) 场桥机构功率 P 为:

$$P = P_2 + \sum P_c \quad (6)$$

2.3 水平运输工具智能体

水平运输工具智能体用于模拟自动导引车和港外集卡的行为, 其状态见图 3c)。逻辑流程为: 到达堆场箱区后, 驶入缓冲区、等待入场指令状态, 收到指令后驶入 I/O 区。当执行存箱任务时, 以重载速度 v_f 行驶至 I/O 区, 进入等待放箱状态, 待集装箱卸载后以空载速度 v_u 离开堆场; 当执行取箱任务时, 以空载速度 v_u 行驶至 I/O 区, 进入

等待提箱状态，待集装箱装载后以重载速度 v_f 离开堆场。在作业过程中，分别计算自动导引车和港外集卡的行驶能耗和等待能耗，计算公式如下：

$$E_{AGV} = e_w t_{w,agv} + e_u t_{u,agv} + (e_f + G e_g) t_{f,agv} \quad (7)$$

$$C_{ET} = c_w t_{w,et} + c_u t_{u,et} + (c_f + G c_g) t_{f,et} \quad (8)$$

式中： e_w 、 e_u 、 e_f 分别为自动导引车单位时间等待能耗、空载速度行驶时单位时间行驶能耗和以重载速度行驶且无载重时单位时间行驶能耗，kW； c_w 、 c_u 、 c_f 分别为港外集卡单位时间等待能耗、空载速度行驶时单位时间行驶能耗和以重载速度行驶且无载重时单位时间行驶能耗，L/s； e_g 、 c_g 为自动导引车和港外集卡载重每增加 1 kN 所引起的单位时间行驶能耗，kW/kN、L/(kN·s)； $t_{w,agv}$ 、

$t_{u,agv}$ 、 $t_{f,agv}$ 为自动导引车等待时间、空载行驶时间和重载行驶时间，s； $t_{w,et}$ 、 $t_{u,et}$ 、 $t_{f,et}$ 为港外集卡等待时间、空载行驶时间和重载行驶时间，s； G 为集装箱自身重力，kN。

3 案例分析

3.1 仿真参数

以某自动化集装箱码头堆场箱区为例，箱区尺寸为 30 贝 8 列（假设只存放 20 ft 集装箱）、集装箱堆四过五，箱区内配置同轨双场桥，两端为海侧和陆侧 I/O 区。自动导引车和港外集卡到达时间间隔服从负指数分布，到达率为 0.33 辆/min。场桥、自动导引车和港外集卡等设备参数见表 2。

表 2 仿真模型参数

自动导引车	单位时间的等待能耗 e_w /kW	空载行驶单位能耗 e_u /kW	无载重时重载行驶单位能耗 e_f /kW	载重每增加 1 kN 所引起的单位时间行驶能耗 e_g /(kW·kN ⁻¹)	空载速度 v_u /(m·min ⁻¹)	重载速度 v_f /(m·min ⁻¹)				
	9	16	14	0.042	350	210				
场桥大车	速度/(m·min ⁻¹)	加速度/(m·s ⁻²)	电机数量/个	额定功率/kW	ϕ_5	μ	D	d	k	C_f
	60	0.43	2	25	1.5	0.015	700	120	0.6	1.5
场桥小车	速度/(m·min ⁻¹)	加速度/(m·s ⁻²)	电机数量/个	额定功率/kW	ϕ_5	μ	D	d	k	C_f
	60	0.33	1	15	1.5	0.08	350	70	0.3	2.0
港外集卡	单位时间的等待能耗 c_w /(L·h ⁻¹)	空载行驶单位能耗 c_u /(L·h ⁻¹)	无载重时重载行驶单位能耗 c_f /(L·h ⁻¹)	载重每增加 1 kN 所引起的单位时间行驶能耗 c_g /(L·kN ⁻¹ ·h ⁻¹)	空载速度 v_u /(m·min ⁻¹)	重载速度 v_f /(m·min ⁻¹)				
	0.001 25	16.8	10.08	0.050 4	350	210				
场桥吊具	空载速度/(m·min ⁻¹)	重载速度/(m·min ⁻¹)	加速度/(m·s ⁻²)	最大高度/m	电机数量和额定功率/kW	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3		
	140	70	0.5	14	1,500	1.1	1.1	1.5		

