

# 地空导弹武器反 TBM 作战优化部署模型研究

段锁力<sup>1</sup>, 张多林<sup>2</sup>, 刘昌云<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800; 2. 空军工程大学科研部, 陕西 西安 710051)

**摘要** 为了提高地空导弹武器反 TBM 作战效能, 主要针对单套活力单元的部署问题进行研究。首先分析了影响地空导弹武器反 TBM 作战部署的主要因素和原则; 其次, 提出了地空导弹武器最大杀伤纵深优化部署准则; 最后, 充分考虑 TBM 再入角影响, 利用 TBM 末段近似直线弹道的特性, 建立了地空导弹武器“一对一”和“一对多”2 种作战模式下的优化部署解析模型。仿真计算表明: 所建地空导弹武器反 TBM 部署模型可行有效, 能够满足地空导弹武器反 TBM 作战的要求。

**关键词** 反 TBM; 杀伤纵深; 优化部署模型

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.06.008

**中图分类号** N945.15 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)06-0039-05

武器系统的部署问题是影响其作战效能的重要因素<sup>[1]</sup>。在地空导弹武器反 TBM 作战过程中, 合理的部署是地空导弹武器是拦截 TBM 的前提。文献[2]给出了一种以掩护能力为指标优化部署模型, 文献[3]给出了其杀伤区的确定方法。关于地空导弹武器系统部署问题的研究大多都是以定性分析为主<sup>[2-3]</sup>, 定量分析<sup>[4-5]</sup>为辅。本文主要是在目前的研究基础上, 主要针对地空导弹武器单个火力单元反 TBM 作战部署进行研究, 针对“一对一”和“一对多”2 种作战样式进行研究, 重点分析 TBM 的再入角因素, 建立地空导弹武器反 TBM 的防御部署优化模型。

## 1 地空导弹武器反 TBM 部署要遵循的原则

1) 地空导弹武器部署后, 应保证其防御面积尽可能多的覆盖保护的区域。只要来袭 TBM 攻击目标时其弹道经过地空导弹武器的杀伤区, 就能起到对保护目标的有效防御作用。

2) 地空导弹武器部署后, 应保证尽可能的提高其单发杀伤概率。影响地空导弹武器单发杀伤概率的因素有很多, 主要影响因素有拦截弹的可靠度、制导误差规律、目标在杀伤区的位置。地空导弹武器系统在杀伤区的水平方向和垂直方向都服从正态分布<sup>[6]</sup>, 所以越靠近杀伤区的中心, 其杀伤概率越大。

3) 地空导弹武器部署后, 应保证尽可能增加其防御纵深。防御纵深定义: 来袭 TBM 穿过武器系统杀伤区所经过的路径。只要有有效防御纵深, 就可以满足以上 2 条, 且增加防御纵深可以增加拦截次数的可能性, 可以通过增加拦截次数来降低 TBM 的突防概率。可见单 TBM 防御部署问题是以有效增加防御纵深为主要目的的部署问题。

## 2 坐标建立和垂直杀伤区

只要来袭 TBM 弹道经过地空导弹武器的杀伤区就是有效部署<sup>[7]</sup>, 但最佳部署才是部署的终极目标, 本

\* 收稿日期: 2011-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61102109)

作者简介: 段锁力(1979-), 男, 河北保定人, 博士生, 主要从事建模与仿真, 反导任务规划研究。

E-mail: suoliduan@163.com

文以最大杀伤纵深为准则建立最佳部署模型<sup>[8-11]</sup>。首先建立发射架为原点的直角坐标系,坐标系的原点通常选取为地面某固定点(如雷达、指挥控制车、导弹发射装置点等);垂直杀伤区见图1。垂直杀伤区为点 $(H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6)$ 围成的区域,其边界条件为:

$$\begin{cases} h_1 < H < h_2 \\ \varepsilon_{\min} < \varepsilon < \varepsilon_{\max} \\ r < D < R \end{cases} \quad (1)$$

式中: $H$ 为纵坐标; $h_1$ 为杀伤区低界; $h_2$ 为杀伤区高界; $\varepsilon, \varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}$ 分别为高低角、高低角下界,高低角上界; $D$ 为斜距; $r$ 为最小斜距; $R$ 为最大斜距。

