

水声多诱饵对抗环境鱼雷导引方法

禹 亮[†], 程咏梅, 陈克喆, 赵会升, 李 松

(西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 针对声诱饵对抗环境下, 鱼雷常规的弹道导引方法难以兼顾对多个目标进行识别与打击要求, 提出了多诱饵环境鱼雷导引方法基本框架, 并基于人工势场提出多目标导引方法. 该方法把目标似真概率和导引方向结合起来, 使各目标在准确度未确定情况下对弹道的影响作用均能得以体现. 首先依据各目标的概率确定牵引目标并计算出牵引关注度; 进而, 改进人工势场法的排斥因素, 提出了吸引关注度概念, 计算其他目标的吸引关注度及导引关注度; 最后在机动能力限定下确定出鱼雷的角速度. 静态靶桩仿真和运动目标仿真实验结果表明, 该方法在保证对似真概率最大的目标进行打击的同时, 能尽可能兼顾对多目标的探测识别, 能显著提高水声多诱饵环境下目标打击的准确性.

关键词: 水声弹道; 导引; 多目标; 识别; 跟踪; 人工势场法

中图分类号: TJ630

文献标识码: A

Torpedo guidance method of the decoy jamming environment

YU Liang[†], CHENG Yong-mei, CHEN Ke-zhe, ZHAO Hui-sheng, LI Song

(Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

Abstract: Submarine and decoys exist under the decoy jamming environment. Traditional trajectory guide methods of the torpedo couldn't guarantee the need for identifying and attack requires simultaneously on multiple targets. The torpedo guidance method framework of the multi-decoy environment is suggested. Founding on the theory of the artificial potential field, a multi-objective guidance method is also provided. The method combines the target plausibility probability and the guiding direction systematically which can consider all targets' effect to the torpedo. Firstly, the tract target is decided using the probability of all targets and then the traction attention rate of the target is computed; next, the repulsion in artificial potential field is improved and the concept of attracting attention is posed, the attracting attention and guiding attention rate of all other targets can be got; finally, the angular velocity of the torpedo with the limitation of its maneuvering capability is calculated. Simulation using static target piles and moving objects demonstrated that, the method cannot only guarantee the attack of the maximum probability target and at the same time can give consideration to detection and recognition of as much as possible targets. It can improve the accuracy of the attack significantly.

Key words: underwater ballistics; guidance; multi-target; identification; tracking; artificial potential field

1 引言(Introduction)

自导鱼雷在发射后, 会经过程序弹道阶段对搜索到的目标按照某种导引与控制方式进行追踪, 直到距离目标很近时转入末攻击弹道程序进行最终的打击. 程序弹道一般是根据打击目标相对于鱼雷的方位、运动关系进行导引与控制设计, 常见的有追踪法、固定提前角法、比例导引法、平行接近法等^[1]. 这些方法主要考虑的是如何保证稳定、平滑、快速地截获目标, 只能针对单一目标导引. 近些年, 在文献[1]基础上, 文献[2]发展了固定提前角法, 推导出一种以航向角为控制律的导引方式提高打击精度; 文献[3]对有角度约束

的偏置比例导引法进行了改进, 把常偏置项改进为时变偏置, 以解决目标机动的导引问题. 此外, 文献[4-5]分别通过仿真、多学科结合方法等方法弹道进行优化设计. 从国内外以上研究来看, 这些方法从本质上来看仍然是针对单一目标提升弹道效能来进行弹道设计.

随着现代水声对抗环境的日益复杂, 在程序弹道阶段, 被攻击目标会释放一个甚至多个声诱饵来对鱼雷进行诱导, 声诱饵一般不具攻击性, 仅是在运动规律、声学属性上模拟出真实目标的特性. 上述导引方法针对单一目标, 由于鱼雷自导扇区限制鱼雷难以兼

收稿日期: 2015-10-02; 录用日期: 2016-10-27.

[†]通信作者. E-mail: ylozy@nwpu.edu.cn; Tel.: +86 29-88430382.

本文责任编辑: 高会军.

国家自然科学基金项目(61135001), 西安市科技计划项目(CXY1436(9))资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61135001) and Xi'an Science and Technology Program (CXY1436(9)).

顾众多目标的追踪, 从而造成鱼雷误跟、失跟而导致打击失败, 而针对多目标态势下鱼雷弹道导引方法尚未见公开报道. 在该过程, 鱼雷自导系统虽无法确定目标真假, 但可根据雷目阵位获取目标声学属性信息, 得出目标的似真程度^[6], 如果能够考虑在弹道导引过程中, 兼顾对多目标追踪及属性识别需要, 对多目标边跟踪边识别, 对提高攻击准确性无疑将起到重要作用. 因此, 设计一种既能够兼顾尽可能多目标追踪需求且考虑对多目标进行识别的导引方法是声诱饵对抗环境下导引设计的迫切要求, 并对提升鱼雷的精确打击与智能化水平具有重要的意义.

人工势场法(artificial potential fields method, APFM)最初由Khatib提出用于机械臂避障^[7], 后广泛应用于机器人避障^[8-11], 近些年在无人机航路规划^[12-14]等领域中得到进一步的应用. 该方法将驱动体的运动看成是目标吸引力和多个障碍物排斥力共同作用的结果, 驱动体总是沿着合力的方向运动. 通过对合力的计算, 便可给出驱动体的运动规律, 该方法在路径设计上能够兼顾到了多个目标对于驱动体的作用, 可以保证同时对多个目标进行跟踪探测; 且一般来说在有限探测间隔时间内合作用力变化不会太快, 能保证弹道的平滑性. 此外, 该方法具有规划速度快、计算量较小易于实现的优点. 因此, 引入人工势场方法对鱼雷进行导引, 无疑是解决复杂环境下鱼雷导引的一种合理的新思路.

本文结合具体水声环境, 给出了声诱饵对抗环境鱼雷导引方法基本框架思想. 该框架综合考虑了多目标跟踪、属性获取目标概率计算、同时兼顾弹道对平滑性需求. 通过对人工势场原理的研究, 提出了基于人工势场的鱼雷导引方法. 把人工势场的排斥作用进行了改进, 提出了牵引关注度、吸引关注度、导引关注度概念, 从而使人工势场法能够很好的用于水声环境. 静态靶桩、动态环境及综合仿真均表明该方法弹道平滑、打击有效, 对于提高声诱饵对抗环境下打击准确度具有明显效果.

