

基于 PAADCP 的海流流速的误差分析及校正方法

郑 一¹, 岳 军¹, 纪乃华¹, 施国全², 韦俊霞²

(1. 青岛理工大学 理学院 数值计算与应用研究所, 山东 青岛 266033; 2. 杭州中船重工第七一五声学研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要: 为了更加合理、有效地利用海流测速数据, 必须进行误差分解和校正。通过分析相控阵声学多普勒海流剖面仪(PAADCP)测试海流流速的原理, 提出了海试数据粗差区别与动态校正的算法, 采用小波多尺度分析方法, 降低了系统误差和随机误差, 建立了海流流速的误差分析与校正方法。利用海试实测的垂向流速数据, 分析了一般情况下的海流流速的误差, 得到垂向流速的均值 ± 0.02 m/s, 误差精确度小于 0.23 m/s, 验证了方法的有效性及其合理性。所得算法和方法对于海流测速数据的实时处理和后处理具有实用价值。

关键词: 海流垂向流速; 误差分析; 粗差校正; 小波分析; 相控阵声学多普勒海流剖面仪(PAADCP)

中图分类号: 763.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2013)05-0081-06

与陆地测量相比, 由于海水的实时动态活动, 使得同一观测量无法进行重复观测; 又由于具有比陆地测量更多的噪声干扰源, 导致海洋测量缺乏必要的效果质量检查与核准手段^[1-2]。如何界定海流流速的误差大小, 特别是确认海流流速的误差参考真值或基准值问题以及误差校正方法, 是海试测量中一个基本的重大问题。本文分析相控阵声学多普勒海流剖面仪(phased array acoustic Doppler current profiler, PAADCP^[3-4])对海洋流速进行检测的原理和方法^[5-6], 利用 PAADCP 海试检测数据, 给出粗差校正的动态反馈控制滤波算法, 基于小波多尺度分析方法^[7-8]对海洋流速降噪处理, 分析影响海流流速的误差来源, 估计误差精度, 建立了海流流速的误差分析与校正方法。

1 PAADCP 的测速原理

PAADCP 的基本原理是利用水声换能器向海水介质发射特定频率的定向声脉冲信号(取 4 个不同的方向), 并接收从海水中声波散射体上反射的回波信号。其主要过程是: 首先, 利用 PAADCP 发射的前后左右 4 个波束分别解算出 4 个速度 v_1, v_2, v_3, v_4 ; 然后, 根据标定 1# 波束与电罗经艏向的安装误差角 α , 通过电罗经测得的航向角 heading, 得到 4 个方向的海水参考层相对运动速度; 最后, 再根据电罗经和 GPS 数据, 计算绝对速度^[6,9-10]。

2 海试测流数据的误差分析及校正方法

在测量学研究领域, 人们按照误差的大小、特性及产生误差的原因将其划分为粗差、系统误差和随机误差三大类型。粗差是指在数据获取、数据传送和数据加工过程中, 由于不规则的差错而造成的, 通常指那些比正常值大得多或小得多的异常数据。系统误差是指由于某种物理的、机械的、技术的、仪器的或作业人员的原因造成的, 具有一定的规律性, 频率较低。随机误差是指由观测条件(使用的仪器、外界环境和观测者)引起的噪声干扰。随机误差与系统误差的区别主要体现在: 它的大小和正负符号都没有规律性, 且频率高^[11-13]。

2.1 海试数据的粗差判定及其校正

粗差问题是海洋测量资料质量检查和质量控制中的一个非常重要的、必须先期校正的问题。PAADCP 数据粗差校正的效果如何, 直接影响到下一步的系统误差和随机误差的校正效果, 直接影响海洋内波判断条件是否奏效, 进而影响内波识别与

收稿日期: 2012-03-22; 修回日期: 2013-03-19

基金项目: “十一五”国家“863”项目(2008AA09A402)

作者简介: 郑一(1955-), 男, 山东武城人, 教授, 硕士, 研究方向为信号处理理论与技术在物理海洋中的应用, 电话: 0532-86871520, E-mail: zhengone@qtech.edu.cn

特征信息提取等关键技术指标^[14]。针对海洋内波现场测量技术及工程数据处理的需要,我们建立了粗差动态反馈校正算法。

粗差动态反馈校正算法的物理原理是:在监测仪器正常平稳工作状态下,海洋观测量应是连续的、慢变的、平滑变化的。也就是说,下一时刻的真实数据,受到前期所得采样数据的直接影响;相邻采样数据之间的变化差异过大,说明出现粗差,应该校正;利用预测数据和原来数据的变化率再进行下一时刻的预测,对粗差校正后的数据再一次动态平滑校正,以减少系统误差和随机误差。

