

文章编号:1671-1637(2015)05-0101-09

确保水深模型航海安全性的深度保证率控制方法

贾帅东^{1,2}, 张立华^{1,2}, 彭认灿^{1,2}, 王 涛^{1,2}, 董 箭^{1,2}

(1. 海军大连舰艇学院 海洋测绘系, 辽宁 大连 116018;

2. 海军大连舰艇学院 海洋测绘工程实验室, 辽宁 大连 116018)

摘 要:针对当前海图水深应用在保证航海安全方面的不足,提出了海图水深的深度保证率控制方法,确保水深模型服务于航海的安全性。利用海图水深注记点,建立不规则三角网水深模型表面,推导了模型表面任意位置水深的整体计算公式。在考虑水深源数据不确定度对航海安全影响的基础上,定量分析了水深模型在任意位置处描述不确定度的影响。通过在模型点上附加不确定度来控制描述不确定度的影响,将水深模型的深度保证率控制在要求之内。在比例尺分别为1:2 000、1:5 000、1:10 000、1:50 000的海图上,对提出的面控方法进行验证,并与传统方法、点控方法进行了对比。分析结果表明:与传统方法相比,在4种海图上,面控方法深度保证率的合格率分别提高了51.72%、49.37%、38.71%、28.39%;与点控方法相比,面控方法分别提高了4.10%、5.00%、5.06%、9.65%;随着比例尺减小,传统方法深度保证率的合格率有所提高,点控方法有所下降,而面控方法因为综合考虑了源数据不确定度和模型描述不确定度的影响,深度保证率的合格率始终保持为100%;面控方法能将深度保证率控制在规定指标(97.5%)范围内,而传统方法和点控方法均不能达到规定指标,说明了面控方法的优越性。

关键词:水深模型;深度保证率;定量控制;不确定度;不规则三角网

中图分类号:U675.81

文献标志码:A

Control method of probability of adequate depth ensuring navigation safety of depth model

JIA Shuai-dong^{1,2}, ZHANG Li-hua^{1,2}, PENG Ren-can^{1,2}, WANG Tao^{1,2}, DONG Jian^{1,2}

(1. Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, Liaoning, China;

2. Hydrographic Surveying and Mapping Laboratory, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, Liaoning, China)

Abstract: Considering the drawback of charted depth in ensuring the navigation safety currently, a control method of probability of adequate depth was proposed, thus the navigation safety of depth model was ensured. The surface of triangulated irregular network (TIN)-based depth model was constructed based on the mark point of charted depth, and the common formula for calculating the depth of model surface at arbitrary position was deduced. Considering the influence of uncertainty of depth source data on navigation safety, the influence of representation uncertainty of depth model at arbitrary position was analyzed quantitatively. The uncertainty was appended on the model point to control the influence of representation uncertainty, and the probability of adequate depth of depth model was controlled to meet the required value. On the charts with the scales of 1:2 000, 1:5 000, 1:10 000, 1:50 000, respectively, the proposed

收稿日期:2015-05-13

基金项目:国家自然科学基金项目(41171349,41471380);国家863计划项目(2012AA12A406-3)

作者简介:贾帅东(1986-),男,安徽合肥人,海军大连舰艇学院工学博士研究生,从事海洋测绘数据处理研究。

导师简介:张立华(1973-),男,湖南桃江人,海军大连舰艇学院教授,工学博士。

surface control method was verified and compared with traditional method and point control method. Analysis result indicates that the acceptable rates of probability of adequate depth controlled by using surface control method on the charts are respectively 51.72%, 49.37%, 38.71%, 28.39% higher than the rates by using traditional method, and are 4.10%, 5.00%, 5.06%, 9.65% higher than the rates by using point control method. When the scale decreases, the acceptable rates of probability of adequate depth controlled by traditional method increase, and the rates by using point control method decrease, however, the rates by using surface control method are always 100% for both considering the uncertainty of source data and the representation uncertainty of depth model. The probability of adequate depth controlled by surface control method meets the required value (97.5%), but traditional method and point control method cannot satisfy the demand, which demonstrates the advantages of surface control method. 3 tabs, 9 figs, 25 refs.

Key words: depth model; probability of adequate depth; quantitative control; uncertainty; triangulated irregular network

Author resumes: JIA Shuai-dong(1986-), male, doctoral student, +86-411-85856444, sky_jsd@163.com; ZHANG Li-hua(1973-), male, professor, PhD, +86-411-85856444, zlhua@163.com.

0 引 言

水深是反映海底地形地貌的最基础性要素^[1],在航海图中,通常以水深注记的形式,通过建立数字水深模型(Digital Depth Model, DDM),实现对海底表面高低起伏形态的数字化表达,为舰船的海上航行提供辅助决策功能^[2-6],因此,水深模型的质量直接影响到舰船海上航行的安全性^[7-9]。

长期以来,为保证水深在航海应用方面的安全性,对于航海图上水深注记的选取,均强调采用取浅舍深原则,保留并突出海底表面的浅点水深^[1,9]。实际上,当这种海图水深应用于航海时,还要在富余水深的计算中考虑测深误差可能对航海安全带来的影响^[10],比如使得海图水深实际可用部分再度变浅(测深误差在同一深度区间通常采用固定的数值^[11])。这种经典的水深注记表达方式由于注记点处水深可以直接从图上读取,对应的实际可用水深也考虑了测深误差的影响,其在航海应用中被认为是可以保证安全的,但对于注记点之间水深需要用离散的水深注记点,通过某种数学方法(如线性内插法)建立起 DDM 表面,并进行相应的水深推估^[10]。张立华等通过理论分析明确指出当遇到海底凸地形时,线性推估的方法会造成模型在某些区域内的实际可用水深仍要深于真实水深,从而给海上航行带来潜在的危险^[10];针对传统方法忽视数据源差异,只根据深度区间设定相对固定的做法,张立华等进行了改进,采用国际海道测量组织推荐使用的的不确

