

文章编号:1674-8190(2018)04-544-07

# 商用飞机机务维修保障能力评价方法

张林帅<sup>1</sup>, 陈志雄<sup>1</sup>, 潘佑<sup>2</sup>, 蔡景<sup>3</sup>

(1. 上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201620)

(2. 上海飞机客户服务有限公司 维修工程部, 上海 200241)

(3. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 211106)

**摘要:** 商用飞机机务维修保障能力的评价效率亟须提高。首先, 建立商用飞机维修保障系统能力评估指标体系; 然后, 介绍主成分分析法的原理, 并建立优化决策模型; 最后, 通过 SPSS 软件采用主成分分析法对不同维修保障方案进行评估, 以保证飞机的适航完整性。结果表明: 主成分分析法消除了主观因素对评价的影响, 得到的评价指标可用于商用飞机维修保障能力的定量评价, 评价结果可为各航空公司及维修单位提供借鉴。

**关键词:** 商用飞机; 维修保障能力; 评价; 主成分分析; SPSS 分析

中图分类号: V267+.2

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.04.012

## Evaluation Method of Maintenance Ability of Commercial Aircraft Maintenance

Zhang Linshuai<sup>1</sup>, Chen Zhixiong<sup>1</sup>, Pan You<sup>2</sup>, Cai Jing<sup>3</sup>

(1. School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

(2. Maintenance Engineering Department, Shanghai Aircraft Customer Service Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

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

**Abstract:** The evaluation efficiency of commercial aircraft maintenance ability must be urgently improved. Firstly, the evaluation index system of commercial aircraft maintenance support system is established. Then, the principle of principal component analysis is introduced and optimization decision model is built. At last, the different maintenance support schemes are evaluated by SPSS software to ensure the integrity of airworthiness of the aircraft. The results show that this method eliminates the influence of subjective factors on the evaluation. The obtained evaluation indexes can be used for the quantitative evaluation of the maintenance ability of commercial aircraft. The evaluation results can provide references for airlines and maintenance organizations.

**Key words:** commercial aircraft; maintenance and support capability; evaluation; principal component analysis; SPSS analysis

## 0 引言

商用飞机是重要的空中交通工具, 我国的机场

数量和商用飞机数量越来越多, 乘客选择需求越来越大, 其安全性经济性得到更多的关注与重视。随着适航规章的改进、人们对安全性经济性要求的提高以及航空公司对飞机使用效率需求的提高, 飞机的维修保障能力越高效合理, 各方面需求越容易得到保障。现有的一些维修策略主要涉及到基本的预防性维修策略(定时维修策略、视情维修策略、主动维修策略)、事后维修策略、改进性维修策略等方法。因此, 对飞机进行机务维修保障能力的分析评估, 尽可能地提高飞机的持续适航性对航空公司和

收稿日期: 2017-12-25; 修回日期: 2018-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(51465047)

航空科学基金(2014ZD56009)

江西省自然科学基金(20151BAB207011)

上海工程技术大学启动基金(校启 2017-13)

通信作者: 陈志雄, chenzhixiong1000@hotmail.com

乘客都具有重大意义。

主成分分析法(Principal Component Analysis,简称PCA)是把较多的指标化为数目较少的综合指标的一种统计分析方法。通过SPSS软件<sup>[1]</sup>进行主成分分析,即采取一种降维的方法,把具有较高相关性的变量转化成彼此相互独立或不相关的几个综合因子,具有出色的表征能力,且新变量之间相互独立。统计表明,主成分分析在多元统计分析方面优势明显,可以消除原指标间多重共线性问题,损失很少信息的前提下,能够反映原始变量的大部分信息。采用该方法能够抓住研究问题的主要矛盾,使复杂的研究问题得到简化,提高分析问题的效率<sup>[2-3]</sup>。主成分分析法已经被大量地应用于概率分析、统计等各个领域<sup>[4-5]</sup>。民航业的维修成本一般占到所有直接运营成本的11%~20%<sup>[6]</sup>。维修保障系统是商用飞机维修所需的人力资源、物质资源、环境资源以及管理手段等要素组成的系统。影响因素很多,这些因素对维修保障能力的影响大小不一。通过科学合理地计算这些因素,充分地分析,进一步提高飞机的维修保障能力,更好地体现出飞机作为重要交通工具的安全性、经济性、舒适性以及环保性。

