青岛港董家口港区琅琊台湾作业区通航适应性仿真研究

张　勇[1]，刘春泽[1,2]，唐　颖[1,2]

（1. 中交水运规划设计院有限公司，北京 100007；
2. 中交集团综合交通虚拟仿真应用技术研发中心（港口和城市），北京 100007）

摘要：针对青岛港董家口港区琅琊台湾作业区多突堤共用航道及多期泊位集中建设导致的通航能力与吞吐量匹配不确定的问题，开展通航适应性仿真研究。采用离散事件动态系统仿真方法，建立考虑船舶随机到港、潮汐乘潮、昼夜航行及柔性靠泊等多约束仿真模型，经实际数据校验，模型对到港船舶数及在泊时间的仿真误差均低于 5%。仿真覆盖近期投产、中期扩建及远期全部泊位投产等多情景。结果表明，各时序航道通过能力均能满足预测吞吐量，航道利用率保持合理，未出现制约性拥堵，系统具备充足的航道适应性；高强度多期开发在合理调度下可保障航道适应性。研究成果实现了多期建设时序下复杂港航系统通航能力的量化评估，可为大型综合性港区水域规划、建设时序优化与资源动态配置提供决策支持。

关键词：通航适应性；离散事件系统仿真；港池航道；多期建设时序；航道通过能力

中图分类号：U651+. 3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)10-0120-07

Simulation study on navigation adaptability of Langyatai Bay operation area in Dongjiakou Port Area of Qingdao Port

Zhang Yong[1], Liu Chunze[1,2], Tang Ying[1,2]

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
2. CCCC Comprehensive Transportation Virtual Simulation Application Technology Research and Development Center(Port and City), Beijing 100007, China)

Abstract: Aiming at the problem of uncertain matching between waterway capacity and throughput development in the Langyatai Bay operation area of Qingdao Port, caused by shared channels of multi-pier basins and the intensive construction of multiple phases of berths, a simulation study on the navigation adaptability is conducted. A discrete-event dynamic system simulation method is developed to build a multi-constraint simulation model, considering multiple constraints including stochastic ship arrivals, tidal window conditions, day/night navigation rules, and flexible berthing operations. The model is verified using actual production data, and the simulation errors for the number of arriving ships and berthing time are both below 5%. Multi-phase scenarios covering recent intensive berth commissioning, medium-term expansion, and long-term full build-out are simulated. The results show that under all sequences the waterway capacity can meet the projected throughput, waterway utilization ratio remains at a reasonable level, no restrictive congestion occurs, and the system possesses sufficient channel adaptability. With rational scheduling, high-intensity multi-phase development can maintain waterway adaptability. The study results achieve a quantitative assessment of navigation capacity for complex port waterway systems under multi-phase construction sequences, providing decision support for water area planning, construction sequencing optimization, and dynamic resource allocation in large comprehensive port areas.

Keywords: navigation adaptability; discrete-event system simulation; harbor basin and channel; multi-phase construction sequence; waterway capacity

收稿日期：2026-04-20　　**录用日期：**2026-05-25

作者简介：张勇(1993—)，男，硕士，工程师，从事港口航道规划与设计工作。

青岛港董家口港区琅琊台湾作业区采用环湾式布局，多突堤港池共用航道，船舶交通组织复杂。近期多个大型泊位即将集中投产，远期规划泊位将陆续建设，到港船舶量激增与水域资源有限的矛盾日益突出，亟须评估多期建设时序下港池航道通航能力的适应性。

随着计算机仿真技术的快速发展，我国主要港口正逐步应用智能仿真技术，开展航道通航标准与通过能力研究[1-5]，确定航道扩建规模[6]，评估航道方案对港口运营的影响[7-8]，分析特殊管制船舶的通航制约及泊位规模与航道的适配性[9]，优化通航标准与方案[10]，开展航道方案与码头规模的协同仿真优化[11-12]。上述研究多侧重单一阶段或简化水域条件，而对于多期高强度开发背景下，多突堤共用航道与柔性作业约束交织的系统性仿真研究尚不多见，尤其缺乏“多期建设时序—港航系统动态响应—通航能力匹配”的量化评估框架。

