

空天防御体系与武器

基于变权 SPA 的空中目标威胁综合评估方法^{*}

单 鑫^a, 董文洪^b

(海军航空工程学院 a 研究生管理大队; b 科研部, 山东 烟台 264001)

摘 要:针对空中目标威胁评估的不确定性和常权方法的缺点,采用集对分析方法,并结合变权理论,提出了一种新的空中目标威胁综合评估模型,给出了具体操作步骤。实例分析表明该方法简单、准确、合理。

关键词:目标威胁;评估模型;集对分析;变权

中图分类号: E955; TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1009-086X(2007)-05-0010-04

A Comprehensive Evaluation Approach for Air Targets Threat Based on Variable Weight SPA

SHAN Xin^a, DONG Wen-hong^b

(Naval Aeronautical Engineering Academy a Department of Graduate Management;
b Department of Sciences Research, Shandong Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the uncertainty of air targets threat evaluation and the disadvantage of invariable weight method, using the variable weight theory, and set pair analysis method, a new evaluation model for air targets threat is put forward. Operational steps is listed in detail. The practical example analysis shows the method is simple, accurate and reasonable.

Key words: target threat; evaluation model; set pair analysis; variable weight

0 引 言

高新技术条件下,空袭兵器自动化程度越来越高,空袭环境越来越复杂,现代防空武器系统必须对空袭目标威胁进行评估,合理的目标威胁评估模型有利于对武器系统资源进行更有效的分配,从而进一步提高系统的作战效能^[1]。

目前威胁评估常见的方法主要有层次分析模型、神经网络模型和基于模糊理论的模型等^[2-4],这些方法最大弊端是忽略了现实中不确定因素和对立

因素的存在或影响,因此存在结果失真的情况。本文则基于变权理论与集对分析,从辨证和动态的角度进行系统的分析,建立了空袭目标威胁综合评估模型,从而能够全面地进行定性与定量的评价,并通过求解该模型给出了空袭目标威胁程度的排序,以此为防空作战决策提供科学依据。

1 变权集对分析的基本理论^[5-7]

集对分析(set pair analysis, SPA)是由我国学者赵克勤于1989年提出的一种关于确定不确定系统

* 收稿日期: 2006-09-28; 修回日期: 2006-11-10

作者简介: 单 鑫(1981-),男,山东招远人。硕士生,研究方向为装备发展与采办理论。

通信地址: 264001 山东烟台海军航空工程学院研究生 3队 电话: 0535-6614261 E-mail: shanxin96@126.com

同异反定量分析的系统分析方法,它的核心思想是把确定不确定视为一个确定不确定系统,从正反、从确定不确定刻画入手去分析研究事物之间的联系与转化。

1.1 集对分析的基本概念

集对分析的基本概念是集对及其联系度 (degree of connection)。所谓集对,就是具有一定联系的 2 个集合所组成的对子。假设根据问题对所论集对展开分析共得到 N 个特性。其中有 S 个为集对中 2 个集合所共有,而集对在另外 P 个特性上对立,在其余 F 个特性上关系不确定,则在不计各特性权重情况下, S/N , F/N , P/N 分别称为所论集对在指定问题 W 下的同一度、差异度、对立度。则联系度 μ 可表示为

$$\mu = S/N + (F/N)i + (P/N)j, \quad (1)$$

式中: i 为差异度系数,取值 $[-1, 1]$; j 为对立度系数,规定取值为 -1 。

令 $S/N = a$, $F/N = b$, $P/N = c$, 则式 (1) 可简记为

$$\mu = a + bi + cj. \quad (2)$$

根据定义 a, b, c 满足归一化条件 $a + b + c = 1$ 。其中 a, c 是相对确定的,而 b 是相对不确定的。式 (2) 是一种确定不确定结构函数,它体现了确定不确定系统的对立统一关系,具有较深刻的方法论意义。

1.2 变权理论^[8-9]