郑珂珂等<sup>[7]</sup>分析了影响航空公司机务维修安全状况的因素,建立了机务维修安全评估指标体系;Chen Dehuang等<sup>[8]</sup>借助实时状态监测对飞机维修决策系统进行了研究;Yang Zhixian等<sup>[9]</sup>通过遗传算法对飞机维修计划进行了优化;崔建国等<sup>[10]</sup>通过灰色模糊与层次分析方法得到了飞机维修保障决策模型;Hong Sheng等<sup>[11-14]</sup>通过一个预处理模型采用小波包经验模式分解(WP-EMD)进行特征提取,使用自组织映射(SOM)来评估系统零部件性能下降的状况,对系统零部件健康状态进行了自适应预测分析,强调了合理地通过构建和管理级联网络来减少大规模级联故障发生的必要性。所有上述研究缺乏基于PCA的商用飞机机务维修保障能力评价的相关研究。

本文建立商用飞机维修保障系统能力评估指标体系,采用主成分分析法,通过SPSS软件对不同维修保障方案进行评估,建立优化决策模型,结合算例给出计算流程,计算不同航空公司机务维修

保障能力,分析各航空公司维修保障能力的差异,以为各航空公司及单位提供借鉴。

## 1 飞机维修保障能力评估指标体系建立

维修保障能力的属性具有多面性,其评价需要综合考虑各种因素条件。评价指标体系的建立是评价的核心问题,对评价目标的实现产生至关重要的影响。在确立商用飞机维修保障能力评价指标体系时,主要体现出科学性、系统性、相对独立性等原则<sup>[15]</sup>,具体指标体系建立流程如图1所示。

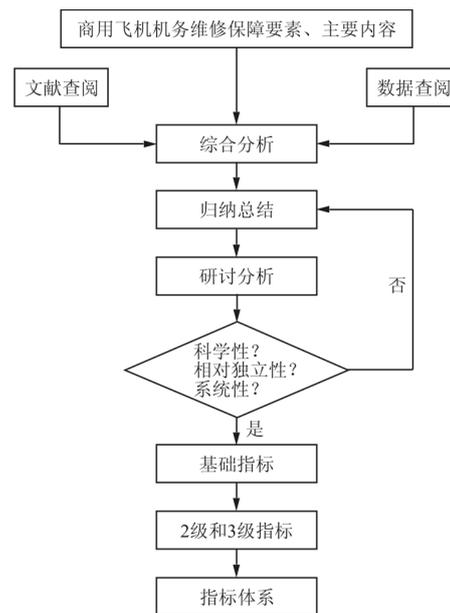


图1 指标体系建立流程

Fig. 1 Establishing the process of indicator system

商用飞机维修保障能力的确定,需要考虑人员、环境、物资以及管理等条件的影响。在全面考虑以上影响条件的基础上,遵循商用飞机维修保障能力评估指标的建立原则,根据商用飞机维修保障的各项需求,按照相关流程,通过广泛征求专家意见,结合航空公司已有的飞机飞行维修数据,通过趋势分析给各个指标进行相应的评定,采用定性定量相结合方法,人员、管理以及环境因素的评定需要采用定性的方法,物的评定需要根据具体数据定量地进行评定。以商用飞机维修保障能力为目标层,从敬业程度、知识技能、执行标准能力、身体素质、心理状态、设施配套率、设备完好率、品种达标

率、维修器材基数达标率、设备工具满编率、保障资料基数达标率、质量控制机构完善合理性、质量检验机构完善合理性、机组专责制度完善合理性、检查制度完善合理 15 个方面建立评估指标体系<sup>[7,16]</sup>,如图 2 所示。

