

中文引用格式:汪磊,安佳宁,赵新斌,等. 基于QAR数据的飞行员个体超限风险精细化评价模型[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(8): 35-42.

英文引用格式:WANG Lei, AN Jianing, ZHAO Xinbin, et al. Refined evaluation model for pilot's individual exceedance risk based on QAR data[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(8): 35-42.

# 基于QAR数据的飞行员个体超限风险 精细化评价模型\*

汪磊<sup>1</sup>研究员, 安佳宁<sup>1</sup>, 赵新斌<sup>2</sup>副研究员, 俞力玲<sup>2</sup>研究员

(1 中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300;

2 中国民航科学技术研究院 航空安全研究所, 北京 100028)

中图分类号: X949

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.08.1824

基金项目: 国家自然科学基金资助(32071063)。

**【摘要】** 为定量评价飞行员个体超限风险, 提出一种基于快速存取记录器(QAR)数据和飞行品质监控(FOQA)的飞行员个体超限风险精细化评价模型。首先, 根据事故统计结果、国际民航组织(ICAO)及FOQA基站划分的核心风险类别, 选取其中3类风险的FOQA监控项目作为评价指标, 计算飞行员个体单项核心风险值; 然后, 运用熵权逼近理想解排序法(TOPSIS)测算各项核心风险值所占权重, 提出飞行员个体超限风险精细化评价模型; 最后, 将模型运用于实际飞行风险量化评价, 通过采集中国民航(CAAC)FOQA基站中共9317条多源融合数据, 量化飞行员个体超限风险, 得到飞行员个体超限风险量化值排序, 结合K-means聚类算法划分飞行员个体超限风险等级。结果表明: 该模型可量化排序1693名飞行员个体超限风险, 并将飞行员超限风险等级划分为高风险、中风险和低风险3类。

**【关键词】** 快速存取记录器(QAR)数据; 个体超限风险; 精细化评价; 飞行品质监控(FOQA); 熵权逼近理想解排序(TOPSIS)法; K-means聚类

## Refined evaluation model for pilot's individual exceedance risk based on QAR data

WANG Lei<sup>1</sup>, AN Jianing<sup>1</sup>, ZHAO Xinbin<sup>2</sup>, YU Liling<sup>2</sup>

(1 College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2 Aviation Safety Institute, China Academy of Civil Aviation Science and

Technology, Beijing 100028, China)

**Abstract:** In order to achieve a quantitative evaluation of individual pilot's exceedance risk, a refined evaluation model for pilot's individual exceedance risk was established based on QAR data and the flight operations quality assurance (FOQA) monitoring items. Firstly, according to accident statistics, International Civil Aviation Organization (ICAO) and the core risks divided by the FOQA station, the FOQA monitoring items associated with the three types of core risks were selected as the evaluation indexes, and the risk value for each core risk of the individual pilots was calculated. In the next step, the

weight of each core risk value was calculated by entropy weighted TOPSIS. Then, the refined evaluation model for the pilot's individual exceedance risk was established. Finally, the model was applied to the quantitative evaluation of actual flight risk. By collecting 9 317 pieces of multi-source fusion data from the FOQA station of Civil Aviation Administration of China (CAAC), the individual exceedance risk of the pilots were quantified, the ranking of individual pilots' exceedance risk was obtained, and the pilot's individual exceedance risk levels were also divided with the use of *K*-means clustering algorithm. The results show that the model can quantify and rank 1 693 individual pilots' exceedance risk, and divide the pilot's exceedance risk into three types, including high risk, medium risk and low risk.

**Keywords:** quick access recorder (QAR) data; individual exceedance risk; refined evaluation; flight operations quality assurance (FOQA); entropy-weighted technique for order preference by similarity to an ideal solution(TOPSIS); *K*-means clustering

## 0 引言

安全始终是航空运输业快速健康发展的决定性因素。各类统计数据表明:超过 80% 的飞行事故都与人为因素密切相关<sup>[1]</sup>。根据中国民航局 2022 年发布的中国民航航空安全报告,在 2012—2021 年我国发生的所有飞行事故中,因机组操作原因导致的事故数占事故总数的 67.59%<sup>[2]</sup>。作为飞机的直接操控者,飞行员在保障飞机安全运行方面扮演着至关重要的角色。因此,针对飞行员个体开展风险量化评价具有重大现实意义。

