基于动态垛形数据的干散货装船码头作业仿真研究*

毕　磊[1,2]，王　翠[3]，柳海宇[1,2]，刘春泽[1,2]，唐　颖[1,2]

（1. 中交水运规划设计院有限公司，北京 100007；
2. 中交集团综合交通虚拟仿真应用技术研发中心（港口和城市），北京 100007；
3. 中国港湾工程有限责任公司，北京 100027）

摘要：针对传统干散货码头设计依赖经验判断、缺乏系统性量化分析工具，进而导致码头吞吐能力、设备利用率低等问题，构建了一套基于动态垛形数据的离散事件仿真建模框架。该框架以卸车与装船两大核心流程为主线，提出由物理对象、抽象对象和逻辑对象组成的三层对象体系，实现码头要素的精细化建模。核心创新包括：设计基于 B 样条曲面拟合的实时堆场垛形构建算法，依据实时垛形信息动态计算取料作业时间；开发船舶止泊算法，综合评估船舶吨级、泊位水深与堆场可达性；制定“少切换流程”导向的卸车和装船流程选择策略，优先将货物卸入同排垛位以减少设备切换次数。该框架应用于年设计吞吐量 900 万 t 的煤炭码头案例，仿真结果显示：泊位利用率达 54.3%，船舶平均在港时间为 36.37 h，翻车机利用率 31.5%，验证了框架对码头吞吐能力、设备利用率和船舶在港时间的量化评估能力，可为码头规划设计、运营优化和决策支持提供科学依据。

关键词：干散货码头；离散事件仿真；对象建模；调度算法；堆场优化；堆垛动态更新

中图分类号：U69　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0058-08

Simulation research on dry bulk cargo loading terminal operations based on dynamic stockpile shape data

BI Lei[1,2], WANG Cui[3], LIU Haiyu[1,2], LIU Chunze[1,2], TANG Ying[1,2]

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
2. CCCC Comprehensive Transportation Virtual Simulation Application Technology Research and Development Center (Port and City), Beijing 100007, China;
3. China Harbour Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: Aiming at the problems of low terminal throughput and low equipment utilization caused by reliance on experiential judgment and the lack of systematic quantitative analysis tools in traditional dry bulk terminal design, this paper constructs a discrete event simulation modeling framework based on dynamic stockpile shape data. Taking the two core processes of unloading and ship loading as the main line, the framework proposes a three-layer object system consisting of physical objects, abstract objects and logical objects, which realizes the refined modeling of terminal operation elements. Key innovations include: a real-time yard stacking construction algorithm based on B-spline surface fitting that dynamically calculates retrieval operation time according to real-time stacking information. A vessel berthing algorithm is developed to comprehensively evaluate vessel tonnage, berth water depth, and yard accessibility. A process selection strategy oriented to “minimizing process switching”

收稿日期：2025-12-06　　**录用日期：**2026-01-23

***基金项目：**国家重点研发计划项目(2023YFB2603800)

作者简介：毕磊(1987—)，女，博士，高级工程师，从事虚拟仿真技术应用研究工作。

水运工程

is formulated for unloading and loading operations, which preferentially unload cargo into stockpiles in the same row to reduce equipment switching times. The framework is applied to a coal terminal case with an annual design throughput of 9 million tons. The simulation results show that the berth utilization rate reaches 54. 3%, the average vessel turnaround time is 36. 37 hours, and the dumper utilization rate is 31. 5%. The findings verify the framework's capability in quantitatively evaluating terminal throughput, equipment utilization rate and vessel turnaround times, and can provide a scientific basis for terminal planning and design, operational optimization and decision-making support.

