

文章编号: 1674-8190(2021)05-068-07

# 民用飞机主最低设备清单建议稿验证评价标准研究

尹楚雄<sup>1</sup>, 顾志武<sup>1</sup>, 薛小锋<sup>2</sup>

(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:** 根据 AC-91-037 的要求, 只有当主最低设备清单建议稿 (PM MEL) 项目验证完成并经飞行运行评审委员会 (FOEB) 评估通过后, 该项目才被算作通过 FOEB 评审。为选择合适的 PM MEL 项目开展验证, 需要民用飞机主制造商全面考虑各影响要素, 并对各影响要素进行科学有效的评估。本文以层次分析法为基础建立 PM MEL 验证评价标准, 利用德尔菲法确定关键指标和各个指标的重要性得分; 以某国产民机型号的燃油系统 PM MEL 项目为案例说明评价标准的应用, 并确定具体的验证项目。结果表明: 本评价标准能够对 PM MEL 验证进行有效评价, 为 PM MEL 验证工作提供了参考和支持。

**关键词:** 层次分析法; 民用飞机; PM MEL 验证; 评价标准

中图分类号: V221

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.05.09

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on Evaluation Standard of Civil Aircraft Proposal Master Minimum Equipment List Validation

YIN Chuxiong<sup>1</sup>, GU Zhiwu<sup>1</sup>, XUE Xiaofeng<sup>2</sup>

(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:** According to the requirements of AC-91-037, the item is considered to be approved by the Flight Operations Evaluation Board (FOEB) only after the proposal master minimum equipment list (PM MEL) item is validated and passed the evaluation of FOEB. In order to select suitable PM MEL items for validation, it is necessary for the main manufacturer of civil aircraft to comprehensively consider each influencing factor and conduct a scientific and effective evaluation of each factor. The PM MEL validation evaluation standard is established based on the analytic hierarchy process (AHP) in this paper. The Delphi method is used to determine the key indicators and the importance scores of each indicator. The application of evaluation standards is explained through the PM MEL items about fuel system of a certain domestic civil aircraft model, and the specific verification item is determined. The results show that the evaluation standard can evaluate PM MEL validation effectively, and provide the reference and support for PM MEL validation.

**Key words:** analytic hierarchy process method; civil aircraft; PM MEL validation; evaluation standard

收稿日期: 2021-07-02; 修回日期: 2021-09-29

通信作者: 尹楚雄, yinchuxiong@comac.cc

引用格式: 尹楚雄, 顾志武, 薛小锋. 民用飞机主最低设备清单建议稿验证评价标准研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(5): 68-74.

YIN Chuxiong, GU Zhiwu, XUE Xiaofeng. Research on evaluation standard of civil aircraft proposal master minimum equipment list validation[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(5): 68-74. (in Chinese)

## 0 引言

主最低设备清单(Master Minimum Equipment List,简称MMEL)是平衡飞机经济性和安全性的重要工具,是飞行运行评审委员会(Flight Operations Evaluation Board,简称FOEB)的主要评审项目,民用飞机主制造商提交主最低设备清单建议稿(Preliminary Master Minimum Equipment List,简称PMMEL)并通过局方评审后,发布MMEL<sup>[1]</sup>。民用飞机运行过程中,当飞机系统出现故障,短期内又不能修复时,需要通过MEL(该手册由航空公司根据批准的MMEL制定)确认是否能够放行,若MEL中包含飞机故障的设备,实现飞机放行,将极大地提高飞机的经济性,提升飞机的市场竞争力。因此全面考虑PMMEL制定过程中影响要素能为民用飞机主制造商提供有益的工作参考,间接提高民用飞机产品的市场认可度。

