

基于 AHP 灰色理论的飞机驾驶舱内环境设计评价^{*}

Evaluation of Interior Environmental Design of Aircraft Cockpit Based on Analytic Hierarchy Process and Grey Theory

西北工业大学工业设计研究所 冯青 余隋怀 初建杰 杜鹤民

[摘要] 在分析驾驶舱内环境特性的基础上,综合考虑了驾驶舱内环境中的设计因素,运用层次分析法建立了基于灰色理论的飞机驾驶舱内环境设计综合评价模型。该模型通过以定量分析为主、定性分析和定量分析相结合的方法,克服了评价的主观性和随意性,实现了对飞机驾驶舱内环境设计的全面、科学和合理的评价。最后,设计并编制了飞机驾驶舱内环境设计评价软件,解决了评价过程中大量的人工数学计算问题。

关键词: 驾驶舱 内环境 评价 AHP 灰色理论

[ABSTRACT] On the basis of the analysis of cockpit environmental characteristics and comprehensive consideration of the cockpit environment design factors, a comprehensive evaluation model which is based on grey theory is set up by the way of using AHP. This model mainly depends on the method of quantitative analysis, quantitative analysis and a combination. It overcomes the evaluation of the subjectivity and arbitrariness and realizes a comprehensive, scientific and reasonable evaluation towards aircraft cockpit environment design. Finally, evaluation software for aircraft cockpit design is designed and lots of artificial mathematical problems during evaluation process are solved.

Keywords: Cockpit Interior environment Evaluation Grey theory and analytic hierarchy process

民用飞机驾驶舱内环境能够为飞行员提供良好的飞行视野和合理的操控布置,以及舒适、可靠的驾驶环境,是飞行员获取飞行信息,并有效地进行指令控制、操纵飞机完成各种飞行任务的工作场所。飞机驾驶舱内环境的范围主要包括:风挡/座舱盖形状布置;舱内座椅,一般分为飞行员座椅和观察员座椅;飞行控制器,包括脚踏板和驾驶杆;仪表显示器;舱内灯光布置;舱内总体空间布局,主要指驾驶舱内部表面形状及进出通道

等的位置;舱内防火、灭火紧急设备设施;个体装备,包括飞行员随身行李的存放设施,简易的食品、饮料的存放装置等。

飞机驾驶舱是飞行员掌握飞行数据的主要来源,也是其工作、休息的场所。因此,飞机驾驶舱的设计是一个复杂的设计过程,涉及到多种不同类型的作业和人机交互活动。从人员伤亡和经济角度看,因人为失误而引起的损失非常大^[1]。设计一个安全、舒适、可靠、高效的飞机驾驶舱,不仅能大幅减少人为失误,还能够降低工作负荷,提高飞行员的工作效率,使飞行员更高效、安全地完成飞行任务,间接地提高飞机的总体性能。

评价方法的科学性与合理性,是飞机驾驶舱内环境设计成功与否的关键问题之一。在飞机维护评价方面, Taichang Hsia 提出了基于质量分析矩阵的维修手册质量评价方法^[2];在系统仿真方面,熊正祥等运用 AHP 方法对舰艇的综合训练成绩进行了模拟评估^[3];此外,杜俊慧等运用灰色理想解法进行了模糊多属性决策(Fuzzy Multi-Attribute Decision Making, FMADM)方法研究^[4]。

1 AHP 灰色理论方法的基本原理

1.1 层次分析法

美国匹兹堡大学教授 Thomas L. Saaty 于 20 世纪 70 年代末提出了层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 理论。层次分析法是对定性问题进行定量分析的一种简便、灵活而又实用的多准则决策方法,采用系统的观点,定量与定量或定量与定性相结合,从不同角度来优化一个由相互关联、相互制约的众多因素构成的复杂系统,对其进行决策分析、预测及评价^[5]。运用 AHP 进行决策时,首先将复杂问题层次化,根据问题和要达到的目标,将问题分解为不同的组成要素,并按照各要素之间的相互关系及隶属关系将因素按不同层次聚集组成,形成一个多层次的分解结构模型。根据系统的特点和基本原则,对各层要素进行对比分析,引入 1~9 比率标度方法构造出判断矩阵,用求解判断矩阵最大特征

^{*} 国家 863 计划重点项目(2007AA040406)资助。

根及特征向量的方法得到各因素的相对权重^[6]。

1.2 灰色综合评价

灰色系统理论是黑箱概念的推广,是研究解决灰色系统分析、建模、预测、决策、评价和控制的理论,运用数学方法来研究信息不完备的系统。所谓灰色综合评价是利用灰色关联度作为测度,来比较各评价对象的优劣程度。它主要是利用灰色关联分析这一工具,即通过计算比较序列和参与序列的关联系数和关联度,来确定各种影响因子的重要度,进而确定重要因子或最优方案。

