

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.06.017

湿滑道面飞机着陆滑水风险量化分析

李岳, 胡宇祺, 蔡靖, 戴轩

(中国民航大学交通科学与工程学院, 天津 300300)

摘要: 基于飞机机载记录仪数据和临界滑水速度提出滑水风险量化指标, 将飞机接地滑行全过程纳入滑水分析范围; 建立着陆阶段飞机轮胎-积水道面流固耦合仿真模型, 考察道面积水分布及接地位置横向漂移影响, 以空客 A320 为代表机型开展案例分析。结果表明, 着陆阶段飞机轮胎临界滑水速度较起飞阶段低 12%~18%, 滑水事故风险更高; 道面横坡引起积水不均匀分布, 跑道边缘滑水风险高于中线区域; 临界滑水速度及滑水风险指标均为关于接地位置横坐标的函数; 同等降雨强度条件下滑水风险概率随飞机接地横向分布标准差增大而减小; 增大横坡度可加快道面积水排除, 2.0% 横坡度工况较 1.5% 时滑水风险降低 5.1%~5.6%; 降雨强度与飞机滑水风险正相关, 由 0.8 mm/min 增大至 2.5 mm/min 时滑水风险指标增加约 13.1%; 该滑水风险量化分析方法可定量描述飞机着陆环境变化影响, 滑水判定方式有明显改进。

关键词: 飞机滑水; 机载记录仪数据; 湿滑道面; 流固耦合; 风险量化

中图分类号: V351.11; U8

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2022)06-1138-07

Quantification Analysis of Hydroplaning Risks of Aircraft Landing on Wet Pavement

LI Yue, HU Yuqi, CAI Jing, DAI Xuan

(College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: A quantitative index of hydroplaning risks is proposed based on the quick access record data of aircraft and the critical hydroplaning speed. The whole taxiing process is considered. A numerical model of aircraft-tire-wet-pavement during the landing phase is established for the fluid-structure coupling analysis. The influence of water distribution on the pavement surface and the transverse shift of landing position are discussed. Case study of Airbus A320 model is then carried out. Results show that the critical hydroplaning speed during the landing phase is 12%—18% lower than that during the take-off phase. The hydroplaning accident risk is assumed to be higher. The cross slope causes uneven distribution of the accumulated water film on the pavement. The hydroplaning risk near the runway edge is higher than that near the center line area. The critical hydroplaning speed and the hydroplaning risk index are functions of the abscissa of aircraft landing position. The probability of the hydroplaning risk decreases with the increase of the transverse standard deviation of lateral distribution of aircraft landing position under the same rainfall intensity conditions. The raise of the cross slope may promote the drainage capability of pavement, while the hydroplaning risk index under the case of 2.0% cross slope is reduced by 5.1%—5.6%, compared with that under the case of 1.5%. Rain intensity shows a positive correlation with the hydroplaning risk. The risk index is raised nearly 13.1% as the rainfall intensity increased from 0.8 mm/min to 2.5 mm/min. The analyzing procedure proposed in this

基金项目: 中央高校基金项目(3122019103)。

收稿日期: 2021-10-11; **修订日期:** 2022-11-21

通信作者: 蔡靖, 女, 教授, E-mail: jcai@cauc.edu.cn。

引用格式: 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 Yue, HU Yuqi, CAI Jing, 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.

paper may quantitatively describe the impact of aircraft landing environment variation. The criteria standard of hydroplaning condition can be notably improved.

Key words: aircraft hydroplaning; quick access record data; wet pavement; fluid-structure interaction; risk quantification

飞机在湿滑道面着陆时可发生轮胎滑水,滑水会导致轮胎与道面失去接触,削弱刹车效用及方向控制力,造成飞机冲偏出跑道等严重事故。美国航空飞行员协会统计表明,飞机在积水道面起降时发生航空事故风险约为干燥条件下的4倍,其中着陆阶段事故占比更是高达79%^[1],因而有必要针对飞机着陆过程开展滑水风险分析。

