



## 感潮河网区航道整治工程潮流数值模拟\*

倪志辉<sup>1,2</sup>, 易静<sup>1</sup>, 张绪进<sup>1,2</sup>

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 2. 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

**摘要:** 东江下游三角洲发生的河道采沙、航道整治等人类活动对该河网区河床形态的自然演变过程产生了较大影响, 引起河网区水动力产生相应的调整。基于非结构网格有限体积法的二维潮流数学模型, 对倒运海水道疏浚工程实施后二维潮流场进行模拟研究, 并从动力场的角度分析河网区航道整治效果。计算结果表明, 工程实施后对水流的影响主要集中在工程附近水域, 对河道沿程水位及流速的影响较小, 可为其它河网地区的航道整治工程提供参考。

**关键词:** 感潮河网区; 航道整治; 潮流; 数值模拟

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)06-0108-006

### Tidal flow numerical simulation study on regulation project in tidal river network area

NI Zhi-hui<sup>1,2</sup>, YI Jing<sup>1</sup>, ZHANG Xu-jin<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
2. Southwestern Research Institute of Water Transportation Engineering, Chongqing 400016, China)

**Abstract:** Sand excavation and channel regulation in Dongjiang delta have great impacts on the natural evolution of the river network area riverbed morphology. The two-dimensional tidal flow mathematical model is used for the tidal current study of Daoyunhai waterway, in which the finite volume method is adopted. On the basis of the model verification against the field-measured data, numerical simulation of tidal flow field before and after regulation is carried out. The treatment scheme of the hydrodynamic is calculated, and the river network channel regulation from the point of view of the dynamic field is analyzed. The study results show that the impact on the flow of water after implementation of the project mainly concentrates in the vicinity of the project. The impact on the drop, flow rate and water level of the river are small. Moreover, it provides the theoretical guidance of channel regulation in the tidal river network area.

**Key words:** tidal river network area; regulation project; tidal flow; numerical simulation

数值模拟试验是研究河道疏浚挖槽后河床变形及水动力场变化的有效手段。对于潮流数学模型, 国外在这方面的研究起步比较早, 并且已取得了很多的研究成果<sup>[1-4]</sup>。近年来, 国内在数值技术上的创新成果也不断应用于实际工程中, 模型

的模拟范围、方程的离散方法、模拟的计算精度以及不同控制方程的耦合求解等, 逐渐在应用的过程中得到改进、补充和完善<sup>[5-9]</sup>。由于东江三角洲网河区地理位置的特殊性和对国民经济发展的重要性, 使得对网河区的开发和利用步伐加快,

收稿日期: 2012-11-12

\*基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTC2012JJA30002); 省部共建水利水运工程教育部重点实验室暨国家内河航道整治工程技术研究中心开放基金(SLK2012A02); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ110409)

作者简介: 倪志辉(1980—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事河流海岸水动力学、环境及数值模拟方面的研究。

且河网复杂、入海口门多、模拟范围广、径潮混杂,以及发生的河道采沙、航道整治等人类活动对河网区河床形态的自然演变过程产生了较大影响,引起河网区水动力产生相应的调整。网河区受潮流和径流的双重影响,加上海洋对网河河口

的作用,其流场相当复杂。为此,笔者从河网区水动力特征出发,以东江中下游河网区倒运海水道航道整治工程为研究对象(图1),建立了感潮河网区平面二维潮流数学模型,并对工程河段整治前后效果进行了计算分析。

