

## 基于扎根理论-灰色关联分析的民航不正常事件致因分析

岳仁田,张婉蓉

(中国民航大学空中交通管理学院,天津 300300)

**摘要:** 分析民航不正常事件致因对预防航空事故具有重要意义。本文基于2023年1月至11月某地区空中交通管理局的不正常事件数据,运用扎根理论进行系统性剖析,通过三级编码识别出关键致因因素,并利用灰色关联分析模型量化评估各因素与不正常事件发生之间的关联程度。结果表明,该方法能够客观地反映不同因素对不正常事件的影响;致因主要包括人为因素、设备因素、环境因素和管理因素,其关联度分别为0.65、0.79、0.67和0.85,其中管理因素的关联性最强。因此,在民航运行安全中应重点关注管理因素。

**关键词:** 不正常事件;民航安全;扎根理论;灰色关联分析

**中图分类号:** V328;X949 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2026)02-0026-06

## Causes of civil aviation abnormal events based on grounded theory-grey relational analysis

YUE Rentian, ZHANG Wanrong

(College of Air Traffic Management, CAUC, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Analyzing the causes of civil aviation abnormal events is of great significance for preventing aviation accidents. Based on the data of abnormal events from the Air Traffic Management Bureau in a certain region from January to November 2023, the grounded theory was employed for systematic analysis. The key causal factors were identified through three-level coding, and the grey relational analysis model was applied to quantify the grey relation degree between each factor and the occurrence of abnormal events. The results demonstrate that this method can accurately reflect the influence of different factors on abnormal events. The causal factors mainly include human factors, equipment factors, environmental factors and management factors, with relational degrees of 0.65, 0.79, 0.67 and 0.85, respectively. Among these factors, management factors exhibit the strongest relation. Therefore, management factors should be a key focus in civil aviation operation safety.

**Key words:** abnormal events; civil aviation safety; grounded theory; grey relational analysis

近年来,民航事故及不正常事件致因分析成为民航运行安全管理领域的研究热点。在事故致因识别方面,文献[1]基于文本挖掘和社会网络分析方法,对通用航空事故调查报告进行分析,提出了通用航空事故关键致因模型。文献[2]采用人因分析和分类系统(HFACS, human factors analysis and classification system)研究了通用航空飞行事故致因因素的分布特点与成因。文献[3]利用认知差错回溯分析方法,对国内外空管不安全事件中的人为风险因素进行了分析。文献[4]采用HFACS分析了53起印度尼西亚共和国航空

事故,研究民族文化在航空事故中的作用。文献[5]综合采用系统理论事故模型和过程人机交互与任务分析、HFACS方法,从组织安全、飞行生命周期、人机交互和人员4个方面对印度尼西亚共和国狮子航空公司的空难事故进行多层次分析,得出事故致因机理并提出预防措施。现有研究多依赖于先验理论框架或结构化数据,在一定程度上限制了分析的广度,尤其在诸如人机交互等特定运行环境中,可能忽略某些新型或隐形致因,从而导致分析结果存在局限性。

民航事故致因间存在一定联系,在事故致因关联

关系方面有较多学者进行研究。文献[6]利用关联规则挖掘算法构建了民航安全事件致因关联模型,通过数据挖掘揭示人为因素间的多维关联模式,为航空安全风险防控体系的智能化升级提供了数据支持。文献[7]基于关联规则和社会网络分析的致因分析方法,构建民航事故致因关联网络,开展飞行阶段与事故致因的中心性分析。文献[8]通过扎根理论提取消费级无人机的事故致因因素,构建贝叶斯网络分析了消费级无人机的事故致因。文献[9]分析了航空安全报告资料,通过改进的关联规则方法挖掘关键因素进行关联网络图分析。文献[10]使用深度学习的方法,分析了民航事故风险因素在事故类型与事故致因之间隐藏的联系。文献[11]提出了一种基于复杂网络理论的航空事故致因分析方法。文献[12]基于节点弹性理论量化了起飞阶段民用飞机(简称民机)驾驶舱人机系统的风险传播过程,发现人为因素失误主导重大风险且疲劳与视觉负荷是核心致因,为风险管理提供了动态分析工具。在致因分析方面,关联规则、社会网络分析等方法能够揭示致因同时出现的情况,但对于因素之间的关联方式与关联强度难以直接量化;而贝叶斯网络依赖于历史数据或专家经验这类先验信息,当数据稀疏时,模型对先验信息的依赖性变强,就会导致模型推导出的结论产生巨大偏差。

