



基于船舶模拟器的航道航迹带 宽度计算方法*

黄伟杨, 李中华

(南京水利科学研究院, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 航迹带宽度是航道规划、设计的重要参数, 一直是航道宽度计算的难点。针对现行规范航迹带宽度计算系数取值困难的问题, 基于船舶操纵模拟器, 通过采集模拟试验仿真数据, 采用将船舶航迹带宽度分为航线偏移量和船舶本身占用空间来直接计算航迹带宽度的方法。结合台州湾大桥区航道, 仿真计算了典型风、流工况的航迹带宽度, 仿真结果与现行规范计算结果基本一致。表明该方法可行, 且具有很好的实用价值。

关键词: 船舶操纵模拟试验; 航迹带宽度; 航道宽度

中图分类号: U 612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0058-06

Calculation method of channel track width based on ship simulator

HUANG Wei-yang, LI Zhong-hua

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology,
Ministry of Transport, Nanjing 210029, China)

Abstract: The track width is an important parameter for channel planning and design, and it has always been difficulty in calculating the channel width. In view of the difficulty in obtaining the value of the calculation coefficient of the track width in the current standard, based on the ship simulator, this paper proposed a method of directly calculating the track width by using the simulation data, which divided the track width into the route offset and the space occupied by the ship itself. In combination with the channel in Taizhou Bay Bridge area, the track width under typical wind and flow conditions is simulated and compared the conclusion with the current specifications. The results of the two methods are basically consistent. It shows that this method is feasible and has good practical value.

Keywords: simulation experiment of ship handling; track width; channel width

船舶在航道上行驶受风、流、水深及边壁等多因素影响, 其实际航行轨迹很难与设计航线重合, 船舶需通过不断地操纵舵角来校正航向, 使船舶航行轨迹线不偏离航道范围。船舶航行克服上述影响, 实际占用的水域宽度称为航迹带宽度, 是航道规划、设计中的重要参数之一。我国现行的 JTS 165—2013《海港总体设计规范》^[1] (简称《规范》) 采用漂移系数、压偏角等经验系数来计算航

迹带宽度, 同时忽略了航道水深、边壁效应等对航迹带宽度的影响, 工程应用中受到一定的限制。本文利用船舶模拟器仿真获取不同风、流、水深工况下, 船舶在设计航道上的航行数据(航向、漂角及坐标信息), 将航迹带宽度分解为航线偏移量和船舶本身占用空间宽度两部分, 直接计算航道航迹带宽度。该方法综合反映了实际工程中的风、流、水深及边壁等因素影响, 更能客观反映实际

收稿日期: 2020-05-27

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402001); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y120011)

作者简介: 黄伟杨(1995—), 男, 硕士研究生, 从事通航水力学研究。

的船舶航迹带宽度值。

1 航道宽度设计现状

1.1 国内现状

我国《规范》定义: 航道有效宽度由航迹带宽度、船舶间富余宽度、船舶与航道底边间的富余宽度组成^[1]。在航道较长、自然条件较差、船舶定位困难情况下, 可适当加宽。其单、双向航道的宽度分别按以下公式计算:

单向航道:

$$W=A+2c \tag{1}$$

双向航道:

$$W=2A+b+c \tag{2}$$

$$A=n(L\sin\gamma+B) \tag{3}$$

式中: W 为航道有效宽度(m); A 为航迹带宽度(m); b 为船舶间富余宽度(m); c 为船舶与航道底边间的富余宽度(m); L 为船舶的长度; B 为船舶的宽度; γ 为航行时的风、流压偏角; n 为船舶漂移系数。

近年来, 不少学者对航道宽度进行研究。陈昌源等^[2]提出了基于多元分析的航道有效宽度, 将影响航道宽度的有效因素综合归纳后确定相关数值并累加, 以确定具体航道宽度; 顾毅^[3]提出了基于漂移量的航道宽度算法, 有效解决了规范中由经验数值确定的各个参数导致计算结果与实际不符的问题; 何阳等^[4]提出了大横流情况两种航道宽度的计算方法, 弥补了《规范》里计算公式使用的不足; 张玮等^[5]提出了一种通过统计最大横流累计频率而选取合理的航道横流数值进而确定航道宽度的计算方法。

