

# 非光滑车表的空气阻力特性

王 耘, 谌 可, 张友国, 宋小文

(浙江大学 机械工程学系, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 基于仿生思想, 将自然界中普遍存在的非光滑表面形态应用到汽车车身, 利用计算流体力学数值模拟方法, 研究采用非光滑车表减小汽车空气阻力的可行性. 从汽车空气阻力的组成入手, 通过对比光滑车表与非光滑车表汽车的外流场, 分析非光滑车表对汽车压差阻力、诱导阻力、摩擦阻力的影响以及减阻机理.

**关键词:** 汽车; 计算流体力学; 非光滑; 空气阻力系数; 减阻

**中图分类号:** U461.1; TB17

**文献标志码:** A

## Aerodynamic Drag Features on Automobile with Non-smooth Surfaces

WANG Yun, CHEN Ke, ZHANG Youguo, SONG Xiaowen

(Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** The form of non-smooth surfaces, which is ubiquitous in nature, is applied to automobiles and the feasibility of aerodynamic drag reduction on automobiles is studied by using computational fluid dynamics (CFD) simulation method. Meanwhile, by studying the composition of the air resistance and comparing the external flow field of automobiles with smooth or non-smooth surfaces, the effects of automobile with non-smooth surfaces on pressure drag, induced drag and frictional drag are analyzed together with the mechanism of drag reduction.

**Key words:** automobile; computational fluid dynamics (CFD); non-smooth; air resistance coefficient; drag reduction

随着国民经济的快速发展, 汽车逐渐成为一种大众消费品. 与此同时, 汽车的能源消耗问题也越来越突出, 降低汽车的能耗日益重要.

近年来, 仿生非光滑表面的减阻研究受到关注

并取得进展: 贴有高仿鲨鱼皮材料的圆形测试棒, 在水槽减阻实验中, 达到了最高 24.6% 的减阻率<sup>[1]</sup>; NACA 0012 飞机的机翼表面贴上微型沟槽膜后, 阻力减少了 6.6%<sup>[2]</sup>; 机身敷有沟槽膜的空客 A340 客机能节省燃油约 3%<sup>[3]</sup>.

本文受非光滑表面减阻的启发, 将之应用到汽车上, 利用数值模拟的方法, 研究采用非光滑车表减小汽车空气阻力的可行性与减阻机理, 以便为非光滑车表的实际应用打下基础.

## 1 模型的构建与计算条件的设定

### 1.1 整车模型的构建

为正确模拟汽车的外流场, 构建和实车外形相似的整车三维模型非常重要. 本文采用逆向工程技术来构建整车的三维模型, 如图 1~3 所示.

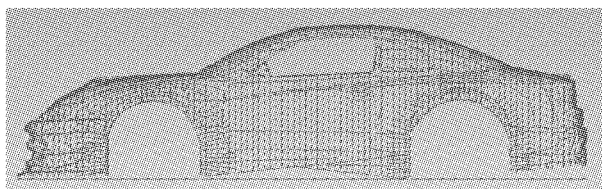


图 1 逆向工程得到的整车线框模型

Fig. 1 Automobile wireframe model generated by reverse engineering

### 1.2 非光滑车身模型的构建

非光滑表面在工程领域已有很多应用<sup>[2]</sup>, 并且收到了显著的减阻效果.

本文选用 3 种最为常见的非光滑单元体<sup>[4-6]</sup>, 如表 1、图 4, 5 所示, 分别为半球形凹坑、半圆形沟槽、正三角形沟槽, 布置在汽车顶盖, 如图 6 所示. 并且, 将光滑车表设为 0 号模型.

收稿日期: 2012-05-15

基金项目: 浙江省科技厅重点科技创新团队项目(2010R50045)

第一作者: 王 耘(1962—), 女, 副研究员, 硕士生导师, 理学博士, 主要研究方向为现代设计理论与方法, 产品数字化设计技术.