因此,我们提出粗差处理的基本原则是:由于海试的各个观测量是连续的、慢变的、平稳变化的,我们用观测量的变换率大于某一阈值来区分粗差;粗差可以用某一邻域的数据取其平均来校正。

以船航向角 heading 的数据处理为例,粗差动态

反馈校正算法是:

第一步:初值赋值: heading(k);

第二步:判断粗差:相邻的数值满足变化率

heading(i)-heading(i-1) > 25;

第三步:粗差校正:

若 heading(i)是粗差,令

heading(i) = (heading(i-1)+heading(i-2)+ heading(i-3)+heading(i-4))/4;

若 heading(i)不是粗差,令 heading(i)=heading(i);

第四步:循环处理:返回到第二步;

第五步:动态平滑:对 heading(k)进行 9 点动态平均处理。

根据 PAADCP 的海试实测数据,利用我们的粗差动态反馈校正算法,航向角 heading 的粗差校正及其效果对比见图 1。可见,我们的粗差校正效果是合理的,精良的。

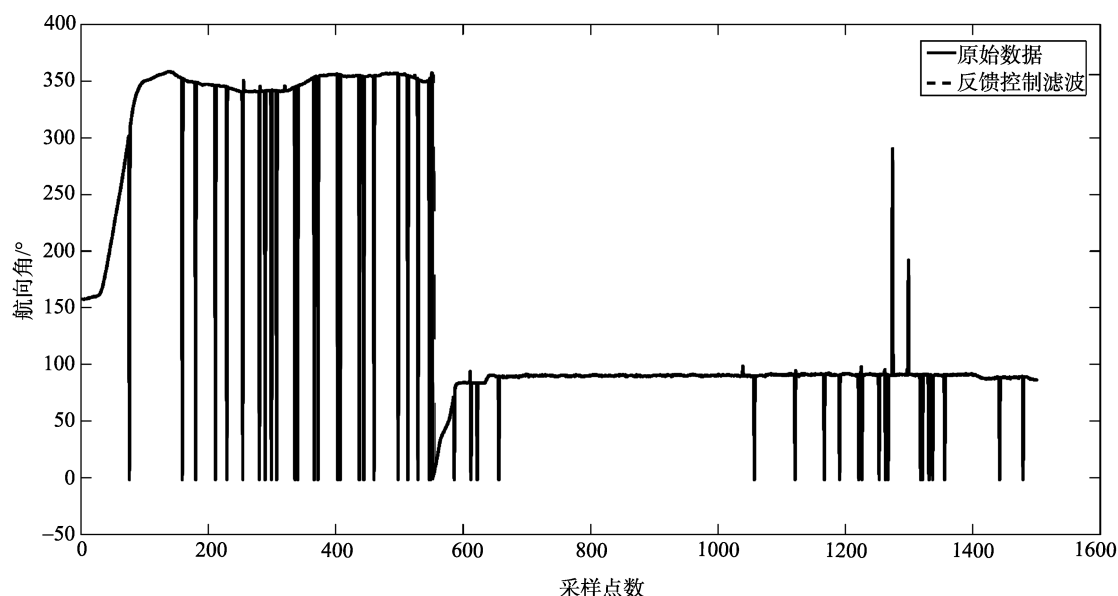


图 1 航向角粗差及粗差校正

Fig. 1 Heading angle gross error and heading angle gross error correction

2.2 海试测流数据的系统误差、随机误差及其校正

在海流流速测量中,导致流速误差的主要误差源有:海况潮位影响、海流剖面仪四波束角偏位、声速变化或器差改正误差、船舶姿态(含横摇角、纵摇角、升沉及首尾摇动)、测试中心定位与测速延时、船速对海流影响、数据后处理等。海洋测量,从监测前的仪器校准到海上的观测作业,再到测量结束后的数据处理各个环节,都不可避免地受到各种误差

源的干扰和影响^[11-13]。这些误差源的干扰和影响,或产生粗差,或导致低频的、有统计规律的系统误差,或产生高频的、无规律可循的随机误差。

为分析方便,我们将内波流场流速构成矩阵形式

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中 x_{ij} 表示第 i 层、第 j 个时刻采样点的内波实测流

