



# 自动化集装箱码头堆场布局

耿卫宁, 宋海涛

(广西钦州保税港区盛港码头有限公司, 广西 钦州 535000)

**摘要:** 在自动化码头海侧装卸、水平运输、堆场装卸、陆侧集疏运四大系统中, 堆场装卸系统差异性最大。中国港口行业在堆场布局方面持续创新, 在“垂直布局+端头交互”模式和“水平布局+道闸控制”模式的基础上, 创新设计并应用转接模式和“垂直布局+U形通道”模式。通过对已投产不同堆场模式自动化码头数据收集, 从安全性、土地利用率、作业效率、自动化程度、单箱能耗等关键指标上, 研究分析不同堆场布局的特点, 探索建立自动化码头堆场布局综合评价体系, 全面、客观地评估不同布局模式, 为自动化码头的建设和运营提供决策依据。并对当前正在规划的自动化码头堆场布局进行了分析。研究结果对新建自动化码头堆场布局规划和传统码头的自动化升级改造具有参考价值。

**关键词:** 自动化; 集装箱; 堆场装卸系统; 堆场布局; 作业效率; 土地利用率

中图分类号: V656.1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0081-08

## Layout of automated container terminal yard

GENG Weining, SONG Haitao

(Guangxi Qinzhou Bonded Port Shenggang Terminal Co., Ltd., Qinzhou 535000)

**Abstract:** Among the four major systems in automated terminals- seaside loading and discharging, horizontal transportation, yard handling, landside collection and distribution-the yard handling system presents the greatest difference across terminals. The Chinese port industry continues to innovate in yard layouts, based on the “vertical layout + end interaction” mode and the “horizontal layout + gate control” mode, introducing innovative transfer modes as well as “vertical layout + U-shaped channel” design. Through data gathering from automated terminals with varied yard configurations that have been put into operation, this study analyzes the characteristics of different yard layouts in terms of key indicators such as safety, land utilization rate, operational efficiency, automation level and energy consumption per TEU. It explores the establishment of a comprehensive evaluation system for the layout of automated terminals, providing a thorough and impartial assessment of various layout patterns to guide the construction and operation of automated terminals. The study also discusses the yard layouts for currently envisioned automated terminals. The research results have reference value for the layout planning and design of new automated terminal yards and the automation upgrading or renovation of traditional terminals.

**Keywords:** automation; container; yard handling system; yard layout; operational efficiency; land utilization rate

近年, 中国自动化码头的发展已超越欧美<sup>[1-3]</sup>, 中国港口行业在自动化码头领域进行了深入研究, 尤其在差异性最大的堆场平面布局领域取得显著成果。陈培等<sup>[4]</sup>研究顺岸式自动化码头

堆场设计, 总结出自动化码头堆场通过能力、设备配置数量、装卸作业人员数量、智能化程度、可靠性、碳排放量、创新性等7项要素; 熊玲燕等<sup>[5]</sup>对比主要的自动化堆场布置类型, 重点对青

收稿日期: 2024-04-28

作者简介: 耿卫宁(1980—), 男, 中级经济师、二级物流师, 从事自动化码头运营管理工作。

岛自动化码头堆场布局进行了研究；王施恩等<sup>[6]</sup>在对国外自动化码头堆场平面布置、设备选型和功能规划等方面分析的基础上，提出洋山自动化码头堆场布局的新模式。

本文基于行业研究，分析自动化码头各子系统之间的关系，对比已运行的自动化码头堆场布局类型，从安全性、土地利用率、设备投资、吞吐量冗余、业务模式变化应对性等堆场关键指标，探讨未来自动化码头堆场布局类型的发展方向。

## 1 堆场装卸系统的重要性

### 1.1 自动化码头系统

自动化集装箱码头包括四大子系统：岸边装卸系统、水平运输系统、堆场装卸系统、陆侧集疏运系统。四大子系统有机组合构成自动化码头总系统。堆场装卸系统是自动化码头四大系统的核心，既要承接海侧装卸船的能力需求，又要承接陆侧集疏运的能力需求。本文着重对堆场装卸系统进行分析研究。

