



一种基于立交形式的 新型集装箱堆场装卸工艺

单 佳，金建明，张雨婷

(上海振华重工(集团)股份有限公司, 上海 200125)

摘要：在不影响码头作业效率的情况下，针对人工与自动化区域的安全隔离问题，通过研究高速公路所采用的互通式立体交叉形式，设计了一种全新的集装箱堆场立交式装卸工艺方案。采用静态分析与动态分析相结合，将立交方案与常见的4种平面装卸工艺方案进行对比，研究得出立交方案在土地利用效率、港口交通组织、堆场设备共享性、调度灵活性、系统效率、装卸系统投资成本等方面的优势与劣势，解决了人工与自动化水平运输设备间的隔离与提高码头作业效率之间的矛盾。在码头自动化升级持续推进的背景下，为新建集装箱自动化码头和传统集装箱码头自动化升级改造提供了一种新思路。

关键词：自动化集装箱码头；隔离方案；互通式立体交叉形式

中图分类号：U65

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)12-0064-06

A new container yard handling process based on flyover technology

SHAN Jia, JIN Jiamming, ZHANG Yuting

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

Abstract: This paper brings forth a new container yard handling process by integrating flyover technology into terminal scenario. It aims to provide a solution for isolation between automatic horizontal transportation equipment and manual horizontal transportation equipment without interfering terminal operation efficiency. By comparing with four typical handling processes, this paper reveals the characteristics of this new container yard handling process from both static and dynamic analysis including land utility, traffic organization, yard handling equipment sharability, dispatcher flexibility, system efficiency, investment cost, balancing the conflict between isolation proposal and operation efficiency improvement. With the continuous development of the terminal automation technology, it provides a new approach for the upgrading and transformation of new container automation terminals and traditional container terminal automation.

Keywords: automated container terminal; isolation proposal; flyover technology

随着新一轮科技革命浪潮的引领，国内外集装箱码头开始引入人工智能、5G 通信、无人驾驶等前沿技术^[1]。码头内自动化水平运输设备的引入与外集卡间的隔离方案也经历从空间隔离+端部装卸/侧面装卸模式、时空隔离+侧面装卸模式到混行模式的发展。然而受制于无人驾驶技术和相关法律法规的制约，混行模式还未大规模推广应用

用。当前主流的空间隔离、时空隔离方案因工艺布局的局限性无法进一步提升码头效率。

本文针对上述问题提出一种采用互通式立体交叉形式的新型集装箱堆场装卸工艺方案，通过应用立交形式隔离码头内自动化水平运输设备与外集卡，既提升了码头作业效率，也可保证人工区域与自动化区域作业的安全性。

收稿日期：2023-03-22

作者简介：单佳（1992—），女，硕士，工程师，从事港口平面布局与仿真研究工作。

1 全自动化码头场内场外运输设备隔离方案

现有人工与自动化水平运输设备的隔离方案主要分为空间隔离和时空隔离两种方式^[2]。其中已在全自动化集装箱码头成熟应用的空间隔离方案主要有两种: 1) 全自动化码头采用典型堆场端部装卸工艺方案^[3], 如国内厦门远海、青岛前湾、洋山四期等, 利用堆场隔离海侧场内自动化水平运输设备与陆侧场外人工水平运输设备, 优势在于堆场封闭管理、港区交通组织简单, 但存在集装箱收发箱点数量有限、轨道吊大车长距离带载运行、能耗高等问题; 2) 广西钦州港采用 U 形方案^[4], 通过 I 形道路和 U 形道路组合隔离人工与自动化水平运输设备, 虽然改善了集装箱收发箱点数量有限的问题, 但是 U 形道路占用了部分可用于堆箱的土地, 因此更适合陆域面积富余的码头, 对于小体量码头较难采用。

