



多泊位少线程内河煤炭码头通过能力 及其影响因素分析

刘庆志¹, 袁盛良¹, 胡格汝²

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200;

2. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430010)

摘要: 针对新工艺下的煤炭码头合理通过能力评估问题, 结合内河煤炭码头规划建设工程, 深入分析多泊位少线程煤炭码头的生产作业过程及生产能力影响因素, 应用系统仿真技术建立该装卸工艺的煤炭码头物流系统模型, 对顺岸式布置的煤炭码头通过能力与装船效率、船舶辅助作业时间、船舶移泊时间之间的关系进行试验研究。结果表明, 多泊位少线程装船作业模式能够满足码头 1 400 万 t 吞吐量需求, 船舶到达密度与年吞吐量的关系最为密切, 而到港辅助作业时间和移泊时间对港口服务水平和装船机利用率有较大影响。

关键词: 煤炭码头; 通过能力; 仿真模型

中图分类号: U 656. 1+25

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0191-06

Throughput capacity of inland coal terminals with multiple berths and few threads and influencing factors

LIU Qing-zhi¹, YUAN Sheng-liang¹, HU Ge-ru²

(1. Hunan Province Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China;

2. Wuhan University of Technology, Wuhan 430010, China)

Abstract: Regarding the evaluation of the reasonable throughput capacity of coal terminals adopting the new technology, this paper analyzes in depth the production operation process of coal terminals with multiple berths and few threads and the factors influencing their production capacity by investigating the planning and construction of an inland coal terminal project. Then, it employs the system simulation technology to build a logistics system model for the coal terminal adopting the loading and unloading technology and experimentally examines the relationships of the throughput capacity of the coal terminal arranged along the shore with the loading efficiency, the auxiliary operation time of the ships, and the berth shifting time of the ships. The results show that the multiple berths and few threads loading operation mode can meet the 14-million-t throughput demand of the terminal. Moreover, the ship arrival density is most closely related to the annual throughput, and the post-arrival auxiliary operation time and the berth shifting time have a large impact on the service level of the port and the utilization rate of the ship loaders.

Keywords: coal terminal; throughput capacity; simulation model

煤炭码头通过能力是影响港口竞争力水平的重要因素, 也是决定煤炭码头物流系统运作效率

的关键所在。作为码头规划、评价码头管理运作系统效率的重要参考指标, 煤炭码头的通过能力

会受到装卸设备配置、皮带生产线数量、堆场容量与工艺、泊位数量、到港船型和船舶到达的不确定性等复杂、随机因素影响。随着码头现代化发展和港口机械制造及管理水平的不断提高，高效机械设备种类不断增多，设备技术参数和性能显著提高，为了节约占地面积、提高设备利用率，泊位数量和设备配置之间会形成新的组合模式，使得多个泊位共享机械作业线成为可能，形成了独特的多泊位少线程干散货码头构型。但是这种码头的构型设计缺少相应的科学依据和行业规范^[1]，无法找到该码头工艺布置通过能力所适用的计算公式。

本文以岳阳华容煤炭储配基地配套码头一期工程(简称“华容煤炭码头”)为例，重点剖析多泊位少线程平面布置下的装卸工艺特点，并运用仿真技术进行离散事件建模，分析在该工艺布置下装船效率、船舶辅助作业时间、船舶移泊时间对码头年吞吐量的影响，从而优化装卸系统配置，提高装卸设备作业效率和码头通过能力。研究成果可为干散货码头物流系统规划设计提供决策支撑依据。

