



空地数据实时传输下的飞机着陆风险预警方法

王岩韬 赵昕颐

Advanced warning method for aircraft landing risk under air-ground data real-time transmission conditions

WANG Yantao, ZHAO Xinyi

引用本文:

王岩韬, 赵昕颐. 空地数据实时传输下的飞机着陆风险预警方法[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(10): 1759–1770. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2022.11.29.002

WANG Yantao, ZHAO Xinyi. Advanced warning method for aircraft landing risk under air-ground data real-time transmission conditions[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(10): 1759–1770. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2022.11.29.002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2022.11.29.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于多变量混沌时间序列的航班运行风险预测模型

Flight operation risk prediction model based on the multivariate chaotic time series

工程科学学报. 2020, 42(12): 1664 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.12.09.002>

20CrMnTi齿轮钢的点蚀敏感性及裂纹萌生风险

Pitting sensitivity and crack initiation risk of 20CrMnTi gear steel

工程科学学报. 2017, 39(5): 731 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.05.011>

基于动力学监测指标的崩塌早期预警研究进展

Research progress on dynamic monitoring index for early warning of rock collapse

工程科学学报. 2019, 41(4): 427 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.04.002>

基于CART决策树的冲压成形仿真数据挖掘

Data mining of deep drawing simulation results based on CART decision tree theory

工程科学学报. 2018, 40(11): 1373 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.11.011>

基于关联关系的仿真模型实时智能推荐方法

Real-time intelligent recommendation method of a simulation model based on incidence relation

工程科学学报. 2017, 39(4): 626 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.04.019>

旋转机械设备状态预警与维修优化

State pre-warning and optimization for rotating-machinery maintenance

工程科学学报. 2017, 39(7): 1094 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2017.07.016>

空地数据实时传输下的飞机着陆风险预警方法

王岩韬[✉], 赵昕颐

中国民航大学国家空管运行安全技术重点实验室, 天津 300300

✉通信作者, E-mail: CAUCwyt@126.com

摘要 面向未来 5G 和卫星网构成的空地高通量互联场景, 为实现飞机着陆风险提前预警. 首先基于统计与模型, 建立了一套以多源运行实时数据为主, 融合历史统计和专家知识的着陆预警体系; 然后, 针对现有研究计算结果滞后问题, 先通过对 ARJ21 飞机着陆过程快速存取记录器(QAR)数据的聚类分析, 将飞行员着陆操作模式分为 4 类, 进而构建基于决策场理论的飞行员着陆操作模式预测模型, 计算并讨论不同场景下、不同个性飞行员的着陆模式选择; 在上述基础上, 针对着陆过程的复杂性和不确定性, 提出一种分层计算的置信规则库推理方法, 融合定性与定量信息实现着陆动态风险评估和预警. 最后, 通过对“2020.10.16 攀枝花跑道外接地事件”和“2010.8.2 伊春空难”着陆过程的风险推理验证了预警方法的有效性, 其中攀枝花事件提前预警时间可达 13 s.

关键词 多源运行数据; 着陆风险; 风险预警; 决策场理论; 分层置信规则库

分类号 N945.24;U8;V328.3

Advanced warning method for aircraft landing risk under air–ground data real-time transmission conditions

WANG Yantao[✉], ZHAO Xinyi

National Key Laboratory of ATM Operation Safety Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

✉Corresponding author, E-mail: CAUCwyt@126.com

ABSTRACT At present, the flight safety work of civil aviation in China mainly investigates the probable causes of accidents and analyzes flight data after air accidents, causing numerous problems such as passive safety management and delayed risk control. To realize the early warning of flight risk during flight, a dynamic method for the evaluation of landing risk and early warning under the condition of future air–ground data real-time transmission was proposed. The landing stage, which has the most complex operation program and the highest accident rate during a flight, was taken as the research object, and future air-to-ground high-throughput interconnection scenarios comprising 5G and satellite networks were considered to solve the problem of advanced intelligent warnings and aircraft alarms in abnormal flights. First, according to the accident causation theory, the human factor reliability model, the system model, and other theories or models, a landing warning index system based on multisource real-time operation data and the integration of historical statistics and expert knowledge was established. Then, a grounding parameter prediction model was established to solve the problem of lag in the acquisition of four grounding parameters, namely ground pitch angle, ground speed, ground vertical rate, and 50 ft–ground horizontal flight distance in actual flight. This model classified the pilot’s landing operation mode by clustering ARJ21 historical landing data and determined the attribute mean value of the four parameters for each type of operation mode. Furthermore, according to decision field theory, the model discussed the landing mode selection of pilots with different personalities in different scenarios and calculated the selection probability of the pilot’s landing operation mode, thereby obtaining the predicted values of the four above-

收稿日期: 2022–11–29

基金项目: 国家重点研发课题(2022YFC3002502); 国家自然科学基金资助项目(U1933103)

mentioned indicators. According to the above, aiming at the complexity and uncertainty of the landing risk early warning system, a reasoning method of the multilayer confidence rule base was proposed. This method improved the traditional reasoning method of the single-layer confidence rule base and adopted the bottom-up hierarchical reasoning method considering the complexity characteristics of the landing process, effectively integrating different sources and forms of qualitative or quantitative data. Thus, the dynamic assessment and reasoning of the landing risk were realized. Finally, using the reasoning-based calculation of the landing process for the “2020.10.16 Panzhihua runway grounding event” and “2010.8.2 Yichun air disaster,” the results verified the effectiveness of the method. It was found that the early warning time of the Panzhihua event can reach 13 s.

KEY WORDS multisource operation data; landing risk; advanced risk warning; decision field theory; hierarchical belief rule base

目前,中国民航飞行安全工作主要依靠事后事故调查和快速存取记录器(QAR)数据分析,存在安全管理被动、风险管控措施滞后等问题。《“十四五”民用航空发展规划》^[1]和《智慧民航建设路线图》^[2]同时指出“需加强对运行数据的监控、分析和预警,提升主动防控能力”,明确提出基于5G和卫星网的空地数据传输技术路线,实现“航空器非正常飞行超前智能预警告警”。因此,需要研究并建立与之配套的风险动态评估与前置预警方法。

对于飞行安全风险研究,一般可分为事故统计预测、业务逻辑推断和飞行操纵分析三种方法。典型事故统计研究成果包括1998年飞行安全基金会(FSF)研制的减少进近和着陆事故工具箱(ALAR)^[3]、2007年美国联邦民航局(FAA)的飞行风险评估工具箱(FRAT)^[4],以及2010年国内冯畅和赵廷弟^[5]建立的基于案例知识的系统安全模型。上述研究主要使用数理统计方法,但由于事故发生率低、样本数量少,限制了统计方法的作用^[6]。2014年,王岩韬等^[7]依据业务逻辑和专家经验,构建了具有通用性、示范性的航班风险评估体系,支持民航局发布了《航空承运人运行控制风险管控系统实施指南》。截止2021年,国内56家运输航空公司以此成果为基础开发了航班运行风险管控系统,使用的核心算法包含风险矩阵、模糊隶属函数、支持向量机等^[8]。上述研究成果基于业务逻辑开展系统分析,可有效用于航前放飞决策,但同时存在过度依赖专家打分、风险评估偏静态等缺点,最为重要的是缺少飞行操纵层面的数据应用,对特定航班情况区分度不高。2019年,Wang等^[9]从飞行员的角度,通过QAR数据分析研究了飞行员操纵对着陆安全的影响;2021年,Barry^[10]将飞行操纵数据与气象数据相结合对飞机冲偏出跑道的风险进行了定量评估;2022年,蔡景等通过26个特征监测参数开展飞机重着陆预测^[11]。以上基于飞行操纵数据的风险评估方法弥补了业务逻辑研究中主观性过强的缺点,且可随监控数据的快速

