反舰导弹射击精度评估研究

李晓斌，贾旭山，席如冰
（中国人民解放军 92941 部队，辽宁 葫芦岛 125001）

摘要：分析了反舰导弹射击精度评估领域命中概率与圆概率偏差、命中区域圆概率偏差的分歧，提出了制导概率椭圆偏差和制导概率圆偏差的新概念。将反舰导弹飞行末段雷达导引头波束覆盖区域与打击目标水面舰艇轮廓大小进行了比对，根据比对结果划分为雷达导引头波束完全覆盖、部分覆盖和内嵌于目标三个等级，对应提出了命中概率评估方法、制导概率椭圆偏差评估方法和制导概率圆偏差评估方法。通过反舰导弹对快艇、驱护舰和航母三类目标射击精度评估算例验证了反舰导弹射击精度评估总体方案的全面性和三类方法的适用性。

关键词：反舰导弹；精度评估；命中概率；制导概率椭圆偏差；制导概率圆偏差
DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2018.01.006
中图分类号：TJ760　　**文献标识码：**A
文章编号：1672-9242(2018)01-0026-05

Firing Accuracy Evaluation of Anti-ship Missile

LI Xiao-bin, *JIA Xu-shan*, *XI Ru-bing*
(Troop 92941, PLA, Huludao 12500l, China)

ABSTRACT: By analyzing differences of hit probability method, circular error probable method and hit area circular error probable method in anti-ship missile firing accuracy evaluation, new concepts of guidance oval error probable method and guidance circular error probable method were proposed. By comparing the beam coverage area of missile seeker at the end of missile flight and the shape of the surface ship, the comparison results were divided into three grades which correspond to the missile seeker beam fully covered, partly covered and embed target, respectively. According to the three situations, the hit probability method, guidance oval error probable method and guidance circular error probable method to evaluate the hit accuracy were provided, respectively. Finally, the comprehensiveness of the general scheme for anti-ship missile firing accuracy evaluation and the applicability of the three new methods were verified with examples of anti-ship missile firing the mosquito craft, the destroyer and frigate and the aircraft carrier.

KEY WORDS: anti-ship missile; accuracy evaluation; hit probability; guidance oval error probable; guidance circular error probable

反舰导弹射击精度评估一直以来主要采用命中概率评定方法[1-2]，但是命中概率作为射击精度评定指标，无法明确表征射击准确度与密集度[3]。目前其他领域常用的精度评估指标是圆概率偏差(circular error probable, CEP)，但该指标存在着与目标特性关联不强的缺点[4]。后来又有学者针对攻击目标的特性，提出命中区域圆概率偏差(hit area circular error probable, ACEP)指标。笔者认为，关于命中概率指标的观点可商榷，同时 CEP、ACEP 等指标也有不足之处。文中将分析命中概率、CEP、ACEP 指标和评定方法各自的适用情况及不足，针对 CEP、ACEP 提出新概念并建立评估方法，最后构建反舰导弹射击精度

收稿日期：2017-11-28；**修订日期：**2017-12-15
作者简介：李晓斌（1975—），男，山西太原人，博士，高级工程师，主要研究方向为导弹武器系统试验总体。

评估总体方案。

1　评估总体方案

1.1　评估分析

反舰导弹射击精度指标一般采用命中概率形式给出，该指标综合了导弹控制精度、瞄准精度及目标被弹面积三个表征要素。

一直以来，反舰导弹射击精度评定主要采用基于给定指标的假设检验方法，但该方法无法表征导弹射击的密集度，即在 n 发 n 中的情况下无法区分 n 发导弹集中命中靶船和分散命中靶船情况。针对该问题补充了下限估计方法，但在导弹全部中靶的情况下依然无法表征密集度[2-3]。

针对表征射击密集度问题，文献[2]和文献[3]介绍了 ACEP 方法，即求解以靶船被弹面几何中心为中心的圆，导弹落入圆与靶船被弹面的重叠区域的概率等于命中概率。虽然表面上看起来 ACEP 解决了反舰导弹射击密集度表征问题，但实际情况与预想情况可能要相差很多。从导弹制导机理可知，导弹射击散布包括瞄准点散布和控制散布，其中瞄准点散布与目标被弹面延展有关。被弹面延展属目标固有特性而难以被消除，即一型导弹射击两个被弹面积相差较大的舰船，导弹落点散布可能相差较大，亦即 ACEP 方法对同型导弹射击密集度将得出明显不同的两个结论。

