



船舶乘潮进港时段水深及横流的推算研究

高明¹, 于延平¹, 谢宁宁², 郭雅琼³

(1.日照港集团岚山港务有限公司, 山东日照276808; 2.中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北武汉430060; 3.河海大学水文水资源学院, 江苏南京210098)

摘要: 以岚山港南作业区为例, 分析研究了环抱式港池建成初期船舶乘潮进港的调度问题。岚山港南作业区进港航道轴线与涨、落潮主流流向夹角较大, 存在近口门航段横流较大的问题; 涨潮阶段横流普遍强于落潮阶段横流; 涨潮阶段最大横流出现在口门外沿航道轴向400 m处。根据统计结果分析建立涨急流速和潮差的关系以及涨潮阶段设计乘潮水位流速与涨急流速的关系, 然后通过查询潮汐表信息推算水深和横流, 从而为确定船舶乘潮进港时间提供科学依据, 达到船舶调度目的。

关键词: 乘潮进港; 横流; 潮差; 涨急流速

中图分类号: TV 135.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)01-0020-05

Calculation of water depth and cross-flow during ship's entering the port in higher tide

GAO Ming¹, YU Yan-ping¹, XIE Ning-ning², GUO Ya-qiong³

(1. Rizhao Port Group Lanshan Harbour Co., Ltd., Rizhao 276808, China; 2. CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan, 430060, China; 3. College of Hydrology and Water Resource, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking the southern operating area of Lanshan port as an example, this paper analyzes the scheduling of ship's entering the port in higher tide at the initial stage of the surrounding basin. There is a larger angle between the channel axis of the southern operating area of Lanshan port and the flow direction of mainstream of flooding and ebbing tides, resulting in a larger cross-flow in the channel near the entrance. The cross-flow during the flood phase is larger than that during the ebb phase. The largest cross-flow during the flood phase presents at 400 m along the channel axis outside the entrance. According to statistic results, the relationship between the maximum velocity during the flood phase and tidal range and relationship between the designed tide-bound water level during the flood phase and the maximum velocity during the flood phase is established and then water depth and cross-flow are calculated by inquiring the tide table, so as to provide a scientific basis for determining the time of ship's entering port in higher tide, and thus achieve the goal of ship scheduling.

Key words: ship's entering the port in higher tide; cross-flow; tidal range; the maximum velocity during flood phase

近年来全球经济迅猛发展, 原油、液化天然气等货物运输量急剧攀升, 运输船型日趋向大型深吃水船舶发展。为适应这一趋势, 港口航道水深的要求越来越高且逐渐向外海发展, 但目前沿

海很多港口航道水深不能满足船舶全天候进港的吃水要求。因此进出港航道水深不足与大型船舶吃水要求之间的矛盾加剧, 对沿海经济发展起到了一定的限制和制约作用, 亟待解决。

收稿日期: 2012-05-07

作者简介: 高明(1970—), 男, 高级工程师, 从事港口建设管理工作。

沿海港口规划设计时通常需要考虑水深、潮流、波浪、泥沙等因素,其中水深条件与航道、港池等级密切相关,天然水深不足时通常进行适当开挖。开挖水深的设计值依据《海港总平面设计规范》计算,具体取值与航道使用频率或设计船型等因素有关。建港初期设计吨级船舶一般考虑乘潮进港即开挖后的航道并不能满足船舶全天候进港要求,沿海港口航道内水深及水流情况受潮流涨落影响显著。由于潮汐的涨落具有极强的规律性,因此可以根据当地的潮汐变化规律进行调度。2006年张鸿雁等^[1]针对镇江港等潮差大的地区提出了乘潮卸船作业计算模式,计算了12万吨级散货船乘高潮进港所需时间。2010年王辉^[2]针对进出港航道水深不能满足大型深吃水船舶全天候进港要求,根据目前已经研究成熟的调和分析法计算潮位及对应潮时,并以此为基础提出了候潮锚地及进出港航道的设计原则、要求和方法。2011年李冰绯等^[3]针对非天然水深大型开敞式码头提出选择适宜船舶靠泊的潮流条件来确定船舶的靠离泊时机,以北方某港口为例计算的船舶乘潮时刻在高潮位前1.2 h,靠泊初始时刻在高潮后0.5 h。这些方法对船舶乘潮进港有一定的指导意义,但每次涨落潮潮差都在变化,仅仅通过高潮位及时间段的确判定水深及水流条件,难以保证船舶安全进港。