定度替代测深误差,通过精细评估每个水深注记点的质量,采用不断变化的不确定度来提高水深在航海应用方面的安全性^[1]。由于不确定度比传统方法所使用测深误差更稳健,且精细评估了各水深注记点(在 DDM 分析中也称模型点)的不确定度,从而在大多数凸地形情形下取得了明显的效果^[1]。但以上方法对模型不确定度的评估仍主要基于随机误差理论进行,即认为推估点的不确定度分布规律与源数据点的规律基本一致。汤国安等通过理论分析和试验比对发现模型在任意位置上的不确定度,并非仅由随机误差构成^[12-15];Zhang 等明确指出模型在任意位置的不确定度主要由 2 部分组成,一部分为由水深注记点的不确定度(也称源数据不确定度)传递引起的不确定度,具有随机误差特征,另一部分为由有限、离散的模型点来表达连续海底表面引起的模型描述不确定度,具有明显的系统误差特征,大小与海底地形变化的复杂程度有关^[16-18]。在某些海底地形凸起更明显的情形下,采用文献[1]所述的变化不确定度的方法,在模型点之间某些区域内还会出现实际可用水深大于真实水深的情况,特别是随着水深模型点的明显减少,模型描述不确定度影响逐渐增大,这种实际可用水深大于真实水深的情况会变得更加明显,因此,为确保水深应用于航海时安全可靠,仅考虑模型点处的水深不确定度是不够的,还需考虑模型描述不确定度的影响。

本文在考虑模型点不确定度影响的基础上,分析了评估水深模型描述不确定度的影响,通过模型

点附加的不确定度信息来有效控制这一影响,从而更完备地控制水深在航海应用方面的安全性。

1 深度保证率及其合格率

为了定量分析水深在航海应用方面的安全性,采用深度保证率及其合格率这2个指标^[7]对水深模型进行质量评估。深度保证率为水深点*i*实际可用水深不大于真实水深的概率

$$\omega_i = \int_{-\infty}^{v_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}u_i} \exp\left(-\frac{z^2}{2u_i^2}\right) dz \quad (1)$$

$$v_i = z_{ri} - z_{ai}$$

式中: ω_i 为水深点*i*的深度保证率; v_i 为水深点*i*的原始观测水深 z_{ri} 与实际可用水深 z_{ai} 的差值; z 为推估水深; u_i 为水深点*i*的垂直标准不确定度。

根据国际海道测量标准关于水深不确定度和国内海道测量规范对测深极限误差的要求,经分析推算可知:若 ω_i 不小于97.5%,则此处的实际可用水深能满足航海安全的需求^[7],反之则在保证航海安全方面存在一定的隐患。

深度保证率的合格率是指在整个建模区域内,实际可用水深的深度保证率达到航海安全要求的比率^[10]

$$\Phi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varphi_i \quad (2)$$

式中: Φ 为深度保证率的合格率; φ_i 为水深点*i*的深度保证率是否合格的判别值,为0-1变量,当 $\omega_i \geq 97.5\%$ 时为1,当 $\omega_i < 97.5\%$ 时为0。

2 考虑水深模型任意位置不确定度的深度保证率控制

2.1 基本思想

为控制水深在航海安全方面的深度保证率,确保水深模型的航海安全性,采用以下基本思路:首先,利用海图水深注记点,建立不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN)水深模型表面;然后,评估出不规则三角网(简称三角网)水深模型表面上任意位置处的不确定度;最后,在模型点源数据不确定度的基础上,再附加一定的不确定度来控制模型表面任意位置的不确定度,提高实际可用水深的深度保证率。

2.2 三角网水深模型表面建立

将航海图中的水深注记点作为模型点,采用改进的逐点插入法^[19-20],构建水深三角网,然后推估出区域内任意点的水深,实现水深模型表面的建立。

目前,在模型点推估任意点水深的数学方法中,

常用的是三角形线性内插法^[21-22]。具体方法如下:在图1三角网建模区域内(三角网的模型点包括 V_1, V_2, \dots, V_{18}),任意给定一点*p*,点*p*的平面坐标为(*x*, *y*),*x*为横向位置,*y*为纵向位置,首先根据该点的平面位置,确定其所在的三角形(由模型点 V_7, V_8, V_{12} 组成的三角形),然后采用式(3)进行推估

$$z = [1 \ x \ y] \begin{bmatrix} 1 & x_7 & y_7 \\ 1 & x_8 & y_8 \\ 1 & x_{12} & y_{12} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} z_7 \\ z_8 \\ z_{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:(x_7, y_7), (x_8, y_8), (x_{12}, y_{12})分别为三角形3个模型点 V_7, V_8, V_{12} 的平面坐标; z_7, z_8, z_{12} 分别为三角形3个模型点 V_7, V_8, V_{12} 对应的水深。

