

声速剖面 EOF 重构的实测数据采样深度研究

王子衡¹, 王振杰^{1,2}, 聂志喜^{1,2}, 张远帆¹

(1. 中国石油大学(华东) 海洋与空间信息学院, 山东 青岛, 266580; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛, 266071)

摘要: 经验正交函数(experiential orthogonal functions, EOF)是重构声速剖面(sound speed profile, SSP)的一种有效方法, 利用部分实测数据结合历史剖面资料可以重构当前位置的声速剖面。针对实测数据的采样深度难以确定这一问题, 本文介绍了一种基于历史声速剖面资料的实测数据采样深度选取方法, 根据 EOF 空间函数的方差贡献率确定数据量, 进而采用 EOF 算法重构全海深声速剖面。实验结果表明: 采用该方法得到的数据重构的声速剖面与实测声速剖面具有较好的一致性, 基于常梯度声线跟踪法得到的水深数据能够满足 0.25% 倍水深限差, 有效波束比达到了 100%, 为实际测量作业中声速数据的采样深度提供了参考。

关键词: 经验正交函数(experiential orthogonal functions, EOF); 声速剖面(sound speed profile, SSP)重构; 测深精度; 多波束测深; 采样深度

中图分类号: P229.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)06-0126-9

DOI: 10.11759/hyxx20200711001

声波在水中的良好传播特性使其成为获取和传递水下信息最为有效的手段^[1-3]。声速是影响水下多波束系统作业精度的重要外部影响因素, 通过影响声线跟踪的精度, 最终影响到测深精度。多波束测深通过换能器实时接收其发射出的各波束经海底反射和散射后返回的到达角和旅行时^[3], 利用声速剖面数据, 由公式计算得到不同波束点对应的水深值。声速剖面是声速的垂直结构分布, 海水的介质特性导致声波的传播轨迹发生弯曲, 要获取波束脚印的确切位置, 需要沿着波束的传播路径追踪声线, 计算波束脚印的水平位移和深度, 即声线跟踪^[3]。因此, 声速剖面的正确与否直接影响多波束测深结果的精度和可靠性^[4]。

海洋中的声速剖面通常由以下两种方法获得: 直接测量法和间接测量法^[4]。直接测量法通过测量声波在海水中已知的固定距离内往返所需的时间或相位来计算声速值。间接测量法利用温盐深测量系统(conductivity, temperature, depth, CTD) 测量海水的温度、盐度及深度等物理量, 再通过声速经验公式计算作业水域内各采样深度的声速值, 进而构成声速剖面。然而在深水大洋进行实际作业时, 受到水深和洋流的影响, 停船投放 CTD 采集声速剖面数据时间成本较高。采用走航式的抛弃式声速剖面计虽然可以快速有效的获得声速剖面, 但其作业成本随之大

大增加。相较于以上方法, 声速剖面重构只需少量的实测声速数据即可实现全海深声速剖面的重构, 提高效率的同时还有效的降低了成本。

由于海洋环境的复杂性, 声速剖面难以用一个简单的函数表示。Davis 等^[5]证明 EOF 是在最小均方差意义下反映声速剖面最有效的基函数; 孙文川等^[6]论证了 EOF 重构的声速剖面具有较高的内符合精度, 能较好地描述实际声速剖面; 张志伟等^[7]研究表明取前 6 阶及以上的 EOF 表示声速剖面可满足多波束测深的精度要求; 张镇迈等^[8]采用部分深度的实测剖面, 并基于测区海域内已有的数据, 对全海深声速剖面实现了重构; 张孝首等^[9]利用实测 CTD 数据通过有理拟合延伸和 EOF 方法实现了深海 5 000 m 声速剖面场的重构; 李洪

收稿日期: 2020-07-11; 修回日期: 2020-12-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0501700, 2016YFB0501705); 国家自然科学基金项目(41374008); 青岛海洋科学与技术试点国家实验室开放基金项目(QNLM2016ORP0401); 中国博士后科学基金项目(2020M672168)

[Foundation: National Key Research and Development Project, No. 2016YFB0501700, 2016YFB0501705; National Natural Science Foundation of China, No.41374008; Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao) Foundation, No. QNLM2016ORP0401; China Postdoctoral Science Foundation funded project, No.2020M672168]

作者简介: 王子衡(1996—), 男, 山西阳泉人, 硕士研究生, 研究方向为水下导航与定位, E-mail: upcwzh@126.com; 王振杰(1968—), 通信作者, 男, 博士生导师, 教授, E-mail: sdwzj@upc.edu.cn

超等^[10]对不同深度位置的部分声速剖面的重构效果进行了探讨;张维等^[11]在对残缺样本声速合理外延的基础上,选取声速剖面变化较剧烈深度的3个声速值实现了剖面重构。以上研究表明,基于EOF方法利用部分实测声速数据重构全海深剖面是可行有效的,但未参与重构的实测数据的采样深度给出明确依据。

本文将测区Argo浮标的温盐深数据通过声速经验公式计算得到的声速剖面作为测区历史声速剖面资料,基于EOF空间函数的方差贡献率选取*K*(EOF阶次)个最大梯度对应深度处的声速值进行声速剖面重构,在保证多波束测深精度的前提下实现了对全海深声速剖面的重构。