国际民航组织在 2022 年发布的安全年度报告中强调了应持续重点关注的高风险事件类别<sup>[3]</sup>,包括冲偏出跑道(Runway Excursion, RE)、空中失控(Loss of Control, LOC)以及可控飞行撞地(Controlled Flight into Terrain, CFIT)3 类核心风险。诸多统计表明:这 3 类事件在众多影响飞行安全的风险事件中具有举足轻重的地位。2022 年,空客公司发布的商业航空事故统计分析报告指出<sup>[4]</sup>,在 1958—2022 年全球商业航空致命事故中,空中失控、可控飞行撞地、冲偏出跑道为导致商用飞机致命事故的前 3 大原因;汪磊等<sup>[5]</sup>通过分析 1959—2019 年间国际民航发生的 626 起事故,得出发生频次最高的 3 类事故为冲偏出跑道、空中失控和可控飞行撞地。

飞行品质监控(Flight Operational Quality Assurance, FOQA)是基于飞机上的快速存取记录器(Quick Access Recorder, QAR)数据,通过监控飞行参数超限情况开展飞行事故统计及安全风险评估的重要手段。目前,国内已有诸多学者通过采集飞行 QAR 数据,结合 FOQA 监控标准及各种风险评估模型和智能算法,对超限事件风险开展研究,按照研究

所采用方法的不同大致分为 3 类。第 1 类研究采用了传统统计建模方法建立 QAR 超限风险评价模型,汪磊等<sup>[6]</sup>依据重着陆判定参数的分布函数,运用定量风险评价方法建立了重着陆风险定量评价模型,为预测超限事件和事故征候发生的风险提供客观参考;孙瑞山等<sup>[7]</sup>将 QAR 超限事件作为评价指标,构建了飞行安全评价模型,并通过实际数据进一步证实了该模型在评价飞行安全水平方面的有效性。第 2 类研究聚焦于特定超限风险事件,基于数据挖掘和聚类的机器学习算法对 QAR 数据建模,卢宾宾等<sup>[8]</sup>利用 QAR 数据对空中颠簸开展研究,为进一步评估飞机空中颠簸的风险提供充分依据;尚家兴等<sup>[9]</sup>提出了一种基于 QAR 数据的曲线聚类方法,将 *K*-means 聚类算法转化为半监督聚类算法自动识别重着陆模式,根据聚类结果和模式相似度评估重着陆事件的超限风险;汪磊等<sup>[10]</sup>以 QAR 数据为依据,基于贝叶斯网络,建立了着陆超限风险贝叶斯网络模型。第 3 类研究着重运用深度学习模型算法从 QAR 大数据中挖掘相关信息,康宗伟<sup>[11]</sup>提出融合多层编解码器和 TG-Attention 的飞机着陆距离预测模型,实现了对飞机冲出跑道的实时预警;陈农田等<sup>[12]</sup>提出了基于 LSTM-DNN 的民机高原进近着陆风险评估方法,为评估高原民机进近着陆风险提供客观参考。综上所述,目前大多数研究都是选取特定的超限事件,运用不同算法开展飞行安全风险评价,缺乏对多项超限风险事件的综合分析。有些学者尝试将研究重点迁移至飞行员个体<sup>[13]</sup>,但较少存在对飞行员个体超限风险的定量评价。

基于此,笔者拟聚焦于飞行员个体风险的定量评估,参照 FOQA 监控项目规范及要求,将威胁民航运行安全的 3 类典型核心风险作为衡量飞行员个体超限风险的标准,建立基于 QAR 数据的超限风险精细

化评价指标体系,计算飞行员个体单项核心风险值。综合熵权逼近理想解排序 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS) 法对飞行员单项核心风险值赋权,构建飞行员个体超限风险精细化评价模型。将模型应用于实际飞行风险量化评价,得到个体飞行员超限风险值及其排序情况,运用 K-means 聚类算法划分飞行员超限风险等级,以期有效预防飞行事故。

## 1 飞行员个体超限风险评价方法

### 1.1 FOQA 与 QAR 数据

QAR 设备能够完整记录有关飞行操纵、飞机状态以及气象情况等多方面信息,涵盖了飞机在整个飞行过程中的上千个参数。QAR 超限事件是指当飞机处于运行过程中的特定阶段或特定时刻,其 QAR 参数超出预设监控标准的不安全事件。QAR 超限事件通常不会对飞行安全造成显著影响,但该类事件的发生暴露出飞行员在操作过程中存在某些问题,如果不及时加以改进,在特定条件下可能会导致更为严重的后果。

目前,航空公司主要通过收集分析日常航线运行中的 QAR 数据,监测飞行参数超限情况。FOQA 的价值在于通过监测识别 QAR 超限事件,充分识别出飞行员不符合标准的操作以及飞行中可能存在的

