

文章编号:1674-8190(2019)04-505-09

基于可拓学的大型复杂航空飞行器效费权衡研究

王剑, 郭鹏, 党宁

(西北工业大学 管理学院, 西安 710129)

摘要: 大型复杂航空飞行器的研制生产与应用涉及大量随机因素和模糊因素, 客观权衡效能和费用成为其全寿命周期管理的核心问题。研究效费权衡分析主要方法的适用条件, 提出可拓学理论及方法并从总体架构、物元模型和应用过程三方面研究大型复杂航空飞行器效费权衡分析中的适用性; 以某复杂航空飞行器为例, 构建效能和费用测度指标体系, 检验可拓学及物元法的可行性。结果表明: 飞行器效费权衡方案受其固有能力、人工成本和材料成本的制约, 多重约束下可拓学的优度评价得出了复杂飞行器效费权衡的最优方案。

关键词: 大型复杂航空飞行器; 效费权衡; 可拓学; 经济可承受性

中图分类号: F272

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.04.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Balance of Effective-Cost of Large-Complexity Aircraft Based on Method of Extenics

Wang Jian, Guo Peng, Dang Ning

(School of Management, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: A large number of random and fuzzy factors are involved in the process of development, production and application of large complex aircraft. Seeking for balance between efficiency and cost objectively has become the core issue of life cycle management for large and complex aircraft. The applicability of the theory and method of extenics in the effective-cost equilibrium analysis on large-complex aircraft is proposed, including the overall architecture, matter-element model and application process. Aiming to test the feasibility of extenics and matter element method, an example of a complex aircraft model is introduced and the index system of efficiency and cost measurement is constructed. Through example analysis, it shows that the aircraft cost effectiveness trade off scheme is constrained by its inherent capability, labor cost and material cost. The optimal scheme for weighing the efficiency and cost of complex aircraft is obtained by evaluating the optimality of extenics under multiple constraints.

Key words: large-complexity aircraft; equilibrium of effective-cost; extenics; economic affordability

收稿日期:2018-10-15; 修回日期:2019-04-10

基金项目:国家自然科学基金面上项目(71672145); 国家自然科学基金青年项目(71402142)

通信作者:郭鹏, guopeng@nwpu.edu.cn

引用格式:王剑, 郭鹏, 党宁. 基于可拓学的大型复杂航空飞行器效费权衡研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(4): 505-513.

Wang Jian, Guo Peng, Dang Ning. Research on balance of effective-cost of large-complexity aircraft based on method of extenics [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(4): 505-513. (in Chinese)

0 引言

新兴技术在航空工业的广泛应用使得大型复杂航空飞行器的功能和性能水平达到了前所未有的高度,单一追求功能或性能目标已不符合当今航空装备发展变革的需求^[1]。新一代大型复杂航空飞行器的发展目标是追求费用、功能、进度、性能等多维度权衡,实现大型复杂航空飞行器的经济可承受性。所谓经济可承受性是指研制、生产、使用与维修的全过程必须在效能与经济性之间保持平衡,可定量地表达为能力与全寿命周期费用之比^[2-3]。经济可承受性分析通过确定可行的性能、费用、进度及风险的权衡,对关键性决策提供了有力支持。同时,经济可承受性分析关键是与任务需求方即军方精诚合作,完成费用、性能和进度的有效权衡,其基础是需求分析,其重点是全寿命周期费用管理和效费权衡分析,同时还包含了风险分析的部分内容^[4]。实际上,经济可承受性的内涵随着航空武器装备体系的不断升级和发展也在不断扩展。狭义的经济可承受性指的是将单个航空武器装备产品的费用作为独立变量进行考虑^[5-6]。广义的经济可承受性指的是用户在一定的资源约束条件下,对航空武器装备体系的合理性、各机种之间配比的科学性的分析与规划^[7-8]。

发达国家尤其是美国,早在 20 世纪 60 年代就开始了关于复杂飞行器效费权衡的实践与研究。在第三代轻型战斗机 F-16 的研制计划中,美国国防部利用现代飞机效费权衡的方法取得了很好的效果,使飞机的全寿命周期费用节省约 42 亿美元^[9];理论方面,效费权衡实现了三大突破:从强调性能到重视效能,从仅重视研制生产费用到强调全寿命周期费用,着眼于效能与全寿命周期费用的统一。韩庆兰等^[10]提出,随着军事需求的不断提高,军用飞机的特性也在不断发展,采用 CAIV 作为独立变量的优化方法,设计了生命周期效费权衡的方案。在满足作战总需求下允许通过权衡适当调整费用与性能的指标,从而将军用飞机的效能与费用高度统一起来,但在具体的表征和度量中,效能与费用仍然是相对独立的特性;卢文斌等^[11]认为,进行飞行器费用—效能分析的一个非常重要的问题就是装备最优化准则的建立,其采用 DEA 数据包

