

基于单波束的施工期航道回淤简化监测方法及应用

王广禄^{1,2}

(1. 天津水运工程勘察设计院, 天津 300456; 2. 中华人民共和国交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘 要: 航道工程建设后, 泥沙和地形通过一定时间到达平衡, 故航道区域发生回淤现象。考虑航道施工期回淤特征的多变性和复杂性, 利用单波束测深技术测量的便捷快速, 且单点垂向精度高的优点, 设计了航道施工期回淤监测快速简便实施方案。方案中使用了固定断面法进行了监测网的布置; 采用距离倒数加权平均法提高狭长航道验潮精度和速度; 使用断面单元分算汇总的办法计算疏浚施工期航道回淤量。通过对实例项目的操作, 基本满足快速准确回淤监测要求, 为长期回淤研究提供宝贵的施工期资料。

关键词: 单波束; 距离倒数; 加权平均法; 泥沙回淤监测

中图分类号: P224

文献标识码: A

文章编号: 1002-3682(2018)03-0050-07

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2018.03.006

我国淤泥质海港众多, 航道建设期间回淤问题是制约港口发展的关键技术问题之一。对于围绕航道回淤问题, 国内采用遥感分析、外业勘察、室内水动力试验、数值模拟等手段, 开展了水沙运动、冲淤演变、沉积环境等方面的研究^[1-3], 如张玮等^[4]应用数学模型模拟计算了连云港海域大型海岸工程实施后对于水流泥沙运动的影响; 解鸣晓等^[5]建立波流共同作用下的泥沙数学模型, 研究了连云港口门防波堤建设对年平均含沙量场及进港航道回淤的影响; 崔方水等^[6]用二维潮流泥沙数学模型及大风骤淤三维数学模型对田湾核电站扩建工程实施后的二维潮流场、泥沙场、地形冲淤场进行了模拟计算分析。但利用建设期航道回淤的监测分析航道回淤状况一直较少。实践中, 在特定区域进行试挖观测是回淤研究的重要手段之一, 国内不少重大航道工程建设前均进行了试挖观测研究, 如长江口、杭州湾、连云港、乐清湾等。但试挖观测必然会增加工程成本, 因此从技术经济角度出发运用简化的单波束测量方法, 实时采集必要的数据为后期的研究提供数据支持成为比较实用技术手段。

1 单波束测深特点

目前海洋测深领域使用最为广泛和成熟的技术是单波束测深技术, 其主要特点是以单点连续测量来形成断面地形数据, 再联合多个断面达到由点到面的区域水深测定。但是断面间的区域一般是需要网格内插来适当补充的^[7]。相比于多波束技术, 单波束测深仪操作更为简单, 使用较少的外部设备, 更为简洁地组装和连接结构, 不需要特别专业人员和船只, 更重要的是使用成本很低。在测量过程中, 使用校检板即可达到符合规范标准的精度要求。

国产的单波束测深仪有无锡海鹰测深仪、中海达测深仪等, 国外的有 Odom 系列等^[8]。随着国内技术发展, 国产仪器已经非常成熟、稳定。

收稿日期: 2018-03-10

资助项目: 交通运输部天津水运工程科学研究所基金项目——打捞区精细地质勘察与岩工参数快速测试技术应用研究(TKS170225)

作者简介: 王广禄(1982-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事勘测工程方面研究. E-mail: wglas4@163.com

(王佳实 编辑)

2 航道回淤监测简化方法

泥沙回淤是航道运维工作的重要问题,航道的疏浚施工期对泥沙回淤特征造成重大改变。不同时间节点航道水深变化极不均匀,呈现多样状态。在监测航道的泥沙回淤情况中,常用的方法是要进行现场监测和室内实验,其内容包括回淤物质组成、回淤泥沙特性、回淤层厚度、密度垂向分布、航道水深等,分析过程需要进行全方位的定性和定量判断来提高监测准确性^[9-13]。航道建设期泥面高程变化剧烈,若要全方位地实验分析所有因素,则难以短时间判断回淤变化、满足工程实践需求。

经研究单波束测深在航迹上具有较高的精度和测量密度,对测量地形剖面十分便捷^[7-8]。为了适应经济的快速发展,满足港区对运输的需求、保证航道通行安全,又节约外业测量成本,本研究采用单波束固定断面平均水深法,通过提取固定断面及附近区域的实测水深值,计算断面平均水深和对比月份的水深差值,并结合港区背景资料,做进一步的泥沙回淤分析。

