



多点乘潮在深水航道设计中的应用

施凌, 丁嵬, 刘永刚

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 目前航道设计中乘潮水位计算多采用单点潮位资料, 该方法对于近岸工程及短航道设计较好, 但单点乘潮难以满足深水长航道对于安全性和经济性的迫切需求。多点乘潮的应用能大幅度提升航道设计中乘潮水位的精准度, 一方面保障航道通航安全性; 另一方面兼顾工程经济性。结合工程实例针对多点乘潮问题展开研究, 结果表明: 通过建立多点潮位站间的潮位回归方程, 借助近岸测站资料推算到航道各段处, 可实现单点乘潮为多点乘潮。而多点潮位资料的稀缺是现实问题, 条件具备时建议开展多点潮位临时观测, 采用潮位拓展方式弥补短期资料长度和精度不足; 条件不足时, 建议借助数模方法推算潮位, 并用实测资料验证模型。

关键词: 多点潮位站; 分段; 乘潮水位; 长航道; 深水航道

中图分类号: U 652.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0260-06

Application of multi-point riding tide in design of deep-water channel

SHI Ling, DING Wei, LIU Yong-gang

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: At present, single-point tidal level data are often used in the calculation of riding tidal level in channel design, which is better for the design of nearshore engineering and short channel. However, it is difficult to meet the urgent needs of safety and economy for deep-water long channel by single-point tide riding. The application of multi-point tide riding can greatly improve the accuracy of tide riding water level in channel design. It can ensure navigation safety of the channel and also can give consideration to the engineering economy. The problem of multi-point tide riding is studied by combining with engineering examples. The results show that by establishing the tide regression equation between multi-point tide stations and using the data of inshore stations to calculate to each section of the channel, the single-point tide riding can be converted into multi-point tide riding to solve the problem of the scarcity of multi-point tide level data. When conditions permit, it is suggested to carry out multi-point tide level temporary observation, and adopt tide level expansion method to make up for the lack of short-term data length and accuracy; when conditions are insufficient, it is suggested to calculate the tide level by means of numerical simulation, and verify the model with the measured data.

Keywords: multi-point tide station; section; riding tide; long channel; deep water channel

近年来, 基于经济和环保的驱动, 油船、集装箱船和豪华游船都在向大型化方向发展。为适应船舶大型化趋势, 港口航道水深越来越深, 航道也逐步向外海深水延伸。我国现有众多港口的深水航道长度已经长达几十公里, 比如日照岚山

港深水航道长度接近 50 km、湛江港进港航道长度接近 60 km。

航道设计水深取值过于保守, 将显著增加工程投资; 反之, 若航道水深取值过小, 将导致航道通航适应性较差, 不能充分保障船舶通航安全。

进港航道里程较长, 为减少航道疏浚工程量, 节省工程投资, 大型船舶往往需要乘高潮进出港, 对航道设计尺度进行细致深入的论证、开展航道分段精细设计, 对于满足船舶航行安全、降低工程投资非常有意义。

当前规范中乘潮水位计算主要采用单一潮位站的单点乘潮^[1-2], 该方法的提出具有一定的时代背景, 也具有较好的实际意义。单一潮位站多为近岸潮位站, 其潮位计算结果对于近海工程及短航道设计具有很好的代表性, 但是对于长达几十公里的航道, 沿程潮位特征值分布变化较大, 容易出现潮差和延时分布的明显差异, 近岸潮位站资料很难反映整个航道的情况。单一潮位站计算的乘潮水位已经难以满足长航道设计的安全性和经济性需求, 多点潮位站乘潮水位的提出对于深水长航道设计具有实际意义。

通过建立多点潮位站间的潮位回归方程, 借助近岸测站资料推算到航道各段处, 可实现单点乘潮为多点乘潮。多点潮位资料稀缺是现实问题, 条件具备时建议开展多点潮位观测, 采用潮位拓展方式弥补短期资料长度和精度不足; 条件不具备、资料匮乏时, 建议借助数模手段推算潮位, 并采用实测潮位资料验证模型的合理性。