本文以日照岚山港为例,结合船舶乘潮进港的水深、流速条件开展研究,给出依据潮汐表确定乘潮进港的调度运行方式,对实际生产运营有直接指导意义,可推广应用于类似港口规划设计。

1 研究区域概况

1.1 港区自然条件

岚山港区潮汐属于正规半日潮型,涨潮主流流向西南,落潮主流流向东北,平均潮差为3.44 m,近岸往复流特征明显,往外海渐远旋转性渐强;港区向外海开敞,波浪无掩护,常风向为北风、东北风,受东北和东南向波浪影响较大;沿岸泥沙以粗颗粒为主,水体含沙量很小,沿岸过境泥沙少,岸线和岸坡稳定,泥沙淤积甚微^[4-5]。

1.2 港区工程概述

岚山港港区规划已确定南作业区的波浪防护方式,其中南作业区规划如图1所示。在老港区的基础上,岚山头防波堤扩建成港区陆域并向南外推,建东北—西南向防波堤,北岸渔港群外侧吹填港区用地并与老港区岸线相连接。原岚山头防波堤西侧形成环抱式港池,渔港区形成半封闭湾,吹填区周边建设码头泊位。

进港航道在老航道的基础上浚深升级,通航标准为设计水深满足10万吨级船舶单向全天候进港要求、20万吨级船舶需要乘潮进港。其中近口门段航道为10万吨级航段,设计底高程为-16.7 m,设计宽度为280 m,航道轴线走向为127°~307°。

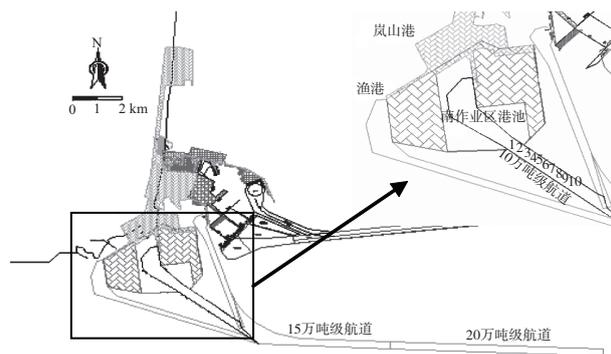


图1 岚山港南作业区

2 数学模型及验证

选用变步长矩形网格建立工程海域平面二维潮流数学模型进行计算。数学模型的基本方程如下:

连续方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(h + \zeta)u] + \frac{\partial}{\partial y}[(h + \zeta)v] = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= f_v - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \\ \frac{gu\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2(h + \zeta)} + \varepsilon_x \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = fu - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gv\sqrt{u^2+v^2}}{C^2(h+\zeta)} + \varepsilon_y \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (3)$$

式中： ζ 为潮位； h 为水深； u, v 分别为 x, y 方向垂线平均流速； t 为时间； f 为科氏系数（ $f=2\omega\sin\phi$ ）； g 重力加速度； C 为谢才系数， $C = \frac{1}{n}(h+\zeta)^{1/6}$ ， n 为曼宁系数； $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 为 x, y 方向紊动扩散系数。

初始条件包括潮位和流速条件，边界条件采用水位边界进行模拟。二维数值计算方法采用ADI法。

模型模拟工况为岚山港区现状，计算域为 $98 \text{ km} \times 63 \text{ km}$ 的矩形域，选取的外海开边界基本不受工程建设影响水域。模型率定及验证采用2008年7月3—4日大潮和2009年8月—9月大、小潮期间潮位、流速、流向资料。经验证表明模拟潮位、流速、流向均与实测值拟合良好，该模型可以复演天然潮流场^[6]。

