

文章编号:1674-8190(2017)04-381-07

# 航空公司飞行安全综合评估方法研究

丁松滨,谷倩倩

(南京航空航天大学 民航学院,南京 211106)

**摘要:**人的因素是影响飞行安全的关键因素,并且各决策因素具有难以度量的不确定性。以机组人为因素为主要研究对象,利用 SHELL 模型建立飞行安全评估指标体系,并利用 AHP 方法计算评估指标体系中各个指标的权重;运用物元理论建立评估模型并利用该模型进行飞行安全综合评估,找出影响飞行安全的主要指标;通过实例验证所用方法的可行性、有效性。结果表明:所用方法可行、有效,能够最大限度地解决评估过程中的不确定性,可为航空公司进行飞行安全管理提供一个可行的方法。

**关键词:**航空运输;飞行安全;SHELL 模型;物元理论;综合评估

**中图分类号:** U8; X949

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2017.04.003

## Research on Comprehensive Evaluation Method of Airline Flight Safety

Ding Songbin, Gu Qianqian

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Human factors are the key factors which affect flight safety, and the factors of decision-making possess are of the characteristic of uncertainty, and difficult to measure. The human factors of the aircrew are the main research object. The flight safety evaluation index system is established by the SHELL model, and the weights of the related index in the evaluation index system are calculated by AHP method. The evaluation model is established by the matter-element theory, which is used to evaluate the flight safety and find out the main indexes that affect flight safety. The rationality and feasibility of this method are validated from the application. The results show that the method is feasible and effective, and can solve the uncertainty in the evaluation process to the maximum extent, which can provide a feasible method for airline flight safety management.

**Key words:** air transportation; flight safety; SHELL model; matter-element theory; comprehensive evaluation

## 0 引言

随着我国民航业的高速发展,飞机已成为人们生活中必不可少的一种交通工具。人们对其安全性也越来越关注,飞行的安全性不仅与旅客的人身及财产安全直接相关,还对航空公司的声誉、经济效益乃至生存产生重大的影响。因此,开展飞行安全分析评估的主要目的是确定飞行安全的安全等级,提前发现飞行安全系统中存在的薄弱环节,找出影响安全的危险因素,以便于有针对性地采取纠

正不安全行为的措施,从而降低飞行事故及飞行事故征候的发生率,提高安全管理水平。

目前,国内外学者对如何提高飞行安全的管理水平,做了大量的研究。国外学者主要采用事件树<sup>[1-3]</sup>、故障率<sup>[4]</sup>等方法以及通过分析飞机飞行时的飞行包线<sup>[5]</sup>、飞机尾流间隔<sup>[6]</sup>等开展飞行安全研究。国内学者主要是通过确定评价指标,选取灰色系统理论<sup>[7-8]</sup>、特尔菲法<sup>[9]</sup>、效用理论<sup>[10]</sup>、相关向量机<sup>[11]</sup>、改进的层次分析法<sup>[12]</sup>等不同的方法开展飞行安全评估研究。然而,由于事故的发生率越来越低,导致样本数据减少,限制了依赖数据统计理论方法的使用。从我国学者开展飞行安全研究的成果中可以看出:问题主要体现在评价方法的选择

收稿日期:2017-07-11; 修回日期:2017-09-07

通信作者:谷倩倩,1281962130@qq.com

上,并且从现有的评价方法来看存在的主要问题是不能很好地解决各影响因素之间的不确定性问题以及缺少对关键影响因素的确定与分析。

从世界航空安全历史发展趋势来看,飞行事故万时率总体呈下降趋势,早期下降明显,后期下降缓慢。其中人的因素导致的事故减少与机械因素导致的事故减少并不同步,人的因素导致的事故下降要缓慢的多<sup>[13]</sup>。

本文采用以机组人为因素为中心的 SHELL 模型,建立飞行安全评估指标体系,并借鉴飞行安全评估具有物元可拓性的思想,构建飞行安全物元理论评估模型,以改进现有评估方法的不足,最后通过实例验证分析所用方法的可行性和有效性。

