

雾航情况下 PIDVCA 算法分析与仿真

王子月, 李丽娜

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为进一步测试验证船舶拟人智能避碰决策(PIDVCA)算法,在互见的左交叉会遇局面的雾航情况下结果是否合理有效,基于《1972 国际海上避碰规则》,以左舷来船为对象,采用几何作图分析互见的左交叉会遇局面在雾航情况下不同交汇特征的避让方法,利用集成有 PIDVCA 算法的船舶智能操控(SIHC)仿真测试平台进行仿真测试。测试结果证明算法的合理性、有效性和经济性。该研究对算法的优化及实际应用具有参考价值。

[关键词] 雾航;几何分析;典型会遇态势;避让决策

[中图分类号] U 675

Analysis and Simulation Verification of PIDVCA Algorithm in Restricted Visibility

WANG Ziyue, LI Lina

(Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to further test and verify the ship personification intelligent collision avoidance decision (PIDVCA) algorithm designed by our research and development team, whether the results are reasonable and effective for the port-side crossing situation in the case of navigation in fog, *International Regulations for Preventing Collisions at Sea 1972*, with the vessel that has the other on her port side as the object, using geometric mapping to analyze the different intersection characteristics of the collision preventing methods, the integrated PIDVCA algorithm of the ship intelligent handling control (SIHC) simulation test platform is used for simulation testing. The test results prove the rationality, validity and economy of the algorithm, which is of great value and practical significance to the optimization and practicality of the algorithm.

Keywords: navigating in restricted visibility; geometric analysis; typical encounter situation; collision preventing strategy

0 引言

随着航运事业的快速发展,船舶航行密度增大,船舶碰撞、搁浅等事故增多,船舶自动化能从根本上解决上述问题,因此船舶智能化研究具有重要意义。文献[1]研制出一种全自动避碰辅助决策系统,并在练习船上进行了模拟实验。专家系统提出了一些避碰决策^[2-4,6]。文献[7-15]源于雷达模拟器的培训教学实践,在船舶自动避碰领域形成了船舶拟人智能避碰决策(personifying intelli-

[收稿日期] 2021-06-21

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51879119)

[作者简介] 王子月(1999—),女,从事航海技术研究。通信作者:李丽娜(1962—),女,教授,硕士,主要从事海上智能交通系统的理论与技术研究。E-mail:lln668@163.com

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

gent decision-making for vessel collision avoidance, 简称 PIDVCA) 理论^[7-15], 并开发了相应应用软件, 为研发船舶智能化奠定了良好的基础。目前针对互见的左交叉会遇局面在雾航 (为方便论述, “能见度不良” 本文均称为雾航) 情况下的决策方法讨论较少, 为了测试验证近期升级改造的 PIDVCA 算法, 本文着重归纳了有关左交叉会遇局面的相关知识点, 采用相对运动标绘几何, 分析开阔水域在雾航情况下左交叉会遇局面的合理避碰决策, 借助船舶智能操控 (ship intelligent handle and control, 简称 SIHC) 仿真测试平台, 进行仿真测试, 对 PIDVCA 算法进行仿真验证及合理性分析。

1 船舶智能避碰理论基础

1.1 目标交会特征的定義和划分

文献 [7] 根据目标船真航向 C_t 和两船速度关系定义了 15 种交会特征, 用 EC (encounter character, 交汇特征) 表示。本文主要针对左舷来船会与我船产生左交叉会遇情况做具体分析, 因此将选择 EC 分别等于 3、30、10、1、7 和 70 这 6 种情况, 如图 1a) ~ f) 所示。其中: V_0 表示本船速度; C_0 表示本船航向; V_t 表示目标船速度; C_t 表示目标船航向; V_r 表示目标船相对于本船的速度; SDA (safe distance approach) 表示本船的安全会遇距离; RML 表示目标船相对于本船的初始相对运动线。

