

基于 GIS 的航道整治决策支持系统

吕升奇¹ 李天碧² 陈界仁¹ 杨 涛¹ 罗 春² 付 勇²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 江西省交通厅航务管理局, 江西 南昌 330008)

摘要 :开发了内河航道 GIS ,通过实测地形资料生成航道数字高程、水深、冲淤量等表面模型 ,借助 GIS 工具显示并分析航道信息 ,可以模拟设置丁坝、顺坝等航道整治工程 ,为水流泥沙数学模型提供计算边界并生成计算网格。能够利用数学模型计算整治工程对流场及航道演变的影响情况 ,可视化显示计算结果 ,以便于分析工程整治效果 ,优化航道整治工程设计方案 ,为航道管理部门提供决策信息支持。本系统已经在赣江航道整治工程管理、辅助设计等方面得到初步应用 ,提高工作效率 4 倍以上。

关键词 :内河航运 ;航道整治工程 ;GIS ;水流泥沙数学模型 ;数字航道

中图分类号 :U617 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2007)05-0029-04

GIS-based decision-making support system for navigation channel regulation//LÜ Sheng-qi¹, LI Tian-bi², CHEN Jie-ren¹, YANG Tao¹, LUO Chun², FU Yong²(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Navigation Administration Bureau of Jiangxi Communication Department, Nanchang 330008, China)

Abstract :The GIS for inland navigation channels was developed, and the terrain models of digital elevation, water depth, and quantity of erosion and deposition were generated based on measured data. With GIS tools, the information of navigation channels could be analyzed, and some navigation channel regulation projects, such as spur dikes and parallel dikes, could be simulated. The above work may provide computational boundaries for water-sediment mathematical model and is helpful to generate computational meshes. Furthermore, by use of the mathematical model, the effects of regulation projects on the evolution of flow fields and navigation channels could be calculated, and the visualized result can offer management departments with decision-making information support to analyze the effects of regulation projects and to optimize design schemes. The system has been applied to management and aided design of Ganjiang navigation channel regulation project, and it has improved the work efficiency for more than 4 times.

Key words :inland navigation; navigation channel regulation project; GIS; water-sediment mathematical model; digital navigation channel

作为综合运输网中的重要组成部分,内河航运具有成本低廉、运送量大、运输距离远、便于综合利用的优势。为了保证航道有足够的水深和航宽,提高内河航运效率,需要经常对航道进行维护,主要的工程措施有丁坝、顺坝、潜坝、锁坝、护岸工程和疏浚等,目的是改变原有航道的水流条件,束水归槽、淤滩冲槽,增加航深^[1]。然而不同的整治工程对航道整治的作用是不同的,如何实时地分析航道中存在的问题并设计最优的工程方案,是工程设计者十分关心的问题。随着计算机及信息技术的飞速发展,许多航道管理部门开发了基于 GIS 的河床演变分析系统及航道管理系统^[2-7],实现了航道相关资料的自动存储、显示、分析及输出,提高了对资料管理的效率。但这些航道管理系统未能实时嵌套水流泥沙数

学模型来计算整治工程实施后不同的工程设计对航道演变的影响,董朝锋等^[7]开发的基于 GIS 的长江口潮流数学模型只能实现特定区域的水流计算及显示,不能随意设定计算边界,也不能进行泥沙及航道演变计算。本文研究基于 GIS 和水流泥沙数学模型的航道整治决策支持系统,可以根据实时数据,在信息系统平台上为水流泥沙数学模型设定计算河段及边界,模拟计算整治工程对航道演变的影响情况,为航道整治工程的设计、优化及管理提供决策信息。

1 航道基本信息管理

1.1 系统开发方式

系统采用符合软件技术发展潮流的组件式 GIS 开发方式,便于系统集成及应用^[8],基于 ActiveX 技

术、在 Visual Basic 6.0 通用开发环境下实现 GIS 的基本功能。信息管理、资料分析及专业模块如基础数据处理、航道信息查询、河道冲淤分析、模型边界提取、计算网格生成、水流泥沙数学模型计算及结果显示等都在系统开发环境下实现,保证了系统运行的效率。

