



# 六横岛液化天然气(LNG)码头 前沿潮流特征分析

王付坤, 杨树刚, 周同弟, 刘鹏飞, 马追

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

**摘要:** 采用潮流调和分析方法对2020年8月6日到2020年8月21日六横岛拟建LNG码头海域3个连续站的表、中、底海流数据进行调和分析, 得到3个站点的 $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $M_4$ 、 $MS_4$ 共6个分潮的调和常数, 并绘制了各层各分潮的潮流椭圆。结果表明: 1) 观测海域表层涨潮平均流速在33~58 cm/s, 落潮平均流速在27~48 cm/s, 流速方向大致集中在WNW~ESE向。2) 该海域潮流为往复流, 潮流性质以正规半日潮为主, 且 $M_2$ 分潮占绝对优势。3) 观测期间表层余流流速在8~17 cm/s, 中层余流流速在8~21 cm/s, 底层余流流速在7~20 cm/s, 方向为WNW向。4) 最大可能流速出现在落潮期间, 表层可以达到149 cm/s、中层可达120 cm/s、底层可达93 cm/s。

**关键词:** 六横岛; 潮流; 余流; 潮流调和分析方法

中图分类号: U 656.1; P 731.22

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0029-07

## Analysis of front tidal current characteristics of LNG wharf in Liuheng island

WANG Fu-kun, YANG Shu-gang, ZHOU Tong-di, LIU Peng-fei, MA Zhui

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** The tidal current harmonic analysis method is used to analyze the surface, middle, and bottom current data at three continuous stations in the sea area of Liuheng island from August 6, 2020 to August 21, 2020. The harmonic constants of  $O_1$ ,  $K_1$ ,  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $M_4$ ,  $MS_4$  of the three stations are obtained, and the tidal current ellipses of each layer are drawn. The results show that: 1) The average velocity of the surface rising tide is 33~58 cm/s, and the average velocity of the ebb tide is 27~48 cm/s. The velocity direction is mainly WNW~ESE. 2) The tidal current in the sea area is reciprocating. The nature of the tidal current is mainly regular semi-diurnal tide, and the  $M_2$  sub-tide has an absolute advantage. 3) During the observation period, the residual current velocity at the surface is 8~17 cm/s, the residual current velocity of the middle layer is 8~21 cm/s, and the residual current velocity at the bottom layer is between 7~20 cm/s. The direction is WNW. 4) The maximum possible velocity occurs during the ebb tide. The surface layer can reach 149 cm/s, the middle layer can reach 120 cm/s, and the bottom layer can reach 93 cm/s method.

**Keywords:** Liuheng island; tidal current; residual current; tidal current harmony analysis method

潮流是海洋工程建设和航道水运关注的一个重要参数<sup>[1]</sup>, 潮流特征对码头的设计、建设和维护尤为重要, 潮流调和方法可以分离得到各个分潮的潮流特征值<sup>[2-3]</sup>。人们对潮流的观测与研究从

未间断<sup>[4-7]</sup>, 许多学者都对中国近海的潮流特征进行过研究<sup>[8-9]</sup>。

六横岛是舟山群岛的第三大岛, 位于浙江省舟山群岛的南部海域, 码头的建设对六横岛的经

济发展有重要的作用。有些学者对六横岛周围的海域的潮流和环流进行了研究,发现六横岛南岸附近涨潮为西北流,落潮为东南流,外青山码头附近流速在 51~154 cm/s<sup>[10]</sup>。本文在前人研究的基础上,利用六横岛拟建 LNG (liquefied natural gas, 液化天然气) 码头前沿海域 3 个站点 2020 年 8 月连续 15 d 的海流观测资料进行潮流调和分析,对该区域的潮流特征作了进一步的研究,以期增进对该海域的潮流、余流规律的认识,为后续码头的设计和建设提供参考。

## 1 数据来源

本文数据来源于六横 LNG 码头前沿海域抛设的 3 个锚定式测流站 (M1、M2、M3), 观测时间由 2020 年 8 月 6 日到 2020 年 8 月 21 日共 15 d。研究区域及站位见图 1。

