

长江口动量系数分布特征研究

宋志尧, 章 卫胜

(河海大学交通与海洋工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于长江口 1996 年 3 月和 9 月共 23 个测点实测水流资料, 计算了动量系数的时空变化, 并应用线性回归法, 计算了特征时间段内的平均动量系数, 获得了长江口动量系数时空分布的基本特征: 时间上, 涨潮大于落潮, 洪季大于枯季, 而大、中、小潮则依次递增; 空间上, 自口外向口内, 北支呈逐渐增大, 而南支呈先增大后减小、口门附近最大的基本特征。由动量系数分析了潮流的摩阻特性, 为数值模拟合理选取曼宁系数提供参考。

关键词: 动量系数; 分布特征; 线性回归; 曼宁系数; 长江口

中图分类号: TV 131.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2003)03-354-04

近十多年来, 随着水动力学的发展, 二维动量系数定义为水深平均动量方程中对流项的修正系数, 也称动量修正系数; 同时应用范围不断延拓, 目前在风生流和潮流数值模拟、流域产沙模型以及局部冲刷机理的研究等方面^[1~7]都有应用。由于在许多情况下动量系数与 1.0 十分接近, 故常近似为 1.0。但平面水流模拟时, 在一些工程问题(如潜坝等)的处理上, 考虑动量系数是必需的, 也是必要的。

入海河口是径流、潮流交汇的复杂水域, 由于两者的共存和相互作用, 流速垂向分布很不均匀。动量系数反映了流速分布的不均匀性, 实质就是水流运动的摩阻特性。因此, 计算河口水域的动量系数, 深入认识水流运动的摩阻特性, 对河口水动力学的发展有理论价值, 同时对河口透水建筑物与水流摩阻力、工程流场数值模拟技术的研究也具有应用价值。

长江口是著名的潮汐河口, 在开发长江口深水航道、实现长江三角洲地区资源和环境的可持续发展以及河口水动力学研究中有典型意义, 而以往的研究大都侧重于分析河口混合过程、环流模式、滞流点变迁等方面。本文基于长江口 1996 年 3 月和 9 月二次大范围实测水流资料, 对长江口动量系数进行了较全面的计算分析, 对动量系数在时空分布上的一些基本特征进行了初步研究, 并对河口潮流运动的摩阻特性作了讨论。

1 河口动量系数及计算

平面二维非恒定流动的动量系数定义在单宽断面上, 按实测流速的东、北分量的不同组合, 每测点共有 3 个动量系数, 分别代表东、北方向水流运动动量沿其正向及侧向的修正值, 其理论表达式及计算式分别为

$$\begin{aligned}\beta_{xx}(t) &= \int_0^D u^2 dz / (\overline{U^2} D) \approx D \sum_{i=1}^K \mu_i^2 \Delta z_i \left/ \left(\sum_{i=1}^K \mu_i \Delta z_i \right)^2 \right. \\ \beta_{xy}(t) &= \int_0^D uv dz / (\overline{UV} D) \approx D \sum_{i=1}^K \mu_i \nu_i \Delta z_i \left/ \left(\sum_{i=1}^K \mu_i \Delta z_i \sum_{i=1}^K \nu_i \Delta z_i \right) \right. \\ \beta_{yy}(t) &= \int_0^D v^2 dz / (\overline{V^2} D) \approx D \sum_{i=1}^K \nu_i^2 \Delta z_i \left/ \left(\sum_{i=1}^K \nu_i \Delta z_i \right)^2 \right.\end{aligned}\quad (1)$$

收稿日期: 2002-01-18; 修订日期: 2002-03-30

基金项目: 河海大学科技创新基金资助项目(2001401143); 河海大学学生科技基金资助项目

作者简介: 宋志尧(1964-), 男, 浙江余姚人, 河海大学教授, 主要从事水动力学理论及数值模拟技术研究。

E-mail: glxy@hhu.edu.cn

式中 t 为时间; D 为水深; u_i 、 v_i 分别为分层流速的东、北分量; \bar{U} 、 \bar{V} 分别代表水深平均流速的东、北分量; Δz_i 为垂向各层的厚度。