1 工程特点

华容煤炭码头是长江中游的电煤储存中心、出口装船码头，预测年煤炭出口量为 1 400 万 t，码头作业全部为装船作业。一期工程规划建成后将有 3 个陆域煤筒仓、2 条取料线以及配套码头前沿采用顺岸式布置的 4 个 3 000 吨级泊位(港工结构兼顾 5 000 吨级)，共配备 2 台移动式装船机，每台移动式装船机服务于 2 个泊位，整机可沿前沿轨道行走，在服务的 2 个泊位之间进行水平移机，具有很强的灵活性。每条取料线对应 1 台装船机，为 2 个泊位提供煤炭，华容煤炭码头平面布置见图 1。本文的研究目的是分析该工程的码头通过能力，判断该工程的装卸工艺系统能否完成年煤炭出口量 1 400 万 t 的需求。

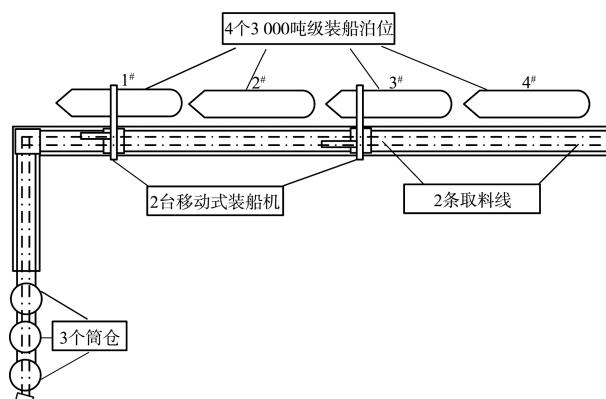


图 1 码头平面布置

2 多泊位少线程作业模式存在的问题及解决方法

如今大多数煤炭码头采用装船机与泊位一一对应或者一个泊位由多台装船机合作完成作业的工艺布置，该模式投资需求大、成本较高，在出口淡季多数装船机易处于空闲状态，设备利用率大幅降低。而多泊位少线程布置可以弥补这些缺陷，且装船机在同一时刻只服务于 1 条船舶，此时另一个泊位上的船舶可充分利用时间差进行靠离泊作业，从而节省时间，提高了装船系统的作业效率。多泊位少线程布置在应用于工程实际时，存在容错率低等问题，设备故障一旦发生，极易造成码头堵塞，影响正常运转，且配泊对于装船机的协调移动至关重要，应进行必要的模拟仿真为码头规划设计提供技术支撑，煤炭码头装卸系统模拟试验有以下特点：1) 模拟试验的码头环境与实际环境接近，可以实现边界条件下的码头作业环境模拟，获得各工况下吞吐量数据。2) 可体现系统参数受随机因素影响时所产生的变化，具有很强的鲁棒性。3) 根据模型运行结果，对系统进行针对性调整，及时修正实施方案，有利于系统优化。

3 多泊位少线程作业模式分析

该码头装卸工艺流程可以简化为：陆域煤筒仓→皮带机系统→转接站→皮带机系统→移动式装船机→船。装船作业过程以船舶为研究对象^[2]，

船舶以一定时间间隔到港, 并产生船型、所需煤炭数量等固定属性。有空闲泊位船舶即可进港靠泊, 否则就在锚地继续等待; 停靠船舶完成辅助作业后, 若装船机空闲, 则开始装船作业, 否则船舶在泊位等待; 装船完成离泊辅助作业后, 即可离港。移动式装船机装船作业流程见图 2。

