doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.002

基于车载平台的车路空气动力场测量装置研究*

王　聪　马　飞　马　威　李　勇　郭　荣
(北京科技大学机械工程学院，北京 100083)

摘要：基于三维粘性不可压缩流体雷诺平均应力方程和 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型，采用数值计算方法对车路空气动力场进行了分析，探讨了车轮前后空气压力与车速的关系，揭示了高速行驶时车轮前后空气压力的变化规律，研制了基于车载平台的空气动力场测试装置。通过实车对车轮前后的空气压力进行了测试，试验结果与计算结果基本吻合，表明该装置能够准确测量实际空气压力，为车路系统空气动力场的研究提供了一种有效手段。

关键词：空气动力　CFD　车路系统　车载测量装置

中图分类号：TP29；U461.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2014)08-0008-06

引言

汽车行驶过程中产生空气动力，轮胎与路面间产生的强大空气动力与降水、荷载等因素一起对路面产生复合作用，诱发大量的道路水损坏[1-4]。近年来，随着高等级道路上车辆行驶速度的不断提高，以及大空隙抗滑沥青混凝土逐渐被路面工程广泛应用，空气动力对路面损坏的影响更加凸显[5-7]。但是，此前由于缺乏专用设备对轮胎与路面间的空气动力进行测量，所以一直无法开展有效的道路病害防治。本文拟对轮胎与路面间产生的空气动力场进行分析与探讨，并研发适用于空气空力场测量的车载测量装置，以期为道路病害防治提供一种有效途径。

1　车路系统空气动力场

1.1　轮胎空气流谱

行驶车辆与空气相对运动产生空气动力，对于运动车辆而言，空气动力始终作用于车辆的表面，对于路面而言，路表承受着空气动力的瞬时作用和反复作用。因此，轮胎周围的空气动力特性是研究车路系统空气动力场的基础。

对于独立的轮胎，由于空气的粘滞作用，邻近轮胎表面的空气粒子可粘附于轮胎表面上，并随之转动，而空气的粘滞性导致周围的空气粒子也按照同样的轨迹运动，从而形成了轮胎周围空气的旋转运动[8-9]，如图 1 所示。而实际上，由于表面花纹的存在，轮胎表面的空气流谱更为复杂。

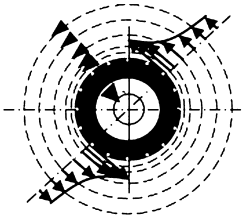

图 1　转动轮胎流谱

Fig. 1　Flow field of a single rotary tire

轮胎在路面上向前滚动过程中，一方面处于迎面而来的匀速气流中，另一方面空气不能从轮胎与路面的压触面间通过。因此，车轮周围的实际气流是两种截然不同的气流——涡流和匀速气流叠加的结果[10]，其流谱如图 2 所示。旋转运动和车轮周围的非对称扰动造成的粘滞性影响使得匀风偏斜，这些非对称压力的分布就会依据马格纳斯效应产生一个气动合力[11]，如图 3 所示。与此同时，这些非对称压力也作用于路表。

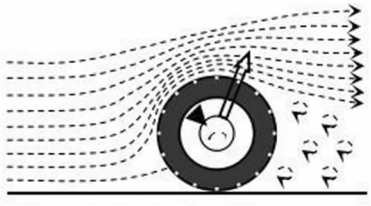

图 2　滚动轮胎流谱

Fig. 2　Flow field of a rolling tire

1.2　车路空气动力场的数值计算

轮胎总是在汽车轮腔内旋转，轮腔内空气与迎面气流只能在接近轮胎触地部位附近混合，而这一区域受到车辆离地间隙等复杂因素的影响，这就使

收稿日期：2013-05-08　修回日期：2013-07-22

*国家自然科学基金资助项目(51274021)和国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA060403)

作者简介：王聪，博士生，主要从事交通智能检测研究，E-mail：by233@139.com

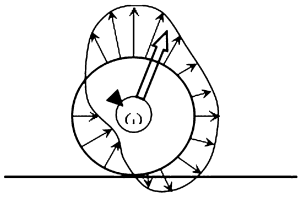

图 3　车轮气动合力

Fig. 3　Aerodynamic resultant of wheel

路面附近的流谱更加复杂。本文采用有限元法，利用三维粘性不可压缩雷诺平均应力方程和 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型[12-13]，对典型小汽车与路面间的流场进行数值计算模拟。