Keywords: dry bulk terminal; discrete-event simulation; object modeling; scheduling algorithm; yard optimization; dynamic stockpile update

干散货码头承担煤炭、矿石、粮食等大宗物资的装卸中转功能，是连接铁路、公路与水运的多式联运枢纽。随着全球贸易量持续增长和船舶大型化趋势加剧，码头面临吞吐量需求攀升与作业效率提升的双重压力[1]。传统码头设计主要依赖经验公式与静态测算，难以捕捉作业流程中的动态耦合关系与资源竞争效应。卸车与装船作业通过堆场缓冲区相互制约，设备调度、流程选择和堆场布局的决策相互关联，构成复杂的非线性系统[2]。

仿真技术为解析此类复杂系统提供了有效手段。国外研究起步较早，Wadhwa[3]建立了涵盖船舶进港、靠泊、装船和离泊等过程的散货码头仿真模型；Umang 等[4]研究了以船舶总服务时间最小为目标的动态混合泊位分配问题；Pratap 等[5]构建了考虑卸船时间、堆场拥挤和装车时间的决策支持模型。近年来，研究逐步向智能化方向发展：Li 等[6]提出基于深度强化学习的散货码头装船调度方法；Jiang 等[7]构建了考虑碳排放的散货港口泊位-堆场联合调度优化模型；Cheimanoff 等[8]设计求解泊位分配与堆场分配集成问题的元启发式算法；van Vianen 等[9]基于仿真模型开发了散货码头动态规划器。国内研究方面，鲁子爱[10]将港口生产系统视为随机服务系统建立了仿真模型；胡东波等[11]提出堆场网格化利用规则及仿真优化方法；余艳英等[12]建立了堆场垛位动态变化的仿真模型；朱本飞[13]研究干散货码头系统分合机理及仿真建模方法；范家佳[14]构建了基于网格化的散货堆场模型；禹化强等[15]对多个航道拓宽方案开展港航系统仿真研究；毕磊等[16]、李林等[17]将数字孪生技术引入港口仿真领域。然而，现有研究仍存在三方面不足：1)缺乏统一的对象建模规范，模型复用性差；2)堆场动态形态建模方法简略，难以根据实时垛形信息动态调整取料效率；3)调度算法多为静态规则，未充分考虑流程切换成本与动态调整机制。

综上，本文构建了一套基于动态垛形数据的干散货装船码头离散事件仿真建模框架。主要创新点包括：1)提出物理-抽象-逻辑三层对象体系，实现码头要素的精细化建模与分离；2)设计基于 B 样条曲面拟合的实时堆场垛形构建算法，依据实时垛形信息动态计算取料作业时间；3)开发综合考虑船舶吨级、泊位水深与堆场可达性的船舶指泊算法；4)制定“少切换流程”导向的卸车和装船流程选择策略，优先将货物卸入同排垛位以减少设备切换次数。该框架可为码头规划设计、运营优化和决策支持提供科学依据。

1　三维垛形实时构建及更新方法

1.1　堆场规格定义与数据准备工作

将整个散货堆场按基本单元进行划分和定义，赋予每个基本单元独立、固定的 ID 号，例如将整个堆场划分为 P001、P002、P003 等。堆场基本单元划分方法见图 1，该划分方式便于对堆场进行精细化管理和货位追踪。

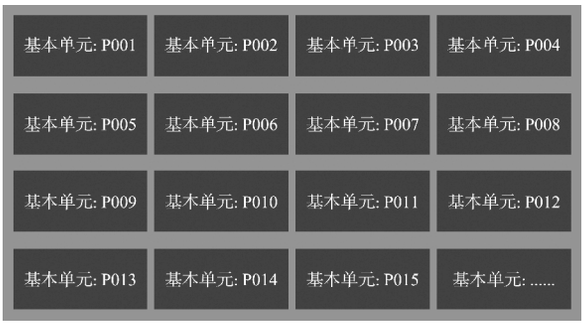

图 1　堆场划分

Fig. 1　Yard division

根据展示精度要求，对堆场基本单元进行网格矩阵划分。网格矩阵的划分精度可根据实际需要调整，通过设置 *X*/*Y* 方向的步长来控制网格密度。网格划分完成后，每个网格节点由 *X*、*Y*、*H* 这 3 个参数定义，其中 *X* 与 *Y* 表示点位的水平位置信息并预先写入系统，*H* 值为点位高度并根据实时扫描数据动态刷新。只需用数组的方式传送刷新 *H* 值即可。*H* 值可通过激光扫描实时获得。如进行精度调整只需更改 *X*/*Y* 步长，更新基础单元预设即可。