本文提出一种融合扎根理论与灰色关联分析的研究方法,以弥补传统致因提取过程中可能的致因遗漏问题。该方法首先运用扎根理论,通过对2023年1月至11月某地区空中交通管理局民航不正常事件数据进行自下而上的三级编码,从中提取致因因素,有效避免了预设框架的局限性,增强了因素识别的全面性。在此基础上,利用灰色关联分析量化各致因因素之间的关联程度,明确不同因素对事故的影响权重并揭示主导因素,降低传统分析方法对大规模样本数据的依赖,更贴合实际应用条件,可为民航安全风险防控提供理论依据与决策支持。

## 1 不正常事件致因因素提取

### 1.1 数据来源及预处理

本文所用数据来源于中国民航某地区空中交通管理局2023年1月至11月的《不正常事件列表》,该数据通过安全管理系统记录,按照《民用航空安全管理规定》进行归档,具有权威性。原始数据中存在重复

记录与信息不全等问题,如同一事件多次上报、关键分类字段缺失,本文在数据预处理阶段删除这些极少量的不准确信息,最终得到所需数据。

### 1.2 扎根理论编码及步骤

扎根理论是由 Glaser 和 Strauss 于 20 世纪 60 年代联合创立的一种质性研究范式<sup>[13]</sup>。该方法突破传统研究框架,通过对质性数据的编码、概念化和分类,建立起与研究现象密切相关的理论框架。扎根理论的关键环节是对数据进行 3 个层次的分层编码,即开放式、主轴式和选择式编码,结果分别对应初始范畴、主范畴和核心范畴。

#### 1) 开放式编码

该阶段通过对原始数据进行分解,将分解后的片段进行描述性编码,将相似的编码归纳为抽象概念,再进一步将概念整合为更高层次的主题,在此过程中避免预设理论,从数据中自然归纳出概念信息。

#### 2) 主轴式编码

此阶段聚焦于构建数据要素之间的逻辑关联网络,通过识别因果链条、时序演进、结构层次、功能差异、动态过程、类型谱系等多元关联模式,将离散的概念单元组织为具有内在逻辑关系的知识体系。

#### 3) 选择式编码

此阶段作为理论整合的关键环节,需要系统梳理已有概念框架,通过交叉验证与关联度分析提炼核心主题。核心主题具备理论统摄力,能够有效整合前期形成的各级分类体系,最终构建出解释力强的理论模型。

扎根理论的操作步骤包括:

- (1) 从原始研究素材中提炼关键概念;
- (2) 建立数据与概念的动态对照,系统解析概念生成的理论命题;
- (3) 明确理论要素的界定,并构建其间的关联关系;
- (4) 基于理论发展的需求,对编码进行迭代抽样;
- (5) 完善理论体系,实现概念层次多元与统一性的整合。

通过多层次的数据结构与理论重组,逐步形成具有良好解释力的研究框架,最终实现对所研究现象的系统化阐释。

### 1.3 扎根理论提取致因因素

通过对所收集到的数据进行三级编码分别得到 27 个初始范畴、5 个主范畴和 4 个核心范畴。具体编码结果如表 1 所示。

表1 编码结果  
Tab.1 Encoding results

初始范畴	主范畴	核心范畴
1 旅客生病身体不适	1 旅客原因	1 人为因素
2 机组操作问题	2 机组原因	
3 飞机舱门故障	3 航空器原因	2 设备因素
4 飞机刹车故障		
5 飞机风挡破裂		
6 飞机发动机故障		
7 电气系统故障		
8 空调系统故障		
9 零件丢失		
10 液压系统故障		
11 导航系统故障		
12 雷达故障		
13 空中防撞系统故障		
14 通讯系统故障		
15 颠簸	4 天气原因	3 环境因素
16 积冰		
17 风切变		
18 雷雨		
19 乱流		
20 鸟击	5 飞行管理原因	4 管理因素
21 无人机干扰		
22 风筝干扰		
23 气球干扰		
24 激光照射干扰		
25 不明空飘物干扰		
26 全球定位系统干扰		
27 跑道污染		