1.2 航道信息显示及查询

系统将内河航道信息按其特性进行分层,每个图层存储特性相同或相似的地物对象集,包括河床及河岸的地形地貌及水文特征、浮标及岸标等助航标志、丁坝等航道整治工程、过船设施、临河跨河建筑、港口码头、水文测站、沿岸取水口、主要工厂等。利用系统提供的编辑工具,可以根据地物的变化编辑地物属性值并以矢量数据、栅格数据、文本属性数据或多媒体的形式进行显示。利用 GIS 的图层叠加功能,多图层数据可分层显示、叠加显示、自由组合显示,给地形分析提供了很大便利。

航道管理部门可以根据浮标、岸标等助航标志的分布情况,分析助航标志布置的合理性(见图1),决定是否需对助航标志加以调整。为了保证通航,有时需要设计各种类型的丁坝、挖槽等,可以在航道图上模拟航道整治工程,确定坝址、坝长、坝高等参数并保存,辅助航道整治工程的设计。

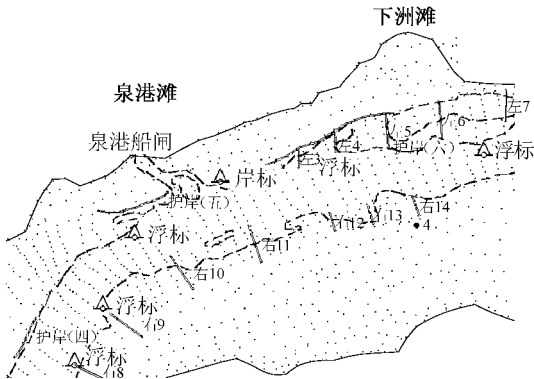


图1 助航标志分布

1.3 基于格网 DEM 进行冲淤分析及显示

基于格网 DEM 对河道冲淤进行分析研究,不仅可以提高工作效率,而且可以提高分析计算的精度^[9]。根据各年份实测的地形高程散点数据生成一系列格网 DEM 高程矩阵文件(*.asc),结合 GIS 空间显示及叠加技术,可以将河床地形以栅格的形式显示,设定不同深度的颜色代表不同的地形高程,使航道的地形分布情况得到形象的展示。借助于 GIS 编辑工具可以在航道 DEM 中任意划分断面,系统自动获取断面高程,可以套绘不同时期的航道断面图。在航道整治工作中,可能需要采用航道疏浚挖槽的方法改善通航条件,在航道 DEM 上选择相应的区域可以方便地进行工程预算。系统还设计了选择任意

两个时期 DEM 数据进行冲淤分析的功能,任意划定分析区域可以计算泥沙冲刷量或淤积量。用格网 DEM 除了对地形分布进行显示和分析,也可以将格网中的高程数据换成实测或模型计算的河道水深、冲刷量、淤积量等,用于显示这些物理量在平面上的连续变化。

2 基于 GIS 的水流泥沙数学模型

2.1 水流泥沙数学模型

与物理模型相比,数学模型修改方便,流场及冲淤计算不受比尺限制,因此目前在河道整治工程、环境保护工程的规划、设计中得到广泛应用^[10-12]。丁坝、顺坝、潜坝、锁坝、护岸工程和疏浚工程等内河航道整治工程的建设给水流泥沙数学模型的发展提出了许多新的要求,本文针对复杂河道的水流泥沙运动及航道整治问题,建立平面二维水流泥沙数学模型,经检验能较好地解答许多工程泥沙问题^[12-13]。水流泥沙数学模型是系统的核心,可以指导并优化工程的规划、设计。模型的控制方程为