变权是相对于常权的,在可加性系统决策中,综合函数为

$$M_m(x_1, x_2, \dots, x_m) = \sum_{i=1}^m w_i x_i, \quad (3)$$

式中: $w_i \in [0, 1]$, 且满足 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$, 如果权 w_i 是常数,式 (3) 就称为常权综合, w_i 称为常权,对应的 $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ 称为常权向量。常权综合在一定程度上反映了影响事物各因素的相对重要次序,由于其简单和一定的合理性而被广泛应用。然而无论各因素的组态 (各因素的取值状况) 如何,权向量 W 都保持固定不变,往往会造成实际问题中出现不合理的综合结果,即出现“状态失衡”问题。因此需要动态调整权向量解

决此问题。

(1) 变权向量 $\tilde{W}(X) = (W_1(X), \dots, W_m(X))$ 可以表示为因素常权向量和状态变权向量 $\tilde{S}(X)$ 的归一化的 Hadamard 乘积

$$\tilde{W}(X) = \frac{\tilde{W} \cdot \tilde{S}}{\sum_{i=1}^m (w_i S_i)} = \frac{(w_1 S_1, \dots, w_m S_m)}{\sum_{i=1}^m (w_i S_i)}. \quad (4)$$

(2) 状态变权向量 $\tilde{S}(X)$ 是某个 m 维实函数 (该函数称为均衡函数 $B(x_1, \dots, x_m)$) 的梯度向量,它反映了各因素状态的一阶变化情况

$$\tilde{S}_X = \text{grad } B(x_1, \dots, x_m) = \left[\frac{\partial B}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial B}{\partial x_m} \right]. \quad (5)$$

1.3 变权集对分析的基本思路

变权 SPA 研究问题的基本思路是:在具体问题背景下,通过动态调整权向量,不但考虑各基本因素的相对重要次序,也考虑集对状态均衡程度,从而在一定程度上解决了“状态失衡”问题。然后对集对的某一特性展开分析,对所论 2 个集合所具有的特性做同、异、反分析并加度量刻画,得出这 2 个集合在所论问题背景下的同异反联系度表达式,并推广到系统由 m 大于 2 个集合组成时的情况,在此基础上深入开展进一步研究。

2 空中目标威胁综合评估模型的建立

2.1 影响威胁度因素

在本文中,假设根据以下 4 个因素考虑威胁评估与排序:目标的类型 (u_1)、目标速度 (u_2)、目标航路捷径 (u_3)、目标飞临时间 (u_4)。

2.2 确定因素权重

根据美国运筹学家 (T. L. Saaty) 教授在其层次分析法 (the analytic hierarchy process, AHP) 中介绍的方法求得权重为 $W = (w_1, w_2, w_3, w_4) = (0.20, 0.30, 0.24, 0.26)$ 。本文选取混合型变权模型确定变权值。

2.2.1 构造均衡函数

考察 4 个因素变化情况对威胁值的影响程度。目标的类型一旦确定,不会随其运动状态的变化而改变。目标到保卫目标速度及航程跟其运动状态有关,但其取值的变化不会引起威胁值的剧烈变化。

只有目标飞临时间 t 的变化最能影响威胁值。因为当 t 很小,也就是目标很接近的时候,其对应的威胁值应该显著提高。

(1) 确定函数形态。由 4 个因素可知,函数为 4 变量函数;另外,由于随着 t 值的减小,需要权值 w_4 相应增加,同时其他因素的权重相应减小。

(2) u_1, u_2, u_3 变化趋势为线性,因此采用一阶线性函数,即

$$B_1 = x_1, B_2 = x_2, B_3 = x_3.$$

(3) u_4 为非线性变化函数,分析问题可知,当目标由远接近, t 取值由大变小, u_4 取值基本上是线性增加,当目标很接近时 (t 的取值很小),其微小变化能显著影响威胁值。所以,本文选择了线性函数加上对数函数的形式,即

$$B_4 = x_4 + l \ln x_4,$$

式中: l 为调整因子。

整个均衡函数为

$$B(x_1, x_2, \dots, x_m) = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + l \ln x_4. \quad (6)$$

2.2.2 计算状态变权

根据式 (5) 求得状态变权向量

$$S_j(x_1, x_2, \dots, x_m) = \frac{\partial B}{\partial x_j} = \begin{cases} 1, & j=1, 2, 3, \\ 1 + \frac{l}{x_4}, & j=4 \end{cases} \quad (7)$$

