

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.11.002

反舰作战中的反辐射导弹运用优化

王肖飞¹, 严建钢², 赵杰¹, 袁有宏¹

(1. 海军航空工程学院研究生大队, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院指挥系, 山东 烟台 264001)

摘要: 为研究反辐射导弹在反舰作战中与常规反舰导弹的协同运用效果, 建立了反舰导弹的突防概率模型, 在反辐射导弹对舰艇防空雷达的毁伤概率研究基础上, 建立反辐射导弹对搜索雷达、制导雷达和炮瞄雷达的毁伤模型, 仿真在不同情况下反辐射导弹的毁伤效果, 并在导弹总数一定的情况下, 对反辐射导弹和常规反舰导弹协同反舰的优化使用模型进行仿真分析。结果表明: 该方法能降低舰艇对导弹的发现和抗击能力, 提高常规反舰导弹的突防概率和增强其反舰作战能力。

关键词: 反辐射导弹; 协同反舰; 优化模型**中图分类号:** TJ762.4 **文献标志码:** A

Optimization Use of ARM in Anti-Ship Operation

Wang Xiaofei¹, Yan Jiangan², Zhao Jie¹, Yuan Youhong¹

(1. Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Dept. of Command, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: To research the effect of coordinated anti-ship operation of ARM and conventional missile, established the model of missile penetration probability. The damage models of search radar, guidance radar and gun pointing radar with ARM are created based on the research on the damage probability of ARM to anti-air radar. The damage effects of ARM in different situation are simulated. And in the case of certain total of the missiles, the optimized model used in coordinated anti-ship operation of ARM and conventional missile is simulated and analyzed. The simulate results demonstrated that the optimization way can reduce the capability of detection and strike, and increase the penetration probability and the capability of anti-ship.

Keywords: ARM; coordinated anti-ship operation; optimization model

0 引言

未来战争是系统与系统、体系与体系之间的对抗, 信息战和电子战将贯穿战争的始终。在这种情况下, 单机、单枚导弹已经不能充分发挥其应有的作用^[1-2]。反辐射导弹(anti-radar missile, ARM)是反舰导弹中的一种。作为现代电子战中硬杀伤武器, ARM是采用被动雷达导引头, 利用接收辐射源的电磁波来发现、跟踪并摧毁辐射源的导弹^[3]。舰艇的舰载雷达系统是一个有机的整体, 不管 ARM 毁伤哪种类型的雷达, 都可能对舰艇的防空反导作战能力造成巨大的影响。因此, 笔者提出将 ARM 和常规反舰导弹协同使用, 从而降低舰艇对导弹的发现和抗击能力, 提高常规反舰导弹的突防概率, 增强其反舰作战能力。

1 反舰导弹突防概率

反舰导弹进入目标的时间间隔基本服从均匀分布, 攻击强度用反舰导弹进入目标的时间间隔 δt_j ($j=1,2,3,\dots$)来描述^[4]。

对于主动雷达寻的反舰导弹, 不管采用哪种射

击方式, 其能否命中目标主要取决于 4 个因素: 1) 反舰导弹在飞向目标的过程中工作正常(P_r); 2) 反舰导弹成功捕捉到目标(P_a); 3) 突破目标的软硬武器的拦截(P_i); 4) 导弹在末制导雷达的导引下命中目标(P_g)。这 4 个概率事件必须都“真”, 反舰导弹才能命中目标。故反舰导弹命中目标的概率 P_h 为^[5]:

$$P_h = P_r \cdot P_a \cdot P_i \cdot P_g \quad (1)$$

由于 P_r 是反舰导弹的固有性能指标, 在给定的使用条件下基本没有变化; 对于大中型舰艇, P_g 的变化也不大^[5-6]; 而 P_a 取决于目标, 同时, ARM 对舰艇防空反导能力的影响仅限于雷达的搜索和制导能力, 且反辐射导弹的突防过程与常规反舰导弹的突防过程基本相同, 因此在这里只把反舰导弹的突防作为主要研究对象。

