

不同船速比对改向避让效果的影响

王兴华^{1,2}, 陈国权¹, 李丽娜^{1,2}, 李国定^{1,2}

(1. 集美大学航海学院, 福建 厦门 361021;

2. 集美大学船舶辅助导航工程国家地方联合研究中心, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了研究船速比在船舶驾驶员制定改向避让决策时的影响, 运用船舶相对运动几何原理建立船速比与改向避让施舵点、改向幅度之间的数学模型, 分析不同目标交汇特征下船速比($K \geq 1$)分别对施舵点和改向幅度的影响。仿真实验结果表明, 船速比($K \geq 1.5$)较大的情况下, 本船按《国际海上避碰规则》(以下简称规则)改向避让的效果不显著, 对左正横附近来船, 可能产生安全隐患。

[关键词] 改向避让; 船速比; 国际海上避碰规则; PIDVCA (personifying intelligent decision making for vessel vessel collision avoidance)

[中图分类号] U 676.1

The Effect of Different Ship Speed Ratios on Collision Avoidance Behavior

WANG Xinghua^{1,2}, CHEN Guoquan¹, LI Lina^{1,2}, LI Guoding^{1,2}

(1. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. National-local Joint Engineering Research Center for AtoN, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to study the influence of ship speed ratios on making course changing decisions for collision avoidance by deck officers, the relative motion geometry of ships is applied to establish the relational model of the speed ratio with rudder point and alteration range, and analyse the effect of speed ratio($K \geq 1$) on the rudder point and alteration range under different target encounter characteristics. The simulation results show that if the ship speed ratio is large ($K \geq 1.5$) and the ship changes course to avoid collision according to the existing «International Regulations for Preventing Collision at sea» (short for COLREGS), the avoidance effect is not significant, and there may be a safety hazard to ships coming from the left beam.

Keywords: course changing decision for collision avoidance; the speed ratio; COLREGS; PIDVCA

0 引言

《国际海上避碰规则》(以下简称《规则》)首次被提案时, 船舶之间的速度相差无几, 且受当时通信条件限制, 目标船速的获取较为困难, 《规则》定义的避碰行为仅基于临近船舶的相对方位^[1]。随着通信技术和船舶的多样化、大型化和高速化发展, 目标船速度的获取较为容易, 船速相差较大($K \geq 1.5$)的情况也较为常见, 船舶驾驶员在根据会遇态势制定避碰方案时, 船速比已成为一个必须要考虑的重要因素。文献[1]在相对方位和速度比的基础上, 用公式和曲线推导出避碰决策

[收稿日期] 2019-09-17

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51879119); 福建省自然科学基金项目(2018J01484); 福建省教育厅项目(JAT170311)

[作者简介] 王兴华(1985—), 女, 助理实验师, 从事船舶智能避碰技术研究。通信作者: 陈国权(1981—), 男, 副教授, 从事船舶智能避碰技术研究。

最有效的路径变化,但未建立船速比与改向幅度、施舵点的具体关系模型和避让优化方案;文献[2]提出基于多种群遗传算法自动生成最优避碰路径的船舶避碰辅助决策方法;文献[3-6]提出基于深度强化学习的船舶避碰方法;文献[7-8]提出根据目标船相对方位和船舶类型确定转向避碰的行动向量;文献[9]建立了基于涡旋势场的改向模型,根据旋涡势的矢量场引导船舶改向避开障碍物。文献[2-9]方法属于人工智能技术和方法,不考虑避碰问题中的抽象因素和避碰参数的量化问题,虽然理论可行,但实用性不足。文献[10-15]将避碰领域知识形式化,将定性的专家避碰经验知识与定量的数学模型进行有效融合,采用船舶相对运动几何建模,建立一系列的数学模型,构建动态避碰知识库,在自建推理机制的引导下,求取避碰决策方案。在船舶拟人智能避碰决策(personifying intelligent decision-making for vessel collision avoidance, PIDVCA)算法研究的过程中,发现基于《规则》进行改向避让的效果受船速比影响较大,会产生不合理的避让局面。因此,本文对船速比与施舵点、改向幅度关系进行建模,分析船速比($K \geq 1$)分别对施舵点、改向幅度的影响,为自动避碰辅助决策研究提供参考。