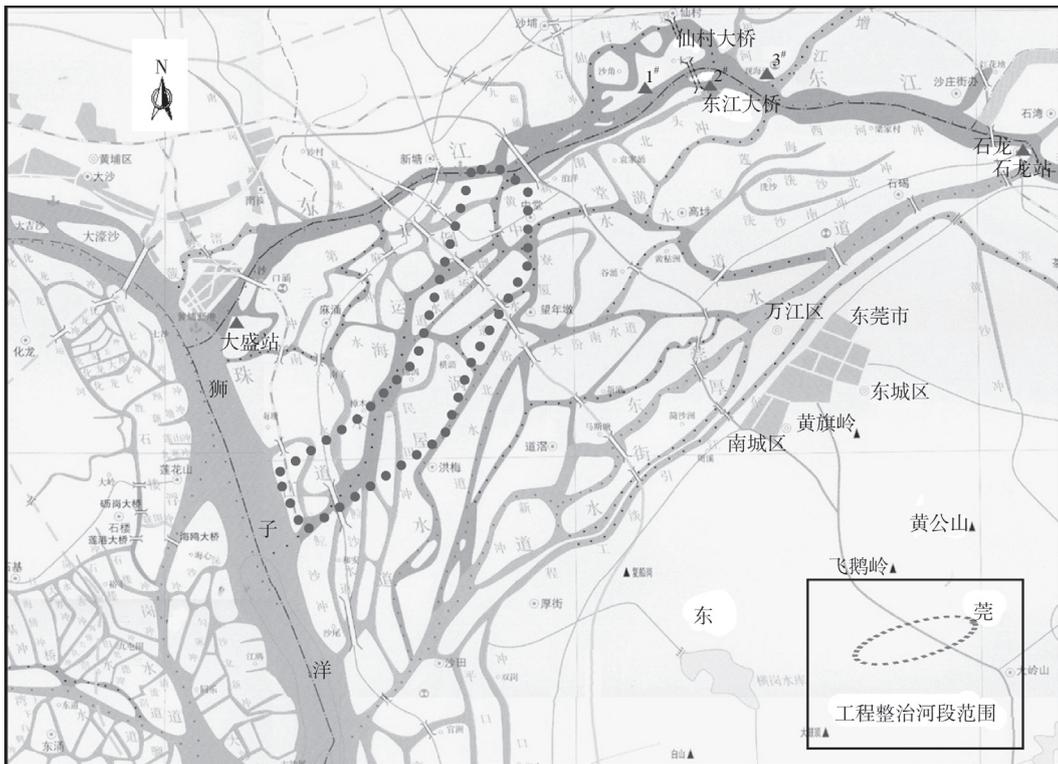


图1 东江中下游河网区

## 1 潮流数学模型

由于东江三角洲网倒运海地形条件较复杂,本模型采用了可以模拟复杂地形下多重动力因子耦合影响的潮流计算模型MIKE21来计算倒运海航道流场,以充分反映实际水域的复杂水动力条件。

### 1.1 计算域的确定及网格剖分

为了精确地获得工程水域的水文动力环境特征,采用大小模型嵌套的计算方法对研究水域潮流进行模拟计算。先利用数学模型对东江下游及三角洲河网大范围平面二维潮流状况进行计算,模拟研究现状条件下水域潮流动力分布特征;然后利用数学模型对工程区附近局部平面二维潮流状况进行模拟,模拟研究倒运海水道的潮流场变化。在模拟中均采用1980年西安坐标系3度带,基面采用国家85高程)。

东江下游及三角洲河网大区域(亦称“大范围”)平面二维潮流计算区域,计算范围区域及网格布置如图2所示,东江上游至博罗站,狮子洋上游至大盛站以北,下游至虎门。计算网格56 380个,最大空间步长150 m,最小空间步长20 m。陆边界采用法向零通量的边界条件,工程海域上游边界采用博罗站流量和大盛站以北的潮位控制,外海开边界条件由南中国海潮波运动数学模型提供。

倒运海水道局部(亦称“小范围”)平面二维潮流计算区域,计算范围区域及网格布置如图3所示,北至东江,距离进口疏浚段工程位置3 km,南至狮子洋,距离1#灯塔疏浚工程位置8 km。计算网格27 555个,最大空间步长40 m,最小空间步长10 m。



图2 大范围计算网格



图3 小范围计算网格

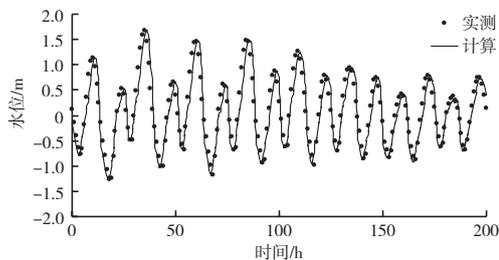
### 1.2 模型的求解方法及边界条件

求解域内采用有限体积法进行离散，即把连续空间区域划分为一组互不重叠的子单元。二维情况下，子单元可以是任意形状的多边形，但是本文中仅考虑三角形和四边形单元。陆边界，采用法向通量为零的边界条件，并使用切向的滑动边界条件，允许水流平行地沿着这些边界流动。在开边界上采用强迫边界条件，由水位、流量、水位流量关系来控制。岸滩边界采用干湿法模拟岸滩上的露滩和淹没过程。紊动扩散系数采用 $200 \text{ m}^2/\text{s}$ ；糙率采用 $0.025\sim 0.035$ 。模型的整体性、守恒性等保证了对洪季、枯季及口外实测资料率定、验证的良好结果。

