

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201607124

汽车涉水时轮辐结构对车表水相分布的影响

胡兴军¹, 姚宏义², 郭 鹏², 杨翰博³, 杨 博¹

(1.汽车仿真与控制国家重点实验室(吉林大学), 长春 130022; 2.吉林大学 汽车工程学院, 长春 130022;
3.中国第一汽车集团公司 技术中心, 长春 130011)

摘 要: 针对汽车涉水时车身表面的水污染问题, 将传统的汽车空气动力学知识和多相流理论相结合, 运用图像处理技术给出车身表面水膜分布情况. 通过对车轮辐板进行改型, 建立不同开孔数目和开孔面积的车轮辐板模型, 分析对比不同开孔数目和开孔面积对水膜分布情况的影响. 试验结果表明, 4 种不同开孔数的辐板中, T7 的涉水性能最优越, 水膜覆盖率较原始值降低了 20.67%. 车轮辐板开孔有助于提高车辆的涉水性能, 开孔数目越少车身表面的水相附着面积也越小. 车轮辐板开孔数目相同时, 车表水相附着面积随着开孔面积的增大而增大.

关键词: 汽车空气动力学; 计算流体力学; 多相流理论; 辐板; 汽车涉水

中图分类号: U461.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)07-0113-06

Influence of wheel spokes structure on the distribution of surface water film during the wading of road vehicle

HU Xingjun¹, YAO Hongyi², GUO Peng², YANG Hanbo³, YANG Bo¹

(1.State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control(Jilin University), Changchun 130022, China;
2.College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;
3. FAW Group Corporation R&D Center, Changchun 130011, China)

Abstract: As for the vehicle surface water pollution problem during the car wading, this paper combined the traditional automotive aerodynamics expertise and multiphase theory to research the water film distribution with the image processing technology. Through modifying the wheel plate, the influence of the number of holes and the opening area on the distribution of water film was analyzed and compared. After the experiment, T7 model had the most perfect wading performance of the four different wheel plate opening holes number in this paper. The water film distribution ratio decreased by 20.67% compared with the original value. We can know that the spoke structure is conducive to improve the wading performance and the less number of spoke has the smaller water phase attachment on the vehicle body surface. When the opening area increase under the same number of wheel plate the water phase attachment area will also increase.

Keywords: automotive aerodynamics; computational fluid dynamics; multiphase flow theory; wheel plate; vehicle wading

雨天行车时, 车轮溅起的水花不仅会加剧车身和底部的污染, 而且在高速行驶中还可能弄脏前风窗和侧窗玻璃, 造成驾驶员的视野变差以及影响汽车外后视镜的使用^[1], 同时还会影响汽车关键总成或者零部件的性能甚至产生腐蚀^[2]. 因此, 研究汽车涉水时水相在车身侧面上的污染区域分布具有重要的意义.

国内外许多学者都对汽车水污染进行过深入的研究. 2011 年, Hagemeyer 和 Hartmann 等^[3] 德国学者从试验与数值仿真两个角度对车身表面污染研究现状进行了阐述, 提出了基于气象信息在风洞中真

实地模拟降雨过程和使用荧光与紫外线相结合的光学测量技术来进行水相特性的分析是未来车身表面污染试验的趋势, 指出如何精确地捕获液滴的复杂流动、水相的分离和液滴的破裂是数值仿真研究中的难点. 2014 年, 捷豹路虎公司的 Gaylard 和 Pitmany 以及 EXA 公司的 Jilesen 等^[4] 学者使用 CFD 仿真软件 PowerFlow 对路虎某款 SUV 的后部污染进行了数值仿真研究, 通过 Lagrangian 粒子示踪法和水膜模型得到了液滴的流动以及表面水相的分布. 并指出后轮旋转对于汽车后部污染的影响较大而前轮旋转的影响相对较小, 并通过风洞试验验证了仿真结果的准确性. 2015 年, 领英摩托公司的 Ray 和 Jawahar^[5] 结合计算流体力学和固体力学方法对积水路面上行驶时车轮溅水冲击对于后轮挡泥

收稿日期: 2016-07-28

基金项目: 国家自然科学基金(50805062);

吉林省重大科技支撑计划(20096005)

作者简介: 胡兴军(1976—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 杨 博, yang_bo@jlu.edu.cn

板的影响进行了研究,分析得到了积水厚度、溅水角度和车轮宽度等因素对于挡泥板耐久性的影响规律. 以上学者对于溅水过程中液滴的形成和运动机理做了一定的研究,但缺少对汽车涉水时影响车身水相分布因素的研究.