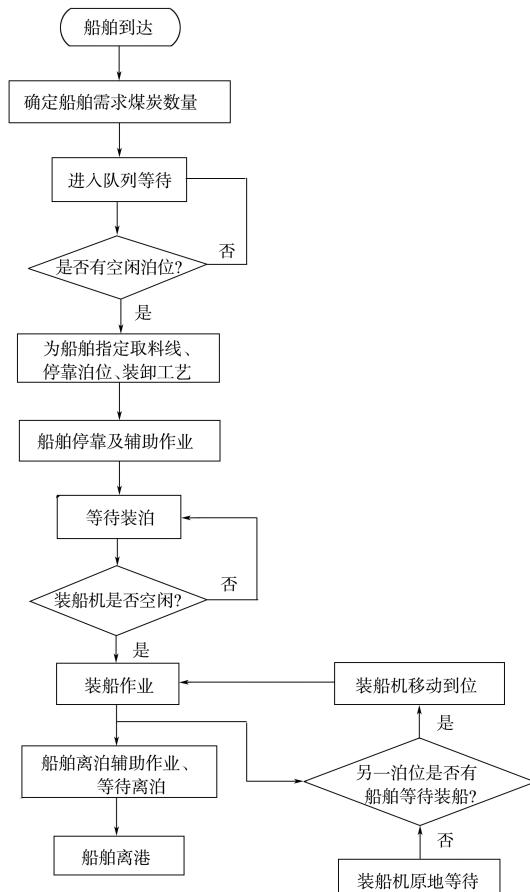


图 2 装船作业流程

装船机 1 通过水平移动为泊位 1 与 2 提供装船服务, 始终由 1 条取料线供应煤炭。船舶 1、2 依次靠泊, 分别对应停靠在泊位 1 与 2。作业过程为: 1) 船舶 1 与 2 依次靠泊, 假设船舶 1 先完成靠泊辅助作业, 装船机 1 为船舶 1 服务, 开始装船作业; 船舶 2 完成靠泊辅助作业后在泊位等待。2) 船舶 1 装船完成后, 装船机 1 沿着前沿轨道正向移动至船舶 2 的装舱口, 船舶 2 开始装船作业; 同时, 船舶 1 开始离泊辅助作业, 完成后船舶离港。此时, 新分配至泊位 1 的船舶开始靠泊。3) 船舶 2 完成装船作业后, 若泊位 1 上有新船舶

靠泊, 则装船机 1 沿着前沿轨道反向移动为新船舶提供装船服务; 否则装船机 1 就在原地等待。同时, 船舶 2 开始进行离泊辅助作业, 完成后船舶离港。

相比于传统的作业模式, 多泊位少线程作业模式可以有效降低设备成本, 提高皮带机、装船机等设备的利用率。与传统的露天堆场相比, 使用筒仓堆存煤炭可减少对港口大气环境的污染。装船机沿着前沿轨道移动, 可以实现船舱的全覆盖, 不需要船舶移档。

4 仿真模型与试验方案

4.1 模型假设

为便于建模, 本文做出以下假设: 1) 陆域筒仓供料不受限制, 与装船效率相匹配。2) 装船机、皮带机等设备均为匀速工作。3) 不考虑装船机、皮带机等设备故障和天气原因引起的作业中断情况。

4.2 主要设计参数

仿真模型是基于华容煤炭码头工程方案设计图纸建立的, 主要参数为: 4 个出口泊位配置 2 条移动式装船机作业线, 单线出场装船额定效率能力 2 400 t/h。筒仓与码头前沿之间水平运输采用带式输送机输送, 皮带机带速 4.0 m/s。仿真时间为 1 a, 考虑剔除不能作业的暴风、暴雨、暴雪等天气, 计全年作业时间 330 d, 共 47.52 万 min。

4.3 模型模块组成

华容煤炭码头仿真模型主要是由 4 个模块组成^[3]: 1) 计划管理模块。处理船舶计划, 根据船舶到达时间安排船舶进港, 包括产生船舶的固定属性等。2) 筒仓取料模块。根据所到船舶的固定属性, 生成对应的取料计划。3) 泊位装船模块。船舶到港后在锚地等待。当计划管理模块判断有空闲泊位后, 安排船舶进行靠泊作业, 并按照筒仓取料计划安排装船机执行装船作业。4) 参数统计模块。统计装船机利用率、全年总吞吐量、各时段吞吐量、船舶在泊时间、船舶装船时间等,

