

军用飞机收益可实现性分析

孙康文, 陈琦, 黄俊, 武哲

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 100191 北京, sunkw100@ase.buaa.edu.cn)

摘要: 为了考核备选设计方案在不确定性因素影响下能够提供的综合能力,通过运用基于区间数层次分析法(AHP)和鲁棒技术(RD)的概率多准则决策方法(MCDM),对传统军用飞机总体方案评估中系统效能评估方法进行概率化处理,形成设计方案收益可实现性(EPACS)评估方法. 本文首先对收益可实现性的基本定义及其相关数学模型进行说明,随后,在考虑飞机设计方案中各设计/状态变量相互关系的前提下,构建了飞机设计方案收益可实现性的层次分析结构模型和评估流程. 最后,利用算例分析检验了上述分析模型的可用性和有效性.

关键词: 不确定性;概率多准则决策方法;收益可实现性

中图分类号: V221 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)03-0132-05

Efficiency practicability of aircraft conceptual/preliminary scheme

SUN Kang-wen, CHEN Qi, HUANG Jun, WU Zhe

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 100191 Beijing, China, sunkw100@ase.buaa.edu.cn)

Abstract: To examine the integration capability of candidate schemes under the condition of uncertainty, the probability multiple-criteria decision-making (MCDM) method, which is based on interval number analytic hierarchy process (AHP) and the robust design (RD), has been introduced to the effectiveness evaluation of aircraft conceptual/preliminary scheme, and the evaluation method of the Efficiency Practicability of Aircraft Conceptual/Preliminary Scheme (EPACS) has been founded. At first, the basic definition and correlative mathematics model of EPACS was made up. And then, taking into account of the correlation of all design/state variables in aircraft scheme, the structural model and the evaluation flow of EPACS was established. At last, the feasibility and validity of the above analysis had been proved by some examples.

Key words: uncertainty; probability multiple-criteria decision-making (MCDM) method; efficiency practicability

目前,军用飞机的系统效能评估,无论对于军方还是制造商,都是1个非常重要的指标^[1]. 通过评估,军方可全面了解各备选军机方案的总体性能优势,而制造商则可凭借这种效能优势获得军方的支持. 因此,军用飞机系统效能评估是非战争条件下评价飞机性能优劣的重要标准^[2-3].

然而,目前的军用飞机效能评估输入量仅局限于经验性的统计参数,输出量也仅是一确定的

数值^[1,4]. 但随着现代飞机设计过程中的不确定因素日益增多^[5-7],设计方案受不确定性因素的干扰日趋明显,本文拟结合现有的效能评估方法以及基于区间数层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和鲁棒技术(robust design, RD)的概率多准则决策(multiple-criteria decision-making, MCDM)方法^[8-9],从另1个角度对军机系统效能的优劣进行定义——考虑相关不确定因素影响下,既定飞机设计方案的相关效能指标同时满足使用方期望要求的概率,即飞机总体方案的收益可实现性(the Efficiency Practicability of Aircraft Conceptual/Preliminary Scheme, EPACS).

收稿日期: 2010-10-08.

基金项目: "航空基础科学基金"资助项目(03B51038).

作者简介: 孙康文(1980—),男,讲师;

黄俊(1964—),男,教授,博士生导师;

武哲(1957—),男,教授,博士生导师.

1 收益可实现性的定义

EPACS 的一般定义为:在新技术引入所产生的不确定性因素影响下,1 个具有期望技术可行性的设计方案,满足或者超过由用户所提基本要求确定的系统收益(系统效能指标)的概率.通常以系统收益可实现率(即飞机总体方案收益成功实现概率,Probability of Conceptual Scheme Success in Efficiency,以 POCSSIE 表示)作为收益可实现性的度量指标.其数学表述如下:

$$P_{SY} = P_{JS} \cdot P\{ \cap [E_{jmin} \leq E_j(x,y) \cdot P_{JKj} \leq E_{jmax}] \} = P\{ \cap [F_{imin} \leq f_i(x,y) \cdot P_{JKi} \leq F_{imax}] \} \cdot P\{ \cap [E_{jmin} \leq E_j(x,y) \cdot P_{JKj} \leq E_{jmax}] \}.$$

