



# 复杂环境条件下的航道通过能力研究

张江南

(山东省港口集团日照港集团有限公司, 山东 日照 276826)

**摘要:** 针对国外某河口港区吞吐量日益增长、乘潮窗口期有限、通航需求较高和通航环境复杂的矛盾, 采用仿真试验方法进行航道通过能力分析。结合已建航道通航底高程和乘高潮水位分布反推不同船型在不同航向的乘潮窗口期; 基于SIMIO软件建立包括码头、内锚地、航道、过驳船舶、外海过驳平台和浮吊, 且考虑潮汐、潮流对船舶航行影响的仿真模型, 通过试验验证包括航道在内的“港口-航运-过驳”系统能够完成的目标吞吐量, 分析其通过能力。研究结果为该港区近期生产调度、远期扩建规划提供了重要依据, 也可为类似工程提供参考。

**关键词:** 航道通过能力; 仿真; 通航窗口期; 过驳

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0131-05

## On waterway throughput capacity under complex environment

ZHANG Jiang-nan

(Shandong Port Group Rizhao Port Group Co., Ltd., Rizhao 276826, China)

**Abstract:** In view of the contradiction of the increasing throughput, limited tidal navigable window period, high demand for navigation, and complex navigation environment in a foreign estuarine port area, we carry out the waterway throughput capacity analysis by the simulation test method. Based on the bottom elevation of the built waterway and the distribution of high tide water level, the tidal window period of different ship types in different directions is deduced; Based on the software SIMIO, a simulation model including terminal, internal anchorage, waterway, transfer barge, offshore transshipping platform, and floating crane is established with consideration of the influence of tide and tidal current on ship navigation. Through the test, it is verified that the “port-transfer barge-transshipment facility” system including the waterway can achieve the target throughput. The analysis results provide an important basis for the short-term production scheduling and long-term expansion planning of the port area, and also may serve as reference for similar projects.

**Keywords:** waterway throughput capacity; simulation; navigable window period; transshipment

航道通过能力通常指在正常生产作业状态下, 基于一定的服务水平, 一年期内通过该航道的最大运输量, 也有学者以单位时间内能够通过的最大船舶数量表示<sup>[1]</sup>。确定航道通过能力的工具有经验公式法<sup>[2]</sup>、排队论等理论模型<sup>[3]</sup>, 以及 MATLAB<sup>[4]</sup>、SIMIO<sup>[5]</sup>、FLEXSIM<sup>[6]</sup>等计算机仿真软件, 对于通航约束条件多、乘潮条件复杂, 以及复式

断面航道, 计算机仿真已成为主要研究工具。

近年来, 在国际大宗固体散货运输市场, 尤其是在非洲等基础设施建设条件相对落后地区的矿石出口项目中, 海上过驳作业模式被广泛采用, 这样仅需建设小吨级泊位, 就能满足装卸大型远洋运输船舶的需求<sup>[7-8]</sup>。针对此类项目, 对于泊位多、过驳点多的复杂过驳系统, 仿真可以综合考

收稿日期: 2021-01-17

作者简介: 张江南(1967—), 男, 高级工程师, 从事港口规划与管理工作。

虑由码头、驳船及过驳设施(过驳平台或浮吊)所组成的系统,具有参数化、可视化的优势,故应用较为广泛。

本文研究对象为国外某河口港区,既有以码头、驳船及过驳设施所组成的港口-过驳系统,又有乘潮航道,且为复式航道(同一断面有不同的通航水深),通航环境较为复杂,对其通过能力的研究则须综合考虑由码头、驳船、航道、过驳设施组成的整个系统。在通用仿真软件 SIMIO 上建立模型,对不同码头、驳船及过驳设施条件下,不同阶段的航道通过能力进行研究,解决生产中面临的实际问题,并为类似项目提供参考。

