

车轮辐板形状对汽车气动阻力影响分析

谷正气^{1,2}, 林肖辉¹, 李伟平¹, 汪怡平¹, 袁志群³

1. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082
2. 湖南工业大学机械工程学院, 湖南株洲 412007
3. 厦门理工学院机械工程系, 福建厦门 361024

摘要 汽车旋转的车轮所产生的复杂分离流对整车外部流场有重要影响,是整车气动阻力主要来源之一。应用计算流体力学对包含轮胎的整车进行仿真分析,并通过风洞试验验证了方法的可靠性。重点讨论了车轮边界条件的设置对计算结果的影响,并对同一型号的车轮,通过改变辐板的开孔个数和开孔面积分析对整车气动阻力系数的影响。结果表明,对车轮的模拟,采用旋转壁面模型比采用多参考坐标系(MRF)更为合理;当辐板开孔数不变时,随着开孔面积的增大,前、后车轮阻力系数都随之增大,整车阻力系数先增大后减小;当单个孔面积不变时,随着开孔数目的增多,后轮阻力系数随之增大,前轮、整车阻力系数先增大后减小。结果为汽车车轮的设计提供一定参考。

关键词 空气动力学;汽车;旋转车轮;计算流体力学

中图分类号 U464.138+2

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.06.008

Effect of the Shape of Wheel Spokes on Vehicle Aerodynamic Performance

GU Zhengqi^{1,2}, LIN Xiaohui¹, LI Weiping¹, WANG Yiping¹, YUAN Zhiqun³

1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China
2. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, Hunan Province, China
3. Department of Mechanical Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, Fujian Province, China

Abstract The complex separated flow induced by wheel and wheel cavity has a great impact on the exterior flow field, and also is one of the major causes of aerodynamic drag. In the present paper, the exterior flow field of a whole car model including wheel is simulated using the computational fluid dynamics method. The related experiments were carried out in HD-2 wind tunnel to validate the reliability of the simulation method. In order to get the accurate flow around rotating wheel and wheel cavity, two different boundary conditions of wheel are compared with those in literature. Then, the influence of the number and size of holes in wheel spoke on the aerodynamic drag coefficient was investigated using the same type wheel. The results show that the rotating wall boundary condition is more reasonable than the MRF; the wheel's drag coefficient increases with the hole open size when the hole number is a constant, while the whole car's drag coefficient is first increased and then decreased; when the single-hole size is fixed but the opening number is increased, the rear wheel's drag coefficient increases, while the front wheel's and the vehicle's drag coefficients are increased first and then decreased. This work can provide a reference for wheel design in the future.

Keywords aerodynamics; automobile; rotating wheel; computational fluid dynamics

0 引言

汽车减阻的目的是降低动力损耗、节约能源、降低用户使用成本。随着车身设计的不断流线化,车轮作为主要外廓运动部件,在空气阻力方面的影响作用越来越显现^[1]。研究表

明,在汽车总阻力中车身外形占45%,车轮及轮腔占30%,车身底板和附加装置占25%^[2]。在汽车车轮的设计中,车轮辐板的设计是一个至关重要的环节,是影响车轮周围以及车底气流流动的重要因素。研究辐板参数对流场变化的影响趋势,

收稿日期:2010-11-29;修回日期:2011-01-16

基金项目:国家自然科学基金项目(50975083);教育部长江学者和创新团队发展计划项目(531105050037);湖南省科技攻关计划重点项目(2009JT1014);湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室自主课题(61075001)

作者简介:谷正气,教授,研究方向为汽车空气动力学、整车性能等,电子信箱:guzhengqi63@126.com

对于改善汽车三维分离流动特性、提高汽车空气动力性能及操纵稳定性有重要意义^[3-5]。

汽车空气动力学研究以风洞测试为主,为模拟车轮的实际旋转情况,1995年,Cogotti等^[6]在Pinfarina风洞采用旋转滚筒法进行全车外流场试验,取得较好的效果,示意图见图1。但是风洞试验周期长,费用较高。随着高性能计算机和CFD技术的发展,采用计算机对汽车三维流场进行仿真分析成为可能,如此则可缩短汽车的开发设计周期、节约开发成本,目前该方法已在汽车工业上广泛使用。

