

理论最低潮面定义和算法的应用问题分析

暴景阳^{1,2} 唐岩¹ 许军¹ 齐珺¹ 孙新轩¹

(1 海军大连舰艇学院, 辽宁 大连: 116018; 2 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 分析了理论最低潮面定义的可能最低潮面含义, 研究了定义实现算法的差异, 发现了长周期分潮改正公式的错误。验潮站深度基准面的重新计算结果与采用值比较表明, 在多数验潮站二者存在明显差别。指出在数字化海洋空间信息构建过程中, 重新确定各站意义一致的深度基准面具有必要性。

关键词: 理论最低潮面; 算法; 一致性

1. 引言

海图深度基准面是海图水深的起算面, 也是水深测量水位改正(归算)的起算面。在我国定义为理论最低潮面, 旧称理论深度基准面。按其定义, 为根据验潮站处主要分潮可靠调和常数计算的理论上可能最低潮面, 理论最低潮面只是其简称。我国统一采用理论最低潮面作为海图深度基准面的 50 余年间, 对其实现算法有不同的解释或理解, 因此, 在不同验潮站可能存在深度基准定义的实现偏差。本文的目的是对这种偏差从理论和现状两方面进行分析和验证。

本文关于海图深度基准面的算法实现仅限于潮汐调和常数的直接计算法。

2 理论最低潮面定义和算法分析

2.1 理论最低潮面定义、含义和基本实现

理论最低潮面的定义或明确含义为由主要分潮组合所得的理论上可能最低潮高, 由相对于当地平均海面的垂直差距度量, 在中国该量值即为海图深度基准值, 以字母 L 表达。

理论最低潮面的随地变化特性使其定义以逐点计算的方式实现, 因此, 理论最低潮面的算法在一定程度上等价于中国海区海图深度基准的基本定义方式。

按照上述定义, 深度基准值由各分潮调和常数综合表达的潮高的可能最低值计算。通常只顾及量值较大的主要分潮, 理论最低潮面采用 13 个分潮组合潮高的极值, 这 13 个分潮包含天文潮 8 个: Q_1 、 O_1 、 P_1 、 K_1 、 N_2 、 M_2 、

S_2 和 K_2 。浅水分潮 3 个: M_4 、 MS_4 和 M_6 ,

长周期分潮 2 个: S_a 和 S_{sa} 。其中 S_2 分潮以天文潮部分为主体, 并包含部分气象影响。长周期潮则主要来自于气象因素的影响。

理论最低潮面算法, 即弗拉基米尔法求取

最低潮高的关键在于根据全日分潮和半日分潮相角的 4 对组合规律, 将潮高表达模型化简为单一变量的函数, 从而便于在其中的基本分潮的一个周期内, 通过数值方法求解极值。在此基础上, 以改正的模式附加浅水分潮与长周期分潮对最低值的贡献。因此, 深度基准值由三部分组成:

$$L = L_0 + \Delta L_S + \Delta L_L \quad (1)$$

其中: L_0 为 8 个天文分潮组合的最低值与平均海面的偏差, ΔL_S 为浅水分潮贡献, ΔL_L 为长周期分潮贡献修正量。

2.2 极值计算的基本原理

理论最低潮面的计算式的详细描述需要应用以下一组约定符号^[1]:

$$\begin{cases} a_1 = g_{K_1} + g_{O_1} - g_{M_2} \\ a_2 = g_{K_1} + g_{P_1} - g_{S_2} \\ a_3 = g_{K_1} + g_{Q_1} - g_{N_2} \\ a_4 = 2g_{K_1} - g_{K_2} - 180^\circ \end{cases} \quad (2)$$