络方法筛选了武器装备效费权衡方案,并应用效率评价指数比较了方案的有效性。

效费权衡分析作为经济可承受性分析的核心内容,同时也是大型复杂飞行器系统成本费用和效能管理的基础。本文利用可拓学评价模型,评估大型复杂航空飞行器效费,主要开展以下工作:(1)比较效费权衡分析的一般方法及适用条件,提出将可拓学理论应用于复杂飞行器效费权衡分析的可行性和总体框架;(2)构建基于多维物元的效费评价模型和基于物元变换的飞机效费方案延拓模型,并提出飞机效费方案可拓分析的思路;(3)引入飞行器算例,构建效费评价指标体系,检验物元方法的适用性。

1 效费比权衡分析及主要方法

1.1 效费比权衡分析的概念

若单独从费用的角度看问题,飞行器的全寿命周期费用越低越好,因而会得出飞行器越简单越好的结论;而如果单独从效能的角度看问题,则飞行器的效能越高越好,因而会得出装备越先进越复杂越好的结论。因此,必须从装备寿命周期费用和效能两个方面来综合考虑飞行器的效费比概念,可将其定义为

$$M = E/C \quad (1)$$

式中: E 为飞行器效能; C 为飞行器费用,一般指飞行器装备寿命周期费用。

由此可知,效费比是飞行器效能与费用的比值。在使用效费比开展飞行器发展、项目管理等决策时,方案的效费比高,则说明其投入越少,产出越高,该方案就越好。

效费分析是指对飞行器的费用和效能及其影响因素进行分析,寻找效费比最高的方案,提高国防资源的利用率。通过效费分析,不仅可以评价不同型号飞行器或同一型号飞行器的不同方案的优劣,还可以确认影响飞行器效费比的主导因素,并通过科学合理的调整和优化,寻求实现最高效费比的方案和途径。

1.2 效费权衡分析的主要方法

常用的效费权衡分析方法有效费指数法、比例模型法等,两类方法的基本原理和适用条件如下。

(1) 效费指数法

由于飞行器费用和效能的量纲不同,效费比的数值会因采用不同的量纲而发生变化,给直接观测与比较带来一定困难。为此,需要进行无量纲化处理,定义效费指数为

$$M(M) = \frac{M(E)}{M(C)} \quad (2)$$

式中: $M(E)$ 为效能指数; $M(C)$ 为费用指数。

效能指数和费用指数又可分别表述为

$$M(C) = \frac{C}{C_{\text{基准}}} \quad (3)$$

$$M(E) = \frac{E}{E_{\text{基准}}} \quad (4)$$

式中: $C_{\text{基准}}$ 、 $E_{\text{基准}}$ 为设定的基准飞行器费用和效能; C 和 E 为待评价飞行器的费用和效能。

(2) 比例模型法

在飞行器研制和生产中,通常会面临多种备选方案。对于某一给定的备选方案,若满足式(5),则表明产出大于投入,认为该备选方案是一种可行方案。

$$M(M_i) = \frac{M(E_i)}{M(C_i)} \geq 1.0 \quad (5)$$

式中: $M(M_i)$ 为第 i 个飞行器备选方案的效费指数; $M(E_i)$ 为第 i 个飞行器备选方案的效能指数; $M(C_i)$ 为第 i 个飞行器备选方案的费用指数。

其物理意义如图 1 所示,射线 OA 上各点均有 $M(M)=1.0$,即 $M(C)=M(E)$;由于在射线 OA 上方区域内的各点 $M(M)>1.0$,则必有 $M(C)<M(E)$,即投入小于产出,代表可行方案的集合,为可行区域;在射线 OA 下方区域内的各点,由于 $M(M)<1.0$,则必有 $M(C)>M(E)$,即投入大于产出,代表不可行方案的集合,为不可行区域。

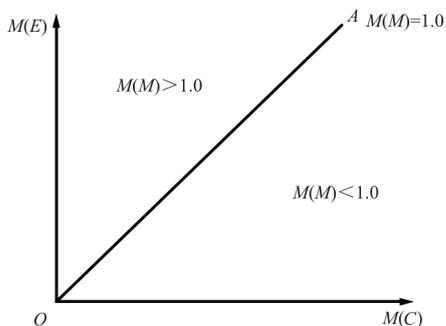


图 1 比例模型的物理意义

Fig. 1 Physical significance of proportional model

在实际的飞行器建设决策过程中,通常受到一些条件的约束,而最大费用和最小效能是最常见的两个约束条件。其中,最大费用约束为 $M(C_i) \leq M(C_{\text{max}})$;最小效能约束为 $M(E_i) \geq M(E_{\text{min}})$ 。最大费用约束和最小效能约束共同决定了备选方案的可行域,如图 2 所示。

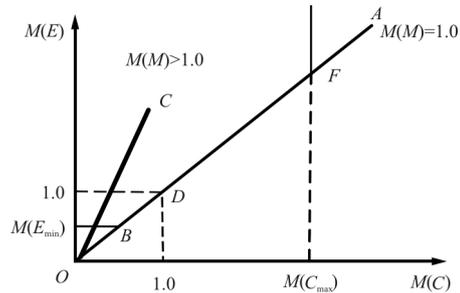


图 2 基于比例模型的效费权衡分析的可行域

Fig. 2 Feasible region of cost-effectiveness balance analysis based on proportional model

