

· 信息技术 ·



面向复杂环境的电厂煤炭接卸系统 物流仿真研究

张文东，魏东

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司，湖北 武汉 430071)

摘要：通过对包含过驳作业的燃煤电厂整个煤炭接卸系统能力的匹配优化、建设投资及运营费用等的研究，基于离散事件动态系统理论，结合计算机仿真技术，建立实现煤炭过驳端装卸船、码头接卸船、穿梭船运输等物流功能的逻辑模型，得出不同系统组合的建设投资及运营费用的分析方法以确定最优的装卸系统配置，为类似过驳系统中穿梭船数量的选取以及码头端接卸能力的合理选取提供参考。

关键词：接卸系统；匹配优化；仿真；系统配置

中图分类号：U 65；U 1

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)02-0115-06

Logistics simulation of coal handling system in power plant under complicated environment

ZHANG Wen-dong, WEI Dong

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on the discrete event dynamic system theory and computer simulation technology, we establish a logical model to realize the logistics functions of the coal transshipment system, the jetty handling system, and shuttle transportation, etc. By studying the capacity matching optimization, construction investment, and operation cost of the whole coal handling system, we obtain the analysis methods of construction investment and operation cost of different system combinations to determine the optimal configuration of loading and unloading system, which serves as a reference for the selection of the number of shuttles in similar transshipment system and a reasonable selection of jetty handling capacity.

Keywords: transfer system; matching optimization; simulation; system configuration

孟加拉某燃煤电厂项目是孟加拉国家重点项
目，煤炭接卸系统是该电厂项目的一个重要组成
部分，包括远洋运输船海上过驳、穿梭船运输和
码头接卸系统3部分。孟加拉湾是风暴潮的多发
地区，气象条件复杂，作业天数有限，极大影响了
煤炭接卸系统能力的发挥，接卸系统内各部分存
在作业效率不线性、卸船过程效率匹配不平衡等
问题，给系统各部分的合理选型造成很大困难。

目前关于各系统之间能力匹配的研究只有定

性分析，或者没有全面考虑相关因素对系统的影响，尚无一套切实可行的计算分析方法^[1]。

如何确定以及优化远洋运输船过驳系统能力、穿梭船数量以及码头接卸设备能力直接影响到接卸系统投资和电厂效益。海上过驳系统年过驳能力的计算类似于码头装卸系统，可借鉴港口规范中码头通过能力计算公式来确定海上过驳系统的装卸能力^[2]，但是由于船舶在过驳同一艘远洋运输船时其能力是变化的，随着远洋运输船载货量减少，其实际效率不断降低，因此过驳能力、穿

梭船的运输能力以及码头端接卸能力的合理确定尤为困难。笔者提出一种结合计算机仿真技术，通过模拟不同穿梭船数量及码头接卸能力对实际情况的影响，统计分析远洋运输船平均在港时间及穿梭船等待时间、综合考虑基础建设及船舶在港费用的经济合理的解决方案。

1 煤炭接卸系统的组成与物流过程影响因素分析

1.1 煤炭接卸系统的组成

煤炭接卸系统主要由远洋运输船海上过驳、穿梭船运输和码头接卸系统3部分组成。

1.1.1 远洋运输船海上过驳系统

1) 海上过驳平台系统。海上过驳平台系统由起重机和皮带机集成方式组成。平台长度一般为110~200 m，平台甲板一侧可根据能力安装多台卸船设备，甲板上设多级皮带机转接，将煤炭转运至驳船上^[3]。该方案优点是使用成熟，在国内外有类似工程的成熟使用经验；缺点是该平台仅有发电系统，没有自航系统，作业必须配备拖轮辅助，建造费用高。因此海上过驳平台系统一般应用于大型过驳系统。

2) 浮式转运船。浮式转运船设有抓斗卸船起重机，煤炭通过抓斗转运至驳船，或利用俯仰机构将煤炭卸至漏斗内，再通过漏斗下方的皮带机转运至装船设备进行驳船装船作业；浮式转运船自带推进系统。浮式转运船平台尺寸小，船长60~75 m，宽度约24 m。抓斗起重能力32~48 t，卸船额定能力7 500~14 000 t/h。该方式可同时采用2艘或3艘浮式转运船进行过驳作业，其优点是结构较为简单，且投资省、机动性好。因此，浮式转运船一般适用于中、小型过驳系统。