速数据。

在交叉点 $P(i, j)$ 处, 经过观测值的粗差处理后, 可建立如下形式的误差方程式

$$x_{ij}(t) = \hat{x}_{ij} + f_i(t) + e_i(t) \quad (2)$$

其中, $\hat{x}_{ij}$ 表示第 i 层、第 j 个时刻采样点的流速的校正值或真值, $f_i(t)$ 表示第 i 层 t 时刻的系统误差, $e_i(t)$ 表示第 i 层 t 时刻的随机误差, $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$ 。

确定校正值矩阵 ($\hat{x}_{ij}$) 的一个原则是: 校正后的数值 $\hat{x}_{ij}$ 应该与原始测试数值 $x_{ij}(t)$ 保持最大的相似性, 以便从原始信号 $x_{ij}(t)$ 中更多地获取有效信息; 同时

校正后的信号 $\hat{x}_{ij}$ 应平稳慢变, 要求二者同时兼顾^[10-11, 14]。

我们按照上述校正原则, 利用 MATLAB 工具软件, 利用 2007 年 7 月 19 日海试测流数据的第 4 层 (即深度为 106 m, 位于内波中间层) 的数据进行多尺度小波分解^[15-16]。取一维小波函数 db6, 作 6 层分解, 分别得到 6 个近似系数 $A_1 \sim A_6$ 和细节系数 $D_1 \sim D_6$, 具体分解图形见图 2。实际上, 高频的细节系数 $D_1 \sim D_3$ 包含了随机误差成分, 低频的近似系数 $A_1 \sim A_3$ 包含了系统误差成分, 近似系数 A_4 就是我们选定的校正值或真值^[14]。

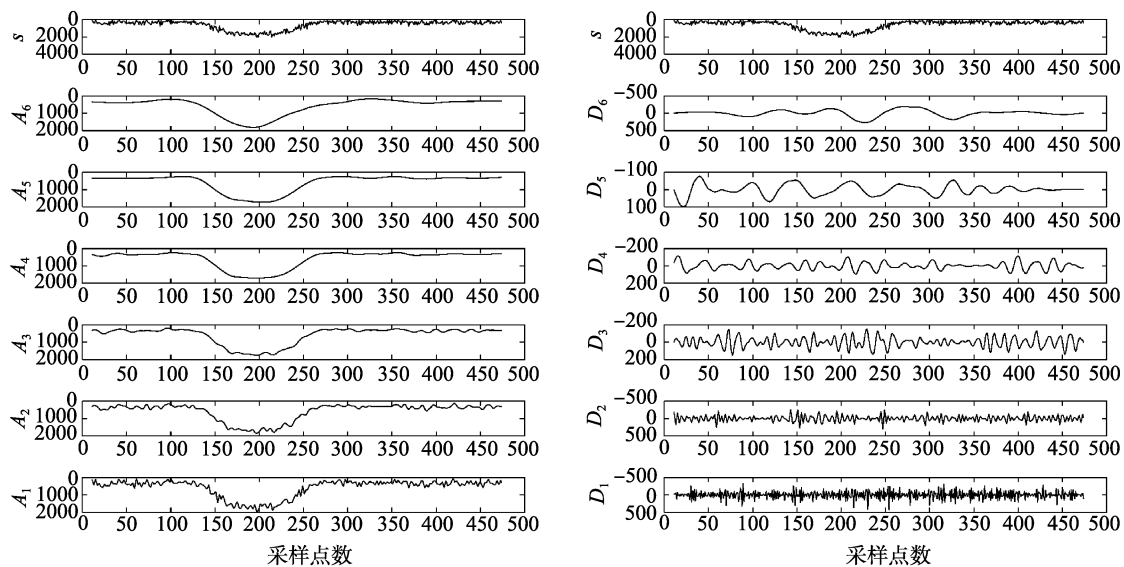


图 2 实测垂向流速数据的 6 尺度小波 db6 分解

Fig. 2 The decomposition of 6 scaling wavelet with db6 for vertical velocity data

3 海试测速数据的误差分析与应用

3.1 数据精确度

长期以来, 在国内主要应用最大绝对误差的概念。对温盐深仪器的精度指标进行评价, 通常取仪器所测的全部数据中与真值相比偏差最大的测量值定为该仪器的精度指标。

联合国教科文组织 (UNESCO) 关于海洋科学的第 54 号文件在第五章中提出: 数据处理中规定精确度 (Accuracy) 采用均方根 (root-mean-square deviation) 误差。据了解, 不少国家都采用均方根误差分析方法^[17-18], 一致认为这种处理方法在海洋测量中是比较合理的^[19-20]。

