

基于多波束测量数据的航道可通航性分析

黎力^{1,2,3}, 李振⁴, 蒋宇雯¹

(1. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 重庆市国土资源和房屋勘测规划院, 重庆 400020;
3. 国家遥感应用工程技术研究中心重庆研究中心, 重庆 400020; 4. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225127)

摘 要: 基于多波束测量数据快速构建高分辨率高精度航道水下地形, 然后根据流体力学模型和原胞自动机算法反演航道水位面, 最后利用航道水位、通航条件和通航尺度等综合条件分析了航道的可通航性。利用以上方法, 基于多波束测量数据和航道水文动态监测数据提高了航道可通航性分析的效率。

关键词: 多波束; 水下地形; 水位面; 航道可通航性

中图分类号: P229.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)06-0032-03

Analysis of channel navigability based on multi-beam data

LI Li^{1,2,3}, LI Zhen⁴, JIANG Yuwen¹

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. Institute of Land Resources and House Surveying and Planning of Chongqing, Chongqing 400020, China;
3. Chongqing Research Center, National Engineering Research Center for Geomatics, Chongqing 400020, China;
4. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: Based on multi-beam observation data, a high-resolution and high-precision channel underwater terrain was built. Then, the fairway water level surface can be derived from the hydrodynamic model and the cellular automata algorithms. Finally, the channel navigability can be analyzed by the fairway water level surface, navigation conditions and navigable scales. The efficiency of channel navigability can be improved based on multi-beam and channel hydrology dynamic data.

Key words: multi-beam; underwater terrain; water level surface; channel navigability

0 引言

航道可通航性检测对于航道管理、航道通航安全起着至关重要的作用。传统的航道通航安全分析, 使用的测深数据大多为单波束测量数据, 所得到的航道水下地形精度不高, 并且人工地进行分析判断, 不利于及时进行航道通航的调整调度。针对传统航道通航性分析的不足, 本文提出了利用高精度、高密度和全覆盖的多波束测量数据^[1], 采用计算机自动进行航道可通航性分析, 从而得到实时的、高精度的检测结果。本文从多波束测深数据出发, 快速构建高精度的航道水下地形, 然后基于流体力学模型和原胞自动机算法反演航道水位面, 最终利用航道水位、通航条件和通航尺度等综合条件对航道可通航性进行评价, 并且基于多波束测量数据对提出的方法进行了分析验证。

1 利用多波束数据构建高精度航道水下地形

在建立高精度航道水下地形时, 充分考虑多波束测量数据的海量特征以及航道的带状分布特征和高精度要求, 采用分块的方法, 基于每块地形数据单独构建 DEM, 最后将分块建立的 DEM 合并成一个 DEM。具体构建方法如下。

1.1 数据分块

采用地形适应性好的四叉树分块方法对多波束水深数据进行分块存储。给定数据分块后每一数据块允许包含的最大点数, 然后对水深点覆盖的范围进行不断地四分, 直到所有分块后的数据块中的点数都小于或等于限定点数为止。分块算法思想如图 1。

1.2 生成分块航道水下地形

针对航道水下地形的复杂性和危险水深等特殊

收稿日期: 2012-09-05; 修回日期: 2012-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于新型不变矩的目标识别可信度研究”(60705009); 水资源与水电工程科学国家重点实验室项目“基于遥感技术的蒸发量尺度效应研究”(2011B083)

作者简介: 黎力(1982-), 男, 湖北随州人, 在读博士, 研究方向: 遥感信息处理与应用。

通讯作者: 李振(1985-), 男, 山东枣庄人, 博士, 讲师, 研究方向: 遥感信息处理与应用和三维激光雷达理论与应用。

特征的存在,采用一种基于 TIN 内插生成格网 DEM 数据的方法,保证水下地形的地貌特征完好和内插后格网的精度。首先采用完整的凸闭包插入算法构建 TIN,然后使用动态距离加权的内插方法对格网点进行高质量内插。

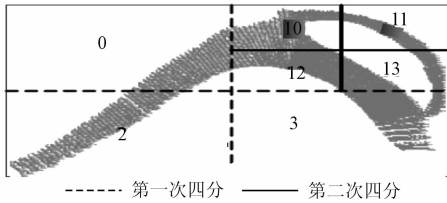


图 1 二叉树分块算法思想

1.3 DEM 拼接

建立分块 DEM 后,利用块之间的重叠区域将 DEM 分块拼接成一个整体连续无缝的 DEM,最终得到高精度的航道水下地形。

2 基于流体力学模型反演航道水位面

为了反演真实的航道水位面,采用基于水力学的水流计算模型得到详细的水流信息,然后利用广度优先搜索算法获得水流演进范围,并采用原胞自动机算法模拟航道水流的方向和速度,实现完整的航道水位面反演。