2 导引方法框架(Framework of the guidance method)

在目标真实性未完全确定情况下进行多目标的精确打击, 应首要保证似真概率最大目标不能被丢失, 且应尽可能保证同时进行更多目标的跟踪, 避免丢失目标, 方能尽可能对更多目标的目标属性获取, 延长目标筛选时间. 即首先应完成概率最大及其他目标的跟踪, 进一步, 可以根据跟踪结果获取雷目阵位信息、目标属性库(真实目标的属性特征)以进行目标似真概率计算^[6], 进而, 在弹道平滑性要求下进行弹道设计, 完成导引过程. 在下一时拍, 根据导引结果, 鱼雷运动方位变化, 进行下一时拍的多目标跟踪, 并重复上述过程. 可见, 声诱饵环境下, 跟踪、概率计算、

弹道设计三者呈交互影响状态, 需兼顾以上3个方面才能进行的导引设计. 其总体框架如图1所示.

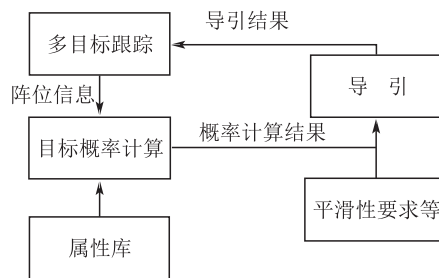


图1 导引方法框架

Fig. 1 Guidance method framework

3 基于人工势场的导引方法(Guidance method based on the artificial potential field)

水声对抗环境下的导引侧重于同时对多个目标的攻击, 需把人工势场法“避障、排斥”作用向吸引性质的“攻击”来进行考虑. 借鉴人工势场法用于无人机航路规划的思想, 采用速度矢量场的形式, 将人工势场的“吸引”势场应用到鱼雷多目标导引当中. 在吸引势场的设计中需要保证对似真概率最大的目标进行导引, 且同时需要保证在导引过程中鱼雷能够有效探测并识别出其他假目标. 基于人工势场法的水下多目标导引方法的原理示意如图2所示.

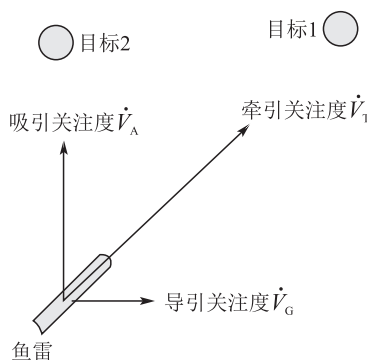


图2 基于人工势场法的导引示意图

Fig. 2 Diagram of the guidance method based on the artificial potential field

依据跟踪过程中获得实时各个目标的似真概率 P_i , 选择概率最大的目标为鱼雷的优先打击目标, 定义为牵引目标 T , 如图2中的目标1. 鱼雷同样应该兼顾其他不确定目标的识别, 导引设计上应该考虑对这些目标靠近以进行探测. 因此, 该类目标产生的将不再是排斥力, 而同样是吸引作用, 定义为吸引目标 A_i , $i = 1, 2, \dots, n-1$, n 为目标个数, 如目标2. 牵引目标产生牵引场, 鱼雷在牵引场作用下产生的作用矢量称为牵引关注度 $\dot{V}_T$; 吸引目标产生吸引场, 鱼雷在吸引场作用下产生的作用矢量称为吸引关注度 $\dot{V}_A$. 考虑较多

目标存在, 吸引目标合力大于牵引目标合力情况, 为保证鱼雷不被吸引目标主导至偏离牵引目标方向, 吸引场同时需要提供导引关注度 $\dot{V}_G$, 该关注度应保证无论任何情况下均能产生朝向牵引目标的作用, 且需保证弹道平滑转向牵引目标. 鱼雷在上述合成关注度作用下, 完成对多目标的导引.

以下下标A表示吸引目标的作用, T表示真目标的作用, 依据势场构造中表示为

$$U = U_A + U_T + U_G, \quad (1)$$

式中: U 为鱼雷所受总势场; U_A 为吸引场; U_T 为牵引场; U_G 为导引场.

对于多个假目标情况, 可以采用势场的叠加性得到多个假目标吸引势场. 此时, 总的势场可表示为

$$U = U_T + \sum_{i=1}^n U_A + \sum_{i=1}^n U_G. \quad (2)$$

根据空间动力学方程和拉格朗日方程, 可以推导出人工势场对控制对象的作用:

$$F_T = -\text{grad}(U_T) = -\left(\frac{\partial U_T}{\partial x}i + \frac{\partial U_T}{\partial y}j + \frac{\partial U_T}{\partial z}k\right). \quad (3)$$

同理,

$$F_A = -\left(\frac{\partial U_A}{\partial x}i + \frac{\partial U_A}{\partial y}j + \frac{\partial U_A}{\partial z}k\right), \quad (4)$$

$$F_G = -\left(\frac{\partial U_G}{\partial x}i + \frac{\partial U_G}{\partial y}j + \frac{\partial U_G}{\partial z}k\right), \quad (5)$$

式中: F_T 为牵引作用; F_A 为吸引作用; F_G 为导引作用. 势场中的合力 F 表示为

$$F = F_T + F_A + F_G, \quad (6)$$

F 决定了控制对象的运动. 假定真实目标牵引作用只有一个, 多个吸引目标产生多个吸引作用和导引作用, 则合力为

$$F = F_T + \sum_{i=1}^{n-1} F_A + \sum_{i=1}^{n-1} F_G, \quad (7)$$

式中 n 为目标个数. 根据牛顿力学原理, 在雷目距离较远情况下, 把鱼雷视为质点, 可得

$$ma = ma_T + m \sum_{i=1}^{n-1} a_A + m \sum_{i=1}^{n-1} a_G = m(a_T + \sum_{i=1}^{n-1} (a_A + a_G)), \quad (8)$$

即

$$a = a_T + \sum_{i=1}^{n-1} (a_A + a_G). \quad (9)$$

上式中: a 为鱼雷加速度, $a = \dot{V}$, $\dot{V}$ 为鱼雷加速度, 根据式(9), 进一步可得

$$\dot{V} = \dot{V}_T + \sum_{i=1}^{n-1} (\dot{V}_A^i + \dot{V}_G^i), \quad (10)$$

$\dot{V}$ 表征了鱼雷在各目标作用下的加速度, 即本文所称关注度. 实际上, 各目标对于鱼雷所作用的势是虚拟的, 其加速度亦是虚拟的, 亦即这种作用可以根据设计目的而进行设计. 根据这个思想, 弹道设计上, 考虑的是各目标的概率、目标阵位以及弹道平滑性要求, 故而对于各关注度进行设计如下.