E-mail: wangyun@zju.edu.cn

通讯作者: 宋小文(1967—), 女, 副教授, 硕士生导师, 工学博士, 主要研究方向为产品数字化设计理论与方法. E-mail: songxw@zju.edu.cn

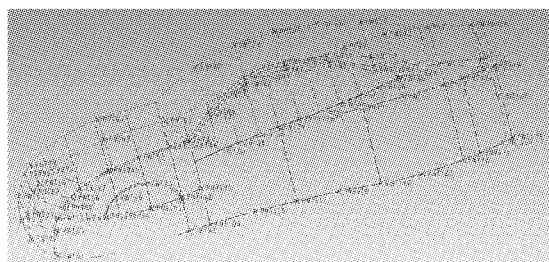


图2 提取的整车轮廓点与轮廓线  
Fig.2 Construction of automobile contour points and contours

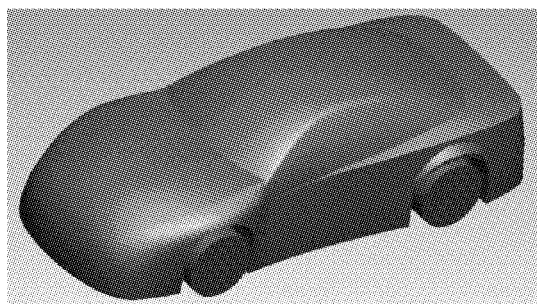
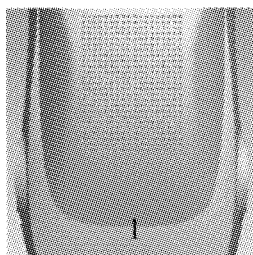
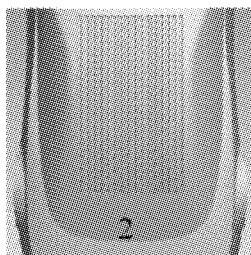


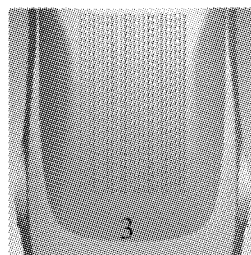
图3 构建好的整车三维模型  
Fig.3 3D automobile model



a 模型1:半球形凹坑型



b 模型2:半圆形沟槽型



c 模型3:正三角形沟槽型

图6 非光滑汽车表面

Fig.6 Automobile with non-smooth surface

### 1.3 网格的划分

利用 Hypermesh 软件来进行网格的划分.

#### 1.3.1 面网格的细密化处理

汽车表面的网格尺寸设为 2.00 mm,但为了将大小仅为 1.50 mm 的非光滑单元体的几何特征表现出来,将非光滑单元体处的网格设为 0.15 mm,如图7所示.

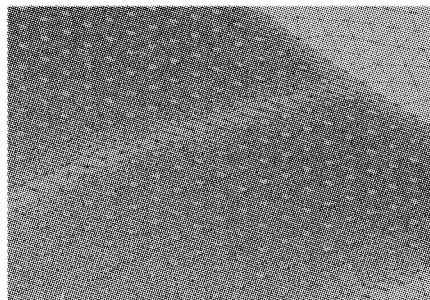


图7 非光滑车表面网格的细密化  
Fig.7 2D mesh optimization of automobile with non-smooth surface

表1 非光滑单元体尺寸

Tab.1 Non-smooth unit size

模型编号	单元体形状	深度/mm	间距/mm
1	半球形凹坑	1.50	2.50
2	半圆形沟槽	1.50	2.50
3	正三角形沟槽	1.50	2.50

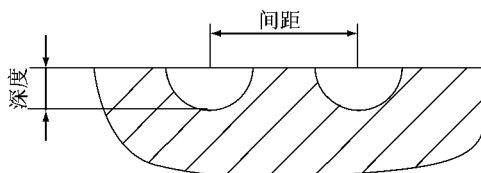
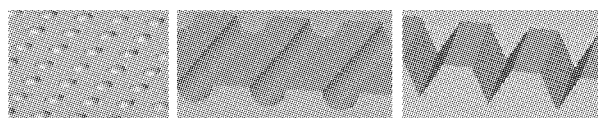


