

轮胎滚动阻力性能的影响因素和仿真优化

周涛 官声欣

万力轮胎股份有限公司

摘要: 轮胎的滚动阻力和汽车燃油消耗直接相关, 自欧盟标签法发布后, 轮胎的滚动阻力成为各大轮胎企业重点关注的性能。本文建立了轮胎滚动阻力仿真模型, 分析轮胎结构设计、材料配方等对滚动阻力的影响趋势, 再选取合适的参数修改轮胎结构, 从仿真层面改善滚动阻力性能, 并对部分方案进行了试验验证。

关键词: 轮胎; 滚动阻力; ABAQUS; 有限元

0 引言

轮胎滚动阻力是指轮胎在水平道路上滚过单位距离机械能转化为热能的能量, 实际测试和计算时取力的单位 (N), 轮胎滚动阻力系数定义为滚动阻力与轮胎负荷的比值, 滚动阻力系数为无量纲。轮胎滚动阻力包括轮胎与路面的摩擦力 (滚动摩擦和滑动微摩擦)、轮胎内部材料摩擦产生的阻力、轮胎滚动时受到的空气阻力以及胎面花纹块拍击路面发声消耗的能量等。

轮胎的滚动阻力和汽车燃油消耗直接相关, 据有关资料显示, 轿车轮胎滚动阻力降低 10%, 可节省燃油 0.8% ~ 2%。因此, 低滚动阻力轮胎的研究和开发成为人们关注的热点。

本文以 215/50R17 加强型半钢子午线轮胎为参考轮胎, 采用 ABAQUS 软件建立轮胎自由滚动有限元模型, 通过提取轮胎模型各单元的应力应变、体积等参数, 利用滚动阻力计算公式, 采用 MATLAB 编写程序, 计算轮胎的滚动阻力和滚阻系数。分析轮胎结构设计、材料配方等设计变更后滚动阻力和滚阻系数的变化, 选取影响因素较大的设计方案, 改善滚阻性能, 并对部分方案进行试验验证仿真结果的正确性。

1 轮胎滚动阻力模型

轮胎的滚动阻力主要由轮胎滚动时的滞后损失及其与路面摩擦产生的损耗造成, 同时损耗的能量以热的形式释放, 使其工作温度上升, 这直接影响轮胎的使用寿命

和汽车能耗。因此, 轮胎滚动阻力的模型, 需要考虑轮胎的热力耦合现象。在建模前, 需要进行橡胶部件的拉伸试验, 选择合适的材料本构关系对应力、应变曲线进行拟合, 同时, 需要测试橡胶部件的 $\tan \delta$ 、导热系数、比热和密度等动态力学性能和热性能参数。

在得到轮胎各个部件材料参数后, 采用 ABAQUS 软件, 建立轮胎装配、充气、静载荷和稳态滚动分析。以稳态滚动三维有限元模型中输出的应力应变为基础, 编写程序计算橡胶单元的生热率。ABAQUS 中不能直接定义热源, 需要使用 Fortran 语言编写子程序 HETVAL 为温度场模型定义热源, 建立轮胎温度场分析模型, 对于轮胎外表面应用对流换热边界条件, 对流换热系数采用反演的办法, 内表面应用与内腔空气的热传导方式。

轮胎在滚动过程中, 其应力、应变通常是脉冲形式, 需对应力、应变进行傅里叶变换, 可以得出轮胎胶料能量损耗的理论公式为:

$$E_d = \sum_{n=1}^N [\pi \cdot n \cdot V \cdot A_n^\sigma \cdot A_n^\epsilon \cdot \sin(\phi_n^\sigma - \phi_n^\epsilon + \delta_n)] \quad (1)$$

式中, V 为黏弹性材料的体积; A_n^σ 为应力幅值; A_n^ϵ 为应变幅值; ϕ_n^σ 、 ϕ_n^ϵ 为单元的应力应变分量, δ_n 为滞后损失角, 通过动态力学试验 (Dynamic Mechanical Analysis, DMA) 来测定。

轮胎在一定速度下进入稳态滚动状态后, 通过提取轮胎单元的应力、应变和黏弹性材料参数等, 采用 MATLAB 对应力、应变曲线进行傅里叶变换, 再利用上述的理论公式 (1), 完成滚动阻力迟滞能耗程序的计算,

