

基于 Argo 数据的北太平洋 声速剖面研究

· 论文 ·

南明星¹, 段睿²

(1. 解放军海洋环境专项办公室, 北京 100081; 2. 西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

【摘要】利用 Argo 实测数据分析了经验正交函数方法的估计精度随函数阶数和海域的变化规律。结果表明, 拟合精度由于受北太平洋环流影响, 在高纬度地区海流环境比较稳定, 拟合精度高, 而在海流交汇处, 声速剖面变化剧烈, 拟合精度低。此外, 还分析了深海声道轴与表层海水声速极大值的分布特征。

【关键词】北太平洋; 声速剖面; 经验正交函数; 声道轴

【中图分类号】O427

【文献标志码】A

Research on the Sound Speed Profile in the North Pacific Ocean Using the Argo Data

NAN Mingxing¹, DUAN Rui²

(1. Navy Marine Environment Office, Beijing 100081, China; 2. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

【Abstract】In this paper, the Argo data is used to analyze the fitting precision of the EOF method versus the EOF order and the location of the ocean. The results show that the circulation has strong effect on the fitting precision. At the high latitude, where the water is stable relatively, the fitting precision is high. In contrast, at the oceans with meeting of the currents, the fitting precision is rather low. Besides, the spatio-temporal distributions of the depth of the deep sound channel axis and the depth of the maximum sound speed at the vicinity of the sea surface are also presented.

【Key words】North Pacific Ocean; sound speed profile; empirical orthogonal function; deep sound channel

1 引言

海洋声速剖面的时空变异性对声场计算的精度具有重要影响^[1-2], 因此, 水声学关注的问题, 例如声传播、声场预报、声学参数反演^[3]和水声通信^[4-5]等, 都希望得到较为准确的声速剖面。因此海洋声速剖面的时空变化特征的研究具有重要意义。张旭^[6-7]、吴培木^[8]和 Reise^[9]分别分析中国近海和菲律宾海域、中国台湾岛恒春西南海域以及太平洋、大西洋和地中海的声速剖面。张伟涛^[10]利用 Argo 实测声速剖面数据, 说明了 EOF 的前 6 个模态反映了南海北部海域声速垂直结构的时空变化特征和声速场水平分布特征。张旭^[11]通过 EOF 分析, 得出了中国台湾以东海域声速垂直结构的时空变化特征。

北太平洋位于亚洲和北美洲之间, 介于赤道与极地之间, 东面通过巴拿马运河与大西洋相连, 西面紧邻中国南海, 北至白令海峡与北冰洋相连。北太平洋平均水深 4 000 多米, 最大水深超过 9 000 米。北太平洋水温和盐度随纬度变化较大。在高纬度附近水温接近冰点, 在低纬度则大约为 25 ~ 30 ℃。海水

的含盐量则在中纬度较高, 靠近赤道雨量充足, 靠近极地则少蒸发, 所以这两处的含盐量较低。声速剖面受温度和盐度的影响较大, 所以在北太平洋海域声速剖面随纬度变化而呈现不同的特征。本文分析了北太平洋典型区域内经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, EOF) 拟合声速剖面的精度与函数阶数的关系, 并结合北太平洋的环流特征, 分析了拟合精度的地域性差异, 这对于海洋调查或军事应用中声速剖面的快速获取具有重要指导意义。

此外, 考虑到深海声道轴及表面波导可实现超远距离水声通信的重要意义, 笔者还分析了北太平洋声道轴和表层水声速极大值深度的季节和区域分布特征。深海声道轴位于声速剖面最小值处, 在声道轴以上, 声速主要受温度影响, 而在声道轴以下, 声速主要由压力决定。深海声道轴随季节变化较小, 是实现超远距离通信的重要声道, 其深度的分布对于水声通信系统的布放深度具有重要的指导意义。由于海洋表面的风力作用、热量、淡水交换 (强迫场) 等作用在海洋上层会形成性质几乎相同的水体, 称之为混合层。在混合层中, 海水性质相似, 由于压力的作用, 声速梯度