图4 非光滑单元体尺寸示意图

Fig.4 Schematic diagram of non-smooth unit size



a 半球形凹坑 b 半圆形沟槽 c 正三角形沟槽

图5 非光滑单元体形状示意图

Fig.5 Schematic diagram of non-smooth unit appearance

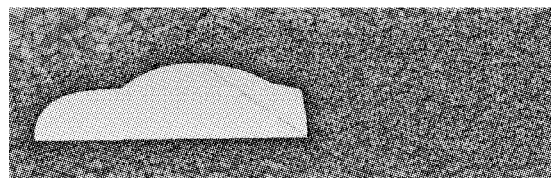
#### 1.3.2 体网格的局部细密化处理

风洞壁面网格尺寸设为 15.00 mm,采用软件的自动模式生成体网格.同时,考虑到汽车高速行驶时,汽车尾部气流的流动非常剧烈,流动状态也非常复杂,为了更好地计算汽车压差阻力,从车顶最高点处开始,将车身后部的网格密度加大 5 倍,如图 8a 所示;同时,为了捕捉汽车表面附近物理量的梯度变化,不但在车体表面附近划分了 5 层总厚度为 1.00 mm 的附面层网格,如图 8b 所示,而且从车表外表面开始,向外延伸 20.00 mm 范围内的体网格密度加大 3 倍,如图 8c 所示.

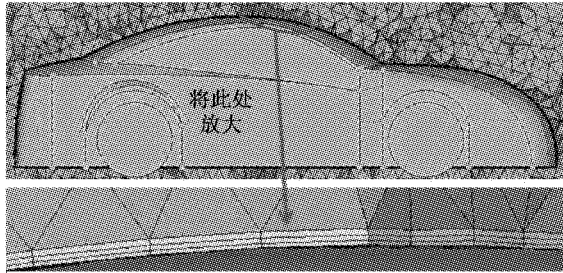
计算区域为车前方 2 倍车长,上方 2.5 倍车高,下方直接与风洞地板接触,左右两侧各 1.5 倍车宽,后方 3 倍车长,风洞采用非对称切角矩形的截面形状,完成后的计算域网格如图 9 所示.

### 1.4 数值模拟的计算条件

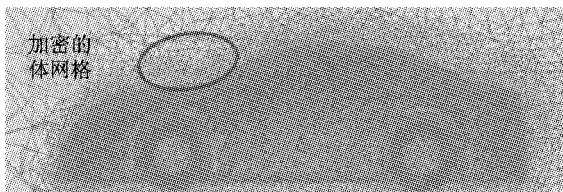
为了减小计算量,采用 1:10 缩小模型,风洞模



a 车尾体网格的细密化



b 细密化的附面层网格



c 近壁面体网格的细密化

图8 非光滑车体表网格的细密化

Fig.8 3D mesh optimization of automobile with non-smooth surface

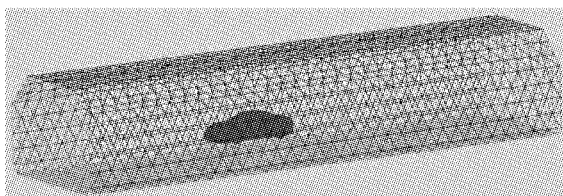


图9 计算域的网格划分

Fig.9 The result of mesh generation

型的阻塞比为 4.8%,考虑到只有当汽车高速行驶时,空气阻力才是主要的行驶阻力,故将车速设定为  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,此时,车速远远低于音速  $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,空气温度和体积的变化可以忽略不计。所以,将空气视为不可压缩流体,不考虑温度场的变化,这样汽车绕流就是一个定常、不可压缩的三维流场。因此,运用三维不可压、定常 Navier-Stokes (N-S) 方程组来描述汽车流场湍流现象,选用 Realizable  $k-\epsilon$  三维湍流模型,采用移动壁面来模拟地面效应。

## 2 结果及分析

### 2.1 数值模拟结果

汽车行驶时的空气阻力为

$$F_w = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2$$

式中:  $F_w$  为空气阻力, N;  $C_D$  为空气阻力系数;  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $A$  为迎风面积,  $\text{m}^2$ , 即汽车正面投影面积;  $v$  为合成气流相对速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 即汽车与空气的相对速度。

由此可见,通过比较空气阻力系数的大小,就可以比较光滑与非光滑车表的汽车,在相同行驶条件下行驶时的空气阻力大小,进而衡量非光滑车表的减阻效果。

表面光滑的汽车,通过数值模拟,求得其空气阻力系数为 0.385。各非光滑车身的空气阻力系数、减阻效果(即非光滑车身与光滑车身的空气阻力系数差值)和减阻率见表 2。