每个基本单元相邻点位拟合生成三角网，每个点位根据自身 *H* 值数组进行拉起，拓扑生成三维结构，自动进行法线修正，赋予纹理贴图等动作，形成三维模型文件。模型运行初始需调用获取一份完整的垛形数据，提前构建出整个堆场垛形场景，作为模型运行时堆场情况的边界条件。

1.2　数据刷新机制

当向堆场基本单元堆料时，按照从外侧矩阵网格节点到内侧的顺序一圈一圈堆存，且当点位高度达到邻近 3 个内侧点位高度平均值时，即认为该点位高度达标，可以换下一点位堆料。

当向堆场基本单元取料时，与上述步骤相反，按照从内侧矩阵网格节点到外侧的顺序一圈一圈取料，且当点位高度达到邻近 3 个外侧点位高度平均值时，即认为该点位高度达标，可以换下一点位取料。

同时，取料设备在取料过程中，依据实时垛形信息动态调整取料作业时间，使模型更贴近生产实际。

采用对数据进行预处理的方式，利用先进的影像压缩与模型发布技术，建立基于四叉树原理的金字塔数据，显示过程依据当前显示分辨率的要求以及选取金字塔中对应登记的数据进行显示，从而实现大范围、高分辨率地景数据的三维仿真显示。

1.3　堆垛货物量计算

堆垛货物量计算主要用于判断该垛是否堆满，判断可堆取作业的货量，以及统计分析。

给定一 $(m+1)(n+1)$ 的网格控制点 $P_{i,j}(0\leqslant i\leqslant m,0\leqslant j\leqslant n)$ 的曲面，曲面示意见图 2。该曲面用于描述堆垛表面形态，通过 B 样条拟合可精确计算堆垛体积。曲面表示为：

$$S(u,v)=\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}w_{i,j}P_{i,j}N_i^k(u)N_j^l(v)\Big/\sum_{i=0}^{m}\sum_{j=0}^{n}w_{i,j}N_i^k(u)N_j^l(v) \tag{1}$$

式中：$w_{i,j}$ 为控制点 $P_{i,j}$ 的权因子$(0\leqslant i\leqslant m,0\leqslant j\leqslant n)$，$k$、$l$ 为阶数，$N_i^k(u)(0\leqslant i\leqslant m)$ 和 $N_j^l(v)(0\leqslant j\leqslant n)$ 分别为 u、v 向的节点矢量 $U=\{u_0,\cdots,u_{m+k}\mid u_i\leqslant u_{i+1},i=0,\cdots,(m+k-1)\}$ 和 $V=\{v_0,\cdots,v_{n+l}\mid v_j\leqslant v_{j+1},j=0,\cdots,(n+l-1)\}$ 的 k、l 阶 B 样条基函数，则：

$$N_i^1(u)=\begin{cases}1, & u_i\leqslant u\leqslant u_{i+1}\\ 0, & \text{其他}\end{cases} \tag{2}$$

$$N_i^k(u)=\frac{u-u_i}{u_{i+k-1}-u_i}N_i^{k-1}(u)+\frac{u_{i+k}-u}{u_{i+k}-u_{i+1}}N_{i+1}^{k-1}(u) \tag{3}$$

其中，u 向节点矢量为 $\{u_0,\cdots,u_{i+k-1}\mid u_i\leqslant u_{i+1},i=0,\cdots,(m+k-1)\}$，$S_{i,j}(u,v)$ 表示拟合的曲面段，$u\in[u_i,u_{i+1}]$，$i=(k-1),\cdots,m$，$v\in[v_j,v_{j+1}]$，$j=(l-1),\cdots,n$。

