



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



UUV攻防博弈的自适应攻击占位机动决策研究

王钊, 王宏健, 张宏瀚, 于丹, 任镜霏

引用本文:

王钊, 王宏健, 张宏瀚, 于丹, 任镜霏. UUV攻防博弈的自适应攻击占位机动决策研究[J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3819–3828.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1347>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

CART决策树方法在煤电厂节能降耗中的应用

Application of CART decision tree model in reducing coal consumption in coal power plant

控制与决策. 2021, 36(5): 1232–1238 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1272>

考虑个体累积共识贡献的犹豫模糊语言自适应共识模型

Adaptive consensus model with hesitant fuzzy linguistic information considering individual cumulative consensus contribution

控制与决策. 2021, 36(1): 187–195 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0556>

基于云模型和多层权重求解的多粒度语言大群体决策方法

Multi-granularity linguistic large group decision-making based on cloud model and multi-layer weight determination

控制与决策. 2021, 36(9): 2257–2266 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0102>

磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor

控制与决策. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

多准则决策中的鲁棒有序回归方法综述

Introduction to robust ordinal regression methods in multi-criteria decision making

控制与决策. 2017, 32(5): 769–779 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1104>

UUV 攻防博弈的自适应攻击占位机动决策研究

王 钊, 王宏健[†], 张宏瀚, 于 丹, 任镜霏

(哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对攻防博弈中无人潜航器 (unmanned underwater vehicle, UUV) 的占位机动决策问题, 现有方法存在研究不充分、不全面、无法解决实际占位攻击决策的问题, 通过研究并建立攻击占位机动的数学模型, 提出采用向量法分析 UUV 极限射程圆和 UUV 可攻区域, 首次给出占位可攻判定规则, 并全面分析不同速度条件下, 有无障碍物条件下的最短时间攻击占位机动决策求解方法. 针对 UUV 占位机动决策中目标运动状态变化的问题, 提出一种参数自适应的攻击占位机动决策方法, 该决策方法能够自适应目标位置、艏向、速度参数的变化, 自主选择最近可达阵位点, 并求解到达该最近可达阵位点的机动参数. 通过仿真验证占位可攻判断规则以及占位机动决策求解方法的有效性、高效性, 以及所提出方法在动态攻防博弈下的参数自适应性.

关键词: 无人飞行器; 攻防博弈; 攻击占位; 可攻区域; 机动决策

中图分类号: N94; TP13 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1347

引用格式: 王钊, 王宏健, 张宏瀚, 等. UUV 攻防博弈的自适应攻击占位机动决策研究 [J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3819-3828.

Adaptive attack occupancy maneuver decision of UUV attack-defense game

WANG Zhao, WANG Hong-jian[†], ZHANG Hong-han, YU Dan, REN Jing-fei

(College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The existing methods for the decision-making of unmanned underwater vehicle (UUV) occupancy in attack-defense games are found to be insufficient and incomplete in addressing practical occupancy attack problems. This study analyzes and establishes a mathematical model for attack occupancy maneuvers, proposes the use of vector analysis to determine the UUV's maximum range circle and the attackable area, develops the concept of occupancy determination rules, and comprehensively analyzes the methods for solving the shortest time attack occupancy maneuvers under different speed conditions with or without obstacles. Additionally, a parameter-adaptive occupancy maneuver decision-making method is proposed to address the issue of target motion state changes. This decision-making method can adapt to the changes in the target's position, heading, and speed parameters, autonomously select the nearest reachable occupancy point, and solve for the maneuver parameters to reach that point. Simulation results validate the effectiveness and efficiency of the occupancy attack determination rules and the maneuver decision-making methods, as well as the parameter adaptability of the proposed approach in dynamic attack-defense games.

Keywords: underwater unmanned vehicles; attack-defense game; attack occupancy; attackable area; maneuver decision

0 引言

随着无人水下航行器 (Unmanned Underwater Vehicle, UUV) 在军事、科研和商业领域的广泛应用, UUV 攻防博弈的研究逐渐成为国际学术界和军事领域的热点问题^[1]. 通过 UUV 集群完成海洋作战任务

将成为未来对抗形态的发展趋势, UUV 攻防博弈的研究对于提高 UUV 的作战能力和生存能力具有重要意义^[2]. 然而, 目前针对 UUV 攻防博弈的研究开放得很少, 大部分研究集中在协同控制^[3-4]、任务分配^[5]和路径规划^[6]等方面, 缺乏对 UUV 攻防博弈中行为和

收稿日期: 2023-09-21; 录用日期: 2024-02-25.

基金项目: 国家科技创新特区项目 (21-163-05-ZT-002-005-03); 水下机器人技术国家重点实验室基金项目 (JCKYS2022SXJQR-09); 高水平科学研究引导计划项目 (3072022QBZ0403).

责任编辑: 张文安.

[†]通讯作者. E-mail: cctime99@163.com.

决策的深入探讨,如何求解符合实际要求的UUV攻防博弈决策问题仍是一个难题^[7-8].

攻防博弈问题主要分为追逃问题^[9-10]、到达回避问题^[11-12]和多智能体对抗^[13]. Sun等^[14]针对复杂动态的海洋环境中存在多个障碍物的追逃问题,提出了一种自组织协作追逐策略,该策略能够使得UUV在追逐过程中避开障碍物,最终追上目标. Yan等^[15]对多人到达-回避问题进行详细研究,构建了博弈双方的界栅及决胜空间. Xu等^[13]用深度强化方法求解有限感知和有限通信条件下的多智能体对抗问题. 虽然上述研究在单方策略优化以及双方均衡结果求解等方面取得了部分理论成果,但由于对抗模型构建简单,成果无法直接应用到UUV攻防博弈中.

在UUV攻击决策的构建中,大多将行为构建为向目标靠近或默认随时可攻等简单模型^[16-18]. 实际对抗中,受到敌我运动状态、任务载荷有效航程、航速等条件的制约,攻击行为往往需要考虑占位的情况. 因此,基于简单行为下的博弈结果往往与实际不符,并且可能导致原本可攻的位置变为不可攻,进而导致整个博弈失败,本文后续仿真对简单行为导致决策失败进行了验证. 是否占位可攻,以及如何机动能够实现最短时间完成占位,是攻击占位机动决策所要考虑的,攻击占位机动决策问题是UUV攻防博弈领域中是一个重要而又容易被忽视的问题.

