



复杂通航环境下海港航道扩建规模仿真研究

王志斌, 王勇健, 王 更, 谢华东

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 沿海成熟港区周边的航道网及港区通航条件复杂, 其航道改扩建的规模论证重点关注航道与港口发展的适应性问题, 而传统静态估算或排队论计算方法难以解决改扩建航道建设规模的适应性问题。考虑到港航系统的随机性、动态性和复杂性, 采用计算机仿真技术手段, 基于 Flexsim 平台, 结合通航环境特征, 建立港航系统仿真模型, 模拟船舶进出港作业全过程。以华南沿海某主要港口公共航道为研究对象, 选取航道服务水平、船舶进出港延误艘次比例、船舶交通延误时间等指标对航道扩建规模进行综合对比, 在未来航道通航效率不低于现状航道通航效率的前提下, 提出推荐的航道扩建规模。研究成果可为沿海港口公共航道扩建规模设计提供借鉴。

关键词: 海港航道; 改扩建; 建设规模; 服务水平; 仿真模型

中图分类号: U656.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0250-06

Simulation study on expansion scale of seaport channel in complex navigation environment

WANG Zhibin, WANG Yongjian, WANG Geng, XIE Huadong
(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: For the channel expansion project of the mature seaport area, the surrounding channel network and the navigation conditions of the seaport area are complex. The demonstration of the scale of the channel expansion project should focus on the adaptability of the channel and seaport development. It is difficult to solve the adaptability problem of the construction scale of channel expansion project by traditional static estimation or queuing theory calculation methods. Considering the randomness, dynamics and complexity of the port and shipping system, this paper establishes a simulation model of the port and shipping system based on the Flexsim platform and the characteristics of the navigation environment. The model can simulate the whole process of ship entry and exit operations. In addition, this paper takes the public channel of a major port along the coast of South China as the research object, and selects the indicators to comprehensively compare the scale of waterway expansion, such as the service level of the channel, the proportion of the number of ship delayed, and the delay time of ships. Then, on the premise that the navigable level of the channel in the future is not lower than that of the current channel, the recommended expansion scale is proposed. The research results can provide reference for the design of the scale of public channel expansion project in coastal ports.

Keywords: seaport channel; expansion project; construction scale; service level; simulation model

随着全球货运量的不断增加和船舶大型化的发展, 国内众多海港航道已成为制约港口运输发展的主要因素。当港口发展到一定水平, 进一步提高港口公用航道建设规模、增加航道通过能力,

将为港口增强服务能力和提升服务水平提供重要支撑。

港口航道建设规模的确定与港口发展水平、航道通过能力、航道建设及维护成本等均有较大

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 王志斌 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口及航道工程咨询、设计、研究、项目管理。

关联。目前,我国各主要港口在确定公用航道建设规模时,仍主要以传统的经验公式进行静态估算,而随着航运系统的复杂化,传统计算方式在确定航道建设规模时逐步显得信服力不强。特别是对改扩建航道,航道运营繁忙,通航船舶众多,周边航道网及港区通航条件复杂,其规模论证应重点关注现有航道与港口发展的适应性问题,而采用传统静态估算或者排队论计算方法均难以解决。

随着计算机仿真技术的快速发展,我国部分主要港口逐步将智能仿真用于研究航道通航标准^[1]和通过能力^[2-5],评估不同航道方案对港口运营的影响^[6-7],分析特殊管制船舶对航道通航的影响^[8]、泊位规模与航道适应能力^[9],优化航道通航方案^[10]等。本文以华南沿海某主要港口公共航道为研究对象,以计算机仿真为手段,提出一种确定复杂通航环境下海港公共航道扩建规模的方法,旨在为沿海港口公共航道设计提供借鉴和参考。

1 通航环境特征分析

华南沿海某主要港口公共航道是一个随机因素多、逻辑关系复杂的港航系统,具有人工航段里程长、各航段通航等级差异大、服务港区多、航道分叉多、船舶类型多、船舶流量大等特点。