为减小误差，导弹会在设计上保证俯仰和偏航两通道独立、精度相当，亦即导弹对点目标射击时落点服从圆散布。当导弹控制均方差与目标被弹面表征尺寸相差较大时，导弹射击呈现密集中靶情况，即导弹射击密集度与目标外廓无关联，这时完全可将给定概率的圆概率偏差用于导弹射击精度评估。

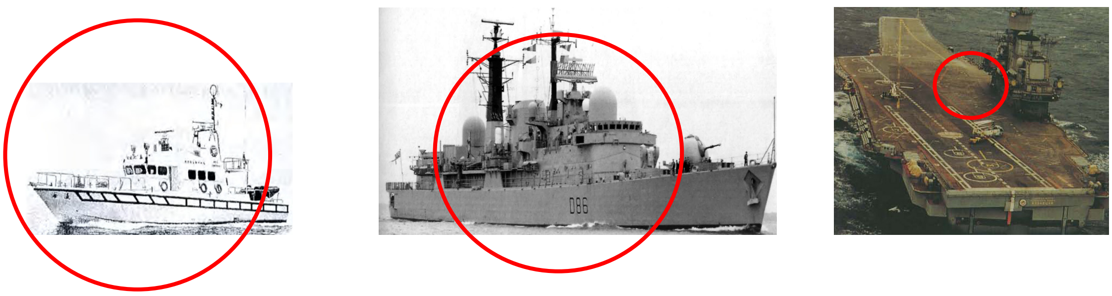
无论 ACEP 或 CEP，其用于反舰导弹射击评估的一个基本问题是“半数必中性”，即通常将圆概率默认为 0.5，这个问题是值得商榷的。据现有的 CEP 的定义可知，CEP 为圆半径且导弹落入圆内的概率为 0.5。因何定义 0.5 已难以严格考证，笔者认为，可能源于早前精确制导武器的界定标准为落入概率不小于 0.5，但反舰导弹的命中概率指标却远高于 0.5，可达 0.7，0.75 乃至 0.8，0.85，而且不同型号反舰导弹其指标也各不相同。

综上分析可知，三种评估方法各有利弊，而 CEP 或 ACEP 用于反舰导弹精度评估的真正问题是“预定了 0.5 的命中概率”。

1.2　评估方案构建

反舰导弹射击精度评估既应表征控制精度，也应表征瞄准精度，必要时还需表征目标被弹面积，目前的评估方法尚无一能全部达成三个目的，其中概率评估无法表征控制精度、CEP 无法表征被弹面积、ACEP 无法表征瞄准精度。反过来讲，CEP 表征了控制精度、概率评估表征了被弹面积、ACEP 包容了两者但无法表征瞄准精度，而且 ACEP 冗余较大、不够紧致。实现准确评估反舰导弹射击精度的关键是建立统一的评估方案，同时摒弃 CEP 或 ACEP 概念而建立与命中概率相关的概率圆概念。

导弹瞄准精度与雷达目标角闪烁有关，雷达目标角闪烁机理比较复杂，但也可以作简单的定性划分。雷达目标角闪烁主要与其散射源合成变化有关，如果散射源数目基本确定，则可对角闪烁作定性预估。反舰导弹末段雷达导引头照射目标不外乎三种情况，如图 1 所示。



a　　b　　c

图 1　雷达导引头照射目标三种情况

第一种情况（图 1a）对应雷达导引头波束全部覆盖目标，主要代表导弹攻击小型水面舰艇（如快艇）类情况。这种情况下目标散射源数目不会有显著增减，亦即雷达照射目标不会有明显的角闪烁。这时应采用命中概率评估方法，也无瞄准精度表征问题。

第二种情况（图 1b）对应雷达导引头波束部分覆盖目标，主要代表导弹攻击中型水面舰艇（如护卫舰）类情况。这种情况下目标散射源数目在铅垂方向上不会有显著增减，亦即雷达照射目标在 y 向不会有明显的角闪烁。这时应采用制导概率椭圆偏差评估方法，指标为 OEP_p，其中角标 p 制导概率，可表征被弹面积和 z 向瞄准精度。

第三种情况（图 1c）对应雷达导引头波束内嵌

于目标，主要代表导弹攻击大型水面舰艇（如航母）类情况。这种情况下目标散射源数目在两个方向上都有不确定的增减情况,但依据文献[5]雷达波束基本在目标被弹面内。这时应采用制导概率圆偏差评估方法，指标为 CEP_p，可表征双向瞄准精度。

