

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.04.018

客机总体方案的综合评价方法

索欣诗¹ 李晓勇² 余雄庆¹ 王宇¹

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016; 2. 上海交通大学航空航天学院, 上海, 200240)

摘要:从民用飞机的经济性、环保性、舒适性和适应性出发,运用层次分析法建立多级层次结构,形成民机总体方案的综合竞争力评价模型。给出了民机方案各性能指标的量化方法,将设计准则转化为具体的民机性能指标。引入多人评价机制,提高评价模型各层级权重分布的合理性。应用本文方法对两种大型客机总体方案进行了综合评价,结果表明该方法能明确地识别出竞争力较高的设计方案,且评价结果具有合理性。算例表明该综合评价模型可用于民机总体方案的优选。

关键词:民用飞机;总体设计;综合评价;层次分析法;竞争力

中图分类号:V221.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2018)04-0558-07

Comprehensive Evaluation Method for Conceptual Design of Commercial Aircraft

SUO Xinshi¹, LI Xiaoyong², YU Xiongqing¹, WANG Yu¹

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;
2. School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract: With the comprehensive consideration of economy, environmental pollution, comfort and flexibility of an aircraft, a mathematical model is developed to evaluate the conceptual design of commercial aircraft by analytic hierarchy process (AHP). Multi-criteria is transformed to specific technique data by a quantitative method. An approach for a group of experts to evaluate one target is introduced to improve the reasonability of weight distributions. The proposed method is used to evaluate two conceptual designs for the commercial aircraft. As a result, the better design is selected in a reasonable way. The example shows that the proposed method can be used to make decision when design selection is needed in conceptual design of commercial aircraft.

Key words: commercial aircraft; conceptual design; comprehensive evaluation; analytic hierarchy process; competitiveness

飞机总体方案设计是飞机研制的早期阶段,对飞机设计具有全局性影响的重大决策,有很大一部分都在这个阶段做出。飞机总体方案设计的典型过程是:(1)形成若干总体方案;(2)对各方案的性能和各种特性进行分析;(3)方案的综

合评价;(4)方案的优选。可以看出,方案的综合评估是飞机总体方案设计过程中的重要环节,是方案优选的基础,综合评价结果直接影响最终的方案。对于民机而言,其总体方案综合评价的结果也是航空公司民机选型评估的重要依据。综

基金项目:江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2016-12-09;**修订日期:**2017-05-07

通信作者:余雄庆,男,教授,博士生导师,E-mail:yxq@nuaa.edu.cn。

引用格式:索欣诗,李晓勇,余雄庆,等. 客机总体方案的综合评价方法[J]. 南京航空航天大学学报,2018,50(4):558-564. SUO Xinshi, LI Xiaoyong, YU Xiongqing, et al. Comprehensive evaluation method for conceptual design of commercial aircraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2018,50(4):558-564.

合评价的合理性将直接影响其市场竞争力。因此,如何建立合理的综合评价方法是客机总体设计中的一个关键问题。

Dirks 和 Meller^[1]建议从经济性、通用性(继承性)、飞行性能、舒适性、环保性和兼容性方面评价民机,并建议将这些指标综合成一个整体指标,即总体吸引力(Overall attractiveness)。他们认为,不同的航空公司会根据自身特点将这些飞机的特性赋予不同的权重并挑选出合适的机型,因此并未给出具体的权重计算方法。美国堪萨斯大学的 Au 针对 20 座支线客机,将生产能力、客舱容积、客舱高度、燃油消耗和场长性能等合成一个价值因子,然后用价格与价值因子的比值作为综合评价指标^[2]。Au 将上述指标量化后赋予不同的指数并相乘,形成价值因子,并作为优化目标成功地应用到支线客机的设计中。Downen 利用市场调查的方法,分析比较了多种现有公务机和消费者的反馈,选取了跑道长度、最大飞行速度等影响公务机竞争力的多种指标,基于多属性评价方法建立了一种公务机综合评价方法^[3]。Sun 等提出了一种用于民机概念设计优化的多准则决策方法,从使用空重、燃油质量、轮挡航时和乘客密度 4 个方面对民机概念设计进行优化^[4]。在 4 个指标等权重的情况下将之应用于飞机的优化设计。由于指标较少,Sun 亦提出了在多种不同权重情况下的应用研究。Weiss 等面向可持续发展的 3 大支柱(经济、生态和社会),应用逼近理想解排序法(Technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS),根据评价对象与理想目标的接近程度进行排序,实现多准则决策分析,并从低噪音、低质量等不同角度研究了客机总体设计的综合评价和设计方案优选^[5]。

