



珠江河口复杂三角洲与多口门水域 潮流运动整体模拟技术研究及应用

刘俊勇

(珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

摘要: 珠江河口是世界上最复杂的河口之一, 进行整体水流模拟是比较困难的。介绍了自行开发的珠江河口湾一、二维联解整体潮流数学模型及大范围整体潮汐物理模型, 两种技术手段相辅相成, 较好地解决了该河口潮流运动的整体模拟问题。以特大型跨河口工程——港珠澳大桥为例, 介绍了两种模型的应用情况, 在数学模型中引入通度系数控制工程复杂边界过流量, 取得了较好的模拟效果。

关键词: 珠江河口; 数学模型; 物理模型

中图分类号: U 617.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0041-05

Research and application of simulation technology “Pearl River Delta and more complex waters of tidal current”

LIU Jun-yong

(Pearl River Water Conservancy Science Institute, Guangzhou 510611, China)

Abstract: The Pearl River Estuary is one of the world's most complex estuaries and the overall flow simulation is more difficult. This paper describes the development of the Pearl River River estuary, the overall trend of a 2-D coupled mathematical model, and large overall tidal model. The two technologies complement each other and better solves the whole estuarine tidal motion simulation problems. Taking the untra-large river-crossing engineering, the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge for example, this paper introduces the application of the two models. Introducing the aperture coefficient to control the engineering of complex boundary flow in the mathematical model, we achieve a good simulation effect.

Key words: the Pearl River estuary; mathematical model; physical model

珠江河口具有“诸江汇流, 河网发达, 八口分流, 河网河口湾共存, 洪潮交汇, 整体连动, 牵一发而动全身”等特点, 珠江河口区水系复杂, 不仅拥有庞大复杂的网河状三角洲, 大小水道几百条, 入海口门也较多, 从东向西依次为虎门、蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门、崖门等8大口门, 渲泄三江洪水, 吞纳南海潮流, 洪潮动力交汇, 气势磅礴, 十分壮观, 其中较大的河口湾有伶仃洋与黄茅海。8大口门形态各异,

动力明显不同。蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门等6个口门以径流作用为主, 又以磨刀门径流最强, 虎门与崖门连通河口湾, 为潮汐通道, 潮流作用强劲。如此复杂的河网, 如此动力复杂的入海口门, 如何较好地反映出河网河口湾水体的整体性与动力特征, 是近年珠江河口模拟研究的热点问题, 有众多科研院校的科研人员参与, 研究方法与角度都不同, 龙江等采用有限元方法建立了珠江河口水动力一维、二维联

收稿日期: 2013-12-06

作者简介: 刘俊勇(1973—), 女, 高级工程师, 从事水力学及河流动力学、河口开发治理研究及水利咨询。

解模型^[1]；唐雄飞等采用有限体积法建立了珠三角河网与河口整体水环境模型^[2]；许炜铭等用差分法自行开发了ccost-2d模型，建立了整个河口水沙模型；徐峰俊等主要用差分法自行研制开发了珠江河口区一、二维联解整体潮流、泥沙与含氯度数学模型^[3]；张蔚等用差分法建立了珠江三角洲与伶仃洋水域一、二维水沙嵌套数学模型^[4]，逢勇等建立了珠江三角洲河网与伶仃洋一、三维水动力学模型联解^[5]。本文主要介绍珠江水利科学研究院自行开发的珠江河口区一、二维联解整体潮流数学模型，与以往不同的是，这里介绍采用数学模型与物理模型相结合的方法，以珠江河口整体潮汐物理模型试验对比辅证数学模型。这两种模型一直同用于珠江河口综合治理研究，取得了较为满意的成果，本文主要介绍模型在珠江河口特大型工程——港珠澳大桥水动力条件分析研究中的应用情况。

1 数学模型

1.1 河网模拟

珠江三角洲河道多狭长顺直，尺度上与河口湾相差较大，水流模拟可采用一维模型，方程采用明渠非恒定流的圣维南方程组，方程组求解采用河网3级联解算法^[6]。

1.2 河口湾模拟

珠江河口湾水域宽阔，水面波浪作用相对不强，如伶仃洋、黄茅海水域可采用平面二维浅水波（潮波）运动方程，为了适用复杂的工程边界或陆域边界，这里在连续方程中引入通度系数^[7]，控制流量通过率，方程如下：

