

短潮位序列系统误差的探测及修复方法研究

柯 灏¹ 赵建虎¹ 张红梅²

(1 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 武汉大学动力与机械学院,武汉市东湖南路 8 号,430072)

摘 要:提出了一种基于最小二乘潮位序列分段匹配方法。通过系统误差类型分析、分段段长确定、沉降发生具体时刻确定、系统误差类型探测和修复等算法研究,实现了临时潮位站潮位资料不同系统误差的准确探测和高精度修复。
关键词:临时潮位站;系统误差;最小二乘;分段匹配
中图法分类号:P229.3

目前,对于潮位资料中存在的显著性系统误差,大多通过人工方式处理;而对于零点缓慢沉降产生的渐进式系统误差,则较难发现^[1]。无论何种系统误差,均会导致潮汐数据无法真实地反映当地实际潮位变化,对潮汐数据的应用会产生较大的影响,需给予足够重视。为此,本文给出了一种基于潮位序列最小二乘匹配的分段检测方法。

根据临时潮位站零点沉降方式的不同,可将系统误差分为跳跃式沉降和渐进式沉降两类。

1 系统误差的探测及修复

1.1 系统误差的探测

验潮站间的潮差比 x 、潮时差 y 、基准面偏差 z ^[2,3] 反映了两站潮位序列在波形上的相关性,理论上 x 、 y 和 z 大小应该恒定不变,考虑到传递误差等因素,不同的同步时段所得的 3 个参数之间会存在着较小差异。基于上述原理,可将临时潮位站的潮位观测序列平均分成几个等长时序,借助相邻长期潮位站分别与之对应的同步潮位观测序列,采用最小二乘潮位序列匹配法,实现分段匹配,得到各段不同的 x_i 、 y_i 、 z_i ($i=1,2,\dots,N$), N 为总共的分段数。

若 i 段数据和 j 段数据计算的 z 分别为 z_i 和 z_j ,则系统误差探测定义如下原则:

$$\max(|z_i - z_j|) \geq K, (1 \leq i, j \leq N, i \neq j) \tag{1}$$

式中,阈值 K 的大小要选择恰当。过小时会将正确的潮位序列错判为含有系统误差的潮位;过大则有可能遗漏潜在的系统误差。《海道测量规范》里潮汐观测精度为 5 cm^[5],因此可将 K 的量值设定为 5。在探测出系统误差后,则需进一步确定系统误差类型。将潮位序列先均分为三等分,分别求出每一段参数 z 值,比较不同段的 z 值,分析其特点以及产生的时段。具体可分为以下 3 种情况。

1) 跳跃性变化。跳跃式沉降发生在第一时段、第三时段,之后趋于稳定:

$$z_1 \neq z_2, z_2 = z_3 \tag{2}$$

$$z_1 = z_2, z_2 \neq z_3 \tag{3}$$

2) 渐进性变化:

$$z_1 \neq z_2 \neq z_3 \tag{4}$$

式(4)中各段的 z 值均不等,说明沉降持续时间较长,贯穿整个潮位时段,为“渐进式”沉降。

1.2 系统误差的修复

1) “跳跃式”系统误差修复。对于式(2)和式(3)中的情况,其潮位修正模型为:

$$\zeta_1(t) = \zeta_1(t) + \Delta z, \Delta z = |z_2 - z_1| \tag{5}$$

$$\zeta_3(t) = \zeta_3(t) - \Delta z, \Delta z = |z_2 - z_3| \tag{6}$$

2) “渐进式”系统误差修复。若沉降在起点

t_0 到 t_N 整个过程中匀速变化, 基于 t_0 时刻的验潮零点, 则观测序列中 t 时刻潮位 $\zeta(t)$ 为:

$$\zeta'(t) = \zeta(t) - \frac{\Delta z}{\Delta t} \times (t - t_0),$$
$$\Delta z = |z_3 - z_1|, \Delta t = t_N - t_0 \quad (7)$$

2 关键问题研究

2.1 最小分段长度的确定

由系统误差探测和修复的原理可知, 分段时间长度越短, 确定沉降开始发生的时刻范围越准,

修复的针对性越强, 潮位修复的精度越高。但当分段过短时, 则 3 参数不能真实反映长期站和临时站潮位曲线之间的相关性。因此, 在分段时必须兼顾以上两个方面, 即希望在不影响 3 参数 x 、 y 、 z 正确的条件下, 使分段长度达到最小。

以长江沿岸白茆和杨林站为例, 将白茆作为长期站, 杨林作为临时站, 观测长度为一个月, 两站的潮汐性质都属于半日潮。假设杨林站存在“渐进式”系统误差, 总沉降量为 74 cm, 分别进行不同时段长度下的潮位序列匹配, 所得结果如表 1 所示。

