



# 散装水泥码头装卸系统物流仿真研究\*

吴 姝<sup>1</sup>, 万佳鑫<sup>1</sup>, 田 仲<sup>2</sup>, 屈 挺<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063;

2. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071;

3. 暨南大学, 广东省大湾区及“一带一路”智慧物流国际联合研究中心, 广东 珠海 519070)

**摘要:** 以 A 港区某散装水泥码头物流系统为研究对象, 基于离散事件动态系统理论, 建立实现散装水泥码头物流功能的逻辑模型。针对码头最大装船能力与水平运输能力不匹配的问题, 通过对码头筒仓数量和容量、船舶等待时间、泊位利用率、码头通过能力等的分析, 给出不同策略组合的水泥筒仓选型方案。梳理码头装卸系统中各子系统的逻辑关系, 采用仿真分析技术, 确定建设投资合理的筒仓配置, 从而提高水泥码头的出运能力和水泥厂总体效益。研究成果可为散装水泥码头出运能力优化提供重要依据, 亦可为此类散货码头装卸系统筒仓数量和容量的选取提供参考。

**关键词:** 码头; 筒仓; 散装水泥; 仿真

中图分类号: U 656.1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0210-05

## Logistics simulation of bulk cement terminal handling system

WU Shu<sup>1</sup>, WAN Jia-xin<sup>1</sup>, TIAN Zhong<sup>2</sup>, QU Ting<sup>3</sup>

(1. Wuhan University of Technology, School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan 430063, China;

2. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China;

3. Jinan University, Guangdong Greater Bay Area and “One Belt One Road” Smart Logistics International Joint Research Center, Zhuhai 519070, China)

**Abstract:** Taking the logistic system of a bulk cement terminal in port area A as the research object, a logical model is established based on the discrete event dynamic system theory to realize the logistics function of the bulk cement terminal. The selection scheme of cement silos with different strategy combinations is given to solve the mismatch between the maximum loading capacity of the terminal and the horizontal transportation capacity through analyses of the number and capacity of terminal silos, vessel waiting time, berth utilization, terminal capacity and so forth. Meanwhile, this paper sorts out the relationship of each subsystem. It uses simulation technology to determine silo configurations to improve the shipping capacity of the cement terminal and the overall benefit of the cement plant. The research results can provide an important basis for optimizing terminal shipping capacity and a reference for selecting the number and capacity of silos in the loading and unloading system of such bulk cargo terminals.

**Keywords:** terminal; silo; bulk cement; simulation

水路运输具有成本低、载质量大等优势, 为大型水泥企业的首选运输方式。我国正在快速实施沿海及内河专业散装水泥码头的基础设施建设,

散货码头作为一个复杂系统, 涉及资源管理、设备调度和运筹优化等多个交叉学科领域, 如何针对专业散装水泥码头后方进行堆存设计、提高作

收稿日期: 2022-03-25

\*基金项目: 2019 年度“广东特支计划”本土创新创业团队项目(2019BT02S593); 2018 年度广州市创新领军团队项目(201909010006)

作者简介: 吴姝(1986—), 女, 博士, 副教授, 从事交通与物流管理等方面研究。

业效率、有效利用码头系统中的各种有限资源、高效适应现代港口的服务要求,成为港口工艺设计和码头生产管理亟待解决的问题。

筒仓作为一种封闭式的储存散状物料的设施,结构简单,占地面积较少,并可从源头解决环境污染等问题,在专业散货码头建设过程中具有不可替代的地位。随着筒仓在散货码头的应用越来越成熟,其结构设计和施工工艺方法也在不断革新,呈现出大型化、智能化、复杂化的发展趋势。目前,国内筒仓类型的码头有散装水泥、散粮、煤炭等。针对筒仓堆场码头的研究内容主要集中在生产作业调度、仿真技术和港口工艺设计等方面。李云军<sup>[1]</sup>基于离散事件动态系统理论,针对出口型煤炭码头物流系统进行建模仿真,研究了堆场筒仓数量和容量与码头通过能力的关系。孟亚好等<sup>[2]</sup>根据散粮码头的工程特定运量规模和集疏运形式,提出如何进行筒仓合理选型和优化的具体技术方法。刘力卓等<sup>[3]</sup>基于计算机仿真技术对秦皇岛港煤炭码头筒仓的出仓模型进行仿真研究,提出多种可供比选的方案,优化了作业流程。艾弯等<sup>[4]</sup>针对筒仓煤炭码头装卸系统建立仿真模型,提出一种基于可靠性理论的分析方法,为码头设计阶段提供更精准的可靠性数据。彭兴文<sup>[5]</sup>以温州港灵昆作业港区某码头水泥中转库项目为例,介绍了水泥装卸、工艺布置和工艺流程设计,并对项目的工艺设备选型、装卸工艺、筒仓布置等进行分析。郑世武<sup>[6]</sup>以天津临港某码头水泥中