1.1.2 穿梭船运输系统

穿梭船形式多样，按航行方式可分为有动力和无动力2种，穿梭船选择主要考虑自然条件尤其是水深条件对船舶吃水的影响，一般载质量为1 000~12 000 t。

1.1.3 码头接卸系统

码头接卸系统主要采用卸船机，卸船机分为

周期性作业机械和连续性作业机械两大类。主要设备类型有门座式起重机、带斗门机、桥式抓斗卸船机及螺旋卸船机等。门座式起重机具有较强的适应能力，一般配置抓斗用于散货装卸，卸船效率一般为400 t/h；带斗门机设有接料漏斗和机上带式输送机，卸船效率一般在600 t/h以下，适应船型不超过5万吨级；桥式抓斗卸船机依靠小车运行实现抓斗的水平移动，优点是卸船效率较高，一般在600~3 000 t/h，缺点是环境污染大。螺旋卸船机可通过连续作业完成卸船作业，优点是卸船效率较高，一般在500~2 000 t/h，清仓量较少，环境污染小；缺点是设备的后期维护费用较高。

1.2 物流过程影响因素

1) 作业天数。作业天数主要受风、雨、雾以及波浪等自然条件的影响，本项目波浪是最主要的影响因素。对于海上过驳系统，允许作业的风速、波高等作业标准目前国际上还没有明确规定，有的运营公司认为波高小于2 m可以作业，有的运营公司认为小于1.5 m可以作业。但参考码头作业的标准看，波高一般超过1 m时，对于6 000吨级及以下驳船，抓斗作业会很困难。

2) 远洋运输船到港的不确定性。过驳远洋运输船到港是一个随机事件，受海上浪、风暴潮等自然条件影响，也受到信息通信、物流设施等社会因素影响，其分布近似于泊松分布，泊松事件流的等待时间，即相继两艘远洋运输船到达时间间隔服从负指数分布。

3) 远洋运输船过驳效率影响。远洋运输船在向穿梭船过驳过程中，每个艘次的过驳效率都不一样，总体呈下降趋势且不线性，而且受当时气象条件差异的影响，过驳效率差别也很大。

4) 穿梭船数量的影响。穿梭船的数量将会影响其运输能力，从而影响过驳的效率以及卸船的效率。

5) 码头卸船效率的影响。码头卸船效率主要取决于卸船机选型，须结合年吞吐量、接卸船型大小、当地环保要求、物料特性等综合选择。

2 基本输入条件

- 1) 煤炭吞吐量: 500 万 t/a;
- 2) 远洋运输船型: 载质量 6 万 t 散货船;
- 3) 过驳点位置: 距离卸煤码头约 46 km;
- 4) 年作业天数: 海上过驳系统约 270 d, 码头接卸系统约 290 d。

5) 海上过驳系统: 过驳平台配置有专业化的过驳设备, 过驳能力一般在 2 000 t/h 以上, 考虑平台建造成本过高, 且过驳能力与码头卸船能力相差太大, 造成一定程度的浪费, 该方案暂不考虑。浮式转运船方案单台额定过驳能力可达 1 000 t/h 以上, 转运船上的固定吊机为定制产品, 且造价低, 该过驳形式在孟加拉沿海过驳市场较普遍, 运营期新造或者租用都较为方便。借鉴港口规范中码头通过能力计算公式, 系统采用 2 套额定卸船能力 1 400 t/h 的浮式转运船可满足货运量需求。过驳系统的过驳时间曲线见图 1。

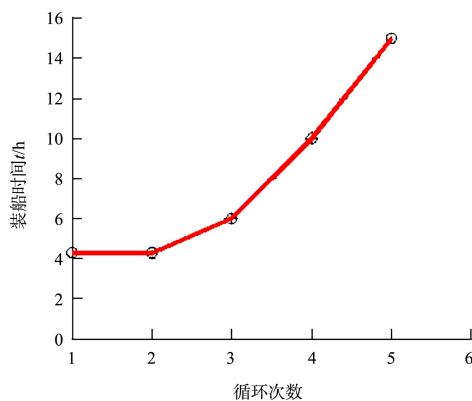


图 1 过驳系统过驳时间曲线

6) 穿梭船运输系统: 采用载质量 6 000 t 驳船, 根据泊位数及作业线数量, 最少配置 2 艘, 再分别按倍数增加至 4 艘及 6 艘共 3 种情况进行分析。