表2 实验结果

Tab.2 The result of the experiment

模型编号	阻力系数	减阻效果	减阻率/%
1	0.378	0.007	1.82
2	0.364	0.021	5.45
3	0.374	0.011	2.86

由表 2 可知,非光滑车身表面能够起到明显的减阻效果,最高的减阻率达到了 5.45%。

### 2.2 减阻机理分析

汽车空气阻力由三大部分叠加而成,它们分别是摩擦阻力、压差阻力和诱导阻力。本节从汽车空气阻力的组成入手,对数值模拟结果进行分析,找出减阻机理。

#### 2.2.1 摩擦阻力

摩擦阻力是由气流与车表之间的粘性作用产生的,粘性力的大小反映了摩擦力的大小。对比非光滑车身与光滑车身的总粘性力大小,如表 3 所示,可以发现非光滑车表的总粘性力比光滑车身的小,这表明非光滑车身能够减小车表的摩擦阻力,从而减小汽车的空气阻力。

表3 不同车表总粘性力

Tab.3 Comparison of viscous forces

模型编号	0	1	2	3
车表总粘性力/N	0.140	0.138	0.122	0.139

#### 2.2.2 压差阻力

汽车行驶时,车表前后压强呈现不对称的分布,见图 10,这种不对称的分布使得车表受到的正压力总和的绝对值小于负压力总和的绝对值,从而形成压差阻力。

压差阻力中,汽车前部约占 9%,其余的几乎全部来自于汽车尾部<sup>[8]</sup>,因此,将汽车分为汽车前部与

汽车尾部,分别进行压力分析。

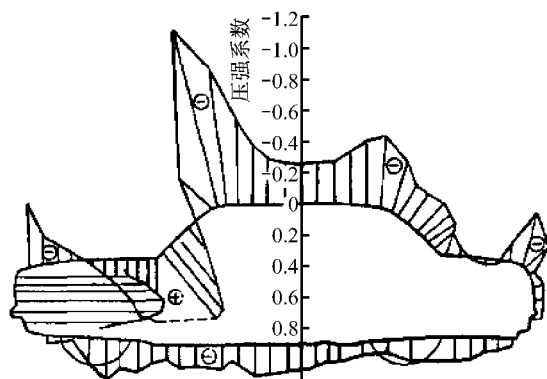


图10 普通公路汽车车表压强分布示意图<sup>[7]</sup>

Fig.10 Schematic diagram of pressure distribution for automobile body surface

光滑车表、不同单元体类型的非光滑车表的汽车前部中心对称面压力云图的对比见图11。由图11可见,由于气流与车表的撞击以及气流被汽车前窗阻挡而被迫改向,会形成两个大的车表高压区,这两个车表高压区带来的正压力,是汽车前部压差阻力的主要来源。如图11所示,对于各个汽车模型,其前部的两个高压区内的压力分布几乎没有区别,因此各汽车模型的前部压差阻力几乎相同,非光滑车身并不能减小汽车前部的压差阻力。

实际上,汽车前部的压差阻力仅占汽车全部压差阻力中很小的一部分。即使采用非光滑车表减小了前部的压差阻力,其对于车身总体减阻的作用也非常微弱。而减小汽车尾部的压差阻力,可以达到明显的减阻效果。

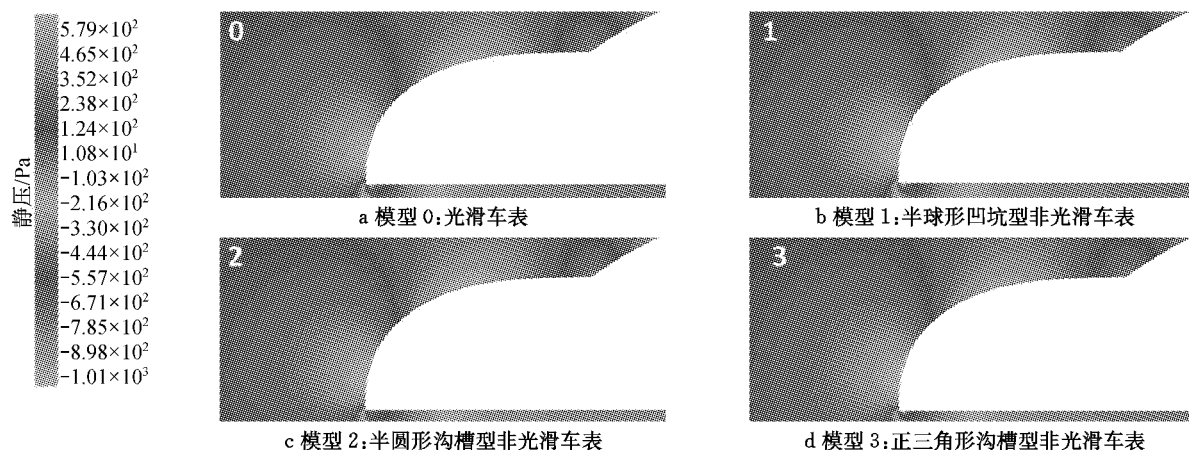


图11 汽车前部中心对称面压力云图对比

Fig.11 Comparison of pressure contours of the longitudinal symmetrical section for front quarter