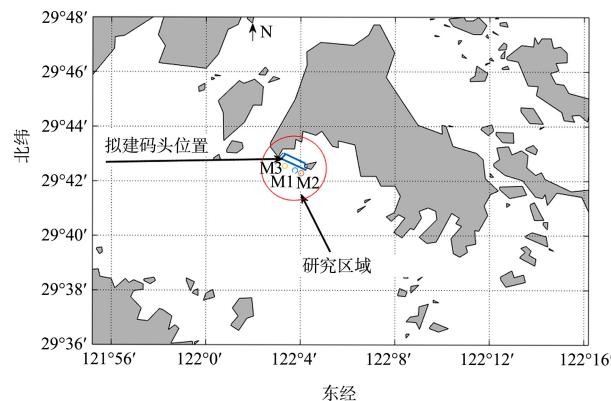


图 1 M1~M3 测站位置

各测站的坐标见表 1。M1、M2、M3 点水深分别为 17、13、23 m。观测所选用的仪器是美国 RDI 公司生产的 600 kHz 的 ADCP, 采样每 1 m 一层, 设置总层数为 30 层, 间隔 10 min 发射 100 个脉冲, 每个脉冲间隔设置为 1 s。

表 1 M1~M3 站点坐标

站点	北纬	东经
M1	29°42'23. 3"N	122°03'46. 0"E
M2	29°42'17. 2"N	122°04'1. 6"E
M3	29°42'33. 4"N	122°03'20. 1"E

获得原始数据后,对测流结果进行质量控制,剔除不良信号后,利用正常数据进行线性内插补齐。对垂向剖面的表、中、底 3 层海流流速、流向进行分析,表层指水面下 0.5 m 水层,中层指 0.6H 水层,底层指仪器测得的剔除受水底反射影响的不良数后离海底最近的 1 层。

## 2 潮流调和分析方法

实测的海流数据包括潮流、余流以及其他高频信号,分析潮流特征首先要把潮流信号从实测的海流数据中分离出来,潮流调和分析方法可以很好地实现这个目的。

数学上,潮流运动可以分解成很多不同频率的分潮运动的叠加,其中每个分潮运动都可以用余(正)弦函数来表示。某站点海流的瞬时流速东、北分量可以用如下函数形式表示:

$$u(t) = u_0 + \sum_{i=1}^N [f_{ui} H_i \cos(\omega_i t + n_{0i} + d_{ui} - g_i)] \quad (1)$$

$$v(t) = v_0 + \sum_{i=1}^N [f_{vi} H_i \cos(\omega_i t + n_{0i} + d_{vi} - g_i)] \quad (2)$$

式中:  $u(t)$ 、 $v(t)$  分别为海流东分量和北分量的流速时间序列;  $t$  为时间;  $u_0$ 、 $v_0$  为东、北分量的定常流动(余流);  $H_i$ 、 $g_i$  为东、北分量的调和常数,分别是第  $i$  个分潮的振幅和迟角;  $f_{ui}$ 、 $d_{ui}$  是各个分潮的交点因子和交点订正角;  $\omega_i$ 、 $n_{0i}$  为各分潮的角频率和天文初相角;  $N$  为分潮个数。根据实测数据,利用最小二乘法,联立求解式(1)、(2)便可以得到东、北分量潮流的调和常数,根据调和分析得到调和常数,进一步可以计算得出该站潮流椭圆要素,比较直观地看出海域潮流特征,同时也可得到该站点的定常流速(余流)。

## 3 研究结果

### 3.1 实测流速特征

由原始数据提取得到了各站各层的最大流速以及对应流向(表 2)和平均流速、平均流向(表 3)。

表2 M1~M3各站各层涨落潮最大流速及对应流向

点位	涨落潮	表层		中层		底层		垂线平均	
		最大流速/ (cm·s <sup>-1</sup> )	流向/( <sup>°</sup> )						
M1	涨潮	129	303	109	304	89	299	107	297
	落潮	106	113	95	111	77	108	90	108
M2	涨潮	129	309	97	304	77	303	102	309
	落潮	119	119	95	116	71	121	92	121
M3	涨潮	136	296	112	279	90	273	102	284
	落潮	96	115	82	111	69	106	79	109

