

船舶转向避让紧迫局面距离和碰撞 距离数学模型的研究

毕修颖¹, 史国友², 毕家铭¹, 刘先杰¹, 龚翔¹, 史佳卉²

(1. 广州航海学院 海运学院, 广东 广州 510725;

2. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

摘要:为解决近距离船舶避让行动的关键问题,研究船舶碰撞会遇过程中转向避让过程,结合船舶的操纵性能,对船舶初始旋回半圆要素以及旋回角度的时间特性进行分析;通过相对运动图的分解和逆向逼近算法,得到船舶转向避让时紧迫局面距离和碰撞距离的数学模型,并且给出该模型的应用;模型应用的结果通过算例和模拟试验得到验证。研究表明:提出的两个距离模型可用来指导近距离时船舶避让行动,为研究船舶碰撞危险度和建立船舶自动避让决策系统提供理论依据。同时,根据该模型,分析对于不同船速比和不同方位的目标船,存在碰撞危险时,本船在不同的会遇阶段应该采取相应的避让行动,也给出了近距离船舶避让行动模式。为船舶驾驶员提供近距离船舶碰撞危险预测和船舶避让决策支持。研究成果对船舶航行安全和航行智能化具有重要意义。

关键词:船舶安全;船舶避让;旋回圈;紧迫局面距离;碰撞距离;会遇态势

中图分类号:U676.1

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.01.008

A study of mathematical modeling of close-quarter situation distance and collision distance in altering course collision avoidance

BI Xiuying¹, SHI Guoyou², BI Jiaming¹, LIU Xianjie¹, GONG Xiang¹, SHI Jiahui²

(1. School of Navigation, Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China;

2. School of Navigation, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to solve the key problem of collision avoidance action of close ships, the steering avoidance process during collision encounter is studied, combining with the ship's maneuvering performance, the time characteristics of the ship's initial turning semicircle elements and turning angle are analyzed; through the decomposition of the relative motion diagram and the inverse approximation algorithm, the mathematical model of the close-quarter situation distance and collision distance is obtained when the ship is steering avoidance. The application of the model is also given; the results of the model application are verified by arithmetic examples and simulation tests. The results show that the proposed two distance models can be used to guide the collision avoidance actions of ships at close range, and provide a theoretical basis for the study of collision risk and the establishment of an automatic collision avoidance decision-making system for ships. At the same time, according to the model, the collision avoidance actions that should be taken by the ship at different stages of the encounter are analyzed for the target ships with different speed ratios and different bearings when there is a collision danger, and the close-range ship collision avoidance action mode is also given. It also gives the model of close-range ship collision avoidance action. It provides the ship deck officers with the support of close-range ship collision danger prediction and ship collision avoidance decision-making. The research results are of great significance to ship navigation safety and navigation intelligence.

收稿日期:2023-11-28

基金项目:广东省普通高校青年创新人才类项目(2018WQNCX139)

作者简介:毕修颖(1965—),男,船长,教授,博士,研究方向为航海技术、船舶安全。E-mail: 122020827534@qq.com

引用格式:毕修颖,史国友,毕家铭,等.船舶转向避让紧迫局面距离和碰撞距离数学模型的研究[J].中国航海,2025,48(1):60-68.

BI X Y, SHI G Y, BI J M, et al. A study of mathematical modeling of close-quarter situation distance and collision distance in altering course collision avoidance[J]. Navigation of China, 2025, 48(1): 60-68. (in Chinese)

Key words: ship safety; ship collision avoidance; ship turning circle; close-quarter situation distance; collision distance; encounter situation

船舶会遇可简单地划分为碰撞会遇和非碰撞会遇。在两船碰撞会遇过程中,本船到目标船间的距离包括:安全航行距离、采取避碰行动距离、紧迫局面距离(d_{close})、碰撞距离(d_{collid})和两船接触发生船舶碰撞。其中,紧迫局面距离和碰撞距离非常重要,二者估值的合理性将与近距离避碰行为是否有效息息相关。紧迫局面距离是指单凭一船的行动无法与目标船在最小安全会遇距离上通过的距离。碰撞距离是指单凭一船的行动无法与目标船发生碰撞的距离。《1972年国际海上避碰规则》(简称《规则》)多次提及这两个用语,但均未介绍其大小和具体计算方法。

《规则》规定:直航船发觉单凭让路船的行动不能避免碰撞时,也应采取最有助于避碰的行动^[1]。如水域足够,单用转向可能是避免紧迫局面的最有效行动。船舶仅凭雷达测到他船时,应判定是否形成紧迫局面。与正横前的他船不能避免紧迫局面时,应将航速减到维持航向的最小速度^[1]。

关于碰撞距离,文献[1]给出的估算为1~2 n mile 或约1 n mile。关于船舶紧迫局面距离,文献[1]给出的估算为2 n mile,文献[2]给出的估算为1~2 n mile。文献[3]研究了船舶领域模型,提出最晚施舵时机的方法。文献[4]运用神经网络理论给出船舶避碰的最晚施舵点,也就是紧迫局面距离。文献[5]研究近距离会遇时船舶避碰动态辅助模型,均属于大致的估算结果。

关于船舶避碰的研究成果较多,包括如何确定船舶碰撞危险度^[6]、《规则》的缺陷和改进^[7-8]、多目标的船避碰问题^[9-14]、智能避碰的决策算法^[15-16]、他船采取随机运动或者采取了不协调的避碰行动措施^[17]、如何利用交通繁忙水域他船的自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)的历史数据和他船的实时数据等^[18-19],这些均属于在远距离情况下的船舶避碰行动问题,不涉及船舶紧迫局面距离和碰撞距离。本文将基于船舶避碰几何模型和船舶操纵性计算这两个距离,从而为近距离船舶避碰决策提供依据。

