

飞机动载作用下轮胎-积水道面相互作用分析

蔡靖^{1,2}, 沈睿¹, 周宁¹, 李岳¹, 范怡飞¹

(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 基于起落架-轮胎-积水道面动力耦合仿真模型并考虑道面平整度影响, 获得起飞、着陆阶段轮胎轮心动位移时程曲线, 在此基础上运用有限元软件仿真分析着陆和起飞阶段动载作用下积水道面支撑力、接触面积及位移阻力的变化规律, 从而获得动载作用下临界滑水速度的动载影响系数。研究结果表明: 在起飞、着陆阶段, 道面支撑力、轮胎与道面接触面积、位移阻力及临界滑水速度均较静载作用下有所降低。起飞阶段, 道面支撑力与静载作用时相差较小, 位移阻力较静载下降0.3~3 kN, 临界滑水速度降低值在5.5 km/h以内; 着陆阶段, 道面支撑力较静载降低5%~10%, 对应位移阻力最大降幅达到50%, 临界滑水速度存在急剧变化的情况, 差值在5~9 km/h。综合上述临界滑水速度变化规律, 定义动静载临界滑水速度比值为动载影响系数, 不同滑行工况下该系数取值在0.95~0.99; 鉴于着陆阶段飞机临界滑水速度降低较大, 滑水风险更高, 偏于安全将动载影响系数取为0.96。

关键词 飞机动载作用; 轮胎-道面相互作用; 临界滑水速度; 道面支撑力; 位移阻力; 动载影响系数

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.02.001

中图分类号 V351 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)02-0001-10

An Analysis of Interaction on Tire-Wet Pavement under Aircraft Dynamic Load

CAI Jing^{1,2}, SHEN Zhe¹, ZHOU Ning¹, LI Yue¹, FAN Yifei¹

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

Abstract Based on the dynamic coupling simulation model of landing gear-tire-wet pavement in consideration of the influence of pavement flatness, the time history curves of tire wheel cardiac displacement at take-off and landing stages are obtained. On this basis, the finite element software is used to simulate and analyze the variation law of supporting force, contact area and displacement resistance of accumulated pavement under dynamic load at landing and takeoff stages, obtaining the dynamic load influence coefficient of critical hydroplaning speed under dynamic load. The results show that the pavement support force, contact area between tire and pavement, displacement resistance and critical hydroplaning speed are all lower than those under static load at take-off and landing stages. At take-off stage, the difference between pavement support force of dynamic and static load is small, the displacement resistance decreases by 0.3~3 kN compared with the static load, and the critical hydroplaning speed decreases within 5.5 km/h; At landing stage, the pavement support force is reduced by 5%~10% compared with the static load, and

收稿日期: 2024-07-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52472369); 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)

作者简介: 蔡靖(1975-), 女, 河北滦州人, 教授, 研究方向为机场工程与场道工程研究。E-mail: caijing75@163.com

引用格式: 蔡靖, 沈睿, 周宁, 等. 飞机动载作用下轮胎-积水道面相互作用分析[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(2): 1-10. CAI Jing, SHEN Zhe, ZHOU Ning, et al. An Analysis of Interaction on Tire-Wet Pavement under Aircraft Dynamic Load[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(2): 1-10.

the corresponding displacement resistance is reduced to the maximum by 50%. The critical hydroplaning speed changes sharply, and the difference is between 5 and 9 km/h. Based on the above-mentioned change law of critical hydroplaning speed, the ratio of critical hydroplaning speed of dynamic and static load is defined as the influence coefficient of dynamic load, and the value of this coefficient is a range from 0.95 to 0.99 under different taxiing conditions; In view of the fact that the critical hydroplaning speed of the aircraft decreases greatly during the landing stage and the hydroplaning risk is higher, the dynamic load influence coefficient is taken as 0.96 for safety.

Key words aerodynamic load effects on aircraft; tire-pavement interaction; critical hydroplaning speed; pavement support force; displacement resistance; dynamic load impact coefficient

飞机在湿滑跑道上起飞着陆滑行时,由于跑道表面积水加之跑道表面不平形成厚度不均匀的水膜,飞机轮胎与积水道面之间相互作用力减弱,使得飞机在滑跑过程中可能发生冲或偏出跑道事故。当飞机的滑跑速度超过 36 km/h 后,轮胎与道面会产生振动响应^[1]。而飞机在起飞、着陆阶段的滑跑速度均在 36~288 km/h 之间,在上述两阶段所引发的振动十分显著,从而导致飞机运行安全稳定性降低。所以在飞机起飞着陆滑跑过程中必须考虑轮胎与积水道面动力耦合作用产生的动载对临界滑水速度的影响,保证飞机在湿滑道面上的运行安全。

目前,国内外针对静载作用下轮胎-积水道面相互作用及其对临界滑水速度的影响做了大量研究。在数值仿真方面:文献[2]基于修正 LuGre 摩擦模型提出临界滑水速度的快速计算方法,以临界滑水速度为滑水风险事件发生的判断指标对滑水风险进行量化;文献[3]对比了不同花纹形式对滑水性能的影响,并研究了摩擦因数、水膜厚度、胎压与负载等参数的影响规律;文献[4]采用极差分析法和方差分析法分析了不同水膜厚度、机轮胎压、滑移率下临界滑水速度对临界滑水速度的影响程度,建立了临界滑水速度修正公式;文献[5]以波音 737-800 的主轮胎为主要研究对象,建立轮胎-水膜-道面相互作用三维模型,基于 Fluent 软件建立三者相互作用有限元分析模型,得出动水压强的显著影响因素;文献[6]对 NASA 临界滑水速度公式进行了修正,分析了不同水膜厚度下的临界滑水速度,并计算得到了常见机型在不同降雨量下的临界滑水速度。在轮胎-道面相互作用试验方面:文献[7]通过现场试验,分析湿滑条件下跑道表面刻槽几何设计与刻槽深度变化对飞机在跑道上抗滑性能的影响,发现梯形刻槽设计比方形刻槽设计更优;文献[8]在道面板内部安装位移传感器以实现不同飞机滑行速度作用于道面板时的动力响应检测,研究了刚性道面结构在飞机滑跑时的动力响应情况;文献[9]基于高精度压力胶片测试技术,开展胎/路接触应力分布特性研究,

研究轮胎作用下沥青路面的抗滑性能衰减规律;文献[10]提出了一种新的实时测试系统,研究了轮胎载荷、胎压、轮胎与路面实际接触面积、轮胎速度、滑移率等参数对路面摩擦的影响;文献[11]设计了一种飞机轮胎冲击试验装置,认为着陆时的冲击质量和速度对飞机轮胎安全至关重要。

