

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.01.016

侧风着陆滑行飞机轮胎-道面相互作用分析

蔡靖, 李琪, 李岳, 刘芳兵, 黄钰岱

(中国民航大学交通科学与工程学院, 天津 300300)

摘要: 通过对侧风作用下的飞机受力进行分析,建立了轮胎-道面相互作用理论模型,得到了侧风作用下两者相互作用的主要影响因素,并进一步基于有限元分析软件ABAQUS建立了侧偏轮胎-道面有限元模型,研究了轮胎不同侧偏角度以及跑道不同积水厚度等因素对于飞机轮胎与道面相互作用的影响规律变化情况。研究结果表明:飞机在跑道滑行时在侧风作用会产生偏离跑道中心线的趋势,道面对轮胎的侧偏力是影响飞机质心偏离跑道中心线距离的重要因素;轮胎侧偏角增大导致轮胎接地非对称性增强,轮胎迎水面的区域长度也呈逐步增大趋势;轮胎迎水面的动水压强呈非对称分布,动水压强较高的区域出现在轮胎的偏转侧,并且最大值接近于 1 MPa,此时易出现滑水风险;而随着跑道道面水膜厚度的逐渐增加,道面相应的侧向摩擦因数也在减小,当水膜厚度达到机场运行管理规定中临界值 13 mm 时,道面摩擦因数仅为干道面时的一半,大大增加飞机偏出跑道风险。

关键词: 交通运输工程;侧风;轮胎侧偏;轮胎-道面相互作用;CEL算法

中图分类号: U463.341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)01-0131-08

Analysis of Tire-Pavement Interaction During Crosswind Landing and Taxiing

CAI Jing, LI Qi, LI Yue, LIU Fangbing, HUANG Yuda

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

Abstract: By analysing the aircraft forces under the effect of crosswind, the theoretical model of tire-pavement interaction is introduced to obtain the main influencing factors in crosswind and ABAQUS is used to establish the interaction model between the cornering tire and the runway pavement. The effect of the slip angle and different runway water thicknesses on the interaction between aircraft tires and the pavement surface is studied. The results indicate that the crosswind causes the aircraft to deviate from the runway center line when the aircraft taxis, and the slide force of the tire on the runway pavement is an important factor affecting the distance of the aircraft's center of mass from the runway center line. An increase in tire slip angle leads to an increase in tire grounding characteristics and a progressive increase in the length of water front area. The distribution of water front pressure increases asymmetrically, in which the high pressure area is concentrated on the side of tire deflection and the maximum value is close to 1 MPa. At this time, there is a risk of water skiing. With the increase of the thickness of water, the lateral friction coefficient of the wet pavement decreases. When the thickness of water reaches the critical value of 13 mm in the airport operational regulations, the lateral friction coefficient of the wet pavement is only half of that of the dry pavement, which

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508559)。

收稿日期: 2021-12-15; **修订日期:** 2022-08-02

通信作者: 李岳, 男, 博士, 副教授, E-mail: leoliyue@163.com。

引用格式: 蔡靖, 李琪, 李岳, 等. 侧风着陆滑行飞机轮胎-道面相互作用分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(1): 131-138. CAI Jing, LI Qi, LI Yue, et al. Analysis of tire-pavement interaction during crosswind landing and taxiing[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(1): 131-138.

greatly increases the risk of aircraft deviating from the runway.

Key words: transportation engineering; crosswind; cornering tire; tire-pavement interaction; CEL algorithm

飞机的着陆过程总体可以分为两个阶段:空中飞行的进近阶段和跑道道面的滑跑阶段。当侧风作用于进近段的飞机时,飞行员可以通过人工操作的方法^[1]来补偿由于侧风作用引起的飞机偏离既定航向的运动,从而使飞机在与跑道表面接触时仍然可以对准跑道中心线。而当侧风作用于在道面滑跑阶段的飞机机身时,飞机能否保持沿跑道中心线滑跑的状态主要取决于飞机轮胎与跑道表面的相互作用。FAA统计数据表明,由侧风导致的事故中发生在地面滑行阶段的比例大于发生在空中进近段^[2]。因此,飞机着陆滑行时与道面的相互作用对侧风作用下飞机着陆安全影响重大。

因此,为了进一步探究侧风作用条件下的飞机在着陆滑行阶段的运行安全问题,国内许多学者对此开展了相关研究。牟让科等^[3]根据飞机在非对称着陆及滑跑时的情况,通过建立动力学理论模型验证该荷载情况可以合理模拟飞机非对称着陆全过程。苏彬等^[4]根据飞机起落架在运动过程中的受力特点,建立一种可以用于飞行模拟器开发的起落架数学模型,并基于此模型进一步数值仿真了飞机在侧风作用中起飞滑跑、减速着陆、道面滑跑及转弯等运动过程,准确地表现了飞机在侧风作用下的运动过程中的动力学特性。马大卫和聂宏等^[5]则建立了飞机在恒定侧风影响下的数学模型,并通过建立虚拟样机的方法进一步分析了飞机在侧风作用下的动力响应。综上所述,可以看到目前针对飞机在侧风作用下的运行安全研究主要以飞机的操纵控制为中心而开展,而很少涉及侧风因素对飞机与跑道间的相互作用影响。

