

战区反导拦截效率模型研究

张 肃, 王颖龙, 曹泽阳
(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘 要:针对拦截战术弹道导弹的问题,建立了情报预警系统和防空导弹拦截系统的排队论模型,给出了反导作战拦截效率的计算模型,并讨论了提高反导拦截效率的对策与方法。

关键词:战区反导;情报预警系统;防空导弹武器系统;拦截效率;模型

中图分类号: O441、TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009 - 3516(2004)04 - 0034 - 03

战术弹道导弹(TBM)采用椭圆型轨道,在大气外飞行,再入速度可达7~9Ma,加之雷达有效反射面积很小,一般预警雷达难以完成情报预警任务,对其拦截具有很大的难度^[1]。对于防空导弹武器系统来说,只有在战区情报预警系统提供早期情报预警的情况下,才有可能对战术弹道导弹进行末段拦截。

若将情报预警系统和防空导弹武器系统分别视作两个服务系统中的服务台,来袭的战术弹道导弹为顾客,而且要顺时经过这两个服务系统,并且防空导弹武器系统只能对经过情报预警系统的战术弹道导弹进行拦截,这样可以利用排队论计算拦截效率^[2-4]。其战区反导流程如图1所示。

1 情报预警系统的发现概率计算模型

设 TBM 以 Poisson 流进袭,密度为 λ_1 ,被情报预警系统发现的概率为 P_f 。则在某一时间 t 当中,来袭的 TBM 数量 $N = \lambda_1 t$ 枚。而其中有 NP_f 枚会接受情报预警系统服务,还有 $N(1 - P_f)$ 枚会对保卫目标直接攻击。

若情报预警系统能同时对 m 批来袭的 TBM 情报进行处理、分析,平均服务率都为 μ_1 ,服务时间服从负指数分布。则这一服务系统可看作一个具有有限等待时间制的 $M/M/m/\infty$ 排队系统。对于来袭 TBM 按照先来先服务的原则,接受 m 个服务台的同时服务。等待在队列中的 TBM,其最大允许等待时间 z_1, z_2, \dots, z_n 为独立同负指数分布, $E(z_i) = \frac{1}{\nu}, \nu > 0$ 。其中 z_i 表示第 i 个到达系

统的 TBM 在需要排队等待时最大允许等待时间。设 $N(t)$ 表示 t 时刻进入系统的 TBM 数量,则 $N(t) = i$ 也表示 t 时刻有 i 个服务台正在进行工作,还有 $m - i$ 个服务台处于空闲状态。而 $N(t) = m + k(k = 1, 2, \dots)$ 则表示除所有 m 个服务台正在进行工作外,还有 k 枚 TBM(顾客)处于等待服务状态。规定 $N(0) = 0$, 则 $\{N(t), t \geq 0\}$ 为具有可列状态的生灭过程,状态空间为 $I = \{0, 1, 2, \dots\}$ 。可以验证其平稳分布存在。其状态转移密度为

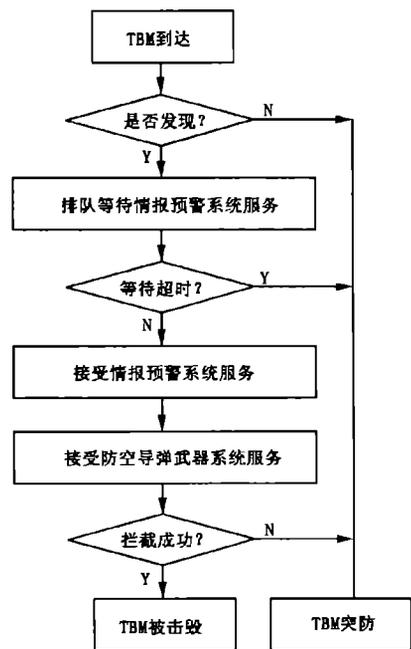


图1 战区反导流程图

收稿日期:2003 - 06 - 23

基金项目:高等学校骨干教师资助计划资助项目(GG - 1105 - 90039 - 1004)子课题

作者简介:张 肃(1980 -),男,甘肃天水人,硕士生,主要从事防空导弹武器作战与辅助决策研究;

王颖龙(1945 -),男,陕西富平人,教授,博士生导师,主要从事防空作战指挥理论与指控优化研究。

$$\begin{aligned}\lambda_n &= \lambda_1, n > 0 \\ \mu_n &= n\mu_1, 1 \leq n \leq m \\ \mu_n &= m\mu_1 + (n - m)v, n > m\end{aligned}$$

可求出其稳态概率为

$$\begin{aligned}P_0 &= \left[\sum_{n=0}^m \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^n + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda_1^{m+k}}{m! \mu_1^m \prod_{j=1}^k (m\mu_1 + jv)} \right]^{-1} \\ P_n &= \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} \right)^n P_0, n = 1, 2, \dots, m \\ P_{m+k} &= \frac{\lambda_1^{m+k}}{m! \mu_1^m \prod_{j=1}^k (m\mu_1 + jv)} P_0, k = 1, 2, \dots\end{aligned}$$