本文应用空气动力学知识和多相流理论,重点讨论汽车低速驶过积水路面时轮胎辐板结构对汽车溅水的影响,并对水相在车身表面上的分布情况予以分析.

1 几何模型

数值仿真采用汽车空气动力学研究中公认的MIRA 标准模型,并在标准模型的基础上进行了改型,如图 1 所示,在标准方背式米拉模型基础上建出了模型的轮腔结构,轮腔的直径为 750 mm(车轮直径为 610 mm),将车轮倒圆,倒圆半径 30 mm^[6].

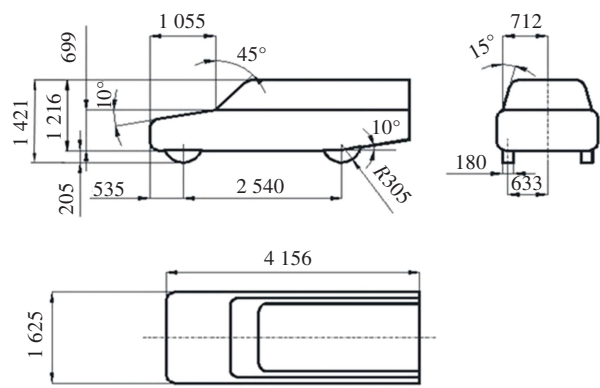


图 1 MIRA 模型尺寸

Fig.1 Size of MIRA model

为了探究轮辐形状、开孔数目和开孔面积^[7]对车身表面水相分布的影响和作用机理,建立了不同开孔数目和开孔面积的车轮几何模型. 为了真实有效地模拟轮胎与地面接触处的变形,以及改善车轮与计算域地板接触处的网格质量,对车轮与地板相切部分进行了几何处理,增加了一个 20 mm 的凸台结构作为过渡^[8]. 仿真中的车轮模型和参数如图 2 和表 1 所示:

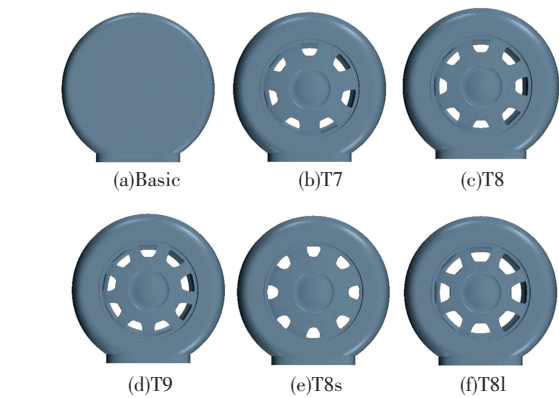


图 2 车轮几何模型

Fig.2 Geometrical models of wheels

表 1 车轮辐板的开孔情况

Tab.1 Details of holes in wheel spokes

辐板模型	几何特征	仿真分析目的
T0	车轮辐板孔数为 0	
T7	车轮辐板孔数为 7	研究车轮开孔数目对车身表面污染分布的影响
T8	车轮辐板孔数为 8	
T9	车轮辐板孔数为 9	
T8	车轮辐板孔数为 8	研究开孔面积对车身表面污染分布的影响
T8s	开孔面积为 T8 的 0.8 倍	
T8l	开孔面积为 T8 的 1.2 倍	

2 湍流与多相流模型

2.1 湍流模型

本文采用适合外流场计算的 Realizable $k - \varepsilon$ 模型,该模型在典型的两方程 $k - \varepsilon$ 模型基础上对正压力进行某种数学约束,将湍动黏度系数 C_μ 和应变率联系起来^[9],保证流动符合湍流的物理定律. 在 Realizable $k - \varepsilon$ 模型中, k 和 ε 的输运方程^[10-11]为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon,$$
$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}.$$