图 2 中,横、纵坐标轴上各有一个值为 1.0 的点,分别表示规格化的航空飞行器效能 $M(E)$ 和全寿命周期费用 $M(C)$ 值均等于 1.0,将其作为规格化的基准效能和规格化的基准全寿命周期费用。分别过横、纵坐标轴上 1.0 的点作垂线交于 D 点,连接 OD 使之交于过 $M(E_{\text{min}})$ 的水平线于 B 点,延长 OBD 使之交 $M(C_{\text{max}})$ 垂线于 F 点,由于 OBD 及其延长线上各点其效费指数 $M(M)$ 均为 1.0,故称之为基准线。自 O 点向基准线上方作任一射线 OC ,其上各点有:

$$M(M)_{OC} = \text{const} \quad (6)$$

即在任一射线上其效费指数均相同。这样按照比例模型的判据,便可得出同一射线上各点所代表的设计方案的优劣相同的结论。但应注意,在同一射线上的各点,离坐标原点越远的点,其效能值越大,方案的技术含量越高。当然,效能的提高也会使费用有所增加,只是效能和费用的增长速率相同,才使得效费指数不变。

2 可拓学方法在飞机效费权衡分析中的应用思路

2.1 总体架构

飞行器的全寿命周期中,无论是在论证研制,

还是在生产制造、使用保障以及退役处置等阶段都涉及大量的决策问题。研究决策问题,一个很重要的方面就是研究如何解决系统的矛盾问题,化不利因素为有利因素,最大限度地实现系统的最优组合和利用。效费权衡分析是一项综合性很强的工作,在这项多决策范畴工作中,需要权衡各影响因素间的复杂关系。

可拓学是由我国学者蔡文教授创立,以不兼容问题为研究重心,基于将不同的矛盾要素转化为兼容问题的基本思想,从形式化角度去研究矛盾的变化,从定性定量两个方面去研究解决矛盾问题的规律和方法^[12-13]。可拓学的理论支柱是物元理论和可拓集合理论,其逻辑细胞是物元。物元是描述事物的基本元,由事物 N , 特征 c 以及量值 v 构成的三元组 $R = (N, c, v)$ 来表述。事物的变化称为开拓,事物变化的可能性称为可拓性,事物的可拓性以物元的可拓性来表征。物元模型构造了整个效费分析的逻辑细胞,方便了问题的描述与分析。基于物元可拓性的飞机效费方案延拓正是从一个已有方案信息搜索、开拓更佳方案的过程,这一过程属于可拓学菱形思维方法的发散阶段。经过这一过程,方案空间得以放大,展拓了选择的余地,蕴含了产生更优方案的可能。在随后的物元聚类中,发散得到的方案集合得以聚合,形成方案集合的粗略结构。在聚类结果的基础上,再选取各类方案中具有代表性的方案参与方案的优度评价,实现菱形思维的收敛过程。上述过程经过多次反馈和迭代修正,最终形成飞机效费方案的满意解,如图 3 所示。

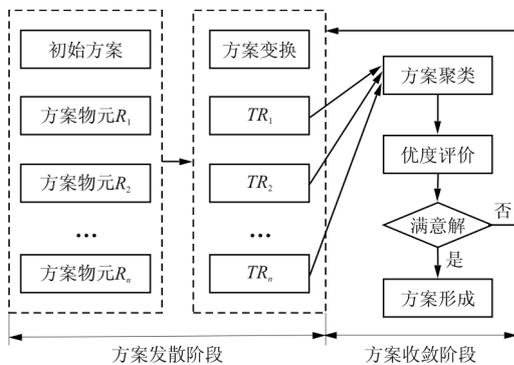


图 3 飞机效费权衡分析可拓工程方法总体框架

Fig. 3 Overall framework of extension engineering method for aircraft cost-effectiveness balance analysis

2.2 高阶复合物元可拓模型及应用过程

2.2.1 基于多维物元的效费方案评价

飞行器效费权衡分析需要对飞行器的各种备选方案进行评价,并逐步进行分析与比较,进而使选择的方案获得满意解。其实质是通过定义和使用可行的权衡空间,充分利用现实的和潜在的因素,降低费用或者提高效能。权衡的目标是在相同的费用下获得更高的效能,或者在相同效能下获得较低的费用,两者必居其一。建立飞行器的效能和费用高阶多维物元模型:

$$R_{\text{pro}} = \begin{bmatrix} N_{\text{pro}} & E & E(N_{\text{pro}}) \\ & C & C(N_{\text{pro}}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: N_{pro} 为飞行器效费方案; E 为效能; $E(N_{\text{pro}})$ 为效能度量; C 为飞行器全寿命周期的费用; $C(N_{\text{pro}})$ 费用度量值。

模型可分解为效能物元模型和费用物元模型。由于效能是采用可用度 A 、可信度 D 和固有能力 C 描述的,效能物元模型可表述为

$$R_{\text{eff}} = \begin{bmatrix} N_{\text{eff}} & A & A(N_{\text{eff}}) \\ & D & D(N_{\text{eff}}) \\ & C & C(N_{\text{eff}}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