本文以日照港岚山港区深水航道二期工程为例, 详细说明多点乘潮计算方法及实际应用情况。

1 工程概况

日照港岚山港区深水航道二期工程是在一期工程基础上的扩建工程, 通航标准为满足满载 30 万吨级原油船、30 万吨级散货船单向通航的要求, 同时满足吃水 20.0 m 的典型船舶在设计低水位通航的要求。整个航道分为 *AD* 段和 *DE* 段两部分, 航道分段方案见图 1。*AD* 段与原油码头港池及北作业区支航道相连, *A* 点为日照港 30 万吨级原油码头二期工程港池和航道的衔接点, *AD* 段航道轴线方位与深水航道一期工程一致, 航道走向 $263^{\circ}22'2'' \sim 83^{\circ}22'2''$, *D* 点位于深水航道一期工程向东侧延长线与现有航路的交点处, 与北作业区南港池支航道的交

点 *C* 距离约 16.361 km, *AD* 航段长度为 26.829 km。*DE* 段为外海段, 航道走向 $279^{\circ}20'50'' \sim 99^{\circ}20'50''$, *D* 点为航道转向点, 两段航道的转向角约为 16° , *DE* 航段长度为 16.000 km。

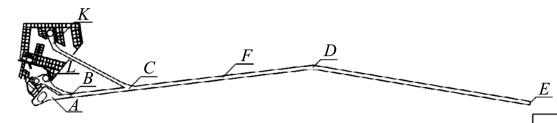


图 1 航道分段方案

2 自然条件

岚山港区属于正规半日潮型。在航道的 *AD* 段, 大潮涨潮期间最大横流为 0.84 m/s, 实测流速为 0.98 m/s, 流向为 204° ; 在航道 *DE* 段, 大潮涨潮期间最大横流为 0.89 m/s, 实测流速为 1.02 m/s, 流向为 219° 。工程区域主要波浪方向为 NE—SE; 沿岸泥沙以粗颗粒为主, 水体含沙量很小, 沿岸过境泥沙少, 岸线和岸坡稳定, 泥沙淤积甚微^[3]。

3 多点潮位站乘潮水位计算

3.1 潮位站基本信息

工程水域各验潮站基准面关系见图 2, 近岸水域设有长期潮位观测站——岚山海洋站, 沿航道布设有 2 个海上定点临时潮位观测站, 即岚山锚地站和 30 万吨级航路北侧站, 见表 1, 其相对位置见图 3。

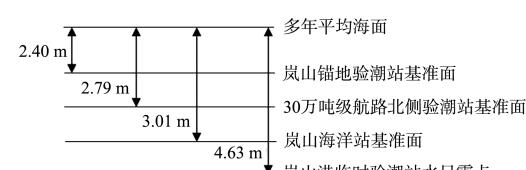


图 2 各验潮站基准面关系



图 3 多点验潮站位置

表 1 各验潮站资料

验潮站	验潮站位置(WGS-84)		实际观测时间
	北纬	东经	
岚山锚地(海上定点 1 [#] 站)	35°04'46"	120°01'28"	2009-07-15—2009-09-01
30 万吨级航路北侧(海上定点 2 [#] 站)	35°08'54"	119°41'54"	2009-09-23T12:00—2009-10-30T7:00
岚山海洋站	35°06'	119°23'	2004—2013 年

3.2 潮汐特性分布情况

3 个潮位观测站(由外海到近岸)实测潮位资料调和分析计算的潮汐性质判别系数分别为 0.31、0.35、0.42, 航道沿程水域潮汐性质一致, 均为规

则半日潮。潮位特征值分布见表 2。航道水域沿程潮差、高潮发生时刻、高潮水位值等潮汐特征值有所不同; 经比较发现 3 站潮时差异不大, 后续相关分析计算、回归方程计算可暂忽略潮时差异。

