



风流主导因素下码头轴线方位优化

赵铁卫¹, 何晓宇², 季大闰²

(1. 浙江省宁波市港航管理局, 浙江 宁波 315041; 2. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006)

摘要: 码头轴线方位角直接影响系泊船舶对码头结构作用的大小, 从而影响结构设计要求, 因此对码头轴线方位角进行优化分析十分必要。基于实际工程算例, 提出风流环境荷载作用下码头最优方位角的确定方法即分层流要素确定法, 并与设计中常用的垂线平均流向法、船舶吃水范围平均流向法进行比较分析。同时, 研究船舶荷载的主导因素与流速及码头方位角之间的关系。结果表明: 3种方法优化得到的最优方位角是有区别的, 区别大小与流速分层要素分布关系密切, 鉴于分层流要素法更能贴近实际流状态, 对于大型开敞式码头结构, 推荐采用分层流要素分析法综合确定码头轴线最优方位角。

关键词: 开敞式码头; 轴线方位角; 风流作用; 船舶荷载

中图分类号: U 656. 135

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)08-0034-07

Optimization of axial azimuth of wharf subjected to wind and current

ZHAO Tie-wei¹, HE Xiao-yu², JI Da-run²

(1. Ningbo Port and Waterway Administration, Ningbo 315041, China;

2. Zhejiang Provincial Planning, Design & Research Institute of Communications, Hangzhou 310006, China)

Abstract: The axial azimuth influences directly the action of the berthing ship on the wharf structure, and thus influences the requirements on the structural design. So, it is necessary to make an optimization analysis on the axial azimuth of wharf for its influence on ship load and corresponding requirement in the structural design. Based on the practical engineering, a method named stratified flow factor is proposed to determine the optimum axial azimuth for wharf. This method and other two traditional methods are analyzed comparatively. Meantime, the relationship among the major factors of ship load, current velocity and axial azimuth is studied. The analysis result shows that the optimum axial azimuth is different from the three methods mentioned in this paper. The method of stratified flow factor is recommended for its more reality.

Keywords: open wharf; axial azimuth; wind current action; ship load

离岸式泊位码头轴线方位的确定是码头总平面设计中关键的设计要素之一。根据 JTS 165—2013《海港总体设计规范》, 码头的轴线方位宜与风、浪、流的主导方向一致, 无法同时满足时, 应服从其主要影响因素。实际设计中通常按码头轴线方位与流向一致设计, 对于横浪较大的情况还须考虑波浪方向的影响。对于风向而言, 通常常风向与强风向的方位不是特别集中, 分布较广,

因此在码头设计中, 船舶荷载的计算通常采取安全方式, 按必须能够抵挡横向风考虑。大型开敞式码头建设前, 有必要对码头的位置和走向进行论证, 码头前沿线布置应与当地风、浪、流及地质条件相适应, 在确保船舶航行操作安全的前提下, 进行技术经济论证, 实现方案最优化^[1-4]。水流流向是较复杂的环境要素, 以往码头轴线方位角优化研究中^[5-7]尚未见到此要素的细化研究。首

收稿日期: 2016-03-14

作者简介: 赵铁卫 (1970—), 男, 高级工程师, 从事港口及航道工程规划设计和研究。

先, 码头所在区域不同测点的流向不会全部一致, 另外, 同一测点不同季节的测试流向也会不同, 即使是同一测点同一时刻, 不同水深范围内的流向也有差别。流速资料报告中通常会给出水深范围内的6个水深点流速大小和流速方向, 并给出垂线平均流速和流向, 在众多的流向中如何确定码头最优方位角, 采用不同分析方法所确定的最优方位角是否有差别, 差别大小的影响因素是本文的重点研究内容。本文还结合某实际工程的测流数据对码头方位角进行分析, 并采用更接近测流结果的分层流要素分析法进行码头最优方位角的分析, 针对工程中常用的垂线平均流向分析法, 以及船舶吃水范围平均流向分析法, 对码头最优方位角的影响进行比较分析, 从而为同类码头优化设计提供参考。

