

基于联系云的飞机轮胎滑水风险可拓评价模型

李岳¹, 周则圆¹, 蔡靖^{1, 2, *}

(1. 中国民航大学交通科学与工程学院, 天津 300300; 2. 民航机场智能建造与工业化工程技术研究中心, 天津 300456)

摘 要: 针对飞机轮胎滑水问题影响因素多、评价指标具备随机模糊与离散性特征问题, 基于联系云可拓理论建立滑水风险评价模型, 定量描述滑水评价指标在不同分类等级之间的转换态势。根据评价指标分级标准确定联系云数字特征, 生成有限区间内联系云, 由云相关度构建联系云可拓矩阵, 结合变权重综合评定最终风险等级, 表征待评价物元与风险等级之间的动态联系; 依托飞机轮胎滑水流固耦合仿真获得案例分析数据, 弥补经典滑水试验工况变量条件少的不足。分析结果表明: 传统正态云模型与可拓联系云模型对滑水事件样本 1 和样本 3 评价结论一致; 对于样本 2, 由所提方法计算滑水风险等级为Ⅲ级, 同等参数条件下风险控制标准更严格, 上述样本风险评价置信因子均小于 0.01, 评价可信程度较高; 所提分析模型为多重不相容指标的随机模糊及不确定性分析提供了可能, 克服了正态云模型无法有效模拟指标在有限区间内分布的缺陷。

关 键 词: 轮胎滑水; 联系云; 可拓理论; 流固耦合; 风险评价

中图分类号: U416.217; V351.11

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2025)03-0705-07

据统计, 近 10 年内由飞机轮胎滑水 (aircraft tire hydroplaning, ATH) 引起的各类冲偏出跑道事故共计 101 起, 对社会公众安全产生显著负面影响^[1]。相较全球年均 6 900 万架次起降量而言, ATH 事件虽然发生几率较低, 但关联损失严重, 针对此类航空安全问题的研究一直备受重视。

依照 ATH 形成机理与防范方法, 以往研究可分为 2 个阶段。第 1 阶段以美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 提出的滑水速度公式为代表, 以临界滑水速度作为 ATH 发生判据, 将轮胎磨损^[2]、道面平整度^[3]、附着系数^[4]、道面刻槽^[5]、轮组构型^[5]、机身侧滑角^[6]与侧风扰动^[7]等因素纳入分析考量, 拓宽了 NASA 公式的适用条件。参照英国 Bristol 大学轮胎溅水喷流试验, 文献 [8] 以道面积水附加阻力作为 ATH 补充判据, 该指标在滑水过后迅速降低并持续影响

飞机滑行姿态。上述研究的不足之处是将 ATH 视为确定性事件, 与事故统计特征不符合。第 2 阶段将公路车辆滑水分析理论引入航空领域, 提出基于全概率的 ATH 风险量化公式^[6], 覆盖飞机高速滑行全过程, 避免仅以最大速度瞬时为最不利分析工况。文献 [9] 将机载快速存取记录器 (quick access record, QAR) 数据引入滑水风险分析, 以表征特定机型在特定道面条件下的起降特征, 促进 ATH 研究从规律化向精细化方向转变, 克服第 1 阶段“二元”判定结论较为粗糙的不足 (即滑水或不滑水)。

近年来, 云模型在解决空管运行保障、飞机重着陆风险等复杂航空随机模糊问题中有广泛的应用^[10-13]。胡宇祺等^[14]探讨了基于正态云模型的飞机滑水安全评价方法, 提取单因素云模型数字特征, 以综合隶属度指标表征滑水风险等级。在此基础上, 本文建立了基于联系云的 ATH 风险可拓评

收稿日期: 2023-03-23; 录用日期: 2023-05-29; 网络出版时间: 2023-06-15 11:19

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230614.1459.002

基金项目: 国家自然科学基金 (52472369); 中央高校基本科研业务费专项资金 (3122019103); 民航机场智能建造与工业化工程技术研究中心开放课题 (MHJGKFKT-01, MHJGKFKT-04)

* 通信作者. E-mail: jcai@cauc.edu.cn

引用格式: 李岳, 周则圆, 蔡靖. 基于联系云的飞机轮胎滑水风险可拓评价模型 [J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51 (3): 705-711.

LI Y, ZHOU Z Y, CAI J. Extensible evaluation model of aircraft tire hydroplaning risk based on connection cloud [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51 (3): 705-711 (in Chinese).