在国内,张毅等从民用客机的经济性、安全性、舒适性和环保性 4 个方面考虑,将反映 4 者的数值指标简单相乘,建立了民用客机总体方案一般评价准则及具体的数学评估公式,分析了影响民用客机各种性能指标的总体参数^[6]。范宇等以超声速民机为研究对象,以快速性、舒适性和经济性作为基本属性,建立了旅客出行时对于飞机机型选择的多目标决策模型^[7]。范宇等以旅客为研究对象,利用问卷调查的方式采集样本后,运用多元回归的方法研究了旅行距离和旅客时间价值与快速性、舒适性和经济性之间的关系,最终形成超声速民机的综合效应值,并为方

案可行性提供了参考。宋笔锋等从“安全性/经济性/舒适性/环保性”角度定性地探讨了客机评价准则体系、思路与方法^[8]。

上述研究从不同的角度出发,采用的综合评价模型和方法具有较大的差异性。本文针对大型客机总体方案设计问题,利用层次分析法,从经济性、适应性、舒适性和环保性 4 个方面出发,形成综合评价指标,即客机的竞争力。以竞争力这个综合指标来评价大型客机的总体方案。

1 综合评价模型

民机是一个复杂的系统,呈现多种特性,其综合评价实质是一个多属性、多准则和多目标的分析与决策问题。

本文采用层次分析法(Alytic hierarchy process, AHP)建立大型客机总体方案综合评价模型。层次分析法的特点是^[9]:将决策问题的有关元素分解成目标、准则、指标等层次,用一定标度对人的主观判断进行客观量化。通过定性与定量分析相结合,使多准则、多属性进行决策。

层次分析法的基本步骤包括:(1)构造层次分析结构。按照决策问题的特性,将系统分为若干层级。(2)建立判断矩阵。判断矩阵元素的值反映人们对各因素相对重要性的认识。(3)一致性检验。确保判断矩阵元素值的一致性。(4)权重计算。根据判断矩阵计算各因素权重。(5)指标量化。将评价对象的各指标值进行合理量化,消除不同计量单位之间的不可比性。(6)决策。根据各层级元素的权重和评价对象的指标值计算得到综合评价结果,并根据评价结果做出决策。

1.1 评价指标体系的层次结构

民机的综合评价指标体系的层次结构如图 1 所示。以竞争力为总的评价目标,经济性、舒适性、环保性和适应性组成准则层,每个准则下包含若干具体的评价指标,组成指标层。最终形成“目标层/准则层/指标层”的层次结构。

需要说明的是,本文没有将安全性列入准则层。原因是:(1)安全性是所有客机必需的属性,客机总体方案必须满足适航条例规定的安全性要求。若总体方案不满足安全性要求,就失去了综合评价的必要性。(2)在总体方案设计阶段,很难定量地进行安全性评估。考虑到上述两方面原因,本文没有将安全性列入准则层,而是隐含地认为:所评估的客机总体方案均满足适航条例规定的安全性要求。

为了实现对民机设计方案的定量评价,在“经济性/舒适性/环保性/适应性”4个准则下构建指标层。指标层的选择应遵循如下原则:(1)指标具有代表性,可准确反映对应的准则;(2)指标易于量化,确保可从评价对象(民机总体方案)获得具体的指标参数。具体的指标层构建说明如下。

(1)经济性

民机经济性是决定民机市场竞争力的最重要因素。飞机的直接运营成本(Direct operating cost, DOC)是衡量飞机使用经济性最主要的定量指标^[10]。它综合反映了客机的使用空重、飞行速度、发动机推力、油耗、可靠性和维修性等因素。DOC通常有3种表达形式:每轮挡小时成本、每航次成本和座公里成本,它们分别从不同侧面来衡量运营成本的大小。本文选用座公里成本描述客机DOC,以反映民机的乘客运送成本,从而衡量民机的经济性。DOC的量纲为 yuan/ASK,座公里(Available seat kilometers, ASK)为反映座位数和航程的参数,其数值为航程乘以乘客座位数,量纲为 km·seat。

