

文章编号: 1674-8190(2022)03-120-07

民用飞机直接维修成本分配模型研究

刘彦波¹, 郑蓝¹, 贾宝惠²

(1. 中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院, 上海 200232)

(2. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 降低民用飞机直接维修成本是提高飞机经济性、增强市场竞争力的重要途径。以民用飞机研制阶段在很大程度上决定其维修成本的高低为背景, 在分析相关文献研究成果的基础上, 构建可反映民用飞机成本特性的设计参数结构层次图, 基于TOPSIS-灰色关联法计算类似机型的相对相似度, 进行民用飞机直接维修成本分配; 将类似机型典型系统直接维修成本数据输入分配模型进行验证。结果表明: 本文模型可较为准确地预测民用飞机系统级直接维修成本, 计算结果满足工程要求, 可为预测新研机型直接维修成本提供参考。

关键词: 民用飞机; 维修性设计; 直接维修成本; TOPSIS-灰色关联法

中图分类号: V267

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.03.13

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Allocation Model of Direct Maintenance Cost of Civil Aircraft

LIU Yanbo¹, ZHENG Lan¹, JIA Baohui²

(1. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China Ltd., Shanghai 200232, China)

(2. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to reduce direct maintenance costs of civil aircraft, it is an important way to improve aircraft economics and enhance market competitiveness. Based on the background that the maintenance cost is largely determined in the development stage of civil aircraft, a hierarchical diagram of the design parameter structure that reflects the cost characteristics of civil aircraft is constructed. The TOPSIS-grey correlation method model is established to calculate the relative similarity of similar aircraft and to carry out the direct maintenance cost allocation of civil aircraft. The direct maintenance cost data of typical systems of similar aircraft types is input into the allocation model for verification. The results show that the model can predict the system-level direct maintenance cost of civil aircraft well, and the calculation results can meet the engineering requirements. The method can provide a reference for predicting the direct maintenance cost of the newly developed aircraft.

Key words: civil aircraft; maintainability design; direct maintenance cost; TOPSIS-grey association method

收稿日期: 2021-02-19; 修回日期: 2021-04-04

基金项目: 国家自然科学基金(U2033209)

通信作者: 刘彦波, lyb_sadri@163.com

引用格式: 刘彦波, 郑蓝, 贾宝惠. 民用飞机直接维修成本分配模型研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 120-126.

LIU Yanbo, ZHENG Lan, JIA Baohui. Research on allocation model of direct maintenance cost of civil aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 120-126. (in Chinese)

0 引言

现如今,民航运输竞争日趋激烈,加之受全球特殊环境的影响,导致飞机大面积停飞,给航空公司带来高额维修成本。飞机运营人重点关注的问题之一是直接运营成本(Direct Operating Costs,简称DOC)的高低。DOC由六大部分组成,其中维修成本作为DOC的重要组成部分,约占10%~20%,可直接影响民用飞机经济性^[1]。WATOG(World Airline Technical Operations Glossary)定义的维修成本可分为直接维修成本(Direct Maintenance Costs,简称DMC)和间接维修成本(Indirect Maintenance Costs,简称IMC)。DMC的高低与民用飞机维修性设计水平相关,IMC的高低与运营人运营能力和管理水平相关,一般为DMC的0.5~2倍^[2]。民用飞机研制阶段可影响DMC高低,因此民用飞机制造商在制定系统功能、设备布置和零部件选择等设计方案时,通常将DMC作为重要依据^[3]。综上,在民用飞机研制阶段分析和控制DMC可在一定程度上提高民用飞机维修经济性,提升民用飞机维修性设计水平。