3.2 海流流速的误差界定

按照上述海洋数据处理的精确度含义, 海流流速的精确度指标定义为均方根误差。

然而, 由于海洋试验的不可重复性和海洋环境的特殊性, 海洋测量数据的参考真值或基准值如何选定呢? 或者说, 什么样的数据才可以认为它接近了真值? 即, 海流流速的均方根误差 (误差限) 到底多大, 才能是工程上可以接受、认可的呢?

在一般海水运动问题中, 对中、高纬度的大、中尺度问题, 在传统近似中忽略垂向流速, 认为垂向流速接近于零。内孤立波引起的最大垂向流速可达到 $0.2 \sim 0.3 \text{ m/s}$ ^[1]。

在正常海况下测得的垂向流速也非常小。我们取

2007年7月19日18:32:56至19:52:56期间80 min的海试垂向流速为例。在这段时间内,没有出现异常的海况

变化。可以认为,海洋试验是在正常的情况下进行,原始数据和降噪后的数据的波动也验证了这一点。见图3。

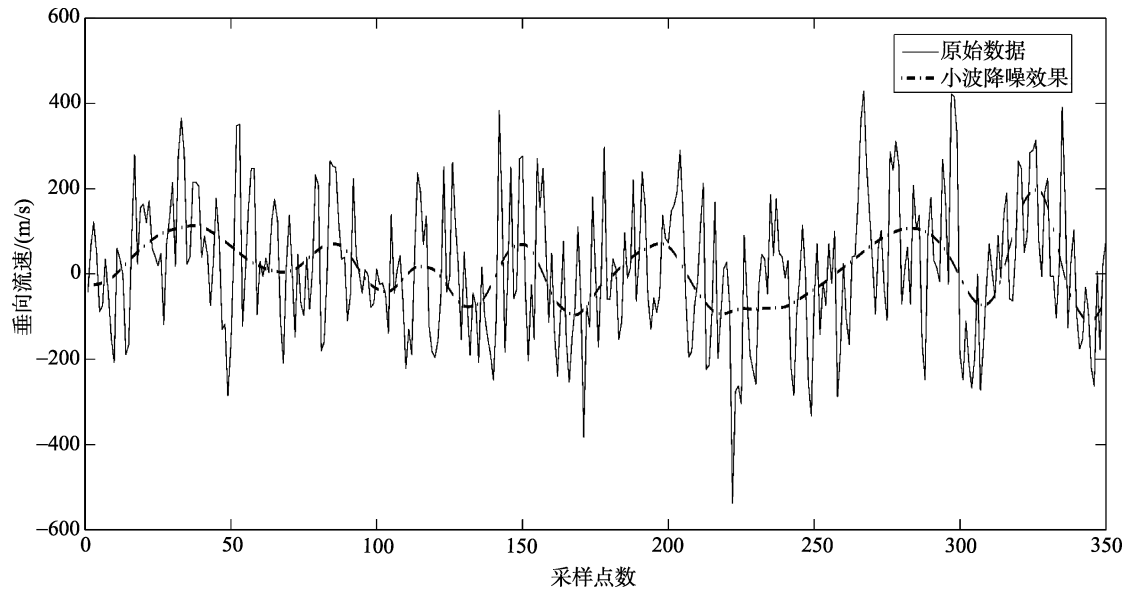


图3 垂向流速波动及小波降噪效果

Fig. 3 Vertical velocity data and the data filtered by wavelet

我们分析误差方程(2),两端取数学期望,得到

$$E(x_{ij}(t)) = E(\hat{x}_{ij}(t)) + E(f_i(t)) + E(e_i(t)).$$

因为 $e_i(t)$ 是第 i 层 t 时刻的随机误差,所以,满足关系式 $E(e_i(t))=0$ 。又因为 $\hat{x}_{ij}$ 是垂向流速的校正值或真值,在正常海况条件下也有 $E(\hat{x}_{ij})=0$ 。因此,得到均值关系式

$$E(x_{ij}(t)) = E(f_i(t)) \quad (3)$$

由于 $f_i(t)$ 是系统误差,本身具有统计规律性,均值关系式(3)说明:(1)各层流速的数学期望 $E(x_{ij}(t))$ 不能出现大的波动。否则,说明系统误差变化较大,应检查系统误差源。(2)各层流速的数学期望 $E(x_{ij}(t))$ 应该接近于零。否则,说明系统误差影响较大,应检查和校正系统误差。上述两条性质,可以作为海试测速误差分析的一个基准标准。即,测量海流垂向流速的各层均值接近于零,并且没有大的波动。