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\Delta(\rho \boldsymbol{V})=0 \tag{1}$$

动量方程为

$$\frac{\boldsymbol{V}\,\partial \rho}{\partial t}+\Delta(\rho \boldsymbol{V}\boldsymbol{V})-\Delta(\mu_{\mathrm{eff}}\Delta \boldsymbol{V})=\Delta p'+\Delta(\mu_{\mathrm{eff}}\Delta \boldsymbol{V})^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

湍流动能 k 方程为

$$\frac{k\,\partial \rho}{\partial t}+\Delta(\rho \boldsymbol{V}k)-\Delta\left(\frac{\mu_{\mathrm{eff}}}{\sigma_k}\Delta k\right)=G-\rho\varepsilon \tag{3}$$

湍流动能耗散率 ε 方程为

$$\frac{\partial \rho\varepsilon}{\partial t}+\Delta(\rho \boldsymbol{V}\varepsilon)-\Delta\left(\frac{\mu_{\mathrm{eff}}}{\sigma_k}\Delta\varepsilon\right)=\frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}G-C_{\varepsilon 2}\rho\varepsilon) \tag{4}$$

式中　μ_{eff}——有效粘性系数　　p'——修正压力

$C_{\varepsilon 1}$、$C_{\varepsilon 2}$、σ_k——常数

利用 CFD Fluent 计算软件对标准小汽车运动过程中的空气流谱进行计算分析。标准小汽车的计算模型如图 4 所示。流场采用对称边界，如图 5 所示。计算中，车轮与路面之间采用滑动单元连接以保证车轮保持转动状态[14-16]。对标准小汽车不同车速下的周围流场计算结果如图 6 ~ 11 所示。

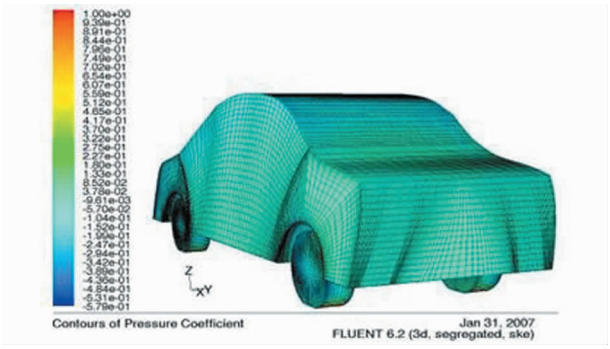

图 4　标准小汽车模型

Fig. 4　A typical car model

图 6 和图 7 为行驶条件下小汽车与路表的空气流线分布，图 8 ~ 11 为不同行驶速度下小汽车轮胎与路面间的气流压力分布。由图 7 可知，在前轮区域，气流下部比较平静，受汽车底面粘性边界层的影响较小。汽车前端下缘和路面间的速度局部提高，气压低于轮腔内的压力，促使空气从轮腔内喷出，与外部气流混合形成湍流。而从后轮腔喷出的气体少于前轮，主要原因是流入气流和流出气流之间的压

