



台州头门港进港航道潮流特征分析

邰彩云^{1,2}

(1. 浙江省深远海风电技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310014;
2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014)

摘要: 利用头门港进港航道水域的实测潮流资料, 通过潮流准调和分析, 研究潮流分布运动特征, 结果表明: 1) 进港航道水域的最大流速为 111 cm/s, 头门岛前沿航段的流速略大于外海航段, 大潮流速大于小潮流速, 流速的垂向分布呈现由表层向中层和底层逐渐减小。2) 影响进港航道水域的主要是 M_2 分潮流, 潮流类型为正规半日浅海潮流; 潮流的运动特征为往复流, 潮流椭圆较为扁平; 可能最大流速为 80~145 cm/s。3) 余流量值不大, 最大量值为 9.2 cm/s, 总体上外海航段余流略大于头门港前沿航段; 头门港前沿航段余流方向指向落潮流向, 外海航段余流方向指向涨潮流向。

关键词: 潮流; 准调和分析; 调和常数; 潮流椭圆; 余流

中图分类号: P731; U61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0179-07

Tidal characteristics in entrance channel of Taizhou Toumen Port

HUAN Caiyun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Far-shore Wind Power Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310014, China;
2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Using the measured tidal data of the entrance channel of Toumen Port, the distribution and movement characteristics of tidal currents are studied through quasi harmonic analysis. The results showed that: 1) The maximum flow velocity of the entrance channel is 111 cm/s. The flow velocity of the leading section of Toumen Island is slightly higher than that of the offshore section, and the flow velocity of the spring tide is greater than that of the neap tide. The vertical distribution of flow velocity gradually decreased from the surface to the middle and bottom layers. 2) The main factor affecting the sea area of the entrance channel is M_2 -point tidal current, which is a regular semi diurnal shallow sea tidal current. The motion characteristic of tidal current is reciprocating flow, and the tidal ellipse is relatively flat, the maximum flow rate may be between 80-145 cm/s. 3) The residual flow value is not significant, with a maximum value of 9.2 cm/s. Overall, the residual flow in the offshore segment is slightly higher than that in the forward segment of Toumen Port. The direction of residual current in the forward section of Toumen Port points towards the ebb tide direction, while the direction of residual current in the offshore section points towards the rising tide direction.

Keywords: tidal current; quasi harmonic analysis; harmonic constant; tidal current ellipse; residual current

潮流是码头、航道等各类水运工程所关注的重要海洋水文要素, 潮流特征对航道疏浚、轴线走向以及船舶进出港安全调度等具有重要的参考意义。基于现场潮流观测资料的准调和分析, 可以对实测潮流进行更加细致深入的了解, 也是水

运工程师的主要研究方法^[1-6]。本文利用头门港进港航道 3 个定点测站的潮流实测资料, 通过准调和和分析航道内潮流分布特征、运动形式、余流等特征, 为进港航道的优化设计和调度运维等提供参考。

收稿日期: 2024-03-12

作者简介: 邰彩云 (1983—), 女, 硕士, 正高级工程师, 从事海洋工程水文研究。

1 数据来源

台州头门港是台州港着力打造的“一港六区”之一^[7]，作业港址位于头门岛南部，头门岛的水深岸线条件较好，适宜建设深水海港，港区规划进港航道外海航段轴线海流走向为 $290^{\circ} \sim 110^{\circ}$ ，头门岛前沿航段轴线海流走向为 $285^{\circ} \sim 105^{\circ}$ ，头门港进港航道和水文测站区位见图1。

