

考虑漂移倍数保证率的开敞海域 深水航道通航宽度深化研究

郭冬冬¹, 马兴华¹, 金雪英¹, 丁大志², 黄小鹏¹, 程天泽¹

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120;

2. 连云港港 30 万吨级航道建设指挥部, 江苏 连云港 222000)

摘要: 依托连云港港 30 万吨级航道工程, 在基于连云港港 15 万吨级船舶实船观测的航道通航宽度计算方法研究成果的基础上, 增加连云港港 25 万~30 万吨级散货船、油船及虾峙门口外 30 万吨级油船实船航行数据样本, 开展考虑漂移倍数保证率的开敞海域深水航道通航宽度深化研究。研究提出, 对于 10 万吨级及以上散货船和油船航道, 船舶漂移倍数可根据航道通航条件的优劣、通航船舶对安全度要求的高低、航道通航密度的大小等在规范取值基础上适当调整, 一般段(非防波堤口门段)航道漂移倍数调整系数可取 0.95~1.15, 防波堤口门段航道漂移倍数调整系数可取 1.05~1.3。研究成果提升了宽度计算方法的系统性、实用性和在同类航道中的普适性, 可为行业规范修订、同类工程建设提供借鉴。

关键词: 通航宽度; 风流压偏角; 漂移倍数; 调整系数

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2025)07-0056-07

doi: 10.7640/zggwjs202507008

Deepening research on the navigation width of deepwater channels in open sea considering the guaranteed rate of drift multiples

GUO Dong-dong¹, MA Xing-hua¹, JIN Xue-ying¹, DING Da-zhi², HUANG Xiao-peng¹, CHENG Tian-ze¹

(1. CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

2. Lianyungang Port 300 000 DWT Channel Development Project Office, Lianyungang, Jiangsu 222000, China)

Abstract: Relying on the 300 000 DWT channel project of Lianyungang Port and based on the research results of the navigation width of the channel observed by 150 000 DWT vessels in Lianyungang Port, the real ship navigation data samples of 250 000 DWT to 300 000 DWT bulk carriers and oil tankers in Lianyungang Port, as well as 300 000 DWT tankers in Xiazhimen channel were added to carry out the deepening research on the navigation width of deepwater channels in open sea considering the guaranteed rate of drift multiples. It is proposed that for channels accommodating bulk carriers and oil tankers of 100 000 DWT and above, the drift multiple of vessels can be appropriately adjusted based on the navigation conditions of the channel, the safety requirements of the navigating vessels, and the density of navigation in the channel, the adjustment coefficient in regular channel sections(non breakwater entrance section)can range from 0.95 to 1.15, and for the breakwater entrance channel section range from 1.05 to 1.3. The research results improve the systematization, practicality, and universality of the width calculation method in similar channels, providing reference for the revision of industry standards and the construction of similar projects.

Key words: the width of waterway; wind and flow pressure angle; drift multiples; adjustment coefficient

收稿日期: 2025-03-06 修回日期: 2025-04-23

基金项目: 江苏省交通运输科技示范项目 (2018Y03)

作者简介: 郭冬冬 (1984—), 男, 浙江舟山人, 高级工程师, 注册港航工程师, 港口航道与海岸工程专业, 从事沿海航道设计研究工作。

E-mail: 181144273@qq.com

0 引言

根据 JTS 165—2013《海港总体设计规范》, 航道通航宽度是指设计通航水深处航道的断面宽度。对于人工航道, 指设计通航水深处挖槽的断面宽度。航道通航宽度的确定主要与通航船型、通航船舶尺度、设计航速、水流、风、浪等自然条件、引航员和驾驶员的操作水平、防波堤口门布置、船舶通航密度和拥塞情况等因素有关。

我国水运工程设计部门在 20 世纪 80 年代开展了大规模的实船航行观测^[1], 共观测 66 艘次, 船型为 0.2 万~7.4 万吨级杂货船、散货船和油船。根据实船观测成果, 推导得到了航道宽度的经验公式及参数, 作为我国现行 JTS 165—2013《海港总体设计规范》航道通航宽度计算公式及参数, 计算公式如下:

单线航道:

$$W=A+2c \quad (1)$$

双线航道:

$$W=2A+b+2c \quad (2)$$

$$A=n(L\sin\gamma+B) \quad (3)$$

式中: W 为航道宽度, m; A 为航迹带宽度, m; c 为船舶与航道底边的富裕宽度, m; b 为船舶间富裕宽度, m; n 为船舶漂移倍数; L 为设计船长, m; B 为设计船宽, m; γ 为风流压偏角, ($^\circ$)。

其中, 船舶漂移倍数和风流压偏角只与横流大小有关, 不考虑通航船型、船舶尺度、设计航速、引航员和驾驶员的操作水平、防波堤口门布置、船舶通航密度和拥塞情况等因素的影响。应用情况表明, 该公式及参数总体上是合理和适用的, 但船舶漂移倍数和风流压偏角的取值不能适应水运工程发展需要, 具体体现在:

1) 近年来船舶大型化发展明显, 相应的船舶操纵性能有了明显提升, 而由于缺少大型船舶的实船航行数据作为支撑, 现有规范风流压偏角和船舶漂移倍数的取值不一定适用, 在大型航道工程实践应用中存在诸多争议, 航道部门认为航道够宽了, 通航部门认为航道不够宽。

2) 不同建设条件和要求对应的船舶漂移倍数 n 和风流压偏角 γ 可能不同, 而现行方法并没有区分, 统一取值。

3) 防波堤口门段水流条件相对复杂, 与非口门段存在较大差异, 而现行方法并未区别对待。

郭冬冬等^[2]通过观测连云港港 15 万吨级航道

内 15 万吨级船舶实船航行数据, 提出一般航道和特殊航道分别在 5° 和 7° 风流压角情况下对应漂移倍数优化建议值。但研究成果尚缺乏系统性和普适性。

本次研究在上述已有科技成果基础上, 增加连云港港 25 万~30 万吨级散货船、油船及虾峙门口外 30 万吨级油船实船航行数据样本, 开展考虑漂移倍数保证率的开敞海域高等级航道通航宽度深化研究, 优化和完善航道通航宽度计算方法及有关参数取值, 进一步提升科技成果的系统性、实用性和在同类航道中的普适性, 可为行业规范修订、同类工程建设提供借鉴。

1 航道概况及实船样本收集

连云港港 30 万吨级航道^[3]呈人字形布置, 其中连接连云港区的外航道内段长 17.3 km, 通航宽度 285~340 m, 设计底高程 -22.4~-22.6 m, 满足 30 万吨级散货船乘潮单向通航; 连接徐圩港区的徐圩航道全长 17.6 km, 通航宽度 350~380 m, 设计底高程 -21.8~-22.0 m, 满足 30 万吨级原油船乘潮单向通航; 外航道外段为两港区共用航段, 长 35.6 km, 通航宽度 345 m, 设计底高程 -22.4~-22.9 m。航道平面布置见图 1。

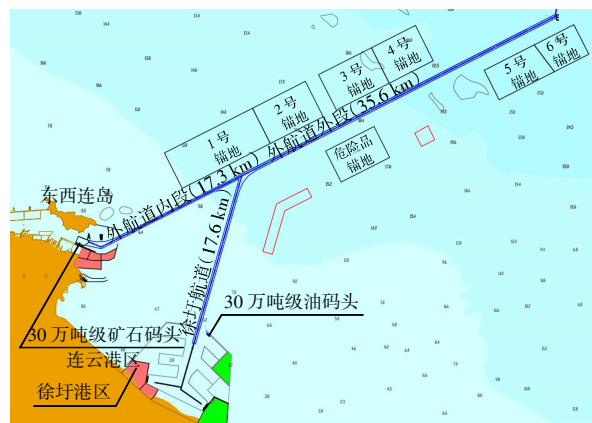


图 1 连云港港 30 万吨级航道平面图

Fig. 1 Plan of 300 000 DWT channel in Lianyungang Port

虾峙门口外 30 万吨级人工航道^[4]按 30 万吨级原油船满载单向乘潮通航设计, 航道全长 14.85 km, 通航宽度 390 m, 设计底高程 -22.5 m。航道平面布置见图 2(图中粗线)。

