现代战斗机空战能力评估及敏感性分析

金 镭 张曙光

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191) (北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

孙金标

(空军指挥学院 战役战术系, 北京 100097)

摘 要: 考虑四代机的特征并结合现代空战特点,建立适用于评估四代机空战能力的层次体系结构模型,结合层次分析法与模糊隶属度函数法进行空战效能的静态评估,并提出了空战能力对结构模型中最底层各单项指标及同层各指标的敏感性概念和算法. 以典型四代机和三代机为例,对构建的模型体系和评估方法进行了验证和细致分析,表明效能的静态评估具有合理性,并且通过效能值对指标的敏感性分析,能为战斗机升级和作战使用提供理论指导.

关 键 词: 作战效能; 静态评估; 层次分析法; 模糊隶属度; 敏感性分析

中图分类号: V 271. 4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)01-0082-05

Air-combat ability and sensitivity analysis of modern fighter aircraft

Jin Lei

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Zhang Shuguang

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Sun Jinbiao

(Department of Operations and Tactics, Air Force Command College, Beijing 100097, China)

Abstract: With the characteristics of the 4th generation fighters and modern air-combat included, an improved hierarchical architecture model of the air-combat capability was put forward, and combined with the analytic hierarchy process and fuzzy membership function technique for the static evaluation of the air-combat effectiveness. Moreover, the sensitivity of the air-combat effectiveness to each single item at the lowest level and all the items at the same level was defined and formulated. Two typical fighter examples, denoting for the 3rd and 4th generation fighters respectively, were used to demonstrate the rationality of the model, and the sensitivity analysis shows to be able to provide guidance to fighter upgrade and aircraft combat operation.

Key words: combat effectiveness; static evaluation; analytic hierarchy process; fuzzy membership function; sensitivity analysis

1 作战飞机效能评估

美国工业界武器系统效能咨询委员会将系统效能定义为预期一个系统能满足一组特定任务要求的程度[1]. 作战飞机作为复杂大系统,其效能衡量牵涉到很多因素,其中很多参数可进行精确计算,但也有很多参数不能直接测量或统计出来而只能进行估计,例如驾驶员的操纵效率. 目前对作战飞机效能的评估呈现概略性、相对性、时效性和局限性的特点[2]. 常用的评估方法有 WSEIAC 作战模型、模糊综合评估法、多属性功效函数法、层次分析法[2]等,都体现出效能评估的概略性、相对性、局限性,但体系上的时效性均有缺陷. 另外,由于装备数据保密等客观条件的影响,效能评

收稿日期: 2008-02-25

作者简介: 金 镭 (1981 -),男,黑龙江牡丹江人,硕士生, buaaura@126.com.

估在体系构造和应用实际均达不到时效,有时延.

2　空战能力层次结构体系模型

现代空战可分为视距内空战和超视距空战[3],战斗机的空战能力表示如下:

$$C = (\alpha_1 C_B + \alpha_2 C_W)\varepsilon \qquad (1)$$

式中,C_B为战斗机超视距空战能力;C_W为战斗机视距内空战能力;α_1,α_2为战斗机超视距空战和视距内空战分配权重系数,两者之和为 1;ε为飞行员操纵效率,先进的航空电子设备可提高飞行员的操纵效率.

在"先敌发现、先敌开火、先敌摧毁、先敌退出"的作战思想牵引下,现代空战与传统视距内空战相比主要有如下特点[4]:信息争夺日趋激烈;攻击范围明显扩大;攻击机会增多、攻击条件放宽;攻防态势具有较大相对性;空战机动的急剧程度减弱;机载武器系统的作用尤为突出;空战阶段发生重要变化.

从中可以提炼出影响战斗机超视距空战能力的指标有:飞机生存力、探测目标能力、飞机武器弹药和外部信息支援力量;影响战斗机视距内空战能力的指标:飞机生存力、探测目标能力和飞机武器弹药.