为此，以琅琊台湾作业区为对象，构建离散事件动态系统仿真模型。该模型综合船舶随机到港、潮汐乘潮窗口、昼夜航行规则及柔性靠泊作业等约束，通过实际生产数据验证，使得到港船舶数与在泊时间仿真误差均低于 5%。以此为基础，量化分析近期集中投产、中期扩建及远期全部泊位投产等多情景下，航道通过能力与预测吞吐量的匹配关系。本文重点揭示多期建设进程中港航系统的瓶颈演化规律，判断通航适应能力的冗余与不足。

针对董家口港区琅琊台湾作业区船舶通航的特定特征，本文重点实现多期建设时序下复杂水域港航系统通航适应性的全情景量化评估，模型精细融合了多突堤共用航道与柔性靠泊机制。研究成果可为大型综合性港区的水域规划、建设时序优化及运营资源动态配置提供科学依据。

1　琅琊台湾作业区通航环境分析

青岛港董家口港区琅琊台湾作业区依托琅琊台湾构筑有掩护环境，分别在董家口半岛和鸭岛附近设南、北两座突堤，突堤端部延伸建设防波堤，在琅琊台湾内形成一个有良好掩护条件的港池，港池内码头岸线环湾布置，使湾内形成突堤与港池相间的空间布局。

作业区内已建 16 个泊位，主要用于装卸金属矿石、通用货种及多用途货种，设计通过能力为 6 102 万 t/a，14 万 TEU/a。根据青岛港发展和建设规划要求，琅琊台湾作业区拟近期开工北三突堤 7#~8#泊位工程、湾底通用码头工程、东部集装箱码头一期工程 3 个项目，按计划将于 2030 年前建成投产，投产后形成 12 个泊位，新增设计通过能力 2 168 万 t/a，361 万 TEU/a；远期规划东部集装箱码头二期、三期工程，形成 7 个泊位，新增设计通过能力 800 万 TEU/a。结合当地现状通航规则调研情况，琅琊台湾作业区通航环境特点如下。

1）自然条件复杂，船舶航行条件多变。琅琊台湾作业区口门附近流水急，自引船舶(特别是重载船舶)需要保持一定安全船速进出口门。作业区内港池流场整体均匀，但在相邻突堤拐角处流速变化剧烈，船舶在靠泊部分岸线时，需要满足一定的潮流条件。作业区内港池航道自口门向湾底距离约 4.4 km，整个港池的岩面高程自南向北逐渐增高，由−18.0 m 逐渐变化至−13.5 m，不同泊位的到港船舶有不同的乘潮需求。

2）船舶货种多样，局部港池交通繁忙。作业区内靠泊船舶类型包括集装箱船、干散货船、杂货船以及特种船等。船舶吨级跨度为 1 万~20 万 DWT，该区域 2023 年通航船舶超过 1 400 艘次，作业区湾内突堤与港池相间，多个泊位共用港池水域，局部港池交通流量繁忙。

3）码头岸线曲折，船舶靠泊组合多样。作业区内泊位沿琅琊台湾自然岸线整体形态呈多段弯折分布，其中北一突堤、北二突堤、北三突堤均按照满堂一字形布置岸线，各段岸线作业货种的装卸机械轨道沿岸线通长布置(北三突堤粮食泊位