价模型,依据 ATH 指标分级标准确定联系云数字特征,生成有限区间内联系云,由云相关度构建联系云可拓矩阵,结合变权权重综合评定 ATH 风险等级。开展 ATH 流固耦合仿真分析,丰富研究案例数据,为 ATH 风险评价提供新的参考。

1 联系云可拓理论

1.1 联系云基本原理

云模型以概率论和模糊数学为基础,以自然语言值为切入点,构建定性定量转换模型,是解决多层次多指标评价问题的分析工具^[15-18]。

对于简单随机变量,假定其在理想无限区间内服从正态分布,采用正态云模型描述数字特征,这与常见滑水评价指标(飞机轴载等级、地面滑行速度、道面积水厚度等)的有限区间分布形式存在差异。对此,汪明武教授等提出了联系云模型,可在有限区间内生成非对称分布云模型,为改进 ATH 风险评价提供了理论支撑^[19]。

假定将 ATH 风险划分 p 个等级 ($i=1,2,\cdots,p$),评价指标 q 个 ($j=1,2,\cdots,q$),评价指标 j 等级为 i 的云由左右 2 朵非对称有限区间分布云构成,以期望值 E_x^i 为中间分界点。云滴是云模型的基本单元,单个云滴隶属度 μ_i 计算式为

$$\mu_i = \left[1 - \left(\frac{x_i - E_x^i}{\alpha_i'} \right)^2 \right]^{\lambda_i} \tag{1}$$

$$\alpha_i' = E_n^i \sqrt{2\lambda_i + 3} \tag{2}$$

$$E_x^i = \frac{L_{\max}^i + L_{\min}^i}{2} \tag{3}$$

$$E_n^i = \frac{\alpha_i}{\sqrt{2\lambda_i + 3}} \tag{4}$$

$$H_e^i = k \tag{5}$$

式中: $\mu_i \in [0,1]$; E_n^i 和 H_e^i 分别为等级 i 左右半朵联系云的熵和超熵, E_n^i 越大,云模型分布越离散, H_e^i 表征随机性与模糊性相关度; α_i 、 α_i' 分别为修正前、后半区间长度;对左半区间, $x_i \in [E_x^i - \alpha_i', E_x^i]$,对右半区间, $x_i \in [E_x^i, E_x^i + \alpha_i']$; $E_n^i \sim \text{Normrnd}(E_n^i, H_e^i)$; $L_{\max}^i$ 、 $L_{\min}^i$ 分别为等级 i 区间上、下限;常数 k 反映云漂浮模糊阈值,本文中取 0.01, k 值越小,表明联系云模型稳定性越好^[20]; λ_i 为 α_i' 对应分布密度函数阶数,由等级 i 区间长度、 α_i 和 α_i' 三者共同决定,计算式为

$$\lambda_i = \frac{\lg 0.5}{\lg \left[1 - \left(\frac{l_i - E_x^i}{\alpha_i} \right)^2 \right]} \tag{6}$$

其中: l_i 为 $L_{\max}^i$ 或 $L_{\min}^i$ 。

联系云模型的基本数字特征如图 1 所示。图中: $\alpha_{\text{left}} = 30$, $\alpha_{\text{right}} = 32$, $E_x = 35$, $H_e = 0.01$, $N = 1\,000$ 。可以看出,依据“ $3E_n$ 规则”,传统正态云模型云滴主要分布在 $[E_x - 3E_n, E_x + 3E_n]$ 范围内,客观上忽视了分类等级的模糊性和被测指标分布区间有限性。而联系云模型由左右 2 朵非对称独立云组成,图 1 中评价指标 j 与等级 i 存在 3 种集对关系。当实测指标值位于等级 i 区间内时,为同一关系,位于相邻等级 $i+1$ 或 $i-1$ 时,为差异关系,位于相隔等级时,符合对立关系。半区间长度 α_{left} 和 α_{right} 由同一关系和差异关系所包含的区间构成。

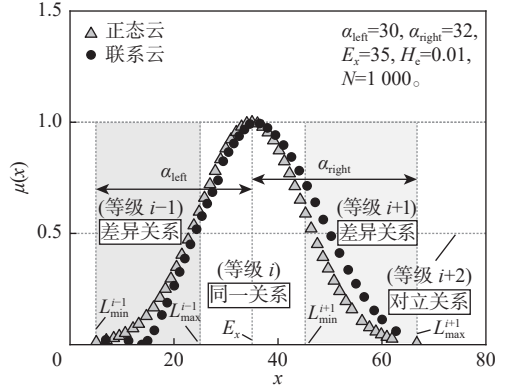


图 1 联系云模型数字特征

Fig. 1 Numerical characteristic of connection cloud model

1.2 可拓理论物元表达

可拓理论是研究元素内部结构与事物可变性的不确定性分析方法^[20-22],利用物元可拓性,通过有序三元组表达事物的量与质,公式为

$$R = \begin{bmatrix} N & C_1 & V_1 \\ N & C_2 & V_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N & C_q & V_q \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中:物元 R 由事物名称 N 、事物特征 C 和事物特征量值 V 共同表示。特征量值 V 为确定数值或数值区间。