7) 码头接卸系统: 结合码头区域水深条件, 不适合建设大型码头。综合考虑建设投资及后期维护费用, 须建设 2 个 6 000 t 驳船泊位, 结合孟加拉政府环保政策的要求, 泊位卸船设备指定采用螺旋卸船机, 结合运输船型, 每个泊位配备 1 台卸船机, 根据港口规范中码头通过能力公式计算, 每台卸船机额定能力不小于 1 000 t/h。本次按

满足年运量最小单台额定能力 1 000 t/h, 以及与过驳系统额定能力相匹配单台额定能力 1 400 t/h 两种情况分析。

8) 驳船靠离泊、过驳、码头卸船、去程、回程时间见表 1。

表 1 时间参数

| 额定卸船效率/(t·h ⁻¹) | 靠泊时间/h | 离泊时间/h | 过驳时间/h | 卸船时间/h | 去程时间/h | 回程时间/h |
|-----------------------------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|
| 2×1 000 | 1 | 0.5 | 4.3~15.0 | 8.6 | 3.5 | 3.5 |
| 2×1 400 | 1 | 0.5 | 4.3~15.0 | 4.5 | 3.5 | 3.5 |

3 仿真模型

通过对接卸系统的分析, 明确内部的逻辑流转关系, 结合 Petri 网建模理论, 构建过驳系统的概念模型^[4]。

船舶到达后开始通过过驳系统进行过驳准备; 然后船舶进行过驳作业, 驳船按计划到达远洋运输船处对应的过驳系统装卸点, 浮式起重机将煤炭输送至驳船; 满载驳船航行至码头, 码头接卸系统将驳船上煤炭卸载输送至后方堆场, 空载驳船返回至远洋运输船处重复运输煤炭, 直至远洋运输船卸载完毕, 作业流程基本结束^[5]。

基于上述作业流程分析, 建立过驳系统 Petri 网模型(图 2), 模型元素含义见表 2。

通过计算机仿真系统, 分别建立 2、4、6 艘驳船转运模型, 见图 3。

表 2 接卸系统 PN 模型元素含义

| 库所 | 含义 | 变迁 | 含义 |
|-----|------------|-----|--------------|
| P0 | 船舶装卸煤炭信息 | T0 | 接收装卸煤炭信息 |
| P1 | 装卸煤炭信息处理 | T1 | 制定卸船作业计划 |
| P2 | 船舶到港 | T2 | 查看码头泊位信息 |
| P3 | 船舶停锚地等待 | T3 | 等待驳船装卸 |
| P4 | 驳船空闲 | T4 | 驳船航行至远洋运输船 |
| P5 | 驳船繁忙 | T5 | 判断浮式起重机状态 |
| P6 | 驳船到达远洋运输船侧 | T6 | 等待浮式起重机空闲 |
| P7 | 浮式起重机空闲 | T7 | 浮式起重机输送煤炭至驳船 |
| P8 | 驳船航行至码头泊位 | T8 | 等待码头泊位作业设备空闲 |
| P9 | 码头泊位作业设备空闲 | T9 | 输送煤炭至后方堆场 |
| P10 | 卸船任务完成 | T10 | 驳船回锚地 |
| P11 | 船舶离港 | | |

