

海底大地秩亏基准网快速标校方法*

孙大军^{1,2,3} 欧阳雨洁^{1,2,3} 韩云峰^{1,2,3†}

(1 哈尔滨工程大学 水声技术全国重点实验室 哈尔滨 150001)

(2 工业和信息化部 海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学) 哈尔滨 150001)

(3 哈尔滨工程大学 水声工程学院 哈尔滨 150001)

2022 年 3 月 23 日收到

2022 年 12 月 16 日定稿

摘要 基于信标互测距信息与绝对坐标信息的融合,提出一种海洋大地控制网快速标校方法。相较于现有方法,快速标校方法降低了自由网平差对起算条件的需求,减少了 50% 以上的绝对标定点数目,标校效率与绝对坐标精度显著提升。在大范围布设时,优势明显。此外,通过对阵型与绝对校准点数目的分析,提出了几种典型阵型在理想条件下的布设方案。浅水试验结果表明,在保证基准网标校精度高于 0.2 m 的条件下,标校效率提升了 50%。

关键词 水下控制网网型校准,水下长基线定位,秩亏自由网平差,水下基准点定位

PACS 数 43.58, 43.60

Rapid calibration method for rank defect submarine geodetic station network

SUN Dajun^{1,2,3} OUYANG Yujie^{1,2,3} HAN Yunfeng^{1,2,3†}

(1 National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University Harbin 150001)

(2 Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University),
Ministry of Industry and Information Technology Harbin 150001)

(3 College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University Harbin 150001)

Received Mar. 23, 2022

Revised Dec. 16, 2022

Abstract A rapid calibration method for marine geodetic control networks based on the combination of beacon mutual ranging information and absolute coordinate information is proposed. Compared with existing methods, the rapid calibration method reduces the initial condition restriction of free net adjustment; the number of absolute calibration points is reduced by more than 50%, and the calibration efficiency and absolute coordinate precision are significantly improved. In addition, several typical formations under ideal conditions are proposed by analyzing the formations and absolute calibration points. The shallow water test results show that the calibration efficiency is improved by 50% when the calibration precision of the reference network is greater than 0.2 m and the calibration precision of the reference network is greater than 0.2 m.

Keywords Marine geodetic control network, Control network adjustment, Control network layout, Calibration of underwater control points

引言

海底大地基准网是一组布放在海底的大地测量基准站,它类似于 GNSS 星座,既可对水面及水下用户提供定位、导航和授时服务,也可用于监测海底板

块运动和海洋环境变化。与卫星定位为主要技术手段的陆地及海面定位不同,电磁波传播拒止条件下,以声波为信息载体的水声定位技术是海底大地基准的精密获取的主要选择。

许多发达国家已经具备基准网布设与维护的能力^[1-3]。比如日本用于监测地质活动所布设的海洋大

* 国家重点研发计划项目(2020YFB0505805)资助

† 通讯作者:韩云峰, hanyunfeng@hrbeu.edu.cn

地基准网^[4-5]。2015年,美国国防高级研究计划局(DARPA)提出的构建“深海 GNSS”以协助潜器获取高精度的定位信息。

传统海底大地基准标定通过综合试验船基阵大地坐标、基阵与海底基准点的相对坐标实现海底基准点的绝对标定^[6]。然而基准点标定十分困难,不仅标定时间长,且受声速影响严重^[7-9]。文献[7]通过集成测量方位和测距的方法实现对基准点位置的标定,标定时间相比于传统的 18~24 h 已经缩短至 2~3 h。但在实现大范围的长基线定位时,如美国 Proserv 公司 NASNet 长基线系统海洋石油工程管道站点布设等海洋工程作业时,其控制点布设最多时可达 77 个。因此,从总体上减少绝对标定点数目,提高布设效率是十分有必要的。

文献[8]通过增加基准的功能来实现基线间的自动测量和校准。文献[9]分析了相对测阵的原理,给出了相对测阵和绝对测阵的坐标转换。文献[10]考虑了基准网的阵型设计与优化。但以上研究均未能有效提升整体标校效率。

文献[11]通过对控制网内基准点分别进行绝对标定,得到每一个基准点的精确初始位置。然后通过基准点之间的相对测量信息,在深度或者其他观测信息的约束下,对网内全部基准点进行坐标的修正,其本质是秩亏自由网平差,虽然基准的内符合精度会相应提升,但是会损失一部分的外符合精度,且在大面积布网时,作业效率低下。

文献[12]利用深度约束,将三维控制网的起算条件从 3 个控制点下降至 2 个点。文献[13-14]在文献[12]的基础上,利用三维无约束平差剔除不合格基线,从而提高网平差精度。虽然提升了绝对标校效率,但需要额外获取信标深度信息。

为解决上述问题,本文提出了一种海底大地基准快速标校方法。该方法降低了需要绝对标定的基准点数目,无需额外观测信息补偿,从根本上实现校准效率的提升。此外将绝对标定结果引入误差方程,在不降低控制网相对坐标精度的前提下,提高了网平差后的绝对精度。

1 海底大地基准快速标校方法原理

海底大地基准快速标校法,是利用海面母船圆走航完成部分海洋大地控制点标定。在此基础上,不同控制点之间互测距组成测边网,采用网平差处理得到海洋大地控制网每个控制点的坐标,完成海洋大地控制网的快速校准,最终实现陆海面基准到

海底的传递^[15-18]。

1.1 海面圆走航绝对标定

海面圆走航是基于距离交汇的绝对标定方法,轨迹的对称性可以消除该方法的部分系统误差。基于该思想,文献[6]提出了工作母船圆走航观测,通过获取对称距离实现单个阵元的绝对标定,同时完成测量基准向海底的传递。其走航方式如图 1 所示。