除外），船舶装卸作业需考虑柔性靠泊需求，缓解港口生产的不平衡性，协调生产各方面的关系，保证装卸及时进行，提高港口的服务水平。

2　琅琊台湾作业区仿真模型构建

2.1　船舶在港作业流程分析

通过对琅琊台湾作业区船舶作业全过程实地调研与系统分析，充分考虑港航系统固有的随机性、动态性和复杂性特征，构建港航系统仿真模型，以复现船舶进出港作业整体流程。

船舶在港作业流程见图 1。

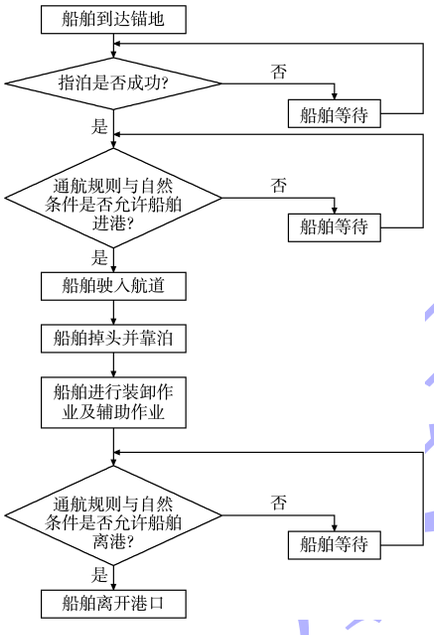

图 1　船舶在港作业流程

Fig. 1　Vessel in-port operation process

1）船舶到达。琅琊台湾作业区内由不同码头公司运营，不同码头公司的到港船舶按照各自规律到港。船舶到港后进入锚地等待指泊。

2）船舶指泊。船舶到达锚地后，需要为船舶分配泊位。若有合适的空闲岸线，则将该段岸线位置分配给船舶，指泊完成；若目的码头的所有岸线均无满足靠泊条件的空闲岸线，则船舶在锚地继续等待。由于各码头船舶吨级跨度大，连续岸线需根据船舶长度和富余尺寸灵活安排靠泊位置。

3）航行进港。指泊完成后，根据通航条件判断船舶是否可以进港。若条件满足，船舶从锚地出发，驶入航道，遵循通航规则与航速限制驶向泊位；否则船舶在锚地等待。

4）靠泊及装卸作业。船舶在回旋水域完成掉头后，靠泊至指定岸线，开始装卸作业和辅助作业。辅助作业包括开工准备作业和完工辅助作业。

5）离泊作业。泊位作业结束后，根据通航条件判断船舶是否可以离泊。若条件满足，则船舶解缆离泊，否则在泊位继续等待。

6）航行出港。船舶离泊后在回旋水域掉头，驶入航道，遵循通航规则与航速限制航行一段时间，直至驶离港口。

2.2　仿真模型基本假设

为聚焦研究重点，模型做以下基本假设。

1）根据港区轮驳有限公司反馈，拖轮规模可随码头建设规模的增加而灵活扩展（通过新购或调配方式），当前及未来的拖轮数量均能满足船舶进出港作业需求。

2）该海区潮汐类型判别系数 $(H_{O1}+H_{K1})/H_{M2}$ 为 0.4（H_{O1}、H_{K1} 为全日分潮 O1、K1 的振幅，H_{M2} 为主要半日分潮 M2 的振幅），属正规半日潮，模型按照每日 2 个高潮、2 个低潮的潮汐曲线进行模拟。模型基于该潮汐规律，结合船舶吃水和潮位，判断不同船舶能否乘潮或缓流进出港。本文仿真模拟的时间范围为全年，潮汐的季节性变化已在全年尺度上得到充分体现，因此该潮汐模型简化方法可以满足本文通航适应性评估的需求。

2.3　仿真模型架构与逻辑模型

仿真模型分为两大系统、8 个子系统：外部驱动系统和内部作业系统，外部驱动系统包括船舶生成子系统、潮流生成子系统、昼夜生成子系统；内部作业系统包括锚地子系统、航道子系统、回旋水域子系统、泊位子系统和船舶调度子系统。仿真模型架构见图 2。

