

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.12.003

## 分层防御系统中防空导弹最佳交接区域选择

彭绍雄<sup>1</sup>, 高传斌<sup>2</sup>, 邹强<sup>1</sup>

(1. 海军航空工程学院飞行器工程系, 山东 烟台 264001;  
2. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对分层防御系统中各层防空导弹作战区域重叠的问题, 对分层防御系统中防空导弹最佳交接区域选择进行研究。以防空作战为背景, 针对分层防御系统中各层防空导弹作战区域重叠的问题, 在导弹对来袭目标允许射击次数模型基础上, 考虑导弹单发杀伤概率, 建立分层防御系统中远程、中程、近程 3 层防空导弹最佳交接区域模型, 并通过 3 个仿真实例进行分析验证。结果表明: 该模型可增加对来袭目标的拦截次数, 提高系统整体作战效能, 为分层防御系统作战效能评估和各层防空导弹性能参数确定提供参考。

**关键词:** 联合防空; 作战效能; 交接区域

**中图分类号:** TJ765.4 **文献标志码:** A

## Selection of Best Transition Area for Air Defense Missiles in Layered Defense System

Peng Shaoxiong<sup>1</sup>, Gao Chuanbin<sup>2</sup>, Zou Qiang<sup>1</sup>

(1. Department of Aircraft Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;  
2. Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** The best transition area of air defense missiles in layered defense system was studied aimed at problem of superposition of operation areas. Under the background of air defense operation and aimed at the problem above, established best transition area model for long-range, middle-range and short-range missiles in layered defense system on the basis of allowed number of shooting model and considering the single missile kill probability. Finally the model rationality was verified through three simulation examples. The results showed that this model can increase shooting number to targets, improve whole operational effectiveness of system, and provide reference for operational effectiveness evaluation of layered defense system and performance parameters determination of each layer of air defense missile.

**Key words:** joint air defense; operational effectiveness; transition area

### 0 引言

从近年来的历次局部战争可以看出, 远程精确打击已成为现代战争的基本作战样式, 依靠单一类型的武器系统进行防空作战越来越困难, 作战效能很低, 这就提出了分层防御系统, 最典型的是美国和俄罗斯的导弹防御系统。美国导弹防御系统可分为 4 层<sup>[1]</sup>: 末端底层点防御, 由 PAC-3 承担; 近程由“海麻雀”, 中程由“标准-1”和“标准-2”, 远程由“标准-2 增程”分别承担。俄罗斯海军装备了远程“利夫”、中程“施基利”、近程的“克里诺克”和末端“嘎什坦”4 个层次的舰空导弹武器系统。

为保证目标在来袭过程中被最大限度地拦截, 增加拦截成功率, 从发现目标到目标离开或被拦截的整个过程中, 一般不允许出现拦截空白, 即出现受分层防御系统防空导弹性能(如杀伤区、允许发射区等)限制而无法对目标进行拦截的空域<sup>[2]</sup>。由于分层防御系统中各层防空导弹作战区域出现了重叠, 而目前对这方面的研究很少, 笔者针对作战区域重叠的问题进行研究。

### 1 问题描述

如图 1, 从现有的分层防御系统的战技指标可以看出, 远程拦截导弹的杀伤区近界 $\rho_{yj}$ 总是小于接替拦截任务的中程拦截弹的杀伤区远界 $\rho_{zj}$ , 而中程拦截弹杀伤区近界 $\rho_{zj}$ 总小于近程拦截弹杀伤区远界 $\rho_{yj}$ 。即分层防御系统中防空区域出现了 2 部分的重叠<sup>[3]</sup>, 如何在重叠空域选择最佳交接距离, 判断继续发射远程导弹进行拦截还是交接给中程导弹拦截或中程交接给近程, 是提高分层防御系统作战效能、增加效费比必须要解决的问题。