1 船速比与改向幅度、施舵点的关系模型

1.1 目标交会特征分类

目标交会特征(target encounter characteristic, TEC)是指在根据目标船相对方位不同所形成的同一种会遇局面中,当本船速度 V_o 和目标船速度 V_t 的关系不同,以及目标船真航向 C_t 取值不同时,本船与目标船会存在不同的交会特征^[1011]。通过计算两船的速度差 $V_t - V_o$ 和航向差 $C_t - C_o$,并根据船舶相对运动航向 C_r 的取值范围来确定船舶会遇所属不同交会特征,如表1所示。例如,右舷前方区域交叉会遇,当目标船的相对运动航向 C_r 取值为 $180^\circ < C_r < 270^\circ$ 时,本船与目标船会有四种交会特征,即 $TEC = 2、4、20$ 和 40 。

表1 目标交会特征取值表
Tab.1 The table of target Encounter Characteristic value

会遇局面 Encounter Situation	TEC	$C_t - C_o / (^\circ)$	$C_r / (^\circ)$	速度关系 Velocity relation
左舷前方交叉会遇 Crossing Situation in front of stroke-side	TEC = 1	0 ~ 90	90 ~ 180	$V_o \leq V_t$
	TEC = 3	0 ~ 90	90 ~ 180	$V_o > V_t$
	TEC = 10	90 ~ 180	90 ~ 180	$V_o \leq V_t$
	TEC = 30	90 ~ 180	90 ~ 180	$V_o > V_t$
右舷前方交叉会遇 Crossing Situation in front of starboard	TEC = 2	270 ~ 360	180 ~ 270	$V_o \leq V_t$
	TEC = 4	270 ~ 360	180 ~ 270	$V_o > V_t$
	TEC = 20	180 ~ 270	180 ~ 270	$V_o \leq V_t$
	TEC = 40	180 ~ 270	180 ~ 270	$V_o > V_t$
对遇局面 Head-on Situation	TEC = 5	180	180	$V_o \geq V_t$
正追越 Overtaking	TEC = 50	0	180	$V_o > V_t$
正被追越 Overtaken	TEC = 6	0	0	$V_o \leq V_t$
锚泊船舶 Anchored Vessels	TEC = 60	C_o	180	$V_t = 0$
被追越或大角度交叉会遇局面 Overtaken or high-angle crossing situation	TEC = 7	0 ~ 90	0 ~ 90	$V_o < V_t$
	TEC = 8	270 ~ 360	270 ~ 360	$V_o < V_t$
	TEC = 70	0 ~ 90	90	$V_o < V_t$
	TEC = 80	270 ~ 360	270	$V_o < V_t$

表1中,当 $TEC = 1, 2, 7, 8, 10, 20, 70, 80$ 时本船速度小于目标船,即 $V_o \leq V_t$ 。其中: $TEC = 1, 2, 10, 20$ 为前方交叉会遇局面; $TEC = 7, 8, 70, 80$ 为被追越或大角度交叉会遇局面。虽然不同目标交会特征下船速比与本船改向幅度、施舵点的关系模型不尽相同,但建模方法基本相同,

故仅以 $TEC = 10$ 为例说明。限于篇幅, 根据实际船舶航行会遇场景多为前方交叉局面且较为复杂, 在分析船速比对改向避让效果影响时, 仅以前方交叉会遇为例, 取 $TEC = 1, 2, 10, 20$ 进行分析。

1.2 船速比与本船改向幅度、施舵点的关系模型

$TEC = 10$ 时船舶相对运动几何如图 1 所示。其中: V_0 和 V_t 表示本船和目标船的航速; V_r 和 V_{rn} 表示本船改向前后目标船相对运动速度; AC 为本船改向幅度。本船改向前后目标船的相对运动矢量线分别用 \overrightarrow{RML} (relative motion line) 和 \overrightarrow{NRML} (new relative motion line) 表示, $\overrightarrow{NRML'}$ 为 \overrightarrow{NRML} 的平行线, 与安全会遇距离 D_{sa} (safe distance approach) 为半径的圆相切, 与改向前的相对运动几何矢量线 \overrightarrow{RML} 相交于 $N(X_b, Y_b)$ 点, 为船舶的转向点, 根据船舶的操纵性及相对运动几何分析可以估算船舶的施舵点 $L(X_a, Y_a)$, 以圆点 O 为起点作 \overrightarrow{RML} 的垂线, 其垂直距离为最近会遇距离 D_{cpa} (distance to closest point of approach)。

