

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.06.005

空气动力学仿真在摩托车造型开发中的应用

周颖,张立鹏,阎岩,史春涛

(天津大学内燃机研究所,天津 300072)

摘要:摩托车空气动力学特性对摩托车的动力性、经济性和操作稳定性有直接影响。由于国内没有摩托车专用风洞,道路滑行试验无法适用于所有车型,所以在一款新型巡航车造型开发阶段,采用空气动力学仿真方法分析实车模型的空气动力学特性,在此基础上指导多个部件优化设计,并对优化后提供的两个挡风板安装方案分别进行了整车仿真分析。仿真结果显示,优化后的两方案整车阻力系数 C_d 值均降低,两挡风板安装方案的空气动力学性能对比为进一步选型提供了参考依据。

关键词:摩托车;空气动力;仿真;造型;设计

中图分类号:U483

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2018)06-042-08

Application of aerodynamic simulation to the development of motorcycle styling

ZHOU Ying, ZHANG Lipeng, YAN Yan, SHI Chuntao

(Tianjin Internal Combustion Engine Research Institute, Tianjin University, Tianjin 30072, P.R. China)

Abstract: The aerodynamic characteristics of motorcycle influence the power performance, fuel economy and operation stability of motorcycles directly. Considering the absence of special wind tunnel for motorcycles in the domestic and road coasting test doing not apply to all types of motorcycle, aerodynamic simulation method was applied in the development process of a new touring styling by analyzing the aerodynamic characteristics of real vehicle model. Basing on that, the optimization design was made and then simulations were made respectively with two windscreen installation angles provided. The simulation results show that drag coefficient C_d is reduced by the optimization scheme and the aerodynamic characteristics comparison between the two installation schemes provide the reference for further style selection.

Keywords: motorcycles; aerodynamics; simulation; styling; design

中国摩托车行业经过近几年的转型升级,产品结构不断完善,通勤踏板车、休闲娱乐摩托车、警用摩托车等新的增长点持续扩大。无论是传统燃油机车还是新兴的电动摩托车,都在向着大马力、高速化的方向发展,摩托车结构的特殊性以及最高车速的一再提高,都使得摩托车在设计阶段必须考虑空气动力学对车辆的影响,因为摩托车的空气动力特性对其动力性、经济性及操作稳定性有直接影响。有资料显示^[1],当车速大

收稿日期:2018-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11332006,11732010,11572221,11502066)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (11332006, 11732010,11572221,11502066).

作者简介:周颖(1977—),女,天津大学内燃机研究所工程师,主要研究方向为车辆动力学仿真及性能优化,(E-mail) zhouying_mailbox@163.com。

于 80 km/h 时,风阻消耗的能量占整车能耗的 80% 以上,所以降低空气阻力对减少摩托车油耗有重要现实意义。

风洞试验是车辆空气动力学研究的重要手段,由于试验成本高昂,国外学者对摩托车的风洞试验研究多针对车体的简化模型或缩尺模型进行^[2-3]。伴随仿真技术的发展,学者也开展了一维或三维模拟研究工作^[4-6],但多为对某一车身部件进行研究^[7]。近年来国外学者对汽车表面形成凹坑型非光滑表面设计达到减阻目的的研究^[8]对摩托车外形设计具有借鉴意义,国内也有学者进行了相关研究工作^[9]。傅立敏教授^[10]对汽车空气动力学性能的研究开展较早,并取得了一定成果,其他学者也针对汽车降阻、降噪方面做了很多研究和努力^[11-12],周涛、曾忠^[13]对大学生方程式赛车的空气动力学套件进行三维仿真优化设计,从而有效地提高了负升阻比(即负升力和阻力比值)。但国内学者对摩托车空气动力学性能的研究相对匮乏,尤其在摩托车产品开发过程中对概念车型的研究未见报道。摩托车驾驶员骑行时暴露于气流中受到多气动分力影响,摩托车质量比汽车轻,更容易受气流影响,因此空气动力学研究对摩托车设计极为重要^[14]。

目前国内还没有摩托车专用风洞,摩托车的气动阻力等空气动力学试验数据只能通过滑行试验获得,但此试验方法对无级变速、自动换挡和自动离合器的摩托车和轻便摩托车不适用。鉴于此,采用数值模拟技术(CFD)模拟风洞试验,可获得摩托车的气动阻力和滑行试验无法得到的详细流场信息,同时也可避免驾驶员坐姿差异带来的影响。笔者通过对一款新型巡航摩托车开发过程中的人-车模型外部流场进行稳态数值模拟,为车身设计、选型提供有效指导。