3.1 牵引关注度 $\dot{V}_T$ (The traction attention $\dot{V}_T$)

选择似真概率最大的目标作为牵引目标, 鱼雷以牵引目标为优先打击目标, 其提供的牵引关注度 $\dot{V}_T$ 数学表达式为

$$\dot{V}_T = P_T \vec{r}_T, \quad (11)$$

式中: P_T 为牵引目标的似真概率, $\vec{r}_T$ 表示牵引场单位矢量, $W_T(x_t, y_t, z_t)$ 表示牵引目标位置, $W_d(x_d, y_d, z_d)$ 表示鱼雷当前位置.

用

$$D_T = \sqrt{(x_t - x_d)^2 + (y_t - y_d)^2 + (z_t - z_d)^2}$$

表示牵引目标相对鱼雷的距离, $\vec{r}_T$ 在 x, y, z 方向分量的表达式为

$$\begin{cases} r_{Tx} = \frac{x_t - x_d}{D_T}, \\ r_{Ty} = \frac{y_t - y_d}{D_T}, \\ r_{Tz} = \frac{z_t - z_d}{D_T}. \end{cases} \quad (12)$$

用雷目连线与鱼雷航向的夹角表示牵引目标相对鱼雷的视角 θ_T . 若鱼雷航向为 $\vec{L}$, 易得

$$\theta_T = \arccos\left(\frac{\vec{L}' \cdot \vec{r}_T}{\|\vec{W}_T - \vec{W}_d\|}\right).$$

3.2 吸引关注度 $\dot{V}_A$ (The attracting attention $\dot{V}_A$)

与人工势场法在无人机航路规划中避开障碍或者威胁的背景不同, 在多目标导引过程中吸引目标对鱼雷产生的是吸引力, 这种吸引力越强, 鱼雷的导引弹道就越靠向该目标. 吸引场模型示意图如图3所示.

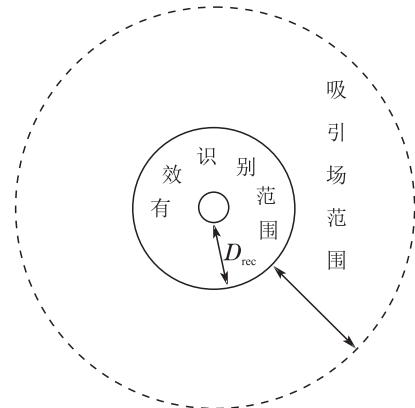


图3 吸引场范围示意

Fig. 3 Range of the attraction field

吸引关注度 $\dot{V}_A$ 的数学表达式为

$$\dot{V}_A = \begin{cases} 0, & D_A^i \leq D_{\text{rec}}, \\ [a + (b - a)(f(D_A^i) + f(\theta_D^i))] \cdot \vec{r}_A^i, & D_{\text{rec}} < D_A^i \leq D_T, \\ 0, & D_A^i > D_T, \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\dot{V}_A$ 表示第*i*个吸引目标对鱼雷产生的吸引关注度; P_A^i 表示吸引目标的似真概率; D_{rec} 表示在任意目标舷角下, 鱼雷能准确识别目标的最小距离; D_A^i 表示吸引目标相对鱼雷的距离; D_T 表示鱼雷最远探测距离; θ_D^i 表示吸引目标相对鱼雷的视线角; $\vec{r}_A^i$ 表示吸引场单位矢量; a 表示吸引场内边沿场强系数; b 表示吸引场外边沿场强系数; $f(D_A^i), f(\theta_D^i)$ 分别表示距离、目标视线角对吸引关注度的影响程度, 其计算公式如下:

$$f(D_A^i) = 1 - \left(\frac{D_A^i - D_{\text{rec}}}{D_T - D_{\text{rec}}} \right)^2, \quad (14)$$

$$f(\theta_D^i) = \left(\frac{\theta_D^i - \theta_T}{\xi} \right)^2, \quad (15)$$

式中 ξ 为鱼雷的探测扇区大小。

在吸引场内边沿, 其场强系数 a 一般取较小值, 表示鱼雷离目标越近, 其有效识别能力就越大, 吸引力就越小, 在有效识别范围内, 吸引力为零, 此时鱼雷已经识别出目标是潜艇还是诱饵, 如果是潜艇, 进入末导引弹道, 否则继续进行导引。

在吸引场外边沿, 其场强系数 $b = P_A^i$ 表示该吸引场的场强与目标的似真概率有关, 概率越大, 吸引关注度越大, 但为了不使鱼雷受距离很远的吸引目标($D_A^i > D_T$)的影响, 当 $D_A^i > D_T$ 时, 吸引关注度 $\dot{V}_A$ 为0。

3.3 导引关注度 $\dot{V}_G$ (The guiding attention $\dot{V}_G$)

如果吸引关注度合力方向与牵引目标合力方向夹角越大, 这种导引力量应该越大方能保证在判断出吸引目标为假目标后能最快转向。故而, 易得出在牵引关注度与吸引关注度方向不重合情况下的以下结论:

定理1 任意吸引关注度均会产生朝向牵引目标的作用, 即 $\forall \dot{V}_A \Rightarrow \exists \dot{V}_G$ 。

定理2 吸引关注度合力方向与牵引目标合力方向夹角 $|\theta_D^i - \theta_T|$ 越大, 则导引关注度越大, 即 $\dot{V}_G \propto |\theta_D^i - \theta_T|$ 。

对于鱼雷探测区任意范围, 假定 $0^\circ \sim 180^\circ$, 要保证任意吸引关注度方向产生朝向牵引目标作用, 只能定义一垂直于该关注度方向且指向牵引目标的作用。故而定义导引关注度方向为: 在该目标、鱼雷以及牵引目标构成平面内, 与吸引关注度 $\dot{V}_A^i$ 垂直且指向牵引目