为正。大于特定频率的声波在混合层中传播时,能量集中在混合层中,几何扩展损失近似为柱面损失,因此由于混合层的存在,形成了表面波导。表面波导是实现声波远距离传播的重要声道之一,其厚度是决定声传播性能的最重要指标。表层水声速极大值深度反映了表面波导的厚度,随区域和季节变化距离,其分布对水声系统的布放深度有重要的指导意义。

2 声速剖面特征量计算的数据源

Argo 观测系统由大量布放在全球海洋中自由漂移的 Argo 剖面浮标组成。大部分浮标的停留深度为 1 000 m,每隔 10 天下潜到 2 000 m 深度并上浮至海面,并测量海水温度、电导率和压力等要素,因此 Argo 数据的时间分辨率为 10 d。国际 Argo 计划自 2000 年底正式实施,将在全球海洋中布放 3 000 个浮标,典型空间分辨率为 $3^\circ \times 3^\circ$ 。国际 Argo 计划的实施为研究太平洋海域的声速剖面结构提供了基础。利用水温、盐度和压力的 Argo 观测剖面数据,结合声速计算的公式可以得到声速剖面。本文选用了 2001 ~ 2010 年,10 年的全球 Argo 资料数据集,计算了 0 ~ 2 000 m 范围内的北太平洋声速剖面。图 1 给出了这 10 年 Argo 剖面在北太平洋的 Argo 数据分布。本文选取了 4 个典型区域进行研究,如图 1 中的标注区域。

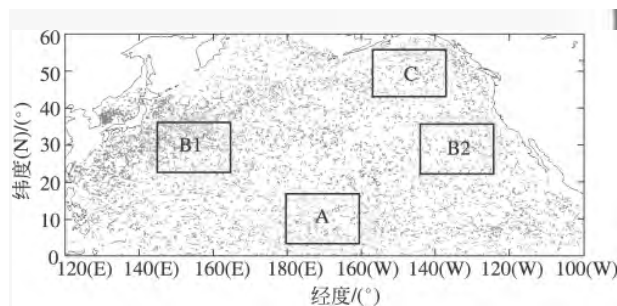


图 1 2001 年 1 月 ~ 2010 年 12 月的 Argo 数据分布

3 北太平洋声速剖面的 EOF 拟合精度分析

3.1 计算方法

EOF 分析可以用于任意海域声速剖面集合的简化。该方法可以减少声速剖面集合的维数,同时保留声速剖面集合中对方差贡献最大的特征,即保留低阶主成分,忽略高阶成分,这样就可以在保证一定精度的前提下用尽量少的参数来表示复杂的声场环境。一般选取 3 ~ 6 阶低阶主成分,就可以较为准确地表

示该海域的任意一条声速剖面,大大减少了描述声速垂直结构所需要的参数。

假设声速剖面采样间隔相等,采样深度表示为 z_i ($i=1, 2, \dots, L$),对应的声速为 $c(z_i)$,若样本总数为 N ,则 N 个声速样本可表示成矩阵形式为

$$C = \begin{bmatrix} c_1(z_1) & c_1(z_2) & \cdots & c_1(z_L) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_N(z_1) & c_N(z_2) & \cdots & c_N(z_L) \end{bmatrix} \quad (1)$$

定义 R 为 C 的协方差矩阵,其中每个元素 r_{ij} 为

$$r_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [c_n(z_i) - \bar{c}(z_i)] [c_n(z_j) - \bar{c}(z_j)] \quad (2)$$

