

短期潮汐潮流数据的正交潮响应分析研究

唐 岩¹ 暴景阳^{1,2} 刘雁春¹ 张立华¹

(1 大连舰艇学院海测工程系,大连市中山区解放路 667 号,116018)
(2 国家海洋局第一海洋研究所,青岛市高科园仙霞岭路 6 号,266061)

摘 要:论证并试验验证了正交潮响应分析对潮汐潮流数据的时间长度的要求,得出理论最短数据时间长度为 2 d;但对于实测数据,要求在以全日潮为主的海区需 7 d 以上数据,在以半日潮为主的海区需 10 d 以上。对于一天到几天的数据,通过引入比例关系和改变模型中 $\Delta\tau$ 的取值,实现了对数据的建模分析。经对中国 12 个主要验潮站连续 366 d 数据的试验验证,短期与长期(1 a)数据分析结果相近,而与准调和与分析相比较,正交潮响应分析具有较高的精度,且不存在良好天文观测日期的选择问题。

关键词:短期潮汐潮流数据;正交潮响应分析;准调和与分析

中图法分类号:P229.2; P228.3

响应分析法最早由 Munk 和 Cartwright 提出^[1],Groves 和 Reynolds 又对其进行改进^[2],得出正交潮响应法。该系列方法由于不必事先规定观测方程中存在何种频率的振动即能客观地分析出各种可能的频率贡献,实现由少量参数描述潮汐潮流变化的规律,故相对于调和分析法,该方法能够更加细致、准确地描述海洋水体运动。基于上述优势,该系列方法在卫星测高数据^[3-5]、沿岸和海上定点验潮(流)站观测数据^[6-7]的潮汐建模以及舰船航行时的潮汐资料需求^[8]等方面具有较好的应用价值。然而,到目前为止,响应分析和正交潮响应分析的应用研究主要是针对中长期数据,对于短期数据的分析一直没有进行系统的论证和试验研究。而在海道测量和海上工程测量作业中,受海洋环境条件和作业成本限制,潮汐和潮流大多只进行一天或几天的短期观测,并以此作为描述区域潮汐潮流性质及满足其他测量作业需求的依据,有必要深入研究。

1 正交潮响应分析的基本原理

响应分析的基本思想是以潮汐驱动力为输入函数、实测数据为输出函数,在输入和输出之间构建一个线性系统,并将该系统作为观测方程解算

其中与时间无关的参数,用以描述潮汐潮流的运动变化规律。

若仅考虑全日潮族和半日潮族,正交潮响应分析的潮高表达式可列为^[2-3]:

$$\zeta(t) = A_0 + \sum_{m=1}^2 \sum_{i=0}^2 [U_{mi} P_{mi}(t) + V_{mi} Q_{mi}(t)] \quad (1)$$

若忽略输入函数中非引潮力位输入,并将引潮力位输入按杜德逊展开式展开至 60 项计算(半日分潮 30 项、全日分潮 30 项),参照文献[1,2]关于输入函数的计算式,将 $P_{mi}(t)$ 和 $Q_{mi}(t)$ 展开整理为:

$$\left\{ \begin{aligned} P_{m0}(t) &= \sum_{i=1}^{30} k_{m1} C_{mi} \cos\theta_{mi} \\ P_{m1}(t) &= \sum_{i=1}^{30} [k_{m2} - 2k_{m3} \cos(\sigma_{mi} \Delta\tau)] C_{mi} \cos\theta_{mi} \\ P_{m2}(t) &= \sum_{i=1}^{30} [k_{m4} - 2k_{m5} \cos(\sigma_{mi} \Delta\tau) + 2k_{m6} \sin(\sigma_{mi} \Delta\tau)] C_{mi} \cos\theta_{mi} \\ Q_{m0}(t) &= \sum_{i=1}^{30} k_{m1} C_{mi} \sin\theta_{mi} \\ Q_{m1}(t) &= \sum_{i=1}^{30} [k_{m2} - 2k_{m3} \cos(\sigma_{mi} \Delta\tau)] C_{mi} \sin\theta_{mi} \\ Q_{m2}(t) &= \sum_{i=1}^{30} [k_{m4} - 2k_{m5} \cos(\sigma_{mi} \Delta\tau) + 2k_{m6} \sin(\sigma_{mi} \Delta\tau)] C_{mi} \sin\theta_{mi} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中, $k_{m1} \sim k_{m6}$ 为常数,数值通过正交关系推算得

