

文章编号:1674-8190(2017)03-262-06

基于相邻优属度熵权的飞机抗毁伤能力评估

李彦彬,余丽山,赵永龙,张海瑞

(空军工程大学 防空反导学院,西安 710051)

摘要: 针对飞机抗毁伤能力评估的重要性以及抗毁伤能力评估的复杂与模糊性,提出基于相邻优属度熵权的飞机抗毁伤能力评估方法。从飞机敏感性、易损性、战伤抢修性和作战能力四个方面构建飞机抗毁伤能力评估指标体系,运用相邻优属度法和熵权法确定主客观权重,并根据评估指标的性质提出抗毁伤能力评估模型。通过算例验证,结果表明:基于相邻优属度熵权的飞机抗毁伤能力评估方法易于实现、操作性强、应用价值高,评估结果也更具客观性,有效地解决了飞机抗毁伤能力评估中的问题。

关键词: 飞机;抗毁伤能力评估;相邻优属度法;熵权法

中图分类号: V271.4

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2017.03.003

Assessment of Aircraft Anti-damage Capability Based on Adjacent Important Degree with Entropy Weight

Li Yanbin, Yu Lishan, Zhao Yonglong, Zhang Hairui

(College of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: For the importance of the aircraft anti-damage ability assessment and the complex and fuzziness of the anti-damage ability assessment, the assessment method of the aircraft anti-damage ability based on adjacent important degree with entropy weight is proposed. The aircraft anti-damage ability evaluation index system is built from four aspects of the sensitivity, vulnerability, the injuries to repair and combat capability, by using adjacent important degree and entropy weight to determine the subjective and objective weights. The anti-damage ability evaluation model is presented according to the property of the evaluation indexes. Through the numerical example verification, it shows that this method is high maneuverability, high application value and easy to implement. The evaluation results are more objective, and the problems in the evaluation of the aircraft anti-damage ability can be effectively solved.

Key words: aircraft; anti-damage ability assessment; adjacent important degree; entropy weight

0 引言

在现代战争中,获取制空权对战争的胜负起决定性作用。飞机作为空战的主要武器,目前面临的作战环境是人类历史上最复杂、最尖端的。如何保证飞机在战斗时,在不减少其战斗的能力前提下,提高承受或者躲避其应对敌对环境的能力,即提高飞机的抗毁伤能力,是目前飞机设计人员主要考虑

的因素之一^[1-2]。

关于飞机的抗毁伤能力,飞机的毁伤概率定义为 $P_K = P_H P_{K/H}$ (P_H 表示目标的敏感性, $P_{K/H}$ 表示目标的易损性)^[3],故已有研究多数从降低飞机的敏感性或者易损性来考虑提高飞机的抗毁伤能力^[4]。对于飞机的抗毁伤能力评估,国内外已经开展了较为系统和全面地研究。裴扬等^[5]从军用飞机敏感性和易损性两方面总结了飞机抗毁伤能力评估的定量计算方法,并指出了在未来体系对抗下飞机抗毁伤能力评估过程中需注意和解决的问题;李曙林等^[6]在敏感性和易损性的基础上,增加飞机

收稿日期:2017-03-17; 修回日期:2017-04-19

通信作者:余丽山,15529668632@163.com

的作战能力评估指标体系,运用区间层次分析法和信息熵法对飞机的抗毁伤能力进行评估,解决了飞机抗毁伤能力评估中的不确定性问题;D. H. Hall等^[7]通过生存力综合评估技术(ISA)与系统效能分析理论(POSSEM)等方法/程序相结合,在飞机的设计和使用上,进行抗毁伤能力权衡计算。由上述研究可以看出,前人在飞机抗毁伤能力评估上做了大量的工作,然而在评估过程中存在着一定的片面性。敏感性考虑的是飞机被敌方发现并被击中的问题,易损性考虑的是飞机承受打击的能力问题,飞机的抗毁伤能力不仅与敏感性和易损性有关,还与飞机损伤后的战伤修复性以及飞机主动消灭威胁源也有一定的关系。

本文从飞机的敏感性、易损性、战伤抢修性和作战能力四个方面分析飞机的抗毁伤能力,利用相邻优属度熵权的方法综合主客观两方面的评估信息,并根据评估指标的性质提出飞机抗毁伤能力评估方法,最后用算例验证方法的正确性,从而解决前人在飞机抗毁伤能力评估过程中存在的片面性。

