

doi: 10.7690/bgzdh.2025.11.002

机载弹药技术准备人为差错影响因素分析

路翠华¹, 谭必标², 滕 静¹

(1. 海军航空大学, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 92914 部队, 海南 临高 571820)

摘要: 为有效预防人为差错事故, 运用德尔菲法对机载弹药技术准备人为差错影响因素进行分析。构建人为差错影响因素层次结构模型, 利用专家评判结果相似度进行专家赋权, 采用模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)对人为差错影响因素进行分析。以某次演习演练机载弹药保障为例进行分析。实例结果表明: 对机载弹药技术准备人为差错影响因素进行定量分析, 对影响因素优先控制次序进行排序, 可为后续研究制定规避措施, 预防人为差错事故, 圆满完成战训任务提供较为重要的意义。

关键词: 机载弹药; 人为差错; 影响因素; FAHP

中图分类号: TJ76 **文献标志码:** A

Analysis of Human Error Influencing Factors in Airborne Ammunition Technical Preparation

Lu Cuihua¹, Tan Bibiao², Teng Jing¹

(1. Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. No. 92914 Unit of PLA, Lin'gao 571820, China)

Abstract: In order to effectively prevent human error accidents, the influencing factors of human error in airborne ammunition technical preparation were analyzed by Delphi method. The hierarchical structure model of human error influencing factors is constructed, and the similarity of expert evaluation results is used to determine the weight of experts, and the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) is used to analyze the human error influencing factors. The airborne ammunition support of an exercise is analyzed as an example. The example results show that the quantitative analysis of the human error influencing factors of airborne ammunition technical preparation and the priority control sequence of the influencing factors can provide more important significance for the follow-up study to formulate avoidance measures, prevent human error accidents and successfully complete the combat training mission.

Keywords: airborne ammunition; human error; influencing factors; FAHP

0 引言

随着部队武器装备的跨越式发展, 智能化、信息化等高新技术越来越多地运用到机载弹药设计与制造中, 新技术的运用使机载弹药的安全性和可靠性进一步提高, 因技术而发生安全事故的概率不断降低。对近几年部队在机载弹药技术准备中发生的事故进行统计分析, 因人为差错引发安全事故的比例大大提高, 成为一线保障部队在机载弹药技术准备中发生事故的重要原因, 制约部队战斗力的提高, 严重影响部队战备训练任务的圆满完成。

目前, 国内外在航空维修领域开展了大量人为差错研究, 并取得了一定成果^[1-7], 对减少部队航空维修保障人为差错事故发挥了重要作用, 但相关研究侧重于定性分析, 重点不突出, 措施针对性不强。不同单位、人员、时间和地点发生人为差错的影响因素各不相同, 笔者以某次演习演练机载弹药技术

准备保障任务为例, 运用德尔菲法对人为差错影响因素进行识别, 模糊层次分析法(FAHP)对人为差错影响因素进行定量分析, 根据分析结果有针对性的研究制定规避措施, 从而有效预防人为差错事故。

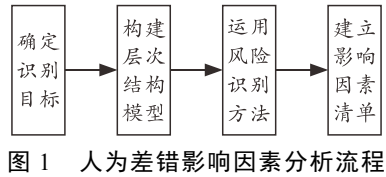
1 机载弹药技术准备人为差错影响因素识别

人为差错影响因素是可能引发人为差错事故的各种因素统称。预防人为差错事故先要准确识别人为差错影响因素。影响因素识别是预防人为差错的关键和基础。开展机载弹药技术准备人为差错影响因素识别: 首先, 对任务进行分析, 确定人为差错影响因素识别的目标; 其次, 根据机载弹药技术准备人、机、法、料、环等要素构建影响因素层次结构模型; 最后, 根据任务特点运用适用的风险识别方法对人为差错影响因素进行识别, 建立人为差错影响因素清单, 为后续开展人为差错影响因素分析

收稿日期: 2024-10-06; 修回日期: 2024-11-06

第一作者: 路翠华(1978—), 女, 山东人, 博士。

提供输入，具体流程如图 1 所示。



1.1 建立人为差错影响因素层次结构

根据全面质量管理理论，结合机载弹药技术准备工作实际，运用层次分析的思想，在文献[1-7]给出各种影响因素的基础上，结合具体保障任务，构建人为差错影响因素层次结构模型，如图 2 所示。

