



# 自动化码头单小车岸桥锁销站 布置工艺仿真研究

梁 燕, 陈 阳, 金建明

(上海振华重工(集团)股份有限公司, 上海市 200125)

**摘要:** 针对采用单小车岸桥的自动化集装箱码头, 为分析锁销站布置工艺对码头装卸效率的影响, 利用 FlexSim 仿真软件对 3 种锁销站布置工艺方案分别建立码头仿真模型, 对比分析不同布置工艺方案的设备作业效率、水平运输设备平均循环距离及速度。仿真结果表明: 锁销站平行布置工艺方案的装卸效率相比单小车岸桥带拆装锁销平台工艺方案提升 1%~13%; 锁销站垂直布置工艺方案的装卸效率相比锁销站平行布置工艺方案提升 12%~14%。仿真结果可为新建自动化集装箱码头或传统集装箱码头自动化升级改造提供理论支撑。

**关键词:** 自动化; 集装箱码头; 布置工艺; 锁销站

中图分类号: U651+.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0175-05

## Simulation of layout technology of twist lock station with single trolley quay cranes in automated container terminal

LIANG Yan, CHEN Yang, JIN Jianming

(Shanghai Zhenhua Heavy Industry Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

**Abstract:** To analyze the effect of container twist lock station layout technology on the handling operation efficiency in automated container terminal using single trolley quay cranes, three terminal simulation models with different twist lock station layout technology are established by FlexSim software. The working efficiency of terminal handling equipment, the average distance per cycle and speed of horizontal transportation equipment in different models are compared by simulation tests. Simulation results show that the handling operation efficiency of the twist lock station parallel layout process plan is increased by 1% to 13% compared to the single trolley quay crane with twist lock handling platform process plan. The handling operation efficiency of the twist lock station vertical layout process plan is increased by 12% to 14% compared to the twist lock station parallel layout process plan. The simulation results can provide theoretical support for the design of automated container terminals or the upgrading and renovation of traditional container terminals.

**Keywords:** automation; container terminal; layout technology; twist lock station

拆装锁销作业是自动化码头工艺流程中的重要生产环节之一。对于采用单小车岸桥的传统集装箱码头, 岸桥装卸船作业时, 锁销的拆装是在岸桥门框内的作业车道由人工完成。当采用单小车岸桥的集装箱码头进行自动化工艺系统设计时,

考虑到人机交互的系统安全性, 需着重考虑锁销站的布置工艺。陆拥军<sup>[1]</sup>、刘洋等<sup>[2]</sup>对自动化拆装锁销技术进行了研究, 吴邵强等<sup>[3]</sup>设计了一种实现人-车时间隔离分流的新型移动式拆装扭锁作业模式, 杨荣等<sup>[4]</sup>设计一种与岸桥随动的辅助转

收稿日期: 2023-05-29

作者简介: 梁燕 (1982—) 女, 博士, 高级工程师, 从事集装箱码头规划设计与仿真研究。

锁拆装作业平台,赵永新等<sup>[5]</sup>介绍了一种配合单起升岸桥的自动拆装锁销工艺。以上主要针对拆装锁销技术与工艺进行研究,并未研究不同锁销站布置工艺对码头装卸效率的影响。

仿真方法在码头研究中广泛应用,张清波等<sup>[6]</sup>对不同码头装卸工艺布局的系统性能进行仿真分析,刘春泽等<sup>[7]</sup>对码头堆场箱位分配策略进行仿真研究,王坚等<sup>[8]</sup>利用仿真技术对码头道路交通组织进行研究,陶辉等<sup>[9]</sup>对码头的机械配置进行了仿真优化研究,武彬等<sup>[10]</sup>对一种锁站布置工艺的动态布置策略进行仿真分析。但目前并未研究利用仿真技术分析不同锁销站布置工艺对码头装卸效率的影响。

本文介绍了3种常见锁销站布置工艺,利用FlexSim仿真软件,针对不同锁销站布置工艺方案建立码头仿真模型,对比分析不同布置工艺方案对码头装卸效率的影响,旨在为新建自动化集装箱码头或传统集装箱码头自动化升级改造提供理论支撑。