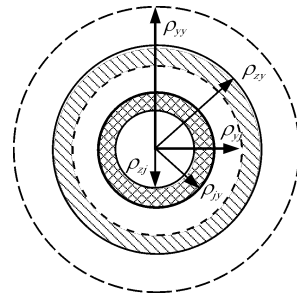


图 1 分层防御系统各射程导弹杀伤区示意图

收稿日期: 2012-06-16; 修回日期: 2012-07-02

作者简介: 彭绍雄(1966—), 男, 湖北人, 硕士, 副教授, 从事导弹武器系统工程研究。

### 2 分层防御系统拦截目标作战过程

分层防御系统中防空导弹联合防空作战过程包括目标搜索与跟踪、导弹发射、导弹飞行及毁伤目标的整个过程。防空导弹一般作战过程可以描述为<sup>[4]</sup>: 搜索雷达发现目标, 形成目标航迹数据, 并将目标航迹数据发送给作战指挥系统; 同时作战指挥系统对目标航迹进行综合识别和威胁判断后, 根据目标所处的空域向相应的武器系统下达目标指示; 武器系统收到目标指示后, 跟踪系统根据目标指示数据快速捕获并跟踪目标, 把跟踪数据反馈给武器系统指挥仪, 指挥仪根据跟踪数据解算射击诸元并带动武器对目标进行射击。防空导弹在飞行过程中以一定的制导方式进行飞行姿态的纠正, 当达到一定的条件后启动引信, 导弹爆炸, 完成对目标的拦截。分层防御系统就是在此基础上, 首先由中远程导弹进行目标拦截, 目标飞行到一定空域后, 交接给近程导弹进行拦截。为了避免拦截目标的过程中出现空白空域, 各相邻层次防空导弹作战空域出现重叠, 使得远近程导弹联合防空作战时, 有充分的空间进行目标拦截任务的交接。分层防御系统拦截目标作战过程如图2所示。

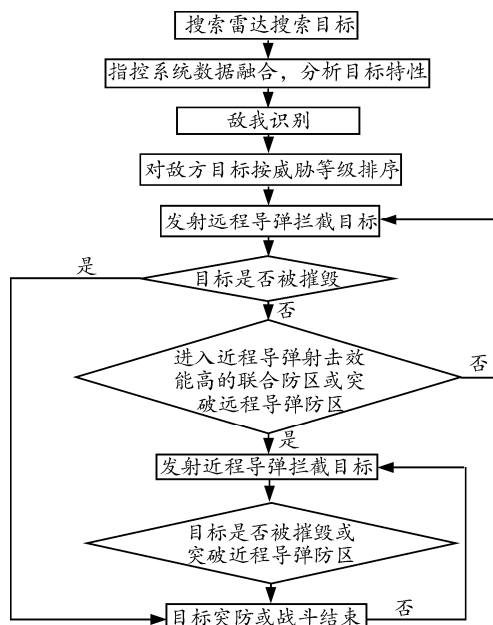


图2 联合防空作战过程

### 3 允许射击次数模型

假设目标飞行速度为  $v_m$ , 高度为  $h$ , 航路捷径为  $p$ , 以水平直线方向进袭, 在目标进入分层防御系统杀伤区之前, 已被远程预警系统发现, 所以防御系统具备足够的反应时间进行战斗准备。在目标  $M$  飞行到发射区远界时, 防空导弹发射, 一段时间后, 导弹与目标在杀伤区远界点  $M_1$  处相遇, 完成

首次射击拦截。在进行射击效果评估后立即发射第二发导弹进行拦截, 以此类推, 计算目标穿越防空导弹发射区过程中防空导弹对目标的拦截次数<sup>[5]</sup>。

具体作战过程如图3所示, 记从防空导弹武器系统阵地到第  $k(k \geq 2)$  个相遇点的水平距离为  $d_k$ , 斜距为  $\rho_k$ 。利用平面  $p=0$ 、平面  $p=p$ 、平面  $h=0$ 、平面  $h=h$ 、平面  $d=d_{max}$  将作战区域从地空导弹武器系统的杀伤区中切割出来。

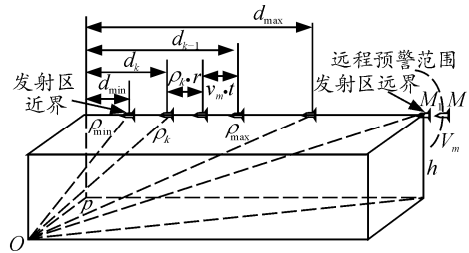


图3 防空导弹武器系统拦截目标过程示意图

$d_k$  可以由式 (1)~(7) 确定:

$$d_k = d_{k-1} - \rho_k \cdot r - v_m \cdot t_f \tag{1}$$

$$\rho_k = \sqrt{d_k^2 + h^2 + p^2} \tag{2}$$

$$d_{max} = \sqrt{\rho_{max}^2 - h^2 - p^2} \tag{3}$$

$$d_{min} = \sqrt{\rho_{min}^2 - h^2 - p^2} \tag{4}$$

$$r = v_m / v_d \tag{5}$$

$$d_1 = d_{max} \tag{6}$$

$$d_k \geq d_{min} \tag{7}$$

式中:  $t_f$  为导弹武器系统反应时间 (包含射击效果评估时间);  $\rho_k$  为第  $k$  个相遇点的斜距;  $v_m$ 、 $v_d$  为目标飞行速度、导弹平均速度;  $\rho_{max}$ 、 $\rho_{min}$  为防空导弹武器系统对目标的杀伤区远界斜距、近界斜距;  $d_{max}$ 、 $d_{min}$  为防空导弹武器系统对目标的杀伤区远界、近界在航路捷径上的投影距离。