转库项目为研究背景,分析了如何进行工艺设备选型、装卸工艺设计以及筒仓布置等问题。

目前,国内外关于散装水泥码头的装卸工艺、筒仓数量和容量设计等的研究成果较少,实际的工程应用案例不多,如何确定和优化码头筒仓数量和容量直接影响到码头的出运能力和水泥厂的效益。根据规范中码头装船机能力的计算公式虽可确定出运需求,但运输能力的匹配以及码头筒仓大小的合理确定往往比较困难,尚无一套全面考虑相关因素对系统影响的计算方法。本文通过分析该码头装卸系统中各子系统的逻辑关系,基于离散事件动态系统理论和仿真技术,建立仿真模型,综合考虑船舶等待时间、泊位利用率、建设投资合理性等因素,提出确定筒仓容量和数量的方案策略。

1 码头工艺系统与通过能力分析

1.1 水泥码头工艺系统

某内河港区散装水泥出口码头距离后方水泥厂约 2 km,受到征地条件限制,水平运输只能通过 1 条带式输送机向码头前方供料,由于码头最大装船能力与水平运输能力不匹配,需在码头每个水泥出口泊位后方建设 1 座筒仓,其容量大小会直接影响码头出运能力和工程投资。本文以该项目为背景,对散装水泥装船工艺方案和筒仓建设规模进行匹配分析,通过建模仿真确定码头筒仓数量和最佳容量。

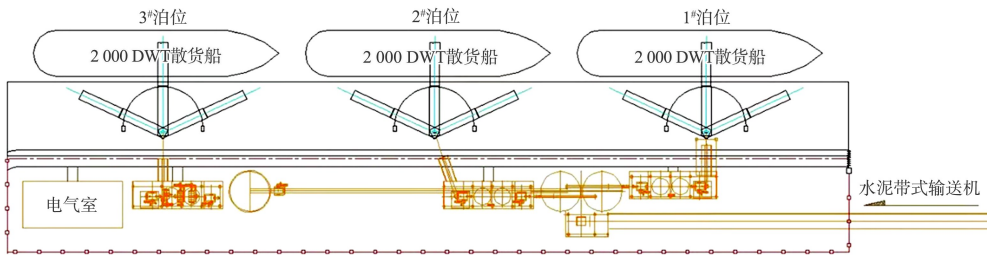


图 1 码头平面工艺

码头规划有 3 个 2 000 吨级水泥出口专用泊位,停靠 1 000~2 000 吨级散货船。根据水泥厂未来产能规划,预计该码头年吞吐量 550 万 t。装卸

工艺流程如下:  
1)带式输送机入仓和存储。后方水泥厂通过 1 条长 2 km 的皮带向前方码头供料,规划布置

3 个水泥筒仓,顶部各设置 1 个布料器以方便散装水泥均匀存储于筒仓内,另外,其顶部还设置布袋式除尘器、料满指示器、料位探孔及入孔等。带式输送机只能同时向 1 个筒仓供料。

2)装船系统。每个筒仓底部安装 1 条运力为 1 200 t/h 的带式输送机,直接送料至装船机后方接料漏斗内,利用漏斗下方设置的空气斜槽,通过伸缩溜筒直接装船。