其中: g 为分潮的迟角, 各分潮由所对应的下标标识, 因此, 对特定地点的一组特定调和常数, 上述符号表征为一组常数。

记分潮相角为 φ , 附以相应的分潮符号作为下标, 将 K_1 分潮的相角与 (2) 式的常数组合, 并约定如下符号^[1]:

$$\begin{cases} \tau_1 = \varphi_{K_1} + a_1 \\ \tau_2 = \varphi_{K_1} + a_2 \\ \tau_3 = \varphi_{K_1} + a_3 \end{cases} \quad (3)$$

顾及分潮相角之间的关系^[1]:

$$\begin{cases} \varphi_{O_1} = \varphi_{M_2} - \tau_1 \\ \varphi_{P_1} = \varphi_{S_2} - \tau_2 \\ \varphi_{Q_1} = \varphi_{N_2} - \tau_3 \\ \varphi_{K_2} = \varphi_{K_1} + a_4 \end{cases} \quad (4)$$

各分潮符号用以表示其振幅与交点因子的

乘积, 则 8 个主要分潮构成的潮高表达式为^[1]:

$$h(t) = M_2 \cos \varphi_{M_2} + O_1 \cos(\varphi_{M_2} - \tau_1) + S_2 \cos \varphi_{S_2} + P_1 \cos(\varphi_{S_2} - \tau_2) + N_2 \cos \varphi_{N_2} + Q_1 \cos(\varphi_{N_2} - \tau_3) + K_1 \cos \varphi_{K_1} + K_2 \cos(2\varphi_{K_1} + a_4) \quad (5)$$

即由 8 个主要分潮组合而得的潮高为 4 个分潮相角的函数, 当然最终为时间 t 的函数。

将 (5) 式右侧的前三对振动进一步整合为变振幅和变迟角的三相复合振动, 则潮高表达为^[1]:

$$h(t) = K_1 \cos \varphi_{K_1} + K_2 \cos(2\varphi_{K_1} + a_4) + \sum_{i=1}^3 R_i \cos(\varphi_i - \varepsilon_i) \quad (6)$$

其中: φ_i 的下标即代表求和的序号, 又顺序对

应分潮符号 M_2 、 S_2 和 K_2 。

记与第 i 个半日分潮配对的全日潮的序号为 i' , 并将顾及了交点改正的分潮振幅恢复为 fH 的形式, 则 (6) 式中求和号中的有关符号算式为:

$$R_i = \sqrt{(fH)_i^2 + (fH)_{i'}^2 + 2(fH)_i (fH)_{i'} \cos \tau_i} \quad (7)$$

$$\varepsilon_i = \tan^{-1} \frac{(fH)_{i'} \sin \tau_i}{(fH)_i + (fH)_{i'} \cos \tau_i}$$

由 8 个主要分潮求得的理论最低潮面即指 (5) 式的极小值。将求极小值过程简化, 强制 (6) 式求和号中各复合振动的相角为 180° , 则由 8 个主要分潮组合形成的可能最低潮为:

$$L_0(\varphi_{K_1}) = \min imum[K_1 \cos \varphi_{K_1} + K_2 \cos(2\varphi_{K_1} + a_4) - \sum_{i=1}^3 R_i] \quad (8)$$

当然, 据 (7) 式, 式 (8) 中的 R_i 和前两项一样, 亦为 K_1 分潮相角的函数。即, 整个函数仅以 K_1 分潮相角 φ_{K_1} 为自变量的函数, 因此, 可在该分潮的一个周期内, 以数值法求极小值获得 8 个分潮组合的可能最低潮面, 函数取极小值 (驻点) 处的自变量记为 $\varphi_{K_1 0}$ 。

浅水分潮对深度基准改正数计算的基本原理是借助浅水分潮源分潮的相角与 φ_{K_1} 相联系, 从而求得其对潮高的贡献量:

$$\Delta L_S = M_4 \cos \varphi_{M_4} + MS_4 \cos \varphi_{MS_4} + M_6 \cos \varphi_{M_6}$$

(9)

