# 后备轮胎布局对越野车空气动力学效应的影响

# 张 超,赵 峰,朱喻成,张治乾,耿子海\*

比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2024年12月4日; 录用日期: 2025年1月10日; 发布日期: 2025年1月20日

# 摘要

为了明确越野车型后备轮胎配置与布局对车辆空气动力学的影响,本文开展了针对MIRA方背标模的空 气动力学仿真研究。研究中将后备轮胎布置在车辆尾部8个不同位置并结合贴体和分离两个后备轮胎布 局配置进行对比分析。计算表明由于贴体后备轮胎布局使MIRA模型尾部环流流动受阻致使车辆尾部左 右两侧存在压力不平衡,同时后备轮胎的引入也导致车辆尾部周围流场的动能损失增大。最终导致车辆 的气动阻力增加并且后备轮胎放置位置越远离车辆尾部中央阻力增加越明显。将贴体布局改为分离布局 后车辆尾部压力得到明显改善,这是由于车辆尾部与后备轮胎之间的缝隙使车辆左右两侧的空气流动比 贴体轮胎布局更加顺畅,结果显示分离布局的车辆风阻系数与基准算例的风阻系数相近,气动性能明显 优于贴体轮胎布局。本文的研究结果为越野相关车型外形和空气动力学的开发提供参考。

#### 关键词

越野车型,后备轮胎,空气动力学,气动阻力

# Aerodynamic Effects of the Backup Tire Arrangement on a Off-Road Type Passenger Car

### Chao Zhang, Feng Zhao, Yucheng Zhu, Zhiqian Zhang, Zihai Geng\*

BYD Automobile Industry Company Limited, Shenzhen Guangdong

Received: Dec. 4<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jan. 10<sup>th</sup>, 2025; published: Jan. 20<sup>th</sup>, 2025

#### Abstract

In order to clarify the influence of the configuration and layout of the off-road vehicle back-up tire

\*通讯作者。

on the vehicle aerodynamics, this paper carried out the aerodynamic simulation research for the MIRA squareback model. The investigation positioned the spare tire in eight distinct locations at the vehicle's rear, with a focus on contrasting two configurations: the body-fitted and the separated configurations. Calculations revealed that the body-fitted configuration in the MIRA model hindered the rear vortex flow, causing pressure discrepancies on either side of the tail, while the inclusion of the spare tire exacerbated the loss of kinetic energy in the flow. These effects ultimately resulted in an increase in the aerodynamic drag of the vehicle, and the drag increase was more pronounced as the tire's placement moved farther away from the central area. The change from the body-fitted tire layout to the separated tire layout resulted in a significant improvement in vehicle rear pressure, as the gap between the rear vehicle and spare tire allowed air to flow more smoothly between both sides of the vehicle than with the body-fitted setup. The results show that the drag coefficient of the separated configuration is close to that of the benchmark, and the aerodynamic performance is significantly better than that of the body-fitted spare tire configuration. The findings of this study serve as a reference for the development of off-road vehicle designs, particularly in terms of exterior aesthetics and aerodynamics.

# **Keywords**

Off-Road, Backup Tire, Aerodynamics, Aerodynamic Drag

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC ① Open Access

# 1. 前言

伴随着自驾游和野营等新兴生活方式的崛起,消费者对越野车型的购买需求日益增强,并且随着越 来越多自主品牌越野车型的上市,越野车这一细分领域的门槛和价格在逐渐降低,此外,新能源车型的 节能、便捷的特点也让越来越多的消费者选择越野车型。由于越野车型的行驶路况较为复杂,其通常配 有后备轮胎以满足在一些爆胎情况下的使用需求,但是目前针对越野车型空气动力学开发的研究大多都 是对车辆局部细节进行气动外形优化,很少有人开展专门针对后备轮胎对车辆气动效应的影响研究。

