

【兵器与装备】

反舰导弹突防概率

曹山根, 姚奕, 刘吉军

(海军潜艇学院, 山东 青岛 266071)

摘要: 随着反舰导弹攻防对抗技术的复杂性、不确定性日益增强, 反舰导弹突防概率评估也日益复杂. 分析舰艇防御剖面, 运用排队论的方法建立反舰导弹突破舰艇多层防御的概率分析模型, 通过计算获得了一些影响反舰导弹突防概率的因素, 对反舰导弹的实际运用有一定的参考价值.

关键词: 反舰导弹; 排队论; 突防概率

中图分类号: TJ761.1+4

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2008)06-0036-03

现代海战中, 反舰导弹是一种最重要的进攻性武器, 而反映反舰导弹作战效能的基本指标之一就是反舰导弹的突防概率, 因此分析反舰导弹的突防概率对实际的作战使用有重要作用. 随着导弹突防与防御技术的不断发展, 反舰导弹突防概率评估的难度也不断加大, 单纯的概率解析计算已经很难涵盖影响反舰导弹突防的不确定因素. 把防御系统看成服务系统, 它的每一个目标通道就是一个服务台, 被服务的顾客就是反舰导弹, 运用排队论方法对反舰导弹突防概率进行计算, 可以有效减少反舰导弹突防概率评估的难度, 得出基本可信的数学模型.

1 反舰导弹对抗过程描述

要对目标舰实施有效的攻击, 反舰导弹至少必须能够对敌方的4层防御体系, 即舰空导弹拦截、近炸型火炮拦截、“密集阵”舰炮拦截和电子干扰^[1]. 按作战空间划分这4层防御体系如图1.

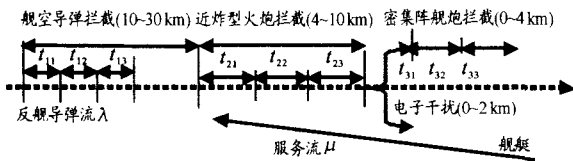


图1 拦截示意

这种防御体系的特点:

1) 多层防御的防空层次之间无火力覆盖, 这种系统相当于串联排队网络^[2]. 它的特点是每个服务节点分别考虑, 然后相乘. 电子干扰与密集阵舰炮拦截在作用空间上虽处于同一个层面, 但由于电子干扰一般是在反舰导弹

索雷达开机后很长的阶段内都可以实施, 时机上具有不确定性. 为简单考虑, 认为电子干扰在进入密集阵拦截之前实施, 把电子干扰视为近炸型火炮拦截与“密集阵”舰炮拦截之间的防御层面. 如此整个系统近似认为串联.

2) 利用排队论方法在建立数学模型时, 顾客流均被认为是泊松流, 这是因为一般来说, 服务系统最难于适应泊松流^[2]. 时间 t 内恰好有 k 枚反舰导弹的到达的概率可按泊松分布确定, 即 $P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}$, 其中 λ 为单位时间内到达反舰导弹的平均数, 即目标流强度.

3) 舰空导弹拦截的服务时间服从参数为 $-\mu_1$ 的负指数分布, 且 $\mu_1 = \frac{1}{t_{11} + t_{12} + t_{13}}$, t_{11} 为武器系统预警时间, t_{12} 为舰空导弹平均射击准备时间, t_{13} 为舰空导弹从起飞到与反舰导弹遭遇的平均时间. 同理, 近炸型火炮拦截的服务时间服从参数为 $-\mu_2$ 的负指数分布, 密集阵拦截的服务时间服从参数为 $-\mu_3$ 的负指数分布. 具体过程如图1.

2 舰艇多层拦截概率模型

2.1 舰空导弹拦截^[3]

防空导弹的有效作战距离在数十公里到上百公里, 飞行器一般以亚声速或超声速飞行, 飞行器在射击区逗留的时间比防空导弹击毁目标的时间长得多(一般为2~3倍), 所以采用存在逗留时间的排队论模型, 即对飞行器的防空服务系统是有限等待的系统.

2.1.1 反舰导弹齐射(每组 m 枚)攻击方式. 状态0, 系统空闲的概率 P_0 ; 状态 k , 系统中有 k 套防御系统拦截的概率为 P_k ; 状态 n , 系统中 n 套防御系统全部拦截, 没有防御系统空闲的概率为 P_n ; 状态 $n+s$, 系统中 n 套防御系统全

* 收稿日期: 2008-06-06

作者简介: 曹山根(1982—), 男, 江苏南通人, 硕士, 主要从事装备效能与评估研究.

部拦截,还有 s 个目标进入等待的概率为 P_{n+s} .