1 声速剖面 EOF 表示原理

1.1 声速剖面 EOF 分解

经验正交函数分析方法也称特征向量分析或主成分分析,是分析矩阵数据的特性、提取主要数据特征量的一种方法^[12]。

在某海域采集 *N* 个声速剖面: $C = [c_{(1)}, c_{(2)}, \dots, c_{(N)}]$, 内插成为 *M* 个垂直标准层, 得到声速矩阵 $C_{M \times N}$:

$$C_{M \times N} = \begin{bmatrix} c_{1(1)} & c_{2(1)} & \dots & c_{N(1)} \\ c_{1(2)} & c_{2(2)} & \dots & c_{N(2)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{1(M)} & c_{2(M)} & \dots & c_{N(M)} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, 每一列为一个声速剖面的标准层插值, 每一行为所有剖面在同一深度的声速。将 *N* 条声速剖面每一行进行平均, 得到平均声速剖面 $\bar{C}_{M \times 1}$:

$$\bar{C}_{M \times 1} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M c_{(i)}, \quad (2)$$

扩展可得平均声速矩阵 $\bar{C}_{M \times N}$, 将声速矩阵与其相减, 得到每个剖面相对于平均剖面的扰动矩阵 $\Delta C_{M \times N}$ 。

$$\Delta C_{M \times N} = C_{M \times N} - \bar{C}_{M \times N}, \quad (3)$$

扰动矩阵的协方差矩阵为:

$$R_{M \times M} = \frac{\Delta C_{M \times N} \Delta C_{M \times N}^T}{N}, \quad (4)$$

其中每个元素 r_{ij} 为:

$$r_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [c_n(z_i) - \bar{c}(z_i)][c_n(z_j) - \bar{c}(z_j)], \quad (5)$$

将 $R_{M \times M}$ 特征分解, 有:

$$R_{M \times M} F_{M \times N} = D_{M \times M} F_{M \times N}, \quad (6)$$

式中, $D_{M \times M}$ 为特征值矩阵, 令特征值 λ_i 按从大到小顺序排列:

$$D_{M \times M} = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M], \quad (7)$$

$F_{M \times N}$ 为特征值对应的特征向量矩阵, 也就是 EOF 空间函数, 可表示为:

$$F_{M \times N} = [f_{(1)}, f_{(2)}, \dots, f_{(k)}], \quad (8)$$

式中, $f_{(k)} (k = 1, 2, \dots, N)$ 为 $M \times 1$ 的列向量, 即为确定的第 *k* 阶 EOF。特征值 λ_i 对应的分量 $f_{(i)}$ 即为第 *i* 阶 EOF。特征值的大小代表了其对应 EOF 空间函数对线性空间的影响权重^[7], 即越大的特征值对应的特征向量中包含的声速重构信息越丰富。

1.2 声速剖面 EOF 重构

测区内的声速剖面完成 EOF 分解后, 利用前几阶 EOF 即可完成测区内任一声速剖面的重构:

$$c(z) = \bar{c}(z) + \sum_{i=1}^K \alpha_i f_i(z), i = 1, 2, \dots, M, \quad (9)$$

式中, $c(z)$ 为重构的声速剖面; z 为各层海水深度; $\bar{c}(z)$ 为平均声速; *K* 为 EOF 阶次; α_i 为重构系数; $f_i(z)$ 为 EOF 空间函数。移项得:

$$\Delta C_{M \times N} = C_{M \times N} - \bar{C}_{M \times N} = F_{M \times K} A_{K \times N}, \quad (10)$$

则重构系数矩阵 $A_{K \times N}$ 为:

$$A_{K \times N} = F_{M \times K}^T \Delta C_{M \times N} = [a_1, a_2, \dots, a_N]_{K \times N}, \quad (11)$$

式中, $a_i = [a_i(1), a_i(2), \dots, a_i(K)]^T$ 为每个声速剖面对应的重构系数。得到重构系数后, 即可按式(9)对测区内任一声速剖面进行 EOF 重构。

2 声速剖面 EOF 重构的数据采样深度选取方法

本文给出了用于声速剖面 EOF 重构的数据采样深度选取的方法步骤。算法流程图见图 1, 详细步骤和说明如下:

(1) 从中国 Argo 实时资料中心 (<http://www.argo.org.cn/>) 获取某海域温盐压数据, 预处理后利用声速经验公式计算得到采样位置处的声速剖面。目前国内外较为认可的声速经验公式有 Chen-Millero, Wilson, Del Grosso 及 Leroy 等, 各模型的温度、盐度、压力的适用范围有所差异。根据文献^[13]的研究, Del Grosso, Chen-Millero, C.C.Leroy、Coppens 四个经验声速模型在全球海域具有较高的精度及适用性, 文献^[14]指出, 在 350~1 000 m 的深度上, Chen-Millero 公式的误差最小, 因此本文选用 Chen-Millero 声速经验公式计算的声速剖面作为样本声速剖面, 利用 Akima 插值^[15]将声速剖面数据内插到垂直标准层。