3.2 工况设置

项目以场桥完成一定数量作业任务为研究对象，重点分析接力区设置对堆场作业效率和能耗的影响。为此，考虑 72 个堆场作业任务（存、取箱任务数量相同），假设存、取箱任务的目标箱位随机分布在堆场箱区内。接力区位置考虑堆场区块内所有 30 个贝位，即贝位号 $N = \{1, 3, \dots, 59\}$ 。港口运营中，堆场作业面临箱重和海陆两侧任务不均衡等情况。为此，也考虑海陆侧任务占比和箱重对效率和能耗的影响。具体为：1) 分配给每个场桥的任务数量由陆侧任务占比 P_L 决定， $P_L = \{0\%, 25\%, 50\%, 75\%, 100\%\}$ ；2) 箱重均值 $W = \{50, 100, 150, 200, 250\}$ ，kN。

3.3 结果分析

每个工况重复运行仿真实验 20 次，得到不同

工况下的堆场作业系统的性能指标值，见图 5~8。分别从作业效率和作业能耗指标进行分析。

3.3.1 作业效率

各陆侧任务占比 P_L 下接力区位置对完工时间的影响，见图 5a)。

1) 当 P_L 一定时， N 由 1 贝偏移至 59 贝，完工时间先减后增。如以 $P_L = 50\%$ 为例，完工时间由 17 515 s 减至最小值 12 911 s，之后增至 17 717 s。当接力区位于两侧时，场桥任务量和行驶范围的不均衡导致完工时间增加，而将接力区设置在靠近中央时完工时间减少。

2) 当 P_L 分别为 0%、25%、50%、75% 和 100% 时，完工时间最小值及对应的贝位分别为 12 152 s/19 贝、12 206 s/25 贝、12 911 s/29 贝、12 334 s/33 贝和 12 168 s/39 贝。

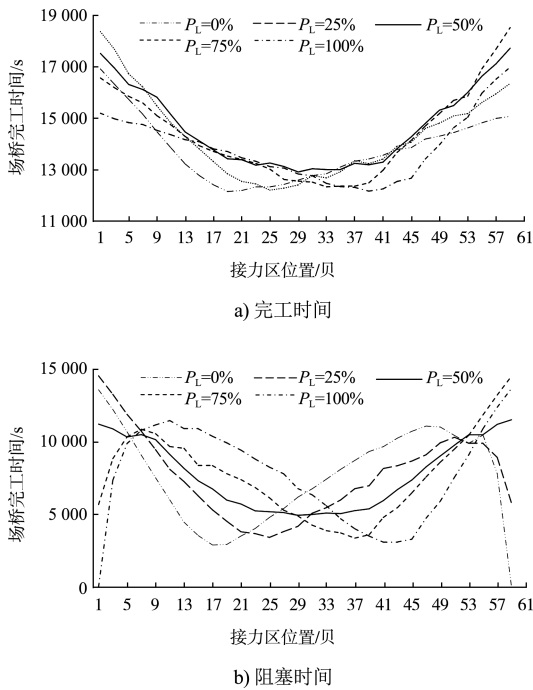


图 5 各工况下的完工和阻塞时间结果

各陆侧任务占比 P_L 下接力区位置对阻塞时间的影响, 见图 5b)。

1) N 由 1 贝偏移至 59 贝, 阻塞时间变化趋势因陆侧任务占比不同而不同, 其变化趋势为:

当 P_L 为 0% 和 25% 时, 阻塞时间先减再增后减。当接力区靠近海侧, 大部分海侧任务需要接力完成, 使得海侧场桥因等待产生较多的阻塞时间; 而接力区靠近中央时, 两场桥的任务量和行驶范围趋向均衡, 阻塞时间减少; 当接力区继续靠近陆侧, 陆侧场桥的行驶范围变小, 使得陆侧场桥因等待产生较多的阻塞时间; 但当接力区靠近陆侧边缘时, 海侧场桥可单独完成大部分海侧任务, 又使得阻塞时间减少。