收稿日期:2010-07-21。
项目来源:国家自然科学基金资助项目(40874001);地理空间信息工程国家测绘局重点实验室开放研究基金资助项目(200810);山东省泰山学者建设工程专项经费资助项目(TSXZ-0520)。

到^[2]; θ_{mi} 、 σ_{mi} 、 C_{mi} 分别为引潮势展开项的天文相角、角速率和振幅系数,可通过天文变量计算得到,其中,天文相角由 1900-01-01:0 时起算的儒略日计算; $\Delta\tau$ 经试算取值为 48 h^[1,2,9]。

潮汐和潮流数据均可按照式(1)模型进行建模分析,但潮流数据首先需分解为北、东两个分量而后进行分析,方法与潮汐分析方法相同,故在以下研究中仅以潮汐数据为例进行论述。试验用潮汐数据均来源于 Hawaii 大学海平面数据中心,观测间隔 1 h。

2 正交潮响应法对数据时间长度要求的研究

2.1 理论最短数据时间长度

Munk 在响应分析观测方程推导过程中^[1],需要对平衡潮高公式进行卷积滤波以实现潮族分离,滤波时要求的最短时间为 $\Delta\tau$,它们对 Honolulu 站的试验结果表明取 48 h 的数据为宜,因此可以推断,响应分析和正交潮响应分析要求数据时间长度在 48h 以上。以下给出设计试验以证明该结论。

假设给定 8 个主要分潮的调和常数(表 1)用以建立一模拟验潮站,将其 1 h 间隔的预报值作为观测值,输入函数采用与表 1 分潮对应的 8 个频率的平衡潮,按照式(1)分别计算 45 h、2 d 和 1 a 数据(起始时间均为 1978-01-01:0)的响应参数,计算结果如图 1 所示,比较 3 个时段结果得出:2 d 和 1 a 结果符合较好,时间再短(45 h)则会出现较大偏差。

表 1 模拟站采用的调和常数

Tab. 1	Harmonic Constants of the Simulated Tide Station							
	Q_1	O_1	P_1	K_1	N_2	M_2	S_2	k_2
H/cm	1	8	5	15	13	74	22	6
g/(°)	212	237	292	296	256	288	343	347

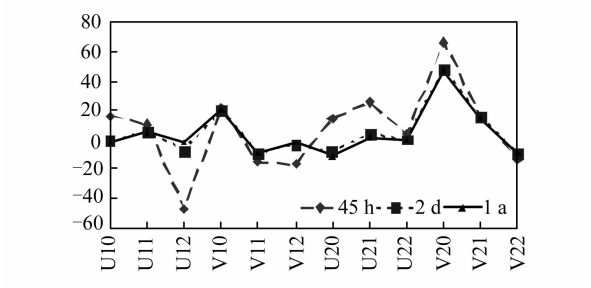


图 1 模拟站不同时间长度数据分析结果
Fig. 1 Parameters Calculated by Different Time Spans of Data at the Simulated Tide Station

2.2 实测数据的分析研究

以上设计试验是在输入与输出不存在扰动的理想状态下进行的,而在实测数据分析时,2 d 数据的结果则可能会有较大偏差。比较北海站 2 d (1978-01-01:8~01-03:7 时)和 1 a(1978 年)的分析结果发现,两个时段的参数解算值的最大差异在 500 以上,2 d 的数据分析结果明显错误(1a 数据分析结果可近似认为是准确值)。