式中: $\bar{c}(h_i)$ 为 h_i 深度上 N 个声速采样数据的平均值。将 R 做特征分解,则有

$$RG = \Delta G \quad (3)$$

式中: Δ 为特征值矩阵; G 为特征向量矩阵,可表示为

$$G = [g_1 \ g_2 \ \cdots \ g_L] \quad (4)$$

式中: g_k ($k=1, 2, \dots, L$) 为 $L \times 1$ 的列向量,即为所确定的第 k 阶经验正交函数。任意一点的声速值可以用平均声速和经验正交函数的加权和来表示,即

$$c = \bar{c} + \sum_{k=1}^L \alpha_k g_k \quad (5)$$

式中: c 为任意声速剖面; \bar{c} 为所有声速剖面样本的平均值; α_k 为对应 g_k 的 EOF 系数。对任意一个声速剖面样本,可以求得其 EOF 系数。公式可表示为

$$c - \bar{c} = G\alpha \quad (6)$$

式中: α 为 $L \times L$ 的对角矩阵,对角线元素为 α_k ,则

$$\alpha = G^{-1} [c - \bar{c}] \quad (7)$$

求得 EOF 系数后,选取若干阶系数及对应的经验正交函数,利用公式就可以得到拟合后的声速剖面。

假设一块海域,共测得 N 条声速剖面,下面给出对声速剖面进行 EOF 拟合误差分析的 5 个步骤,即:

(1) 由于 ARGO 数据并非等间距采样,因此在采样点之间采用 Akima 插值,得到 L 个等间距采样点上的声速值,并根据式(2)求得其协方差矩阵。

(2) 求出协方差矩阵的特征值和特征向量,选择特征值绝对值较大的 q 个经验正交函数,便确定了 1 ~ q 阶的经验正交函数,一般选定 $q \ll L$,式(6)则变为由 q 个未知数、 L 个线性方程组成的一个超定系统。

(3) 式(7)中 G^{-1} 表示广义逆,则可以求出前 q

个 α_k 的最小二乘解。

(4) 利用求得的 $1 \sim q$ 阶 EOF 和相应的系数 根据式(5)就可以拟合该海域的声速剖面。

(5) 对步骤(4)求得的声速剖面与实测的声速剖面进行比较,通过误差分析,便可得到 EOF 阶次的选取对声速剖面拟合精度的影响。

本文采用两种方法衡量拟合误差,分别为最大误差和均方误差。

假设拟合的声速剖面为 $c'(z)$,则沿深度方向上的最大误差 E_1 表示为

$$E_1 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \max_{n=1}^N (|c'_n(z_i) - c_n(z_i)|) \quad (8)$$

式中 $c'_n(z_i)$ 和 $c_n(z_i)$ 分别表示拟合和实测的第 n 个声速剖面在深度 z_i 处的值。沿样本方向上的最大误差 E_2 表示为

$$E_2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \max_{i=1}^L (|c'_n(z_i) - c_n(z_i)|) \quad (9)$$

沿深度方向上的均方误差 E_3 表示为

$$E_3 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [c'_n(z_i) - c_n(z_i)]^2} \quad (10)$$

沿样本方向上的均方误差 E_4 定义为

$$E_4 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L [c'_n(z_i) - c_n(z_i)]^2} \quad (11)$$

选取不同的 EOF 阶数 q ,上述(4)中误差可以衡量 EOF 拟合精度随阶数的变化。

3.2 结果与分析

根据 3.1 节中 EOF 计算方法,对北太平洋海域 4 个典型区域冬季和夏季的声速剖面进行 EOF 分析,得出 EOF 阶次的选取对声速剖面拟合精度的影响。

图 2 给出了在深度方向上最大误差均值和 RMS 均值随 EOF 阶次的时空变化规律。图 3 为沿样本方向上最大误差均值和 RMS 均值随 EOF 阶次的时空变化规律。从图 2 和图 3 可以看出,最大误差均值和 RMS 误差随 EOF 阶次的增加而减小,其季节性变化较小。区域 C 最大误差均值和 RMS 均值整体上最小,这是该区域位于高纬度海区,海流较稳定,声速剖面变化平稳,所以用若干阶 EOF 就可以表征该区域的声速变化规律。但是区域 B1 位于黑潮与亲潮交汇处,既有

