引文格式：胡洁,张涛,刘朋俊,等. 基于断面加密和微分插值的水下地形拟合构建技术研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(9): 10-12. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.09.003

基于断面加密和微分插值的水下地形拟合构建技术研究

胡　洁[1]，张　涛[2]，刘朋俊[1]，姜成桢[1]，丁怡博[1,3]
（1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司，河南 郑州 450003；2. 黄河万家寨水利枢纽有限公司，山西 太原 030001；
3. 四川大学 水利水电学院，四川 成都 610065）

摘　要：在国家推行网络强国战略大背景下，数字孪生流域和智慧水利建设逐渐为流域水利信息化赋能。江河流域重点区域的数据底板建设是实现数字孪生流域建设的重要基础。缺少资料或设备支撑区域的水下地形模拟和水上水下无缝融合是数据底板建设的瓶颈。基于多源测量数据，提出了一种结合虚拟断面加密和微分插值的水下地形模拟方法，对水下地形模拟结果与陆上地形进行融合，生成水上水下无缝融合的库区地形成果。该方法已成功应用于数字孪生万家寨和小浪底建设项目中，为数字孪生水利项目建设提供了技术支撑和解决方案。

关键词：水下地形；河道断面；数字孪生流域；断面插值技术
中图分类号：P231　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）09-0010-03

Research on Underwater Terrain Fitting Construction Technology Based on Sectional Encryption and Differential Interpolation

HU Jie[1], ZHANG Tao[2], LIU Pengjun[1], JIANG Chengzhen[1], DING Yibo[1,3]
(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;
2. Y.R Wanjiazhai Water Multi-purpose Dam Project Co., Ltd., Taiyuan 030001, China;
3. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Under the overarching national strategy of developing Internet technology, the development of digital twin basins and smart water conservancy management is progressively empowering the informatization of basin water conservancy. Currently, the construction of data platforms in key areas of river basins is an important foundation for realizing the development of digital twin basins. The development bottlenecks in the data platform construction include the lack of data or equipment support in regional areas for simulating underwater terrain techniques and seamless integration technology for dry-wet boundaries. Based on multi-source measurement data, we proposed an underwater terrain fitting construction method combining sectional encryption with differential interpolation. This method had been successfully applied to the digital twin construction projects of Wanjiazhai and Xiaolangdi, which could provide technical support and solutions for the construction of digital twin water conservancy projects.

Key words: underwater terrain, river section, digital twin basin, section interpolation technology

根据水利部《数字孪生流域建设技术大纲》关于“构建全国统一、及时更新的L1级数据底板，主要江河流域重点区域建成L2级数据底板，重点水利工程建成L3级数据底板”的要求，一体化河道三维建模已成为数据底板建设的首要任务[1-2]。水陆一体的地形数据是数字孪生数据底板建设的骨架，可反映区域地形地貌空间形态、水流连通性以及陆上侵蚀与水底淤积，是精细化孪生场景构建、可视化支撑泥沙冲淤分析、防洪淹没预演等功能的基础[1,3]。陆上连续地形数据可通过航空航天摄影[4]、激光点云扫描[5]等技术采集，但获取水下连续地形数据较困难、成本较高。水下地形是重要的水文特征数据，每年通过断面法在重要库区、河道采集汛前汛后两期断面数据，作为支撑水利专业分析的主要水下地形数据，因此积累了大量的历史时序数据[6-7]。实地测量线状布设的方式难以支撑河道二维计算，且在可视化表达上也不直观[6]。利用无人船搭载多波束进行水下测绘，可获取连续点云数据，但受限于成本，往往仅用于坝前漏斗区、淤积三角洲顶坡段、支流拦门沙坎等冲淤变化明显的重点水下区域[7]。传统水文测量[8]的离散线状断面数据和多波束采集的局部点云数据在空间上均不连续，难以满足水利数字孪生建设对物理流域、物理水利工程全要素

