

文章编号: 1674-8190(2021)05-059-09

民用飞机主最低设备清单建议稿项目模糊综合评价方法研究

顾志武¹, 杜倩宜², 冯蕴雯², 薛小锋²

(1. 上海飞机客户服务有限公司 飞行运行支援部, 上海 200241)

(2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 民用飞机主最低设备清单建议稿(PMMEL)候选项目确定及验证是目前民用飞机主制造商通过适航审查的重要环节。本文提出一种PMMEL项目模糊综合评价方法,分析民用飞机PMMEL项目制定的目的,建立模糊综合评价因素论域;采用层次分析法计算权向量,建立PMMEL候选项目模糊综合评价模型,并获得模糊综合评价结果;以某型民用飞机主起落架下位锁弹簧PMMEL候选项目为例进行评价。结果表明:PMMEL项目模糊综合评价方法具有可行性和准确性,能够准确地得到PMMEL候选项目是否列入的评价结果,为传统的PMMEL项目评价方法提供分析结果验证,具有良好的工程应用价值。

关键词: 民用飞机;主最低设备清单建议稿;模糊综合评价;层次分析法;评价模型

中图分类号: V328.5

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.05.08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Preliminary Master Minimum Equipment List Fuzzy Comprehensive Evaluation Method of Civil Aircraft

GU Zhiwu¹, DU Qianyi², FENG Yunwen², XUE Xiaofeng²

(1. Flight Operation Support Department, Shanghai Aircraft Customer Service Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

(2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: it is an important link to verify and determine the candidate items of the preliminary master minimum equipment list (PMMEL) for the main civil aircraft manufacturer passing through airworthiness certification. In this paper a new PMMEL fuzzy comprehensive evaluation method of civil aircraft is proposed. Firstly, the factors domain of fuzzy comprehensive evaluation is established by analyzing the purpose of PMMEL. Then, the different fuzzy weights by using the analytic hierarchy process are determined and a fuzzy comprehensive evaluation model of PMMEL is set up. The fuzzy comprehensive evaluation results are obtained. Finally, a PMMEL candidate project of the civil aircraft main landing gear down lock spring is taken as an example. Result shows that the new PMMEL evaluation method combined with the expert-based evaluation and essential fuzzy analysis is feasible and accurate, which can accurately get the clear result of whether the candidate project is allowed to be included in PMMEL and provide the analysis result verification for the traditional PMMEL method. It has important value and bright prospects for application.

Key words: civil aircraft; PMMEL; fuzzy comprehensive evaluation; analytic hierarchy process; evaluation model

收稿日期: 2021-07-02; 修回日期: 2021-10-13

通信作者: 冯蕴雯, fengyunwen@nwpu.edu.cn

引用格式: 顾志武, 杜倩宜, 冯蕴雯, 等. 民用飞机主最低设备清单建议稿项目模糊综合评价方法研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(5): 59-67.

GU Zhiwu, DU Qianyi, FENG Yunwen, et al. Preliminary master minimum equipment list fuzzy comprehensive evaluation method of civil aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(5): 59-67. (in Chinese)

0 引言

随着我国民用飞机制造技术的发展,具有自主知识产权的国产民用飞机正逐步大量投入使用。民用飞机在满足安全性的前提下,重点需对其运营经济性进行充分考虑,确保民用飞机运营能够实现高安全性和高签派率^[1]。主最低设备清单建议稿(Preliminary Master Minimum Equipment List,简称PMMEL)用于平衡民用飞机的安全性和经济性,旨在保证安全飞行的前提下提高民用飞机的签派率,故确定PMMEL是目前保障民用飞机运营阶段安全经济不可或缺的必要环节。

传统的PMMEL项目分析方法主要有对比经验法、安全性分析法和逻辑决断分析法。许科龙^[2]最早提出对比经验法和逻辑决断分析法作为PMMEL项目评价的方法;张瑞华^[3]利用对比经验法分析了某型飞机的液压系统PMMEL项目;汪震宇等^[4]利用安全性分析法对发动机舱火警探测器进行分析,得出PMMEL候选项目评估结果;包丽等^[5]用逻辑框图联系功能危险分析、故障模式影响分析、故障树分析三种安全性分析方法,形成了具有可执行性的逻辑决断分析法。在传统的PMMEL项目分析方法中,对比经验法凭借相似机型类比分析确定PMMEL候选项目,仅依靠经验判定难以确定评价结果的准确性和可靠性;而逻辑决断分析法结合了常用的三种安全性分析方法,评判过程较为复杂,不利于实际的工程应用。模糊综合评价法可以对与多种评价因素有关的目标计算得到一个具体的评价结果,具有评价结果明确的特点,现已广泛运用于质量控制、资源管理等多种工程领域^[6-8]。

