

余水位时变统计规律分析及水位预报方法改进

赵祥鸿¹, 暴景阳¹, 王一丁², 董晓光³, 卞国旗⁴

(1. 海军大连舰艇学院 海洋测绘系, 辽宁 大连 116018; 2. 海军海洋测绘研究所, 天津 300061;
3. 海军出版社, 天津 300450; 4. 92899 部队, 浙江 宁波 315200)

摘要: 论证了余水位提取对选用潮高模型的依赖性, 以验潮站实测数据分析计算了余水位的时域统计规律和空间统计规律。实验结果表明, 以协因数为技术指标, 余水位具有较明显的时空相似性或一致性特征。基于余水位统计特性和配置原理, 设计了未来时段水位预报的改进方法, 并以实验数据验证了方法的有效性。

关键词: 海道测量; 余水位; 协因数函数; 时空特征; 水位预报

中图分类号: P229

文献标志码: B

文章编号: 1671-3044(2017)03-0036-04

1 引 言

近年来, 余水位的研究日益引起海洋测绘工作者的重视, 主要研究目标是以尽量少的验潮站布设量, 在满足海道测量水位改正精度前提下, 提高水位控制效率或降低水位控制成本。如 Hess 等一系列文章介绍了美国的水位控制原理、方法和 TCARI 软件工具^[1-3], 唐岩、黄辰虎、侯世喜、王征等也曾就余水位技术在海道测量水位控制中的应用进行了研究^[4-9]。从本质上看, 这种应用在已知测区潮汐规律的基础上, 主要利用余水位的空间特性。

除在海道测量水位控制应用之外, 余水位技术还可以改进水位短期预报精度。如美国在重要航道推行了水位现报技术, 此技术中, 使用海洋地理信息导航的船只不仅需要当前时刻的水位发布数据, 还需要对伺候一段时间内的水位变化过程有全面的了解, 这就需要现报系统具有一定的水位精确预报能力。在我国香港海域和珠江口水域, 这种技术已经或正在推广使用, 而预测能力的改进, 主要将利用余水位的时间相关性。国内黄骅港使用的潮汐监测与发布系统, 利用余水位变化的持续性对未来余水位做短时间外推, 实现潮汐预报的实时化^[10]。

本文将根据余水位的时间相关性规律, 以及这种规律的空间相似性统计分析, 基于最小二乘配置原理, 设计了未来时段水位预报的改进方法, 论证了水位短期精确预报方法实施的可行性。

2 余水位提取方法

通过验潮站或其他观测技术获取的水位 $h_w(t)$ 可描述为潮位 $h_T(t)$ 、余水位(亦称非潮汐水位或增减水) $r(t)$ 和观测误差 $\Delta(t)$ 之和, 即:

$$h_w(t) = h_T(t) + r(t) + \Delta(t) \quad (1)$$

根据现代水位观测的技术条件及水位观测相关规定^[11-13]要求, 观测误差 $\Delta(t)$ 可得到有效控制, 相比水位的其他两项构成成分, 为可忽略小量。

潮位 $h_T(t)$ 为海面规律性变化部分, 且具有如下形式:

$$h_T(t) = h_0 + \sum_{i=1}^I f_i H_i \cos(\sigma_i t + V_{0i} + u_i - g_i) \quad (2)$$

式中, h_0 为常量, 是相对选用参考基准的潮汐振动平衡面, 通常由算得的平均水位代替; H_i 、 g_i 为分潮调和常数; f_i 、 u_i 为分潮的交点因子和交点订正角; V_0 为参考时刻($t=0$)的平衡潮分潮相角; σ 为分潮角速率; i 为分潮标号; I 为描述潮高所用分潮总数。

表示潮高所采用的分潮数目决定于用于调和分析的水位观测时段长度以及不同行业的应用需求。根据潮汐分析原理, 由 1 年的水位观测资料可分析 100 余个分潮, 据文献^[13], 可选定的标准分潮数为 122 个, 其中 13 个主要分潮是海洋测绘实践中常用的。