平均忙的服务台个数为

$$\bar{m} = \sum_{n=1}^{m-1} nP_n + m \sum_{n=m}^{\infty} P_n$$

TBM 受到情报预警系统服务的概率为

$$P_q = \frac{\mu_1}{\lambda_1} \bar{m}$$

未被情报预警系统处理的 TBM 的概率为

$$1 - P_q$$

有可能遭到防空导弹武器系统末段拦截的 TBM 数量为 $NP_f P_q$ 枚, 而有 $NP_f(1 - P_q)$ 枚 TBM 将会突防对保卫目标攻击。

2 防空导弹武器系统末段拦截效率计算模型

防空导弹武器系统在接到战术弹道导弹攻击的预警情报之后, 应立即做好射击准备。设目标通道数为 c , 每个目标通道的射击时间服从参数为 μ_2 的负指数分布, 战术弹道导弹的进袭流密度为 $\lambda_2 = \lambda_1 P_q$, 则此服务系统可看成一个具有消失制 $M/M/c/c$ 的排队系统。设战术弹道导弹受到拦截时的杀伤概率为 P_c , $M(t)$ 表示 t 时刻进入系统的战术弹道导弹数量, 则 $\{M(t), t \geq 0\}$ 为有限可列状态生灭过程, 状态空间为 $I = \{0, 1, 2, \dots, c\}$ 。其平稳分布存在, 即

$$\begin{aligned}\lim_{t \rightarrow \infty} P(M(t) = j) &= P_j > 0 (j \in I) \\ \sum_{j=0}^c P_j &= 1\end{aligned}$$

状态转移密度为

$$\begin{aligned}\lambda_n &= \lambda_2, n = 0, 1, 2, \dots, c - 1 \\ \mu_n &= n\mu_2, n = 1, 2, \dots, c\end{aligned}$$

可求出其稳态概率为

$$\begin{aligned}P_0 &= \left[\sum_{n=0}^c \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda_2}{\mu_2} \right)^n \right]^{-1} \\ P_n &= \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda_2}{\mu_2} \right)^n P_0, n = 1, 2, \dots, c\end{aligned}$$

平均忙的目标通道数 \bar{c} 为

$$\bar{c} = \frac{\lambda_2}{\mu_2} (1 - P_c)$$

目标通道的利用率为

$$\Delta T\% = \frac{\sum_{n=1}^c nP_n}{c}$$

TBM 的突防率 P_i 为

$$P_i = P_c = \frac{1}{c!} \left(\frac{\lambda_2}{\mu_2} \right)^c P_0$$

拦截成功的概率 P_i 为

$$P_i = (1 - P_i) P_i$$

未遭拦截而突防的 TBM 数量为 $NP_f P_q P_i$ 枚, 未毁伤而突防的 TBM 数量为 $NP_f P_q (1 - P_i)$ 枚, 最终将有 $N_{\text{突防}} = N(1 - P_f) + NP_f(1 - P_q) + NP_f P_q P_i + NP_f P_q (1 - P_i)$ 枚 TBM 对目标进行攻击。

拦截效率 η 为

$$\eta = 1 - \frac{N_{\text{突防}}}{N} = P_f P_q P_i - P_f P_q P_i = P_f P_q (1 - P_i) P_i - P_f P_q P_i$$

3 结束语

情报预警系统与防空导弹武器系统构成了反战术弹道导弹的二个必要条件, 而且两者要能密切配合。

由于有效拦截战术弹道导弹的数量与 P_i 成正比关系, 所以必须提高防空导弹武器系统的杀伤概率, 才能提高反导效率。其技术方法是进一步研制新的能够反战术弹道导弹的武器系统。战术方法是进行合理的战斗部署以及运用集火射击的方法。战斗部署一般要视保卫目标大小和疏散情况具体而定, 但在一定的火力区纵深下保证尽可能大的杀伤区重叠次数和火力密度。进行集火射击时, 可以对一枚战术弹道导弹发射较多的导弹, 从而提高杀伤概率。

基于排队论的方法, 本文给出了战区反导拦截效率计算模型, 可为防空作战指挥人员提供重要的决策理论依据。但由于实际的作战过程的影响因素很多, 本文作了一些假设及简化处理, 若要考虑更为复杂的反导作战情况, 可以从这种处理方法出发用离散事件系统仿真的方法进行模拟, 从而得到更好的结果。

参考文献:

- [1] 陈鸿猷, 郭有全, 王颖龙. 中国人民解放军地空导弹兵战术学[M]. 北京: 解放军出版社, 2000.
- [2] 赵 玮, 王荫清. 随机运筹学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [3] 钱颂迪. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版, 1990.
- [4] 张多林. 地面防空作战仿真建模方法的探讨[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2000, 1(1): 70-75.

(编辑: 田新华)

Research on Intercepting Efficiency Model of War Region Anti - TBM

ZHANG Su, WANG Ying-long, CAO Ze-yang

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract: In view of the problem of intercepting TBM in the future air defense war, this paper establishes two queuing models of the intelligence forecasting system and the interception system, in this way, the intercepting efficiency can be calculated. At the same time some methods of enhancing the intercepting efficiency are discussed.

Key words: war region anti - TBM; intelligence forecasting system; air defense missile system; intercepting efficiency; model