反舰导弹突防概率可表示为:

$$P_i = 1 - (1 - P_f) \cdot (1 - P_l) \cdot (1 - P_p) \quad (2)$$

其中: P_f 是雷达发现导弹的概率; P_l 是舰空导弹拦截导弹的概率; P_p 是舰炮拦截导弹的概率。

收稿日期: 2011-07-04; 修回日期: 2011-07-22

作者简介: 王肖飞(1979—), 男, 山东人, 博士研究生, 从事海军兵种作战数理战术分析研究。

1.1 雷达对反舰导弹的发现概率模型

雷达发现反舰导弹的概率^[7]:

$$P_R(R_j) = \exp\left(\frac{(R_j/R_0)^4 \ln P_{R_0} \ln P_{fa}}{\ln P_{fa} - \ln P_{R_0} + (R_j/R_0)^4 \ln P_{R_0}}\right) \quad (3)$$

式中: R_j 是第 $j(j=1,2,\dots)$ 枚反舰导弹与目标间的距离; P_{fa} 是目标雷达的虚警概率; P_{R_0} 是目标雷达在已知距离 R_0 上的检测概率。

反舰导弹在距离区间 $[r_{m1}, r_{m2}]$ 被目标雷达检测到的概率为:

$$P_f(R_j) = \int_{r_{m1}}^{r_{m2}} \frac{P_R(r)}{TV_d} dr \quad (4)$$

只要 $[r_{m1}, r_{m2}]$ 足够小, 即可得到每枚反舰导弹在每个距离区间被发现的概率。如果

$$P_f \geq \xi_1 \quad (5)$$

式中: ξ_1 为 $(0,1)$ 均匀分布随机数。则第 j 枚反舰导弹在距离 R_j 上被发现, 并根据 R_j 的大小确定它威胁排序。

1.2 舰空导弹拦截反舰导弹模型

1.2.1 舰空导弹拦截概率

舰空导弹每次拦截成功的概率为:

$$P_l = 1 - (1 - p_l)^k \quad (6)$$

式中: p_l 为每枚舰空导弹成功拦截反舰导弹的概率。

若

$$P_l \geq \xi_2 \quad (7)$$

式中: ξ_2 为 $(0,1)$ 上均匀分布随机数。则舰空导弹拦截成功, 从而判断是否转火。

对第 1 枚进入目标的反舰导弹, 且发射装置空闲, 那么, 第 2 次发射舰空导弹拦截同一反舰导弹时, 反舰导弹与目标的距离为:

$$R_{1,2} = R_{\max} - V_d \left[\frac{R_{\max} - V_d(k-1)t_4}{(V_d + V_f)} + (k-1)t_4 + t_3 + t_1 \right] \quad (8)$$

$$(R_1 > R_{\max} + V_d t_1, j=1)$$

$$R_{1,2} = R_j - V_d \left[\frac{R_j - V_m(k-1)t_4}{(V_d + V_f)} + (k-1)t_4 + t_3 + t_1 \right] \quad (9)$$

$$(R_1 \leq R_{\max} + V_f t_1, j=1)$$

式中: V_d 为反舰导弹的飞行速度; V_f 为舰空导弹的平均飞行速度; R_{\max} 、 R_{\min} 为舰空导弹武器系统

的远界、近界; t_1 为反应时间; t_2 为转火时间; t_3 为拦截效果评估时间; t_4 为舰空导弹武器系统的最小发射间隔。

若发射装置忙, t 时刻发射装置空闲, t 从第 1 次拦截开始计时, 那么, 第 2 次发射舰空导弹拦截该反舰导弹时, 反舰导弹与目标的距离为:

$$R_{j,2} = R_{\max} - V_d(t + t_4) \quad (R_1 > R_{\max} + V_d t_1, j=1) \quad (10)$$

$$R_{j,2} = R_j - V_d(t + t_4) \quad (R_1 \leq R_{\max} + V_d t_1, j=1) \quad (11)$$

第 $i-1$ 次拦截失败, 实施第 i 次拦截, 若发射装置空闲, 发射舰空导弹拦截同一反舰导弹时, 反舰导弹与目标的距离为:

$$R_{1,i} = R_{1,i-1} - V_d((R_{1,i-1} - V_d(k-1)t_4)/(V_d + V_f) + (k-1)t_4 + t_3) \quad (12)$$

1.2.2 舰空导弹转火模型

舰空导弹武器系统一般具有同时拦截多目标的能力, 因此, 在对第 1 枚反舰导弹拦截的同时, 也可拦截后续进入的反舰导弹。设第 i 次拦截第 1 枚进入的反舰导弹成功, 且第 j 枚反舰导弹满足: 1) 可靠飞行且捕捉到目标; 2) 在舰空导弹作用范围内; 3) 被目标发现; 4) 没有被分配舰空导弹; 5) 比它近的反舰导弹均已被分配了拦截资源。