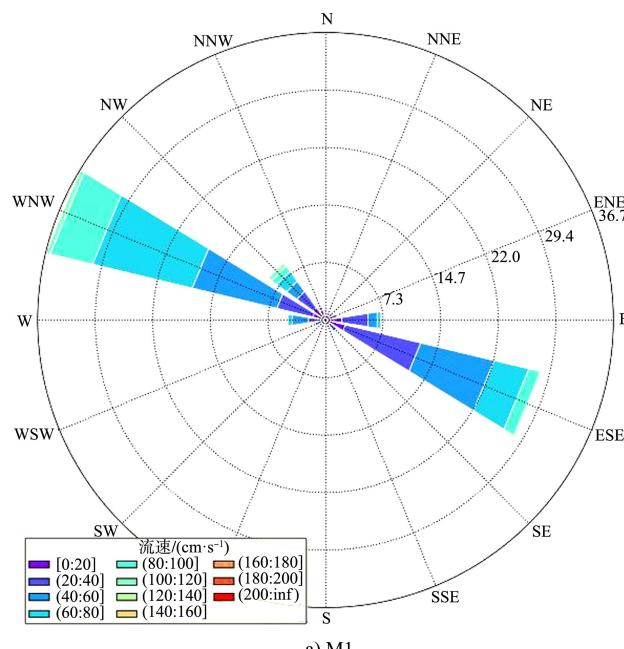
表3 M1~M3各站各层涨落潮平均流速及平均流向

点位	涨落潮	表层		中层		底层		垂线平均	
		平均流速/ (cm·s <sup>-1</sup> )	流向/( <sup>°</sup> )						
M1	涨潮	55	302	48	293	39	289	48	295
	落潮	41	103	36	110	28	116	37	109
M2	涨潮	58	302	43	303	34	299	45	306
	落潮	48	117	39	124	30	129	39	123
M3	涨潮	33	306	50	293	41	291	46	295
	落潮	27	113	28	107	22	107	28	109

对比发现: 观测海域最大涨潮速度为136 cm/s, 出现在M3站点表层, 最大落潮速度为119 cm/s, 出现在M2站点表层; M1~M3各站表、中、底实测最大涨潮流速和平均涨潮流速均大于最大落潮流速和平均落潮流速, 涨潮平均流向为299°, 落潮平均流向为113°; M1、M2站点随着深度的增加平均流速逐渐变小, M3中层平均流速最大、表层次之、底层最小。

从各点流向频率看: M1点涨潮流向集中在285°~305°, 占比48.7%, 落潮流向集中在100°~120°, 占比33.4%; M2点处涨潮流向集中在290°~305°, 占比48.3%, 落潮流向集中在110°~140°, 占比34.5%; M3点涨潮流向集中在285°~300°, 占比51.5%, 落潮流向集中在95°~125°, 占比30.9%, 见图2。观测海域涨落潮方向大致集中在