(1)

式中: $i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N; P_{SY}$ 表示总体方案的收益可实现性概率;第 1 个等号右边第一项表示总体方案的技术可行性概率;第二项表示第 j 项收益准则实际值落入其对应可行域(E_{jmin}, E_{jmax}) 内的概率; P_{JKi} 为新技术对第 i 项设计准则的综合影响因子; P_{JKj} 为新技术对第 j 项效能准则的综合影响因子; x 表示设计变量向量; y 表示状态变量向量.一般地,当可实现性概率 $> 50\%$ 时即认为该设计方案在收益上具有实现的可能.

当为受新技术引入或其它相关不确定性因素扰动影响的设计变量/状态变量(与设计变量无关,但又影响设计方案的量)、效能变量/效能状态变量赋予某种形式的分布(上述参数的选取大多满足均匀随机分布或正态随机分布)后,上式稍加修改便可应用于基于收益可实现性的飞机总体设计方案优化过程中,修改后如下:

$$P_{SYO} = \max \{ P_{JS} \cdot P\{ \cap [E_{jmin} \leq E_j(x,y) \leq E_{jmax}] \} \} = \max \{ P\{ \cap [F_{imin} \leq f_i(x,y) \cdot P_{JKi} \leq F_{imax}] \} \cdot P\{ \cap [E_{jmin} \leq E_j(x,y) \cdot P_{JKj} \leq E_{jmax}] \} \}.$$

(2)

式中: $i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N; P_{SYO}$ 表示优化后的总体方案的收益可实现性.上式的含义是,在相关变量的有效取值范围内,寻求使总体方案收益可实现性最大化的参数组合.为避免收益可实现性概率达到 1 后阻碍优化过程的进一步进行,当优化循环至可实现性概率为 1 后,将对相关准则构成的约束范围进行适当收缩,直至获得唯一的优化方案.

此外,由于上述模型反映的是所有效能指标能被同时满足的概率,因而,公式(1)可以反映设计方案在设计空间上的实际收益可实现性概率(对于统一的计算标准来说,它是 1 个相对绝对化的值,因而可作为判断实际收益大小的标准).此外,对公式(1)

中的模型稍加修改即可满足基于收益可实现性设计方案优选的需要,具体如下:

$$P_{SYE} = P_{JSE} \cdot P\{ \cap [(v_k \cdot N)E_{jmin} \leq E_j(x,y) \cdot P_{JKj} \leq E_{jmax}/(v_j \cdot N)] \} = P\{ \cap [(w_i \cdot M)F_{imin} \leq f_i(x,y) \cdot P_{JKi} \leq F_{imax}/(w_i \cdot M)] \} \cdot P\{ \cap [(v_k \cdot N) \cdot E_{jmin} \leq E_j(x,y) \cdot P_{JKj} \leq E_{jmax}/(v_j \cdot N)] \}.$$

(3)

式中: $i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N; P_{SYE}$ 表示待优选总体方案的等价收益可实现性;第 2 个等号右边的第一项表示第 i 项设计准则实际值落入其对应设计准则 F_i 等价可行域($(w_i \cdot M) \cdot F_{imin}, F_{imax}/(w_i \cdot M)$) 内的概率;第二项表示第 j 项收益准则实际值落入其对应等价可行域($(v_j \cdot N) \cdot E_{jmin}, E_{jmax}/(v_j \cdot N)$) 内的概率; w_i 为第 i 项设计准则的权重数; v_j 为第 j 项收益准则的权重数,受决策不确定性因素的影响,它们可通过基于区间数 AHP 和 DEA 的专家综合评判法获得^[10]; M, N 分别为设计准则、收益(效能)准则的数目.