1 紧迫局面距离和碰撞距离模型

1.1 相对运动要素模型

紧迫局面距离和碰撞距离示意图见图1。图1中: O 和 T 分别表示本船和目标船,目标船位于点 T 处的方位为 B ,距离为 d 。

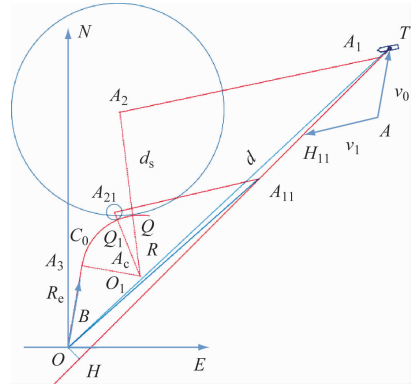


图1 紧迫局面距离和碰撞距离示意
Fig. 1 Diagram of the close-quarter situation distance and collision distance

图1中: OA_1 为紧迫局面距离,是指目标船沿相对运动线 TH 运动到 A_1 点,本船右满舵,在相同的时间内,目标船的真运动轨迹为 A_1A_2 ,本船的真运动轨迹为 OA_3Q , OA_3 为本船的滞距, A_3Q 为本船初始旋回轨迹, A_3Q 与最小安全会遇距离圆相切于 Q 点, A_2Q 为最小安全会遇距离 d_s ; OA_{11} 为碰撞距离,是指目标船运动到 A_{11} 点,本船右满舵,在相同的时间内,目标船的真运动轨迹为 $A_{11}A_{21}$,本船的真运动轨迹为 OA_3Q_1 , $A_{21}Q_1$ 取本船船长的1/2,认为两船发生碰撞。

目标船相对于本船运动的示意图见图2。图2中:小圆表示最小安全会遇距离圆,目标船的相对运动线落在该圆以外才算安全通过,圆心为本船 O ,半径为最小安全会遇距离 d_s ;大圆表示最小安全会遇距离圆向外扩大一个本船初始旋回半径,圆心为本船 O ,半径为 d_s 与本船初始旋回半径 R 之和。

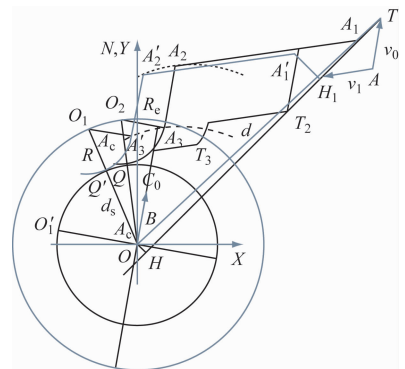


图2 目标船相对于本船运动的示意
Fig. 2 Motion diagram of the target ship relative to the own ship

根据船舶相对运动分解,本船的初始旋回圆中心最终落在该大圆的圆周上。本船不采取避让行动

时,目标船的相对运动轨迹为其相对运动线 TA_1T_2H ,最近会遇距离为 (Distance to the Closest Point of Approach, d_{CPA});本船采取避让行动后,并使目标船在 d_s 通过时,目标船的相对运动轨迹为 $TA_1T_2T_3Q$,其中, TA_1T_2 部分为直线, T_2T_3Q 部分为曲线,并与最小安全会遇距离圆相切,切点为 Q 点,最近会遇距离为 d_s 。

设本船与目标船的速度和航向分别为 v_0, C_0 和 v_1, C_1 。在平面直角坐标系 OXY 中,可求出目标船相对于本船的相对速度和相对航向,分别记为 v_{01}, C_{01} ,还可求出 d_{CPA} 和到达最近会遇处的时间 (Time to the Closest Point of Approach, t_{CPA})。

d_{CPA} 有正负之分,当本船位于目标船的相对运动线的左侧时或者本船相对于目标船的航向 ($C_{01} - 180^\circ$) 大于目标船方位 (B) 时, d_{CPA} 为正,反之, d_{CPA} 为负; $d_{CPA} = 0$ 说明目标船的相对运动线经过本船中心。目标船 T 的 $d_{CPA} < 0$ 如图 2 所示。

1.2 船舶紧迫局面距离和碰撞距离模型

船舶避碰实践经验证明,船舶旋回圈的前 1/3 部分最具实际意义。于是,定义船舶初始旋回半圆和船舶初始旋回半圆滞距。

定义 1: 船舶初始旋回半圆是指船舶满舵后,航迹线向施舵一侧改变,根据船舶旋回轨迹的前 1/3 拟合得到的初始 1/3 圆。

定义 2: 船舶初始旋回半圆滞距 (R_e) 是指船舶满舵后先保持一段直线航行,从施舵点到船舶旋回半圆弧的起点之间的距离。

本船旋回圈见图 3。图 3 中: 船舶在 A_2 点右满舵, A_2A_3 直线段为船舶旋回半圆滞距。半圆弧 A_3A_4 是本次操船条件下的船舶初始旋回半圆。滞距的方向为该直线的方向,垂直于旋回半圆的初始半径 O_1A_3 ,即 $A_2A_3 \perp O_1A_3$ 。滞距的方向为船舶航迹线的方向,由于有风流压差的存在,有时并不等于船舶的航向。

