



汇出汇入条件下港内航道船舶安全距离研究*

王茁宇, 殷艳红, 高玉捷

(宁波大学海运学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 在港内航道中, 船舶的数量多密度大, 船舶汇入汇出对在航道中正常行驶的其它船舶造成了一定的安全隐患。在已有的船舶运动模型的理论基础上, 对船舶汇入汇出安全行驶进行了初步设计, 并计算出能够进行安全汇入与汇出的最小距离要求。

关键词: 船舶汇入汇出; 港内航道; 安全距离设计

中图分类号: U 612.32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)05-0102-05

Safety vessel distance in port fairway during vessel's entering or outing of fairway

WANG Zhuo-yu, YIN Yan-hong, GAO Yu-jie

(Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In the port fairways, there are so many vessels that a high density is observed. The movement of vessels in and out of fairways influences the safety of other moving vessels. Based on the theory of vessel motion model, this paper introduces a method to calculate the minimum safety distance for vessels entering and outing of fairways. We also apply the method to a case study in Ningbo port, which gives suggestions for the safety management of vessels in fairways.

Key words: vessel's entering or outing of fairway; port fairway; design of safety distance

2011年2月国务院以宁波-舟山港海域为核心区的浙江海洋经济发展上升为国家战略之后, 宁波-舟山港在全国乃至全球的经济地位变得日益重要^[1]。宁波-舟山港航运业务量增长迅速, 港区内通航的船舶大增, 通航密度大大提高, 高密度的航行船只增加了港口内船舶航行的安全隐患。

2006—2008年随着船只数量的增加, 事故相应上升。宁波海事局意识到安全问题的重要性, 通过加强管理, 降低事故率。2009—2011年事故率虽然有所下降, 但事故仍然存在且造成损失较大。因此从大的社会环境来说还是很有必要研究船舶的安全航行。

表1 2006—2011年宁波-舟山港进出港海船艘次与交通事故数^[2-3]

年份	进出港海船/(艘·次 ⁻¹)	事故件数	沉船艘数	死亡失踪人数/人	直接经济损失/亿元
2006	77.4	81	20	27	0.31
2007	99.4	47	23	28	0.33
2008	106.1	55	27	44	0.66
2009	105.4	52	26	21	0.85
2010	110.3	42	19	41	0.41
2011	137.6	22	9	6	0.14

收稿日期: 2013-07-27

*基金项目: 宁波大学国家级大学生创新创业训练计划(201211646013); 宁波大学智慧港口和航运技术(SZX11067)

作者简介: 王茁宇(1991—), 男, 从事航海技术研究。

1 港区内船舶汇入汇出安全性研究

船舶在港区内的行为基本包括两种, 即船舶的汇入行为和汇出行为。汇入是指出港船舶加入到出港队列中的行为。当船舶需要跨越航道汇入时, 为异侧汇入; 当船舶不需要跨越航道汇入时, 为同侧汇入。汇出是指进港队列中的船舶离开进港队列的行为。当船舶需要跨越航道汇出时, 为异侧汇出; 当船舶不需要跨越航道汇出时, 为同侧汇出^[4]。

船舶在港内航道的汇入汇出的安全性越来越受到许多学者的关注。从国内外的相关研究状况来看, 关于港口公共航道通过能力的研究并不多见。大多数研究基于港口航道, 且主要从航道的一般属性(即航道长度、航道宽度以及航道水深等)和通航船舶的一般属性(航速、船舶尺度等)以及船舶交通流特性(船舶交通量、速度、密度等)来计算航道的通过能力, 学者采用排队论模型和仿真方法等研究航道通过能力, 船舶在航道内汇入汇出的研究大多基于排队理论来研究船舶在航道中的通过能力^[5]。这种研究方式比较宏观, 易于对船舶进行管理, 但研究未考虑具体船舶的操纵行为设计, 以及在汇入汇出的情况下几乎未考虑船舶间的最小横向安全距离、船舶的一般行为与船舶本身追随性指数和旋回性指数的关系。

本文将船舶本身的固有系数与船舶行为相结合, 采用数学方法, 运用船舶运动一阶操纵方程, 讨论船舶旋回性指数 K 、追随性指数 T 与船舶在汇入汇出的情况下的关系, 探求船舶能安全地完成汇入汇出的最小横向安全距离。

