

未确知条件下多枚导弹打击不规则面目标的毁伤效果评估

王志辉^{1,2}, 胡剑文^{1*}, 朱晓敏^{1,3}, 张亚军²

(1. 军事科学院 战略评估咨询中心, 北京 100091; 2. 陆军炮兵防空兵学院南京校区, 江苏 南京 211132;
3. 国防科技大学 系统工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:在信息缺乏的情况下,如何提高对多枚导弹打击不规则面目标毁伤效果评估的可信度是导弹作战运用研究的重难点。通过蒙特卡罗方法建立给定参数下的面目标毁伤效果评估模型;采用信度分布函数对该问题的未确知性进行评估,评估结果显示毁伤效果未确知性较高;基于信度熵,分析导弹各个属性的未确知性对毁伤效果未确知性的影响;通过针对性减小影响大的属性的未确知性,迭代减小毁伤效果的未确知性。仿真实验结果表明面目标有效毁伤率的未确知范围得到显著减小。该研究能够有效指导毁伤效果评估工作,减小其中的不确定性。

关键词:毁伤评估;面目标;蒙特卡罗方法;未确知性;信度熵

中图分类号:TB114.1 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2024)03-213-09



听语音
与作者互动
聊科研

Evaluation of damage effect against irregular area target by multiple missiles under uncertainty

WANG Zhihui^{1,2}, HU Jianwen^{1*}, ZHU Xiaomin^{1,3}, ZHANG Yajun²

(1. Strategic Evaluation and Consulting Center, Academy of Military Science, Beijing 100091, China;

2. Army Academy of Artillery and Air Defense(Nanjing Campus), Nanjing 211132, China;

3. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the case of lack of information, how to improve the reliability of the evaluation of the damage effect of multiple missiles against irregular surface targets is a major difficulty in the research of missile operation. An evaluation model for the damage effect on area targets with given parameters was established using the Monte Carlo method. Belief degree distribution functions were employed to assess the uncertainties in the problem, and the assessment results showed a high level of uncertainty in the damage effect. Based on belief entropy, the influence of the uncertainty in each attribute of the missile on the uncertainty of the damage effect was analyzed. By specifically reducing the uncertainty of attributes with significant impact, the uncertainty of the damage effect was iteratively decreased. Simulation results show that the range of uncertainty for the effective damage rate of the area target is significantly reduced. This research can effectively guide the work of damage assessment and reduce its uncertainty.

Keywords: damage evaluation; area target; Monte Carlo method; uncertainty; belief entropy

毁伤效果评估是武器研发、弹药使用、战术与战略制定的重要基础性工作^[1],在现代战争中具有重要的军事意义。近年来,国内较深入地开展了大量毁伤效果评估相关的研究,取得了显著的成果。但是,受到侦察手段和评估技术的限制,毁伤效果评估的一些领域仍处在理论研究阶段,存在一些关键与棘手的问题亟待解决。特别地,相关信息获取是制约毁伤效果评估的瓶颈,如何在信息缺乏、不充分条件下获得具有较高可信度的

毁伤评估结果是一项严峻的挑战。

未确知性是指由于信息不足或认识局限而产生的认知上的不确定性^[2]。相较于随机型不确定性,这种不确定性可以通过引入更多信息或增加知识来减少^[3]。在评估活动中,评估对象的属性未确知,按照评估模型计算,将得到一个未确知的结果。如果评估结果的未确知程度很高,则无法为后续的决策论证提供支撑,其价值作用将受到明显限制。文献[4-5]运用主观概率区间手

段刻画各类属性的未确知性,然后通过相应的评估模型,综合算子等手段,求出评估结果的概率分布,最后用均值或相关统计量来代表未确知的评估结果。文献[6]用定性到定量转换的语言刻画武装直升机的能力参数与相应权重,并运用层次分析法进行效能综合。对于方案的评估,文献[7-9]用区间数刻画未确知性,用区间数排序法^[10-11]确定方案排序。区间数排序法有中值排序法、基于期望和方差的排序法、基于可能度的排序法等,但不同的区间排序法得出的结论可能不一样。

从文献调研的结果看,面对评估中普遍存在的未确知性,大多数文献秉持“平均主义”的思想,用平均值等统计量去替代不确定的结果,得出的结论与实际值仍然存在较大的偏差,犹如文献[12]所指的“平均的终结”。在评估实践中,为了获得准确的评估结果,评估工作应当逐步减少评估结果的未确知性,然而减少未确知性的评估模式很少有文献讨论。

多枚导弹打击复杂不规则的面目标,若导弹参数未确知,其毁伤效果也就未确知,传统的评估方法难以得到可靠稳定的毁伤评估结果。本文基于探索性范式的评估思想^[13],提出基于信度熵的探索性评估方法,旨在指导评估实践,通过迭代渐近的方式减小毁伤效果评估中的不确定性。

1 基于信度熵的探索性评估方法

基于信度熵的探索性评估方法的流程如图1所示。首先建立评估框架,根据评估目标定下评估指标,并构建合适的评估模型;接着对未确知变量进行建模与计算,提出用信度熵衡量未确知性的大小;然后结合敏感性分析,找出对评估结果未确知性“贡献”大的关键属性;针对关键属性投入人力、物力和时间,引入更多的信息以减小其未确知性,如进行更多的试验;修正后的属性重新迭代到评估模型中进行计算和分析,直到评估结果信度熵达到需求或无法减小为止。

探索性评估方法的核心思想是,把复杂问题分解,灵活采用人机综合的手段,以迭代渐近的方式得到可靠稳定的评估结果^[14]。探索性评估方法不追求一个很精确的评估结果,而重在减小评估结果的未确知性。