但是,无论数值仿真或试验研究,国内外针对轮胎-道面相互作用及其对临界滑水速度的影响分析时,对轮胎轴载的设置均为静轴载,并且多以集中力的形式施加在轮胎与轮毂耦合中心,忽略了飞机在起飞着陆过程中起落架-轮胎-道面动力响应对机轮-道面相互作用的影响。实际上,飞机在起飞和着陆滑跑过程中会产生振动加速度,表现为动荷载。动荷载作用下引起的轮胎-道面相互作用机理及临界滑水速度均不同于静载作用。因此,鉴于动载动力特性引起轮胎-湿滑道面相互作用机理及临界滑水速度的变化,有必要分析动载作用下飞机轮胎-积水道面动力相互作用,从而获得动载作用下临界滑水速度变化规律,保证飞机在积水道面的运行安全。从而本文基于振动理论动力学方程和道面平整度曲线,建立起落架-轮胎-道面耦合动力学系统仿真模型并计算得出起飞、着陆阶段轮胎轮心动位移时程曲线,利用 ABAQUS 有限元软件建立轮胎-积水道面动力耦合有限元模型,分析不同滑行工况时动静荷载作用下道面支撑力、位移阻力和临界滑水速度的变化情况,并综合道面支撑力和位移阻力确定临界滑水速度的方法,得出动载作用下临界滑水速度动载影响系数,为飞机在积水道面的安全运行提供支撑。

1 起落架-轮胎-积水道面动力耦合理论仿真模型

1.1 平整度曲线

目前国内外均采用平整度指数(International roughness index, IRI)对机场道面的不平整度进行

评价^[12],而机场道面的表面不平整度随机性可以采用功率谱密度(power spectral density, PSD)方法进行构建^[13]。

$$\text{IRI} = 0.78a_0 \sqrt{G_q(n_0)} \quad (1)$$

式中: $a_0 = 10^3 \text{ m}^{-1.5}$ 为常数; n 为该采样空间的空间频率,表示单位距离中的波长数,取值范围为 $0.011 \text{ m}^{-1} < n < 2.83 \text{ m}^{-1}$; $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$ 为采样空间参考频率; $G_q(n_0)$ 为 n_0 下的道面功率谱密度值,与道面等级和道面平整度指数 IRI 相关,单位为 m^3 。

运用三角级数合成方法仿真生成基于 IRI 指数的不平整道面,即将多个正弦函数叠加后便得到基于平整度指数 IRI 的道面随机响应:

$$q(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2G_q(n_{\text{mid}-i})\Delta n} \sin(2\pi n_{\text{mid}-i}x + \alpha_i) \quad (2)$$

式中: x 为滑跑距离; $q(x)$ 为道面空间平整度曲线; N 为将频率范围 (n_1, n_2) 均分所得小区间数量; α_i 为均匀分布于 $[0, 2\pi]$ 的随机数; $n_{\text{mid}-i}$ 为第 i 个小区间的中心频率; Δn 为采样区间宽度。

由 $x = vt$ 将空间平整度曲线转换为时间平整度曲线形式:

$$q(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2G_q(n_{\text{mid}-i})\Delta n} \sin(2\pi n_{\text{mid}-i}vt + \alpha_i) \quad (3)$$

简化并求导得出随机道面不平整度时程微分方程:

$$\dot{q}(t) = -2\pi n_{00}vq(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)}v\omega(t) \quad (4)$$

式中: $\omega(t)$ 为功率谱密度为 0.5 的双边白噪声信号; n_{00} 为下截止空间频率,依照《GB/T 7031—2005》推荐值为 0.01 m^{-1} ; v 为飞机滑跑速度,单位为 m/s ; $q(t)$ 为道面平整度曲线,单位为 m 。

基于上述方程,在 MATLAB/SIMULINK 中建模,采用变采样频率,取采样频率与速度成反比,

仿真得到的数据转换到空间范围内满足空间不变原则,结果见图 1。

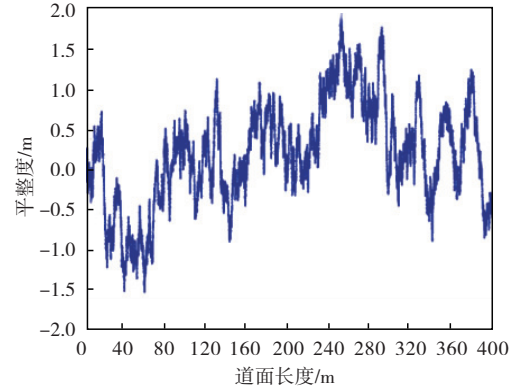


图 1 变采样频率道面平整度仿真

Fig. 1 Simulation of pavement flatness with variable sampling frequency

1.2 飞机着陆动力学模型建立

经过简化飞机起落架-轮胎-积水道面相互作用动力学模型见图 2。图 2 中, m_1 为飞机模型的自身质量, k_1 、 c_1 分别为后起落架簧载质量的刚度、阻尼, m_2 为左、右起落架的非簧载质量, k_2 、 c_2 分别为后起落架非簧载质量的刚度、阻尼。以上参数取值依据文献[14],具体见表 1。

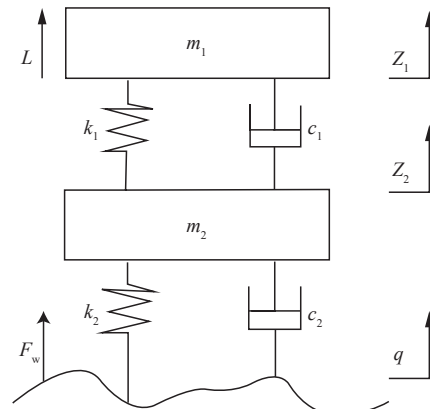


图 2 动力学理论模型

Fig. 2 Dynamic theoretical model

表 1 动力学模型参数取值

Tab. 1 Parameters of dynamic model

飞机参数	m_1/kg	$k_1/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$c_1/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	m_2/kg	$k_2/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$c_2/(\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$
数值	59 033	614	625	888	4 000 010	4

根据飞机机体动力学振动理论,建立式(5)所示的动力学响应微分方程组^[15]:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{Z}_1 + k_1(Z_1 - Z_2) + c_1(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_2) - L &= 0 \\ m_2 \ddot{Z}_2 + k_1(Z_2 - Z_1) + c_1(\dot{Z}_2 - \dot{Z}_1) + \\ k_2(Z_2 - q) + c_2(\dot{Z}_2 - \dot{q}) - F_w &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: Z_1 、 Z_2 分别为上部、下部结构的垂直位移; L 为飞机升力; F_w 为水膜抬升力。

