

doi: 10.7690/bgzdh.2014.05.004

## 基于模糊控制的线导鱼雷方位导引法

李斌<sup>1</sup>, 张靖康<sup>1</sup>, 李刚<sup>2</sup>

(1. 海军潜艇学院作战指挥系, 山东 青岛 266042; 2. 海军潜艇学院训练部, 山东 青岛 266042)

**摘要:** 针对线导鱼雷常用的现在方位导引法和修正方位导引法存在的不足, 提出一种基于模糊控制的线导鱼雷方位导引法。采用模糊控制过程中模糊化、建立模糊控制规则和模糊变换器、模糊判别 3 个步骤, 利用潜艇与鱼雷和目标方位线夹角和声纳分辨角的关系, 建立线导鱼雷方位导引法的模糊控制模型, 对线导鱼雷导引方式进行改进。结果证明, 该方法达到了线导鱼雷最优化攻击目标的目的。

**关键词:** 线导鱼雷; 导引法; 模糊控制; 声纳方位

**中图分类号:** TJ631.4 **文献标志码:** A

## A Guiding Method of Wire-Guidance Torpedo Based on Fuzzy Control Theory

Li Bin<sup>1</sup>, Zhang Jingkang<sup>1</sup>, Li Gang<sup>2</sup>

(1. Department of Combat Command, Navy Submarine Academy, Qingdao 266042, China;

2. Department of Training, Navy Submarine Academy, Qingdao 266042, China)

**Abstract:** Aiming at the problems existed in current azimuth guidance method and revising azimuth guidance method of wire-guidance torpedo, put forwards a guiding method of wire-guidance torpedo based on fuzzy control theory. Adopt fuzzification of fuzzy control process, establish fuzzy control principle and fuzzy transformer and fuzzy judgment. Use relation among target azimuth wire included angle, sonar discrimination angle submarine and torpedo, establish wire-guidance torpedo guiding method model, and modify guiding mode of wire-guidance torpedo. The results show that the method achieves an optimal goal that the wire-guidance torpedo attacking the target.

**Keywords:** wire-guidance torpedo; guiding methods; fuzzy control; sonar bearing azimuth

### 0 引言

鱼雷上采用线导导引可扩大鱼雷的攻击范围, 允许攻击方实施快速攻击, 并可延伸鱼雷的制导范围, 实现鱼雷的全程制导。另外, 线导鱼雷具有良好的隐蔽性和抗干扰性, 使得国内外远航程鱼雷都采用线导导引。线导鱼雷导引方式基本上可以分为现在方位导引法、修正方位导引法、前置点导引法以及人工导引法等<sup>[1]</sup>。由于前置点导引法的前提条件是目标为定速直航, 而人工导引法又受到人工定性判断的局限性影响, 这 2 种导引法通常作为辅助方法使用。常用的导引法是现在方位导引法和修正方位导引法。但在实际导引过程中, 2 种导引方式都有一些缺点。此外, 鱼雷作战功能的增强, 特别是制导方式的改变, 必然对鱼雷攻击决策、发射和导引控制等作战使用的相关环节提出一系列新的需求<sup>[2]</sup>; 因此, 需进一步改进目前的导引方法。基于此, 笔者提出一种基于模糊控制的线导鱼雷方位导引法。

### 1 常用线导鱼雷方位导引法

线导鱼雷导引法指的是线导鱼雷发射出管, 经

自主控制航行进入线导导引航行段后, 潜艇指控系统即可通过线导指令对鱼雷进行导引控制, 将鱼雷逐渐导引至目标散布区附近, 为鱼雷末端自导装置捕获目标创造必要的条件的方法。

#### 1.1 现在方位导引法

所谓现在方位导引法是指将鱼雷导引到当前目标方位上并逐渐与目标接近的控制过程。现在方位导引法也称为当前方位导引法。

如图 1 所示, 令  $W_s$ 、 $d_s$  分别为发射鱼雷时的潜艇位置点和目标位置点, 对应的发射方位为  $F_s$ 。当鱼雷经自主控制航行到达  $L_1$  点时, 潜艇和目标分别位于  $W_1$  点  $d_1$  点, 对应的目标方位为  $F_1$ 。此时开始进入线导导引控制阶段, 系统试图将鱼雷导引到当前方位线  $F_1$  上接近目标。经过一定的导引间隔  $\Delta t$ , 潜艇和目标分别位于  $W_2$  与  $d_2$  点时, 系统试图将鱼雷导引到当前方位线  $F_2$  上接近目标……依次类推。当导引间隔  $\Delta t$  足够小时, 就可以将鱼雷导引到始终接近当前目标方位线上, 使得潜艇、鱼雷和目标接近在同一方位线上, 即潜艇对应的目标方位和鱼雷方位重合。因为现在方位导引法是始终将鱼雷导引

