

海岸河口水域流速分离方法初探

孔 俊, 宋志尧, 陈秀华

(河海大学交通与海洋工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 从海岸河口地区的水动力特征出发, 应用潮流、风生流流速垂直分布的理论模式和最小二乘法原理, 提出了一种从实测流速分离出潮流和风生流的方法, 并首先对黄河口的潮流和实验室的风生流进行检验性分离计算, 然后应用于长江口北支河段及口外实测流速的分离, 实测流速分离后, 不仅可获得表层的潮流速和风流速, 而且还可从中得到底床粗糙高度并估算作用于海表面的风速数据. 初步研究表明, 此流速分离方法原理简单、过程合理、结果可信, 是一种适用于现场资料分析计算的有效方法, 既可广泛应用于海岸河口实测流速的分离, 又可为海岸河口水动力数值模拟提供合理的海底和海面边界条件.

关键词 海岸河口 流速垂直分布 潮流 风生流 最小二乘法 流速分离

中图分类号 P731 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2001)05-0013-05

海岸河口水域引起水体运动的动力因素众多, 有潮动力、风作用力、辐射应力、地转偏向力(即柯氏力)和因密度变化引起的斜压力等. 因此, 该水域实际流速中应包含有潮流、风生流、波生流、地转流和密度流等, 在河口水域, 还应包含径流成分, 其组成十分复杂. 一般而言, 因潮动力引起的潮流是其中最主要的, 此外, 风生流和波生流则相对较为重要. 波生流广泛分布于极浅的近岸破波带附近, 而在流速实测点因水深一般较大, 波浪不可能破碎, 这就是说, 波生流在实测流速中并不显著. 因此, 潮流和风生流是实测流速的主要组成部分, 也是海岸河口水动力研究的主要对象. 一方面, 潮流和风生流由于动力成因根本不同, 导致其流速垂直分布的显著差异, 对物质(包括泥沙)输移和扩散过程的作用也是迥然有别的^[1~3]. 另一方面, 随着海岸河口水动力及环境数值模拟的深入和发展, 风作用力是必须考虑的一个重要因素^[4]. 尽管现有的二、三维数值模式理论上可以考虑风作用力, 但实际应用时经常因缺乏实测风场资料而不得不忽略, 在这种情况下要很好地复演和预测水流运动及物质的输移和扩散过程是不可能的. 鉴于此, 本文应用潮流、风生流流速垂直分布的理论模式和最小二乘法原理, 忽略两者之间的非线性作用, 提出了一种将实测流速有效分离为潮流和风生流的方法. 初步研究表明, 该分离方法简捷实用, 不仅丰富了现场资料的分析手段, 而且可为海岸河口水动力数值模拟提供正确合理的海底和海面边界条件, 从而提高模式验证和预测计算的精度和可信度.

1 理论模式

国内外的分析研究结果^[5~8]表明, 对潮流运动而言, 流速的垂直分布服从对数律, 即

$$U_t(z) = a \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(d/z_0)} \quad (1)$$

式中: U_t ——潮流速; a ——表层潮流速; d ——水深; z_0 ——底床粗糙高度; z ——距离底床的高度.

另一方面, 水体在风作用下的运动, 根据 Hansen 和 Rattray^[9]的研究, 其流速的垂直分布为

$$U_w(z) = b [3(1 - z/d)^2 - 4(1 - z/d) + 1] \quad (2)$$

式中: U_w ——风流速; b ——海面的风流速.

Mansur 等^[1]曾应用此两个理论模式分别研究了海区潮动力和风作用下油膜的扩散过程, 并获得较满意

的预测结果,说明这两个理论模式是可信的.

2 分 离 方 法

由于实测流速主要是潮流速和风流速,因此理论上可假定实际流速是两者线性合成的,即

$$U(z) = U_t(z) + U_w(z) \tag{3}$$

若记 $\Phi_1 = \ln(z/z_0)/\ln(d/z_0)$, $\Phi_2 = 3(1 - z/d)^2 - 4(1 - z/d) + 1$, 则

$$U(z) = a\Phi_1 + b\Phi_2 \tag{4}$$

理论上,式(4)应满足垂直各层上的实测值,但由于实测值本身的误差及忽略两者非线性作用等因素,故各层的理论计算值与实测值存在误差,于是有

$$U_k - U(z_k) = R_k \tag{5}$$

式中: U_k ——第 k 层实测流速值; $U(z_k)$ ——第 k 层流速理论计算值; z_k ——第 k 层与底床的距离; R_k ——第 k 层的误差值, $1 \leq k \leq n$, n 为实测总层数.