连续方程

$$\frac{\partial(\theta_c z)}{\partial t} + \frac{\partial(h\theta_x u)}{\partial x} + \frac{\partial(h\theta_y v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

x 向动量方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \nu \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{gn^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} - fv = \varepsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

y 向动量方程

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} + \nu \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{gn^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} + fu = \varepsilon \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中： x, y 为笛卡尔坐标； t 为时间； u, v 为沿 x, y 方向的垂线平均流速； z 为水位； h 为水深； n 为曼宁系数； ε 为紊动黏性系数； f 为柯氏力系数； g 为重力加速度； θ_c 对应离散单元的面通度，为网格中能够被流体通过的面积（网格面积减去网格中固体或障碍物的面积）与整个网格面积之比，定义在网格中心； θ_x, θ_y 分别为对应于离散单元的 x, y 方向线通度，为该方向上能够被流体通过的网格长度与该网格总长之比，定义在网格边界上；通度系数根据结构占据网格大小，取值在0与1之间，占满网格取0，不占网格取1。

由于水域边界复杂，采用贴体曲线坐标 (ξ, η) ， $\xi = \xi(x, y), \eta = \eta(x, y)$ ，将不规则的物理区域转换为规则区域计算，将笛卡尔坐标系下方程转换为计算坐标下方程，方程组求解采用ADI法^[3-8]。

1.3 河网河口湾模块联解

根据水流连续条件，一、二维模型在联解点上需满足的条件见文献[3, 9]。

1.4 珠江河网河口湾模型建立

一维模型：上游以北江三水、西江马口、流溪河的老鸦岗站、增江的麒麟嘴站、东江的博罗站、潭江的石嘴水位站等断面控制，下游以河口断面大虎（虎门）、南沙（蕉门）、冯马庙（洪奇门）、横门、灯笼山（磨刀门）、黄金（鸡啼门）、西炮台（虎跳门）及官冲（崖门）等断面控制。

二维模型：上边界以河口断面大虎、南沙、冯马庙、横门、灯笼山、黄金、西炮台及官冲等断面控制；下边界至外海-30 m等深线，西边界至黄茅海西边的台山电厂，东边界至香港水域。模型范围见图1。

一、二维模型联解点设置在8个口门控制断面。三角洲河网布置见图1，河口湾水域网格布置见图2。

建模地形整个模型范围内以1999—2005年大断面资料、河道测图、海图为主。模型以1998年

表1 模型试验相似比尺设计

平面 比尺 λ_L	垂直 比尺 λ_H	模型 变率 η	流速 比尺 λ_V	糙率 比尺 λ_n	时间 比尺 λ_T	流量 比尺 λ_Q
700	70	10	8.37	0.64	83.67	409 963

2.2 地形制作

伶仃洋水域水深变化幅度小,地形较平坦,模型制作采用桩点法,桩点间距为1 m。对于航道及深槽,水深变化大,地形较复杂,模型制作采用断面模板法,其中非重点区域模板断面间距为1 m,在工程区附近将根据地形情况适当加密断面间距。根据模型试验规程规范的要求,模型地形制作时平面位置误差控制在 ± 1.0 cm之内,制模断面和桩点高程误差控制在 ± 1.0 mm之内。

2.3 潮位控制与量测

模型控制系统采用珠江水利科学研究院研制的分布式工业控制系统,中央监控机主要存储模型试验的各种参数,发布命令,显示实时监控图表、过程曲线、历史试验数据,打印相关参数和报警等;通过RS232串行通信线与现场机联接。现场机依据中央监控机的命令,自动完成数据采集和生潮设备的控制等任务。

模型的上边界通过量水堰控制径流流量,下边界生潮方式采用多口门变频器控制。模型上采用变频调速器直接调节水泵提供给模型的供水量,系统根据给定的潮位控制曲线调控每个变频器的输出频率,从而满足边界分段潮位控制的需要。