1 飞机抗毁伤能力评估指标体系

当飞机作战受到敌方武器威胁时,敏感性与易损性越低,抗毁伤能力越高。除此之外,提高飞机的作战能力^[8],是从主动攻击方面消灭威胁源,提高飞机的抗毁伤能力;提高飞机的战伤抢修能力,是从飞机受伤后被动防御上提高飞机的抗毁伤能力^[9]。因此,本文从飞机的敏感性、易损性、战伤抢修性以及作战能力四个方面分析,建立飞机抗毁伤能力评估指标体系。

1.1 敏感性

敏感性指的是飞机被红外、雷达或其他的探测装置探测到,被破片、高能激光束、冲击波或动能弹丸等威胁物体击中的可能性。与飞机敏感性有关的因素有:飞机自身的特性(例如较小的雷达散射面积;高机动性,躲避对方的威胁攻击);飞机上的对抗装置(例如用于压制跟踪雷达的反雷达导弹,欺骗导弹或者防止被探测的电子对抗装置);飞机运用的战术(例如利用地势、地形、气候等自然条件避免被探测到)^[10]。飞机上的电子对抗设备可获取敌方的雷达、携带雷达的武器平台以及雷达制导

武器系统的性能参数,可通过电子欺骗、电子干扰以及反辐射攻击等软、硬杀伤的手段,对敌方雷达的作战效能进行削弱或者破坏。电子对抗能力对飞机的隐身以及避免飞机被探测攻击具有重要的作用,是飞机敏感性的重要指标。飞机的电子对抗能力 ϵ_e 如表1所示。

表1 电子对抗能力 ϵ_e 系数

Table 1 Electronic countermeasure ability ϵ_e coefficient

序号	电子对抗设备	ϵ_e
1	全向雷达告警系统	(0, 0.25]
2	全向雷达告警系统、消极干扰投放系统	(0.25, 0.5]
3	全向雷达告警系统、消极干扰投放系统、红外及电磁波积极干扰器	(0.5, 0.75]
4	全向雷达告警系统、消极干扰投放系统、红外及电磁波积极干扰器、导弹逼近告警系统	(0.75, 1]

可用飞机的电子对抗能力表征飞机的敏感性,电子对抗能力系数 ϵ_e 可根据飞机的电子对抗设备以及设备的功效在表1所给的区间内取值。

1.2 易损性

本文中易损性是指结构易损性,根据我国的军用标准GJB/Z202-2001中的定义:易损性是在某种人为的敌对环境中,飞机由于遭受不同等级的威胁机理,完成任务的能力受到降低限定等级的一种系统特性^[11]。飞机在威胁方向致命性部件暴露的面积越大,飞机被破片、动能杆等杀伤元素击中的可能性越大,飞机也就越容易被杀伤。因此,飞机的易损性可用飞机的致命性部件暴露面积比例 P_p 表示,可表示为飞机在上、下、左、右、前、后六个打击方向的致命性部件暴露面积和与飞机暴露面积的比值。

$$P_p = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^6 A_{P_{ij}}}{\sum_{j=1}^6 A_{P_j}} \quad (1)$$

式中: n 为第 j 个打击方向致命性部件的个数; $A_{P_{ij}}$ 为第 j 个打击方向第 i 个致命性部件的暴露面积; A_{P_j} 为第 j 个打击方向飞机暴露的总面积。

飞机易损性还与飞机致命性部件的装置和设计手段(如有效地将发动机分开)、致命性部件在遭受打击后继续工作的能力等因素有关^[12],为了评

估计算、应用方便,本文未从此方面考虑。

1.3 战伤抢修性

飞机战伤抢修性(Aircraft Combat Resilience,简称 ACR),指的是在作战环境下,利用有限的时间和资源对战伤飞机进行应急修理,使战伤飞机迅速地恢复到自救或者具有完成某种任务的能力,从而提高飞机的抗毁伤能力。战伤抢修可以使飞机在最短的时间内,转入战斗状态,保证飞机最大的出动架次以及完成任务的能力。对于损伤严重的飞机,经过抢修,保证其能够飞到后方进行修理。战伤抢修性可用 $P_{E/C}$ 表示,即在战争的条件下,在规定的时间内战伤的飞机被修复的概率。

$$P_{E/C} = P(t_1 \leq t) \quad (2)$$

式中: E 为用应急的方法及手段修理损伤的飞机, C 为在战争的条件下和在规定的时间内, $P_{E/C}$ 为条件概率; t_1 为修理战伤飞机恢复到基本功能的时间; t 为在战争的条件下允许的修理时间。