一般情况下 $n \geq 3$, 即应确定的变量个数少于应满足的条件数. 此类问题宜采用最小二乘法,使各层误差的平方和最小. 即令

$$\Delta = \sum_{k=1}^n (R_k)^2 = \sum_{k=1}^n [U_k - U(z_k)]^2 \tag{6}$$

有最小值,应用偏导求极值法,则要求 $\frac{\partial \Delta}{\partial a} = \frac{\partial \Delta}{\partial b} = 0$, 由此可得到一个关于 a 和 b 的线性方程组,解之可得 a , b 值:

$$a = \frac{\sum_{k=1}^n \Phi_1(z_k) \Phi_2(z_k) \sum_{k=1}^n U_k \Phi_2(z_k) - \sum_{k=1}^n \Phi_2^2(z_k) \sum_{k=1}^n U_k \Phi_1(z_k)}{[\sum_{k=1}^n \Phi_1(z_k) \Phi_2(z_k)]^2 - \sum_{k=1}^n \Phi_1^2(z_k) \sum_{k=1}^n \Phi_2^2(z_k)} \tag{7}$$

$$b = \frac{\sum_{k=1}^n \Phi_1(z_k) \Phi_2(z_k) \sum_{k=1}^n U_k \Phi_1(z_k) - \sum_{k=1}^n \Phi_1^2(z_k) \sum_{k=1}^n U_k \Phi_2(z_k)}{[\sum_{k=1}^n \Phi_1(z_k) \Phi_2(z_k)]^2 - \sum_{k=1}^n \Phi_1^2(z_k) \sum_{k=1}^n \Phi_2^2(z_k)} \tag{8}$$

对实测流速矢量,由于潮流方向与风生流方向不可能完全一致,因此应先将其分解为东、北方向的分量,分别求出各个方向上的待求变量,最后合成得到海面潮流速和风流速矢量.

3 海底粗糙高度的确定和海面风速的估算

粗糙高度 z_0 是水动力研究的重要参数,表征底床的粗糙程度并受地形、水流条件的影响. 在无风作用时,其值可由近底床两个层面 ($k = 1, 2$) 的流速值确定:

$$z_0 = \exp \frac{U_2 \ln z_1 - U_1 \ln z_2}{U_2 - U_1} \tag{9}$$

但当存在风作用时, z_0 一般不应再由(9)来确定. 为此,采用筛选法寻找 z_0 , 即预先应确定 z_0 可能的取值范围,根据所确定的 z_0 的精度决定备选值 z_0 的总数. 筛选的目标是寻找 z_0 , 使其在两个方向(东、北)上理论计算值与实测值的总误差达到最小,因此,对 z_0 的筛选过程是伴随着流速分离同时进行的.

关于海面风速,在已知海面风流速矢量 S 的条件下,用以下经验公式估算得到:

$$W = S/K$$

式中: W ——海面上 10 m 处的风速; K ——风因子,在实际海域,可根据回归分析结果得出,如我国东海的风因子可取为^①

$$K = 9.27(|W| + 0.125)^{-0.639} \tag{10}$$

① 葛明达,等. 海洋工程水文学. 河海大学,1996. 356.

4 检验及应用

对本文提出的流速分离方法进行了检验计算和应用计算.

文献[3]给出了黄河口共四个点潮流速垂直分布的实测数据,我们对各点进行了流速分离计算,结果因方法本身所引起的风流速很小(表 1),其表面风流速最大不足表面潮流速的 2.5%,而分离后的潮流速与实测值也较为一致(图 1).

表 1 流速分离结果(检验计算)
Table 1 Separated velocity results (test case)

流速		表层潮流速/(cm·s ⁻¹)		表层风生流速/(cm·s ⁻¹)		z ₀ /cm
		计算	实测	计算	实测	
黄河口滨海区	E1	130.2	130.0	-0.2	0.0	2.00
	E2	99.5	100.0	2.2	0.0	2.00
	E14	119.9	110.0	-2.3	0.0	3.00
	T5	112.0	113.0	1.3	0.0	2.00
风生流试验		0.3	0.0	7.4	8.9	0.50

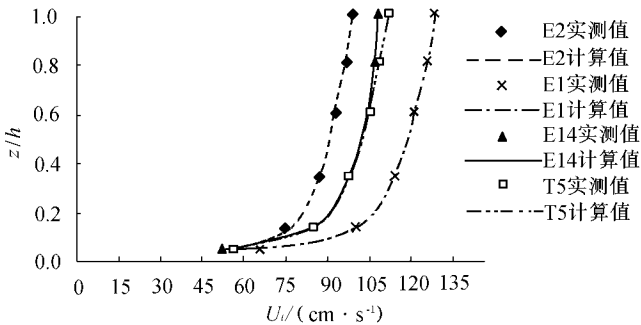


图 1 黄河口滨海区四测点分离后的潮流速与实测值比较

Fig.1 Comparison of calculated and observed results of tidal current in Yellow River Estuary after velocity separation

同时,根据 Koutitas^[10]的风生流实验得到的流速垂直分布数据进行了分离计算,结果因方法本身所引起的潮流速很小(表 1),其表面潮流速仅为表面风流速的 4%,而分离后的风流速与实测值也较为一致(图 2).

