

基于离差最大的机场威胁度评估

徐加强¹, 毕义明¹, 梁伟², 张璇³

(1. 第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025; 2. 航天飞行器生存技术与效能评估实验室, 北京 100085;
3. 中国人民解放军 96411 部队, 陕西 宝鸡 721000)

摘要: 威胁度是威胁方和反威胁方综合对抗的体现, 威胁同时作用于多个目标, 威胁不是每个威胁属性威胁度的简单相加。针对这些特点, 构建了战机威胁度属性指标体系; 选择理想方案, 建立了基于离差最大的属性权重分配模型, 根据乘积思想构建了单战机单目标威胁度评估模型; 按照最大有利度原则, 建立了单战机多目标威胁度评估模型; 在此基础上, 累加并归一化后求取机场威胁度。计算表明, 本模型能正确反映机场威胁度, 验证了模型的可行性, 可作为火力分配目标威胁系数使用。

关键词: 机场; 威胁度; 离差; 多属性评估

中图分类号: E 9

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.08.26

Airport threaten degree evaluation based on maximal deviations

XU Jia-qiang¹, BI Yi-ming¹, LIANG Wei², ZHANG Xuan³

(1. The Second Artillery Engineering College, Xi' an 710025, China;

2. Institute of Survival Technology and Efficiency Evaluation of Aero-Craft, Beijing 100085, China;

3. Unit 96411 of the PLA, Baoji 721000, China)

Abstract: The threaten degree is the reflection of the integrated countermeasure between menace side and anti-menace side. The menace affects more targets simultaneously. The menace is not equivalent to the sum of the threaten degree which each threat attribute possesses. In view of the facts, the aircraft threaten degree attributed indexes are constructed. After giving an ideal scheme, the attributed weight distribution model based on maximizing deviations is built, and the threaten degree evaluation model about one aircraft to one-target is constructed. According to the most favorableness, the models for one aircraft to multi-targets are given. After accumulating and normalization, the paper gets the airport threaten degree. The example shows that the result can reflect the threat of airports accurately. It also verifies the feasibility of this method, which can be used as threat coefficients in fire distribution.

Keywords: airport; threaten degree; deviation; multiattribute evaluation

0 引言

一体化联合作战中, 机场是精确制导武器重点打击的对象。机场本身没有威胁, 其威胁源自所停放战机。因此, 机场威胁度可用战机威胁度间接替代。现行资料表明, 战机威胁度评估主要从 3 个方向展开: 一是采用“构建指标—建立判断矩阵—求取属性权重—获取威胁度—目标排序”方式, 使用方法主要有对策论、灰关联法、D-S 证据理论、熵权法、多属性决策理论^[1]、贝叶斯推理^[2]、定性定量混合表示法^[3]、灰关联投影、基于标准偏差最小函数法^[4]、基于离差变动最大函数法^[5]等; 二是采用智能算法, 从自适应调节、全局收敛角度求解, 主要有: 遗传算法^[6]、人工神经网络^[7]、模糊推理、遗传模糊推理^[8]等; 三是借助高新计算机, 避开构模难题, 创建数据库, 通过程序模拟实现^[9]。从应用

效果看, 第一种方法在空袭武器威胁度评估中取得了较大成功。但是, 以上方法也存在不足, 如没有考虑目标特性、没有考虑单战机对多目标同时实施威胁现象、采用加权和求威胁度有悖实情等。对此, 文章构建了合理的战机属性指标体系, 建立了可行威胁度求解模型, 并用算例验证了模型的正确性和可行性。

1 基本原理

威胁是相对的, 威胁度是己方威胁能力和对方反威胁能力的综合体现; 威胁是多向的, 战机进入攻击区时, 将同时对多个目标构成威胁。机场威胁度评估是个复杂系统工程, 需从单架战机入手, 经层层综合, 最终得出所有机场威胁度。具体实现过程如下:

步骤 1 机场威胁度属性量化指标构建。根据威胁相

对性,建立机场属性量化指标;

步骤 2 单战机—单目标威胁度评估。构建战机威胁度属性量化指标,选择隶属度函数或量化准则,根据离差最大思想求出属性权重,按照乘积思想求出单战机对单目标威胁度;