式中: ρ 为气体密度; k 为湍动能; u_i 为时均速度; μ 为空气动力黏性系数; μ_t 为湍动黏度; σ_k 和 σ_ε 分别为湍动能 k 和湍动耗散率 ε 对应的 Prandtl 数,其取值分别为 1.0 和 1.2; G_k 为由平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项;系数 $C_1 = \max(0.43, \eta/(\eta + 5))$, 系数 $C_2 = 1.9$; $\eta = (2E_{ij}E_{ij})^{\frac{1}{2}}k/\varepsilon$; E_{ij} 为反应主流的时均变化率,表达式为 $E_{ij} = \frac{1}{2}(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$. 湍动黏度表达式为

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon}.$$

其中,

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s U^* k/\varepsilon}, A_0 = 4.0,$$
$$A_s = \sqrt{6} \cos \phi, \phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W),$$
$$W = \frac{E_{ij}E_{jk}E_{kj}}{(E_{ij}E_{ij})^{\frac{1}{2}}}, E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$
$$U^* = \sqrt{E_{ij}E_{ij} + \widetilde{\Omega}_{ij}\widetilde{\Omega}_{ij}}, \widetilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k,$$
$$\Omega_{ij} = \widetilde{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k.$$

式中, $\overline{\Omega}_{ij}$ 为在角速度 ω_k 的参考系中获得的时间平均下的转动速率张量。

2.2 多相流理论及双流体模型

在本文研究的计算域中存在空气相和液体相, 属于气-液两相流计算。基于这种考虑, 双流体模型的方程中包括各个相的质量方程、动量方程以及能量方程, 同时还包括每相界面热量传输方程、质量传输方程以及界面应力方程、物性方程等补充方程。每一相的控制方程组如下^[12-13]:

连续方程为

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \mathbf{u}_k) = 0,$$

动量方程为

$$\frac{\partial \rho_k \mathbf{u}_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k \mathbf{u}_k \mathbf{u}_k) = -\nabla \cdot (p_k \mathbf{I} - \mathbf{T}_k) + \rho_k \mathbf{g}_k,$$

能量方程为

$$\frac{\partial \rho_k (e_k + \frac{\mathbf{u}_k^2}{2})}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho_k (e_k + \frac{\mathbf{u}_k^2}{2}) \mathbf{u}_k \right] = -\nabla \cdot \mathbf{q}_k + \nabla \cdot [(-p_k \mathbf{I} + \mathbf{T}_k) \cdot \mathbf{u}_k] + \rho_k \mathbf{g}_k \cdot \mathbf{u}_k.$$

式中: ρ_k 为各相的密度, $\mathbf{u}_k$ 为各相速度向量, p_k 为各相压力标量, $\mathbf{I}$ 为单位张量, $\mathbf{T}$ 为剪切力张量, $\mathbf{g}_k$ 为重力加速度向量, e_k 为热力学标量。

3 数值计算与仿真

3.1 计算域及网格策略

在进行数值仿真时, 将计算域设置成长度为 10 倍车长, 宽度为 9 倍车宽, 高度为 6 倍车高, 入口距汽车前端 3 倍的车长, 出口距车辆后端 6 倍的车长^[14]。

进行网格划分时使用非结构化网格, 在汽车及计算域表面生成三角形面网格, 为了准确地模拟边界层内的流动, 在车身表面法向拉伸出 4 层棱柱形边界层(见图 3), 最后采用 Trimmer 网格生成器生成体网格^[15-16]。为了准确地获得车身表面的流动和水相的分布以及节省计算资源, 采用局部区域网格加密的方法, 对车身表面等重点区域进行网格加密。

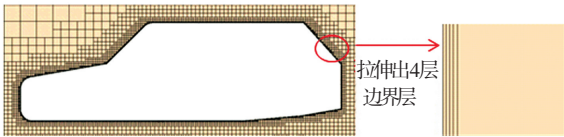


图 3 计算网格示意

Fig.3 Computational mesh

3.2 数值仿真边界条件

由于模拟的是积水路面, 需要仿真车轮在有水路面下的旋转工况, 建立了 4 个子运动参考系, 将车

轮设置成转动壁面, 车轮的旋转角速度设为 $\omega = 27.32 \text{ rad/s}$, 同时将入口处分为两部分: Inlet-air 和 Inlet-water。当汽车在积水路面上行驶时不会有太高的行驶速度, 因此仿真车速设置为 30 km/h , 同时将水相入口的水相厚度设置为 100 mm 。为了真实地模拟汽车的运动, 将地面设置为移动壁面, 同时为了消除计算域边界对于计算的影响, 将计算域其他边界设置为对称边界。