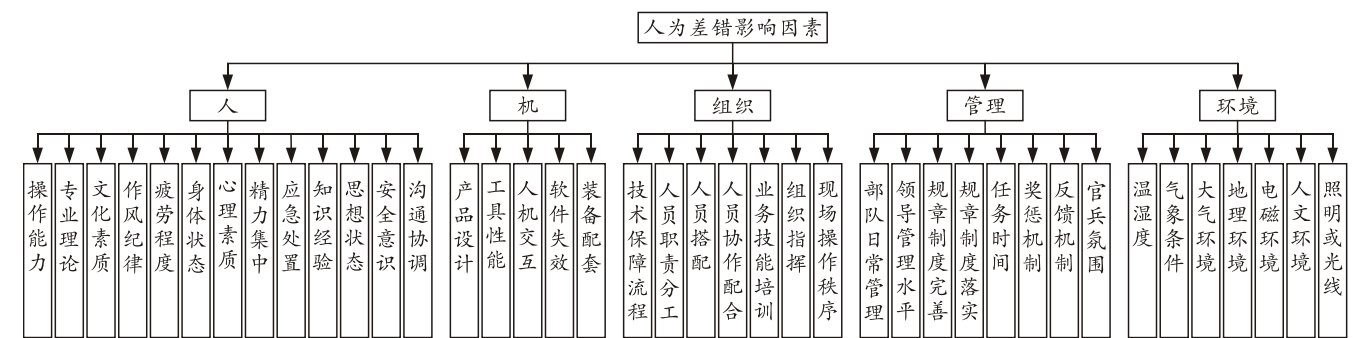


图 2 人为差错影响因素层次结构模型

1.2 基于德尔菲法的人为差错影响因素识别

准确识别人为差错影响因素是进行人为差错影响因素分析的前提和基础，常用的方法有：德尔菲法、头脑风暴法、专家咨询法、流程图法、工作分解法。综合分析以上方法优缺点，根据部队具有丰富的保障经验、弹药专家、底层事故积累等实际情况，在人为差错影响因素识别上运用德尔菲法可信度高。

1.2.1 德尔菲法

德尔菲法，也称专家调查法，起源于 20 世纪 40 年代末，由美国兰德公司创始，是一种反馈匿名函询法。该方法主要是利用经验丰富的专家采用匿名方式。背靠背的反复函询调查，通过反复函调、反馈、归纳、再反馈，最终使专家意见趋于统一，精准识别人为差错影响因素，具体流程如图 3 所示。在国外，许多学术机构对德尔菲法的可信度和准确度进行验证。验证结果表明：采用匿名反馈、反复函调的德尔菲法，在经过专家的反复函调咨询后，得出的结果可信度和准确度通常非常高[8]。

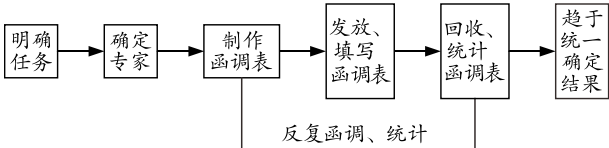


图 3 德尔菲法流程

1.2.2 机载弹药技术准备人为差错影响因素识别

在进行机载弹药技术准备时，从人员自身、组织指挥、管理制度和工作环境 4 方面影响因素入手，按照构建的影响因素层次结果模型，对在开展机载

弹药技术准备过程中发生人为差错的影响因素进行全面识别，风险识别方法的选择要综合考虑任务特点、部队实际、时间因素、数据资料等。笔者采用德尔菲法对机载弹药技术准备人为差错影响因素进行识别。选取 5 位涵盖一线保障部队、院校和军工工厂所的机载弹药保障专业专家，利用德尔菲法对人为差错影响因素进行反复函调咨询，直到专家意见最终趋于统一。在图 2 的影响因素层次结构模型上，确定部队执行某次演习演练机载弹药技术准备人为差错影响因素，如图 4 所示。