连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{C_{\xi}C_{\eta}} \left[\frac{\partial (C_{\eta}Hu)}{\partial \xi} + \frac{\partial (C_{\xi}Hv)}{\partial \eta} \right] = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial (Hu)}{\partial t} + \frac{1}{C_{\xi}C_{\eta}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_{\eta}Hu u) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_{\xi}Hu v) + \right. \\ & \quad \left. Hu v \frac{\partial C_{\eta}}{\partial \eta} - Hv^2 \frac{\partial C_{\eta}}{\partial \xi} \right] = - \frac{g u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} - \\ & \quad \frac{g H}{C_{\xi}} \frac{\partial h}{\partial \xi} + \frac{1}{C_{\xi}C_{\eta}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_{\eta}H\sigma_{\xi\eta}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_{\xi}H\sigma_{\eta\xi}) + \right. \\ & \quad \left. H \frac{\partial C_{\xi}}{\partial \eta} - H\sigma_{\eta\eta} \frac{\partial C_{\eta}}{\partial \xi} \right] \quad (2) \\ & \frac{\partial (Hv)}{\partial t} + \frac{1}{C_{\xi}C_{\eta}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_{\eta}Hv u) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_{\xi}Hv v) + \right. \\ & \quad \left. Hv u \frac{\partial C_{\eta}}{\partial \eta} - Hu^2 \frac{\partial C_{\xi}}{\partial \eta} \right] = \\ & \quad - \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} - \frac{g H}{C_{\eta}} \frac{\partial h}{\partial \eta} + \frac{1}{C_{\xi}C_{\eta}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_{\eta}H\sigma_{\xi\eta}) + \right. \\ & \quad \left. \frac{\partial}{\partial \eta} (C_{\xi}H\sigma_{\eta\eta}) + H\sigma_{\xi\eta} \frac{\partial C_{\eta}}{\partial \xi} - H\sigma_{\xi\xi} \frac{\partial C_{\xi}}{\partial \eta} \right] \quad (3) \end{aligned}$$

式中:u、v 分别为 ξ 和 η 方向的流速分量;h 为水位;H 为水深;t 为时间;g 为重力加速度;C 为谢才系数;C_ξ、C_η 为正交曲线坐标系中的拉梅系数,C_ξ = √(x_ξ² + y_ξ²),C_η = √(x_η² + y_η²);σ_{ξξ}、σ_{ηη}、σ_{ξη}、σ_{ηξ} 为应力项。

悬移质泥沙扩散方程为

$$\frac{\partial (HS_i)}{\partial t} + \frac{1}{C_{\xi}C_{\eta}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_{\eta}HuS_i) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_{\xi}HvS_i) \right] =$$

$$\frac{1}{C_{\xi}C_{\eta}}\left[\frac{\partial}{\partial\xi}\left(\frac{\varepsilon_{\xi}}{\sigma_s}\frac{C_{\eta}}{C_{\varepsilon}}\frac{\partial S_i}{\partial\xi}\right)+\frac{\partial}{\partial\eta}\left(\frac{\varepsilon_{\eta}}{\sigma_s}\frac{\partial S_i}{\partial\eta}\right)\right]+\alpha_i\omega_i(S_i^*-S_i)\quad(4)$$

式中: α_i 为悬移质泥沙中第 i 组泥沙的恢复饱和系数; ω_i 为第 i 组泥沙的沉速; S_i, S_i^* 分别为分组粒径的水流含沙量及挟沙力; $\varepsilon_{\xi}, \varepsilon_{\eta}$ 为坐标系 ξ 及 η 方向上的泥沙扩散系数。

方程(1)~(4)可转化为对流扩散方程的通用形式,并采用 SIMPLER 法求解^[13-15]。

根据沙量守恒可得河床变形方程^[13-15]:

$$\rho_s g \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{1}{C_{\xi}} \frac{\partial g_{b\xi}}{\partial \xi} + \frac{1}{C_{\eta}} \frac{\partial g_{b\eta}}{\partial \eta} = \sum_{i=1}^n \alpha \omega_i (S_i - S_i^*) \quad (5)$$

式中: Z_b 为河床高程; ρ_s 为淤积泥沙干密度。

2.2 数学模型与 GIS 的集成

系统实现将 GIS 强大的数据显示、编辑及分析功能同水流泥沙数学模型集成,利用 GIS 编辑工具选取计算区域,在区域中生成计算网格并实现网格正交化,设定边界条件、初始条件、河道分段糙率等参数,分别保存在模型库中。模型读取设定参数完成计算后,结果同样放入模型库中。这些计算结果可以通过多种形式分析及显示,分别由不同的分析及显示模块完成,各个模块之间是相对独立的,均通过数据接口与模型库进行联系。

2.2.1 计算区域的选取

计算区域的选取要根据航道整治的要求、计算目的、河道自然条件及实测水文资料等综合考虑。本文选取赣江樟树—拖船埠河段进行计算,该段航道有多处浅滩,航道水流较为复杂,至 2002 年已完成修建 28 座丁坝工程。