汽车尾部压差阻力的大小,主要取决于尾涡区离车尾距离的远近和尾涡区内压强的大小:尾涡区内的压强越大、尾涡区离车尾的距离越远,则汽车尾

部受到的低压影响就越小,压差阻力也就越小,反之就越大。由图12可以看出,非光滑车表尾部的压力分布与光滑车表有着明显的不同,它们尾部气流的

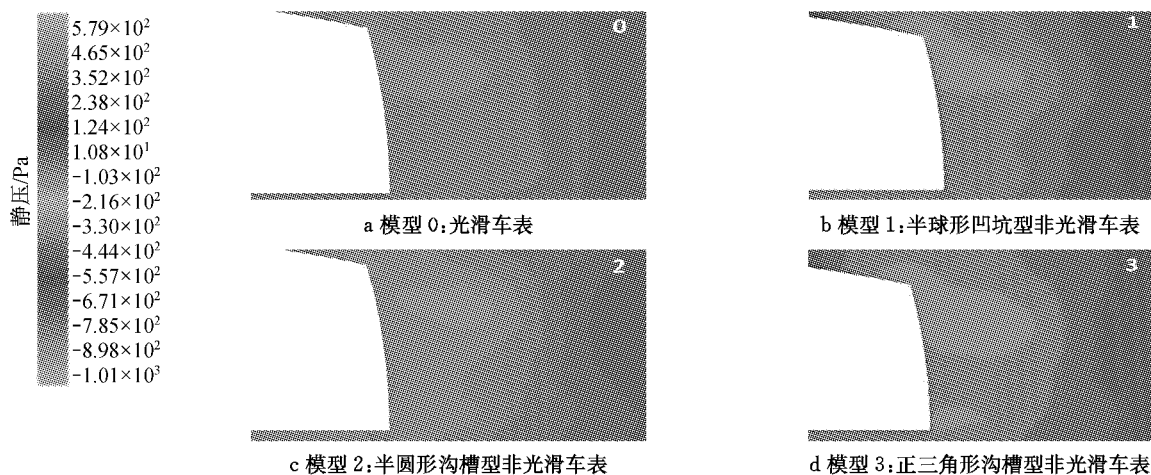


图12 汽车尾部中心对称面压力云图对比

Fig.12 Comparison of pressure contours of the longitudinal symmetrical section for rear quarter

压强明显比光滑车表的要大,因此,车尾负压带来的影响较小,它们的压差阻力也较光滑车表小。

在能够减阻的非光滑车表中,又以2号模型减阻效果更为明显,它的减阻率最大。将2号模型与光滑车表进行中心对称平面压力云图、等压线图、流线图的对比,如图13所示,可以看出,2号模型相对于光滑车表,其低压区面积更小,尾涡区内压强更高。而且,气流流过2号模型的车身后,在汽车尾部形成

的2个涡流的涡流中心离汽车尾部较表面光滑的汽车远,如图13c、图13b所示,而汽车尾涡区离车尾越远,尾涡带来的低压影响就越小,汽车尾部表面的压力就越大,产生的压力差也越小。通过压力分布的计算,见图14,2号车的压差阻力减少了2.33%,这说明2号模型的汽车尾部流线较表面光滑的汽车好,有着更优的汽车尾涡,空气阻力更小。

