

Simulation Study on Anti-Sliding Performance of Hydrops Runway

Zhaoxu Liu

Dept. ChongQing JiaoTong University, ChongQing, China

Abstract: In order to study the anti-sliding performance of the aircraft in the runway, a finite element analysis method is used to establish a finite element model of the contact between the aircraft wheel and the road surface. The vertical deformation of tire under aircraft load is analyzed and compared with empirical formula to verify the feasibility of the model. Then the adhesion coefficient is used as the anti-sliding evaluation index, and the influence of aircraft speed, tire load, tire pressure and water film thickness on the adhesion coefficient is analyzed by model. The specific conclusions for this study are as follows: The adhesion coefficient between the tire and the pavement decreases with increasing speed, increases as the tire load increases, and decreases as the tire pressure increases. The adhesion coefficient decreases with the increase of water film thickness, and when the water film thickness is small, the adhesion coefficient decreases more obviously with the increase of velocity.

Keywords: Hydrops runway; Finite element simulation; Anti-sliding performance; Adhesion coefficient

积水机场跑道抗滑性能仿真研究

刘朝旭

重庆交通大学, 重庆, 中国, 400074

Email: 787770469@qq.com

摘要: 为了研究飞机在积水机场道面的抗滑性能, 采用有限元分析方法, 建立飞机轮组与道面接触的有限元模型, 计算轮组在荷载作用下的竖向变形量, 将其结果与经验公式计算出的结果进行对比, 验证有限元模型的可行性; 再以附着系数作为轮胎与跑道间的抗滑性能评价标准, 最后根据有限元模型分析飞机速度、轮胎荷载、轮胎胎压和水膜厚度等不同工况对附着系数的影响。分析结果表明: 轮胎与跑道之间的附着系数随着速度的变快而逐渐变小; 随着飞机轮组所受荷载增大而增大; 随着轮胎胎压的增大而减小; 水膜厚度增加时附着系数变小, 且水膜越薄, 附着系数随着速度增加下降趋势更加明显。

关键词: 积水跑道; 有限元模拟; 抗滑性能; 附着系数

1 引言

飞机起飞与降落阶段的抗滑性能对飞机安全飞行起到至关重要的作用。飞机在积水跑道滑行时, 道面积水受到轮胎挤压而在轮胎迎水面上产生动水压强作用, 其合力可造成飞机刹车失灵和操控性能降低, 威胁飞机的起降安全^[1]。因此, 研究雨天机场道面抗滑性能是极为必要的。

季天剑通过模拟试验方法对降雨条件下路面水膜厚度的大小做研究, 通过试验数据探讨路面水膜厚度与降雨强度、坡面长度、坡度以及破面粗糙的关系^[2]。杨旭东等采用有限元, 分析荷载、路表构造、胎压和行车速度等因素对轮胎与路面附着系数的影响

^[3]。Novikov 等介绍了一种基于路面附着系数的车辆制动研究方法, 可测试事故中汽车发生打滑时路面附着系数^[4]。Cong Ling 等结合流体动力学理论及有限元方法提出了考虑路面摩擦特性时确定制动距离的方法^[5]。Fwa 等通过三维有限元模型模拟了湿滑铺面上轮胎摩擦效应, 利用数值方法分析了水膜厚度对附着系数的影响^[6-7]。现有的研究多为汽车轮胎在积水道面的抗滑性能, 对飞机轮胎研究较少, 本文分析轮胎-路面接触机理的基础上, 运用 ABAQUS 有限元软件而建立飞机轮胎在积水跑道上的行驶模型; 并以附着系数作为抗滑性能评价指标, 评价不同工况下积水机场跑道的抗滑性能。

