

空地协同方式优化方法研究

刘毅, 李凌鹏, 李为民, 雷中原

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:针对地空导弹兵与歼击航空兵协同的特点,探讨了空地协同方式的选取及优化方法。首先对不同协同方式的效能进行初步评估,以确定最佳协同方式,然后根据不同作战方向的敌我兵力对比给出了协同兵力的调整方案及相关的数学模型,算例证明了此方法的有效性。

关键词:协同作战; 方式; 优化; 数学模型

中图分类号: N945.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2007)04-0080-04

协同作战,是在目的、任务、地点、时间和遂行任务的方法上协调一致的作战行动^[1]。地空导弹兵与歼击航空兵的作战协同问题是其中最为复杂的,在敌来袭目标数量一定、我防空兵力数量和部署已知的条件下,如何根据地空导弹兵和歼击航空兵的战斗能力、空中情况的复杂程度、所采用的指挥系统,而进行空地协同方式的优化对战斗结果有很大的影响,因此,研究空地协同方式的优化具有重要的军事价值。

1 空地协同方式选取和优化步骤分析

按区域协同,是双方在各自的责任区域能够确保消灭所有的空中目标,按目标协同,即为地空导弹兵和歼击航空兵指定要消灭的不同目标群或同一组空中目标,按方向协同,是在地空导弹兵营(群)丧失战斗力的情况下或在空中情况复杂、信息不足或时间有限等紧急情况下使用。

因为地面防空兵的部署在战时是固定的,不可能进行较大的变动,在选取空地协同方式的基础上,通过重新区分歼击航空兵在某些区域或方向上的力量编成可使空地协同效能最大。图1为协同兵力方案的选取和优化的主要步骤。

在敌来袭目标数量一定、我防空兵力数量和部署已知的条件下,为了选择空地协同方式,需要进行效能评估,效能指标为消灭来袭目标的数学期望。协同方式的选取模型先将防空作战单元的作战能力进行折算,再根据排队论的方法计算防空兵器的射击能力,并根据效能指标选取最优的协同方式,包括的子模型有:基于排队论的防空兵器射击概率模型和作战单元作战能力的折算模型。

歼击航空兵兵力调整模型是在分析各方向兵力对比的基础上,通过对比现有兵力和理想兵力对空地协同方式进行优化,包括的子模型有:各方向的兵力对比计算模型、理想兵力比计算模型和歼击航空兵兵力调整模型。

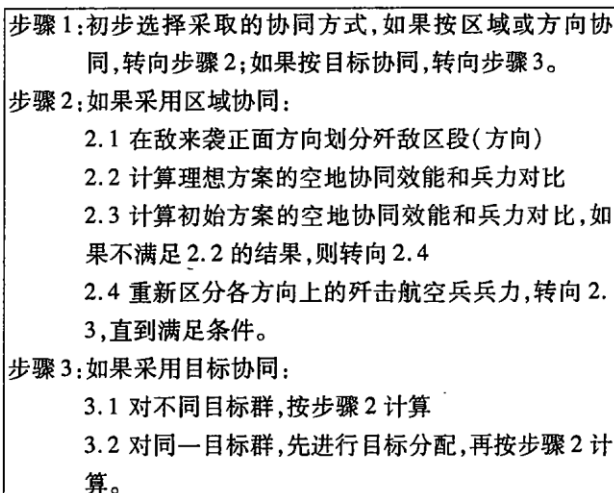


图1 空地协同作战方案优化步骤示意图

收稿日期:2006-10-17

基金项目:国家“863”计划资助项目(2006AA705103)

作者简介:刘毅(1981-),男,河北定州人,博士生,主要从事防空反导作战运筹分析研究。

2 相关模型研究

2.1 基于排队论的防空兵器射击概率模型

不管是歼击航空兵,还是地面防空兵,都可以看作是一个某请求流的服务系统,此请求流在任意随机时间向服务系统输送。这种请求流是串行进入防空兵器火力范围内的空袭武器的数量。