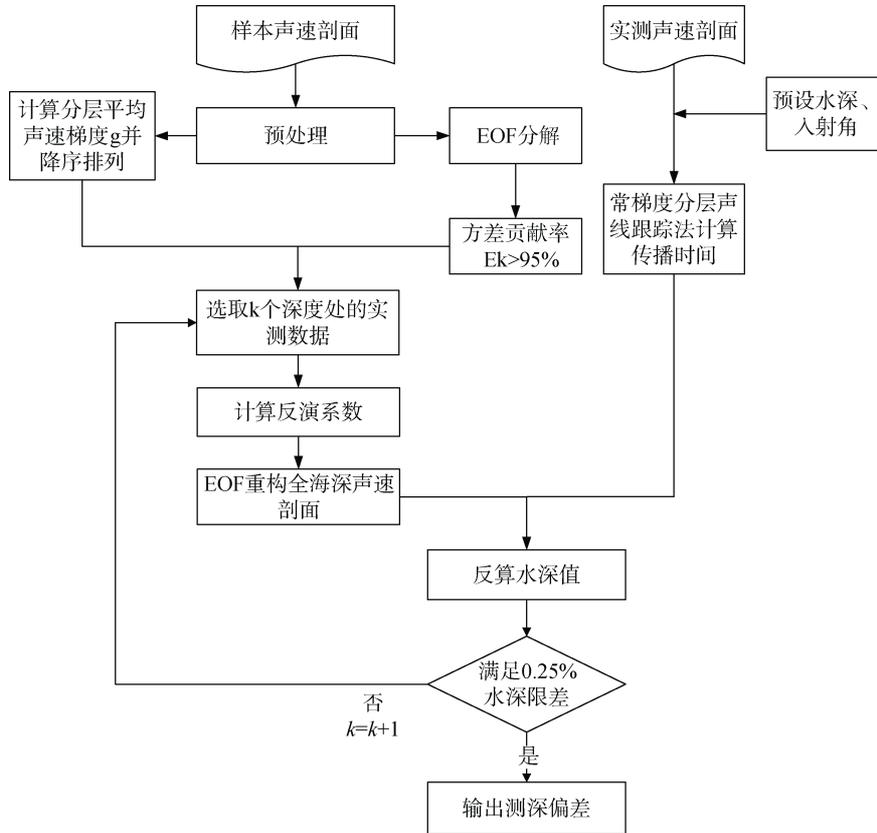


图1 声速剖面 EOF 重构的数据采样深度选取算法流程图
Fig. 1 Algorithm flowchart of data sampling depth selection for SSP EOF reconstruction

(2) 按照 1.1 节中的方法进行 EOF 分解, 提取 EOF 函数, 计算各阶 EOF 的方差贡献率和累计方差贡献率。方差贡献率^[16]指的是每一阶 EOF 包含声速场信息的百分比。其计算公式为:

$$\sigma_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^M \lambda_i} \times 100\%, \quad (12)$$

式中, σ_i 表示第 i 阶方差贡献率, λ_i 表示协方差矩阵 R 经降序排列后的第 i 个特征值。

前 K 阶 EOF 对区域的累计贡献率可表示为:

$$w(K) = \frac{\sum_{i=1}^K \lambda_i}{\sum_{j=1}^M \lambda_j}, \quad (13)$$

一般地, 如果 $w(K)$ 的值大于等于 95%, 则认为利用前 K 阶 EOF 能较好的表示该区域的主要信息^[5]。

(3) 计算测区内每一声速剖面每一深度层的声速梯度, 然后计算平均分层声速梯度:

$$G_{i,n} = \frac{c_{i+1,n} - c_{i,n}}{z_{i+1,n} - z_{i,n}}, \quad (14)$$

$$\bar{G}_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N G_{i,n}, \quad (15)$$

式中, $c_{i,n}$ 和 $c_{i+1,n}$ 分别表示第 n 条声速剖面第 i 层和第 $i+1$ 层的声速值, z_{i+1} 和 $z_{i+1,n}$ 分别表示第 n 条声速剖面第 i 层和第 $i+1$ 层的深度值。按照平均分层声速梯度由大到小, 对声速层进行降序排列, 形成新的声速层矩阵。

(4) 从新构建的声速层矩阵中选取 K 个深度处的声速值(即选取 K 个声速变化最剧烈处的声速值), 结合 K 阶 EOF 计算得到重构系数矩阵 $A_{K \times N}$, 重构全海深声速剖面。

(5) 基于实测声速剖面, 预设水深值 H 和初始入射角, 根据分层常梯度声线跟踪法^[2], 以 H 作为约束迭代计算声波的传播时间 T :

$$T = \sum_{i=1}^{Y-1} \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{pg_i^2 \Delta z_i} \ln \left[\frac{c_{i+1}}{c_i} \right], \quad (16)$$

式中, Y 表示实测声速剖面的层数, θ_i 和 θ_{i+1} 分别表示实测剖面第 i 层和第 $i+1$ 层的入射角, g_i 表示实测剖面第 i 层的梯度, c_i 和 c_{i+1} 分别表示实测剖面第 i 层和第 $i+1$ 层的声速, Δz_i 表示第 i 层的深度差。 p 为 Snell 系数:

$$p = \frac{\sin \theta_i}{C_i} = \frac{\sin \theta_{i+1}}{C_{i+1}}. \quad (17)$$

(6) 用重构的声速剖面 and T 反算波束水深值^[6] H' 。声波在重构的声速剖面第 i 层的传播时间 t_i 为:

$$t_i = \frac{\theta'_{i+1} - \theta'_i}{pg_i^2 \Delta z_i} \ln \left[\frac{c'_{i+1}}{c'_i} \right], \quad (18)$$

