

doi: 10.7690/bgzdh.2022.09.003

# 一种反舰导弹捕获目标概率仿真计算方法

王志恒, 孙茂义, 王 智

(中国人民解放军 91550 部队 41 分队, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 针对捕获目标概率在导弹武器系统设计、试验鉴定、作战效能评估等方面的重要性, 提出一种反舰导弹捕获目标概率的仿真计算方法。分析影响反舰导弹导引头一次开机捕获概率的主要因素并给出其分布规律, 建立导引头搜索范围计算模型; 基于该方法进行反舰导弹捕获概率的算例分析, 分析各因素对捕获概率的影响。仿真算例结果表明: 该方法能简便有效地计算反舰导弹捕获目标概率, 可应用于反舰导弹性能分析、命中评估等场合。

**关键词:** 反舰导弹; 捕获概率; 现在点攻击; 目指误差; 定位误差; 自控终点散布; 目标运动

**中图分类号:** TJ761.1<sup>+</sup>4 **文献标志码:** A

## A Simulation Calculation Method for Target Acquisition Probability of Anti-ship Missile

Wang Zhiheng, Sun Maoyi, Wang Zhi

(No. 41 Team, No. 91550 Unit of PLA, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Aiming at the importance of target acquisition probability in missile weapon system design, test and evaluation, operational effectiveness evaluation, a simulation calculation method of anti-ship missile target acquisition probability was proposed. The main factors affecting the acquisition probability of the anti-ship missile seeker are analyzed and the distribution law is given, and the calculation model of the search range of the seeker is established. Based on this method, the acquisition probability of the anti-ship missile is analyzed, and the influence of each factor on the acquisition probability is analyzed. The simulation results show that the method can calculate the probability of anti-ship missile capturing the target simply and effectively, and can be applied to anti-ship missile performance analysis, hit evaluation and other occasions.

**Keywords:** anti-ship missile; acquisition probability; present point attack; target pointing error; positioning error; self-control terminal distribution; target motion

## 0 引言

反舰导弹捕获目标概率是指导引头开机后能够捕捉到目标的可能性, 即目标落入导引头搜捕范围并被导引头捕捉到的概率<sup>[1-2]</sup>。现代导弹雷达导引头通常只需搜索区域覆盖目标, 就能检测到目标; 因此, 搜捕概率就等于导弹搜索区覆盖目标的概率<sup>[3-4]</sup>。反舰导弹雷达导引头开机后捕获目标是反舰导弹能命中目标的前提条件, 捕获目标概率在导弹武器系统设计、试验鉴定、作战效能评估等方面有着重要应用; 因此, 对反舰导弹导引头一次开机捕获概率的建模、仿真计算具有重要意义。文献[5]考虑反舰导弹自控终点误差和目标散布误差, 仿真计算了不同参数下反舰导弹的目标捕获概率。文献[6]针对目指精度误差较大的目标, 研究多枚导弹区域射击提高捕获概率的方法。文献[7]给出一种反舰导弹纯方位攻击模式下捕获概率计算方法。文献[8]

考虑导弹自控终点散布、目标机动范围、目指精度误差影响建立了反舰导弹捕捉目标概率计算模型, 但未考虑发射平台定位误差影响。

笔者考虑导弹自控终点散布、目标机动范围、目指精度误差、发射平台定位误差等影响条件, 提出一种反舰导弹捕获目标概率仿真计算方法, 可用于反舰导弹目标概率的仿真计算, 为反舰导弹武器系统设计、试验鉴定、作战效能评估等应用提供参考。

## 1 捕获概率影响因素及分布特性

### 1.1 捕获概率影响因素

对现在点攻击方式下反舰导弹捕获目标的概率分析。反舰导弹水面发射平台一般由其他平台提供超视距目指信息, 水面发射平台接收到目指信息后, 武器控制系统根据目指信息、发射平台位置等初始条件规划导弹飞行航路, 并控制导弹发射。导