经过分析,造成 2 d 实测数据结果错误的原因是:法方程系数矩阵制约性较弱,制约数(条件数)为 1.3×10^6 ,矩阵严重病态^[10]。即正交潮响应分析中的输入或输出(观测值)即使存在较小偏差,也会对响应参数解造成较大影响,而在实测数据分析过程中,输入函数不准确和观测误差等偏差是不可避免的。因此,相对理想状态下的数据,在实测数据的正交潮响应分析时,需要更长时间的数据以避免法方程系数矩阵病态。由此,正交潮响应分析要求的数据最短时间将由其法方程系数矩阵的制约性决定,以下讨论其组成及制约性。

根据式(1),法方程系数矩阵由时变函数 $P(t)$ 和 $Q(t)$ 构成的,在权阵为单位阵时,其表达式为:

$$\boldsymbol{N} = (n_{ij})_{12 \times 12} = \boldsymbol{B}^T \boldsymbol{B} \tag{3}$$

其中,

$$\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} P_{00} & Q_{00} & P_{01} & Q_{01} & P_{02} & Q_{02} \\ P_{10} & Q_{10} & P_{11} & Q_{11} & P_{12} & Q_{12} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中, \boldsymbol{P} 和 \boldsymbol{Q} 为离散时间序列的列向量,由式(2)计算获得。一般地,良态矩阵对角线元素的绝对值明显大于对角线两侧的非对角元素的绝对值,理想情况是所有非对角元素等于零。依此标准考察 \boldsymbol{N} 的各个元素 n_{ij} :

$$n_{ij} = \sum_t \beta_i(t) \beta_j(t) = \sum_t \varphi_{ij}(t) \tag{5}$$

式中, $\beta_i(t)$ 为矩阵 \boldsymbol{B} 的第 t 行、 i 列的元素,根据式(2)可知它是由多个不同频率的正弦或余弦波叠加构成。

由式(5)可知, n_{ij} 的数值大小取决于时间函数 $\phi_{ij}(t)$ 的变化情况。以 $\phi_{00}(t)$ 为例,结合式(2)对其进行频率项展开:

$$\begin{aligned} \varphi_{00}(t) &= P_{00}^2(t) = \left(\sum_{i=1}^{30} k_{01} C_{0i} \cos \theta_{0i} \right)^2 \\ &= \sum_{i=1}^{30} k_{01}^2 C_{0i}^2 \cos^2 \theta_{0i} + 2 \sum_{i \neq j}^{30} k_{01}^2 C_{0i} C_{0j} \cos \theta_{0i} \cos \theta_{0j} \\ \cos \theta_{0j} &= \frac{1}{2} k_{01}^2 \sum_{i=1}^{30} C_{0i}^2 + k_{01}^2 \sum_{i \neq j}^{30} C_{0i} C_{0j} \cos (\theta_{0i} - \theta_{0j}) + \frac{1}{2} k_{01}^2 \sum_{i=1}^{30} C_{0i}^2 \cos 2\theta_{0i} + \end{aligned}$$

$$k_{01}^2 \sum_{i \neq j} C_{0i} C_{0j} \cos(\theta_{0i} + \theta_{0j}) \tag{6}$$

推导结果表明, $\phi_{00}(t)$ 是由一个不随时间变化的常数项和多个周期项叠加构成, 同理, 当 i 和 j 为其他数值时, 也可得到 $\phi_{ij}(t)$ 相似的结构。经过统计计算, \mathbf{N} 对角元素上的 $\phi_{ij}(t) (i=j)$ 中的常数项远大于非对角元素上的常数项 (约 100 倍以上), 故可推断出以下几个问题。

1) 在观测时间较长的情况下, 可以近似认为 $\phi_{ij}(t)$ 中周期项部分的时间求和值为 0, 常数项部分则不断累积增加, 因此, \mathbf{N} 的对角元素 $n_{ij} (i=j)$ 将远大于非对角元素 $n_{ij} (i \neq j)$, 为良态矩阵;