3 项目实践

3.1 项目概况

天津某工业区航道位于河流入海口,港池航道工程所在水域的自然水深较浅,内航道及以内段的标高为 $-2.5\sim+2.0$ m,水下地形由内向外逐渐加深,海底平均坡度 $<1/2\ 000$,港池、航道均需开挖一条底宽 250 m、底标高 -14.0 m 凹槽。在开挖施工过程中,航道的水下地形会发生剧烈变化,同时也会发生不同于正常运营期间情况的泥沙回淤特征。因此有必要持续跟踪施工期水下地形变化,并进行泥沙回淤特征分析,掌握港池、航道的泥沙回淤规律。

航道疏浚期为 1 a,分为 4 个时间段:第 1 阶段在 1—2 月期间,疏浚范围包括 H6+5~H7+0 航段、H8+5~H10+0 的航道北半侧及航道以北区域、H12+0 航段;第 2 阶段在 2—5 月期间,疏浚范围包括 H6+0 航段、H8+0 附近航道的南半侧区域(长度均约 1.0 km),H10+0~H12+0 航段;第 3 阶段在 5—8 月期间,疏浚范围包括 H4+0~H5+0 段航道的南半侧区域、H8+0 附近段南半侧、H9+0~H10+0 航段、H11+0~H12+0 航段北半侧、H13+0~H14+0 航段的南半侧,疏浚区域不连续;第 4 阶段在 8—12 月期间,疏浚主要集中在 H4+0~H8+0 的航道北半侧、H10+0~H11+0 航段、H12+0~H13+0 局部段和 H14+0~H15+0 航段。

3.2 断面布置及测量方法

关于回淤监测的方法设计是通过布设垂直航道若干条固定断面,每个时间段都进行固定断面测量,这样便可得到不同时间的航道基本回淤情况。

在各个时段的分析中,考虑到航道及两侧区域一直处于施工状态,泥沙回淤受施工影响程度随航道沿程变化较大,水深沿程变化也较大,在泊位区域、港池及过渡段和航道沿程整公里及半公里等处布设了较为密集的固定断面(图 1),同时为了检验水深断面可靠度,设置了横交所有断面,并且平行于航道北中南三条测深断面。

现场测量时,应采用最低频率不高于 33 kHz 高频水深测量仪,因为这时的信号反射面对应的淤泥密度一般在 $1.03\sim1.05\text{ t/m}^3$,这个密度面以上的水体一般可认为是可以适航的^[14-15]。

为了提高测量精度,潮位改正采用距离倒数加权平均法^[16]。设置 A, B, C 验潮站(图 1),其平面坐标分别为 (X_a, Y_a) , (X_b, Y_b) , (X_c, Y_c) ,某一时刻的潮高值为 h_a, h_b, h_c ,待测潮高点 Z 的坐标值为 (X_z, Y_z) ,则 Z 点该时刻的潮高值为