收稿日期: 2022-05-09; 修回日期: 2022-06-27

作者简介: 王志恒(1988—), 男, 吉林人, 博士, 工程师, 从事试验训练仿真研究。E-mail: wzh5625412@163.com。

弹发射后，开始自控段飞行，即导弹在导航系统控制下按照设定航路飞行至预定雷达导引头开机位置。导弹飞行至预定雷达导引头开机位置后，雷达导引头开机搜索目标，导引头捕获目标后，开始自导段飞行，即导弹在导引头引导下飞向目标舰船<sup>[9]</sup>。

通常，雷达导引头搜索范围为扇面，主要参数包括：搜索近距、搜索远距、搜索左限和搜索右限，这些参数决定了导弹捕获目标的基本能力。在不存在目标运动以及误差影响的理想条件下，一般反舰导弹雷达导引头开机后，目标大概率处于雷达搜索扇面内；因此，研究反舰导弹雷达导引头捕获目标概率更重要的是分析目标运动以及各种误差对雷达导引头搜索范围的影响。

反舰导弹发射平台接收目指信息规划导弹航

路时，目指信息中的目标位置信息一般存在一定误差；同时，发射平台自身位置信息也存在一定误差。导弹从发射平台发射后到达预定位置后雷达开机，该过程中受导航系统误差影响，雷达开机点相对于预定开机点也存在一定误差。导弹飞行时，目标也在运动，有可能运动出导弹雷达搜索范围，即影响反舰导弹雷达导引头捕获概率的因素主要包括：目指误差、发射平台位置误差、自控终点散布误差和目标运动。

假设某反舰导弹打击目标飞行过程航路不存在转弯点，单枚导弹打击单目标情况下，依次给出了考虑目标运动及依次叠加目指误差、发射平台位置误差和自控终点散布误差时导引头搜捕范围示意图，如图 1 所示。