2.2.2 初始条件

初始计算水位利用计算河段上、下游实测水位(樟树、拖船埠实测水位)进行沿程插值,同一断面上不考虑横比降。初始水流速度沿断面方向上取零,沿水流方向上由曼宁公式计算得到,并进行断面流量校正。

2.2.3 边界条件

边界条件对计算结果的正确与否影响很大,在河道水流计算中有水、陆两种边界。在陆边界上,法向流速和切向流速为零;在水边界上,一般采用实测水文资料作为边界条件,如实测水位、流速、流量、悬移质及推移质泥沙资料等。选取水边界控制断面时要注意离整治工程区足够远,以免受工程影响。控制断面与水流流线要保持正交,附近区域地形要比较平缓,还要保证控制断面区域有流速、水位及泥沙资料。本次计算采用樟树、拖船埠 1997~2002 年的

实测水位及泥沙资料作为控制输入边界条件。

天然河道中通常都会有边滩和江心洲,某些滩地可能坡度平缓、滩面宽广,随着水位的变动,水边线在滩地上变动很大,需要合理地进行动边界处理。模型中采用“削切”技术,将露出单元的河床高程降至水面以下,并预留薄层水深,同时将其单元糙率取为无限大量级,使露出单元的速度计算值为零,水位冻结不变,这样就将复杂的移动边界问题处理成固定边界问题。

2.2.4 糙率的率定

河床糙率的取值对计算结果具有重要作用,其大小取决于河床组成物质、水流条件、河床平面形态等,且随流量的变化而变化。通常河段综合糙率是通过实测资料的验证来确定的,需要将实测流量分为几个流量级,不同的流量级对应不同的综合糙率。

2.2.5 整治工程对水流阻力的影响

航道整治工程对水流的阻力随河道水位的不同而有变化,在丁坝密集处适当加密网格,对与丁坝靠近的网格单元进行加糙处理。若单元未露出水面,适当加大糙率单元高度,按正常单元进行计算,若单元露出水面,则按冻结法进行处理。

2.2.6 计算网格的生成

系统选定并生成了计算边界后,根据边界节点坐标可以在边界内划分所需密度的四边形网格。为了模型计算需要,四边形网格还要进行正交化转换,正交网格生成后,各节点高程可以通过其坐标在由实测资料生成的航道 DEM 上直接读出。本系统所生成的计算域正交网格如图 2 所示。

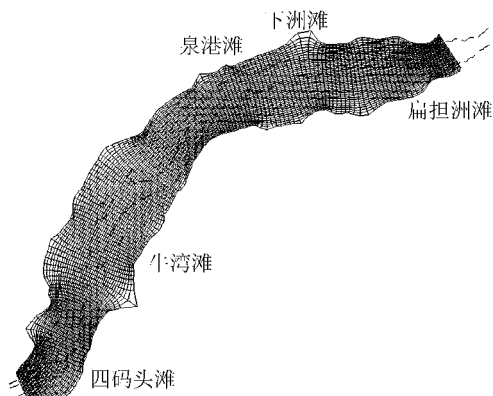


图 2 正交四边形网格

3 计算结果及分析

根据 1997~2002 年樟树等站 5 年的水文资料,模拟计算了樟树至拖船埠段 28 座丁坝对航道流场的影响,得出了本段河床经过 5 年冲淤调整后的河床形态,河道地形资料采用 1997 年实测高程数据。图 3 为樟树站流量为 2030 m³/s 时的河段流场,可以

看出丁坝改变了水流流态,将流场同航道 DEM 图层叠加可以看出河道经过冲淤调整后,主流更加集中于主槽,这有利于河道主航道的冲刷淘深,增加主航道水深。图 4 为 2002 年实测地形下樟树站流量分别为 $2030\text{ m}^3/\text{s}$ 及 $11100\text{ m}^3/\text{s}$ 时的水流动力轴线分布,可以看出流量有较大变化时水流动力轴线变化并不大,水流动力轴线及主航道保持相对稳定。图 5 为任意选取的 2 个断面(断面 1 及断面 2)1997~2002 年剖面套绘图,可以看出在丁坝工程整治作用下断面形态发生了变化,主航槽有不同程度的加深,达到了束水归槽、淤滩冲槽以增加航深,改善航道通航条件的目的。利用系统提供的编辑工具,也可以在航道中模拟增加新的丁坝或顺坝等,分别设定坝根、坝头高程及坝长并保存设定信息,模型可以按照新的工程方案进行模拟计算。