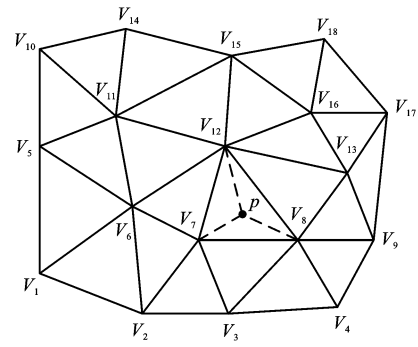


图1 不规则三角网水深模型表面

Fig. 1 Surface of TIN-based depth model

将描述单个三角形的水深推估式(3)扩展为全局三角网内的水深推估公式,表示为

$$z = [\lambda_1(x, y) \ \lambda_2(x, y) \ \dots \ \lambda_m(x, y)] \cdot \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & \dots & z_m \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

式中: $\lambda_1(x, y), \lambda_2(x, y), \dots, \lambda_m(x, y)$ 分别为计算点*p*水深时模型点 V_1, V_2, \dots, V_m 的系数; z_1, z_2, \dots, z_m 分别为模型点 V_1, V_2, \dots, V_m 的水深。

可根据待估点*p*的平面位置(*x*, *y*)及所在三角形来确定 $\lambda_1(x, y), \lambda_2(x, y), \dots, \lambda_m(x, y)$ 。以图1中的点*p*为例,该点位于由模型点 V_7, V_8, V_{12} 组成的三角形内,则模型点 V_7, V_8, V_{12} 上的系数 $\lambda_7(x, y), \lambda_8(x, y), \lambda_{12}(x, y)$ 可根据式(5)计算得到,其余模型点上的系数为0

$$[\lambda_7(x, y) \ \lambda_8(x, y) \ \lambda_{12}(x, y)] = [1 \ x \ y] \begin{bmatrix} 1 & x_7 & y_7 \\ 1 & x_8 & y_8 \\ 1 & x_{12} & y_{12} \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

结合式(5),对式(4)进行进一步整理,令

$$\lambda(x, y) = [\lambda_1(x, y) \ \lambda_2(x, y) \ \dots \ \lambda_m(x, y)]$$

$$Z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_m]^T$$

可得

$$z = \lambda(x, y)Z \quad (6)$$

式中: $\lambda(x, y)$ 为由模型推估任意点 (x, y) 处水深的系数矩阵; Z 为模型点水深矩阵。

2.3 三角网水深模型不确定度的分析与评估

水深模型在任意位置的不确定度, 主要包括水深源数据不确定度传递引起的不确定度和水深模型的描述不确定度。水深模型的不确定度分析见

图 2: u_{r1} 、 u_{r2} 分别为模型在点 p_1 、 p_2 处的源数据传递不确定度; u_{s1} 、 u_{s2} 分别为模型在点 p_1 、 p_2 处的描述不确定度, 具有明显的系统误差特征, 其大小与海底地形变化的复杂程度有关^[23]; u_1 、 u_2 分别为模型在点 p_1 、 p_2 处总的不确定度。当水深模型真正应用于保证航海安全时, 一方面要考虑水深模型点上源数据不确定度对航海安全的影响, 另一方面还须考虑水深模型描述不确定度的影响。

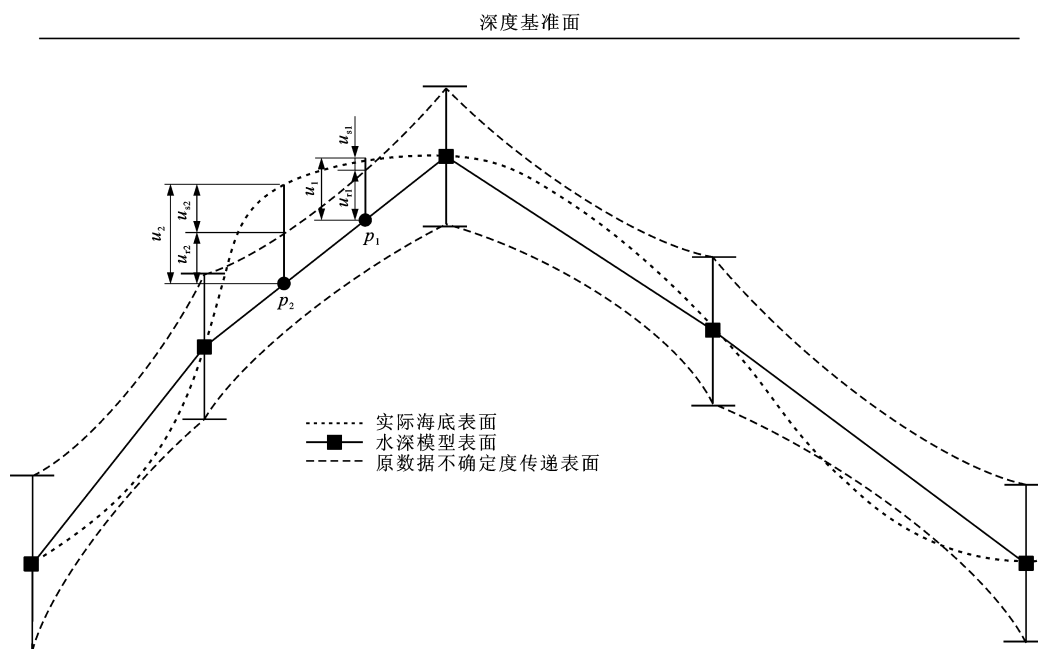


图 2 水深模型不确定度分析

Fig. 2 Uncertainty analysis of depth model

采用国际标准化组织推荐的不确定度合成方法, 推导得出由水深模型点的不确定度传递至所内插的模型点的不确定度为^[21]