下面运用该方法于未确知条件下多枚导弹打击不规则面目标毁伤效果的评估上。

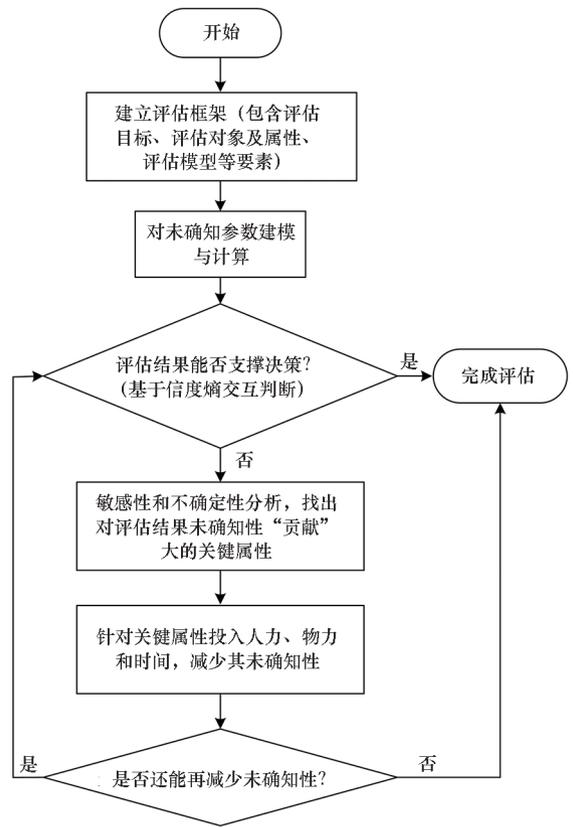


图1 基于信度熵的探索性评估方法的流程
Fig. 1 Process of uncertainty-entropy based exploratory evaluation method

2 面目标毁伤效果的评估模型

多枚导弹打击复杂不规则面目标,毁伤效果用有效毁伤面积或有效毁伤率表示。有效毁伤面积是指多枚导弹联合覆盖区域与复杂形状面目标区域的重叠部分的面积;有效毁伤率是指有效毁伤面积相对于目标面积的比例。本文通过仿真实验来建立评估模型。假设敌方某军事目标呈面状,需要使用多枚导弹进行打击。如图2所示,紫色区域是需要打击的军事目标区域,黄色和绿色区域是需要避免伤害的非军事目标区域。敌方军事目标区域位于图中坐标原点,多枚导弹瞄准坐标原点对军事目标进行模拟打击仿真实验。把 n 次 (n 足够大) 实验的平均有效毁伤面积或平均毁伤率作为毁伤效果的评估指标。

面目标毁伤计算主要涉及两个难题:一是面目标是任意不规则形状,二是多枚导弹毁伤幅员重叠面积计算复杂。对于这类问题,用常规的解析方法求解十分困难。本文用蒙特卡罗随机点法计算导弹的有效毁伤面积,基本思路是:依据每枚导弹落点的精度,即圆概率误差 (circular error probability, CEP) (记为 E) 随机产生落点,在落点

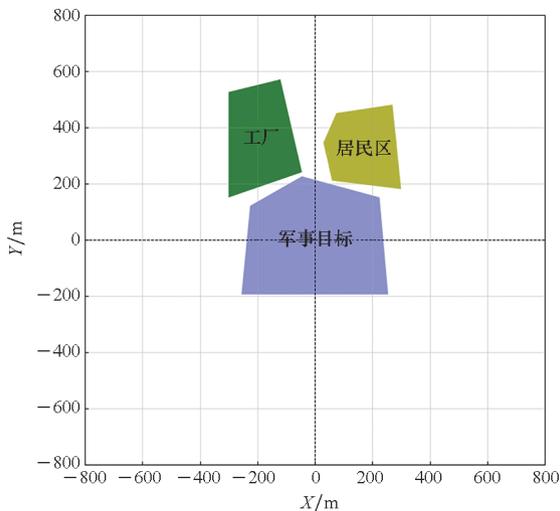


图2 目标示意图

Fig. 2 Diagram of the target

处依据每枚导弹的威力半径 R 生成毁伤圆,多枚导弹得到多个毁伤圆;在每个毁伤圆内产生足够数量的均匀分布的随机点,遍历每个随机点,判断是否在目标区域内以及所处毁伤圆的数量,通过点数之比计算面积之比,进而计算目标区域的毁伤面积。

具体的仿真实验算法步骤如下:

1) 输入目标的相关数据,如不规则目标的多边形顶点。

2) 输入导弹相关数据,导弹的发射数量,导弹的瞄准点,综合考虑导弹随机误差与系统误差的 E ,单枚导弹的威力半径 R 。

3) 根据导弹攻击的瞄准点与导弹的 E ,按照正态分布随机产生导弹落点,正态分布的标准差 σ 经计算为 $0.849\ 3E$ 倍。

4) 根据每个导弹的落点和威力半径确定毁伤圆,在此圆内均匀产生足够多的点,设为 M ,若导弹数量为 N ,则总共产生了 $M \times N$ 个点。

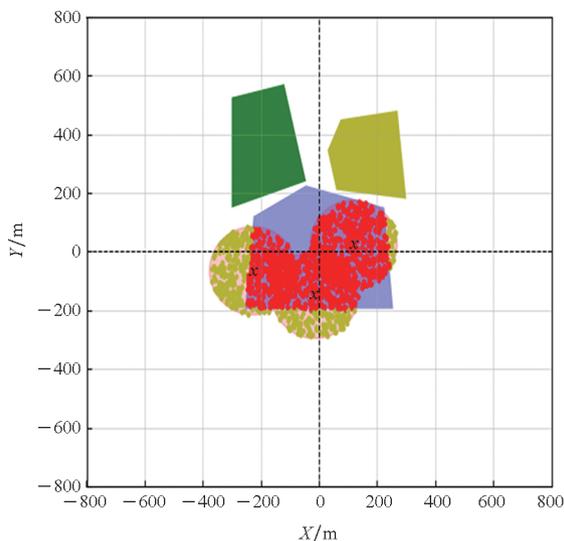
5) 目标是不规则图形,很难用解析的方法来计算多个毁伤圆与目标区域相交的面积。在第4步基础上遍历每个点,一是判断点是否在目标区域内,可以采用射线法或像素法;二是计算目标区域内每个点的重叠状况,统计目标区域内属于一共 i 个毁伤圆内点的数量,记作 t_i (t_1 是落入1个圆的个数, t_2 是落入2个圆的个数……依此类推)。

6) 按照式(1)计算有效毁伤面积:

$$S = \pi R^2 \frac{\sum_{i=1}^N t_i / i}{M} \quad (1)$$

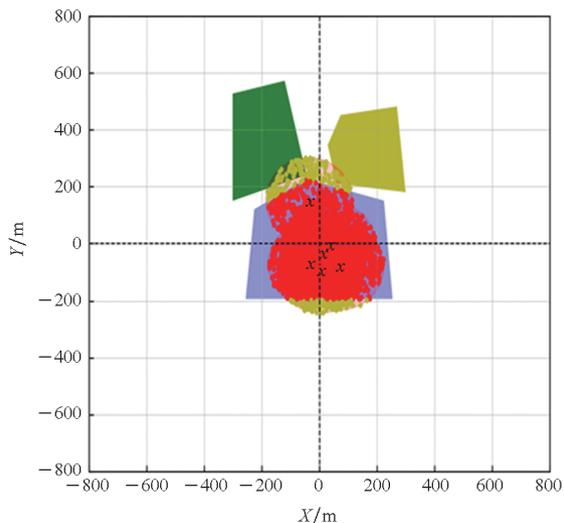
设定每枚导弹的 E 为 150 m, R 为 150 m,瞄

准点为目标中央(0, 0)。图3(a)和图3(b)分别是3枚导弹和6枚导弹打击目标实验中随机一次毁伤效果的示意图,图中紫色区域是需要被打击的敌方军事目标,黑色 x 点是导弹依据 E 按照正态分布计算的随机落点,毁伤圆内的点是蒙特卡罗随机点,红色的点表示在目标区域内,黄色的点表示在目标区域外。由于随机点很多且较密集,红色区域正是被导弹毁伤的区域。图3(a)中的有效毁伤面积为 $116\ 135\ \text{m}^2$,有效毁伤率为 64.7%;图3(b)中的有效毁伤面积为 $138\ 431\ \text{m}^2$,有效毁伤率为 77.1%。



(a) 3枚导弹毁伤目标

(a) 3 missiles damage target



(b) 6枚导弹毁伤目标

(b) 6 missiles damage target

图3 多枚导弹打击面目标的仿真实验
Fig. 3 Simulation experiment of multi-missile striking area target

在上述实验参数下进行 1 000 次打击实验,

求取平均值得到:3 枚导弹的平均有效毁伤面积约为 108 953 m², 目标区域平均毁伤率约为 60.8%;6 枚导弹的平均有效毁伤面积约为 148 417 m², 目标区域平均毁伤率约为 82.9%。

在给定参数下计算长期平均有效毁伤面积, 作为毁伤效果的评估结果, 是稳定且可靠的。但现实中, 如果缺少必要信息, 导弹的精度 (E) 和威力 (R) 未确知, 无法得到一个确定的评估结果, 而这种未确知性问题是普遍现象。

3 未确知属性的建模与计算

对于未确知变量的建模与处理, 常见的有模糊集^[15]、模糊变量^[16]、主观概率分布^[17]、信度分布^[18]等数学工具。模糊集可以用来描述未确知集合, 但导弹的精度 (E) 和威力 (R) 是连续的未确知变量, 用模糊集描述不太合适。模糊变量是一个从可能性空间到实数的函数, 文献^[19]证明了用模糊变量描述未确知变量会导致逻辑悖论。主观概率是通过想象估计系统的长期频率, 对人的想象力要求很高, 当主观概率与系统固有的长期频率偏差较大时, 概率的乘法规则会放大这种偏差。本文引入更符合人的直觉的信度分布函数来描述未确知变量。

3.1 信度分布函数的原理

信度是对专家主观判断的建模, 这种主观判断能够辅助人们解决一些主观的决策问题。信度分布函数是不确定理论^[18]中的一部分, 是未确知变量不完全信息的载体。和概率分布函数形式一样, 信度分布函数的函数值表示小于等于某一个值的主观信度。

定义 1^[18] 关于未确知变量 ξ 的信度分布函数 Φ 定义为: 对于任何实数 x 都有 $\Phi(x) = M\{\xi \leq x\}$ 。

例如, 某型导弹的 E 是未确知变量, 其信度分布函数如图 4 所示。假设实数 $x = 150$, 则对应的 $E \leq 150$ m 的信度为 0.7。从图 4 中能看到对于任意实数 x , 都有对应的信度。

