

DOI: 10.13382/j.jemi.B2307085

道面摩擦系数测量方法研究:特定工况下 估算模型构建与验证*

牛亚东^{1,2} 朱华波² 周 围²

(1.湖州职业技术学院智能制造学院 湖州 313000;2.河北工业大学机械工程学院 天津 300401)

摘要:随着我国民航业的快速发展,飞机起降安全问题是机场当局面临的重要考虑和挑战。轮胎与跑道接触面上产生的摩擦力被认为是飞机安全着陆的关键因素,而对于摩擦系数测量方法的研究是解决我国道面摩擦系数测量工作的重要任务。提出一种基于有限元的道面摩擦系数测量方法,利用 ABAQUS 进行轮—路相互作用的多物理场耦合分析,分别获得不同载荷、气压和速度工况下摩擦系数与胎面摩擦(剪)应力之间的关系。通过分析获得单变量工况与多变量工况下摩擦应力的变化趋势,然后利用拟合法逆向求解摩擦系数,建立不同工况的摩擦系数估算模型,实现在特定工况下仅依靠胎面摩擦应力估算摩擦系数的测量方法。最后,采用机场跑道摩擦系数测试车对标准工况下的估算模型进行验证。6次测试距离为3 000 m的实验结果表明,估算测量与实际测量之间的误差为2.47%~4.13%,通过实验验证了基于有限元法所构建的估算模型的有效性与准确性,为道面摩擦系数测量方法的研究提供思路。

关键词: 道面摩擦系数;测量方法;有限元分析;估算模型;实验验证

中图分类号: V351.11 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.1099

Study on measurement method for runway friction coefficient: construction and verification of estimation model with specific condition

Niu Yadong^{1,2} Zhu Huabo² Zhou Wei²

(1. School of Intelligent Manufacturing, Huzhou Vocational & Technical College, Huzhou 313000, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: With the rapid development of China's civil aviation industry, the safety of aircraft takeoff and landing is an important consideration and challenge faced by the airport authorities. Friction, which is generated on the contact surface between the tire and runway, is a crucial factor in ensuring the safe landing of aircraft. Measuring the friction coefficient is a vital task for resolving the issue of measuring runway friction coefficient in China. In this paper, we present a finite element method to quantify the runway friction coefficient. We perform a multi-physical field coupling analysis of tire-runway interactions utilizing ABAQUS. This allows us to obtain the correlation between the friction coefficient and the tread friction (shear) stress under varying load, pressure, and speed conditions. By analyzing the trend of friction stress variation under both univariate and multivariate operating conditions, and subsequently employing the fitting method to reverse solve the friction coefficient, it is possible to establish models for estimating the friction coefficient under differing operating conditions. This leads us to the achievement of a measurement method that solely relies on tread friction stress to assess friction coefficient within specific operating conditions. Finally, a tester for determining the friction coefficient of airport runways has been employed to validate an estimation model in accordance with standard working conditions. Six experiments were conducted at a distance of 3 000 metres, as a result, the discrepancies between the estimation outcomes and the actual measurements ranged from 2.47% to 4.13%. This study affirms the validity and accuracy of the finite element method-based estimation model and presents a stimulating framework for investigating the measurement technique of runway friction coefficient.

Keywords: runway friction coefficient; measurement method; finite element analysis; estimation model; experimental validation

0 引言

随着我国民航业的快速发展,飞机起降安全问题是机场当局面临的重要考虑和挑战。国际民航组织对近几年全球飞行事故进行统计,统计结果表明飞机在降落减速或起飞加速时偏/冲出跑道事故占据很大一部分^[1]。事故造成人员伤亡与财产损失,因此对于跑道表面摩擦系数的测量工作一直以来被视为飞机安全起降的重要问题^[2]。依据我国民用机场运行安全管理规定—

中国民用航空总局令第191号规定:跑道每日航空器着陆15架次以上的机场,应当对道面摩擦系数进行测试^[3-5]。因此,开展道面摩擦系数测量方法研究是解决我国机场跑道摩擦系数测量工作的重要任务,具有重要的理论意义和应用价值。

在过去几十年里,国际上不同的组织机构、科研人员,甚至包括波音^[6]和空客^[7]在内的飞机制造商均不遗余力的对道面摩擦测量开展研究。道面包含机场跑道与公路,二者具有相同的摩擦机理,前者是飞机轮胎与机场跑道,而后者是汽车轮胎与公路。飞机与汽车在摩擦测量领域具有很多相似之处,二者相互借鉴与共同发展,形成了较为全面的道面摩擦特性测量技术。飞机—道面摩擦系数测量方法包括设备测量法^[8]、飞机动力学模型法^[9-10]、影响因素模型法^[11-12],而汽车—道面摩擦系数测量方法包括基于原因法^[13]、基于效果法^[14-15]、多源信息融合法^[16-17]。

测量设备法中除机场跑道摩擦系数测试车外(airport runway surface friction tester, ASFT, 即4.2节中测量实验平台),其余设备所测量的结果只能代表局部,不能代表整条跑道的摩阻状况。飞机动力学法需要做出大量的假设才能够建立模型,该方法的主要目的是通过动力学方程获得最大摩擦系数时的滑移率。基于原因法可以准确地表征跑道表面状况,但是对于道面摩擦系数的计算结果非常粗糙,区间变化是不可追踪的。以文献^[18]为例,进行大量工作的结果仅仅是将道面区域的摩擦特性赋予高、中、低3种,而不是具体的摩擦系数值。基于效果法中摩擦力可以通过轮胎变形反映出来,但是轮胎模型种类多、参数多,且还须考虑不同的工况。

跑道摩擦系数是反映机场跑道适航状况的重要参数,但在上述测量方法中,仅有ASFT测量的结果是摩擦系数,其余测量结果仅为能够表征摩擦系数的有关信息。近年来,基于摩擦系数影响因素的模型法取得了进展,相关文献建立了可以在任意车速下仅从宏观与微观纹理来预测摩擦系数的模型^[19]、通过沥青道面抛光程度预测摩擦系数的模型^[20]、水膜厚度与摩擦系数关系的数学模型^[21]、跑道去胶前和去胶后随飞机累计载荷变化的经验摩擦衰减模型^[22]、轮胎滑移率与摩擦系数关系的模

型^[23]。基于影响因素法较为直观地描述了摩擦系数与影响因素之间的关系,但是相关研究所建立的数学模型中含有许多参数,需要通过大量的实验进行拟合,为该方法的应用带来了不便。

针对道面摩擦特性测量方法的研究有许多,但是大部分都停留在理论研究层面。虽然有很多新方法和思路不断提出,但仍处于概念设计与探讨阶段,鲜见付诸实施验证后的系统评估和经验总结。我国民航业起步较晚,面向道面摩阻性能测量尚缺乏足够的实践经验。因此,深入探索轮—路相互作用机理、开展摩擦系数测量方法研究仍是亟待突破的重要研究方向。轮胎自身的运动参数对摩擦系数有很大的影响,由上述相关研究现状可知,可利用这些影响因素建立摩擦系数测量模型。于是,本工作采用有限元法,既能实现不同影响因素对摩擦系数影响作用研究,又能建立摩擦系数估算模型。本文工作基于摩擦系数影响因素构建估算模型,相较于飞机动力学模型法、基于原因法与基于效果法,本工作测量的结果是摩擦系数;相较于文献^[19-23],本工作选用轮胎与道面耦合作用中的影响因素,通过有限元法实现仅依靠胎面摩擦应力就能估算特定工况下的道面摩擦系数。本文的创新性研究工作为:

1) 提出一种基于有限元的道面摩擦系数测量方法,构建轮路多物理场耦合模型,使用ABAQUS分析不同充气压力、载荷和速度工况下摩擦系数与摩擦应力之间的关系及摩擦系数变化趋势;