WNW~ESE向。



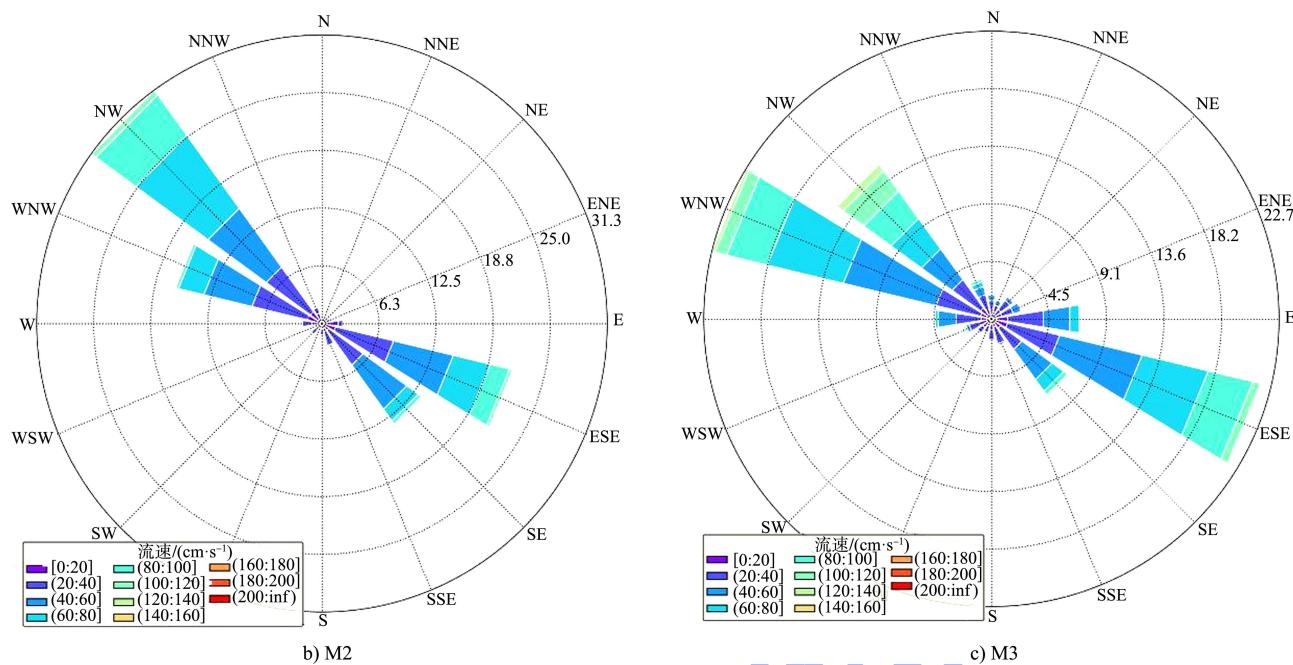


图 2 实测垂线平均流速、流向玫瑰图

### 3.2 潮流特征

对 3 个站点 15 d 的潮流数据分别进行调和分

析, 得到各站点表、中、底层的  $O_1$ 、 $K_1$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $M_4$ 、 $MS_4$  分潮的潮流椭圆要素, 结果见表 4。

表 4 潮流椭圆要素

站点	水层	分潮	长轴/cm	短轴/cm	最大流速方向角/(°)	初相位/(°)	椭圆率	潮流形态比
表层	M1	$O_1$	4.0	-0.3	155.7	161.2	-0.07	
		$K_1$	4.8	2.0	124.8	338.8	0.42	
		$M_2$	71.4	-4.5	112.9	349.9	-0.06	0.12
		$S_2$	20.2	-0.7	105.2	38.2	-0.03	
		$M_4$	4.1	-1.7	114.5	195.5	-0.41	
		$MS_4$	5.3	-0.9	115.9	147.4	-0.16	
中层	M1	$O_1$	2.2	1.5	60.5	320.8	0.68	
		$K_1$	3.4	-1.3	119.6	10.6	-0.39	
		$M_2$	64.9	3.4	111.4	353.7	0.05	0.09
		$S_2$	18.9	1.1	115.8	42.9	0.06	
		$M_4$	3.7	0.6	100.5	237.3	0.17	
		$MS_4$	4.1	0.7	94.9	195.3	0.17	
底层	M1	$O_1$	2.0	1.2	39.2	300.5	0.57	
		$K_1$	1.9	-1.6	120.7	24.0	-0.84	
		$M_2$	50.8	6.5	111.6	351.3	0.13	0.08
		$S_2$	15.7	0.4	118.5	39.8	0.03	
		$M_4$	2.6	2.1	85.0	72.3	0.79	
		$MS_4$	3.0	-0.4	67.6	21.0	-0.14	