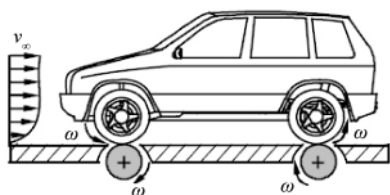


图1 旋转滚筒法

Fig. 1 Method of rotating roller

由于车轮和轮腔的复杂分离流对整车外部流场的影响,对车轮的空气动力学特性研究也日益受到重视。2006年,许清霖等^[7]以单独车轮为研究对象,用不同的计算域对车轮流场进行计算,分析了车轮静止和滚动、来流速度等对阻力系数的影响。胡兴军等^[8]对某简单车体,考虑了不同辐板对外部流场的影响,并对不同车轮的表面压力进行分析。

本文在前人工作的基础上,利用fluent软件对某复杂车体进行研究,重点讨论了车轮边界条件的设置,实现车轮周围流场的可视化处理,得出不同辐板对整车气动性能的影响规律,引出车轮设计的重要性,从而为车轮的设计提供一定参考。

1 数值仿真计算

1.1 几何模型的建立

仿真模型是在CAD软件UG模块中建立,本文主要研究不同形状辐板对整车阻力系数的影响,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。根据GB/T 2978—1997,轮胎选择为155/65R14。考虑车轮的实际变形情况,对车轮接地区域进行修正^[4]。整车和车轮模型如图2、图3所示,截面 $z=0.23\text{m}$ 是为了方便后续分析。

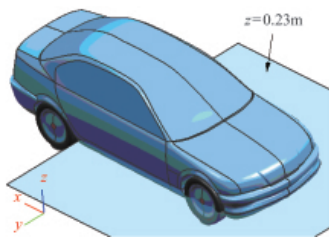


图2 整车模型

Fig. 2 Car model

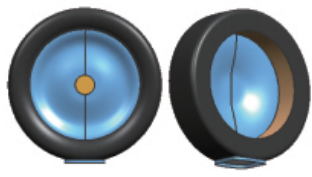


图3 车轮模型

Fig. 3 Wheel model

1.2 仿真方案的选定

对图3所示车轮,轮辐的修改采用以下两组方式,部分示意图见图4。

(1) a组:车轮开3个孔,模型 $a_1\sim a_7$ 单个开孔面积按比例增加,孔面积与辐板面积之比依次为0,8%,12%,16%,20%,24%,28%,分析开孔面积对整车气动性能的影响。

(2) b组:车轮单个开孔面积不变,单孔面积与辐板面积之比为4%,增减开孔个数,模型 $b_1\sim b_4$ 分别为无开孔、开3个孔、5个孔、7个孔,分析开孔数对整车气动性能的影响。

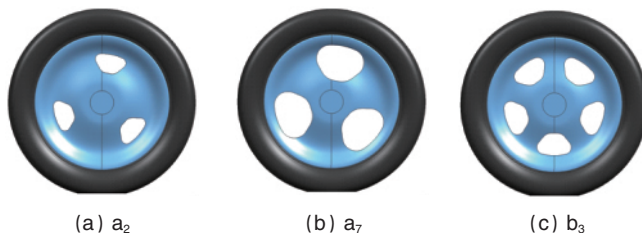


图4 不同辐板的车轮模型

Fig. 4 Different wheel models

1.3 基本控制方程和湍流模型

通常状态下,汽车在开阔空间行驶,属于低马赫数的交通工具,空气介质物性参数可视为常数,汽车周围流场可考虑为不可压缩流体。由于其外形复杂,车身周围容易引起气流分离,因此汽车外流场属于黏性、不可压缩流,且具有典型的三维分离流动特性,所以按湍流处理^[1]。湍流计算的基本控制方程为三维不可压缩雷诺时均为Navier-Stokes方程,简称RANS方程,其控制方程如下^[9]:

连续方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

运动方程

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu_{\text{eff}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2)$$

其中, u_i, u_j 为平均速度分量, x_i, x_j 为坐标分量, p 为流体微元体上的压力, ρ 为密度, μ_{eff} 为湍流有效黏性系数。

在时均应变率特别大的情况下,标准 $k-\varepsilon$ 模型有可能导致负的正应力,为了使流动符合湍流的物理定律,需要对正应力进行数学约束。为了保证这种约束的实现,Shih认为湍流动能黏度计算式中的系数 C_μ 不应是常数,而应与应变率联系起来,从而提出了Realizable $k-\varepsilon$ 模型,关于 k 和 ε 的输运方程如下^[9]。

