

[引用格式] 曹迟, 史文涛, 王百合, 等. 无人水下航行器反潜作战模型仿真 [J]. 水下无人系统学报, 2025, 33(1): 156-163.

无人水下航行器反潜作战模型仿真

曹 迟¹, 史文涛^{1,2}, 王百合¹, 张群飞¹

(1. 西北工业大学 航海学院, 陕西 西安, 710072; 2. 西北工业大学 海洋研究院, 江苏 太仓, 215400)

摘 要: 针对反潜作战场景下建立水下武器仿真系统的需求, 文中通过分析无人水下航行器(UUV)战术特性, 依据 UUV 反潜战作战规则及打击任务, 依次给出了 UUV 发射控制、线导导引、目标探测、目标搜索跟踪和 underwater 目标攻击等各功能子模块作战全流程, 通过各功能子模块的建模构成完整的 UUV 反潜作战仿真模型, 为水下对抗仿真任务提供了相应的动态链接库以便调用。经仿真验证, 构建的 UUV 仿真模型能够根据使用者提供的敌我位置及声学参数等战场环境信息完成水下反潜打击作战任务, 为水下武器对抗仿真系统的建立提供技术支持。

关键词: 无人水下航行器; 动态链接库; 反潜作战; 仿真系统

中图分类号: TJ67; U674

文献标识码: A

文章编号: 2096-3920(2025)01-0156-08

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2024-0116

Simulation of Anti-Submarine Warfare Model of Unmanned Undersea Vehicles

CAO Chi¹, SHI Wentao^{1,2}, WANG Baihe¹, ZHANG Qunfei¹

(1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Ocean Institute, Northwestern Polytechnical University, Taicang 215400, China)

Abstract: In view of the requirement of establishing an underwater weapon simulation system in an anti-submarine warfare scenario, this paper analyzed the tactical characteristics of unmanned undersea vehicle(UUV), clarified the whole flow of the sub-modules of the UUV for warfare operations, including launch control, wire guide, target detection, target search and tracking, underwater target attack, and other functions. By modelling the various functional sub-modules, a comprehensive anti-submarine warfare simulation model of UUVs was constructed, providing a corresponding dynamic link library to be called for underwater warfare simulation missions. After simulation verification, the constructed UUV simulation model can realize the underwater anti-submarine strike mission according to the battlefield environment information provided by users, such as two-party location and acoustic parameters and provide technical support for the establishment of an underwater weapon countermeasure simulation system.

Keywords: unmanned undersea vehicle; dynamic link library; anti-submarine warfare; simulation system

0 引言

随着海洋战场在信息化战争中的地位愈发重要, 针对综合海洋战场仿真系统的开发提出了更

高的要求。快速、高效地开发水下武器仿真系统, 可以有效论证参战武器的性能, 加快水下武器装备部队的速度。因此, 建立系统的水下反潜武器装备的模型库, 开展无人水下航行器(unmanned un-

收稿日期: 2024-06-21; 修回日期: 2024-09-12; 录用日期: 2024-09-27.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62371393).

作者简介: 曹 迟(1999-), 男, 在读硕士, 主要研究方向为水下探测通信一体化.

OPEN ACCESS

dersea vehicle, UUV)对抗仿真系统的可组合性研究, 规范仿真模型的开发方法, 增强仿真模型的重用能力, 是当前水下武器仿真系统开发研究的主要发展方向。

在海上反潜战、反水雷战以及情监侦/电子战等作战场景中, 为了完成作战目标, 需要潜艇搭载使用 UUV 完成特定作战任务。UUV 因其体积小、隐身性好、机动灵活、成本低以及可组网使用等优势, 在未来反潜作战中具有很大的应用潜力^[1-2]。目前国内针对 UUV 集群、发射出管、空间运动、路径规划、探潜能力, 以及动态目标跟踪导引等方面的建模与仿真已经做了大量工作^[3-8], 而针对 UUV 完整反潜作战流程的仿真研究还比较有限。基于此背景, 文中针对 UUV 反潜作战过程中的发射控制、线导导引、目标探测、目标搜索跟踪和目标攻击等各功能子模块和流程进行建模, 形成完整的 UUV 反潜作战仿真模型, 并对该模型进行了仿真分析, 验证了其适用性。

1 模型功能模块

在水下复杂作战场景中, 攻击型核潜艇通常使用 UUV 实施对舰/艇攻击, 潜艇借助自身隐蔽性, 在发现目标后对其进行快速识别和发射决策, 占据最佳攻击阵位后实施攻击^[9-10]。发射艇在发射具备线导能力的 UUV 后, 利用连接航行器的光纤对其进行制导, 将其导引至目标附近^[11], 待接近目标后, 潜艇下达探测开机指令, UUV 转为声探测模式, 解算目标搜索弹道, 进行自主寻的, 在发现目标后进行目标跟踪并攻击目标。

