

# 水下航行体触网关联体运动建模与仿真分析

戴文留<sup>1,2</sup>, 彭 顺<sup>1,2</sup>, 廖欢欢<sup>1,2,\*</sup>, 彭双志<sup>1,2</sup>, 颜学坚<sup>1,2</sup>

(1. 江南工业集团有限公司, 湖南 湘潭 411207; 2. 中国兵器水中兵器研究院, 湖南 长沙 410006)

**摘要** 为防止水下航行体攻击水面舰艇, 提高水面舰艇的防御和生存能力, 根据尾流自导水下航行体的攻击特性, 在舰艇尾流后方布撒拦截网是直接、有效的对抗手段之一。为了深入了解水下航行体触网关联体的运动特性, 通过建立水下航行体触网关联体仿真运动模型, 得到了水下航行体在不同触网位置下关联体的运动状态变化规律。结果表明: 1) 水下航行体触网后, 速度逐渐降低, 最终趋于稳定, 稳定速度的大小与触网位置和关联体质量基本无关; 2) 配重的速度随时间变化关系为先迅速增大, 后逐渐降低。仿真结果对舰艇反水下航行体拦截网设计研究具有一定的参考意义。

**关键词** 舰艇防御; 拦截网; 关联体运动; 建模仿真

**中图分类号** TJ866 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2022)02-0151-06

**DOI** 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.02.010

## Modeling and Simulation Analysis on Associated Body Motion of Underwater Vehicle Touching Net

DAI Wenliu<sup>1,2</sup>, PENG Shun<sup>1,2</sup>, LIAO Huanhuan<sup>1,2,\*</sup>, PENG Shuangzhi<sup>1,2</sup>, YAN Xuejian<sup>1,2</sup>

(1. Jiangnan Industries Group Co., Ltd., Xiangtan 411207, China; 2. China Ordnance Underwater Weapons Research Institute, Changsha 410006, China)

**Abstract** In order to prevent surface ships from attacks by underwater vehicles and improve the defense and survivability of ships, launching intercept nets behind the wake of ships according to the attack characteristics of wake homing underwater vehicles is one of the direct and effective countermeasures. On the purpose of deeply understanding the kinetic characteristics of associated body of underwater vehicles touching the net, this paper obtains the motion states change law of the associated bodies of underwater vehicles touching the net at different touching positions by establishing the motion simulation model of the associated body of underwater vehicles touching the net. The results show that: 1) after the underwater vehicle touching the net, the speed gradually decreases and finally tends to be stable, and the value of stable speed is basically irrelevant to the net touching position and the mass of the associated body; 2) the variation relation between the speed of counterweight and time is that it first increases rapidly and then decreases gradually. The simulation results provide certain reference value for the design and research of anti-underwater vehicle interception network.

**Key words** ship defence; intercept net; associated motion; modeling and simulation

## 0 引言

目前各国水面舰艇的空中防御体系比较完善、

有效<sup>[1]</sup>, 而水面和水下防御体系, 特别是对水下航行体的防御, 则相对薄弱。尽管反水下航行体武器近年来有了快速改进, 但尾流自导水下航行体的出

现,使得水面舰艇现有的防御变得困难<sup>[2]</sup>。水下航行体的威胁已经成为影响海上交通、军事和商业船只生存能力的主要因素,因此必须加紧开展反尾流自导水下航行体的相关弹药技术研究,以提高水面舰艇的防御和生存能力。根据尾流自导水下航行体的攻击特性<sup>[3]</sup>,在舰艇尾流后方布撒拦截网是直接、有效的“面拦截,面摧毁”对抗手段之一,可有效保护水面舰艇<sup>[4]</sup>。

为研究水下航行体触网关联体的运动特性,本文基于 SimMechanics 建立水下航行体触网关联体仿真运动模型<sup>[5]</sup>,分析了水下航行体在不同触网位置下关联体的运动状态变化规律,对拦截网设计具有一定的参考意义。