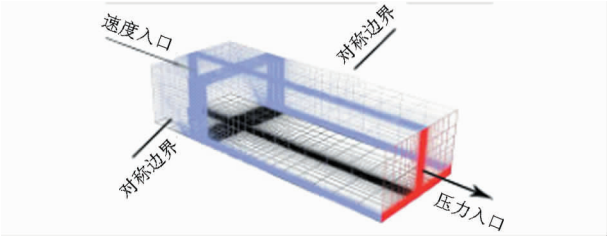

图 5　流场边界

Fig. 5　Boundary of flow field

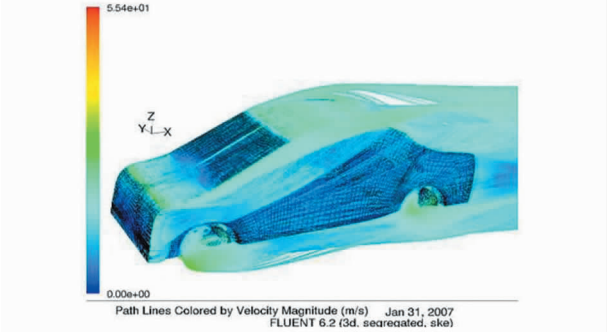

图 6　运动汽车周围空气流线

Fig. 6　Air streamline around a moving car

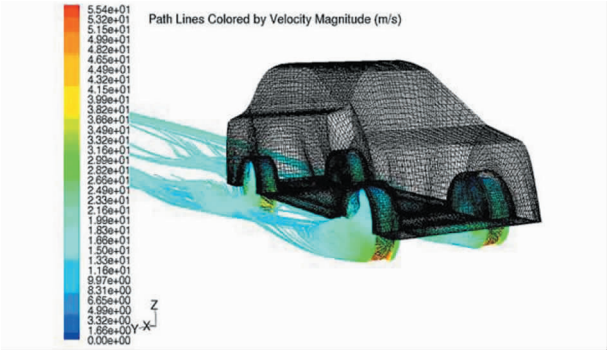

图 7　轮胎周围空气流线

Fig. 7　Air streamline around wheels

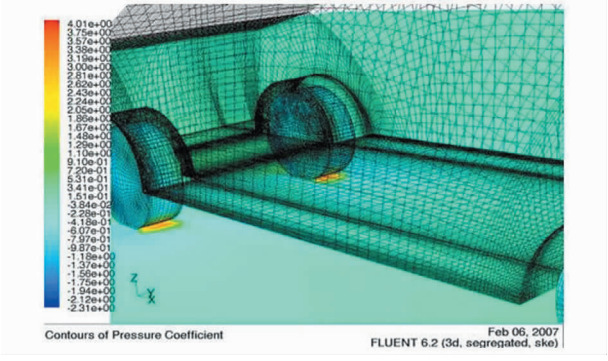

图 8　速度 80 km/h 时后轮前端压力

Fig. 8　Pressure distribution of the front area between rear wheels and pavement at speed of 80 km/h

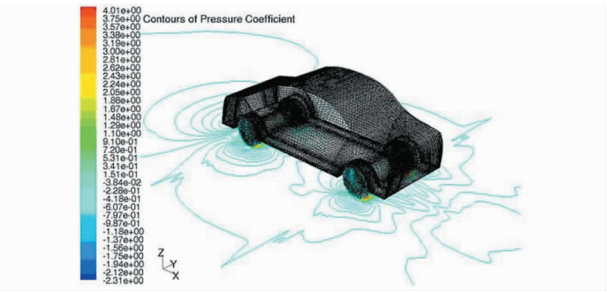

图 9 速度 80 km/h 时道路表面气压分布

Fig. 9 Air pressure distribution of pavement around car wheels at speed of 80 km/h

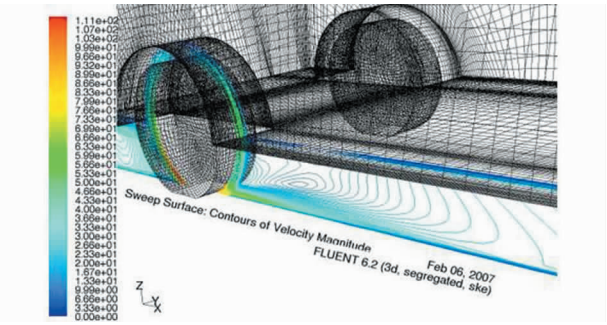

图 10 速度 160 km/h 时后轮前端压力

Fig. 10 Pressure distribution of the front area between rear wheels and pavement at speed of 160 km/h

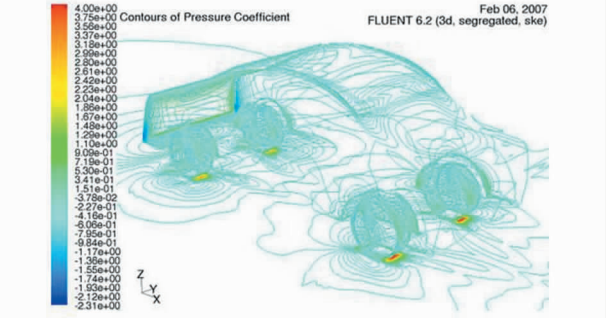

图 11 速度 160 km/h 时道路表面气压分布

Fig. 11 Air pressure distribution of pavement around car wheels at speed of 160 km/h

