引文格式:李亚飞,姚宜斌,祁敏敏,等.利用GNSS进行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),2026,51(1):199-206.DOI:10.13203/j.whugis20240059

Citation:LI Yafei,YAO Yibin,QI Minmin,et al.Deformation Monitoring and Tidal Response Analysis of Strong Surge Tide Estuary Sluice with GNSS[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(1):199-206.DOI:10.13203/j.whugis20240059

利用GNSS进行强涌潮河口大闸形变监测与潮汐响应分析

李亚飞[1,2] 姚宜斌[3,4] 祁敏敏[2] 吴承红[2] 郭子槐[3]
王伟棠[3] 张 良[3,4]

1 浙江建设职业技术学院,浙江 杭州,311231
2 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
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。全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)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。研究结果表明,采用5 min滑动步长和2 h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,可能是同频其他信号引起的。

关键词:GNSS;形变监测;河口大闸;潮位调和分析;潮汐响应

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-09-18

DOI:10.13203/j.whugis20240059 **文章编号**:1671-8860(2026)01-0199-08

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

LI Yafei[1,2] *YAO Yibin*[3,4] *QI Minmin*[2] *WU Chenghong*[2] *GUO Zihuai*[3]
WANG Weitang[3] *ZHANG Liang*[3,4]

1 Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, China
2 Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary (Zhejiang Institute of Marine Planning and Design), Hangzhou 310017, China
3 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China
4 Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China

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**: 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

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

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 up direction, and not exceeding 1 mm in the longitudinal and vertical 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 min sliding step and a 2 h 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

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)是一种重要的高精度定位技术,已广泛应用于边坡、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高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博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高频影响因素的响应。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20 Hz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。如文献[15]采用10 Hz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的年际周期信号。

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)都难以满足河口大闸的监测要求。河口大闸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几小时[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,河口大闸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,曹娥江大闸工程地处钱塘江下游的曹娥江口,是中国第一河口大闸。曹娥江河口涌潮高度可达2~3 m,涌潮压力达70~90 kPa[19]。在如此强烈的涌潮冲击下,大闸可能产生形变、震动等现象,影响大闸安全。对大闸进行高精度形变监测具有重要的意义。

本文以曹娥江大闸为研究对象,采用GNSS对其进行形变监测,提出基于GNSS的小时级周期亚毫米级形变信号提取方法,识别河口大闸潮汐响应特征。

1 数据与方法

1.1 GNSS数据

图1为曹娥江大闸所在位置及GNSS监测点位置示意图。为了对曹娥江大闸进行形变监测,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2025-01-29—2025-03-19共50 d。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 3个坐标轴形成左手坐标系。