最后将该方法应用于长江口口外测点 A 和北支测点 B, C (A :122°34' 50" E, 31°42' 50" N ;B :121°34' 45" E, 31°45' 17" N ;C :121°40' 00" E, 31°41' 22" N) 的流速分离计算,这三个测点都有同步的实测风速可资验证. 另外,北支的径流量较小,但存在一定量密度流的干扰,而口外径流和密度流则更小. 分离结果见表 2. 从表 2 可以看出,同一测点不同时刻所确定的值较为接近,风速与实测值也比较接近,外海的风向与实测风向也较为一致,但北支两点的风向与河道走向有很大的关系,当风向与河道走向较为一致时分离结果较好,反之则较差. 图 3、图 4 为分离结果及理论计算值与实测值的比较.

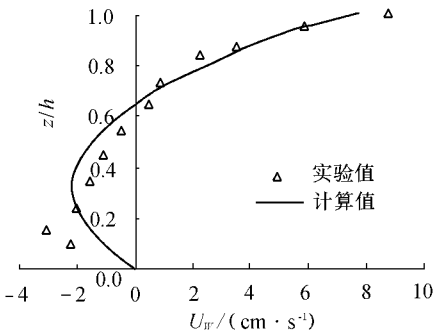


图 2 分离后的风生流速与实验值比较
Fig.2 Comparison of calculated and observed results of wind-induced current after velocity separation

表 2 流速分离结果(应用计算)
Table 2 Separated velocity results (application case)

测点	z_0/cm	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		风向	
		计算	实测	计算/($^{\circ}$)	实测
A	0.62	9.33	10.60	101.47	SE
	0.95	12.07	9.00	206.00	SW
	0.80	10.82	8.80	100.63	S
	0.90	12.08	8.40	131.40	S
	0.95	6.15	8.70	301.56	N
	0.85	9.08	8.60	34.14	NE
B	0.82	3.74	3.62	225.76	W
	0.79	4.40	3.19	293.25	NW
C	1.05	4.11	3.20	302.58	NW
	1.11	3.24	3.34	165.87	SE
	0.98	4.02	6.50	117.92	SE
	1.00	4.48	6.38	150.38	SE