根据抢修人员修复战伤飞机的数量来定义战伤抢修能力,一般分为三级^[2]:①无抢修能力,战伤飞机变成战损飞机, $P_{E/C}$ 为 0;②在下一出动前有 50% 的战伤飞机可被修复即中等抢修能力, $P_{E/C}$ 为 0.5;③在中等抢修能力的基础上,最终又修复 30% 的战伤飞机即良好抢修能力, $P_{E/C}$ 为 0.8。

1.4 作战能力

作为武器平台的军用飞机,可挂载激光武器、导弹等先进的制导杀伤性武器,其对威胁的主动攻击能力,是客观存在的。军用飞机主动自主防御,即通过拦截、摧毁或损伤飞行的威胁物,降低或者消除威胁^[13]。通过飞机的作战能力,对威胁实施进攻的“硬杀伤”,从而提高飞机的抗毁伤能力。

军用飞机的作战能力主要表现为发现、击中、毁伤威胁目标,可用 P_{KK} 表示。

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

式中: P'_D 为飞机发现威胁目标的概率; P'_H 为飞机装载武器击中威胁目标的概率; P'_K 为武器杀伤威胁目标的概率。

对于雷达系统,虚警概率一定时,对于目标距离为 R_0 ,RCS 为 σ_0 ,雷达的探测概率为 P_{a0} ,那么

该雷达对于任意距离 R 上任意 RCS 的威胁目标发现概率 P'_D 为

$$P'_D = P_{a0}^{(R^4)/(R_0^4)} \quad (4)$$

击中威胁目标概率 P'_H 为

$$P'_H = \frac{A_p}{2\pi\sigma_r^2 + A_p} \quad (5)$$

式中: A_p 为威胁目标的迎击面积; σ_r 为飞机对威胁目标发射导弹脱靶距离的圆标准差^[8]。

对于飞机发射导弹杀伤威胁目标的概率 P'_K 可参考目标易损性的算法。

飞机抗毁伤能力评估指标体系如图 1 所示。

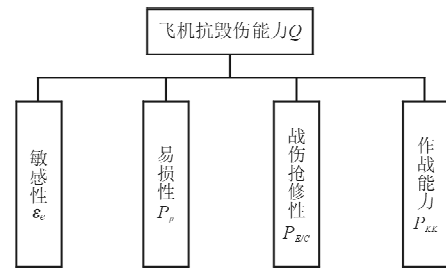


图 1 飞机抗毁伤能力评估指标体系

Fig. 1 The plane anti-damage ability evaluation index system

2 基于相邻优属度熵权的权重确定方法

权重的确定是描述评估对象相对重要程度的数值,是评估过程中重要的一部分。综合赋权法可以将主观赋权与客观赋权相结合,使权重既包含主、客观信息,又可以避免人为主观因素对权重的影响,客观地反应问题的真实情况。

2.1 相邻优属度法

相邻优属度法是在有限二元比较法的基础上确定主观权重的一种方法。对目标集 $O = \{o_1, o_2, \dots, o_m\}$ 中的 m 个评估指标的重要性进行排序。假设 $o_1 > o_2 > \dots > o_m$, 其中 $o_k > o_l$ 表示 o_k 比 o_l 重要。对其进一步定义,当 o_k 比 o_l 重要时, $0.5 < \beta_{kl} \leq 1$; 当 o_l 比 o_k 重要时, $0 \leq \beta_{kl} < 0.5$; 当 o_k 与 o_l 同等重要时, $\beta_{kl} = 0.5$, 特别地 $\beta_{kk} = 0.5$, 而且 $\beta_{kl} = 1 - \beta_{lk}$ 。其中 β_{kl} 是 o_k 相对 o_l 的重要性模糊标度值, $k = 1, 2, \dots, m; l = 1, 2, \dots, m$ 。