$$h_z = D_a \cdot h_a + D_b \cdot h_b + D_c \cdot h_c, \quad (1)$$

$$D_a = (1/R_a) / (1/R_a + 1/R_b + 1/R_c), \quad (2)$$

$$D_b = (1/R_b) / (1/R_a + 1/R_b + 1/R_c), \quad (3)$$

$$D_c = (1/R_c) / (1/R_a + 1/R_b + 1/R_c), \quad (4)$$

式中, R_a, R_b, R_c 分别为 Z 点到 A, B, C 验潮站的平面距离。使用实测的各验潮站的数据, 运用这个方法迅速得到各测深点的潮高值。

从固定断面上提取不同时间段等间距实测水深值, 便可计算出各个施工节点后的水深变化值。取最后一次测量断面值和全年回淤变化值绘制平面变化分布图(图 2, 图 3)。

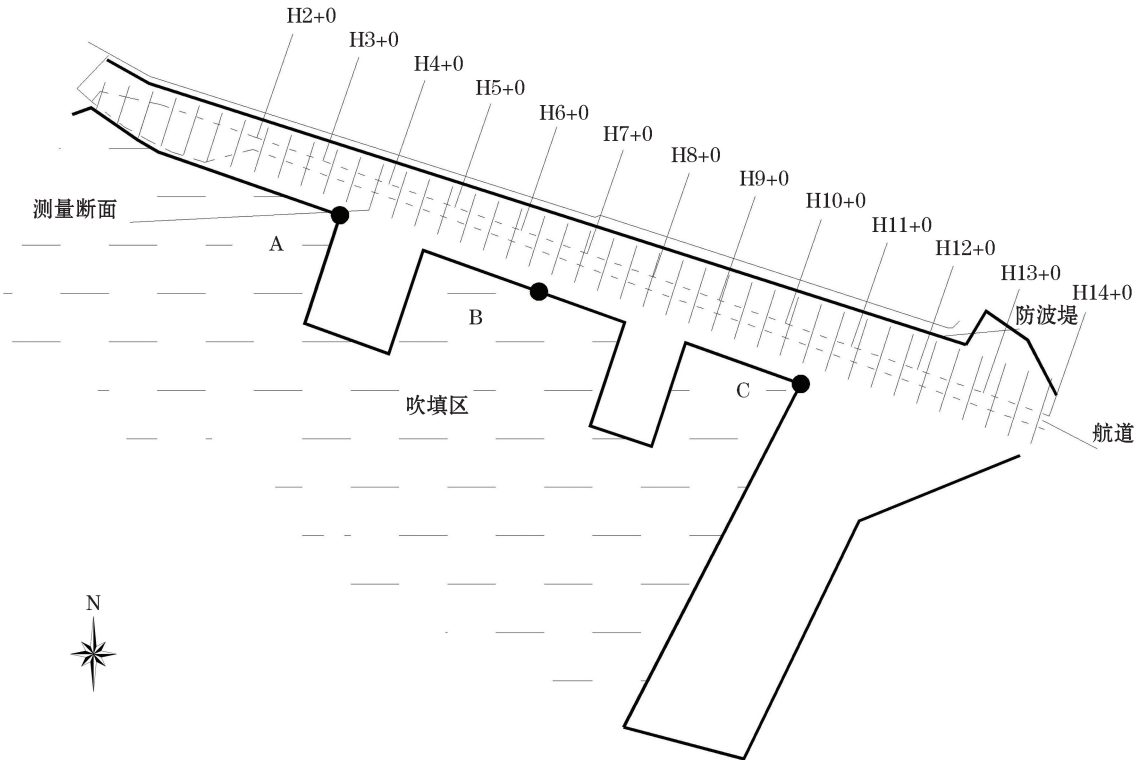


图 1 航道监测综合平面示意图

Fig.1 An comprehensive planar sketch of waterway monitoring

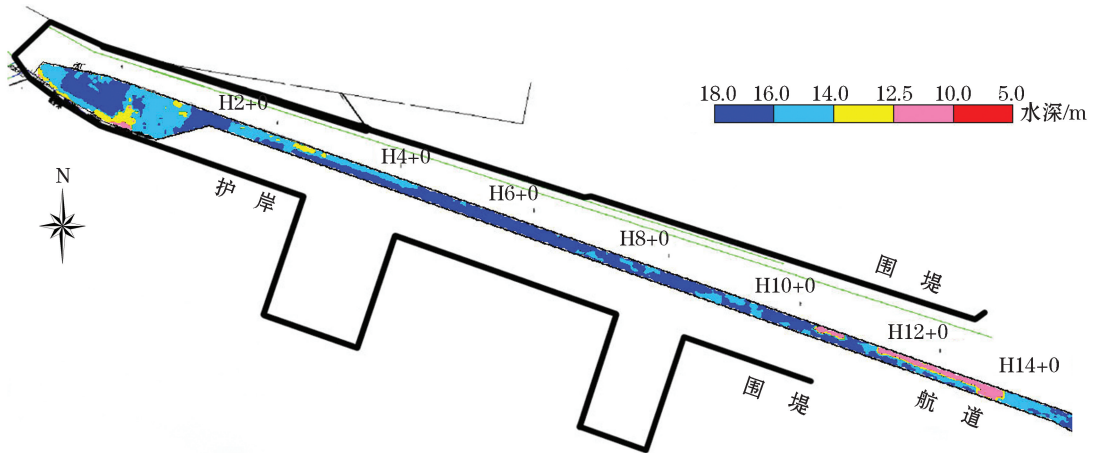


图 2 最终航道测深平面分布图

Fig.2 The plane distribution map of final channel bathymetry

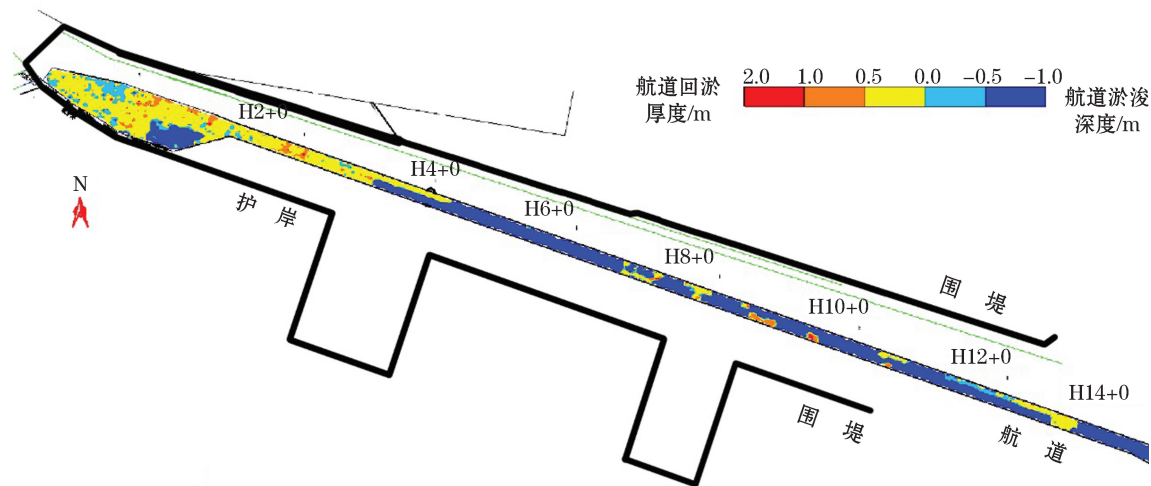


图 3 全年航道泥沙回淤变化平面分布图

Fig.3 Plane distribution of the channel siltation in the whole year

3.3 航道泥沙回淤主要特征分析