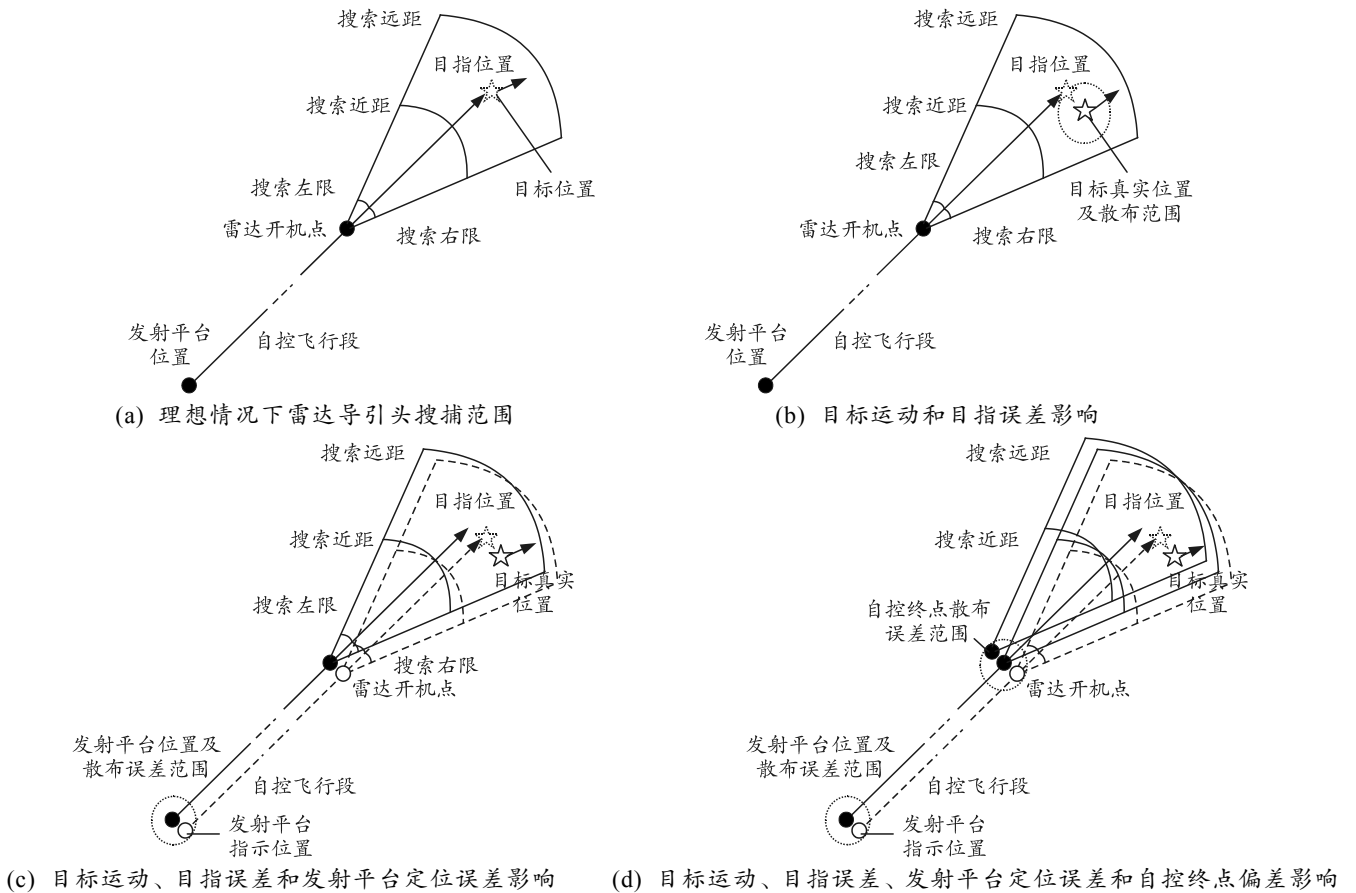


图 1 4 种因素对导引头搜捕范围影响

图 1(a)不考虑各种误差时，导弹采用现在点攻击方式，飞行到预定雷达开机点搜索目标，仅目标运动对搜捕成功概率有影响。图 1(b)考虑目指误差时，目指位置在目标真实位置附近一定范围内散布，导弹的预定搜捕点为目指位置，目标以真实位置为初始点随机向某一方向运动。图 1(c)考虑平台定位误差时，相当于在图 1(b)搜捕范围基础上对导

弹航路和搜捕范围进行了平移。图 1(d)考虑自控终点散布误差时，实际雷达开机点位置是在图 1(c)雷达开机点位置上叠加了自控终点误差。

### 1.2 导引头搜索范围计算模型

设某平台发射导弹打击目标，发射平台指示位置为 $(x, y)$ ，平台指示位置经度、纬度误差为 $(\Delta x,$

$\Delta y$ ), 目标指示位置为  $(p, q)$ , 目标指示位置经度、纬度误差为  $(\Delta p, \Delta q)$ , 自控终点散布误差  $(\Delta m, \Delta n)$ 。雷达开机距离为  $a$ , 地球半径为  $R$ 。在发射平台位置、目标位置连线及它们所在的经线和纬线组成的直角球面三角形内可求解相关位置关系。

根据直角球面三角形纳皮尔规则, 目标指示位置与平台指示位置距离  $c$  为:

$$c = R \cdot \arccos(\cos(p-x) \cdot \cos(q-y)) \cdot \pi / 180。 \quad (1)$$

定义导弹航向角为平台指示位置与目标指示位置地球面连线与经线方向夹角, 记为  $\alpha$ , 有:

$$\alpha = \arccos(\tan(p-x) \cdot \cotan(c/R))。 \quad (2)$$

设规划雷达开机点经纬度  $(l, s)$ , 则有:

$$l = x + ((c-a)/c) \cdot (p-x); \quad (3)$$

$$s = y + ((c-a)/c) \cdot (q-y)。 \quad (4)$$

实际雷达开机点经度、纬度  $(l', s')$  分别为:

$$l' = x + ((c-a)/c) \cdot (p - (x - \Delta x)) + \Delta m; \quad (5)$$

$$s' = y + ((c-a)/c) \cdot (q - (y - \Delta y)) + \Delta n。 \quad (6)$$

设导弹平均飞行速度为  $v_1$ , 目标运动速度为  $v_2$ , 目标相对于经线方向航向角  $\theta$ , 则雷达开机时目标位置  $(p', q')$  为:

$$p' = (p - \Delta p) + R \cdot \arctan((\cos \theta) \cdot \tan((c-a)v_2 / v_1 R)); \quad (7)$$

$$q' = (q - \Delta q) + R \cdot \arcsin((\sin \theta) \cdot \sin((c-a)v_2 / v_1 R))。 \quad (8)$$

雷达开机点与此时目标位置距离记为  $d$ , 目标位置与雷达开机点及经线方向夹角为  $\beta$ :

$$d = R \cdot \arccos(\cos(p' - l') \cdot \cos(q' - s')) \cdot \pi / 180; \quad (9)$$

$$\beta = \arccos(\tan(p' - l') \cdot \cotan(d/R))。 \quad (10)$$

如果目标与雷达开机点距离小于搜索远距大于搜索近距, 且方位角在搜索左右限范围内, 则认为搜索成功。设导引头搜索近距和远距分别为  $r_1$  和  $r_2$ , 搜索左右限  $k$ , 则目标被捕获的判断准则为:

$$\left. \begin{aligned} r_1 \leq d \leq r_2 \\ \alpha - k \leq \beta \leq \alpha + k \end{aligned} \right\}。 \quad (11)$$

以上各计算模型中, 位置单位为经度、纬度, 实际编程计算时部分需换算为弧度。

### 1.3 影响因素分布特性

#### 1) 目标运动。

目标运动具有随机性, 在目指信息中未包含舰船速度信息时, 可认为反舰导弹打击的舰船目标在经济航速范围内随机向某个方向运动。

#### 2) 目指误差。

目指误差可能由侦察平台对目标定位误差引

起, 也可能由信息发送时延引起, 可以近似为以目标为圆心一定范围内的均匀分布。

#### 3) 发射平台位置误差。

反舰导弹发射平台自身定位误差一般以真实位置为圆心一定范围内均匀分布。

#### 4) 自控终点误差。

自控终点误差主要由惯导系统陀螺漂移引起, 一般服从以预定雷达开机点为圆心 2 维正态分布, 方差取决于导弹惯导精度及导弹飞行时间<sup>[10]</sup>。

## 2 仿真计算流程

笔者设计基于蒙特卡洛仿真的思想计算反舰导弹捕获目标的概率, 即首先根据捕获概率影响因素分布特性随机生成目指误差、平台定位误差、自控终点误差、目标运动等反舰导弹打击目标舰船初始条件; 然后仿真单次导弹飞行与目标运动过程, 判断单次导引头捕获目标情况; 再通过多次仿真获得反舰导弹捕获目标概率, 当捕获目标概率收敛时, 仿真结束, 其基本流程如图 2 所示。