确定航迹带宽度是航道规划、设计的前提, 也是通航安全评估中的重要步骤^[6]。《规范》的航迹带宽度计算公式中, 在横风 ≤ 7 级条件下, 漂移系数 n 和风、流压偏角 γ 的取值见表 1, 仅根据航道水域的风、流环境取值, 且取值范围多是基于经验总结, 没有考虑水深、边壁及视觉环境等因素影响, 实际操作中存在一定不足。

表 1 满载船舶漂移系数 n 和风、流压偏角 γ 的关系

横流 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	n	$\gamma/(^{\circ})$
$v\leq 0.25$	1.81	3
$0.25<v\leq 0.5$	1.69	7
$0.5<v\leq 0.75$	1.59	10
$0.75<v\leq 1.00$	1.45	14

1.2 国外现状

国际航运协会规范(PIANC) *Harbor Approach Channels-Design Guidelines*^[7] 中提出了航道宽度的概念设计方法和详细设计方法, 其中概念设计方法在国外工程项目中得到了广泛的认可和使用。日本规范^[8]在大量实船操纵试验的基础上, 总结出了航道宽度的详细参数设计方法, 但是该规范缺乏对波浪作用、拖轮作用以及航道底质等影响因素的考虑。美国规范 CEM^[9]中对于航道宽度的设计主要参考了 PIANC 方法, 其中关于宽度的计算仅适用于设计初期阶段。西班牙规范 ROM 3.1-99^[10]给出了基于大量的船舶操纵试验的确定性设计方法和通过船舶操纵模拟器、小比例物理模型试验等相结合的半概率设计方法。从各国规范和标准在航道宽度设计时考虑的影响因素看出, 西班牙规范和 PIANC 规范所考虑的影响因素最为全面。

2 基于船舶模拟器的航迹带宽度计算方法

2.1 计算原理

目前各国对于航道宽度的研究中^[11-12], 都将航迹带宽度作为主要研究对象。针对其他方法产生成本高、量化难等问题^[13], 可以利用船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS), 获得反映船舶实时航行的动态信息(航艏向、航迹点的经纬度等), 进而分析船舶航迹带宽度, 已经有一些学者做过相关研究。周翠等^[14]利用实船采集的 AIS 数据, 运用最小二乘法原理及船舶航迹带理论模型, 计算出航迹带尺度及船舶漂移系数的取值范围; 姚肖肖等^[15]利用船舶 AIS 轨迹数据, 采用 Douglas-Peucker 算法对海量轨迹数据进行处理, 将计算出各条边的船舶航行密度值作为

MMAS 蚁群算法的初始信息素浓度，求解港口间的最优安全航线。

本文利用船舶操纵模拟器测试系统，建立三维水域环境，模拟设计船舶在该水域内不同风、流、水深等环境因素影响下的船舶航行试验。根据船舶在设计航道上的航行数据(航向、漂角及坐

