

通用航空安全评价指标体系研究

宋薇薇, 刘岩松

(沈阳航空航天大学民用航空学院, 沈阳 110136)

摘要: 从人为因素的角度出发, 分析人为因素中对通用航空安全有影响的因素, 从而有效预防通用航空事故的发生, 提高通用航空安全。在讨论人为因素的基础上, 综合考虑人、硬件、环境、软件等各种因素, 并在 SHEL 模型的基础上, 分析人为因素对航空安全的影响。建立综合评价体系, 列出影响通用航空安全的一级和二级指标。运用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP)-熵值法组合赋权确定权重, 主观、客观相结合更具说服力, 并以此建立模糊综合评价模型。最后结合中国近年通用航空事故分析, 进行模糊评价。根据最大隶属度原则得出影响通用航空安全的主要人为因素综合评价等级, 并提出相应的具体建议及措施。

关键词: 航空运输; 通用航空安全; 人为因素; 模糊综合评价; AHP-熵值法; SHEL 模型

中图分类号: [U8] 文献标识码: A

文章编号: 1674-2850(2019)05-0824-08

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Research on general aviation safety evaluation index system

SONG Weiwei, LIU Yansong

(Civil Aviation College, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: Starting from the perspective of human factors, the factors affecting general aviation safety among human factors are analyzed, so as to effectively prevent the occurrence of general aviation accidents and to improve general aviation safety. On the basis of discussing human factors, various factors are comprehensively considered such as human, hardware, environment and software. And the influence of human factors on aviation safety is analyzed based on SHEL model. A comprehensive evaluation system is established, which lists the primary and secondary indicators that affect general aviation safety. The analytic hierarchy process (AHP)-entropy method is used to determine the weights by combining weights. The combination of subjective weight and objective weight is more convincing, and a fuzzy comprehensive evaluation model is established. Finally, combined with the analysis of China's general aviation accidents in recent years, the fuzzy evaluation is carried out. According to the maximum membership degree principle, the comprehensive evaluation level of main human factors affecting general aviation safety is obtained, and the corresponding specific recommendations and measures are proposed.

Key words: air transport; general aviation safety; human factors; fuzzy comprehensive evaluation; AHP-entropy method; SHEL model

0 引言

自古以来航空安全都是民航工作的重要组成部分^[1]。通用航空作为一个高风险与高科技并存的产业, 不会发生一些航空事故。根据最新数据统计, 2014年至2017年发生通用航空事故的总数为74起^[2]。作为航空运行复杂系统中的核心组成部分, 人为因素的地位越来越突出, 已经成为决定民航安全的首要因素。

1972年, EDWARDS教授首次提出了安全工作中“人”所处的特定系统界面的原理, 即SHEL模型^[3]。

1986年,贝叶斯网络(Bayesian network, BN)被认为可能成为概率推理中最普及的模型,它是贝叶斯方法和图形理论相结合的产物,也被称为“信度网络”、“贝叶斯置信网络”或“有向无环图模型”^[4]。1999年,孙瑞山等^[5]采用基元事件分析法对现役飞机进行详细研究和统计分析,以及对航路和机场进行分析,进而对航空公司的固有危险度进行评估,得出更加客观、综合、全面的评估结果。2012年,金灿灿等^[6]采用定性和定量相结合的方法进行安全风险评估,主要是针对民航维修安全人为因素的评价,得出了影响风险的主要因素。

以上方法均仅从一个方面对航空安全进行研究,但航空安全会随很多因素变化。因此,本文选择模糊综合评价用以降低通航飞机运行过程中的危险,从而满足以后飞行安全的实际需要,具有十分重要的意义。

