

· 信息技术 ·



青岛港前湾航道通过能力仿真预测*

于周讯¹, 朱成斌¹, 胡 滨¹, 刘君伟¹, 刘 钊^{2,3}

(1. 青岛港国际股份有限公司, 山东 青岛 266000; 2. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063;
3. 内河航运技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430063)

摘要: 为研究青岛港前湾单向航道扩建工程结束后航道通过能力变化, 进一步提升航道服务水平, 基于 Flexsim 仿真平台, 建立青岛港港口时空作业系统, 构建青岛港前湾航道仿真模型。根据不同水平年通航船舶分不同吨级、船型通过前湾航道的艘次预测结果, 开展仿真试验, 对青岛港前湾航道扩建工程实施前后航道的通过能力和服务水平进行分析。结果表明: 青岛港前湾航道扩建工程有效提升了航道通过能力, 提高航道服务水平, 研究结果可为航道扩建后确定船舶通航标准提供重要理论和决策指导。

关键词: 航道通过能力; 服务水平; Flexsim; 航道仿真

中图分类号: U 651

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0165-06

Simulation and prediction of through capacity of Qianwan Waterway in Qingdao Port

YU Zhouxun¹, ZHU Chengbin¹, HU Bin¹, LIU Junwei¹, LIU Zhao^{2,3}

(1. Qingdao Port International Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

2. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

3. Hubei Province Key Laboratory of Inland Waterway Transport Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: In order to study the changes in the through capacity of the Qianwan one-way waterway in Qingdao Port after the completion of the waterway expansion project and improve the waterway service level, this study establishes a spatio-temporal operation system of the Qingdao Port and a simulation model of the Qianwan Waterway in Qingdao Port based on Flexsim simulation platform. According to the predicted results of the number of ships of different tonnage and types passing through the Qianwan Waterway in different level years, the study carries out the simulation test and analyzes the through capacity and service level of the waterway before and after the expansion project of the Qianwan Waterway in Qingdao Port. The results show that the expansion project of the Qianwan Waterway in Qingdao Port can effectively improve the through capacity and service level of the waterway. The research results can provide important theoretical and decision-making guidance for determining the navigation standards of ships after the waterway expansion.

Keywords: through capacity of waterway; service level; Flexsim; waterway simulation

青岛港是我国重要的国际综合性枢纽海港之一, 正在加快建设东北亚国际航运枢纽和全球重要能源的原材料中转分拨基地, 随着近几年青岛港到港船舶数量的增多, 大型船舶到港密度也不

断增加, 给原本紧张的泊位资源以及船舶通航效率带来新的压力。青岛前湾港区作为青岛港泊位数量最多, 通航密度以及通航压力最大的港区, 其前湾单向航道通航规则是制约前湾港区航道通

收稿日期: 2022-08-03

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC1407404)

作者简介: 于周讯 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水上交通安全与港口航道评估等工作。

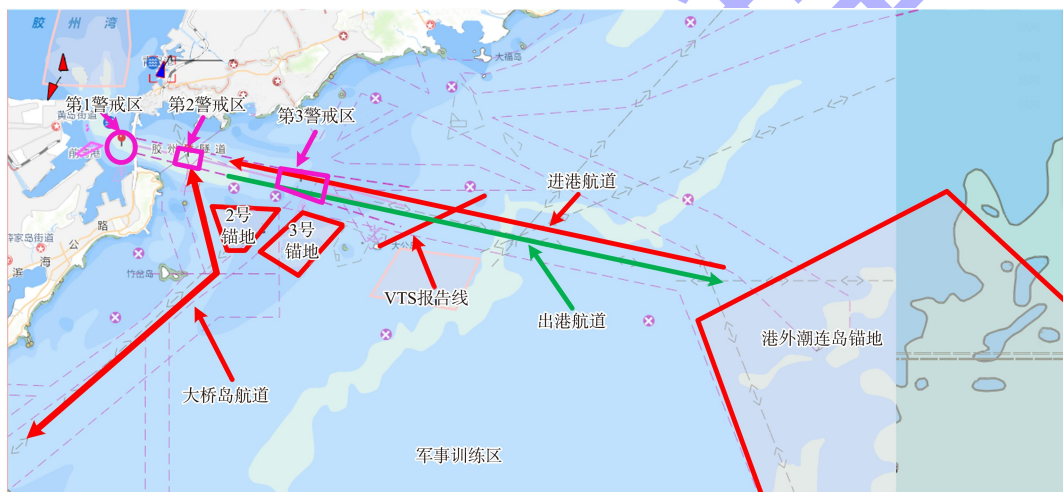
过能力及提升航道服务水平的主要原因。目前青岛前湾航道满足 5 万吨级集装箱船双向、10 万吨级船舶乘潮单向通航^[1]，但受到航道水深等多方面安全因素的限制，前湾航道进出港船舶一直保持单向通航。随着港口发展，现有航道宽度、深度和通航标准均不满足船舶通航的需求。为改善青岛港前湾港区通航条件，增强港口服务能力，需对前湾航道进行扩建。项目完成后将现有航道 5 万吨级集装箱船双向、10 万吨级船舶单向乘潮航道，扩建为 10 万吨级集装箱船舶全天候双向航道；航道有效宽度由 280 m 疏浚到 490 m，底高程由 -15.0 m 疏浚到 -16.5 m (炸岩区 -16.7 m)^[2]。该项目完成后将提升青岛港前湾航道运输能力，

