



基于 Flexterm 软件的集装箱码头 自动化堆场箱位分配策略对比

刘春泽, 林 奎, 唐 颖

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 为了分析集装箱码头自动化堆场的箱位分配策略对于码头运行的影响, 采用计算机仿真方法, 结合工程实例进行研究。总结学术研究及生产实际中常见的自动化堆场箱位分配策略; 基于 Flexterm 仿真平台, 分别对秘鲁某集装箱码头及希腊某集装箱码头构建系统仿真模型, 模拟不同箱位分配策略下的集装箱码头自动化堆场和岸边生产作业过程; 通过仿真试验统计主要设备作业效率及状态占比。结果表明, 不同箱位分配策略对集装箱码头运行的影响并没有一致规律, 应根据研究项目的实际情况和研究目标合理选择箱位分配策略。

关键词: 系统仿真; 自动化集装箱码头; 箱位分配; Flexterm

中图分类号: U 656. 1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0328-06

Comparison of container slot assignment strategy of automated yard for container terminal based on software Flexterm

LIU Chun-ze, LIN Kui, TANG Ying

(CCCC WaterTransportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In order to analyze the influence of container slot assignment strategy of container terminal with automated yard on terminal operation, we apply the computer simulation method combined with the actual projects to study. We summarize the common slot assignment strategies from related research and operating project, establish the system simulation models of container terminals in Peru and Greece based on Flexterm simulation platform, simulate the processes of automated yard and ship-to-shore operating under different slot assignment strategies, and collect the ratios of efficiency and states of main equipment after simulation tests. The results show that there are no specific patterns for the influence of slot assignment strategy on terminal operation, and the slot assignment strategy should be carefully chose according to the actual condition of research program and research target.

Keywords: system simulation; automated container terminal; slot assignment; Flexterm

进口及中转集装箱从集装箱船卸下、出口集装箱通过集卡送至港内后, 一般堆放在港内堆场作为缓冲, 此时需要为集装箱分配堆场箱位。集装箱的堆场箱位分配既需要考虑集装箱进堆场时的港内生产情况, 如堆场内集装箱堆存、装卸设备利用等, 又需要考虑集装箱出堆场时的港区生产作业, 特别是集装箱装船顺序的要求等。因此

集装箱的堆场箱位分配要考虑众多因素, 问题的求解非常复杂。

国内外学者针对集装箱码头箱位分配问题, 主要采用构建数学模型和求解模型的技术路线开展研究, 其研究范围、考虑的影响因素、目标函数、求解方法等各有不同。陈超等^[1]以箱区位置、箱数量分配、箱位分配为决策变量, 以内集卡接

运单位标箱(TEU)平均作业时间最少、场桥作业成本最低为目标, 构建了出口箱箱区选择与箱位分配两阶段非线性整数规划模型, 并设计了基于遗传算法的双层启发式算法求解。毛钧等^[2]在集装箱混堆模式下, 以平衡各箱区贝位间的作业量和最小化泊位到堆场的运输距离为两个阶段的优化目标, 构建集装箱码头堆场空间资源配置优化的两阶段优化模型, 并基于 LINGO (linear interactive and general optimizer, 交互式线性和通用优化求解器) 模型进行求解。Jiang 等^[3]为了平衡短期计划对现状和未来集装箱箱位分配的影响, 提出了 SALP (space allocation given long-term plan, 按长期计划分配空间) 方法, 利用短期计划(包括在场的集装箱、在途的集装箱的信息)、长期计划(对于未来需求的预测)构建混合整数规划数学模型。Jin 等^[4]考虑堆场空间分配、场桥调度、交通拥堵因素, 以最小化场桥运行成本和在堆场内的移动成本为目标, 构建整数线性规划数学模型, 基于“分而治之”的思路求解问题, 采用和声搜索算法及约束满足技术以保证计算效率。Tan 等^[5]针对在资源有限(堆场空间和设备)的集装箱码头的出口集装箱的箱位分配和场桥调度问题, 考虑岸桥作业量的上下波动, 并权衡堆场空间共享及码头运营成本, 构建混合整数规划数学模型。

研究集装箱箱位分配问题时, 国内外学者仅考虑船舶计划、岸桥调度、场桥调度、水平运输车辆调度、外集卡取送箱到达等之中一项或多项内容构建数学模型, 并且研究数学模型的求解或