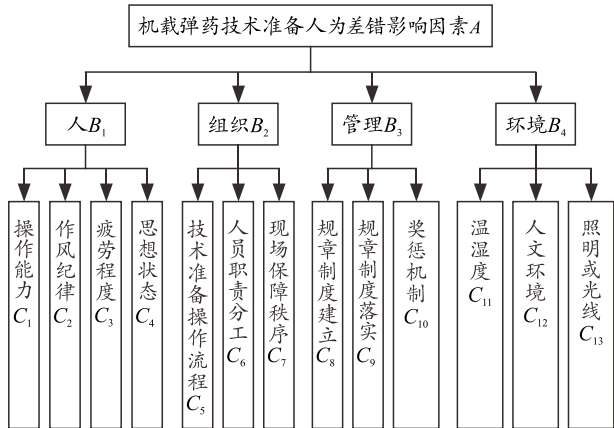


图 4 机载弹药技术准备人为差错影响因素识别

2 机载弹药技术准备人为差错影响因素分析

人为差错影响因素分析是运用适用的分析方法对人为差错影响因素重要度进行分析排序，是制定针对性规避措施的前提，是预防人为差错事故的关键。常用的分析方法有：专家调查法、层次分析法、FAHP、概率分析法、多因素分析法等。笔者结合机载弹药技术准备特点，拟采用 FAHP 对人为差错影

响因素进行定量分析^[9-11]。

2.1 FAHP

FAHP 是一种定性与定量相结合的系统分析方法, 是在层次分析法的基础上融合模糊数学理论, 对构建判断矩阵方法和评判标准进行了改进。改进后的模糊层次分析法适用性更广、操作更简单, 在决策分析中应用非常广泛。在人为差错影响因素分析中具体操作流程如图 5 所示。

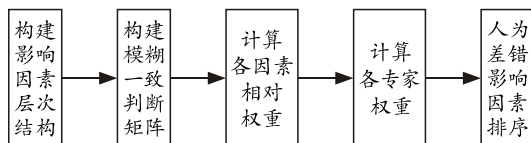


图 5 影响因素模糊层次分析流程

2.1.1 建立影响因素分析层次结构

根据 1.2 节基于德尔菲法的某次演习演练机载弹药技术准备人为差错影响因素识别结果, 建立机载弹药技术准备人为差错影响因素分析层次结构, 如图 4 所示。

2.1.2 构建模糊一致判断矩阵

在模糊层次分析法中, 假定上层次元素 B_i 同下层次中的元素有联系, 用元素 r_{ij} 表示元素 C_i 和元素 C_j 相比较的重要程度($i, j=1, 2, \dots, n$), 则模糊一致判断矩阵 R 可表示为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

r_{ij} 具有以下特征: 1) $0 \leq r_{ij} \leq 1 (i, j=1, 2, \dots, n)$;

2) $r_{ii}=0.5 (i=1, 2, \dots, n)$; 3) $r_{ij}+r_{ji}=1 (i, j=1, 2, \dots, n)$ 。

2.1.2.1 构造 R 矩阵

元素 r_{ij} 的实际意义: 元素 r_{ij} 表示对于上级元素 B_i , 下级元素 C_i 和元素 C_j 相比较时, 元素 C_i 和元素 C_j 具有“...比...重要”的模糊关系隶属度。重要程度用数字 0.1~0.9 表示, 如表 1 所示。

表 1 重要程度标度^[12]

标度 r_{ij}	含义
0.5	元素 C_i 和元素 C_j 一样重要
0.6	元素 C_i 比元素 C_j 稍微重要
0.7	元素 C_i 比元素 C_j 明显重要
0.8	元素 C_i 比元素 C_j 特别重要
0.9	元素 C_i 比元素 C_j 异常重要
0.1~0.4	元素 C_i 与元素 C_j 比较的值为 r_{ij} , 则元素 C_j 与元素 C_i 比较的值为 $r_{ji}=1-r_{ij}$

在解决具体问题中, 首先, 确定机载弹药技术保障方面的专家; 其次, 由专家准确识别某次机载弹药技术准备任务中存在的人为差错影响因素; 最后, 由专家评判人为差错影响因素重要度, 根据各位专家的评判结果最终构建模糊判断一致性矩阵 R 。

2.1.2.2 检验模糊一致性

FAHP 在多因素决策中的应用只需要检验是否具有模糊一致性, 避免了层次分析法需要检验判断矩阵一致性的问题, 具体检验步骤如下:

1) 先确定一行重要度比较把握的元素, 假设决策者对第 m 行 $r_{m1}, r_{m2}, \dots, r_{mn}$ 的判断非常有把握。

2) 用 R 的第 m 行元素减去第 $k (k=1, 2, \dots, n, m \neq n)$ 行的对应元素, 若所得的 n 个值均相等, 则不需要对第 k 行元素进行调整; 否则, 将对第 k 行元素进行调整, 使其满足差值均相等。

以此类推, 对构建的模糊判断矩阵 R 进行模糊一致性检验。

2.1.3 确定人为差错影响因素相对权重

设元素 c_1, c_2, \dots, c_n 的模糊一致判断矩阵为 $R=(r_{ij})_{n \times n}$, 元素 c_1, c_2, \dots, c_n 的权重值为 w_1, w_2, \dots, w_n , 根据综合层次分析法计算各影响因素相对权重的方法, 笔者直接运用公式计算各影响因素的相对权重 w_i :

$$w_i = \frac{2 \sum_{j=1}^n r_{ij}}{n(n-1)} - \frac{1}{n(n-1)} (i, j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

通过计算得到单排序, 根据层次分析法得到第 k 位专家的层次总排序为: $w^{(k)} = [w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \dots, w_n^{(k)}]$, 具体推导证明过程可参考文献[13]。

2.1.4 确定专家相对权重

专家赋权的科学性直接影响人为差错影响因素分析结果的准确性, 目前常用的赋权方法是主观赋权法, 笔者根据专家评判之间的差异, 通过计算最终确定各位专家的权重。模糊层次分析法各位专家的评判结果差异最终体现在影响因素层次总排序中, 总排序的相似度最终反映了专家的权重。即第 $k (k=1, 2, \dots, m)$ 位专家所确定的各因素的权重向量即层次总排序为: $w^{(k)} = [w_1^{(k)}, w_2^{(k)}, \dots, w_n^{(k)}]$, θ_{k1} 表

示权重向量 $\mathbf{w}^{(k)}$ 与 $\mathbf{w}^{(1)}$ 的夹角, 则定义 θ_{k1} 的余弦为:

$$c_{k1} = \cos \theta_{k1} = \frac{\mathbf{w}^{(k)} \times \mathbf{w}^{(1)}}{|\mathbf{w}^{(k)}| \times |\mathbf{w}^{(1)}|} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i^{(k)} \times w_i^{(1)}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (w_i^{(k)})^2 \sum_{i=1}^n (w_i^{(1)})^2}} \quad (3)$$

式中 c_{k1} 为权重向量 $\mathbf{w}^{(k)}$ 与 $\mathbf{w}^{(1)}$ 的相似程度, 且 $-1 \leq c_{k1} \leq 1$, c_{k1} 越大, 表明 $\mathbf{w}^{(k)}$ 与 $\mathbf{w}^{(1)}$ 越接近。通过计算层次总排序向量的夹角余弦, 得到各位专家层次总排序向量相似度矩阵:

$$\mathbf{C} = \cos \theta_{k1} = (c_{k1})_{m \times m} = \begin{bmatrix} 1 & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & 1 & \cdots & c_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 \mathbf{C} 为对称矩阵, 令 $c_k = \sum_{i=1}^m c_{ki}$, c_k 反映了 $\mathbf{w}^{(k)}$ 与其他专家层次总排序向量的差异, 即 c_k 值越大, 表示 $\mathbf{w}^{(k)}$ 与其他专家层次总排序向量越相似, 用 a_k 表示第 k 位专家的权重^[13]:

$$a_k = c_k / \sum_{k=1}^m c_k, (k=1, 2, \cdots, m) \quad (5)$$

2.1.5 计算影响因素排序

首先, 计算出人为差错影响因素每个层次的排序, 根据每个层次的排序得到层次总排序; 其次, 计算根据总排序向量相似度计算每位专家的权重; 最后, 根据式(6)计算得到机载弹药技术准备人为差错各影响因素的值, 根据最终求得的数值对人为差错影响因素进行排序, 作为后续制定针对性规避措施的依据。

$$w_i = \sum_{k=1}^m a_k w_i^{(k)} \quad (6)$$

式中: w_i 为因素 i 最终权值; a_k 为专家 k 权重; $w_i^{(k)}$ 为专家 k 对因素 i 判断权重。

2.2 实例分析

以某次演习演练机载弹药技术准备保障任务为例, 前面章节对机载弹药技术准备人为差错影响因素进行了识别, 建立了影响因素分析层次结构模型, 针对此次任务选取了 5 位机载弹药保障专业专家, 涵盖一线保障部队、院校和军工厂所。为提高分析结果准确度, 5 位专家深入一线任务部队实地考察, 最终根据以上层次结构模型分别给出模糊一致判断矩阵, 并通过了模糊一致性检验。其中专家 1 给出