(2)舒适性

德国、中国台湾、荷兰和美国等对乘客体验的调查研究都表明,增大腿部空间、膝部空间以及个人空间在舒适性体验上有积极的作用^[11]。所以,在舒适性设计上应优先考虑腿部空间及个人空间。除此之外,飞机的运动是否平稳以及客舱内环境亦对舒适性有直接影响。因此,选择座椅宽度、座椅排距和客舱高度3个典型指标反映

乘客的腿部空间和个人空间。阵风缓和技术指标反映飞行的平稳性。客舱噪声和客舱气压两个可直接影响乘客健康的指标作为评价舒适性的补充指标。

(3)环保性

随着环境污染日益严重,环保已成为所有行业的共识,航空业也不例外。民机飞行产生的环境污染主要包括噪声污染和尾气污染两部分。针对噪声污染,选择起飞噪声、横侧噪声和进场噪声作为评价指标^[12]。对于尾气污染,选择未燃烧碳氢化合物、碳氧化物和氮氧化物为评价指标^[13]。

(4)适应性

适应性用来衡量飞机的机场适应性(起飞性能、着陆性能和翼展长度等)以及航线性能(航程、商载等)。简单地说,航空公司都希望一架民机具有较强的载客能力,较短的起降距离和较快的飞行速度。

在起飞阶段,客机的起飞爬升性能通常由第2阶段爬升要求来决定。这一阶段的最小爬升率应按照单发失效情况来验证。因此选取“第2阶段爬升梯度”作为爬升典型指标。同时,起飞场长越短,进近速度越小,着陆距离越短,民机起降适应性越强。设计商载、设计航程、最大商载、最大商载航程和巡航马赫数越大,民机航线适应性越强。除此之外,翼展越小,民机对机场配套设施的要求越低,对提高适应性起积极作用。上述各个指标共同构成了反映民机适应性的评价指标。

