

防空导弹目标分配优化方法研究*

王晓红^{1,2}, 沈永福²

(1 海军装备研究院, 北京 100161; 2 海军航空工程学院, 山东烟台 264001)

摘要:从工程实践角度,对防空导弹目标分配总体方法进行研究,包括:应该解决的若干问题、目标可分配区的计算方法、目标分配的总体思路 and 流程、分配算法优化等。重点针对防空导弹对不同类别目标具有不同杀伤区的问题,提出通过限定目标参与分配方案计算的时机以改善武器系统设计效果的新思路;介绍将传统的匈牙利算法应用于目标分配的处理方法,并提出一种基于启发式算法、可提高运行效率的求解方法。仿真结果验证了该方法的可行性。

关键词:防空导弹;目标分配;优化匹配;启发式求解

中图分类号:E926.4 **文献标志码:**A

The Research on Optimized Method of Target Assignment for Antiaircraft Missiles

WANG Xiaohong^{1,2}, SHEN Yongfu²

(1 Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China;

2 Naval Aeronautical and Astronautical University, Shandong Yantai 264001, China)

Abstract: The target assignment method was wholly studied from the perspective of engineering application, which includes some problems ought to be solved, the calculation method of assignable zone, the overall approach and flow, and the optimal arithmetic. Moreover, aiming at the problem that the antiaircraft missiles have different killing zones for different target types, a new approach of target assignment was presented which could improve the design effects of the weapon systems by limiting the calculation occasion of target to participate in assignment scheme. The handling method which adopts traditional Hungary Arithmetic for target assignment was introduced, and a new method based on the heuristic approach was presented, which can improve the functioning efficiency. Simulation results showed its feasibility.

Keywords: antiaircraft missile; target assignment; optimized matching; heuristic approach

0 引言

防空导弹的作战决策过程主要包括:拦截可行性判断、威胁评定和排序、目标分配等。其中,目标分配是指根据目标运动参数、数量和防空导弹火力通道的数量、性能、导弹资源等,将目标分配给不同火力通道拦截,使防空作战效能达到极大的优化技术。从数学上讲,就是要在给定的约束条件下,寻求满足目标函数的目标分配方案。现有文献对目标分配算法的研究,多数侧重于目标分配结果的寻优^[1-6]。但在实践中,随着空袭目标种类的增多,防空导弹需要拦截多种目标,而对不同类别的目标会有不同的杀伤区,为了在目标密集攻击条件下最大限度的利用防空导弹火力资源,有必要考虑这一因素带来的影响,从总体思路上确定一种优化的处理方法,并将有关目标分配

的理论研究和工程应用结合起来。

文中从工程实践角度出发,对防空导弹目标分配总体方法进行了研究,包括:目标分配应该解决的相关问题,目标可分配区的计算方法,目标分配的总体思路 and 流程,目标分配算法的寻优等。其中,重点针对防空导弹对不同类别目标具有不同杀伤区的问题,探讨了目标分配方法改进的总体思路,确定了在各个时刻对哪些目标进行分配方案计算;以及如何将传统的匈牙利算法应用于防空目标分配,另外,从提高运行效率的角度,提出了一种基于启发式算法的求解方法。

1 目标分配应解决的若干问题

作为防空导弹作战决策过程中的关键环节之一,目标分配需解决的相关问题主要包括:

* 收稿日期:2011-11-30

作者简介:王晓红(1975-),女,山东青州人,工程师,博士研究生,研究方向:军事装备学。

- 1) 各个火力通道责任扇区的划分;
- 2) 目标可分配区计算;
- 3) 目标分配策略。

其中,划分火力通道责任扇区是为了确定作战时各火力通道所负责的舷角范围。该范围的划分需要根据总的作战扇区大小、防空导弹的发射方式、通道数量、安装位置及周围物体的遮挡等综合确定^[7]。各扇区之间必要的重合是需要的,但重合太多又会增加目标分配的复杂性,因此应进行初步划分后再利用各种优化算法进行调整。文中对此不作展开讨论,重点对后两个问题进行探讨。

2 目标可分配区计算

目标可分配区由分配始线和末线共同限定。分配始线与末线的准确定义为:当目标越过分配始线后,就可以将它分配给导弹武器的某一火力通道,该通道开始启动对该目标的拦截准备过程,包括选弹、导弹加电等;如果目标已越过分配末线而还未分配的话,则不再分配。

设置目标分配始线和末线的原因在于:

1) 如果目标未到达分配始线就予以分配,对于倾斜发射型或采用指令制导、半主动寻的等制导方式的防空导弹而言,会使发射装置、制导雷达或照射雷达等提早进入调转指向、等待发射状态,导致通道占用、系统资源浪费;