1.3 AHP 灰色理论综合评价过程

随着对 AHP 研究的不断深入,人们逐渐发现了其存在的缺陷和不足,于是将灰色理论的思想和方法引入到 AHP 中,出现了基于灰色聚类层次分析法。

多指标在进行综合评价时,确定各因素评价目标的权重分配非常关键,权重系数选取是否合理,直接影响到评价结果。由专家凭借以往经验及主观判定来确定权重,具有较大的主观性和人为偏差。本文首先采用 AHP 法对飞机驾驶舱内环境设计方案进行层次分析;建立层次结构模型并通过计算判断矩阵的最大特

结果。

2 驾驶舱内环境评价层次结构模型的建立

2.1 驾驶舱内环境特性分析

目前,飞机已经发展到专门化、多样化以及高效化,各种类别的飞机都有其自身特有的优势和专门完成的事物,而不同类型的飞机驾驶舱产生不同的设计需求特性,导致评价标准各异,因此,本文以我国某新型双发民用支线客机为例进行设计评价分析。

飞机驾驶舱内环境设计涉及到多个学科的知识,如形态学、心理学、色彩学、图形学、照明设计、人机工程等。因此对其设计方案的评价也应该是一个多层次、多因素的评价体系。为了提高评价的效率我们需要建立舱内设计评价准则,作为评价优劣的依据。

2.2 驾驶舱内环境评价层次结构分析

评价指标的选取需遵循全面性、科学性、合理性等原则,评价准则有定量的也有些是定性的,对此,需采用系统分析方法中的层次结构分析法进行决策分析、预测和评价。综上分析后,建立梯阶层次结构模型,如图 1

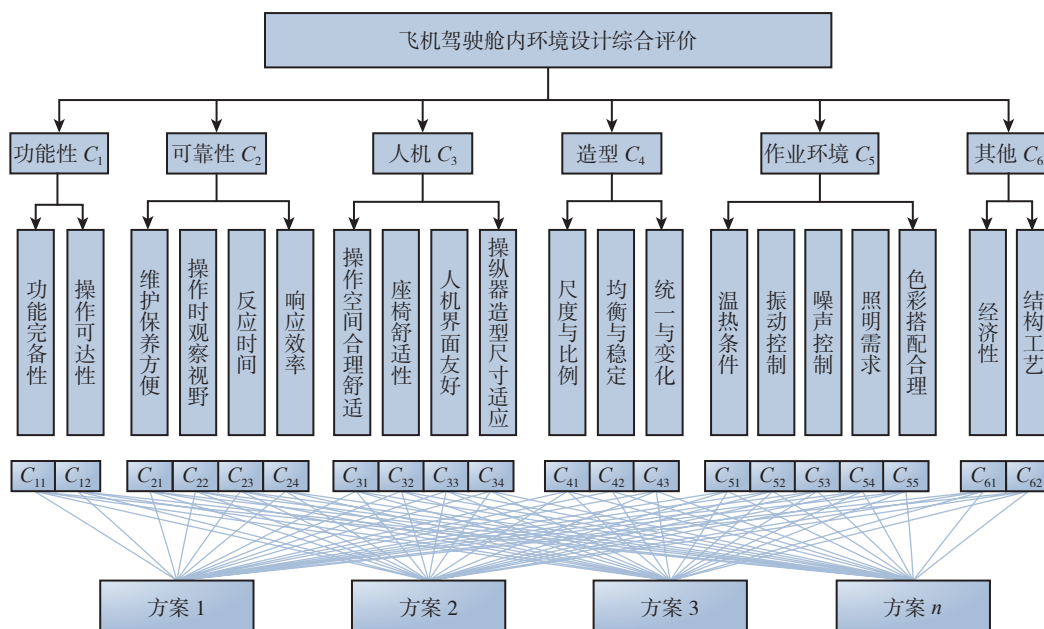


图1 飞机驾驶舱内环境设计评价结构层次模型

Fig.1 Evaluation structure model of interior environmental design of aircraft cockpit

征值来衡量矩阵的一致性,直到符合检验的要求;最后利用灰色系统理论建立比较序列,通过计算各评价对象与参考序列的关联度最终确定最优结果。利用 AHP 灰色理论飞机驾驶舱内环境设计评价方法,可使评价决策过程数字化、系统化,使评价结果更具客观性和可信性,有效避免主观因素的影响,从而获得客观的评价

所示。

3 评价模型的建立

3.1 建立判断矩阵

层次分析法要求逐层计算相互联系的元素间影响的相对重要性,并予以量化,组成判断矩阵,作为分析的

基础。在利用层次分析法构建的评价体系中,准则层有6个评价因素,子准则层有20个评价因素,两两比较,得到判断矩阵 B ,其形式如下:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} = (b_{ij})_{n \times n},$$