采用时空隔离方式的码头有日本名古屋和天津港北疆港区 C 段^[5]码头, 主要通过道闸和交通灯来实现自动化区和非自动化区的隔离, 优点在于基于传统集装箱码头布局, 无需在土建上进行大的变动, 解决了集装箱收发箱点数量少、能耗高等问题; 但由于人工与自动化水平运输设备仍存在交叉路径, 不可避免产生互相等待影响系统效率的情况。

近几年国内外一些码头如宁波舟山港梅东码头^[6-7]及泰国林查班港 D 码头基于传统轮胎吊堆场, 在无物理隔离措施的情况下尝试进行有人集卡和无人集卡的混行。现阶段初步实现在混行区域内的避让、超车、绕行等操作, 然而针对多因素、多约束、多目标的复杂工况则需要进一步研发更加高效、智能的调度及路径优化系统, 因此采用无人集卡的混行方案仍无法在港口大规模推广应用^[8]。

2 集装箱堆场立交式装卸工艺方案

针对现有装卸工艺方案中存在的问题, 通过研究高速公路所采用的互通式立体交叉形式设计一种全新的集装箱堆场立交式装卸工艺方案, 简称“立交方案”。互通式立体交叉形式被广泛应用于解决道路交叉口交通干扰, 无须设置额外的闸机或者交通灯进行管理。因此利用该项技术既能保证

码头作业的安全高效, 又能合理利用土地资源, 实现人工与自动化水平运输设备的隔离。图 1 为立交形式局部示意, 双悬臂轨道吊一侧为自动化水平运输设备车道, 另一侧为立交形式的外集卡车道。

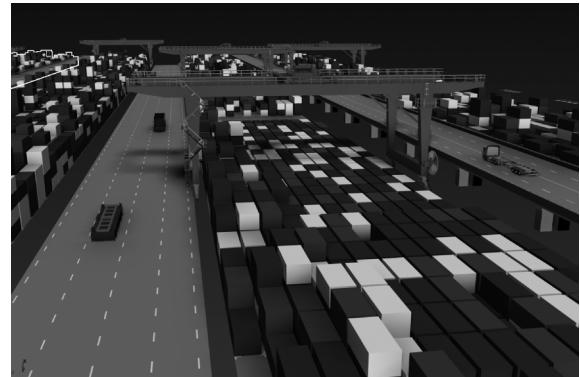


图 1 局部立交形式

立交方案按照码头岸线总长 800 m 的 2 个 10 万箱级集装箱泊位进行设计。码头前沿岸边装卸设备采用单小车岸桥, 堆场装卸设备采用双悬臂自动化轨道吊, 场内自动化水平运输设备可采用场内 AGV、IGV 或无人集卡等, 场外水平运输设备为人工集卡。立交方案的装卸工艺整体平面布置见图 2。

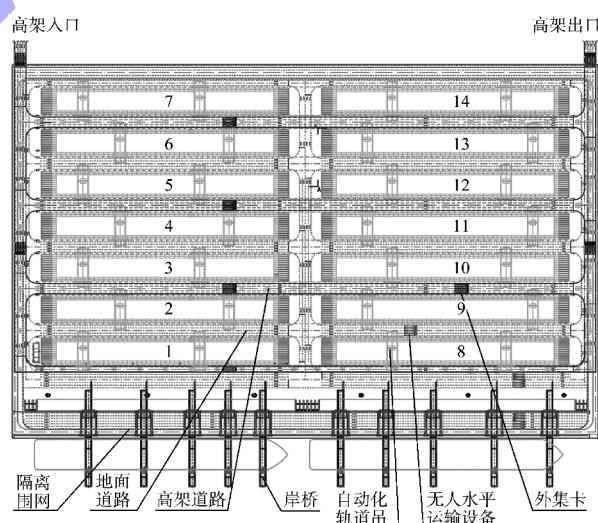


图 2 立交方案的装卸工艺平面布置

码头前沿作业区采用自动化单小车岸桥进行装卸作业, 岸桥轨内布置普通箱和超限箱装卸区, 通过安全围网隔离, 轨后布置舱盖板存放区。水平运输区衔接前沿装卸与堆场存取作业, 布置隔离围网和安全门区分自动化与非自动化区域, 保证作业安全性。堆场作业区共划分为 14 个箱区,