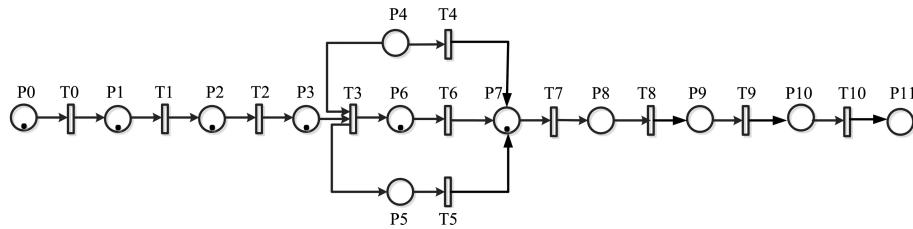
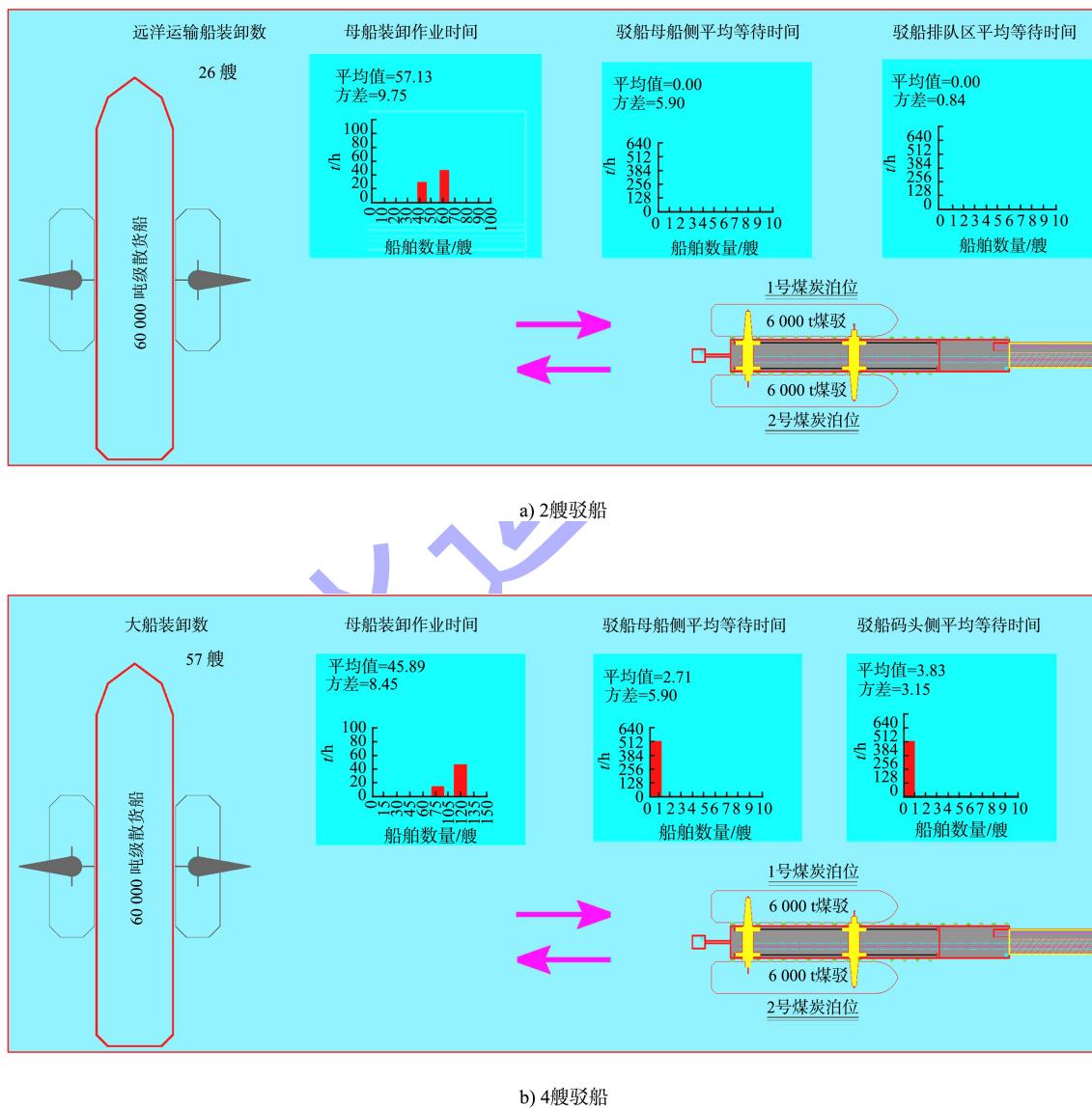