推动港口建设，满足青岛港前湾港区集装箱进出口业务需求，助力山东自贸区青岛片区国际贸易、航运物流等产业的发展。

1 青岛港航道通航现状

1.1 航道分布

青岛港进港航道以进港主航道为主线，汇聚大桥岛支航道，见图 1a)，到团岛水域即第 1 警戒区水域航道流向大港、内锚地、油港、前湾港和海西湾 5 个方向，见图 1b)，第 1 警戒区内水流湍急，可航水域宽度受限，多方向船舶交通流汇聚，船舶种类杂且数量较多，监管缺失，渔船任意捕捞航行，水域内船舶通航交通态势复杂多变^[3]。



a) 青岛港



b) 胶州湾

图 1 进港航道

1.2 前湾港码头分布

前湾港区位于胶州湾西南侧，分布于黄岛前湾环抱的港湾，受东南风和涌浪影响较小。青岛港的煤炭矿石深水码头、集装箱深水码头、件杂货码头均在此港区。码头沿前湾顺岸而建，包括 20 万吨级矿石码头 1 个、15 万吨级矿石泊位 2 个、7 吨级矿石泊位 4 个、5 万吨级煤炭泊位 2 个、件杂货泊位 9 个、集装箱泊位 24 个 (其中 11 个 20 万吨级泊位)，泊位分布见图 2。码头特点为小突堤、大顺岸，有利于船舶靠离泊作业。



图 2 前湾港区泊位分布

1.3 前湾航道通过能力计算方法选取

航道通过能力的计算方法有长江公式、西德公式等传统经验公式, 但只限于静态的估算, 无法反映动态复杂的港口作业系统^[4-6], 计算结果局限性较大, 且胶州湾航道分叉多, 港区分布广, 进出胶州湾航道船的船数量较多、交通流量较大、船舶类型复杂。传统经验公式无法计算航道船舶通过能力, 更无法准确评价航道服务水平。计算机仿真模拟是解决航道改扩建方案以及计算航道通过能力的有效方法。通过模拟离散事件改变状态的系统, 在计算机内建立港口作业三维模型的 Flexsim 系统仿真平台^[7], 计算分析前湾航道扩建工程前后航道通过能力和服务水平的具体变化, 为前湾航道后续通航标准建设提供重要指导与参考。