平行于前沿岸线布置，每个箱区布置 2 台自动化悬臂轨道吊。自动化悬臂轨道吊的一侧悬臂端与场内自动化水平运输设备进行交互，另一侧悬臂端与立交高架装卸道上的外集卡进行交互。对存在平面交叉的路段采用立交高架道路，实现场内自动化水平运输设备和外集卡的物理隔离，全场交通流向按照单向环形车流原则布置，方便外集卡车辆进入和离开堆场。

立交方案的装卸船流程为：集装箱船—单小车岸桥—自动化水平运输设备—自动化双悬臂轨道吊—集装箱堆场。

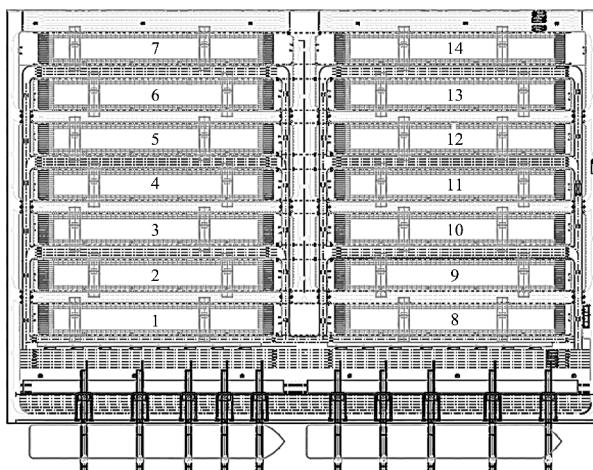
臂轨道吊—集装箱堆场。集疏运流程为：外集卡—立交道路—自动化双悬臂轨道吊—集装箱堆场。

3 方案对比

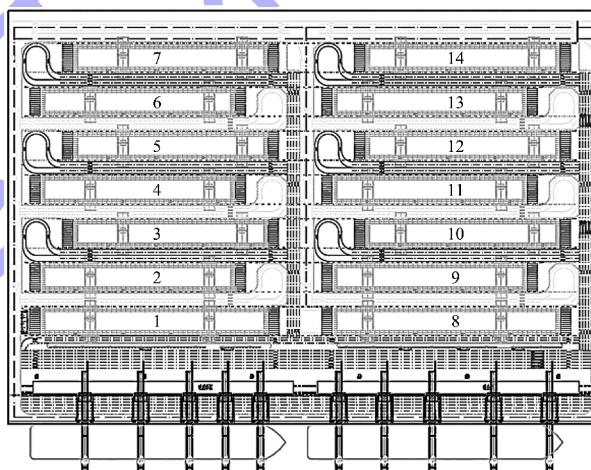
为全面剖析立交方案的特点，在基于码头规模、占地面积、装卸设备选型尽可能一致或接近的前提下，选取 4 种平面装卸工艺方案作为对比参考对象，对比方案描述见表 1。对比方案总平面布置见图 3。

