

EOF 重构声速剖面对深水多波束的 声速改正分析

张孝首^{1,2}, 周兴华^{1,2*}, 唐秋华^{1,2}, 王盼龙^{1,2}, 丁继胜^{1,2}, 王永康²

(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘 要:声速误差是多波束水深地形测量主要误差源之一,通常采用现场声速剖面测量的方式加以改正,但在深远海多波束水深地形测量时,现场获取全深度的声速剖面并非易事。针对这一问题,利用东南印度洋海洋调查工作中采集到的 17 个站位的 CTD 数据,将所有站位声速剖面拓展到全深度,采用经验正交函数分析法(Empirical Orthogonal Functions, EOF)构建调查区声速剖面场,可获得声速剖面场内任意一点的声速值。然后通过 EOF 重构声速剖面场获得的声速值对测区内多波束水深地形数据进行改正,并与实测声速剖面对多波束水深地形数据的改正结果进行对比,结果表明,5 000 m 水深范围内 2 种声速改正结果相差很小,EOF 重构法对深水多波束的声速改正满足水深测量的要求。

关键词:C. C. Leroy 算法; EOF; 声速剖面; 多波束

中图分类号:P716

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2020)01-0034-10

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2020.01.004

引用格式:ZHANG X S, ZHOU X H, TANG Q H, et al. Analysis on correction of deep water multi-beam sound velocity using sound velocity profiles reconstructed by EOF[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(1): 34-43. 张孝首, 周兴华, 唐秋华, 等. EOF 重构声速剖面对深水多波束的声速改正分析[J]. 海岸工程, 2020, 39(1): 34-43.

海洋声速是海洋环境观测的基本要素之一,主要受温度、盐度与压力的影响,准确的声速剖面对各种海洋声学测量均具有重要的意义。大洋声速剖面大部分符合混合层、主跃层与深海等温层的三层剖面结构,具有一定的规律性。目前声速剖面测量主要有直接测量和间接测量两种方法。直接测量法通常采用声速剖面仪直接测量声速,测量精度较高;间接测量通常利用 CTD 测量得到的温度、盐度和压力等数据,根据声速经验公式计算得到声速,该方法的精度主要取决于所选择的声速经验公式与仪器精度^[1-2]。在大洋科考中,无论是采用直接法还是间接法,全水深声速剖面都需停船定点作业,对于 4 000 m 的全水深声速剖面测量,大约耗时 5~6 h,采集效率较低,成本较高。在深海多波束海底地形测量过程中,通常采用定点 CTD 作业和走航 XCTD 相结合等方式获取声速数据,但 XCTD 作业深度有限,无法获取全海深声速剖面,易导致因声速数据不准确产生的多波束测量误差,从而影响海底地形成果精度。为有效改正此种原因导致的误差,可以利用声速剖面结构参数化模型实现对声速的有效表示,模型主要分为两类,一类为解析函数模型,另一类为经验正交函数模型^[3](Empirical Orthogonal Functions, EOF)。

解析函数模型利用一系列数学表达式及参数表示声速随深度的变化,此类模型的缺点是公式较复杂,应用者需要具备较强的数学基础,不利于推广应用。EOF 函数模型也叫主成分分析法,是描述声速剖面最有效的基函数,其将具有相同特征的声速剖面群进行模态分解,得到基函数,一般 3~6 个基函数就可以近似表

收稿日期:2019-07-13

资助项目:国家重点研发计划项目——海上搜寻演示验证技术与评估(2017YFC0306003)和水下参考框架点建设与维护技术(2016YFB0501703)

作者简介:张孝首(1993-),男,硕士研究生,主要从事海洋测绘方面研究. E-mail: xiaoshouzhang2019@outlook.com

* 通讯作者:周兴华(1964-),男,研究员,博士,主要从事海洋测绘方面研究. E-mail: xhzhou@fio.org.cn

(陈 靖 编辑)

示任意一个声速剖面^[4-6]。根据沈远海^[6]、张旭等^[7]、孙文川等^[8]的研究表明,EOF 方法构建浅水声速剖面场具有良好的效果,在构建深远海声速剖面场时的效果研究较少^[11]。本文基于东南印度洋海洋调查工作,对获取的 CTD 实测数据计算得到的全水深声速剖面进行计算,利用 EOF 分析方法建立整个作业区的声速剖面场模型;在此基础上,提取深水多波束测量所需声速剖面,对多波束水深地形数据进行声速改正,实验结果表明,通过 EOF 方法表示的声速剖面可以有效对多波束测量数据进行声速改正。

1 EOF 分析法构建声速剖面场原理

设测区有 N 个实测声速剖面,每个声速剖面有 M 个均匀深度的声速值, (x_i, y_i) 为声速剖面对应的地理坐标, x_i 为纬度, y_i 为经度,将 N 个声速剖面表示为矩阵形式为^[12]:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1(1) & c_1(2) & \cdots & c_1(N) \\ c_2(1) & c_2(2) & \cdots & c_2(N) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_M(1) & c_M(2) & \cdots & c_M(N) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:每一列代表一个声速剖面,每一行代表各个声速剖面同一深度层的声速。

对式(1)中的每一行取平均值,得到所有声速剖面同一深度层的平均声速值,最终得到平均声速矩阵 $\bar{\mathbf{C}}_{M \times N}$,将声速剖面矩阵与平均声速矩阵相减得到声速扰动矩阵 $\Delta \mathbf{C}_{M \times N}$,进而得到扰动矩阵的协方差矩阵 $\mathbf{COV}_{M \times N}$:

$$\mathbf{COV}_{M \times N} = \frac{1}{n} \mathbf{C} \times \mathbf{C}^T, \quad (2)$$

计算协方差矩阵的特征值 $\lambda (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N)$ 和特征向量 $\mathbf{V} (\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_N)$:

$$\mathbf{COV}_{M \times N} \times \mathbf{V}_{M \times M} = \mathbf{V}_{M \times M} \times \lambda_{M \times N}, \quad (3)$$