本次研究利用船舶自动识别(AIS)系统, 共采集了近 1 150 艘 25 万~30 万吨级散货船和油船进港航行实时船位、航向、航速等航行数据。实船样本采集数量见表 1。

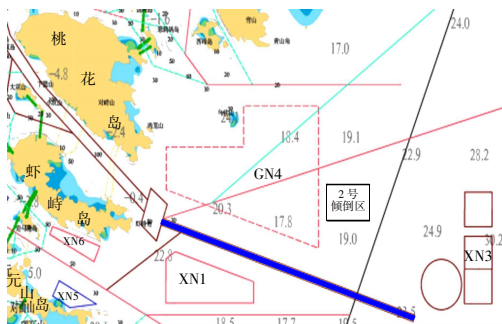


图 2 虾峙门口外 30 万吨级航道平面图
Fig. 2 Plan of 300 000 DWT channel in Xiazhimen

表 1 AIS 系统实船样本采集汇总

Table 1 Summary of real ship samples collected from the AIS system

航道	船型	船舶等级	进港船舶/艘次
连云港港 30 万吨级航道	散货船	25 万吨级	181
	散货船	30 万吨级	151
	油船	30 万吨级	60
虾峙门口外 30 万吨级航道	油船	30 万吨级	752

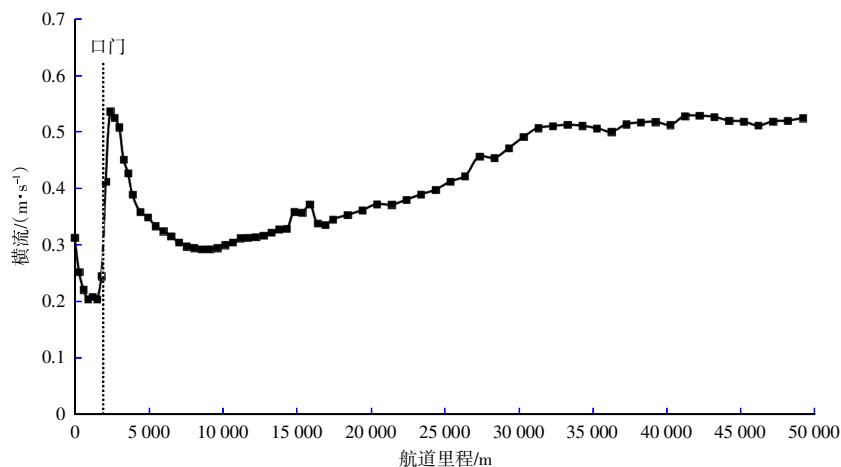


图 3 连云港港 30 万吨级航道典型大潮最大横流沿程分布(30 万吨级散货船)
Fig. 3 Distribution of typical spring tide maximum cross-flow along the 300 000 DWT channel of Lianyungang Port (300 000 DWT bulk carrier)