综合对 C_B和 C_W分析,构建具有现代空战特点的四代机空战能力的指标体系模型,见图 1、图 2.

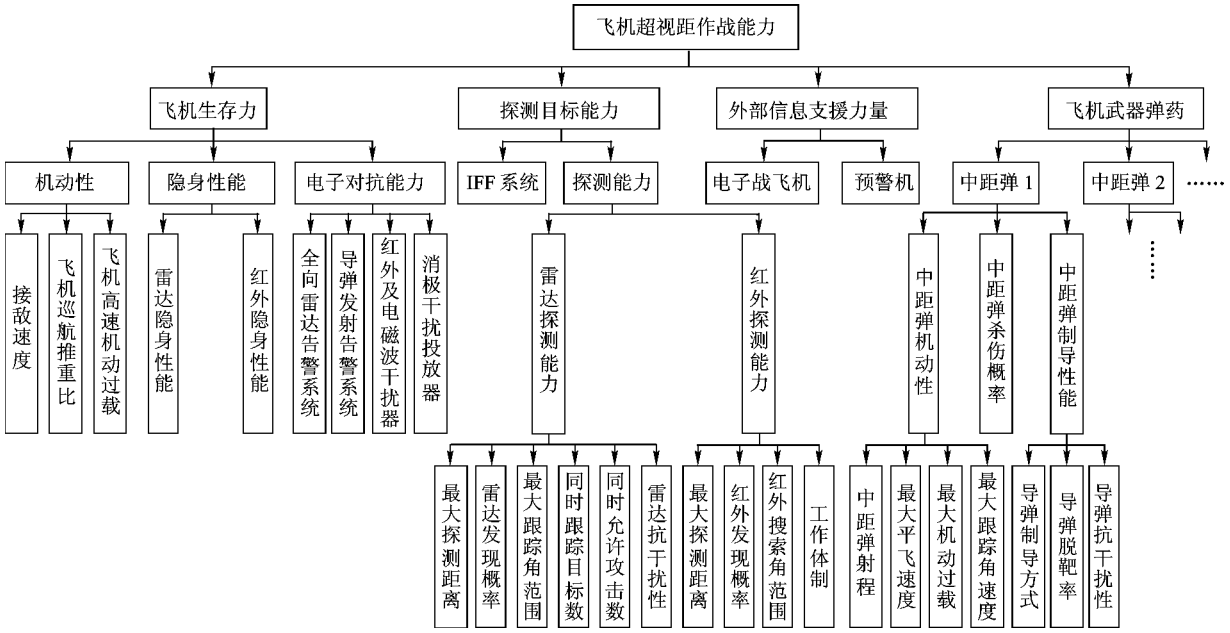


图 1　超视距空战能力层次结构体系模型

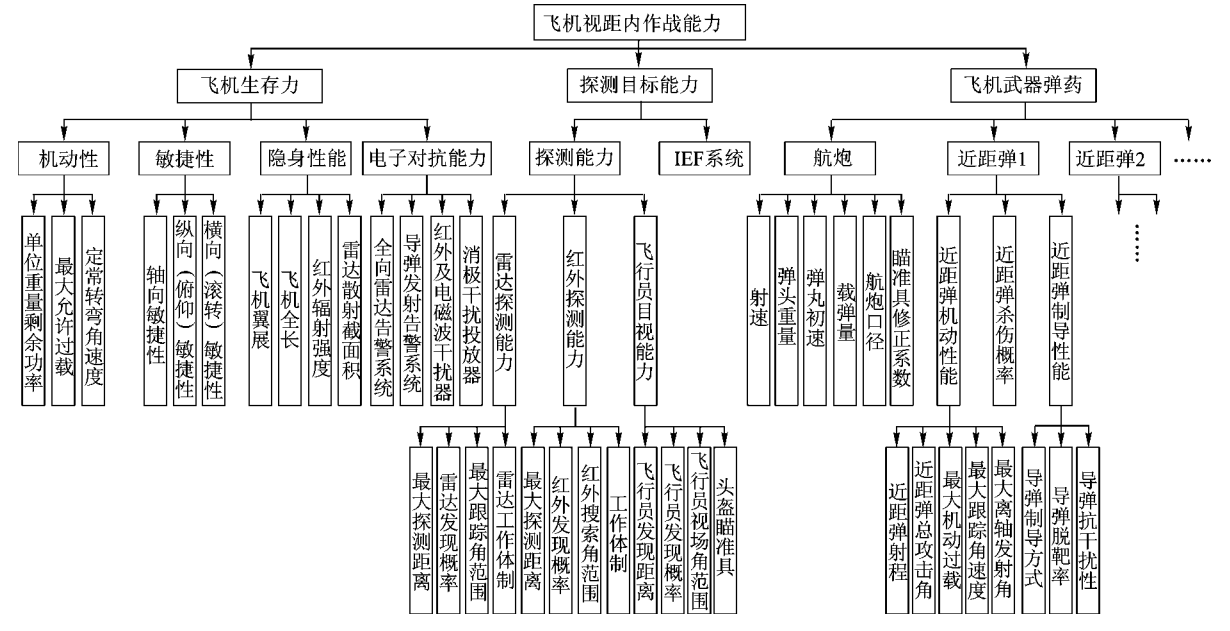


图 2　视距内空战能力层次结构体系模型

3 空战效能静态评估及敏感性分析

3.1 空战效能的静态评估

基于图 1、图 2的结构体系模型,用层次分析法结合模糊隶属度进行战斗机空战能力的计算评估[5]. 将递阶结构模型中的目标层定义为根节点,模型中具有从属关系且相互关联的两层,上层节点定义为下层子系统的父节点,相对应的下层所有节点称为上层子系统的子节点;模型中层间各个指标的联系用箭头表示,即下层指标只对其所属上层子系统有影响,同层之间各子系统、单项指标相互独立,如图 3所示.

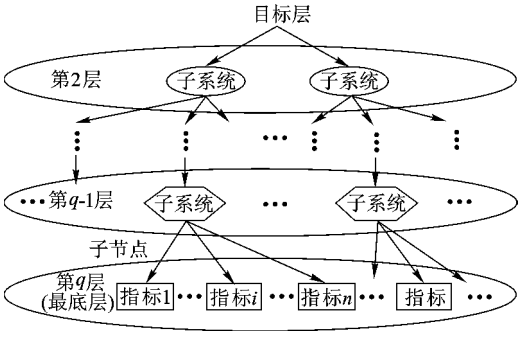


图 3 多级递阶结构模型

因此,影响战斗机空战能力的是各子系统下所有最底层的单项指标,由下式给出:

$$E = \sum_{i=1}^{N} E_i \tag{2}$$

$$E_i = W_i \times \mu_i \tag{3}$$

$$W_i = \prod_{k=2}^{q} W_{ik} \tag{4}$$

式中,E_i为模型中单项指标 i的效能值;N为模型中单项指标 i的个数;μ_i为模型中单项指标 i对于指标期望值的隶属度,由所选模糊隶属度函数确定;W_{ik}为第 k层中,单项指标 i所属的第 k层子系统在第 k层中所占的权重,由层次分析法确定.

3.2 敏感性分析

1) 飞机空战能力对于单项指标的敏感性. 假设某机单项指标 p取值变化 Δp,引起隶属度变化为 $\Delta\mu_p$,空战能力变化为 ΔE_p,根据式 (2)计算 ΔE_p相对于指标 p隶属度变化 $\Delta\mu_p$的敏感性为

$$\Delta E_p / \Delta\mu_p = \prod_{k=2}^{q} W_{pk} = W_p \tag{5}$$

指标 p性能变化 Δp达到指标期望值 (先进飞机已达到的指标值)时,ΔE_p相对于 Δp的敏感性为

$$\Delta E_p = (1 - \mu_p) \times \prod_{k=2}^{q} W_{pk} = (1 - \mu_p) \times W_p \tag{6}$$