2) 在观测时间较短的情况下, $\phi_{ij}(t)$ 中的周期项部分的时间求和值非 0 且可能数值较大 (主要是不足整周期部分的和值), 同时, \mathbf{N} 中各个元素的周期项各不相同, 可能使得其非对角元素上周期项时间求和值远大于对角元素, 从而可能出现 $n_{ij} (i \neq j) > n_{ij} (i=j)$, 造成 \mathbf{N} 病态。

由此可知, $\phi_{ij}(t) (i \neq j)$ 中时变部分的周期是决定 \mathbf{N} 制约性的关键因素。经统计, $\phi_{ij}(t)$ 中频率最低项周期约为 18.6 a, 故在此以 $\phi_{01}(t)$ 为例, 考察其 19 a (1975~1993) 离散数据的频谱结构 (如图 2(a) 所示), 得出其主要频率项的周期集中在两部分: ① 周期在 11 h~14 h 之间的高频段; ② 周期在 5 d~19 a 之间的低频段。其中, 低频部分 (如图 2(b) 所示) 又以周期为 9.1 d、13.7 d、27.6 d、182.2 d 左右的周期项为主。

结合函数展开式及频谱结构图, 统计不同 i, j 取值时的 $\phi_{ij}(t) (i \neq j)$ 中主要低频项的周期可知, 对于由日潮族构成的时变函数 $P_0(t), Q_0(t)$ 之间乘积得到的 $\phi_{ij}(t) (i, j \leq 6)$, 主要低频项的周期约为 6.8 d、9.1 d、13.7 d、27.6 d 和 182.3 d; 对于由半日潮族构成的时变函数 $P_1(t), Q_1(t)$ 之间乘积得到的 $\phi_{ij}(t) (i, j > 6)$, 主要低频项的周期约为 9.6 d、14.8 d 和 27.6 d; 对于由不同潮族构成的时变函数之间乘积得到的 $\phi_{ij}(t)$ 不含低频项。

根据上述统计结果, 可得以下结论: 在应用正交潮响应分析法时, 数据时间长度应尽量保证在半年 (182 d) 以上, 但在精度要求不高的情况下, 依据不同潮汐类型, 观测时间长度要求可相应降低, 日潮占优时最短可为 7 d, 半日潮为 10 d。

以北海站 (正规日潮)、坎门站 (正规半日潮) 为例, 分别对不同时间长度数据进行正交潮响应分析, 两站数据观测起始时间分别为 1978-01-01 : 8 时和 1996-01-01 : 8 时, 分析结果如图 3、图 4 所示。若认为 1 a 所得参数近似为准确值, 则以

综合预报误差 RSS (root sum square) 反映短期分析结果与准确值差异:

$$RSS = \left[\sum_{i=1}^{12} (X_i - X'_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{7}$$

式中, X_i 为短期分析所得参数; X'_i 为 1 a 所得参数。两试验站统计计算结果为: 北海站 6 d 的 RSS 误差为 52.5 cm, 7 d 则降为 17.7 cm; 坎门站 8 d 的 RSS 为 41.5 cm, 10 d 则降为 24.3 cm。上述结果表明, 两站分别由 7 d 和 10 d 分析所得响应参数的精度相对较高, 时间再短 (6 d 和 8 d) 精度则会明显下降, 符合前文的理论论证结果。