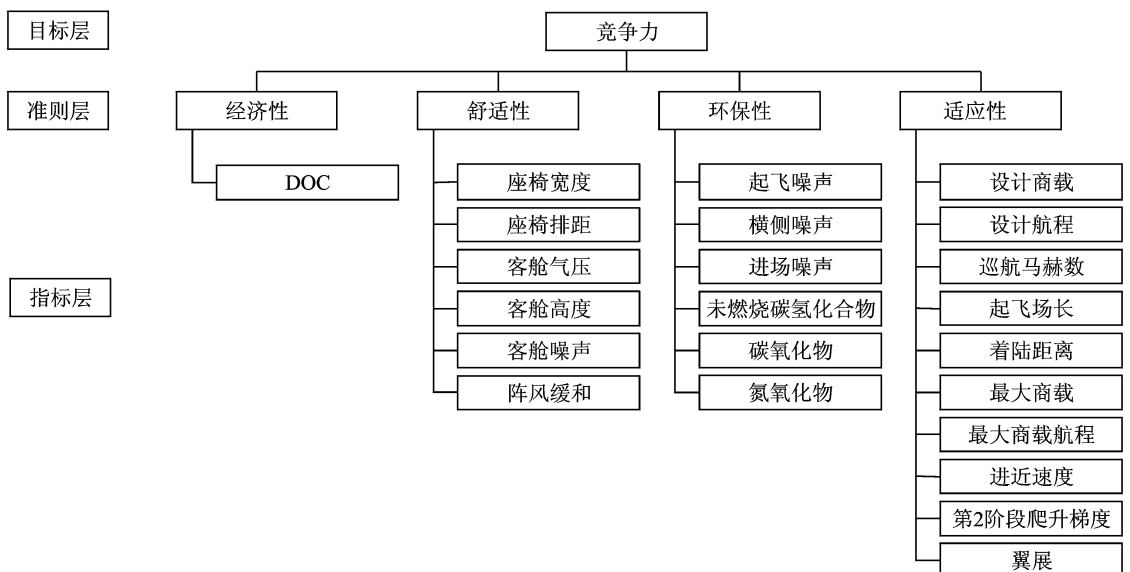


图1 民机综合评价模型的层次结构

Fig. 1 Multi-level evaluation model for airliners

1.2 层次结构一致性检验和权重计算

运用 AHP 法计算各参数权重时,分别对各层中的参数构造两两比较判断矩阵,然后进行一致性检验并计算权重。判断矩阵中元素通常由数字 1~9 和它们的倒数构成。矩阵中第 (i, j) 位置元素数值表示第 i 行对应的参数对比第 j 列对应的参数的重要程度:大于 1 时, i 比 j 重要,且数值越大差别越明显;小于 1 时, i 的重要性小于 j ,数值越小差别越明显。为了使权重分布更合理,引入多位专家对同一模型构造判断矩阵,并根据专家的判断能力,形成综合判断矩阵^[14]。以准则层为例,两位专家对准则层分别建立判断矩阵 A_1 和 A_2 。

		经济性	舒适性	环保性	适应性
$A_1 =$	经济性	1	5	7	3
	舒适性	1/5	1	2	1/2
	环保性	1/7	1/2	1	1/4
	适应性	1/3	2	4	1
		经济性	舒适性	环保性	适应性
$A_2 =$	经济性	1	4	3	2
	舒适性	1/4	1	1/2	1/3
	环保性	1/3	2	1	1/4
	适应性	1/2	3	4	1

完成判断矩阵建立后,需对所建立的判断矩阵需进行一致性检验。对于判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,当满足 $a_{ij} = 1/a_{ji}$ 且 $a_{ik}(a_{kj} = a_{ij} (i, j, k = 1, 2, \dots, n)$ 时,认为 A 是完全一致性矩阵。但是在大多数情况下,由于客观事物的复杂性和主观判断的多样性,专家建立的判断矩阵很难达到完全一致性要求。在实际应用中,当判断矩阵达到一定的一致性程度即可认为该矩阵满足一致性要求。对于任意判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,其一致性指标(Consistent index, C. I.)为

$$C. I. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

式中: λ_{\max} 为矩阵的最大特征根, n 为矩阵阶数。C. I. 值越小,判断矩阵的一致性越高。

由于判断矩阵阶数越高,矩阵越难达到一致性要求,因此,层次分析法的创始人 Satty^[9]提出了用随机一致性指标(Random index, R. I.)修正 C. I.,即用随机一致性比率(Consistent ratio, C. R.)反映判断矩阵的一致性,则

$$C. R. = \frac{C. I.}{R. I.} \quad (2)$$

当 $C. R. < 0.1$ 时,认为判断矩阵满足一致性

要求。1~10 阶判断矩阵对应的 R. I 值如表 1 所示。需要说明的是当 $n < 3$ 时,判断矩阵必然满足一致性要求。

表 1 1~10 阶判断矩阵 R. I. 值

Tab. 1 Values of R. I. for 1~10 order judgement matrixes

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R. I.	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49

在根据多名专家分别建立的判断矩阵建立综合判断矩阵时,认为一致性较好的专家具有较好的判断力^[14]。若共有 m 位专家建立判断矩阵,则对于第 k 名专家,其判断力权重 P_k 为

$$P_k = \frac{e^{-10(m-1)C. I. k}}{\sum_{i=1}^m e^{-10(m-1)C. I. i}} \quad (3)$$

最终的综合判断矩阵为

$$A_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^m P_i \cdot A_i \quad (4)$$

根据两个判断矩阵,由式(1)可计算得到两者的一致性指标分别为 $C. I. _1 = 0.0094$, $C. I. _2 = 0.0103$,由式(2)求得两者的一致性比率分别为 $C. R. _1 = 0.011$, $C. R. _2 = 0.012$,两者均小于 0.1,满足一致性要求。由式(3)求得两者的判断力权重分别为 $P_1 = 0.5022$, $P_2 = 0.4978$ 。由式(4)求得两位专家的综合判断矩阵为

$$A_{\text{mix}} = \begin{bmatrix} 1 & 4.5022 & 5.0089 & 2.5022 \\ 0.2249 & 1 & 1.2533 & 0.4170 \\ 0.2377 & 1.2467 & 1 & 0.3744 \\ 0.4163 & 2.4978 & 3.0044 & 1 \end{bmatrix}$$