标等 AIS 信息)，将航迹带宽度分解为航线偏移量和船舶本身占用空间宽度两部分，见图 1，通过多组重复性试验，获取航道航迹带宽度 A ，即：

$$A=A_1+A_2 \tag{4}$$

式中： A_1 为航线偏移量(m)； A_2 为船舶本身占用空间宽度(m)。

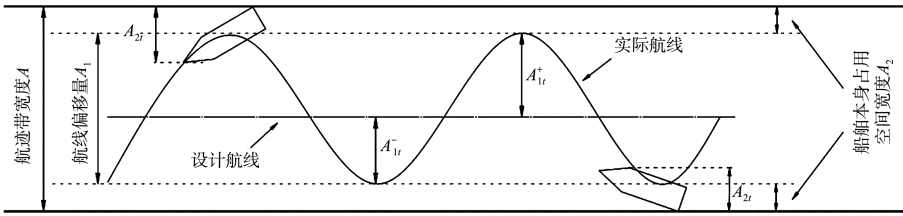


图 1 船舶航迹线示意

2.2 航线偏移量

航迹线的偏移量是指实际航线上点位与设计航线之间计算所得的坐标差 A_{lr} ，见图 1，其中 A_{lr}^+ 和 A_{lr}^- 为设计航线两侧最大距离。通过多组重复性试验，将所得数据进行筛选，获得 A_{lr}^+ 和 A_{lr}^- 的概率分布。航线偏移量 A_1 计算如下：

$$A_1=\max(A_{lr}^+)|_{t=0}^T+\max(A_{lr}^-)|_{t=0}^T \tag{5}$$

式中： A_{lr}^+ 为航线右侧最大距离； A_{lr}^- 为航线左侧最大距离； t 为试验中某时刻； T 为试验总时间。

2.3 船舶本身占用空间宽度

船舶本身占用的空间宽度是指船舶在航行过程中某一时刻扫过水域的面积宽度，可理解成船舶在航迹线法线上的投影，见图 2。

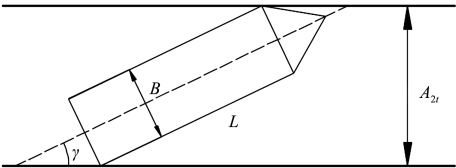


图 2 船舶占用空间宽度示意

船舶在河道上航行时为了保持航向、降低风流影响，通常使船舶的真实航向和船舶航迹向与风、流压偏角 γ 保持一致，某时刻船舶本身占用空间宽度计算如下：

$$A_{2t} \approx L\sin\gamma+B \tag{6}$$

式中： A_{2t} 为 t 时刻船舶本身占用空间宽度； γ 为航行时的风、流压偏角，可以由船舶 AIS 数据中的

实际航迹向与船舶向计算得出：

$$\gamma=\frac{h-\varepsilon}{180^\circ}\pi \tag{7}$$

式中： ε 为实际航迹向； h 为航艏向。

由于船舶本身占用空间宽度为航线两侧的超过航迹线偏移量的宽度，见图 1，为了简便计算，近似处理为航行过程中船舶本身占用空间的最大宽度，即：

$$A_2=\max(A_{2t})|_{t=0}^T \tag{8}$$

3 实例计算

3.1 模拟试验场景建立

根据台州湾地区实际运行货船类别，模拟仿真试验选择测试了一条 5 000 t 内河货船，其总长 128 m、宽度 17 m、型深 30 m、满载吃水 3.6 m，航速为 10 kn，设计船舶效果见图 3。



图 3 设计船舶效果

台州湾大桥区通航条件试验河道水深设定为 12 m，上行船舶起点为台州湾大桥下游 2 km，终点为台州湾大桥上游 2 km；下行船舶的起点和终

点与上行船舶的相反, 航线为直线段。船舶操纵模拟器三维建模场景效果见图 4。



图 4 三维建模场景

考虑船舶正常航行时涨落潮流场及风场的组合影响, 试验典型工况见表 2。

表 2 试验工况

工况	潮流场	航向	风场
ZSW	涨潮	上行	无风
ZSB			北风
ZSN			南风
ZXW		下行	无风
ZXB			北风
ZXN			南风
LSW	落潮	上行	无风
LSB			北风
LSN			南风
LXW		下行	无风
LXB			北风
LXN			南风

考虑最不利条件, 模拟试验选取的风向为无风、北风 7°、南风 187°(即船舶航行受横向风), 风速取 6 级(10.8~13.8 m/s)。每个工况进行 10 组模拟试验, 将 10 组试验计算结果剔除最大和最小的两组, 剩余 8 组结果取平均值作为该工况的计算值。本文仅以涨潮流场条件下试验船舶上行航行为例, 分析不同风场条件下的船舶航行数据。