为构建可还原实际 ATH 复杂风险量化分析系统,将联系云引入可拓理论物元表达,以联系云模型数字特征替换事物特征量值 V ,基于联系云的可拓物元形式如下:

$$R_i = \begin{bmatrix} N & C_1 & (E_x^1, E_n^1, H_e^1, \alpha_1, \lambda_1) \\ N & C_2 & (E_x^2, E_n^2, H_e^2, \alpha_2, \lambda_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ N & C_q & (E_x^q, E_n^q, H_e^q, \alpha_q, \lambda_q) \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中: $(E_x^j, E_n^j, H_e^j, \alpha_j, \lambda_j)$ 为 N 关于评价指标 C_j 的联系云表达。通过联系云解决 ATH 风险等级划分与边界处理问题,利用可拓理论定量分析事物特征 C_j 间不相容问题,实现有限区间分布评价指标的随

机模糊分析。

2 飞机轮胎滑水评价模型

2.1 基本评价流程

图 2 为基于联系云可拓理论的 ATH 风险评价基本流程。

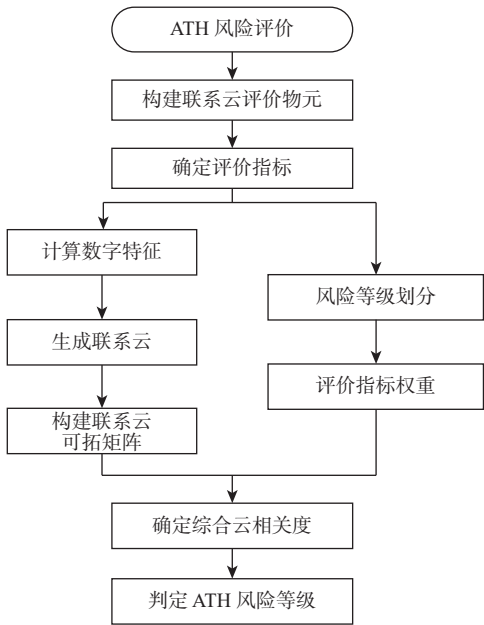


图 2 基于联系云的 ATH 可拓评价流程
Fig. 2 Extension evaluation process of ATH based on connection cloud

步骤 1 ATH 受飞机性能、道面状况及污染物分布因素共同影响, 根据待评价物元选定评价指标 C_j , 确定各风险等级左右半区间长度 α_{left} 和 α_{right} , 求解联系云数字特征 $(E_x, E_n, H_e, \alpha, \lambda)$, 生成有限区间等级联系云。

步骤 2 根据实测样本数据计算该样本隶属于各风险等级的云相关度, 构建基于联系云的可拓矩阵。

步骤 3 综合评价指标权重和联系云可拓矩阵, 确定当前样本综合云相关度, 最终判定待评价物元的 ATH 风险等级。

2.2 可拓矩阵构建

构建可拓矩阵是确定 ATH 风险等级的基础。对于分类标准区间值随风险等级增大而单调增大的指标(如地面滑行速度、道面积水厚度等), 等级 i 左右半区间长度计算式为

$$\begin{cases} \alpha_{\text{left}} = E_x^i - L_{\min}^{i-1} \\ \alpha_{\text{right}} = L_{\max}^{i+1} - E_x^i \end{cases} \quad (9)$$

相反的, 对于分类标准区间值随等级增大而单调减小的指标(如道面摩擦系数、飞机轴载等级等), 等级 i 的左右半区间长度计算式为

$$\begin{cases} \alpha_{\text{left}} = E_x^i - L_{\min}^{i+1} \\ \alpha_{\text{right}} = L_{\max}^{i-1} - E_x^i \end{cases} \quad (10)$$

按 2.1 节步骤 1 分别计算左右半区间数字特征, 得出 ATH 风险等级界限的标准联系云; 生成以等级 i 区间熵值 E_n^i 为均值、以超熵 H_e^i 为标准差的正态随机数 $E_n^{i'}$ 。假定待评价 ATH 样本指标值为 x_i , 由式 (1) 计算其对应隶属度, (x_p, μ_i) 共同构成一个云滴, 重复上述步骤直至生成由 n 个云滴组成的联系云。 μ_i 表征了指标值 x_i 关于等级 i 的云隶属度, μ_{ji} 表示事物指标与等级 i 云表示的事物指标之间的关联度, 称为云相关度。由云相关度组成的联系云可拓矩阵 S 形式如下:

$$S = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1p} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2p} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mu_{q1} & \mu_{q2} & \cdots & \mu_{qp} \end{bmatrix} \quad (11)$$