1 研究对象条件分析

1.1 码头及运量

该港区有 4 个矿石出口业主码头,受航道水深限制,均采用装货至驳船、再经驳船运输至外海过驳锚地、最终经过驳平台(或浮吊)过驳至远洋散货船的方式运营。各码头现状(近期)及规划(中、远期)出矿运量需求见表 1。

表 1 各码头运输船型及出矿需求 万 t/a			
码头	近期(现状)	中期	远期
A	1 200	1 800	2 700
B	700	700	700
C	1 000	1 000	1 000
D	-	-	2 000
合计	2 900	3 500	6 400

1.2 运输船型

研究对象由不同类型的专用驳船承担码头至外海过驳锚地的矿石运输,其中码头 C 采用 8 000 DWT驳船,其他码头采用 1.2 万 DWT 驳船,2 种驳船均无动力装置,须通过拖轮顶推或拖带航行。拖轮-驳船组合体出港下行时控制吃水为驳船满载吃水,上行时控制吃水为拖轮吃水,见表 2。

表 2 各船型不同航向的控制吃水

船型	下行	上行	航行模式
	(驳船满载吃水)/m	(拖轮吃水)/m	
1.2 万 DWT 驳船	4.98	3.70	拖轮顶推
8 000 DWT 驳船	4.30	3.90	拖轮拖带

1.3 航道条件

码头与过驳锚地间的航道大部分航段满足上述船型双向全天候通航,仅河口拦门沙段须疏浚,以满足双向乘潮通航要求。分 3 个阶段进行疏浚施工,但近期仅疏浚了下行侧(满载出港)航道。各阶段航道设计底高程见表 3。

表 3 各阶段航道设计底高程

航道	m		
	近期(现状)	中期	远期
下行侧	-3.5	-3.5	-4.5
上行侧	-2.5	-3.5	-4.5

注:理论最低潮面起算。

1.4 复杂环境因素

一方面,不同码头的泊位数量和装卸作业效率的区别直接影响船舶装卸作业时间和驳船候泊时间,使航道的运行呈忙闲不均的状态,给航道通过能力带来影响;另一方面,由于过驳船舶须乘潮通过河口段航道,会造成船舶等待航道的现象,延长驳船完成一个作业循环的时间,影响过驳系统的转运效率。

所以航道通过能力不能简单用单位时间内过驳船舶排队通过航道瓶颈段的数量来推算,而应纳入由过驳船舶、锚地、航道、泊位及过驳平台组成的港航系统中开展综合研究,采用离散事件动态系统研究方法,建立仿真模型,考虑船舶吨级和配备数量、码头和过驳系统的作业和靠离泊时间、船舶航速、乘潮时间窗口、潮流流速等因素,模拟过驳船舶从码头装船、候潮、通过航道、在外海过驳点卸船、再候潮并通过航道返回码头装船的过驳作业全过程,通过仿真试验,分析不同情况下的航道通过能力。