图 2 过驳系统 PN 模型



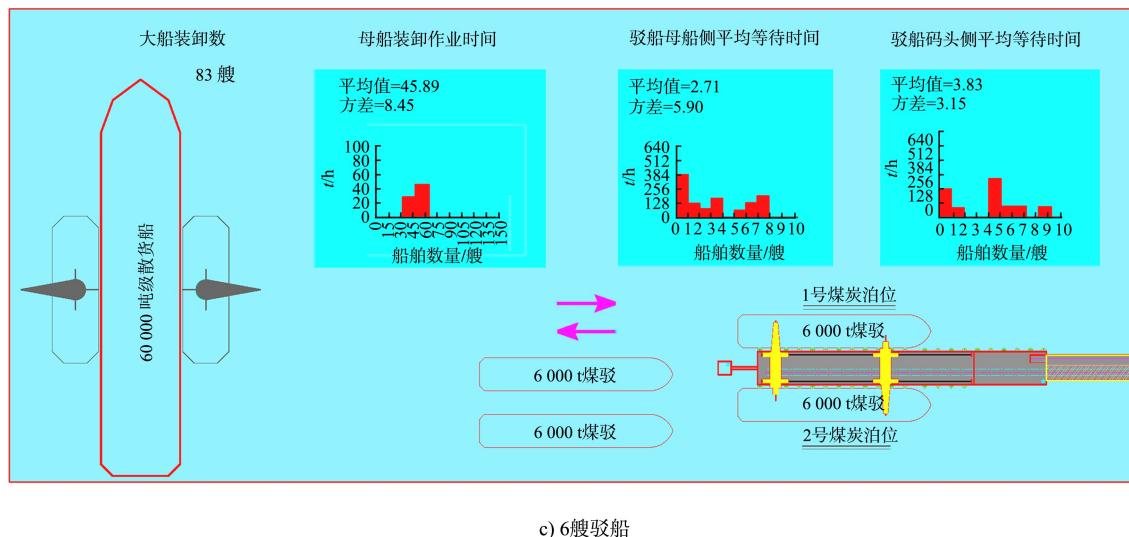


图3 不同数量驳船转运模型

4 试验工况组合

远洋运输船到达时间间隔服从参数为 λ 的负指数分布, 其中参数 λ 根据基本输入条件可设置为 NEGEXP(77.76) (单位: h), 在此船舶到港间隔下, 分别进行 6 组工况组合试验(表 3)。

表3 工况组合

| 工况组合 | 驳船数量/艘 | 码头卸船额定效率/(t·h ⁻¹) |
|------|--------|-------------------------------|
| 1 | 2 | 2×1 000 |
| 2 | 2 | 2×1 400 |
| 3 | 4 | 2×1 000 |
| 4 | 4 | 2×1 400 |
| 5 | 6 | 2×1 000 |
| 6 | 6 | 2×1 400 |

5 试验数据及分析

按照表 3 试验工况组合, 改变随机数流, 分别运行仿真模型, 取平均值, 见表 4。

表4 不同工况组合试验数据

| 工况组合 | 全年母船装卸数量/艘 | 母船平均装卸时间/h | 过驳端驳船平均等待时间/h | 驳船码头端平均等待时间/h |
|------|------------|------------|---------------|---------------|
| 1 | 55.5 | 122.00 | 0 | 0 |
| 2 | 61.4 | 110.09 | 0 | 0 |
| 3 | 85.4 | 59.68 | 0.35 | 0.95 |
| 4 | 85.9 | 53.51 | 0.93 | 0.44 |
| 5 | 86.4 | 45.32 | 3.05 | 3.89 |
| 6 | 86.8 | 41.47 | 5.59 | 1.37 |

通过表 4 分析得知, 码头装卸船舶数量及驳船总的等待时间受驳船数量与码头设备效率的共同影响。配置 2 艘驳船时, 码头服务船舶数不超过 62 艘, 不能满足设计要求; 驳船分别配备 4 艘

和 6 艘 2 种情况下, 码头服务远洋运输船数约为 87 艘, 能满足设计要求。当驳船配备 4 艘时, 码头额定卸船效率 1 000 t/h 和 1 400 t/h 对装卸远洋运输船数量的影响很小, 均能满足设计要求。在码头卸船效率一定的条件下, 配置 4 艘或者 6 艘驳船对远洋运输船在港时间影响较大, 相差均大于 12 h, 且对驳船总的等待时间的影响较大, 相差 5~6 h; 在驳船数量一定的条件下, 码头卸船效率 1 000 t/h 和 1 400 t/h 对远洋运输船在港时间有一定的影响, 均为 4~6 h, 码头卸船效率对驳船总的等待时间的影响较小。

综上分析可看出, 工况组合 3 可满足电厂煤炭进口需求, 但远洋运输船平均等待时间明显增加, 有必要对煤炭接卸系统投资费用和远洋运输船在港费用进行综合分析, 码头投资费用综合水工结构建设投资费用、卸船设备购置费、皮带机输送系统购置费等, 远洋运输船综合考虑滞港费、年租船费用及人工费等。各组合对比结果见表 5。