### 1 水下航行体触网问题描述

水下航行体触网关联体运动模型的工作环境处于海水之中。2 个浮筒通过网体将 2 个配重悬浮于海水中,浮筒与配重之间的拉力将网体竖直展开,而网体水平方向基本不受力的影响,随海浪运动<sup>[6]</sup>。当航行体以一定的航行速度垂直碰触到网体时,网体将牵连浮筒和配重做关联运动,如图 1 所示。

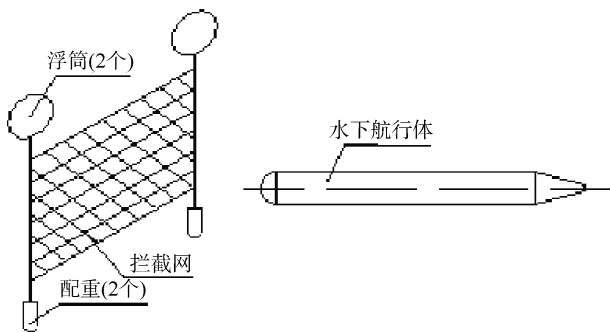


图 1 水下航行体触网运动示意图

Fig.1 Schematic diagram of an underwater vehicle touching net

## 2 建立仿真模型

### 2.1 仿真假设

由于水下航行体触网后与浮筒和配重之间的交联运动关系十分复杂,为便于仿真计算,作如下假设:

- 1) 将水下航行体、浮筒和配重等效为相当体积、重量的球体,不考虑刚体旋转对水下运动的影响;
- 2) 水下航行体推力方向始终保持初始触网速度方向,一旦触网,水下航行体将与触网区域网体锁死,无滑动、脱落现象;
- 3) 网体按受力特性简化为 4 根柔性线体,无延伸,水流对其影响忽略不计。

水下航行体触网关联体运动简化结构示意图如图 2 所示。

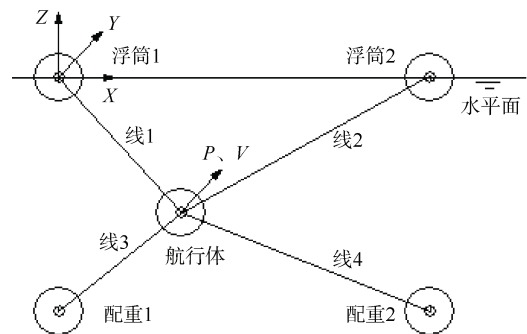


图 2 水下航行体触网关联体运动简化结构图

Fig.2 Simplified structure diagram of associated body motion of an underwater vehicle touching net

### 2.2 仿真模型

按照上述假设条件,水下航行体触网关联体可简化为仅具有水下负浮力  $F_f$ 、运动阻力  $F_d$ 、水下航行体推力  $P$  和柔性线体拉力  $F_{li}$  的简化刚体系运动,各关联体动力学方程如下所示<sup>[7]</sup>。

$$M \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_f + \vec{F}_d + \vec{P} + \sum_{i=1}^n \vec{F}_{li}$$

式中:  $M$  为关联体(水下航行体、浮筒、配重)质量;  $v$  为关联体(水下航行体、浮筒、配重)速度。

采用 Simmechanics 程序建立水下航行体触网关联体运动模型如图 3 所示<sup>[8-13]</sup>。该机构是由刚体机构(航行体、浮筒 1、浮筒 2、配重 1、配重 2)、柔性线体机构(Line1、Line2、Line3、Line4)通过万向铰联接而成。其中,刚体机构航行体为原件,通过柔性线体机构将力传递给各浮筒和配重,在浮筒 1 初始位置建立地面坐标系  $O\_XYZ$ ,浮筒、配重与网体在  $XOZ$  平面内完全展开,  $Y$  轴为水下航行体初始运动方向。