2 船舶最小横向安全距离的设计

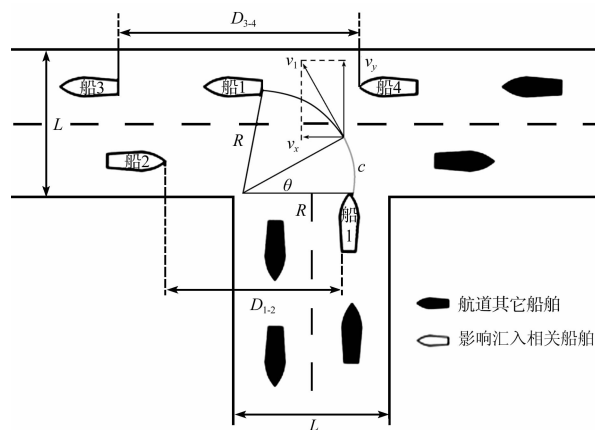
本研究不考虑船舶在航道内所受自然外力因素的影响(如风、流等), 也未考虑实际中其它船舶采取例如追越等行为对于汇入(或汇出)船舶的影响。模型计算中假设航道内船舶有且只有一个进港队列(或出港队列), 计算船舶安全汇入汇出两船之间所需的最小横向安全距离。根据船舶汇入汇出的情况不同, 研究异侧汇入、同侧汇入、

异侧汇出、同侧汇出共4种情形的船舶行为及最小横向安全距离的推算。

为了验证推导模型的准确性, 加入一个算例来具体计算船舶异侧汇出的研究距离。本文提出的两船间最小横向安全距离是运用相对运动的方法得出, 即在一船汇入(或汇出)的过程中, 将另一船视作静止, 汇入(或汇出)船的速度与“静止船”的实际速度进行叠加, 当两船同时到达一点时的极限情况。在实际中, 只要两船的横向距离大于这个最小横向距离时, 两船即可进行汇入汇出。

2.1 异侧汇入

在实际的航行当中, 由于船用计程仪的误差较大, 并不能很好地利用船舶在汇入(或汇出)时所经过的弧长来进行定量的计算, 因此, 需要设计一种更为简单、直观的方法, 来模拟船舶汇入汇出时的情景。图1是船舶进行异侧汇入的行为模拟。



注: R 为汇入船需要转过的半径; θ 为船舶轨迹所形成圆弧的圆心角; c 为船舶所经过的弧长; L 为航道宽度。

图1 异侧汇入

假设研究对象为汇入的船只1, 可将它在任意时刻汇入过程中的速度 v_1 正交分解为水平与竖直两个分速度 v_x 和 v_y , 如图2所示, v_x 与 v_1 的夹角为 φ 。假定船1、船2、船3和船4的速度分别为 v_1, v_2, v_3, v_4 , 船1在从0时刻到 t 时刻走过的纵向位移为 S_y , 横向位移为 S_x ; S_{saf} 为航道内规定两船的安全船距; t 为船舶旋转的时间; T 为船舶从转向起的时间, 为一个关于时间的函数。根据几何关系可知:

$$\theta + \varphi = \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

则 v_x 和 v_y 分别为:

$$v_x = v_1 \cos \varphi = v_1 \sin \theta \quad (2)$$

$$v_y = v_1 \sin \varphi = v_1 \cos \theta \quad (3)$$

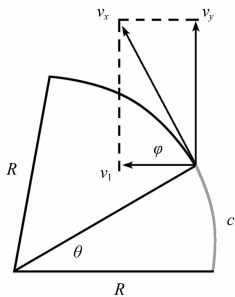


图2 速度分解

根据野本谦作和诺宾的 K 、 T 分析法, 对已导出的船舶运动一阶操纵方程进行数学推导可知: 当时间 t 趋近于无穷大时, 旋回角加速度 $v_\infty = 0$, 旋回角速度 $r = k\delta$ 时, 船舶旋转半径 R 可得^[6]:

$$R = \frac{v}{r} = \frac{v}{k\delta} \quad (4)$$

将上式代入可得:

$$\theta = \frac{c}{R} = \frac{v_1 t}{v_1 / k\delta} = k\delta t \quad (5)$$

因此, S_x , S_y 分别为:

$$S_x = \int_0^t v_x dT = \int_0^t v_1 \sin \theta dT = \int_0^t v_1 \sin \frac{v_1 T}{R} dT = \int_0^t v_1 \sin(k\delta T) dT \quad (6)$$

$$S_y = \int_0^t v_y dT = \int_0^t v_1 \cos \theta dT = \int_0^t v_1 \cos \frac{v_1 T}{R} dT = \int_0^t v_1 \cos(k\delta T) dT \quad (7)$$