3.3.1 淤积的时空分布特征

分析表 1 的数值可知,很多断面的水深差值为负值,即表现为冲刷,考虑航道的实际情况,认为航道不应发生冲刷,而主要是维护疏浚施工造成,另外测量误差也会产生一些影响。发生回淤的断面,各季度的回淤厚度大多介于 0.1~0.4 m。

表 1 年内港池航道水深均值变化(m)

Table 1 Mean variations of water depth in the channel of harbor pool within a year(m)

航道断面号	月 份				
	1—2 月	2—5 月	5—8 月	8—12 月	全年
H2+0	0.2	0.0	0.3	-0.2	0.3
H2+5	0.0	0.1	0.4	0.1	0.5
H3+0	0.5	-0.2	0.6	-0.2	0.7
H3+5	-0.3	0.3	0.0	0.2	0.3
H4+0	0.2	-0.1	-0.8	0.5	-0.1
H4+5	-0.1	0.1	-1.9	0.0	-1.9
H5+0	0.1	0.1	-2.4	0.1	-2.2
H5+5	0.0	-3.1	-0.1	-0.8	-4.0
H6+0	0.1	-2.4	0.2	-0.9	-3.0
H6+5	-4.4	-0.3	0.5	-0.5	-4.6
H7+0	-3.7	0.0	0.3	-1.1	-4.6
H7+5	0.0	0.1	0.0	0.1	0.3
H8+0	-0.6	-1.0	0.1	0.3	-1.1
H8+5	0.2	0.0	0.2	0.2	0.5
H9+0	-2.1	-1.4	0.2	0.2	-3.1
H9+5	-0.2	0.0	0.0	-1.8	-1.9
H10+0	0.4	-2.0	0.1	-1.3	-3.0
H10+5	0.0	0.4	-0.5	-3.6	-3.6
H11+0	-0.1	-2.8	0.5	-2.6	-5.0

