

doi: 10.7690/bgzdh.2013.07.001

尾流自导鱼雷双雷齐射射击诸元优化模型

武志东, 朱伟良, 张靖康

(海军潜艇学院作战指挥系, 山东 青岛 266042)

摘要: 为优化尾流自导鱼雷两雷齐射时的射击诸元, 对尾流自导鱼雷双雷齐射射击进行优化研究。介绍尾流自导鱼雷齐射组织方法, 建立尾流自导鱼雷两雷齐射的数学模型, 分析影响尾流自导鱼雷齐射使用的约束因素, 在此基础上, 研究射击诸元优化解算方法, 并给出具体的优化解算模型和详细的解算流程图。结果表明: 基于尾流自导鱼雷双雷齐射的数学原理兼顾工程实现时的弹道约束, 充分考虑其作战需要, 能为尾流自导鱼雷齐射有关问题的深入研究提供理论支持。

关键词: 尾流自导鱼雷; 齐射; 射击诸元; 弹道优化

中图分类号: TJ630 **文献标志码:** A

Firing Parameters Optimization Model of Double Salvo for Wake Guided Torpedo

Wu Zhidong, Zhu Weiliang, Zhang Jingkang

(Department of Combat & Command, Navy Submarine Academy, Qingdao 266042, China)

Abstract: In order to optimize the firing parameters of double salvo for the wake-guided torpedo, carried out optimization research of double salvo for the wake-guided torpedo. The paper introduced the organizing method of double salvo, set up the relative mathematical models of the firing parameter calculation, and analyzed the key restriction of firing trajectory for the wake guided torpedo. Based on this, the paper researched the optimizing calculation method of the firing parameters of double salvo, gave the specific calculation model and the detailed calculating flow chart. This models bases on mathematical principle of double salvo for the wake-guided torpedo, takes trajectory restriction into account for engineering implement, at the same time researches the implement flow for the battlefield usage, so the conclude can afford theoretic uphold for researching the relational salvo problem.

Key words: wake guided torpedo; double salvo; firing parameters; trajectory optimization

0 引言

在实际鱼雷攻击中, 为了先敌发射、争取战术上的主动, 潜艇往往需要在没有获取完整、准确的目标运动要素的情况下发射鱼雷, 此时存在较大的目标散布。为提高作战效能, 应采用齐射的方法来提高单枚鱼雷捕获、跟踪以及命中目标的概率。潜艇组织自导鱼雷齐射分为扇面齐射和平行航向齐射 2 种方式^[1]。依据文献[2]的论述, 相同战术态势下平行航向齐射较扇面齐射具有更大的战术优越性。

目前, 国内外学者对自导鱼雷的齐射问题进行了大量研究, 得出很多有价值的结论。文献[3-4]给出了在获取的目标运动要素不完整或目标运动要素误差较大的情况下, 潜艇发射反潜自导鱼雷攻击敌潜艇时的目标散布数学模型; 文献[5]建立了尾流自导鱼雷单雷一次转角射击命中方程组, 指出尾流自导鱼雷采用平行航向齐射射击样式时的命中概率较高; 为了解决尾流自导鱼雷齐射时的“不漏”问题, 文献[6]指出, 必须依据目标的几何长度和鱼雷的弹道特性, 把握齐射鱼雷进入目标尾流的间隔,

可以通过齐射雷数的选择, 来提高齐射鱼雷的命中数量。

在此基础上, 笔者对尾流自导鱼雷双雷齐射射击进行优化, 可为深入展开尾流自导鱼雷齐射有关问题的研究提供理论支撑。

1 尾流自导鱼雷双雷齐射的组织方法

依据文献[5], 尾流自导鱼雷齐射的典型射击样式为两雷平行航向齐射和“带角(距离)”攻击。

1.1 尾流自导两雷平行航向齐射

如图 1 所示, 所谓的尾流自导两雷平行航向齐射指的是: 2 条尾流自导鱼雷发射出管后, 首先各自完成出管直航、转过第一次转角 ω_{11} 和 ω_{12} , 同时由出管开始, 各自计算尾流自导装置开启管制距离。之后, 齐射两雷各自沿 $C_w+\omega_{11}$ 、 $C_w+\omega_{12}$ 航向进行齐射扇面展开。当鱼雷走完尾流自导装置开启管制距离 D_{21} 后, 扇面展开段结束, 2 条鱼雷各自进行二次转角 ω_{21} 和 ω_{22} 。转过二次转角后, 齐射两雷开始沿与展开扇面中线平行的航向航行, 并且鱼雷尾

