基于COLREGS的无人艇避碰方法 [[1]](#footnote-1)

许 强，王庆丰，张懿军，王琪，聂凯璐，洪旺

（江苏科技大学，江苏 镇江 221000）

摘 要：为解决无人艇在执行航行任务时存在动态障碍物规避的情形，旨在探讨基与COLREGS的无人艇避碰方法，以无人艇与规避目标船为对象展开避碰的研究。本文根据无人艇在实际航行过程中需要遵循COLREGS来彼此约束，结合无人艇与动态障碍船之间运动态势参数，计算船舶碰撞危险度衡量USV与碍航物之间的碰撞风险，通过检测和判断CRI的变化来验证避碰行为的可靠性，形成总的避碰系统策略，确保无人艇在遇到其他障碍船时能够做出正确的避碰决策。通过仿真分析所提出的USV避碰系统策略遵循COLREGS中的相关规定，规划出的避碰路径有效规避了目标障碍物，降低了碰撞风险。结果表明对于提高无人艇的避碰能力和安全性具有重要的理论和实际意义。

关键词：COLREGS；运动参数；碰撞危险度；避碰决策

中图分类号： 文献标志码：A

0 引言

国际海上避碰规则（COLREGS）是一套全球性的标准，旨在确保在海上航行的船舶之间保持安全距离，减少相撞的可能性，并保护船舶、船员和乘客的生命财产安全。COLREGS包括了许多规则，涉及了船舶的灯光、信号、航行方向和速度等多个方面。其中最基本的规则是避让规则。船舶必须遵守“避让他船”的原则，即在航行中必须避让正在前方航行的船舶和右舷侧的船舶。在海上船舶应该保持右侧通行，这是因为大多数国家的航行规则都是如此，也有助于避免相撞的发生[1]。

无人艇在遵守COLREGS方面存在一些挑战。COLREGS是根据有人船只的特点制定的，因此在应用于无人艇时可能存在一些困难和限制。由于无人艇往往是通过遥控或自主导航系统进行操作的[2]，这意味着其船舶操纵员并不在船舶上，无法直接观察周围的船舶和环境，因此可能存在更大的安全风险。这需要对COLREGS进行适当的修改和调整，以便无人艇和有人船只能够更好地相互协调和避让。为此对无人艇在航行途中避免发生碰撞展开必要的研究[3-4]。沈[5]等人考虑船舶的操纵特性和避碰规则，基于深度学习算法结合避碰经验规则让USV航行轨迹符合避让决策的要求，实现了在复杂水域中能够自动避碰。康[6]等人对无人艇避碰模型与路径规划方法展开了分类分析, 重点是将智能优化方法与船舶领域模型相结合，进一步提高船舶避碰路径规划的精度和实用性。杜[7]等人针对USV避免电子海图上未标示动态障碍物的问题，提出了一种符合COLREGS的规避方案。该方法将动态障碍物在某一时刻转换为相对无人艇瞬时静止的状态，通过实时计算避碰模型，使用粒子群优化算法求解无人艇最优的航速和航向改变量，从而实现动态障碍物的规避任务。

因此无人艇在实际航行过程中需要遵循COLREGS[8]来彼此约束，本文设计一套针对无人艇动态避障的规则，结合无人艇与动态障碍船之间运动态势，通过船舶碰撞危险度衡量USV与碍航物之间碰撞风险，并设计无人艇避碰决策系统模型，最后，通过仿真实验验证避碰规则常出现的经典会遇局面。

