



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 基于 GNSS 的强涌潮河口大闸形变监测与潮汐响应分析
作者: 李亚飞, 姚宜斌, 祁敏敏, 吴承红, 郭子槐, 王伟棠, 张良
DOI: 10.13203/j.whugis20240059
收稿日期: 2024-09-18
网络首发日期: 2024-10-08
引用格式: 李亚飞, 姚宜斌, 祁敏敏, 吴承红, 郭子槐, 王伟棠, 张良. 基于 GNSS 的强涌潮河口大闸形变监测与潮汐响应分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240059>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240059

引用格式：

李亚飞, 姚宜斌, 祁敏敏, 等. 基于 GNSS 的强涌潮河口大闸形变监测与潮汐响应分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240059 (LI Yafei, YAO Yibin, QI Minmin, et al. Deformation Monitoring and Tidal Response Analysis of Strong Surge Tide Estuary Sluice Based on GNSS [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240059)

基于 GNSS 的强涌潮河口大闸形变监测与潮汐响应分析¹

李亚飞^{1,2}, 姚宜斌^{3,4}, 祁敏敏¹, 吴承红¹, 郭子槐³, 王伟棠³, 张良^{3,4*}

1 浙江省水利河口研究院 (浙江省海洋规划设计研究院), 浙江 杭州, 310017

2 浙江建设职业技术学院, 浙江 杭州, 311231

3 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉, 430079

4 湖北珞珈实验室, 湖北 武汉, 430079

摘要：河口大闸受潮汐涨落的影响可能产生相对于河岸的微小形变，研究大闸相对形变的潮汐响应对大闸安全运维具有重要意义。GNSS (global navigation satellite system) 是一种重要的形变监测手段，常用于大坝高精度形变监测或桥梁震动特征的提取。现有的 GNSS 监测模式难以满足潮汐响应信号特征的识别。以曹娥江大闸为研究对象，布设 GNSS 基准站和监测站，对大闸进行形变监测，提出基于 GNSS 的数小时级周期亚毫米级形变信号提取方法，识别河口大闸形变的潮汐响应。研究表明，采用 5 分钟滑动步长和 2 小时解算窗口可以有效保留大闸形变的潮汐响应特征。受潮汐涨落影响，曹娥江大闸对较大的 M2 和 S2 分潮响应最大，但响应信号微弱，同频振幅在天方向不超过 1.5 mm，在大闸顺向和大闸垂向不超过 1 mm。整体上，大闸对各分潮的响应在振幅大小上呈线性正相关，但对于个别分潮（如 S4、K1）出现了过大响应，可能是由于同频其他信号引起。

关键词：GNSS；形变监测；河口大闸；潮位调和；潮汐响应

Deformation Monitoring and Tidal Response Analysis of Strong Surge Tide Estuary Sluice Based on GNSS

LI Yafei^{1,2}, YAO Yibin^{3,4}, QI Minmin¹, WU Chenghong¹, GUO Zihuai³, WANG Weitang³, ZHANG Liang^{3,4*}

1. Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary (Zhejiang Institute of Marine Planning and Design), Hangzhou 310017, China

2 Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, China

3 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

收稿日期：2024-09-18

基金项目：浙江省水利厅科技计划 (RC2160)；湖北省自然科学基金青年项目 (2023AFB058)；湖北珞珈实验室开放基金 (230100010)。

第一作者：李亚飞，硕士，高级工程师，研究方向为海洋测绘以及水利测绘。815088881@qq.com

通信作者：张良，博士，副研究员。lzhang2019@whu.edu.cn

Abstract: Objectives: The deformation of the river estuary sluice gate may be slightly affected by the tidal fluctuations, and studying the sluice gate's response to tidal deformation is of great significance for the safety and maintenance of the sluice gate. GNSS is a significant tool for deformation monitoring, commonly used for high-precision deformation monitoring of dams or extraction of vibrational characteristics of bridges. However, existing GNSS monitoring mode is inadequate for identifying the characteristics of tidal response signals. **Methods:** In this study, the Cao'e River Sluice was selected as the research subject. GNSS base and monitoring stations were set up to observe the sluice's deformation. And a method utilizing GNSS-based monitoring techniques was proposed to extract sub-millimeter-level deformation signals with a period of several hours, aimed at identifying the tidal response of the river estuary sluice gate. **Results:** The results show that due to tidal fluctuations, the Cao'e River Sluice has the greatest response to the larger M2 and S2 partial tides, but the response signal is weak, with the same frequency amplitude not exceeding 1.5 mm in the U direction, and not exceeding 1 mm in the X and Y directions. Overall, the sluice's response to each partial tide is linearly positively correlated in terms of amplitude size, but an excessive response to individual partial tides (such as S4, K1) has occurred, which may be caused by other signals of the same frequency. **Conclusions:** Using a 5-minute sliding step and a 2-hour solution window can effectively retain the characteristics of the tidal response. This method facilitates the accurate monitoring and assessment of the sluice gate's response to tidal influences, thereby enhancing the safety and maintenance strategies for estuarine sluice structures.

