



煤炭装船码头堆场通过能力优化

吴立新¹, 曹震², 郭家琪², 冯鹏²

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;

2. 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: 针对沿海煤炭出口码头到港煤炭种类和堆存位置多样、堆场作业情况复杂、配煤工艺流程繁杂等对码头堆场布置方案和煤种堆存分布管理带来的巨大挑战, 以黄骅港煤炭码头一期工程为例, 对煤炭码头堆场通过能力进行优化研究。在不改变工艺布置方案的条件下, 通过分析现场实际运营数据、优化流程选择、调整垛位大小和堆存煤种布局, 利用计算机仿真手段对各方案进行测算, 得到最优堆场通过能力方案。结果表明, 在传统装卸工艺方案设计和技术手段无法实现的情况下, 利用仿真手段将运营管理、运营策略等因素融合到方案设计中, 可为煤炭装船码头堆场布置方案提供理论参考和数据支撑, 也为煤炭码头智能化建设提供支持。

关键词: 煤炭装船码头; 堆场布置; 煤种分布; 仿真

中图分类号: U 653.7; U 656.1+33

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0334-07

Optimization of stockyard throughput capacity in coal export terminal

WU Li-xin¹, CAO Zhen², GUO Jia-qi², FENG Peng²

(1.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

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

Abstract: Aiming at the great challenges of the stockyard layout and coal grade distribution management of the coal export terminal, caused by the variety of coal types and stack positions, the complex stockyard operation and coal blending process, We take the first phase project of Huanghua Port as an example, carry out optimization research on the throughput capacity of coal stockyard. Under the condition of the original process plan, we analyze actual operation data, optimization process selection, the stock position size and the coal type adjustment, and use the computer simulation method to calculate each scheme and obtain the optimal scheme of the stockyard throughput capacity. The results show that when the traditional loading and unloading process scheme design and technology implementation difficulties, using simulation method for integrating operation management and strategy to the scheme design can provide theoretical reference and data support for coal export terminal stockyard layout, and also lay the foundation for wisdom of the coal terminal upgrade.

Keywords: coal export terminal; stockyard layout; coal grade distribution; simulation

煤炭装船码头作为海铁联运的枢纽主要提供煤炭堆存、加工及转运等服务。而堆场是煤炭装船码头工艺系统的核心组成部分, 堆场通过能力(是指在一定的堆场区域和生产作业设备条件下, 通过合理的生产组织, 在单位时间内堆场所通过

的货运量)对码头整体装卸工艺系统能力影响较大, 因此提高煤炭装船码头堆场的通过能力对保障码头装船能力具有重要意义。堆场通过能力通常受堆场面积、货物堆存期、货种数量、装卸设备效率、生产组织等因素影响。通过扩建堆场、

增加装卸设备来提高堆场通过能力会大幅提高项目成本。因此, 合理的安排堆场生产组织调度成为目前煤炭装船码头提升通过能力的有效途径之一, 而煤炭装船码头到港煤炭种类和堆存位置的多样性, 导致堆场作业十分复杂多变。本文拟通过优化堆场垛位布置方案和煤种堆存分布减少流程冲突、提高流程平均作业效率, 从而提升堆场通过能力, 进而使码头整体通过能力得到提升。

目前, 关于提升煤炭装船码头堆场通过能力这一问题, 部分学者对垛位分配调度, 取料机调度等方面进行了一定程度的研究。例如, Boland 等^[1]结合贪婪构造、枚举和整数规划, 开发堆场调度技术, 实现港口吞吐量水平的提高。王敏等^[2]研究堆场的入库堆垛问题, 建立约束模型, 对垛位的分配和调用策略进行优化; 彭骏骏^[3]以空间利用最大化为目标, 建立码头堆场垛位分配模型, 并设计算法进行求解; 王煜等^[4]认为煤炭堆存位置的选择可分为分配区域选择、设备与堆场匹配、最优区域选择 3 个阶段; Hu 等^[5]以完工时间最小化为目标, 将堆取料机调度问题表示为混合整数规划模型; Angelelli 等^[6]针对煤炭出口码头堆场取料机工作调度问题, 开发了相关的常数因子近似算法; 黄国梁等^[7]以 Petri 理论为基础, 研究散货码头系统建模方法, 确定散货码头

