基于不确定性的设计方案经济可承受性分析

吕明云 孙康文 马云鹏 武 哲

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191)

摘 要：研制周期中的不确定性因素对飞机总体方案的评估结果有着重要影响.通过对飞机设计过程中不确定性因素的分类及其相应处理方法的分析，建立了基于区间数层次分析法AHP(Analytic Hierarchy Process)和鲁棒设计RD(Robust Design)的概率多准则决策MCDM(Multiple-Criteria Decision-Making)方法，可用于处理不确定因素影响下的飞机总体设计方案评估问题，并使评估结果更具科学性.通过上述方法的引入，着重考虑了新技术的引入和寿命周期费用的波动对设计方案的影响，建立了基于不确定性的设计方案经济可承受性分析结构模型.最后，利用算例分析检验了上述分析模型的有效性.

关 键 词：区间数层次分析法；鲁棒设计；概率多准则决策技术；经济可承受性

中图分类号：V 221.8

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)01-0118-05

Economic affordability of aircraft conceptual/preliminary scheme based on uncertainty

Lü Mingyun Sun Kangwen Ma Yunpeng Wu Zhe

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

Abstract: The uncertainty in research cycle was considered to be an important influence on aircraft conceptual/preliminary scheme evaluation (ACSE). Through the classification of uncertainties during the aircraft design process and analysis of their corresponding treatment methods, the probability multiple-criteria decision-making (MCDM) method was made up, which was based on interval number analytic hierarchy process (AHP) and the robust design (RD). It could be used to deal with the evaluation of aircraft conceptual/preliminary scheme, when the process exists a vast amount of uncertainty. Meanwhile, the result of the assessment was more scientific than traditional method. Taking account of new technology and life cycle cost fluctuation impact on design options, the above methods were utilized to analyze the economic affordability of aircraft conceptual/preliminary scheme (EAACS). And then, the structural model of EAACS was established. The result of analysis verifies the validity of the above methods.

Key words: interval number analytic hierarchy process; robust design; probabilistic multiple-criteria decision-making; economic affordability

随着商业竞争和高技术条件下战场环境的日趋残酷，飞机的设计要求越来越高，必须在设计中采用更多的新技术；飞机研制周期和研制成本也在不断上升.新技术的使用和研制周期的增长导致飞机发展过程中的不确定性增大[1-4].

因此，传统的确定性设计方法已很难满足现代飞机设计的需要，必须在飞机设计过程中充分考虑不确定性因素的影响，以使设计结果更加满足实际需要，这对现代飞机设计，尤其是现代民用飞机设计更为重要.

由于飞机设计中主要面临的问题是参数的分析与优化，本文将主要研究基于概率论的飞机设

收稿日期：2009-03-02

作者简介：吕明云(1969－)，男，湖北公安人，副教授，lv503@buaa.edu.cn.

计问题处理方法——基于区间数层次分析法 AHP(Analytic Hierarchy Process)和鲁棒技术 RD(Robust Design)的概率多准则决策 MCDM (Multiple-Criteria Decision-Making)方法.

1　概率 MCDM 方法

1.1　区间数 AHP

AHP 是当前飞机设计中处理权重问题的主要方法.随着现代飞机综合性能的日益提高,决策问题将受到大量不确定性因素的影响.为此,本文将区间数 AHP 引入到现代飞机设计的权重分析中,通过给出准则间相对重要性程度的区间判断

$$\begin{bmatrix} [(L_{11})_z,(U_{11})_z] & [(L_{12})_z,(U_{12})_z] & \cdots & [(L_{1n})_z,(U_{1n})_z] \\ [(L_{21})_z,(U_{21})_z] & [(L_{22})_z,(U_{22})_z] & \cdots & [(L_{2n})_z,(U_{2n})_z] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ [(L_{n1})_z,(U_{n1})_z] & [(L_{n2})_z,(U_{n2})_z] & \cdots & [(L_{nn})_z,(U_{nn})_z] \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中

$$(L_{ij})_z=\sum_{k=1}^{m}\lambda_k(L_{ij})_k,(U_{ij})_z=\sum_{k=1}^{m}\lambda_k(U_{ij})_k$$

其中,λ_k 为根据第 k 位专家对相关特性的熟悉程度确定的熟悉度权重系数.

关于区间数判断矩阵的权重分析可采用遗传算法[5]进行处理,常用于设计方案的优选中.