步骤 3 单战机—多目标威胁度评估。按照最大有利度原则,得出单战机对多目标威胁度;

步骤 4 单机场威胁度评估。根据战机类型、数量,求出单机场威胁度;

步骤 5 多机场威胁度评估。按步骤 4 求出所有机场威胁度,归一化得出各机场威胁度。具体实现如图 1 所示。

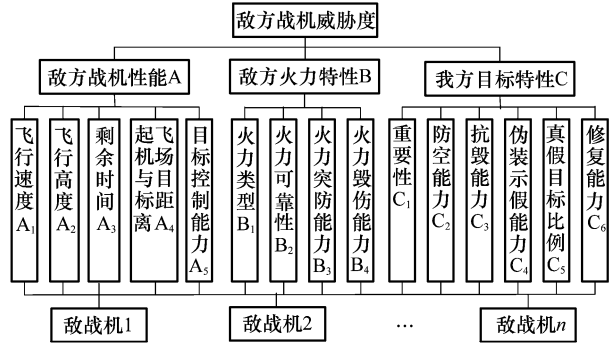


图 2 敌战机威胁度属性构成图

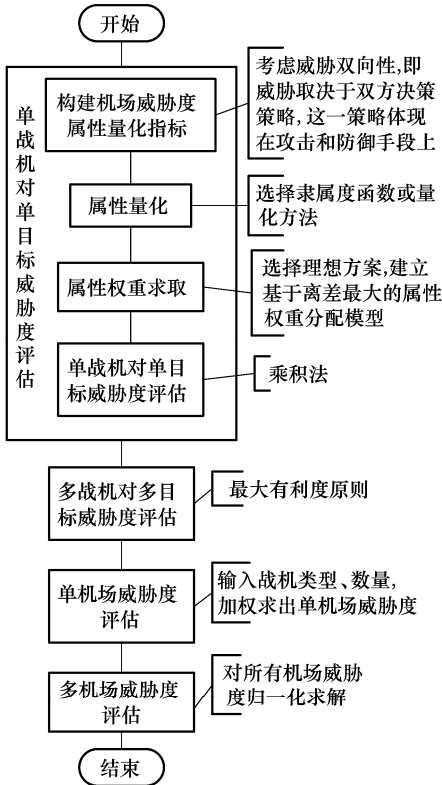


图 1 机场威胁度评估流程图

2 机场威胁度指标分析

2.1 属性指标构建

战机是机场威胁度的重要体现,战机威胁度既与战机性能、携带火力有关,又与威胁目标特性密不可分。战机自身性能属性主要包括战机起飞点与目标距离、飞行速度、飞行高度、剩余时间(起飞准备时间+战机飞行时间+作战武器飞行时间)、目标控制能力;携带火力属性包括火力类型、火力可靠性、火力突防能力、火力毁伤能力;防御方目标属性包括目标重要性、防空能力、抗毁能力、伪装示假能力、真假目标比、修复能力,如图 2 所示。上述指标有的属性值越大威胁度越大,称为正影响属性;有的属性值越小,威胁度越大,称为负影响属性,其属性值可通过属性函数或量化分析到。

2.2 目标属性威胁度量化

目标属性量化及属性权重分配是进行威胁度评估的两个关键问题。战机威胁度评估中,方案集用 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 属性集用 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 表示,敌第 i 架战机第 j 项属性对我方第 k 个目标属性值可表示为 R_{ijk} ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, l$)。标准化得 $(r_{ijk})_{n \times m}$ 为敌战机 A_i 的属性 u_j 对我方第 k 个目标评估矩阵。

(1) 飞行高度、飞行速度、毁伤能力等属性量化

飞行高度、飞行速度、火力可靠性、火力突防能力、火力毁伤能力属性值越大,敌战机威胁度越高,这种威胁在邻近目标时逐渐增大,当增大到特定值后,呈现出饱和态势,增长幅度很小,此时威胁度隶属度函数可用偏大型正态分布表示:

$$u(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 1 - e^{-\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)^2}, & x > a \end{cases} \quad (1)$$