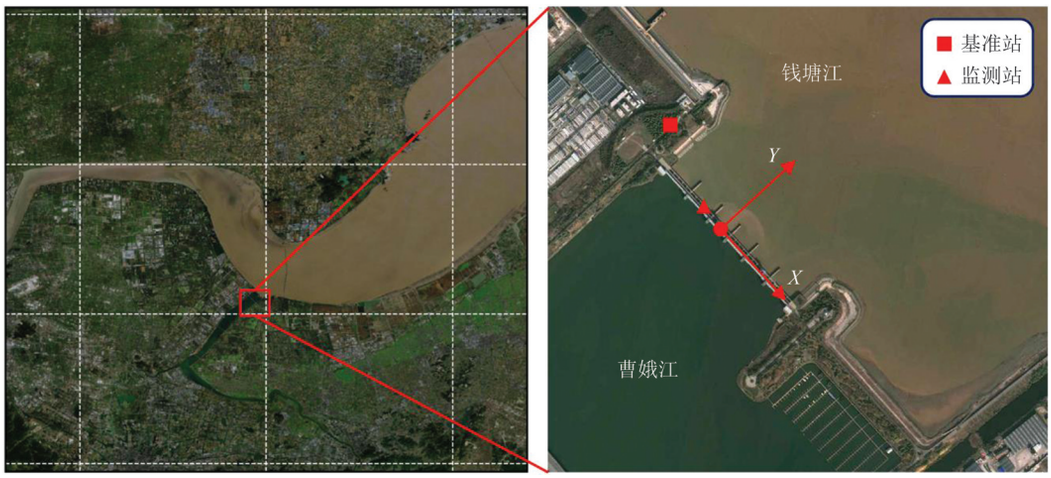


图1　曹娥江大闸与监测点位图

Fig. 1　Location of Cao'e River Sluice and Monitoring Sites

1.2　水位数据

在曹娥江大闸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 min，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。

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。

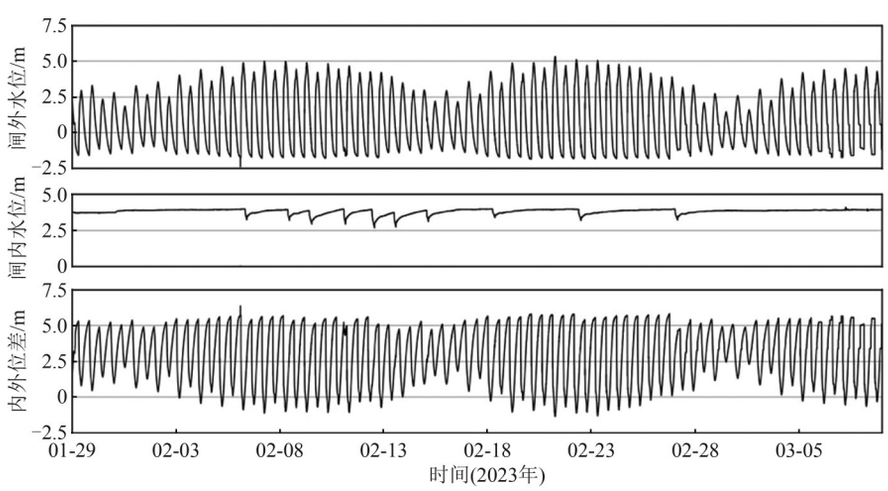


图2　潮位时间序列图

Fig. 2　Time Series Diagram of Tidal Level

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GPS、北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system，BDS)、格洛纳斯导航卫星系统(GLONASS)、伽利略导航卫星系统(Galileo)4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 h和24 h；对于2 h解，为提高分潮频率的可分辨能力，采用5 min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]。

1.4　潮位调和分析

调和分析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：

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

式中，H_0为平均水位；H_i表示分潮i的振幅；a_i为

表1 GNSS变形监测解算配置

Table 1 Settings of GNSS Deformation Monitoring

选项	配置
星座	GPS、BDS、Galileo
频段	GPS: L1/L2,BDS: B1I/B3I,Galileo:E1/E5a
卫星轨道	广播星历
采样间隔/s	15
截止高度角/(°)	15
解算时段长度/h	2/24
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

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,本文仅分析大于4 h的分潮。如表2所示为周期大于4 h并且小于27 d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式(1),并估计待估参数H_i和a_i($i=1,2,\cdots,35$)。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。本文认为信噪比大于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]。

2 结果与分析

图3所示为解算得到的日解和2 h解不同分量的位移变化时间序列。日解的解算精度较高,达到了1~2 mm,2 h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Z方向,误差最大为3.6 mm,标准差为1.51 mm。2 h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Z方向,误差最大为27 mm,标准差为5.29 mm。2 h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 h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 h解与日解的差异,将2023-02-01—2023-02-08的局部数据放大,可以看出,一天内2 h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 h解呈现一定的周期性波动,在每天的0时和12时,2 h解的误差达到极大值,而在大约6时和18时,2 h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GNSS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。

