

# 鱼雷仿真试验中脱靶量的计算方法研究

吴 碧, 王毅刚, 林 龙

(中国人民解放军 91388 部队, 广东 湛江 524022)

**摘 要** 针对鱼雷仿真试验中脱靶量用点目标计算存在较大误差的情况, 通过应用近似的方法建立潜艇和水面舰艇的表面模型, 并给出了针对不同表面模型计算脱靶量的方法, 用以修正原计算方法的误差。对 2 种计算方法进行了仿真验证, 仿真数据表明: 与应用点目标计算的脱靶量相比较, 给出的方法计算的脱靶量更接近于真实的鱼雷自导导引精度。

**关键词** 鱼雷; 仿真试验; 脱靶量

**中图分类号** TJ63<sup>+</sup>1.5 **文献标识码** A

## Research on Calculation Method of Miss Distance in Torpedo Simulation Test

WU Bi, WANG Yigang, LIN Long

(No. 91388 Unit of PLA, Zhanjiang 524022, China)

**Abstract** Aiming at the situation that there are big errors in the calculation of miss distance using point target in torpedo simulation test, the surface model of submarine and surface warship is established by approximation method, and the methods of calculating miss distance for different surface models are given to correct the error of the original calculation method. In this paper, two calculation methods are simulated and verified, and the simulation data show that the miss distance calculated by the method presented in this paper is closer to the real torpedo homing guidance accuracy than that calculated by point target.

**Key words** torpedo; simulation test; miss distance

## 0 引言

随着仿真技术的发展和仿真可信度的提高, 鱼雷的仿真试验也由性能的仿真试验验证, 转向了精度指标的仿真试验, 这为鱼雷仿真试验的数据处理、评估等带来了一定的难度。自导鱼雷的自导导引精度用脱靶量来表示, 脱靶量实际上是鱼雷离目标金属壳体表面的最小距离, 是衡量鱼雷性能优劣的指标之一。实航试验中对脱靶量的考核, 往往是在靶上安装脱靶量测量装置, 直接测量雷目最小距离, 或是试验中鱼雷穿过目标时引信动作, 则鱼雷过靶, 较真实地反映了鱼雷的脱靶量。但鱼雷半实物仿真系统中所有的物体均是虚拟的, 鱼雷与目标

的交互是通过信号的形式进行, 通常将鱼雷的制导系统和舵面等实物接入仿真系统中, 鱼雷制导系统主动发射的信号被仿真系统解析后, 根据目标的型号、位置、方向自动生成了线性或矩形的亮点回波信号, 通过对接阵由制导系统接收, 由此完成鱼雷与目标的交互。仿真试验中鱼雷的运动轨迹和目标的运动信息均由仿真系统通过模型计算, 用点目标表示。脱靶量表示的是鱼雷离目标金属壳体表面的最小距离<sup>[1]</sup>, 而目标是有几十米上百米尺度的物体, 用点目标来计算脱靶量显然不合适<sup>[2]</sup>。本文通过采用近似的方法建立目标的表面模型, 用以替代点目标计算脱靶量, 文章还给出了计算脱靶量的方法。

### 1 目标表面模型的建立

仿真试验中鱼雷攻击的目标有潜艇和水面舰艇, 如果严格按潜艇和水面舰艇的尺寸建立模型, 需要有潜艇和水面舰艇详细的设计图纸, 而这些往往是机密级的, 难以得到。另外, 即使有了详细的设计图纸, 由于在设计上潜艇和水面舰艇的表面不是规则的图形, 也难以按详细的设计进行建模, 因此, 可采用近似的方法建立潜艇和水面舰艇的表面模型。

#### 1.1 潜艇模型的建立

潜艇分为艇艏、艇体、艇艉等部分<sup>[3]</sup>, 用平时收集整理各类型潜艇的尺寸, 对目标进行仿真, 构建出与目标实物相似的体目标用于计算脱靶量; 设计的潜艇仿真形状<sup>[4]</sup>: 艇艏为半球体, 半径为  $R$ ; 艇体为圆柱体, 圆半径与艇艏半径一样, 柱体长度为  $2R_1$ ; 艇艉为圆锥体, 底的半径与艇艏半径一样, 圆锥体高度为  $L$ ; 如图 1 所示。