项目来源：国家重点研发计划资助项目（2023YFC3209200）；智慧中原地理信息技术河南省协同创新中心科研课题（2023C005）。
第一作者简介：胡洁（1981—），硕士，正高级工程师，主要从事数字孪生水利设计与实施工作，E-mail：379673853@qq.com。

数字映射和精细表达的需求，无法直观呈现河道、库区水底形态和淤积变化，也无法为水利专业模型[9]（如二维水动力模型）提供友好的数据支撑，亟需一种便捷高效的算法和技术实现对线状断面数据和局地多波束数据的拟合，从而构建空间上连续的多时序水下地形数据[10]。本文提出了一套完整的基于虚拟断面加密和微分插值的水下连续地形快速拟合方法，为数字孪生[11-13]水利数据底板建设提供核心技术支撑。

1　研究区概况与数据来源

本文选取的研究区为万家寨龙口库区。万家寨水利枢纽工程位于黄河北干流托克托至龙口河段峡谷内，是黄河中游规划开发的8个梯级中的第一个工程，1998年建成蓄水，以供水、发电为主，兼有防洪、防凌等综合功能，总库容为8.96亿m^3。龙口水利枢纽2009年建成蓄水，位于万家寨下游25.6 km，开发任务是发电和对万家寨调峰流量进行反调节，总库容为1.96亿m^3。2022年万家寨水利枢纽被水利部列为11个数字孪生水利工程先行先试重点工程之一，自此数字孪生万家寨项目建设工作开始启动。数据底板是数字孪生万家寨建设的算据支撑，库区的水下地形更是不可或缺，承载着数字化场景建设和库区冲淤分析评价的重要任务。因此，本文以数字孪生万家寨项目需求为依托，对库区水下地形模拟工作进行了深入研究。

本文采用2022年汛前万家寨龙口库区干支流的93条大断面处的多波束测绘带状断面数据、万家寨龙口坝前漏斗区多波束扫描数据以及同期拍摄的0.2 m分辨率无人机影像数据。

2　技术方法分析

2.1　技术原理

基于库区断面数据、坝前漏斗区多波束扫描数据、遥感影像提取的断面测量同期的水边线，利用数据处理、数据插值、DEM制作、数据裁剪、格式转换等GIS功能[14]与程序开发相结合的方式，模拟生成库区水下地形，并与陆上地形进行融合处理，形成水上水下无缝融合的库区地形数据，为洪水在河槽中的演进模拟、库区冲淤变化分析提供数据基底支撑。

2.2　技术流程

1）遥感水边线智能提取。构建适用于库区水边线目标的图像识别模型，选择合适优质的数据集进行训练并测试；再选择合适的目标识别模型提取水边线目标，提取结果见图1。

2）实测断面数据处理。通过分析实测断面数据可知，原始测量数据主要包括XLS格式和TXT格式两种数据文件[15]。在TXT格式的实测断面数据中，状态1表示水面以上的测量值，0表示水面测量值，−1表示水面以下的测量值。由于原始数据中的测量点没有坐标信息，若要通过GIS分析利用这些数据，则需将原始测量数据处理为带有坐标信息的离散点，并转换为SHP格式数据文件（图2），其中secName字段为断面名称，z为高程。

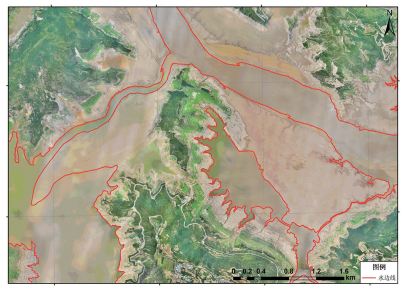


图1　水边线提取结果

3）编程点插值。基于原始测量点数据，根据断面名称生成每个断面的线要素，构建断面线矢量图层；再将断面线矢量数据分别与左、右岸水边线进行相交分析，生成左、右岸水边点图层，并根据原始断面测量数据拟合的多项式函数计算水边点处的高程值，若为支流水边线，则延长水边线至深泓线，将延长后的水边线看作新的水边线；最后利用左、右岸水边点分别分割左、右岸水边线，得到两两断面间的水边线。