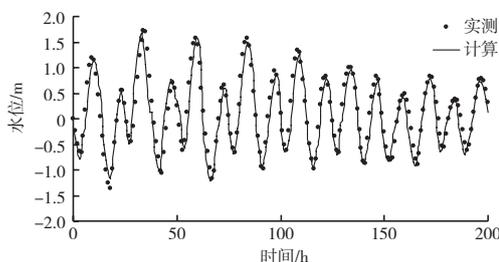
## 2 模型的验证

利用1999年洪季、2001年枯季、2010年洪季、2011年枯季的潮位和2001年枯季的流速等东江下游及三角洲河网水文测验资料对数模的合理

性进行验证。验证潮位站为大盛、麻涌、漳澎、泗盛围和石龙，测站如图1所示。本文只给出了部分水位站的潮位、流速过程验证图，潮位验证曲线见图4，流速验证曲线见图5。

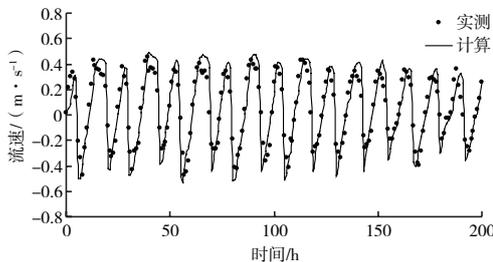


a) 大盛断面

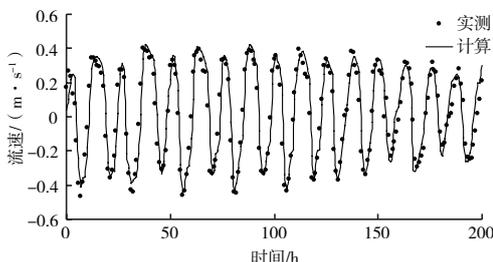


b) 泗盛围断面

图4 潮位验证



a) 大盛断面



b) 泗盛围断面

注：流速正为涨潮流速，负为落潮流速。

图5 流速验证

可见，各验证点计算水位、流速和实测值吻合较好，表明二维潮流数学模型参数合理，所建立的河网潮流数学模型精度较高，可以用来模拟东江三角洲河网水流运动情况，分析网河区航道整治工程后水位、潮流变化情况。

### 3 潮流场动力特性分析

从图6和图7可以看出, 东江河网主要受上游博罗径流和口门外上溯潮波的影响, 动力环境相对简单。东江三角洲的4条出海水道, 均属于潮汐动力作用为主的河口地区, 其分流形式长期保持基本稳定, 其水动力特征是: 东莞水道无论涨、落潮动力均是最强的河道, 北干流居其次, 倒运海水道居第3, 麻涌水道居末。涨潮时, 东江三角洲网河区上游受两岸收缩地形的反射作用, 潮流强度自口门向上游逐渐减弱, 近口门处潮汐明显较强, 在虎门口达到最大。潮波进入各河口后, 前坡变陡后坡变缓, 浅水分潮增加, 造成涨潮历时缩短, 落潮历时延长。枯季涨潮历时比洪季长, 而落潮历时则相反。落潮时, 由于东江三角洲网河水系分流的自动调节作用, 石龙汉口分流比的变化对口门4条主要出海水道的动力强弱变化影响不大。