的矩阵为:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{A-B_i}^{(1)} &= \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.7 & 0.9 \\ 0.4 & 0.5 & 0.6 & 0.8 \\ 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.7 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}; & \mathbf{R}_{B_1-C_i}^{(1)} &= \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.6 & 0.8 \\ 0.3 & 0.5 & 0.4 & 0.6 \\ 0.4 & 0.6 & 0.5 & 0.7 \\ 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{R}_{B_2-C_i}^{(1)} &= \begin{bmatrix} 0.5 & 0.8 & 0.7 \\ 0.2 & 0.5 & 0.4 \\ 0.3 & 0.6 & 0.5 \end{bmatrix}; & \mathbf{R}_{B_3-C_i}^{(1)} &= \begin{bmatrix} 0.5 & 0.7 & 0.9 \\ 0.3 & 0.5 & 0.7 \\ 0.1 & 0.3 & 0.5 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{R}_{B_4-C_i}^{(1)} &= \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6 & 0.9 \\ 0.4 & 0.5 & 0.8 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (7) \end{aligned}$$

根据式(1), 计算得到专家 1 对每个人为差错影响因素评判的层次单排序向量为:

$$\mathbf{w}_{A-B_i}^{(1)} = [0.367 \quad 0.300 \quad 0.233 \quad 0.100];$$

$$\mathbf{w}_{B_1-C_i}^{(1)} = [0.350 \quad 0.217 \quad 0.283 \quad 0.150];$$

$$\mathbf{w}_{B_2-C_i}^{(1)} = [0.5 \quad 0.2 \quad 0.3];$$

$$\mathbf{w}_{B_3-C_i}^{(1)} = [0.533 \quad 0.333 \quad 0.134];$$

$$\mathbf{w}_{B_4-C_i}^{(1)} = [0.5 \quad 0.4 \quad 0.1] \quad (8)$$

根据层次分析法, 得到专家 1 对每个人为差错影响因素评判的总排序向量为:

$$\mathbf{w}^{(1)} = [0.128 \quad 0.079 \quad 0.105 \quad 0.055 \quad 0.150 \quad 0.060 \quad 0.090 \quad 0.124 \quad 0.078 \quad 0.031 \quad 0.050 \quad 0.040 \quad 0.010] \quad (9)$$

同理, 可以计算出其他 4 位专家的层次总排序向量分别为:

$$\mathbf{w}^{(2)} = [0.137 \quad 0.068 \quad 0.091 \quad 0.046 \quad 0.134 \quad 0.072 \quad 0.103 \quad 0.097 \quad 0.076 \quad 0.035 \quad 0.068 \quad 0.047 \quad 0.026];$$

$$\mathbf{w}^{(3)} = [0.117 \quad 0.083 \quad 0.094 \quad 0.048 \quad 0.137 \quad 0.055 \quad 0.083 \quad 0.101 \quad 0.089 \quad 0.052 \quad 0.061 \quad 0.047 \quad 0.033];$$

$$\mathbf{w}^{(4)} = [0.128 \quad 0.104 \quad 0.008 \quad 0.055 \quad 0.130 \quad 0.100 \quad 0.070 \quad 0.093 \quad 0.074 \quad 0.033 \quad 0.049 \quad 0.062 \quad 0.022];$$

$$\mathbf{w}^{(5)} = [0.120 \quad 0.096 \quad 0.073 \quad 0.061 \quad 0.122 \quad 0.066 \quad 0.094 \quad 0.098 \quad 0.076 \quad 0.043 \quad 0.068 \quad 0.060 \quad 0.023] \quad (10)$$

利用式(3)~(5), 计算出 5 位专家的权重向量为:

$$\mathbf{a} = [0.200 \quad 0.202 \quad 0.201 \quad 0.195 \quad 0.202] \quad (11)$$