同理,若将费用按飞行器系统功能单元分解为硬件研制费 C_H 、配套设备研制费 C_E 和软件研制费 C_S ,费用的物元模型则可表示为

$$R_c = \begin{bmatrix} N_c & C_H & C_H(N_c) \\ & C_E & C_E(N_c) \\ & C_S & C_S(N_c) \end{bmatrix} \quad (9)$$

除此之外,还可按需求对每一项目做进一步的分解,建立更低阶的物元模型。

将效能物元和费用物元代入方案物元模型,以实现方案物元的降阶,降阶后的方案物元成为一个六维的低阶物元模型。

$$R_{\text{pro}} = \begin{bmatrix} N_{\text{pro}} & A & A(N_{\text{pro}}) \\ & D & D(N_{\text{pro}}) \\ & C & C(N_{\text{pro}}) \\ & C_H & C_H(N_{\text{pro}}) \\ & C_E & C_E(N_{\text{pro}}) \\ & C_S & C_S(N_{\text{pro}}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.2.2 基于物元变换的飞机效费方案延拓

在考虑优化效费方案时,可以采用价值工程理

论。从物元分析的观点来看,价值工程的本质是从物元的可拓性出发,通过物元变换提高事物的价值。飞行器效费方案的高阶多维物元模型可表示为

$$\mathbf{R}_{\text{pro}} = \begin{bmatrix} N_{\text{pro}} & E & E(N_{\text{pro}}) \\ & C & C(N_{\text{pro}}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

价值工程的基本思想是利用方案物元的发散性,寻求方案 N_x 来代替 N_{pro} ,使 $c_E(N_x) \Rightarrow c_E(N_{\text{pro}})$,其中有:

$$c_E(N_x) = \frac{E(N_x)}{C(N_x)} \quad (12)$$

$$c_E(N_{\text{pro}}) = \frac{E(N_{\text{pro}})}{C(N_{\text{pro}})} \quad (13)$$

同时, $E(N_x) \in A$, A 为指定的范围。上述过程可表述为求解 N_x 满足 $c_E(N_x) \geq c_E(N_{\text{pro}})$ 且 $E(N_x) \in A$, 要求的解集: $\{N_x\} = \{N_x | E(N_x) \in A, c_E(N_x) > c_E(N_{\text{pro}})\}$ 。

这种没有降阶的方案分析方法,实际上是以效费比的概念来开拓和比较各个方案物元。

降阶后的方案物元由 6 个特征元组成,即 $N_{\text{pro}} = (M_1, M_2, \dots, M_6)$ 。由飞行器的效能计算模型和研制费用估算关系式,得到效能和研制费用的量值: $E = f_E(N_{\text{pro}}) = f_E(M_1, M_2, \dots, M_6)$, $C = f_C(N_{\text{pro}}) = f_C(M_1, M_2, \dots, M_6)$ 。

对各个特征元分别计算 E 与 C 的相对变化率 $\frac{\partial \ln E}{\partial \ln M_i}$ 和 $\frac{\partial \ln C}{\partial \ln M_i}$, 相对 M_i 的效能费用相对变化为 $\frac{\partial \ln E}{\partial \ln M_i} / \frac{\partial \ln C}{\partial \ln M_i}$, 表示当特征元 M_i 相对改变时,对应的费用 C 变化所获得效能的相对变化。显然,特征元 M_i 的费用效能越高,则通过改善 M_i 来提高效能的经济性越高。

通过效能敏感度分析得出各个特征元对效能影响大小的排序。若所有特征元的全体构成的集合为特征全集 U , 选取一阈值 K_E , 规定满足 $\left| \frac{\partial \ln E}{\partial \ln M_i} \right| - K_E \geq 0$ 的特征元为关键的效能影响特征元,其 E_{xE} 集合称为效能可拓特征集,表示为

$$E_{xE} = \left\{ M_i | M_i \in U, \left| \frac{\partial \ln E}{\partial \ln M_i} \right| - K_E \geq 0 \right\} \quad (14)$$

E_{xE} 的补集 $\overline{E_{xE}}$ 就是非关键的效能影响特征的集合。同理,通过费用敏感度分析,可以确定费用

可拓特征集 E_{xC} , 表示为

$$E_{xC} = \left\{ M_i | M_i \in U, \left| \frac{\partial \ln C}{\partial \ln M_i} \right| - K_C \geq 0 \right\} \quad (15)$$

式中: K_C 为费用影响阈值。

类似地, $\overline{E_{xC}}$ 表示非关键的费用影响特征集合。集合 $E_{xE}, \overline{E_{xE}}, E_{xC}, \overline{E_{xC}}$ 都是方案物元特征全集 U 的子集。各个初始效费方案特征元落在不同的特征集合中,可以采用相应的特征量值变换,以达到改进原有方案的目的。各方案要素分属下列四种情形之一,可分别处理,如表 1 所示。