针对现有PMMEL候选项目评价方法中存在的问题,本文提出一种基于模糊综合评价的PMMEL候选项目评价方法,对经过初期定性分析筛选的PMMEL候选项目进行评价,将专家对不同PMMEL候选项目的评分数据作为输入的原始数据,建立PMMEL模糊综合评价模型,根据评价结果判定该PMMEL候选项目是否纳入到PMMEL中;并对某型民用飞机主起落架下位锁弹簧PM-

MEL候选项目进行模糊综合评价,与经典FMEA分析方法得到的结果进行对比,以验证该评价模型的可行性和准确性。

1 模糊综合评价理论

1.1 模糊综合评价

模糊综合评价法可以对与多种因素有关的对象做出一个具体的评价^[9]。若有一个需要评价的项目 X ,需要确定被评价对象的所有评价指标(因素),并建立评价因素论域 U 。假设有 n 层因素隶属层级,则评价因素论域 $U=(U_1, U_2, \dots, U_i, \dots, U_n)$,其中 $U_i=(U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{im})$ ($i=1, 2, \dots, m$)表示具有 m 个评价指标的第 i 层因素集; U_{ij} 表示第 i 层的第 j 个评价指标。一般评价因素论域确定顺序由第一层开始逐层向下分解,直到分解出整个体系的最后一层指标为止。为了反映各因素的重要程度,对各因素 U_{ij} 分配一个相应的权数 a_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$),一般要求 $a_{ij}>0$, $\sum a_{ij}=1$,再由各权重 a_{ij} 组成一个矩阵 A ,称为模糊权重矩阵。

确定评价指标(因素)及权重之后,需要进一步确定评价等级论域。评价等级是评价者对被评价对象在某因素条件下可能作出的各种评价结果的集合,评价等级集合 $V=(v_1, v_2, \dots, v_l)$ 本质上就是对被评价对象变化区间的一个划分,其中 v_p ($p=1, 2, \dots, l$)表示第 p 个评价结果, l 为总评价结果数。然后进行单因素模糊评价,建立模糊关系矩阵 R 。先基于一个因素进行相应的评价,确定目标对评价集合 V 的隶属度,称为单因素模糊评价。

在进行了单因素模糊评价后,逐一对研究目标在每个评价因素 U_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$)上进行评价,从一个评价因素出发确定目标对模糊子集的隶属程度,就是模糊关系矩阵:

$$R_p = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m} \quad (1)$$

矩阵 R_p 中第 i 行第 j 列元素 r_{ij} ,代表某个目标基于因素 U_{ij} 对 v_p 的隶属度。目标在某个评价因素

U_{ij} 上的评价结果,反映在模糊向量($R|U$)上,而其他的评价方法都是由实际参数值反映出来的,因此,从这个角度讲模糊综合评价要求更多的信息,具有结果清晰、系统性强的特点。

最后,得到模糊权向量 A 与模糊关系矩阵 R 通过模糊算子计算得到模糊综合评价结果向量 B 。该模型为

$$A \cdot R = B = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (2)$$

式中: $b_j(j=1, 2, \dots, m)$ 是由 A 与 R 通过模糊合成算子得到的,表示被评级对象从整体上看对 V 评价等级的隶属程度。

用到的模糊合成算子是 $M(\wedge, \vee)$ 算子

$$b_j = \bigvee_{i=1}^m (a_i \wedge r_{ij}) = \max_{1 \leq i \leq m} \{ \min(a_i, r_{ij}) \} \quad (3)$$

$(j=1, 2, \dots, m)$

得到模糊综合评价结果向量 B 后,运用加权平均原则分析模糊综合评价结果,将 B 中对应分量各等级的秩逐级进行加权求和,最终得到被评价对象在等级论域中的相对位置,即为被评价对象的评价结果。

1.2 层次分析法

层次分析法(Analytic Hierarchy Process,简称AHP)是一种结合了定性分析和定量分析的考虑多因素的分析方法^[10],被广泛应用于指标权重的确定^[11]。该方法把研究对象中考虑的多因素进行有序层次分析,可以对需要进行定性判断但考虑因素众多且没有大量数据支撑的问题有一个合理的解决。层次分析法在定量分析方面主要用判断矩阵构造的方法^[12],具有简便、计算量小、小样本结果可靠等特点^[13]。AHP的主要计算步骤为

步骤1 收集模糊综合评价建立的因素论域及各层级间的隶属关系,构造递阶层次结构模型。

步骤2 采用两两比较的方法,从最底层逐层进行比较判断,确定低层指标相对于存在隶属关系的上一层指标的重要性(采用1~9比例标度属于层次分析法通用比例标度表^[14]),并构造判断矩阵 G 。层次分析法中的关键是判断矩阵的建立,根据模糊综合评价中所建立的因素集,建立判断矩阵,判断矩阵元素的值反映了专家对各元素相对