2 前湾航道仿真模型构建

2.1 港口作业系统

模拟建立船舶到达港外或锚地、进港、装卸作业、离泊全过程。具体作业系统流程见图 3。

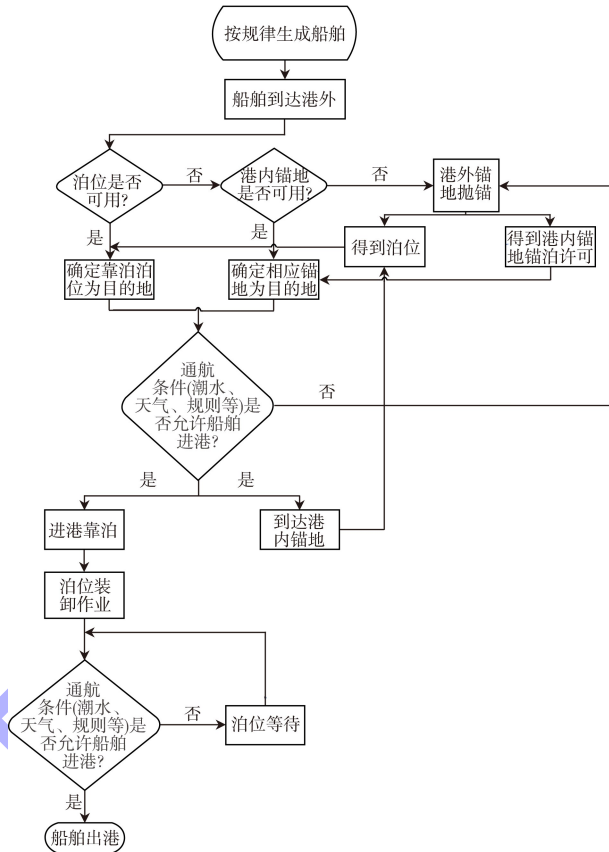


图 3 港口作业系统流程

2.2 仿真模型

2.2.1 船舶到港规律

前湾港区泊位数量较多, 包括集装箱、矿石、煤炭和件杂货码头, 进出前湾港区船舶类型较多, 集装箱船是其主流船型。通过分析 2021 年进出前湾港区船舶数据, 进出前湾航道的集装箱船到港时间间隔采用二阶爱尔朗分布, 散矿、杂货等船型的到港时间间隔采用负指数分布^[8]。

2.2.2 锚地模型

模型将锚地分为两种, 2 万吨级及以下船舶分配到前海 2、3 号锚地, 2 万吨级以上船舶分配到港外潮连岛锚地。

2.2.3 潮汐模型

统计近 5 a 青岛港因大雾、大风等恶劣天气原因导致停工封航天数, 并取其平均数 20 d 作为港口整年不可作业天数, 即航道年可通航天数取 345 d。

胶州湾海域潮汐属于正规半日潮型,模型中每 12 h 生成 1 次高潮水位,高潮水位持续时间根据《青岛港潮汐表》确定。

2.2.4 航道分段模型

胶州湾主航道第 2 至第 1 警戒区总长约 5.1 km,可用航道宽度为 700 m,通航分隔带内水深 20.0 m 以上。第 1 警戒区至大港航道总长约 7.4 km,航道水深 12.5 m,至油港主航道总长约 8.3 km,航道可航水域宽度超 500 m,航道内流水较急,流速最高可达 0.77 m/s,至前湾港散矿码头航道约 3.5 km,水深 19.0 m 以上,航道内横流流速较大,至海西湾主航道总长约 9.3 km,航道宽度较宽,航道最小水深 7.0 m。

前湾航道自主航道端点 ($36^{\circ}02'04''N, 120^{\circ}15'51''E$) 航向 260° (080°), 至 ($36^{\circ}01'56''N, 120^{\circ}14'53''E$), 转向 238° (058°) 进入港池, 航道长 3.1 km, 宽 280 m, 水深 14.5 m 以上, 且前湾航道作为胶州湾进港主航道船舶交通流量最大的分支航道, 船舶通航环境复杂多变, 见图 4a)。

由青岛港南下或北上至青岛港的内贸船舶通过大桥岛航道与胶州湾主航道在第 2 警戒区汇聚, 进出胶州湾的船舶全部通过第 2 警戒区至第 1 警戒区航段, 并由第 1 警戒区分流至大港、海西湾、油港、内锚地以及前湾 5 个方向。因此, 为更准确的预测前湾航道船舶通过能力变化, 对航道进行分段建模, 见图 4b)。第 2 警戒区至第 1 警戒区水域为公共段航道, 进出青岛港船舶全部由此段水域进出, 前湾航道为独立航道, 只进出前湾港区船舶。通过预测独立航段前湾航道的通过能力变化趋势可耦合公共航段胶州湾主航道的通过能力变化趋势。



a) 前湾



b) 胶州湾

图 4 航道

2.2.5 泊位模型

目前前湾港区拥有生产性泊位 42 个, 包括集装箱泊位 24 个, 散矿泊位 9 个, 杂货泊位 9 个, 其中 20 万吨级泊位 13 个, 10 万吨级及以上泊位 26 个, 并在建 2 个 10 万吨级自动化集装箱泊位。根据来港船舶种类、吨级及目的作业区为该船指定装卸泊位。