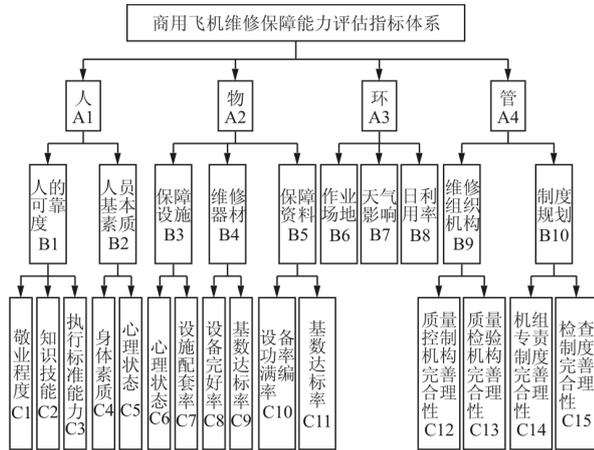


图 2 商用飞机维修保障能力指标体系  
Fig. 2 Commercial aircraft maintenance support index system

## 2 主成分分析法

假如评价样本有  $m$  个对象,每个对象有  $n$  个评价指标,通过线性变换将其转化为维数较低的  $p$  个互不相关指标变量,这就是主成分变量。主成分分析法的具体步骤如下<sup>[17-18]</sup>:

(1) 选用 Z-Score 法对指标数据  $x_{ij} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$  进行标准化处理。

$$z_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / \sigma_j \quad (1)$$

式中:  $x_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}, \sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}$ , 可以得到标准化样本决策矩阵  $\mathbf{Y} = (y_{ij})_{m \times n}$ 。

(2) 计算所有样本指标的相关矩阵  $\mathbf{R} = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

$$r_{ij} = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m y_{ik} y_{jk} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

(3) 计算相关矩阵  $\mathbf{R}$  的特征值  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0$  以及相应的特征向量。

$$\boldsymbol{\alpha}_j = [\alpha_{j1}, \alpha_{j2}, \dots, \alpha_{jn}]^T \quad (3)$$

(4) 计算相应于特征值的各分量的方差贡

献率:

$$p = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

选取符合  $\frac{\sum_{i=1}^p \lambda_i}{\sum_{j=1}^n \lambda_j} \geq e$  ( $e$  的数值通常为 0.85) 的

前  $p$  个主成分当作低维指标的主成分决策矩阵:  $\mathbf{Z} = (z_{ij})_{m \times p} = [z_1, z_2, \dots, z_p]$ 。依据主成分分析的结果,可以得到主成分指标权重为

$$u_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{k=1}^p \lambda_k} \quad (j=1, 2, \dots, p) \quad (5)$$

从而可以得到构造主成分的加权决策矩阵:

$$\mathbf{U} = (u_{ij})_{m \times p} = [u_{11} z_1, u_{12} z_2, \dots, u_{p1} z_p] \quad (6)$$

## 3 优化决策模型的建立

定义 1 对于主成分加权决策  $\mathbf{U} = (u_{ij})_{m \times p}$  矩阵的指标属性值,  $u_j^+ = \max\{u_{ij} | i=1, 2, \dots, m\}, u_j^- = \min\{u_{ij} | i=1, 2, \dots, m\} (j=1, 2, \dots, p)$  则称由  $A^+ = (u_1^+, u_2^+, \dots, u_p^+)$  和  $A^- = (u_1^-, u_2^-, \dots, u_p^-)$  构造的方案,分别为主成分正理想方案和主成分负理想方案。

定义 2 称  $d_i^+$  和  $d_i^-$  分别为  $A_i (i=1, 2, \dots, m)$  对主成分正理想方案和主成分负理想方案的偏离度。

$$d_i^+ = \sqrt{\left| \sum_{j=1}^p u_{ij} - u_j^+ \right|} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

$$d_i^- = \sqrt{\left| \sum_{j=1}^p u_{ij} - u_j^- \right|} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

根据定义 2 中的偏离度能够评判出实施方案是否可行,据此根据计算结果比较得出各具体维修实施方案的差异性。假设综合主成分指标  $q_i$  为方案  $A_i$  的数学期望排序,则  $q_i d_i^+$  为方案  $A_i$  距离主成分正理想方案的期望偏离度,  $(1-q_i) d_i^-$  为方案  $A_i$  距离主成分负理想方案的期望偏离度。假如使各个方案  $A_i$  或者偏离主成分正理想方案,或者偏离主成分负理想方案,经过分析对比,就能够把各个实施方案的差异以及优劣性直观明了地呈现出来,因此可以建立如下的综合优化模型:

$$\begin{aligned} \max F(q_1, q_2, \dots, q_m) &= \max \{ (q_i d_i^+)^2 + [(1 - q_i) d_i^-]^2 \} \\ &= \max \left[ \sum_{i=1}^m q_i^2 \sum_{j=1}^p (u_{ij} - u_j^-)^2 + (1 - q_i^2) \sum_{j=1}^p (u_{ij} - u_j^+)^2 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

