

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.01.007

## 弹炮结合武器系统拦截巡航导弹效率模型

吕超<sup>1</sup>, 王光辉<sup>2</sup>, 迟玉玮<sup>3</sup>, 李英杰<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院 研究生管理大队, 山东 烟台 264001; 2. 海军航空工程学院 指挥系, 山东 烟台 264001; 3. 海军航空工程学院 教育技术中心, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对现代防空作战中弹炮结合武器系统抗击敌空袭巡航导弹的特点, 运用排队论原理建立弹炮结合武器系统射击效率评估模型。该模型给出了弹炮结合武器系统对巡航导弹射击效率的计算方法, 分析了在地空导弹系统、高炮系统拦截区内拦截次数对拦截巡航导弹效率的影响, 并通过实例验证了模型的可行性和有效性。该模型对优选火力运用方案、充分发挥弹炮结合武器系统的作战效能, 具有一定的理论意义和实践价值。

**关键词:** 弹炮结合武器系统; 巡航导弹; 防空; 排队论

**中图分类号:** O223 **文献标志码:** B

## Model of Shooting Efficiency for Intercepting Cruise Missile of Ground-to-Air Missile and Anti-Aircraft Gun Integration Weapon

Lu Chao<sup>1</sup>, Wang Guanghui<sup>2</sup>, Chi yuwei<sup>3</sup>, Li yingjie<sup>1</sup>

(1. Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. Dept. of Command, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China; 3. Educational Technique Center, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** According to the characteristics of ground-to-air missile and anti-aircraft gun integration weapon against cruise missiles, use the queue theory to establish the ground-to-air missile and anti-aircraft gun integration weapon firing efficiency evaluation model. The model shows the way of calculating the efficiency of ground-to-air missile and anti-aircraft gun integration weapon against cruise missiles, and considers the influence to interception efficiency caused by the number of the shooting in the area intercepting, and an example to demonstrate the feasibility and effectiveness of the model. The model has some theoretical and practical value to the program of fire using and improving operational effectiveness.

**Keywords:** ground-to-air missile and anti-aircraft gun integration weapon; cruise missile; anti-air; queue theory

### 0 引言

弹炮结合防空武器是低空近程防空导弹和小口径高炮通过共用搜索、指挥、控制、通信或火控系统而集成的防空武器系统。它既有防空导弹制导精度高、射程较远和和毁伤目标效能好的优点, 又有高炮近程火力密集、反应快、工作可靠、近距离毁伤概率高的优点, 能相互弥补导弹和高炮各自不足, 高效地完成防空任务。故依据排队论原理并结合弹炮结合武器系统作战实际, 建立弹炮结合武器系统射击效率评估的排队论模型, 并运用实例进行验证。

### 1 基本假设

设巡航导弹目标流为泊松流, 具有平稳性、普通性和无后效性<sup>[1]</sup>。巡航导弹的到达时间间隔服从负指数分布, 分布密度为:  $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ , 其中,  $\lambda$  为目标流强度, 即单位时间内到达巡航导弹的平均数。

弹炮结合武器系统由地空导弹系统和高炮系统 2 个分系统组成。导弹分系统有  $m_1$  个目标通道, 且

在杀伤区纵深内可对目标实行  $k$  次拦截。每次拦截时对每个目标的射击时间服从负指数分布  $f(t) = \mu_{di} e^{-\mu_{di} t} (t > 0)$ ,  $\mu_{di}$  为第  $i$  次拦截时地空导弹一个目标通道对目标的服务率,  $\mu_{di} = 1/t_{dfwi}$  为第  $i$  次拦截时地空导弹平均拦截时间 (平均服务时间); 高炮分系统有  $m_2$  个目标通道, 且在杀伤区纵深内可对目标实行  $n$  次点射。每次点射时对每个目标的射击时间服从负指数分布  $f(t) = \mu_{gi} e^{-\mu_{gi} t} (t > 0)$ ,  $\mu_{gi}$  为第  $i$  次拦截时一个目标通道对目标的服务率,  $\mu_{gi} = 1/t_{gfw_i}$  为第  $i$  次点射时高炮平均拦截时间 (平均服务时间)。

一旦发现目标, 只要地空导弹有空闲目标通道, 就立即进行射击, 当所拦截目标被杀伤或飞出导弹杀伤区时, 立即将火力转向新发现的目标或等待射击的目标。当目标在导弹拦截区突防后, 将由火炮分系统继续进行拦截, 直至目标突防。

收稿日期: 2010-07-25; 修回日期: 2010-09-27

作者简介: 吕超 (1984-), 男, 山东人, 硕士研究生, 助理工程师, 从事军事运筹学研究。

## 2 弹炮结合武器系统排队论服务模型

根据弹炮结合武器系统巡航导弹的作战过程及基本假设, 在持续入侵的空袭环境下, 可将弹炮结合武器系统看作由地空导弹和高炮串行服务的随机服务系统。地空导弹系统及高炮系统是“服务台”, 弹炮结合武器系统对巡航导弹的射击即对巡航导弹进行“服务”, 连续到达的巡航导弹目标流是“顾客”。对来袭的巡航导弹采用先到达先服务规则, 并按先由地空导弹后由高炮的顺序依次拦截。弹炮结合武器系统对巡航导弹的作战过程可用图 1 描述<sup>[2]</sup>。