2) 利用拟合法构建特定工况下摩擦系数估算模型,并搭建测量实验平台。通过实际测量实验实现标准工况下估算模型的准确性与有效性验证。

通过本文的研究工作,以期为该领域的研究提供理论依据与思路。

1 轮—路多场耦合分析理论基础

道面摩擦系数的测量大都是使用带有滑移的轮胎,轮胎主要是由橡胶构成的,其中胎面橡胶是飞机、汽车与道面唯一接触的材料。橡胶的摩擦与大多数固体的摩擦性质有很大的不同,原因在于橡胶材料的低弹性模量和橡胶在宽频率区域上呈现的高内部摩擦。Persson^[24]在对橡胶理论和接触力学的研究中,推导出摩擦系数取决于道面粗糙度和滑动速度。当橡胶在道面上滑动时,道面由于其粗糙度使得橡胶产生振动力,振动力会导致能量“耗散”。由滞后作用造成的能量耗散与橡胶滑动速度、橡胶与道面接触面积 A_s 、橡胶的摩擦剪切应力 σ_f 有关。在 t_0 时刻内,所造成的能量耗散如式(1)所示。

$$\Delta E = \sigma_f \cdot A_s \cdot v \cdot t_0 = u \sigma \int d^2 x \cdot dt = (2\pi)^3 \int d^2 q \cdot d\omega \cdot (-i\omega) u(\mathbf{q}, \omega) \sigma(-\mathbf{q}, -\omega) \quad (1)$$

式中: v 为滑动速度, u 为橡胶表面形变函数, σ 为橡胶表面应力分布函数, $\mathbf{q}$ 为波矢, $\mathbf{q} = (q_x, q_y)$, ω 为橡胶表面的振动频率。引入道面功率谱密度函数 $C(\mathbf{q})$, 采用极坐标的表达方式, 摩擦剪切应力可用式 (2) 进行表示。

$$\sigma_f = \frac{1}{2} \int d^2 q \cdot q^2 \cos \theta \cdot C(\mathbf{q}) \cdot \text{Im} \left[\frac{E(qv \cos \theta)}{1 - v^2} \right] \quad (2)$$

式中: E 为橡胶模量函数, $\text{Im}[\cdot]$ 表示取 $[\cdot]$ 的虚部, v 为泊松比。于是, 摩擦系数可由摩擦剪切应力 (σ_f) 与垂直应力 (σ_v) 的比值进行表征, 即:

$$\mu = \frac{\sigma_f}{\sigma_v} = \frac{1}{2} \int d^2 q \cdot q^2 \cos \theta C(\mathbf{q}) P(\mathbf{q}) \text{Im} \left[\frac{E(qv \cos \theta)}{(1 - v^2) \sigma_v} \right] = \frac{1}{2} \int d^2 q \cdot q^3 C(\mathbf{q}) P(\mathbf{q}) \times \int_0^{2\pi} d\theta \cdot \cos \theta \text{Im} \left[\frac{E(qv \cos \theta)}{(1 - v^2) \sigma_v} \right] \quad (3)$$

在橡胶滑动过程中伴随着能量的存储与耗散, 可通过复模量对该过程进行描述。将橡胶的变化过程简化为三元件模型描述橡胶材料应力与应变之间的关系, 该方法需要获得大量的参数, 包括橡胶材料参数与道面相关参数。在实际研究时, 可用有限元法进行数值分析计算, 通过使用有限元计算软件实现橡胶与道面相互作用的力学分析。

2 轮—路多场耦合分析模型建立

2.1 有限元分析流程

由式 (3) 可知, 摩擦系数可用胎面摩擦应力与垂直应力的比值进行表征, 为采用数值分析法对不同工况下胎面摩擦应力与摩擦系数之间的关系进行研究提供了理论依据。轮胎有限元分析是一个非常复杂的工程计算问题, 它涉及到几何、非线性材料、接触等。分析流程包括 3 部分, 分别为前处理、求解过程和后处理。3 个过程中涉及到的软件有 CAD、Hypermesh 和 ABAQUS。针对本文的研究工作, 有限元分析流程如图 1 所示。

2.2 轮胎有限元模型

轮胎主要由胎面、胎圈、带束层、气密层和胎侧等构成。其中, 胎面是直接与会道面接触的部分, 由胎冠和胎肩等组成; 胎圈是与轮毂接触的部分, 由三角胶、钢丝圈和胎圈胶等组成; 带束层位于胎冠与胎体之间, 是一种复合材料, 由钢丝和尼龙丝线组成。本文以摩擦系数车的测量轮为研究对象, 测量轮相关参数如表 1 所示。

在表 1 的基础上对相关参数进行了具体化, 选用胎面宽度 60 mm、横截面宽度 105 mm、胎面高度 102.5 mm 的凹槽花纹胎。轮胎由多个部件构成, 虽然都是橡胶制品, 但它们之间的材料特性却有所不同。在数值分析过

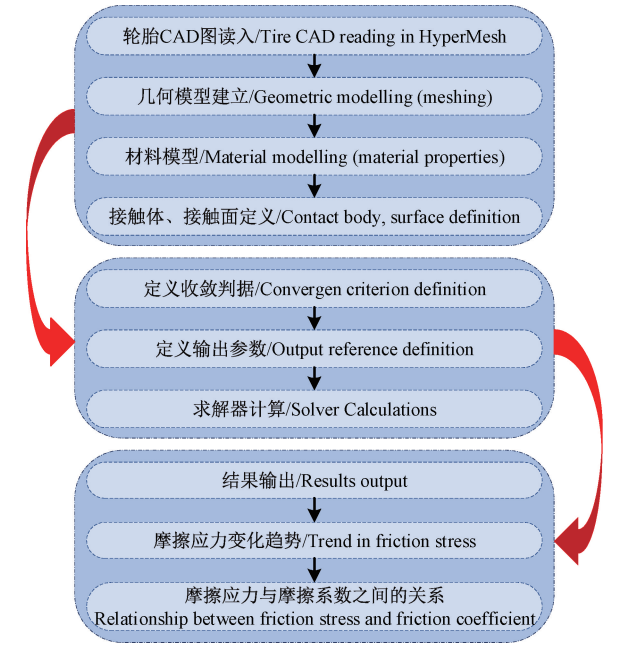


图 1 有限元分析流程

Fig. 1 Finite element analysis process

表 1 摩擦系数车测量轮参数

Table 1 Measuring wheel parameters for ASFT

名称	参数	名称	参数
尺寸	4.00~8	充气压力	210 kPa
半径	254±38 mm	胎面宽度	61±2.5 mm
外径	417±5 mm	横截面宽度	104±3.8 mm

程中, 需要将这些不同性质的材料进行耦合, 从而对轮胎的性能进行分析。文献 [25] 和 [26] 将轮胎模型简化为 7 个组成部分, 文献 [27] 和 [28] 将轮胎模型简化为 8 个组成部分, 文献 [29] 将轮胎模型简化为 9 个组成部分。本文选用 8 个轮胎构成部件进行数值分析, 分别为: 胎侧、胎面、胎肩、胎体、内衬、带束层、三角胶和钢丝圈。对这些部件进行网格划分, 网格划分结果如图 2 所示。

2.3 橡胶材料参数

在确定轮胎的橡胶组成后, 需要对这些不同部位的橡胶材料进行拉伸试验, 然后建立不同部位橡胶材料的本构模型。橡胶材料可以看作是一种不可压缩的超弹性材料, 在对其进行拉伸实验时, 它的应力—应变关系呈现非线性的关系。有限元分析中常用的橡胶弹性体非线性模型有 3 种, 文献 [27] 与 [28] 分别对 Neo-Hookean 模型、Moony-Rivlin 模型和 Yeoh 模型进行了拟合。本文选用 Neo-Hookean 模型建立各部位的本构模型, 它是 Moony-Rivlin 模型的一种缩减形式, 其表达式如式 (4) 所示。

$$U = C_{10} (I_1 - 3)^2 + \frac{1}{D_1} (J_{el} - 1)^2 \quad (4)$$

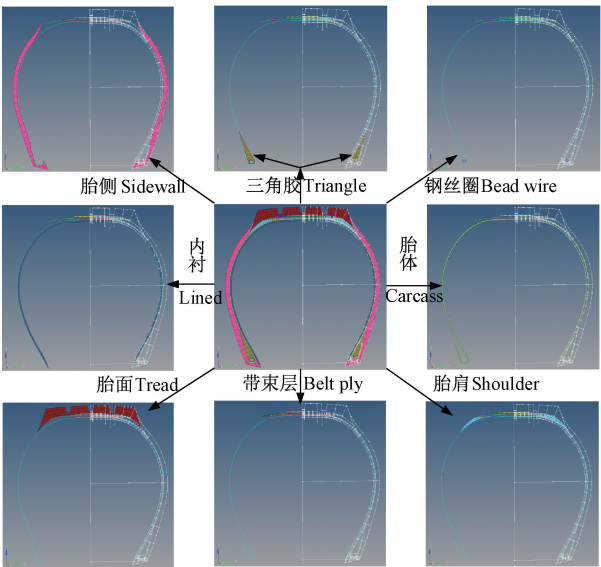


图 2 轮胎不同部件的网格划分图

Fig. 2 Grid division of different parts of tire

式中: C_{10} 与 D_1 为材料系数, J_{el} 为压缩前后的体积比。该模型只有两个参数, 适用于橡胶小变形。选用文献 [1] 中的材料参数, 各部件的系数如表 2 所示。