1 基于COLREGS的无人艇避碰规则

本文主要针对COLREGS规则中的如下几条作重点描述。

第十三条：超越（Overtaking），当一艘船正在超越另一艘船时，超越船应该保持避让距离，直到超越完毕，并避免对被超越船造成危险。

第十四条：对头遇（Head-on Meeting），当两艘船相向而行时，应该采用“右舷避让”原则，互相避让。

第十五条：横遇（Crossing），当两艘船在交叉航行时，即相互横过对方船艏船首时，应该采用“右舷避让”原则，应该尽量避让在右舷的船。

总之，避免与其他船只相撞是所有船只（包括无人艇）在海上的首要任务。

由于无人艇的动态行为会比较复杂，在实际应用中，需要考虑到无人水面艇的运动状态、速度、加速度等多种因素，以准确判断其与其他船只之间的相对位置和运动趋势。在这种情况下，通过上述避碰规则最重要的是将会遇态势进行划分与定义，并针对不同的局面提出相应的避碰规则，避免舰艇与目标障碍船之间发生航行碰撞危险，以便更好地实施避碰策略，让无人艇在复杂的海上交通中更加安全地航行。如果无人艇与目标障碍无人艇正常行驶在同一海域遭遇追越、相遇或交叉情况的局面中，其中一艘无人艇具有避让行为，则该艇应当采取适当的行动，避免与另一艘艇发生冲突碰撞风险。针对多种会遇态势使得无人艇应该采取何种规避行为具体如下图1所示。

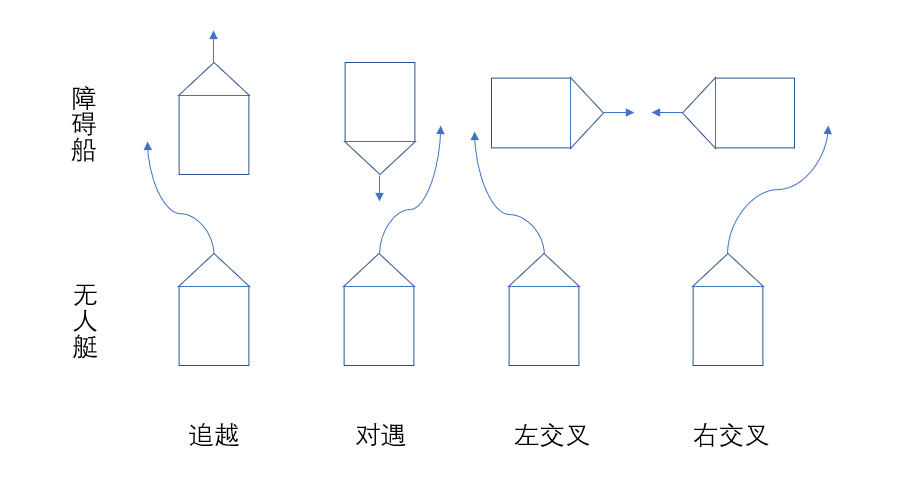


图1 会遇局面避碰模型示意图

通过判断无人艇是否相交或者距离是否小于某个阈值，从而判断是否发生碰撞和冲突。结合避碰模型规则得出碰撞冲突区域的定量划分如图2所示，具体描述如下：

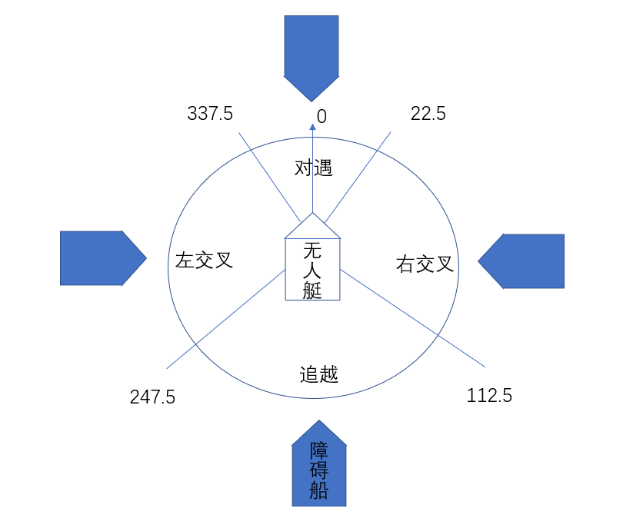


图2 碰撞冲突区域会遇判断

追越：当障碍船与无人艇的航向差时，处于追越状态，则无人艇从碍航物左侧航行。

对遇：当障碍船与无人艇的航向差时，处于对遇状态，则无人艇从碍航物右侧航行。

左交叉：当障碍船与无人艇的航向差时，此时形成左交叉情况，这表示目标障碍船在无人艇的右侧，此时无人艇应该向左避让，避免靠近目标障碍船的右侧，则无人艇向左从碍航物艉部航行。