波音公司在民用飞机研制阶段通过提升维修性设计来减少计划维修任务、提高维修可达性,使得B737NG的机体维修费用比B737CL的机体维修费用降低约15%,成为最具竞争力的机型^[4];J. Scanlan等^[5]概述了A380飞机系统设计和技术谱系,对比了部分成本预测模型的优缺点,并指出当前无可反映影响与成本预测相关的不确定性因素的系统的、被普遍接受的算法;A. Salonen等^[6]提出并讨论了不良维修成本概念,从一个新的角度来识别维修缺陷并分析其对维修成本的影响;R. Fritzsche^[7]通过研究昂贵库存备件,利用动态故障率评估方法来延长飞机免维修运营时间,有效降低了维修成本。

Wu H等^[8]研究认为民用飞机维修性设计和故障诊断是影响DMC的关键因素,故障诊断专家系统可有效降低民用飞机的DMC;吴静敏等^[9]建立了基于案例推理的DMC预测模型,可有效降低模型对专家经验的依赖;陈晓川等^[10]从面向成本设计角度利用BP神经网络对民用飞机全寿命周期

成本进行估算,指出从设计阶段起即需要重视飞机成本管理;Hong S等^[11-12]通过加权卡尔曼滤波算法建立健康评估模型来降低锂电池维修成本;李稷等^[13]从民用飞机安全性和可靠性角度研究得出民用飞机维修成本与民用飞机设计方案、设计参数是直接相关的。

综上所述,国内对民用飞机DMC分析进行了一定的研究,但鲜有文献从民用飞机设计角度研究分析DMC,且从机身系统设计层面考虑降低DMC的研究较少,未考虑体现民用飞机成本特征的设计参数。基于此,本文在民用飞机设计阶段分析DMC,从体现民用飞机成本特性的参数出发,通过分析类似机型设计指标参数,利用熵权法和TOPSIS-灰色关联法建立民用飞机直接维修成本分配模型,并通过实例验证模型的有效性。

1 组合指标权重评价模型

组合指标权重评价模型可充分利用自身的优点并提高数据分析的兼容性。熵权法是一种客观评价指标权重、可有效反映数据隐含信息的方法^[14]。TOPSIS法作为样本数据各评价指标加权处理的方法,可对多个属性的指标进行综合评价,对原始样本数据直接进行运算,有效地减少信息损失^[15]。灰色关联分析法是一种多因子统计分析方法,根据不同指标的多个属性与最差样本和最佳样本之间的关联度判断样本优劣,具有小样本、高可靠性的特点^[16-17]。

1.1 熵权法

假设有 m 个样本、 n 个评价指标,则初始矩阵 $X=[x_{ij}]_{m \times n}$, $x_{ij} > 0$ ($i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$)。为消除不同评价指标量纲差异,对初始矩阵标准化处理,得标准矩阵 $L=[l_{ij}]_{m \times n}$ 。

$$l_{ij} = \frac{\max_{1 \leq j \leq n} x_{ij} - x_{ij}}{\max_{1 \leq j \leq n} x_{ij} - \min_{1 \leq j \leq n} x_{ij}} \quad (1)$$

式中: $\max_{1 \leq j \leq n} x_{ij}$ 为第 j 个指标初始数据最大值;

$\min_{1 \leq j \leq n} x_{ij}$ 为第 j 个指标初始数据最小值。

第 j 个评价指标的熵值 N_j :

$$N_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m l_{ij} \ln l_{ij} \quad (2)$$

第 j 个评价指标权重 ω_j :

$$\omega_j = \frac{1 - N_j}{n - \sum_{j=1}^n N_j} \quad (3)$$

指标权重向量 W :

$$W = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n]^T \quad (4)$$

1.2 TOPSIS-灰色关联法模型

通过熵权法计算的指标权重向量 W 与标准化

$$k_{i(j)} = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} |p_{ij} - p_{0(j)}| + \lambda \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |p_{ij} - p_{0(j)}|}{|p_{ij} - p_{0(j)}| + \lambda \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |p_{ij} - p_{0(j)}|} \quad (8)$$

$$h_{i(j)} = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} |p_{ij} - p_{1(j)}| + \lambda \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |p_{ij} - p_{1(j)}|}{|p_{ij} - p_{1(j)}| + \lambda \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |p_{ij} - p_{1(j)}|} \quad (9)$$