各类安全隐患,并将结果应用于对飞行员操纵行为的监督和培训,来提高飞行机组操作品质,完善标准操作程序。

### 1.2 超限风险精细化评价指标体系

核心风险的定义主要包括冲偏出跑道、空中失控和可控飞行撞地 3 类风险事件。

冲偏出跑道通常发生在起飞和着陆阶段,其中,着陆阶段约占事故总数的 77%<sup>[13]</sup>。研究表明:飞机在进近阶段(特别是最后进近阶段)的表现对着陆质量的好坏影响显著<sup>[14-15]</sup>。因此,可以认为,导致飞机进近不稳定、影响飞机着陆表现的因素是诱导飞机发生冲偏出跑道事故的关键因素。

空中失控通常表现为飞机气动失速或进入复杂状态<sup>[16]</sup>,其发生的典型特征包括飞机的坡度角、飞机的俯仰姿态及空速偏离正常运行参数范围<sup>[17]</sup>。

可控飞行撞地事故主要集中发生在进近和着陆阶段<sup>[18]</sup>,其成因非常复杂,包括人为因素、环境因素和技术因素,其中,人为差错占有绝对比重,而环境因素主要包括当时的风速风向、能见度等,技术因素主要是指飞机速度、航向等。

依据局方基站选取的 3 类核心风险对应的监控项目<sup>[19]</sup>,参考民航飞行专业知识和行业专家经验,得出基于 QAR 超限事件监控的评价指标体系,见表 1。

表 1 飞行员个体超限风险精细化评价指标体系

Table 1 Index system for refined evaluation of individual pilot's exceedance risk

核心风险	冲偏出跑道	空中失控	可控飞行撞地
评价指标	下滑道偏离 航向道偏离 着陆速度大 50 ft 至接地距离远 起飞滑跑方向不稳定 着陆滑跑方向不稳定 进近速度大 进近速度小 选择着陆构型晚 着陆放起落架晚 接地仰角大 接地仰角小 着陆坡度大 进近坡度大	接地仰角小 接地仰角大 着陆坡度大 进近坡度大 起飞坡度大 爬升坡度大 离地仰角大	下滑道偏离 航向道偏离 500~50 ft 下降率大 进近速度大 进近速度小 选择着陆构型晚 着陆放起落架晚 接地仰角大 接地仰角小 着陆坡度大 进近坡度大

注:1ft= 0.3048 m。

### 1.3 飞行员个体单项核心风险值测度

飞行员个体单项风险的可能性表示为飞行员在某段时期内发生单项核心风险超限事件的频次与总飞行航班数的比值,因此,个体单项核心风险值测度

的重点在于充分评估指标的严重度。赵新斌等<sup>[20]</sup>提出了一种运行风险量化模型,依据选定的运行风险量化指标,将对应的 QAR 数据输入模型,计算得到运行风险值。涉及到的个体飞行员单项核心风险

按下式计算:

$$S_t = \frac{1}{m_1} \times S_{at} + \frac{1}{m_\theta} \times S_{\theta t}$$

$$= \frac{1}{m_1} \times \left( \frac{1}{M_t} \sum_{i=1}^{M_t} \sum_{j=1}^q w_j S_{ijt} \right) + \frac{1}{m_\theta} \times \left( \frac{1}{M_t} \sum_{i=1}^{M_t} \sum_{l=1}^p w_l Y_{lit} \right) \quad (1)$$

其中,

$$S_{ijt} = \begin{cases} \frac{x_{ijt} - x_{ij0}}{\max\{x_j - x_{j0}\}}, & x_{ijt} > x_{ij0} \\ 0, & x_{ijt} \leq x_{ij0} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $S_t$  为待评价对象在第  $t$  天总的运行风险值;  $m_1$  为待评价对象的非警告类监控项目在一个历史周期之内的风险均值;  $S_{at}$  为待评价对象的非警告类监控项目在第  $t$  天的运行风险值;  $m_\theta$  为待评价对象的警告类监控项目在一个历史周期之内的风险均值;  $S_{\theta t}$  为待评价对象的警告类监控项目在第  $t$  天的运行风险值;  $M_t$  为第  $t$  天的航班总数;  $q$  为非警告类监控项目的总数;  $w_j$  为第  $j$  个非警告类监控项目对于运行风险的权重;  $S_{ijt}$  为第  $j$  个非警告类监控项目在第  $t$  天的第  $i$  个航班中相对于预设标准值的偏移量比上全行业在所述历史周期内该非警告类监控项目相对于预设标准值的最大偏移量;  $p$  为警告类监控项目的总数;  $w_l$  为第  $l$  个警告类监控项目对于运行风险的权重;  $y_{lit}$  为第  $l$  个警告类监控项目在第  $t$  天的第  $i$  个航班中发生的次数。