参考以往研究经验^[23-25], 确定本文 ATH 评价指标 q 为 5 个, 滑水风险分类等级 p 为 4 级。

2.3 评价指标与等级确定

近年来, 耦合欧拉-拉格朗日 (coupled Eulerian-Lagrangian, CEL) 算法支撑复杂 ATH 仿真分析快速发展, 弥补了经典轮胎滑水试验工况较简单、考察变量少等不足, 可为 ATH 风险分析提供案例数据。此类仿真方式与分析精度经相关研究反复验证并普遍采用, 详细建模及模型验证流程参见文献 [26-27], 典型轮胎滑水 CEL 模型形式如图 3 所示。

图 3 中, 滚动飞机轮胎与道面积水相对高速运动并产生冲击变形, 轮胎-道面-积水层体系相互作用直至滑水临界状态, 可根据分析需要调节飞机动力滑行、道面表面性能及积水层分布等参数条件。在选择评价指标时, 既要考虑其对 ATH 系统各部分代表性, 也应考虑机场运行实践中数据获取的难易程度与可靠性。综合相关研究成果与行业标准, 本文选取的 5 项 ATH 风险评价指标包括滑行速度、积水厚度、摩擦系数、单轮轴载和刻槽深度, 减

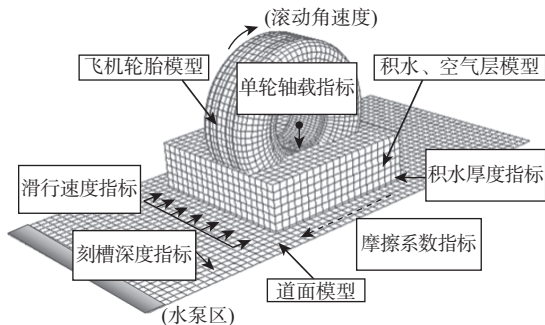


图 3 典型轮胎滑水 CEL 算法仿真模型
Fig. 3 Typical simulation model of tire hydroplaning based on coupled Eulerian-Lagrangian algorithm

少人为主观评价对 ATH 分析的不利影响。

采用文献 [9] 提出滑水风险指标(hydroplaning risk index, HRI)进行滑水风险分级,该指标基于 QAR 数据特征分析提出,可量化地面滑行速度降至安全区间范围前,高滑水风险“窗口期”在飞机起降全过程中的占比。将 ATH 风险划分为可忽略(I 级)、可接受(II 级)、可接受需整改(III 级)和不可接受(IV 级)共 4 个等级。通过前期仿真分析,确定上述 ATH 风险评价指标分级标准,限于文章篇幅不再展开,评价指标分类标准如表 1 所示。

图 4 中,4 朵联系云依次对应风险等级 I~IV。II 和 III 等级分布与图 1 中样式一致;由于指标在有限范围取值, I 和 IV 等级外侧半区间云模型不“下

落”,边界隶属度为固定值 1,较以往正态云分布特征更合理。本文选取 5 项评价指标均为定量指标,各指标不同风险等级标准云之间存在交叉重叠,可还原 ATH 风险评价模糊随机特性。

表 1 ATH 风险等级评价指标分类标准
Table 1 Classification standards of evaluation indexes for ATH risk grades

风险等级	滑行速度/ (km·h ⁻¹)	积水厚度/ mm	摩擦 系数	单轮轴载/ kN	刻槽深度/ mm
I	≤200	≤5	>0.7	>123.1	>5
II	≤230	≤8	≤0.7	≤123.1	≤5
III	≤260	≤11	≤0.6	≤107.3	≤4
IV	>260	>11	≤0.6	≤91.7	≤3

