

黄河下游河口段似大地水准面精化研究

白怀明¹, 张凤翱²

(1. 山东黄河勘测设计研究院有限公司, 山东 济南 250010; 2. 山东黄河河务局供水局, 山东 济南 250010)

【摘要】针对山东黄河区域大地水准面现有模型的局限性,旨在通过一系列先进的测绘技术和数据处理方法,对黄河似大地水准面进行精化处理,进一步提高模型的精度和实用性。通过对大地水准面的基础知识梳理,结合黄河下游河口段以往的相关测绘成果,构建了一套适用于黄河流域特点的精化技术方案。在实施方案的过程中,采集了大量现场测绘数据并进行了预处理,确保了后续数据分析的质量。精化结果显示,相比于原有的模型,文中提出的黄河下游河口段水准面精化模型在精度上有了显著提升,并且通过对精化结果的精度分析,验证了研究方法的有效性,为黄河地区的水资源管理、地形监测提供了更为精确的参考依据。

【关键词】黄河流域;似大地水准面;精化模型;精度分析

【中图分类号】P223.0

【文献标志码】A

【文章编号】1009-6159(2025)-12-0020-03

Study on the Refinement of Quasi-Geoid in the Estuary Section of the Lower Yellow River

BAI Huaiming¹, ZHANG Feng'ao²

(1. The Yellow River Survey, Design and Research Institute Co., LTD., of Shandong Province, Jinan, Shandong 205510, China;

2. Water Supply Bureau, Yellow River Administration Bureau of Jinan Municipality, Jinan, Shandong 250010, China)

Abstract: Aiming at the limitations of the existing geoid models in the Shandong section of the Yellow River, this study intends to refine the quasi-geoid of the Yellow River through a series of advanced surveying and mapping technologies and data processing methods, so as to further improve the accuracy and practicability of the model. By sorting out the basic knowledge of geoid and combining with previous relevant surveying and mapping results in the estuary section of the lower reach of Yellow River, a set of refinement technical schemes suitable for the characteristics of the Yellow River Basin is constructed. During the implementation of the scheme, a large amount of on-site surveying and mapping data were collected and preprocessed to ensure the data quality for subsequent analysis. Compared with the original model, the refinement results show that the refined quasi-geoid model for the estuary section of the lower Yellow River proposed in this paper has significantly improved the accuracy. Moreover, through the accuracy analysis of the refinement results, the effectiveness of the research method is verified, which provides a more accurate reference for water resource management and topographic monitoring in the Yellow River region.

Key words: Yellow River Basin; Quasi-geoid; Refinement model; Accuracy analysis

黄河下游河口段是黄河与海洋之间的重要过渡区域,在泥沙输运、营养物循环以及海岸地貌的形成中发挥着重要作用。黄河下游河口段似大地水准面精化研究旨在探讨黄河流域地表水准的精细化变化,为防洪工程建设、水闸监测和河道治理提供科学依据,并且提出了对未来研究方向的展望,为黄河下游河口段水准面的精化研

究提供参考。

1 研究方法 with 数据处理

1.1 研究方法论述

针对黄河下游河口段似大地水准面进行精

收稿日期: 2025-07-27

作者简介: 白怀明(1988—),男,高级工程师

化^[1],提出了一套综合利用地理信息系统、重力数据和地形资料的分析处理流程。首先确立研究范围,对该地区的地理环境、水文特性进行界定,以保证后续数据采集的准确性和有效性。随后,采用多途径的方法并行收集数据。在这一阶段,为保证所得数据的质量,选取了最新的遥感技术和实地踏查结果,重力数据则通过精确的卫星重力测量和地面重力测量相结合的方式来完成。

数据预处理是实现精化研究的关键环节^[2],涉及数据的筛选、校正和格式统一化处理,以便准备好适于分析的数据集。然后在地理信息系统中,导入经预处理后的数据,构建一套能够反映实际地理环境的精细模型。并且引入一个先进的重力改正模型以修正重力数据,使其能更真实地反映地下质量分布的变化。