变化进行实时评价,但缺少预测,无法用于提前预警。

欧洲空管总体规划、欧洲航空愿景(Flight Path 2050),以及FAA下一代航空运输系统(NextGen),对飞行过程数据扩展与空地传输给出了技术路线。2021年Wang等^[12]使用贝叶斯熵更新算法将广播式自动相关监视(ADS-B)系统中的动态监控数据与航路、跑道等固定位置融合来提高航迹预测的精度,可针对跑道混淆、冲偏出跑道等不安全事件提供安全预警。科学利用海量多源运行数据,进而提高飞行安全与效率是未来的研究重点。

基于上述问题及发展趋势,本文以飞行过程中操作最复杂、事故率最高的着陆阶段作为研究对象,提出一种未来空地数据传输条件下的着陆风险动态评价与预警方法,其改进之处在于:①针对高通量空地互联场景,构建一套综合事故统计与模型分析的着陆风险预警指标体系;②针对飞行操纵参数获取滞后的问题,通过飞行员着陆操作模式预测实现着陆操纵风险的超前预警;③针对历史数据、业务推断等单一数据源的信息不准确问题,将统计数据、专家知识用于QAR定量数据的补充,完善风险表达和推理;④针对着陆风险的多指标复杂结构特点,使用分层的置信规则库(Belief rule base, BRB)方法搭建规则库结构。

1 着陆风险预警体系的构建

构建科学、适用的风险指标体系是着陆风险评估和预警的关键环节。根据以下原则构建:①全面性,从系统整体梳理“人、机、环”各系统要素;②可用性,每一指标均具备足够数据支持;③严谨性,指标经解释结构模型计算,依据结果构建层级;④合理性,完全遵照事故因果关系进行指标连接。其中“人”方面,飞行机组作为飞机的直接操控者,其决策和操作的正确性直接影响了飞行安全,借鉴人因可靠性分析中的信息处理模型^[13]与人员信息处理(I)、决策(D)和动作执行(A)过程模型(IDAC)^[14],从信息输入、判断决策、操作动作、精

神状态和工作环境五方面评价机组风险，如图 1 所示。

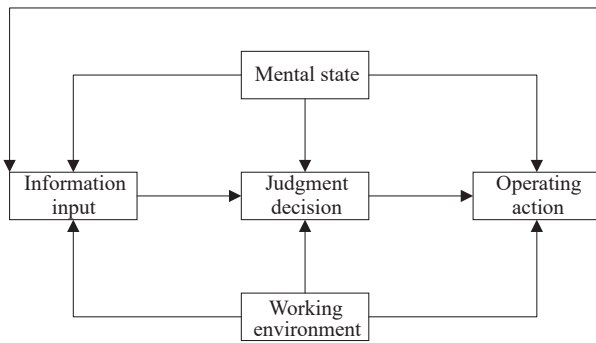


图 1 机组信息处理模型
Fig.1 Information processing model of the crew

图 1 中，信息输入部分包括管制员、签派员指令，气象情报等。判断决策反映了机组个人能力，体现为驾驶经验、超限率与违规率。着陆阶段的操作动作可分为着陆准备和接地操作，着陆准备期间的飞行操作可直观体现在监控数据中，但接地操作中的接地距离、接地速度等参数在飞行后才可获取，无法实现预警；因此，第 2 节提出基于决策场的接地安全预测模型，用以解决该问题。精神状态包括压力、疲劳等，目前国内外在生理指标测量精神状态方面的研究和实践已逐渐成熟，可实时监测飞行员状态。工作环境包括机组搭配以及是否存在信息干扰，后者指由于管制员指令、系

统提示音、机组交流等信息叠加造成的声音干扰，例如“2019 年挪威航 B38M 无视复飞指令”的原因是复飞指令被飞机自动报告系统的提示音所掩盖，该指标可通过驾驶舱语音获知。

在“机”方面，影响飞机着陆安全的因素主要包括发动机、起落架、轮胎等；在“环”方面，影响飞机着陆的环境因素主要包括气象条件与机场跑道刹车效应，可分别通过天气图、气象报文、机场通报、跑道状况评估矩阵得到。此处，根据专家评分和解释结构模型计算结果，将跑道刹车效应层级调上一级，与气象条件、机组和飞机因素并列。

由上，以飞机冲偏出跑道、重着陆、擦机尾、可控飞行撞地等典型不安全事件的提前预警为目标，通过对 2010 年至今世界民航事故的统计与分析，结合国内外最新文献成果，构建着陆风险预警体系如图 2 所示，其中输入指标 35 个($X_1 \sim X_{35}$)。

2 着陆操作模式预测模型

为解决图 2 中 $X_{32} \sim X_{35}$ 数据获取滞后问题，先将飞行员的着陆操作模式进行分类，并确定每类操作模式下 $X_{32} \sim X_{35}$ 的属性均值，再通过决策场理论计算飞行员着陆操作模式的选择概率。