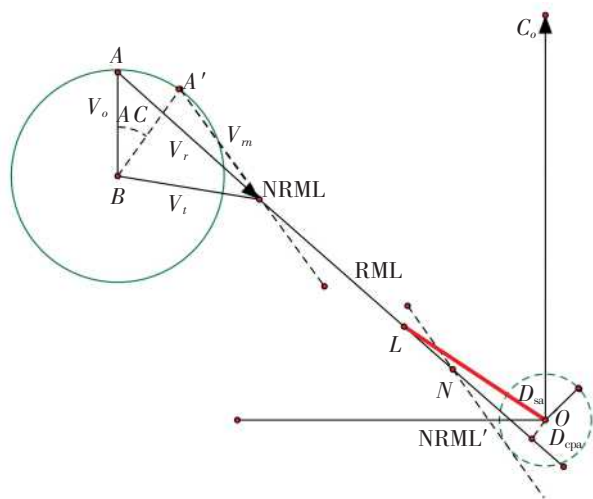


图 1 $TEC=10$ 船舶相对运动几何图

Fig.1 Relative motion geometric figure of the ship in $TEC=10$

根据图 1 所示的几何关系, 建立求解目标船

运动要素及本船改向后的预测运动要素模型, 可分别列出 \overrightarrow{RML} 和 $\overrightarrow{NRML'}$ 两条直线方程如下^[10,11]:

$$\begin{cases} y_{RML} = x \cdot \cot C_r + D_{cpa}/\sin C_r, \\ y_{NRML'} = x \cdot \cot C_{rn} + \text{sign}(D_{sa}) \cdot D_{sa}/\sin C_{rn}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: C_r 与 C_{rn} 分别代表本船改向前后目标船相对于本船的航向; $\text{sign}(D_{sa})$ 为 D_{sa} 的符号函数, 此例情况下 $\text{sign}(D_{sa}) = -1$ 。

若本船单纯改向避让, 新的相对运动速度 V_{rn} 和航向 C_{rn} 的计算公式为:

$$V_{rn} = \sqrt{V_0^2 + V_t^2 - 2 V_0 V_t \cos(C_t - AC - C_0)}. \quad (2)$$

$$C_{rn} = 180^\circ + AC - \arcsin[V_t \sin(C_t - C_0 - AC)/V_{rn}]. \quad (3)$$

此时可得转向点 N ,

$$\begin{cases} x_b = [(-D_{sa}/\sin C_{rn}) - (D_{cpa}/\sin C_r)]/(\cot C_{rn} - \cot C_r), \\ y_b = x_b \cdot \cot C_{rn} + (-D_{sa})/\sin C_{rn}. \end{cases} \quad (4)$$

在 \overrightarrow{RML} 上取点 a , 使 ab 的长度等于 D_{ss} , D_{ss} 为本船转向某一角度时的相对位移。 L 作为估算施舵点 $L(X_a, Y_a)$ 的值由式 (5) 计算得到:

$$\begin{cases} x_a = x_b - D_{ss} \sin C_r, \\ y_a = y_b - D_{ss} \cos C_r. \end{cases} \quad (5)$$

则本船距离 L 点的距离即为本船到施舵点的距离 D_r , $D_r = \sqrt{x_a^2 + y_a^2}$ 。

同时, 对应的改向幅度 $AC = C_{rn} - \arcsin(\sin(C_t - C_{rn} - C_0) \times V_t/V_0) - 180$ 。其中: $C_{rn} = C_r + \arcsin(D_{sa}/D_r) + \arcsin(D_{cpa}/D_r)$

同理, 可得其他不同交会特征下船速比分别与改向幅度、施舵点的关系模型。

2 改向避让效果分析

根据《规则》, 在交叉相遇局面中, 互见或能见度不良时, 有他船位于本船右舷, 本船应给他船让路, 本船为让路船; 互见中, 他船位于本船的左舷, 他船应给本船让路; 能见度不良时, 他船位于