收稿日期: 2013-01-30; 修回日期: 2013-02-23

作者简介: 武志东(1980-), 男, 山西人, 博士, 讲师, 从事潜艇武器系统作战建模与仿真研究。

流自导装置将随之开启并进入稳定工作状态，鱼雷开始搜索目标尾流。在鱼雷搜索到目标尾流之前，鱼雷将沿平行航向直航下去，直至尾流自导装置捕捉到目标尾流。当尾流自导装置捕捉到目标尾流时，鱼雷将立即根据在发射前输入的目标舷别，由尾流自导装置内置弹道程序控制，沿目标航行的方向，以类似蛇行的弹道追赶并命中目标。

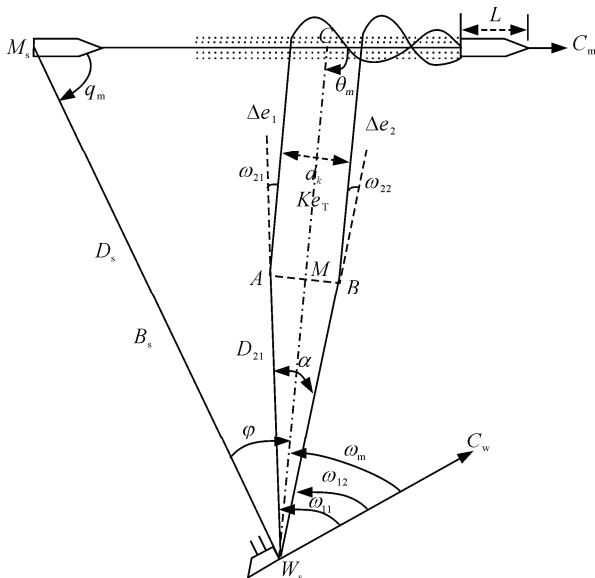


图 1 尾流自导两雷平行航向齐射

图 1 中，潜艇组织尾流自导鱼雷两雷平行航向齐射时，齐射时刻目标舰艇位于 M_s 点，潜艇位于 W_s 点，潜艇至目标距离为 D_s ，方位为 B_s ，齐射 2 条鱼雷出管后惯性直航距离为 a ，一次转角为 $\omega_{1i}(i=1,2)$ ，散角为 α ，各自航行完分散航程 D_{21} 后到达 A 、 B 两点，在 A 、 B 两点 2 条鱼雷分别执行各自的二次转角 $\omega_{2i}(i=1,2)$ 转至主航向 MC ，经自适应航行稳定以后尾流自导装置开机，分别航行 $\Delta e_i(i=1,2)$ 后，以进入角 θ_m 进入目标尾流，沿着目标航向追踪目标，直至命中目标或航程耗尽。

可见，以上所述的尾流自导两雷平行航向齐射射击方式，适用于齐射展开扇面中线尾流命中角 θ_m 介于 $[\theta_{min}, \theta_{max}]$ (其中， θ_{min} 和 θ_{max} 分别为鱼雷进入目标尾流，能够有效捕获目标尾流时，目标航向与鱼雷反航向的最小和最大夹角) 时的情况，这也是一般常见的尾流自导鱼雷齐射射击方式。如果在进行尾流自导两雷平行航向齐射射击时的射击阵位态势使得 $\theta_m < \theta_{min}$ 或 $\theta_m > \theta_{max}$ ，那么，以 $\theta_m < \theta_{min}$ 或 $\theta_m > \theta_{max}$ 的尾流命中角进行尾流自导两雷平行航向齐射射击时的鱼雷命中目标概率必然过低。为了不使尾流进入角过小或过大，保证一定的命中概率值，就需要采用“带角(距离)”射击方式进行攻击。

1.2 尾流自导鱼雷“带角”攻击

如图 2，尾流自导鱼雷“带角(距离)”攻击射击方式指：如果由当前阵位发射鱼雷进行尾流自导两雷平行航向齐射射击时对应的尾流进入角 $\theta_m < \theta_{min}$ 或 $\theta_m > \theta_{max}$ ，则为了便于鱼雷尾流自导装置捕获目标尾流、保证一定的命中概率值，指控系统将自动计算相应于 $\theta_m = \theta_{min}$ 或 $\theta_m = \theta_{max}$ 的两雷平行航向齐射鱼雷射击参数值，并控制鱼雷进行 $\theta_m = \theta_{min}$ 或 $\theta_m = \theta_{max}$ 的尾流自导两雷平行航向齐射。指控系统“带角(距离)”射击方式也简称为“带角”攻击。

