

基于改进 TOPSIS 的航空发动机 维修性评估方法

詹湘琳¹, 舒龙诚¹, 刘涛¹, 樊智勇²

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300;

2. 中国民航大学 工程技术训练中心, 天津 300300)

摘要: 针对民用航空发动机维修性设计方案优选时缺少对定量指标评估的问题, 提出一种基于改进 TOPSIS 的维修性评估方法; 该方法首先根据民用航空发动机的设计准则、相关维修标准和持续适航的约束, 构建定性的维修性指标体系和定量的维修性指标体系; 以层次分析法和熵权法相结合的方式确定各指标的权重系数; 通过建立虚拟仿真维护环境计算出各定量指标, 在此基础上, 运用改进 TOPSIS 法对航空发动机不同维修性设计方案的维修性进行综合评估; 实验验证提出的方法能够得出最佳的维修性设计方案, 可为民用航空发动机的维修性评估提供参考。

关键词: 航空发动机; 维修性评估; 定性指标; 定量指标; TOPSIS

Maintainability Evaluation Method of Aero-engine Based on Improved TOPSIS

ZHAN Xianglin¹, SHU Longcheng¹, LIU Tao¹, FAN Zhiyong²

(1. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Engineering Technology Training Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at the problem of lack quantitative index evaluation in the optimization of maintainability design scheme of civil aero-engine, a maintainability evaluation method based on improved technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) is proposed. Firstly, the qualitative and quantitative maintainability index systems are constructed according to the design criteria of civil aero-engine, relevant maintenance standards and constraints of continuous airworthiness. The weight coefficient of each index is determined by the combination of analytic hierarchy process and entropy weight method. The quantitative indicators can be calculated by the establishment of virtual simulation maintenance environment, On the basis, the improved TOPSIS method is used to comprehensively evaluate the maintainability of different maintenance schemes of aero-engine. The experimental results show that the proposed method can obtain the best maintainability design, which can provide a reference for the maintainability evaluation of civil aero-engine.

Keywords: aero-engine; maintainability evaluation; qualitative indicators; qualitative indicators; TOPSIS

0 引言

维修性是指在给定条件下, 使用所述的程序和资源实施维修时, 产品在给定的使用条件下保持或恢复能完成要求的功能状态的能力^[1]。产品在维修性设计过程中的目标是实现能快速维修和经济维修, 特别是在安全维修的条件下能够缩短维修时间^[2]。民用航空发动机是飞机的重要组成部分, 维修的成本也十分昂贵, 在整个飞机维修工作中具有很高的比重^[3]。对于维修频次比较高的民用航空发动机而言, 如何科学有效的进行维修性评估, 选择出最佳

的航空发动机的维修性设计方案存在较大困难。

在对民用航空发动机进行维修性评估时, 建立维修性指标体系是重要一环。目前关于民用航空发动机的维修性指标的综合评估主要是以定性指标为主, 缺少对定量指标评估的数学模型, 对航空发动机的维修性设计方案的优选产生了严重的影响。文献 [4] 通过对航空发动机推力结构的设计的不同进行维修性分析。运用虚拟维修技术建立虚拟样机模型, 在虚拟维护环境下模拟真实的维修过程, 并以虚拟人体模型对航空发动机的推力结构的设计进行维修活动的仿真, 最终得出采用 O 型导管的反推器比采用 D

收稿日期: 2022-11-24; 修回日期: 2023-01-04。

基金项目: 中央高校基本科研业务费(3122022060)。

作者简介: 詹湘琳(1976-), 女, 博士, 副教授。

樊智勇(1979-), 男, 硕士, 副教授。

引用格式: 詹湘琳, 舒龙诚, 刘涛, 等. 基于改进 TOPSIS 的航空发动机维修性评估方法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(9): 310-316.

型导管的反推器具有较好的维修性。文献 [5] 引入动作捕捉系统对民机的维修性进行评估, 通过搭建虚拟维修的场景, 添加需要维修的 3-D 数字样机模型, 真实的人运用动作捕捉系统控制虚拟仿真环境下的虚拟人体模型进行维修拆卸活动, 并根据评估的准则为民机的维修性设计提出合理的意见。文献 [6] 通过运用虚拟现实技术来对航空发动机的维修性的关键技术进行讨论, 解决了传统物理样机制造周期长、成本高和后期难以修改的局面, 提出的虚拟维修技术对航空发动机的维修难度的评估能够在设计前期找到维修性设计的问题。文献 [7] 采用了层次分析法 (AHP) 与模糊评判理论相结合的方法对舰艇的维修性进行定量的评估, 此评估方法运用层次分析法确定指标的权重, 并将影响维修性的因素进行逐层分解, 能够得出不同方案之间维修性水平的差别。文献 [8] 采用了逼近理想排序法 (TOPSIS, technique for order preference by similarity to an Ideal solution) 对装备维修性定性指标进行综合量化评价研究, 并利用熵权法确定各指标权重。此评估方法确定指标的权重主要依靠了客观的数据, 而且评估的结果与基于虚拟样机的评估结果相同。文献 [9] 运用 TOPSIS 方法对发动机的性能质量进行评估, 通过计算方案与理想解之间的欧式距离, 得到用于方案排序的贴近度。但当方案关于理想解的欧式距离的连线对称时, 就无法比较方案的优劣。而且 TOPSIS 法不能有效的剔除冗余指标对评价结果造成的影响^[10]。但灰色关联度分析算法能消除冗余指标的影响。