## 2 飞行员个体超限风险模型构建

### 2.1 熵权 TOPSIS 法确定 3 类核心风险权重

以 3 类单项核心风险为评价指标, 基于熵权 TOPSIS 法<sup>[21]</sup> 建立飞行员个体超限风险评价模型, 具体计算步骤如下:

第 1 步: 构建标准化评价矩阵。设飞行员个体超限风险的原始评价指标矩阵为  $R$ :

$$R = (r_{ab})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $r_{ab}$  为第  $a$  名飞行员个体在第  $b$  项核心风险上对应的风险值;  $m$  为飞行员数量;  $n$  为核心风险个数, 取  $n=3$ 。

由于单项核心风险值越大, 在综合评价个体风险时所起到的作用越显著, 因此, 将 3 类核心风险值

都看作正向指标, 对原始数据作归一化处理:

$$z_{ab} = \frac{r_{ab} - \min(r_{ab})}{\max(r_{ab}) - \min(r_{ab})} \quad (4)$$

$z_{ab}$  为经过归一化处理第  $a$  名飞行员在第  $b$  项核心风险上对应的风险值。

处理后得到规范化矩阵如下:

$$\bar{R} = (z_{ab})_{m \times n} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

第 2 步: 计算指标权值。第  $b$  项指标的信息熵值  $e_b$  计算如下:

$$e_b = -\frac{1}{\ln m} \sum_{a=1}^m h_{ab} \ln h_{ab} \quad b = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

其中,

$$h_{ab} = \frac{z_{ab}}{\sum_{a=1}^m z_{ab}} \quad (7)$$

式中  $h_{ab}$  为第  $a$  名飞行员个体在第  $b$  项核心风险上对应的风险均值。

根据第  $b$  项指标的信息熵值  $e_b$  计算出对应的权重  $w_b$ :

$$w_b = \frac{1 - e_b}{\sum_{a=1}^m (1 - e_b)} \quad (8)$$

第 3 步: 生成规范化加权评价矩阵。将规范化处理后的矩阵元素乘以各指标的权值, 得到规范化加权评价矩阵  $V$ :

$$V = (v_{ab})_{m \times n} = \begin{bmatrix} w_1 z_{11} & w_2 z_{12} & \cdots & w_n z_{1n} \\ w_1 z_{21} & w_2 z_{22} & \cdots & w_n z_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_1 z_{m1} & w_2 z_{m2} & \cdots & w_n z_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

第 4 步: 确定正负理想解。通过计算得到正理想解与负理想解为:

正理想解:

$$V^+ = \{\max_b V_{ab} \mid a = 1, 2, \dots, m\} \quad (10)$$

负理想解:

$$V^- = \{\min_b V_{ab} \mid a = 1, 2, \dots, m\} \quad (11)$$

第 5 步: 计算距离。计算评价指标与正负理想解之间的距离。

评价指标与正理想解的距离:

$$d_a^+ = \left\{ \sum_{b=1}^n (V_{ab} - V_b^+)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

评价指标与负理想解的距离:

$$d_a^- = \left\{ \sum_{b=1}^n (V_{ab} - V_b^-)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

第 6 步:计算相对接近程度。最终,求出相对接

$$I_a = \frac{\sqrt{\sum_{b=1}^n (w_b z_{ab} - \min_b w_b z_{ab})^2}}{\sqrt{\sum_{b=1}^n (w_b z_{ab} - \max_b w_b z_{ab})^2} + \sqrt{\sum_{b=1}^n (w_b z_{ab} - \min_b w_b z_{ab})^2}} \quad (15)$$

式中:  $I_a$  为第  $a$  名飞行员的个体超限风险值;  $w_b$  为根据熵权法得到的第  $b$  项指标权重。

### 3 飞行员个体超限风险模型应用

#### 3.1 数据介绍及预处理

数据来源为中国民航 FOQA 基站,基站以全行业运输飞机 QAR 数据为核心,综合各类航空安全信息及 FOQA 信息,同时融合机组、地理、气象等飞机运行相关数据,开展典型安全事件监控。

