

11-20-2019

Numerical Simulation for Airflow Field around Car Wheels

Haibo Huang

Ningbo University, Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo 315211, China;

Xudong Yu

Ningbo University, Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo 315211, China;

Qingguo Liu

Ningbo University, Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo 315211, China;

Zhang Tao

Ningbo University, Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo 315211, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Numerical Simulation for Airflow Field around Car Wheels

Abstract

Abstract: The airflow field characteristics around the wheels have great influence on the flying of road dust and tire wear particles. *Using the rotating wall boundary technology, an aerodynamic model of the vehicle-tire was built and verified.* The airflow field around the wheels was obtained. The results show that *the two airflows between the wheel and the wheel guard meet leading to the vortex. The airflows mainly overflow near the intersection. Due to the significant pumping effects, the airflow tends to fly to outside and upward near the front and rear wheels, respectively. In the rear of the car, the airflow forms a couple of horseshoe-shaped vortex and two pairs of dragging vortex.*

Keywords

tire, rotating wall, airflow field, numerical simulation

Authors

Haibo Huang, Xudong Yu, Qingguo Liu, Zhang Tao, and Jianan Dong

Recommended Citation

Huang Haibo, Yu Xudong, Liu Qingguo, Zhang Tao, Dong Jianan. Numerical Simulation for Airflow Field around Car Wheels[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(4): 641-647.

汽车车轮周围气流场的数值模拟研究

黄海波, 余旭东, 刘清国, 张涛, 董家楠

(宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 运动车轮周围气流场对地面扬尘及轮胎磨损颗粒物的运动有很大影响。使用旋转壁面技术模拟车轮滚动, 建立了车辆-轮胎空气动力学模型并进行了试验验证, 对车轮周围气流场进行了三维数值模拟。结果表明: 气流在轮胎-轮罩间隙中存在相汇区并形成涡流, 气流主要从相汇处溢出。扬尘及颗粒物主要围绕涡流动并获得动能脱出。气流在前、后轮的泵吸效应显著, 但前轮气流倾向于向外侧发散, 后轮附近气流场倾向于向上发散。气流在车尾会形成马蹄涡和拖拽涡。

关键词: 轮胎; 旋转壁面; 外流场; 数值模拟

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 04-0641-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0122

Numerical Simulation for Airflow Field around Car Wheels

Huang Haibo, Yu Xudong, Liu Qingguo, Zhang Tao, Dong Jianan

(Ningbo University, Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo 315211, China)

Abstract: The airflow field characteristics around the wheels have great influence on the flying of road dust and tire wear particles. Using the rotating wall boundary technology, an aerodynamic model of the vehicle-tire was built and verified. The airflow field around the wheels was obtained. The results show that the two airflows between the wheel and the wheel guard meet leading to the vortex. The airflows mainly overflow near the intersection. Due to the significant pumping effects, the airflow tends to fly to outside and upward near the front and rear wheels, respectively. In the rear of the car, the airflow forms a couple of horseshoe-shaped vortex and two pairs of dragging vortex.

Keywords: tire; rotating wall; airflow field; numerical simulation

引言

汽车在高速行驶过程中会卷带大量的地面扬尘。轮胎作为与地面直接接触的部件, 其附近流场与地面扬尘的扬起高度、扩散范围等有着最直接的关系, 因此掌握轮胎附近气流的流动特性对研究道路附近的空气污染具有重要的作用。

近年来, 针对车轮外流场的研究主要集中在实验和数值模拟两个方面。Sammy 等对孤立车轮外流场进行了模拟分析, 发现旋转工况下车轮表面的气流分离点提前, 车轮滚动工况下产生的气动阻力和气动升力较小^[1]。刘臣才等分析了对带有花纹的子午线轮胎滚动工况的流场, 由于花纹底部区域及轮胎前后侧涡流的影响, 使得轮胎的阻力和阻力系数均偏大^[2]。杨志刚等对静止和旋转孤立车轮局部流场进行研究, 并给予试验验证, 得到孤立车轮旋转对车轮附近局部流场的影响以及形成机理, 车轮的转动使总体压差减小, 气动阻力和升力均有所降低^[3]。