现有针对攻击占位机动决策的研究较少^[19-21],文献^[22]讨论了最小占位速度、最短时间占位的计算问题,但讨论的占位阵位点并非是最短时间占位阵位点,而由人为指定;文献^[21]考虑了等概率圆的影响下占位攻防博弈对抗,但没有考虑阵位点的选取以及阵位点占位问题;文献^[23]提出了一种基于深度强化学习和蒙特卡洛搜索树的机动决策方法,但决策效果依赖收益函数的建立,可理解性较差,无法应用到实际决策中.

现有UUV攻击占位机动决策存在以下问题: 1) 占位机动决策研究不透彻,针对是否存在可攻占位点仅进行了讨论或图形分析,并未给出具体规则的解析解; 2) 占位机动决策研究不全面,在追逃、到达回避等问题的研究中,为了保证博弈均衡的存在,往往仅讨论攻击者速度大于目标的情况,且捕获条件未考虑任务载荷的影响; 3) 占位机动决策设计不智能,现有的占位机动决策方法需要人为指定阵位点,无法自主选择最佳阵位点^[24-25].

针对上述问题,本文进行如下研究: 根据任务载荷实际约束,构建UUV攻击占位的数学模型; 通过向

量分析法,全面研究攻击者速度大于、等于、小于目标3种情况下的占位可攻判定规则; 分析最短时间占位阵位点的选取依据,并分别给出有无障碍物的最短时间攻击占位机动求解方法; 提出一种参数自适应的攻击占位机动决策方法,该方法能够自适应目标位置、艏向、速度参数的变化,自主选择最近可达阵位点,并求解到达该最近可达阵位点的参数; 最后通过仿真进行了验证.

1 UUV攻击占位机动的数学模型

给出如下定义: 以 O 为圆心建立北东坐标系,北向为 y 轴正方向,东向为 x 轴正方向; UUV处于点 $A(x_a, y_a)$,速度为 V_w ,最大速度为 V'_w ; 任务载荷最大速度为 V_l ,极限射程为 S_{ij} ; 目标坐标 $M(x_m, y_m)$,目标速度为 V_m ,目标航向的单位向量为 $\vec{C}_m = (e_x, e_y)$.

1.1 UUV任务载荷的极限射程圆

假设UUV的任务载荷恰好在航行到最大有效射程时命中目标. 如图1所示,不同目标舷角下组成的轨迹便是任务载荷的极限射程圆^[26],其中 θ 为命中角, X_{m0} 为目标舷角, W_0 为阵位点.

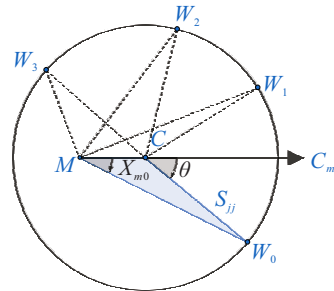


图1 极限射程圆示意图

令 $m_l = V_m/V_l$, 线段 MC 长度为

$$L_{MC} = \frac{S_{ij}}{V_l} \times V_m = m_l S_{ij}. \quad (1)$$

在实际应用中,UUV发射的任务载荷主要分为直航式和转角式两种类型^[27]. 上述极限射程圆是在直航式任务载荷射击条件下得出的,显然,UUV进入极限射程圆后才可能命中目标.

不同的任务载荷的航行轨迹可能并非直线,海洋扰动和目标等存在各种误差,使得极限射程圆可能并非一个标准圆,而是一个近似圆. 由于近似圆计算复杂,且其之间的误差占比总体较小,在研究机动决策时往往以标准圆进行分析,也可根据任务载荷的类型和实际情况将近似圆转换为多个标准圆进行综合分析,以提供决策支持^[19,27].

1.2 UUV占位可攻的图形分析

针对占位可攻问题,采用相对运动关系描述. 如图2所示,将一个与目标速度大小相等、方向相反的

向量(图中的 $-V_m$)叠加到UUV(点A)上,即可将目标及阵位点看成固定的. 图中以B为圆心的圆是相对运动速度圆,半径为 V'_w ,其中 V_x 的方向表示相对运动方向, \vec{V}_x 由 \vec{V}_m 和 \vec{V}_w 共同决定. 则点A到该圆的两条切线(图中AE、AF两射线)所夹区域为UUV的机动可行域. 显然,阵位点的选取应在该机动可行域内.

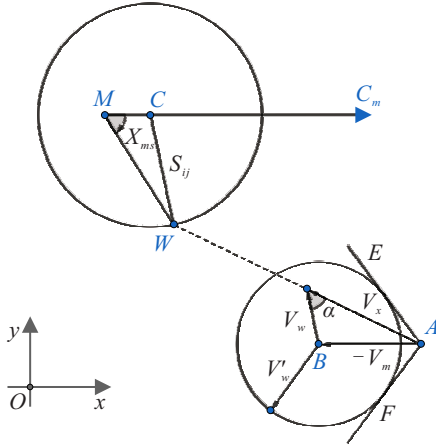


图2 UUV 占位可攻判断示意图

由图2可知,当极限射程圆与AE、AF射线所围区域有交集时,UUV存在占位可攻阵位点. 现有占位攻击的研究内容大多在该基础上进行,但仅停留在图形或定性分析,本文将对该内容进行更深入地研究.

2 求解UUV占位可攻的判断条件

本文在上述图形分析的基础上,对UUV占位可攻问题进行向量分析,并给出不同速度条件下不等式组判断条件.

2.1 占位可攻求解过程

类比 m_l , 定义 m_w 为

$$m_w = \frac{V_m}{V'_w}, m_l = \frac{V_m}{V_l}. \quad (2)$$

由式(1), $\vec{OC} = \vec{OM} + \vec{MC}$, 点C坐标 (x_c, y_c) 为

$$\begin{cases} x_c = x_m + e_x S_{ij} m_l, \\ y_c = y_m + e_y S_{ij} m_l. \end{cases} \quad (3)$$

2.1.1 $V'_w > V_m$ 的情况

由图2,此时UUV的机动可行域为整个平面,即UUV必定能在某时刻占领到阵位点W,UUV相对目标无论处于任何位置均存在可达阵位点. 因此当 $V'_w > V_m$ 时,UUV必定占位可攻.