式中, θ'_i 和 θ'_{i+1} 分别表示重构声速剖面第 i 层和第 $i+1$ 层的入射角, g'_i 表示重构剖面第 i 层的梯度, c'_i 和 c'_{i+1} 分别表示重构剖面第 i 层和第 $i+1$ 层的声速。

$$T - \sum_{i=1}^J t_i = 0, \quad (19)$$

式中, J 表示使等式成立的 t_i 的个数。所以:

$$H' = \sum_{i=1}^J \Delta z_i. \quad (20)$$

(7) 计算测深误差 σ :

$$\sigma = \frac{|H - H'|}{H} \times 100\%. \quad (21)$$

定义有效波束比为满足深度限差的波束占总波束的比率^[17], 首先统计满足 0.25% 水深限差要求的波束数, 然后判断多波束测深的有效波束比是否达到 100%, 如果是, 则输出测深偏差, 实验结束, 反之, 则将选取阶数 K 加 1, 重新完成重构系数矩阵的计算以及之后的步骤, 直至符合满足测深精度的要求。

3 实验分析

实验数据源于中国 Argo 资料实时中心发布的《全球 Argo 浮标剖面观测资料质量再控制数据集》^[18], 选取 2006—2009 年每年 1 月份的 Argo 浮标数据。将 153.5°W—155°W, 27.5°N—29°N 的海区作为区域 1; 153.5°W—155.5°W, 22.5°N—24.5°N 的海区作为区域 2。去除不合格的剖面后, 区域 1 选取了 18 个剖面, 区域 2 选取了 15 个剖面。

典型深海声速剖面结构如图 2 所示^[2], 主要划分为三部分: 混合层(由表面层和季节跃变层构成)、主跃层和深海等温层。其中, 声速在混合层和主跃层的变化情况复杂, 而在深海等温层中, 声速随深度的增加呈趋势稳定的正梯度增加, 接近线性变化。因此本文重点对混合层和主跃层这两部分声速变化情况更为复杂的水层的声速剖面进行研究, 统一截取海面至海深 1 000 m 的深度之间作为本次实验的剖面范围。

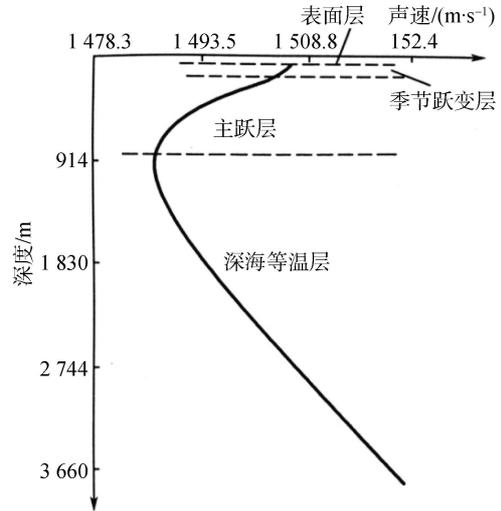
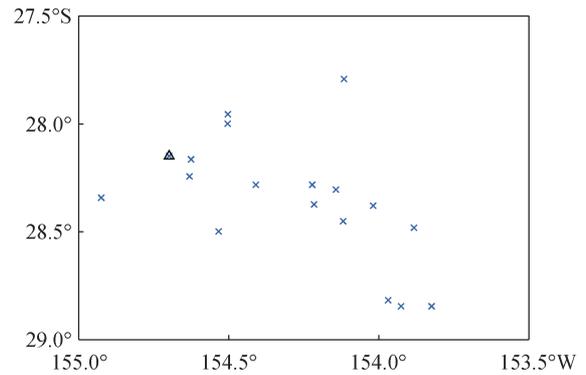


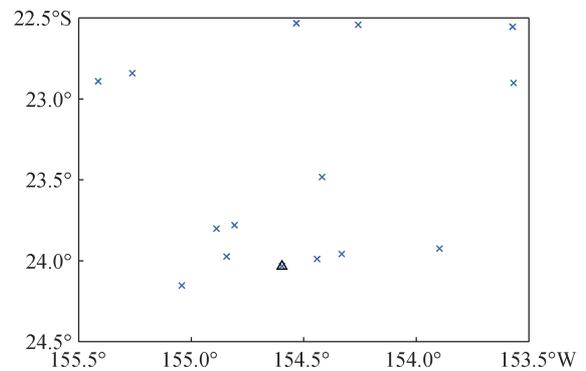
图 2 深海典型声速剖面图

Fig. 2 Typical deep-sea sound speed profile

随机选取区域内 1 条剖面用作检核重构精度, 其余剖面作为已知剖面数据。实验区域内的 Argo 剖面浮标分布如图 3(a)和(b)所示, 图中“×”点代表已知的样本剖面, “▲”代表用于检核的剖面。



(a) 区域1内的浮标分布情况



(b) 区域2内的浮标分布状况

图 3 实验海域内浮标剖面分布图

Fig. 3 Distribution map of the buoy profiles in the experimental sea area

3.1 数据预处理

(1) Argo 剖面浮标测量的是海水的温度、盐度和压力数据, 采用 Chen-Millero 声速经验公式^[19]计算得到相应深度处的声速值:

$$c = c_w(T, P) + c_c(T, P) + A(T, P)S + B(T, P)S^{3/2} + D(P)S^2, \quad (22)$$

式中,

$$A(T, P) = 1.389 - 1.262 \times 10^{-5} T + 7.164 \times 10^{-5} T^2 + 2.006 \times 10^{-6} T^3 - 3.21 \times 10^{-8} T^4 + (9.474 2 \times 10^{-5} - 1.258 0 \times 10^{-5} T - 6.488 5 \times 10^{-8} T^2 + 1.050 7 \times 10^{-5} T^3 - 2.012 2 \times 10^{-10} T^4) P + (-3.906 4 \times 10^{-7} + 9.104 1 \times 10^{-9} T - 1.600 2 \times 10^{-10} T^2 + 7.988 \times 10^{-12} T^3) P^2 + (1.100 \times 10^{-10} + 6.649 \times 10^{-12} T - 3.389 \times 10^{-13} T^2) P^3,$$