2 轮胎-积水机场跑道模型建立

2.1 轮胎模型

模拟轮胎和道面的相互作用中重要的是轮胎模型，在模拟中选取空客 A320 机型主起落架轮胎 H46×17-R20 为研究对象。轮胎是由橡胶、轮辋、帘线-橡胶复合材料等不同构件组成的复杂部件。在有限元模型中使用 Neo-Hookean 模型表示橡胶材料；使用 Rebar 单元表示帘线-橡胶复合材料；轮辋选择刚性材料模拟。首先在 ABAQUS 中建立 H46×17-R20 轮胎的平面（二维）轮胎的、1/2 断面模型，然后将建立的二维轮胎的 1/2 模型绕圆周旋转 360°得到 1/2 轮胎立体（三维）模型，最后将 1/2 轮胎三维模型轴对称便可建立完整轮胎的三维轮胎模型，而且只考虑飞机轮胎的纵向花纹。

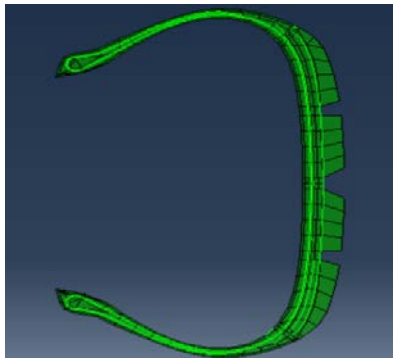


Figure 1. One-half tire model
图 1. 1/2 轮胎模型图

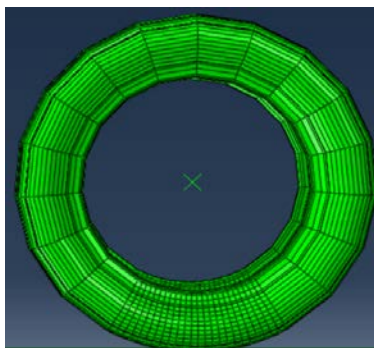


Figure 2. Tire 3D model
图 2. 三维轮胎模型图

为了验证建立模型的正确性，对轮胎胎压为 1.14MPa，施加 76.6kN 的垂直荷载，计算此时的轮胎下沉量，并与 G.Komandi^[8] 研究了不同尺寸、不同气

压的轮胎在混凝土路面上行驶时的轮胎变形，提出轮胎变形经验公式对比。

$$\delta = C_1 \frac{W^{0.85}}{S_0^{0.7} D^{0.43} P^{0.6}} K_0 \quad (1)$$

式中： δ 为轮胎压缩变形量（cm）； C_1 为轮胎设计有关的参数，子午线轮胎 $C_1=1.5$ ； W 为轮胎上荷载（daN）； D 为轮胎外径（cm）； S_0 为轮胎宽度（cm）； P 为轮胎内压（100KPa）； $K_0=15 \times 10^{-3} \times S_0 + 0.42$

根据式（1），计算轮胎变形量 3.08cm，有限元模拟值为 2.71cm，误差为 12.01%。尽管不是表述同一对象，但通过与经验公式对比可以从侧面验证轮胎有限元模型的合理性。

2.2 轮胎-积水跑道接触模型

轮胎-积水道面接触模型包括四大部分：轮胎、空气层、水膜层和刚体路面，路面和水膜模型则保持静止不动，轮胎向前滚动。根据《航空承运人湿跑道和污染跑道运行管理规定》道面水膜在 1-3mm 为湿滑跑道，道面积水厚度在 3mm 以上为污染跑道，道面积水水膜厚度超过 13mm 时飞机禁止起降。因此在有限元模拟中水膜厚度取值范围为 1-12mm。

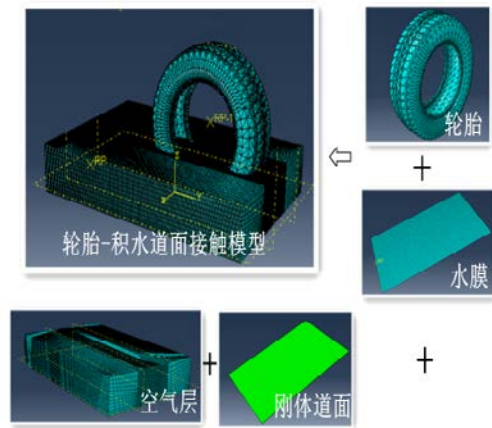


Figure 3. Tire-hydrops runway contact model
图 3. 轮胎-积水跑道接触模型

3 抗滑性能评价标准

当轮胎在跑道上滚动时，轮胎与跑道间的接触区域可分为粘着区域和滑动区域两部分。由图 3 可见，法向反力 P_n 与静摩擦力 F_{sn} 作用在附着区域 l_n 内；法