表 2 Neo-Hookean 模型各部件系数^[1]

Table 2 Coefficients of various components for Neo-Hookean model^[1]

部件	参数		部件	参数	
	C_{10}	D_1		C_{10}	D_1
胎面胶	0.671	0.03	内衬胶	0.503	0.024
胎体胶	0.839	0.024	三角胶	0.671	0.03
胎侧胶	0.336	0.06	带束胶	0.839	0.024
胎肩胶	1.006	0.02			

带束层作为轮胎的骨架材料, 钢丝与帘线组成了框架结构, 然后在表面上进行覆胶。骨架材料是一种复合材料, 在 ABAQUS 中可通过加强筋 (* Rebar) 定义这种材料的属性, 通过 * Embedded Element 指令将帘线嵌入到橡胶材料中。本文在使用 ABAQUS 进行有限元分析时骨架材料的参数如表 3 所示。

表 3 轮胎骨架材料参数

Table 3 Tire frame material parameters

参数	冠带层	带束层 1	带束层 2	胎体层	钢丝圈
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 240	10 500	10 500	1 400	22 400
泊松比	0.32	0.28	0.28	0.28	0.28
杨氏模量/MPa	6 554	114 907	114 907	4 200	203 660
帘线间距/mm	0.9	1.43	1.43	1.37	0
帘线截面积/ mm^2	0.24	0.23	0.23	0.20	0.64

3 轮—路多场耦合分析

3.1 稳态运输分析

在 ABAQUS 有限元分析过程中, 采用稳态滚动分析法对胎面的摩擦特性进行分析。稳态滚动分析也被称为稳态运输分析, 混合了拉格朗日法与欧拉法。该方法的优点在于分析过程中网格不动, 材料在网格内流动。传统的拉格朗日法虽然能够模拟滚动, 但是分析耗时且胎面所有网格均需要细化。相较于混合法, 仅需接触面的网格细化就可以得到精准的结果。结合摩擦系数车测量轮的运动状态, 在利用 ABAQUS 进行分析时, 可将其视为轮胎进行直线滚动的运动学问题。根据式 (3) 可知与摩擦系数最为密切的参数为摩擦应力, 而摩擦应力与轮胎载荷、充气压力、速度和摩擦系数有很大的关联。因此, 本节利用数值分析对不同参数条件下摩擦系数与胎面所受摩擦应力之间的关系进行研究与分析。表 4 为数值分析中轮胎参数的取值范围。

表 4 轮胎参数范围

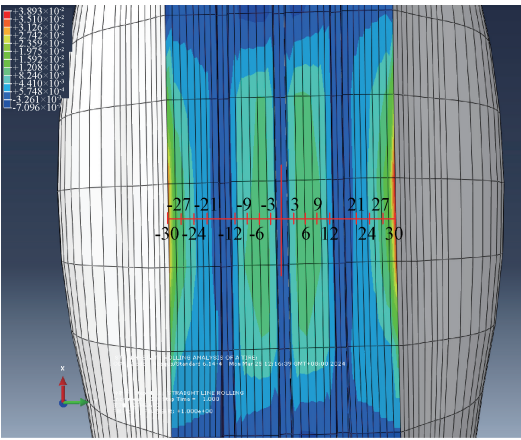
Table 4 Range of tire parameters

符号	参数	范围	单位
p	充气压力	150~250, 增量 20	kPa
F_z	轮胎载荷	80~120, 增量 10	kgf
v	速度	60~100, 增量 10	km/h
μ	摩擦系数	0.30~0.80, 增量 0.01	/

在利用 ABAQUS 软件进行数值分析时需要给定接触面的摩擦系数, 然后通过计算获得胎面摩擦应力。摩擦系数的变化势必会引起胎面摩擦应力的变化, 因此可以借助胎面摩擦应力的分布间接反映不同工况下摩擦系数的变化。设 $p=210\text{ kPa}$ 、 $F_z=100\text{ kgf}$ 、 $v=90\text{ km/h}$ 、 $\mu=0.8$, 在此条件下胎面摩擦应力分布如图 3(a) 所示。以胎面中心为原点建立坐标系, 不同位置且不同摩擦系数对应的摩擦应力如图 3(b) 所示。

3.2 单变量工况

由图 3 可知, ABAQUS 场输出中的摩擦应力并非是整个接触区域内的平均应力, 而是根据颜色指示不同区域所受应力的程度。文献 [30] 定义了一个极限参考应力, 即采集所有工况条件下的子域的最高应力水平。为了对不同摩擦系数条件下胎面摩擦应力的变化进行分析, 本文采用了与文献 [30] 用同样的方法, 即通过数值分析计算得出的摩擦应力均为极限摩擦应力。对有限元分析计算的结果进行整理, 分别得出不同载荷、充气压力、速度条件下的摩擦系数与胎面摩擦应力之间的关系, 如图 4 所示。对于图 4 中不同工况下的变化趋势, 结合式 (3) 给出相应的分析。



(a) 胎面坐标系示意图
(a) Coordinate system of the contact surface

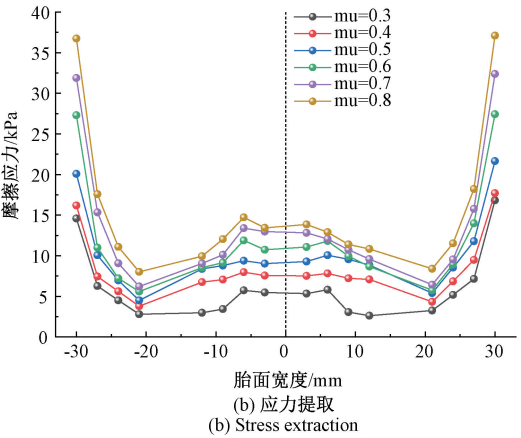


图 3 胎面摩擦应力分布图

Fig. 3 Tread friction stress distribution map

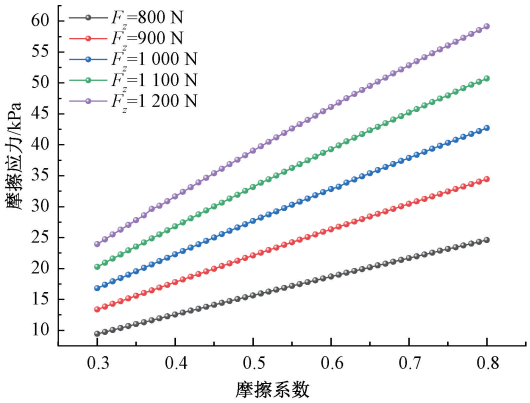
对图 4(a)的变化趋势做出如下分析:1) 相同载荷条件下,垂直应力几乎不发生变化。随着摩擦系数的增加,胎面摩擦应力随之增加;2) 相同摩擦系数条件下,随着载荷的增加,垂直应力增加。如若保持摩擦系数不变,则胎面摩擦应力随之增加。

对图 4(b)的变化趋势做出如下分析:1) 相同充气压力条件下,因载荷不发生变化,垂直应力也不发生变化。随着摩擦系数的增加,胎面摩擦应力随之增加;2) 相同摩擦系数条件下,随着充气压力的增大,轮胎与道面的接触面积随之减小,作用在轮胎上的载荷不变,则垂直应力变大。如若保持摩擦系数不变,则摩擦应力亦随之变大。