在此领域,以往主要依托美国NASA(National Aeronautics and Space Administration)飞机轮胎滑水性能试验及临界滑水速度(以下简称 v_c)公式进行滑水判定,当飞机滑行速度超过 v_c 时即认为构成滑水发生必要条件^[2]。由于NASA公式形式较为简略,仅反映单一胎压因素影响。对此,朱晟泽^[3]基于NASA试验开展不同侧滑角下细长体机身滑水性能研究,分析胎压、水膜厚度和宏观纹理对 v_c 的影响。冯停^[4]通过数值仿真探讨部分滑水轮胎 v_c 与荷载条件之间相关关系。朱兴一等^[5]开展基于真实路面纹理的飞机着陆滑水数值仿真,考察水膜厚度、轮胎滑移率及滑行速度对滑水性能影响。黄晓明等^[6]对多因素影响下的轮胎滑水形成过程进行系统探讨。上述研究工作拓展了NASA公式适应条件,丰富了轮胎与道面流固耦合相互作用分析因素。由于滑水问题的复杂性,有研究将飞机滑行状态纳入 v_c 考量。赵安家等^[7]基于 v_c 指标研究飞机结构、跑道状况和侧风因素与轮胎滑水形成关系。李岳等^[8]通过滑水仿真提出适应飞机起飞与着陆不同滑行过程的 v_c 上下限解概念。Huebner等^[9]基于不同试验结果探讨 v_c 判定方法。文献^[10]建立轮胎滑水临界状态理论模型,可针对不同机型预测 v_c 结果。为改善跑道抗滑性能,降低滑水发生几率,有的学者研究侧重道面排水能力优化。Benedetto^[11]研究路面排水能力增强与飞机滑水风险降低效果。Fwa等^[12]分析刻槽道面几何特征的滑水影响,通过增加刻槽宽度和深度提高 v_c 值,进而提出适应抗滑要求的路面轮辙修复标准^[13]。综合来看,现有研究主要通过完善 v_c 指标应用条件解决复杂起降条件下飞机滑水安全分析问题,其不足之处在于仅能获得二元分析结论(即滑水或不滑水),难以支撑精细化滑水风险量化管理。

本文基于飞机起降数据和临界滑水速度提出滑水风险量化指标,将飞机接地滑行全过程纳入风险分析范围;建立适应着陆滑行阶段的飞机轮

胎-积水道面流固耦合仿真分析模型,考察道面积水分布及接地位置漂移因素影响;通过一组算例阐明基于全概率公式的滑水风险量化分析过程。

1 滑水风险量化指标

轮胎滑水行为受飞机起降性能、滑行运动状态与道面积水状况共同影响,其形成机理极为复杂。基于美国兰利中心飞机轮胎滑水性能试验提出 v_c 经验公式为

$$v_c = 6.36 \sqrt{p_t} \quad (1)$$

式中 v_c 仅与胎压 p_t 大小有关,无法反映起降条件变化影响。Ong等^[2]针对高速公路汽车滑水问题提出一种风险量化方法,并将其应用于飞机滑水研究

$$\alpha = P(v_0 > v_c) = 1 - F(v_c) = 1 - \int_0^{v_c} f(v_0) dv_0 \quad (2)$$

式中: v_0 为飞机接地速度; $f(v_0)$ 为起降速度概率密度函数,可通过积分得到临界滑水速度超越概率 $P(v_0 > v_c)$, α 为滑水风险值,以飞机接地瞬时运动状态作为滑水判定依据。值得注意的是,在满足 $v_0 < v_c$ 前飞机仍处于滑水高风险“窗口期”内,上述量化方法对接地滑行过程考虑不足。据此,本文将机载记录仪(Quick access record, QAR)数据引入着陆滑水风险分析,以空客A320机型为例,典型QAR曲线形式如图1所示。