其中:

$$\begin{cases} \varphi_9 = \varphi_{M_4} = 2\varphi_{M_2} + 2g_{M_2} - g_{M_4} \\ \varphi_{10} = \varphi_{MS_4} = \varphi_{M_2} + \varphi_{S_2} + g_{M_2} + g_{S_2} - g_{MS_4} \\ \varphi_{11} = \varphi_{M_6} = 3\varphi_{M_2} + 3g_{M_2} - g_{M_6} \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{且: 取: } \begin{cases} \varphi_{M_2} = \varepsilon_1 \\ \varphi_{S_2} = \varepsilon_2 \end{cases} \quad (11)$$

依浅水分潮改正的同样策略可实现长周期分潮改正项 ΔL_L 的计算。由于两个主要长周期分潮和 S_2 及 K_1 分潮的相角可写为:

$$\begin{aligned} \varphi_{S_a} &= h - g_{S_a} \\ \varphi_{S_{S_a}} &= 2h - g_{S_{S_a}} \\ \varphi_{S_2} &= 2t - g_{S_2} \\ \varphi_{K_1} &= t + h + 90^\circ - g_{K_1} \end{aligned} \quad (12)$$

其中: t 为自午夜起算的平太阳时角。

将两个长周期分潮的相角分别与 S_2 和 K_1 分潮的相角组合, 则可导得:

$$\varphi_{S_a} - \varphi_{K_1} + \frac{1}{2}\varphi_{S_2} = g_{K_1} - \frac{1}{2}g_{S_2} - g_{S_a} - 90^\circ \quad (13)$$

$$\varphi_{S_{S_a}} - 2\varphi_{K_1} + \varphi_{S_2} = 2g_{K_1} - g_{S_2} - g_{S_{S_a}} - 180^\circ$$

将 φ_{S_2} 替换为 ε_2 , 则有:

$$\varphi_{S_a} = \varphi_{K_1} - \frac{1}{2}\varepsilon_2 + g_{K_1} - \frac{1}{2}g_{S_2} - g_{S_a} - 90^\circ \quad (14)$$

$$\varphi_{S_{S_a}} = 2\varphi_{K_1} - \varepsilon_2 + 2g_{K_1} - g_{S_2} - g_{S_{S_a}} - 180^\circ$$

而长周期分潮对深度基准面 (偏差) 的贡献为:

$$\Delta L_L = H_{S_a} \cos \varphi_{S_a} + H_{S_{S_a}} \cos \varphi_{S_{S_a}} \quad (15)$$

3 理论最低潮面算法的进一步分析

3.1 浅水分潮和长周期分潮改正的算法

实现理论最低潮面的计算关键在于求得 13 个分潮叠加理论上可获得的极小值, 从而, 各验潮站计算值具有同样的最低潮含义。

理论可能最低潮的实现, 关键在于浅水分潮改正和长周期分潮改正项的计算。

顾及浅水分潮 M_4 、 MS_4 和 M_6 对潮高贡献后形成的可能最低潮位, 理论上应与 8 个主要天文分潮综合求解。然而, 由于浅水分潮与 K_1 分潮和其它分潮的相角存在着组合的困难。因此借助其源分潮的相角与 φ_{K_1} 相联系, 以改正的模式计算。公式 (9) 给出了一种实现方法, 可以发现其改正是不充分的, 主要原因

在于由(8)式求得极值的驻点处,浅水分潮的正负和大小具有一定的随机性,因此,合理的改正模式为在求极值过程中综合顾及其影响,即采用下式:

$$L_{11} = -\min[L_0(\varphi_{K_1}) + \sum_{i=9}^{11} (fH)_i \cos \varphi_i(\varphi_{K_1})] \quad (16)$$

式中的 K_1 分潮相角对应于如下区间:

$$\varphi_{K_1,0} - \Delta\varphi \leq \varphi_{K_1} \leq \varphi_{K_1,0} + \Delta\varphi \quad (17)$$