力梯度小[17]。

图 9 和图 11 为不同车速下路表压力分布。计算分析表明,在车轮前部迎风面与路面间存在一个压力区域,而在轮胎后部背风面与路面间存在一个负压区域。气压随车速的变化而变化,且前轮产生的气压高于后轮区域,如图 8 和图 10 所示。气压分布区域相对集中在轮胎与路面之间,该区域以外的压力迅速下降。也就是说,在车辆通过的轮迹上,就某一点而言,它在瞬时就先后承受了空气动力造成的正负压力变换,虽然空气压力较小,但是对于大空隙的沥青路面来说,这样的反复气压作用足以引发空隙内水气状态的变化,诱发路面的损坏[18-19]。对计算结果中路表最大气压的统计如图 12 所示。

从图 12 可知,轮前压力和轮后负压都与车速的

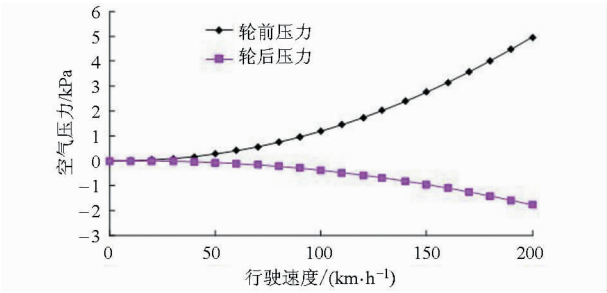

图 12 不同行驶速度下汽车轮胎前后区域的压力极值

Fig. 12 Maximum pressure values of the front-back area between wheel and pavement at different speeds

平方呈正比,随着车速的提高,空气压力呈几何增长。当车速达到 100 km/h 时,轮前压力超过 1.2 kPa,而轮后负压也达到了 −0.5 kPa,这个压力的量值对于路面的影响较大,但是并没有引起人们的重视。

2 行驶车辆周围空气流场的测量

2.1 车路系统空气动力自动测量装置

自动测量装置由空气压力传感器、车速(车轮转速)传感器、传感器随车固定支架、数据扫描记录仪共同构成,能够测量车路系统中轮胎与路面之间空气压力的动态变化,如图 13 所示。传感器随车固定支架的结构如图 14 所示,空气压力传感器量程为 ±2 500 Pa,转速传感器量程不小于 2 500 r/min,数据扫描记录仪的扫描频率为 100 Hz。

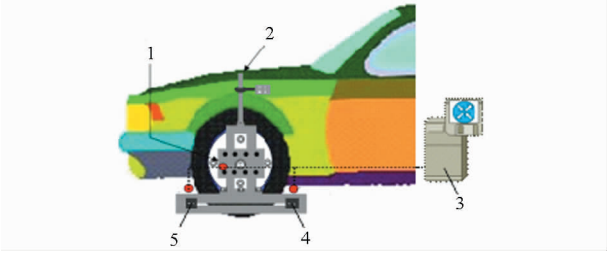

图 13 路面与轮胎间空气压力测量装置

Fig. 13 Measurement device of air pressure between tires and pavement

1. 转速传感器 2. 传感器随车固定支架 3. 车载数据扫描记录仪 4. 空气压力传感器 1 5. 空气压力传感器 2

运动车辆轮胎与路面之间的空气压力是变化的,其压力与车辆行驶速度密切相关[20],在测量空气压力的同时,必须对相应的行驶速度进行同步测量。因此,通过传感器随车固定支架将空气压力传感器固定于轮胎前后,将转速传感器安置于随车固定支架的轮轴上,同步采集 2 种传感器的数据,实时记录保存,便于后期的对比分析。

轮胎本身是高速旋转的,行驶中的振动使它的位置与车体不断地发生着变化,因此在运动车辆轮胎与路面间架设传感器是相当困难的,需要借助能

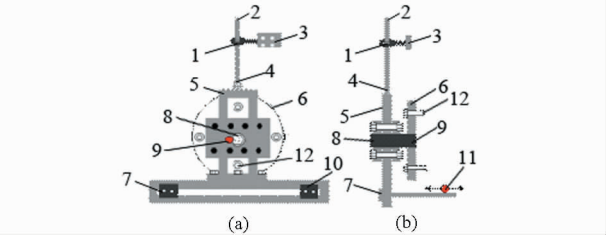

图 14　传感器随车固定支架结构示意图

Fig. 14　Structural diagram of vehicle-mounted sensor support

1. 万向套管　2. 可垂直自由活动的滑杆　3. 固定板　4. 铰链　5. 悬挂支架(可上下调节离地高度)　6. 车轮同步盘　7. 横向导轨　8. 转轴(将悬挂支架与车轮同步盘连接在一起)　9. 转速传感器　10. 可调节位置的传感器支架　11. 空气压力传感器(位置可调)　12. 固定螺栓