收稿日期: 2017-03-16 修回日期: 2017-08-25;
基金项目: 国家自然科学基金(51205213);
作者简介: 黄海波(1978-), 男, 山东临沂, 博士, 教授, 研究方向为轮胎力学, 滚动体摩擦磨损; 余旭东(1994-), 男, 浙江宁波, 硕士生, 研究方向为轮胎气流场分布; 刘清国(1990-), 男, 安徽淮北, 硕士生, 研究方向为轮胎气流场分布。

<http://www.china-simulation.com>

国内外学者对车轮外流场的研究以孤立车轮为主，主要集中在车轮对汽车气动力的影响方面，而对整车车轮周围气流场的流动特性对地面扬尘等颗粒物影响的分析研究相对较少。鉴于车轮转动气流场对地面扬尘的重要影响，本文建立以旋转壁面为边界条件的车体-车轮模型，对车轮外流场进行三维数值模拟，分析车轮周围气流的流动特性，为研究由于车轮转动引起的道路扬尘的运动规律提供借鉴。

1 模型建立

1.1 车体模型

本文主要研究车轮周围气流的流动情况，因此在建立模型时忽略了后视镜、门把手、雨刮器、雨水槽等部件，并进行了局部简化，以提高计算效率。为了更加直观地观察车体的主要尺寸，采用二维视图的方式，分别作车体的侧视图和俯视图，汽车模型主要参数尺寸如图 1 所示。

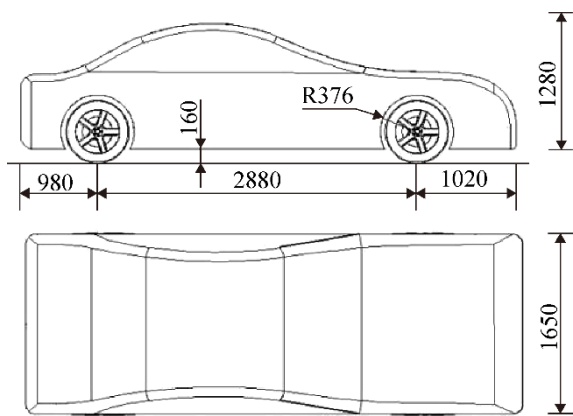


图 1 模型主要尺寸

Fig. 1 Dimensions of the model

1.2 车轮和旋转壁面

选取型号为 205/55R16 的车轮作为研究对象，其由轮辐、轮辋、制动盘及轮胎等部件构成。车轮的各个组成部件均按照实际车轮参数较为精确地建模，同时对车轮模型进行适当地简化。为了保证车轮与地面接触位置的网格质量，根据车轮的实际变形情况对车轮接地区域进行修正。切掉变形区域

的一段劣弧，并在车轮底部拉伸一个长度为 90 mm 长方体凸台，用来模拟车轮接地印迹长度。这样，不但改善了轮胎与地面接触的网格质量，还考虑了轮胎在承重时产生的变形，从而更加真实地模拟车轮与地面的接触状态。车轮模型尺寸参数和转角示意图 2。

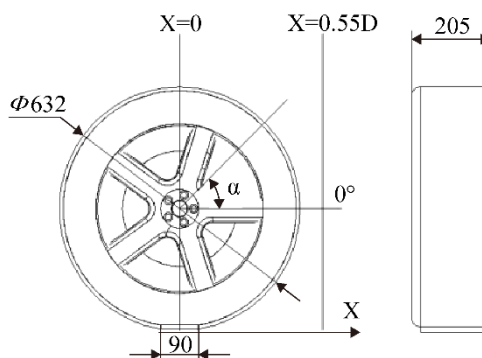


图 2 车轮模型

Fig. 2 Wheel model

车轮滚动对车轮周围气流的流动特性有重要影响，本文采用旋转壁面模型模拟车轮滚动，将轮胎和车身作为一个计算域，轮胎整体定义为旋转壁面，车身表面为固定无滑移壁面，轮胎相对车身作旋转运动，旋转轴为车轮中轴线，旋转角速度通过来流速度换算得到。

由于汽车外流场对轮胎的变形影响较小，在计算模拟过程中，将车轮看作刚性体，忽略车轮与流体的流固耦合作用以及轮胎变形行为。

1.3 计算区域的选取及网格划分

为了避免风洞的堵塞效应，使湍流充分发展，汽车外流场的计算域选取如下：车头前方取 3 倍车长，车尾后方取 5 倍的车长，车身上部取 5 倍车高，车身侧部取 4 倍的车宽^[4-5]。考虑到计算模型流场的对称性，沿纵向对称平面取流场区域的一半作为计算区域，模型计算域如图 3 所示。在汽车外流场网格划分时，采用四面体+三棱柱混合网格划分策略，贴近车体、车轮表面区域采用三棱柱网格，能够更好地捕捉流体在汽车表面的流动规律，车体周围区域采用四面体网格。为了提高数值模拟精度，