## 1 基于 SHELL 模型的飞行安全评估指标体系的构建

### 1.1 SHELL 模型

SHELL 模型是由 Elwyn Edwards 在 1972 年提出的描述飞行中人的因素的概念模型,它由软件(S)、硬件(H)、环境(E)、人员(L)四部分组成<sup>[14]</sup>。在该模型中,“人员”处于模型的中心,其他要素围绕在它的周围。通过该模型可以分析以人为中心构成界面的四个要素之间的相互关系。

### 1.2 飞行安全评估指标体系的构建

通过分析总结 ASN(中国民用航空安全信息系统)网站<sup>[15]</sup>提供的飞行事故数据库中的事故描述属性,从飞行事故数据库中筛选影响飞行安全的主要因素。经过不完全统计与分类暂且将影响因素界定在 SHELL 模型的 4 个界面上以及机组人员自身因素上,建立飞行安全评估指标体系,如图 1 所示。

①人—人因素:主要是指飞行人员和机组其他成员,以及和 ATC、签派员等其他人员之间的信息交流与配合度,若飞行员和其他人员之间的信息交流出现偏离、误解,就会为最终差错埋下伏笔。

②人—环境因素:主要是指气压、温度、噪声、复杂天气等,都会增加飞行人员犯错的机率。

③人—硬件因素:主要是指机载设备显控界面设计和使用理念与人的生理认知特点不符,或者对意外情况缺乏考虑等,致使机组人员的差错很容易产生。

④人—软件因素:主要是指软件设计的不合理性、信息显示的不恰当性或信息的误解、误用等,都会诱发飞行员产生错误。

⑤机组自身因素:主要是指由于机组人员自身的性格心理、生理、技能水平等因素诱使飞行人员产生错误。

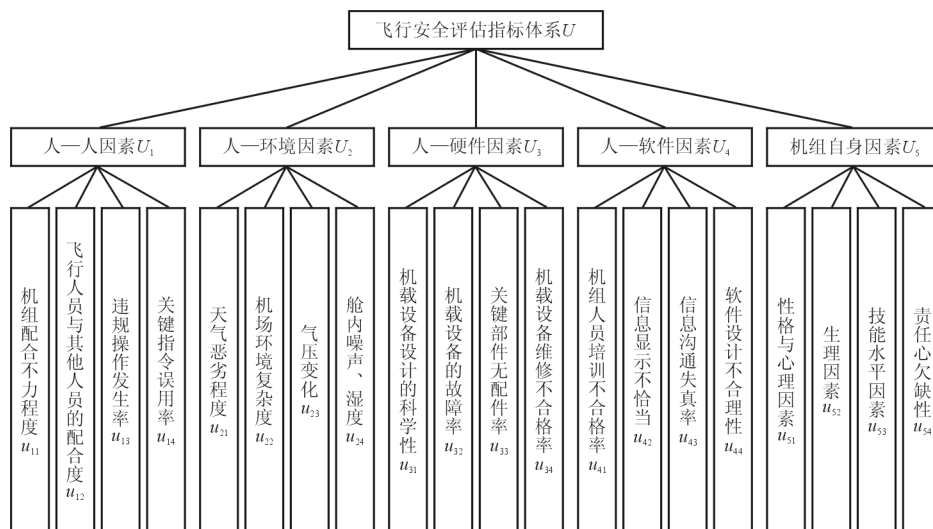


图 1 飞行安全评估指标体系

Fig. 1 Flight safety assessment index system

## 2 物元理论

物元理论的研究对象主要是一些多层次、多目标的复杂不相容问题,即通过系统物元变换处理系统中存在的不相容问题。用物元理论研究问题的核心是通过建立关联函数进行计算,从而从定性和定量两个角度来表示事物具有某种性质的程度<sup>[16]</sup>。将物元理论应用于飞行安全评估研究,不仅计算工作量小和计算过程简单,并且能够将评价对象的质与量结合起来进行综合评价。