表2 不同分潮的周期

Table 2 Periods of Different Partial Tides

组别	分潮	周期/h
第1组	MM	661.288 189 4
	MSF	354.371 168 4
第2组	ALP1	29.072 640 90
	2Q1	28.006 183 77
	Q1	26.868 358 48
	O1	25.819 31 130
	NO1	24.833 244 76
	K1	23.934 496 07
	J1	23.098 475 73
	OO1	22.306 093 13
	UPS1	21.578 231 88
第3组	EPS2	13.127 270 20
	MU2	12.871 752 30
	N2	12.658 356 03
	M2	12.420 601 31
	L2	12.191 613 15
	S2	12.000 004 80
	ETA2	11.754 527 84
第4组	MO3	8.386 299 805
	M3	8.280 400 871
	MK3	8.177 143 086
	SK3	7.992 704 260
第5组	MN4	6.269 175 842
	M4	6.210 300 653
	SN4	6.160 192 099
	MS4	6.103 340 541
	S4	5.999 998 800
第6组	2MK5	4.930 881 370
	2SK5	4.797 373 342
第7组	2MN6	4.166 283 021
	M6	4.140 200 435
	2MS6	4.092 388 117
	2SM6	4.045 665 858

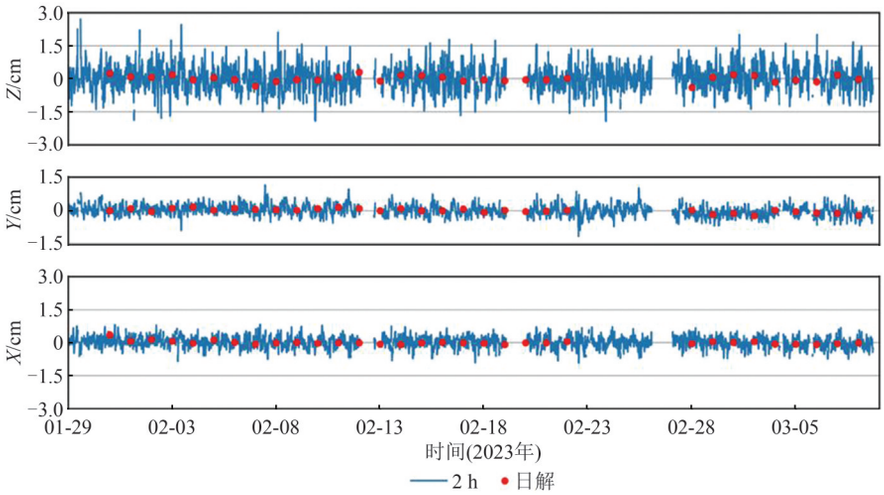


图 3　变形监测位移变化时间序列

Fig. 3　Time Series of Displacement Changes in Deformation Monitoring

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 3 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 h,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 h,因此仅展示周期超过 4 h(即频率 0.25 次/h)以上的信号。从图 4 中可以看出,闸外水位和内外位差的频谱基本相同。为便于分析,将大于 4 h 周期的主要分潮以虚线表示,各分潮的周期见表 2。表 2 的各组分潮中,第 3 组(周期 11.75～13.13 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 2.4 m 和 1.1 m;第 1 组(周期 354.37～661.29 h)分潮中 MSF 和 MM,第 2 组(21.58～29.07 h)分潮中主太阴日周期 O1 和日月合成日周期 K1,第 5 组(6.00～6.27 h)分潮中 M4 和 MS4,第 7 组(4.04～4.17 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 4 组(7.99～8.99 h)、第 6 组(4.80～4.93 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。