送给群服务系统的请求,一般情况下在一段时间内予以服务,此后,系统就空出来并准备接受新的请求,多通道系统可同时对几个请求服务,在一定的目标输入流特性下可能有这样的情况,即不是所有目标被射击,其中某一部分会突防。射击目标的可能性主要与可用时间(即空袭时间 T_{kx})和目标服务需用时间 T_{fw} 之间的相对比值有关。

空防对抗是一个有限等待服务系统,当目标在防空兵器拦截范围内时,排队等候服务,服务等待时间 T_{dd} 被认为是随机的并按指数规律分布,射击目标的概率为

$$P_{sj} = 1 - P_n = 1 - \frac{\beta \frac{\alpha^n \sum_{s=1}^{\infty} \frac{s\alpha^s}{n! \prod_{m=1}^s (n+m\beta)}}{\alpha \sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^n \sum_{s=1}^{\infty} \frac{s\alpha^s}{n! \prod_{m=1}^s (n+m\beta)}}, (\beta = \frac{T_{fw}}{T_{dd}}) \quad (1)$$

式中: $\alpha = \lambda T_{fw}$; P_n 为未射击目标的概率。

$$\text{防空群消灭空中目标的数学期望为: } N = \lambda T_{kx} P_{sj} P_{hs} \quad (2)$$

然而 P_{sj} 往往在实战中不满足目标被服务的概率,必须考虑到歼击机或导弹数量的限制,为此, P_{sj} 是两个相关事件概率的乘积:对于歼击航空兵而言, $P_{sj} = P_{yd} \cdot P_{gj}$, P_{yd} 可用上面排队论的方法得到。

$$P_{gj} = \min \left\{ \frac{N_{zb}}{N_{kx} P_{yd}}, 1 \right\} \quad (3)$$

式中: N_{zb} 为作战准备的歼击机数(单个火力单元所有可以射击的导弹数); N_{dw} 为分配给每个目标的歼击机数(导弹数); N_{kx} 为空袭兵器的数量; P_{yd} 为“给目标分配目标通道”概率; P_{gj} 为“当有目标通道时给目标分配指定的火力单元射击”概率。按区域协同组织防空兵力对不同区域的来袭目标实施抗击,这种方法使歼击航空兵和地空导弹兵在各自的区域不受限制地消灭空中之敌。来袭目标经过不同区域时受到不同防空兵力的层层抗击,这种过程可看作多服务台串联的排队系统。则

$$\alpha_m = (1 - P_{sj}^m P_{hs}) \alpha_{m-1} \quad (4) \quad P_{sj} = P_1 + \sum_{k=2}^m P_k \prod_{i=1}^{k-1} (1 - P_i) \quad (5)$$

按方向协同指组织防空兵力在各自规定的抗击方向范围内对目标实施抗击。这种过程可看作两个独立的排队系统。

按目标协同指组织防空兵力对不同类型的目标实施抗击。计算方法同“按方向协同”。

2.2 作战单元作战能力的折算模型

在一个作战集团(群)内,有多种型号的防空兵器,为了计算的方便,需要找一个标准的武器系统作为参照系,把其它武器系统的作战能力指标等效成标准武器系统。

2.2.1 作战飞机作战能力的计算模型

采用对数法计算战斗机的战斗效能,作战飞机的作战能力可分为两大类^[2]:一为空对空;一为空对地。两者在飞机总作战能力评估中占多少分量要根据使用方对该型飞机的要求而定。设 G 为空战能力指数, E 为空对地攻击能力指数,为总作战能力指数,则:

$$E = a_1 K + a_2 k G \quad (6)$$

式中: a_1, a_2 为空对空和空对地任务分配系数,两者之和应等于1; k 为平衡系数, K 和 G 的计算公式如下:

$$K = [\ln B + \ln(\sum A_1 + 1) + \ln(\sum A_1 + 1)] \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \quad (7)$$

$$G = [\ln(\text{当前航程}) + \ln(\text{当量载弹量})] \varepsilon_4 \quad (8)$$

式中: B 为机动性参数; A_1 为火力参数; A_2 为探测能力参数; ε_1 为操纵效能系数; ε_2 为生存力参数; ε_3 为航程系数; ε_4 为电子对抗能力系数。