余水位来源于气象等因素扰动影响造成的海面变化, 由于气象扰动因素的复杂性, 就长时段观测数据而言, 难以模型化和实施有效的系统误差补偿, 但在不同的时间段, 因为物理诱因的连续性及海洋的

收稿日期: 2016-09-28; 修回日期: 2016-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(41474012, 41374018)。

作者简介: 赵祥鸿(1989-), 男, 河北秦皇岛人, 博士研究生, 主要从事多波束水深数据处理方法研究。

惯性,必然存在一定的统计关系,即具有“信号”特征。在验潮站已实施长期水位观测的前提下,既存在实测水位 $h_w(t)$,又可根据潮汐分析结果,获得相应的潮位序列 $h_T(t)$,因此,在忽略观测误差的前提下,可得余水位:

$$r(t) = h_w(t) - h_T(t) \quad (3)$$

关于自观测水位分离余水位的方法,除采用直接求差方法外,唐岩等曾用半参数回归模型^[4],结果较为一致。事实上,余水位的规律决定于潮位 $h_T(t)$ 的表示。理论上,潮位应包含所有可参数化的潮汐成分,但实用中,分潮选取个数不足时,经式(3)分离的余水位必然包含其他残余潮汐成分的规律性变化。因此,可将式(3)的表达归结为两种情况:

$$\begin{aligned} r_1(t) &= h_w(t) - h_{T1}(t) \\ r_2(t) &= h_w(t) - h_{T2}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

式中,标注下标“1”的余水位为彻底移去潮汐成分的余水位,而标注下标“2”的余水位为仅移去主要潮汐成分的余水位。在本文的后续计算和分析中,第一种情况的潮高按 122 个分潮计算,第二种情况的潮高按 13 个分潮计算。

3 中国及周边海域余水位统计规律的实验分析

3.1 余水位协方差(协因数)统计方法

所用实验资料为自夏威夷大学海平面中心下载的中国及周边海域长期验潮站逐时水位观测数据。验潮站的分布见图 1。

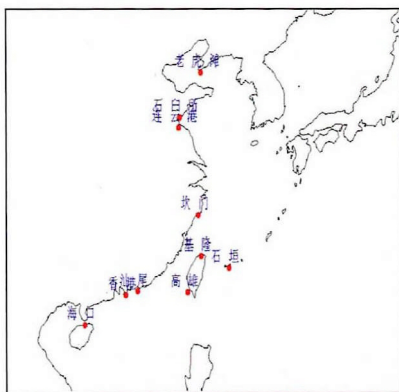


图1 中国及周边海域长期验潮站分布图

在对水位观测数据(年序列)进行潮汐调和分析的基础上,根据式(3)算得余水位序列 $r_j(j=1,2,3,\dots,N)$, N 为余水位个数。根据下式计算余水位的方差估值 $\hat{\sigma}_r^2$,并进一步开方获得余水位的中误差估值 $\hat{\sigma}_r$ 。

$$\hat{\sigma}_r^2 = \frac{\sum_{j=1}^N r_j^2}{N - 2I - 1} \quad (5)$$

由下式计算间隔为 $\Delta t=k$ 的余水位协方差:

$$\hat{\sigma}_r(k) = \frac{\sum_{j=1}^{N-k} r_j r_{j+k}}{N - 2I - k - 1} \quad (6)$$

显然,方差是 $k=0$ 情况下的协方差特例。将所有协方差信息标准化,即均除以方差,得到不同间隔对应的相关系数序列,亦即协因数序列:

$$Q(k) = \rho(k) = \frac{\hat{\sigma}_r(k)}{\hat{\sigma}_r^2} \quad (7)$$

3.2 余水位协因数计算结果的分析

3.2.1 时变规律分析

以老虎滩验潮站为例,根据各年的余水位数据,分别对应式(4)两种情况计算余水位的协因数,绘制出协因数曲线如图 2、3,其中纵坐标为协因数(相关系数),横坐标表示潮汐观测时间间隔(k)。