2.2.6 船舶调度模型

1) 船舶调度优先级。需乘潮进港船舶优先安排, 不需乘潮进港船舶原则按照船舶抵港和离泊的先后顺序, 但由于集装箱班轮时效性特点, 将集装箱船优先安排。

基于胶州湾主航道以及前湾单向航道通航特点, 需乘潮进港靠泊船舶有 20 万吨级及以上的满载大油船、10 万吨级及以上的满载大矿船以及 10 万吨级及以上吃水超 14.5 m 的集装箱船。由于胶州湾主航道第 1 警戒区汇聚 5 股船舶交通流, 受吃水限制主航道可航水域宽度有限, 交通流量复杂多变且船舶数量较多。因此, 考虑满载大油船、大矿船吃水较大操纵受限, 当其乘潮进港靠泊时具有最高优先级^[9]。

2) 船舶进港条件。船舶到达港外潮连岛锚地或前海 2、3 号锚地时, 若泊位、航道以及潮水允许船舶进港, 则上航道进港, 若不满足则继续在锚地等泊。

2.3 仿真模型运行验证

模拟胶州湾主航道以及前湾航道 2021 年的运营过程并重复运行 10 次取平均值, 仿真得 2021 年

整年胶州湾主航道以及前湾单向航道进出港船舶分别为 32 405、20 112 艘次, 而实际分别为 33 764、21 700 艘次, 模拟仿真数据与实际数据基本一致, 证明该仿真模型符合实际港口作业系统的运行规律。

3 仿真试验

3.1 试验设计

模拟预测公共段胶州湾主航道和独立段前湾航道 2025、2030 以及 2035 年不同船型、吨级进出港艘次数, 预测结果见表 1。

表 1 胶州湾主航道及前湾航道船舶通过量预测

航段	年份	船型	船舶通过量/艘次						合计
			≤2 万 t	3 万~5 万 t	7 万~10 万 t	12 万 t	15 万 t	≥20 万 t	
独立段	2025	集装箱船	4 128	6 301	5 152	903	767	701	17 952
		件杂货船	1 311	752	0	0	0	0	2 063
		干散矿船	539	404	243	65	202	335	1 788
		合计	5 978	7 457	5 395	968	1 069	1 036	21 803
	2030	集装箱船	4 225	7 015	5 564	958	824	756	19 342
		件杂货船	1 401	845	0	0	0	0	2 246
		干散矿船	458	423	306	102	235	341	1 865
		合计	6 084	8 283	5 870	1 060	1 059	1 097	23 471
	2035	集装箱船	6 081	9 016	7 621	1 124	909	864	25 615
		件杂货船	1 503	1 011	0	0	0	0	2 514
		干散矿船	440	453	363	122	251	346	1 975
		合计	8 024	10 480	7 984	1 246	1 160	1 210	30 104
公共段	2025	集装箱船	8 414	9 142	6 214	1 006	976	942	26 758
		件杂货船	1 887	1 503	101	30	24	0	3 545
		干散矿船	939	544	363	85	313	435	2 686
		危险品船	1 514	1 111	176	91	158	206	3 256
		合计	12 754	12 300	6 854	1 212	1 471	1 583	36 245
	2030	集装箱船	8 714	9 342	6 314	1 106	1 076	1 042	27 569
		件杂货船	1 987	1 603	104	34	27	0	3 755
		危险品船	1 614	1 152	184	98	178	216	3 479
		干散矿船	945	547	365	92	317	440	2 713
		合计	13 260	12 644	6 967	1 330	1 598	1 698	37 516
	2035	集装箱船	8 901	9 455	6 402	1 153	1 146	1 106	28 163
		件杂货船	2 087	1 623	114	40	33	0	3 897
		危险品船	1 984	1 402	284	103	182	218	4 173
		干散矿船	1 063	565	35	102	383	445	2 851
		合计	14 035	13 045	6 835	1 398	1 744	1 769	39 084

目前, 前湾航道扩建工程已完成 75%, 计划在 2022 年底完工, 可满足 20 万吨级以上船舶全天候单向、10 万吨级船舶全天候双向通航。由于前湾港区进出港船舶 80% 以集装箱船为主, 其航线密度不断增加, 船舶大型化发展趋势及超大型集装箱船到港密度也不断增大。因此, 为反映工程扩建前后航道通过能力和航道服务水平变化^[10], 特针对集装箱船设计仿真试验方案见表 2。

