

缩比模型轮胎转速对整车风阻影响分析

孙晨光, 陈彩龙

(泛亚汽车技术中心有限公司, 上海 201208)

摘要: 在缩比模型风洞试验中,若车轮转速设置与气体来流相同,会使轮胎旋转角速度倍增,导致缩比模型设计难度增大,同时试验中的不稳定因素也会增加,因此需要对缩比模型风洞试验中轮胎转速对风阻的影响进行分析,以探究轮胎降转速试验的可行性。本文基于某MPV车型,通过风洞试验及计算流体动力学(CFD)仿真方法对轮胎转速对整车风阻的影响进行分析,结果表明:轮胎转速对风阻测试结果有影响;缩比模型车轮速度设定与来流相同时,缩比模型与全尺寸风阻结果更一致。

关键词: 缩比模型风洞;车轮转速;空气阻力;仿真分析
中图分类号: U461.1 **文献标志码:** A

Analysis of Influence of Wheel Rotation Rate on Wind Drag in RSWT

SUN Chenguang, CHEN Cailong

(Pan Asia Technical Automotive Center, Shanghai 201208, China)

Abstract: In reduces scaled wind tunnel (RSWT) tests, if the wheel speed is set to the same as the wind, it will double the tire rotation angular velocity, making it more difficult to design a scaled model. At the same time, it will cause a greater instability. Therefore, it is necessary to analyze the effect of tire speed on wind resistance in RSWT tests to explore the feasibility of tire speed reduction tests. Based on a MPV, the influence of wheel rotation speed is analyzed using wind tunnel test and the computational fluid dynamics (CFD) method. The result shows that the tire speed has an impact on the wind resistance test results. The wheel speed setting of the scaled model is the same as the incoming flow, and the scaled model is more consistent with the full-scale wind resistance results.

Key words: reduced scaled wind tunnel test(RSWT); wheel rotation speed; aerodynamic resistance; simulation analysis

随着人们对燃油车的经济性、电动车的续航里程、车辆操控稳定性及驾乘舒适性的追求,汽车的整车气动性能开发越发重要^[1]。汽车风洞作为整车气动性能开发的主要手段,目前在我国的各汽车主机厂、汽车研发机构、高校汽车专业等地不断建成。与全尺寸风洞相比,缩比模型风洞建造成本低,在汽车开发前中期的汽车造型方案优选、型面气动开发、车身底盘气动优化等过程中具有较大优势,效率高、响应快、成本低^[2]。

在缩比模型风洞中,需要模拟相似的气体流动及分离状态,以提升试验的精确性,这就需要使缩比模型与全尺寸模型满足雷诺相似原理^[3]。雷诺数 Re 计算公式为:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度, u 为流速, L 为特征长度, μ 为动力黏滞系数。

在汽车的风阻组成中,轮胎及周边对整车风阻的影响较大,约占25%~30%。为了能更真实地反映汽车在道路上的行驶状况,在汽车风洞中设有模拟道路系统和车轮旋转的五带系统(中央移动带、车轮移动带等)。

在缩比模型风洞中,由于车轮也按比例缩小,若在保证轮胎旋转的线速度与来流速度保持一致,则轮胎的转速要大幅度提高。泛亚缩比模型风洞为40%缩比风洞,风洞的最大设计风速为250 km/h^[4]。为了保证缩比模型风洞与整车风洞试验的流场雷诺数相似,需要缩比模型轮胎的角速度达到实车的6.25倍。这对缩比模型车轮及其周边机构的设计与实现提出了极高的要求,对试验的安全运行也构成了较大挑战。

为了探索轮胎降转速进行试验的可能性,有必要对缩比模型风洞中轮胎转速对整车风阻的影响进行研究。本文研究中,全尺寸风洞试验在同济大学

地面交通工具风洞中心进行^[5],缩比模型风洞试验在泛亚汽车技术中心缩比风洞实验室中进行。两个风洞中,被测模型都是通过4根支撑杆与天平链接,整车所受的气动力通过4根支撑杆与4个车轮移动带传递到天平上从而被测得。两个风洞都配备了组合式边界层控制系统及五带系统,能较好地模拟整车道路行驶的流场特性及保证测试结果准确性。