式中: $\lambda=0.5$ 。

通过式(8)可以求出指标与 P_0 的灰色关联系数矩阵 $K = [k_{ij}]_{m \times n}$, 通过式(9)可以求出指标与 P_1 的灰色关联系数矩阵 $H = [h_{ij}]_{m \times n}$ 。

将矩阵 K 和 H 迭代作为优化初始决策矩阵, 计算优化负理想解 k_0^- 、优化正理想解 h_0^+ :

$$k_0^- = \min_{1 \leq i \leq m} k_{ij} = [k_0^-(1), k_0^-(2), \dots, k_0^-(n)] \quad (10)$$

$$h_0^+ = \min_{1 \leq i \leq m} h_{ij} = [h_0^+(1), h_0^+(2), \dots, h_0^+(n)] \quad (11)$$

计算矩阵 K 和矩阵 H 中第 i 个样本与 k_0^- 和 h_0^+ 的欧氏距离 d_i^- 和 d_i^+ :

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n [k_{ij} - k_0^-(j)]^2} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n [h_{ij} - h_0^+(j)]^2} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (13)$$

由式(8)计算 k_{ij} 到 k_0^- 关于第 j 个指标的优化灰色关联系数矩阵 $A = [a_{ij}]_{m \times n}$, 由式(9)计算 h_{ij} 到 h_0^+ 关于第 j 个指标的优化灰色关联系数矩阵 $B = [b_{ij}]_{m \times n}$ 。

第 i 个样本、第 j 个指标与 k_0^- 、 h_0^+ 的灰色关联度:

$$l_i^- = \sum_{j=1}^n \omega_j a_{ij} \quad (14)$$

初始矩阵相乘得加权决策矩阵 $P^{[18-19]}$:

$$P = [p_{ij}]_{m \times n} = [\omega_{ij} l_{ij}]_{m \times n} \quad (5)$$

确定各样本的初始负理想解 P_0 、初始正理想解

解 P_1 :

$$P_0 = \min_{1 \leq i \leq m} p_{ij} = [p_0(1), p_0(2), \dots, p_0(n)] \quad (6)$$

$$P_1 = \max_{1 \leq i \leq m} p_{ij} = [p_1(1), p_1(2), \dots, p_1(n)] \quad (7)$$

计算 p_{ij} 到 P_0 和 P_1 对于第 j 个指标系数 $k_{i(j)}$ 和 $h_{i(j)}$:

$$t_i^+ = \sum_{j=1}^n \omega_j b_{ij} \quad (15)$$

对欧式距离 d_i^- 、 d_i^+ 和灰色关联度 l_i^- 、 t_i^+ 规范化处理:

$$D_i^- = d_i^- / \sum_{i=1}^m d_i^- \quad (16)$$

$$D_i^+ = d_i^+ / \sum_{i=1}^m d_i^+ \quad (17)$$

$$T_i^- = t_i^- / \sum_{i=1}^m t_i^- \quad (18)$$

$$T_i^+ = t_i^+ / \sum_{i=1}^m t_i^+ \quad (19)$$

1.3 计算相对相似度

$$Y_i = \frac{\alpha D_i^- + \beta T_i^+}{(\alpha D_i^- + \beta T_i^+) + (\alpha D_i^+ + \beta T_i^-)} \quad (20)$$

式中: $\alpha = \beta = 0.5$ 。

将 Y_i 进行归一化处理, 即样本相对相似度:

$$\bar{Y}_i = Y_i / \sum_{i=1}^m Y_i \quad (21)$$

2 民用飞机 DMC 分配模型分析

2.1 民用飞机相似性评价指标

拥有良好维修性设计水平的民用飞机, 在研

制阶段可决定维修成本的 70%~80%。本文分析民用飞机设计参数,在参考文献[10-11]研究成果的基础上,建立飞机相似性指标层次图,如图 1 所示。其中飞机质量、座位数、发动机海平面起飞推力对民用飞机设计方案有很大的影响,进而对民用飞机 DMC 产生影响,是需关注的三大参数。

