

文章编号:1671-1637(2026)08-0231-12

侧风非均匀积水道面耦合作用下飞机偏出跑道的行为特征

张耀华¹, 种小雷^{*1}, 任怡楠², 周则圆¹

(1. 空军工程大学 陕西 西安 710038; 2. 中国民航大学 交通科学与工程学院, 天津 300300)

摘要:建立了侧风与道面非均匀积水耦合动力学模型,分析了侧风气动力矩、积水不平衡阻力矩与前轮纠偏力矩之间的作用关系;构建了基于欧拉-拉格朗日耦合算法与机械系统动力学自动分析的联合仿真体系,实现了从局部轮组滑水作用力识别到整机滑跑偏出响应模拟的跨尺度传递;研究了积水厚度差异、侧风速度及侧风方向对飞机质心轨迹、侧向偏移量和机身偏转角的影响规律,提出了以18.7 m质心侧向偏移量作为A320飞机在45 m宽跑道上发生偏出跑道的安全判据。研究表明:在240 km·h⁻¹速度接地时,10 mm的积水厚度差可造成16 kN的摩阻力差异;6 mm积水厚度差可造成11.6 m最终侧向偏移;道面湿滑放大了侧风的偏出效应,相同侧风条件下湿滑跑道飞机最大偏转角约为干跑道的2.8倍;在侧风与非均匀积水共同作用下,飞机侧向偏移显著增加,并可能在滑跑过程中突破跑道安全限值;非均匀积水通过左右主起落架纵向阻力差诱发偏转力矩,是飞机偏出跑道的重要内在驱动力;侧风主要通过气动侧向力和偏航力矩改变飞机横向往运动状态,并在湿滑道面条件下进一步放大偏出效应;当积水力矩与侧风力矩方向相同时,飞机偏转姿态显著增大,当二者作用力方向同向叠加时,飞机轨迹偏离速率明显提高。研究结果可为跑道积水监测、侧风运行限制及着陆滑跑偏出风险评估提供理论依据和数据支撑。

关键词:机场工程;轮胎滑水;多体动力学;偏出跑道;侧风;非均匀积水

中图分类号:V351.11 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.324

Characteristics of aircraft runway veer-off behavior due to coupled action of crosswind and uneven water accumulation on pavement

ZHANG Yao-hua¹, CHONG Xiao-lei^{*1}, REN Yi-nan², ZHOU Ze-yuan¹

(1. Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China; 2. College of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: A coupled dynamics model for aircraft runway veer-off under the combined action of crosswind and uneven water accumulation on pavement was established. The relationship among the aerodynamic moment induced by crosswind, the unbalanced drag moment induced by water accumulation, and the correcting moment of the nose wheel was analyzed. A co-simulation system based on the coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) algorithm and Automatic Dynamic Analysis of

出版历程:2025-12-23 收稿,2026-04-04 修回,2026-05-27 录用

作者简介:张耀华(1999-),男,陕西神木人,工学博士研究生,E-mail:18098046259@163.com。

* 通信作者:种小雷(1973-),男,陕西西安人,教授,博士生导师,工学博士,E-mail:kgy_cxl@163.com。

引用格式:张耀华,种小雷,任怡楠,等.侧风非均匀积水道面耦合作用下飞机偏出跑道的行为特征[J].交通运输工程学报,2026,26(8):231-242.

Citation: ZHANG Yao-hua, CHONG Xiao-lei, REN Yi-nan, et al. Characteristics of aircraft runway veer-off behavior due to coupled action of crosswind and uneven water accumulation on pavement[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(8): 231-242.

Mechanical Systems (ADAMS) was constructed. The cross-scale transfer from local wheel-set hydroplaning force identification to full-aircraft landing-roll veer-off response simulation was achieved. The effects of water-depth difference, crosswind speed, and crosswind direction on the center-of-mass trajectory, lateral offset, and yaw angle of the aircraft were investigated. A safety criterion was proposed, in which a center-of-mass lateral offset of 18.7 m was taken as the veer-off threshold for an A320 aircraft on a 45 m wide runway. The results indicate that a water-depth difference of 10 mm causes a friction resistance difference of 16 kN at a touchdown speed of $240 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. A water-depth difference of 6 mm causes a final lateral offset of 11.6 m. Wet pavement amplifies the veer-off effect of crosswind. Under the same crosswind conditions, the maximum yaw angle of the aircraft on a wet runway is about 2.8 times that on a dry runway. Under the combined action of crosswind and uneven water accumulation, the lateral offset of the aircraft increases significantly, and it may exceed the runway safety limit during the landing roll. Uneven water accumulation induces a yawing moment through the longitudinal resistance difference between the left and right main landing gears, and it is an important internal driving force for aircraft veer-off. Crosswind mainly changes the lateral motion state of the aircraft through aerodynamic side force and yawing moment, and it further amplifies the veer-off effect under wet pavement conditions. When the water-induced moment and the crosswind-induced moment have the same direction, the aircraft yaw attitude increases significantly. When the two forces act in the same direction, the trajectory deviation rate of the aircraft increases obviously. The results provide a theoretical basis and data support for runway water accumulation monitoring, crosswind operation limitation, and landing-roll veer-off risk assessment.

Keywords: airport engineering; tire hydroplaning; multibody dynamics; runway veer-off; crosswind; uneven water accumulation

Publication history: Received 2025-12-23; Received in revised form 2026-04-04; Accepted 2026-05-27

* **Corresponding author:** CHONG Xiao-lei, professor, PhD, E-mail: kgy_cxl@163.com.

0 引 言

飞机偏出跑道是威胁全球航空安全的主要风险之一^[1-5]。根据国际航空运输协会(International Air Transport Association, IATA)的安全报告,此类事故在恶劣天气条件下尤为高发,且在所有事故类型中占据极高比例^[6-8]。在诸多导致偏出跑道的因素中,强降雨引起的道面积水和伴随的强侧风为两大关键诱因^[9]。积水导致道面处于低摩擦运行状态,极易诱发轮胎滑水,进而导致飞机丧失方向控制力。同时,强侧风则会直接对机体施加宏观横向气动力和偏航力矩,干扰飞机的航向保持。

针对道面积水安全问题,此领域多聚焦于均匀积水条件下的滑水机理研究。NASA的经典研究^[10]提出的临界滑水速度的经验公式为滑水研究提供了理论基础。随着有限元仿真模拟的成熟,后续研究通过欧拉-拉格朗日耦合(Coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)算法对轮胎在均匀水膜中的流体

动力、摩擦阻力特性进行了深入探讨,并拓展了临界滑水速度的适用范围和滑水极限的判定条件^[11-12]。但真实道面积水受轮辙和平整度等多因素影响,往往呈现非均匀分布特征,易出现两侧飞机主起落架轮胎接地摩擦差异,导致飞机失去操纵能力^[13]。对此,部分学者进行拓展研究。李少杰^[14]建立了机械系统动力学自动分析(Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System, ADAMS)模型进行飞机滑跑动态分析,比对积水差异引发的道面不平衡摩擦对飞机滑跑影响。李岳等^[15]提出了非均匀积水临界长度评价指标,有效量化了非均匀积水引发的偏转累积作用。上述研究结论均基于无侧风假设,未能反映侧风与非均匀积水的耦合作用。