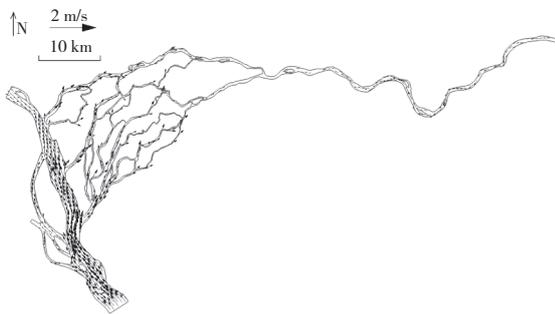


图6 大范围涨急流场

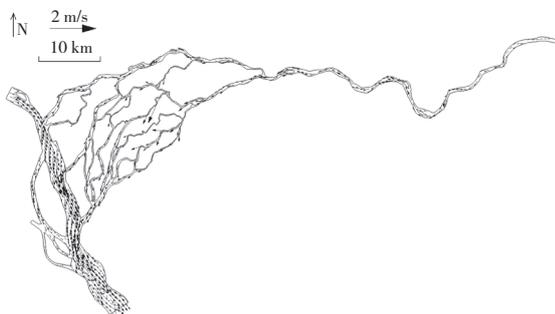


图7 大范围落急流场

## 4 整治工程计算分析

### 4.1 工程方案

东江中下游河网倒运海水道中上游河段两岸受堤围控制, 平面形态相对保持稳定, 河床变形较

小; 下游段受大规模的进出港航道疏浚工程的影响, 河床呈大幅度下切趋势。依据工程布置思路拟定了具体工程方案: 河道上游进口浅段进行疏浚, 疏浚航槽长度约430 m, 疏浚断面宽度45 m, 挖槽水深3.8 m; 搓溜大桥附近浅段区域挖槽水深3.8 m; 西部干道淡水河大桥下游约870 m处1#过河标对出水域的1 300 m浅段疏浚挖槽水深4.5 m; 角尾出口处进行疏浚, 挖槽水深4.5 m, 具体布置情况如图8所示。

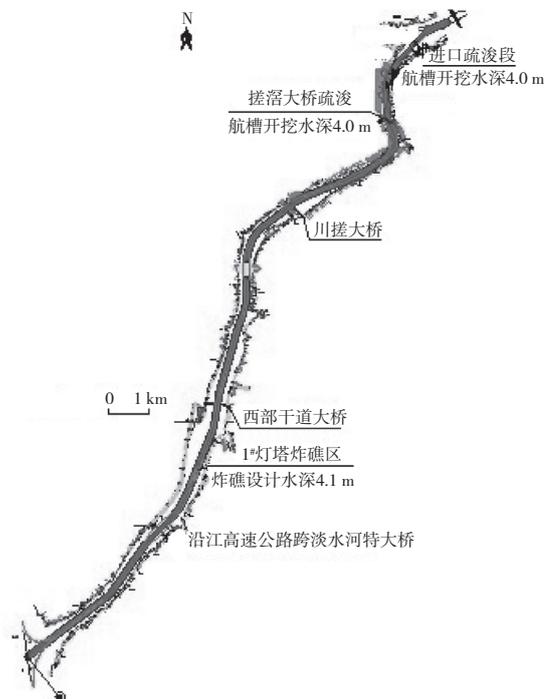


图8 整治工程平面布置

### 4.2 计算结果与分析

为了工程偏安全考虑, 采用平面二维潮流数学模型对河段整治工程方案进行了落急时刻的计算分析。计算选取 $9\ 640\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $P=10\%$ )、 $11\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $P=5\%$ ) 及 $14\ 400\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $P=1\%$ ) 三级流量, 通过对比分析, 了解工程实施前后落急时刻的水位、流速、流场等水流条件的变化情况。

#### 1) 沿程水位变化。

数模计算结果表明, 涨潮时在疏浚区域下游水位较工程前壅高, 疏浚区上游水位较工程前降低; 落潮时刚好相反, 在疏浚区上游水位较工程前壅高, 疏浚区下游水位较工程前降低, 一般是愈靠近疏浚区水位变化愈大。