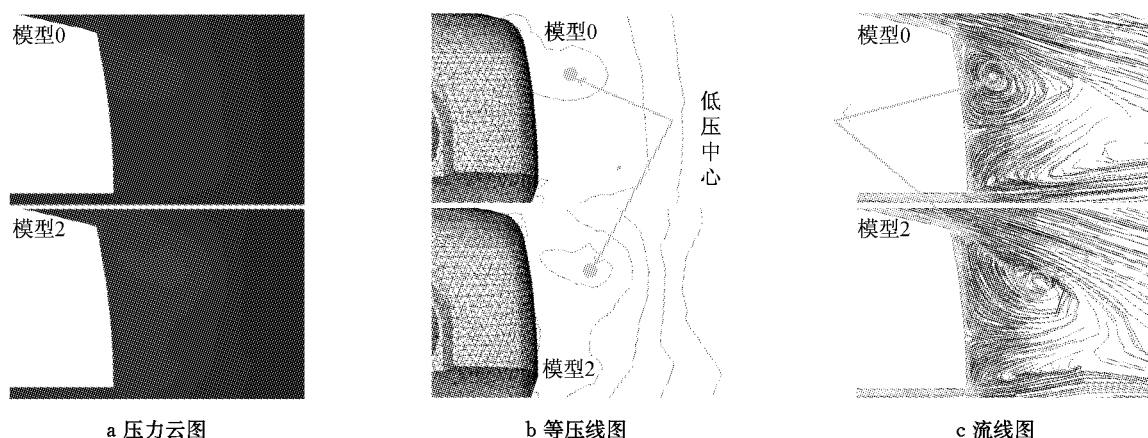


图13 中心对称面对比图

Fig. 13 Comparison of the longitudinal symmetrical sections

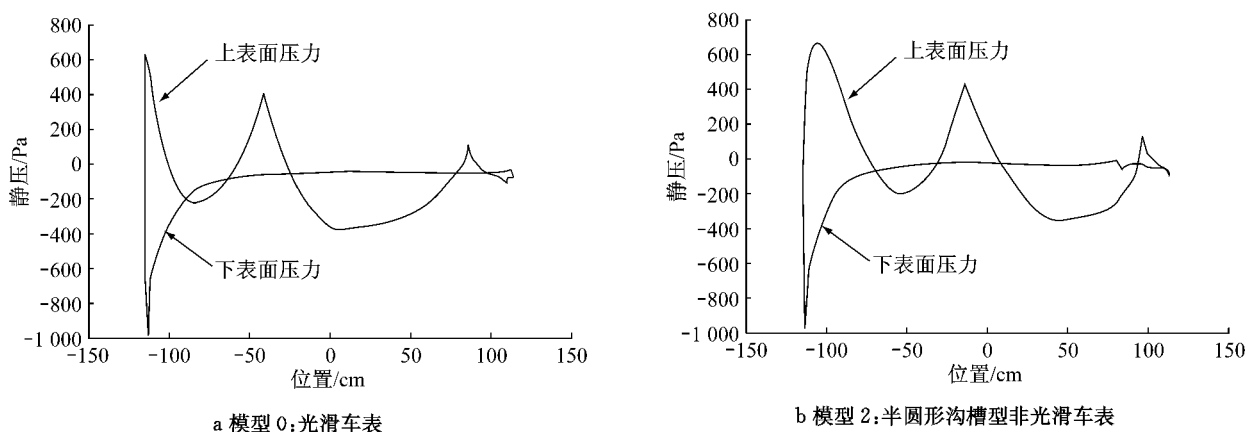


图14 中心对称面压力分布对比图

Fig. 14 Comparison of pressure distributions of the longitudinal symmetrical section

### 2.2.3 诱导阻力

前面在分析汽车尾部的压差阻力时,只考虑了沿来流方向的涡流。实际上,汽车尾部的涡场不但包含了沿来流方向的涡流,还包含着垂直于来流方向的涡流,即车尾纵向涡。车尾纵向涡包含着一定量的动能,会消耗一部分能量,消耗的这部分能量所用来克服的阻力就是诱导阻力。显而易见,诱导阻力的大小与车尾纵向涡的大小是密切相关的:车尾纵向涡越小,诱导阻力也越小,反之越大。车尾纵向涡会产生一个大的低压区,可以通过比较车尾纵向截面内

的压力,来衡量车尾纵向涡的大小。

将减阻效果较好的2号和3号模型与光滑车身进行车尾纵向截面压力云图的比较,纵向截面选取在距离车尾125 cm处,为了便于比较低压区面积的大小,在汽车的中部增加了一个参考截面,如图15所示。

如图16所示,相对于光滑的车身,2号和3号模型的低压区面积更大,截面内的压力更低,气流的速度更快,气流的动能更大。这说明2号和3号模型受到的诱导阻力要大于光滑的车身。