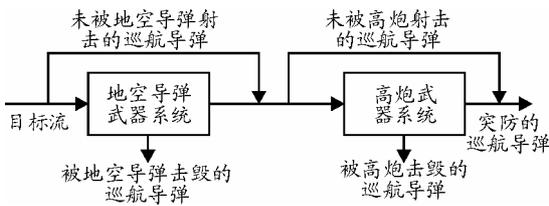


图 1 弹炮结合武器系统对巡航导弹的拦截过程

地空导弹在其杀伤区纵深内一般都具有对目标的多重拦截能力, 来袭目标只有经过地空导弹的多重拦截后才有可能突防。如果防空导弹拥有较多目标通道时, 应尽可能划分多重拦截, 并使每次拦截时参与拦截的目标通道数尽量均衡。这样可以提高防空导弹的作战效能<sup>[3]</sup>。因此, 地空导弹每次对目标流进行拦截时都分配一定数量的目标通道。同样, 高炮在其杀伤区纵深内也一般具有对目标的多重拦截能力, 高炮每次对目标流进行拦截时都分配一定数量的目标通道。

地空导弹分系统的每一个目标通道是一个服务台, 顾客流即为持续进入地空导弹拦截区的目标流。对于高炮分系统, 它的每一个目标通道为一个服务台, 顾客流即为持续进入高炮拦截区的目标流。

## 3 弹炮结合武器系统拦截效率模型

### 3.1 地空导弹系统拦截过程

设地空导弹在其杀伤区内第  $i$  次拦截时目标未受拦截而突防的概率为  $P_{dci}$ <sup>[4]</sup>、对目标的服务概率为  $P_{dsi}$  及对目标成功拦截的概率为  $P_{ddi}$ , 则:

$$\begin{cases} P_{dci} = \frac{\alpha_{di}^{dc_i}}{dc_i!} / \sum_{j=0}^{dc_i} \frac{\alpha_{di}^j}{j!} \\ P_{dsi} = 1 - P_{dci} \\ P_{ddi} = P_{dsi} P_{di} \end{cases}$$

式中:  $P_{di}$  为地空导弹对目标的杀伤概率,  $dc_i$  为第  $i$  次拦截时地空导弹服务的目标通道数,  $\alpha_{di}$  为第

$i$  次拦截时一个地空导弹目标通道射击一个目标所需平均时间内进入拦截区平均目标数, 由下式计算:

$$\alpha_{di} = \frac{\lambda_{di}}{\mu_{di}}$$

在拦截过程中, 每次拦截后目标的输出率等于该次拦截的目标输入率中没有受到拦截和虽然受到拦截但没有被杀伤的目标流, 每次拦截时目标的输入率等于上次拦截的输出率。因此, 第  $i$  次拦截的目标输入率  $\lambda_{di}$  和目标输出率  $\lambda_{dOi}$  可由下式计算:

$$\begin{cases} \lambda_{di} = \lambda \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_{ddj}) \\ \lambda_{dOi} = \lambda \prod_{j=1}^i (1 - P_{ddj}) \end{cases}$$

### 3.2 高炮系统拦截过程

巡航导弹通过地空导弹拦截区后将受到高炮继续拦截, 与地空导弹分系统类似, 高炮分系统在其杀伤区内也可对目标进行多次拦截。

设第  $i$  次拦截目标突防概率为  $P_{gci}$ 、对目标的服务概率为  $P_{gsi}$  及对目标成功拦截的概率为  $P_{gdi}$ , 则

$$\begin{cases} P_{gci} = \frac{\alpha_{gi}^{gc_i}}{gc_i!} / \sum_{j=0}^{gc_i} \frac{\alpha_{gi}^j}{j!} \\ P_{gsi} = 1 - P_{gci} \\ P_{gdi} = P_{gsi} P_{gi} \end{cases}$$

式中:  $P_{gi}$  为高炮一次点射对目标的杀伤概率;  $gc_i$  为第  $i$  次点射时高炮服务的目标通道数;  $\alpha_{gi}$  为第  $i$  次点射时高炮一个目标通道射击一个目标所需平均时间内进入拦截区平均目标数, 由下式计算:

$$\alpha_{gi} = \frac{\lambda_{gli}}{\mu_{gi}}$$

进入高炮系统拦截区的目标流为地空导弹第  $k$  次拦截后的输出流  $\lambda_{dOk}$ 。高炮分系统第  $i$  次点射时的目标输入率  $\lambda_{gli}$  和目标输出率  $\lambda_{gOi}$  可由下式计算:

$$\begin{cases} \lambda_{gli} = \lambda_{dOk} \prod_{j=1}^{i-1} (1 - P_{gdj}) \\ \lambda_{gOi} = \lambda_{dOk} \prod_{j=1}^i (1 - P_{gdj}) \end{cases}$$

