

基于梯度训练法的径向基函数潮流分离方法

张红梅¹ 黄家勇² 赵建虎² 陈志高² 朱世芳²

1 武汉大学动力与机械学院,湖北 武汉,430072
2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘 要:针对传统潮流分析方法在感潮河段实施走航数据潮流分离中的不足,提出了一种基于梯度训练法的径向基函数潮流分离方法,解决了传统潮流分析方法时序数据长、潮流分离实施复杂问题;也解决了基于贪婪拟合法的径向基函数潮流分离算法存在的节点位置无法准确确定以及过度拟合导致结果不稳定等难题;根据潮流分离结果重构流场,在徐六泾走航断面实验中取得了优于 0.25 m/s 的外推精度。
关键词:潮流分离;感潮河段;走航 ADCP 数据;径向基函数;梯度训练法
中图法分类号:P229;P231.5 **文献标志码:**A

感潮河段的潮流和径流对于流体动力学特征研究、流场构建、流量计算、河道清淤以及河床演变分析等有着十分重要的作用^[1,2]。为获取一定时期稳定的潮流和径流模型,常借助长期锚定或座底 ADCP(acoustic Doppler current profiler)流速数据来实施二者分离。但该方法需长时观测,难以满足短期需要,因此,开展基于该方法的短期走航数据的潮流分离研究显得非常必要^[3-6]。

受走航作业和感潮河段特点影响,ADCP 在一个或几个断面开展连续走航测量时,数据存在不等时间、不等间距的特点。若据此开展基于传统潮流调和与分析方法的潮流分离,需首先实施等间距、等时间内插,计算繁琐且精度不高。如何基于走航 ADCP 数据实施潮流分离是目前的一个难题。Candela 等在 1992 年验证了径向基函数用于 ADCP 走航数据中潮流分离的可行性,并以格林函数为基函数实现了潮流分离^[7]。Münchow 等将 Candela 方法由二维扩展到三维^[8]。Vennell 等以高斯函数为基函数,提出了基于贪婪拟合法的径向基函数求解算法^[9]。上述研究中,基于调和与分析的传统分离方法忽视了测点间的空间相关性;Candela^[7]和 Münchow^[8]方法需预给出各点权重和足够的特征点,分类结果可信度较低;基于贪婪拟合法的径向基求解算法^[9]存在很多问题,如随节点数增多出现过度拟合和精度变差,未给出迭代终止原则,不能判断最

适合的节点数及实用性较差等。本文提出一种基于梯度训练法的径向基函数潮流分离方法,以期解决上述问题,实现潮流分离。

1 传统潮流分离方法

1.1 潮流调和与分析

传统潮流分离方法首先在走航断面起点和终点间等间距内插得到内插点;然后在每一个走航测次中,根据内插点附近的实际测量点进行反距离加权计算各内插点在该测次中的流速及对应的时间。据此得到内插点流速时序数据,在每个点上借助式(1)开展潮流调和与分析^[10],由于东分量和北分量的潮流分离过程相同,本文只分析东分量的潮流分离。

$$\begin{cases} U(t) = U_0 + \sum_{i=1}^m U_i \cos(\omega_i t - \theta_i) \\ V(t) = V_0 + \sum_{i=1}^m V_i \cos(\omega_i t - \xi_i) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $U(t)$ 、 $V(t)$ 为某点流速观测值的东、北分量; U_0 、 V_0 是余流值东、北分量; m 是采用的分潮数; t 为测量时间; U_i 、 V_i 分别是第 i 个分潮的东北分量;振幅 ω_i 是第 i 个分潮的角速度; θ_i 、 ξ_i 分别是第 i 个分潮的东北分量迟角。

若记 $U_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$, $\theta_i = \arctan \frac{b_i}{a_i}$, 则式(1)

可以写成:

$$U(t)=U_0+\sum_{i=1}^m[a_i\cos(\omega_it)+b_i\sin(\omega_it)]$$

(2)

$$\sum_{j=1}^h\lambda_jp(c_j)=0$$

(8)

式(2)可借助最小二乘来解算,获得各点余流、各分潮调和常数及其椭圆要素。对所有点开展类似工作,实现潮流分离,进而得到断面不同位置的余流和潮流模型。

1.2 径向基函数法

径向基函数法根据空间任意点到节点的距离来影响函数的取值,是一种径向对称的标量函数。常见的基函数有高斯函数、格林函数、多元二次函数等。在潮流分离中,通过输入样本(点位)和输出样本(流速)训练获得基函数的节点扩展系数和权重系数,实现二维平面内的流速内插和潮流调和常数的平滑,无需顾及走航 ADCP 数据的时间、空间分辨率。