MMEL建议项目的验证目的是确保飞机带不工作项目放行的情况下,仍然满足规章所要求足够的安全水平,为FOEB评审和MMEL持续改进提供依据<sup>[2]</sup>。根据AC-91-037要求,验证对象包括故障影响分析、操作程序、维修程序、机组工作负荷。当验证完成并经FOEB评估通过后,建议项目才算作通过FOEB评审。而实际工作中,因型号研制进度的要求,为保证新型号PMMEL编制后能够尽快开展验证工作,且专项PMMEL验证工作也会占用主制造商较多的资源和精力,而从数百个MMEL建议项目中筛选需要开展特别验证的评价标准就显得尤为重要。

民用飞机主制造商通常是基于经验选取对应的PMMEL验证项目,但缺乏能全面考虑各影响因素的评价标准。开展PMMEL验证评价标准研究,能有效梳理PMMEL验证工作中的各影响要素(如安全性、民航规章、机组工作等),科学合理地筛选出PMMEL验证项目,为PMMEL项目通过FOEB评审提供支持和参考。

国外,欧洲航空安全局(EASA)编发了主最低设备清单的取证规范和指导材料(CS-MMEL)<sup>[3]</sup>,对PMMEL工作进行了较为全面的指导,但对PMMEL验证项目的选取并未给出具备可操作性的方法或原则。国内,许科龙<sup>[4]</sup>研究了民用飞机主最低设备清单验证工作的管理方法;朱杰霞等<sup>[5]</sup>研究了对运行文件和持续适航文件的验证实施,但

均未对如何选择确定PMMEL验证项目进行深入研究。

层次分析法<sup>[6]</sup>作为一种将与决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析的决策方法,比较适合于具有分层交错评价指标的目标系统,而且目标值又难于定量描述的决策问题<sup>[7]</sup>。在理论研究方面,郭金玉等<sup>[8]</sup>开展了针对层次分析法的研究与应用;常建娥等<sup>[9]</sup>开展了层次分析法确定权重的研究。在实践应用方面,付强等<sup>[10]</sup>开展变燃速发射药连续化生产模糊综合评价模型研究;郭立<sup>[11]</sup>开展了人机结合层次分析—灰色模糊综合评价方法的研究;崔建国等<sup>[12]</sup>开展了基于灰色模糊与层次分析的多属性飞机维修决策方法研究;刘爽等<sup>[13]</sup>开展了基于AHP和PCA的多指标评价建模方法及应用研究;贾宝惠等<sup>[14]</sup>研究了基于AHP-SPA方法的民用飞机修理级别确定综合分析模型。上述研究成果为应用层次分析法解决PMMEL验证评价问题,提供了理论可行性和可借鉴案例。

本文首先采用德尔菲法确定PMMEL验证评价标准的关键指标和各个指标的重要性得分,然后采用层次分析法计算得到权重,最后通过实际案例说明评价标准的应用效果。

## 1 PMMEL验证工作概述

PMMEL验证要满足民航规章对于PMMEL制定的各项要求及原则。根据AC-91-037要求,验证对象包括故障影响分析、操作程序、维修程序、机组工作负荷,其中考虑到MMEL的维修程序会直接引用或者列入飞机维修手册(AMM),且针对维修程序的验证仅能通过书面验证或地面试验开展,本文将不针对维修程序的验证予以讨论。

目前民用飞机主制造商对MMEL建议项目的验证主要采用书面验证、地面试验、飞行试验、模拟器试验的方法<sup>[5]</sup>,对各验证方法的说明如下:

(1)采用说明性文件的方法,通过编制PMMEL,对建议项目进行分析论证,表明建议项目符合AC-91-037的要求。

(2)采用地面试验的方法,对故障后的系统工作状态进行演示,表明故障影响分析与实际情况相符。

(3)采用飞行试验的方法,对故障后的飞行进

行演示,表明故障影响分析与实际情况相符,和/或机组工作负荷可接受。

(4) 采用模拟器试验的方法,对故障后的飞行进行模拟,表明故障影响分析与实际情况相符,和/或机组工作负荷可接受。

因实际工作中,所有 MMEL 建议项目均需开展书面验证,本文讨论的 PMMEL 验证仅包括地面试验、飞行试验、模拟器试验。

## 2 关键指标的提取

为提取 PMMEL 验证评价标准的关键指标(影响要素),通过德尔菲法<sup>[15]</sup>,根据经验列出可以用来评价验证方法的指标,然后建立专家组,并设计问卷,让专家评判各指标的重要程度。

