

孙涛, 何林帮. 温盐深变化对波束脚印坐标的影响规律分析[J]. 海洋学报, 2023, 45(2): 130–138, doi:10.12284/hyxb2023007
Sun Tao, He Linbang. Analysis of the influence of temperature, salinity and depth variations on beam footprint coordinates[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(2): 130–138, doi:10.12284/hyxb2023007

温盐深变化对波束脚印坐标的影响规律分析

孙涛¹, 何林帮^{2*}

(1. 江苏易图地理信息科技有限公司, 江苏 扬州 225009; 2. 中国科学院深海科学与工程研究所 深海软件开发研究室, 海南 三亚 572000)

摘要: 在多波束测深中, 温盐深剖面数据的准确性对测量精度起到非常重要的作用, 而在实际测量中, 温盐深误差又不可避免地存在。为了分析温盐深变化对波束脚印坐标的影响规律并将其影响值量化, 本文在声速剖面间接测量数据的基础上, 选择精度较高、适应性较强的声速经验公式推导其误差公式, 计算温盐深变化所引起的声速误差值, 并且在常梯度声线跟踪模型的基础上推导出声波旅行轨迹的水平位移和垂直位移误差公式, 然后结合声速剖面计算出声速误差对波束脚印坐标的影响程度。实验结果表明, 温度变化对声速的影响最大, 盐度和深度依序次之; 温度、盐度、深度 3 个参量的变化引起波束脚印 Z 坐标的变化量均大于 X、Y 坐标, 最高可达变化前深度的 0.6%。温度和盐度的变化引起的三轴坐标值变化量随入射角的增大而减小, 而深度变化引起的三轴坐标值变化量几乎不随入射角的变化而变化。本文研究结果可为温盐深误差对多波束测深精度评估工作提供借鉴作用。

关键词: 温盐深; 波束脚印; 声速经验公式; 声线跟踪

中图分类号: P229 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2023)02-0130-09

1 引言

温度、盐度和深度是影响海水声速的 3 大主要因素, 其中温度对表层水面声速的影响尤为重要, 并且表层海水声速受其影响变得较为复杂^[1]。在高精度的多波束测深中, 真实可靠的海底波束脚印坐标可借助高精度的声速剖面数据和精确的声线跟踪模型获得^[2], 因此, 声速剖面数据对波束脚印的精确计算起到决定性的作用。

海水声速测量的方法有两种, 其一为直接测量法, 利用声速剖面仪 (Sound Velocity Profiler, SVP) 通过声波在某一海水深度处固定距离上的传播时间或相位, 直接获得声波传播速度的方法。通常又分为环鸣法、相位法、脉冲时间法、驻波干涉法及脉冲循环法等。其二为间接测量法, 利用温盐深 (Conductivity,

Temperature, Depth, CTD) 剖面仪测定每层海水的温度、盐度以及深度 (静压力), 再根据海水声速与温度、盐度、压力 (深度) 之间的经验公式, 获取声速剖面^[3]。在直接测量法中, 虽然可借助高精度的 SVP 获取准确度较高的声速剖面数据, 但是在实际水深测量过程中, 也常因为表层温盐深变化的复杂性而没有布设足够密度的实测站点而导致代表性误差, 从而给海底水深测量带入显著性误差^[4]。在间接测量法中, 国内外众多学者对一些声速经验公式进行了比对, 分析了它们的适用范围和相关精度^[5-7], 但是甚少对温盐深变化引起的声速误差做出量化计算, 也没有进一步对温盐深变化导致的海底波束脚印坐标误差做出量化分析, 尽管有些文献已经阐述了表层声速误差对波束脚印坐标计算的影响^[8-9]。

为此, 本文将先对温盐深变化引起的声速误差做

收稿日期: 2022-05-24; 修订日期: 2022-07-29。

基金项目: 上海市重点研发计划项目 (20DZ1206504)。

作者简介: 孙涛 (1984—), 男, 四川省巴中市人, 高级工程师, 主要研究方向为水下地形测绘。E-mail: 187298857@qq.com

* 通信作者: 何林帮, 男, 助理研究员, 主要研究方向为多波束测深、水下自主导航。E-mail: helb@idsse.ac.cn

定量化分析, 然后根据声线跟踪模型和声速剖面计算声速变化对海底波束脚印坐标值的影响程度。此分析结果可为温盐深误差对多波束测深精度的评估工作提供借鉴作用。

2 温盐深变化对声速的影响

近半个世纪以来, 海洋科学家相继提出很多不同海水的声速经验公式, 不同的公式有其不同的适用范围, 尽管一些公式适用范围相同, 但是公式形式差别较大, 在不同的海域, 由不同声速经验公式获得的声速差异较大, 即使在同一海域, 它们计算出来的声速同实际声速也存在着较大差异。目前对声速经验公式研究较多的是 DelGrosso、Wilson 和 Chen-Miller 3种算法, 相关的研究表明, DelGrosso 的声速计算算法比 Chen-Miller 算法好^[10], Wilson 公式也叫 Wilson 精确公式, 虽然提出年代早, 但直至现在还被认为较为稳定的公式^[6]。为此, 本文研究使用 DelGrosso 和 Wilson 的声速计算公式做相关分析。

1974年, DelGrosso 给出了一种计算海水声速的经验公式(简称“DelGrosso 公式”)^[11], 由此可推导出其声速误差模型公式, 即:

$$dC_{STP} = dC_T + dC_S + dC_P + dC_{STP}, \quad (1)$$

$$dC_T = 0.501\ 109\ 398\ 873 \times 10dT - 0.550\ 946\ 843\ 172 \times 10^{-1} \times [2TdT + (dT)^2] + 0.221\ 535\ 969\ 240 \times 10^{-3} \times [3T^2dT + 3T(dT)^2 + (dT)^3], \quad (2)$$

$$dC_S = 0.132\ 952\ 290\ 781 \times 10^1 \times dS + 0.128\ 955\ 756\ 844 \times 10^{-3} \times [2SdS + (dS)^2], \quad (3)$$

$$dC_P = 0.156\ 059\ 257\ 041 \times dP + 0.244\ 998\ 688\ 441 \times 10^{-4} \times [2PdP + (dP)^2] - 0.883\ 392\ 332\ 513 \times 10^{-8} [3P^2dP + 3P(dP)^2 + (dP)^3], \quad (4)$$