2.1 决策场理论

决策场理论^[15]的基本思想是决策者对每个备选方案的偏好会随着时间的推移而演变^[16]，当对

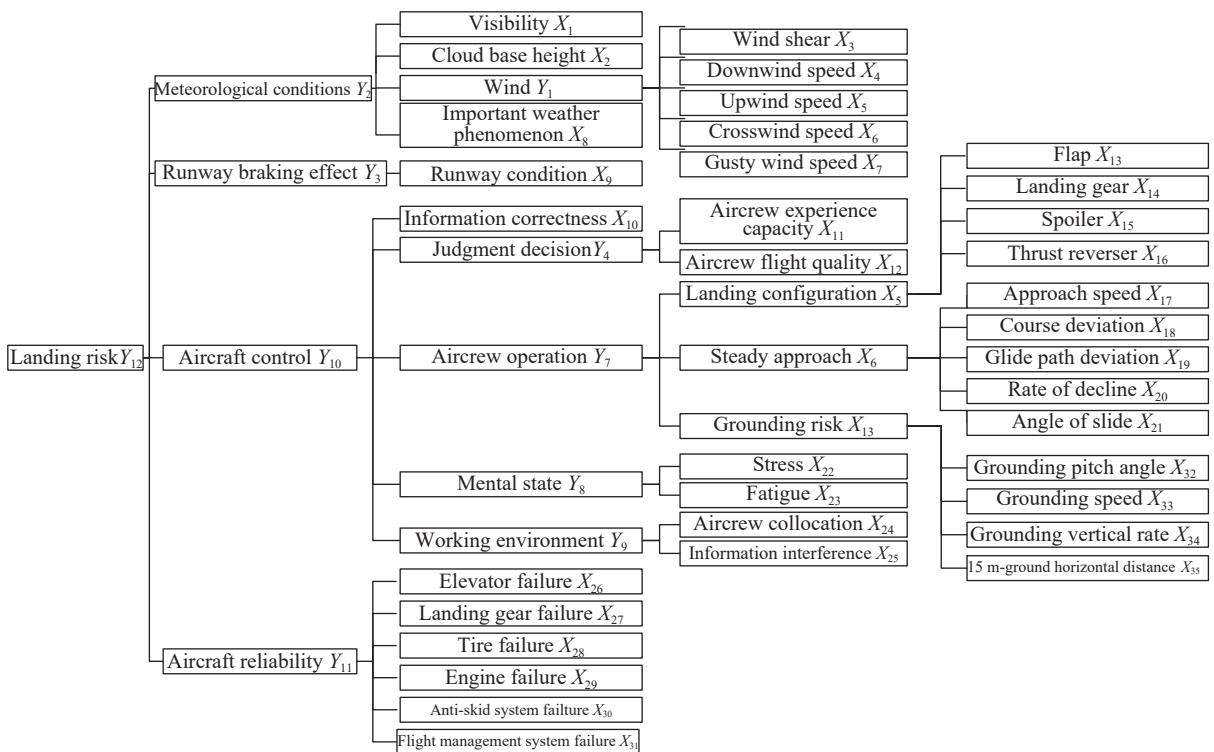


图 2 着陆风险指标体系

Fig.2 Risk index system for the landing

某个方案的偏好达到一定阈值时, 该方案将被选择. 假设共有 n 个备选方案, 决策者在时刻 t 对备选方案 $i(i \in (1, n))$ 的偏好强度为 $P_i(t)$, 定义 $\mathbf{P}(t) = \{P_1(t), P_2(t), \dots, P_n(t)\}$ 为 n 维偏好强度向量, 当 $t=0$ 时, $\mathbf{P}(0)$ 为初始偏好. 设 h 为任意小的时间单位, 则决策者的偏好变化过程可通过式(1)描述:

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{S} \cdot \mathbf{P}(t-h) + \mathbf{V}(t) \quad (1)$$

其中, \mathbf{S} 为 $n \times n$ 维反馈矩阵; $\mathbf{V}(t)$ 为 n 维效价向量.

(1) 反馈矩阵 \mathbf{S} .

反馈矩阵体现了决策过程中备选方案之间的相互关系. \mathbf{S} 的主对角线元素表示备选方案对自身前一个时刻偏好强度的记忆; \mathbf{S} 的非对角线元素表示方案之间的抑制或影响作用, 矩阵中元素 $s_{ii'}$ 计算公式为:

$$s_{ii'} = -0.10 \cdot e^{-0.022(d_{ii'}^4)} \quad (2)$$

其中, $d_{ii'}$ 为方案之间的心理距离, 一般采用欧氏距离, $i, i' \in (1, n)$.

(2) 效价 $\mathbf{V}(t)$.

效价向量由比较矩阵 \mathbf{C} 、属性矩阵 \mathbf{M} 与注意力权重向量 $\mathbf{W}(t)$ 三部分组成:

$$\mathbf{V}(t) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{W}(t) + \sigma(t) \quad (3)$$

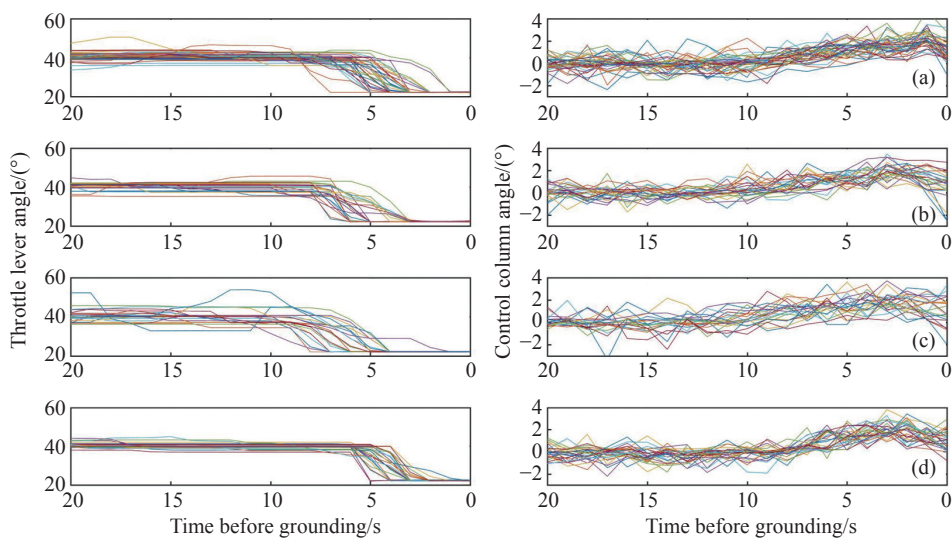


图3 飞行员着陆操作模式. (a) A类; (b) B类; (c) C类; (d) D类

Fig.3 Pilot landing operation modes: (a) Class A; (b) Class B; (c) Class C; (d) Class D

A类: 在接地前约 4~9 s 开始收油门, 先缓慢拉杆, 在接地前 10 s 左右加速拉杆, 在接地前 1 s 左右快速推杆.

B类: 在接地前约 7 s 开始收油门, 先缓慢拉杆, 在接地前 3 s 左右推杆.

C类: 在接地前约 9 s 开始收油门, 先缓慢拉杆, 在接地前 12 s 左右加速拉杆, 在接地前 4 s 左

其中, $\sigma(t)$ 为随机误差项, 代表决策过程中未考虑的属性对方案选择的影响, 假设其服从均值为 0、方差为 0.5 的正态分布; \mathbf{C} 为比较矩阵, 用于对各备选方案进行比较; \mathbf{M} 为属性矩阵, 代表决策者对各备选方案的每个属性的评价; $\mathbf{W}(t)$ 为权重向量, 表示在时刻 t 分配给每个属性的注意力权重.

(3) 决策规则.

① 当备选方案 i 的偏好强度 $P_i(t)$ 最先达到设定的阈值 γ 时, 决策停止, 备选方案 i 被选择.

② 当决策时间 t 达到设定的时限 T 时, 决策停止, 此时偏好强度最大的备选方案将被选择.

2.2 飞行着陆操作模式预测模型

接地前飞行操作阶段, 一般指距离地面高度 60 m, 此时飞行员与机场跑道已建立目视, 断开自动驾驶由手动操纵. 为保障飞机平稳安全着陆, 飞行员会根据飞机状态选择合适的拉平时机与收油门时机, 并不断调整驾驶杆与油门杆位置, 该过程是一个动态决策过程. 此处, 筛选出 113 组完整着陆过程的 ARJ21 机型 QAR 数据, 使系统聚类法和平均法对着陆前 2 s 的驾驶杆和油门杆角度变化进行聚类分析^[17], 结果显示 ARJ21 飞行员着陆操作模式可分为 4 类, 如图 3 所示, 代表 4 个备选方案:

右缓慢推杆.

D类: 在接地前约 6 s 开始收油门, 持续缓慢拉杆.

该分类结果与文献 [17] 对比可见, 飞行员操纵相同组类并具有相似操纵系统机型时的行为模式差异很小. 经分析发现, 当飞机在组类和操纵系统方面不存在显著差异时, 飞行操纵模式与飞行

员相关性较强,与机型相关性较小.从数据结果角度来看,相同组类并具有相似操纵系统的机型,实际飞行中的飞行操纵模式分类基本相同.