$$u_r(x, y) = 0.81 \left[(u_{x1}^2 + u_{x2}^2 + u_{x3}^2) \left(\frac{S_x}{S_z} \right)^2 + (u_{y1}^2 + u_{y2}^2 + u_{y3}^2) \left(\frac{S_y}{S_z} \right)^2 + (u_{z1}^2 + u_{z2}^2 + u_{z3}^2) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中: $u_r(x, y)$ 为水深模型在点 (x, y) 处的源数据传递不确定度; u_{x1} 、 u_{x2} 、 u_{x3} 分别为三角形 3 个模型点的水平不确定度在 x 轴的分量; u_{y1} 、 u_{y2} 、 u_{y3} 分别为 3 个模型点的水平不确定度在 y 轴的分量; u_{z1} 、 u_{z2} 、 u_{z3} 分别为 3 个模型点的垂直不确定度; S_x 、 S_y 、 S_z 分别为三角形平面在 3 个坐标平面 yOz 、 xOz 、 xOy 上的投影面积。

水深模型描述不确定度是由有限、离散的模型点建立的水深模型表面与无限、连续的真实海底表面之间的偏差。由于误差的不可避免性, 真实的海底表面是无法获得的, 因此, 利用高密度的多波束水

深数据直接建立水深模型表面, 近似替代真实的海底表面, 简称最优逼近海底表面^[10]。水深模型在任意点 (x, y) 处的描述不确定度为

$$u_s(x, y) = |z_r(x, y) - z| \quad (8)$$

式中: $u_s(x, y)$ 为水深模型在点 (x, y) 处的描述不确定度; $z_r(x, y)$ 为最优逼近海底表面在点 (x, y) 处的水深。

评估水深模型在任意点 (x, y) 处的不确定度 $u(x, y)$ 为

$$u(x, y) = u_r(x, y) + u_s(x, y) \quad (9)$$

2.4 模型任意位置不确定度到模型点不确定度的优化控制

由于目前主要采用海图水深注记点 (即水深模型点) 的形式来表达海底地形变化, 保证航海安全, 在这些水深模型点 $k(k=1, 2, 3, \dots, m)$ 上能够保留详细的数据信息, 如平面位置 (x_k, y_k) 与深度 z_k , 然而, 对于建模区域内的任意位置处的不确定度信息 ($u(x, y)$) 是没有记录的。为了控制水深模型在任

意位置处不确定度对航海安全保证的影响,可在水深模型点上附加 2 个不确定度信息 U_{rk} 和 U_{sk} ,其中, U_{rk} 为水深模型中模型点 k 源数据不确定度及其传递的控制量, U_{sk} 为水深模型中模型点 k 描述不确定度的控制量,见图 3,模型在任意位置 (x, y) 处的不确定度 $u(x, y)$ 对航海安全的影响,被相应位置上的控制量 $U(x, y)$ 有效地控制。

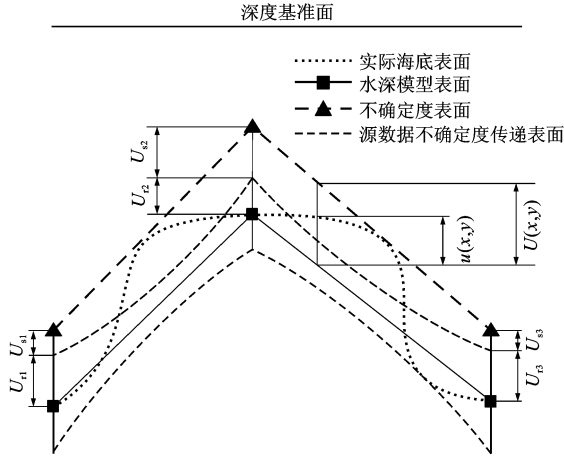


图 3 深度保证率控制

Fig. 3 Control of probabilities of adequate depths

由于水深源数据不确定度在模型表面的传递分布呈现出“两端大、中间小”的哑铃形状^[24],故通过水深模型点上的源数据不确定度,即可有效控制源数据不确定度及其传递的影响。根据张立华等提出的基于 GUM 的不确定度评估方法^[1],可得到各水深模型点的源数据不确定度控制量 U_{rk} 。

利用模型点上附加的描述不确定度控制量 U_{sk} ,来控制水深模型在任意位置处描述不确定度的影响。可通过建立模型面上任意位置的不确定度 $u(x, y)$ 与 U_{sk} 间的数学关系准确求解出 U_{sk} 的数值,然后采用线性规划的相关算法进行计算,具体方法如下。

根据式(6)可知,水深模型点上的源数据不确定度控制量 U_{rk} 与描述不确定度控制量 U_{sk} 对建模区域内任意位置 (x, y) 处的控制量 $U(x, y)$ 为

$$U(x, y) = \lambda(x, y)(\mathbf{U}_r + \mathbf{U}_s) \quad (10)$$

$$\mathbf{U}_r = [U_{r1} \quad U_{r2} \quad \cdots \quad U_{rm}]^T$$

$$\mathbf{U}_s = [U_{s1} \quad U_{s2} \quad \cdots \quad U_{sm}]^T$$

式中: \mathbf{U}_r 为由水深模型点上源数据不确定度控制量构成的矩阵; \mathbf{U}_s 为由水深模型点上描述不确定度控制量构成的矩阵。

由图 3 可以看出,只要水深模型点上 U_{rk} 与 U_{sk} 在任意位置 (x, y) 处的控制量 $U(x, y)$ 不小于水深

模型面在该位置上精细的不确定度信息 $u(x, y)$,就能使航海实际应用中推估的水深不大于实际水深,从而满足舰船航海安全的需求,即 $U(x, y)$ 与 $u(x, y)$ 应存在以下关系

$$U(x, y) \geq u(x, y) \quad (11)$$

将式(10)代入式(11),得

$$\lambda(x, y)(\mathbf{U}_r + \mathbf{U}_s) \geq u(x, y) \quad (12)$$

对式(12)进一步推导整理,可得

$$\lambda(x, y)\mathbf{U}_s \geq u(x, y) - \lambda(x, y)\mathbf{U}_r \quad (13)$$