### 2.1 物元的基本概念

给定研究对象的事物名称  $N$ ,其中事物  $N$  的特征  $U$  用  $X$  来度量。因此以  $R=(N,U,X)$  有顺序三元组来描述事物  $N$  的元,简称物元。若事物  $N$  的特性体现在多个方面,即以  $U_1,U_2,U_3,\dots,U_m$  个特征的度量值  $X_1,X_2,X_3,\dots,X_m$  来描述事物  $N$  的特性,则称  $R$  为  $m$  维物元,用矩阵的形式表示为

$$R = \begin{bmatrix} N & U_1 & X_1 \\ & U_2 & X_2 \\ & \dots & \dots \\ & U_m & X_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 2.2 单指标评价

在飞行安全评估指标体系中, $U=\{U_i\}$  为评价指标集合,其中  $U_i(i=1,2,\dots,m)$  为影响因素层, $U_i=\{u_{ij}\},u_{ij}(i=1,2,\dots,m;j=1,2,\dots,n)$  为指标层。

#### (1) 经典域与节域的确定

经典域是指评估指标关于各个评价等级的量值范围,用矩阵的形式表示为

$$R_{if} = \begin{bmatrix} U_{if} & u_{i1} & X_{if1} \\ & u_{i2} & X_{if2} \\ & & \dots \\ & u_{in} & X_{ifn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{if} & u_{i1} & [a_{if1}, b_{if1}] \\ & u_{i2} & [a_{if2}, b_{if2}] \\ & \dots & \dots \\ & u_{in} & [a_{ifn}, b_{ifn}] \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $U_{if}$  表示当一级影响因素的评价等级为第  $f$  级时,二级指标  $u_{in}$  的经典域为  $[a_{ifn}, b_{ifn}]$ 。

节域是指评估指标关于所有评价等级所规定的量值范围,用矩阵的形式表示为

$$R_{ip} = \begin{bmatrix} U_{ip} & u_{i1} & X_{ip1} \\ & u_{i2} & X_{ip2} \\ & & \dots \\ & u_{in} & X_{ipn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{ip} & u_{i1} & [a_{ip1}, b_{ip1}] \\ & u_{i2} & [a_{ip2}, b_{ip2}] \\ & \dots & \dots \\ & u_{in} & [a_{ipn}, b_{ipn}] \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $U_{ip}$  为一级影响因素的所有评价等级, $p=1,2,\dots,f$ ;  $[a_{ipn}, b_{ipn}]$  为二级指标  $u_{in}$  关于所有评价等级所规定的取值范围。

#### (2) 确定待评物元

待评物元是指评估指标通过物元分析得到的具体数据,用矩阵的形式表示为

$$R_i = \begin{bmatrix} U_i & u_{i1} & Y_{i1} \\ & u_{i2} & Y_{i2} \\ & & \dots \\ & u_{in} & Y_{in} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $U_i$  为评估指标体系中相应的一级影响因素; $Y_{in}$  为一影响因素  $U_i$  下的二级指标  $u_{in}$  的具体物元量值。

#### (3) 关联度

关联度的大小表征了评估指标隶属于某一评价等级的程度。

单指标关联度:一级影响因素  $U_i$  中第  $j$  项二级指标的安全等级为第  $f$  级时的关联度为

$$K_f(Y_{ij}) = \begin{cases} \frac{\rho(Y_{ij}, X_{ifj})}{\rho(Y_{ij}, X_{ipj}) - \rho(Y_{ij}, X_{ifj})} & Y_{ij} \notin X_{ifj} \\ \frac{-\rho(Y_{ij}, X_{ifj})}{|X_{ifj}|} & Y_{ij} \in X_{ifj} \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\rho(Y_{ij}, X_{ifj}) = \left| Y_{ij} - \frac{1}{2}(a_{ifj} + b_{ifj}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ifj} - a_{ifj}) \quad (6)$$

$$\rho(Y_{ij}, X_{ipj}) = \left| Y_{ij} - \frac{1}{2}(a_{ipj} + b_{ipj}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ipj} - a_{ipj}) \quad (7)$$