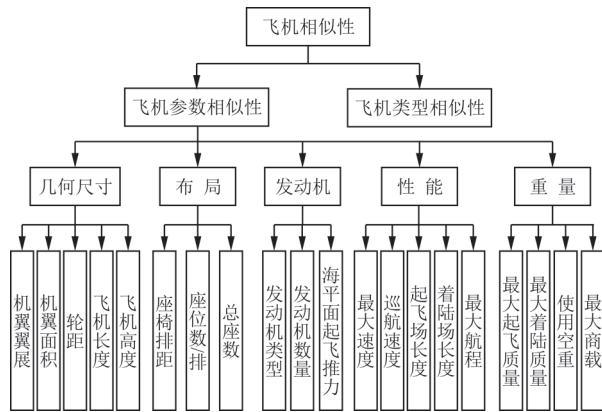


图 1 飞机相似性指标层次图

Fig. 1 Index hierarchy of aircraft similarity

2.2 民用飞机 DMC 分配模型

建立基于成本特征指标的飞机相似度评价指标层次图,首先通过熵权法确定评价指标权重,其次利用 TOPSIS 法对有多个属性的指标进行加权计算,得到各类似机型的最优解与最劣解,然后利用灰色关联法根据不同指标的多个属性与最佳样本和最差样本间的关联,计算类似机型加权关联度,最后归一化得出类似机型相对相似度,并根据飞机设计经验和成熟度,在技术背景相似的情况下,可以代表飞机的技术复杂程度,建立 DMC 分配模型,如图 2 所示。

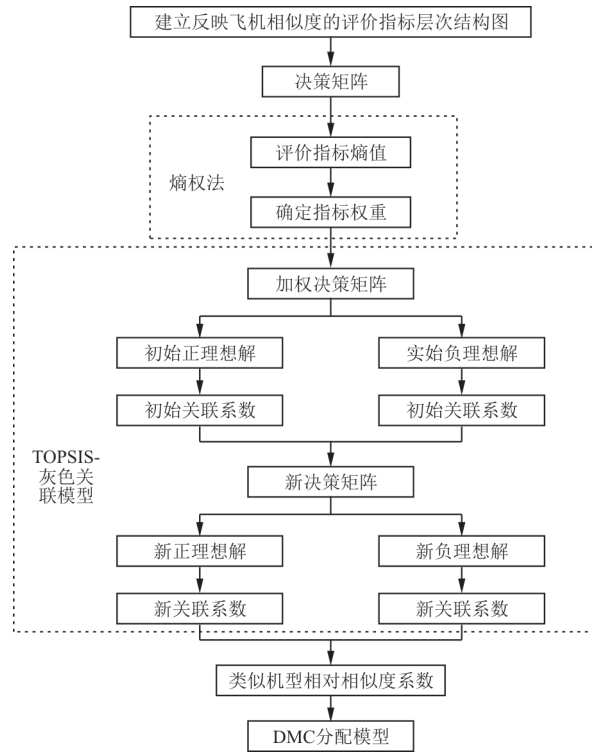


图 2 DMC 分配模型

Fig. 2 Allocation model of DMC

3 实例验证

3.1 类似机型相对相似度

飞机研制阶段对 DMC 分配,一般采用相似度法来分析目标机型 DMC,通过对现有相似机型进行筛选,避免机型间差距过大。从图 1 可以看出:民用飞机评价指标众多,结合工程设计经验,本文主要选取:最大起飞质量、使用空重、机长、机翼面积、发动机海平面起飞推力、座位数、最大航程和巡航速度指标。民用飞机维修成本数据由多个渠道获得:航空公司、文献和某些权威机构,筛选出有效数据进行案例分析,如表 1 所示。