基于上述研究, 对于民用航空发动机这一评估对象, 在所建立的维修性指标体系中, 维修性指标体系中不仅应有维修性定性指标, 也应有维修性定量指标。单一的运用层次分析法或熵权法来确定权重往往会难以符合实际情况, 从而导致 TOPSIS 法的评估结果的准确度不够精确。因此, 本文运用改进 TOPSIS 的方法对航空发动机的维修性进行综合评估。首先利用组合赋权法改进传统 TOPSIS 法中各维修性指标的权重, 其次, 引入灰色关联度理论改进 TOPSIS 法, 将灰色关联度分析算法计算的灰色关联度与 TOPSIS 法计算的欧式距离集合, 得到相对贴近度。根据相对贴近度的大小, 对各备选方案进行排序。

1 TOPSIS 方法

TOPSIS 法是一种多属性决策分析方法^[11], 主要是通过有限个评估指标与理想目标的接近程度来进行排序。若评估分析的对象与理想的系统非常接近, 则该系统为最优系统, 从而确定最优方案。TOPSIS 法的算法流程如下:

假设共有 m 个评估方案, n 个指标数, x_{ij} 为第 i 个评估方案中第 j 个指标的原始值, 其中, $i=1, 2; \dots; j=1, 2, \dots, n$, 可以得到初始化评估矩阵。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.1 规范化评估矩阵

为了消除各指标量纲的不同对方案决策带来的影响, 因此需要对初始化的矩阵进行无量纲化处理, 以此便于分析评估^[12]。当对各指标进行规范化处理时, 不同类型指标的规范化方法不一样, 其具体方法如下:

1) 当指标的类型为效益型时, 指标的值越大对评估的结果越有利:

$$y_{ij} = \begin{cases} y_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}^{\min}}{x_{ij}} & (\text{当各方案的任一指标值不同时}) \\ \frac{x_{ij}}{x_{ij}^{\max}} & (\text{当各方案的任一指标值都相同时}) \end{cases}$$

其中:

$$x_{ij}^{\min} = \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}, x_{ij}^{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} \quad (2)$$

2) 当指标的类型为成本型时, 指标的值越小对评估的结果越有利:

$$y_{ij} = \begin{cases} y_{ij} = 1 - \frac{x_{ij}}{x_{ij}^{\max}} & (\text{当各方案的任一指标值不同时}) \\ \frac{x_{ij}^{\min}}{x_{ij}} & (\text{当各方案的任一指标值都相同时}) \end{cases}$$

其中:

$$x_{ij}^{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}, x_{ij}^{\min} = \min_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} \quad (3)$$

1.2 单位化评估矩阵

$$z_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m y_{ij}^2}}, i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

1.3 确定正负理想方案

确定各因素影响的正理想解方案 Z^+ 与负理想解方案 Z^- :

$$Z^+ = \{ \max_{1 \leq i \leq m} z_{ij} \} = [z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+] \quad (5)$$

$$Z^- = \{ \min_{1 \leq i \leq m} z_{ij} \} = [z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-] \quad (6)$$

1.4 计算各方案到正负理想解之间的距离

根据各指标权重 $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$, 通过将每个方案和正负理想方案的距离进行计算得出:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (z_{ij} - z_{ij}^+)^2} \quad (7)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (z_{ij} - z_{ij}^-)^2} \quad (8)$$

其中: D_i^+ 和 D_i^- 分别为方案到正负理想解方案之间的距离。

1.5 计算各方案的综合距离

$$S_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (9)$$

根据计算得到 S_i 的大小, 可以对各方案进行排序, S_i 的值越大, 则各方案越接近理想方案。

通过上述 TOPSIS 方法的算法流程可知。在步骤 (4) 中, TOPSIS 方法对于指标权重的确定往往只采用层次分析法或熵权法确定权重。而层次分析法主要是采用专家经验