λ_N 对应的特征向量 $\mathbf{V}_N$ 即为 EOF 的一个模态, $\mathbf{V}$ 即为 EOF 空间函数。

将 EOF 投影到声速扰动矩阵,得到所有空间特征向量对应的时间系数(主成分) $\mathbf{PC}_{M \times N}$:

$$\mathbf{PC}_{M \times N} = \mathbf{V}_{M \times M}^T \times \Delta \mathbf{C}_{M \times N}, \quad (4)$$

式中, $\mathbf{PC}_{M \times N}$ 中的每一列为对应声速扰动剖面的时间系数。

声速剖面矩阵可以表示为以下形式:

$$\mathbf{C}_{M \times N} = \bar{\mathbf{C}}_{M \times N} + \mathbf{V}_{M \times M} \times \mathbf{PC}_{M \times N}, \quad (5)$$

每一个特征向量对应的特征值表示此特征向量的权重,根据张志伟等的研究,前六阶经验正交函数就可以有效表示声速剖面,因此,本文用前六阶经验正交函数重构声速剖面,表达式如下:

$$\mathbf{C}_{M \times N} = \bar{\mathbf{C}} + \mathbf{V}_{M \times 6} \times \mathbf{PC}_{6 \times N}. \quad (6)$$

运用双线性插值方法对得到的时间系数进行插值,可得到任意一点的时间系数:

$$\mathbf{PC}_{N \times 6}^T = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1 y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2 y_2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & x_N & y_N & x_N y_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{01} & a_{02} & \cdots & a_{06} \\ a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & \cdots & a_{36} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

根据最小二乘法原理 $\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{A})$,得到待求参数矩阵 $\mathbf{a}_{4 \times 6}$ 。

2 深海声速剖面场建立

2.1 CTD 数据预处理

本研究选取东印度洋海洋调查工作中获取的 17 个 CTD 站位数据,其中全水深 3 个(8、12 及 13 号站

位),非全水深 14 个(测站位置如图 1 所示)。首先将各站 CTD 测量得到的温度、盐度数据按 1 m 深度间隔导出,温度与盐度变化如图 2 所示,然后再将 14 个非全水深 CTD 的温度、盐度数据拟合计算至 4 000 m。

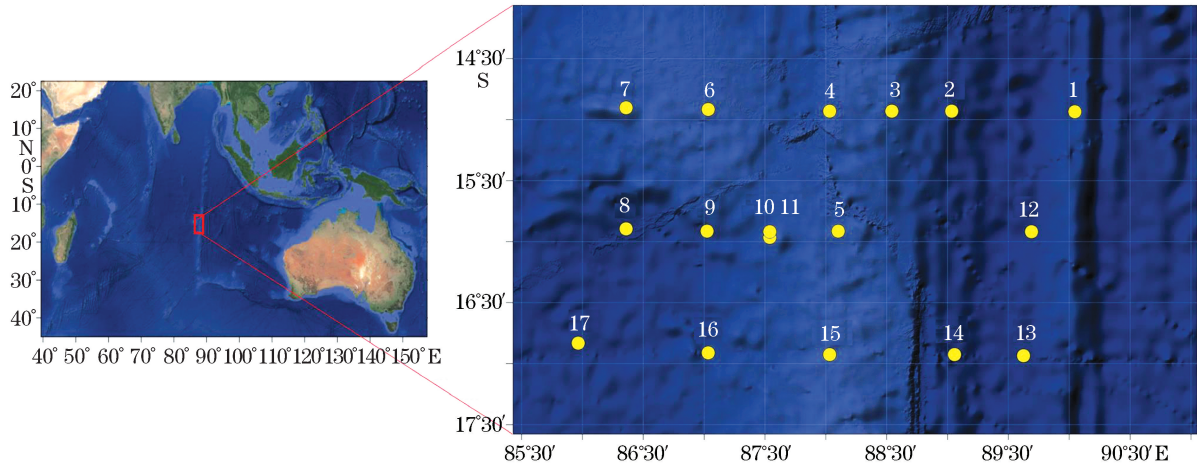


图 1 CTD 测站位置

Fig.1 Location of CTD stations

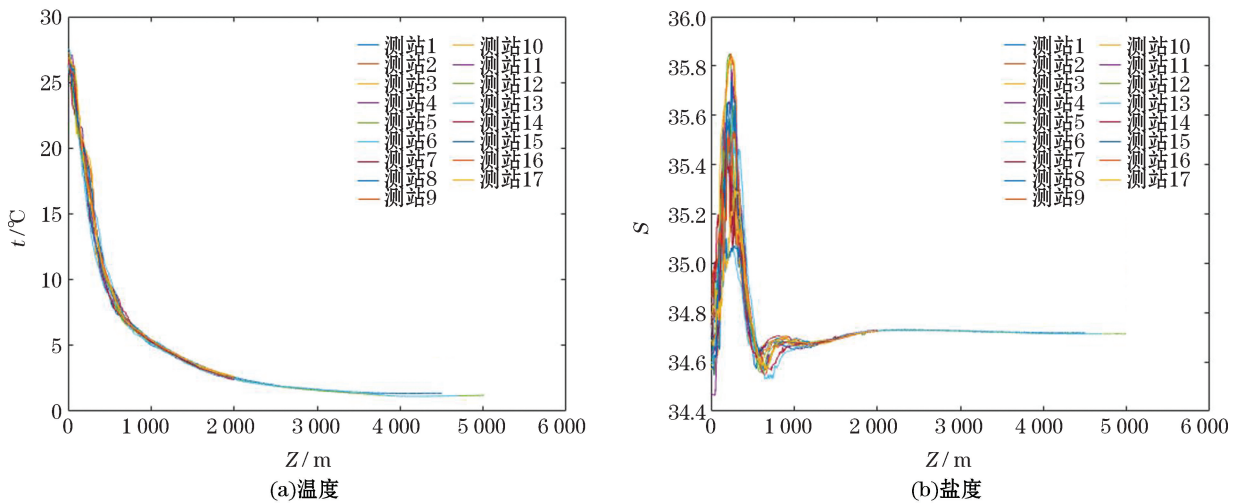


图 2 温度与盐度变化

Fig.2 Changes in temperature and salinity

通过 3 个全水深 CTD 数据分析后发现,该区域海洋温度与盐度在 2 000 m 以下变化较小(图 2),其中温度我们可将其变化近似为线性变化,可通过有理拟合公式进行拟合计算:

$$y = \frac{p_1 \times x + p_2}{x^2 + q_1 \times x + q_2}, \quad (8)$$

式中: x 为深度(m); y 为温度(°C); p_1, p_2, q_1 和 q_2 为参数。

为验证温度拟合公式的精度,随机选取一个全水深深测站所测温度数据,对 1 000~2 000 m 温度数据进行拟合并预测 2 000~4 000 m 的温度,预测温度误差见图 3,可知预测最大误差为 0.07 °C,引起的声速误差为 0.3 m/s,表明运用式(8)可以对温度进行有效的拟合预测。研究区内距离较近的

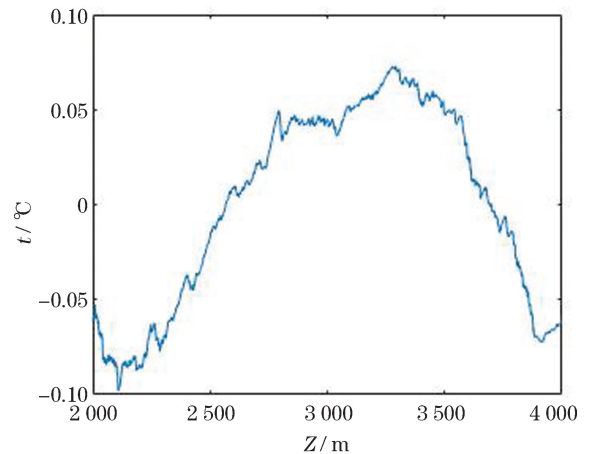


图 3 温度拟合误差

Fig.3 The fitting error of temperature

CTD 站位盐度基本相同,可采用邻近的全水深盐度数据对非全水深盐度数据进行替代。通过以上计算,最终得到 17 组深度为 4 000 m、间隔为 1 m 的温度、盐度数据。

2.2 CTD 声速剖面计算

基于 CTD 获取的温、盐、深数据,通过声速剖面经验公式可以计算得到各测站声速剖面,目前国内外比较认可的声速剖面经验公式有 Chen-Millero^[13], Wilson^[14], Del Grosso^[13-14] 及 Leroy^[15] 等,各模型的温度、盐度、压力适用范围有所差别。根据黄辰虎等的研究,Del Grosso、Chen-Millero、C. C. Leroy、Coppens 四个声速模型在全球海域具有较高精度及适用性,Del Grosso 及 Chen-Millero 两个模型具有最优精度。在以 Del Grosso 作为最优模型的假设下,C. C. Leroy 公式与 Del Grosso 公式计算得到的声速差值约为 ± 0.1 m/s,随着水深的增加,互差趋于 0.04 m/s,且使用 C. C. Leroy 模型计算声速无需测量压力^[15-17],为消除对压力数据延伸引起的声速计算误差,本文选取 C. C. Leroy 声速剖面经验公式计算声速,C. C. Leroy 算法的表达式^[15]:

$$\begin{aligned} C = & 1402.5 + 5T - 5.44 \times 10^{-2} T^2 + 2.1 \times 10^{-4} T^3 + 1.33S - 1.23 \times 10^{-2} TS \\ & + 8.7 \times 10^{-5} T^2 S + 1.56 \times 10^{-2} Z + 2.55 \times 10^{-7} Z^2 - 7.3 \times 10^{-12} Z^3 \\ & + 1.2 \times 10^{-6} Z(\varphi - 45^\circ) - 9.5 \times 10^{-13} TZ^3 + 3 \times 10^{-7} T^2 Z + 1.43 \times 10^{-5} SZ, \end{aligned} \quad (9)$$

式中: C 为声速; T 为温度($^\circ\text{C}$); S 为盐度; Z 为水深(m); φ 为测量处纬度。根据式(9)计算,共得到 17 组水深为 4 000 m,间隔为 1 m 的声速剖面(图 4)。

2.3 声速剖面的 EOF 表示

研究区 17 组声速剖面包含 3 组全水深声速剖面,14 组非全水深声速剖面,本文利用 2 组全水深声速剖面,14 组非全水深声速剖面构建两个声速剖面场,最大水深分别为 1 500 和 4 000 m,站号 13 的全水深声速剖面数据作为验证。

2.3.1 1 500 m 水深声速剖面场建立

选取 1~1 500 m 声速剖面,对所选数据组成的声速矩阵进行经验正交分解,将特征向量按方差贡献率从大到小的顺序进行排列,张旭等^[3,7]认为前 3~6 组特征向量累积方差贡献率为 89.4%~96.6%。本文取前 6 组 EOF 特征向量构建声速剖面场,前 6 组特征向量累积方差贡献率为 95.01%。用预留全水深声速剖面进行验证,对重构声速剖面与实测声速剖面进行对比,结果如图 5。

由图 5 可知,重构声速剖面与实测声速剖面非常接近,无明显差异点,0~300 m 声速误差逐渐变大,300~700 m 声速误差逐渐变小,700~1 500 m 声速误差无显著变化。声速误差最大值约为 4 m/s,声速差值较大处出现在混合层,深度约为 300 m,且在混合层差值跳跃较大,这与温度在海水中的变化基本吻合,为验证,对第 13 组 CTD 温度数据求导,结果如图 6。

由图 6 可知,在 700 m 以内导数绝对值较大,最大值约为 200 m,700~1 000 m 导数绝对值相对较小,1 000~2 000 m 导数绝对值接近 0,且基本无变化,2 000 m 以后基本为 0,证明温度在 700 m 以内变化较快,200 m 左右变化最为剧烈,700~1 000 m 变化逐渐趋于平缓,1 000~2 000 m 匀速下降,2 000 m 以后基本没有变化。混合层由于受光照影响,一天之内同一水深温度变化较大,同一时间垂直方向温度也存在较大