1.2　RD 方法

RD 是一种使系统性能对于制造过程的波动或其工作环境的变化不敏感的技术,可以概率的形式为决策机关提供定量的决策参数.根据飞机总体设计是由多个准则共同作用的结果,将多变量概率理论引入到飞机设计过程中,形成以下两大算法[6-7]:

1) 经验分布函数

对于 M 次采样,关于随机变量 $\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,\cdots,x_N)$ 的多变量概率群分布函数可以用如下公式表述:

$$f(x_1,x_2,\cdots,x_N)=\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}I((a_{j1},a_{j2},\cdots,a_{jN})=(x_1,x_2,\cdots,x_N)) \tag{3}$$

式中,a_{ji} 表示关于随机变量 i 的第 j 次采样值,且:

$$I((a_{j1},a_{j2},\cdots,a_{jN})=(x_1,x_2,\cdots,x_N))=\begin{cases}1 & (a_{j1},a_{j2},\cdots,a_{jN})=(x_1,x_2,\cdots,x_N)\\ 0 & \text{其它}\end{cases}$$

关于随机变量 $\boldsymbol{X}$ 的联合累积概率分布函数可用数学公式表述如下:

$$F(x_1,x_2,\cdots,x_N)=\frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M}I(a_{j1}\leqslant x_1,a_{j2}\leqslant x_2,\cdots,a_{jN}\leqslant x_N) \tag{4}$$

其中

$$I(a_{j1}\leqslant x_1,a_{j2}\leqslant x_2,\cdots,a_{jN}\leqslant x_N)=\begin{cases}1 & (a_{j1}\leqslant x_1,a_{j2}\leqslant x_2,\cdots,a_{jN}\leqslant x_N)\\ 0 & \text{其它}\end{cases}$$

由于上述公式不要求任何形式的数值积分,因而只要获得采样数据,就可以使用.

2) 联合概率模型

联合概率模型是对参数型多变量联合概率密度(或累积)分布函数的明确表述,允许连续使用由传统概率设计过程生成的概率信息及其单变量准则分布输出,可用下式表述:

$$f(x_1,x_2,\cdots,x_N)=\frac{1}{C}f_{X_1}f_{X_2}\cdots f_{X_N}g(x_1,x_2,\cdots,x_N) \tag{5}$$

其中

$$C=\int_{\Omega}\cdots\int f_{X_1}f_{X_2}\cdots f_{X_N}g(x_1,x_2,\cdots,x_N)\mathrm{d}x_1\mathrm{d}x_2\cdots\mathrm{d}x_N$$

$$0\leqslant f(x_1,x_2,\cdots,x_N)\leqslant 1$$

$$\int_{\Omega}\cdots\int f(x_1,x_2,\cdots,x_N)\mathrm{d}x_1\mathrm{d}x_2\cdots\mathrm{d}x_N=1$$

相应的联合累积分布函数可表示为

$$\int_{\Omega}\cdots\int f(x_1,x_2,\cdots,x_N)\mathrm{d}x_1\mathrm{d}x_2\cdots\mathrm{d}x_N=\frac{1}{C}\int_{\Omega}f_{X_1}\int f_{X_2}\int\cdots\int f_{X_N}g(x_1,x_2,\cdots,x_N)\mathrm{d}x_N\mathrm{d}x_{N-1}\cdots\mathrm{d}x_1 \tag{6}$$

式(5)、式(6)中的相关函数可由下式求得

$$g(x_1,x_2,\cdots,x_N)=$$

$$\binom{N}{2}+\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N}\rho_{ij}\frac{x_i-\mu_i}{M_i}\times\frac{x_j-\mu_j}{M_j} \tag{7}$$

式中，M_i，M_j 分别表示 x_i，x_j 分布具有足够大概率值区间的半区间长度；

$$\rho_{ij}=\frac{\sum_{i,j=1}^{n}(x_i-\bar{x}_i)(x_j-\bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x}_i)^2\sum_{j=1}^{n}(x_j-\bar{x}_j)^2}}=$$

$$\frac{\sum_{i,j=1}^{n}x_ix_j-n\bar{x}_i\bar{x}_j}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n}x_i^2-n\bar{x}_i^2\right)\left(\sum_{j=1}^{n}x_j^2-n\bar{x}_j^{\,2}\right)}}$$

由于多数复杂系统分析模型中的相关单变量概率分布函数主要是通过回归分析获得的，因此该方法所产生的联合概率分布不如基于经验分布函数获得的联合概率分布模型精确，但是由其生成的曲线图（非离散曲线图）较前者具有规律性.