当飞机在跑道道面上运行时,其会受到来自道面的作用力,而飞机轮胎是与跑道道面直接发生接触的部分,因此道面对飞机的作用力实际是通过轮胎传递的,其中包括垂直于轮胎与道面的接触面且方向指向轮胎轴心的道面支撑力和与运动趋势方向相反的摩擦力。而当侧风作用在跑道上滑行的飞机机身时,在风荷载的作用下,轮胎会受到沿侧风方向的侧向力,相应地,轮胎也会受到与该侧向力作用方向相反的侧向道面摩擦力的影响。考虑到由于轮胎侧偏特性的影响,飞机轮胎在侧风作用下产生的弹性变形会使其前进方向逐渐发生侧偏,从而使飞机在着陆滑跑过程中产生前进方向偏离跑道中心线的现象,容易引起高速运行下的飞机发

生冲偏出跑道事故,因此必须对侧风作用下飞机轮胎的侧偏特性进行研究。

目前国内外针对轮胎侧偏特性的研究主要围绕汽车轮胎进行展开的。1941年,Fromm^[6]通过对轮胎结构的简化,认为胎冠变形是产生轮胎侧偏行为的原因,提出最早的“梁模型”。在此基础上,Fiala^[7]建立了侧偏轮胎与道面相互作用的理论模型。Pacejka^[8]将轮胎胎体变形视作受拉伸的弦,并基于此进一步建立了轮胎的侧偏力与侧偏角之间的函数关系,为非稳态轮胎模型的建立提供基础。Bakker和Pacejka等^[9-12]在试验研究基础上,基于三角函数建立用于描述轮胎侧偏特性的“Magic Formula”经验模型。郭孔辉等^[13-14]以Fiala的理论模型为基础,建立统一的轮胎侧偏半经验模型,可以有效实现不同工况下车辆轮胎的力学特性的预测。Rao等^[15]通过有限元模拟代替物理试验识别轮胎设计属性、工作条件和“Magic Formula”模型因子之间的关系。另一方面,由于试验条件以及环境的限制,针对飞机轮胎,也仅有NASA研究中心曾通过飞机起落架动态试验机针对不同转动速度、侧偏角度、轮胎胎压等多种因素影响下的轮胎力学特性进行过试验研究^[16-17]。

综上所述,可以得出目前国内外对于侧风作用下的飞机着陆滑性研究,更多着眼于指导飞机操纵,尤其对于轮胎侧偏特性的研究对飞机轮胎鲜有涉及。所以有必要进一步探讨侧风作用下不同因素对飞机轮胎与跑道道面相互作用的影响,从而为侧风作用时飞机运行安全提供理论依据。

因此,本文首先基于侧风作用下飞机受力情况建立了飞机轮胎与跑道道面相互作用理论模型,分析了其主要影响因素,并进一步以此为基础利用ABAQUS有限元分析软件建立飞机轮胎-道面相互作用三维有限元模型,对侧风影响下的飞机轮胎与跑道道面相互作用变化情况进行分析与研究。

1 轮胎与道面相互作用力分析

为了分析飞机与道面之间的相互作用,选取飞机轮胎为研究对象。

(1) 侧风着陆中轮胎侧偏分析

为了进一步研究侧风着陆过程中飞机轮胎的侧偏情况,建立简化的刷子模型^[18-19]:假定轮胎仅由轮胎主体和轮胎表面两部分组成,其中轮胎主体

部分被假定为刚体,不发生变形,轮胎表面看作是与轮胎主体部分紧密相连的弹性刷毛,其方向沿着轮胎胎心指向轮胎胎面。定义轮胎与跑道表面相互作用过程中轮胎胎面与跑道表面的接触部分为轮胎的接地印记,长度为 $2a$,进一步以接地印记所在平面为基础建立平面直角坐标系 xOy ,结果如图 1 所示。其中 O 点为印记的前端, x 轴正向为轮胎的前进方向, y 轴正向为刷毛的侧向变形方向, λ 表示轮胎在侧风作用下产生的侧偏角。结合轮胎在侧风作用下有无产生侧向偏移的情况,进一步将印记分为两部分:附着区(无侧向位移)和滑移区(存在侧向位移),并定义两区域的交界处 x_c 为起滑点。