## 2 港航及过驳航道系统的概念模型

### 2.1 概念模型

研究对象主要包括各矿石企业的装船码头、

驳船(含顶推或拖带拖轮)、过驳平台以及公用航道 3 部分,见图 1。

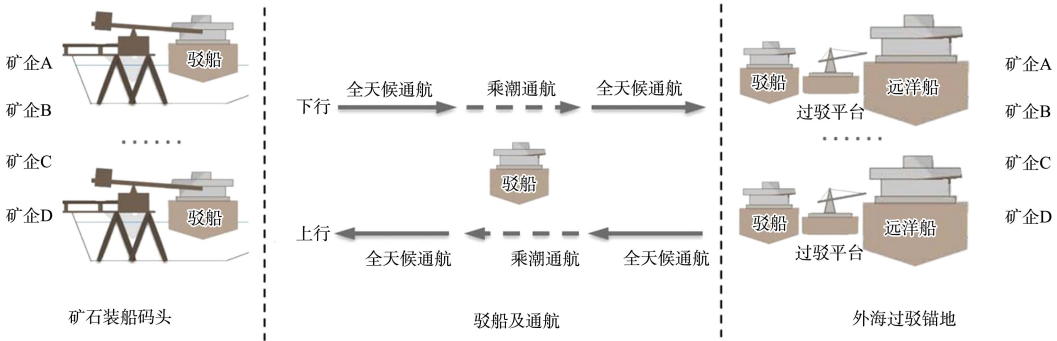


图 1 港航及过驳航道系统的概念模型

### 2.2 乘潮窗口期推算

考虑到研究对象的复杂性,各船型在不同阶段、不同航向上的乘潮窗口期是仿真模型的关键条件。基于不同船型的吃水要求、航道建设现状及规划,结合乘潮水位分布特点推算各阶段航道在不同航向上能满足不同船型通航的乘潮窗口期。

乘潮水位通常根据需乘潮的船舶航行密度、

航行时间,结合潮汐特性、航道沿程潮位过程等因素确定<sup>[9]</sup>,进而结合船型吃水等因素确定航道底高程。本工程航道底高程已由当地政府确定,且考虑航道近期为复式航道,故须根据乘高潮水位分布反向推算,得出不同船型在不同阶段、不同航向上的乘潮窗口期作为仿真模型的输入条件。

1.2 万 DWT 驳船在近期航道 2 个方向的乘潮窗口期计算过程及结果见表 4。

表 4 1.2 万 DWT 驳船在近期航道条件下的乘潮窗口期计算

参数	组合体限制吃水 $T/\text{m}$	船舶航行时船体下沉量 $Z_0/\text{m}$	航行时龙骨下最小富余深度 $Z_1/\text{m}$	波浪富余深度 $Z_2/\text{m}$	船舶装载纵倾富余深度 $Z_3/\text{m}$	航道通航所需水深 $D_0/\text{m}$	上行/下行侧最高泥面高程/ $\text{m}$	上行/下行侧最低通航水位/ $\text{m}$	每潮次理论可通航时间/ $\text{h}$	每潮次测算乘潮窗口期/ $\text{h}$
上行	3.70	0.2	0.3	0.48	0.15	4.83	-2.5	2.33	5.77	5.25
下行	4.98	0.2	0.3	0.48	0.15	6.11	-3.5	2.61	4.51	4.10

同理,推算得到各阶段不同船型的乘潮窗口期,见表 5。

表 5 各阶段不同船型的乘潮窗口期

船型	h					
	近期		中期		远期	
	上行	下行	上行	下行	上行	下行
1.2 万 DWT 驳船	5.25	4.10	7.74	4.10	10.91	7.04
8 000 DWT 驳船	4.99	6.51	7.48	6.51	10.91	9.22