表 1 不同时段长度下的相关系数 R 及 3 个参数 x 、 y 、 z
Tab. 1 Comparison of Correlation Coefficient and Three Parameters of the Different Time Lengths

参数列		时段长						
		1 m	15 d	7 d	3 d	1 d	12 h	6 h
潮位正确	相关系数 $R/\%$	99.8	99.8	99.8	99.9	99.9	99.8	99.4
	潮差比 x	1.010	1.008	1.011	1.005	0.998	0.970	1.022
	潮时差 y/h	0.932	0.933	0.920	0.934	0.926	0.891	2.019
	基准面偏差 z/m	-0.049	-0.037	-0.031	-0.024	0.000	0.070	0.208
含有“渐进式” 系统误差	相关系数 $R/\%$	96.5	99.1	99.6	99.8	99.9	99.8	99.4
	潮差比 x	1.024	1.009	1.007	1.005	0.997	0.966	1.018
	潮时差 y/h	0.934	0.937	0.918	0.933	0.927	0.897	2.019
	基准面偏差 z/m	0.288	0.139	0.063	0.011	0.015	0.083	0.220

1) 潮位正确情况下, 分段长度不小于 12 h, 匹配得到的 3 参数均十分接近, 且匹配后长期站和临时站潮位曲线相关性很好; 而当分段长度为 6 h, 匹配所得 y 和 z 变化较大, R 略有下降, 这表明 6 h 分段得到的 3 参数不正确。

2) 潮位存在“渐进式”系统误差情况下, ① R 普遍低于潮位正确的情况, 段长度越长, 这些现象越明显, 而段长度越短, R 越大。分析认为, 在短时间内, 系统误差对潮波的影响主要体现在纵向, 而对波形和潮差比的影响相对较小。② 同潮位正确情况与前类似, 当分段长度不短于 12 h 时, 匹配得到的 x 、 y 和 z 变化均较小; 当段长等于小于 6 h 时, x 、 y 和 z 均变化较大。

以上分析表明, 若存在系统误差, 在判断最小段长时, R 仅作为一个参考, 而非决定要素; x 、 y 和 z 的变化中, z 变化最显著, 可作为主判断要素。 x 和 y 变化相对较小, 但当 x 和 y 发生显著变化时, 则意味着最小二乘潮位序列匹配法计算所得参数不能正确地反映 3 个参量的原有意义, 这时的时段长度即为最小段长。因此, 建议以 x 、 y 和 z 显著变化为判断标准, R 为辅助标准, 判断最小段长。在确定最小段长时, 建议最好不小于一个潮汐周期。鉴于本文采用的白茆和杨林站潮汐性质都是半日潮, 因此可将最小段长定为 1 d。

2.2 沉降时段的确定

日平均海平面基本可以消除日周期、半日周期甚至更短周期分潮及潮汐噪音的影响^[1], 在某一区域内, 临近潮位站间的日平均海平面具有很好的相关性。基于这一特性, 可根据每 24 h 的滑动平均海平面日变特征来确定沉降发生的时刻:

$$\Delta_j = \frac{1}{24} \left[\sum_{i=j-11}^{i=j+12} h_2(t_i) - \sum_{i=j-11}^{i=j+12} h_1(t_i) \right] - \overline{\Delta\text{MSL}} \geq k$$

(8)

式中, 长期站和临时站潮位曲线分别为 $h_1(t)$ 和 $h_2(t)$; $\overline{\Delta\text{MSL}}$ 为正常情况下两站日平均海平面差值的平均值; Δ_j 为 j 时刻两站日平均海平面差值相对 $\overline{\Delta\text{MSL}}$ 的变化量; k 为 Δ_j 的阈值。

第 i 时刻临时站正常潮高观测值为 $h'_2(t)$, 若发生 l_i 沉降量, 则有:

$$h_2(t_i) = h'_2(t_i) + l_i$$

(9)

将式(9)代入(8)式可得:

$$\Delta_j = \left\{ \frac{1}{24} \left[\sum_{i=j-11}^{i=j+12} h'_2(t_i) - \sum_{i=j-11}^{i=j+12} h_1(t_i) \right] - \overline{\Delta\text{MSL}} \right\} + \frac{1}{24} \sum_{i=j-11}^{i=j+12} l_i \geq k$$

(10)

在式(10)中, 若临时站潮位正确, 等式右边第一项应近似为零, 则有:

$$\sum_{i=j-11}^{i=j+12} l_i \geq 24k$$

(11)

当每个时刻沉降量累计相加超过 $24k$ 时,可探测出沉降。根据两站日变曲线的差异计算出每个时刻的沉降量 l_i 后,便可以确定沉降累计时刻的个数和具体发生时刻。