表 2 各站潮位潮汐特征值

潮位	观测站	起算面/m	最高潮位/m	最低潮位/m	平均高潮位/m	平均低潮位/m	最大潮差/m	最小潮差/m	平均潮差/m	平均涨潮历时	平均落潮历时	平均水位/m	统计时段
实测潮位	岚山海洋站	3.01	6.06	-0.29	4.84	1.30	5.59	1.33	3.54	5 h 39 min	6 h 45 min	3.03	2009—2010 年
扩展潮位	30 万吨级航路北侧验潮站	2.79	5.55	-0.20	4.45	1.24	5.06	1.20	3.20	5 h 39 min	6 h 45 min	2.81	2009—2010 年
	岚山港锚地验潮站	2.40	4.72	-0.11	3.79	1.10	4.26	1.01	2.69	5 h 39 min	6 h 45 min	2.42	2009—2010 年

3.3 乘潮水位计算

综合分析潮位基础资料, 可以采用以下技术路线将单点乘潮拓展为多点乘潮: 1) 统一各验潮站起算面; 2) 多点潮位站短期潮位数据扩展为长周期潮位数据, 分析潮位特征值; 3) 同期潮位数据进行相关分析, 建立多点潮位站之间的潮位回归方程; 4) 计算各潮位站不同延时的乘潮水位。为和其他资料衔接更加方便, 后续 3 站潮位资料均统一到岚山海洋站基准面。

为延伸资料长度以满足计算要求, 须将海上 2 个临时定点验潮站潮位数据扩展为长周期潮位数据, 本次计算潮位扩展使用的方法如下: 设 $T_A(t)$ 、 $T_B(t)$ 为 A、B 两站从各自基准面起算的水位, 则两站在同步观测时段内的水位信息之间的关系可描述为:

$$T_B(t) = \gamma T_A(t + \delta) + \varepsilon \quad (1)$$

式中: γ 为放大或收缩比例因子和平移因子, 定义为潮差比(或潮高比), 本次计算中采用逐时相关分析计算的斜率; δ 为水平移动因子, 定义为潮时差, 由于各验潮站之间的潮时差较小, 因此计算中暂不引入潮时差; ε 为垂直移动因子, 定义为基准面偏差。三者可统称为潮汐比较参数, 见图 4。

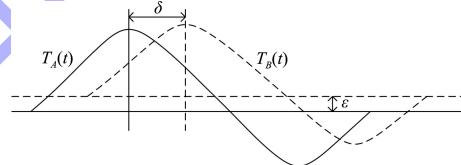


图 4 水位比较拟合示意

潮位的相关性分析是多点乘潮计算中关键的环节, 进而建立起多点潮位站之间的潮位回归方程。

对海上 2 个临时定点潮位观测站与岚山海洋站之间分别进行高潮、低潮、逐时以及半潮差(相邻的高潮和低潮的潮位高度差之半)相关性分析, 比较相关系数分布及相关性趋势曲线。

相关分析计算采用式(2)~(5), 计算结果见表 3 和图 5、6。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})} \quad (3)$$

$$a = \bar{y} - b \bar{x} \quad (4)$$

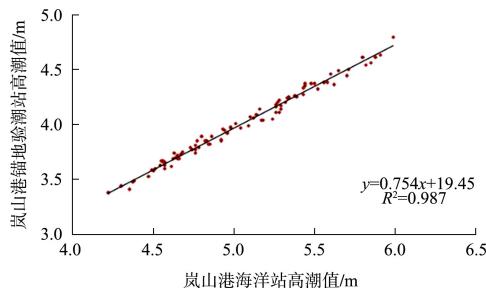
$$S_e^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2 \quad (5)$$

式中: x 、 y 为相关分析的两个实测序列; \bar{x} 、 \bar{y} 为两

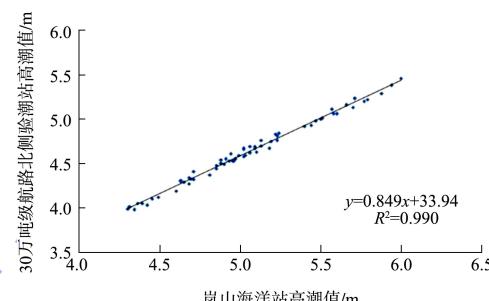
个实测序列的平均值; N 为实测序列的个数; \hat{y} 为预报值; R 为相关系数; b 为斜率; a 为截距; S_e^2 为残差方差。航道沿线多点乘潮水位分布情况见表 4。