1 分层流要素分析

分层流要素分析即考虑不同水深测点的流速大小和方向对停靠码头船舶的综合影响, 依据实测流速资料确定流速及流向, 在实际设计计算中, 通常选取各测点不同水深测流值中最大流速值发生的时刻所对应的不同水深处的实测流速及流向。码头最优方位角 θ_0 为风流影响下船舶荷载最小的方位或方位范围。针对某一测点位置对码头某一方位角 θ 情况下, 考虑涨落潮影响及船舶不同装载度时计算船舶荷载, 从而得到该方位角对应的最大船舶荷载 $N_{\max, \theta}$, 并可以在大致流向范围内得到 $N_{\max, \theta}$ 与 θ 的关系曲线, 在关系曲线中即可找到 $N_{\max, \theta}$ 的最小值, 即 N_{\max, θ_0} , 其中 θ_0 即为最优方位角。计算中船舶荷载以船舶系缆力为代表, 具体计算参照 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》的相关公式。船舶系缆力计算如下:

$$N_{\max} = \frac{K}{n} \left(\frac{\sum F_x}{\sin \alpha \cos \beta} + \frac{\sum F_y}{\cos \alpha \cos \beta} \right) \quad (1)$$

式中: $\sum F_x$ 、 $\sum F_y$ 分别为可能同时出现的风和水流对船舶作用产生的横向分力总和与纵向分力总和(kN); K 为系船柱分布不均匀系数; n 为计算船舶同时受力的系船柱数目; α 为系船缆的水

平投影与码头前沿线所成的夹角; β 为系船缆与水平面之间的夹角。作用在船舶上的风荷载计算如下:

$$F_{xw} = 73.6 \times 10^{-5} A_{xw} v_x^2 \zeta_1 \zeta_2 \quad (2)$$

$$F_{yw} = 49.0 \times 10^{-5} A_{yw} v_y^2 \zeta_1 \zeta_2 \quad (3)$$

式中: F_{xw} 、 F_{yw} 分别为作用在船舶上的计算风压力的横向和纵向分力(kN); A_{xw} 、 A_{yw} 分别为船体水面以上横向和纵向受风面积(m^2); v_x 、 v_y 分别为设计风速的横向和纵向风量(m/s); ζ_1 为风压不均匀折减系数; ζ_2 为风压高度变化修正系数。当水流与船舶纵轴平行或流向角小于 15° 或大于 165° 时, 水流对船舶作用产生的水压力船首横向分力和船尾横向分力以及纵向分力可按下列公式计算:

$$F_{xsc} = C_{xsc} \frac{\rho}{2} v^2 B' \quad (4)$$

$$F_{xmc} = C_{xmc} \frac{\rho}{2} v^2 B' \quad (5)$$

$$F_{yc} = C_{yc} \frac{\rho}{2} v^2 S \quad (6)$$

式中: F_{xsc} 、 F_{xmc} 、 F_{yc} 分别为水流对船首横向分力、船尾横向分力和水流纵向分力(kN); C_{xsc} 、 C_{xmc} 、 C_{yc} 分别为水流对船首横向分力系数、船尾横向分力系数和纵向分力系数; ρ 为水的密度(t/m^3); v 为水流速度(m/s); B' 为船舶吃水线以下的横向投影面积(m^2); S 为船舶吃水线以下的表面积。当水流与船舶纵轴斜交, 即夹角为 $15^\circ \sim 165^\circ$ 时, 水流对船舶作用产生的横向分力与纵向分力可按下列公式计算:

$$F_{xc} = C_{xc} \frac{\rho}{2} v^2 A_{xc} \quad (7)$$

$$F_{yc} = C_{yc} \frac{\rho}{2} v^2 A_{xc} \quad (8)$$

式中: A_{xc} 、 A_{yc} 分别为相应装载情况下的船舶水下部分垂直和平行水流方向的投影面积(m^2)。在利用分层流要素分析法计算作用在船舶上的水压力时, 应考虑船舶吃水范围内不同水深处的流速特征, 包括流速的大小和流速的方向。垂向平均流向分析法与分层流要素分析法类似, 但在计算船舶上水压力时, 不同水深处的流速特征中的各点