### 2.3 综合评估

#### ① 一级影响因素对各安全等级的关联度

当一级影响因素  $U_i$  (例如人-人因素) 的安全等级为第  $f$  级时的关联度为

$$K_f(U_i) = \sum_{j=1}^n \omega_j^i K_f(Y_{ij}) \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (8)$$

### ②综合关联度

计算待评事物  $N$  (航空公司飞行安全) 当飞行安全等级为第  $f$  级时的关联度为

$$K_f(N) = \sum_{i=1}^m W_i K_f(U_i) \quad (9)$$

### ③安全等级评定

由上文得到的航空公司飞行安全对各安全等级的关联度数值, 根据最大隶属度原则可知, 整体航空公司飞行安全的安全等级, 即

$$K_0 = \max K_f(N) \quad (10)$$

## 3 实例验证

为了验证此方法的可行性和有效性, 以国内某航空公司飞行安全的实际情况为例进行说明。在确定出评估指标体系权重的基础上, 利用物元理论建立模型开展飞行安全量化评价分析, 得到航空

人—人因素指标	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$
机组配合不力程度	85~100	75~85	60~75	0~60
飞行人员与管制人员的配合度	85~100	75~85	60~75	0~60
违规操作发生率	90~100	75~90	60~75	0~60
关键指令误用率	90~100	75~90	60~75	0~60

### ②评估指标的节域

$$R_{ip} = \begin{bmatrix} U_1 & u_{11} & 0 \sim 100 \\ & u_{12} & 0 \sim 100 \\ & u_{13} & 0 \sim 100 \\ & u_{14} & 0 \sim 100 \end{bmatrix}$$

### ③评估指标的物元值

$$R_1 = \begin{bmatrix} U_1 & u_{11} & 83 \\ & u_{12} & 72 \\ & u_{13} & 88 \\ & u_{14} & 75 \end{bmatrix}$$

### ④评估指标的关联度

公司飞行安全等级以及影响飞行安全的关键指标 (违规操作发生率、机组人员培训不合格率) 以便于航空公司有针对性的采取措施, 加强防范, 保证飞行安全。

### 3.1 基于物元理论的单指标评价

首先, 将评估指标的安全等级化分为很安全、安全、较安全、不安全四个等级, 针对每个评估指标的经典域有专家根据专业的知识以及经验来确定其安全等级。其次, 由 15 名民航领域的专家根据评估指标的经典域, 给出每个二级评估指标的物元值, 并取所有物元值的平均作为此二级评估指标最终的物元值。现以人—人因素下的评估指标为例进行具体的分析。

#### ①评估指标的经典域

由①、②、③确定出评估指标的经典域、节域、物元量值以后, 利用式(5)~式(7)分析计算人—人因素( $U_1$ )下的二级评估指标: 机组配合不利程度( $u_{11}$ )、飞行人员与管制人员的配合度( $u_{12}$ )、违规操作发生率( $u_{13}$ )、关键指令误用率( $u_{14}$ )4个评估指标对“很安全( $p_1$ )、安全( $p_2$ )、较安全( $p_3$ )、不安全( $p_4$ )”四个评估等级的关联度值, 如表1所示, 且从表中的数据可知, 飞行人员与管制员的配合度( $u_{12}$ )与关键指令误用率( $u_{14}$ )这两个评估指标是需要重点关注的指标。

表1 人—人因素指标各等级关联度

Table 1 The relevance of each level of human-human factors index

评估指标	关联度			
	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$
机组配合不力程度	-0.105 3	0.200 0	-0.320	-0.575
飞行人员与管制员的配合度	-0.317 1	-0.096 8	0.120	-0.300
违规操作发生率	-0.142 9	0.133 3	-0.520	-0.700
关键指令误用率	-0.361 1	0.133 3	-0.080	-0.425