根据测点空间分布和数据时间序列, 本文选用了1996年3月和9月的水文测验资料共23个测点。这些测点, 时间上涵盖了洪、枯季和大、中、小潮, 空间上覆盖了长江口的各入海通道并延伸至口外, 如图1所示。

由式(1)可知各测点动量系数均是时间的函数, 为了研究动量系数的空间分布和时间分布上的异同, 需计算不同时间段(如涨、落潮, 大、中、小潮等)内的平均动量系数。为此, 应用线性回归法, 将式(1)中各项的分子分母进行相关分析, 确定相关函数, 从而获得平均动量系数。

结果表明, 动量系数集中在1.00~1.24, 平均值约为1.07, 与Falconer^[4]的研究一致。

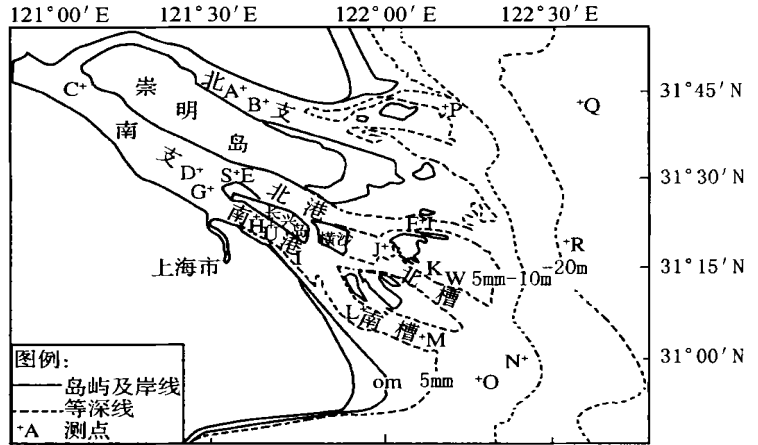


图1 长江口测点分布图

Fig. 1 Measuring points in the Yangtze River estuary

2 时间分布特征

2.1 时间序列基本特征

图2为测点3动量系数与流速时间序列的比较, 两者分布特征极为一致。在192h内(含大、中、小潮), 其基本特征为: ①在大部分时间内, 动量系数的变化不显著, 其值接近1; ②在动量(即流速)趋于零的短时间内, 转流前后, 垂线流速有正有负, 所计算的分母很小, 但分子因平方后仍是定值, 故动量系数时常会出现脉冲值。

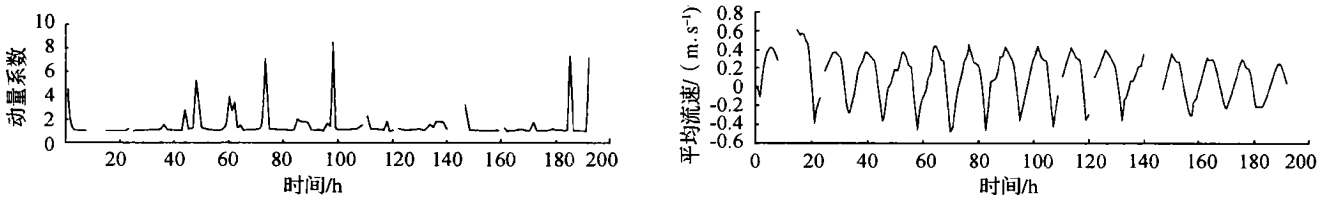


图2 动量系数及断面平均流速的时间序列

Fig. 2 Time series of momentum coefficients and depth averaged velocities

2.2 时间分布一般特征

表1 不同时间段内的平均动量系数

Table 1 Time averaged momentum coefficients in different time phases

动量系数	潮 态		潮 型			季 节	
	落潮	涨潮	大潮	中潮	小潮	枯季	洪季
β_{xx}	1.046	1.068	1.049	1.061	1.070	1.035	1.072
β_{yy}	1.034	1.059	1.061	1.071	1.087	1.038	1.088
β_{xy}	1.062	1.088	1.038	1.048	1.085	1.033	1.068