湍流动能 k 方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

湍流动能耗散率 ε 方程

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} \quad (4)$$

其中, v 为 y 方向的动量, E 为时均应变率, $\sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.2, C_2=1.9, C_1=\max\left(0.43, \frac{\eta}{\eta+5}\right), \eta=\sqrt{2E_{ij}E_{ij}} \cdot \frac{k}{\varepsilon}, E_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right), G_k$ 是由平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项,

$$G_k=\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5)$$

湍流有效黏性系数 μ_{eff} 为

$$\mu_{eff}=\mu+\mu_t \quad (6)$$

其中

$$\mu_t=\rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, C_\mu=\frac{1}{A_0+A_s U^* k/\varepsilon}, A_0=4.0, A_s=\sqrt{6} \cos\phi, \phi=\frac{1}{3} \cos$$

$\sqrt{6} W, W=\frac{E_{ij}E_{ij}E_{kl}}{(E_{ij}E_{ij})^{3/2}}, U^*=\sqrt{E_{ij}E_{ij}+\tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}, \tilde{\Omega}_{ij}=\Omega_{ij}-2\varepsilon_{ijk}\omega_k, \Omega_{ij}=\tilde{\Omega}_{ij}-\varepsilon_{ijk}\omega_k$ 这里, $\tilde{\Omega}_{ij}$ 是从角速度为 ω_k 的参考系中观察到的时均转动速率张量, 显然对无旋转的流场, U^* 算式中的第 2 项为 0, 这一项是用以表示旋转的影响的, 也是本模型的特点之一。

1.4 数值计算方法的试验验证

为了验证 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型数值方法计算的准确性, 对图 2 所示模型进行了风洞测力试验 (图 5), 风洞试验和仿真结果的整车阻力系数 C_d 值如表 1 所示。受风洞试验条件的限制, 此时数值仿真和实验试验, 车轮都是静止不转的。



图 5 模型风洞试验
Fig. 5 Model tunnel test

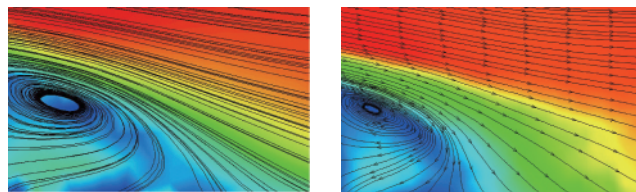
表 1 整车阻力系数 C_d 试验值和仿真值
Table 1 A comparison of drag coefficient between test and simulation

风速/($m \cdot s^{-1}$)	试验值	仿真值	相对误差/%
25	0.2869	0.2804	2.27
30	0.2853	0.2802	1.78
35	0.2847	0.2796	1.79
40	0.2850	0.2806	1.54

由表 1 可知, 气动阻力的数值仿真结果与风洞试验结果比较接近, 验证了数值仿真的准确性。图 6 为汽车尾部纵对称面流线图及速度云图的数值仿真结果 (图 6(a)) 与粒子成像测速法 (PIV) 测量结果 (图 6(b)) 对比, 可以看出, 两个结果在湍流涡的形态和位置方面非常吻合, 仅在局部区域速度上有稍许差别。所以后续仿真采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型。

1.5 网格划分和边界条件设置

网格划分是仿真计算的重要一步, 对计算结果的精度有



(a) (b)
图 6 汽车尾部纵对称面流线和速度云图

很大影响。此次仿真的计算域为一个围绕车身的长方体, 汽车模型前部留 3 倍车长, 上部留 4 倍车高, 后部留 6 倍车长, 两侧均留 5 倍车宽。在 ANSYS ICEM CFD 10.0 中完成网格划分, 采用 Octree 网格生成方法在整个计算流域生成非结构化空间网格, 在车身表面拉伸出与其平行的三棱柱网格, 以满足壁面函数的需求, 精确模拟汽车表面的附面层。在计算敏感区域使用密度盒加密, 以达到局部网格细化提高计算精度的目的。