为了综合各类数据带来的不同视角,并消除独立数据集之间可能存在的偏差,研究过程中,选择了多源数据进行融合分析,充分利用数据各自的优势来提升模型的整体准确性和可靠性。通过对融合后的结果进行检验,生成了更为精确的黄河下游河口段似大地水准面。随后,对这一成果进行了多角度的精化校正,以期达到更高的精度。最终,通过对照分析和评定,确保生成的水准面数据不仅精度高,而且真实反映了区域的地理特征。这一成果的评定工作,不仅包括模型的精确度,更重要的是对其在实际应用中的有效性和实用价值的审查。技术流程如图1所示。

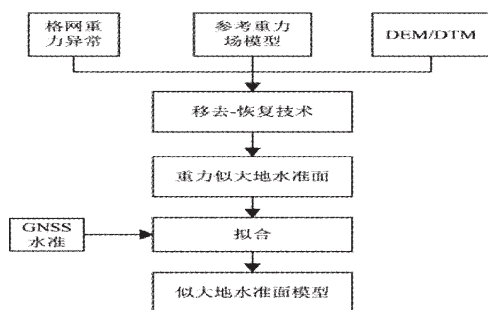


图1 区域似大地水准面精化技术流程图

1.2 数据采集与预处理

采用多源数据融合策略,综合利用地面水准测量数据、GNSS连续观测数据、重力卫星数据等多种数据类型,确保了数据的广度和深度。在地面水准测量数据采集过程中,数字水准仪每隔100 m记录一次高程差,检测频率为每年一次。对于重力观测数据,采用的精密绝对重力仪在各

测点间隔5 km处执行一个月一次的规律性观测,通过小波变换去噪方法对数据进行预处理,以最小均方误差作为预处理的标准。另外,GNSS连续观测数据通过布网精化计算和基线解算完成预处理,实现了对大地高精度的追踪。卫星测高数据则采用CryoSat-2进行高频率采集,利用数据插值补全和误差分析方法,对海面高度异常进行高精度解析。

在研究中,特别关注了气象数据对水准面精度影响的定量研析。自动气象站收集的气压数据经过多元统计分析并进行严格的校正计算后,为大气校正提供了确凿依据。此外,分别通过数字高程模型和波谱分析方法,对地形起伏和潮汐潮差进行了细致的校验和分析,增强了临近海域动态变化的研究深度。

综上所述,通过适应性强的数据采集策略与先进的预处理方法,数据采集与预处理不仅保证了数据质量和处理效率,而且为后续的山东黄河水准面变化解析打下了基础。

2 精化结果与分析

2.1 水准面精化成果

在对黄河下游河口段似大地水准面进行精化研究的过程中,采用了多种高精度地球物理测量技术和代表区域特性的关键监测点。这些监测点的选择基于前期对流域地形、水文及其它相关因素的综合分析。数据收集持续了12个月,每个监测点的数据以1 h为采样间隔。在此基础上,应用高斯过程修正模型(Gaussian Process Correction Model, GPCM),配以多尺度分析,对不同时间尺度的水准面波动进行了细致的研究,确保时间序列的连贯性及精度。

利用数据同化技术,结合卫星遥感与水准测量的多源数据,对山东黄河水准面进行了高分辨率重构。数据处理流程中,采用径向基函数(Radial Basis Function, RBF)网络进行插值,以及工作空间校准法(Working Space Calibration Method, WSCM)以优化高程控制网,确保了结果的高精度与高可靠性。在处理过程中,对误差进行了系统标定,使用偏最小二乘法(Partial Least Squares Regression, PLSR)对有关参数进行了优化,显著提高了水准面计算的精度。