### 1.2 堆场装卸系统的类型

堆场装卸系统主流设备为自动化轨道吊，从大车运行速度上分为高速轨道吊和低速轨道吊；从设备结构上分为无悬臂轨道吊、单悬臂轨道吊、双悬臂轨道吊；从交互方式上分为端部交互和侧边交互；从业务类型上分为本地进出口型和中转型。堆场操作系统和堆场策略对堆场的作业效率影响较大<sup>[7]</sup>。

### 1.3 堆场装卸系统影响码头整体能力

集装箱装卸作业流程化，整体作业效率和能力取决于最薄弱环节。在码头各子系统能力配置时以确保船舶离港准时、集疏运服务顺畅作为能力配置的核心要求，行业内多采用“不平衡配置模式”，即：堆场能力>水平运输能力>岸边装卸能力；堆场能力>闸口集疏运能力<sup>[8]</sup>。

中国集装箱码头实际吞吐量多数超设计能力，以青岛自动化码头为例，设计年吞吐量 260 万 TEU，2023 年实际吞吐量 420 万 TEU，超设计能力 61.5%。海侧装卸系统、水平运输系统通过增加岸桥、水

平运输车辆实现能力提升；闸口集疏运系统通过预约机制实现能力释放；堆场装卸系统建设完成后能力提升空间有限。

## 2 国内已投产自动化码头堆场布局

### 2.1 “垂直布局+端头交互”模式

“垂直布局+端头交互”模式为欧美自动化码头主流模式，国内典型代表为青岛自动化码头。该模式适合本地进出口类型的码头，其特征是堆场内部不设道路，土地利用率高，见表 1。此布局实现堆场全封闭，每个堆场配置 2 台高速轨道吊（最高速度 270 m/min），装卸船和集疏运分布在堆场的两端，交通秩序易于管控。此布局的弊端包括：1) 水水中转比例提高将导致海侧轨道吊繁忙，陆侧轨道吊利用率低<sup>[9]</sup>；2) 堆场能力固定、提升空间小，为确保作业效率，需严格控制堆场长度，不适合陆域纵深长的码头；3) 端头交互需采用高速轨道吊，设备成本、土建成本、单箱能耗较其他模式偏高；4) 轨道吊承担了集装箱堆场内的“水平运输功能”，其“装卸功能”无法充分发挥，需配置较多堆块数量、机械数量以满足效率要求。

表 1 各模式自动化码头堆场参数

Tab. 1 Parameters of automated terminal yard in various modes

自动化码头	长度/ m	宽度/ m	平面箱位/ 万 TEU	单箱 用地/m <sup>2</sup>	堆箱利 用率/%
青岛自动化码头	565.5	1 317.0	1.895 4	39.3	38.17
上海自动化码头	501.0	2 432.5	2.745 0	44.4	33.78
天津自动化码头	539.5	1 978.5	1.091 2	97.8	15.34
南沙自动化码头	650.0	1 285.0	1.920 0	43.5	34.48
钦州自动化码头	690.0	1 301.5	1.737 9	51.7	29.01

注：长、宽包含外集卡集疏运区域、水平导引车运行区域、码头主干道。

### 2.2 “水平布局+道闸控制”模式

“水平布局+道闸控制”模式国内典型代表为天津自动化码头，其适合传统码头自动化升级改造，新建码头应用较少。堆场内采用双悬臂轨道吊作业，实现内外集卡的局部隔离。自动水平导引车与外集卡的路径交叉通过道闸管控，阻断了交通流，导致通行效率相对较低<sup>[10]</sup>，适合对作业效率

要求低的码头; 此布局内部通道多, 为满足自动水平导引车的转弯半径, 需要一定的车道宽度, 土地利用效率较低; 堆场无法实现全封闭, 与其他模式相比安全性低。

### 2.3 转接模式

转接模式目前仅南沙自动化码头应用, 适合水水中转比例高的码头, 南沙自动化码头水水中转比例约 90%。其特征是在堆场的最外侧设立集疏运交互区, 利用该区域将内外集卡物理隔离, 见图 1。交互区采用双悬臂低速轨道吊, 一侧悬臂负责外集卡作业, 一侧悬臂负责自动化水平导引车作业。