获得滚动阻力数值，再用滚动阻力和负荷比值得到滚动阻力系数。

2 轮胎设计和材料参数影响分析

从轮胎滚动阻力产生的机理分析，橡胶材料的 $\text{tg } \delta$ 影响最大，轮胎结构设计、施工等因素会影响轮胎的应力、应变以及质量体积，从而影响轮胎的滚动阻力。因此本文从设计、材料等方面调整，仿真分析各因素对滚动阻力的影响。

2.1 结构设计的影响

首先分析轮胎的轮廓设计影响，轮胎胎面外轮廓圆弧的第一段弧半径 R_1 值、第二段弧半径 R_2 值、行驶面高度 h 和胎圈宽度等设计影响轮胎的接地形状，在原始设计上，分别增大和减小 R_1 、 R_2 、 h 值，建立滚阻模型，分析结果如表 1 所示。

表 1 轮胎轮廓设计对滚动阻力系数的影响

方案说明	原始方案	减小胎圈宽度	增大 R_1 值	减小 R_1 值	增大 R_2 值	减小 R_2 值	增大 h 值	减小 h 值
滚动阻力系数	8.22	8.27	8.18	7.92	7.91	8.13	8.27	8.01

从分析结果来看，轮胎胎圈宽度对滚动阻力影响较小， R_1 值、 R_2 值、行驶面高度变化的敏感度基本相当，改变轮廓对滚动阻力有一定的影响，最大影响在 4% 以内，但仿真的数值波动比试验波动大，可以在首规格的设计阶段结合轮胎印痕的仿真分析选取合适的参数。

再变更轮胎的一些主要受力部件如带束、胎体、胎侧、三角胶、胎面和胎肩等，分析结构变更后的受力以及体积等变化对滚动阻力系数的影响，分析结果见表 2。

表 2 轮胎结构设计对滚动阻力系数的影响

方案说明	原始方案	胎体反包高度降低	三角胶高度降低	花纹沟深度增大	胎侧厚度降低	带束层宽度增加	胎肩厚度降低
滚动阻力系数	8.22	7.01	8.19	8.45	8.03	8.66	7.83

从表 2 来看，轮胎带束层宽度、胎体反包高度及胎肩厚度对滚动阻力影响明显，敏感度高，花纹沟深改变后，胎冠厚度变化，因此也影响明显。三角胶高度和胎侧厚度对滚动阻力的影响相对较小。其中降低带束层宽度、胎体反包高度、带束宽度和胎肩厚度均能降低滚动阻力。

2.2 材料的影响

轮胎胎面是对轮胎滚动阻力影响最大的部分，胎面胶对滚动阻力的贡献约占轮胎滚动阻力总量的 50% 以

上。不同胎面胶的 $\text{tg } \delta$ 及本构参数不同，从而所产生的滚动阻力也不同。选取两种不同的胎面胶，改变胎面胶的材料本构参数和滞后损失角，分析结果见表 3，变更胎面胶材料，采用低 $\text{tg } \delta$ 的胎面胶，滚动阻力系数有明显的降低。

表 3 轮胎胎面材料对滚动阻力系数的影响

方案说明	原始方案	变更胎面胶材料
滚动阻力系数	8.22	7.49

轮胎的骨架材料是主要承载部件，但对滚动阻力的影响研究较少，因此，选取胎体层、带束层，修改骨架材料的模量、分布密度和帘线半径等参数，分析骨架材料参数的变更对滚动阻力系数的影响，分析结果见表 4。

表 4 轮胎骨架材料对滚动阻力系数的影响

方案说明	原始方案	带束分布密度减小	带束模量减小	带束钢丝半径减小	胎体模量减小	胎体分布密度减小	胎体钢丝半径减小
滚动阻力系数	8.22	8.03	7.71	8.04	7.25	7.23	7.24

该规格是双层高反包胎体设计，因此胎体层对滚动阻力影响最大。骨架材料的影响趋势模量 > 分布密度 > 半径，整体上骨架材料模量降低、分布密度降低、半径降低，滚动阻力呈降低趋势，部分趋势有波动，可能和模型的收敛性不好有关，是调整了建模参数造成的。

3 试验验证

本文以 215/50R17 半钢子午线轮胎为参考，该规格是双层高反包胎体设计，选取前期分析结果影响比较大的参数，对带束宽度、胎体反包高度、胎体材料和胎肩厚度等进行微调，设计了三种改善方案，分别进行试验和仿真分析。滚动阻力系数结果见表 5。