3 工程后流速及横流条件分析

岚山港南作业区由防波堤形成港池口门，受水深条件限制，进港航道轴线与涨、落潮流主流流向夹角较大，存在近口门航道段横流较大的问题。南作业区东侧防波堤等实体建筑物的扩建改变了工程附近海域涨落潮流流场，港区口门附近涨潮流速显著增加。为分析近口门航道段水流特性，在近口门处沿航道轴线每间隔200 m设流速分析点，共设10个点位（图1）分析近口门航道段的流速及横流分布情况。

2008年7月3—4日大潮期间涨潮潮差为5.3 m（岚山港有资料以来最大潮差为5.97 m），潮差大，流速极值偏大，对船舶通航影响较大。因此选用此潮型为代表潮型分析南作业区近口门航道段的流速和横流情况。

3.1 流速条件分析

图2为南作业区建成后涨急时刻流场，根据计算结果可得以下结论：进出港航道轴向与涨落潮流流向最大夹角可超过 70° ，是造成横流偏大的主要原因；3#点位距口门约400 m处流速及较大流速

历时明显大于其他点位值，是船舶安全通航的最不利点位；涨潮阶段流速大于落潮阶段流速，因此需要重点分析3#点位来确定船舶的进港时机。

3.2 横流的时间过程分析

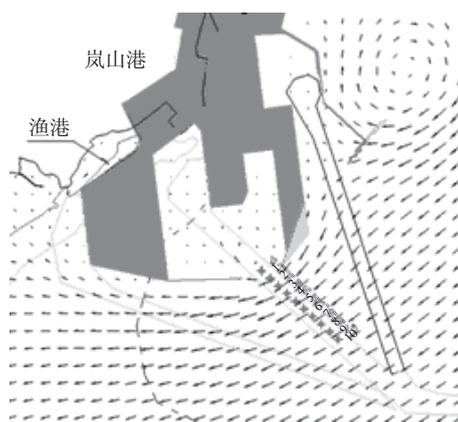


图2 涨急时刻流场

由于外海潮流时刻发生着变化，航道内横流的大小也随之改变。根据计算结果，涨潮阶段最大横流出现在口门外沿航道轴向400 m处，即3#点位。图3给出了3#点的潮位、横流时间过程线，分析得到以下结论：最大横流峰值出现在涨潮阶段，发生于低潮位之后约3 h；涨潮阶段出现的横流普遍大于同潮位落潮阶段的横流；潮位达到最高值或最低值时横流值很小。

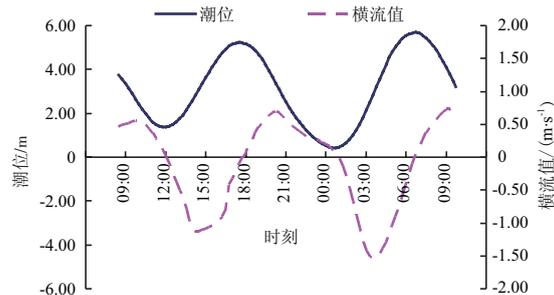


图3 3#点位潮位、横流时间过程线

4 船舶乘潮进港时机分析

船舶进港时首先需要判断水深条件，水深足够时再考虑航道内横流情况。不同吨级船舶吃水深度不同，受横流影响程度亦不同，较小型船舶吃水浅、抗横流能力弱，主要考虑横流条件即避开急流时段进港；较大型船舶吃水深、抗横流能力相对强些，主要考虑乘潮时间问题。因此船舶进港调度时迫切需要预测短时间内航道的水深和横

流情况。航道内的潮位和流速除受天文要素影响外,还与近岸工程边界条件有关。潮位的预测值可以查潮汐表获得;流速因受岸界及工程边界影响明显,沿航道轴线变化较大,拟通过数值模拟计算得到与潮差的相关关系表达式。岚山港南作业区主航道要求20万吨级船舶乘潮进港,本文主要探讨船舶在近口门航道段乘潮进港的时机选择及在保证通航所需水深的条件下乘潮进港期间航道内的横流条件,为船舶的安全通航提供理论依据。