1.3 概率 MCDM 方法

由前文可知：AHP 虽可将总体方案进行逐层划分，建立明确详细的系统结构框图并进行相关分析，但目前的 AHP 对总体方案中不确定性因素影响认识不足，分析结果抗干扰能力差；RD 技术则多用于产品质量的过程控制，很少应用于飞机总体方案评估阶段[8-9]. 因此，本文以概率技术为基础，将区间数 AHP 和 RD 进行有机结合，构建基于区间数 AHP 和 RD 的概率 MCDM 方法，一般执行步骤见图 1.

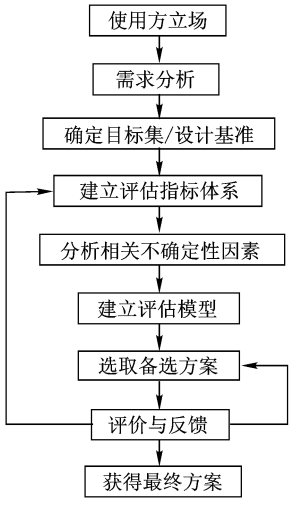


图 1 基于区间数 AHP 和 RD 的概率 MCDM 方法的执行流程

2 经济可承受性分析结构模型

将上述基于区间数 AHP 和 RD 的概率 MCDM 方法应用到飞机总体方案的经济可承受性评估中，可构建如图 2、图 3 所示的层次分析结构模型. 该模型主要包括 2 级评价指标体系：第 1 级以主要设计参数为分析对象，考察设计方案在技术上的可行性概率；第 2 级以技术可行性分析结果为基础，考察设计方案在费用上可以承受的概率.

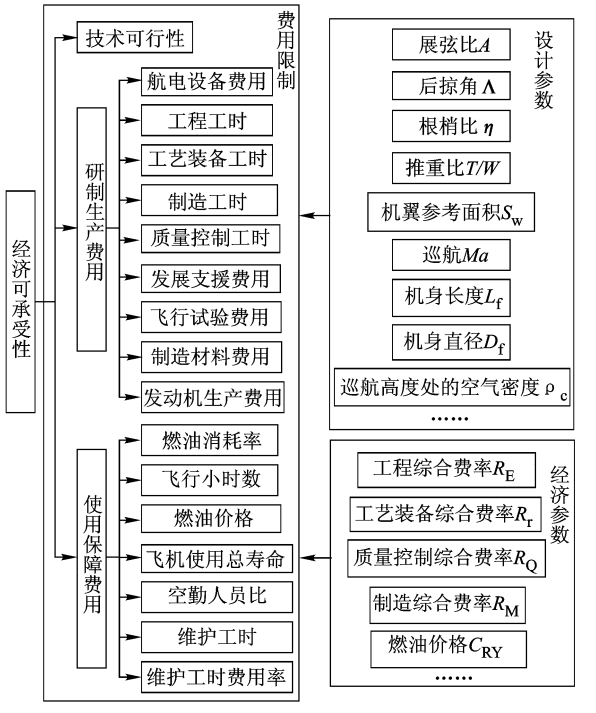


图 2 飞机总体方案经济可承受性分析结构模型

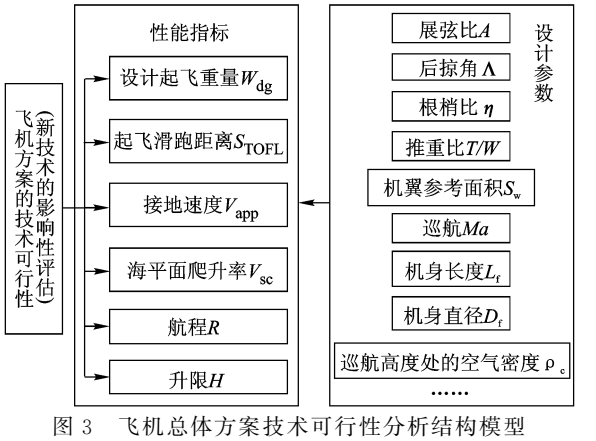


图 3 飞机总体方案技术可行性分析结构模型

技术可行性的一般定义：在新技术的完善程度和已有技术在飞机设计方面应用成熟程度的综合影响下，在设计参数有效取值范围构成的设计空间中，由约束条件（设计准则）所确定的可行区域占整个设计空间的大小. 通常用技术可行率作为可行性的度量指标，其数学表述为

$$P_{\mathrm{JS}}=P\{\bigcap[F_{i\min}\leqslant f_i(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})P_{\mathrm{JK}i}\leqslant F_{i\max}]\}$$
$$i=1,2,\cdots,M \tag{8}$$