### 3.3 弹炮结合武器系统拦截效率

弹炮结合武器系统实际杀伤巡航导弹的概率:

$$P_s = 1 - \frac{\lambda_{gOn}}{\lambda}$$

式中:  $\lambda_{gOn}$  为经过高炮系统  $n$  次点射后的目标

输出流。

在空袭持续时间内，弹炮结合武器系统杀伤巡航导弹的数学期望

$$E_M = \lambda t P_S$$

### 4 实例计算

假设空袭目标入侵密度  $\lambda=10$  枚/min, 持续时间 12 min, 弹炮结合武器系统中地空导弹武器系统有 6 个目标通道, 在其杀伤区纵深可对目标拦截 2 次,  $t_{dfw1}=120$  s,  $t_{dfw2}=60$  s,  $P_{dl}=0.7$ ; 高炮系统有 4 个目标通道, 在其杀伤区纵深内可对目标点射 2 次,  $t_{gfw1}=12$  s,  $t_{gfw2}=10$  s,  $P_{gl}=0.3$ 。计算该弹炮结合武器系统射击效率。

利用模型进行求解, 经计算  $\lambda_{gO2}=3.5228$  枚/min,

$$P_S = 1 - \frac{\lambda_{gO2}}{\lambda} = 0.6477, E_M = 77.72 \text{ 枚。}$$

\*\*\*\*\*

(上接第 7 页)

表 3 火力点 A 射击结果

参数	数值
竖直角 $\alpha/^\circ$	7.743 7
水平角 $\beta/^\circ$	1.413 1
最高点 $h/m$	239.1
与目标距离 $d/m$	4 001.2
总误差/m	0.000 1

射击效果如图 6。

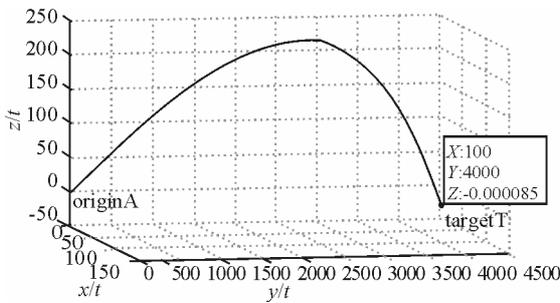


图 6 射击效果图

通过本例分析, 可知该方法确实高效实用, 为弹道研究提供了一种新的思路。

### 4 结束语

1) 该方法不仅弹道精确, 而且对火力点的最佳射角解算高效, 在多处理机并行计算的情况下平均需要 0.1 s 就可以完成求解任务; 2) 该方法针对弹道解算问题, 对龙格库塔方法与基本遗传算法的改进切实有效, 无论是时间还是精度都有显著改善; 3) 该方法是一种弹道反解的通用算法, 对模型中的

### 5 结束语

该模型较易通过计算机编程实现, 对优选火力运用方案、充分发挥弹炮结合武器系统的作战效能, 具有一定的理论意义和实践价值, 为反巡航导弹作战理论研究及弹炮结合武器系统仿真系统的开发奠定了基础。

### 参考文献:

[1] 甘应爱. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005(6): 312-314.  
 [2] 毛和瑞, 常云丽, 萧元星. 弹炮一体化防空系统的服务概率模型[J]. 火力与指挥控制, 2001, 26(3): 17-18.  
 [3] 陈立新. 防空导弹网络化体系效能评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 243.  
 [4] 官建成. 随机服务过程及其在管理中的应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993: 143.

参数进行合理设置后方可使用, 并且算法简洁, 易于编程实现。

### 参考文献:

[1] 王润岗, 花传杰, 韩志军, 等. 虚拟环境中坦克射击训练仿真系统[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(1): 88-90.  
 [2] 闫章更. 射表编拟技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.  
 [3] 王旭智, 孙中森, 宋建中. 利用外弹道微分方程组实时快速解算高炮理论弹道的研究[J]. 电子器件, 2007, 30(6): 2297-2300.  
 [4] 周启煌, 于凉, 邱晓波. 战车火控外弹道实时解算的研究[J]. 火力与指挥控制, 2001, 26(4): 14-18.  
 [5] 孙幸福, 狄邦达. 高炮火控外弹道实时解算及其应用[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(5): 110-112.  
 [6] 黄云清, 舒适, 陈艳萍. 数值计算方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.  
 [7] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.  
 [8] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10): 2911-2916.  
 [9] 赵青. 遗传算法三种编码策略的比较研究[J]. 微型电脑应用, 2008, 24(5): 47-49.  
 [10] 李培志, 樊丁. 基于实数编码的改进遗传算法研究[J]. 宇航计测技术, 2008, 28(1): 54-57.  
 [11] 曹棕焱, 李光布, 李景辉. 遗传算法的分析及其改进[J]. 计算机仿真, 2009, 26(7): 228-231.  
 [12] M Srinivas, L M Patnaik. Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithm [J]. IEEE Trans on SMC, April, 1994, 24(4).  
 [13] 钟晓声, 李应歧. 一种基于遗传算法的防空导弹火力分配优化方法[J]. 四川兵工学报, 2009(7): 20-24.