考察 $\beta_{k,k+2}$ 与 $\beta_{k,k+1}$ 及 $\beta_{k+1,k+2}$ 之间的关系。在数轴 $0 \sim \beta_{kl}$ 上, $\beta_{k,k+2} \in [\beta_{k,k+1}, 1]$; 在数轴 $0 \sim \beta_{k+1,l}$

上, $\beta_{k+1,k+2} \in [\beta_{k+1,k+2}, 1] = [0.5, 1]$ 。如图 2 所示。

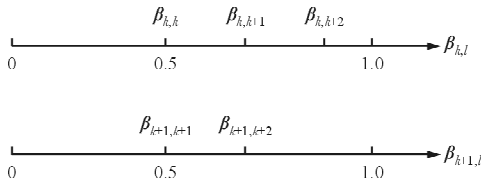


图 2 $\beta_{k,k+2}$ 与 $\beta_{k,k+1}$ 及 $\beta_{k+1,k+2}$ 之间的关系

Fig. 2 The relationship among the $\beta_{k,k+2}$,

$\beta_{k,k+1}$ and $\beta_{k+1,k+2}$

令

$$\beta_{k|1,k|2}^{(k)} = \beta_{k,k+2} - \beta_{k,k+1} \quad (6)$$

$$\beta_{k+1,k+2}^{(k+1)} = \beta_{k+1,k+2} - \beta_{k+1,k+1} = \beta_{k+1,k+2} - 0.5 \quad (7)$$

将 $\beta_{k+1,k+2}^{(k+1)}$ 从坐标系 $0 \sim \beta_{k+1,l}$ 的 $[0.5, 1]$ 区间投影到坐标系 $0 \sim \beta_{k,l}$ 的 $[\beta_{k,k+1}, 1]$ 区间上, 即将 $\beta_{k+1,k+2}^{(k+1)}$ 转换为 $\beta_{k|1,k|2}^{(k)}$ 。

$$\frac{\beta_{k|1,k|2}^{(k)}}{1 - \beta_{k,k+1}} = \frac{\beta_{k+1,k+2}^{(k+1)}}{0.5} \quad (8)$$

将式(5)和式(6)带入式(7), 即可推导出统一的递推公式:

$$\beta_{k,l} = \beta_{k,l-1} + 2(1 - \beta_{k,l-1})(\beta_{k+1,l} - 0.5) \quad (9)$$

根据任意两个评估指标的相对重要性模糊标度值, 构建关于指标重要性的有序二元比较矩阵:

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \cdots & \beta_{1m} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \cdots & \beta_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta_{m1} & \beta_{m2} & \cdots & \beta_{mm} \end{bmatrix} = [\beta_{kl}]$$

其中, $k, l = 1, 2, \dots, m$ 。

经归一化处理得到主观权重:

$$\omega_k = \frac{\sum_{l=1}^m \beta_{kl}}{\sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m \beta_{kl}} \quad (10)$$

式中: $k, l = 1, 2, \dots, m; k \neq l$ 。

2.2 熵权法

熵是热力学和信息论中的概念, 是表征系统的混乱程度的一个度量指标。熵与信息量相对, 一个系统越有序, 它所包含的信息就越多, 熵值越小。熵权法就是根据指标熵值来确定权重^[14]。

评估指标值的熵

$$e(f_j) = -K \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (11)$$

式中: $f_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij}}$; b_{ij} 为评价矩阵第 i 行第 j 列指标

值; K 的取值通常为 $\frac{1}{\ln n}$ 。

信息量与熵成反比关系, 得到信息量权重:

$$\omega_s = \frac{[1 - e(f_j)]}{[m - E]} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

式中: $E = \sum_{j=1}^m e(f_j)$, 称为总熵。

2.3 综合权重

利用比例系数, 将主观权重和客观权重相结合, 得到综合权重, 可以表示为

$$\omega(i) = \lambda \omega_k(i) + \alpha \omega_s(i) \quad (13)$$

式中: $0 < \lambda < 1, 0 < \alpha < 1, \lambda, \alpha$ 为主观权重与客观权重之间的比例系数。

将主观权重与客观权重相结合, 可综合得到评估指标的权重。但 λ, α 的取值, 却存在着分歧, 若根据决策者的喜好程度确定比例系数 λ, α 的值, 可能导致评估的结果偏主观性。