试验所采用的数据是基于局方基站收集到的 QAR 数据、飞行员云执照数据、机组排班信息等多种数据源,运用数据关联、重组技术,处理得到涵盖各类要素的多源异构融合数据,共计 9 317 条。包含的字段有时间、核心风险类别、飞行员身份信息及通过计算获得的飞行员个体单项核心风险值。将飞行员身份信息脱敏后,得到具体数据实例见表 2(仅列出数据集中部分原始数据, F 表示飞行员)。

表 2 数据实例

Table 2 Data instance

时间	核心风险类别	飞行员	风险值
2020-11-22	冲偏出跑道	F <sub>1</sub>	0.004 980 916
2021-03-14	可控飞行撞地	F <sub>2</sub>	0.001 598 222 3
2021-03-22	冲偏出跑道	F <sub>3</sub>	0.004 465 648 9
2021-06-20	冲偏出跑道	F <sub>4</sub>	0.000 590 422 2
2021-09-5	空中失控	F <sub>5</sub>	0.002 491 506 2

将上述原始数据按照飞行员个体分类,得到飞行员个体及其对应的 3 类核心风险值,共计 1 693 条数据。对同一名飞行员而言,若多次发生某项核心风险,则将其对应该项风险的所有风险值求和,作为该名飞行员在这项风险上的最终得分。通过将所有单项核心风险值加和,各项风险的发生频次均被纳入模型的计算结果,得出的个体超限风险量化结

近程度  $D_a$  值。 $D_a$  越大,说明该飞行员个体超限风险越高,排名情况根据  $D_a$  值的大小排序。

$$D_a = \frac{d_a^-}{d_a^+ + d_a^-} \quad (a = 1, 2, \dots, m) \quad (14)$$

#### 2.2 个体超限风险精细化评价模型

综合上述计算过程,得到模型公式如下:

果更贴合实际。

为方便后续计算,将所有飞行员个体单项核心风险数据的量纲统一至 (0, 100) 范围内,具体数据实例见表 3。

表 3 统一量纲后的数据实例

Table 3 Data instance after non-dimensional disposal

F	RE 风险值	LOC 风险值	CFIT 风险值
飞行员 F <sub>6</sub>	5.200 982 523	0	46.012 269 938
飞行员 F <sub>7</sub>	6.204 539 982	0.226 500 563	0.154 041 108
飞行员 F <sub>8</sub>	1.204 283 986	3.233 034 572	1.090 901 236
飞行员 F <sub>9</sub>	19.947 326 070	1.424 487 463	0
飞行员 F <sub>10</sub>	10.276 362 606	36.363 636 363	25.144 733 431

#### 3.2 确定 3 类核心风险权重

利用熵权法可测算出飞行员单项核心风险的权重占比,见表 4。指标权重高表示不同飞行员在该维度下的数据波动幅度明显,在评价飞行员个体超限风险时中发挥的作用更大。因此,指标权重越高,在个体超限风险判定过程中就越关键。评价结果中,LOC 权重最高,其次是 CFIT,最低为 RE。

表 4 熵权法计算单项核心风险权重

Table 4 Weights of individual core risk calculated by entropy weight method

指标	发生频率	信息熵值	信息效用值	权重
RE	0.846	0.935	0.065	0.084 74
LOC	0.032	0.634	0.366	0.474 46
CFIT	0.122	0.660	0.340	0.440 80

国际航空运输协会发布的统计数据显示,全球运输航空在 2017—2021 年共发生 229 起事故(图 1),造成 1 017 人死亡<sup>[22]</sup>。虽然 LOC、CFIT 事故发生数量占比较低,分别只占总事故数的 6.6% 和 4.4%,但此类事故一经发生,往往会导致机毁人亡的灾难性结果。统计结果表明:LOC 和 CFIT 造成的死亡人数共占事故总死亡人数的 77.7%,其致命

风险远远高于其他类事件。因此,在计算个体风险值时,这2项指标发挥着决定性作用。而RE发生较为频繁,且造成重大和严重损害后果的可能性相对很低,因此,该指标在综合计算个体风险值时,取值无显著差距。

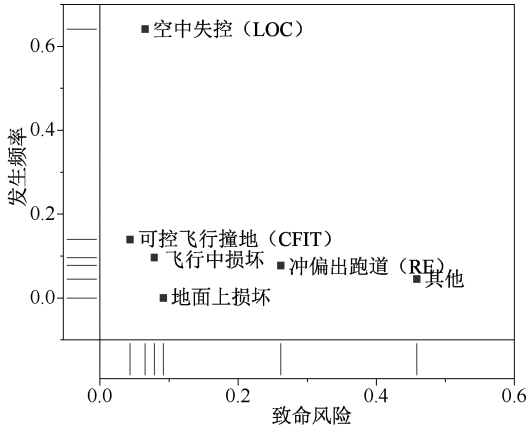


图1 2017—2021年全球运输航空事故原因统计  
Fig.1 Statistics on causes of global transportation aviation accidents from 2017 to 2021