指标 p性能提升到期望值时,ΔE对于 Δp的敏感性与 ΔE_p对于指标 p的隶属度 $\Delta\mu_p$敏感性目的一样都是通过敏感性计算来分析各单项指标对飞机空战能力的影响程度. ΔE对于 Δp的敏感性与 ΔE_p对于指标 p的隶属度 $\Delta\mu_p$敏感性不同的是指标 Δp的变化属大幅变化,而隶属度 $\Delta\mu_p$的变化属小幅变化.

2) 飞机空战能力对于同层指标的敏感性. 由图 3典型递阶结构模型可知,下层指标 (子系统)只对其所属上层子系统有影响,同层之间各子系统、单项指标相互独立. 各子系统相对于目标层的敏感性完全取决于其下属分支中各单项指标相对于目标层的敏感性.

以第 $q-1$层中各指标 (子系统)为例,假设目标层相对于 $q-1$层中第 r节点的敏感性为 $\Delta E^{q-1,r}$,完全取决于目标层对 r节点下所有子节点的敏感性 $\Delta E^{q,r}$ (假设 $q-1$层中第 r节点下子节点数为 t),则 $\Delta E^{q-1,r}$与 $\Delta E^{q,r}$有如下递推关系式:

$$\Delta E^{q-1,r} = \sum_{m=1}^{t} \Delta E_m^{q,r} = \left(\sum_{m=1}^{t} (1 - \mu_m) \times \prod_{k=2}^{q} W_{mk} \right)^{q,r}$$
$$q \geq 2,\ r \geq 1 \tag{7}$$

特殊地,若第 i层中某节点 j下无任何子节点,则 $\Delta E^{i,j}$按下式进行计算:

$$\Delta E^{i,j} = (1 - \mu_j) \times \prod_{k=2}^{i} W_{jk} \qquad i \geq 2,\ j \geq 1 \tag{8}$$

4 算例研究

4.1 选取模糊隶属度函数

评估空战效能的单项指标是由许多定量指标和定性指标共同组成的. 根据飞机的实际情况选取 F分布中岭形分布的偏大型、偏小型及正态分布的中间型作为算例的 3种隶属度函数. 定义越大越好指标的隶属度:

$$A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{b-a}\left(x - \frac{a+b}{2}\right) & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x \end{cases} \tag{9}$$

其中,b为指标期望值;a为指标下限.

对于越小越好的指标,其隶属度定义:

$$A(x) = \begin{cases} 0 & b \leq x \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\sin\frac{\pi}{b-a}\left(x - \frac{a+b}{2}\right) & a \leq x < b \\ 1 & x < a \end{cases} \tag{10}$$

其中,a为指标期望值;b为指标上限.

要求介于区间 $[a, b]$的指标的隶属度定义:

$$u(x) = \exp\left\{-\frac{[x-(a+b)/2]^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (11)$$

其中 σ为 x以 $(a+b)/2$为期望值时的均方差.

4.2 效能的静态评估

根据上述空战能力评估模型,以典型四代机 A与典型三代机 B为例,对二者的空战能力进行算例计算. 其中,典型四代机 A装备 6枚"AM-120C"、2枚"AM-9M";典型三代机 B装备 2枚"R-27R"、2枚"R-27ER"、2枚"R-27T"、4枚"R-73A".计算结果如表 1.可见,飞机 A除视距内空战的武器弹药效能评估低于飞机 B外,其它方面评估值均高于飞机 B.