表 5 轮胎不同方案滚动阻力系数试验和仿真分析对比

调整项目	原始方案一	方案二	方案三	方案四
胎体材料	胎体钢丝材料 1	胎体钢丝材料 1	胎体钢丝材料 2	胎体钢丝材料 1
胎体反包高度	胎体反包高度 1	胎体反包高度 1	胎体反包高度 1	胎体反包高度 2
带束钢丝	带束钢丝材料 1	带束钢丝材料 2	带束钢丝材料 3	带束钢丝材料 1
轮胎质量/kg	10.85	11.13	10.20	10.73
滚动阻力系数试验	8.01	7.97	7.52	7.60
滚动阻力系数仿真	8.22	8.21	6.68	7.00

从表 5 的结果来看，带束钢丝材料 2 比带束钢丝材料 1 滚动阻力系数降低较多，带束钢丝材料 3 比带束钢丝材料 1 滚动阻力系数降低更多。
(下转第 54 页)

5 结语

本文阐述了基于三维视觉技术的高精度引导方案在工业机器人轮胎装配生产线中的应用价值及其优势，总结起来为以下两点：

（1）三维视觉技术能够实时捕捉轮胎与轮毂的精确位置及姿态信息，保障装配过程的精确性与稳定性。

（2）借助三维视觉引导，可实现对轮胎与轮毂配合精度的精确控制，降低装配误差，从而提升装配效率及质量。

未来的研究将着眼于进一步提高装配效率与优化算法。一方面，可以探索更快速、更精确的三维视觉技术，以推动装配过程的提速。另一方面，可以致力于开发更为智能化的算法，以适应不同轮胎和轮毂的变化，增强系统的适应性和灵活性。同时，融合机器学习、人工智能等先进技术，对装配过程进行实时监控与优化，从而进一步提升装配效率和质量。

参考文献

[1] 于玲. 工业机器人视觉定位技术与应用探讨 [J]. 科技与创新, 2024, (08): 50-52+56. DOI: 10.15913/j.cnki.kjycx.2024.08.012.

[2] 余鹏, 唐荣芳, 赵莹莹, 等. 视觉识别下分拣机器人目标稳准抓取系统设计 [J]. 信息技术, 2024, (04): 115-120+125. DOI:10.13274/j.cnki.hdzj.2024.04.018.

[3] 刘新洋, 栗琳, 张佳明. 工业机器人自动视觉检测综合实训平台的设计与实践 [J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(02):222-225. DOI:10.19927/j.cnki.syyt.2024.02.044.

[4] 李吉祥, 林福. 基于视觉的机器人抓取系统设计 [J]. 闽西职业技术学院学报, 2024, 26(01):115-118.

（上接第 44 页）

料 1 整体的刚度要强，但对滚动阻力影响不大。方案三同时降低胎体和带束层整体的刚度，滚动阻力降幅明显，对于该规格来讲，胎体层材料刚度降低有利于滚动阻力。胎体反包高度对滚动阻力影响明显，降低胎体反包高度有利于滚动阻力。轮胎重量和滚动阻力不完全正相关，关键是减重和加重的部位对滚动阻力的影响有多大。仿真和试验的整体趋势一致，但仿真模型对结构比较敏感，降低幅度比实际要大。

4 结语

本文采用 ABAQUS 软件，建立了轮胎的温度场和自由滚动仿真模型，提取轮胎单元的应力、应变和黏弹性材料参数等，采用 MATLAB，通过理论公式，完成滚动阻力和滚动阻力系数的计算。从轮胎的轮廓设计、主要部件的结构设计、橡胶和骨架材料等方面进行调整，分析了各参数对轮胎滚动阻力的影响，对于

本文选择的 215/50R17 规格轮胎，胎面胶、胎体层反包高度、带束层宽度、胎体和带束骨架材料参数等，对轮胎的滚动阻力影响较为明显，并通过试验结果进行验证，试验方案三的滚动阻力系数降低了 6%，降幅明显。分析结果对轮胎设计人员有良好的理论指导意义，可将上述多种改善方案组合起来，进一步降低轮胎的滚动阻力。

参考文献

[1] 马改陵, 徐鸿, 崔文勇, 等. 子午线轮胎滚动阻力的研究进展 [J]. 橡胶工业, 2005(52): 501-510.

[2] 赵敏. 降低轮胎滚动阻力的途径 [J]. 轮胎工业, 2006(26): 586-593.

[3] 晋琦. 轮胎滚动阻力及稳态滚动温度场的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.