图15 车尾参考面的设定

Fig.15 Schematic diagram of reference plane location

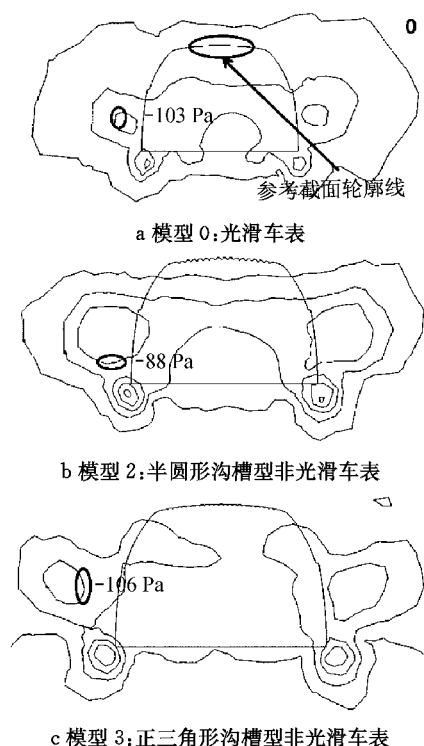


图16 距车尾125 cm的截面压力比较图

Fig.16 Comparison of pressure distributions of the section 125 cm from the rear of the car

模拟试验结果表明,非光滑车表能够减小压差阻力与摩擦阻力.虽然2号和3号模型的诱导阻力相对光滑车身有所增大,但3部分阻力叠加后的总体减阻效果仍比光滑车身好,见表2,说明2号和3号模型诱导阻力的增大量小于压差阻力与摩擦阻力减小量的总和,在总体上仍然表现出减阻的效果.

### 3 结论

(1)非光滑车表具有明显的减阻效果.与表面光

滑的汽车相比,本文研究对象的 $\text{最大减阻率}$ 达到了 $5.45\%$ ,能够起到降低汽车油耗,提高汽车燃油经济性的作用.

(2)非光滑车表能够减小汽车的空气阻力,是因为它能影响汽车的外流场.非光滑车表能够改善汽车的尾部涡场,使尾涡区远离车尾,有效地减小了尾涡区的低压对汽车的影响,降低了汽车的压差阻力.与光滑车表相比,气流流过非光滑车表时受到的摩擦力更小,这能有效降低汽车的摩擦阻力.非光滑车表也会给汽车外流场带来负面影响,它会加剧汽车上、下部气流的对流,增加汽车的诱导阻力,但诱导阻力的增加并不明显.总体而言,非光滑车表能够改善汽车的外流场,达到减阻的效果.

### 参考文献:

- [1] ZHANG Deyuan, LI Yuanyue, HAN Xin, et al. High-precision bio-replication of synthetic drag reduction shark skin[J]. Bionic Engineering, 2011(56):938.
- [2] Lee S J, Jan Y G. Control of flow around a NACA 0012 airfoil with a micro-riblet film[J]. Journal of Fluids and Structures, 2005,20(5):659.
- [3] 刘博,姜鹏,李旭朝,等.鲨鱼盾鳞肋条结构的减阻仿生研究进展[J].材料导报,2008,22(7):14.
- [4] LIU Bo, JIANG Peng, LI Xuzhao, et al. Drag reduction bionic research on riblet surfaces of shark skin[J]. Materials Review, 2008,22(7):14.
- [5] Ricardo Garcia-Mayoral, Javier Jimenez. Drag reduction by riblets [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society, 2011,369:1412.
- [6] Brian Dean, Bharat Bhushan. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society, 2010,368:4775.
- [7] LIU Zhihua, DONG Wencai, XIONG Ying, et al. Analysis on factors and mechanism of drag reduction by grooved surface[J]. Journal of Ship Mechanics, 2007,11(6):820.
- [8] 杜广生.汽车空气动力学[M].北京:中国标准出版社,1998.
- [9] DU Guangsheng. Automotive aerodynamics [M]. Beijing: China Standard Press, 1998.
- [10] 傅立敏,刘锡国.典型汽车尾流结构的研究[J].汽车工程, 1996,18(6):343.
- [11] FU Limin, LIU Xiguo. A study on the wake structure of typical automobile shapes[J]. Automotive Engineering, 1996,18(6): 343.