1 气流对运动物体的作用机理

物体对不可压缩流体输送能量的唯一机理是通过黏附条件产生涡量(速度的旋度),流体对物体的反作用就是已产生的涡量对物体的作用^[15]。从动力学角度分析,涡量场通常和黏性流动存在着对应关系,物面边界层、分离流区、尾迹区等必然分布着涡量^[16],涡量是由速度梯度造成的,速度梯度的存在伴随着压力分布不均,从而形成压差,产生气动阻力及气动升力。对于行驶中的车辆,气动力的大小影响着车辆的最高车速、加速时间以及燃油经济性,同时,气动力及其波动以及气动噪声是导致驾驶员不适和疲劳的重要原因^[14]。

2 仿真模型

首先对一款现有产品车进行模拟,计算域尺寸为车前 5 倍车长,车后 10 倍车长,6 倍车宽,4.5 倍车高,阻塞比 2.1%。人-车模型周围局部加密,最小尺寸 1 mm,最大尺寸 25.6 m,得到如图 1 所示的包面网格。体网格采用六面体核心 Trimmed 网格,边界区域采用多面体 Prism 网格,体网格参见图 2,网格总数约 1 000 万。

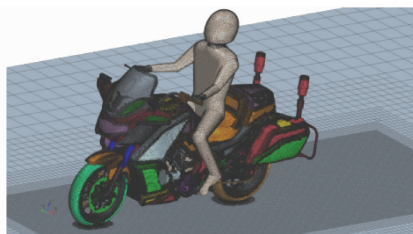


图 1 包面网格

Fig.1 Surface wrap mesh

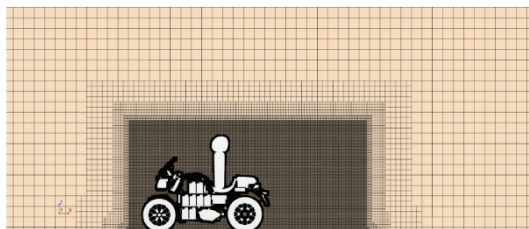


图 2 体网格剖面图

Fig.2 Cut-section of volume mesh

边界条件设入口为速度边界,出口为压力边界,计算域顶面为滑移壁面,侧面为对称壁面,底面为运动壁面。采用雷诺平均 N-S 方程(RANS),realizable K-Epsilon 湍流模型。

3 滑行试验数据对比

对应样车的滑行试验在天津摩托车检测中心的专业试验场进行,路面条件及试验的气候条件包括风力、湿度、气压及气温等均符合国家标准对道路试验的要求,采用 VBOX 3i GPS 综合测试仪进行测试,其主机用于测量移动车辆的速度和运行距离,并且提供横、纵向加速度、减速度、时间、制动及滑行等数值;外接各种模块和传感器以采集油耗等其他数据。其系统组成参见图 3。

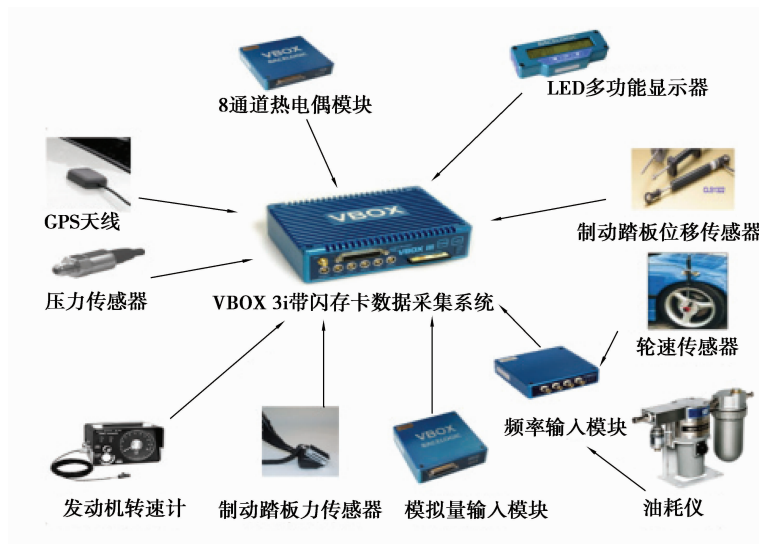


图 3 扩展的 VBOX3i 测试系统

Fig.3 Extended test system of VBOX3i

硬件主要技术参数如下:

速度测量范围:0~160 km/h;速度测量精度:0.1 km/h;速度分辨率:0.01 km/h;时间测量精度:0.01 s;时间分辨率:0.01 s。

仿真对 70,90,110 km/h 3 种车速下的阻力值与试验值进行对比,结果如表 1。从表 1 可以看出仿真结果和试验值的偏差在 5%以内,吻合较好,表明仿真方案可行,可开展后续研究工作。

表 1 仿真和试验阻力数据对比

Table 1 Comparison of simulational and experimental F_{drag}

$v/$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	F_{drag}/N		偏差/ %
	试验值	仿真值	
70	187	179	4.28
90	308	295	4.22
110	461	441	4.34

4 仿真结果及分析

本仿真内容是用前述仿真方案对一款开发中的巡航车效果图模型进行仿真分析,在此基础上对造型进行优化,形成详细设计方案,并对详细设计方案模型进行仿真分析。

4.1 效果图方案仿真结果

如图 4 对影响摩托车气动特性的外观部件进行了划分和定义,仿真可获得对应部件的受力结果。其

中“导流罩”包括油箱和座椅下方的所有外观部件,图 5 为 3 种车速(70,90,110 km/h)下各部件气动阻力仿真结果。可以看到,各部件受到的阻力都随着车速的增加而增加且变化趋势一致,导流罩、车头及前挡风板是主要受力部件,因它们直接迎风且迎风面积较大所致;后备箱和边箱的受力次之,这两个部件虽然不直接迎风,但由于处于车身尾部,其形状直接影响气流离开车身后在其后方形成的尾流的运动形式,从而影响后方的压力分布,所以会对行车阻力产生较大影响;后轮及后挡泥板由于周边流经的气流较少所以受力较小。