图 1 南沙自动化码头堆场平面  
Fig. 1 Plan of Nansha automated terminal yard

此布局采用转接的方式避免外集卡进入堆场内部, 确保了堆场的作业效率。其弊端为: 1) 导致码头运营成本增加, 以出口为例, 业务流程增加了堆场“一卸”、“一装”和水平运输 3 个环节, 见图 2; 2) 受业务类型制约较大, 如码头本地货增多, 交互区的能力将制约码头整体作业能力。



图 2 转接模式出口流程  
Fig. 2 Transfer mode export process

### 2.4 “垂直布局+U 形通道”模式

“垂直布局+U 形通道”模式为钦州自动化码头

的创新, 且码头后方配置铁路, 通过路径规划兼顾装卸船作业和火车装卸作业<sup>[11]</sup>。每个箱区配置 2 台双悬臂低速轨道吊, 内外集卡分别在轨道吊悬臂两侧作业。自动导引车通道为 I 形, 外集卡车道呈 U 形布置, 每隔 1 个箱区在轨道吊轨内布置 1 条外集卡离场通道, 外集卡装卸完成后, 行驶至堆场海侧端头掉头离场, 见图 3。

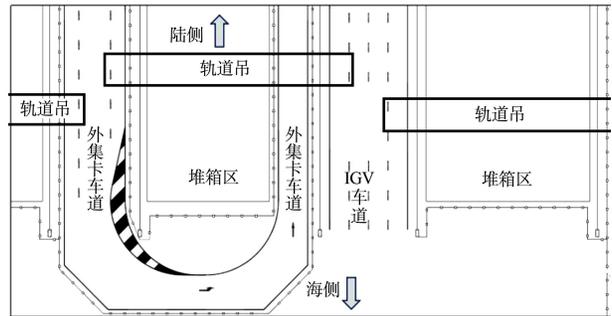


图 3 U 形堆场布局及车道分布  
Fig. 3 Layout and lane distribution of U-shaped yard

此设计在“垂直布局+端头交互”模式和“水平布局+道闸控制”模式的基础上, 充分利用钦州港陆域宽广的优势。除土地利用效率指标低于“垂直布局+端头交互”模式外, 其他指标均优于其他模式。

#### 2.4.1 建设、维护成本低

自动水平导引车和外集卡通过 U、I 形通道行驶至堆场内部, 作业时轨道吊无需长距离移动, 轨道吊单箱作业平均移动距离优势显著, 见表 2。

表 2 4 种模式轨道吊作业移动距离  
Table 2 Moving distances of rail crane operations for four modes

自动化码头	堆场总长度/m	单箱作业移动贝位数/个	单箱作业移动距离/m
青岛自动化码头	429	44.18	282.75
上海自动化码头	375	39.14	250.50
天津自动化码头	419	11.38	72.83
南沙自动化码头	560	10.52	67.33
钦州自动化码头	574	7.47	47.81

注: 天津、南沙、钦州模式移动距离随堆场盘存量、堆场策略等因素波动, 青岛、上海模式则相对稳定。

基于其无长距离移动需求, 设备选型为低速轨道吊(最高速度 110m/min), 设备采购成本、轨道土建、轨道型号、轨道维护和设备维护成本等均低于高速轨道吊, 见表 3。

表 3 高速轨道吊与低速轨道吊参数对比

Tab. 3 Parameter comparisons between high-speed and low-speed rail cranes

轨道吊类型	设备采购成本/ (万元·台 <sup>-1</sup> )	轨道采购成本/ (万元·hm <sup>-1</sup> )	轨道基础建设 成本/(万元·hm <sup>-1</sup> )	轨道养护成本/ (元·台 <sup>-1</sup> ·万 TEU <sup>-1</sup> )	轨道吊维保成本/ (万元·台 <sup>-1</sup> ·万 TEU <sup>-1</sup> )	单箱能耗/ (kW·h·TEU <sup>-1</sup> )
高速轨道吊	2 250	28	85	500	3 000	4.6
低速轨道吊	2 040	21	55	200	2 000	3.5