文中主要针对 UUV 模型反潜/反水面战作战过程中的行为进行仿真, 其过程主要包括发射控制、线导导引、目标探测、目标搜索跟踪及目标攻击等各功能子模块。

发射控制子模块: 接收由上级潜艇平台的发射指令, 并对指令进行响应。

线导导引子模块: 接收由上级潜艇平台的线导遥控指令, 并对指令进行响应, 解算线导弹道。

目标探测子模块: 模拟 UUV 在复杂水声环境中的信号检测和参数估计等功能的解算。

目标搜索跟踪子模块: 实现在声探测作用下的目标搜索和目标跟踪过程中的弹道逻辑和参数

解算功能, 实现对目标的搜索和跟踪过程。

目标攻击子模块: 模拟 UUV 攻击目标过程, 判断 UUV 是否成功命中目标, 同时对剩余航程进行解算, 判断 UUV 续航能力。

模型功能结构见图 1, 仿真流程见图 2。

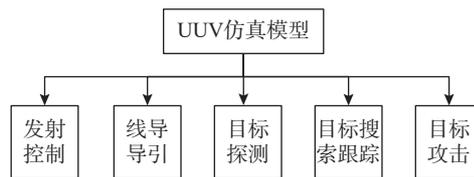


图 1 UUV 仿真模型功能结构图

Fig. 1 Functional structure of the UUV simulation model

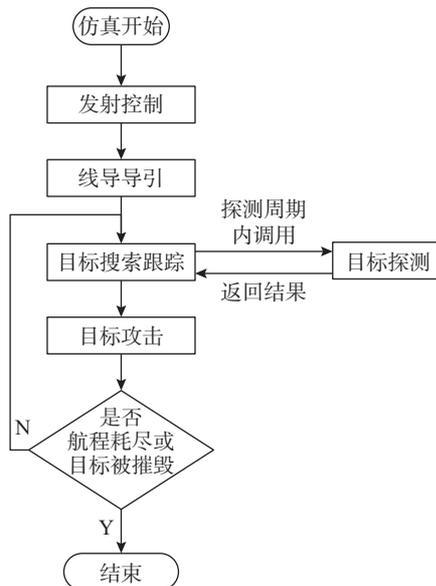


图 2 模型仿真流程示意图

Fig. 2 Flow chart of model simulation

2 模型建立

2.1 发射控制

发射控制规则适用于航行器发射控制子模块, 是指将 UUV 武器从上级潜艇平台发射出去, 使其获得一定的初始状态, 以达到预定目标或完成特定任务的过程。UUV 实体发射控制子模块的行动主要为响应潜艇对航行器的发射控制指令, 在获得发射指令后, 航行器继承上级潜艇平台的实时状态信息, 包括经度、纬度、高度以及航向、航速等信息。UUV 将以上参数作为仿真开始的初始值并进行相应的机动动作, 具体流程如图 3 所示。

接收到潜艇的发射指令后, 航行器仿真开始,

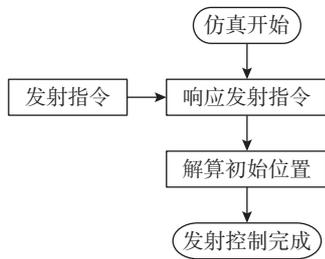


图3 发射控制子模块仿真过程示意图

Fig.3 Flow chart of simulation process of the launch control sub-module

首先响应该指令,与搭载平台分离,并开始解算初始位置信息,需要满足的约束为航行器6自由度的机动模型,包括航行器三维位置坐标、俯仰角、水平航向角以及机动速度。

在解算航行器的初始位置时,需要将上级潜艇平台在WGS84坐标下的经度、纬度、高度转化为当地东北天(east-north-up, ENU)坐标系下的坐标^[12]。为了简化计算,俯仰角及水平航向角继承发射时刻上级潜艇平台的数值,航速则参考UUV具体型号参数。

计算得到航行器6自由度的机动参数后,将其作为航行器仿真开始时的初始值,进入线导导引模块仿真。

2.2 线导导引

线导导引规则适用于航行器线导导引子模块,UUV实体线导导引子模块的行动主要为响应上级潜艇平台对航行器的线导控制指令并进行相应的机动动作。在线导导引阶段中,一方面UUV通过导线实时接收上级潜艇平台遥控指令控制UUV变向、变速及变深,另一方面UUV也可将遥测信息通过导线传回至上级潜艇平台,上级潜艇平台通过收到的遥测信息判断UUV是否应该结束线导工作阶段并开启声探测,以提高反潜任务完成率。具体流程如图4所示。