3.2 航迹带宽度计算

采集船舶在航行过程中的 AIS 动态数据, 包括船位(经、纬度坐标)、航迹向、航艏向、航速和舵角等数据。为了方便计算分析, 将经纬度坐标系转化为笛卡尔直角坐标系, 将船位数据转换成 x、y 坐标的航迹点, 得到代表船舶航行航迹线方程, 见表 3。

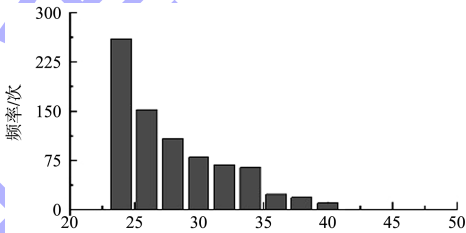
表 3 不同风况下航迹线方程

风况	航迹线方程
无风	$y=(-2\times10^{-11})x^3+(7\times10^{-8})x^2-0.097\ 2x+66.779$
南风	$y=(-1\times10^{-11})x^3+(2\times10^{-6})x^2-0.093\ 9x+64.381$
北风	$y=(3\times10^{-10})x^3+(2\times10^{-7})x^2-0.098\ 1x+64.656$

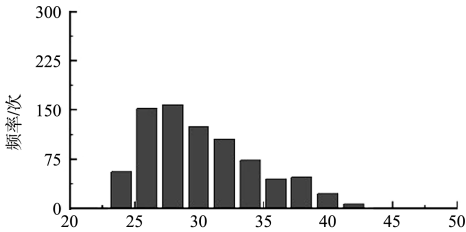
根据式(5)~(8)求得航迹带宽度, 结果见表 4。航迹带宽度频率分布和密度曲线见图 5、6。

表 4 不同风况下航迹带宽度

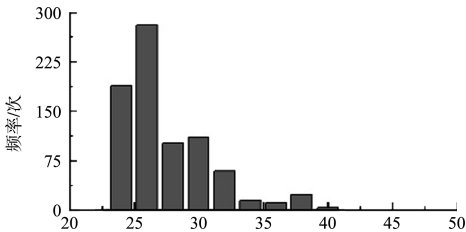
风场	A_{1r}^*/m	A_{1l}^*/m	A_1/m	A_2/m	A/m
无风	5.48	-8.48	13.96	27.11	41.06
南风	4.89	-8.08	12.96	26.86	39.82
北风	8.03	-9.58	17.61	29.46	47.07



a) 无风



b) 北风



c) 南风

图 5 航迹带宽度频率分布

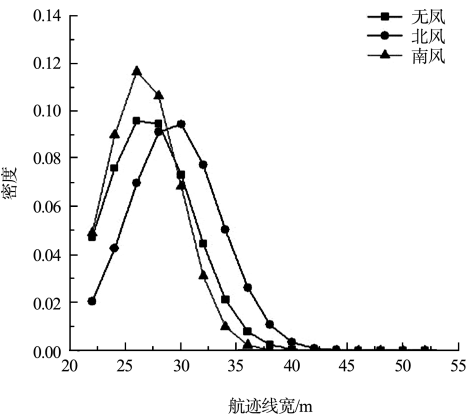


图 6 航迹带宽度密度曲线

船舶在涨潮上行过程中，北风风况下的船舶航迹带宽度最大值达到 47.07 m，而此风况下的航迹线宽度频率分布相比其他风况更加均匀，且航迹线宽度频率分布越集中，频率越大，其密度峰值越大。

该工况下舵角的特征参数见表 5，舵角曲线和频率分布见图 7、8。

表 5 舵角试验统计

风场	舵角试验统计值/(°)						峰值
	最大值	最小值	均值	中位数	标准差	偏态系数	
无风	10.1	-11.0	-0.7	-1	3.79	0.39	1.01
南风	6.0	-13.1	-4.6	-5	3.35	0.56	1.17
北风	16.1	-8.0	3.8	3	4.34	0.29	0.81