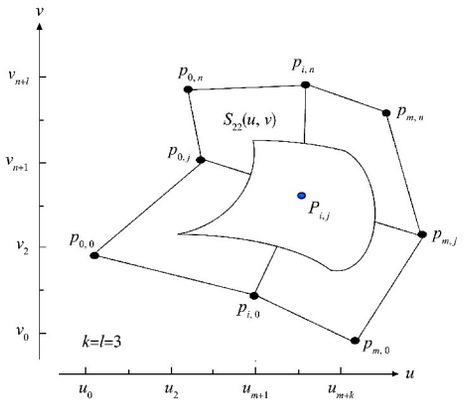

图 2　网格控制点 $P_{i,j}$ 的曲面

Fig. 2　Surface of grid control point $P_{i,j}$

假设该空间曲面 S 在绝对坐标系 xoy 下的投影面为 s，则所围成的空间闭区域 Ω 的体积 V 为：

$$V=\iiint_{\Omega}\mathrm{d}\Omega=\iiint_{\Omega}\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z=\oint_{S}z(x,y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y=\oint_{s'}z(u,v)\,\mathrm{d}u\mathrm{d}v \tag{4}$$

式中：s'为相对坐标系 uov 下的投影平面区域。

根据上述公式可以计算堆垛货物量，用于为卸车和装船流程选择垛位。

2　干散货装船码头作业仿真技术

2.1　流程分析

干散货装船码头的作业流程主要分为卸车作业流程和装船作业流程，堆场作为缓冲区连接两个作业流程。

1）卸车作业流程。卸车作业流程以铁路或公路车辆到港为始点，以货物卸载至堆场为终点，其核心环节包括：车辆到达与排队、卸车设备分配、流程选择与启动、散货传输、堆场堆存、设备释放与车辆离港。该流程的关键在于协调卸车设备、皮带机流程与堆场堆存位置的可达性，避免因流程冲突导致设备闲置或车辆等待。

2）装船作业流程。装船作业流程以船舶到港为始点，以货物装载完毕离泊为终点，其核心环节包括：船舶靠泊、泊位分配、装船机选择、流程选择与启动、堆场取料、多轮装船(含可能的等水作业)、设备释放与船舶离港。与卸车流程不同，装船作业常需分多轮进行，中间可能因等待船舶排水而中断装卸作业，增加了调度的复杂性。该流程需综合考虑船舶吨级、泊位水深、装船机可达性、堆场货位状态等多重约束。

3）堆场缓冲机制。堆场不仅是物理存储空间，更是协调卸车与装船节奏的动态缓冲区。堆场管理需动态追踪各基本单元的货种、货主、堆存量和垛位形态，为卸车计划指定堆存位置，为装船计划提供取料来源。堆场的利用效率直接决定了码头整体通过能力，是连接两大作业流程的枢纽。

2.2　对象设计

干散货装船码头仿真建模框架的搭建分为五部分，分别是火车/汽车生成子系统、船舶生成子系统、卸车子系统、装船子系统和堆场工艺子系统。火车/汽车生成子系统和船舶生成子系统分别作为模型驱动，卸车子系统以卸车调度作业为核心，装船子系统以装船调度作业为核心，通过堆场进行协调配合。仿真模型框架见图 3，该框架清晰地展示了各子系统之间的数据流和控制关系。