针对基于收益可实现性的设计方案优选还需作如下说明:如果至少有 1 个备选方案达到了指定的 P_{SYE} 水平,那么 P_{SYE} 值最高的备选方案就是最佳方案.如果没有 1 个备选方案的 P_{SYE} 值能够大于 0,则需对相关准则值进行适当调整以生成更高的 P_{SYE} 值.同样的,如果同时有几个备选方案的 P_{SYE} 值均达到了 1,也必须对准则值进行修改以降低 P_{SYE} 的值,从而使得备选方案间可以区分开并最终确定出真正的最佳方案.

2 收益可实现性分析模型与流程

由于在飞机总体方案评估阶段只有几何参数和相关性能/效能参数的取值范围已知,因此,本文采用计算评估法中的对数法^[4]进行作战效能分析,由此形成的收益可实现性分析结构模型如图 1 所示,分析中将以隐身能力指数^[10]、空战能力指数、空地作战能力指数、可用性、可信性^[4,11]五大效能指标作为军机系统收益可实现性的主要评价准则,具体应用时可根据实际情况取舍.

针对新引入的隐身能力指数说明如下:隐身设计在现代作战飞机设计中的地位日趋显著,但在传统的对数法中,仅在生存力系数中考虑了雷达隐身特性的影响,存在明显不足.为此,在总体方案评估中引入隐身能力指数的概念,其定义为所设计的军用飞机能不被既定基准体(根据使用方的战场想定所构建的空防体系或假想敌战机)探测到的能力大小.因此,可借鉴对数法中求取探测能力参数的方法进行计算.其数学表述如下:

$$E_{\text{隐身}} = R^r \cdot R^{\text{IR}} \cdot R^S \cdot R^C.$$

(4)

式中: $E_{\text{隐身}}$ 表示隐身效能指标; R^r 表示基准体对既定机型的雷达探测能力; R^{IR} 表示基准体对既定机型的红外探测能力; R^S 表示基准体对既定机型的噪音探测能力; R^C 表示基准体对既定机型的目视能力. 乘积形式表明任何 1 项的薄弱将对军机的整体隐身性能产生严重影响.

式(4)中的相关参数 R^r 、 R^{IR} 、 R^S 、 R^C 均可通过下式求得:

$$R^r = (L_{\text{FI}}^2/4) \times (\theta/360^\circ) \cdot P_{\text{FI}} \cdot K.$$

(5)

对于 R^r : L_{FI} 表示以既定机型的 RCS 值为参考,基准体能将其探测到的最大距离;常数 4 表示有效目视发现能力 2 km 的平方; θ 为基准体所拥有雷达的最大搜索总方位角; P_{FI} 表示基准体以雷达搜索发现既定机型的概率; K 为基准体雷达体制衡量系数,其取值为测距器 0.3、无角跟踪能力雷达 0.5、圆锥扫描雷达 0.6、单脉冲雷达 0.7、脉冲多普

勒雷达 0.8 ~ 1.0,并按下视能力强弱选值.

对于 R^{IR} : L_{FI} 表示以既定机型的红外特征值为参考,基准体能将其探测到的最大距离; θ 为基准体所拥有红外探测器的最大搜索总方位角; P_{FI} 表示基准体以红外探测发现既定机型的概率; K 为基准体红外体制衡量系数,其取值为单元件亮点式红外探测器 0.3、多元固定式探测装置 0.5、搜索跟踪装置 0.7 ~ 0.9,如配有激光测距器则再增加 0.05.

对于 R^S : L_{FI} 表示以既定机型的发动机噪声值为参考,基准体能将其探测到的最大距离; θ 为基准体拥有的声探测器的最大搜索总方位角; P_{FI} 表示基准体以声探测器发现既定机型的概率;由于关于声探测装置的相关介绍很少,故此处的 K 取 1.0.