表 2 实船样本逐时横流推算

Table 2 Real ship sample hourly cross-flow calculation

北京时间	X(54 坐标)/m	Y(54 坐标)/m	艏向/(°)	潮汐类型	横流点位	潮位/m	流速/(m·s ⁻¹)	流向/(°)	横流/(m·s ⁻¹)
2018-01-26T11:41:40	460 958.214	3 848 650.175	245	小潮	L21	1.29	0.16	187.04	0.13
2018-01-26T11:42:09	460 827.175	3 848 587.128	245	小潮	L20	1.32	0.15	180.72	0.14
2018-01-26T11:42:28	460 754.702	3 848 552.491	245	小潮	L20	1.32	0.15	180.72	0.14
2018-01-26T11:42:40	460 710.522	3 848 531.602	245	小潮	L20	1.32	0.15	180.72	0.14
2018-01-26T11:42:51	460 666.489	3 848 511.081	245	小潮	L20	1.32	0.15	180.72	0.14
2018-01-26T11:43:10	460 591.105	3 848 474.609	245	小潮	L20	1.32	0.15	180.72	0.14
2018-01-26T11:43:29	460 520.162	3 848 440.523	245	小潮	L20	1.32	0.15	180.72	0.14
2018-01-26T11:43:39	460 468.933	3 848 415.967	245	小潮	L20	1.32	0.15	180.72	0.14
2018-01-26T11:43:51	460 429.484	3 848 396.907	245	小潮	L20	1.32	0.15	180.72	0.14

3 风流压偏角确定

根据 JTS 165—2013《海港总体设计规范》, 横流与风流压偏角的关系见表 3。各样本根据进港期间的实时横流结合表 3 确定。

表 3 船舶漂移倍数 n 和风流压偏角 γ 值
Table 3 Drift multiples n and adjustment coefficient γ

风力	横流 $V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	n	$\gamma/(\text{°})$
横风 ≤ 7 级	$V \leq 0.10$	1.81	3
	$0.10 < V \leq 0.25$	1.75	5
	$0.25 < V \leq 0.50$	1.69	7
	$0.50 < V \leq 0.75$	1.59	10

1) 连云港港 30 万吨级航道

根据数模推算, 航道沿线横流均较小, 基本不超过 0.5 m/s; 从各样本沿程横流实时分布来看, 横流沿程变化明显, 且自外海向内基本呈逐渐减小趋势, 至口门附近横流增大。经统计, 各样本口外一般段和防波堤口门段实时横流均主要集中在 0.1~0.5 m/s。因此, 研究对象为风流压偏角如

下的样本:

横流 $0.10 \text{ m/s} < V \leq 0.25 \text{ m/s}$, 对应风流压偏角 5° ; 横流 $0.25 \text{ m/s} < V \leq 0.50 \text{ m/s}$, 对应风流压偏角 7° 。

2) 虾峙门口外 30 万吨级航道(一般段)

根据数模推算, 航道沿线横流较大, 最大可达到 0.82 m/s; 从各样本沿程横流实时分布来看, 航道沿程横流在 0.25~0.50 m/s 区间的样本数最多; 0.50~0.75 m/s 区间的样本数次之; 其他区间样本数较少。因此, 研究对象为风流压偏角如下的样本:

横流 $0.25 \text{ m/s} < V \leq 0.50 \text{ m/s}$, 对应风流压偏角为 7° ; 横流 $0.50 \text{ m/s} < V \leq 0.75 \text{ m/s}$, 对应风流压偏角为 10° 。

4 航迹带宽度 A 统计

为保证统计分析精度, 先行筛选剔除不合理样本, 再对实测的航迹带宽度进行统计, 统计结果见表 4、表 5 和图 4。各样本对应航速基本在 8~10 kn 之间。

表 4 一般段实测航迹带宽度 A 统计表
Table 4 Statistics of the measured track width A for the regular section

航道	船舶吨级	风流压偏角 $\gamma/(\text{°})$	样本数/个	统计值/m			
				最小值	最大值	标准差	平均值
连云港港 30 万吨级航道	25 万吨级散货船	5	489	66	160	19	101
	30 万吨级散货船		180	68	158	18	108
	30 万吨级油船		181	72	163	18	106
	25 万吨级散货船	7	43	73	148	18	111
虾峙门口外 30 万吨级航道	30 万吨级油船	10	489	64	176	23	108
	30 万吨级油船		119	70	191	29	112

表 5 防波堤口门段实测航迹带宽度 A 统计表
Table 5 Statistics of the measured track width A for the breakwater entrance section