当 P_L 为 50% 时, 阻塞时间先减后增, 阻塞时间由 11 234 s 减至最小值 4 933 s (29 贝), 之后增至 11 534 s。即接力区靠近两侧, 对应场桥的行驶范围变小, 使得阻塞时间较接力区靠近中央时更长。

当 P_L 为 75% 和 100% 时, 阻塞时间先增再减后增, 与 P_L 小于 50% 时相反。

当 $P_L = 100%$ 且 $N = 1$ 贝或 $P_L = 0%$ 且 $N = 59$ 贝时, 海侧或陆侧场桥单独作业, 阻塞时间为 0。

2) 除阻塞时间为 0 的情况外, 当 P_L 分别为 0%、25%、50%、75% 和 100% 时, 阻塞时间最小值及对应的行号分别为 2 886 s/17 贝、3 411 s/25 贝、4 933 s/29 贝、3 361 s/37 贝和 3 080 s/41 贝。

因此, 从工作效率指标来看, 完工时间和阻塞时间最小值对应的接力区位置基本一致, 且偏向任务比例更多的一侧。

3.3.2 作业能耗

各工况下接力区位置对应的港内设备耗电量及港外集卡耗油量, 见图 6。

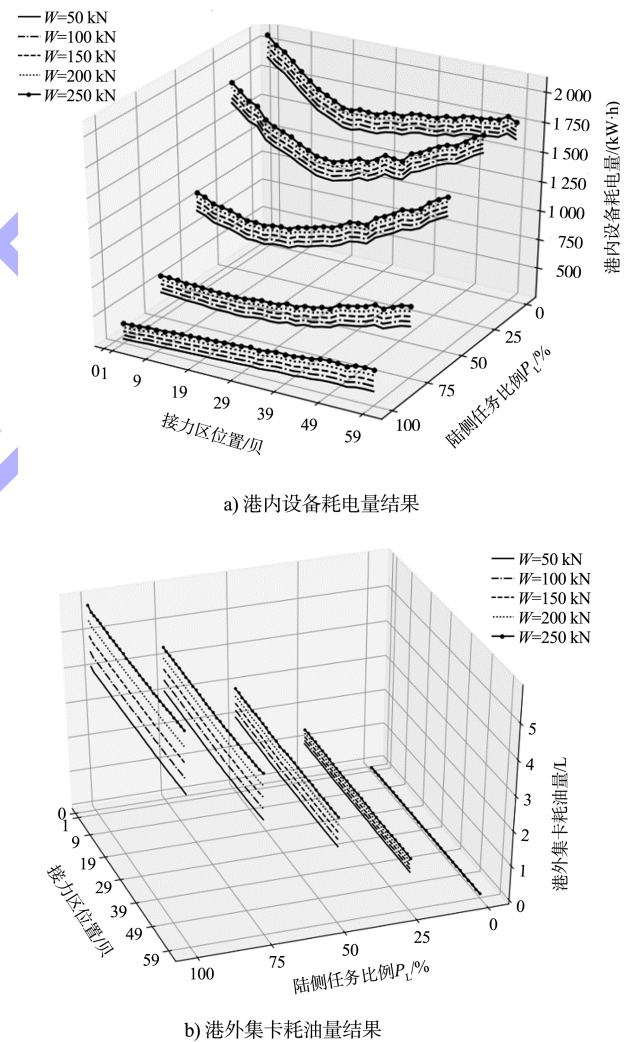


图 6 各工况下港内设备耗电量和港外集卡耗油量结果

1) 在相同陆侧任务占比和接力区位置下, 港内设备耗电量和港外集卡耗油量基本随箱重力均值 W 增加而成比例增加。当 P_L 为 0%、25%、50%、75% 和 100% 时, 箱重力均值 W 每增加 50 kN, 港内设备耗电量分别增加 47、43、40、37 和 34 kW·h;