大尺度环流,中尺度内波、涡旋和锋面,也有小尺度的对流等,声速剖面变化剧烈,需采用高阶 EOF 才可以刻画该海域声速剖面的变化,若采用的 EOF 阶次较少,会导致拟合的声速剖面实测值误差较大,从而造成最大误差均值和 RMS 均值较大。

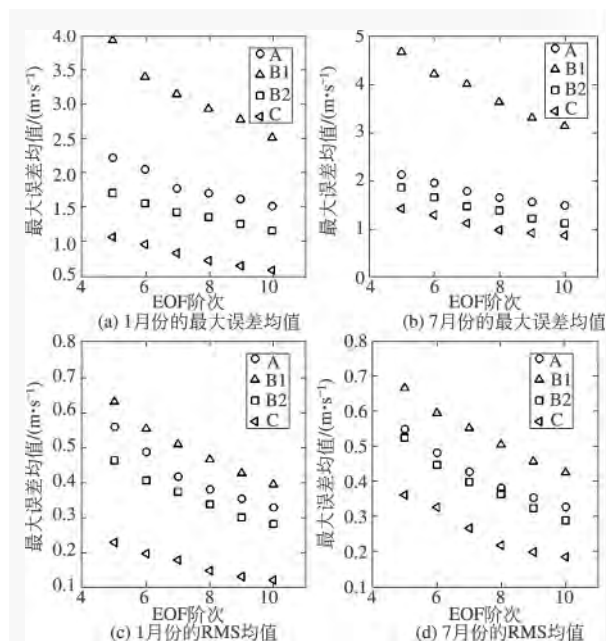


图2 沿深度方向上声速剖面拟合精度随 EOF 阶次的时空变化曲线

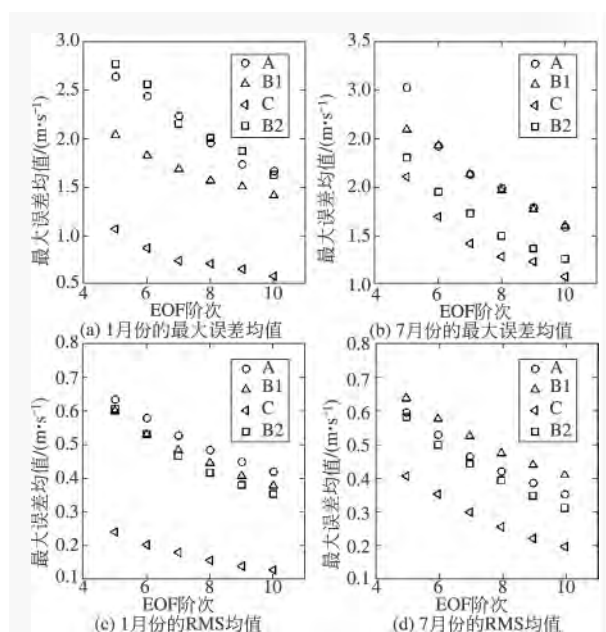


图3 沿样本方向上声速剖面拟合精度随 EOF 阶次的时空变化曲线

4 深海声道轴与表层海水声速极大值的分布特征

表1给出了北太平洋典型区域声道轴深度的平均值。从表1可以看出,深海声道轴只在A、B1和B2三个区域明显存在,其区域性和季节性变化较小,深度平均值大多集中在900~1100 m之间,区域B2相对较浅,在700 m左右,这与亚极地水随加利福尼亚流向低纬度方向散布有关。由于源自亚热带辐合带海域的高温高盐中层水团,广泛地活跃于主跃层之下到1000多米深的水层,呈现出声速正梯度变化,所以在C区域并没有形成深海声道轴。