式(13)建立了水深模型表面在任意位置 (x, y) 处的不确定度 $u(x, y)$ 与水深模型点上的描述不确定度控制量 U_{sk} 之间的数学关系。

只要将各模型点上的描述不确定度控制量 U_{sk} 考虑得足够大,就可以保证式(13)所述的数学关系成立,从而满足舰船的航海安全需求。然而,若一味地扩大各模型点上的 U_{sk} ,将导致在航海中的实际可用水深较小,从而损失较多的可航行资源,因此,需要优化 U_{sk} 的数值,即在保证航海安全的前提下,使 U_{sk} 在整个建模区域内的控制总量 C 最小

$$C = \min \iint \lambda(x, y)\mathbf{U}_s dx dy \quad (14)$$

将高密度的原始水深数据点(数量为 n)代入式(13)、(14),整理可得

$$C = \min \sum_{j=1}^n \lambda(x_j, y_j)\mathbf{U}_s \quad (15)$$

$$\text{s. t. } \lambda(x_j, y_j)\mathbf{U}_s \geq u(x_j, y_j) - \lambda(x_j, y_j)\mathbf{U}_r$$

式中: $\lambda(x_j, y_j)$ 为由模型推估平面位置点 (x_j, y_j) 处水深的系数矩阵; $u(x_j, y_j)$ 为由模型在平面位置点 (x_j, y_j) 处的不确定度。

采用线性规划中的相关算法^[25],可解算出各模型点的描述不确定度控制量 U_{sk} 。在不破坏原有数据信息完整性的前提下,通过在模型点上新增的描述不确定度信息,可实现对整个水深模型面的不确定度控制,进一步提高水深用于航海的深度保证率。

2.5 实际可用水深的计算与航海应用

受纸质海图的传统作业思维约束,当前海图水深点的信息主要记录的仍只是水深注记点(即水深模型点)的平面位置和深度等信息,并未精确保留水深注记点的不确定度信息。

传统方法只能对照表 1 的海图测深误差,根据水深区间来粗略得到不确定度,即误差,见表 2。随着数字海图的普及和推广,可以记录更多关于水深注记点的详细信息。点控方法针对不同来源的水深数据,对每个水深注记点的水深不确定度与传递进

表 1 海图测深误差

Tab. 1 Measurement errors of chart

水深/m	0~20	20~100	>100
误差/m	0.3	1.0	水深的 1%

表 2 部分水深模型点信息

Tab. 2 Informations of some depth model points

原海图水深注记点信息			传统方法		点控方法		面控方法		
横坐标/ cm	纵坐标/ cm	深度/ m	标准误差/ m	实际可用 水深/m	源数据不 确定度/m	实际可用 水深/m	源数据不 确定度/m	描述不 确定度/m	实际可用 水深/m
14.22	59.32	5.1	0.3	4.8	0.4	4.7	0.4	0.8	3.9
41.98	13.66	19.2		18.9	0.7	18.5	0.7	0.2	18.3
42.00	27.80	17.7		17.4	0.7	17.0	0.7	0.5	16.5
41.92	41.98	14.2		13.9	0.6	13.6	0.6	4.5	9.1
28.50	47.35	2.3		2.0	0.4	1.9	0.4	0.8	1.1
36.46	63.61	6.7		6.4	0.4	6.3	0.4	0.1	6.2
55.77	13.99	17.1		16.8	0.7	16.4	0.7	1.0	15.4
56.00	27.81	13.2		12.9	0.6	12.6	0.6	0.8	11.8
55.94	40.83	10.4		10.1	0.5	9.9	0.5	1.6	8.3
49.27	52.07	5.3		5.0	0.4	4.9	0.4	0.1	4.8

当水深模型实际应用于航海时,为考虑到误差(不确定度)对航海安全保证率的影响,应该在原海图注记水深的基础上,减去表 2 中的标准误差(或不确定度),得出模型点处在航海中的实际可用水深

$$z_{ak} = z_{rk} - U_{rk} - U_{sk} \quad (16)$$

式中: z_{ak} 为模型点 k 处的实际可用水深; z_{rk} 为模型点 k 处的原海图注记水深。

利用这些模型点的实际可用水深,采用式(17)的线性内插法,推估模型任意位置 (x, y) 处的实际可用水深 z_a ,从而建立起模型应用于航海时的实际可用水深表面

$$z_a = \lambda(x, y)Z \quad (17)$$

3 试验与分析

3.1 深度保证率的合格率比对分析

为了比较传统方法、点控方法^[1]与本文面控方法在保证航海安全方面的差异,选取图 4 的试验海区进行分析。首先,从原始多波束水深数据中均匀、随机选取一定数量的水深点作为检查点,并从其余原始水深数据中按照取浅舍深原则,选取水深模型点,构建不规则三角网水深模型;然后分别采用传统方法、点控方法与面控方法对水深模型的不确定度进行控制;最后,采用深度保证率及其合格率来评估 3 种方法的控制效果,见表 3。