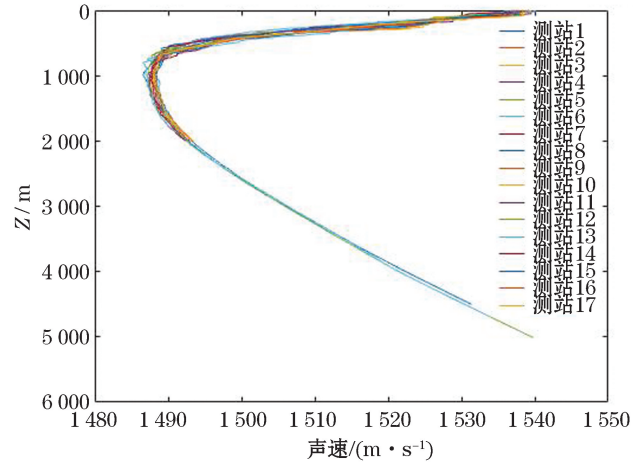


图 4 17 组声速剖面

Fig.4 17 groups of sound velocity profiles

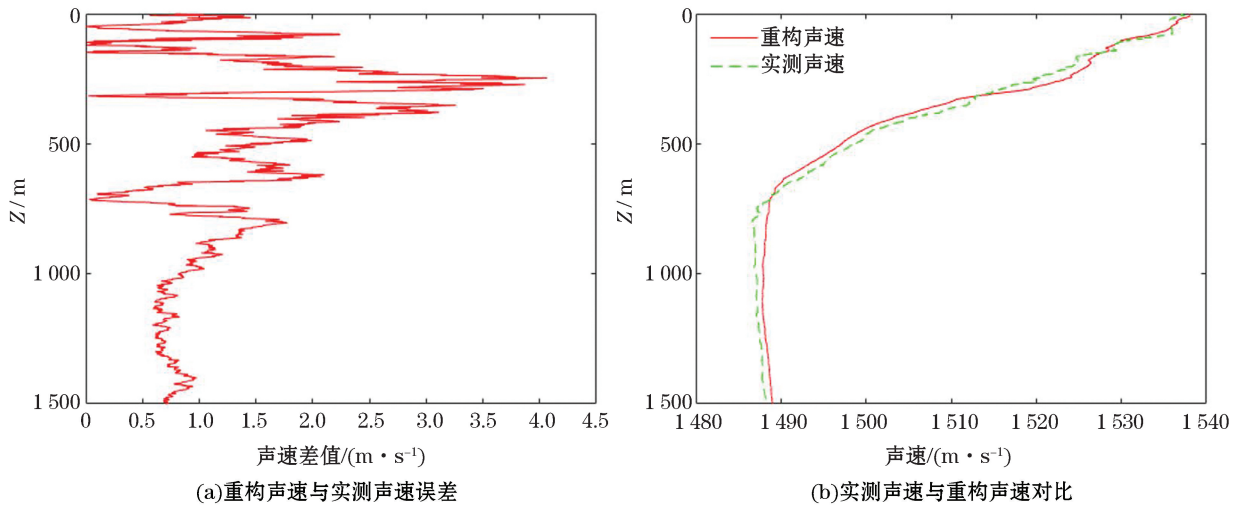


图5 1 500 m 声速误差

Fig.5 Sound velocity errors within a water depth of 1 500 m

差异,在影响声速的3个主要因素中,又以水温变化对声速的影响最大,在深度与盐度不变的情况下,温度变化1℃,声速变化约为4.5 m/s。温度变化越快,声速变化也越快,重构声速剖面场所需的特征向量也就越多。本文构建声速剖面场所用声速剖面的声速按照1 m深度间隔均匀分布,同一深度构建声速剖面场所用声速剖面数相同,在声速剖面数相同的情况下,温度变化越复杂,构建的声速剖面场精度越差,实测声速与重构声速剖面差值也越大。

经计算,声速误差的标准差为1.383 4 m/s,其中大于3 m/s的数量为63个,占总数比例为4.2%;2~3 m/s为118个,占总数比例为7.9%;1~2 m/s为527个,占总数比例为35.1%;声速差小于1 m/s的为792个,占总数比例为52.8%,证明利用EOF方法构建声速剖面场效果较好。

2.3.2 4 000 m 水深声速剖面场建立

选取1~4 000 m声速剖面,对照构建1 500 m声速剖面场的方法建立4 000 m声速剖面场,前6组特征向量累积方差贡献率为94.34%,用预留全水深声速剖面进行验证,对重构声速剖面与实测声速剖面进行对比,结果如图7。

声速误差的标准差为0.880 2 m/s,其中大于3 m/s的数量为64个,占总数比例为1.6%;2~3 m/s为117个,占总数比例为2.925%;1~2 m/s为643个,占总数比例为16.075%;声速差小于1 m/s的为3 176个,占总数比例为79.4%。与构建的1 500 m声速剖面场进行对比可知,将声速延伸至4 000 m并不会降低声速剖面场的精度。