重要性的认识,能够得到较为准确的权重^[15]。若该层有 n 个因素则判断矩阵 G 为 $n \times n$ 矩阵。

步骤3 对判断矩阵 G 正规化后进行一致性检验,当 CR 满足式(4)时,认为判断矩阵 G 是符合一致性要求的,反之则认为判断矩阵 G 不具有足够的一致性,需要再次调整。

$$CR = CI/RI < 0.1 \quad (4)$$

式中: CR 为判断矩阵的随机一致性比率; RI 为判断矩阵的平均随机一致性指标(RI 值查表得到); CI 为判断矩阵的一致性指标。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

式中: λ_{\max} 为判断矩阵 G 的最大特征根; n 为判断矩阵 G 的阶数。

步骤4 解矩阵方程计算各级评价因素的权向量 W :

$$GW = \lambda_{\max} W \quad (6)$$

式中: W 为特征值 λ_{\max} 对应的特征向量,即所求的权向量。

2 民用飞机 PMMEL 项目模糊综合评价模型

2.1 PMMEL 项目评价指标建立

本文建立用于PMMEL评价的三层级指标,对于第一层指标,飞机安全性的首要因素是飞机自身的机械原因,其直接决定了飞机的安全状态。其次,PMMEL项目涉及大量人员的操作内容,人为因素是造成飞机事故的主要原因,人员的影响不可忽视。此外,考虑到部分飞机对特殊环境飞行的适应情况以及特殊要求,环境也作为一大因素。因此PMMEL项目的制定是飞机、操作人员和环境的有机整体,故PMMEL项目评价第一层指标一般为 $U = \{\text{飞机, 人员, 环境}\}$ 。

进一步建立评价指标中的第二层指标。针对第一层指标 U 中的飞机,飞机的机械安全性则需分别探究是否具有冗余性设计,以及该项目设备失效后造成的安全性和维修可靠性方面的问题,即 $U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}\} = \{\text{冗余性, 安全性, 维修可靠性}\}$ 。对于第三层级评价指标,飞机设备或项目

的冗余性,可以考虑在飞机设计初期就对该系统有冗余性系统设计或飞机上具有针对该系统的功能替代设备,即 $U_{11} = \{\text{冗余性系统设计, 功能替代设备}\}$; 飞机的安全性, 可以考虑某 PMMEL 候选项目在失效后的故障影响和继发故障影响, 即 $U_{12} = \{\text{故障影响, 继发故障影响}\}$; 飞机的维修可靠性, 则仅考虑飞机的保障率, 具体可指飞机的签派可靠度、平均故障时间等指标, 即 $U_{13} = \{\text{飞机保障率}\}$ 。

同理, 针对第一层级指标中的人员, 则需同时考虑机组人员和维修人员两方面的影响, 即 $U_2 = \{U_{21}, U_{22}\} = \{\text{机组人员, 维修人员}\}$ 。机组人员应当考虑到某 PMMEL 项目失效后的操作程序(O)以及对机组人员工作负荷是否增加、增加的程度是否可接受, 即 $U_{21} = \{\text{操作程序}(O), \text{机组人员工作负荷}\}$; 维修人员则考虑某 PMMEL 项目失效后维修人员应遵守的维修程序(M), 即 $U_{22} = \{\text{维修程序}(M)\}$ 。

针对环境指标, 应考虑民用飞机运行过程中需要面对的特殊飞行环境, 即 $U_3 = \{U_{31}\} = \{\text{特殊环境}\}$ 。环境指标应根据具体进行型号审定的航空器部件进行具体的分析, 例如特殊环境下还可细分为高温环境、高原环境等。

2.2 PMMEL 项目评价等级标准划分

对 PMMEL 项目进行最终评价的目的是明确某系统或部件项目是否纳入到 PMMEL 中。因此, 将评价等级论域定义为 3 个等级, 即

$$v = (v_1, v_2, v_3) = (-1, 0, 1) \quad (7)$$

对应描述为 $v = \{\text{低风险, 可接受, 高风险}\}$, 根据描述表示是否将某系统或部件项目纳入 PMMEL 的危险等级。 $(-1, 0, 1)$ 实际表示的是模糊数, 并根据数值确定相应的风险等级, 目的是达到对评语进行量化处理确定评语等级论域, 即建立评价集:

$$v = \{v_1, v_2, v_3\} = \{\text{低风险, 可接受, 高风险}\} \quad (8)$$

对应的评价定量等级标准如表 1 所示。

表 1 PMMEL 项目模糊综合评价定量等级标准
Table 1 Fuzzy comprehensive evaluation quantitative grading standard of PMMEL

评价值	评语	等级
$V_i < -0.5$	低风险	E_1
$-0.5 < V_i \leq 0.5$	可接受	E_2
$0.5 < V_i \leq 1$	高风险	E_3