定义 2^[18] 对于 x 在 $0 < \Phi(x) < 1$ 上, 如果信度分布函数是一个连续的严格递增函数, 那么 $\Phi(x)$ 是正则的, 并且 $\lim_{x \rightarrow -\infty} \Phi(x) = 0$, $\lim_{x \rightarrow +\infty} \Phi(x) = 1$ 。

定义 3^[18] 假设 ξ 是具有信度分布函数 $\Phi(x)$ 的一个未确知变量, 那么反函数 $\Phi^{-1}(x)$ 称为 ξ 的信度分布的逆函数。

定理 1^[18] $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ 是独立的未确知变

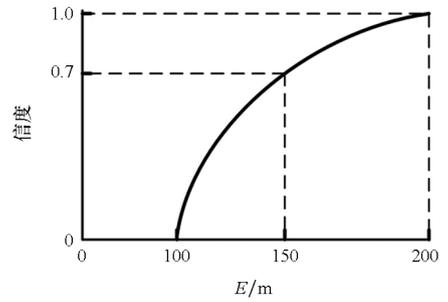


图 4 E 的信度分布函数

Fig. 4 Belief degree distribution function of E

量, $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ 分别是其正则信度分布函数, 如果 f 是一个严格单调递增函数, α 是信度值, 那么未确知变量 $\xi = f(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 具有信度分布的逆函数:

$$\psi^{-1}(\alpha) = f(\Phi_1^{-1}(\alpha), \Phi_2^{-1}(\alpha), \dots, \Phi_n^{-1}(\alpha)) \tag{2}$$

同理, 经过变换, 如果 f 是一个严格单调递减函数, 则:

$$\psi^{-1}(\alpha) = f(\Phi_1^{-1}(1-\alpha), \Phi_2^{-1}(1-\alpha), \dots, \Phi_n^{-1}(1-\alpha)) \tag{3}$$

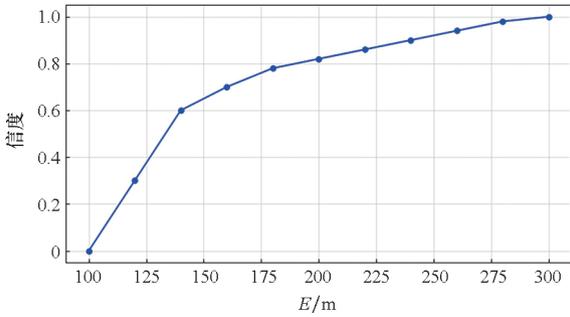
3.2 输入参数的信度分布函数

未确知输入变量的信度分布主要依靠专家的判断生成。为了提高专家判断的准确性, 减小判断噪声, 文献^[20]给出了专家主观判断的校准方法。先用该方法对专家进行校正, 然后与专家交互得到离散的判断数据, 最后采用分段插值法生成信度分布函数。组织专家研讨, 假设通过初始信息和知识得到 E 和 R 的信度分布函数, 如图 5 所示。

图 5(a) 中, $E \leq 180$ m 的信度为 0.78, $E > 180$ m 的信度为 0.22, 这说明专家通过评估, 对于 E 在 $[100, 180]$ m 的范围内信度较高, 在 $(180, 300]$ m 的范围内信度较低, 意味着在区间 $[100, 180]$ m 的未确知性较高, 在区间 $(180, 300]$ m 的未确知性较低; 图 5(b) 中, 威力半径 $R \leq 160$ m 的信度为 0.8, $R > 160$ m 的信度为 0.2, 同理, R 在区间 $[100, 160]$ m 的未确知性较高, 在区间 $(160, 300]$ m 的未确知性较低。由于 E 和 R 的量纲相同, 故可对二者的未确知性大小进行比较, 能够直观地看到 E 的未确知程度比 R 要稍高一些。

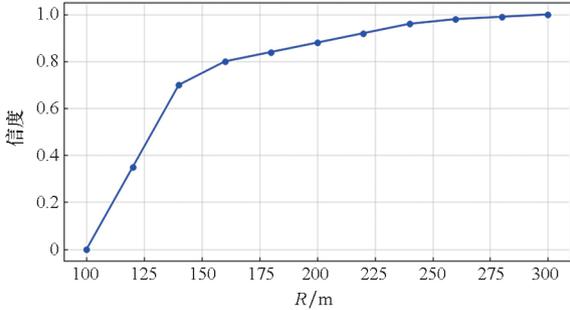
3.3 毁伤效果的信度分布函数

打击图 2 所示的军事目标, 导弹数量取 4 枚, E 和 R 未确知, 其信度分布函数建模如图 5 所示。对目标的长期平均有效毁伤面积设为 A ,



(a) E 信度分布函数

(a) Belief degree distribution function of E



(b) 威力半径 R 的信度分布函数

(b) Belief degree distribution function of kill-radius R

图5 导弹未确知参数的信度分布函数

Fig.5 Belief degree distribution function of unascertained missile parameters

单位为 m^2 。R 与 A 的关系在区间内可以看作是一个递增函数, E 与 A 的关系在区间内可以看作是递减函数。依据式(2)和式(3),即:

$$A = f(E, R) = f(\Phi_E^{-1}(\alpha), \Phi_R^{-1}(1 - \alpha)) \quad (4)$$

式中, $E = \Phi_E^{-1}(\alpha)$ 是 E 信度分布函数的逆函数, $R = \Phi_R^{-1}(1 - \alpha)$ 是威力半径 R 信度分布函数的逆函数。