Key words: GNSS, deformation monitoring, estuary sluice gate, tidal harmonic analysis, tidal response

GNSS (Global Navigation Satellite System) 是一种重要的高精度定位技术, 已广泛边坡、桥梁、大坝、高层建筑等目标的形变监测^[1-7]。在 GNSS 形变监测中, 主要采用低频静态解算和低频动态解算两种模式。低频静态解算模式通常可以发现长期形变特征。在理想观测条件下, 通过长时间 (如 24 h) 的静态解算, GNSS 形变监测精度可达水平 1-2 mm, 垂直 2-3 mm 的精度^[8]。大坝形变监测通常采用这种模式^[9]。比如南水北调东线工程双王城水库大坝监测中, 采用日解模式实现了水平 1 mm、垂直 2 mm 的监测精度, 发现了双王城水库的不均匀沉降^[10]; 在对意大利撒丁岛的阿尔布雷亚大坝进行监测中, 采用日解模式的解算精度可以达到亚毫米级^[11]。但这种长时段解算的方法平滑了高频信号, 难以捕捉日内位移变化和低频影响因素的响应。高频动态解算模式则保留了高频信号, 有利于分析监测目标的高频变化特征^[12]。桥梁形变监测通常采用这种模式^[13]。如在广州鹤洞大桥进行监测研究中, 采用 20Hz 高频动态解算结果, 识别出桥梁震动频率特征^[14]。高频动态解算虽然保留了高频信号, 但由于其解算精度只有数毫米至厘米级, 只能提取较大的位移信号。如陈渠森等^[15]采用 10Hz 高频 GNSS 数据对英国福斯路桥悬索塔进行监测研究, 提取了长期桥梁变形趋势与 9.3 mm 的年度周期信号。

因此, GNSS 在监测频率和监测精度上存在矛盾。现有 GNSS 变形监测方法 (无论是低频静态解算还是高频动态解算) 都难以满足河口大坝的监测要求。河口大坝主要的扰动因素是潮汐涨落^[16], 而潮汐受日月引力而形成, 最主要的周期为数小时至十数小时^[17], 静态日解或半日解模式无法满足响应频率信号的提取。同时, 潮汐各分潮频率的差异较小, 如 S2 和 K1 分潮仅相差 0.08 h^[18], 其提取和识别对采样频率提出了更高的要求。此外, 河口大坝受扰动发生形变量只有 1 mm 级甚至更小, 高频动态解算模式的噪声较大, 如此微弱的信号往往淹没在噪声中。

钱塘江是世界三大强涌潮河流之一。曹娥江大坝工程地处钱塘江下游的曹娥江口, 是中国第一河口大坝。曹娥江河口涌潮高度可达 2-3 m, 涌潮压力达 70 - 90 kPa^[19]。在如此强列的涌潮冲击下, 大坝可能产生形变、震动等现象, 影响大坝安全。对大坝进行高精度形变监测具有重要的意义。

本文以曹娥江大坝为研究对象, 基于 GNSS 对进行形变监测, 提出基于 GNSS 的小时级周期亚毫

米级形变信号提取方法，识别河口大坝潮汐响应特征。

1 数据与方法

1.1 GNSS 数据

如图 1 所示，曹娥江大坝所在位置及 GNSS 监测点位置示意图。为了对曹娥江大坝进行形变监测，在泄洪闸上安装 GNSS 接收机一套，同时在左岸布设基准站。基准站和监测站均采用合众思壮 MIS20 一体化监测接收机。监测站与基准站距离约为 315 m。所搜集到的数据为 2023 年 1 月 29 日至 3 月 19 日共 50 天。为便于分析，将解算结果转换到闸向坐标系。坐标系的原点设置为大闸中点附近的某一固定坐标，其 X 轴沿大闸指向东南方向，即大闸顺向；Y 轴垂直于大闸指向东北方向，即大闸垂向；Z 轴垂直于所在的椭球面，即天向；X、Y、Z 三个坐标轴形成左手坐标系。