式中, a 和 σ 分别为样本均值和样本方差。

(2) 防空能力、抗毁能力、修复能力等属性量化

我区防空能力、抗毁能力、修复能力、真假目标比例和剩余时间属性值越大,敌战机所能构成威胁度越小。当属性值小于某一数值 a_1 时,敌战机构成巨大威胁;当属性值大于某一数值 a_2 时,敌战机几乎不能构成威胁;当我方目标属性介于两者之间时,呈现指数下降。此时,威胁度隶属度函数可用偏小型岭形分布表示:

$$u(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a_1 \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{a_2 - a_1} \left(x - \frac{a_1 + a_2}{2}\right), & a_1 < x < a_2 \\ 0, & x \geq a_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, a_1 和 a_2 分别表示敌战机对我方威胁度最大与最小时的界分值。

(3) 起飞机场与目标距离属性量化

起飞机场与目标距离是确定敌战机能否形成有效攻击的前提,若该距离大于战机最大作战半径,则战机对我方目标不构成威胁;反之则构成威胁。此时,威胁度隶属度函数可用下式表示:

$$u(x) = \begin{cases} 0, & x \leq s_0 \\ 1, & x > s_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, x 为敌机作战半径; s_0 为敌机场与我目标距离。

(4) 真假目标比例属性量化

真假目标比越大, 伪装效果越好, 敌战机摧毁我方目标概率越小, 用数学式描述为

$$u(x) = \frac{1}{x+1} \quad (4)$$

式中, x 表示真假目标的比值。

(5) 火力类型、目控能力、目标重要性等属性量化

火力类型、目标控制能力、目标重要性、伪装示假能力没有特定规律, 按照 G. A. Miller 9 级量化理论进行量化^[10]。1~9 级分别为极小、非常小、较小、小、中、大、较大、非常大、极大。通常, 火力类型属性分为导弹、精确制导炸弹、普通炸弹 3 种, 分别按 9、7、5 三级量化; 目标控制能力属性量化为小、中、大、非常大四级, 分别对应为 3、4、5、8。我方目标重要性分为极大、较大、一般、较小、极小量化为 9、7、5、3、1 五级。我方目标伪装与敌战机威胁成反比, 我方伪装越好, 敌战机构成威胁越小, 故我方目标伪装能力按照极好、很好、好、一般、较差、差量化为 1、2、4、6、8 五级。

3 机场威胁度评估建模

3.1 单战机对单目标威胁度评估

通过属性量化计算得到决策矩阵 R_{ij} , 规范化得标准决策矩阵 $r_{ij} \in [0, 1]$, 若 $r_{ij} = 0$, 说明敌战机对我目标不构成威胁; 若 $r_{ij} = 1$, 说明敌战机对我目标构成致命性威胁。设属性威胁度等于 1 为理想方案, 记为 A^* , $A^* = (1, 1, \dots, 1) \in R^n$ 。 $V_i(\omega) = \sum_{j=1}^m |r_{ij}\omega_j - \omega_j|$, $i \in N$, 则 $V_i(\omega)$ 反映了各架战机在属性 u_j 下与理想方案差异, 若这种差异很小, 对目标构成的威胁度也小, 将赋予较小权重; 反之, 将赋予较大权重。

设 $V_{jk}(\omega)$ 表示第 i 架战机第 j 项属性对我方第 k 个目标的离差, ω_{ijk} 表示第 i 架战机第 j 项属性对我方第 k 个目标的权重, 令 $N = \{1, 2, \dots, n\}$, $M = \{1, 2, \dots, m\}$, $K = \{1, 2, \dots, l\}$, 则对第 k 个目标, 第 i 架战机与其他目标之间的离差为

$$V_{jk}(\omega) = \sum_{i=1}^n V_{ijk} = \sum_{i=1}^n |r_{ij} - 1| \omega_{ijk} \quad (5)$$

根据离差最大化原理, ω 的选择应使所有属性对目标总离差最大。因此, 可建立下列单目标决策模型

$$\begin{cases} \max V_k(\omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |r_{ij} - 1| \omega_{ijk} \\ \text{s. t. } \omega_{ijk} \geq 0, \sum_{j=1}^m \omega_{ijk} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

作拉格朗日函数

$$d(\omega_{ijk}, \lambda) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |r_{ij} - 1| \omega_{ijk} + \frac{1}{2} \lambda \left(\sum_{j=1}^m \omega_{ijk}^2 - 1 \right) \quad (7)$$