对各指标进行权重的赋值, 主观性比较强。选取专家的数量不同, 权重就会有所差异。熵权法主要是根据指标本身的属性及特点来确定权重, 客观性比较强。选取的样本数据过小时, 指标权重的确定就会出现偏差。从而导致各备选方案的排序往往会出现偏差。而且传统 TOPSIS 方法对各方案与理想方案之间关于指标对方案影响差别程度的区分不够详细^[13], 往往也会导致评估的结果不够准确。而灰色关联度能够分析各方案中指标之间的关联程度和相似度, 评估的结果往往与预设的最优方案相一致。因此, 为了解决传统 TOPSIS 方法评估结果的准确性问题, 采用组合赋权法和灰色关联度改进 TOPSIS 方法对于各维修性设计方案的排序往往能够取得理想的效果。

2 改进的 TOPSIS 方法

对民用航空发动机进行维修性综合评估, 确定权重是关键的问题之一。为了使维修性评估结果更具准确性, 在对维修性定性指标体系和维修性定量指标体系进行综合评估时, 运用组合赋权法对各指标进行赋权往往是比较理想的。该方法是结合层次分析法^[14]计算的权重值和熵权法^[15]计算的权重值进行线性组合的一种方法。在确定权重方面往往能消除专家带来的主观因素和数据样本大小带来的客观因素的影响。因此, 为了保障民用航空发动机维修性评估结果的准确性, 采用组合赋权法来确定维修性定性指标和定量指标的权重。并且为了使各维修性设计方案中指标之间的关联程度和相似程度更容易分析, 运用灰色关联度来弥补 TOPSIS 方法的这一缺陷^[16], 其改进 TOPSIS 流程如图 1 所示。

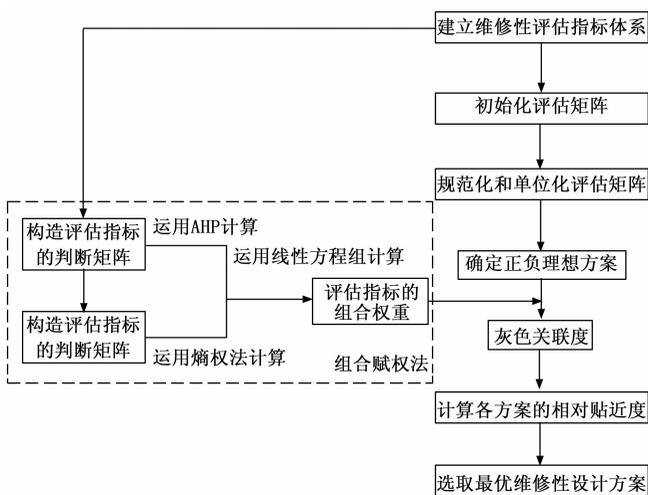


图 1 改进 TOPSIS 算法计算流程

2.1 组合赋权法

该方法能够较好的利用专家对指标的评价因子的偏好确定权重, 能够比较合理的确定指标的重要性, 也能够根据研究系统指标的实际数据来确定权重, 避免人为因素的影响。在确定航空发动机的维修性评估指标权重值时, 能

达到在权重确定上的主观和客观的统一, 使量化的结果更符合实际^[17]。具体步骤为:

1) 首先按照系统的结构特点将复杂的问题通过层次结构来简化, 并对复杂决策问题的本质、影响因素以及内在关系进行深入分析, 将指标体系分为目标层、准则层和指标层。并通过专家的知识以及经验分析各指标的重要程度, 由此构造判断矩阵 A , 运用 AHP 计算出各评估指标的主观权重 $\omega_1 (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ 。

2) 根据系统的实际数据来确定权重, 运用系统所得数据构建具有 m 个事物, n 个评估指标的判断矩阵: $S = (s_{ij})_{m \times n}, i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。

3) 对判断矩阵进行归一化处理, 得矩阵 $T, T = (t_{ij})_{m \times n}, i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。 T 中各指标可以使用归一化的公式为:

$$t_{ij} = \frac{S_{ij}}{\sum_{i=1}^m S_{ij}} \quad (10)$$

4) 依据熵的基本定义, 求各指标的信息熵 E_j 。

$$E_j = -\frac{\sum_{i=1}^m (t_{ij} \ln t_{ij})}{\ln m} \quad (11)$$

5) 计算差异性系数 f_j 。

$$f_j = 1 - E_j \quad (12)$$

6) 确定评估指标的客观权重 β_j 。

$$\beta_j = \frac{f_j}{\sum_{j=1}^n f_j} \quad (13)$$

运用熵权法计算出各评估指标的客观权重为 $\omega_2 (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ 。