Vennell 以高斯函数作为径向基函数法的基函数,并添加多项式部分来表示潮流调和常数 U_0 、 a_i 、 b_i 的空间分布,函数形式如下:

$$S(X)=P(X)+\sum_{j=1}^h\lambda_j\Phi(r_j)$$

(3)

式中, X 表示测点位置; h 是节点个数; $P(X)$ 是关于 X 的多项式项; $\Phi(r_j)$ 为基函数,与测点和节点间距离 $r_j=|X-c_j|$ 相关; c_j 为基函数第 j 个节点位置,是关于 c_j 径向对称的函数; λ_j 为基函数权重系数。

Vennell 等研究中 $P(X)$ 采用二阶多项式,基函数采用高斯函数:

$$P(X)=f(x,y)=$$

$$[1\ x\ y\ x^2\ xy\ y^2][\beta_1\ \cdots\ \beta_6]^T$$

(4)

$$\Phi(r_j)=\exp\left(-\frac{r_j^2}{2\delta^2}\right)$$

(5)

式中, (x,y) 为测点 X 的坐标; β_1 、 \cdots 、 β_6 为多项式系数; $r_j=|X-c_j|$ 为测点到第 j 个节点距离 δ 为基函数的扩展系数。

式(3)的矩阵形式为:

$$S(X)=[P\ A]W=DW$$

(6)

式中, $A=[\Phi(r_1)\cdots\Phi(r_j)]$; $W=[\beta\ \lambda]$ 为由多项式系数 β_j 和基函数权重系数 λ_j 组成的矩阵。

用式(6)形式的函数表示 U_0 、 a_i 、 b_i ,代入式(2)中得到径向基函数调和分析的矩阵表达式:

$$U=[D\ D\cos(\omega_1t)\ D\sin(\omega_1t)\ \cdots]\times$$

$$[W_0\ W_{c1}\ W_{s1}\ \cdots]^T$$

(7)

根据 Micchelli 和 Myers 研究^[11, 12],离散数据内插中权重系数 λ_j 有解必须满足:

边界条件(8)必须分别对 $p=1$ 、 $p=x$ 、 $p=y$ 、 $p=x^2$ 、 $p=xy$ 、 $p=y^2$ 成立。当测点位置无限增大时,式(8)可以约束径向基函数中的多项式部分。

在节点选取方面,传统方法采用随机或人为选取,潮流分离模型受选取的节点数量和位置影响显著,解不唯一。Vennell^[9] 等将贪婪拟合法用于节点获取。贪婪拟合法首先设定节点个数 h 为 0,即式(3)中只包含多项式部分,对式(7)求解,根据参与模型求解的各测点拟合残差,将残差最大点作为新增节点;重复操作,随着节点数 h 增加,模型精度随之提高。贪婪拟合法克服了传统节点随机选取的影响,无须知道先验流场特征点,即可通过反复拟合获得最终余流和潮流信息。但缺点也比较明显,未给出迭代的终止条件,且随着节点数增多,会出现过度拟合,模型精度反而变差;此外,不能判断最合适的节点数量和位置,尤其是后者,确定的节点均为已有测点,当节点选定后,不能根据流速的时空变化特征适时调整节点位置,模型适用性较差。为此, § 2 将给出一种改进算法,即基于梯度训练法的径向基函数潮流分离算法。

2 基于梯度训练法的径向基函数潮流分离算法

梯度训练法通过最小化目标函数实现对径向基解算中节点、扩展常数和权值的调节^[13]。本文利用梯度算法的思想,将径向基函数代入式(1),根据目标函数最小求得节点坐标 $(c_{j,x},c_{j,y})$ 、扩展常数 δ_j 和权值 w_j 的下降梯度,得到参数的调节量,对潮流分离模型进行逼近。

用相同形式的基函数表示 U_0 、 a_i 、 b_i ,代入式(2)可得到 $U(X_i)$ 的表达式:

$$U(X_i)=F_0+\sum_{n=1}^N(F_n\cos(\omega_nt_i)+G_n\sin(\omega_nt_i))$$

(9)