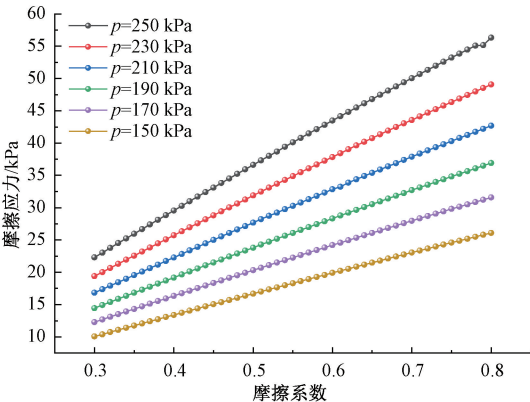
对图 4(c)的变化趋势做出如下分析:1) 相同速度条件下,因载荷不发生变化,垂直应力也不发生变化。随着摩擦系数的增加,胎面摩擦应力随之增加;2) 相同摩擦系数条件下,随着速度的增加使得载荷变小,垂直应力随之减小。如若保持摩擦系数不变,则摩擦应力亦随之变小。

3.3 多变量工况

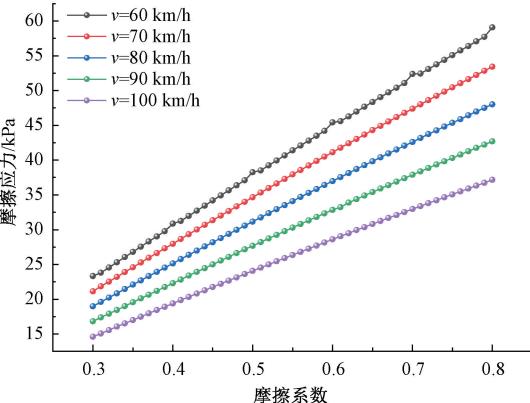
轮胎与道面之间的摩擦受多个影响因素的制约,因



(a) 载荷工况
(a) Load conditions



(b) 气压工况
(b) Inflation pressure conditions



(c) 速度工况
(c) Speed conditions

图 4 不同工况摩擦系数与摩擦应力之间的关系
Fig. 4 Relationship between friction coefficient and friction stress for different conditions

此有必要对多变量工况下摩擦应力的变化趋势进行分析。本文选用的两个变量组合工况有充气压力与载荷、载荷与速度耦合,而 3 个变量工况为充气压力、载荷与速度耦合。

对于两个变量工况,绘制不同摩擦系数条件下三维摩擦应力分布,利用插值法生成三维曲面。图 5 为不同

充气压力与载荷耦合作用下的摩擦应力分布,此时轮胎的速度为 90 km/h;而图 6 为不同载荷与速度耦合作用下的摩擦应力分布,此时轮胎充气压力为 210 kPa;结合图 4(a)与(b)对图 5 进行分析可知,摩擦应力随着充气压力与载荷的共同增加而呈现快速增加的趋势。随着摩擦

系数的变大,同一位置对应的摩擦应力相应地变大。结合图 4(a)与(c)对图 6 进行分析可知,摩擦应力随着载荷的增加与速度的减小而呈现快速增加的趋势。随着摩擦系数的变大,同一位置对应的摩擦应力相应地变大。

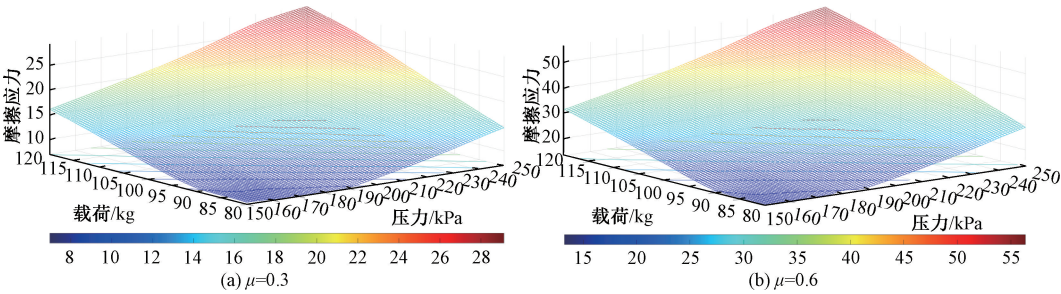


图 5 充气压力与载荷耦合作用下摩擦应力分布

Fig. 5 Friction stress distribution under the coupled action of inflation pressure and load

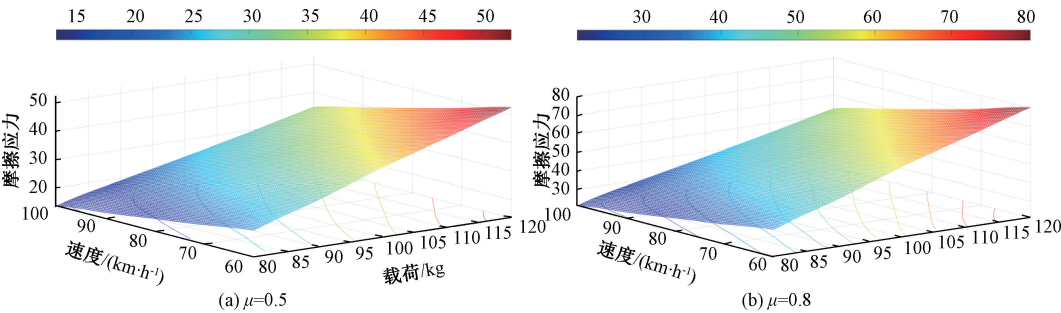


图 6 载荷与速度耦合作用下摩擦应力分布

Fig. 6 Friction stress distribution under the coupled action of load and speed

对于 3 个变量耦合作用下的摩擦应力分布采用四维图形进行表示。其中, x 、 y 、 z 3 个轴分别表示 3 个变量,用颜色指示第四维的大小。不同摩擦系数下充气压力、

载荷与速度耦合作用下的摩擦应力四维散点如图 7 所示。由图 7 可得在 3 个变量耦合作用下,摩擦应力的变化趋势。

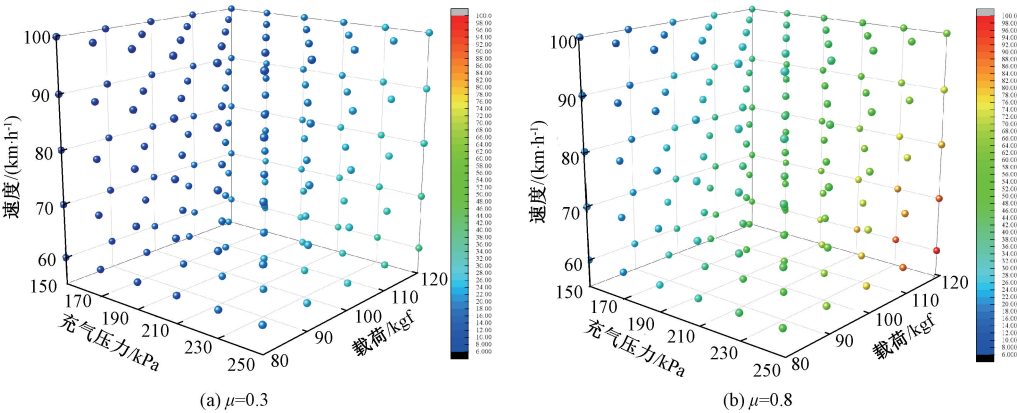


图 7 充气压力、载荷与速度耦合作用下摩擦应力分布

Fig. 7 Friction stress distribution under the coupled action of inflation pressure, load and speed

4 道面摩擦系数估算模型构建

4.1 估算模型构建

第 3 节分别对不同载荷、充气压力和速度单变量工况及多变量耦合工况下的胎面摩擦应力与摩擦系数之间的关系进行了分析。然而,在这些分析中摩擦系数作为自变量,摩擦应力作为因变量。为了将摩擦系数作为测量目标,本文提出利用拟合逆向求解摩擦系数的方法。通过该方法可将特定工况下的胎面摩擦应力作为自变

量,摩擦系数作为因变量。由上可知,函数的映射关系从 $f(p,F_z,v,\mu) \rightarrow \sigma_f$ 转变为 $f(p,F_z,v,\sigma_f) \rightarrow \mu$ 。因此,该方法实现在特定工况下,仅依靠胎面摩擦应力就能够估算摩擦系数。