海洋测速成果的总体测速误差精度采用均方差

$$Err(j) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\hat{x}_{ij} - E(x_{ij})]^2}{n}} \quad j=1,2,\dots,m$$

来评定检测海流流速成果的误差精确度。

根据上述分析,我们利用2007年7月19日海试实测数据,去除海面下42 m盲区^[6,14],得到各层海流垂向流速均值和标准差如图4所示。

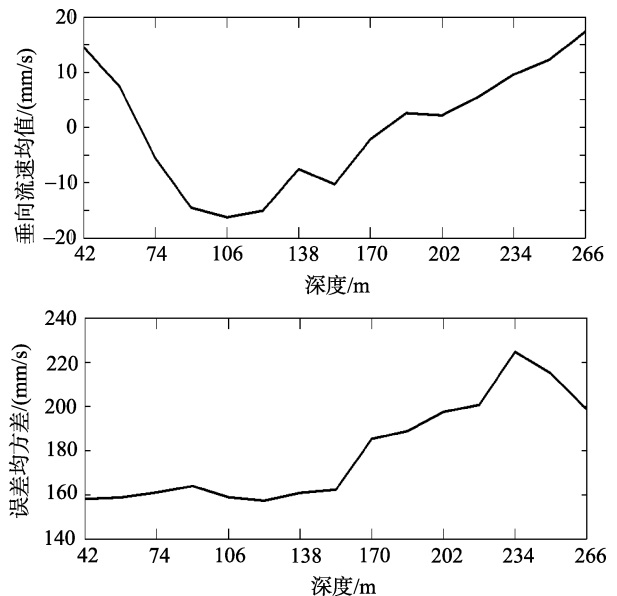


图4 垂向流速均值与误差均方差

Fig. 4 The mean vertical velocity and mean square error

可见,测速成果的垂向流速慢变平稳,均值大小为 ± 0.02 m/s,测速误差精确度小于 0.23 m/s。

3.3 海流流速的后处理效果

我们将上述误差分析方法和降噪算法运用到海试数据后处理中。

图 5 是采用海试实际监测数据,利用粗差动态反馈校正算法和小波降噪校正算法,通过等流速线和颜色棒表示的内波水平流速检测图^[14]。可见内孤立波结构非常清晰,并且数据波动也偏小,更加符合海况变化的慢变、平稳状态。