分析可知,当 $j=1, 2, 3$ 时, S_j 为常数,表示其对应的权值不随 x_j ($j=1, 2, 3$) 的取值变化;当 $j=4$ 时,其对应的权值 w_4 随 x_4 的减小而增大,特别当 x_4 接近 0 的时候, S_4 趋向于无穷,符合实际。

根据式 (4), (7), 计算得到变权向量 $\tilde{w} = (\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \tilde{w}_3, \tilde{w}_4)$ 中诸元素为

$$\tilde{w}_j = \begin{cases} \frac{w_j}{w_j + w_4 \left(1 + \frac{l}{x_j}\right)}, & j=1, 2, 3, \\ \frac{w_4 \left(1 + \frac{l}{x_j}\right)}{w_j + w_4 \left(1 + \frac{l}{x_j}\right)}, & j=4 \end{cases} \quad (8)$$

2.3 确立综合评价模型

设 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 为影响因素集, u_s (1

$s = n$) 的程度为“高”、“一般”、“低”3级。若视“高”为联系度表达式中的“ a ”,“一般”为“ b ”,“低”为“ c ”,则评估目标关于影响因素 u_s 的同、异、反评价为 $r_{s1} + r_{s2}i + r_{s3}j$ 其中 $r_{s1} + r_{s2} + r_{s3} = 1$ 。进而有同异

反评价矩阵 $\begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{13} \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & \dots & r_{n3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ i \\ j \end{bmatrix}$, 称 $E = (1, i, j)^T$ 为

同异反系数矩阵。根据上述方法 U 上各因素的权向量为 $\tilde{w} = (\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n)$, 并且 $\sum_{i=1}^n \tilde{w}_i = 1$, 则同异反评价模型为

$$\mu = (\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n) \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{13} \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & \dots & r_{n3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ i \\ j \end{bmatrix} = \sum_{s=1}^n \tilde{w}_s r_{s1} + \sum_{s=1}^n \tilde{w}_s r_{s2} i + \sum_{s=1}^n \tilde{w}_s r_{s3} j \quad (9)$$

在 SPA 意义下, $a = \sum_{s=1}^n \tilde{w}_s r_{s1}$ 反映了 U 因素中

“高”的同一度; $c = \sum_{s=1}^n \tilde{w}_s r_{s3}$ 反映了“低”的程度,

称为对立度,二者均为确定项; $b = \sum_{s=1}^n \tilde{w}_s r_{s2}$ 为指标

U “一般”的情况,称为差异度,是不确定项,其中实际存在着可客观确定的部分,可把 b 中的相对确定部分分离出来,加到确定项中。根据 SPA 理论的 i 比例取值法^[10],运用 $a + b + c = 1$, 分别取 $i = a, i = c$, 可得

$$\begin{aligned} \mu_{(a\text{-确定})} |_{i=a} &= a + bi = a + ba, \\ \mu_{(c\text{-确定})} |_{i=c} &= c + bi = c + bc, \\ \mu_{(b\text{-不确定})} &= 1 - \mu_{(a\text{-确定})} |_{i=a} - \mu_{(c\text{-确定})} |_{i=c} = \\ &= b^2 = \left(\sum_{s=1}^n \tilde{w}_s r_{s2} \right)^2. \end{aligned}$$

将分离 $\mu_{(b\text{-不确定})}$ 的确定部分 $\left(\sum_{s=1}^n \tilde{w}_s r_{s2} \right)^2$ 加到

相应的确定项中去, 得 $a = \sum_{s=1}^n \tilde{w}_s r_{s1} +$

$\left(\sum_{s=1}^n \tilde{w}_s r_{s2} \right)^2, c = \sum_{s=1}^n \tilde{w}_s r_{s3} + \left(\sum_{s=1}^n \tilde{w}_s r_{s2} \right)^2, b =$