$$dC_{STP} = -0.127\ 562\ 783\ 426 \times 10^{-1} (SdT + TdS + dSdT) + 0.635\ 191\ 613\ 389 \times 10^{-2} (PdT + TdP + dPdT) + 0.265\ 484\ 716\ 608 \times 10^{-7} [2TP^2dT + P^2(dT)^2 + 2T^2PdP + 4TPdT + 2PdP(dT)^2 + T^2(dP)^2 + 2TdT(dP)^2 + (dT)^2(dP)^2] - 0.159\ 349\ 479\ 045 \times 10^{-5} [P^2dT + 2TPdP + 2PdTdP + T(dP)^2 + dT(dP)^2] + 0.522\ 116\ 437\ 235 \times 10^{-9} \times [3TP^2dP + 3TP(dP)^2 + T(dP)^3 + P^3dT + 3P^2dTdP + 3PdT(dP)^2 + dT(dP)^3] - 0.438\ 031\ 096\ 213 \times 10^{-6} [3T^2PdT + 3TP(dT)^2 + P(dT)^3 + T^3dP + 3T^2dTdP + 3T(dT)^2dP + P(dT)^3] - 0.161\ 674\ 495\ 909 \times 10^{-8} [2SP^2dS + P^2(dS)^2 + 2S^2PdP + 4SPdSdP + 2PdP(dS)^2 + S^2(dP)^2 + 2SdS(dP)^2 + (dS)^2(dP)^2] + 0.968\ 403\ 156\ 410 \times 10^{-4} \times [2TSDT + S(dT)^2 + T^2dS + 2TdTdS + dS(dT)^2] + 0.485\ 639\ 620\ 015 \times 10^{-5} [PS^2dT + TS^2dP + S^2dTdP + 2TPSdS + 2SPdTdS + 2STdPdS + 2SdTdPdS + TP(dS)^2 + PdT(dS)^2 + TdP(dS)^2 + dTdP(dS)^2] - 0.340\ 597\ 039\ 004 \times 10^{-3} [PSdT + TPdS + PdTdS + TSdP + SdTdP + TdSdP + dTdSdP], \quad (5)$$

式中, dC_{STP} 为总声速误差, dC_T 为温度引起的声速误差, dC_S 为盐度引起的声速误差, dC_P 为压力引起的声速误差, dC_{STP} 为温盐压引起的声速误差, 单位均为 m/s; T 为温度, dT 为温度误差, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; S 为盐度, dS 为盐度误差; P 为压强, dP 为压强误差, 单位为 kg/cm^2 。

1960年, Wilson 给出了一种计算海水声速的经验公式(简称“Wilson 公式”)^[12], 由此可推导出其声速误差模型公式, 即:

$$dV = dV_T + dV_P + dV_S + dV_{STP}, \quad (6)$$

$$dV_T = 4.623\ 3dT - 5.458\ 5 \times 10^{-2} [2TdT + (dT)^2] + 2.822 \times 10^{-4} [3T^2dT + 3T(dT)^2 + (dT)^3] - 5.07 \times 10^{-7} [4T^3dT + 6T^2(dT)^2 + 4T(dT)^3 + (dT)^4], \quad (7)$$

$$dV_P = 1.605\ 18 \times 10^{-1} dP + 1.0279 \times 10^{-5} [2PdP + (dP)^2] + 3.451 \times 10^{-9} [3P^2dP + 3P(dP)^2 + (dP)^3] - 3.503 \times 10^{-12} [4P^3dP + 6P^2(dP)^2 + 4P(dP)^3 + (dP)^4], \quad (8)$$

$$dV_S = 1.391dS - 7.8 \times 10^{-2} [2SdS - 70dS + (dS)^2], \quad (9)$$

$$dV_{STP} = (S - 35)[-1.197 \times 10^{-2} dT + 2.61 \times 10^{-4} dP - 1.96 \times 10^{-7} \times (2PdP + (dP)^2) - 2.09 \times 10^{-6} \times (TdP + PdT + dPdT)] + dS[-1.197 \times 10^{-2} \times (T + dT) + 2.61 \times 10^{-4} (P + dP) - 1.96 \times 10^{-7} (P + dP)^2 - 2.09 \times 10^{-6} (PT + TdP + PdT + dPdT)] + P[-2.796 \times 10^{-4} dT + 1.330\ 2 \times 10^{-5} (2TdT + (dT)^2) - 6.644 \times 10^{-8} (3T^2dT + 3T(dT)^2 + (dT)^3)] + dP[-2.796 \times 10^{-4} (T + dT) + 1.330\ 2 \times 10^{-5} (T + dT)^2 - 6.644 \times 10^{-8} (T + dT)^3] + P^2[-2.391 \times 10^{-7} dT + 9.286 \times 10^{-10} \times (2TdT + (dT)^2)] + [2PdP + (dP)^2] \times [-2.391 \times 10^{-7} (T + dT) + 9.286 \times 10^{-10} \times (T + dT)^2] - 1.745 \times 10^{-10} \{P^3dT + [3P^2dP + 3P(dP)^2 + (dP)^3](T + dT)\}, \quad (10)$$

式中, dV 为总声速误差, dV_T 为温度引起的声速误差, dV_S 为盐度引起的声速误差, dV_P 为压力引起的声速误差, dV_{STP} 为温盐压引起的声速误差, 单位均为 m/s; T 为温度, dT 为温度误差, 单位为 $^{\circ}\text{C}$; S 为盐度, dS 为盐度误差; P 为压强, dP 为压强误差, 单位为 kg/cm^2 。

3 声速变化对波束脚印坐标的影响

海水中声速与海水温度、盐度和静压力相关, 并随着它们的变化而变化^[13], 由于很难获得声速随深度变化的函数, 通常只能借助声速剖面仪获得一定深度间隔的声速剖面, 并根据声速变化, 借助 Snell 法则, 沿声线跟踪, 获得波束海底投射点在船体坐标系下的坐标^[14-15]。在每个水层中, 由于只知道该层上界和下界声速, 因此通常假设声速在该层以常梯度 g 传播, 采用类似处理方法处理其他各水层, 并沿着声线跟踪到

