



# 集装箱码头年通过能力仿真及其评价指标

张清波, 梁燕

(上海振华重工(集团)股份有限公司, 上海 200125)

**摘要:** 在集装箱码头规划阶段, 通常会根据公式计算码头年通过能力设计值, 由于船舶到港时间、到港船舶尺寸、载重吨位、装卸箱量等均具有不稳定性和不平衡性, 导致码头设计通过能力和实际通过能力相差较大。针对该问题进行集装箱码头年通过能力评估研究, 以某集装箱码头为例, 通过计算机仿真软件 FlexSim 建立集装箱码头装卸系统宏观仿真模型, 综合考虑泊位年通过能力和堆场堆存能力对集装箱码头年通过能力的影响, 给出集装箱码头年通过能力仿真评价指标, 通过分析码头的仿真数据, 得到该集装箱码头的年通过能力评估值为 260 万 TEU。集装箱码头年通过能力的合理评估可以更好地为码头管理决策提供科学依据, 有利于提高码头服务水平。

**关键词:** 集装箱码头; 年通过能力; 仿真; 评价指标

中图分类号: U656.1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0147-06

## Simulation and evaluation indexes of annual throughput capacity of container terminal

ZHANG Qingbo, LIANG Yan

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

**Abstract:** In a container terminal planning stage, a design value of annual throughput capacity usually can be got according to the formula to calculate. Design and the actual gap of throughput capacity is large, due to the instability and imbalance of the time, the size, the deadweight, the loading and unloading volume of vessels to the port and so on. Taking a container terminal as an example, a handling system macro simulation model of container terminal is established by using computer simulation software FlexSim. Considering the influence of berthing annual capacity and yard storage capacity for the annual throughput capacity of a whole container terminal, its evaluation indexes are displayed. Based on the analysis of the simulation data of the terminal, the evaluation value of annual throughput capacity of the container terminal is 2.6 million TEU. The reasonable assessment of container terminal's annual capacity can provide a scientific basis for terminal management decision-making and improve the service level of the terminal.

**Keywords:** container terminal; annual throughput capacity; simulation; evaluation indexes

随着经济贸易全球化的深入推進, 集装箱运输产业稳步发展, 全球集装箱码头竞争日趋激烈。泊位新建及改扩建是提高码头通过能力和港口服务水平的重要手段, 对集装箱码头年通过能力进行合理评估是编制港口规划、衡量港口管理水平、决定是否投资建设新泊位的重要依据。张煜等<sup>[1]</sup>考虑船舶的组合约束, 通过计算机仿真计算了泊位年通过能力; 刘剑等<sup>[2]</sup>指出装箱码头泊位实际年通过能力远大于设计通过能力的原因; 李艳阳

等<sup>[3]</sup>以实际运营码头为例, 将决定泊位通过能力的各个环节分为若干因素, 通过计算机仿真得出各因素对泊位通过能力影响的权重; 唐国磊等<sup>[4]</sup>研究了航道尺度对集装箱码头泊位有效利用率的影响; 刘玉姣等<sup>[5]</sup>以实际集装箱码头为例, 仿真分析了岸桥增加前后的泊位通过能力变化情况。

以上关于集装箱码头年通过能力的研究均采用了计算机仿真技术, 但是并未说明仿真统计数据的分析过程, 仅聚焦泊位而忽视了堆场堆存能

收稿日期: 2023-07-20

作者简介: 张清波 (1990—), 女, 硕士, 工程师, 从事码头系统仿真工作。

力对集装箱码头年通过能力的影响。本文以天津某集装箱码头为例,通过计算机仿真对集装箱码头装卸系统进行宏观仿真建模,综合考虑泊位年通过能力和堆场堆存能力对整个集装箱码头年通过能力的影响,列出仿真评价指标,为仿真决策提供科学依据。

## 1 宏观仿真建模

### 1.1 宏观仿真模型搭建

集装箱码头装卸系统是一个复杂的离散事件动态系统,采用计算机仿真分析这种复杂系统最佳方法,对码头通过能力进行仿真研究时,宜建立宏观仿真模型,简化岸桥作业、堆场作业、水平运输设备作业和闸口作业的细节过程,重点考虑船舶靠泊和岸桥调度策略,模拟船舶靠泊与岸桥装卸作业,并兼顾不同属性集装箱在堆场的堆存期,模拟集装箱在堆场的数量变化。集装箱码头装卸系统宏观仿真流程如图1所示。