取高斯函数作为基函数, F_0 、 F_n 、 G_n 的基本形式为:

$$F(X_i)=\sum_{j=1}^h w_j\Phi(X_i-c_j),\Phi(r_j)=\exp\left(-\frac{r_j^2}{2\delta^2}\right)$$

(10)

式中, $r_j=|X_i-c_j|$ 为测量点 X_i 与节点 c_j 间的距离; δ 为基函数的扩展常数。

根据式(9)、式(10)得到流速的径向基函数形

式:

$$U(X_i) = \sum_{j=1}^h \Phi(X_i - c_j) \Gamma \quad (11)$$

式中, $\Gamma = w_j + \sum_{n=1}^N [\omega_{[(2n-1)h+j]} \cos(\omega_n t_i) + \omega_{(2nh+j)} \sin(\omega_n t_i)]$

取径向基函数网络学习的目标函数 E 和误差 e_i 为:

$$\Delta c_{j,x} = -\eta \frac{\partial E}{\partial c_{j,x}} = \frac{\eta}{\delta_j^2} \sum_{i=1}^P e_i \Phi(X_i - c_j) (X_{i,x} - c_{j,x}) [\omega_j + \sum_{n=1}^N (\omega_{[(2n-1)h+j]} \cos(\omega_n t_i) + \omega_{(2nh+j)} \sin(\omega_n t_i))] \quad (13)$$

$$\Delta c_{j,y} = -\eta \frac{\partial E}{\partial c_{j,y}} = \frac{\eta}{\delta_j^2} \sum_{i=1}^P e_i \Phi(X_i - c_j) (X_{i,y} - c_{j,y}) [\omega_j + \sum_{n=1}^N (\omega_{[(2n-1)h+j]} \cos(\omega_n t_i) + \omega_{(2nh+j)} \sin(\omega_n t_i))] \quad (14)$$

$$\Delta \delta_j = -\eta \frac{\partial E}{\partial \delta_j} = \frac{\eta}{\delta_j^3} \sum_{i=1}^P e_i \Phi(X_i - c_j) (X_i - c_j)^2 [\omega_j + \sum_{n=1}^N (\omega_{[(2n-1)h+j]} \cos(\omega_n t_i) + \omega_{(2nh+j)} \sin(\omega_n t_i))] \quad (15)$$

$$\Delta \omega_j = -\eta \frac{\partial E}{\partial \omega_j} = \begin{cases} \eta \sum_{i=1}^P e_i \Phi(X_i - c_j), j = 1, 2, \dots, h \\ \eta \sum_{i=1}^P e_i \Phi(X_i - c_j) \cos(\omega_n t_i), j = (2n-1)h+1, (2n-1)h+2, \dots, (2n-1)h+h \\ \eta \sum_{i=1}^P e_i \Phi(X_i - c_j) \sin(\omega_n t_i), j = 2nh+1, 2nh+2, \dots, 2nh+h \end{cases} \quad (16)$$

式中, $(X_{i,x}, X_{i,y})$ 为测量点 X_i 的平面坐标, η 为学习率。

将测量数据代入式(13)~(16),求得各调节量,结合初值,得到调整后的 $c_{j,x}$ 、 $c_{j,y}$ 、 δ_j 和 w_j :

$$\begin{cases} c_{j,x}(k+1) = c_{j,x}(k) + \Delta c_{j,x} \\ c_{j,y}(k+1) = c_{j,y}(k) + \Delta c_{j,y} \\ \delta_j(k+1) = \delta_j(k) + \Delta \delta_j \\ w_j(k+1) = w_j(k) + \Delta w_j \end{cases} \quad (17)$$

式中, $k=0, 1, 2, \dots$ 。将调整后的以上参数代入式(11),计算 $U(X_i)$,并与观测数据 U_i 比较,得到模型精度。重复以上操作 k 次,直至相邻两次模型精度变化小于设定阈值,也即得到了用于潮流分离的径向基函数的最佳节点位置 c_j 、扩展系数 δ_j 和权值 w_j 。

在上述解算中,节点的数量可以根据实验来确定。在 ADCP 走航区域,逐个增加节点个数,在走航起点和终点之间等间距内插得到节点坐标初值,式(7)求解模型并统计模型精度;随着节点数的增加,模型精度随之提高,但当节点数量达到一定时,模型精度不再提高。据此拐点,确定最佳节点个数。