### 1.2 码头通过能力的影响因素

散装水泥装船机分为机械式和气力式 2 种类型。其结构形式相似,区别在于材料进入船舶货舱的方式不同。机械式通过带式输送机将水泥转移到收集槽中;气力式则是通过输送管道将水泥输送至装船机后,先经过气物分离器,再进入收集槽。本项目后方水泥厂供料系统为带式输送机,结合船型特点,码头前沿采用机械式弧形轨道装船机。

#### 1.2.1 装船机能力确定

根据 JTS 166—2020《河港工程总体设计规范》<sup>[7]</sup>,码头通过能力计算如下:

$$P_t = \frac{T_y G}{t_z + t_f} \cdot \rho \quad (1)$$
$$\frac{t_d - t_s}{t_d - t_s}$$

式中: $P_t$ 为泊位年通过能力(t/a); $T_y$ 为泊位年可营运天数,考虑到风、雨、雾的影响,综合分析取 260 d; $t_z$ 为装卸 1 艘船所需时间(h), $t_z = G/p$ ,其中  $G$  为设计船型实际平均载货量,取 2 000 t, $p$  为设计船时效率,暂取 960 t/h; $t_d$ 为昼夜小时数,取 24 h; $t_s$ 为昼夜非生产时间之和,取 2 h; $t_f$ 为船舶的装卸辅助作业、技术作业时间以及船舶靠离泊时间之和,取 1 h; $\rho$  为泊位利用率,取 60%。

通过计算,单个泊位年设计通过能力为 228 万 t,3 个泊位共计 684 万 t,满足年吞吐量 650 万 t 需求。由以上计算可知船时效率取 960 t/h 可满足设计要求,装船干扰系数取 0.8,每个泊位配备 1 台额定效率为 1 200 t/h 的装船机。

#### 1.2.2 带式输送机选型

考虑环保要求,水平运输带式输送机全程需做封闭廊道,受水泥厂与码头间征地限制,廊道

总宽度限制在 4 m 以内,为保证操作和维修人员通行和操作安全,带式输送机两侧需保留必要的检修通道,一般单侧廊道净宽应 $\geq 0.8$  m,剩余带式输送机本身占用宽度 $\leq 2.4$  m,对应带式输送机带宽 $\leq 1.8$  m。结合散装水泥输送特性,宜取低带速,经综合考虑,输送散装水泥时,水平运输带式输送机选型为带宽 1.8 m、带速 1.6 m/s、最大运力 1 500 t/h。

#### 1.2.3 筒仓选择

目前,我国散装水泥筒仓主要有 2 种类型,一种是钢筋混凝土筒仓,另一种是钢板筒仓。根据形状,钢筋混凝土筒仓又可分为钢筋混凝土垂直筒仓和浅圆仓。其中,立式钢筋混凝土筒仓的直径一般较小,筒体较高,是一种常见的筒仓类型,但其成本相对较高,设计时间和施工周期较长。相反,浅圆仓直径较大,筒体相对较短,成为近年来我国大力发展的一种新型筒仓,具有储存量、成本低、施工周期短、水泥进出仓易机械化操作等特点。因此,本项目考虑选择钢筋混凝土浅圆筒仓。

## 2 码头物流系统分析建模

在散装水泥码头物流装卸仿真系统中,临时实体包含船舶、水泥等,永久实体包含带式输送机、筒仓、装船机等。临时实体的输入或输出会触发一系列的离散事件,并改变码头内部的状态。在船舶到达和离开的事件驱动下,完成整个码头系统的动态进程。Petri 网是一种以图形形式研究系统组织结构和动态特性的方法,因具有层次清晰、描述清楚、直观易懂等优点而被广泛应用。Petri 网通常是一个五元组,PN: (P, T, I, O,  $\mu$ )。库所 P 表示组成物流系统的每一个工作单元、人物或活动的状态;变迁 T 表示改变状态的事件;I 和 O 表示库所到变迁或变迁到库所有向弧上的输入和输出函数; $\mu$  表示工作对象。变迁是网络中的控制点,强迫工作对象通过网络流动,其动态行为是由“条件”和“动作”来描述的。“条件”限制变迁能发生的托肯,只有满足条件的托肯才