向反力 P_b 与滑动摩擦力 F_{xb} 作用在滑动区域 l_b 内。路面对轮胎的附着力 F_{xn} 和 F_{xb} 推动轮胎向前移动，法向荷载为附着区域和滑动区内法向反力之和。附着系数的表达式如公式 (2) 所示：

$$\varphi_x = F_x / P \quad (2)$$

式中 F_x 为整个接触面上水平反力， P 为路面法向荷载， φ_x 为附着系数。

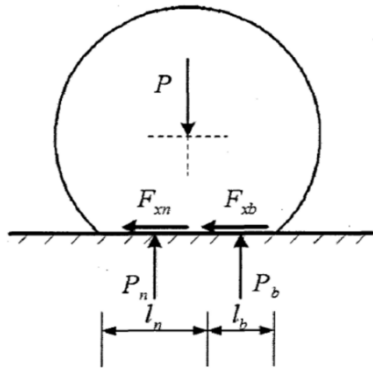


Figure 4. Tire and runway contact stress state
图 4. 轮胎与跑道接触受力状态示意图

轮胎与跑道间的附着系数要大于滑动摩擦系数，这是由于轮胎与跑道接触范围包括粘着区域和滑动区域两部分，粘着区域产生静止摩擦力，而滑动区域内产生滑动摩擦力。因此附着系数包含静摩擦系数和滑动摩擦系数两部分。只有胎面滑移面积扩大到整个接触面积，摩擦力与附着力相等时，附着系数与摩擦系数在数值上才是相等的。

4 计算结果分析与讨论

4.1 轮胎荷载对附着系数影响

有限元模拟中假定轮胎胎压为 1.14MPa,水膜厚度为 4mm，改变其轮胎荷载 (64kN、70kN、76.6kN) 和速度，计算轮胎受到不同荷载时飞机轮胎与积水跑道之间的附着系数。

从图 5 曲线变化趋势可看出，随速度增加，路面附着系数呈明显下降趋势，而且附着系数在速度比较低时变化趋势相对较为平缓，当行驶速度超过 120km/h 时附着系数下降趋势变得急剧。从图 5 还可观察到，随着轮胎所受荷载增大附着系数也变大。当速度为 40km/h 时，轮胎荷载 64kN、70kN、76.6kN 的附着系数分别为 0.44、0.51、0.55；而速度 240km/h 时，

轮胎荷载 64kN、70kN、76.6kN 的附着系数分别为 0.16、0.20 和 0.23，附着系数相对比 40km/h 时分别下降 0.28、0.31 和 0.32。这说明轮胎所受荷载大小及速度高低会显著影响附着系数，因为当轮胎胎压保持不变时，随着轮胎荷载增大，轮胎和跑道之间的接触面积变大，附着系数随之增大。

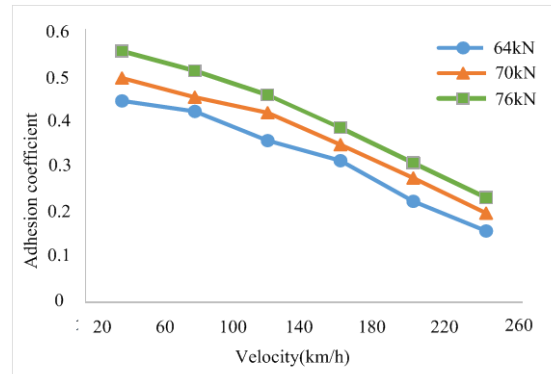


Figure 5. Adhesion coefficient varies with tire load

图 5. 附着系数随轮胎荷载变化

4.2 轮胎胎压对附着系数影响

轮胎胎压对飞机在地面安全行驶性能有较大影响，此时轮胎胎压的变化会影响到轮胎的弹性模量。当轮胎内压力较低时，轮胎受到荷载后的变形较大，其所受到的滚动阻力也会变大。有限元模拟计算中假定轮胎所受到荷载为 76.6kN,水膜厚度为 4mm，改变轮胎胎压 (1.0MPa、1.2MPa、1.4MPa) 计算不同速度下轮胎与跑道间的附着系数，计算结果见图 6。