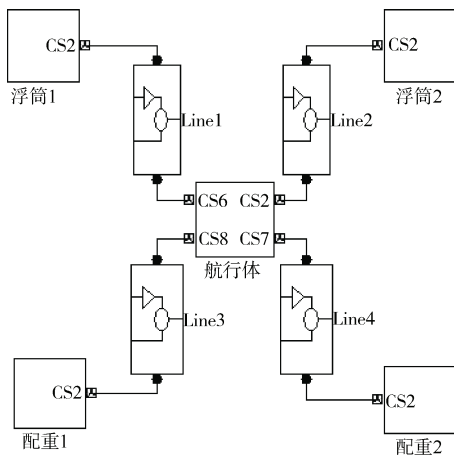


图 3 水下航行体触网关联体运动仿真程序

Fig.3 A simulation program for motion simulation of associated bodies of an underwater vehicle touching net

柔性线体机构由众多连杆模块通过万向铰联

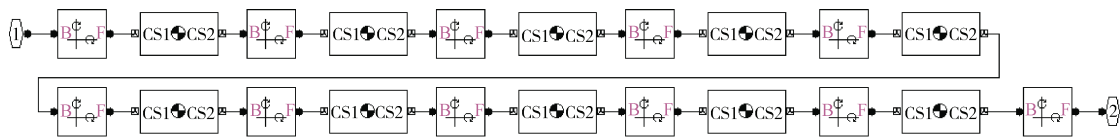


图 4 柔性线体机构程序

Fig.4 Mechanism program of flexible wire body

式中： $v$  为关联体（水下航行体、浮筒、配重）速度，其中  $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$  为速度  $v$  在地面坐标系上的分量； $S$  为关联体（水下航行体、浮筒、配重）参考截面积； $C_d$  为关联体（水下航行体、浮筒、配重）水中阻力系数。

接起来近似模拟，如图 4 所示。

在模型中，设置各关联体（水下航行体、浮筒、配重）在水下运动过程中的负浮力及水下运动阻力情况如下所示。

1) 负浮力。

负浮力  $\vec{F}_f$  始终为  $OZ$  轴方向。

$$\vec{F}_f = [0 \quad 0 \quad (\rho V - M)g]$$

式中： $\rho$  为海水密度； $V$  为关联体（水下航行体、浮筒、配重）体积； $M$  为关联体（水下航行体、浮筒、配重）质量； $g$  为重力加速度。

2) 阻力。

阻力  $F_d$  始终与速度方向相反。

$$\vec{F}_d = -\frac{\rho v S C_d}{2} [v_x \quad v_y \quad v_z]$$

### 2.3 仿真参数设置

关联体初始位置及水下航行体、浮筒、配重各自初始参数如表 1 所示。选取 3 个水下航行体触网位置进行仿真计算，比较分析关联体之间运动关系及水下航行体、配重速度/加速度大小。

表 1 初始参数

Table 1 Initial parameters

关联体	初始/触网位置	质量/kg	体积/m <sup>3</sup>	等效半径/m	等效截面积/m <sup>2</sup>	阻力系数	推力/N	初始速度/(m/s)
水下航行体	[12.5 0 -7.5] [5 0 -5] [20 0 -10]	1 600	1.6	0.25	0.223	0.1	7 000	25
浮筒 1	[0 0 0]	6	0.1	0.3	0.28	0.6	-	-
浮筒 2	[25 0 0]	6	0.1	0.3	0.28	0.6	-	-
配重 1	[0 0 -15]	25	0.005	0.11	0.038	0.1	-	-
配重 2	[25 0 -15]	50	0.008	0.124	0.048 3	0.4	-	-

### 3 仿真结果及分析

水下航行体在位置 1 触网时，仿真结果如图

5-7 所示。水下航行体在位置 1 触网后，浮筒 1 与浮筒 2 的间距逐渐缩短；水下航行体速度逐渐下降，在 3 s 后趋于稳定，约为 5 m/s， $y$  轴加速度先