## 2 不正常事件灰色关联分析

### 2.1 灰色关联分析理论

灰色系统理论主要用于分析存在信息缺失的不确定性系统<sup>[4]</sup>。该理论适用于模型不明确、运行机制不清晰、难以用固定规律或参数进行分析的系统,主要通过已知信息进行挖掘,得到潜在规律,从而实现未知情况的分析预测。灰色关联分析是灰色系统理论的核心工具,通过对数据序列进行量化分析,构建序列之间的关联度指标,通过关联分析解释无特定分布或线性关系的要素之间的联系,关联度数值越大,要素之间的相关性越强,关联度数值越小,要素之间的联系越弱。目前,该方法的应用已覆盖了经济管理、环境科学、工程技术、医疗等多个领域,可为复杂系统的分析提供理论方法支持。

### 2.2 灰色关联分析的流程及步骤

灰色关联分析的流程如图1所示。

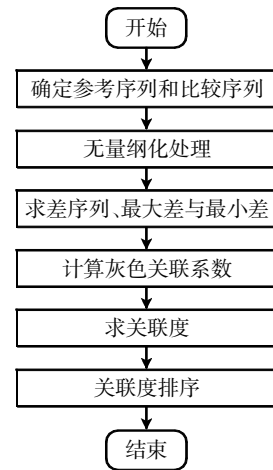


图1 灰色关联分析流程

Fig.1 The process of grey relational analysis

#### 1) 确定参考序列和比较序列

在灰色关联分析中,确定参考序列和比较序列是进行分析的基础。反映系统行为特征的数据序列,称为参考序列;影响系统行为的因素组成的数据序列,称为比较序列。

参考序列  $X_0$  可表示为

$$X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)) \quad (1)$$

式中,  $x_0(n)$  为参考序列中第  $n$  月的值,  $n$  取值为 11。

比较序列  $X_i$  可表示为

$$X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)) \quad (2)$$

式中:  $x_i(n)$  为比较序列中第  $n$  月的值;  $i$  表示影响因素种类,根据编码结果取值为 4。本文选取的数据来自 2023 年 1 月—11 月。

#### 2) 无量纲化处理

对变量进行无量纲化处理,从而方便对各种数据进行统一处理。以参考序列为基准,对其进行无量纲化处理,公式可表示为

$$X'_i = \frac{X_i}{X_0} = (x'_i(1), x'_i(2), \dots, x'_i(n)) \quad (3)$$

式中:  $X'_i$  为无量纲化处理后的比较序列;  $x'_i(n)$  为无量纲化处理后的比较序列中第  $n$  月的值。

#### 3) 求差序列、最大差与最小差

$$\Delta i(n) = |x'_0(n) - x'_i(n)| \quad (4)$$

$$M = \max \Delta i(n) \quad (5)$$

$$m = \min \Delta i(n) \quad (6)$$

式中:  $\Delta i(n)$  表示第  $n$  个月参考序列与比较序列的差值;  $x'_0(n)$  表示无量纲化处理后的参考序列中第  $n$  月的值;  $M$  表示最大差;  $m$  表示最小差。

#### 4) 计算灰色关联系数

$$r(x_0(n), x_i(n)) = \frac{m + \rho M}{\Delta i(n) + \rho M} \quad (7)$$

式中: $r(x_0(n), x_i(n))$ 表示第  $i$  个比较序列在第  $n$  个月与参考序列的灰色关联系数; $\rho$  为分辨系数,为减少最大差太大引起的数据失真,一般取 0.5。

5)求关联度

$$R(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{11} r(x_0(n), x_i(n)) \quad (8)$$

式中, $R(x_0, x_i)$ 表示第  $i$  个比较序列与参考序列之间的关联度。

6)关联度排序

将上一步计算出的关联度进行大小排序,根据关联度大小判断各因素与系统的关联程度。

### 3 案例分析

根据扎根理论得到的分类范畴,对核心范畴的 4 类因素:人为因素、设备因素、环境因素和管理因素进行致因因素统计,结果如表 2 所示。

表 2 2023 年 1—11 月不正常事件致因因素统计

Tab.2 Statistics of causal factors for abnormal events from January to November 2023

月份	人为因素 $X_1$	设备因素 $X_2$	环境因素 $X_3$	管理因素 $X_4$	总计
1	9	45	16	26	96
2	15	69	35	53	172
3	20	73	24	93	210
4	27	78	33	77	215
5	24	79	25	91	219
6	27	63	36	70	196
7	35	79	39	104	257
8	25	70	30	171	296
9	13	49	26	113	201
10	23	54	21	101	199
11	11	63	21	57	152
总计	229	722	306	956	2 213

1)确定参考序列与比较序列

本文主要是对不正常事件影响因素进行分析,所以参考序列为每月不正常事件发生的总数序列,代表系统的整体特征;比较序列为各致因因素导致的每月不安全事件发生的频次数列,可分别表示为