本船的左舷, 本船亦有让路义务。因此, 当 $TEC = 2$ 或 20 时, 本船的避让时机为形成一般危险时, 应避免进入紧迫局面。当 $TEC = 1$ 或 10 且互见时, 本船为直航船, 本船的避让时机为本船逼近到单凭让路船 (目标船) 的行动不能避免碰撞时, 称为最晚施舵时机; 当 $TEC = 1$ 或 10 且能见度不良时, 避让时机与 $TEC = 2$ 和 20 一致。为便于对比说明, 选取 $TEC = 1$ 、 10 且能见度不良和 $TEC = 2$ 、 20 互见本船避让时机一致的情况。

假定两船的船长、操纵性参数不变, 目标船相对于本船的方位不变, 两船安全会遇距离 D_{sa} 相同, 设定为 2 n mile , 会遇距离不变, 设定为 14 n mile (nm) , 最近会遇距离 D_{cpa} 为 0 n mile , 本船速度设置为 15 kn 。交汇特征为 $TEC = 1, 2, 10$ 和 20 时, 若本船向右等幅度改向 30° , K 值取 $1.0, 1.1, 1.2, \dots, 2.0$ 时, 分析本船到施舵点的距离 D_r 的变化。当 $TEC = 10$ 和 20 时, 本船向右改向 30° , K 对 D_r 的影响如下表 2 所示。

表 2 TEC = 10 和 20 不同船速比与 D_r 的关系

Tab.2 The relationship of Different speed ratio and D_r in $TEC = 10$ and 20

K	TEC = 10				TEC = 20			
	V_m /kn	$C_t - C_o$ /($^\circ$)	C_m /($^\circ$)	D_r /n mile	V_m /kn	$C_t - C_o$ /($^\circ$)	C_m /($^\circ$)	D_r /n mile
1.0	21.2132	120.0	165.0	7.727	28.9778	240.0	225.0	7.727
1.1	22.8659	123.0	163.9	8.329	30.6294	237.0	224.2	8.168
1.2	24.4865	125.4	163.0	8.920	32.2473	234.6	223.5	8.599
1.3	26.0844	127.4	162.2	9.502	33.8415	232.6	222.8	9.024
1.4	27.6653	129.1	161.5	10.078	35.4182	230.9	222.2	9.445
1.5	29.2334	130.5	160.8	10.649	36.9817	229.5	221.7	9.862
1.6	30.7915	131.8	160.3	11.217	38.5349	228.2	221.2	10.276
1.7	32.3416	132.9	159.8	11.781	40.0801	227.1	220.8	10.688
1.8	33.8852	133.9	159.3	12.344	41.6188	226.1	220.4	11.098
1.9	35.4235	134.7	158.9	12.904	43.1522	225.3	220.0	11.507
2.0	36.9575	135.5	158.5	13.463	44.6813	224.5	219.7	11.915

若本船等距离改向, 即 D_r 不变, 其值取 $K = 1.0$ 时 $AC = 30^\circ$ 的 D_r , 当 K 分别取值 $1.0, 1.1, 1.2, \dots, 2.0$ 时, 分析 AC 的变化趋势。例如, 当 $TEC = 10$ 和 20 时, $D_r = 7.727\text{ n mile}$, K 对 AC 的影响的变化如下表 3 所示。

表 3 TEC = 10 和 20 不同船速比与 AC 的关系

Tab.3 The relationship of Different speed ratio and AC in $TEC = 10$ and 20

K	TEC = 10				TEC = 20			
	V_m /kn	$C_t - C_o$ /($^\circ$)	C_m /($^\circ$)	AC /($^\circ$)	V_m /kn	$C_t - C_o$ /($^\circ$)	C_m /($^\circ$)	AC /($^\circ$)
1.0	21.1929	120.0	165.1	30.1	26.9293	240.0	240.0	30.1
1.1	22.3774	123.0	165.1	32.6	28.6322	237.0	237.0	31.9
1.2	23.4927	125.4	165.1	35.1	30.2952	234.6	234.6	33.5
1.3	24.5425	127.4	165.1	37.7	31.9294	232.6	232.6	35.2
1.4	25.5254	129.1	165.1	40.4	33.5419	230.9	230.9	36.8
1.5	26.4347	130.5	165.1	43.3	35.1379	229.5	229.5	38.4
1.6	27.2581	131.8	165.1	46.4	36.7207	228.2	228.2	40.0
1.7	27.9729	132.9	165.1	49.9	38.2929	227.1	227.1	41.6
1.8	28.5371	133.9	165.1	53.8	39.8566	226.1	226.1	43.2
1.9	28.8572	134.7	165.1	58.6	41.4131	225.3	225.3	44.7
2.0	28.6189	135.5	165.1	65.4	42.9636	224.5	224.5	46.2