在侧风影响方面,现有研究已广泛认识到侧风是飞机着陆阶段横向控制的主要挑战^[16]。相关工作主要针对进近阶段操纵品质展开。刘海良等^[17]利用数字虚拟飞行技术建立整机模型,对侧风条件下飞机飞行姿态的操稳特性和安全性进行了分析。

陆军等^[18]开发了一种基于小脑神经网络CMAC与PID算法并行机制的航向控制策略,并借助OpenGL技术构建三维模型,用于模拟飞机着陆阶段的连续动态过程。Lungu等^[19]开发一种用于飞机在横向平面的控制系统,在横向平面仿真中表现出对强侧风的良好鲁棒性。上述研究核心在于评估飞机的操作品质以及控制策略,对飞机地面滑跑阶段受侧风扰动分析仍有欠缺;多数研究局限于单因素分析,针对侧风非均匀积水道面耦合作用下的整机滑行机理和量化表征不足。

对此,本文建立耦合动力学理论模型,从力学机理上分析侧风与非均匀积水产生偏转力矩的叠加与

抵消效应。通过基于CEL算法与ADAMS多体动力学的联合仿真体系,从局部到宏观视角量化不同等级和方向的侧风与非均匀积水耦合作用下对飞机偏出轨迹、机身偏转角的影响,为道面污染物管理与飞行安全保障提供数据支撑。

1 耦合动力学理论模型

1.1 坐标系定义及运动学描述

为揭示侧风与非均匀积水耦合作用下飞机滑跑偏出机理,基于刚体动力学和气动力学原理,建立如图1的耦合动力学理论模型,旨在从理论解析关键动力学方程,分析扰动力矩对飞机滑行稳定性的影响。

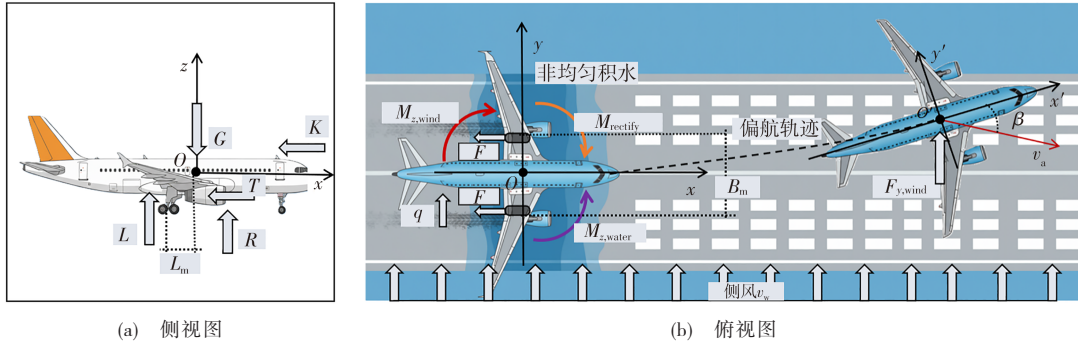


图1 耦合动力学理论模型

Fig. 1 Coupled dynamics theoretical model

图1中,以接地滑行起点飞机质心位置 O 为原点建立坐标系, x 轴与跑道中线重合, y 轴垂直于跑道中线, z 轴为竖直方向。 $x'O'y'$ 坐标系基于飞机机身建立,属局部坐标系,原点 O' 与飞机质心重合, x' 轴与飞机轴线方向保持一致, y' 轴垂直于机身轴线方向。为突出分析重点,简化分析条件作如下假定:①滑行过程中飞机近似为刚体,忽略机体变形影响;②飞机机身无翻滚运动,仅考虑水平面内偏出和侧滑;③侧风风向沿 y 轴,大小恒定。

竖直方向上机身自重 G 、机翼升力 L 与道面支撑力 R 在竖向达到动态平衡。 R 由道面支撑力 R_p 和动水抬升力 R_h 两部分组成; G 按飞机着陆质量 m 计算,故 $G=mg$, g 为重力加速度;由伯努利方程计算飞机机翼升力 L 为

$$L = \frac{1}{2} C_{\text{lift}} \rho_{\text{air}} v^2 S_{\text{wing}} \quad (1)$$

式中: C_{lift} 为量纲为1的升力系数; ρ_{air} 为空气密度,非高原地区近似取 $1.293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; S_{wing} 为机翼面积; v 为滑行速度,在 $230 \sim 260 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 范围内连续改变^[20]。

水平方向上,飞机为当前坐标系内发生平面运动的三自由度体系。由机身惯性力、空气阻力 K 、广

义摩阻力 F 、发动机反推力 T 共同组成作用力系; F 主要由湿摩擦力 F_p 和积水附加阻力 F_h 两部分组成, F_p 通过轮胎附着系数 φ 与 R_p 相乘得到, F_h 与轮胎滑水状态相关且在滑水临界时刻达到峰值^[21],其计算式为

$$F_h = \frac{1}{2} n C_{\text{resist}} \rho_{\text{water}} v^2 S_{\text{tire}} \quad (2)$$

式中: n 为轮组系数; ρ_{water} 为水体密度,取 $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_{resist} 为阻力系数; S_{tire} 为轮胎前缘积水接触面积。

1.2 非均匀积水偏出机理

飞机经过非均匀积水区域时,轮胎水膜相互作用产生非对称力系。积水较深一侧轮胎受动水压力明显大于较浅一侧,导致轮胎被抬升并诱发滑水现象,与道面有效接触面积减小,相应附着系数 φ 发生非线性衰减。此时飞机受力呈现明显的不平衡特征。较深一侧轮胎所受 F_h 增大, F_p 减小,左右主起落架受力差异将产生绕 z 轴的非对称阻力扭矩 $M_{z, \text{water}}$ 为

$$M_{z, \text{water}} = \frac{1}{2} B_m F_{h, L} - \frac{1}{2} B_m F_{h, R} + L_m \varphi_L R_{p, L} - L_m \varphi_R R_{p, R} \quad (3)$$

式中:下标 L、R 分别代表左、右侧主起落架; B_m 为两侧主起落架间距; L_m 为主起落架到质心距离,可由飞机设计手册查得。

$M_{z,water}$ 会迫使机体向阻力较大一侧偏转。其次,积水存在会降低轮胎侧偏刚度,加剧了侧滑失稳风险。

1.3 侧风偏出机理

飞机气动力学模型可视作“翼身+垂尾”组合。当飞机遭遇垂直侧风 v_w 时,会与机身前进速度矢量合成产生侧滑角 β 。侧风作为宏观空气扰动,在机翼和机身侧面诱发伯努利效应,形成动态压力场,作用机体的动压 q 可表示为

$$q = \frac{1}{2} \rho_{air} v_a^2 \quad (4)$$

式中: v_a 为飞机相对于空气的运动速度。

侧风直接产生的气动侧向力 $F_{y,wind}$ 和偏转力矩 $M_{z,wind}$ 表达式为^[22]

$$F_{y,wind} = \frac{1}{2} C_Y \rho_{air} v_a^2 S_{wing} \quad (5)$$

$$M_{z,wind} = \frac{1}{2} C_Q \rho_{air} v_a^2 S_{wing} b \quad (6)$$

式中: b 为机翼翼展,由查表可得; C_Y 为量纲为1的飞机侧风风力系数; C_Q 为偏航力矩系数,数值与机身、机翼及垂尾受力权重贡献有关。

C_Y 、 C_Q 权重贡献可用侧向力导数 $C_{Y\beta}$ 和偏航力矩导数 $C_{Q\beta}$ 表示^[23]

$$\begin{cases} C_{Y\beta} = \frac{\partial C_Y}{\partial \beta} \\ C_{Q\beta} = \frac{\partial C_Q}{\partial \beta} \end{cases} \quad (7)$$