表 2 试验设计方案

试验方案	预测水平年	航道通航标准
1	2025	20 万吨级集装箱船单向通航
2	2030	20 万吨级集装箱船单向通航
3	2035	20 万吨级集装箱船单向通航
4	2025	10 万吨级集装箱船双向通航
5	2030	10 万吨级集装箱船双向通航
6	2035	10 万吨级集装箱船双向通航

船舶等待航道进出港的时长直接反映该航道服务水平的能力^[11], 本文以船舶通过前湾航道的

艘次数以及集装箱船平均等待航道时间作为评价指标。

3.2 试验结果

前湾航道保持 20 万吨级集装箱船舶不满载全天候或满载乘潮单向通航标准, 以及目前海事、引航对吃水超 15.0 m 的集装箱船夜间不得进出港限制

的解除(吃水超 15.0 m 的集装箱船须白天走深水航槽进出港), 得到各水平年的试验结果见表 3。

前湾航道扩建工程完成后, 航道可满足 10 万吨级及以下集装箱船全天候双向通航要求, 10 万吨级以上集装箱船仍单向可全天候通航, 得到各水平年的预测结果见表 4。

表 3 20 万吨级单向航道仿真试验结果

预测水平年	年通航船舶/艘次	船舶平均等待航道时间/h	≥1 万吨级集装箱船平均等待航道时间/h	≥10 万吨级集装箱船平均等待航道时间/h	20 万吨级集装箱船平均等待航道时间/h
2025	21 972	1.15	1.01	1.05	1.03
2030	23 552	1.32	1.23	1.26	1.21
2035	30 261	1.43	1.33	1.35	1.31

表 4 10 万吨级双向航道仿真试验结果

预测水平年	年通航船舶/艘次	船舶平均等待航道时间/h	≥1 万吨级集装箱船平均等待航道时间/h	≥10 万吨级集装箱船平均等待航道时间/h	20 万吨级集装箱船平均等待航道时间/h
2025	21 987	0.31	0.12	0.11	0.65
2030	23 612	0.34	0.16	0.15	0.72
2035	30 326	0.36	0.21	0.23	0.77

通过仿真试验数据结果变化可知:

1) 各预测水平年航道通航船舶艘次均达到预测值水平, 说明航道通过能力满足各预测水平年的船舶通航需求。

2) 前湾航道扩建后满足 10 万吨级及以下集装箱船双向通航标准要求, 明显缩短了船舶等待航道进港时间, 由扩建前平均 1.1 h 缩短为扩建后平均 0.3 h, 20 万吨级集装箱船的平均等待时间也相应缩短, 航道服务水平得到有效提高, 更好地服务于当前及未来前湾港区大型集装箱班轮的生产作业。

3) 前湾航道扩建工程为后续部分散杂货码头改造为集装箱码头、持续提升前湾港区集装箱船舶服务能力以及建设东北亚国际航运中心提供了有力保障。

4 结语

1) 根据前湾港区单向航道船舶通航特点, 以 Flexsim 可视化动态仿真平台建立前湾航道仿真模型, 考虑潮汐、锚地以及航道通航要求等因素模拟前湾港区港口作业系统过程, 对比胶州湾主航道通过能力预测结果变化趋势, 前湾航道扩建后

极大提升了航道通过能力, 使船舶慢速排队通过胶州湾主航道的现状得到较大改善。

2) 将航道年通过船舶艘次以及船舶平均等待航道时间作为评价指标, 定量分析前湾航道扩建前后航道通过能力及服务水平变化。仿真试验表明按照前湾航道扩建工程后的船舶通航标准要求, 前湾航道的船舶通过能力以及航道服务水平得到明显提高, 直接带动了胶州湾主航道第 1 至第 2 警戒区船舶的通航效率。

3) 前湾航道扩建工程结束后, 仿真试验结果可为实施具体船舶通航标准要求提供可靠的依据。

参考文献:

[1] 周树高, 李坤鹏. 超大型集装箱船进出受限港池口门通航条件分析[J]. 水运工程, 2021(10): 119-124.

[2] 魏博. 青岛港前湾航道扩建工程爆破开挖施工研究[J]. 东北水利水电, 2022, 40(3): 15-17.

[3] 李成海, 王建涛, 胡甚平. 青岛港水域航行安全风险评估[J]. 北部湾大学学报, 2020, 35(11): 7-13.

[4] 张江南. 复杂环境条件下的航道通过能力研究[J]. 水运工程, 2021(9): 131-135.