利用式(6)计算得到此次演习演练机载弹药技术准备人为差错影响因素向量总排序为:

$$\mathbf{w} = [0.126 \quad 0.086 \quad 0.075 \quad 0.053 \quad 0.135 \quad 0.070 \quad 0.088 \quad 0.103 \quad 0.079 \quad 0.039 \quad 0.059 \quad 0.051 \quad 0.023] \quad (12)$$

根据影响因素向量总排序, 对机载弹药技术准

备人为差错影响因素优先控制次序进行排序，如表 2 所示。

表 2 人为差错影响因素优先控制次序排序

重要度	影响因素	权重	排序
关键 $w_i \geq 0.1$	技术准备操作流程 C_5	0.135	1
	操作能力 C_1	0.126	2
	规章制度建立 C_8	0.103	3
重要 $0.05 \leq w_i < 0.1$	现场保障秩序 C_7	0.088	4
	作风纪律 C_2	0.086	5
	规章制度落实 C_9	0.079	6
	疲劳程度 C_3	0.075	7
	人员职责分工 C_6	0.070	8
	温湿度 C_{11}	0.059	9
	思想状态 C_4	0.053	10
	人文环境 C_{12}	0.051	11
一般 $w_i < 0.05$	奖惩机制 C_{10}	0.039	12
	照明或光线 C_{13}	0.023	13

由表 2 可知：1) 执行本次演习演练机载弹药技术准备任务，技术准备操作流程、人员操作能力、规章制度建立 3 个影响因素是预防人为差错的关键因素，必须高度重视，任务前研究制定针对性规避措施做好重点防范；2) 现场保障秩序、人员作风纪律、规章制度落实、人员疲劳程度、人员职责分工、温湿度、思想状态、人文环境 8 个影响因素，是人为差错防范的重要因素，要重点关注，做好防范；3) 奖惩机制、照明或光线 2 个影响因素是一般因素，任务中要注意避免。

3 结论

笔者运用德尔菲法构建人为差错影响因素层次结构模型，对人为差错影响因素进行识别，运用模糊层次分析法对人为差错影响因素进行分析排序，利用专家评判结果相似度进行专家赋权，提高了专家赋权客观性和准确性，最后以某次演习演练机载弹药技术准备保障任务为例，对人为差错影响因素进行定量分析。实例分析结果表明：运用科学适用

的分析方法对机载弹药技术准备人为差错影响因素进行定量分析，对影响因素优先控制次序进行排序，为后续研究制定针对性人为错差规避措施，有效预防人为差错事故，圆满完成部队战训任务具有较为重要的意义。

参考文献：

[1] 牟艳东, 张亮, 吕剑宝. 对航空维修中人为差错的研究与思考[J]. 黑龙江科技信息, 2016(12): 134.

[2] 王飞. 分析飞机维修中人为差错的原因分析与控制[J]. 数字通信世界, 2018(10): 259.

[3] 陈静敏. 航空维修差错人为因素浅析[J]. 科技信息, 2013(26): 447.

[4] 于靖伟. 浅析航空维修中人为差错产生的原因和预防措施[J]. 才智, 2016(24): 231.

[5] 韩良元. 航空维修中人为差错诱因分析与预防建议[J]. 科技视界, 2017(5): 321-329.

[6] 王彦. 民用航空器人为差错影响因素及航空安全维护策略思考[J]. 科技与创新, 2015(17): 32-34.

[7] 孟飞, 杨海涛. 航空维修人为差错分析与预防对策研究[J]. 西安航空学院学报, 2015, 33(5): 32-35.

[8] 王琳. 装备研制的风险评估方法[J]. 国防, 2018(9): 64-67.

[9] 孙勇, 张乐, 胡洁. 基于模糊层次分析法的无人运输机效能评估[J]. 军事交通学报, 2022, 1(11): 91-94.

[10] 陆巍巍, 张鑫, 苏剑. 基于模糊层次分析法的导弹保障能力评估[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(6): 128-130, 148.

[11] 梁鑫磊. 基于模糊层次分析法的民航机务维修风险评估研究[D]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2012.

[12] 甘旭升, 端木慧子, 高海龙, 等. 模糊一致矩阵的 AHP 在装备采购风险评价中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(8): 108-112.

[13] 刘凤强, 孙志强, 谢红卫. 航空维修人为差错影响因素分析中的模糊层次分析法[J]. 中国安全科学学报, 2008(7): 43-48.