飞行员着陆操作模式预测模型如图4所示:

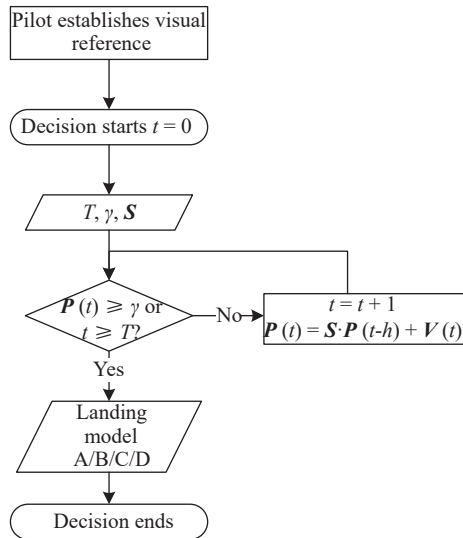


图4 飞行员着陆操作模式预测模型

Fig.4 Prediction model of the pilot landing operation modes

图4表示,当飞行员建立目视参考时开始决策,根据着陆情景和飞行员个体特性确定合适的决策时限 T 、反馈矩阵 S 、偏好阈值 γ 、初始偏好向量 $P(0)$ 作为输入参数,输入决策场模型中进行计算.当某一备选方案的偏好达到阈值时或决策时间达到时限时停止决策,根据决策场规则输出预测结果,即选择的着陆模式 A/B/C/D 之一.根据每

类操作模式的统计数量,设定初始偏好向量 $P(0)$:

$$P(0) = \left[\frac{37}{113}, \frac{25}{113}, \frac{23}{113}, \frac{28}{113} \right]$$

其他关键参数设定如下:

(1)属性矩阵 M .

属性矩阵 M 的元素 m_{ij} 表示决策者对于备选方案 i 的属性 j 的评价值.为了防止飞机在着陆过程中发生冲偏出跑道等不安全事件,根据文献 [16-17] 等前期成果,飞机的接地速度、垂直载荷、接地仰角以及接地距离应保持在合适范围内,根据 ARJ21 实际 QAR 数据项,选取接地俯仰角、接地速度、接地垂直速率、15 m 接地距离 4 个参数作为备选方案属性.

由于所属性属于固定型,即操作参数越接近标准值越好,将 QAR 数据做正态拟合如图5,曲线均值作为各参数标准参考值,然后采用线性插值法将属性矩阵做归一化处理,如表1和表2所示.

由表1和表2可以看出, A类方案在接地速度方面表现最优,着陆距离良好,但控制垂直速率方面表现较差; B类方案 15 m 接地距离最优,垂直速率其次; C类方案俯仰角最优,但其余属性均表现不佳; D类方案接地时的垂直速率和水平速度表现优秀,且俯仰角与着陆距离同样保持较高水平.四类方案在不同属性方面表现有所差异,体现了飞行员对各属性关注程度不同,例如选择 C类方案的飞行员在着陆时更关注俯仰角的大小,而对接地速度、垂直速率等其他参数较为忽视,容易

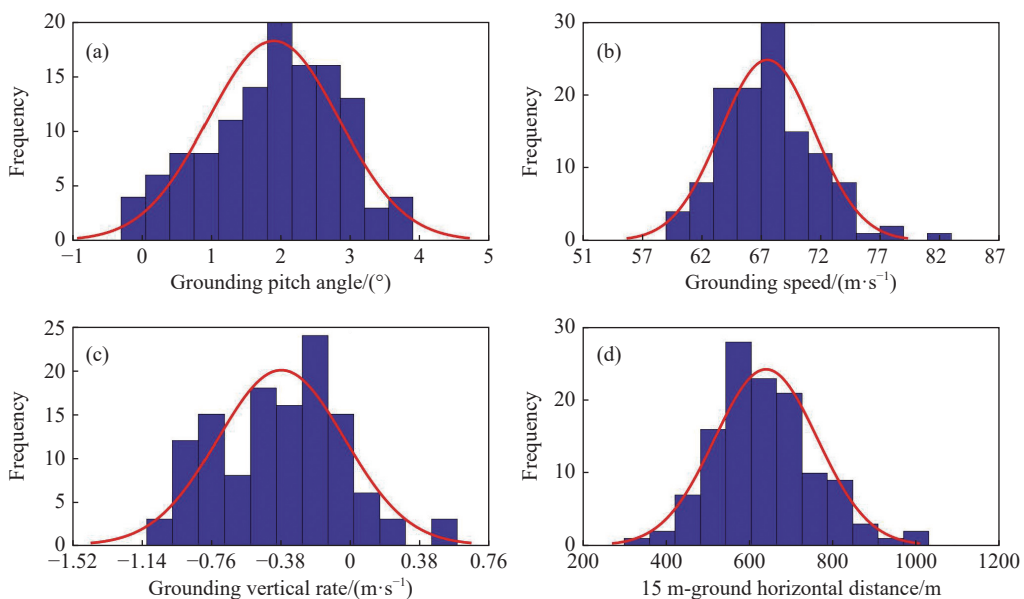


图5 着陆属性正态拟合图。(a) 接地俯仰角;(b) 接地速度;(c) 接地垂直速率;(d) 15 m-接地水平距离

Fig.5 Normal distribution fitting of landing attributes: (a) grounding pitch angle ;(b) grounding speed;(c) grounding vertical rate; (d) 15 m-ground horizontal distance

表 1 属性矩阵与属性参考值

Table 1 Attribute matrix and attribute reference values

Alternative model	Grounding pitch angle/(°)	Grounding speed/(m·s ⁻¹)	Grounding vertical rate/(m·s ⁻¹)	15 mground horizontal distance /m
A	2.17	67.32	-0.31	598.27
B	1.52	66.26	-0.43	661.29
C	2.02	68.60	-0.43	757.64
D	1.73	67.26	-0.36	566.38
Mean value	1.89	67.45	-0.43	641.26
Standard deviation	0.94	4.06	0.28	123.44

表 2 归一化后属性矩阵

Table 2 Normalized attribute matrix

Alternative plan	Grounding pitch angle	Grounding speed	Grounding vertical rate	15 m-ground horizontal distance
A	0.51	1.00	0.00	0.84
B	0.00	0.00	0.95	1.00
C	1.00	0.22	0.12	0.00
D	0.69	0.94	1.00	0.51

发生重着陆、冲出跑道等不安全事件, 因此接地风险较高。

(2) 注意力权重向量 $W(t)$ 。

注意力权重向量 $W(t)$ 表示决策者在时刻 t 分配给每个属性的关注程度。飞行员在着陆过程中需要时刻关注各着陆属性的参数变化, 假设在决策过程中飞行员对各属性的注意力权重按平稳随机过程随时间变化, 设定各方案初始权重为 1/4。

(3) 比较矩阵 C 。

比较矩阵用于对各备选方案在时间 t 上的加权平均值进行比较, 计算公式如下:

$$C_{i' i} = \begin{cases} 1, & i = i' \\ \frac{-1}{(n-1)}, & i \neq i' \end{cases} \quad (4)$$