4 数值计算结果分析

在本文研究中, 运用图像处理软件分别计算水相和车身侧面总的像素数^[17], 并用比值 R_w 来衡量水相附着区域面积的大小:

$$R_w = S_w / S_s.$$

式中: S_w 为水相在车身表面附着的总像素数, S_s 为车身侧面总像素数。表 2 列出了各种工况下的水相附着面积 R_w 。

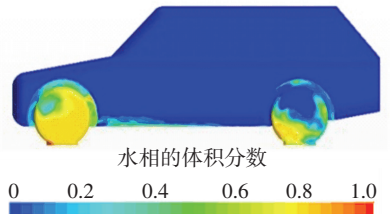
表 2 水相附着区域面积处理结果

Tab.2 Water phase proportion

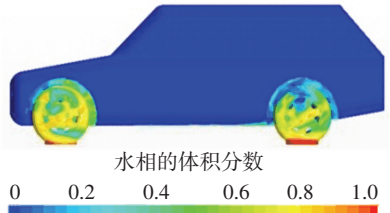
仿真方案	S_w	S_s	$R_w / \%$
Basic	1 748	96 740	1.8 069
T7	1 061	96 633	1.0 980
T8	1 345	96 572	1.7 431
T9	1 204	96 339	1.2 498
T8l	2 888	96 830	2.8 250
T8s	1 680	96 380	1.92 70

图 4 为 2.0 s 时刻的车身侧面水相分布, 色标的颜色由蓝色到红色的变化代表了水相体积分数由 0 到 1 的变化。蓝色代表代表无水相分布, 红色代表水相体积分数最大。通过与 Basic 车型的水相体积分数图对比发现, 开孔辐板车型的水相附着面积比无开孔的 Basic 车型的水相附着面积要小, 同时 Basic 车型靠近前轮后下方的车身侧表面出现了一条狭长的水相分布。对比 T7、T8、T9 车型的水相分布图和表 2 中的像素比数据可知, 车身侧面的水相分布随车轮辐板开孔数目发生变化, 开孔越少, 车身表面水相体积分数越小。其中 T7 模型的涉水性能最好, 具有最小的水相附着面积, 水相附着面积约为 0.37% , 较原始车型相比下降了 20.67% 。

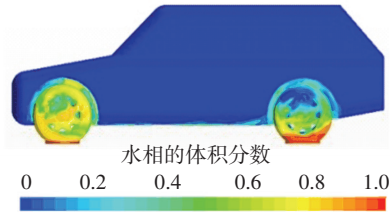
图 5 为车轮横向截面的速度矢量图, 在横向截面靠近车轮附近区域存在一个沿逆时针流动的涡, 这个涡结构的存在促使此处的气流流向车身表面。在这个向车身表面流动气流的作用下, 由车轮旋转带起的水滴具有了向车身表面附着的速度分量, 因此增加了液滴在车身表面附着的机率。



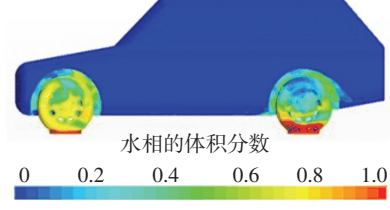
(a) Basic 无辐板结构车型



(b) T7 辐板车型



(c) T8 辐板车型



(d) T9 辐板车型

图 4 不同轮辐模型汽车车身侧面水相分布

Fig.4 Water phase distribution on vehicle body side with different wheel model

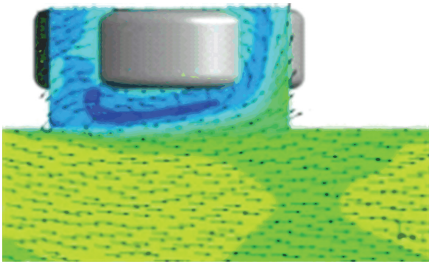
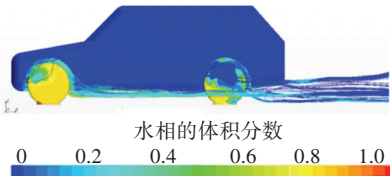