并以直方图、饼图等形式显示出来。

各模块间都存在着内部作用，相互协调，并时刻进行信息交换，从而保证整个模型的正常运行。

4.4 仿真的服务模式

在港口系统的实际作业过程中，船舶进港、船舶靠泊、船舶装船等活动都需要遵循一定的规则，这些规则共同组成了华容煤炭码头系统的服务模式。根据码头实际情况分析，该模型主要服务模式设计如下^[4]：1)任何泊位在同一时刻只服务于1条船舶。2)船舶到港后，若所有泊位都被占用，船舶须在锚地排队等待，队长没有限制。3)船舶靠泊时，有相适应的泊位处于空闲状态，船舶必须按照先到先服务的原则接受合适泊位的服务。4)船舶装船时，同一时刻1台装船机只能服务于1条船舶，每条船舶的装船作业都是一次性完成。5)船舶属性在进港时就规定好，且在后续作业过程中不再改变。

4.5 港口服务水平评价指标

本文引入港口服务水平指标 AWT/AST 研究煤炭码头的合理通过能力^[5]，其中 AWT 为船舶的平均等待时间，AST 为船舶平均在泊作业时间。AWT/AST 的值越高，说明船舶相对等待时间就越长，更倾向于牺牲船方的利益提高码头通过能力；AWT/AST 的值越低，说明对船舶服务水平越高，但同时会牺牲码头的部分泊位资源和装卸能力。一般认为，AWT/AST 的值处于 0.1~0.5 时，双方

利益都能合理接受，当 AWT/AST 达到 0.5 时，船方和港方都能达到利益最大化。

4.6 仿真程序的实现

华容煤炭码头的仿真模型通过 WITNESS 编程实现，仿真运行界面见图 3。

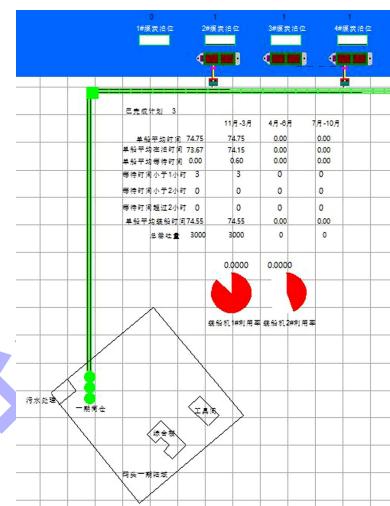


图 3 仿真运行界面

4.7 模拟试验工况

4.7.1 码头通过能力研究

模拟试验工况设计结合华容煤炭码头作业特点，分别以装船效率因子、到港辅助作业时间、移泊时间为因变量，获取模拟环境下全年吞吐量、装卸设备利用率等相关技术参数。

该试验主要采用表 1 的 3 种船型进行试验，共 27 种试验工况，见表 2。装船机移泊时间正向取 5 min/次，反向取 6 min/次；船舶辅助作业时间服从截断正态分布 $TNormal(40, 30, 50)$ 。

表 1 到达船型情况

船舶吨级	时段	数量比例
1 000~3 000	11月一次年3月	1 000 与 2 000 吨级船舶比例为 1:1
	4—10月	2 000 与 3 000 吨级船舶比例为 1:1
1 000~5 000	11月一次年3月	1 000 与 2 000 吨级船舶比例为 1:1
	4—6月	2 000 与 3 000 吨级船舶比例为 1:1
1 000	7—10月	2 000, 3 000, 4 000, 5 000 吨级船舶比例为 3:3:2:2
	全年	-

表 2 码头通过能力试验方案

船舶吨级	装船效率因子	到港时间间隔/min	试验序号
1 000~3 000	0.8	50, 85	1
		40, 70	2
		30, 55	3
	0.9	50, 85	4
		40, 70	5
		30, 55	6
	1.0	50, 85	7
		40, 70	8
		30, 55	9
1 000~5 000	0.8	50, 85, 110	1
		40, 70, 95	2
		30, 55, 80	3
	0.9	50, 85, 110	4
		40, 70, 95	5
		30, 55, 80	6
	1.0	50, 85, 110	7
		40, 70, 95	8
		30, 55, 80	9
1 000	0.8	30	1
		25	2
		20	3
	0.9	30	4
		25	5
		20	6
	1.0	30	7
		25	8
		20	9