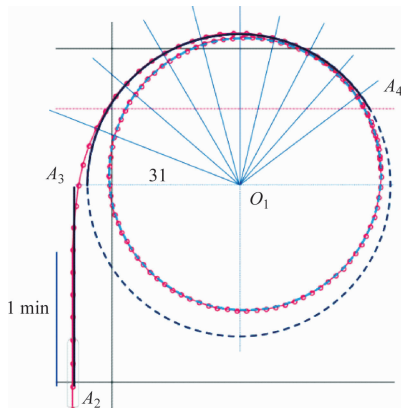


图 3 本船旋回圈

Fig. 3 Own ship turning circle

按下列 4 个步骤求转向避让时的船舶紧迫局面距离。

1) 本船以海上定速做右满舵旋回,得到旋回圈如图 3 所示,开始用舵时间定义为 $t = 0$,可求出滞距 R_e 、初始旋回半径 R 和本船旋回转向角度 A_c 对应的时间 t 列表。

2) 求 A'_1 的坐标 (x, y) 。从某一时刻 t_1 起,例如 $t_1 = 2 \text{ min}$,就对应一个船舶旋回转向角,例如 $A_{c1} = 20^\circ$ 如图 2 所示。从本船左正横 OO'_1 方向起,向艏向度量角度 $\angle O'_1OO_1 = A_{c1}$,直线 OO_1 与最小安全距离圈交于 Q' 点;从 Q' 点起,沿着本船旋回运动的相反方向 $Q'A'_3 A'_2$,度量船舶旋回角 A_{c1} 对应的 $Q'A'_3$ 弧和 R_e ,可得到本船初始用舵点 A'_2 ;再从 A'_2 点起,沿着目标船运动的反方向 $A'_2 A'_1$,度量目标船的 $v_1 t$,可得到初始用舵时目标船的相对位置 A'_1 点,于是,可求出 A'_1 点坐标 (x, y) 为

$$\begin{cases} x = (d_s + R) \sin\left(C_0 + A_c - \frac{\pi}{2}\right) + R \sin\left(C_0 + \frac{\pi}{2}\right) + R_e \sin C_0 + v_1 t \sin(C_1 + \pi) \\ y = (d_s + R) \cos\left(C_0 + A_c - \frac{\pi}{2}\right) + R \cos\left(C_0 + \frac{\pi}{2}\right) + R_e \cos C_0 + v_1 t \cos(C_1 + \pi) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: C_0 为本船的航向; t 为本船右满舵后,旋回转向 A_c 角度所用的时间。

3) T 代表目标船, TH 为目标船的相对运动轨迹线, OH 为最近会遇距离 d_{CPA} ,该值在图 2 上为负值, TH 直线方程为

$$x \cos(C_{01} + \pi) - y \sin(C_{01} + \pi) + d_{CPA} = 0 \quad (2)$$

A'_1 到直线 TH 距离 d 为

$$d = x \cos(C_{01} + \pi) - y \sin(C_{01} + \pi) + d_{CPA} \quad (3)$$

4) 目标船沿着相对运动线移动,目标船的相对位置 A'_1 点应该一直保持在该相对运动线 TH 上,如果 A'_1 点不在 TH 线上,则令 $t_1 = t_1 + \Delta t$,重复前面步骤 2) 和步骤 3) 进行迭代计算。其中, Δt 为时间增量,当 $|d|$ 小于某一小值 ε 时则认为该点已经在目标船的相对运动线 TH 上了,于是得到 A_1 点,结束迭代。 OA_1 就是紧迫局面距离 d_{close} 见式(4),此时 t_1 时刻对应的旋回角度就是船舶最大转向角度 A_c ,也就是图 2 中的 $\angle O'_1OO_2$ 。

$$d_{close} = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (4)$$

迭代计算求船舶紧迫局面距离的流程见图 4。

求船舶碰撞距离的步骤与前面相似,只是把式(1)中的 d_s 用 0.5 倍的船长 ($0.5L$) 替代,重新进行

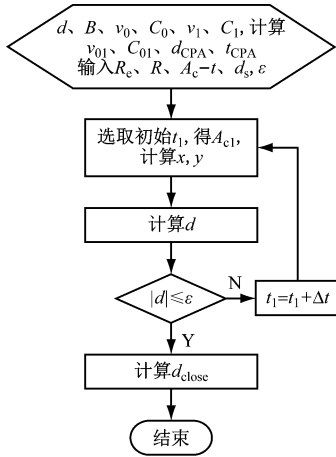


图4 求船舶紧迫局面距离的流程

Fig.4 Flow chart to find ship's close-quarter situation distance

步骤2)~步骤4)的计算,这时从式(4)得到的距离就是船舶碰撞距离。只有在 d_{CPA} 小于某一值时才存在船舶碰撞距离。

2 模型的应用

选择不同船速和不同方位的目标船,使其最近会遇距离 $d_{CPA} = 0$ 研究模型的应用。本文选择3个船速比(目标船速度除以本船速度)的目标船,分别为 $v_1/v_0 = 0.8, 1.0, 1.2$, 确定模型的适用范围。

选择模拟船的长度 $L = 190$ m, 速度和航向分别为 $v_0 = 12.4$ kn 和 $C_0 = 0^\circ$, 到目标船的距离为 $d = 5$ n mile。

参考图3本船右满舵的旋回圈,考虑到相对运动分解中本船的反向运动,让该旋回圈平面旋转 $C_0 + 180^\circ$, 对应于图2中的本船的反向轨迹 A_2A_3Q 。在该旋回圈中对本船避碰有用的操纵数据为初始旋回半圆(O_1)和此半圆对应的船舶滞距(A_2A_3)。根据本船的速度 $v_0 = 12.4$ kn, 本船1 min的航行距离为0.207 n mile, 求得本船的滞距 $R_e = 0.31$ n mile, 本船的初始旋回半径 $R = 0.245$ n mile。再从该初始半圆的圆心(O_1)出发, 画出经过整0.5 min船舶位置的射线, 每条射线与 O_1A_3 的夹角都代表船舶旋回的转向角度, 于是得到本船旋回转向角度 A_c 对应的时间 t 见表1。