1 风洞对标结果

本文的风洞试验结果来自同济大学上海地面交通工具风洞中心和泛亚缩比模型风洞实验室,两个风洞之间已完成系列对标。对标试验中,选取了MPV、SUV、CUV、三厢车、两厢车等5种典型乘用车作为对标车型,其缩比模型轮胎转速采用与来流速度相同的匹配。对标结果如图1所示^[6]。

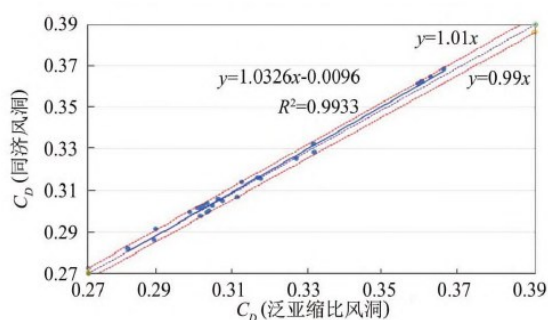


图1 泛亚缩比模型风洞与同济风洞对标结果(整车风阻)
Fig.1 Comparison of test result in PATAc RSWT and Tongji AAWT

对标结果表明,泛亚缩比模型风洞测试结果与同济风洞具有高度的一致性,最大误差不超过1% ($\Delta C_d < 0.003$)。

2 风洞试验结果与分析

本文基于上汽通用汽车某已上市MPV车型进行试验,车辆采用上市实车及缩比硬质车辆模型,分别在同济风洞与泛亚缩比模型风洞中进行整车气动阻力测量。测试车辆及模型如图2及图3所示。

实车在全尺寸风洞中、缩比硬质模型在泛亚缩比模型风洞中,不同轮胎转速工况下各方案的测试结果如图4所示。由图4可以看出,当轮胎转速为0时,同济全尺寸风洞与泛亚缩比风洞测量结果具有高度一致性。

在缩比模型风洞中,当轮胎转速为250 km/h



图2 同济风洞实车测试
Fig.2 Test in Tongji AAWT



图3 泛亚缩比风洞缩比模型测试
Fig.3 Test in PATAc RSWT

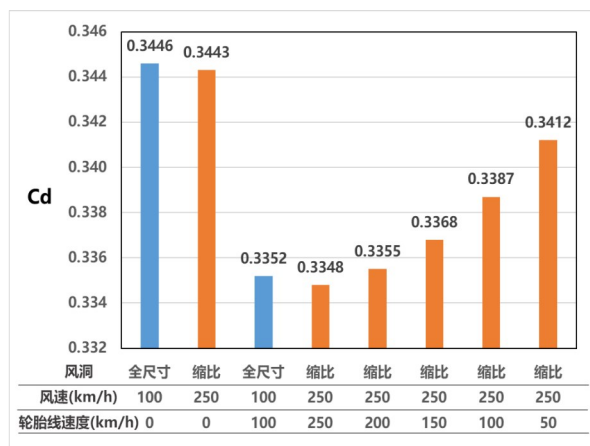


图4 风洞试验结果
Fig.4 Test result in wind tunnel

时,整车阻力系数测量结果与全尺寸风洞结果一致;随着轮胎转速逐渐降低,整车阻力系数逐渐增大;当轮胎转速为0时,整车阻力系数增大约0.010。

上述结果表明,对于该MPV车型,在缩比模型风洞中,轮胎转速会对整车阻力产生一定影响。当缩比模型轮胎外缘线速度与来流速度一致,即都为250 km/h时,二者测量结果最为一致。车轮降速转动会导致整车阻力的上升,轮胎转速越低,整车风阻越大。从试验结果来看,当轮胎转速为200 km/h时,阻力差异在0.001以内。所以,轮胎转速降低至原先的80%左右,可作为工程开发的设定工况,从

而降低模型设计难度,减小试验中的不稳定因素。

基于以上试验结果,为进一步理解不同车轮转速下轮胎周边的流场特性,找出引起整车风阻变化的原因,对全尺寸风洞中轮胎转速为 100 km/h,缩比模型风洞中轮胎转速分别为 250 km/h、100 km/h 的工况进行数值仿真。

