

基于区间数的飞机生存力评估方法

李曙林, 陈宁, 杨哲, 周莉, 张铁军

(空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038)

摘要 针对飞机生存力评估的必要性以及生存力评估中存在的模糊性和不确定性, 提出了一种基于区间数的飞机生存力评估方法。从敏感性、易损性和作战能力3个方面构建了飞机生存力评估指标体系, 基于区间层次分析法和信息熵法得到了飞机生存力的区间数形式的指标权重, 利用权重系数法建立了飞机生存力的评估模型, 最后进行了实例计算。结果表明, 该方法能够较好地解决生存力评估中存在的模糊性和不确定性问题, 从而使评估结果更客观。

关键词 飞机; 生存力评估; 不确定性; 区间层次分析法; 信息熵法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.01.001

中图分类号 V221 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)01-0001-04

Evaluation Method of Aircraft Survivability Based on Interval Number

LI Shu-lin, CHEN Ning, YANG Zhe, ZHOU Li, ZHANG Tie-jun

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Since aircraft survivability evaluation is necessary and it is fuzzy and uncertain, a new evaluation method based on interval number was proposed. The index system for aircraft survivability evaluation was constructed by susceptibility, vulnerability and combat capability, the interval weights were calculated based on interval-based analytic hierarchy process and information entropy, the evaluation model of aircraft survivability was established based on weight coefficient. In the end, a numerical example was given. Calculation results show that the method is effective and feasible.

Key words: aircraft; survivability evaluation; uncertain; interval-based analytic hierarchy process; information entropy

飞机生存力^[1-2]是飞机设计和使用中主要考虑的性能指标之一。国内外关于飞机生存力已开展了较为系统的研究^[3-6], 主要从敏感性和易损性角度分析不同作战条件下的飞机生存力水平, 忽略了飞机的作战能力对飞机生存力的影响, 所得到的结论往往比较片面^[7]。另外, 由于飞机生存力与战术使用、作战环境等因素有关, 决策者在定权时往往很难给

出准确的决策信息, 同时权重的确定也容易受到决策者自身经验、素质以及人类思维模糊性等因素的影响, 导致指标权重存在一定的模糊性, 很难用确定值来描述。因此有必要探索新的方法来解决生存力评估中存在的模糊性和不确定性, 使评估结果更符合实际。

本文采用区间层次分析法^[8]和信息熵法确定区

收稿日期: 2012-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61172083)

作者简介: 李曙林(1959—), 男, 河北威县人, 教授, 博士生导师, 主要从事飞机结构强度、可靠性及生存力研究。E-mail: yangzhekj@163.com

引用格式: 李曙林, 陈宁, 杨哲, 等. 基于区间数的飞机生存力评估方法[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2014, 15(1): 1-4. LI Shulin, CHEN Ning, YANG Zhe, et al. Evaluation method of aircraft survivability based on Interval number[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(1): 1-4.

区间型评估指标权重,提出了考虑飞机作战能力的区间数生存力评估方法,最后进行了实例计算。

1 飞机生存力评估指标体系建立

飞机在敌方武器威胁的环境下作战时,具有较低的探测敏感性和易损性,从而具有较高的生存力。由文献[7]可知,战场环境下,飞机的生存力在很大程度上还取决于其自身的作战能力。飞机作战能力越强,威胁的生存概率越低,其对飞机的打击能力减弱,则飞机的生存力相应得到提高。因此,本文从敏感性、易损性和作战能力3个基本要素出发,构建飞机生存力评估指标体系。