7) 采用矩阵微分性质等价变换为最优化一阶导数条件的线性方程组:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T & \omega_1 \omega_2^T \\ \omega_2 \omega_1^T & \omega_2 \omega_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \omega_1^T \\ \omega_2 \omega_2^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中: $\omega_1 (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ 为层次分析法算出的权重值, $\omega_2 (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ 为熵权法算出的权重值。 λ_1 和 λ_2 为要求的线性组合系数。对 λ_1 和 λ_2 进行归一化处理得到组合赋权的综合表达式为:

$$\omega = \frac{\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \omega_1^T + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \omega_2^T + \frac{\sqrt{\omega_1 \omega_2}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{\omega_1 \omega_2^T}} + \eta \omega_1^T + (1 - \eta) \omega_2^T}{3} \quad (15)$$

式中, η 为主观权重的偏好系数, 且 $0 \leq \eta \leq 1$, 通常取为 0.6。

对于维修性指标权重的确定方法可知, 组合赋权法不仅能够消除主观因素的影响, 也能避免受到样本随机误差和样本容量大小的影响, 使不重要的指标权重会偏大的结果。为了使维修性评估的结果更加准确, 消除 TOPSIS 中

各方案距离理想方案更近的同时与负理想解的距离也近的问题, 引入灰色关联度重新定义新的贴近度的公式往往能够解决排序结果不合理的缺陷。

2.2 灰色关联度

灰色关联度法是根据方案之间的相似度来判定它们的关联程度, 是在对每个方案的各影响因素进行比较的基础上给出关联度的。能够使各备选方案与理想方案在曲线形状上的一致性。其计算过程是在 TOPSIS 方法的基础上形成一种新的相对贴近度计算方式, 其计算过程如下:

1) 计算各方案与正负理想解方案的灰色关联度系数 ξ_{ij}^+ 和 ξ_{ij}^- [18-20]。

$$\xi_{ij}^+ = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} |z_j^+ - z_{ij}| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |z_j^+ - z_{ij}|}{|z_j^+ - z_{ij}| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |z_j^+ - z_{ij}|} \quad (16)$$

$$\xi_{ij}^- = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} \min_{1 \leq j \leq n} |z_j^- - z_{ij}| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |z_j^- - z_{ij}|}{|z_j^- - z_{ij}| + \rho \max_{1 \leq i \leq m} \max_{1 \leq j \leq n} |z_j^- - z_{ij}|} \quad (17)$$

式中, ρ 为分辨系数, 在 (0, 1) 内取值, 当 ρ 越小, 关联系数间差异越大, 区分能力越强, 通常 ρ 取 0.5。 Z^+ 为正理想解方案, Z^- 为负理想解方案, z_{ij} 为单位化的评估矩阵。

2) 计算各方案与正负理想解方案的灰色关联度 R^+ 和 R^- 。

$$R^+ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \xi_{ij}^+ \quad (18)$$

$$R^- = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \xi_{ij}^- \quad (19)$$

3) 分别对所求的正负理想解的距离和灰色关联度进行规范化处理:

$$L_i^+ = \frac{D_i^+}{\max_{1 \leq i \leq m} D_i^+}, L_i^- = \frac{D_i^-}{\max_{1 \leq i \leq m} D_i^-} \quad (20)$$

$$H_i^+ = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} R^+}{R^+}, H_i^- = \frac{\min_{1 \leq i \leq m} R^-}{R^-} \quad (21)$$

式中, D_i^+ 和 D_i^- 分别为方案到正负理想解方案之间的距离。

对规范化后的正负理想解的距离和灰色关联度进行线性加权融合:

$$G_i^+ = \alpha L_i^+ + \beta H_i^+ \quad (22)$$

$$G_i^- = \alpha L_i^- + \beta H_i^- \quad (23)$$

式中, α 和 β 为决策者对正负理想解的距离和灰色关联度的偏好程度, 通常 $\alpha + \beta = 1$, 取 α 和 β 的值都为 0.5。

计算各方案的相对贴近度为:

$$C_i = \frac{G_i^+}{G_i^+ + G_i^-} \quad (24)$$

根据计算得到 C_i 的大小, 可以对各方案进行排序, C_i 的值越大, 则各方案越接近理想方案。

3 评估结果的验证与分析

3.1 航空发动机维修性指标体系的构建

对于民用航空发动机而言, 维修性评估主要是针对维修性定性指标和维修性定量指标。选取一种适宜的维修性

指标体系的构建方法尤为重要, 目前常用的方法有属性分类法、分析法、综合法、目标层次法、德尔菲法等 [21]。本文依据 GJB/Z 91-97 《维修性设计技术手册》给出了维修性设计的一般要求, 并结合航空发动机维修性验证的情况下, 以目标层次法来建立航空发动机的维修性指标体系。为了使评估的结果更加合理化, 指标体系越理想, 评估的结果就会越贴近实际的情况。因此, 维修性评估指标体系的建立 [22] 主要依据五个基本原则: (1) 遵从科学性原则; (2) 遵从系统性原则; (3) 遵从可操作性原则; (4) 遵从准确性原则; (5) 遵从层次性原则。在建立了维修性评估指标体系之后, 需要通过这些指标确定最佳的维修性设计方案。