$C_{Y\beta}$ 、 $C_{Q\beta}$ 二者数值可协同评估飞机滑行姿态,其大小与飞机型号有关。需指出, $C_{Y\beta}$ 和 $C_{Q\beta}$ 旨在对侧风扰动机理进行量化解析。在实际滑跑的大侧滑工况下,气动特性具有显著非线性。在后续的数值仿真中可实时捕获机身相对气流的动态矢量,并考虑气动中心偏移效应,以更精确地表征非线性气动力响应。

$F_{y,wind}$ 会迫使飞机产生侧向加速度并向下风向发生偏移; $M_{z,wind}$ 会引发风标效应,使飞机机头转向迎风方向。在地面滑跑阶段,机身过度的迎风偏转会导致前轮导向转角与实际运动方向分离,进而诱发剧烈侧滑甚至侧翻风险。

1.4 耦合作用机理

在真实非均匀积水跑道侧风着陆场景中,在侧

风与非均匀积水共同作用下,飞机的动力学平衡遵循牛顿-欧拉方程

$$I_z \omega_z = M_{z,wind} + M_{z,water} + M_{rectify} \quad (8)$$

式中: I_z 为飞机绕 z 轴的机身转动惯性矩; ω_z 为侧风与非均匀积水耦合作用下的偏转角加速度; $M_{rectify}$ 为前轮转向系统的纠偏控制力矩,受前轮转角 α 和 φ 限制。

形式上,总扰动力矩由各项矢量合成,但在物理机制上,三者呈现出显著的非线性耦合特征,积水诱导的初始偏转会直接改变 β ,进而改变 $M_{z,wind}$ 的大小和方向;同时积水存在导致 φ 急剧衰减,使得 $M_{rectify}$ 的有效能力被显著压缩。其次,飞机的偏出行为取决于 $M_{z,wind}$ 气动项、 $M_{z,water}$ 水动项与 $M_{rectify}$ 轮胎纠偏项的动态博弈。且耦合作用具有较强的方向敏感性,存在叠加和抵消效应:当 $M_{z,water}$ 与 $M_{z,wind}$ 符号相同时,总扰动力矩叠加,迅速消耗 $M_{rectify}$ 纠偏余量,飞机偏转效应远大于单一因素;当符号相反时,气动力矩与积水力矩相互抗衡,飞机可能表现出复杂的动态震荡特征。因此飞机的偏出过程并非各单一因素影响的线性累加,而是基于运动状态相互反馈的非线性动态过程。耦合性来源于各项对共同状态的非线性依赖与方向敏感叠加。

综上,本节所建立的理论模型在定性层面明确了各物理量的作用路径,揭示了侧风和非均匀积水导致的偏出机理及耦合条件下的方向效应。考虑到轮胎滑水过程中复杂的流固耦合现象及气动效应的非线性动态影响,仅依靠理论解析难以精确获取不同组合下的参数演变规律,无法定量描述两类因素在偏出作用的具体贡献权重。对此,有必要借助数值仿真模型等手段进一步对耦合效应进行风险量化研究。

2 基于 CEL 算法与 ADAMS 多体动力学的联合仿真体系

为克服理论模型的量化局限性,故建立基于 CEL 算法与 ADAMS 多体动力学的联合仿真体系。以构建侧风非均匀积水跑道飞机着陆滑行场景,模拟局部轮胎滑水到宏观飞机受力偏出演变过程,量化分析飞机偏出跑道风险潜在影响。

2.1 CEL 轮组滑水仿真

在 ABAQUS 软件中建立如图 2 所示的 A320 轮组滑水仿真模型,模型由道面、流体域(积水空气)和轮组 3 个部分构成。其中道面采用 S8R 壳单元进行

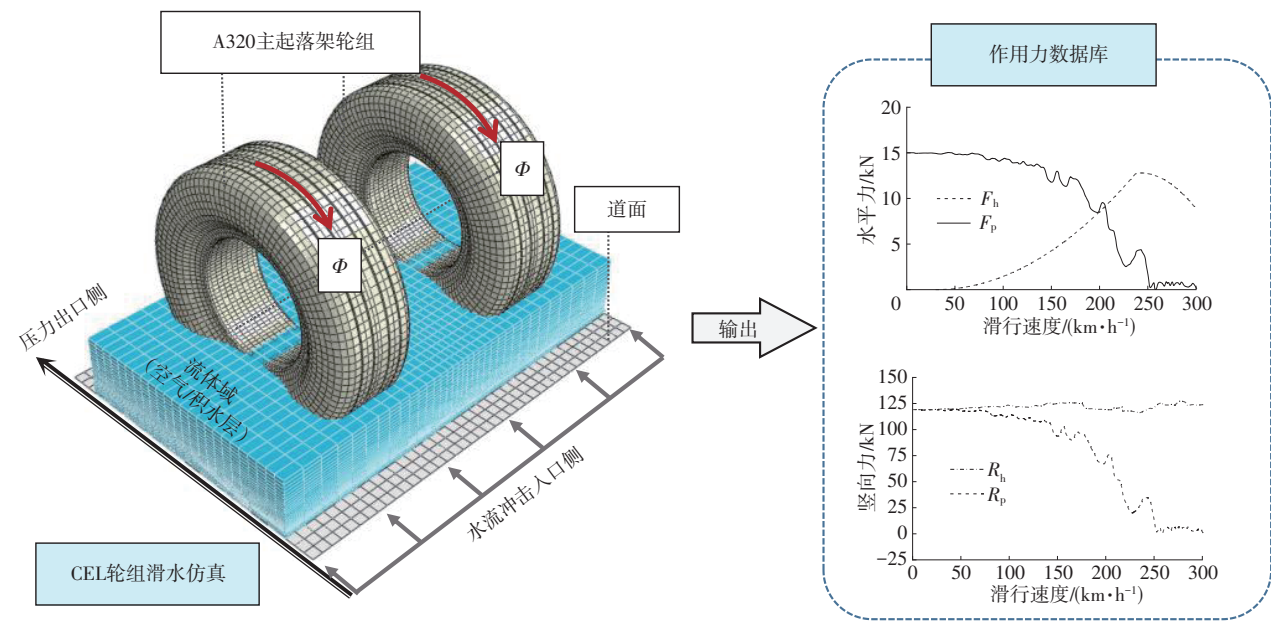


图2 A320轮组滑水仿真模型

Fig. 2 A320 wheel set hydroplaning simulation model

模拟,并设为刚体以确保接触界面的数值稳定性;轮胎规格为46×17R20,采用拉格朗日网格离散,设定单元类型为C3D8R(八节点线性六面体减缩积分单元),以确保橡胶材料超弹特性的有效捕捉;轮胎下部的流体域包含积水层与空气层,均采用欧拉网格离散(EC3D8R单元)。积水层厚度可根据工况动态调整;上覆空气层可为溅水和喷流提供表达空间,确保流体运动真实性。