本船旋回角度 A_c 对应的时间 t 示意图5, 可从图5中提取船舶旋回操纵的特征值, 为船舶旋回角度的时间特性。根据航行环境, 取最小安全会遇距离 $d_s = 0.5$ n mile, 于是, 给定 v_1 和 $d_{CPA} = 0$, 可求出目标船位于不同方位(B)处的目标船的航向(C_1)、目标船相对于本船的速度(v_{01})、相对航向(C_{01})、 t_{CPA} 、 d_{close} 、 d_{collid} 和 A_c 等参数。

表1 本船转向角度 A_c 对应的时间 t

Tab.1 The ship's turning angle A_c corresponding to its time t

序号	时间 t/min	角度 $A_c/(^\circ)$
1	1.5	0
2	2.0	20
3	2.5	40
4	3.0	58
5	3.5	74
6	4.0	90
7	4.5	104
8	5.0	118
9	5.5	131
10	6.0	144

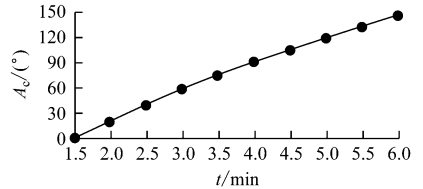


图5 本船旋回角度 A_c 对应的时间 t 示意

Fig.5 Schematic diagram of time corresponding to the ship's turning angle A_c

2.1 避让慢速船

设目标船的速度为 $v_1 = 9.9$ kn, 这时的船速比 $k_v = 0.8$, d_{CPA} 取0, 可以求出目标船位于不同方位(B)处的本船的 d_{close} 、本船的 d_{collid} 和与其对应的最大旋回转向角度等参数见表2。

对应于表2的紧迫局面距离和碰撞距离随目标船的方位变化示意图6。由图6可知: $d_{close} < 2$ n mile, $d_{collid} = 0.40 \sim 0.84$ n mile, 与文献[1]的估算结果一致。

本船在避让慢速船的情况下, 当目标船的舷角(Q)超过一定值 $\sin^{-1}(k_v)$ 时, 已经不存在碰撞会遇的局面了, 在本例中 Q 为 53.1° , 于是, 目标船方位的值取到 50° 如表2所示。避让慢速船时最大舷角示意图7。对于本例中的目标船方位超过 50° 时, 本船向右转向避让的角度已经超过 90° , 所用的时间也明显加长。这时, 向左转向避让更有利, 特别是当 $d_{CPA} < 0$ 时, 于是得到避让慢速船时舷角范围是舷角 $Q < \sin^{-1}(k_v)$ 。

2.2 避让等速船

设目标船的速度为 $v_1 = 12.4$ kn, 这时的船速比 $k_v = 1$, d_{CPA} 最近会遇距离取0, 可求出目标船位于不

表2 不同方位目标船的 d_{close} 和 d_{collid} , $k_v = 0.8$ Tab.2 Speed ratio $k_v = 0.8$, d_{close} and d_{collid} of a target ship in different bearings

$B/(\circ)$	5	10	20	30	40	50
$d_{close}/n\ mile$	1.58	1.58	1.56	1.46	1.32	1.07
$d_{collid}/n\ mile$	0.84	0.83	0.78	0.70	0.58	0.40
$A_{C1}/(\circ)$	72.4	74.0	78.8	82.0	86.8	91.4
$A_{C2}/(\circ)$	32	32	32	32	32	31
$C_1/(\circ)$	191.3	202.6	225.4	248.8	273.6	303.6
t_{CPA}/min	13.5	13.7	14.6	16.3	19.5	27.9
v_{01}/kn	22.2	21.9	20.6	18.5	15.4	10.8
$C_{01}/(\circ)$	185	190	200	210	220	230

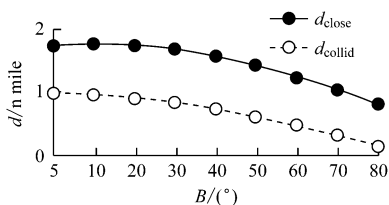
注: B 为目标船的方位; A_{C1} 和 A_{C2} 为本船在紧迫局面距离处和在碰撞距离处采取行动后的最大转向角; v_{01} 和 C_{01} 为目标船的相对速度和相对航向。

同方位(B)处的紧迫局面距离、碰撞距离和与其对应的最大旋回转向角度等参数见表3。

表3 不同方位目标船的 d_{close} 和 d_{collid} , $k_v = 1.0$ Tab.3 Speed ratio $k_v = 1.0$, d_{close} and d_{collid} of a target ship in different bearings

$B/(\circ)$	5	10	20	30	40	50	60	70	80
$d_{close}/n\ mile$	1.73	1.75	1.72	1.67	1.56	1.42	1.23	1.01	0.80
$d_{collid}/n\ mile$	0.96	0.95	0.89	0.81	0.72	0.59	0.45	0.29	0.13
$A_{C1}/(\circ)$	72.4	75.6	78.8	83.6	86.8	91.4	95.6	99.8	106.8
$A_{C2}/(\circ)$	34	34	33	32	32	31	30	28	25
$C_1/(\circ)$	190	200	220	240	260	280	300	320	340
t_{CPA}/min	12.1	12.3	12.9	14.0	15.8	18.8	24.2	35.4	69.7
v_{01}/kn	24.7	24.4	23.3	21.5	19.0	15.9	12.4	8.5	4.3
$C_{01}/(\circ)$	185	190	200	210	220	230	240	250	260

对应于表3的船舶 d_{close} 和 d_{collid} 随目标船的方位变化示意图8。由图8可知: $d_{close} < 2\ n\ mile$, $d_{collid} = 0.13 \sim 0.96\ n\ mile$, 与文献[1]对船舶紧迫局面距离的估计一致。