相对贪婪拟合法,上述算法不但解决了节点

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^P e_i^2, e_i = U_i - U(X_i) \quad (12)$$

式中, U_i 是流速观测值; $U(X_i)$ 是径向基函数拟合值。

若给定节点数 h 及其坐标 $(c_{j,x}, c_{j,y})$ 以及扩展常数 δ_j 和权值 w_j 初值,为使目标函数最小,需分别对 $c_{j,x}$ 、 $c_{j,y}$ 、 δ_j 和 w_j 求梯度,得到各自调节量,见式(13)~(16),对模型进行最快逼近。

$$\Delta c_{j,x} = -\eta \frac{\partial E}{\partial c_{j,x}} = \frac{\eta}{\delta_j^2} \sum_{i=1}^P e_i \Phi(X_i - c_j) (X_{i,x} - c_{j,x}) [\omega_j + \sum_{n=1}^N (\omega_{[(2n-1)h+j]} \cos(\omega_n t_i) + \omega_{(2nh+j)} \sin(\omega_n t_i))] \quad (13)$$

$$\Delta c_{j,y} = -\eta \frac{\partial E}{\partial c_{j,y}} = \frac{\eta}{\delta_j^2} \sum_{i=1}^P e_i \Phi(X_i - c_j) (X_{i,y} - c_{j,y}) [\omega_j + \sum_{n=1}^N (\omega_{[(2n-1)h+j]} \cos(\omega_n t_i) + \omega_{(2nh+j)} \sin(\omega_n t_i))] \quad (14)$$

$$\Delta \delta_j = -\eta \frac{\partial E}{\partial \delta_j} = \frac{\eta}{\delta_j^3} \sum_{i=1}^P e_i \Phi(X_i - c_j) (X_i - c_j)^2 [\omega_j + \sum_{n=1}^N (\omega_{[(2n-1)h+j]} \cos(\omega_n t_i) + \omega_{(2nh+j)} \sin(\omega_n t_i))] \quad (15)$$

数的确定问题,还通过多次迭代和位置修正,解决了节点位置的准确确定问题。此外,该方法计算中根据梯度调节参数采用迭代法,未采用最小二乘法,避免了贪婪拟合法模型求解可能出现病态矩阵导致模型解不唯一问题。

3 实验结果及分析

3.1 实验数据

为验证上述方法的正确性,选用长江口徐六泾附近断面实测 ADCP 走航数据用于实验。图 1(a)中黑线为走航断面,长度 3.78 km。在断面上开展了超过 2 个半日潮周期的连续 ADCP 走航测量,每小时进行一次测量,一次测量时间约 20 min,总计完成了 26 个测次的测量。走航观测恰逢秋季大潮期,期间最大涨潮流速为 1.46 m/s,最大落潮流速为 1.65 m/s。借助距离走航断面约 4 km 左右的锚定 ADCP 测量数据开展频谱分析(图 1(b)),可以看出流域内主要分潮包括 K1、M2、M4、M6、M8,考虑各分潮的贡献及走航时间长度,潮流调和分析中使用了 M2、M4、M6、M8 等 4 个分潮。