在发射控制阶段完成后直接进入线导导引阶段,具体流程如下。

1) 首先初始化发射线导参数,之后进入线导初始机动段,完成直航、垂直定深和水平定向弹道,具体算法如下。

$T_0 \sim T_{0+1}$: 进行匀速直线航行, T_0 为航行器的发射时刻, T_{0+1} 为发射后一秒;

$T_{0+1} \sim T_{0+5}$: 进行水平面定向,即发射时的初

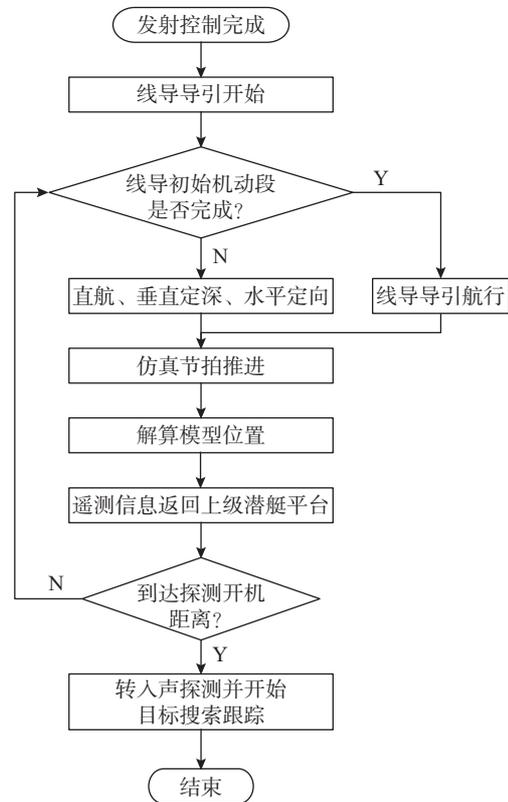


图4 线导导引子模块仿真过程示意图

Fig.4 Flow chart of simulation process of the wire guide sub-module

始航向 $+K \cdot 40^\circ$, K 为发射艇舷别,左为-1,右为+1;同时进行垂直面定深 $Z+20$ m, Z 为航行器发射时的初始深度(为避免UUV航线与上级潜艇平台重合,具体定向、定深数值需根据实际情况设定,这里给出参考值);

$T_{0+5} \sim T_{0+7}$: 水平定向,2 s内完成 40° 的航向改变,航向回归初始值;

$T_{0+7} \sim T_{0+10}$: 完成垂直定深至UUV设定航行深度。

2) 在线导初始机动段完成后,进入线导导引控制段,航行器在每个仿真步长获得来自上级潜艇平台的偏航角,不断导引航行器向目标的位置靠近,到达目标附近一定距离后,探测自导开机,航行器由线导转为声探测工作模式。

在线导导引阶段中,需要实时解算并输出航行器的三维坐标及航速航向等信息,由于模型内部在ENU坐标系下计算出的三维坐标不适用于大系统使用的WGS84坐标系,所以需要输出转换后的WGS84坐标系下的经度、纬度和高度。

航行器模型通过线导模块实时向上级潜艇平台输出自己的位置信息, 告知航行器的状态, 方便上级潜艇平台判断是否传递探测开机指令并结束线导导引, 进入下阶段的目标搜索跟踪模块。

2.3 目标探测

当航行器接收到上级潜艇平台发送的声探测开机指令后, 航行器结束线导导引阶段, 进入声探测工作模式。在每个探测周期, 航行器通过目标探测子模块对目标进行探测和估计^[13]。目标探测任务子模块由目标搜索跟踪模块调用, 根据声呐反馈探测的目标状态量, 计算当前探测目标的信噪比, 通过比较信噪比与检测阈判断航行器是否检测到目标, 并估计目标的方位和距离, 仿真过程如图 5 所示。

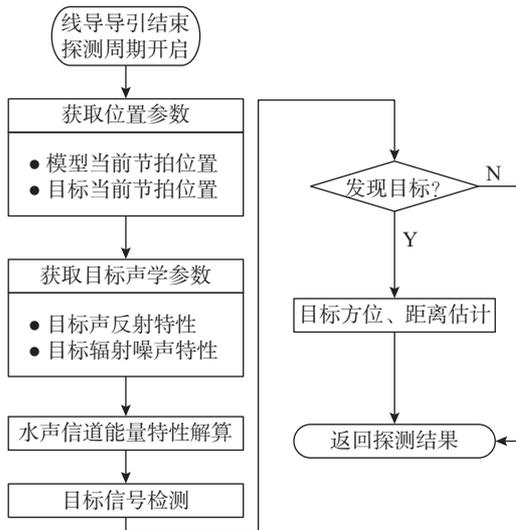


图 5 目标探测子模块仿真过程示意图

Fig. 5 Flow chart of simulation process of the target detection sub-module

目标探测子模块主要涉及的算法如下。

1) 目标检测

通过计算接收到目标信号的信噪比进行探测判决, 判决是否发现目标。

在进行目标检测时, 以最大似然比准则作为设计检测器的标准, 也就是说, 在虚警概率小于某一事先给定值的情况下, 使检测概率最大, 以此确定检测门限。对于能量检测, 一般采取固定门限, 以此作为检测阈值。