在道面摩擦系数的实际测量过程中,轮胎的运动参数不是固定的,设标准轮胎运动参数为 $p=210\text{ kPa}$ 、 $F_z=100\text{ kgf}$ 、 $v=90\text{ km/h}$ 、滑移率为 0.15,在该工况下通过数值分析获得摩擦应力与摩擦系数之间的关系如图 8(a)所示。使用 OriginLab 软件进行拟合,通过拟合获得摩擦系数与摩擦应力之间的关系如图 8(b)所示。

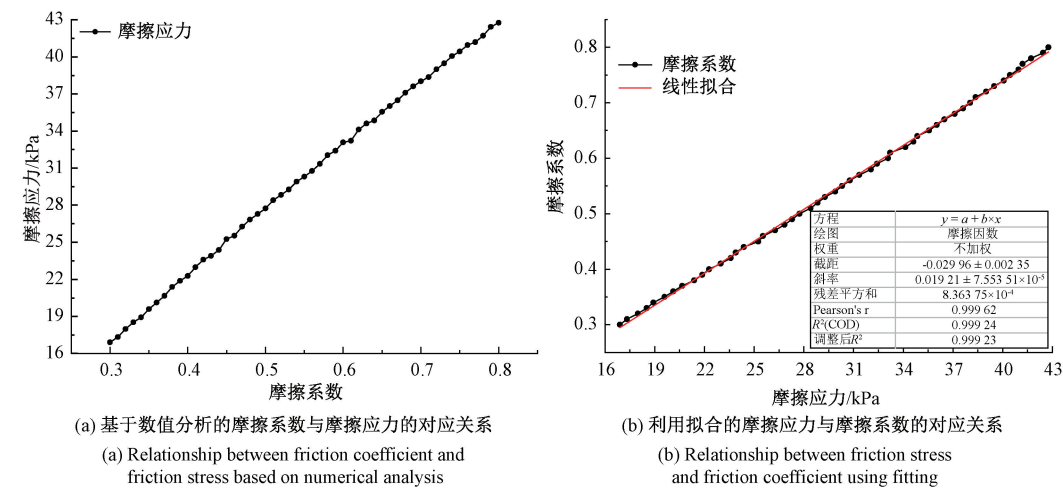


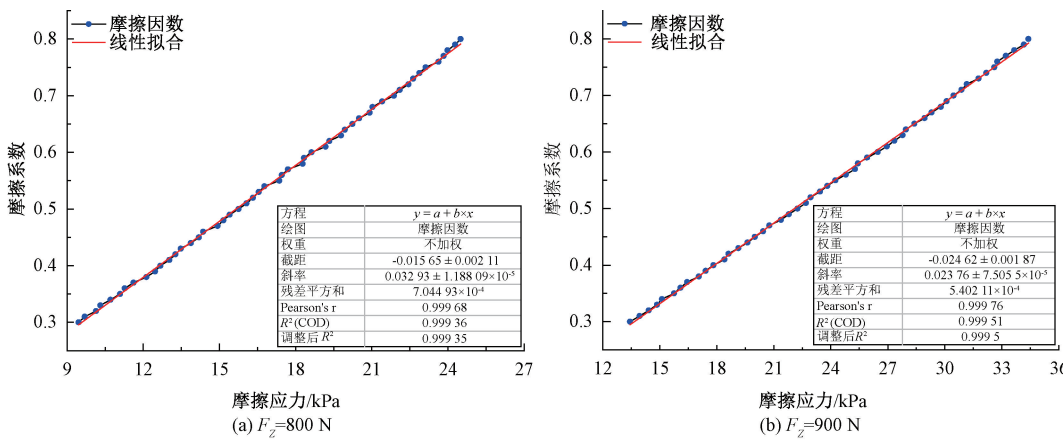
图 8 标准轮胎运动参数条件下的曲线对应关系

Fig. 8 Corresponding relationship of curves under the condition of standard tire motion parameters

除标准轮胎运动参数条件外,还分别对其他工况进行了拟合。这些不同的工况分别为:不同载荷条件下的线性拟合,载荷取值 80、90、110、120 kgf,拟合结果如图 9 所示;不同充气压力条件下的线性拟合,充气压力取值 170、190、230、250 kPa,拟合结果如图 10 所示;不同速度条件下的线性拟合,速度取值 60、70、80、100 km/h,拟合

结果如图 11 所示。

根据图 8(b)与图 9~11 可知,对不同轮胎载荷、充气压力和速度分别选择了 5 种工况进行线性拟合。拟合形式为 $y = a + b \times x$,其中 x 为摩擦应力, y 为摩擦系数。每种工况下的线性拟合表达式如表 5 所示。