1.1 敏感性

敏感性是指飞机在完成作战任务过程中被威胁击中的可能性,用飞机被损伤机理击中的概率 P_H 表示,主要与飞机的雷达散射面积、红外辐射隐身能力、电子对抗能力及机动性有关。敏感性通常由以下概率来进行测度:威胁是主动的并准备攻击飞机的概率 P_A ,飞机被威胁探测、识别及跟踪的概率 P_{DIT} ,威胁传播物发射或者开火并击中飞机的概率 P_{LGD} [1],有:

$$P_H = P_A P_{DIT} P_{LGD} \quad (1)$$

1.2 易损性

易损性是指飞机不能承受损伤机理一次或多次打击的程度,用飞机被一种或多种损伤机理命中后杀伤的条件概率 $P_{K/H}$ 表示,与飞机的易损面积 A_V 及迎击面积 A_P 有关[1],计算如下:

$$P_{K/H} = A_V / A_P \quad (2)$$

A_V 主要与以下几方面因素有关:① 威胁的种类,如射弹、导弹的破片、导弹的冲击波等;② 威胁对飞机的杀伤模式,如穿透、引燃、引爆等;③ 威胁的打击速度、打击方向等;④ 飞机致命性部件的尺寸、材料、等效靶厚度以及在飞机中的位置等。

1.3 作战能力

军用飞机作为武器平台,其对威胁目标的打击能力是客观存在的,特别是现代军机可挂载反辐射导弹、激光武器等先进武器装备,通过拦截飞行的威胁传播物、摧毁或损伤发射前的威胁机理,从而消除威胁或使威胁作用降低,最终提升飞机的生存力[7]。

在飞机与威胁遭遇时,对于飞机而言,其作战能力 P_{KK} 主要体现在成功地向威胁发起进攻,可表示为:

$$P_{KK} = P'_D P'_H P'_K \quad (3)$$

式中 P'_D 、 P'_H 、 P'_K 分别为飞机发现目标、机载武器击中、杀伤目标的概率。

2 基于区间数的生存力评估指标权重确定

本文利用区间层次分析法[9-10]和信息熵法[11],通过主、客观定权相结合的方法来得到区间数形式的生存力评估指标权重。

2.1 评估指标的标准化和聚合

2.1.1 标准化处理

指标体系中的指标类型分为效益型、成本型、固定型、区间型、偏离型和偏离区间型等6类[11]。在飞机生存力评估指标体系中,敏感性和易损性为成本型指标,作战能力为效益型指标。为消除不同指标类型对评估结果的影响,在进行生存力评估前应对评估指标进行标准化处理。

设 n 为待评估的飞机数量, m 为评估指标个数, u_{ij} 和 r_{ij} 分别为标准化处理前后第 i 个被评估飞机的第 j 个指标值, $u_{\max j}$ 和 $u_{\min j}$ 分别为所有评估飞机中第 j 个指标值的最大值和最小值。

指标为效益型指标时,其标准化指标值为:

$$r_{ij} = \frac{u_{ij} - u_{\min j}}{u_{\max j} - u_{\min j}}, i \in n \quad (4)$$

指标为成本型指标时,其标准化指标值为:

$$r_{ij} = \frac{u_{\max j} - u_{ij}}{u_{\max j} - u_{\min j}}, i \in n \quad (5)$$

2.1.2 评估指标聚合

本文采用权重系数法[4]对飞机生存力进行评估,其函数形式描述如下:

$$p_i = \omega_1 r_{i1} + \omega_2 r_{i2} + \dots + \omega_m r_{im} \quad (6)$$

式中: p_i 表示第 i 架飞机的评估值; ω_k ($k=1,2,\dots,n$)为第 k 个评估指标权重。

2.2 评估指标权重的确定

为了克服主观赋权法随意性大和客观赋权法忽视决策者的主观知识与经验等缺点,本文结合区间层次分析法的主观赋权法和信息熵客观赋权法,来确定各评估指标的权重。

2.2.1 区间层次分析法

传统层次分析法中,标量化依据各种标度体系,常用的标度体系为互反性1~9标度表[9]。为了克服其在确定权重过程中的主观性,发展形成区间层次分析法,运用区间数代替点值来构造判断矩阵,且原始数据和计算结果都用区间数的形式表达。