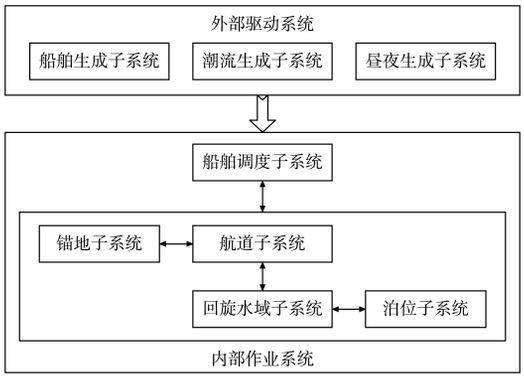

图 2　仿真模型架构

Fig. 2　Simulation model architecture

2.3.1　船舶生成子系统

船舶生成子系统基于预设的船舶到港时间间隔概率分布，驱动离散事件仿真流程，动态实例化船舶实体。各码头公司的船舶平均到港时间间隔，根据该码头公司各阶段的年到港船舶数计算得到。其中，散货船和杂货船的到港时间间隔服从 3 阶埃尔朗分布随机生成，集装箱船的到港时间间隔服从截断正态分布随机生成。

2.3.2　锚地子系统

锚地子系统作为到港船舶的队列缓冲区，主要承担等待队列管理、泊位分配协调及水域空间协调功能。

2.3.3　航道子系统

航道子系统具备两项主要功能：1）对拟进入航道船舶的通行条件进行预分析研判；2）对船舶在航道内的航行过程进行动态仿真推演。

航道通行条件判断包括：同向船舶安全间距是否满足要求；航道是否处于单向通航时段；船舶是否满足乘潮条件；船舶是否处于夜航限制时段；船舶通过口门时潮流条件是否允许；相邻泊位是否存在同时靠离泊冲突；船舶靠离泊时的潮流条件是否满足等。当以上条件均满足时，船舶方可进入航道。

2.3.4　回旋水域子系统

回旋水域子系统具备两项主要功能：1）判断船舶能否进入回旋水域；2）模拟船舶在回旋水域内的回旋、靠泊及离泊过程。同一回旋水域仅允许一艘船舶进行回旋作业，当有船舶正在使用时，后续船舶需在航道内等待。

2.3.5　泊位子系统

泊位子系统用于管理码头泊位的分配、使用等操作。泊位分配需满足以下条件：船舶装卸货种与泊位类型匹配；船舶吨级与泊位等级匹配；连续空闲岸线长度满足船舶组合靠泊要求。满足以上条件的泊位岸线可分配给船舶。船舶靠泊后，在泊位子系统完成装卸作业和辅助作业。

2.3.6　船舶调度子系统

船舶调度子系统是仿真模型内部作业系统中负责统筹泊位分配和船舶进出港安排的核心子系统，主要承担船舶指泊和船舶进出港时机判断两项关键功能。

2.3.7　潮流生成子系统

将潮汐曲线提前导入模型，基于潮汐曲线实时计算当前及未来一段时间的潮位值和缓流时间窗口，为乘潮通航判断提供依据。

2.3.8　昼夜生成子系统

根据当地日出日落时间，设定模型中的白天与夜晚时段。当夜间禁止通航的船舶计划进入航道时，调用该子系统判断船舶航行时段内是否均处于白天时段，若处于夜间时段则禁止通行。

2.4　仿真模型构建与评估指标

本文仿真模型的边界包括陆域与水域两部分。在此范围内，系统模拟的要素主要有船舶、航道与港池、泊位、潮汐以及昼夜变化，这些要素共同构成本文研究与模拟的核心对象。其中，陆域边界为琅琊台湾作业区内泊位岸线，船舶在此停靠并进行装卸作业。水域边界为锚地和琅琊台湾港池及航道。琅琊台湾作业区港航系统仿真模型基于仿真软件 AnyLogic 构建出上述仿真模拟过程。结合港方运营单位关注重点，针对琅琊台湾作业区通航能力仿真评估指标为：1）年完成船舶数，单位为艘次；2）船舶平均等泊位时间，单位为 h；3）船舶平均进港等水域时间，单位为 h；4）船舶平均出港等水域时间，单位为 h；5）船舶平均在泊作业时间，单位为 h；6）船舶平均在泊时间，单位为 h；7）港口服务水平指标（t_{AWT}/t_{AST}）。