1) 研究航段里程长。航道自外海自然水深处起算至最内侧港区,全长约 120 km,为三大港口、十大港区的公用航道。本文研究航段为外侧 66 km 范围,航段现状满足 10 万及 15 万吨级集装箱船双向通航。

2) 服务港区、泊位众多。研究航道沿程服务十大港区,各类生产性泊位共计 1 067 个,泊位总通过能力达 6.6 亿 t,其中万吨级以上泊位 144 个。

3) 航道分叉多、通航等级不一。因服务港区多,研究航道沿程分叉较多,分叉航道等级各不相同。多个小船航道与研究航道存在交汇,船舶

在公共航道中航行需注意避让在航道中穿越的小型船舶。此外,研究航段等级为 10+15 双向通航标准,往陆侧方向航道等级降低,且部分船舶需考虑乘潮通航。

4) 船舶类型多、流量大。2020 年,研究航段进出港的船舶(3 000 DWT 以上)约为 5.0 万艘次/a,且随着港口基础设施发展仍在持续增长,船舶类型包括集装箱船、LNG 船、干散货船、液体散货船、杂货船、邮轮、汽车滚装船以及特种船等。近年来,大型船舶通航艘次占比呈现逐年增加趋势。

2 仿真模型构建

2.1 港航系统作业流程

考虑到港航系统的随机性、动态性和复杂性,采用能够模拟各种不确定因素的计算机仿真技术建立港航系统仿真模型,模拟船舶进出港作业全过程。

如图 1 所示,船舶航行作业流程为:1) 船舶到达。受天气等影响,船舶随机到达港口,通知调度船舶预计到港时间。2) 锚地待泊。如果港区有对应类型和等级的空闲泊位并且满足进港条件(天气、潮位、通航时间、航道通航方向等),则驶入航道;否则继续在锚地等待。3) 航道航行进港。船舶从指定上线点驶入航道,根据通航规则、速度限制等在航道中航行,经过一段时间后驶离航道。4) 靠泊作业。船舶在回旋水域掉头后,开始靠泊作业。5) 泊位作业。靠泊后,船舶系缆,并进行辅助作业和装卸作业。6) 离泊作业。泊位作业完成后,根据天气、潮位、通航时间、航道通航方向等,判断当前航道是否满足通航条件,如果满足条件,船舶离开泊位;否则继续等待。7) 航道航行出港。船舶离开泊位后,在回旋水域掉头,之后驶入航道,并根据通航规则、速度限制等在航道中航行一段时间至下线点。8) 离开港口。船舶在指定的下线点驶离航道,离开港口。

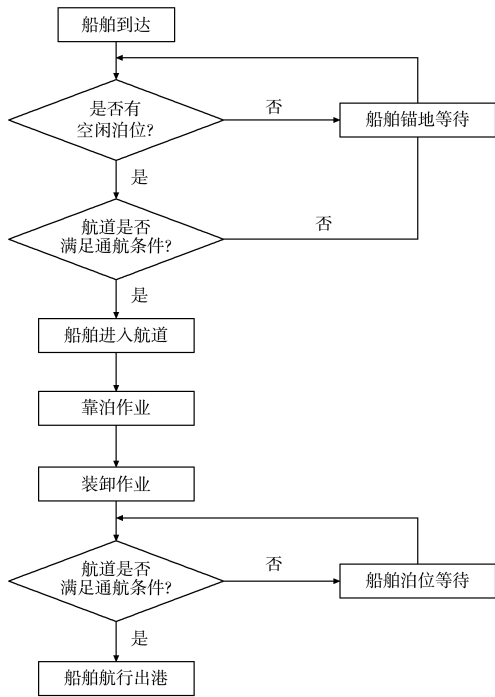


图1 港航系统船舶航行作业流程

2.2 港航系统仿真模型组成

1) 船舶生成模块。用于模拟船舶到达港口的过程，可以基于历史数据、概率分布或其他规律性模式生成船舶到达的时间间隔和数量，进而生成船舶到港序列，且多种船舶生成方式可组合。