第一步,建立专家组:选取环控、机电、航电、动力装置、结构5个专业每个专业领域的2名 PMMEL 工作经验丰富的专家,共10人,另外再增加3名飞行经验丰富的机长和2名资深乘务员,一同组成15人的专家小组。

第二步,设计问卷:问卷内容为请专家评价各项指标的重要性,为了能够评判各个指标,引入量表。特别重要计5分,重要计4分,不清楚计3分,不重要计2分,非常不重要计1分。

第三步,第一轮问卷进行完成后,回收问卷,整理数据(如表1所示)。

表1 第一轮问卷采集数据

Table 1 The data from the first round of questionnaires

专家编号	重要性评分				
	指标1	指标2	指标3	指标4	指标5
专家1	5	4	2	5	4
专家2	5	4	2	5	5
专家3	4	4	1	4	5
专家4	4	4	2	4	4
专家5	5	4	1	5	4
专家6	5	3	2	3	5
专家7	4	4	2	4	4
专家8	4	4	1	4	4
专家9	5	4	1	4	4
专家10	4	4	2	5	4
专家11	5	5	2	5	5
专家12	5	3	3	5	5
专家13	4	3	2	4	5
专家14	4	4	2	4	4
专家15	4	3	1	4	5

为使问卷结果更加客观、可信,将第一轮整理的结果数据发送给各专家,由专家参考这部分内容修改自己的意见(如表2所示),最终获取各专家的一致性意见。得到的5项指标及其重要性得分的算术平均值:指标1,故障影响中对飞机安全性的影响(4.385);指标2,继发故障影响中对飞机安全性的影响(3.923);指标3,对所属系统或功能的熟悉程度(1.923);指标4,操作程序内容是否来源于飞机飞行手册(4.230);指标5,增加机组工作负荷程序(4.538)。

表2 第二轮问卷采集数据

Table 2 The data from the second round of questionnaires

专家编号	重要性评分				
	指标1	指标2	指标3	指标4	指标5
专家1	5	4	2	5	4
专家2	5	5	2	5	5
专家3	4	4	1	4	5
专家4	4	4	2	4	4
专家5	5	4	1	5	4
专家6	3	3	2	3	5
专家7	4	4	2	3	4
专家8	4	4	1	3	5
专家9	5	5	1	4	4
专家10	4	4	2	5	4
专家11	5	5	3	5	5
专家12	5	3	3	5	5
专家13	4	3	4	4	5
专家14	4	4	2	4	4
专家15	4	3	1	4	5

为了验证问卷数据的一致性,需运用信度检验,计算得到标准化 Cronbach  $\alpha$  系数值为 0.924,大于 0.9<sup>[16]</sup>,说明数据信度质量高,可用于进一步分析。而指标“对所属系统或功能的熟悉程度”的重要性得分低于3且明显低于其他指标,因此需在评价体系中将此指标删除。

## 3 层次分析法构建评价标准体系

### 3.1 构建关键指标判断矩阵

层次分析法对于判断矩阵的构建主要运用两两比较方法,具体的比例标度及含义<sup>[17]</sup>如表3所示。

表 3 比例标度及其含义  
Table 3 Proportional scale and its meaning

标度值	含义
1	表示两个元素相比,具有同等重要性
3	表示两个元素相比,该元素比另一个元素稍重要
5	表示两个元素相比,该元素比另一个元素明显重要
7	表示两个元素相比,该元素比另一个元素强烈重要
9	表示两个元素相比,该元素比另一个元素极端重要
2,4,6,8	如果对事物的差别介于两者之间时,可取上述相邻判断的中间值
$a_{ij}$	若元素 $i$ 与元素 $j$ 重要性之比为 $a_{ij}$ ,那么元素 $j$ 与元素 $i$ 重要性之比为 $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$