4.1 潮差与涨急流速的关系

岚山港海区涨潮阶段流速明显大于落潮阶段流速,南作业区航道内落潮阶段横流一般不大于1 m/s,对大型船舶通航影响相对较小,因此主要研究潮差与涨急流速的关系。数学模型验证计算的2次大潮对应应有4个涨潮阶段,其涨潮潮差分别为3.45 m, 4.11 m, 4.63 m和5.30 m,提取3[#]~6[#]点

表1 不同潮差下口门段3[#]~6[#]点涨急流速及横流

潮差/m	频率/%	流速	口门流速点流速/(m·s ⁻¹)			
			3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]
3.45	52	涨急流速	1.27	1.16	1.01	0.89
		横流	1.14	1.04	0.91	0.80
4.11	25	涨急流速	1.52	1.35	1.21	1.10
		横流	1.37	1.22	1.09	0.99
4.63	10	涨急流速	1.62	1.45	1.31	1.22
		横流	1.46	1.30	1.18	1.10
5.30	1	涨急流速	1.76	1.55	1.40	1.30
		横流	1.58	1.40	1.26	1.17

对应潮段的涨急流速并计算横流值,见表1。

分析表1可知,潮差与口门段涨急流速的关系表现为:潮差越大,航道内横流的速度越大。由于3[#]点位在不同潮差下涨急时刻横流值均为最大值,对船舶通航安全影响最大,因此以3[#]点位为代表,绘制3[#]点位涨急流速与潮差的关系(图4)

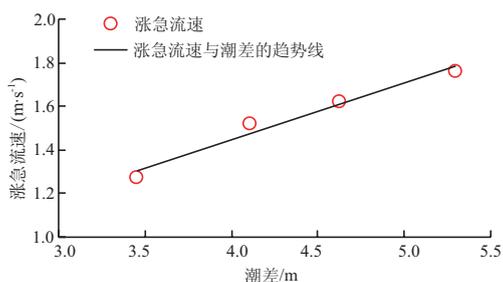


图4 涨急流速与潮差的拟合

并进行拟合。

通过公式拟合可得涨急流速与潮差的关系为线性关系,相关系数值为0.9849,拟合公式如下:

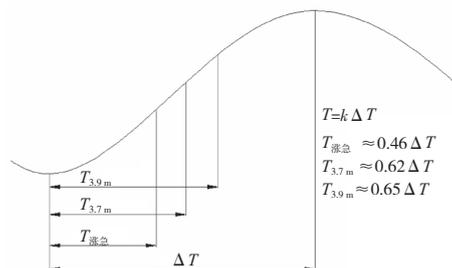
$$v_{\text{涨急}} = 0.2594H_{\text{潮差}} + 0.4083 \quad (4)$$

式中: $v_{\text{涨急}}$ 为涨急时刻流速; $H_{\text{潮差}}$ 为从最低潮位到最高潮位的潮位差值。

通过查潮汐表信息计算潮差,代入该公式即可推算涨急时刻航道内的最大流速值,从而在一定程度上掌握航道内的流速情况。

4.2 设计乘潮水位时涨潮流速和涨急流速关系

设计部门统计多年资料得到了本工程海域乘潮水位:乘潮3 h保证率80%的乘潮水位为3.70 m;乘潮2 h保证率90%的乘潮水位为3.90 m。统计涨潮阶段乘潮水位3.7 m和3.9 m及涨急流速的发生时刻,其中涨急、乘潮水位3.7 m和3.9 m发生时刻分别记为 $T_{\text{涨急}}$, $T_{3.7\text{ m}}$ 和 $T_{3.9\text{ m}}$,见图5。