该改正模式可称为区间改正, $\Delta\varphi$ 可取 45° 或 180° 。

长周期分潮改正的一般算法与最低潮面意义也存在差异,由(15)式作为长周期分潮对理论最低潮面的修正算法,其修正原理是将长周期分潮的贡献折叠于日周期函数内,修正量的大小和正负也是随机的,不能真实体现长周期分潮对理论可能最低潮面的实际贡献。所应施加的改正应为两个长周期分潮叠加的极低值,故可取为:

$$\Delta L'_L = -\min(H_{S_a} \cos \varphi_{S_a} + H_{S_{sa}} \cos \varphi_{S_{sa}}) \quad (18)$$

该极值问题也可由数值计算法求解,所对应的时间尺度应为 $1a$ 。即覆盖 S_a 分潮的一个完整周期和 S_{sa} 分潮的两个完整周期。

若略去 S_{sa} 分潮的贡献,(18)式可简化为:

$$\Delta L''_L = H_{S_a} \quad (19)$$

事实上,计算深度基准面所需的两个长周期分潮主要表现为气候的周期性变化对海面的影响,而不是天文引潮驱动力,因此,(18)式表达的海面年周期变化的最低值可由实际水位观测的各月平均海面最大负距平值确定,即采用季节改正数:

$$\Delta L'''_L = \bar{h}_L - \min(\bar{h}_m) \quad (20)$$

其中: \bar{h}_L 为由某一固定基准起算的长期平均海面高,而 \bar{h}_m 为相同基准下的月平均海面高。

此外,可将(15)式表达的长周期分潮的贡献直接叠加于(16)式,即:

$$L_{13} = -\min[L_0(\varphi_{K_1}) + \Delta L_S + \Delta L_L] \quad (21)$$

3.2 理论最低潮面与最低天文潮面的近似等价性分析

最低天文潮面是国际海道测量组织近十几年来向其成员国极力推荐的全球统一的海图深度基准面定义,并且已被越来越多的国家所采用。

根据字面的理解,最低天文潮面应为所有天文分潮叠加的最低潮面,同样由该面与平均海面的垂直偏差来表达。但概念在具体实现时,往往是在顾及8个最主要的全日分潮和半日分潮之外,考虑摩擦等动力学影响机制决定的浅水分潮和以气象因素为主要诱因的两个主要长周期分潮对潮高的贡献,以预报法实现覆盖月球升交点进动周期(18.61a)内最低潮位的确定,其实际意义也就不再是严格意义的最低天文潮面了,而是理论最低潮面所应用的13个主要分潮实际预报时出现的最低潮。

对理论最低潮面和最低天文潮面做对比分析可以发现:若由(8)式的半理论方法(部分分潮组合最大振幅形式,8个天文潮数值法求极值)确实可得到这8个分潮组合的最低值,考虑到(8)式已包含了交点因子的影响,则由该式求得的最低值即覆盖交点周期的真正意义的最低天文潮面。与文献^[5](王骥,刘克修,2002)的结论一致。

根据(8)式,并顾及(16)式、(19)式或(20)式,得到13个分潮综合作用的可能最低潮面,则理论最低潮面算法与由13个分潮预报的最低潮面,即多数国家采用的“最低天文潮面”即便不完全等价,也应具有良好的一致性,这与文献^{[6][7]}(暴景阳等,2003,2006)的结论基本一致。

4 理论最低潮面算法应用的多样性

4.1 典型处理方法分析

据笔者掌握的情况,目前可查的关于理论最低潮面的最早算法描述见于文献^[1],该文献相关内容可当做弗拉基米尔算法的原始引进。

文献^[1]在按本文(2)~(8)式的总体计算流程确定8个主要天文分潮叠加可能达到的最低值(与平均海面的垂直偏差)后,进行浅水分潮改正和长周期潮改正。而规定对浅水分潮改正只有在三个主要浅水分潮的振幅之和大于20cm时才予以实施。改正的做法从其描述看,按本文的(9)式计算,而其给出的算例则按(16)式计算,即采用区间改正法。关于长