同理,采用相同的方法来确定其他评估指标对四个安全等级的关联度。

### 3.2 评估指标权重的确定

采用 AHP 法确定评估指标的权重,因篇幅有限,本文将不再详细论述确定权重的过程。由 AHP 法计算得到评估指标的权重如下:

$$W = (0.327, 0.116, 0.253, 0.184, 0.120)$$

二级评估指标权重:

$$\begin{cases} w^1 = (0.225, 0.240, 0.308, 0.227) \\ w^2 = (0.209, 0.215, 0.212, 0.358) \\ w^3 = (0.275, 0.219, 0.341, 0.165) \\ w^4 = (0.300, 0.246, 0.220, 0.189) \\ w^5 = (0.297, 0.224, 0.258, 0.221) \end{cases}$$

### 3.3 综合评估结果

①一级影响因素对各安全等级的关联度

将得到的二级评估指标对四个安全等级的关联度以及评估指标的权重代入式(8),可计算出 5 项一级影响因素对四个安全等级的关联度数值,如表 2 所示。

②综合关联度

将表 2 中的关联度数据代入式(9),计算出航空公司飞行安全对四个安全等级的关联度,如表 3 所示。

表 2 一级影响因素对四个安全等级的关联度

Table 2 The relevance for four security level of first-level influencing factors

一级影响因素	关联度				等级( $p$ )
	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	
人—人因素	-0.225 8	0.093 1	-0.221 5	-0.513 5	2
人—环境因素	-0.212 1	0.204 4	-0.224 1	-0.512 8	2
人—硬件因素	-0.261 2	0.207 0	-0.098 0	-0.441 9	2
人—软件因素	-0.311 6	0.014 7	0.091 8	-0.335 7	3
机组自身因素	-0.236 6	0.276 2	-0.196 5	-0.497 8	2

表 3 航空公司飞行安全综合评估结果

Table 3 Comprehensive assessment results of airline flight safety

评估对象	关联度				等级( $p$ )
	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	
航空公司飞行安全	-1.247 2	0.795 5	-0.648 3	-2.301 7	2

从表 3 可以看出:航空公司飞行安全的安全等级为安全。并且从表 2 可以看出:人—软件因素( $U_4$ )的安全等级为较安全,关联度数值为 0.091 8。人—人因素( $U_1$ )的安全等级为安全,关联度数值为 0.093 1,与人—硬件因素、人—环境因素、机组自身因素相比其关联度数值最小。因此,航空公司应重点关注人—软件因素与人—人因素中的评估指标。

### 3.4 结果分析

考虑人—软件因素( $U_4$ )与人—人因素( $U_1$ )中的二级评估指标的不同物元取值进行模拟分析,寻

求影响飞行安全的主要指标,以便于航空公司有关安全管理部门针对查找出的影响指标,有目的性的采取措施,加强安全管理,避免飞行事故及事故征候的发生,从而提高航空公司飞行安全水平。其中,所选取评估指标的物元值在原物元值的基础上按照一定比例(5%)在节域范围内逐渐增大,而其他评估指标的物元值和权重值保持不变。通过对二级评估指标的物元值这一变量进行多次模拟分析,得到航空公司飞行安全随着不同指标物元值的增加对  $p_1$ (很安全)和  $p_2$ (安全)这两个安全等级的隶属度曲线,如图 2~图 5 所示。

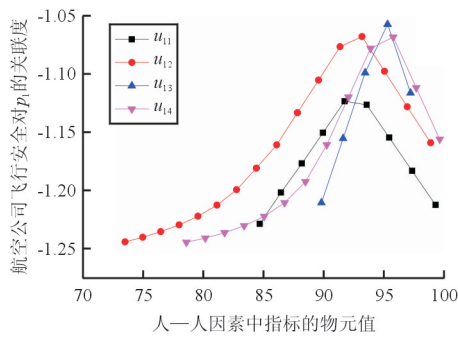


图 2 航空公司飞行安全对  $p_1$  的关联度随人—人因素中评估指标不同物元值的变化曲线

Fig. 2 The variation curves of the relevance for  $p_1$  of airline flight safety with different matter-element value of human-human factors index