对于 R^C : L_{FI} 一般取为 8 km;发现概率 P_{FI} 为 0.59 ~ 0.75;视场角在 $160^\circ \sim 360^\circ$ 之间,视不同飞机而定; $K = 1.0$.

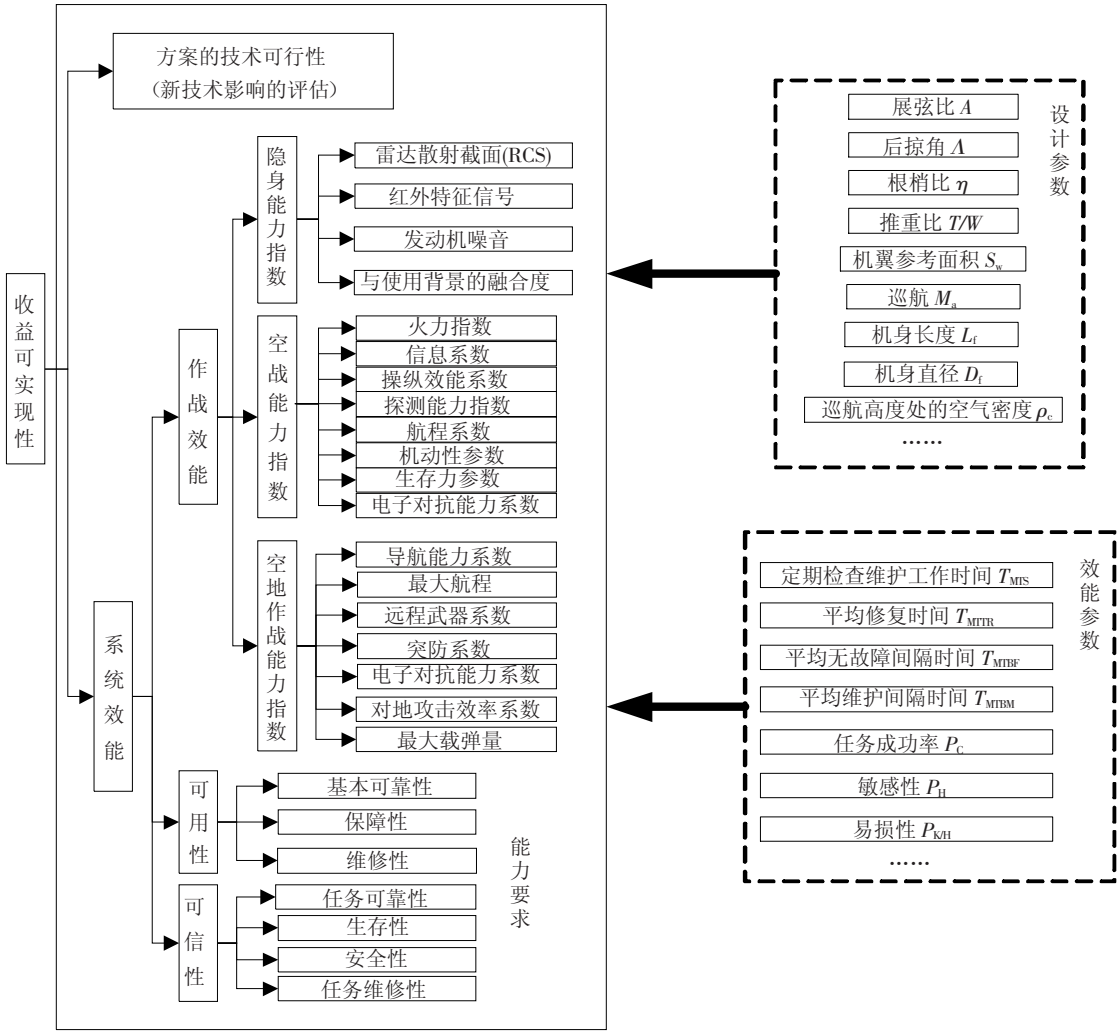


图 1 军用飞机总体方案收益可实现性分析结构模型

依据上述分析,可构建军用飞机设计方案的收益可实现性评估流程(包括可实现性概率判断、方案优化以及方案优选)如图 2 所示.