与轮胎保持固定相对位置的随车固定支架,且该支架要能方便灵活地调节传感器位置。为此设计了传感器随车固定支架,如图 14 所示。该支架通过车轮同步盘固定于车辆轮胎上,能与轮胎同步同心转动,而位于同步盘中心的转轴就为悬挂支架提供了一个与车轮同步的支点。虽然悬挂支架可以借助这个支点与车轮同步前进,但是必须使其保持稳定的垂直状态,而不是随车轮旋转。为此,支架又通过铰链、可垂直自由活动的滑杆、万向套管、固定板将悬挂支架固定于轮腔上壁,在限制支架旋转的同时,保证了滑杆在万向套管中的上下自由活动,这样一方面保持了与轮胎同步(相对位置固定),另一方面保持了支架自身的稳定(减小了振动影响)。

悬挂支架可上下调节离地高度,传感器支架也可沿导轨调节与轮胎的距离,传感器可在传感器支架上做平行于胎面的位置调节。因此,传感器可以在轮胎与路面之间进行三维位置调节,实现对该区域任意位置的空气压力测量。

本装置的工作流程如下:①首先选取平直的适合于测量的路段,在合适的气象条件下(晴朗、地面风速小于 5 m/s)进行测量。②将传感器随车固定支架固定于一侧车轮上,并保证其稳定可靠。③调节悬挂支架、传感器支架、传感器,使轮胎前后的两只空气压力传感器正好位于期望的测量位置。④将传感器数据线连接到数据扫描记录仪上,并开机检测。⑤待一切准备就绪后,启动车辆以不同的行驶速度行进,数据扫描记录仪将同步记录行车速度和轮胎前后空气压力的数值。⑥反复多次试验,测量车路系统中轮胎与路面间多个位置的空气压力,籍此可描绘该区域不同行驶速度时的空气压力场分布。

本装置具有的优点:①借助该套设备可以解决风洞试验无法解决的难题,对车路系统中轮胎与路面之间的空气压力的动态变化进行实际测量,从而突破了以往的测量盲区。②由于车路系统中轮胎与路面之间的空气动力与车辆行驶速度密切相关,因此该套设备对车轮转速(也就能进一步计算车辆的行进速度)进行了同步的测量和记录,便于后期的研究整理。③由于对传感器进行了高速扫描,因此可以实现高速自动数据采集,从而大幅度提高数据的精确性和数据采集的自动化。④传感器随车固定支架设计合理,为传感器提供了稳定可靠的架设,并可以灵活调整传感器位置,可对路面与轮胎间的全区域进行测量。⑤测量是在车载平台上进行,设备集成化程度高,便于运输携带。⑥可拓展性好,每个传感器支架上可扩展为多传感器同时测量,从而大大提高工作效率。

2.2　车辆空气动力的实测

该车载测量系统,曾在山东省东港高速公路和上海市 *A*5 高速公路上实测了小汽车、中型吉普车和大型货车实测了车轮前后区域的压力,如图 15 所示。传感器实际的测点、测量的结果与理论计算值的比较如图 16 所示。

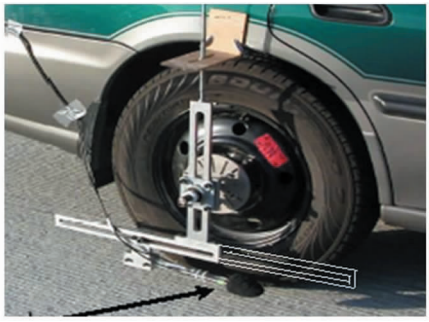

图 15　行驶车辆周围空气动力测量

Fig. 15　Measuring of air pressure around a moving car

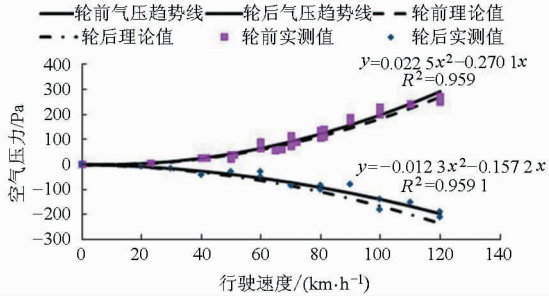

图 16　轮胎前后空气压力实测结果与理论值的比较

Fig. 16　Measured and theoretical pressure data of front and back area between wheels and pavement