本文以某型飞机的航空发动机来展开维修性评估, 针对航空发动机体积大、元器件结合较紧密、结构复杂、工作环境苛刻和维修环境复杂的情况, 维修过程中应尽量减少平均维修时间、拆卸航空发动机单元数量, 降低维修的可达性难度, 提高维修人员的安全性, 同时使维修物资的使用量最少。因此, 依据航空发动机维修的特点和维修环境的复杂情况, 维修性定性指标体系的建立如表 1 所示。维修性定量指标体系的建立如表 2 所示。

表 1 航空发动机维修性定性指标体系

目标层	准则层	指标层
维修性评估定性指标体系	简化性 U_1	简化功能 U_{11}
		减少零部件的品种 U_{12}
	标准化与互换性 U_2	易损件的标准化程度 U_{21}
		结构模块化程度 U_{22}
		互换性和通用化程度 U_{23}
	防差错与识别性 U_3	发生差错能及时发现的能力 U_{31}
		容错性 U_{32}
		设置识别标志 U_{33}
	安全性 U_4	维修人员安全性 U_{41}
		维修项目中安全点的比例 U_{42}
维修危险部位的可报警能力 U_{43}		

3.2 实验平台及实验目的

3.2.1 虚拟人体模型的构建

要对民用航空发动机的电子控制器的维修性进行评估, 虚拟人体模型的建立是非常重要的一环, 在虚拟维修任务的仿真环境下, 虚拟人的主要作用是用于代替真实维修人员进行维修过程的仿真。虚拟人体模型的创建主要依据中国标准化研究院人类工效学实验室的数据, 其建立的人体模型要不少于 50 个关节, 不少于 90 个自由度。并且为了使虚拟人满足虚拟环境下的维修性分析和评估, 所建立的虚拟人的身材尺寸通常以 95% 的百分位 (身高为 179.74 cm, 体重为 71.07 kg) 来建立。图 2 给出了 5 种百分位的虚拟人体模型。

3.2.2 虚拟样机模型的建立

虚拟维修样机的建立不仅需要在外形和实际的物体有逼

表 2 航空发动机维修性定量指标体系

目标层	准则层	指标层
维修性评估定量指标体系	可达性 V_1	视野可达性 V_{11}
		手和工具可达性 V_{12}
	人因工程 V_2	维修人员舒适性 V_{21}
		维修人员耐久性 V_{22}
	维修时间参数 V_3	平均修复时间 V_{31}
		主要部件更换时间 V_{32}
		恢复功能用的任务时间 V_{33}
	维修工时参数 V_4	平均维修时间 V_{34}
		维修事件平均直接维修工时 V_{41}
	维修人素参数 V_5	维修活动平均直接维修工时 V_{42}
		维修人员能量消耗 V_{51}
		维修人员力量要求 V_{52}
		维修人员疲劳恢复时间 V_{53}
	其他参数 V_6	每次维修的平均维修费用 V_{61}
拆卸单元数量 V_{62}		
维修物资使用量 V_{63}		
维修频次 V_{64}		

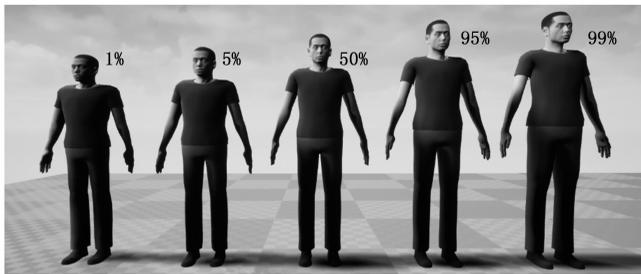


图 2 不同百分位的虚拟人体模型

真的相似度，而且还需要保留维修仿真所需要的模型结构^[23]。对于一架民机而言，建立整架飞机的虚拟样机模型往往比较困难，而且跟评估对象无关的模型用处往往也不大，因此，对于虚拟样机的模型需要删除不必要的部件，保留需要进行维修性评估的一部分。

航空发动机通常是一个由多零件、多系统组成的复杂装配体。通常采用零件树分析法构建航空发动机的三维模型，首先将航空发动机的整体部分进行合理的划分，按照自顶向下的原则分为系统—部件—零件的层次。采用 CATIA 三维建模软件搭建航空发动机的虚拟样机模型，对于需要进行维修任务仿真的零部件，其零部件相互连接的部分，保证其形状和尺寸的大小一致，管路和线路建模时能够形成简单的装配体。