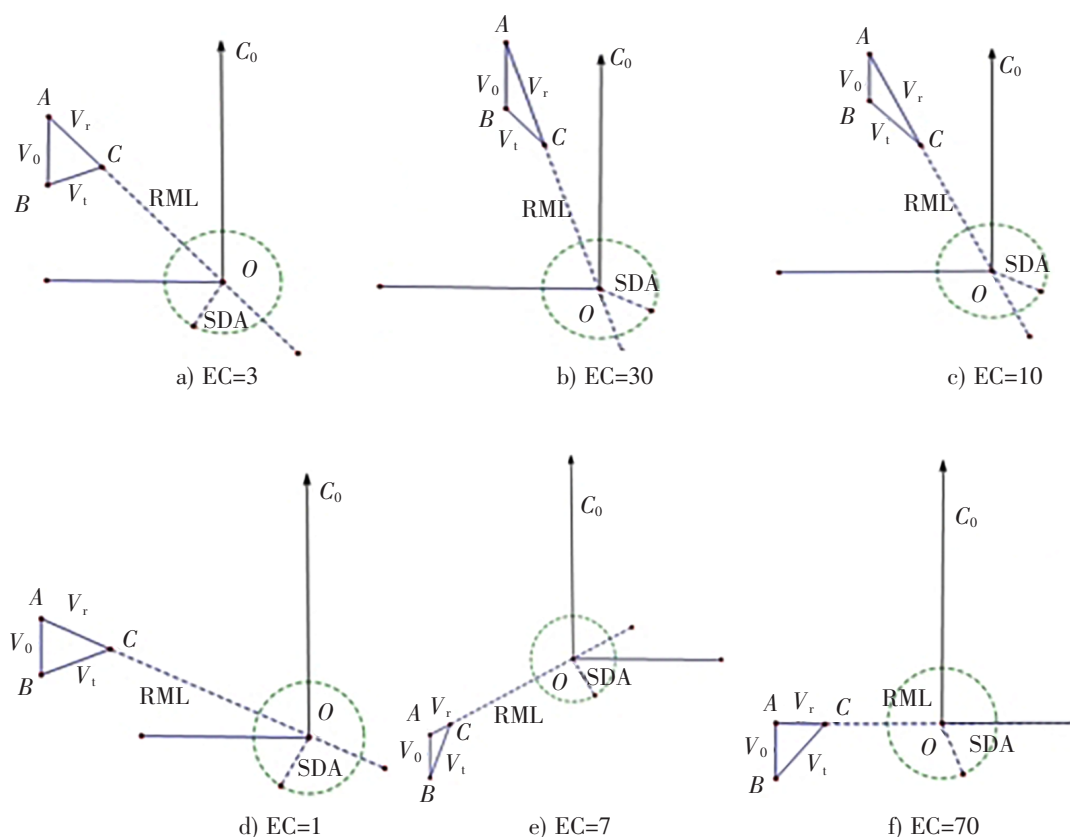


图 1 交汇特征示意图

Fig.1 Schematic diagram of encounter character

1.2 会遇态势的划分

《国际海上避碰规则》(以下简称《规则》) 规定^[16], 雾航情况下, 会遇两船不存在直航船和让路船之分, 均为让路船。通过对目标船所在方位详细划分, θ 为来船的相对方位时, 本文主要研究 $247.5^\circ \leq \theta < 354^\circ$ 的目标船。

1.3 安全会遇距离

船舶的安全会遇距离 SDA (safe distance approach) 是判断目标船与本船是否存在碰撞危险的重要依据, 但是一个模糊的概念。文献 [8] 提出了三个判断危险度的重要概念, 分别是最大安全会遇距离 (SDA_{max})、临界安全会遇距离 (SDA_c) 和安全会遇距离最小值 (SDA_{min}), 以及相关求解公式。仿真中以 SDA_c 评判危险, 以 SDA_{max} 作为决策依据。

2 避碰决策

2.1 基于《规则》的决策

根据《规则》中第二章第一节“船舶在任何能见度情况下的行动规则”第八条“避免碰撞的行动”, 第三节第十九条“船舶在能见度不良时的行动规则”, 可得出以下结论: 1) 为避免紧迫局面的发生, 采取的避让行动应是及早的、大幅度的, 并能使两船在安全会遇距离上驶过让清。2) 当对方不采取有效避让措施时, 不论是在雾航情况下还是在互见中, 本船均需采取右让行动进行避开。3) 船舶在避免紧迫危险时, 如按其规定采取行动将导致船舶碰撞或航行事故, 不按规定采取行动却可避免碰撞或航行事故时, 允许背离其规定的规则。

2.2 两船避碰决策分析

雾航时, 对于左交叉会遇局面的来船, 本船是让路船, 需要采取避让行动。采取行动的时机应在两船相距 4~6 n mile 时, 避让行动若采取减速与右转向结合效果会相互抵消, 考虑算法适用水域为开阔水域, 按照《规则》第八条第三款“如有足够的水域, 则单用转向可能是避免紧迫局面的最有效行动, 只要这种行动是及时的、大幅度的, 并且不造成另一紧迫局面”。因此, 本文以向右转向为主, 绘制几何图, 转向应为 30° 或以上, 必要时转向 $60^\circ \sim 90^\circ$, 以做到《规则》的“大幅度”。

在 EC 分别等于 3、30、10、1、7 和 70 时, 都有目标船相对运动线过本船船首或过本船船尾两种情况, 对这 12 种情况做相应的几何分析, 下文举例作图说明。

1) EC = 7 且目标船的相对运动线过本船首

几何作图分析如图 2 所示。图 2 中目标船船速为 22 kn, 航向为 38.8° ; 本船船速为 15 kn, 航向为 359.97° 。由图 2 可知, 当本船采取小角度右转避让行动时, 即可获得与 SDA 圆相切的相对运动线 aG , 但不满足《规则》“大幅度” ($AC \geq 30^\circ$), 因此本船转向避让幅度 $AC1 \geq 30^\circ$ ($AC1$ 为 $\angle ABA'$ 弧度线)。

同理, EC = 3 且目标船相对运动线过本船首和尾、EC = 7 且目标船相对运动线过本船首、EC = 30 且目标船相对运动线过本船尾和 EC = 70 且目标船相对运动线过本船首时, 均只需本船采取小角度右转便能避开, 但为符合《规则》“大幅度”, 均取 $AC \geq 30^\circ$ 时的避让决策行动。