(a) $F_z=800\text{ N}$

(b) $F_z=900\text{ N}$

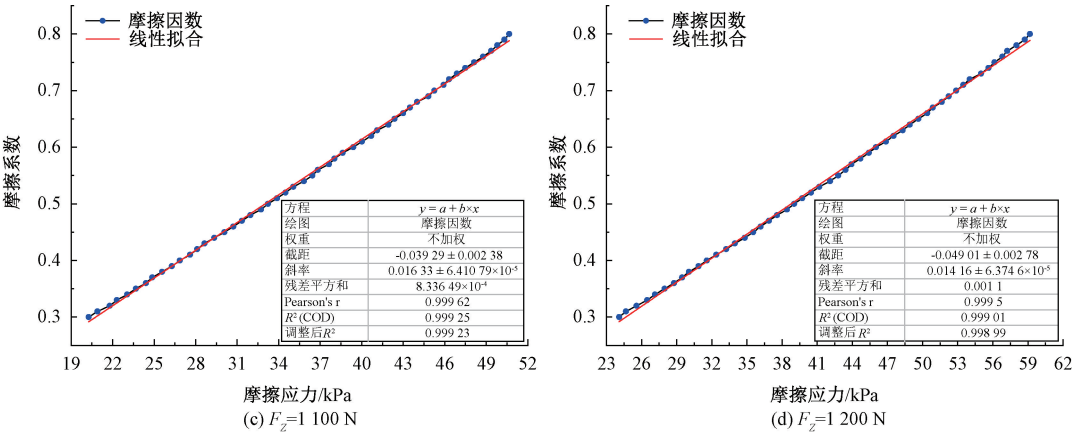


图9 不同载荷下的线性拟合结果

Fig. 9 Linear fitting results under different loads

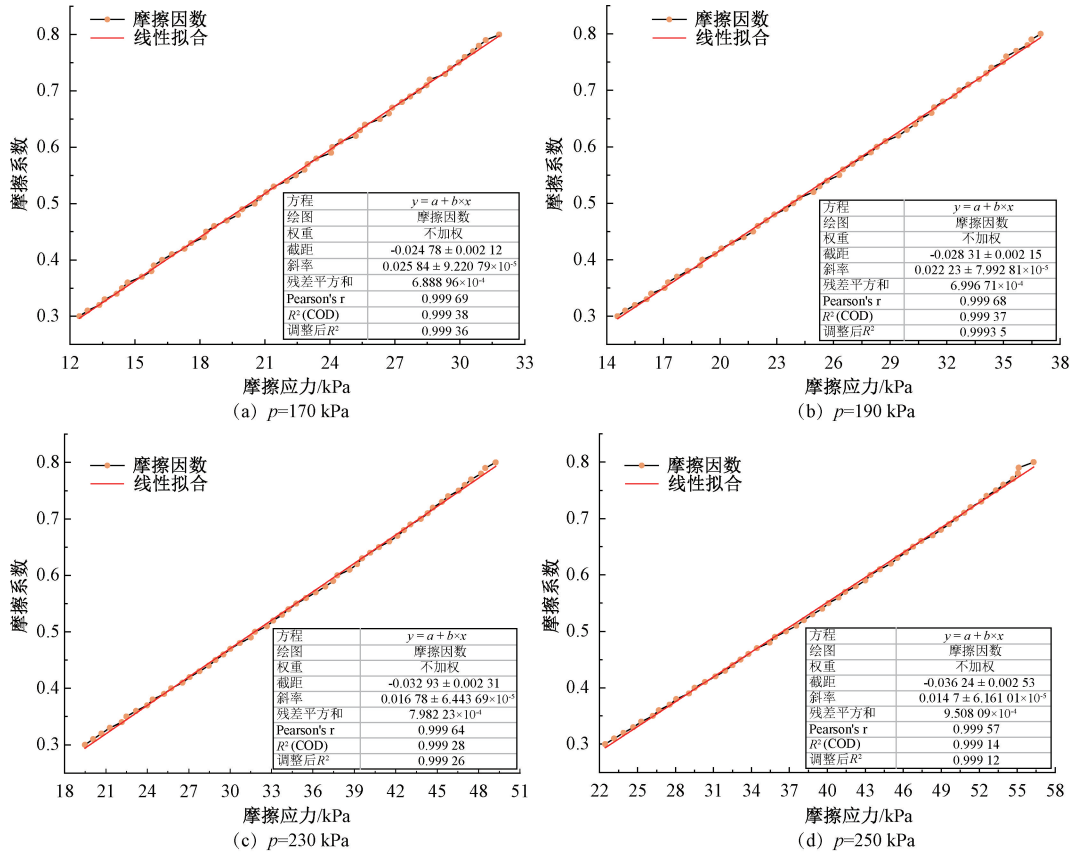


图10 不同充气压力下的线性拟合结果

Fig. 10 Linear fitting results under different inflation pressures

4.2 实验平台搭建

为保证飞机起降安全,我国民航部门和国际民航组织对机场道面的摩擦性能都有明确的规定。其中,道面摩擦系数是衡量机场道面摩擦性能的一个重要参数。规定要求机场必须定期采用连续测试摩擦系数的仪器来测

定跑道表面的摩擦特性,因此摩擦系数车被广泛地用于机场跑道摩擦系数的测量。它是一种专用的特种车辆设备,既可以用于测量机场跑道的摩擦系数,又可以用于测量公路的摩擦系数。它是在普通汽车的基础上改装而来的,在原车后桥中增加一个专用于测量跑道摩擦系数的

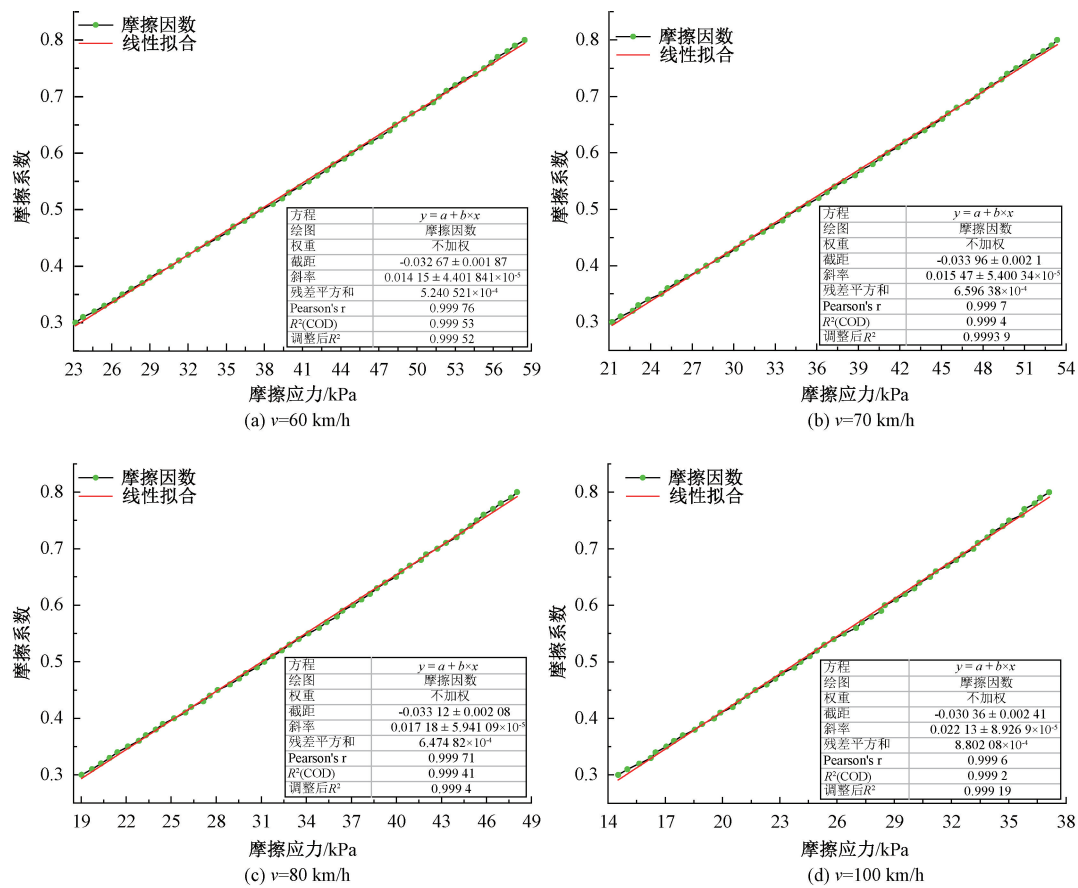


图 11 不同速度下的线性拟合结果

Fig. 11 Linear fitting results under different speeds

表 5 不同工况拟合结果

Table 5 Fitting results for different working conditions

工况		截距 a	斜率 b	R^2
载荷/kgf	80	-0.015 65	0.032 93	0.999 35
	90	-0.024 62	0.023 76	0.999 50
	100	-0.029 96	0.019 21	0.998 96
	110	-0.039 29	0.016 33	0.999 23
	120	-0.049 01	0.014 16	0.998 99
气压/kPa	170	-0.024 78	0.025 84	0.999 36
	190	-0.028 31	0.022 23	0.999 35
	210	-0.029 96	0.019 21	0.998 96
	230	-0.032 93	0.016 78	0.999 26
	250	-0.036 24	0.014 70	0.999 12
速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	60	-0.032 67	0.014 15	0.999 52
	70	-0.033 96	0.015 47	0.999 39
	80	-0.033 12	0.017 18	0.999 40
	90	-0.029 96	0.019 21	0.998 96
	100	-0.030 36	0.022 13	0.999 19

测量轮。为验证估算模型的准确性与有效性,需要搭建测量系统进行实际的测量实验。摩擦系数车测量原理与可靠性实验详见文献[4]。图 12 为实验平台的硬件系

统,主要是由机械系统、液压系统与电气系统组成。其中,机械系统保证测量轮与主车轮产生固定滑移率(滑移率为 0.15);液压系统则是用于测量轮的收、放;电气系统由 PLC 与传感器系统组成,实现测量过程中控制功能与上位机数据交互功能。上位机基于 Microsoft Visual Studio 平台进行开发,使用 C#语言开发 Winform 应用程序。程序采用多任务多线程并行处理方式,可高效地处理大量的数据。

4.3 验证与分析

上述研究过程采用数值分析法模拟复杂的轮—路相互作用,与实际测量过程存在差别。本节首先基于搭建的测量平台在标准工况条件下进行实际测量,然后对所构建模型的估算效果进行评价。选择长度为 3 000 m 的机场跑道进行测量实验,胎面摩擦应力采用胎面摩擦力与接触面积的比值进行计算,6 次实际测量与估算测量的曲线如图 13 所示。

取间距为 500 m,将 3 000 m 跑道分成 6 段,每段实际测量的平均数为 $A_1 \sim A_6$,估算测量的平均数为 $E_1 \sim E_6$,6 次测量的结果如表 6 所示。