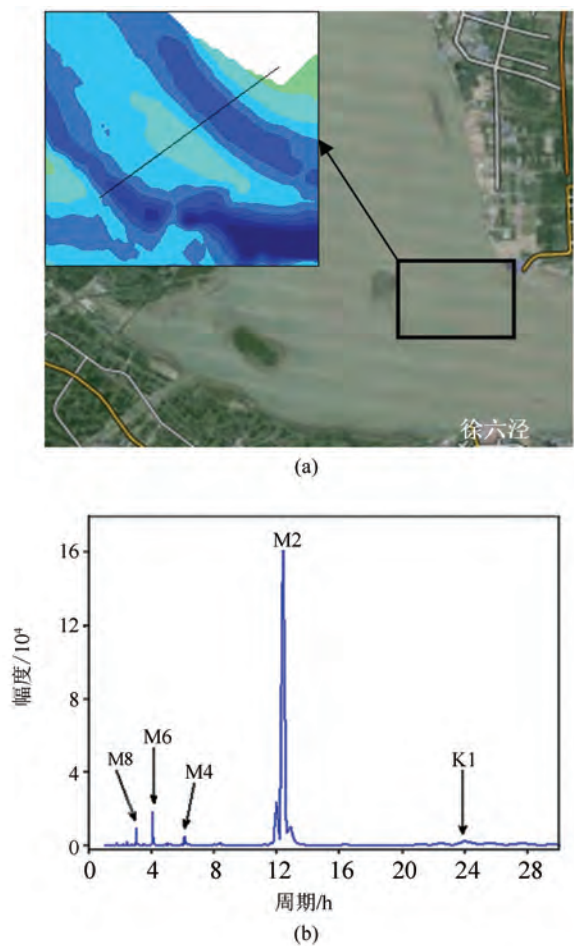


图 1 测量断面位置及流速频谱分析图

Fig.1 Location of Section and Frequency-Spectrum

3.2 潮流分离

利用走航获得的 26 个测次的 ADCP 流速数据,分别采用经典潮流分析、基于贪婪拟合法的径向基函数、基于梯度训练法的径向基函数 3 种方法在东向和北向分别实施潮流分离。采用经典潮流分析时,沿断面线以 10 m 为间隔选择了 378 个点;在每一个走航测次中,根据内插点附近的实际测量点进行反距离加权,计算各内插点在该测次中的流速及对应的时间,形成流速时序,根据式(2)实施潮流分析,获得各点的余流和潮流模型。借助径向基函数实施潮流分离,采用贪婪拟合法时,基于式(7)通过多次拟合选择节点,实现潮流分离;采用梯度训练法拟合时,取东向流速和北向流速计算中的学习率均为 0.000 18,节点初始值等间距选取,设置迭代阈值 0.01 m/s,从 2 个节点开始逐渐增加节点个数,计算对应的模型精度值,根据精度变化的拐点求得节点的个数为 5,重新设置迭代阈值为 0.001 m/s,并基于式(11)~(17),通过迭代运算获得了最终的分析模型。

为对比 3 种方法的精度,分别开展了 3 组实

验。

实验 1 所有 26 个测次数据全部参与潮流分析,利用所得模型,结合实测数据,计算模型的内符合精度见表 1。

实验 2 采用前一个周期的测量数据,即前 13 个测次的数据进行潮流分离,后 13 个测次用来验证模型。

实验 3 与实验 2 相反,实验 3 中后一个周期的 13 个测次数据用于潮流分离,而前一个周期的数据用于模型检验。

由于实验 2 和 3 中测次太少,传统调和分析方法精度较低,因此仅开展了径向基函数法中的两种拟合方法实验,两个实验取得的潮流分离模型的内符合和外推精度见表 1。

表 1 表明,3 种方法中,贪婪拟合法具有较好的内符合精度,但其外推精度相对较差,误差几乎是内符合精度的 3 倍;相对而言,梯度训练法的内外符合精度基本一致,其内符合精度略低于贪婪拟合法,但外推精度高于贪婪拟合法。分析认为,贪婪拟合法在计算时增加了二阶多项式部分,因

此增加了模型中未知参量的个数,解算需更多的数据点;受素流、环境和设备等因素影响,观测数据中可能存在异常值;此外,该法节点一旦选定,不再改变。一旦误差点被选作节点,会给分离模型确定带来显著影响。且贪婪拟合未给出拟合迭代的终止条件,过度拟合会导致模型的内符合精度较高,而外符合或外推精度则显著偏低。梯度训练法基于目标函数最小原则,即误差平方和最小构建模型,通过目标函数对节点、扩展系数和权值梯度的不断调整,实现最优待求量的确定,因此构建的潮流分离模型最优,内符合和外推精度一致,更能真实地反映实际变化。

表 1 三种潮流分离方法的精度对比/(m·s⁻¹)

Tab.1 Comparison of Accuracies of Tidal Current Separation of Three Methods(m·s⁻¹)

实验	拟合方法	内符合精度(±)	外推精度(±)
1	传统调和分析方法	0.191	/
	径向基函数法(贪婪拟合法)	0.145	/
	径向基函数法(梯度训练法)	0.202	/
2	径向基函数法(贪婪拟合法)	0.113	0.308
	径向基函数法(梯度训练法)	0.150	0.215
3	径向基函数法(贪婪拟合法)	0.108	0.345
	径向基函数法(梯度训练法)	0.150	0.246