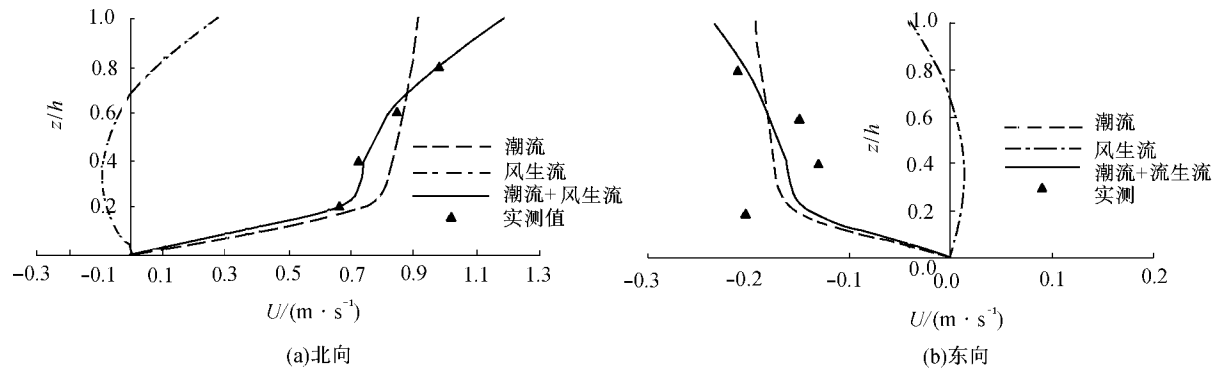


图 3 A 点流速分离结果
Fig.3 Separated results of velocity at point A

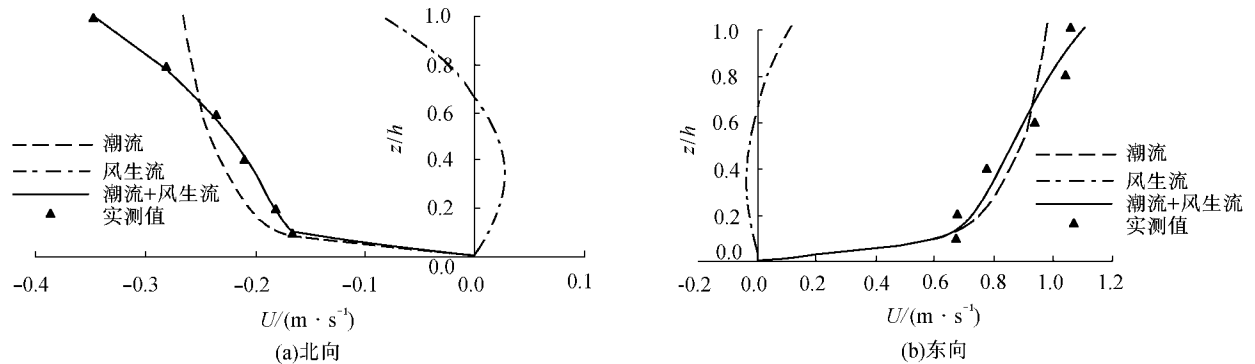


图 4 C 点流速分离结果
Fig.4 Separated results of velocity at point C

5 结 论

- a. 海岸河口水域的水流运动是不同的动力因素综合作用的结果,潮流和风生流是其中的主要组成部分,通过科学合理的方法是可以进行流速分离的.
- b. 本文所提出的分离方法简捷有效,对流速进行分离的同时还可获得海底粗糙高度和海面 10m 处的风速数据,可为水动力数值模拟提供科学合理的海底和海面边界条件.
- c. 由分离结果获得的风速数据有时误差较大.这一方面有待于潮流速及风生流速垂直分布理论模式的改进和完善,另一方面还可能与其他流动(如径流、地转流、密度流等)的扰动及其相互之间的非线性作用有

关,尚有待进一步研究.

参考文献：

[1] Mansur L,Price D M.OIL-RW：A mathematical model for predicting oil spills trajectory and weathering[J]. Hydraulic and Environmental Modelling,1992,12 201 ~ 211.

[2] Geyer W R. Influence of wind on dynamics and flushing of shallow estuaries[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,1997,44 713 ~ 722.

[3] Sobarzo M B, Figueroa D, Arcos D R. The influence of winds and tides in the formation of circulation layers in a bay, a case study： Concepcion Bay, Chile [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,1997,45 729 ~ 736.

[4] 宋志尧,薛鸿超,严以新,等.潮汐动力场准三维数值模拟[J].海洋工程,1998,16(3) 54 ~ 61.

[5] 王风聪,高慎月,苏志清.黄海口滨海区潮流速度的铅直分布及其粗糙度参量的初步研究[J].青岛海洋大学学报,1989,19(2) 37 ~ 41.

[6] Collins M B,Gao S.Tidally-induced flow structure over-intertidal flats[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,1998,46 233 ~ 250.

[7] Bergeron N E, Abrahams A D. Estimating shear velocity and droughness length from velocity profile[J]. Water Resources Research,1992, 28(8) 2155 ~ 2158.

[8] Anwar H O. Velocity profile in shallow coastal waters[J]. J of Hydraulic Engineering,1996,122(4) 220 ~ 223.

[9] Hansen D V, Rattay J R M. Gravitational circulation in straits and estuaries[J]. J of Marine Research,1965,23 104 ~ 122.

[10] Koutitas C, O'connor B. Modeling three-dimensional wind-induced flows[J]. J of Hydraulics Division,1980,106(HY11) 1843 ~ 1865.

A Preliminary Study on Approach of Velocity Separation
in Coastal and Estuarine Waters

KONG Jun, SONG Zhi-yao, CHEN Xiu-hua

(College of Traffic and Ocean Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract：Based on the hydrodynamic feature and the theoretical velocity profile of the tidal and the wind-induced current in the coastal and estuarine waters, an approach to separating the observed current into the tidal and the wind-induced current by use of the least square method is advanced for the first time in this paper. By use of this approach, not only is the surface velocity of the tidal and wind-induced current obtained, but also the bed roughness height is determined and the wind velocity above the water surface is estimated. For verification of its value, this approach is applied to the velocity data observed from the Yellow River Estuary, the Yangtze River Estuary and laboratory test data. All the results are satisfactory. The research results show that this approach is simple in principle, feasible in process, and reasonable in result. So this approach is a valid method to analyze and calculate the field data, and can be applied widely to the separation of the observed velocity in the coastal and estuarine waters. Simultaneously the reasonable boundary conditions on the surface and bottom can be obtained for the two- and three-dimensional numerical simulation.

Key words：coast and estuary；velocity profile；tidal current；wind-induced current；the least square method；velocity separation