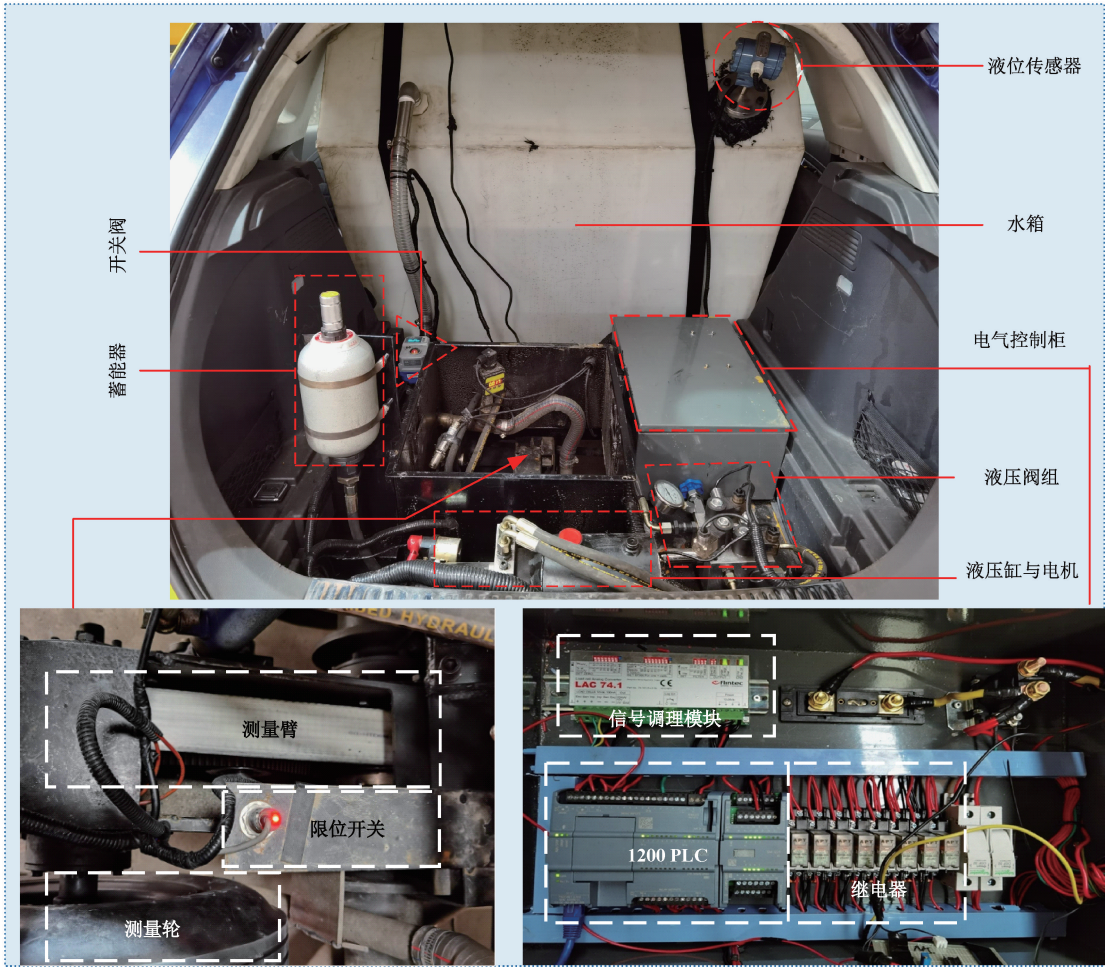
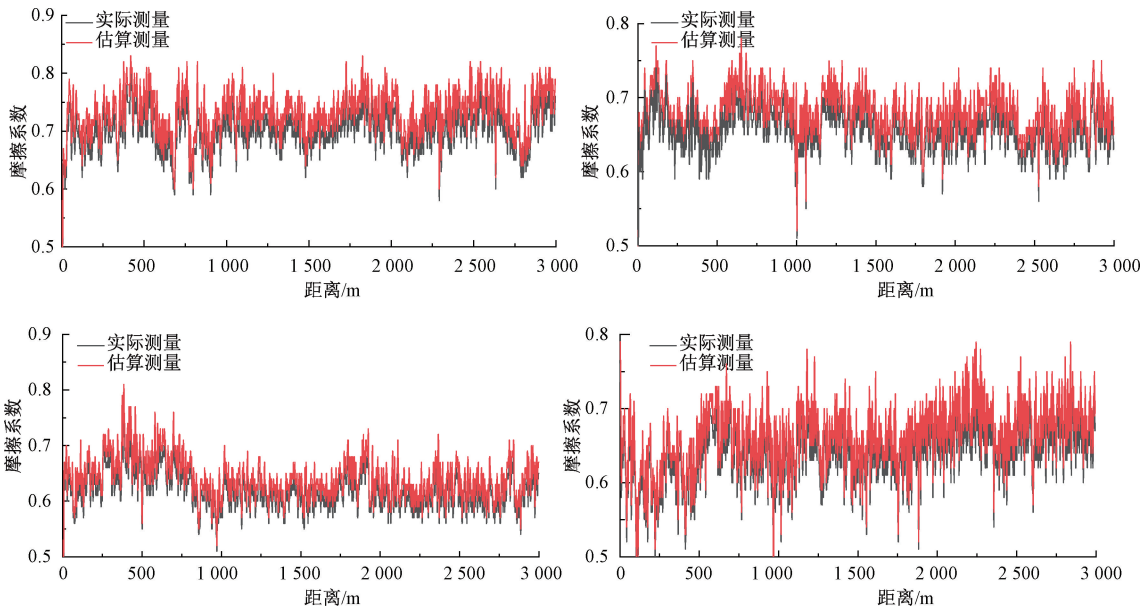


图 12 摩擦系数测量实验平台

Fig. 12 Friction coefficient measurement experimental platform



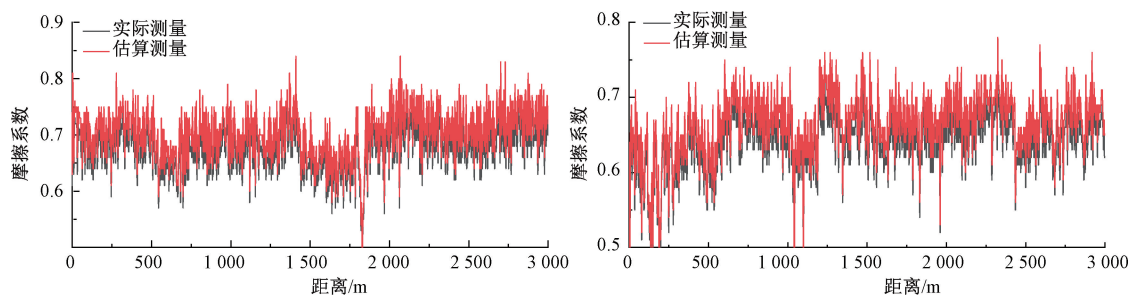


图 13 跑道摩擦系数的测量曲线与估算曲线

Fig. 13 Measured and predicted curves for friction coefficient

表 6 实际测量与估算测量结果

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6
A ₁	0.701	0.652	0.647	0.603	0.687	0.602
E ₁	0.724	0.673	0.663	0.622	0.713	0.620
A ₂	0.690	0.673	0.630	0.642	0.664	0.650
E ₂	0.716	0.699	0.653	0.664	0.688	0.672
A ₃	0.702	0.663	0.611	0.639	0.676	0.645
E ₃	0.731	0.685	0.629	0.660	0.701	0.667
A ₄	0.711	0.645	0.618	0.633	0.645	0.642
E ₄	0.738	0.666	0.638	0.654	0.667	0.663
A ₅	0.701	0.653	0.609	0.659	0.696	0.657
E ₅	0.728	0.675	0.628	0.682	0.722	0.680
A ₆	0.711	0.650	0.611	0.664	0.698	0.650
E ₆	0.740	0.672	0.630	0.687	0.724	0.672

由表 6 可知,估算测量的结果高于实际测量的结果,二者误差在 2.47%~4.13%。通过实验对基于数值分析的道面摩擦系数估算测量方法的有效性 with 准确性进行了验证,二者产生差异的原因可以归结为:

- 1) 轮胎橡胶材料参数在数值模拟与实际运动中存在差异;
- 2) 数值模拟中采用刚性道面代替实际道面;
- 3) 构建模型时应力为最大应力,估算时为平均应力;
- 4) 实际测量时轮胎参数是小范围内实时变化的,估算时参数是固定的。然而,在实际工程中可采用标定法提升估算测量的准确性,即通过大量的实验获得相关系数。

5 结 论

针对道面摩擦系数测量方法研究,本文采用数值模拟分析、估算模型建立、实验验证的方法进行深入研究。本文提出一种基于有限元的道面摩擦系数测量方法,同时实现摩擦系数影响因素分析和估算模型的建立,并对所提出的方法进行验证。针对不同轮胎运动参数对摩擦的影响,使用 ABAQUS 有限元分析得出不同轮胎充气压力、载荷和速度条件下摩擦系数与胎面摩擦应力之间的

关系。随着摩擦系数的增加,胎面摩擦应力随着增加;同一摩擦系数条件下,充气压力越小、载荷越大、速度越小,则胎面摩擦应力就越大。利用拟合逆向求解摩擦系数,建立不同工况下的估算模型,实现在特定工况下仅依靠胎面摩擦应力估算摩擦系数的方法。采用本团队研发的摩擦系数车对估算模型进行验证,实验结果表明误差在 2.47%~4.13%,证明了该方法的准确性与有效性。本文的研究工作可为道面摩擦系数测量方法领域的研究提供思路。

参考文献

[1] NIU Y D, LU X W, LI X Y, et al. Modeling and analysis of runway friction coefficient prediction methods based on multi-variable coupling [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71 : 2501909.