把图5所示的 E 和 R 的信度分布函数代入式(4),得到4枚导弹打击图2所示军事目标的 A 的信度分布函数,如图6所示。

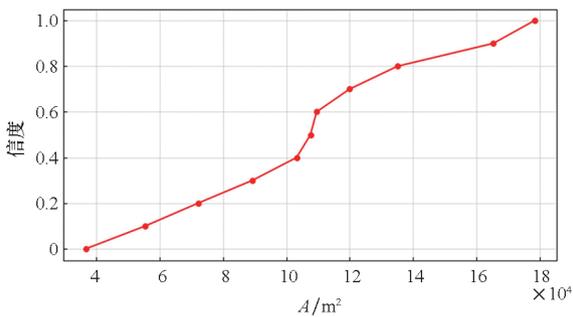


图6 A 的信度分布函数

Fig.6 Belief degree distribution function of A

对图6进行分析。A 可能的取值范围为 $37\ 723 \sim 179\ 500\ m^2$, 对应的长期平均毁伤率为

21% ~ 100%。能够直观看到 A 的信度分布变化比较均匀,这意味着 A 有较高的未确知性。日常生活中,相较于十成把握(信度为1)对应的范围,人们更加青睐于利用九成把握对应的范围。例如让一个学生估测他的考试成绩,那么 0 ~ 100 分必然是十成把握,但这样的估分就失去了它的价值。因此信度取值 0.9 对应的范围更加值得评估人员关注。当信度为 0.9 时, A 取值 $37\ 723 \sim 165\ 260\ m^2$, 平均有效毁伤率为 21% ~ 92%, 下一步就是要缩小这个范围。

为了从量化角度对未确知性有更加深入的研究,需要引入一个数学概念来衡量未确知性的大小,即信度熵。

3.4 信度熵

信息论中用信息熵表示不确定性事件信息量的期望。信息熵的计算公式可以反映离散的随机型变量不确定性的。借鉴信息熵的思想,本文采用信度熵衡量未确知变量未确知性的大小,并给出信度分布函数刻画下的连续变量的信度熵计算公式:

$$S_\xi = \int_L^U \left[\Phi(\xi) \log_2 \left(\frac{1}{\Phi(\xi)} \right) + (1 - \Phi(\xi)) \log_2 \left(\frac{1}{1 - \Phi(\xi)} \right) \right] d\xi \quad (5)$$

式中, ξ 表示一个未确知的连续变量, U 和 L 分别是 ξ 的上限和下限, Φ 表示未确知变量的信度分布函数, S_ξ 表示信度熵。变量 ξ 的信度分布越集中在 $\Phi(\xi) = 0.5$ 附近,则 S_ξ 越大,表明人对于 ξ 的主观判断越不确定,即未确知性越高。式(5)从定量角度衡量了连续变量的未确知性大小。

将 E、R 以及 A 的信度分布函数分别代入式(5)计算,得到 E 的信度熵为 118, 威力半径 R 的信度熵为 96, A 的信度熵为 92 084。由于本文的案例中 E 和 R 的量纲相同,所以可以比较 E 和 R 的未确知性。显然 E 未确知性高于 R, 和 3.2 节中分析的结论一致。

为了得到更加可靠的评估结果,需要减小评估对象属性的信度熵。把对评估结果的信度熵贡献大的属性视作关键属性。在有限的时间和成本约束下,优先减小关键属性的信度熵(投入人力和物力,引入更多信息和知识,或者进行更加精准的测量),可以提高评估工作的效率和效益。虽然 E 本身的未确知性更大,但这并不意味着该属性对评估结果的未确知性的影响一定更大,因为没有考虑属性对评估结果的敏感性。

4 查找关键属性

本节给出两种查找关键属性的方法。一种是多维数据可视化分析的方法,即结合敏感区域分析,找到敏感且未确知程度高的属性。另一种方法是全局敏感度计算法,即基于信度熵的分解,分别计算每个未确知属性对评估结果信度熵的贡献,贡献大的即为关键属性。

4.1 多维数据可视化方法

评估结果信度熵的大小主要受到评估对象属性自身的未确知性及其对评估结果的敏感性影响。敏感性是指模型参数或初始状态值的变化对模型输出变量的影响大小。评估对象的属性对评估结果的敏感性是由评估模型决定的。敏感且未确知程度高的区域可以理解文献[21]所描述的“极端斯坦”。如果属性在某个区域对输出结果不敏感,即使在这个区域未确知性高,对评估结果的影响也不大。例如图 7,红色的点基本上占满了整个紫色目标区域,这说明威力半径 R 在超过某个值后(E 在一定范围内),即使它的未确知性很高,对毁伤效果的影响也不大,因为有效毁伤面积接近饱和; E 也是如此,当超过某个值后(R 在一定范围内),即使它的未确知性很高,对毁伤效果的影响也不大,因为导弹落点的散布太大造成有效毁伤面积接近为 0。

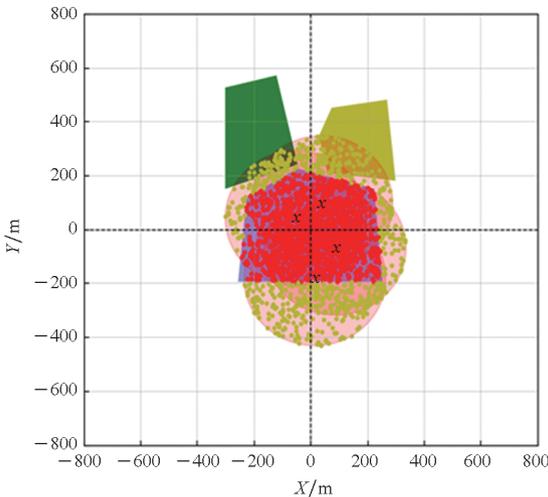


图 7 大威力半径的毁伤效果

Fig. 7 Damage efficiency with long kill-radius

E 和 R 对 A 的影响并不相互独立,其敏感性无法单独分析,需要找到其对应的敏感区域。下面对 4 枚导弹的毁伤效果进行敏感区域分析。导弹数量 $n = 4$, E 和威力半径 R 分别在各自的区间内取不同的值: $E = \{100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300\} \text{ m}$, $R = \{100, 120,$