2) 如果目标已经越过分配末线但还未分配,考虑到武器系统的反应时间,即便这时马上分配,也已来不及拦截,因此不应再予以分配。

2.1 分配始线的计算方法

1) 当目标做超低空飞行(飞行高度接近 0)、且以 0 航路飞来时,分配始线可表示为:

$$R_{\text{fpxs}} = R_{\text{ssj}} + (t_1 + t_2 + t_3) \times V_T \quad (1)$$

其中: R_{fpxs} 为目标分配始线; R_{ssj} 为导弹杀伤区远界; t_1 为导弹飞至杀伤区远界所需时间; t_2 为武器系统的反应时间; t_3 为时间裕量; V_T 为目标速度。

2) 当目标以一定高度飞行、或有航路时,分配始线应随之调整,如图 1 所示。图中,目标飞行高度为 H ,航路为 0,则有:

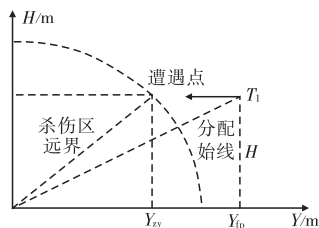


图 1 分配始线计算示意图

$$R_{\text{fpxs}} = \sqrt{Y_{\text{fp}}^2 + H^2} \quad (2)$$

$$Y_{\text{fp}} = Y_{\text{zy}} + (t_1 + t_2 + t_3) \times V_T \quad (3)$$

$$Y_{\text{zy}} = \sqrt{R_{\text{yj}}^2 - H^2} \quad (4)$$

当存在航路捷径时,式(2)、式(4)中还要加入航路捷径,调整为:

$$R_{\text{fpxs}} = \sqrt{Y_{\text{fp}}^2 + H^2 + P^2} \quad (5)$$

$$Y_{\text{zy}} = \sqrt{R_{\text{yj}}^2 - H^2 - P^2} \quad (6)$$

2.2 分配末线的计算方法

分配末线的计算方法同理,用杀伤区近界 R_{ssj} 代替杀伤区远界 R_{ssj} 即可。但需注意的是,由于导弹最大过载能力有限,在拦截有航路或一定高度的目标时,能实现的杀伤近界要受杀伤区最大俯仰角和最大航路角的限制,因此当下式:

$$\sqrt{R_{\text{ssj}}^2 - H^2 - P^2} < Y_{\text{zy}, \text{min}} \quad (7)$$

成立时,取: $Y_{\text{zy}} = Y_{\text{zy}, \text{min}}$

其中:

$$Y_{\text{zy}, \text{min}} = \max(\sqrt{(H \cdot \cot \alpha)^2 - P^2}, P \cdot \cot \beta) \quad (8)$$

式中, α 、 β 分别为杀伤区的最大俯仰角和最大航路角。

由此可知,由于目标的高度和航路,以及导弹杀伤区最大俯仰角、最大航路角的存在,使得导弹对该目标的杀伤近界推后,分配末线也相应增加。

3 目标分配策略

目标分配策略则是指求得目标分配方案的整个过程中所采用的方法,包括:在每个时刻对哪些目标进行分配方案计算、对这些目标进行分配的计算模型、求解方法等。

3.1 目标分配的总体思路

常用的目标分配方法是:在每个计算周期,按照目标的威胁排序,选取威胁值最大的若干目标进行分配方案的计算,然后再判断目标是否越过分配始线,一旦越过则按分配方案计算结果将其分配给相应通道,该通道开始进入选弹、加电等一系列拦截程序,如图 2 所示。

这种处理方法看似合理,威胁度较高的目标优先参与分配方案计算,并且和威胁度较低的目标处于同一火力通道责任扇区时也会优先分配。但实际上,由于防空导弹对不同类型的目标有不同的杀伤区,也就有不同的可分配区,威胁度高的目标并不一定比威胁度低的目标先进入可分配区。按照前述方法计算时,

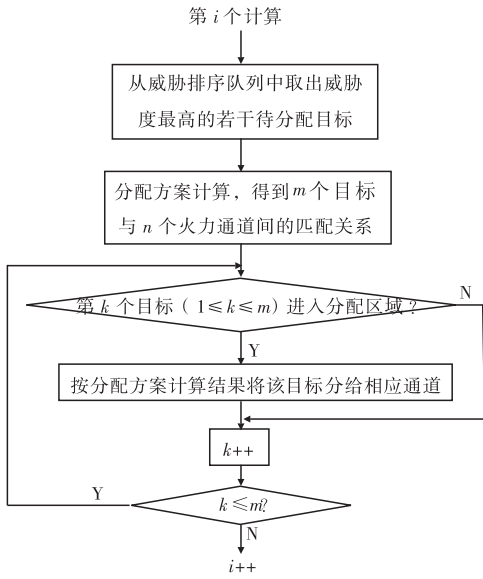


图2 常用的目标分配方法流程

并未考虑谁先进入可分配区的问题,而仅仅考虑了威胁程度的高低,因此得到的结果必然是有利于威胁度较高的目标,而威胁度相对较低的目标,即便进入了可分配区,也有可能不能及时拦截,造成火力通道资源的不能有效利用。