令  $\frac{\partial F}{\partial q_i} = 0$ , 得到

$$q_i = \frac{\sum_{j=1}^p (u_{ij} - u_j^-)^2}{\sum_{j=1}^p (u_{ij} - u_j^+)^2 + \sum_{j=1}^p (u_{ij} - u_j^-)^2} \quad (10)$$

根据式(10)能够得到各个方案总体优化决策排序向量  $(q_1, q_2, \dots, q_m)$ , 从而能够对方案开展详细准确的评价。

### 4 算例

现有 6 个民用航空公司(分别设为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $A_5$  和  $A_6$ ), 采用专家咨询法对上述 15 个指标进行预测, 这些数值是参考历史相关数据、专

家的经验和意见、分析人员的具体计算后确定的, 结果如表 1 所示。现通过 SPSS 软件主成分分析法<sup>[19]</sup>对各单位的商用飞机维修保障能力进行评估(SPSS 软件可以通过模块“降维”实现主成分分析), 分析结果如表 2(总方差百分比示意图)所示。

通过 SPSS 分析、降维、因子分析等步骤, 由总方差百分比示意图(表 2)可知,  $(\sum_{i=1}^4 \lambda_i) / (\sum_{j=1}^{15} \lambda_j) = 93.2\% \geq 85\%$ , 这表明前四个主成分能够代表最初的 15 个指标来分析各个民用航空公司单位的机务维修保障能力水平, 因此取前 4 项主成分就可以达到决策分析的要求。主成分分析碎石图如图 3 所示。

表 1 6 个航空公司评价指标预测数值

Table 1 Evaluation index forecast value of six airlines

航空公司	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>9</sub>	C <sub>10</sub>	C <sub>11</sub>	C <sub>12</sub>	C <sub>13</sub>	C <sub>14</sub>	C <sub>15</sub>
A <sub>1</sub>	82.7	78.5	93.4	91.1	77.3	79.1	87.6	80.2	81.2	79.9	84.7	93.3	89.9	87.2	92.6
A <sub>2</sub>	92.1	69.3	89.9	82.3	91.5	90.6	87.9	82.3	81.5	85.7	83.7	88.9	78.9	83.6	90.1
A <sub>3</sub>	90.8	80.4	95.0	77.5	82.5	92.5	91.8	93.3	89.9	94.5	69.2	86.9	87.8	69.9	92.1
A <sub>4</sub>	88.8	83.1	98.1	69.8	66.9	87.6	79.8	77.3	80.2	85.9	89.6	79.6	81.7	83.5	84.2
A <sub>5</sub>	91.5	89.9	93.8	82.4	75.2	83.5	79.9	85.6	78.3	79.7	77.7	78.9	83.2	82.4	83.1
A <sub>6</sub>	79.3	81.3	89.5	79.9	71.1	69.2	73.5	68.4	75.9	78.2	79.3	88	71.3	77.0	79.5

表 2 总方差百分比示意图

Table 2 The total variance percentage diagram

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差的%	累积%	总计	方差的%	累积%
1	6.837	45.583	45.583	6.837	45.583	45.583
2	3.472	23.147	68.730	3.472	23.147	68.730
3	2.206	14.710	83.439	2.206	14.710	83.439
4	1.467	9.782	93.221	1.467	9.782	93.221
5	1.017	6.779	100.000	1.017	6.779	100.000
6	$6.995 \times 10^{-16}$	$4.664 \times 10^{-16}$	100.000			
7	$5.068 \times 10^{-16}$	$3.379 \times 10^{-15}$	100.000			
8	$3.592 \times 10^{-16}$	$2.395 \times 10^{-15}$	100.000			
9	$1.858 \times 10^{-16}$	$1.239 \times 10^{-15}$	100.000			
10	$2.291 \times 10^{-17}$	$1.527 \times 10^{-16}$	100.000			
11	$-7.928 \times 10^{-17}$	$-5.285 \times 10^{-16}$	100.000			
12	$-1.521 \times 10^{-16}$	$-1.014 \times 10^{-15}$	100.000			
13	$-3.148 \times 10^{-16}$	$-2.099 \times 10^{-15}$	100.000			
14	$-3.511 \times 10^{-16}$	$-2.340 \times 10^{-15}$	100.000			
15	$-5.544 \times 10^{-16}$	$-3.696 \times 10^{-15}$	100.000			