当自动检测时, 若输出信噪比大于检测阈值, 判定有目标, 小于检测阈值则判定无目标, 即

$$\begin{cases} X_{\text{SNR}} - X_{\text{DT}} \geq 0, \text{有目标} \\ X_{\text{SNR}} - X_{\text{DT}} < 0, \text{无目标} \end{cases} \quad (1)$$

式中, X_{SNR} 为在接收端接收到的被动辐射噪声或主动回波信号的信噪比; X_{DT} 为检测阈值。

2) 参数估计

目标探测系统需要估计目标的许多参数, 其中距离和方位最为重要。一旦确认发现目标, 就开始进行目标的参数估计, 只要确定了航行器和目标的距离和方位, 就能实现对目标的自动跟踪。

目标精确定向是实现航行器精确制导和自动目标识别的重要基础。现有和正在研制的系统大多采用了波束形成技术, 如相邻三波束插值法目标方位估计、分裂波束互谱法测方位估计和多波束输出最大值目标方位估计等。对目标距离的估计, 可以采用相关法进行目标距离估计以实现目标定位。

2.4 目标搜索跟踪

目标搜索跟踪规则适用于航行器目标搜索跟踪子模块, 当线导导引结束, 声探测开启后, 目标搜索规则开始执行; 目标探测子模块探测到目标且估算到目标位置后, 目标搜索跟踪规则开始执行, 根据不同时刻航行器和目标的状态量, 解算航行器的搜索跟踪逻辑弹道。

1) 目标搜索

航行器结束线导导引后进入搜索阶段, 同时声呐开始搜索目标。搜索弹道的基本形式有直航搜索、梯形搜索、蛇形搜索、环形搜索和螺线形搜索等弹道方式^[14]。该子模块仿真中航行器采用环形弹道进行目标搜索, 环形搜索方式的目的是根据自身的性能最大可能地发现目标, 并尽量节约航程。采用环形搜索弹道时, 航行器进行圆周运动, 由此实现航行器的 360° 空间搜索。

在解算环搜弹道时, 首先确定转弯半径

$$r = V_h / \sin(V_a) \quad (2)$$

式中, V_h 、 V_a 分别为航行器当前时刻的线速度和角速度。

接着计算航行器一个仿真步长的航向改变量

$$\Delta_{\text{angle}} = V_a \cdot X_{\text{step}} / 1000 \quad (3)$$

式中, X_{step} 为仿真步长。

然后得到航行器当前时刻的新航向

$$X_{Course+} = \Delta_{angle} \quad (4)$$

输出 ENU 坐标系下的航行器坐标

$$\begin{cases} x+ = r \cdot \sin \Delta_{angle} \cdot \sin X_{Course} \\ y+ = r \cdot \sin \Delta_{angle} \cdot \cos X_{Course} \\ z = z \end{cases} \quad (5)$$

为保持坐标一致, 将式(5)得到的 ENU 坐标系下的 x 、 y 、 z 转换为 WGS84 坐标系下的经度、纬度和高度, 并输出给上级潜艇平台。

航行器在进行目标搜索任务时, 每过 1 个探测周期, 调用目标探测子模块, 进行 1 次目标探测与目标估计。

2) 目标跟踪

目标跟踪主要负责 UUV 在发现目标之后进行跟踪阶段的弹道轨迹解算。该模型涉及的主要算法包括不同的跟踪导引算法, 如尾追法、固定提前角导引法、自动调整提前角导引法、平行接近法以及比例导引法等。目标搜索跟踪仿真流程见图 6。