到当前目标方位上并接近目标；因此，不管目标运动要素是否准确，也不管目标是否机动，只要潜艇声纳或潜望镜等探测器材能够对目标跟踪探测，且鱼雷有足够的航程，就可以将鱼雷导引到目标附近，以便鱼雷自导装置发现、跟踪目标，最终命中目标。

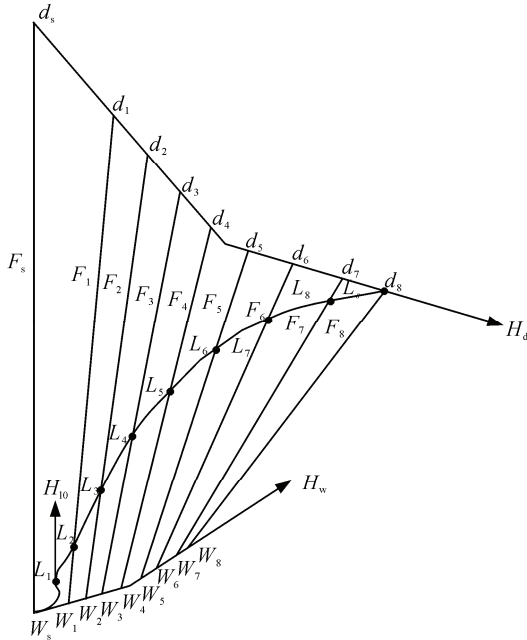


图 1 现在方位导引法

现在方位导引法的突出优点是导引控制不依赖于目标运动参数，且可对机动目标攻击的鱼雷导引。这种导引方法是最有效、最常用的方法。但由于该导引法试图控制鱼雷在潜艇声纳方位线上，即潜艇、鱼雷和目标几乎在同一方位线上，会导致鱼雷航行噪声掩盖目标噪声的现象，使得潜艇声纳无法对目标实施跟踪探测<sup>[3]</sup>。

### 1.2 修正方位导引法

由于在鱼雷发射后采用现在方位导引法会造成鱼雷航行噪声干扰潜艇声纳对目标的跟踪探测，以致导引难以正常进行，为此可使用一种改进的导引法——修正方位导引法。

修正方位导引法是指系统在对鱼雷进行导引的过程中，设法将鱼雷导引到与当前目标方位偏离一个角度的方向上接近目标。修正方位导引法使鱼雷方位偏离目标方位，如果这个偏离角大于声纳分辨角，则鱼雷航行噪声就不会对声纳跟踪探测目标造成干扰；因此，修正方位导引法也称无干扰导引法。

从修正方位导引法的导引原理上讲，系统既可以将鱼雷导引至超前于当前目标方位一个角度，也可以将鱼雷导引至滞后于当前目标方位一个角度。因为鱼雷航行后留下的航迹(鱼雷尾流)会对潜艇声

纳探测目标造成一定的干扰或掩蔽；因此，修正方位导引法通常采用后者，即将鱼雷导引至滞后于当前目标方位一个角度的方向上，如图 2 所示。

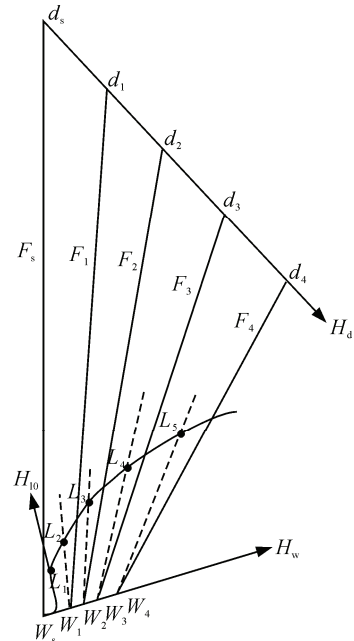


图 2 修正方位导引法

由于修正方位导引法是控制鱼雷始终偏离当前方位线一个角度，如果按该导引方法一直进行下去就会造成鱼雷偏离目标的距离较远，导致鱼雷自导装置发现目标的概率大大降低；所以，目前普遍采用的修正方位导引过程中，一般设置随着鱼雷远离本艇系统逐渐减小偏离角  $\gamma$ ，最终自动转到现在方位导引。其偏离角的计算公式为：