以此为基础可构建反舰导弹射击精度评估总体方案。

2 反舰导弹射击精度评估方法

2.1 命中概率评估方法

命中概率评估方法主要有经典评估方法和 Bayes 评估方法，分别包括点估计和区间估计，通常采用区间估计方法，既能给出置信概率，又能给出估值的范围[1]。

1）经典估计。设 X 为导弹一次射击的命中数，取值为 0 或 1。假设有 n 次独立射击，得到 X 的 n 个观察值$(X_1, X_2, \ldots, X_n)$，用 $s=\sum_{i=1}^{n} X_i$ 表示成功数，则得到命中概率 p 的点估计为：

$$\hat{p}=\frac{s}{n} \tag{1}$$

若给定置信度 r，p 的置信区间$(p_{\mathrm{L}}, p_{\mathrm{U}})$满足式（2）：

$$\begin{cases}\sum_{x=0}^{n-s} C_n^x p_{\mathrm{L}}^{n-x}\left(1-p_{\mathrm{L}}\right)^x=\dfrac{1-r}{2} \\ \sum_{x=0}^{n-s-1} C_n^x p_{\mathrm{U}}^{n-x}\left(1-p_{\mathrm{U}}\right)^x=\dfrac{1+r}{2}\end{cases} \tag{2}$$

2）Bayes 估计。p 的共轭后验密度为 $f(p|s,n-s)=\beta(p|s_0+s,n_0-s_0+n-s)$，无先验信息时采用 Lindley 方法确定 $s_0=0$，$n_0=0$，即 $f(p|s,n-s)=\beta(p|s,n-s)$。$p$ 的点估计采用后验期望估计：

$$\hat{p}=\frac{s}{n} \tag{3}$$

给定可信度 r，p 的可信区间$(p_{\mathrm{L}}, p_{\mathrm{U}})$满足式（4）：

$$\begin{cases}\int_0^{p_{\mathrm{L}}} f(p \mid s, n-s)=1-r \\ \int_0^{p_{\mathrm{U}}} f(p \mid s, n-s)=r\end{cases} \tag{4}$$

2.2 制导概率椭圆偏差评估方法

定义反舰导弹制导概率椭圆偏差 OEP_p=（a，b）指在靶标坐标系内 y 向半轴为 a，z 向半轴为 b 的椭圆，导弹落入该椭圆内的概率为 p，a 与 b 之比等于落点散布在 y 向与 z 向的标准差之比，即有：

$$\frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z}\iint_{\frac{y^2}{a^2}+\frac{z^2}{b^2}\leqslant 1}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2}+\frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right]\mathrm{d}y\mathrm{d}z=p \tag{5}$$

令 $\dfrac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z}\exp\left[-\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{y^2}{\sigma_y^2}+\dfrac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right]=f$。

可得靶平面内的等概率密度线为：

$$\frac{y^2}{\sigma_y^2}+\frac{z^2}{\sigma_z^2}=-2\ln\left(2\pi\sigma_y\sigma_z f\right) \tag{6}$$

由式（6）可知，若系统误差为 0，且两维度相互独立，导弹落点散布在靶平面上的等概率密度线为椭圆。

若设 $\dfrac{a}{\sigma_y}=\dfrac{a}{\sigma_z}=k$，则由式（5）可进一步得：

$$k=\sqrt{-2\ln(1-p)}, 0<p<1 \tag{7}$$

则有：

$$\begin{aligned}a&=\sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sigma_y \\ b&=\sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sigma_z\end{aligned} \tag{8}$$

即从椭圆概率偏差的评估转变为了对 y 向、z 向标准差的分别评估。

1）经典估计。反舰导弹圆概率偏差评估同样包括点估计和区间估计。

点估计实际上是给出 OEP_p 的长短半轴 a,b 的一个估值，首先需给出 σ_y，σ_z 的一个估值，两者方法一致，采用式（9）：

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i^2} \tag{9}$$

则 OEP_p 的点估计为：

$$\widehat{OEP_p}=\left(\sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Y_i^2}, \sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Z_i^2}\right) \tag{10}$$

区间估计采用枢轴量法，并认为系统误差可以得到修正，即 $\mu_y=\mu_z=0$。σ_y、σ_z 的置信水平为 $1-\alpha$，置信区间为：

$$\left(\sigma_{\mathrm{L}}, \sigma_{\mathrm{U}}\right)=\left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} X_i^2}{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(n)}}, \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} X_i^2}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n)}}\right) \tag{11}$$