李兵等人在仰望 U8 的开发过程中提出一种越野混动车型风阻开发流程,以数值仿真为主要开发工 具完成了外造型、车底部以及轮辋等区域的性能开发[1]。屈鹏等人对越野车辆的车头、A 柱、车尾倒角 以及阻风板等局部进行修正及优化实现了车辆风阻系数降低 0.028 [2]。饶紫微等人通过对某小型越野车 型进行数值仿真发现外流场中沿车身外形的大幅度压力脉动是气动噪声的主要来源之一[3]。王俊等人采 用数值仿真的方法对某型 SUV 包括前保险杠下部、发动机罩、车顶以及轮眉在内的多个关键部位进行仿 真优化,显著降低了该车型的风阻系数[4]。陈永良等人通过仿真计算方法研究扩散器角度对于 SUV 车型 空气动力学性能的影响,研究发现扩散器下斜角度的增大会导致风阻系数增加[5]。Al-Saadi 等人通过应 用一些修改和空气动力学装置,对运动型多用途车(SUV)的空气动力学性能进行数值优化提升,他们研究 发现居于车辆尾部中央位置的后备轮胎向上或向下移动对车辆的空气动力学性能影响很小[6],但是他们 只考虑后备轮胎垂直方向上位置改变对空气动力学特性的影响,缺乏开展针对后备轮胎向左右偏置的研 究。此外,调研发现目前市场上越野车型后备轮胎的布置无统一性,后备轮胎的位置通常情况下位于车 辆尾部平面的中央,也有多种车型的后备轮胎安装位置偏置。尽管市场上出现多款后备轮胎偏置的车型, 但是由于缺乏专门关于后备轮胎对汽车空气动力学性能影响的研究,因此很少有人能够清晰解释后备轮 胎位置及布局对车辆空气动力学的具体影响。 车辆后备轮胎(或类似结构)作为一种常见的越野车型部件,不仅影响车辆的外观特性,对车辆的空气 动力学性能也有很大的影响。随着汽车造型的不断更新发展以及消费者审美需求的改变,多元化的车辆 尾部设计进入大众的视野,然而针对尾部备胎对于车辆空气动力学特性的具体影响行业内仍没有系统的 研究。本文以 MIRA 汽车方背标模为研究对象,采用 STAR-CCM+软件对其进行整车空气动力学分析, 研究后备轮胎安放布局对于车辆空气动力学性能的影响。本论文具体阐述两部分内容,第一部分是对此 次研究方法的具体介绍;第二部分是对后备轮胎的仿真结果进行细致分析与讨论。通过此次研究梳理, 可以为后续相关车型的空气动力学开发提供有力的参考和支持。

# 2. 研究方法

# 2.1. 汽车几何模型

本文的研究对象为 MIRA 方背式模型,这种简化的汽车模型在汽车空气动力学的研究中使用非常广 泛,具有与真实汽车较为接近几何外形,车身表面光滑无棱角,车身周围的拐角由倒角圆滑过渡,车轮 为无轮腔设计。此次研究使用 1:1 方背式模型进行研究,其具体尺寸如图 1 所示[7] [8]。参考 MIRA 模型 轮胎的直径在模型尾部加装宽度为 200 mm 的轮胎部件。图 2 展示的是配有后备轮胎的 MIRA 方背模型, 此次针对贴体后备轮胎(轮胎与车辆尾部紧密相连,车体与轮胎之间没有间隙)和分离后备轮胎(轮胎独立 安装,通过固定点连接放置,轮胎与车辆缝隙宽度为 50 mm)两个布局展开深入研究(如图 2(b)和图 2(c)所 示),为了提高网格生成质量,在后备轮胎与车身连接处作倒角处理。







 Figure 2. Off-road vehicles with spare tire

 图 2. 配有后备轮胎的越野车型



(b) 贴体轮胎布局侧视图



(c) Side view of the separated tire layout(c) 分离轮胎布局侧视图

fitted tire layout

### 2.2. 计算域设置

为减少阻塞的影响并使流场充分发展,计算域设置如图 3 所示:车头到计算域的入口距离为 4 倍车 长,车尾到计算域出口距离为 10 倍车长,计算域总长为 15 倍车长;车的左右两侧到计算域的左右两侧 的距离为 8 倍车宽,计算域总宽为 17 倍车宽;计算域总高为 7 倍车高,最终此算例的阻塞比约为 0.76%。



Figure 3. Schematic of the computational domain 图 3. 计算域示意图

## 2.3. 网格划分

汽车的轮胎是具有弹性变形的材料,因此,在实际模拟的过程中,在车轮接地处使用小垫块将车轮与地面连接,避免了车轮直接与地面计算域相切而产生的尖锐区域,使得此处的网格质量得到了改善,并且更加符合汽车行驶时的实际情况。为使数值模拟的结果可靠,此次研究在汽车表面添加边界层并且 在车身周围设置多层加密区对体网格进行更进一步的加密,往外逐层变大变疏,对A柱、轮胎、车辆尾 部等气流分离区域进行局部网格加密,最终所得切割体网格总数约为2300万。

## 2.4. 湍流模型与边界设置

采用 STAR-CCM+中的 *k-ω* SST 耦合湍流模型进行计算,根据汽车行驶的实际情况进行边界条件参数设定。进口边界条件为速度入口,汽车以 30 m/s 的速度匀速运动,出口边界条件采用压力出口边界,具体的计算域边界条件设置,如下表1所示。

Table 1. Boundary condition setting of computational domain	n
<b>表</b> 1. 计算域边界条件设定	

边界名称	边界条件类型			
计算域入口	速度入口 U=30 m/s			
计算域出口	压力出口 P=0 Pa			
计算域地面	滑移壁面			
计算域侧面/上面	对称壁面			
模型表面	无滑移壁面			