优化算法。然而集装箱码头是复杂系统, 实际生产中涉及的因素众多, 而且各因素对箱位分配及对码头生产的影响难以量化, 难以对各因素进行取舍, 因此有必要采用系统仿真的方法, 结合码头实际生产情况, 对集装箱码头整体的运行进行仿真建模, 进而研究箱位分配策略对码头生产的影响。

1 集装箱码头箱位分配算法

卸船、外集卡进箱、翻箱作业都需要执行箱位分配, 其中卸船、外集卡进箱的箱位分配策略是本文主要研究的内容。根据集装箱码头生产调度经验和基本常识, 各箱位分配算法首先须满足以下原则: 1) 同类集装箱集中堆放, 便于船舶装卸作业、集装箱管理、减少翻箱率, 本文取长度、空重类型、进出口类型、目标船舶、在船上的排位置均相同的集装箱作为同类箱; 2) 最优先将同一集卡运送的两个箱安排在同一箱区。

箱位分配算法总体上分 3 步进行: 确定堆区→确定贝位→确定列。各步均按照指定的指标及顺序对可选的堆、贝、列进行评价, 并选择指标最好的; 当所有指标均相同时, 就随机选择。根据国内外学者的研究成果、相关工程经验, 本文主要选取堆场内集装箱数量、已计划集装箱数量、场桥行驶距离作为箱位选择的指标, 且各指标均是越小越好。根据上述算法及指标, 提出 3 种箱位分配策略, 见表 1。翻箱作业时, 一般将上层的集装箱放到同贝位或相邻贝位, 且尽量减少场桥大车的移动。

表 1 各箱位分配策略包含的评价指标及评价顺序

策略	评价指标及顺序		
	确定堆区	确定贝	确定列
1	已计划集装箱数量>场内集装箱数量>随机	已计划集装箱数量>场内集装箱数量>随机	已计划集装箱数量>场内集装箱数量>随机
2	已计划集装箱数量>随机	场桥行驶距离>已计划集装箱数量>随机	已计划集装箱数量>随机
3	随机	场桥行驶距离>随机	随机

2 仿真建模

2.1 方法

为对比上述集装箱码头自动化堆场箱位分配策略, 分别对秘鲁某集装箱码头和希腊某集装箱码头构建系统仿真模型(简称“秘鲁项目模型”和“希腊项目模型”), 前者以集装箱进出口为主且堆

场内空重箱混堆, 后者以集装箱中转为主且空重箱分开堆放。在两个模型中分别采用上述箱位分配策略, 并在码头生产高峰期工况下(岸桥始终保持工作状态), 对比岸桥效率、场桥效率、设备状态占比等指标。

系统仿真建模采用 Flexterm 软件。该软件专

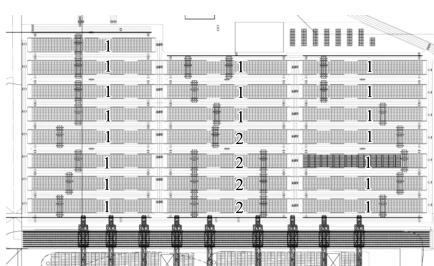
门用于集装箱码头的仿真，能够对集装箱码头平面布置形式、工艺流程进行全面模拟，涵盖码头装卸、水平运输、堆场作业和管理、闸口大门、铁路集疏运等方面。在 Flexterm 中，箱位分配算法通过比较箱位分值实现，即对每一个可能的集装箱堆放位置(堆场、贝、列)分别就上述指标计算分值并求和。各指标的分值由基础分值和权重相乘得到：对于越小越好的指标，基础分值是负分；“场内集装箱数量”的权重是相应堆场、贝位和列内堆存集装箱的数量，“已计划集装箱数量”的权重是相应堆场、贝位和列的已分配位置但还未进入的集装箱的数量，“场桥行驶距离”的权重是作业该集装箱场桥需要行驶的距离。分值最大的堆场、贝位和列即为最终的结果。较通常的“对两个箱位的各评价指标逐一进行条件判断并选择最优”的思路，该实现方式计算效率更高，更适合箱位比选这种需要大量判断的场景。

2.2 秘鲁某集装箱码头

2.2.1 码头平面方案

码头包括两个专业集装箱泊位，岸线总长度 860 m。装卸船作业采用单小车岸桥，共配置 9 台，轨距 35 m，岸桥海侧轨道中心线距码头前沿距离 4.0 m，陆侧轨道后沿布置 20 m 宽的舱盖板区及总宽 12 m 的道路，码头前沿总宽 71 m。