图8 不同方位目标船的 d_{close} 和 d_{collid} , $k_v = 1.0$ Fig.8 The ship's close-quarter situation distance and collision distance with relative bearings, $k_v = 1.0$

本船在避让等速船的情况下,当目标船的 Q 超

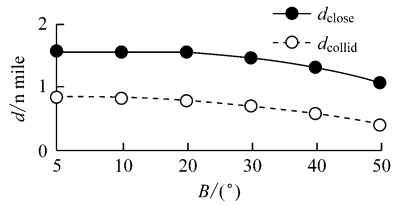
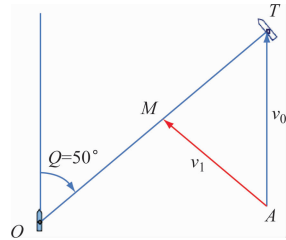
图6 不同方位目标船的 d_{close} 和 d_{collid} , $k_v = 0.8$ Fig.6 The ship's close-quarter situation distance and collision distance with relative bearings, $k_v = 0.8$ 

图7 避让慢速船时最大舷角示意

Fig.7 Schematic diagram of the biggest relative bearing when avoiding a slower speed ship

过一定值时,相对速度明显减小见图9,当相对速度减小到本船速度的 $1/2$ 时,可算出目标船的舷角为 $Q = \pi/2 - \sin^{-1}(0.25)$, 相当于 75.5° , 不利于本船的避碰行动^[20-22]。当目标船的 Q 大于 70° 时,向右转向的角度将超过 100° 如图3所示,相对速度减小到本船速度的 68.5% , 避让的时间也明显变长,达到 $35.4\ min$ 。于是便得到避让等速船时舷角的范围是目标船的 Q 小于 70° 。

2.3 避让快速船

设目标船的速度为 $v_1 = 14.9\ kn$, 这时的船速比为 $k_v = 1.2$, d_{CPA} 取 0 , 可求出目标船位于不同方位(B)处的 d_{close} 、 d_{collid} 和与其对应的最大旋回转向角度等参数见表4。

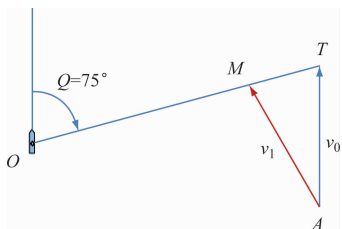


图9 避让等速船时大舷角情况示意

Fig.9 Schematic diagram of a big relative bearing when avoiding a same speed ship

表4 不同方位目标船的 d_{close} 和 d_{collid} , $k_V = 1.2$

Tab.4 Speed ratio $k_V = 1.2$, d_{close} and d_{collid} of a target ship in different bearings

$B/(\circ)$	5	10	20	30	40	50	60	70	80
$d_{close}/n\ mile$	1.87	1.88	1.88	1.82	1.76	1.65	1.52	1.38	1.26
$d_{collid}/n\ mile$	1.06	1.05	1.00	0.94	0.84	0.73	0.61	0.49	0.36
$A_{C1}/(\circ)$	72.4	74.0	78.8	82.0	86.8	91.4	95.6	99.8	105.0
$A_{C2}/(\circ)$	34	34	33	34	32	31	30	29	25
$C_1/(\circ)$	189	198	216	235	252	270	286	301	315
t_{CPA}/min	11.0	11.1	11.6	12.4	13.6	15.4	18.1	22.2	28.1
v_{01}/kn	27.2	27.0	25.9	24.3	22.1	19.5	16.5	13.5	10.7
$C_{01}/(\circ)$	185	190	200	210	220	230	240	250	260

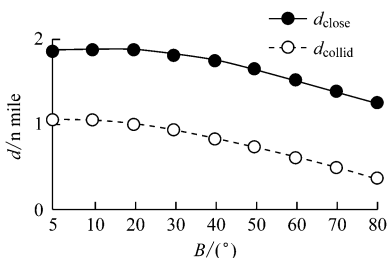


图10 不同方位目标船的 d_{close} 和 d_{collid} , $k_V = 1.2$

Fig.10 The ship's close quarter situation distance and collision distance with relative bearings, $k_V = 1.2$

本船避让快速船时总是采取向右转向过目标艏部的做法,大舷角情况示意见图11。由于目标船的速度较快,这种情况下不要试图向左转向,通过目标船艏部,在目标船的舷角大于 80° 时,可向左旋回一周等待目标船过去。

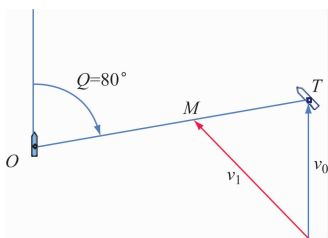


图11 避让快速船时大舷角情况示意

Fig.11 Schematic diagram of a big relative bearing when avoiding a faster speed ship

对应于表4的船舶 d_{close} 和 d_{collid} 随目标船的方位变化情况示意见图10。图10中: $d_{close} < 2\ n\ mile$, $d_{collid} = 0.36 \sim 1.06\ n\ mile$; 当目标船的速度等于 $18\ kn$, 方位 $B = 5^\circ$ 时, 船舶紧迫局面距离 $d_{close} = 2.05\ n\ mile > 2\ n\ mile$, $d_{collid} = 1.19\ n\ mile$, 因此, 不能笼统地说船舶紧迫局面距离都小于 $2\ n\ mile$, 也不能说船舶碰撞距离都在 $1 \sim 2\ n\ mile$ 之间。