水运工程

港口服务水平指标 t_{AWT}/t_{AST} 是全年模型的主要评价指标。其中，t_{AWT} 为船舶平均等待时间，包含船舶平均等泊位时间、平均进港等水域时间和平均出港等水域时间；t_{AST} 为船舶平均在泊作业时间；t_{AWT}/t_{AST} 反映的是船舶等待时间占在泊作业时间的比值。

琅琊台湾作业区主要为散货船、杂货船和集装箱船，结合该水域船舶通航的复杂水域条件，本文推荐的各类码头的服务水平评价标准为：琅琊台湾作业区散货码头、通用码头的服务水平 $t_{AWT}/t_{AST}\leqslant 0.5$，多用途码头的服务水平 $t_{AWT}/t_{AST}\leqslant 0.4$、集装箱码头的服务水平 $t_{AWT}/t_{AST}\leqslant 0.3$。

2.5 仿真模型验证

为验证仿真模型架构、基本假设等模拟分析内容的有效性和可靠性，本文根据仿真试验结果与 2023 年实际运营数据做比对，仿真模型按照与调研情况对应的原则，针对不同货种到港船舶和在泊时间进行统计分析。最终对仿真模型情况的有效性和可靠性进行判断。对比结果见表 1。

表 1 模型验证对比结果

Tab. 1 Comparison results for model validation

主要货种	停靠泊位	到港船舶数/艘次			在泊时间/h		
		试验结果	2023 年生产数据	偏差/%	试验结果	2023 年生产数据	偏差/%
金属矿石	D2～D5	1 349.3	1 350	-0.1	23.99	23.83	0.7
通用散杂货	D6～D17、D20、D21	1 740.9	1 741	0	35.74	37.31	-4.2
集装箱	D18、D19	247.2	247	0.1	13.84	13.95	-0.8

该结果表明，所构建的仿真模型在输入参数、逻辑结构及输出响应方面均与现状系统保持了良好的一致性，模型有效性和可靠性得到较好的验证。

3 适应性分析与通航能力评估

3.1 仿真工况设计

为研究现状泊位、近期新建泊位及远期规划泊位条件下，琅琊台湾作业区港航系统通过能力与港口生产需求的适应性，设计 3 个仿真试验工况，见表 2。

表 2 仿真试验工况

Tab. 2 Simulation test conditions

工况	泊位条件	到港船型和船舶数
1	现状泊位	2023 年到港船型和船舶数
2	现状泊位＋近期新建泊位	现状泊位：2023 年实际船型和船舶数； 新建泊位：近期预测船型和船舶数
3	现状泊位＋近期新建泊位＋远期规划泊位	现状泊位：2023 年实际船型和船舶数； 新建泊位：远期预测船型和船舶数

每组工况进行 10 次仿真试验，每次试验的模型运行时间为 357 d。

3.2 港航系统适应性分析

在现状泊位和到港船舶数条件下，作业区港池航道系统与现状港口发展需求适应性仿真试验结果见表 3。琅琊台湾作业区内北一突堤、北二突堤、北三突堤在完成吞吐量指标的情况下，码头服务水平均低于 0.5，全港码头平均服务水平为 0.13，达到推荐标准。因此，琅琊台湾作业区港池航道适应现状港口发展需求。

近期新建北三突堤 7#～8#泊位工程、湾底通用泊位工程和东部集装箱码头一期工程投产运营后，作业区港池航道系统与近期港口发展需求适应性仿真试验结果见表 4。

从已建泊位的船舶平均等泊位时间相较于现状变化情况可以看出，靠泊北一突堤、北三突堤南侧等大吨级泊位的船舶等泊位时间明显缩短，新建工程可有效减少小吨级散杂货船在一定时间内占用大吨级泊位的情况；而船舶平均进/出港等水域时间略有增加，这表明近期港池航道的通行能力相对稳定，虽然码头服务水平指标也有所增加，但该指标仍然处于较好水平。