堆场区域划分为 3 个箱区，共有 22 块堆区。各堆区面积相同，地面箱位数量 420 个(按 20ft 箱计)，所有堆区地面箱位数量总计 9 240 个。堆场区域重箱、空箱混堆，且设有专门的冷藏箱堆场。堆场装卸作业采用双悬臂自动化轨道场桥(ARMG)，共配置 26 台，轨距 31 m，相邻两台双悬臂 ARMG 轨道间距分别为 20 m(不考虑布置高杆灯)和 24 m(考虑布置高杆灯)。码头平面布置见图 1。



注：数字为各堆区分配的 ARMG 数量。

图 1 秘鲁某集装箱码头平面方案

2.2.2 设备参数

单小车岸桥门架速度 0.75 m/s，加速度 0.12 m/s²。岸桥到达指定位置后，在连续作业且不存在等待的情况下，岸桥理论作业效率的平均值可达 38.7 move/h，最大值 40 move/h，最小值 37.5 move/h。

双悬臂自动化轨道场桥(ARMG)大车速度 2.0 m/s，加速度 0.35 m/s²；小车速度 1.5 m/s，加速度 0.3 m/s²；吊具空载速度 1.5 m/s，重载速度 0.75 m/s，加速度 0.35 m/s²。吊具抬升高度 18.5 m。

港内水平运输车辆、集疏运车辆均为集卡，其中内集卡 60 台。内外集卡行驶最大速度为 30 km/h，且在模型中不考虑车辆行驶的加减速性能。主干道包括垂直码头岸线的经向路、码头前沿和最靠近陆侧的纬向路，车辆限速 25 km/h；箱间路限速 15 km/h；在交叉口处，沿主干道直行限速 25 km/h，沿箱间路直行限速 5 km/h，右转限速 5 km/h，左转限速 3 km/h。

2.2.3 船舶到达和外集卡到达

高峰期靠泊 10 万吨级集装箱船和 7 万吨级集装箱船各 1 艘，分别设置 5 条作业线和 4 条作业线，每条作业线分别对应 1 台岸桥作业。按照“卸船时先卸空箱，再卸重箱；装船时先装重箱，再装空箱”的原则设计各作业线集装箱的作业顺序，且作业箱数量足够保证岸桥处于工作状态。集装箱按表 2 的箱型比例生成，其中 20 ft(6.1 m) 箱占比 43%，40 ft(12.2 m) 箱占比 57%。

表 2 秘鲁某集装箱码头项目仿真模型输入的集装箱箱型比例

箱型	进口比例/%	出口比例/%	中转比例/%	合计/%
空箱	13.8	13.8	3.1	31
普通重箱	31.4	31.4	6.6	69
合计	45.2	45.2	9.7	100

闸口进场的车辆平均处理时间 0.7 min，出场时间 0.4 min。外集卡在模型运行时段内均匀到港，送空箱集卡平均到闸口频率为 30 辆/h，送普通重箱集卡平均为 68 辆/h，取空箱集卡平均为 30 辆/h，取普通重箱集卡平均为 68 辆/h。

2.2.4 设施设备调度及作业规则

岸桥按照内集卡到达先后顺序进行作业。当场桥有多个集卡排队等待时, 按照内集卡优先、装船优先、减少大车移动的原则依次选择作业任务, 并综合考虑集卡等待时间、翻箱数量。多场桥在同一堆场作业、选择作业任务时, 要考虑场桥之间的安全间距, 即 4 个贝位长度。

自动化集装箱码头的水平运输车辆一般在多个岸桥间共享并进行统一调度。在模型中为内集卡分配作业任务时, 尽可能将空闲内集卡均匀地分配给所有岸桥, 并优先将内集卡分配给行驶距离更短的岸桥。