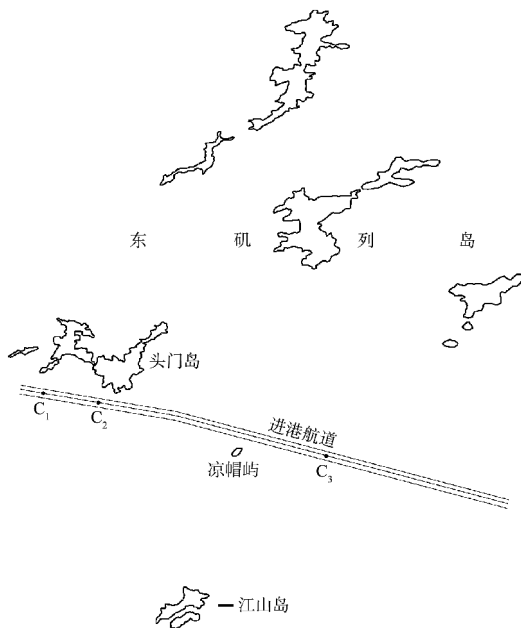


图1 头门港进港航道和水文测站区位

采用头门港进港航道3个定点测站同步潮流观测，各测站位置见图1， C_1 和 C_2 测站位于进港航道的头门港前沿航段， C_3 测站位于进港航道的外海航段。潮流观测设备为美国RDI公司的声学多普勒流速剖面仪(acoustic doppler current profiler) ADCP(600 kHz)，仪器测量方式自水面往下。观测时间为小潮(2020-10-12T16:00:00—2020-10-13T18:00:00)和大潮(2020-10-18T09:00:00—2020-10-19T11:00:00)，大、小潮的观测时间均持续1个周日约26 h；采样每0.5 m设置1层，共设置50层，采样间隔为30 min。将测得的原始数据进行质量控制后，统计分析垂向剖面的表层、中层、底层3层流速和流向，其中，表层为水面以下0.5 m的水层，底层为去除受海底反射等影响的不良数据后离海

底最近的1层，中层为表层和底层中间位置的水层。

2 潮流准调和和分析

根据潮流调和分析原理^[8]，实际潮流由众多不同频率的分潮流叠加而成，将各分潮流从实测潮流中分离出来称为调和分析。对于实测潮流仅有约1 d的数据，只能分析出1个主要分潮流，此时必须引入到(O_1 为太阴主要分潮， K_1 为太阴—太阳赤纬全日分潮， M_2 为太阴主要半日分潮， S_2 为太阳主要半日分潮， M_4 为太阴浅水1/4日分潮， MS_4 为太阴、太阳浅水1/4日)分潮流之间的振幅比和迟角比，即差比常数，这种方法称作引入差比关系方法；对于实测潮流为若干天的数据，在分析过程中可不引入差比常数，这种方法称作不引入差比关系方法^[9]。

本文实测潮流包括大、小潮汛各1周的数据，通过不引入差比关系的方法，采用PAWLOWICZ^[10]潮流调和分析程序包T-TIDE对实测潮流数据进行准调和和分析，得到6个主要分潮流 O_1 和 K_1 、 M_2 和 S_2 、 M_4 和 MS_4 的调和常数，进而计算各分潮流的椭圆要素，据此分析潮流类型、运动形式、余流等，该调和在国内被诸多学者广泛应用^[11-15]。

3 成果分析

3.1 实测潮流特征

表1为各测站的实测最大流速，图2为其潮流矢量过程线，航道水域的实测最大涨、落潮流速分别为111 cm/s(276°)和82 cm/s(102°)，出现在 C_2 测站大潮表层。从潮流矢量过程线可以看出：大潮流速大于小潮流速，分层流速呈现由表层向中层和底层逐渐减小的垂向分布特征；头门岛前沿航段主流向指向西北偏西(WNW)和东南偏东(ESE)方向，外海航段主流向指向西北(NW)和东南(SE)方向。

表 1 各测站分层最大涨、落潮流速及其对应流向

潮型	测站	潮态	表层		中层		底层	
			最大流速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	流向/($^{\circ}$)	最大流速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	流向/($^{\circ}$)	最大流速/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	流向/($^{\circ}$)
大潮	C ₁	涨潮	85	290	83	286	57	278
		落潮	76	101	70	117	50	92
	C ₂	涨潮	111	276	90	269	62	277
		落潮	82	102	74	92	52	96
	C ₃	涨潮	63	320	51	298	42	292
		落潮	60	95	48	111	40	129
小潮	C ₁	涨潮	74	285	65	272	41	273
		落潮	69	80	59	101	29	84
	C ₂	涨潮	79	288	67	260	46	262
		落潮	71	92	61	91	31	94
	C ₃	涨潮	71	306	55	283	37	293
		落潮	62	75	47	88	26	124