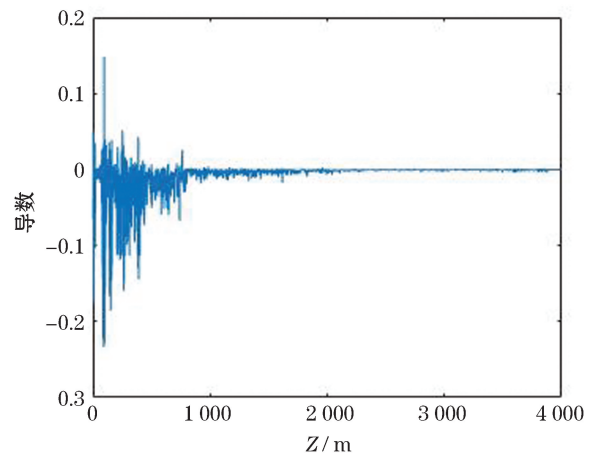


图6 温度导数

Fig.6 Temperature derivative

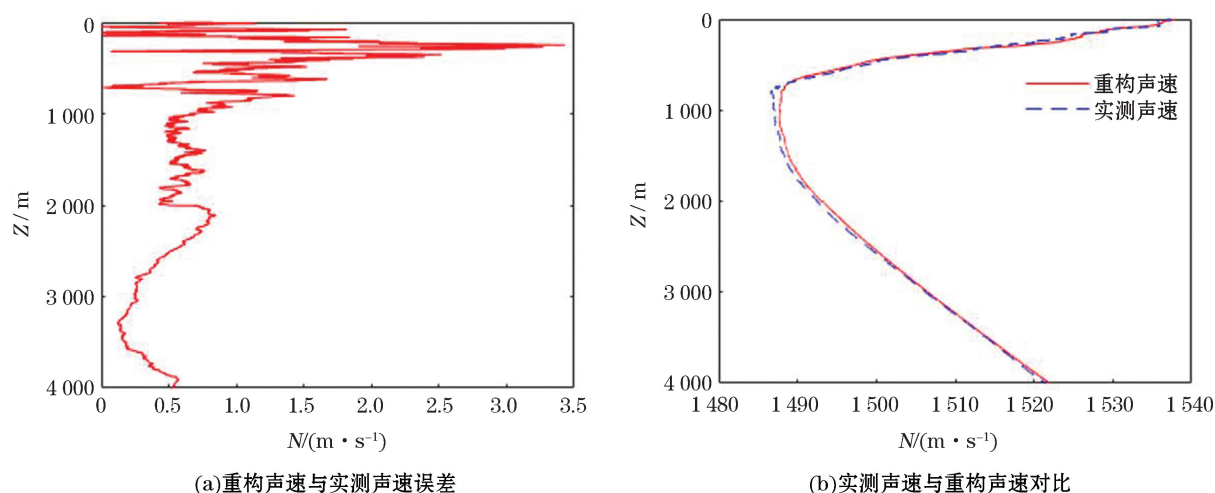


图 7 4 000 m 声速误差

Fig.7 Sound velocity errors within a water depth of 4 000 m

3 重构声速剖面对深水多波束水深数据进行改正

为验证 EOF 方法构建的声速剖面场对深水多波束进行声速改正的效果,利用构建的 4 000 m 声速剖面场,选取同一区域 EM122 深水多波束测量的 6 条测线进行声速改正,测线位置如图 8 所示。其中测线 1 和测线 2 水深约为 3 000 m、测线 3 和测线 4 水深约为 4 000 m、测线 5 和测线 6 水深约为 5 000 m。

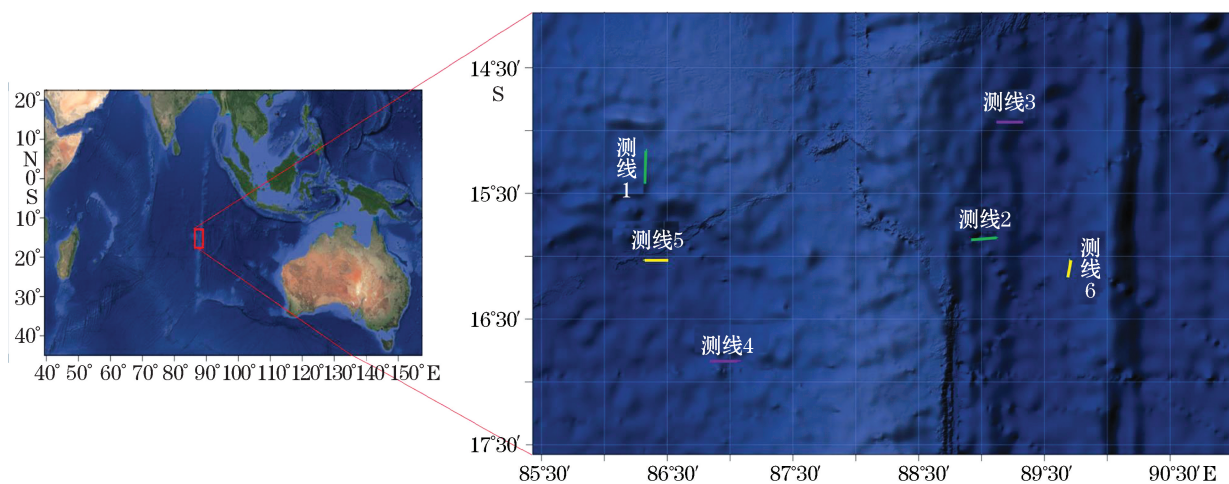


图 8 多波束测线位置

Fig.8 Locations of multi-beam survey lines

测线 1 实测声速剖面深度为 1 500 m,测线 2、测线 3 和测线 4 实测声速剖面深度为 2 000 m,测线 5 和测线 6 实测声速剖面深度为 4 500 m。为验证本方法的有效性,采用 Caris10.0 软件进行多波束数据处理,对选取的 6 条测线分别运用实测声速剖面 and EOF 方法重构声速剖面进行声速改正,将改正后水深点输出并进行对比,2 种声速剖面改正对比结果如图 9~11,图中颜色表示差值大小,图中箭头表示测量船的航向。对比结果进行最大值、最小值、平均值及中误差计算,结果如表 1。