流向用垂线平均流向来简化代替；而船舶吃水范围平均流向分析法则，是将吃水范围内不同水深处的流速特征中的各点流向用吃水范围内的平均流向来代替。

2 码头轴线方位优化实例

某码头为 30 万吨级矿石码头，水工结构按靠泊 40 万吨级散货船设计。计算船型参数见表 1。

表 1 计算船型

船舶吨级 DWT/万 t	设计船型尺寸/m			
	总长	型宽	型深	满载吃水
40	360	66	30.6	23

在码头拟建位置处布置 3 个测流点 D5、D6 和 SW2，并选取冬季和夏季两个时段进行了水流测试。根据测流报告提取大潮状态下 3 个测点不同季节的流速实测最大值统计结果(表 2)。

表 2 大潮状态下 3 个测点不同季节的流速实测最大值

位置	潮位	面		0.2H		0.4H		0.6H		0.8H		底		垂线平均	
		流速 (m/s)	流向 (°)	流速 (m/s)	流向 (°)	流速 (m/s)	流向 (°)	流速 (m/s)	流向 (°)	流速 (m/s)	流向 (°)	流速 (m/s)	流向 (°)	流速 (m/s)	流向 (°)
D5 测点 (水深 22.36 m)	夏季涨潮	1.77	333	1.66	335	1.54	342	1.45	341	1.14	348	0.71	353	1.32	345
	夏季落潮	1.94	136	1.67	145	1.59	152	1.5	166	1.38	165	0.92	172	1.4	159
	夏季涨潮	1.89	334	1.84	335	1.87	342	1.69	343	1.37	344	0.99	346	1.58	342
D6 测点 (水深 33.86 m)	夏季落潮	2.08	159	1.99	163	1.86	159	1.8	162	1.53	160	1.13	172	1.7	161
	冬季涨潮	1.86	344	1.79	344	1.75	342	1.67	340	1.54	338	0.95	343	1.63	341
	冬季落潮	1.52	146	1.47	154	1.4	163	1.25	166	1.12	169	0.72	170	1.26	165
SW2 测点 (水深 22.36 m)	冬季涨潮	1.69	350	1.58	350	1.41	347	1.34	353	1.23	352	0.89	359	1.3	354
	冬季落潮	1.23	166	1.22	167	1.24	165	1.08	171	0.91	170	0.71	164	1.05	165

为便于表示码头方位角，本文采用简化表示法，例如方位角 N140°~N320°在本文直接用 140°表示。在流速方向附近 130°~180°每间隔 1°取值，共选取了 51 个方位角，分别计算 3 个测点和不同季节涨落潮流组合共计 8 种典型状态下，码头不同方位角布置所对应的船舶荷载。

设计船型满载吃水为 23 m，约为 D6 测点处的 0.6 倍实测水深，约为 D5 测点和 SW2 测点处的 0.8 倍设计水深(设计水深按 26 m 考虑)；设计船型压载吃水约 12.7 m，约为 D6 测点处的 0.4 倍实测水深，约为 D5 测点和 SW2 测点处的 0.4 倍设计水深。对于 40 万吨级船舶水动力计算，其流速及流向角分层取值，即综合考虑不同水深范围内流速矢量值。以 D6 测点为例，满载吃水时需考虑表面处、0.2 倍水深 0.2H 处、0.4 倍水深 0.4H 处及 0.6 倍水深 0.6H 处的流速及流向，而对于 D5 测点和 SW2 测点则还需要考虑 0.8 倍设计水深 0.8H 处的流速及流向。对于 40 万吨级船舶压载水动力计算，D6、D5 和 SW2 测点压载水流力的计算中，流速及流向角分层取值时仅考虑表面处、0.2 倍水深 0.2H 处、

0.4 倍水深 0.4H 处的流速及流向。综合考虑分层水流的流速及流向对码头前沿船舶荷载值的影响，从而达到优化码头方位角的目的。以 D6 点及某码头方位角为例，40 万吨级船舶计算模式见图 1。