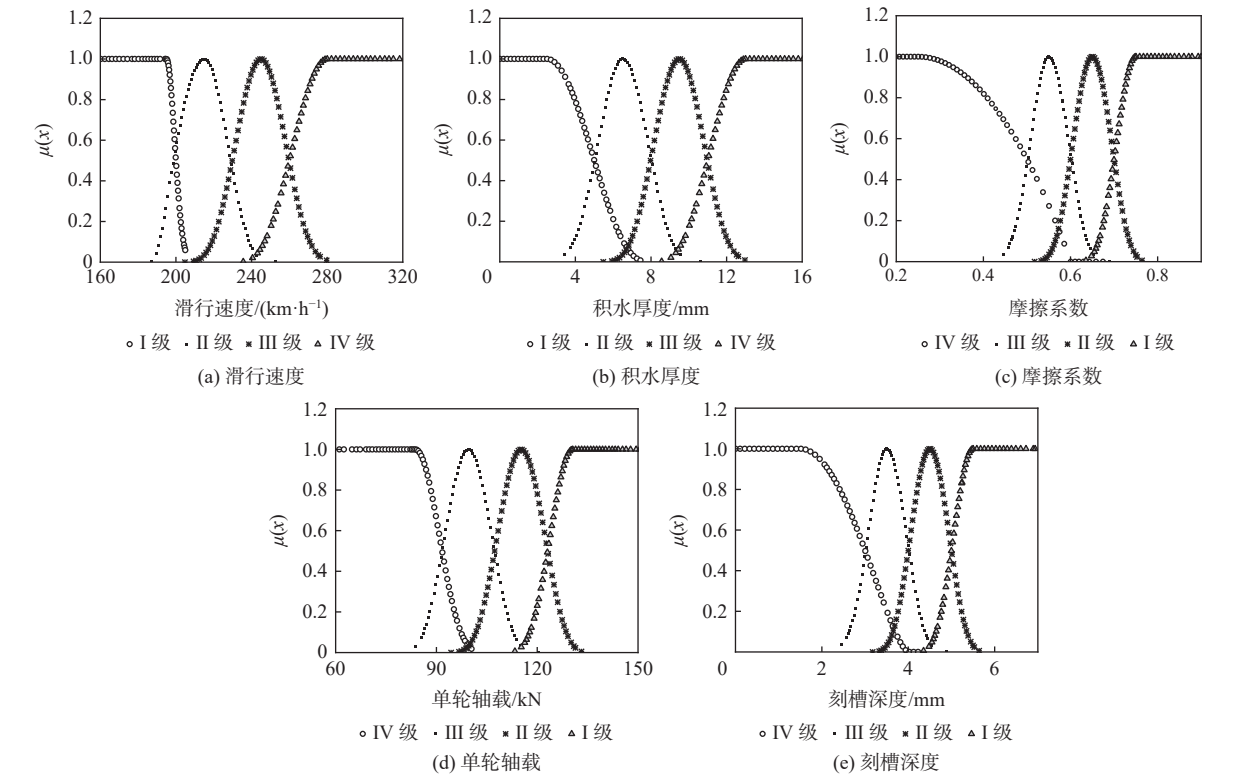


图 4 评价指标隶属 ATH 风险等级标准联系云

Fig. 4 Standard connection clouds of evaluation index under different membership of ATH risk grades

依托联系云可拓矩阵 $\mathbf{S}$ 及权重向量 $\mathbf{W}$, 两者相乘得到综合云相关度向量 $\mathbf{A}$, ATH 风险等级评价模型如下:

$$a_i(N) = \max \{a_i(N) | i = 1, 2, 3, 4\} \tag{12}$$

$$r = \sum_{i=1}^4 a_i g_i / \sum_{i=1}^4 a_i \tag{13}$$

式中: a_i 为 $\mathbf{A}$ 的最大分量值, 表征当前待评价样本 N 关于等级 i 的综合云相关度; g_i 为 4 个等级得分分值; r 为加权平均法计算评判分数。

可通过多次计算减弱可拓矩阵 $\mathbf{S}$ 中 μ_{ji} 的随机

性, 公式如下:

$$\begin{cases} E_{rx} = \frac{r_1(x) + r_2(x) + \cdots + r_n(x)}{n} \\ E_{rn} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i(x) - E_{rx})^2} \\ \theta = E_{rn} / E_{rx} \end{cases} \tag{14}$$

式中: 置信因子 θ 表示 ATH 评价结果分散程度与可信度, 为多次计算期望值 E_{rx} 与熵值 E_{rn} 之比; 重复运算次数 $n=300 \sim 500$ 次; 通常取 $\theta \leq 0.01$ 作为控制标准。

3 实例应用

为验证联系云可拓评价理论的合理性和比较优势,以某多雨地区 4E 等级机场为例开展滑水风险等级评价应用分析。该机场道面因长期运行导致表面性能下降,湿滑起降条件下,轮胎滑水事件频发导致 ATH 问题突出,3 起典型滑水事故征候跑道运行参数如表 2 所示。