3 仿真结果分析

3.1 仿真方法

本文使用 Fluent 软件进行流体仿真。建立全尺寸以及缩比模型风洞仿真模型,分别计算了全尺寸风洞中轮胎转速 100 km/h,缩比模型风洞中轮胎转速 0、100、250 km/h 的工况,通过对流场计算结果的对比研究缩比模型风洞中整车阻力变化的原因。

仿真计算中,保留了车辆前舱和车底的零件细节特征,前舱内的冷凝器(condenser)、散热器(radiator)和碰撞安全装置(CAC)使用多孔介质参数,车轮采用了 MRF 模型域与旋转壁面相结合的方式模拟车轮周围的流场,其中轮毂部分使用 MRF 域^[7],同时将轮胎外壁设置为旋转壁面,以模拟实际车辆行驶过程中轮胎的旋转,进一步降低仿真的误差。车体表面采用三角形网格,流体采用四面体网格,整体网格数量约为 5 000 万。某车的计算模型如图 5 所示。

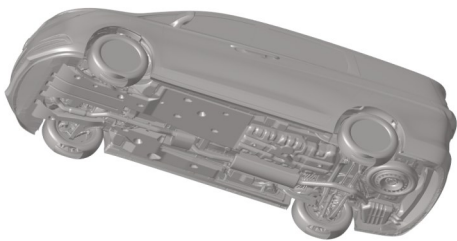


图 5 仿真模型示意图

Fig.5 Simulation model

等比例模型中,计算域前端设置为速度入口,速度为 27.78 m/s,以模拟全尺寸车 100 km/h 的行驶速度;缩比模型中,速度入口速度设置为 69.44 m/s,以模拟缩比模型车 250 km/h 的行驶速度。计算域后端设置为压力出口,两侧、顶部及底部设置为对称面,车身及零件表面设置为无滑移壁面边界条件。

由于汽车外形复杂,容易引起分离,所以使用湍流模型进行处理,本文仿真采用 k-e Realizable 湍流模型进行计算,采用二阶迎风格式离散求解,使用稳态的方式。

3.2 仿真准确性对比

使用计算流体动力学(CFD)方法仿真得到的各方案阻力系数与风洞试验测试得到的阻力系数如图 6 所示。从图 6 中可以看出,仿真结果与试验测试的整车阻力误差均控制在 1% 以内,误差主要是仿真计算模型与风洞试验模型之间的差异导致。在仿真中,往往会对计算模型进行一定程度的简化,过程中造成的差异是不可避免的。就结果来看,对于轮胎转速对整车阻力的影响,仿真计算结果与试验数值具有较高的一致性。

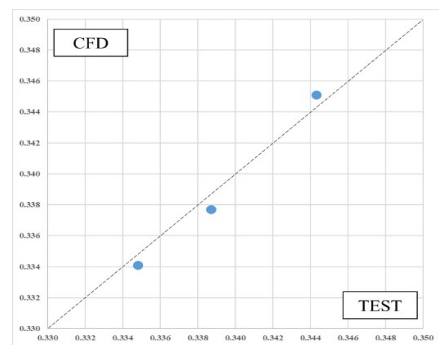


图 6 仿真与试验阻力系数对比

Fig.6 Comparison of Cd between CFD and test

3.3 计算结果分析

从风洞试验中得到的阻力结果来看,缩比风洞中轮胎以 250 km/h 的线速度转动时,整车的阻力系数与全尺寸风洞试验中得到的整车系数具有高度的一致性。随着轮胎转速降低,整车阻力逐渐上升,当轮胎不旋转时,整车阻力系数最大,比全尺寸车结果大约 0.010。为了研究这一测试结果产生的原因,对仿真计算得到的阻力系数数值与流场结果进行分析研究。