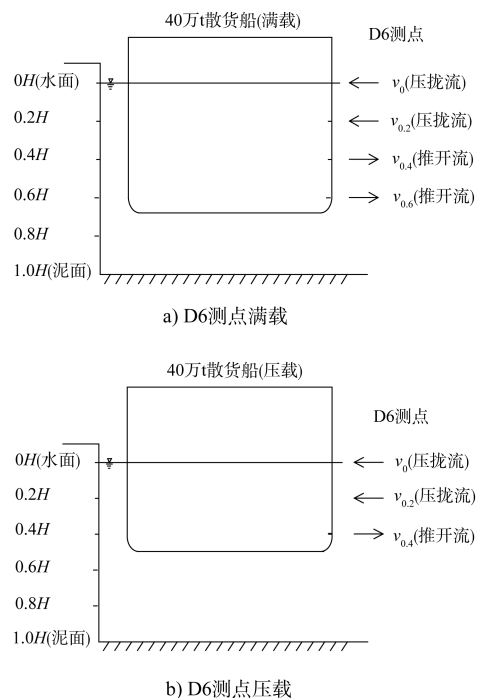


图 1 码头前沿 40 万吨级船舶分层流计算简图

图 2 分别为 D5 测点夏季和 SW2 测点冬季的大潮涨潮、落潮 4 种典型时刻下, 分层流速大小及方向与码头方位角优化区间的相对位置关系。

图 3 分别为 D6 测点夏季和冬季的大潮涨潮、落潮 4 种典型时刻下, 分层流速大小及方向与码头方位角优化区间的相对位置关系。

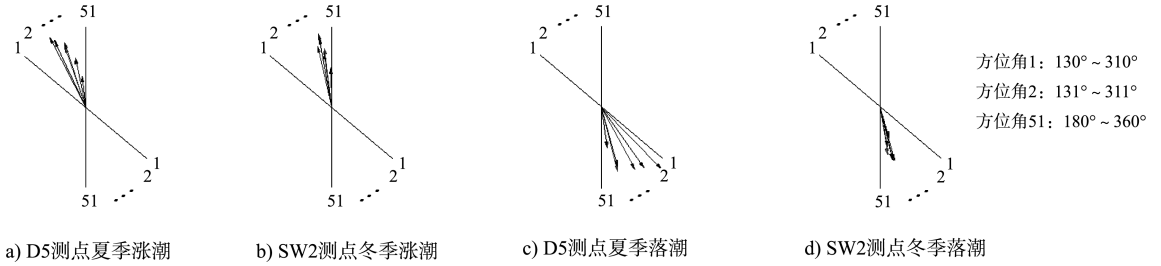


图 2 D5 和 SW2 测点各典型时刻分层流速大小及方向与码头方位角的相对位置

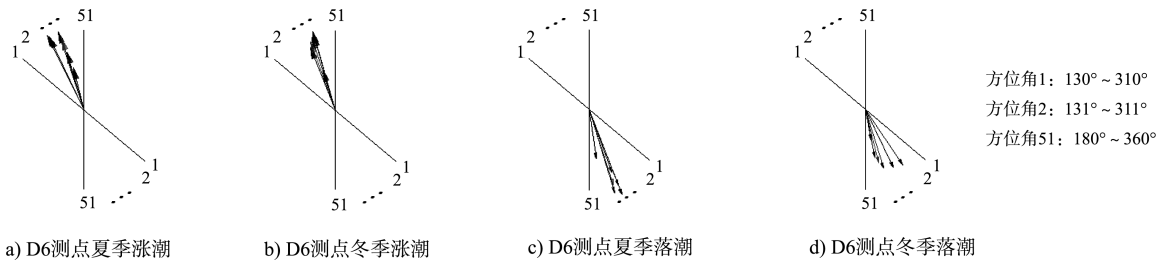
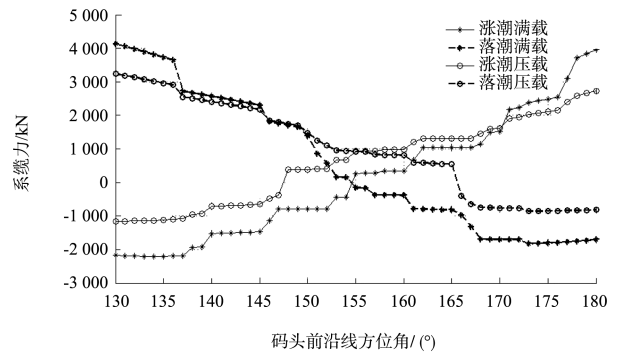
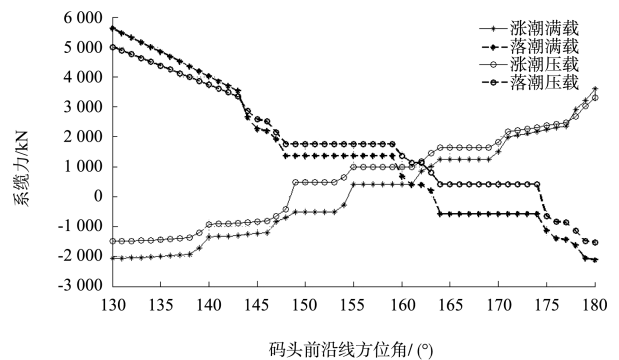