设 $\tilde{\mathbf{A}} = (\tilde{a}_{ij})_{m \times m}$ 为区间数矩阵,即 $\tilde{a}_{ij} = [a_{ij}^L, a_{ij}^U]$ 。记 $\mathbf{A}^L = (a_{ij}^L)_{m \times m}$, $\mathbf{A}^U = (a_{ij}^U)_{m \times m}$,并记 $\mathbf{A} = [\mathbf{A}^L, \mathbf{A}^U]$ 。同样对区间数向量 $\tilde{\mathbf{x}} = (\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m)^T$,即 $\tilde{x}_i = [x_i^L, x_i^U]$,记 $\mathbf{x}^L = (x_1^L, x_2^L, \dots, x_m^L)^T$

$l_m)^T, \mathbf{x}^U = (x_1^U, x_2^U, \dots, x_m^U)^T$, 并记 $\bar{\mathbf{x}} = [x^L, x^U]$ 。对于给定的区间数判断矩阵, 区间层次分析法确定权重的计算步骤如下:

步骤 1 利用特征向量法分别求 $\mathbf{A}^L, \mathbf{A}^U$ 的最大特征值及其对应的具有正分量的归一化特征向量 $\mathbf{x}^L, \mathbf{x}^U$ 。

步骤 2 由 $\mathbf{A}^L = (a_{ij}^L)_{m \times m}, \mathbf{A}^U = (a_{ij}^U)_{m \times m}$, 按式(7)计算 α 和 β :

$$\alpha = \left[\frac{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\sum_{i=1}^m a_{ij}^U}}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{\sum_{j=1}^m a_{ij}^L}} \right]^{1/2}, \beta = \left[\frac{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\sum_{i=1}^m a_{ij}^L}}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{\sum_{j=1}^m a_{ij}^U}} \right]^{1/2} \quad (7)$$

步骤 3 权重向量 $\omega_{CZ} = [\alpha x^L, \beta x^U]$ 。

2.2.2 信息熵

在信息论中, 信息熵是系统无序程度的度量。某个评估指标的信息熵越小, 则它在综合评价中所起的作用也越大, 即指标的权重也越大。因此, 可以利用信息熵这一工具来计算生存力各指标的权重。基本步骤如下:

步骤 1 构造决策矩阵 $\mathbf{U} = (u_{ij})_{n \times m}$, 并利用式(4)、式(5)将其标准化为 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times m}$ 。

步骤 2 计算矩阵 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times m}$, 得到归一化矩阵 $\mathbf{D} = (d_{ij})_{n \times m}$, 其中:

$$d_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^n r_{ij}, i \in n, j \in m \quad (8)$$

步骤 3 计算评估指标 u_j 输出的信息熵:

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n d_{ij} \ln d_{ij}, j \in m \quad (9)$$

当 $d_{ij} = 0$ 时, 规定 $d_{ij} \ln d_{ij} = 0$ 。

步骤 4 计算评估指标权重向量 $\omega_S = (\omega_{S1}, \omega_{S2}, \dots, \omega_{Sm})$, 其中:

$$\omega_{Sj} = \frac{1 - E_j}{\sum_{k=1}^m (1 - E_k)}, j \in m \quad (10)$$

2.2.3 主观权重与客观权重的结合

本文采用应用较为广泛的组合赋权法, 即 $\bar{\omega} = \lambda \omega_{CZ} + (1 - \lambda) \omega_S$, 其中, $\bar{\omega}$ 为组合后的权重, ω_{CZ} 和 ω_S 分别为主观权重和客观权重, 为权衡系数, 且 $0 \leq \lambda \leq 1$, λ 反映了决策者对主、客观权重的偏好程度, λ 越大, 表示主观权重对综合权重的影响越大。

3 生存力评估算法

根据第 2 节的分析, 基于区间数的飞机生存力评估算法具体步骤如下:

步骤 1 构造飞机生存力的决策矩阵 $\mathbf{U} = (u_{ij})_{n \times m}$, 其中 u_{ij} 表示飞机 x_i 关于指标 s_j 的指标值, 然后利用式(4)和式(5)将 $\mathbf{U} = (u_{ij})_{n \times m}$ 转化为

标准化的决策矩阵 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times m}$ 。

步骤 2 采用区间层次分析法将专家意见转化为生存力评估指标的区间型权重 ω_{CZ} , 根据规范化的决策矩阵 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times m}$, 基于信息熵法计算得到评估指标的权重 ω_S , 然后利用 $\bar{\omega} = \lambda \omega_{CZ} + (1 - \lambda) \omega_S$ 对主、客观权重进行结合。

步骤 3 利用式(6)计算各型飞机的综合属性值, 并根据大小进行生存力排序。

4 应用实例

本文依据所提出的飞机生存力评估方法, 对表 1 所示 5 型飞机的生存力进行评估, 以确定这些飞机的生存力优劣。

表 1 飞机生存力指标数据

Tab.1 Indices of aircraft survivability

机型	P_H	$P_{K/H}$	P_{KK}
1	0.135	0.27	0.645
2	0.290	0.170	0.730
3	0.100	0.495	0.430
4	0.375	0.110	0.215
5	0.220	0.350	0.520

通过征求专家意见, 得到飞机生存力各指标的区间数判断矩阵, 见表 2。

表 2 飞机生存力各指标的区间数判断矩阵

Tab.2 Interval number judgement matrix of aircraft survivability

生存力	P_H	$P_{K/H}$	P_{KK}
P_H	[1, 1]	[3, 4]	[4, 5]
$P_{K/H}$	[1/4, 1/3]	[1, 1]	[2, 3]
P_{KK}	[1/5, 1/4]	[1/3, 1/2]	[1, 1]

按照区间层次分析法的计算步骤可求得 $\mathbf{x}^L = [0.651 \ 1, 0.229 \ 6, 0.119 \ 2]^T$, $\mathbf{x}^U = [0.638 \ 1, 0.241 \ 9, 0.120 \ 0]^T$, $\alpha = 0.961 \ 5, \beta = 1.031 \ 2$, 于是可得区间数权重向量 $\omega_{CZ} = ([0.626 \ 0, 0.658 \ 0], [0.220 \ 8, 0.249 \ 4], [0.114 \ 6, 0.123 \ 7])^T$ 。

对表 1 进行标准化处理, 得到决策矩阵:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.872 \ 7 & 0.584 \ 4 & 0.835 \ 0 \\ 0.309 \ 1 & 0.844 \ 2 & 1.000 \ 0 \\ 1.000 \ 0 & 0.000 \ 0 & 0.417 \ 5 \\ 0.000 \ 0 & 1.000 \ 0 & 0.000 \ 0 \\ 0.563 \ 6 & 0.376 \ 6 & 0.592 \ 2 \end{bmatrix}$$

对 \mathbf{R} 进行信息熵计算, 可得: $E_1 = 0.809 \ 7, E_2 = 0.823 \ 6, E_3 = 0.829 \ 9$, 进一步求得指标的信息熵权 $\omega_S = (0.354 \ 5, 0.328 \ 6, 0.316 \ 9)^T$ 。

利用公式 $\bar{\omega} = \lambda \omega_{CZ} + (1 - \lambda) \omega_S$, 其中 λ 取 0.6, 得敏感性、易损性、作战能力各指标的区间数权重分

别为: $\boldsymbol{\varepsilon}_1 = [0.517\ 4, 0.536\ 6]$, $\boldsymbol{\varepsilon}_2 = [0.263\ 9, 0.281\ 1]$, $\boldsymbol{\varepsilon}_3 = [0.195\ 5, 0.201\ 0]$ 。