$\left(\sum_{s=1}^n \tilde{w}_s r_{s2} \right)^2$ 。则待评模型的联系度为 $\mu = a +$

$b i + c j$

对于 m 个目标评估,当 a_k (同一度)与 c_k (对立面)值 ($k=1, 2, \dots, m$)的大小不同时,可以得知待估目标之间的威胁排序;当某 2 个或 2 个以上目标 a_k 值相等时,再比较 c_k 值大小便可排出所评目标之间的威胁排序。若第 k 个待估目标的联系度为 $\mu = a_k + b_k i + c_k j$ 根据同异反态势排序表^[11]能够确定其态势的级别,辨别它们之间的差异性;由态势的定义可知, $shi(k) = \frac{a_k}{c_k}$,从而比较 $shi(k)$ 的大小可得待估目标的次序。

3 实例分析

若把威胁因素作为集合 A , 待评目标状况作为集合 B , 进行对比分析, 则可发现实际目标某些方面完全构成威胁, 某些方面可能不完全构成威胁, 其他方面介于二者之间, 集合 A 与集合 B 存在“同异反”关系。假设在一次要地防空作战中, 发现空中有 3 批敌目标对要地入侵, 已识别出 4 批目标的类型分别为战术导弹、轰炸机、歼击机, 且已测得各批目标的参数及数据如表 1 所示。

表 1 威胁目标参数及数据

Table 1 The parameters and data of threat targets		所估目标		
威胁因素	目标 1 (高一般低)	目标 2 (高一般低)	目标 3 (高一般低)	
u_1 目标类型 (a b c)	战术导弹 (0.8 0.1 0.1)	轰炸机 (0.5 0.1 0.4)	歼击机 (0.6 0.3 0.1)	
u_2 目标速度 / ($m \cdot s^{-1}$) (a b c)	480 (0.8 0.1 0.1)	150 (0.5 0.2 0.3)	230 (0.6 0.2 0.2)	
u_3 航路捷径 /km (a b c)	25 (0.5 0.2 0.3)	15 (0.6 0.2 0.2)	12 (0.7 0.2 0.1)	
u_4 飞临时间 /s (a b c)	80 (0.8 0.1 0.1)	150 (0.6 0.3 0.1)	100 (0.5 0.2 0.3)	

空中目标威胁综合评估步骤如下:

(1) 确定各目标各威胁因素变权值

取 $x_1 = u_1, x_2 = u_2, x_3 = u_3, x_4 = t, l = 100$, 采用变

权方法计算, 根据式 (8) 对于目标 1, $w_1 = \frac{0.2}{0.2 + 0.3 + 0.24 + 0.26 \left(1 + \frac{100}{80} \right)} = 0.144$, 同理可求 $w_2 = 0.216, w_3 = 0.172, w_4 = 0.468$ 。

对于目标 2, 同理可求 $w_1 = 0.170, w_2 = 0.256, w_3 = 0.205, w_4 = 0.369$; 对于目标 3, $w_1 = 0.159, w_2 = 0.238, w_3 = 0.190, w_4 = 0.413$ 。

(2) 利用式 (9) 计算得各个目标威胁程度评估结果联系度表达式:

$$\mu_1 = W R_1 E = (0.144, 0.216, 0.172, 0.468) \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.1 \\ 0.5 & 0.2 & 0.3 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 \\ 0.8 & 0.1 & 0.1 \end{bmatrix} (1, i, j)^T = 0.735 + 0.123i + 0.080j$$

同理可得 $\mu_2 = 0.563 + 0.220i + 0.218j, \mu_3 = 0.583 + 0.216i + 0.202j$ 将不确定项转化到确定项后可得 3 个待估目标的评价结果联系度:

$$\mu_1 = 0.750 + 0.015i + 0.095j (\text{强同势}); \mu_2 = 0.611 + 0.048i + 0.266j (\text{强同势}); \mu_3 = 0.629 + 0.047i + 0.248j (\text{强同势})。$$