表 1 类似机型评价参数指标

Table 1 Evaluation parameters of similar models

机 型	机翼面积/m ²	机身长度/m	座位数/个	海平面起飞推力/kN	最大航程/km	巡航速度/(km·h ⁻¹)	最大起飞质量/kg	使用空重/kg
类似机型 1	122.6	37.6	150	118.9	5 400	820	78 000	42 600
类似机型 2	93.1	37.1	115	97.9	2 600	840	49 940	32 100
类似机型 3	105.4	33.4	125	140.2	4 200	780	62 800	32 700
目标机型	80.6	33.5	90	87.9	3 700	820	40 500	24 955

以目标机型参数构成特征矩阵 A , 以类似机型参数构成特征矩阵 B , 模糊处理得到决策矩阵 M 。

$$M = \begin{bmatrix} 0.657 & 0.891 & 0.600 & 0.739 & 0.685 & 1.000 & 0.519 & 0.586 \\ 0.866 & 0.903 & 0.783 & 0.898 & 0.703 & 0.976 & 0.811 & 0.811 \\ 0.765 & 0.997 & 0.720 & 0.627 & 0.881 & 0.951 & 0.645 & 0.645 \end{bmatrix}$$

对决策矩阵进行归一化处理得标准矩阵 L :

$$L = \begin{bmatrix} 0.116 & 0.157 & 0.106 & 0.130 & 0.121 & 0.176 & 0.091 & 0.103 \\ 0.129 & 0.134 & 0.117 & 0.134 & 0.105 & 0.145 & 0.121 & 0.116 \\ 0.120 & 0.157 & 0.113 & 0.099 & 0.139 & 0.150 & 0.102 & 0.120 \end{bmatrix}$$

计算指标权重 W :

$$W = [0.127, 0.096, 0.140, 0.130, 0.129, 0.088, 0.151, 0.139]^T$$

基于 TOPSIS 模型计算得到的加权标准决策矩阵 P :

$$P = \begin{bmatrix} 0.015 & 0.015 & 0.015 & 0.017 & 0.016 & 0.016 & 0.014 & 0.014 \\ 0.016 & 0.013 & 0.016 & 0.017 & 0.014 & 0.013 & 0.018 & 0.016 \\ 0.015 & 0.015 & 0.016 & 0.013 & 0.018 & 0.013 & 0.015 & 0.017 \end{bmatrix}$$

各样本评价指标的初始负理想解 p_0 和初始正理想解 p_1 :

$$p_0 = [0.015, 0.013, 0.015, 0.013, 0.014, 0.013, 0.014, 0.014]$$

$$p_1 = [0.016, 0.015, 0.016, 0.017, 0.018, 0.016, 0.018, 0.017]$$

根据各指标系数得灰色关联系数矩阵:

$$K = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.559 & 1.000 & 0.403 & 0.539 & 0.503 & 1.000 & 1.000 \\ 0.514 & 1.000 & 0.531 & 0.378 & 1.000 & 1.000 & 0.333 & 0.530 \\ 0.749 & 0.558 & 0.613 & 1.000 & 0.355 & 0.874 & 0.591 & 0.455 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0.521 & 0.993 & 0.539 & 0.834 & 0.521 & 1.000 & 0.382 & 0.453 \\ 1.000 & 0.432 & 1.000 & 1.000 & 0.365 & 0.339 & 1.000 & 0.760 \\ 0.628 & 1.000 & 0.803 & 0.333 & 1.000 & 0.375 & 0.486 & 1.000 \end{bmatrix}$$