表 1 特征元影响程度分析

Table 1 Analysis of influencing degree of feature element

四种情形	影 响
$M_i \in \overline{E_{xE}} \cap \overline{E_{xC}}$	效能和费用都不发生显著影响
$M_i \in E_{xE} \cap \overline{E_{xC}}$	当需要提高方案效能时,应优先考虑落在这一特征集合中的特征元,使花费较少的费用增长的代价而获得较高的效能增益。
$M_i \in \overline{E_{xE}} \cap E_{xC}$	当突破费用规定的限额而需减少费用时,应优先考虑适当降低这一特征集合中的特征元的量值,使系统效能降低较少的情况下,费用的减少更为显著。
$M_i \in E_{xE} \cap E_{xC}$	对费用和效能都会产生显著的影响,需慎重处理。必要时,要通过对它们进行效能、费用的计算与排序,根据决策的需要,确定特征元的调整方式。

2.2.3 飞机效费方案可拓聚类分析

(1) 方案物元间相似性的测度

为了对飞行器效费方案进行优度评价,可应用聚类分析的方法,对效费方案进行分类。分类时要综合权衡效费方案物元的六个特征元。为了实现对方案物元相似性的测度,可采用 Minkowski 距离公式(式(16))来衡量物元在特征空间的亲疏程度。

$$d_p(R_i, R_j) = \left[\sum_{k=1}^n |V_{ik} - V_{jk}|^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (p > 0) \quad (16)$$

$p = 1, p = 2, p = \infty$ 分别对应绝对值距离、欧氏距离和切比雪夫距离。

(2) 方案物元的可拓关系

建立效费方案物元的可拓关系是解决效费方案聚类问题的关键。设 W_1, W_2 是两个效费方案物元集, 在 $W_1 \times W_2$ 上规定一个到实域 R 的映射 K , 如式(17)所示。

$$\bar{r} = \{(R_i, R_j, r_{ij}) \mid (R_i, R_j) \in W_1 \times W_2, r_{ij} = K(R_i, R_j) \in (-\infty, +\infty)\} \quad (17)$$

式(17)为 W_1 与 W_2 之间的一个二元可拓关系。当 $W_1 = W_2 = W$ 时, 是以 W 为基的二元可拓关系。可拓关系的实质是一个可拓集合, 它是描述效费方案物元集内效费方案物元关系的工具。

(3) 效费方案可拓聚类分析

对集合中的元素进行分类的一个重要原则是按相似性进行划分。以上所建立的可拓关系是以方案物元的 Minkowski 距离为基础的。距离 $d_p(R_i, R_j)$ 越小, 表明效费方案间的相似性越大。为了对效费方案进行分类, 定义相似系数 r_{ij} 。效费方案物元的平均距离为

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_p(R_i, R_j)}{n(n-1)} \quad (18)$$

平均距离为相似性的中界点, 对应的相似系数为 0, 建立如下从效费方案物元距离到相似系数的映射关系:

$$k(R_i, R_j) = r_{ij} = \bar{d} - d_p(R_i, R_j) \quad (19)$$

相似关系经过多次复合运算后, 可以得到可拓等价关系 \bar{r} 。据此等价关系 \bar{r} , 可以定义实现效费方案分类。若 $\bar{r} = \{(R_i, R_j, r_{ij}) \mid (R_i, R_j) \in W \times W, r_{ij} = K'(R_i, R_j) \in (-\infty, +\infty)\}$ 为上述可拓等价关系, 如果取一个 $(-\infty, +\infty)$ 间的实数值 x , 令 $K(R_i, R_j) = K'(R_i, R_j) - x$, 可得式(20)~式(22)。

$$r = \{(R_i, R_j) \mid (R_i, R_j) \in W \times W, K(R_i, R_j) \geq 0\} \quad (20)$$

$$i = \{(R_i, R_j) \mid (R_i, R_j) \in W \times W, K(R_i, R_j) \leq 0\} \quad (21)$$

$$J_0(\bar{r}) = \{(R_i, R_j) \mid (R_i, R_j) \in W \times W, K(R_i, R_j) = 0\} \quad (22)$$

对任意的 $R_i, R_j \in W$, 若 $(R_i, R_j) \in r$, 则 R_i, R_j 属于同一类, 否则不属于同一类。按此原则实现对效费方案物元集合的划分, 称为对效费方案物元集合按阈值 x 的划分。显然, x 值不同, 分类的方式

也不同。按上述定义对效费方案的分类即为基于可拓关系的可拓聚类分析法。选取不同的阈值, 能作出效费方案物元聚类谱系图, 实现对效费方案分类的直观显示。

3 算例

以某飞行器为例, 验证可拓学及物元方法在效费权衡分析中的可行性, 并利用可拓学的优度评价法对飞行器效费方案进行权衡分析, 选择最优的效费方案。

3.1 飞行器效费权衡分析指标体系构建

3.1.1 效能指标构成

为综合分析飞行器效能影响因素, 构建飞行器效能评估指标体系。其中, 一级指标由固有能力、可用性、可信性指标构成: ①固有能力指标。固有能力是在已知执行任务期间系统状态的情况下, 系统完成任务能力的量度, 即能力是系统各种性能的集中表现; ②可用性指标。可用性是开始执行任务时系统状态的量度, 与可靠性、维修性、维修管理、维修人员数及其能力水平、器材备件供应等密切相关, 是飞行器可靠性、维修性、保障性、耐久性等等的函数; ③可信性指标。可信性是在已知开始执行任务时系统状态的情况下, 在执行任务过程中的某一个或某几个时刻系统状态的量度, 可信性与任务可靠性、生存性、环境适用性有关。