2) EC = 1 且目标船的相对运动线过本船尾的几何分析

当 EC = 1 且目标船的相对运动线过本船尾时, 几何图如图 3 所示。图 3 中本船位于坐标系原点, 航向为 359.97° , 航速为 15 kn; 目标船位于 C 点, 距本船 6.09 n mile, 相对方位为 299.62° , 目标船航向为 79.19° , 船速为 22 kn; SDA 圆半径为 1.9 n mile。从 A 点出发过 C 点作目标船相对于本船的初始相对运动线 RML, 可见 RML 在 SDA 圆内与本船有碰撞危险。于是, 本船采取向右转向的措施 (以 B 点为圆心作圆, aC 与该圆相切, a 点为切点), 本船开始转向时, 相对运动线先向 SDA 圆心靠近, 甚至从过本船首变为过本船船尾, 如虚线 aG 所示。改向后 $DCPA < SDA$, 说明本船已经错过本船向右改向让目标船过本船尾的时机, 因此, 从过本船船尾向上变化, 再次变为过本船首, 并开始趋向 SDA 圆外, 直到新相对运动线 NRML 与 SDA 圆相切, 此时避让幅度 $AC1 = 67.69^\circ$, 说明从此刻起随着两船距离减小, 改向角随之增大, 即从 67.69° 逐步增大, 才能使目标船与本船无碰撞危险。上述分析表明, EC = 1 的目标船在错过目标船过本船尾的最晚避让改向点后, 还存在目标船过本船首的避让方法, 显然第二种方法较第一种避让效果差^[11], 尽管目标船在 SDA 外通过, 但本船驾驶员避让

存在某种压迫感,因此,当左舷来船比我船速度快时,应及早采取避让措施,而不是僵化的在所谓的 4~6 n mile 才采取避让措施。

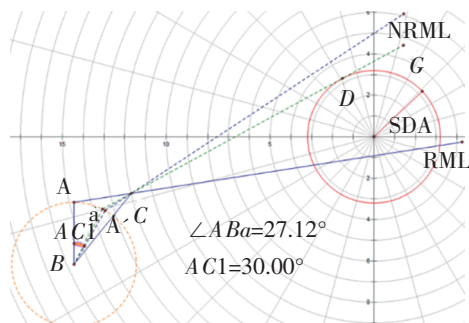


图 2 EC=7 目标船相对运动线过本船尾
Fig.2 EC=7 the relative motion line of the target ship passes through the stern of the ship

同样的,当目标船速度比我船快且距离小于 7~8 n mile,即 EC=1 目标船相对运动线过本船首和船尾、EC=10 目标船相对运动线过本船尾、EC=30 目标船相对运动线过本船首以及 EC=70 目标船相对运动线过本船尾时,均需本船采取大幅度右转避让。

3) EC=10 且目标船相对运动线过本船首的几何分析

当 EC=10 且目标船相对运动线过本船首时,几何图如图 4 所示。图 4 可看出,当目标船位于 C 点,刚好可从本船 SDA 圆外驶过时,本船可以转两个角度,分别是 $\angle ABa = 98.02^\circ$ 和 $\angle AC1 = 46.87^\circ$,当向右转向角度大于 46.87° 时,目标船新相对运动线 nG 在本船 SDA 圆外,说明本船向右转向 $46.87^\circ \sim 98.02^\circ$ 可安全避让目标船,但本船最大转向角为 90° ,所以本船避让幅度为向右转向 $46.87^\circ \sim 90^\circ$ 。

2.3 多船避碰决策的分析

当左舷前方有两艘来船与本船分别构成交叉会遇局面,以两目标船 EC=30 为例,进行雾航情况下的几何作图分析。目标船初始状态及相关参数如表 1 所示,本船航向 0° ,航速 14.6 kn。

表 1 目标船初始状态及相关参数

Tab.1 Initial state and relevant parameters of target ship

目标船 Target vessel	航向 Course/ $^\circ$	航速 Speed/kn	距离 Distance/n mile	相对方位 Relative orientation/ $^\circ$
1	90.4	14.4	11.93	315.64
2	132.8	13.4	8.12	337.34

以本船为圆心、SDA=1.8 n mile 作圆,如图 5 所示。初始时刻,两目标船均与本船存在碰撞危险。在雾航情况下,当目标船 2 航行到距离本船 6 n mile,即 G 点时,目标船 1 位于 H 点,本船采取转向措施进行避让。当本船向右转向 32.81° 时,即 $\angle AC1 = 32.81^\circ$ 时,目标船 2 相对运动线 NRML2 刚好可与本船 SDA 圆相切,此时目标船 1 的新相对运动线 NRML1 在 SDA 圆外,证明该避让幅度能确保两目标船与本船无碰撞危险。

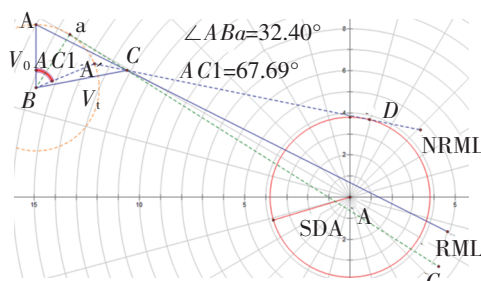


图 3 EC=1 目标船相对运动线过本船首
Fig.3 EC=1 relative motion line of target ship passing through the bow

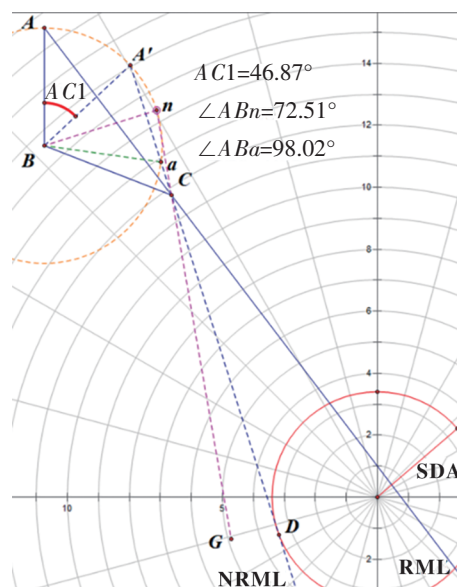


图 4 EC=10 目标船相对运动线过本船首
Fig.4 EC=10 the relative motion line of the target ship passes through the bow