选用惩罚性状态变权向量,权重向量 W 与变权理论结合,依据飞机滑跑状态和外部环境动态调

表 2 滑水事故征候跑道运行参数组合

Table 2 Parameter combination of operating runway of hydroplaning symptoms

样本	滑行速度/ (km·h ⁻¹)	积水厚度/ mm	单轮轴载/ kN	刻槽深度/ mm	摩擦 系数
1	220	3	138.8	6	0.76
2	250	5	100.4	5	0.66
3	280	8	76.5	2	0.60

表 3 ATH 风险安全性评价结果及对比

Table 3 Safety evaluation results of ATH risks and comparison

样本	综合云相关度				置信因子	稳定性等级与起降条件		
	I	II	III	IV		本文方法	正态云法	规范判定
1	0.922 9	0.068 7	0.008 2	0	0.003 9	I	I	允许起降
2	0.212 7	0.441 8	0.390 3	0.037 6	0.001 2	II	III	允许起降
3	0.000 7	0.171 3	0.288 5	0.546 2	0.008 3	IV	IV	允许起降

表 3 中,3 组样本评价结果的置信因子 θ 均小于 0.01,表明采用本文建议的联系云可拓理论计算 ATH 风险等级结果分散性小,可信程度高。与传统正态云模型评价结果相比,两者对样本 1 和样本 3 的评价等级结论一致,分别为 I 级和 IV 级;对于样本 2,采用本文计算理论得出 ATH 风险等级为 III 级,风险控制标准更为严格。依托集对关系构建 ATH 联系云可拓评价模型,为多重不相容指标的随机模糊及不确定性分析提供了可能,克服了正态云模型不能有效模拟评价指标在有限区间内分布的缺陷,使之更符合指标分类和信息获取的实际特征。

4 结 论

- 1) 将联系云模型引入可拓理论物元表达,实现 ATH 风险评价基于语言值的定性概念和数值表示之间的相互映射,拓展了传统正态云模型的应用方式。
- 2) 联系云模型在有限区间内生成非对称分布云模型,更加符合 ATH 评价指标分布特征;依托飞机轮胎滑水流固耦合仿真,可确定评价指标分级标准。

整。对偏离正常运行的某些指标值,根据偏离严重程度给予惩罚性调整,使评估结果与实际运行状态趋近一致。变权向量 W 计算结果如下:

$$\begin{cases} W_1 = [0.066\ 5, 0.436\ 9, 0, 1\ 477, 0.265\ 3, 0.083\ 6] \\ W_2 = [0.198\ 7, 0.206\ 7, 0, 2\ 044, 0.189\ 0, 0.201\ 2] \\ W_3 = [0.185\ 3, 0.131\ 7, 0, 2\ 316, 0.235\ 6, 0.215\ 8] \end{cases}$$

(15)

由式 (12) 确定各样本的评判等级,结果可信程度在表 3 中列出。以样本 1 滑行速度为例 ($x_0=220\text{ km/h}$),说明对应 I ~ IV 等级联系概率的计算过程。按式 (1) 计算隶属度 $\mu_{1,11}=0, \mu_{1,21}=0.919\ 2, \mu_{1,31}=0.122\ 1, \mu_{1,41}=0$, 此时样本 1 滑行速度指标对等级 II 隶属程度最大,其次为等级 III,隶属等级 I 或等级 IV 可能性为 0。同理,对其他 4 项指标求解各等级云相关度。进而结合评价指标权重向量求得隶属不同等级的综合云相关度,并按最大综合云相关度原则判定样本风险等级。

3) 实例应用表明,联系云可拓评价模型可统一定量描述等级模糊转换态势和指标的确定与不确定性,对 ATH 风险控制更为严格,且置信因子小于 0.01,符合可信度要求,可为同类研究提供参考。

参考文献 (References)

[1] 赵安家,孙丽莹,孟哲理. 飞机轮胎滑水与预防控制措施研究综述[J]. 飞机设计, 2015, 35(5): 46-51.

ZHAO A J, SUN L Y, MENG Z L. A search for mechanism and preventability measure of the aircraft tire hydroplaning[J]. Aircraft Design, 2015, 35(5): 46-51(in Chinese).

[2] 蔡靖,许净. 沟槽磨损对飞机轮胎滑水影响仿真分析[J]. 中国民航大学学报, 2020, 38(2): 38-43.

CAI J, XU Z. Simulation analysis on influence of groove abrasion on aircraft hydroplaning[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2020, 38(2): 38-43(in Chinese).

[3] 许净. 考虑道面平整度的飞机轮胎滑水安全问题研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2019: 10-23.

XU Z. Study on water skiing safety of aircraft tires considering pavement smoothness[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2019: 10-23(in Chinese).