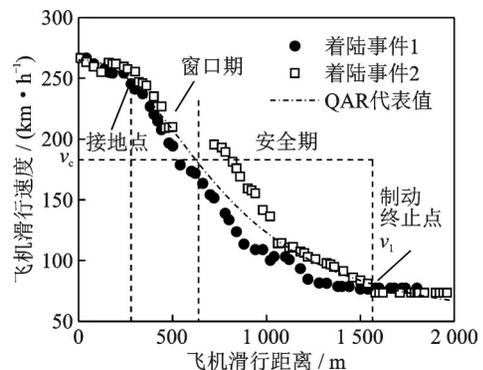


图1 A320飞机着陆QAR数据

Fig.1 A320 aircraft landing QAR data

图1中,接地点速度在250 km/h上下,至跑道近端距离约300 m;飞机接地后开启发动机反推及防滑控制措施,通过自动刹车系统实施减速,气象条件和人为因素导致不同着陆事件间QAR曲线存在差异;速度降至70 km/h以下时达到制动终止点,可根据机场布局和快滑道位置择机脱离跑道,

滑行总长度约1 200 m,滑行速度与滑行距离对应关系如图1所示。

根据QAR曲线及 v_c 计算高风险“窗口期”滑行距离在着陆全过程中占比,定义飞机滑水风险量化指标(Hydroplaning risk index, HRI)为

$$\text{HRI} = \frac{K(v_c) - K(v_0)}{K(v_1) - K(v_0)} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $K(v)$ 为滑行距离函数, v_1 为跑道脱离速度。一方面,QAR数据是对飞机起降性能与跑道运行状态的综合反映,同一条跑道上不同飞机具备不同QAR数据特征,可通过数据统计分析获得代表值曲线;另一方面,道面横坡使得跑道中心至边缘积水厚度逐步增加,式中 v_c 及 $K(v_c)$ 并非固定值且与飞机着陆接地位置密切相关。

该指标将飞机着陆滑行全过程纳入滑水风险分析范围,针对特定机型、积水状况和接地条件进行风险量化计算,滑水判别方式与以往明显不同。

2 滑水仿真模型

2.1 基本参数

当前轮胎滑水仿真分析包含轮胎冲击模型和水流冲击模型2种主流方式。有研究表明,二者计算道面支撑力变化规律和 v_c 结果相互等效,且后者计算成本更低^[14]。故本文采用水流冲击方式模拟飞机轮胎流固耦合滑水行为,基于ABAQUS软件建立仿真分析模型形式如图2所示。

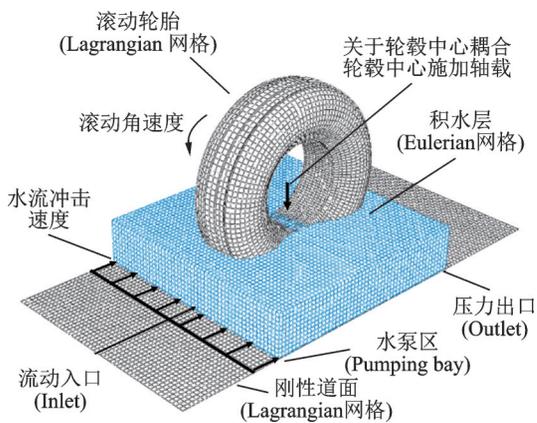


图2 飞机轮胎滑水有限元模型

Fig.2 Finite element model of aircraft tire hydroplaning

轮胎及道面采用拉格朗日网格离散,轮胎中心与轮毂耦合,轮胎内部等效为具有统一本构的均质橡胶材料^[7],采用Mooney-Rivlin模型模拟橡胶材料超弹性变形特征^[15];上部积水层与空气层采用无匹配离散欧拉网格建模,轮胎滚动方向两端分别设置水泵区和压力出口,通过调节水流冲击速度模拟不同轮胎滑行状态,转动角速度与水流速度匹

配,滑移率保持为1.0。轮胎与积水层物理力学参数在文献[16]已详细说明,此处不再赘述。依据《国际民用航空公约(ICAO)》附件14考察2种道面横坡度情况,1.5%和2.0%,积水分布计算结果见3.1节。

2.2 模型验证

图3给出了道面对轮胎支撑力随滑行速度变化曲线,模型参数依据NASA试验条件确定。采用ASTM标准E-524规格轮胎,模拟3种胎压条件,滑行速度由25 km/h逐步增大至250 km/h,积水层厚度7.6 mm。