首先遍历水边线，对每段水边线进行等距离分割得到水边线上的分割点，并根据线性插值计算每个分割点的高程值；然后遍历断面线，对每个断面线进行等距离分割得到断面线上的分割点，并根据多项式插值计算每个分割点的高程值；最后遍历左、右岸水边线上的分割点，对应的分割点组成一个虚拟断面，对虚拟断面进行等距离分割生成虚拟断面上的分割点，并根据线性插值计算对应断面上分割点的高程值。河道断面插值结果见图3。

	secName	X	Y	z
1	黄河6	617 217.022 764	3 868 842.608 436	265.730...
2	黄河6	617 222.517 672	3 868 850.963 434	262.450...
3	黄河6	617 225.265 126	3 868 855.140 933	261.740...
4	黄河6	617 209.879 385	3 868 831.746 938	270.080...
5	黄河6	617 210.428 875	3 868 832.582 438	268.920...
6	黄河6	617 213.176 329	3 868 836.759 937	268.110...
7	黄河6	617 214.824 801	3 868 839.266 437	266.970...
8	黄河6	617 199.439 060	3 868 815.872 442	275.900...
9	黄河6	617 207.131 931	3 868 827.569 439	273.320...
10	黄河6	617 208.780 403	3 868 830.075 939	271.390...
11	黄河6	617 209.329 894	3 868 830.911 439	271.250...
12	黄河6	617 182.954 338	3 868 790.807 448	283.780...
13	黄河6	617 191.196 699	3 868 803.339 945	283.430...

图2　SHP数据结构示意图

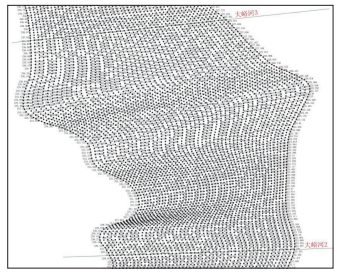


图3　编程点插值结果

4）水下地形模拟与水上地形融合。基于GIS方法，利用实测断面点、实测断面插值点和插值断面点内插生成库区水下地形[16]；在地形编辑软件中，检查模拟的水下地形成果，对明显不合理的地方进行编辑

优化，确保模拟水下地形成果的合理性和准确性。将模拟生成的水下地形成果与实际遥感影像进行对比，识别出模拟结果中可能存在的不合理或不准确之处。对比模拟结果中的河岸（水上和水下地形交界处）地形特征（地形起伏、岩石、沙波等）与实际遥感影像中的对应区域，验证模拟结果的准确性和真实性。针对水下地形模拟的不合理之处，在水面和水下地形交界处创建一个过渡带，通过插值技术来调整过渡带内的高程值，使得水下地形逐渐过渡到水面地形高程。针对河道中线处的水下地形异常（如深度突变、地形不连续、岩石或障碍物等），通常采用光滑算法进行处理。水下地形异常区域优化前后对比见图4。本文主要采用Bezier曲线[17]的插值和光滑技术。Bezier曲线通过控制点和节点定义曲线形状，可通过调整控制点来实现曲线的平滑过渡。本文利用Bezier曲线描述水面和水下地形交界处的形状，使得地形变化更加平滑。

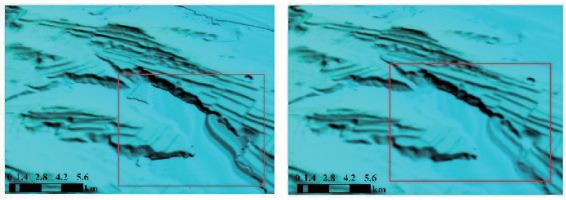


图4 水下地形异常区域优化示例

在地形优化处理后，需对交界处的纹理和颜色进行过渡，实现水上水下地形的完美融合，首先在水上和水下地形交界处创建一个渐变区域的过渡带，从水面纹理到水下地形纹理逐渐变化，实现纹理融合；再调整水上和水下地形的颜色和色调，确保它们在视觉上的一致性和自然感。