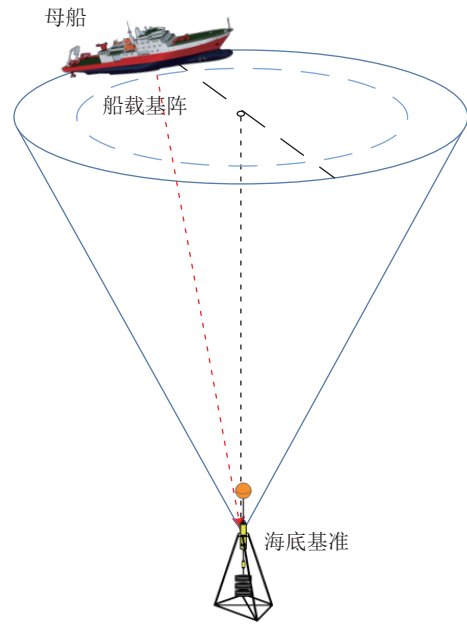


图 1 圆绝对标定原理

设第 i 次观测时船载基阵的地理坐标为 (X_i, Y_i, Z_i) , $i = 1, 2, \dots, n$ 。待测定的海底基阵阵元的坐标为 (X_p, Y_p, Z_p) , 利用声线跟踪得到两者之间的斜距离观测量为 L_i ^[19], 测量误差为 ΔL_i 。 $f_i(x)$ 为第 i 次观测时船载基阵至阵元之间的距离函数, $f_i(x)^0$ 为方程在基阵初值 (X_0, Y_0, Z_0) 处的值, L_i 可表达为

$$L_i = f_i(x) + \Delta L_i. \quad (1)$$

对上式线性化得:

$$L_i = f_i(x)^0 + \left[\frac{\partial f_i}{\partial x} \quad \frac{\partial f_i}{\partial y} \quad \frac{\partial f_i}{\partial z} \right] \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} + \Delta L_i, \quad (2)$$

则误差方程为

$$v_i = \left[\frac{\partial f_i}{\partial x} \quad \frac{\partial f_i}{\partial y} \quad \frac{\partial f_i}{\partial z} \right] \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} + \Delta L_i, \quad (3)$$

其中, $f_i(x)^0 = \sqrt{(X_i - X_0)^2 + (Y_i - Y_0)^2 + (Z_i - Z_0)^2}$, $\Delta L_i = f_i(x)^0 - L_i$ 。

由 n 条测量距离构建如下矩阵形式:

$$V = B_1 X - L, \quad (4)$$

其中

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} \frac{-(x_1 - x_0)}{f_1(x)^0} & \frac{-(y_1 - y_0)}{f_1(x)^0} & \frac{-(z_1 - z_0)}{f_1(x)^0} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{-(x_n - x_0)}{f_n(x)^0} & \frac{-(y_n - y_0)}{f_n(x)^0} & \frac{-(z_n - z_0)}{f_n(x)^0} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} \Delta L_1 \\ \vdots \\ \Delta L_n \end{bmatrix}, \mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix}.$$

由于所有点都在圆周上, 距离基本相等, 可认为等权, 则有

$$\mathbf{X} = (\mathbf{B}_1^T \mathbf{B}_1)^{-1} \mathbf{B}_1^T \mathbf{l}. \quad (5)$$

海底阵元坐标 \$(X_p, Y_p, Z_p)\$ 为

$$\begin{bmatrix} X_p & Y_p & Z_p \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \end{bmatrix}^T + \begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \end{bmatrix}^T. \quad (6)$$

点位的协因数阵为

$$\mathbf{Q}_{xx} = \begin{bmatrix} Q_{\hat{x}\hat{x}} & Q_{\hat{x}\hat{y}} & Q_{\hat{x}\hat{z}} \\ Q_{\hat{y}\hat{x}} & Q_{\hat{y}\hat{y}} & Q_{\hat{y}\hat{z}} \\ Q_{\hat{z}\hat{x}} & Q_{\hat{z}\hat{y}} & Q_{\hat{z}\hat{z}} \end{bmatrix} = (\mathbf{B}_1^T \mathbf{B}_1)^{-1}. \quad (7)$$

阵元点位精度可借助下式计算:

$$\sigma_{\hat{x}} = \sigma_0 \sqrt{Q_{\hat{x}\hat{x}}}, \sigma_{\hat{y}} = \sigma_0 \sqrt{Q_{\hat{y}\hat{y}}}, \sigma_{\hat{z}} = \sigma_0 \sqrt{Q_{\hat{z}\hat{z}}}.$$

1.2 传统相对测阵方法

海洋大地控制网布设完毕后, 利用圆走航标定获得初始位置和控制点之间的互测距获得距离测量值, 采用秩亏自由网平差处理, 对绝对标定后控制点进行坐标修正。

设海底控制网有 \$m\$ 个控制点组成, 则全部基线数量为

$$n_{\text{all}} = \frac{m(m-1)}{2}. \quad (8)$$

根据给定的测距精度定权 (\$\sigma_0\$ 为单位权标准差, \$\sigma_i\$ 为对应基线测距标准差):

$$P_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2}. \quad (9)$$

若第 \$k\$ 条基线 (共 \$n_{\text{all}}\$ 条) 的端点分别为 \$A_k\$ 和 \$B_k\$, 令

$$\hat{X}_{A_k} = X_{A_k}^0 + \hat{x}_{A_k}, \hat{Y}_{A_k} = Y_{A_k}^0 + \hat{y}_{A_k}, \hat{Z}_{A_k} = Z_{A_k}^0 + \hat{z}_{A_k}, \quad (10)$$

$$\hat{X}_{B_k} = X_{B_k}^0 + \hat{x}_{B_k}, \hat{Y}_{B_k} = Y_{B_k}^0 + \hat{y}_{B_k}, \hat{Z}_{B_k} = Z_{B_k}^0 + \hat{z}_{B_k}, \quad (11)$$

误差方程为

$$L_k + v_k = S_{A_k B_k}^0 + \frac{\Delta X_{A_k B_k}^0}{S_{A_k B_k}^0} (\hat{X}_{B_k} - \hat{X}_{A_k}) + \frac{\Delta Y_{A_k B_k}^0}{S_{A_k B_k}^0} (\hat{Y}_{B_k} - \hat{Y}_{A_k}) + \frac{\Delta Z_{A_k B_k}^0}{S_{A_k B_k}^0} (\hat{Z}_{B_k} - \hat{Z}_{A_k}), \quad (12)$$

其中, \$\Delta X_{A_k B_k}^0, \Delta Y_{A_k B_k}^0, \Delta Z_{A_k B_k}^0\$ 表示基线两端点各方向向上坐标差值, \$S_{A_k B_k}^0\$ 表示初值点下的基线长度。