由灰色关联系数矩阵 K 和 H 分别求解优化负理想解 k_i^- 、优化正理想解 h_i^+ :

$$k_i^- = [0.514, 0.558, 0.531, 0.378, 0.355, 0.503, 0.333, 0.455]$$

$$h_i^+ = [1.000, 1.000, 1.000, 1.000, 1.000, 1.000, 1.000, 1.000]$$

各样本指标至 k_i^- 和 h_i^+ 的欧式距离:

$$d_i^- = [1.110, 0.930, 0.810]$$

$$d_i^+ = [1.170, 1.100, 1.130]$$

各样本指标与 k_i^- 和 h_i^+ 的加权关联系数:

$$t_i^- = [0.400, 0.400, 0.400]$$

$$t_i^+ = [0.540, 0.740, 0.650]$$

各类似机型的相对相似度:

$$\bar{Y}_i = [0.320, 0.350, 0.330]$$

3.2 民用飞机 DMC 分配分析

从维修单位和运营单位收集到的维修成本数据具有相对真实性,能够反映出飞机在相对特定的运营环境中由管理水平和设计水平所决定的经

济性。由于维修成本数据收集困难,本文并未覆盖民用飞机所有系统和结构^[20],而是选择故障后影响适航性、维护任务相对较多的系统作为分析对象,如空调系统(ATA21)、飞行操纵系统(ATA27)、燃油系统(ATA28)、液压系统(ATA29)、起落架系统(ATA32)、辅助动力装置(ATA49)。

由类似机型所预测的新机型各系统 DMC 如表 2 所示。并与实际值进行对比,发现预测值普遍比实际值小,如图 3 所示,可以看出:空调系统,使用频繁,运营环境质量不佳时,维修任务增多,维修成本增加,但成熟机型或借鉴相似机型先进设

计经验,将空调系统设备航线可更换单元划分更为合理,维修成本会有所降低;起落架系统,维修任务较多,该系统中的时寿件较多,需定期更换零部件,各种精密元件需专门的维修技术,维修成本高,且起落架系统的零部件更换频率与飞行机组的操作关联度较大,造成预测值与实际值误差偏大,因此,对于这类维修,可选择送修的方式来提高飞机经济性;飞行操纵系统,不同机型控制方式不同,如电传操纵和机械操纵,系统设备的可靠性和维修性差别较大,计算结果误差大,随着高新技术的引进,可选择可靠性逐渐提升的电传操纵系统,减少飞机维修成本,同时降低飞机重量;燃油系统和液压系统,各机型在设计形式上差距不大,零部件可靠性高,计算结果误差相对较小;辅助动力装置(Auxiliary Power Unit,简称APU),维修间隔较长,且APU与多个系统连接,维修技术要求高,拆装一次所需的时间长、费用高,维修成本误差较大,因此,应将零部件布置在可达性较好的位置,减少维修任务,降低维修成本。

表2 系统级DMC
Table 2 DMC of system level

机型	DMC/(美元·飞行小时 ⁻¹)					
	ATA21	ATA27	ATA28	ATA29	ATA32	ATA49
机型1	9.6	18.6	1.9	2.5	36.1	15.2
机型2	8.2	15.8	1.5	2.2	37.9	12.9
机型3	9.1	17.2	2.2	2.8	35.8	14.1
新机型 (预测)	8.9	17.2	1.9	2.5	36.6	14.1