由空气动力学可得,飞机升力 L 为:

$$L = C_s \frac{1}{2} \rho_q v^2 S_l \quad (6)$$

式中: C_s 为飞机升力系数,为无量纲参数; ρ_q 为空气

气密度,可取 1.293 kg/m³;S_i 为机翼面积,单位为 m²,由 A320 飞机手册可知,飞机升力系数为 0.9,单个机翼面积为 1.4 m,飞机单轮静轴载为 153 kN。

建立如图 3 所示动水压力计算模型,基于动量定理计算流体固体相互作用,分析轮胎在动力滑水状态下动水压力随时间的变化曲线。

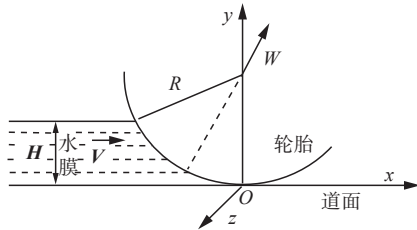


图 3 动力学模型受力分析
Fig. 3 Force analysis of dynamic model

取轮胎前缘水膜微段进行受力分析,对轮胎前缘积水作用区域进行积分,可得水膜抬升力:

$$F_w = \int_0^{\arccos \frac{R-H}{R}} \rho V^2 b R \cos \theta d\theta = \rho V^2 b \sqrt{2RH - H^2} \quad (7)$$

式中:R 为轮胎半径;V 为水流冲击速度,表示轮胎以相同速度在积水道面上滑行;b 为轮胎宽度; ρ 为水流密度;H 为水膜厚度。

为方便动力学微分方程在 MATLAB/SIMULINK 模块中的输入,将式(5)的振动方程矩阵化,系数矩阵表达如下:

$$\begin{aligned} x_1 &= Z_1, x_2 = \dot{Z}_1, x_3 = Z_2, x_4 = \dot{Z}_2 \\ \mathbf{X} &= [x_1, x_2, x_3, x_4]^T \\ \mathbf{U} &= [L, q, q_1, F_w]^T \\ \dot{\mathbf{X}}_1 &= \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U} \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C}\mathbf{X}(t) + \mathbf{D}\mathbf{U} \end{aligned}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_1}{m_1} & -\frac{c_1}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} & \frac{c_1}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_1}{m_2} & \frac{c_1}{m_2} & -\frac{(k_1 + k_2)}{m_2} & -\frac{(c_1 + c_2)}{m_2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_2}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & \frac{1}{m_2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_1}{m_1} & -\frac{c_1}{m_1} & \frac{k_1}{m_1} & \frac{c_1}{m_1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m_1} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

在 Simulink 中搭建矩阵方程的框架结构,见图 4、图 5,计算得出以轮心动位移表征的起飞、着陆时轮胎动荷载时程曲线,见图 6。

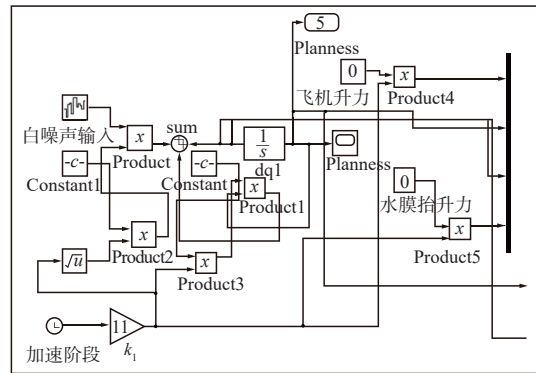


图 4 系统输入变量框图
Fig. 4 Block diagram of system input variables

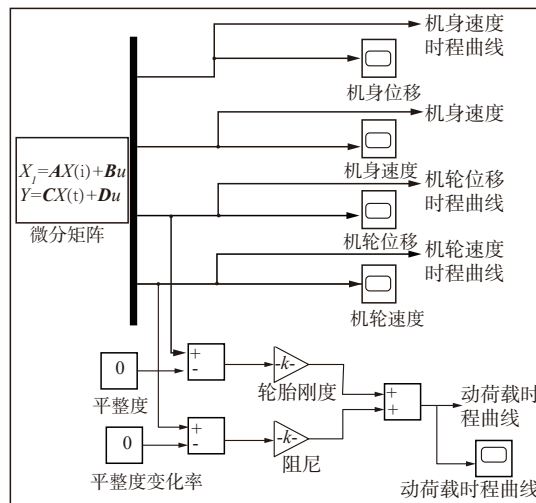
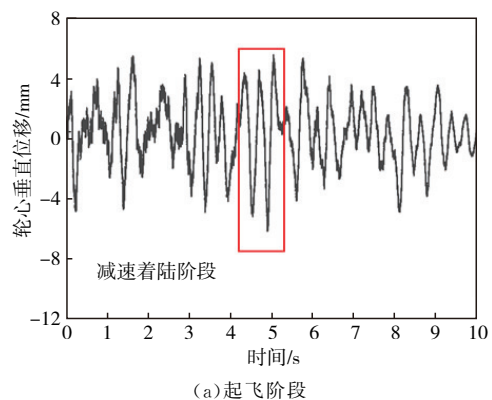


图 5 系统动载输出框图
Fig. 5 Block diagram of system dynamic load output



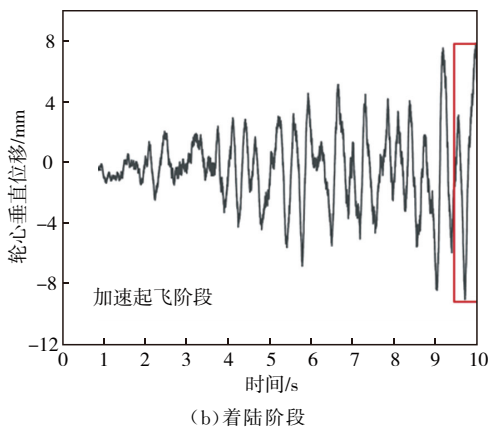


图 6 动位移时程曲线

Fig. 6 Dynamic displacement curves

2 轮胎-积水道面动力耦合滑水有限元模型

利用 ABAQUS 有限元软件,基于上一章节获得的轮心位移时程曲线,结合(CEL)流固耦合^[16]的计算方法建立轮胎-积水道面动力耦合有限元分析模型。在此基础上研究动荷载作用下轮胎-积水道面动力耦合作用机理。