则转火到第 j 枚反舰导弹, 即将分配给第 1 枚反舰导弹的所有资源均分配给第 j 枚反舰导弹。

此时, 第 j 枚反舰导弹与目标的距离为:

$$R_{j,1} = R_{1,i+1} + V_d \sum_{n=1}^{i-1} \delta t_n \quad (13)$$

式中: δt_n 为第 $n-1$ 枚和第 n 枚来袭导弹的时间间隔; $R_{1,i+1}$ 为第 1 枚反舰导弹被摧毁时与目标的距离, 其计算方法与 $R_{1,2}$ 、 $R_{1,i}$ 相同。

若发射装置空闲, 拦截过程同第 1 枚反舰导弹。

若发射装置忙, 那么直到发射装置空闲时才实施拦截。因此, 当第 j 枚反舰导弹被拦截时, 目标和反舰导弹的距离为:

$$R_{j,1} = R_{1,2} + V_d \left[\sum_{n=1}^{j-1} \delta t_n + \frac{R_{1,2}}{V_f} - t_2 - t \right] \quad (14)$$

1.3 舰炮拦截导弹模型

按口径划分舰炮分为大中小口径舰炮, 通常将 127 mm 以上的舰炮划分为大口径舰炮; 口径在 57~127 mm 的舰炮列为中口径舰炮; 口径在 20~40 mm 的舰炮划分为小口径舰炮。防空用的舰炮通

常使用中小口径的舰炮。反导用的舰炮特点为：炮的射速高；射角范围大；为了拦截不同方向的来袭目标，达到全空域防御的目的，反应时间快；命中精度较高等。

1.3.1 反舰导弹对中口径舰炮的突防概率

相较小口径舰炮，中口径舰炮的防空区域较远。假定其最大开火距离为 R_{jmax} ，最小射程为 R_{jmin} ，则反舰导弹通过其防御区间时可发射的散弹数为：

$$N_z = \frac{n_z}{60} \cdot \frac{R_{jmax} - R_{jmin}}{V_d} \quad (15)$$

式中： n_z 为中型口径舰炮的射速。

反舰导弹对中口径舰炮的突防概率为：

$$P_{zj} = \left(1 - \frac{p_z}{W_1}\right)^{N_z-1} \quad (16)$$

式中： p_z 为中口径舰炮对反舰导弹的击毁概率； W_1 为必须毁伤数。

1.3.2 反舰导弹对小口径舰炮的突防概率

密集阵的射击过程为^[8]：搜索雷达探测到目标后，把目标交给跟踪雷达，即由搜索状态转入跟踪状态；当火控系统计算目标对舰艇构成威胁时，立刻下令至转管炮进行开火，在舰艇周围形成火力网罩，构成严密保护层并摧毁目标。对进入其最大射程的目标，密集阵可发射的最大散弹数为：

$$N_x = \frac{n_x}{60} \cdot \frac{R_{mmax} - R_{mmin}}{V_d} \quad (17)$$

式中： n_x 为小口径舰炮的射速； R_{mmax} 、 R_{mmin} 为射击最大、最小区间。

反舰导弹的突防概率为：

$$P_{xj} = 1 - \frac{p_x}{W_2} \left(1 - \frac{p_x}{W_2}\right)^{N_x-1} \quad (18)$$

式中： p_x 为密集阵对导弹的击毁概率； W_2 为平均命中数。则反舰导弹对舰炮的突防概率为：

$$P_p = P_{zj} \cdot P_{xj} \quad (19)$$

2 ARM 对雷达的作战能力分析

2.1 舰载雷达部分对舰艇作战能力的影响

2.1.1 对舰艇最大探测距离的影响

当警戒、对空搜索雷达受到毁伤时，将影响舰艇对空中目标的探测能力。考虑到部分制导雷达也具有目标搜索能力，如 SPG-60 为导弹制导雷达，但也具有对空搜索功能。因此，若舰上具有对空搜

索能力的雷达为 n 部，只有这些雷达全部被毁伤时，才认为舰艇完全失去目标探测能力^[9-10]。

2.1.2 对舰艇抗击能力的影响

制导雷达：制导雷达数决定了舰空导弹的同时抗击目标数。制导雷达完全被摧毁时，舰空导弹将无法对目标进行拦截。

炮瞄雷达：当炮瞄雷达完全被摧毁时，舰炮将无法对目标进行拦截。

2.2 毁伤概率研究

不妨设舰艇舰载雷达共有 M 部。其中：搜索雷达数为 S ，编号分别为 (S_1, S_2, \dots, S_S) ，制导雷达数为 Z ，编号分别为 (Z_1, Z_2, \dots, Z_Z) ，炮瞄雷达数为 P ，编号分别为 (P_1, P_2, \dots, P_P) 。