3.1.2 费用指标构成

根据调研及相关文献研究, 提炼飞行器全寿命周期费用, 包括: ①人工成本。人工成本主要包括研制员工的工资、津补贴、培训费等工资性支出。其中, 研制员工工资 = 年从事研制工作的员工数 \times 研制年限 \times 年人均工资水平; 津补贴、培训费等一般按照员工工资比例计提。②材料成本。材料成本包括在研制过程中产生的原材料成本、辅助材料成本、外购材料成本、燃料动力成本等。其中原材料是指在研制过程中直接用于制造, 且构成系统实体的材料; 辅助材料是指在研制过程中辅助制造, 但最终不构成系统实体的材料; 燃料成本是指用于购买研制所需的燃料、电力、能源的成本。③管理成本。管理成本是指在研制期间应分摊的管理费用, 包括办公成本、会议成本、差旅成本等。其计算公式一般为按比例折算提取。

根据上文所形成的飞行器效能及费用评价指

标,依次设置各评价指标代号,构建飞行器效费评价指标体系,如表 2 所示。

表 2 飞行器系统效能及费用评价指标体系
Table 2 Index system of evaluation of aircraft system effectiveness-cost

目标层	效能指标	费用指标
飞行器效费权衡评价指标体系	固有能力 I_1	人工成本 I_4
	可用性 I_2	材料成本 I_5
	可信性 I_3	管理成本 I_6

3.2 指标量值和权重确定

在现有统计资料和实验数据的基础上,确定飞行器效费方案 A,B,C 和 D,关于其评价指标的量值如表 3 所示。

表 3 飞行器效费指标体系
Table 3 Index system of aircraft's effectiveness-cost

效费方案	指标体系					
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
A	优	优	良	0.75	0.60	0.80
B	良	良	中	0.70	0.70	0.75
C	良	中	优	0.80	0.85	0.90
D	中	良	良	0.85	0.90	0.85

根据有关资料和经验数据,确定测度的相对程度,依据经验数据,应用 AHP 群体决策法构造一级指标两两比较判断矩阵,如表 4 所示,其中 W 为指标权重向量; CI 为判断矩阵的一致性指标; CR 为判断矩阵的随机一致性比率。

表 4 $I \sim I_i$ 判断矩阵
Table 4 Judgment matrix of $I \sim I_i$

I	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	W	CI	CR
I_1	1	3	5	1	1	3	0.268	0.059	0.059<0.100
I_2	1/3	1	2	1/3	1/3	1	0.092	0.059	0.059<0.100
I_3	1/5	1/2	1	1/5	1/5	1/2	0.050	0.059	0.059<0.100
I_4	1	3	5	1	1	3	0.268	0.059	0.059<0.100
I_5	1	3	5	1	1	3	0.199	0.059	0.059<0.100
I_6	1/3	1	2	1/3	1/3	1	0.124	0.059	0.059<0.100

根据计算,由表 4 可知确定评价指标 $I = \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6\}$ 的权系数为 $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6\} = (0.268, 0.092, 0.050, 0.268, 0.199, 0.124)$ 。

3.3 合格度计算

3.3.1 特征合格度

关于效费方案优劣衡量条件 M ,指标 I 某特

征元量符合要求的量值范围为 X_0 ;不符合要求,但可转变为符合要求的量值 X' ,量值允许的取值范围为 U 。以 X_0 为经典域, X' 为可拓域的可拓集合,描述 U 上任一个值 u 符合要求的程度,设其关联函数值为 K_{X_0} ,称它为 u 关于衡量条件 M 的合格度。

根据方案各指标的量值,建立指标与目标的关联函数。指标 I_4, I_5, I_6 与目标的关联函数为

$$k(x) = \begin{cases} x & (0 \leq x \leq 1) \\ 0 & (x < 0 \text{ 或 } x > 1) \end{cases} \quad (23)$$

而指标 I_1, I_2, I_3 与目标的关联函数为

$$k(y) = \begin{cases} 0.8 & (y = \text{优}) \\ 0.7 & (y = \text{良}) \\ 0.5 & (y = \text{中}) \\ 0.3 & (y = \text{差}) \end{cases} \quad (24)$$

将飞行器效费方案 A,B,C 和 D 关于评价指标的取值代入相应的关联函数中,求出权衡目标关于评价指标的关联度,得

$$\begin{cases} k_1 = (0.8, 0.7, 0.7, 0.5) \\ k_2 = (0.8, 0.7, 0.5, 0.7) \\ k_3 = (0.7, 0.5, 0.8, 0.7) \\ k_4 = (0.75, 0.70, 0.80, 0.85) \\ k_5 = (0.60, 0.70, 0.85, 0.90) \\ k_6 = (0.80, 0.75, 0.90, 0.85) \end{cases}$$