主观权重与客观权重的评定原理存在着差异, 为了得到更科学和易于接受的权重, 比例系数 λ, α 的确定也需兼顾主观经验和客观数据。因此, 本文通过引入距离函数计算比例系数 λ, α , 使得指标的权重与不同的方法计算权重的分配系数相符合。

主观权重与客观权重之间的距离函数为

$$d(\omega_k, \omega_s) = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\omega_k - \omega_s)^2} \quad (14)$$

为了使比例系数 λ, α 之间的差异与不同权重之间的差异程度相符合, 则

$$d(\omega_k, \omega_s)^2 = (\lambda - \alpha)^2 \quad (15)$$

$$\lambda + \alpha = 1 \quad (16)$$

通过上述公式, 可求得不同权重的分配系数, 进一步可求得指标的组合同权重。

3 实例验证

根据经验知识以及对相邻优属度法公式的推导, 给出重要性排序的二元比较矩阵, 如表 2 所示。

表 2 相邻优属度法二元比较矩阵

Table 2 Optimal adjacent binary comparison matrix

	ϵ_e	P_p	$P_{E/C}$	P_{KK}
ϵ_e	0.500	0.500	0.525	0.550
P_p	0.500	0.500	0.525	0.550
$P_{E/C}$	0.475	0.475	0.500	0.525
P_{KK}	0.450	0.450	0.475	0.500

经计算,得到归一化的主权重为

$$\omega_k = (0.263, 0.263, 0.245, 0.229)$$

根据本文提出的飞机抗毁伤能力评估方法,对 5 种机型(如表 3 所示)^[2]的抗毁伤能力进行评估。

表 3 五种机型指标参数

Table 3 Five kinds of model parameters

机型	ϵ_e	P_p	$P_{E/C}$	P_{KK}
1	0.135	0.270	0.735	0.645
2	0.290	0.170	0.430	0.730
3	0.100	0.495	0.655	0.430
4	0.375	0.110	0.535	0.215
5	0.220	0.350	0.600	0.520

飞机抗毁伤能力评估指标中,敏感性和易损性是愈小愈优,属于成本型指标。战伤抢修性和作战能力是愈大愈优,属于效益型指标。为了消除对评估结果的影响,分别对成本型指标和效益型指标进行标准化处理。

成本型指标标准化公式:

$$r_{ij} = \frac{u_{\max j} - u_{ij}}{u_{\max j} - u_{\min j}} \quad (17)$$

效益型指标标准化公式:

$$r_{ij} = \frac{u_{ij} - u_{\min j}}{u_{\max j} - u_{\min j}} \quad (18)$$

对表 2 进行标准化处理后得到的决策矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.873 & 0.584 & 1.000 & 0.835 \\ 0.309 & 0.844 & 0.000 & 1.000 \\ 1.000 & 0.000 & 0.738 & 0.418 \\ 0.000 & 1.000 & 0.344 & 0.000 \\ 0.564 & 0.377 & 0.557 & 0.592 \end{bmatrix}$$

经计算,各评估指标的熵值为

$$e(f_1) = 0.809 2$$

$$e(f_2) = 0.823 2$$

$$e(f_3) = 0.818 5$$

$$e(f_4) = 0.829 5$$

根据信息量与熵值成反比的关系,得到评估指标的权重:

$$\omega_s = (0.265, 0.246, 0.252, 0.237)$$

通过计算得到比例系数 λ 、 α 分别为 0.51、0.49,那么飞机敏感性、易损性、战伤抢修性和作战能力的权重:

$$\omega = (0.264, 0.255, 0.248, 0.233)$$

由于飞机敏感性与易损性是成本型指标。战伤抢修性和作战能力是效益型指标,定义飞机抗毁伤能力如表 4 所示。

$$H = -\omega_1 \epsilon_e - \omega_2 P_p + \omega_3 P_{E/C} + \omega_4 P_{KK} \quad (19)$$