[4] 张恒. 轮胎与湿滑道面相互作用下的飞机滑水行为研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2018: 62-66.

ZHANG H. Study on aircraft water skiing behavior under the interaction between tire and wet road surface[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2018: 62-66(in Chinese).

[5] 朱兴一, 庞亚凤, 杨健, 等. 湿滑条件下基于真实纹理道面的机轮着陆滑水行为解析[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 159-170.

ZHU X Y, PANG Y F, YANG J, et al. Analysis on the hydroplaning of aircraft tire under real texture pavement conditions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 159-170(in Chinese).

[6] 刘芳兵. 湿滑跑道飞机侧风着陆滑行安全研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020: 45-47.

LIU F B. Study on the safety of aircraft landing and taxiing in cross-wind on wet runway[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020: 45-47(in Chinese).

[7] TREMBLAY L, METIVET M, MEUNIER F, et al. Method and system for aircraft sideslip guidance: US11054437[P]. 2021-07-06.

[8] 李岳, 宗辉杭, 蔡靖, 等. 飞机轮组滑水行为与道面积水附加阻力[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(5): 1099-1107.

LI Y, ZONG H H, CAI J, et al. Hydroplaning behavior of aircraft wheel group and additional resistance due to accumulated water on pavement[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(5): 1099-1107(in Chinese).

[9] 李岳, 胡宇祺, 蔡靖, 等. 湿滑道面飞机着陆滑水风险量化分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6): 1138-1144.

LI Y, HU Y Q, CAI J, et al. Quantification analysis of hydroplaning risks of aircraft landing on wet pavement[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(6): 1138-1144 (in Chinese).

[10] FWA T F, PASINDU H R, ONG G P. Critical rut depth for pavement maintenance based on vehicle skidding and hydroplaning consideration[J]. Journal of Transportation Engineering, 2012, 138(4): 423-429.

[11] 张兆宁, 石峰. 基于组合赋权云模型的塔台管制系统运行安全评估[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(4): 1254-1265.

ZHANG Z N, SHI F. Operational safety assessment of tower control system based on combined weighted cloud model[J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(4): 1254-1265(in Chinese).

[12] 史佳辉, 徐吉辉, 陈玉金, 等. 基于交互作用矩阵多维云模型的飞机重着陆风险评估方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(10): 3026-3032.

SHI J H, XU J H, CHEN Y J, et al. Research on risk assessment method of aircraft heavy landing based on interaction matrix-multidimensional cloud model[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(10): 3026-3032(in Chinese).

[13] 唐家文, 董兵, 王超峰. 基于云模型的空管安全运行保障能力评价[J]. 航空工程进展, 2021, 12(4): 59-67.

TANG J W, DONG B, WANG C F. Evaluation on safe operation support ability of air traffic management based on cloud model[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(4): 59-67(in Chinese).

[14] 李岳, 胡宇祺, 蔡靖, 等. 基于变权重-正态云模型的飞机轮胎滑水风险研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(9): 2299-2305.

LI Y, HU Y Q, CAI J, et al. Hydroplaning risk of aircraft tire based on variable weight theory-normal cloud model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(9): 2299-2305 (in Chinese).

[15] 周义蛟, 郭基联, 周舟. 基于云模型与组合赋权法的飞机保障性评估研究[C]//2017 年首届航空保障设备发展论坛. 北京: 中国航空航天工具协会, 中国航空学会航空维修工程专业分会, 2017: 142-148.

ZHOU Y J, GUO J L, ZHOU Z. A study on military aircraft supportability assessment based on cloud model and game theory[C]// Proceedings of the 2017 1st Aviation Support Equipment Development Forum. Beijing: China Aerospace Tools Association, Aviation Maintenance Engineering Branch of the Chinese Aerospace Society, 2017: 142-148(in Chinese).

[16] 叶琼, 李绍稳, 张友华, 等. 云模型及应用综述[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(12): 4198-4201.

YE Q, LI S W, ZHANG Y H, et al. Cloud model and application overview[J]. Computer Engineering and Design, 2011, 32(12): 4198-4201(in Chinese).

[17] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.

LI D Y, LIU C Y. Study on the universality of the normal cloud model[J]. Engineering Science, 2004, 6(8): 28-34(in Chinese).

[18] 刘俊杰, 张瑞瑞, 叶英豪, 等. 基于云模型的航空器地面滑行错误事件风险分析[J]. 中国民航飞行学院学报, 2022, 33(5): 51-56.