[2] ALEX K P. Airplane braking friction on dry snow, wet snow or slush contaminated runways [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 150 : 70-74.

[3] 牛亚东, 张思祥, 田广军, 等. 机场跑道摩擦系数影响因素研究 [J]. 应用力学学报, 2021, 38 (2) : 715-720. NIU Y D, ZHANG S X, TIAN G J, et al. Research on influencing factors of friction coefficient in airport runway [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38 (2) : 715-720.

[4] 周围, 田广军, 牛亚东, 等. 摩擦系数车测量系统设计与实验分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35 (8) : 205-211. ZHOU W, TIAN G J, NIU Y D, et al. Design of surface friction tester measuring system and experiment analysis [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35 (8) : 205-211.

[5] 田广军. 机场道面摩擦系数检测系统研发 [D]. 天津: 河北工业大学, 2021. TIAN G J. Research and development of friction factor detection system for airport pavement [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2021.

- [6] KLEIN-PASTE A, HUSEBY A B, ANDERSON J D, et al. Braking performance of commercial airplanes during operation on winter contaminated runways [J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 79: 29-37.
- [7] 周围,朱华波,牛亚东,等. 飞机跑道摩擦系数测试系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2020, 39(12): 81-83, 87.
- ZHOU W, ZHU H B, NIU Y D, et al. Design of testing system for friction coefficient of airstrip [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(12): 81-83, 87.
- [8] KHALEGHIAN S, EMAMI A, TAHERI S. A technical survey on tire-road friction estimation [J]. Friction, 2017, 5(2): 123-46.
- [9] SUN D, JIAO Z X, SHANG Y X, et al. High-efficiency aircraft antiskid brake control algorithm via runway condition identification based on an on-off valve array [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 32(11): 2538-2556.
- [10] JIAO Z X, SUN D, SHANG Y X, et al. A high efficiency aircraft anti-skid brake control with runway identification [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 91: 82-95.
- [11] NIU Y D, JIANG X Y, MENG F Q, et al. Techniques and methods for runway friction measurement: A review of state of the art [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 9510717.
- [12] BOIDI G, MARCIO R D S, PROFITO F J, et al. Using machine learning radial basis function (RBF) method for predicting lubricated friction on textured and porous surfaces [J]. Surface Topography: Metrology and Properties, 2020, 8(4): 044002.
- [13] BEHROUZ M, HAMZEH Z, MOHSEN Z, et al. Pavement friction and skid resistance measurement methods: A literature review [J]. Open Journal of Civil Engineering, 2016, 6(4): 537-565.
- [14] ACOSTA M, KANARACHOS S, BLUNDELL M. Road friction virtual sensing: A review of estimation techniques with emphasis on low excitation approaches [J]. Applied Sciences, 2017, 7: 1230.
- [15] 郭孔辉. 汽车轮胎动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- GUO K H. Automotive Tyre Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [16] JIA Z X, FU K Y, LIN M X. Tire-pavement contact-aware weight estimation for multi-sensor WIM systems [J]. Sensors (Basel), 2019, 19(9): 2027.
- [17] PAUL D, VELENIS E, HUMBERT F, et al. Tyre-road friction μ -estimation based on braking force distribution [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2018, 233(8): 2030-2047.
- [18] ROYCHOWDHURY S, ZHAO M, WALLIN A, et al. Machine learning models for road surface and friction estimation using front-camera images [C]. 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2018: 1-8.
- [19] WANG D W, CHEN X H, YIN C E, et al. Influence of different polishing conditions on the skid resistance development of asphalt surface [J]. Wear, 2013, 308(1-2): 71-78.
- [20] CUI M, KANG H W, ZHANG Z W. New measurement method of concrete pavement surface macro-texture [J]. Advanced Materials Research, 2012, 382: 293-299.
- [21] CEREZO V, GERTHOFFERT J, BOUTELDJA M, et al. Modeling-based approach to relate ground friction measurements to aircraft braking performance [J]. Journal of Aircraft, 2016, 53(1): 251-261.
- [22] LUCA M D, ABBONDATI F, YAGER T J, et al. Field measurements on runway friction decay related to rubber deposits [J]. Transport, 2016, 31(2): 177-182.
- [23] NIU Y D, ZHANG S X, TIAN G J, et al. Estimation for runway friction coefficient based on multi-sensor information fusion and model correlation [J]. Sensors, 2020, 20(14): 3886.
- [24] LORENZ B, OH Y R, NAM S K, et al. Rubber friction on road surfaces: Experiment and theory for low sliding speeds [J]. Journal of Chemical Physics, 2015, 142(19): 194701.
- [25] 张重阳. 花纹沟槽异物对轮胎使用特性的影响研究 [D]. 汉中: 陕西理工大学, 2020.
- ZHANG CH Y. Study on the effect of foreign body in pattern groove on the service characteristics of tire [D]. Hanzhong: Shaanxi University of Technology, 2020.
- [26] 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 SH Z. Numerical simulation of tire skid resistance based on pavement macro-texture [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [27] 闫治仲. 积水路面轮胎抓着性能仿真研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- YAN ZH ZH. Simulation study of tire braking performance on wet roads [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [28] 胡竞文. 计及复杂花纹的轮胎胎面磨耗预测 [D]. 长

春:吉林大学,2017.

HU J W. Tire tread wear prediction considering the complex pattern [D]. Changchun:Jilin University,2017.

- [29] 张竞楠. 轮胎胎面磨损仿真分析及磨损特性的研究 [D]. 青岛:山东科技大学,2019.

ZHANG J N. Simulation analysis of tire tread wear and study on its wear characteristic [D]. Qingdao:Shandong University of Science and Technology,2019.

- [30] ZHOU Y, LIN Q, YANG X, et al. Material stiffness optimization for contact stress distribution in frictional elastic contact problems with multiple load cases [J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design,2021,17(3):503-519.

作者简介



牛亚东,2023 年于河北工业大学获得博士学位,现为湖州职业技术学院讲师,主要研究方向为道面摩擦系数测量方法研究与在线测量装备研发、软测量技术等。

E-mail: 2023026@huvtc.edu.cn

Niu Yadong received his Ph. D. degree from Hebei University of Technology in 2023. He is currently a lecturer at Huzhou Vocational and Technical College. His main research interests include the research of pavement friction coefficient measurement methods and online measurement equipment development, as well as soft measurement technology.



朱华波,2018 年于河北工业大学获得学士学位,现于河北工业大学攻读博士学位,主要研究方向为现代测控技术、视觉精密测量、机器人视觉定位等。

E-mail: huburt@163.com

Zhu Huabo received his B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2018. He is currently pursuing a doctoral degree at Hebei University of Technology. His main research interests include the modern measurement and control technology, visual precision measurement, as well as robot visual positioning.



周围(通信作者),分别于 2004 年、2007 年和 2010 年在河北工业大学获得学士、硕士和博士学位,现为河北工业大学机械工程学院教授,硕士生导师,主要研究方向为在线测控装备与仪器仪表技术研发、基于微流控技术的细胞分析与检测。

E-mail: zhouwei@hebut.edu.cn

Zhou Wei (Corresponding author) received his B. Sc. , M. Sc. and Ph. D. degrees from Hebei University of Technology in 2004, 2007, and 2010 respectively. He is currently a professor and master's supervisor at the School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology. His main research interests include the development of online measurement and control equipment and instrument technology, as well as cell analysis and detection based on microfluidics.