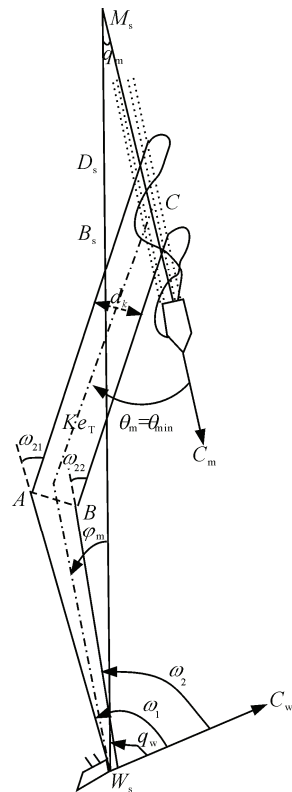


图 2 尾流自导鱼雷“带角”攻击

尾流自导鱼雷“带角”射击方式是以尾流自导两雷平行航向齐射射击方式射击时的一种特殊情况。这种射击方式必须在求得准确目标运动要素和距离的前提下，由指控系统控制，并以现行提前角的方式实施发射。由于指控系统“带角”攻击时的进入角要么较小 (θ_{min})，要么较大 (θ_{max})；因此，该射击方式对目标运动要素的精度要求较高，尤其是对目标距离值的精度要求比较严格。

2 尾流自导鱼雷双雷齐射数学模型

尾流自导鱼雷“带角”攻击时，齐射中线轨迹可以看作是一条尾流自导鱼雷二次转角射击时的弹道轨迹，其区别在于尾流自导鱼雷“带角”攻击时的齐射中线尾流进入角是 θ_{min} 或 θ_{max} ；尾流自导鱼

雷平行航向齐射时的齐射中线轨迹，可以看作是尾流自导鱼雷一次转角射击时的弹道轨迹；可见，尾流自导鱼雷平行航向齐射是一种齐射中线轨迹二次转角为 0，且尾流进入角满足 $\theta_{\min} \leq \theta_m \leq \theta_{\max}$ 时的“带角”攻击射击方式。

因此，尾流自导鱼雷双雷齐射的数学模型，其建模过程为：

1) 建立尾流自导鱼雷单雷二次转角(二次转角为 ω_2 ，二次转角后的直航距离为 Ke_T)射击，且尾流进入角 θ_m 不确定时的射击诸元解算模型；

2) 依据齐射鱼雷间隔、鱼雷转角、尾流进入角、进入距离和进入点等约束，进一步解算齐射两雷的射击诸元。

显然， $\omega_2=0$ 时得到的齐射鱼雷射击诸元是双雷平行航向齐射射击诸元； $\omega_2 \neq 0$ 且 $\theta_m = \theta_{\min}$ 或 $\theta_m = \theta_{\max}$ 时得到的齐射鱼雷射击诸元是双雷“带角”攻击射击诸元。

2.1 齐射尾流自导鱼雷中线的数学模型

尾流自导鱼雷平行航向齐射时，齐射鱼雷中线的轨迹等价于二次转角射击时的尾流自导鱼雷弹道，如图 3 所示。潜艇位于 W_s 点，航向为 C_w ，目标位于 M_s 点，航向为 C_m ， v_1 和 v_m 分别为鱼雷和目标航速，目标距离为 D_s ，目标舷角为 q_m ，潜艇舷角为 q_w ， ω_1 和 ω_2 分别为齐射鱼雷中线二次转角射击时的一次转角和二次转角， φ 为提前角， θ_m 为进入角，尾流进入点 C 距离目标舰尾 D_w ，旋回半径为 R ，一次转角结束至二次转角前的航程为 s_1 ，二次转角结束至进入目标尾流的距离为 Ke_T 。