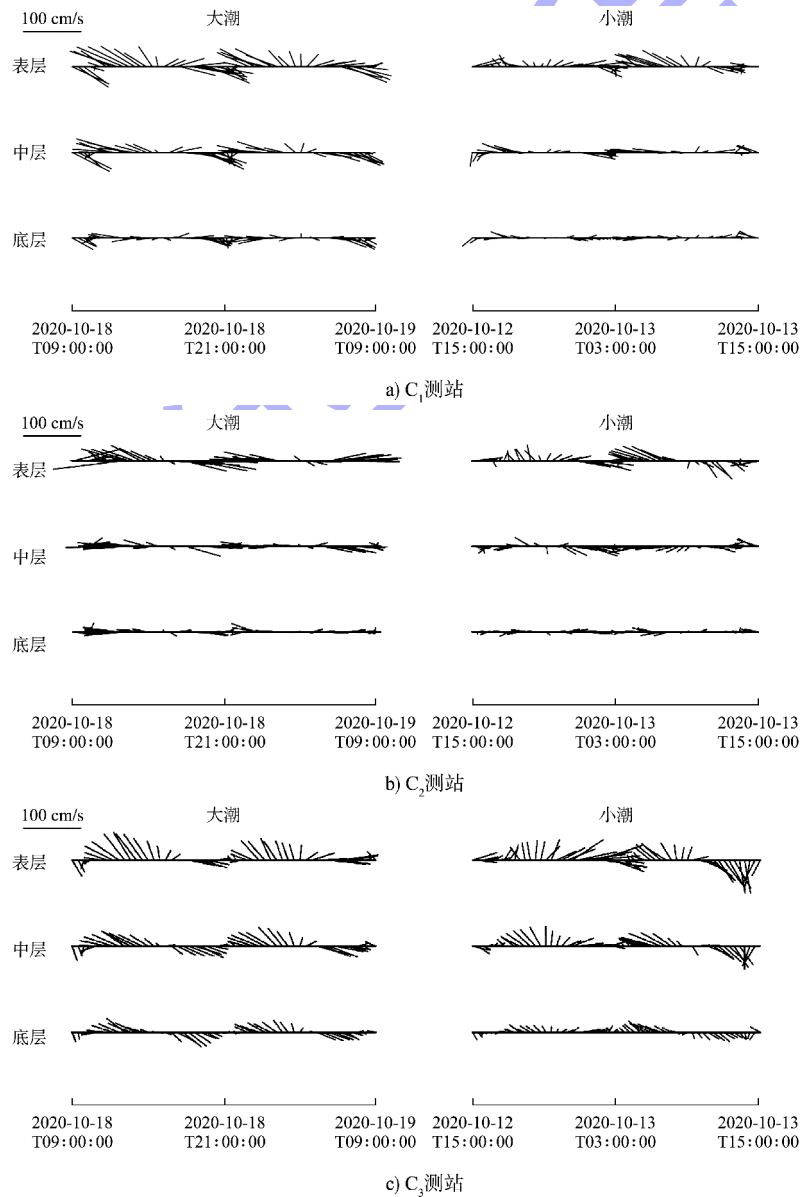


图 2 潮流矢量过程线

表 2 为 51 cm/s 以上的较大流速对应的流向和航道轴线的夹角, 夹角在 10° 以内的占比达 55.3%

~68.5%, 可见航道走向和潮流向分布特征较为相符, 对港区的航道调度和航行安全有利。

表 2 各测站实测潮流对应流向和航道轴线夹角占比

测站	0°~5°	5°~10°	10°~15°	15°~20°	20°~25°	25°~30°	大于 30°
C ₁	32.1	23.2	19.6	14.3	9.0	1.8	-
C ₂	33.3	35.3	13.7	13.7	4.0	-	-
C ₃	35.3	31.4	17.6	11.8	3.9	-	-

3.2 潮流调和

3.2.1 调和常数和潮流椭圆要素

各测站的调和常数见表 3, 由表可知, 航道水域主要受 2 个半日分潮流 M₂ 和 S₂ 的影响, 尤其

以 M₂ 分潮流为主, 而 2 个全日分潮流 O₁、K₁ 和 2 个浅水分潮流 M₄、MS₄ 则较为微弱; 各分潮流的振幅东分量比北分量显著, 振幅由表层向中层和底层减小。