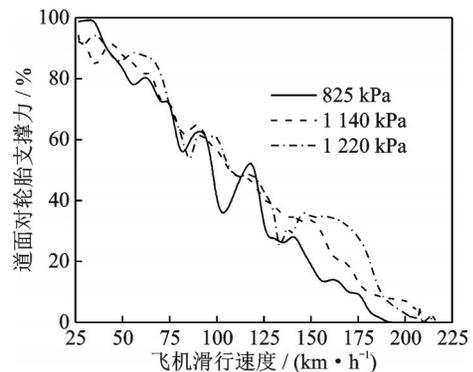


图3 道面支撑力随滑行速度变化曲线

Fig.3 Variation curves of pavement supporting force versus taxiing speed

图3中,积水对轮胎冲击作用随滑行速度增加而增大,支撑力曲线呈现振荡下降趋势;剩余支撑力不足5%时可认为轮胎已接近临界滑水状态,此时滑行速度即为 v_c 值。表1中依次列举了水流加速与减速冲击条件下 v_c 分析数据,对应飞机起飞与着陆滑行过程,并与NASA公式结果进行比较。

表1 临界滑水速度结果对比

Table 1 Comparison of critical hydroplaning speed results

胎压/kPa	起飞阶段/(km·h ⁻¹)		着陆阶段/(km·h ⁻¹)
	NASA公式	仿真分析	仿真分析
1 220	222	215	183
1 140	215	209	185
825	183	190	155

NASA滑水试验采用逐步加速方式,符合飞机起飞阶段滑行特征。以NASA公式结果为基准,3种胎压条件下水流加速仿真所得 v_c 与前者相差可在4%左右,符合以往研究误差控制范围(10%以下),表明该模型计算精度可满足滑水分析需要。对于飞机着陆阶段,水流减速冲击时 v_c 较加速冲击时仿真结果低12%~18%,与文献[1]给出的相差15%结论较为一致,符合研究规律。因

此后续研究均采用减速冲击方式模拟着陆过程中轮胎滑水行为,作为滑水分析最不利工况。

3 滑水风险量化分析

滑水风险分析目的在于计算飞机在不同着陆条件下发生滑水事故的可能性,从滑水形成物质基础(积水状况)和诱发条件(接地状况)两方面入手,计算影响因素共同发生的累积概率,实现滑水风险量化目标。

3.1 道面积水状况分布

降雨引起道面积水是飞机滑水事故的诱发条件之一,积水厚度与降雨强度、道面坡度和地表径流等因素相关。采用平面二维浅水方程计算道面横向积水分布,假定降雨与排水达到动平衡状态,积水保持相对静止且流速不为零,道面横向各截面流量固定(不考虑纵坡),忽略风应力、科氏力和二阶扩散项,修正二维浅水方程计算式为^[17]

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} h \\ v_x h \\ v_y h \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} v_x h \\ v_x^2 h + 0.5gh^2 \\ v_x v_y h \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{pmatrix} v_y h \\ v_x v_y h \\ v_y^2 h + 0.5gh^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q(t) \\ ghS_{0x} - ghS_{0y} \\ ghS_{1y} - ghS_{1x} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: h 为流体层厚度; v_x 、 v_y 为 x 与 y 方向流体速度; S_{0x} 、 S_{0y} 为 x 与 y 方向上坡度源项; S_{1x} 、 S_{1y} 为 x 与 y 方向的摩擦源项; $q(t)$ 为降雨强度,参考吴建军等^[18]提出的短时强降雨强度标准,选取0.8、1.5和2.5 mm/min 3种情况进行道面积水分布计算,编制 Matlab 程序求解道面积水横向分布如图4所示。

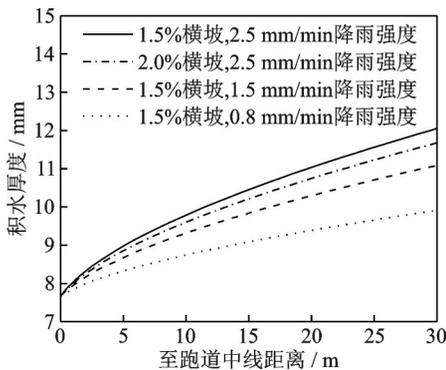


图4 道面积水横向分布

Fig.4 Transverse distribution of water film on pavement

图4中,道面积水厚度自中心至边缘非线性增加;0.8 mm/min降雨强度时1.5%横坡道面中心与边缘积水厚度差2.3 mm,随着降雨强度进一步增大,两者相差增至0.8 mm/min时的2.0倍和3.0