2.1 轮胎模型

以国内主流飞机 A320 的主起落架轮胎为研究主体,轮胎参数为 46×17R20,具体参数见表 2。

表 2 飞机轮胎参数

Tab. 2 Aircraft tire parameters

轮胎参数	数值
胎压 P/kPa	1 140
橡胶正定常数 C_{10}	9.9×10^6
橡胶正定常数 C_{01}	8.8×10^6
橡胶不可压缩常数 D_1	10^7
静轴载 W/kN	152

将轮毂简化为实心刚性体,施加胎压时,轮胎胎压作用方向与内胎面垂直;轮胎橡胶材料的力学特性较为复杂,飞机轮胎在轴载与内压的作用下会产生较大的变形,可达几个厘米,属于大变形。在保证计算精度前提下为提高模型计算效率,忽略轮胎的其他材料组成,将其视为均质、各向同性的橡胶材料,采用超弹性本构关系反映其变形特征^[17]。网格划分:轮胎沿中轴线动力耦合中心等角度均匀划分,从内层到外层采用环向均匀划分,网格密度两个方向上保持相同。单元节点设置为八节点线性六面体减缩积分单元。

2.2 积水模型

为了表征流体的流动特征及边界特征,积水层

设置为水膜层和空气层两部分,并只对积水层进行参数属性的设置。水膜的参数见表 3^[18], ρ_0 为水膜初始密度,单位为 kg/m^3 ; c_0 为常温常压下水中声速,单位为 m/s ; s, Γ_0 为材料常数。

表 3 水膜相关参数

Tab. 3 Water related parameters

参数	$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$c_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	s	Γ_0
水	998.203	1 480	1.79	0.2

对水膜层采用欧拉网格划分,以解决水流冲击产生的扭曲大变形问题,通过试算确定水膜层尺寸为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 。依据《航空承运人湿跑道和污染跑道运行管理规定》^[19]选取水膜层厚度在 3~13 mm 之间。积水模块单元类型为 EC3D8R(欧拉网格),对于积水区域与轮胎和道面动力耦合作用网格的细化,在竖向上,随厚度均匀划分 3~5 层;对于积水模块上部的空气单元,采用线性布种划分网格,主要表征水流与轮胎接触冲击后的流动特征,水膜层单元总数为 44 000。考虑到整个模拟过程中水膜层的积水厚度应保持一致,故在模型周围底部设置不透水边界,轮胎前方设置水流入口,轮胎后方设置水流出口,水膜层整体模型见图 7。

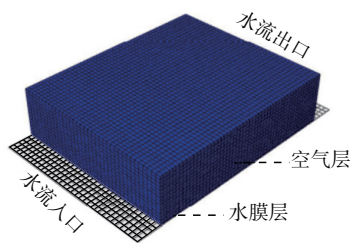


图 7 积水模型

Fig. 7 Water film model

2.3 动荷载输入

直接对轮胎施加动荷载时程曲线会造成结果不收敛及计算效率大大降低的情况^[20],因此在相互作用模型中动荷载的施加采用轮心动位移时程曲线进行输入,起飞着陆阶段均选取图 6 中最大振幅且稳定震动的时间段为动荷载输入特征曲线段。在有限元仿真过程中,总仿真时长设置为 0.5 s, 0~0.2 s 为加速起飞阶段, 0.2~0.3 s 为匀速阶段, 0.3~0.5 s 为减速着陆阶段。

在左侧边界条件设置中,对轮毂耦合中心进行位移约束,通过轮胎竖向变形量的经验公式计算得出轮胎初始位移为 -0.032 m,即轮胎在受到 15.3 kN 静轴载时产生的竖直下沉量,动载时程变化部分则通过位移幅值调整来完成。

将特征曲线段的数据与轮胎初始位移相加后得

到基于有限元模型坐标系的轮心动位移时程曲线,将基于轮心的动位移时程曲线除以轮胎初始位移后得到动位移幅值比曲线见图 8,并将其输入有限元模型中。

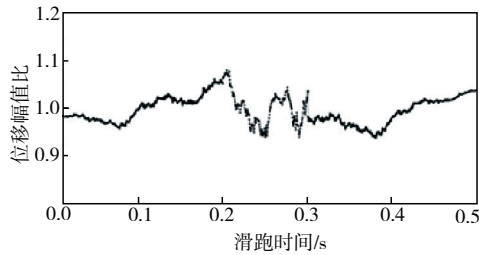
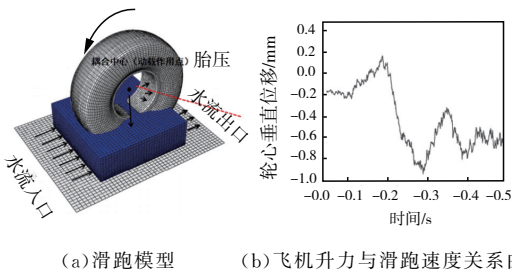


图 8 动位移幅值比曲线

Fig. 8 Amplitude ratio curve of dynamic displacement

2.4 轮胎-积水道面动力耦合作用模型

将水膜层、道面和轮胎模型进行装配组合,水膜层放置于道面表面,其底部边界与道面上表面贴合,水膜层设置 9.8 m/s^2 的重力加速度。以水流高速冲击轮胎模拟轮胎前进速度时,为保证其稳定性,在水膜底层和两边都设置边界约束^[21],能够确保轮胎与积水充分接触。轮胎的运动由轮胎转动和水流冲击轮胎两部分组成,在轮心 o 处施加竖直方向的动位移比时程曲线表征动荷载,并赋予轮胎沿轮心的角速度和水流冲击轮胎的速度 V ,在轮胎前方水流入口处水流加速度为 a ,初速度为 V_0 ,在覆盖整个水膜层后达到流速稳定、厚度稳定。形成轮胎-积水道面动力耦合作用三维有限元模型,见图 9。



(a) 滑跑模型 (b) 飞机升力与滑跑速度关系曲线

图 9 轮胎-积水道面动力耦合作用三维有限元模型

Fig. 9 Three-dimensional finite element model for dynamic coupling of tire-wet pavement

2.5 轮胎模型验证

在轮胎动力耦合中心处施加 A320 机型主起落架的最大额定静载 153 kN 和相对应的动载曲线,在动载影响下轮心位移逐渐变化,而后释放动载,轮心位移稳定在静载施加时的位置不再发生变形,提取整个过程中轮胎动力耦合中心的竖向位移见图 10。由图 10 可知在整个过程中轮胎胀大静负荷半径为 500.5 mm ,与《GB/T9746—2004 航空轮胎系列规范》^[22] 中的取值范围 $488 \sim 512 \text{ mm}$ 相符,说