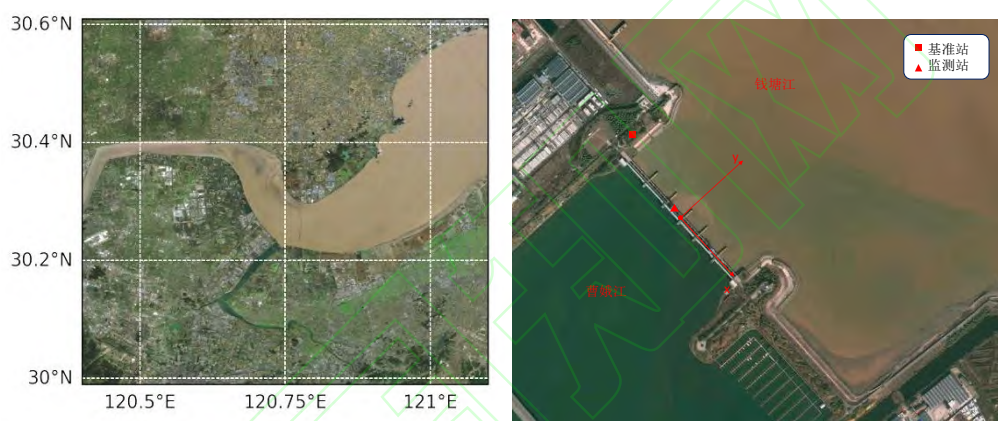


图 1 曹娥江大坝与监测点位图
Fig. 1 Location of Cao'e River Sluice and Monitoring Sites

1.2 水位数据

在曹娥江大坝泄洪闸的外侧和内侧，均安装有水位仪。水位观测时间间隔为 5 分钟，所搜集数据时间段与 GNSS 一致。在此期间的闸外水位、闸内水位及闸内外水位差如图 2 所示。其中，闸内水位较为稳定，基本维持在 3.8 m 左右。但由于开闸泄洪的原因，水位多次突然下降，最低达到了 2.5 m。由于闸外即为钱塘江，因此其水位变化剧烈。闸外水位最低至 2.5 m，最高可达 5 m。一日两潮，周而复始。此外，受开闸泄洪的影响，闸内外水位均有非平滑突变现象。由于闸内水位远比闸外水位平稳，且水位总体高于闸外水位。因此，闸内外水位差整体也呈现周期性变化。

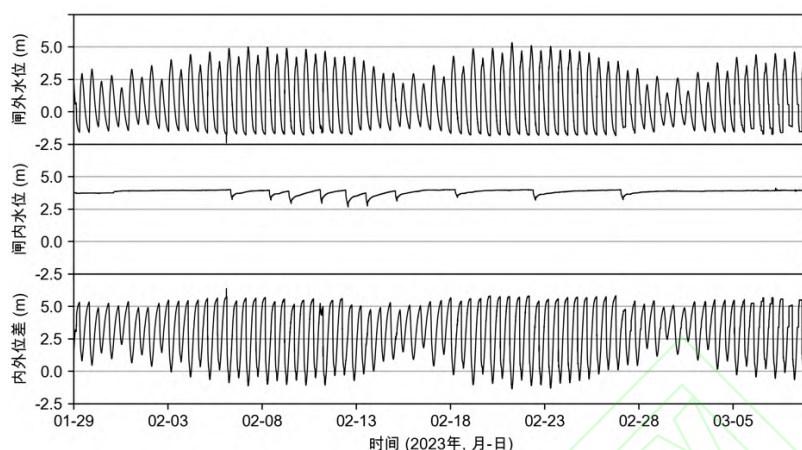


图 2 潮位时间序列图
Fig. 2 Tidal level time series diagram

1.3 GNSS 解算

GNSS 解算配置如表 1 所示。虽然 MIS20 接收机可以接收 BDS、GPS、GLONAS、Galileo 四星信号，但由于 GLONASS 模糊度固定较为复杂，在解算时仅采用 GPS、BDS、Galileo 的观测值。所采用的定位模式为双差相对静态定位模式，解算时段窗口长度为 2 小时和 24 小时；对于 2 小时解，为提高分潮频率的可分辨能力，采用 5 分钟步长的滑动窗口进行处理；因站间距离较近，忽略对流层和电离层延迟参数。所采用的解算软件基于 RTKLib 2.4.3 的源代码进行优化而来^[20]。

表 1 GNSS 变形监测解算配置
Tab. 1 Settings of GNSS deformation monitoring

选项	配置
星座	GPS、BDS、Galileo
频率	GPS: L1/L2、BDS: B1I/B3I、Galileo: E1/E5a
卫星轨道	广播星历
采样间隔	15 s
截止高度角	15°
解算时段长度	2 小时/24 小时
观测值	双差伪距和相位观测值
电离层延迟	忽略
对流层延迟	忽略
定位模式	静态
模糊度策略	连续

1.4 潮位调和分

调和分是将潮位表示为不同频率周期分潮的线性综合^[21]，通常表示为

$$H(t) = H_0 + \sum_{i=1}^n H_i \cos(2\pi \cdot f_i t + a_i) \quad (1)$$

其中, H_0 为平均水位, H_i 表示分潮*i*的振幅, a_i 为分潮*i*的相位, f_i 为分潮*i*的频率, 分潮*i*的周期为 $1/f_i$ 。根据时域采样定律, 这里仅分析大于 4 小时的分潮。如表 2 所示, 为周期大于 4 小时并且小于 27 天的分潮, 共 35 个, 根据其周期大小分为 6 组。

在调和分析过程中, 将表 2 中的频率作为常数代入公式(1), 并估计待估参数 H_i 和 a_i ($i = 1, \dots, 35$). 在估计过程中, 信噪比是衡量分潮是否显著的依据, 计算方式为分潮振幅/振幅误差。这里认为信噪比大于 2 的分潮是显著的。本文所采用的潮位调和分析工具为 T_TIDE^[21]。