图 3 D6 测点各典型时刻分层流速大小及方向与码头方位角的相对位置

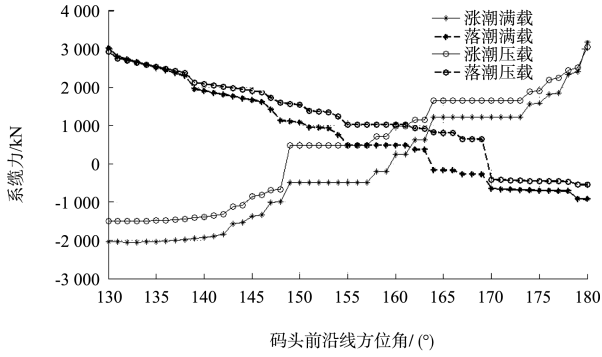
图 4a) 为 D5 测点位置处码头轴线方位角从 130°~180°变化过程中涨潮及落潮情况下, 40 万吨级散货船满载和压载情形下船舶系缆力的变化情况, 其中系缆力考虑了分层水流的影响以及不同水流的压拢及推开效应, 其中负值表示水流压拢效果大于横风的推开效果, 此时实际的系缆力为 0; 正值则表示水流与风合力的推开效果大于压拢效果, 此时的数值便是实际系缆力。图 4b)、4c) 分别为 D6 测点位置处码头前沿线方位角从 130°~180°变化过程中夏季和冬季的涨落潮情况, 40 万吨级散货船满载和压载情形下船舶系缆力的变化情况。图 4d) 为 SW2 测点位置处码头轴线方位角的优化结果。由图 4 结果可知: D5 测点的最优方位角 θ_0 为 153°~160°, 系缆力 $N_{\max_{\theta_0}}$ 约为 1 000 kN; D6 测点最优方位角 θ_0 为 161°~162°, 系缆力 $N_{\max_{\theta_0}}$ 约为 1 200 kN; SW2 测点最优方位角 θ_0 为 168°~169°, 系缆力 $N_{\max_{\theta_0}}$ 约为 900 kN。