行了评估^[1],作为一项源数据的不确定度信息,附加在水深模型点的信息中。本文方法在记录源数据不确定度的基础上,在水深模型点上再附加一项描述不确定度信息,即面控方法。

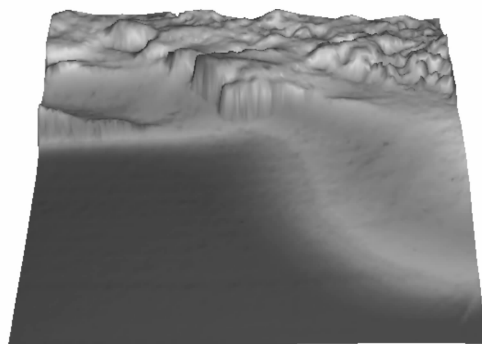


图 4 试验海区

Fig. 4 Experimental sea area

表 3 控制效果比较

Tab. 3 Comparison of control effects

比例尺	深度保证率的合格率/%		
	传统方法	点控方法	面控方法
1 : 2 000	48.28	95.90	100.00
1 : 5 000	50.63	95.00	100.00
1 : 10 000	61.29	94.94	100.00
1 : 50 000	71.61	90.35	100.00

从表 3 可以看出,在比例尺为 1 : 2 000、1 : 5 000、1 : 10 000、1 : 50 000 的海图上,面控方法对航海中实际可用水深深度的保证率的合格率比传统方法分别提高了 51.72%、49.37%、38.71%、28.39%,比点控方法分别提高了 4.10%、5.00%、

5.06%、9.65%。可见,与传统方法和点控方法相比,面控方法对航海中实际可用水深深度的合格率的合格率均有一度程度的提高,且较传统方法提高的程度更为明显。得到这一结果的原因如下:传统方法仅将水深划分为3个区间,对照海图测深误差表来粗略地评估水深模型点的不确定度,导致传统方法的深度保证率的合格率最低;点控方法精细考虑了每个模型点的水深质量差异,并按照国际海道测量标准要求,精细计算出相应的源数据不确定度,从而显著提高了深度保证率的合格率;面控方法在点控方法的基础上,进一步考虑了水深模型任意位置描述不确定度的影响,从而再度提高了实际可用水深深度的合格率。

对比表3中3种方法的试验结果还可以看出:随着比例尺减小,模型点数量减少,保留的浅点水深会将整个模型表面进一步变浅,从而使得传统方法在一定程度上提高了深度保证率的合格率,而点控方法由于未考虑模型描述不确定度的影响,使得实际可用水深深度的合格率有所下降,但仍高于同比例尺下的传统方法;面控方法综合考虑了源数据不确定度和模型描述不确定度的影响,不同比例尺均能将深度保证率控制在规定的范围之内,从而使得深度保证率的合格率达到100%。

3.2 深度保证率控制的三维效果对比分析

不失一般性,选取比例尺1:5 000下3种方法控制深度保证率的三维效果进行比较分析,结果分别见图5~7。在比例尺1:5 000下的原水深模型基础上,分别采用上述3种方法对不确定度进行控制后建立实际可用水深表面。由于无法获得真实海底表面,使用密度最高的原始多波束水深数据直接建立水深模型表面以近似替代真实海底表面,出于航海安全的考虑,在该表面的基础上减去相应的不

■ 实际海底表面 ■ 实际可用水深表面

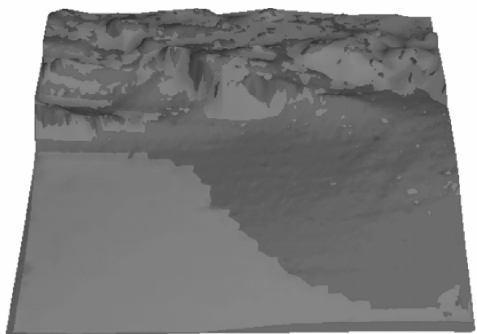


图5 传统方法的三维效果

Fig. 5 3D effect of traditional method

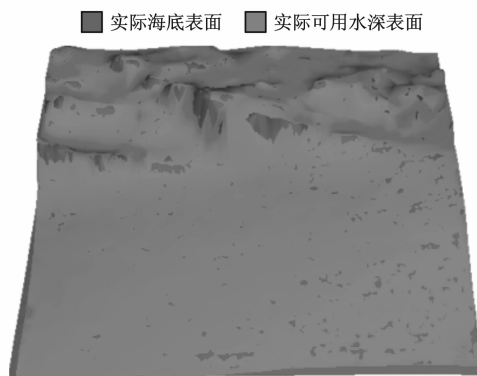


图6 点控方法的三维效果

Fig. 6 3D effect of point control method

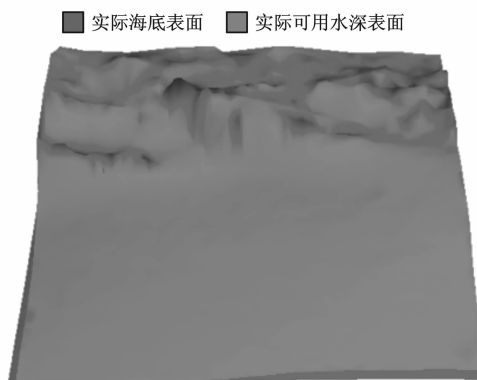


图7 面控方法的三维效果

Fig. 7 3D effect of surface control method

确定度后,建立了海底表面。若区域内实际海底表面部分露出,表明该区域内实际可用水深的深度保证率未达到规定的97.5%这一指标,可能会对航海安全构成一定的威胁。

从图5~7可以看出,面控方法能满足航海安全要求的深度保证率,在考虑源数据不确定度影响的基础上,进一步利用模型点的描述不确定度来有机地控制模型描述不确定度的影响,从而使实际可用水深在任意局部区域内的深度保证率均能达到规定的数值指标,而点控方法和传统方法在某些局部区域内无法使实际可用水深的深度保证率达到规定的数值指标。