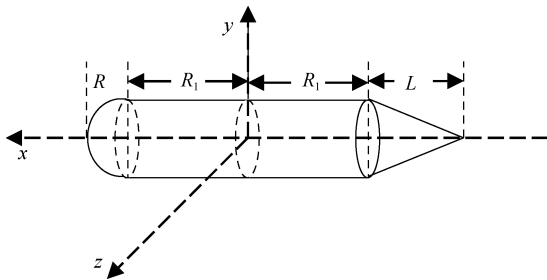


图 1 潜艇模型  
Fig. 1 Submarine model

#### 1.2 水面舰艇模型的建立

水面舰艇模型模拟水线以下的部分, 将水线以下部分近似为半椭球体, 3 个半轴分别为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ , 如图 2 所示。

#### 1.3 建立坐标

当目标为潜艇时, 以目标的中心点位置为原点建立坐标: 设目标沿艇艏向艇艉方向为  $x$  轴正方向, 垂直于  $x$  轴向上为  $y$  轴正方向,  $z$  轴垂直于  $x$  轴与  $y$  轴组成的平面, 方向符合右手法则; 令原点处于潜艇圆柱形艇体的中心位置。

当目标为水面舰船时: 以舰艇吃水线截面的中心点为原点建立坐标, 设目标沿舰艏向舰艉方向为

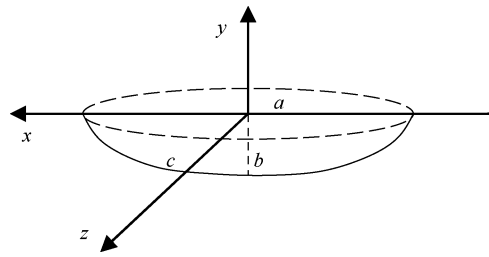


图 2 水面舰船模型  
Fig. 2 Surface ship model

$x$  轴正方向, 垂直于  $x$  轴向上为  $y$  轴正方向,  $z$  轴垂直于  $x$  轴与  $y$  轴组成的平面, 方向符合右手法则。

### 2 脱靶量的计算方法

脱靶量的计算需根据鱼雷的运行周期, 计算每一运行周期鱼雷到潜艇或舰艇表面的最小距离  $r$ , 然后比较不同周期的值, 最终得出在整个运行过程中鱼雷到潜艇或舰艇表面的最小距离<sup>[5]</sup>, 即为脱靶量。因此, 首先计算每一运行周期鱼雷到潜艇或舰艇表面的最小距离  $r$ , 假设  $t$  周期鱼雷处于  $A(x_t, y_t, z_t)$  点, 则  $t$  周期鱼雷到潜艇或舰艇表面的最小距离  $r$  计算公式如下。

1) 目标为潜艇时雷目最小距离的计算方法。

当  $x_t > R_1$  时, 计算鱼雷到艇艏壳体表面的距离: 将鱼雷  $A(x_t, y_t, z_t)$  点与艇艏半球体球心  $O$  点直线连接,  $AO$  与艇艏壳体表面相交于  $B$  点, 如图 3 所示,  $AB$  为鱼雷到潜艇表面的最小距离, 用  $r$  表示:

$$r = \sqrt{y_t^2 + z_t^2 + (x_t^2 - R_1^2)} - R \quad (1)$$

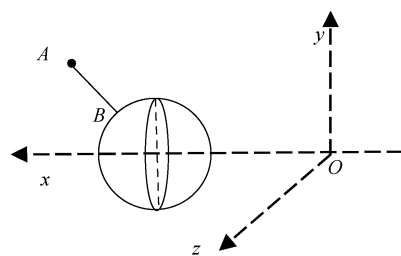


图 3 鱼雷到艇艏壳体表面示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of torpedo to bow hull surface

当  $-R_1 - L < x_t < -R_1$  时, 计算鱼雷到艇艉壳体表面的距离: 过  $A(x_t, y_t, z_t)$  点做与  $x$  轴重合的平面, 如图 4 所示。该平面与艇艉圆锥壳体表面分别相交

于  $BD$ 、 $ED$  两条直线，其中  $BD$  离  $A(x_t, y_t, z_t)$  点较近，过  $A(x_t, y_t, z_t)$  点做垂直于  $x$  轴的连线与  $x$  轴相交于  $C(x_t, 0, 0)$  点， $AC$  与  $BD$  相交于  $O$  点，过  $A(x_t, y_t, z_t)$  点做垂直于  $BD$  的线，与  $BD$  相交于  $B$  点。 $\triangle BAC$  与  $\triangle BDC$  在同一个平面内， $\angle BAC$  与  $\angle BDC$  相等，设为  $\theta$ ， $AB$  为鱼雷到潜艇表面的最小距离，用  $r$  表示<sup>[6]</sup>：

$$\theta = a \tan(R/L) \quad (2)$$

$$AO = \sqrt{y_t^2 + z_t^2} - (L + R_1 - x_t) \tan \theta \quad (3)$$

$$r = AO \cos \theta = (\sqrt{y_t^2 + z_t^2} - (L + R_1 - x_t)R/L) \cos \theta \quad (4)$$