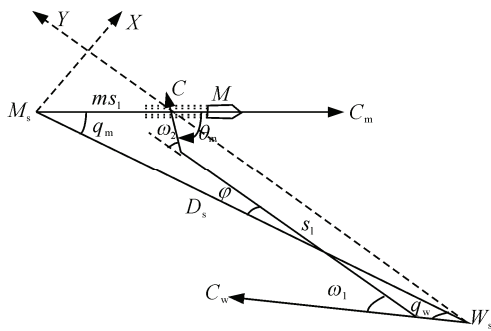


图 3 齐射尾流自导鱼雷中线轨迹示意图

建立以鱼雷航向线为 Y 轴的直角坐标系，取潜艇位置点 W_s 为坐标系原点，则可建立下列方程组：

$$\begin{cases} D_s \cos \varphi = [ms_1 - D_w + m(|\omega_2| R + Ke_T)] \cos \theta_m - E + s_1 + R \sin \omega_2 + Ke_T \cos \omega_2 \\ D_s \sin \varphi = [ms_1 - D_w + m(|\omega_2| R + Ke_T)] \sin \theta_m + H - (Ke_T \sin \omega_2 + R - R \cos \omega_2) \end{cases}$$

其中： $m=v_m/v_1$ ； $\theta_m=q_m+\varphi+\omega_2$ ； $\varphi=\omega_1-q_w$ ； $E=a+R|\omega_1| -$

$$R \sin |\omega_1| + a \cos |\omega_1|； H = \pm (R - R \cos |\omega_1| + a \sin |\omega_1|)。$$

建立含有提前角 φ (或一次转角 ω_1) 的超越方程：

$$F(\omega_1) = m[D_s \sin(\omega_1 - q_w) + (E - R - R \sin \omega_2 + D_w \cos \theta_m - Ke_T \cos \omega_2) \sin(q_m + \omega_1 - q_w) + (H - D_w \sin \theta_m) \cos(q_m + \omega_1 - q_w)] + R - D_s \sin(\omega_1 - q_w) + H - Ke_T \sin \omega_2 - R \cos \omega_2 - D_w \sin \theta_m$$

解此超越方程 $F(\omega_1)=0$ ，可得鱼雷一次转角 ω_1 。

鱼雷进入目标尾流前的航程为

$$s_1 = h(\varphi) / (1 + m \cos \theta_m) + a + R|\omega_1| + R|\omega_2| + Ke_T$$

其中： $h(\varphi) = D_s \cos \varphi - R \sin \omega_2 - Ke_T \cos \omega_2 + E + (D_w - m(|\omega_2| R + Ke_T)) \cos \theta_m。$

依据文献[7]，鱼雷进入目标尾流后的追踪段航程为 s_2 ，取决于尾流自导鱼雷的导引机制、目标航速 v_m 、鱼雷进入目标尾流时的进入角 θ_m 和进入距离 D_w 。因此，对于给定的尾流自导鱼雷战技术性能指标和末端导引机制，鱼雷进入目标尾流后的追踪段航程计算模型，可描述为：

$$s_2 = F_w(v_m, \theta_m, D_w)$$

因此，齐射鱼雷中线的总航程为：

$$s = h(\varphi) / (1 + m \cos \theta_m) + a + R|\omega_1| + R|\omega_2| + Ke_T + F_w(v_m, \theta_m, D_w)$$

2.2 齐射尾流自导鱼雷的数学模型

假设尾流自导鱼雷进入角为 θ_1 ， d_k 为齐射鱼雷间隔， Δe_1 和 Δe_2 分别为齐射第 1 和第 2 条鱼雷由鱼雷尾流自导装置开启工作(鱼雷完成二次转角)到进入目标尾流时的鱼雷航程，则：

$$\begin{cases} \Delta e_1 = Ke_T - 0.5 \cdot d_k \cdot \text{ctg} \theta_1 \\ \Delta e_2 = Ke_T + 0.5 \cdot d_k \cdot \text{ctg} \theta_1 \end{cases}$$

其中： $\theta_1 = \theta_m$ (θ_m 为齐射鱼雷中线的尾流进入角)。

下面计算两雷二次转角前直航距离，分别为 D_{12_1} 、 D_{12_2} 。

齐射扇面中线二次转角前的直航距离为

$$D_{12} = h(\varphi) / (1 + m \cos \theta_m)$$

因此，齐射两雷二次转角前直航距离为

$$D_{12_1} = \sqrt{\left(\frac{d_k}{2}\right)^2 + D_{12}^2 - 2 \cdot \frac{d_k}{2} \cdot D_{12} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \omega_2\right)}$$

$$D_{12_2} = \sqrt{\left(\frac{d_k}{2}\right)^2 + D_{12}^2 - 2 \cdot \frac{d_k}{2} \cdot D_{12} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \omega_2\right)}$$