2.3 希腊某集装箱码头

2.3.1 码头平面方案

整个码头从西到东分别布置有西侧码头前沿、西侧堆场、中间车道、东侧堆场、东侧码头前沿, 空箱堆场位于码头北侧。平面布置见图 2。

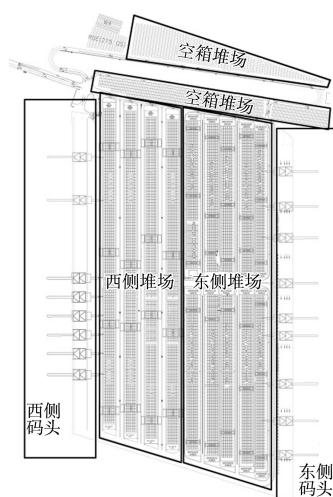


图 2 希腊某集装箱码头平面方案

西侧码头前沿岸线总长 707 m, 总宽 63 m。装卸船作业采用 8 台单小车岸桥, 其中北侧 2 台轨距 20 m, 南侧 6 台轨距 30.5 m。西侧堆场宽 184 m, 划分 4 个箱区、8 块堆区, 每块堆区配置 2 台双悬臂轨道吊, 轨距 29 m。中间车道宽 25 m。

东侧堆场宽 156 m, 划分 5 个箱区、10 块堆区, 西边 4 个箱区的每堆区配置 3 台轨距 31 m 电动轮胎吊, 东侧的一个箱区的每堆区配置 3 台轨

距 26 m 电动轮胎吊。东侧码头前沿岸线总长 780 m, 总宽 43 m。装卸船作业采用 9 台单小车岸桥, 轨距 20 m, 岸桥海侧轨道中心线距码头前沿距离 3.5 m, 陆侧轨道后沿布置 19.5 m 宽的舱盖板区及 1 条行车道, 门架下布置 2 条车道。码头堆场参数见表 3。

表 3 希腊某集装箱码头堆场参数

位置	地面箱位数量/TEU	箱型	堆高/层	装卸设备
西侧堆场	3 717	重箱、冷藏箱	6	双悬臂轨道吊
东侧堆场	4 321	重箱、冷藏箱	5~6	电动轮胎吊
空箱堆场 (码头以北)	1 645	空箱	8	空箱堆高机 (14 台)

2.3.2 设备参数

岸边装卸作业采用单小车岸桥, 岸桥到达指定位置后, 在连续作业且不存在等待的情况下, 岸桥理论作业效率的平均值可达 42 move/h, 最大值 46 move/h, 最小值 38 move/h。

堆场装卸作业采用的轨道吊、轮胎吊参数见表 4。空箱堆高机行驶速度 240 m/min, 装卸一个集装箱平均约 30 s, 最长为 60 s, 最短仅 10 s。

表 4 希腊某集装箱码头场桥参数

装卸设备	吊具速度/ (m·min ⁻¹)		小车速度/ (m·min ⁻¹)	门架速度/ (m·min ⁻¹)
	重载	空载		
双悬臂轨道吊	35	80	100	120
电动轮胎吊 (轨距 31 m)	26	52	70	130
电动轮胎吊 (轨距 26 m)	26	52	70	130

港内水平运输车辆、集疏运车辆均为集卡, 其中内集卡 107 台。内外集卡行驶最大速度为 25 km/h, 且在模型中不考虑车辆行驶的加减速性能。主干道、箱间路车辆限速 20 km/h, 码头前沿限速 15 km/h, 交叉口限速 5 km/h。

2.3.3 船舶到达和外集卡到达

高峰期西侧码头自西向东靠泊 3 万 DWT 和 16.5 万 DWT 集装箱船各 1 艘, 分别设置 6 条和 2 条作业线; 东侧码头靠泊 3 艘 4 万 DWT 集装箱船, 分别设置 3 条作业线; 上述各船每条作业线

分别对应 1 台岸桥作业。按照“先卸船后装船；卸船时先卸空箱，再卸重箱；装船时先装重箱，再装空箱”的原则设计各作业线集装箱的作业顺序，且作业箱量保证岸桥处于工作状态。集装箱按表 5 所列箱型比例生成，其中 20 ft 箱占比 40%，40 ft 集装箱占比 60%。外集卡在模型运行时段内均匀到港，到港间隔平均为 0.876 min。

表 5 希腊某集装箱码头项目仿真模型输入的集装箱箱型比例

箱型	中转比例/%	进口比例/%	出口比例/%	合计/%
普通重箱	61.2	8.5	7.5	77.2
冷藏箱	2.0	0.3	0.2	2.5
空箱	16.8	1.2	2.3	20.3
合计	80.0	10.0	10.0	100.0