$$c_w(T, P) = 1402.388 + 5.037 1 T - 5.808 52 \times 10^{-2} T^2 + 3.342 \times 10^{-4} T^3 - 1.478 \times 10^{-6} T^4 + 3.146 4 \times 10^{-9} T^5 + (0.153 563 + 6.898 2 \times 10^{-4} T - 8.178 8 \times 10^{-6} T^2 + 1.362 1 \times 10^{-7} T^3 - 6.118 5 \times 10^{-10} T^4) P + (3.126 \times 10^{-5} - 1.710 7 \times 10^{-6} T + 2.592 7 \times 10^{-8} T^2 - 2.533 5 \times 10^{-10} T^3 + 1.040 5 \times 10^{-12} T^4) P^2 + (-9.772 9 \times 10^{-9} + 3.850 4 \times 10^{-10} T - 2.364 3 \times 10^{-12} T^2) P^3,$$

$$c_c(T, P) = (0.002 9 - 2.19 \times 10^{-4} T + 1.4 \times 10^{-5} T^2) P + (-4.76 \times 10^{-6} + 3.47 \times 10^{-7} T - 2.59 \times 10^{-8} T^2) P^2 + 2.68 \times 10^{-9} P^3,$$

$$B(T, P) = -1.922 \times 10^{-2} - 4.42 \times 10^{-5} T + (7.363 7 \times 10^{-5} + 1.794 5 \times 10^{-7}) P,$$

$$D(P) = 1.727 \times 10^{-3} - 7.983 6 \times 10^{-6} P,$$

其中, T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; S 为盐度; P 为压力, bar。

(2) 将计算得到的声速数据利用 Akima 插值函

数内插成 1 m 的等间距标准层。样本声速剖面结构如图 4。

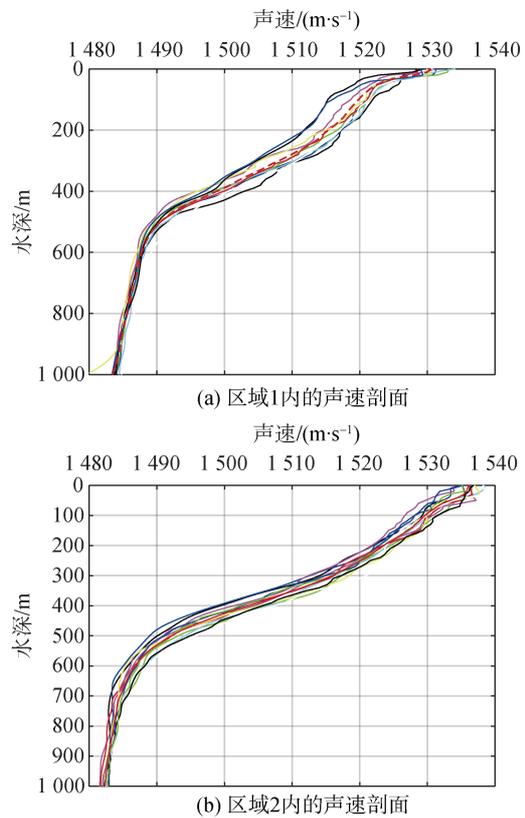


图 4 声速剖面结构示意图
Fig. 4 Schematic diagrams of SSP

3.2 确定参与重构的数据深度及声速值

分别对两个区域的样本声速剖面进行 EOF 分解, 得到测区 EOF 空间函数的方差贡献率和累计方差贡献率, 如表 1 所示。可以看出, 在区域 1 中, 前 5 阶 EOF 的累计方差贡献率可达 97.985%, 在区域 2 中, 前 5 阶 EOF 的累计方差贡献率达 95.813%, 均已大于 95%, 因此利用前 5 阶 EOF 能够较好的表示当前区域的主要信息。

表 1 声速剖面不同阶次 EOF 方差贡献率

Tab. 1 Variance contribution rate of the different order EOF of the SSP

EOF 阶次	区域 1		区域 2	
	方差贡献率/%	方差累计贡献率/%	方差贡献率/%	方差累计贡献率/%
1	76.973	76.973	75.057	75.057
2	11.387	88.359	10.058	85.115
3	4.030	92.390	5.121	90.236
4	2.775	94.164	2.905	93.141
5	1.821	97.985	2.672	95.813

图 5 给出的是由两个实验海域内的样本声速剖面提取的 1~5 阶 EOF, 可以明显看出, 第 1 阶 EOF 空间函数的变化较小, 整体呈趋势稳定, 这表明前几阶 EOF 中包含了实验海域内的声速场的主要信息, 而 2~5 阶 EOF 空间函数的变化明显, 变化集中在浅层区