海底,即实现常梯度声线跟踪和波束海底坐标计算^[16]。

假设声线从换能器发射,经过 N 个水层,每个水层上界 z_i 声速为 C_i ,下界 z_{i+1} 声速为 C_{i+1} ,层内声速以常梯度 g_i 变化,则 i 层内声速函数为

$$C_i(z) = C_i + g_i(z - z_i), \quad (11)$$

而声速常梯度 g_i 的计算式为

$$g_i = (C_{i+1} - C_i)/(z_{i+1} - z_i), \quad (12)$$

由式(12)推导出声速常梯度 g_i 误差公式为

$$dg_i = (dC_{i+1} - dC_i)/(z_{i+1} - z_i). \quad (13)$$

如图 1 所示,在常梯度 g_i 声速变化下,声线在第 i 层内的传播轨迹为一连续的、带有一定曲率半径为 R_i 的弧段^[17],若 Snell 常数为 p ,则 R_i 为

$$R_i = -1/pg_i. \quad (14)$$

假设第 i 层内声线传播的 Harmonic 平均声速为 C_{Hi} ,

则声线在此层内传播的水平位移 Δy_i 和时间 t_i 为^[18]

$$\begin{aligned} \Delta y_i &= R_i(\sin \alpha_i - \sin \alpha_{i+1}) = (\cos \theta_{i+1} - \cos \theta_i)/pg_i \\ &= [(\cos \theta_{i+1} - \cos \theta_i)/\sin \theta_i]C_i/g_i \\ &= \left\{ \sqrt{1 - [p(C_i + g_i \Delta z_i)]^2} - \sqrt{1 - (pC_{i+1})^2} \right\} / pg_i, \end{aligned} \quad (15)$$

用 dC 和 dg 代入式(15),得出水平位移 Δy_i 的误差公式为

$$\begin{aligned} d(\Delta y_i) &= \left\{ \sqrt{1 - [p(C_i + dC_i) + (g_i + dg_i)\Delta z_i]^2} \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{1 - [p(C_{i+1} + dC_{i+1})]^2} \right\} / p(g_i + dg_i) \\ &\quad - \left\{ \sqrt{1 - [p(C_i + g_i \Delta z_i)]^2} - \sqrt{1 - (pC_{i+1})^2} \right\} / pg_i, \end{aligned} \quad (16)$$

声线在每个水柱层的旅行时间 t_i 为

$$\begin{aligned} t_i &= \frac{R_i(\alpha_i - \alpha_{i+1})}{C_{Hi}} = [\arccos(pC_i + pg_i \Delta z_i) \\ &\quad - \arccos(pC_{i+1})] \times \ln(1 + g_i \Delta z_i / C_i) / pg_i^2 \Delta z_i, \end{aligned} \quad (17)$$

C_{Hi} 为第 i 层内声线传播的 Harmonic 平均声速。

同理,用 dC 和 dg 代入式(17),得出每层声线旅行时间误差公式为

$$\begin{aligned} dt_i &= \left\{ \ln \left[1 + \frac{(g_i + dg_i)\Delta z_i}{C_i + dC_i} \right] \arccos \{ p[C_i + dC_i + (g_i + dg_i)\Delta z_i] \} \right. \\ &\quad \left. - \arccos [p(C_i + dC_i)] \right\} / p \Delta z_i (g_i + dg_i)^2 \\ &\quad - \left\{ \ln \left[1 + \frac{g_i \Delta z_i}{C_i} \right] \arccos [p(C_i + g_i \Delta z_i)] \right. \\ &\quad \left. - \arccos (pC_i) \right\} / pg_i^2 \Delta z_i. \end{aligned} \quad (18)$$

在分层声线跟踪时,除了计算整层的垂直位移、水平位移和传播时间外,还需要依据传播剩余时间计算剩余层的垂直位移和水平位移。假设声线在第 i 层内传播时,声线在该层内 r 点处(图 1)结束,此时剩余时间 t_r 等于波束单程旅行时间 t_{all} 减去第 i 层以前累计的传播时间,则声线在剩余层内的垂直位移

Δz_r 和水平位移 Δy_r 为

$$\Delta y_r = R_i(\sin \alpha_i - \sin \alpha_r), \quad (19)$$

$$\Delta z_r = R_i \cos \alpha_r - R_i \cos \alpha_i = t_r C_{Hi}, \quad (20)$$

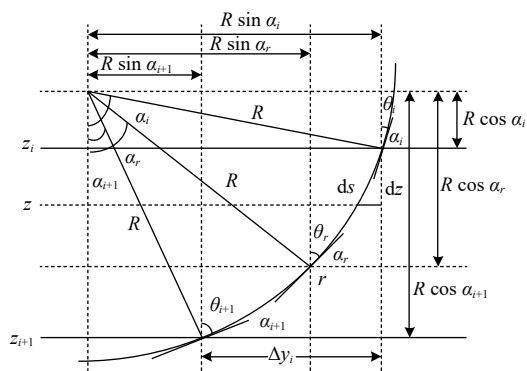


图 1 常梯度声线跟踪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of constant-gradient sound ray tracking

而这里的 C_{Hi} 取整个水柱的平均声速 C_H , 其计算公式为

$$C_H = (z - z_0) \left[\sum_{i=1}^N \frac{1}{g_i} \ln \left(1 + \frac{g_i \Delta z_i}{C_i} \right) \right]^{-1}. \quad (21)$$

由式(20)和(21)可得出最后一个水层的垂直深度误差 $d(\Delta z_r)$ 为

$$\begin{aligned} d(\Delta z_r) &= t_r \left\{ (z - z_0) \left[\sum_{i=1}^N \frac{1}{g_i + dg_i} \ln \left(1 + \frac{(g_i + dg_i)\Delta z_i}{C_i + dC_i} \right) \right]^{-1} \right. \\ &\quad \left. - (z - z_0) \left[\sum_{i=1}^N \frac{1}{g_i} \ln \left(1 + \frac{g_i \Delta z_i}{C_i} \right) \right]^{-1} \right\}, \end{aligned} \quad (22)$$