模型潮位的量测采用本院研制的GS-3B光栅式跟踪水位仪,精度可达到0.1 mm。流速的量测采用LS-3C光电流速仪。

2.4 模型验证

模型布设了65个潮位测站和128个流速测点,还布设了4套PIV流速场测量系统,所有采集及试验实现自动化。截至目前,该模型经过多年应用完善,运行稳定^[10-11]。

3 应用案例

港珠澳大桥工程是横跨珠江口外伶仃洋水域、

连接东西两岸的特大型桥隧工程,东起大屿山香港机场,西至珠海拱北、澳门半岛北端登陆,主线总长约35 km(隧道长6 km,桥梁段长约29 km),跨伶仃洋深水航道(大濠水道)段采用隧道,其余为桥梁段。全线共布置隧道东、西人工岛,珠海-澳门口岸,香港口岸,珠海侧接线人工岛等5个人工岛,桥墩约有300个。

对于这样的特大型工程,工程规模浩大,横跨水域较长,结构繁多、形态各异、大小不一,模拟困难。采用常规的模拟试验手段难以透彻研究工程附近水动力条件,利用本文的河口整体数学模型与物理模型相结合的研究手段就显得非常必要。为了较精确模拟工程结构形状,在河口大范围二维数学模型网格基础上进行了多次加密逐步逼近结构外形,对工程边界处未占满网格,利用通度系数控制通过流量。物理模型可直观反映出工程附近特殊流态,与数学模型计算成果对照分析,计算得隧道人工岛附近流场见图4,试验结果见图5。可见,两种模拟结果基本一致,模拟效果良好,基本可反映实际情况。隧道人工岛上下游一定区域潮流运动明显改变,产生回流区,在此水域,流速降低,泥沙输移受阻回旋落淤,未来会形成一定淤积带;而人工岛东西两端水流变急,挑流明显,极易对岛壁造成冲刷。