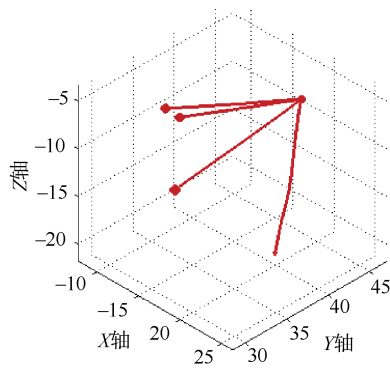
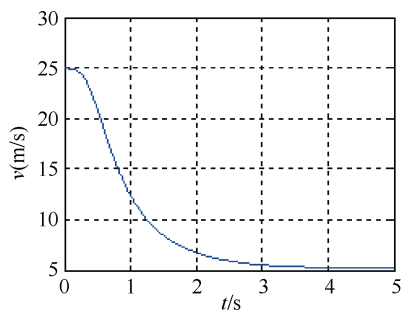
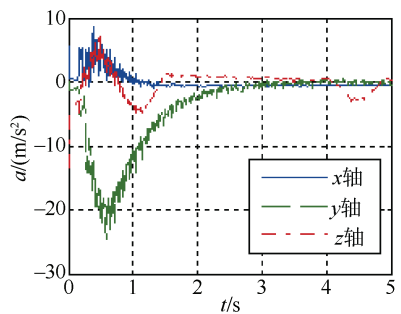


图 5 水下航行体触网空间运动曲线

Fig.5 Space motion curve of an underwater vehicle touching net



(a) 水下航行体速度随时间的变化关系



(b) 水下航行体加速度随时间的变化关系

图 6 水下航行体速度、加速度随时间变化曲线

Fig.6 Variation curve of speed and acceleration of an underwater vehicle with time

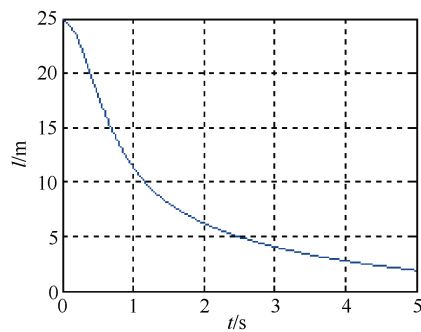


图 7 浮筒间距随时间变化曲线

Fig.7 Variation curve of float distance with time

增大后减小，峰值约为  $25 \text{ m/s}^2$ ；配重 1 与配重 2 速度随时间变化，先迅速增大，而后逐渐下降，前者峰值速度为  $19 \text{ m/s}$ ，后者约为  $14 \text{ m/s}$ ，配重 2 速度在下降过程中逐渐趋于稳定；配重 1 与配重 2 均拥有较大短暂起始加速度，最高约  $370 \text{ m/s}^2$ 。

水下航行体在位置 2 触网时，仿真结果如图 8-10 所示。水下航行体在位置 2 触网后，浮筒 1 与浮筒 2 的间距逐渐缩短；水下航行体速度逐渐下降，并稳定在约  $5 \text{ m/s}$ ，Y 轴加速度先增大后减小，峰值约为  $21 \text{ m/s}^2$ ；配重 1 与配重 2 速度随时间变

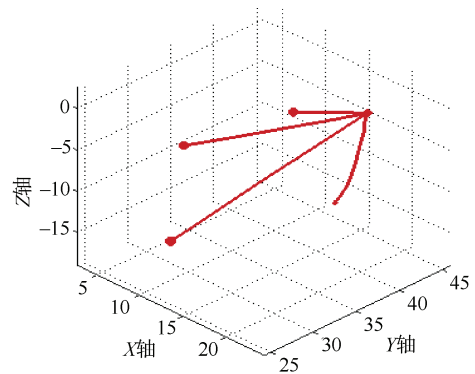
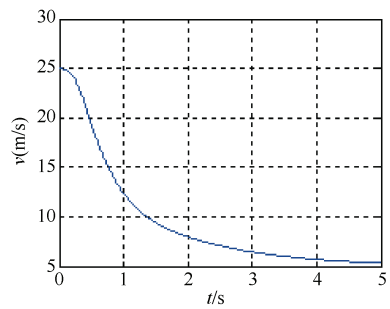
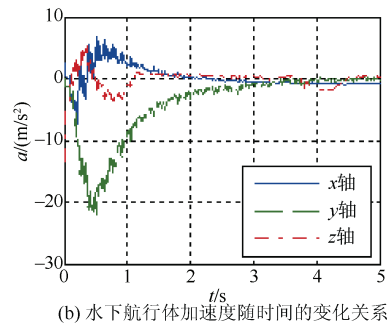