2.3.4 设施设备调度及作业规则

希腊项目模型应满足上一节所描述的秘鲁项目模型的设施设备调度及作业规则。此外西侧码头装卸的集装箱只能堆在西侧堆场，东侧码头装卸的集装箱可以堆在西侧和东侧堆场。

3 结果及分析

3.1 仿真试验设计

分别对秘鲁和希腊项目模型在策略 1~3 下的码头作业高峰期的运行进行统计，从岸桥、场桥和内集卡的角度对不同策略进行对比分析，选取的指标有岸桥效率、场桥效率及各设备的状态占比。秘鲁项目模型共模拟 11 h 的运行，含 1 h 的模型预热时间；希腊项目模型共模拟 18 h 的运行，含 8 h 的预热时间。

3.2 结果分析

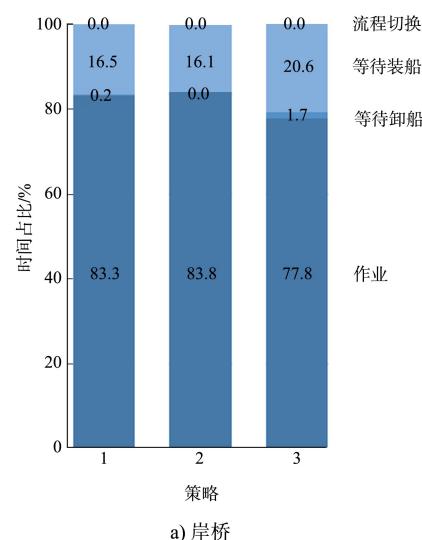
1) 码头最主要的功能是装卸船作业，岸桥效率是装卸船作业能否满足要求的首要评价指标，而且场桥、集卡等设备配置也都是以保证岸桥作业进行的。仿真结果见表 6，可以看出，在秘鲁项目模型中，策略 1 与 2 的岸桥效率相差不大，且比策略 3 的大 7.5% 左右；在希腊项目模型中，策略 1 与 3 的岸桥效率相差不大，而策略 2 比两者大 2.0% 左右，可见策略 1~3 相差并不显著。由以上可知，对于集装箱码头这一复杂系统，不同箱

位分配策略对于不同码头的影响并没有一致的规律，结果因码头而异。

表 6 仿真结果对比

模型	策略	岸桥效率/ (move·h ⁻¹)	场桥效率/ (move·h ⁻¹)
秘鲁项目	1	32.9	26.0
	2	33.1	25.4
	3	30.8	28.0
希腊项目	1	25.7	16.1
	2	26.2	16.3
	3	25.7	16.6

2) 秘鲁项目模型的仿真结果见图 3。可以看出，选用策略 2 时的岸桥效率最大，而此时的场桥效率却是各策略中最小的，甚至比选用策略 3 时要小 10% 左右；选用策略 3 时的岸桥效率最小，而此时场桥效率却是各策略中最大的。希腊项目模型的仿真结果见图 4，可以看出，选用策略 2 时的岸桥效率最大，而此时场桥效率既非最大又非最小。究其原因，岸桥效率和场桥效率的发挥都需要内集卡，而且对于内集卡的要求是矛盾的：为使岸桥效率最大，内集卡要快速完成当前任务、继续执行新的任务、减少在场桥下的等待时间；为使场桥效率最大，内集卡要适当在场桥下等待，保证场桥能连续作业、减少等待。这也从另一方面证明，对于集装箱码头这一复杂系统，不同箱位分配策略对于不同码头运行的影响并没有一致规律。