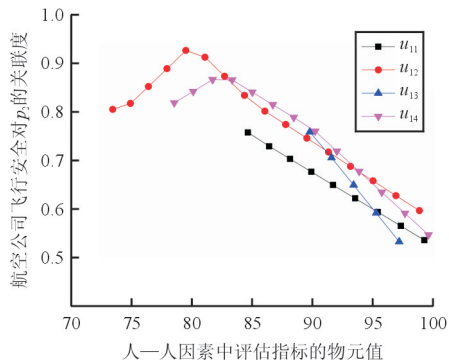


图 3 航空公司飞行安全对  $p_2$  的关联度随人—人因素中评估指标不同物元值的变化曲线

Fig. 3 The variation curves of the relevance for  $p_2$  of airline flight safety with different matter-element value of human-human factors index

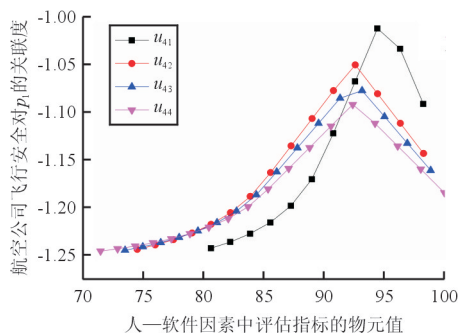


图 4 航空公司飞行安全对  $p_1$  的关联度随人—软件因素中评估指标不同物元值的变化曲线

Fig. 4 The variation curves of the relevance for  $p_1$  of airline flight safety with different matter-element value of human-software factors index

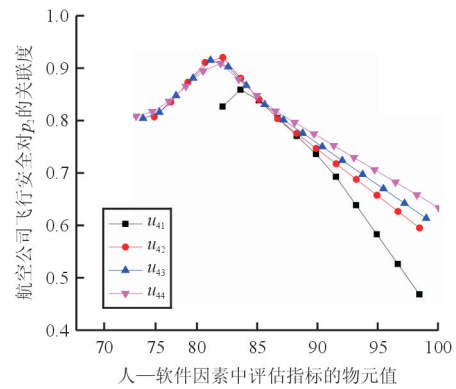


图 5 航空公司飞行安全对  $p_2$  的关联度随人—软件因素中评估指标不同物元值的变化曲线

Fig. 5 The variation curves of the relevance for  $p_2$  of airline flight safety with different matter-element value of human-software factors index

从图 2~图 5 可以看出:随着人—人因素和人—软件因素下二级评估指标的物元值逐渐增加,航空公司飞行安全对  $p_1$ 、 $p_2$  的关联度呈同样的趋势,即先上升后下降的趋势;评估指标  $u_{13}$ 、 $u_{41}$  对航空公司飞行安全影响最大。因此,航空公司应从  $u_{13}$  (违规操作发生率)、 $u_{41}$  (机组人员培训不合格率)两个方面采取适当的预防措施,加强管理。

## 4 结 论

(1) 以 SHELL 模型为基础,系统分析了有关影响飞行安全的因素,建立了飞行安全评估指标体系。

(2) 运用物元理论建立了航空公司飞行安全综合评估模型,不仅可以解决决策因素之间“部分确定,部分不确定”的模糊性,而且可以正确反映事物质与量的内在联系与变化规律。

(3) 通过分析计算得到了航空公司飞行安全的安全等级为安全,以及通过多次模拟分析得到了违规操作发生率、机组人员培训不合格率两个指标是影响飞行安全的主要指标。通过实例的验证分析,表明所用方法的实用性与有效性。为航空公司进一步加强安全管理,提升安全水平,提供了参考。