数值仿真是在有限区域内进行的, 因此在区域的边界上需要给定边界条件, 边界条件的确定需要在数学上满足适定性, 在物理上具有明确的意义。

本次仿真的关键是车轮边界条件的设置。对模型 a_1 采用多参考系 (MRF) 模型和旋转壁面模型分别进行仿真。对轿车后轮来说, 往往是全部或局部在前轮的尾流中运动。由实验测得后轮前部正压区的正压值以及上部负压区的负压值都小于前轮。后轮的气动阻力约占车轮总气动阻力的 35%^[1]。采用 MRF 模型, 前轮阻力系数为 0.0312, 后轮阻力系数为 0.007, 后轮阻力仅占车轮总阻力的 18.3%; 车轮边界采用旋转壁面时, 计算得出前轮阻力系数为 0.02975, 后轮阻力系数为 0.0163, 后轮的气动阻力约占车轮总气动阻力 35.4%, 因此把车轮边界条件设置为旋转壁面更为合理。边界条件的具体设置如下: 入口速度 u 分别为 40, 0, 0 m/s; 出口压力 $p=101325$ Pa; 地面为移动避免边界, 速度 u_x 为 40, 0, 0 m/s; 计算域的左右和上表面为无滑移壁面边界; 车各表面为无滑移壁面边界; 前后车轮为旋转壁面, 转速 $\omega=140.26$ rad/s。

2 数值仿真结果和分析

本文主要研究车轮辐板对外流场的影响情况。先对模型 a_3 车轮附近的流场状况进行分析。图 7、图 8 分别为前轮轮腔处流线和车轮表面压力流线图。高速气流流到车轮前部时, 受车轮阻碍会产生分离, 分别流向车轮外侧、车轮内侧和车轮上部。流向车轮内侧的气流和部分从车底面流到轮腔附近的气流在轮腔的后部形成一个高压区 (图 7 中所圈位置)。这部分气流又随着车轮的旋转形成一系列漩涡, 涡的耗散会引起阻力的增加。漩涡在轮腔和车轮的前部处产生挤压, 最后被轮子外侧的高速气流带走。由图 8 能够清楚地看出轮子处气流的流向。气流在高压区处形成分离线, 由于车轮的旋转, 在高压区的上部, 车轮旋转带来的气流与沿车轮表面向上的气流产生交汇, 形成附着线。

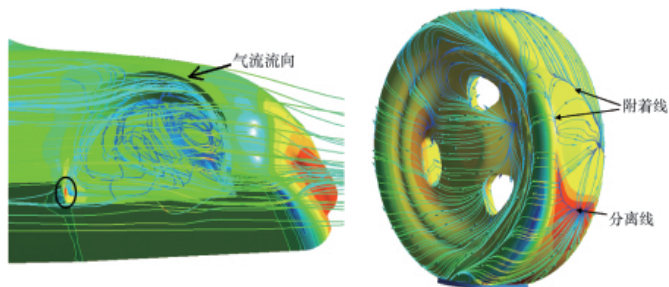


图 7 前轮轮腔处空间流线图 图 8 车轮表面流线和压力云图
Fig. 7 Stream line of the front wheel cavity Fig. 8 Surface pressure and streamline of the wheel

2.1 开孔面积的影响

从仿真结果可以看出,车轮旋转时,整车阻力系数比车轮静止时要小。这与 Lee Axon 等^[10]的实验规律一致。a 组模型数值仿真结果如表 2 所示。可以看出,随着开孔面积的增大,进入轮腔的气流相对增加,使轮腔内正压力区域变大,涡流运动变的复杂,前后车轮阻力系数增大。 a_3 的整车阻力系数最大。图 9 为模型 a_1 、 a_3 前轮附近流线对比图, a_3 轮腔内的漩涡比 a_1 的强烈一些。这是由于开孔的存在,使气流从开孔处进入到轮腔内,这部分气流和从车底部进入轮腔的气流相汇合,加强了轮腔内漩涡的强度,使涡的能量耗散大,导致整车阻力随着开孔面积的增大而增大。当开孔面积进一步增大的时候,从开孔处进入轮腔的气流速度有所增加,气流进入轮腔后对其内漩涡的形成起一定干涉作用,将漩涡中的部分气流从轮子内侧带出轮腔,减少了车身涡能量的耗散,减小了整车阻力。所以整车阻力呈现如表 2 所示先增大后减小的趋势。

表 2 a 组模型参数和仿真结果

Table 2 Model parameters and simulation results of a-group

模型	前轮阻力系数	后轮阻力系数	整车阻力系数
a_1	0.02975	0.0163	0.2669
a_2	0.03331	0.0212	0.2691
a_3	0.0337	0.0231	0.2732
a_4	0.0348	0.0235	0.2725
a_5	0.0358	0.02465	0.2716
a_6	0.0361	0.0249	0.2713
a_7	0.03675	0.02525	0.2706