仿真中,通常会将整车分为数百个组成部分,以研究车辆某些部件上的受力情况。将缩比模型在不同轮胎转速下阻力系数差别最大的部件列出,并与全尺寸模型计算结果计算差值。差值为正则表示该部件上的阻力系数与全尺寸模型相比偏大,差值为负表示偏小。选取车轮转速 250 km/h 与 100 km/h 两个工况进行研究,得到的结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,轮胎转动影响最大的部位为轮罩和胎皮,其次为 A 面、底盘、悬架、轮毂等部位,这些零件为车轮本身或在车轮附近。高速转动的轮胎改变了其周围的流场,从而影响到了车轮自身及其周边零件上的压力分布情况。为了研究轮胎转动使整车阻力产生变化的原因,下文将对仿真得到的压力与流场分布情况进行对比分析。

表 1 阻力系数差异最大的部件

Table 1 Components with largest Cd difference

部件	阻力系数	
	250 km/h	100 km/h
前轮轮罩(2个)	0.0001	0.0062
A面	0.0002	0.0035
前轮后方底盘	-0.0001	0.0018
前悬架(2个)	0.0000	0.0015
后轮轮毂(2个)	0.0000	0.0012
胎皮(4条)	-0.0003	-0.0045

3.4 流场分布对比

选取车轮转速 250 km/h 和 100 km/h 工况下缩比模型流场分布与全尺寸风洞仿真结果对比,以研究轮胎转动速度对整车阻力产生影响的流动机理。从计算结果中可以得知,前轮轮罩、A面、前轮后方底盘、前悬架、后轮轮毂及胎皮上的阻力差异较大,故以这些零件上的压力分布作为研究对象。前轮轮罩上的压力分布对比如图 7 所示。

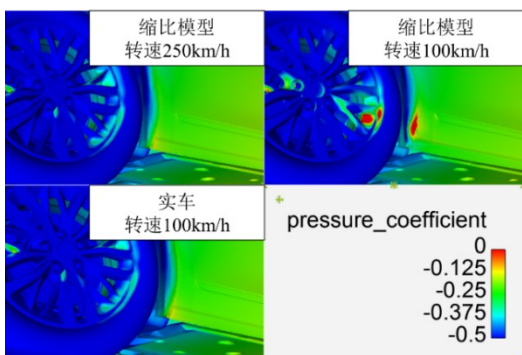


图 7 前轮轮罩压力分布

Fig.7 Pressure distribution around front wheel cover

由图 7 中可见,缩比模型在轮胎转速 250 km/h 工况下,其前轮轮罩后方压力分布与全尺寸模型具有较好的一致性;而缩比模型在轮胎旋转 100 km/h 工况下,前轮后方的轮罩上压力明显上升,造成阻力的增加。为探究这一压力差异产生的原因,对其附近的流速分布进行对比分析,其前轮轮罩附近的流速分布对比如图 8 所示。由于全尺寸与缩比模型满足雷诺相似,所以这里选取速度与车长的乘积作为变量进行对比。

从图 8 中可以看出,缩比模型在轮胎转速 250 km/h 的工况下,其前轮附近流速与全尺寸模型具有较好的一致性;而缩比模型轮胎线速度降低为 100 km/h 时,由于转速的降低,前轮周围空气受到的轮胎干扰更小,气流更加贴近车身,更多的气流冲击轮罩的迎风部位,造成局部压力升高,阻力增加。前悬架及前轮后方底盘上的压力分布如图 9 所示。