仿真采用动流场冲击滚动轮胎方式,模拟着陆滑行轮胎的相对运动过程;轮胎关于轮毂中心实施刚性耦合,在轴载作用下绕轮毂中心转动。其转动角速度 Φ 与水流速度实时匹配,模拟轮胎自由滚动状态;模型中的轮胎-积水-道面接触、摩擦模型形式、参数取值依据及模型适用性,前期文献已作详细说明^[24-26],本文不再重复展开,相关建模参数详见表1。

表1 轮组滑水仿真模型参数

Table 1 Wheel set hydroplaning simulation model parameters

类别	指标参数	数值	类别	指标参数	数值
轮胎规格	轮胎外径/mm	1 168	轮毂参数	轮毂密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 800
	轮胎内径/mm	508		弹性模量/MPa	2×10^4
	轮胎宽度/mm	432	流体参数	流体初始密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 000
	轮胎胎压/kPa	1 140		动力黏度/($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	1.0×10^3
	轮胎轴载/kN	153.2		积水范围/ m^3	$1.5\times 1.5\times (0.3+h)$, h 为积水深度
	沟槽深度/mm	17	道面材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 850
	沟槽数量	4		弹性模量/MPa	3.5×10^4
	沟槽宽度/mm	20		泊松比	0.15

仿真目的在于求解局部轮胎滑水全过程作用力系,重点输出竖向 R_p 、 R_h 以及水平向 F_h 、 F_p 随 v 变化的时程结果。该数据可表征轮胎从达到滑水极限直至脱离滑水全过程的道面作用力变化规律。基于此,构建覆盖道面允许起降积水厚度范围的作用力数据库,作为关键输入支撑后续ADAMS整机动力学仿真。

2.2 ADAMS动力学仿真

基于ADAMS平台建立了如图3的A320飞机

着陆滑跑多体动力学模型,开展侧风非均匀道面飞机着陆滑行动力学仿真,从而获取相应偏出特征参数。

考虑到ADAMS软件在复杂3D建模精度方面的局限性,故在CATIA软件中依据A320结构手册建立包含机身、起落架及前轮转向系统在内的足尺几何模型^[27],共计865件独立几何实体;并以Parasolid格式导入ADAMS仿真环境并完成结构装配;根据A320真实物理参数对各部件进行质量、重

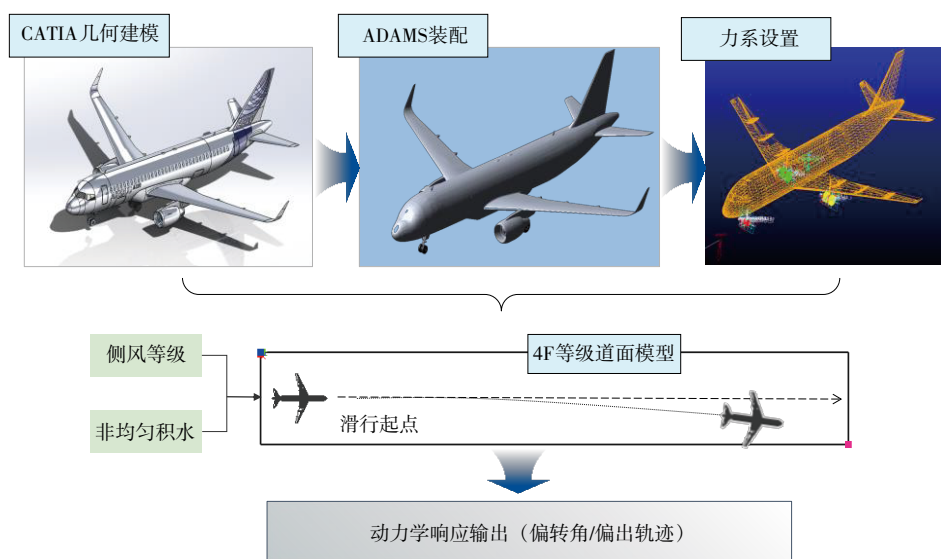


图3 A320飞机着陆滑跑多体动力学模型

Fig. 3 Multi-body dynamics model for landing roll of A320 aircraft

心、转动惯量等物理属性定义;并通过转动副、移动副、圆柱副、胡克副和球副等约束构建整机拓扑关系^[28],确保运动学关系的正确性。

针对前轮转向系统,模型采用转动副定义前起落架支柱与机身的相对运动关系。考虑到本文旨在量化环境因素导致的偏出风险,仿真设定为无人干预模式,即不施加主动转向控制力矩。为准确模

拟液压转向作动筒在非操纵状态下的位置保持特性与抗扰能力,在转向自由度上施加了等效扭转刚度与旋转阻尼,其数值依据A320地面维护手册设定(见表2)。左右主起落架积水差异通过改变整机滑行状态,使前轮在轮胎侧向力与回正约束作用下出现被动的对地转角响应,该转角属于ADAMS系统动力学响应结果,而非预设输入。

表2 ADAMS仿真参数

Table 2 ADAMS simulation parameters

参数	数值	参数	数值
机长/m	37.57	垂直刚度/(kN·m ⁻¹)	2 400
翼展/m	35.80	垂直阻尼/(N·s·m ⁻¹)	28
主起落架横向间距/m	7.59	纵向滑移刚度/(N·m ⁻¹)	2 000
机身底部距地面/m	1.72	机翼面积/m ²	122.4
主起落架分配系数	0.95	侧风风速/(m·s ⁻¹)	0~17
单侧轮组积水厚度/mm	3~13	受风面积/m ²	31
积水厚度差/mm	0~10	侧风合力/kN	0~17.67
等效扭转刚度/(N·m·rad ⁻¹)	3.5×10^5	旋转阻尼系数/(N·m·s·rad ⁻¹)	800

在ADAMS中以地面坐标系统内设置风场参考标记点,设定 v_w 垂直跑道中线;ADAMS模型通过传感器实时提取机身质心速度矢量并与外部风速矢量合成,动态解算瞬时相对动压与侧滑角,模型根据文献[29]提供的气动数据,利用样条插值实时计算非线性的侧向力系数和偏航力矩系数,进而动态计算 $F_{y,wind}$ 和 $M_{z,wind}$,并将其作为变量函数施加于机身气动中心,以精确复现滑跑过程中随速度变化的气动干扰效应。