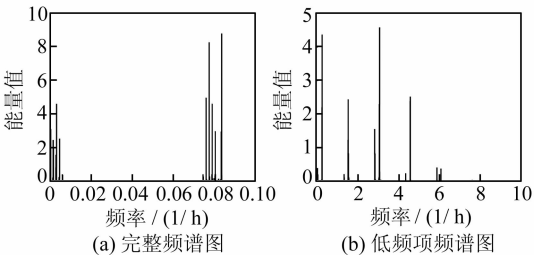


图 2 函数 $\phi_{01}(t)$ 的频谱图
Fig. 2 Spectrum of Function ϕ_{01}

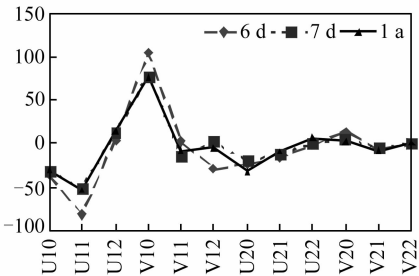


图 3 北海站不同时间长度数据的分析结果
Fig. 3 Parameters Calculated by Different Time Spans of Data at Beihai Tide Station

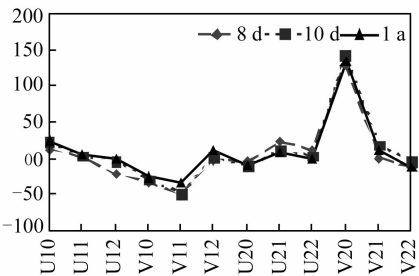


图 4 坎门站不同时间长度数据的分析结果
Fig. 4 Parameters Calculated by Different Time Spans of Data at Kanmen Tide Station

需要说明的是, 理论上, 有时仅由 7 d 或 10 d 数据得出的结果精度会较低, 这主要是由于该观测时段内周期为 7 d 或 10 d 的低频项在 $\phi_{ij}(t) (i \neq j)$ 中贡献较小, 从而使得法方程系数矩阵 \mathbf{N} 结构不稳定所致。为保证精度, 可引入衡量矩阵制

约性的标准来评定响应分析结果的精度^[10]:当制约数在 0~100 之间时,矩阵为良态矩阵,此时认为响应分析结果较可靠;当制约数大于 100 时,矩阵为中等或严重病态矩阵,此时认为响应分析结果精度较低。本文对图 3 算例进行试算,7 d 的制约数为 143,8 d 为 81,1 a 为 2,由此可见,依据该标准所得时间长度与理论值基本符合,可用以判断正交潮响应分析要求的数据最短时间长度。

3 短期数据正交潮响应分析的实现

3.1 法方程系数矩阵的病态性问题

病态矩阵可通过引入参数的比例关系作为限制条件来改善其结构。依据该思路,短期数据的正交潮响应分析的过程变为:选定观测点附近某一响应参数已知点,并假设观测点和已知点的同一潮族的响应参数具有相同的比例关系,依此假设构建观测点的待求参数的方程组作为式(1)的限制条件:

$$\begin{matrix} \mathbf{C} & \mathbf{X} & - & \mathbf{W} & = & 0 \\ 10 \times 13 & 13 \times 1 & & 10 \times 1 & & \end{matrix} \quad (8)$$

式中, \mathbf{X} 为平均海面 A_0 和响应参数 U 、 V 构成的列向量,是待求参数; \mathbf{C} 为常数矩阵; \mathbf{W} 为比例值构成的向量。将式(1)和式(8)按照附有限制条件的间接平差求解即可得到短期的平均海面及较为准确的响应参数。

上述方法是建立在两空间点的同一潮族的响应参数具有相同比例关系的假设基础上的,即相同潮族响应参数在空间上须均匀变化。事实上,潮波尤其是同一潮族的潮波在小范围海域内的传播受到的海底或海岸地形影响大致相同,故可认为上述假设基本成立。

3.2 理论最短数据时间长度的限制问题

综上所述,响应分析的理论最短数据时间长度与 $\Delta\tau$ 的取值相关,文献[1-2]取 $\Delta\tau=1/\Delta\nu$ 。其中, $\Delta\nu$ 为各潮族频带宽度,在其推导过程中,全日潮族的有效频带取为 0.8 c/d~1.1 c/d,半日潮族取为 1.75 c/d~2.05 c/d,即 $\Delta\nu$ 取 0.3 c/d, $\Delta\tau$ 为 1.7 d,但经试验计算取 $\Delta\tau$ 为 48 h 为宜。