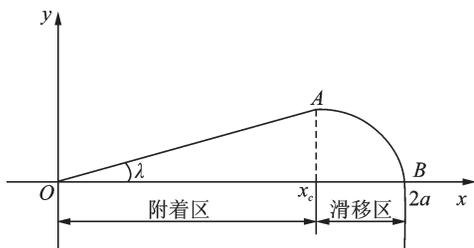


图 1 轮胎接地印记侧向变形

Fig.1 Lateral deformation of tire grounding mark

当轮胎的侧偏角度较小时,此时在接地印记内轮胎不发生侧向滑移,印记内侧向分布荷载 $q_y(x)$ 如图 2 所示,则 $q_y(x)$ 可表示为

$$q_y(x) = k\Delta y = kx \tan \lambda \quad (1)$$

式中 k 代表轮胎胎面的侧向分布刚度。

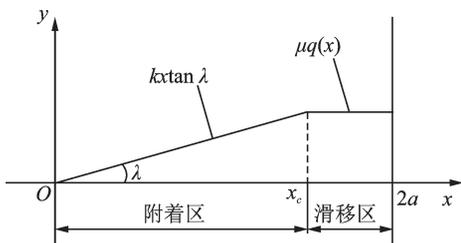


图 2 轮胎接地印记侧向分布荷载

Fig.2 Lateral distributed load of tire grounding mark

因此,侧风作用下轮胎所受的侧偏力 f_y 为

$$f_y = \int_0^{2a} q_y(x) dx = 2a^2 k \tan \lambda \quad (2)$$

当侧偏角 λ 较大时,轮胎将在接地印记内产生侧向滑移,为了使计算简便,本文忽略了跑道道面的纹理,并假定跑道道面摩擦因数处处相等,数值均为 μ 。设 $q_z(x)$ 为轮胎印记内的竖向分布荷载,当 $x > x_c$ 时, $q_y(x) = \mu q_z(x)$,其中起滑点 x_c 为

$$x_c = (\mu q_z(x)) / (k \tan \lambda) \quad (3)$$

因此,轮胎所受的侧偏力 f_y 可表示为

$$f_y = \int_0^{2a} q_y dx = \int_0^{x_c} xk \tan \lambda dx + \int_{x_c}^{2a} \mu q_z dx \quad (4)$$

将轮胎印记内竖向荷载近似为均匀分布,则压力分布函数 $q_z(x)$ 为

$$q_z(x) = \frac{N}{2a} \quad (5)$$

将压力分布函数 $q_z(x)$ 代入侧偏力 f_y 表达式(4),整理得到

$$f_y = \mu N - \frac{\mu^2 N^2}{4C_\lambda \tan \lambda} \quad (6)$$

式中: C_λ 为轮胎侧偏刚度,数值上有 $C_\lambda = 2a^2 \lambda$,并取决于轮胎的类型; N 为轮胎所受道面支撑力。

由式(4)可知,对于某一类型的轮胎而言,道面摩擦因数 μ 、轮胎所受的道面支撑力 N 以及侧风作用下轮胎产生的侧偏角 λ 是影响轮胎侧偏力 f_y 的主要因素。

(2)道面支撑力

根据飞机在道面上滑跑时的 3 自由度运动假设,此时在竖直方向(z_d 轴)上飞机受力平衡,且假定飞机左、右两侧主起落架的轮胎荷载分配系数相等,并取 G 为飞机在跑道上滑跑时的重力。

当飞机在干燥道面上滑行时,由于其速度较高,因此还需考虑升力作用对飞机受力的影响,所以飞机在 z_d 轴方向上的力学方程可表示为

$$\begin{cases} N_n + N_l + N_r = G - L \\ N_l = N_r \end{cases} \quad (7)$$

而当飞机在被水污染的跑道上行驶时,由于其高速行进的状态,导致跑道上的积水无法及时从飞机轮胎处排出从而形成“壅水”现象并产生动水压强,其作用于飞机轮胎并对轮胎产生竖直向上的作用力。因此,飞机轮胎所受的垂直道面向上的抬升力分别来自道面对轮胎的竖向支撑力和轮胎处的“壅水”所产生的竖向动水压力。因此,飞机在 z_d 轴方向上力学方程可表示为

$$\begin{cases} (N_n + W_n) + (N_l + W_l) + (N_r + W_r) = G - L \\ N_l = N_r \end{cases} \quad (8)$$

式中 W_n 、 W_l 、 W_r 分别为前起落架、左侧主起落架、右侧主起落架受到的竖向水膜抬升力。

根据空气动力学原理,飞机受到的空气竖向抬升力 L 可表示为

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho v_a^2 S = \frac{1}{2} C_L \rho [(v_w - v_{dy})^2 + v^2] S \quad (9)$$

式中 C_L 为飞机的升力系数,其可表示为

$$C_L = C_{L0} + C_{L\alpha} \alpha \quad (10)$$

式中:当飞机的迎角 α 为零时,飞机相应的升力系

数变为 C_{L0} , 并且对于轴对称飞机有 $C_{L0} = 0$; $C_{L\alpha}$ 为飞机机翼的升力特性曲线斜率。

对于某一种特定机型的飞机而言, 升力系数线性取决于飞机迎角 α , 而着陆后飞机的迎角可视作定值, 所以可以认为飞机受到的空气竖向抬升力主要取决于飞机在跑道上的滑行速度 v 的大小。

