

# 基于排队论的多层拦截巡航导弹效率分析

郭建亮, 高 歆, 申卯兴  
(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:**用排队论方法解决混合多层部署拦截巡航导弹效率问题。以3层部署为例,进行一定的假设,应用排队系统理论,建立了3层防空导弹武器拦截巡航导弹的效率模型。首先分别对每层防空导弹的拦截效率进行分析计算,综合后得出3层部署总的拦截效率,并计算出来袭巡航导弹的突防概率;最后给出算例,验证了模型的实用性与可行性。该方法既可以计算出给定部署方案的拦截效率,也可进行反推,得出给定拦截效率下的部署方案,具有很大的适用性,能够为作战部署计划的制定和实施提供参考依据,为指挥员提供相关的辅助决策信息。

**关键词:**拦截效率;巡航导弹;排队系统;地空导弹;多层部署

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-3516.2009.05.008

**中图分类号:** TN95      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-3516(2009)05-0037-04

由于巡航导弹在飞行过程中航线比较固定,它在遭到防空导弹拦截时无法自主作规避动作,所以在模型中可将巡航导弹的飞行状态看作是等速定高直线平飞状态,多以成批次的方式对重点目标进行打击<sup>[1-2]</sup>。这不是一个简单的静态过程,而是一个复杂的动态过程,传统上将单发和多发杀伤概率作为评定武器系统作战效能的标准已经不能用来全面评价混合部署的防空武器系统作战能力,本文用排队论的方法来进行分析<sup>[3]</sup>。

## 1 模型建立与效率分析

### 1.1 模型建立

为有效拦截巡航导弹袭击,必须增大防空火力纵深,形成尽早拦截、层层打击的态势,通常将不同型号和性能的防空导弹混合多层部署,结合使用,有利于发挥各种防空导弹的优点,拦截巡航导弹的火力网一般有3层,第1层由某型远程导弹对巡航导弹进行消耗性攻击,第2层由改进后的某新型中程地空导弹阻击突防的巡航导弹,第3层由某型近程地空导弹进行拦截<sup>[1]</sup>。

战术假设:敌方巡航导弹(假设巡航导弹不对防空武器进行袭击)袭击我重要保卫目标设施,我方部署远、中、近3层防御线,并且各火力单元部署符合最优化原则,部署方案见图1。火力单元一次射击后立即观察射击结果,如果巡航导弹被击毁,则该巡航导弹立刻消失,火力单元结束射击后立刻转移火力;如果未被击毁或击伤,则该巡航导弹继续飞行。只有巡航导弹突破各层防线才能打击被保卫目标。

对以上过程进行分析后可以看出,我方地空导弹武器系统作为一个服务系统,服务台是火力单元,对象目标是巡航导弹,火力单元和来袭导弹数量都是有限的。若第1层防线上的武器都在射击,则后来的巡航导弹将突破这一层防线,进入下一层防区。由于来袭的巡航导弹速度非常快,使其不可能在我防区内作较长时间逗留,所以每一层防线可按照有限源损失制排队系统来研究。

设拦截系统中第*i*层拦截部署有 $n_i$ 套某型防空武器系统,目标到达服从泊松流 $\lambda$ ,服务时间服从负指数

\* 收稿日期:2008-09-16

基金项目:国家“863”计划资助项目(2006AAXX1513)

作者简介:郭建亮(1976-),男,内蒙古卓资人,硕士生,主要从事防空作战决策分析研究。

E-mail: guojianliangaa@163.com

分布  $\mu_i$ , 对巡航导弹的拦截成功率为  $p_i$ , 其中  $i=1$  时为远程防空导弹武器系统;  $i=2$  时为中程防空导弹武器系统;  $i=3$  时为近程防空导弹武器系统。由于每一层部署的防空导弹武器系统不同, 拦截能力也不同, 则  $\mu_i$  不同, 目标流  $\lambda$  也随着拦截后突防概率和杀伤概率的不同而不同。