表 1 各对比方案描述

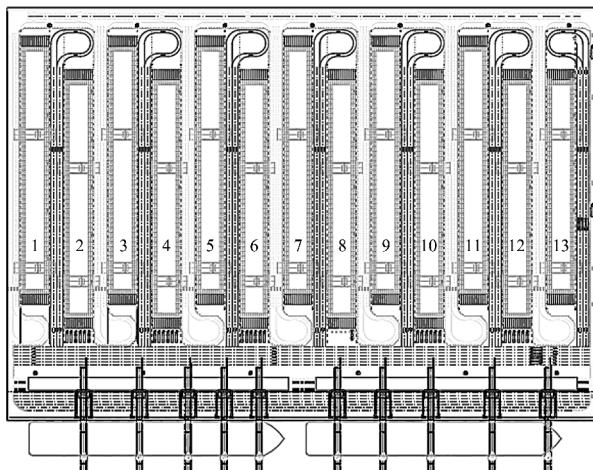
方案	方案名称	设备组合	水平运输隔离方式	堆场与岸线位置关系
1	井形装卸方案	单小车岸桥+自动化双悬臂轨道吊+自动化水平运输设备	场内/场外水平运输时空隔离	平行
2	平行 P 形装卸方案	单小车岸桥+自动化双悬臂轨道吊+自动化水平运输设备	场内/场外水平运输空间隔离	平行
3	垂直 P 形装卸方案	单小车岸桥+自动化双悬臂轨道吊+自动化水平运输设备	场内/场外水平运输空间隔离	垂直
4	U 形装卸方案	单小车岸桥+自动化双悬臂轨道吊+自动化水平运输设备	场内/场外水平运输空间隔离	垂直



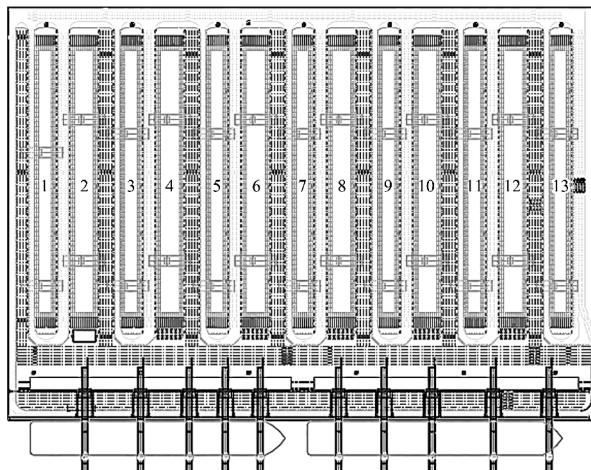
a) 方案1



b) 方案2



c) 方案3



d) 方案4

图 3 各对比方案总平面布置

采用静态与动态分析相结合的方式, 更直观、准确地得出立交方案与对比方案之间的差异。静态分析侧重平面布局、土地利用效率、堆场设备共享性和调度灵活度、交通组织等方面。由于集装箱堆场立交式装卸工艺未在实际码头中应用, 因此需要进一步仿真动态分析。基于 Smartsim 仿真平台对各方案的系统效率、设备利用率、交通组织等方面展开模拟分析得出量化数据。

3.1 静态分析

3.1.1 土地利用效率

在同等码头岸线长度和码头纵深条件下, 装卸系统土地面积包括堆场存取区域和与堆场布置形式密切相关的区域, 如从岸桥前沿至堆场间的区域、堆场后方的主干道区域、以及堆场两侧的通行道路。由于不同方案的布置方式不同, 所能利用的总土地面积略有差别, 因此统一折算到单位面积地面箱位(TEU/公顷)进行比较, 且为显示其直观性, 所有数据转化成与立交方案的比值见图 4, 在同等土地面积条件下, 立交方案可布置的地面箱位数均高于其他 4 种对比方案。

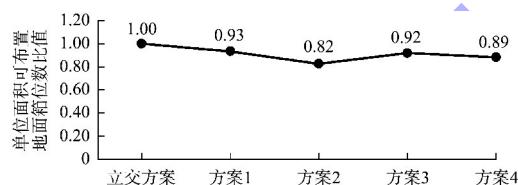


图 4 不同方案的单位面积可布置地面箱位数对比

3.1.2 堆场设备共享性和调度灵活度

立交方案沿岸线方向轨道吊可同轨跨区作业, 过街可自动控制, 安全性高、调度灵活。方案 1 和 2 沿岸线方向轨道吊可同轨跨区作业, 但由于存在外集卡纵向通道过街需人工介入, 存在过街安全隐患, 调度灵活性略低于立交方案; 方案 3 和 4 的轨道吊只能在指定箱区运行, 无法调度至其他箱区作业, 调度灵活性最低。