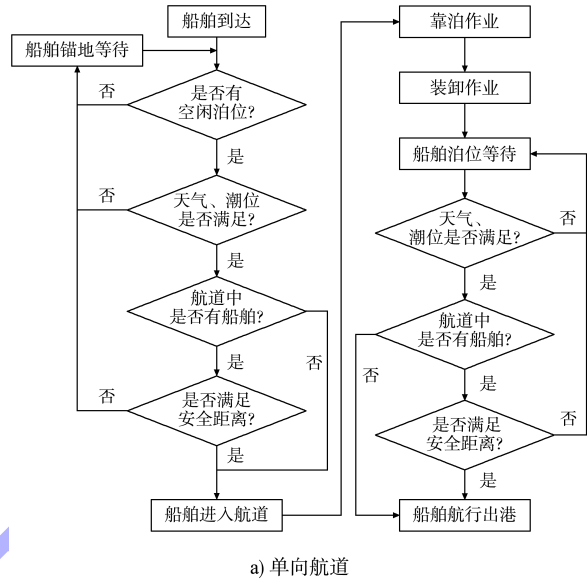
2) 自然条件模块。潮汐、风、雾、降水、流、波浪等直接影响港区的年营运天数和航道的通航天数，是影响航道通过能力和服务水平的重要因素。考虑到自然条件的随机性，为突出其对船舶通航的影响，自然条件模块重点考虑潮汐和恶劣天气因素。

3) 锚地模块。负责管理锚地数量、锚位容量、每个锚地可供锚泊的船舶类型和吨级等，并且为船舶分配锚位、模拟锚地待泊过程等。

4) 航道模块。负责管理航道轴线布置、航道边界、航道通航水深、通航规则等信息，其中通航规则主要包括船舶优先级调度、船舶航行避让、船舶进入航道条件判别等。

5) 泊位模块。根据来船的类型、吨级以及目的港区，为船舶指定停靠泊位，并设置船舶在港进行装卸及辅助作业的时间，模拟船舶靠离泊及装卸作业过程。

6) 船舶调度模块。主要根据船舶优先级对船舶进出港顺序进行排列，同时结合航道宽度限制对航道单向或双向通航进行控制。船舶调度流程见图2。



a) 单向航道

b) 双向航道

图2 船舶调度流程

2.3 港航系统仿真模型实现

仿真模型建模范围包括研究航段及与其相连的各分叉航道、所服务各港区泊位、港外候潮待泊锚地等。仿真模型基于 Flexsim 仿真建模软件编程实现。通过 Flexsim 的仿真引擎，对船舶的到达、锚地候潮待泊、航道航行、泊位装卸作业等关键过程进行建模，并模拟不同航道建设规模下的港航系统船舶作业过程，统计船舶航行效率等信息，从而帮助用户评估港航系统的效率和容量，并进行优化和决策。模型运行的仿真界面如图3所示。