续表4

站点	水层	分潮	长轴/cm	短轴/cm	最大流速方向角/(°)	初相位/(°)	椭圆率	潮流形态比
M2	中层	O <sub>1</sub>	3.7	-0.3	135.5	126.1	-0.07	0.12
		K <sub>1</sub>	5.7	1.7	132.0	349.1	0.30	
		M <sub>2</sub>	79.5	-2.4	126.5	352.1	-0.03	
		S <sub>2</sub>	21.6	-0.6	118.8	44.9	-0.03	
		M <sub>4</sub>	5.1	-0.3	116.6	216.4	-0.06	
		MS <sub>4</sub>	4.9	0.4	111.3	154.3	0.09	
M3	中层	O <sub>1</sub>	1.6	0.8	77.3	305.9	0.49	0.08
		K <sub>1</sub>	3.2	-1.4	115.3	352.4	-0.44	
		M <sub>2</sub>	63.0	5.1	124.2	354.5	0.08	
		S <sub>2</sub>	19.7	0.8	129.1	43.5	0.04	
		M <sub>4</sub>	3.3	1.8	104.3	244.2	0.53	
		MS <sub>4</sub>	4.8	1.2	96.6	200.9	0.25	
M3	底层	O <sub>1</sub>	1.6	0.9	69.0	284.2	0.57	0.08
		K <sub>1</sub>	2.1	-1.8	96.1	353.5	-0.84	
		M <sub>2</sub>	49.0	6.7	123.8	352.9	0.14	
		S <sub>2</sub>	16.0	0.5	115.8	42.7	0.03	
		M <sub>4</sub>	2.7	2.2	42.7	133.4	0.81	
		MS <sub>4</sub>	3.4	1.2	78.3	35.2	0.35	
M3	表层	O <sub>1</sub>	1.7	1.1	175.3	82.8	0.61	0.17
		K <sub>1</sub>	6.0	-0.8	110.0	338.9	-0.14	
		M <sub>2</sub>	45.6	-2.5	119.0	347.1	-0.05	
		S <sub>2</sub>	15.0	-1.7	110.3	62.8	-0.12	
		M <sub>4</sub>	6.5	-1.7	124.2	239.0	-0.27	
		MS <sub>4</sub>	5.0	-1.1	128.3	108.3	-0.22	
M3	中层	O <sub>1</sub>	1.5	1.0	61.0	287.1	0.63	0.07
		K <sub>1</sub>	2.4	-0.7	115.7	342.4	-0.15	
		M <sub>2</sub>	59.0	3.3	110.6	351.6	0.06	
		S <sub>2</sub>	17.6	2.1	114.7	37.7	0.12	
		M <sub>4</sub>	2.9	1.2	97.0	215.0	0.41	
		MS <sub>4</sub>	2.8	0.4	103.4	189.9	0.16	
M3	底层	O <sub>1</sub>	2.5	0.4	37.3	272.0	0.18	0.09
		K <sub>1</sub>	1.6	-0.9	98.6	351.8	-0.54	
		M <sub>2</sub>	45.5	3.2	109.1	351.4	0.07	
		S <sub>2</sub>	14.4	1.8	109.0	37.6	0.13	
		M <sub>4</sub>	4.2	1.0	87.9	69.3	0.23	
		MS <sub>4</sub>	5.0	-0.2	97.0	203.3	-0.04	

注: 椭圆短轴正(负)值表示潮流椭圆逆(顺)时针旋转, 最大流速方向角是指椭圆长轴与Y轴(N向)顺时针旋转的夹角。

椭圆长半轴代表分潮的最大流速。M1~M3站各层M<sub>2</sub>分潮的长半轴显著大于其他分潮, 说明站点半日潮M<sub>2</sub>分潮占据绝对优势。由表层到底层, M1、M2站点的M<sub>2</sub>分潮的最大流速逐渐减小, M3站的M<sub>2</sub>分潮的最大流速呈现中层大、表底小的特点。

M<sub>2</sub>和S<sub>2</sub>为主要优势分潮, 其中M<sub>2</sub>分潮是绝对

的优势分潮, 各站点各层M<sub>2</sub>分潮的最大流速方向角为110°~120°, 大致沿着等深线方向(NW~SE向)。

潮流运动形式可依主要分潮流M<sub>2</sub>的椭圆率|K|予以判定。当|K|<0.25时, 潮流以往复流为主; 反之, 则为旋转流。当K值为正时, 潮流呈逆时针的旋转; K为负时, 潮流呈顺时针向旋转。

M1~M3 站各层  $M_2$  的椭圆率  $|K|$  在 0.03~0.14, 潮流以往复流为主, 表中底潮流旋转方向不一, 表层  $K$  为负值, 潮流顺时针旋转, 中层和底层  $K$  为正值, 潮流逆时针旋转。

潮流类型可由主太阴日分潮流  $O_1$  与太阴、太阳赤纬日分潮流  $K_1$  的潮流椭圆长半轴 ( $W_{K_1}$ 、 $W_{O_1}$ ) 之和与主太阴半日分潮流  $M_2$  的潮流椭圆长半轴 ( $W_{M_2}$ ) 之比值  $F$  来确定:

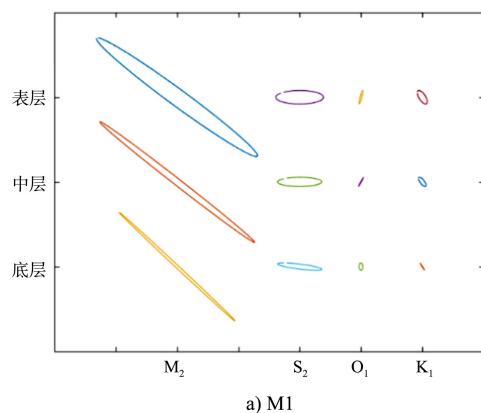
$$F = (W_{K_1} + W_{O_1}) / W_{M_2} \quad (3)$$