续表

航道断面号	月 份				
	1—2 月	2—5 月	5—8 月	8—12 月	全年
H11+5	-2.0	-2.8	0.4	0.1	-4.2
H12+0	-2.1	-0.5	0.1	0.4	-2.1
H12+5	-0.1	-1.5	0.7	-1.3	-2.1
H13+0	0.1	-0.2	-1.8	0.5	-1.4
H13+5	0.4	-0.3	0.2	0.0	0.3
H14+0	0.0	0.1	-1.8	-1.6	-3.3
H14+5	0.0	0.0	-0.7	-2.6	-3.3

注：正值表示水深变浅；负值表示水深加深

为了更好地掌握施工期间临港航道泥沙回淤的强度和分布规律,利用各月份的水深测图,提取了各固定断面每个月份的水深数据,然后针对每个月的回淤厚度作进一步的计算分析。为此,对季度回淤为负值的进行剔除,通常认为只有疏浚才能在较短时间内造成大的水深变化,所以剔除水深加大在 0.4 m 以上的数据。剔除后再累加余下数据得到就是断面全年的平均回淤厚度,经统计航道年内平均预计厚度约 0.33 m。由图 2、图 3 可知,由于各断面均不同程度地受到了疏浚影响,导致航道沿程各断面的水深变化值相差较大,航道泥沙回淤沿程并不均匀,尤其是 H2+0~H4+0 区域回淤的较为明显,口门附近也发生一定的回淤,但其水深也不大。造成这种分布特征主要原因:1)疏浚作业区域大多集中在 H4+0 海侧,并且临近 H4+0 疏浚施工正值夏季东南风盛行,导致该区域的底质泥沙二次悬浮向陆侧淤积;2)航道末端连接入海河流,也会带来一定的河流沉积。

3.3.2 年度泥沙回淤量计算

年度泥沙回淤量可用实际挖方工程量减去开挖土方量测量计算值。开挖土方量计算值为测区面积乘以实测水深变化值。考虑测区水深分布不均匀问题,在计算开挖土方量值时采用相邻断面作为小单元逐一计算,再累加求得总值,避免总体平均断面计算造成较大误差。

使用实测断面数值、CAD 图中测算面积和施工方提供的施工量,计算得航道段(H2+0~H14+0)的年淤积量为 59 万 m³,回淤强度为 0.47 m/a。

3.3.3 回淤强度公式验证

回淤经验公式是通过理论推导和工程实践总结得到的,经过多年积累与总结已经具有很高的实用价值^[4-6]。在拥有足够环境资料的前提下,可以采用经验公式来和实测值互相验证。经调查,该海域泥沙 D₅₀ 介于 0.002 5~0.019 2 mm,平均为 0.005 2 mm,同时黏土含量大多也在 40% 以上,属于典型的淤泥质海岸。刘家驹和张镜潮公式^[17]在计算淤泥质海岸港池、航道回淤强度时,得到广泛运用,其公式为

$$P = \frac{\omega st}{\gamma_0} \left\{ k_1 \left[1 - \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^3 \right] \sin \theta + k_2 \left[1 - \frac{h_1}{2h_2} \left(1 + \frac{h_1}{h_2} \right) \right] \cos \theta \right\}, \quad (5)$$

式中, P 为回淤强度(m/a); ω 为泥沙沉降速度(m/s); θ 为水流与航道交角; s 为 h_1 时年平均含沙量(kg/m³); t 为淤积时间(s); h_1, h_2 为开挖前后半潮位水深(m); γ_0 为淤积物干容重(kg/m³); k_1, k_2 为横流和顺流淤积系数。

根据《海港水文规范》^[18](JTS 145-2-2013),对应平均中值粒径为 0.005 2 mm 的泥沙可取 ω 为 0.000 5 m/s;该区域风浪方向都是以南北轴为起点向西或东旋转表示,航道走向为北偏西 20°,可取 θ 为 25°;根据背景调查,施工前该海域水文资料反映年平均含沙量约为 0.09 kg/m³;将 1 a 时间转化为 31 536 000 s;开挖前、后平均水深分别取 2,16 m;干容重按 $\gamma_0 = 1\,750 D_{50}^{0.183}$ 计算为 668.4 kg/m³;在缺乏实测资料时,根据公式推荐 $k_1 = 0.35, k_2 = 0.13$ 。代入参数,计算的回淤强度为 0.4 m/a,略小于实测强度,考虑参数取值均为统计值,存在偏差也是有据可循的,两者数值量级的对比结果比较接近,即说明该简化回淤监测方法具有一定可靠性。