具体说明如下:针对既定设计方案,首先进行可行性分析,在可行性概率满足期望值(一般为 50%)的条件下,进行设计方案的收益可实现性

分析;否则,设计方案需在引入新技术的条件下再次进行可行性分析. 针对可以进行收益可实现性分析的设计方案,利用对数法建立的五大评估准则(隐身能力指数、空战能力指数、空地作战能力指数、可用性、可信性),结合使用方的具体要求可确定相应准则的基准值,再综合相关不确定性因素的随机分布赋值,即可根据式(1)计算出设计方案的收益可实现性. 若收益可实现性概率不

能达到(或超过)期望值(一般为 50%),则需进入新技术(或设计变量有效取值范围)的重新选取,直至收益可实现性概率达到期望值. 特别地,为相关变量赋予随机分布只在可实现性概率分析阶段起作用. 一旦分析流程进入优化阶段,设计/效能变量将根据具体优化方法在其有效范围内进行取值;至于进入方案优选阶段后,所面对的将是不同设计/效能参数的最佳组合.

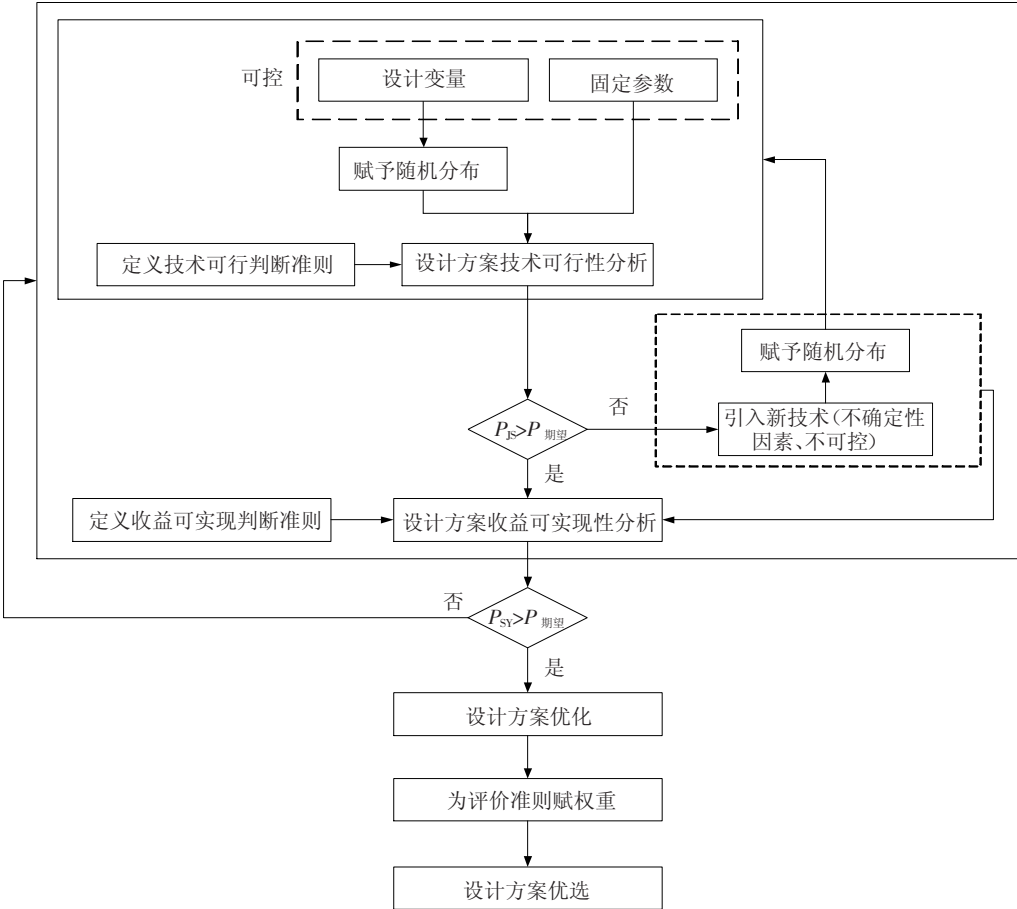


图 2 军用飞机总体方案收益可实现性评估流程

3 算例分析与验证

以文献[12]中引入新技术“适应性机翼外形技术”优化后的可行性设计方案为例,相关设计

参数取值如表 1 所示.
运用本文研究方法判断,该方案满足如表 2 (参考第三代战机拟定)所示的收益指标的概率.

表 1 最优可行设计方案

设计变量	机翼展弦比	机翼面积/m ²	机翼后掠角/(°)	机翼相对厚度	平尾展弦比	平尾面积/m ²	平尾后掠角/(°)
最佳解	3.66	72.80	38.91	0.056	6.25	10.57	31.17

设计变量	垂尾展弦比	垂尾面积/m ²	垂尾后掠角/(°)	最大飞行速度	推重比	巡航高度空气密度/(kg·m ⁻³)	可行性概率/%