2.1.2 $V'_w = V_m$ 的情况

当 $V'_w = V_m$ 时,可得图3所示的临界状态示意图,此时可达的阵位点有且仅有一点(图3点W). 易知,当且仅当攻击UUV点A处于图3中蓝色阴影部分(即UUV的可攻区域),UUV存在可达阵位点,占位可攻.

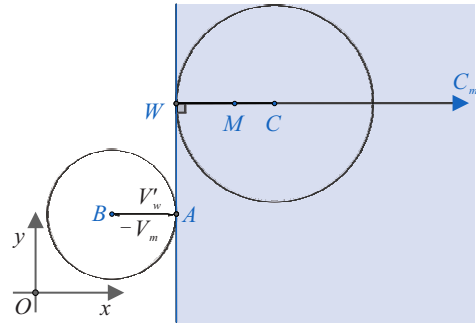


图3 $V'_w = V_m$ 时UUV占位可攻的临界示意图

由 $\vec{OW} = \vec{OC} - \vec{WC}$, 点W坐标 (x_w, y_w) 为

$$\begin{cases} x_w = x_m + e_x S_{ij} (m_l - 1), \\ y_w = y_m + e_y S_{ij} (m_l - 1). \end{cases} \quad (4)$$

则过点W的切线方程可表示为

$$(x - x_w)(x_w - x_c) + (y - y_w)(y_w - y_c) = 0. \quad (5)$$

若A、C在切线的同一侧,即

$$(x - x_w)(x_w - x_c) + (y - y_w)(y_w - y_c) \leq 0, \quad (6)$$

则必定占位可攻. 因此当 $V'_w = V_m$ 时占位可攻的判断条件可表示为: 当A (x_a, y_a) 满足式(6)时,UUV占位可攻.

2.1.3 $V'_w < V_m$ 的情况

如图4,此时可达阵位点有且仅有一点即W. 直线AN与圆B相切于点N,与圆C相切于点W,延长CM交直线AN与点P,过点P做圆C另一切线交圆C于点Q. 由 $\triangle PWC \sim \triangle ANB$, 则 L_{PC} 为

$$L_{PC} = S_{ij} \frac{V_m}{V'_w} = m_w S_{ij}. \quad (7)$$

当UUV处于图4阴影位置时占位可攻,下面进行求解.

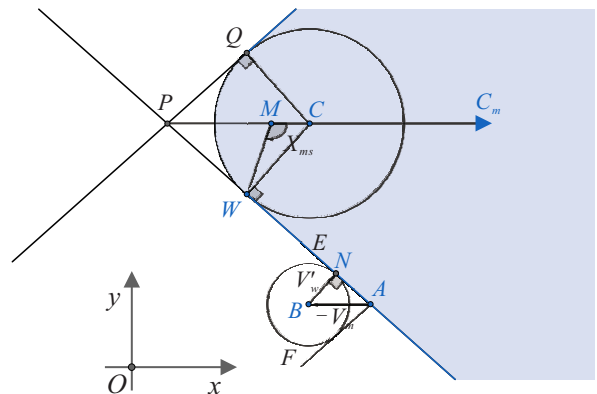


图4 $V'_w < V_m$ 时UUV占位可攻临界示意图

由式(7), $\vec{OP} = \vec{OC} - \vec{PC}$, 则点P坐标 (x_p, y_p) 为

$$\begin{cases} x_p = x_m + e_x S_{ij} (m_l - m_w), \\ y_p = y_m + e_y S_{ij} (m_l - m_w). \end{cases} \quad (8)$$

由式(7), $m_w > 1$, 点P必定在圆C外,图4阴影区

域可看作:圆C区域+圆C的切线(直线PQ与直线PW)与极线(直线QW)相交后点C所处区域.

1) 圆C区域可表示为

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 - S_{ij} \leq 0. \quad (9)$$

2) 点P关于圆C的极线(QW)方程为

$$(x_p - x_c)(x - x_c) + (y_p - y_c)(y - y_c) = S_{ij}^2. \quad (10)$$

3) 已知圆C方程为 $(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = S_{ij}^2$, 令过点P的圆C的切线方程为 $y = k(x - x_p) + y_p$, 直线与圆相切等价于圆心到直线距离为半径, 即 $\frac{|kx_c - y_c + y_p - kx_p|}{\sqrt{k^2 + 1}} = S_{ij}$, 可得

$$[(x_c - x_p)^2 - S_{ij}^2]k^2 + 2(y_p - y_c)(x_c - x_p)k + (y_p - y_c)^2 - S_{ij}^2 = 0. \quad (11)$$

情况1 当 $(x_c - x_p)^2 - S_{ij}^2 = 0$ 时, 切线方程为

$$\begin{cases} x = x_p, \\ y = k(x - x_p) + y_p, \end{cases} \quad (12)$$

其中 $k = -\frac{(y_p - y_c)^2 - S_{ij}^2}{2(y_p - y_c)(x_c - x_p)}$. 此时, 圆C的切线(直线PQ与直线PW)与极线(直线QW)相交后点C所处区域可表示为

$$\begin{cases} (x - x_p)(x_c - x_p) \geq 0, \\ (y - k(x - x_p) - y_p)(y_c - k(x_c - x_p) - y_p) \geq 0, \\ (x_p - x_c)(x - x_c) + (y_p - y_c)(y - y_c) - S_{ij}^2 \leq 0. \end{cases} \quad (13)$$

情况2 当 $(x_c - x_p)^2 - S_{ij}^2 \neq 0$ 时, 式(11)必定存在两个实根, 切线方程组为

$$\begin{cases} y - k_1(x - x_p) - y_p = 0, \\ y - k_2(x - x_p) - y_p = 0. \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$k_1 = -\frac{S_{ij}\sqrt{(x_c - x_p)^2 + (y_c - y_p)^2 - S_{ij}^2}}{-S_{ij}^2 + x_c^2 - 2x_cx_p + x_p^2} - \frac{(x_c - x_p)(y_c - y_p)}{(S_{ij} - x_c + x_p)(S_{ij} + x_c - x_p)},$$

$$k_2 = \frac{S_{ij}\sqrt{(x_c - x_p)^2 + (y_c - y_p)^2 - S_{ij}^2}}{-S_{ij}^2 + x_c^2 - 2x_cx_p + x_p^2} - \frac{(x_c - x_p)(y_c - y_p)}{(S_{ij} - x_c + x_p)(S_{ij} + x_c - x_p)}. \quad (15)$$

此时, 圆C的切线(直线PQ与直线PW)与极线(直线QW)相交后点C所处区域可表示为

$$\begin{cases} (y - k_1(x - x_p) - y_p)(y_c - k_1(x_c - x_p) - y_p) \geq 0, \\ (y - k_2(x - x_p) - y_p)(y_c - k_2(x_c - x_p) - y_p) \geq 0, \\ (x_p - x_c)(x - x_c) + (y_p - y_c)(y - y_c) - S_{ij}^2 \leq 0. \end{cases} \quad (16)$$

因此, $V'_w < V_m$ 时占位可攻的判断条件为: A满足不等式(9)或不等式组(13)或不等式组(16).