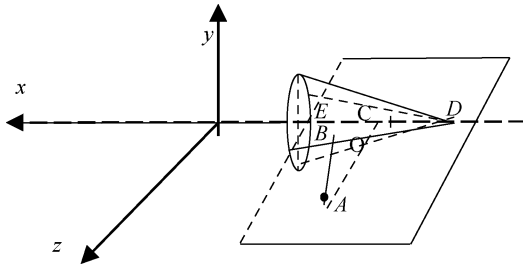


图 4 鱼雷到艇艉壳体表面示意图

Fig. 4 Schematic diagram of torpedo to stern hull surface

当  $x_t \leq -R_1 - L$  时，计算鱼雷到艇艉圆锥体顶点的距离。

$$r = \sqrt{y_t^2 + z_t^2 + (x_t - (-R_1 - L))^2} \quad (5)$$

当  $-R_1 < x_t < R_1$  时，计算鱼雷到艇体壳体表面的距离：过  $A(x_t, y_t, z_t)$  点做垂直于  $x$  轴的平面，平行于  $y$  轴和  $z$  轴组成的平面，与  $x$  轴相交于  $O(x_t, 0, 0)$  点，连接  $AO$  与壳体表面相交于  $B$  点，如图 5 所示，则  $AB$  为鱼雷到潜艇表面的最小距离：

$$r = \sqrt{y_t^2 + z_t^2} - R \quad (6)$$

2) 目标为水面舰艇时雷目最小距离的计算方法。

$t$  时刻目标吃水线平面为  $xz$  平面。令原点为椭球体的中心点，舰船吃水线最深处到水平面的距离作为椭球体半轴长  $c$ ，舰艇吃水线水平面最宽处距离的一半作为椭球体半轴长  $b$ ，舰艇艏艉吃水线水平面最长处距离的一半作为椭球体半轴长  $a$ ，如图 6 所示。

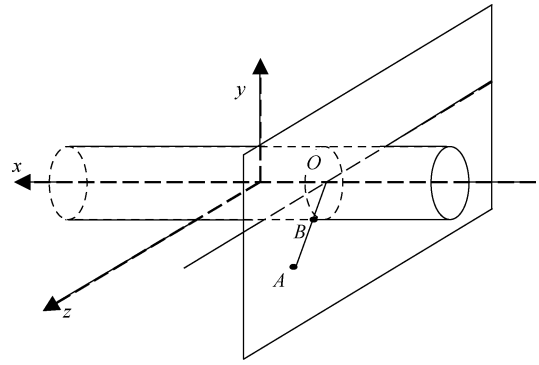


图 5 鱼雷到艇体壳体表面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of torpedo to hull surface

舰船壳体表面椭球面的方程为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (7)$$

作  $A(x_t, y_t, z_t)$  点到椭球面某点的垂线，与椭球体相交于一点， $A(x_t, y_t, z_t)$  点在该点切平面的法线上。设法线与椭球面的交点为  $O(x_0, y_0, z_0)$ ，椭球体在  $O(x_0, y_0, z_0)$  处的切平面为

$$\frac{2x_0}{a^2}(x - x_0) + \frac{2y_0}{b^2}(y - y_0) + \frac{2z_0}{c^2}(z - z_0) = 0 \quad (8)$$

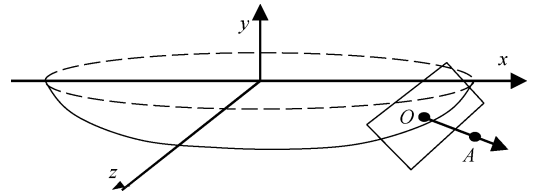


图 6 鱼雷到舰艇水下壳体表面示意图

Fig. 6 Schematic diagram of torpedo to underwater shell surface of naval vessel

该切平面的法向量<sup>[7]</sup>：

$$\mathbf{n} = \left\{ \frac{2x_0}{a^2}, \frac{2y_0}{b^2}, \frac{2z_0}{c^2} \right\} \quad (9)$$

由于向量  $OA$  与椭球体切平面的法向量  $\mathbf{n}$  的方向一致，则：

$$\frac{(x_t - x_0)a^2}{2x_0} = \frac{(y_t - y_0)b^2}{2y_0} = \frac{(z_t - z_0)c^2}{2z_0} = k \quad (10)$$