$t \rightarrow \infty$, 则得稳态方程组为

$$\begin{cases} \alpha P_0 = P_1 \\ (1 + \alpha) P_1 = 2P_2 \\ \dots \\ (k + \alpha) P_k = (k + 1) P_{k+1}, (0 < k < m) \\ (k + \alpha) P_k = (k + 1) P_{k+1} + \alpha P_{k-m}, (m \leq k < n) \\ \dots \\ (\alpha + n) P_n = (n + \beta) P_{n+1} + \alpha P_{n-m} \\ (\alpha + n + s\beta) P_{n+s} \\ = [n + (s + 1)\beta] P_{n+s+1} + \alpha P_{n+s-m} (s \geq 1) \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$ 为服务强度; λ 为单位时间内到达巡航导弹的平均数, 即目标流强度; μ 为系统的服务率; $\beta = \frac{\nu}{\mu}$ 为导弹等待时间内得不到服务而突防的强度, $\nu = \frac{1}{\tau}$; τ 为目标在服务区的逗留时间.

记 $P_k = P_0 f_k(\alpha, \beta, m)$, 根据 $\sum_{k=0}^{\infty} P_k = 1$, 可解出 $P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^{\infty} f_k(\alpha, \beta, m)}$. 突破该拦截层而没有受到射击的概率为 $P_n = \frac{\beta \sum_{s=1}^{\infty} s P_{n+s}}{\alpha m}$.

实际运用中, 只要实际攻击时间超过 1 座武器平均射击时间的 2~3 倍, 可以近似地认为符合长时间 ($t \rightarrow \infty$) 的攻击.

2.1.2 单枚导弹依次攻击方式. 状态过程等同于编队攻击, 经过化简得出目标流没有受到射击的概率:

$$P_n = \frac{\frac{\alpha^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{s \alpha^s}{\prod_{m=1}^s (n + m\beta)}}{\sum_{k=0}^{\infty} \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^n}{n!} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\alpha^s}{\prod_{m=1}^s (n + m\beta)}} \quad (2)$$

P_n 可以通过查洛维科夫编制的消失概率表方便地查出.

若舰空导弹单发命中概率为 P_{jk} , 则反舰导弹突破舰空导弹拦截的概率

$$Q_{jk} = P_n + (1 - P_n)(1 - p_{jk}) = 1 - p_{jk}(1 - P_n)$$

2.2 近炸型火炮拦截^[3]

反舰导弹在这个拦截区域飞行速度较快, 而近炸型火炮系统反应时间相对较长, 可近似认为该服务系统是无等待的排队系统, 当系统忙时后来目标不受射击直接突破防线则进入下一层.

2.2.1 反舰导弹齐射(每组 m 枚)攻击方式. 在拦截时舰空导弹防御系统可能处于 4 种状态: 状态 0, 系统空闲的概率 P_0 ; 状态 k , 系统中有 k 套防御系统拦截的概率为 P_k ; 状态 n , 系统中 n 套防御系统全部拦截, 没有防御系统空闲的概率为 P_n ; 状态 $n + s$, 系统中 n 套防御系统全部拦截, 还有 s 个目标进入等待的概率为 P_{n+s} .

$t \rightarrow \infty$, 则得稳态方程组为

$$\begin{cases} \alpha P_0 = P_1 \\ (1 + \alpha) P_1 = 2P_2 \\ \dots \\ (k + \alpha) P_k = (k + 1) P_{k+1}, (0 < k < m) \\ (k + \alpha) P_k = (k + 1) P_{k+1} + \alpha P_{k-m}, (m \leq k < n) \\ \dots \\ n P_n = \alpha P_{n-m} + \alpha P_{n-m+1} + \dots + \alpha P_{n-1} \end{cases}$$

攻击时间持续相当长后, $\sum_{k=0}^{\infty} P_k = P_0 \sum_{k=0}^{\infty} f_k(\alpha) = 1$, 进而可解出 P_0, P_n . 当 n 座武器都在射击, 后来目标无等待则突破该拦截层, 突破该拦截层而没有受到射击概率为 P_n .

2.2.2 单枚导弹依次攻击方式. 状态过程等同于编队攻击, $t \rightarrow \infty$, 则得稳态方程组为

$$\begin{cases} \alpha P_0 = P_1 \\ \dots \\ (\alpha + k) P_k = \alpha P_{k-1} + (k + 1) q_{k+1} \\ \dots \\ n P_n = \alpha P_{n-1} \end{cases}$$

反舰导弹突破该拦截层而没有受到射击概率为:

$$P_n = \frac{\alpha^n}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!}} \quad (3)$$

若近炸火炮单发命中概率为 P_{hp} , 多发连射时命中概率为 $P_{hp} = 1 - (1 - p_{hp})^N$, 其中 N 为射击弹数. 可得出反舰导弹的突破近炸火炮拦截的概率.