3 实验及分析

为检验上述方法的正确性,以长江口徐六泾为临时潮位站,其 2006-01 潮位资料为研究对象,记录时间间隔为 1 h,共 744 个记录。人为改动原始数据,在 21 日到 31 日期间,添加 0.5 m 的系统误差,使潮位曲线呈“跳跃式”变化。以相距约 21 km 的崇头站为长期验潮站,该站同年 1 月验潮数据为同步验潮资料。由于“跳跃式”系统误差较容易发现,因此,可直接将潮波波形发生跳跃变化的时刻作为分段点,将徐六泾站的验潮资料分为 3 段,利用最小二乘潮位曲线匹配法进行潮位匹配,计算所得 3 参数如表 2 所示。

表 2 “跳跃式沉降”3 参数值比较

Tab. 2 Comparison of Three Parameters

时段	参数		
	x	y/h	z/m
2006-01-01~2006-01-10	0.865	-0.417	0.048
2006-01-11~2006-01-20	0.867	-0.456	0.064
2006-01-21~2006-01-31	0.865	-0.447	0.576

从表 2 知,3 段匹配所得 x 、 y 近似相等; z 在第 1、2 段近似相等,在第 3 段存在约 50 cm 变化,远超过所给定的 10 cm 的阈值,表明沉降发生在该段。据式(6)对第三段潮位进行修复,修复所得潮位与原始潮位的最大互差不超过 1.2 cm,具有较高的修复精度。

以徐六泾站 2006-01-11~2006-01-20 潮位资料为研究对象,人为使其发生“渐进式”匀速沉降,沉降从 13 日 12:00 开始,到 17 日 08:00 结束,速度为 1 cm/h。仍以崇头站为长期验潮站,徐六泾站为临时验潮站。首先将徐六泾潮位资料分为 3 段,采用最小二乘潮位序列分段匹配法,分别进行匹配所得 3 参数值如表 3 所示。

表 3 “渐进式沉降”3 参数值比较

Tab. 3 Comparison of Three Parameters

时段	参数			相关系数 R
	x	y/h	z/m	
2006-01-11~2006-01-13	0.890	-0.521	-0.017	98.4%
2006-01-14~2006-01-16	0.858	-0.466	0.566	95.5%
2006-01-17~2006-01-20	0.853	-0.456	1.028	97.7%

从表 3 中可初步判定临时站潮位资料中含有

“渐进式”系统误差。将每一段以 1 d 为单位继续划分,然后再用潮位序列匹配法计算每小段的 3 参数变化(图 1)。从图 1 中 3 参数变化趋势可得知,每天潮位序列匹配所得 R 彼此非常接近,均在 98% 左右,说明每天潮位曲线匹配效果较好; x 和 y 彼此间都非常接近,而 z 则先呈现线性上升然后平缓变化的趋势,这表明该站的零点发生了渐进式沉降后,然后趋于稳定。同时,从图 1 中可以看出,这种渐进式变化从 13 日开始,到 17 日沉降结束,总的沉降量约在 1 m 左右。

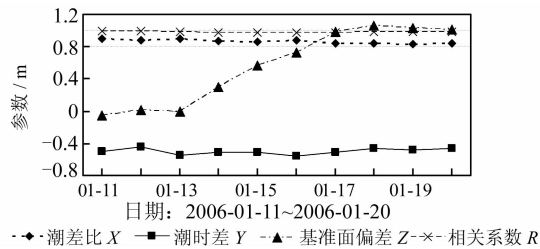


图 1 2006-01-11~2006-01-20 每天 3 参数 x 、 y 、 z 及相关系数变化趋势图

Fig. 1 Changes of the Three Parameters x , y , z and R

在探测出沉降发生的大致时间范围后,需进一步确定沉降在 13 日发生的具体时刻和 17 日结束的具体时刻,从而进行针对性的修复。

首先,提取出崇头和徐六泾两站 12 日到 14 日的所有潮位数据,依次滑动计算从 12 日 12 点开始到 13 日 23 点结束期间每个时刻对应的日平均海平面(图 2)。

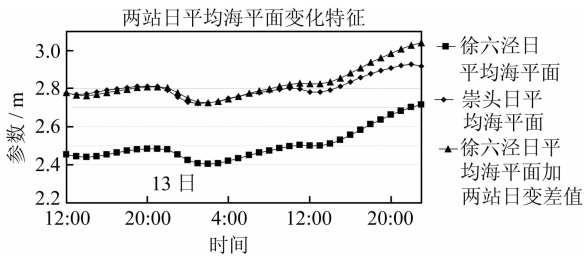


图 2 崇头和徐六泾日平均海平面及差值

Fig. 2 Daily Mean Sea Level and Their Difference Between Chongtou Gauge and Xuliujing Gauge