3 船舶智能避碰决策

3.1 船舶拟人智能避碰决策

船舶拟人智能避碰决策, 主要是模拟驾驶员进行决策, 利用现有知识获取现场船舶的动静态信息, 结合《规则》和海员通常做法, 做出最安全经济的决策, 具体决策过程可参见文献 [9]。

决策过程船舶潜在危险评判: $DCPA < SDA_c$, $TCPA > 0$ 。其中: DCPA (distance at closest point of approach) 为最近会遇距离; TCPA (time to closest point of approach) 为最近会遇时间。

具体决策流程如图 6 所示。图 6 中最大改向角为本船改向小于或等于 90° 时获得 DCPA 最大的改向角。

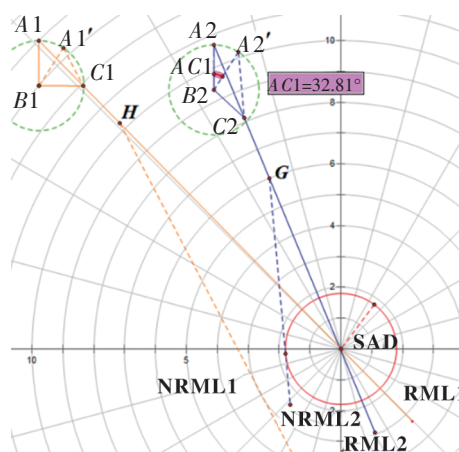


图 5 EC=30 两目标船

Fig.5 EC=30 two target ships

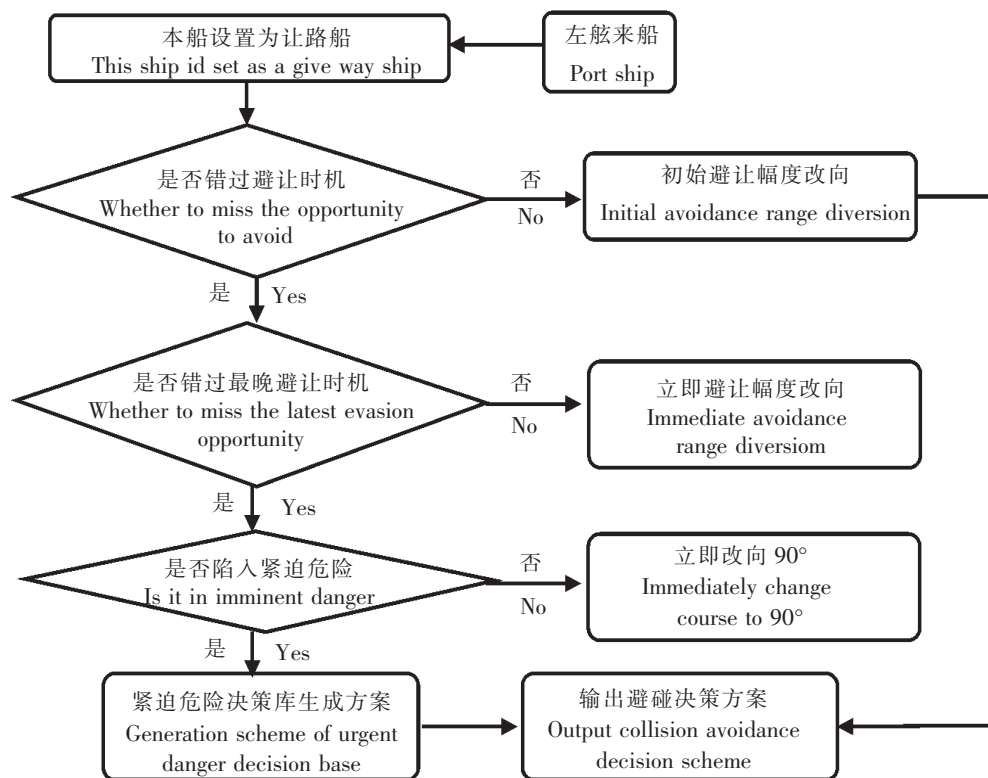


图 6 雾航情况避碰决策流程图

Fig.6 Flow chart of collision avoidance decision in fog navigation

3.2 两船仿真实验结果分析

基于 2.2 的几何作图分析, 利用仿真实验验证船舶拟人智能避碰决策的有效性。在仿真实验中, 本船为一艘智能集装箱船, 船模号为 3095 (船长 347 m), PIDVCA 算法能根据相应的会遇态势在不同环境下做出不同的避碰决策; 目标船则是一艘“非智能船”, 从始至终一直保持相同的航速和航向航行, 当两船有碰撞危险时, 不采取任何避让行动; 仿真实验均在三级风, 风速为 4 m/s, 无流的环境下进行。

1) EC = 7 且目标船相对运动线过本船尾的会遇场景

本船航向为 0° ，航速 15 kn，目标船初始状态及相关参数如表 2 所示。

表 2 目标船初始状态及相关参数
Tab. 2 Initial state and relevant parameters of target ship

航向 Course/ $(^\circ)$	航速 Speed/kn	距离 Distance /n mile	相对方位 Relative orientation/ $(^\circ)$	SDA /n mile	SDA _c /n mile	SDA _{min} /n mile	TCPA /min	DCPA /n mile
38.8	22	8.82	256.83	1.28	0.66	0.13	37.78	-0.67