(3) 可知待估目标均处于强同势, 如果不计不确定性, 仅考虑其中的负面影响, 则可令 $i = 0, j = -1$, 于是得到 3 个目标各自的联系度为: $\mu_1 = 0.845, \mu_2 = 0.877, \mu_3 = 0.877$, 由此可知目标 1 威胁度最大, 目标 2 与目标 3 威胁度相当。各目标态势值为: $shi(1) = 7.9; shi(2) = 2.3; shi(3) = 2.5$ 。由态势值表明: 目标 1 势值最大, 因而它处于最强势, 但从不确定角度看, 由于 $0.266 > 0.248 > 0.095$, 所以目标 2 的不确定性 (潜在威胁) 最大。

4 结 束 语

本文将 SPA 与变权理论相结合, 从一个全新角度对空中目标威胁程度进行了评估分析, 解决了由于权值的固定不变造成某些情况下结果不合理的情况, 并系统地认识每个目标的态势及差异性等, 该方法还可以推广到有 3 个以上等级评语时的目标威胁评估, 如采用四级评语时可采用 4 元联系数构建

(下转第 23 页)

近程末端防御火力网内,防空兵力的队型主攻方向应采取一线配置,增加火力纵深,提高抗击效果。在中远程火力网中可采用在主攻方向加强后的扇型队型,以扩大拦截正面。

2 结 束 语

通过上文的分析,可以得出这样的结论:要想有效应对敌空袭的“点穴式”打击就必须充分做好对敌精确制导武器的抗击准备,合理对现有防空武器和侦察预警装备进行部署和任务区分,争取做到“早发现、早行动”;利用多层防空火网对敌精确制导武器进行拦截和抗击,从而保证高价值目标不受“点穴式”打击的威胁。此外为了达到先发制人的效果,还可利用远程攻击火力在敌发动“点穴式”空

袭打击之前对地(水)面的敌精确制导武器发射平台和基地进行反击,将敌精确制导武器摧毁于使用之前。

参考文献:

- [1] 吴学栋,石厉辉,韩卫旭. 防空兵抗击敌防区外空袭的对策[J]. 防空兵指挥学院学报, 2005, (2): 48-49.
- [2] 蔡为民,郭宝金,刘法明. 城市防空中空空导弹部队作战使用问题研究[J]. 防空兵指挥学院学报, 2005, (2): 50-51.
- [3] 夏学华,陈昭林,朱改明,等. 美军作战理论新发展[M]. 济南:黄河出版社, 2000.
- [4] 程开甲,李元正,胡世祥,等. 国防系统分析方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2003.

(上接第 13 页)

同异反系统评价矩阵,具体方法可参考文献[12]。相信在未来数据完备、均衡函数构造恰当的条件下,基于数据分析的该评估方法将会有更大的利用空间和更好的应用效果。

参考文献:

- [1] 高方君. 空袭目标威胁评估模型研究[J]. 上海航天, 2005, (2): 11-14.
- [2] 陈克,刘士场,王幸军. AHP法改进及其在目标威胁等级评估中的应用[J]. 指挥控制与仿真, 2006, 28(1): 108-110.
- [3] 刘雁兵,刘付显. 基于模糊神经网络的空袭目标威胁评估[J]. 战术导弹技术, 2005, (3): 9-12.
- [4] 黄宪成,陈守煜. 定量和定性指标相混合的威胁排序模型[J]. 兵工学报, 2003, 24(1): 78-81.
- [5] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社, 2000.

- [6] 李思志,李艳红. 物流供应商选择模型研究[J]. 物流技术, 2005, (9): 95-97.
- [7] 张琳,陈绍顺. 基于集对分析的战场态势分析模型[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2005, 27(5): 55-59.
- [8] 李德清,李洪兴. 状态变权向量的性质与构造[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2002, 38(4): 455-461.
- [9] 曹可劲,江汉,赵宗贵. 一种基于变权理论的空中目标威胁估计方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2006, 7(1): 32-35.
- [10] 赵克勤,曾伟. 基于集对分析(SPA)的弃权问题研究[J]. 决策与决策支持系统, 1995, 5(3): 86-94.
- [11] 覃杰,周生明. 基于联系数的态势排序方法[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2003, 21(3): 41-44.
- [12] 王霞. 联系数为4与6的四元联系数系统态势数值排序及应用[J]. 数学的实践与认识, 2004, 34(7): 107-112.