2.2 UUV占位可攻解析规则小结

上述分析未对立即可攻和占位可攻进行区分, 占位可攻区域包含了立即可攻区域, 现分别给出立即可攻与占位可攻的判断解析规则.

立即可攻的判断规则: 点A满足不等式(9), UUV处于极限射程圆内, 可直接发起攻击.

当不满足立即可攻条件时, 需要进行攻击占位机动, 则占位可攻的判断条件, 即是否存在机动可达阵位点的条件为:

- 1) $V'_w > V_m$ 时, UUV必定占位可攻;
- 2) $V'_w = V_m$ 时, 点A满足不等式(6);
- 3) $V'_w < V_m$ 时, 点A满足不等式组(13)或(16).

3 自适应最短时间占位机动决策方法设计

现有的占位机动决策大多需要人为指定阵位点, 无法适用动态变化的战场态势对决策的自主性要求, 因此本节对可达阵位点的自主选取进行研究, 提出最短时间占位阵位点的选取依据, 并设计一种自适应最短时间攻击占位机动决策方法.

3.1 最短时间占位阵位点的选取依据

当UUV不在圆C内且占位可攻时, 对 V_m 和 V'_w 进行等比例放大, 得到如图5所示以 B' 为圆心的相对位移圆, 其与圆C相切于 W_{CB} 点, 以点C向 AB' 延长线做垂线, 交 AB' 延长线于点D, 连接CD和 DB' , 连接 AW_{CB} 交圆B于点 D_1 , 连接 BD_1 , 易知 $BD_1 // B'W_{CB}$. 则 W_{CB} 必定存在于AE与AF所夹的机动可行域内, 且为最短时间可达阵位点, 下面进行求解.

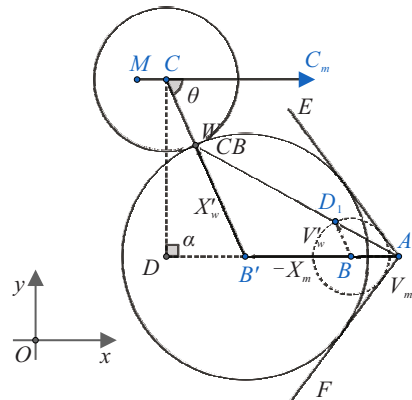


图5 UUV最短时间攻击占位决策

3.2 最短时间攻击占位机动参数的求解方法

由直角三角形 $\triangle CB'D$ 可知

$$L_{CD}^2 + L_{DB'}^2 = L_{CB'}^2. \quad (17)$$

其中: L_{CD} 、 $L_{DB'}$ 、 $L_{CB'}$ 分别表示线段 CD 、 DB' 、 CB' 的长度, $L_{CB'} = S_{ij} + X'_w$.

下面分别对 L_{CD} 、 $L_{DB'}$ 以及 X'_w 进行求解, 并给出占位机动决策的相关参数.

3.2.1 L_{CD} 表达式

由式(3)、点 $C(x_c, y_c)$ 和 $A(x_a, y_a)$ 、目标航向 $\vec{C}_m = (e_x, e_y)$, 图5直线 AB' 可表示为

$$\frac{y - y_a}{x - x_a} = \frac{e_y}{e_x}. \quad (18)$$

由于 $CD \perp AB'$, CD 直线方程可表示为

$$y - y_c = -\frac{e_x}{e_y}(x - x_c). \quad (19)$$

联立式(18)和(19), 可求得 $D(x_d, y_d)$ 坐标为

$$\begin{cases} x_d = \frac{e_x^2 x_c - e_x e_y y_a + e_x e_y y_c + e_y^2 x_a}{e_x^2 + e_y^2}, \\ y_d = \frac{e_x^2 y_a - e_x e_y x_a + e_x e_y x_c + e_y^2 y_c}{e_x^2 + e_y^2}. \end{cases} \quad (20)$$

点 C 到直线 AB' 的距离 L_{CD} 为

$$L_{CD} = \sqrt{(x_c - x_d)^2 + (y_c - y_d)^2}. \quad (21)$$

3.2.2 $L_{DB'}$ 、 X'_w 的表达式

1) 当 \vec{C}_m 与 \vec{DA} 同向(即 $\vec{C}_m \vec{DA} \geq 0$)时, 有

$$L_{DB'} = L_{AD} - X_m = L_{AD} - m_w X'_w, \quad (22)$$

其中 $L_{AD} = \sqrt{(x_a - x_d)^2 + (y_a - y_d)^2}$.

将 $L_{CB'}$ 、 L_{CD} 、 $L_{DB'}$ 代入式(17), 并用 c 表示 L_{CD} , 用 a 表示 L_{AD} , 易知 a 、 c 为定值, 可得

$$(m_w^2 - 1)X_w'^2 - 2(m_w a + S_{ij})X'_w + c^2 + a^2 = S_{ij}^2. \quad (23)$$

若 $m_w^2 - 1 = 0$, 则式(23)存在一个根, 有

$$X'_w = \frac{c^2 + a^2 - S_{ij}^2}{2(m_w a + S_{ij})}. \quad (24)$$

若 $m_w^2 - 1 \neq 0$, 则式(23)必定存在两个实根, 有

$$\begin{aligned} x_1 &= -\frac{\sqrt{(a + S_{ij} m_w)^2 - c^2 m_w^2 + c^2}}{m_w^2 - 1} + \frac{am_w + S_{ij}}{m_w^2 - 1}, \\ x_2 &= \frac{\sqrt{(a + S_{ij} m_w)^2 - c^2 m_w^2 + c^2}}{m_w^2 - 1} + \frac{am_w + S_{ij}}{m_w^2 - 1}. \end{aligned} \quad (25)$$