2.4 直航船行动时机

由图6、图8和图10可知: 随着目标船舷角的增大, 本船的 d_{close} 和 d_{collid} 均变小; 随着目标船速度增大, 本船速度保持不变时, 本船的 d_{close} 和 d_{collid} 增大, 说明目标船的速度越快, 本船避让的时机越提前, 相应地本船的最佳避碰时机也提前; 本船的 d_{close} 比 d_{collid} 提前约 $0.8\ n\ mile$, 可以确定该段距离内的时间差约为 $2\ min$, 因此, 紧迫局面时, 要求船长必须毫不犹豫地采取大幅度的避碰行动。

直航船“可独自采取操纵行动”的时机就是本直航船的紧迫局面距离, 直航船“采取最有助于避碰行动”的时机就是本直航船的碰撞距离。关于直航船采取的避碰行动时机, 航海人员都抱怨特别困难和不可确定, 如今利用本文提出的数学模型就可以用数值把他们确定下来了。

3 模拟试验

3.1 让路船的行动

根据表2给出的计算结果, 选择本船为让路船, 本船的航向和速度分别为 0° 和 $12.4\ kn$, 长度为 $190\ m$ 。目标船的速度取 $9.9\ kn$, 这时的船速比为 0.8 , 选取本船到目标船的距离为 $5\ n\ mile$, 目标船的 d_{CPA} 取 0 。在大型船舶操纵模拟器上做一组模拟试验, 对应于不同的目标船方位角, 在目标船到达 d_{close}

处右满舵转向避让目标船,模拟 d_s 的大小, d_{close} 和 d_{collid} 模拟试验结果见表5。

表5 d_{close} 和 d_{collid} 模拟试验结果

Tab.5 Simulation results of d_{close} and d_{collid}

$B/(\circ)$	5	10	20	30	40	50
$d_{s1}/n\ mile$	0.51	0.50	0.51	0.51	0.52	0.51
$d_{s2}/n\ mile$	0.06	0.04	0.08	0.04	0.02	0.02
$d_{close}/n\ mile$	1.58	1.58	1.56	1.46	1.32	1.07
$d_{collid}/n\ mile$	0.84	0.83	0.78	0.70	0.58	0.40
$A_{c1}/(\circ)$	72.4	74.0	78.8	82.0	86.8	91.4
$A_{c2}/(\circ)$	32	32	32	32	32	31

注: d_{s1} 和 d_{s2} 分别为本船在紧迫局面距离处和碰撞距离处采取行动后的最小通过距离。

由表5可知: d_{s1} 均为 0.5 n mile 通过目标船,说明 d_{close} 模型符合实际情况。

同样,在目标船到达 d_{collid} 处右满舵避让目标船,模拟是否发生碰撞或测量 d_{s2} , 结果是均几乎发生碰撞,说明 d_{collid} 模型符合实际情况。

本让路船在紧迫局面距离处采取避碰行动的模拟试验图见图12。图12中:目标船方位 $B = 30^\circ$, 目标船的航向 $C_1 = 248.8^\circ$, 本让路船的 $d_{close} = 1.46$ n mile。直航船保向保速,本让路船在紧迫局面距离处右满舵后,两船通过的距离为 0.5 n mile, 是设定的最小安全会遇距离,说明模型与实际避碰情况符合。

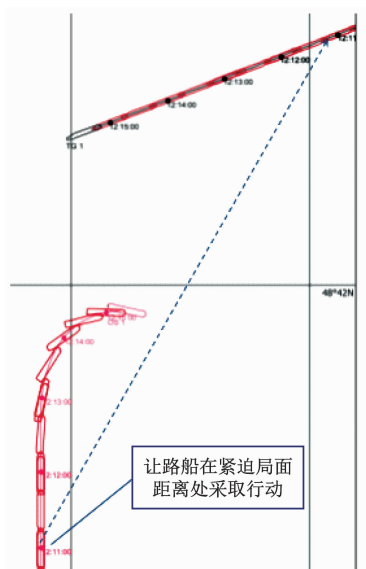


图12 让路船在紧迫局面距离处采取行动

Fig.12 Action taken to avoid collision by the give way ship

3.2 直航船的行动

选择本船为直航船,本船的航向和速度分别为 285.4° 和 12.4 kn, 长度 190 m, 目标船的航向和速

度分别取 0° 和 14.9 kn, 这时的船速比为 1.2, 目标船的距离取 5 n mile, 相对方位为 -30° 。

取最小安全会遇距离 0.5 n mile, 可以求出本船的 d_{close} 和 d_{collid} 分别为 1.54 n mile 和 0.97 n mile。同样可以确定目标船位于其他方位时,本船的 d_{close} 和 d_{collid} 见表6。

表6 直航船的 d_{close} 和 d_{collid}

Tab.6 The d_{close} and d_{collid} of the stand-on ship

$RB/(\circ)$	-50	-40	-30	-20	-10
$d_{close}/n\ mile$	1.23	1.39	1.54	1.68	1.78
$d_{collid}/n\ mile$	0.8	0.88	0.97	1.02	1.06
$A_{c1}/(\circ)$	40	47.2	54.5	61.2	66
$A_{c2}/(\circ)$	41.8	38.0	37.0	36.0	35.0
t_{CPA}/min	15.4	13.6	12.4	11.6	11.1

本例中,本直航船“独自采取操纵行动”的时机为 $d = 1.23 \sim 1.78$ n mile。

让路船可能同时或随后采取的避碰行动与本船的避碰行动并不冲突,但确实给直航船带来大幅度避让和强大的心理阴影。因此,要求让路船提早行动,不给直航船心理压力和更多的研判时间,使其不至于陷入紧迫局面。