以如图3所示的攻防态势为例:两不同类型的目标 T_1 、 T_2 先后来袭,处在防空导弹武器系统同一火力通道的责任扇区内。 T_1 的威胁度高于 T_2 ,该防空导弹对这两类目标有不同的杀伤区和可分配区。

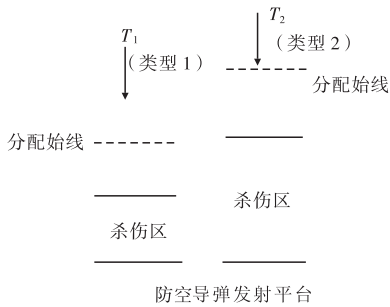


图3 防空导弹对不同类型目标的杀伤区和可分配区

对此,按照目前常用的分配方法,会先把 T_1 分给该通道, T_2 排在后面。事实上, T_2 先进入了可分配区,这时如果还是要等 T_1 越过分配始线后对其先实施拦截,然后再转火拦截 T_2 ,那么可能会因为该火力通道的等待而造成资源浪费。反之,如果要先分配 T_2 ,就可能避免这种等待,更加充分紧凑的利用武器系统资源。计算表明,采用后者方式,在一定条件下,该火力通道可以更早完成对这两个目标的拦截、空余出来。但这样一来,之前分配方案计算的意义又在哪里?同时,这种仅仅按照威胁度排序选取参与分配方案计算的目标、并确定求解时的权重的思路,已经决定了所

得的分配方案不一定是一种优化方案,用如表1所示的假设态势说明。

表1 三个目标的态势假设

目标	T_1	T_2	T_3
所属火力通道	A_1	A_1, A_2	A_2
威胁值	W_1	W_2	W_3
威胁排序	$W_1 > W_2 > W_3$		
进入可分配区顺序	T_2, T_3, T_1		

按照常用的分配方法,会得到这样的分配结果: $T_1 \rightarrow A_1, T_2 \rightarrow A_2, T_3 \rightarrow A_2$ 。后面即便按照进入可分配区的顺序,先分配 T_2 ,但依然和前述态势一样,造成了通道一的浪费。而如果先把 T_2 分配给通道一、 T_3 分配给通道二,那么完全有可能更早结束对这三个目标的拦截。

由此,文中提出如下目标分配思路:

- 1) 在每个计算周期,只对当前已进入可分配区的未分配目标进行分配方案计算;
- 2) 对上述目标再按照射击效果最大化的模型进行分配方案求解;
- 3) 得到结果后随即分配到相应通道。

3.2 分配方案计算方法

3.2.1 计算模型

设有 m 个待分配目标, n 个火力通道。第 j 个目标的威胁值为 $\omega_j (j = 1, 2, \dots, m)$,且目标威胁值越大,威胁程度越高,那么分配方案的计算模型可表示为^[8]:

$$\text{Max } z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \quad (9)$$

其中,系数矩阵 (c_{ij}) 的元素 c_{ij} 为:

$$c_{ij} = \begin{cases} \omega_j & \text{第 } i \text{ 通道可拦截第 } j \text{ 个目标} \\ 0 & \text{第 } i \text{ 通道不可拦截第 } j \text{ 个目标} \end{cases}$$

可拦截的定义为:当通道完好且有空闲,而且该目标属于该通道的责任扇区,则认为该通道可拦截该目标。否则,认为该通道不可拦截该目标。

分配决策矩阵 (x_{ij}) 的元素 x_{ij} 为:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{当指派第 } i \text{ 通道去拦截第 } j \text{ 个目标} \\ 0 & \text{当不指派第 } i \text{ 通道去拦截第 } j \text{ 个目标} \end{cases}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_i x_{ij} \leq N, & j = 1, 2, \dots, m \\ \sum_j x_{ij} \leq 1, & i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (10)$$

即一个通道最多只分配 N 个目标,一个目标最多只分到一个通道。对于一次只分配一个目标的大多数防空导弹而言, $N = 1$;但对于允许一次分配多个目标

给一个通道的防空导弹,则有 $1 \leq N \leq$ 最大允许分配的目标数。

3.2.2 “匈牙利法”求解

对于式(10),当 $N = 1$ 时,该问题即属于传统的指派问题,一般采用“匈牙利法”求解^[9],但当应用该方法求解式(9)时,还应当进行如下处理和变换:

1)“匈牙利法”适用于极小化的指派问题,要应用于这种极大化的问题,可令:

$$b_{ij} = M - c_{ij}$$

其中, M 为足够大的常数;这时系数矩阵变换为 $B = (b_{ij})$ 。

目标函数经变换后,通过求解以下公式:

$$\text{Min } z' = \sum_i \sum_j b_{ij} x_{ij} \quad (11)$$

所得最小解就是原问题的最大解。

2) 如果事先算得的威胁值越小对应目标威胁程度越高,在这里需变换成“威胁度越高威胁值越大”,即令 $\omega' = W - \omega_j$, W 为足够大常数;

3) 按照待分配目标的威胁值和各通道的空闲情况,拦截能力得到 $(m \times n)$ 系数矩阵后,要将其中全为 0 的行或列去掉;得到的矩阵 $(m' \times n')$,如果 $m' \neq n'$,则需要引入“虚目标”或“虚通道”^[4],得到 (c_{ij}) 。

当约束条件中 $N \geq 1$ 时,式(9)的求解难度将大大增加,公开文献没有给出这方面的精确求解方法。为简化求解,基于“威胁度高的目标优先分配、威胁度较低的目标后分配”的原则,经仿真验证,可采用多次调用上述分配过程、直到目标分完或通道没有空闲的方法。

3.2.3 启发式算法求解

基于“匈牙利法”的求解过程需要对系数矩阵进行多次处理,计算机实现程序较为复杂,但目标呈饱和和攻击态势,防空导弹火力通道数较多时,提高决策效率极为重要。为此,文中基于以下原则,提出一种更为简便的目标分配算法:1)威胁度高的目标优先拦截;2)将目标尽量分配到不同通道,减少排队长度。

求解方法:将待拦截队列中的目标按照其威胁度排序从高到低逐一进行分配,对处于多个火力通道责任扇区内的目标,优先分配给与队列前一个目标不同的通道,直到目标分完或通道没有空闲。

这种方法的缺点在于,分配前面的目标时未考虑后面的目标,因此不能保证最终分配结果满足威胁值之和最大,因而它得到的并不是最优解,但其计算过程却得到了简化。

4 仿真实验及结论

以舰空导弹为例,对文中提出的目标分配方法进行验证,并对两种求解算法的效果进行对比。在不考虑导弹拦截情况下,假设:目标为一定到达强度的泊松流,速度分别为亚音速和超音速,到达角随机分布,一次作战中产生的目标数量一定,防空导弹武器系统采用多通道配置,多次仿真得到的平均分配结果如表 2 所示。可见,采用上述方法能够保证具有多种杀伤区的防空导弹武器系统对来袭目标实施拦截,对超音速目标时两种求解算法的分配结果略有区别,证明了本方法的可行性。

表 2 对不同速度目标的分配结果

求解算法	目标类型	
	亚音速	超音速
匈牙利法	100%	97.87%
启发式算法	100%	97%

需要说明的是,在一次向一个通道分配多个目标时,事实上还应考虑武器系统转火所需时间,即同时分配给该通道的多个目标是不是都能来得及拦截。这一约束条件将极大地增加目标分配方案求解的难度,有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 赵晨光,耿奎,李为民,等. 防空导弹武器系统目标分配的多种算法[J]. 现代防御技术, 2001, 29(3): 7-9.
- [2] 蔡怀平,陈英武. 武器-目标分配(WTA)问题研究进展[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(12): 11-15.
- [3] 李勇军,黄卓,郭波. 武器-目标分配问题综述[J]. 兵工自动化, 2009, 28(11): 1-4.
- [4] 吴鹤,王靖宇,蔡少荣. 防空导弹作战单元目标分配建模研究[J]. 弹箭与制导学报, 2007, 27(3): 298-300.
- [5] 王冠男,陈焱中,李为民. 混编式防空导弹群目标分配模型[J]. 光电与控制, 2007, 14(1): 19-21.
- [6] 刘付显,邢清华. 基于混合遗传算法的目标优化分配[J]. 系统工程理论与实践, 2002(7): 84-88.
- [7] 滕克难,王国田. 舰空导弹系统原理与分析[M]. 北京:解放军出版社, 2003.
- [8] J M Rosenberger, A Yucel. The generalized weapon target assignment problem[C]//McLean, VA: 10th International Command and Control Research and Technology Symposium: the Future of C2, 2005.
- [9] 《运筹学》教材编写组. 运筹学[M]. 北京:清华大学出版社, 1990.