域, 尤其是在越靠后的阶次中, 这反映了声速场相对于平均 SSP 的细节变化^[7]。

计算每个样本声速剖面每层的梯度变化情况, 得到该区域的平均分层声速梯度及对应的深度位置, 按照平均分层声速梯度由大到小对声速层降序

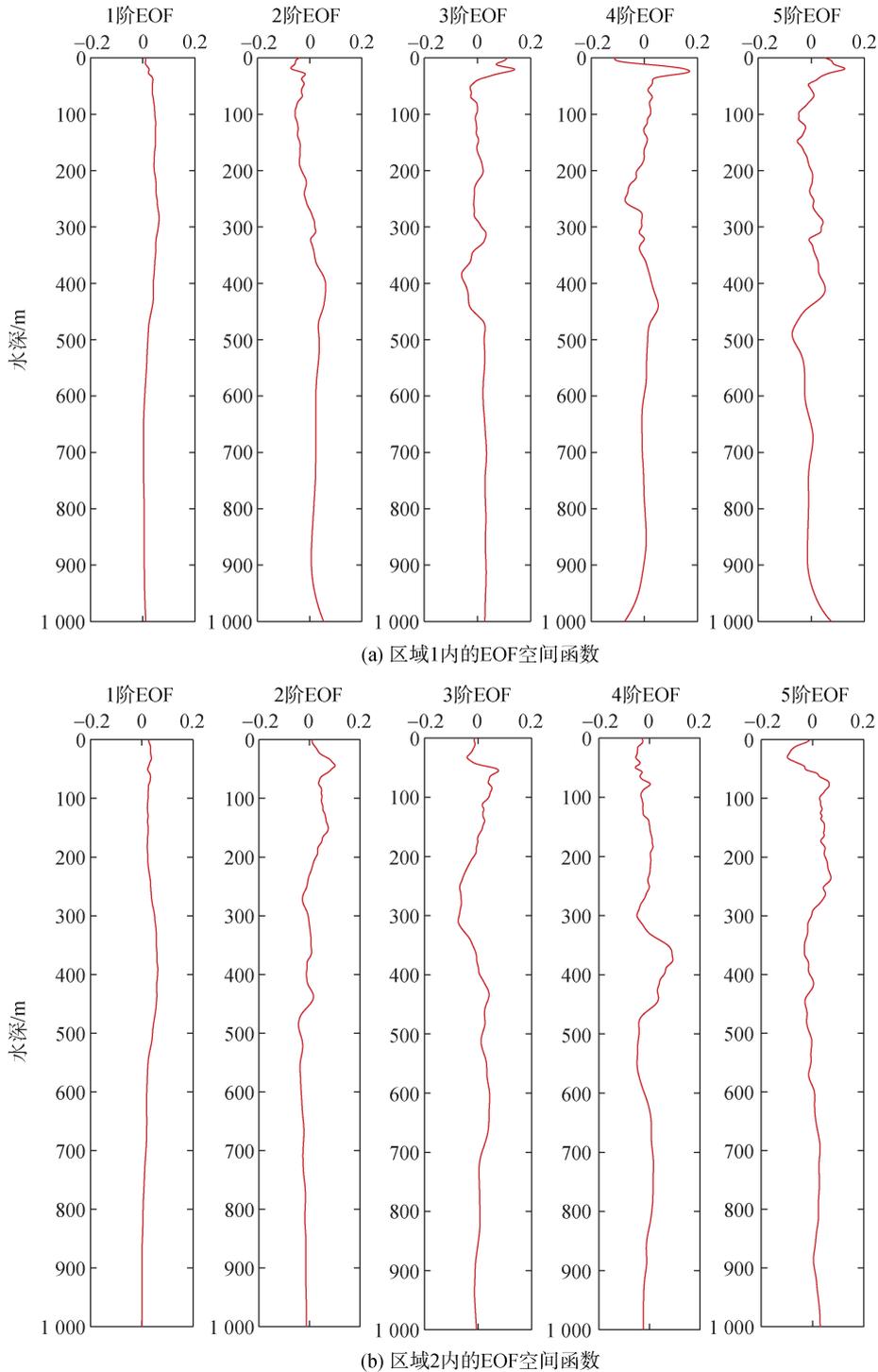


图 5 1~5 阶 EOF 空间函数
Fig. 5 1~5 order EOFs

排列, 自上而下选取 5 个深度处的声速值, 选取结果如表 2 所示。

表 2 选取的深度及声速

Tab. 2 Selected depths and sound speed values

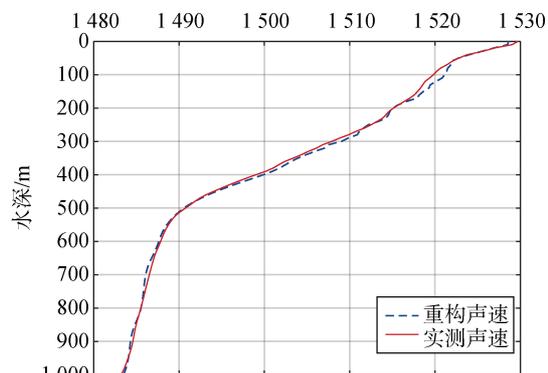
序号	平均分层声速梯度	深度/m	声速/(m·s ⁻¹)	
1	区域 1	0.320	23	1 526.734
	区域 2	0.150	394	1 507.895
2	区域 1	0.317	22	1 526.586
	区域 2	0.150	393	1 507.774
3	区域 1	0.315	24	1 526.444
	区域 2	0.150	392	1 507.650
4	区域 1	0.306	21	1 526.305
	区域 2	0.150	395	1 507.523
5	区域 1	0.301	25	1 526.170
	区域 2	0.149	391	1 507.392