事实上,实现全日潮族和半日潮族的分离最短仅需 24 h 的数据^[11],其与 48 h 数据滤波的区别在于:24 h 的滤波结果包含了更多的位于频带边缘的小分潮或噪声,相当于增大响应输出函数的误差。然而,由于该部分误差较小,故可推断 $\Delta\tau$ 取 24 h 的响应分析结果虽然在精度上会低于 $\Delta\tau$ 取 48 h 的结果,但结果仍然准确可靠。若取

$\Delta\tau$ 为 24 h,则正交潮响应分析中的常系数 $k_1\sim k_6$ 经重新计算后在表 2 中列出。

表 2 正交潮展开的常系数表($\Delta\tau=24$ h)
Tab. 2 Constants Used in the Process of Orthogonal Response Analysis($\Delta\tau=24$ h)

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
$m=1$	0.029 6	0.580 0	0.299 9	2.431 2	1.217 7	0.290 4
$m=2$	0.019 8	0.430 8	0.233 3	1.366 4	0.673 0	0.180 3

在此还需说明的是, $\Delta\tau$ 取 24 h 仅是在需要对一个周日潮汐潮流观测数据进行响应分析时应用,当待分析的数据时间长度大于 2 d 时,建议 $\Delta\tau$ 仍取 48 h。

3.3 试验结果

试验采用闸坡和澳门两站 1 a(1980 年)数据,两站距离约 200 km,比较两站 1 a 所得参数的比例关系(两不同潮族分别以 U_{10} 和 U_{20} 为基准),结果(图 5)显示:相邻站间同一潮族的响应参数比例相差不大,参数空间均匀变化的假设条件成立。此外,为证明表 2 计算结果的正确性,比较了闸坡站在 $\Delta\tau$ 分别取 24 h 和 48 h 时 1 a 数据的分析结果,两者 RSS 误差仅为 0.86 cm,表明 $\Delta\tau$ 取 24 h 准确可行。

现以闸坡为短期观测站,澳门为附近已知长期验潮站,为闸坡站提供参数比例关系。对闸坡站 366 组周日观测数据进行正交潮响应分析(1980-01-01:8 时~1981-01-01:7 时),并得出 366 组响应参数,计算上述所得响应参数与闸坡站 1 a 分析所得参数的 RSS 误差,结果如图 6 所示。

图 6 中结果显示,在大多数时间内,短期正交潮响应分析结果与长期分析结果符合较好,但个别时段结果出现较大异常。经分析和查证,造成异常较大的原因是该时间段内观测水位可能受天气因素影响在 24 h 内的变化发生异常,故使得描述水位运动变化规律的参数与准确值相差较大。本文查询了前 7 个 RSS 误差最大时段的风速资料(RSS 误差在 38.5 cm~123.4 cm 之间),各时段内最大风速均在 50 m/s 以上,最大值达到 200 m/s,表明期间天气变化较为剧烈。除去上述异常较大的 7 个时段,其余时段的平均 RSS 误差为 9.0 cm,这是由数据观测质量、比例关系误差等不可避免的因素造成的。

4 短期数据准调和与分析与正交潮响应分析的比较

相对于调和分析,响应分析脱离了分潮概念,

可用较少的参数实现众多分潮的表示,同时也在很大程度上避开了调和分析中分辨率的限制。如 1 a 左右资料的调和分析仅能分离不同亚群的分潮,1 个月左右资料仅能分离不同群的分潮,而通过潮汐导纳函数,由响应分析可得到任意频率分潮的调和常数^[3,9]。由此可以推断,响应分析模型由于顾及了较多的天文分潮,其潮高模型的精度必然高于调和分析模型,响应参数也能够更准确地描述水位运动变化规律,具有更好的潮汐潮流预报能力。