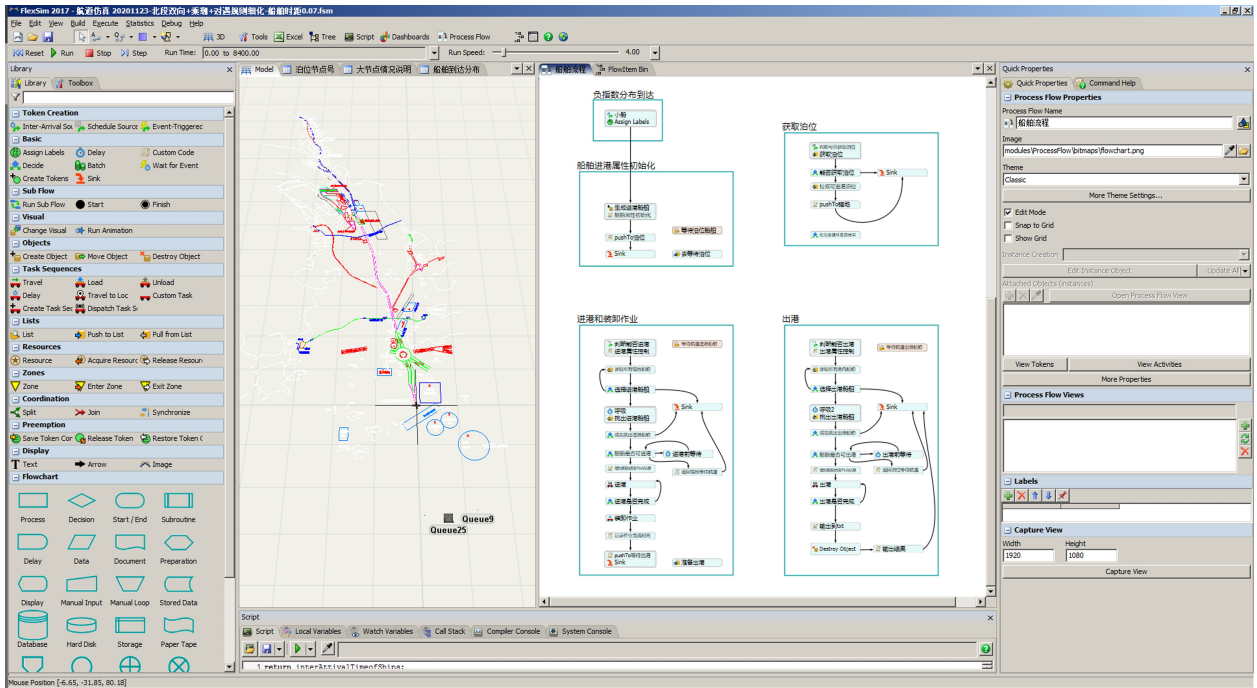


图 3 仿真界面

2.4 模型验证

以 2020 年实际船舶流量和现状航道规模为输入条件, 运行仿真模型获取验证数据, 经与实际数据比对可知, 除个别基数较小数据外, 分港区、分船型、分吨级进出港船舶艘数仿真结果与实际差异均控制在 5% 以内, 典型港区船舶等待时间 2 h 以上艘数占比数据差异均在 3% 以内, 仿真数据与实际误差均较小。

3 试验分析与评估

3.1 仿真试验工况设置

仿真试验以航道现状规模和不同扩建方案建设规模对应的设计尺度为仿真试验工况, 输入 2030 年和 2035 年预测的到港船型、吨级组合参数, 共设计 8 种仿真工况, 见表 1。

表中 15+10、20+10、20+15、20+20 的 4 种航道建设规模分别对应 15 万吨级集装箱船与 10 万吨级集装箱船双向通航、20 万吨级集装箱船与 10 万吨级集装箱船双向通航、20 万吨级集装箱船与 15 万吨级集装箱船双向通航、20 万吨级集装箱船与 20 万吨级集装箱船双向通航, 其中 15+10 为航道现状规模, 20+10、20+15、20+20 为 3 种航道扩建规模。

表 1 仿真工况设置

工况	仿真水平年	通航船舶数量/万艘次	航道建设规模/万吨级
1			15+10
2			20+10
3	2030	9.025 2	20+15
4			20+20
5			15+10
6			20+10
7	2035	9.956 9	20+15
8			20+20

3.2 仿真试验结果分析

仿真模型运行时长取 13 个月, 其中首月数据不进行记录, 所有统计输出数据运行 10 次(每次运行, 随机种子不同)取平均值。经运行分析, 各工况 1 年期出港船舶数量与生成船舶数量比值均高于 99.5%, 表明 4 种航道扩建规模均能满足预测水平年到港船舶流量的通航能力要求。考虑到大型船舶(尤其集装箱班轮)对航道服务水平和等待时间比较敏感, 本次研究主要对 5 万吨级以上大型船舶的统计指标进行分析。

3.2.1 航道服务水平

参考港口服务水平, 定义航道服务水平为等待航道时间与作业时间的比值(其中等待航道时间不含等待泊位时间), 比值越小, 服务水平越高。各工况服务水平统计值见表 2。