明轮胎模型是合理的。

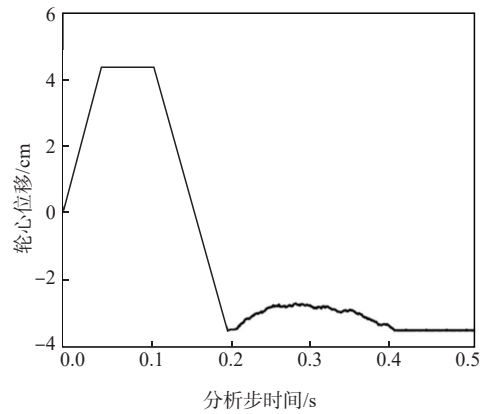


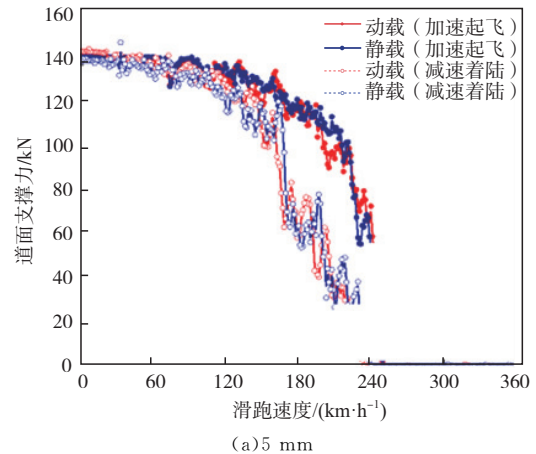
图 10 轮心位移稳定曲线

Fig. 10 Stability curve of wheel center displacement

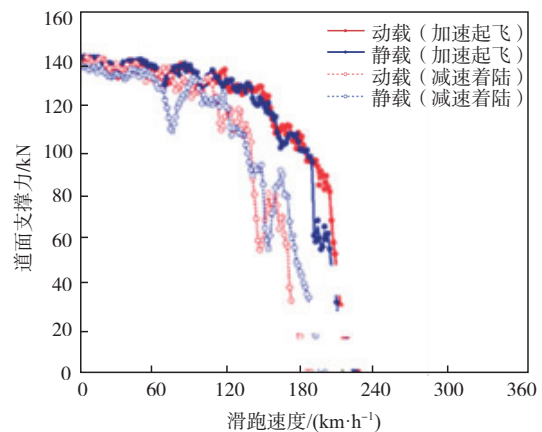
3 动载作用下积水道面飞机轮胎受力状态及与静载下对比分析

3.1 道面支撑力变化分析

基于上述模型,选择平整度指数 $IRI=1$ 的道面与轮胎动力相互作用与静载下相互作用进行对比分析,得到不同水膜厚度情况下,道面支撑力变化趋势见图 11。



(a) 5 mm



(b) 7.66 mm

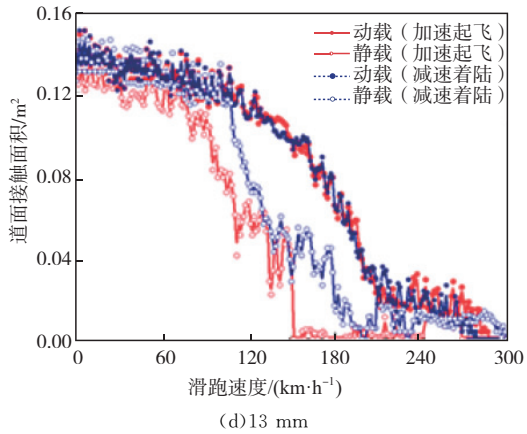
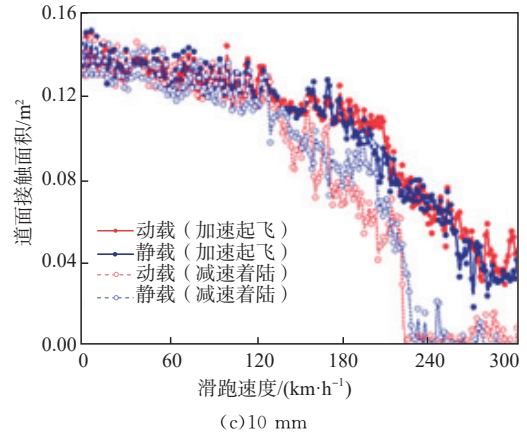
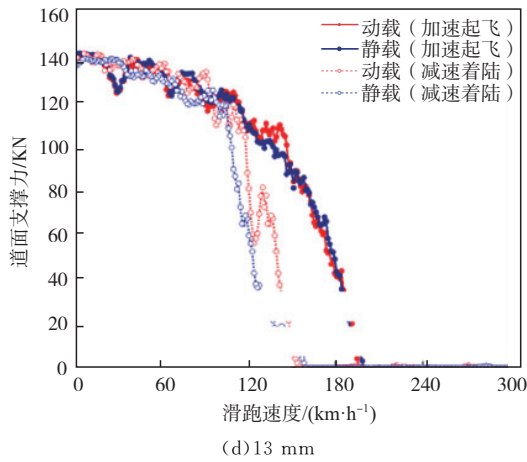
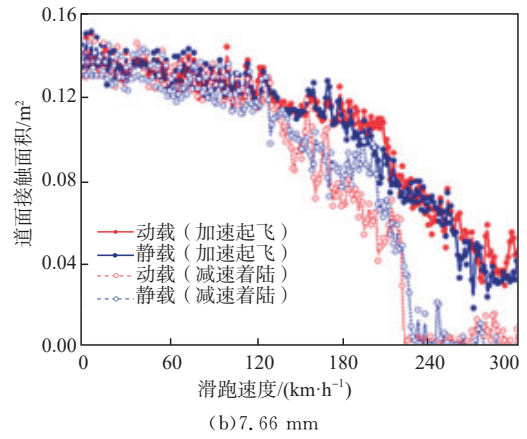
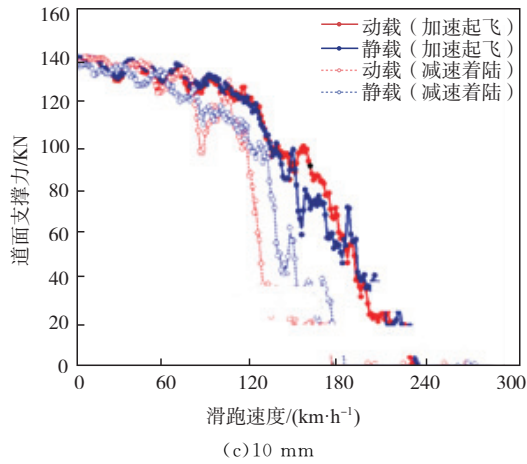