### 3.3 个体超限风险值计算

以表4数据为基础,结合3类核心风险的评价维度,综合评价飞行员个体超限风险。将处理好的数据代入模型,得到飞行员个体超限风险计算值,并对计算结果排序。图2为部分飞行员3类核心风险得分情况以及个体超限风险值计算结果(取超限风险值排名前10的飞行员)。

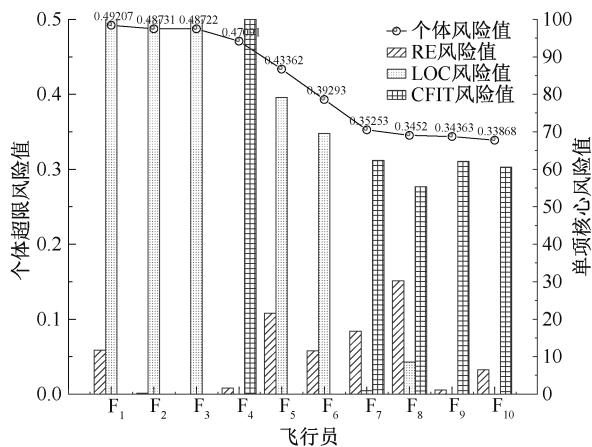


图2 飞行员个体超限风险计算结果  
Fig.2 Computed results of pilots' individual exceedance risk

### 3.4 模型有效性验证

在验证模型有效性时,将3类核心风险值的算数平均数作为模型提出前飞行员个体超限风险量化

值,与模型计算结果展开对比。

首先,根据2种方法依次评价飞行员个体超限风险,并基于模型计算结果按风险值从大到小对飞行员排序。分别选取个体风险排名前100%、前50%及前10%的飞行员对应的2组风险值序列,对其进行Shapiro-Wilk正态性检验,检验结果表明所有风险值序列均不符合正态分布。

由此,选择Spearman相关性分析计算2组风险值序列的相关性,结果见表5。可以看出,2组计算结果间的相似程度随飞行员范围不断缩小,呈现出持续降低的趋势。

表5 2种计算方法结果相似性  
Table 5 Similarity of results of two methods

飞行员个体数	相关系数
Top 100%	0.965
Top 50%	0.926
Top 10%	0.751

分析可知:文中提出的风险量化模型可以得到更细粒度的结果,适合用于飞行员个体超限风险的精细化评价。此外,模型综合考虑3类核心风险的发生频率及影响程度,可弥补简单将风险均值作为衡量个体超限风险标准的方法在实际飞行风险评价中的局限性,使超限风险管理更加科学有效。

### 3.5 个体超限风险等级划分

为划分飞行员个体超限风险等级,采用K-means聚类算法分析飞行员个体超限风险计算结果。聚类数量K值的选择是否恰当对聚类效果有着至关重要的影响。根据肘部法则选取K值,计算结果如图3所示。可以看出,当K=3时,K-means聚类的损失函数下降速度显著放缓,因此,选择K=3为聚类数量。

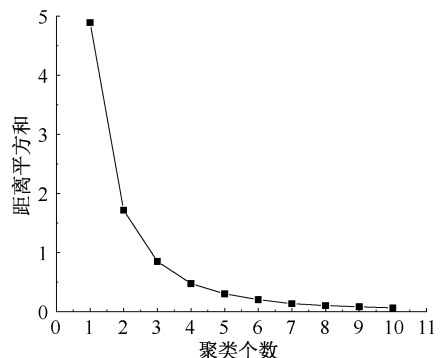


图3 肘部法则选定聚类个数K  
Fig.3 Selecting cluster number K with Elbow Method

*K*-means 聚类分析的结果见表 6。可以看出,飞行员个体超限风险等级可划分为 3 类,每类包含飞行员数量占比分别为 88.009%、10.396%和 1.595%,对应聚类中心的值(保留十位小数)为 0.019 735 623 2、0.336 348 159 5 和 0.118 726 863 1。