如图1所示, 设当 $S_{y1} = \frac{L}{4}$ 时, 船1的纵向走过的距离为 S_{y1} , 船2与船1的横向相对走过的距离为 S_1 , 所用的时间为 t ; 当 $S_{y2} = \frac{3L}{4}$ 时, 船1的纵向走过的距离为 S_{y2} , 船3与船1的横向相对走过的距离为 S_2 , 所用时间为 t' 。则:

$$S_{y1} = \int_0^t v_1 \cos(k\delta T) dT = \frac{L}{4} \quad (8)$$

$$S_1 = \int_0^t [v_1 \sin(k\delta T) + v_2] dT \quad (9)$$

$$S_{y2} = \int_0^{t'} v_1 \cos(k\delta T) dT = \frac{3L}{4} \quad (10)$$

$$S_2 = \int_0^{t'} [v_3 - v_1 \sin(k\delta T)] dT \quad (11)$$

由式(8)可解出 t :

$$t = \frac{c}{k\delta} \arcsin\left(\frac{k\delta L}{4v_1}\right) \quad (12)$$

将 t 代入式(9)中可解出 S_1 :

$$S_1 = \frac{v_2}{k\delta} \arcsin\left(\frac{k\delta L}{4v_1}\right) - \frac{v_1}{k\delta} \cos\left[\arcsin\left(\frac{k\delta L}{4v_1}\right)\right] \quad (13)$$

同理, 通过式(10)解出 t' :

$$t' = \frac{c}{k\delta} \arcsin\left(\frac{3k\delta L}{4v_1}\right) \quad (14)$$

将 t' 代入式(11)中可解出 S_2 :

$$S_2 = \frac{v_3}{k\delta} \arcsin\left(\frac{3k\delta L}{4v_1}\right) - \frac{v_1}{k\delta} \cos\left[\arcsin\left(\frac{3k\delta L}{4v_1}\right)\right] \quad (15)$$

因此, 若使船1能够顺利汇入航道内, 船1与船2的最小横向安全距离须满足:

$$D_{1-2} = S_1 + S_{saf} = \frac{v_2}{k\delta} \arcsin\left(\frac{k\delta L}{4v_1}\right) - \frac{v_1}{k\delta} \cos\left[\arcsin\left(\frac{k\delta L}{4v_1}\right)\right] + S_{saf} \quad (16)$$

同时, 船3与船4的最小横向安全距离需满足:

$$D_{3-4} = S_2 + 2S_{saf} = \frac{v_3}{k\delta} \arcsin\left(\frac{3k\delta L}{4v_1}\right) - \frac{v_1}{k\delta} \cos\left[\arcsin\left(\frac{3k\delta L}{4v_1}\right)\right] + 2S_{saf} \quad (17)$$

2.2 同侧汇入

同侧汇入时, 船1与异侧汇入中所列 S_1 的方程基本相同, 如图3所示, 若使船1能够顺利汇入航道内, 可由式(18)推算船2与船3的最小横向安全距离:

$$D_{2-3} = S_1 + 2S_{saf} = \frac{v_2}{k\delta} \arcsin\left(\frac{k\delta L}{4v_1}\right) - \frac{v_1}{k\delta} \cos\left[\arcsin\left(\frac{k\delta L}{4v_1}\right)\right] + 2S_{saf} \quad (18)$$

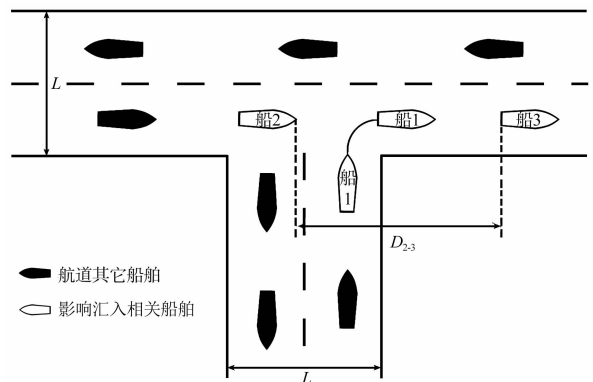


图3 同侧汇入

2.3 异侧汇出

船舶在航道中汇出的模型与汇入模型类似, 船 1 在港内航道汇出时的轨迹见图 4, 船 1、船 2 的速度分别为 v_1 和 v_2 , 航道宽度为 L , 船 1 在从 0 时刻到 t 走过的纵向位移为 S_y , 横向位移为 S_x ; t 为船舶旋转的时间; T 为船舶从转向起的时间, 根据几何关系可知:

$$v_x = v_1 \cos\theta \quad (19)$$

$$v_y = v_1 \sin\theta \quad (20)$$

$$S_x = \int_0^t v_x dT = \int_0^t v_1 \cos\theta dT \quad (21)$$

$$S_y = \int_0^t v_y dT = \int_0^t v_1 \sin\theta dT \quad (22)$$

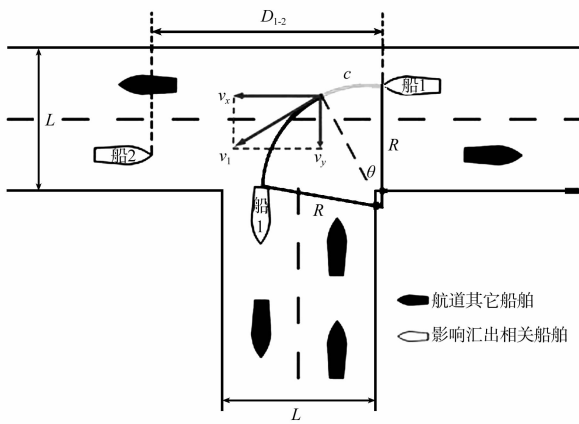


图 4 异侧汇出

当 $S_y = \frac{L}{2}$ 时, 船 1 与船 2 有碰撞危险。因此, 需要计算船 1 与船 2 的船距 D_{1-2} 。由几何关系可知:

$$S_y = \int_0^t v_y dT = \int_0^t v_1 \sin(k\delta T) dT = \frac{L}{2} \quad (23)$$

解出 t 为:

$$t = \frac{1}{k\delta} \arccos\left(1 - \frac{k\delta L}{2v_1}\right) \quad (24)$$

设船 1、船 2 的横向相对走过的距离为 S , 则:

$$S = \int_0^t (v_x + v_2) dT = \int_0^t [v_1 \cos(k\delta T) + v_2] dT \quad (25)$$

将 t 代入式 (25) 中, 得:

$$S = \frac{v_2}{k\delta} \arccos\left(1 - \frac{k\delta L}{2v_1}\right) + \frac{v_1}{k\delta} \sin\left[\arccos\left(1 - \frac{k\delta L}{2v_1}\right)\right] \quad (26)$$

因此, 船 1 与船 2 的船距 D_{1-2} 为:

$$D_{1-2} = S + S_{saf} = \frac{v_2}{k\delta} \arccos\left(1 - \frac{k\delta L}{2v_1}\right) + \frac{v_1}{k\delta} \sin\left[\arccos\left(1 - \frac{k\delta L}{2v_1}\right)\right] + S_{saf} \quad (27)$$

2.4 同侧汇出

如图 5 所示, 由于船舶在现行航道内不与其它船舶发生碰撞危险, 因此, 可直接汇出航道即可。但应注意的是, 船 1 汇出时应该加强与船 2 的沟通, 以免发生碰撞。

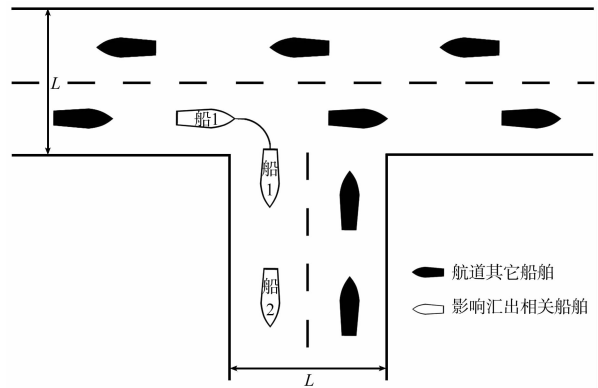


图 5 同侧汇出

3 算例

为检验船舶行为模型的计算能力, 以金塘港锚地为例, 考虑金塘锚地有条件作为船舶汇入汇出的环境以及对一般船舶通过能力, 金塘锚地位于金塘岛西侧, 为船舶引航、待泊、避风锚地。该锚地水深宽裕, 水深 15 ~ 25 m, 底质为泥沙, 锚抓力良好^[7]。该锚地可供万吨级以上船舶锚泊, 船舶汇出的情况较多。

如图 6 所示, 航道宽度 L 为 240 m, 一条长为 100 m 的船 A 欲进入金塘锚地进行锚泊, 其速度 v_1 为 8 kn; 另一侧航道内, 迎面驶来另一船 B, 其速度 v_2 为 12 kn。船 A 的旋回性指数已知 k 为 0.082 s^{-1} , 船 A 转过的舵角为 20° , 船 A 最小安全距离 S_{saf} 为 600 m 左右。