表 2 不同分潮的频率与周期
Tab. 2 Frequencies and periods of different partial tides

组别	分潮	周期/小时
第一组	MM	661.2881894
	MSF	354.3711684
第二组	ALP1	29.07264090
	2Q1	28.00618377
	Q1	26.86835848
	O1	25.81931130
	NO1	24.83324476
	K1	23.93449607
	J1	23.09847573
	OO1	22.30609313
	UPS1	21.57823188
	第三组	EPS2
MU2		12.87175230
N2		12.65835603
M2		12.42060131
L2		12.19161315
S2		12.00000480
ETA2		11.75452784
第四组	MO3	8.386299805
	M3	8.280400871
	MK3	8.177143086
第五组	SK3	7.992704260
	MN4	6.269175842
	M4	6.210300653
	SN4	6.160192099
	MS4	6.103340541

	S4	5.999998800
第六组	2MK5	4.930881370
	2SK5	4.797373342
第七组	2MN6	4.166283021
	M6	4.140200435
	2MS6	4.092388117
	2SM6	4.045665858

2 结果与分析

如图 3 所示解算得到的日解和 2 小时解在不同分量位移变化时间序列。日解的解算精度较高，达到了 1-2 mm，2 小时解的解算精度稍低，但仍达到了 3-5 mm。日解在 X 方向，误差最大为 -4.0 mm，标准差为 0.99 mm；在 Y 方向误差最大为 1.9 mm，标准差为 0.85 mm；在 U 方向，误差最大为 3.6 mm，标准差为 1.51 mm。2 小时解在 X 方向，误差最大为 8.2 mm，标准差为 2.3 mm；在 Y 方向，误差最大为 11.6 mm，标准差为 2.4 mm；在 U 方向，误差最大为 27 mm，误差标准差为 5.29 mm。2 小时解在一天之内的变化最大达到了 3 cm。在监测周期内，无论是 2 小时解，还是日解，均没有明显的位移趋势。

为了更清晰地显示一天内 2 小时解与日解的差异，将 2 月 1 日至 2 月 8 日的局部数据放大，绘制在各子图中。图中可以看出，一天内 2 小时解在不同时段内与日解的差异变化较大。二者的差异从 -1.5 cm 到 1.5 mm。直观上看，2 小时解呈现一定的周期性波动，在每天的 0 时和 12 时，2 小时解的误差达到极大值，而在大约 6 时和 18 时，2 小时解的误差达到极小值。但这一规律并不十分明显，并且混合了多种误差。根据 GNSS 误差影响因素，引起不同时段定位结果不一致的原因可能有：（1）基准站和流动站两处的大气条件不同，导致对流层残余误差没有被消除干净；（2）多路径因素的影响；（3）潮汐涨落的扰动，包括潮汐冲击的影响、水位差异的压力影响；（4）固体潮和潮汐负荷的影响。虽然解算精度较高，但由于位移对于潮汐信号的响应微弱，并且混合了多种频率的影响因素和误差，从时域上难以得到位移相对于潮位的变化关系。