其中, i, i' 表示 n 个备选方案中的一个方案, 即 $i, i' \in (1, n)$ 。

2.3 着陆偏好分析与接地安全指标计算

单次的决策结果具有偶然性, 因此通过模拟 1000 次飞行员的决策过程, 获取飞行员对不同方案选择概率, 记为 P_A 、 P_B 、 P_C 、 P_D 。然后通过对决策时限 T 和反馈矩阵主对角线元素 S_{ii} 参数设定, 分析不同情况、不同特点的飞行员着陆操作模式偏好, 进而可计算指标接地操作 Y_{13} 。

2.3.1 着陆偏好分析

飞行员在自动驾驶断开后开始决策, 离地 60 m 时结束决策, 决策时长在 10 ~ 30 s 之间, 由此设定

决策时限 $T=10$ s 和 $T=30$ s, 分别代表时间充裕和时间紧迫两种情况。另一方面, 决策场理论规定反馈矩阵主对角线元素 $0 \leq S_{ii} < 1$, $S_{ii}=0$ 表示决策完全不受自身前一个时刻方案偏好影响; $S_{ii}=1$ 表示决策全然受上一时刻方案偏好的影响, 结合着陆情景设定 $S_{ii}=0.1$ 和 $S_{ii}=0.9$, 分别代表犹豫型和果断型两种飞行员特点。此外通过多次试验设定偏好阈值 γ 为 5。将设定参数代入前文模型中, 循环计算 1000 次, 得到不同参数设定下飞行员选择着陆模式的概率, 如表 3 所示, 单次决策偏好分布如图 6 所示。

从表 3 和图 6 中可以看出: (a) 过程体现了在时间紧迫的条件下, 飞行员犹豫不决的选择行为, 该情况下的方案选择结果较为分散。与之类似的还有情况 (c), 以上两种情况反映了在面对复杂决策时, 决策者力图通过平衡每一个属性从而达到最优结果的思考过程, 因此该过程往往是缓慢费时的, 且在达到决策时限时存在瞬时的选择倾向, 体现了飞行员信心不足、过于谨慎的心理特点^[18]。此类犹豫型的决策一般由决策时限决定停止时间, 因此具有较强的不确定性, 安全性较差。(b) 和 (d) 反映了飞行员的果断型决策, 即对上一时刻选择的方案具有信心, 因此决策过程时间短, 最终决策由偏好阈值决定。图中多次出现偏好反转现象, 该现象表明了飞行员在决策时, 需要综合考虑接地时的各项属性指标, 并通过评估、整合每一种方

表3 不同参数设置下的着陆模式选择概率

Table 3 Landing mode selection probability under different parameter settings

Parameter settings	P_A	P_B	P_C	P_D	Mean time/s
$T=10\text{ s}, S_{ii}=0.1$	0.235	0.237	0.152	0.376	10.00
$T=10\text{ s}, S_{ii}=0.9$	0.190	0.083	0.015	0.712	9.79
$T=30\text{ s}, S_{ii}=0.1$	0.251	0.250	0.129	0.370	30.00
$T=30\text{ s}, S_{ii}=0.9$	0.114	0.036	0.001	0.849	16.04

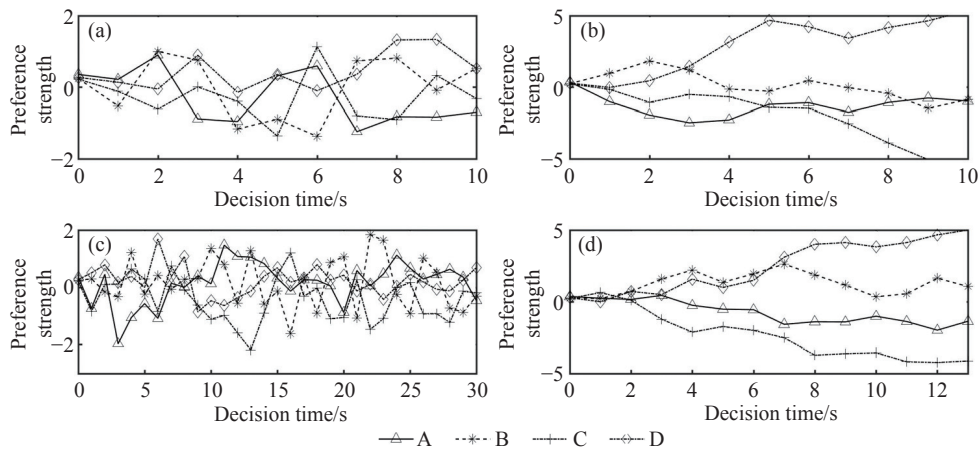


图6 飞行员着陆操作偏好分布图。(a) $T=10\text{ s}, S_{ii}=0.1$; (b) $T=10\text{ s}, S_{ii}=0.9$; (c) $T=30\text{ s}, S_{ii}=0.1$; (d) $T=30\text{ s}, S_{ii}=0.9$

Fig.6 Preference distribution of the pilot landing operations: (a) $T=10\text{ s}, S_{ii}=0.1$; (b) $T=10\text{ s}, S_{ii}=0.9$; (c) $T=30\text{ s}, S_{ii}=0.1$; (d) $T=30\text{ s}, S_{ii}=0.9$

案带来的后果，最终选定合适的着陆方案。对比表3中“ $T=10\text{ s}, S_{ii}=0.9$ ”和“ $T=30\text{ s}, S_{ii}=0.9$ ”两方案选择概率可以发现，随着决策时限的增加，选择安全性高的D类方案的概率相应增加，说明了决策时限长短对决策正确性的影响。

2.3.2 接地操作指标计算

在确定决策时限 T 和反馈矩阵主对角线元素 S_{ii} 等参数后，计算得到飞行员选择不同着陆模式的概率。根据表1，接地操作指标 ($X_{32} \sim X_{35}$) 计算公式如下：

$$\begin{cases} X_{32} = 2.17P_A + 1.52P_B + 2.02P_C + 1.73P_D \\ X_{33} = 130.86P_A + 128.8P_B + 133.35P_C + 130.75P_D \\ X_{34} = -60.22P_A - 85.12P_B - 84.04P_C - 70.00P_D \\ X_{35} = 598.27P_A + 661.29P_B + 757.64P_C + 566.38P_D \end{cases} \quad (5)$$

3 着陆风险分层 BRB 评估方法

飞机着陆风险数据中除了飞机故障率、信息正确率等概率信息，还存在模糊不精确、不完全的信息，如机组驾驶水平、气象条件等，此类信息无法用概率形式清楚表达^[19]，故被称为认知不确定性^[20-21]。置信规则库推理 (RIMER) 方法是一种基于 D-S 证据理论、决策理论、模糊理论和传统 IF-THEN 规则库理论的推理方法^[22-23]，适用于认知不

确定性和概率不确定性问题建模^[24]。

此处改进传统单层置信规则库推理方法，针对着陆过程复杂性特点，提出自下而上的分层推理方法^[25]，具体步骤如下：

步骤一：根据着陆风险指标构建分层置信规则库 (BRB) 系统。完整的着陆风险评估系统由 35 个输入变量 $X_1 \sim X_{35}$ ，12 个中间变量 $Y_1 \sim Y_{11}$ 和 Y_{13} ，1 个输出变量 Y_{12} 组成，共包括 13 个子规则库，如图 7 所示。