式中，等号右边方括号中的项表示在设计变量取有效值情况下，第 i 项设计准则实际值落入其对应设计要求 F_i 可行域（$F_{i\min}$，$F_{i\max}$）内的概率；$\boldsymbol{x}$ 为设计变量向量；$\boldsymbol{y}$ 为状态变量向量. 一般地，当可

行性概率大于 50%时即被认为该方案有现实可行性.此外,式(8)中的 $P_{\mathrm{JK}i}$ 为新技术对第 i 项设计准则的综合影响因子,相应确定公式如下:

$$P_{\mathrm{JK}i}=\Big[\sum((P_{\mathrm{SY}})_{Ii}(P_{\mathrm{WB}})_I)+\sum((P_{\mathrm{SS}})_{Ji}/(P_{\mathrm{WB}})_J)\Big] \tag{9}$$

式中,$(P_{\mathrm{SY}})_{Ii}$ 表示第 I 项新技术为第 i 项准则所提供的收益;$(P_{\mathrm{SS}})_{Ji}$ 表示第 J 项新技术为第 i 项准则招致的损失,可用系统性能升/降的百分比来量化,是技术不确定性因素作用的结果;$(P_{\mathrm{WB}})_I$ 和 $(P_{\mathrm{WB}})_J$ 则表示新技术在未来使用阶段的技术成熟性概率.

经济可承受性的一般定义:在相关不确定性因素(包括新技术引入以及相关经济参数的扰动)的影响下,一个具有期望技术可行性的设计方案,满足或者优于用户所提经费预算要求的概率.常以系统的经济可承受率作为经济可承受性的度量指标,相应数学表述如下:

$$P_{\mathrm{JJ}}=P_{\mathrm{JS}}\cdot P\{\bigcap[C_{k\min}\leqslant C_k(\boldsymbol{z},\boldsymbol{m})\leqslant C_{k\max}]\}=P\{\bigcap[F_{i\min}\leqslant f_i(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})P_{\mathrm{JK}i}\leqslant F_{i\max}]\}\cdot P\{\bigcap[C_{k\min}\leqslant C_k(\boldsymbol{z},\boldsymbol{m})P_{\mathrm{JK}k}\leqslant C_{k\max}]\}$$
$$i=1,2,\cdots,M\qquad k=1,2,\cdots,L \tag{10}$$

式中,等号右边第 2 项表示第 k 项经济准则实际值落入其对应可行域($C_{k\min}$,$C_{k\max}$)内的概率;$P_{\mathrm{JK}i}$ 为新技术对第 i 项设计准则的综合影响因子,参见式(8);$P_{\mathrm{JK}k}$ 为新技术对第 k 项经济准则的综合影响因子,其计算类似式(9);$\boldsymbol{x}$ 为设计变量向量;$\boldsymbol{y}$ 为状态变量向量;$\boldsymbol{z}$ 表示经济变量向量;$\boldsymbol{m}$ 表示经济状态变量向量.一般地,当可承受性概率大于 50%时即被认为该方案的全寿命周期费用预算是可以接受的.

3　算例分析

下面以某型战斗机总体设计方案的经济可承受性分析为例进行详细说明(设计中引入的新技术为"适应性机翼外形技术").假定该型战斗机相关准则的期望值如表 1 所示,设计参数的取值、新技术对相关参数的影响及相关费用因素的分布分别见文献[10,11,7].