在计算敏感区(壁面附近、尾流等区域)进行网格加密处理。

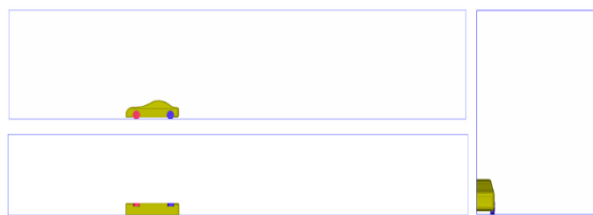


图 3 模型计算域
Fig. 3 Computational domain of the model

1.4 计算方法和边界条件的设定

一般认为汽车外流场是三维、等温、定常、不可压的湍流运动, 汽车速度远低于声速的 1/3, 此时空气属于不可压缩范围^[6-7]。计算模型选择三维定常不可压缩粘性流动, 采用三维不可压缩雷诺平均 N-S 方程^[8]。流场计算选用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型, 相比标准 $k-\epsilon$ 模型, 此模型对湍流粘度和湍流耗散率两项进行了修正, 可更好地处理高应变率及流体旋转较大的流动^[9-10]。采用壁面函数法处理流体在近壁面区的流动。具体求解器参数设置如表 1 所示。

表 1 求解器参数设置
Tab. 1 Parameter settings of the solver

设置项	数值
湍流模型	稳态 RNG $k-\epsilon$ 模型
空间离散格式	二阶迎风
迭代方式	SIMPLE
数值精度	Residual= 1×10^{-4}

汽车外流场的数值模拟是在计算域内进行的, 在此区域的边界上需要给定与实际相近或相似的边界条件。在计算域选取时, 取车身上部为 5 倍车高, 车身侧面为 4 倍车宽, 忽略计算域边界(顶面和与对称面相对的侧面)对流场的干涉, 定义计算域顶面及侧面为固定无滑移壁面^[11], 为了克服地面效应, 设置地面为移动无滑移壁面。具体的边界条件设置如下: 计算域入口为速度入口, 速度大小等于来流速度; 出口采用压力出口, 设置压力

值为 0; 汽车纵向对称面设为对称边界条件; 计算域顶面及侧面为固定无滑移壁面; 地面为移动无滑移壁面, 模拟汽车与地面的相对运动; 车身表面为固定无滑移壁面。

2 模型验证

为了验证数值计算的准确性, 测取前轮-轮罩间隙中间、轮胎径向对称面上的压力和速度, 与数值计算结果进行对比分析。车轮转角示意图如图 2 所示, 水平方向定义为 0° , 转角为 α 。试验设备如图 4 所示, 鼓风机用来控制和调整风速的大小。试验方案: 调整风机风速为 10 m/s, 调节轮胎转速与风速对应, 待试验装置工况稳定后, 利用速度-压力测试仪分别测取车轮-轮罩间隙对应角度处的速度和压力值。



图 4 试验装置图
Fig. 4 Test device

图 5 为车轮-轮罩间隙的压力和速度分布曲线图。从图中可以看出, 试验压力最大值位于 38° 附近; 数值模拟结果与试验数据较为吻合, 位于 32° 左右。模拟值和试验值变化规律一致, 数值上具有较好的吻合度。说明该模型具有较好的精度。