表2 各工况航道服务水平

工况	5万吨级以上 各类船舶航道 服务水平	5万吨级以上 集装箱船航道 服务水平	15万吨级及以上 集装箱船航道 服务水平
1	0.30	0.28	0.35
2	0.19	0.18	0.27
3	0.14	0.13	0.16
4	0.11	0.10	0.09
5	0.33	0.30	0.37
6	0.22	0.20	0.30
7	0.16	0.15	0.20
8	0.11	0.11	0.10

根据统计数据可知，航道扩建对5万吨级以上各类船舶的航道服务水平的提升具有显著作用，尤其对15万吨级以上集装箱船的服务水平提升具有较大作用。在20+15建设规模下，2030和2035年航道服务水平维持在0.15；2035年大型船舶航次增加，部分20万吨级集装箱船受航道宽度限制导致延误水平稍高，使15万吨级及以上集装箱船航道服务水平降至0.2。在20+20建设规模下，2030和2035年航道服务水平均维持在0.1，可见航道对船舶的限制很小，航道对船舶的服务水平较高。

3.2.2 船舶进出港延误艘次比例

对于延误时间小于15 min的船舶，认为其延误时间过小，对船舶正常进港作业影响不大，统计该类船舶的延误时间无意义。因此，定义航道进出港延误艘次比例为进/出港被交通延误超过15 min船舶的数量占同类所有船舶的比例。各工况船舶进出港延误艘次比例统计值见表3。

表3 船舶进出港延误艘次比例

工况	5万吨级以上 各类船舶延误 艘次占比/%	5万吨级以上 集装箱船延误 艘次占比/%	15万吨级及以上 集装箱船延误 艘次占比/%
1	28.2	28.2	50.9
2	11.8	12.2	37.3
3	5.3	5.4	17.5
4	1.8	1.9	5.0
5	33.6	33.8	57.0
6	15.3	16.1	44.2
7	7.7	8.1	24.1
8	2.3	2.5	6.6

根据统计数据可知，航道扩建对5万吨级以上各类船舶进出港延误艘次占比减少影响显著，但对15万吨级及以上集装箱船延误艘次占比降低的效果稍差。在20+15建设规模下，5万吨级以上各类船舶2030和2035年的延误艘次占比维持在10%以内，而单独分析15万吨级及以上集装箱船延误艘次占比约在20%的水平，可见航道规模的扩建可大大减小大型船舶航行对较低等级船舶的影响，而大型船舶自身受部分情况无法双向通航的限制，仍具有一定比例被延误。当航道扩建至20+20的规模时，所有船舶的延误艘次占比均较小，该规模下航道不再是影响延误艘次比例的主导因素。

3.2.3 船舶交通延误时间

对于进港船舶，船舶交通延误时间指泊完成后进港延误船舶对应的平均延误时间(不包含待泊时间)；对于出港船舶，船舶交通延误时间为装卸作业完成后出港延误船舶对应的平均延误时间。各工况船舶交通延误时间见表4。

表4 船舶交通延误时间

工况	5万吨级以上 各类船舶平均 延误时间/h	5万吨级以上 集装箱船平均 延误时间/h	15万吨级及以上 集装箱船平均 延误时间/h
1	7.49	4.92	6.02
2	3.78	2.10	4.20
3	2.62	0.93	2.00
4	2.21	0.51	0.87
5	8.15	5.80	6.80
6	4.38	2.84	5.12
7	3.05	1.28	2.37
8	2.32	0.72	1.20

根据统计数据可知，航道扩建对5万吨级以上各类船舶延误时间的降低影响显著。在20+15建设规模下，5万吨级以上各类船舶2030和2035年的平均延误时间维持在2~3 h，而对于优先级较高的5万吨级以上集装箱船而言，其平均延误时间约1 h；此外，对于15万吨级以上集装箱船，其平均延误时间也降至2 h，基本在可接受的范围。当航道扩建至20+20的规模时，15万吨级及以上集装箱船平均延误时间继续降低较大幅