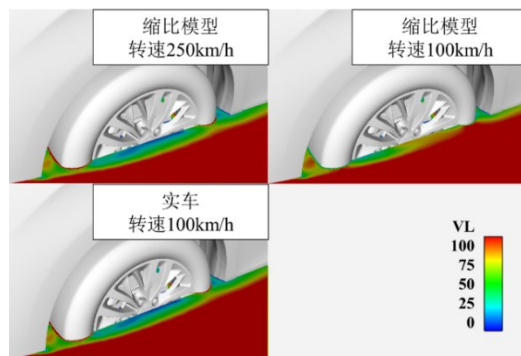


图 8 前轮罩附近流速分布

Fig.8 Flow velocity distribution around front wheel cover

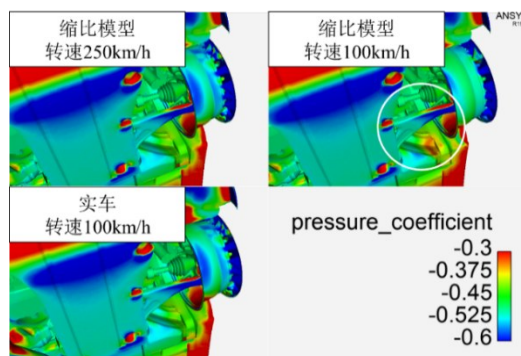


图 9 前悬架附近压力分布

Fig.9 Pressure distribution around front suspension

从图 9 中可以看出,缩比模型在轮胎转速 250 km/h 的工况下,其前悬架及前轮后方底盘上的压力分布与全尺寸模型具有较好的一致性;而缩比模型轮胎旋转 100 km/h 时,前悬架及前轮后方底盘上的压力有一定程度增加。该现象的产生原因与前文分析原因一致,即以较低转速转动的轮胎对其周围流动干扰小,气流更加贴近车身,从而使轮胎周围的零件受到更大的气流直冲,局部压力升高,阻力增加。后轮轮毂上的压力分布情况对比如图 10 所示。

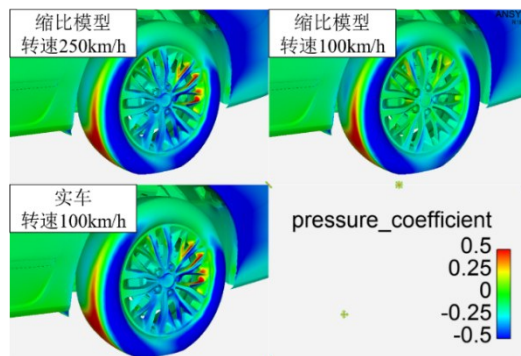


图 10 后轮轮毂压力分布

Fig.10 Pressure distribution on rear wheel rim

从图 10 中可以看出,缩比模型在轮胎不同转速工况下,后轮轮毂上的压力分布存在明显差异。缩比模型轮胎以 250km/h 转动时,后轮毂压力分布与全尺寸模型较为一致。相比 100km/h 转速工况,其后轮毂后方产生了一定正压区域,而轮毂下方朝前部分负压区域更大,综合结果为后轮毂受到的阻力更小。后轮胎皮上的压力分布如图 11 所示。

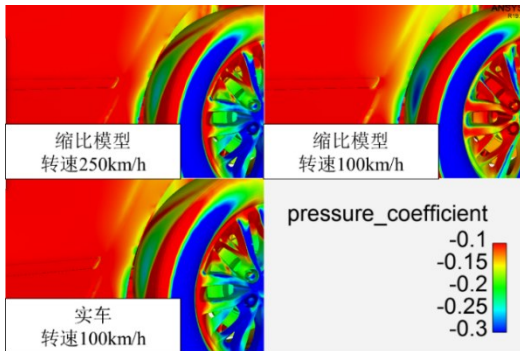


图 11 后轮胎皮压力分布

Fig.11 Pressure distribution on rear wheel rubber

从图 11 中可以看出,缩比模型在轮胎转速 250 km/h 的工况下,其前悬架及前轮后方底盘上的压力分布与全尺寸模型具有较好的一致性;而缩比模型轮胎旋转 100 km/h 时,后轮胎皮上的压力有一定程度的降低,所以后轮胎皮受到的阻力更小。为了研究压力分布差异的产生原因,对其周围的流场进行对比分析。后轮胎皮附近的流速分布对比如图 12 所示。

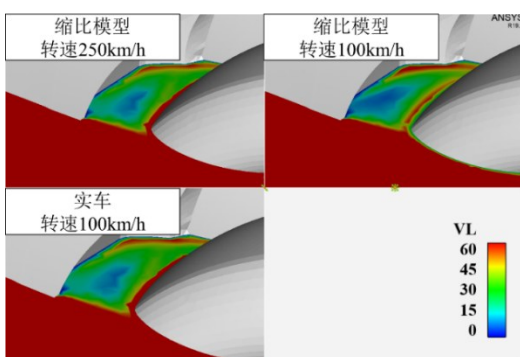


图 12 后轮附近流速分布

Fig.12 Flow velocity distribution rear wheel

从图 12 中可以看出,缩比模型在轮胎转速 250 km/h 的工况下,其后轮罩与轮胎之间的流速分布与全尺寸模型具有较好的一致性。相比轮胎旋转 100km/h 的工况,由于转速高,轮罩与胎皮之间的气流速度较快,有更多车辆侧面的来流可以从轮胎前