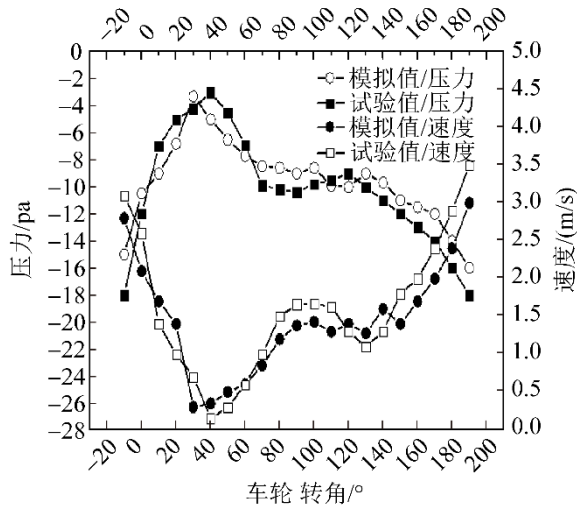


图5 车轮-轮罩间隙压力和速度曲线

Fig. 5 Pressure and velocity between the wheel and the wheel guard

3 数值模拟及结果分析

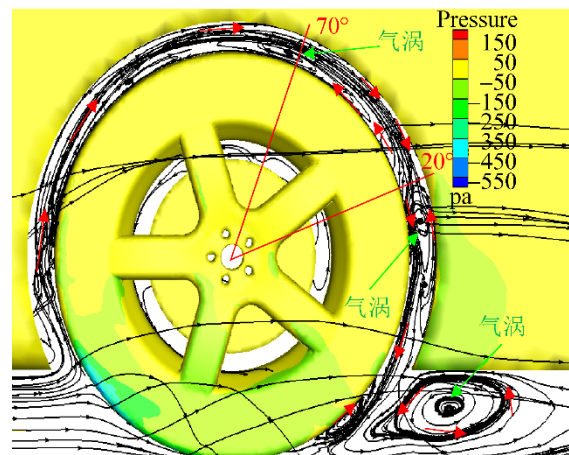
3.1 车轮-轮罩间隙流场分析

参照车辆前进速度为 15 m/s, 对应车轮旋转角速度为 47.5 rad/s。

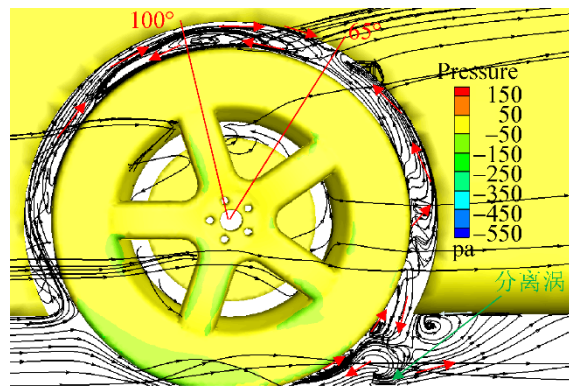
图 6 为前、后车轮中心纵截面气流流线图。流向车底的气流, 进入地面和车底的间隙, 由于车轮的阻碍作用, 气流从前方进入车轮-轮罩之间的空隙。如图 6(a)所示, 流入车轮-轮罩间隙的气流与随车轮旋转上升的气流在 20°左右方向相汇, 气流流速下降, 压力升高, 气流产生回流, 之后再次与来流相遇, 分别在 20°下方和 70°方向附近形成两个漩涡。进入车轮与覆盖件间隙的一部分气流从 20°下方位置溢出, 从车身侧面流出。在前轮后方, 由于车轮旋转造成低压区, 使后方气流部分回流形成一个尺度较大的漩涡。

后轮处于前轮的尾流和来流的混合流场中, 造成了前、后车轮附近流场环境的差异。如图 6(b)所示, 流入车轮-轮罩之间的空隙的气流与随车轮旋转上升的气流在 65°左右相汇, 在 100°附近形成了漩涡。进入车轮与覆盖件间隙的一部分气流从 65°上方溢出, 从车身侧面划过。由于后轮的旋转和地面效应, 气流在车轮近表面以及底盘、地面处

均形成了相对尺度较小的漩涡, 其中包括一个分离漩涡, 分离的气流分别流向车轮底部和后方。



(a) 前轮



(b) 后轮

图6 前、后车轮-轮罩间隙流线图

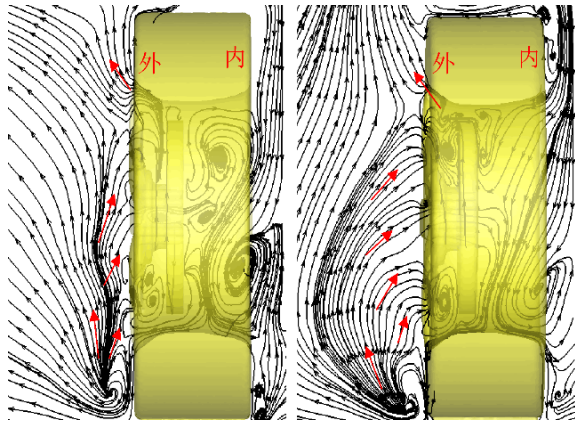
Fig. 6 Airflow streamlines between the wheel and wheel guard for front and rear wheels, respectively