航道	船舶吨级	风流压偏角 $\gamma/(\text{°})$	样本数/个	统计值/m			
				最小值	最大值	标准差	平均值
连云港港 30 万吨级航道	30 万吨级散货船	5	26	87	166	21	119
	25 万~30 万吨级散货船	7	112	81	182	20	126

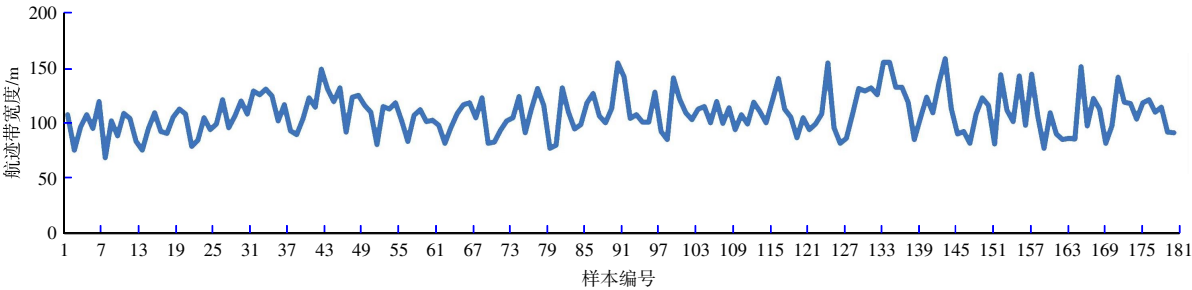


图 4 连云港港 30 万吨级散货船、一般段、 $\gamma=5^\circ$ 时实测航迹带宽度 A 统计图

Fig. 4 Statistics of the measured track width A for 300 000 DWT bulk carriers in the regular section of Lianyungang Port at $\gamma=5^\circ$

5 漂移倍数 n 统计

根据交通运输部 JTS 165—2013《海港总体设计规范》航迹带宽度计算公式, 转换得漂移倍数 $n = A / (L \sin \gamma + B)$, 统计不同航段、不同风流压偏角的实测船舶漂移倍数, 见表 6、表 7 和图 5。

采用柯尔莫诺夫-斯米尔诺夫检验法, 对实测船舶漂移倍数 n 进行分布检验, 服从 GAMMA 分布^[7], 计算一般段航道(见图 6、图 7、表 8)和防波堤口门段航道(见图 8、图 9、表 9)在不同保证率下的船舶漂移倍数 n 值。

表 6 一般段实测漂移倍数 n 值统计表

Table 6 Statistics of the measured drift multiple n for the regular section

航道	船舶吨级	风流压偏角 $\gamma / (^{\circ})$	样本数/个	统计值			
				最小值	最大值	标准差	平均值
连云港港 30 万吨级航道	25 万吨级散货船	5	489	0.78	1.84	0.23	1.18
	30 万吨级散货船		180	0.80	1.72	0.20	1.20
	30 万吨级油船		181	0.82	1.83	0.21	1.20
	25 万吨级散货船	7	43	0.76	1.57	0.19	1.14
虾峙门口外 30 万吨级航道	30 万吨级油船		489	0.64	1.76	0.24	1.08
	30 万吨级油船	10	119	0.60	1.60	0.24	0.95

表 7 防波堤口门段实测漂移倍数 n 值统计表

Table 7 Statistics of the measured drift multiple n for the breakwater entrance section

航道	船舶吨级	风流压偏角 $\gamma / (^{\circ})$	样本数/个	统计值			
				最小值	最大值	标准差	平均值
连云港港 30 万吨级航道	30 万吨级散货船	5	26	0.96	1.82	0.24	1.32
	25 万~30 万吨级散货船	7	112	0.86	1.66	0.19	1.21

