

# 基于伴随技术的反舰导弹突防概率动态计算方法<sup>\*</sup>

王志东, 顾文锦, 刘志成, 毕兰金

(海军航空工程学院, 山东烟台 264001)

**摘要:**为了实时解算可信度较高的反舰导弹突防概率,以反舰导弹突击舰艇硬防御系统为军事背景,采用伴随技术,在深入分析舰艇反导硬防御体系并对其建模的基础上,着重研究了反舰导弹和舰空导弹的攻防对抗过程,得到了反舰导弹突防概率的解析解。该方法不仅能保证突防概率解算的快速性,而且能体现出攻防态势、反舰导弹末端机动策略以及拦截方武器系统性能等因素对反舰导弹突防效能的影响。

**关键词:**反舰导弹;突防概率;伴随技术;动态计算

**中图分类号:**TJ761.14 **文献标志码:**A

## Dynamic Calculate Method of the Penetration Probability for Anti-Ship Missile Based on Adjoint Technique

WU Zhidong, GU Wenjin, LIU Zhicheng, BI Lanjin

(Navy Aeronautical and Astronautical University, Shandong Yantai 264001, China)

**Abstract:** In order to get the reliable and real-time penetration probability for anti-ship missile, the paper took the warfare of anti-missile to warship's solid defense system as the military background, adopting the adjoint technique, the model was built for anti-missile defense system of warship, and the paper put great emphasis on studying the attack-defense countermeasure course of anti-ship missile to ship-air missile, the analytic model of the penetration probability was ultimately gained for anti-ship missile. The arithmetic is not only capable of satisfying the needs of missile real time program but also can embody the influence of attack-defense situation, terminal maneuver tactic for anti-ship missile, performance of enemy warship's weapon system and so on to anti-ship missile's penetration efficiency.

**Keywords:** anti-ship missile; penetration probability; adjoint technique; dynamic calculate

### 0 引言

反舰导弹对水面舰艇的突防效能一般用突防概率来表征。目前,反舰导弹突防概率的计算方法主要有两种,第一种方法是基于给定的反舰导弹对舰空导弹、舰炮以及电子干扰的突防概率,进而计算反舰导弹对水面舰艇总的突防概率,该方法虽然计算量小但不能够反映出攻防态势和突防策略对反舰导弹突防效能的影响,也不能够量化分析攻防双方武器系统能对反舰导弹突防效果的影响,第二种方法是采用蒙特卡罗法,该方法虽然具有较高的计算精度和可信度,但实现起来工作量大、计算消耗时间多,同时对研究人员的知识面也要求较高。

文中采用伴随技术,通过定量分析攻防态势、反舰导弹机动策略、舰空弹过载能力以及目标舰艇武器系统反应时间等因素对拦截弹稳态脱靶量的影响,建立它

与稳态脱靶量之间的解析关系模型,进而得出反舰导弹对舰艇硬防御系统总的突防概率动态计算模型。

### 1 水面舰艇反导防御能力分析

水面舰艇对来袭反舰导弹的拦截作战区域可分为:导弹作战区、弹炮皆能作战区和舰炮作战区三部分<sup>[1]</sup>,如图1所示。

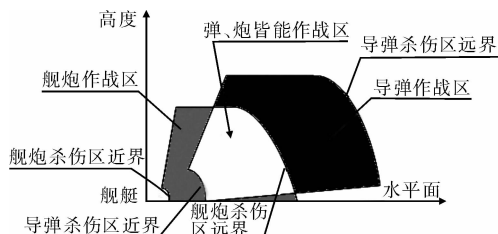


图1 水面舰艇反导作战区示意图

依据文献[2],假设反舰导弹航路捷径为 $P$ ,飞行高度为 $H$ ,飞行速度为 $V_m$ ,舰空导弹最大射程为 $R_y$ ,

<sup>\*</sup> 收稿日期:2010-06-24

基金项目:总装武器装备重点创新基金资助

作者简介:王志东(1980-),男,山西文水人,博士研究生,研究方向:海军兵种及武器系统仿真。

最小射程为  $R_j$ ，鉴于目前水面舰艇主要依赖舰空导弹拦截来袭反舰导弹，文中暂不考虑反舰炮对舰空导弹的拦截。反舰导弹按照进入目标舰艇反导杀伤区之前开始机动，突破杀伤区之后结束机动的原则，分别建立末端机动起止时间、机动周期和机动次数解算模型，则水面舰艇反导防御系统对来袭反舰导弹拦截区纵深为：