表1 深海声道轴的时空统计值 m

月份	区域A	区域B1	区域B2	区域C
1月	998.2	974.4	698.1	—
4月	1006.4	949.8	703.3	—
7月	1004.9	955.9	693.1	—
10月	1003.6	971.4	693.9	—

表2给出了北太平洋典型区域表层海水声速极大值深度的平均值。表层海水声速极大值深度受日照、降水和径流的影响,其区域性和季节性变化明显。北太平洋海域由于夏季光照强,声速极大值深度升至海表,所以表层声速极大值深度都是夏季小于冬季的;由于大洋西海岸受西边界流的影响,雨量充沛,海水混合均匀,所以整体上声速极大值深度西部高于东部。位于热带海域的区域A全年日照平均,且远离陆地,径流影响小,故声速极大值深度季节性变化较小;位于亚热带辐合带的区域B1和B2由于是各种流的交汇区,冬季,由于表层海水温度较低,所以垂直混合加强,混合层加厚,使这三个区域的声速极大值深度整体上高于海域其他区域,特别是受亚热带模态水控制的区域B1,其声速极大值深度为整个海域的最大值;夏季由于太阳的直射,海表温度急剧升高,从而使声速极大值深度明显小于冬季,并且形成整个海区声速极大值深度的最小值区。如前所述,区域C声速随深度显著增加,声速极大值出现在深层海域。

表2 声速极大值深度的时空统计值 m

月份	区域A	区域B1	区域B2	区域C
1月	48.7	99.7	67.9	—
4月	53.4	86.2	74.6	—
7月	44.5	7.9	7.6	—
10月	32.8	20.7	23.4	—

5 结论

本文利用2001年1月~2010年12月的Argo数据,分析了北太平洋声速剖面特征量的时空分布规律,主要包括以下三个方面:

(1) EOF拟合声速剖面的最大误差均值和RMS随EOF阶次的增加而减小,其季节性变化较小。在高纬度海区,由于海流环境比较稳定,该海区声速剖面的变化比较平稳,EOF拟合误差较小;而位于黑潮与亲潮交汇处等声速剖面变化比较剧烈的海区,由于平均声速剖面与各剖面的声速差较大,从而造成EOF拟合误差较大,需采用的EOF阶次较高。

(2) 北太平洋深海声道轴深度的区域性和季节性变化较小,深度平均值大多集中在900~1100 m之间。在高纬度海区,由于源自亚热带辐合带海域的高温高盐中层水团,广泛地活跃于主跃层之下到1000多米深的水层,呈现出声速正梯度变化,所以无法形成深海声道轴。

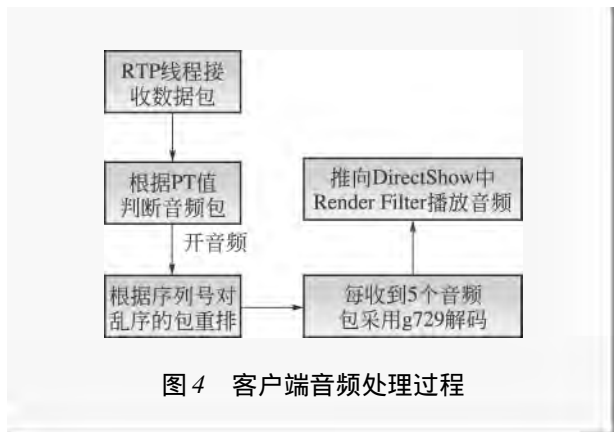
(3) 北太平洋海域由于夏季光照强,声速极大值深度靠近海表,而冬季海表温度降低,该深度下降,所以表层声速极大值深度都是夏季小于冬季的。此外,由于大洋西海岸受西边界流的影响,雨量充沛,海水混合均匀,所以整体上声速极大值深度西部高于东部。

本文的分析结果可用于指导声速剖面快速获取技术中EOF阶次的选择,以及水声通信和探测系统的布放深度。决定声速剖面的特性的其他重要参量,例如季节性跃层和主跃层,将在后续研究工作中展开。