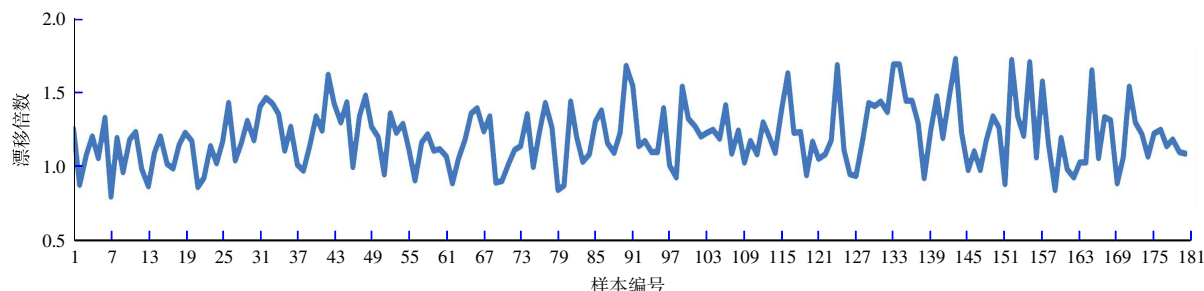


图 5 连云港港 30 万吨级散货船、一般段、 $\gamma=5^{\circ}$ 实测漂移倍数 n 值统计图

Fig. 5 Statistics of the measured drift multiple n for 300 000 DWT bulk carriers in the regular section of Lianyungang Port at $\gamma=5^{\circ}$

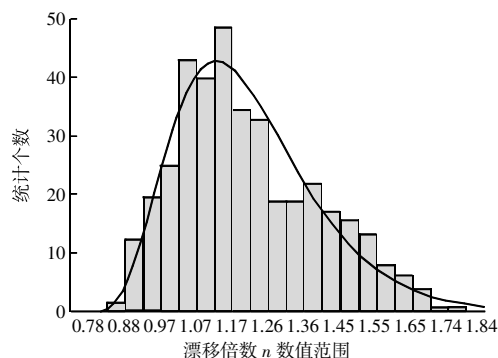


图 6 一般段航道船舶漂移倍数 n 概率分布图 (连云港港 25 万吨级散货船、 $\gamma=5^{\circ}$)

Fig. 6 Probability distribution of drift multiples n for the regular section(250 000 DWT bulk carriers of Lianyungang Port, $\gamma=5^{\circ}$)

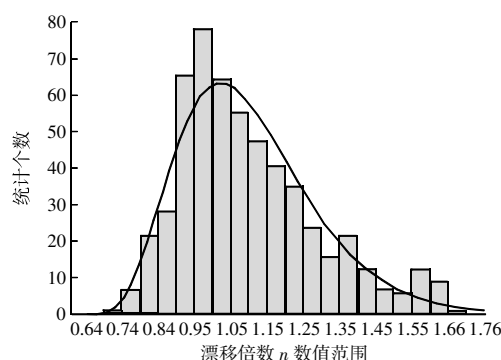


图 7 一般段航道船舶漂移倍数 n 概率分布图 (虾峙门 30 万吨级油船、 $\gamma=7^{\circ}$)

Fig. 7 Probability distribution of drift multiples n for the regular section(300 000 DWT oil tankers of Xiazhiemen, $\gamma=7^{\circ}$)

表 8 不同保证率下船舶漂移倍数统计值汇总表(一般段)

Table 8 Summary of the statistical value of drift multiples under different guarantee rates(regular section)

航道	船舶吨级	风流压偏角 $\gamma/ (^{\circ})$	样本数/个	漂移倍数 n			
				规范值	95%保证率	99%保证率	99.7%保证率
连云港港 30 万吨级航道	15 万吨级散货船	5	—	1.75	—	1.78 ^[1]	1.94 ^[1]
	25 万吨级散货船		489	1.75	1.61	1.86	2.04
	30 万吨级散货船		180	1.75	1.59	1.82	1.98
	30 万吨级油船		181	1.75	1.60	1.84	2.01
	15 万吨级散货船	7	—	1.69	—	1.74 ^[1]	1.88 ^[1]
	25 万吨级散货船		43	1.69	1.53	1.76	1.92
虾峙门口外 30 万吨级航道	30 万吨级油船	10	489	1.69	1.51	1.76	1.94
	30 万吨级油船		119	1.59	1.38	1.65	1.84