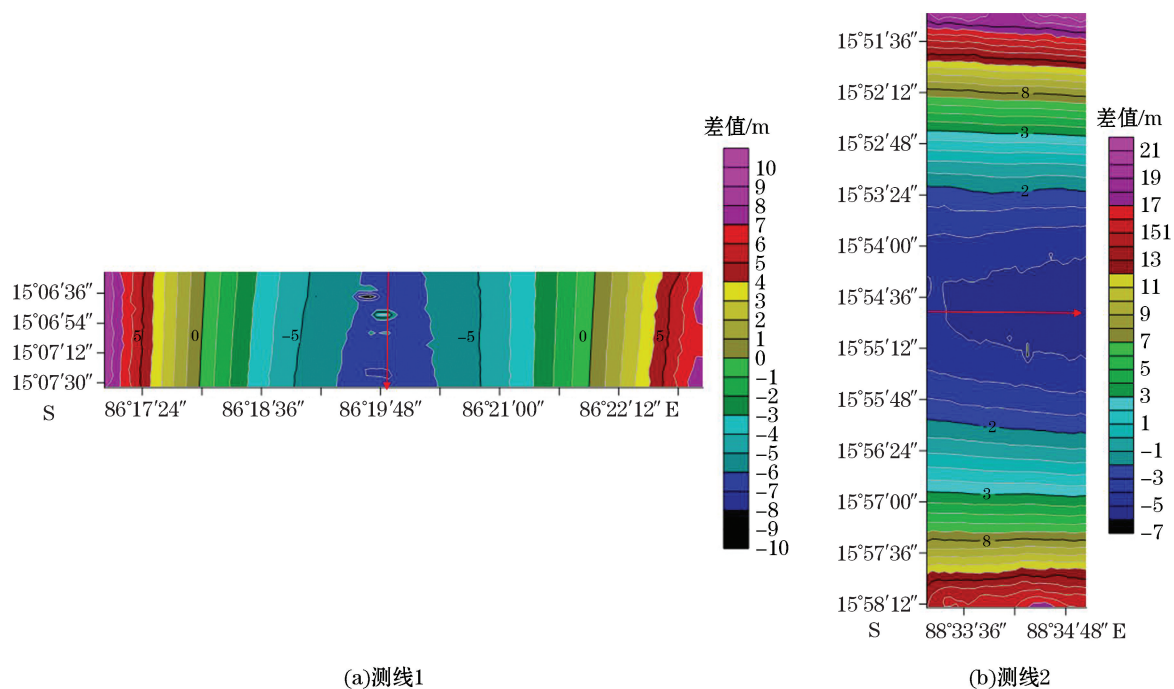


图 9 3 000 m 水深差值

Fig.9 Differences within a water depth range of 3 000 m

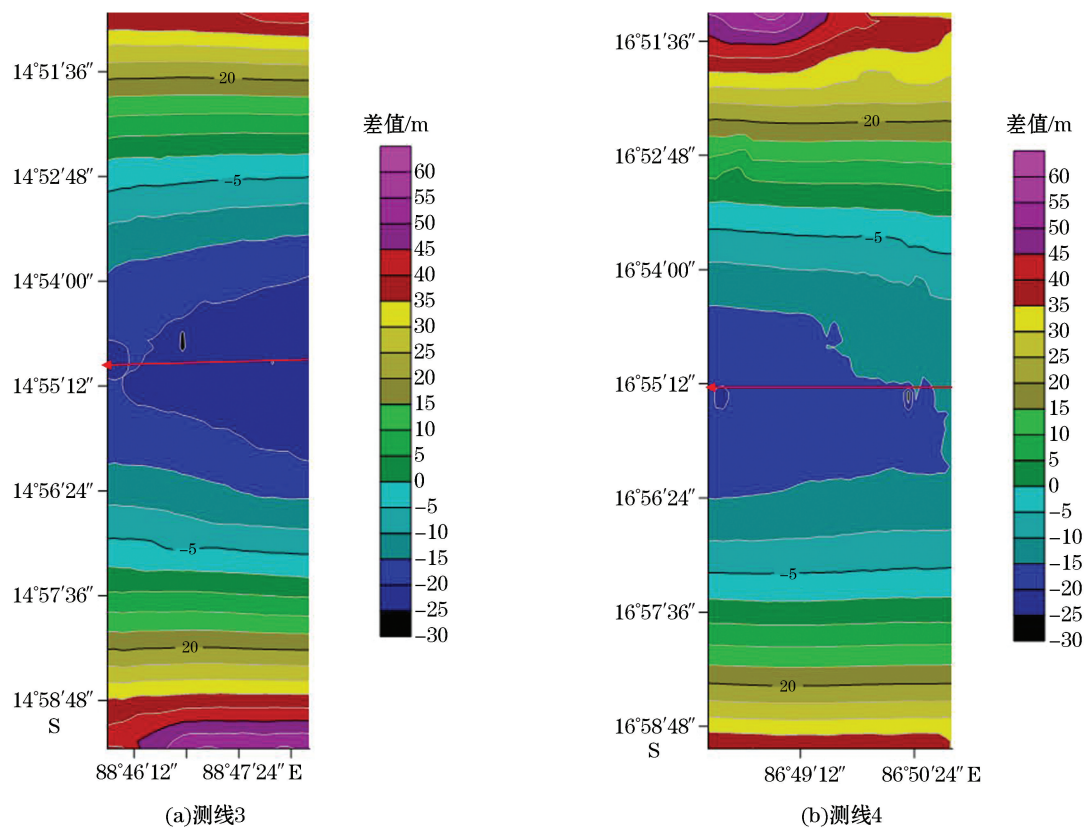


图 10 4 000 m 水深差值

Fig.10 Differences within a water depth range of 4 000 m

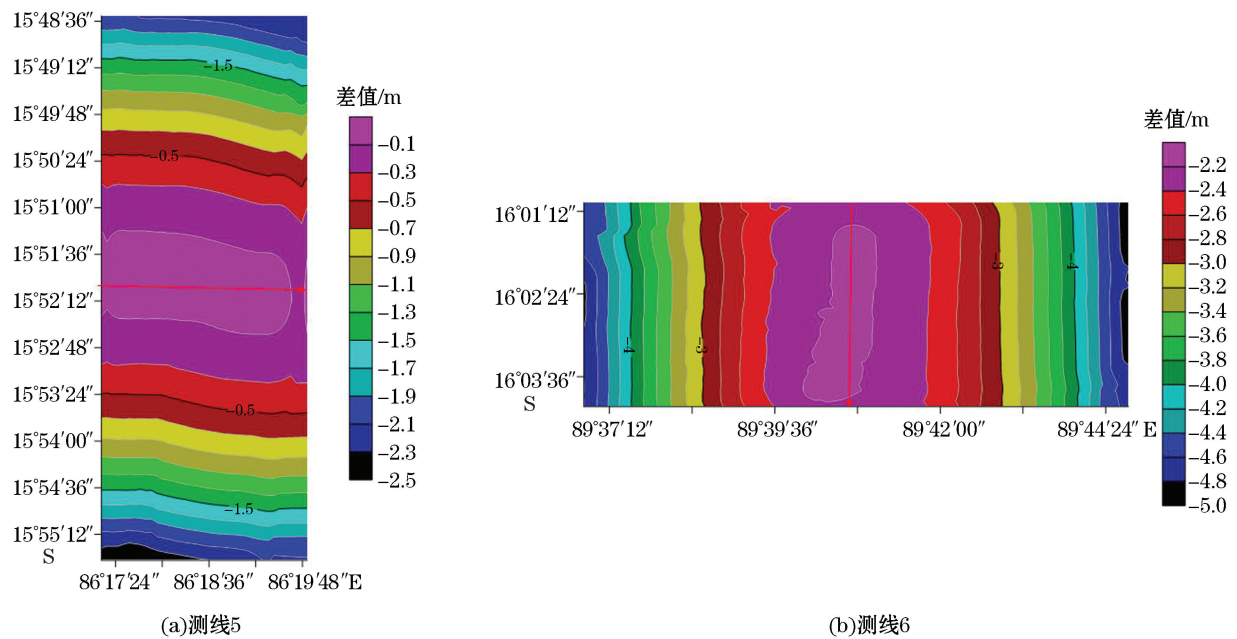


图 11 5 000 m 水深差值
Fig.11 Differences within a water depth range of 5 000 m

表 1 两种声速剖面改正结果误差统计(m)

Table 1 Error statistics of the results corrected by using two types of sound velocity profiles (m)

误差值	测线 1	测线 2	测线 3	测线 4	测线 5	测线 6
最小值/m	-11.382	-11.368	-29.265	-28.155	-2.369	-4.965
最大值/m	9.129	20.572	56.394	57.806	-0.041	-2.153
均值/m	-1.396	2.072	0.358	0.275	-0.799	-3.015
中误差/m	4.136	6.688	19.765	16.353	0.659	0.774

由图 11 和表 1 中可知水深约为 5 000 m 的测线 5 和测线 6 中误差最小,约为 0.7 m,相对中误差为 0.014%,误差绝对值的最大值约为 5 m,相对误差为 0.1%,且误差范围为最小,约为 2.5 m,测线 5 和测线 6 声速改正所用重构声速剖面深度接近实测声速剖面深度,可以认为 2 种声速剖面深度不同对声速改正结果带来的误差可以忽略不计,误差的主要来源为同一深度层的声速差。测线 5 和测线 6 对比的结果表明,通过 EOF 方法重构声速剖面对多波束数据进行声速改正的结果接近实测声速剖面对多波束数据进行声速改正的结果。