2.3 电子干扰^[4]

导弹对电子干扰的突防概率 $P_{\sigma} = P_y P_w$, P_y 为导弹对有源干扰的突防概率, P_w 为导弹对无源干扰的突防概率.

$$P_y = 1 - \frac{\mu_1 \mu_2 (\lambda + \mu_1 + \mu_2)}{(\lambda + \mu_1)(\lambda + \mu_2)(\mu_1 + \mu_2)} \quad (4)$$

式中: μ_1 电子侦察设备处理信号强度, μ_2 电子干扰设备处理信号强度.

$$P_w = \begin{cases} \frac{Z}{J + Z}, N < R \\ \frac{RZ / (Z + J) + N - R}{N}, N \geq R \end{cases} \quad (5)$$

式中: J 为被保护目标的真目标数量; Z 为干扰弹形成的箔条云团数; R 为无源干扰设备能同时干扰的目标批数; N 为发射的导弹数量.

干扰层对所有反舰导弹的干扰效果相同, 能突破电子干扰且进入小口径近程火炮射程内的导弹必是已自动导向目标的导弹, 此时还需要把反舰导弹的自导命中概率 $P_{\bar{f}}$ ^[5] 考虑进来.

$$P_{\bar{f}} = \left\{ \left[1 - \exp\left(-\frac{c^2}{2\sigma_y^2}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

因此理论上能抵抗电子干扰并飞向目标的反舰导弹概率 Q_{σ} 为 $Q_{\sigma} = P_{\sigma} P_{\bar{f}}$.

2.4 密集阵舰炮拦截

密集阵舰炮拦截射击程式是: 首先搜索目标, 然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开火,然后是闭环射击,在舰艇周围形成强大的火力网罩,构成严密的保护层,直到目标被击毁,然后武器系统自动转向另一个目标^[6],根据单枚密集阵炮弹的命中概率计算出单枚反舰导弹对密集阵弹幕的命中概率为 $P_{mjz} = 1 - \left(1 - \frac{P_{mjz}}{\omega}\right)^N$,其中 P_{mjz} 为密集阵炮弹单发命中概率, ω 为密集阵对反舰导弹的平均必须命中数, N 为射击弹数. 如果反舰导弹继续到达而密集阵舰炮正在对别的目标射击,则突破该防御. 该服务系统同样也是无等待的排队系统,突破该拦截层而没有受到射击概率 P_n 的计算公式类似于近炸火炮层. 反舰导弹的突破该层拦截的概率

$$Q_{mjz} = P_n + (1 - P_n)(1 - P_{mjz}) = 1 - P_{mjz}(1 - P_n).$$

2.5 最终突防概率计算

由于来袭的巡航导弹为泊松流,依据泊松流的分解定理,突破各防区后的目标流仍为泊松流,且有 $\lambda_1 = \lambda Q_{jk}$,其中 λ_1 为突破舰空导弹拦截的目标流; $\lambda_2 = \lambda_1 Q_{hp}$,其中 λ_2 为突破火炮层的目标流;文章开始已经假设电子干扰作用时机是在近炸火炮及密集阵拦截之间,因此设 λ_3 为突破电子干扰的目标流 $\lambda_3 = \lambda_2 Q_{gr}$. 最后突防概率 $Q = Q_{jk} Q_{hp} Q_{gr} Q_{mjz}$.

3 应用实例

3.1 参数假定

假设空袭密度为 $\lambda = 4$,采取单枚导弹依次攻击方式.

某舰的防空系统由 2 套舰空导弹系统组成 ($n_1 = 2$),舰空导弹对处于射击区域的目标平均发射率为 $\mu_1 = \frac{1}{t} = 2$ 枚/min,单发命中概率为 $P_{jk} = 0.7$,射击远界 30 km,近界 10 km,反舰导弹在此阶段飞行速度 200 s/m,因此反舰导弹在该防空区域平均逗留 100 s.

近炸型火炮系统 2 套 ($n_2 = 2$),对处于射击区域的目标平均发射率为 120 枚/分,单发命中概率为 $p_{hp} = 0.008$,一发命中即毁伤. 射击远界 10 km,近界 4 km,反舰导弹在此阶段飞行速度 2 Ma,系统平均服务率 $\mu_2 = \frac{1}{t} = 12/\text{min}$.