$$\Delta L = D_{S,\max} - D_{S,\min}$$

式中： $D_{S,\max}$ 、 $D_{S,\min}$  分别为反舰导弹飞行弹道与反导杀伤区远界和近界的交点离目标水面舰艇的水平距离。

杀伤区远界为：

$$S_y = \sqrt{D_{S,\max}^2 + H^2 + P^2}$$

杀伤区近界为：

$$S_j = \sqrt{D_{S,\min}^2 + H^2 + P^2}$$

### 1.1 机动开始时间

假设反舰导弹末制导雷达开机时刻为 0 时刻，则机动开始时间为：

$$t_b = \max[(R_{ZD} - D_{S,\max})/V_M, 0]$$

式中  $R_{ZD}$  为反舰导弹末制导雷达自导作用距离。

### 1.2 机动结束时间

$$t_e = (R_{ZD} - D_{S,\min})/V_M$$

当机动周期  $T_M$ 、机动次数  $N_S$  确定后，实际机动结束时间为：

$$t_e = t_b + N_S T_M$$

### 1.3 机动周期和机动次数

反舰导弹机动周期和机动次数不仅与机动方式和飞行速度有关，且受最大可用过载的制约。依据文献[3]可知，导弹以最大法向过载进行末端变轨机动能够取得最好的突防效果，此外，在实际作战使用和工程设计中，一般将导弹变轨机动次数设定为整数，以抵消变轨机动导致的跟踪目标误差。文中以反舰导弹蛇行机动为例，假设反舰导弹始终以最大法向过载进行末端变轨机动。

1) 反舰导弹蛇行机动时，最少机动次数为：

$$N_{S,\min} = \lceil \Delta L / A_{\max} \rceil$$

其中： $A_{\max}$  为导弹一个机动周期的纵向位移最大值，且  $A_{\max} = 4 \cdot V_M^2 / a_{MN,\max}$ ， $a_{MN,\max}$  为最大可用法向加速度； $\lceil \cdot \rceil$  为取整符号； $\Delta L$  为目标舰艇的反导杀伤区纵深。可见，导弹机动次数为  $N_{S,\min}$  时，机动幅度最大，当导弹仍然以最大过载机动，当机动次数增加时，即  $N_S > N_{S,\min}$  时，导弹的机动幅度将变小。

反舰导弹以最大法向过载蛇行机动过程中，弹道曲率半径  $R_M$  和机动角速度  $\omega_M$  的大小始终保持不变，分别为：

$$R_M = \frac{V_M^2}{a_{MN,\max}}, \omega_M = \frac{a_{MN,\max}}{V_M}$$

2) 导弹机动次数为  $N_S$  ( $N_S \geq N_{S,\min}$ ) 时的机动周期为：

$$T_M = 4 \cdot \arcsin\left(\frac{\Delta L}{4 \cdot N_S \cdot R_M}\right) / \omega_M$$

3) 导弹机动周期  $T_M$  时的机动幅值为：

$$L_M = R_M \cdot \left(1 - \sin\frac{T_M V_M}{R_M}\right)$$

## 2 突防-拦截问题模型

采用国际流行使用的导弹末制导简化模型<sup>[4-6]</sup>，如图 2 所示。

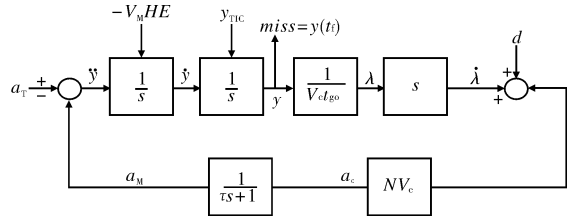


图 2 导弹末制导简化模型

图 2 中， $a_T$  是突防反舰导弹的机动加速度； $-V_M HE$  是导引头初始误差，其中  $V_M$  是拦截导弹的速度， $HE$  是前置角偏差； $y_{TIC}$  是目标位置初始误差； $V_c$  为接近速度； $t_{go}$  为剩余时间； $\lambda$ 、 $\dot{\lambda}$  分别为视线角、视线角速度； $d$  是视线率  $\dot{\lambda}$  测量过程中的常值陀螺漂移； $\frac{1}{\tau s + 1}$  是弹体动力学环节， $\tau$  是时间常数；拦截导弹采用比例导引律： $a_c = N V_c \dot{\lambda}$ ； $y$  为拦截导弹相当于突防反舰导弹的  $y$  方向位移； $a_c$ 、 $a_m$  分别为拦截导弹的指令加速度和实际的机动加速度。