在仿真步长中通过ADAMS求解器实时获取轮胎瞬时速度及所在积水深度。轮胎竖向及水平向外力矢量通过编写ADAMS求解器控制函数(AKISPL

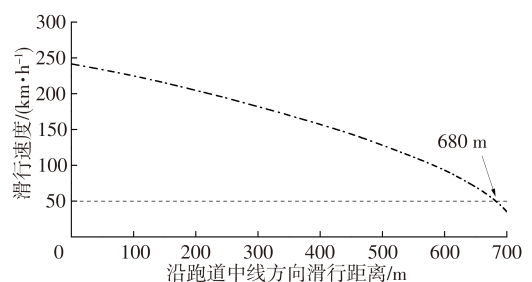
和IF逻辑函数)进行定义。函数以轮胎瞬时速度和所在位置积水深度为自变量,实时调用第2.1节生成的CEL作用力数据库,插值计算出当前 R_p 、 R_h 、 F_h 和 F_p 力系,用于修正ADAMS轮胎模型中的有效载荷与可用附着系数及侧偏刚度;轮胎侧向力由ADAMS轮胎模型计算;侧风通过改变整机侧偏角、偏航响应及载荷转移间接影响轮胎工况,以保证轮胎滑水机理与气动外载效应的分层清晰。

通过STEP阶跃函数添加发动机推力曲线^[30],模拟着陆滑跑过程中双发反推作用。计算开始后:飞机以给定的接地初速度沿跑道中线滑行,在相关作用力系下进行变减速运动,以飞机偏出跑道边缘

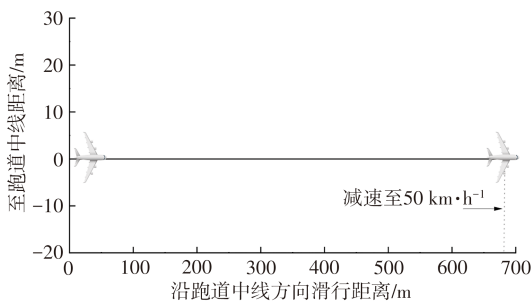
或滑行速度降至 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以下作为结束分析条件,提取着陆滑行全过程运动学特征结果。建模相关参数在表2列出。

2.3 模型验证

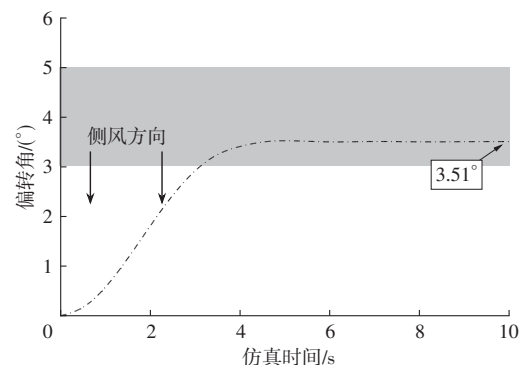
为确保联合仿真模型在侧风与积水工况下的置信度,本节针对关键子模型与侧向动力学响应进行了分层验证:首先选取无侧风、干跑道条件作为基准工况开展验证分析。该工况下外部扰动最小,有利于在排除侧风气动力与道面附加阻力等复杂因素影响的前提下,重点检验多体动力学建模、起落架与轮胎参数设定以及制动与反推力模型的合理性。基准工况仿真结果如图4(a)、(b)所示,飞机由接地初始速度 $240 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 减速至 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的滑跑距离为 680 m ,位于《飞行品质监控项目规范 第1部分:空客系列飞机》(MH/T 2005.1—2007)给出的典型着陆距离区间($300 \sim 750 \text{ m}$)。同时,在无偏转外因作用



(a) 速度变化结果



(b) 轨迹变化结果



(c) 侧向气动响应验证

图4 仿真模型验证结果

Fig. 4 Simulation model validation results

下,飞机质心轨迹始终保持在跑道中线附近,未出现非物理振荡或数值发散现象。

图4(c)针对侧风响应特性,设定干燥道面,侧风风速 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的工况进行仿真。结果显示,为保持跑道中线滑行,飞机需保持 3.51° 的偏转角以平衡侧风气动力矩。根据空气动力学理论计算无地面摩擦阻情况下飞机偏转角结果约为 7° ,由于地面滑跑阶段轮胎侧向力的约束作用,使得仿真结果小于理论值,符合地面滑跑的物理特征,验证了机轮道面作用模型对侧向气动响应的正确修正。且该数值落入A320飞行机组操作手册(FCOM)及相关气动数据库中推荐的侧风修正参数区间($3^\circ \sim 5^\circ$)^[31],表明ADAMS整机模型能正确反映侧风诱导的风标效应与侧向平衡规律。

模型验证结果表明:所建模型能够合理再现飞机着陆滑跑的动力学特征,具备开展侧风与非均匀积水等复杂耦合工况分析的基础可靠性。基于该基准一致性验证,下文进一步引入非均匀积水与侧风扰动,对飞机偏出行为进行定量研究。

3 仿真结果分析

3.1 仿真工况设计

为系统探究复杂气象环境对着陆滑跑安全的影响机理,基于第2节构建仿真工况矩阵见表3。仿真设定A320机型以常规着陆质量(50 t)和标准接地速度($240 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$)为基准状态,选取积水厚度差异 Δh 和侧风速度 v_w 作为关键控制变量。为突出横向非均匀积水导致的两侧受力差异机理并保证工况可对比性,适度简化分析条件假定沿跑道纵向无积水变化,忽略排水条件、局部不平整与降雨时空变化影响。积水工况覆盖《航空承运人湿跑道和污染跑道运行管理规定》的道面允许起降积水范围; v_w 设置区间为 $0 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,方向沿 y 轴正向取正值,满足覆盖CCAR-25适航章程及A320飞行手册规定的运行极限;结合《民用机场飞行区技术标准》(MH 5001—2013)及国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)附件14的相关规定,4F级跑道标准宽度为 45 m (半宽为 22.5 m)。A320主起落架外轮距约为 7.59 m (半宽约为 3.8 m)。当飞机质心侧向偏移量超过 $22.5 - 3.8 = 18.7 \text{ m}$ 时,意味着外侧主起落架轮胎物理上已驶出跑道边界,即判定为发生偏出跑道事故。故取 18.7 m 为质心侧偏距离的安全限值。

表 3 仿真工况

Table 3 Simulated operating conditions

工况组别	编号	左侧积水深度/mm	右侧积水深度/mm	积水厚度差异 Δh /mm	侧风速度 $v_w/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
A 组:积水影响	A1	5	3	2	0
	A2	9	3	6	0
	A3	13	3	10	0
B 组:侧风影响	B1	0	0	0	-5
	B2	3	3	0	-5
	B3	0	0	0	-10
C 组:耦合影响	C1	9	3	6	-5
	C2	9	3	6	5
	C3	13	3	10	10

3.2 非均匀积水对滑跑稳定性的影响

图 5 为 A 组仿真工况飞机滑行轨迹及机身偏转角时程结果。由图 5(a)可知,飞机侧向偏离程度与 Δh 呈正相关关系;在 A2 工况下,仅 6 mm 的左右积水深度微差即导致了 11.6 m 的最终侧向偏移,平均每 1 mm 的水深差异可诱发约 1.9 m 的轨迹偏离,表明在高速滑跑阶段,飞机横向运动状态极易受非对称阻力扰动而发散。图 5(b)中最大偏转角随之增大,峰值位置前移,对飞机滑行姿态控制较为不利。