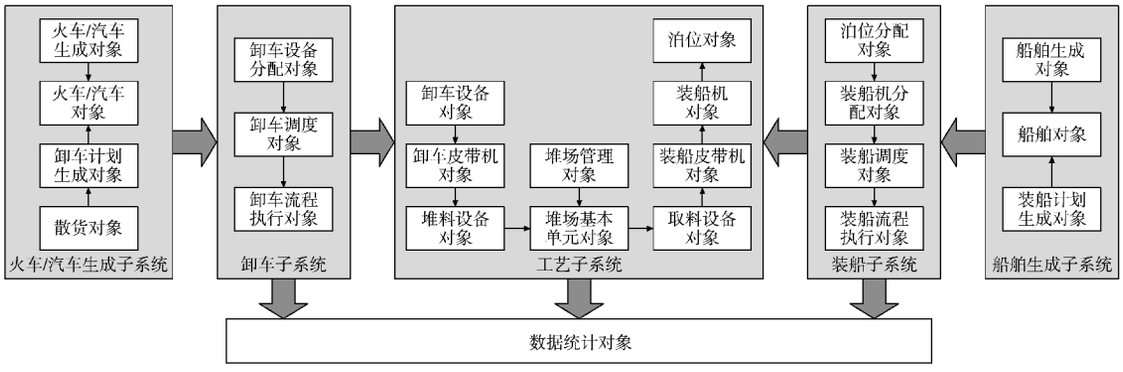

图 3　干散货装船码头的仿真模型框架

Fig. 3　Simulation model framework of dry bulk loading terminal

各子系统由一系列对象组成。根据对象类型分为物理对象、抽象对象和逻辑对象三类。

1）物理对象。物理对象为码头可以看见的实物对象。物理对象根据实物是否可移动又分为固定的物理对象和移动的物理对象两类。固定物理对象主要包括：卸车设备、堆场及其基本单元、卸车皮带机、装船皮带机和泊位等对象。移动物理对象主要包括：火车/汽车、散货、堆取料设备(堆料机、取料机、堆取料机等)、装船机、船舶等对象。

2）抽象对象。抽象对象是码头生产作业中的非实物对象，主要包括票货、装船计划、卸车计划、卸车流程和装船流程等对象。

3）逻辑对象。逻辑对象通过读取物理对象状态，或几个逻辑对象之间通过输入与输出接口进行交互，判断码头各作业环节是否完成，作业流程是否冲突，并控制物理对象执行码头作业流程。逻辑对象主要包括：船舶生成、装船计划生成、泊位分配、装船机分配、装船调度、火车/汽车生成、卸车计划生成、卸车设备分配、卸车调度、流程执行、堆场管理和数据统计等对象。

2.3　模拟关键算法

2.3.1　船舶止泊算法

船舶止泊算法根据船舶吨级、装船计划垛位可达性和泊位空闲状态，为到港船舶分配最优泊位。算法需确保船舶能够安全靠泊，且所需装船的堆场基本单元可通过流程从该泊位到达。具体实现需遍历所有可用泊位，评估其与船舶的匹配度，选择综合成本(如移泊距离、流程切换次数)最小的方案。船舶止泊算法流程见图 4，该算法综合考虑了船舶特性与码头资源配置的匹配性。

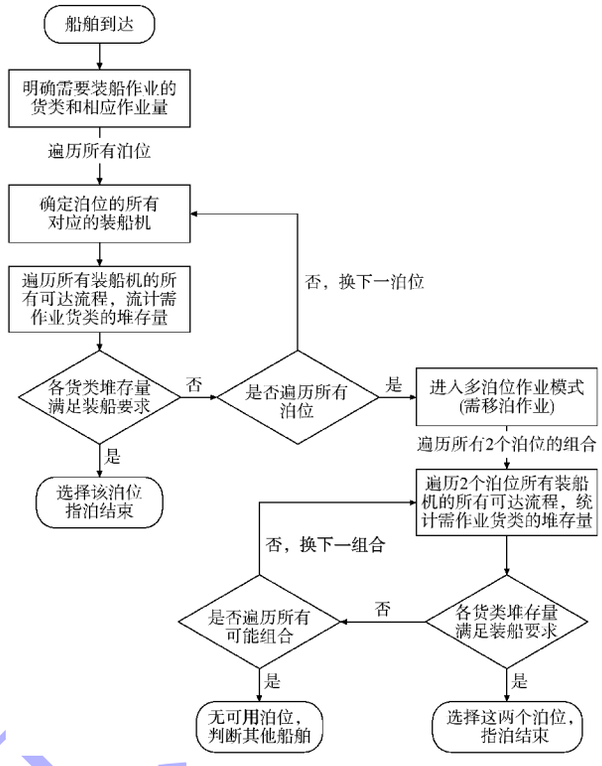

图 4　船舶止泊算法

Fig. 4　Ship berthing algorithm

2.3.2　卸车流程选择算法

基于“少切换流程策略”，一列火车的货物优先卸入位于同一排的堆场基本单元，此时更换堆场基本单元不用切换堆场内的堆料设备，只需设备大机移动。此外，优先将货物卸入即将装满的堆场基本单元，以提高堆场空间利用率。具体流程为：火车到达后，系统首先为其指定空闲翻车机并确定所有可达堆场，随后依次遍历各堆场检查作业设备空闲状态，对设备空闲的堆场统计其可堆存容量，若某堆场容量满足需求则按容量降序排列基本单元完成堆存并结束流程，若均不满足则进入流程切换模式重新遍历堆场，采用贪心策略保留设备空闲的堆场进行部分堆存并更新剩余需求，直至需求满足或所有堆场遍历完毕，最终输出堆场和作业设备选择结果。