倍,不均匀分布特征增强;道面横坡为2.0%时,同等降雨强度条件下中心与边缘积水厚度差低于1.5%横坡情况,增大道面横坡度有利于加快横向排水,积水分布差异缓和。

显然,仅采用NASA公式计算 v_c 结果存在局限性,跑道中线至边缘轮胎滑水极限明显不同,临界滑水速度应为关于接地位置横坐标函数 $v_c(x)$,风险指标 $HRI(x)$ 也随之变化。应分段开展滑水仿真计算,作为风险量化分析基础。

3.2 接地滑行位置分布

如前文所述, $v_0 > v_c$ 是飞机滑水事故另一诱发条件。在着陆末段飞机尽力与跑道中线对齐,受气流干扰和人为操控影响仍可在小范围内发生摆动,由接地瞬时姿态决定轮胎实际作用位置及滑行路径^[19]。因此需考虑飞机接地滑行位置横向漂移分布,以确定滑水风险累积概率。基于不同跑道起降数据统计得出单个飞机轮胎接地位置横向分布如图5所示^[20-24]。

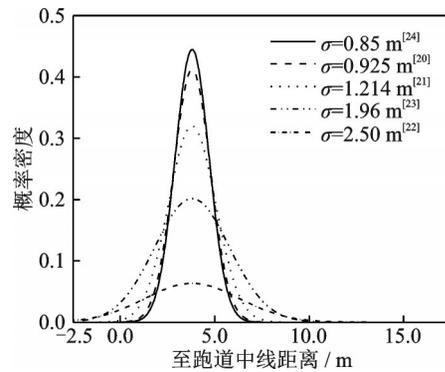


图5 飞机接地位置横向分布

Fig.5 Transverse distribution of aircraft landing position

图5中,飞机接地位置呈现正态分布特征,符合美国联邦航空管理局基于轮迹统计分析给出的飞机主轮横向分布规律^[19],概率密度峰值点位置由主力机型主起落架间距确定;当标准差小于1.0 m时,接地分布宽度不超过7.0 m,最大概率密度小于0.45;接地分布宽度随标准差增加而增大,概率密度峰值随之减小;部分机场标准差达到2.5 m,此时一侧起落架接地偏移范围已“跨过”跑道中线,并与另一侧接地横向分布曲线相互叠加,增大滑水风险分析难度。

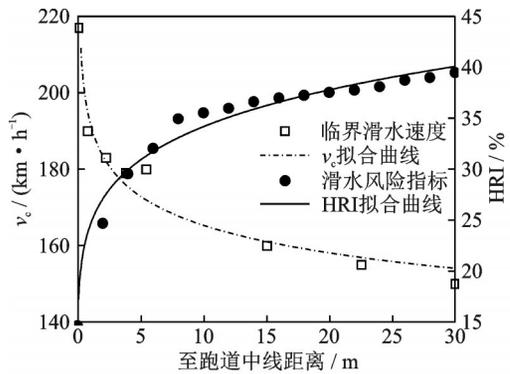
3.3 案例分析

研究表明飞机主起落架外侧轮胎滑水可早于其他轮胎发生,对飞机整体滑行安全最为不利^[13]。据此以空客A320机型主起落架外侧轮胎为案例开展滑水风险量化分析。轮胎基本参数如表2所示。

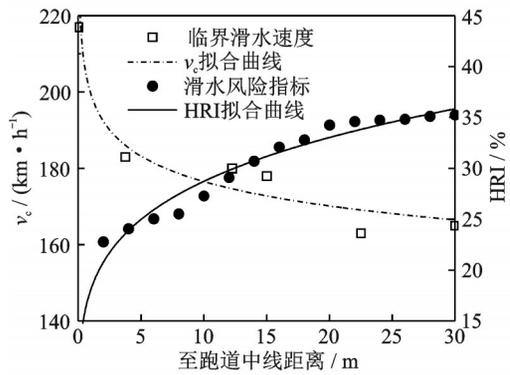
表2 A320主起落架轮胎参数

指标	数值	指标	数值
轮胎直径/mm	1 160	胎纹断面尺寸/mm ²	20×17
轮胎宽度/mm	430	两侧胎纹间距/mm	53
轮胎胎压/kPa	1 140	中心胎纹间距/mm	98
单轮轴载/kN	76.6	主起落架间距/m	7.6
纵向胎纹数量/条	4	轮心间距/m	0.93

