

改进型经验正交函数海洋声速剖面预报方法

韩梅, 魏亮, 周艳霞

(海军潜艇学院 海军战术水声数据中心, 山东 青岛 266071)

摘要: 鉴于深海温跃层以下往往声速值缺乏, 声速剖面不完整的原因, 提出一种声速剖面的预报方法: 在传统经验正交函数预报法基础上, 首先改进协方差矩阵的求解方法, 将原始数据的空间信息和时间信息有效地融合到协方差矩阵中, 通过由大量实测数据统计得出的时间函数的经验公式, 得到合成剖面, 将二者结合, 把不完整剖面垂直向下延拓到海底, 较为有效地解决了传统方法求解协方差矩阵和时间函数较粗糙的问题, 给出了完整的海洋声速剖面的准确预报。实测数据检验结果表明, 改进方法的预报精度比传统方法有了很大提高。

关键词: 不完整剖面; 经验正交函数; 声速剖面预报

中图分类号: P733.211

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2009)01-0030-04

海洋声场环境是决定海军作战行动成败的关键因素之一, 海洋声场规律依赖于海洋中声速剖面。由于观测条件和观测设备的局限, 某些海域已知的声速剖面并不完整, 特别是一些较深的海域, 海水底层声速值无法测量。在实际测量数据集中, 有些声速剖面的数据可能由于某种原因而丢失, 尤其是对于海水底层, 在缺乏原始数据或插值不能满足精度要求的情况下, 寻求其他方法来补充预报这些不完整剖面是一个亟待解决的问题。

Davis^[1]证明了在最小均方意义下, 经验正交函数(Empirical Orthogonal Functions, 简称EOF)是描述声速剖面的最有效的基函数。通常只需要 2~3 号这样的基函数就能足够精确地表达任意一个声速剖面; 沈远海等^[2]分析了在浅海中采用经验正交函数来表示声速剖面的可行性; 周士弘等^[3]探讨了采用一定阶数的经验正交函数来预报海表以下深度的声速剖面的方法, 该文指出: 利用卫星遥感或航空遥感得到的海表温度, 可根据海洋动力-热力学过程对温跃层以下一定深度内的水温进行预报, 进而可获取该深度范围内的声速分布。海洋卫星遥感技术的发展为海洋观测和研究提供了大量的海洋资料数据集, 由此若能对跃变层以下深度声速值的进行有效的预报, 必将对我国海洋环境资料和数据库建设的完备性产生积极影响。但是在利用传统的经验正交函数分解来预报声速剖面时, 不但协方差矩阵的求解显得比较粗糙, 而且只能依据完整的声速

剖面最小二乘拟合来计算时间函数值, 无法利用温跃层深度内声速值已知的不完整剖面。

作者在传统EOF预报方法基础之上, 借鉴美国模块化海洋数据同化系统(MODAS)中提出的温度盐度剖面延拓的经验方法^[4], 提出了一种跃变层以下深度声速值缺乏情况下不完整剖面的预报方法, 利用中国某海域南森站数据进行验证的结果表明, 该方法可使该类声速剖面的预报比传统经验正交函数方法更为精确, 是可行的。

1 传统EOF预报方法

若研究的海洋环境因子为声速, 假设在某个海域有 N 个已知的声速剖面样本, 每个剖面有 $k+1$ 层, 则这些对应的声速剖面可表示成矩阵形式:

$$C = \begin{bmatrix} c_1(0) & c_1(h_1) & \cdots & c_1(h_k) \\ c_2(0) & c_2(h_1) & \cdots & c_2(h_k) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ c_N(0) & c_N(h_1) & \cdots & c_N(h_k) \end{bmatrix}$$

定义 R 为 C 的协方差矩阵:

收稿日期: 2008-07-11; 修回日期: 2008-10-28

基金项目: 国防预研基金资助项目(9140A03050206TB1501, 51303020401_01); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET)