堆场分配瓶颈, 提出改进策略; 张涛等^[8]建立堆场资源配置模型, 以堆场利用率最大化为目标, 对模型进行优化求解。然而国内外仍然缺乏针对堆场垛位布置和煤种分布的研究。如何在不改变工艺方案的前提下, 在复杂动态的作业系统中得到合理的堆场垛位布置和煤种分布方案是我国煤炭码头建设与管理一直面临的关键难题之一。

本文以黄骅港煤炭码头一期工程为例, 在不改变堆场垛位和工艺布置的情况下, 利用仿真方法对各方案进行评价, 提出调整各个垛位相对大小和堆存煤种的优化方案, 减少装卸工艺流程冲突, 提高堆场设备作业效率, 进而提升堆场通过能力和码头装船能力。

1 工程概况及特点

1.1 工程概况

黄骅港煤炭港区近 3 年煤炭下水量均在 2.0 亿 t 左右, 其已成为我国北方煤炭第一大装船港口。黄骅港煤炭码头共建有四期工程, 目前现有煤炭装船泊位 17 个, 翻车机卸车系统 13 套以及配套建设的 12 条露天料场和 48 座储煤筒仓。其中一期工程设置 6 条露天堆场, 每个堆场又分别划分为 6~10 个容量 1.3 万~3.7 万 t 的垛位。一期工程平面布置见图 1。

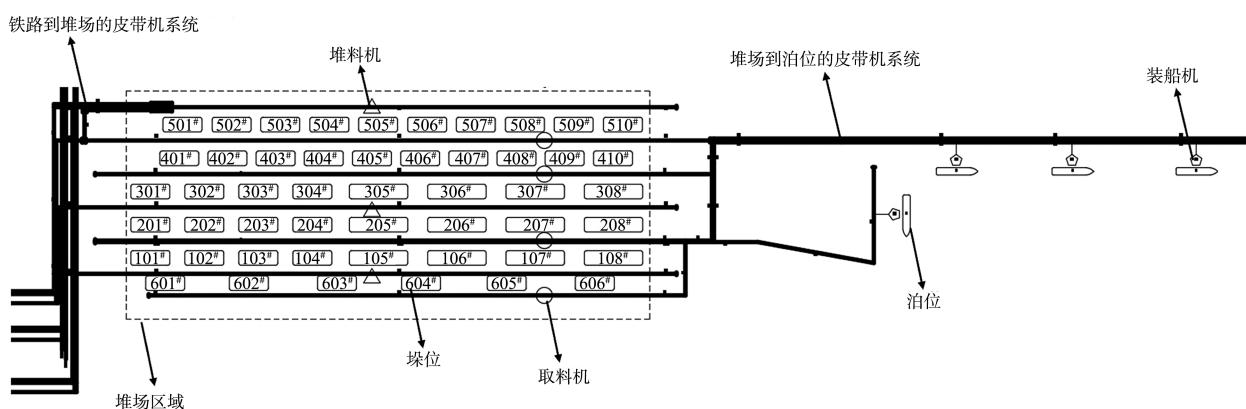


图 1 黄骅港煤炭码头一期工程平面布置

1.2 工程特点

一期工程的 6 条堆场中, 1#~3#堆场各设 8 个

垛位, 分别为 101#~108#、201#~208#、301#~308#垛位; 4#、5#堆场各设 10 个垛位, 分别为 401#~

410[#]、501[#]~510[#] 垛位；6[#] 堆场设 6 个垛位，为 601[#]~606[#] 垛位(其中,501[#] 和 606[#] 垛位闲置)。堆场具体布置，堆(取)料线、装船机轨道和堆(取)