$140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300\} \text{ m}$ 。

这样全组合就有 $11 \times 11 = 121$ 种实验组合,每种实验组合仿真 100 次取平均值。最终得到 R, E 与 A 关系的三维曲面图(如图 8 所示)和等高线图(如图 9 所示)。

对图 8 和图 9 进行分析,能够粗略地得到, E 大致在区间 $[180, 300] \text{ m}$ 对 A 敏感(下降更快), R 大致在区间 $[100, 220] \text{ m}$ 对 A 敏感(上升更快)。敏感区域可以用笛卡儿积表示: $\Omega = [180, 300] \text{ m} \times [100, 220] \text{ m}$ 。

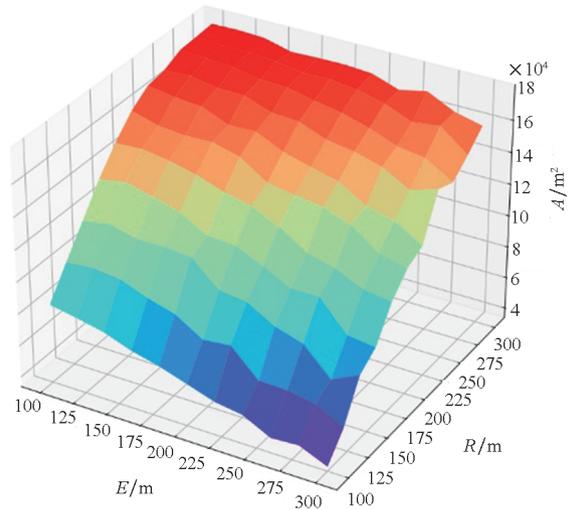


图 8 毁伤效果的三维曲面图

Fig. 8 3D surface diagram of damage efficiency

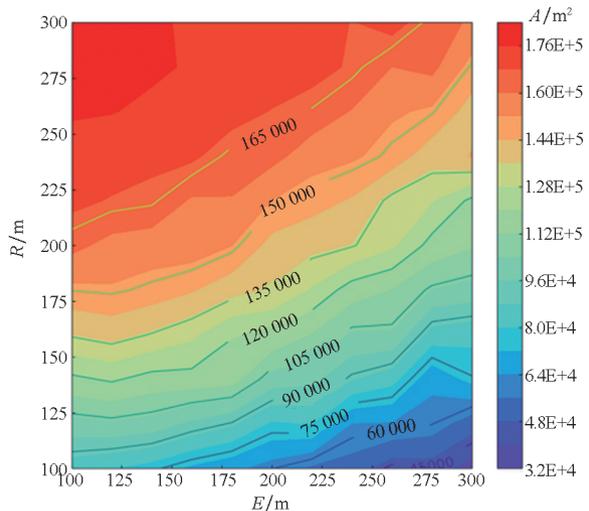


图 9 毁伤效果的等高线图

Fig. 9 Contour diagram of damage efficiency

结合 3.2 节的分析, E 在 $[100, 180] \text{ m}$ 的未确知性较高,在 $(180, 300] \text{ m}$ 的未确知性较低,可见 E 在不敏感区域的未确知性较高但在敏感区域的未确知性较低; R 在 $[100, 160] \text{ m}$ 的未确知性较高,在 $(160, 300] \text{ m}$ 的未确知性较低,可见 R

在不敏感区域的未确知性较低但在敏感区域的未确知性较高。因此,可以认为 R 对 A 的信度熵贡献更大。

4.2 全局敏感度计算法

4.1 节通过多维可视化的分析方法找到了关键属性。本节给出另外一种方法——全局敏感度计算法。全局敏感度分析是研究模型输出的不确定性组成如何定量追溯到模型的各种不确定性输入因素^[22]。经典的全局敏感度系数计算方法采用方差量化不确定性,这里采用信度熵量化。

令 $\Phi(A)$ 为长期平均有效毁伤面积 A 的信度分布函数,即 $\alpha = \Phi(A)$ 。

令

$$G(\Phi(A)) = \Phi(A) \log_2 \left(\frac{1}{\Phi(A)} \right) + (1 - \Phi(A)) \log_2 \left(\frac{1}{1 - \Phi(A)} \right)$$

故, A 的信度熵可记为 $S_A = \int_{L_A}^{U_A} G(\Phi(A)) dA$

下面对 S_A 进行分解,分解成各个未确知属性对熵的“贡献”:

$$\begin{aligned} S_A &= \int_{L_y}^{U_y} G(\Phi(A)) dA = \int_0^1 G(\alpha) (\Phi^{-1}(\alpha))' d\alpha \\ &= \int_0^1 G(\alpha) \left\{ \frac{\partial f}{\partial \Phi_E^{-1}(1-\alpha)} \cdot (\Phi_E^{-1}(1-\alpha))' + \frac{\partial f}{\partial \Phi_R^{-1}(\alpha)} \cdot (\Phi_R^{-1}(\alpha))' \right\} d\alpha \\ &= \int_0^1 \frac{\partial f}{\partial \Phi_E^{-1}(1-\alpha)} G(\alpha) (\Phi_E^{-1}(1-\alpha))' d\alpha + \int_0^1 \frac{\partial f}{\partial \Phi_R^{-1}(\alpha)} G(\alpha) (\Phi_R^{-1}(\alpha))' d\alpha \\ &= \int_0^1 \frac{\partial f}{\partial \Phi_E^{-1}(1-\alpha)} S_E d\alpha + \int_0^1 \frac{\partial f}{\partial \Phi_R^{-1}(\alpha)} S_R d\alpha \\ &= C_E + C_R \end{aligned} \tag{6}$$