则声线传播总的垂直位移 z 和水平位移 y 为

$$y = \sum_{i=1}^{N-1} \Delta y_i + \Delta y_r, \quad (23)$$

$$z = \sum_{i=1}^{N-1} \Delta z_i + \Delta z_r. \quad (24)$$

4 结果与分析

在本次的实验中,采用加拿大 RBR XR-420 温盐深仪在海南万宁某海域采集相关的温度、盐度和压力数据进行分析。XR-420 温盐深仪温度的测量范围为 $-5 \sim 35^\circ\text{C}$, 精度为 $\pm 0.002^\circ\text{C}$; 电导的测量范围为 $0 \sim 70 \text{ mS/cm}$, 精度为 $\pm 0.003 \text{ mS/cm}$; 深度测量范围为 $10 \sim 6600 \text{ m}$, 精度为满量程的 0.05% 。在该海域布设了 4 站测量站点(图 2), 每个站点间隔 1000 m 左右, 形成一个类似正方形的区域。采集的温盐压数据一共有 3 列, 分别为电导率、温度和压强, 它们的单位分别 mS/cm 、 Degrees_C 、 decibars , 需要将它们转换成

DelGrosso 和 Wilson 的声速经验公式的单位, 即 ppt、 $^{\circ}\text{C}$ 、 kg/cm^3 。实验中的多波束声呐数据, 为 Kongsberg 公司的 Simrad EM3002 多波束回声测深仪所采集, 声呐工作频率为 300 kHz, 扇区最大开角为 130° , 最大探测

波束为 254 个, 斜距分辨率为 5 cm, 深度分辨率为 1 cm。以下分别分析温度、盐度和深度的变化对声速的影响, 以及它们的变化对多波束海底波束脚印坐标的影响。

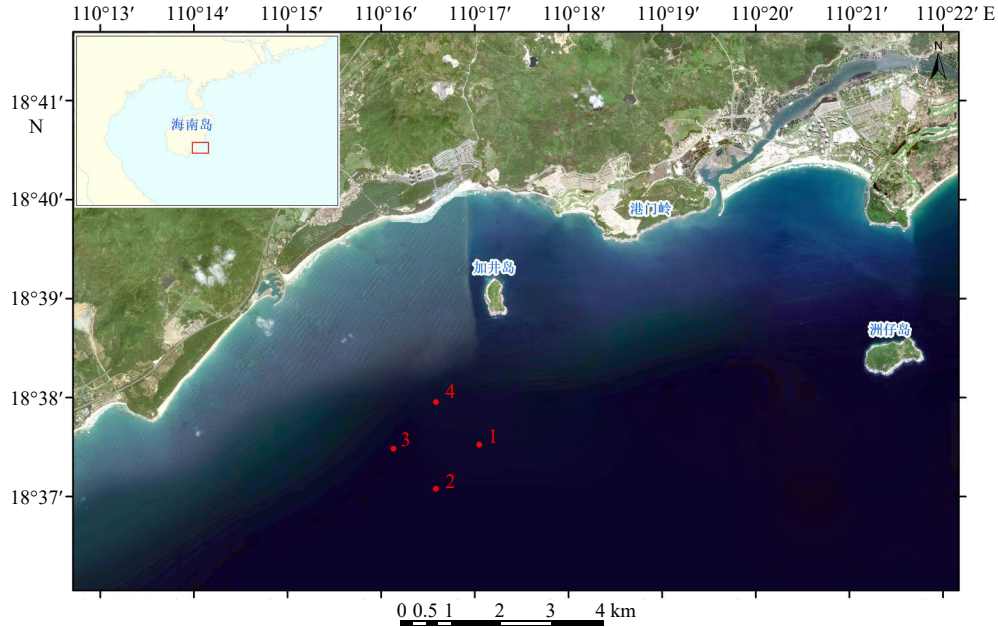


图 2 CTD 采集的 4 个站点位置
Fig. 2 The four locations for CTD sampling

如图 3 所示, 采用 Wilson、DelGrosso 声速经验公式计算 4 个站点的声速曲线分别用不同线段表示, 由图可知, Wilson 声速经验公式计算的 4 个站点的声速差值比 DelGrosso 声速经验公式计算的差值大。从纵深方向看, Wilson 声速经验公式计算值是先变大后变小, DelGrosso 声速经验公式计算值是随着深度增加逐渐变小。在水深 25 m 以浅的水域, 两种声速经验公式在同一站点的计算值差值较大, 而在 25~60 m 的水域, 两者的计算值差值较小。

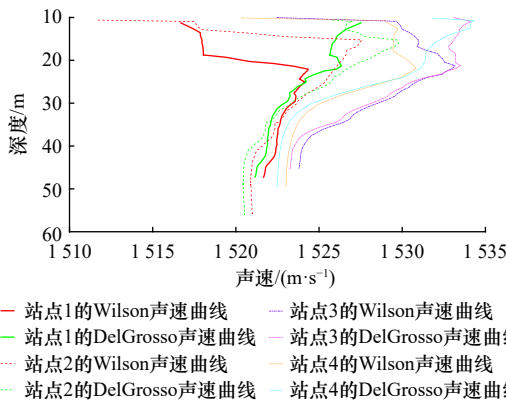


图 3 两种声速经验公式计算的 4 个站点的声速剖面
Fig. 3 The sound velocity profiles of four stations calculated by two empirical sound velocity formulas

在盐度和深度两个参量不变的情况下, 温度增加 1°C 后, 分别采用两种声速经验公式计算 4 个站点声速的差值, 如图 4 所示。温度增加 1°C 后计算出来的声速均比之前有所增大, 声速增值在 $2.1\sim 2.8\text{ m/s}$ 之间, 呈现出声速差值随水深增大而增大的趋势, 但是

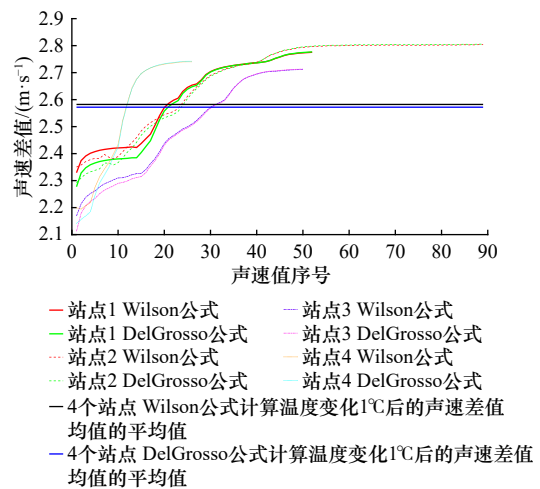


图 4 温度变化 1°C 后两种声速经验公式计算同一站点的声速差值
Fig. 4 The sound velocity difference after the 1°C change of temperature calculated by two empirical sound velocity formulas at the same station