2.4.2 作业效率高,单箱能耗低

“垂直布局+U形通道”模式的工艺轨道吊理论作业效率 40 自然箱/h, 实际作业效率 25~35 自然箱/h。而“垂直布局+端头交互”模式轨道吊需频繁长距离行驶, 能耗高、效率低, 不同的堆场纵深和设备速度作业效率有所不同, 大致为 15~20 自然箱/h。通过仿真与“垂直布局+端头交互”模式相比, 自动导引车和外卡车的平均等待时间分别减少 85%和 75%, 平均排队分别减少 80%和 41%, 堆场的运营效率提高 4%<sup>[12]</sup>。

2.4.3 堆场策略简单,便于生产组织

堆场策略是制约堆场作业效率的重要因素<sup>[13]</sup>。“垂直布局+U形通道”模式的堆场策略采取整“贝”模式, 即堆场内的 1 个堆垛是最小管理单元。而“垂直布局+端头交互”模式的堆场策略管理的最小单元是 1 个堆垛中的 1“列”, 见图 4, 堆场策略的复杂度呈几何倍数增加, 生产组织难度大。

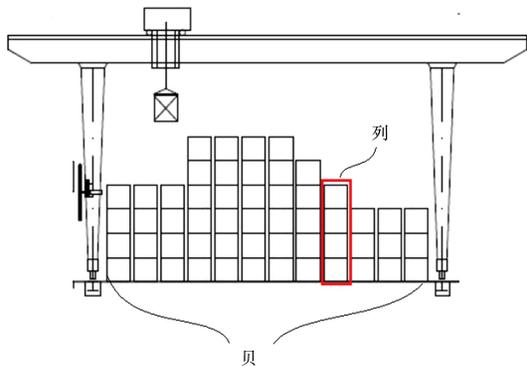


图 4 集装箱堆场贝、列

Fig. 4 Container yard bays and columns

2.4.4 对业务变化适应性强

集装箱码头的业务易受国际贸易环境、国家政策、临港产业发展等因素影响, 码头在规划设计需考虑业务变化。“垂直布局+端头交互”模式堆场海陆侧作业能力均衡, 适合本地进出口为主的码头; 转接模式适合水水中转为为主的码头。“垂直布局+U形通道”模式下, 外集卡和自动水平导引车可以到达堆场内部, 适应业务的多种变化。

2.4.5 堆场能力提升空间大

堆场能力主要体现在堆存能力和作业效率 2 个指标: 1) 增加平面箱位数, “垂直布局+端头交互”模式、“水平布局+道闸控制”模式、转接模式均无法增加平面箱位数; 2) 增加堆场设备, “垂直布局+端头交互”模式无法增加堆场设备, 转接模式在交互区增加堆场设备的空间有限。

“垂直布局+U形通道”可以根据堆场的纵深增加堆场设备以迅速提高堆场能力。随着自动驾驶技术的发展, 人工与自动的混行是必然趋势<sup>[14]</sup>, 届时外集卡与自动导引车之间的围网拆除, 原外集卡离场通道可用于码放集装箱。堆场列数由 9 列增加至 12 列, 堆存能力提升 14.29%。

2.5 堆场布局综合对比

通过综合对比安全性、作业效率、土地利用等堆场关键指标, 各种模式的堆场布局均有其优势和不足, 见表 4。各码头应根据自己特点结合业务需求, 综合考量关键指标的优先级和权重, 审慎选择适合的堆场布局模式。

表 4 各模式堆场布局综合对比

Tab. 4 Comprehensive comparisons of yard layout in various modes

布局类型	安全性	自动化程度	作业效率	设备投资	土地利用	单耗	能力提升	业务适应性
垂直布局+端头交互	高	高	中	高	高	高	低	低
垂直布局+U形通道	中	中	高	低	中	低	高	高
水平布局+道闸控制	中	中	低	低	低	低	高	高
转接模式	中	中	高	低	中	中	中	低