## 1 锁销站布置工艺方案

### 1.1 单小车岸桥带拆装锁销平台

在单小车岸桥海侧横梁上加装专门的拆装锁销平台,工艺布置方案见图1。由于岸桥增加了在拆装锁销平台处的作业环节,会影响岸桥作业能力,从而影响码头装卸效率。

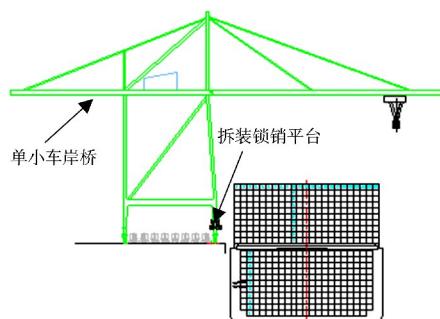


图1 配置拆装锁平台的单小车岸桥

### 1.2 锁销站平行岸线布置

码头可在地面规划专门的集中拆装锁销区域,通过配置安全岗亭等设施或采用智能锁销站,保障作业人员安全。其中1种布置工艺是将锁销站

平行岸线布置于码头前沿和堆场之间的通道上,工艺布置方案见图2。码头内无人车辆在堆场与岸桥间周转需要经过锁销站时,可能产生绕行路径,降低车辆周转率。此外,该工艺导致原有通行道的交通组织更加复杂,容易引起道路拥堵。

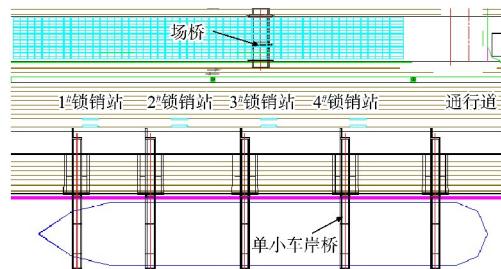


图2 锁销站平行岸线布置

### 1.3 锁销站垂直岸线布置

锁销站垂直于码头岸线布置在岸桥陆侧轨道与码头海侧通行道之间的区域,可根据船舶停靠位置将锁销站移动至船头、船尾处,工艺布置方案见图3。当锁销站位置和码头海侧通行道与堆场经路的交叉路口相邻时,可能因无人车辆进出锁站排队引起路口拥堵。此外,该工艺需要足够的空间用以安装锁销站,并满足无人车辆进出锁销站的转弯半径。

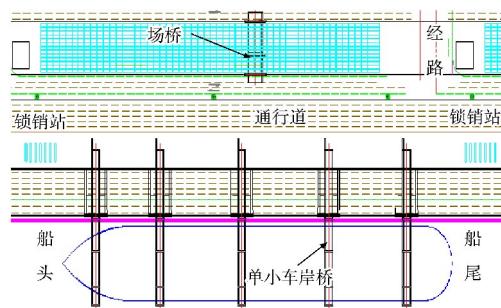


图3 锁销站垂直岸线布置

## 2 仿真设计

### 2.1 参数设计

以天津港某集装箱码头为研究对象,码头前沿配置双20(吊具1次吊2个20 ft箱)单小车岸桥,水平运输设备采用无人车辆,堆场平行于岸线布置,配置无悬臂自动化轨道吊。分别按照3种锁销站布置工艺对该码头工艺布局进行方案比选,工艺方案见表1。方案1的锁销站数量与岸桥数量

一致;方案2受岸线长度、堆场布局及无人车辆运动性能影响,最多可布置10台锁销站;方案3的锁销站数量可根据需要增加或减少,研究中假设与方案1锁销站数量相同。码头基本参数见表2,码头设备参数见表3。

表1 锁销站布置工艺方案

方案名称	锁销站布置工艺	锁销站数量/台
方案1	锁销站布置在岸桥拆装锁销平台上	12
方案2	锁销站平行布置于海侧通行道上	10
方案3	锁销站垂直布置于岸桥陆侧轨道与码头海侧通行道之间的区域	12