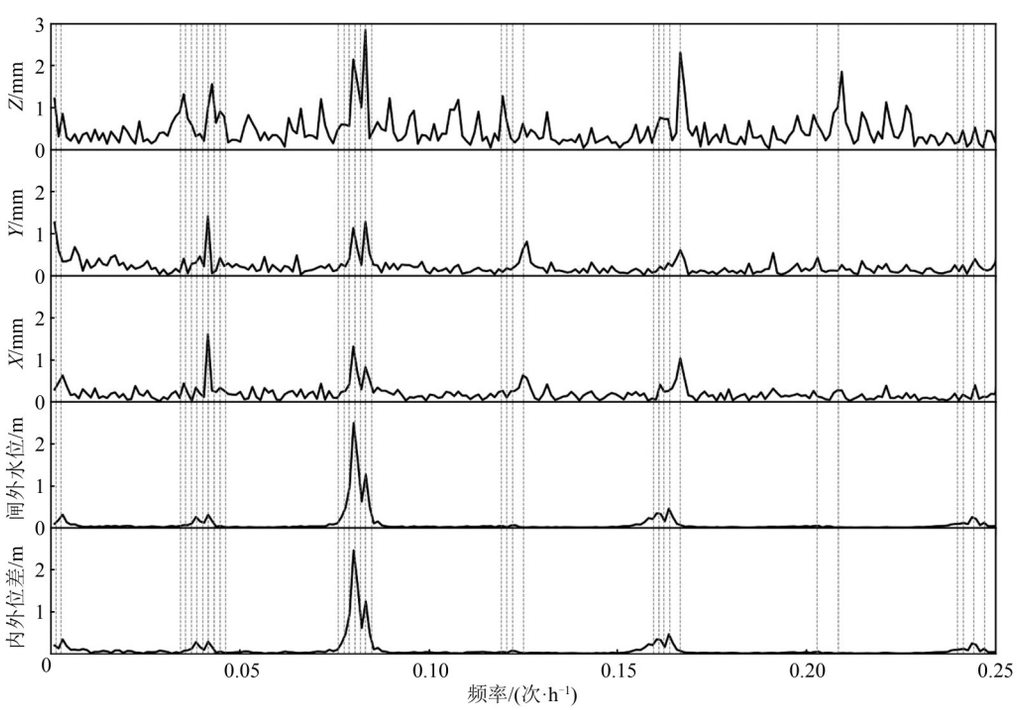


图 4　不同位移分量和水位频谱分析(竖线对应分潮频率)

Fig. 4　Spectrum Analysis of Different Displacement Components and Water Levels (Vertical Lines Correspond to Partial Tide Frequencies)

相比之下,位移分量的频域信号略显复杂。对于 3 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3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Z分量,噪声幅值较大,可以达到与分潮信号接近的数值。

为进一步分析位移分量对分潮周期信号的响应,对坐标的3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的分量认为是有效分潮信号,如图5所示。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,可以清晰地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S2,3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,Z分量显示出比M2还强的振幅响应。3个坐标分量中,Y分量对8个分潮信号响应显著,而Z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,因此更能反映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2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Z方向均有显著响应,但其振幅大小差别较大,尤其是在Z方向上,因此可能受到相同频率不同因素的影响。对于Z方向的各显著分潮中,MM和MO3均是特有的显著分潮,在X和Y方向上响应不显著。