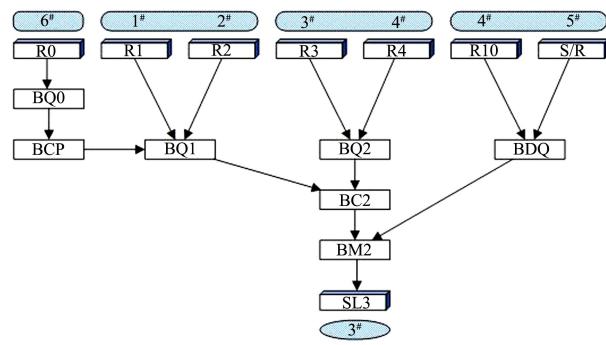
料机工作区域的分布情况见图 1。堆场各个垛位原容量情况见表 1。

表 1 各个垛位大小原始容量

万 t

堆场编号	垛位编号(后两位)									
	01 [#]	02 [#]	03 [#]	04 [#]	05 [#]	06 [#]	07 [#]	08 [#]	09 [#]	10 [#]
5 [#]	0	2.5	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
4 [#]	1.8	1.9	2.0	1.9	1.8	1.9	2.0	1.9	1.9	1.9
3 [#]	2.2	2.2	2.2	2.2	3.7	3.7	3.7	3.7	—	—
2 [#]	2.1	2.1	2.1	2.1	3.6	3.6	3.6	3.6	—	—
1 [#]	2.1	2.1	2.1	2.1	3.7	3.7	3.7	3.7	—	—
6 [#]	1.5	1.5	1.6	1.7	1.8	0	—	—	—	—

以 3[#]泊位对应的堆场作业流程为例，说明该煤炭码头堆场的作业流程特点，见图 2。



注：R 为取料机，SL 为装船机，S/R 为堆/取料机，其余字母代表不同的皮带机。

图 2 3[#]泊位对应的堆场作业流程

结合码头平面布局和 3[#]泊位对应的堆场作业流程可以看出，煤炭从某一垛位到某一泊位的工艺路径相对固定，且必须经过某些位置特殊的皮带机设备，如 BQ1 皮带机。若该流程被占用后，将无法为其他垛位的装船过程提供服务。因此，若垛位大小划分和煤种布局不合理，如垛位划分过小，可能会导致堆场作业切换过于频繁，而垛位划分过大，又会降低堆场作业的灵活性；将常用煤种布置在同一堆场，则将无法满足多泊位同时配煤装船的煤种和数量要求，出现取料装船过

程冲突、频繁切換作业流程等问题。上述问题势必影响堆场作业正常秩序、降低作业效率和堆场通过能力，进而影响码头通过能力。因此，合理划分垛位大小和分配煤种布局就成为堆场管理运营中的重要课题。

由于煤炭码头作业系统结构复杂，涉及设备及流程繁多，采用一般的数学方法难以真实体现其作业过程。而利用仿真方法，按照一定的调度运行规则，模拟系统中的诸多随机因素和作业流程，并统计相关评价指标，可以对不同方案下码头堆场垛位大小和煤种布局的合理性做出分析评价。

2 仿真模型

2.1 模型假设

为便于建模，本文做出以下假设：1) 翻车机、堆料机、皮带机、取料机、装船机等装卸运输设备均为匀速工作；2) 不考虑堆、取料机等移动式装卸设备的移垛时间和设备故障等影响。