关于两种分析方法的对比研究,Zetler 等通过试验得出响应分析与调和分析精度相同或前者精度稍高的结论^[12];黄辰虎等则比较了 1 a 数据

的正交潮响应法和调和分析法,得出两者精度基本相同^[13]。对于短期数据,理论上,由于准调和

分析模型采用分潮数目较少(一般仅用 O_1 、 K_1 、 M_2 、 S_2 4 个分潮),正交潮响应分析模型应具有相对更高的精度,分析结果也应更加准确。

以闸坡站 1980 年实测数据为例,分别采用引入差比关系的准调和

分析模型^[11]和本文模型对其中 366 组周日数据进行分析,差比关系由澳门站提供。为便于比较分析,将响应参数按导纳函数^[3]转换为调和常数,而后分别计算 366 组由两种不同方法得到的 4 个主要分潮的预报值与年调和

分析结果中 4 个分潮的预报值,并在图 7 中给出两种方法预报值与年预报值的均方根差。

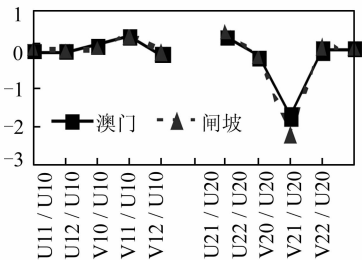


图 5 澳门与闸坡站
响应参数比例

Fig. 5 Parameters Ratios of
Macau and Zhapo Tide Stations

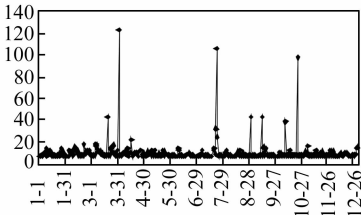


图 6 周日数据分析
结果的 RSS 误差/cm

Fig. 6 RSS of Parameters
Calculated by Every 24 h Data

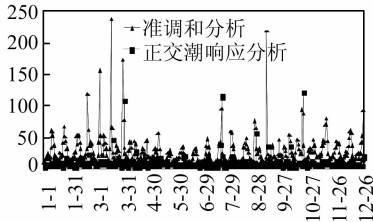


图 7 两种方法的短期预报
值与年预报值的均方根差/cm

Fig. 7 Two Arrays of RMS Between
Short and Annual Prediction Values

图 7 中结果显示,除在天气变化剧烈期间外,正交潮响应分析法的均方根差明显小于准调和

分析方法,表明前者分析所得参数相对后者更接近于年分析结果(近似准确值)。该试验结果与之前理论论证结果相符。同时,在试验结果中还发现,正交潮响应分析相对较为稳定,其原因可能是:准调和

分析方法由于需要顾及良好的天文日期^[9,11],在小潮期间可能会使得全日潮或半日潮分析结果发生错误,故均方根差序列波动较大;而正交潮响应法则不需顾及天文日期,故均方根差较为稳定,具有更好的适用性。

按照上述方法,统计计算中国沿岸 12 个主要验潮站两种分析方法的 366 组均方根差的平均值,结果如表 3 所示。其中,由于附近缺少基准站,所用差比关系由本站长期数据分析所得调和常数提供。统计结果显示,12 个验潮站的正交潮响应分析结果更接近于年分析结果,故其相对于准调和

分析结果具有较高的精度。

5 结 语

针对制约数大于 100 的短期数据,可通过引

表 3 中国主要验潮站两种分析方法比较/cm
Tab. 3 Comparison of Two Analysis Methods at the
Main Stations in China

验潮站	正交潮响应	准调和	验潮站	正交潮响应	准调和
大连	7.1	30.2	香港	3.8	18.1
连云港	14.5	52.6	澳门	5.4	21.4
吕四	10.4	56.1	闸坡	9.9	27.4
坎门	10.9	64.4	海口	8.4	26.4
厦门	12.8	62.2	北海	13.3	49.2
汕尾	4.6	15.6	东方	7.8	29.8