3.3.2 规范合格度

效费方案指标量值关于目标 I 的合格度 $K(I)$ 计算如下:

$$K(I) = \begin{cases} \frac{K(I)}{\max_{x \in x_0} k(x)} & (K(I) > 0) \\ \frac{K(I)}{\max_{x \in x_0} |K(x)|} & (K(I) < 0) \end{cases} \quad (25)$$

得出各方案的指标量值的合格度为

$$\begin{cases} k_1 = (1.000, 0.875, 0.875, 0.625) \\ k_2 = (1.000, 0.875, 0.625, 0.875) \\ k_3 = (0.875, 0.625, 1.000, 0.875) \\ k_4 = (0.882, 0.824, 0.941, 1.000) \\ k_5 = (0.667, 0.778, 0.944, 1.000) \\ k_6 = (0.889, 0.833, 1.000, 0.944) \end{cases}$$

3.4 飞行器效费方案的优度评价

方案物元 $N_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 关于衡量条件 M_1, M_2, \dots, M_n 规范合格度为

$$K(N_j) = \begin{bmatrix} K_{1j} \\ K_{2j} \\ \vdots \\ K_{nj} \end{bmatrix} \quad (j=1,2,\dots,m) \quad (26)$$

故效费方案物元 N_j 的优度为

$$C(N_j) = \alpha K(N_j) = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \begin{bmatrix} K_{1j} \\ K_{2j} \\ \vdots \\ K_{nj} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \alpha_i k_{ij} \quad (j=1,2,\dots,m) \quad (27)$$

对 N_j 的优度进行比较,若 $C(N_0) = \max_{j \in \{1,2,\dots,m\}} \{C(N_j)\}$,则效费方案 N_0 为最优。由上

述结果计算出,飞行器效费方案 A 的优度为

$$C(A) = (0.268 \ 0.092 \ 0.050 \ 0.268 \ 0.199 \ 0.124) \times \begin{bmatrix} 1.000 \\ 1.000 \\ 0.875 \\ 0.882 \\ 0.667 \\ 0.889 \end{bmatrix} = 0.883 \quad (28)$$

同理, $C(B) = 0.803, C(C) = 0.896, C(D) = 0.882$ 。由测度结果可知, $C(C) = \max\{C(A), C(B), C(C), C(D)\}$,故飞行器效费方案 C 最优。评价大小排序为 $C(C) > C(A) > C(D) > C(B)$ 。

通过上述四个效费方案的分析和选择,飞行器固有能力和人工成本和材料成本对方案的选择影响较大,因此,若要优化飞行器的效费方案,主要要提高飞行器固有能力和适当降低人工成本和材料成本。

4 结 论

论文提出运用可拓学理论与方法展开大型复杂航空飞行器效费权衡分析的适用性,并构建了效费权衡模型。在多重约束下,基于可拓学的优度评价方法可以遴选出复杂飞行器效费权衡的最优方案。该方法可应用于作战方案生成与评价过程中,为任务需求方促进寿命周期效费管理优化提供理论参考。

参考文献

- [1] 蔡跃洲. 技术经济方法体系的拓展与完善——基于学科发展历史视角的分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2011(11): 138-146.
Cai Yuezhou. The extension and perfection of methods system for technical economics[J]. Journal of Quantitative &

- Technical Economics, 2011(11): 138-146. (in Chinese)
- [2] 周伟. 几种绩效评价方法的实证比较[J]. 评价与管理, 2010(3): 25-28.
Zhou Wei. Empirical comparison of several performance evaluation methods[J]. Assessment and Management, 2010(3): 25-28. (in Chinese)
- [3] Jussi Kangaspunta, Juuso Liesio, Ahti Salo. Cost-efficiency analysis of weapon system portfolios[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 223: 264-275.
- [4] 黄隽, 曲东才, 吴晓男. 基于 RBF 神经网络的军机研制费用估算模型研究[J]. 飞机设计, 2004(1): 65-67.
Huang Jun, Qu Dongcai, Wu Xiaonan. Development of R&DC estimating model for military aircraft based on RBF neural networks[J]. Aircraft Design, 2004(1): 65-67. (in Chinese)
- [5] 王科, 魏法杰. 用经济可承受性思想指导航空装备建设[J]. 国防技术基础, 2007(6): 44-51.
Wang Ke, Wei Fajie. Use the idea of economic affordability to guide the construction of weapons and equipment[J]. Technology Foundation of National Defence, 2007(6): 44-51. (in Chinese)
- [6] 王宜新, 张晨斌, 刘虎. 基于全寿命周期成本的民用飞机总体参数优化[J]. 飞机设计, 2012, 32(1): 23-30.
Wang Yixin, Zhang Chenxiao, Liu Hu. The optimization of civil aircraft conceptual parameters based on life-cycle cost[J]. Aircraft Design, 2012, 32(1): 23-30. (in Chinese)
- [7] 李延杰, 刘晓东, 付雅芳. 基于 CAIV/EA 的经济可承受性优化设计[J]. 数学的实践与认识, 2011(5): 186-190.
Li Yanjie, Liu Xiaodong, Fu Yafang. Weapon affordability optimization design based-on CAIV/EA[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2011(5): 186-190. (in Chinese)
- [8] 邓修权, 张江侠, 孙需要, 等. 考虑经济可承受性的直升机