根据权重系数法,可得各型飞机生存力评估区间值,取区间数的中间值,得到实数值,见表3。

表3 飞机生存力评估区间值与实数值

Tab.3 Interval number and evaluation result of aircraft survivability

机型	区间值	实数值
1	[0.769 0, 0.800 4]	0.784 7
2	[0.578 2, 0.604 2]	0.591 2
3	[0.599 0, 0.620 5]	0.609 8
4	[0.263 9, 0.281 1]	0.272 5
5	[0.506 8, 0.527 3]	0.517 0

可得各型飞机生存力排序(由大到小)结果为 $\mathbf{X} = (1, 3, 2, 5, 4)$ 。

5 结语

本文在分析飞机生存力影响因素的基础上,建立了考虑飞机作战能力的生存力评估指标体系,并采用区间层次分析法和信息熵法确定了敏感性、易损性、作战能力的指标权重,提出了基于区间数的飞机生存力评估方法。计算结果表明该方法运算简单、易于实现,能够较好地解决生存力评估中存在的模糊性和不确定性问题,从而使评估结果更具客观性,为飞机生存力评估研究提供了新的思路,具有较好的应用价值。

参考文献(References):

- [1] Ball R E. The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design[M]. Reston: American institute of aeronautics and astronautics inc, 2003.
- [2] 王怀威, 李曙林, 陈宁. 飞机生存力评价指标之间相关性的解决策略[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2010, 11(6): 7-11.
WANG Huaiwei, LI Shulin, CHEN Ning. A method of solving the correlation of evaluation indices of aircraft survivability[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010, 11(6): 7-11. (in Chinese)
- [3] David H H, Ronald M D, Michael S R. Unmanned aerial system survivability[J]. AIAA 2009-2401.
- [4] 李寿安, 张恒喜, 李曙林, 等. 飞机生存力评估与综合权衡方法研究[J]. 航空学报, 2005, 26(1): 23-26.
LI Shouan, ZHANG Hengxi, LI Shulin, et al. Research on aircraft survivability evaluation and syn-

thetic tradeoff method[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2005, 26(1): 23-26. (in Chinese)

- [5] David H H, Ronald L K. Survivability models and simulations: past, present and future [J]. AIAA 2009-2397.
- [6] 赵晨钟, 韩庆. 聚焦式战斗部攻击下飞机的易损性计算[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2012, 13(1): 15-17.
ZHAO Chenzhong, HAN Qing. Calculation on the vulnerability of aircraft from a focusing warhead[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2012, 13(1): 15-17. (in Chinese)
- [7] 王怀威, 李曙林, 童中翔. 基于作战能力的飞机生存力模型及其综合权衡[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(8): 933-936.
WANG Huaiwei, LI Shulin, TONG Zhongxiang. Modeling and tradeoff of aircraft survivability based on combat capability[J]. Journal of Beijing university of aeronautics and astronautics, 2011, 37(8): 933-936. (in Chinese)
- [8] 郭辉, 徐浩军, 周莉. 基于区间数 TOPSIS 法的空袭目标威胁评估[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011, 12(1): 40-45.
GUO Hui, XU Haojun, ZHOU Li. Evaluation of air attack threat against target based on interval numbers TOPSIS[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(1): 40-45. (in Chinese)
- [9] Sajjad Z. Incorporating the uncertainties of decision judgments in the analytic hierarchy process[J]. European journal of operational research, 1991, 53: 206-216.
- [10] 龚胜科, 徐浩军, 周莉, 等. 基于区间 AHP 法与粗糙集的飞机空战效能评估[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2010, 11(5): 16-20.
GONG Shengke, XU Haojun, ZHOU Li, et al. Aerial warfare efficiency evaluation for fighter-plane based on interval AHP and rough set[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010, 11(5): 16-20. (in Chinese)
- [11] 郭辉. 空中力量体系对抗的决策与优化研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2010.
GUO Hui. Research on combat decision making and optimization of air power system of systems combat [D]. Xi'an: Air force engineering university, 2010. (in Chinese)

(编辑:徐敏)