表 3 相关系数计算结果

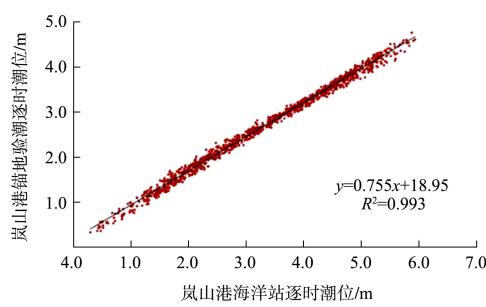
观测站	相关性	相关系数 $R(R^2)$	斜率 b	截距 a/m	残差方差 S_e^2	残差最大差/ m^2
岚山锚地验潮站与 岚山海洋站	高潮相关	0.993 8 (0.987 7)	0.754 5	0.194 5	13.46	0.098 1
航路北侧验潮站与 岚山海洋站	逐时相关	0.996 6 (0.993 3)	0.755 5	0.189 6	67.01	0.265 3
航路北侧验潮站与 岚山海洋站	高潮相关	0.995 3 (0.990 6)	0.849 7	0.339 5	13.10	0.073 0
航路北侧验潮站与 岚山海洋站	逐时相关	0.998 6 (0.997 2)	0.902 3	0.094 0	42.79	0.208 1



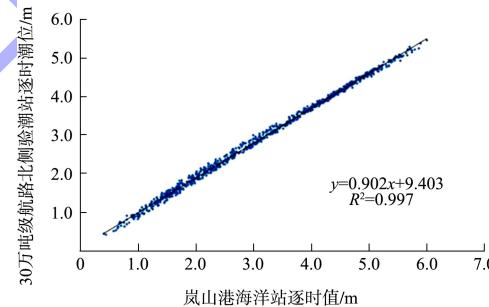
a) 高潮相关



a) 高潮相关



b) 逐时相关



b) 逐时相关

图 5 岚山锚地验潮站与岚山港海洋站相关分析

图 6 航路北侧验潮站与岚山港海洋站相关分析

表 4 不同乘潮历时乘潮水位

保证率/%	站位	乘潮水位/m								
		1.0 h	2.0 h	3.0 h	3.5 h	4.0 h	4.5 h	5.0 h	5.5 h	6.0 h
70	岚山海洋站	4.58	4.42	4.16	4.00	3.83	3.60	3.44	3.25	3.10
	30 万吨级航路北侧验潮站	4.43	4.28	4.05	3.90	3.75	3.57	3.40	3.22	3.05
	锚地验潮站	4.20	4.08	3.89	3.77	3.64	3.49	3.34	3.21	3.04
80	岚山海洋站	4.44	4.29	4.05	3.89	3.73	3.50	3.34	3.18	3.02
	30 万吨级航路北侧验潮站	4.30	4.17	3.96	3.81	3.66	3.48	3.31	3.14	2.97
	锚地验潮站	4.10	3.98	3.81	3.69	3.56	3.41	3.26	3.08	2.91
90	岚山海洋站	4.23	4.10	3.88	3.73	3.57	3.38	3.20	3.05	2.90
	30 万吨级航路北侧验潮站	4.12	4.00	3.80	3.66	3.52	3.35	3.18	3.02	2.89
	锚地验潮站	3.94	3.84	3.68	3.56	3.44	3.29	3.15	3.01	2.88

4 航道设计中的应用

结合一期工程通航的实际情况, 分析船舶在各段航道中的乘潮航行时间。考虑不同船型、不

同航路、每潮次进港船舶数量的组合, 各段航道乘潮航行的工况组合见表 5。

表 5 各段航道乘潮航行工况

工况	船型	航路起止点	每潮次进港船舶数量	备注
1	30 万吨典型油船	E—A	1	满足低平潮靠泊
2	满载 30 万吨级油船	E—A	1	-
3A		E—K	1	北作业区南港池口门
3B	满载 30 万吨级矿石船	E—L	1	中作业区北港池口门