图 5 车轮横向截面速度矢量图

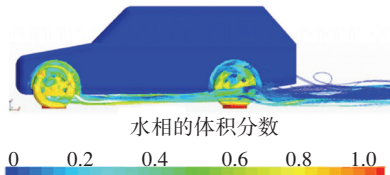
Fig.5 Velocity vector on wheel in the lateral plane

图 6 为 Basic 和 T7 车型车身侧面流线及水相体积分数图. 结合车身侧面流动与水相分布情况分

析可得液滴的运动轨迹,车轮运动溅起的液滴离开车轮表面后,在车轮附近与车身侧面气流的作用下,具有了向车身后部运动的趋势. 液滴在向车身后部运动的过程中,一旦液滴的运动到达车身表面就会造成液滴在车身表面的附着. 根据图 6 可知,水相在车身表面的附着与液滴的运动轨迹是一致的.



(a) Basic 车型



(b) T7 车型

图 6 Basic 和 T7 车身流线及水相分布情况

Fig.6 Streamline and water phase distribution on body side

与此同时,轮辐结构的改变也造成了车轮底部流动的改变(见图 7).

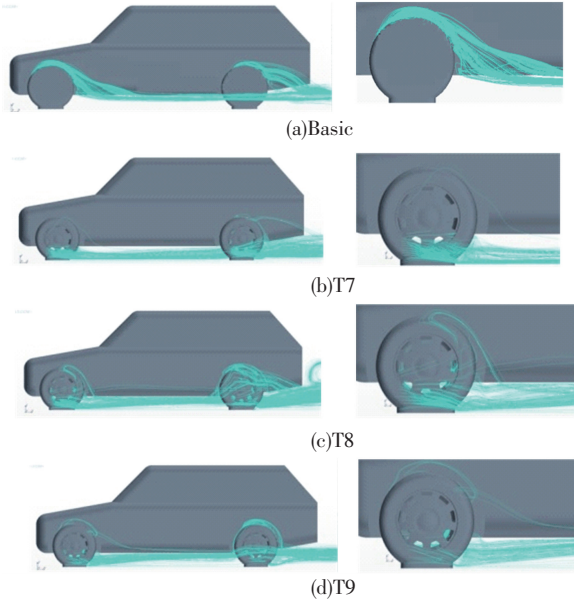


图 7 不同模型轮胎流线图

Fig.7 Velocity streamline of different wheel model

由图 7 可知,在无开孔的 Basic 车型的前后轮后部均出现了一个向上流动的涡,气流向上流动后在车身侧面被向下拉长,在这一过程中未发生破裂. T7 车型未出现向上流动的涡结构,但相比 Basic 车型,T7 车型的涡流位置较低,同时在车轮辐孔的作

用下该涡结构被拖拉得很长,而此时水相在车身表面的附着也相对较小. 随着辐板开孔数的增多,T8 模型后轮与车身尾部出现了较紊乱的气流流动,该气流流动的作用增加了后部车轮处水相的扩散,从而造成了较多的水相附着. 随着开孔数目的继续增加,T9 模型的车轮后部出现了多个涡结构,但是由于涡结构的位置较低同时未出现向后拖拽的现象,因此未造成水相附着的增加. 从表 2 中的像素比值可知 T9 模型的车表水相较小,与 T7 车型接近.

轮腔处的速度卷积图分析如图 8 所示.