表 1　相关准则的期望值

技术准则			经济准则	
起飞总重 W_{dg}/kg	起飞滑跑距离 S_{TOFL}/m	进场速度 V_{app}/(m·s^{-1})	研制和生产费用 $C_{\mathrm{RDT,E,P}}$/万元	使用保障费用 C_{SB}/万元
≤23 000	≤500	≤65	≤3 600	≤6 650

利用经验分布函数计算得设计方案的技术可行性为

$$P_{\mathrm{JS}}=P(W_{\mathrm{dg}}\leqslant 23\,000,S_{\mathrm{TOFL}}\leqslant 500,V_{\mathrm{app}}\leqslant 65)=\frac{1}{5\,000}\sum_{i=1}^{5\,000}I(a_{iW_{\mathrm{dg}}}\leqslant 23\,000,a_{iS_{\mathrm{TOFL}}}\leqslant 500,a_{iV_{\mathrm{app}}}\leqslant 65)=98.8\%$$

式中,a_i 表示第 i 次随机采样获得的数值,其随机采样点在三维坐标系内的分布见图 4.根据图 4 可直观获得如下结论:①设计方案的波动仅存于一个较小的局部区域;②设计起飞重量为有效限制目标准则;③大部分采样点落在目标期望空间内.因此,该设计方案具有很高的技术可行性.

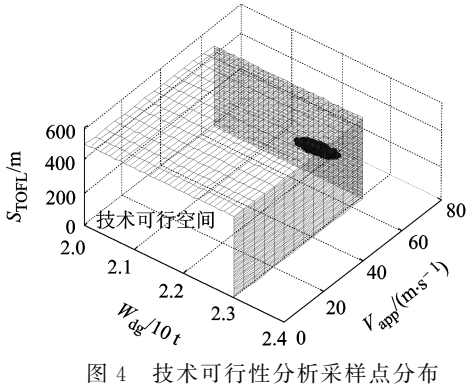


图 4　技术可行性分析采样点分布

进一步,可利用上述计算过程中的采样数据获得相关准则的单变量概率累积分布曲线,以此获得不同设计准则取值下,设计方案满足该项准则的可行性概率,见图 5.

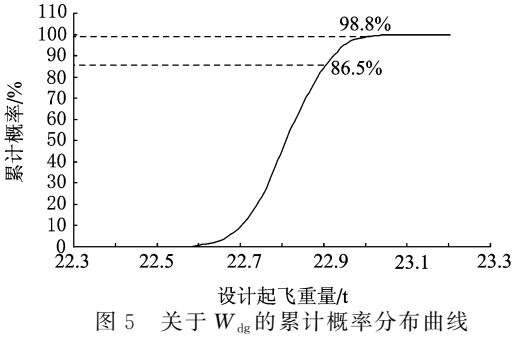


图 5　关于 W_{dg} 的累计概率分布曲线

利用经验分布函数可得设计方案相应的经济可承受性为(相应三维坐标系中的概率密度函数分布见图 6)

$$P_{\mathrm{JJ}}=P_{\mathrm{JS}}P(C_{\mathrm{RDT,E,P}}\leqslant 36\,000\,000,C_{\mathrm{SB}}\leqslant 66\,500\,000)=P_{\mathrm{JS}}\frac{1}{5\,000}\sum_{i=1}^{5\,000}I(a_{iC_{\mathrm{RDT,E,P}}}\leqslant 36\,000\,000,a_{iC_{\mathrm{SB}}}\leqslant 66\,500\,000)=79.17\%$$

利用所获得的蒙特卡洛仿真数据构建的关于

$C_{RDT,E,P}$,C_{SB}的概率分布直方图及其相应的回归曲线分别见图7、图8.

由图可知,研制和生产费用$C_{RDT,E,P}$是满足$\mu=3\,392$万元,$\sigma=125.7$万元的正态分布,使用保障费用C_{SB}是满足$\mu=6\,140$万元,$\sigma=547$万元的正态分布.另外,根据上述计算结果($P_{JJ}=79.17\%>50\%$)可知,本例中的设计方案在经济可承受性上是可以接受的.