3.1.3 交通组织

立交方案场内自动化水平运输设备和外集卡分别通过地面道路和高架道路进出堆场完成装卸作业, 通过空间隔离方式避免场内外水平运输设备的平面交叉, 提高了作业过程的安全性。方案 1

场内自动化和场外水平运输设备均通过地面道路进出堆场完成装卸作业, 纵向道路存在交叉干扰, 需额外配置交通灯或道闸实现时间隔离, 因此存在相互等待效率降低的问题。方案 2 和 3 场内自动化水平运输设备和场外水平运输设备均在地面道路进出堆场完成装卸, 通过 P 形通道实现空间隔离, 其中方案 3 堆场垂直于岸线, 相较于方案 2 在海侧有更多的场内自动化水平运输设备进出口点, 不易拥堵。方案 4 通过 I 形和 U 形通道组合, 实现场内自动化水平运输设备和场外水平运输设备的空间隔离, 更适合采用可双向行驶的场内自动化水平运输设备。

3.1.4 投资成本

投资成本分析范围主要是装卸系统方面的投资成本, 包括主要装卸设备、自动化软硬件以及与装卸工艺布局方式密切相关的堆场区域土地的投资成本(如立交式道路系统、堆场地面部分等)。如图 5 所示, 方案 1~4 的装卸系统投资成本相对较低, 分别是立交方案的 0.81、0.80、0.76 和 0.79 倍, 因此立交方案的装卸系统投资成本相对劣势, 根本原因在于立交道路系统的建造成本相对较高。

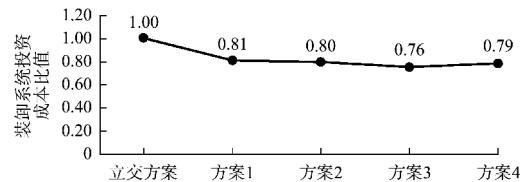


图 5 各方案装卸系统的投资成本对比

3.1.5 堆场设备的拆迁便利性

由于高架桥的环形道路, 立交方案可能对轨道吊的整机卸船安装带来不利影响, 对建设进度的协调组织要求较高, 或考虑采用散件安装方式, 但周期长成本有所增加。其余对比方案对堆场轨道吊的拆迁便利性均较好。

由静态分析得出: 立交方案除具有场地利用率高的优势外, 还具有堆场设备共享性高、调度能力强、场内外水平运输设备容易实现空间互不交叉干扰等优点, 但在投资成本及拆迁便利性方面存在一定劣势。