与文献[21]的功能分解法计算结果进行对比,如图3~图4所示。

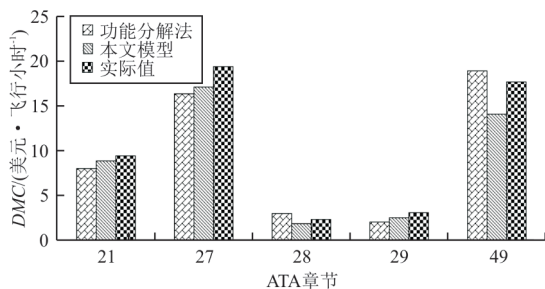


图3 模型计算值与实际值对比
Fig. 3 Comparison of model calculated value and actual value

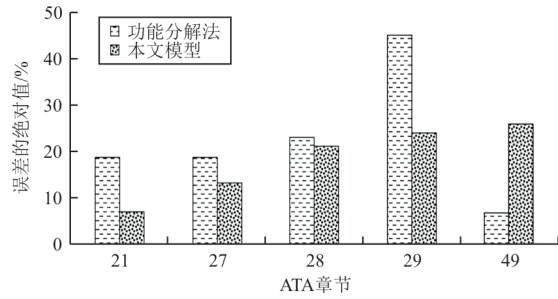


图4 不同模型计算误差的绝对值
Fig. 4 Absolute value of the prediction errors of different models

通过与实际值对比,本文模型计算值误差普遍低于20%,而功能分解法计算误差普遍高于20%,除ATA49偏高外,因此本文模型计算结果更为准确。功能分解法的评价过程受评价者主观原因的影响,容易出现偏差,影响结果的客观性,而本文通过TOPSIS-灰色关联法建立DMC分配模型,避免了人的主观影响,且模型综合考虑了机翼面积和飞机质量等反映飞机成本特征的参数,使得预测结果更准确。

4 结论

(1) 本文从民用飞机研制阶段对直接维修成本进行分析与控制,构建了民用飞机设计参数组合指标权重评价模型,提供了详细的类似机型相对相似度计算方法。

(2) 本文建立了新研机型直接维修成本分配模型,利用类似机型数据进行验证,可为新研机型直接维修成本分配分析工作提供一定的参考。

参考文献

[1] MAPLE M. Understanding maintenance costs for new and existing aircraft[J]. *Airline Fleet and Asset Management*, 2001, 2(5): 56-62.

[2] 梁剑,左洪福. 民用飞机维修成本评估[J]. *交通运输工程学报*, 2002, 2(4): 95-98.
LIANG Jian, ZUO Hongfu. Evaluation of maintenance cost for commercial aircraft[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2002, 2(4): 95-98. (in Chinese)

[3] 黄艳,蔡景,代定强,等. 基于可靠性、维修性和测试性的民用飞机供应商选择[J]. *航空工程进展*, 2021, 12(2): 136-142,156.
HUANG Yan, CAI Jing, DAI Dingqiang, et al. Civil aircraft supplier selection based on reliability, maintainability and testability[J]. *Advances in Aeronautical Science and En-*