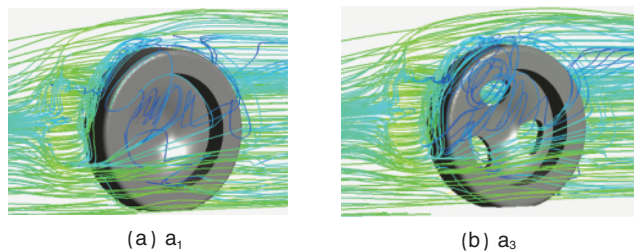


图 9 汽车前轮附近流线

Fig. 9 Streamline around the front wheel

图 7 中前轮轮腔后部的高压区所在平面位于 $z=0.23\text{m}$ 左右。图 10 为 $z=0.23\text{m}$ 截面上压力云图和流线图。可以看出,轮辐开口附近有涡生成,气流产生分离,使涡量有所增加。气动阻力的增大正是由于物体近表面流体中的涡量增大所致。模型 a_3 截面上的涡系增多至 4 个,能量耗散多,阻力系数大。

随着开孔面积进一步增大,从辐板孔处进入的气流对原来流场产生干涉,这一变化在轮腔后部的正压区(图 10 所圈位置)处有所体现。因此整车的阻力系数先增大后减小。

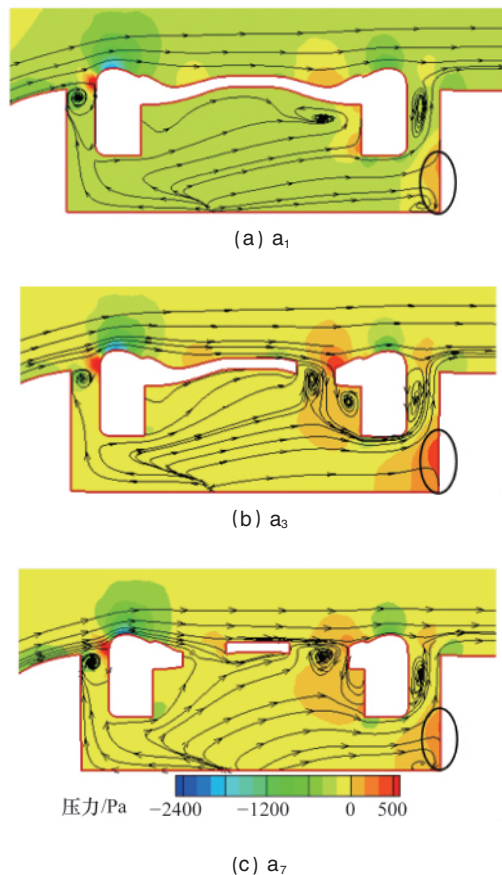


图 10 各模型平面压力云图和流线图

Fig. 10 Surface pressure and streamline of every model

2.2 开孔数的影响

b 组模型仿真结果如表 3 所示。后轮的阻力系数增大,分析过程和 a 组相似,主要是因为进入轮腔的气流增多引起的。

表 3 b 组模型仿真结果

Table 3 Model parameters and simulation results of b-group

模型	前轮阻力系数	后轮阻力系数	整车阻力系数
b_1	0.02975	0.0163	0.2669
b_2	0.0337	0.0231	0.2732
b_3	0.03092	0.02800	0.2695
b_4	0.02995	0.02842	0.2684

涡的形成和破碎可以在湍动能图上表现出来,涡流动越复杂,湍动能越剧烈,能量消耗就越多,阻力系数随之增大。

图 11 为前轮 $z=0.23\text{m}$ 截面湍动能云图,可以看出随着开孔数的增多,前轮轮腔内的湍动能因气流的增多先变得剧烈,后由于气流的干涉作用趋于平缓,从而使前轮和整车阻力系数表现为先增大后减小。