本直航船在碰撞距离处采取避碰行动的模拟试验图见图13。图13中:本直航船的碰撞距离为 0.97 n mile,属于直航船采取最有助于避碰的行动。让路船保向保速,本直航船在其碰撞距离处右满舵后,两船的通过距离为 0.05 n mile,属于几乎碰撞的情况,说明模型符合实际情况。

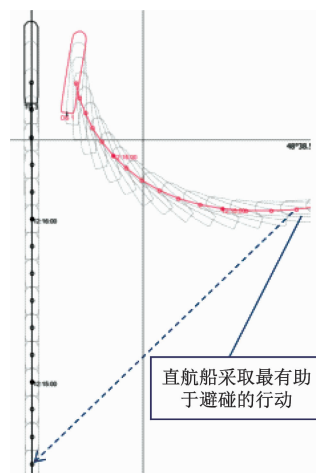


图13 直航船采取最有助于避碰的行动

Fig.13 Action taken by the stand-on ship as will best aid to avoid collision

4 结束语

船舶转向避让时紧迫局面距离和碰撞距离模型

是近距离船舶避碰研究与实践的基础,由此可以看清近距离船舶避碰行为模式^[23],综合考虑船舶会遇过程,其避碰行动模式有^[24-25]:让路船在最佳避碰时机处“让路”;直航船在紧迫局面距离处“独操”;两船在碰撞距离处采取“最有助于避碰的行动”。如果两船都不采取避碰行动发生碰撞,或者让路船单方拒不采取行动造成几乎发生碰撞的局面,则值班驾驶员应该接受严格的管控。

受太多的具有模糊特征的观念等的约束,能突破船舶避碰理论总是很难,因为没有来自理论上的想象力解开这类谜团,一直处于困惑的状态,认为船舶 d_{close} 和 d_{collid} 很难得到数值解。研究发现,会遇船舶之间的 d_{close} 或 d_{collid} 并不总是相同的,也就是说,会遇的两船并不总是同时进入紧迫局面状态,特别是当两船的操纵性能相差较大时更容易出现这种现象,因此,需重新考量紧迫局面的含义及其对近距离船舶操纵避碰的指导。论文的结果还需要实船检验,今后将开发实船避碰操纵图。

参 考 文 献

[1] 吴兆麟,赵月林. 船舶避碰与值班[M]. 大连:大连海事大学出版社,2023.
WU Z L, ZHAO Y L. Ship collision avoidance and watch-keeping [M]. Dalian: Dalian Maritime University,2023. (in Chinese)

[2] 李士雷. 船舶避碰的最晚施舵点研究[D]. 大连:大连海事大学,2022.
LI S L. Research on the latest minute action for ship collision avoidance [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022. (in Chinese)

[3] 闫成勇. 基于速度障碍法的船舶避碰决策研究[D]. 大连:大连海事大学,2021.
YAN C Y. Research on ship collision avoidance based on velocity obstacles [D]. Dalian: Dalian Maritime University,2021. (in Chinese)

[4] 管致莹. 基于组合模糊推理的船舶碰撞危险预警研究[D]. 长春:吉林大学,2021.
GUAN Z Y. Research on early warning of ship collision danger based on composition fuzzy inference [D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)

[5] 王欣,刘正江,李铁山. 近距离会遇时船舶避碰动态辅助模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021,42(9): 1256-1261.
WANG X, LIU Z J, LI T S. Collision avoidance dynamic support model for ships meeting at a close range [J]. Journal of Harbin Engineering University,2021,42(9): 1256-1261. (in Chinese)

[6] MEI J H, ARSHAD M R, TANG J R. Collision risk assessment based artificial potential field approach for

multi-ships avoidance[J]. Indian Journal of Geo-marine Sciences, 2019, 48(7SI):1037-1047.

[7] 张铎. 从国际海上避碰规则的渊源看其存在的缺陷[J]. 世界海运,2018,41(1):1-4.
ZHANG D. From the origin of international collision avoidance rules at sea to see its existing defects [J]. World Shipping, 2018, 41(1): 1-4. (in Chinese)

[8] 张铎. 避碰规则中“让路直航规则”的缺陷[J]. 世界海运,2018,41(8):1-4.
ZHANG D. The defects of "give way for the direct rule" in collision avoidance rules[J]. World Shipping, 2018, 41(8):1-4. (in Chinese)

[9] 孙亮. 多船会遇态势下船舶避碰路径规划研究[D]. 大连:大连海事大学,2022.
SUN L. Research on ship collision avoidance path planning under the situation of multi-ship encounter [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022. (in Chinese)

[10] 徐言民,张云霄,沈杰,等. 基于模糊集合理论的船舶碰撞危险度模型[J]. 舰船科学技术,2021,43(7): 82-87.
XU Y M, ZHANG Y L, SHEN J, et al. A model of ship collision risk index based on fuzzy set theory [J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(7): 82-87. (in Chinese)

[11] HUANG Y M, CHEN L Y, CHEN P F. Ship collision avoidance methods; state-of-the-art[J]. Safety Science, 2020, 121: 451-473.

[12] WOO J, KIM N. Collision avoidance for an unmanned surface vehicle using deep reinforcement learning[J]. Ocean Engineering,2020,199:107001.

[13] HUANG Y M, CHEN L Y, VAN G P. Generalized velocity obstacle algorithm for preventing ship collisions at sea[J]. Ocean Engineering,2019,173:142-156.

[14] ZHAO L, ROH M I. COLREGs-compliant multi-ship collision avoidance based on deep reinforcement learning [J]. Ocean Engineering, 2019,191:106436.