## 3 过驳及航道通行系统的仿真模型

### 3.1 模型范围

模型范围包括过驳船舶(含驳船及拖轮)、各码头装船泊位、外海过驳平台和浮吊、航道以及潮汐、潮流等对船舶航行的影响。

### 3.2 驳船作业过程

仿真模型的过驳船舶作业过程见图 2。

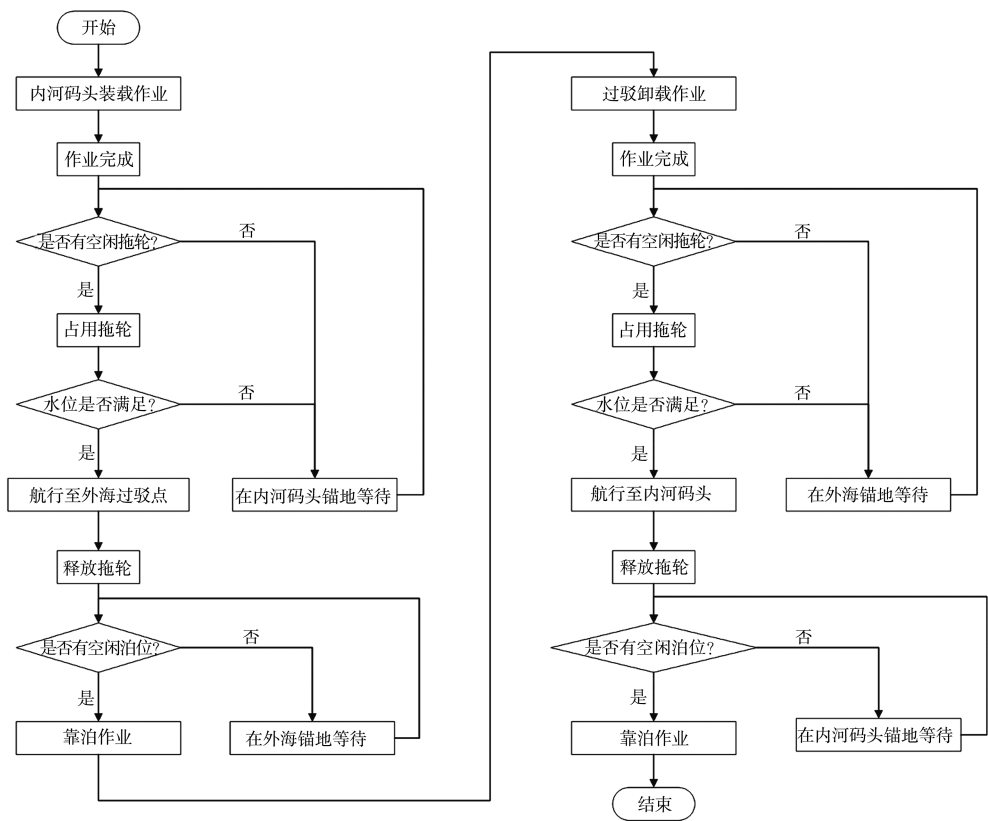


图 2 驳船作业流程

3.3 仿真模型模拟过程

1) 码头装船作业。驳船在码头的装船作业过程细分为靠泊—装船作业—辅助作业—离泊 4 个过程。根据调研，驳船平均靠离泊时间为 1 h，除靠离泊之外的船舶在泊辅助作业时间为 0.5 h。单驳船平均装船时间由船舶平均装载量与单船净平均作业效率确定。并且，码头工人按 3 班倒轮班休息，每次换班有 40 min 码头不能作业。

2) 船舶进入航道判断。过驳船舶在进入航道前，须判断航道条件是否允许进入。满足如下条件船舶方可进入航道：①有空闲拖轮；②根据运营经验，同向船舶安全间距须大于 0.5 n mile (0.92 km)，考虑航速不同，8 000 DWT 驳船安全间隔时间取 12 min，1.2 万 DWT 驳船安全间隔时间取 8 min；③驳船可以在乘潮窗口期内通过航道疏浚段。

在判断驳船是否可乘潮通过航道时，由于 8 000 DWT 驳船航速小于 1.2 万 DWT 驳船，模型中安排 8 000 DWT 驳船尽量叠加同向潮流航行，即满载下行时，8 000 DWT 驳船排在 1.2 万 DWT 驳船之后通过航道(乘落潮流)；空载上行时，

8 000 DWT 驳船排在 1.2 万 DWT 驳船之前通过航道(乘涨潮流)。

3) 驳船航行。驳船在外海航行时，按照静水航速航行；在河口航道段航行时，受涨、落潮流速影响，航速不同。模型根据船舶航行方向和潮流随潮周期变化的流向，计算船舶在河口航道段的航行时间。

4) 船舶靠泊判断。驳船在码头装船泊位和外海过驳泊位(过驳平台或浮吊)靠泊之前须判断是否有空闲泊位：如果有空闲泊位则靠泊；如果没有，则在泊位附近锚地等待。空载驳船在码头附近待泊锚地等待，满载驳船在外海过驳点锚地等待。