则得到 OEP_p 的置信下限估计 $OEP_{p\mathrm{L}}$ 和置信上限估计 $OEP_{p\mathrm{U}}$ 分别为：

$$\begin{aligned}OEP_{p\mathrm{L}}&=\left(\sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i^2}{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(n)}}, \sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} Z_i^2}{\chi_{\frac{\alpha}{2}}^2(n)}}\right) \\ OEP_{p\mathrm{U}}&=\left(\sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i^2}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n)}}, \sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} Z_i^2}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}}^2(n)}}\right)\end{aligned} \tag{12}$$

2）Bayes 估计。采用 Raiffa & Schlaifer 引进的共轭型，并用 Lindley 方法，对于正态分布方差 σ^2 可得如下后验分布：

$$f\left(\frac{1}{\sigma^2}\right)=\Gamma\left(\frac{1}{\sigma^2} \mid \frac{n}{2}, \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i^2}{2n}\right) \tag{13}$$

采用后验期望估计得到 σ 的点估计为 $\sigma=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i^2}$，则其 OEP_p 的点估计与经典方法一致。σ 的区间估计为：

$$(\sigma_{\mathrm{L}},\sigma_{\mathrm{U}})=\left(\sqrt{\frac{1}{\Gamma^2_{1-\frac{\alpha}{2}}\left(\frac{n}{2},\frac{\sum_{i=1}^{n}X_i^2}{2n}\right)}},\sqrt{\frac{1}{\Gamma^2_{\frac{\alpha}{2}}\left(\frac{n}{2},\frac{\sum_{i=1}^{n}X_i^2}{2n}\right)}}\right) \tag{14}$$

则可得 OEP_p 的区间估计的上限和下限分别为：

$$\begin{cases} OEP_{p\mathrm{L}}=\left(\sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sqrt{\frac{1}{\Gamma^2_{1-\frac{\alpha}{2}}\left(\frac{n}{2},\frac{\sum_{i=1}^{n}Y_i^2}{2n}\right)}},\sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sqrt{\frac{1}{\Gamma^2_{1-\frac{\alpha}{2}}\left(\frac{n}{2},\frac{\sum_{i=1}^{n}Z_i^2}{2n}\right)}}\right)\\ OEP_{p\mathrm{U}}=\left(\sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sqrt{\frac{1}{\Gamma^2_{\frac{\alpha}{2}}\left(\frac{n}{2},\frac{\sum_{i=1}^{n}Y_i^2}{2n}\right)}},\sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sqrt{\frac{1}{\Gamma^2_{\frac{\alpha}{2}}\left(\frac{n}{2},\frac{\sum_{i=1}^{n}Z_i^2}{2n}\right)}}\right)\end{cases} \tag{15}$$

2.3　制导概率圆偏差评估方法

定义反舰导弹制导概率圆偏差 $CEP_p=r$ 指在靶标坐标系内半径为 的圆，导弹落入该圆内的概率为 p，即有：

$$\frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z}\iint_{y^2+z^2\leqslant r^2}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2}+\frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right]\mathrm{d}y\mathrm{d}z=p \tag{16}$$

多数情况下导弹的双向控制精度基本相等，继而有：

$$\frac{1}{2\pi\sigma^2}\iint_{y^2+z^2\leqslant r^2}\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2+z^2}{\sigma^2}\right)\right]\mathrm{d}y\mathrm{d}z=p \tag{17}$$

则有：

$$r=\sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sigma \tag{18}$$

1）经典估计。由于导弹双向精度相等，因此有如下点估计：

$$\hat{\sigma}=\sqrt{\frac{1}{2n}\left[\sum_{i=1}^{n}Y_i^2+\sum_{i=1}^{n}Z_i^2\right]} \tag{19}$$

$$CEP_p=\sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\hat{\sigma} \tag{20}$$

区间估计同样采用枢轴量法，得：

$$(\sigma_{\mathrm{L}},\sigma_{\mathrm{U}})=\left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}Y_i^2+\sum_{i=1}^{n}Z_i^2}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}(2n)}},\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}Y_i^2+\sum_{i=1}^{n}Z_i^2}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(2n)}}\right) \tag{21}$$

则得到 CEP_p 的区间估计的上限和下限分别为：

$$\begin{cases} CEP_{p\mathrm{L}}=\left(\sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}Y_i^2+\sum_{i=1}^{n}Z_i^2}{\chi^2_{\frac{\alpha}{2}}(2n)}}\right)\\ CEP_{p\mathrm{U}}=\left(\sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}Y_i^2+\sum_{i=1}^{n}Z_i^2}{\chi^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(2n)}}\right)\end{cases} \tag{22}$$