周期分潮改正，具体有两种方案，一种方法是按（15）式计算改正数。另一种方法，也是当时最常采用的方法是季节改正数法，即应用（20）式。

1975年版《海道测量规范》^[2]对深度基准面的算法表述基本同文献^[1]，但应采用的具体算法没有明确列出。

分别于1990年和1998年发布的《海道测量规范》^{[3][4]}取消了浅水分潮改正关于其量值的限制条件，且统一采用13个分潮计算理论最低潮面（与平均海面的垂直偏差）。所用的公式不再分段，将 K_1 分潮之外的其它分潮相角均联系于 K_1 分潮相角，由数值法在 K_1 分潮的一个变化周期内求得极值，即采用（21）式。

值得说明，文献[1]和各版《海道测量规范》^{[2][3][4]}关于长周期分潮贡献的计算，所取的分潮相角不是采用本文推导的（14）式，而是采用如下公式：

$$\varphi_{S_a} = \varphi_{K_1} - \frac{1}{2}\varepsilon_2 + g_{K_1} - \frac{1}{2}g_{S_2} - 180^\circ - g_{S_a} \quad (22)$$

$$\varphi_{S_{sa}} = 2\varphi_{K_1} - \varepsilon_2 + 2g_{K_1} - g_{S_2} - g_{S_{sa}}$$

由于算法的原始或引进中的可能不准确，进一步影响到长周期分潮改正的不确定性。

4.2 多样性可能引起的基准定义偏差分析

深度基准面算法的多样性使得不同时期所计算的深度基准面数值不具有同一的理论可能最低潮面含义，影响短期和临时验潮站深度基准的传递，也影响通过水位控制而推算的测区任一点的水深，特别是当采用不同验潮站组合进行水位控制时，会使同一点的深度基准及水

深值产生不惟一性。

对于大多数验潮站，早期的算法不必顾及浅水分潮改正。而采用浅水改正的少数站，因为改正方法的可能不当，所算得的深度基准面未必是11个分潮叠加的最低潮，因此，使深度基准面确定偏高（L值偏小）。长周期分潮改正采用两种算法，特别是基于相角的改正法，其改正效果具有随机性，也往往使得深度基准面确定偏高。采用最低月距平值作为季节改正数的方法，可能应用居多。

近两版的《海道测量规范》顾及了所有13个分潮的影响，在很大程度上保证了不同验潮站之间浅水分潮影响的连续性，主要问题可能出现在长周期分潮改正的不合理性。这种不合理性主要是由于长周期振动的贡献向短周期的折叠，不仅不能发挥长周期分潮的改正作用，而且，产生不同站改正量的随机性。这种随机性不仅包含（22）式改正项的不正确，而且还可能由不同站间 K_1 分潮迟角的差异引起。

另外，各版《海道测量规范》对深度基准面计算公式的应用，规定水位观测时段均较短（可用于1个月甚至更短时段的验潮站），潮汐调和常数的不稳定性也会影响深度基准面计算值的可靠性（深度基准面的精度问题将另文讨论）。

本文对中国100余验潮站采用现行《海道测量规范》算法计算了相应的深度基准，与原采用值比较，其差异分布如图1所示，横坐标为计算值与原采用值的差异，纵坐标为验潮站的比例。