5）水下地形精度分析。随机抽取实测断面上100个监测点不参与建立水下地形，将剩余测量点生成水下地形，再逐一比较这些点的内插高程和100个监测点的测量高程，计算得到各点的误差和中误差。水下地形实测值与模拟值的比较结果见图5，R^2为0.95，均方根误差为2.65 m，平均误差为0.15 m，相对误差为0.016%，已到达我国DEM生产技术规定《1∶10 000数字高程模型生产技术规定》的一级中误差（丘陵地小于1.2 m）标准，构建的水下地形符合精度要求。

3 推广应用

每年汛前汛后都会对建成水库进行库区断面测量，从而了解库区冲淤情况，估算水库使用寿命，尤其对于多沙河流，可通过模拟的水下地形直观展现库区的冲淤变化情况。该方法掌握了基于断面数据模拟水下地形的技术流程、注意事项，编写了利用断面实测点、水边点等数据进行两两实测断面间断面点插值

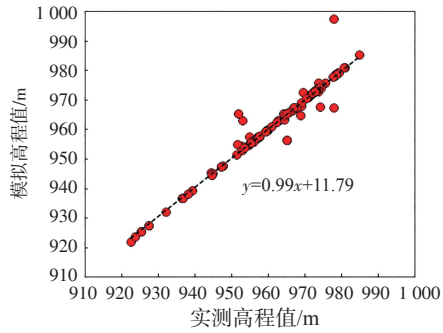


图5 水下地形实测值与模拟值比较

程序，技术路线合理、实用性强，模拟的水下地形精度可靠，在水库库容计算、库区冲淤变化分析、洪水实时演进模拟等工作中具有较强的推广应用价值。

1）基于该方法生产的万家寨影响区至龙口下游影响区整个万家寨管辖黄河河道的水下地形在数字化场景建设、库区泥沙淤积分析等业务中得到推广应用，部分成果见图6、7。

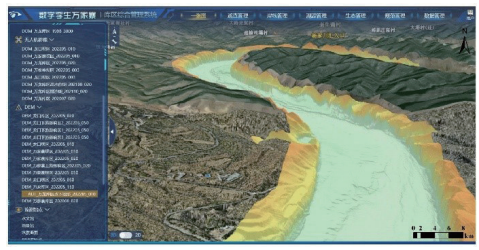


图6 基于水下地形的万家寨库区三维数字化场景建设

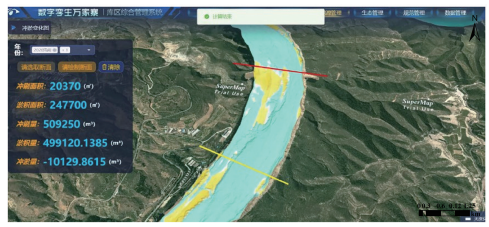


图7 基于水下地形的万家寨库区泥沙冲淤定量分析

2）基于该方法获得的小浪底库区多期汛前汛后的水下地形在冲淤分析应用中得到推广应用，成果见图8、9。



图8 拟合后小浪底库区水下地形

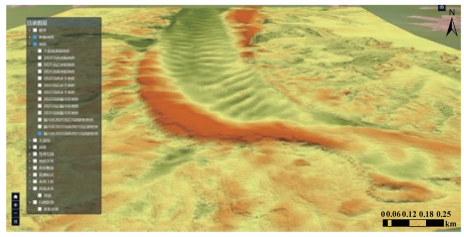


图9 小浪底库区冲淤变化直观展示

（下转第42页）