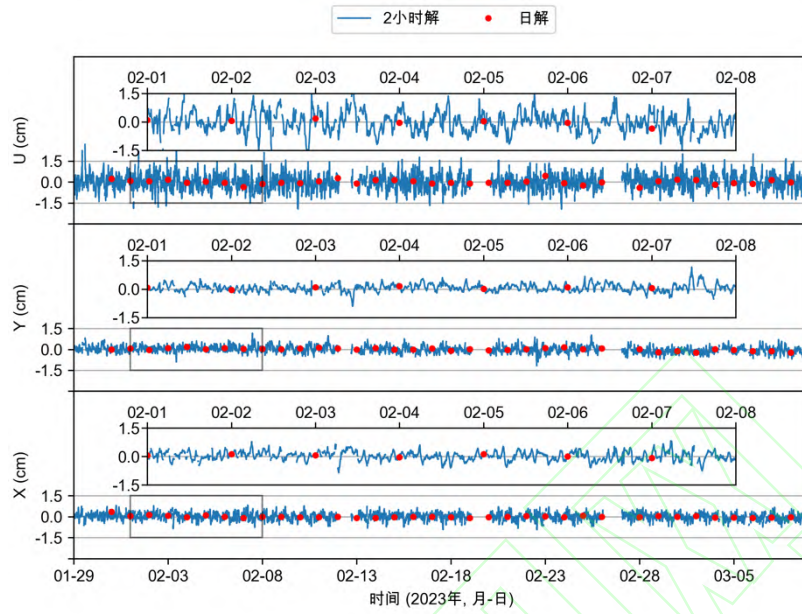


图3 变形监测位移变化时间序列

Fig. 3 Time series of displacement changes in deformation monitoring

因此对监测点位移变化、闸外水位和内外位差进行傅里叶变换^[22]，探索其在频率域的特征。图4为三个变量经傅里叶变换后的频谱图，由于GNSS解算时长设置为2小时，根据时域采样定律，可以完全恢复的连续信号的周期最小为4小时，因此仅展示频率小于0.25以上的信号。为便于分析，将大于4小时周期的主要分潮以虚线形式表示，各分潮频率和周期见表2。图4中可以看出，闸外水位和内外位差的频谱基本相同。在表2中各组分潮中，第三组（周期11.75 h-13.13 h）分潮中主太阴半日潮M2和主太阳半日潮S2振幅最大，分别达到了约2.4 m和1.1 m，第一组（周期354.37 h-661.29 h）分潮中MSF、MM、第二组（21.58 h-29.07 h）分潮中主太阴日周期O1和日月合成日周期K1、第五组（6 h-6.27 h）分潮中M4和MS4、第七组（4.04 h - 4.17 h）分潮中2MS6分潮振幅也较为明显，但幅值相对较小，最大达到了0.2 - 0.5 m左右，第四组(7.99 h - 8.99 h)、第六组(4.80 h - 4.93 h)分潮振幅最小，不超过0.1 m。除各分潮频率以外，其他频率信号十分微弱。

相比之下，位移分量的频域信号略显复杂。对于三个位移分量的频率域而言，上述较明显分潮相应显示较为明显的信号，如M2、S2、K1分潮。但也有部分分潮响应不一致，如S4分潮在闸内水位和内外水位差的信号均不明显，但在三个位移分量上信号显著；而MS4分潮在水位信号中明显，但在位移分量中表现不明显。对于X分量和Y分量，各有效信号相对于噪声的幅值较为显著，但对于U分量，噪声幅值较大，可以达到与分潮信号接近的数值。

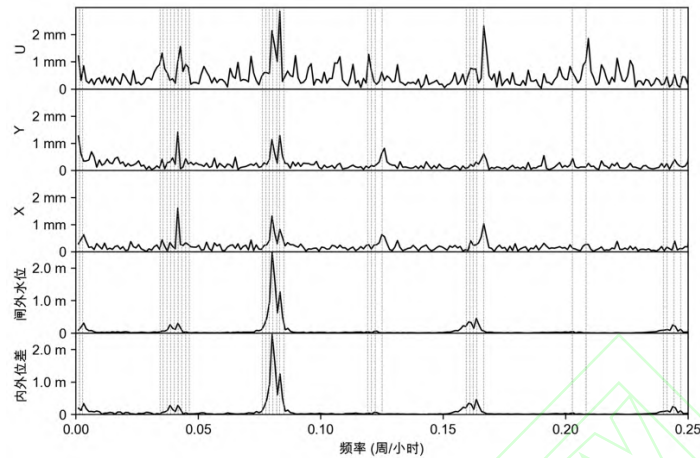


图 4 不同位移分量和水位频谱分析（竖线对应分潮频率）

Fig. 4 Spectrum analysis of different displacement components and water levels (vertical lines correspond to partial tide frequencies)

为进一步分析位移分量对分潮周期信号的响应，对坐标的三个分量及闸外水位和内外水位差进行潮汐调和分析，筛选信噪比大于 2 的分量认为有效分潮信号。将各分潮信号绘制在图中，如图 5 所示。图中颜色深浅表示各分潮信号的振幅大小，未填充颜色表示无效分潮信号。图中可以更清晰得看出坐标分量对潮汐分量的响应情况。对于信号最强的两个分潮 M2 和 S2，三个坐标分量均有较明显的响应信号，但响应大小与分潮大小并不一致，坐标分量对 M2 的响应比对 S2 的响应小。而对于潮位信号中不显著的分潮 S4，在 U 分量显示出比 M2 还强的振幅响应。三个坐标分量中，Y 分量对 8 各分潮信号响应显著，而 U 分量和 X 分量仅对 6 个分潮信号响应显著。由于 Y 分量垂直于泄洪闸方向，因此更能反应大闸内外水位差引起的位移变化。其中，MSF、2Q1、NO1 为 Y 方向独有的信号响应，但振幅量级较低，小于 0.4 mm。Y 方向的三个有效分潮响应信号 K1、SK3 在 X 方向也是有效的信号响应，并且振幅大小接近，可能是受相同因素的影响；而 Y 方向的 S2 分潮和 S4 分潮虽然在 X 方向和 U 方向均有显著响应，但其振幅大小差别较大，尤其在 U 方向上，因此可能受到相同频率不同因素的影响。对于 U 方向各显著分潮中，MM 和 MO3 均是特有的显著分潮，在 X 和 Y 方向上响应不显著。