图 11 道面支撑力动静载对比分析

Fig. 11 Comparative analysis of dynamic and static loads on pavement support force

取道面支撑力降为轴载的 10% 时对应的滑跑速度为临界滑水速度, 由图 11 可以看出, 加速起飞阶段, 动载对于道面支撑力的影响较小, 临界滑水速度差值均在 5.5 km/h 以内。减速着陆阶段, 支撑力变化存在急剧上升或下降的情况, 差值在 5~9 km/h。

3.2 轮胎积水道面接触面积影响分析

利用上述有限元模型, 计算在 5 mm、7.66 mm、10 mm、13 mm 4 种水膜厚度下, 分别施加动载和静载作用时在加速起飞阶段和减速着陆阶段轮胎与道面接触面积的变化趋势见图 12。

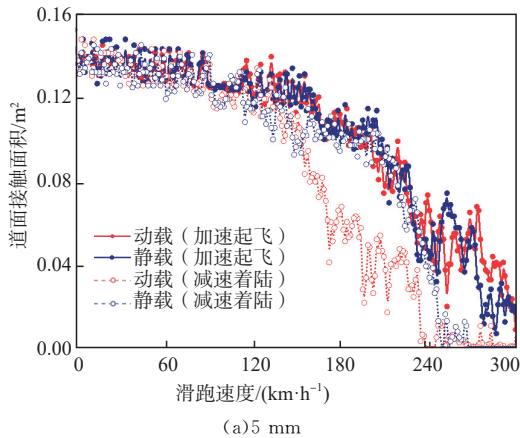


图 12 道面接触面积变化曲线

Fig. 12 Curve of change in contact area of pavement

由图 12 可以看出, 加速起飞阶段, 轮胎-道面接触面积变化曲线较为接近, 说明动载在此阶段影响较小。减速着陆阶段, 动载对接触面积的影响较起飞阶段变大, 且动载作用下的接触面积均小于静载下的结果, 接触面积从 0.147 m² 左右降低至 0.015 m² 左右时, 即降低至初始接地面积的 10% 时, 滑跑速度达到临界滑水速度, 与道面支撑力结果一致。

3.3 临界滑水速度影响分析

3.3.1 道面支撑力角度

从道面支撑力的角度分析动静荷载对临界滑水速度的影响, 对图 11 进行分析并将数据整理, 见表 4。

表 4 动静荷载下的临界滑水速度

Tab. 4 Critical hydroplaning speed of dynamic and static loads

水膜厚度/mm	起飞			着陆		
	动载/(km·h ⁻¹)	静载/(km·h ⁻¹)	比值	动载/(km·h ⁻¹)	静载/(km·h ⁻¹)	比值
5.00	250.0	250.0	1.00	232.6	240.3	0.97
7.66	250.0	250.0	1.00	219.5	228.4	0.96
9.00	243.2	245.1	0.99	200.6	208.2	0.96
10.00	235.4	238.9	0.99	178.7	187.6	0.95
11.00	226.2	230.1	0.98	165.4	172.7	0.96
12.00	214.3	218.6	0.98	157.4	163.5	0.96
13.00	194.6	199.9	0.97	153.5	158.8	0.97

由表 4 可看出,动载作用下起飞和着陆阶段临界滑水速度均小于静载结果,但起飞阶段动载对临界滑水速度影响着陆阶段要小,着陆阶段两者差值保持在 10 km/h 左右。动载作用下起飞阶段临界滑水速度降低较小,动静比值在 0.97~1.00 之间,而着陆阶段临界滑水速度降低较大,动静比值在 0.95~0.97。定义动静载临界滑水速度比值为动荷载影响系数,其变化规律见图 13。

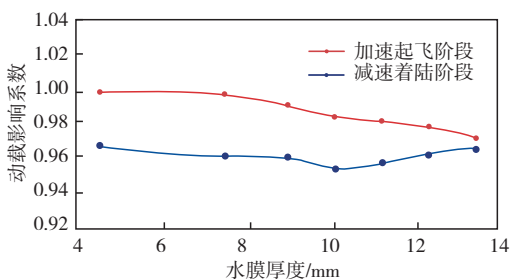


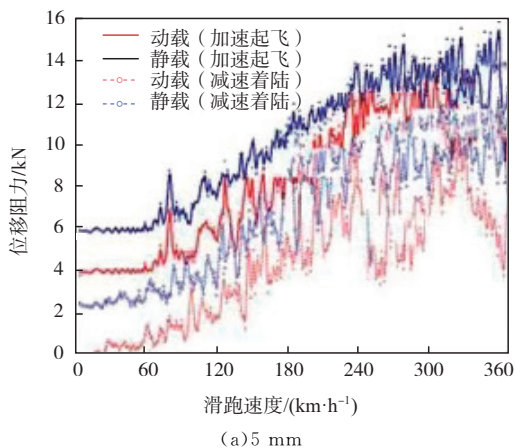
图 13 动载影响系数

Fig. 13 Influence coefficient of dynamic load

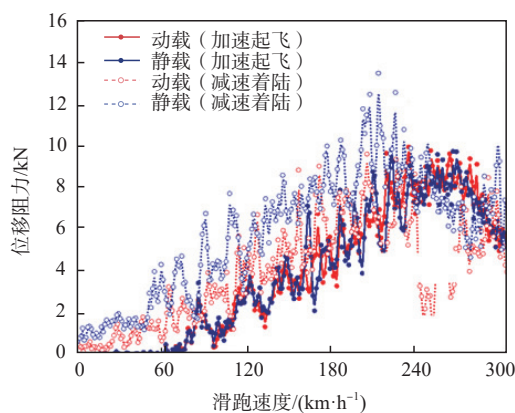
从图 13 可以看出,动载作用使得飞机临界滑水速度降低,说明在动载作用下飞机起降滑跑更为危险,起飞阶段动载影响系数均值为 0.98,着陆阶段动载影响系数均值为 0.96,偏于安全考虑,对动载作用下临界滑水速度预测采用着陆阶段动载影响系数 0.96。