由最短时间占位机动要求可知, X'_w 取较小值 x_1 . 此时 X_w 为

$$\begin{cases} \frac{c^2 + a^2 - S_{ij}^2}{2(S_{ij} + m_w a)}, m_w^2 = 1; \\ -\frac{\sqrt{(a + S_{ij} m_w)^2 - c^2 m_w^2 + c^2}}{m_w^2 - 1} + \frac{am_w + S_{ij}}{m_w^2 - 1}, \\ m_w^2 \neq 1. \end{cases} \quad (26)$$

2) 当 \vec{C}_m 与 \vec{DA} 异向(即 $\vec{C}_m \vec{DA} < 0$)时, 由 $L_{DB'} = L_{AD} + X_m = L_{AD} + m_w X'_w$, X'_w 为

$$\begin{cases} \frac{c^2 + a^2 - S_{ij}^2}{2(S_{ij} - m_w a)}, m_w^2 = 1, \\ -\frac{\sqrt{(a - S_{ij} m_w)^2 - c^2 m_w^2 + c^2}}{m_w^2 - 1} + \frac{S_{ij} - am_w}{m_w^2 - 1}, \\ m_w^2 \neq 1. \end{cases} \quad (27)$$

3.2.3 机动航向、最短时间以及阵位点坐标

由 $\vec{OB}' = \vec{OA} - X_m \vec{C}_m$ 可知, $B'(x_b, y_b)$ 为

$$\begin{cases} x_b = x_a - m_w X'_w e_x, \\ y_b = y_a - m_w X'_w e_y. \end{cases} \quad (28)$$

则 UUV 最短时间攻击占位机动决策的航向为

$$\arctan\left(\frac{y_c - y_b}{x_c - x_b}\right) = \arctan\left(\frac{y_c - y_a + m_w X'_w e_y}{x_c - x_a + m_w X'_w e_x}\right). \quad (29)$$

此时最短攻击占位机动时间 $t = \frac{X'_w}{v'_w}$, W_{CB} 为

$$\begin{cases} x_{W_{CB}} = x_b + \frac{X'_w(x_c - x_b)}{X'_w + S_{ij}}, \\ y_{W_{CB}} = y_b + \frac{X'_w(y_c - y_b)}{X'_w + S_{ij}}. \end{cases} \quad (30)$$

3.3 参数自适应的攻击占位机动决策设计

UUV 攻防博弈是一个动态过程, 为适应动态博弈中双方的运动姿态变化, 本文在结合以上研究内容的基础上, 设计一种参数自适应的 UUV 最短时间攻击占位机动决策方法, 流程如图6所示.

该参数自适应的决策方法能够解决动态攻防博弈下的 UUV 攻击占位机动决策问题, 自适应先验信息(UUV 位置、UUV 最大速度、任务载荷速度、任务载荷的有效射程)及探测信息(目标位置、目标速度及航向)等信息的变化, 自适应求解是否立即可攻或占位可攻, 并在占位可攻时求解出最短时间达到阵位点的时间以及航向等相关机动参数, 最终形成动态战场态势下的 UUV 最短时间攻击占位机动决策的方案.

3.4 有障碍物时的最短时间占位机动决策分析

由于水下对抗环境复杂, 障碍物的存在会对占位机动决策的求解带来挑战. 如图7所示, 绿色四边形

扰动, UUV的欠驱动运动模型如下所示:

$$\begin{cases} \dot{x} = \mu \cos \psi, \\ \dot{y} = \mu \sin \psi, \\ \dot{\psi} = r, \\ -10^\circ/\text{s} \leq r \leq 10^\circ/\text{s}. \end{cases} \quad (32)$$

其中: x 、 y 为坐标, μ 为线速度, ψ 为艏向角, r 为角速度.

4.1 占位可攻判断规则及求解方法的有效性验证

作战想定: 设置目标的初始位置为(10 n mile, 10 n mile), 以速度 $V_m = 8 \text{ kn}$ 向北(y) 偏东(x) 80° 航行. 如图9所示, 设计多个UUV以本文方法对目标进行占位机动, 任务载荷的极限射程 S_{ij} 为 10 n mile, 速

度 V_l 为 40 kn; UUV 的最大速度 V_w' 为 6 kn, 初始参数及仿真结果如表1所示, 仿真步长为 1 s.

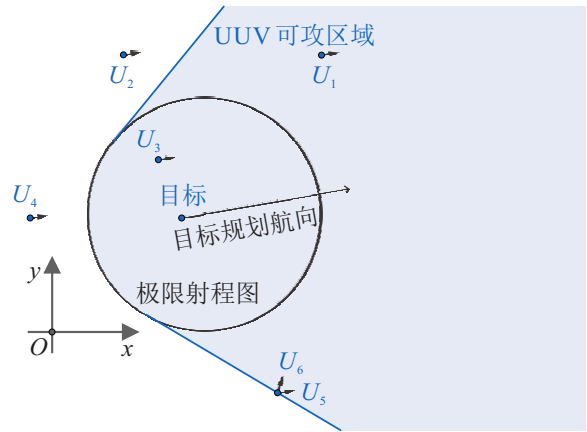


图9 不同初始位置下UUV占位机动结果

表1 不同初始位置下UUV占位机动结果表

序号	起始位置 (n mile)	初始航向 (rad)	占位航向			阵位点坐标/(n mile)		占位时间		
			计算值/rad	仿真值/rad	误差/%	计算值	仿真值	计算值/s	仿真值/s	误差/%
U_1	(22.000, 24.000)	$\pi/18$	-1.95144	-1.95192	0.025	(206.073, 204.995)	(206.196, 204.979)	2249.3	2254	0.210
U_2	(5.000, 24.000)	$\pi/18$	-	-	-	无可达阵位点	无可达阵位点	-	-	-
U_3	(8.000, 15.000)	$\pi/18$	-	-	-	极限射程圆内	极限射程圆内	-	-	-
U_4	(-3.000, 10.000)	$\pi/18$	-	-	-	无可达阵位点	无可达阵位点	-	-	-
U_5	(18.220, -5.000)	$\pi/18$	1.36906	1.36908	0.001	(197.064, 22.676)	(197.120, 22.6978)	4450.8	4454	0.071
U_6	(18.220, -5.000)	1.36906	1.36906	1.36906	0.000	(197.064, 22.676)	(197.064, 22.6789)	4450.8	4451	0.004

由表1对比结果可知, 所提出的最短时间占位机动决策方案与理想最短时间占位机动方案基本一致, 仿真结果与理想结果误差均小于0.210%. 其中案例 $U_1 \sim U_5$ 的误差产生原因主要是转角角速度限制, 案例 U_6 是仿真时间步长限制. 仿真结果验证了所提出方法对于匀速运动目标最短时间占位机动决策的有效性和正确性.