注: ΔT 表示从最低潮位到最高潮位的涨潮历时,
 T 为涨急或设计乘潮水位距离低潮位的历时。

图5 涨潮时刻、乘潮水位时刻与涨潮流时的关系

根据关系式中系数 k 呈递增趋势可知,涨潮期间设计乘潮水位高于涨急时刻潮位,整个乘潮期间潮流流速都小于涨急流速。

4.3 船舶进港时机分析

潮位每天乃至每时每刻都在发生变化,工程海域涨潮流一般强于落潮流,对于吨级相对较小的船舶,水深一般能够满足,优先选择平潮期或落潮期进出港;对于吨级较大船舶,必须乘潮进港时,首先确认乘潮时间,当乘潮时间较宽裕时,尽量利用涨潮末段和落潮初段时间进港。

具体操作时,首先判断当时水深是否满足船舶乘潮进港要求,其次查潮汐表并根据求得的涨急流速和潮差的关系,设计乘潮水位时涨潮流速与涨急流速的关系推算船舶乘潮进港期间水深及

横流，如果水深及横流满足船舶的通航标准则可以进港，反之则进入锚地等候调度。

5 结语

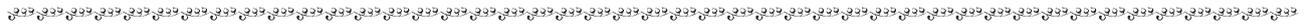
在大量计算的基础上，针对岚山港南作业区工程布置及航道条件，给出了南作业区进港航道最不利航段涨急流速和潮差的关系表达式，分析得到了各乘潮水位出现时刻和涨急流速出现时刻的预测关系表达式。通过查询潮汐表，查得拟进港时段内低、高潮位值及相应出现时刻，即可依据本文提出的关系表达式推算出涨急流速值及各乘潮时间点距低潮位时刻的时间，为需乘潮进港船舶调度提供了科学依据。

研究主要依据平面二维数学模型计算开展，所采用的流速值均为垂线平均值，实际操作时需注意流速沿垂向的分层特征^[7]；岚山港南作业区深水航道建成时间较短，在实际调度过程中还需注意收集实测资料，反馈修正本文提出的关系表达式。

参考文献：

- [1] 张鸿雁, 唐傲泽, 冯海波. 湛江港老码头乘潮卸船作业理论分析[J]. 水运工程, 2006(9): 39-40.
- [2] 王辉. 船舶乘潮进出港通航组织方案研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [3] 李冰绯, 施凌. 非天然水深大型开敞式码头靠泊时机与乘潮水位的确定[J]. 水运工程, 2011(S1): 77-81.
- [4] 国家海洋局北海预报中心. 岚山港区海流、泥沙调查分析报告[R]. 青岛: 国家海洋局北海预报中心, 2008.
- [5] 交通部水运规划设计院, 山东省交通厅. 全国海岸普查山东省沿海港址概况[R]. 北京: 交通部水运规划设计院, 1983.
- [6] 马进荣, 周益人. 岚山港近航道口门段局部物理模型研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.
- [7] 解鸣晓, 张玮, 李国臣. 双导堤口门航道横流特性对通航影响研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2009(5): 968-971.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第19页)

参考文献：

- [1] 王红川. 抛物型缓坡方程在工程水域波浪场计算中的应用[C]. 第十七届全国水动力学研讨会暨第六届全国水动力学学术会议论文集, 2003.
- [2] 唐军, 沈永明, 崔雷. 基于抛物型缓坡方程模拟近岸植被区波浪传播[J]. 海洋学报, 2011(33): 8-11.
- [3] 李绍武, 卢丽峰, 尹振军. 基于抛物型缓坡方程的波浪数值模型应用研究[J]. 港工技术, 2004(1): 1-5.
- [4] Berkhoff J C W. Computation of combined refraction-diffraction[C]. Proceeding of the 13th Coastal Engineering Conference. Vancouver: ASCE, 1972: 471-490.
- [5] Radder A C. On the parabolic equation method for water wave propagation [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1979, 95(41): 159-176.
- [6] Kirby J T, Dalrymple R A. A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of stokes waves by mildly varying topography [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 136: 453-466.
- [7] James T Kirby. Rational approximations in the parabolic equation method for water waves[J]. Coastal Engineering, 1986(10): 355-378.
- [8] Kirby J T. A general wave equation for waves over ripple beds[J]. Fluid Mech, 1986, 162: 171-186.

(本文编辑 武亚庆)