2.3.3　装船流程选择算法

首先需要充分利用所有的可选择的、空闲的装船机；然后基于“少切换流程策略”，优先选择装船货物均来自同一排的堆场基本单元，此时更换堆场基本单元不用切换堆场内的取料设备，只需设备大机移动；最后，优先将堆场基本单元卸空。

具体流程为：船舶到达后，系统为其指定所有可用的空闲装船机，依次遍历各装船机确定其流程可达的堆场，并以排为单位遍历各堆场，优先选择作业设备空闲且目标货类堆存量最大的一排堆场，若该排堆场容量满足装船需求，则将各装船机可达的基本单元按堆存量倒序排列并依次取料，完成装船流程选择；若容量不足则继续遍历其他堆场，当该装船机所有堆场均不满足时切换至下一装船机；若所有装船机均无法单独满足需求，则进入流程切换模式，在已选装船机基础上继续选择其他装船机，明确各装船机可达且设备空闲的未计划堆场，以排为单位计算货类堆存量并正序排列，保留装船机和堆场作业设备，累加各装船机容量直至满足剩余装船需求，最终输出装船机、堆场及作业设备选择结果，若遍历完所有装船机仍无法满足需求，则判定无合适流程。

3　案例分析与应用展望

采用通用仿真软件 AnyLogic 实现以上系统仿真框架，并应用于国外某煤炭卸车装船码头的实时仿真。

3.1　设备及堆场信息

该码头是典型的卸车装船的煤炭码头，采用翻车机卸车，装船机装船。现状设计年吞吐能力达 900 万 t，远期吞吐能力达到 1 200 万 t。当前有翻车机 2 台、卸车/进场线 2 条、堆取料机 2 台、堆场 3 条、出场线 1 条、装船机 1 台、泊位 1 个、清车线 3 条。堆场分 3 排，根据货量分 3～4 垛。靠外侧的两排堆场容量不分垛为 9.5 万 t，增加 1 个分垛减少 6 000 t；中间一排堆场较宽，容量不分垛为 26.3 万 t，增加 1 个分垛减少 1.95 万 t。堆场内货种暂考虑 5 种，比例为 4∶2∶2∶1∶1。模型运行中动态更新货量和取料设备运行效率。

3.2　卸车作业参数

确认翻车机以及流程可用后，进行调车准备，时间约 10 min。火车从车场行驶到翻车机房的时间约 20 min。翻车机为单节车皮的翻车时间约 2.4 min。火车清车作业按 1.5 h 考虑。如果为冻煤火车，应先在解冻室内完成解冻，再进入卸车周期。12 月—次年 3 月，当地火车运输的煤炭存在一定冻煤情况。冻煤火车需经解冻室进行解冻作业，并且冻煤在翻车机内还需额外增加碾煤过程。解冻室同时容纳 8 节车皮，根据冻煤程度解冻需 20～30 min，碾煤时间根据冻煤程度需 3～8 min/节。

3.3　装船作业参数

船舶作业分 3 轮，作业量分别为载货量的 50%、45%、5%，作业效率分别为每台装船机 2 700、2 700、1 000 t/h。此外根据船舶吨级的不同，船舶靠泊时间 1～2 h，开工准备时间 0.5～1 h，完工辅助时间 2～3 h，离泊 0.5～1 h。

3.4　冻煤列车到达比例

12 月—次年 3 月，冻煤列车到达比例根据该地区有关统计资料整理得到，并按照不同情况形成两组冻煤列车生成策略：一组为按照多年统计资料的平均数值生成；另一组为按照多年中冻煤程度较厉害、冻煤列车比例较大的最不利年份生成。4 个月产生冻煤列车的比例见表 1。为便于处理，假设到港火车若为冻煤列车，则所有车厢均为冻煤车厢；若该火车没有冻煤车厢，则所有车厢均不是冻煤车厢。