2.2 模型框架

首先将黄骅港煤炭码头作业系统分为卸车作业、堆场作业、装船作业 3 个部分，分别建模，然后连接各部分模型，使之合成一个整体作业系统。模型框架见图 3。

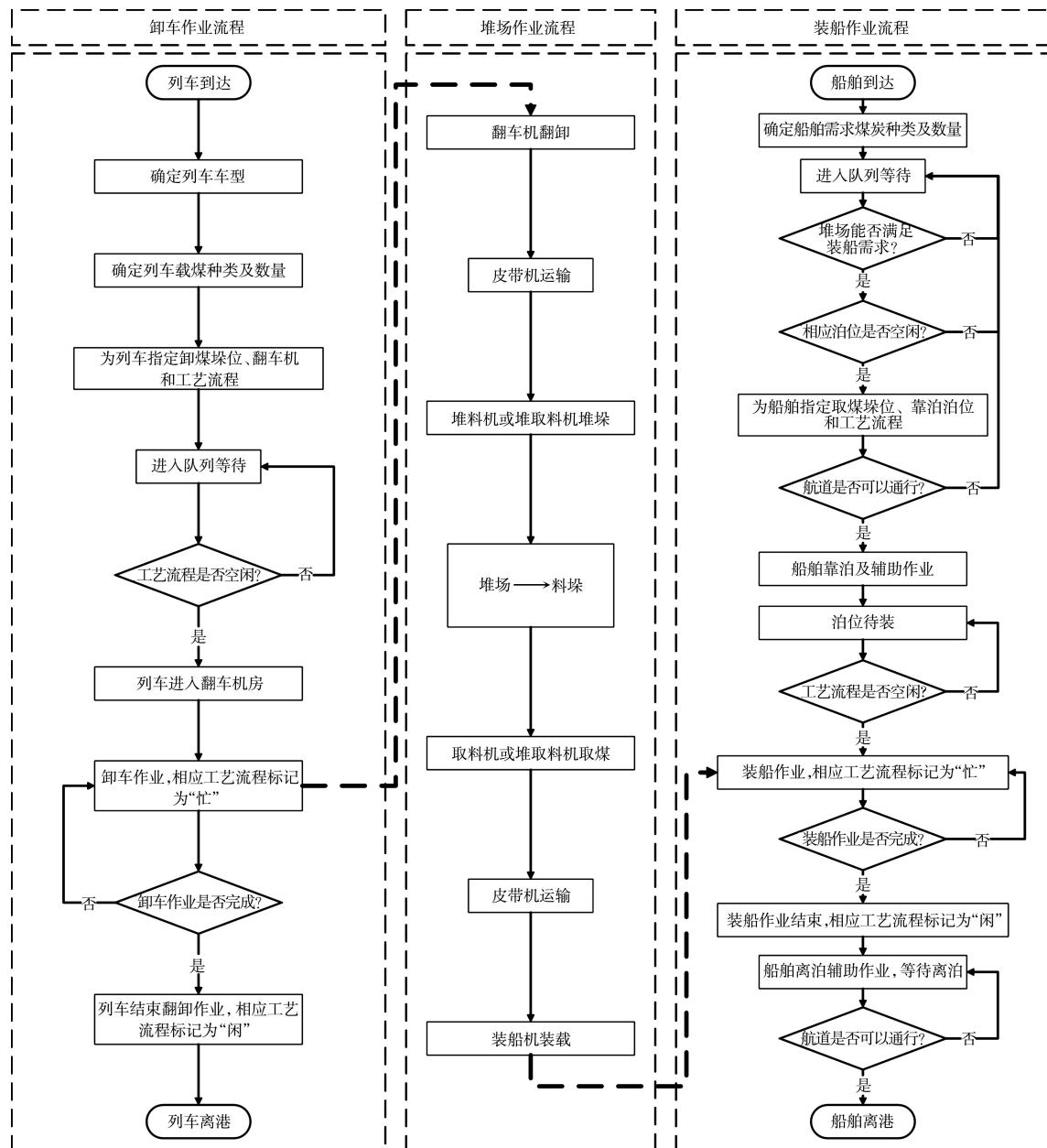


图 3 仿真模型框架

2.2.1 卸车作业流程

该过程以列车为研究对象, 读取列车到港历史数据, 列车到港时间间隔满足概率分布函数, 并按照一定的比例, 将车型、煤种及载煤量等信息赋予列车。待为其分配卸煤垛位、翻车机及工艺流程后, 若流程空闲, 则开始卸车, 同时启动堆场堆垛流程; 若流程被其他作业任务占用, 则列车在队列中继续等待。卸车完成后, 列车离港。

2.2.2 堆场作业流程

该过程以煤炭为对象, 分为堆垛和取煤。在

堆场堆垛流程中, 开始卸车时, 列车中的煤炭将经由分配好的工艺流程(包括翻车机、皮带机、堆料机等)进入相应垛位堆存。在堆场取煤流程中, 装船时, 相应垛位的煤炭将由分配好的工艺流程(包括取料机、皮带机、装船机等)装入相应船舶。

2.2.3 装船作业流程

该过程以船舶为研究对象, 较卸车作业流程更为复杂。船舶以一定时间间隔到港, 并按照一定比例, 将船舶吨级、需求煤种及数量等信息赋予船舶。若堆场堆存煤种可以满足装船需求, 且