两种声速经验公式计算同一站点的声速差值比较接近。

在温度和深度两个参量不变的情况下, 盐度增加 1 后, 分别采用两种声速经验公式计算 4 个站点声速的差值, 如图 5 所示。Wilson 声速经验公式计算的 4 个站点盐度变化前后的声速差值呈现随水深增大而变小的规律; 而 DelGrosso 声速经验公式计算的声速差值呈现随水深增大而变大的规律。并且, 两者计算同一站点的声速差值相差太大。

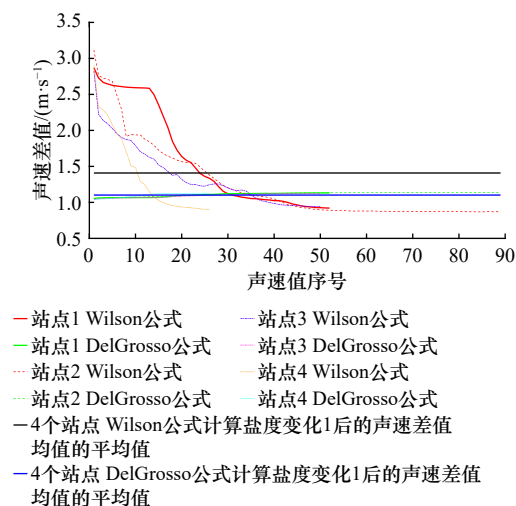


图 5 盐度变化 1 后两种声速经验公式计算同一站点的声速差值

Fig. 5 The sound velocity difference after the 1 change of salinity calculated by two empirical sound velocity formulas at the same station

在温度和盐度两个参量不变的情况下, 深度增加 10 m 后, 分别采用两种声速经验公式计算 4 个站点声速的差值, 如图 6 所示。Wilson 声速经验公式计算的 4 个站点深度变化前后的声速差值呈现随水深增大而变化较小的规律; 而 DelGrosso 声速经验公式计算的声速差值呈现随水深增大而变小的规律。并且, 两者计算同一站点的声速差值在 25 m 以浅水域相差太大, 而在 25~60 m 水域声速差值比较接近。

分别在温度变化 1℃、盐度变化 1、深度变化 10 m 的情况下, 统计了 4 个站点两种声速经验公式计算的声速变化均值, 如表 1 所示。其中当盐度变化 1 时, 两种声速公式计算的变化均值相差较大, 差值约为 0.3 m/s; 而当温度变化 1℃ 和深度变化 10 m 时, 两种声速公式计算的变化均值相差较小, 差值在 0.01 m/s 以内。

在分析了温度、盐度及深度变化对声速的影响之后, 需要进一步分析 3 个参量的变化对多波束海底波束脚印坐标的影响。根据图 3 的声速剖面曲线, 认为 DelGrosso 声速经验公式计算 4 个站点的声速较 Wilson

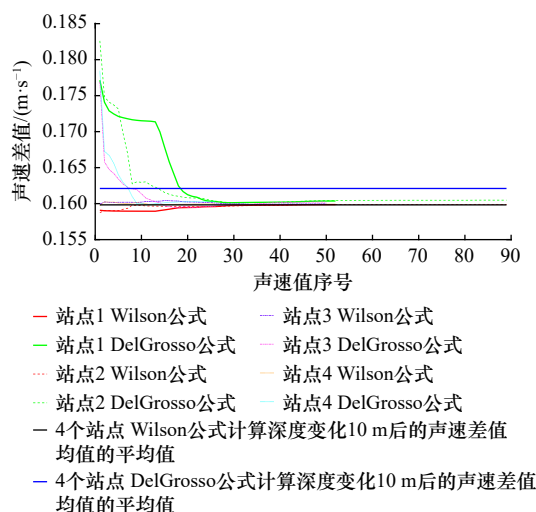


图 6 深度变化 10 m 后两种声速经验公式计算同一站点的声速差值

Fig. 6 The sound velocity difference after the 10 m change of depth calculated by two empirical sound velocity formulas at the same station

表 1 4 个站点 2 种声速经验公式计算的声速变化均值

Table 1 The mean value of sound velocity variation calculated by two empirical sound velocity formulas at four stations

| 参量变化值 | Wilson公式计算值/(m·s ⁻¹) | DelGrosso公式计算值/(m·s ⁻¹) |
|----------|----------------------------------|-------------------------------------|
| 温度变化1℃ | 2.582 | 2.572 |
| 盐度变化1 | 1.408 | 1.102 |
| 深度变化10 m | 0.160 | 0.162 |

公式稳定, 故采用 DelGrosso 公式计算随 3 个参量变化的声速变化值。

在分析温度、盐度及深度变化对波束脚印坐标影响规律的实验中, 选择一个多波束条带第 2001 Ping 至 2020 Ping 中左舷入射角 60°~5°(外边缘波束至中央波束方向)的多波束数据进行声线跟踪获得相应的波束脚印坐标。将 3 个参量变化引起的声速变化值添加至变化前的声速剖面数据中, 进而根据声线跟踪模型计算 3 个参数变化前后引起的波束脚印坐标值变化量。当温度变化 1℃ 时, 波束脚印 3 个轴坐标变化均呈现出随入射角增大而减小的趋势, 如图 7 所示, 这个现象可由式(15)解释, 波束水平位移量与入射角是一种递减函数关系, 而波束方位角由波束分配角和姿态角确定, 是一个定量, 因此, 波束在 X 和 Y 轴的坐标值变化量与入射角也是一种递减函数关系; 当盐度变化 1 时, 波束脚印 3 个轴坐标变化也呈现出同样的变化趋势, 如图 8 所示; 而当深度变化 10 m 时, 波束脚印 3 个轴坐标变化呈现出一种无序的现象, 即