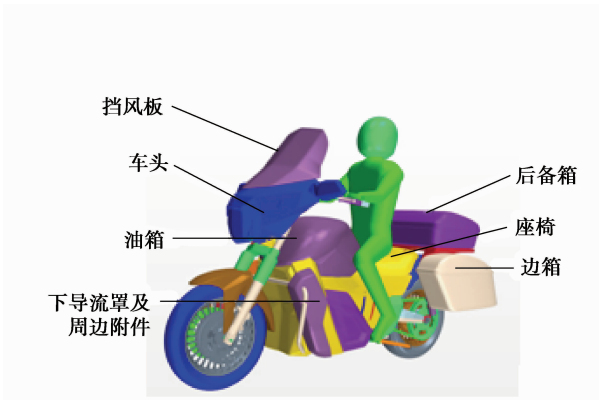


图 4 摩托车外形部件

Fig.4 Aerodynamic parts of motorcycle

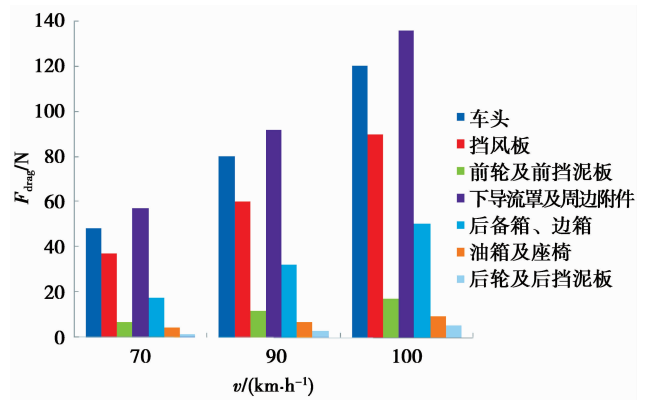


图 5 摩托车外形部件气动阻力仿真结果

Fig.5 Simulation results of F_{drag} of motorcycle parts

以下对车速为 110 km/h 情况下的仿真结果进行进一步分析。

图 6 显示随车身长度方向发展的累计阻力曲线。可以看到阻力从前轮开始缓慢升高,到达车头后急剧上升,离开仪表盘后有所回落,之后逐步升高,经过驾驶员时又有一定幅度下降,之后恢复到原来水平并逐渐升高直至车尾。流场分布从图 7 模型对称面上压力分布可以看出,车体迎风面前方形成高压区,挡风板和驾驶员之间出现相对低压区,尤其在油箱上方形成局部低压,其形成原因可从图 8 对应截面上线积分卷积法 (line integral convolution-LIC) 得到的速度矢量图看到,挡风板和油箱的导流作用在此处形成流动死区,导致低压的形成,与挡风板前的相对高压的共同作用致使行车阻力的产生。气流经过驾驶员位置,其背后压力高于胸前的压力,形成背推力,使得阻力系数降低。由经验可知,骑乘人员的受力情况与挡风板的设计直接相关。