方进入轮罩与轮胎间的区域,冲击胎皮的迎风面,从而造成局部压力上升,阻力更大。

从仿真结果来看,缩比模型在不同轮胎转速下,车身零件上的压力分布与周围的流场存在较大差异,当轮胎以与风速相同的 250 km/h 速度转动时,缩比模型与全尺寸模型的阻力测量结果、压力和流速分布情况具有较好的一致性。所以缩比模型采用 250 km/h 的轮胎转速测量结果更为精确。

4 结论

本文基于上汽通用汽车某已上市 MPV 车型,在泛亚缩比模型风洞中设定了不同的车轮转速进行气动阻力测试,并与同济大学全尺寸风洞中的测量结果进行了对比。之后使用 Fluent 软件进行仿真,通过对缩比模型风洞中不同轮胎转速下受力差别较大的区域进行流场情况分析比较,研究了缩比模型轮胎转速对整车阻力产生影响的原因。通过试验与仿真分析的结果,对于某 MPV 车型,可以得到以下结论:

(1) 缩比模型不同转速下的气动阻力测量结果存在差异,当轮胎以 250 km/h 的速度旋转时,其气动阻力测量结果与全尺寸风洞测试结果一致,随着轮胎转速降低,整车风阻随之增大;

(2) 缩比模型在不同轮胎转速下,轮胎附近零件上的压力及其周围的流场分布存在较大区别,轮胎转速降低时,对其周围的空气扰动减小,从而影响其周围零件的受力情况;

(3) 轮胎转速降低至原先的 80% 左右时,对测试结果的影响在 0.001 以内,可作为工程开发的设定工况,从而降低模型设计难度,减小试验中的不稳定因素。

参考文献:

- [1] HUCHO W H. Aerodynamics of Road Vehicles[M]. 4th ed. SAE Publications Group, Warrendale PA: 1998.
- [2] 曾翌,鲍欢欢,陈军,等.汽车模型风洞研究[J].机床与液压, 2019,47(16):40.
ZENG Yi, BAO Huanhuan, CHEN Jun, *et al.* Wind tunnel research on automotive models [J]. Machine Tool and Hydraulic, 2019, 47(16): 40.
- [3] 庞加斌,刘晓晖,陈力,等.汽车风洞试验中的雷诺数、阻塞和边界层效应问题综述[J].汽车工程, 2009, 31(7):609.
PANG Jiabin, LIU Xiaohui, CHEN Li, *et al.* Review of Reynolds number, blockage and boundary layer effects in wind tunnel tests[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(7): 609.

- [4] 贾青, 李挺, 杨志刚. 旋转车轮对整车气动性能的影响评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 42(6):949.
JIA Qing, LI Ting, YANG Zhigang. Evaluation of rotating wheel aerodynamic performance impact [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 42(6): 949.
- [5] 陈力, 刘晓晖, 庞加斌, 等. 风洞试验中车辆锚定方式对气动力测量的影响分析[J]. 汽车工程, 2014, 36(11):1369.
CHEN Li, LIU Xiaohui, PANG Jiabin, *et al.* Influence of vehicle anchoring methods on aerodynamic measurement in wind tunnel tests [J]. Automotive Engineering, 2014, 36(11): 1369.
- [6] 尹章顺, 陈彩龙, 王夫亮. 泛亚汽车缩比模型风洞性能与气动实验[J]. 空气动力学学报, 2020(5):924.
YIN Zhangshun, CHEN Cailong, WANG Fuliang. PATAC reduced scaled wind tunnel performance and aerodynamic tests [J]. Journal of Aerodynamics: 2020(5): 924.