标, 计算方法如下式:

$$\dot{V}_G^i = \varepsilon \arccos\left(\frac{\vec{r}_T' \cdot \vec{r}_A}{\|\vec{r}_T' \cdot \vec{r}_A\|}\right) \cdot \left(\frac{\vec{r}_A \times (\vec{r}_T \times \vec{r}_A)}{\|\vec{r}_A \times (\vec{r}_T \times \vec{r}_A)\|}\right), \quad (16)$$

式中 ε 为导引关注度与吸引关注度的大小比值, 其计算公式为

$$\varepsilon = \left| \frac{\theta_D^i - \theta_T}{\xi} \right|. \quad (17)$$

该式表示当吸引目标与牵引目标的视线角比较接近时, 导引关注度接近于0, 而当两者的视线角差值比较大时, 吸引目标产生的导引关注度就大。

3.4 机动力约束下的导引(Guidance under the constraint of maneuvering force)

在水下环境中, 鱼雷的机动能力有限。本文采用鱼雷的最大转弯角速度 $\dot{\psi}_d^{\text{max}}$ 将鱼雷机动力约束融合到导引当中, 保证导引的可行性及弹道平滑性。得到牵引关注度 $\dot{V}_T$ 、吸引关注度 $\dot{V}_A$ 、导引关注度 $\dot{V}_G$ 之后, 按下式进行合并得到下一时刻鱼雷的关注度矢量 $\dot{V}^{\text{next}}$:

$$\dot{V}^{\text{next}} = \dot{V}_T + \sum_i^{n-1} (\dot{V}_A^i + \dot{V}_G^i). \quad (18)$$

计算鱼雷下一时刻的航向 ψ_d^{next} :

$$\psi_d^{\text{next}} = \arccos(\vec{L}' \cdot \frac{\dot{V}^{\text{next}}}{\|\dot{V}^{\text{next}}\|}). \quad (19)$$

则下一时刻鱼雷的航向角速度为

$$\dot{\psi}_d^{\text{next}} = \min(\dot{\psi}_d^{\text{max}}, \dot{\psi}_d^{\text{next}}), \quad (20)$$

式中 $\dot{\psi}_d^{\text{max}}$ 为鱼雷机动能力限定下的最大角速度。

建立以鱼雷当前航向角 $\vec{L}$ 、关注度矢量 $\dot{V}^{\text{next}}$ 构成的空间局部坐标系 N 。定义局部坐标系 X_N 方向向量为 $\frac{\dot{V}^{\text{next}}}{\|\dot{V}^{\text{next}}\|}$, Y_N 方向向量为 $\frac{\vec{L}}{\|\vec{L}\|}$, 则 $Z_N = \frac{\vec{X}_N \times \vec{Y}_N}{\|\vec{X}_N \times \vec{Y}_N\|}$ 。

当前航向角在局部坐标系下表示为 $\vec{L}_N$, 可得

$$\vec{L}_N = [X_N \ Y_N \ Z_N]' \cdot \vec{L}. \quad (21)$$

当前航向角在局部坐标系下按照最大角速率旋转后的角度为

$$\vec{\psi}_N^{\text{next}} = \begin{bmatrix} \cos(2\pi - \dot{\psi}_d^{\text{next}} t) & -\sin(2\pi - \dot{\psi}_d^{\text{next}} t) & 0 \\ \sin(2\pi - \dot{\psi}_d^{\text{next}} t) & \cos(2\pi - \dot{\psi}_d^{\text{next}} t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \vec{L}_N, \quad (22)$$

可以得到在全局坐标系下的航向角如下式:

$$\vec{\psi}^{\text{next}} = [X_N \ Y_N \ Z_N] \vec{\psi}_N^{\text{next}}. \quad (23)$$

4 仿真验证(Simulation)

为体现算法的有效性, 分别在目标为静态靶桩、目标运动及系统综合仿真. 假定鱼雷采样时间间隔 $T = 1$ s, 最大转弯角速度 $\dot{\psi}_d^{\max} = 5$ ($^{\circ}$)/s, 假定鱼雷准确识别出目标真假的距离 $D_{\text{rec}} = 500$ m, 探测扇区 $\xi = 45^{\circ}$, 速度大小 $|V_d| = 20$ m/s. 吸引场内边沿场强系数 $a = 0$. 当雷目距离达到 D_{rec} 时, 若该目标判定为假目标则排除该目标按本文方法继续仿真, 若该判定为真目标则结束仿真.

4.1 静态靶桩仿真(Static target pile)

仿真场景 1 鱼雷初始位置(0, 0, 0), 初始航向分量(1, 1, 0); 1个潜艇, 位置(2400, 2300, 2300), 静止, 似真概率 $P_T = 0.7$; 两个声诱饵, 位置分别为(300, 1050, 1020), (2200, 1600, 2000), 静止, 似真概率分别为0.3, 0.3. 导引效果如图4–6所示.

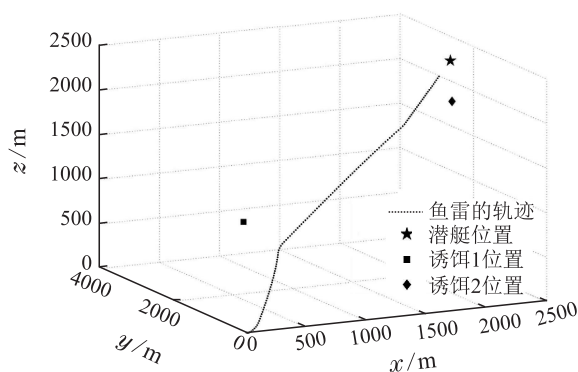
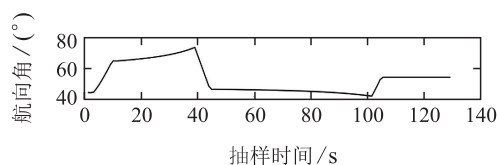
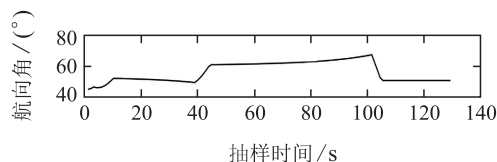