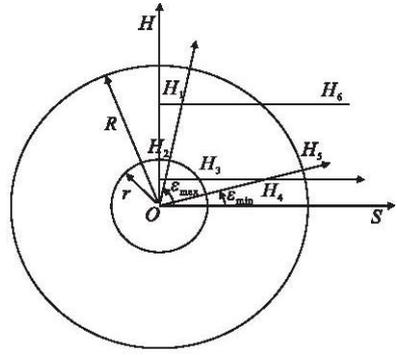


图1 垂直杀伤区

Fig.1 The vertical kill zone

### 3 优化部署模型

地空导弹武器对目标的杀伤纵深因TBM再入角的不同和进入地空导弹武器的杀伤区入点的不同会有很大不同。假定相同射程的TBM的再入角相同,不同射程的TBM其再入角随着射程变远而变大。为了方便计算,可以假设末段是一条直线弹道。按照图1所建立的直角坐标系,可以表示为一个线性函数:

$$y = x \tan \varepsilon + b \quad (2)$$

式中: $x$ 为纵坐标; $b$ 为纵坐标截距; $\tan \varepsilon$ 为斜率。顶点的坐标为 $H_1(h_2/\tan(75^\circ), h_2), H_2(r \cos(75^\circ), r \sin(75^\circ)), H_3(\sqrt{r^2 - h_1^2}, h_1), H_4(h_1/\tan(15^\circ), h_1), H_5(R \cos(15^\circ), R \sin(15^\circ)), H_6(\sqrt{R^2 - h_2^2}, h_2)$ 。

式(2)分别经过6个顶点时的 $b$ 的取值分别为( $\varepsilon_{\min} = 15^\circ, \varepsilon_{\max} = 75^\circ$ ): $b_1 = h_2(1 - \tan \varepsilon / \tan 75^\circ); b_2 = r(\sin 75^\circ - \tan \varepsilon \cos 75^\circ); b_3 = h_1 - \tan \varepsilon \sqrt{r^2 - h_1^2}; b_4 = h_1(1 - \tan \varepsilon / \tan 15^\circ); b_5 = R(\sin 15^\circ - \tan \varepsilon \cos 15^\circ); b_6 = h_2 - \tan \varepsilon \sqrt{R^2 - h_2^2}$ 。以上 $b$ 的取值大小顺序为:

$$b_1 > b_6 > b_2 > b_3 > b_4 > b_5 \quad (3)$$

以 $b$ 的取值变化来反应TBM的攻击位置的变化是可行的。由于杀伤纵深的计算受到TBM再入角 $\varepsilon$ 的影响,主要体现在当 $30^\circ < \varepsilon < \varepsilon_1, \varepsilon_1 < \varepsilon < \varepsilon_2, 60^\circ > \varepsilon > \varepsilon_2$ 3种情况见如图2。

1) 当 $30^\circ < \varepsilon < \varepsilon_1$ 时,设武器系统的防御纵深为 $D(S, H)$ ,其表达式分以下5种情况。

①当 $b_6 < b \leq b_1$ 时,解 $\begin{cases} y = x \tan \varepsilon + b \\ y = h_2 \end{cases}$ ,得交点坐标为:

$$\begin{cases} x_1 = (h_2 - b) / \tan \varepsilon \\ y_1 = h_2 \end{cases} \quad (4)$$

解 $\begin{cases} y = \tan \varepsilon x + b \\ y = \tan 75^\circ x \end{cases}$ ,得交点坐标为:

$$\begin{cases} x_2 = b / (\tan 75^\circ - \tan \varepsilon) \\ y_2 = b \tan 75^\circ / (\tan 75^\circ - \tan \varepsilon) \end{cases} \quad (5)$$

所以杀伤纵深为:

$$D(S, H) = ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)^{1/2} = [((h_2 - b \tan 75^\circ / (\tan 75^\circ - \tan \varepsilon))^2 + ((h_2 - b) / \tan \varepsilon - b / (\tan 75^\circ - \tan \varepsilon))^2]^{1/2} \quad (6)$$

②当 $b_2 < b \leq b_6$ 时,解 $\begin{cases} y = x \tan \varepsilon + b \\ y = \sqrt{R^2 - x^2}, x \geq 0 \end{cases}$ ,得交点坐标为:

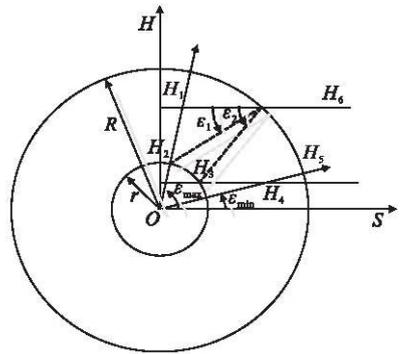


图2 再入角不同影响示意图

Fig.2 The influence of different reentry angle

$$\begin{cases} x_3 = -2btan\varepsilon + \sqrt{4b^2 \tan^2 \varepsilon - 4(\tan^2 \varepsilon + 1)(b^2 - R^2)} \\ y_3 = (R^2 - (-2btan\varepsilon + \sqrt{4b^2 \tan^2 \varepsilon - 4(\tan^2 \varepsilon + 1)(b^2 - R^2)})^2)^{1/2} \end{cases} \quad (7)$$

由式(4)和式(7)得到杀伤纵深为:

$$D(S, H) = ((x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2)^{1/2} \quad (8)$$

③当  $b_3 < b \leq b_2$  时,解  $\begin{cases} y = xtan\varepsilon + b \\ y = \sqrt{r^2 - x^2} \end{cases}$ , 得交点坐标为:

$$\begin{cases} x_4 = -2btan\varepsilon + \sqrt{4b^2 \tan^2 \varepsilon - 4(\tan^2 \varepsilon + 1)(b^2 - r^2)} \\ y_4 = (r^2 - (-2btan\varepsilon + \sqrt{4b^2 \tan^2 \varepsilon - 4(\tan^2 \varepsilon + 1)(b^2 - r^2)})^2)^{1/2} \end{cases} \quad (9)$$

所以杀伤纵深为:

$$D(S, H) = ((x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2)^{1/2} \quad (10)$$

④当  $b_4 < b \leq b_3$  时,解  $\begin{cases} y = xtan\varepsilon + b \\ y = h_1 \end{cases}$ , 得交点坐标为:

$$\begin{cases} x_5 = (h_1 - b)/tan\varepsilon \\ y_5 = h_1 \end{cases} \quad (11)$$

所以得到杀伤纵深为:

$$D(S, H) = ((x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2)^{1/2} \quad (12)$$

⑤当  $b_5 \leq b \leq b_4$  时,解  $\begin{cases} y = xtan\varepsilon + b \\ y = tan15^\circ x \end{cases}$ , 得交点坐标为:

$$\begin{cases} x_6 = b/(tan15^\circ - tan\varepsilon) \\ y_6 = btan15^\circ/(tan15^\circ - tan\varepsilon) \end{cases} \quad (13)$$

所以杀伤纵深为:

$$D(S, H) = ((x_3 - x_5)^2 + (y_3 - y_5)^2)^{1/2} \quad (14)$$

综上所述可以得到总的杀伤纵深数学模型为:

$$D(S, H, b) = \begin{cases} D(S, H) = ((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2)^{1/2}, & b_6 < b \leq b_1 \\ D(S, H) = ((x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2)^{1/2}, & b_2 < b \leq b_6 \\ D(S, H) = ((x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2)^{1/2}, & b_3 < b \leq b_2 \\ D(S, H) = ((x_3 - x_5)^2 + (y_3 - y_5)^2)^{1/2}, & b_4 < b \leq b_3 \\ D(S, H) = ((x_3 - x_6)^2 + (y_3 - y_6)^2)^{1/2}, & b_5 \leq b \leq b_4 \end{cases} \quad (15)$$

2) 当  $\varepsilon_1 < \varepsilon < \varepsilon_2$  时,  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6$  的大小顺序发生了改变:

$$b_1 > b_2 > b_6 > b_3 > b_4 > b_5 \quad (16)$$

同理可以得到综合杀伤纵深数学模型为:

$$D(S, H, b) = \begin{cases} D(S, H) = ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)^{1/2}, & b_2 < b \leq b_1 \\ D(S, H) = ((x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2)^{1/2}, & b_6 < b \leq b_2 \\ D(S, H) = ((x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2)^{1/2}, & b_3 < b \leq b_6 \\ D(S, H) = ((x_3 - x_5)^2 + (y_3 - y_5)^2)^{1/2}, & b_4 < b \leq b_3 \\ D(S, H) = ((x_3 - x_6)^2 + (y_3 - y_6)^2)^{1/2}, & b_5 \leq b \leq b_4 \end{cases} \quad (17)$$