针对此会遇态势，算法生成避让决策如图 7a) 所示，避让轨迹全过程如图 7b) 所示。这是算法优化后输出的结果，算法优化前输出的结果与几何作图结果一致，如图 7c) 和 d) 所示。

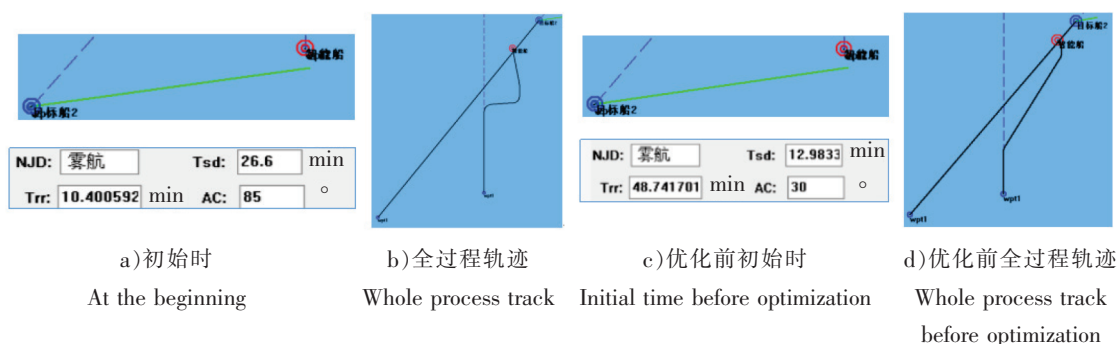


图 7 EC=7 目标船相对运动线过本船尾仿真实验图

Fig.7 EC=7 Simulation experiment diagram of the target ship's relative motion line passing through the stern of the ship

从复航时机 (T_r) 看，优化后的避让时间明显比优化前的时间短。若本船按照优化前的决策进行转向避让，会导致出现两船僵持很久的局面。长时间的僵持局面中，如果疏忽很可能使两船陷入紧迫局面甚至可能导致紧迫危险，这是航行过程忌讳的场景。

从仿真数据图中得出的数据，根据式 (1) 可以直接求出优化前和优化后的航迹偏移量 (X_{TE}) 分别为 6.09 n mile 和 2.6 n mile。很明显优化后决策的航迹偏移量小于优化前，说明优化后的决策不仅更安全合理，而且更经济。这是假定左舷来船没有采取避让行动的情况，如果来船在合适的时机采取避让行动，本船不需要采取大角度行动，而且能够在较短的时间完成避让行动。

$$X_{TE} = (T_r/60) \times V_0 \times \sin AC. \quad (1)$$

2) EC = 1 且目标船相对运动线过本船首的会遇场景

本船航向 0° ，航速 15 kn，目标船初始状态及相关参数如表 3 所示。

设目标船初始状态及相关参数如表 3 所示。

表 3 目标船初始状态及相关参数
Tab. 3 Initial state and relevant parameters of target ship

航向 Course/ $(^\circ)$	航速 Speed/kn	距离 Distance /n mile	相对方位 Relative orientation/ $(^\circ)$	SDA /n mile	SDA _c /n mile	SDA _{min} /n mile	TCPA /min	DCPA /n mile
78.1	22	7.54	298.23	1.91	1.06	0.16	18.86	-0.30

由表 3 可知，初始时刻目标船 $DCPA < \text{本船 } SDA_c$ ， $TCPA > 0$ ，两船存在碰撞危险，此时目标船已错过从本船尾驶过本船第一个最晚避让改向点，根据 PIDVCA 算法生成的避碰决策如图 8 所示。由图 8a 可知，避让时机为 8.98 min，转向避让 90° ；由图 8b) 可看出两船最终安全避让；由图 8c) 可看

出避让过程中 DCPA 在避让执行大约 3 min 以后一直大于 SDA; 当 TCPA = 0 时, DCPA = 2.87 n mile, 明显大于 SDA, 说明本船最后驶过让清目标船。

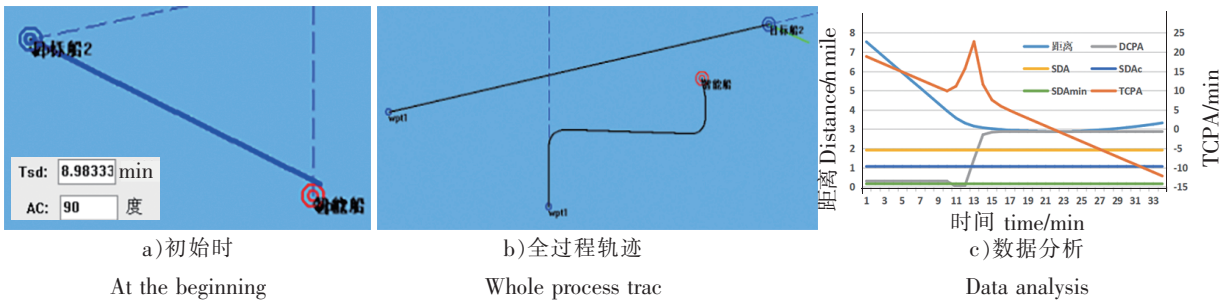


图 8 EC=1 目标船相对运动线过本船首仿真实验数据图
Fig.8 EC=1 Simulation experiment of the relative motion line of the target ship passing through the bow data diagram