右交叉：当障碍船与无人艇的航向差时，此时形成右交叉情况，这表示目标障碍船在无人艇的左侧，此时无人艇应该向右避让，避免靠近目标障碍船的左侧，则无人艇向右从碍航物艉部航行。

2 无人艇与目标障碍船运动参数计算

对于舰船的碰撞危险度求解需计算水面无人艇与规避对象的船舶到最近会遇点距离（Distance to Closest Point of Approach, DCPA）和船舶到最近会遇点时间（Time to Closest Point of Approach, TCPA）,为此在本节中做相应简要描述。图3为USV与碍航物在北东坐标系下的路径规划运动参数图。

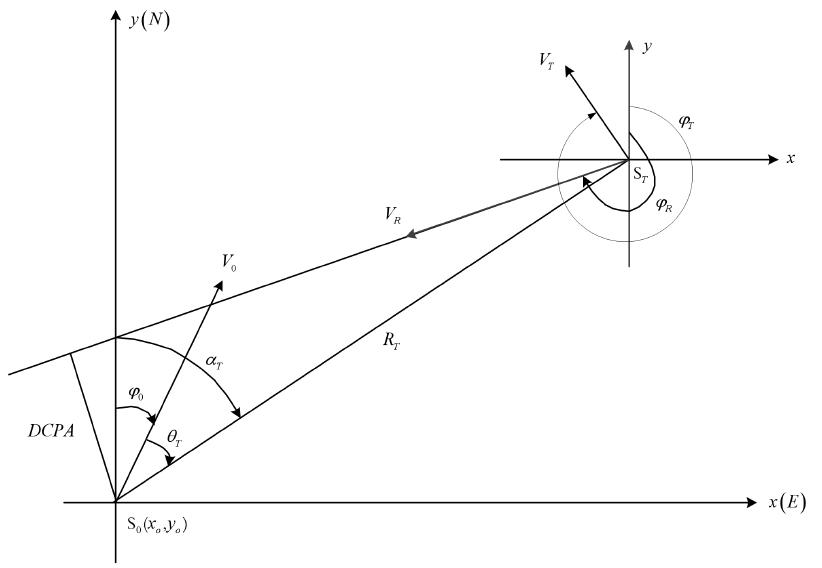


图3 USV与碍航物相对运动参数图

预先设定：水面无人艇的位置用表示，速度用表示，航向用表示；规避对象的位置用表示，速度用表示，航向用表示。水面无人艇的位置坐标为，速度矢量为；规避对象的坐标为，其速度矢量为，按下列步骤进行计算。

1）水面无人艇的速度矢量为：

 （1）

 （2）

其中： （3）

2）规避对象的速度矢量为：

 （4）

 （5）

其中： （6）

3）规避对象相对水面无人艇的运动速度矢量为：

相对速度矢量表示为：

 （7）

其中，在轴、轴上的分量分别为：

 （8）

相对运动速度大小为：

 （9）

相对速度方向为：

 （10）

其中： （11）

4）水面无人艇与规避对象相对距离为：

 （12）

5）规避对象相对无人艇的方位角为：

 （13）

 （14）

6）规避对象相对方位为：

 （15）

7）规避对象与水面无人艇航向交叉角为：

 （16）

8）水面无人艇与规避对象的最近会遇距离（DCPA）为：

 （17）

9）水面无人艇与规避对象的最近会遇时间（TCPA）为：

（18）

通过上述步骤求解结果，得到无人艇的碰撞危险度为：

 （19）

式（19）中和是由多避碰过程得出的加权值。通常与无人艇到达位置有关，水面无人艇在右边有其他舰船运动时，，水面无人艇在左边有其他舰船运动时，，。综上所述，无人艇与其他舰船的碰撞值越小，碰撞风险可能越高，反之越低。