### 3 国内规划设计中的自动化码头堆场布局

#### 3.1 双O形布局模式

天津港采用“双O”形布局模式,见图5。该模式在“垂直布局+U形通道”基础上,将外集卡离场与入场通道合并,在堆场端头形成“双O”形外集

卡掉头区域,见图6。通过车道共享提高了土地利用约5%~7%,但外集卡对向行驶,安全管控难度增大。

综合对比“双O”形布局模式垂直于岸壁和平行于岸壁2种模式,垂直布局优于水平布局,见表5。

表5 “双O”平行布局和垂直布局综合对比

Tab. 5 Comprehensive comparisons between parallel and vertical layout of “double O” mode

比选项目		平行布局	垂直布局
绿色	光伏风力发电	风电+光伏	风电+光伏
	岸电设施	有	有
	是否实现零排放	是	是
	外集卡行驶路程/km	4.6	4.2
	装卸工艺能耗/(kW·h·TEU <sup>-1</sup> )	12.67	11.12
	得分	87.77	100
安全性	拆装锁	地面集中拆锁,人机分离	平台拆锁,人机分离
	自动化区域	区域围网隔离+门禁管理	
	自动化设备	设备自动感知、执行	
	得分	100	100
可靠性	岸边、堆场、水平运输设备	技术成熟,安全可靠	技术成熟,安全可靠
	TOS(码头操作系统, Terminal operating system)与场桥、岸桥系统对接	成熟	成熟
	堆场集装箱堆存系统	箱门朝向不一致,需开发	成熟
	水平运输与场桥、岸桥对接	成熟	成熟
	得分	95	100
系统效率	场桥覆盖面	每箱区4~8台轨道吊覆盖	每箱区2台轨道吊
	设备灵活性	设备调度灵活	设备调度不灵活
	效率保障	生产效率有保障	设备故障对本箱区作业影响较敏感
	海侧峰值效率/(箱·h <sup>-1</sup> )	24.0	24.3
	海侧需要设备数量/台	23	22
	陆侧峰值效率/(箱·h <sup>-1</sup> )	22.0	22.3
	陆侧需要设备数量/台	32	31
	海侧效率支持率/%	100	100
	陆侧效率支持率/%	66	71
得分	95	95	
创新性	创新水平	国内首创	国内首创
	得分	95	98
通过能力	重箱、空箱平面箱位数/TEU	15 763	16 320
	冷藏箱平面箱位数/TEU	704	640
	最大通过能力(万TEU·年 <sup>-1</sup> )	350	365
	得分	90	100
经济性	总投资/亿元	81.774 0	81.530 6
	工期/月	24	24
	作业成本/(元·TEU <sup>-1</sup> )	96.16	95.93
	得分	99.76	100
综合得分		94.39	98.20