表2 码头基本参数

岸线 长度/m	单小车岸桥 数量/台	无人车辆 数量/辆	无悬臂自动化 轨道吊数量/台	岸桥双20尺箱工况作业 箱量占总箱量比例/%	外集卡到港 频率/(辆·h <sup>-1</sup> )	岸桥吊具在拆装锁 销平台定位时间/s	无人车辆在锁销 站的定位时间/s	平均拆锁 销时间/s
1 200	12	84	31	50	180	10	30	45

表3 设备速度参数

设备 名称	空载最大 速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	满载最大 速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	空载 加速度/ (m·s <sup>-2</sup> )	满载 加速度/ (m·s <sup>-2</sup> )
岸桥	-	-	-	-
大车	0.83	0.83	0.10	0.10
小车	4.00	4.00	0.67	0.67
吊具	3.00	1.50	0.60	0.60
无悬臂自动化轨道吊	-	-	-	-
大车	2.00	1.00	0.25	0.25
小车	2.00	2.00	0.40	0.40
吊具	1.33	0.67	0.33	0.33
无人车辆	-	-	-	-
直行	6.94	6.94	0.80	0.30
转弯	1.39	1.39	0.80	0.30

## 2.2 仿真建模

在FlexSim仿真软件基础上二次开发了SmartSim软件,该软件是专门针对集装箱码头的仿真软件,继承于真实码头系统中的控制逻辑与算法,更能保证仿真结果的有效性。利用该软件可在码头规划设计阶段对方案进行评估与优化,目前该软件已被应用于广州南沙四期工程、深圳盐田港东作业区集装箱码头等国内多个大型自动化集装箱码头工艺规划方案的评估验证。软件部分仿真实体见图4。利用该仿真软件对3种锁销站布置工艺方案进行建模,码头仿真模型见图5。

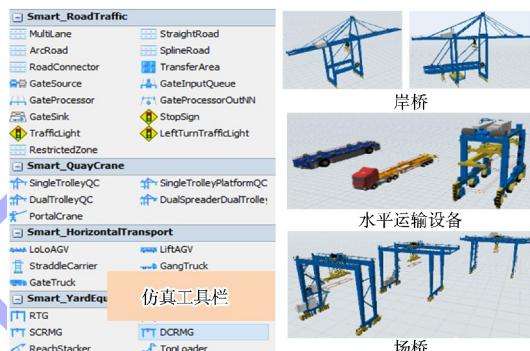


图4 Smartsim软件仿真实体

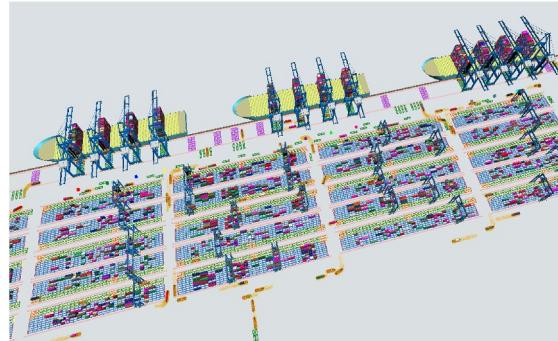


图5 集装箱码头仿真模型

## 2.3 仿真实验设置

考虑所有岸桥同时卸船作业,外集卡按照设定的频率到港,进箱和提箱作业各占50%。在基本试验中参考表2中的拆锁销时间,分析不同工艺方案的各项系统性能指标。当拆锁销时间变化时,不同锁销站布置工艺方案的系统性能可随之

变化, 研究假定拆锁销时间为 25、35、45、55 s 这 4 种情况, 对拆锁销时间进行敏感性分析。

### 3 仿真数据分析

#### 3.1 结果评价指标

$$t_c = t_{co} + t_{cw} + t_{ci} \quad (1)$$

式中:  $t_c$  为岸桥作业时间,  $t_{co}$  为岸桥装卸时间,  $t_{cw}$  为岸桥等待时间,  $t_{ci}$  为岸桥空闲时间。

$$\eta_c = \frac{N_c}{t_c} \quad (2)$$

式中:  $\eta_c$  为岸桥效率, 箱/h;  $N_c$  为岸桥作业箱量, 箱;  $t_c$  为岸桥作业时间, h。

$$U_c = \frac{t_{co}}{t_c} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $U_c$  为岸桥利用率, %。