表 1　典型三代机 B与典型四代机 A静态评估结果

评估项目	典型三代机 B	典型四代机 A
视距内空战能力(除弹药)	0.1764	0.1970
超视距空战能力(除弹药)	0.3747	0.5370
装备中距弹的作战能力	0.0712	0.0900
装备近距弹的作战能力	0.0324	0.0107
战斗机的空战能力	0.6548	0.8347

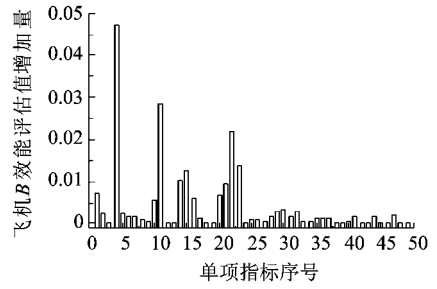
飞机 A有着飞机 B无法媲美的优势:超音速巡航能力、隐身性能、优秀的火控雷达、多目标打击能力、先进的"宝石柱"机载航空电子设备,这些机载设备大幅提高了飞机 A的超视距空战能力,并使其整体效能提到一个新的高度. 而飞机 A近距弹效能值低于飞机 B,这是由于飞机 A为提高隐身性能和超音速巡航能力,采用内置弹舱,这使迎头雷达散射截面积更小,超音速阻力更小. 但内置式载弹缺点是武器挂点少. 其中,飞机 A共有 3个内置弹舱,空战挂载方案为两个侧武器舱各挂 1枚 AM-9L近距空空导弹,主武器舱携带 6枚 AM-120C先进中距空空导弹. 飞机 B共有 10个武器挂点,空战挂 2枚 R-27R中距离半主动雷达制导空空导弹、2枚 R-27T中距红外制导空空导弹、2枚 R-27ER中距离半主动雷达制导空空导弹、4枚 R-73A近距红外导弹. 上述挂点数和载弹性能的差别,由效能值给以定量的反映.

4.3 敏感性分析

1) 飞机空战能力对于单项指标的敏感性

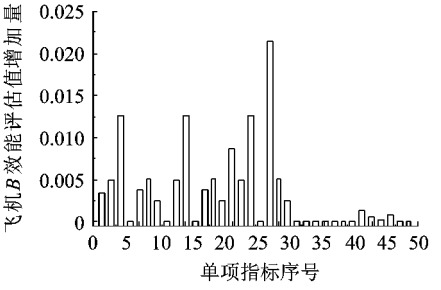
以飞机 B为例,若将其最底层所有单项指标提高到先进飞机值(期望值),其效能值变化随单项指标变化的曲线如图 4、图 5所示.

图 4中飞机 B(除弹药)各单项指标达到期望值时引起效能值变化较大的单项指标是:第 4项雷达散射截面积、第 11项雷达最大发现距离、第 22项预警指挥机、第 23项单位重量剩余功率(SEP, Specific Excess Power). 超视距空战已经成为现阶段及未来空战的主要作战方式,其特点是发现-攻击,要求先于对方发现目标并完成敌我识别、持续照射目标直到达到攻击条件、攻击目标完成任务. 所以,第 4, 11, 22项指标值的变化引起的效能变化灵敏度明显. 同时,超视距空战还不能代替视距内空战成为空战的全部. 由图 4可知,飞机 B的 SEP与飞机 A的差别导致的效能差异明显. SEP反映了飞机机动性,而机动性是飞机近距格斗能力的保障.



1—接敌速度; 2—巡航推重比; 3—高空机动过载; 4—雷达隐身性能; 5—红外隐身性能; 6—雷达告警系统; 7—导弹告警系统; 8—红外、电磁波干扰; 9—消极干扰投放器; 10—超视距IFF系统; 11—雷达发现距离; 12—雷达发现概率; 13—雷达跟踪角范围; 14—最大跟踪目标数; 15—最多攻击目标数; 16—雷达抗干扰性; 17—红外发现距离; 18—红外发现概率; 19—红外跟踪角范围; 20—红外工作体制; 21—电子战飞机; 22—预警指挥机; 23—SEP; 24—最大允许过载; 25—定常转弯角速度; 26—轴向敏捷性; 27—纵向敏捷性; 28—横向敏捷性; 29—飞机翼展; 30—飞机全长; 31—红外辐射强度; 32—雷达散射截面积; 33—雷达告警系统; 34—导弹告警系统; 35—红外、电磁波干扰; 36—消极干扰投放器; 37—雷达最大发现距离; 38—雷达发现概率; 39—最大跟踪角范围; 40—雷达工作体制; 41—红外探测距离; 42—红外发现概率; 43—红外搜索角范围; 44—红外工作体制; 45—飞行员发现距离; 46—飞行员发现概率; 47—飞行员视场角范围; 48—头盔瞄准具; 49—视距内IFF系统.