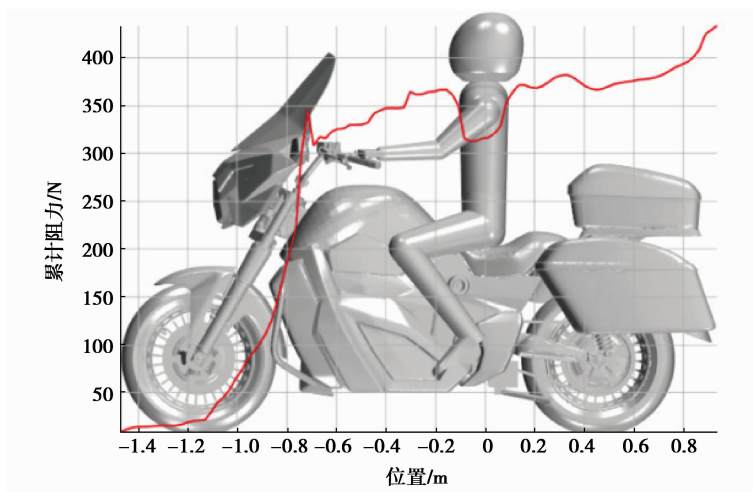


图 6 阻力发展曲线

Fig.6 Development of F_{drag}

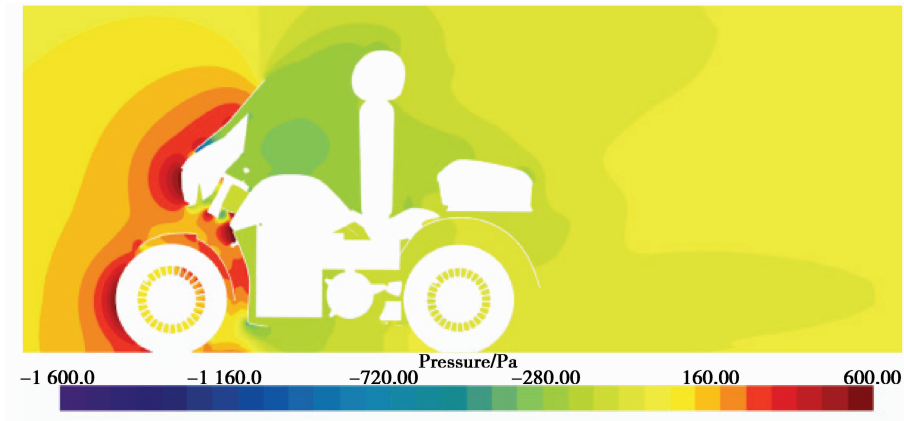


图 7 对称面压力场

Fig.7 Pressure field on symmetrical surface

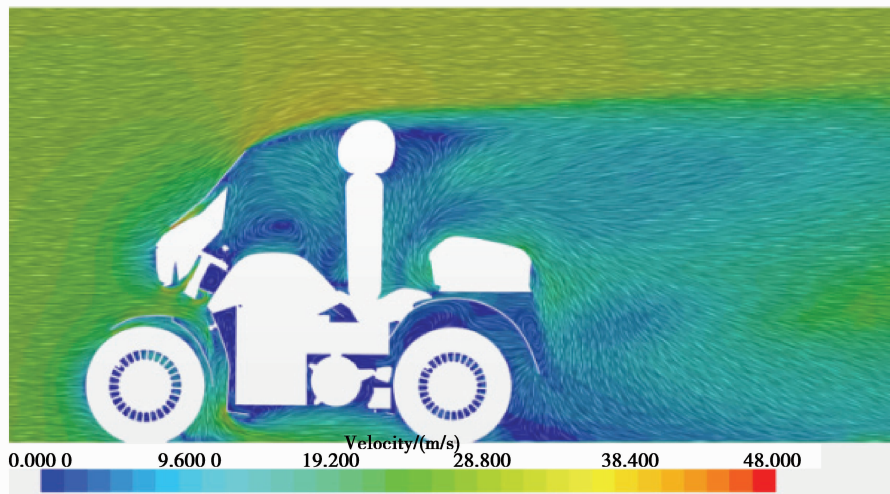


图 8 线积分卷积速度场

Fig.8 Velocity field(with line integral convolution) on symmetrical surface

图 9 中灰蓝色曲面是总压力系数为 0 的等值面,等值面内处于负压区。可以看到前轮、车头、挡风板以后的车体部分基本都被包裹在等值面内,设计方案应尽可能减小此等值面包裹的范围,因为负压区范围越小,气动阻力越小。车后地面上拖出的负压区是由边箱和后挡泥板之间气流形成的尾涡造成的,参见图 10 边箱和后挡泥板之间气流流线。尾涡的存在范围受车尾形状影响。

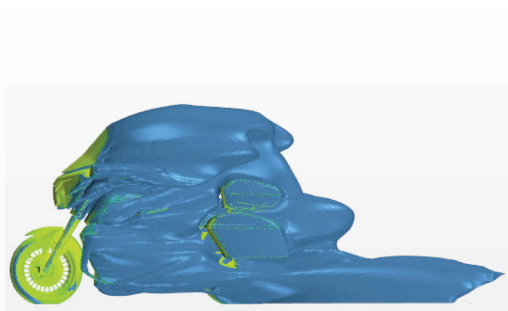


图 9 总压系数为 0 的等值面

Fig.9 Iso-surface of total pressure coefficient=0

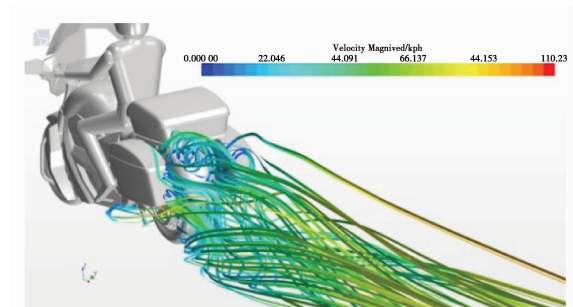


图 10 尾涡流线

Fig.10 Streamline of trailing vortex

涡旋通常用涡量来量度其强度,涡量值越高表征速度矢量的旋度越高。图 11 显示了涡量在 200~800 $\frac{1}{s}$ 范围内分布情况。可以看到,涡量场中高涡量区存在于气流离开车体迎风面的分离处,挡风板上缘涡量超过 800 $\frac{1}{s}$ 的区域没有显示,是全场涡量最高区域。气流离开物体表面的分离流区内逆压梯度的存在导致了涡旋产生,减小涡旋存在的区域范围及旋流强度,一方面可降低行车阻力,另一方面可减小气动噪声,增加骑乘人员舒适性。