依据伴随系统的转换规则，可以得到图 2 的突防-拦截系统伴随方框图，如图 3 所示。

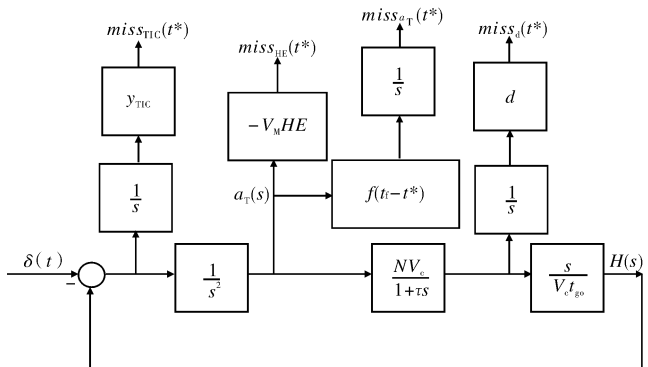


图 3 突防-拦截共轭方框图

依据文献[7],反舰导弹蛇行机动突防舰空弹拦截,产生的拦截弹总的脱靶量为:

$$miss_{总}(t^*) =$$

$$\sqrt{miss_{a_T}^2(t^*) + miss_{y_{TIC}}^2(t^*) + miss_{HE}^2(t^*) + miss_d^2(t^*)}$$

式中: $t^*$ 为舰空导弹拦截突防反舰导弹的伴随机动时间; $miss_{y_{TIC}}(t^*)$ 为反舰弹初始位置偏差 $y_{TIC}$ 引起的拦截导弹脱靶量; $miss_{HE}(t^*)$ 为舰空弹导引头初始误差 $-V_M HE$ 引起的拦截导弹脱靶量; $miss_{a_T}(t^*)$ 为反舰弹机动 $a_T$ 引起的拦截导弹脱靶量; $miss_d(t^*)$ 为舰空弹常值陀螺漂移 $d$ 引起的拦截导弹脱靶量。

### 3 伴随技术在攻防对抗过程中的应用

反舰弹对水面舰艇硬拦截的突防过程是三维空间的动态过程,如图 4 所示,而伴随技术理论主要用于处理二维空间的突防-拦截问题,为了研究方便,文中将该三维空间的动态拦截过程在水平面和垂直面内分别进行分析。

图 4 中, $M$ 为突防反舰弹; $I$ 为拦截舰空弹; $R$ 为反舰弹与舰空弹之间的距离; $M_{cz}$ 、 $M_{sp}$ 分别是反舰弹 $M$ 在垂直面 $XOY$ 和水平面 $XOZ$ 上的投影; $P$ 为反舰弹突防弹道的航路捷径; $H$ 为反舰弹飞行高度; $V_m$ 、 $V_i$ 分别是反舰弹和舰空弹的飞行速度。

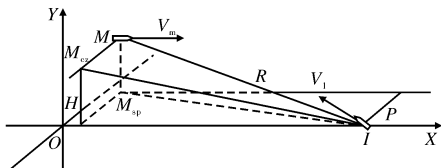


图 4 舰空弹拦截反舰导弹的三维空间示意图

图 4 中, $M$ 为突防反舰弹; $I$ 为拦截舰空弹; $R$ 为反舰弹与舰空弹之间的距离; $M_{cz}$ 、 $M_{sp}$ 分别是反舰弹 $M$ 在垂直面 $XOY$ 和水平面 $XOZ$ 上的投影; $P$ 为反舰弹突防弹道的航路捷径; $H$ 为反舰弹飞行高度; $V_m$ 、 $V_i$ 分别是反舰弹和舰空弹的飞行速度。