1 人为因素基本理论与模糊综合评价法

1.1 人为因素基本理论

国际上对人为因素的定义是 EDWARDS 教授提出的“人为因素是通过系统应用人为科学,在系统工程框架中优化人与其活动的关系”^[7]。

1.2 模糊综合评价法

1.2.1 模糊综合评价基本概述

模糊综合评价法由美国伯克利加利福尼亚大学的 ZADEH 教授最先创立,其主要适用于多因素决策^[8]。模糊综合评价法是通过数学方法,对受多种因素影响的事物进行综合评价。其优势在于:得出的结果比较清晰,具有较强的系统性。目前,模糊综合评价法已经成功应用于很多领域,能较好地解决模糊的、难以量化的问题^[9]。

基于人为因素的通用航空安全有多种影响因素,而各因素间又有着千丝万缕的联系,因此为了数据的准确客观性,本文主要采用模糊综合评价法与 AHP-熵值法相结合的方法进行综合评价。

1.2.2 模糊综合评价基本步骤

- 1) 建立评价指标的因素集;
- 2) 建立评价集;
- 3) 确定评价因素的权重;
- 4) 建立评价矩阵;
- 5) 得出模糊综合评价结果。

2 基于人为因素的通用航空安全模糊综合评价模型的建立

2.1 人为因素对通用航空安全的影响因素

人为因素对通用航空安全的影响因素包括个人因素、团队协作、机组间交流、技术水平、机组资源管理等,这些因素均会对通用航空安全造成一定的影响。

2.2 以人为因素为中心的通用航空安全模糊综合评价体系的建立

2.2.1 基本模型介绍

1) SHELL 模型

1972年,EDWARDS 教授提出了 SHELL 模型:软件、硬件、环境、生命件。1987年,HAWKIN 对模型进行了改进^[10]。SHELL 模型如图 1 所示。

SHEL 模型的创新性就在于它将系统的特性视为四个组成部分相互作用的结果，主要指人与人、人与硬件、人与软件、人与环境之间相互作用的关系。

2) REASON 模型

1990 年，英国曼彻斯特大学 REASON 教授提出了 REASON 模型^[11]。作为航空事故调查与分析的理论模型之一，REASON 认为事故的发生是由系统失效引起的，因而可以分为显性失效和隐性失效。

本文以 SHEL 模型为基础，主要分析以人为因素为中心的通用航空安全的影响因素。由 REASON 模型可知组织管理因素对通用航空安全的影响，因此要充分考虑通用航空公司管理环境及行业外部环境。

2.2.2 建立多级模糊综合评价体系

根据 SHEL 模型，从“人-人、人-硬件、人-环境、人-软件”关系出发，依据人为因素对通用航空安全的影响，构建通用航空安全模糊综合评价体系，如图 2 所示。

图 2 中， U 为评价指标因素集； U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 为一级指标； U_{11} 、 U_{12} 、 U_{13} 、 U_{14} 、 U_{15} ， U_{21} 、 U_{22} 、 U_{23} 、 U_{24} ， U_{31} 、 U_{32} 、 U_{33} ， U_{41} 、 U_{42} 为二级指标。

2.3 构建模糊综合评价模型

1) 建立评价指标的因素集

评价指标因素集 U 是由各个影响因素组成的集合，即 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 。基于人为因素的通用航空安全综合评价体系中，评价指标因素集为

$$U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\};$$

$$U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{15}\}; \quad U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}\}; \quad U_3 = \{U_{31}, U_{32}, U_{33}\}; \quad U_4 = \{U_{41}, U_{42}\}.$$

2) 建立评价集

评价集 V 是对评价对象的评价，将评价结果分为 5 个等级：高 (V_1)、较高 (V_2)、一般 (V_3)、较低 (V_4) 和低 (V_5)。

$$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{\text{高, 较高, 一般, 较低, 低}\}.$$

3) 确定评价因素的权重

确定指标权重的方法有很多，这里主要采用组合赋权法，即 AHP 与熵值法相结合进行权重的确定，即 AHP-熵值法。

运用 AHP 确定权重系数，首先建立递阶层次结构，如图 2 所示；然后建立判断矩阵，判断矩阵是由若干位专家根据一定经验所作出的两两因素比较矩阵；最后进行一致性检验，至判断矩阵具有满意一致