表 1　当地冬季 4 个月冻煤列车产生比例
Tab. 1　Proportion of frozen coal trains in the four winter months

月份	多年平均的冻煤列车比例/%	最不利年份的冻煤列车比例/%
12 月	4.15	3.50
1 月	6.95	16.28
2 月	7.12	15.03
3 月	3.42	0.07

3.5 统计指标

主要统计码头完成吞吐量、船舶平均在泊时间、泊位利用率、翻车机利用率等指标。

3.6 试验设计及主要结论

仿真试验分两组。试验 1：在现状 900 万 t 吞吐量的前提下，通过堆垛实时更新方法动态获取堆垛垛型、货量，作为模型的初始条件，并据此开展仿真推演，模拟码头运行 1 年(年作业天数 350 d)，分析码头现状对吞吐量需求的适应性，以及设施设备配置的合理性。试验 2：模拟冬季 4 个月，此时煤炭月需求量比全年平均值提高 10%，并分别考虑冻煤程度为多年平均的情况以及最不利年份的情况，对码头运行情况进行分析。

在试验 1 条件下，该项目可以完成现状 900 万 t 吞吐量的需求。在完成现状年吞吐量时，泊位利用率(54.3%)偏高；现状 2 条进场线和 1 条出场线共用 2 台堆取料机，卸车和装船流程冲突较为明显，船舶平均在泊时间为 36.37 h；2 台翻车机利用率约 31.5%，属于合理范围之内。

在试验 2 条件下，对于平均冻煤程度，装船机利用率为 44.1%，翻车机利用率为 36.6%，翻车机日均翻车 7.09 列(整列)，堆取料机取料利用率 22.1%，堆料利用率 24.3%，均比较合理；堆场平均利用率和泊位平均利用率均较大，分别为 56.7%和 61.1%。

对于最不利冻煤程度，装船机利用率为 44.2%，翻车机利用率为 38.8%，翻车机日均翻车 7.07 列(整列)，堆取料机取料利用率 22.1%，堆料利用率 25.5%，均比较合理；堆场平均利用率和泊位平均利用率均较大，分别为 55.9%和 61.1%。

与全年运行情况相比，在当地冬季 4 个月期间，装船机、翻车机、堆取料机等设备的利用率和泊位利用率均有一定程度增加，堆场利用率则降低。

基于该框架的干散货码头作业仿真建模技术，可应用于：1)码头规划设计阶段，评估不同工艺布局、设备数量与堆场容量的配置方案；2)运营优化阶段，测试不同堆存策略、调度规则对吞吐效率的影响；3)应急预案制定，模拟设备故障、极端天气等异常场景下的系统韧性；4)人员培训，作为数字孪生基础平台支持操作员仿真训练。

4 结论

1）框架具备对码头运营进行量化评估的能力，能够为码头规划、运营优化、应急预案制定及人员培训等环节提供有力支持与精准评估，在全方位、多层次保障干散货码头稳定、高效、安全运营方面具有较大应用价值。

2）实时垛形数据提升仿真精度。通过 B 样条曲面拟合算法构建三维垛形模型，可依据实时垛形信息动态精准计算取料作业时间，相比传统静态参数方法，能更准确地反映堆场作业的实际效率变化，为码头作业的精细化管理提供了可靠依据。

3）“少切换流程”策略有效降低了设备空转。该策略通过优先将货物卸入同排垛位，减少堆取料设备的切换次数，提高了设备利用效率，为码头降低运营成本、提高作业效率提供了有效助力。

4）框架存在以下不足：船舶指泊算法未充分考虑多船同时到港时的动态调度优化问题；仿真模型尚未与物联网实时数据对接，无法实现虚实交互的在线仿真功能；针对极端天气、设备故障等异常场景的模拟能力有待加强。

5）未来研究及应用可深化方向：①集成机器学习算法，实现基于历史数据的智能调度策略动态优化，进一步提升码头运营的智能化水平；②扩展多货种、多码头的协同仿真能力，满足日益复杂的码头运营需求，促进港口资源的优化配置；③对接物联网与数字孪生技术，构建虚实交互的在线仿真系统，实现对码头运营的实时监控与精准决策，推动干散货码头向数字化、智能化方向转型升级。

参考文献：

[1] BENBRIK O, BENMANSOUR R, RODRIGUES F. A review of bulk terminal operations: Status, trends, and future outlook [J]. Computers & operations research, 2025, 183: 107199.