3.3 分离结果分析

以上实验表明,本文提出的基于梯度训练法的径向基函数潮流分离方法最优,据此对断面余流和潮流实施分离。下面从余流和主分潮 M2 的椭圆要素两个方面分析潮流分离结果。

(1)余流分析

利用传统方法及本文方法分别进行潮流分离得到的余流分布如图 2(a)所示。图 2 中沿测线每 200 m 绘制一个余流值。总体而言,除在岸边、主航道位置二者存在小的偏差外,其他位置两种方法得到的余流大小和方向基本重合。在主航道上,前者得到的最大流速值为 0.709 m/s,岸边最小流速值为 0.301 m/s;而后者则分别为 0.578 m/s 和 0.289 m/s,二者偏差均方根为 0.056 m/s。分析认为,基于 2 个周期 26 个测次的有限数据开展潮流分析,会影响传统潮流分析模型的确定精度;此外,所有点数据均通过时间和空间内插获得,也会给传统方法的精度带来影响。本文方法具有较好的空间相关性,分离得到的余流值更接近实际。

(2)潮流分析

沿航线 20m 等间隔取点,对这些点上的传

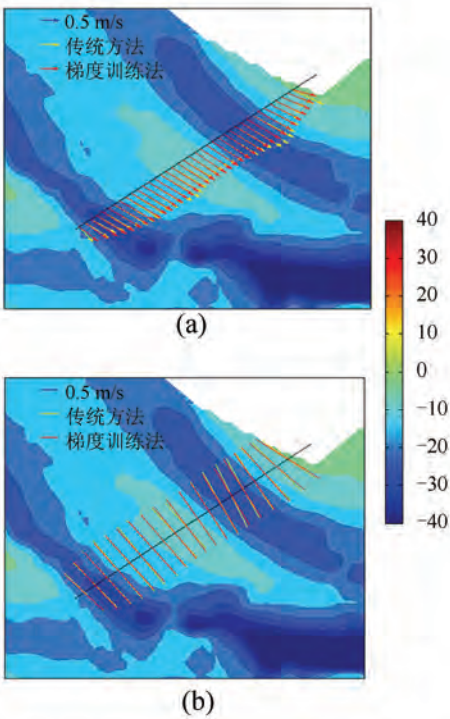


图 2 传统方法与本文方法所得余流和 M2 分潮潮流椭圆长半轴比较
Fig.2 Comparison of Residual and Ellipse Semimajor of M2 with Traditional Harmonic Analysis Method and Gradient Training Method

统方法潮流分离结果与对应位置的本文方法潮流分离结果比较。从图 1(b)可以看出,4 个分潮中,M2 分潮振幅最为显著,因此选 M2 分潮的潮流椭圆参数作为两种方法潮流分离结果的比较对象。由于为直通河道,椭圆参数的短半轴非常小,图 2(b)仅给出了两种方法的 M2 分潮椭圆参数的长半轴。可以看出,传统方法和本文方法潮流分离得到的 M2 分潮误差很小,两种方法得到的长轴最大值分别是 1.19 m、1.13 m,偏差均方根为 0.049 m,且方向非常一致,表明本文给出的潮流分离方法正确,可以反映实际的潮流变化。

4 结 语

本文提出的利用梯度训练法的径向基函数潮流分析方法,克服了基于贪婪拟合法的径向基函数潮流分离方法的不足,解决了过度拟合造成的模型内符合精度偏高而外符合精度偏低、节点个数无法确定以及固定节点位置无法反映时空流场变化等问题,实现了基于走航 ADCP 流速数据的潮流分离,取得了优于 0.25 m 的外符合精度。

本文利用梯度训练法在长江口区域进行潮流分离,具有一定的局限性。未来的研究方向主要包括梯度训练算法中学习率的自适应研究、本文算法在不同水文条件下的适用性以及如何利用其他插值方法实现潮流分离。

参 考 文 献

[1] Zhang Qin. Techniques for Tidal Current Separation from Ship-Mounted ADCP Data [J]. *Marine Science Bulletin*, 2000, 19(4): 49-55(张 芩. 船载 ADCP 资料的潮流分离技术 [J]. 海洋通报, 2000, 19(4): 49-55)

[2] Hench J L, Luettich Jr R A. Transient Tidal Circulation and Momentum Balances at a Shallow Inlet [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2003, 33(4): 913-932