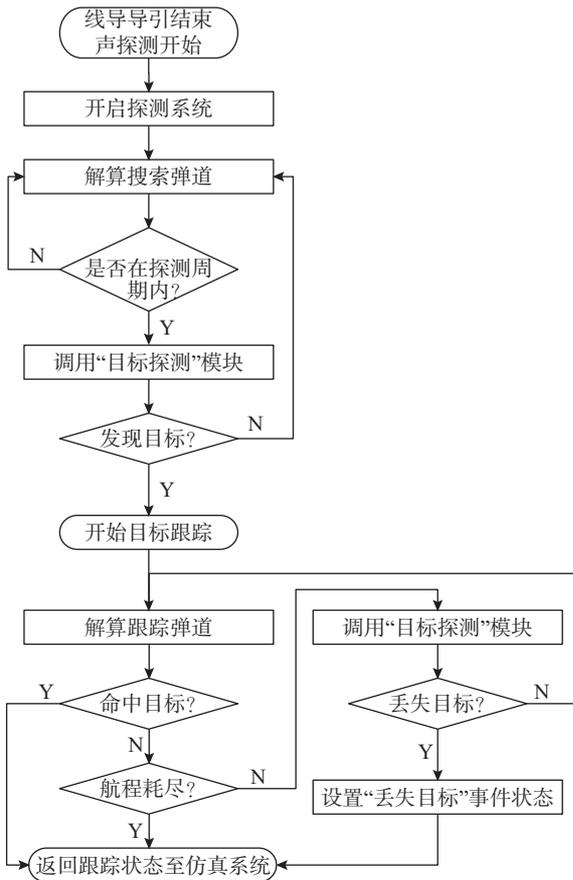


图 6 目标搜索跟踪子模块仿真过程示意图

Fig. 6 Flow chart of simulation process of the target search and track sub-module

2.5 目标攻击

目标攻击规则适用于航行器目标攻击子模块, UUV 模型在仿真中的每一个步长都会调用目标攻击子模块来判断是否命中目标并解算剩余航程。将航行器与目标的距离作为参数判断是否命中, 同剩余航程的解算参与仿真中每一个步长, 以此来判断仿真是否继续进行。目标攻击子模块的仿真流程如图 7 所示。

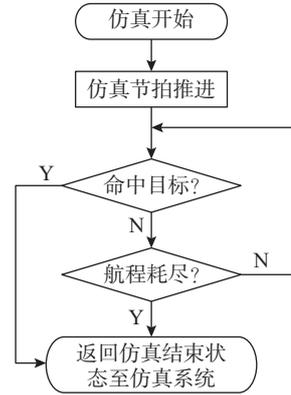


图 7 目标攻击子模块仿真过程示意图

Fig. 7 Flow chart of simulation process of the target attack sub-module

1) 判断是否命中目标

攻击型 UUV 对敌方舰船的破坏效果主要取决于其装药量以及炸药的性能, 敌方舰船的防护结构, 起爆点距舰船壳体的距离以及命中目标的部位^[15]。在判断是否命中目标时, 以 UUV 与目标间的距离作为参数进行计算。

首先确定航行器与目标的三维距离 X_{Dis_X} 、 X_{Dis_Y} 、 X_{Dis_Z} 以及两者距离 X_{TarDis} , 将目标简化为圆柱体, 定义目标长度及半径分别为

$$\begin{cases} X_{tarLength} = 100 \text{ m} \\ X_{tarRadius} = 5 \text{ m} \end{cases} \quad (6)$$

接下来通过以下各式求得航行器点与目标航向直线的距离 X_{Dis1} 。首先计算

$$k_0 = \tan(X_{TarCourse}) \quad (7)$$

式中: $X_{TarCourse}$ 为目标当前时刻的航向, 如果 $|k_0| < 0.01$, 则 $X_{Dis1} = X_{Dis_X}$; 否则另取 k_0 的倒数 k'_0 , 如果 $|k'_0| < 0.01$, 则 $X_{Dis1} = X_{Dis_Y}$; 如果前 2 项均不满足, 则执行以下算法。

a) 作目标航向直线

$$b_0 = y_0 - k'_0 \cdot x_0 \quad (8)$$

式中, x_0 和 y_0 分别为目标在 ENU 坐标系下的 x 和 y 位置信息。

b) 过航行器点, 作垂直目标航向直线的直线

$$\begin{cases} k_1 = -1/k'_0 \\ b_1 = y_1 - k_1 \cdot x_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中, x_1 和 y_1 分别为航行器在 ENU 坐标系下的 x 和 y 位置信息。

c) 求垂线交点坐标

$$\begin{cases} x_J = (b_1 - b_0)/(k'_0 - k_1) \\ y_J = k'_0 \cdot x_J + b_0 \end{cases} \quad (10)$$

d) 最终得到航行器点与目标航向直线的距离

$$X_{Dis1} = \sqrt{(x_J - x_1)^2 + (y_J - y_1)^2} \quad (11)$$

然后可求出航行器点到圆柱中心轴的距离, 即

$$X_{Dis2} = \sqrt{(X_{DisZ})^2 + (X_{Dis1})^2} \quad (12)$$

接着可求出航行器点离圆柱中心的最大接触距离, 即

$$X_{DisMAX} = \sqrt{X_{Dis2}^2 + (X_{TarLength}/2)^2} \quad (13)$$

当且仅当下式满足时, 才可判定航行器命中目标, 结束仿真流程。

$$\begin{cases} X_{Dis2} < X_{TarRadius} \\ X_{TarDis} < X_{DisMAX} \end{cases} \quad (14)$$