对于 A_{mix} 有 $C. R. _{\text{mix}} = 0.0911 < 0.1$,满足一致性要求。通过一致性检验后,由判断矩阵计算出各因素的权重^[9],得到两位专家的权重向量和综合权重向量分别如下: $W_1 = (0.5791, 0.1213, 0.0670, 0.2326)$, $W_2 = (0.4658, 0.0906, 0.1611, 0.2771)$, $W_{\text{mix}} = (0.5224, 0.1118, 0.1115, 0.2543)$ 。可见,由于 A_1 的一致性优于 A_2 ,因此 1 号专家的判断力权重高于 2 号专家。最终,形成综合判断矩阵后,计算出的综合权重介于两者之间,但更接近 1 号专家,即准则层按照权重值从大到小排列依次为“经济性/适应性/舒适性/环保性”。采用类似的办法,对各准则层下的指标层进行权重设置,最终得到的权重分布如图 2 所示,图 2 中各参数后的数值表示该参数的权重。注意到准则层相对于目标层的权重之和为 1。准则层下各指标权重之和亦为 1。

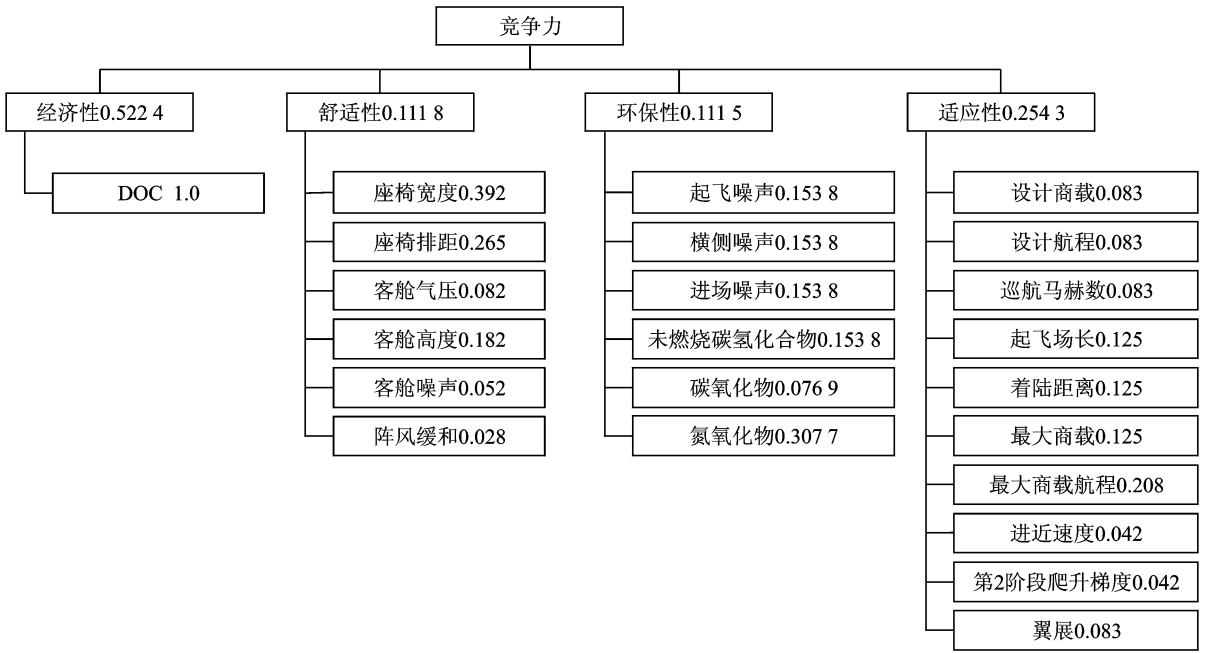


图2 层次结构中各参数权重

Fig. 2 Weights of all parameters in level structure

1.3 指标层参数归一化

由于层次结构中指标层含有多种指标且量纲各不相同,在进行综合评价之前,需对各指标值进行归一化操作。采用非线性 S 形可导函数归一化方法进行参数量化。该方法的优点是可突出参数的饱和和特性^[15]。一方面,某项性能参数有物理限制或当今技术实现能力的极限;另一力面,提高某项性能带来的效益,也有 S 形曲线趋向。对于数值越大越好的参数,归一化的公式为

$$\bar{V}_i = \frac{1}{1 + T \cdot e^{-U[\frac{6}{V_{imax} - V_{imin}} \times (V_i - \frac{V_{imax} + V_{imin}}{2})]}} \quad (5)$$