图4 场景1导引效果图

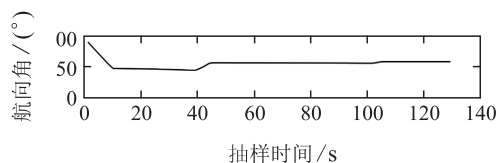
Fig. 4 Guidance effect of Scene 1



(a) X方向航向角



(b) Y方向航向角



(c) Z方向航向角

图5 场景1鱼雷航向角变化曲线

Fig. 5 Curve of torpedo heading angle in Scene 1

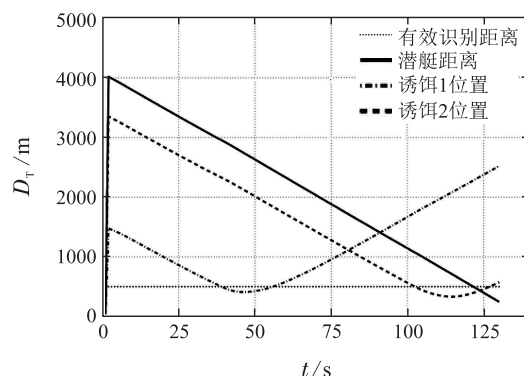


图6 场景1各目标与鱼雷距离变化曲线

Fig. 6 Curve of distance between the target and torpedo in Scene 1

4.2 运动目标仿真(Moving objects)

仿真场景 2 鱼雷初始位置(0, 1000, 1000), 初始航向分量(1, 0, 0); 1个潜艇, 位置(2000, 1000, 1000), 速度10 m/s, 航向分量(1, 0, 0), 似真概率 $P_T = 0.6$; 2个声诱饵, 位置分别为(1600, 1500, 950), (2000, 2000, 950), 航向与潜艇一致, 速度10 m/s, 似真概率为0.3. 导引效果如图7–9所示.

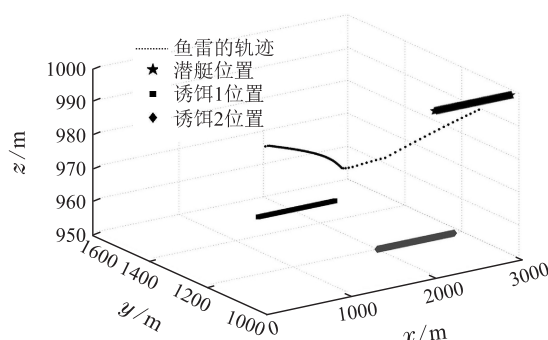
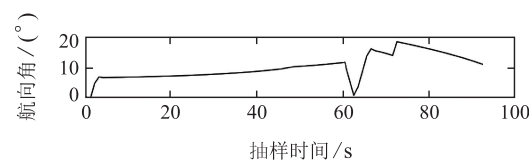
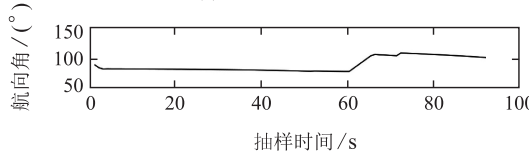


图7 场景2导引效果图

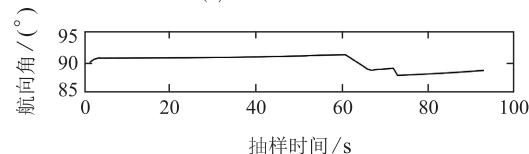
Fig. 7 Guidance effect of Scene 2



(a) X方向航向角



(b) Y方向航向角



(c) Z方向航向角

图8 场景2鱼雷航向角变化曲线

Fig. 8 Curve of torpedo heading angle in Scene 2

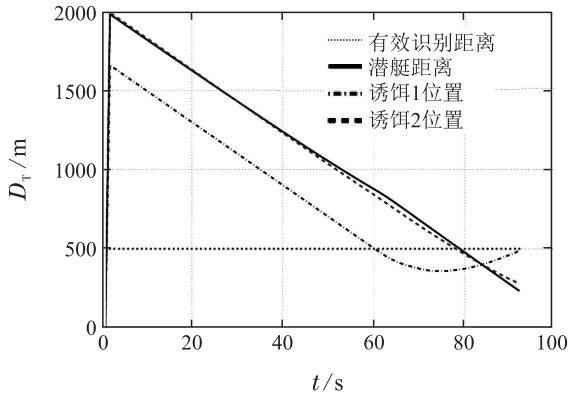


图9 场景2各目标与鱼雷距离变化曲线

Fig. 9 Curve of distance between the target and torpedo in Scene 2

仿真场景3 鱼雷初始位置(0,0,0), 初始航向分量(1,1,1); 1个潜艇, 位置(1000,1000,1000), 速度(7,7,7), 似真概率 $P_T = 0.5$; 2个声诱饵, 初始位置与潜艇在同一位置, 速度分别为(-9,0,7) m/s, (-7,4,7) m/s, 似真概率都为0.3. 导引效果如图10-12所示.

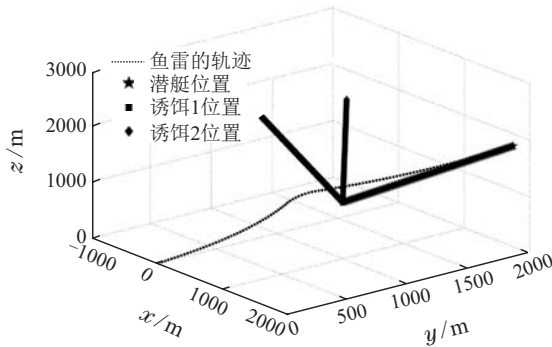
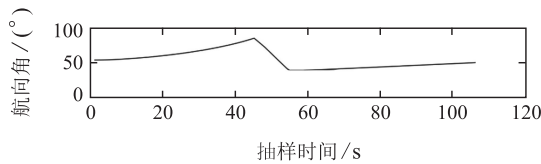
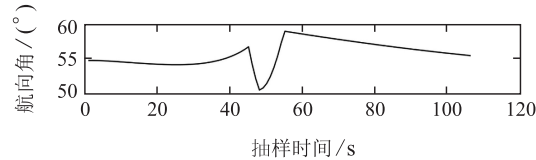


图10 场景3导引效果图

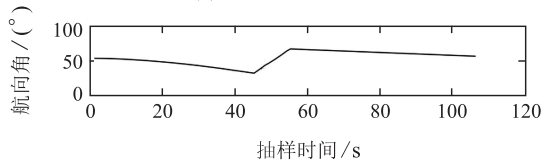
Fig. 10 Curve of torpedo heading angle in Scene 3