#### 3.1 反舰弹初始位置偏差引起的脱靶量

反舰弹和舰空弹突防-拦截过程在水平面的投影,如图 5 所示。

图 5 中, $R_{sp}$ 为反舰弹与舰空弹相遇机动初始时刻的水平距离,则 $P$ 对应反舰导弹初始位置偏差 $y_{TIC}$ ,显然 $R_{sp} = \sqrt{R^2 - H^2}$ ,因此航路捷径 $P$ 导致的脱靶量可表示为:

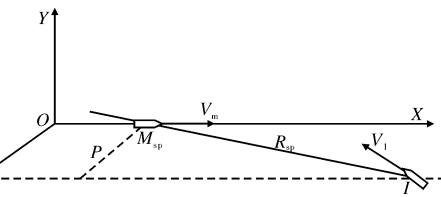


图 5 舰空导弹拦截反舰导弹的航向平面图

水平距离,则 $P$ 对应反舰导弹初始位置偏差 $y_{TIC}$ ,显然 $R_{sp} = \sqrt{R^2 - H^2}$ ,因此航路捷径 $P$ 导致的脱靶量可表示为:

$$miss_P(s) = P \cdot \tau^N s^{N-1} / (1 + \tau s)^N \quad (1)$$

反舰弹和舰空弹突防-拦截过程在垂直面的投

影,如图 6 所示。

图 6 中, $R_{cz}$ 为反舰弹与舰空弹相遇机动初始时刻的垂直平面投影距离,则 $H$ 对应反舰导弹初始位置偏差 $y_{TIC}$ ,显然 $R_{cz} = \sqrt{R^2 - P^2}$ ,因此飞行高度 $H$ 导致的脱靶量可表示为:

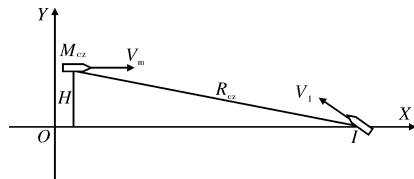


图 6 舰空导弹拦截反舰导弹的垂直平面图

$$miss_H(s) = H \cdot \tau^N s^{N-1} / (1 + \tau s)^N \quad (2)$$

对式(1)、式(2)分别进行反拉普拉斯变换,解算出 $miss_P(t^*)$ 、 $miss_H(t^*)$ ,依据以上分析可知初始位置偏差引起的脱靶量为:

$$miss_{y_{TIC}}(t^*) = \sqrt{miss_P^2(t^*) + miss_H^2(t^*)}$$

#### 3.2 反舰弹末端机动引起的脱靶量

依据文献[8],反舰导弹末端机动(蛇行、螺旋、摆式),在水平面和垂直面的弹道投影曲线均可表示为:

$$f(t) = L \cdot \sin(\omega t + \theta)$$

式中: $\omega$ 为反舰导弹机动的频率; $L$ 为反舰导弹机动的幅值; $\theta$ 为反舰导弹机动的初始相位。

考虑到反舰导弹通常是根据预设定的机动起止时间来启动和结束末端机动,而末端机动的持续时间远大于舰空导弹的制导系统时间常数 $\tau$ ,因此认为决定反舰弹突防效果的因素主要是稳态脱靶量,文中不考虑暂态脱靶量对突防-拦截效果的影响。

对于图 2 所示的线性时变系统,输入频率为 $\omega$ 的正弦信号,系统输出也是一个频率为 $\omega$ 、有着不同幅值和相位的正弦信号。

##### 1) 水平面机动引起的稳态脱靶量

$$miss_{a_{sp}}(t^*) = ka_{MN} \sin(\omega t^* + \theta + \varphi) \quad (3)$$

##### 2) 垂直面机动引起的稳态脱靶量

$$miss_{a_{cz}}(t^*) = ka'_{MN} \sin(\omega t^* + \theta' + \varphi) \quad (4)$$

式(3)、式(4)中, $a_{MN}$ 和 $a'_{MN}$ 分别是反舰导弹水平面和垂直面机动的最大法向加速度, $\theta$ 和 $\theta'$ 分别为反舰导弹水平面和垂直面机动的初始相位角, $k$ 和 $\varphi$ 分别为图 3 中 $a_T(s)$ 的幅频特性和相频特性。