式中: V_i 为变换前的参数值; \bar{V}_i 为归一化后的数值; V_{imax} 和 V_{imin} 分别为参数的最大最小值。 T 和 U 为曲线调节参数。需要说明的是,对于数值越小越好的参数,式中的 $V_{imax} - V_{imin}$ 应用 $V_{imin} - V_{imax}$ 取代。

以“座椅宽度”指标为例。客机经济舱座椅宽度一般在 400 mm 至 500 mm 之间。在这个范围内,随着宽度的增加,乘客的舒适度会不断增加,当尺寸小于 400 mm 或大于 500 mm,乘客的舒适性体验对座椅宽度的敏感性降低。对该指标进行 S 形函数归一化后,参数数值变化如图 3 所示。

运用类似的方法处理指标层涉及的所有指标,得到标准化的参数值。需要说明的是,在进行最大最小值定义时,若该项指标有适航条例规定或设计要求规定的数值约束,那么可以将最大最小值设置为该约束值。若评价对象的任一指标违背约束值,

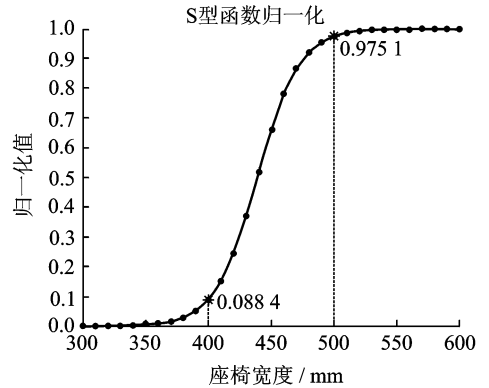


图3 座椅宽度 S 型函数归一化

Fig. 3 Normalization of value of seat width with S-function

则进行归一化时,该指标值映射得到的标准值为 0。

1.4 竞争力计算

在计算民航竞争力时,首先判断该民航方案是否有某个指标的标准值为 0。若有,则说明该方案为不可行方案,其竞争力为 0。若无,则通过加权求和的方法,由指标层开始向目标层逐级累加。假设第 i 个准则下的第 j 个指标的标准值为 \bar{V}_{ij} ,权重为 W_{ij} ,则该准则的参数值为

$$V^i = \sum \bar{V}_{ij} \cdot W_{ij} \quad (6)$$

类似地,若该准则相对于目标层的权重为 W^i ,那么最终的竞争力值 V_{final} 为

$$V_{final} = \sum V^i \cdot W^i \quad (7)$$

2 客机总体方案的综合分析

某民机的设计要求如下:三舱布局 280 座级,巡航高度 11 887 m,巡航速度 0.85Ma,设计航程 12 000 km 等。针对上述设计要求,有两个不同的设计方案,其典型的设计参数如表 2 所示。

表 2 设计参数

Tab. 2 Design parameters

设计参数	方案 1	方案 2
参考面积/m ²	355	370
海平面静推力/kN	333	341
机翼展弦比	10.46	10.76
1/4 弦线后掠角/(°)	32.4	29.65
机翼梯形比	0.10	0.111 7
翼根相对厚度	0.135	0.130 4
座椅宽度/mm	488	462
座椅排距/mm	788	763
客舱高度/m	1.88	1.89

客机总体设计综合分析程序是总体方案综合评价的基础,其主要功能是对总体设计方案的几何、推进、气动、质量、性能、经济性和环保性等进行综合分析,并得到客机总体方案的各指标参数,为后续综合评价提供支撑。本文采用的客机总体设计综合分析程序的架构如图 4 所示^[16-17]。对某个客机方案进行多学科分析之后,得到各指标层参数值。随后将所有的输入输出参数存入数据库并传递给综合评价模块。