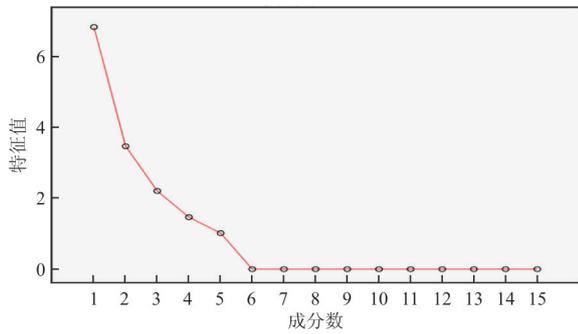


图3 主成分分析碎石图

Fig. 3 Principal component analysis scree plot

从图3可以看出:前4个主成分特征值较大(碎石图是按照特征根大小排列的主成分散点图,纵坐标是特征值,横坐标是成分数)。各个指标的前5个主成分SPSS软件分析数值如表3所示。

通过SPSS软件分析,得出成分矩阵条形图(如图4所示),可以直观地观察出各个变量之间的相关性,有助于各航空公司更科学合理地制定相应的维修计划。

表3 各指标成分数值

Table 3 Index values of each indicator

评估指标	成分数值				
	1	2	3	4	5
敬业程度	0.765	-0.197	0.399	-0.154	-0.438
知识技能	-0.324	-0.713	0.038	0.592	-0.185
身体素质	0.054	0.795	0.178	0.540	-0.205
执行标准能力	0.296	-0.766	0.438	0.126	0.343
心理状态	0.658	0.578	-0.150	-0.270	-0.371
设施配套率	0.856	-0.293	0.183	-0.360	-0.138
质量检验机构完善合理性	0.724	-0.056	0.440	0.504	0.159
机组专责制度完善合理性	-0.306	0.320	0.888	-0.070	-0.107
检查制度完善合理性	0.863	0.392	0.214	0.101	0.214
设备完好率	0.958	0.255	0.092	0.040	0.086
质量控制机构完善合理性	0.172	0.887	-0.147	0.135	0.380
保障资料基数达标率	-0.429	0.109	0.760	-0.413	0.235
设备工具满编率	0.830	-0.322	-0.283	-0.273	0.229
维修器材基数达标率	0.936	-0.119	-0.223	0.054	0.241
品种达标率	0.913	-0.217	-0.017	0.213	-0.271

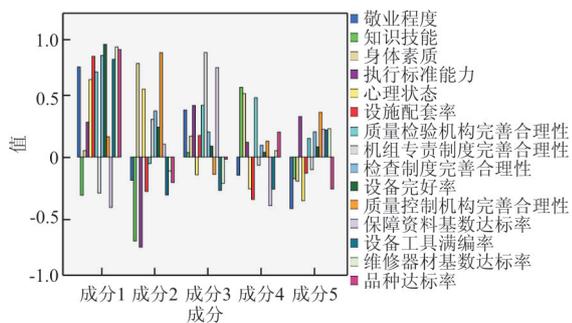


图4 成分矩阵条形图

Fig. 4 Component matrix bar chart

根据成分矩阵(如表3所示),设这4个主成分分别用  $y_1, y_2, y_3, y_4$  表示,15个指标变量分别用

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_{15}$  表示,则4个主成分的线性组合如式(11)所示。可以看出:第1主成分在设备完好率、维修器材基数达标率、品种达标率上对应的系数较大,反映了航空公司器材设备对商用飞机维修保障能力产生最重要的影响;第2主成分在身体素质、质量控制机构完善合理性对应的系数较大,刻画了航空公司的人员及组织机构对商用飞机维修保障能力的影响;第3主成分中机构专责制度完善合理性对应较大的系数,反映了航空公司的管理方面的水平;第4主成分中知识技能起到主要作用,表明维修人员的知识技能对维修保障能力的好与差起着较大的作用。