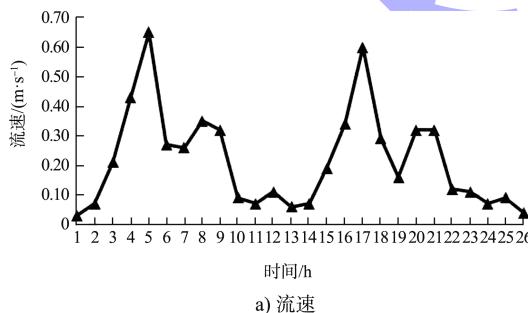
为尽量减少航道疏浚工程量、降低工程投资,参考航道通航的典型工况^[3],按照分段乘潮的方式设计。将航道分成 AD 和 DE 两段,分段采用不同乘潮水位进行设计,仅选取工况 1、2 条件计算各段航道乘潮航行时间,结果见表 6。

通过分析实测资料和数模模拟成果,可以获取 30 万吨级原油码头前沿实测流速、流向和水位关系^[4],见图 7。由图 7 可知,码头前沿水流流速、

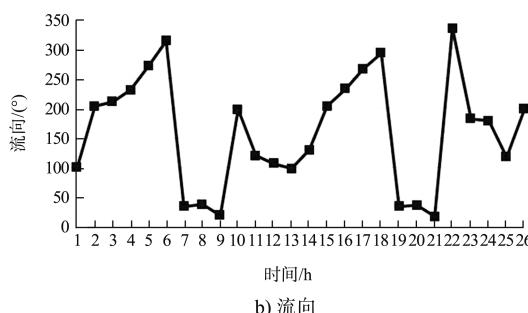
流向的变化过程为:高(低)平潮前 2~3 h 开始逐渐减小,高(低)平潮后 2 h 左右流速降到最小,但是高(低)潮后 2 h 左右时,水流方向发生转变。在满足设计需求的前提下,为了尽量节省工程投资,对于满载的 30 万吨级油船仅考虑高平潮后 2 h 靠泊,乘潮过程见图 7。同时为提高航道通过能力,确定吃水 20.0 m 的 30 万吨级典型油船须满足在低平潮靠泊的要求。30 万吨级典型油船乘潮过程见图 8。

表 6 各段航道乘潮航行时间计算结果

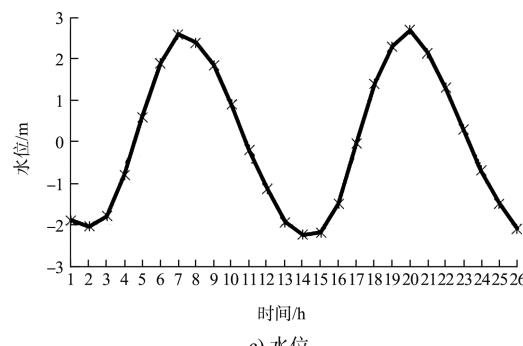
工况	航段	长度/km	航速/kn	时间富余系数 K_t	分段航行时间/h	累计航行时间/h	乘潮历时/h
工况 1:30 万吨级典型油船 低平潮靠泊	AD	26.876	7.5	1.1	2.13	2.13	低平潮前后 2
	DE	16.000	8.5				
工况 2:满载 30 万吨级油船 通航(每潮次进 1 艘船)	AD	26.876	7.5	1.1	2.13	2.13	3.3
	DE	16.000	8.5				