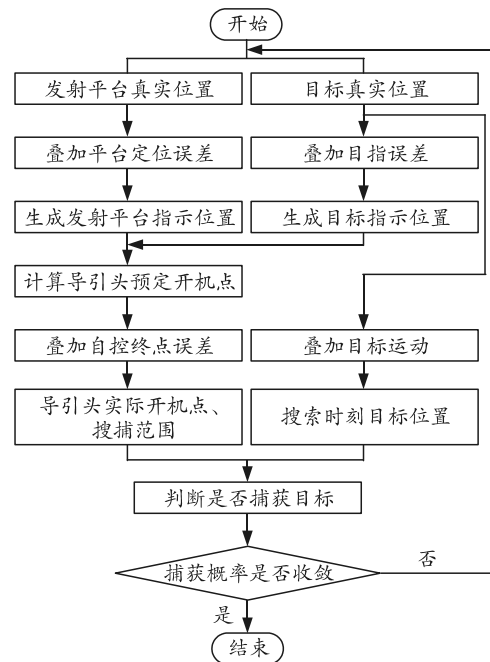


图 2 捕获概率仿真计算基本流程

## 3 案例仿真

### 3.1 仿真参数

假设某水面舰艇接到指令及目指信息, 打击目标舰船, 仿真主要初始条件如表 1 所示。

每次仿真假设目标随机以 15~20 节之间的航速向任意方向运动。发射平台定位误差服从以真实位置为圆心半径 3 km 内的 2 维均匀分布, 目指位

置误差服从以真实位置为圆心半径 5 km 内的 2 维均匀分布, 自控终点散布服从以预定雷达开机点为圆心的 2 维正态分布, 自控飞行时间越长, 散布误差越大。按照表 1 条件目标距离发射平台实际距离 236.75 km, 导弹雷达导引头开机距离 40 km, 即导

弹飞行 196.75 km 时雷达开机, 假设此飞行距离上自控终点误差服从标准差为 3 km 的正态分布。

仿真导弹飞行过程, 判断目标是否在反舰导引头搜捕范围内, 统计累计捕获目标概率, 当捕获概率收敛时仿真结束。

表 1 仿真初始条件

发射平台真实位置	目标真实位置	雷达导引头搜索 近距/km	雷达导引头搜索 远距/km	搜索左、右限/(°)	雷达开机 距离/km	导弹平均飞行 速度/Ma
(123°E, 27°N)	(124.5°E, 28.5°N)	25	5	30	40	0.6

### 3.2 仿真结果

在 Matlab 环境下编程实现了上述仿真计算过程。导弹和目标位置经纬度解算采用直角球面三角形计算公式进行。为简化计算, 假设导弹从发射平台发射后直接飞向导引头开机点, 不存在航路转弯点。

如图 3—6 所示, 给出了 20 000 次仿真中导引头搜捕概率影响因素分布情况。目标运动终点分布为环形, 目标位置服从以真实位置为中心半径 5 km 圆内均匀分布, 发射舰船指示位置服从以真实位置为中心半径 3 km 圆内均匀分布, 自控终点误差服从标准差为 3 km 的 2 维正态分布, 满足仿真条件设定。