作者简介: 韩梅(1967-), 女, 山东淄博人, 副教授, 硕士, 主要从事水声环境效应技术研究; 通讯作者: 魏亮, 电话: 0532-83959463,

Email: weiliang_jm@163.com

$$r_{m,n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [c_i(z_m) - \bar{c}(z_m)] [c_i(z_n) - \bar{c}(z_n)]$$

$$m, n = 0 \cdots k$$

其特征向量 $\boldsymbol{v} = [v_0, v_1, \dots, v_k]$ 为矩阵 R 的空间函数, 考虑到为了消除多年的变化, 常用声速距平场进行分析, 任何一点的距平场可以表示为:

$$c_n(x, y, z_i) = \bar{c}(z_i) + \sum_{i=0}^k \alpha_i(x, y) v_i \quad (1)$$

上式是由 $k+1$ 个未知数、 $k+1$ 个线性方程组成的, 因此可根据原始声速数据用最小二乘拟合出不同的位置点的 α 系数, 然后通过经验正交函数和 α 系数进行声速剖面重构。

2 改进EOF预报方法

传统的预报方法其协方差矩阵的求解没有考虑原始数据点在时间上的差别和空间上的散布对预报结果的影响, 在运用经验正交函数将声速剖面分解为空间函数和时间函数后, 利用距离预报点最近的观测点的完整声速剖面拟合出时间函数, 或者用历史数据线性回归出时间函数与时间、空间的关系, 进而求解出预报点的时间函数。显见, 前者较粗糙, 后者需大量完整连续的时间空间数据。故提出以下改进:

原始声速矩阵 C 在深度 m 与深度 n 上的协方差矩阵, 其组成元素 $r_{i,m,n}$:

$$r_{i,m,n} = \frac{\sum_{j=1}^N b_{i,j(m,n)} (C_{j,m} - \bar{C}_{i,m})(C_{j,n} - \bar{C}_{i,n}) / (\sigma_{i,m} \sigma_{i,n})}{\sum_{j=1}^N b_{i,j(m,n)}} \quad (2)$$

式中 $\sigma_{i,m}$ $\sigma_{i,n}$ 由 (3) 式确定:

$$\sigma_{i,k} = \left[\sum_{j=1}^N b_{i,j} (C_{j,k} - \bar{C}_{i,k}) / \sum_{j=1}^N b_{i,j} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$\bar{C}_{i,m}$ 和 $\bar{C}_{i,n}$ 分别是分析位置点 i 在深度 m 和 n 处的加权平均值, 用 (4) 式计算:

$$\bar{C}_{i,k} = \sum_{j=1}^N b_{i,j} C_{j,k} / \sum_{j=1}^N b_{i,j} \quad (4)$$

其中 $b_{i,j}$ 是位置点 i 和 j 之间的相关性系数:
 $b_{i,j} = \exp\{-[(x_i - x_j)/L_x]^2 - [(y_i - y_j)/L_y]^2 - [(t_i - t_j)/L_t]^2\}$ (5)
 其中 x 和 y 分别表示东西和南北位置, 即经度与纬度; t 为时间, L_t 为时长, 一般为 1 000 h; L_x 和 L_y 为长度, 依据纬度 φ , 按式 (6) 计算:

$$L_x = 240000 / (0.35\varphi^2 + 300)$$

$$L_y = 240000 / (0.35\varphi^2 + 400) \quad (6)$$

L_x 和 L_y 的值在北半球最小为 300 km, 南半球最小为 500 km。为方便计算, 当

$$\sum_{j=1}^N b_{i,j} < 1.2 \text{ 时,}$$

$r_{m,n}$ 设为 0, 依据特征值绝对值大小由大到小选出较大绝对值所对应的特征向量, 用绝对值最大的特征值对应特征向量 \boldsymbol{e}_k 作为 EOF 分解的空间函数, 得到合成剖面如 (7) 式:

$$C_{j,k}^{\text{syn}} = \bar{C}_{i,k} + \alpha_j \boldsymbol{e}_k \quad (7)$$

其中 α_j 为最大特征向量 \boldsymbol{e}_k 的权值, 即 EOF 分解的时间函数, 由 (8) 式确定:

$$\alpha_j = \sum_{k=1}^{M_j} w_k [\boldsymbol{e}_k (C_{j,k} - \bar{C}_{i,k})] / \sum_{k=1}^{M_j} w_k \quad (8)$$