因此对于某一机型, 行驶速度 v 和道面干湿情况是轮胎所受道面支撑力 N 的影响因素, 当机型确定时道面摩擦因数 μ 、轮胎侧偏角 λ 、飞机的行驶速度 v 和道面干湿条件是影响飞机与道面相互作用关系的主要因素。

2 轮胎道面相互作用模型建立

2.1 轮胎模型

选取常见的空客 A320 作为代表飞机机型来展开研究, A320 机型的主起落架轮胎型号为 46×17R20, 相关参数如表 1 所示。

表 1 飞机轮胎主要参数

Table 1 Main parameters of aircraft tires

名称	数值
轮胎直径/cm	116.8
轮胎内径/cm	50.8
轮胎宽度/cm	43.2
轮辋宽度/轮胎断面宽	0.7
轮辋胎圈座斜度/(°)	5
额定负荷/kN	208.7
额定胎压/kPa	无负荷: 1 530 有负荷: 1 590

本文使用有限元分析软件 ABAQUS 来建立飞机轮胎的三维模型: 根据飞机轮胎的实际物理特征, 在 AutoCAD 软件中按照其实际尺寸绘制轮胎剖面并导入 ABAQUS 生成轮胎有限元模型。并且为了提高有限元模型的总体计算效率, 本文将轮胎的主体部分等效为各项同性的橡胶材料且使用超弹性模型 Mooney-Rivlin 来描述轮胎的物理变形特征。总体上, 飞机轮胎使用 C3D8R 单元进行模拟。

2.2 道面模型

对于跑道道面而言, 同样为了使模型运算更为简便起见, 则通过 S4R(壳单元) 来建立, 并且忽略跑道在飞机轮胎作用下产生的形变, 将跑道表面看作是刚性的。由于轮胎发生侧偏时, 其所受的侧偏力需要一定的时间才能达到稳定状态, 同时根据多次试算可知, 当轮胎的行驶速度越小时, 侧偏力达到稳定时所需的时间就越长, 而轮胎相应的行驶距离也就越长。因此, 为了便于结果分析, 根据该机

型的着陆速度范围(0~250 km/h), 本文最终设定轮胎行进的最低速度工况为 50 km/h, 而经计算该种速度工况下轮胎所受的侧偏力在行驶距离达到 14 m 后基本稳定, 因此取跑道道面的尺寸为 16.0 m×1.4 m(长×宽)。

为了建立湿滑的道面模型, 本文在道面模型的表面加设积水模型, 其由两部分组成: 与道面直接接触的积水层和覆盖在积水层上方的空气层, 设定积水区的总厚度为 300 mm, 并且根据《航空承运人湿跑道和污染跑道运行管理规定》^[20] 中跑道表面水膜超过 13 mm 要禁止航空器起降的规定, 最终取积水层的厚度为 7.66 mm。考虑到积水模型的纵向长度过长时会大大影响模型的整体运算效率^[21], 因此本文建立的积水域的平面尺寸为 1.0 m×1.0 m, 同时为了使有限元模型的计算结果更为精确可靠, 积水模型在垂直方向上使用 EC3D8R(拉格朗日单元) 由高到低逐步加密的方式进行网格划分。经反复试算, 最终水膜层网格划分为 3 层。

2.3 轮胎-湿滑道面有限元模型

对于积水道面, 则分别将建立的飞机轮胎模型和积水模型按照一定位置关系放置在道面一端, 并且根据相对运动原理, 在积水域的前后两端分别设置“进水面”和“出水面”, 使水流以特定速度冲击原地滚动的飞机轮胎, 同时为了防止水的渗透, 本文将积水域的两侧和底面均设定为“不透水”边界^[22], 最终建立的有限元模型如图 3 所示。

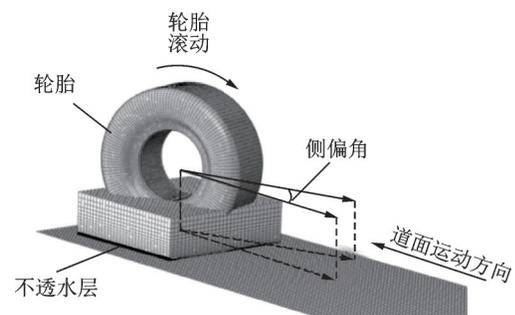


图 3 轮胎-湿道面相互作用模型

Fig.3 Tire-wet pavement interaction model

为验证轮胎-湿道面相互作用有限元模型的可靠性, 设定轮胎的侧偏角度为 0° , 道面积水厚度为 7.66 mm, 分别提取轮胎以不同速度在该湿道面上行驶时所受的道面支撑力, 计算出轮胎发生滑水时的临界危险速度为 230 km/h, 与经典的 NASA 临界滑水速度公式^[23] 的计算结果 214.7 km/h 相比十分接近, 相对误差仅为 7.1%。因此, 可以认为该有限元模型有较高的可靠性, 可以用于轮胎与湿道面相互作用分析。