表5 综合费用经济性对比

| 项目 | 建设投资费用/万元 | 远洋运输船平均在港时间/h | 远洋运输船在港综合费用/万元 |
|--------|-----------|---------------|----------------|
| 工况组合 3 | A | 60 | 2 366 |
| 工况组合 4 | A+1 200 | 53 | 2 090 |
| 工况组合 5 | A+5 000 | 45 | 1 774 |
| 工况组合 6 | A+6 200 | 41 | 1 706 |
| 备注 | - | 单程时间 | - |

注: 以上费用对比均按年服务远洋运输船 83 艘次计。

经综合分析,虽然工况组合 3 在最小建设投资情况下可满足电厂煤炭进口需求,但综合营运费用较高,考虑电厂全生命周期,工况组合 4 整体更为经济。这为工程建设方案的决策提供了另一种思路。

6 结语

1)过驳系统中驳船数量以及码头端接卸能力的确定对控制整个过驳系统的投资规模具有重要意义,驳船数量及码头端接卸能力的选取目前还没有一套明确的计算方法。

2)基于离散事件动态系统理论的物流仿真模型能够更准确、更细化地描述驳船数量和码头端接卸能力的动态变化,使得过驳系统仿真模型更符合实际情况,大大提高了系统仿真技术在过驳系统规划设计中的应用水平。

3)通过对专用散货过驳系统进行仿真,分析

比较驳船数量、码头接卸能力对远洋运输船在港时间、驳船等待时间的影响,分析不同工况组合的系统运营费用,确定最优的装卸系统配置,为类似过驳系统中驳船数量的选取以及码头端接卸能力的合理选取提供一个切实可行的参考方法。

参考文献:

- [1] 邹勇.浅谈水上过驳作业[J].广东造船,2006(3):46-48,45.
- [2] 中交水运规划设计院有限公司.海港总体设计规范:JTS 165—2013[S].北京:人民交通出版社,2014.
- [3] 刘锴.水上过驳装卸工艺设计[J].港口科技,1992(9):5-13,17.
- [4] 黄国梁,周强.基于 Petri 网的散货码头出口工艺系统建模与仿真[J].港口装卸,2007(3):35-37.
- [5] 余艳英,周强.基于堆场网格化的专业煤炭码头物流系统仿真模型[J].水运工程,2011(8):52-55.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 98 页)

5 结论

1)结合大连湾通航船舶现状、大连湾航道与锚地使用情况,通过引入具有 95% 保证率的通航代表船长,计算并确定了桥梁与锚地、人工岛与航道、锚地与航道的安全距离要求,计算简便,为解决该类问题提供了一种新的思路。

2)对于跨海交通工程影响下的桥、岛、隧与锚地、航道安全距离的研究成果仍然较少,具体项目实施时均参考同类项目经验或依赖数学及物理模型试验研究来解决该问题,亟待开展相关规范的编修工作。

3)锚地实际使用中应加强对锚泊船舶安全教育以及大桥的安全管理工作。大连湾水域航路交错、通航船舶密度大、种类繁多,应结合跨海通道工程的建设,完善通航安全保障措施,加强海事配套设施建设。

参考文献:

- [1] 孟凡超,刘晓东,徐国平.港珠澳大桥主体工程总体设

计[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会.全国桥梁学术会议论文集.北京:中国土木工程学会桥梁及结构工程分会,2010.

- [2] 李靓亮,李文全.《内河通航标准》中水下隧道与锚地安全间距的探讨[J].水运工程,2018(12):108-112,118.
- [3] 王新磊,张勇,何琼.浅谈港珠澳大桥路线总体设计[J].市政技术,2013,31(S1):92-95.
- [4] 李勤荣,周荣.国外跨海大桥水域的船舶定线制[J].水运管理,2020,42(Z1):11-13.
- [5] 裴金林,刘怀汉,许乐华,等.桥梁与码头等临河建筑物安全间距研究[J].水运工程,2013(9):95-98.
- [6] 胡殿才,汪生杰,崔峥.某离岸人工岛平面方案论证[J].水运工程,2012(12):162-167,199.
- [7] 康苏海,赵永印,耿艳芬.三亚湾人工岛建设对肖旗港航道影响[C]//中国海洋工程学会.第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下).南京:中国海洋工程学会,2015.
- [8] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.海港总体设计规范:JTS 165—2013[S].北京:人民交通出版社,2014.

(本文编辑 武亚庆)