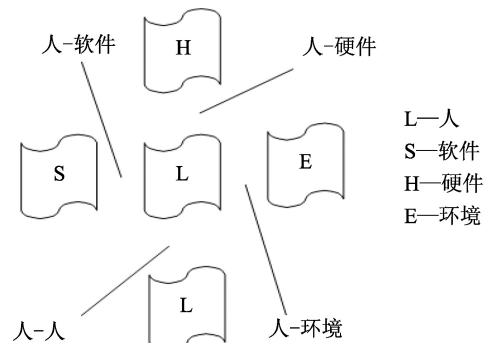


图 1 SHEL 模型^[10]
Fig. 1 SHEL model^[10]

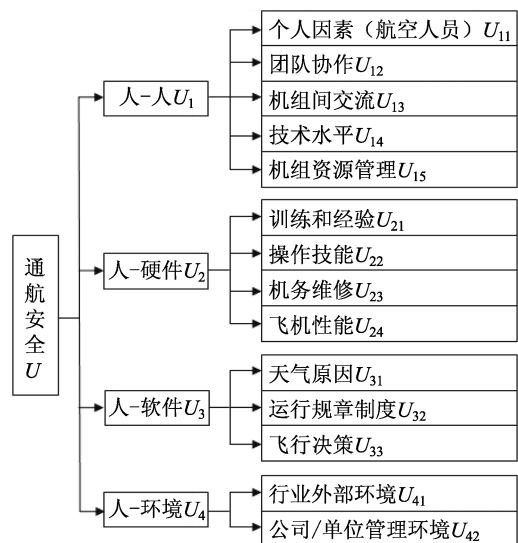


图 2 基于人为因素的通用航空安全综合评价体系

Fig. 2 Comprehensive evaluation system of general aviation safety based on human factors

性，否则需要调整判断矩阵，直到通过一致性检验为止。

利用熵值法确定权重，是通过数据本身的特征进行权重的确定。将样本数据用熵值函数求出每个指标的效用价值，然后综合每个指标在总体中的效用价值，进而得到指标权重^[12]。

组合赋权法的权重为

$$W = \alpha \times W' + (1 - \alpha) \times W'' \quad (1)$$

其中， $\alpha=0.5$ ； W' 为通过 AHP 得到的权重值； W'' 为通过熵权法得到的权重值。由式（11）可以得到各指标的组合权重。

4) 建立评价矩阵

请专家对各因素状况进行打分，建立各因素的评分等级矩阵。例如，对个人因素（航空人员）的影响，有 50%的专家认为影响高，30%认为较高，10%认为一般，10%认为较低，0%认为低。由此得出 $R_{11}=(0.5, 0.3, 0.1, 0.1, 0)$ ，同理得出其他指标的评价矩阵。

5) 模糊综合评价结果

将权重向量与评价矩阵相乘，根据最大隶属度原则，即可得到被评价对象的评价结果。

3 实例分析

本文选取 2001 年至 2013 年中国通用航空事故进行分析，因为 2014 年之后很多通用航空事故的原因仍在调查中。在 2001 年至 2010 年共发生 22 起通用航空事故^[13]，2013 年通用航空 10 起事故，较 2011 年 5 起和 2012 年 1 起相比增长较多，引起飞行事故的直接原因主要包括机组因素、机械故障、机务维修和天气因素。其中，机组原因 21 起、机械故障 6 起、机务维修 4 起、天气原因 3 起、责任待定 4 起。直接原因的分析可以指明分析的方向，但探究直接原因之下更深层次的原因才能从根本上避免类似事故的再次发生。

3.1 实例综合评价

根据 2.2 节中建立的通用航空安全模糊综合评价体系和 2.3 节构建的模糊综合评价模型来综合评价 2001 年至 2013 年中国通用航空事故。

3.1.1 建立评价指标的因素集

$U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\} = \{\text{人-人}, \text{人-硬件}, \text{人-软件}, \text{人-环境}\};$