3 相互作用分析

3.1 湿道面轮胎侧偏特性分析

为了分析侧风下飞机在湿滑跑道上滑行时轮胎与道面的相互作用,在 7.66 mm 厚度的水膜条件下,设置侧偏角为 0°、2°、4°、6°、8° 五个工况,计算飞机滑跑速度相同时的轮印内应力分布,如图 4 所示。

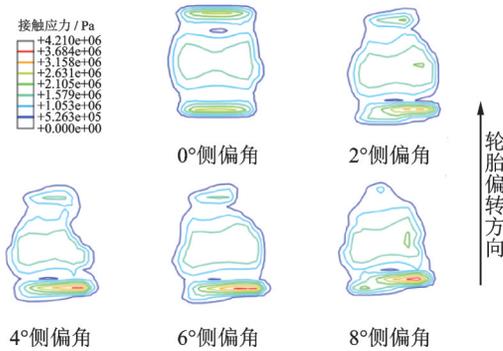


图 4 湿道面上轮印内应力分布
Fig.4 Stress distribution in wheel print on wet pavement

由图 4 可以看出,当飞机轮胎在侧风的作用下发生侧偏后,轮胎与跑道道面的接触印记内的应力呈现不均匀分布状态,且在轮胎的背向片偏转侧出现应力集中现象。而随着轮胎侧偏角度的逐渐增大,这种应力集中现象愈发明显,并且当轮胎侧偏角度达到 8° 时,轮胎接触印记中的应力达到最大值 4.21 MPa。为了进一步分析轮胎侧偏角度对接触印记中应力分布状态的影响,分别提取不同侧偏角下的道面高应力区面积,并计算相应的高应力区面积所占轮印面积的百分比,结果如表 2 所示。

表 2 不同侧偏角时湿道面高应力区面积

Table 2 Area of high stress zone of wet pavement at different sideslip angles

侧偏角/(°)	0	2	4	6	8
高应力区面积/ (10 ⁻³ m ²)	58	51	48	53	52
轮印面积/ (10 ⁻³ m ²)	144	125	116	126	123
高应力区占比/%	40.0	40.8	41.4	42.1	42.3

由表 2 可以看到,当轮胎不发生偏转时,高应力区面积占比相对较小,为 40.0%,而随着轮胎侧偏角度的逐渐增大,高应力区的面积占比也随之增大,当轮胎的侧偏角度达到 8° 时,高应力面积所占比例达到了 42.3%。

同样,为了进一步分析侧偏角度对轮胎与道面接触面积的影响,分别提取不同侧偏角度下的轮胎

偏转侧、背向偏转侧及总体与道面的接触面积,并将结果绘制在图 5 中。

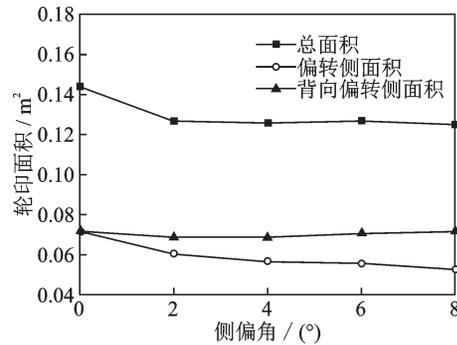


图 5 湿道面上不同侧偏角时轮印面积
Fig.5 Wheel print area at different sideslip angles on wet pavement

由图 5 可以看到,在侧风作用下轮胎发生侧偏后的轮印总面积基本保持不变,为 0.126 m²,不随侧偏角增大而有明显变化,并且与轮胎不发生侧偏情况下的胎印总面积 0.144 m² 相比下降 12.5%。对于侧偏轮胎,当侧偏角从 2° 逐渐增大时,偏转侧的轮印面积由 0.061 m² 逐渐下降到 0.053 m²,而背向偏转侧轮印面积则由 0.069 m² 逐渐增大到 0.072 m²。同样,为了分析轮胎两侧轮印面积在不同侧偏角度下的变化情况,分别计算轮胎偏转侧和背向偏转侧面积所占总面积的百分比,并将计算结果汇总至表 3 中。

表 3 湿滑道面轮印两侧面积占总面积比例

Table 3 Proportion of the area on both sides of the wheel printing on the wet runway surface to the total area

轮胎侧偏角/(°)	0	2	4	6	8
偏转侧面积 占总面积百分比/%	50	47	45	44	42
背向偏转侧面积 占总面积百分比/%	50	53	55	56	58