[15] 沈海青. 基于强化学习的无人船舶避碰导航及控制[D]. 大连:大连海事大学,2018.
SHEN H Q. Collision avoidance navigation and control for unmanned marine vessels based on reinforcement learning [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018. (in Chinese)

[16] 李丽娜,陈国权,杨凌波,等. 船舶拟人智能避碰决策算法测试及应用[J]. 中国航海, 2022,45(1):1-7.
LI L N, CHEN G Q, YANG L B, et al. Test and application of personifying intelligent decision-making algorithm for vessel collision avoidance [J]. Navigation of China, 2022,45(1):1-7. (in Chinese)

[17] HU L, NAEEM W, RAJABALLY E, et al. A multiobjective optimization approach for COLREGs-compliant path planning of autonomous surface vehicles

- verified on networked bridge simulators [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020,21(3): 1167-1179.
- [18] CHEN P F, HUANG Y M, PAPANIMITRIOU E, et al. An improved time discretized non-linear velocity obstacle method for multi-ship encounter detection [J]. Ocean Engineering, 2020,196:106718.
- [19] LAZAROWSKA A. Verification of ship's trajectory planning algorithms using real navigational data [J]. TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation,2019,13(3):559-564.
- [20] 毕修颖,赵士涛,龚翔,等. 船舶避碰双让理念行动模式研究[J]. 广州航海学院学报, 2023,31(1):1-7.
- BI X Y, ZHAO S T, GONG X, et al. Research on action mode of double ship collision avoidance [J]. Journal of Guangzhou Maritime University,2023,31(1): 1-7. (in Chinese)
- [21] 杨英超. 从碰撞事故中谈“直航船”的行动[J]. 中国海事,2020(7):34-36.
- YANG Y C. Discussion on the action of "stand-on vessel" on the view of collision accident [J]. China Maritime Safety,2020(7): 34-36. (in Chinese)
- [22] 倪生科. 基于规则的船舶智能避碰决策关键技术研究[D]. 大连:大连海事大学,2020.
- NI S K. Study on key technologies for ship intelligent decision making for collision avoidance based on rules [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020. (in Chinese)
- [23] 毕修颖. 近距离船舶避碰行动模式研究[J]. 中国海事, 2023,10: 24-28.
- BI X Y. Research on the models of ship collision avoidance action at close-range [J]. China Maritime Safety, 2023,10: 24-28. (in Chinese)
- [24] 毕修颖,石云鹏. 直航船采取最有助于避碰行动时机研究[J]. 广州航海学院学报, 2024,32(2): 1-6.
- BI X Y, SHI Y P. Research on the opportunity of action taking best aid to avoid collision by stand-on vessel[J]. Journal of Guangzhou Maritime University, 2024, 32(2): 1-6. (in Chinese)
- [25] 毕修颖,马文耀,贾传荧. 船舶碰撞危险度及避碰决策模型[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2024: 127-132.
- BI X Y, MA W Y, JIA C Y. Ship collision risk index and collision avoidance decision-making models [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2024: 127-132. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第33页)
- CHEN C R, LI G D, LI F S. The risk threshold of ship collision in different waters [J]. China Navigation, 2020,43(4): 27-32. (in Chinese)
- [3] CHENG Z Y, LI Y, WU B. Early warning method and model of inland ship collision risk based on coordinated collision-avoidance actions [J]. Journal of Advanced Transportation, 2020,2020:1-14.
- [4] 胥文,胡江强,尹建川,等. 基于模糊理论的船舶复合碰撞危险度计算[J]. 舰船科学技术,2017,39(7): 78-84.
- XU W, HU J Q, YIN J C, et al. Composite evaluation of ship collision risk index based on fuzzy theory [J]. Ship Science and Technology, 2017,39(7): 78-84. (in Chinese)
- [5] SZLAPCZYNSKI R, SZLAPCZYNSKA J. A ship domain-based model of collision risk for near-miss detection and collision alert systems [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021,214:1-21.
- [6] 江行,贾志霏,郑海涛. 基于四元船舶领域和避碰规则的碰撞危险度模型[J]. 船舶工程,2020,42(增刊1):370-375.
- JIANG X, JIA Z P, ZHENG H T. Collision risk model based on quaternion ship domain and preventing collisions regulations [J]. Ship Engineering, 2020, 42(Suppl.1): 370-375. (in Chinese)
- [7] LIU D, WANG X, CAI Y, et al. A novel framework of real-time regional collision risk prediction based on the RNN approach [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020,8(3):224.
- [8] ABEBE M, NOH Y. Developing a ship collision risk index estimation model based on dempster-shafer theory [J]. Applied Ocean Research, 2021, 113: 102735-102746.
- [9] ZHANG W B, GOERLANDT F. An advanced method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data[J]. Ocean Engineering, 2016,124(15):141-156.
- [10] LIU Z H, WU Z L, ZHENG Z Y. Modelling ship density using a molecular dynamics approach [J]. The Journal of Navigation, 2020,73(3):628-645.
- [11] MOU J M. Study on collision avoidance in busy waterways by using AIS data [J]. Ocean Engineering, 2010,37(5):483-490.
- [12] 郭世泽,陆哲明. 复杂网络基础理论[M]. 北京:科学出版社,2012:34-36.
- GUO S Z, LU Z M. Basic theory of complex networks [M]. Beijing: Science Press, 2012: 34-36. (in Chinese)
- [13] LIU Z H, WU Z L, ZHENG Z Y. A cooperative game approach for assessing the collision risk in multi-vessel encountering [J]. Ocean Engineering, 2019,187:1-12.
- [14] LIU Z H, WU Z L, ZHENG Z Y. A novel framework for regional collision risk identification based on AIS data [J]. Applied Ocean Research, 2019,89:261-272.
- [15] FUJII Y, TANAKA K. Traffic capacity [J]. Journal of Navigation,1971,24(4):543-552.