2.3 PMMEL 项目模糊综合评价步骤

PMMEL 项目模糊综合评价分为五个具体的步骤: 确定评价对象、计算评价指标权重、建立模糊关系矩阵、计算综合评价向量以及对评价结果进行判定。PMMEL 项目模糊综合评价步骤如图 1 所示。

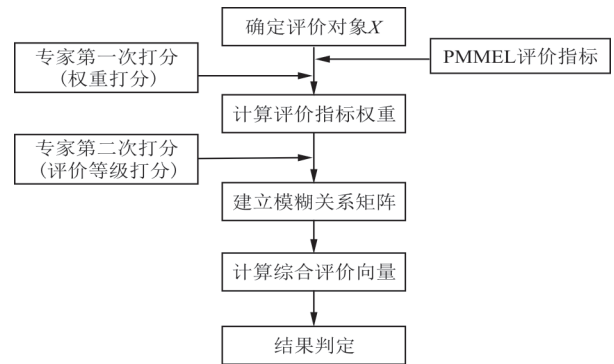


图 1 PMMEL 项目模糊综合评价步骤

Fig. 1 Fuzzy comprehensive evaluation steps of PMMEL

步骤 1 确定评价对象 X。评价对象为某具体系统或设备的 PMMEL 候选项目, 即经过定性分析后仍不确定其失效危险等级, 故不能确定是否列入 PMMEL 中。

步骤 2 计算评价指标权重。对 PMMEL 候选项目的评价因素集进行权重系数计算, 运用层次分析法, 采集专家及相关人员对各因素指标的评价结果, 自上而下构造各级判断矩阵, 检验其是否满足一致性要求, 计算得到权重向量 W , 组合得到模糊权重矩阵 A 。

步骤 3 建立模糊关系矩阵。根据评价等级论域, 结合专家评价结果, 可邀请多位专家进行 PMMEL 项目评价 (PMMEL 项目专家评价表如表

2所示),建立各级模糊关系矩阵 R 。

表2 PMMEL项目模糊综合评价专家评价表示例
Table 2 Fuzzy comprehensive expert evaluation sheet of PMMEL

因素集	评语集		
	低风险	可接受	高风险
冗余性系统设计 功能替代设备 冗余性 U_{11}			
故障影响 继发故障影响 安全性 U_{12}			
飞机保障率 维修可靠性 U_{13}			
飞机 U_1			
操作程序(O) 机组人员工作负荷 机组人员 U_{21}			
维修程序(M) 维修人员 U_{22}			
人员 U_2			
特殊环境 U_{31}			
环境 U_3			

注:专家在0~1之间打分评价,若因素与评语完全符合则给定数值为1,完全不相似则给数值0,其余按照相似程度给出0~1之间的数值。

步骤4 计算综合评价向量。根据步骤2得到的模糊权重矩阵 A 和步骤3得到的各级模糊关系矩阵 R ,通过模糊综合评价模型 $A \cdot R = B$,自下而上计算模糊综合评价结果向量 B 。

步骤5 结果判定。运行加权平均原则,将步

骤4得到的模糊综合评价结果向量 B 中对应分量各等级的秩逐级进行加权求和,最终自下而上计算得到被评价对象在等级论域中的相对位置,即为被评价对象PMMEL候选项目 X 的评价结果,即将此系统或设备列入PMMEL中是否可接受。

3 飞机主起落架下位锁弹簧 PM-MEL项目评价案例分析

3.1 确定评价对象

根据世界民航事故数据库相关资料的统计结果,起落架收放系统发生故障时引起的I类、II类事故较多,是民用飞机安全性分析的重点。Boeing 737等机型将起落架收放功能等相关项目作为PMMEL,MMEL和MEL项目^[16]。同时,中国民用航空规章CCAR-25-R4中对起落架的设计做出了明确规定和要求^[17],在起落架收放系统可能发生的众多故障类型中,“起落架不能放下或放下未锁定”故障等级为危险级,指标要求为 $10^{-7}/\text{fh}$ 。故本算例选取某型民用飞机主起落架系统中下位锁弹簧作为PMMEL候选项目,即 X 为主起落架下位锁弹簧。

3.2 指标权重计算

为了计算针对某型飞机主起落架下位锁弹簧PMMEL候选项目评价分析因素的模糊权重向量,首先构建层次分析法递阶层次结构如图2所示,在本案例中不考虑具体的运行环境影响。