式中, b_{ij} 表示依据评价准则 A_k , 要素 B_i 对 B_j 的相对重要性。 b_{ij} 的取值如表1所示。

表1 两两因素相对重要性取值

B_i/B_j	相等	稍微重要	明显重要	强烈重要	极端重要
b_{ij}	1	3	5	7	9

对于判断矩阵 B 有:

$$b_{ii}=1, b_{ij}=1/b_{ji} > 0 \quad (i, j=1, 2, \dots, n)。$$

衡量判断矩阵质量的标准是矩阵中的判断是否有满意的一致性,如果判断矩阵存在关系: $b_{ij} = b_{ik}/b_{kj} > 0$, ($i, j, k=1, 2, \dots, n$), 则该判断矩阵具有完全的一致性。

3.2 相对重要度计算和一致性检验

3.2.1 相对重要度计算

根据判断矩阵 B , 计算各要素的权重系数, n 个权重系数构成一个权重向量 W , 即 $W=\{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ 。

在本文及其后的编程中,为简化计算,采用合积分法求解 W 。

首先,对判断矩阵 B 进行规范化:

$$\bar{b}_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij}}, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n);$$

按行相加后得和数 $\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij};$

最后,进行归一化处理,即得到权重系数 $W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i}。$

3.2.2 一致性检验

通过计算一致性指标 $C.I.=\lambda_{\max}-n/(n-1)$, 若 $C.I. \leq 0.1$, 就认为判断矩阵具有一致性,据此判断计算结果是否能接受。计算相对一致性指标 $C.R.=C.I./R.I.$, 其中,平均随机一致性指标 $R.I.$ 可以通过表2查到;当 $C.R. < 0.1$ 时,认为判断矩阵具有满意的一致性,否则就必须重新调整判断矩阵,直到具有满意的一致性。当通过一致性检验时,表明近似特征向量能够客观表征驾驶舱内环境设计评价因素的权重,用于后续的 AHP 灰色综合评价。

表2 1~12 阶判断矩阵的 $R.I.$ 值

阶数 n	1	2	3	4	5	6
$R.I.$	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24
阶数 n	7	8	9	10	11	12
$R.I.$	1.32	1.41	1.45	1.49	1.52	1.54

4 运用 AHP 灰色综合评价法进行评价

4.1 确定评价标准

评价标准集是评价者对评价对象(因素指标)可能做出的各种评价结果(评定值)所组成的集合^[7]。设有 m 个评价,其评价对象的集合为 A , 即 $A=\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, n 个因素指标的集合为 V , 即 $V=\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 。将 A 与 V 中的元素任意搭配后的因素指标值记为 v_{ij} ($i=1, 2, \dots, n$)。

4.2 确定最优指标集

最优指标是从各评价对象的同一指标中选取最优的一个,可按式进行:

$$v_{*j} = \begin{cases} v_{ij\max} \\ v_{ij\min} \end{cases},$$

式中, $v_{ij\max}=\max(v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{mj}); v_{ij\min}=\min(v_{1j}, v_{2j}, \dots, v_{mj}); j=(1, 2, \dots, n)。$

各阶段指标的最优值组成的集合称为最优指标集,它是各评价对象比较的基准。将最优指标和各评价对象的指标值组成判断矩阵 D , 即:

$$D = \begin{bmatrix} v_{*1} & v_{*1} & \cdots & v_{*n} \\ v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix},$$

式中, v_{ij} 为第 i 个评价专家中第 j 个指标的原始值。

4.3 确定评价矩阵

在对各评价指标进行那个标准化处理之后,以最优指标为参考序列,各评价对象的指标为比较序列,计算第 i 个评价对象中第 j 个指标与最优指标集中的第 j 最优指标的灰色关联系数 L_{ij} :

$$L_{ij} = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} |v_{*j} - v_{ij}| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |v_{*j} - v_{ij}|}{|v_{*j} - v_{ij}| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |v_{*j} - v_{ij}|},$$

式中, ρ 为分辨系数,在实际使用时,应根据序列间的关联程度选择分辨系数,一般取 $\rho \leq 0.5$ 最为恰当。

这样,各评价对象与最优指标的关联系数组成评价矩阵 R , 即:

$$R = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{m1} & L_{m2} & \cdots & L_{mn} \end{bmatrix}。$$

4.4 确定评价指标的权系数及综合评价

由于各指标的重要程度不同,因此需要对各个指标赋予不同的权系数 w , w_j ($j=1,2,\dots,n$)。权系数应满足归一化和非负条件,即 $\sum_{j=1}^n w_j = 0$ 且 $w_j \geq 0$ 。

同时,令 $W = (w_1, w_2, w_n)^T$, 计算出灰色关联度表示的评价结果矩阵 $B = R \cdot W = (b_i)_{m \times 1}$, 其中,

$$b_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot L_{ij}, i = (1, 2, \dots, m)。$$