依据图4中道面积水厚度分布,采用本文建立的滑水仿真分析模型,分段求解不同接地位置 v_c 结果并进行非线性拟合。对照QAR代表值曲线,计算滑水风险指标HRI(x)结果并在图6中绘出。



(a) 2.5 mm / min rain intensity and 1.5% transverse slope



(b) 2.5 mm / min rain intensity and 2.0% transverse slope

图6 临界滑水速度与HRI分布

Fig.6 Distribution of critical hydroplaning speed and HRI

与道面积水分布规律对应, v_c 自跑道中线至边缘呈指数型下降趋势,与Fwa等^[13]研究相符;以1.5%横坡道面为例,跑道边缘 v_c 较中线位置低57.7 km/h,当飞机出现较大幅度横向偏移时,可导致一侧起落架轮胎超出滑水界限条件;跑道中线两侧约10 m宽接地带范围内,滑水风险指标HRI低于30%,至跑道边缘位置HRI值增加至35%以上,飞机在跑道边缘接地时滑水事故几率明显高于中线区域。

沿宽度方向将跑道划分为 n 个小段,从图6可以得出各分段HRI(x_i)代表值,根据飞机接地位置

分布概率密度函数 $\omega(x)$,通过积分得出各分段接地概率 $P(x_i)$,此时第 i 段风险概率为

$$\beta_i(x) = \text{HRI} \left(x_i + \frac{\Delta x}{2} \right) \int_{x_i}^{x_i + \Delta x} \omega(x) dx \quad (5)$$

式中: x_i 为第 i 段至道面中线距离; Δx 为各分段道面宽度。采用全概率公式对各分段结果累积,得出当前道面整体滑水风险概率,有

$$\beta(x) = \sum_{i=1}^n \beta_i(x) = \sum_{i=1}^n \left[\text{HRI} \left(x_i + \frac{\Delta x}{2} \right) \int_{x_i}^{x_i + \Delta x} \omega(x) dx \right] \quad (6)$$

将各分段HRI(x_i)与 $P(x_i)$ 相乘得到飞机轮胎滑水风险值贡献率分布,结果如图7所示。

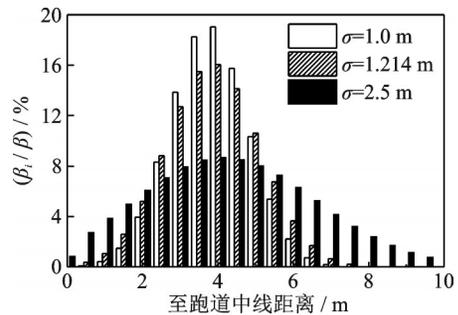


图7 轮胎滑水风险贡献率分布

Fig.7 Probability distribution of contribution ratio of hydroplaning risk of aircraft tire

图7中,轮胎滑水风险贡献率峰值出现在飞机着陆位置最大概率处(接地带区域),跑道边缘位置虽然HRI(x_i)较大,但接地概率 $P(x_i)$ 极低,对轮胎滑水风险贡献率较低,与道面积水厚度并非正相关关系;跑道中线位置HRI(x_i)与 $P(x_i)$ 均较小,因而轮胎滑水贡献率也保持在较低水平。

表3列举了多种工况组合下滑水风险结果,分析可知:(1)同等降雨强度条件下滑水风险概率随横向分布标准差增大而减小,降幅分别为1.7%和2.2%;(2)同等横向分布标准差条件下增大道面横坡度有助于促进积水排除和降低滑水风险,2.0%工况较1.5%工况风险值降低5.1%~5.6%,符合Benedetto^[11]的研究结论;(3)对比工况4、7和8结果降雨强度因素与飞机滑水风险概率正相关,降雨强度由0.8 mm/min增至2.5 mm/min时滑水风险增加13.1%;(4)工况4滑水风险概率高于其他工况,为表3中抗滑最不利条件,符合单因素分析规律。