3.3.4 淤积趋势

从宏观上来说,由该海区的水文、气象等动力条件所决定的含沙量时、空分布特征,短期内难以发生大的

变化,因此在接下来的相当长的一段时间内,泥沙回淤将仍然表现出沿航道分布不均的特征。

从泥沙来源角度分析,该段航道回淤主要来源是其北部浅滩泥沙二次悬浮和吹填区外泄高含沙水体。一方面,在此航道疏浚的同时,航段附近的泄泥口也进行了封堵后,彻底解除了其一重要泥沙来源;另一方面,航道北侧由于近年来吹填作业进行了搅吸取土,使浅滩水深加大,一定程度上减小了滩面泥沙二次悬浮并进入航道的可能性,从长期动力地貌作用来看,此航道不会发生强淤现象,但应注意极端天气和特殊施工作业的影响。

4 结 论

淤泥质海岸经行航道疏浚会引起比较大的回淤现象,因此对于施工的指导意见要适当的增加挖深,以保证工程竣工时能满足适航条件。根据工程实际情况,制定相应的回淤监测计划,以便指导施工和控制工程质量。根据工程实践和理论验证,得到如下结论:

1)依赖于单波束测深便捷连续的特点及测区平面形状,设计航道疏浚施工期回淤监测的简化方案,能够满足施工期对监测要求快速准确的需求,节约项目成本。

2)采用三点验潮站距离倒数加权平均法改正潮位和断面单元计算实测挖方量的方法,在提高测量精度方面有较高可行性。

3)工程实践中,疏浚施工产生的浮泥也会造成回淤量的增加,而部分回淤量也被疏浚,所以这部分施工期的回淤量测量误差是否能相互抵消仍然有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] ZHANG R Z, CHEN K, YU G L, et al. Characteristics of the suspension concentration of bottom fluid mud under the actions of different waves[J]. Coastal Engineering, 2016, 35(1): 24-32. 张睿智, 陈科, 喻国良, 等. 波浪作用下浮泥悬浮浓度特性研究[J]. 海岸工程, 2016, 35(1): 24-32.
- [2] CAO C L, ZHANG Y Q, XIONG C B, et al. Research on the influence of breakwater construction to seabed sediment scouring and silting environment[J]. Coastal Engineering, 2016, 35(3): 12-22. 曹成林, 张永强, 熊丛博, 等. 防波堤建设对海底泥沙冲淤环境影响研究[J]. 海岸工程, 2016, 35(3): 12-22.
- [3] YIN Y, ZHANG N. Sedimentary environments of Xiyang tidal channel of radial tidal sand ridge system since the late period of Late Pleistocene in South Yellow Sea[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(5): 618-628. 殷勇, 张宁. 南黄海辐射沙脊群西洋潮道晚更新世晚期以来沉积环境[J]. 古地理学报, 2010, 12(5): 618-628.
- [4] ZHANG W, LIU R, QIAN W, et al. Influence of large-scale coastal engineering on hydrodynamics and sediment transport[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2014, 35(1): 1-7. 张玮, 刘燃, 钱伟, 等. 大型海岸工程对水流和泥沙运动的影响研究[J]. 水道港口, 2014, 35(1): 1-7.
- [5] XIE M X, ZHANG W. Numerical modeling of silting features in approach channel under the influence of entrance breakwaters in Li- anyungang Harbour[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2008(5): 15-21. 解鸣晓, 张玮. 连云港口门防波堤建设对航道回淤影响数值研究[J]. 泥沙研究, 2008(5): 15-21.
- [6] CUI F S, GU L, LI W D. Sediment problems related to expansion project of Tianwan Nuclear Power Plant[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2013, 34(4): 323-326. 崔方水, 顾磊, 李文丹. 田湾核电站扩建工程泥沙问题研究[J]. 水道港口, 2013, 34(4): 323-326.
- [7] ZHANG C Y. Comprehensive application of single beam and multi-beam sounder in surveying and mapping [J]. Construction Engineering Technology and Design, 2016(9): 10-14. 张程瑜. 单波束与多波束测深仪在测绘工作中的综合使用[J]. 建筑工程技术与设计, 2016(9): 10-14.
- [8] LONG Z X. Research on the Application of single beam multi-beam bathymetric system in ocean channel survey[J]. Shuzihua Yonghu, 2017(29): 147-149. 龙仲兴. 单波束多波束测深系统在海洋航道测量中的应用研究[J]. 数字化用户, 2017(29): 147-149.
- [9] ZAI Z Q. Study of siltation during construction period in Dagu waterway of Tianjin Port[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2013, 34(2): 128-132. 翟征秋. 天津港大沽沙航道施工期回淤研究[J]. 水道港口, 2013, 34(2): 128-132.
- [10] PANG Q X, SUN L C. Survey and study on characteristic of sediment in the constructing channel of muddy coast[J]. Port & Waterway