由表 3 可知,当轮胎的侧偏角为 0°,即轮胎不发生侧偏时,轮胎中心线两侧的胎印面积相等,均占胎印总面积的一半。随着侧风作用的逐渐增强,轮胎偏转角度开始增大,轮胎偏转侧的胎印面积占比开始迅速减小,与此同时背向偏转侧的胎印面积占比则逐渐增大,轮胎两侧与道面接触的差异性开始逐渐显现。当轮胎的偏转角度达到 8° 时,轮胎两侧胎印面积占比的差距也达到最大值 16%。

进一步分别对轮胎中心线两侧印记内的竖向接触应力进行积分,即可得到轮胎偏转侧和背向偏转侧所受的道面支撑力,并计算道面总支撑力,将计算结果绘制在图 6 中。

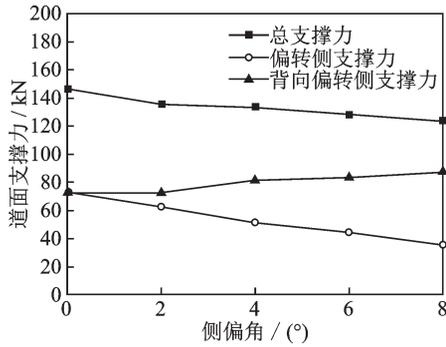


图6 湿道面上不同侧偏角时道面支撑力

Fig.6 Pavement support force at different sideslip angles on wet pavement

由图6可知,当轮胎侧偏角度为 0° 时,轮胎不发生偏转,此时轮胎中心线两侧的支撑力保持一致,均为73.5 kN。而随着轮胎侧偏角度的增大,轮胎偏转侧所受的道面支撑力开始迅速减小,而轮胎背向偏转侧所受的道面支撑力则呈逐渐增大的趋势,当轮胎侧偏角度达到 8° 时,两者的差值也达到最大。进一步分析不同侧偏角度下轮胎所受总的道面支撑力的变化情况,可以看到道面总支撑力也呈逐步下降的趋势,表明水膜对轮胎产生的竖向作用力在逐渐增强,因此分别提取轮胎前缘部分迎水面所受到的动水压强,结果如图7所示。

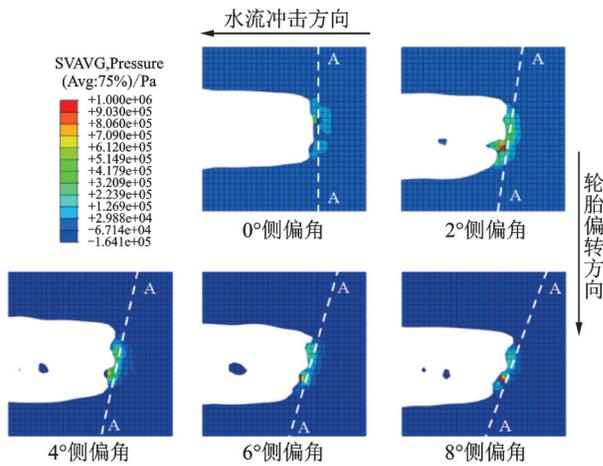


图7 不同侧偏角度时动水压强分布

Fig.7 Hydrodynamic pressure distribution at different sideslip angles

由图7可以看到,随着轮胎侧偏角的逐渐增大,流体绕过轮胎的路径也逐渐变长,轮胎前缘迎水面区域的长度也由未发生偏转时的0.29 m增长到0.34 m。同样,为了分析轮胎侧偏角度对动水压强的影响,进一步提取轮胎前缘部分投影方向横截面A-A上的动水压强,其变化情况如图8所示。

由图8可知,当轮胎不发生偏转时,横截面上的动水压强以轮胎轴线为中心基本呈对称分布。而随着轮胎侧偏角度从0开始逐渐增大,轮胎偏转

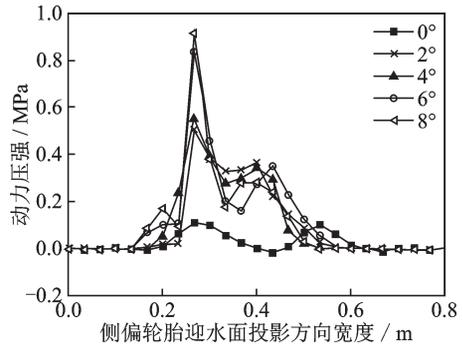


图8 动水压强变化曲线

Fig.8 Hydrodynamic pressure curves

侧对应的横截面上的动水压强分布出现高压集中区,并且轮胎的偏转角度越大,相应的动水压强高压区极值就越大。当偏转角度为 8° 时,动水压强峰值接近1 MPa,与轮胎胎压(1.14 MPa)相当,此时飞机轮胎接近滑水。

3.2 湿道面侧向摩擦因数

依据文献[24],积水厚度不同,当飞机以200 km/h的速度行驶时,道面摩擦因数与积水厚度的关系取值见表4。

表4 不同积水厚度湿道面摩擦因数

Table 4 Friction coefficient of wet pavement with different water accumulation thicknesses