$$\gamma = \gamma_0 \left(1 - \frac{D_1}{D_{10}}\right) \tag{1}$$

当按设定初始偏离角  $\gamma_0$  发射鱼雷后，如果声纳能够分辨目标噪声和鱼雷噪声，则系统按公式计算偏离角  $\gamma$ 。可见，随着鱼雷远离发射艇偏离角  $\gamma$  不断减小。当鱼雷距发射艇的距离  $D_1$  等于修正导引距离  $D_{10}$  时，偏离角  $\gamma$  为  $0^\circ$ ，此时，修正方位导引随之结束，即自动转为现在方位导引。

考虑到要保证声纳能良好地分辨目标和鱼雷，通常初始偏离角  $\gamma_0$  设置得足够大，使得线导鱼雷航程损耗比较大。此外，如果在进行修正方位导引时目标在距离较远时进行了机动，此时，当偏离角  $\gamma$  逐步减小为  $0^\circ$  后，再按照现在方位导引很可能会丢失目标，使得线导鱼雷攻击的效果大打折扣。

## 2 模糊控制

模糊控制是利用计算机对人脑所具有的模糊推

理机能的模拟。采用模糊数学知识来模拟人的思维方法，把用自然语言描述的控制策略改造成模糊控制规则，由模糊控制规则构造模糊关系  $R$ ，这里的  $R$  用以作为模糊变换器。在设计模糊控制器时，根据被控对象的具体情况确定模糊控制器的结构<sup>[4]</sup>。把输入输出的模糊向量按模糊推理的方法来处理，进而确定控制量。

实现上述模糊控制过程，一般可用以下 3 个步骤：1) 模糊化；2) 建立模糊控制规则和模糊变换器  $R$ ；3) 模糊判别<sup>[5]</sup>。

### 2.1 模糊化

所谓模糊化，就是指要把观测值由确切的数字转化为模糊集的步骤。为实现这个转化，首先要把观测值论域上的语言表示成模糊集，其次要确定论域的划分。

### 2.2 建立模糊控制规则和模糊变换器 $R$

将语言值表成论域上的模糊集后，构建模糊条件语句：

若  $A_1$  且  $B_1$ ，则  $C_1$ ；

若  $A_1$  且  $B_2$ ，则  $C_2$ ；……；等等。

这些条件语句构成了模糊控制规则，模糊条件语句可归结为模糊关系，用以建立系统的模糊变换器  $R$ 。 $R$  的具体表达式由条件语句的具体内容决定。任给输入  $A^*$ ，由模糊推理规则可知，输出为模糊集  $B^*$ ：

$$B^* = A^* \circ R \tag{2}$$

则称  $B^*$  为模糊响应。

### 2.3 模糊判别

在实际采取控制行动时，必须变模糊响应为确切响应，即把由模糊变换器输出的模糊响应变为确切的控制量，然后应用到被控对象上去。此过程称为模糊判决。经常采用的是最大隶属原则法。最大隶属原则就是将输出的模糊集中的隶属度最大的因素作为控制量。此法能够突出主要信息，而且比较简单。

完成上述 3 个步骤即建立了模糊控制器，模糊控制器的示意图如图 3。

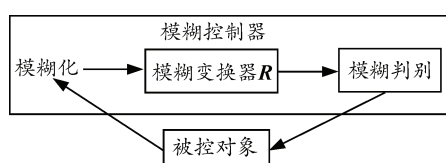


图 3 模糊控制器

## 3 线导鱼雷方位导引法的模糊控制模型

在实际线导鱼雷攻击过程中，若目标声纳方位交替出现“无效”、“有效”状态，就意味着可能由于与目标方位线夹角控制不佳导致鱼雷不断出现遮蔽目标的状态，此时若采取人工干预，会受到人工定性判断的局限性影响，不如自动导引方法那样科学合理。若结合当时紧张的战斗气氛和复杂的目标机动状况，更有可能出现人工导引失误。采用模糊控制自动导引，避免人工导引出现失误，既要目标机动时不丢失目标，又要实现鱼雷航行噪声不会对声纳跟踪探测目标造成干扰，也就是采用模糊控制方式对将鱼雷修正导引至声纳“恰好”能识别到目标的边界区域附近，同时结合线导鱼雷现在方位导引法和修正方位导引法各自的优势，笔者建立基于模糊控制的线导鱼雷方位导引法数学模型。