(a) X方向航向角



(b) Y方向航向角



(c) Z方向航向角

图11 场景3鱼雷航向角变化曲线

Fig. 11 Torpedo heading angle change curve of Scene 3

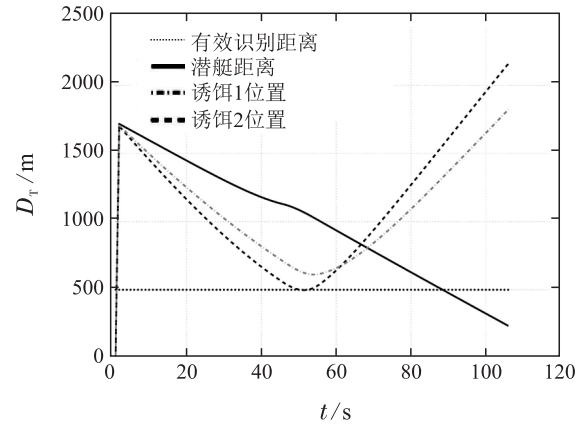


图12 场景3各目标与鱼雷距离变化曲线

Fig. 12 Curve of distance between the target and torpedo in Scene 3

场景1验证了在多个静止目标存在的环境下, 当吸引目标、牵引目标与鱼雷距离远近不一, 基于人工势场法多目标导引的有效性. 从图4中可以直观看出鱼雷除了主要朝牵引目标运动, 还被吸引目标所影响, 在保证朝最大似真概率的目标运动前提下, 尽可能接近其他目标, 从而在导引过程中对其进行有效识别. 在图6中可以看到, 各个目标与鱼雷距离的最小值都低于有效识别距离, 也就是各个目标都得到了有效的识别, 且导引过程中牵引目标与鱼雷的距离减小得非常快, 满足鱼雷快速命中潜艇的要求. 从图5中可以看出, 本文方法所产生的鱼雷导引弹道满足弹道平滑性要求. 因此, 总的来说, 本方法在静态靶桩环境下不仅保证了对最大似真概率目标的导引, 而且有利于对其他目标的识别, 具有弹道平滑的优点. 场景2、场景3验证了在多个运动目标存在的环境下, 基于人工势场多目标导引法的有效性, 从图7-12中可以看出, 本方法在平行运动两目标、多目标多种运动情况下同样保证了对最大似真概率目标的导引, 同时对其他目标的识别也得到了保证. 打击过程中, 弹道未出现跳跃抖动现象, 具有弹道平滑的优点.

4.3 综合仿真(Synthesis scene)

真实情况下, 鱼雷弹道路径不同, 雷目阵位将不同, 获取的目标属性将随阵位不同而变化^[6], 各目标的概率均随之变化, 从而影响下一时刻弹道方向, 据此进行水下多目标导引综合仿真. 根据实时探测情况, 鱼雷能够自动获取目标属性, 并计算当前目标属于真实潜艇的概率, 进一步调整弹道进行跟踪打击. 仿真中, 鱼雷和各目标均随机自主运动, 最大概率随机分配至某一目标, 其后各目标概率按照文献[6]建模并根据雷目阵位实时获取和计算. 雷目初始距离为3000 m, 仿真开始后各目标按小于8节的定值随机朝四周某一方向运动, 假定鱼雷以15节速度进行攻击, 最长仿真时间600时拍, 每时拍为0.02 s. 定义导引成功率率为导引鱼雷至能够识别真实目标位置的概率, 这

期间所花费时间定义为导引时间. 分别在1个诱饵和1个潜艇下以及3个诱饵一个潜艇条件下, 进行500次蒙特卡洛仿真, 仿真结果如表1所示.

从表1可以看出, 在目标较少情况下, 本文方法能够显著提高成功导引率, 相较成功率较高的固定提前角法, 成功导引率从59%提高到92%. 但造成导引时间增长, 从162时拍, 增加到198时拍. 这是由于本方法兼顾了目标属性探测, 从而弹道较长, 时间增加. 在目标较多情况下, 在总导引时间限定下, 本文提出方法仍能保证成功率在90%左右, 且总时间仅283时拍, 其他两种方法均存在在限定时间内出现大量的丢失正确目标而最终航程耗尽情况, 从而造成导引时间增加及成功率低的结果. 综合性仿真测试表明, 本导引方

法均能达到“不丢失最大目标、兼顾更多目标探测、弹道平滑”的效果, 有效提高了打击准确度. 如图13展示了4个目标情况下本方法的典型打击过程.

表1 综合环境500次蒙特卡洛仿真结果
Table 1 500 Monte Carlo simulation results of synthesis scene

方法	2个目标		4个目标	
	成功率/%	时拍数	成功率/%	时拍数
追踪法	54.33	182	31.92	439
固定提前角法	59.24	162	36.21	422
本文方法	92.88	198	89.62	283