齐射鱼雷散角 α (即齐射两雷一次转角结束时 2 条鱼雷航向间的夹角 $|\omega_{11} - \omega_{12}|$) 为：

$$\alpha = \arcsin\left[0.5 \times d_k \times \sin\left|\frac{\pi}{2} - \omega_2\right| / D_{12_1}\right] + \arcsin\left[0.5 \times d_k \times \sin\left|\frac{\pi}{2} + \omega_2\right| / D_{12_2}\right]$$

齐射鱼雷二次转角 ω_{21} 、 ω_{22} :

$$\omega_{21} = \omega_2 - \arcsin[0.5 \cdot d_k \cdot \sin |0.5 \cdot \pi - \omega_2| / D_{12_1}]$$

$$\omega_{22} = \omega_2 + \arcsin[0.5 \cdot d_k \cdot \sin |0.5 \cdot \pi + \omega_2| / D_{12_2}]$$

齐射鱼雷一次转角 ω_{11} 、 ω_{12} :

$$\omega_{11} = \omega_1 + \arcsin[0.5 \cdot d_k \cdot \sin |0.5 \cdot \pi - \omega_2| / D_{12_1}]$$

$$\omega_{12} = \omega_1 - \arcsin[0.5 \cdot d_k \cdot \sin |0.5 \cdot \pi + \omega_2| / D_{12_2}]$$

齐射中线鱼雷航程为:

$$s_m = D_{12} + s_b + \omega_2 R_2 + e_2 + Ke_T + F_w(v_m, \theta_m, D_w)$$

其中, s_b 为鱼雷一次转角结束时的航程。

则齐射鱼雷航程 s_{11} 、 s_{12} 分别为:

$$s_{11} = s_m - 0.5 \cdot d_k \cdot \text{ctg} \theta_1$$

$$s_{12} = s_m + 0.5 \cdot d_k \cdot \text{ctg} \theta_1$$

3 尾流自导鱼雷齐射需满足的约束条件

依据文献[8], 使用尾流自导鱼雷对目标实施攻击时, 为保证鱼雷准确搜索并稳定跟踪目标, 不仅要求鱼雷有足够的航程, 同时还要求鱼雷以一定的角度进入目标尾流一定的距离范围之内。此外, 鱼雷航行过程中还受齐射鱼雷间隔、最大转弯角、最大法向机动能力等约束。

3.1 进入角约束

尾流自导鱼雷首次进入目标尾流时, 若在目标尾流中航行的时间太长, 将会给鱼雷的自导检测装置的识别逻辑造成混乱; 此外, 还会由于目标尾流边界的不规则性, 以及尾流中空穴的干扰, 将存在极大的可能使鱼雷跟踪目标的方向变反, 进而造成攻击的失败。所以, 以合适的角度进入目标尾流是保证鱼雷正常检测和确认尾流及其边界的基本要求。即尾流进入角需满足:

$$\theta_{\min} \leq \theta_m \leq \theta_{\max} \quad (1)$$

其中: θ_{\min} 和 θ_{\max} 分别为鱼雷进入目标尾流时, 目标航向与鱼雷反航向的最小和最大夹角。

3.2 进入距离约束

进入距离是指鱼雷进入目标尾流时刻鱼雷与目标舰尾的距离。由于目标尾流生存时间有限, 结果是越远离目标尾流场的强度越弱。即只有其中一部分是有效尾流, 如果鱼雷在远离有效尾流处进入尾流, 鱼雷就不能“感知”尾流的存在, 也就不能发现尾流。这就要求鱼雷不能在较大距离上进入目标尾流, 这一距离的边界就是目标有效尾流的上限 $D_{w\max}$, 同时, 即使鱼雷在目标有效尾流范围内进入尾流时能够发现尾流, 鱼雷进入目标尾流之后也还需要一定的适应与调整过程, 才能稳定在目标尾流

中, 而随着鱼雷进入角度的不同, 鱼雷的弹道也呈现不同的稳定过程。因此, 当鱼雷进入目标尾流距离较近时, 有可能鱼雷弹道正在振荡过程中就穿越目标位置而造成脱靶。这就要求鱼雷不能在较小距离上进入目标尾流, 满足鱼雷弹道稳定的这一最小距离就是目标有效尾流的下限 $D_{w\min}$ 。即尾流自导鱼雷进入目标尾流的距离 D_w 需满足:

$$D_{w\min} \leq D_w \leq D_{w\max} \quad (2)$$

3.3 鱼雷航程约束

尾流自导鱼雷的航程 s 可分为 2 部分: 鱼雷发射出管至鱼雷进入目标尾流前的航程 s_1 和鱼雷进入目标尾流之后的追踪段航程 s_2 , 即: $s = s_1 + s_2$ 。