图 3 樟树站流量为 $2030\text{ m}^3/\text{s}$ 时的流场



图 4 航道 DEM 樟树站不同流量时的水流动力轴线

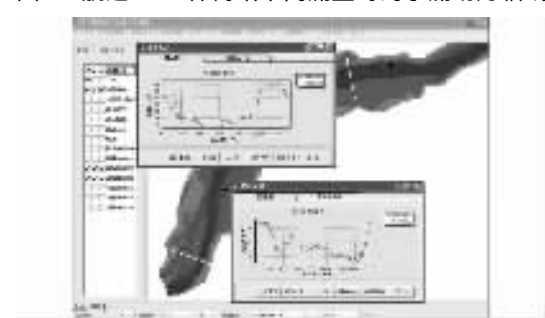


图 5 河道断面套绘图

4 结 语

在内河航运信息化建设亟待加强的背景下,本文开发了基于 GIS 和二维水流泥沙数学模型的航道

整治决策支持信息系统。该系统实现了对航道相关资料的查询、显示及管理,在航道 DEM 上任意划分断面图、进行任意区域的河道冲淤分析。建立了考虑丁坝等航道整治工程对航道演变影响的平面二维水流泥沙数学模型,可以基于 GIS 选择要计算的河段,根据需要模拟建立航道整治工程,计算结果以流场分布、水流动力轴线分布、泥沙冲淤分布等形式在系统中显示,模型计算结果可以辅助航道整治工程方案优化。结合赣江樟树-拖船埠段航道整治工程,模拟计算了 28 座丁坝整治工程对航道演变的影响,从模型计算结果来看,丁坝工程明显改变了水流流态,经过 5 年的冲淤调整,河床形态发生了变化,达到了束水归槽、淤滩冲槽以增加航深,改善航道通航条件的目的。本文研究工作可为我国内河水运工程的规划、设计、开发、运行管理等提供参考。

参考文献:

- [1] 林益才. 水工建筑物[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1996:24-36.
- [2] 周宏伟,余旭. 基于 GIS 的水道演变分析系统的设计和实现[J]. 测绘工程, 2003, 12(2):27-29.
- [3] MILNE J A. Modeling river channel topography using GIS[J]. International Journal Geographical Information Science, 1997, 11(5):499-519.
- [4] 王道席,雷鸣,王军良. 小浪底库区及下游河道地理信息系统开发[J]. 人民黄河, 2000, 22(8):44-45.
- [5] 沈敏. 地理信息系统在航道管理中的应用[J]. 广东造船, 2003(1):43-45.
- [6] 何杰,辛文杰,徐志杨. GIS 技术在潮流数学模型中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(2):34-37.
- [7] 童朝锋,严以新,林跃华. 长江口深水航道数学模型信息系统研究[J]. 海洋工程, 2003, 21(1):101-104.
- [8] 宋关福,钟耳顺. 组件式地理信息系统研究与开发[J]. 中国图像图形学报, 1998, 3(4):313-317.
- [9] 杨健新. DEM 技术在河床冲淤变化分析中的应用[J]. 人民珠江, 2004(5):44-48.
- [10] 远航,于定勇. 潮流与泥沙数值模拟回顾及进展[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(1):97-106.
- [11] 张晏方. 青岩子河段航道整治方案数值模拟研究[J]. 水运工程, 1998(3):22-25.
- [12] 陈国祥,陈界仁,沙捞,巴里. 三维泥沙数学模型的研究进展[J]. 水利水电科技进展, 1998, 18(1):13-19.
- [13] 陈界仁,陈国祥. 赣江航道整治工程泥沙数学模型[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2003, 31(2):224-228.
- [14] 金忠青. N-S 方程的数值解与紊流模型[M]. 南京:河海大学出版社, 1989:189-204.
- [15] 陆永军,张华庆. 平面二维河床变形的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展:A 辑, 1993, 8(3):273-284.

(收稿日期:2007-04-19 编辑:高建群)