$$\begin{cases} y_1 = 0.756x_1 - 0.324x_2 + 0.054x_3 + \dots + 0.939x_{14} + 0.913x_{15} \\ y_2 = -0.197x_1 - 0.713x_2 + 0.795x_3 + \dots + 0.119x_{14} - 0.217x_{15} \\ y_3 = 0.399x_1 - 0.038x_2 + 0.178x_3 + \dots + 0.223x_{14} - 0.017x_{15} \\ y_4 = -0.154x_1 - 0.592x_2 + 0.54x_3 + \dots + 0.054x_{14} + 0.213x_{15} \end{cases} \quad (11)$$

记  $\hat{y}_1, \hat{y}_2, \hat{y}_3, \hat{y}_4$  分别是航空公司在 4 个主成分上的得分,  $F$  表示航空公司维修保障能力的总得分, 即  $F = 0.45583\hat{y}_1 + 0.23147\hat{y}_2 + 0.14710 \times \hat{y}_3 + 0.09782\hat{y}_4$ , 将数据代入式(11)4 个主成分的线性公式, 计算出各航空公司在 4 个主成分的总得分和相应的名次, 如表 4 所示。

表 4 6 个航空公司总得分和名次  
Table 4 6 airlines total score and ranking

航空公司	排序值	排 序
A1	0.233 1	3
A2	0.235 6	2
A3	0.257 2	1
A4	0.222 0	5
A5	0.227 9	4
A6	0.203 9	6

从表 4 可以看出: A3 航空公司排序第一, 经分析发现, 该航空公司的设备完好率、维修器材基数达标率、品种达标率较高。而排名最差的 A6 航空公司在上述几个方面得分较差, 影响了自身的排名。这说明在商用飞机维修保障中, 设备完好率、维修器材基数达标率、品种达标率是相对较为重要的指标, 也是提高各航空公司商用飞机维修保障能力的重点。各航空公司相关部门在建设管理中, 应对问题作出合理高效的判断, 制定切实可行高效率的实施方案。

## 5 结 论

(1) 在确定了维修相关数据后, 利用主成分分析方法, 能够比较准确地计算出不同航空公司的维修保障水平, 从而为航空公司提供维修保障评价指标参考。

(2) 以航空公司机务维修保障能力为研究对象, 可以利用主成分分析法找到一个新的评价指标, 在信息损失量很小的情况下, 将多个指标综合成一个新的指标。新指标经过评估后, 在确认有效

的前提下, 可用于商用飞机维修保障能力的状态评价。

(3) 在今后开展飞机维修保障能力评价研究时, 可以考虑把主成分分析方法与其他方法结合使用, 以进一步提高评价的准确性。

## 参考文献

[1] 易正俊. 数理统计及其工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 174-189.  
Yi Zhengjun. Mathematical statistics and engineering applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 174-189. (in Chinese)

[2] 王志平, 徐天杰, 苏景新. 基于数据模型的某型民用飞机货舱区域腐蚀影响因素研究[J]. 航空学报, 2012, 33(5): 940-948.  
Wang Zhiping, Xu Tianjie, Su Jingxin. Research on relationship of civil aircraft cargo compartment corrosion and its influencing factors based on data model[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(5): 940-948. (in Chinese)

[3] 胡小娜. 基于 PCA-BP 的飞机爬升段油耗分析模型[J]. 科技创新与应用, 2017(19): 88-89.  
Hu Xiaona. PCA-BP based aircraft climbing section fuel consumption analysis model[J]. Technology Innovation and Application, 2017(19): 88-89. (in Chinese)

[4] Trappey A J C, Trappey C V, Ma L, et al. Intelligent engineering asset management system for power transformer maintenance decision supports undervarious operating conditions[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 84(1): 3-11.