步骤二：为系统中每个变量设定参考等级与参考值。该步骤是为了将飞行中直接获取的各项数据转化为用于推理的有效信息，例如能见度 800 m 为低，1600 m 为中，5000 m 为高，则当能见度为 1000 m 时，判断能见度为低的可信度为 25%，能见度为中的可信度为 75%。除跑道状况 X_9 依据跑道状况代码 (RWYCC) 分为 7 个等级，其余指标按相关规章或专家知识分为低 (L)、中 (M)、高 (H)，或者是 (Y) 与否 (N)，指标参考值如表 4 所示。

步骤三：将规则库中的原始规则扩展为置信规则。为了实现更加精确的推理，使用置信度表示推理过程中的不确定性。将图 7 所示的 13 个子规则库与专家的业务经验相结合，可以得到 117 条相互独立的置信规则，如表 5 所示。为了符合真实

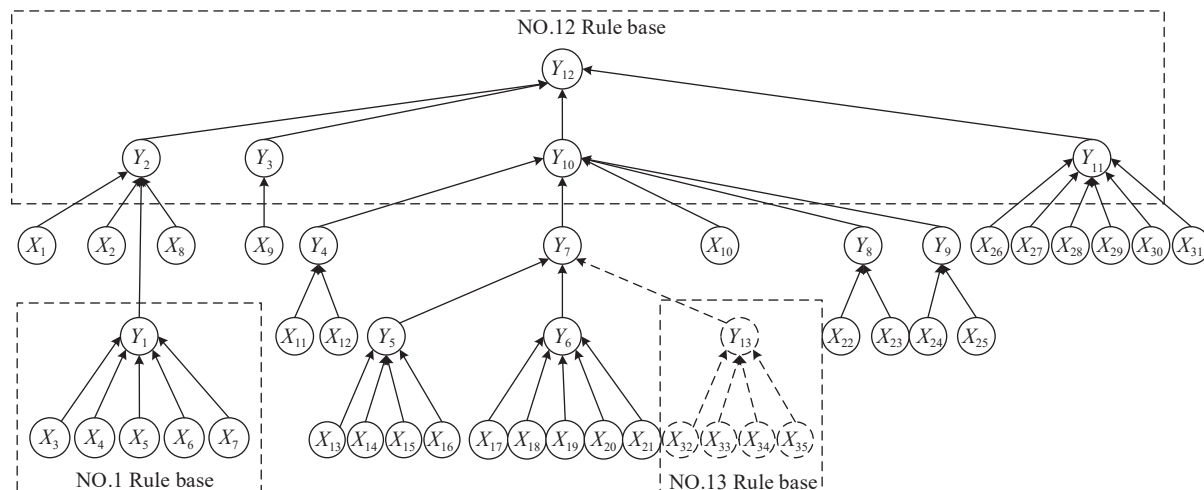


图 7 基于分层 BRB 的着陆风险评估系统

Fig.7 Landing risk assessment system based on layered BRB

表 4 指标参考值

Table 4 Index reference values

Index	Reference values	Index	Reference values
X_1	L(800 m); M(1600 m); H(5000 m)	X_{19}	L(0); M(0.5); H(1)
X_2	L(60 m); M(300 m); H(600 m)	X_{20}	L(3.05 m·s ⁻¹); M(4.07 m·s ⁻¹); H(5.59 m·s ⁻¹)
X_3	N(0); Y(1)
X_4	L(0 m·s ⁻¹); M(3.6 m·s ⁻¹); H(10 m·s ⁻¹)	Y_{10}	L(1); M(5); H(10)
...	...	Y_{11}	N(0); Y(1)
X_{17}	L($V_{ref}-2.5$ m·s ⁻¹); M(V_{ref} , m·s ⁻¹); H($V_{ref}+10$ m·s ⁻¹)	Y_{12}	L(1); M(5); H(10)
X_{18}	L(0); M(0.5); H(1)	Y_{13}	L(1); M(5); H(10)

Notes: V_{ref} means reference landing speed, m·s⁻¹.

表 5 着陆风险评估置信规则库

Table 5 Landing risk assessment belief rule base

Rule number	Rule base number	Rule weight	Premise attribute	Evaluation result
1	1	1	(X_3 is Y)	Y_1 is {(L,1)}
2	1	1	(X_4 is H)	Y_1 is {(H,1)}
3	1	1	(X_3 is N \wedge X_4 is M \wedge Y_5 is M \wedge X_6 is M \wedge X_7 is M)	Y_1 is {(M,1)}
4	1	1	(X_3 is N \wedge X_4 is L \wedge Y_5 is L \wedge X_6 is L \wedge X_7 is M)	Y_1 is {(L,0.75), (M,0.25)}
5	1	1	(X_3 is N \wedge X_4 is M \wedge Y_5 is M \wedge X_6 is L \wedge X_7 is L)	Y_1 is {(L,0.5), (M,0.5)}
6	1	1	(X_3 is N \wedge X_4 is L \wedge Y_5 is L \wedge X_6 is L \wedge X_7 is L)	Y_1 is {(L,1)}
...
115	13	1	(X_{35} is L)	Y_{13} is {(L,0.2), (M,0.3), (H,0.5)}
116	13	1	(X_{35} is H)	Y_{13} is {(L,0.2), (M,0.3), (H,0.5)}
117	13	1	(X_{32} is M \wedge X_{33} is M \wedge Y_{34} is M \wedge X_{35} is M)	Y_{13} is {(L,0.8), (M,0.2)}

运行情况, 置信规则库的建立采用了前提属性之间“交”“并”混合的方式, 同时可以避免组合爆炸。以子规则库 2 为例, 影响着陆气象条件 Y_2 的因素包括能见度 X_1 、云底高 X_2 、风 Y_1 以及有无重要天

气现象 X_8 。

规则 1: if(能见度低 \vee 云底高低 \vee 风大 \vee 有重要天气现象), then(气象条件差, 置信度 1)。

规则 2: if(能见度高 \wedge 云底高高 \wedge 风小 \wedge 无重

要天气现象), then(气象条件好, 置信度 1).

规则 3: if(能见度高 \wedge 云底高中 \wedge 风小 \wedge 无重要天气现象), then{(气象条件好, 置信度 0.7), (气象条件中, 置信度 0.3)}.

其中, 规则 1 表示若能见度低、云底高低、风大、有重要天气现象四者任一情况出现, 则气象条件为差. 规则 2 表示当且仅当能见度高、云底高高、风小、无重要天气现象四者全部成立时, 气象条件才为好. 规则 3 表示好坏情况均存在的一般情况, 其规则置信度的取值与优势条件数量有关.

步骤四: 子规则库推理. 根据文献 [25] 置信规则库激活权重的计算方法和证据推理(ER)中的规则组合方法可以得到子规则库推理的最终输出 $S(x)$ 为:

$$S(x) = \{(D_m, \beta_m), m = 1, 2, \dots, M\} \quad (6)$$

其中, D_m 表示第 m 个评价结果; β_m 表示对于评价结果 D_m 的置信度; M 表示评价结果参考值个数.

可通过公式 (7) 将评价结果 $S(x)$ 转化为评价价值形式:

$$\mu(S(x)) = \sum_{m=1}^M \mu(D_m) \beta_m \quad (7)$$

其中, $\mu(D_m)$ 表示第 m 个评价结果对应的参考值; $\mu(S(x))$ 表示最后评价价值.