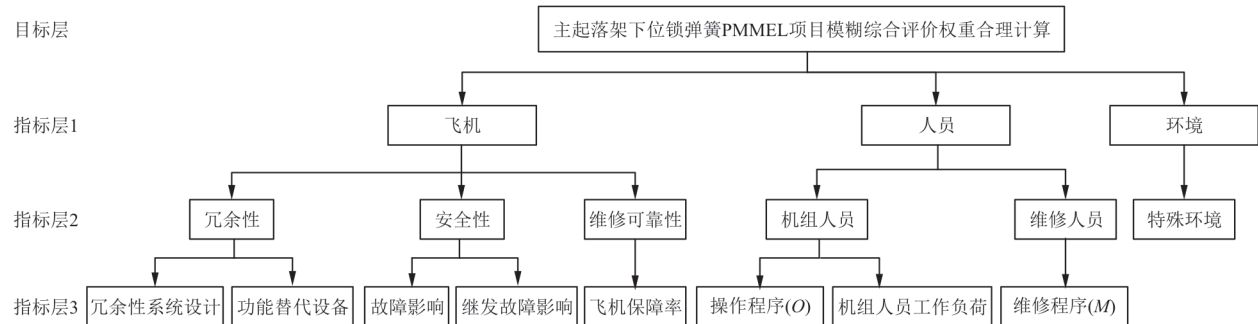


图2 PMMEL评价指标递阶层次结构图

Fig. 2 Hierarchical structure of PMMEL fuzzy comprehensive evaluation factors

以指标层 1 的模糊权重向量为例,首先对某专家通过两两比较得到的数据信息进行处理,使专家打分数据能够准确地构造出指标层 1 判断矩阵

$S = (u_{ij})_{p \times p}$ ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3; p = 3$) 即:

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix}$$

计算判断矩阵 S 的最大特征根 $\lambda_{\max} = 3.0385$, 由式(5)可知,一致性指标为 0.019 25,查表不同阶判断矩阵的平均随机一致性指标 RI ,阶数为 3 的判断矩阵 $RI = 0.58$,计算 CR 为

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.019\ 25}{0.58} = 0.033\ 2$$

显然, CR 小于 0.1,故认为判断矩阵 S 是符合要求的,即具有足够的一致性,最大特征根 λ_{\max} 对应的特征向量 W 为

$$W = (0.916\ 1, 0.371\ 5, 0.150\ 6)$$

计算得到正规化后的特征向量 W_1 为

$$W_1 = (0.637\ 0, 0.258\ 3, 0.104\ 7)$$

同理计算得到指标层 2 和指标层 3 的模糊权重向量,正规化后得到飞机主起落架下位锁弹簧 PMMEL 候选项目评价分析因素的模糊权重如表 3 所示。

表 3 评价指标权重表
Table 3 The weight of fuzzy comprehensive evaluation factor

指标层 1 及权重	指标层 2 及权重	指标层 3 及权重
飞机 U_1 (0.637 0)	冗余性 U_{11} (0.142 9)	冗余性系统设计(0.677 1) 功能替代设备(0.322 9)
	安全性 U_{12} (0.714 2)	故障影响(0.166 7) 继发故障影响(0.833 3)
	维修可靠性 U_{13} (0.142 9)	飞机保障率(1)
人员 U_2 (0.258 3)	机组人员 U_{21} (0.875 0)	操作程序(O)(0.677 1) 机组人员工作负荷 (0.322 9)
	维修人员 U_{22} (0.125 0)	维修程序(M)(1)
	环境 U_3 (0.104 7)	特殊环境 U_{31} (1) 特殊环境(1)

3.3 PMMEL 项目评价计算

将来源于有关专家的统计数据(如表 4 所示)建立各三级子因素的模糊关系矩阵 R ,专家评价规则按照:若因素与评语完全符合则给定数值为 1,完全不相似则给数值 0,其余按照相似程度给出 0~1 之间的数值。

表 4 专家评分表
Table 4 Fuzzy comprehensive expert evaluation sheet

因素集	评语集		
	低风险	可接受	高风险
冗余性系统设计	0.90	0.10	0.00
功能替代设备	0.70	0.20	0.10
冗余性 U_{11}	0.80	0.20	0.00
故障影响	0.70	0.25	0.05
继发故障影响	0.60	0.30	0.10
安全性 U_{12}	0.70	0.25	0.05
飞机保障率	0.80	0.20	0.00
维修可靠性 U_{13}	0.80	0.20	0.00
飞机 U_1	0.75	0.20	0.05
操作程序(O)	0.80	0.15	0.05
机组人员工作负荷	0.80	0.20	0.00
机组人员 U_{21}	0.80	0.20	0.00
维修程序(M)	0.75	0.20	0.05
维修人员 U_{22}	0.75	0.20	0.05
人员 U_2	0.80	0.20	0.00
特殊环境 U_{31}	0.90	0.10	0.00
环境 U_3	0.90	0.10	0.00