综合来看,上述分析方法可针对特定道面状况、降雨条件和着陆机型实施滑水风险量化计算。与以往滑水判定方式相比,该方法可定量描述道面横坡及接地位置偏移等因素影响,判定方式符合滑

表3 不同工况下跑道整体滑水风险概率

Table 3 Overall probability of hydroplaning risk of runway under different conditions

工况	降雨强度/(mm·min ⁻¹)	坡度/%	飞机着陆横向分布标准差/m	滑水风险概率/%
1	2.5	2.0	1.000	23.4
2	2.5	2.0	1.214	23.2
3	2.5	2.0	2.500	21.7
4	2.5	1.5	1.000	29.0
5	2.5	1.5	1.214	28.8
6	2.5	1.5	2.500	26.8
7	1.5	1.5	1.000	22.5
8	0.8	1.5	1.000	15.9

水事故统计规律^[25]。滑水风险分析是提出安全措施的理论基础^[26],基于该方法可支撑飞机滑水风险精细化评价。

4 结 论

(1)本文提出了基于飞机起降数据和临界滑水速度的滑水风险量化指标,将飞机接地滑行全过程纳入分析范围,改进以往二元滑水判定方式。

(2)本文建立了适应着陆滑行阶段的飞机轮胎-积水道面流固耦合仿真模型,探讨道面积水分布与飞机接地位置横向漂移对滑水风险的影响。

(3)案例分析结果表明同等降雨强度条件下滑水风险概率随飞机接地横向分布标准差增大而减小;增大横坡可加快积水排除并降低滑水风险,降雨强度与飞机滑水风险正相关;基于全概率公式可对上述因素影响实施定量分析。

为简化分析条件,本文仅探讨由横坡度引起道面积水一维不均匀分布问题。由于道面纵坡及轮辙等的共同作用,实际积水情况要复杂得多,将在后续研究中探讨二维不均匀积水下滑水风险问题。

参考文献:

- [1] VAN ES G W H, ROELEN A L C, KRUIJSEN E A C, et al. Safety aspects of aircraft performance on wet and contaminated runways: NLR-TP—2001-216 [R]. Amsterdam, Netherlands: National Aerospace Laboratory, 2001.
- [2] ONG G P, FWA T F. A stochastic-mechanistic procedure to evaluate aircraft landing hydroplaning risk on runways[C]//Proceedings of Transportation Research Board 90th Annual Meeting. Washington D C, USA: Transportation Research Board, 2011.
- [3] 朱晟泽. 基于路面宏观纹理的轮胎抗滑行为数值模拟研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
ZHU Shengze. Numerical simulation of tire skid resistance based on pavement macro-texture [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [4] 冯婷. 湿滑路面轮胎滑水机理研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
FENG Ting. The study of tire hydroplaning mechanism on wet road [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2018.
- [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 Xingyi, PANG Yafeng, YANG Jian, et al. Analysis on the hydroplaning of aircraft tire under real texture pavement conditions [J]. China Journal Highway Transportation., 2020, 33(10): 159-170.
- [6] 黄晓明, 刘修宇, 曹青青, 等. 积水路面轮胎部分滑水数值模拟[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(9): 113-121.
HUANG Xiaoming, LIU Xiuyu, CAO Qingqing, et al. Numerical simulation of tire partial hydroplaning on flooded pavement [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(9): 113-121.
- [7] 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, 80.
ZHAO Anjia, SUN Liying, MENG Zheli. A search for mechanism and preventability measure of the aircraft tire' hydroplaning [J]. Aircraft Design, 2015, 35(5): 46-51, 80.
- [8] 李岳, 蔡靖, 宗一鸣. 湿滑道面飞机轮胎临界滑水速度数值仿真[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(5): 90-101.
LI Yue, CAI Jing, ZONG Yiming. Numerical simulation of critical hydroplaning speed of aircraft tire under wet pavement condition [J]. Journal of Transportation Engineering, 2017, 17(5): 90-101.
- [9] HUEBNER R S, REED J R, HENRY J J. Criteria for predicting hydroplaning potential [J]. Journal of Transportation Engineering, 1986, 112(5): 549-553.
- [10] VAN ES G W H. Hydroplaning of modern aircraft tires: NLR-TP—2001-242 [R]. Amsterdam Netherlands: National Aerospace Laboratory, 2001.
- [11] BENEDETTO A. A decision support system for the safety of airport runways: The case of heavy rain-