研究表明, 当左舷来船 EC = 1, 7, 70 时, 因为其速度比本船快, 双方改向 30° 的避让时机速度慢者早于速度快, 相当于互见中速度慢的“直航船”对危险度感受度大于速度快的“让路船”, 当速度慢的“直航船”率先采取行动, 因两船危险消失, 使互见中的“让路船”没有采取行动, 结果可能因两船相对速度小, 导致长时间并行航行的不合理会遇局面。可以看出 PIDVCA 算法并不是生硬的照搬《规则》, 而是充分理解《规则》划分让路和直航的原则, 将方便让路或避让效果好的一方划分为让路船, 从而避免上述被动局面。雾航情况下延迟互见中“直航船”的避让时机, 即使在互见中的“让路船”不采取行动情况下, 也可以安全有效避过, 确保避碰决策实施方案的合理性、有效性和经济性。

3) EC = 3、30、10、1、7 和 70 的会遇场景

EC = 3、30、10、1、7 和 70, 目标船相对运动线不论过船首还是船尾, 在仿真实验中 PIDVCA 算法生成的决策都为向右转向, 且最后都驶过让清, 只是不同条件下向右避让的角度大小不同。雾航情况下的 12 个仿真测试避碰决策归纳如表 4 所示。

表 4 雾航情况下避碰决策方案汇总表
Tab.4 Summary of collision avoidance decision-making schemes in restricted visibility

会遇态势(相对运动线过本船首) Encounter situation (Relative motion line crosses the bow of the ship)	仿真决策 Simulation decision /(°)	会遇态势(相对运动线过本船尾) Encounter situation (Relative motion line crosses the stern of the ship)	仿真决策 Simulation decision /(°)
EC = 3	30	EC = 3	30
EC = 30	41	EC = 30	30
EC = 10	57	EC = 10	74
EC = 1	90	EC = 1	90
EC = 7	90	EC = 7	85
EC = 70	90	EC = 70	90

3.3 多船仿真实验结果分析

《规则》中关于“左交叉”的概念仅对两船而言, 多船情况下海员的通常做法对避让重点船沿用两船的《规则》, 因此, PIDVCA 算法将会遇危险船的“左交叉”概念均沿用两船《规则》, 按照特殊情况处理。互见情况下 PIDVCA 算法的多船避碰策略为: 当本船对危险目标船均为让路船或既是让路船又是直航船时, 本船避让重点船策略按照让路船实施避让行动; 本船对所有危险来船均为直航船时, 本船避让重点船策略按照直航船实施避让行动, 对直航船的最佳避碰策略为最晚避让时机实施最大改向幅度 ($C_m \leq 90^\circ$)^[12]。

1) 仿真测试对比分析

基于 2.3 的几何作图分析，利用仿真实验验证 PIDVCA 算法提供的避碰决策方案的合理性和有效性。在仿真实验中，本船仍为一艘智能船，船模号为 3095，目标船 1 和目标船 2 均为“非智能船”。

雾航情况下，本船航向 0° ，航速 14.6 kn，目标船 1 与目标船 2 的初始状态及相关参数如表 5 所示。此时本船对危险目标船而言均为让路船，故本船避让重点船策略按照让路船实施。

表 5 目标船 1 与目标船 2 初始状态及相关参数

Tab.5 Initial state and relevant parameters of target ship 1 and target ship 2

目标船 Target ship	航向 Course/ $^\circ$	航速 Speed/kn	距离 Distance /n mile	相对方位 Relative orientation/ $^\circ$	SDA /n mile	SDA _c /n mile	SDA _{min} /n mile	TCPA /min	DCPA /n mile
1	90.4	14.4	11.93	315.53	1.81	1.14	0.15	34.8	-0.012
2	132.8	13.4	8.06	337.40	1.89	1.09	0.09	18.9	-0.007

在仿真实验中本船实施了分段决策，即先对近危险目标船 2（避让重点船）生成决策，决策为右让 90° ，完成避让复航后，再对远危险目标船 1 生成第二次的避让决策方案，即 9.85 min 后右让 30° ，且在预测复航时机 22.3 min 后复航，两目标船均与本船驶过让清，避让轨迹如图 9a) ~ 图 9c) 所示。

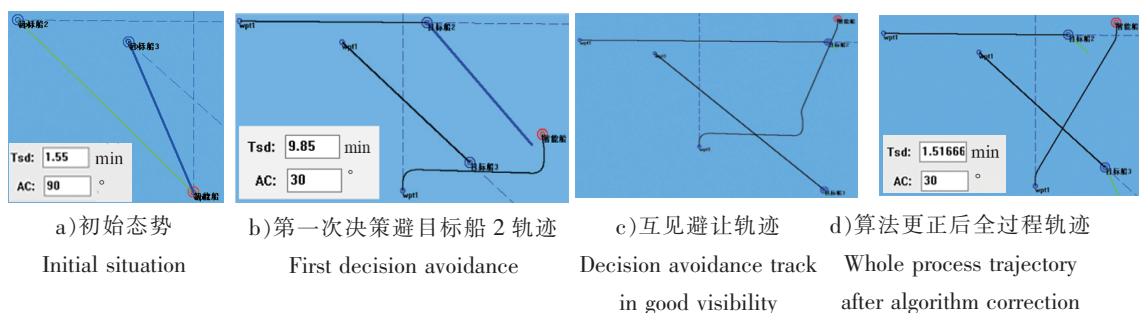


图 9 避让左交叉多船会遇局面

Fig.9 Avoiding the situation of meeting multiple ships at left crossing

对比 2.3 节多船避碰决策的几何作图发现，算法生成的第一次决策改向角过大，导致预测避让后的 DCPA = 9.56 n mile，见表 6，其值比实际大得多，与实际不吻合。通过分析发现第一次决策的最佳改向角误用了互见的决策方法，因该态势下两个目标船均为左舷来船，本船为直航船，由于雾航条件下的判定条件错误，导致决策过程按照互见条件确定最佳改向角，从而造成本船的 DCPA 远大于 SDA。