注: (50, 85, 110) 代表 11 月一次年 3 月、4—6 月、7—10 月船舶平均到港时间间隔分别为 50、85、110 min。

4.7.2 到港辅助作业时间对通过能力影响研究

到港辅助作业时间是指靠离泊、检查、系解缆等辅助作业环节, 一般与船型、装载量、码头布置等有关。试验选取 1 000~3 000 吨级船型; 装船机移泊时间正向取 5 min/次, 反向取 6 min/次; 装船效率因子取 0.9。共 6 种试验方案, 见表 3。

表 3 到港辅助作业时间试验方案

辅助作业时间/min	平均到港时间间隔/min	试验序号
TNormal(30, 20, 40)		1
TNormal(40, 30, 50)	40, 70	2
TNormal(50, 40, 60)		3
TNormal(30, 20, 40)		4
TNormal(40, 30, 50)	30, 55	5
TNormal(30, 20, 40)		6

注: (40, 70) 为正常作业间隔, (30, 55) 为高峰作业间隔。

4.7.3 移泊时间对通过能力的影响研究

试验选取 1 000~3 000 吨级船型; 船舶辅助作业时间服从截断正态分布 TNormal(40, 30, 50)。大机移动最大速度为 25 m/min, 装船效率因子取 0.9, 综合考虑装船机停机开机等实际工作情况, 该项研究共 6 种试验方案, 见表 4。

表 4 移泊时间试验方案

移泊时间/min	平均到港时间间隔/min	试验序号
5, 11		1
10, 22	40, 70	2
15, 33		3
5, 11		4
10, 22	30, 55	5
15, 33		6

注: (5, 11) 代表移泊时间正向 5 min/次、反向 11 min/次。

5 试验过程与数据分析

5.1 码头通过能力分析

数值分析显示各组试验运行的总吞吐量见图 4。可以看出, 各组试验方案皆可满足 1 400 万 t 吞吐量的目标; 装船效率的提高对码头吞吐量的影响不大; 当装船效率一定时, 船舶到港时间间隔越短吞吐量越大。港口服务水平和装船机利用率见表 5。可以看出, 平均到港时间间隔较长时, 到港船舶较少, 等待时间较短, 提升装船效率后装船机利用率有所下降; 当来船密度增加时, 提升装船效率能大大减少船舶等待时间。当各方案的服务水平越接近 0.5 时就越合理, 但从仿真数据可以看出, 此时装船机利用率均在 80% 以上, 这说明装卸系统的平稳运行十分依赖于所有装船机的正常工作, 如果设备出现突发故障的话可能会造成航道拥堵及码头作业紊乱的现象。

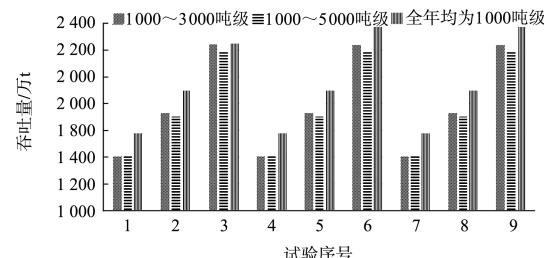


图 4 总吞吐量

表 5 港口服务水平与装船机利用率

试验序号	1 000~3 000 吨级		1 000~5 000 吨级		1 000 吨级	
	服务水平	装船机利用率/%	服务水平	装船机利用率/%	服务水平	装船机利用率/%
1	0.05	67.1	0.05	66.3	0.19	86.1
2	0.14	78.0	0.13	75.8	0.55	93.9
3	1.66	91.7	1.66	89.1	144.60	99.9
4	0.03	63.2	0.03	62.3	0.13	83.3
5	0.09	73.7	0.08	71.4	0.33	91.0
6	0.48	86.8	0.47	84.2	3.65	99.1
7	0.03	60.2	0.02	59.2	0.10	81.0
8	0.06	70.2	0.06	67.9	0.23	88.8
9	0.26	82.9	0.26	80.2	1.02	97.0