2）Bayes 估计。点估计与经典方法一致。σ 的区间估计为：

$$(\sigma_{\mathrm{L}},\sigma_{\mathrm{U}})=\left(\sqrt{\frac{1}{\Gamma^2_{1-\frac{\alpha}{2}}\left(\frac{n}{2},\frac{\sum_{i=1}^{n}Y_i^2+\sum_{i=1}^{n}Z_i^2}{4n}\right)}},\sqrt{\frac{1}{\Gamma^2_{\frac{\alpha}{2}}\left(\frac{n}{2},\frac{\sum_{i=1}^{n}Y_i^2+\sum_{i=1}^{n}Z_i^2}{4n}\right)}}\right) \tag{23}$$

则有 CEP_p 的区间估计的上限和上限分别为：

$$\begin{aligned} CEP_{p\mathrm{L}}&=\left(\sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sigma_{\mathrm{L}}\right)\\ CEP_{p\mathrm{U}}&=\left(\sqrt{-2\ln(1-p)}\cdot\sigma_{\mathrm{U}}\right)\end{aligned} \tag{24}$$

4　反舰导弹射击精度评估算例

假设一型导弹对快艇、护卫舰和航母进行射击，雷达导引头的波束宽 5°，末段攻击距离为 500~200 m，射击次数均 8 次，制导概率 p 为 0.8，评估算例见表 1（置信度或可信度取 0.8）。

表 1 反舰导弹射击精度评估算例

目标种类		快艇	护卫舰	航母
被弹面尺寸		20 m×6 m	120 m×11 m	280 m×70 m
试验数据		{1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1}	*Y*:{0.1778, -0.2869, -2.4970, 0.8832, -4.0085, 2.1430, 4.8707, -2.0753} *Z*:{5.1480, 7.5240, -9.5624, -8.6458, 3.4269, -2.3993, 4.1400, 4.8937}	*Y*:{3.5595, 6.4512, 3.3430, 5.9542, -6.0123, -0.0989, -0.7836, -8.0204} *Z*:{1.2865, -5.2824, 7.0757, -4.0255, 2.6437, 1.0966, -4.6095, -10.8534}
经典	点估计	0.75	(4.7358, 11.0839)	9.4170
	区间估计	(0.54, 0.8)	(3.6671, 8.6123) (7.1757, 16.8526)	(7.6522, 14.9737)
贝叶斯	点估计	0.75	(4.7358, 11.0839)	9.4170
	区间估计	(0.63, 0.88)	(3.6671, 8.6123) (7.1757, 16.8526)	(7.6522, 14.9737)
备注		无先验信息时，贝叶斯方法和经典方法有差异。	无先验信息时，贝叶斯方法和经典方法运算结果相等。	

5 结论

1）在反舰导弹命中精度评估领域，不能再将圆或椭圆概率偏差理解为半数必中圆，而应将其与制导命中概率相关联。

2）对于反舰导弹射击效果评估不能简单地采用命中概率、圆概率偏差评估或椭圆概率偏差评估，而应基于工程背景将雷达导引头波束与典型目标舰外廓相比较，针对全部覆盖、部分覆盖和内嵌三种情况分别采用命中概率评估、椭圆概率偏差与圆概率偏差三种方法进行评估。

3）在对严格点靶（无角闪烁）射击的情况下，可以评估导弹的控制精度，除此情况不易区分瞄准精度与控制精度。

参考文献：

[1] 曲宝忠, 孙晓峰. 海军战术导弹试验与鉴定[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 44-47.

[2] 唐雪梅, 蔡洪, 杨华波, 等. 导弹武器精度分析与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 17-19.

[3] 王正明, 卢芳云, 段晓君. 导弹试验的设计与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 438-442.

[4] 武小悦, 刘琦. 装备试验与评价[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 284-290.

[5] 茆诗松. 贝叶斯统计[M]. 北京: 中国统计出版社, 1990: 43-47.

[6] 周源泉, 翁朝曦. 可靠性评定[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 42-46.

[7] 茆诗松, 王玲玲. 可靠性统计[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1984: 119-123.

[8] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 191-191.

[9] 黄培康, 殷红成. 扩展目标的角闪烁[J]. 系统工程与电子技术, 1990(12): 1-11.

[10] 赵东涛, 王浩. 基于角闪烁抵制的高分辨雷达角跟踪技术[J]. 电子科技, 2010(11): 67-69.