式中, Φ_E 和 Φ_R 分别表示 E 和 R 的信度函数, S_E 和 S_R 分别表示 E 和 R 的信度熵, C_E 和 C_R 分别表示 E 和 R 对有效毁伤面积信度熵 S_A 的贡献。

$$C_E = \int_0^1 \frac{\partial f}{\partial \Phi_E^{-1}(1-\alpha)} G(\alpha) [\Phi_E^{-1}(1-\alpha)]' d\alpha \tag{7}$$

$$C_R = \int_0^1 \frac{\partial f}{\partial \Phi_R^{-1}(\alpha)} G(\alpha) [\Phi_R^{-1}(\alpha)]' d\alpha \tag{8}$$

运用数值方法近似计算式(7)和式(8),得到 $C_E \approx 19\ 032\ \text{m}$, $C_R \approx 76\ 595\ \text{m}$,可见 R 对信度熵的贡献明显更大,与4.1节可视化方法分析的结论一致。

第4节提出了两种查找关键属性的方法,多

维可视化的方法简便直观,但不适用于大量属性的重要性排序;式(6)的方法可以推广到 n 维属性空间中,计算重要性排序,但对计算稳定性有一定的要求。

5 迭代减小评估结果信度熵

减小评估结果的信度熵,是通过迭代减小评估对象的属性的信度熵实现的。如果评估结果的信度熵满足要求或者属性的信度熵很难再被减小,则可以停止评估工作,否则继续减小属性的信度熵。

5.1 针对性减小关键属性的信度熵

对毁伤效果的未确知程度影响最大的关键属性是 R 。为了提高评估工作的效率,节省成本和资源,优先减小 R 的信度熵,重点关注其在 $100 \sim 220\ \text{m}$ 的情况(在这个区间该属性对结果更加敏感,未确知性也更高)。减小评估属性的信度熵可灵活采用多种手段,如加大实验力度进行更加精准的测量,收集更多的信息,或者采用文献[13]中多专家综合集成的方法提高判断可靠性。修正后的 R 的信度分布函数如图10所示。

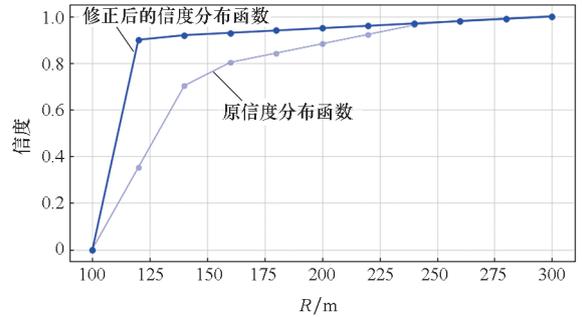


图10 R 的信度分布函数修正前后
Fig. 10 Belief degree distribution function of R before and after modification

图10中,修正后的 $R \leq 120\ \text{m}$ 的信度为0.9,可见在 $[100, 120]\ \text{m}$ 区间的信度非常高,未确知性得到显著减小。根据式(5)计算, R 的信度熵从96减小到了61。

5.2 修正毁伤效果的信度分布函数

将式(2)和式(3)代入 E 和 R 调整后的信度分布函数,通过蒙特卡罗仿真模型计算,得到调整后的毁伤效果的信度分布函数,如图11所示。能够直观地看到 A 的未确知性减小了。根据式(5), A 的信度熵从 $92\ 084$ 减小到了 $63\ 098$ 。下面对修正后的 A 信度分布函数进行分析。

从信度轴看,信度取0.9时, A 的范围从调整

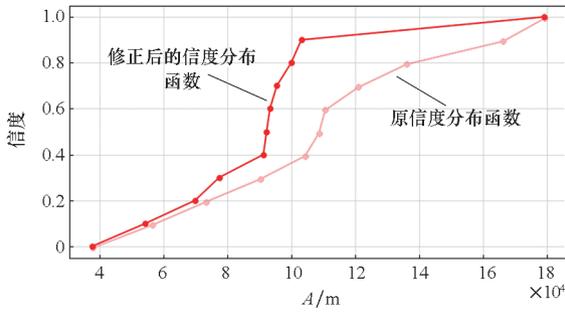


图 11 A 的信度分布函数修正前后

Fig. 11 Belief degree distribution function of A before and after modification

前的 $[37\ 723, 165\ 260]\text{m}^2$ 缩小到了 $[37\ 723, 103\ 184]\text{m}^2$, 对应的有效毁伤率未知范围从 $[21\%, 92\%]$ 缩小到 $[21\%, 57\%]$, 未知范围显著减小; 从 A 轴看, 在修正 R 之前, 平均有效毁伤面积 $[37\ 723, 103\ 184]\text{m}^2$ (平均有效毁伤率 $[21\%, 57\%]$) 对应的信度接近 0.4, 可以理解成专家只有四成的把握, 修正之后信度提高到 0.9, 意味着专家对这个范围的信心大幅度提高。