由专家评价数据表提取出各级因素与评价域的模糊关系矩阵,以冗余性的三级因素为例。冗余性的三级因素可以表示为 $U_{11} = \{\text{冗余性系统设计, 功能替代设备}\}$ 与 $V = \{V_1, V_2, V_3\} = \{\text{低风险, 可接受, 高风险}\}$ 的模糊关系矩阵 R_{11} 为

$$R_{11} = \begin{pmatrix} 0.9 & 0.1 & 0.0 \\ 0.7 & 0.2 & 0.1 \end{pmatrix}$$

同理得到安全性 U_{12} 的三级因素、维修可靠性 U_{13} 的三级因素、机组人员 U_{21} 的三级因素、维修人员 U_{22} 的三级因素、飞机 U_1 的二级因素、人员 U_2 的二级因素、环境 U_3 的二级因素与 $V = \{V_1, V_2, V_3\} = \{\text{低风险, 可接受, 高风险}\}$ 的模糊关系矩阵分别为

$$R_{12} = \begin{pmatrix} 0.7 & 0.25 & 0.05 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 R_{13} &= (0.8 \quad 0.2 \quad 0.0) \\
 R_{21} &= \begin{pmatrix} 0.8 & 0.15 & 0.05 \\ 0.8 & 0.2 & 0.0 \end{pmatrix} \\
 R_{22} &= (0.75 \quad 0.2 \quad 0.05) \\
 R_1 &= \begin{pmatrix} 0.8 & 0.2 & 0.0 \\ 0.7 & 0.25 & 0.05 \\ 0.8 & 0.2 & 0.0 \end{pmatrix} \\
 R_2 &= \begin{pmatrix} 0.8 & 0.2 & 0.0 \\ 0.75 & 0.2 & 0.05 \end{pmatrix} \\
 R_3 &= (0.9 \quad 0.1 \quad 0.0) \\
 R &= \begin{pmatrix} 0.75 & 0.2 & 0.05 \\ 0.8 & 0.2 & 0.0 \\ 0.9 & 0.1 & 0.0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

得到各级模糊关系矩阵后,利用模糊综合评价模型 $A \cdot R = B$,求得相应的模糊综合评价结果向量为

$$B_{11} = W_{11} \cdot R_{11} = (0.8354 \quad 0.1323 \quad 0.0323)$$

同理求得其他模糊综合评价结果向量为

$$B_{12} = W_{12} \cdot R_{12} = (0.6167 \quad 0.2917 \quad 0.0917)$$

$$B_{13} = W_{13} \cdot R_{13} = (0.8000 \quad 0.2000 \quad 0.0000)$$

$$B_{21} = W_{21} \cdot R_{21} = (0.8000 \quad 0.1661 \quad 0.0339)$$

$$B_{22} = W_{22} \cdot R_{22} = (0.7500 \quad 0.2000 \quad 0.0500)$$

$$B_1 = W_1 \times R_1 = (0.7286 \quad 0.2357 \quad 0.0357)$$

$$B_2 = W_2 \times R_2 = (0.7938 \quad 0.2000 \quad 0.0063)$$

$$B_3 = W_3 \times R_3 = (0.9000 \quad 0.1000 \quad 0.0000)$$

$$B = W \times R = (0.7786 \quad 0.1895 \quad 0.0319)$$

3.4 评价结果分析

根据得到的评价结果向量,进行综合评分值 V 的计算,具体计算公式为 $V_i = vB$ ($v = (-1, 0, 1)$),自下而上首先对三级因素综合评分值进行计算,得到结果为

$$\begin{aligned}
 V_{11} &= -1 \times 0.8354 + 0 \times 0.1323 + 1 \times \\
 &0.0323 = -0.8031
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{12} &= -1 \times 0.6167 + 0 \times 0.2917 + 1 \times \\
 &0.0917 = -0.5250
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{13} &= -1 \times 0.8000 + 0 \times 0.2000 + 1 \times \\
 &0.0000 = -0.8000
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{21} &= -1 \times 0.8000 + 0 \times 0.1661 + 1 \times \\
 &0.0339 = -0.7661
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{22} &= -1 \times 0.7500 + 0 \times 0.2000 + 1 \times \\
 &0.0500 = -0.7000
 \end{aligned}$$

由上述计算对照评价定量分级标准,五个二级因素子集均为 E_1 等级,则表示接受主起落架下位锁弹簧列入 PMMEL 项目为低风险事件。

其次对二级因素综合评分值进行计算,得到结果为

$$\begin{aligned}
 V_1 &= -1 \times 0.7286 + 0 \times 0.2357 + 1 \times \\
 &0.0357 = -0.6929
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_2 &= -1 \times 0.7938 + 0 \times 0.2000 + 1 \times \\
 &0.0063 = -0.7875
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_3 &= -1 \times 0.9000 + 0 \times 0.1000 + 1 \times \\
 &0.0000 = -0.9000
 \end{aligned}$$

由上述计算对照评价定量分级标准,三个一级因素子集均为 E_1 等级,则表示接受主起落架下位锁弹簧列入 PMMEL 项目为低风险事件。

最后对总体因素综合评分值进行计算,得到结果为

$$\begin{aligned}
 V &= -1 \times 0.7786 + 0 \times 0.1895 + 1 \times \\
 &0.0319 = -0.7467
 \end{aligned}$$