从图 10 和表 1 中可以看出测线 3 和测线 4 的中误差最大,约为 17 m,相对中误差为 0.425%,接近《海道测量规范》^[18]规定的 1%的中误差的一半,误差绝对值的最大值约为 58 m,相对误差为 1.45%,超过了《海道测量规范》规定的 1%的中误差,其误差范围也为最大,约为 85 m,这是因为测线 3 和测线 4 进行声速改正所用实测声速剖面深度为 2 000 m,远小于本文重构声速剖面的 4 000 m 深度,用 2 000 m 处声速表示 2 000 m 以下声速会对水深点最终结果带入较大误差,应用本文方法构建的声速剖面进行声速改正可以有效解决此类问题,提高测量成果精度,对边缘波束的改正效果最为明显;从图 9 和表 1 中可以看出水深约为 3 000 m 的测线 1 和测线 2 中误差约为 5 m,相对中误差为 0.17%,误差绝对值的最大值约为 20 m,相对误差为 0.67%,误差范围大小约为 26 m,大于测线 5 和测线 6,小于测线 3 和测线 4,这是因为测线 1 和测线 2 的水深小于测线 3 和测线 4 的水深,用声速剖面最大深度点处的声速表示最深点以下声速对水深点结果带来的

误差小于测线 3 和测线 4。

综上所述,在 5 000 m 范围内,利用 EOF 方法构建的声速剖面与利用实测声速剖面对深水多波束数据进行声速改正最终得到的水深相差很小,可以满足深远海水深测量的要求。

4 结 论

本文对印度洋实测 CTD 数据运用 C. C. Leroy 声速经验公式计算得到各测站声速剖面,应用有理拟合公式对非全水深声速剖面进行延伸,在此基础上利用 EOF 方法建立研究区声速剖面场,通过分析处理并与实测声速剖面对比,建立的声速剖面场与实测声速剖面具有良好的符合性,得到结论:

1)利用 EOF 方法重构声速剖面,对深水多波束水深地形数据进行声速改正。在 5 000 m 水深范围内,应用重构声速剖面与实测全水深声速剖面进行声速改正的水深点最大误差为 5 m,满足深远海水深测量的要求。

2)在无法获取调查区 CTD 站位的全水深声速剖面的情况下,对非全水深声速剖面应用简单有效的有理拟合公式进行延伸,不会影响构建声速剖面场的精度,并可有效改善边缘波束的精度。

3)在深远海多波束地形测量无法获取实时、全水深声速剖面的情况下,EOF 反演声速剖面方法可以作为一种实测声速剖面的有效补充。

参考文献(References):