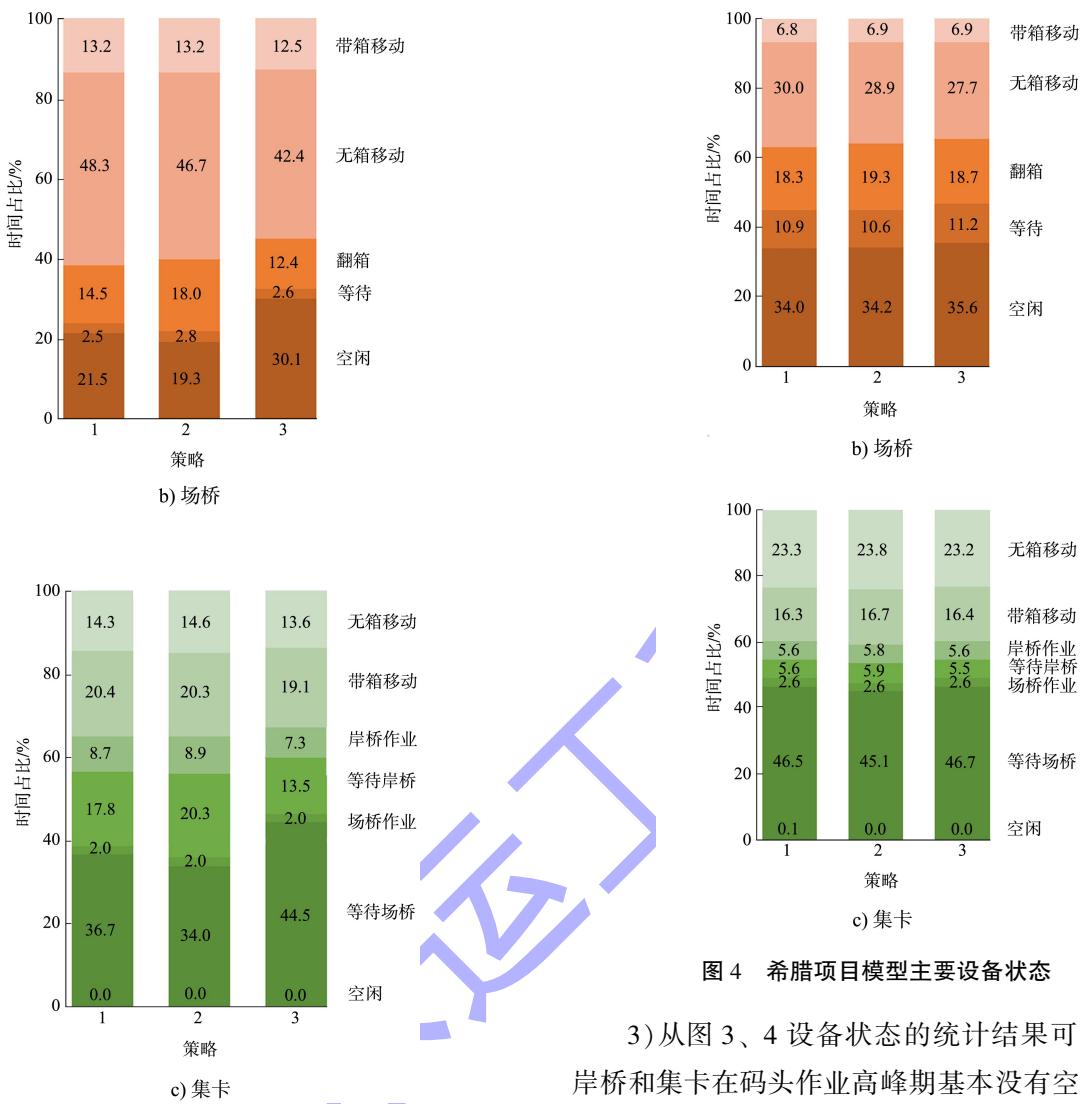


图 3 秘鲁项目模型主要设备状态

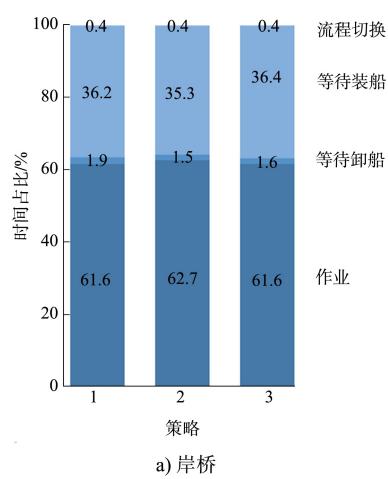


图 4 希腊项目模型主要设备状态

3) 从图 3、4 设备状态的统计结果可以看出, 岸桥和集卡在码头作业高峰期基本没有空闲时间, 这是符合试验设计的; 而场桥总有一定的空闲时间, 这是由各设备的作业特点决定的。岸桥是码头装卸作业的核心, 生产中特别是高峰期需要保证岸桥满负荷运转。按照作业流程, 内集卡一旦完成上一任务, 就会分配新的任务, 始终处于有任务的状态。由于装船集装箱在堆场内相对集中堆放, 船舶装卸船作业又需按照预定计划执行, 因此场桥总是会存在着忙闲的不同状态。但是岸桥、集卡、场桥均存在着没有效率的状态, 比如岸桥和集卡的各种等待状态、场桥的空闲状态。这些没有效率的状态占比过大, 反映了设备调度的不合理或是配置的设备数量过多, 也表明存在进一步优化的可能性。

(下转第 340 页)