3) 当  $60^\circ > \varepsilon > \varepsilon_2$  时:

$$b_1 > b_2 > b_3 > b_6 > b_4 > b_5 \quad (18)$$

同理可以得到综合杀伤纵深数学模型为:

$$D(S, H, b) = \begin{cases} D(S, H) = ((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2)^{1/2}, & b_2 < b \leq b_1 \\ D(S, H) = ((x_1 - x_4)^2 + (y_1 - y_4)^2)^{1/2}, & b_3 < b \leq b_2 \\ D(S, H) = ((x_1 - x_5)^2 + (y_1 - y_5)^2)^{1/2}, & b_6 < b \leq b_3 \\ D(S, H) = ((x_3 - x_5)^2 + (y_3 - y_5)^2)^{1/2}, & b_4 < b \leq b_6 \\ D(S, H) = ((x_3 - x_6)^2 + (y_3 - y_6)^2)^{1/2}, & b_5 \leq b \leq b_4 \end{cases} \quad (19)$$

部署模型就是为了保证来袭 TBM 在杀伤区的杀伤纵深最大,即为:

$$\begin{aligned} & \max D(S, H, b, \varepsilon) \\ \text{s. t. } & h_1 < H < h_2; \varepsilon_{\min} < \varepsilon < \varepsilon_{\max}; r < D < R; b_5 \leq b \leq b_1 \end{aligned} \quad (20)$$

但是由于 TBM 的来袭方向和攻击区域内的目标位置不同,往往不能同时保证所有 TBM 都具有最大的杀伤纵深,部署方案应该以总体杀伤纵深最大为准则,得到的优化模型为:

$$\begin{aligned} & \max \sum_{i=1}^N w_i D_i(S, H, b, \varepsilon) \\ \text{s. t. } & \begin{cases} h_1 < H < h_2; \varepsilon_{\min} < \varepsilon < \varepsilon_{\max}; r < D < R \\ b_5 \leq b \leq b_1; \sum_{i=1}^N w_i = 1, \text{ 且 } 0 \leq w_i \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (21)$$

式中  $w_i$  为目标  $i$  的威胁权重系数。

## 4 仿真验证

假设地空导弹武器的杀伤区参数为:  $40 < H < 150$  (km);  $15^\circ < \varepsilon < 75^\circ$ ;  $60 < D < 200$  (km)。假设有 3 个来袭 TBM,为了简化且能说明问题,不妨假设这 3 个来袭的 TBM 刚好在同一个垂直杀伤区平面内。在杀伤区垂直平面内分别攻击防御区域内的目标点  $D_1, D_2, D_3$ ,假设这 3 个来袭 TBM 同等重要,这 3 个点都在  $S$  轴上相距 5 km,再入角分别为:  $\pi/3, \pi/4, \pi/4$ 。建立 3 个来袭 TBM 的近似弹道方程为:

$$y = \frac{\sqrt{3}}{2}x + b'; y = x + b''; y = x + b'''$$

$b', b'', b'''$  之间的关系为:

$$b' = \frac{\sqrt{3}}{2}(b'' + 5); b''' = b'' - 5$$

根据再入角求得  $b'_1, b'_2, b'_3, b'_4, b'_5, b'_6, b''_1, b''_2, b''_3, b''_4, b''_5, b''_6, b'''_1, b'''_2, b'''_3, b'''_4, b'''_5, b'''_6$  的值见表 1。

表 1 真值表

Tab. 1 The real value of  $b$

TBM	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$
TBM1	80.384 8	25.881 9	-11.961 5	-218.564 1	-282.842 7	-79.128 8
TBM2	109.807 6	35.355 3	10.000 0	-109.282 0	-141.421 4	17.712 4
TBM3	109.807 6	35.355 3	10.000 0	-109.282 0	-141.421 4	17.712 4

为了保证被保护目标都在掩护区内,  $b''$  的取值范围为  $(-136.421 4, 87.376 0)$ ,所以模型就变为以  $b''$  为变量的最大值求解问题。解得  $b'' = 17.712 4$  时取得最大值,部署方案为:距离 TBM2 的距离为 17.712 4 km。