表 6 *K*-means 算法聚类分析结果Table 6 Results of *K*-means clustering algorithm

聚类类别	频数	占比/%	均值±标准差	聚类中心
类别 1	1 490	88.009	0.02±0.017	0.019 735 623 2
类别 2	176	10.396	0.119±0.041	0.336 348 159 5
类别 3	27	1.595	0.336±0.077	0.118 726 863 1

采用轮廓系数、DBI 和 CH 3 项评价指标评价聚类结果。轮廓系数的取值范围为(-1,1),同类别样本距离越紧凑、不同类别样本之间距离越分明,轮廓系数得分越趋近于 1,聚类效果越好。DBI 计算每个类别和其最相近类别之间的相似度,再通过求出所有相似度的平均值衡量聚类结果的优劣,值越小表示聚类效果越好。CH 指数作为簇间距离与簇内距离的比值,值越大表示聚类效果越好。表 7 为试验所得到的 *K*-means 聚类结果在 3 项算法性能评价指标上的得分。综合各评价指标的含义及度量标准,得出试验聚类效果较为优质可信。

表 7 *K*-means 聚类算法性能度量指标得分Table 7 *K*-means clustering algorithm performance measure

评价指标	轮廓系数	DBI	CH
得分	0.762	0.462	4 012.724

通过分析聚类结果,将个体超限等级划分为低风险、中风险及高风险 3 个等级。被划分为类别 1 的飞行员,在日常飞行任务中超限操作较少,发生 3 类核心风险超限的可能性及严重性均保持在较低水平,因此,可将该类飞行员的超限风险等级判定为低风险;被划分为类别 2 的飞行员,个体超限风险计算值处于中等范围,飞行技能存在一定短板,需及时加强训练,改善不合规范的操作,该类飞行员对应个体超限风险等级可划分为中风险;被划分为类别 3

的飞行员,个体超限风险值普遍较高,发生可控飞行撞地及空中失控这 2 类严重事故的隐患较大,航空公司需重点管控该类飞行员,加强飞行技能考核,制定专项评估及相应训练计划,此类飞行员被确定为高风险飞行员。飞行员个体超限风险及等级划分情况如图 4 所示。

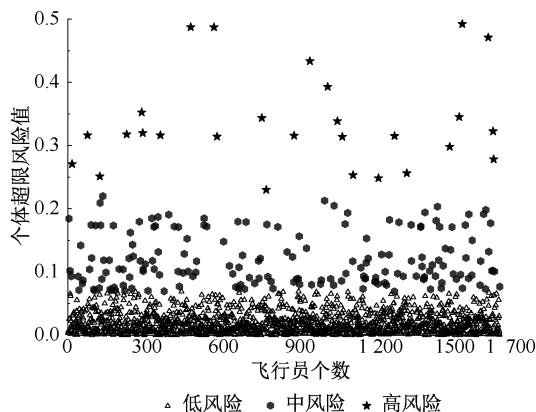


图 4 飞行员个体超限风险值及对应风险等级划分  
Fig. 4 Individual pilots' exceedance risk value and corresponding risk level

## 4 结 论

1) 以 9 317 条多源融合数据为基础,构建飞行员个体超限风险精细化评价模型,得到 1 693 名飞行员的超限风险量化值及对应风险等级,为飞行安全管理提供有力的数据支持。建立飞行员个体超限风险精细化评价指标体系,计算出飞行员单项核心风险量化值,并综合 3 类核心风险的概念及特点,完成权重分配。

2) 相较于传统风险评价方法将各项超限事件风险均值作为飞行员个体超限风险量化标准,模型能够深入挖掘影响飞行员个体风险的不同维度,结合实际不断优化,得出更为精细的风险评价结果,有助于精准排查风险人员,提升超限风险管理效率。

3) 下一步尝试分析不同超限风险等级飞行员的操作特征,为不同机队、航司优化飞行员训练方案、提升飞行绩效提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] International Civil Aviation Organization. Safety report 2020[R], 2020.
- [2] 中国民航局. 中国民航航空安全报告, 2022[R], 2022.
- [3] International Civil Aviation Organization. Safety report 2022[R], 2022.
- [4] Airbus SAS. A statistical analysis of commercial aviation accidents 1958-2022[R], 2022.
- [5] 汪磊, 梁妍. 全球民航事故调查数据统计与分析[J]. 综合运输, 2021, 43(3): 7-12.  
WANG Lei, LIANG Yan. Statistical analysis on global civil aviation accident investigation data[J]. China Transportation Outlook, 2021, 43(3): 7-12.