多层防空导弹武器系统拦截巡航导弹的排队系统见图 2。

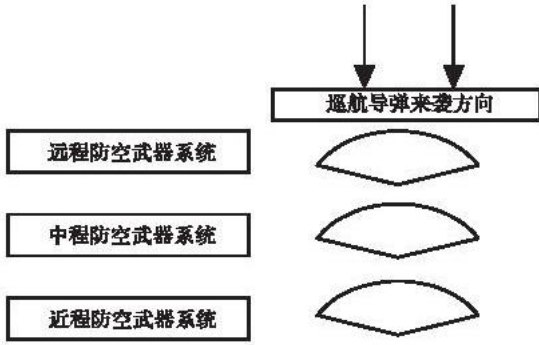


图 1 3 层火力部署方案

Fig.1 Three Players force assignment project

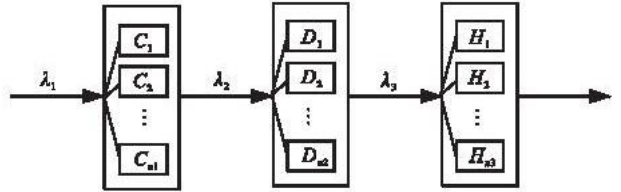


图 2 防空导弹多层拦截的排队系统图

Fig.2 Queuing diagram of multilayer defense of air defense missile

### 1.2 效率分析

袭来巡航导弹数量为  $N$ , 根据流的平衡定律和正规方程可知, 第 1 层防线的拦截效率可用  $M/M/m/m/N$  损失制排队模型来求解, 故巡航导弹突破第 1 层防线的概率为<sup>[5]</sup>:

$$P_{n_1} = \frac{\alpha^{n_1}}{m!} / \sum_{j=0}^{n_1} \frac{\alpha^j}{j!} \tag{1}$$

式中  $\alpha = \lambda / \mu$ 。巡航导弹第 1 层突防数为:

$$N_{t_1} = N [P_{n_1} + (1 - P_{n_1})(1 - p_1)] \tag{2}$$

只有第 2 层防线的的所有武器都在射击的情况下, 后来的巡航导弹方能突破第 2 层防线。进入第 2 层防线的目标包括第 1 道防线没有受到射击的目标和受到射击后没有毁伤的目标, 即  $\lambda = \lambda [P_{n_1} + (1 - P_{n_1})(1 - p_1)]$ ,  $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$ , 则巡航导弹突破第 2 层防线的概率为:

$$P_{n_2} = \frac{\alpha^{n_2}}{n_2!} / \sum_{j=0}^{n_2} \frac{\alpha^j}{j!} \tag{3}$$

巡航导弹第 2 层突防数为:

$$N_{t_2} = N_{t_1} [P_{n_2} + (1 - P_{n_2})(1 - p_2)] \tag{4}$$

第 3 层防线对巡航导弹的拦截过程可视为一个具有有限排队时间的  $M/M/n_3/n_3/N$  排队系统, 等待队列中的每个顾客, 其最大允许等待时间服从负指数分布, 且  $\lambda = \lambda [P_{n_2} + (1 - P_{n_2})(1 - p_2)]$ 。

具有有限等待时间制的排队系统是一个生灭过程, 该生灭过程统计平衡解存在<sup>[5]</sup>, 平均忙的拦截武器系统个数为<sup>[6]</sup>:

$$\bar{n}_3 = \sum_{n=1}^{n_3-1} n P_n + n_3 \sum_{n=n_3}^{\infty} P_n \tag{5}$$

同时根据  $\bar{n}_3 = \lambda / \mu (1 - P_{n_3})$ , 可得到巡航导弹的突防概率为:

$$P_{n_3} = (\lambda - \bar{n}_3 \mu) / \lambda \tag{6}$$

所以, 经过 3 层拦截后巡航导弹的突防数量为:

$$N_{t_3} = N_{t_2} [P_{n_3} + (1 - P_{n_3})(1 - p_3)] \tag{7}$$

式(5)一式(8)中:  $p_1 = (N - N_{t_1}) / N$ ;  $p_2 = (N_{t_1} - N_{t_2}) / N_{t_1}$ ;  $p_3 = (N_{t_2} - N_{t_3}) / N_{t_2}$ ; 并记  $P_T = N_{t_3} / N$ ,  $P_T$  为巡航导弹经多层拦截后的突防概率。则防空武器系统对巡航导弹的杀伤概率为<sup>[7]</sup>:

$$P_S = 1 - P_T \tag{8}$$

## 2 算例分析

实战中,多层武器系统混合部署抗击巡航导弹的效率  $P'_s$  还与发现目标能力、武器可靠性、故障率、抗干扰性等有关,故:

$$P'_s = (1 - P_r)QRG \quad (9)$$

式中: $P'_s$ 为多层武器系统的杀伤概率; $P_r$ 为巡航导弹经多层拦截后的突防概率; $Q$ 、 $R$ 和 $G$ 分别表示多层部署武器系统使用的可靠性、战术可靠性和抗击敌干扰的概率。若杀伤概率  $P_s \geq 0.95$ ,则认为来袭目标被拦截<sup>[8]</sup>,可模拟得出  $n_1, n_2, n_3$  相应数值,供指挥员决策。其中, $Q$ 、 $R$ 和 $G$ 的值可以应用其它相应计算方法给出<sup>[9]</sup>。