相应泊位是空闲状态，则将相应垛位、泊位及连接前两者的作业流程指定给该船。在航道条件满足的情况下，船舶即可进港靠泊；否则船舶继续等待。完成装船前的辅助作业后，若流程空闲，则启动堆场取煤流程，同时开始装船；若流程被其他作业任务占用，则船舶在泊位等待。装船完成，经离泊辅助作业后，若航道条件满足，则船舶离港。

2.3 模型参数

1) 输入参数：车船到港规律，列车车型、载煤种类和数量，船舶吨级、需求煤种和数量，翻车机、皮带机、堆料机、取料机、装船机编号和数量，垛位数量、容量、位置，工艺流程，航道封航时间表等。

2) 输出参数：堆场作业时间、船舶等待时间、船舶在泊停时、垛位利用率等。

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真实验验证

现行方案下的堆场布置模式固定，垛位分配多为小堆离岸远，大堆离岸近。煤种堆存分布没有明显规律，仅保证需求量较大的主流煤种存在多条堆场及垛位中，目的是主流煤种取料装船流程较多，但煤种分布与堆垛大小没有明显的逻辑关系，一些货量较少的煤种被分配到大垛位存储。

输入初始数据，反复运行模型 3 次，验证堆场作业时间、船舶等待时间、船舶在泊停时、垛位利用率等，确定模型的稳定性。现行方案仿真结果见表 2，现行方案 1#堆场各垛位平均利用率见表 3。

表 2 现行方案仿真结果

运行模型	平均堆场作业时间/h	船舶平均等待时间/h	平均船舶在泊停时/h
第 1 次	18.145 4	84.809 9	105.607 4
第 2 次	17.975 6	89.544 2	108.507 8
第 3 次	18.246 1	82.476 5	102.495 6
均值	18.122 4	85.610 2	105.536 9

表 3 现行方案 1#堆场各垛位利用率

垛位	垛位利用率/%	垛位	垛位利用率/%
101 [#]	73.636 1	105 [#]	39.990 5
102 [#]	70.788 2	106 [#]	45.733 3
103 [#]	63.209 2	107 [#]	44.757 2
104 [#]	59.218 9	108 [#]	41.619 9

模型中到港船只遵循与往年数据相似的概率分布函数。在模拟船舶数量较大、模型运行时间较长，且不采用前 30 d 数据的情况下，现行方案仿真的 3 次数据与实际统计数据基本一致，趋于稳定。

3.2 仿真实验设计

3.2.1 垛位大小重新规划

实际运行过程中发现堆场的利用率处于波动状态，平均利用率高于 70% 的小垛位会在某些时段达到 100% 的利用率。当输入堆场煤量激增时，很可能导致小垛位堆满而大垛位剩余空间大的情况发生，进而降低煤炭的转运效率。为了避免该情况出现，适当扩大小垛位的容量，缩小大垛位的容量，即降低大、小垛位之间的堆量差距，使堆场利用率趋于稳定。

优化方案 1 见表 4。降低大垛位和小垛位之间的堆量差距，保留个别垛位原有堆量特点。垛位利用率稳定的垛位不进行调整，波动幅度较大的小垛位进行扩容量，波动幅度较大的大垛位进行缩小容量。

表 4 垛位容量大小重新规划方案

堆场编号	垛位编号(后两位)										万 t
	01 [#]	02 [#]	03 [#]	04 [#]	05 [#]	06 [#]	07 [#]	08 [#]	09 [#]	10 [#]	
5 [#]	0	2.0	2.0	1.7	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	
4 [#]	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	
3 [#]	2.9	2.9	2.9	2.9	3.0	3.2	3.1	2.7	-	-	
2 [#]	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	3.0	2.8	3.0	-	-	
1 [#]	2.9	2.9	2.9	2.9	3.0	3.0	3.1	2.7	-	-	
6 [#]	1.3	1.7	1.7	1.7	1.7	0	-	-	-	-	