步骤五: 分层置信规则库推理. 分层 BRB 系统由多个子规则库组成, 其推理过程是, 首先给定下层规则库的输入, 使用子规则库和 ER 算法进行推理产生下层规则库的输出, 并将其作为上层规则库的输入进行下一次运算. 以图 7 中子规则库 1 为例, 首先输入 $X_3 \sim X_7$, 根据表 5 子规则库 1 计算得到 Y_1 , 然后将 Y_1 与其他输入 X_1 、 X_2 、 X_8 代入规则库 2 中参与计算. 以此类推, 可得最终风险推理结果 Y_{12} .

4 实例验证

4.1 攀枝花事件验证

4.1.1 事故描述

2020 年 10 月 16 日, 深圳航空 A319-100/B-8667 号机执行 ZH9247 航班, 在攀枝花机场 02 号跑道 RNP APCH 进近着陆过程中在跑道外接地. 根据事故调查报告, 结合着陆风险指标体系, 其接地前 20 s 数据如表 6 所示, 其中信息正确率和飞机系统可靠性设为 90% 和 95%, 其他指标依据真实数据记录获得.

由表 6 可知, 在 B-8667 进近着陆过程中, 主导能见度由 2500 m 减少至 1200 m, 小阵雨、轻雾、部分雾, 风速为 $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 机场跑道刹车效应良好; 飞机各系统均工作正常; 飞机在进近过程中存在下滑角、下降率过大, 偏离下滑道, 表速过大等不稳定进近问题. 此外, 飞行机组在不能见跑道情况下脱离自动驾驶仪改用人工飞行, 增加了工作压力; 机长技术级别较高, 与副驾驶存在较大技术梯度, 且两人属于不同基地, 第一次配合飞行, 搭配水平差.

4.1.2 风险计算

根据事故报告中的情景描述, 设定决策时限为 15 s, 反馈矩阵主对角线元素为 0.3. 计算得到飞行员着陆模式选择概率 $P_A=26.3\%$, $P_B=23\%$, $P_C=14\%$, $P_D=36.7\%$, 将其代入公式 (5) 中计算得到接地安全评价指标 $X_{32} \sim X_{35}$.

将 $X_1 \sim X_{35}$ 指标数据输入着陆风险评估规则库中, 经推理计算得到接地前 20 s 的着陆风险值如表 7 所示.

为了直观地体现风险因素动态变化对着陆安全的影响, 将分层 BRB 推理得到气象条件、飞机操纵两个中间变量与表 7 中风险值绘制在同一张图中, 如图 8 所示.

表 6 B-8667 着陆风险指标值

Table 6 Landing risk index values of B-8667

Time before grounding/s	X_1/m	X_2/m	X_3	...	$X_{20}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$X_{21}/(^{\circ})$...	X_{30}	X_{31}
20	2500	1000	0		3.46	2.8		0.95	0.95
19	2465	1000	0		3.73	3		0.95	0.95
18	2430	1000	0		4.00	3.3		0.95	0.95
...
3	1310	1000	0		4.28	3.9		0.95	0.95
2	1275	1000	0		4.05	3.6		0.95	0.95
1	1200	1000	0		3.90	3.6		0.95	0.95

表 7 B-8667 实时风险评估值

Table 7 Real-time risk assessment value of B-8667

Time before landing/s	20	19	18	...	3	2	1
Risk value	4.55	4.55	4.56	...	7.29	8.11	8.84

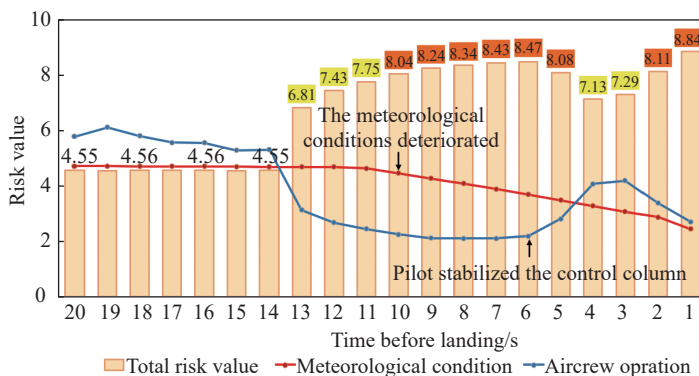


图 8 B-8667 风险变化情况

Fig.8 Risk changes in B-8667

从图 8 可以看出, 接地前 14~20 s 有轻雾、小阵雨等天气现象, 气象条件一般, 飞机操纵小幅变化, 该时段内风险值在 4~5 间浮动. 之后能见度持续降低, 气象条件缓慢下降; 而机组操纵出现了明显的稳杆动作, 下降率低于正常剖面, 操纵表现明显变差; 接地前 10 s 风险值超过 8, 并快速上升至 8.47. 接地前 6 s, 虽然机长对飞机操纵有所调整, 风险值短暂回降, 但风险值总体仍呈上升趋势, 接地时高达 8.84, 属于高风险着陆.

4.1.3 风险预警

根据预警原则, 当风险值达到某一阈值时, 应对飞行员给予相应提示, 并明确指出风险来源. 根据航司运控常用风险等级, 将风险划分为“可接受的”“缓解后风险可接受的”“不可接受的”, 阈值分别为 5 和 8. 该案例在风险值高于 5 时, 对应图 8 中接地前第 13 秒, 应针对下降率过大、下降剖面过低两个风险要素, 及时提醒飞行员, 要求其做出操作调整. 当风险值超过 8 时, 对应图 8 中接地前第 10 s, 应即时干预. 对于着陆不稳定状态需遵守“八该一反对”, 及时拉起复飞.

此外, 预警体系中的机组飞行经验、技术级别搭配等属于客观因素. 若在航班运行之初, 即已显示出较高的初始风险值, 应加强航班监控, 关注其

他因素变化趋势, 防止风险超出阈值, 避免不安全事件的发生.

4.2 伊春空难验证

2010 年 8 月 24 日, 河南航空 E190 型 B-3130 号飞机在伊春林都机场仪表进近过程中, 撞毁在 30 号跑道入口外. 根据事故调查报告中数据计算, 着陆最后阶段的风险情况如表 8 所示.

通过 BRB 推理计算, 得到该航班着陆最后阶段风险值为 9.41, 表明风险极大. 其中 $Y_{10}=2.92$, 表示机组在着陆过程中的整体表现较差, 具体包括未建立目视条件下手动飞行压力过大 ($Y_8=3.37$)、机组交流配合欠缺导致的工作环境差 ($Y_9=3.55$), 此外根据河南航空公司飞行技术管理记录, 该机长近一年来超限事件数量大、种类多、缺乏安全意识, 决策的正确率相对较低 ($Y_4=3.26$); 此外, 在气象条件方面, 能见度低和轻雾的出现增大了着陆风险; 以上计算结果与空难事故调查报告高度吻合.

本文模型中的参数和告警阈值可以根据应用方所需的安全容忍度进行调整, 另一方面可以通过详细的不安全事件记录数据进行参数优化, 从而提高预警准确率.