则有

$$v_k = f_{k_x} \hat{x}_{A_k} + f_{k_y} \hat{y}_{A_k} + f_{k_z} \hat{z}_{A_k} + f_{k_d} \hat{x}_{B_k} + f_{k_e} \hat{y}_{B_k} + f_{k_f} \hat{z}_{B_k} - l_k, \quad (13)$$

其中, \$l_k = L_k - S_{A_k B_k}^0\$, \$S_{A_k B_k}^0 = [(X_{B_k} - X_{A_k})^2 + (Y_{B_k} - Y_{A_k})^2 + (Z_{B_k} - Z_{A_k})^2]^{1/2}\$, \$f_{k_x} = \Delta X_{A_k B_k}^0 / S_{A_k B_k}^0\$, \$f_{k_y} = \Delta Y_{A_k B_k}^0 / S_{A_k B_k}^0\$, \$f_{k_z} = \Delta Z_{A_k B_k}^0 / S_{A_k B_k}^0\$, \$f_{k_d} = \Delta X_{A_k B_k}^0 / S_{A_k B_k}^0\$, \$f_{k_e} = \Delta Y_{A_k B_k}^0 / S_{A_k B_k}^0\$, \$f_{k_f} = \Delta Z_{A_k B_k}^0 / S_{A_k B_k}^0\$。

利用 \$n_{\text{all}}\$ 条观测边, 有

$$\begin{cases} v_1 = f_{1_a} \hat{x}_{A_1} + f_{1_b} \hat{y}_{A_1} + f_{1_c} \hat{z}_{A_1} + f_{1_d} \hat{x}_{B_1} + f_{1_e} \hat{y}_{B_1} + f_{1_f} \hat{z}_{B_1} - l_1, \\ v_2 = f_{2_a} \hat{x}_{A_2} + f_{2_b} \hat{y}_{A_2} + f_{2_c} \hat{z}_{A_2} + f_{2_d} \hat{x}_{B_2} + f_{2_e} \hat{y}_{B_2} + f_{2_f} \hat{z}_{B_2} - l_2, \\ \vdots \\ v_{n_{\text{all}}} = f_{n_{\text{all}}_a} \hat{x}_{A_{n_{\text{all}}}} + f_{n_{\text{all}}_b} \hat{y}_{A_{n_{\text{all}}}} + f_{n_{\text{all}}_c} \hat{z}_{A_{n_{\text{all}}}} + f_{n_{\text{all}}_d} \hat{x}_{B_{n_{\text{all}}}} + f_{n_{\text{all}}_e} \hat{y}_{B_{n_{\text{all}}}} + f_{n_{\text{all}}_f} \hat{z}_{B_{n_{\text{all}}}} - l_{n_{\text{all}}}. \end{cases} \quad (14)$$

令 \$\mathbf{S}\$ 为约束条件矩阵, \$\mathbf{S}\$ 的秩为 \$d\$, \$\mathbf{P}_x\$ 为对应的权阵。重心基准约束下, 权阵为

$$\mathbf{P}_x = \mathbf{E}, \quad (15)$$

\$\mathbf{E}\$ 为单位矩阵, 为了获得未知参数的唯一解, 给定权的约束条件为

$$\mathbf{S}^T \mathbf{P}_x \hat{\mathbf{x}} = 0. \quad (16)$$

当 \$\mathbf{S}\$ 的秩为 \$d\$ 时, 有

$$r \begin{bmatrix} \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{S}^T \end{bmatrix} = \mathbf{u}. \quad (17)$$

若有 \$m\$ 个阵元点, 则自由测阵网平差中, 未知数的个数 \$u = 3m\$。

根据

$$\mathbf{N} \mathbf{S} = \mathbf{0}, \quad (18)$$

令 \$\alpha_i\$ 为矩阵 \$\mathbf{N} = \mathbf{B}_2^T \mathbf{P} \mathbf{B}_2\$ 的第 \$i\$ 个零特征值对应的互不相关的特征向量, 则 \$\mathbf{S} = [\alpha_1 \cdots \alpha_d]\$。

基于式 (14) 构建平差模型:

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}_2 \hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}, \quad (19)$$

式中, \$\mathbf{V}\$ 的维数为 \$n_{\text{sum}} \times 1\$, 系数矩阵 \$\mathbf{B}_2\$ 的维数为 \$n_{\text{all}} \times 3m\$, \$\hat{\mathbf{x}}\$ 矩阵的维数为 \$3m \times 1\$, \$\mathbf{l}\$ 的维数为 \$n_{\text{all}} \times 1\$。当 \$\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}\$ 最小时, 则有

$$\hat{\mathbf{x}}_p = (\mathbf{B}_2^T \mathbf{P} \mathbf{B}_2 + \mathbf{P}_x \mathbf{S} \mathbf{S}^T \mathbf{P}_x)^{-1} \mathbf{B}_2^T \mathbf{P} \mathbf{l}. \quad (20)$$

1.3 海底大地基准快速校准

海底大地基准快速校准是基于海面绝对位置校准和海底相对位置校准的一种标校方法, 其主要思路是利用部分基准点的绝对坐标和基准点间的距离测量值, 通过网平差处理后, 可获得海底控制网每个

基准点的绝对坐标。

假设海底控制网有 m 个控制点, 其中通过水面标定获取绝对位置的控制点数目为 n 。则未知基线数为

$$n_{\text{sum}} = (m + n - 1)(m - n)/2. \quad (21)$$

由于部分控制点的绝对坐标通过水面标定已知, 所以基线可分为两类, 一种是一端控制点位置未知, 另一种是两端控制点位置均未知。前者数目为

$$n_1 = n(m - n), \quad (22)$$

后者数目为

$$n_2 = (m - n)(m - n - 1)/2. \quad (23)$$

同样, 根据给定的测距精度定权 (σ_0 为单位权标准差, σ_i 为对应基线测距标准差):

$$P_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2}. \quad (24)$$

若第 j 条双端未知控制点基线 (共 n_2 条) 的端点分别为 A_j 和 B_j , 同式 (10) 和式 (11), 可列误差方程为

$$L_j + v_j = S_{A_j B_j}^0 + f_{j_a}(\widehat{x}_{B_j} - \widehat{x}_{A_j}) + f_{j_b}(\widehat{y}_{B_j} - \widehat{y}_{A_j}) + f_{j_c}(\widehat{z}_{B_j} - \widehat{z}_{A_j}). \quad (25)$$