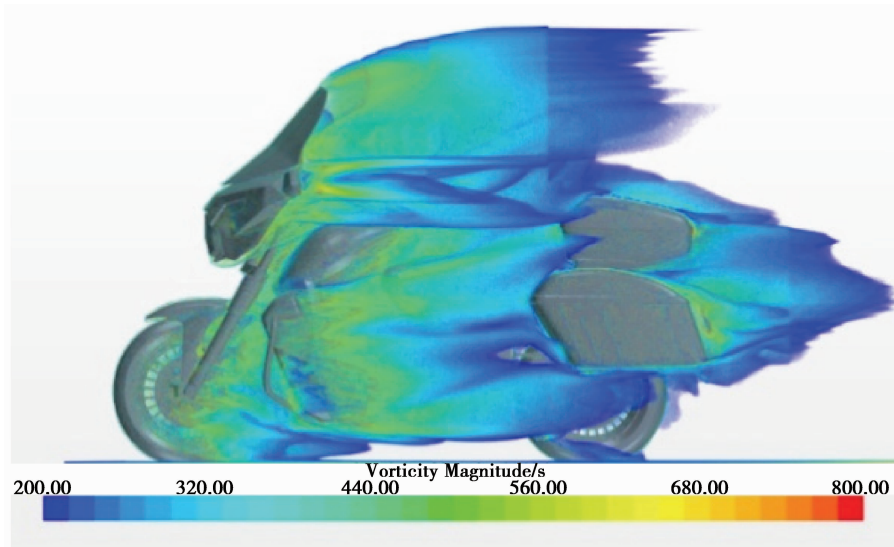


图 11 涡量分布

Fig.11 Vorticity distribution

4.2 详细设计方案仿真结果

详细设计方案(以下简称为“Ⅱ方案”)对效果图方案(以下简称为“Ⅰ方案”)所有曲面覆盖件进行了优化设计,对结构件进行了细化,并提供两种挡风板安装角度,使得挡风板立起高度不同,通过空气动力学仿真进行了方案对比。为便于说明,对两安装角度分别称为“Ⅱ(高)方案”“Ⅱ(低)方案”,Ⅱ(高)方案挡风板与地面的倾角大于Ⅱ(低)方案,使得安装后顶沿离地高度高于后者。图 12 是Ⅰ、Ⅱ方案挡风板外观图。

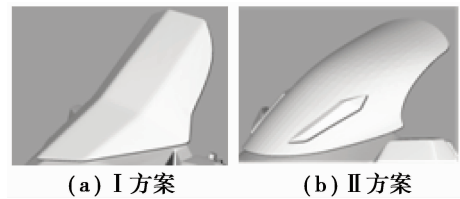


图 12 挡风板外观图

Fig.12 Windscreen model

表 2 列出了Ⅱ方案整车仿真得到的部分部件及整车的空气阻力,并与Ⅰ方案相应结构进行了对比。Ⅰ、Ⅱ方案数据对比可以看出挡风板造型的变化使得Ⅱ方案挡风板阻力变小;安装角度的改变使得Ⅱ(低)挡风板阻力进一步减小,并降低了车头的阻力,这是由改变车头后方压力引起的。但同时由于对驾驶员的遮挡减少,驾驶员受到的阻力增加。挡风板型线的改变,使得Ⅱ方案驾驶员行进方向的受力由Ⅰ方案的背推向前转变为前推向后。表中高、低两方案前 3 项阻力的差值等于两款方案整车阻力的差值,阻力相差 32 N。

表 2 空气阻力对比

Table 2 Comparison of F_{drag}

部件名称	F_{drag} / N		
	Ⅱ(高)方案	Ⅱ(低)方案	Ⅰ方案
挡风板	91	71	113
车头	124	96	99
驾驶员	10	26	-10
车身尾部	22	22	39
整车	411	379	434

表 3 列出了仿真得到的 I、II 方案前、后轮和整车升力系数。3 个方案前轮升力系数均为负值,受力压向地面,幅值相当;后轮都受到抬离地面的升力,且 II 方案后轮升力系数比 I 方案降低了 75%,这和车轮辐板结构改进有关。从整车考虑,II(高)方案使整车升力方向由 I 方案抬离地面转为压向地面,操作稳定性提升;而 II(低)方案迎风面积最小,整车升力系数最大,II(低)方案相较于 II(高)方案整车阻力系数 C_d 降低 4.2%,但升力系数增加 61 倍。

表 3 迎风面积、升力系数 C_l 、阻力系数 C_d 对比

Table 3 Comparison of frontal area, C_l , C_d

方案	迎风面积/ m ²	C_l			C_d
		前轮	后轮	整车	
II(高)	1.05	-0.014	0.002	-0.006	0.71
II(低)	1.01	-0.014	0.002	0.360	0.68
I	1.07	-0.013	0.008	0.016	0.74

5 结 语

笔者运用空气动力学仿真的方法,对一款造型开发中的巡航摩托车进行了多物理场分析研究,指导详细结构设计,并对详细结构的两种挡风板安装方案进行了分析、比较,为进一步选型提供参考依据。结果证明空气动力学仿真方法可有效指导摩托车造型开发。仿真过程中没有考虑车轮本身的旋转运动以及轮胎的细节特征,后续研究将考虑上述因素,进一步提高仿真精度,同时指导车轮外形设计。

参考文献:

- [1] 吴正权. 浅谈摩托车空气阻力系数 C_D 值的简易确定方法[J]. 摩托车技术, 1996(3):12-14.
WU Zhengquan. Simple defining method for air resistance coefficient C_D of motorcycles[J]. Motorcycle Technology, 1996(3):12-14. (in Chinese)
- [2] Turner D Cerro, Yao Y F, Marchant D. Motorcycle aerodynamic performance improvement through belly pan designs evaluation and testing[C] // SAE 2012 World Congress & Exhibition, April 24-26, Detroit, Michigan. [S.l.]: SAE International, 2012.
- [3] Garcia-Polanco N, Arocha H, Lorenzo J. Aerodynamic study of prototype motorcycle using experimental techniques and visualization flow[C] // SAE Brasil 2005 Congress and Exhibit, Detroit, Michigan. [S.l.]: SAE International, 2005.
- [4] Desai S, Leylek E, Lo C B, et al. Experimental and CFD comparative case studies of aerodynamics of race car wings, underbodies with wheels, and motorcycle flows [C] // Motorsports Engineering Conference & Exposition, Detroit, Michigan. [S.l.]: SAE International, 2008.
- [5] Sharma A, Limebeer D J N. Dynamic stability of an aerodynamically efficient motorcycle[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(8):1319-1340.
- [6] Meijaard J P, Poppv A A. Influences of aerodynamic drag, the suspension system and rider's body position on instabilities in a modern motorcycle[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(1):690-697.
- [7] Goudar N, Lalwani B. Aerodynamic braking for high-speed motorcycles[C] // SAE Brake Colloquium & Exhibition, Detroit, Michigan. [S.l.]: SAE International, 2014.
- [8] Takafumi M, Takahiro K, Taro Y, et al. Identification of vortical structure drastically worsens aerodynamic drag on a 2-Box vehicle using large-scale simulations[C] // SAE 2016 World Congress and Exhibition, Detroit, Michigan. [S.l.]: SAE

- International, 2016.
- [9] 杨易,黄剑锋,范光辉,等. 非光滑表面对汽车尾涡结构的控制分析研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(8): 133-140.
YANG Yi, HUANG Jianfeng, FAN Guanghui, et al. Research on non-smooth surfaces for control of the automobile trailing vortex structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52:(8): 133-140. (in Chinese)
- [10] 傅立敏. 汽车空气动力学[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
FU Limin. Automotive aerodynamics[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [11] 姜健,校辉,吴朝晖,等. 某款轻型商用车降油耗方法[J]. 中国机械工程, 2014, 25(24): 3043-3047.
JIANG Jian, XIAO Hui, WU Zhaohui, et al. Reduction fuel consumption method for a commercial vehicle[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2014, 25(24): 3043-3047. (in Chinese)
- [12] 谷正气,王宁,汪怡平等. 基于空腔流动特性的汽车侧窗风振噪声控制方法研究[J]. 振动工程学报, 2014, 27(3): 408-415.
GU Zhengqi, WANG Ning, WANG Yiping. Control of wind buffeting noise in side-window of automobiles based on cavity flow characteristics[J]. Journal of Vibration Engineering, 2014, 27(3): 408-415. (in Chinese)
- [13] 周涛,曾忠. FSAE赛车新型曲面前翼尾翼气动优化设计[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(10): 40-52.
ZHOU Tao, ZENG Zhong. Optimal aerodynamic design for formula SAE car using curved wings [J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(10): 40-52. (in Chinese)
- [14] Yuji Araki, Kazuhiro Gotou. Development of aerodynamic characteristics for motorcycles using scale model wind tunnel[C]// Small Engine Technology Conference & Exposition, Detroit, Michigan.[S.l.]: SAE International, 2001.
- [15] 吴介之. 运动物体与涡量场相互作用的不可压理论——涡量场在物面的产生及其耗散[J]. 空气动力学学报, 1986, 4(2): 168-177.
WU Jiezhi. Incompressible theory of the interaction between moving bodies and vorticity field—the generation of vorticity by body surfaces and its dissipation[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1985, 4(2): 168-177. (in Chinese)
- [16] 童秉纲,尹协远,朱克勤等. 涡运动理论[M]. 2版.合肥:中国科技大学出版社, 2009.
TONG Binggang, YIN Xieyuan, ZHU Keqin, et al. Vortex motion theory[M]. 2nd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009. (in Chinese)

(编辑 张 苹)