算法经过修正后，重新对在雾航情况下多船会遇局面进行仿真实验，结果如图 9d) 所示。结果显示算法经过修正后，目标船预测避让后的 DCPA 不仅大于 SDA，且数值与实际更加吻合（见表 6），体现了算法的合理性，最后两目标船均与本船驶过让清，体现了算法的有效性。

表 6 算法修正前后数据对比

Tab.6 Data comparison before and after algorithm correction

数据对比 Data comparison	预测避让后 DCPA After forecast avoidance DCPA/n mile
错误算法时 Error algorithm	9.56
算法修正后 After algorithm correction	2.56

2) 几何作图对比分析

根据算法生成的决策，以几何作图为基础，从航迹偏移量的角度，对互见时生或的分段避让决策做进一步分析；对算法修正后雾航时生成的决策作几何图进行验证。如图 10 所示。

图 10 可看出，初始时目标船 1 和目标船 2 对于本船的相对运动线 RML1 和 RML2 不仅与本船 SDA 圆相交，也与本船 SDA_c 圆相交，与本船都存在潜在碰撞危险。针对该会遇态势，算法生成的决策为 1.55 min 后向右改向 90° ，预测 28.6 min 后复航。矢量 $\overrightarrow{A1C1}$ 是目标船 1 相对于本船的运动速度，

其矢量长度为目标船1在6 min内相对于本船的运动距离。由式(2)可求出1.55 min目标船1行驶的距离 x ,同理求出目标船2的运动距离,再根据所得值在图10中作点,得到1.55 min后目标船1和目标船2分别在 P_1 点和 P_2 点时本船开始施舵。考虑避让转向 90° 的操纵时间(4.67 min),得到本船转向后目标船1和目标船2的转向点分别为 P_1' 和 P_2' 点。

$$V_r/6 = x/t_0 \quad (2)$$

本船采取向右转向 90° ($AC_1=90^\circ$)的避让措施,避让危险目标船2(避让重点船)28.6 min后复航。改向 90° 后目标船1和目标船2分别生成新的相对运动线RML1'和RML2',根据 $V_r \times T_{rr}$ 确定目标船1和目标船2的复航点分别为 F_1 和 F_2 。28.6 min后,目标船1和目标船2分别处于 E_1 点和 E_2 点,此时目标船2的相对运动线 F_2E_1 已位于本船SDA圆外,与本船无碰撞危险,说明已安全避让目标船2,但目标船1的相对运动线 E_1P 仍与本船SDA圆和 SDA_c 圆相交,与本船存在碰撞危险,故算法生成9.9 min后向右转向 30° 避让目标船1的决策,目标船1生成新的相对运动线RML1''。航行22.3 min后,根据式(2)计算得出目标船1处于 G_1 点,本船复航,相对运动线 G_1N 位于本船 SDA_c 圆外,已安全避让。