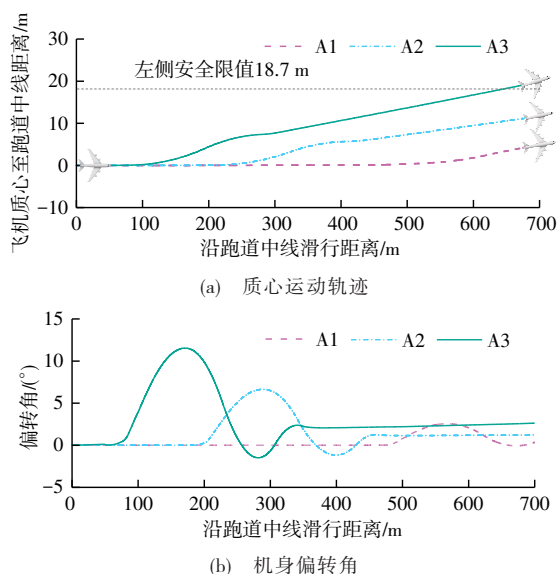


图 5 A 组工况仿真结果

Fig. 5 Simulation results for operating condition A

由图 5(a)中,在微弱差异 A1 工况下,飞机在惯性力主导下初期表现出良好的方向稳定性;全过程偏移量微小,经过 500 m 滑行才发生偏转,且该时段飞机已处于低速滑行时段,飞行员操控及前轮转向纠偏可有效控制;在中等差异 A2 工况下,飞机在前 200 m 保持相对稳定,随后在持续 F 差异累积作用下开始向左偏移,最终偏移量达 11.6 m,尽管未突破 18.7 m 的安全限值,但已显著压缩了跑道安全裕

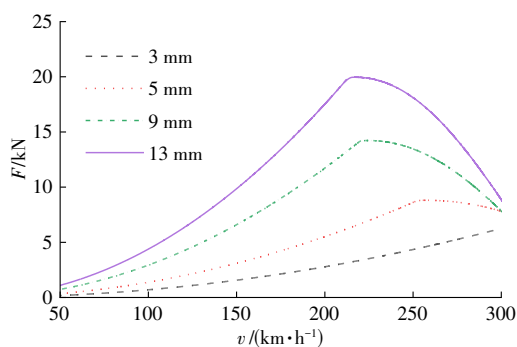
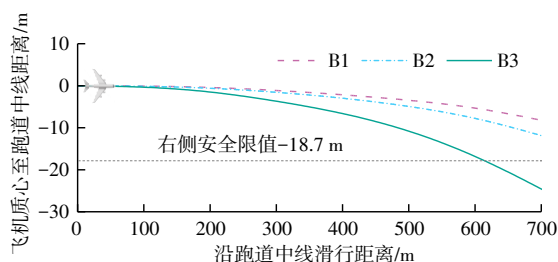
度;在严重差异 A3 工况下,飞机仅滑行 100 m 随即发生剧烈偏转,达到最大偏转角 11.7° 时仍处于高速滑行区间,偏转角峰值可达 A2 工况的 2 倍,无人为干预条件下飞机于 680 m 突破安全限值。

图 5(b)中,偏转角曲线呈现先增后减的震荡趋势,反映了机身惯性力与偏转力矩的相互平衡过程。尽管偏转角在滑跑中后期会出现纠偏趋势,但 A3 工况初期产生的较大偏转角已形成了不可逆的侧向速度分量。这表明,当高速阶段的初始扰动超过特定阈值,即便后续姿态有所修正,飞机仍会因产生的横向惯性而偏出跑道。

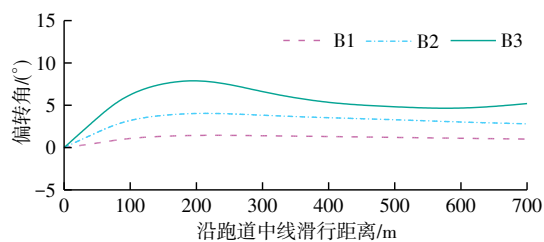
图 6 为 CEL 轮组滑水仿真输出的不同积水深度下轮胎所受广义摩阻力 F 随滑跑速度变化的曲线。结果显示:细观视角下 F 与滑跑速度及积水深度呈现显著非线性耦合关系,随着着陆过程滑跑速度的减小, F 整体呈先增大后减小趋势;且 F 大小与积水深度成正相关;其峰值点代表了轮胎从“完全滑水”向“部分滑水”的过渡时刻^[20],曲线的转变反映了轮胎滑水过程水膜抬升、有效迎水面增加的流体动力学特性;对比图 6 中 13 mm 与 3 mm 曲线结果,当飞机以 $240 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 速度接地,在该速度情况下两侧 F 形成高达 16 kN 的初始接地差值,在机身平面内形成指向深水侧的强偏转力矩,为诱发飞机偏转的直接驱动力;对于机场运行而言,在既定机型和接地速度下,当 Δh 超过特定阈值,机身自有纠偏手段难以保障着陆安全,需在道面积水监测设定更为严格的控制指标。

3.3 侧风对滑跑稳定性的影响

图 7 为 B 组工况的仿真结果,可以看出:在左侧持续侧风气动力 $F_{y,\text{wind}}$ 作用下,3 组工况飞机均呈现向右侧(下风向)偏出的趋势,且偏出程度受侧风等级主导;受风标效应影响,飞机于滑跑初期向左侧(上风向)偏转,各工况偏转角约于 200 m 处达到峰值,随后因 $F_{y,\text{wind}}$ 于机身投影分量的减小和前轮纠偏

图6 F 随 v 变化曲线Fig. 6 Variation curves of F with v 

(a) 质心运动轨迹



(b) 机身偏转角

图7 B组工况仿真结果

Fig. 7 Simulation results for operating condition B

作用下略有回落,整体呈先增大后减小的趋势。

结合表3和图7,可以得到以下结果。

(1)对比B1与B3工况:道面干燥情况下,当 v_w 增至 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时飞机所受 $F_{y, \text{wind}}$ 影响显著增强。在B1工况下飞机凭借良好的侧向附着力可将轨迹处于安全限值区域内,而B3工况下飞机自身侧偏能力难以抵抗侧向推力,于590 m处突破安全限值。

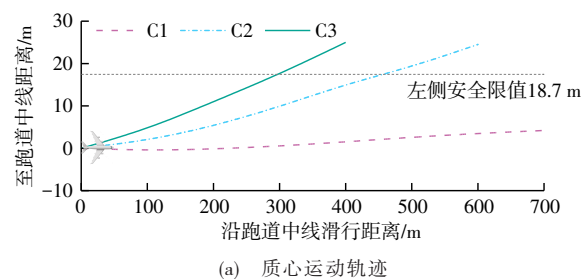
(2)对比B1与B2工况:同等 v_w 条件下,因道面湿滑削弱了轮胎附着能力,导致B2工况轨迹偏移量及偏转角均高于B1工况。B2工况在700 m处偏移量为12.5 m,较B1工况安全余量被显著压缩。同时B2的最大偏转角(4.2°)可达B1工况(1.5°)的2.8倍,飞机姿态控制难度加大,发生姿态失稳概率陡增。