为更直观，现将交叉局面 $TEC = 1, 2, 10$ 和 20 情况下，船速比 K 分别对本船到施舵点的距离 D_r 和改向幅度 AC 的影响用折线图展示，如图 2 和图 3 所示。

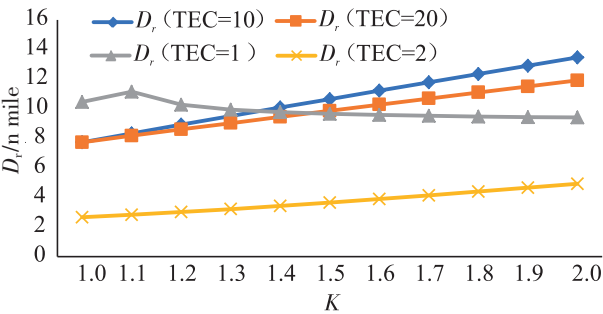


图 2 $TEC=1, 2, 10$ 和 20 K 对 D_r 的影响曲线

Fig.2 The influence curve of K on rudder point in $TEC=1, 2, 10$ and 20

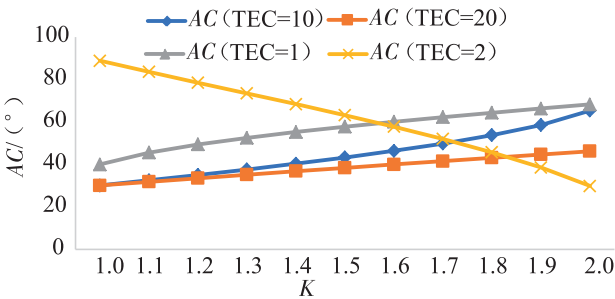


图 3 $TEC=10$ 和 20 K 对 AC 的影响曲线

Fig.3 The influence curve of K on AC in $TEC=1, 2, 10$ and 20

从图 2 和图 3 可以看出，在 $TEC = 10$ 且能见度不良时，本船按《规则》向右改向，若改向幅度不变，船速比 $K = 2$ 的施舵点几乎是 $K = 1$ 的二倍，即 $K = 2$ 的施舵时机要比 $K = 1$ 提早一倍；若本船的施舵点不变， $K = 2$ 的改向幅度是 $K = 1$ 时的 2 倍。同理， $TEC = 20$ 且互见时，本船为让路船，当等幅度改向时， K 值越大，施舵时机来的越早；当等距离改向时， K 值越大，改向幅度越大。较为特殊的是 $TEC = 1$ 和 $TEC = 2$ ，当 $TEC = 1$ 且能见度不良时，若本船等幅度改向，随着 K 值的增大，施舵点呈现先升后降的趋势，这与本船过目标船舶或船尾有关，根据船舶相对运动几何变化规律亦可得出；当 $TEC = 2$ 且互见时，若本船等距离改向，随着 K 值的增大，改向幅度呈下降趋势。

3 模拟仿真实验效果及避让决策优化

为验证上述分析结论，在船舶智能操控仿真测试平台上对 PIDVCA 算法进行了大量仿真模拟实验。仿真实验表明，船速比较大的情况下 ($K \geq 1.5$) 若严格按照《规则》条款执行会出现不理想的避让效果，如图 4 所示。