分别对 ω_{ijk} 和 λ 求偏导, 并分别令其等于 0, 然后对 ω_{ijk} 归一化处理得权重 ω_{ijk} 为

$$\omega_{ijk} = \frac{\sum_{i=1}^n |r_{ij} - 1|}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |r_{ij} - 1|} \quad (8)$$

3.2 战机威胁度评估

传统加权方法计算有悖实际, 如在导弹射程小于导弹与目标间距离时, 按加权方式求出导弹威胁度大于 0, 这与实际情况不符, 这里采用乘积方式确定战机威胁度。则第 i 架战机对第 k 个目标的威胁度 $z_{ik}(\omega)$ 用数学式表达为

$$z_{ik}(\omega) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - r_{ij}\omega_{ijk}) \quad (9)$$

式中, 当 $k=1$ 时, 表示单战机对单目标威胁度, 这种情形现已做大量研究。当 $k>1$ 时, 表示敌战机同时威胁我方多个作战单元, 此时确定敌战机对我方目标威胁度的方法有 3 种, 即累加思想、随机确定原则、最大有利度原则。从作战角度考虑, 方法三更接近实际, 选用该方法进行计算, 用数学式表示为

$$z_i(\omega) = \max_{i \in K} (z_{ik}(\omega)) = \max_{i \in K} \left(1 - \prod_{j=1}^m (1 - r_{ij}\omega_{ijk}) \right) \quad (10)$$

若机场拥有战机数量为 n , 则敌战机威胁度可表示为

$$z(\omega) = \sum_{i=1}^n z_i(\omega) = \sum_{i=1}^n \max_{i \in K} \left(1 - \prod_{j=1}^m (1 - r_{ij}\omega_{ijk}) \right) \quad (11)$$

尽管不同类型战机作战性能不同, 但上述权重求思想建立在同一标准, 即与理想方案 A^* 偏差基础上。因此, 求出的战机性能直接代表了本战机构成的威胁度, 不必再根据战机类型进行权重修正。同时, 上述所有战机威胁度之和也代表了该机场对我方目标构成的威胁度, 用 $z_{\text{enemy_airport}}(\omega)$ 表示。

3.3 机场威胁度评估

设敌机场有 h 个, 则各机场威胁度为

$$z_{\text{enemy_airport}(t)}(\omega) = \frac{z_{\text{enemy_airport}(t)}(\omega)}{\sum_{t=1}^h z_{\text{enemy_airport}(t)}(\omega)} \quad (12)$$

式中, $z_{\text{enemy_airport}(t)}(\omega)$ 按式(11)求取。

4 算例分析

设有甲、乙、丙 3 个机场, 分别用 $P_{\text{甲}}$ 、 $P_{\text{乙}}$ 、 $P_{\text{丙}}$ 表示。机场甲拥有两类战机 J_1 、 J_2 , 其中 J_1 8 架, J_2 10 架; 机场乙拥有两类战机 J_3 、 J_4 , 其中 J_3 25 架, J_4 18 架; 机场丙拥有一类战机 J_5 20 架。每类战机将对我方 T_1 、 T_2 目标构成威胁。 A_1 、 A_2 隶属度函数参数 (a, σ) 取值分别为 $(0.5, 1)$ 、 $(1, 1.5)$, 单位分别为 10^3 km/h 和 10^3 km; B_2 、 B_3 、 $B_4(a, \sigma)$ 取值为 $(0.6, 0.15)$; C_2 、 C_3 、 $C_6(a_1, a_2)$ 取值为 $(0.2, 1)$; $A_3(a_1, a_2)$ 取值为 $(10, 30)$; A_4 、 S_0 取值如表 1 所示。敌战机威胁度评估属性矩阵如表 2 所示。

根据目标属性函数和 G. A. Miller 量化理论, 对战机威胁度属性进行量化求解, 得到归一化矩阵如表 3 所示。

表 1 敌机机场与我目标距离 S_0

	10^3 km		
	$P_{\text{甲}}$	$P_{\text{乙}}$	$P_{\text{丙}}$
T_1	2	3	2.5
T_2	1.5	2.5	3