经计算,得到五种机型的抗毁伤能力如表 4 所示。

表 4 五种机型抗毁伤能力

Table 4 Anti-damage ability of five kinds of models

机型	抗毁伤能力(H)	机型	抗毁伤能力(H)
1	0.228	4	0.056
2	0.157	5	0.123
3	0.110		

从表 4 可以看出:飞机的抗毁伤能力为机型 1 > 机型 2 > 机型 5 > 机型 3 > 机型 4。

4 结 论

本文通过对飞机抗毁伤能力的分析,建立了飞机敏感性、易损性、战伤抢修性和作战能力的抗毁伤能力评估指标体系,并运用相邻优属度熵权的方法确定各指标的权重,提出了抗毁伤能力评估方法。

通过算例验证表明:基于相邻优属度熵权的飞机抗毁伤能力评估方法在充分考虑评估指标的性质基础上,可以有效地解决评估过程中的人为因素的干扰,使评估结果更具客观性。并且上述方法易于实现、操作性强、应用价值高,对飞机抗毁伤能力的评估有借鉴意义。

参考文献

- [1] Ball R E. The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design [M]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics INC, 2003.
- [2] 李曙林,李寿安,童中翔. 战伤抢修对飞机生存力的影响分

- 析[J]. 兵工学报, 2005, 26(6): 795-797.
- Li Shulin, Li Shouan, Tong Zhongxiang. Effect of battle damage assessment and repair on aircraft survivability[J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(6): 795-797. (in Chinese)
- [3] 李向东, 杜忠华. 目标易损性[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013: 1-9.
- Li Xiangdong, Du Zhonghua. Target vulnerability [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013: 1-9. (in Chinese)
- [4] 杨哲, 李曙林, 周莉. 飞机作战生存力设计参数灵敏度分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(8): 1096-1101.
- Yang Zhe, Li Shulin, Zhou Li. Design parameters sensitivity analysis of aircraft survivability[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(8): 1096-1101. (in Chinese)
- [5] 裴扬, 宋笔锋, 石帅. 飞机作战生存力分析方法研究进展与挑战[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 216-229.
- Pei Yang, Song Bifeng, Shi Shuai. Analysis method of aircraft combat survivability: progress and challenge[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 216-229. (in Chinese)
- [6] 李曙林, 陈宁, 杨哲. 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. Evaluation method of aircraft survivability based on interval number[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2014, 15(1): 1-4. (in Chinese)
- [7] Hall D H, Ketcham R L. Survivability models and simulations: past, present and future [C] // Proc. of the 50st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2009.
- [8] 杨哲, 李曙林, 周莉. 考虑作战能力的飞机生存力权衡设计[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(1): 90-94.
- Yang Zhe, Li Shulin, Zhou Li. Tradeoff design of aircraft survivability considering aircraft combat capability[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(1): 90-94. (in Chinese)
- [9] 张均勇, 赵磊, 李武奇. 飞机战伤抢修性评价模型研究[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(10): 63-67.
- Zhang Junyong, Zhuo Lei, Li Wuqi. Study on evaluative modeling for aircraft combat resilience[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2015, 36(10): 63-67. (in Chinese)
- [10] Kang Park, Ilwanil Kang, Chongman Kim. Sensitivity analysis of design parameters of an anti-aircraft gun for hit probability enhancement[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(10): 3043-3046.
- [11] Li Jun, Yang Wei, Zhang Yugang. Aircraft vulnerability modeling and computation methods based on product structure and CATIA[J]. Journal of Aeronautics, 2013, 26(2): 334-342.
- [12] 宋笔锋, 裴扬, 郭晓辉. 飞机作战生存力计算理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 2-9.
- Song Bifeng, Pei Yang, Guo Xiaohui. Aircraft combat survivability calculation theory and methods[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 2-9. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 陈兆荣, 雷勋平. 基于熵权可拓的我国能源安全评价模型[J]. 系统工程, 2015, 33(7): 153-157.
- Chen Zhaorong, Lei Xunping. Evaluating energy security in china based on entropy weight extension model[J]. Systems Engineering, 2015, 33(7): 153-157. (in Chinese)

作者简介:

李彦彬(1968—),男,副教授。主要研究方向:国防采办与项目管理。

余丽山(1992—),男,硕士研究生。主要研究方向:国防采办与项目管理。

赵永龙(1991—),男,硕士研究生。主要研究方向:装备管理理论与方法。

张海瑞(1994—),男,硕士研究生。主要研究方向:国防采办与项目管理。

(编辑:赵毓梅)