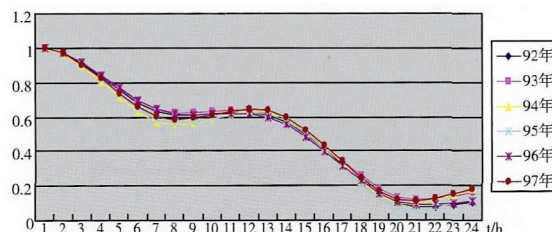


图2 老虎滩 1992~1997 年 13 分潮的余水位协因数曲线

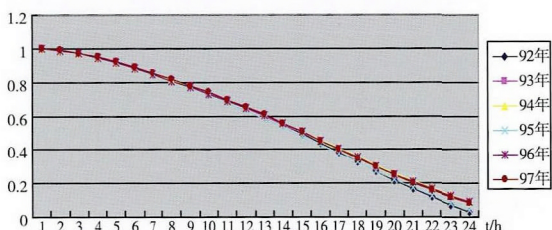


图3 老虎滩 1992~1997 年 122 分潮的余水位协因数曲线

根据图 2、3 所反映出的计算结果,可总结出下列规律:

(1) 由不同年份数据,相同潮高表达式计算的协因数统计值具有良好的稳定性和一致性,反映了余水位信号的较强统计规律性。

(2) 通过基本全频谱潮汐成分自实测水位分离得到的余水位表现出更明显的规律性,而仅通过主要分潮剥离的余水位具有较明显的周期性变化特征。这表明,通过主要分潮预报潮位,在提取的余水位中,存在着其他未顾及分潮的显著影响。

(3) 随着时间间隔的增大,余水位的相关性具有降低的总体趋势,就所分析的样本而言,在大约半天(12h)的时间尺度内,余水位具有 0.5 以上的相关度,这种时间相关特点可应用于利用此前数据的水位预报近期改善。