ARM 捕捉舰载雷达 i 时，对舰载雷达 j 的毁伤概率记为 P_{ij} 。则每枚 ARM 对每部搜索雷达、制导雷达和炮瞄雷达的毁伤概率分别为：

$$\begin{cases} P_{Sj} = \sum_{i=1}^M P_{iS_j} \\ P_{Zj} = \sum_{i=1}^M P_{iZ_j} \\ P_{Pj} = \sum_{i=1}^M P_{iP_j} \end{cases} \quad (20)$$

先讨论第 1 枚突防的 ARM 对舰载雷达的毁伤情况。若第 1 枚 ARM 对搜索雷达的毁伤数为 k ，考虑到每部舰载雷达的差异（位置、类型等），可知共有 C_M^k 种不同的取法。将每次取出的 k 部搜索雷达编号记为 (k_1, k_2, \dots, k_k) 。

因此取出的 k 部搜索雷达都被毁伤的概率为：

$$P_{k1} = \prod_{i=1}^k P_{Sk_i} \quad (21)$$

由于共有 C_M^k 种取法，则对 S 部搜索雷达中至少毁伤 k 部的概率为：

$$P_{k2} = C_M^k \cdot \prod_{i=1}^k P_{Sk_i} \quad (22)$$

可知第 1 枚突防的 ARM 毁伤 k 部舰载搜索雷达的毁伤概率为：

$$P_{Sk} = C_M^k \cdot \prod_{i=1}^k P_{Sk_i} \cdot \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k_1, k_2, \dots, k_k}}^S (1 - P_{Si}) \quad (23)$$

类似的，第 1 枚突防的 ARM 毁伤 k 部制导雷达的概率为

$$P_{Zk} = C_M^k \cdot \prod_{i=1}^k P_{Zk_i} \cdot \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k_1, k_2, \dots, k_k}}^Z (1 - P_{Zi}) \quad (24)$$

第 1 枚突防的 ARM 毁伤 k 部炮瞄雷达的概率为

$$P_{Pk} = C_M^k \cdot \prod_{i=1}^k P_{Pk_i} \cdot \prod_{\substack{i=1, \\ i \neq k_1, k_2, \dots, k_k}}^P (1 - P_{Pi}) \quad (25)$$

式中: (k_1, k_2, \dots, k_k) 为每次取出 k 部 (搜索/制导/炮瞄) 雷达的相应编号。

将第 1 枚 ARM 毁伤 k_1 部搜索雷达的概率记为 $P_{S_1 k_1}$ 。在剩余的 $(S - k_1)$ 部搜索雷达中取出 k_2 部, 在搜索雷达中的编号为 $(k_{21}, k_{22}, \dots, k_{2k_2})$ 。则下一枚 ARM 对剩余的 $(S - k_1)$ 部搜索雷达毁伤 k_2 部的概率为:

$$P_{S_2 k_2} = P_{S_1 k_1} \cdot C_{(S-k_1)}^{k_2} \cdot \prod_{i=1}^{k_2} P_{S k_i} \cdot \prod_{\substack{i=k_1, \\ i \neq k_{21}, k_{22}, \dots, k_{2k_2}}}^S (1 - P_{Si}) \quad (26)$$

依此类推。若第 i 枚 ARM 对搜索雷达的毁伤数记为 k_i , 在搜索雷达中的编号为 $(k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{ik_i})$, 毁伤概率记为 $P_{S_i k_i}$ 。则第 I 枚 ARM 对剩余搜索雷达的毁伤数为 k_i 的概率:

$$P_{S_I k_I} = \prod_{j=1}^{I-1} P_{S_j k_j} \cdot C_{(S-h)}^{k_I} \cdot \prod_{i=1}^{k_I} P_{S k_i} \cdot \prod_{\substack{i=k_1, \\ A}}^S (1 - P_{Si}) \quad (27)$$