- [6] 汪磊, 孙瑞山, 吴昌旭, 等. 基于飞行 QAR 数据的重着陆风险定量评价模型[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(2):88-92.  
WANG Lei, SUN Ruishan, WU Changxu, et al. A flight QAR based model for hard landing risk quantitative evaluation[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(2): 88-92.
- [7] 孙瑞山, 杨绎煊, 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 safety evaluation based on QAR data[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(7): 87-92.
- [8] LU Binbin, SUN Huabo, ZHANG Xiaoyue, et al. Exploring spatial patterns of flight turbulence incidents in China with QAR data[C]. 2019 IEEE 1<sup>st</sup> International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCSIT), 2019: 570-573.
- [9] LI Xu, SHANG Jiaying, ZHENG Linjiang, et al. Curvecluster+: curve clustering for hard landing pattern recognition and risk evaluation based on flight data [C]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022: 12 811-12 821.
- [10] 汪磊, 孙景陆, 王文超, 等. 基于 QAR 数据的着陆超限风险贝叶斯网络分析模型[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(1):26-34.  
WANG Lei, SUN Jinglu, WANG Wenchao, et al. Bayesian network analysis model on landing exceedance risk based on flight QAR data[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(1): 26-34.
- [11] 康宗伟. 基于 QAR 数据和深度学习的民航客机冲出跑道事件预警研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.  
KANG Zongwei. Research on early warning of airliner runway overrun events based on QAR data and deep learning[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [12] 陈农田, 满永政, 李俊辉. 基于 QAR 数据的民机高高原进近着陆风险评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(1):77-85.  
CHEN Nongtian, MAN Yongzheng, LI Junhui. Risk assessment method for civil aircraft approach and landing at high plateau based on QAR data[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(1):77-85.
- [13] WANG Lei, GAO Shan, HONG Ruiyuan, et al. Effects of age and flight exposure on flight safety performance: evidence from a large cross-sectional pilot sample[J]. Safety Science, 2023, 165; DOI: 10.1016/j.ssci.2023.106199.
- [14] WANG Lei, GAO Shan, TAN Wei, et al. Pilot's mental workload variation when taking a risk in flight scenario: a study based on flight simulator experiments[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2023, 29: 1-35.
- [15] 占欣. 基于 QAR 数据的冲/偏出跑道风险评估研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020.  
ZHAN Xin. Research on risk evaluation of runway excursion based on QAR data[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020.
- [16] Loss of control in-flight accident analysis report [R/OL]. [2019-10-11]. [https://www.iata.org/contentassets/b6eb2adc248c484192101edd1ed36015/loc-i\\_2019.pdf](https://www.iata.org/contentassets/b6eb2adc248c484192101edd1ed36015/loc-i_2019.pdf).
- [17] Guidance material and best practices for the implementation of upset prevention and recovery training[Z]. [2023-11-12]. [https://www.iata.org/contentassets/b6eb2adc248c484192101edd1ed36015/gmbp\\_uprt.pdf](https://www.iata.org/contentassets/b6eb2adc248c484192101edd1ed36015/gmbp_uprt.pdf).
- [18] 杜红兵, 王雪莉. 基于贝叶斯网络的可控飞行撞地事故原因分析方法[J]. 安全与环境学报, 2009, 9(5): 136-139.  
DU Hongbing, WANG Xueli. Cause analysis of the controlled flight bumping into terrain based on the Bayesian network[J]. Journal of Safety and Environment, 2009, 9(5): 136-139.
- [19] 方方, 赵新斌, 张曰权, 等. 一种航空风险评价方法、装置及计算机设备: 中国, CN202010399853.2[P]. 2023-06-13.
- [20] 赵新斌, 张曰权, 王浩锋, 等. 一种运行风险量化方法、运行风险评价方法及装置: 中国, CN201811238049.5 [P]. 2023-05-23.
- [21] 任亮, 张海涛, 魏明珠, 等. 基于熵权 TOPSIS 模型的智慧城市发展水平评价研究[J]. 情报理论与实践, 2019, 42(7):113-118,125.  
REN Liang, ZHANG Haitao, WEI Mingzhu, et al. Research on the evaluation of development level of smart city based on entropy TOPSIS model[J]. Expert Systems with Applications, 2019, 42(7): 113-118, 125.
- [22] International Air Transport Association. Interactive safety report[R/OL]. [2023-12-31]. <https://www.iata.org/en/publications/safety-report/interactive-safety-report/>.

**作者简介:** 汪磊 (1982—),男,安徽霍山人,博士,研究员,博士生导师,主要从事航空安全与人为因素等方面的研究。E-mail: wanglei0564@hotmail.com。