图 4　效能值随各单项指标(除弹药)变化曲线



1—R-27R射程; 2—R-27R平飞速度; 3—R-27R机动过载; 4—R-27R跟踪角速度; 5—R-27R导弹制导方式; 6—R-27R导弹脱靶率; 7—R-27R抗干扰性; 8—R-27ER射程; 9—R-27ER平飞速度; 10—R-27ER机动过载; 11—R-27ER跟踪角速度; 12—R-27ER导弹制导方式; 13—R-27ER导弹脱靶率; 14—R-27ER抗干扰性; 15—R-27T射程; 16—R-27T平飞速度; 17—R-27T机动过载; 18—R-27T跟踪角速度; 19—R-27T导弹制导方式; 20—R-27T导弹脱靶率; 21—R-27T抗干扰性; 22—P-73A射程; 23—P-73A平飞速度; 24—P-73A机动过载; 25—P-73A跟踪角速度; 26—P-73A导弹制导方式; 27—P-73A导弹脱靶率; 28—P-73A抗干扰性; 29—航炮射速; 30—弹丸初速; 31—航炮口径; 32—弹头重量; 33—载弹量; 34—瞄准具系数.

图 5　效能值随弹药中各单项指标的变化曲线

武器弹药的影响如图 5.飞机 B装备的近距

弹“射手”P-73A与飞机 A 装备的 AM-9M均是第4代先进近距弹,二者性能可比拟. 飞机 B 携带的中距弹是前苏联“白杨树”AA-10系列,而飞机 A 携 AM-120C是美国休斯敦公司研制的全天候、全方位主动雷达制导中距弹. “白杨树”系列性能落后于 AM-120C. 从图 5可知,提高“白杨树”系列中距弹的最大机动过载(第 3项 R-27R机动过载、第 10项 R-27ER机动过载、第 17项 R-27T机动过载)是提高中距弹效能的有效方法,这与实际空战效果相吻合. 图 5中最具提升效果的指标是第 19项 P-27T导弹的制导方式. P-27T属被动红外制导的中距弹,在空战接敌阶段双方战斗机均采取迎头飞行,而飞机机头左右 20 的范围是飞机红外辐射最小的区域,这种情况下,要能够对敌机实施攻击就要求载机尽可能的接近敌机,但可能同时进入敌导弹的攻击包线内,这对载机的生存力是相当不利的. 且迎头接敌时,红外制导的 P-27T与其它的主动弹、半主动弹相比而言对目标的威胁并不大,所以 P-27T如果能够改变其制导方式将给目标造成更大的威胁. 另外,P-27T导弹 45 km的射程(第 15项指标)相比于 AM-120C的 80 km的射程差距较大,提高最大射程也将有助于提高中距弹的效能值.

2) 飞机空战能力对于同层指标的敏感性

将飞机 B 各单项指标全面提升到先进飞机指标的期望数值,计算图 1、图 2中处于目标层相对于同层的子系统的敏感性.

体系中战斗机空战能力对于第 2层两子系统的敏感性 $\Delta E^{2,1}$,$\Delta E^{2,2}$及战斗机空战能力所提高的百分比数据计算如下:飞机 B 超视距空战能力的提升空间:$\Delta E^{2,1}=0.1906$,$\Delta E^{2,1}/E_B=29\%$;飞机 B 视距内空战能力的提升空间:$\Delta E^{2,2}=0.0426$,$\Delta E^{2,2}/E_B=6.5\%$. 可见,全面提升飞机 B 的超视距空战能力 C_B将使 E_B提高 29%,全面提升视距内空战能力 C_W只能使 E_B提高 6.5%. 在新机改型投入相同情况下,选择提升 C_B效果更明显.