最佳解	6.76	12.40	44.16	2.25	1.06	0.136 6	98.8

表 2 使用方的收益(效能)指标期望值

收益指标	空战能力指数(C _K)	空地作战能力指数(D _K)	可用度(A)
期望值	16.87	11.25	0.70

相关状态变量取值如表 3 所示(由于设计参数对设计方案的影响在文献[12]中已作分析,本

文仅分析效能参数对设计方案的影响). 根据经验,表 3 中的时间参数在受到新技术影响时,绝大多数情况下满足正态随机分布. 因此,在进行收益可实现性分析时对上述状态变量赋以正态随机分布. 相关固定参数的取值参见文献[10].

表 3 收益相关状态变量			h
取值范围	T_{MTBM}	T_{MTTR}	T_{MTS}
最小值	90	3	30
最大值	120	5	40

按照前述数学公式在 MATLAB7.0 上建立计算分析模型,经仿真计算可得

$$\begin{aligned} P_{SY} &= P_{JS} \cdot P\{ \cap (E_{jmin} \leq E_j(x,y) \leq E_{jmax}) \} = \\ &P_{JS} \cdot P\{ C \geq 16.87, D \geq 11.25, A \geq 0.7 \} = \\ &75.08\% \end{aligned}$$

此时,随机采样点在三维坐标系内的图形如图 3 所示.

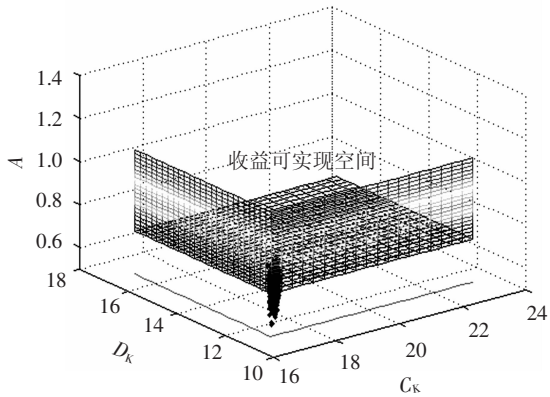


图 3 总体方案收益可实现性分析图($P=75.08\%$)

由上述仿真分析可以获得关于 C_K 、 D_K 、 A 的单变量累积概率分布分别如图 4、5、6 所示.

根据上述图形可以很容易的获得相关收益准则在不同取值条件下所能获得的可实现性概率.