构建航空发动机虚拟样机模型后，为了使零部件能够正确的拆装维修，维修工具虚拟模型的建立在虚拟仿真环境下是非常重要的，对维修对象而言，维修工具是对维修对象进行操作的媒介。在对民用航空发动机进行维修任务仿真时，通常需要的维修工具有工具架、扳手、钳子、螺丝刀、十字镐、运输托架和运输小车等等。

通过结合某型民用航空发动机电子控制器维修性设计阶段的虚拟样机模型^[24]，将航空发动机电子控制器的维修性设计方案转化为虚拟样机模型。并将航空发动机电子控制器的固定方式和连接方式进行重新设计，让其固定在航空发动机上端 a 位置、中端 b 位置和下端 c 位置形成三种维修性设计方案如图 3 所示。

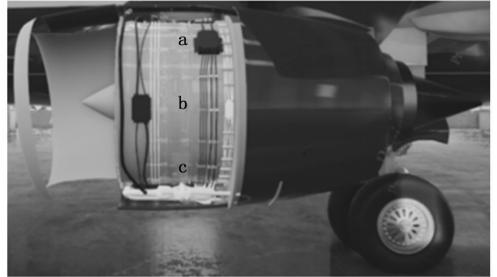


图 3 航空发动机维修性设计方案

3.2.2 航空发动机虚拟维修任务仿真

首先运用 makereal3D 软件对虚拟样机中航空发动机的三种维修性设计方案中的电子控制器的七个接头进行设定维修任务仿真分析，第一步拆卸风扇整流罩舱门，从风扇壳体插座上断开用于内化插孔的电插头，并在电插头上放置保护盖，然后拆卸防冰活门，将连接在电子控制器上的冷却空气管道的卡箍和预成型软管进行拆卸。最后拆下进气整流罩连接到发动机安装边上的螺栓、垫圈和螺帽。第二步拆卸电子控制器通道 A 的电线束，首先从吊架接线盒上断开电插头，打开电线束连接到支架上的弹簧锁卡箍和线路固定夹。然后从线路固定夹上拆下橡胶支架，并拆下连接到支架上的螺栓，打开点火激励器上的弹簧锁卡箍拆下线束。第三步拆卸点火器旁的螺栓、卡箍和止动凸耳，并断开电插头，在电插头上放置保护盖。不同的航空发动机设计方案的固定方式和连接方式不同其拆卸的顺序和步骤会有所区别，因此得出三种维修性设计方案指标的数据也会有所不同。以维修过程中指标层的手和工具可达性为例分析，运用 makereal3D 虚拟仿真软件，仿真软件的仿真界面如图 4 所示。形成的可达性包络图如图 5 所示，所得到的指标数据为 5/7。同理，根据仿真结果，可以得出维修性



图 4 维修任务人机分析界面

定量指标中平均修复时间、维修人员能量消耗、维修人员力量要求、维修人员疲劳恢复时间、拆卸单元个数和维修物资使用量参数的值。而维修性定性指标和其他指标主要通过专家进行评定, 将维修性定性指标值的结果分为差 (1~3 分)、中 (4~6 分) 和优 (7~10 分), 最终得出三种维修性设计方案的各维修性指标的数据如表 3 所示。



图 5 可达性包络图

表 3 维修性设计方案各指标参数

评估指标	指标类型	方案		
		a	b	c
简化功能(10)	定性-效益	7	7	7
减少零部件的品种(10)	定性-效益	6	6	6
易损件的标准化程度(10)	定性-效益	6	6	6
结构模块化程度(10)	定性-效益	8	8	8
互换性和通用化程度(10)	定性-效益	7	7	7
发生差错能及时发现的能力(10)	定性-效益	4	8	7
容错性(10)	定性-效益	6	7	6
设置识别标志(10)	定性-效益	9	8	7
维修人员安全性(10)	定性-效益	6	8	7
维修项目中安全点的比例(1)	定性-效益	0.6	0.8	0.7
维修危险部位的可报警能力(10)	定性-效益	8	7	6
视野可达性(10)	定量-效益	8	9	7
手和工具可达性(1)	定量-效益	2/7	6/7	5/7
维修人员舒适性(10)	定量-效益	7	9	5
维修人员耐久性(10)	定量-成本	7	8	5
平均修复时间(h)	定量-成本	2.4	1.8	2.6
主要部件更换时间(min)	定量-成本	42	30	25
恢复功能用的任务时间(h)	定量-成本	4.2	3.5	3.7
平均维修时间(h)	定量-成本	3	1.5	2
维修事件平均直接维修工时(1)	定量-成本	0.5	0.8	0.67
维修活动平均直接维修工时(1)	定量-成本	0.6	0.7	0.8
维修人员能量消耗(kj/min·m ²)	定量-成本	45.06	23	35.4
维修人员力量要求(N)	定量-成本	20	16	28
维修人员疲劳恢复时间(min)	定量-成本	10.78	6.93	9.76
每次维修的平均维修费用(万元)	定量-成本	1.8	1.9	1.7
拆卸单元数量(个)	定量-成本	12	10	18
维修物资使用量(个)	定量-成本	19	17	16
维修频次(次)	定量-成本	5	5	5