图 8 水下航行体触网空间运动位移曲线

Fig.8 Space motion curve of underwater vehicle touching net



(a) 水下航行体速度随时间的变化关系



(b) 水下航行体加速度随时间的变化关系

图 9 水下航行体速度、加速度随时间变化曲线

Fig.9 Speed and acceleration of underwater vehicle changing with time

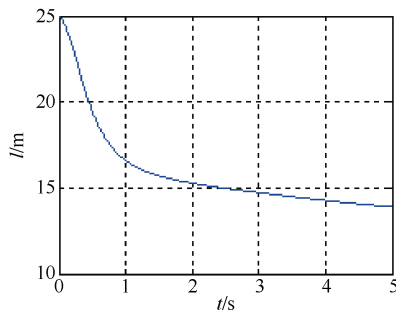


图 10 浮筒间距随时间变化曲线

Fig.10 Variation curve of float distance with time

化,先迅速增大,而后逐渐下降,前者峰值速度为 20 m/s,后者约为 10 m/s,配重 2 速度在下降过程中逐渐趋于稳定;配重 1 与配重 2 均拥有较大短暂起始加速度,最高约  $500 \text{ m/s}^2$ 。

水下航行体在位置 3 触网时,仿真结果如图 11-13 所示。水下航行体在位置 3 触网后,浮筒 1 与浮筒 2 的间距逐渐缩短;水下航行体速度逐渐下降,在 3 s 后趋于稳定,约为 5 m/s, Y 轴加速度先增大后减小,峰值约为  $30 \text{ m/s}^2$ ;配重 1 与配重 2 速度随时间变化,先迅速增大,而后逐渐下降,前者峰值速度为 15 m/s,后者约为 18 m/s,配重 2 速度在下降过程中逐渐趋于稳定;配重 1 与配重 2 均拥有较大短暂起始加速度,最高约  $500 \text{ m/s}^2$ 。

仿真分析如下。

1) 水下航行体水平运动触网后,速度逐渐降低,最终趋于稳定,稳定速度的大小与触网位置和关联体质量基本无关。水下航行体最终稳定速度应在水下航行体推力与关联体水中阻力之和相等时出现,所以,要想减小水下航行体的最终速度,应增大关联体参考截面积和水中阻力系数。

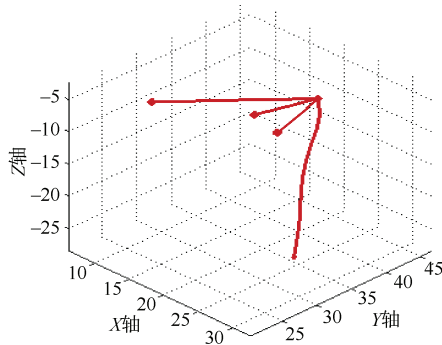
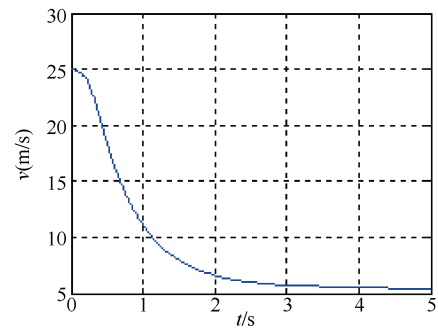
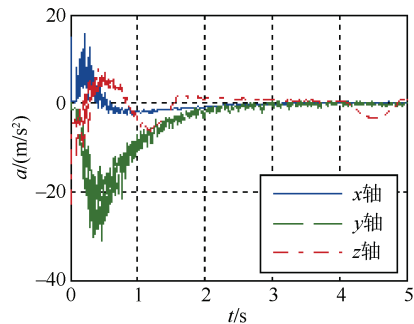