3.2.2 煤种分布重新分配

当前港口运营方对不同种类煤炭的堆存位置选择不明确, 常出现需求量大的几类煤种堆存在同一排垛位中, 易导致靠泊的船舶须等待取料机完成之前的工作流程, 而其他取料带的取料机处于闲置状态。这种不合理的煤种堆存分布, 造成堆场的装卸设备资源浪费, 使堆场运行效率降低。

船方对主流煤种的需求量较大, 因此主流煤种所在垛位的利用率较稳定。故将部分主流煤种调往垛位利用率波动较大的垛位处, 预期可稳定垛位利用率, 提高堆场运行效率。

针对几种主流煤种(1#、13#、33#、43#煤种)进行位置重分布, 将它们调往垛位利用率波动较大的垛位处。煤种初始和重新分配方案见表 5。

表 5 煤种初始和重新分配方案

方案	堆场编号	垛位编号(后两位)									
		01#	02#	03#	04#	05#	06#	07#	08#	09#	10#
初始分配	5#	—	1#	8#	—	19#	32#	1#	14#	13#	9#
	4#	33#	26#	32#	13#	21#	16#	9#	1#	44#	—
	3#	24#	32#	33#	19#	1#	1#	13#	14#	—	—
	2#	21#	8#	9#	—	32#	9#	13#	1#	—	—
	1#	26#	9#	25#	14#	19#	1#	13#	1#	—	—
	6#	25#	13#	—	13#	13#	—	—	—	—	—
重新分配 (优化方案 2)	5#	43#	13#	8#	43#	19#	32#	1#	14#	13#	9#
	4#	33#	26#	32#	13#	21#	16#	9#	1#	44#	43#
	3#	24#	32#	33#	19#	1#	1#	13#	14#	—	—
	2#	21#	8#	9#	43#	32#	9#	13#	1#	—	—
	1#	26#	9#	25#	14#	19#	1#	13#	1#	—	—
	6#	25#	13#	43#	1#	13#	—	—	—	—	—

3.2.3 组合方案

将上述两种优化思路结合, 即将堆场垛位大小重新规划和煤种分布重新分配结合起来, 形成组合优化方案 3。

3.3 仿真实验结果与分析

按照优化方案 1~3 运行模型, 得到结果见表 6。

表 6 优化方案的仿真结果

优化方案	运行模型	平均堆场作业时间/h	船舶平均等待时间/h	平均船舶在泊停时/h
1	第 1 次	17.371 4	74.404 4	94.768 2
	第 2 次	17.172 8	77.645 0	97.586 1
	第 3 次	17.413 8	71.514 1	92.075 6
	均值	17.319 3	74.521 2	94.810 0
2	第 1 次	17.971 4	84.751 4	104.591 4
	第 2 次	17.941 8	81.562 3	100.784 5
	第 3 次	18.159 5	90.894 6	107.745 2
	均值	18.024 2	85.736 1	104.373 7
3	第 1 次	17.289 8	70.056 4	90.784 6
	第 2 次	17.562 3	71.489 5	92.018 3
	第 3 次	16.895 6	78.152 3	95.745 1
	均值	17.249 2	73.232 7	92.849 3

由表 6 可看出, 优化方案 1 在合理降低大、小垛位容量差后, 有效降低了堆场作业阻塞概率, 可明显缩短平均堆场作业时间、平均等待时间和平均在港时间; 优化方案 2 在改变主流煤种分布后, 也可小幅降低 3 项时间指标; 优化方案 3 的仿真结果最佳, 吸收了前两种方案的优势, 得到的仿真结果与原始数据相比, 平均堆场作业时间缩短 4.818%, 船舶平均等待时间缩短 14.46%, 船舶总在泊停时缩短 12%。

4 结语

1) 在不改变堆场垛位位置和工艺方案的前提下, 以合理降低大、小垛位之间的堆存量差值改变垛位大小划分, 保留个别垛位原有堆存量, 可以有效降低堆场作业阻塞概率, 缩短平均堆场作业时间、平均等待时间和平均在港时间。