- [1] LU X P, HUANG C H, ZHOU F N, et al. Selection of optimal sound velocity model in the global ocean(I)[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2016, 36(3): 16-20, 24. 陆秀平, 黄辰虎, 周丰年, 等. 全球海域最优声速计算模型的综合选定(一)[J]. 海洋测绘, 2016, 36(3): 16-20, 24.
- [2] YANG Y H, WANG C J. 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. 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.
- [3] ZHANG X, ZHANG Y G, ZHANG J X, et al. A new model for calculating sound speed profile structure[J]. Haiyang Xuebao, 2011, 33(5): 54-60. 张旭, 张永刚, 张健雪, 等. 一种新的声速剖面结构参数化方法[J]. 海洋学报, 2011, 33(5): 54-60.
- [4] DAVIS R G. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean[J]. Journal of Physical Oceanography, 1976, 6(3): 249-266.
- [5] ZHANG Z W, BAO J Y, LIN J J. Order selection of EOF expression of sound velocity profile in multibeam surveys[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2017, 37(5): 17-21. 张志伟, 暴景阳, 林建炬. 多波束测量声速剖面 EOF 表示阶次选取研究[J]. 海洋测绘, 2017, 37(5): 17-21.
- [6] SHEN Y H, MA Y L, TU Q P, et al. Feasibility of description of the sound speed profile in shallow water via empirical orthogonal functions (EOF)[J]. Applied Acoustics, 1999, 11(2): 21-25. 沈远海, 马远良, 屠庆平, 等. 浅水声速剖面用经验正交函数(EOF)表示的可行性研究[J]. 应用声学, 1999, 11(2): 21-25.
- [7] ZHANG X, ZHANG Y G, ZHANG S J, et al. A comparison between the EOF and GDEM methods for reconstruction of sound speed profile[J]. Applied Acoustics, 2010, 29(2): 115-121. 张旭, 张永刚, 张胜军, 等. 经验正交函数与广义数值环境模式重构声速剖面的比较[J]. 应用声学, 2010, 29(2): 115-121.
- [8] SUN W C, BAO J Y, JIN S H. Effects of sound speed profiles represented by EOF to multibeam bathymetric data[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(6): 21-24, 28. 孙文川, 暴景阳, 金绍华. 声速剖面 EOF 表示对多波束水深数据的影响研究[J]. 海洋测绘, 2014, 34(6): 21-24, 28.
- [9] HE L, LI Z L, ZHANG R H, et al. Experience orthogonal function representation and matching field inversion of sound velocity profile in East China Sea[J]. Progress in Natural Science, 2006(3): 351-355. 何利, 李整林, 张仁和, 等. 东中国海声速剖面的经验正交函数表示与匹配场反演[J]. 自然科学进展, 2006(3): 351-355.
- [10] DING J S, ZHOU X H, TANG Q H, et al. Expression of multi-beam echo sounding sound velocity profile with empirical orthogonal functions[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(5): 446-449. 丁继胜, 周兴华, 唐秋华, 等. 多波束勘

- 测声速剖面场的 EOF 表示方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(5): 446-449.
- [11] ZHANG X, ZHANG Y G, ZHANG J X, et al. EOF analysis of sound speed profiles in sea area east of Taiwan[J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(4): 498-506. 张旭, 张永刚, 张健雪, 等. 台湾以东海域声速剖面序列的 EOF 分析[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(4): 498-506.
- [12] LEBLANC L R, MIDDLETON F H. An underwater acoustic sound velocity data model[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1980, 67(6): 2055-2062.
- [13] CHEN C A, MLIJERO F J. Speed of sound in seawater at high pressures[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1977, 62(5): 1129-1135.
- [14] WILSON W D. Extrapolation of the equation for the speed of sound in seawater[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1962, 34(6): 866-866.
- [15] LEROY C C, ROBINSON S P, GOLDSMITH M J. A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 124(5): 2774.
- [16] HUANG C H, ZHOU F N, SHEN J S, et al. Selection of optimal sound velocity model in the global ocean: part II precision analysis and its application[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2016, 36(4): 16-20, 30. 黄辰虎, 周丰年, 申家双, 等. 全球海域最优声速计算模型的综合选定(二): 精度分析及实际应用[J]. *海洋测绘*, 2016, 36(4): 16-20, 30.
- [17] DENG Z J, HUANG C H, LU X P, et al. Several problems of sound velocity profile data use in multibeam sounding[J]. *Hydrographic Surveying And Charting*, 2015, 35(5): 43-46. 邓志军, 黄辰虎, 陆秀平, 等. 多波束测深声速剖面数据使用中的若干问题[J]. *海洋测绘*, 2015, 35(5): 43-46.
- [18] Commander Department of the Navy (Navigation Guarantee Department). Specification for hydrographic survey: GB 12317—1998[S]. Beijing: Standards Press of China. 海军司令部(航海保证部). 海道测量规范: GB 12317—1998[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.

Analysis on Correction of Deep Water Multi-beam Sound Velocity Using Sound Velocity Profiles Reconstructed by EOF

ZHANG Xiao-shou^{1,2}, ZHOU Xing-hua^{1,2}, TANG Qiu-hua^{1,2}, WANG Pan-long^{1,2},
DING Ji-sheng^{1,2}, WANG Yong-kang²

(1. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. First institute of oceanography, MNR, Qingdao 266061, China)

Abstract: Sound velocity error is one of the main error sources in multi-beam bathymetric survey and is usually corrected by in-situ measurement of sound velocity profile. However, it is not easy to obtain a full depth sound velocity profile in the field. For solving this problem, CTD data collected at 17 stations during the survey in the Southeast Indian Ocean are applied and the sound velocity profiles obtained at all the stations are expanded to a full depth. And then, the Empirical Orthogonal Function (EOF) method is used to reconstruct the sound velocity profile field in the survey area. Thus, the value of sound velocity at any point in the sound velocity profile field can be obtained. The sound velocity values thus obtained are used to correct the multi-beam bathymetric data in the survey area, and the corrected results are compared with those obtained by using the measured sound velocity profiles. It is shown that within the depth range of 5 000 m the results from the two types of sound velocity corrections have very small differences, indicating that the correction of deep water multi-beam sound velocity by using the EOF reconstruction method can meet the requirements of bathymetric surveys.

Key words: C. C. Leroy algorithm; EOF; sound velocity profile; multi-beam

Received: July 13, 2019