根据式(5)~式(8)得, 对 J_1 、 T_1 、 T_2 属性权重分别为 $\omega_{1j1} = (0.15, 0.11, 0.02, 0.06, 0.09, 0.1, 0.03, 0.05, 0.04,$

0.14, 0.03, 0.04, 0.03, 0.05, 0.06); $\omega_{1j2} = (0.13, 0.14, 0.03, 0.06, 0.1, 0.09, 0.03, 0.04, 0.08, 0.12, 0.03, 0.04, 0.03, 0.04, 0.04)$, 在各种威胁评估属性中, 战机飞行速度、飞行高度、目标控制能力、携带火力类型以及目标重要性属性分配权重较大, 分别为 $(0.15, 0.11, 0.09, 0.1, 0.14)$ 和 $(0.13, 0.14, 0.1, 0.09, 0.12)$, 说明这些属性对战机威胁度影响较大, 与实际相符合。根据式(9)得 J_1 对 T_1 、 T_2 的威胁度分别为 0.86 和 0.73, 观察表 2 易知, J_1 对 T_1 、 T_2 构成威胁不同源自于目标特性不同, 尽管 T_1 较 T_2 重要, 且拥有较好的抗毁能力, 但是 T_1 防空、伪装示假、真假目标比、短期

修复能力都较 T_2 差, 导致的结果是 J_1 对 T_1 形成的威胁更大, 说明区域防空、伪装示假等在现代阵地防御中起着更重要的作用。根据式(10)取 J_1 威胁度为 0.86, 威胁目标为 T_1 , 同理求得 J_2 威胁度为 0.53, 威胁目标为 T_2 ; J_3 威胁度为 0.94, 威胁目标为 T_1 , J_4 、 J_5 对 T_1 、 T_2 威胁度均为 0, 即不对 T_1 、 T_2 构成威胁。根据式(11)得机场甲威胁度为 1.39, 机场乙威胁度为 0.94, 机场丙威胁度为 0。根据式(12)归一化得机场甲、乙、丙威胁度分别为 $(0.597, 0.403, 0)$, 说明机场甲对我方目标构成威胁度最大, 战争发生时, 需对其重点打击。

表 2 敌战机威胁度评估属性矩阵表

	敌方战机性能 A										敌方火力特性 B						我方目标特性 C														
	A ₁		A ₂		A ₃		A ₄		A ₅		B ₁		B ₂		B ₃		B ₄		C ₁		C ₂		C ₃		C ₄		C ₅		C ₆		
	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	
P _甲	J ₁	3	3	1	1	10	8	3	3	5	5	9	9	0.7	0.7	0.75	0.75	0.85	0.85	9	7	0.7	0.5	0.6	0.9	2	4	5	3	0.3	0.65
	J ₂	2.5	2.5	1.5	1.5	15	12	2.5	2.5	4	4	9	9	0.8	0.8	0.75	0.75	0.7	0.7	9	7	0.7	0.5	0.6	0.9	2	4	5	3	0.3	0.65
P _乙	J ₃	1.5	1.5	2	2	25	21	4	4	8	8	7	7	0.65	0.65	0.8	0.8	0.9	0.9	9	7	0.7	0.5	0.6	0.9	2	4	5	3	0.3	0.65
	J ₄	0.5	0.5	0.8	0.8	55	40	1	1	3	3	5	5	0.9	0.9	0.7	0.7	0.65	0.65	9	7	0.7	0.5	0.6	0.9	2	4	5	3	0.3	0.65
P _丙	J ₅	0.3	0.3	0.5	0.5	60	75	0.5	0.5	3	3	5	5	0.85	0.85	0.75	0.75	0.65	0.65	9	7	0.7	0.5	0.6	0.9	2	4	5	3	0.3	0.65