仿真模型通过计算机仿真软件 FlexSim 进行搭建,仿真运行界面如图 2 所示。搭建的模型主要包含 6 大模块:1) 船舶计划模块按照船舶到达周计划生成船舶,具有船舶吨级、到港时间、装卸箱量、要求作业时间等属性;2) 航道管理模块制定船舶进出航道规则,模拟天气、水文等对船舶进出航道的影响;3) 岸线分配模块采用柔性靠

泊,动态分配岸线资源;4) 岸桥调度模块根据船舶要求的完工时间对岸桥进行动态调度;5) 堆场模块根据集装箱堆存期和装卸船作业在堆场中生成或消除集装箱;6) 数据统计模块对泊位利用率、船舶平均等待时间、船舶平均在泊时间、船舶作业时间等指标进行数据统计。

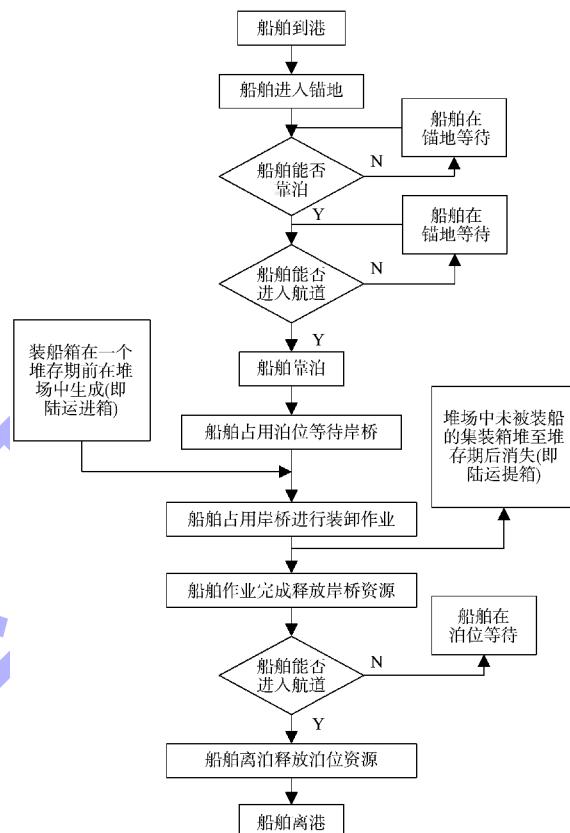


图 1 集装箱码头装卸系统宏观仿真流程

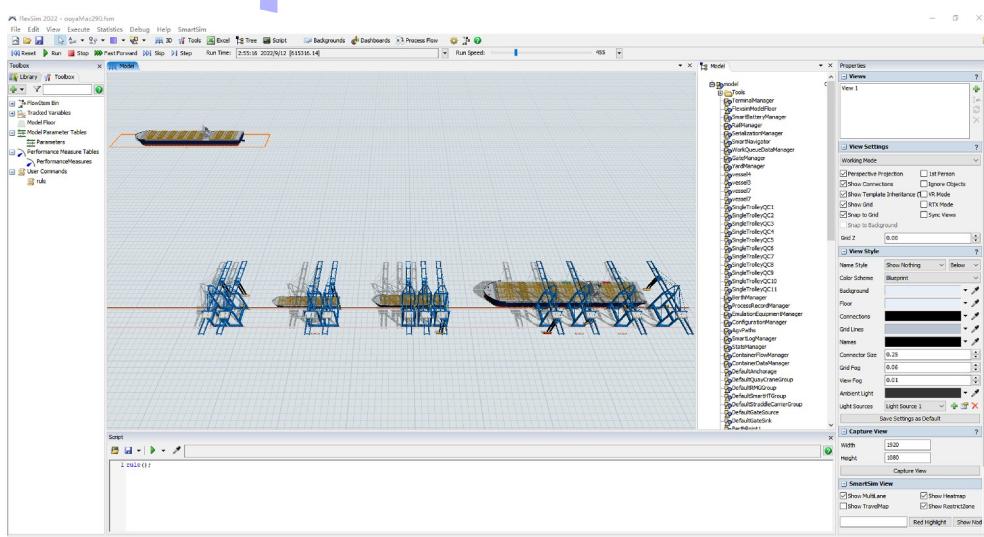


图 2 集装箱码头宏观仿真运行界面

## 1.2 仿真参数输入

泊位仿真建模参数主要包括3个方面, 分别是泊位、堆场及船舶相关参数。以天津某集装箱

码头为例进行年通过能力仿真建模, 码头参数输入见表1~3。

表1 泊位相关参数

设计通过能力/ (万TEU·a <sup>-1</sup> )	岸线 长度/m	泊位 数量/个	泊位实际年 营运天数/d	集装箱标准 箱折算系数	昼夜装卸 作业时间/h	集装箱装卸桥 设计配备台数/台	水水中转 比例/%	进出口 比例/%	卸船箱 比例/%	装船箱 比例/%
170	1 100	4	349	1.37	24	11	17.5	82.5	51	49

表2 堆场相关参数

集装箱类型	比例/%	堆存天数/d	堆高层数/层	地面箱位数/个
普通重箱	50.08	3.38	4	8 292
空箱	48.70	4.00	5	2 129
冷藏箱	0.98	7.00	4	492
超限箱	0.24	15.00	1	204

表3 船舶相关参数

船舶吨级/ 吨级	载箱量/ TEU	船长/ m	船型 比例/%	累计船型 比例/%	装卸箱量/ TEU	要求作业 时间/h	岸桥实效率/ (自然箱·h <sup>-1</sup> )	最大可作业 岸桥数/个
5 000	700	121	22.5	100.0	1 100	19.8	30	2