由表1可见,在9 640 m<sup>3</sup>/s流量下,在槎滘大桥下游约350 m至1<sup>#</sup>灯塔区域附近段水位略有跌落,降幅为0.002~0.011 m,在西部干道大桥附近区域水位降幅达到最大值,约为0.011 m,在1<sup>#</sup>灯塔下游水位有所升高,但变化幅度不大;沿江高速公路大桥至出口段,工程前后水位变化不明显。在11 200 m<sup>3</sup>/s流量下,进口浅段至1<sup>#</sup>灯塔段水位略有降低,而在西部干道大桥和东太大桥附近降幅达到最大,约为0.005 m;在沿江高速大桥附近水位有所升高,变化幅度逐渐增大,增幅约为0.003 m;而沿江高速公路大桥至角尾段,工程前后水位变化不明显。在14 400 m<sup>3</sup>/s流量下,工程对水流条件的影响仍较小,进口浅段区域水

位基本上没有变化,但从槎滘大桥处水位开始跌落,在西部干道大桥区域降幅达到最大值,降幅约为0.005 m,而沿江高速公路大桥至角尾段水位有所升高,但增幅不大。由此可见,疏浚工程对河道沿程水位的影响幅度随流量的增大逐渐减小。

2) 流速变化

疏浚工程可以增加碍航浅段处的涨落潮流速,有助于航道水深的维护。当流量为9 640 m<sup>3</sup>/s时,河心流速多在0.6~2 m/s,与工程前相比除了1<sup>#</sup>灯塔附近河槽流速较工程前略有降低外,其余河段流速皆有所增加,增幅在0.001~0.019 m/s;当流量为11 200 m<sup>3</sup>/s时,河心流速多在0.8~2.2 m/s,与工程

表1 方案实施后不同流量下沿程水位变化

位置	9 640 m <sup>3</sup> /s			11 200 m <sup>3</sup> /s			14 400 m <sup>3</sup> /s		
	工程前	工程后	差值	工程前	工程后	差值	工程前	工程后	差值
进口浅段处	2.468	2.468	0	2.718	2.718	0	3.235	3.235	0
江南纸厂	2.332	2.332	0	2.553	2.553	0	3.004	3.004	0
槎滘大桥下游约350 m	2.122	2.118	-0.004	2.311	2.309	-0.002	2.709	2.707	-0.002
川槎大桥上游约200 m	1.863	1.858	-0.005	2.011	2.007	-0.004	2.331	2.326	-0.005
东太大桥	1.760	1.752	-0.008	1.888	1.882	-0.006	2.171	2.167	-0.004
西部干道大桥	1.645	1.634	-0.011	1.750	1.744	-0.006	1.994	1.989	-0.005
1 <sup>#</sup> 灯塔	1.560	1.558	-0.002	1.655	1.654	-0.001	1.872	1.871	-0.001
沿江高速大桥上游350 m	1.447	1.450	0.003	1.519	1.522	0.003	1.689	1.691	0.002
角尾	1.259	1.260	0.001	1.289	1.290	0.001	1.365	1.366	0.001

前相比流速变化不大,除了1<sup>#</sup>灯塔附近流速较工程前河槽流速略有降低外,降幅约为0.041 m/s,其余河段流速皆有所增加,增幅在0.001~0.021 m/s;当流量为14 400 m<sup>3</sup>/s时,河心流速多在0.9~2.6 m/s,流速变化不明显,除1<sup>#</sup>灯塔疏浚区附近河段流速较工程前河槽流速略有降低外,降幅为0.043 m/s,其余河段流速皆有所增加,增幅多在0.001~0.024 m/s。工程实施前后各级流量下的流速变化见图9所示。由此可知,工程实施后,河道内水流相对集中,9 640 m<sup>3</sup>/s流量下主流带附近流速略有增加;11 200 m<sup>3</sup>/s及以上流量时,工程对流速的影响较小,工程前后流速基本没有变化。

5 结语

1) 针对东江三角洲网河区水流条件复杂的特

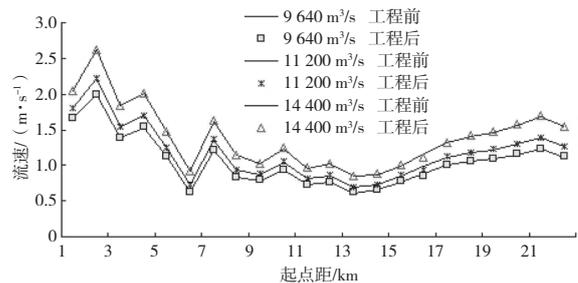


图9 工程前后各级流量流速变化(河心)