3.3 声速剖面重构

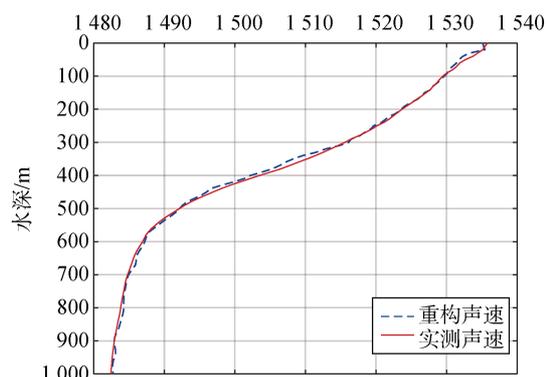
选取表 2 提取的声速值计算重构系数矩阵, 进而重构全海深声速剖面。两个实验海域内声速剖面的重构结果如图 6 所示, 重构误差如图 7 所示, 区域 1 的均方根误差为 0.514 m/s, 区域 2 的均方根误差为 0.609 m/s。可以看出: 重构声速剖面与实测声速剖面整体符合程度较好; 在两个区域的浅层部分, 尤其是区域 1 的 100 m 深度附近和区域 2 的 350 m 深度附近, 重构声速剖面与实测声速剖面有明显出入, 这可能是由于只选取了前几阶的 EOF 空间函数进行重构, 部分阶次的 EOF 空间函数并不能包含测区声速场的全部信息, 造成了部分信息的损失, 因而出现了一定的偏差。此外, 以 500 m 水深作为分界, 深层部分的声速剖面重构结果较为稳定, 整体的重构误差较小; 浅层部分的声速剖面重构结果相比较差, 造成该现象的原因可能是浅层部分的海水包含混合层和主跃层, 海洋要素在其中的变化情况复杂, 而在深层海水中已趋于稳定。

3.4 多波束测深检验

在多波束测深中, 利用 EOF 重构的声速剖面最终都要应用于声线改正。因此对于利用重构的声速剖面进行声线改正能否满足实际应用的要求, 还需要作进一步的检验。美国国家海洋与大气局(national oceanic and atmospheric administration, NOAA)对声速剖面引起的水深误差规定^[20]: “若使用的声速剖面与实际声速剖面对测深改正造成的互差超过 0.25%



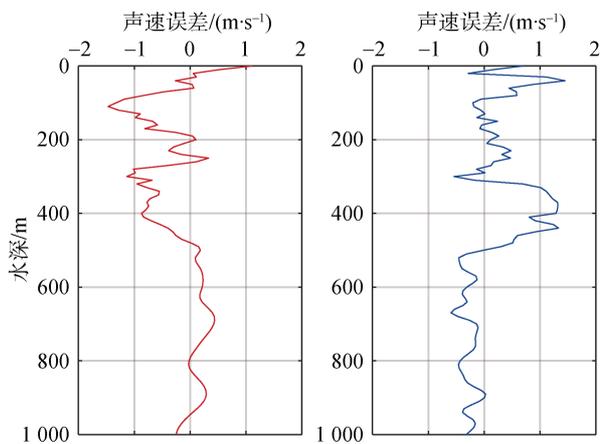
(a) 区域1的重构声速剖面
声速/(m·s⁻¹)



(b) 区域2的重构声速剖面
声速/(m·s⁻¹)

图 6 重构的声速剖面

Fig. 6 Reconstructed SSP



(a) 区域1声速剖面重构误差 (b) 区域2声速剖面重构误差

图 7 声速剖面重构误差

Fig. 7 Error of reconstructed SSP

水深则视为超限”。本文实验以 NOAA 的测深限差作为检验声速剖面重构精度的标准, 并结合有效波束比来判断利用 EOF 重构声速剖面的有效性。设置水深和波束的初始入射角, 基于实测声速剖面, 分层常梯度声线跟踪波束的往返时间, 利用该时间与重

构的声速剖面再通过分层常梯度声线跟踪法反算水深,并与真实水深值进行对比,比较两者差值是否满足 0.25%水深限差,最后统计有效波束比。

表 3 为使用两侧区域重构的声速剖面进行多波束测深的结果,可以看出,使用重构的声速剖面进行声速改正得到的各波束点水深均符合限差要求,有效波束比均达到了 100%。

表 3 重构声速剖面的最大偏差和有效波束比
Tab. 3 Maximum deviations and effective beam ratios of the reconstructed SSPs

实验区域	最大偏差/m	有效波束比/%
区域 1	1.791	100
区域 2	1.480	100

4 结论

本文对重构全海深声速剖面所需实测数据的采样深度进行了研究,实验证明在对历史声速剖面资料进行分析后,按照 K 阶 EOF 函数方差累计贡献率大于 95%,选取 K 个最大平均分层声速梯度处的声速值作为已知值,重构的声速剖面能够满足 NOAA 对多波束测量声速剖面造成的误差要求,为实际测量作业中声剖数据的采样深度提供了参考,提高了工作效率。由于海洋声速易受各种环境复杂性的影响,因此其他海区的选取阶次及深度会有所不同,但本文介绍的方法和所得规律性结论具有一定的普适性。

参考文献:

[1] 赵建虎. 现代海洋测绘[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2012.
ZHAO Jianhu. Modern ocean mapping[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2012.

[2] 刘伯胜, 雷家煜, 刘波声. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
LIU Bosheng, LEI Jiayu, LIU Bosheng. Hydroacoustics principle[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010.