1万	1 050	141	20.0	77.5	1 500	19.8	30	3
2万	1 900	183	37.5	57.5	2 900	21.5	30	4
3万	3 500	241	7.5	20.0	3 300	25.3	30	6
5万	5 650	293	9.5	12.5	3 500	25.3	30	6
15万	15 500	367	3.0	3.0	11 000	52.8	30	10

## 1.3 仿真试验

根据码头计划年吞吐量设置仿真试验, 基于船型比例信息, 通过改变船舶到达周计划实现码头年吞吐量的变化。在天津某集装箱码头仿真试验中, 设计码头年吞吐量分别为210万、240万、260万、280万、290万TEU。

以码头计划年吞吐量210万TEU为例, 该码头的船舶到达周计划见表4。船舶采用柔性靠泊, 先到先服务, 同一艘船进行装卸船作业时按照先卸后装的顺序进行。另外, 该宏观仿真模型的仿真时间为1 a。

表4 码头船舶到达周计划

船舶吨级/吨级	周一	周二	周三	周四	周五	周六	周日	周总计	船型比例/%	单船装卸箱量/TEU	周总箱量/TEU
5 000	-	2	-	2	-	-	1	5	31.3	803	4 015
1万	2	-	-	-	-	-	1	3	18.8	1 095	3 285
2万	-	1	2	1	1	-	-	5	31.3	2 117	10 585
3万	-	-	-	-	1	-	-	1	6.3	2 409	2 409
5万	1	-	-	-	-	-	-	1	6.3	2 555	2 555
15万	-	-	-	-	1	-	-	1	6.3	8 030	8 030

## 2 集装箱码头年通过能力评价指标

### 2.1 船舶待时占其泊位停时的比例

1) 定义。船舶平均等待时间(average wait time, AWT)占其平均在泊停留时间(average stay time, AST)的比例 $A$ 。

2) 评价准则。JTS 165-4—2011《海港集装箱码头设计规范》中指出: 在沿海港口集装箱码头中, 3个以上泊位连续布置的大型(5万吨级以上)集装箱码头服务水平指标宜为 $0.1 \leq A \leq 0.3$ ; 2个以下泊位组成的小型集装箱码头服务水平指标宜