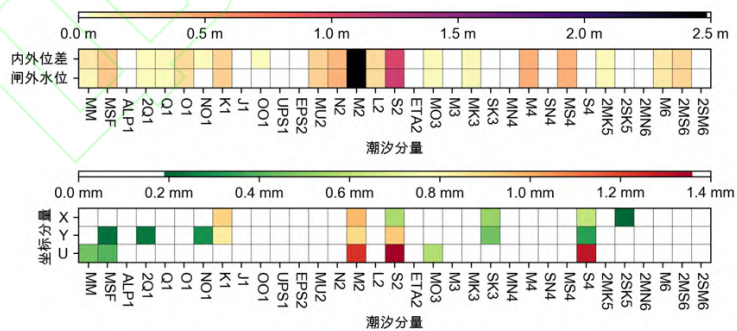


图 5 位移分量对分潮周期信号的响应

Fig. 5 Response of displacement components to partial tide cycle signals

为进一步分析水位各频振幅与位移响应是否具有定量关系，将调和分析中闸内水位（内外位差）各频振幅与位移分量各频振幅展示在同一张图上，如图 6 所示。图中空心原点表示表 2 中各分潮频率，横坐标和纵坐标分别为闸内水位（内外位差）与位移的各频振幅。黑色三角形为各位移分量有效的响应信号（信噪比大于 2）。其中，由于 Y 方向位移主要受闸两侧水位差影响，因此对应绘制的是内外水位差得到的各频振幅。图中可以看出，三个方向对各频分潮响应大致与各分潮振幅呈正相关变化，但

响应较为微弱。对于振幅小于 0.5 m 的分潮，X 方向与 Y 方向的各项响应大多小于 0.2 mm，U 方向的各项响应大多小于 0.4 mm，并且信噪比大多小于 2，信号不显著。在 U 方向，振幅大于 1mm 的分潮响应只有 M2、S2 和 S4；在 Y 方向，振幅大约 0.5 mm 的分潮响应只有 M2、S2、K1；在 X 方向，振幅大于 0.5 mm 的分潮响应只有 M2、K1、SK3 和 S4。

基于 GNSS 进行大坝位移监测结果主要受几个方面的影响：（1）海潮周期性涨落对大坝的冲击产生的同频响应；（2）大坝两侧水位不一致引起的压力差使大坝产生垂直于大坝（即 Y 方向）的形变；（3）与海潮同频的固体潮和潮汐负荷对基准站和监测站影响不同而引起的位移变化；（4）与潮汐同频的未模型化误差对基线解算结果的影响，如多路径效应。

从频率域可以看出三个位移分量对分潮频率的响应明显（见图 4），但各方向大小不同。从数值上看，大坝位移形变对分潮振幅的响应大体呈线性正相关（见图 6），但大部分的响应信号微弱，各分潮振幅大小大多小于 0.5 m，对大坝所引起的形变小于 0.2 mm。各分潮信号中，最显著的分潮为 M2 和 S2 分潮，振幅分别为 2.5 m 和 1.4 m，相应地，X 和 Y 方向的同频响应也较大。

Y 方向的特有分潮响应主要与大坝两侧水位差异相关。由于 Y 方向的特有分潮响应只有 2Q1 和 NO1，其振幅大小均小于 0.4 mm，说明水位差异对大坝的影响非常微小。

相比之下，尽管闸外水位（内外位差）的个别分潮振幅较小，但位移分量的响应明显过大，如 U 方向的 MO3、MM 分潮响应；Y 方向 SK3、NO1、S4 分潮响应；X 方向的 S4、SK3 分潮。这种不一致可能是与海潮相同频率的其他因素（如固体潮和潮汐负荷）引起的。此外，GNSS 未模型化误差可能存在与潮汐同频的信号，而对位移产生影响。如 GPS 轨道周期为 11 小时 58 分^[23]，与 S2 分潮频率接近，多路径效应通常包含 23 小时 56 分 4 秒的周期信号^[24]，与 K1 分潮频率周期接近，这可能是 S2 和 K1 分潮的位移响应明显偏大的原因。

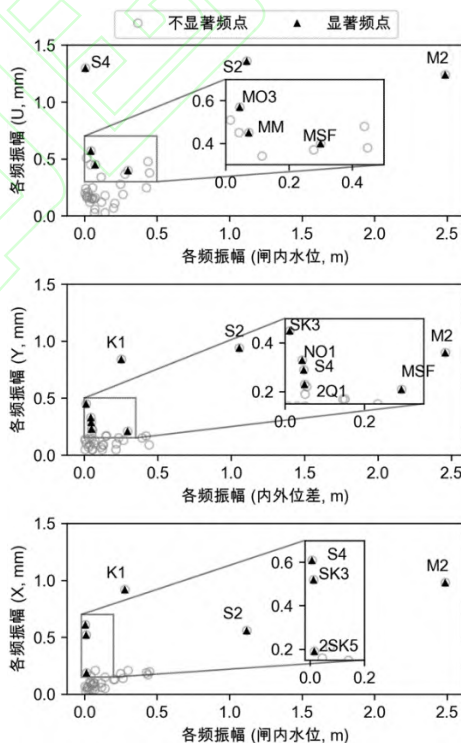


图 6 位移分量对各频分潮的定量响应

Fig. 6 Quantitative response of displacement components to each frequency partial tide