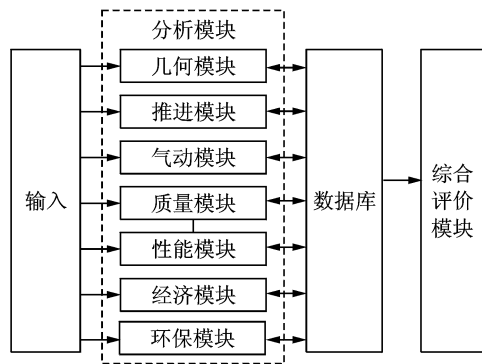


图 4 客机综合分析及评价工具

Fig. 4 Architecture of comprehensive analysis and evaluation for airliners

3 客机总体方案的竞争力评价

在综合评价模块中,利用建立的综合评价模型进行总体方案的综合评价。需要说明的是,在层次结构中,指标层中的指标并非全为图 4 所示分析模块的输出,有些指标为输入,如座椅宽度、座椅排距、客舱高度和设计航程等。

利用上述客机综合分析工具,分析表 2 中两

个设计方案,可得到指标层参数。表 3 列出了权重较大的典型指标参数的真实值和归一化之后的标准值。

表 3 典型指标参数

Tab. 3 Values of typical parameters

参数	方案 1		方案 2	
	真实值	标准值	真实值	标准值
DOC	0.319 yuan/ ASK	0.767 3	0.315 yuan/ ASK	0.807 5
座椅宽度	488 mm	0.950 3	462 mm	0.796 1
座椅排距	788 mm	0.091 7	763 mm	0.054 5
客舱高度	1.88 m	0.109 7	1.89 m	0.121 7
起飞噪声	86.6 dB	0.657 8	84.6 dB	0.778 7
横侧噪声	96 dB	0.172 7	97.0 dB	0.133 6
进场噪声	95.4 dB	0.312 9	91.8 dB	0.575 4
氮氧化物	1 324.3 kg	0.595 6	1 259.7 kg	0.684 6
最大商载	50 400 kg	0.780 2	50 400 kg	0.780 2
最大商载航程	7 770 km	0.579 8	7 820 km	0.597 8
起飞场长	2 443 m	0.712 2	2 390 m	0.806 7
着陆距离	1 664 m	0.665 9	1 602 m	0.789 4

运用层次结构评价模型,计算两个民机方案的竞争力,获得详细的数值结果如图 5 所示。

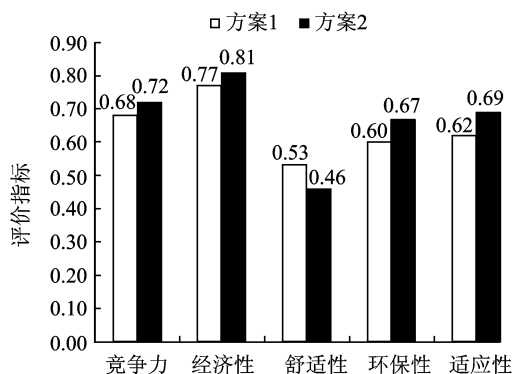


图 5 两种客机总体方案综合评价结果

Fig. 5 Conceptual design evaluation result between two kinds of commercial aircraft

相比方案 1,方案 2 具有更高的竞争力。具体到准则层的表现如下:方案 2 的舒适性略差,但由于其经济性、环保性和适应性都表现较好,尤其是经济性的表现对综合竞争力的影响最大,故而方案 2 比方案 1 在竞争力上具有明显优势。

4 结 论

针对大型客机总体设计方案综合评估问题,提出了客机竞争力的概念。应用层次分析法,从经济性、适应性、舒适性和环保性 4 个方面,建立了客机的综合评价指标(竞争力)的模型。根据本文方法,对两种大型客机总体方案进行了综合评价。研究结果表明:(1)本文方法能明确地识别出竞争力较

高的设计方案,评价结果合理;(2)在评价过程中,引入多人决策模型,可提高本文评价模型的鲁棒性。

下一步研究中,将以客机竞争力为优化目标,开展客机总体方案优化设计的研究。

参考文献:

- [1] DIRKS G A, MELLER F. Multidisciplinary design optimization-enhanced methodology for aircraft and technology evaluation [C]//Proceedings of the 8th AIAA/USAF/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization. Long Beach, CA: [s. n.], 2000:179-182.
- [2] AU H M. The development and application of a multi-criteria optimization method to the design of a 20-seat regional jet airliner[D]. Lawrence: University of Kansas, 2006.
- [3] DOWNEN T D, NIGHTINGALE D J, MAGEE C L. Multi-attribute value approach to business airplane product assessment[J]. Journal of Aircraft, 2005,42(6):1387-1395.
- [4] SUN Xiaoqian. Incorporating multicriteria decision analysis techniques in aircraft conceptual design process[J]. Journal of Aircraft, 2014, 51(3): 861-869.
- [5] WEISS M. Technology assessment of future aircraft; Socio-eco-efficiency [C]//Proceedings of the 28th Congress of the International Council of Aeronautical Sciences. Brisbane, Australia: [s. n.], 2012: 456-470.
- [6] 张毅,王和平. 民用客机总体方案评价准则研究[J]. 西北工业大学学报,2006,24(6):791-794.
ZHANG Yi, WANG Heping. Some suggestions on evaluating preliminary overall design of Chinese passenger aircraft[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006,24(6):791-794.
- [7] 范宇,宋笔锋,张炜. 一种基于多目标决策的超音速民机方案评价方法[J]. 航空计算技术,2009,39(2):1-5.
FAN Yu, SONG Bifeng, ZHANG Wei. A method to estimate project of supersonic civil transport based on multi-object decision-making theory[J]. Aeronautical Computing Technique, 2009,39(2):1-5.
- [8] 宋笔锋,张彬乾,韩忠华. 大型客机总体设计准则与概念创新[J]. 航空学报,2008,29(3):583-595.
SONG Bifeng, ZHANG Binqian, HAN Zhonghua. The study of concept design criteria for large-scale passenger aircraft with new technologies [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008,29(3):583-595.
- [9] SATTY T L. The analytic hierarchy process [M]. New York: McGraw Hill, 1980.
- [10] 叶叶沛. 民用飞机经济性 [M]. 成都:西南交通大学出版社,2013.
YE Yepei. Civil aircraft economy [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2013.
- [11] VINK P, BRAUER K. Aircraft interior comfort and design [M]. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [12] COLLIER F, THOMAS R, BURLEY C, et al. Environmentally responsible aviation-real solutions for environmental challenges facing aviation [C]//Proceedings of the 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. Nice, France: [s. n.], 2010.
- [13] BRUNET M, AUBRY S, LAFAGE R. The clean sky programme: Environmental benefits at aircraft level [R]. AIAA 2015-2390, 2015.
- [14] 李宴喜,陶志. 层次分析法中判断矩阵的群组综合构造方法[J]. 沈阳师范大学学报,2002,20(2):86-90.
LI Yanxi, TAO Zhi. Structure method for judging matrix of group in the AHP [J]. Journal of Shenyang Normal University, 2002,20(2):86-90.
- [15] 董彦非,王礼沅,王卓健,等. 基于空战模式和 AHP 法的空战效能评估模型 [J]. 系统工程与电子技术, 2006,28(6):886-888.
DONG Yanfei, WANG Liyuan, WANG Zhuojian, et al. Air combat effectiveness assessment model based on operational pattern and analytic hierarchy process [J]. Systems Engineering & Electronics, 2006, 28(6):886-888.
- [16] 张帅,余雄庆. 中短程客机总体参数敏感性分析 [J]. 航空学报,2013,34(4):809-816.
ZHANG Shuai, YU Xiongqing. Sensitivity analysis of primary parameters in preliminary design of a short/medium-haul airliner [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013,34(4):809-816.
- [17] 余雄庆,张帅. 面向客机族的总体参数优化方法 [J]. 南京航空航天大学学报,2012,44(5):718-724.
YU Xiongqing, ZHANG Shuai. Optimization for conceptual design of airliner family [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012,44(5):718-724.