对不同测点的流速资料按季节、潮型和潮态不同逐一分类, 计算平均动量系数(表1), 研究动量系数时间分布上的一般特征, 结果是: 涨潮大于落潮, 洪季大于枯季, 大、中、小潮则依次递增。

3 空间分布特征

对23个测点的计算表明, 因实测时间不同步、实测时段也不相等, 且各点四周地形又不尽相同等, 故平均动量系数在空间分布上并无明显的特征。鉴此, 向外海方向, 分别沿北支取测点B、P、Q, 沿南支在北港取测点C、D、F、R及在南港取测点C、D、I、N, 在同一时间段(3月12日13:00~3月13日16:00)内, 计

算主方向平均动量系数 β_{xx} 并作比较(表 2)。显然, β_{xx} 在长江口水域随径流方向的空间分布有以下特征: ① 北支水域, 由于径流影响小, 潮汐作用强, β_{xx} 由外海向口内逐渐增大; ② 南支及南港、北港, 因径流与潮汐作用强弱而显不同: 在外海至口门段内, 以潮流作用为主, β_{xx} 是逐渐增大的, 而由口门内向上, 随着径流作用的增强, β_{xx} 则呈减小趋势, 最大值一般出现在径流与潮流交汇的口门附近。

表 2 不同水道 β_{xx} 的沿程分布Table 2 β_{xx} distribution along different water channels

测 点	北 支			南支北港				南支南港			
	B	P	Q	C	D	F	R	C	D	I	N
β_{xx}	1.056	1.055	1.020	1.006	1.047	1.054	1.039	1.006	1.047	1.054	1.048

4 讨 论

动量系数是在对三维水流运动简化为二维深度平均运动时出现的一个系数, 对于理想的均匀流动, 该系数等于 1.0。但是由于几乎所有的实际流动都不同程度地受到摩阻作用, 造成流速垂线分布不均匀, 并通过动量系数得以体现。因此本质上动量系数反映了水流运动的非线性摩阻特性。

在模拟平面二维水流运动时, 水流摩阻力就是床面阻力, 一般表示为

$$\bar{\tau}_b = \rho g \sqrt{\bar{U}^2 + \bar{V}^2} C^2 D(\bar{U}, \bar{V}) \quad (2)$$

式中 ρ 为水流密度; $C = D^{1/6}/n$ 为谢才系数; n 为曼宁糙率系数。

在式(2)中, 水流运动的摩阻特性通过谢才系数 C 或曼宁糙率系数 n 得以体现, 虽迄今二维水流运动的数值模拟已日臻完善, 但实际计算时, n 的选取仍具经验性, 取值为 0.01~0.04 s/m^{1/3}。在河口, n 的选取是依潮型、潮态而有所不同, 如在长江口, 刘桦^[7]涨潮时取 $n = 0.016$, 而落潮时取 $n = 0.013$ 。事实上, 这种选取有一定的合理性。1981 年以来, 国外学者通过室内实验、现场观测和研究分析发现了潮波运动的这一特性: 当潮波自深海传向近岸, 因地形变浅, 潮流的加速使运动的阻力增大, 而退潮时阻力则明显减小^[3]。

潮流是由潮动力作用引起的。潮波从深水传向浅水, 因底床摩擦等, 潮流流速垂线分布是不均匀的, 越近海底流速越小。国内外学者对此提出了许多理论模式, 如对数分布、指数分布、抛物分布和对数-线性分布等, 其中基于 Prandtl 混合长假设和 Von Karman 自相似学说的对数律最为著名, 许多水域的实测流速也基本符合对数律^[8,9]。若假定河口水流流速服从对数律, 则动量系数可表为(k 为 Von Karman 常数)^[3,4]

$$\beta = 1 + g/k^2 C^2 = 1 + gn^2/k^2 D^{1/3} \quad (3)$$

从式(3)不难看出, 动量系数与曼宁系数的二次方成正比, 动量系数大就意味着曼宁系数也大, 以不同潮态的平均动量系数 β_{xx} 为例, 由式(3)和表 1 可知(下标 f 代表涨潮, e 代表落潮):

$$n_f/n_e = \sqrt{(\beta_{xx} - 1)_f / (\beta_{xx} - 1)_e} = 1.22 \quad (4)$$

该值与多个长江口数模计算时 n 的选取十分接近。通过动量系数分布特征的研究, 从另一个侧面体现了曼宁系数的某些特征, 从而加深对潮流运动摩阻特性的认识, 为潮流计算中该系数的合理选取提供参考。