图 2 中,徐六泾站和崇头站从 01-12 日 12:00~01-13 日 11:00 每个时刻所对应的滑动日平均海平面变化趋势基本一致,其垂直方向偏移量为 32.5 cm。当消除偏移量后,两站日平均海平面最大差值不超过 2 cm,因此,可将式(8)中的阈值 k 设定 2 cm,根据式(11)可知,累积沉降的阈值 $24k$ 为 48 cm。

在 13 日 11:00 后,平移后的徐六泾每个时刻对应的日平均海平面变化曲线开始上扬,随着时间

延伸,与崇头每个时刻对应的日平均海平面变化曲线间的分离量越来越大。因此,初步判定沉降发生在 13 日 11:00 到 14:00 间。在 14:00,崇头的日平均海平面值为 2.79 m,徐六泾对应的日平均海平面在加上 32.5 cm 后为 2.835 m,两者的差值为 4.5 cm,则根据式(11)可知,从沉降时刻开始的累计沉降量为 $4.5 \times 24 = 108$ cm,远大于 48 cm 阈值。

从图 1 和图 2 知,根据不同时刻的日平均海平面差异,可以计算出整个过程中匀速沉降的速度约为 1 cm/h。借助该速度,可以反求沉降发生的具体时刻。设沉降开始时刻的沉降量为 l_1 ,从 13 日 14:00 加上 12 h 逆推到沉降开始发生时刻间的时刻个数为 n ,则根据等差递增序列有: $nl_1 + (1/2)n(n+1) = 108$ 。由 $l_1 = 1$ cm,可得 $n \approx 13$,即从 13 日 14:00 加上 12 h 逆推 13 个时刻,均发生沉降。据此,沉降发生的具体时刻在 13 日 13:00 左右,基本可正确探测出沉降发生的时刻。采用类似的做法,沉降结束的时刻在 17 日 8:00。

根据式(7)对徐六泾该段潮位资料进行修复。根据 17 日和 13 日的参数 z ,计算零点总沉降量为: $\Delta z = |z_{17} - z_{13}| = 98.5$ cm。期间,发生沉降的时刻有 92 个。对于 17 日 8:00 后的数据修复采用式(6),修复结果如图 3 所示。修复后的潮位曲线与正确潮位曲线吻合度极高,最大偏差为 5.5 cm,平均偏差大小为 2.8 cm。

本文针对临时潮位站不同的系统误差类型及其特点,给出了一种基于最小二乘潮位序列分段匹配检测法。理论和实验均表明,该方法可有效地实现不同类型系统误差的探测和修复,对实际生产具有借鉴意义。

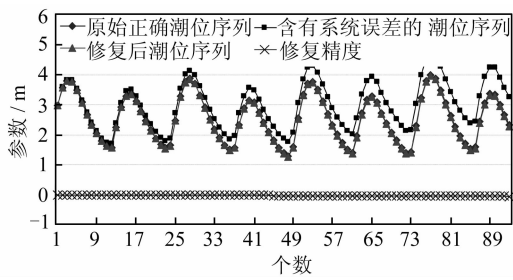


图 3 最小二乘潮位序列分段检测方法精度
Fig. 3 Accuracy of Self-segmented Tide Sequence Matching Method

参 考 文 献

[1] 刘雷, 缪锦根, 李宝森. 压力式验潮仪零点漂移检测及修正方法研究[J]. 海洋测绘, 2010, 30(7): 73-75
[2] 刘雁春. 海洋测深空间结构及其数据处理[M]. 北京: 测绘出版社, 2003
[3] 赵建虎. 现代海洋测绘[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007
[4] 黄祖珂, 黄磊. 潮汐原理与计算[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005
[5] 国家质量技术监督局. GB12327-1998. 海道测量规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999
[6] 许军, 刘雁春, 暴景阳, 等. 最小二乘水位拟合模型的参数时变规律研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(12): 1418-1421
[7] 刘雁春, 陈永奇, 梁开龙, 等. 近海海洋测量瞬时海面数学模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 1996, 21(3): 20-24

第一作者简介: 柯灏, 博士生。研究方向为海洋测绘、潮汐分析及海洋垂直基准。
E-mail: jjdkjoy@163.com

Study on the Detection and Repair Method of the Short-Period Tidal Gauge Observation System Error

KE Hao¹ ZHAO Jianhu¹ ZHANG Hongmei²

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, 8 South Donghu Road, Wuhan 430072, China)

Abstract: The system error contained in the temporary tidal information would have a great impact on the water level correction and computation of the theoretical bathymetrical datum, and not easy to find, especially the zero point of pressure-type tide gauges gradually sinking. This paper presents a self-segmented tide sequence matching method which is based on the least squares. Through analysis system error type, determination of length of sub-section and specific time of sinking, algorithm research of detection and repair, ultimately implement the accuracy detection and precision repair of different type of tidal system error in the temporary tide gauge, and tested by the experiment.

Key words: temporary tide gauge; system error; least squares; self-segmented matching