表 3 各测站的调和常数

测站	分潮	表层				中层				底层			
		北分量		东分量		北分量		东分量		北分量		东分量	
		振幅/cm	迟角/(°)	振幅/cm	迟角/(°)	振幅/cm	迟角/(°)	振幅/cm	迟角/(°)	振幅/cm	迟角/(°)	振幅/cm	迟角/(°)
C ₁	M ₂	19.2	175	57.8	328	12.7	173	57.7	325	8.2	177	50.5	321
	S ₂	8.3	237	31.0	23	7.4	240	25.9	28	4.7	253	25.8	30
	K ₁	2.8	86	6.4	250	1.7	130	5.5	257	0.9	186	4.5	261
	O ₁	1.4	254	8.1	331	1.4	19	4.6	330	1.2	23	1.4	322
	M ₄	3.2	187	2.8	15	1.4	270	4.0	14	1.5	242	3.1	330
	MS ₄	4.7	274	7.7	139	4.9	262	5.0	122	5.4	281	5.4	103
C ₂	M ₂	9.5	191	58.3	326	6.8	204	49.7	324	4.6	181	42.7	318
	S ₂	9.5	115	34.8	13	8.3	109	28.7	360	7.2	103	27.2	3
	K ₁	1.1	309	9.2	288	2.2	274	5.2	285	2.3	304	3.9	281
	O ₁	6.0	0	6.1	354	5.2	25	5.0	316	5.2	46	3.2	280
	M ₄	2.2	290	6.5	346	2.7	18	3.8	351	3.1	22	3.7	4
	MS ₄	0.8	335	7.8	94	1.7	150	5.4	80	1.3	160	3.7	52
C ₃	M ₂	24.8	203	41.0	349	18.6	190	46.1	342	14.7	179	39.7	338
	S ₂	7.8	220	23.1	15	8.6	234	13.7	22	9.5	234	12.6	26
	K ₁	6.8	274	8.2	305	3.3	322	6.0	319	2.2	350	4.6	311
	O ₁	7.6	8	7.9	303	1.9	125	1.3	246	2.9	198	2.0	217
	M ₄	4.2	21	4.0	253	4.4	17	0.8	217	5.1	21	1.1	163
	MS ₄	3.9	107	4.7	62	3.3	144	2.7	269	2.6	134	2.5	278

由调和计算分析所得的潮流椭圆要素见表 4, 得出影响航道水域的主要为半日分潮流 M₂ 和 S₂, 尤其 M₂ 分潮流, 其椭圆长轴明显长于其他分潮流。图 3 绘制了 M₂ 和 S₂ 分潮流的潮流椭圆, 头

门岛前沿潮流椭圆的长轴略长于外海航段; 潮流椭圆长轴的垂向分布和实测潮流速的垂向分布特征一致, 长轴由表层向中层、底层缩短; 另外, 椭圆长轴的方向和实测潮流的主流向一致。

表 4 各测站的潮流椭圆要素

测站	分潮	表层				中层				底层			
		长轴/cm	短轴/cm	椭圆率	长轴方向/(°)	长轴/cm	短轴/cm	椭圆率	长轴方向/(°)	长轴/cm	短轴/cm	椭圆率	长轴方向/(°)
C ₁	O ₁	8.1	1.4	-0.17	268	4.7	1.0	0.21	259	1.6	0.9	0.58	232
	K ₁	6.9	0.7	-0.10	293	5.6	1.3	-0.23	281	4.5	0.9	-0.19	267
	M ₂	60.4	8.2	-0.14	287	58.8	6.0	-0.10	281	51.0	4.7	-0.09	278
	S ₂	31.8	4.5	-0.14	103	26.7	3.9	-0.15	104	26.0	3.1	-0.12	98
	M ₄	4.3	0.3	0.06	139	4.0	1.4	-0.34	95	3.1	1.5	-0.50	269
	MS ₄	8.5	3.0	0.36	117	6.6	2.4	0.36	134	7.7	0.2	0.02	135
C ₂	O ₁	8.6	0.4	0.05	225	6.0	4.2	0.70	222	5.6	2.4	0.42	335
	K ₁	9.2	0.4	0.04	264	5.7	0.4	-0.07	247	4.5	0.8	0.17	241
	M ₂	58.7	6.7	-0.11	277	49.8	5.9	-0.12	274	42.9	3.1	-0.07	275
	S ₂	34.9	9.3	0.27	93	28.8	7.8	0.27	276	27.2	7.1	0.26	93
	M ₄	6.7	1.8	-0.28	258	4.6	1.1	0.23	236	4.8	0.8	0.16	50
	MS ₄	7.8	0.7	-0.09	93	5.4	1.5	0.28	83	3.7	1.2	0.32	97
C ₃	O ₁	9.2	6.0	0.65	227	2.1	1.0	-0.49	335	3.5	0.5	-0.16	214
	K ₁	10.2	2.8	-0.27	231	6.8	0.1	0.02	241	4.9	1.3	0.26	248
	M ₂	46.3	12.2	-0.26	299	49.1	8.1	-0.16	290	42.0	5.0	-0.12	289
	S ₂	24.1	3.2	-0.13	107	15.6	4.0	-0.25	120	15.4	3.6	-0.24	126
	M ₄	5.2	2.6	0.49	317	4.4	0.3	0.06	351	5.2	0.7	-0.13	350
	MS ₄	5.6	2.3	0.4	53	3.8	1.9	-0.51	325	3.4	1.1	-0.33	317