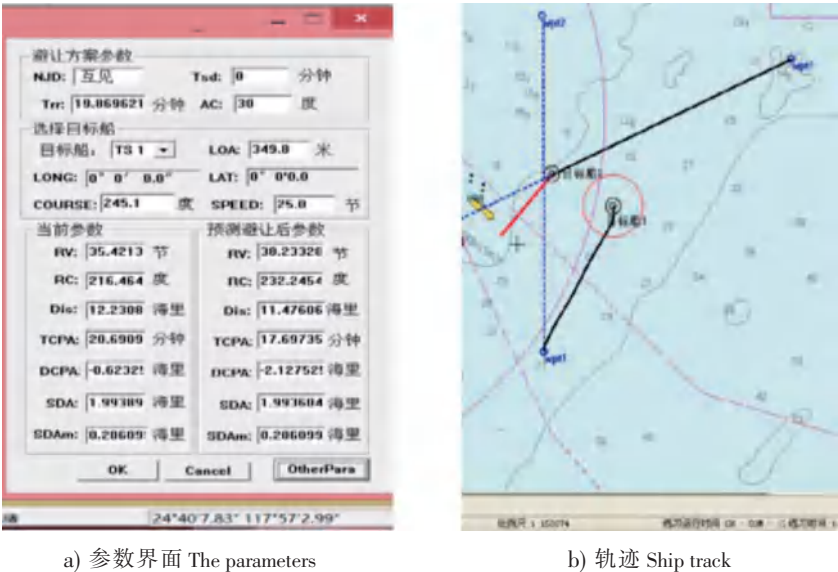


图 4 互见下 $TEC=20$ 的避让仿真实验结果航行轨迹 ($K=1.8, D_{sa}=1.99$ n mile)

Fig.4 Simulation experiment results of avoidance collision in crossing right situation and in visibility ($K=1.8, D_{sa}=1.99$ n mile)

TEC = 20 的交汇特征, 目标船 1 设为本船, 在互见情况下, 按照《规则》的避让责任划分, 本船为让路船, 目标船 2 为直航船, 本船按《规则》向右改向避让, 因目标船速度远大于本船, 本船的避让时机远远提前。由图 4 的仿真结果可以看出, 本船的避让效果并不显著, 即避让时机远远提前, 其提前量取决于 K 值, 其值越大, 提前量越多。

现以能见度不良条件下左正横附近 ($247.5^{\circ} < \text{目标船相对方位} < 292.5^{\circ}$) 来船且 TEC = 1 为例, 说明较高船速比对基于《规则》改向避让效果出现的不合理现象, 并提出优化建议。如图 5a) 所示, 在能见度不良情况下, 目标船 1 和目标船 2 均应承担避让义务, 目标船 1 因速度较小, 避让时机较早, 为了避开危险选择率先避让, 目标船 2 在其避让时机到来时, 因其碰撞危险消失而选择不采取避让行动, 以致两船因相对运动速度很小而长时间僵持。显然, 此种避让行为不利于船舶安全航行, 不符合船舶避让的安全性、科学性和经济性。

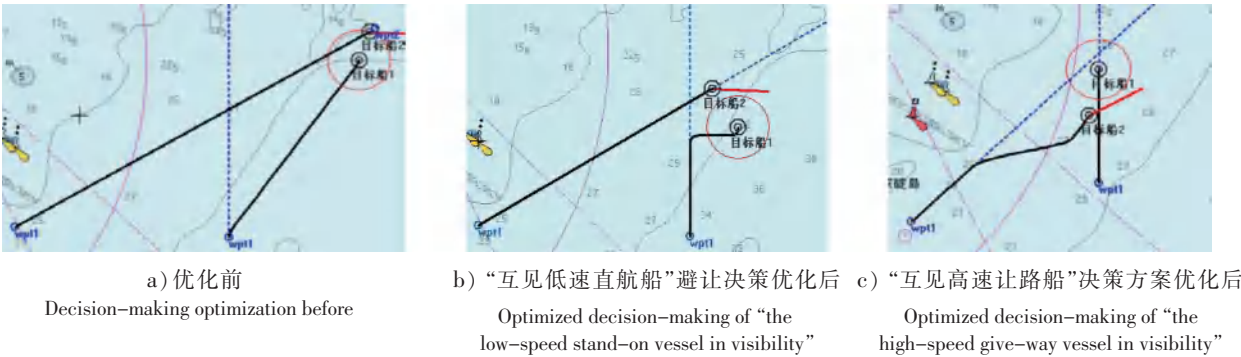


图 5 能见度不良对来自左正横附近会遇船舶优化处理前后实验结果

Fig.5 Simulation experiment results of before and after optimization of decision-making for the left near the beam encounter situation and in restricted visibility