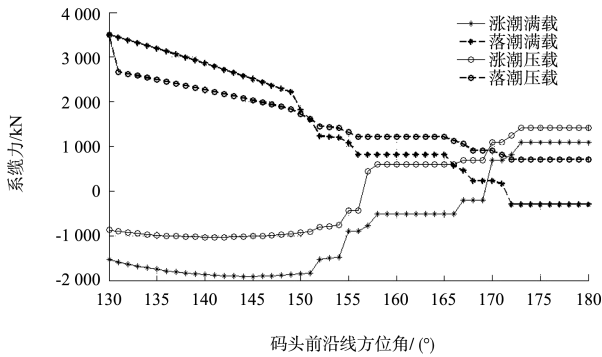
a) D5测点夏季实测数据



b) D6测点夏季实测数据



c) D6测点冬季实测数据

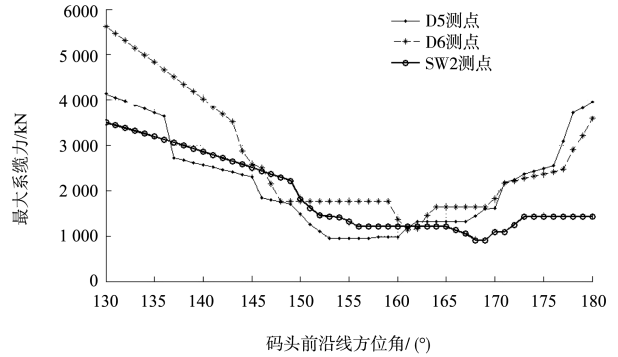


d) SW2测点冬季实测数据

注：停靠船型：41万t散货；停靠方式：前沿停靠。

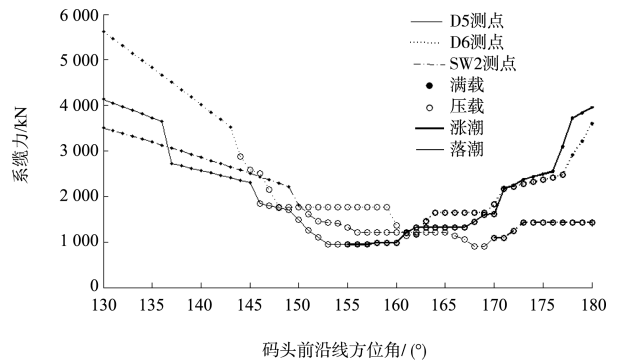
图4 码头前沿线方位角与系统力关系曲线

图5为综合考虑3个测点(D5、D6和SW2)时码头轴线不同方位角对应的船舶最大系统力的变化规律。由图5可见，在这3个测点附近布置卸煤码头时，码头轴线最优方位角虽然并不一致，但综合3个测点的结果仍然可以找出相对的最优方位角 θ_o ，介于 $161^\circ \sim 162^\circ$ 之间，此时3个测点的最大系统力均不大于1208 kN。图6在图5的基础上给出最大系统力的控制工况。图6表明：当码头方位角偏东南/西北方向且与主流方向夹角较大时，落潮满载的工况起控制作用，最大系统力随着夹角的增大成直线型显著增大，随着码头方位角与主流向夹角越来越小时，落潮压载和涨潮压载为控制工况，随着码头方位角继续增大，码头方位角偏向正南/正北方向时，控制工况又逐渐变为涨潮满载。



注：停靠船型：41万t散货；停靠方式：前沿停靠。

图5 D5、D6、SW2 测点处码头轴线方位角与最大系统力关系曲线



注：停靠船型：41万t散货；停靠方式：前沿停靠。

图6 D5、D6、SW2 测点位置处码头轴线方位角与最大系统力关系曲线及对应工况

3 流速大小对码头轴线方位优化的影响

船舶系统力 $N_{\max, \theta}$ 由两部分组成，一部分是风引起的系统力 $N_{\max, w, \theta}$ ；另一部分是流引起的系统力 $N_{\max, c, \theta}$ 。当 $N_{\max, w, \theta} \geq N_{\max, c, \theta}$ 时，定义此时 θ 的范围为风主导方位角 θ_w ，反之则定义为流主导方位角 θ_c 。以D6测点夏季实测涨落潮数据为依据，并按比例调整垂线平均流速 v 分别为1.4、1.6、1.8、2.0、2.2、3.2 m/s时，分析了风主导方位角 θ_w 的范围与流速之间的关系，并得到码头轴线最优方位角 θ_o 及相对应的最大系统力 N_{\max, θ_o} 情况。优化分析中仍然在流速方向附近从 $130^\circ \sim 180^\circ$ 每间隔 1° 取值，共选取了51个方位角。计算结果见表3。

表 3 不同流速作用下风主导方位角、码头最优方位角及对应的最大系缆力

$v/(m/s)$	$\theta_w/(^\circ)$	$\theta_o/(^\circ)$	$N_{\max,\theta_o}/kN$
1.4	140~170	161	1 054
1.6	148~169	161	1 107
1.8	160~163	161	1 167
2.0	160~162	161	1 234
2.2	160~162	161	1 307
3.2		161	1 773