LIU J J, ZHANG R R, YE Y H, et al. Risk analysis of aircraft ground taxiing error event based on cloud model[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2022, 33(5): 51-56(in Chinese).

[19] 汪明武, 王霄, 龙静云, 等. 基于多维联系正态云模型的泥石流危险性评价[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(2): 368-375.

WANG M W, WANG X, LONG J Y, et al. Risk assessment of debris flow based on multidimensional connection normal cloud model[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(2): 368-375(in Chinese).

[20] 汪明武, 朱其坤, 赵奎元, 等. 基于有限区间联系云的围岩稳定性评价模型[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 140-144.

WANG M W, ZHU Q K, ZHAO K Y, et al. Stability evaluation model of surrounding rock based on limited interval connection cloud[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Sup 1): 140-144(in Chinese).

[21] 马丽叶, 张涛, 卢志刚, 等. 基于变权可拓云模型的区域综合能源系统综合评价[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2789-2799.

MA L Y, ZHANG T, LU Z G, et al. Comprehensive evaluation of regional integrated energy system based on variable weight extension cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2789-2799(in Chinese).

[22] 蔡文, 杨春燕, 何斌. 可拓学基础理论研究的新进展[J]. 中国工程科学, 2003, 5(2): 80-87.

CAI W, YANG C Y, HE B. New development of the basic theory of extenics[J]. Engineering Science, 2003, 5(2): 80-87(in Chinese).

[23] 关晓吉. 基于可拓联系云模型的隧道塌方风险等级评价方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(11): 186-192.

GUAN X J. Evaluation method on risk grade of tunnel collapse based on extension connection cloud model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(11): 186-192(in Chinese).

[24] 牛亚东, 张思祥, 田广军, 等. 机场跑道摩擦系数影响因素研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(2): 715-720.

NIU Y D, ZHANG S X, TIAN G J, et al. Research on influencing factors of friction coefficient in airport runway[J]. Chinese Journal

of Applied Mechanics, 2021, 38(2): 715-720(in Chinese).

[25] 王迎超, 靖洪文, 张强, 等. 基于正态云模型的深埋地下工程岩爆烈度分级预测研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(4): 1189-1194.
WANG Y C, JING H W, ZHANG Q, et al. A normal cloud model-based study of grading prediction of rockburst intensity in deep underground engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(4): 1189-1194(in Chinese).

[26] 宗一鸣. 湿滑道面条件下轮胎力学行为与飞机着陆安全问题研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2017: 19-30.
ZONG Y M. Research on tire mechanical behavior and aircraft landing safety under wet road surface conditions[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017: 19-30(in Chinese).

[27] OH C W, KIM T W, JEONG H Y, et al. Hydroplaning simulation for a straight-grooved tire by using FDM, FEM and an asymptotic method[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(1): 34-40.

Extensible evaluation model of aircraft tire hydroplaning risk based on connection cloud

LI Yue¹, ZHOU Zeyuan¹, CAI Jing^{1, 2, *}

(1. College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. Intelligent Construction and Industrialization Engineering Technology Research Center of Civil Aviation Airport, Tianjin 300456, China)

Abstract: Since aircraft tire hydroplaning can be influenced by several factors, and the characteristic of evaluation indexes can be described as fuzzy, random, and discrete, a hydroplaning risk evaluation model based on extension theory and connection cloud was established, so as to quantify the transformation of hydroplaning evaluation indexes among different classification levels. The numerical characteristics of the connection cloud were calculated according to the leveling criteria of evaluation indexes, and the connection cloud within a limited range was generated. The extensible matrix of the connection cloud was built by using certainty degrees. In this way, the final risk level could be obtained on the basis of variable weights, which demonstrated the dynamic connection between elements to be evaluated and risk level. The case analysis data was obtained by the fluid-solid coupling simulation of aircraft tire hydroplaning to make up for the lack of variable conditions in the classic hydroplaning test. The analysis results show that the evaluation conclusions of sample 1 and sample 3 are consistent based on the traditional normal cloud model and extensible connection cloud model. The hydroplaning risk level of sample 2 is given as III by using the proposed model in this paper. Therefore, the risk control is considered more restrict under the same parameter condition. The confidence factor of the above sample risk assessment is less than 0.01, and the credibility of the evaluation results is high. The proposed model in this paper provides an alternative method for random-fuzzy and uncertainty analysis involving multiple incompatibility indexes. Hence, the defect of the normal cloud model in simulating the distribution of evaluation indexes within a limited range can be overcome.

Keywords: tire hydroplaning; connection cloud; extension theory; fluid-solid coupling; risk evaluation

* Corresponding author. E-mail: jcai@cauc.edu.cn