3 无人艇碰撞危险度计算

船舶碰撞危险度（Collision Risk Index，CRI）是用来度量两船舶行驶过程中发生碰撞可能性的主要参数，可以直接用数值大小来量化表示碰撞可能性的程度[9]，假定初始。其中，表示两船不存在任何碰撞可能性，则表示在当前态势下，即使本船大角度转向同样无法避免碰撞。值越大，碰撞危险程度越高。DCPA与TCPA对碰撞风险度至关重要。本文研究空间碰撞风险与时间碰撞风险。

3.1 空间碰撞危险度

空间碰撞危险度（Space Collision Risk，SCR）是是衡量无人艇与避碰对象遇到碰撞的指标。

对DCPA与船舶能够安全通过距离与会遇距离进行比较来确定SCR，得到DCPA的隶属函数值具体为：

（20）

其中：为绝对安全会遇距离，；为空间碰撞风险的零边界，以保证安全航行。若DCPA大于，USV可安全通过无需采取措施；若DCPA小于，则水面无人艇和目标之间存在一定的碰撞危险，有必要采取适当的规避措施以保证安全通过；当DCPA于和之间时，则需要通过计算船舶碰撞危险度判定。

（21）

其中：。

3.2 时间碰撞危险度

时间碰撞危险度（Time Collision Risk，TCR）则描述在有一定碰撞风险条件下，其中一方为避免碰撞所采取使用一定舵角改变航向时间的紧急程度，也就是最晚的打舵时间，一旦错过这一时间，即便采取措施碰撞将依然无法避免。TCR主要用来描述会遇双方航速、速度比、船体长度、DCPA等性能指标参数和海上态势信息对CRI的影响。

对TCPA与船舶能够通过最晚打舵时的时间与规避船位于目标位置最近会遇时间进行比较来确定TCR，得到TCPA的隶属函数值具体为：

 （22）

 （23）

 （24）

其中：为目标进行规避时的TCPA，为无人艇避开障碍时所反应的最短时间，为目标位置到最近相遇点的时间。TCPA的隶属度函数值取值越小，则表示碰撞危险越大。

综上所述，无人艇和目标规避船的综合CRI模型需要由SCR和TCR共同加权得到为：

 （25）

其中,为加权因子，具体描述为：

（1）当时，；

（2）当，时，；

（3）当，时，。

3.3 避碰决策策略

无人艇避碰系统模型通过传感器、雷达、相机等装置获取周围环境和USV自身状态的数据，例如USV的速度、位置、方向和周围目标障碍船的位置、速度和方向等。对收集到数据进行处理，以得到与其他物体的距离、时间和碰撞危险度等信息。通过数学和物理原理计算DCPA、TCPA和CRI等参数评估与其他规避船发生碰撞的风险。根据评估的结果，如果发现存在碰撞风险，则需要开始避让行动。USA会根据不同的情况采取不同的运动策略。在避碰任务完成后，USV需要恢复原来的航行状态，并重新评估与其他物体的碰撞风险。检测避碰任务的效果，如果发现存在问题，则需要重新调整模型参数或运动策略。在紧急情况下，例如遇到狂风巨浪或机械故障等，USV需要快速做出应急避障任务。USV避碰系统模型策略具体流程如图4所示。

在无人艇避碰行动中，当避碰危险度达到一定的阈值时，就应该启动避碰行动，以确保多无人艇的安全行驶。为此本文在验证避碰任务的可靠性时，可以通过检测避碰过程中的CRI是否降低到小于0.4来判断。因此，当CRI降低到小于0.4时，可以认为避碰任务已经完成，无人艇可以安全行驶和放行。

当碰撞危险度为0时，USV与碍航物之间的距离可以被认为是安全距离。当碰撞危险度为1时，两者之间必然会出现避碰行为，此时两者之间的距离可以称作是碰撞距离。最后，当碰撞危险度达到指定的阈值（前面设定的0.4）时，此时应该避免在这个距离内发生碰撞，即行动距离。