鱼雷航程 s 不能超过鱼雷的最大允许有效航程 s_{\max} , 即: $s \leq s_{\max}$ 。

此外, 尾流自导鱼雷发射出管后, 鱼雷由初速到稳定速度有一加速过程, 鱼雷稳定在设定深度又有一寻深过程, 鱼雷转向结束后需要进行自适应才能稳定在预定航向上, 自导装置开机也需要鱼雷离开潜艇(发射平台)一定的距离, 以保证潜艇安全, 并且自导开机至鱼雷进入目标尾流也需要一段时间进行稳定。鉴于以上原因, 鱼雷总航程存在下限 s_{\min} , 即:

$$s_{\min} \leq s \leq s_{\max} \quad (3)$$

3.4 鱼雷最大转弯角约束

为了防止发射出管的鱼雷对发射平台本身构成威胁, 在鱼雷武器研制过程中, 对其自控段最大转弯角进行了约束, 即:

$$|\omega| \leq \omega_{\max} \quad (4)$$

其中 ω_{\max} 为尾流自导鱼雷自控段最大允许转弯角。

3.5 齐射鱼雷间隔约束

齐射出管的 2 条尾流自导鱼雷结束航程管制距离后自导开机, 如果鱼雷横向间隔太小或由于发射延迟导致其中一条鱼雷进入另一条鱼雷的搜索扇面内, 就可能导导致鱼雷在航行过程中的互导现象。为了防止互导现象的发生, 一般对齐射鱼雷有最小齐射鱼雷间隔的限制, 即:

$$d_k \geq d_{k\min} \quad (5)$$

其中 $d_{k\min}$ 为最小允许齐射鱼雷间隔。

4 尾流自导鱼雷齐射射击诸元优化解算方法

尽管尾流自导鱼雷在经验给定的进入距离内进入目标尾流能够在一定程度上满足尾流自导鱼雷捕获、稳定跟踪目标尾流的要求, 但选定的进入点距

目标舰尾的距离不同，则鱼雷的航程消耗会有较大差异。由此可见，从尽量扩大鱼雷攻击的范围、节省鱼雷追踪目标时间的角度考虑，进入点距目标的距离越小越利于潜艇攻击。

文中尾流自导鱼雷齐射射击诸元优化主要指在满足尾流进入角、进入距离、鱼雷航程和鱼雷最大允许转弯角等约束前提下，尽可能减少鱼雷总航程。

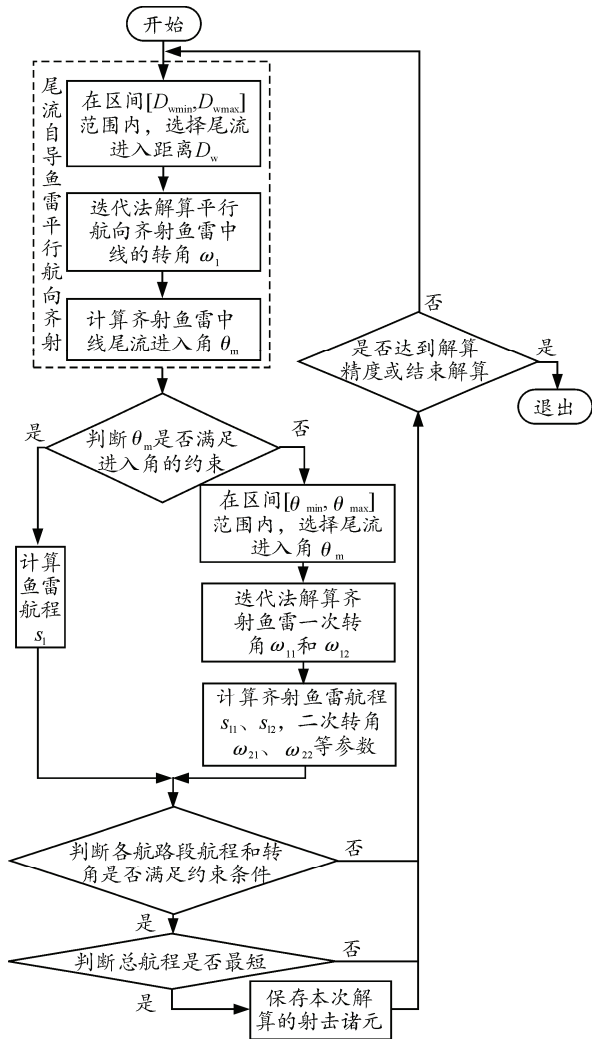


图4 齐射射击诸元优化流程

联立式(1)~式(5)，可得尾流自导鱼雷齐射时的射击诸元优化解算模型为：

$$\min s_m = h(\varphi) / (1 + m \cos \theta_m) + R|\omega_1| + a + R|\omega_2| + Ke_T + F_w(v_m, \theta_m, D_w)$$

$$\text{st.} \begin{cases} \theta_{\min} \leq \theta_m \leq \theta_{\max} \\ D_{w\min} \leq D_w \leq D_{w\max} \\ s_{\min} \leq s \leq s_{\max} \\ |\omega_{11}| \leq \omega_{\max}, |\omega_{12}| \leq \omega_{\max} \\ |\omega_{21}| \leq \omega_{\max}, |\omega_{22}| \leq \omega_{\max} \\ d_k \geq d_{k\min} \end{cases}$$

其中： $h(\varphi) = D_s \cos \varphi - R \sin \omega_2 - Ke_T \cos \omega_2 + a + R|\omega_1| - R \sin |\omega_1| + a \cos |\omega_1| + (D_w - m(|\omega_2| R + Ke_T)) \cos \theta_m$ 。

具体解算流程，如图4所示。

图4中，尾流进入距离 D_w 可在区间 $[D_{w\min}, D_{w\max}]$ 范围内按照等间隔进行选取，具体为：

$$D_{wn+1} = D_{wn} + (D_{w\max} - D_{w\min}) / k$$

$$D_{w0} = D_{w\min}$$

其中： k 为最大允许迭代解算次数； $n=0,1,2,\dots,k-1$ 。

解算过程中，可参照文献[9]，用牛顿迭代法解算超越方程。

5 结束语

笔者通过分析尾流自导鱼雷齐射组织方法，明确尾流自导鱼雷平行航向齐射和“带角”攻击的内涵，通过建立尾流自导鱼雷双雷齐射数学模型，分析2种齐射样式间的内在联系，然后分析了尾流自导鱼雷作战使用需满足的几个约束条件，最后研究了在满足鱼雷弹道各个约束条件下，尾流自导鱼雷齐射射击诸元的优化解算方法，给出了具体的解算模型和详细的解算流程。在此基础上，可进一步研究尾流自导鱼雷多平台协同攻击时的作战使用效能，也可以进一步研究复杂海洋环境对尾流自导鱼雷作战使用的影响。

参考文献：

- [1] 刘鑫, 唐献平, 初磊, 等. 舰载声自导鱼雷双雷平行齐射射击参数优化仿真研究[J]. 鱼雷技术, 2010, 18(5): 397-400.
- [2] 赵正业. 潜艇火控原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 257-260.
- [3] 宗方勇, 王树宗, 杨立强. 潜射反潜自导鱼雷平行航向齐射遮盖目标散布研究[J]. 鱼雷技术, 2007, 28(6): 704-708.
- [4] 宗方勇, 王树宗, 刘辉. 潜射声自导鱼雷两雷平行航向齐射遮盖目标散布[J]. 弹道学报, 2007, 19(2): 16-20.
- [5] 穆连运, 赵柞德, 马亮. 尾流自导鱼雷射击方法研究[J]. 鱼雷技术, 2003, 11(1): 34-36.
- [6] 李本昌, 梁涛. 尾流自导鱼雷的齐射及其建模[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(6): 128-130.
- [7] 李本昌, 刘振峰, 海宽. 尾流自导鱼雷及其射击控制的关键技术[J]. 火力与指挥控制, 2002, 27(增刊): 90-92.
- [8] 李本昌, 刘振峰, 庄冬春. 尾流自导鱼雷的射击瞄点及射击解算[J]. 鱼雷技术, 2003, 11(1): 37-39.
- [9] 陆铭华. 舰艇作战模拟理论与方法[M]. 北京: 海军出版社, 2000: 118-119.