图 11 水下航行体触网空间运动曲线

Fig.11 Space motion curve of an underwater vehicle touching net



(a) 水下航行体速度随时间的变化关系



(b) 水下航行体加速度随时间的变化关系

图 12 水下航行体速度、加速度随时间变化曲线  
Fig.12 Variation curve of speed and acceleration of an underwater vehicle with time

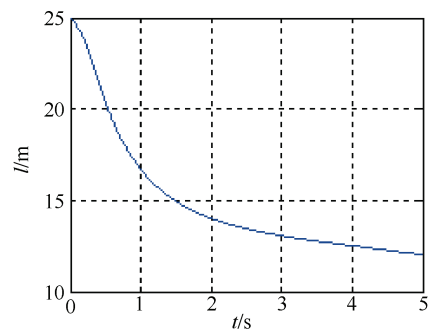


图 13 浮筒间距随时间变化曲线

Fig.13 Variation curve of float distance with time

2) 配重的速度随时间变化关系为先迅速增大,后逐渐降低。与配重 1 相比,配重 2 的速度更加稳定,且配重 2 的速度与加速度振荡频率明显高于配重 1。分析其原因是:配重 1 与配重 2 相比具有更小的水中阻力系数,在获得某一速度后,更易于保持速度,因此,配重 1 在运动过程中受水下航行体拖动的频率低于配重 2,所以其速度与加速度振荡频率较低。

3) 根据仿真结果可知,水下航行体触网后,向关联体重的一边转弯运动。这里假设水下航行体

推力方向为地面坐标系  $OY$  轴, 而不是雷体轴线方向, 所以仿真结果并不能完全代表关联体真实运动过程, 将在后续研究中改进。

#### 4 结束语

本文通过建立水下航行体触网关联体仿真运动模型, 得到了水下航行体在不同触网位置下关联体的运动状态变化规律。结果表明: 1) 水下航行体触网后, 速度逐渐降低, 最终趋于稳定, 稳定速度的大小与触网位置和关联体质量基本无关; 2) 配重的速度随时间变化关系为先迅速增大, 后逐渐降低。仿真结果对舰艇反水下航行体拦截网设计研究具有一定的参考意义。

#### 参考文献

- [1] 于天翔, 毕义明, 孙兴龙. 航母编队弹道导弹防御体系研究分析[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(10): 1-4, 11.
- [2] 陈明. 提升我水下攻防作战能力的对策措施[J]. 数字海洋与水下攻防, 2019, 2(1): 1-3.
- [3] 赵向涛, 寇祝, 王佳婧, 等. 水面舰艇规避尾流自导鱼雷方法研究[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(9):

100-104.

- [4] 陈敬军. 国外鱼雷防御问题评述(四)鱼雷防御系统中不断出现的硬杀伤能力[J]. 声学技术, 2013, 32(5): 439-444.
- [5] 赵广元. MATLAB与控制系统仿真实践[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- [6] 于洋. 空间飞网抛射展开动力学建模与仿真[J]. 宇航学报, 2010, 31(5): 1289-1296.
- [7] 胡晓楠. 柔性绳索在空气阻力作用下的动力学仿真研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(10): 1334-1337.
- [8] 陈钦. 空间绳网系统设计与动力学研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [9] 李强. 空间绳系卫星系统动力学建模及仿真研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [10] 文登. 某无人机撞网回收系统动力学仿真分析与优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [11] 杨方. 系留气球平台动力学仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(12): 66-70.
- [12] 卢新平. 用 Dirac 符号表述的非自由质点系动力学方程[J]. 计力学与实践, 2005, 27(1): 76-78.
- [13] 陈治. 质点系动力学: 系统建模[J]. 北京轻工业学院学报, 1999, 17(1): 75-80.

(责任编辑: 曹晓霖)