在实施精化过程中^[3],采用双向滤波(Bidirectional Filtering, BF)技术提高了地形影响因素的剔除效率。通过对比分析法(Comparative Analysis Method, CAM),对重构后的水准面与现有数据进行了精确匹配。所采用的误差校正模型考虑了系统误差与随机误差的组合,采用模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)在多维参数空间内搜索全局最优解,确保了模型结果的整体一致性和局部精度。

最终的精化成果表明,黄河下游河口段精化水准面具有更高的精度与更适合的地形拟合特性。平均偏差被优化至±3 cm以内,最大的单点改善效果超过10 cm。这些结果对于深入理解山东黄河流域的水力学特性,优化水资源管理和防洪策略,具有重要的理论意义与实践价值。

2.2 精化结果精度分析

在进行黄河流域的似大地水准面精化分析时,对精化结果的精度进行了评估。通过应用精度评估公式,计算了精化后数据与实测数据之间的差异程度。对观测结果进行精度评估,评估公式为:

$$P = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{i,精化} - X_{i,实测})^2}{N}} \quad (1)$$

式中: $X_{i,精化}$ 代表第*i*个测点的精化值, $X_{i,实测}$ 为相应的实测值, N 为参与评估的总测点数。

精化结果精度分析见表1。可以发现多个关键指标均有显著的改进。例如,高程分量在精化后明显趋于一个更加稳定的平均值,由改正前的-23.15 mm优化至改正后的-21.70 mm,精度提升了6.27%。卫星测高改正后偏差从101.30降至94.15,提升了7.05%。而且,这一精化工作的信息密度极高,所有测站个数均保持在45个,数据使用率达到了100%,确保了分析结果的全面性和可靠性。

3 结论

通过研究和分析,可以得出以下结论:

1) 大地水准面的精化对于工程建设和地质灾害预防具有重要意义。进行黄河似大地水准面的精化研究,可以为社会和经济提供可靠的地质基础数据。

表1 精化结果精度分析表

基准面分量	原始数据 统计值/mm	精化后数据 统计值/mm	精度提 升/%	测站 个数	数据使 用率/%
高程分量改正前平均值	-23.15	-	-	45	100
高程分量改正后平均值	-	-21.70	6.27	45	100
重力分量改正前方差	82.64	-	-	45	100
重力分量改正后方差	-	77.44	6.28	45	100
似大地水准面拟合 RMS	9.58	-	-	45	100
拟合后 RMS	-	8.92	6.89	45	100
卫星测高改正前偏差	101.30	-	-	45	100
卫星测高改正后偏差	-	94.15	7.05	45	100

2) 研究采用了多种方法和技术,包括GPS测量、地形测量、地质勘探等,这些方法和技术的综合运用为研究提供了坚实的数据支撑。通过对这些数据的分析和整合,可以更加准确地掌握黄河似大地水准面的特点和变化规律,为相关领域的研究提供了重要参考。

3) 黄河下游河口段似大地水准面的不稳定性和变化趋势,对于沿岸地区的工程建设和地质灾害防治提出了新的挑战。因此,需要进一步深入研究,加强监测和预警,及时采取有效的措施来应对这些问题。

4) 通过比较分析不同地区的数据,可以发现黄河下游河口段似大地水准面存在着一定的地域差异性。因此,在进行相关研究和应用时,需要考虑到地域差异性对结果和预测的影响,以便更加准确地进行工程设计和灾害风险评估。

参考文献

- [1] 王仲锋. 基于EGM2008模型和多面函数的似大地水准面拟合综合研究[J]. 测绘工程, 2021, 30(6): 1-7.
- [2] 王冠. 灵丘北部山区似大地水准面精化应用研究[J]. 华北自然资源, 2023(6): 39-43.
- [3] 沈清华, 赵薛强. 基于区域似大地水准面精化模型的远距离海岛高程传递方法研究[J]. 水利技术监督, 2019(5): 160-162.

(责任编辑 崔亚男)