2.1 基于水力学水流计算模型演进水流

由于区域之间存在水位差使得水会往低处流动,从而产生水流演进,最终达到水位平衡状态。具体做法是首先用数值方法直接求解二维浅水方程^[2]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + 0.5gh^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} \\ = gh(S_{ox} - S_{fx}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(hv^2 + 0.5gh^2)}{\partial y} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} \\ = gh(S_{oy} - S_{fy}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: h 为水深, u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的流速, S_{ox} 、 S_{oy} 、 S_{fx} 、 S_{fy} 分别为 x 、 y 方向的河床斜率和摩擦阻力。

然后引入动力学中的上风格式对上述浅水方程进行分解,再采用水动力学离散方法对浅水方程进行离散,求解离散方程以得到非结构网格上各离散点的数值。最终获得航道水下地形各网格节点处的水深、水位和 x 、 y 方向上的水流信息。

2.2 基于广度优先搜索航道边界

将整个地形当作一张无向图,通过在图上进行连通性分析找到在某一特定水位条件下的地形图的

最大连通构件,从而得到水流演进范围。

具体做法是将三维地形投影到二维平面上,则地形高程成为二维平面格网的附属高度信息。采用广度优先搜索算法(Breadth First Search, BFS),以待判断网格是否与已经淹没的网格相邻和网格的平均高程是否低于设定的水位作为边界搜索的判断条件对无向图进行搜索,从而得到航道边界。

2.3 基于原胞自动机算法模拟航道水流流向及流速

在水流演进 CA 模型^[3]中使用 Manning 方程来计算每个原胞上的水流速度,公式如下:

已知当前原胞的水流深度 d 、宽度 W ,原胞的水面坡度 S 以及地表粗糙度系数 n ,则速度为 V :

$$V = \frac{d^{2/3} \cdot S^{1/2}}{n} \quad (4)$$

水流穿过原胞代表的地表空间所需时间 T_i :

$$T_i = W/V \quad (5)$$

以 D8 水流单流向判断算法为基础构建水流演进 CA 模型局部规则^[4],判断水流方向。

$$f: S_i^{t+1} = f[(S_i^t, S_N^t), A] \quad (6)$$

式中: (S_i^t, S_N^t) 为时刻 t 时中心原胞和邻域原胞核心状态的组合, A 为中心原胞及其邻域原胞辅助状态的组合, f 为原胞自动机的局部演化规则。

输入原胞辅助状态变量(DiEM、地表摩擦系数等),通过 Manning 方程实时计算出原胞的核心状态即可得到航道水位反演^[5]。

3 航道可通航性检测

主要基于通航水位、通航条件(例如通航尺度、水流条件、气象条件等)、船舶尺度与通航尺度等条件对航道可通航性进行分析。

首先,根据第 1 章所得的高精度航道水下地形得到航道中心线,从而生成等距、垂直于河道中心线的航道横断面。然后,根据第 2 章反演所得的航道水位面与航道横断面相交得到航道的宽度 B_1 :

$$B_1 = B_F + 2d \quad (7)$$

$$B_F = B_S + L \sin \beta \quad (8)$$

式中: B_1 为直线段单线航道宽度, m; B_F 为航迹带宽度, m; d 为船舶或船队外舷至航道边缘的安全距离, m, 船队可取 $0.25 \sim 0.30B_F$, 货船可取 $0.34 \sim 0.40B_F$; B_S 为船舶或船队的宽度, m; L 为顶推船队长度或货船长度, m; β 为航行漂角, ($^\circ$), I ~ V 级航道可取 3° , VI 级和 VII 级航道可取 2° 。

式(7)中未考虑风和流速等动态因素的影响,而风和流速对船舶航行安全非常重要。^[5] 本文在式

(7) 的基础上加入上述动态因素的影响:

假设船速 U_c (m/s) 和流速 U_s (m/s) 已知, 则流所致的漂移量为 ΔB_1 (m):

$$\Delta B_1 = U_x S / (|U_c \cos \beta + U_s \cos \alpha|) \quad (9)$$

式中: U_x 为横向速度; S 为航道长度。

船舶在风中航行时, 受风的影响既要发生偏转又要发生漂移, 风所致的漂移量为 ΔB_2 (m):

$$\Delta B_2 = K \cdot \left(\frac{B_\alpha}{B_w} \right) \cdot e^{-0.14V} \cdot V_\alpha \cdot S \cdot \frac{\sin \alpha_f}{|V \cos \alpha + U \cos \beta|} \quad (10)$$