3.2 动态分析

由于集装箱堆场立交式装卸工艺还未在实际码头中应用，因此通过系统仿真分析方式验证该

方案的合理性及适用性非常重要，仿真试验采用 Smartsim 软件进行，图 6 为立交方案的仿真模型。

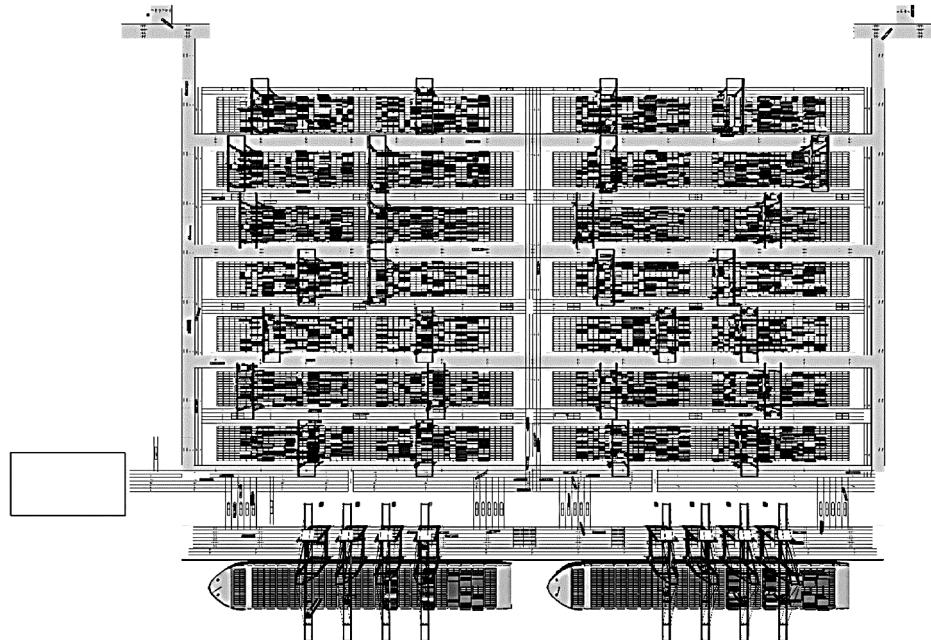


图 6 立交方案新工艺布局仿真模型

3.2.1 系统效率

在岸桥与自动化水平运输设备配比为 1:8 的情况下，立交方案与对比方案 1~4 的仿真结果见图 7。其中立交方案的系统效率作为基准值，方案 1~4 的系统效率分别是立交方案的 0.94、0.80、0.90、0.99 倍，由此可得立交方案的系统效率最优，方案 4 次之。

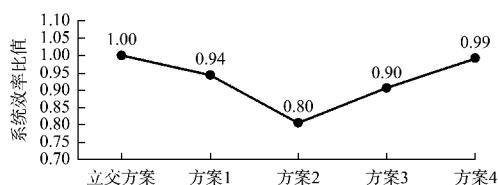


图 7 各方案系统效率对比

3.2.2 交通情况

由于难以直观评价交通组织，因此通过分析水平运输设备堵塞情况以及等待装卸设备进行交互等情况间接表示。各方案的仿真结果见图 8。其中有效利用率指水平运输设备正常行驶时间与岸桥和轨道吊进行交互时间之和在一个循环时间中的占比。有效利用率由大到小排序依次为方案 2、

方案 3、立交方案、方案 4 和方案 1，5 种方案的水平运输设备能力均有一定余量。从堵塞情况分析，立交方案堵塞率最低为 21.2%，因此在满足系统目标效率条件下，立交方案对于改善交通组织有积极的影响。从等待岸桥和等待轨道吊的比例来看，立交方案为 17.6% 高于其余 4 种方案，也说明立交方案的交通组织更优，水平运输设备的周转率更高，从而减少岸桥和轨道吊等待水平运输到位的时间。

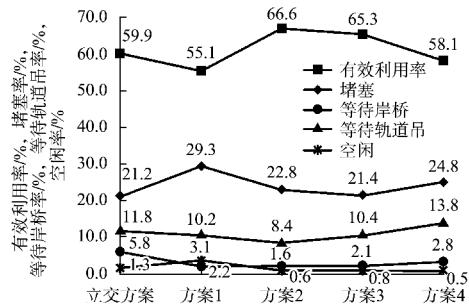


图 8 各方案水平运输设备状态对比

4 结语

- 在土地利用效率方面，立交方案单位面积可布置的地面箱位数最高，其余 4 种方案为立交

方案的 0.82~0.93 倍。

2) 在堆场设备共享性和调度灵活度方面, 立交方案支持轨道吊同轨跨区作业, 且过街可自动控制, 调度灵活性最高。

3) 在交通组织方面, 立交方案通过立交形式空间隔离场内外水平运输设备, 保证作业安全性, 并提升了系统效率, 其余 4 种对比方案的系统效率为立交方案的 0.80~0.99 倍。