表 3　现状适应性仿真试验结果

Tab. 3　Simulation test results of current adaptability

码头位置	年完成船舶数/艘次	船舶平均等泊位时间/h	船舶平均进港等水域时间/h	船舶平均出港等水域时间/h	船舶平均在泊作业时间/h	船舶平均在泊时间/h	码头服务水平
北一突堤泊位	1 349	5. 88	0. 22	1. 23	22. 76	23. 99	0. 32
北二突堤泊位	1 741	0. 61	0. 28	0. 59	35. 15	35. 74	0. 04
北三突堤南侧泊位	247	0. 35	0. 28	0. 43	13. 41	13. 84	0. 08

表 4　近期适应性仿真试验结果

Tab. 4　Simulation test results of near-term adaptability

码头位置	年完成船舶数/艘次	船舶平均等泊位时间/h	船舶平均进港等水域时间/h	船舶平均出港等水域时间/h	船舶平均在泊作业时间/h	船舶平均在泊时间/h	码头服务水平
北一突堤泊位	1 350	4. 03	1. 51	1. 28	22. 78	24. 06	0. 30
北二突堤泊位	1 741	1. 40	3. 26	0. 94	32. 66	33. 60	0. 17
北三突堤南侧泊位	247	0. 23	1. 63	0. 67	13. 73	14. 39	0. 18
北三突堤 7#～8#泊位	1 165	2. 89	2. 36	0. 91	21. 85	22. 77	0. 28
湾底通用泊位	954	13. 91	2. 55	0. 68	47. 96	48. 64	0. 36
东部集装箱一期	557	4. 17	1. 11	1. 98	26. 33	28. 30	0. 28

远期在近期新增泊位的基础上，再增加规划东部集装箱码头二期和三期工程，作业区港池航道系统与远期港口发展需求适应性仿真试验结果见表 5。可以看出，在新增东部集装箱码头二期和三期工程后，作业区内港池航道较为拥挤，船舶平均等泊位时间、平均进出港等水域时间均呈上升趋势，码头服务水平数值进一步增加，已接近推荐指标，琅琊台湾作业区港池航道仍能适应远期港口发展要求。

表 5　远期适应性仿真试验结果

Tab. 5　Simulation text results of long-term adaptability

码头位置	年完成船舶数/艘次	船舶平均等泊位时间/h	船舶平均进港等水域时间/h	船舶平均出港等水域时间/h	船舶平均在泊作业时间/h	船舶平均在泊时间/h	码头服务水平
北一突堤泊位	1 350	5. 17	1. 92	1. 35	22. 78	24. 13	0. 37
北二突堤泊位	1 741	2. 29	4. 90	1. 20	32. 78	33. 97	0. 26
北三突堤南侧泊位	247	0. 18	2. 72	1. 02	13. 63	14. 65	0. 29
北三 7#～8#泊位	1 165	4. 03	3. 45	1. 11	21. 85	22. 97	0. 39
湾底通用泊位	954	14. 98	3. 81	0. 92	47. 96	48. 88	0. 41
东集一期	557	4. 18	1. 31	1. 97	26. 33	28. 30	0. 28
东集二期、三期	1 143	0. 56	2. 57	1. 41	30. 62	32. 03	0. 15

4　结语

1）本文构建的琅琊台湾作业区港航系统仿真模型具有良好的有效性与可靠性。模型以 2023 年实际生产数据进行验证，到港船舶数及在泊时间等关键指标偏差均小于 5%，其中金属矿石到港船舶数偏差仅为-0. 10%，通用散杂货在泊时间偏差为-4. 20%，集装箱在泊时间偏差为-0. 80%，大部分指标偏差控制在 1%以内，表明模型能够较为准确地复现作业区港航系统的实际运行状态。