如果该评估结果满足决策者的需求, 则评估停止, 若未满足, 则继续迭代减小评估结果的信度熵, 直至评估结果达到要求。

6 结论

多枚导弹打击不规则面目标, 在给定导弹参数的情况下, 用蒙特卡罗方法评估毁伤效果, 结果确定且可控。

但现实中, 常由于信息获取的限制, 导弹的关键参数是未确知的。面对未确知的情况, 本文采用信度分布函数表征参数的未确知性, 依据不确定理论, 代入蒙特卡罗方法的评估模型, 能够计算出毁伤效果的信度分布函数, 但这个毁伤效果的信度分布的未确知性通常较高。本文给出了减小毁伤效果未确知性的思路框架, 并给出了两种查找关键属性的方法: 一种方法是通过多维可视化的手段找出敏感且未确知程度高的属性; 另一种方法是基于信度熵分解计算每个属性对评估结果信度熵的贡献比例, 针对性地减小关键属性的未确知性, 并重新迭代评估, 从而减小毁伤效果的未确知性。

仿真实验的结果表明, 本文的方法能够有效地减小毁伤效果的未确知性。基于信度熵的探索性评估方法能够指导毁伤效果评估活动, 把有限的资源和成本花在解决问题的“刀刃”上, 从而极大地提高了毁伤评估工作的效率和效益。

参考文献 (References)

- [1] 陈琪锋, 孟云鹤, 陆宏伟. 导弹作战应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
CHEN Q F, MENG Y H, LU H W. Missile operational application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [2] TANNENBAUM D, FOX C R, ÜLKÜMEN G. Judgment extremity and accuracy under epistemic vs. aleatory uncertainty[J]. Management Science, 2017, 63(2): 497 – 518.
- [3] DER KIUREGHIAN A, DITLEVSEN O. Aleatory or epistemic? Does it matter? [J]. Structural Safety, 2009, 31(2): 105 – 112.
- [4] BANDTE O. A probabilistic multi-criteria decision making technique for conceptual and preliminary aerospace systems design[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2000.
- [5] ALRWASHDEH S S, ALSARAIREH F M. Wind energy production assessment at different sites in Jordan using probability distribution functions [J]. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2018, 13(20): 8163 – 8171.
- [6] CHENG C H, YANG K L, HWANG C L. Evaluating attack helicopters by AHP based on linguistic variable weight [J]. European Journal of Operational Research, 1999, 116(2): 423 – 435.
- [7] WAN S P, DONG J Y. Decision making theories and methods based on interval-valued intuitionistic fuzzy sets [M]. Singapore: Springer, 2020.
- [8] YE J. Multiple attribute decision-making method based on the possibility degree ranking method and ordered weighted aggregation operators of interval neutrosophic numbers [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology, 2015, 28(3): 1307 – 1317.
- [9] WU Y N, XU H, XU C B, et al. Uncertain multi-attributes decision making method based on interval number with probability distribution weighted operators and stochastic dominance degree [J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 113: 199 – 209.
- [10] JIANG J R, REN M, WANG J Q. Interval number multi-attribute decision-making method based on TOPSIS [J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(7): 5059 – 5064.
- [11] HUANG W W, ZHANG F W, XU S H. A complete ranking method for interval-valued intuitionistic fuzzy numbers and its applications to multicriteria decision making [J]. Soft Computing, 2021, 25(3): 2513 – 2520.
- [12] ROSE T. The end of average: how we succeed in a world that values sameness[M]. New York: HarperOne, 2016.
- [13] 胡剑文. 探索性评估论证方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.
HU J W. Exploratory decision analysis[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2020. (in Chinese)
- [14] 胡剑文, 季明, 付东, 等. 一种面向复杂问题的评估分析

- 方法、装置和计算机设备: 113204924B [P/OL]. 2023 - 10 - 24 [2023 - 12 - 01]. <https://www.vipzhuanli.com/patent/202110592670.7>.
- HU J W, JI M, FU D, et al. Evaluation analysis method and device for complex problems, and computer equipment; 113204924B [P/OL]. 2023 - 10 - 24 [2023 - 12 - 01]. <https://www.vipzhuanli.com/patent/202110592670.7>. (in Chinese).
- [15] LIN S S, SHEN S L, ZHOU A N, et al. Risk assessment and management of excavation system based on fuzzy set theory and machine learning methods [J]. *Automation in Construction*, 2021, 122: 103490.
- [16] KWAKERNAAK H. Fuzzy random variables: I. definitions and theorems [J]. *Information Sciences*, 1978, 15 (1): 1 - 29.
- [17] CHEW S H, SAGI J S, WANG W Q. A parsimonious theory of subjective probability [J/OL]. *SSRN Electronic Journal*, 2021 (2): 3777432 [2022 - 05 - 01]. <https://fass.nus.edu.sg/ecs/wp-content/uploads/sites/4/2021/03/21-Feb-Chew-Sagi-Wang-A-Parsimonious-Theory-of-Subjective-Theory1.pdf>.
- [18] LIU B D. *Uncertainty theory: a branch of mathematics for modeling human uncertainty* [M]. Berlin: Springer, 2011.
- [19] LIU B D. Why is there a need for uncertainty theory [J]. *Journal of Uncertain Systems*, 2012, 6(1): 3 - 10.
- [20] HUBBARD D W. *How to measure anything: finding the value of intangibles in business* [M]. 3rd ed. Hoboken, State of New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2014.
- [21] TALEB N N. *The black swan: the impact of the highly improbable* [M]. New York: Random House, 2007.
- [22] SUN X F, CROKE B, ROBERTS S, et al. Comparing methods of randomizing Sobol' sequences for improving uncertainty of metrics in variance-based global sensitivity estimation [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 210: 107499.