

# 汽车后视镜气动干涉阻力特性的数值计算研究

袁志群<sup>1</sup>, 谷正气<sup>2,3</sup>, 卢克龙<sup>2</sup>

(1. 厦门理工学院 机械工程系, 福建 厦门 361024;  
2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082; 3. 湖南工业大学, 湖南 株洲 412008)

**摘要:** 以获得汽车后视镜最优气动造型和改善汽车燃油经济性为目的, 应用计算流体力学方法对汽车外部流场进行了数值分析, 详细描述了汽车后视镜的气动干涉阻力特性, 重点分析了后视镜形状和相对车身的横向距离对气动阻力的影响。计算结果表明: 后视镜气动阻力占整车气动阻力的4.08%; 后视镜的形状和位置对气动阻力影响较大, 存在一个最佳的横向距离使得气动阻力系数最大能够下降2.76%。汽车模型的风洞试验验证了该数值计算方法的准确性, 计算分析结果为汽车后视镜的设计与改进提供了参考依据。

**关键词:** 气动阻力; 数值计算; 后视镜; 干涉阻力; 横向距离

中图分类号: U461.1; TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)03-0081-05

## Study on Numerical Simulation of Aerodynamic Interference Drag Properties of Auto Rearview Mirror

Yuan Zhiqun<sup>1</sup>, Gu Zhengqi<sup>2,3</sup>, Lu Kelong<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen Fujian 361024, China;  
2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body of Hunan University, Changsha 410082, China;  
3. Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

**Abstract:** In order to obtain the optimal aerodynamic shape of auto rearview mirror and improve fuel economy, the CFD method is applied to numerical analysis on automobile external flow field. The interference drag properties of auto rearview mirror are described in detail and the influence of the mirror's shape and its horizontal distance to the body on the aerodynamic drag is mainly analyzed. The result shows that the aerodynamic drag of auto rearview mirror for the whole is 4.08% and the influence of its shape and position is great, which at the best horizontal distance the aerodynamic drag coefficient can drop 2.76%. The wind tunnel trial on car model verifies the accuracy of numerical computation method, and the results of the computation analysis provide reference basis for the design and improvement of auto rearview mirror.

**Keywords:** aerodynamic drag; numerical simulation; mirror; interference drag; level distance

## 0 引言

随着石油能源日趋枯竭、石油价格日趋上升以及国家对节能的日趋重视, 降低汽车的燃油消耗变得越

来越重要。因此, 在对高速行驶的汽车进行空气动力学设计时, 除了满足结构设计、美学、人体工程学以及法规要求外, 还应努力降低气动阻力, 以降低汽车燃油消耗。以前国内外主要关注压差阻力, 通过改进

收稿日期: 2009-11-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975083), 国家863计划基金资助项目(2007AA04Z122)

通信作者: 袁志群(1983-), 男, 湖南常德人, 厦门理工学院教师, 硕士, 主要研究方向为汽车空气动力学与汽车安全,

E-mail: yzqhnu@163.com

车身局部造型来改善近车体的气流流动状况<sup>[1-2]</sup>, 随着研究的深入, 对汽车局部细节的修改已经日趋成熟, 想要获得更大幅度的降低压差阻力已经变得相当困难。研究表明: 车身附件的干涉阻力占汽车总气动阻力的比例非常大, 而后视镜处流场非常复杂, 是影响车身附件干涉阻力的主要组成部分<sup>[3-6]</sup>。因此对后视镜进行合理的设计来降低整车气动阻力、改善燃油经济性的方案是合理可行的。

伴随着计算机的发展以及计算技术的进步, 数值仿真技术取得了迅猛发展, 作为空气动力学研究的辅助手段, 数值仿真结果不仅不受风洞实验存在的洞壁干扰、堵塞效应、雷诺数效应等的限制, 而且避免了风洞实验的许多瓶颈。将数值计算结果与风洞试验结果进行对比, 可以对风洞试验的结论进行补充校正。本文主要对汽车后视镜外部流场进行了数值计算, 并重点研究了后视镜的形状和位置对整车气动阻力特性的影响。数值计算得到的后视镜气动特性数据对于改善后视镜流场、降低整车气动阻力提供了理论依据, 所以对汽车后视镜气动干涉阻力特性的研究是一次很有意义的尝试。