$$L_{EA} = \frac{L_E}{C} \quad (4)$$

式中:  $L_{EA}$  为无人车辆平均空载循环距离, m/cycle;  $L_E$  为无人车辆空载总行驶距离, m;  $C$  为无人车辆作业循环数, cycle。

$$L_{FA} = \frac{L_F}{C} \quad (5)$$

式中:  $L_{FA}$  为无人车辆平均重载循环距离, m/cycle;  $L_F$  为无人车辆重载总行驶距离, m。

$$v = \frac{L}{t_v} \quad (6)$$

式中:  $v$  为无人车辆平均速度, m/s;  $L$  为无人车辆总行驶距离, m;  $t_v$  为无人车辆总行驶时间, s。其中, 行驶时间包含行驶过程中因避让或排队等待的时间。

$$t_{VA} = \frac{t_v}{C} \quad (7)$$

式中:  $t_{VA}$  为无人车辆平均循环时间, s/cycle;  $t_v$  为无人车辆总行驶时间, s。

$$t_{VA} = t_{VE} + t_{VF} + t_{VC} + t_{VB} + t_{VCW} + t_{VBW} + t_{VI} \quad (8)$$

式中:  $t_{VA}$  为无人车辆平均循环时间,  $t_{VE}$  为无人车辆空载行驶时间,  $t_{VF}$  为无人车辆满载行驶时

间,  $t_{VC}$  为无人车辆与岸桥的交互时间,  $t_{VB}$  为无人车辆在堆场与场桥交互的时间,  $t_{VCW}$  为无人车辆在岸桥下的等待时间,  $t_{VBW}$  为无人车辆在堆场的等待时间,  $t_{VI}$  为无人车辆无任务时的空闲时间。仿真时考虑无人车辆为单循环作业, 即在前沿与堆场间周转时一半循环为重车, 一半循环为空车。

$$U_v = \frac{(t_{VE} + t_{VF} + t_{VC} + t_{VB})}{t_{VA}} \times 100\% \quad (9)$$

式中:  $U_v$  为无人车辆有效利用率, %。

#### 3.2 试验结果

方案 2 中的锁销站数量最少, 仿真得出该方案中锁销站利用率为 50.93%, 利用率不高, 说明锁销站不是系统瓶颈, 仿真得出的不同方案装卸效率差异主要与锁销站布置工艺相关。码头运营时, 船时效率是体现码头服务水平的重要指标。因此, 岸桥效率可以代表码头装卸效率。仿真得出的岸桥效率与利用率见图 6。方案 1 的岸桥基本满负荷运转, 原因是岸桥增加拆装锁销平台降低了岸桥作业能力, 方案 2 相比方案 1 岸桥效率提高约 10%, 方案 3 相比方案 2 岸桥效率提高约 12%。因此, 方案 3 的码头装卸效率最高。

码头无人车辆平均循环距离与平均速度见图 7, 方案 2 相比于方案 1、3, 车辆平均循环距离约高 28%, 原因是方案 2 的锁销站布置工艺使车辆产生了绕行路径。无人车辆平均每个作业循环内各个作业状态所用时间见图 8, 可知方案 1 的车辆空载运行时间较长, 原因是方案 1 的岸桥作业能力较低, 车辆在岸桥下方作业车道排队等待卸船的时间较长, 此外, 车辆在岸桥下等待时间也明显高于方案 2、3; 方案 2 的车辆满载运行时间较长, 原因是车辆载箱经过锁销站拆锁销时可能需要排队, 此外, 该方案因为锁销站布置工艺导致的绕行使车辆满载行驶距离增大。方案 3 的车辆满载运行时间高于方案 1、低于方案 2, 原因是车辆载箱经过锁销站时可能需要排队, 但与方案 2 相比, 车辆无需绕行。

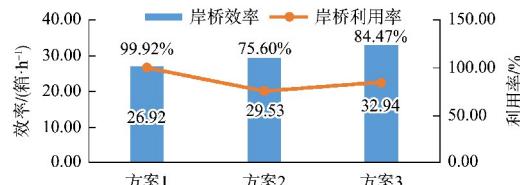


图 6 岸桥效率与利用率关系

结合图 7、8 可知, 虽然方案 1、3 的平均循环距离相当, 但方案 1 的车辆平均循环时间较长, 车辆平均速度更低。方案 2 的车辆平均速度最高, 是由于该方案的行驶路径最长, 在路径较长的道路上行驶时更容易提高车辆速度, 但因为路径较长, 车辆平均循环时间仍然高于方案 3。