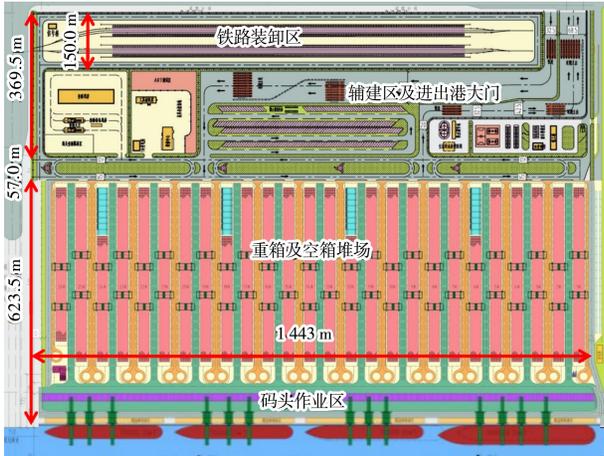


图5 天津“双O”形布局模式平面  
Fig. 5 Plan of double O-shaped layout in Tianjin

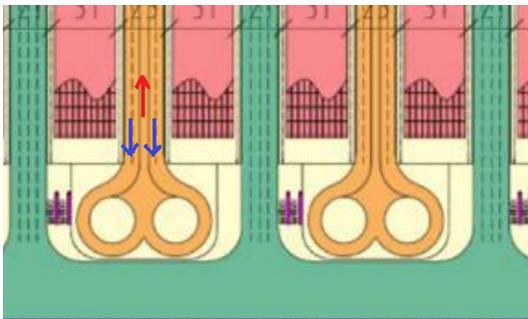


图6 “双O”形布局集卡掉头区域  
Fig. 6 Truck turning area in double O-shaped layout

### 3.2 P形布局模式

厦门港和上海罗泾码头采用P形布局模式，与“双O”形布局模式类似，均是在“垂直布局+U形通道”基础上，将外集卡离场与入场通道合并，

在堆场端头形成P形掉头区域，见图7。

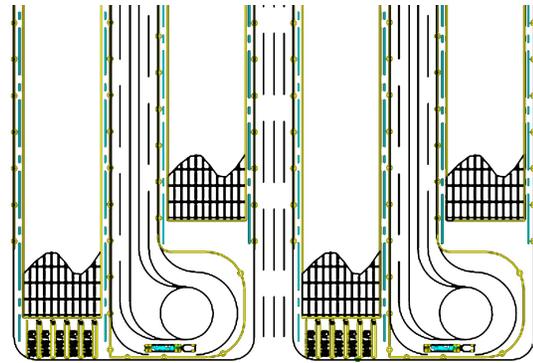


图7 P形布局模式集卡调头区域  
Fig. 7 Truck turning area in P-shaped layout

### 3.3 纵路道闸方案

宁波梅山港采用纵路道闸模式，见图8。该布局相比“垂直布局+U形通道”模式，提高了土地利用效率，但在自动水平导引车优先的道闸控制逻辑下，外集卡的平均周转时间高于“垂直布局+U形通道”模式、“垂直布局+端头交互”模式和转接模式。