入参数的比例关系作为限制条件来降低法方称系数矩阵的制约数,从而实现 48 h 以上数据的正交潮响应分析。当数据时间长度在 24 h~48 h 时,可进一步通过改变正交潮响应分析中的 $\Delta\tau$ 的取值(24 h),以牺牲少量精度为代价降低原有模型对理论最短数据时间长度的限制,实现对数据的建模分析。经实测数据检验,除天气变化较为剧烈时段,1 d 数据的分析结果与长期数据分析结果符合较好;而与准调和

分析相比较,响应分析结果相对较为准确,且不必顾及天文日期的选择问题,适用性更强。

参 考 文 献

[1] Munk W H, Cartwright D E. Tidal Spectroscopy and Prediction [J]. Phil Trans Roy Soc, 1966, A259: 533-581

[2] Groves G W, Reynolds R W. An Orthogonalized Convolution Method of Tide Prediction[J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80(30): 4 131-4 138

[3] 暴景阳. 基于卫星测高数据的潮汐分析理论与方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2002

[4] 暴景阳, 晁定波, 李建成, 等. 由 T/P 卫星测高数据建立南中国海潮汐模型的初步研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 1999, 24(4): 341-345

[5] 许军, 暴景阳, 刘雁春. 潮汐模型对利用卫星测高数据研究海平面变化的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2006, 31(6): 503-507

[6] 黄祖珂, 陈宗镛. 潮汐响应分析[J]. 山东海洋学院学报, 1983, 13(2): 13-20

[7] David T P. Tides, Surges and Mean Sea-level[M].

New York: John Wiley & Sons Ltd, 1987

[8] 张立华, 刘雁春, 朱庆. 基于动态水位的航线可行性分析方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(9): 892-895

[9] 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

[10] 黄维彬. 近代平差理论及其应用[M]. 北京: 解放军出版社, 1992

[11] 方国洪, 郑文振, 陈宗镛, 等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986

[12] Zetler B D, Cartwright D E. Some Comparisons of Response and Harmonic Tide Predictions[J]. Intern Hydro Rev, 1979, 56(2): 105-115

[13] 黄辰虎, 暴景阳, 刘雁春, 等. 正交潮响应分析法与调和分析法在验潮站潮汐资料分析中的对比研究[J]. 海洋测绘, 2004, 24(2): 19-23

第一作者简介: 唐岩, 博士生, 主要从事应用潮汐潮流研究。
E-mail: ty96561@163. com

Research on Orthogonal Response Analysis of Tide and Current Using Short Term Data

TANG Yan¹ BAO Jingyang^{1,2} LIU Yanchun¹ ZHANG Lihua¹

(1 Department of Hydrography and Cartography, Dalian Naval Academy, 667 Jiefang Road, Dalian 116018, China)
(2 First Institute of Oceanography, State Oceanic Administrator, 6 Xianxialing Road, Qingdao 266061, China)

Abstract: The requirement of tide or current data length of orthogonal response analysis is researched through theoretical deduction and experiment. The results show that it requires at least 2 day-length of ideal data. But for the actual observations, it requires at least 7 day-length data in the diurnal tide dominated area, and 10 days in the semi-diurnal tide dominated area. Towards a shorter term data than described above, an improved model of orthogonal response analysis is found and used to analysis this type of data through introducing ratio of parameters and changing the value of $\Delta\tau$. The result of experiment using 366 groups of data at 12 stations in China, which contains 1 day-length data in each group, showed that the parameters calculated from short term data are close to the ones from long term data (annual data). Finally, a comparison between orthogonal response analysis and quasi-harmonic analysis for short term data is studied through both theoretical deduction and experiment. The results showed that the former one has a higher precision and does not have to take good astronomic date into account.

Key words: short term data of tide and current; orthogonal response analysis; quasi-harmonic analysis