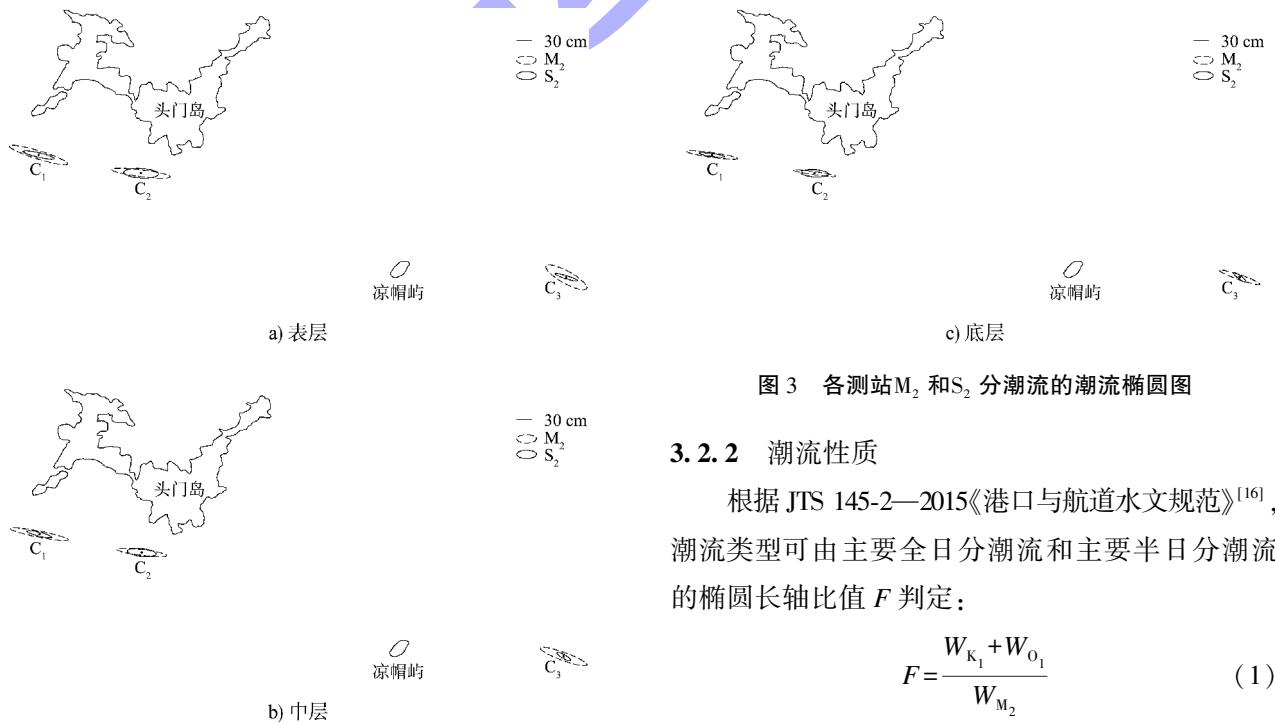


图 3 各测站M₂和S₂分潮流的潮流椭圆图

3.2.2 潮流性质

根据 JTS 145-2—2015《港口与航道水文规范》^[16]，潮流类型可由主要全日分潮流和主要半日分潮流的椭圆长轴比值 F 判定：

$$F = \frac{W_{K_1} + W_{O_1}}{W_{M_2}} \quad (1)$$

考察浅水分潮流的影响程度可由浅水影响系数 G 判定:

$$G = \frac{W_{M_4} + W_{MS_4}}{W_{M_2}} \quad (2)$$

式中: W_{K_1} 、 W_{O_1} 、 W_{M_2} 、 W_{M_4} 、 W_{MS_4} 、 W_{M_2} 分别为 K_1 、 O_1 、 M_2 、 M_4 、 MS_4 、 M_2 分潮流的最大椭圆长轴长度。

经计算的 F 和 G 如表 5 所示, 各测站的 F 值均小于 0.50, 潮流类型为正规半日潮流; 各测站的 G 值均大于 0.04, 说明浅水分潮流的影响较大; 因此, 头门港进港航道的潮流类型可归为正规半日浅海潮流。

表 5 各测站潮流性质判据

测站	表层		中层		底层	
	F	G	F	G	F	G
C_1	0.23	0.06	0.19	0.06	0.13	0.07
C_2	0.30	0.10	0.22	0.10	0.20	0.10
C_3	0.32	0.08	0.21	0.11	0.21	0.11

3.2.3 潮流运动形式

潮流运动形式通常以椭圆率 K (椭圆短轴与椭圆长轴比值) 的绝对值 $|K|$ 来判定, 当 $|K| < 0.25$ 时, 潮流以往复流为主; 当 $|K| > 0.25$ 时, 潮流表现为较强的旋转性。影响航道水域的主要为半日分潮流 M_2 , 可根据 M_2 分潮流的椭圆率 K 值来分析潮流运动形式。表 6 为各测站分潮流的椭圆率, 可见各测站 $|K|$ 均小于 0.25, 表现为往复流特征。

表 6 各测站 M_2 分潮流的椭圆率

测站	表层	中层	底层
C_1	-0.14	-0.10	-0.09
C_2	-0.11	-0.09	-0.07
C_3	-0.23	-0.16	-0.12

3.2.4 可能最大流速

对于正规半日潮流海域, 潮流的可能最大流速按式(3)计算:

$$v_{\max} = 1.295 W_{M_2} + 1.245 W_{S_2} + W_{K_1} + W_{O_1} + W_{M_4} + W_{MS_4} \quad (3)$$

式中: v_{\max} 为可能最大流速, W_{M_2} 、 W_{S_2} 、 W_{K_1} 、

W_{O_1} 、 W_{M_4} 、 W_{MS_4} 分别为 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 M_4 、 MS_4 分潮流的最大椭圆长轴矢量, 计算结果如表 7 所示。 C_1 、 C_2 、 C_3 测站的可能最大流速分别为 145、149、105 cm/s, 均大于实测最大流速, 方向均指向涨潮流向; 垂向呈现由表层向中层、底层而逐渐减小, 头门岛前沿大于外海航段。

表 7 各测站可能最大流速及其对应流向

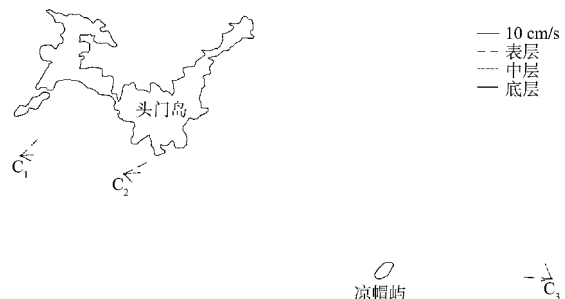
测站	表层		中层		底层	
	流速/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	流向/ ($^\circ$)	流速/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	流向/ ($^\circ$)	流速/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	流向/ ($^\circ$)
C_1	145	282	125	287	111	277
C_2	149	270	115	271	106	275
C_3	105	280	91	291	80	290