设某防空指挥所指挥7套不同型号武器系统混编组成3层防空火力体系,其中2套远程防空导弹,2套中程防空导弹,3套近程防空导弹分别设置在第1、第2和第3道防线,每一套武器系统每次只能射击一个目标,即  $n_1 = 2, n_2 = 2, n_3 = 3$ ,每道防线的杀伤概率为  $p_1 = 0.95, p_2 = 0.90, p_3 = 0.98$ 。并且火力单元部署符合最优化原则。已知来袭的巡航导弹为30枚,巡航导弹流强度  $\lambda = 2$  枚/min,3类武器系统对目标的射击时间分别服从参数  $\mu_1 = 1, \mu_2 = 3/4, \mu_3 = 1/2$  的负指数分布,假设每套武器系统同一时间内只能射击一个目标,多层部署武器系统使用的可靠性  $Q = 0.98$ 、战术可靠性  $R = 0.95$  和抗击敌干扰的概率  $G = 0.85$ ,我们来估算该防空武器系统的防空效率。

$$\text{由 } \alpha = \frac{\lambda}{\mu_1}, \text{得 } \alpha = 2, \text{有: } P_{n_1} = \frac{\alpha^{n_1}}{n_1!} / \sum_{j=0}^{n_1} \frac{\alpha^j}{j!} = 0.4。 \text{则: } N_{t_1} = N[P_{n_1} + (1 - P_{n_1})(1 - p_1)] = 12.9 \text{ (枚)}。$$

将  $P_{n_1} = 0.4$  代入公式  $\lambda = \lambda [P_{n_1} + (1 - P_{n_1})(1 - p_1)]$  和  $\alpha = \frac{\lambda}{\mu_2}$ ,得  $\alpha = 1.15$ ,有:

$$P_{n_2} = \frac{\alpha^{n_2}}{n_2!} / \sum_{j=0}^{n_2} \frac{\alpha^j}{j!} = 0.235$$

则:

$$N_{t_2} = N_{t_1} [P_{n_2} + (1 - P_{n_2})(1 - p_2)] = 4 \text{ (枚)}$$

同理  $\lambda = \lambda [P_{n_2} + (1 - P_{n_2})(1 - p_2)] = 0.27, \lambda / \mu_3 = 0.54$ ,把所需数据代入式(5)、式(6)、式(7)中,得  $P_{n_3} = 0.019$ 。

则有:

$$N_{t_3} = N_{t_2} [P_{n_3} + (1 - P_{n_3})(1 - p_3)] = 0.16 \text{ (枚)}$$

$N_{t_1}, N_{t_2}, N_{t_3}$  为各个突防拦截层的巡航导弹数。

防空武器系统对巡航导弹的杀伤概率为  $P_s = 1 - P_r = 1 - 0.16/30 = 0.99$ ,则可认为来袭巡航导弹全部被拦截。考虑武器系统的平均雷达发现目标概率能力系数、使用的可靠性、战术可靠性和抗击敌干扰的概率,则此多层部署武器系统对巡航导弹的杀伤概率为:

$$P'_s = (1 - P_r)QRG = 0.99 \times 0.98 \times 0.95 \times 0.85 = 0.783$$

## 3 结束语

本文运用排队论建立防空导弹多层拦截巡航导弹的效率模型,针对各种不同类型的防空导弹武器系统,通过运算得到了在多层部署情况下的射击效率,这样的研究思路是对解决目标成批到达、多层防空武器系统作战动态问题的一种尝试。结果表明:采用这样的研究方法和模型能准确描述多层拦截巡航导弹的过程,同时反向推演可模拟得出  $n_1, n_2, n_3$  相应数值为2,2,3,给指挥员提供兵器配置最优部署作战方案的科学决策依据,符合动态作战的实际需求,具有不断深入研究的价值。