5.2 到港辅助作业时间对通过能力的影响分析

到港辅助作业时间对于吞吐量的影响见图 5。可以看出, 到港辅助作业时间对于吞吐量的影响不大, 这是由于到港密度没有达到码头峰值, 在一定时间内都能完成相对应的吞吐量。港口服务水平指标见图 6。可以看出在正常作业下, 港口服务水平都处于合理范围, 但到港辅助作业平均时间为 50 min 时装船机利用率高于 75%; 高峰作业下, 港口服务水平处于中等水平, 设备利用率超过了 80%, 码头作业压力大, 到港辅助作业时间应控制在 50 min 以下。

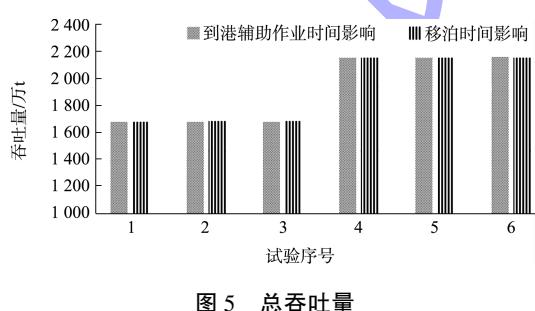
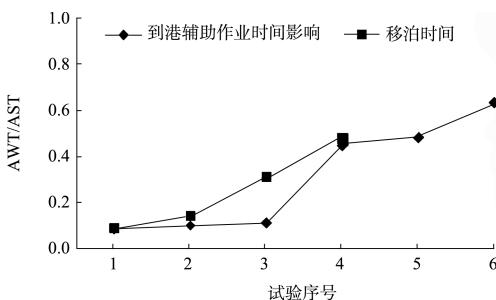


图 5 总吞吐量



注: 移泊时间试验 5、6 的 AWT/AST 值为 7.51、82.75, 为异常值。

图 6 港口服务水平指标

5.3 移泊时间对通过能力的影响分析

根据图 5 的吞吐量水平来看, 移泊时间对于

吞吐量的影响不大, 这是由于移泊时间相较于装船时间较短, 在长时间仿真下对于累计装船量的影响较小。由图 6 可知, 试验 5、6 整体服务水平出现异常值, 不符合实际运营情况, 反映出如果在高峰作业时移泊时间较长, 可能会导致航道拥堵, 码头作业紊乱的现象。船型较小时需要移泊的次数相比于装大型船更多一些, 因此如果到港船舶的船型较小时, 对于移泊作业的要求更高。

6 结语

1) 当为 1 000~3 000 吨级、1 000~5 000 吨级以及全年均为 1 000 吨级船舶时, 码头配置基本可以完成 1 400 万 t 的年吞吐量; 仅为 1 000 吨级小船到港时, 设备处于相对繁忙的状态。与年吞吐量关系最为密切的是船舶到达密度, 到港辅助作业时间和移泊时间更多影响的是港口服务水平和装船机利用率。

2) 本文详细分析多泊位少线程平面布置下的新型装卸作业模式特点与作业流程, 基于离散型事件动态系统, 应用计算机仿真技术评估码头通过能力, 弥补利用规范公式计算通过能力所存在的缺陷。

3) 该新型装卸工艺具有合理应用性, 节约资金投入、节省占地面积, 可为煤炭码头物流系统规划与设计提供理论研究和技术支撑, 具有深远的工程意义。

(下转第 214 页)