取  $0.4 \leq A \leq 0.5$ 。

3) 案例分析。天津某集装箱码头不同年吞吐量下的船舶待时占其泊位停时的比例如图 3 所示。当码头年吞吐量为 210 万~280 万 TEU 时,  $A$  均介于  $[0.1, 0.3]$ ; 当码头年吞吐量为 290 万 TEU 时,  $A$  值超过了 0.3, 不满足码头服务水平指标要求。

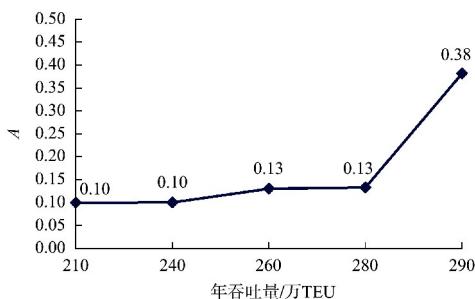


图 3 不同年吞吐量下的船舶待时占其泊位停时的比例

## 2.2 泊位有效利用率

1) 定义。船舶停靠泊位的时间占泊位仿真时间的比重。

2) 计算公式。

$$U_b = \frac{\sum_{i=1}^Q L_i T_i}{L_b T_{sum}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $U_b$  为泊位有效利用率;  $Q$  为船舶数量;  $L_i$  为第  $i$  条船的长度(包含船舶安全间隔距离);  $L_b$  为泊位总长度;  $T_i$  为第  $i$  条船的在泊时间;  $T_{sum}$  为仿真总时间。

3) 评价准则: 集装箱码头泊位有效利用率取值可参照表 5(取自 JTS 165-4—2011《海港集装箱码头设计规范》)。

表 5 集装箱码头泊位有效利用率

泊位数	泊位有效利用率									
	$A=5\%$	$A=10\%$	$A=15\%$	$A=20\%$	$A=25\%$	$A=30\%$	$A=35\%$	$A=40\%$	$A=45\%$	$A=50\%$
1	0.070	0.131	0.184	0.231	0.273	0.311	0.345	0.375	0.403	0.429
2	0.265	0.362	0.429	0.481	0.523	0.558	0.587	0.613	0.635	0.655
3	0.395	0.493	0.556	0.603	0.639	0.669	0.694	0.715	0.733	0.749
4	0.481	0.575	0.633	0.675	0.707	0.733	0.755	0.773	0.788	0.801
5	0.543	0.632	0.686	0.724	0.752	0.775	0.794	0.810	0.823	0.835
6	0.590	0.674	0.727	0.758	0.785	0.805	0.822	0.836	0.848	0.859
7	0.627	0.706	0.752	0.785	0.809	0.828	0.843	0.856	0.866	0.875
8	0.657	0.732	0.775	0.805	0.828	0.845	0.859	0.871	0.880	0.889
9	0.681	0.753	0.794	0.822	0.843	0.859	0.872	0.883	0.892	0.900
10	0.702	0.770	0.810	0.836	0.856	0.871	0.883	0.893	0.901	0.908

4) 案例分析。天津某集装箱码头不同年吞吐量下的泊位有效利用率如图 4 所示, 泊位有效利用率随年吞吐量的增大而增大。该集装箱码头有 4 个泊位, 若集装箱码头服务水平指标满足  $0.1 \leq A \leq 0.3$ , 则由表 5 可知, 该码头的泊位有效利用率不宜超过 73.3%。

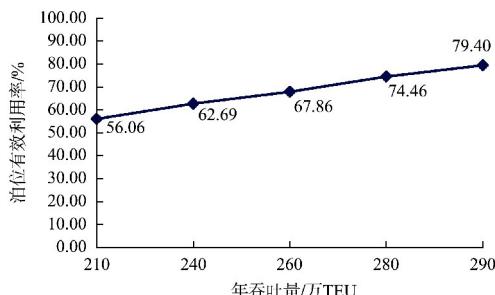


图 4 不同年吞吐量下的泊位有效利用率

## 2.3 船舶在锚地的等待时间

1) 定义。船舶停留在锚地的时间。

2) 评价准则。船舶在锚地的等待时间  $> 8$  h 的概率不宜超过 10%。

3) 案例分析。天津某集装箱码头不同年吞吐量下的船舶在锚地的等待时间如图 5 所示。当码头年吞吐量不超过 240 万 TEU 时, 船舶在锚地的等待时间一般不会超过 8 h; 当码头年吞吐量不超过 280 万 TEU 时, 船舶在锚地等待时间超过 8 h 的概率小于 10%; 当码头年吞吐量达到 290 万 TEU 时, 船舶在锚地等待时间  $> 8$  h 的概率超过 10%。