举例说明,当  $X:Y=3$  时,可以说  $X$  比  $Y$  稍微重要,反之  $Y:X=1/7$  时,则  $X$  比  $Y$  强烈重要。

根据层次分析法比例标度的定义并结合德尔菲法得到的各指标重要性打分结果,各关键指标的两两比较判断矩阵  $A$  (正互反矩阵),如表 4 所示,其中  $P_1$  为故障影响中对飞机安全性的影响, $P_2$  为继发故障影响中对飞机安全性的影响, $P_3$  为操作程序内容是否来源于飞机飞行手册, $P_4$  为增加机组工作负荷程度。

表 4 PMMEL 验证关键指标的判断矩阵  
Table 4 The judgment matrix of PMMEL validation critical indicators

指标	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
$P_1$	1	2	1	1
$P_2$	1/2	1	1	1/3
$P_3$	1	1	1	1
$P_4$	1	3	1	1

### 3.2 权重计算

利用算数平均法计算各关键指标的权重<sup>[12]</sup>步骤如下:

第一步,将判断矩阵按列归一化(每个元素除以其所在列的和);

第二步,将归一化的矩阵按行求和;

第三步,将向量中每个元素除以关键指标个数,就得到了权重向量  $W$ 。

$$W = (W_1, W_2, W_3, W_4)^T = (0.28, 0.159, 0.245, 0.316)^T$$

### 3.3 一致性检验

为检验一致性,需要计算  $I_C$ :

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

计算判断矩阵  $A$  的最大特征根:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (2)$$

式中:  $W$  为所求的特征向量;  $(AW)_i$  为向量  $AW$  的第  $i$  个元素。

$$AW = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1 & 1/3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.28 \\ 0.159 \\ 0.245 \\ 0.316 \end{pmatrix}$$

$$(AW)_1 = 1 \times 0.28 + 2 \times 0.159 + 1 \times 0.245 + 1 \times 0.316 = 1.159$$

$$(AW)_2 = (1/2) \times 0.28 + 1 \times 0.159 + 1 \times 0.245 + (1/3) \times 0.316 = 0.649$$

$$(AW)_3 = 1 \times 0.28 + 1 \times 0.159 + 1 \times 0.245 + 1 \times 0.316 = 1$$

$$(AW)_4 = 1 \times 0.28 + 3 \times 0.159 + 1 \times 0.245 + 1 \times 0.316 = 1.318$$

$$\lambda_{\max} = 1.159 / (4 \times 0.28) + 0.649 / (4 \times 0.159) + 1 / (4 \times 0.245) + 1.318 / (4 \times 0.316) = 1.035 + 1.020 + 1.020 + 1.043 = 4.118$$

得到:

$$I_C = (4.118 - 4) / (4 - 1) = 0.039$$

不同阶判断矩阵的平均随机一致性指标  $I_R$  如表 5 所示。

表 5 1~8 阶判断矩阵的  $I_R$  值<sup>[14]</sup>  
Table 5  $I_R$  value of 1~8 order judgment matrix<sup>[14]</sup>