注：舵角“+”为右舵，“-”为左舵。

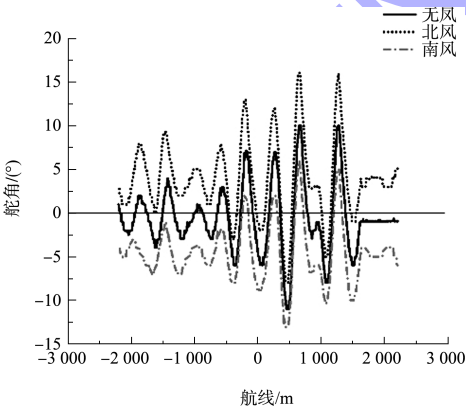


图 7 舵角曲线

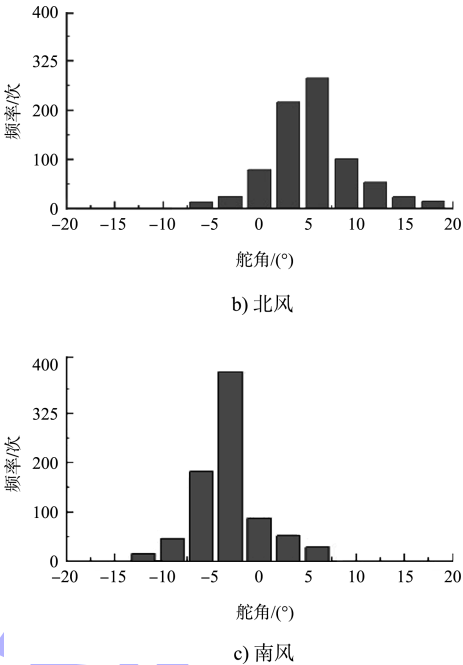
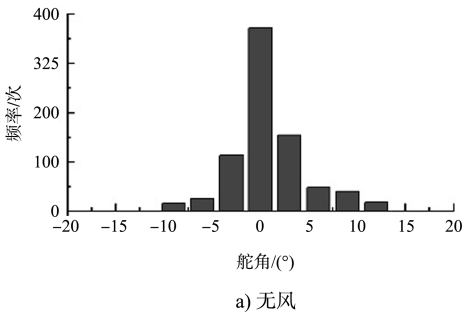


图 8 舵角频率分布

在航行过程中，无风工况下舵角分布均匀，0°左右使用频率相近；北风工况下整体偏向右舵，5°左右频率较高；南风工况下整体偏向左舵，-3°左右频率较高。舵角模拟结果与实际相符，可认为具有参考价值。

同理，依次计算涨潮下行、落潮上行、落潮下行这 3 种工况下的航迹带宽度，结果见表 6。

表 6 不同工况下航迹带宽度

工况	风场	A_{li}^+/m	A_{li}^-/m	A_1/m	A_2/m	A/m
涨潮下行	无风	5.18	-8.95	14.13	24.32	38.44
	南风	6.59	-5.70	12.29	25.02	37.31
	北风	6.20	-4.65	10.85	25.29	36.14
落潮上行	无风	3.63	-5.15	8.78	28.06	36.84
	南风	3.10	-4.90	8.00	28.02	36.03
	北风	5.01	-5.36	10.36	29.01	39.37
落潮下行	无风	6.43	-7.09	13.52	26.34	39.87
	南风	7.94	-6.54	14.48	28.23	42.72
	北风	9.50	-8.92	18.42	26.02	44.44

在涨潮流场条件下，试验船舶受不同风场影响，在台州湾大桥区域正常双向航行时，上行最大航迹带宽度为 47.07 m，下行最大航迹带宽度为 38.44 m；落潮流场条件下，上行最大航迹带宽度为 39.37 m，下行最大航迹带宽度为 44.44 m。综合各种工况，该航道最大航迹带宽度取 47.07 m。