度, 但其他船舶平均延误时间降低幅度一般。

3.3 分析总结

现状 5 万吨级以上各类船舶平均延误时间约 1.7 h, 15 万吨级以上集装箱船的平均延误时间约 2.7 h。考虑未来在基本满足航道通航效率的前提下, 尽可能降低工程总投资, 按照 2030 和 2035 年航道通航效率不低于现状通航效率考虑航道扩建规模, 结合前文分析, 推荐航道按照 20+15 的规模扩建, 可以基本满足包括 20 万吨级集装箱船在内的各类船舶的通航需求。如果未来进出某港出海航道的大型船舶比例进一步增加, 可以考虑将航道进一步扩建至 20+20 的规模。

4 结语

1) 本文以 Flexsim 仿真平台为基础, 结合船舶进出港作业流程建立了港航系统仿真模型, 经验证, 仿真数据与实际误差较小, 仿真模型可用于对船舶进出港通航效率的模拟和研究。

2) 以华南沿海某主要港口公共航道为案例, 结合仿真模型选取航道服务水平、船舶进出港延误艘次比例、船舶交通延误时间等指标对航道扩建规模进行综合对比得出, 航道规模由 15+10 扩建到 20+15 时, 2030 和 2035 年船舶的服务水平均有显著提升, 船舶进出港延误艘次占比、船舶延误时间等均有显著下降, 20+15 的航道通航效率略优于现状条件下航道的通航效率; 航道规模为 20+20 时, 2030 和 2035 年航道服务水平均维持在 0.1 的高水平线, 船舶的延误艘次占比、船舶平均延误时间均较小, 航道不再是影响通航效率的主

要因素。

3) 本文在未来航道通航效率不低于现状航道通航效率的前提下, 提出推荐的航道扩建规模, 能够适应该港口未来发展趋势, 尽可能降低工程总投资。研究成果可为沿海港口公共航道扩建规模设计提供借鉴和参考。

参考文献:

- [1] 姚海元, 房卓, 郝军, 等. 多智能体航道通航标准仿真技术[J]. 水运工程, 2016(5): 116-120.
- [2] 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.
- [3] 王更, 许才广. 基于 Flexsim 的深圳港铜鼓航道通过能力仿真研究[J]. 水运工程, 2019(9): 181-185, 195.
- [4] 于周讯, 朱成斌, 胡滨, 等. 青岛港前湾航道通过能力仿真预测[J]. 水运工程, 2023(6): 165-170, 178.
- [5] 焦广军, 王轩, 李笑晨, 等. 天津港北航道通过能力仿真模拟试验研究[J]. 水道港口, 2023, 44(3): 383-391.
- [6] 左天立, 聂向军, 郝军, 等. 基于多智能体的复杂水域航道通航仿真优化[J]. 中国航海, 2017, 40(1): 97-101.
- [7] 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.
- [8] 史殿中. 超大型船舶通航对航道通过能力影响的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- [9] 沈忱, 房卓, 张民辉, 等. 单航道多泊位的液化天然气码头建设规模仿真研究[J]. 水运工程, 2019(11): 122-126, 132.
- [10] 沈忱, 孙路, 鲍建宇, 等. 曹妃甸 LNG 码头建设规模与通航效率的适应性[J]. 水运工程, 2019(12): 70-74.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 218 页)

- [8] 何文钦, 宓宝勇, 王勇健, 等. 中国石化海南炼化化工有限公司 100 万吨/年乙烯及炼油改扩建工程项目配套码头工程重大件接卸初期方案说明[R]. 广州: 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 2021.
- [9] 马进荣, 周益人, 沈雨生, 等. 中国石化海南炼化化工有限公司 100 万吨/年乙烯及炼油改扩建工程项目配

套码头工程防波堤和引堤断面波浪物理模型试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2020.

- [10] 马进荣, 周益人, 沈雨生, 等. 中国石化海南炼化化工有限公司 100 万吨/年乙烯及炼油改扩建工程项目配套码头工程引堤、防波堤波浪局部整体物理模型试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2020.

(本文编辑 赵娟)