从测试车实际测量结果来看,测量值与理论计算值基本一致,且变化趋势相同。存在一定差异的主要原因是:实地风速与车辆前进速度叠加造成的实际风速大于或小于车速;轮胎花纹对空气的粘滞层起到了影响作用,而理论计算中为了简化计算,假设轮胎为光滑表面,由此造成一部分偏差。总体来看,在轮胎前测点(路表上 5 cm,距离轮胎 3 cm)测

得的空气压力略大于理论计算值,但误差小于10%;在轮胎后测点(路表上 5 cm,距离轮胎 5 cm)测得的负压略小于理论计算值,误差小于15%。

3 结论

(1) 车辆行驶过程中,在车轮前部的迎风面与路面间存在一个压力区域,而在轮胎后部的背风面与路面间存在一个负压区域。气压随车速的变化而变化,且前轮产生的气压高于后轮区域。

(2) 数值计算结果表明,轮胎周围的空气压力随车速呈几何增长,小型汽车速度达到 100 km/h 时,轮前压力超过 1.2 kPa,而轮后负压也达到了 -0.5 kPa,轮胎前、后压力相差较大。

(3) 设计的车路空气动力场测量系统对行驶车辆轮胎周围的空气动力场进行了实测,测量结果与理论计算结果基本吻合,说明系统能够基本准确测量轮胎前后的实际空气压力,为车路系统中空气动力场的研究提供了有效手段。

参 考 文 献

1 Coleman S A, Baker C J. High sided road vehicles in cross winds[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 36(2):1383 - 1392.

2 孙璐,邓学钧. 速度与车辆动态特性对于车路相互作用的影响[J]. 土木工程学报,1997,30(6):34 - 40.
Sun Lu, Deng Xuejun. The influences of speed and dynamic characteristics of truck on vehicle-pavement interactions[J]. China Civil Engineering Journal, 1997,30(6):34 - 40. (in Chinese)

3 张宏超,孙立军. 沥青路面早期损坏的现象与试验分析[J]. 同济大学学报:自然科学版,2006,34(3): 331 - 334.
Zhang Hongchao, Sun Lijun. Development and analysis of premature failures of the asphalt pavements[J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2006,34(3): 331 - 334. (in Chinese)

4 李美江,王旭东. 沥青混凝土路面水损坏的试验分析[J]. 公路,2006,7(7):170 - 174.
Li Meijiang, Wang Xudong. Experiment analysis of water damage in asphalt concrete pavement[J]. Highway, 2006,7(7):170 - 174. (in Chinese)

5 肖庆一,薛航,徐金枝,等. 基于表面能理论的沥青路面水损坏模型研究[J]. 武汉理工大学学报,2009,29(5):71 - 73.
Xiao Qingyi, Xue Hang, Xu Jinzhi, et al. Mositure damage model of asphalt mixture based on surface and interface theory[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009,29(5):71 - 73. (in chinese)

6 潘宝峰. 动水压力作用下路面材料损伤的评价方法研究[D]. 大连:大连理工大学,2010.
Pan Baofeng. Study on the evealuation method of pavement materials damage under hydrodynamic pressure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)

7 崔新壮,金青. 轮载作用下饱水沥青路面的动力响应[J]. 山东大学学报:工学版,2008, 38(5):19 - 24.
Cui Xinzhuang, Jin Qing. The dynamic response of saturated asphalt pavement under wheel loads[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2008, 38(5):19 - 24. (in Chinese)

8 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1997:181 - 199.

9 陆志良. 空气动力学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009:117 - 128.