参考序列为

$$X_0 = (96, 172, 210, 215, 219, 196, 257, 296, 201, 199, 152)$$

比较序列为

$$X_1 = (9, 15, 20, 27, 24, 27, 35, 25, 13, 23, 11)$$

$$X_2 = (45, 69, 73, 78, 79, 63, 79, 70, 49, 54, 63)$$

$$X_3 = (16, 35, 24, 33, 25, 36, 39, 30, 26, 21, 21)$$

$$X_4 = (26, 53, 93, 77, 91, 70, 104, 171, 113, 101, 57)$$

2)无量纲化处理

对数据进行无量纲化处理,结果如表 3 所示。

表 3 无量纲化处理

Tab.3 Dimensionless processing

月份	人为因素 $X_1$	设备因素 $X_2$	环境因素 $X_3$	管理因素 $X_4$
1	0.09	0.47	0.17	0.27
2	0.09	0.40	0.20	0.31
3	0.10	0.35	0.11	0.44
4	0.13	0.36	0.15	0.36
5	0.11	0.36	0.11	0.42
6	0.14	0.32	0.18	0.36
7	0.14	0.31	0.15	0.40
8	0.08	0.24	0.10	0.58
9	0.06	0.24	0.13	0.56
10	0.12	0.27	0.11	0.51
11	0.07	0.41	0.14	0.38

3)求差序列、最大差与最小差

将参考序列与比较序列代入公式得到差序列,结果如表 4 所示。最大差与最小差分别为 0.94 和 0.42。

表 4 差序列

Tab.4 Difference sequences

月份	人为因素 $X_1$	设备因素 $X_2$	环境因素 $X_3$	管理因素 $X_4$
1	0.91	0.53	0.83	0.73
2	0.91	0.60	0.80	0.69
3	0.90	0.65	0.89	0.56
4	0.87	0.64	0.85	0.64
5	0.89	0.64	0.89	0.58
6	0.86	0.68	0.82	0.64
7	0.86	0.69	0.85	0.60
8	0.92	0.76	0.90	0.42
9	0.94	0.76	0.87	0.44
10	0.88	0.73	0.89	0.49
11	0.93	0.59	0.86	0.63

4)计算灰色关联系数

灰色关联系数的计算结果如表 5 所示。

表 5 灰色关联系数

Tab.5 Grey relational coefficients

月份	人为因素 $X_1$	设备因素 $X_2$	环境因素 $X_3$	管理因素 $X_4$
1	0.65	0.89	0.68	0.74
2	0.64	0.83	0.70	0.77
3	0.65	0.79	0.66	0.87
4	0.66	0.81	0.68	0.80
5	0.66	0.80	0.66	0.85
6	0.67	0.78	0.69	0.80
7	0.67	0.77	0.68	0.84
8	0.64	0.72	0.65	1.00
9	0.63	0.73	0.66	0.98
10	0.66	0.74	0.65	0.93
11	0.64	0.85	0.67	0.81