2) 剩余航程解算

航行器剩余航程的计算模型为

$$S_i = S_{i-1} - V_i \cdot X_{step}/1000 \quad (15)$$

式中: S_i 为航行器在第 i 个步长, 即 $i \cdot X_{step}/1000$ 时的剩余航程; V_i 为航行器在该时刻的航速; S_{i-1} 为上一个步长时的剩余航程; 若航行器做变速运动, 第 i 个步长 X_{step} 对应的航速 V_i 改变, 则单步长内航行器的航程减少量 $V_i \cdot X_{step}/1000$ 也随之改变, 以应变速制运动。

3 仿真结果分析

UUV 仿真模型在仿真系统、上级实体以及目标实体的调度和服务支持下运行。如图 8 所示, UUV 仿真模型作为一个实体存在于水下对抗装备体系仿真系统之中, 在仿真进行的过程中, UUV 仿真模型将与相关实体进行数据交互, 获取其仿真所需要的输入参数并输出反潜任务的处理结果, 从而保证整个仿真系统的顺利进行。

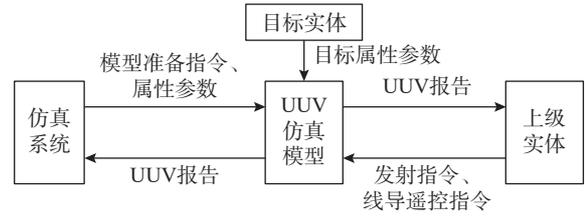


图 8 外部模型与 UUV 模型调用关系图

Fig. 8 Call relationship diagram between external model and UUV model

通过 Visual Studio 软件设定上级潜艇平台、攻击目标实体等模型参数并运行, 再通过 MATLAB 软件对 UUV 轨迹进行作图, 具体初始化参数设置如下。

a) 设定上级潜艇平台于 WGS84 坐标系下 121.858°E , 20.520°N , -100 m 处发射 UUV, 并将该坐标作为测站原点 O , 方便后续进行 WGS84 到 ENU 的坐标系变换;

b) 设定 UUV 运动参数为: 最大航行速度 15 kn , 被动声探测环搜角速度 $20^\circ/\text{s}$, 主动声探测环搜角速度 $10^\circ/\text{s}$;

c) 设定目标位置为 WGS84 坐标系下 121.880°E , 20.526°N , -200 m ; 目标声学参数设定为目标强度 30 dB , 目标辐射噪声级 125 dB 。

初始化参数设置完成后, 根据上述各功能子模块对 UUV 反潜作战行为进行仿真, 经坐标转换后在 ENU 坐标系下的 UUV 运行轨迹如图 9 所示。为了更直观地展示 UUV 的运动状态, 图 10、图 11 分别给出了 UUV 的航深变化情况以及三维轨迹图。

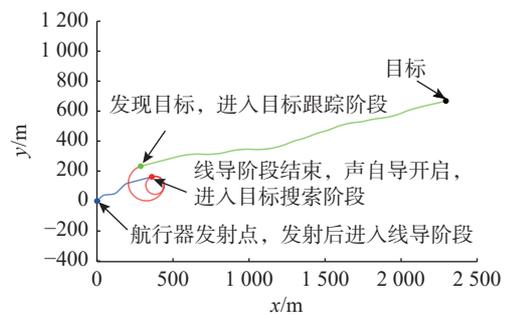


图 9 ENU 坐标系下 UUV 平面轨迹图

Fig. 9 UUV plane trajectory in ENU coordinate system

从图 9~图 11 可知, UUV 与上级潜艇平台分离并完成发射控制子模块仿真后, 进入线导导引子模块仿真(蓝色标注线), 导引 UUV 至目标附近后线导结束, 转为声探测模式进入目标搜索跟踪