根据以上仿真计算设置得到的 MIRA 方背模型的风阻系数为 0.3527,参考同济大学风洞试验中测得 MIRA 方背模型的风阻系数为 0.3668 [9] [10],仿真计算结果与试验结果的误差为 3.8%,仿真设置满足计算的精度要求。

# 3. 仿真结果分析

本文针对贴体轮胎布局和分离轮胎布局两个配置展开研究,分析这两种布局情况下轮胎位置对车辆 空气动力学性能的影响。每个布局进行 8 个算例(后备轮胎布置在车辆尾部不同位置)的研究,详见表 2, 其中算例 1 为基准算例(原始 MIRA 模型未装配后备轮胎)。"左"和"下"分别表示轮胎基于中央位置向 左和向下移动。

 Table 2. Correspondence between different examples and spare tire positions (Unit: mm)

 表 2. 不同算例与备胎位置对应关系(单位: mm)

Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8	Case9
无 (基准)	中间	左: 250	下: 90	下: 110	左: 250 下: 90	左: 250 下: 110	左: 320 下: 90	左: 320 下: 110

风阻系数(*C*<sub>d</sub>)一直是汽车空气动力学研究的关键指标,其直接影响汽车在高速行驶时的能耗,降低汽车的风阻系数也一直是汽车空气动力学开发的关键内容[11]。图 4 所展示的是后备轮胎在不同位置时车辆的风阻系数 *C*<sub>d</sub>值。首先从贴体轮胎布局的结果可以看出后备轮胎的加装对车辆气动阻力的影响显著,风阻系数明显增加,在所有的算例中风阻系数最低增加了 2 counts,最高增加了 4.8 counts。相较于 Case2,后备轮胎在基于车辆尾部中央位置往左或者往下单向偏移后风阻系数仅增加 0.8 count。后备轮胎位置往左下方偏移后风阻系数相对于中央位置又有所增加,风阻系数增加了约 2.5 counts,增加效果明显。此外,通过图中结果可以明显发现后备轮胎布局从贴体改为分离后车辆的气动性能明显改善,风阻系数降低至跟无后备轮胎相近的水平,此时后备轮胎对于车辆空气动力学特性的影响很小。



**Figure 4.** Drag coefficient for different positions of backup tire 图 4. 后备轮胎放置不同位置时的风阻系数

接着选择 Case9(后备轮胎位置相对于中央位置往左偏移 320 mm,往下偏移 110 mm)的计算结果对后备轮胎的气动效应展开深入分析。图 5 展示的是车辆尾部平均流场强度以及流线的计算结果,从图 5(a) 和图 5(b)的结果可以看出增加轮胎之后尾流区域变小,尾流区两个主涡的位置也受到车体外形的影响往远离车体的方向偏移。但是在增加后备轮胎后在轮胎位置的下方出现一个相对较小贴体涡,并且由于轮胎结构增加了低压尾流区域作用于后部基面的面积从而导致车辆尾部负压区面积的扩大,增大了车辆前后的压差。此外,王子杰等人的研究结果显示在 MIRA 方背模型尾部存在一个较大的回流涡[12],而后备轮胎恰好阻碍了车辆尾部回流涡的正常流动。为了揭示贴体轮胎布局与分离轮胎布局风阻系数差异的原因,对图 5(b)与图 5(c)的结果进行分析,对比发现由于后备轮胎与车身之间缝隙的存在使车辆左右两侧气流的流动得到改善,并且轮胎下方的小型贴体涡也已经消失。由于分离轮胎布局的尾涡区中两个主涡离车尾更远,分离轮胎布局相比于贴体布局更有利于车辆尾部压力的恢复。分离轮胎布局的尾流鞍点[13](通常认为是尾流结束的位置)会比贴体轮胎布局更加远离车辆尾部(Longa 等人的研究表明车辆尾部回流涡长度的增加通常与平均阻力的下降有相关性[14])。因此,分离轮胎布局较长的尾流涡可能是其气动阻力比贴体布局低的原因之一。



**Figure 5.** The velocity flow field and streamline of vehicle's tail at Y = -0.32 m section 图 5. Y = -0.32 m 截面汽车尾部速度流场以及流线示意图





在汽车的数值模拟研究中常使用总压零等值面图去区分车辆尾部流动分离区域,图6和图7展示了

车辆尾部总压零等值面的结果,并且使用湍动能(TKE)对总压等值面进行渲染。无后备轮胎时车辆尾部总 压等值面呈明显的对称分布,然而尾部配置变为贴体轮胎布局后等值面结构在后备轮胎位置存在明显的 差异变化,车辆尾部左右两侧存在明显的压力分布差异,并且贴体轮胎配置一侧的尾部湍动能明显增强, 具有更强的能量交换,这些现象都表明贴体轮胎布局增加了车辆的气动阻力。分离后备轮胎布局方案的 总压等值面较贴体方案分布更加对称,尽管其左侧轮胎位置区域的总压分布相比于基准情况仍存在一定 差异,但仍能说明轮胎与车辆尾部之间的缝隙有利于尾部左右两侧压力的恢复。此外,图中圈注位置附 近的湍流动能也相较于贴体布局明显变小,亦说明车体与轮胎之间的缝隙起到一定减阻效果。