[2] HU H T, MO J, ZHEN L. Integrated optimization of container allocation and yard cranes dispatched under delayed transshipment [J]. Transportation research part C: emerging technologies, 2024, 158: 104429.

[3] WADHWA L C. Planning operations of bulk loading terminals by simulation [J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 1992, 118(3): 300-315.

[4] UMANG N, BIERLAIRE M, VACCA I. Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports [J]. Transportation research part E: logistics and transportation review, 2013, 54: 14-31.

[5] PRATAP S, DAULTANI Y, TIWARI M K, et al. Rule based optimization for a bulk handling port operations [J]. Journal of intelligent manufacturing, 2018, 29(2): 287-311.

[6] LI C G, WU S R, LI Z, et al. Intelligent scheduling method for bulk cargo terminal loading process based on deep reinforcement learning [J]. Electronics, 2022, 11(9): 1390.

[7] JIANG X, ZHONG M, SHI J H, et al. Optimization of integrated scheduling of restricted channels, berths, and yards in bulk cargo ports considering carbon emissions [J]. Expert systems with applications, 2024, 255: 124604.

[8] CHEIMANOFF N, FÉNIÈS P, KITRI M N, et al. Exact and metaheuristic approaches to solve the integrated production scheduling, berth allocation and storage yard allocation problem [J]. Computers & operations research, 2023, 153: 106174.

[9] VAN VIANEN T A, OTTJES J A, NEGENBORN R R, et al. Simulation-based operational control of a dry bulk terminal [C]//Proceedings of 2012 9th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. New York: IEEE Press, 2012: 73-78.

[10] 鲁子爱, 林民标. 港口服务系统的计算机仿真研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(3): 17-21.
LU Z A, LIN M B. On numerical simulation of port service system [J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 1999, 27(3): 17-21.

[11] 胡东波, 李盼, 张滨滨, 等. 散货码头堆场调度的仿真优化[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(2): 424-433.
HU D B, LI P, ZHANG B B, et al. Simulation and optimization for bulk terminal yard scheduling [J]. Journal of system simulation, 2016, 28(2): 424-433.

[12] 余艳英, 周强. 基于堆场网格化的专业煤炭码头物流系统仿真模型[J]. 水运工程, 2011(8): 52-55.
YU Y Y, ZHOU Q. On professional coal terminal logistics system simulation model based on stacking grids [J]. Port & waterway engineering, 2011 (8): 52-55.

[13] 朱本飞. 干散货码头系统分合机理及仿真建模方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
ZHU B F. Research on system separation and integration mechanism and simulation modeling method of dry bulk terminal [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.

[14] 范家佳. 港口散货堆场堆位智能分配方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
FAN J J. Research on stacks intelligent allocating method of bulk yard in port [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.

[15] 禹化强, 唐颖. 基于仿真技术的黄骅港煤炭港区航道拓宽方案确定[J]. 水运工程, 2021(10): 316-322, 327.
YU H Q, TANG Y. Determination of channel widening scheme in coal port area of Huanghua Port based on simulation technology [J]. Port & waterway engineering, 2021(10): 316-322, 327.

[16] 毕磊, 郭享, 柳海宇, 等. 煤炭港口数字孪生系统构建及应用[J]. 水运工程, 2024(5): 185-192.
BI L, GUO X, LIU H Y, et al. Construction and application of digital twin system for coal ports [J]. Port & waterway engineering, 2024(5): 185-192.

[17] 李林, 张钊, 范垂荣, 等. 干散货码头数字孪生综合管控平台架构与实践[J]. 水运工程, 2024(1): 189-195.
LI L, ZHANG Z, FAN C R, et al. Architecture and practice of digital twin integrated management and control platform for dry bulk terminal [J]. Port & waterway engineering, 2024(1): 189-195.

(本文编辑　赵娟)

水运工程