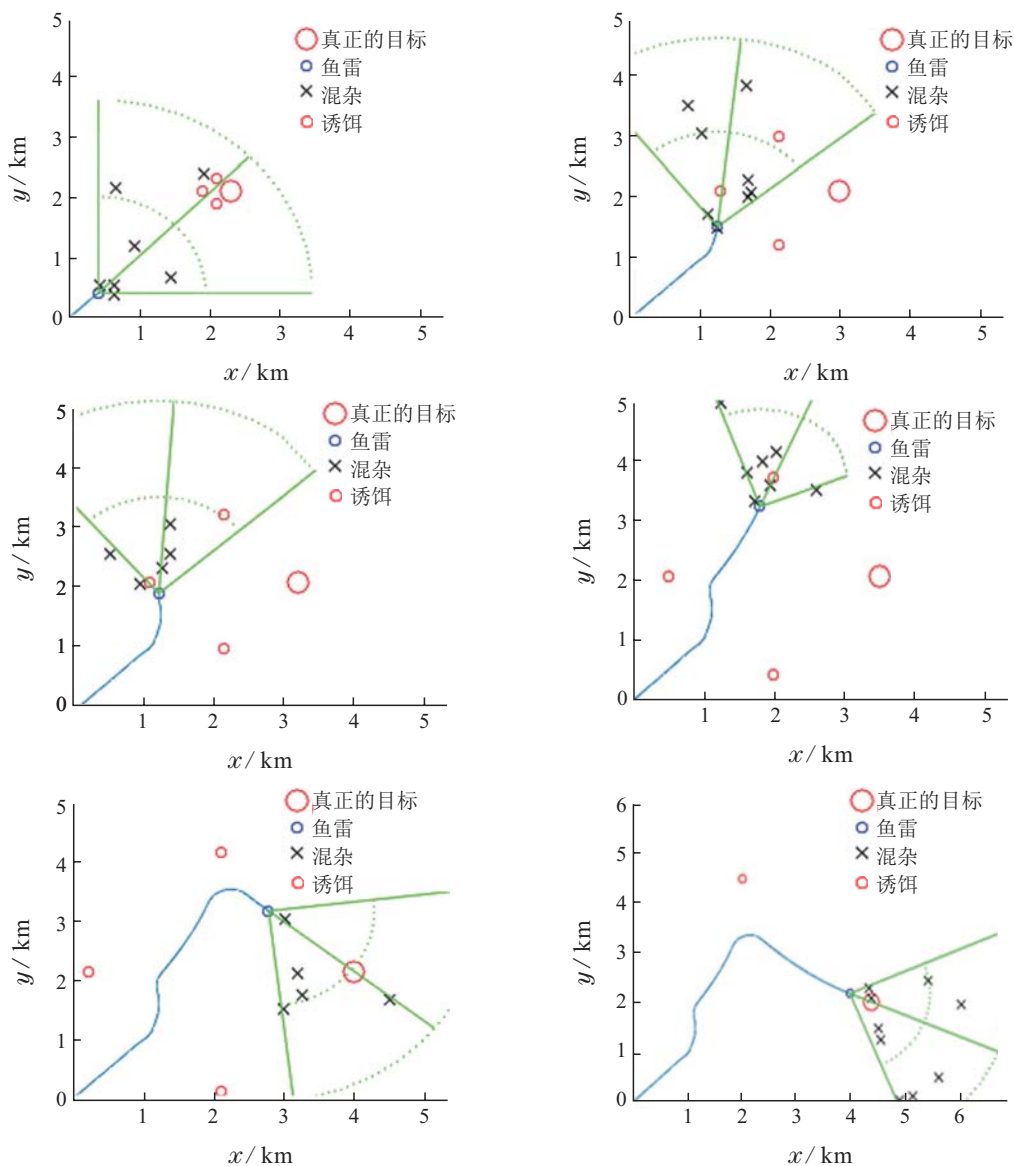


图13 综合仿真环境典型导引弹道

Fig. 13 Typical trajectory of the synthetic simulation scene

5 分析与讨论(Analysis and discussion)

人工势场法中存在“局部最小”、“对称性”^[13]造成的受控对象无法驱动问题. 国内外学者对这一问题已进行了较为广泛的研究, 主要改进分别从改变势场函数^[13]、虚拟共同质心点^[14]等制定相应策略方法, 以及结合其他算法^[15]等, 这些方法的提出都有效地解决人工势场的上述缺陷. 在水声多诱饵环境下, 对人工势场的排斥因素转变为吸引因素, 现在对上述两个问题进行鲁棒性分析. 根据多诱饵对抗具体环境, 做以下假设:

- 1) 真实目标只有一个, 概率最大目标有且只有一个;
- 2) 鱼雷探测扇区 $\xi < 180^\circ$, 吸引关注度合力与牵引关注度夹角小于 180° ;
- 3) 根据导引关注度定义, 导引关注度与吸引关注度垂直且指向牵引目标.

局部最小问题主要是由于“吸引”与“排斥”作用共线、方向相反且大小相同相互抵消而引起, 如图14所示. 多诱饵环境下, 不存在排斥力因素, 其作用同样为吸引作用, 只会增加朝目标运动的作用, 从而快速到达目标点, 反复震荡无法到达目标点的可能性不存在. 但是, 如图15, 当鱼雷处于两目标中间, 三者共线, 在同样大小的吸引力作用下, 仍然会出现鱼雷无法驱动的可能, 但这种情形与假设2)矛盾. 故多诱饵环境不存在由于合力为0造成的无法驱动问题.

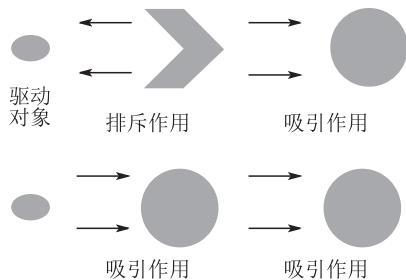


图14 局部最小问题在多诱饵环境下分析示意

Fig. 14 Analysis of local minimum problem in multi-decoy environment

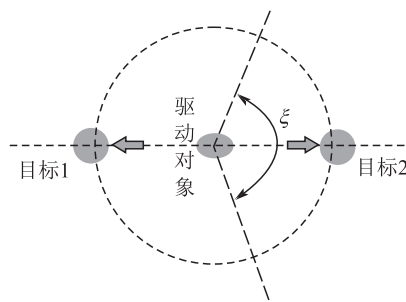


图15 鱼雷处于两目标中间时所受作用分析

Fig. 15 Analysis of torpedo in the middle of the two target

但是, 假定两目标概率一致, 鱼雷速度方向位于两

目标的角平分线上, 如图16所示. 这时会出现两目标对鱼雷大小相等的吸引(牵引)作用的情形, 导致鱼雷保持现有速度方向, 不朝两目标的任意一个进行攻击. 实际上, 根据假设1)、假设3), 随机选取一个目标作为牵引目标, 依据第2.2、2.3节方法计算出导引作用, 则可以看出, 目标会改变速度方向, 朝选取最大概率目标运动, 自然解决对称性造成的问题.

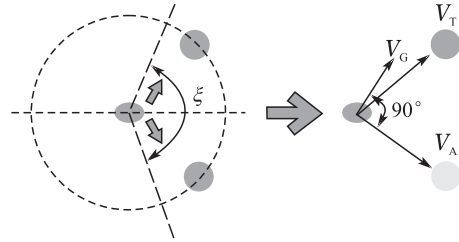


图16 对称性问题的自然解决

Fig. 16 Natural solution to the problem of symmetry

那么, 是否会有合成作用带来的对称性问题呢. 这种可能性是存在的, 但是, 从矢量的合成与分解示意(如图17所示), 由于导引关注度的存在, 合成关注度与目标位置不重合, 即便目标沿着合成作用与某单独关注度作用的角平分线运动, 实际上仍是选择了趋近某一目标进行运动. 即不存在对称性带来的问题.