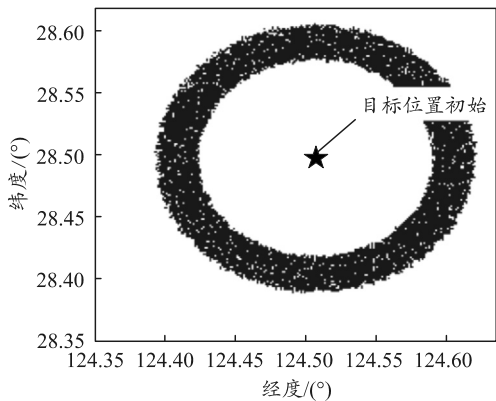


图 3 目标初始位置及运动终点

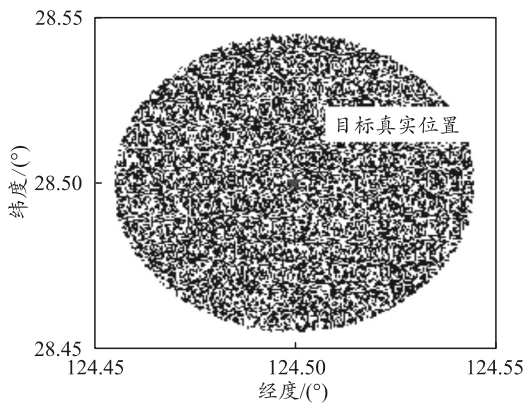


图 4 目标真实位置及目指位置分布

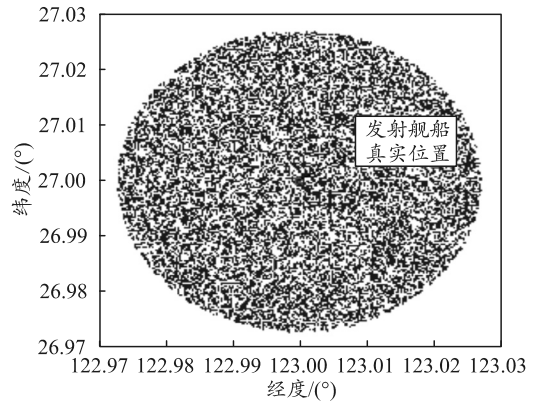


图 5 发射舰船真实位置及指示位置分布

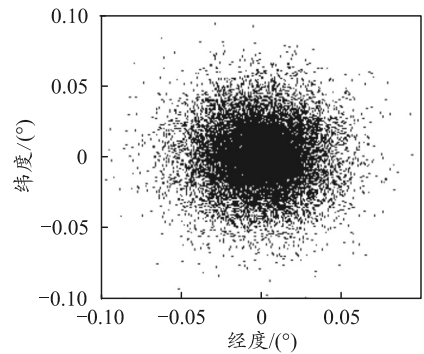


图 6 自控终点误差分布

如图 7 所示, 给出了单次仿真导弹飞行轨迹及导引头搜索目标情况。图中导弹发射舰船实际位置及导引头搜索扇面进行了局部放大。该次仿真中, 导引头开机时刻目标在搜索扇面内, 目标被捕获。

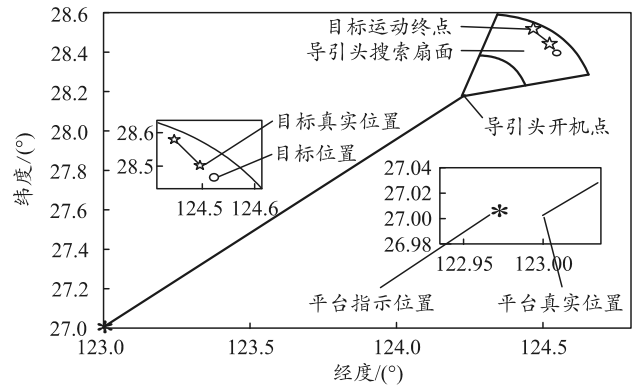


图 7 单次仿真导弹飞行轨迹及导引头搜索情况

导弹搜捕目标 20 000 次，得到命中概率随仿真次数的变化如图 8 所示。

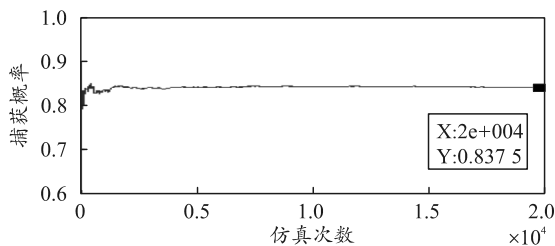
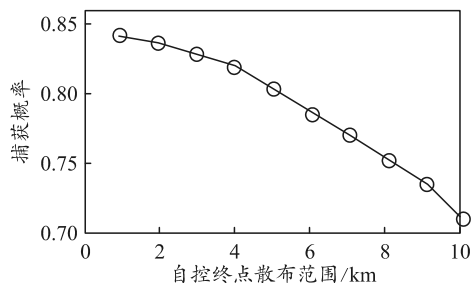