#### 3.3 稳态脱靶量解算流程

依据反舰导弹信息、拦截方水面舰艇武器系统信息以及舰空导弹信息,按照图 7 所示的稳态脱靶量解算流程,可得出给定态势下的拦截弹(即舰空弹)稳态脱靶量的解算模型,考虑到拦截弹的发射时机具有一

定的随机性,因此反舰弹和拦截弹的伴随机动时间  $t^*$  存在最大值  $t_{\max}^*$  和最小值  $t_{\min}^*$ ,一般认为  $t^*$  服从正态分布或均匀分布。

1)  $t^*$  服从均匀分布

利用 C 语言函数库中现有的 rand() 函数获得 [0, 1] 均匀随机数  $\xi$ ,该方法所产生的伪随机数可以通过分布均匀性和独立性检验。如下式:

$$\begin{cases} \xi = \text{rand}() / \text{RAND\_MAX} \\ \text{RAND\_MAX} = 0x7FFF \end{cases}$$

为确保随机产生伪随机数,使用 srand((unsigned)

time(NULL)) 获取系统时间来初始化伪随机数的种子。因此:

$$t^* = t_{\min}^* + \xi(t_{\max}^* - t_{\min}^*)$$

2)  $t^*$  服从正态分布

依据文献[9],产生标准正态随机数  $\eta$  为:

$$\eta = \sum_{k=1}^{12} \xi_k - 6$$

其中,  $\xi_k$  为 [0, 1] 均匀随机数。对于服从数学期望为  $\mu$ , 均方差为  $\sigma$ , 即服从分布  $N[\mu, \sigma^2]$  的正态随机数  $\delta$  为  $\delta = \mu + \eta\sigma$ , 因此  $t^* = 0.5(t_{\min}^* + t_{\max}^*) + \eta\sigma$ 。