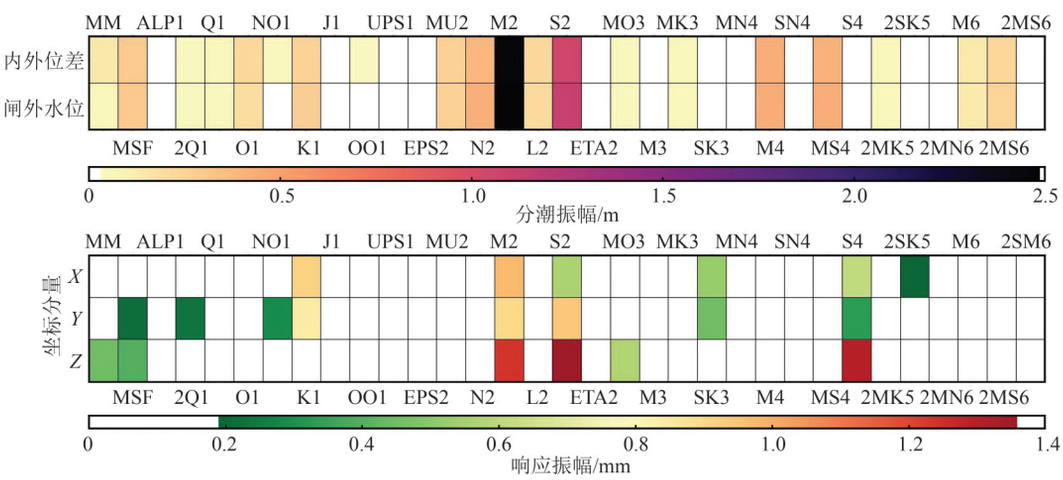


图5 位移分量对分潮周期信号的响应

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(或内外位差)的各频振幅与位移分量的各频振幅展示在同一张图上,如图6所示。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分潮振幅。可以看出,3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方向的各频响应大多小于0.2 mm,Z方向的各频响应大多小于0.4 mm,并且信噪比大多小于2,信号不显著。在Z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。

利用GNSS进行大闸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闸的冲击产生的同频响应;(2)大闸两侧水位不一致引起的压力差使大闸产生垂直于大闸(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3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,大闸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,对大闸所引起的形变小于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闸两侧水位差异相关。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

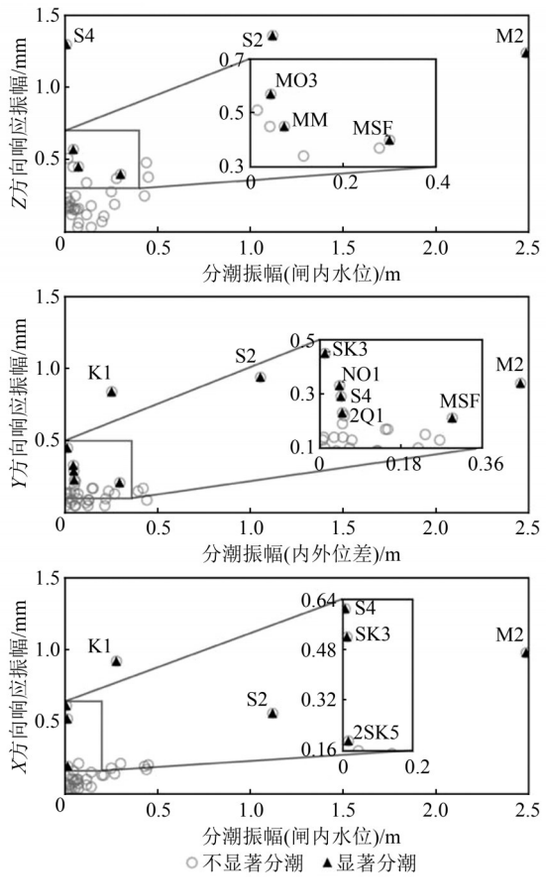


图6　位移分量对各频分潮的定量响应

Fig. 6　Quantitative Response of Displacement Components to Each Frequency Partial Tide

位差异对大闸的影响非常微小。

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Z方向的MO3、MM分潮响应，Y方向的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 h 58 min[23]，与S2分潮频率接近，多路径效应通常包含23 h 56 min 4 s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。

3　结　语

本文以曹娥江大闸为研究对象，基于GNSS对进行高精度形变监测。解算的日解达到了水平1 mm、垂直2 mm的监测精度，监测结果显示在所搜集数据的时段内，大闸各方向没有明显的位移趋势。为揭示大闸对潮汐的响应特征，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 h，为提升对分潮频率的分辨能力，采用5 min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 h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Z方向不超过1.5 mm，在X方向和Y方向不超过1 mm，表明大闸对潮汐涨落响应微弱；水位差异引起的大闸垂向（Y方向）的振幅响应小于0.4 mm，表明水位差异对大闸的影响较小。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，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的。

参　考　文　献

[1] GAO J X, HU H. Advanced GNSS Technology of Mining Deformation Monitoring[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009, 1(1): 1081-1088.