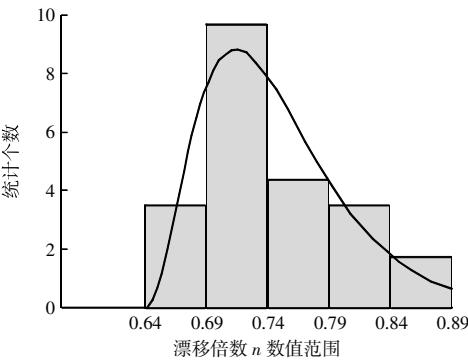


图 8 口门段航道船舶漂移倍数 n 概率分布图
(连云港港 30 万吨级散货船、 $\gamma=5^{\circ}$)

Fig. 8 Probability distribution of drift multiples n for the breakwater entrance section(300 000 DWT bulk carriers of Lianyungang Port, $\gamma=5^{\circ}$)

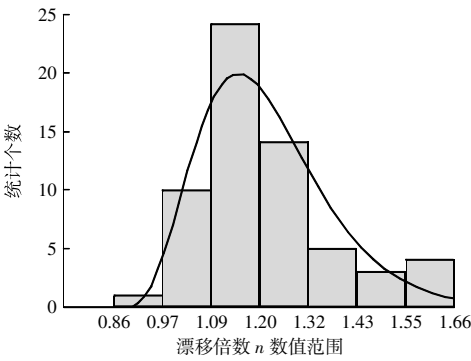


图 9 口门段航道船舶漂移倍数 n 概率分布图
(连云港港 25 万~30 万吨级散货船、 $\gamma=7^{\circ}$)

Fig. 9 Probability distribution of drift multiples n for the breakwater entrance section(250 000 DWT–300 000 DWT bulk carriers of Lianyungang Port, $\gamma=7^{\circ}$)

表 9 不同保证率下船舶漂移倍数统计值汇总表(防波堤口门段)

Table 9 Summary of the statistical value of drift multiples under different guarantee rates(breakwater entrance section)

航道	船舶吨级	风流压偏角 $\gamma/ (^{\circ})$	样本数/个	漂移倍数 n			
				规范值	95%保证率	99%保证率	99.7%保证率
连云港区 30 万吨级航道	30 万吨级散货船	5	26	1.75	1.79	2.09	2.30
	25 万+30 万吨级散货船	7	112	1.69	1.75	2.02	2.21

统计表明, 15 万吨级及以上船舶漂移倍数对不同吨级、不同货种(散货、原油)的船型差异并不敏感。对于一般段航道, 95%保证率下的漂移倍数 n 值约为规范值的 0.9~0.92 倍; 99%保证率下的漂移倍数 n 值约为规范值的 1.02~1.06 倍; 99.7%保证率下的漂移倍数 n 值约为规范值的 1.11~1.17 倍; 对于防波堤口门段航道, 95%保证率下的漂移倍数 n 值约为规范值的 1.02~1.04 倍; 99%保证率下的漂移倍数 n 值约为规范值的 1.19~1.20 倍; 99.7%保证率下的漂移倍数 n 值约为规范

值的 1.31 倍。

6 开敞海域深水航道通航宽度计算方法的优化与应用

6.1 漂移倍数取值

为便于在航道通航宽度设计中推广应用上述研究成果, 本文引入漂移倍数调整系数, 来修正现行规范计算公式中的漂移倍数取值。结合航道通航条件的优劣、通航船舶对安全度要求的高低、航道通航密度的大小等, 漂移倍数调整系数取值见表 10、表 11。

表 10 一般段航道漂移倍数调整系数表

Table 10 Adjustment coefficient for drift multiples of regular section

航道特征	保证率/%	漂移倍数调整系数
航道顺直、水流平顺、船流密度低	95	0.95~1.00
航道微弯、水流较为平顺, 或船流密度较高	99	1.00~1.05
航道多弯、水流较为紊乱, 或船流密度高	99.7	1.10~1.15