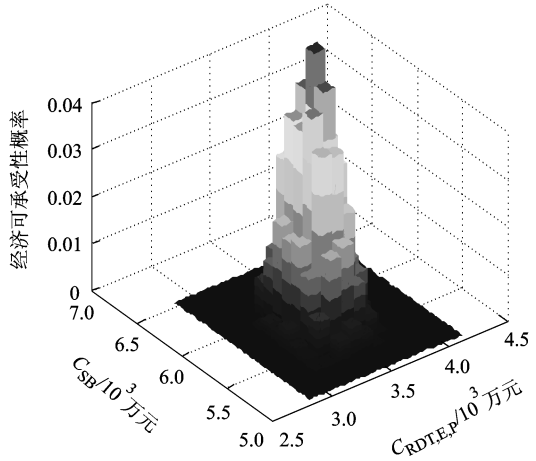


图6 经济可承受性概率密度函数图

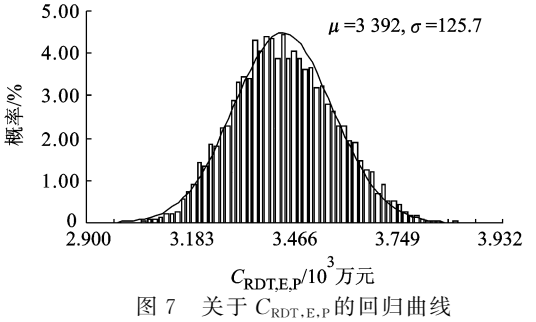


图7 关于$C_{RDT,E,P}$的回归曲线

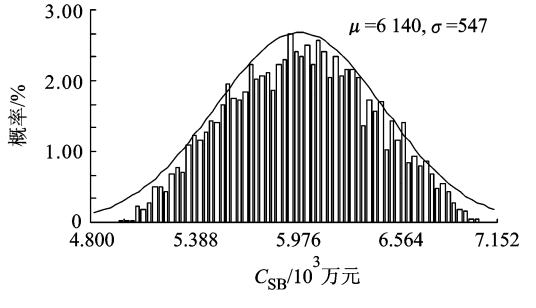


图8 关于C_{SB}的回归曲线

4 结束语

本文通过对基于区间数AHP和RD的概率MCDM方法的运用,完成了飞机总体方案经济可承受性的相关定义和层次分析结构模型的建立.与常规全寿命周期费用分析方法不同之处在于,本文的研究方法既能对传统的分析参数进行有效利用,又可在充分考虑相关不确定性因素对设计方案影响的情况下获得比传统方法更具科学性的结果.

参考文献(References)

[1] 孙康文,黄俊.军用飞机总体方案的可承受性分析[J].飞行力学,2008,26(1):83-86
Sun Kangwen, Huang Jun. The affordability analysis of military aircraft conceptual/preliminary scheme[J]. Flight Dynamics, 2008, 26(1): 83-86(in Chinese)

[2] Daniel A D, Mavris D N. Uncertainty modeling and management in multidisciplinary analysis and synthesis[R]. AIAA 2000-0422, 2000

[3] 熊雯.飞行器总体方案的多学科鲁棒设计[D].北京:北京航空航天大学航空科学与工程学院,2005
Xiong Wen. Multidisciplinary robust design of aircraft conceptual configuration[D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005(in Chinese)

[4] Kirby M R. A methodology for technology identification, evaluation, and selection in conceptual and preliminary aircraft design[D]. Georgia: School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology, 2001: 1-20

[5] 朱建军.层次分析法的若干问题研究及应用[D].沈阳:东北大学信息科学与工程学院,2005
Zhu Jianjun. Research on some problems of the analytic hierarchy process and Its application [D]. Shenyang: School of Information Science and Technology, Northeastern University, 2005(in Chinese)

[6] Mavris D N, Bandte O, DeLaurentis D A. Determination of system feasibility and viability employing a joint probabilistic formulation[R]. AIAA-99-0183, 1999

[7] Bandte O. A probabilistic multi-criteria decision making technique for conceptual and preliminary aerospace systems design [D]. Georgia: School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology, 2000

[8] 栾恩杰,高志强,马恒儒,等. 健壮设计手册[M]. 北京:国防工业出版社,2002:1-24
Luan Enjie, Gao Zhiqiang, Ma Hengru, et al. Robust design manual [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 1-24 (in Chinese)

[9] DeLaurentis Daniel A, Mavris D N. Uncertainty modeling and management in multidisciplinary analysis and synthesis [R]. AIAA 2000-0422, 2000

[10] 孙康文.军用飞机总体方案评估体系研究[D].北京:北京航空航天大学航空科学与工程学院,2009
Sun Kangwen. Research on system for aircraft conceptual/preliminary scheme evaluation[D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009(in Chinese)

[11] Utturwar A S, Rallabhandi S K, DeLaurentis D A, et al. A bi-level optimization approach for technology selection[R]. AIAA 2002-5426, 2002

(编 辑:李 晶)