若第 i 条单端未知控制点基线 (共 n_1 条) 的端点分别为 A_i 和 B_i , 其中 A_i 为已知控制点, 令

$$\widehat{X}_{A_i} = X_{A_i}^0, \widehat{Y}_{A_i} = Y_{A_i}^0, \widehat{Z}_{A_i} = Z_{A_i}^0, \quad (26)$$

$$\widehat{X}_{B_i} = X_{B_i}^0 + \widehat{x}_{B_i}, \widehat{Y}_{B_i} = Y_{B_i}^0 + \widehat{y}_{B_i}, \widehat{Z}_{B_i} = Z_{B_i}^0 + \widehat{z}_{B_i}. \quad (27)$$

同理可列误差方程:

$$L_i + v_i = S_{A_i B_i}^0 + f_{i_a} \widehat{x}_{B_i} + f_{i_b} \widehat{y}_{B_i} + f_{i_c} \widehat{z}_{B_i}, \quad (28)$$

则利用 n_{sum} 条未知基线, 有

$$\begin{cases} v_1 = -f_{1_a} \widehat{x}_{A_1} - f_{1_b} \widehat{y}_{A_1} - f_{1_c} \widehat{z}_{A_1} + f_{1_a} \widehat{x}_{B_1} + f_{1_b} \widehat{y}_{B_1} + f_{1_c} \widehat{z}_{B_1} - l_1, \\ \vdots \\ v_{n_2} = -f_{n_2_a} \widehat{x}_{A_{n_2}} - f_{n_2_b} \widehat{y}_{A_{n_2}} - f_{n_2_c} \widehat{z}_{A_{n_2}} + f_{n_2_a} \widehat{x}_{B_{n_2}} + f_{n_2_b} \widehat{y}_{B_{n_2}} + f_{n_2_c} \widehat{z}_{B_{n_2}} - l_{n_2}, \\ v_{n_2+1} = f_{(n_2+1)_a} \widehat{x}_{A_{n_2+1}} + f_{(n_2+1)_b} \widehat{y}_{A_{n_2+1}} + f_{(n_2+1)_c} \widehat{z}_{A_{n_2+1}} + f_{(n_2+1)_a} \widehat{x}_{B_{n_2+1}} + f_{(n_2+1)_b} \widehat{y}_{B_{n_2+1}} + f_{(n_2+1)_c} \widehat{z}_{B_{n_2+1}} - l_{n_2+1}, \\ \vdots \\ v_{n_{\text{sum}}} = f_{n_{\text{sum}}_a} \widehat{x}_{A_{n_{\text{sum}}}} + f_{n_{\text{sum}}_b} \widehat{y}_{A_{n_{\text{sum}}}} + f_{n_{\text{sum}}_c} \widehat{z}_{A_{n_{\text{sum}}}} + f_{n_{\text{sum}}_a} \widehat{x}_{B_{n_{\text{sum}}}} + f_{n_{\text{sum}}_b} \widehat{y}_{B_{n_{\text{sum}}}} + f_{n_{\text{sum}}_c} \widehat{z}_{B_{n_{\text{sum}}}} - l_{n_{\text{sum}}}, \end{cases} \quad (29)$$

$$l_i = L_i - S_{A_i B_i}^0. \quad (30)$$

当控制点数目较少, 导致方程组秩亏时, 采用重心基准作为额外约束, 同 1.2 节可得基准约束条件矩阵 S 。

基于式 (29) 构建平差模型:

$$V = B_3 \widehat{x} - l, \quad (31)$$

式中, V 的维数为 $n_{\text{sum}} \times 1$, 系数矩阵 B_3 的维数为 $n_{\text{sum}} \times 3(m - n)$, $\widehat{x}$ 矩阵的维数为 $3(m - n) \times 1$, l 的维数为 $n_{\text{sum}} \times 1$ 。当 $V^T P V$ 最小, 且 $\text{rank}(B_3) < 3(m - n)$ 时, 有

$$\widehat{x}_p = (B_3^T P B_3 + P_x S S^T P_x)^{-1} B_3^T P l. \quad (32)$$

当 $\text{rank}(B_3) \geq 3(m - n)$ 时, 有

$$\widehat{x}_p = (B_3^T P B_3)^{-1} B_3^T P l. \quad (33)$$

获取基线长度的改正值, 以及阵元点坐标的改正值: $\widehat{L} = L + V$, $\widehat{X} = X + \widehat{x}$ 。精度为

$$\sigma_0^2 = \frac{V^T P V}{n_{\text{sum}} - \text{rank}(B_3)}. \quad (34)$$

2 仿真分析

为了初步验证本文提出的海底大地基准快速标校法的可行性, 拟在不同阵型、不同标定方案下进行仿真实验。比较海底海面快速校准与单纯相对测阵的区别。

仿真实验中不同阵型的真实位置 (圆走航标定结果) 如图 2 所示, 各阵型均为正多边形, 圆半径为 1000 m, 基阵中心为坐标原点。实际布放常用 GNSS 接收机的定位精度一般为 $5 \text{ mm} + 0.5 \text{ ppm}$ 左右, 而深度计的标称精度一般为 $(0.01 \pm 0.1\%) \text{ m}^{[20-21]}$, 但是考虑到布放时信标的漂移, 仿真过程中会对假定未被圆走航标定的基元增加标准差 σ 为 10 m 正态分布的随机平面位置误差和标准差 σ 为 1 m 正态分布的随机深度位置误差, 模拟海底控制网布设时只对部分控制点进行海面圆走航校准的情形。仿真时所有基元间的测距信息 L 增加了标准差为距离千分之五大小正态分布的随机测距误差, 且不同基元间的测距次数为 50 次。仿真时将坐标真值作为外符合参考; 各个边的观测条件一致, 采用距离定权:

$$P_i = \frac{1}{S_i}. \quad (35)$$

2.1 绝对标定控制点数目对仿真结果的影响

海面圆走航绝对标定的控制点数目不同的情况下, 不同阵型的整体校准结果对比如图 3 和图 4 所示, 具体结果见表 1。

从图 3 可知, 海面海底快速校准的外符合精度, 在各方案下均远优于传统相对测阵平差的结果, 达到分米级。且绝对标定的控制点数目大于等于 2 时,

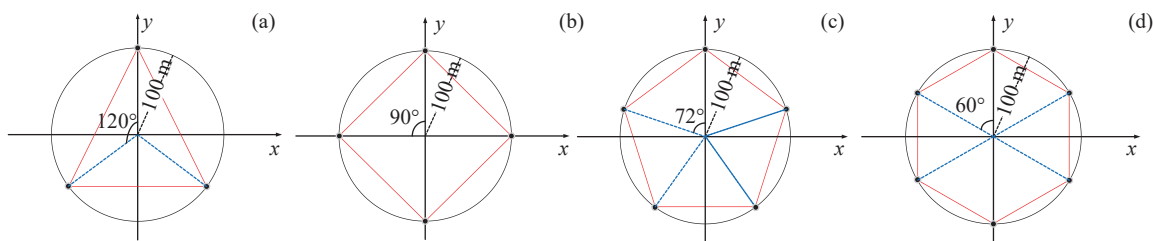


图2 仿真阵型布设方案 (a) 三元阵; (b) 四元阵; (c) 五元阵; (d) 六元阵

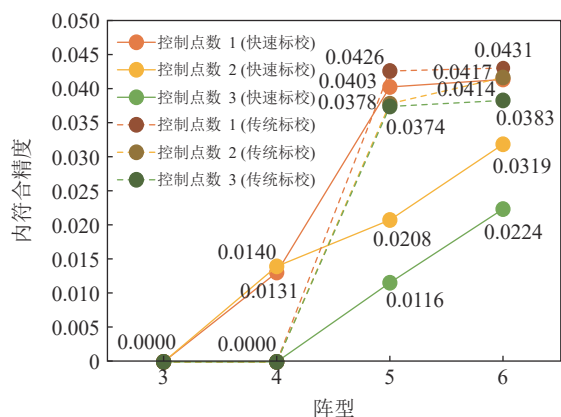


图3 不同阵型下各布设方案的内符合精度对比

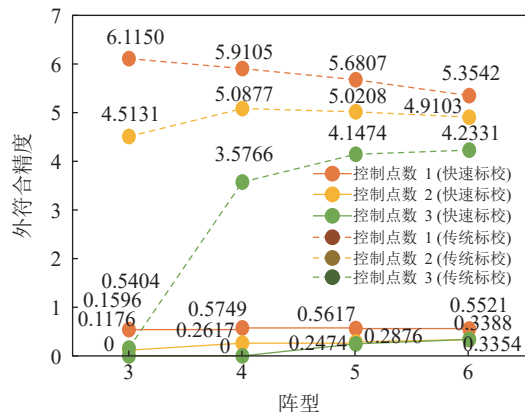


图4 不同阵型下各布设方案的外符合精度对比

表1 不同阵型下各布设方案的精度对比结果

控制点数	阵型	海底海面快速校准		传统相对测阵平差	
		内符合精度 (m)	外符合精度 (m)	内符合精度 (m)	外符合精度 (m)
1	3	0.00	0.54	0.00	6.12
	4	0.01	0.57	0.00	5.91
	5	0.04	0.56	0.04	5.68
	6	0.04	0.55	0.04	5.35
2	3	0.00	0.12	0.00	4.51
	4	0.01	0.26	0.00	5.09
	5	0.02	0.29	0.048	5.02
	6	0.03	0.34	0.04	4.91
3	3	0.00	0.00	0.00	0.16
	4	0.00	0.00	0.00	3.58
	5	0.01	0.25	0.04	4.15
	6	0.02	0.33	0.04	4.23

阵元数目越高,快速校准的内符合精度优势越大,达到厘米级。仿真实验表明,快速校准方法的外符合精度达到分米级,而对于内符合精度来说,控制点数目为2或3时,趋势接近,无明显提升。出于工程考虑,绝对控制点数目越低越好,但校准点数目为1时,精度相对较低,所以选择校准点数目为2的方案作进一步分析。

2.2 绝对标定控制点分布对仿真结果的影响

本节在海面绝对标定控制点数目为2的前提下,对不同网型下的不同控制点分布进行仿真分析,探究在不同网型中控制点的最优分布。仿真条件不变,绝对标定控制点数目为2,进行1000次的蒙特卡洛仿真实验,各阵型在不同分布下的校准结果如图5—图7所示。由于三元阵在此没有分布差异,所以不做比较。

如图5—图7所示, L1~L3 分别对应左图中在该阵型下选取的不同校准方案,方案选取对应基线两端控制点进行绝对标定。右图为1000次仿真结果的所有控制点的整体水平位置校准误差。从图中可以看出,对于同一网型,基线越短时校准误差越大,即当起算基线相对阵型越长,解算精度越高。为了更加直观地看出基线长度和校准误差水平的关系,将所有1000次仿真结果取均值进行比较,结果进一步验证了该结论,如表2所示,平均点位中误差 δ 不高于0.5 m,

$$\delta = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \sqrt{(\hat{X}_i - X_i)^2 + (\hat{Y}_i - Y_i)^2 + (\hat{Z}_i - Z_i)^2} \right), \quad (36)$$

其中, $(\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i)$ 表示阵元*i*位置估计值, (X_i, Y_i, Z_i) 表示阵元*i*位置真值, *n*表示阵元数目。