### 3.1 建立隶属函数

以潜艇航向为基准，从线导鱼雷发射后  $t(t >$  鱼雷初始自控弹道执行时间) 时刻鱼雷与目标方位线夹角为  $\gamma_t$ ，声纳在  $t$  时刻对目标最小分辨角为  $\alpha_t$ ，若要声纳分辨出鱼雷和目标，使得  $\gamma_t > \alpha_t$ 。理想状态下的模糊控制方位导引如图 4 所示。

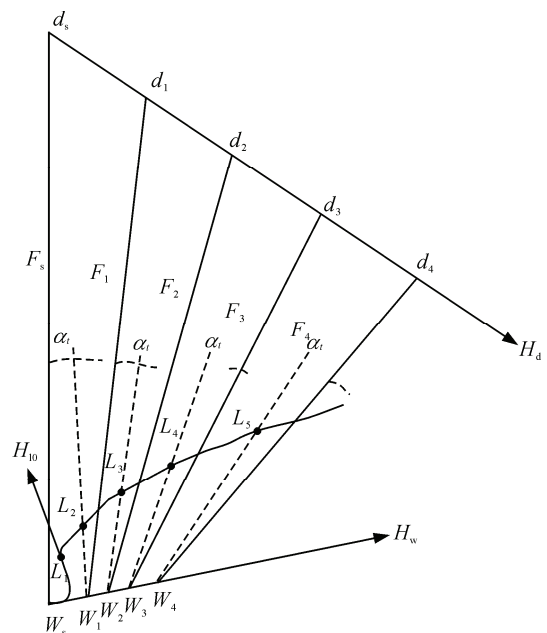


图 4 模糊控制方位导引法

取  $\gamma_t = \alpha_t + \Delta\alpha$  为基准点， $\Delta\alpha$  表示一个小角度，为声纳刚好识别出鱼雷和目标留出一个小的余量。单位时间内，对基准点的偏差  $e$  为正，表示  $\gamma_t > \alpha_t + \Delta\alpha$ ；对基准点的偏差  $e$  为负，表示

$\gamma_i < \alpha_i + \Delta\alpha$ 。这里给出其变化的范围，将其平均分为 5 个等级，即：

$$U = \{-2\Delta\alpha, -\Delta\alpha, 0, +\Delta\alpha, +2\Delta\alpha\} \quad (3)$$

由观测所得的偏差分为 5 个等级，分别为正大 ( $D$ )，正小 ( $d$ )，零 ( $0$ )，负小 ( $x$ )，负大 ( $X$ )。其隶属函数如表 1<sup>[6]</sup>所示。

表 1 线导鱼雷目标方位与声纳最小分辨角偏差隶属函数

观测 偏差	最小分辨角				
	$-2\Delta\alpha$	$-\Delta\alpha$	$0$	$+\Delta\alpha$	$+2\Delta\alpha$
$D_e$	0	0	0	0.5	1
$d_e$	0	0	0	1	0.5
$0_e$	0	0.5	1	0.5	0
$x_e$	0.5	1	0	0	0
$X_e$	1	0.5	0	0	0

单位时间潜艇控线导鱼雷方位变化量  $\phi \in V$ ，方位向着减小  $\gamma_i$  的变化方向为负，向着增大  $\gamma_i$  的变化方向为正，将变化量分为 7 个量级，每个量级用  $\Delta\gamma$  表示，即：

$$V = \{-3\Delta\gamma, -2\Delta\gamma, -\Delta\gamma, 0, +\Delta\gamma, +2\Delta\gamma, +3\Delta\gamma\} \quad (4)$$