能从变迁的输入库所移动出来<sup>[18]</sup>。

2.1 动态模型建立

根据散装水泥码头的作业流程, 基于 Petri 网理论建立码头物流系统顶层动态模型, 见图 2。同理, 可建立该系统中下层各子系统的动态模型, 进而建立起整个系统的仿真模型。表 1 为动态模型库所与变迁的具体含义。

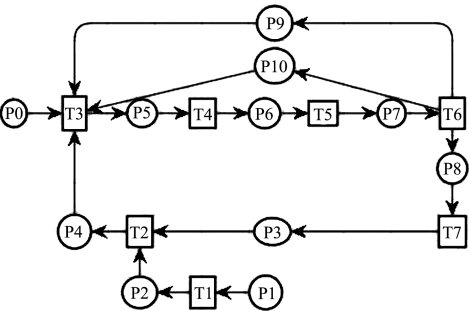


图 2 码头物流系统动态模型

表 1 物流系统模型中库所与变迁的含义

库所	含义	变迁	含义
P1	船舶	T1	船舶到港
P2	在锚等待	T2	船舶靠泊
P3	泊位	T3	堆场对接出场皮带机
P4	等待装船	T4	带式输送机取水泥至筒仓
P5	取料机工作状态	T5	筒仓至装船机
P6	出场皮带工作状态	T6	装船机装船, 出场结束
P7	装船机工作状态	T7	船舶离港
P8	船舶准备离开状态	-	-
P9	装船机	-	-
P10	筒仓	-	-
P0	堆场	-	-

2.2 仿真逻辑模块及元素设计

2.2.1 船舶到港模型

船舶到港子模型主要用于判断到港船只是否进入等待队列、进入码头。基于统计数据, 模型按照一定的分布规律生成船只实体, 同时再用 2 个随机变量设置每个船只所需水泥的类型和吨数。如果泊位有空闲船舶, 则直接进入泊位进行装载工作; 否则进入锚地排队等待。

2.2.2 船舶出港模型

船舶出港子模型主要用于更新泊位占有量和判断筒仓剩余量。首先, 当船舶装载水泥达到船舶所需吨数, 船舶便会离开泊位, 再离开港口。

在船舶离开泊位的同时, 泊位占有量也同步更新, 方便其他船舶进行进港靠泊。在船舶离港的同时, 判断筒仓的剩余量, 如果低于设置数量, 则触发一次装仓任务。

2.2.3 装仓模型

装仓任务触发后, 水泥厂向前方输送相应种类和数量的水泥。如果多个泊位同时装船作业, 则会出现同一时间触发多个装仓任务的现象, 此时以优先触发条件的筒仓进行装仓作业。

2.2.4 装船模型

船舶到达泊位后, 模型根据接收到的所需水泥的种类和数量等参数发布装船任务, 然后装船机向对应筒仓提取目标水泥并输送至船舶, 船舶装满则装船任务结束。

3 仿真试验与数据分析

3.1 参数设计

1) 根据设定的码头吞吐量 650 万 t/a, 按船舶载货量 2 000 t 考虑, 年来船总量应为 3 250 艘次, 结合泊位运营时间求得船舶到达时间间隔为 115 min。船舶按负指数分布 NEGEXP(115,1) 进港。

2) 当水泥种类为 1 时, 设置筒仓单仓容量分别为 4 000、3 000、2 000 t; 当水泥种类为 2 时, 筒仓 1、2 同时负责第 1 种类型水泥, 筒仓 3 负责第 2 种类型水泥, 设置筒仓单仓容量分别为 6 000、4 000、3 000 t。

3) 3 个泊位共有 3 条作业线, 每条装船线装船能力为 960 t/h。

4) 后方水泥厂通过 1 条带式输送机以 1 500 t/h 的运输能力向 3 条进仓线输送水泥, 1 条进仓线独立连接 1 个筒仓。

5) 码头泊位日作业时间约为 20 h, 水平输送线日作业时间约为 22 h。

6) 完成初始化设置。在初始化设置中, 筒仓为水泥装满的状态。

3.2 仿真结果分析

仿真的时间设置为 1 a, 共提供 3 种仿真试验



方案。通过改变单仓容量，仿真得到船舶平均在港时间和筒仓内水泥的平均堆存量。为减少误差，每个试验方案运行 10 次，得到仿真数据输出结果，见表 2。仿真运行主界面见图 3。