综上所述，通过基于避碰危险度的判断和检测CRI的变化来验证避碰行为的可靠性是一个有效的方案，可以确保无人艇在遇到其他障碍船时能够做出正确的避碰决策，保证船只的安全行驶。

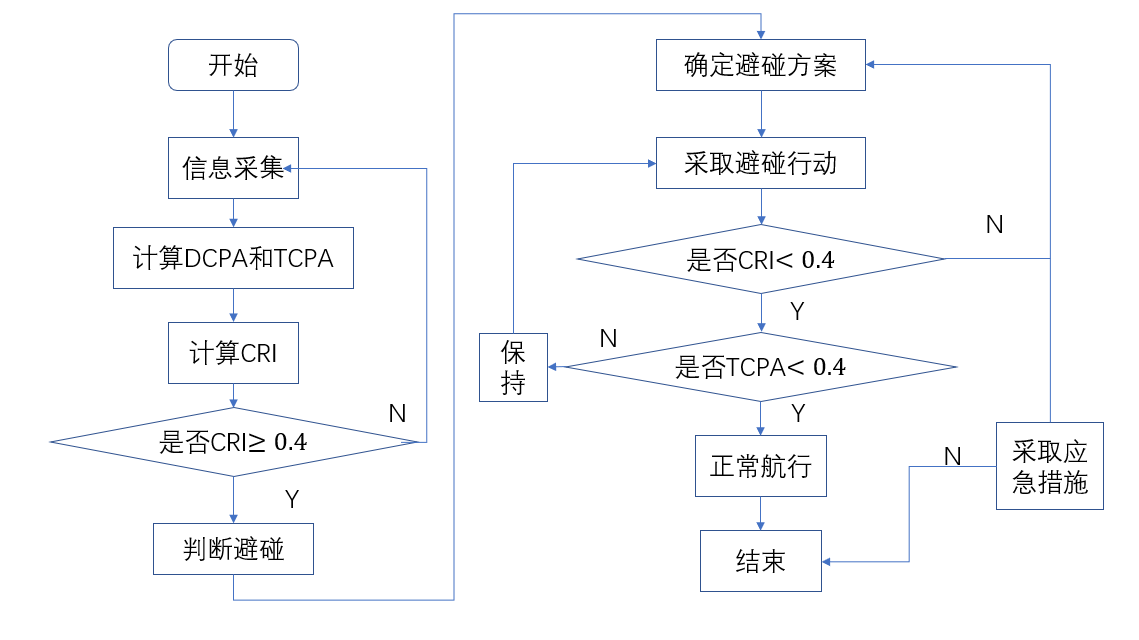


图4 USV避碰系统模型策略

4 仿真结果与分析

通过MATLAB进行USV避碰路径规划，包括追越、对遇与交叉情况进行仿真分析，无人艇的位置在的范围内随机初始化，且每艘无人艇的初始航向都是，会遇各情况时有一艘目标障碍船驶向无人艇，对USV航行构成安全影响，根据提出的避碰决策系统模型进行动态避碰。

4.1 追越

无人艇初始位置为，初始速度为，目标障碍船的初始位置为，初始速度为，具体动态避碰如图5所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 避碰轨迹图 | 相对距离 |
|  |  |
| 无人艇轨迹路线 | 碰撞危险度对比 |

图5 追越局面

4.2 对遇

无人艇初始位置为，初始速度为，目标障碍船的初始位置为，初始速度为，具体动态避碰如图6所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 避碰轨迹图 | 相对距离 |
|  |  |
| 无人艇轨迹路线 | 碰撞危险度对比 |

图6 对遇局面

4.3 左交叉

无人艇初始位置为，初始速度为，目标障碍船的初始位置为，初始速度为，具体动态避碰如图7所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 避碰轨迹图 | 相对距离 |
|  |  |
| 无人艇轨迹路线 | 碰撞危险度对比 |