说明将主起落架下位锁弹簧列入 PMMEL 事件风险属于 E_1 级。因此,根据模糊综合评价的结果,该机型的主起落架下位锁弹簧在纳入 PMMEL 项目时,其风险低于可接受等级,亦表示能够接受该部件列入 PMMEL 项目,进而说明基于模糊综合评价方法对 PMMEL 项目进行评价的可行性。

若有多位专家进行评价,则需将多位专家打分取平均值后再按照模糊综合评价结果计算流程计算专家评价最终结果,以此来确保专家打分方法的可信度和准确度。

对主起落架下位锁弹簧 PMMEL 候选项目用传统的安全性分析方法 FMEA,并通过逻辑决断分析,得到主起落架下位锁弹簧 FMEA 分析结果(如表 5 所示)以及是否允许列入 PMMEL 中。锁弹簧的 FMEA 分析故障等级为 II,在有运行程序或操作程序能够使飞机保持在放飞的安全水平时,能够继续出勤或继续飞行,并且同一侧主起落架两个弹簧不允许同时失效,即只允许单个锁弹簧失效。根据 PMMEL 项目确定决断分析法分析可知,主起落架锁弹簧可列为 PMMEL 项目。由此验证了模糊综合评价法对 PMMEL 项目评价具有准确性^[18-20]。

表 5 主起落架下位锁弹簧 FMEA 表
Table 5 FMEA sheet of main landing gear lower lock spring

故障模式及原因	飞行阶段	故障影响	故障的识别与纠正措施	故障等级	是否能够出勤或继续飞行	备注
单个锁弹簧失效	L	a. 锁弹簧功能失效 b. 起落架放下后无法锁定 c. 飞机由于起落架无法锁定,在降落时机体可能受损	定期检查 检查维护	II	能,需要定期跟踪维护	明显

4 结 论

(1) 本文所创建的 PMMEL 项目模糊综合评价模型,充分考虑了 PMMEL 项目制定过程中的飞机、人员、环境三个方面的影响因素。

(2) 运用层次分析法确定各级因素权重,解决了传统对比经验法无法确定其准确度的缺陷,并且作为一种可以得出明确结论的 PMMEL 项目评价方法,可以与传统 PMMEL 项目评价方法相互验证,增加 PMMEL 制定的严谨性。

(3) 以某型民用飞机主起落架下位锁弹簧 PMMEL 候选项目为例,基于模糊综合评价法对 PMMEL 项目进行评价,所得结果与传统逻辑决断分析相符,证明其能够很好地解决 PMMEL 项目确定问题,具有较好的工程应用价值。

该方法也有一定的局限性:把定性问题定量分析,虽然最终得到的结论是定性的,但是评估过程中涉及很多定量计算,总体因素综合评分值直接决定评价定量等级标准表中对应的最终结果,误差超过一定范围后会影响到评价结果分级,对于该方法的误差分析也是很重要的一点。

参 考 文 献

- [1] 杨洁. 探讨国产民用飞机产业的技术创新条件[J]. 中国航班, 2020(7): 15-16.
YANG Jie. Discuss the technological innovation conditions of domestic civil aircraft industry[J]. China Airlines, 2020(7): 15-16. (in Chinese)
- [2] 许科龙. 民用航空器主最低设备清单建议书(PMMEL)编制工作研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2009(1): 22-22.
XU Kelong. Research on the preparation of the proposal for the master minimum equipment list (PMMEL) for civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2009(1): 22-22. (in Chinese)
- [3] 张瑞华. 某型飞机的液压系统 PMMEL 项目研究[J]. 中国科技信息, 2015(23): 22-23.
ZHANG Ruihua. Research on the PMMEL project of a certain aircraft hydraulic system[J]. China Science and Technology Information, 2015(23): 22-23. (in Chinese)
- [4] 汪震宇, 何浩松. 基于安全性分析的民用飞机 PMMEL 制定方法[C]// 第二届民用飞机机电系统国际论坛. 南京: 中国航空学会, 2015: 127-131.
WANG Zhenyu, HE Haosong. The method of making PMMEL for civil aircraft based on safety analysis[C]// The Second International Forum on Civil Aircraft Electromechanical System. Nanjing: CSAA, 2015: 127-131. (in Chinese)
- [5] 包丽, 韩冰冰, 包健波. 民用飞机初始主最低设备清单的制定[J]. 科技创新导报, 2013(10): 55-58.
BAO Li, HAN Bingbing, BAO Jianbo. The development of civil aircraft preliminary master minimum equipment list (PMMEL)[J]. Technology Innovation Herald, 2013(10): 55-58. (in Chinese)
- [6] 许雪燕. 模糊综合评价模型的研究及应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2011.
XU Xueyan. Research and application of fuzzy comprehensive evaluation model[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2011. (in Chinese)
- [7] 闵庆文, 余卫东, 张建新. 区域水资源承载力的模糊综合评价分析方法及应用[C]// 2004 年中国西部环境问题与可持续发展国际学术研讨会. 西安: 中国科学技术协会, 2004: 546-551.
MIN Qingwen, YU Weidong, ZHANG Jianxin. Fuzzy comprehensive evaluation analysis method and application of regional water resources carrying capacity[C]// 2004 International Symposium on Environmental Issues and Sustainable Development in Western China. Xi'an: China Association for Science and Technology, 2004: 546-551. (in Chinese)
- [8] 韩利, 梅强, 陆玉梅, 等. AHP-模糊综合评价方法的分析与研究[J]. 中国安全科学学报, 2004(7): 89-92.
HAN Li, MEI Qiang, LU Yumei, et al. Analysis and research on AHP-fuzzy comprehensive evaluation method[J]. China Safety Science Journal, 2004(7): 89-92. (in Chinese)
- [9] 赵远, 焦健, 赵廷弟. 基于模糊理论的风险评价方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(8): 1825-1831.
ZHAO Yuan, JIAO Jian, ZHAO Tingdi. Risk evaluation