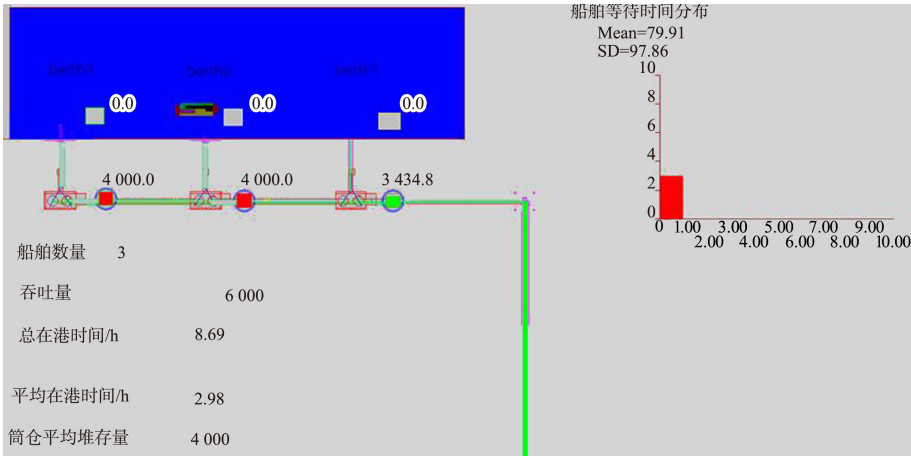


图 3 仿真运行主界面

表 2 水泥种类各工况仿真试验数据

水泥种类	单仓容量/t	年船舶数量/艘	年吞吐量/万 t	船舶在港时间/min		筒仓平均堆存量/t	
				平均值	最大值	最大值	平均值
1	2 000	3 320	664.0	268	372	2 000	968
	3 000	3 320	664.0	193	230	3 000	2 631
	4 000	3 320	664.0	183	219	4 000	3 309
2	3 000	3 320	664.0	202	229	3 000	2 963
	4 000	3 320	664.0	197	210	4 000	3 272
	6 000	3 320	664.0	185	210	6 000	3 166

从表 2 的试验数据可以看出，在 1 种水泥的情况下，3 种筒仓均可满足预定吞吐量，但单仓容量为 2 000 t 时船舶产生拥堵现象，船舶的平均在港时间明显较高，严重影响装船效率。在单仓容量设置为 3 000、4 000 t 的情况下，筒仓平均堆存量比较小，物流顺畅，且船舶在港时间均在可接受范围内。但单仓容量为 4 000 t 时，堆存量相对较高，即该条件虽能完成通航能力，但增加存储成本。当水泥种类为 2 种时，3 种筒仓均可满足预定吞吐量，且物流顺畅，考虑到前期投资和后期存储成本，3 000 t 单仓容量更为合适。仿真试验在相同的外界条件和相同的设备装卸条件下进行，根据仿真试验结果可知：在由堆场堆存量决定水泥厂输送量的物流方案中，单个容量为 3 000 t 的 3 个筒仓可满足年吞吐量需要，且船舶等待时间合适。因此，在水泥厂与船舶之间的物流运输系统基本稳定的前提下，同时采用高效率的堆场策略，

码头设计 3 个单仓容量为 3 000 t 的水泥筒仓即可满足整个码头的生产作业要求。

4 结语

1)通过码头通过能力的计算，验证了选择额定效率 1 200 t/h 装船机的合理性。综合考虑征地和水泥特性等因素，确定了输送散装水泥合适的带式输送机选型为带宽 1.8 m、带速 1.6 m/s、最大运力 1 500 t/h。

2)通过模拟不同策略下码头的实际操作情况，根据仿真结果，对筒仓的最优容量进行分析和判断，并给出筒仓的选型建议。根据仿真实验结果，3 个方案的装卸工艺流程、通过能力等均能满足生产作业要求，但是考虑工程投资和运营成本，经综合比较，单仓容量为 3 000 t 的筒仓为推荐最优方案。