[5] 何晓群. 现代统计分析方法与应用[M]. 4 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2016: 265-275.  
He Xiaoqun. Modern statistical analysis methods and applications[M]. 4th ed. Beijing: China Renmin University Press, 2016: 265-275. (in Chinese)

[6] 左洪福, 蔡景, 吴昊, 等. 航空维修工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1-2.  
Zuo Hongfu, Cai Jing, Wu Hao, et al. Aviation maintenance engineering[M]. Beijing: Science Press, 2011: 1-2. (in Chinese)

[7] 郑珂珂, 左洪福. 航空公司机务维修安全评估技术研究[J]. 航空维修与工程, 2011(6): 80-82.  
Zheng Keke, Zuo Hongfu. Research on safety assessment technologies of commercial aircraft maintenance[J]. Avia-

- tion Maintenance & Engineering, 2011(6): 80-82. (in Chinese)
- [8] Chen Dehuang, Wang Xiaowei, Zhao Jing. Aircraft maintenance decision system based on real-time condition monitoring[J]. Procedia Engineering, 2012, 29: 765-769.
- [9] Yang Zhixian, Yang Guobin. Optimization of aircraft maintenance plan based on genetic algorithm[J]. Physics Procedia, 2012, 33: 580-586.
- [10] 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. Multiple attribute maintenance decision making of aircraft based on grey-fuzziness and analytical hierarchy process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(2): 478-486.
- [11] Hong Sheng, Zhou Zheng, Zio Enrico, et al. Condition assessment for the performance degradation of bearing based on a combinatorial feature extraction method[J]. Digital Signal Processing, 2014, 27(1): 159-166.
- [12] Hong Sheng, Zhou Zheng, Zio Enrico, et al. An adaptive method for health trend prediction of rotating bearings[J]. Digital Signal Processing, 2014, 35(c): 117-123.
- [13] Hong Sheng, Lü Chuan, Zhao Tingdi, et al. Cascading failure analysis and restoration strategy in an interdependent network[J]. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 2016, 49(19): 195101.
- [14] Hong Sheng, Zhu Juxing, Braunstein Lidia A, et al. Cascading failure and recovery of spatially interdependent networks[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2017(10): 103208.
- [15] 张峰, 谢振华, 马喜月, 等. 基于主成分分析的军用飞机维修保障能力评估[J]. 飞机设计, 2011, 31(4): 76-80.
- Zhang Feng, Xie Zhenhua, Ma Xiyue, et al. Evaluation about the maintenance support ability of military avion based on principal component analysis[J]. Aircraft Design, 2011, 31(4): 76-80. (in Chinese)
- [16] 王海涛, 阳平华. 基于主成分分析法的装备维修资源保障能力评估[J]. 四川兵工学报, 2008, 29(2): 30-32, 35.
- Wang Haitao, Yang Pinghua. Evaluation of equipment maintenance resources supportability based on principal component analysis[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2008, 29(2): 30-32, 35. (in Chinese)
- [17] 付忠广, 王丽平, 戈志华, 等. 采用主成分分析法综合评价电站机组的运行状态[J]. 动力工程, 2008, 28(4): 548-551.
- Fu Zhongguang, Wang Liping, Ge Zhihua, et al. Principal component analysis for comprehensive evaluation on information of power plant unit[J]. Journal of Power Engineering, 2008, 28(4): 548-551. (in Chinese)
- [18] 曹惠玲, 牛军, 涂迅来, 等. 一种基于主成分分析法的发动机性能评估方法[J]. 中国民航大学学报, 2011, 29(6): 8-11.
- Cao Huiling, Niu Jun, Tu Xunlai, et al. Engine performance assessment based on principal components analysis[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2011, 29(6): 8-11. (in Chinese)
- [19] 张文霖. 主成分分析在 SPSS 中的操作应用[J]. 市场研究, 2005(12): 31-34.
- Zhang Wenlin. The principal components analysis in SPSS operational applications [J]. Marketing Research, 2005(12): 31-34. (in Chinese)

### 作者简介:

**张林帅**(1991—),男,硕士研究生。主要研究方向:安全性评估与持续适航。

**陈志雄**(1977—),男,博士,副教授。主要研究方向:航空维修工程、安全性评估与持续适航、发动机状态监控与故障预测。

**潘佑**(1985—),男,硕士,工程师。主要研究方向:航电系统维修工程。

**蔡景**(1976—),男,博士,副教授。主要研究方向:四性与适航管理。

(编辑:赵毓梅)