3.3.2 位移阻力角度

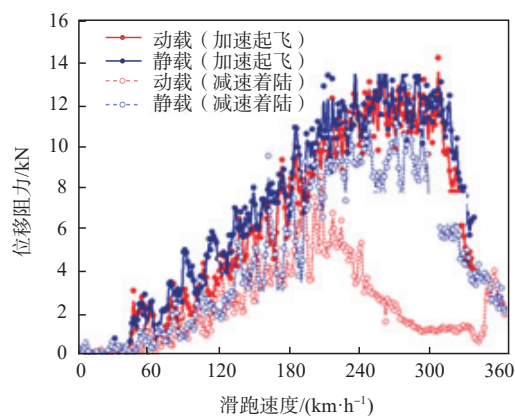
依据文献[23]可知,位移阻力最大值对应的滑跑速度为临界滑水速度,首先分析动荷载对位移阻力变化的影响趋势,见图 14。



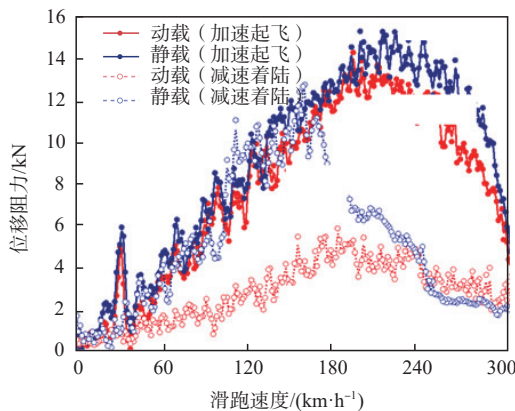
(a) 5 mm



(b) 7.66 mm



(c) 10 mm



(d) 13 mm

图 14 位移阻力随滑跑速度变化曲线

Fig. 14 Curve of displacement resistance versus speed

由图 14 可以看出,起飞阶段,在不同水膜厚度下,动静荷载作用下位移阻力曲线相差较小,最大差 2 kN;着陆阶段,随着水膜厚度的增加,动静荷载下位移阻力的峰值差值逐渐增大。随着水膜厚度的增加,动静荷载对应临界滑水速度均在降低,且起飞阶段与着陆阶段临界滑水速度差值先增后减。这说明低水膜厚度情况下,水膜厚度及荷载形式对于起飞阶段飞机临界状态的影响较小,具体分析见表 5。

表 5 动静荷载下的临界滑水速度

Tab. 5 Critical hydroplaning speed of dynamic and static loads

水膜 厚度 /mm	起飞			着陆		
	动载/ (km·h ⁻¹)	静载/ (km·h ⁻¹)	比值	动载/ (km·h ⁻¹)	静载/ (km·h ⁻¹)	比值
5.00	272.3	283.4	0.96	228.5	243.7	0.94
7.66	253.1	263.5	0.98	200.3	211.7	0.95
9.00	246.3	254.6	0.97	188.3	198.6	0.95
10.00	232.4	239.6	0.97	173.2	183.1	0.95
11.00	218.7	226.4	0.97	167.1	175.4	0.95
12.00	206.5	212.6	0.97	158.1	164.3	0.96
13.00	192.6	198.1	0.97	150.6	155.5	0.97

由表 5 可以看出,随着水膜厚度的增加,动静载临界滑水速度的变化趋势相一致,起飞阶段临界滑水速度降差值较着陆阶段要小;低水膜情况下动静载临界滑水速度差值较大,而高水膜情况下差值较小。进一步根据表 5 给出图 15 动载影响系数曲线。

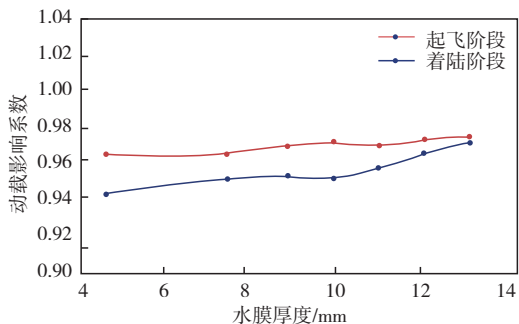


图 15 动载影响系数

Fig. 15 Influence coefficient of dynamic load

由图 15 可以看出,起飞阶段动载影响系数始终大于着陆阶段动载影响系数,起飞阶段动载影响系数在 0.96~0.97 之间,均值为 0.965,着陆阶段动载影响系数在 0.94~0.97 之间,均值为 0.96,以位移阻力为参照分析临界滑水速度时,偏于安全的考虑,将动载影响系数定为 0.96。因此综合道面支撑力和位移阻力分析结果,取考虑轮胎-积水道面动力相互作用影响的临界滑水速度动载影响系数为 0.96。

4 结论

本文利用 ABAQUS 有限元软件建立轮胎-积水道面动力耦合有限元模型,并结合动力学理论模型分析不同水膜厚度及动静荷载作用下道面支撑力、接触面积,位移阻力变化规律,最终获得临界滑水速度的变化情况,得到以下结论:

1) 起飞、着陆阶段,动载均会引起道面支撑力较静载减小,但起飞阶段影响较小,对应临界滑水速度较静载降低值在 5.5 km/h 以内。着陆阶段,动载作用下支撑力下降较大,且存在急剧上升和下降情况,对应临界滑水速度降低值最大可达 9 km/h。

2) 起飞、着陆阶段,动载均会引起轮胎-道面接触面积减小,但起飞阶段对接触面积的影响较小。

着陆阶段,动载对接触面积的影响较起飞阶段变大,接触面积从 0.147 m² 左右降低至 0.015 m² 左右时,即降低至初始接地面积的 10% 时,滑跑速度达到临界滑水速度,与道面支撑力结果一致。

3) 从道面支撑力的角度分析动静荷载对临界滑水速度的影响,动载作用下起飞和着陆阶段临界滑水速度均小于静载结果,但起飞阶段影响较着陆阶段要小;从位移阻力的角度分析动静荷载对临界滑水速度的影响,起飞阶段,不同水膜厚度下,动静荷载作用下位移阻力曲线相差较小,最大差 2 kN;着陆阶段,动静荷载下位移阻力的峰值差值最大可达 8 kN。随着水膜厚度的增加,动静荷载对应临界滑水速度均在降低,差值先增后减。

4) 定义动静载临界滑水速度比值为动荷载影响系数,综合考虑道面支撑力角度和位移阻力角度分析临界滑水速度,偏于安全取考虑轮胎-积水道面动力相互作用影响的临界滑水速度动载影响系数为 0.96。