3.3 改进 TOPSIS 法评估结果

通过图 1 流程中的层次分析法和熵权法计算得出各维修性指标的权重如表 4 所示。

表 4 基于层次分析法和熵权法的指标权重

指标 U/V	层次分析法	熵权法	指标 U/V	层次分析法	熵权法
U ₁₁	0.250 0	0.228 7	V ₂₂	0.166 7	0.443 5
U ₁₂	0.750 0	0.771 3	V ₃₁	0.321 5	0.264 7
U ₂₁	0.637 0	0.371 9	V ₃₂	0.070 3	0.190 9
U ₂₂	0.104 7	0.342 1	V ₃₃	0.537 9	0.262 4
U ₂₃	0.258 3	0.286 0	V ₃₄	0.070 3	0.282 0
U ₃₁	0.279 7	0.205 5	V ₄₁	0.555 6	0.500 0
U ₃₂	0.626 7	0.258 6	V ₄₂	0.444 4	0.500 0
U ₃₃	0.093 6	0.535 9	V ₅₁	0.701 0	0.360 5
U ₄₁	0.804 4	0.603 3	V ₅₂	0.192 9	0.283 6
U ₄₂	0.073 8	0.207 0	V ₅₃	0.106 1	0.355 9
U ₄₃	0.121 8	0.189 7	V ₆₁	0.507 6	0.205 1
V ₁₁	0.333 3	0.486 9	V ₆₂	0.065 5	0.297 9
V ₁₂	0.666 7	0.513 1	V ₆₃	0.324 3	0.215 5
V ₂₁	0.833 3	0.556 5	V ₆₄	0.102 6	0.271 5

由层次分析法和熵权法获得的主客观权重可知, 将两种方法所得的权重运用式 (15) 建立的组合赋权法进行计算, 得出最终各项指标层的权重, 并将表 4 的权重值和组合赋权法所得的结果进行对比分析, 如图 6 所示。

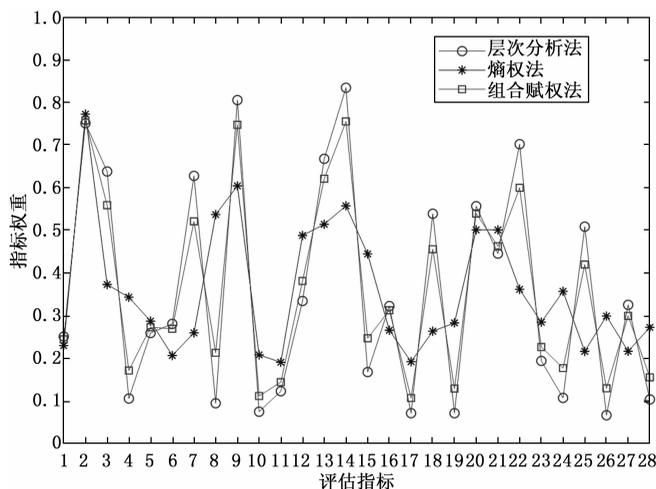


图 6 各方法所得权重对比分析图

由图 6 可知, 组合权重法计算的权重值会位于层次分析法计算的权重值和熵权法计算的权重值的中间, 能更好的削弱专家打分带来的主观性的问题, 也能解决完全依靠熵值带来的不确定性问题。对于最后维修性评估结果的准确性会更准确。

3.4 TOPSIS 和改进 TOPSIS 法对比

通过 TOPSIS 法和改进 TOPSIS 法求得各航空发动机的

维修性设计方案的相对贴程度如表 5 所示。TOPSIS 法求得最终的维修性设计方案的排序为方案 b、方案 a 和方案 c。改进 TOPSIS 法求得最终的维修性设计方案的排序为方案 b、方案 c 和方案 a。TOPSIS 法的评估结果与预设的维修性设计方案顺序不相符。改进 TOPSIS 方法评估结果与预设的维修性设计方案顺序相符。

表 5 TOPSIS 法和改进 TOPSIS 法计算的相对贴程度

方案	TOPSIS	改进 TOPSIS
a	0.415 0	0.402 0
b	0.684 8	0.611 9
c	0.413 5	0.403 0

由此可知,本文所提的改进 TOPSIS 方法的准确性更好,能够有效的评估出各种维修性设计方案优劣的顺序,与最初预设各航空发动机维修性设计方案优劣的顺序是一致的。充分说明了本文所提出的维修性评估方法的有效性。