图7 左交叉局面

4.4 右交叉

无人艇初始位置为，初始速度为，目标障碍船的初始位置为，初始速度为，具体动态避碰如图8所示。

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| 避碰轨迹图 | 相对距离 |
|  |  |
| 无人艇轨迹路线 | 碰撞危险度对比 |

图8 右交叉局面

5 结语

因此，在海上交通中保证无人艇与其他船只的安全避碰是非常重要的。本研究通过对COLREGS规则的研究和分析，提出了基于COLREGS的无人艇避碰方法，该方法包括了无人艇避碰的基本原则和具体操作，在具体操作中，根据会遇船舶的位置关系和运动状态，提出了相应的避碰策略，包括直行遇碰、正面遇碰、侧面遇碰、相反方向遇碰等。通过经典会遇局面的仿真实验，验证了所提出的无人艇避碰方法的可行性和有效性，结果表明，所提出的无人艇避碰方法能够有效地保证无人艇与其他船只的安全避碰，并且具有较高的实用性和可操作性。为实际应用提供了可靠的技术支持。

参考文献：

[1] 王鸿东,易宏,向金林,付悦文.基于海事规则的中型无人艇避碰路径规划算法研究及应用[J].中国舰船研究,2022,17(05):184-195+203.

[2] 刘佳,王杰. 无人水面艇避障路径规划算法综述[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(8): 1–10,20.

[3] CAMPBELL S, NAEEM W. A rule-based heuristic method for COLREGS-compliant collision avoidance for an unmanned surface vehicle[J]. IFAC proceedings volumes, 2012, 45( 27):386－391．

[4] TANG Pingpeng, ZHANG Rubo, LIU Deli,et al. Local reactive obstacle avoidance approach for high-speed unmanned surface vehicle[J]. Ocean engineering, 2015,106:128－140.

[5] 沈海青,郭晨,李铁山,余亚磊.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(06):998-1005.

[6] 康与涛,朱大奇,陈伟炯.船舶避碰路径规划研究综述[J]. 船海工程,2013,42( 5):141－145.

[7] 杜开君,茅云生,向祖权,周永清,宋利飞,刘彬.基于海事规则的水面无人艇动态障碍规避方法[J]. 船海工程,2015,44(03):119-124.

[8] ENG X M. Evolution of the safe path for ship navigation[J]. Applied Artificial Intelligence, 2003, 17(2): 87–104.

[9] 王少博,张英俊,胡鑫.考虑船位预测不确定性的船舶碰撞危险度计算方法[J].中国舰船研究,20 21,16(01): 114-120.

**Collision avoidance method of unmanned surface vehicle based on COLREGS**

**XU Qiang,** **WANG Qing-feng, ZHANG Yi-jun, WANG Qi, NIE Kai-lu, HONG Wang**

（Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 221000,China）

**Abstract:** In order to solve the problem of dynamic obstacle avoidance when unmanned surface vehicle ( USV ) performs navigation tasks, this paper aims to explore the collision avoidance method of USV based on COLREGS, and studies the collision avoidance between USV and target ship. In this paper, according to the fact that the USV needs to follow the COLREGS to constrain each other in the actual navigation process, combined with the motion situation parameters between the USV and the dynamic obstacle ship, the ship collision risk degree is calculated to measure the collision risk between the USV and the obstacle. The reliability of collision avoidance behavior is verified by detecting and judging the change of CRI, and the overall collision avoidance system strategy is formed to ensure that the USV can make correct collision avoidance decisions when encountering other obstacle ships. The USV collision avoidance system strategy proposed by simulation analysis follows the relevant regulations in COLREGS. The planned collision avoidance path effectively avoids the target obstacle and reduces the collision risk. The results show that it has important theoretical and practical significance for improving the collision avoidance ability and safety of USV.

**Key words:** COLREGS, Motion parameters, Collision risk, Collision avoidance decision-making

1. 作者简介：王庆丰（1976—），男，教授，研究方向为船舶与海洋工程结构设计。 [↑](#footnote-ref-1)