参考文献

- [1] 董倩,王建华,张献民.飞机-跑道耦合作用下刚性跑道振动响应研究[J].振动与冲击,2021,40(13): 64-72.
DONG Q, WANG J H, ZHANG X M. Vibration Response of Rigid Runway under Aircraft-Runway Coupling[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(13): 64-72. (in Chinese)
- [2] 赵鸿铎,赵兰若,蔡爵威,等.基于临界滑水速度的湿滑路面全域滑水风险量化评价[J].同济大学学报(自然科学版),2023,51(8): 1174-1181.
ZHAO H D, ZHAO L R, CAI J W, et al. Quantitative Evaluation of Hydroplaning Risk on Wet Pavement Based on Critical Hydroplaning Velocity[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(8): 1174-1181. (in Chinese)
- [3] 赵珍辉.轮胎滑水有限元显式动力学分析[D].合肥:中国科学技术大学,2009.
ZHAO Z H. Explicit Finite Element Dynamic Analysis of Tire Water Skiing[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [4] 宋坤.湿滑道面水膜厚度预测及飞机临界滑水速度的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
SONG K. Prediction of Water Film Thickness on Wet Road Surface and Study on Critical Water Skiing Speed of Aircraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [5] 蔡靖,李岳,宗一鸣,等.湿滑跑道飞机着陆轮胎-水膜-道面相互作用[J].北京航空航天大学学报,2017,43(12): 2382-2391.
CAI J, LI Y, ZONG Y M, et al. Aircraft Tire-Water Film-Pavement Interaction on Wet Pavement in Landing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(12): 2382-2391. (in Chinese)

- [6] 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.
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. (in Chinese)
- [7] PASINDU H R. Analytical Evaluation of Impact of Groove Deterioration on Runway Frictional Performance[J]. *Transportation Research Procedia*, 2020, 48: 3814-3823.
- [8] 翁兴中, 寇雅楠, 颜祥程. 飞机滑行作用下水泥混凝土道面板动响应分析[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(14): 6.
WENG X Z, KOU Y N, YAN X C. Dynamic Response Analysis of Cement Concrete Pavement Slab under Aircraft Taxi[J]. *Vibration and Shock*, 2012, 31(14): 6. (in Chinese)
- [9] 李伟雄, 张肖宁, 陈搏, 等. 基于接触应力集中的沥青路面抗滑性能评价[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(16): 107-113.
LI W X, ZHANG X N, CHEN B, et al. Evaluation on Asphalt Pavement Skid Resistance Based on Contact Stress Concentration[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(16): 107-113. (in Chinese)
- [10] YU M, XIAO B, YOU Z P, et al. Dynamic Friction Coefficient between Tire and Compacted Asphalt Mixtures Using Tire-Pavement Dynamic Friction Analyzer[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 258: 119492.
- [11] GAN Y, FANG X, WEI X, et al. Numerical and Experimental Testing of Aircraft Tyre Impact during Landing [J]. *The Aeronautical Journal*, 2021, 125(1294): 2200-2216.
- [12] 吕耀志, 董倩, 胡春飞, 等. 跑道动荷载与国际平整度指数关系研究[J]. *中外公路*, 2013, 33(3): 4.
LV Y Z, DONG Q, HU C F, et al. Research on the Relationship between Runway Dynamic Load and International Roughness Index[J]. *Journal of China and Foreign Highways*, 2013, 33(3): 4. (in Chinese)
- [13] 凌建明, 刘诗福, 袁捷, 等. 采用 IRI 评价机场道面平整度的适用性[J]. *交通运输工程学报*, 2017, 17(1): 20-27.
LING J M, LIU S F, YUAN J, et al. Applicability of IRI Based Evaluation of Airport Pavement Roughness [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2017, 17(1): 20-27. (in Chinese)
- [14] 董倩, 王建华, 张献民. 飞机-跑道耦合作用下刚性跑道振动响应研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(13): 64-72.
DONG Q, WANG J H, ZHANG X M. Vibration Response of Rigid Runway under Aircraft-Runway Coupling[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(13): 64-72. (in Chinese)
- [15] 唐瑞琳, 巩磊, 王博. 飞机起落架动力学建模及地面运动仿真[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(16): 6889-6897.
TANG R L, GONG L, WANG B. Landing Gear Dynamics Modeling and Aircraft Ground Motion Simulation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(16): 6889-6897. (in Chinese)
- [16] 郝艳广, 袁龙文, 韩劲龙, 等. 基于车-桥耦合动力作用的车辆与桥梁力学行为[J]. *公路交通科技*, 2021, 38(2): 80-89.
HAO Y G, YUAN L W, HAN J L, et al. Mechanical Behavior of Vehicle and Bridge Based on Vehicle-Bridge Coupling Dynamic Action[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2021, 38(2): 80-89. (in Chinese)
- [17] 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 Y M. Research on Tire Mechanical Behavior and Aircraft Landing Safety under Wet Road Surface Conditions[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017. (in Chinese)
- [18] 李晓杰, 张程娇, 王小红, 等. 水的状态方程对水下爆炸影响的研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(8): 46-52.
LI X J, ZHANG C J, WANG X H, et al. Numerical Study on the Effect of Equations of State of Water on Underwater Explosions [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(8): 46-52. (in Chinese)
- [19] 蒋怀宇. 航空承运人湿跑道和污染跑道运行管理规定[S]. 北京: 中国民用航空局, 2021.
JING H Y. Regulations for the Operation and Management of Wet Runways and Contaminated Runways by Air Carriers[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2021. (in Chinese)
- [20] 李岳, 宗辉杭, 蔡靖, 等. 飞机轮胎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)
- [21] 杨丰丰, 赵显新, 周兴林, 等. 轮胎-道路接触力动态加载装置的设计[J]. *机械设计与制造*, 2018(8): 209-211.
YANG F F, ZHAO X X, ZHOU X L, et al. Design of Tire Toad Contact Force Dynamic Loading Device[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2018(8): 209-211. (in Chinese)
- [22] 全国轮胎轮辋标准化技术委员会. 航空轮胎系列: GB/T 9746—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
National Technical Committee on Tire and Rim of Standardization Administration of China. Series of Aircraft Tyres: GB/T 9746—2004[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004. (in Chinese)
- [23] 蔡靖, 黄钰岱, 李琪, 等. 飞机轮胎-湿滑道面相互作用 SPH 算法仿真分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2025, 51(1): 53-62.
CAI J, HUANG Y D, LI Q, et al. Simulation Analysis of SPH Algorithm for Aircraft Tire-Wet Slide Surface Interaction[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2025, 51(1): 53-62. (in Chinese)

(编辑: 陈斐)