2.2.2 地空导弹武器系统作战能力的折算模型

以标准型防空导弹武器系统等效替代第 i 型防空导弹武器系统的等效准则,是指在其各自杀伤区内最大可能杀伤的目标数相同的条件下,第 i 型防空导弹武器系统等效标准型防空导弹目标通道的数量。按照这一准则,可得

$$N_b = \frac{N_i(1+t_d\mu_i)P_{1i}}{(1+t_b\mu_i)P_{1b}} \quad (9)$$

式中: N_b 为第 i 型防空兵器等效标准型地导兵器时的目标通道数; N_i 为第 i 型地导兵器的实际目标通道数; t_b, t_i 为空中目标分别在标准型和第 i 型地导兵器发射区的平均逗留时间; μ_b, μ_i 为标准型和第 i 型地导兵器单位时间内一个目标通道平均射击目标数; P_{1b}, P_{1i} 为标准型和第 i 型防空兵器对目标的单发杀伤概率。

根据公式(1) - (9),可计算出不同的防空力量按不同方式协同时消灭敌来袭目标的数学期望。

2.3 各方向的兵力对比计算模型^[3]

l 方向 k 歼敌区段上的兵力对比用下式计算

$$q_{lk} = \frac{B_{lk}Q_{lk}}{N_{lk}}, B_{lk} = P_d \sum_{i=1}^l P_{il} a_{ilk} n_{ilk}, Q_{lk} = 1 - \beta_{lk} (1 - e^{-\frac{B_{olk}}{\sum_{i=1}^l a_{ilk}}}) \quad (10)$$

式中: B_{lk} 为 l 方向 k 歼敌区段上防空部队的作战能力; Q_{lk} 为 l 方向 k 歼敌区段保存单位作战能力的概率; a_{ilk} 为在与敌对抗时, l 方向 k 区段上 i 型防空兵器的平均射击次数; N_{lk} 为突向 l 方向 k 区段的敌空袭兵器数量; P_d 为 k 区段低空目标的雷达探测概率; P_{il} 为 i 型防空兵器一次射击毁伤某型空袭兵器的平均概率; n_{ilk} 为在 l 方向 k 区段参加抗击敌突击的 i 型防空兵器数量; β_{lk} 为敌空袭兵器在突击中压制防空兵器的先验概率,这一概率有两个值——敌在突击中有、无预警机和侦察系统; B_{olk} 为对抗中敌空袭兵器的战斗能力,同 B_{lk} 的计算。

则 l 方向总的兵力对比和消灭敌来袭目标的总概率 P_l 为

$$q_l = \sum_{k=1}^K q_{lk}, P_l = 1 - e^{-q_l} \quad (11)$$

2.4 理想兵力对比计算模型

按文献[3]的优化结论,当两方向兵力比之差在数量上等于这两个方向的空袭兵器平均重要程度指数比的对数才使防空部队的作战效能最大,有

$$q_l - q_{l+1} = \ln \frac{C_l}{C_{l+1}} \quad (12)$$

$$q_{lk}^o = \frac{\left[\frac{N_{lk}}{N(l+1)k} \frac{Q_{(l+1)k}}{Q_{lk}} q_{lk} + q_{(l+1)k} \right] - [q_l^{(k-1)} - q_{l+1}^{(k-1)}] + \ln \frac{C_l}{C_{l+1}}}{1 + \frac{N_{lk}}{N(l+1)k} \frac{Q_{(l+1)k}}{Q_{lk}}} \quad (13)$$

式中: $q_l^{(k-1)}$ 为方向 $k-1$ 区段形成的兵力对比; q_{lk}^o 为方向 l 区段形成的理想兵力对比; C_l 为 l 方向上敌空袭兵器的重要程度。

2.5 歼击航空兵兵力调整模型

比较理想方案的初始方案的兵力比,确定需要加强的方向为

$$\Delta q_{lk} = q_{lk}^o - q_{lk}, \Delta q_{(l+1)k} = q_{(l+1)k}^o - q_{(l+1)k} \quad (14)$$