联立式 (1)~(7), 通过编程计算, 可以求出  $k$  值, 即防空导弹对目标的允许射击次数。

### 4 防空导弹交接区域选择模型

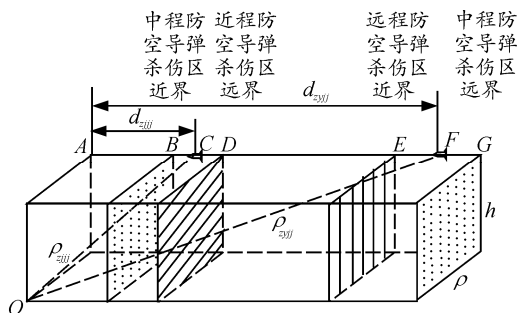


图4 防空导弹交接示意图

对图1中的2个重合区域, 如何进行防空交接

非常关键，选择合理的交接距离，决定继续发射远程导弹还是中程导弹，或选择中程导弹与近程导弹交接，可以增加对来袭目标的拦截次数，提高防空作战效能<sup>[5]</sup>。防空导弹交接过程如图 4 所示。

目标飞行到 EG 段时，中程与远程防空导弹进行交接，记交接点 F 距离阵地 O 的水平距离 AF= $d_{zyjj}$ ，交接点 F 距离阵地 O 的斜距为 OF= $\rho_{zyjj}$ ；同理，当目标飞行到 BD 段时，中程与近程防空导弹进行交接，记交接点 C 距离阵地 O 的水平距离 AC= $d_{zjjj}$ ，交接点 C 距离阵地 O 的斜距为 OC= $\rho_{zjjj}$ 。为争取防空作战效能的最大化，必须增加对来袭目标的拦截次数，结合允许射击次数模型，提出以下模型。

目标函数：

$$E_{\max} = k_1 + k_2 + k_3 \quad (8)$$

远程防空导弹约束：

$$\begin{cases} d_{k_1} = d_{k_1-1} - \rho_{k_1} \cdot r - v_m \cdot t_f \\ \rho_{k_1} = \sqrt{d_{k_1}^2 + h^2 + p^2} \\ d_{y\max} = \sqrt{\rho_{y\max}^2 - h^2 - p^2} \\ d_{y\min} = \sqrt{\rho_{zyjj}^2 - h^2 - p^2} \\ r = v_m / v_d \\ d_1 = d_{\max} \\ d_{k_1} \geq d_{y\min} \\ \rho_{y\min} \leq \rho_{zyjj} \leq \rho_{z\max} \end{cases} \quad (9)$$

中程防空导弹约束：

$$\begin{cases} d_{k_2} = d_{k_2-1} - \rho_{k_2} \cdot r - v_m \cdot t_f \\ \rho_{k_2} = \sqrt{d_{k_2}^2 + h^2 + p^2} \\ d_{z\max} = \sqrt{\rho_{zyjj}^2 - h^2 - p^2} \\ d_{z\min} = \sqrt{\rho_{zjjj}^2 - h^2 - p^2} \\ r = v_m / v_d \\ d_1 = d_{z\max} \\ d_{k_2} \geq d_{z\min} \\ \rho_{z\min} \leq \rho_{zjjj} \leq \rho_{j\max} \\ \rho_{y\min} \leq \rho_{zyjj} \leq \rho_{z\max} \end{cases} \quad (10)$$

近程防空导弹约束：

$$\begin{cases} d_{k_3} = d_{k_3-1} - \rho_{k_3} \cdot r - v_m \cdot t_f \\ \rho_{k_3} = \sqrt{d_{k_3}^2 + h^2 + p^2} \\ d_{j\max} = \sqrt{\rho_{zjjj}^2 - h^2 - p^2} \\ d_{j\min} = \sqrt{\rho_{j\min}^2 - h^2 - p^2} \\ r = v_m / v_d \\ d_1 = d_{j\max} \\ d_{k_3} \geq d_{z\min} \\ \rho_{z\min} \leq \rho_{zjjj} \leq \rho_{j\max} \end{cases} \quad (11)$$