密集阵舰炮速射炮 2 套 ($n_3 = 2$),对处于射击区域的目标平均发射率为 3 000 枚/min,单发命中概率为 $P_{mjz} = 0.007$,平均必须命中反舰导弹数 $\omega = 2.67$ ^[6],射击远界 1.5 km,近界 0.5 km,反舰导弹在此阶段飞行速度 2 Ma,平均服务率 $\mu_3 = 6/\text{min}$.

电子干扰 $\mu_1 = 0.7$, $\mu_2 = 0.75$, $\lambda = 1$ 发/3 s, $N < R$,且 $Z = 4$;被攻击舰艇主尺度:长 $c = 138.1$ m,宽 $d = 13.7$ m.

3.2 舰空导弹拦截

$$\alpha = \frac{\lambda}{\mu} = 2, \nu = \frac{1}{\tau} = 1, \beta = \frac{\nu}{\mu} = 0.5, n = 2.$$

根据式(2),并通过查洛维科夫编制的消失概率表可以方便地查出 $P_n = 0.225$.

反舰导弹突破该拦截概率 $Q_{jk} = 0.457 5$.

3.3 近炸火炮型拦截

$$\lambda_1 = \lambda Q_{jk} = 4 \times 0.457 5 = 1.83$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\mu} = 0.152 5, n = 2.$$

根据式(3),求出 $P_n = 0.010$.

$$P_{hp} = 1 - (1 - 0.008)^{\frac{2 \times \langle 10000 - 4000 \rangle}{2 \times 340}} = 0.148 4$$

反舰导弹突破该拦截概率 $Q_{hp} = 0.853 1$.

3.4 电子干扰

$$\mu_1 = 0.7, \mu_2 = 0.75, \lambda = 1 \text{ 发/3 s}, N < R, \text{且 } Z = 4$$

根据公式(4)(5)求出 $P_{gr} = P_y P_w = 0.338$.

根据公式(6)算出单发反舰导弹自导命中概率 $P_{fj} \approx 0.7$.

理论上能抵抗电子干扰并飞向目标的反舰导弹概率

Q_{gr} 为

$$Q_{gr} = P_{gr} P_{fj} = 0.236 6$$

3.5 密集阵舰炮拦截

$$\lambda_3 = \lambda_2 Q_{gr} = \lambda_1 Q_{hp} Q_{gr} = 0.369 4$$

密集阵舰炮射速为 3 000 发/分,即 50 发/s.

$$P_{mjz} = 1 - \left(1 - \frac{0.007}{2.67}\right)^{\frac{50 \times \langle 1500 - 500 \rangle}{2 \times 340}} = 0.175 5,$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{0.369 4}{6} = 0.061 6, n = 2.$$

根据式(3),求出 $P_n = 0.001 8$,可解出反舰导弹突破密集阵舰炮拦截的概率 $Q_{mjz} = 1 - P_{mjz}(1 - P_n) = 0.824 8$.

最后突防概率 $Q = Q_{jk} Q_{hp} Q_{gr} Q_{mjz} = 0.076 2$.

3.6 模型分析

根据射击弹数 $N = (\text{远界} - \text{近界})/\text{攻击速度}$,可知反舰导弹的速度越快,除了缩短了反导系统的服务时间,还会使得近炸型火炮及密集阵舰炮多发命中概率明显下降,反舰导弹的突防概率也就越大. 比如若反舰导弹末端(0~10 km)的突防速度降为 1 Ma,近炸火炮及密集阵多发命中概率分别提高为 $P_{hp} = 0.246 8$, $P_{mjz} = 0.320 2$,并可知若近炸型火炮及密集阵舰炮单发命中概率都提高到 0.01,则概率分别提高为 $P_{hp} = 0.162 1$, $P_{mjz} = 0.241 0$,对突防不利.

一般情况下,单发武器的命中概率不可能达到 100%,因而不能保证首发命中目标,为了保证武器命中目标,要求提高命中概率,一般可用 2 发反舰导弹齐射方式攻击 1 个目标. 如此其他参数保持不变,可计算出以反舰导弹齐射 ($m = 2$) 方式攻击的概率 $Q = Q_{jk} Q_{hp} Q_{gr} Q_{mjz} = 0.125 3$.

总之,提高反舰导弹末端的突防速度是提高反舰导弹突防概率行之有效的办法,另外反舰导弹齐射方式攻击比单枚导弹依次攻击有一定优势.