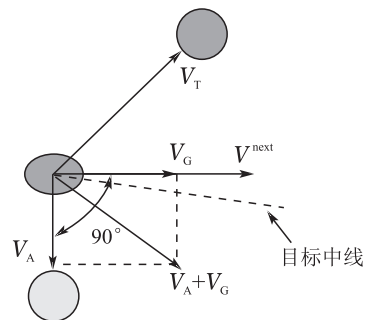


图17 合作用对称问题示意

Fig. 17 Symmetric problem under the resultant force

从以上3点的讨论可以看出, 在多诱饵环境本方法不存在“局部最小”、“对称性”等系列问题.

6 结语(Conclusions)

本文针对水声多目标准确打击问题, 提出了基于人工势场法的弹道设计方法. 该方法考虑了对多个目标属性信息的识别及对概率最大目标的打击. 该方法把多目标分别按照牵引目标和吸引目标进行考虑, 计算出牵引关注度以及吸引目标的吸引关注度、导引关注度, 最后在鱼雷机动能力限定范围下计算出鱼雷的机动角速度. 通过静态模拟靶桩仿真、运动目标仿真及综合仿真, 均表明该方法具有良好的可行性, 能够在打击目标的同时, 兼顾多目标的识别, 同时, 弹道具有较高平滑性满足实际机动控制要求. 该方法为水声多目标精确打击提供了新的思路和方法.

参考文献(References):

- [1] CHEN Chunyu, ZHANG Jingyuan, WANG Mingzhou, et al. *Anti-torpedo Technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
(陈春玉, 张静远, 王明洲, 等. 反鱼雷技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.)
- [2] LIU Yu, YUAN Jianping, HOU Chaohuan. Research on the guidance law of underwater autoguide weapon [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(4): 483 – 486.
(刘宇, 原建平, 侯朝焕. 水下自导武器导引律研究 [J]. 兵工学报, 2008, 29(4): 483 – 486.)
- [3] AKHIL G, GHOSE D. Biased PN based impact angle constrained guidance using a nonlinear engagement model [C] // *American Control Conference (ACC)*. Montreal, QC: IEEE, 2012: 950 – 955.
- [4] PAN Guang, YANG Kui. The analysis of FLAG trajectories of anti-torpedo torpedo based on MATLAB [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2013, 33(4): 149 – 152.
(潘光, 杨悝. 基于MATLAB的反鱼雷鱼雷固定提前角导引弹道仿真 [J]. 火箭与制导学报, 2013, 33(4): 149 – 152.)
- [5] ZHANG Y P, ZHANG J Y, YING W J. Torpedo guidance system multidisciplinary design based on IDF [C] // *The 5th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*. Hangzhou, China: IEEE, 2013: 259 – 262.
- [6] YU L, CHENG Y M, SONG L, et al. Underwater acoustic multi-target recognition algorithm based on hierarchical information fusion structure [C] // *The 17th International Conference on Information Fusion*. Salamanca, Spain: IEEE, 2014: 1 – 8.
- [7] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [C] // *International Conference on Robotics and Automation*. St. Louis, Missouri: IEEE, 1990: 500 – 505.
- [8] PARKM G, LEEM C. Artificial potential field based path planning for mobile robots using a virtual obstacle concept [C] // *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*. Kobe, Japan: IEEE/ASME, 2003: 735 – 740.
- [9] DUAN Hua, ZHAO Dongbiao. Potential field-based obstacle avoidance algorithm for dynamic environment [J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Nature Science Edition)*, 2006, 34(9): 39 – 41, 56.
(段华, 赵东标. 动态环境下基于势场原理的避障方法 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(9): 39 – 41, 56.)
- [10] ZHU Yi, ZHANG Tao, SONG Jingyan. Path planning for nonholonomic mobile robots using artificial potential field method [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(2): 152 – 158.
(朱毅, 张涛, 宋靖雁. 非完整移动机器人的人工势场法路径规划 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(2): 152 – 158.)
- [11] ZHU Yi, ZHANG Tao, SONG Jingyan. Study on the local minima problem of path planning using potential field method in unknown environments [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(8): 1122 – 1130.
(朱毅, 张涛, 宋靖雁. 未知环境下势场法路径规划的局部极小问题研究 [J]. 自动化学报, 2010, 36(8): 1122 – 1130.)
- [12] LI Chuntao, YI Xiaoqin, HU Mu. Real-time path planning of uav based on velocity vector [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 44(3): 340 – 346.
(李春涛, 易小芹, 胡木. 基于速度矢量场的无人机实时动态航路规划 [J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(3): 340 – 346.)
- [13] DAI Jiyang, WANG Cunsong, YIN Linfei, et al. Hierarchical potential field algorithm of path planning for aircraft [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(11): 1505 – 1510.
(代冀阳, 王村松, 殷林飞, 等. 飞行器分层势场路径规划算法 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(11): 1505 – 1510.)
- [14] FANG Xu, LIU Jinkun. Three-dimension path planning and trajectory tracking control for quadrotor unmanned aerial vehicle [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(8): 1120 – 1128.
(方旭, 刘金琨. 四旋翼无人机三维航迹规划及跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(8): 1120 – 1128.)
- [15] JUAN A H O, KATYA R V. Autonomous robot navigation based on the evolutionary multi-objective optimization of potential fields [J]. *Engineering Optimization*, 2013, 25(1): 19 – 43.

作者简介:

禹亮 (1981–), 男, 博士研究生, 高级实验师, 目前研究方向为水声反对抗跟踪、识别、弹道一体化技术, E-mail: ylozy@nwpu.edu.cn;

程咏梅 (1960–), 女, 博士生导师, 教授, 目前研究方向为多目标跟踪、信息融合等, E-mail: chengym@nwpu.edu.cn;

陈克喆 (1991–), 男, 硕士, 目前研究方向为水声反对抗、弹道设计, E-mail: chenkezhe24@qq.com;

赵会升 (1995–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为弹道设计、多目标跟踪, E-mail: zhaohuisheng@mail.nwpu.edu.cn;

李松 (1988–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为机动平台跟踪, E-mail: lisong@mail.nwpu.edu.cn.