其中 M_j 为不完整剖面最大层数, 权数 w 用于加强较深处预报值与观测值之间的匹配程度:

$$w_k = (z_k - z_{k-1})^{1/4}, k = 1, \dots, M_j, w_1 = w_2 \quad (9)$$

完整的声速剖面通过把各个声速剖面拼接到含有参数 k 最大值的完整剖面上得到。

$$C_k = C_k^{\text{syn}} + [C_{k \text{ max}} - C_{k \text{ max}}^{\text{syn}}] \exp[-(z_k - z_{k \text{ max}}) / L_z] \quad (10)$$

$$z_k > z_{k \text{ max}}$$

其中 L_z 为垂直长度标准, 设为 200 m。

3 实验及结果分析

数据来源: 南森站, 海区范围: 22°~22°30'N, 123°~123°30'E, 时间: 7 月份, 深度范围 0~2 500 m, 选取 9 组 31 个标准层剖面数据, 取样本数 $N=8$, 第 9 组作为检测数据。

从图 1 的原始声速剖面可以看出, 所选取的声速剖面比较均匀, 该海区声道轴深度在 1000 m 左右, 且声道轴以下较为稳定; 图 2 给出了原始剖面距平场, 从中可以看出, 在 500 m 深度处声速剖面的变化比较大。这是由于日变化及测量误差等种种因素引起的。

传统方法预报时, 空间函数采用前三阶经验正交函数, 时间函数采用距离预报点最近观测点的完整声速剖面拟合得出。图 3 给出了原始 EOF 和改进 EOF 所代表信息量占完整剖面信息的百分比, 从图 3 中可以看出, 三阶 EOFs 所代表的信息量从原来的 92.03% 提高到 95.33%, 空间函数所代表的信息量占完整剖面信息的百分比均有较大提高。

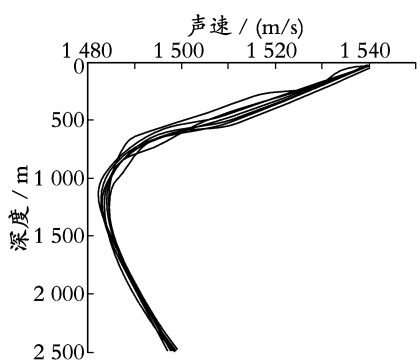


图1 原始声速剖面图

Fig.1 The original sound speed profile

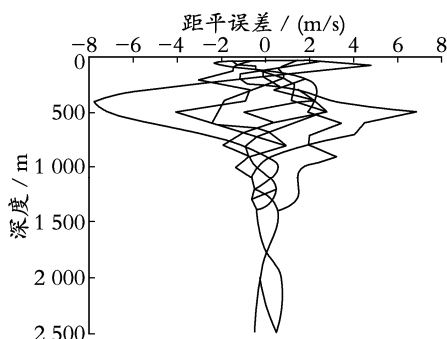


图2 原始剖面的距平场

Fig.2 The differences between original sound speed profile and average profile

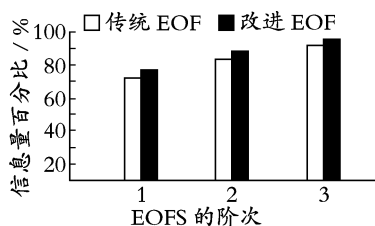


图3 前三阶经验正交函数所代表的信息量

Fig.3 The information contained by the first three EOFs

为检验改进模型,以预报第九个剖面 800 m 以下深度的声速值进行实验,并与原始剖面相比较,结果如图 4 和图 5 所示。图 4 的预报结果表明,改进后 EOF 预报结果明显优于传统的 EOF 预报结果。经计算,预报的误差均方差从原始的 2.6444 降低为现在的 1.6733, 同比降低了 36.7%, 效果明显;图 5 给出了运用原始 EOF 和经改进后的 EOF 预报检