无法判断3个坐标值变化随入射角变化的规律,如图9所示。

为了更好地揭示温盐深变化对波束脚印坐标值的影响规律,将20 Ping多波束数据中每个入射角的

变化值取平均值绘制变化曲线图,如图10所示,当温度增加1℃或者盐度增加1后,波束脚印3个轴坐标值变化趋势为随着入射角增大而减小,X轴和Y轴坐标值变化率一致,而Z轴变化率较大;而当深度增加

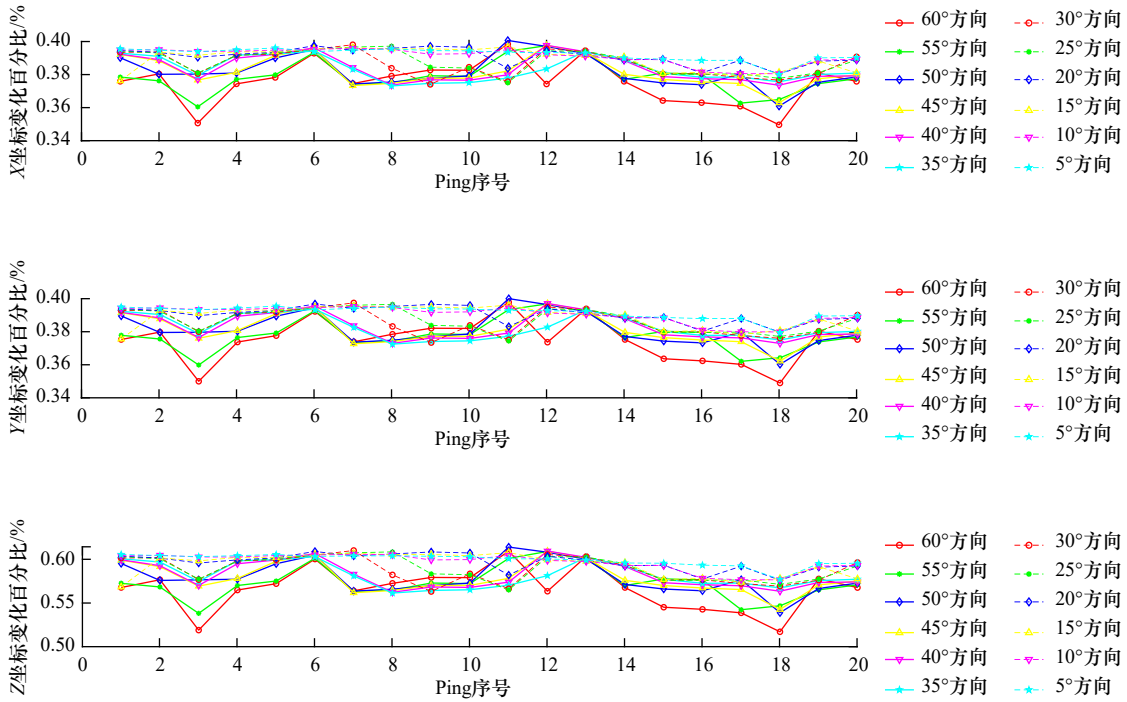


图7 温度变化1℃后引起的坐标值变化量

Fig. 7 The coordinate value change caused by the 1 °C change of temperature

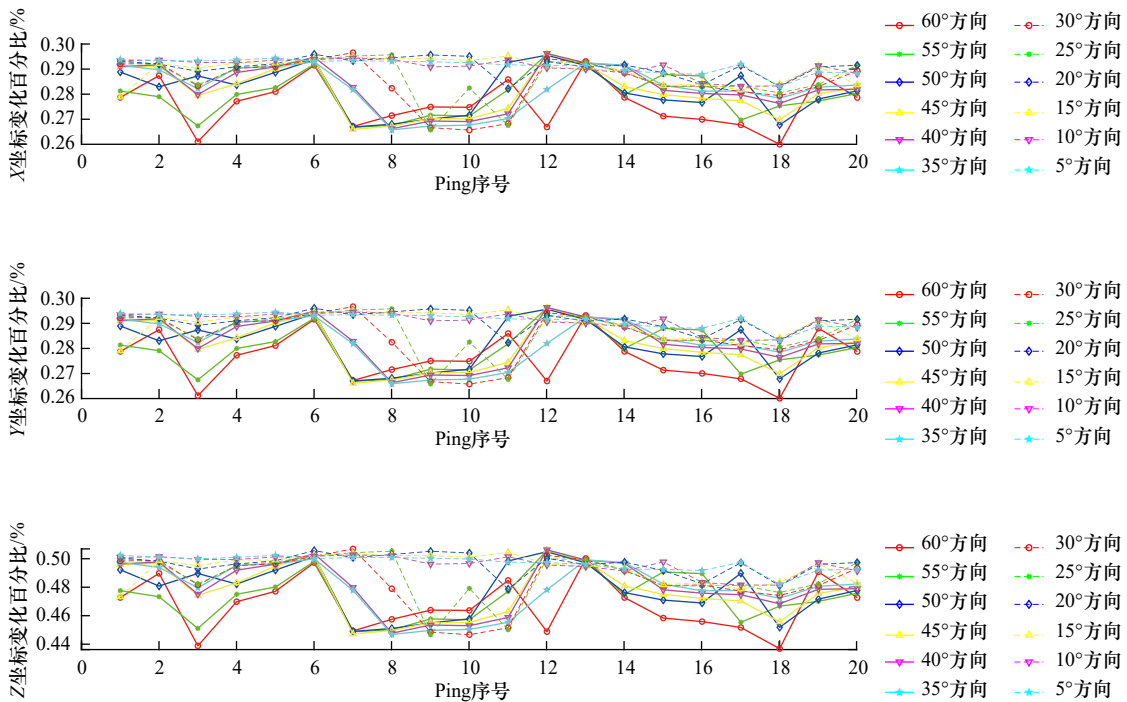


图8 盐度变化1后引起的坐标值变化量

Fig. 8 The coordinate value change caused by the 1 change of salinity

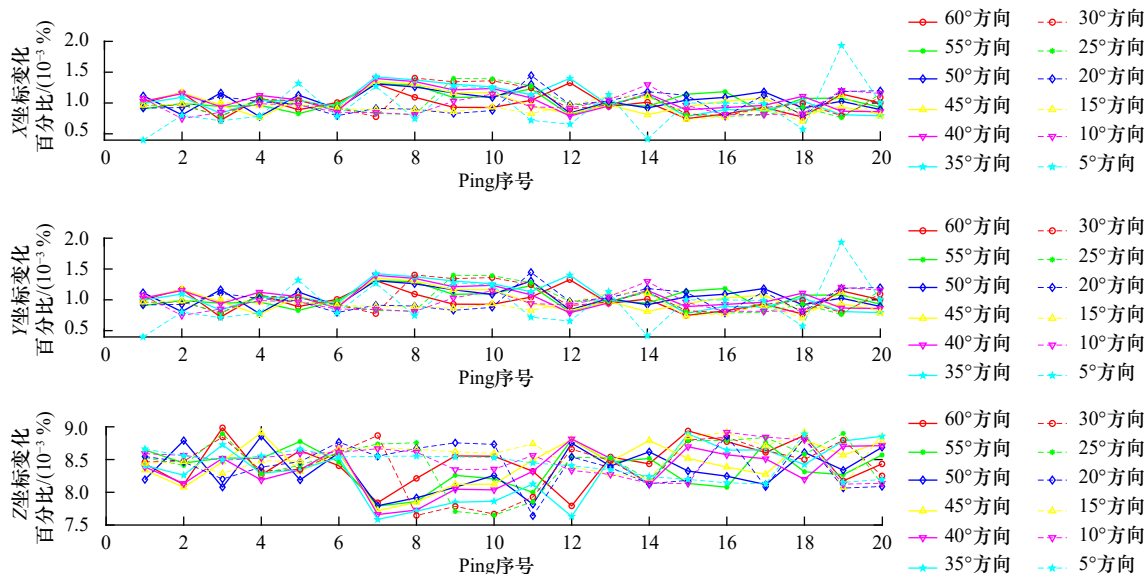


图 9 深度变化 10 m 后引起的坐标值变化量

Fig. 9 The coordinate value change caused by the 10 m change of depth

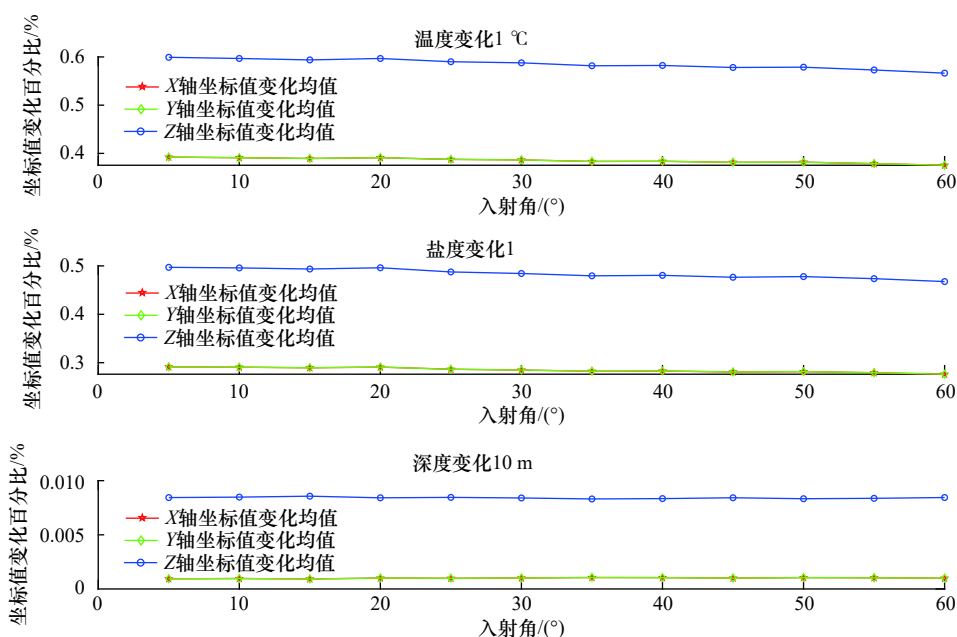


图 10 温盐深变化引起的各个入射角波束坐标变化均值