图 8 仿真捕获概率随仿真次数的收敛情况

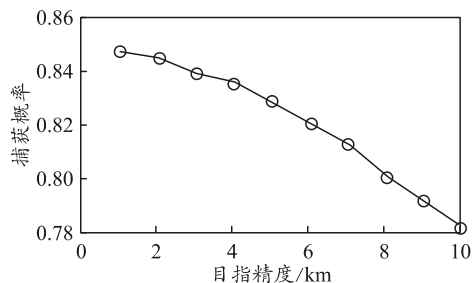
从上图可看出：导弹捕获目标概率随仿真次数增多趋于收敛，仿真 20 000 次后捕获概率为 0.837 5，即该条件下导引头对目标捕获概率为 0.837 5。

### 4 各因素对捕获概率的影响

改变自控终点散布、目标机动速度、目指精度



(a) 捕获概率随自控终点散布变化



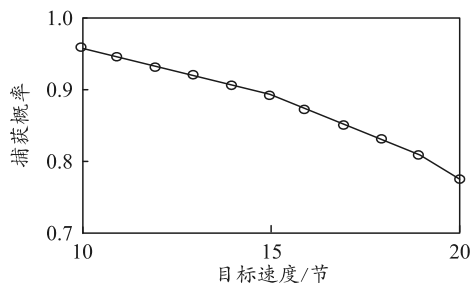
(c) 捕获概率随目指精度变化

误差及发射平台定位误差参数，其他仿真参数与上节相同，研究各因素对反舰导弹捕获目标概率的影响。上节仿真中，目标机动速度采用 15~20 节的随机速度，为研究各因素对捕获概率的影响，其他因素变化时目标航速设定为固定值 18 节。各因素的变化范围如表 2 所示。

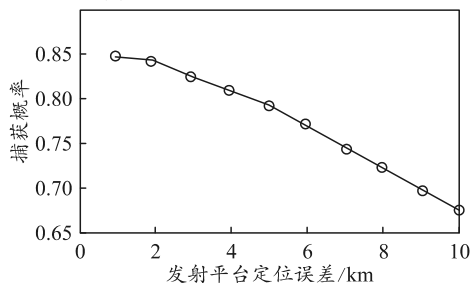
表 2 影响因素变化范围

序号	自控终点散布/km	目标速度/节	目指精度误差/km	发射平台定位误差/km
1	1~10	18	5	3
2	3	10~20	5	3
3	3	18	1~10	3
4	3	18	5	1~10

按照上表中序号每次变化一个因素进行仿真，得到各因素对导弹捕获目标概率的影响如图 9 所示。



(b) 捕获概率随目标速度变化



(d) 捕获概率随发射平台定位误差变化

图 9 命中概率随各因素变化情况

由上图可以看出：在自控终点散布、目指精度、发射平台定位误差变化均为 1~10 km 条件下，发射平台定位误差对命中精度的影响最大，命中概率由 0.847 6 下降到 0.673 4；目标速度由 10 节增到 20 节，命中概率由 0.959 1 下降至 0.777 2。

### 5 结束语

笔者考虑目标运动、发射平台位置误差、目指误差、自控终点散布误差影响，提出一种反舰导弹捕获目标概率的仿真计算方法。案例仿真分析结果表明：该方法简便有效，能为打击目标命中概率估算、作战效能评估和仿真推演等提供参考。笔者在建模时对捕获过程进行了适当简化，主要为导引头

搜索时间较短，未考虑导引头在开机后短时间未捕获目标持续搜索或二次搜索，同时未考虑目标对反舰导弹干扰的影响，下一步可以考虑对此进行研究。

### 参考文献：

- [1] 陈钰宁, 曾家有, 钟阳春. 采用现在点射击方式的反舰导弹捕获概率计算模型[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(2): 208-210.
- [2] 马新星, 丁广威. “人在回路”红外成像反舰导弹捕获概率模型[J]. 战术导弹技术, 2017(2): 47-51.
- [3] 张建强, 刘忠, 杨红梅. 基于搜索论的远程反舰导弹捕获概率建模方法[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(4): 188-194.