2）多期建设时序下，琅琊台湾作业区港池航道通航能力均能满足泊位建设规模需求。现状工况下，全港码头平均服务水平为 0. 13，远优于推荐标准(≤0. 5)；近期 3 个项目投产后，靠泊大吨级泊位的船舶平均等泊位时间由 5. 88 h 降至 4. 03 h，码头服务水平仍处于较优水平(0. 17～0. 36)；远期全部规划泊位建成后，各码头服务水平虽有所上升(0. 15～0. 41)，但均未超出推荐标准。上述结果表明，作业区港池航道在多期高强度开发背景下仍具备充足的通航适应性。

3）本文实现了多期建设时序下复杂水域港航

系统通航能力的量化评估，可为大型综合性港区的水域规划优化、泊位建设时序安排及港航资源动态配置提供决策参考。未来可进一步拓展模型在极端天气、突发事件等非常规工况下的应用，探索仿真技术与智慧港口调度系统的融合，提升模型对实际运营的支撑能力。

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.
Yao Haiyuan, Fang Zhuo, Hao Jun, et al. Simulation method of criteria for waterway navigation based on multi-agent technology [J]. Port & Waterway Engineering, 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.
Tang Ying, Xue Xiaoxiao, Shang Jianping. Simulation on the throughput capacity analysis of deep channel in Guangzhou port [J]. Port & Waterway Engineering, 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.
Wang Geng, Xu Caiguang. Simulation study on the capacity of Tonggu channel in Shenzhen Port based on Flexsim [J]. Port & Waterway Engineering, 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.
Yu Zhouxun, Zhu Chengbin, Hu Bin, et al. Simulation and prediction of through capacity of Qianwan Waterway in Qingdao Port [J]. Port & Waterway Engineering, 2023(6): 165-170, 178.

[5] 焦广军, 王轩, 李笑晨, 等. 天津港北航道航道通过能力仿真模拟试验研究[J]. 水道港口, 2023, 44(3): 383-391.
Jiao Guangjun, Wang Xuan, Li Xiaochen, et al. Modeling and simulation research on the traffic capacity of the North Channel of Tianjin port[S]. Journal of Waterway and Harbor, 2023, 44(3): 383-391.

[6] 王志斌, 王勇健, 王更, 等. 复杂通航环境下海港航道扩建规模仿真研究[J]. 水运工程, 2024(8): 250-255.
Wang Zhibin, Wang Yongjian, Wang Geng, et al. Simulation study on expansion scale of seaport channel in complex navigation environment [J]. Port & Waterway Engineering, 2024(8): 250-255.

[7] 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.
Zuo Tianli, Nie Xiangjun, Hao Jun, et al. Optimization of coastal channels in complicated waters through multi-agent simulation [J]. Navigation of China, 2017, 40 (1): 97-101.

[8] 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.
Yu Huaqiang, Tang Ying. Determination of channel widening scheme in coal port area of Huanghua Port based on simulation technology [J]. Port & Waterway Engineering, 2021(10), 316-322, 327.

[9] 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.
Shi Dianzhong. The study of influence on channel traffic capacity by navigation of very large ship [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.

[10] 房卓, 赵鑫哲, 唐国磊, 等. 北部湾港大型深水航道远期适应性及通航标准仿真分析[J]. 水运工程, 2024(10): 144-151.
Fang Zhuo, Zhao Xinzhe, Tang Guolei, et al. Simulation of long-term adaptability and navigation standard of large deepwater channel in Beibu Gulf Port [J]. Port & Waterway Engineering, 2024(10): 144-151.

[11] 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.
Shen Chen, Fang Zhuo, Zhang Minhui, et al. Simulation study on construction scale of LNG terminal with multi-berths in one-way channel[S]. Port & Waterway Engineering, 2019(11): 122-126, 132.

[12] 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.
Shen Chen, Sun Lu, Bao Jianyu, et al. Construction scale of Caofeidian LNG terminals and navigation efficiency adaptability[J]. Port & Waterway Engineering, 2019(12): 70-74.

（本文编辑 王璁）

水运工程