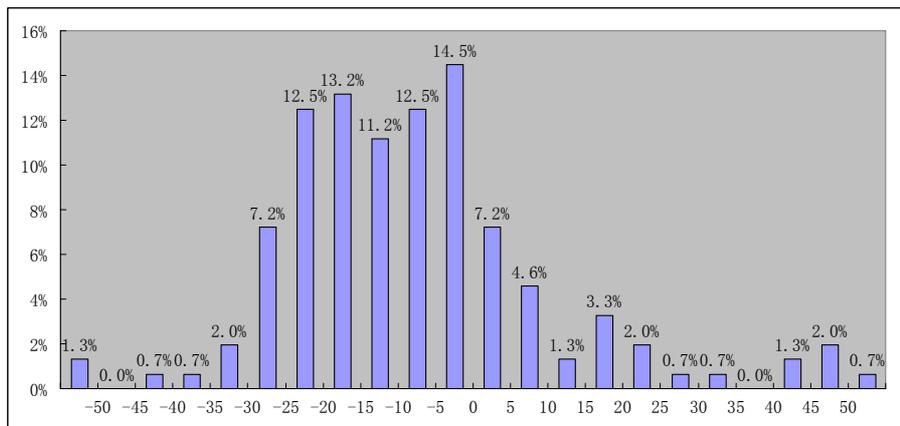


图1 中国沿海深度基准面采用值与同一算法结果偏差的统计分布

由图1可见，按统一公式计算的深度基准值与采用值偏差在±10cm之间的验潮站仅占

38.8%，甚至在部分验潮站，偏差可达数十cm。虽然产生的原因可能是多样的，但算法的不同无疑是重要原因之一。另外，原采用值总体比

现行规范公式算法的结果偏小。

5 结论

(1) 分析了理论最低潮面的含义, 该面实质上应为所顾及的主要分潮经充分组合所得到的最小值。该含义是深度基准面意义一致性和短期站基准传递的基础。

(2) 正确计算的理论最低潮面与最低天文潮面具有近似的一致性。

(3) 理论最低潮面算法关于浅水分潮和长周期潮订正具有多种处理方案, 长周期分潮改

正公式可能存在错误。计算方法引进以来, 其应用方法也曾历经变迁, 致使各验潮站深度基准的含义存在不一致性。

(4) 统计计算表明我国长期部分验潮站的深度基准采用值与统一公式计算结果存在明显偏差。

(5) 鉴于深度基准在各验潮站具体实现的含义不一致性, 在数字化海洋基础空间信息建设中, 重新确定基准面控制框架是必要的。

参考文献

- [1] 中国人民解放军海军司令部海道测量部. 实用潮汐学[M], 中国人民解放军海军司令部海道测量部: 天津, 1959
- [2] 中国人民解放军海军司令部航海保证部. 海道测量规范—水深测量[S], 中国人民解放军海军司令部航海保证部: 天津, 1975
- [3] 国家技术监督局. 海道测量规范 (GB 12327-90) [S], 中国标准出版社: 北京, 1990
- [4] 国家技术监督局. 海道测量规范 (GB 12327-98) [S], 中国标准出版社: 北京, 1998
- [5] 王骥, 刘克修. 关于海图深度基准面计算方法的若干问题[J], 海洋测绘, 2002, 22(4): 10-13
- [6] 暴景阳, 黄辰虎, 刘雁春等, 海图深度基准面的算法研究, 海洋测绘, 2003, 23 (1): 8-12
- [7] 暴景阳, 刘雁春, 晁定波等, 中国沿岸主要验潮站海图深度基准面的计算与分析, 武汉大学学报 (信息科学版), 2006, 31 (3): 224~228

The analysis of the application of definition and algorithms of Lowest Normal Low Water(LNLW)

Bao Jing-yang^{1,2} Tang Yan¹ Xu Jun¹ Qi Jun¹ Sun Xin-xuan¹

- (1. Department of hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, Dalian, Liaoning, 116018
2. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Abstract: In this paper, the meaning of the Lowest normal low water(LNLW) is analyzed. The differences existed in the algorithms for calculating the LNLW is researched. It is discovered that, some mistakes consist in the original formula about the corrections from long term period tide. The statistics from the comparisons between the derived datum from harmonic constants and from tidal gauge records shows great differences. In present, for the construction of digital hydrographic spatial information, it is necessary to reconstruct the vertical chart datum system for coherence.

Key words: Lowest normal low water(LNLW); Algorithm; Coherence

作者简介: 暴景阳 (1965-), 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事海洋大地测量研究