3 结论

本文以曹娥江大坝为研究对象,基于 GNSS 对进行高精度形变监测。解算的日解达到了水平 1mm,垂直 2mm 的监测精度,监测结果显示在所搜集数据的时段内,大坝各方向没有明显的位移趋势。

为揭示大坝对潮汐的响应特征,采用了较短解算时段长度进行静态相对解算。为保留 GNSS 解算结果中的数小时的分潮响应信号,将解算时段长度设置为 2 小时,为提升对分潮频率的分辨能力,采用 5 分钟步长的滑动窗口进行处理,得到了三维位移分量的时间序列。

解算结果很好地保留了大于 4 小时周期的分潮信号。三维位移分量对振幅超过 1 m 的 2 个分潮 M2 和 S2 响应最大,但在 U 方向不超过 1.5 mm,在 X 方向和 Y 方向不超过 1 mm,表明大坝对潮汐涨落响应微弱;水位差异引起的大坝垂向(Y 方向)的振幅响应小于 0.4 mm,表明水位差异对大坝的影响较小。整体上,大坝对各分潮的响应在振幅大小上呈线性正相关,但对于个别分潮(如 S4、K1)出现了过大响应,这可能是同频固体潮和海潮负荷或同频未模型化误差引起。

参考文献

- [1] JING-XIANG G, HONG H. Advanced GNSS technology of mining deformation monitoring[J/OL]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009, 1(1): 1081-1088. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.166>.
- [2] ZHAO L, YANG Y, XIANG Z, et al. A Novel Low-Cost GNSS Solution for the Real-Time Deformation Monitoring of Cable Saddle Pushing: A Case Study of Guojiatuo Suspension Bridge[J/OL]. *Remote Sensing*, 2022, 14(20): 5174. <https://doi.org/10.3390/rs14205174>.
- [3] QUESADA-OLMO N, JIMENEZ-MARTINEZ M J, FARJAS-ABADIA M. Real-time high-rise building monitoring system using global navigation satellite system technology[J/OL]. *Measurement*, 2018, 123: 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.054>.
- [4] WANG Chenhui, GUO Wei, MENG Qingjia, et al. Landslide Deformation Monitoring Method and Performance Analysis Based on GNSS Virtual Reference Station[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 990-996. (王晨辉, 郭伟, 孟庆佳, 等. 基于虚拟参考站的 GNSS 滑坡变形监测方法及性能分析[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2022, 47(6): 990-996)
- [5] HUANG Guanwen, CHEN Zi, XU Yongfu, et al. (2023). GNSS real-time monitoring technology of expansive soil slope[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 52(11), 1873-1882.(黄观文, 陈孜, 徐永福. 膨胀土边坡 GNSS 实时监测技术[J]. *测绘学报*, 2023, 52(11): 1873-1882.)
- [6] Guo Wen, WANG Guoquan, BAO Yan, et al. Tilt and Settlement Monitoring of High-Rise Buildings Using GNSS Precise Point Positioning and Seasonal Ground Deformation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(7): 1043-1051. (郭稳, 王国权, 鲍艳, 等. 顾及季节性变形的 GNSS 高层建筑倾斜和沉降观测方法[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2020, 45(7): 1043-1051.)
- [7] CAO Shilong, LIU Genyou, WANG Shengliang, et al. Bias Characteristics and Accuracy Analysis of GPS Ultra-Long Baseline Solution[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(2): 260-267. (曹士龙, 刘根友, 王生亮, 等. GPS 超长基线解算的误差特性与精度分析[J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2023, 48(2): 260-267.)
- [8] Li Zhenghang, Wu Yunsun, Li Zhenhong, et al. (2000). Processing and Analysis of the External Deformation Data of Geheyan Dam[M]. *Journal of Wuhan University of Surveying and Mapping*, 482-484.(李征航, 吴云孙, 李振洪, 等. 隔河岩大坝外观变形数据的处理和分析[M]//*武汉测绘科技大学学报*. 2000: 482-484.)
- [9] JIANG Weiping, LIANG Yuhan, YU Zaikang, et al. Progress and Thoughts on Application of Satellite Positioning Technology in Deformation Monitoring of Water Conservancy Projects[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1625-1634.(姜卫平, 梁娱涵, 余再康, 等. 卫星定位技术在水利工程变形监测中的应用进展与思考[M]//*武汉大学学报(信息科学版)*: 卷 47. 2022: 1625-1634.)
- [10] XIAO R, SHI H, HE X, et al. Deformation Monitoring of Reservoir Dams Using GNSS: An Application to South-to-North Water Diversion Project, China[J/OL]. *IEEE Access*, 2019, 7: 54981-54992. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2912143>.
- [11] BARZAGHI R, CAZZANIGA N, DE GAETANI C, et al. Estimating and Comparing Dam Deformation Using Classical and GNSS Techniques[J/OL]. *Sensors*, 2018, 18(3): 756. <https://doi.org/10.3390/s18030756>.
- [12] PAN L, XIONG B, LI X, et al. High-rate GNSS multi-frequency uncombined PPP-AR for dynamic deformation monitoring[J/OL]. *Advances in Space Research*, 2023, 72(10): 4350-4363. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.08.056>.
- [13] WANG X, ZHAO Q, XI R, et al. Review of Bridge Structural Health Monitoring Based on GNSS: From Displacement Monitoring to Dynamic Characteristic Identification[J/OL]. *IEEE Access*, 2021, 9: 80043-80065. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3083749>.
- [14] RAO R, LI C, HUANG Y, et al. Method for Structural Frequency Extraction from GNSS Displacement Monitoring Signals[J/OL]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2019, 47(3): 20180087. <https://doi.org/10.1520/JTE20180087>.