当起算基线越长时,以该基线为约束的网平差方程组条件数越低,解算精度越高。

2.3 不同网型的总体校准方案

从仿真结果来说,单个阵型中所需的控制点数目为2,但是组网时,控制点是可以复用的。只需要满足单个三元或四元阵中包含2个控制点即可。

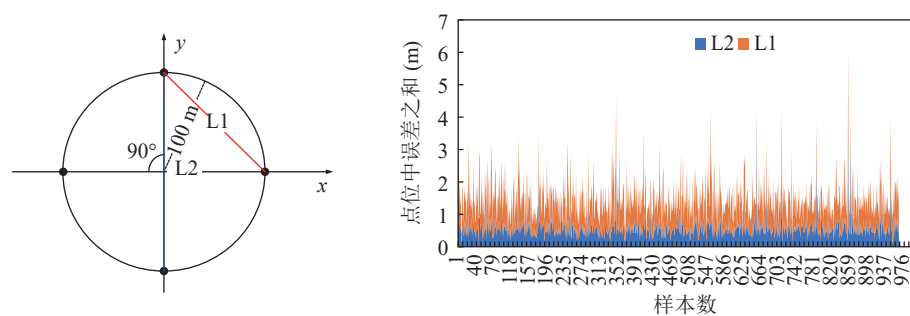


图5 四元阵控制点分布对校准结果的影响

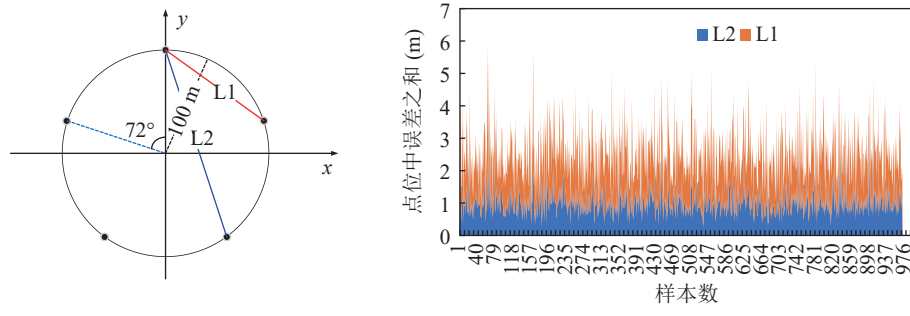


图6 五元阵控制点分布对校准结果的影响

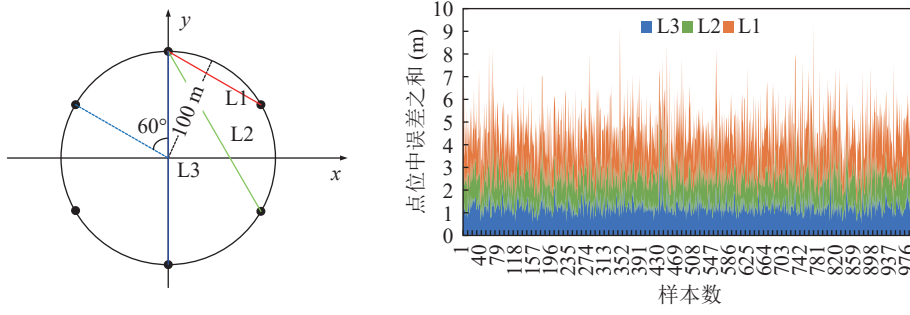


图7 六元阵控制点分布对校准结果的影响

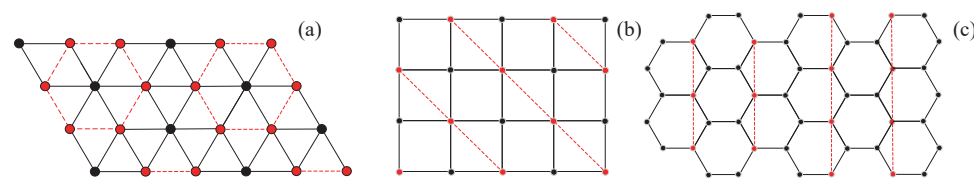


图8 布设方案 (a) 正三角形网; (b) 正四边形网; (c) 正六边形网六边形网

表2 基线长度与定位误差的关系

网型	方案	基线长度 (m)	δ (m)
四元阵	L1	1414.335	0.48
	L2	2000.400	0.37
五元阵	L1	1175.741	0.49
	L2	1902.534	0.34
六元阵	L1	1000.200	0.46
	L2	1732.513	0.34
	L3	2000.900	0.33

再考虑到基线长度和对称性, 拟定了一些在不同网型下, 总体控制点数目最少的方案^[22-23]。

图8中红色阵元为选定的绝对标定点。对于正三角形网型, 在使用本文提出的海底海面快速校准方法时可以节省 1/3 的校准资源; 对于正四边形网可节省 1/2 的校准资源; 对于正六边形网可节省 2/3 的校准资源。阵元越多, 使用联合标校方法节省的校准资源越多。

3 湖试试验及数据处理分析

为进一步验证本文提出的海底大地基准快速标校法及其相应的校准方案的正确性, 于吉林省吉林市松花湖进行了四元阵控制网布设实验, 试验水深

约 60 m。试验条件所限,无法进行大范围布网,仅对单个四元阵进行定位精度和导航精度验证。若单阵校准后定位与导航精度满足要求,则整体控制网由于作用范围内阵元数目的增加,其定位导航精度亦将满足要求。

实验共设计了 4 套锚系阵元,布放在湖底组成控制网,阵元之间的距离设计为 100 m 左右。通过配备 GNSS 的实验船将阵元布设到湖底,投放时记录实验船 GPS 位置,作为阵元的位置初值。根据记录位置开展圆走航标校试验和湖底基阵的相对测量,阵元间基线往返观测 50 次。在完成控制网布放和标定试验后,利用布放的 4 只阵元开展定位导航试验。由实验船携带声学基阵模拟目标在控制网范围内的运动,同时在定位过程中记录船载基阵上方架设的 GNSS 接收机 (Veripos LD7, 其精密单点定位精

度 < 0.1 m) 的实时位置信息,作为定位精度评价参考值。

3.1 不同快速校准方案的阵元校准结果

为充分验证该文的理论方法,对所有阵元进行了圆走航标校观测。在验证快速校准方法时,其中两个阵元使用圆走航绝对标定后的坐标,其余阵元使用布设时记录 GPS 值作为水平位置,取平均水深为垂直位置。如表 3 所示,表中记录了各个控制点投放时水面船的 GPS 位置作为初值,圆走航标定结果作为修正值。可以看到 C2 和 C4 平面位置差相对较大,主要原因有两点: (1) 信标在后续试验中移动过位置,但是通过拖拽水面锚系的方式移动,无法确定信标位置,所以并未重新记录初值; (2) 布放采用的是锚系结构,本身绳长为 10 m 左右,随水流会有漂动。

表 3 各信标标定结果

信标编号		X (m)	Y (m)	Z (m)
C2	初值	4841929.578	315676.980	62.828
	修正后	4841955.114	315690.413	60.955
C4	初值	4841854.225	315692.535	60.882
	修正后	4841835.066	315697.764	59.964
C5	初值	4841862.234	315789.482	61.837
	修正后	4841864.983	315792.608	59.834
C6	初值	4841958.240	315783.367	61.581
	修正后	4841969.620	315787.096	60.562