图 7 无人车辆平均循环距离与速度关系

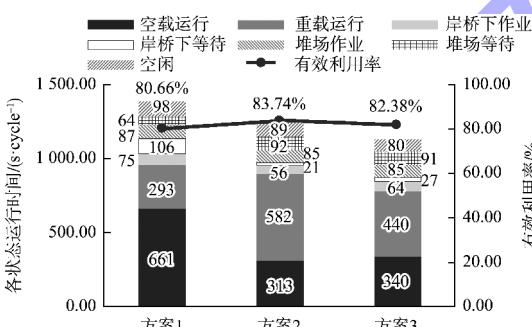


图 8 无人车辆运行状态

### 3.3 拆锁销时间敏感性

对拆锁销时间设置不同数值后, 仿真得出 3 种工艺方案的岸桥效率, 见图 9。可知随着拆锁销时间增大, 方案 1 的岸桥效率下降明显, 其他两种方案变化较缓慢。随着拆锁销时间增大, 方案 2、3 相比方案 1 的优势增加, 方案 3 相比方案 2 的优势减弱。基于不同数值的拆锁销时间, 方案 2 相比方案 1 岸桥效率提升 1%~13%, 方案 3 相比方案 1 岸桥效率提升 15%~27%, 方案 3 相比方案 2 岸桥效率提升 12%~14%。

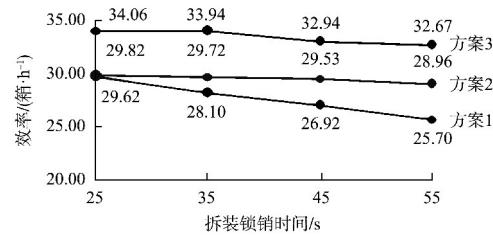


图 9 敏感性分析试验的岸桥效率

不同仿真试验下无人车辆的运行状态, 见图 10。可知随着拆锁销时间增大, 方案 1 的车辆平均循环时间增大明显, 方案 2、3 变化不明显。原因是方案 1 中的岸桥作业能力降低使车辆在岸桥下等待时间增加, 导致平均循环时间增大明显; 而方案 2、3 中锁销站不是系统瓶颈, 对车辆的平均循环时间影响不明显。

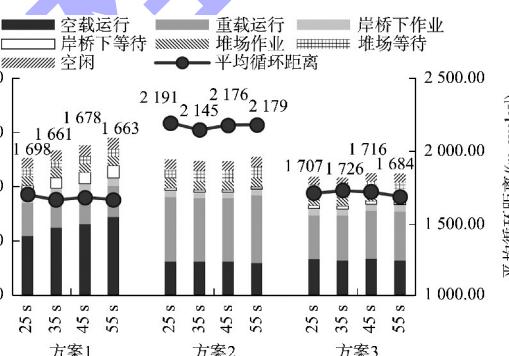


图 10 敏感性分析试验的无人车辆运行状态

### 4 结论

1) 当锁销站布置在单小车岸桥拆装锁销平台时, 对水平运输车辆的交通组织无影响, 但影响岸桥单机效率, 岸桥成为码头系统瓶颈; 当锁销站平行岸线布置时, 对水平运输车辆的交通组织影响较大, 车辆运行路径较长; 当锁销站垂直岸线布置时, 对水平运输车辆的交通组织影响较小, 但车辆转入转出锁销站需要的空间较大。

2) 基于仿真试验, 方案 1 的装卸效率最低, 方案 2 的装卸效率相比方案 1 提升 1%~13%; 方案 3 的装卸效率相比方案 2 提升 12%~14%。若码头布局满足方案 3 中布置锁销站所需的空间, 建议码头优先选择该工艺方案。对于方案 1 和方案 2, 两者效率相差不大时, 由于方案 2 的通行道交通组织更加复杂, 建议优先选择方案 1, 反之则选择方案 2。

(下转第 185 页)