灰色关联度越大,说明该评价对象越接近于最优指标,因此,若 $b_i = \max(b_1, b_2, \dots, b_m)$, 则第 i 个评价对象为最优,从而给出对驾驶舱内环境设计的质量评价。

5 评价系统实现及应用验证

根据算法,利用 VC 语言编制开发了飞机驾驶舱内环境设计综合评价系统软件,其软件的逻辑框架如图 2 所示。

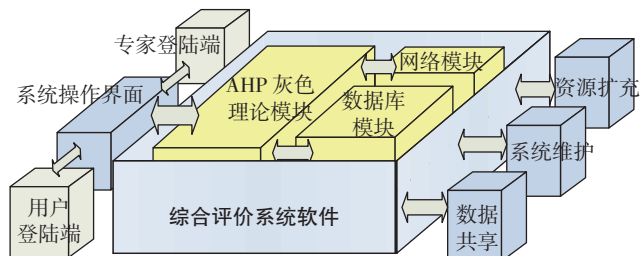
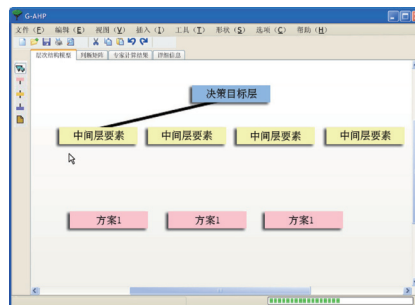


图2 飞机驾驶舱内环境设计评价软件逻辑框架
Fig.2 Logical framework of evaluation software

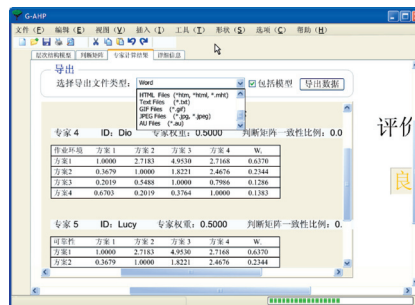
评价软件按文中的描述建立了评价因素集,且允许管理员通过系统维护模块按层次法原理修改和补充评价的层次及其评价指标; AHP 灰色理论模块依据文中的数学模型编制了数据处理程序。用户在使用本软件时,可以在用户界面中输入权重评价数据,系统按 AHP 自动计算出评价指标的权重值,在不修改评价因素集时,权重值可重复使用。在进行评价时,可以指定参与评价的专家数,加入的网络模块支持 TCP/IP 网络协议,可多人异地同时在线评价,并按百分制由专家对评价指标进行打分,系统会结合指标权重值自动计算出系统的综合评分。综合评价系统界面如图 3 所示。

6 结论

飞机驾驶舱的设计,是飞机先进性、安全性、舒适性的一个缩影,直接关系到飞机的市场竞争力。本文在分



(a) 界面 1



(b) 界面 2

图3 评价软件界面

Fig.3 Interface of evaluation software

析驾驶舱内环境特性分析基础上,把定性分析和定量计算有机结合,研究了飞机驾驶舱内环境设计综合评价的理论和方法,建立了基于 AHP 灰色理论的飞机驾驶舱内环境设计综合评价体系,并且通过编制软件,实现了繁琐数学计算的自动化处理,具有较强的推广性和普适性。同时,本评价体系还存在一定的片面性,特别是随着航空制造业不断发展,新技术的广泛应用,评价指标必然要不断更新和修正,所以飞机驾驶舱内环境设计综合评价体系的应是动态的,需要不断进行探讨和研究。

参考文献

- [1] 王黎静,袁修干. 飞机座舱设计人机工效评价探讨. 中国安全科学学报, 2002, 12(2):64-66.
- [2] Hsia T C. Evaluating the writing quality of aircraft maintenance technical orders using a quality performance matrix. International Journal of Industrial Ergonomics, 2007,37:605-613.
- [3] 熊正祥,王立强,孙永侃,等. 基于 AHP 的舰艇模拟训练成绩评估研究. 系统仿真学报, 2008, 20(12):3130-3133.
- [4] 杜俊慧,魏法杰. 基于灰色理想解法的模糊多属性决策方法研究. 中北大学学报(自然科学版), 2008, 29(6):510-514.
- [5] 周前祥,蔡烈,李洁. 载人航天器人机界面设计. 北京:国防工业出版社, 2009.
- [6] 柯宏发,陈永光,夏斌. 电子战装备作战效能灰色评估模型和算法. 系统仿真学报, 2005, 17(3):760-762.
- [7] 邵飞,邓卫,易富君,等. 基于 AHP 灰色理论的大城市公交系统综合评价方法. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(6): 536-541.

(责编 深蓝)