$F \leq 0.5$  为正规半日潮流;  $0.5 < F \leq 2.0$  为不正规半日潮流;  $2.0 < F \leq 4.0$  为不正规全日潮流;  $F > 4.0$  为正规全日潮流。M1 站表、中、底层的  $F$  值分别为 0.12、0.09 和 0.08; M2 站表、中、底层的  $F$  值分别为 0.12、0.08 和 0.08; M3 站表、中、底层的  $F$  值分别为 0.17、0.07 和 0.09。3 个站点各层的  $F$  值均小于 0.5, 潮流类型为正规半日潮流。

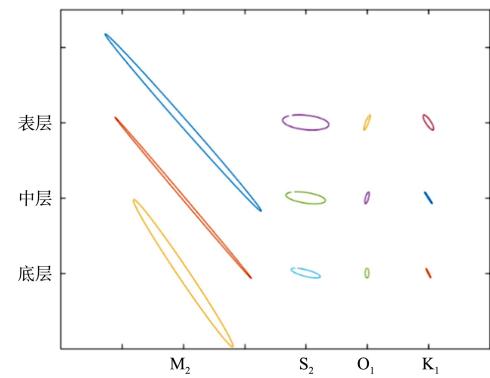
M1~M3 站点分布于超浅海海域, 浅水分潮的作用不可忽略, 一般用  $G$  衡量浅水分潮的影响:

$$G = (W_{M_4} + W_{MS_4}) / W_{M_2} \quad (4)$$

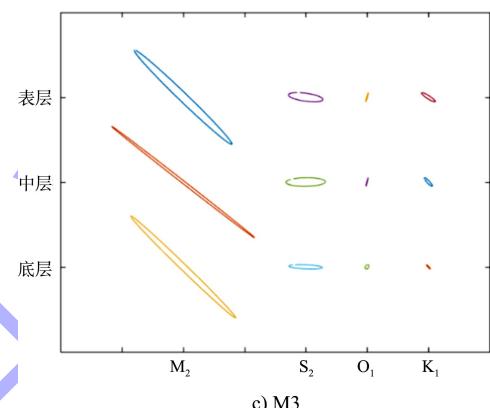
式中:  $W_{M_4}$ 、 $W_{MS_4}$  为浅水分潮  $M_4$ 、 $MS_4$  的潮流椭圆的长半轴;  $W_{M_2}$  为主太阴半日分潮流  $M_2$  的潮流椭圆长半轴;  $G > 0.04$  时说明浅水分潮比较显著。经计算, M1 站表、中、底层的  $G$  值分别为 0.13、0.13 和 0.12; M2 站表、中、底层的  $G$  值分别为 0.13、0.12 和 0.11; M3 站表、中、底层的  $G$  值分别为 0.25、0.10 和 0.20。3 个站点各层的  $G$  值均大于 0.04, 说明观测海域浅水效应显著。



a) M1



b) M2



c) M3

图 3 各站点潮流椭圆

M1~M3 站  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $O_1$ 、 $K_1$  分潮的潮流椭圆从表层到底层形态基本一致, 各分潮长半轴由表到底逐渐减小, 见图 3。说明各站潮流流速从表层到底层逐渐减小。

### 3.3 余流特征

余流是指从实测海流中剔除周期性潮流后的运动, 对水体的运输和交换起着重要的作用。根据调和分析结果计算出各站点表、中、底层余流的流速、流向见表 5。

表 5 M1~M3 各站点表、中、底层余流的流速、流向

点位	水层	流速/(cm·s <sup>-1</sup> )	流向/(°)
		17	
M1	表层	13	297
	中层	12	283
	底层	11	270
M2	表层	8	302
	中层	7	280
	底层	6	268
M3	表层	21	296
	中层	20	290
	底层	19	284

a) M1

发现 M1~M3 站点各层的余流流速对应流向在 280°~338°, 为涨潮流方向。M1~M3 表层余流流速分别 17、13、8 cm/s; 中层余流流速分别 13、8、21 cm/s; 底层余流流速分别 12、7、20 cm/s; M1、M2 随着深度的增加余流流速逐渐变小, M3 中层余流流速最大, 底层次之, 表层最小。