- gineering, 2021, 12(2): 136-142,156. (in Chinese)
- [4] HAYES S. Reduced maintenance costs for the 737-600/-700/-800/-900 family of airplane [EB/OL]. (2015-10-03) [2021-02-19]. <https://www.docin.com/p-1307676922.html>.
- [5] SCANLAN J, HIL T, MARSH R, et al. Cost modelling for aircraft design optimization [J]. Journal of Engineering Design, 2002, 13(3): 261-269.
- [6] SALONEN A, DELERYD M. Cost of poor maintenance: a concept for maintenance performance improvement [J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2011, 17(1): 63-73.
- [7] FRITZSCHE R. Cost adjustment for single item pooling models using a dynamic failure rate: a calculation for the aircraft industry [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2012, 48(6): 1065-1079.
- [8] WU H, LIU Y, DING Y, et al. Methods to reduce direct maintenance costs for commercial aircraft [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2004, 76(1): 15-18.
- [9] 吴静敏, 左洪福. 基于案例推理的直接维修成本预计方法 [J]. 航空学报, 2005, 31(2): 190-194.
WU Jingmin, ZUO Hongfu. New method for direct maintenance cost estimating by using CBR [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 31(2): 190-194. (in Chinese)
- [10] 陈晓川, 李晴. 大飞机全生命周期成本估算方法和控制策略研究 [J]. 机械设计, 2010, 27(5): 1-7.
CHEN Xiaochuan, LI Qing. Research on life cycle cost estimation method and control strategy methods of big aircraft [J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(5): 1-7. (in Chinese)
- [11] HONG S, ZENG Y N. A health assessment framework of lithium-ion batteries for cyber defense [J]. Applied Soft Computing, 2021, 101: 107067.
- [12] HONG S, YUE T Y, LIU H. Vehicle energy system active defense: a health assessment of lithium-ion batteries [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2020, 115: 1-19.
- [13] 李稷, 胡挺. 基于成本的民用飞机可靠性与安全性一体化设计 [J]. 航空工程进展, 2021, 12(3): 121-129.
LI Ji, HU Ting. Integrated design of civil aircraft reliability and safety based on cost [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(3): 121-129. (in Chinese)
- [14] 胡珊, 刘晶. 模糊综合评价法在产品设计方案决策中的应用 [J]. 机械设计, 2020, 37(1): 135-139.
HU Shan, LIU Jing. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in product design scheme decision [J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(1): 135-139. (in Chinese)
- [15] 王杰, 李占玲. 基于熵权的 TOPSIS 综合评价法在大气环流模式优选中的应用 [J]. 南水北调与水利科技, 2020, 33(3): 1-15.
WANG Jie, LI Zhanling. Best alternative selection of general circulation models based on the entropy weighted TOPSIS method [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 33(3): 1-15. (in Chinese)
- [16] 王义保, 杨婷惠, 王世达. 基于组合赋权和灰色关联的城市公共安全感评价 [J]. 统计与决策, 2019, 35(18): 45-50.
WANG Yibao, YANG Tinghui, WANG Shida. Evaluation on urban public security sense based on combined weighting and grey correlation [J]. Statistics & Decision, 2019, 35(18): 45-50. (in Chinese)
- [17] 张金亨, 董艳超, 方斌. 基于灰色关联法的耕地后备资源供需耦合分析 [J]. 地域研究与开发, 2020, 39(1): 163-167, 174.
ZHANG Jinteng, DONG Yanchao, FANG Bin. Coupling analysis of supply and demand of cultivated land reserve resource based on gray correlation method [J]. Areal Research and Development, 2020, 39(1): 163-167, 174. (in Chinese)
- [18] 孙国营, 陕振沛, 孙新杰, 等. 基于 TOPSIS-灰色关联方法的水资源配置评价模型研究 [J]. 节水灌溉, 2019(7): 68-76.
SUN Guoying, SHAN Zhenpei, SUN Xinjie, et al. Research on water resources allocation evaluation model based on TOPSIS-gray correlation method [J]. Watering Saving Irrigation, 2019(7): 68-76. (in Chinese)
- [19] 张宁, 李青, 李闯将, 等. 基于极限学习机和熵值法的岩土灾变预警 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19(33): 251-258.
ZHANG Ning, LI Qing, LI Chuangjiang, et al. Rock and soil catastrophe early warning research based on extreme learning machine and entropy method [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(33): 251-258. (in Chinese)
- [20] 刘余, 刘昕, 张继斌, 等. 民用飞机结构非计划直接维修成本预计研究 [J]. 航空工程进展, 2019, 10(3): 407-412, 422.
LIU Yu, LIU Xin, ZHANG Jibin, et al. Study on unscheduled direct maintenance cost of civil aircraft structure [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(3): 407-412, 422. (in Chinese)
- [21] 毕翠霞, 徐峻, 魏法杰. 基于价值工程的民用飞机维修目标成本分配 [J]. 工业工程, 2012, 15(2): 105-108.
BI Cuixia, XU Jun, WEI Fajie. Value-engineering-based target cost allocation in civil aircraft maintenance [J]. Industrial Engineering Journal, 2012, 15(2): 105-108. (in Chinese)

作者简介:

刘彦波(1992—),男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机维修工程分析、民用飞机维修性设计。

郑蓝(1984—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机维修工程分析、民用飞机维修性设计和飞机维修培训。

贾宝惠(1971—),女,硕士,教授。主要研究方向:民用飞机维修工程分析。

(编辑:马文静)