$U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{15}\} = \{\text{个人因素（航空人员）}, \text{团队协作}, \text{机组间交流}, \text{技术水平}, \text{机组资源管理}\};$

$U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}\} = \{\text{训练和经验}, \text{操作技能}, \text{机务维修}, \text{飞机性能}\};$

$U_3 = \{U_{31}, U_{32}, U_{33}\} = \{\text{天气原因}, \text{运行规章制度}, \text{飞行决策}\};$

$U_4 = \{U_{41}, U_{42}\} = \{\text{行业外部环境}, \text{公司/单位管理环境}\}.$

3.1.2 建立评价集

$V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{\text{高}, \text{较高}, \text{一般}, \text{较低}, \text{低}\}.$

3.1.3 确定评价因素的权重

根据 AHP 和熵值法理论进行计算，然后根据式（1）得到通用航空安全各指标因素权重，如表 1 所示。

表 1 通用航空安全各指标因素权重

Tab. 1 Weights of factors in general aviation safety indicators

指标层	AHP	熵值法	综合权重
人-人关系 U_1	0.149	0.264	0.207
人-机关系 U_2	0.709	0.260	0.485
人-软关系 U_3	0.089	0.248	0.168
人-环关系 U_4	0.053	0.228	0.140
个人因素（航空人员） U_{11}	0.467	0.254	0.361
团队协作 U_{12}	0.287	0.198	0.243
机组间交流 U_{13}	0.172	0.168	0.170
技术水平 U_{14}	0.043	0.243	0.143
机组资源管理 U_{15}	0.031	0.137	0.084
训练和经验 U_{21}	0.048	0.265	0.156
操作技能 U_{22}	0.491	0.309	0.400
机务维修 U_{23}	0.274	0.252	0.263
飞机性能 U_{24}	0.187	0.174	0.180
天气原因 U_{31}	0.769	0.305	0.537
运行规章制度 U_{32}	0.147	0.343	0.245
飞行决策 U_{33}	0.084	0.352	0.218
行业外部环境 U_{41}	0.667	0.512	0.589
公司/单位管理环境 U_{42}	0.333	0.488	0.411

通用航空安全 U 权重： $W = (0.207, 0.485, 0.168, 0.140)$ ；

人-人关系 U_1 权重： $W_1 = (0.361, 0.243, 0.170, 0.143, 0.084)$ ；

人-硬件关系 U_2 权重： $W_2 = (0.156, 0.400, 0.263, 0.180)$ ；

人-软件关系 U_3 权重： $W_3 = (0.537, 0.245, 0.218)$ ；

人-环境关系 U_4 权重： $W_4 = (0.589, 0.411)$ 。

3.1.4 建立评价矩阵

根据专家统计表，打分 1~5 分别代表低~高，因此得出以下评价矩阵：

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \begin{pmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0 \end{pmatrix}, & R_2 &= \begin{pmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.1 & 0.1 \end{pmatrix} \\
 R_3 &= \begin{pmatrix} 0.2 & 0.5 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.1 & 0 \end{pmatrix}, & R_4 &= \begin{pmatrix} 0 & 0.1 & 0.3 & 0.4 & 0.2 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \end{pmatrix}.
 \end{aligned}$$

3.1.5 模糊综合评价结果

对二级指标进行模糊综合评价，计算出指标层的评价向量为

$$B_1 = W_1 \times R_1 = (0.3314, 0.4381, 0.1666, 0.0649, 0),$$

$$B_2 = W_2 \times R_2 = (0.2374, 0.4036, 0.2957, 0.0443, 0.0180),$$

$$B_3 = W_3 \times R_3 = (0.2191, 0.3611, 0.3490, 0.0708, 0),$$

$$B_4 = W_4 \times R_4 = (0, 0.1411, 0.3411, 0.3589, 0.1589).$$

由此可得模糊评价矩阵 $B = \begin{pmatrix} 0.3314 & 0.4381 & 0.1666 & 0.0649 & 0 \\ 0.2374 & 0.4036 & 0.2957 & 0.0443 & 0.0180 \\ 0.2191 & 0.3611 & 0.3490 & 0.0708 & 0 \\ 0 & 0.1411 & 0.3411 & 0.3589 & 0.1589 \end{pmatrix}$.