5) 外海过驳卸船作业。驳船在外海过驳泊位的卸船作业过程与装船泊位类似，细分为靠泊—卸驳船装大船作业—辅助作业—离泊 4 个过程。根据调研，驳船在外海过驳平均靠离泊时间为 1.5 h，除靠离泊之外的船舶在泊辅助作业时间为 0.5 h。单驳船平均卸船时间由船舶平均装载量与单船净平均作业效率确定。并且，外海过驳泊位的工人也按 3 班倒轮班休息，每次换班有 40 min 码头不能作业。

3.4 仿真模型实现

针对驳船作业的特点，在通用仿真软件 SIMIO 上建立了港航系统仿真模型，模拟驳船从码头到外海过驳点过驳，再返回码头装船全作业过程。

4 仿真试验结果

基于以上仿真模型，在考虑各码头泊位数量、装船效率、驳船及拖轮合理配置数量、外海过驳点过驳平台和浮吊合理配置数量及各自作业效率后，得到各业主码头在不同阶段所能达到的通过能力(表 6)，满足前文所述运量需求，航道通过能力得到验证。

表 6 各码头的通过能力分析结果 万 t/a			
码头	近期	中期	远期
A	1 386	1 910	2 727
B	705	705	705
C	1 001	1 001	1 001
D	-	-	2 020
合计	3 092	3 616	6 453

5 结论

1)在航道建设方案不受企业控制的情况下，可结合已疏浚航道底高程，根据不同企业船型在不同航向下的吃水情况，结合乘潮水位分布特点推算不同情况下的乘潮窗口期，作为进一步开展仿真分析的关键输入条件。

2)针对研究对象的特点建立仿真模型，在考虑潮位、潮流等影响因素的情况下，模拟驳船从码头装船、候潮、通过航道、在外海过驳点卸船、

再候潮并通过航道返回码头装船的过驳作业全过程。研究结果表明该航道通过能力满足需求，解决了生产中面临的实际问题，研究方法可为类似项目的研究提供参考。

参考文献：

[1] 吴兆麟, 朱军.海上交通工程[M].大连: 大连海事大学出版社, 2004.

[2] 丁涛, 徐湘文.基于 OD 结构网络模型的长江干线航道通过能力研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(4): 751-754.

[3] KUMARAN S K, DOGRA D P, ROY P P. Queuing theory guided intelligent traffic scheduling through video analysis using Dirichlet process mixture model[J]. Expert systems with applications, 2019, 118: 169-181.

[4] 鲁雷.港口航道通过能力建模仿真研究[J].中国水运(下半月), 2019, 19(9): 67-68.

[5] 唐颖, 薛晓晓, 商剑平.广州港深水航道通过能力仿真分析[J].水运工程, 2016(10): 157-161.

[6] DULEBENETS M A, GOLIAS M M, MISHRA S, et al. Evaluation of the floaterm concept at marine container terminals via simulation[J]. Simulation modelling practice and theory, 2015, 54: 19-35.

[7] 戴祖洪.水上过驳平台在干散货物流服务中的发展前景初探[J].市场周刊(理论研究), 2008(4): 103-104.

[8] 李刚, 黄敬东.一种港口驳运系统设备配置方案[J].港口装卸, 2021(1): 25-27.

[9] 中交水运规划设计院有限公司.港口总体设计规范: JTS 165—2013[S].北京: 人民交通出版社, 2013.

(本文编辑 郭雪珍)

2022 年《水运工程》杂志征订工作已经开始，请登录《水运工程》杂志社官方网站 [www.sygcc.com.cn](http://www.sygcc.com.cn) 首页下载中心下载“2022 年《水运工程》征订通知单”，有关要求和反馈信息一应俱全。

征订通知

2022 年《水运工程》杂志征订工作已经开始，请登录《水运工程》杂志社官方网站 [www.sygcc.com.cn](http://www.sygcc.com.cn) 首页下载中心下载“2022 年《水运工程》征订通知单”，有关要求和反馈信息一应俱全。