然后对歼击航空兵进行调整。

3 算例分析

如图2所示,敌战斗机分4批220架向我保卫要地进袭,根据本文第2部分的调整方案,确定最优的方案为:将敌进袭方向分为两个方向(方向 k 和方向 $k+1$),采取区域协同和目标协同相结合的方法,先由歼击航空兵在“歼航拦截区段”进行空中拦截作战,再在“歼航、地导共同拦截区段”进行目标协同作战。

为了便于进行调整计算,将方向 k 和方向 $k+1$ 又分为低空(100 m - 150 m)和中高空(7 000 m - 7 500 m),完成针对不同方向不同区段的计算之后,标记出了兵力调整前后的兵力对比和歼敌数学期望值。

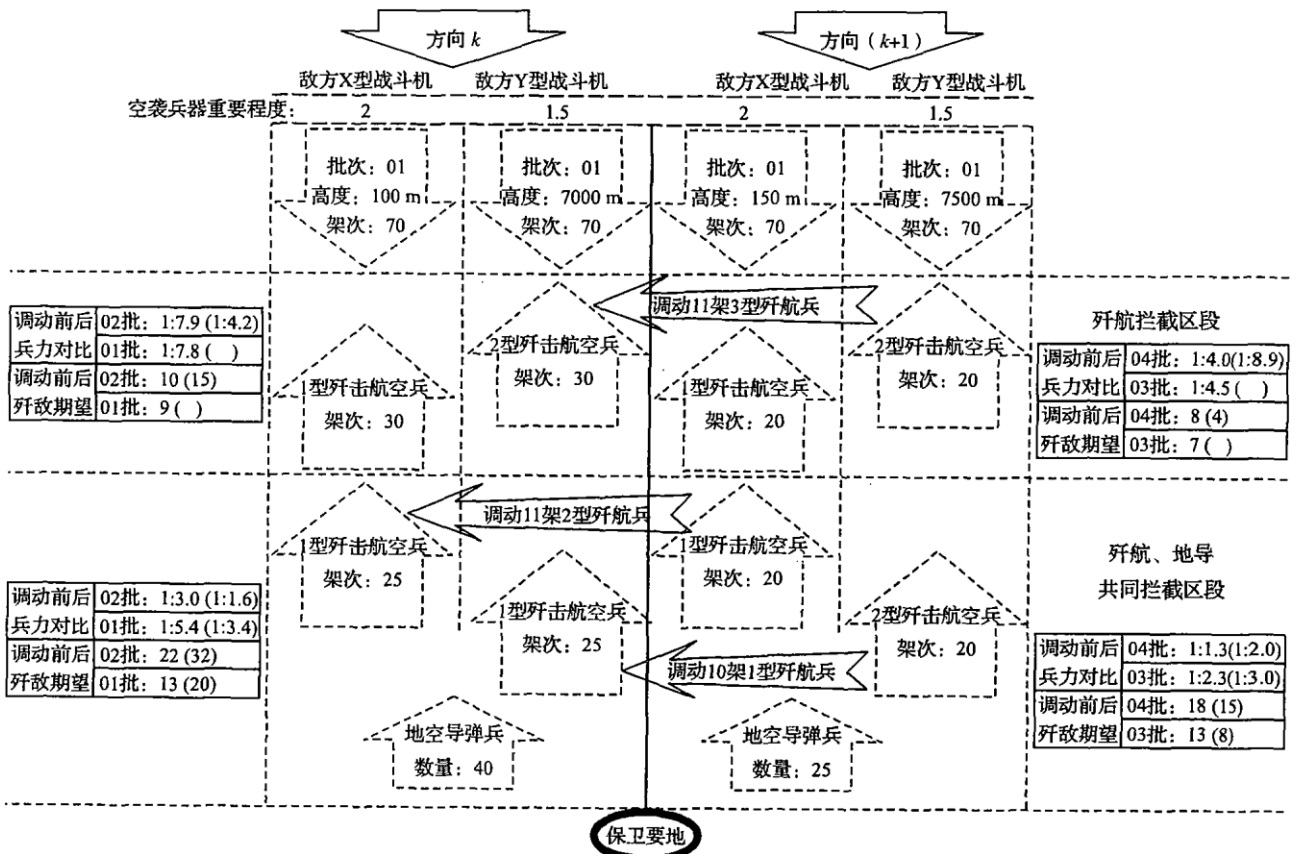


图2 空地协同方式优化算例示意

4 结束语

本文对空地协同方式的选择和优化问题进行了研究,给出了相应的计算模型,并进行了仿真算例验证,表明该方法可操作性强。但是,作为一种新的方法,还需要在目标流的复杂化,合理区分歼敌区段和更多协同方式的论证等方面做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 林涛,赵建军. 俄罗斯地空导弹兵战术[M]. 北京:军事科学出版社,2005.
- [2] 王光源,谭伟. 战斗机在空中加油条件下的战斗效能评价研究[A]. 第四届中国青年运筹与管理学者大会论文集[C]. 2001. 377-381.
- [3] 年来斌,牛存良. 防空作战模拟与效能评估[M]. 北京:军事科学出版社,2001.
- [4] 倪忠仁. 地面防空作战模拟[M]. 北京:解放军出版社,2001.
- [5] 李登峰,许腾. 海军运筹分析教程[M]. 北京:海潮出版社,2004.
- [6] 郭张龙,丁而启. 一种基于DIS/HLA仿真的空对地作战效果评估方法[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2006,7(2):22-24.
- [7] 韩俊杰,李为民. 多通道防空导弹武器系统作战效能分析的排队模型研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2005,6(4):20-22.
- [8] 张要一,王颖龙. 多型地空导弹网络化作战部署效能评估[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2005,6(5):14-16.

(编辑:田新华)

(下转第91页)

参考文献:

- [1] 涂序彦. 大系统控制论[M]. 北京:国防工业出版社,1994.
- [2] 王其藩. 高级系统动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1996.
- [3] Forrester J W. 系统原理[M],王洪斌. 北京:清华大学出版社,1986.
- [4] 苏懋康. 系统动力学原理及应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,1988.
- [5] 复旦大学. Vensim User Guide[M]. 上海:复旦大学 SD 研究室,2000.
- [6] 黄建新,娄寿春,张志峰. 基于数据法的装备维修保障系统效能评估模型[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2006,7(1):39-41.
- [7] 田建锋. 防空体系优化研究[D]. 三原,空军工程大学导弹学院,2002.
- [8] 杨建军. 油料调运过程的数学建模[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2005,6(5):91-94.