式中: h 为第 I 枚 ARM 攻击时的剩余 ARM 数,

$$h = S - \sum_{i=1}^{I-1} k_i \quad (28)$$

A 为约束条件:

$$A = \left\{ \begin{array}{l} (i \neq k_1, k_2, \dots, k_k), (i \neq k_{21}, k_{22}, \dots, k_{2k_2}), \dots, \\ (i \neq k_{11}, k_{12}, \dots, k_{1k_1}) \end{array} \right\} \quad (29)$$

由此可知在 ARM 对舰载雷达攻击 I 次后, 对舰载搜索雷达的毁伤期望值:

$$N_S = \sum_{i=0}^I \sum_{j=1}^M P_{S_j k_j} \quad (30)$$

同样的, ARM 对舰载雷达攻击 I 次后, 舰载制导雷达的毁伤期望值为:

$$N_Z = \sum_{i=0}^I \sum_{j=1}^Z P_{Z_j k_j} \quad (31)$$

舰载炮瞄雷达的毁伤期望值为:

$$N_P = \sum_{i=0}^I \sum_{j=1}^P P_{Pk_j} \quad (32)$$

3 协同反舰研究

3.1 协同反舰优化模型

优化模型的方法为: 先利用 ARM 突击打击舰

艇的雷达系统, 再用常规反舰导弹对目标进行打击。

若 ARM 的发射数为 m , 常规反舰导弹的发射数为 n 。考虑到武器发射平台的载弹数有限, 设定约束条件:

$$m + n \leq D \quad (33)$$

式中: D 为武器发射平台的最大载弹数。

m 枚 ARM 入射时, 对舰艇的突防概率 P_{im} 。则突防 ARM 的期望值为:

$$m' = m P_{im} \quad (34)$$

不妨设 n 枚常规反舰导弹在 s 部搜索雷达、 z 部制导雷达、 p 部炮瞄雷达下的突防概率为 $P_{ij}(s, z, p)$, 每枚常规反舰导弹对舰艇的毁伤概率为 P_h , 则最终毁伤舰艇的概率为:

$$P = P_h^{n P_{ij}(s, z, p)} \quad (35)$$

则模型可简化为: 通过优化 m 、 n 的值, 以达到对目标最大毁伤, 以及使得耗弹量最小。

$$\begin{cases} \max(P_h^{n P_{ij}(s, z, p)}) \\ \min(m + n) \end{cases} \quad (36)$$

3.2 仿真分析

仿真条件: 以某型 ARM 和常规反舰导弹为仿真对象, 以某型驱逐舰为作战目标, 其搭载的对空搜索雷达 SPS-48E, 防空制导雷达为 SPG-60, 同时为密集阵提供火控信息, 舰炮火控雷达为 SPQ-9A。相关性能数据参数见文献[11]和[12]。

仿真过程:

Step1: ARM 单一弹型进行突防。通过蒙特卡罗方法进行弹道仿真, 对突防 ARM 数量为 1~5 的情况下统计需要发射的 ARM 数量。

Step2: 在 Step1 仿真结果的基础上, 结合 2.2 建立的 ARM 对防空雷达的毁伤概率模型, 分别就突防 ARM 数量为 1~5 枚的情况下, 对各型防空雷达的毁伤情况进行仿真, 并进行概率统计。

Step3: 对优化使用模型进行仿真。在 ARM 与常规反舰导弹总数为 10 枚的情况下, 对 10 种不同的组合进行弹道仿真, 结合 Step2 的仿真结果, 对联合常规反舰导弹协同使用进行统计, 获得不同情况下突防 ARM 的数量和常规反舰导弹的数量。

仿真结果如下:

- 1) 计算的 ARM 突防数和发射数关系如图 1。
- 2) ARM 突防数量与毁伤雷达概率关系如图 2~4。

3) 导弹总数一定情况下, ARM 和常规反舰导弹协同反舰效果如图 5。

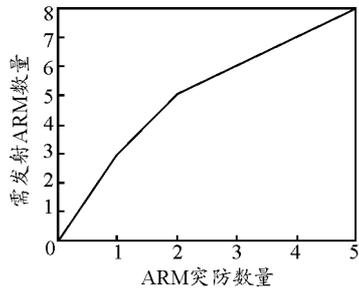


图 1 ARM 突防数量与发射数量关系

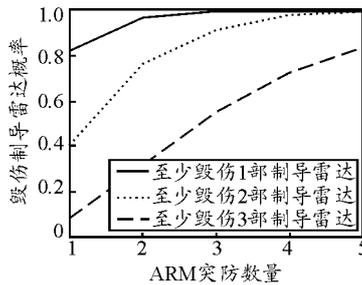


图 2 ARM 突防数量与毁伤制导雷达概率关系

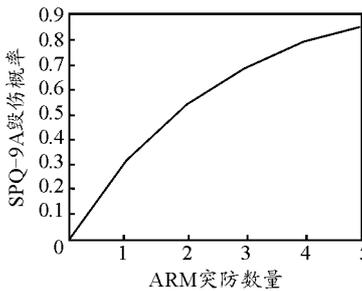


图 3 ARM 突防数量与毁伤 SPQ-9A 概率关系

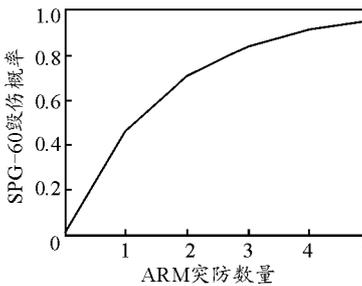


图 4 ARM 突防数量与毁伤 SPG-60 概率关系

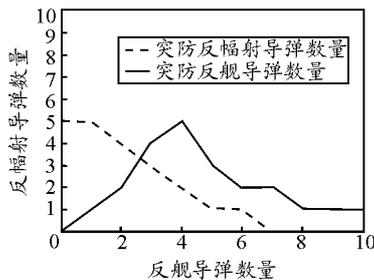


图 5 ARM 突防数量与常规反舰导弹突防数量关系

从仿真过程中可以看出:

- 1) 制导雷达数量决定了舰艇的可同时拦截目标数。当制导雷达都被摧毁时, 舰空导弹将无法工作。
- 2) 火控雷达 SPQ-9A 被摧毁时中型口径舰炮将无法进行工作。
- 3) SPG-60 为密集阵系统提供目标指示, 当 SPG-60 被摧毁时密集阵将无法进行工作。

从仿真结果可以看出:

- 1) 当发射 6 枚反辐射导弹, 4 枚常规反舰导弹时, 突防的常规导弹数量为最多。
- 2) 当发射的导弹全部为常规反舰导弹时, 其突防的数量只有 2 枚。

4 结论

从研究结果可以看出: 在反舰作战中, 将 ARM 导弹与常规反舰导弹协同使用, 可以提高反舰作战效能; 由于 ARM 导弹造价比常规反舰导弹要低, 且重量轻, 因此, 在导弹总数一定的情况下, 将 ARM 导弹和常规反舰导弹的数量合理优化, 可以在反舰作战效能获得很大提高的同时, 减轻载机的载荷, 提高作战效益。

参考文献:

- [1] 林涛, 刘永才, 关成启, 等. 飞航导弹协同作战使用方法探讨[J]. 战术导弹技术, 2005(2): 8-12.
- [2] 肖增博, 雷虎民, 夏训辉. 多导弹协同作战关键技术与展望[J]. 飞航导弹, 2008(6): 24-26.
- [3] 朱振旺. 反辐射导弹的发展和作战方式[J]. 飞航导弹, 1994(4): 2-4.
- [4] 唐瑞栋, 王光辉, 严建钢. 反舰导弹入射流的数字特征研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2004, 18(2): 31-35.
- [5] 纪永清, 董文洪, 唐金国. 海军兵种武器系统作战效能评估[M]. 北京: 海潮出版社, 2000: 33-37.
- [6] 王光辉, 严建钢, 郭荔生, 等. 目标位置误差存在条件下反舰导弹命中模型研究[J]. 火箭与制导学报, 2004, 24(1): 88-90.
- [7] 郭正新, 江晶. 一种不同距离的雷达检测概率计算模型[J]. 空军雷达学院学报, 2003, 17(4): 7-9.
- [8] 宋贵宝, 孔丽, 李红亮, 等. 密集阵反导系统拦截反舰导弹模型研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(10): 2128-2130.
- [9] 彭征明, 李云芝, 罗小明. 反辐射导弹毁伤能力评估研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2005, 16(3): 15-18.
- [10] 冷锋, 邹振宁, 伍波. 反辐射导弹作战效能分析[J]. 战术导弹技术, 2005, 21(6): 5-7.
- [11] 罗宇, 黄风雷, 刘彦. 反辐射导弹对某型雷达目标毁伤能力的评估[J]. 火箭与制导学报, 2005, 25(1): 139-141.
- [12] 孙治国. 舰载反舰导弹变加速机动作战效能分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.