3.2 车轮横截面上的气流场分析

分别选取图 2 所示 $X=0$ 和 $X=0.55D$ 两个截面, 分析车轮横截面上的气流分布。如图 7 所示, 在前、后车轮 $X=0$ 截面上, 气流流态大致相似, 来流由车轮内侧中间位置流入刹车盘空隙, 在刹车盘位置形成漩涡, 然后由车轮边缘流出; 车轮外侧底部气流与轮缘流出的气流形成漩涡, 气流分离上卷, 部分上卷的气流进入轮毂, 说明车轮旋转形成低压区, 具有明显的泵吸效应。

如图 8 所示, 在 $X=0.55D$ 截面上出现多处气流分离现象, 形成多个尺度不同的涡流。在前轮后

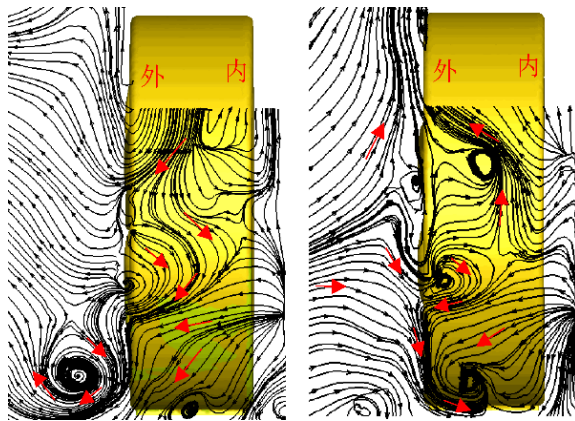
方形成一个较大的拖曳涡和多个小涡, 较大的拖曳涡是由于流向车轮外侧的气流与地面发生碰撞后发生翻转, 再次与该处气流相互作用造成的。



(a) 前轮 (b) 后轮

图 7 $X=0$ 横截面流线

Fig. 7 Cross section streamlines at $X=0$



(a) 前轮 (b) 后轮

图 8 $X=0.55D$ 横截面流线

Fig. 8 Cross section streamlines at $X=0.55D$

3.3 车轮-轮罩间隙的压力和速度分布

车轮转动时, 车轮和轮罩间隙中气流的流动会造成不同位置处速度和压力的变化。为测取车轮-轮罩间隙中心的压力和速度分布, 沿车轮转动方向在车轮-轮罩间隙周向设置监控点, 车轮转角示意图见图 2, 测取不同转角对应车轮-轮罩间隙点处的压力和速度值。

图 9 为前、后车轮-轮罩间的压力和速度分布曲线。流向车轮上方的气流, 受到车轮的旋转作用,

气流速度不断减小, 压力不断增加, 在前轮 20° 和后轮 65° 左右达到最大, 对应的速度值最小。此后车轮的旋转使气流速度逐渐增加, 压力再度减小。同时, 可以看出压力和速度的值成反比, 即高压区和低速区、低压区和高速区所在位置相对应。

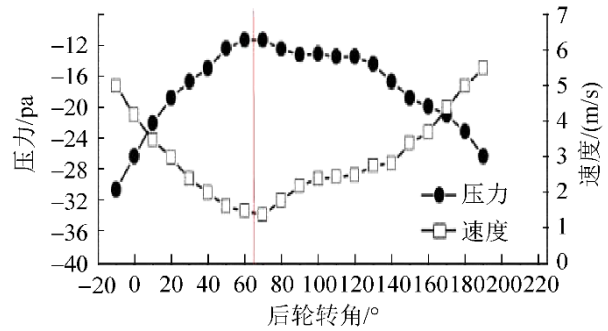
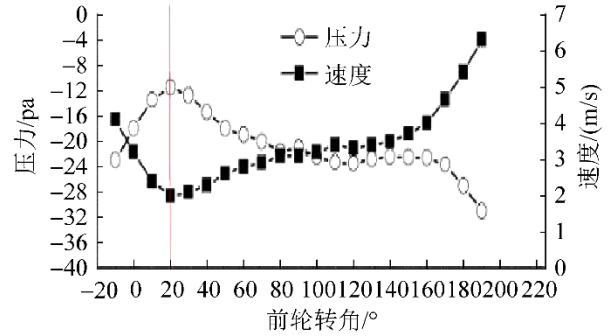