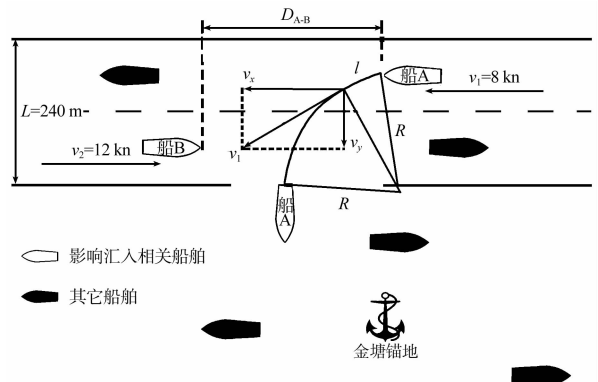


图 6 算例图解

由式(27)得, 船 A、船 B 两船间的距离至少应为 $D_{A-B} = 1\ 044.834\ m$ 。

计算结果表明, 船舶汇入汇出的行为模型能够充分判断船舶能否顺利地汇入汇出航道, 以及船舶汇入汇出行为与航道宽度、两船速度、汇入汇出船的旋回性指数以及其所操舵角的角度等因素的影响。本文在研究时, 忽略了船舶尺度的影响, 并将船舶实际旋回运动视作匀速圆周运动。若考虑船舶尺度以及实际航行时船舶所做旋回半径逐渐减小的减速运动对研究的影响, 计算结果应增大。

4 结论

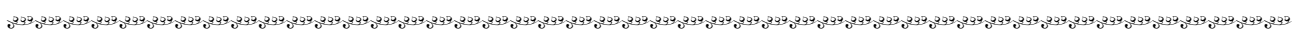
为了能够充分判断船舶能否成功汇入汇出航道, 以船舶运动一阶运动方程为基础, 设计并推导出了船舶在汇入汇出航道时的船舶需要安全通过的最小横向距离公式。该设计在实际航行中能够较为客观地判断船舶是否具有顺利汇入汇出航道的能力, 为船舶在航道内航行安全提供一定理论基础, 并对设计进行实际计算。但并未考虑自然外力因素(如风、流等)、船舶尺度、实际航行时船舶运动状态以及其它船舶可能采取的行为(如追越等)对汇入汇出船舶的影响。在今后的研

究中, 将会逐渐完善此项设计, 使其更贴近实际, 提高其可用和可操作性。

参考文献:

- [1] 王宇飞. 基于海洋经济战略的宁波-舟山港核心区水上交通安全研究[J]. 中国水运, 2013(1): 38-40.
- [2] 宁波海事局. 2006—2011 年水上交通事故评估报告[R]. 宁波: 宁波海事局, 2012.
- [3] 舟山海事局. 2006—2011 年水上交通事故评估报告[R]. 舟山: 舟山海事局, 2012.
- [4] 刘敬贤, 文元桥. 基于船舶行为特征的港口航道通过能力仿真[J]. 大连海事大学学报, 2009(5): 31-37.
- [5] 文元桥, 刘敬贤. 港口公共航道船舶通过能力的计算模型研究[J]. 中国航海, 2010(6): 35-39.
- [6] 洪碧光. 船舶操纵[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2008: 19-22.
- [7] 宁波海事局, 航行指南-锚地-锚地分布情况-金塘锚地 [EB/OL]. [2010-10-13] (2013-06-14) <http://www.nbmsa.gov.cn/portal/section/17/2010/10/13/5e464650f6b34b6b95b0853c5beedc9f/>.
- [8] 田鑫. 特定水域内船舶领域的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2009.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 96 页)

4 结语

1) 对于日调节或无调节枢纽库区沿程设计最低通航水位的计算, 应按入库流量与坝前运行水位相组合, 得出多组回水曲线, 取其下包线作为沿程各点的设计最低通航水位。

2) 通过枢纽成库前后实测水位资料分析, 成库后综合糙率与成库前有所变化, 成库后设计最低通航水位不能直接采用天然河段糙率进行计算。

3) 规划枢纽库区设计最低通航水位计算式较为复杂的, 而运用相似河段成库前后糙率的变化规律来计算是较为合适的, 成果也是可信的。

参考文献:

- [1] JTJ 145-1—2011 内河航运工程水文规范[S].
- [2] GBJ 50139—2004 内河通航标准[S].
- [3] 徐锡荣, 白金霞. 韩江干流航道设计最低通航水位探讨[J]. 水利水电科技进展, 2011(12): 66-68.
- [4] JTJ/T 232—1998 内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程[S].
- [5] 贡炳生, 蔡国正, 张贤明. 论天然河流设计最低通航水位两种确定方法的矛盾与统一[J]. 水运工程, 2009(1): 161-165.

(本文编辑 郭雪珍)