由图 6 附着系数变化趋势可看出，随着轮胎内压力的增大，轮胎与跑道间附着系数减小，当速度为 40km/h 时，轮胎胎压 1.0MPa、1.2MPa、1.4MPa 的附着系数分别为 0.59、0.54、0.48；而速度 240km/h 时，轮胎荷载 1.0MPa、1.2MPa、1.4MPa 的附着系数分别为 0.26、0.23 和 0.18，附着系数相对比 40km/h 时分别下降 0.33、0.31 和 0.30。出现这个现象的原因是由于轮胎内压力大小发生变化影响到轮胎刚性。当轮胎受到荷载不变时，随着胎压增大，轮胎的弹性模量也会增大，轮胎与跑道接触后轮胎的变形量变小，轮胎和跑道之间的接触面积也变小，从而附着系数下降。与此相反，当轮胎胎压变小后，轮胎的变形量变大，轮胎与跑道之间的接触面积变大，附着系数随之增

大。

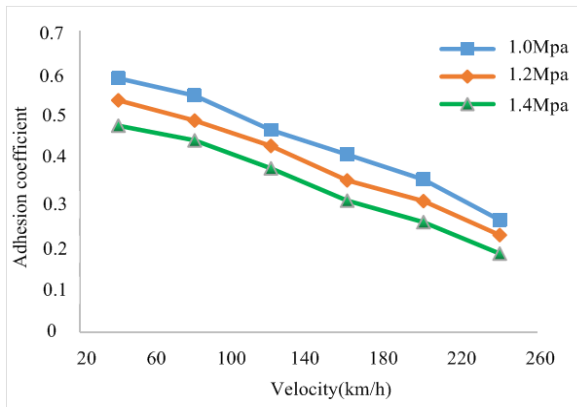


Figure 6. Adhesion coefficient varies with tire pressure
图 6. 附着系数随轮胎胎压变化曲线

4.3 水膜厚度对附着系数影响

有限元模拟中假定轮胎胎压 1.14MPa, 荷载为 76.6kN, 改变行驶速度和水膜厚度, 计算不同水膜厚度 (2mm、4mm、6mm、8mm、10mm、12mm) 时轮胎与跑道间的附着系数。

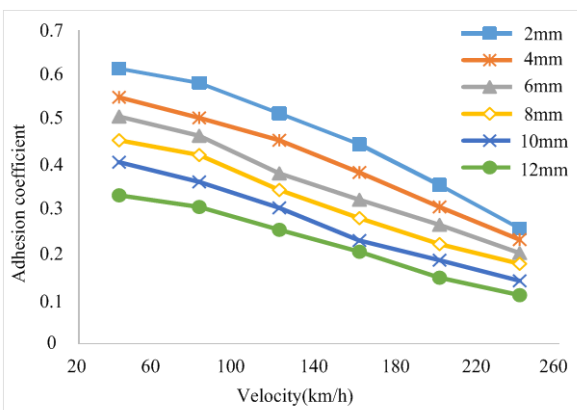


Figure 7. Effect of water film thickness on adhesion coefficient
图 7. 水膜厚度对附着系数影响

由图 7 变化曲线可看出, 随着水膜厚度的增加, 轮胎与跑道间的附着系数变小。当 40km/h 速度时, 水膜厚度 2mm 和 12mm 的附着系数分别为 0.62 和 0.33; 当速度达到 240km/h 时, 2mm 和 12mm 水膜厚度的附着系数分别为 0.26 和 0.11, 与附着系数相对