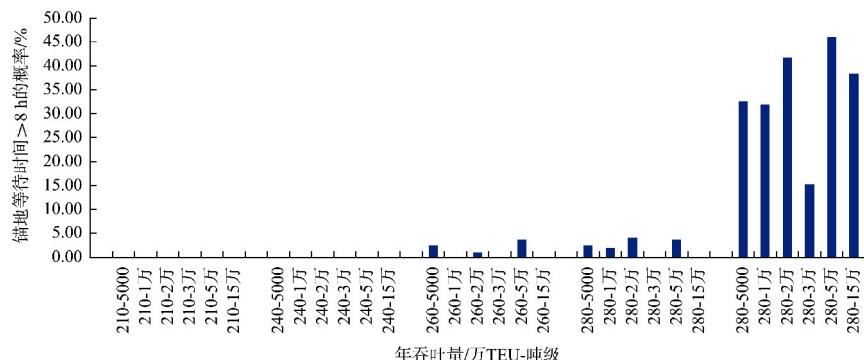


图 5 码头船舶在锚地等待时间超过 8 h 的概率

## 2.4 船舶作业时间

- 1) 定义。船舶靠泊后的装卸作业时间。
- 2) 评价准则。船舶作业时间不宜超过船公司要求的船舶作业时间。
- 3) 案例分析。天津某集装箱码头各船型在不

同年吞吐量下的船舶作业时间如表 6 所示。当码头年吞吐量为 210 万~260 万 TEU 时, 6 种船型的船舶作业时间均满足要求; 当码头年吞吐量为 280 万~290 万 TEU 时, 有 2 种及以上船型的船舶作业时间超过了要求的时间。

表 6 天津某集装箱码头各船型在不同年吞吐量下的船舶作业时间

船舶吨级/吨级	船公司要求	作业时间/h				
		210 万 TEU	240 万 TEU	260 万 TEU	280 万 TEU	290 万 TEU
5 000	19.8	19.8	19.8	19.8	22.8	21.8
1 万	19.8	19.7	19.6	19.6	19.7	19.9
2 万	21.5	20.9	21.5	21.5	22.4	23.0
3 万	25.3	25.2	25.3	25.2	25.2	29.8
5 万	25.3	25.1	25.1	25.2	25.2	25.3
15 万	52.8	52.7	52.7	52.6	52.6	53.7

## 2.5 堆场容量利用率

- 1) 定义。堆场被占用箱位数占总箱位数的比率。
- 2) 计算公式

4) 案例分析: 天津某集装箱码头不同年吞吐量下的泊位有效利用率如图 6 所示。当码头吞吐量为 210 万~290 万 TEU 时, 堆场平均利用率为 44%~61%, 堆场最大利用率为 49%~67%。该集装箱码头堆场设备采用 RTG, 由表 7 可知, RTG 堆场的堆场容量利用率为 55%~70%。当码头年吞吐量为 210 万~290 万 TEU 时, 堆场容量利用率均没有超过 70%。

$$U_y = \frac{Q_{\text{use}}}{Q} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $U_y$  为堆场容量利用率;  $Q_{use}$  为堆场被占用的箱位数;  $Q_{sum}$  为堆场总箱位数。

3) 评价准则。集装箱码头堆场容量利用率取值可参照表 7(取自 JTS 165—2013《海港总体设计规范》)。

表 7 集装箱堆场堆箱层数及容量利用率

堆场作业设备	堆箱层数/层	容量利用率/%
轨道式集装箱龙门起重机	5~8	60~70
轮胎式集装箱龙门起重机	3~5	55~70
跨运车	2~3	70~80
正面吊运车	3~4	60~70
空箱堆箱机	5~8	70~80