Fig. 10 The mean value of beam coordinate variation of each incident angle caused by the variation of temperature, salinity and depth

10 m 后, 波束脚印 3 个轴坐标值随入射角的变化率几乎处于水平状态, X 轴和 Y 轴坐标值变化率也一致, 而 Z 轴变化率较大。

5 结论

本文主要讨论了温度、盐度和深度三者的变化对海水声速的影响, 进而对多波束海底波束脚印坐标的影响。针对研究海域的水文特点, 分别采用了 Wilson 和 DelGrosso 两种声速经验公式计算了温度、盐度及深度的变化值所引起的海水声速变化量。然

后, 在原始声速剖面文件中加入三者所引起的声速变化量, 最后通过声线跟踪模型计算海底波束脚印坐标的变化值。实验结果表明, 温度变化 1°C 所引起的海水声速变化较盐度变化 1、深度变化 10 m 所引起的声速变化量大, 其中深度变化所引起海水声速变化量最小。在影响波束脚印坐标方面, 3 个参量的变化引起的 Z 轴坐标值变化量均大于 X、Y 轴坐标值的变化量, 而且 Z 轴坐标值变化量最高可达深度的 0.6% 左右。其中, 温度和盐度的变化引起的 3 轴坐标值变化量随入射角的增大而减小, 而深度变化引起的 3 轴坐

标值变化量几乎不随入射角的变化而变化。本文的研究结果揭示了温度、盐度、深度的测量误差所引起的波束脚印坐标误差不可忽略,尤其在高精度的深海测量中,温度和盐度误差可以给水深测量结果带入较

大的误差。为此,只有借助高精度的温盐深仪和遵守相关测量规范,充分重视温盐深误差给多波束测深带来的重要影响,尽可能地削弱温盐深误差给多波束测深带入的误差,才能获得满意的高精度测量成果。

参考文献:

- [1] 肖付民,黄毅,张永厚,等.表层声速误差对多波束测深数据的影响分析[J].*海洋测绘*,2021,41(1):27-30.
Xiao Fumin, Huang Yi, Zhang Yonghou, et al. Analysis of surface sound speed errors on multibeam sounding data[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2021, 41(1): 27-30.
- [2] 朱庆,李德仁.多波束测深数据的误差分析与处理[J].*武汉测绘科技大学学报*,1998,23(1):1-4,46.
Zhu Qing, Li Deren. Error analysis and processing of multibeam soundings[J]. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping*, 1998, 23(1): 1-4, 46.
- [3] 朱小辰,刘雁春,肖付民,等.海道测量多波束声速改正精确模型研究[J].*海洋测绘*,2011,31(1):1-3,8.
Zhu Xiaochen, Liu Yanchun, Xiao Fumin, et al. Rigorous model of multibeam echosounding system sounding velocity correction[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2011, 31(1): 1-3, 8.
- [4] 张志伟,暴景阳,肖付民,等.利用模拟退火算法反演多波束测量声速剖面[J].*武汉大学学报·信息科学版*,2018,43(8):1234-1241.
Zhang Zhiwei, Bao Jingyang, Xiao Fumin, et al. Inversion of sound velocity profile in multibeam survey based on simulated annealing algorithm[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(8): 1234-1241.
- [5] 杨永红,王翠杰.基于压强和深度的两种不同声速计算方法比较[J].*海洋测绘*,2015,35(3):64-66.
Yang Yonghong, Wang Cuijie. Comparison of two methods for calculating ocean sound speed profiles based on pressure and depth[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2015, 35(3): 64-66.
- [6] 吴碧,陈长安,林龙.声速经验公式的适用范围分析[J].*声学技术*,2014,33(6):504-507.
Wu Bi, Chen Chang'an, Lin Long. Analysis of applicable scope of empirical equation for sound velocity[J]. *Technical Acoustics*, 2014, 33(6): 504-507.
- [7] 张启国,陈献,刘强.远海多波束水深测量中声速剖面获取方法研究[J].*海洋测绘*,2019,39(5):1-4.
Zhang Qiguo, Chen Xian, Liu Qiang. Research on the method of the sound speed profile acquisition in deep sea multi-beam sounding[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2019, 39(5): 1-4.
- [8] 朱小辰,肖付民,刘雁春,等.表层声速对多波束测深影响的研究[J].*海洋测绘*,2007,27(2):23-25,29.
Zhu Xiaochen, Xiao Fumin, Liu Yanchun, et al. Research on the influence of surface sound velocity in multibeam echo sounding[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2007, 27(2): 23-25, 29.
- [9] 刘胜旋.关于表层声速对多波束测深影响及改正的探讨[J].*海洋测绘*,2009,29(6):26-29.
Liu Shengxuan. The correction and effect of surface sound velocity on the multibeam echosounding[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2009, 29(6): 26-29.
- [10] Meinen C S, Watts D R. Further evidence that the sound-speed algorithm of Del Grosso is more accurate than that of Chen and Millero[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1997, 102(4): 2058-2062.
- [11] Del Grosso V A. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations)[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1974, 56(4): 1084-1091.
- [12] Wilson W D. Speed of sound in sea water as a function of temperature, pressure, and salinity[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1960, 32(6): 641-644.
- [13] 刘伯胜,雷家煜.水声学原理[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1993:23.
Liu Bosheng, Lei Jiayu. Principles of Underwater Acoustics[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1993: 23.
- [14] Barnard T E. Geometrically derived ray-theory results and direct verification of the Pekeris solution for unbounded constant-gradient media[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2012, 37(2): 244-254.
- [15] Ogasawara H, Mori K, Nakamura T. Reciprocal sound propagation experiment in very shallow water area of Hashirimizu port[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(7S): 07HG15.
- [16] Ramezani H, Jamali-Rad H, Leus G. Target localization and tracking for an isograd sound speed profile[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(6): 1434-1446.
- [17] 赵建虎,刘经南.多波束测深及图像数据处理[M].武汉:武汉大学出版社,2008:125-127.
Zhao Jianhu, Liu Jingnan. Multibeam Bathymetry and Image Data Process[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008: 125-127.
- [18] 何林帮,赵建虎,张红梅,等.顾及姿态角的多波束声线精确跟踪方法[J].*哈尔滨工程大学学报*,2015,36(1):46-50.
He Linbang, Zhao Jianhu, Zhang Hongmei, et al. A precise multibeam sound ray tracking method taking into account the attitude angle[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2015, 36(1): 46-50.

Analysis of the influence of temperature, salinity and depth variations on beam footprint coordinates

Sun Tao¹, He Linbang²

(1. Jiangsu Easy-map Geographic Information Technology Co. Ltd., Yangzhou 225009, China; 2. Deep-sea Software Development Laboratory, Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya 572000, China)

Abstract: The multi-beam echo sounder is usually used in bathymetry activity, the accuracy of temperature, salinity and depth profile data play a very important role in the bathymetry. Unfortunately, those errors among the temperature, salinity and depth data were inevitably brought into the measurement. To analyze the influence of temperature, salinity and depth variations on beam footprint coordinates and quantify its influence value, then, on basis of the indirect measurement data of sound velocity profile, the empirical formula of sound velocity with high precision and strong adaptability were selected to deduce their error formula, and the error value of sound velocity caused by temperature, salinity and depth variation was calculated. On the basis of constant-gradient sound ray tracing model, the horizontal and vertical displacement error formulas of sound wave travel path were derived, and then the influence value of acoustic velocity error on beam footprint coordinates was calculated by combining with sound velocity profile. The experimental results show that temperature has the greatest influence on sound velocity, followed by salinity and depth. The variations of temperature, salinity and depth cause the Z -coordinate variation of the beam footprint to be larger than the X and Y coordinates, up to 0.6% of the depth before the change. The variation of three-dimensional coordinates caused by temperature and salinity decreases with the increase of incident angle, however, the variation of three-dimensional coordinates caused by depth hardly changes with the change of incident angle. The results of this paper can be used for reference to evaluate the accuracy of multi-beam bathymetry with temperature, salinity and depth error.

Key words: temperature, salinity and depth; beam footprint; empirical formula of sound velocity; sound ray tracing