阶数	$I_R$	阶数	$I_R$
1	0	5	1.12
2	0	6	1.24
3	0.58	7	1.32
4	0.90	8	1.41

当  $R_C = \frac{I_C}{I_R} < 0.1$  时,说明判断矩阵  $A$  是符合

要求的,即判断矩阵  $A$  具有足够的一致性;否则,说明该判断矩阵  $A$  不具有足够的一致性,需要重新调整、计算<sup>[17]</sup>。

### 3.4 建立 PMMEL 验证标准评价体系的标准计算方法

验证评价,需建立 PMMEL 验证评价体系的标准计算方法,如表 6 所示。

为方便针对每个 PMMEL 项目进行 PMMEL

表 6 PMMEL 项目验证评价体系的标准计算方法

Table 6 Standard calculation method for PMMEL item validation evaluation system

指标	计算方法
故障影响中对飞机安全性的影响	故障影响造成的最严重危害等级为“较大的”,计 100;“较小的”,计 60;“无安全性影响”,计 0。
继发故障影响中对飞机安全性的影响	下一个最关键故障影响造成的最严重危害等级为“较大的”,计 100;“较小的”,计 60;“无安全性影响”或“无继发故障影响”,计 0。
操作程序内容是否来源于飞机飞行手册	在 AFM 中完全没有任何内容,计 100;在 AFM 中有完整程序,计 0;若部分内容在 AFM 中已给出,可根据缺少内容的百分比,视情打分。
增加机组工作负荷程度	对飞行机组:增加了较大的工作负荷,计 100;增加了较小的工作负荷,计 60; 对客舱机组:增加了较大的工作负荷,计 70;增加了较小的工作负荷,计 40; 对地面维护:造成较大的工作负荷,计 60;增加了较小的工作负荷,计 20。

注:该部分内容可参考机组人员意见在 0~100 范围调整分值。

## 4 案例运用

举例,验证评价的分值为  $\sum_{i=1}^n P_i \cdot W_i$ ,分别计算各

以国产某型号大型客机的 28 章 PMMEL 项目

PMMEL 项目的验证评价分值,计算结果如表 7 所示。

表 7 国产某型号大型客机 28 章 PMMEL 项目验证评价计算结果

Table 7 The validation calculation results of ATA28 PMMEL items of one domestic aircraft

PMMEL 项目	故障影响中对飞机安全性的影响	继发故障影响中对飞机安全性的影响	操作程序内容是否来源于飞机飞行手册	增加机组工作负荷程度	验证评价
28-21-01 压力加油系统	最严重危害等级为无安全性影响,计 0。	无	无	轻微增加地面维护人员工作负荷,计 20。	7.32
28-21-02 压力加油自动模式	最严重危害等级为无安全性影响,计 0。	无	无	轻微增加地面维护人员工作负荷,计 20。	7.32
28-21-03 压力加油手动模式	最严重危害等级为无安全性影响,计 0。	无	无	轻微增加地面维护人员工作负荷,但手动加油模式使用频度并不高,计 10。	3.16
28-21-04 中央翼油箱加油切断阀	最严重危害等级为无安全性影响,计 0。	无	无	不增加机组工作负荷,计 0。	7.32
28-21-05 机翼油箱加油切断阀	最严重危害等级为无安全性影响,计 0。	无	无	轻微增加地面维护人员工作负荷,计 20。	7.32
28-21-06 放油切断阀	最严重危害等级为较小的,计 60。	无	无	不增加机组工作负荷,计 0。	16.8
28-21-07 加/放油控制板	最严重危害等级为无安全性影响,计 0。	无	无	不增加机组工作负荷,计 0。	0
28-22-01 中央翼油箱交流泵	最严重危害等级为较小的,计 60。	最严重危害等级为较小的,计 60。	在 AFM 中无 O 程序内容,但 FCOM 中已提供操作程序内容,计 0。	轻微增加飞行机组工作负荷,计 60。	45.3
28-23-01 APU 直流泵	最严重危害等级为较小的,计 60。	无	在 AFM 中已有 O 程序内容,计 0。	不增加机组工作负荷,计 0。	16.8
28-23-02 APU 供油切断阀	最严重危害等级为较小的,计 60。	无	无	轻微增加机组工作负荷,计 60。	35.76