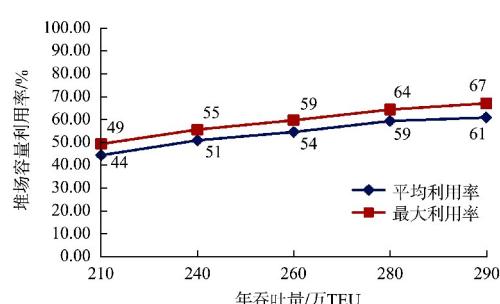


图 6 不同年吞吐量下的堆场容量利用率

### 3 结论

1) 当研究码头年吞吐量超过 280 万 TEU 时, 船舶待时占其泊位停时的比例超过 0.3, 船舶在锚地等待时间  $>8$  h 的概率超过 10%, 说明该集装箱码头的年通过能力不应超过 280 万 TEU。

2) 当码头年吞吐量超过 260 万 TEU 时, 泊位有效利用率超过 73.3%, 某些船型的船舶作业时间超过了船公司要求的作业时间, 说明该集装箱码头的年通过能力不应超过 260 万 TEU。

3) 当码头年吞吐量为 210 万~290 万 TEU 时, 堆场容量利用率均没有超过 70%, 说明该集装箱码头堆场的年通过能力不低于 290 万 TEU。

4) 根据分析, 天津某集装箱码头年通过能力评估值为 260 万 TEU。集装箱码头年通过能力的

合理评估可以更好地为码头的管理决策提供科学依据, 有利于提高码头服务水平。

### 参考文献:

- [1] 张煜, 魏世桥. 船舶靠泊组合下的泊位年通过能力仿真研究[J]. 水运工程, 2007(11): 41-44.
- [2] 刘剑, 王诺, 陈俊虎, 等. 关于集装箱码头年泊位通过能力核定的几个问题[J]. 水运工程, 2008(4): 42-45.
- [3] 李艳阳, 于军苓, 杨春霞. 大窑湾集装箱码头泊位通过能力影响因素研究[J]. 水运工程, 2010(7): 53-56.
- [4] 唐国磊, 王文渊, 郭子坚, 等. 航道尺度对集装箱码头泊位有效利用率的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016(1): 127-131.
- [5] 刘玉姣, 丁杰, 刘庆志, 等. 长沙霞凝港集装箱码头泊位通过能力仿真分析[J]. 港口科技, 2022(9): 37-40.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 135 页)

### 4 结语

1) 本文依据对浙江省现有运行的旅游船型调研以及航道定级与船舶大小, 将旅游专用航道划分为 A、B、C 3 个等级。其中 A 类代表船型为  $(25\sim30)\text{m} \times (4.8\sim5.2)\text{m} \times (1.2\sim1.4)\text{m}$ , B 类代表船型为  $(24\sim26)\text{m} \times (4.0\sim4.5)\text{m} \times (0.9\sim1.2)\text{m}$ , C 类代表船型为  $(18\sim22)\text{m} \times (3.6\sim4.2)\text{m} \times (0.8\sim1.0)\text{m}$ 。

2) 基于现行规范, 提出低等级旅游专用航道的航道宽度、水深、转弯半径以及通航净空尺度的计算方法。其中航道宽度根据规范按 VI、VII 级及等外航道取值; 水深基于舒适性的需求, 富余水深可按 0.5 m 计; 转弯半径宜为客船长度的 4 倍, 不应小于客船长度的 3 倍; 通航净空尺度的安全富余高度根据航行技术等因素取 0.3~1.0 m。此外, 对于通航条件较差的航段, 应设置相应导助航标志。

3) 本文针对浙江省内航道的实际条件提出了低等级旅游航道专用航道尺度, 填补了现行规范的空白, 为各地低等级航道发展旅游航道提供建设依据。

### 参考文献:

- [1] 赵东华, 陈虹, 陈越. 内河航道定级与船舶大型化发展[J]. 水运工程, 2011(11): 184-188, 206.
- [2] 吕健伟, 李志峰, 徐朝辉. 内河限制性航道通航尺度及跨航桥梁拆建方案探讨[J]. 水运工程, 2014(10): 139-142.
- [3] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [4] 田璇. 区域交通一体化中地方政府职能创新研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [5] 长江航道规划设计研究院. 航道工程设计规范: JTS 181—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.

(本文编辑 王传瑜)