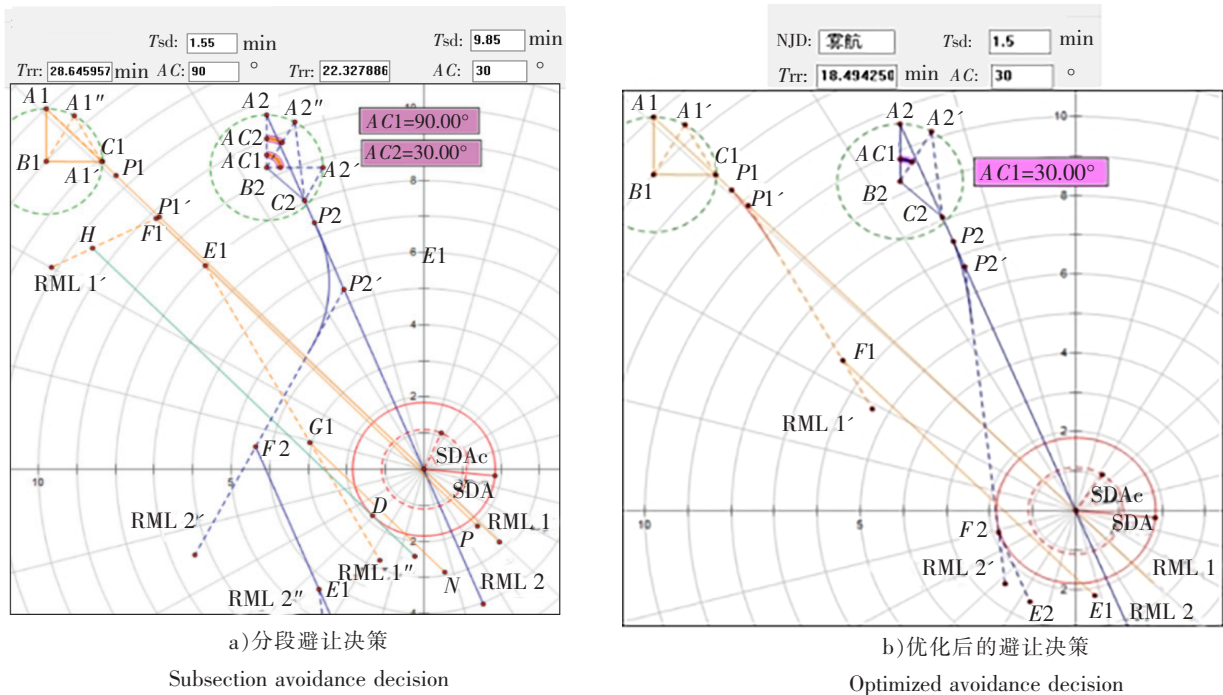


图10 多船避让几何图

Fig.10 Multi vessel avoidance geometry

因为本船航速为14.6 kn ($V_0=14.6$ kn),将算法生成的分段决策结果分别带入式(3),算出航迹偏移量 $X_{TE1}=6.96$ n mile, $X_{TE2}=2.71$ n mile,避让全过程本船的航迹偏移量为 $X_{TE1}+X_{TE2}=9.6$ n mile。

$$X_{TE} = (T_{rr}/60) V_0 \times \sin AC. \quad (3)$$

下面解释为何算法针对该测试场景进行分段决策,而不是向右转向 90° 完全避开两危险目标船后再复航。如果本船向右转向 90° 直至能够安全避让目标船1,其复航后相对运动线如图10a)的 HD ,切本船 SDA 圆于 D 点。几何画板中度量出 $P_1H=1.94$ cm, $A_1'C_1=0.02$ cm,因为实际船舶避让参数是以6 min度量,以1:1的比例在图中作出,即目标船1航速为14.4 kn,6 min目标船1则行驶1.44 n mile,所以 B_1C_1 长为1.44 cm。本船转向后,新的矢量三角形为 $A_1'B_1C_1$,度量出 $A_1'C_1=0.02$ cm,表明本船改向 90° 后,目标船1的相对运动速度为0.2 kn,又由于 P_1H 是 $A_1'C_1$ 的平行线,设目标船1从 P_1 点航行到 H 点用时为 y min,根据 $A_1'C_1/6 = P_1H/y$ 可以得出 $y=582$ min。

避让过程中本船的航迹偏移量 $X_{TE'} = (y/60)V_0 \times \sin AC = 141.62 \text{ n mile}$ 。

很明显分段决策产生的航迹偏移量(9.67 n mile)明显小于仅进行一次决策的航迹偏移量(141.62 n mile),说明算法生成的决策不仅能有效避开危险目标船,并且面对复杂局面能灵活应变,具有进行分段决策的能力。在避开危险目标的同时缩短航迹偏移量,生成的决策经济有效,体现了算法的优越性和合理性。

4 结论

本文以左交叉会遇局面为重点研究对象,基于《规则》作出相应的几何图进行决策分析,并对升级版PIDVCA算法雾航情况的两船和多船会遇场景进行仿真实验,发现个别场景由于判定条件缺失,从而生错误决策。对左舷EC=1、7和70决策进行局部优化,分析与仿真结果表明,算法升级版对左交叉会遇局面雾航情况下形成的决策方案是合理的、有效的,体现了算法的“拟人”特性,能够有效规避算法量化《规则》过程可能产生的不合理决策效果。本研究可为相关研究人员提供参考。

本文仅分析开阔水域中左舷来船雾航的情况,对于港口水域和繁忙水域的避碰决策分析有待后续深入研究。

[参考文献]

- [1] COENEN F P, SMEATON G P, BOLE A G. Knowledge-based collision avoidance[J]. The Journal of Navigation, 1989, 42(1): 107-116.
- [2] 吴兆麟, 刘德新, 贾传荧. 船舶智能避碰决策与控制系统总体结构[J]. 大连海事大学学报, 2004, 30(2): 1-3.
- [3] GAO M, SHI G Y. Ship collision avoidance anthropomorphic decision-making for structured learning based on AIS with Seq-CGAN[J]. Ocean Engineering, 2020, 217: 107922.
- [4] 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, 2021, 26(2): 509-524.
- [5] 孙立成. 船舶避碰决策数学模型的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2000.
- [6] HUANG Y, CHEN L, CHEN P, et al. Ship collision avoidance methods: state-of-the-art[J]. Safety Science, 2020, 121: 451-473.
- [7] 黄颖. 船舶紧迫危险避碰决策方法研究[D]. 厦门: 集美大学, 2013.
- [8] 陈传仁, 李国定, 李福生, 等. 不同水域船舶会遇危险评判阈值[J]. 中国航海, 2020, 43(04): 27-32.
- [9] 李丽娜, 杨神化, 熊振南, 等. 船舶拟人智能避碰决策理论框架的研究[J]. 中国航海, 2009(2): 30-34.
- [10] 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): 1-5.
- [11] 李丽娜, 熊振南, 高岩松, 等. 单船避碰智能决策的生成与优化方法[J]. 中国航海, 2002(2): 49-52.
- [12] 李丽娜, 熊振南, 任勤生. 多船避碰智能决策的生成与优化方法[J]. 信息与控制, 2003, 32(2): 189-192.
- [13] 陈国权. 船舶避碰自动化关键技术研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [14] 李丽娜, 杨神化, 曹宝根, 等. 船舶避碰智能决策自动化研究[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2006, 11(2): 188-192.
- [15] 熊振南, 李丽娜, 周伟. 紧迫危险下的船舶智能避碰决策研究[J]. 中国航海, 2009(4): 39-43.
- [16] 中华人民共和国海事局. 1972年国际海上避碰规则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)