- 总体方案评估[J]. 航空科学技术, 2018, 29(5): 55-65.
Deng Xiuquan, Zhang Jiangxia, Sun Xuyao, et al. Evaluation of helicopter conceptual design considering economic affordability[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29(5): 55-65. (in Chinese)
- [9] 王光耀, 孙颖, 常巧云. 基于 CAIV 的经济可承受性设计[J]. 飞机设计, 2016, 36(1): 9-16.
Wang Guangyao, Sun Ying, Chang Qiaoyun. Affordability design based on CAIV[J]. Aircraft Design, 2016, 36(1): 9-16. (in Chinese)
- [10] 韩庆兰, 程晓娟, 徐丹. 基于 CAIV 的机械产品设计方案费效权衡优化[J]. 控制与决策, 2014, 29(8): 1524-1526.
Han Qinglan, Cheng Xiaojuan, Xu Dan. Mechanical product design cost-effective trade-off based on CAIV[J]. Control and Decision, 2014, 29(8): 1524-1526. (in Chinese)
- [11] 卢文斌, 刘慎洋, 刘妍, 等. 基于 DEA 模型的装备费用——效能分析[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(6): 43-47.
Lu Wenbin, Liu Shenyang, Liu Yan, et al. Research on cost-effectiveness analysis of equipment based on DEA method[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2017, 47(6): 43-47. (in Chinese)
- [12] 杨国为. 基于物元动态系统分析的智能化模型化概念设计[J]. 计算机工程, 2011, 41(16): 109-113.
Yang Guowei. Intelligentized and modeling conceptual design based on the analysis of matter element dynamic system[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 41(16): 109-113. (in Chinese)
- [13] 杨春燕, 蔡文, 涂序彦. 可拓学的应用、研究与发展[J]. 系统科学与数学, 2016, 36(9): 1506-1512.
Yang Chunyan, Cai Wen, Tu Xuyan. Research, application and development on extenics[J]. System Science and Mathematics, 2016, 36(9): 1506-1512. (in Chinese)

作者简介:

王 剑(1972—),男,博士研究生。主要研究方向:工业工程与系统工程。

郭 鹏(1962—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:工业工程与系统工程。

党 宁(1994—),女,硕士研究生。主要研究方向:工业工程。

(编辑:马文静)

(上接第 495 页)

- [13] 刘瑛. 飞行器战术机动动作最优航迹控制模型研究[D]. 天津:天津大学, 2014.
Liu Ying. Optimal trajectory control model for tactical maneuver of aircraft[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [14] 张滢, 杨任农, 左家亮, 等. 激光制导炸弹呢无偏置上仰投放战术机动规划[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(5): 1074-1080.
Zhang Ying, Yang Rennong, Zuo Jialiang, et al. Tactic maneuver planning of loft delivery of laser-guided bomb with no offset[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(5): 1074-1080. (in Chinese)
- [15] 陆彦. 航空外弹道学[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1985.
Lu Yan. Exterior ballistics of aviation[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1985. (in Chinese)
- [16] 刘勋, 高正红, 商重阳. 空战仿真中机动控制模型研究[J]. 飞行力学, 2007, 25(1): 34-38.
Liu Xun, Gao Zhenghong, Shang Chongyang. Study of maneuver autopilot models in air combat simulation[J]. Flight Dynamics, 2007, 25(1): 34-38. (in Chinese)
- [17] 张翔伦, 杨蔷薇. 基于机动动作库的实时轨迹生成与仿真研究[J]. 飞行力学, 2008, 26(3): 29-32, 36.
Zhang Xianglun, Yang Qiangwei. Research on real-time trajectory generation based on tactical maneuvers data base [J]. Flight Dynamics, 2008, 26(3): 29-32, 36. (in Chinese)
- [18] 毛厚晨, 高文明, 赵顾颖, 等. 突袭作战俯冲攻击空域目标轨迹规划仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(9): 34-38.
Mao Houchen, Gao Wenming, Zhao Guhao, et al. Research and simulation of target trajectory planning on airspace of division attack in raid combat [J]. Computer Simulation, 2017, 34(9): 34-38. (in Chinese)

作者简介:

魏燕明(1965—),男,硕士,副教授。主要研究方向:计算机数值模拟。

王 倩(1984—),女,硕士,讲师。主要研究方向:电磁计算。

张建祥(1987—),男,硕士,讲师。主要研究方向:计算机、非线性建模。

黄海清(1959—),女,本科,副教授。主要研究方向:非线性建模、计算物理。

毛厚晨(1994—),男,硕士,讲师。主要研究方向:防相撞。

甘旭升(1971—),男,博士,副教授。主要研究方向:非线性系统建模、空域管理。

(编辑:沈愷)