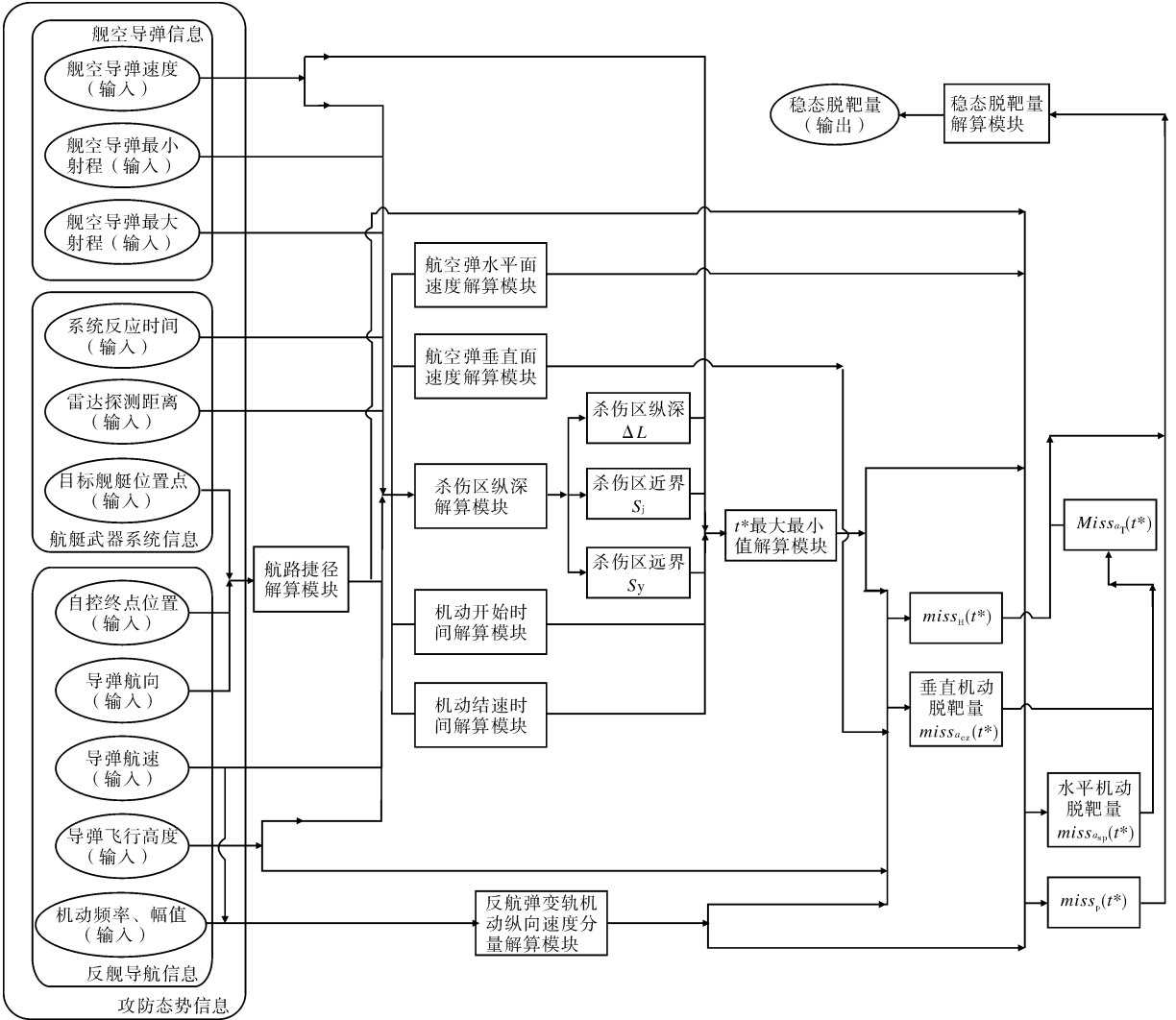


图 7 稳态脱靶量解算流程

## 4 突防概率动态计算

### 4.1 仿真次数

依据文献[10],达到给定精度值  $\omega_p$  所需的模拟计算次数为:

$$N = \frac{t_\alpha^2 \cdot p(1-p)}{\omega_p^2}$$

式中:  $t_\alpha$  为服从  $t$  分布的置信概率;  $p$  为事件发生的概率(即反舰弹突防概率)。

### 4.2 突防概率解算过程

给定攻防态势下的反舰导弹突防概率计算过程,如图 8 所示。

解算步骤分三步进行:

- 1) 依据攻防态势和预设定的反舰导弹末端机动幅值和频率,计算反舰弹和拦截舰空弹的伴随机动时间  $t^*$  的最大值  $t_{\max}^*$  和最小值  $t_{\min}^*$ ;
- 2) 在闭区间  $[t_{\min}^*, t_{\max}^*]$  上,按照正态分布(或均匀

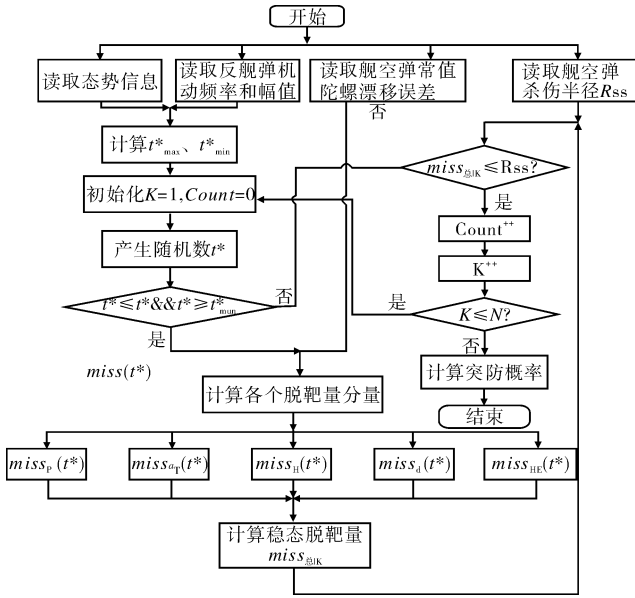


图 8 突防概率动态计算过程

分布)产生  $N$  个  $t^*$  随机数,计算每个  $t^*$  对应的拦截弹稳态脱靶量,统计总的拦截成功次数  $Count$ ,则拦截成功概率为  $P_{\text{拦}} = Count/N$ ;