10 方刚. 高速汽车气动特性的研究与分析[D]. 长沙:湖南大学,2000.
Fang Gang. Research and analysis of automotive highway aerodynamic characteristics[D]. Changsha: Hunan University,2000. (in Chinese)

11 丁则胜,邱光纯,张萍. 马格纳斯效应的研究与发展[J]. 华东工程学院学报,1981(4):119 - 147.
Ding Zesheng, Qiu Guangchun, Zhang Ping. On study and development of magnus effect[J]. Transactions of the Journal of East China Institute of Technology,1981(4):119 - 147. (in Chinese)

12 姜乐华,谷正气. CFD 在汽车空气空力学研究中的应用[J]. 湖南大学学报:自然科学版,1997,24(4):52 - 56.
Jiang Lehua, Gu Zhengqi. The application of CFD methods to automobile aerodynamics[J]. Transactions of the Journal of Hunan University: Natural Sciences, 1997, 24(4):52 - 56. (in Chinese)

13 杨博,傅立敏. 轿车外流场网格生成策略及数值模拟[J]. 农业机械学报,2007,38(4):8 - 11
Yang Bo, Fu Limin. Mesh generation strategies of the external flow field around a sedan and the numerical simulation research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(4):8 - 11. (in Chinese)

14 谷正气,姜乐华,吴军,等. 汽车绕流的数值分析及计算机模拟[J]. 空气动力学学报, 2000,18(2): 188 - 193.
Gu Zhengqi, Jiang Lehua, Wu Jun, et al. The numerical analysis and computer simulation on automobile flow field[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2000,18(2): 188 - 193. (in Chinese)

15 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(3):58 - 61.
Xie Jinming, Zhang Yangjun, Tu Shangrong. Numerical simulation study of ground effects on flow field around vehicle bodies[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003,39(3):58 - 61. (in Chinese)

16 郭建成. 基于 CFD 的汽车气动力高精度计算及优化[D]. 长沙:湖南大学,2012.
Guo Jiancheng. High precision calculation and optimization of automobile aerodynamic forces based on CFD method[D].

Changsha: Hunan University, 2012. (in chnese)

17 傅立敏,胡兴军,张世村. 车轮辐板开孔对汽车外流场影响的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2006,37(1): 8 - 11.
Fu Limin,Hu Xingjun,Zhang Shicun. Numerical simulation of influence of holes in wheel spokes on automotive external flow-field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(1): 8 - 11. (in Chinese)

18 欧金秋. 沥青路面水损坏的动水压力驱动机理研究[D]. 济南:山东大学,2012.
Ou Jinqiu. Dynamic pore water pressure driving mechanism research of asphalt pavement moisture damage[D]. Ji'nan: Shandong University,2012. (in Chinese)

19 钟建,周青莲. 公路沥青路面水损坏原因及防治对策[J]. 公路交通技术,2005(4):49 - 51.
Zhong Jian, Zhou Qinglian. Causes and preventive measures of highway asphalt pavement damages by water[J]. Technology of Highway and Transport, 2005(4):49 - 51. (in Chinese)

20 王靖宇,赖晨光,胡兴军. 汽车底部外形对气动特性的影响[J]. 中国公路学报,2008,21(2): 111 - 115.
Wang Jingyu, Lai Chenguang, Hu Xingjun. Influence of automotive underbody shape on aerodynamic performance[J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(2): 111 - 115. (in Chinese)

Development of a Vehicle-mounted Testing Device for Aerodynamic Field around Wheels

Wang Cong　Ma Fei　Ma Wei　Li Yong　Guo Rong

(*School of Mechanical Engineering*, *University of Science and Technology Beijing*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Strong aerodynamic force is generated between the wheels and road surface while a vehicle is moving fast on the road. As a result, the road surface is stroked by instantaneous and repeated aerodynamic force. For porous asphalt pavement, the repeated air pressure acted on the pavement would cause changes of water vapour state within, leading to pavement damage. Based on the 3D viscous incompressible Reynolds-averaged Navier-stokes equations and turbulence model $k-\varepsilon$ double equation model, the aerodynamic field between the vehicle and pavement was analyzed with numerical computing methods. The relationships between air pressures around the wheels and vehicle speed were studied. The variations of the air pressures at the front and back of the wheel were obtained. A vehicle-mounted aerodynamic field testing device was developed. Air pressures of the front and back of moving wheels were measured with the vehicle-mounted device. Testing results agreed with numerical calculation. It was indicated that the developed device could be used to investigate the aerodynamic field in vehicle - pavement system.

Key words: Aerodynamic force　Computational fluid dynamics　Vehicle - pavement system　Vehicle-mounted measurement device