3.2.5 余流

从实测潮流中将各周期性分潮流分离出来后剩余的运动即为余流, 余流对海域的水体交换和物质输移具有重要意义。各测站的余流矢量见图 4。 C_1 、 C_2 、 C_3 测站的余流最大值分别为 7.5、8.2、9.2 cm/s; 外海航段余流相对略大于头门港前沿; 余流量值从表层向中层、底层略有减小; 头门港前沿余流指向落潮流向, 外海航段余流指向涨潮流向。

表 8 各测站余流流速及其对应流向

测站	潮型	表层		中层		底层	
		流速/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	流向/ ($^\circ$)	流速/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	流向/ ($^\circ$)	流速/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	流向/ ($^\circ$)
C_1	大潮	7.5	45	4.1	86	3.6	118
	小潮	7.1	57	6.1	69	5.2	170
C_2	大潮	8.2	63	5.3	85	3.8	137
	小潮	6.8	78	4.4	65	3.6	142
C_3	大潮	8.9	273	5.3	338	3.3	258
	小潮	9.2	257	7.4	312	4.9	320



a) 大潮



图 4 各测站余流矢量

4 结论

1) 进港航道最大涨潮流速和最大落潮流速分别为 111 和 82 cm/s; 头门岛前沿航段的流速略大于外海航段流速; 大潮流速大于小潮流速; 流速的垂向分布呈现由表层向中层和底层而逐渐减小。

2) 51 cm/s 以上较大流速对应流向和航道轴线的夹角在 10° 以内的占比较高, 航道走向和潮流方向的分布较为相符, 有利于航道的航行安全调度。

3) 影响进港航道的主要是 M_2 分潮流, 潮流类型为正规半日浅海潮流; 潮流的运动特征为往复流, 潮流椭圆较为扁平。可能最大流速为 80~145 cm/s, 其平面分布和垂向分布与实测潮流的特征一致。

4) 余流量值总体不大, 最大量值为 9.2 cm/s, 总体上外海航段余流略大于头门港前沿航段。余流量值从表层向中层、底层略有减小; 头门港前沿余流指向落潮流向, 外海航段余流指向涨潮流向。

参考文献:

[1] 刘恒魁, 魏昌理. 海流观测在水运工程中的应用[J]. 水运工程, 2006(6): 9-10.

- [2] 刘高伟, 王元叶. 虾峙门航道口门附近水动力特征研究[J]. 水运工程, 2017(2): 14-18.
- [3] 王付坤, 杨树刚, 周同弟, 等. 六横岛液化天然气(LNG)码头前沿潮流特征分析[J]. 水运工程, 2021(8): 29-35.
- [4] 韩路, 孙晓帆, 章卫胜, 等. 宁波舟山港鼠浪湖岛建港水文条件研究[J]. 水运工程, 2020(10): 34-39.
- [5] 魏诗晏, 杨伟, 赵亮. 荣成外海海流特征及影响因素[J]. 海洋科学, 2022, 46(4): 55-66.
- [6] 宋泽坤, 施伟勇, 张峰, 等. 三门湾近期水动力特性观测研究[J]. 应用海洋学学报, 2017, 36(2): 279-285.
- [7] 交通部规划研究院. 台州港总体规划(2017—2030)[R]. 北京: 交通部规划研究院, 2017.
- [8] 陈宗镛. 潮汐学[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [9] 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.
- [10] PAWLOWICZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T-TIDE[J]. Computers and geosciences, 2002, 28(8): 929-937.
- [11] 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.
- [12] 张继云, 陈波. 防城港外海海域夏冬季周日潮流的准调和分[J]. 广西科学, 2022, 29(6): 1058-1066.
- [13] 张静, 王忠良, 汤保贵, 等. 后水湾网箱养殖区五测站两周日海流观测的准调和分[J]. 海洋通报, 2014, 33(1): 56-61.
- [14] 曹雪峰, 陈兆林, 于洁雯, 等. 丁字湾近岸海域潮汐、潮流和余流特征研究[J]. 海洋湖沼通报, 2023, 45(1): 74-81.
- [15] 卢燕, 李泽文, 李淑江, 等. 海南万宁近岸余流特征分析[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(1): 53-61.
- [16] 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(2022 版)[S]. 大连: 大连海事大学出版社, 2022.

(本文编辑 赵娟)