其中： $k_1, k_2, k_3$  为远程、中程、近程防空导弹对目标的拦截次数； $\rho_{zyjj}, \rho_{zjjj}$  为中远程、中近程防空导弹交接时的斜距； $d_{y\max}, d_{y\min}, d_{z\max}, d_{z\min}, d_{j\max}, d_{j\min}$  为远、中、近程导弹杀伤区远、近界对应的水平距离； $\rho_{y\max}, \rho_{y\min}, \rho_{z\max}, \rho_{z\min}, \rho_{j\max}, \rho_{j\min}$  为远、中、近程导弹杀伤区远界、近界斜距。

### 5 考虑单发杀伤概率的作战效能模型

对分层防御系统而言，远、中、近程 3 种导弹进行联合防空作战，各种导弹对目标的杀伤概率不同，所以在交接区域选择模型基础上，考虑单发杀伤概率能更准确地反映系统真实的作战效能。

记分层防御系统远、中、近程防空导弹单发杀伤概率为  $p_1, p_2, p_3$ ，作战效能取防空导弹武器系统杀伤目标的期望值，即  $E=p \cdot k$ ， $p$  表示单发杀伤概率， $k$  表示拦截次数。在上节建立的交接区域选择模型基础上对模型进行修正，在约束条件不变的情况下，将目标函数修改为  $E_{\max}=p_1 \cdot k_1+p_2 \cdot k_2+p_3 \cdot k_3$ 。

### 6 仿真与结果分析

为检验模型的合理性，笔者设计了 3 个仿真实验：首先定量分析导弹参数对作战效能的影响；然后分析目标参数对作战效能的影响；最后根据建立的交接区域选择模型，计算分层防御系统中防空导弹的最佳交接距离。

#### 6.1 防空导弹性能参数对系统作战效能影响

设目标为飞行高度 1 km，航路捷径 10 km 的战斗机群，防空导弹对该目标的杀伤区远界为 120 km，近界为 15 km，分别计算防空导弹自身速度、系统反应时间和目标与防空导弹速度比  $v_m/v_d$  对系统作战效能的影响，仿真结果如图 5 所示。

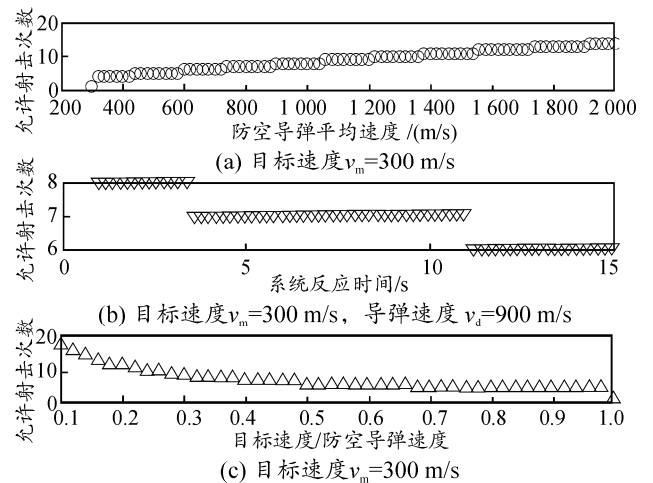


图 5 防空导弹参数与射击次数关系

从图5可以看出, 允许射击次数随防空导弹速度的增加而增大, 而进一步的仿真表明, 增大趋势不会一直延续, 这主要是受到系统反应时间的限制, 单纯依靠增加防空导弹速度无法实现作战效能的最优化, 必须设法缩短系统反应时间。

## 6.2 来袭目标参数对系统作战效能的影响

设某型防空导弹对典型目标的杀伤区远界为120 km, 近界为15 km, 导弹平均飞行速度为900 m/s, 系统反应时间为3 s, 利用Matlab编程分别计算来袭目标速度、目标航路捷径和目标飞行高度对系统作战效能的影响, 仿真结果如图6所示。