4) 在装卸系统投资成本方面, 立交方案略高, 其余 4 种对比方案为立交方案的 0.76~0.81 倍。

5) 在堆场设备的安拆便利性方面, 立交方案由于立交高架桥的限制相较于其余 4 种方案略低。

6) 立交方案在土地利用效率、港口交通组织、堆场设备共享性、调度灵活性、系统效率等方面优势明显。在当前混行模式不成熟的情况下, 为新建集装箱自动化码头以及传统集装箱码头自动化升级改造提供了一种全新思路。待无人驾驶技术成熟后, 亦可作为提升和优化港区交通组织的有效手段。

(上接第 27 页)

- [12] HALIM R, PAPACHRISTOU I, CHEN G Q, et al. The effect of cell disruption on the extraction of oil and protein from concentrated microalgae slurries [J]. Bioresource technology, 2022, 346: 126597.
- [13] ZIEMBOWICZ S, KIDA M, KOSZELNIK P. Reservoir bottom sediments as heterogeneous catalysts for effective degradation of a selected endocrine-disrupting chemical via a Fenton-like process [J]. Journal of water process engineering, 2019, 32: 100950.
- [14] LI B, ZHAO J H, GE W Q, et al. Coagulation-flocculation performance and floc properties for microplastics removal by magnesium hydroxide and PAM [J]. Journal of environmental chemical engineering, 2022, 10(2): 107263.
- [15] WANG H F, QI H Y, DU K, et al. Reinterpretation of the mechanism of coagulation and its effects in waste

参考文献:

- [1] 麦宇雄, 刘洋, 梁浩. 自动化集装箱码头平面与工艺总体布局现状与发展趋势[J]. 水运工程, 2022 (10): 1-7.
- [2] 刘广红, 程泽坤, 林浩, 等. 自动化集装箱码头总体布局模式对比分析[J]. 水运工程, 2016 (9): 14-18.
- [3] 王烽, 麦宇雄, 许鸿贯, 等. 自动化集装箱码头总体技术路线的选择[J]. 水运工程, 2022(10): 8-12.
- [4] 刘洋, 麦宇雄, 覃杰. 适用于江海联运海港自动化集装箱码头的总体布置方案[J]. 水运工程, 2019 (9): 119-124.
- [5] 黄鹭旭. 传统集装箱码头智能化改造平面运输工艺与装备[J]. 中国港口, 2021(11): 60-62.
- [6] 张肇伦, 周鸿茂, 石洁锐, 等. 集装箱码头水平运输设备混行技术方案研究[J]. 珠江水运, 2022(8): 113-115.
- [7] 胡旭程, 邱涛, 张碧波, 等. 传统集装箱码头自动化作业链的研究及实践[J]. 中国水运(下半月), 2022, 22(9): 73-75.
- [8] 汪浩. 夯实智慧港口技术基础锻造一流强港硬核力量[J]. 宁波经济(三江论坛), 2023(1): 10-12.

(本文编辑 赵娟)

activated sludge treatment [J]. Separation and purification technology, 2022, 291: 120958.

- [16] ZHU G C, XIONG N C, WANG C, et al. Application of a new HMW framework derived ANN model for optimization of aquatic dissolved organic matter removal by coagulation [J]. Chemosphere, 2021, 262: 127723. 1-127723. 12.

- [17] 严子春, 陶仁乾. HCA 强化混凝预处理生活污水的效果及机理 [J]. 中国环境科学, 2018, 38 (11): 4114-4119.

- [18] 王瑞彩, 吴腾, 诸裕良, 等. 疏浚泥浆泥水快速分离的复合絮凝试验研究[J]. 水运工程, 2023(3): 35-40, 55.

- [19] 徐伟杰, 王瑞彩, 陶桂兰, 等. 颗粒粒径分布对泥浆絮凝效果的影响[J]. 水电能源科学, 2022, 40(4): 179-182.

(本文编辑 王传瑜)