式中: $K = \left(\frac{\rho_\alpha \cdot C_\alpha}{\rho_w \cdot C_w} \right)^{1/2}$, 一般取 0.038 ~ 0.041; B_α 为船体水线上侧受风面积, m^2 ; B_w 为船体水线下侧受风面积, m^2 , 取 $B_w = Ld$; V_α 为相对风速, m/s ; V_s 为风中船速, m/s ; α_f 为风作用方向与航道轴线的夹角($^\circ$)。

最终, 航道宽度为:

$$B_1 = B_F + 2d + \Delta B_1 + \Delta B_2 \quad (11)$$

利用计算所得的宽度和深度, 与规定的可通航的宽度深度进行比较, 初步判断通航性。

然后结合水流条件和气象环境等因素得到可通航性的进一步结论。图 2 即为可通航性检测的流程。

4 实验数据分析验证

实验中利用 ATLAS FANSWEEP 200 测量的多波束数据构建了高精度的航道地形。如图 3 所示为部分 1:500 的航道地形线化图。

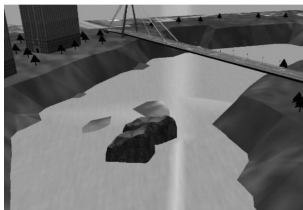


图 4 航道水流模拟图 1

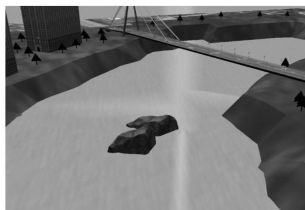


图 5 航道水流模拟图 2

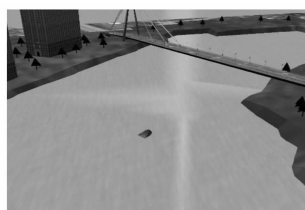


图 6 航道水流模拟图 3

5 结 语

本文提出的航道可通航性的计算机自动检测方法, 通过多波束测量数据构建了高精度的航道水下地形, 基于流体力学模型和原胞自动机算法反演了航道水位面, 从而自动计算出了航道的宽度和深度, 为航道可通航性检测提供了重要的依据。该方法弥补了传统人工判断的不足, 有利于进行实时的航道管理、航道通航安全分析。

参考文献:

[1] 刘经南, 赵建虎. 多波束测深系统的现状和发展趋势

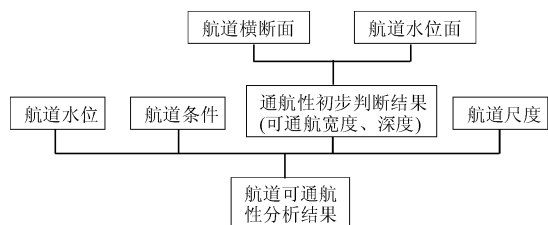


图 2 航道可通航性检测流程

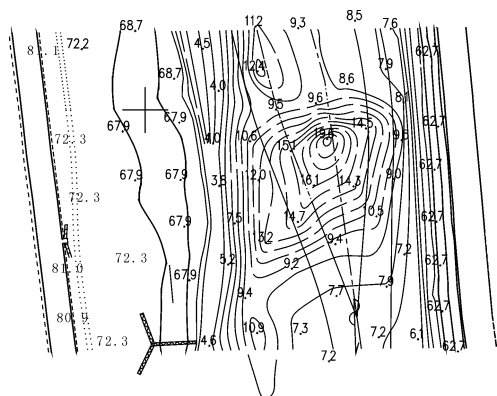


图 3 航道地形线化图

利用航道水文监测站的动态监测数据, 根据航道水位面反演理论对反演的航道水位面和航道水流变化情况, 使用 VC++ 和 Multigen Vega 进行了可视化, 如图 4~6 所示。可以看出基于流体力学模型计算演进的水流与真实水流情况相似, 能够较真实的反映出航道的水流变化。

根据所建立的高精度航道水位面和反演的水流模型, 可以对航道可通航性情况进行实时的判断。

[J]. 海洋测绘, 2002, 22(5): 3-6.

- [2] 王虹, 靳宝华, 王健. 长河段二维水流模型参数的合理选择[J]. 水力发电学报. 2005, 24(4): 114-118.
- [3] 谢余才. 河道演化的动力学模拟研究[D]. 宁夏: 宁夏大学, 2011.
- [4] Murray A B, Paola C. Properties of a cellular braided - stream model[J]. Earth Surf. Landforms, 1997, 22: 1001-1025.
- [5] 吴萍莉. 浅析 GIS 与 CA 在生态系统中的集成应用[J]. 能源与环境, 2008(1): 75-76.
- [6] 邓良爱, 杨伟, 刘明俊. 弯曲河段宽度与航道通航能力关系研究[J]. 交通信息与安全, 2010, 28(6): 14-16.