表 11 防波堤口门段航道漂移倍数调整系数表

Table 11 Adjustment coefficient for drift multiples of breakwater entrance section

口门段特征	保证率/%	漂移倍数调整系数
1) 除 2)、3) 以外的其他情况	95	1.05~1.10
2) 口门距离弯段超过制动距离、流态较为平顺, 或船流密度较高	99	1.15~1.20
3) 口门邻近弯段, 或流态较为紊乱, 或船流密度高	99.7	1.25~1.30

6.2 航道通航宽度计算公式及参数

航道通航宽度按照式(1)、式(2)计算, 计算公式(3)转换为计算公式(4):

$$A = \alpha n (L \sin \gamma + B) \quad (4)$$

式中: A 为航迹带宽度, m; α 为漂移倍数调整系数, 按表 10 和表 11 取值。

6.3 连云港港 30 万吨级航道改扩建工程应用

连云港港 30 万吨级航道改扩建工程拟在现有连云港港 30 万吨级航道基础上扩建, 其中连云港区航道满足 7 万吨级集装箱船全潮双向通航, 兼顾 40 万吨散货船、20 万吨级集装箱船乘潮单向通航。

利用本次研究成果, 外航道内段口门段风流压偏角 $\gamma=10^\circ$, 按表 11 取口门段 99%保证率对应调整系数 α 值 1.15~1.20, 计算改扩建工程外航道内段口门段通航宽度为 366~377 m。

7 结语

本文提出, 对于 10 万吨级及以上散货船和油船航道, 船舶漂移倍数可根据航道通航条件的优劣、通航船舶对安全度要求的高低、航道通航密度的大小等在规范取值基础上作适当调整, 一般段(非防波堤口门段)航道漂移倍数调整系数可取 0.95~1.15, 防波堤口门段航道漂移倍数调整系数

可取 1.05~1.30。研究成果提升了系统性、实用性和在同类航道中的普适性, 可为行业规范修订、同类工程建设提供借鉴。

参考文献:

- [1] JTS 165—2013, 海港总体设计规范[S].
JTS 165—2013, Design code of general layout for sea ports[S].
- [2] 郭冬冬, 金雪英, 曹恩广, 等. 基于大型船舶实船观测的开敞海域浅滩深挖槽航道通航宽度研究[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(11): 35~38.
GUO Dong-dong, JIN Xue-ying, CAO En-guang, et al. On the width of a waterway with deeply dredged trench at the site of shallow shoal based on vessel observation[J]. China Harbour Engineering, 2016, 36(11): 35~38.
- [3] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 连云港港 30 万吨级航道二期工程初步设计[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2017.
CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd. Preliminary design for the Phase II of the 300 000 DWT channel project in Lianyungang Port[R]. Shanghai: CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., 2017.
- [4] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 虾峙门口外 30 万吨级航道工程初步设计[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2007.
CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd. Preliminary design for the Xiazhimen 300 000 DWT channel project[R]. Shanghai: CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., 2007.
- [5] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 淤泥质浅滩深挖槽航道总体设计关键技术深化研究与应用[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2019.
CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd. Deepening research and application of the key technology in the overall design of a waterway with deeply dredged trench at the site of shallow shoal[R]. Shanghai: CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., 2019.
- [6] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 开敞海域大型船舶浅滩深挖槽航道宽度计算方法补充研究[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2024.
CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd. Supplementary research on the calculation method of channel width for deep-dredging trench of large ships in open sea shallow waters[R]. Shanghai: CCCC Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., 2024.
- [7] WALPOLE R E. 概率与统计[M]. 周勇, 马昀蓓, 谢尚宇, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2014.
WALPOLE R E. Essentials of probability and statistics for engineers and scientists[M]. ZHOU Yong, MA Yun-bei, XIE Shang-yu, et al., Translate. Beijing: China Machine Press, 2014.