4.2 占位机动决策的参数自适应性验证

现对占位机动决策的自适应性和正确性进行验证. 目标的初始位置为(10 n mile, 10 n mile), 做变速运动, 其运动策略如下:

- 1) 0 ~ 60 min, 以 4 kn 速度朝北向东 80° 巡航;
- 2) 60 ~ 120 min, 加速至 6 kn 朝北向东 70° 移动;
- 3) 120 min 以后, 加速至 8 kn 沿北向东 70° 逃离.

设计对照实验如图10所示. 各攻击UUV仅占位方法不同. 其中: M_1 为本文方法, M_2 为朝向目标^[13]的占位方式, M_3 为朝向目标射程圆心的占位方式, M_4 为选择命中角 θ 为 0° 的占位方式, $M_5 \sim M_7$ 为朝向不同命中角 θ 的占位方式. 各攻击UUV的初始位置均为(30 n mile, 48.9 n mile), 最大速度为 6 kn, 初始航向为 -1.74502 , 任务载荷的极限射程为

10 n mile.

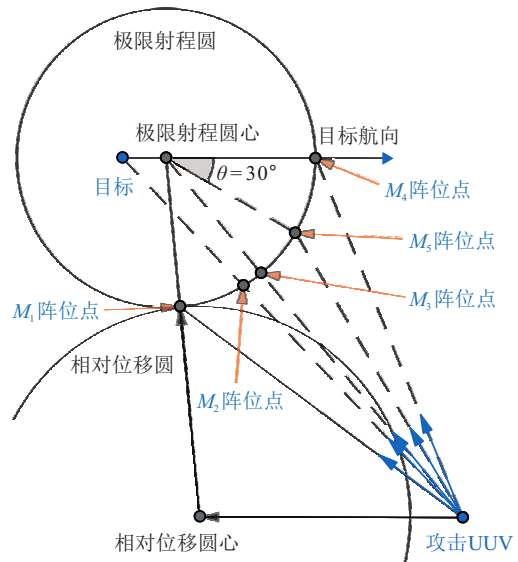


图10 不同攻击占位方式

依次采用上述 $M_1 \sim M_7$ 的占位方式对目标进行攻击占位, 得到仿真结果如表2所示. 由表2可知, 所提出的最短时间攻击占位方法具有较大的优越性, 在所有占位方法中耗时最短, 而朝向目标等简单的攻击占位行为会导致本来占位可攻的态势变为无法占位.

表2 不同攻击占位方式的仿真结果表

名称	攻击占位方式	占位时间/min
M_1	本文攻击占位方式	215
M_2	朝向目标	无法占位
M_3	朝向极限射程圆心	无法占位
M_4	$\theta = 0^\circ$	226
M_5	$\theta = 30^\circ$	239
M_6	$\theta = 60^\circ$	无法占位
M_7	$\theta = 90^\circ$	无法占位

M_1 到达阵位点时的运动轨迹如图11所示. 攻击UUV的初始位置均位于可攻范围内. 由图11可知, 当 M_1 到达自身选取的阵位点时, M_2 、 M_7 已脱离可攻区域, $M_2 \sim M_7$ 均未到达各自阵位点.

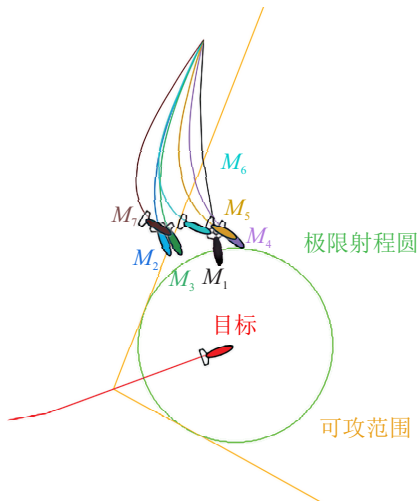


图11 M_1 到达时, $M_1 \sim M_7$ 的机动结果

现对所提出方法具有的参数自适应性进行分析. 各UUV到极限射程圆心的距离、到各自阵位点的距离、航向变化曲线如图12~图14所示.

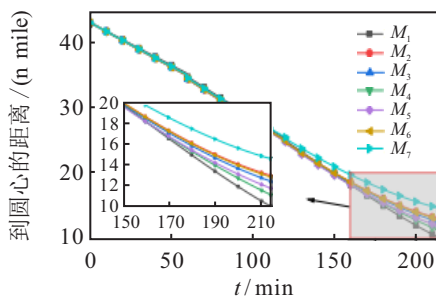


图12 攻击UUV到极限射程圆心的距离变化曲线

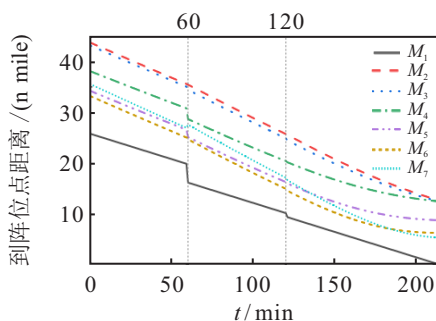


图13 攻击UUV到各自阵位点距离随时间变化曲线

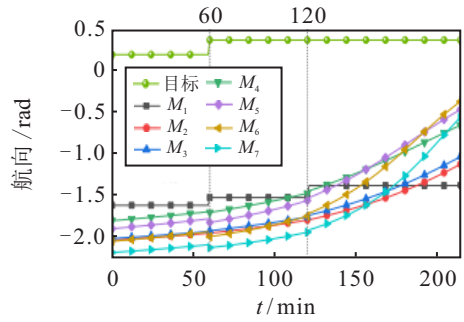


图14 UUV航向随时间变化曲线

图12可以反映出UUV的占位机动速度, 可知, 所提出方法 M_1 到极限射程圆圆心距离的下降速度大于其他攻击UUV的下降速度, 并最先到达极限射程圆上指定的阵位点.