3.2.2 空间规律分析

运用前文所述方法,根据 1996 年的水位数据分

别计算 10 个验潮站的余水位相关系数,并按海区分别绘图,结果见图 4~6。

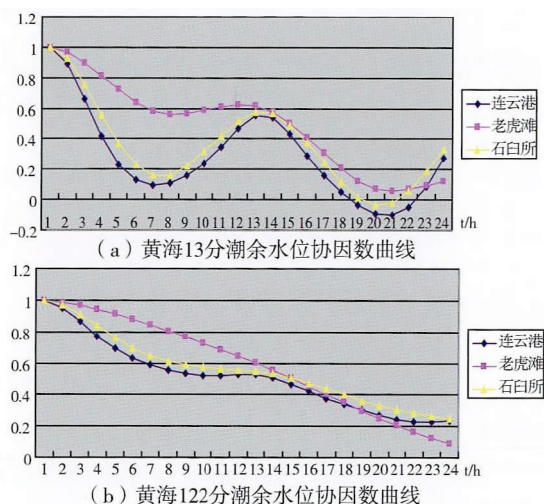


图4 黄海水域 13 分潮和 122 分潮余水位协因数曲线

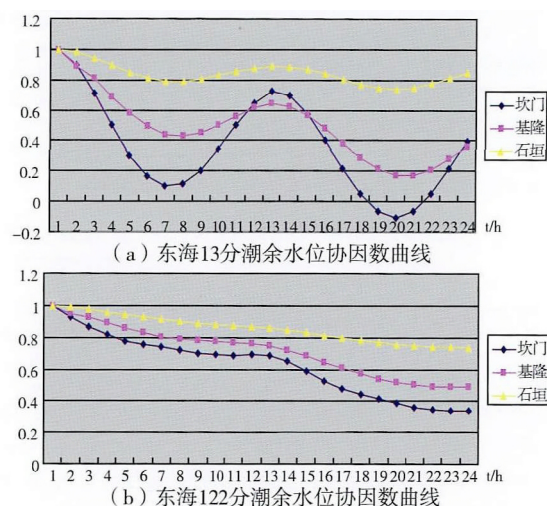


图5 东海海域 13 分潮和 122 分潮余水位协因数曲线

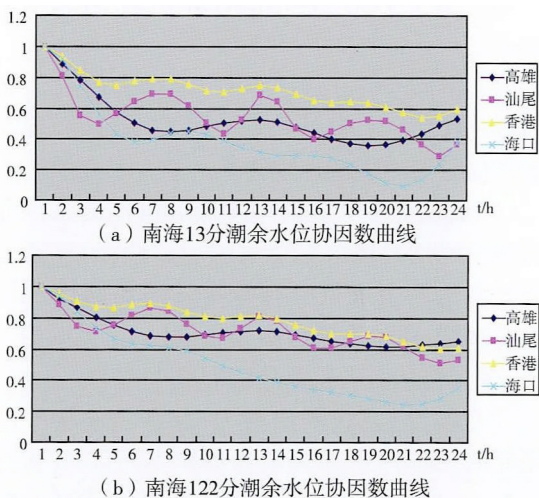


图6 南海海域 13 分潮和 122 分潮余水位协因数曲线

该组曲线除表现了仅由主要分潮分离的余水位存在较明显的周期性变化成分这一共同特征外,还表明:

(1) 空间位置相邻的验潮站,协因数曲线具有一定的一致性,或至少规律的相似性。如连云港与石臼所之间,基隆站与坎门站之间。

(2) 开阔海域,余水位变化具有更强的时间相关性,如石垣的余水位协因数曲线呈现较缓慢的衰减,反映出更长时间的相关尺度。

值得说明,本研究所采用的验潮站,就水位的工程应用而言有过大的空间尺度,本文的研究仅属于一般性的规律分析,并说明余水位协因数规律在不同海区会存在相近的统计规律。可以推测,对于实际应用而言,所分析和实用的数据会在一定的空间限度内,不论是用较多的分潮预报还是仅采用主要分潮实施潮位预报,余水位变化规律会更趋一致,除非潮汐特征异常区域。

4 近期预报的实现原理与试验分析

4.1 近期水位预报的最小二乘配置法原理

鉴于余水位具有信号特征,且随时间变化的协因数在一定的空间尺度上具有规律性和稳定性特征,因此,可根据统计推估原理进行余水位的近期预测,而预报的潮位可作为足够精确的水位趋势项,将趋势项和信号预测结果进行组合,即采用配置模型^[4],实现未来一段时间内的水位预测。

信号的预测公式采用:

$$r' = Q_{rr} Q_{rr}^{-1} r \quad (8)$$

式中, r 为待预测的余水位序列; r 为用于预测的实测余水位序列; Q 为由前述协因数信息构成的向量或矩阵。

按配置原理,预测水位则表达为:

$$h_w(t) = h_r(t) + r'(t) \quad (9)$$

4.2 实验方法与结果

选取老虎滩验潮站某一天的实测验潮数据,按照上面的公式对后 12h 余水位值进行估计,并对后 12h 的水位进行预报,所得结果见图 7。

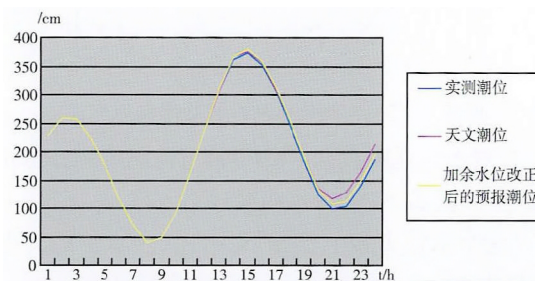


图7 水位预测结果及与潮位预报和实测水位的比较示意图

为更形象地说明这种基于近期余水位,进行未来一段时间水位预报的效果,将实测水位和预测水位的差异放大显示见图 8。

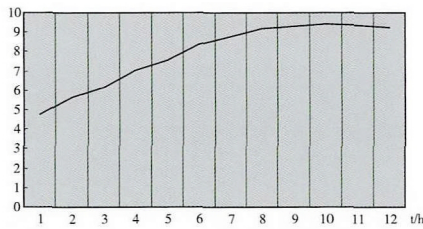


图8 预测水位与实测水位的差值示意图

就本实例而言,利用此前 12h 监测的余水位数据,改进未来一段时间内的水位预报具有较显著的效果,在未来 12h 内,可将水位预报误差控制在 10cm 以内。需要说明,本技术的主要应用场合为现报系统支持下的未来水位预报,应用该技术可不断对未来一段时间内的水位预报值进行动态修正,这种动态预测修正策略可实现预测水位曲线和实测水位曲线的最佳符合,在保证应用时刻及之前的水位具有高可靠性的同时,保证近期未来的水位可靠性。