积水厚度 h /mm	3	5	7.66	10	13
摩擦因数 μ	0.66	0.53	0.45	0.43	0.32

为了分析不同工况下轮胎侧向力系数的变化情况,在飞机滑行速度为200 km/h时,分别选取道面摩擦因数为0.66、0.53、0.45、0.43、0.32时的5种工况并分别计算道面水膜厚度为3、5、7.66、10以及13 mm时的轮胎侧向力系数,将结果绘制在图9中。

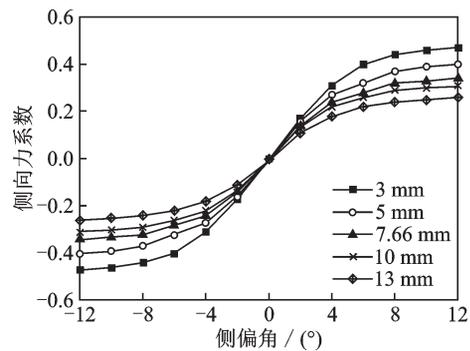


图9 轮胎侧向力系数变化曲线

Fig.9 Tire lateral force coefficient curves

由图9可知,不同水膜厚度下,轮胎侧向力系数变化曲线均存在一定范围的近似线性变化区间。当水膜厚度为3 mm时,轮胎侧向力系数的近

似线性变化区间约为 $(-8^{\circ}, +8^{\circ})$,而随着道面上水膜厚度的逐渐增厚,侧向力系数线性变化区间的范围也在逐渐减小。当水膜达到跑道开放所允许的最大厚度 13 mm 时,该线性变化区间已经缩小至 $(-4^{\circ}, +4^{\circ})$ 。超出该范围后轮胎将达到侧向附着极限,并且轮胎侧向力系数的变化趋势也逐渐趋于平缓。对于湿道面,将轮胎在不同水膜厚度下所达到的最大侧向力系数定义为跑道侧向摩擦因数,分别进行计算并与干燥道面状态下的跑道侧向摩擦因数数值进行对比,计算相应工况下的下降百分比,计算结果如表 5 所示。

表 5 不同水膜厚度下的湿滑道面侧向摩擦因数

Table 5 Lateral friction coefficient of wet slide surface under different water film thicknesses

积水厚度/mm	0	3	5	7.66	10	13
侧向摩擦因数	0.51	0.47	0.40	0.34	0.31	0.26
下降率/%	—	7.8	21.6	33.3	39.2	49.0

由表 5 可以看出,与干燥道面状况下的跑道侧向摩擦因数相比,当跑道道面被水污染后,其相应的侧向摩擦因数均有所下降,表明在侧风作用下,与干燥道面相比,飞机在湿滑道面上的抗侧滑能力较差。进一步分析不同水膜厚度下的道面侧向摩擦因数可以发现,干燥道面条件下的侧向摩擦因数为 0.51,而随着水膜厚度的增大,摩擦因数数值呈逐渐下降的趋势,当水膜厚度达到允许的最大值 13 mm 时,道面侧向摩擦因数仅为 0.26,下降幅度近 50%。因此,当飞机在该水膜厚度的污染跑道上滑行时,更容易偏离跑道中心线,大大增加飞机着陆过程中的偏出跑道风险。这与上述管理规定中水膜厚度超过 13 mm 要对跑道进行关闭的要求相契合。

4 结 论

基于 ABAQUS 软件应用混合拉格朗日-欧拉方法建立了飞机轮胎-道面相互作用三维有限元模型,通过分析得出以下结论:

(1)在侧风作用下轮胎发生偏转后,轮胎与道面的接触印记内应力呈不均匀分布状态,并且侧偏角度越大,这种不均匀状态就越明显。当侧偏角度达到 8° 时,轮胎背向偏转侧的接触印记中存在最大应力值 4.21 MPa。

(2)随着轮胎侧偏角度的增大,轮印不对称性也在逐渐增强。当侧偏角为 8° 时,轮印两侧的非对称性程度也达到最大,此时轮胎偏转侧的动水压强峰值也达到最大,接近 1 MPa,与轮胎胎压(1.14

MPa)相当。

(3)道面积水越厚,湿滑道面侧向摩擦因数越小。当积水厚度为 13 mm 时,湿滑道面侧向摩擦因数仅为干燥道面的一半。侧偏轮胎在湿滑上行,将大大增加轮胎滑水风险。

参考文献:

- [1] 杨俊,杨军利,叶露. 飞行原理[M]. 2版. 成都:西南交通大学出版社, 2012.
YANG Jun, YANG Junli, YE Lu. Principles of flight [M]. 2nd ed. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2012.
- [2] ES G V, GEEST P V D, NIEUWPOORT T. Safety aspects of aircraft operations in crosswind[R]. [S. l.]: National Aerospace Laboratory NLR, 2001.
- [3] 牟让科,胡孟权. 飞机非对称着陆和滑跑载荷分析[J]. 机械科学与技术, 2000(S1): 72-74.
MU Rangke, HU Mengquan. Analysis of the asymmetric landing and taxiing loads of aircraft[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2000(S1): 72-74.
- [4] 苏彬,王大海,陈又军. 起落架数学模型及其在风场中的应用[J]. 飞行力学, 2007, 25(1): 63-66.
SU Bin, WANG Dahai, CHEN Youjun. Landing-gear mathematical model and its application in wind-field[J]. Flight Dynamics, 2007, 25(1): 63-66.
- [5] 马大卫,聂宏,张明. 民用飞机侧风影响下的侧偏研究[J]. 飞行力学, 2013(1): 5-9.
MA Dawei, NIE Hong, ZHANG Ming. The corrective research of the civil aircraft under the influence of the crosswind[J]. Flight Dynamics, 2013(1): 5-9.
- [6] FROMN H. Kuzer berichte ueber die geschichte der theorie des tadflattens[M]. Ber: Lilie-Nthal Ges, 1941.
- [7] FIALA E. Seitenkrafte am rollenden luftreifen[J]. VDI-Zeitschrift, 1954, 29(11): 81-92.
- [8] PACEJKA H B. The wheel shimmy phenomenon: A theoretical and experimental investigation with particular reference to the non-linear problem[EB/OL]. (1966-12-14). <http://resolver.tudelft.nl/uuid:f1466330-a78c-4784-bc05-47d4d7e9569a>.
- [9] PACEJKA H B, SHARP R S. Shear force development by pneumatic tyres in steady state conditions: A review of modelling aspects[J]. Vehicle System Dynamics, 1991, 20(3): 121-175.
- [10] BAKKER E, NYBORG L, PACEJKA H B. Tyre modelling for use in vehicle system studies[J]. SAE Transactions 870421, 1987, 96(2): 190-204.
- [11] BAKKER E, PACEJKA H B, LIDNER L. A new

- tire model with an application in vehicle system studies [J]. SAE Transactions 890087, 1989, 98(6): 101-113.
- [12] BESSELINK I J M, SCHMEITZ A J C, PACEJKA H B. An improved magic formula/swift tyre model that can handle inflation pressure changes[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(S1): 337-352.
- [13] 郭孔辉, 王裕民, 刘蕴博, 等. 轮胎侧偏特性的半经验模型[J]. 汽车工程, 1986(2): 46-56.
GUO Konghui, WANG Yumin, LIU Yunbo, et al. The semi-empirical model for tire lateral properties [J]. Automotive Engineering, 1986(2): 46-56.
- [14] 郭孔辉. UniTire: 统一轮胎模型[J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 90-99.
GUO Konghui. UniTire: Unified tire model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12): 90-99.
- [15] RAO K V N, KUMAR R K, MUKHOPADHYAY R, et al. A study of the relationship between magic formula coefficients and tyre design attributes through finite element analysis [J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(1): 33-63.
- [16] DAUGHERTY R H. A study of the mechanical properties of modern radial aircraft tires: NASA/TM-2003-212415[R]. Hampton, Virginia: Langley Research Center, 2003.
- [17] 朱一锷. 飞行原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2018.
ZHU Yikun. Principles of flight[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2018.
- [18] 郭孔辉, 吴海东, 卢荡. 冰面上轮胎稳态侧偏刷子模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007(2): 7-12.
GUO Konghui, WU Haidong, LU Dang. Brush model for steady-state side-slip of tire on icy road[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007(2): 7-12.
- [19] 刘青, 郭孔辉, 陈秉聪. 轮胎刷子模型分析: I. 稳态侧偏刷子模型[J]. 农业机械学报, 2000(1): 20-23.
LIU Qing, GUO Konghui, CHEN Bingcong. Review of tire brush models: I. Steady state cornering brush models[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000(1): 20-23.
- [20] 中国民用航空局. 航空承运人湿跑道和污染跑道运行管理规定: AC-121-FS-33R1[S]. 北京: 中国民用航空局, 2021.
Civil Aviation Administration of China. Wet the runway and pollution rules of operation and management with carrier in civil aviation: AC-121-FS-33R1[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2021.
- [21] 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(7): 241-252.
CAI Jing, LI Yue, ZONG Yiming. Comparison of prediction methods for critical hydroplaning speed of aircraft tire on wet pavement [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017(7): 241-252.
- [22] 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(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 Traffic and Transportation Engineering, 2017(5): 90-101.
- [23] HORNE W B, DREHER R C. Phenomena of pneumatic tire hydroplaning: Technical Note D-2056 [R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administration, 1963.
- [24] 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, 2017.
ZHANG Heng. Study on the hydroplaning behavior of aircraft under the interaction of tire and wet pavement [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2017.

(编辑: 胥橙庭)