图13可以反映出占位方法对战场态势变化是否敏感, 以及UUV到阵位点的距离关系. 由图13可知, 不同占位方式的UUV由于阵位点选择不同, 会导致与各自阵位点的距离相差较大, 在整个占位过程中相较其他占位方式, 本文所选的阵位点不仅是最近的可达阵位点, 而且能够很好地适应目标运动状态的变化.

图14可以反映出UUV对目标不同运动状态变化的敏感度. 在占位过程中, 目标分别在60 min进行了速度和航向变化, 在120 min进行了速度变化, 对比图13和图14可知, M_2 、 M_3 既无法适应目标航向及速度变化, 仅能根据目标的位置信息进行占位机动, 又无法完成攻击占位任务; $M_4 \sim M_7$ 对目标的航向变化敏感, 对速度变化并不敏感; M_1 对目标航向和速度变化均敏感, 能够自适应目标速度和航向两项运动状态的变化, 完成对目标的占位机动任务.

通过本节仿真验证可知, 所提出的占位机动决策方法能够自适应目标状态的变化, 自主进行对目标攻击占位机动决策, 适用于动态攻防博弈决策.

4.3 存在障碍物情况下的占位机动决策验证

为验证存在障碍物时的最短时间占位机动决策, 设计如下仿真验证方案, 参数如表3所示. 分别对存在障碍物和不存在障碍物的情况进行仿真, 结果如图15和表4所示.

表3 仿真参数表

	初始位置/(n mile)	初始航向/rad	速度/kn
目标	[0, 20]	$\pi/18$	8
攻击UUV	[50, 50]	$\pi/18$	6

图15为存在障碍物时UUV完成最短时间占位时刻图, 图中绿色四边形为障碍物, 黑色直线为无障碍物时UUV的最短时间占位机动决策, 红色直线为存

在障碍物时 UUV 的最短时间占位机动决策. 该仿真结果验证了存在障碍物时最短时间占位机动决策求解方法的有效性.

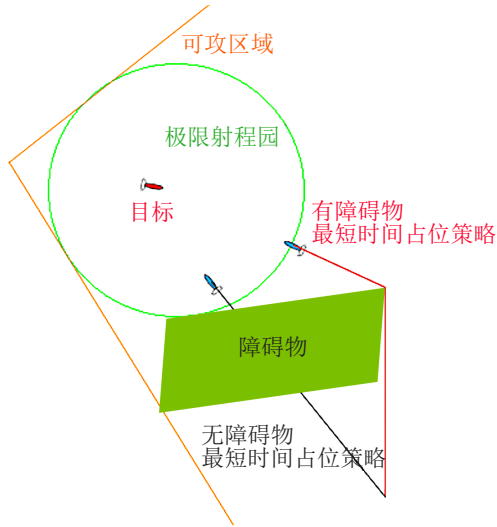


图 15 存在障碍物情况下的占位机动决策仿真

表 4 仿真结果

	占位时间/s	占位阵位点/(n mile)	顶点/(n mile)
无障碍物	12946	[36.5, 33.1]	-
有障碍物	14577	[42.9, 30.2]	[50.0, 33.6]

4.4 决策求解方法的性能验证

为验证本文决策方法的性能,对不同数量 UUV 进行占位决策求解. 验证方案如下: 将目标放置在一个 20 n mile × 20 n mile 的环境中, 随机生成攻击 UUV, 统计所有 UUV 的占位决策求解时间, 结果如表 5 所示.

表 5 算法性能验证

数量	不同攻击状态的 UUV 数量			算法耗时 /s
	立即可攻	占位可攻(占比)/%	无法攻击	
100	1	32 (32.00)	67	0.003 0
1 000	6	322 (32.20)	672	0.022 0
10 000	69	3 216 (32.16)	6 715	0.243 2
100 000	776	32 651 (32.65)	66 573	2.604 0

由表 5 可见, 随着生成攻击 UUV 数量的增加, 总是有约 32% 的 UUV 是占位可攻的, 因此随机生成的 UUV 位置具有一般性. 随着 UUV 数量的增加, 所提出决策方法求解耗时呈线性增加, 方法的时间复杂度为 $O(1)$, 验证了本文方法的高性能, 方法可以应用到大规模的 UUV 博弈对抗中.

5 结 论

本文主要研究 UUV 攻防博弈中攻击占位机动决策问题, 通过建立 UUV 的攻击占位机动模型, 采用向量分析法提出 UUV 与目标的相对运动关系, 进而求解出攻击占位机动的最短时间决策参数. 设计一种

参数自适应的攻击占位机动决策方法, 并分析存在障碍物时的最短时间占位机动决策方法. 最后通过仿真验证了攻防博弈中简单攻击占位机动决策以及人为指定阵位点策略的不合理性, 验证了所提出方法在求解是否占位可攻、无障碍物情况下的最短时间占位决策问题的有效性、高效性, 以及攻击占位机动决策方法的自适应性. 本文同时对 UUV 占位机动决策和 UUV 攻防博弈对抗中攻击行为设计进行了详细研究, 为 UUV 攻防博弈建模及决策求解提供了参考.

参考文献(References)