计算可得：

$$x_0 = \frac{x_t}{1 + \frac{2k}{a^2}}, y_0 = \frac{y_t}{1 + \frac{2k}{b^2}}, z_0 = \frac{z_t}{1 + \frac{2k}{c^2}} \quad (11)$$

式中:  $K$  为常数。

由于点  $O(x_0, y_0, z_0)$  为椭球面上的一点, 因此它满足上式:

$$\frac{x_t^2}{(a + \frac{2k}{a})^2} + \frac{y_t^2}{(b + \frac{2k}{b})^2} + \frac{z_t^2}{(c + \frac{2k}{c})^2} = 1 \quad (12)$$

在  $x_t, y_t, z_t, a, b, c$  已知的情况下, 可以求出  $k$  值, 代入以上公式, 得到  $x_0, y_0, z_0$ , 则  $t$  时刻鱼雷到潜艇表面的最小距离  $r$  为

$$r = \sqrt{(x_t - x_0)^2 + (y_t - y_0)^2 + (z_t - z_0)^2} \quad (13)$$

### 3) 脱靶量的计算。

以自导开机时刻为零点  $t_0$ , 获取从自导开机到仿真结束这段时间的目标和鱼雷坐标信息。按照以上的计算方法, 计算出每个仿真周期  $t_i$  时刻鱼雷到目标体表面的最小距离  $r_i$ , 并与  $t_i$  时刻之前的最小距离  $r$  相比较。如果  $r_i$  小于  $r$ , 将  $r_i$  的值赋予  $r$ , 继续计算下一周期的最小距离并进行比较, 直至所有的仿真周期计算结束,  $r$  即为脱靶量。

## 3 仿真计算

实施仿真试验, 通过计算点目标时的脱靶量和应用上述方法计算的脱靶量进行比较, 可以看出, 应用上述方法计算的脱靶量更接近于鱼雷的自导精度, 假设鱼雷的自导精度小于 10 m。

1) 鱼雷攻击的目标是潜艇时, 设潜艇的艇艏为半球体, 半径为 5 m; 艇体为圆柱体, 圆半径为 5 m, 柱体长度为 70 m; 艇艉为圆锥体, 底的半径为 5 m, 圆锥体高度为 10 m。表 1 为所做的 6 条试验中 2 种方法计算得到的脱靶量的比较值。

表 1 仿真试验比较

Table 1 Comparison of simulation tests

序号	点目标计算脱靶量/m	修正的脱靶量/m
1	15.1	4.42
2	34.1	4.44
3	11.2	4.7
4	9.06	3.9
5	20.1	4.64
6	34.5	5.74

2) 鱼雷攻击的目标是舰艇时, 设水面舰船的水线以下部分为半椭球体, 3 个半轴分别为

$a=60$  m,  $b=10$  m,  $c=-6$  m; 表 2 为所做的 6 条试验中 2 种方法计算得到的脱靶量的比较值。

表 2 仿真试验比较

Table 2 Comparison of simulation tests

序号	点目标计算脱靶量/m	修正的脱靶量/m
1	51.6	6.7
2	55	8.1
3	41.9	7.5
4	17	4.3
5	20.1	4.7
6	34.5	5.6
7	60.25	8.76

## 4 结束语

随着仿真技术的发展, 将仿真技术应用于水中兵器的试验验证将更加普及<sup>[8]</sup>, 随之而来的是与实航试验截然不同的数据处理方法。本文针对应用仿真系统实施鱼雷自导导航精度试验所面临的问题, 提出了改进的计算方法, 该方法能大大地改善原有计算方法的误差, 使得计算结果更加接近于鱼雷的自导精度。该方法能够为将来实施鱼雷自导精度仿真试验提供更加精准的数据, 为保证试验的顺利进行提供保障。

## 参考文献

- [1] 孟庆玉, 张静远. 鱼雷作战效能分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [2] 徐德民. 鱼雷自动控制系统[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2001.
- [3] 汪玉, 姚耀中. 世界海军潜艇[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [4] 聂卫东, 康凤举, 苏颖, 等. 鱼雷弹道仿真中潜艇体目标建模与应用研究[J]. 计算机仿真, 2004, 21(8): 10-12.
- [5] 谢勇, 张静远, 谌剑, 等. 体目标条件下反潜鱼雷命中目标模型[J]. 海军工程大学学报, 2011, 23(1): 88-93.
- [6] 闫章更, 魏振军. 试验数据的统计分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [7] 王小宁, 康凤举, 吴宇, 等. 体目标条件下的鱼雷攻击效果评估仿真方法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(1): 401-405.
- [8] 李浩. 基于 HLA 的鱼雷武器系统分布交互仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.

(责任编辑: 肖楚楚)