点,建立了大小模型嵌套的平面二维潮流数学模型,经过模型的率定和验证,模型基本反映了东江三角洲网河区及倒运海水道潮流变化规律,可利用此模型进行有关分析计算,为倒运海水道航道整治效果提供依据。

2) 涨潮时,东江三角洲网河区上游潮流强度自口门向上游逐渐减弱,近口门处潮汐明显较

强,在虎门口达到最大;落潮时,由于东江三角洲网河水系分流的自动调节作用,石龙汉口分流比的变化对口门4条主要出海水道的动力强弱变化影响不大。

3)利用本文所建立的潮流模型对倒运海水道局部浅段进行了疏浚前后效果计算分析,计算结果表明,工程实施后对水流的影响主要集中在工程附近水域,对河道沿程水位、比降影响较小。9 640 m<sup>3</sup>/s流量下主流带附近流速略有增加;11 200 m<sup>3</sup>/s及以上流量时,工程对流速的影响较小,工程前后流速基本没有变化。

4)基于以上分析,此疏浚整治方案是可行的。

#### 参考文献:

- [1] Chau K W, Jin H S, Sin Y S. A finite difference model of two-dimensional tidal flow in Tolo Harbor, Hong Kong[J]. Appl Math Modelling, 1996, 20:321-328.
- [2] Petera J, Nassehi V. A new two-dimensional finite element model for the shallow water equation using a lagrangian framework constructed along fluid particle trajectories[J].

- International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1996, 39(24): 4 159-4 182.
- [3] Hu H M, Wan K H. Mathematical modeling of suspended sediment transport in open channel flows using hybrid finite-analytic method[J]. Water Resource, 2000(5): 1-10.
- [4] Shapiro G I. 5D model for sand transport in a shallow sea: Effect of ekman veering[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24: 659-671.
- [5] 李毓湘, 逢勇. 珠江三角洲地区河网水动力学模型研究[J]. 水动力学研究与进展, 2001, 16(2): 143-155.
- [6] 柯国益, 薛雷平. 二维潮流计算中非结构有限体积法研究和应用[J]. 海洋工程, 2009, 27(4): 67-72.
- [7] 匡翠萍, 刘旭, 陈思宇, 等. 无结构网格二维潮流模型的开发及应用[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2011, 39(12): 1 779-1 783.
- [8] 谈广鸣, 赵连军, 韦直林, 等. 海河口平面二维潮流泥沙数学模型研究[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(5): 545-550.
- [9] 郑国栋, 黄东, 赵明登, 等. 一、二维嵌套模型在河口工程中的应用[J]. 水利学报, 2004 (1): 22-27.

(本文编辑 郭雪珍)

~~~~~

(上转第88页)

## 5 结论

1)由于LNG船舶自身的危险性以及航行安全要求的特殊性,在条件允许情况下应该开辟LNG船舶专用航道;当LNG船舶需要与航道共线航行时,需要多部门相互协调,保障LNG船舶安全通航。

2)对于珠海港高栏港区主航道而言, LNG船舶进入高栏港主航道航行过程中需要实施清道护航等安全措施,同时需要海事部门以及港口调度部门进行科学合理协调,以便于船舶安全靠离泊,保障船舶及人员人身安全以及附近海域生态安全。

3)由于LNG船舶只能在白天进出港口,且不考虑乘潮,而其他大型散货船、集装箱船舶受到航道水深条件限制需要利用高潮时段进出港口,

因此安排LNG船舶进出港时,可适当避开高潮时段,选择航道交通流密度较小时段,以减小对主航道船舶通航的影响。

#### 参考文献:

- [1] 李顺亮, 李清烈. 粤东LNG码头工程通航安全评估[J]. 水运工程, 2012(4): 93-97.
- [2] 甘浩亮. 港口水域LNG船舶交通组织优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [3] 赵智帮, 李鑫. 航道通过能力的计算方法[J]. 港工技术, 2011(6): 15-18.
- [4] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 珠海港高栏港区LNG航道疏浚工程工程可行性研究报告[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2012.
- [5] JTS 165-5—2009 液化天然气码头设计规范[S].

(本文编辑 武亚庆)