- [1] 赵留平, 李环, 王鹏. 水下无人系统智能化关键技术的发展现状[J]. 无人系统技术, 2020, 3(6): 12-24. (Zhao L P, Li H, Wang P. Development of key technologies for intelligent unmanned underwater system[J]. Unmanned Systems Technology, 2020, 3(6): 12-24.)
- [2] 冯景祥, 姚尧, 潘峰, 等. 国外水下无人装备研究现状及发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(23): 1-8. (Feng J X, Yao Y, Pan F, et al. Existence and development trend of underwater unmanned equipment in foreign countries[J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(23): 1-8.)
- [3] 王敏, 倪俊, 时昊天. 基于分布式观测器的多自主水下机器人确定学习控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(2): 388-394. (Wang M, Ni J, Shi H T. Deterministic learning control of multiple autonomous underwater vehicles based on a distributed observer[J]. Control and Decision, 2023, 38(2): 388-394.)
- [4] 郭戈, 王兴凯, 徐慧朴. 基于声呐图像的水下目标检测、识别与跟踪研究综述[J]. 控制与决策, 2018, 33(5): 906-922. (Guo G, Wang X K, Xu H P. Review on underwater target detection, recognition and tracking based on sonar image[J]. Control and Decision, 2018, 33(5): 906-922.)
- [5] 杨惠珍, 王强. 基于动态蚁群劳动分工模型的多 AUV 任务分配方法[J]. 控制与决策, 2021, 36(8): 1911-1919. (Yang H Z, Wang Q. A multi-AUV dynamic task allocation method based on antcolony labor division model[J]. Control and Decision, 2021, 36(8): 1911-1919.)
- [6] Jones M, Djahel S, Welsh K. Path-planning for unmanned aerial vehicles with environment complexity considerations: A survey[J]. ACM Computing Surveys, 55(11): 234.
- [7] 谢伟, 杨萌, 龚俊斌. 水下攻防对抗体系及其未来发展[J]. 中国工程科学, 2019, 21(6): 71-79. (Xie W, Yang M, Gong J B. Underwater attack-defense confrontation system and its future development[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(6): 71-79.)
- [8] Wang L L, Zhu D Q, Pang W, et al. A survey of

- underwater search for multi-target using multi-AUV: Task allocation, path planning, and formation control[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 278: 114393.
- [9] Sun Z Y, Sun H B, Li P, et al. Cooperative strategy for pursuit-evasion problem with collision avoidance[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112742.
- [10] Qu X Q, Gan W H, Song D L, et al. Pursuit-evasion game strategy of USV based on deep reinforcement learning in complex multi-obstacle environment[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 273: 114016.
- [11] Deng R L, Shi Z Y, Zhong Y S. Reach-avoid games with two cooperative attackers: Value function and singular surfaces[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2024, 60(1): 558-573.
- [12] Zhang E H, Li J, Zhu C, et al. Bearing-based prescribed-time formation control of underactuated autonomous surface vehicles with the interception of attackers[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 262: 112187.
- [13] Xu J, Huang F, Wu D, et al. Deep reinforcement learning based multi-AUVs cooperative decision-making for attack-defense confrontation missions[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 239: 109794.
- [14] Sun Z Y, Sun H B, Li P, et al. Cooperative strategy for pursuit-evasion problem in the presence of static and dynamic obstacles[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 279: 114476.
- [15] Yan R, Shi Z Y, Zhong Y S. Task assignment for multiplayer reach-avoid games in convex domains via analytical barriers[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2020, 36(1): 107-124.
- [16] Yan R, Shi Z Y, Zhong Y S. Reach-avoid games with two defenders and one attacker: An analytical approach[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(3): 1035-1046.
- [17] Wei N, Liu M, Cheng W. Decision-making of underwater cooperative confrontation based on MODPSO[J]. *Sensors: Basel*, 2019, 19(9): e2211.
- [18] Zhen Z Y, Xing D J, Gao C. Cooperative search-attack mission planning for multi-UAV based on intelligent self-organized algorithm[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 76: 402-411.
- [19] 吴晓海, 周智超, 杜海. 潜艇鱼雷攻击可攻区域[J]. *火力与指挥控制*, 2009, 34(4): 131-133.
(Wu X H, Zhou Z C, Du H. Research of the available attack area of torpedo launched by submarine[J]. *Fire Control and Command Control*, 2009, 34(4): 131-133.)
- [20] 雷震撼, 袁富宇. 自导鱼雷转角射击诸元简化计算[J]. *四川兵工学报*, 2014, 35(1): 41-44.
(Lei Z H, Yuan F Y. Simplified computing of parameters with turn angle shooting of homing torpedo[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2014, 35(1): 41-44.)
- [21] Xinchu T, Huajun Z, Hang G. Research on occupancy maneuvering scheme of unmanned under water vehicle[C]. *Chinese Control and Decision Conference*. Piscataway: IEEE, 2020: 3478-3483.
- [22] 温洪, 魏石川, 陈志鹏, 等. 鱼雷攻击占位相关参数计算[J]. *指挥控制与仿真*, 2008, 30(3): 58-60.
(Wen H, Wei S C, Chen Z P, et al. Calculation on relative parameter of favored submarine position for torpedo attack[J]. *Command Control & Simulation*, 2008, 30(3): 58-60.)
- [23] Zhang H P, Zhou H, Wei Y J, et al. Autonomous maneuver decision-making method based on reinforcement learning and Monte Carlo tree search[J]. *Frontiers in Neurorobotics*, 2022, 16: 996412.
- [24] 周东波. 面向典型任务的UUV空间运动规划方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
(Zhou D B. Research on UUV spatial motion planning method of typical tasks[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.)
- [25] 严代彪, 王树宗, 李俊年. 潜艇鱼雷攻击时占位机动参数的确定[J]. *武汉理工大学学报: 交通科学与工程版*, 2005, 29(3): 339-341.
(Yan D B, Wang S Z, Li J N. Calculation of maneuver parameters of submarine shooting torpedoing[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2005, 29(3): 339-341.)
- [26] 夏佩伦. 潜艇鱼雷攻击占位机动方案的确定与分析[J]. *火力与指挥控制*, 2013, 38(11): 114-117.
(Xia P L. Determination and analysis of getting-to-the-firing-position maneuver scheme for submarine attacking with torpedo[J]. *Fire Control & Command Control*, 2013, 38(11): 114-117.)
- [27] 夏佩伦, 李长文. 水下目标跟踪与攻击新理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
(Xia P L, Li C W. New theory of underwater target tracking and attack[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.)

作者简介

王钊(1994—), 男, 博士生, 从事UUV博弈对抗的研究, E-mail: 814551366@hrbeu.edu.cn;

王宏健(1971—), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 从事水下无人系统自主控制与任务感知、多栖运载器探测制导与控制、探测系统目标感知与识别等研究, E-mail: cctime99@163.com;

张宏瀚(1982—), 男, 副教授, 博士, 从事船舶运动控制技术、水下无人系统可靠控制技术等研究, E-mail: zhanghonghan2008@163.com;

于丹(1995—), 女, 博士生, 从事UUV博弈对抗的研究, E-mail: cocomomo@hrbeu.edu.cn;

任镜霏(1996—), 女, 博士生, 从事水下无人飞行器模型、预测控制等研究, E-mail: renjingfei@hrbeu.edu.cn.