[2] ZHAO L D, YANG Y H, XIANG Z F, 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]. *Remote Sensing*, 2022, 14(20): 5174.

[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]. *Measurement*, 2018, 123: 115-124.

[4] 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.
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.

[5] 王坚，于亦龙，柳根，等. 超高层建筑变形GNSS多源融合监测方法及进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2025，50(6)：1065-1076.
WANG Jian, YU Yilong, LIU Gen, et al. Method and Progress for GNSS Multi-source Fusion Deformation Monitoring in Super-Tall Buildings[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(6): 1065-1076.

[6] 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.
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.

[7] 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.
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.

[8] 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[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(6): 482-484.
LI Zhenghang, WU Yunsun, LI Zhenhong, et al. Processing and Analysis of the External Deformation Data of Geheyan Dam[J]. *Journal of Wuhan University of Surveying and Mapping*, 2000, 25(6): 482-484.

[9] 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[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1625-1634.
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.

[10] XIAO R Y, SHI H K, HE X F, et al. Deformation Monitoring of Reservoir Dams Using GNSS: An Application to South-to-North Water Diversion Project, China[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 54981-54992.

[11] BARZAGHI R, CAZZANIGA N E, DE GAETANI C I, et al. Estimating and Comparing Dam Deformation Using Classical and GNSS Techniques[J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 756.

[12] PAN L, XIONG B W, LI X P, et al. High-Rate GNSS Multi-frequency Uncombined PPP-AR for Dynamic Deformation Monitoring[J]. *Advances in Space Research*, 2023, 72(10): 4350-4363.

[13] WANG X P, ZHAO Q Z, XI R J, et al. Review of Bridge Structural Health Monitoring Based on GNSS: From Displacement Monitoring to Dynamic Characteristic Identification [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 80043-80065.

[14] RAO R, LI C C, HUANG Y H, et al. Method for Structural Frequency Extraction from GNSS Displacement Monitoring Signals[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2019, 47(3): 2026-2043.

[15] CHEN Q S, JIANG W P, MENG X L, et al. Vertical Deformation Monitoring of the Suspension Bridge Tower Using GNSS: A Case Study of the Forth Road Bridge in the UK[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(3): 364.

[16] 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.
SHEN Qianying, JI Xiaomei, ZHANG Wei, et al. Impact of Estuarine Storm Surge Barriers on Spatio-temporal Variation of Tidal Asymmetry in a Delta[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2021, 40(5): 1-9.

[17] 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.
WU Zhilu, LIU Yanxiong, HE Xiufeng, et al. Inversion of Ocean Tidal Loadings of Marine Constituents Based on the GPS Measurements in the Offshore Islands [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(1): 61-69.

[18] WOLANSKI E, ELLIOTT M. Estuarine Water Circulation [EB/OL]. (2016-09-03) [2024-02-07]. https://linkinghub. elsevier. com/retrieve/pii/B9780444633989000027.

[19] 傅森彪. 曹娥江大闸工程建设关键技术研究与实践[J]. 水利水电技术, 2014, 45: 6-10.
FU Senbiao. Research and Practice on Key Technologies of Cao'e River Dam Construction[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2014, 45: 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, Tokyo, Japan, 2007.

[21] PAWLOWICZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB Using T_TIDE[J]. *Computers & Geosciences*, 2002, 28(8): 929-937.

[22] BRIGHAM E O, MORROW R E. The Fast Fourier Transform[J]. *IEEE Spectrum*, 1967, 4(12): 63-70.

[23] 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.
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.

[24] CHOI K, BILICH A, LARSON K M, et al. Modified Sidereal Filtering: Implications for High-Rate GPS Positioning[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(22): 2004GL021621.