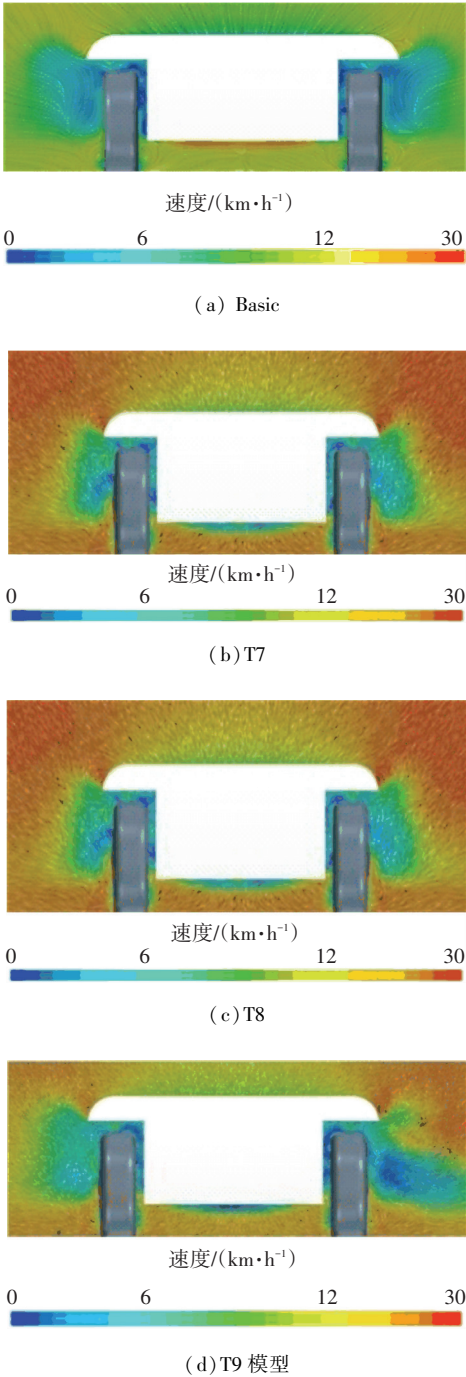


图 8 不同模型车轮纵向截面速度矢量图

Fig.8 Velocity vector of different model in lengthways plane

由图 8 可知,辐板开孔数在影响车轮底部流动的同时也造成了轮腔内部流动的改变. 辐板开孔情况下轮腔附近纵向剖面上的涡结构有向外扩展的趋势,结合图 6 中出现的逆时针旋涡结构,分析可知辐板开孔会增加液滴向车身表面运动的趋势. 在 T7 模型中能够明显地观察到涡结构有向车身底部运动的趋势,这一趋势要强于向外扩散的趋势,正是这个原因造成了 T7 模型水相附着率比原始车型小. 结合图 8 和图 7 对 T7 车型进行分析可知,T8 车型的大部分涡流具有向车身上部运动的趋势,这一运动趋势增加了水相在车身表面的附着,这也是 T8 车型水相体积分数大的原因. 而在 T9 模型中,虽然涡结构也存在向车身上部运动的趋势,但是只是相对较小的部分,大部分的涡结构的运动趋势是向下的,这很好地解释了 T9 车型的水相附着面积小于 T8 车型但稍大于 T7 车型的原因. 最后结合表 2 中的数据可知,随着开孔面积的增加,轮胎后面的流场液越来越紊乱,从而增加了水相在车身表面的附着机率.

5 结 论

1) 本文将传统空气动力学理论和多相流算法相结合,探索出一种适合于研究汽车涉水的数值仿真方法,并用图像处理软件形象具体地对车身侧面水相分布进行捕捉与精确测量,为车身表面水污染的量化提供了新的思路.

2) 经过仿真发现,在车身底部车轮附近存在一个逆时针方向流动的的涡结构,该涡结构增加了液滴向车身表面运动的趋势,从而增加了液滴在车身表面附着的机率.

3) 研究发现辐板开孔数目会影响车身表面水相分布,随着开孔数的增加,车表水相附着面积较原始车型呈现减小趋势,其中辐板开孔数为 7 时的涉水性能最好,其水相附着面积约占 0.37%,较原始车型降低了 20.67%.

4) 在车轮横向剖面处逆时针涡流和轮腔内存在的向车身上部运动涡结构的共同作用下,增加了开孔辐板车型水相的附着面积,而向车身下部运动的涡结构会减少水相在车身表面的附着. 当辐板开孔数目相同时,开孔面积越大,水相的附着面积也越大,即开孔数目一定时,水相附着面积与开孔面积成正比例关系.