一级模糊综合评价为 $B^* = W \times B = (0.2205, 0.3669, 0.2843, 0.0971, 0.0310)$.

根据最大隶属原则，评价结果中最大数值 0.3669 所对应的等级为最终评价等级，评价为较高。

3.2 综合评价结果分析

2001 年至 2013 年中国通用航空事故的最终评价等级是最终结果中最大数值 0.3669 所对应的等级，即基于人为因素的中国通用航空安全模糊综合评价等级为较高。

人-人关系最终评价结果为 $B_1 = W_1 \times R_1 = (0.3314, 0.4381, 0.1666, 0.0649, 0)$ ，综合评价等级为较高，个人因素（航空人员）影响等级最高；

人-硬件关系最终评价结果为 $B_2 = W_2 \times R_2 = (0.2374, 0.4036, 0.2957, 0.0443, 0.0180)$ ，综合评价等级为较高，操作技能影响等级最高；

人-软件关系最终评价结果为 $B_3 = W_3 \times R_3 = (0.2191, 0.3611, 0.3490, 0.0708, 0)$ ，综合评价等级为较高，天气原因影响较大；

人-环境关系最终评价结果为 $B_4 = W_4 \times R_4 = (0, 0.1411, 0.3411, 0.3589, 0.1589)$ ，综合评价等级为较低，行业外部环境的影响相对较大。

B_1, B_2, B_3, B_4 可以反映出各指标影响程度的强弱关系，根据最大隶属原则可以得出，近年通用航空飞行事故中，影响通用航空安全的因素指标中人与人之间的因素影响程度最高，其次为人与硬件的因素，人与软件的因素影响相对较低，人与环境的因素影响最低。

4 提高通用航空安全的建议措施

通过对 2001 年至 2013 年中国通用航空事故进行综合评价，根据各指标等级，提出建议措施。

4.1 人-人关系

个人因素方面：从上述评价结果来看，个人因素所占权重最高，因此通用航空人员应自觉克服自身问题，及时调整自己的状态；

团队协作方面：加强团队协作，熟悉业务流程；

机组交流方面：在工作中规范用语，同时互相提醒，以便综合得出最佳判断；

技术水平方面：航空公司应组织工作人员定期培训，开经验交流会来学习前辈经验等。

相对评价等级较低的机组资源管理的培训是培养机组判断决策能力的有效途径，也是必不可少的。

4.2 人-硬件关系

训练和经验方面：包括专业理论训练和实际操纵（包括模拟机训练与飞行训练）。

操作技能方面:影响最高的因素,操作技能是每个航空人员必须掌握的。除了学基础的理论知识之外,也要进行飞行训练,以增加操作技能。

机务维修方面:加强机务人员的学习氛围,同时也要为维修人员提供良好的技术支持。

飞机性能方面:通用航空人员要对所飞机型的飞机性能有全面了解,平时加强飞机性能知识的学习是通用航空安全的重要保证。

4.3 人-软件关系

天气原因:一定要保证信息的准确性,并及时更新,确保准确无误。

加强公司各部门对规章制度的学习,如果条件允许建议定期进行考核。

飞行决策:在飞行中应做出正确判断与决策。

4.4 人-环境关系

根据评价结果,行业外部环境和公司单位管理环境,还需各有关部门进行协调。

5 结论

本文首先根据人为因素的研究理论和方法,对2001年至2013年中国通用航空飞行事故进行分析,运用AHP-熵值法计算权重,得出了模糊综合评价结果,影响通用航空安全的因素指标中人与人之间的因素影响程度最高,其次为人与机的因素,人与软件的因素影响相对较低,人与环境的因素影响最低。然后,从人-人、人-硬件、人-软件、人-环境关系方面对提高通用航空安全提出了具体的建议措施。同样也需要有关部门制定良好的规章制度,降低人为因素对通用航空安全的影响,从而提高通用航空的安全性。