3.3 单个水深点的深度保证率对比分析

从比例尺1:5 000的海图中随机抽取一定数量的检查点,计算3种方法在单个水深点上的实际可用水深,结果见图8,可用水深的深度保证率,评估结果见图9。

从图9中可以看出,在对单个水深点的深度保证率控制方面,相比于传统方法和点控方法,面控方法能将实际可用水深的深度保证率控制在规定的范围之内,而传统方法和点控方法在部分水深点上的

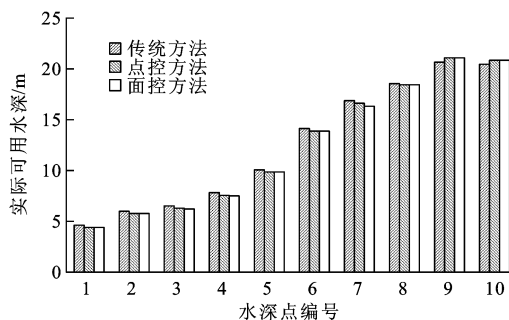


图 8 实际可用水深对比

Fig. 8 Comparison of actual available depths

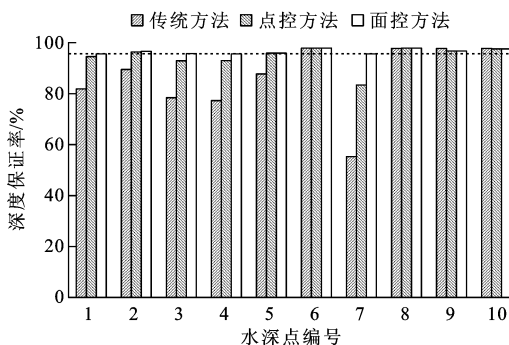


图 9 深度保证率对比

Fig. 9 Comparison of probabilities of adequate depths

深度保证率未能达到虚线所示 97.5% 的深度保证率,进一步说明了面控方法在单个水深点的深度保证率控制方面的优越性。

4 结 语

(1)针对当前海图水深在保证航海安全方面的不足,提出了一种深度保证率控制方法,分析了传统方法和点控方法难以有效控制深度保证率达到规定数值的内在原因,即未充分考虑模型描述不确定度这一系统性误差对航海安全的影响。定量分析了水深模型在任意位置处描述不确定度的影响,并在模型点上附加不确定度来有机地控制这一影响,从而将模型的深度保证率控制在规定指标范围内。通过试验比对分析,验证了本文面控方法较传统方法和点控方法在确保航海安全性方面的优越性,因此,在航海实际应用中,采用面控方法可以利用海图水深更加可靠地保障舰船在海上的航行安全。

(2)面控方法仅从水深的角度探讨了航海安全的保障方法,还有待于进一步研究其他影响航海安全的因素。另外,本文采用常用的三角面线性插值方法进行 DDM 表面推估,分析其他插值方法对深度保证率控制的影响,是下一步的研究方向。

参考文献:

References:

- [1] 张立华,贾帅东,元建胜,等.一种基于不确定度的水深控浅方法[J].测绘学报,2012,41(2):184-190.
ZHANG Li-hua, JIA Shuai-dong, YUAN Jian-sheng, et al. A method for controlling shoal-bias based on uncertainty[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(2): 184-190. (in Chinese)
- [2] 汤青慧,唐旭,崔晓晖,等.基于动态通达网络模型的最优航程规划方法[J].武汉大学学报:信息科学版,2015,40(4):521-528.
TANG Qing-hui, TANG Xu, CUI Xiao-hui, et al. Optimal voyage planning strategies based on a dynamic access network model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(4): 521-528. (in Chinese)
- [3] 张安民.e-航海中的动态信息服务若干关键技术研究[D].武汉:武汉大学,2013.
ZHANG An-min. Research on some key techniques of dynamic information services in e-navigation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. (in Chinese)
- [4] 潘明阳,刘涛,王德强,等.Web多维数字航道监控平台[J].交通运输工程学报,2014,14(2):97-103,126.
PAN Ming-yang, LIU Tao, WANG De-qiang, et al. Web multidimensional digital waterway monitoring platform[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(2): 97-103, 126. (in Chinese)
- [5] GORALSKI R, RAY C, GOLD C. Applications and benefits for the development of cartographic 3D visualization systems in support of maritime safety[J]. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2011, 5(4): 423-431.
- [6] 张立强.构建三维数字地球的关键技术研究[D].北京:中国科学院,2004.
ZHANG Li-qiang. Key technologies for 3D digital earth development[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2004. (in Chinese)
- [7] 张立华,朱庆,刘雁春,等.电子海图平台下的航线自动设计方法[J].大连海事大学学报,2007,33(3):109-112.
ZHANG Li-hua, ZHU Qing, LIU Yan-chun, et al. A method for automatic routing based on ECDIS[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2007, 33(3): 109-112. (in Chinese)
- [8] 贾帅东,张立华,宋国大,等.基于区域平均垂直不确定度的自适应网格水深建模方法[J].测绘学报,2012,41(3):454-460.
JIA Shuai-dong, ZHANG Li-hua, SONG Guo-da, et al. A method for constructing an adaptive grid digital depth model based on mean vertical uncertainty of area[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(3): 454-460. (in Chinese)
- [9] SMITH S M. The navigation surface: a multipurpose bathymetric database[D]. Durham: University of New Hampshire, 2003.
- [10] 张立华,贾帅东,王涛,等.深度保证率和表达度指标的定义及评估方法[J].武汉大学学报:信息科学版,2015,40(5):695-700.