从运行角度来看,这一结果表明,侧风限制不仅要考虑机型气动特性,还需综合考虑道面表面状态。在湿滑跑道上,即便侧风未达到飞行手册极限值,组

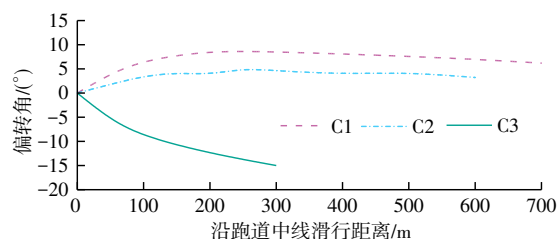
合工况也可能超出滑跑控制安全边界。

3.4 耦合作用下对滑跑稳定性的影响

道面非均匀积水和侧风导致的飞机偏转均具有明显的方向效应,为解析二者耦合作用下飞机的偏转趋势,故设计了C组工况进行比对,见图8。从运动轨迹结果可知,3组工况虽呈现出向左侧偏离跑道中线的同一趋势,但偏离速率及程度差异显著。



(a) 质心运动轨迹



(b) 机身偏转角

图8 C组工况仿真结果

Fig. 8 Simulation results for operating condition C

C1工况为A2和B1工况进行叠加,通过上文分析可知,C1工况道面非均匀积水与侧风作用力相互抵消而抑制了轨迹的偏移,而两者所构成的偏转力矩同向叠加,导致其全程轨迹虽处于安全区域内,但飞机被迫保持着较大的偏转姿态(约 8.5°),显著增加了飞机操控负担。对于C2工况,因侧风方向的相反结果呈现“作用力同向叠加,偏转扭矩相抵消”的模式,导致C2工况表现出更强的失稳态势,轨迹偏离速率远大于C1,于470 m处偏出左侧安全限值;偏转角受到两偏转扭矩的动态博弈有明显震荡趋势,但机身偏转角较C1工况明显减弱,最大偏转角约为C1工况的1/2。

C3工况考察了极大积水差异与强侧风极端条件对飞机滑行姿态的影响,飞机于滑跑初期在强侧风的影响下迅速向右侧偏转,随着向左非均匀积水的偏转作用的积累,向右的偏转趋势稍有回落,但偏转角最大值仍达到 15° 且呈现发散态势;但同向巨大的合成作用力导致飞机轨迹快速向左偏出,仅300 m即突破安全限值,发生偏出跑道事故。可见在极端不利气象因素耦合作用下,飞机将快速进入失稳状态。

综上,非均匀积水与侧风的耦合效应并非简单的线性累加,耦合效应呈现显著方向性特征:侧风诱导偏航力矩与非均匀积水引起的不平衡纵向阻力矩可表现为同向叠加或反向抵消,不同叠加模式决定了飞机滑跑偏转的发展速度与失稳形态。机场运行管理中不仅要积水差异和侧风强度设定单因素安全阈值,还应考虑限制和禁止两因素组合超限情况,以确保机场运行安全。

3.5 局限性讨论

(1)为突出左右非均匀积水引发的受力差异,将积水厚度差在跑道纵向近似为恒定,但真实道面受纵坡、排水、轮辙与降雨时空变化影响。该简化可能影响对“最不利位置”、局部深水区长度、偏离位置及偏出距离的精确预测。本文结论主要用于规律与敏感因素识别,针对具体机场或特定降雨条件下的局部峰值风险与最不利位置评估,需进一步引入分段水深或空间变化水深和道面实测数据进行风险量化评估。且实际滑跑过程中,滑移率会随制动与反推介入而变化,其影响将在后续研究中通过扩展速度-水深-滑移率数据库进一步考虑。

(2)研究主要关注水平面内的偏出与侧偏演化,做出忽略翻滚的简化假定,其目的在于突出侧风与非均匀积水引发的偏出和侧偏主导机理,降低自由度带来的参数不确定性。但在强侧风或大侧向加速度条件下,滚转会导致两侧主起落架荷载分布改变,进而影响偏转角峰值与偏移距离。后续研究需引入滚转自由度与载荷转移模型,并对极端工况开展敏感性分析以提高预测保真度。

(3)当前量化结论基于A320在特定接地速度与构型下的工况分析,考虑到不同机型起降性能和操纵策略存在差异,后续应针对不同机型和参数敏感性拓展适用模型,并结合机场实测道面污染数据和侧风信息发展耦合仿真体系,为着陆安全阶段保障提供量化支撑。

4 结 语

(1)侧风和道面非均匀积水耦合会显著增加飞机着陆操控难度,压缩着陆安全边界,是诱导飞机偏出跑道的重要因素。对此本文从耦合动力学偏出机理出发,建立基于CEL算法与ADAMS多体动力学的联合仿真体系,实施细观和宏观视角联合的仿真分析,探究耦合环境条件对着陆滑跑安全的影响机理。

(2)仿真结果表明,A320机型在 $240\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 接

地速度下,道面 10 mm 的左右主轮积水厚度差可导致高达 16 kN 的纵向阻力差,其产生的偏转力矩足以在无人干预下导致飞机于 680 m 处突破安全限值;侧风主要通过作用机身的宏观侧向气动力和风标效应改变机头指向,破坏飞机的航向平衡。

(3)道面湿滑显著放大了侧风的致偏风险,在相同侧风 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 条件下,湿滑跑道飞机的最大偏转角约为干跑道的 2.8 倍;侧风与非均匀积水的耦合效应并非简单的线性累加,而具有明显的方向效应特征,取决于二者作用力与偏转扭矩的叠加模式;建议在机场运行管理中建立积水侧风耦合预警机制,当侧风风速超过 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,跑道左右两侧积水深度差异需控制在 6 mm 以内;若监测到存在 10 mm 以上积水差异时,应严格限制大侧风条件下的着陆运行,以防止飞机突破纠偏极限而发生偏出跑道事故。

参 考 文 献:

References:

- [1] 蔡爵威,赵鸿铎,钱鑫,等.采用实测数据实时修正的机场跑道水膜厚度面域分布预估方法[J].交通运输工程学报,2023,23(1):105-114.
CAI Jue-wei, ZHAO Hong-duo, QIAN Xin, et al. Estimation method for area distribution of water film thickness on airport runway modified by measured data in real time [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(1): 105-114.
- [2] 陈正磊,种小雷,刘超佳,等.基于多智能体建模和蒙特卡洛仿真的跑道容量评估[J].交通运输工程学报,2023,23(6):244-256.
CHEN Zheng-lei, CHONG Xiao-lei, LIU Chao-jia, et al. Runway capacity evaluation based on multi-agent modeling and Monte Carlo simulation [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6): 244-256.
- [3] 汤新民,顾俊伟,张康,等.无人驾驶航空器自主探测与避让技术研究综述[J].交通运输工程学报,2026,26(3):1-24.
TANG Xin-min, GU Jun-wei, ZHANG Kang, et al. Research review on autonomous detect and avoid technologies for unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(3): 1-24.
- [4] ZHOU Z Y, CHONG X L, CHEN Z L, et al. A long sequence time-series forecasting method for early warning of long landing risks with QAR flight data [J]. Aerospace, 2025, 12(8): 744.
- [5] 周则圆,种小雷,陈正磊,等.基于多维联系云的飞机冲偏出跑道集对风险评价模型[J/OL].北京航空航天大学学报,2025-09-22. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0388>.
ZHOU Ze-yuan, CHONG Xiao-lei, CHEN Zheng-lei, et al. Risk assessment model for runway excursions of aircraft based on set pair analysis and multi-dimensional relational cloud [J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and