Figure 7. Zero isosurface of total pressure at the rear of the vehicle rendered by turbulent kinetic energy (the underside view) 图 7. 湍动能渲染的车辆尾部总压零等值面(车辆底部视角)

## 4. 结论与展望

本文以汽车标模 MIRA 方背实车模型为研究对象开展了汽车后备轮胎对汽车空气动力学性能影响的 研究。由车辆风阻系数的结果可以发现后备轮胎对车辆的空气动力学性能影响明显,贴体后备轮胎布局 明显增加了车辆行驶时所受的气动阻力。将贴体后备轮胎布局改为分离轮胎布局后车辆的风阻系数明显 降低,达到未安装后备轮胎时的风阻水平。通过对车辆尾部的速度流场以及总压零等值面的结果对 Case9 展开进一步分析,发现贴体后备轮胎布局阻碍了车辆尾部回流涡的流动,增强了动能损失并导致车辆尾 部左右两侧出现压力差进而导致车辆风阻系数增加,而分离布局轮胎与车辆尾部之间的缝隙在一定程度 上提到了车辆尾部左右两侧气流的交换,有助于尾部压力的改善。综合以上分析,建议在越野车型开发 的过程中后备轮胎采用分离布局。

图 4 中为何轮胎向左偏置后采用分离轮胎布局方案的风阻系数比基准算例还要低需要进一步深入研究,并且文章中分离轮胎布局中轮胎与车辆尾部的距离为 50 mm,后续还拟开展此参数对于汽车空气动力学效应的影响。此外车辆的行驶稳定性也是车辆空气动力学性能开发过程中需要着重考虑的研究内容,后续也将继续深化开展后备轮胎配置布局与车辆行驶稳定效应之间的关联。

# 参考文献

- [1] 李兵, 张亚东, 罗秋丽, 等. 仰望 U8 风阻开发[C]//2023 年汽车空气动力学分会学术年会论文. 2023: 13-26.
- [2] 屈鹏, 刘雪莹. 一种汽车风噪与风阻虚拟分析方法[J]. 汽车工程师, 2020(3): 56-57.
- [3] 饶紫微,乔维高,杨松,等.某车型外流场特性的数值仿真研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2014,38(2):450-453.
- [4] 王俊,陈如意. 某 SUV 车身风阻的优化设计研究[J]. 汽车技术, 2016(2): 19-22, 62.

- [5] 陈永良, 徐鹏, 梁赫. 汽车扩散器的降阻研究[J]. 上海汽车, 2023(9): 10-13, 20.
- [6] Al-Saadi, A., Al-Farhany, K., Idan Al-Chlaihawi, K.K., Jamshed, W., Eid, M.R., Tag El Din, E.S.M., et al. (2022) Improvement of the Aerodynamic Behavior of a Sport Utility Vehicle Numerically by Using Some Modifications and Aerodynamic Devices. Scientific Reports, 12, Article No. 20272. <u>https://doi.org/10.1038/s41598-022-24328-w</u>
- [7] 周华,杨志刚,朱晖. 基于整车风洞试验的 MIRA 车型数值计算[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(4): 1043-1053.
- [8] 张英朝,郑镇雨,吴开广,等. MIRA 快背式模型主动减阻研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(5): 588-592.
- [9] Wang, Y., Xin, Y., Gu, Z., *et al.* (2014) Numerical and Experimental Investigations on the Aerodynamic Characteristic of Three Typical Passenger Vehicles. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 7, 659-671.
- [10] 庞加斌,林志兴,余卓平,等. TJ-2风洞汽车模型试验的修正方法[J]. 汽车工程, 2002, 24(5): 371-375.
- [11] 傅立敏. 汽车设计与空气动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [12] 王子杰. 典型轿车瞬态气动特性实验研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [13] Hesse, F. and Morgans, A.S. (2023) Characterization of the Unsteady Wake Aerodynamics for an Industry Relevant Road Vehicle Geometry Using LES. *Flow, Turbulence and Combustion*, **110**, 855-887. https://doi.org/10.1007/s10494-023-00400-x
- [14] Dalla Longa, L., Morgans, A.S. and Dahan, J.A. (2017) Reducing the Pressure Drag of a D-Shaped Bluff Body Using Linear Feedback Control. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, **31**, 567-577. https://doi.org/10.1007/s00162-017-0420-6