4 结束语

本文以 TOPSIS 理论为基础,建立了完善的航空发动机的维修性定性评估指标体系和维修性定量评估指标体系。提出了以组合赋权法和灰色关联度来改进 TOPSIS 的维修性评估方法。通过将层次分析法和熵权法相结合形成组合赋权法来进行指标权重的赋权,克服了评估中指标权重依靠专家打分带来的主观性和依靠熵值带来的不准确性的问题。并将改进的 TOPSIS 维修性评估方法用于实验验证,得出了与实际情况相一致的维修性设计方案排序。由此验证,该方法可以为航空发动机维修性设计方案的优选提供一种路径。

参考文献:

- [1] 吕川. 维修性设计分析与验证 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [2] 程浩, 马仕明, 刘勇. 电子设备维修性设计与评价 [J]. 航天控制, 2014, 32 (6): 71-74.
- [3] 顾海健, 邵传金. 基于场景分析的航空发动机维修性评估方法研究 [J]. 航空维修与工程, 2021; 44 (5): 47-49.
- [4] XU H C, PAN Y, XIONG Y X, et al. Comparative study on two civil engine thrust reversers for their maintainability analysis [C] //MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018, 169: 01026.
- [5] WU X D, LIU H, MO S, et al. Research of Maintainability Evaluation for Civil Aircrafts Based on the Motion Capture System [C] //Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2012, 198: 1062-1066.
- [6] SHI H, XIANG S, WANG J. Analysis of Key Technologies for Aeroengine Maintenance Based on Virtual Reality [C] //Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2009, 16: 801-805.
- [7] 张冬, 张平, 方强, 等. 基于模糊层次分析法的舰艇维修性评估方法 [J]. 中国舰船研究, 2013, 8 (1): 102-106.
- [8] 徐达, 李闯, 李洋, 等. 基于 TOPSIS 的装备维修性定性指标综合评价研究 [J]. 航天控制, 2014, 32 (5): 92-96.
- [9] LEI J, CHANG W, ZHOU S, et al. Study on the quality evaluation model of diesel engine with ANP and TOPSIS method [C] //2018 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS). IEEE, 2018: 1-6.
- [10] 王雄伟, 陈春良, 曹艳华, 等. 基于改进 TOPSIS 法的装备维修任务优先级确定方法 [J]. 计算机测量控制, 2018, 26 (4): 108-111, 142.
- [11] QUAN H, LI S, WEI H, et al. Personalized product evaluation base on GRA-TOPSIS and Kansei engineering [J]. Symmetry, 2019, 11 (7): 867.
- [12] 季晓晓. 武器装备作战试验概念模型及评估方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
- [13] 徐达, 焦庆龙. 基于 TOPSIS 法与灰色关联度法的故障样本分配方法 [J]. 火力与指挥控制, 2019, 44 (10): 163-167, 172.
- [14] 张馨予, 胡冰, 张逸楠, 等. 基于改进 Grey-AHP 的雷达装备维修性评估方法 [J]. 现代防御技术, 2021, 49 (5): 78-87.
- [15] 牛军锋, 孙静娟, 李生厚, 等. 基于“综合赋权”模糊物元模型的机场运行安全评价 [J]. 火力与指挥控制, 2017, 42 (4): 101-104.
- [16] 吴飞美, 林鸿熙. 联系向量距离与灰色关联度结合的理想解法 [J]. 系统科学与数学, 2022, 42 (4): 978-991.
- [17] 徐达, 李闯, 焦庆龙, 等. 基于主客观组合赋权的装甲装备维修性综合评价 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2014, 28 (6): 18-22.
- [18] 邓聚龙. 灰色系统理论教程 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992.
- [19] 邱少明, 王建伟, 杜秀丽, 等. 基于指标双层变权和 TOPSIS-灰关联的多目标威胁评估方法 [J]. 光电与控制, 2021, 28 (6): 1-6.
- [20] 黄胜, 郭海鹏, 侯远杭, 等. 基于改进 TOPSIS 的舰船总体方案群决策方法 [J]. 上海交通大学学报, 2014, 48 (1): 92-97.
- [21] 刘仁, 卞树檀, 于强. 评估指标体系构建的方法研究 [J]. 电子设计工程, 2013, 21 (1): 34-36.
- [22] 赵玉慧, 曹艳丽, 于晓洋, 等. 光电侦察装备维修性定性要求评估技术 [J]. 光电与控制, 2021, 28 (6): 110-113.
- [23] 任浩男. CFM56 型发动机虚拟维修技术研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2018.
- [24] XU D, LI C, JIAO Q, et al. Research on a comprehensive evaluation of equipment maintainability qualitative index based on virtual prototypes [C] //2016 11th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS). IEEE, 2016: 1-5.