湖底控制网网型如图 9 所示,为比较不同校准方案下的校准结果,分别选取 L1~L6 方案节点为绝对标定点,其余点仅使用投放时记录的位置信息作为已知值进行快速校准。

圆走航模式下,测距系统误差对水平位置分量影响较小,若采用历元差分模型更可以消除大部分系统误差,在 3000 m 水深试验中定位精度高达 0.2 m。因此,本文将圆走航标校值作为参考真值,将同一校准方案下不同阵元的点位中误差平均值 δ 作为外符合精度评价标准,比较不同方案下的整体校准精度和对应基线长度的关系。

如表 4 所示, N , E , U 是联合标校结果与各阵元的圆走航标校结果在各方向上的均方根误差。可以发现快速校准在高程方向上与绝对校准相差较大,这可能是绝对校准本身在高程方向上误差较大导致的,联合标校方法引入了相对测量值,对声速误差不敏感,其自身的高程方向的精度应当更高。但由于海底基线标校对高程方向不敏感,导致平差方程的病态。可以考虑在基阵网布设时适量加入深度值相差较大的阵元,如浮标潜标等,既方便绝对校准,也

可一定程度上克服方程的病态。

从水平误差来说,虽然精度水平没有按照预估中与基线长度成反比,但可能是数据量较小导致。总体上各点点位中误差之和最佳情况下低于 0.2 m,单个阵元平均误差低于 0.05 m。从结果来说,利用部分基元的绝对校准实现了对基阵网的整体精准校准。

3.2 海底海面快速校准方法导航性能验证

如图 10 和图 11 所示分别将全部阵元绝对标定方法和海底海面快速校准方法下 (2.1 节提出的方案) 标定的控制网定位结果与 GPS 轨迹对比,由于用户运动轨迹大部分在控制网外,导致定位结果较差,但在认定 GPS 值为真值的情况下,两者具有相同量级的定位精度,水平定位结果相差小于 5 m,本文提出的海底海面快速校准方法达到了预期要求。

3.3 试验总结

海底大地基准快速标校法的优点在于,在海洋大地控制网布设时,仅需要对小部分基准点进行水面标定获得精确位置信息,通过基准点之间的相对

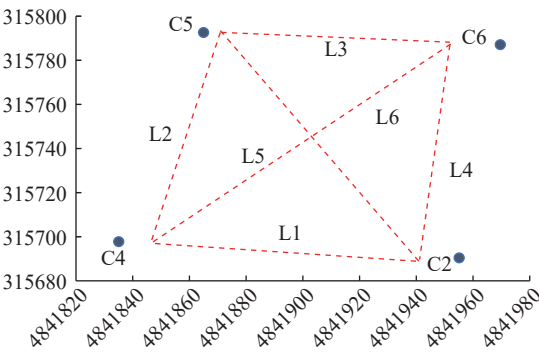


图9 湖底控制网网型

测量信息, 即可获取全部的控制网基准点的精密位置, 提高了标定效率。大部分情况下其定位精度量级不低于对全部基准点进行水面标定, 相较于传统相对测阵方法拥有更好的外符合精度。

现有方法下, 绝对标定与相对测阵所需要测量的参数和联合标校需要的参数是一致的。联合标校的优点在于减少绝对标校的信标点数, 降低工程量, 且定位性能不低于原方法, 在绝对位置精度上还有一点提升。

综上, 湖试结论对实际海洋大范围布设, 依旧具备一定的参考价值。

表4 各方案标校精度对比

方案	基线长度 (m)	N (RMSE) (m)	E (RMSE) (m)	U (RMSE) (m)	外符合精度(δ) (m)	内符合精度(σ_0) (m)
L1	120.277	0.024	0.111	3.253	0.202	0.081
L2	99.451	0.051	0.087	3.822	0.127	0.570
L3	104.785	0.172	0.280	6.058	0.632	0.031
L4	97.766	0.151	0.195	4.163	0.493	0.030
L5	136.267	0.074	0.031	3.904	0.134	0.112
L6	161.510	0.093	0.049	3.001	0.209	0.017

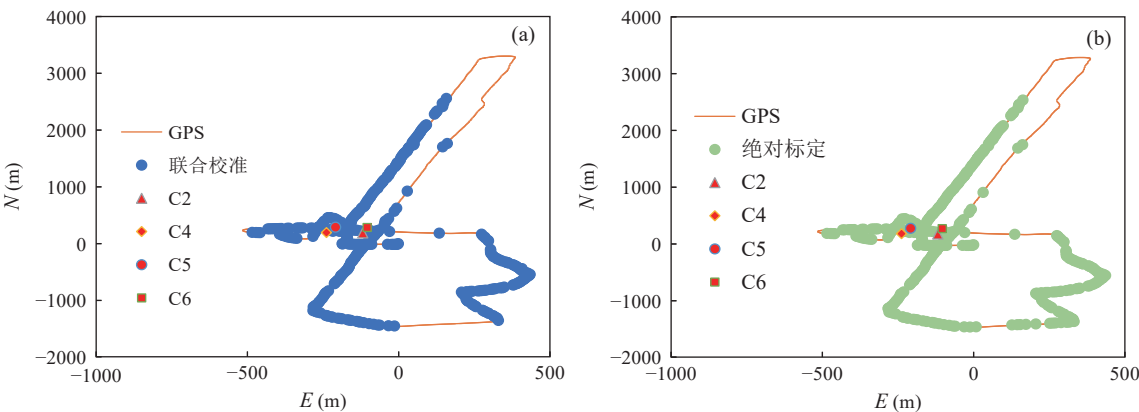


图10 导航结果比较 (a) 绝对标定; (b) 快速校准方法

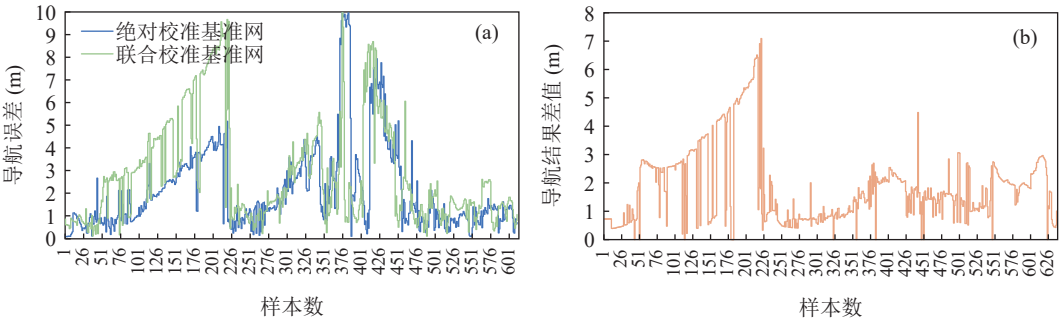


图11 结果分析 (a) 导航误差对比; (b) 导航结果的点位差值

4 结论

海洋大地控制网布设是海洋事业进一步发展的

重要基础与保障, 在海图测绘、需要高精度定位的水下工程作业、地壳运动关键节点的动态监测等方面都有着重要意义。但繁琐的标定作业和阵型精度修正, 严重限制了控制网的布设进程。本文提出海底