## 参考文献

- [1] Ahmadi A, Soderholm P. Assessment of operational consequences of aircraft failures: Using event tree analysis[C]. Big Sky, MT, USA: Aerospace Conference, 2008.
- [2] Catalyurek U, Rutt B, Metzroth K, et al. Development of a code-agnostic computational infrastructure for the dynamic generation of accident progression event trees[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95(3): 278-294.
- [3] Brissaud F, Smidts C, Barros A, et al. Dynamic reliability of digital-based transmitters[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2011, 96(7): 793-813.
- [4] Milan J. An assessment of risk and safety in civil aviation [J]. Journal of Air Transport Management, 2000, 6(1): 43-50.
- [5] Richardson J, Kabamba P T, Atkins E M, et al. Safety margins for flight through stochastic gusts[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2014, 37(6): 2026-2030.
- [6] Bobylev A V, Vyshinsky V V, Soudakov G G, et al. Aircraft vortex wake and flight safety problems[J]. Journal of Aircraft, 2010, 47(2): 663-674.
- [7] 文军. 基于灰色多层次的航空公司飞行安全评价研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(2): 29-34.  
Wen Jun. Airline flight safety risk assessment based on grey hierarchy method [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(2): 29-34. (in Chinese)
- [8] 孙瑞山, 杨绎暄, 汪磊. QAR数据在飞行安全评价中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(7): 87-92.  
Sun Ruishan, Yang Yixuan, Wang Lei. Study on flight evaluation based on QAR data [J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(7): 87-92. (in Chinese)
- [9] 曲庆龙, 宋家文, 王翩翩. 基于AHP方法的飞行安全风险评估模型[J]. 计算机与数字工程, 2015, 43(5): 864-866.  
Qu Qinglong, Song Jiawen, Wang Pianpian. Flight safety risk assessment model based on AHP method[J]. Computer and Digital Engineering, 2015, 43(5): 864-866. (in Chinese)
- [10] 高建国, 端木京顺, 甘旭升. 效用理论在飞行安全风险评估中的应用[J]. 价值工程, 2010, 29(23): 107-108.  
Gao Jianguo, Duanmu Jingshun, Gan Xusheng. Application of utility theory in the evaluation of flight safety risk[J]. Value Engineering, 2010, 29(23): 107-108. (in Chinese)
- [11] 甘旭升, 端木京顺, 高建国. 基于相关向量机的飞行安全评价方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(12): 143-148.  
Gan Xusheng, Duanmu Jingshun, Gao Jianguo. Flight safety evaluation method based on relevance vector machine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(12): 143-148. (in Chinese)
- [12] Zhang Xiaoyu, Chen Jiusheng. Decision model of flight safety based on flight event[J]. Physics Procedia, 2011, 33: 462-469.
- [13] 陈东锋, 矫正刚, 张国正. 人的因素与飞行安全[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 12-48.  
Chen Dongfeng, Jiao Zhenggang, Zhang Guozheng. Human factors and flying safety[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 12-48. (in Chinese)
- [14] 杜俊敏. 人为因素与飞行安全[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016: 43-45.  
Du Junmin. Human factors and flight safety[M]. Beijing: Beihang University Press, 2016: 43-45. (in Chinese)
- [15] Flight Safety Foundation. ASN aviation safety database [EB/OL]. [2017-07-10]. <http://aviation-safety.net>.
- [16] 李玲玲, 刘敬杰, 凌跃盛, 等. 物元理论与证据理论相结合的电能质量综合评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 383-391.  
Li Lingling, Liu Jingjie, Ling Yuesheng, et al. Power quality comprehensive evaluation based on matter-element theory and evidence theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 383-391. (in Chinese)

## 作者简介:

丁松滨(1964—),男,博士,教授。主要研究方向:飞行系统安全与人为因素、飞行性能工程。

谷倩倩(1991—),女,硕士研究生。主要研究方向:飞行系统安全与人为因素、飞行性能工程。

(编辑:赵毓梅)