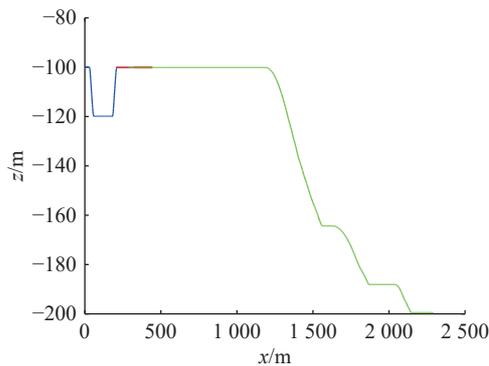


图10 ENU坐标系下UUV纵向轨迹图

Fig. 10 UUV longitudinal trajectory in ENU coordinate system

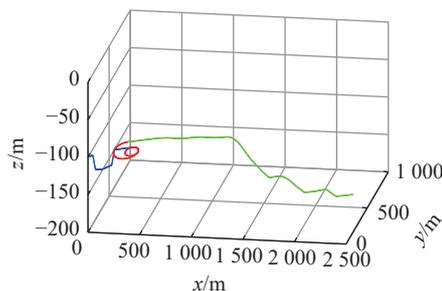


图11 ENU坐标系下UUV三维轨迹图

Fig. 11 UUV three-dimensional trajectory in ENU coordinate system

子模块,同时开始调用目标探测子模块并进行环形搜索(红色标注线),发现目标后进入目标跟踪阶段(绿色标注线),最终成功打击目标完成反潜作战任务。

由上述仿真实例分析,UUV仿真模型根据从仿真系统接收到的仿真引擎控制,从上级潜艇平台接收到的发射参数和线导指令,从目标节点接收到的目标声学及运动学参数,依靠目标探测子模块估计出目标的相关参数,如相对方向、距离等,配合目标搜索跟踪子模块得出UUV的搜索跟踪弹道,并向仿真系统传递目标参数估计结果和UUV运动属性参数,配合完成反潜打击作战任务。

4 结束语

文中在掌握UUV模型关键参数的基础上,用于水下对抗仿真场景下对武器对抗系统框架、防御策略、对抗效果等关键技术的研究分析。通过分析UUV装备组成、工作机理、性能参数及各动作行为,针对发射控制、线导导引、目标探测、目标搜索跟踪与目标攻击等各功能子模块构建了UUV

全功能仿真模型。根据UUV反潜作战规则,通过与上级潜艇平台联合执行反潜打击任务,依托Visual Studio软件对UUV整体反潜作战流程进行了仿真实现,并且能够结合具体作战场景的需求和特点,对仿真模型进行配置和调整,包括上级潜艇平台释放UUV时的经度、纬度和深度,UUV设定的工作深度等参数,以实现反潜任务的高效处理和稳定运行。文中研究的UUV仿真模型是基于Visual Studio软件进行开发的,通过生成动态链接库文件供使用者调用,能够应用于工程实践,支撑系统任务规划,具有良好的可适用性。

在未来的研究中,还需要结合敌我双方各海军单位模型构建作战想定,进一步完善UUV仿真模型运行效率以及与各实体的交互能力。

参考文献:

- [1] ZHANG L Y, LIU L, ZHANG L. Research on position correction method for AUV large depth navigation based on ranging positioning[J]. Computer Communications, 2020, 150: 747-756.
- [2] 李楠,陈练,庞衍鹏,等.无人艇装备技术发展及作战运用探析[J].舰船科学技术,2019,41(23):29-34.
LI N, CHEN L, PANG Y P, et al. Analysis on key technologies evolution and application of USV[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(23): 29-34.
- [3] 徐伟,刘锋,普俊韬,等.水下无人飞行器集群仿真试验系统设计与研究[J].舰船科学技术,2023,45(21):115-118.
XU W, LIU F, PU J T, et al. Design and research of unmanned underwater vehicle cluster simulation test system[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(21): 115-118.
- [4] 杨文,马亮.UUV自航发射方法探究[J].舰船科学技术,2017,39(12):114-117.
YANG W, MA L. Research on technology of self-propelled launching UUV[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(12): 114-117.
- [5] 常开应,王庆云,沈鹏,等.水下无人飞行器空间运动建模与操纵性仿真预报[J].舰船科学技术,2022,44(17):72-76.
CHANG K Y, WANG Q Y, SHEN P, et al. Space motion modeling and maneuverability simulation prediction of underwater unmanned vehicle[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(17): 72-76.
- [6] 王莹莹,周佳加,赵杨,等.基于改进人工势场的水下无人飞行器路径规划仿真研究[J].实验室研究与探索,2023,42(1):109-113,146.
WANG Y Y, ZHOU J J, ZHAO Y, et al. Research on