5 结束语

本文以验潮站实测数据分析计算了余水位的时域统计规律和空间统计规律,并基于余水位统计特性和配置原理,设计了未来时段水位预报的改进方法。通过基本理论介绍与分析,本文研究得出如下结论:

(1) 单站余水位具有较稳定的统计相关性,统计相关的具体特征与潮位预报采用的潮高模型具有一定的关联,根据主要分潮分离的余水位含有一定程度的潮汐成分,显示出一定的周期性特征。

(2) 余水位变化规律呈现出较强的区域相似性特点,反映了余水位的空间代表性,为基于余水位的水位控制方法提供了必要的实验验证。

(3) 基于余水位的统计规律,可改进未来短期时段的水位预报精度。

参考文献:

- [1] Hess, K.W., R.A. Schmalz, C. Zervas, and W.C. Collier, Tidal Constituent And Residual Interpolation (TCARI): A New Method for the Tidal Correction of Bathymetric Data [J]. NOAA Technical Report NOS CS 4, 99 pp. 1999.
- [2] Monica Cisternelli and Stephen Gill. Implement of TCARI into NOS Hydrographic Survey Operations [J]. US Hydrographic Conference 2005, 2005.
- [3] 唐 岩. 余水位的时空分布规律及数值海面形态表达 [D]. 大连: 海军大连舰艇学院, 2006.
- [4] 唐 岩, 暴景阳, 许 军. 余水位的内插及其对潮高模型的精化 [J]. 测绘科学, 2007, 32(6): 94-95.
- [5] 侯世喜, 黄辰虎, 陆秀平, 等. 基于余水位配置的海洋潮位推算研究 [J]. 海洋测绘, 2005, 25(6): 29-33.
- [6] 黄辰虎, 卫国兵, 翟国君, 等. 海道测量中余水位分离方法的研究 [J]. 海洋测绘, 2013, 33(6): 5-10.
- [7] 黄辰虎, 陆秀平, 欧阳永忠等. 远海航渡式水深测量水位改正方法研究 [J]. 海洋测绘, 2013, 33(5): 10-14.
- [8] 王 征, 桑 金, 王 骥. 海洋潮位推算在水深测量中的应用 [J]. 海洋测绘, 2002, 22(2): 3-8.
- [9] 刘 雷, 李宝森, 李 冬, 等. 基于余水位订正的海洋潮位推算关键技术研究 [J]. 海洋测绘, 2012, 32(2): 11-14.
- [10] 黄辰虎, 陆秀平, 黄谟涛, 等. 中国黄骅港潮汐监测与发布 [J]. 中国港湾建设, 2007, 147(1): 51-53.
- [11] GB 12327-1998. 海道测量规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [12] GB/T 14914-1994. 海滨观测规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [13] 方国洪, 王 骥, 陈宗镛, 等. 潮汐与潮流的分析和预报 [M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
- [14] 崔希璋, 於宗俦, 陶本藻, 等. 广义测量平差 [M]. 2 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2009.

Time-varying Statistical Regularity of Residual Water Level and Improved Method of Water Level Predicting

ZHAO Xianghong¹, BAO Jingyang¹, WANG Yiding², DONG Xiaoguang³, BIAN Guoqi⁴

(1. Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;

2. Naval Institute of Hydrographic Surveying and Charting, Tianjin 300061, China;

3. Navy Press, Tianjin 300450, China; 4. 92899 Troops, Ningbo 315200, China)

Abstract: In this paper the dependence of the residual water level selection on the chosen tidal level model is determined. Using the observed data of tidal stations, the temporal and spatial statistical regularity of the residual water level is calculated in this paper. The experiment result shows that the residual water level has the obvious similarity or consistency in time and space. Based on the statistical regularity of the residual water level and the theory of configuration, an improved method of the water level prediction is designed and the effectiveness is verified by the experimental data.

Key words: hydrographic survey; residual water level; association factor; temporal and spatial characteristics; water level prediction