图 9 前、后轮-轮罩间隙压力和速度曲线

Fig. 9 Pressure and velocity between the wheel and wheel guard for front and rear wheels, respectively

3.4 汽车尾部流场分析

气流流至汽车尾部末端处, 突然失去附着物, 由壁面边界进入自由边界, 与汽车尾部气流形成了剪切层而被卷吸, 同时车轮转动将部分气流推向汽车尾部和侧面, 受车轮尾流的影响, 气流在车身尾部的流动更加复杂、紊乱。图 10 为汽车纵向对称截面尾部气流流线图。由图可见, 由于汽车上部气流的下洗作用和底部气流的上洗作用, 在距离车尾一定的区域形成一对明显的较大尺度的反向漩涡, 又称为马蹄涡, 其中上漩涡为顺时针, 下漩涡为逆时针。该区域又称为死水区, 在这个区域内气流的速度较低, 压力较小。由于车尾区域两个漩涡的存在, 容易造成扬尘颗粒物上卷, 不利于汽车尾部(后

牌照、尾气管等)、行李舱盖等部位的清洁,同时引起车尾附近空气的潜在污染。

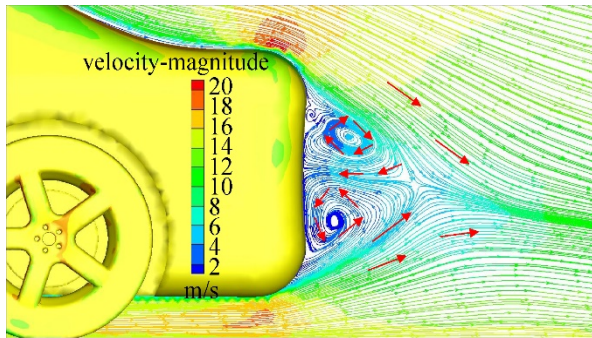


图 10 纵向对称面尾部流线图

Fig. 10 Streamline in the longitudinal symmetrical plane

图 11 为汽车尾部横截面速度矢量图,表征横截面上的气流流动情况。图中可以发现,气流在截面上形成了上下两对比较大的对称涡系 A_1-A_2 和 B_1-B_2 , 习惯上称为拖拽涡。其中上方的一对漩涡 A_1-A_2 是由车身侧面气流与向下顶部的气流汇合而成,下方的一对涡流 B_1-B_2 是由侧面和车身底部的气流上卷形成的。涡系在运动过程中上扬、卷吸扬尘等颗粒物,加剧了道路附近空气的污染。

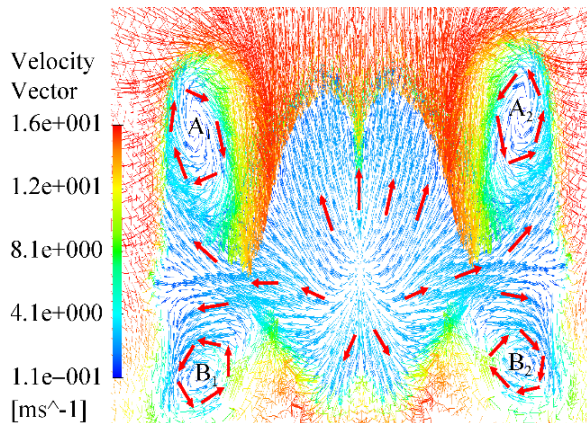


图 11 汽车尾部横截面气流场速度矢量图

Fig. 11 Vector graph of airflow in cross-section at the rear of the car

4 气流场对颗粒物飞扬的影响

前、后车轮周围流场对其附近地面扬尘及轮胎磨损颗粒物的运动有较大的影响。由于地面扬尘等颗粒物的质量较小,因此认为颗粒物在车轮、车体

周围主要随着气流运动、尘化。在车轮中间位置,由于车轮滚动的泵吸效应会使一部分颗粒物吸入轮毂(图 7),部分颗粒沿轮毂外侧上扬。偏出车轮后,气流在后方和侧方均形成一定尺度的涡(图 6、图 8),扬尘及颗粒物主要围绕涡流动,较为杂乱,规律不显著,但能够获得一定的脱出动能,脱出后随着空气流动散落到周围的环境中。