表 8 B-3130 着陆风险指标值

Table 8 Landing risk index values of B-3130

Index	X_1	X_2	X_3	...	X_{20}	X_{21}	...	X_{30}	X_{31}
Value	2800	600	0	...	872	3	...	0.95	0.95

5 结论

面向未来 5G 和卫星网空地数据传输场景,提出了面向富数据条件下的着陆风险动态评价与预警方法,经计算与验证得到结论如下:

(1)采用“实时飞行数据+历史事故统计+专家知识经验”的数据模式,可充分利用多源信息,完善了风险表达和推理;

(2)在“人机环”系统理论上,使用解释结构模型,将跑道刹车效应层级提前;使用信息处理模型,从信息输入、决策判断、信息输出、精神状态和工作环境五方面对机组操纵水平进行评价。

(3)决策场理论可以清晰地描述飞行员决策时的偏好变化过程,并可适应不同场景、不同个体的决策问题。通过批量仿真计算可以预测飞行员的选择概率,以此实现飞行超前预警。

(4)分层 BRB 可以将不同来源、不同形式、定性或定量的数据进行有效融合,适用于解决飞行安全预警等多指标复杂结构推理问题。

参 考 文 献

- [1] CAAC. The 14th five-year civil aviation development planning [J/OL]. *The State Council The People's Republic Of China* (2021-12-14) [2022-11-29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/07/content_5667003.htm
(中国民用航空局.“十四五”民用航空发展规划[J/OL].中华人民共和国中央人民政府(2021-12-14)[2022-11-29].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/07/content_5667003.htm)
- [2] CAAC. Notice of the civil aviation administration of China on issuing road map for smart civil aviation [J/OL]. *The State Council The People's Republic Of China* (2022-01-21) [2022-11-29]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-01/21/content_5669771.htm
(中国民用航空局.中国民用航空局关于印发智慧民航建设路线图的通知[J/OL].中华人民共和国中央人民政府(2022-01-21)[2022-11-29].https://www.gov.cn/xinwen/2022-01/21/content_5669771.htm)
- [3] Reed S. ALAR approach and landing accident reduction [J/OL]. *Flight Safety Digest* (2019-05-09) [2022-11-29]. https://flightsafety.org/fsd_aug-nov00/
- [4] FAA. Flight risk assessment tools [J/OL]. *FAA Safety Briefing* (2022-02-04) [2022-11-29]. <https://www.faa.gov/newsroom/safety-briefing/flight-risk-assessment-tools>
- [5] Feng C, Zhao T D. Case knowledge-based system safety risk model. *Acta Aeronaut Sin*, 2010, 31(4): 724
(冯畅,赵廷弟.基于案例知识的系统安全风险模型.航空学报,2010,31(4):724)
- [6] Wang H W, Zuo H F. Evaluation of airline safety. *Syst Eng*, 2006, 24(2): 46
(王华伟,左洪福.航空公司安全评估研究.系统工程,2006,24(2):46)
- [7] Wang Y T, Li R, Lu F, et al. Risk assessment system of flight operation based on multiple factor analysis. *J Tianjin Polytech Univ*, 2014, 33(3): 84
(王岩韬,李蕊,卢飞,等.基于多因素分析的航班运行风险评估体系.天津工业大学学报,2014,33(3):84)
- [8] Wang Y T, Chen G M, Liu Y, et al. Flight operations risk improvement prediction based on Adaptive Lasso and RF. *J Transp Syst Eng Inf Technol*, 2018, 18(4): 194
(王岩韬,陈冠铭,刘毓,等.基于Adaptive Lasso与RF的航班运行风险预测改进研究.交通运输系统工程与信息,2018,18(4):194)
- [9] Wang L, Zhang J Y, Dong C T, et al. A method of applying flight data to evaluate landing operation performance. *Ergonomics*, 2019, 62(2): 171
- [10] Barry D J. Estimating runway veer-off risk using a Bayesian network with flight data. *Transp Res C*, 2021, 128: 103180
- [11] Cai J, Cai K, Huang S J. Early warning method for heavy landing of civil aircraft based on real-time monitoring parameters. *J Traffic Transp Eng*, 2022, 22(2): 298
(蔡景,蔡坤焯,黄世杰.基于实时监测参数的民用飞机重着陆预警方法.交通运输工程学报,2022,22(2):298)
- [12] Wang Y H, Pang Y T, Chen O, et al. Uncertainty quantification and reduction in aircraft trajectory prediction using Bayesian-Entropy information fusion. *Reliab Eng Syst Saf*, 2021, 212: 107650
- [13] Havlikova M, Jirgl M, Bradac Z. Human reliability in man-machine systems. *Procedia Eng*, 2015, 100: 1207
- [14] Degrauwe M G R, Nys O, Dijkstra E, et al. IDAC: An interactive design tool for analog CMOS circuits. *IEEE J Solid State Circuits*, 1987, 22(6): 1106
- [15] Busemeyer J R, Townsend J T. Decision field theory: A dynamic-cognitive approach to decision making in an uncertain environment. *Psychol Rev*, 1993, 100(3): 432
- [16] Gao F, Wang M Z. Process-oriented dynamic route choice model. *J Transp Syst Eng and Inf Technol*, 2009, 9(5): 96
(高峰,王明哲.面向决策过程的动态路径选择模型.交通运输系统工程与信息,2009,9(5):96)
- [17] Zheng L, Chi H, Shao X Y. Pattern recognition and risk analysis for flight operations. *Chin J Manag Sci*, 2017, 25(10): 109
(郑磊,池宏,邵雪焱.基于QAR数据的飞行操作模式及其风险分析.中国管理科学,2017,25(10):109)
- [18] Wang L, Ren Y, Wu C X. Effects of flare operation on landing safety: A study based on ANOVA of real flight data. *Saf Sci*, 2018, 102: 14

- [19] Jiang J, Li X, Xing L N, et al. System risk analysis and evaluation approach based on fuzzy evidential reasoning. *Syst Eng Theory Pract*, 2013, 33(2): 529
(姜江, 李璇, 邢立宁等. 基于模糊证据推理的系统风险分析与评价. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(2): 529)
- [20] Samson S, Reneke J A, Wiecek M M. A review of different perspectives on uncertainty and risk and an alternative modeling paradigm. *Reliab Eng Syst Saf*, 2009, 94(2): 558
- [21] Yazdi M, Kabir S. Fuzzy evidence theory and Bayesian networks for process systems risk analysis. *Hum Ecol Risk Assess*, 2020, 26(1): 57
- [22] Yang J B, Liu J, Wang J, et al. Belief rule-base inference methodology using the evidential reasoning Approach-RIMER. *IEEE Trans Syst Man Cybern A*, 2006, 36(2): 266
- [23] Yang J B, Liu J, Xu D L, et al. Optimization models for training belief-rule-based systems. *IEEE Trans Syst Man Cybern A*, 2007, 37(4): 569
- [24] Guo M. A belief-rule-based inference method for modeling systems under uncertainties. *Syst Eng Theory Pract*, 2016, 36(8): 1975
(郭敏. 基于置信规则库推理的不确定性建模研究. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(8): 1975)
- [25] Zhou Z J, Yang J B, Hu C H. *Expert System of Belief Rule Base and Modeling of Complex System*. Beijing: Science Press, 2011
(周志杰, 杨建波. 置信规则库专家系统与复杂系统建模. 北京: 科学出版社, 2011)