- method based on fuzzy theory[J]. System Engineering and Electronic Technology, 2015, 37(8): 1825-1831. (in Chinese)
- [10] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148-153.
GUO Jinyu, ZHANG Zhongbin, SUN Qingyun. Research and application of analytic hierarchy process[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(5): 148-153. (in Chinese)
- [11] 何逢标. 综合评价方法MATLAB实现[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2010.
HE Fengbiao. The MATLAB realization of comprehensive evaluation method [M]. Beijing: China Social Sciences Press, 2010. (in Chinese)
- [12] 常建娥, 蒋太立. 层次分析法确定权重的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(1): 153-156.
CHANG Jian'e, JIANG Taili. Research on the determination of weight by analytic hierarchy process[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(1): 153-156. (in Chinese)
- [13] 金新政, 厉岩. 优序图和层次分析法在确定权重时的比较研究及应用[J]. 中国卫生统计, 2001, 18(2): 119-120.
JIN Xinzheng, LI Yan. Comparative study and application of priority diagram and analytic hierarchy process in determining weight[J]. China Health Statistics, 2001, 18(2): 119-120. (in Chinese)
- [14] 崔建国, 林泽力, 吕瑞, 等. 基于模糊灰色聚类 and 组合赋权法的飞机健康状态综合评估方法[J]. 航空学报, 2014, 35(3): 764-772.
CUI Jianguo, LIN Zeli, LYU Rui, et al. Comprehensive assessment method of aircraft health status based on fuzzy grey clustering and combined weighting[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(3): 764-772. (in Chinese)
- [15] 崔建国, 傅康毅, 陈希成, 等. 基于灰色模糊与层次分析的多属性飞机维修决策方法[J]. 航空学报, 2014, 35(2): 478-486.
CUI Jianguo, FU Kangyi, CHEN Xicheng, et al. Multi-attribute aircraft maintenance decision-making method based on grey fuzzy and analytic hierarchy process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 478-486. (in Chinese)
- [16] U. S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. Master minimum equipment list (MMEL) of Boeing 737[S]. USA: Boeing Company, 2018.
- [17] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standard of transport aircraft: CCAR-25-R4[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [18] 冯蕴雯, 朱铮铮, 姚雄华, 等. 民机起落架安全性分析方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2016, 34(6): 969-975.
FENG Yunwen, ZHU Zhengzheng, YAO Xionghua, et al. An effective safety analysis method of civil aircraft landing gear[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2016, 34(6): 969-975. (in Chinese)
- [19] 高有道, 李婷婷, 冯蕴雯, 等. 垂直收放式起落架提升机构设计及可靠性分析[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(11): 1763-1767.
GAO Youdao, LI Tingting, FENG Yunwen, et al. Design and reliability analysis for vertical lifting type landing gear retraction mechanism[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(11): 1763-1767. (in Chinese)
- [20] 赵劲彪, 郑香伟, 冯蕴雯, 等. 飞机起落架应急放机构可靠性分析[J]. 机械设计与制造, 2014(8): 31-33.
ZHAO Jinbiao, ZHENG Xiangwei, FENG Yunwen, et al. Reliability analysis of landing gear mechanism during emergency extending[J]. Machinery Design and Manufacture, 2014(8): 31-33. (in Chinese)

作者简介:

顾志武(1981—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:民机健康运行、民机放行技术。

杜倩宜(1998—),女,硕士研究生。主要研究方向:民机可靠性分析。

冯蕴雯(1968—),女,博士,教授。主要研究方向:飞机可靠性维修性工程、系统工程。

薛小锋(1983—),男,博士,副研究员。主要研究方向:疲劳寿命可靠性及维修性。

(编辑:马文静)