[3] Huang Jiang, Ge Yong. Application of the Separation of Tidal and Subtidal Currents for Ship-mounted ADCP Data from Repeating Measurements in a Transect of Xiamen Harbor [J]. *Journal of Oceanography In Taiwan Strait*, 2009, 28(1): 123-129 (黄 奖, 葛 勇. 船载 ADCP 资料的潮流分离方法在厦门港断面重复走航中的应用 [J]. 台湾海峡, 2009, 28(1): 123-129)

[4] Shen Junqiang, Pan Weiran, Zhang Guorong, et al. Analysis of Tidal and Residual Current Characteris-

tics at the Cross-section of Tong'an Bay Entrance in Winter Based on the 3-D Harmonic Separation Method [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2012, 31(3): 338-344 (沈俊强, 潘伟然, 张国荣, 等. 基于三维调和分离的同安湾口门断面冬季潮流和余流特征的分析 [J]. 台湾海峡, 2012, 31(3): 338-344)

[5] Cui Xinmei, Hua Feng, Gao Dalu. Tidal Current Separation from Ship-Mounted ADCP Measurements in Summer in Taiwan Strait [J]. *Advances in Marine Science*, 2011, 29(4): 446-454 (崔欣梅, 华 锋, 高大鲁. 台湾海峡夏季走航 ADCP 资料的滤潮处理 [J]. 海洋科学进展, 2011, 29(4): 446-454)

[6] Chen Zhigao, Zhang Hongmei, Zhao Jianhu. Adaptive Determination Method of Optimal Calculation Model of ADCP Dead-Zone Flow Velocity [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(6): 729-733 (陈志高, 张红梅, 赵建虎. ADCP 盲区流速最优推算模型自适应确定方法研究 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(6): 729-733)

[7] Candela J, Beardsley R C, Limeburner R. Separation of Tidal and Subtidal Currents in Ship-Mounted Acoustic Doppler Current Profiler Observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 1992, 97(C1): 769-788

[8] Münchow A. Detiding Three-Dimensional Velocity Survey Data in Coastal Waters [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(5): 736-748

[9] Vennell R, Beatson R. Moving Vessel Acoustic Doppler Current Profiler Measurement of Tidal Stream Function Using Radial Basis Functions [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978 - 2012), 2006, 111(C9):11-15

[10] Fang Guohong. The Tides and Currets Analysis and Forecasting [M]. Beijing: China Ocean Press, 1986 (方国洪. 潮汐和潮流的分析和预报 [M]. 北京:海洋出版社, 1986)

[11] Micchelli C A. Interpolation of Scattered Data; Distance Matrices and Conditionally Positive Definite Functions [J]. *Constructive Approximation*, 1986, 2(1):11-22

[12] Myers D E, Kriging C. Radial Basis Functions and the Role of Positive Definiteness [J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 1992, 24(12): 139-148

[13] Platt J. A Resource-allocating Network for Function Interpolation [J]. *Neural Computation*, 1991, 3(2): 213-225

An Improved Tidal Current Separation Method of Radial Basis Function Using Gradient Training

ZHANG Hongmei¹ HUANG Jiayong² ZHAO Jianhu² CHEN Zhigao² ZHU Shifang²

1 School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Ship-mounted acoustic Doppler current profiler (ADCP) measurements have been used to obtain detailed observations of the spatial patterns of flows. To separate tidal and subtidal currents from the ship-mounted ADCP data at tidal reach, traditional harmonic analysis method require redundant measurements, and complex tidal current separation operations. Developments in radial basis function (RBF) interpolation theory are demonstrated to significantly improve the quality of the tidal velocity field extracted from the measurements. Tidal current separation method of RBF using greedy fit couldn't optimal centers for RBF, and the over-fitting of RBF would lead to the instability of separation model. To overcome these deficiencies, this paper proposes an improved tidal current separation method of radial basis function using gradient training. The tidal current separation results in Xuliujing section verified the feasibility of the tidal current separation method of gradient training RBF. The inner precision of reconstructed flow field based on the tidal current separation method using gradient training is better than 0.21 m/s, and the prediction accuracy is better than 0.25 m/s.

Key words: current separation; tidal reach; ship-mounted ADCP; radial basis function; gradient training

First author: ZHANG Hongmei, PhD, professor, specializes in the marine survey. E-mail: hmzhang@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41376109, 41576107, 41176068; Sea and Island Use Dynamic Monitoring Research Program of Liaoning Province, No.LNZC20170900260.