[3] 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.
ZHAO Jianhu, LIU Jingnan. Multi-beam sounding and image data processing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008.

[4] 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.

[5] DAVIS R E. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean[J]. J.phys.oceanogr, 1976, 6(3): 249-266.

[6] 孙文川, 暴景阳, 金绍华, 等. 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.
SUN Wenchuan, BAO Jingyang, JIN Shaohua, et al. Study on the effect of sound velocity profile EOF on multi-beam water depth data[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2014, 34(6): 21-24.

[7] 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.
ZHANG Zhiwei, BAO Jingyang, LIN Jianju. Multi-beam measurement sound velocity profile EOF for order selection study[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2017, 37(5): 17-21.

[8] 张镇迈, 李整林, 戴琼兴. 利用有限深度声速数据重构全海深声速剖面[J]. 声学技术, 2008, 27(5): 106-107.
ZHANG Zhenmai, LI Zhenglin, DAI Qiongxing. Sound speed profile reconstruction from the data measured in a limit depth[J]. Technical Acoustics, 2008, 27(2): 106-107.

[9] 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.
ZHANG Xiaoshou, ZHOU Xinghua, TANG Qihua, et al. Analysis on correction of deep water multi-beam sound velocity profiles reconstructed by EOF[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(01): 34-43.

[10] 李洪超, 赵柯柯, 师军良. 基于 EOF 的 ARGO 浮标声速剖面重构[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2017, 29(2): 32-35.
LI Hongchao, ZHAO Keke, SHI Junliang. Modeling three-dimensional acoustic field in the ocean by using Argo and EOF[J]. Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute, 2017, 29(2): 32-35.

[11] 张维, 黄益旺, 王延意, 等. 利用残缺样本声速重构声速剖面[J]. 声学技术, 2012, 31(4): 371-374.
ZHANG Wei, HUANG Yiwang, WANG Yanyi, et al. Sound speed profile reconstruction from incomplete sample data[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(4): 371-374.

[12] 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.
DING Jisheng, ZHOU Xinghua, TANG Qihua, 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.

[13] 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.
- HUANG Chenhu, ZHOU Fengnian, SHEN Jiashuang, 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.
- [14] 吴碧, 陈长安, 林龙. 多种声速经验公式的比较分析研究[J]. 声学技术, 2013: 32(5): 296-298.
- WU Bi, CHEN Chang-an, LIN Long. Research and comparison of multiple empirical equations for sound velocity[J]. Technical Acoustics, 2013: 32(5): 296-298.
- [15] 谢骏, 胡均川, 笄良龙, 等. 浅海声速剖面自动分类方法研究[J]. 海洋通报, 2009, 28(3): 76-80.
- XIE Jun, HU Junchuan, DA Lianglong, et al. Study on automatic classification methodology of sound speed profile in the shallow sea[J]. Marine Science Bulletin, 2009, 28(3): 76-80.
- [16] 张伟涛, 张韧, 王辉瓚, 等. 基于 Argo 观测资料的南海北部海域声速场时空特征分析[J]. 海洋通报, 2013, 32(3): 275-280.
- ZHANG Weitao, ZHANG Ren, WANG Huizan, et al. Temporal and spatial characteristics of sound velocity field in the northern South China Sea based on Argo observation data[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(3): 275-280.
- [17] 朱小辰. 多波束测深数据处理关键模型及应用研究[D]. 大连: 海军大连舰艇学院, 2011.
- ZHU Xiaochen. Research on key model and application of multi-beam sounding data processing[D]. Dalian: Naval Dalian Ship Academy, 2011.
- [18] 王辉赞, 张韧, 王桂华, 等. 全球 Argo 浮标剖面观测资料质量再控制数据集用户手册. 2010. 15.
- WANG Huizan, ZHANG Ren, WANG Guihua, et al. User manual for global Argo buoy profile observation data quality control dataset. 2010. 15.
- [19] CHEN C T. Speed of sound in seawater at high pressures[J]. Acoustical Society of America Journal, 1977, 62(5): 1129-1135.
- [20] NOAA. NOS Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables[S]. 1999.

Research on the sampling depth in the EOF reconstruction of the sound speed profile

WANG Zi-heng¹, WANG Zhen-jie^{1, 2}, NIE Zhi-xi^{1, 2}, ZHANG Yuan-fan¹

(1. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Laboratory for marine Mineral Resource, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China)

Received: Jul. 11, 2020

Key words: empirical orthogonal functions; sound speed profile reconstruction; sounding accuracy; multibeam sounding; sampling depth

Abstract: Reconstructing the whole sea depth sound speed profile (SSP) at the current location can be done by performing empirical orthogonal functions (EOFs) by means of measured data and historical SSP data. Determination of the sampling depth of data is difficult. With this in mind, we introduce a way to choose the sampling depth of data according to the historical SSP data, determine the amount of data based on the variance contribution rate of the EOF spatial function, and then use the EOF algorithm in reconstructing the whole sea depth SSP. We find that the reconstructed SSP by the EOF method agrees well with the measured SSP. We also find that the depth data obtained by constant gradient sound ray tracing can meet the 0.25% depth limit set out by the National Oceanic and Atmospheric Administration and that the effective beam ratio has reached 100%, which provides a reference for the acquisition depth of the SSP data in the actual measurement operations and improves the operation efficiency.

(本文编辑: 康亦兼)