港外集卡耗油量分别增加 0、0.11、0.21、0.31 和 0.42 L。

2) 随着 P_L 逐渐增加, 各接力区位置下的港内设备耗电量大体上逐渐减少, 港外集卡耗油量逐渐增加。当 N 为 29 贝时, 随着 P_L 由 0% 增至 100%, 港内设备耗电量由 1 466~1 629 kW·h 降至 312~472 kW·h, 见图 6a), 港外集卡耗油量由 0 增至 4.14~5.82 L, 见图 6 b)。

3) 随着接力区位置 N 由 1 贝偏移至 59 贝, 见图 6a), 当 P_L 为 100% 时, 港内设备耗电量由 276~414 kW·h 逐渐增至 365~550 kW·h; 当 P_L 为 0%、25%、50% 和 75% 时, 港内设备耗电量先减后增, 分别在 21、25、17 和 19 贝取得最小值。与港内设备耗电量不同, 见图 6b), 当 P_L 一定, 随着接力区位置由 1 贝偏移至 59 贝, 港外集卡耗油量仅略微减少。以 P_L 为 50% 为例, 各 W 下港外集卡耗油量均减少 0.06 L。

因此, 从作业能耗指标来看, 将接力区位置适当偏向海侧, 不仅可以显著降低港内设备耗电量, 而且对港外集卡耗油量的影响较小, 有利于实现节能减排。

综上, 仿真结果验证了堆场作业仿真模型可有效模拟堆场设备作业流程及其交互行为, 并得到不同工况下的指标值。结果表明: 接力区位置偏向任务占比较多的一侧时, 堆场服务效率显著提升; 接力区位置对港外集卡耗油量的影响较小, 但将接力区适当偏向海侧, 可显著降低港内设备耗电量。由此可见, 效率和能耗对应的最优接力区位置不尽相同, 因此, 在实际调度过程中, 应根据具体工况合理设计接力区, 实现效率和能耗双目标。

4 结论

1) 为准确地描述堆场作业系统的复杂性和随机性, 建立基于智能体的堆场作业仿真模型。模拟堆场设备的作业流程及其交互行为, 并获得各工况的工作效率和能耗的指标值。

2) 为提升双场桥堆场的服务效率, 接力区位

置宜偏向任务比例较多的一侧。

3) 根据堆场区块两侧的任务比例, 接力区可适当偏向海侧, 以实现节能减排。

参考文献:

- [1] PARK T, CHOE R, OK S M, et al. Real-time scheduling for twin RMGs in an automated container yard[J]. OR Spectrum, 2010, 32(3): 593-615.
- [2] VIS I F A, CARLO H J. Sequencing two cooperating automated stacking cranes in a container terminal[J]. Transportation science, 2010, 44(2): 169-182.
- [3] 徐豪泽. 自动化集装箱码头双场桥协同调度优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- [4] 魏亚茹, 朱瑾. 自动化码头双场桥调度与集装箱存储选位建模[J]. 计算机应用, 2018, 38(4): 1189-1194.
- [5] CHOE R, YUAN H, YANG Y, et al. Real-time scheduling of twin stacking cranes in an automated container terminal using a genetic algorithm [C]// Proceedings of the 27th annual ACM symposium on applied computing choe, Trento: ACM, 2012.
- [6] HAN X, WANG Q, HUANG J. Scheduling cooperative twin automated stacking cranes in automated container terminals[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 128: 553-558.
- [7] 邱亚, 梁承姬, 张悦. 动态接力点模式下双自动化轨道吊协调调度[J]. 上海海事大学学报, 2020, 41(3): 53-59.
- [8] GHAREHGOZLI A H, VERNOOIJ F G, ZAERPOUR N. A simulation study of the performance of twin automated stacking cranes at a seaport container terminal[J]. European journal of operational research, 2017, 261(1): 108-128.
- [9] 卢毅勤. 不确定环境下码头堆场设备集成调度优化[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(21): 247-253.
- [10] 徐亚, 张恒, 全雄文, 等. 基于鲁棒反应式策略的集装箱码头堆场和场桥联合调度[J]. 物流技术, 2016, 35(9): 52-57.
- [11] 马莉丽. 桥门式起重机电机拖动系统能效及其控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [12] 北京起重运输机械研究所. 起重机设计规范: GB/T 3811—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

(本文编辑 赵娟)