在“水平布局+道闸控制”基础上优化，自动水平导引车车道居中，外集卡车道在两侧，通过车流优化减少了自动水平导引车与外集卡的水平交叉点，见图9。

自动导引车车道居中，利用主管道的宽度满足自动导引车转弯半径的需求，提高土地利用效率约5%，见表6。

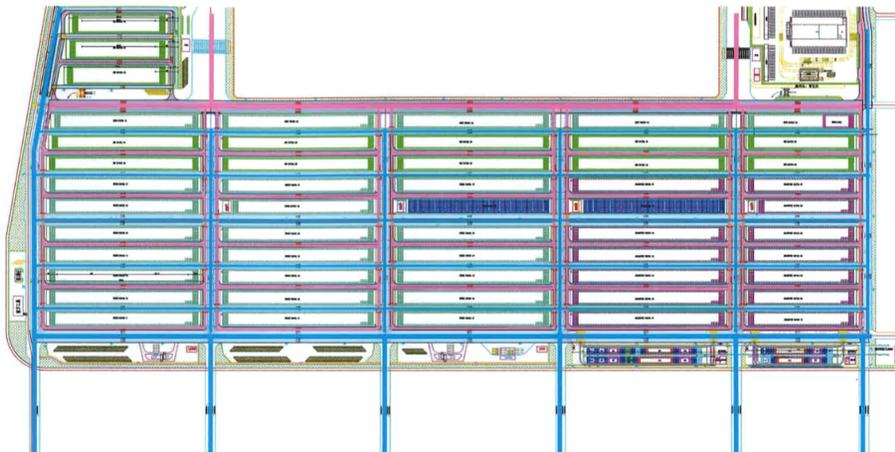


图8 纵路道闸模式平面  
Fig. 8 Plan of longitudinal road gate mode

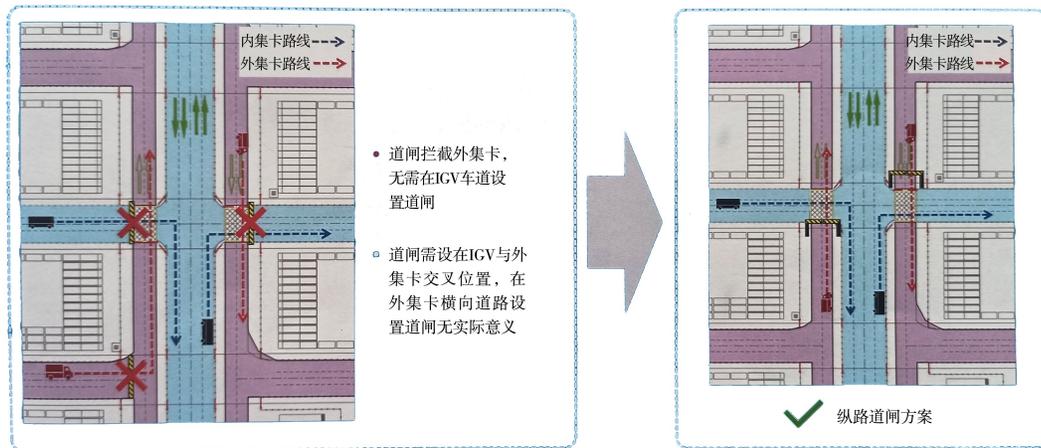


图 9 纵路道闸模式堆场内路口设计

Fig. 9 Intersection design of longitudinal road gate mode

表 6 2 种模式参数对比

Tab. 6 Parameter comparisons between two modes

模式	纵路宽度/m	箱区间距/m	损失贝位/个	损失堆场总能力/%
外集卡车道居中	58	80	5	8
水平导引车车道居中	36	62	2	3

纵路道闸模式的难点为道闸控制系统和外集卡司机的管理, 道闸模式在国内应用较少, 天津自动化码头道闸策略为自动水平导引车优先。道闸控制系统的智能化水平决定通行效率。外集卡司机的管理是集装箱码头的难点, 其驾驶行为的规范性影响通行效率。目前上海外高桥四期码头和赤湾码头在测试人工驾驶和自动驾驶混行模式, 人工驾驶的不规范行为对自动驾驶干扰较大。

#### 4 结语

1) 港口间的竞争是资源配置效率的竞争, 是生产能力不断跃升的竞争。自动化码头堆场布局模式的创新本质是资源优化。堆场布局模式是码头资源配置的一种形式, 通过对土地、设备、资本、能耗等资源进行组合配置来塑造堆场能力, 满足码头对安全、效率、利润等运营指标的要求。

2) 堆场布局模式设计基于操作流程, 操作流程服务于码头业务。堆场布局的设计需紧密围绕码头业务模式特点, 通过综合评价体系和仿真技术选择适合的堆场布局方案。目前立体堆场和空轨技术处于探索阶段尚不成熟。随着车路协同和自动驾驶技术的发展, 外集卡和自动导引车的混

行成为发展趋势。

3) 自动化码头堆场涉及较多不确定性因素, 具有整体性、有序性和动态相关性的特点。依靠经验已不能满足自动化码头堆场规划设计的需求, 行业内急需建立自动化码头堆场布局综合评价体系和仿真系统。系统性地评估不同布局模式的优劣, 并为布局设计提供科学决策依据。

#### 参考文献:

[1] 贾远琨. 洋山深水港四期自动化码头[J]. 百科探秘(海底世界), 2019(Z2): 12-15.  
 JIA Y K. Yangshan deep-water port phase IV automated terminal [J]. Encyclopedia exploration (Underwater world), 2019(Z2): 12-15.

[2] 本刊讯. 山东港口青岛港自动化码头作业效率再刷世界纪录[J]. 中国航务周刊, 2022(27): 20.  
 Chinashipping gazette. Shandong port Qingdao port automated terminal operation efficiency breaks world record again. [J]. China shipping gazette, 2022(27): 20.

[3] 本刊讯. 广西北部湾港启用全国首个海铁联运集装箱自动化码头[J]. 中国航务周刊, 2022(27): 20.  
 Chinashipping gazette. The Beibu Gulf Port in Guangxi launches the country's first automated sea-rail intermodal container terminal [J]. China shipping gazette, 2022(27): 20.