- storms[J]. *Transportation Research Part A*, 2002, 36(8): 665-682.
- [12] FWA T F, ONG G P. Transverse pavement grooving against hydroplaning II: Design[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2006, 132(6): 449-457.
- [13] FWA T, PASINDU H, ONG G. Critical rut depth for pavement maintenance based on vehicle skidding and hydroplaning consideration[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2012, 138(4): 423-429.
- [14] 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.
- [15] FWA T F, ANUPAM K, ONG G P. Relative effectiveness of grooves in tire and pavement for reducing vehicle hydroplaning risk[J]. *Transportation Research Record*, 2010, 2155(1): 73-81.
- [16] 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.
ZONG Yiming. Study on the mechanical properties of aircraft tire and safety problem in landing on wet pavement[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017.
- [17] MA Y, GENG Y, CHEN X. Water distribution influenced by pavement alignment design[J]. *Journal of Transportation Engineering Part B Pavements*, 2020, 146(4): 04020058.
- [18] 吴建军, 袁成松, 周曾奎, 等. 短时强降雨对能见度的影响[J]. *气象科学*, 2010, 30(2): 274-278.
WU Jianjun, YUAN Chengsong, ZHOU Zengkui, et al. Impact of short term heavy rainfall on the monitoring and forecast of sudden visibility descent[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2010, 30(2): 274-278.
- [19] FAA. Airport pavement design and evaluation, AC 150/5320-6E[R]. USA: [s.n.], 2009.
- [20] 袁捷, 史恩辉, 雷电, 等. 上海虹桥国际机场飞机轮迹横向偏移规律研究[J]. *中国民航大学学报*, 2015, 33(2): 1-6.
YUAN Jie, SHI Enhui, LEI Dian, et al. Lateral deviation pattern and model of aircraft wheel path on Shanghai Hongqiao International Airport[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2015, 33(2): 1-6.
- [21] 程国勇, 张扬扬, 周浩. 机场跑道轮迹测试及横向分布参数研究[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(11): 22-30.
CHENG Guoyong, ZHANG Yangyang, ZHOU Hao. Study on wheel track test and lateral distribution parameters of airport runway[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37(11): 22-30.
- [22] 雷电, 赵鸿铎, 吴璨. 飞机轮迹横向分布测试系统的比选分析[J]. *西部交通科技*, 2021(10): 63-68.
LEI Dian, ZHAO Hongduo, WU Can. The analysis and selection for aircraft deviation test system[J]. *Western China Communications Science & Technology*, 2021(10): 63-68.
- [23] BARNES T, DEFIORIO T, MICKLOS R. Video landing parameter survey-washington national airport[J]. *Environmental Science*, 1999, 7: 108613011.
- [24] 张品峰, 蒋小伟. 考虑轮迹横向偏移的机场水泥道面分仓设计[J]. *黑龙江交通科技*, 2019, 42(4): 15-16.
ZHANG Pinfeng, JIANG Xiaowei. Soil design of airport cement pavement considering lateral offset of wheel trace[J]. *Heilongjiang Jiaotong Keji*, 2019, 42(4): 15-16.
- [25] Aviation Safety Network. Accident description[EB/OL]. (2020-08-01) [2020-10-01]. <https://aviation-safety.net/database/events/dblist.php?Event=LTLW>.
- [26] 高清平. 基于粗糙集理论的危险化学品运输风险分析[J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21(11): 103-108.
GAO Qingping. Risk analysis for hazardous materials transportation based on rough set theory[J]. *China Safe Science Journal*, 2011, 21(11): 103-108.

(编辑:张蓓)