表 3 敌战机威胁度评估矩阵表

	敌方战机性能 A										敌方火力特性 B						我方目标特性 C														
	A ₁		A ₂		A ₃		A ₄		A ₅		B ₁		B ₂		B ₃		B ₄		C ₁		C ₂		C ₃		C ₄		C ₅		C ₆		
	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	
P _甲	J ₁	0.99	0.99	1	1	1	1	1	1	0.63	0.63	1	1	0.36	0.36	0.63	0.63	0.94	0.94	1	0.78	0.3	0.69	0.5	0.3	0.5	1	0.17	0.25	0.96	0.4
	J ₂	0.98	0.98	1	1	1	1	0	1	0.5	0.5	1	1	0.83	0.83	0.63	0.63	0.36	0.36	1	0.78	0.3	0.69	0.5	0.3	0.5	1	0.17	0.25	0.96	0.4
P _乙	J ₃	0.63	0.63	0.36	0.36	0.5	0.97	1	1	1	1	0.78	0.78	0.11	0.11	0.83	0.83	0.98	0.98	1	0.78	0.3	0.69	0.5	0.3	0.5	1	0.17	0.25	0.96	0.4
	J ₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0.38	0.38	0.56	0.56	0.98	0.98	0.36	0.36	0.11	0.11	1	0.78	0.3	0.69	0.5	0.03	0.5	1	0.17	0.25	0.96	0.4
P _丙	J ₅	0	0	0	0	0	0	0	0	0.38	0.38	0.56	0.56	0.94	0.94	0.63	0.63	0.11	0.11	1	0.78	0.3	0.69	0.5	0.03	0.5	1	0.17	0.25	0.96	0.4

5 结论

机场威胁度评估是一项复杂的决策过程, 目前尚未形成有效的评估理论和方法。本文考虑威胁相对性, 构建了战机威胁度属性指标, 而后按照单机对单目标、单机对多目标、多机对多目标思想, 从下到上、逐层升华, 建立可行模型, 求出单机场威胁度, 在此基础上, 运用相同方法求出所有机场威胁度, 并进行归一化求解, 从而确定各机场威胁度, 为火力分配提供依据。计算结果表明该方法能有效确定机场威胁度, 可以为指挥员定下火力决心、选择打击目标提供可行依据。

参考文献:

[1] Zhang C, Su H B, Hou C Z, et al. An object threat assessment method based on indefinite multiple attribute decision making[J]. *Journal of China Ordnance*, 2007, 3(1): 39 - 42.

[2] Okello N, Thorns G. Threat assessment using bayesian networks[C] // *Proc. of the Sixth International Conference of Information Fusion*, 2003: 1102 - 1109.

[3] 黄宪成, 陈守焜. 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. (Huang X C, Chen S Y. A new model of threat evaluation involving qualitative and quantitative objects[J]. *Acta Armamentarii*, 2003, 24(1): 78 - 81.)

[4] 关键, 袁诗龙. 岛屿封锁作战炮兵目标价值排序的优化模型[J]. *火力与指挥控制*, 2005, 34(3): 136 - 140. (Guan J, Yuan S L. The optimized model of artillery target value sequencing in the

island blockade combat[J]. *Fire Control & Command Control*, 2005, 34(3): 136 - 140.)

[5] 李俊生, 梁伟, 刘雪梅, 等. 基于离差最大化的导弹中段目标威胁度评估[J]. *系统工程理论与实践*, 2007, 5(5): 136 - 140. (Li J S, Liang W, Liu X M, et al. The multi-attribute of menace of targets in midcourse of ballistic missile based on maximal deviation method[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2007, 5(5): 136 - 140.)

[6] Gonsalves P G, Burge J E, Harper K A. Architecture for genetic algorithm-based threat assessment[C] // *Proc. of the Sixth International Conference of Information Fusion*, 2003: 965 - 971.

[7] 王俊, 姜长生. 基于 LSRBF 神经网络的空战目标威胁评估[J]. *电光与控制*, 2007, 14(4): 43 - 48. (Wang J, Jiang C S. Target threat assessment based on LSRBF neural network for air combat[J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, 14(4): 43 - 48.)

[8] Gonsalves P, Cunningham R, Ton N, et al. Intelligent threat assessment processor using genetic algorithms and fuzzy logic[C] // *Proc. of the Third International Conference on Information Fusion*, 2000: 18 - 24.

[9] 邹成璐. 空军 XX 指挥自动化系统的模拟训练系统设计[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007. (Zou C L. Designing of air XX command automation system simulation training system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.)

[10] Kulak O. A decision support system for fuzzy multi-attribute selection of material handling equipments[C] // *Proc. of the Expert Systems with Applications*, 2005, 29(2): 310 - 319.