由计算结果可以发现, 风主导方位角通常位于流入射方向附近, 且随着流速的增加, 风主导方位角的范围逐渐减小, 流主导方位角范围逐渐增大, 当流速足够大时(达到 3.2 m/s 时), 所有方位角均为流主导方位角。通常而言, 码头建设区域流速范围内码头轴线最优方位角均属于风主导方位角。本算例中码头最优方位角都发生在 D6 点落潮流垂线平均流向的方位, 即与流速流向一致的方位, 与流速大小无关, 此时最大系缆力的大小随着流速的增加而增加。实测流速的垂线平均流速为 1.7 m/s, 因此最大系缆力在 1 107~1 167 kN。表 4 为码头轴线方位角与最优方位角存在不同偏差时所引起的船舶系缆力。

由表 4 可知, 随着流速的增加, 最优方位角对应的最大系缆力逐渐增加; 而码头轴线方位角设置的偏差所引起的最大系缆力增加的幅度也随

着流速的增加而增大; 另外, 轴线方位角在 2° 偏差以内时, 随着偏差角度的增加, 系缆力增加的幅度逐渐增大, 而轴线方位角偏差在 3°~5° 范围内时, 随着偏差角度的增加, 系缆力增加的幅度保持不变。

表 4 码头轴线方位角与最优方位角存在不同偏差时所引起的船舶系缆力

$\bar{v}/(m/s)$	$N_{\max,\theta}/kN$					
	θ_o	$\theta_o \pm 1^\circ$	$\theta_o \pm 2^\circ$	$\theta_o \pm 3^\circ$	$\theta_o \pm 4^\circ$	$\theta_o \pm 5^\circ$
1.4	1 054	1 214	1 480	1 482	1 482	1 482
1.6	1 107	1 316	1 664	1 667	1 667	1 667
1.8	1 167	1 431	1 871	1 875	1 875	1 875
2.0	1 234	1 560	2 103	2 108	2 108	2 108
2.2	1 307	1 702	2 359	2 366	2 366	2 366
3.2	1 773	2 609	4 000	4 028	4 028	4 028

4 分层流向夹角大小对码头轴线方位优化的影响

以测流点 D5、D6 和 SW2 的实测数据为依据, 分别采用垂线平均流向法、船舶吃水范围平均流向法与分层流要素法, 对码头最优方位角及相应的最大船舶荷载进行计算分析, 结果见表 5。3 种方法得到最优方位角以及最优方位角之间的偏差与分层流夹角之间的关系见表 6。其中 $\theta_{o,1}$ 为垂线平均流向法得到的最优方位角, $\theta_{o,2}$ 为船舶吃水范围平均流向法得到的最优方位角。

表 5 3 种方法确定码头轴线最优方位角及相应的最大系缆力

测点		垂线平均法			船舶吃水范围平均法			分层流法	
		流向/ $(^\circ)$	$\theta_{o,1}/(^\circ)$	$N_{\max,\theta_{o,1}}/kN$	流向/ $(^\circ)$	$\theta_{o,2}/(^\circ)$	$N_{\max,\theta_{o,2}}/kN$	$\theta_{o,3}/(^\circ)$	$N_{\max,\theta_{o,3}}/kN$
D5	涨潮	345	160 -164	577	337	156	577	落潮压载	
	落潮	159	涨潮压载		147	涨潮压载		154	941
SW2	涨潮	354	落潮压载		349	落潮满载		落潮压载	
	落潮	165	166 -173	704	168	167 -168	788	168 -169	905
D6 夏	涨潮	342	162 -177	1 647	337	161 -172	1 647	落潮压载	
	落潮	161	涨潮压载		160	涨潮压载		161	1 136
D6 冬	涨潮	341	落潮压载		343	落潮压载		落潮压载	
	落潮	165	150 -160	1 348	154	158 -162	631	155 -161	1 014