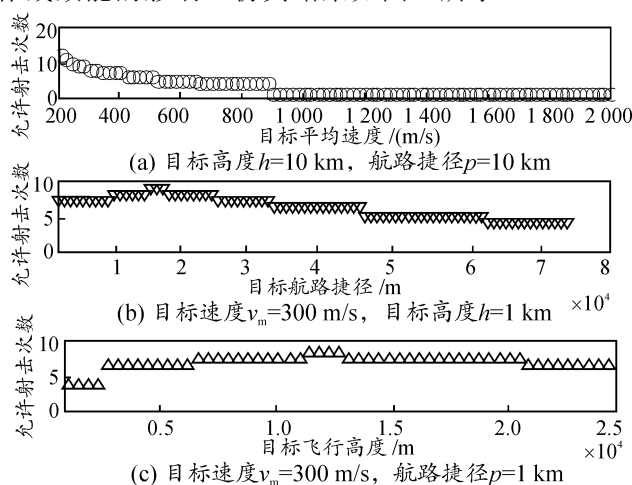


图6 来袭目标参数对系统作战效能的影响

从图6中可以看出, 目标飞行速度对系统作战效能的影响非常大: 当目标速度超过防空导弹速度时, 系统作战效能急剧下降; 从目标航路捷径和飞行高度图中可以看出, 防空导弹武器系统作战效能一定区域内达到峰值, 这是由于导弹的杀伤区远界到高远界的边界和杀伤区近界都呈现出弧面, 所以当目标飞行高度不超过弧面中部最突出部分时, 在一定范围内, 随着高度和航路捷径的增大, 目标穿越杀伤区的距离就越大, 时间越长, 留给导弹的射击次数就越多。这点对于要地防空和舰艇编队防空具有极大的意义, 在不同区域合理配置多套防空武器系统, 能够保证各个方向来袭目标都处在系统最佳作战效能的拦截区域。

## 6.3 最佳交接区域

设目标为战斗机群, 平均飞行速度  $v_m=300$  m/s, 高度为1 km, 航路捷径为4 km, 分层防御系统远、中、近程导弹平均飞行速度分别为600, 900, 1 000 m/s, 对此典型目标的杀伤区远界分别为120, 50, 15 km, 杀伤区近界分别为20, 10, 1 km, 单发杀伤概率分

别为0.8, 0.9, 0.7, 系统反应时间分别为  $t_f=8, 5, 2$  s, 仿真结果如图7所示。

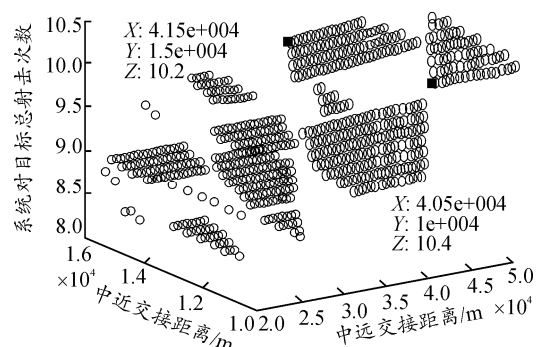


图7 最佳交接区域仿真结果

从图7可以看出, 中远程防空导弹交接距离  $\rho_{zyij}$  与中近程防空导弹交接距离  $\rho_{zjij}$  相互制约。当中近程防空导弹交接距离为  $\rho_{zjij}=(10\pm 0.5)$  km 时, 中远程防空导弹交接距离取  $\rho_{zyij}=(40.5\sim 50)$  km  $\pm 0.5$  km (其中  $\pm 0.5$  km 是仿真步长产生的误差), 此时系统作战效能  $E=10.4$  最大; 当中近程防空导弹交接距离为  $\rho_{zjij}=(12.5\pm 0.5)$  km 时, 中远程防空导弹交接距离只能取  $\rho_{zyij}=(48.5\sim 50)$  km  $\pm 0.5$  km, 系统作战效能才能最大化。所以分层防御系统最佳交接区域, 不仅与目标特性(如速度、高度、航路捷径等)有关, 还与系统自身参数有关, 而且中远程导弹交接与中近程交接区域相互影响, 把握好这个最佳交接范围, 可以使得系统作战效能最大。

## 7 结论

研究表明: 系统在重叠区存在最佳交接区域, 在这个最佳区域中完成防空任务的交接, 可增加对来袭目标的拦截次数, 提高系统整体作战效能。对最佳交接区域的定量计算, 可以为分层防御系统的作战效能评估和系统中远、中、近程导弹性能参数平衡提供参考, 同时为多套分层防御系统区域配置提供理论依据, 确保区域防空作战效能最大化。

## 参考文献:

- [1] 张巍, 王敏, 许世录. 美国导弹防御系统的发展动向分析[J]. 现代防御技术, 2007, 35(3): 25-31.
- [2] 司万兵, 赵新国, 杨志强. 美国导弹防御系统的发展现状和影响[J]. 兵工自动化, 2011, 30(1): 1-3.
- [3] 王涛, 唐宴虎. 弹炮结合武器系统火力衔接问题研究[J]. 现代防御技术, 2007, 35(5): 92-95.
- [4] 于松书, 唐硕. 基于 petri 网的防空作战过程建模[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(3): 38-41.
- [5] 姚悦亭, 赵建军, 吕小勇, 等. 舰空导弹的射击次数模型[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(3): 81-84.