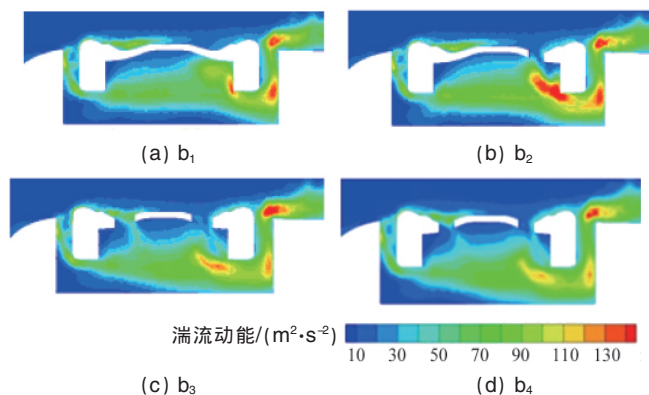


图 11 b 组模型湍动能云图

Fig. 11 Turbulent kinetic energy contours of model b

3 结论

本文采用 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型,研究车轮辐板形状对汽车外流场的影响规律,得出以下结论。

(1) 用计算流体力学的方法对旋转车轮流场分析时,车轮边界条件的设置采用旋转壁面模型比 MRF 模型更合理。

(2) 对开孔数不变,开孔面积增大的情况,进入前、后轮腔的气流增多,流场变的复杂,前后轮阻力系数增加。进入轮腔内的部分气流从车轮内侧流出,对整车流场有一定的干涉,降低了涡的耗散,使整车阻力系数先增大后减小。

(3) 对单个开孔面积不变,开孔数目增大的情况,后轮阻力系数随着进入轮腔内气流的增多而增大。从前轮 z 截面湍动

能云图可以看出,受进入轮腔内气流的影响,前轮腔内涡的耗散先增大后减少,使前轮和整车阻力系数都先增加后减小。

参考文献 (References)

- [1] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 140-167.
Gu Zhengqi. Car acta aerodynamic [M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 140-167.
- [2] Wickern G, Zwicker K, Pfadenhauer M. Rotating wheels—Their impact on wind tunnel test techniques and on vehicle drag result [C]//SAE. Detroit: SAE, 1997: 970133.
- [3] Tian H Q. Formation mechanism of aerodynamic drag of high-speed train and some reduction measures [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, 16(1): 166-171.
- [4] 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]//SAE. Detroit: SAE, 2008: 080805.
- [5] Huminic A, Chiru A. On CFD investigations of vehicle aerodynamics with rotating wheels' simulation[C]//SAE. Detroit: SAE, 2006: 060804.
- [6] Cogotti A. Ground effect simulation for full-scale cars in the pininfarina wind tunnel[C]//SAE. Detroit: SAE, 1995: 950996.
- [7] 许清霖, 康宁. 汽车车轮流场的数值模拟[J]. 力学与实践, 2006, 28(6): 15-18.
Xu Qinglin, Kang Ning. *Mechanics and Engineering*, 2006, 28(6): 15-18.
- [8] 胡兴军, 傅立敏. 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, 2006, 34(12): 1684-1688.
Hu Xingjun, Fu Limin. *Journal of Tongji University*, 2006, 34(12): 1684-1688.
- [9] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 120-122.
Wang Fujun. *The fluid mechanics analysis* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 120-122.
- [10] Axon L, Garry K, Howell J. An evaluation of CFD for modeling the flow around stationary and rotating isolated wheels [C]//SAE. Detroit: SAE, 1998: 980032.

(责任编辑 刘志远)

·学术动态·



“第九届中国智能机器人学术研讨会”征稿

由中国人工智能学会主办的“第九届中国智能机器人学术研讨会”将于 2011 年 11 月 11—13 日在深圳召开。

征文内容: 机器人理论与控制技术; 人工智能与智能控制技术; 智能机器人体系结构及实现方法; 机器学习、算法与知识工程; 基于网络的机器人结构与控制; 机器人传感技术、智能传感器; 多智能体系统理论与应用; 多传感器集成与信息融合; 移动机器人及自主导航技术; 机器视觉、图像处理与模式识别技术; 机器人同时定位与地图创建(SLAM); 机器人结构设计及计算机仿真技术; 嵌入式计算机技术; 无线通信网络技术; 服务机器人、特种机器人、足球机器人、仿生(人)机器人; 信息获取与数据挖掘; 智能机器人的应用。

征文截止日期: 2011 年 4 月 30 日。

联系电话: 027-87556242, 李炜; 电子信箱: liwei0828@mail.hust.edu.cn; 会议网址: <http://caai.cn/contents/48/2358.html>。