参考文献

[1] GAYLARD A P, DUNCAN B. Simulation of rear glass and body side vehicle soiling by road sprays [J]. SAE Inetrnational, 2011, 4 (1): 184-196. DOI: 10.4271/2011-01-0173.
[2] 胡兴军. 汽车空气动力学 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2014:

- 89-92.
HU Xingjun. Automotive aerodynamics [M]. Beijing: China Communication Press, 2014: 89-92.
- [3] HAGEMER T, HARTMANN M, THEVENIN D. Practice of vehicle soiling investigations: A review [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(8): 860-875.
- [4] GAYLARD A P, PITMAN J, JILESEN J, et al. Insights into rear surface contamination using simulation of road spray and aerodynamics [J]. SAE International, 2014, 7(2): 673-681. DOI: 10.427/2014-01-0610.
- [5] RAY R, JAWAHAR N. Study of fluid structure interaction due to water splashing on the rear fender of motorcycles [C/OL]. (2015-04-14) [2016-06-29]. <http://papers.sae.org/2015-01-0673>.
- [6] HU Xingjun, LIAO Lei, LEI Yulong, et al. A numerical simulation of wheel spray for simplified vehicle model based on discrete phase method [J]. Advance in Mechanical Engineering, 2015, 7(7): 1-8. DOI: 10.1177/1687814015597190.
- [7] 胡兴军, 傅立敏, 张世村, 等. 具有不同辐板车轮的空气动力学特性研究 [J]. 同济大学学报 (自然科学版). 2006, 34(12): 1684-1688.
HU Xingjun, FU Limin, ZHANG Shicun, et al. Research on aerodynamic characteristics of automotive wheels with different wheel spokes [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(12): 1684-1688.
- [8] DIMITRIOU I, KLUSSMANN S. Aerodynamic forces of exposed and enclosed rotating wheels as an example of the synergy in the development of racing and passenger cars [C/OL]. (2006-04-06) [2016-06-29]. <http://papers.sae.org/2006-01-0805>.
- [9] 夏超, 单希壮, 杨志刚, 等. 不同湍流模型在列车外流场计算中的比较 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2014, 42(11): 1687-1693. DOI: 10.11908/j.issn.025-374x.2014.11.010.
XIA Chao, SHAN Xizhuang, YANG Zhigang, et al. A computation study of different turbulence models in computation of flow around simplified train [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(11): 1687-1693. DOI: 10.11908/j.issn.025-374x.2014.11.010.
- [10] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An introduction to computation fluid dynamics: the finite volume method [M]. 2th ed. New York: Wiley, 1995: 85-87.
- [11] JILESEN J, SPRUSS I, KUTHADA T, et al. Advances in modelling a-pillar water overflow [C/OL]. (2015-04-14). <http://papers.sae.org/2015-01-1549>.
- [12] LAJOS T, PRESZLER, FINTAL L. Styling and aerodynamic of buses [J]. International Journal of Vehicle Design, 1998, 9(1): 1-15.
- [13] 李会雄. 多相流及其应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007: 525-526.
LI Huixiong. Multiphase flow and its application [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2007: 525-526.
- [14] 王夫亮, 傅立敏. 侧风对轿车气动特性影响的数值模拟研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1255-1258.
WANG Fuliang, FU Limin. Numerical simulation of the crosswind effects on the aerodynamic performance of a sedan [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(8): 1255-1258.
- [15] 朱自强, 李津, 张正科, 等. 计算流体力学中的网格生成方法及其应用 [J]. 航空学报, 1998, 19(02): 152-158.
ZHU Ziqiang, LI Jin, ZHANG Zhengke, et al. Grid generation method in CFD and its application [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica. 1998, 19(02): 152-158.
- [16] JUNYA O, YASUSHI M, KENJI O. Development of underbody aerodynamic simulation using automatically generated tetrahedral and prismatic cell [C/OL]. (2001-03-05) [2016-06-29]. <http://papers.sae.org/2001-01-0704>.
- [17] 廖磊. 车轮溅水及其对车身表面污染的仿真研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
LIAO Lei. Numerical research on wheel spray and related body soiling [D]. Changchun: Jilin University, 2014.

(编辑 杨 波)