参考文献:

- [1] 闻宏伟,申卯兴.多通道地空导弹武器系统射击过程系统结构模型探究[J].弹箭与制导学报,2002,22(2):103-107.  
WEN Hongwei, SHEN Maoxing. Some Probing on the Oppugn Efficiency of Ground-to-Air Missile Weapon System

- [J]. Journal of Projectiles Rockets Missile and Guidance, 2002, 22(2): 103—107. (in Chinese)
- [2] 迟刚, 王树宗. 便携式防空导弹拦截巡航导弹效能仿真研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(2): 261—263.  
CHI Gang, WANG Shuzong. Research of Anti-Cruise Missile Efficiency Simulations of The Man-Portable Air Defense Missile[J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(2): 261—263. (in Chinese)
- [3] 高歆. 多层拦截巡航导弹系统的综合效能分析[D]. 西安: 空军工程大学, 2003.  
GAO Xin. The Analysis of Synthesis Effective in the System of Multiplayer Weapons Intercepting Cruise Missile[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2003. (in Chinese)
- [4] 陈栋, 邢昌凤. 排队论方法在评估防空武器系统能力方面的应用[J]. 海军工程大学学报, 2003, 15(3): 110—114.  
CHEN Dong, XING Changfeng. Application of Queuing Theory to Evaluating the Capability of Air Defense Weapon System[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2003, 15(3): 110—114. (in Chinese)
- [5] 孙荣桓, 李建平. 排队论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
SUN Ronghuan, LI Jianping. Basic of Queuing Theory[M]. Beijing: The Science Publishing Company, 2002. (in Chinese)
- [6] 赵晨光, 李为民. 利用排队论探讨多层拦截巡航导弹的问题[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(2): 177—178.  
ZHAO Chenguang, LI Weimin. Discussing on Multiplayer Defense Cruise Missile by Use of Queuing Theory[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(2): 177—178. (in Chinese)
- [7] 郑泽席. 多种防空武器混合部署时抗打击效率计算的数学模型及方法[J]. 军事系统工程, 2000, 14(3): 2—5.  
ZHEN Zexi. The Math Model and Method to Calculate the Oppugn Effective of Multiplayer Mixed Air Defence Weapons[J]. Military System Engineering, 2000, 14(3): 2—5. (in Chinese)
- [8] 金星, 洪延姬. 工程系统可靠性数值分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.  
JIN Xing, HONG Yanji. The Method of Numerical Analysis of Engineering System Reliability[M]. Beijing: Defense Industry Publishing Company, 2002. (in Chinese)
- [9] 申卯兴, 许进, 郑武团. 基于灰色加权聚类决策的空中目标威胁评估[J]. 系统科学进展及应用, 2007, 7(2): 218—223.  
SHEN Maoxing, XU Jin, ZHENG Wutuan. Threaten Assessment Based on Grey Fixed Weight Cluster Decision Making for Aerial Target[J]. Advances in System Science and Applications, 2007, 7(2): 218—223. (in Chinese)
- [10] 申卯兴, 刘铭, 闻宏伟. 系统动力学在防空系统中的应用研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2003, 4(3): 40—43.  
SHEN Maoxing, LIU Ming, WEN Hongwei. Researches on the Applications of System Dynamics in Air Defense System[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Edition Science, 2003, 4(3): 40—43. (in Chinese)

(编辑: 田新华)

## Analysis of Intercept Efficiency for Multilayer Defense Cruise Missile Based on Queuing Theory

GUO Jian-liang, GAO Xin, SHEN Mao-xing

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

**Abstract:** The queuing theory is applied to calculating the intercept efficiency of the mixed multiplayer disposition. Taking a three multiplayer disposition for example, based on some hypothesis and using the queuing theory, a model of intercept efficiency of a three multiplayer disposition is built. First, the intercept efficiency of each layer is calculated, based on which the total efficiency is got, and the penetration probability of the cruise missile is calculated. Finally, an example is given to verify the practicability and feasibility of the model. This method can be used to calculate the intercept efficiency when disposition schemes are given, it can also be used to get the disposition schemes to meet an intercepting efficiency. This can provide a reference basis for making and implementing the disposition schemes, and simultaneously provide some relative information for the commander in decision making.

**Key words:** intercept efficiency; cruise missile; queuing system; ground-to-air missile; multilayer dispo-

sition