a) 流速

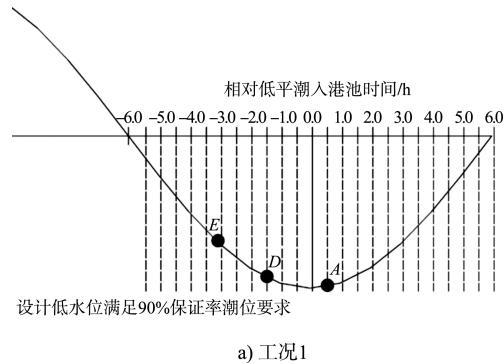


b) 流向



c) 水位

图 7 30 万吨级原油码头前沿实测流速、流向和水位关系



a) 工况1

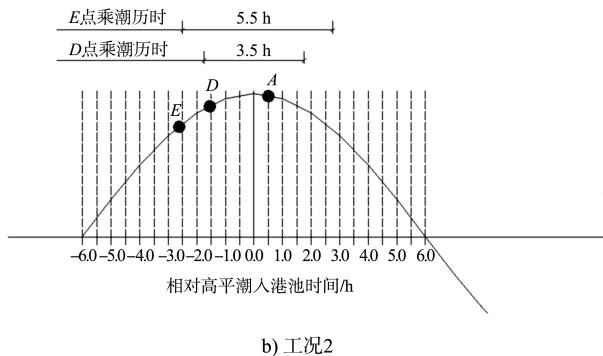


图 8 30 万吨级油船乘潮过程

表 7 通航典型船舶分段航道乘潮水位情况

乘潮方式	每潮次进港 船舶数量	AD 段		DE 段		船型
		乘潮历时/h	乘潮水位/m	乘潮历时/h	乘潮水位/m	
多点乘潮(高潮、90%)	1	3.5	3.66	5.5	3.01	满载 30 万吨级油船
单点乘潮(高潮、90%)	1	3.5	3.73	5.5	3.05	
低平潮	1	低平潮	0.63	低平潮前 2	0.75	30 万吨级典型油船

综合经济性和安全性, 最终推荐 AD 段取用航路北侧验潮站乘潮水位计算结果, 具体取值见表 8; DE 段取用锚地验潮站乘潮水位成果。综合通航各工况的使用需求, 航道最终设计底高程取

通过对航道沿线 3 个潮位验潮站资料进行计算分析, 可分别采用多点乘潮水位和单点乘潮水位进行两段航道尺度计算。相比单点乘潮成果, 采用多点乘潮成果 AD 段航道疏浚量增加 1 881.32 m³、DE 段航道疏浚量增加 640 m³。仅增加极小疏浚量, 能给整个航道的安全性和实际使用的便捷性带来很大提升。各段航道采用单点乘潮和多点乘潮的水位取值见表 7。

表 8 最终航道设计底高程推荐取值

船型	AD 段			DE 段			备注
	设计水深/m	乘潮水位/m	航道底高程/m	设计水深/m	乘潮水位/m	航道底高程/m	
30 万吨典型油船	23.02	0.63	-22.39	23.02	0.75	-22.27	每潮次进 1 艘船
满载 30 万吨级油船	25.52	3.66	-21.86	25.52	3.01	-22.51	每潮次进 1 艘船

5 结论

1) 通过建立多点潮位站间的潮位回归方程, 借助近岸测站资料推算到航道各段处, 可实现单点乘潮为多点乘潮。多点潮位资料的稀缺是最现实的制约因素, 有条件时可以在航道沿线合适位置布设临时潮位观测站, 采用潮位拓展类似方式弥补短期资料长度和精度不足; 条件不足时, 可利用数模的研究手段, 进行多点潮位的推算, 并采用航道沿线进行水文观测时的同期潮位资料验证模型的合理性。

2) 要充分论证工程水域的水下地形特征、波浪、潮流及航速等因素的分布情况, 结合通航主力船型停靠码头作业的时段选取, 合理确定各段的乘潮历时、乘潮保证率, 确保最终各段乘潮水位取值的准确性。

值见表 8, AD 段航道底高程取值为 -22.39 m, DE 段航道底高程取值为 -22.51 m。航道建成后, 能满足通航所有船型的乘潮需求。

3) 应统筹考虑工程的经济性和安全性, 评估目标工程区域开展多点乘潮的必要性和可能性; 结合航道选线位置确定外海潮位站位置; 将多点乘潮结果应用于深水长航道工程的优化设计中。

参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [2] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [3] 张宁, 邵铁政. 人工长航道分段计算航道水深的方法[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(7): 190-191.
- [4] 李冰绯, 施凌. 非天然水深大型开敞式码头靠泊时机与乘潮水位的确定[J]. 水运工程, 2011(S1): 77-81.