比 40km/h 时分别下降 0.36 和 0.22。相对于水膜较厚时, 较薄水膜条件下附着系数随行驶速度的变化比较明显。而且当速度较慢时, 水膜厚度对附着系数影响比较大; 随着速度的不断变快, 水膜厚度的变化对附着系数影响能力开始变小。水膜一方面会成为轮胎与跑道之间的润滑膜, 减少了两者间接触面积, 降低了附着力; 另一方面水的存在会产生动水压力, 导致轮胎与跑道部分脱离。两方面的综合作用使得轮胎与跑道之间的附着系数变小, 降低了机场跑道的抗滑性能。

5 结论

本文基于有限元软件建立轮胎-积水跑道抗滑模型, 分析各种因素对抗滑性能的影响, 主要结论如下:

轮胎荷载对附着系数影响显著, 胎压 1.14MPa, 水膜厚度 4mm, 速度 40km/h 时, 轮胎荷载由 64kN 增加到 76.6kN, 附着系数由 0.44 增加到 0.55; 加速到 240km/h 时, 轮胎荷载由 64kN 增加到 76.6kN, 附着系数由 0.16 增加到 0.23, 说明轮胎与跑道间的附着系数随着轮胎所受荷载的增大而变大。

当轮胎所受荷载不变, 行驶速度为 40km/h, 轮胎胎压由 1.0MPa 增加到 1.4MPa 时, 附着系数由 0.59 下降到 0.48; 当速度增加到 240km/h, 轮胎胎压由 1.0MPa 增加到 1.4MPa 后, 附着系数由 0.26 下降到 0.18。这是由于胎压增大后, 轮胎的弹性模量变大, 导致轮胎与跑道接触后轮胎的变形量变小, 轮胎和跑道之间的接触面积也变小, 从而附着系数下降

随着跑道表面的水膜变厚, 轮胎与跑道间的附着系数降低。当行驶速度由 40km/h 增加到 240km/h 后, 2mm 厚度的水膜的附着系数由 0.62 下降到 0.26, 12mm 厚度的水膜附着系数由 0.33 降到 0.11, 附着系数分别下降 0.36 和 0.22。说明轮胎与跑道之间的附着系数会随着速度变快而减小, 随着水膜厚度的增加而降低, 而且水膜较薄时, 附着系数随速度变化较明显。

本文在建立有限元模型时, 为简化模型的复杂程度而忽略了跑道的表面纹理影响, 在今后的研究中将进一步深化。

References (参考文献)

- [1] Anjia Zhao, Liying Sun, Zheli Meng. A review of research on aircraft tire water skiing and preventive control measures. Air-

- craft Design. 2015, 35(10), 46-50.
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. 飞机设计. 2015, (10), 46-50.
- [2] Tianjian Ji. Influence of rainfall on the adhesion coefficient between tire and pavement. Southeast University. 2004.
季天剑. 降雨对轮胎与路面的附着系数的影. 东南大学, 2004.
- [3] Xudong Yang, Mulian Zheng, Hongtao Zhu. et al. Numerical simulation of friction contact between tire and cement concrete pavement. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition. 2010, 30(4), 13-17.
杨旭东, 郑木莲, 朱洪涛, 等. 轮胎与水泥混凝土路面摩擦接触状况数值模拟. 长安大学学报: 自然科学版, 2010(4), 13-17.
- [4] Novikov I, Lazarev D. Experimental installation for calculation of road adhesion coefficient of locked car wheel. Transportation Research Procedia. 2017, 20, 463-467.
- [5] Cong Ling, XiaoMing Huang. Influence of pavement frictional properties on braking distance. Journal of Southeast University: English Edition. 2011, (2), 210-212.
- [6] Ju F.H., Fwa T.F., Ong G.P. Evaluating wet weather driving benefits of grooved pavements. International Journal of Pavement Research & Technology. 2013, 6(4), 287-293.
- [7] Pasindu H.R., Fwa T.F. Improving wet-weather runway performance using trapezoidal grooving design. Transportation in Developing Economies. 2015, 1(1), 1-10.
- [8] Jide Zhuang. Automotive tire science. Beijing Institute of Technology Press. 1996.
庄继德. 汽车轮胎学. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.