[4] 陈培, 武彬, 张煜, 等. 顺岸式自动化集装箱码头堆场布局设计[J]. 港口装卸, 2022(1): 62-65.  
 CHEN P, WU B, ZHANG Y, et al. Layout design of along-shore automated container terminal yard [J]. Port

- operation, 2022(1): 62-65.
- [5] 熊玲燕, 岳金灿. 自动化集装箱码头堆场布置模式简析[J]. 港工技术, 2018, 55(5): 42-44, 93.  
XIONG L Y, YUE J C. Layout mode of automated container terminal yard [J]. Port engineering technology, 2018, 55(5): 42-44, 93.
- [6] 王施恩, 何继红, 林浩, 等. 自动化集装箱码头堆场布置新模式[J]. 水运工程, 2016(9): 23-26, 45.  
WANG S E, HE J H, LIN H, et al. New mode of automated container terminal yard layout [J]. Port & waterway engineering, 2016 (9): 23-26, 45.
- [7] KEMME N. Effects of storage block layout and automated yard crane systems on the performance of seaport container terminals[J]. OR Spectrum, 2012, 34(3): 563-591.
- [8] 包起帆, 罗文斌. 现代集装箱码头的建设与运营技术[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2006: 13.  
BAO Q F, LUO W B. Construction and operation technology of modern container terminals [M]. Shanghai: Shanghai Science & Technical Publishers, 2006.
- [9] 张立斌, 李刚. 高水水中转比例下的自动化集装箱码头堆场装卸工艺方案比较[J]. 水运工程, 2019(5): 78-83, 151.  
ZHANG L B, LI G. Comparison of automated container terminal yard loading and unloading process plans under high water transfer ratio[J]. Port & waterway engineering, 2019(5): 78-83, 151.
- [10] 张景韶, 张正东. 一种低成本提高城市主干路通行效率的交通方案[J]. 交通世界, 2019(36): 7-9.  
ZHANG J S, ZHANG Z D. A low-cost transportation solution to improve efficiency of urban main roads[J]. Transpo world, 2019 (36): 7-9.
- [11] LIU W Q, ZHU X N, WANG L, et al. Multiple equipment scheduling and AGV trajectory generation in U-shaped sea-rail intermodal automated container terminal [J]. Measurement, 2023, 206: 112262.
- [12] YANG X, YU Z, PEI C, et al. Simulation analysis of isolated lane layout in automated container terminal yard [C]//2021 6th International conference on transportation information and safety (ICTIS), Wuhan: [s: n. ], 2021.
- [13] 付鹏成, 宋海涛, 李强, 等. 自动化集装箱码头堆场策略[J]. 水运工程, 2019(10): 32-36.  
FU P C, SONG H T, LI Q, et al. Automated container terminal yard strategy [J]. Port & waterway engineering, 2019(10): 32-36.
- [14] 柴树山, 周志强, 徐灵旻. 自动驾驶与人工驾驶混行交通安全问题及管理对策探讨[J]. 道路交通管理, 2023(7): 39-41.  
CHAI S S, ZHOU Z Q, XU J Y. Discussion on safety issues and management countermeasures of mixed traffic of autonomous driving and manual driving [J]. Road traffic management, 2023(7): 39-41.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 50 页)

- [7] 交通运输部天津水运工程科学研究所, 中交四航工程研究院有限公司. 水运工程水工建筑物检测与评估技术规范: JTS 304—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.  
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd. Technical specification for detection and assessment of water transport engineering hydraulic structure: JTS 304—2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [8] 林红威. 单调及重复荷载作用下锈蚀钢筋混凝土粘结性能试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
LIN H W. Experimental study on the bond behavior of corroded reinforced concrete under monotonic or repeated loading [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [9] 孙彬, 牛荻涛, 王庆霖. 锈蚀钢筋混凝土梁抗弯承载力计算方法[J]. 土木工程学报, 2008, 41(11): 1-6.  
SUN B, NIU D T, WANG Q L. Calculation method for flexural capacity of corroded RC beams[J]. China civil engineering journal, 2008, 41(11): 1-6.
- [10] ZHAO C X, YING Z Q, DU C B, et al. Experimental study on the bond-slip behaviour between corroded bars and concrete [C]//ICCGBMEE. Proceedings of the 5th International Conference on Civil and Green Building Materials and Environmental Engineering. New York: ICCGBMEE, 2023: 1-7.

(本位编辑 王璁)