### 3.4 最大可能流速

为了更好地了解观测海域的潮流强度特征, 计算出可能最大流速。规则半日潮流的可能最大流速计算公式为:

$$\mathbf{v}_{\max} = 1.295 \mathbf{v}_{M_2} + 1.245 \mathbf{v}_{S_2} + \mathbf{v}_{K_1} + \mathbf{v}_{O_1} + \mathbf{v}_{M_4} + \mathbf{v}_{MS_4} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{v}_{M_2}$ 、 $\mathbf{v}_{S_2}$ 、 $\mathbf{v}_{K_1}$ 、 $\mathbf{v}_{O_1}$ 、 $\mathbf{v}_{M_4}$ 、 $\mathbf{v}_{MS_4}$  分别为各分潮流的椭圆长半轴矢量。计算出的各站点最大可能的流速、流向见表 6。

表 6 M1~M3 站点各层最大可能的流速、流向

点位	水层	流速/(cm·s <sup>-1</sup> )	流向/(°)
M1	表层	134	114
	中层	120	123
	底层	93	106
M2	表层	149	125
	中层	118	113
	底层	92	104
M3	表层	96	118
	中层	107	127
	底层	87	124

M1~M3 站点各层的最大可能流速对应流向在 104°~127°, 为落潮流方向。M1~M3 表层最大可能流速分别 134、149、96 cm/s; 中层最大可能流速分别为 120、118、107 cm/s; 底层最大可能流速分别为 93、92、87 cm/s; M1、M2 随着深度的增加最大可能流速逐渐变小, M3 中层最大可能流速最大、表层次之、底层最小, 这与实测流速表现的规律一致。

## 4 结论

1) 观测海域表层涨潮平均流速在 33~58 cm/s, 落潮平均流速在 27~48 cm/s, 流速方向大致集中在 WNW~ESE 向。

2) 该海域潮流为往复流, 潮流性质以正规半

日潮为主, 且 M<sub>2</sub> 分潮占绝对优势。表层潮流顺时针旋转, 中层和底层潮流逆时针旋转。M<sub>2</sub> 分潮的最大流速方向角为 110°~120°, 大致沿着等深线方向, 为 NW~SE 方向。

3) 观测期间表层余流流速为 8~17 cm/s, 中层余流流速为 8~21 cm/s, 底层余流流速为 7~20 cm/s, 方向为 WNW 向。

4) 最大可能流速出现在落潮期间(约 110°), 数值上表层可以达到 149 cm/s, 中层和底层分别可以达到 120 cm/s 和 93 cm/s。

5) 以上结论为六横岛 LNG 码头的设计和建设提供了水动力依据, 还可以与码头海域相关的数值模拟结果进行验证和校准。

## 参考文献:

- [1] 张安民, 宁一伟, 王晨旭, 等. 天津港主航道连续观测点潮流和余流特征分析[J]. 海洋学研究, 2019, 37(1): 75-82.
- [2] 紫梦楠. 厦门湾及邻近海域潮汐潮流数值模拟与预报研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [3] 唐岩, 刘雁春, 暴景阳, 等. 关于潮流(准)调和分析方法中的几个问题[J]. 测绘科学, 2010, 35(S1): 33-35.
- [4] 赵保仁, 方国洪, 曹德明. 渤、黄、东海潮汐潮流的数值模拟[J]. 海洋学报(中文版), 1994(5): 1-10.
- [5] 张凤烨, 魏泽勋, 王新怡, 等. 潮汐调和分析方法的探讨[J]. 海洋科学, 2011, 35(6): 68-75.
- [6] 杨万康, 袁笛, 张俊彪, 等. 大小门岛海域表层潮流和余流特征分析[J]. 海洋科学, 2014, 38(7): 76-81.
- [7] 张锋, 李瑞杰, 孙杰, 等. 长江口及其邻近海域两定点周日海流观测的准调和分析[J]. 海洋湖沼通报, 2019(5): 57-63.
- [8] 赵保仁, 方国洪, 曹德明. 渤海、黄海和东海的潮余流特征及其与近岸环流输送的关系[J]. 海洋科学集刊, 1995, 36(10): 1-11.
- [9] 叶安乐, 梅丽明. 渤黄东海潮波数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 1995(1): 63-70.
- [10] 周妹贞. 舟山六横近岸环流特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.