- path planning for UUV based on improved artificial potential field[J]. Research and Exploration In Laboratory, 2023, 42(1): 109-113,146.
- [7] 尤岳, 周涛, 陈科, 等. 水下无人航行器探潜能力建模与仿真分析[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(19): 66-71.
YOU Y, ZHOU T, CHEN K, et al. Submarine detection modeling and simulation of unmanned underwater vehicle [J]. Ship Science and Technology, 2021, 43(19): 66-71.
- [8] 李娟, 张建新, 杨莉娟, 等. 未知环境下 UUV 动态目标跟踪导引方法[J]. 水下无人系统学报, 2019, 27(3): 290-296.
LI J, ZHANG J X, YANG L J, et al. Dynamic Target tracking guidance method for UUV in unknown environment[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2019, 27(3): 290-296.
- [9] 董鹏, 付敏飞, 周野. 美国攻击型核潜艇发展研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(21): 217-221.
DONG P, FU M F, ZHOU Y. American nuclear-powered attack submarine[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(21): 217-221.
- [10] 杨大伟, 张培培, 颜士坤. 国外核潜艇武器装备及其发展趋势[J]. 指挥控制与仿真, 2007, 29(5): 110-116.
YANG D W, ZHANG P P, YAN S K. The weapon's equipment of foreign nuclear submarine and its developing tendency[J]. Command Control & Simulation, 2007, 29(5): 110-116.
- [11] 汤伟江, 刘卫东, 高卓, 等. 水下线导航行器航路规划对导线布放可靠性的影响[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(6): 747-753.
TANG W J, LIU W D, GAO Z, et al. Influence of route planning of underwater wire-guided vehicle on reliability of wire deployment[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2021, 29(6): 747-753.
- [12] 赵崇丞, 王君, 白华珍. 混合坐标系下跟踪自由段弹道导弹的优化研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(7): 94-98, 218.
ZHAO C C, WANG J, BAI H Z. An optimized survey on the tracking of ballistic missile at free-flight phase in mixed coordinate system[J]. Computer Simulation, 2017, 34(7): 94-98, 218.
- [13] 李志舜. 现代鱼雷自导系统及其发展趋势[J]. 鱼雷技术, 1999, 7(1): 6-9.
LI Z S. Modern torpedo homing system and its development trend[J]. Torpedo Technology, 1999, 7(1): 6-9.
- [14] 郝保安, 孙起, 杨云川, 等. 水下制导武器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [15] 石秀华, 许晖, 韩鹏, 等. 水下武器系统概论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.

(责任编辑: 陈 曦)

《水下无人系统学报》相关文献导航

1. 张志伟, 方泽江, 何润民, 等. 美军水下特种作战装备的发展现状及趋势分析. 2024, 32(5).
2. 张洪瑞, 李斌, 程帅, 等. 目标运动要素解算质量评价体系构建与评估. 2024, 32(4).
3. 张洪瑞, 苏骏, 李谦, 等. 基于主被动联合工作声呐探测信息的 UKF 目标运动要素解算方法. 2024, 32(2).
4. 赵申东, 野理聪, 曹骏泷, 等. 悬浮式航空自导深弹水下攻潜作战效能分析. 2023, 31(5).
5. 程帅, 李斌, 黄华红, 等. 战场海流对管装鱼雷反潜作战效能影响分析. 2023, 31(5).
6. 张宁, 寇小明, 李斌, 等. 基于遗传算法的应召搜潜路径优化. 2023, 31(2).
7. 郭力强, 马亮, 张会, 等. 数据驱动的 AUV 鱼雷攻击有效阵位自主决策方法. 2022, 30(4).
8. 王佳雯, 祁晓斌, 王瑞, 等. 环境压强连续变化作用下水下燃气射流数值仿真. 2022, 30(4).
9. 刘文钰, 高永琪, 张洪刚. 鱼雷电磁引信干扰机作战仿真及效能分析. 2022, 30(4).
10. 邓新文, 谢勇. 双雷齐射时前雷航行噪声对后雷主动声自导检测的影响分析与对策. 2022, 30(4).
11. 何心怡, 张迪洲, 祝琳, 等. 潜艇涡流速度特性数值仿真. 2022, 30(2).
12. 陶荣华, 王丹, 迟铖. 国外航空磁探潜装备应用分析及发展趋势. 2021, 29(4).
13. 鞠建波, 郁红波, 范赵鹏, 等. 吊放声呐扩展螺旋阵搜潜效能评估改进方法. 2020, 28(4).
14. 李启飞, 吴芳, 韩蕾蕾, 等. 基于 AlexNet 迁移学习的磁异常信号检测方法. 2020, 28(2).
15. 张方方, 李文哲, 董晓明, 等. 噪声干扰器作用下反潜鱼雷主动自导性能数值分析. 2020, 28(1).
16. 何心怡, 陈双, 陈菁, 等. 国外反潜训练靶标应用现状与启示. 2019, 27(6).
17. 赵艾奇, 王戈, 孙建, 等. 基于目标舷别判断的火箭助飞鱼雷射击方法. 2019, 27(4).
18. 刘海光, 李伟, 张永. 远程诱骗型 UUV 掩护潜艇作战效能建模与仿真. 2019, 27(3).