[参考文献] (References)

- [1] 李鹏. 人为因素和航空安全[J]. 科技风, 2018 (30): 59.
LI P. Human factors and aviation safety[J]. Technology Wind, 2018(30): 59. (in Chinese)
- [2] 山东通用航空. 2018年年度报告[EB/OL]. [2019-06-14]. <http://stock.qlmoney.com/bulletin/86015844801.html>.
Shangdong Tong Hang. Annual report 2018[EB/OL]. [2019-06-14]. <http://stock.qlmoney.com/bulletin/86015844801.html>. (in Chinese)
- [3] 王锦山. 浅析 SHELL 模型中各界面的关系[J]. 空中交通管理, 2004 (1): 46-49.
WANG J S. Analysis of relationship of interfaces in SHELL model[J]. Air Traffic Management, 2004(1): 46-49. (in Chinese)
- [4] PEARL J. Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference[M]. Palo Alto: Morgan Kaufmann Publishers, 1988.
- [5] 孙瑞山, 刘汉辉. 航空公司安全评估理论与实践[J]. 中国安全科学学报, 1999, 9 (3): 69-73.
SUN R S, LIU H H. Assessment theory and practice for airline safety[J]. China Safety Science Journal, 1999, 9(3): 69-73. (in Chinese)
- [6] 金灿灿, 左洪福, 潘绍松. 基于 Bayes 估计的民航维修人为差错评估技术研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12 (22): 5689-5692.
JIN C C, ZUO H F, PAN S S. The research on Bayesian estimation of human error probability evaluation for civil aviation maintenance[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(22): 5689-5692. (in Chinese)
- [7] 曹海峰. 民用航空器事故中的人为因素分析[J]. 中国民用航空, 2008 (2): 41-43.
CAO H F. Analysis of human factors in civil aviation accidents[J]. China Civil Aviation, 2008(2): 41-43. (in Chinese)
- [8] 朱顺泉. 数据、模型与决策[M]. 北京: 北京大学出版社, 2014.
ZHU S Q. Data, models, and decisions[M]. Beijing: Peking University Press, 2014. (in Chinese)

- [9] 严星. 基于模糊综合评价法的工程项目环境风险研究[J]. 价值工程, 2016, 35 (30): 18-20.
YAN X. Research on environmental risk of engineering project based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Value Engineering, 2016, 35(30): 18-20. (in Chinese)
- [10] 姬志伟. 基于人为因素的民航飞行安全评估研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
JI Z W. Research on civil aviation flight safety evaluation based on human factors[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [11] 梅柠. 基于 AHP-熵值法的低碳绿色公路运输发展研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
MEI N. Research on the development of low carbon green highway transportation based on AHP-entropy method[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013. (in Chinese)
- [12] 韩朋, 左洪福. 基于 AHP 灰色关联分析法的航空发动机维修供应商评价与选择研究[J]. 价值工程, 2008, 27 (12): 16-19.
HAN P, ZUO H F. To study on evaluating and selecting MRO supplier of aero-engine based on AHP and GRA[J]. Value Engineering, 2008, 27(12): 16-19. (in Chinese)
- [13] 田磊, 常松涛. 通用航空事故高发原因分析[J]. 科技视界, 2017 (11): 119.
TIAN L, CHANG S T. Analysis of the causes of high incidence of general aviation accidents[J]. Science & Technology Vision, 2017(11): 119. (in Chinese)

(责任编辑: 肖书笑)