- [9] 杨 懿,武 昌,齐胜利. 基于突变理论的维修保障系统效能评估研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2005,6(5):27-31.

(编辑:田新华)

Evaluation Framework of Logistics Supply Based on Multi-layer State Space

SUN Yan-dong^{1,2}, TIAN Jian-feng¹

(1. Air Force Logistics Department of Beijing Military region, Beijing 100035, China; 2. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China)

Abstract: Considering the characteristic of logistics supply, this paper proposes a new evaluation method based on the idea of multi-layer state space, and establishes a feedback network mathematical model. In this way, the problems of integrate modeling and system optimizing can be solved effectively. Practice proves that the method is reasonable and effective.

Key words: logistics supply; multi-layer state space; system dynamics

(上接第 83 页)

Optimization Research on Air-ground Cooperative Engagement Pattern

LIU Yi; LI Ling-peng, LI Wei-min, LEI Zhong-yaun

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

Abstract: Based on the analysis of the cooperative engagement of SAM troops and air arm, the selection and optimization method of air-ground cooperative engagement is put forward. Firstly, the overall combat efficiency under different cooperative engagements is calculated and the best pattern is selected. Secondly, the adjusting plan is given according to the strength ratio between enemy and ourselves, and simultaneously the relevant mathematic models are given. This method is proved to be effective by a certain example. The method can provide reference for the decision-making of air-ground cooperative engagement.

Key words: cooperative engagement; pattern; optimization; mathematical model