为了解决上述问题, 以航迹偏移量最小为目标, 集成 PIDVCA 算法对避碰决策进行动态优化处理, 优化结果如图 5b) 和图 5c) 所示。图 5b) 中, 在能见度不良情况下, 目标船 1 (互见低速直航船) 的避让时机应选取互见情况下作为直航船的最晚施舵时机。图 5c) 中, 在能见度不良情况下, 避让方案的优化方法采取目标船 2 (互见高速让路船) 主动提前履行避让义务, 这时目标船 1 会因两船危险消失而保持直航。

由图 5 的模拟仿真例子可知, 在能见度不良条件下, 目标船 1 若按《规则》选择避让时机形成不合理的避让效果, 若按互见情况下选择避让时机, 避让效果更优; 或者, 若“目标船 2 作为高速船能够承担更多的避让责任势必会使避让局势更和谐。

4 结论与建议

船舶智能避碰技术在应用过程中必须遵循《规则》要求, 然而随着人工智能技术和计算机技术的迅猛发展推动着船舶向大型化、高速化、智能化方向发展, 使得《规则》中的一些定义开始变得不够合理。《规则》定义的避碰行为通常只基于临近船舶的相对方位, 在船速比相差无几且确定船速比较为困难的年代是完全合理的, 但在高速船普遍存在和获取目标船船速较为容易的情况下, 船速比对机器模拟船舶驾驶员制定改向避让方案的影响不可忽视。现将影响归纳如下:

- 1) 互见情况下, 在目标船与本船形成较高船速比的交叉会遇局面下, 若本船按《规则》改向避让会出现避让效果不显著, 即让路船的避碰行动远远提前, 其提前量取决于 K 值, 其值越大, 提前量越多;
- 2) 能见度不良情况下, 在左正横附近 ($247.5^{\circ} < \text{目标船相对方位} < 292.5^{\circ}$) 来船的交叉会遇局

面下,按照《规则》改向避让在来船没有采取相应避让行动情况下可能产生安全隐患。

针对这些影响,建议在研究智能避碰决策时应“体现实践中对《规则》的合理延伸”来解决因严格按《规则》的避让行为所带来的避让效果不合理的现象。

[参考文献]

- [1] WU ZHAOLIN. Course changes to avoid collision as a function of the speed ratio [J]. 大连海运学院学报, 1985, 11(1): 15-22.
- [2] 倪生科, 刘正江, 蔡垚, 等. 基于遗传算法的船舶避碰决策辅助 [J]. 上海海事大学学报, 2017, 38(1): 12-15.
- [3] 周双林, 林星, 刘克中, 等. 规则约束下基于深度强化学习的船舶避碰方法 [J]. 中国航海, 2020, 43(3): 27-32.
- [4] WANG CB, ZHANG XY, CONG LZ, et al. Research on intelligent collision avoidance decision-making of unmanned ship in unknown environments [J]. Evolving Systems, 2019, 10: 649-658.
- [5] SAWADA R, SATO K, MAJIMA T. Automatic ship collision avoidance using deep reinforcement learning with LSTM in continuous action spaces [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2020.
- [6] 沈海青, 郭晨, 李铁山, 等. 考虑航行经验规则的无人船舶智能避碰导航方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(6): 998-1005.
- [7] 于家根, 刘正江, 卜仁祥, 等. 基于拟态物理学优化算法的船舶转向避碰决策 [J]. 中国航海, 2016, 39(1): 36-38.
- [8] 于家根, 刘正江, 卜仁祥, 等. 基于社会情感优化算法的船舶转向避碰决策 [J]. 中国航海, 2018, 41(3): 81-86.
- [9] LEE MC, NIEH CY, KUO HC, et al. A collision avoidance method for multi-ship encounter situations [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2020, 25: 925-942.
- [10] 黄颖. 船舶紧迫危险避碰决策方法研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2013.
- [11] 周伟. 宽水域船舶智能避碰决策算法验证及优化 [D]. 厦门: 集美大学, 2011.
- [12] 李丽娜, 陈国权, 李国定, 等. 船舶拟人智能避碰决策方法研究综述 [J]. 航海技术, 2014(2): 42-49.
- [13] 陈国权. 船舶避碰自动化关键技术 [D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [14] 李丽娜, 陈国权, 邵哲平, 等. 船舶拟人智能避碰决策方法及其评价标准的构建 [J]. 大连海事大学学报, 2011, 37(4): 1-6.
- [15] 李丽娜, 张寿桂. 航海自动化 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)