测数据的绝对误差,可见改进的 EOF 预报在各个水层面上的标准差绝对值均小于传统方法,且其最大预报误差不到 0.8 m/s, 预报精度与传统方法相比明显提高。

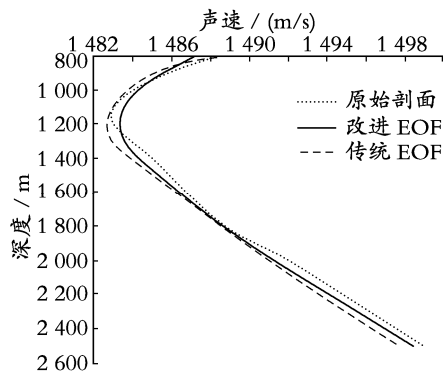


图4 两种方法的预报结果

Fig.4 The results of the two forecast methods

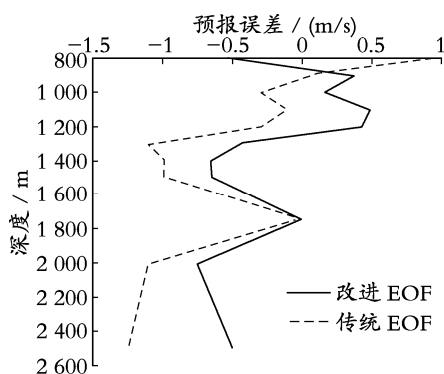


图5 两种方法的预报误差

Fig.5 The errors of the two forecast methods

综观改进的 EOF 方法预报声速剖面整个过程,改进主要体现在以下几个方面:(1)传统的 EOF 方法中,协方差矩阵没有考虑原始资料位置点和时间上的差别对空间函数求解的影响。(2)传统方法中,时间函数只能近似利用距离预报点最近的完整剖面用最小二乘法拟合得出,而改进的 EOF 方法,则依据大量实验数据得出的经验公式,更具代表性和适用性。(3)改进的 EOF 方法有一个依据不完整剖面向跃变层以下延拓的过程,而传统方法无法利用声速值已知的不完整剖面。

4 结论

作者利用实测数据,采用两种方法预报出检测

位置点的声速剖面，并与检测剖面相比较，得到以下结论：（1）在协方差矩阵中体现原始数据的时间和位置信息，对空间函数所代表信息量的提高有着重要的影响。（2）空间函数在一定时空范围内是稳定的，时间函数的预报精度直接影响整个声速剖面的预报效果。（3）改进后声速剖面预报方法比传统方法更为精确，是可行的。

参考文献：

[1] Davis R G. Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific

Ocean.[J] *Phys Ocean*, 1976, 6: 249-266.

[2] 沈远海, 马远良, 屠庆平, 等. 浅水声速剖面用经验正交函数表示的可行性研究[J].应用声学, 1999, **18**(2): 1-7.

[3] 周士弘, 张茂有, 周曰鹏. 海洋声速场的经验正交函数描述及声速剖面预报[J].海洋通报, 1999, **18**(5): 27-34.

[4] Fox D N, Teague W J, Barron C N, *et al* , The modular ocean data assimilation system (MODAS)[J].*Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*,2001,**19**(7): 240-252.

An improved empirical orthogonal functions (EOF) on the forecast of ocean sound speed profile

HAN Mei, WEI Liang, ZHOU Yan-xia

(Underwater Acoustics Center, Navy Submarine Academy, Qingdao 266071, China)

Received: Jul., 11, 2008

Key words: short speed profile; empirical orthogonal functions(EOF); prediction of sound speed profile

Abstract: Based on empirical orthogonal functions(EOF), the article gave a prediction method of sound speed profile, the depth of which is below the thermocline. First, it improved the method to get the solution of covariance matrix and mix the position information of the original data and the time information together into the covariance matrix; and then, gave several empirical time function formulas calculated with a lot of real statistics. It could predict the acoustic speed profile. Compared with the traditional prediction method with the real statistics, the precision of the improved method could make a better improvement than the prediction that used the traditional EOF.

(本文编辑: 刘珊珊)