前轮形成的气流场倾向于向外侧发散(图 7(a)、图 8(a)),气流携带颗粒物向车轮外侧扩散;而后轮形成的气流场倾向于向上发散(图 7(b)、图 8(b)),颗粒物随着气流向车轮上方、后窗附近运动。扬尘和颗粒物的上升高度越高,意味着滞空时间越长。

5 结论

通过建立汽车车轮外流场三维模型,采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型封闭时均方程,对车轮附近外流场三维数值模拟,得到以下结论:

(1) 车轮附近不同的流场环境,造成车轮-轮罩间隙气流场的差异:气流在间隙中存在相汇区并形成涡流。轮胎-覆盖件空隙的气流主要从相汇处溢出,划过车身向后方移动。

(2) 气流会在轮胎后方和侧方均形成一定尺度的涡,扬尘及颗粒物主要围绕涡流动,能够获得一定的脱出动能,脱出后会偏移至远离行驶轨迹的位置。

(3) 气流在前、后轮外侧的泵吸效应显著,但前轮气流倾向于向车轮外侧发散,后轮附近气流场倾向于向上发散。

(4) 气流流至汽车尾端突然失去附着物,进入自由边界流动,在车尾区域形成复杂的马蹄涡和拖拽涡,气流流动较为紊乱。

参考文献:

- [1] Sammy D, Tracie J, Graham. The effect of simplifications on isolated wheel aerodynamics[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics (S0167-6105), 2015, 146(8): 90-101.
- [2] 刘臣才, 束永平. 基于 CFD 技术的子午线轮胎滚动工

- 况的流场分析[J]. 橡胶工业, 2014, 61(10): 614-617.
- Liu Chencai, Shu Yongping. Flow field analysis of radial tire rolling condition based on CFD technology[J]. Rubber Industry, 2014, 61(10): 614-617.
- [3] 杨志刚, 李挺, 贾青. 静止和旋转孤立车轮局部流场的评价[J]. 计算机辅助工程, 2012, 21(5): 15-19.
- Yang Zhigang, Li Ting, Jia Qing. Evaluation of local flow field of static and rotating isolated wheels[J]. Computer Aided Engineering, 2012, 21(5): 15-19.
- [4] Marco L. Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT[C]// Frankfurt. FLUENT's Second biennial European Automotive CFD Conference. Germany, 2005: 29-30.
- [5] 张海滨. 含发动机舱内流、地面效应的汽车流场模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008: 11-14.
- Zhang Haibin. Simulation of vehicle flow field with engine cabin flow and ground effect[D]. Nanjing: Nanjing university of aeronautics and astronautics, 2008: 11-14.
- [6] 傅立敏. 汽车空气动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 125-128.
- Fu Limin. Automotive aerodynamics[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006: 125-128.
- [7] 胡兴军. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014: 56.
- Hu Xingjun. Automotive aerodynamics[M]. Beijing: People's Communications Press, 2014: 56.
- [8] 谢今明, 张扬军, 涂尚荣. 地面效应对汽车外部流动的影响[J]. 机械工程学报, 2003, 39(2): 58-61.
- Xie Jinming, Zhang Yangjun, Tu Shangrong. Influence of ground effect on external flow of automobile[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(2): 58-61.
- [9] 贾志浩, 付卫东, 王堃雅, 等. 湍流模型在汽车流场仿真中的应用[J]. 中国科技信息, 2012(22): 49-50.
- Jia Zhihao, Fu Weidong, Wang Kunya, et al. Application of turbulence model in vehicle flow field simulation[J]. China Science and Technology Information, 2012(22): 49-50.
- [10] 李小珊, 孙桓五, 黄锦华. 两方程模型在汽车外流场数值计算中的实用性分析[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(8): 1296-1299.
- Li Xiaoshan, Sun Hengwu, Huang Jinhua. Practicality analysis of two-equation model in numerical simulation of outer flow field[J]. Mechanical Science and Technology, 2011, 30(8): 1296-1299.
- [11] 谷正气, 林肖辉, 李伟平, 等. 车轮辐板形状对汽车气动阻力影响分析[J]. 科技导报, 2011, 29(6): 57-61.
- Gu Zhengqi, Lin Xiaohui, Li Weiping, et al. Effect of the shape of wheel spokes on vehicle aerodynamic performance[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(6): 57-61.