2) 在不改变堆场垛位位置和工艺方案的前提下, 针对主流煤种进行位置重新分布, 将它们调往垛位利用率波动较大的垛位处, 可小幅降低平

均堆场作业时间、平均等待时间和平均在港时间。

3) 在不改变堆场垛位位置和工艺方案的前提下, 垛位大小重新规划和煤种分布重新分配的组合优化方案可有效改善堆场作业秩序, 使平均堆场作业时间缩短 4.818%、船舶平均等待时间缩短 14.46%、平均船舶总在泊停时缩短 12%, 切实提升堆场通过能力, 使煤炭码头整体运行高效。

4) 应用仿真技术来评估煤炭码头堆场通过能力, 弥补了传统堆场布置和煤种分配方案设计的缺陷, 可为煤炭码头智能化建设提供理论依据和技术支撑。

参考文献:

- [1] BOLAND N, GULCZYNSKI D, SAVELSBERGH M. A stockyard planning problem[J]. Euro journal on transportation and logistics, 2012, 1(3) : 197-236.
- [2] 王敏, 李铁克. 求解入库堆垛问题的改进约束满足算

(上接第 333 页)

4 结语

1) 本文构建了集装箱码头及自动化堆场的生产作业系统仿真模型, 在模型中考虑了实际生产中必不可少的设施及设备, 如码头、堆场、闸口、集装箱、船舶、岸桥、场桥、内集卡、外集卡等, 及必不可少的生产环节, 如装卸船作业、水平运输、堆场作业、外集卡进提箱等, 并研究不同箱位分配策略对码头生产的影响。

2) 根据国内外学者的研究成果及实际生产经验, 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, 并提出 3 种箱位分配策略。仿真试验的结果表明, 对于由码头、堆场、闸口组成的复杂系统, 不同箱位分配策略对集装箱码头运行的影响并没有一致的规律。因此研究码头运行相关问题且考虑堆场作业时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。

3) 一般来说, 在码头作业高峰期, 岸桥、集卡没有空闲时间, 而场桥总有一定的空闲。但岸桥和集卡的各种等待状态、场桥的空闲状态, 都

法[J].计算机工程与应用, 2010, 46(1) : 7-10.

- [3] 彭骏骏.煤炭码头堆场垛位分配优化模型研究[J].港口装卸, 2019(4) : 36-40.
- [4] 王煜, 郑惠强, 李强.基于知识工程的煤炭码头堆场分配策略[J].上海海事大学学报, 2012, 33(3) : 26-30.
- [5] HU D Y, YAO Z Q. Stacker-reclaimer scheduling in a dry bulk terminal[J]. International journal of computer integrated manufacturing, 2012, 25(11) : 1047-1058.
- [6] ANGELELLI E, KALINOWSKI T, KAPOOR R, et al. A reclaimer scheduling problem arising in coal stockyard management[J]. Journal of scheduling, 2016, 19(5) : 563-582.
- [7] 黄国梁, 周强.基于 Petri 网的散货码头出口工艺系统建模与仿真[J].港口装卸, 2007(3) : 35-37.
- [8] 张涛, 苗明, 金淳.基于仿真优化的集装箱堆场资源配置研究[J].系统仿真学报, 2007, 19(24) : 5631-5634.

(本文编辑 王璁)

属于没有效率的状态, 这样的状态占比过大, 反映了设备调度的不合理或是配置的设备数量过多, 表明存在进一步优化的可能性。

参考文献:

- [1] 陈超, 台伟力, 杨逸蓝, 等.出口箱随机入港下的箱区选择与箱位分配协调调度[J].上海交通大学学报, 2014, 48(4) : 544-550, 557.
- [2] 毛钧, 李娜, 靳志宏.基于混堆模式的集装箱码头堆场空间资源配置优化[J].大连海事大学学报, 2014, 40(1) : 117-122.
- [3] JIANG X J, CHEW E P, LEE L H, et al. Short-term space allocation for storage yard management in a transshipment hub port[J]. OR spectrum, 2014, 36(4) : 879-901.
- [4] JIN J G, LEE D H, CAO J X. Storage yard management in maritime container terminals[J]. Transportation science, 2016, 50(4) : 1300-1313.
- [5] TAN C M, HE J L. Integrated yard space allocation and yard crane deployment problem in resource-limited container terminals[J]. Scientific programming, 2016(2) : 1-12.

(本文编辑 王璁)