从表7可以看出:PM MEL项目“28-22-01 中央翼油箱交流泵”、“28-23-02 APU 供油切断阀”的验证评价分值明显高于其他项目,可针对上述两个PM MEL项目进行验证。

结合验证方法适用范围以及PM MEL项目功能考虑,可得出结论:PM MEL项目“中央翼油箱交流泵”安排试飞试验,PM MEL项目“APU 供油切断阀”安排地面试验。后续其他系统将同样按此方法开展PM MEL项目验证评价,确定完整的PM MEL验证清单,并在型号研制阶段的试飞工作中结合或单独开展。

## 5 结 论

(1) 本文提出的PM MEL验证评价标准,采用定性分析与定量计算相结合的方式对影响PM MEL验证的各项因素进行了综合评价,为解决筛选需验证的PM MEL项目提供了一种新思路,避免了先前工作只能依赖经验或等待审查方在评审所有PM MEL项目后给出建议性质的验证清单。

(2) 本文所论述的评价标准,可通过故障影响中对飞机安全性的影响、继发故障影响中对飞机安全性的影响、操作程序内容是否来源于飞机飞行手册、增加机组工作负荷程度这四个关键指标,根据各PM MEL项目的实际情况,并在最终的评价计算前综合考虑机组意见,最终根据评价快速提取出PM MEL验证项目清单,在型号研制过程中同步开展PM MEL建议项目的编制与验证,为民用飞机主制造商开展PM MEL相关工作提供一定的建议和参考。

### 参 考 文 献

- [1] 中国民用航空局. 航空器主最低设备清单的制定和批准: AC-91-037[S]. 北京: 中国民用航空局, 2018.  
Civil Aviation Administration of China. Preparation and approval of aircraft master minimum equipment list: AC-91-037[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2018. (in Chinese)
- [2] 于欣. 主最低设备清单(MMEL)评估报告的研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2011(4): 1-4.  
YU Xin. Research of master minimum equipment list (MMEL) assessment report[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2011(4): 1-4. (in Chinese)
- [3] European Union Aviation Safety Agency. Certification specifications and guidance material for master minimum equipment list (CS-MMEL)[S]. North Rhine-Westphalia Koln: European Aviation Safety Agency, 2021.
- [4] 许科龙. 民用飞机主最低设备清单验证工作研究[J]. 科技创新导报, 2015(33): 39-40.  
XU Kelong. Research of aircraft master minimum equipment list validation[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015(33): 39-40. (in Chinese)
- [5] 朱杰霞, 陈朋. 浅析民用飞机运行文件和持续适航文件的验证实施[J]. 科技创新导报, 2016(27): 15-18.  
ZHU Jiexia, CHEN Peng. The validation of the operation document and continued airworthiness instructions for civil aviation research[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016(27): 15-18. (in Chinese)
- [6] 赵焕臣. 层次分析法[M]. 北京: 科学出版社, 1986.  
ZHAO Huanchen. Analytic hierarchy process[M]. Beijing: Science Press, 1986. (in Chinese)
- [7] 许树柏. 实用决策方法: 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.  
XU Shubo. Practical decision-making method: principle of analytic hierarchy process[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 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)
- [10] 付强, 马忠亮, 高可正, 等. 变燃速发射药连续化生产模糊综合评价模型研究[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(1): 197-200.  
FU Qiang, MA Zhongliang, GAO Kezheng, et al. Study on fuzzy comprehensive evaluation model for continuous production for variable burning rate propellant[J]. Journal of Safety and Environment, 2010, 10(1): 197-200. (in Chinese)
- [11] 郭立. 人机结合层次分析-灰色模糊综合评价方法的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.  
GUO Li. The research of man-machine integration analysis hierarchy level and grey fuzzy comprehensive evaluation method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [12] 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 Aero-

- nautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 478-486. (in Chinese)
- [13] 刘爽, 吕永波, 张仲义. 基于 AHP 和 PCA 的多指标评价建模方法及应用[J]. 信息与控制, 2015, 44(4): 416-421. LIU Shuang, LYU Yongbo, ZHANG Zhongyi. Multi-index evaluation modeling method based on AHP and PCA and its application[J]. Information and Control, 2015, 44(4): 416-421. (in Chinese)
- [14] 贾宝惠, 于灵杰, 蔺越国, 等. 基于 AHP-SPA 方法的民机修理级别确定综合分析模型[J]. 航空学报, 2017, 38(11): 178-186. JIA Baohui, YU Lingjie, LIN Yueguo, et al. Comprehensive analysis model for determination of civil aircraft repair level based on AHP-SPA method[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(11): 178-186. (in Chinese)
- [15] OBSBORNE J, COLLINS S, RATCLIFFE M, et al. What "ideas-about-science" should be taught in school science? A delphi study of the expert community[J]. Journal of Research in Science Teaching, 2003, 40(7): 692-720.
- [16] 周俊. 问卷数据分析——破解 SPSS 的六类分析思路[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017. ZHOU Jun. Questionnaire data analysis: six kinds of analysis ideas of SPSS[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2017. (in Chinese)
- [17] 荀焯. 军事物流学[M]. 北京: 中国财富出版社, 2019. XUN Ye. Military logistics[M]. Beijing: China Fortune Press, 2019. (in Chinese)
- 作者简介:**  
尹楚雄(1988—), 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 民机最低设备清单。  
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。  
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: 丛艳娟)



(上接第 58 页)

- 14] 潘晓茜, 康锐. 基于灰色预测的加速试验机理一致性判定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(6): 80-84, 90. PAN Xiaolian, KANG Rui. Identification method of failure mechanism consistency for accelerated testing on grey forecasting[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(6): 80-84, 90. (in Chinese)
- [15] DALTON E, REN G, PUNCH J, et al. Accelerated temperature cycling induced strain and failure behaviour for BGA assemblies of third generation high Ag content Pb-free solder alloys[J]. Materials & Design, 2018, 154: 184-191.
- [16] LU X, DING M, ZHANG C, et al. Investigation on microstructure evolution and failure mechanism of boron doped diamond coated titanium electrode during accelerated life test [J]. Thin Solid Films, 2018(8): 306-313.
- [17] YE Z, CHEN L, TANG L, et al. Accelerated degradation test planning using the inverse gaussian process [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2014, 63(3): 750-763.
- [18] HAN L, WANG Y, ZHANG Y, et al. Competitive cracking behavior and microscopic mechanism of Ni-based superalloy blade respecting accelerated CCF failure [J]. International Journal of Fatigue, 2021, 150: 106306.
- [19] 郑鑫. 铸铝合金的高低周复合疲劳裂纹扩展和寿命研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012. ZHENG Xin. Study on fatigue crack propagation and fatigue life for cast aluminum alloys under high-cycle & low-cycle interaction loading [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [20] LI W, CUI H, CHEN W, et al. Very high cycle fatigue of cast aluminum alloys under variable humidity levels [J]. SAE International Journal of Materials & Manufacturing, 2015, 8(2): 556-562.
- [21] ZHENG X, Jr ENGLER-PINTO C C, XU X, et al. Modeling of fatigue damage under superimposed high-cycle and low-cycle fatigue loading for a cast aluminum alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 560: 792-801.
- 作者简介:**  
韩雷(1989—), 男, 博士, 博士后。主要研究方向: 航空发动机涡轮叶片损伤失效机理、寿命评估理论与先进增材制造等。  
廖尚红(1990—), 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 航空发动机机械加工工艺以及技术管理。  
于圣杰(1993—), 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 民用飞机环境控制系统设计、试验试飞及运营等。  
费成巍(1983—), 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 飞行器/航空发动机结构可靠性与健康管理和机器学习等。
- (编辑: 丛艳娟)