为更直观地展示数据,将灰色关联系数可视化为热力图与雷达图,分别如图2、图3所示。

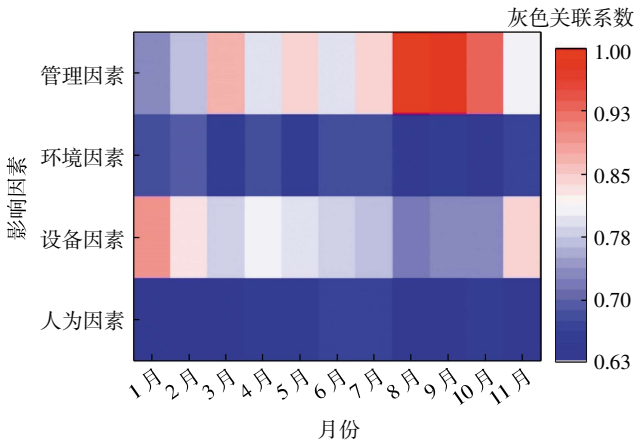


图2 灰色关联系数热力图

Fig.2 Heatmap of grey relational coefficients

— 人为因素 — 设备因素 — 环境因素 — 管理因素

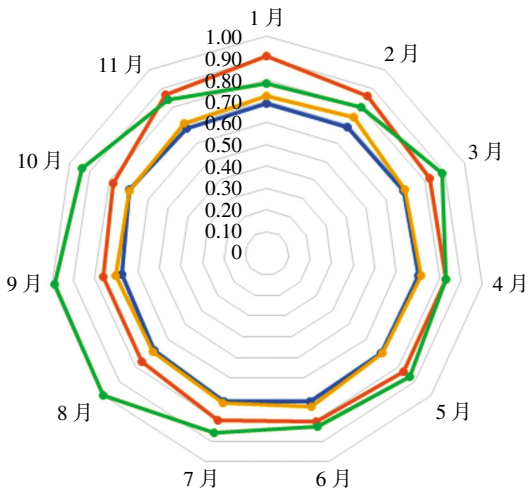


图3 灰色关联系数雷达图

Fig.3 Radar chart of grey relational coefficients

根据图2和图3,2023年1月至11月某地区发生的民航不正常事件的致因分析如下。

(1)人为因素在热力图中整体颜色偏蓝,各月的关联系数相对较低且比较平稳,说明机组的操作与旅客身体情况几乎不受季节影响,该因素与不正常事件的关联程度较低。

(2)设备因素在热力图中颜色有一定的波动,在1月、2月与11月颜色偏红,说明在天气寒冷的冬季,飞机的系统设备更易发生故障;同时恰逢春运,飞机运行压力较大,对飞机设备的影响程度增大。

(3)环境因素在2个图中的波动较小,该地区气候相对温和湿润,气象条件较为平稳,在民航系统运行中通过空管部门对天气的预测,可以为航班的调整争取充足的应对时间,能够有效地降低环境因素中天

气的影响。

(4)管理因素在热力图中的整体颜色偏红,关联系数在8—10月偏高。分析其原因可能是这一时期正值鸟类迁徙与繁殖的高峰期,驱鸟任务繁重,鸟击风险上升;并且由于时值暑假与“十一”黄金周,户外活动较多,无人机、风筝等飞行物增加了飞行干扰,飞行环境的管理难度加大,因此管理措施的有效性是影响不正常事件发生的关键。

5)计算关联度并排序

计算关联度并对其进行排序,结果如表6所示。

表6 关联度排序

Tab.6 Ranking of relational degrees

影响因素	关联度	排名
人为因素	0.65	4
设备因素	0.79	2
环境因素	0.67	3
管理因素	0.85	1

根据计算结果可得关联度排序为:管理因素>设备因素>环境因素>人为因素。

为评估模型参数变化对结果的影响程度,分别取  $\rho = 0.3$  与  $\rho = 0.7$ ,对灰色关联系数进行二次计算,得到敏感度分析结果如表7所示。

表7 敏感度分析

Tab.7 Analysis of sensitivity

影响因素	关联度		排名
	$\rho=0.3$	$\rho=0.7$	
人为因素	0.60	0.69	4
设备因素	0.75	0.82	2
环境因素	0.62	0.71	3
管理因素	0.82	0.87	1

不同  $\rho$  值时的关联度对比图如图4所示,与  $\rho = 0.5$  得到的关联度进行对比,发现尽管分辨系数调整后关联度数值有所变化,但是管理因素的关联度仍位居首位,其他因素关联度的排名也没有发生变化,因此,灰色关联分析得出的各因素重要性排序不因分辨系数的微小波动而改变。

综上,管理因素对民航不正常事件的影响最为显著,在日常运行中要重点强化对飞行环境的管理;其次是设备因素,在日常运行中要加强飞机设备的检查与维护,以减少设备的故障情况;环境因素同前2种因素相比,关联程度较低,但在日常运行中仍要加强天气监测,完善极端天气的预警机制;尽管人为因素关联度最低,但仍需重视,应持续加强机组培训与疲劳管理,并时刻关注旅客健康状况。

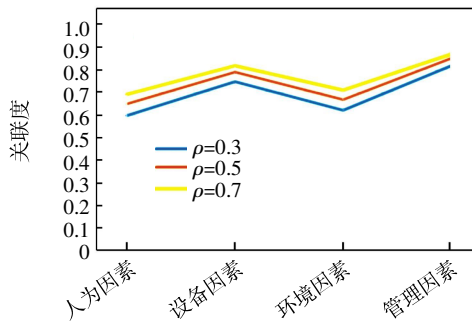


图 4 关联度对比图

Fig.4 Comparison chart of relational degrees

### 4 结语

本文基于扎根理论与灰色关联分析方法,系统地识别并量化了民航不正常事件的致因因素,建立了影响因素与不正常事件的关联性。该方法从非结构化的某地区空管局的不正常事件数据中提取出多维致因因素,结合灰色关联分析对影响因素进行定量评估,为小样本、动态数据研究提供新思路,可为民航安全风险防范提供技术支持。未来可扩大数据收集的范围、延长观测周期,并加强数据分析的普适性,深入研究不同致因因素对民航安全运行的影响。

### 参考文献:

[1] 郑秀梅,田晓康,柳青,等.通用航空事故致因文本挖掘和社会网络分析[J].安全与环境学报,2024,24(2):602-609.