最后需要说明的是,由于本方案的收益可实现性概率 $P_{SY} = 75.08\% > 50\%$,因此可以认为既定设计方案在经过基于收益可实现性评估后具有现实可行性.

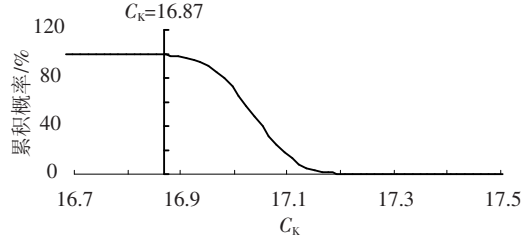


图 4 空战能力指数的累积概率分布

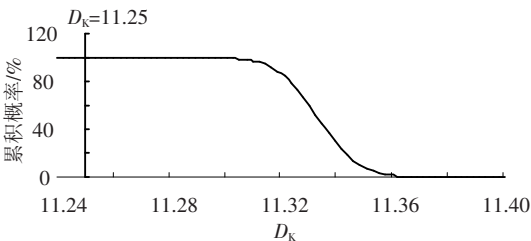


图 5 空地作战能力指数的累积概率分布

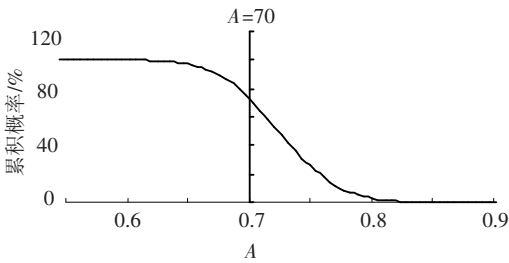


图 6 可用度的累积概率分布

4 结 论

与常规作战效能评估方法不同的是,本文建立的基于不确定性的军用飞机收益可实现性分析结构模型,即植根于传统的作战效能评估方法之中(便于以往经验数据的充分利用),又比传统的效能方法更具科学性(充分考虑相关不确定性因素对设计方案造成的影响),因而,更能满足现代飞机设计的需要.

参考文献:

[1] 张恒喜,朱家元,郭基联. 军用飞机型号发展工程导论[M]. 北京:国防工业出版社,2004:17-30.

[2] 李 千,纪小柠,牟 牧. 基于 AHP 和 ANP 作战飞机系统效能评估[J]. 火力与指挥控制,2009,34(增刊):92-94.

[3] 牟 牧,陈东林,王 广. 作战飞机系统效能评估中系统建模的仿真及应用[J]. 工程与技术,2005,5(21):46-47.

[4] 朱宝鑫,朱荣昌,熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 第二版. 北京:航空工业出版社,2006:63-118.

[5] 张为华,李晓斌. 飞行器多学科不确定性设计理论概述[J]. 宇航学报,2004,25(6):702-706.

[6] DELAURENTIS D A, MAVRIS D N. Uncertainty modeling and management in multidisciplinary analysis and synthesis[R]. Reno, Nevada: Georgia Institute of Technology, AIAA-2000-0422.

[7] NATHAN R H. A probabilistic methodology for radar cross section prediction in conceptual aircraft design[D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2001.

[8] 吕明云,孙康文,马云鹏,等. 基于不确定性的设计方案经济可承受性分析[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(1):118-122.

[9] BANDTE O. A probabilistic multi-criteria decision making technique for conceptual and preliminary aerospace systems design[D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2000.

[10] 孙康文. 军用飞机总体方案评估体系研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2009:61-87.

[11] 黄俊. 航空武器装备作战效能分析[D]. 北京:北京航空航天大学,2000:64-84.

[12] MAVRIS D N, DELAURENTIS D A, OLIVER B, et al. A stochastic approach to multi-disciplinary aircraft analysis and design[R]. Reno, Nevada: Georgia Institute of Technology, AIAA-98-0912. (编辑 张 宏)