4 结束语

反舰导弹突防概率评估一直是军方和工业设计部门十分关心的技术难题,很难获取导弹攻防对抗双方的全部武器性能参数. 实际作战时还可能存在着许多不可预知的因素,比如饱和和攻击时防御系统防御会误炸别的目标,反舰导弹流突破各防御层后不再是简单的泊松流,这都带来了导弹突防概率评估很强的不确定性和复杂性.(下转第 41 页)

表1 导弹毁伤目标概率及目标权重

目标		B_1	B_2	B_3
重要程度 w_j		0.3	0.2	0.5
毁伤概率 e_{ij}	导弹类型 A_1	0.4	0.1	0.5
	A_2	0.2	0.4	0.2

该火力分配问题的目标函数为

$$\max F = \sum_{j=1}^n \omega_j [1 - \prod_{i=1}^m (1 - e_{ij})^{x_{ij}}] = 1 - 0.3 \times 0.6^{x_{11}} \times 0.8^{x_{21}} - 0.2 \times 0.9^{x_{12}} \times 0.6^{x_{22}} - 0.5 \times 0.5^{x_{13}} \times 0.8^{x_{23}}$$

其中

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^3 x_{1j} = 6, \sum_{j=1}^3 x_{2j} = 10 \\ x_{ij} \geq 0 (i=1,2, j=1,2,3) \end{cases}$$

利用混沌粒子群算法来解决上述问题,取粒子种群数为20,根据测试函数的表现取 $c_1 = 2.8, c_2 = 1.3, w = 0.5$ (见作者另文).每个粒子代表目标函数的一个解,解的维数就是粒子的维数,编码方式采用实数编码.例如粒子位置(1,3,...)就是指第1枚弹攻击第1个目标,第2枚攻击第3个目标.由于粒子群算法一般是在实数域上进行搜索,而分配方案选择是非线性整数规划问题,所以在编程实现时,需要将实数域搜索转化为整数域搜索.运行程序后,求得最优解为(2,5,0,5,4,0), $F = 0.917809$.结果如图1.

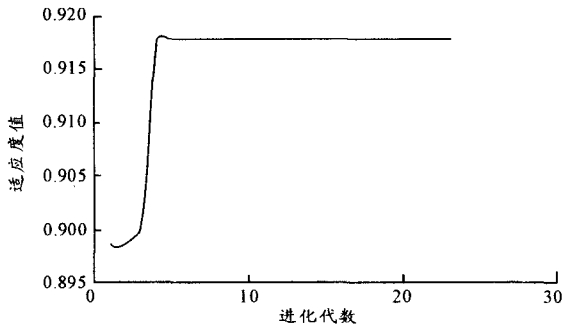


图1 火力分配目标函数

从计算结果可以看出,混沌粒子群算法仅经过5代就可以找到最优解,在P41.8的计算机上运行一次仅需要十几毫秒,搜索效率非常快.与文献[1]中平均求解时间48.2 ms比较,效率明显提高,而且文献[1]中搜索到的并不是最优解,仅是一个次优解.

另外,通过加入混沌变量,利用混沌运动的遍历性,有效地避免了粒子容易陷入局部极值区间的问题.综合来看,混沌粒子群算法对于解决此类问题提供了一个比较高效的解决方法.

参考文献:

- [1] 张晓丰,程红斌,张凤鸣.改进遗传算法的导弹目标分配方法[J].火力与指挥控制,2007(4):59.
- [2] 任斌,丰镇平.改进遗传算法与粒子群优化算法及其对比分析[J].南京师范大学学报:工程技术版,2002(2):14.
- [3] 王才宏.常规导弹对地面油库目标打击方法研究[D].西安:二炮工程学院,2004.
- [4] 高尚.群智能算法及其应用[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [5] 莫愿斌.粒子群优化算法的扩展与应用[D].杭州:浙江大学,2006.
- [6] Kennedy J. The particle swarm: social adaptation of knowledge[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Indianapolis: IEEE, 1997:303.

(上接第38页)本研究对这些问题进行简化,初步建立了一个计算反舰导弹突防概率模型,通过计算获得了一些影响反舰导弹突防概率的因素,对导弹突防概率评估问题研究具有一定的借鉴意义.

参考文献:

- [1] 宋贵宝,陈峰,李毅.对抗条件下反舰导弹的作战概率仿真分析[J].战术导弹技术,2007(4):77.
- [2] 李军.运筹学[M].北京:科学出版社,2003.

- [3] 楚耶夫.军事技术运筹学基础[M].北京:国防工业出版社,1976.
- [4] 孔丽,宋贵宝,李毅,等.电子干扰条件下反舰导弹突防概率计算[J].海军航空工程学院学报,2005(5):559.
- [5] 张安.航空武器系统分析导论[M].西安:西北工业大学,2001.
- [6] 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(10):21-28.