诚然, 数模计算时曼宁系数的选取, 既应体现其物理含义(沙粒阻力、沙波阻力), 又应包涵其它许多因素, 如高含沙量的制紊作用、方程的离散计算格式等, 因而应综合考虑各因素而定。也就是说, 曼宁系数的选取还应视各河口的具体情况而定。式(4)仅就流速剖面基本符合对数律的河口得出的, 而对其它型式流速剖面的河口, 还需作进一步的研究分析, 如在钱塘江河口, 涨落潮流速相差很大, 流速剖面呈抛物分布^[10], 所用曼宁系数, $n_f = 0.007 \sim 0.012$, $n_e = 0.01 \sim 0.016$, 而 $n_f/n_e < 1$ 。

5 结 论

- (1) 从时间分布看, 长江口动量系数呈涨潮大、落潮小, 洪季大、枯季小, 大、中、小潮呈递增趋势。
- (2) 在空间分布上, 自外海向口门内, 长江口动量系数在北支呈逐渐增大的趋势, 而在南支呈先增大后减

小、口门附近最大的基本特征, 与径流和潮流动力的强弱及咸淡水的混合程度密切相关。

(3) 研究动量系数时空分布特征, 可进一步认识不同季节、不同潮型、不同潮态和河口不同水域潮流运动的摩阻特征, 为数值模拟中曼宁系数的合理选取提供科学依据。

参考文献:

- [1] Koutitas C. Mathematics Model in Coastal Engineering[M]. London: Pentech Press, 1988. 78-79.
- [2] 宋志尧. 海岸河口三维水流场垂向级数解模型[D]. 南京: 河海大学, 1999.
- [3] Song Z Y, Liu Y F. Corrected formula of bed resistance coefficient for plane numerical simulation of tidal current[J]. China Ocean Engineering, 2000, 14(2): 221-227.
- [4] Falconer R A. Numerical model of tidal circulation in harbors[J]. J. of the Waterway Port Coastal and Ocean Division, 1980, 106(WW1): 31-48.
- [5] 汤立群. 物理成因产沙模型研究中亟待解决的几个问题[J]. 泥沙研究, 1999, (5): 22-28.
- [6] 周名德. 粘土局部冲刷与模拟相似[J]. 水利学报, 1998, (7): 60-63.
- [7] 刘 桦. 长江口水环境数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2000, 15(1): 7-30.
- [8] 王凤聪, 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.
- [9] Anwar H O. Velocity profile in shallow coastal waters[J]. J of Hydraulic Engineering, 1996, 122(4): 220-223.
- [10] 周 胜, 倪浩清, 等. 钱塘江水下防护工程的研究与实践[J]. 水利学报, 1992, (1): 20-30.

Characteristics of temporal and spatial distribution of momentum coefficients for the Yangtze River estuary

SONG Zhi yao, ZHANG Wei sheng

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

Abstract: Based on the field data of velocity profile observed at 23 measuring points distributed over the Yangtze River estuary in March and September, 1996, the momentum coefficients are calculated and their distribution characteristics are obtained through statistical calculations. For different typical time intervals and different places in the Yangtze River estuary, the results of linear regression show that the momentum coefficients are larger for flood than for ebb, and for flood season than for dry season, that they increase from spring tide, mean tide to neap tide on temporal distribution, and that they increase from the outside of the month to inside the month for the North Branch, and increase at first and then decrease from outside the month to inside the month for the South Branch, the maximum value appearing near the month where riverflow crosses tide on spatial distribution. Through analysis, the feature of frictional resistance in the motion of tide is better understood, and an easy approach is provided for choosing the Manning coefficient for numerical simulation of plane 2-D tidal current.

Key words: momentum coefficient; characteristics of distribution; linear regression; Manning coefficient; Yangtze River estuary