所选方案相对简单,但是很清晰地验证了所建模型正确性、有效性和求解的可行性。

## 5 结束语

本文针对地空导弹武器在反 TBM 的作战过程中的部署问题进行了研究,建立以最大防御纵深为准则的“一对一”和“一对多”2 种作战样式的防御部署优化模型,通过仿真验证,表明所建优化部署模型简单高效。接下来的工作要对模型的求解问题进行研究,给出高效的求解算法,以满足实时作战的需要。

## 参考文献:

- [1] 高尚. 多道防线导弹优化部署[J]. 南京航空航天大学学报, 2002, 34(2): 126 - 129.  
GAO Shang. Optimum deployment model for multi - lines of missile defence[J]. Journal of Nanjing university of aeronautics & astronautics, 2002, 34(2): 126 - 129. (in Chinese)
- [2] 邢清华, 刘付显. 区域防空部署优化系统建模[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(5): 712 - 715.  
XING Qinghua, LIU Fuxian. Modeling on area air defense optimization deployment system[J]. Systems engineering and electronics, 2006, 28(5): 712 - 715. (in Chinese)
- [3] 曹海江, 刘铭, 王威. 地空导弹抗击 TBM 杀伤区仿真研究[J]. 现代防御技术, 2008, 36(4): 19 - 24.  
CAO Haijiang, LIU Ming, WANG Wei. Research on the damage zone of SAM intercepting the tactical ballistic missile[J]. Modern defence technology, 2008, 36(4): 19 - 24. (in Chinese)
- [4] 刘健. 反 TBM 战斗部署优化问题[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(2): 123 - 126.  
LIU Jian. Optimization of anti - TBM disposition[J]. Systems engineering - theory & practice, 2002, 22(2): 123 - 126. (in Chinese)
- [5] 刘健, 王颖龙, 聂成. 反战术弹道导弹(TBM)战斗部署有关问题探讨[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(3): 66 - 68.  
LIU Jian, WANG Yinglong, NIE Cheng. Some problems about anti - TBM disposition[J]. Systems engineering and electronics, 2001, 23(3): 66 - 68. (in Chinese)
- [6] 周林, 张文, 娄寿春, 等. 多通道地空导弹武器系统拦截决策模型研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(6): 698 - 699.  
ZHOU Lin, ZHANG Wen, LOU Shouchun, et al. Study on the model of intercepting decision for multi channel surface to air missile weapon system[J]. Journal of system simulation, 2002, 14(6): 698 - 699. (in Chinese)
- [7] Nelson Steven L. Alternative approach to the solution of Lambert's problem[J]. Journal of guidance control and dynamics, 1992, 15(4): 1003 - 1009.
- [8] Lys, Navarro Serment, John Modula, et al. Optimal sensor placement for cooperative distributed vision [C]//International conference on robotics & automation. New Orleans: [s. n. ], 2004: 939 - 944.
- [9] Hong Zhang. Optimal sensor placement [C]//International conference on robotics and automation. Nice: [s. n. ], 1992: 1852 - 1860.
- [10] Michele Garetto, Marco Griboaldo, Carla Fabiana Chiasserini. Sensor deployment and relocation: an unified scheme [J]. Journal of computer science and technology, 2008, 23(3): 400 - 412.
- [11] Sonic Martinez. On optimal sensor placement and motion coordination for target tracking [C]//International conference on robotics and automation. Barcelona: [s. n. ], 2005: 4544 - 4549.

(编辑:田新华)

## Research on the Model of Optimal Disposition of the Surface to Air Missile Weapon System Intercepting TBM

DUAN Suo - li<sup>1</sup>, ZHANG Duo - lin<sup>2</sup>, LIU Chang - yun<sup>1</sup>

(1. Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 2. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** In order to improve the anti - TBM effectiveness of the surface to air missile weapon, the problem that the disposition of one piece of the surface to air missile weapon system is studied in the paper. Firstly, some major factors that influence the surface to air missile weapon system intercepting TBM are analyzed. Secondly, the rule of the maximum killed depth (KD) is put forward. Finally, by taking the reentry angle of TBM into account and making use of the ballistic trajectory character of approximately beeline, the two optimal models of anti - TBM defense disposition are established which are about "single to single" and "single to multi" fighting patterns. At last, an example simulation is given, which testifies that the models are effective, feasible available and can meet the demand of anti - TBM.

**Key words:** anti - TBM; killed depth; model of optimization Disposition