- Astronautics, 2025-09-22. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0388>.
- [6] FWA T F. Pavement skid resistance properties for safe aircraft operations[J]. Journal of Road Engineering, 2024, 4(4): 361-385.
- [7] 赵丁仪, 齐心歌, 汪磊. 冲偏出跑道事件风险评估研究进展[J]. 航空工程进展, 2025, 16(1): 1-8.
ZHAO Ding-yi, QI Xin-ge, WANG Lei. Research progress analysis on risk assessment of runway excursion [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025, 16(1): 1-8.
- [8] FRICKE H, SCHLOSSER M, GARCIA M A, et al. Embedding aircraft system modeling to ATM safety assessment techniques[J]. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2019, 3: 100026.
- [9] AIRPLANES B C. Statistical summary of commercial jet airplane accidents worldwide operations 1959-2022[R]. Seattle: The Boeing Company, 2023: 4-10.
- [10] DAUGHERTY R H, STUBBS S M. Measurements of flow rate and trajectory of aircraft tire-generated water spray: NASA TP-2718[R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 1987: 7-8.
- [11] FWA T F, ONG G P. Wet-pavement hydroplaning risk and skid resistance: Analysis[J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(5): 182-190.
- [12] TANG T C, ANUPAM K, KASBERGEN C, et al. A finite element study of rain intensity on skid resistance for permeable asphalt concrete mixes [J]. Construction and Building Materials, 2019, 220: 464-475.
- [13] 宗辉杭, 李岳, 蔡靖, 等. 基于飞机滑水安全的沥青道面积水评价指标[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(3): 765-773.
ZONG Hui-hang, LI Yue, CAI Jing, et al. Evaluation index of accumulated water-film on asphalt pavement considering safety of aircraft hydroplaning[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(3): 765-773.
- [14] 李少杰. 考虑不平衡摩擦的湿滑污染道面飞机着陆安全问题研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2020: 26.
LI Shao-jie. Study on the safety problem of aircraft in landing on wet-pollution pavement considering unbalanced friction[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020: 26.
- [15] 李岳, 张耀华, 蔡靖, 等. 横向非均匀积水对飞机滑水偏出跑道行为影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52(3): 698-705.
LI Yue, ZHANG Yao-hua, CAI Jing, et al. Influence on veer-off behavior of aircraft hydroplaning due to transverse uneven water accumulation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(3): 698-705.
- [16] SLIHTA M, LAZAREVA I, SESTAKOV V. Evaluation of the dynamic characteristics of aircraft during landing in crosswinds[J]. Transport and Aerospace Engineering, 2015, 2(1): 27-35.
- [17] 刘海良, 王立新. 基于数字虚拟飞行的民机侧风着陆地面航向操纵特性评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(3): 516-525.
- [18] 陆军, 吴国强, 吴叶斌, 等. 飞机降落过程自适应控制仿真研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(4): 53-57.
LU Jun, WU Guo-qiang, WU Ye-bin, et al. Simulation based on optimized CMAC-PID control in process of aircraft landing [J]. Computer Simulation, 2011, 28(4): 53-57.
- [19] LUNGU R, LUNGU M. Control of the aircraft lateral-directional motion during landing using the H-INF control and the dynamic inversion [J]. Proceedings of the Romanian Academy-Series A: Mathematics, Physics, Technical Sciences, Information Science, 2015, 16: 547-555.
- [20] 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 Yue, ZONG Hui-hang, CAI Jing, 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.
- [21] 徐长群, 陶超. 大型客机积水跑道起降附加阻力评估[J]. 民用飞机设计与研究, 2018(1): 98-103.
XU Chang-qun, TAO Chao. Additional drag assessment on standing water runways for large civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2018(1): 98-103.
- [22] 马大卫, 聂宏, 张明. 民用飞机侧风影响下的纠偏研究[J]. 飞行力学, 2013, 31(1): 5-9, 23.
MA Da-wei, NIE Hong, ZHANG Ming. The corrective research of the civil aircraft under the influence of the crosswind [J]. Flight Dynamics, 2013, 31(1): 5-9, 23.
- [23] 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: 78-79.
LIU Fang-bing. Study on the safety of aircraft landing and taxiing in crosswind on wet-pavement [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020: 78-79.
- [24] 蔡靖, 李岳, 宗一鸣. 湿滑道面飞机轮胎临界滑水速度计算方法比较[J]. 航空学报, 2017, 38(7): 236-247.
CAI Jing, LI Yue, ZONG Yi-ming. Comparison of prediction methods for critical hydroplaning speed of aircraft tire on wet pavement[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(7): 236-247.
- [25] 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 Yi-ming. Numerical simulation of critical hydroplaning speed of aircraft tire under wet pavement condition [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(5): 90-101.
- [26] 李岳, 张耀华, 蔡靖, 等. 道面分区积水条件下飞机着陆滑行规律[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 2024-12-30. <https://>

- doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0702.
- LI Yue, ZHANG Yao-hua, CAI Jing, et al. Taxiing law of aircraft landing on pavement under condition of regional water accumulation [J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024-12-30. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0702>.
- [27] 王 裕, 刘 卫, 张嘉振. 面向增材制造技术的民用飞机典型铰链结构拓扑优化设计[C]//中国航空学会. 第八届中国航空学会青年科技论坛论文集. 北京: 中国航空学会, 2018: 541-546.
- WANG Yu, LIU Wei, ZHANG Jia-zhen. Topology optimization design of typical hinge for civil aircraft based on additive manufacturing technology [C] //Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Proceedings of the 8th Youth Science and Technology Forum of the Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2018: 541-546.
- [28] 侯志礼, 王钢林. 某无人机着陆滑跑动态仿真分析[J]. *飞机设计*, 2011, 31(5): 9-11.
- HOU Zhi-li, WANG Gang-lin. Dynamic simulation of landing and rolling for a certain UAV [J]. *Aircraft Design*, 2011, 31(5): 9-11.
- [29] 马 涛, 吴 俊, 唐樊龙, 等. 基于多源数据与大模型的无人机巡航风险识别技术[J]. *交通运输工程学报*, 2026, 26(3): 75-88.
- MA Tao, WU Jun, TANG Fan-long, et al. Unmanned aerial vehicle cruise risk identification technology based on multi-source data and large models [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2026, 26(3): 75-88.
- [30] 黄敬杰, 张 鑫, 孟 超, 等. 反推力装置对民航飞机减速性能影响[J]. *航空动力学报*, 2023, 38(3): 728-734.
- HUANG Jing-jie, ZHANG Xin, MENG Chao, et al. Effect of thrust reverser on the deceleration performance of civil aircraft [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2023, 38(3): 728-734.
- [31] 唐铁桥, 曹 峰, 王 芃, 等. 飞机可持续滑行技术理论进展与应用挑战[J]. *交通运输工程学报*, 2026, 26(1): 8-30.
- TANG Tie-qiao, CAO Feng, WANG Peng, et al. Theoretical advances and application challenges of sustainable aircraft taxiing technology [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2026, 26(1): 8-30.