海面联合标定方法,利用小部分控制点的绝对标定信息和控制点的互测距信息完成所有控制点位置标定的同时进行阵型的修正。通过定期的相互测量和少量的绝对标定即可保持控制网阵型的相对精度。

与传统方法相比,本文方法在保证标校精度不降低的条件下,标定作业效率提升 50% 以上。通过网平差方法融合了互测距信息和绝对标定信息,阵型绝对坐标修正精度从米级提升至分米级,定位结果一致性更强。分析 60 m 水深的湖试数据,当基线长度为 100 m 左右,以绝对标定结果为参考真值时,点位中误差之和低于 0.2 m,内符合精度最高可达到厘米级别。当其应用于深水标定作业时,标定作业效率随着标定作业工程量的提升也会进一步提高。仿真理论分析和实验数据表明本文方法能够实现高精度和高效率的控制网阵型标定和修正,解决了现有海洋大地控制网布设效率低、位置精度维护困难的问题,具有一定的应用价值。目前实测数据仅采用湖试结果,对于实际海底大地基准布设而言,条件要苛刻得多。本文方法的适用性与可靠性仍需要进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Spiess F N, Chadwell C D, Hildebrand J A, *et al.* Precise GPS/Acoustic positioning of seafloor reference points for tectonic studies. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1998; **108**(2): 101—112
- 2 Favali P, Beranzoli L. Seafloor observatory science: A review. *Ann. Geophys.*, 2006; **49**(2-3): 515—567
- 3 Matsumoto Y, Ishikawa T, Fujita M. Weak interplate coupling beneath the subduction zone off Fukushima, NE Japan, inferred from GPS/acoustic seafloor geodetic observation. *Earth Planets Space*, 2008; **60**(6): 9—12
- 4 Mochizuki M, Sato M, Yoshida Z, *et al.* Seafloor geodetic observations around Japan. Proceedings of the 2002 International Symposium on Underwater Technology, IEEE, Tokyo, Japan, 2002: 239—243
- 5 Fujita M, Ishikawa T, Mochizuki M, *et al.* GPS/Acoustic seafloor geodetic observation: method of data analysis and its application. *Earth Planets Space*, 2006; **58**(3): 265—275
- 6 吴永亨. LBL精密定位理论方法研究及软件系统研制. 博士学位论文, 武汉: 武汉大学, 2013
- 7 Vickery K. Acoustic positioning systems: New concepts – the future. Proceedings of the 1998 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles, IEEE, Cambridge, MA, USA, 1998: 103—110
- 8 Larsen M B. Synthetic long baseline navigation of underwater vehicles. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, IEEE, Providence, RI, USA, 2000: 2043—2050
- 9 Sato M, Fujita M, Matsumoto Y, *et al.* Improvement of GPS/acoustic seafloor positioning precision through controlling the ship's track line. *J. Geodesy*, 2013; **87**(9): 825—842
- 10 韩云峰, 郑翠娥, 孙大军. 长基线定位系统高精度阵型标定方法. *声学学报*, 2016; **41**(4): 456—464
- 11 赵建虎, 邹亚靖, 吴永亨, 等. 深度约束的海底控制网节点坐标确定方法. *哈尔滨工业大学学报*, 2016; **48**(10): 137—141
- 12 赵建虎, 陈鑫华, 吴永亨, 等. 顾及波浪影响和深度约束的水下控制网节点绝对坐标的精确确定. *测绘学报*, 2018; **47**(3): 413—421
- 13 Han G, Qian A, Zhang C, *et al.* Localization algorithms in large-scale underwater acoustic sensor networks: A quantitative comparison. *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, 2014; **2014**(1): 1—11
- 14 刘宁, 徐天河. 基于自适应分层的声线跟踪改进算法. 中国卫星导航年会, 中国卫星导航学术年会组委会, 北京, 2019: 74—78
- 15 Osada Y, Kido M, Fujimoto H. A long-term seafloor experiment using an acoustic ranging system: Precise horizontal distance measurements for detection of seafloor crustal deformation. *Ocean Eng.*, 2012; **51**: 28—33
- 16 Zhao J, Zou Y, Zhang H, *et al.* A new method for absolute datum transfer in seafloor control network measurement. *J. Mar. Sci. Technol.*, 2016; **21**: 226
- 17 赵建虎, 李娟娟, 李萌. 海洋测量的进展及发展趋势. *测绘信息与工程*, 2009; **34**(4): 25—27
- 18 杨元喜, 刘焱雄, 孙大军, 等. 海底大地基准网建设及其关键技术. *中国科学: 地球科学*, 2020; **50**(7): 936—945
- 19 曾安敏, 杨元喜, 明锋, 等. 海底大地基准点圆走航模式定位模型及分析. *测绘学报*, 2021; **50**(7): 939—952
- 20 Ballu V, Bouin M N, Calmant S, *et al.* Absolute seafloor vertical positioning using combined pressure gauge and kinematic GPS data. *J. Geod.*, 2010; **84**(1): 65—77
- 21 Sharp I, Yu K, Hedley M. On the GDOP and accuracy for indoor positioning. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2012; **48**(3): 2032—2051
- 22 Osada Y, Kido M, Fujimoto H, *et al.* Development of a seafloor acoustic ranging system toward the seafloor cable network system. *Ocean Eng.*, 2008; **35**(14-15): 1401—1405
- 23 韩云峰. 大规模水下传感器网络节点精确定位技术研究. 博士学位论文, 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016