- ZHANG Li-hua, JIA Shuai-dong, WANG Tao, et al. Definitions and estimating methods of a probability of an adequate depth and representiveness[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(5): 695-700. (in Chinese)
- [11] 王鹤荀,郭洪驹. 船舶安全富余水深的确定[J]. *上海海事大学学报*, 2004, 25(4): 19-21.
- WANG He-xun, GUO Hong-ju. Determination of ship's safe under-keel clearance[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2004, 25(4): 19-21. (in Chinese)
- [12] 汤国安,赵牡丹,曹 茜. DEM地形描述误差空间结构分析[J]. *西北大学学报:自然科学版*, 2000, 30(4): 349-352.
- TANG Guo-an, ZHAO Mu-dan, CAO Han. An investigation of the spatial structure of DEM errors[J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2000, 30(4): 349-352. (in Chinese)
- [13] 王耀革,朱长青,王志伟. 数字高程模型(DEM)的整体误差分析[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2009, 34(12): 1467-1470.
- WANG Yao-ge, ZHU Chang-qing, WANG Zhi-wei. Global error analysis of DEM models[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(12): 1467-1470. (in Chinese)
- [14] 吴艳兰,胡 海,胡 鹏,等. 数字高程模型误差及其评价的问题综述[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2011, 36(5): 568-574.
- WU Yan-lan, HU Hai, HU Peng, et al. A review on the issues in DEM error and DEM quality assessment[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(5): 568-574. (in Chinese)
- [15] BEEKHUIZEN J, HEUVELINK G, BIESEMANS J, et al. Effect of DEM uncertainty on the positional accuracy of airborne imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(5): 1567-1577.
- [16] ZHANG Li-hua, JIA Shuai-dong, PENG Ren-can, et al. A quantitative method to control and adjust the accuracy of adaptive grid depth modeling[J]. *Marine Geodesy*, 2013, 36(4): 408-427.
- [17] 胡 鹏,吴艳兰,胡 海. 再论 DEM精度评定的基本理论问题[J]. *地球信息科学*, 2005, 7(3): 28-33.
- HU Peng, WU Yan-lan, HU Hai. A new research on fundamental theory of assessing the accuracy of DEMs[J]. *Geo-Information Science*, 2005, 7(3): 28-33. (in Chinese)
- [18] HARE R, EAKINS B, AMANTE C. Modelling bathymetric uncertainty[J]. *International Hydrographic Review*, 2011, 4(2): 31-42.
- [19] 宋占峰,蒲 浩,詹振炎. 快速构建 Delaunay 三角网算法研究[J]. *铁道学报*, 2001, 23(5): 85-91.
- SONG Zhan-feng, PU Hao, ZHAN Zhen-yan. Study on an algorithm for fast constructing Delaunay triangulation[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2001 23(5): 85-91. (in Chinese)
- [20] 胡金星,潘 懋,马照亭,等. 高效构建 Delaunay 三角网数字地形模型算法研究[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2003, 39(5): 736-741.
- HU Jin-xing, PAN Mao, MA Zhao-ting, et al. Study on faster algorithm for constructing Delaunay triangulations DTM[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, 39(5): 736-741. (in Chinese)
- [21] 贾帅东,刘一帆,张立华,等. 水深源数据不确定度在 TIN 水深建模中的传播规律分析[J]. *海洋测绘*, 2014, 34(3): 17-19, 24.
- JIA Shuai-dong, LIU Yi-fan, ZHANG Li-hua, et al. Propagation analysis of depth source data uncertainty in TIN depth modeling[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2014, 34(3): 17-19, 24. (in Chinese)
- [22] 田峰敏,赵玉新,李 磊,等. 由矢量电子海图构建海底 TIN DEM 方法研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2009, 30(2): 142-147, 153.
- TIAN Feng-min, ZHAO Yu-xin, LI Lei, et al. A method of constructing undersea TIN DEM based on vector nautical chart[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2009, 30(2): 142-147, 153. (in Chinese)
- [23] 王光霞,朱长青,史文中,等. 数字高程模型地形描述精度的研究[J]. *测绘学报*, 2004, 33(2): 168-173.
- WANG Guang-xia, ZHU Chang-qing, SHI Wen-zhong, et al. The further study on the accuracy of DEM terrain representation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, 33(2): 168-173. (in Chinese)
- [24] 蓝悦明,陶本藻. 以点位误差描述线元位置不确定性的误差带方法[J]. *测绘学报*, 2004, 33(4): 289-292.
- LAN Yue-ming, TAO Ben-zao. End points accuracy based error band method for determination of a line segment position uncertainty[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2004, 33(4): 289-292. (in Chinese)
- [25] 朱建军,谢 建. 附不等式约束平差的一种简单迭代算法[J]. *测绘学报*, 2011, 40(2): 209-212.
- ZHU Jian-jun, XIE Jian. A simple iterative algorithm for inequality constrained adjustment[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(2): 209-212. (in Chinese)