[2] 于郝欣,谢中朋.基于HFACS模型的通用航空飞行事故致因研

Aviation 2023 Forum, June 12-16, 2023, San Diego, CA and Online. AIAA, 2023: 3613.

[35] LI Q B, CHEN C H, NG K K H, et al. Single-pilot operations in commercial flight: effects on neural activity and visual behaviour under abnormalities and emergencies[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(8): 277-292.

[36] 时统宇,马煜森,曹宇杰,等.基于改进功能共振分析法的SPO风险演化[J].中国安全科学学报,2024,34(6):29-38.

[37] 苏建军,钱卫国,彭伟,等.Delphi法在医学重点学科绩效评价指标体系构建中的应用[J].中国卫生经济,2009,28(5):73-74.

[38] 余超.农村宅基地退出风险:识别、评价与控制[D].成都:四川大学,2021.

[39] YAGER R R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multi criteria decision making[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1988, 18(1): 183-190.

[40] 栾昊,谭维,汪磊.基于35起不安全事件的民航飞行员失能致因分析[J].综合运输,2023,45(9):15-21.

究[J].安全,2021,42(12):31-35.

[3] 杨越,马博凯,曹宇轩.国外空管不安全事件中的人误风险分析[J].中国安全科学学报,2022,32(12):38-45.

[4] PRATAMA G B, WIDYANTI A, SUTALAKSANA I Z. Incorporating Hofstede's national culture in human factor analysis and classification system (HFACS): cases of Indonesian aviation safety[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 154: 01063.

[5] 吴桐,张宜静,王启飞,等.基于狮航空难的多层次事故致因分析及预防[J].科学技术与工程,2023,23(16):7152-7159.

[6] 叶雪飞,傅强.基于关联规则的民航不安全事件人因分析[J].现代计算机,2023,29(3):91-96.

[7] 刘丹,罗颜声,李诗轩,等.面向飞行全过程的民航事故致因关联网络分析[J].中国安全科学学报,2024,34(3):84-92.

[8] YUE R T, HAN M, HOU B W. Cause analysis of consumer-grade UAV accidents based on grounded theory-Bayesian network[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 39(5): 584-592.

[9] 袁乐平,张文东,赵力梵,等.基于TEM模型的民航不安全事件关联规则挖掘与分析[J].中国安全生产科学技术,2022,18(10):31-36.

[10] GUO Y Y, SUN Y C, HE Y D, et al. Deep-learning-based model for accident-type prediction during approach and landing [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(1): 472-482.

[11] YUE R T, LI J Y, HAN M. Cause analysis of aviation accidents based on complex network theory[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 38(4): 646-655.

[12] 王逸凡,孙有朝,刘勋,等.起飞阶段民机驾驶舱人机系统风险分析方法研究[J].交通信息与安全,2024,42(4):42-52.

[13] GLASER B G, STRAUSS A L. The discovery of grounded theory: strategies for qualitative research[M]. New York: Aldine Pub. Co., 1967.

[14] 邓聚龙.灰色系统综述[J].世界科学,1983(7):3-7.

(责任编辑:刘雅婷)

(上接第 25 页)

[41] SCHMID D, KORN B. A tripartite concept of a remote-copilot center for commercial single-pilot operations[C]//AIAA Information Systems-AIAA Infotech & Aerospace. Grapevine, Texas: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017:1-13.

[42] PECHLIVANIS K, HARRIS D. Single pilot concept of operations: hazard identification and mitigation measures[J]. The International Journal of Aerospace Psychology, 2025, 35(4): 161-184.

[43] LUO Y, WANG M, CHEN Y, et al. TFCluster: an efficient algorithm to mine maximal differential function-resource biclusters for single pilot operations safety analysis[C]//2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC), October 3-7, 2021, San Antonio TX, USA. IEEE, 2021: 1-6.

[44] CHEN Y, LUO Y, WANG M, et al. DFCluster: an efficient algorithm to mine maximal differential biclusters for single pilot operations task synthesis safety analysis[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(5): 400-418.

(责任编辑:刘雅婷)