图 6给出了飞机 B 第 3层各层子系统(或指标)提升到先进飞机指标期望值时其空战效能值 E_B相应的增加量. 可见,第 3层中 7个子系统敏感性较大的分别是超视距空战阶段飞机探测目标能力、飞机生存力、外部信息支援能力和视距内空战的飞机生存力这 4个指标. 敏感性越大说明此项指标距离先进飞机指标期望值的差距越大,同时也说明此项指标具有的提升空间也就越大. 所以,提升飞机 B 的整体空战能力需先从提高飞机的生存力和信息获取优势入手. 若需要进行更细致的对比,可类似地对其他下级各层进行分析.

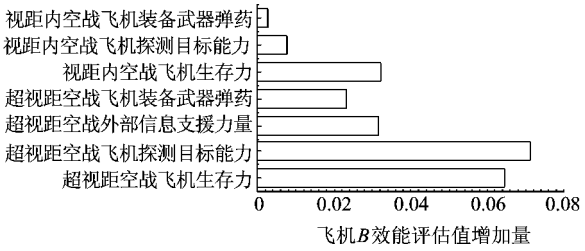


图 6 效能值随第 3层各子系统的变化曲线

5 结 论

本文所建立的评估模型以作战飞机整体为研究对象,充分考虑了四代机的特征,从体系上做到了评估需要的时效性要求. 本文提出的敏感性分析找出了性能较差飞机的各个组成部分与先进飞机之间的差距,定量的给出了这些部分具体能够提升的空间. 为战斗机改进改型和作战使用提供理论指导. 空战效能的静态评估是对武器装备的固有属性进行评估,静态评估只是武器装备效能评估的一部分,若需要评估分析武器装备在特定条件下、被用来执行特定作战任务过程中所达到预期目标的程度,则需对其进行效能的动态评估.

参考文献 (References)

[1] 汪民乐,高晓光,蔡付东. 作战飞机效能分析研究综述[J]. 飞行力学, 2001, 19(4): 1-5
Wang Minle, Gao Xiaoguang, Cai Fudong. Overview of research on military aircraft combat effectiveness analysis[J]. Flight Dynamics, 2001, 19(4): 1-5 (in Chinese)

[2] 朱宝鎏,朱荣昌,熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 北京:航空工业出版社, 1993: 1-14
Zhu Baoliu, Zhu Rongchang, Xiong Xiaofei. Assessments of effectiveness for aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1993: 1-14 (in Chinese)

[3] 傅攀峰,罗鹏程,周经伦,等. 空战武器体系超视距空战能力指标研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(8): 1072-1075
Fu Panfeng, Luo Pengcheng, Zhou Jinglun, et al. Research on the BVR air combat capability index of air-to-air weapon systems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(8): 1072-1075 (in Chinese)

[4] 张彦冰. 空军航空兵战术教程[M]. 北京:空军指挥学院, 2005: 20-25
Zhang Yanbing. Air force science of tactics tutorial [M]. Beijing: Air Force Command College, 2005: 20-25 (in Chinese)

[5] 金镭,张曙光. 模糊理论在作战飞机效能评估中的应用[C]//飞行力学与飞行试验(2006)学术交流年会论文集. 西安:飞行力学杂志社, 2006: 193-199
Jin Lei, Zhang Shuguang. Application of fuzzy theory for effectiveness evaluation on flight aircraft[C]//Proceedings of the Annual Seminar of Flight Mechanics and Flight Test (2006). Xi'an: Flight Dynamics Magazine, 2006: 193-199 (in Chinese)

(责任编辑:赵海容)