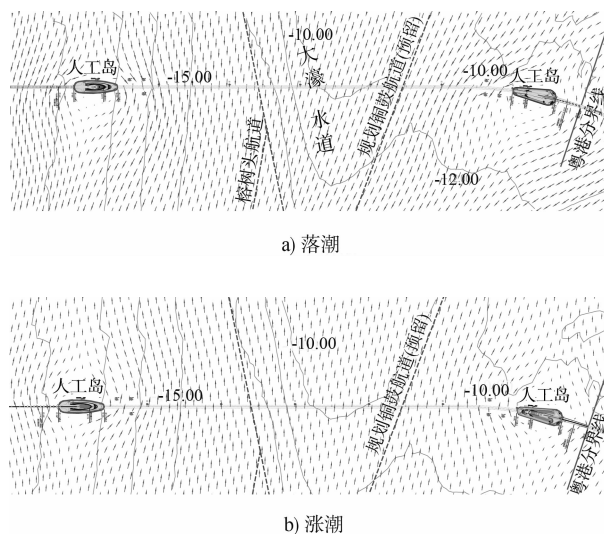


图4 隧道人工岛附近平面流场数模计算结果

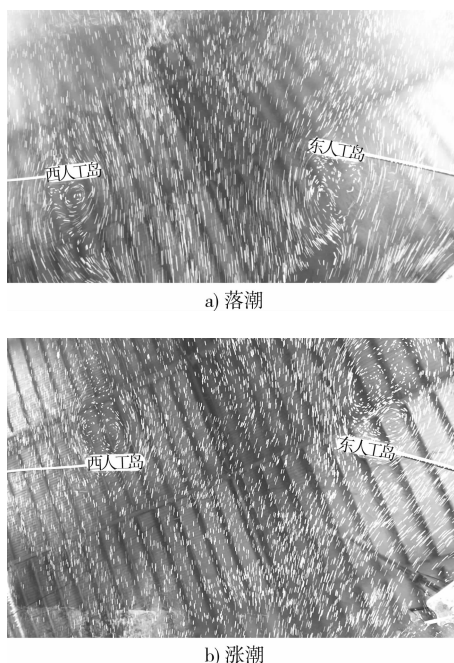


图5 隧道人工岛附近物理模型试验流场照片

4 可视化研究

一般的水流运动可视化多采用矢量箭头标示, 本文结合物理模型试验撒纸屑示踪方法, 数学模型计算结果可视化采用质点运动标示, 用 Avid Studio 软件将若干张质点图片制作成电影, 用 animitor 连续播放, 形成水流动态效果。考虑珠江口多股水流汇集, 采用不同颜色质点标示, 可较好地显示出多股水流运动轨迹与掺混过程, 动态演示效果生动逼真, 宛如物模纸屑运动 (图6)。

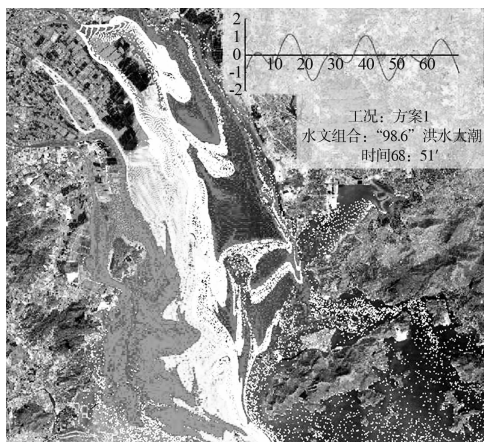


图6 珠江口伶仃洋水域潮流运动可视化 (数模)

5 结语

1) 对珠江河口已有的模拟技术成果进行了总结; 介绍了自行开发的珠江河口一、二维联解潮流

数学模型。河网采用一维潮流模型, 河口湾采用二维潮流模型, 一、二维模型在口门断面以水力连续条件联解。二维模型连续方程中引入通度系数来控制工程复杂边界网格过流量, 达到模拟目的。

2) 数学模型与整体物理模型相结合进行论证研究, 两种手段取长补短, 更科学、合理地反映了河口区水流运动的整体连动性及河网、口门、河口湾水体交换掺混过程。

3) 两种模型同应用于河口特大型涉水工程港珠澳大桥专题论证, 应用效果良好, 可模拟反映工程附近水流运动特征。

4) 数学模型成果质点运动可视化, 是对技术手段的进一步完善, 提高了成果直观性与物理模型成果对比性。

参考文献:

- [1] 龙江, 李适宇. 珠江口水动力一维、二维联解的有限元计算方法[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2007, 22(4): 512-519.
- [2] 唐雄飞. 基于有限体积法的珠三角河网与河口整体水环境模型研究[D]. 广州: 中山大学, 2009.
- [3] 徐峰俊, 朱士康, 刘俊勇. 珠江河口区水环境整体数学模型研究[J]. 人民珠江, 2003(5): 12-18.
- [4] 张蔚, 严以新, 郑金海, 等. 珠江河网与河口一、二维泥沙嵌套数学模型研究[J]. 泥沙研究, 2006(6): 11-17.
- [5] 逢勇, 黄智华. 珠江三角洲河网与伶仃洋一、三维水动力学模型联解研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(1): 10-13.
- [6] 张二骏. 河网非恒定流的三级联合解法[J]. 华东水利学院学报, 1982(1): 1-12.
- [7] 刘兆存. 通度系数法处理不规则边界的研究[J]. 计算物理, 1997, 14(1): 115-120.
- [8] 华祖林. 边界拟合坐标下流场计算模式[J]. 海洋工程, 1994, 12(8): 65-72.
- [9] 珠江水利科学研究院. 珠江三角洲河口区潮流泥沙及含盐度耦合联解数学模型报告[R]. 广州: 珠江水利科学研究院, 2003.
- [10] 吴小明, 邓家泉, 吴天胜, 等. 珠江河口大型潮汐整体物理模型设计与应用[J]. 人民珠江, 2002(6): 14-16.
- [11] 珠江水利科学研究院. 珠江河口整体物理模型设计及验证试验研究报告[R]. 广州: 珠江水利科学研究院, 2003.