构造隶属函数如表 2 所示。

表 2 线导鱼雷方位变化量隶属函数

观测 偏差	鱼雷方位变化量						
	$-3\Delta\gamma$	$-2\Delta\gamma$	$-\Delta\gamma$	$0$	$+\Delta\gamma$	$+2\Delta\gamma$	$+3\Delta\gamma$
$D_e$	0	0	0	0	0	0.5	1
$d_e$	0	0	0	0	1	0.5	0
$0_e$	0	0	0.5	1	0.5	0	0
$x_e$	0	0.5	1	0	0	0	0
$X_e$	1	0.5	0	0	0	0	0

### 3.2 建立模糊控制规则和模糊关系 R

根据线导鱼雷控制原则，建立下述模糊控制规则：

- 若  $e$  负大，则  $v$  正大；
- 若  $e$  负小，则  $v$  正小；
- 若  $e$  零，则  $v$  零；
- 若  $e$  正小，则  $v$  负小；
- 若  $e$  正大，则  $v$  负大。

根据上述模糊控制规则表示出  $U$  到  $V$  的模糊关系  $R$

$$R = (D_e \times X_\phi) \cup (d_e \times x_\phi) \cup (0_e \times 0_\phi) \cup (x_e \times d_\phi) \cup (X_e \times D_\phi) \quad (5)$$

通过计算得到模糊变换器  $R$  为：

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### 3.3 响应动作

任给一个观测量  $e \in F(X)$  作为输入，把  $R$  作为模糊控制器，由  $u = e \circ R$  输出响应动作。

按照最大隶属度原则，由  $V$  的取值，取控制量为 3 级作为响应动作。如果输出量在某一等级处隶属度最大，则响应动作即为这一等级；如果同时出现连续的  $u$  的定义域隶属度最大的输出量，将其对应的等级取平均值。需要说明的是，按照模糊控制理论， $u$  的峰值的定义域必须相邻，若出现彼此不相邻的情况，则无法取得响应动作。

例如，当  $\gamma_i$  对基准点的偏差  $e$  为  $-2\Delta\alpha$  时， $e = (0, 0, 0, 0, 0)$ ， $u = e \circ R = (0, 0, 0, 0, 0.5, 0.5, 1)$ ，最大隶属度对应的等级  $u^* = +3\Delta\gamma$ 。同理，当  $\gamma_i$  对基准点的偏差  $e$  分别为  $-\Delta\alpha$ ， $0$ ， $+\Delta\alpha$ ， $+2\Delta\alpha$  时，得到线导鱼雷模糊控制表如表 3 所示。

表 3 线导鱼雷与目标方位夹角模糊控制

$e$	$-2\Delta\alpha$	$-\Delta\alpha$	$0$	$+\Delta\alpha$	$+2\Delta\alpha$
$u$	$+3\Delta\gamma$	$+\Delta\gamma$	$0$	$-\Delta\gamma$	$-3\Delta\gamma$

### 4 结束语

通过建立线导鱼雷方位导引法的模糊控制模型，将其应用于鱼雷攻击指控系统中，结合比对目标和线导鱼雷的声纳方位量的变化，可实现指控系统对线导鱼雷自动控制。由于实现实时控制，既可同时解决修正方位导引法和人工导引法存在的问题，又能结合这 2 种导引法的优势，使线导鱼雷既不会遮蔽目标，又不会过于偏离目标，从而达到线导鱼雷最优化攻击目标的目的。

### 参考文献：

- [1] 颜士坤, 杨大伟, 杨光. 线导鱼雷的方位导引模型及工程化研究[J]. 指挥控制与仿真, 2009, 31(4): 51-53.
- [2] 李伟, 邓正前, 荣海洋. 潜射线导鱼雷作战使用攻击决策[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(10): 1-4.
- [3] 计时鸣, 周龙兵, 谭大鹏, 等. 面向软性磨粒流加工的流速模糊控制[J]. 机电工程, 2013, 30(2): 160-163.
- [4] 李庆春, 高军伟, 谢广明, 等. 基于模糊控制的仿生机器鱼避障算法[J]. 兵工自动化, 2011, 30(12): 65-69.
- [5] 李斌, 高建伟, 孟范栋. 一种基于模糊控制的潜艇纯机动防御声自导鱼雷方法[J]. 指挥控制与仿真, 2006, 28(5): 64-67.
- [6] 马治明, 王雪梅, 易志虎. 模糊控制在飞航导弹自动控制系统中的应用[J]. 兵工自动化, 2009, 28(1): 17-21.