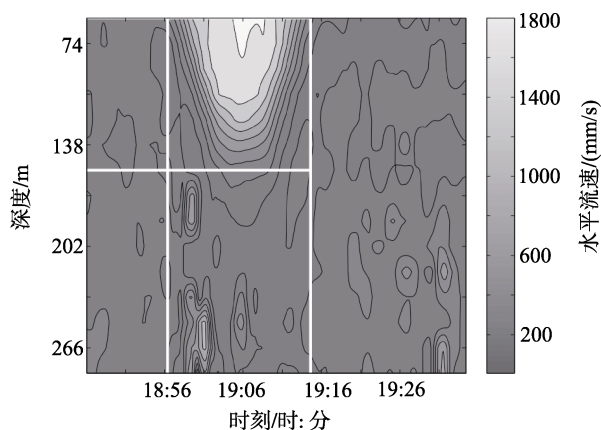


图 5 算法校正效果检测图

Fig. 5 The effect figure by correction algorithms

4 结论

本文通过对海流流速测量误差的定性、定量分析及计算机数值模拟,认为:首先必须进行测流数据的粗差区别与校正,然后再进行系统误差和随机误差的处理,利用粗差动态反馈滤波并结合多尺度小波分析是一个好方法。利用同层的垂向流速应位于同一水平线上的物理意义,提出了利用垂向流速是否位于同一水平线作为误差分析的基准值,得到成果的误差精确度小于 0.23 m/s。所用方法对于进一步应用到海洋内波的声学监测和内波特征的研究具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 方欣华, 杜涛. 海洋内波基础和中国海内波[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005: 12-15, 308-308.
- [2] 颜梅, 范植松, 傅深波, 等. 海洋内波预报技术研究的必要性与可行性初探[J]. 海洋预报, 2010, 27(2): 76-81.
- [3] 沈斌坚, 张国栋. 相控阵声学海流剖面仪性能指标考核方法探讨[J]. 声学与电子工程, 2004, 3: 31-33.
- [4] 李震, 冯雷, 邱薇, 等. 几种测流设备的比测试验及分析[J]. 海洋技术, 2006, 25(4): 42-45, 64.
- [5] Pan Xi, Cui Zhanzhong. Doppler signal simulation and analytic system for radio fuze[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2008, 17(1): 62-66.
- [6] 孙文俊, 沈斌坚. 海洋内波 ADCP 监测技术研究[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(4): 170-173.
- [7] 高成, 董长虹, 郭磊, 等. Matlab 小波分析与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 10-12, 104-122.
- [8] Xing Qi, Roseanna M. Neupauer wavelet analysis of characteristic length scales and orientation of two-dimensional heterogeneous porous Media[J]. Advances in Water Resources, 2010, 33(4): 514-524.
- [9] 黄谟涛, 程国君, 欧阳永忠, 等. 海洋测量误差处理技术研究进展与展望[C]//中国测绘学会. 中国测绘学会第十五届海洋测绘综合性学术研讨会论文集. 北京: 中国测绘学会, 2003: 6.
- [10] 黄雄飞, 周徐昌, 何建军. 声学多普勒海流剖面仪误差源分析[J]. 声学与电子工程, 2006, 4: 1-3.
- [11] 张雪, 胡晓琴. 阵列信号处理中的误差分析概论[J]. 科技信息, 2011, 35: 171-171.
- [12] 沈斌坚, 唐义政, 胡益群, 等. 国产宽带相控阵声学多普勒海流剖面仪[J]. 声学与电子工程, 2005, 1: 1-3.
- [13] Blair H B, Ramon G C, Kent L D. Performance of a broad-band acoustic Doppler current profiler[J]. Journal of Oceanic Engineering, 1991, 16(4): 402-407.
- [14] Zheng Yi, Yue Jun, Sun Xiaofeng, et al. Studies of filtering effect on internal solitary wave flow field data in the South China Sea using EMD[J]. Advances in Environmental Science and Engineering, 2012, 523: 1422-1425.
- [15] 刘孟德, 杜丽斌, 任国兴. 数字滤波及小波分析技术在海流测量中的应用[J]. 山东科学, 2011, 24(6): 71-74.
- [16] Quellec G. Adaptive nonseparable wavelet transform via lifting and its application to content-based image retrieval[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(1): 25-35.
- [17] Petra N, De Caro D., Garofalo V, et al. Truncated binary multipliers with variable correction and minimum mean square error[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2010, 57(6): 1312-1325.
- [18] 朱华, 葛世荣. 结构函数与均方根分形表征效果的比较[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(4): 396-399.
- [19] 刘雪堂, 林红军. CTD 剖面仪现场定标和误差分析[J]. 海洋技术, 1990, 9(1): 18-24.
- [20] GB12327.1998, 海道测量规范[S].

A method of error analysis and correction of ocean current velocity based on phased array acoustic Doppler current profiler

ZHENG Yi¹, YUE Jun¹, JI Nai-hua¹, SHI Guo-quan², WEI Jun-xia²

(1. Institute of Numerical Calculation and Application, School of Science, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China; 2. 715th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Hangzhou 310012, China)

Received: Mar.,22,2012

Key words: ocean current vertical velocity; error analysis; gross error correction; wavelet analysis; phased array acoustic Doppler current profiler (PAADCP)

Abstract: In order to use current velocity data more reasonably and effectively, error decomposition and correction must be disposed first. Based on the analysis of the theory of phased array acoustic Doppler current profiler (PAADCP), a method to distinguish the gross errors and to correct the gross errors is introduced, by the method of multi-scaling wavelet analysis, we reduced the systematical errors and the random errors, a method of errors analysis and correction of ocean current velocity is established. Through analysis of the original ocean vertical velocity data and the errors, we got that the average value of vertical velocity ranges from -0.02 to 0.02 m/s, and the accuracy is less than 0.23 m/s, which shows that the method is effective and reasonable. The obtained algorithms and methods for real-time processing and post processing the current data have a practical value.

(本文编辑: 刘珊珊)