参考文献

- [1] 张忠兵,马远良,杨坤德,等.浅海声速剖面的匹配波束反演方法[J].声学学报,2005,30(2):103-107.
- [2] CHIU L Y S, LIN Y T, CHEN C F, et al. Focused sound from three-dimensional sound propagation effects over a submarine canyon[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2011, 129(6):260-266.
- [3] 杨坤德,马远良.利用海底反射信号进行地声参数反演的的方法[J].物理学报,2009,58(3):1798-1805.
- [4] 陈新,杨益新.OFDM水声通信的水池试验验证[J].电声技术,2010,34(5):56-58.
- [5] 石鑫,刘家亮.被动时反镜在水声通信中的应用研究[J].电声技术,2010,34(4):63-66.
- [6] 张旭,张永刚,黄飞灵,等.中国近海声速剖面的模态特征[J].海洋通报,2010,29(1):29-37.

(下转第80页)



行排序。当一级缓存中包达到一定数量后每次取5个包进行g729解码并重新组成一帧数据,解码好的数据帧放入二级缓存,最终推入DirectShow中的Render Filter通过计算机的声卡播放音频。

4 系统设计成果图

音视频功能模块完成后,将ActiveX插件嵌入IE浏览器的Web客户端中实现视频播放和音频播放的功能,最终的成果是视频能够流畅地播放出来,对着设备端的传声器讲话,Web客户端也能很清晰地听到声音。Web视频监控视频模块成果图如图5所示。

5 结束语

本文提出了一种基于B/S架构的视频监控音视频模块的设计方案,音视频的播放基于Web客户端,通过视频播放主页面以ActiveX插件的形式在网页中控制音频和视频的开启和关闭。首先在网页中添加播放视频的控件,利用VS2005创建ActiveX插件,创建完成后在插件中添加方法实现音视频播放功能。音视频模块利用socket通信机制通过客户端发送请求消息给设备端,设备端收到请求后发送包含视频包和音频包的RTP包,客



图5 Web视频监控视频模块成果图(截图)

户端接收到音频包和视频包分别进行不同的处理,处理完成后推入DirectShow中第二级和第三级滤波器中进行处理,最终通过计算机的显卡和声卡分别播放视频和音频。

参考文献

- [1] 李虎,林中. 远程网络视频监控系统的设计与实现[J]. 现代电视技术, 2004(12):82-84.
- [2] 刘善魁,须文波,王晶,等. 基于B/S模式的Web应用程序的设计[J]. 无锡轻工业大学学报, 2000, 19(3): 292-295.
- [3] 毕晓玲. 基于Web的教学网页设计要点浅析[J]. 湖北民族学院学报:自然科学版, 2000, 18(3):60-63.
- [4] 查卫翔,谭南林. ActiveX控件在基于B/S结构的远程监控中的应用[J]. 北方交通大学学报, 2002, 26(1):58-62.
- [5] 陆其明. Directshow开发指南[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [6] 孙鑫,余安萍. VC++深入详解[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.

作者简介

陈晓伟, 硕士研究生, 主要研究方向为多媒体数字通信;
孟利民, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为无线通信与网络、通信信号处理、嵌入式系统。

[责任编辑]丁雪

[收稿日期]2013-11-11

(上接第64页)

- [7] 张旭,张永刚,张胜军,等. 菲律宾海的声速剖面结构特征及季节性变化[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(6):23-34.
- [8] 吴培木,郭小钢,吴日升. 台湾岛恒春西南海域声速场特性分析[J]. 海洋学报, 2002, 24(1):179-190.
- [9] REISE B, ETTER P C. Performance assessment of active sonar configuration options [C]//Proc. Undersea Defence Technology Conference. Hamburg: [s. n.], 1997:408-413.

- [10] 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.
- [11] 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.

[责任编辑]闫雯雯

[收稿日期]2013-11-26