3) 反舰弹突防概率解算模型为:

$$P_{\text{突}} = 1 - Count/N$$

### 5 仿真分析

以反舰弹采用蛇行机动策略突防目标舰艇舰空弹拦截为例,反舰弹和舰空弹的仿真基本数据如表 1 和表 2 所示。

假设反舰弹突防开始距离为 60km,则舰空弹对来袭反舰导弹的杀伤区纵深为 32.2km,反舰导弹开始机动时间为 0s,结束机动时间为 35s,机动时间间隔为 35s。

反舰导弹蛇行机动突防时,机动周期为整数,机动次数 10 以内的可能参数组合如表 3 所示。

表 1 反舰弹基本数据

指标名称	取值
飞行速度 $V_M/(m/s)$	680.0
飞行高度 $H/m$	25.0
航路捷径 $P/m$	60.0
最大可用法向过载 $a_{MN,max}/g$	10.0
末制雷达作用距离 $R_{ZD}/km$	25.0

表 2 舰空弹基本数据

指标名称	取值
飞行速度 $V_M/(m/s)$	1020.0
最大射程 $R_y/km$	120.0
最小射程 $R_j/km$	1.0
武器系统反应时间 $T_{fy}/s$	5.0
制导系统时间参数 $T/s$	0.85
有效导航比 $N$	3
常值陀螺漂移 $d/(rad/s)$	0.05
前置角偏差 $HE/(^\circ)$	-20.0
末制雷达作用距离 $R_{ZD}/km$	25.0
杀伤半径 $R_{SS}/m$	15.0

表 3 反舰导弹蛇行机动参数组合

指标名称	取值					
机动次数 $N_s$	2	3	4	5	7	8
机动周期 $T_M/s$	19	12	8	7	5	4
机动频率 $\omega/(rad/s)$	0.33	0.52	0.79	0.90	1.26	1.57
周期纵向位移 $A/km$	11.93	7.91	5.36	4.71	3.38	2.71

取统计模拟计算误差不超过 0.01,设置信概率为 95.4%,根据  $t$  分布表可查得  $t_\alpha$  取 2,反舰导弹突防概率为 0.5 时,所需的最少模拟计算次数为 10000。

在  $[0,35]$  之间按照均匀分布取  $t^*$  随机数 10000 次,反舰弹蛇行机动 2 次时,突防概率为 48.7%,随着机动次数的增加,突防概率单调递减。

### 6 结束语

文中在对攻防态势建模的基础上,利用伴随技术,得到了确定性误差条件下反舰导弹末端机动突防的稳态脱靶量解析解,并在此基础上分析了舰空弹发射时机服从均匀分布和正态分布时,反舰弹突防概率动态计算方法。需要说明的是,这里得出的脱靶量是基于假设拦截弹有无限的法向过载能力,但这不影响文中对反舰导弹机动突防效果的评估。

#### 参考文献:

- [1] 马春茂. 弹炮结合防空武器系统总体设计[M]. 北京:国防工业出版社,2008:199-206.
- [2] 顾文锦,武志东,毕兰金. 反舰导弹末端机动弹道控制模型及其作战使用方式[C]//2009年中国飞行力学年会论文集,北京理工大学宇航学院,2009:26-31.
- [3] 顾文锦,严建钢. 飞航导弹过载控制与变轨[M]. 山东烟台:海军航空工程学院,2005:206-227.
- [4] Zarchan P. Proportional navigation and weaving targets[J]. Journal of Guidance, and Dynamics, 1995,18(3):969-974.
- [5] Ohlmeyer E J. Root-mean-square miss distance of proportional navigation missile against sinusoidal target[J]. Journal of Guidance, and Dynamics, 1996,19(3):563-568.
- [6] 姜玉宪,崔静. 导弹摆动式突防策略的有效性[J]. 北京航空航天大学学报, 2002,28(2):133-136.
- [7] 顾文锦,毕兰金,武志东. 基于伴随技术的超音速反舰导弹末端机动突防的脱靶量分析[J]. 海军航空工程学院, 2009,24(4):400-404.
- [8] 顾文锦,赵红超. 导弹末端机动的一体化控制模型[J]. 宇航学报,2004,25(6):677-680.
- [9] 康崇禄. 国防系统分析方法[M]. 北京:国防工业出版社,2003:370-371.
- [10] 陆铭华. 舰艇作战模拟理论与方法[M]. 北京:海军出版社,2000:164-166.