- Engineering, 2009(12): 159-164. 庞启秀, 孙连成. 淤泥质海岸航道建设期泥沙回淤特征监测研究[J]. 水运工程, 2009(12): 159-164.
- [11] SUN L C. Sediment research in construction of Tianjin Harbor and its evolvement[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2006, 27(6): 341-347. 孙连成. 天津港工程泥沙研究及其进展[J]. 水道港口, 2006, 27(6): 341-347.
- [12] WEI R Z. Research on back-silting observation of trial excavation of Hangzhou Bay deep channel[J]. Port & Waterway Engineering, 2002(10): 94-110. 魏日征. 杭州湾深水航道试挖回淤观测研究[J]. 水运工程, 2002(10): 94-110.
- [13] ZHENG W. Back silting monitoring and analysis of deep foundation trench in the Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge immersed tunnel project[J]. China Harbour Engineering, 2015, 35(11): 25-28. 郑伟. 港珠澳大桥沉管隧道深基槽回淤监测与分析[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(11): 25-28.
- [14] LIANG R J, HAN X J, LIU Z D, et al. Research and application on navigable depth of Zhuhai Power Plant[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2014, 35(4): 343-346. 梁荣江, 韩西军, 刘志东, 等. 珠海电厂港区适航水深研究与应用[J]. 水道港口, 2014, 35(4): 343-346.
- [15] PANG Q X, YANG S S, YANG H, et al. Research and application of the technique of nautical depth in muddy harbors[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010, 9(3): 33-38. 庞启秀, 杨树森, 杨华, 等. 淤泥质港口适航水深技术研究与应用[J]. 水利水运工程学报, 2010, 9(3): 33-38.
- [16] ZHOU L Y, CONG H W. A method of tidal calibration for regional single beam bathymetry in Shallow Sea[J]. Marine Geology Letters, 2005, 21(3): 36-39. 周良勇, 丛鸿文. 滨浅海单波束测深潮汐改正的方法[J]. 海洋地质动态, 2005, 21(3): 36-39.
- [17] LIU J J, ZHANG J C. Siltation prediction for navigation channels and harbour basins on muddy beach[J]. Hydro-Science and Water Transportation, 1993(4): 301-320. 刘家驹, 张镜潮. 淤泥质海岸航道、港池淤积计算方法及其推广应用——兼论连云港建西大堤后的泥沙问题[J]. 水利水运工程学报, 1993(4): 301-320.
- [18] Ministry of Transport of the People's Republic of China. Hydrologic code for seaports: JTS 145-2-2013[S]. Beijing: China Communication Press, 2013: 1-206. 中华人民共和国交通运输部. 海港文规范: JTS 145-2-2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013: 1-206.

Simplified Method for Channel Siltation Monitoring During Construction Period Based on Single Beam Sounding and Its Application

WANG Guang-lu^{1,2}

(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T, Tianjin 300456, China;

2. Tianjin Survey and Design Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: As sediment and terrain reach equilibrium over time after the engineering construction, siltation phenomenon occurs in the channel area. By applying the advantages of single beam bathymetry, which are fast and convenient measurement and high vertical accuracy of single point, and considering the variability and complexity of the channel siltation during the construction period as well, a quick and simple scheme for siltation monitoring during the construction period is designed. In this scheme, the fixed section method and the distance reciprocal weighted average method are used respectively to arrange the monitoring network and to improve the accuracy and speed of tide observation. The channel siltation volume during the dredging period is calculated by the method of calculating the section units first and then summarizing. The actual operation of an instance project indicates that this scheme can basically meet the requirements of fast and accurate siltation monitoring, which provides valuable information on the construction period for the research of long-term channel siltation.

Key words: single-beam; distance reciprocal; weighted average method; siltation monitoring

Received: March 10, 2018