- [15] CHEN Q, JIANG W, MENG X, et al. Vertical Deformation Monitoring of the Suspension Bridge Tower Using GNSS: A Case Study of the Forth Road Bridge in the UK[J/OL]. Remote Sensing, 2018, 10(3): 364. <https://doi.org/10.3390/rs10030364>.
- [16] SHEN Qianying, JI Xiaomei, ZHANG Wei, et al. Impact of estuarine storm surge barriers on spatiotemporal variation of tidal asymmetry in a delta[J]. Journal of Tropical Oceanography, 40(5), 1-9.(沈倩颖, 季小梅, 张蔚, 等. 河口挡潮闸对三角洲潮汐不对称时空变化的影响[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(5): 1-9.)
- [17] WU Zhi-Lu, LIU Yan-Xiong, HE Xiu-Feng, et al. 2017. Inversion of ocean tidal loadings of marine constituents based on the GPS measurements in the offshore islands. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 60(1): 61-69.(吴志露, 刘焱雄, 何秀凤, 等. 基于近岸海岛 GPS 数据反演海洋分潮负荷影响[J]. 地球物理学报, 2017, 60(1): 61-69.)
- [18] WOLANSKI E, ELLIOTT M. Estuarine water circulation[M/OL]//Estuarine Ecohydrology. Elsevier, 2016: 35-76[2024-02-07]. <https://linking-hub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444633989000027>.
- [19] Fu Senbiao. Research and Practice on Key Technologies of Cao'e River Dam Construction[M]. Water Resources and Hydropower Engineering, 45, 6-10.(傅森彪. 曹娥江大坝工程建设关键技术研究与实践[M]//水利水电技术: 卷 45. 2014: 6-10.)
- [20] TAKASU T, KUBO N, YASUDA A. Development, evaluation and application of RTKLIB: a program library for RTK-GPS[C]//GPS/GNSS symposium. 2007: 213-218.
- [21] PAWLOWICZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J/OL]. Computers & Geosciences, 2002, 28(8): 929-937. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4).
- [22] BRIGHAM E O, MORROW R E. The fast Fourier transform[J/OL]. IEEE Spectrum, 1967, 4(12): 63-70.
- [23] YIN Haitao, GAN Weijun, XIAO Genru. Modified Sidereal Filter and Its Effect on High-rate GPS Positioning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(5): 609-611..(殷海涛, 甘卫军, 肖根如. 恒星日滤波的修正以及对高频 GPS 定位的影响研究[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2011, 36(5): 609-611.)
- [24] CHOI K, BILICH A, LARSON K M, et al. Modified sidereal filtering: Implications for high - rate GPS positioning[J/OL]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(22): 2004GL021621. <https://doi.org/10.1029/2004GL021621>.

网络首发:

标题: 基于 GNSS 的强涌潮河口大闸形变监测与潮汐响应分析

作者: 李亚飞, 姚宜斌, 祁敏敏, 吴承红, 郭子槐, 王伟棠, 张良

收稿日期: 2024-09-18

DOI:10.13203/j.whugis20240059

引用格式:

李亚飞, 姚宜斌, 祁敏敏, 等. 基于 GNSS 的强涌潮河口大闸形变监测与潮汐响应分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2024,DOI: 10.13203/j.whugis20240059 (LI Yafei, YAO Yibin, QI Minmin, et al. Deformation Monitoring and Tidal Response Analysis of Strong Surge Tide Estuary Sluice Based on GNSS [J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2024,DOI: 10.13203/j.whugis20240059)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

淮南矿区关闭矿井地表次生沉陷 InSAR 监测与规律分析

郑美楠, 邓喀中, 郭庆彪, 赵若南, 秦锡鹏

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(8): 1356-1366.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220701>

基于“三查”体系的丹巴县滑坡隐患早期识别与监测

付豪, 李为乐, 陆会燕, 许强, 董秀军, 郭晨, 谢毅, 王栋, 刘刚, 马志刚

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 734-746.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220418>

兰州新区平山造城竣工后地表形变 InSAR 时序监测与分析

龚翔, 许强, 蒲川豪, 陈婉琳, 修德皓, 纪续

武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(2): 236-245.

<http://ch.whu.edu.cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210553>