本次模拟的台州湾大桥区域航道基本顺直, 涨落潮条件下, 河道横向流速基本在 0.5 m/s 以内, 按照《规范》船舶漂移倍数 n 取 1.69, 风、流压偏角 γ 取 7° , 根据式(3) 计算得出的最大航迹带宽度 $A'=55.09\text{ m}$, 与船舶模拟器试验的航迹带宽度 47.07 m 基本一致。

4 结论

- 1) 仿真试验表明: 5 000 t 船舶在台州湾大桥区附近航行时, 船舶航迹带宽度为 47.07 m, 与《规范》计算值 55.09 m 基本一致, 表明将航迹带宽度分解为航线偏移量和船舶本身占用空间宽度两部分, 进而直接计算的方法可行。
- 2) 本方法包含了风、流、水深、视觉等环境等因素影响, 提高了航迹带宽度计算的精度, 可以作为航道宽度计算的一种方法, 应用于航道规划和设计。

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, 2013.

[2] 陈昌源, 戴冉, 姜灿, 等.基于多元分析的航道有效宽度研究[J].中国水运(下半月), 2015, 15(9): 258-260.

[3] 顾毅.基于漂移量的航道宽度算法浅析[J].中国水运(理论版), 2006, 4(11): 23-24.

[4] 何阳, 杨长义, 陈玺文.关于大横流情况海港航道宽度计算方法的探讨[J].港工技术, 2013, 50(5): 13-14.

[5] 张玮, 李泽.基于最大横流累积频率的航道宽度设计方

法[J].中国港湾建设, 2014(10): 27-30, 73.

[6] 于家根.港口水域航道合理规划设计研究[D].大连: 大连海事大学, 2008.

[7] PIANC(International Navigation Association). Harbor approach channels-design guidelines[S]. Brussels: PIANC, 2014.

[8] Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism (MLIT). Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan[S]. Tokyo: OCDI, 2009.

[9] USACE (US Army Corps of Engineers). Coastal engineering manual[S].Washington: EM 1110-2-1100, 2006.

[10] ROM 3.1-99. Recommendations for the design of the maritime configuration of ports, approach channels and harbor basins[S]. English version. Madrid: Puertos del Estado, 2007.

[11] 竺奇乐, 喻国良.海港航道直线段宽度确定方法的比较[J].水道港口, 2012, 33(5): 447-453.

[12] 聂细亮.中日港口航道宽度设计标准比较研究[D].大连: 大连海事大学, 2010.

[13] PHILIPP L, CHRISTIAN B, MARTIN H B, et al. Comprehensive analysis of automatic identification system (AIS) data in regard to vessel movement prediction[J]. Journal of navigation, 2014, 67(5): 791-809.

[14] 周翠, 肖进丽, 牟军敏.基于 AIS 信息的船舶航迹带尺度确定与分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(6): 1278-1282.

[15] 姚肖肖, 胡勤友, 杨春.基于蚁群算法与海量 AIS 数据的船舶航线规划[J].交通信息与安全, 2019, 3(37): 79-85.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 52 页)

[2] 中交水运规划设计院有限公司.黄骅港(煤炭港区)五期工程工可研[R].北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2015.

[3] 王金福, 钱亚臣, 郭晓勇.翻车机卸车系统的现状及发展[J].矿山机械, 2005(11): 27-29.

[4] 李俊岭.散货疏运站翻车机系统作业能力研究[J].铁道货运, 2019(11): 54-58.

[5] 中交水运规划设计院有限公司.黄骅港 2 亿吨能力关键技术保障研究[R].北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2019.

[6] 李清立, 苗大维.重载铁路单元列车运输的技术经济分析[J].北方交通大学学报, 1995(3): 411-414.

(本文编辑 郭雪珍)