表6 分层流夹角与不同方法确定的最优方位角偏差

测点	分层流最大夹角		分层流法	垂线平均法		船舶吃水范围平均法	
	垂线范围/m	船舶吃水范围/m	$\theta_o/(\circ)$	$\theta_{o,1}/(\circ)$	$\theta_{o,1}-\theta_o/(\circ)$	$\theta_{o,2}/(\circ)$	$\theta_{o,2}-\theta_o/(\circ)$
D5	36	16	154.0	162.0*	8.0	156.0	2.0
SW2	7	6	168.5*	169.5*	1.0	167.5*	1.0
D6 夏	13	4	161.0	169.5*	8.5	166.5*	5.5
D6 冬	24	20	158.0*	155.0*	3.0	160.0*	2.0

注：*前的数据代表范围平均值。

计算结果表明：垂线平均流向法与船舶吃水范围平均流向法所确定的码头轴线最优方位角与分层流流向法确定的码头轴线最优方位角之间存在一定的偏差，偏差值的大小与分层流最大夹角大小以及流速大小存在比较复杂的关系：通常而言，分层流夹角越大，流速越大，采用垂线平均流向法确定码头轴线最优方位角可能引起的偏差越大，本工程实例中最大偏差角达到 8.5° ；另外，垂线平均流向法引起的最优方位角偏差通常大于船舶吃水范围平均流向法。3种方法确定最优方位角时控制工况通常均是压载情况，只有流速特别小时(SW2测点落潮平均流速 1.05 m/s)，才出现控制工况为满载情况。

5 结论

1) 采用分层流要素法确定码头轴线方位角能反映出测点不同水深流要素对船舶荷载的影响，更符合实际情况。

2) 实际工程常见流速范围内(平均流速 $1.4\sim 2.2\text{ m/s}$)，采用分层流要素法确定码头轴线最优方位角时，最优方位角通常位于主流方向附近，且均属于风主导方位角，控制工况均为压载。流速值大小沿水深变化关系保持不变时，最优方位角只与各水深点流向情况有关，而与流速值大小无关。

3) 码头轴线方位角设置的偏差所引起的最大系缆力增加的幅度随着流速的增加而增大；小偏差范围内(2° 以内)，随着偏差角度的增加，系缆力增加的幅度逐渐增大，而稍大偏差范围内($3^\circ\sim 5^\circ$)，随着偏差角度的增加，系缆力增加的幅度保持不变。

4) 码头方位角在流速方向范围内变化时，最大船舶荷载的控制工况有比较明显的规律：当码头方位角与主流方向夹角较大时，控制工况为满载；当码头方位角与主流向夹角比较接近时，控制工况为压载。

5) 垂线平均流向法与船舶吃水范围平均流向法所确定的码头轴线最优方位角，与分层流要素分析法确定的码头轴线最优方位角之间存在一定的偏差，偏差值与分层流最大夹角以及流速存在比较复杂的关系：通常而言，分层流夹角越大，流速越大，采用垂线平均流向法确定码头轴线最优方位角可能引起的偏差越大。

参考文献：

- [1] 李冠华, 彭玉生. 大型开敞式码头轴线方位的选择——青岛港原油码头三期工程设计实例[J]. 水运工程, 2008(6): 64-67.
- [2] 罗刚, 陈怀忠. 开敞式码头最佳方位的研究[J]. 港工技术, 2003(4): 12-14.
- [3] 范寅初. 对开敞式码头总平面设计若干问题的探讨[J]. 中国水运: 下半月, 2013(8): 281-282.
- [4] 袁殷. 高桩式码头的设计研究[J]. 科技资讯, 2013(21): 44-45.
- [5] 蒋庆. 复杂水动力条件下大型开敞式码头轴线的确定[J]. 水运工程, 2007(9): 123-126.
- [6] 彭玉生, 赵有明. 金塘大浦口集装箱码头岸线位置及走向的论证[J]. 水运工程, 2006(10): 128-132.
- [7] 邹志利, 张日向, 张宁川, 等. 风浪流作用下系泊船系缆力和碰撞力的数值模拟[J]. 中国海洋平台, 2002(17): 24-29.

(本文编辑 郭雪珍)