## 1 数学模型建立

汽车车速一般远低于声速, 即马赫数较小, 因此, 汽车空气动力学属于低速空气动力学, 故汽车周围流场可以看作是三维不可压缩的粘性等温流场<sup>[1]</sup>, 由于此类流场外形复杂, 容易引起分离, 所以应按湍流处理。研究表明, 以 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型计算气动参数较理想<sup>[7]</sup>, 被广泛应用于汽车绕流问题中, 本文即选用该湍流模型。

湍流计算的基本控制方程为三维不可压缩雷诺时均 Navier-Stokes 方程, 简称 RANS 方程, 其控制方程如下:

$$\text{连续方程 } \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

运动方程

$$\frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad (2)$$

方程 (1) 和 (2) 中:

矢量  $u_i, u_j$  是平均速度分量;

$x_i, x_j$  为坐标分量;

$p$  是流体微元体上的压力;

$\mu_{\text{eff}}$  为湍流有效粘性系数, 且

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

其中  $\mu$  为动力粘度,  $\mu_t$  为湍动粘度。

Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型是相对较新的两方程  $k-\varepsilon$  方程, 该方程具有最新的湍流控制方程和针对耗散率的传递方程, 适用于雷诺应力下的确定的数学约束, 以及确定的湍流流态, 而这些是  $k-\varepsilon$  湍流模型和 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型不能实现的, 它关于  $k$  和  $\varepsilon$  的输运方程如下:

湍流动能方程为

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

湍动耗散率方程为

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

方程 (3) 和 (4) 中:

$\rho$  为流体密度;

$k$  为湍流动能;

$\varepsilon$  为湍流动能耗散率;

$G_k$  是由于平均速度梯度引起的湍流动能  $k$  的产生项, 且

$$G_k = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j};$$

$$\sigma_k = 1; \quad \sigma_\varepsilon = 1.2; \quad C_2 = 1.9;$$

$$C_1 = \max \left( 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right),$$

$$\eta = \left( 2 E_{\bar{u}_i \bar{u}_i} E_{\bar{u}_j \bar{u}_j} \right)^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}, \quad E_{\bar{u}_i \bar{u}_i} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

这种湍流模型可用于各种不同类型的流动计算, 包剪切流、边界层流动以及带有分离的流动, 比较适合汽车外流场的数值仿真计算。

## 2 几何模型建立

几何模型在 UG 环境下按 1:1 建立, 由于主要研究后视镜对整车气动性能的影响, 所以对车身进行了简化, 忽略了门把手、雨刮器、雨水槽等, 图 1 为计算用几何模型。

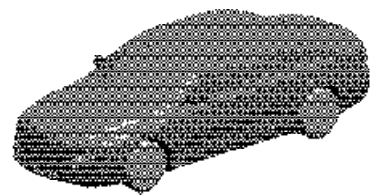


图 1 汽车几何模型

Fig. 1 Geometric model of car

### 3 计算模型建立

#### 3.1 网格划分及边界条件设置

网格划分及边界条件设置如下: 计算域取围绕车身的长方体, 汽车模型前部留3倍车长, 模型上部留5倍车高, 模型后部留7倍车长, 模型两侧均留5倍车宽, 整个计算区域与实际空气流动区域具有一致性。采用OCTREE方法在整个计算流域生成非结构化空间网格, 在汽车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。通过采用不同的网格数目验证了网格的无关性<sup>[8]</sup>, 测试表明所划分的网格单元数足以消除网格密度的影响。

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, 而且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。汽车在实际行驶的过程中, 地面是不存在附面层的, 在此采用移动壁面边界条件, 以便消除由于数值仿真而产生的地面边界层。研究表明<sup>[9]</sup>, 这种方法是切实可行的。

计算域边界条件设置如下:

计算域入口速度  $u=30$  m/s,  $v=0$ ,  $w=0$  ( $u, v, w$  表示3个坐标方向的速度分量);

计算域出口压力  $p=101\ 325$  Pa;

计算域地板采用移动壁面边界, 移动速度  $u=30$  m/s,  $v=0$ ,  $w=0$ ;

计算域左右及上表面采用滑移壁面边界;

汽车车身表面采用无滑移壁面边界。

#### 3.2 计算方案

为了探讨汽车后视镜的形状以及位置对汽车整车气动特性的影响, 首先对图1中的原始方案进行计算, 得出整车的气动特性数据, 分析汽车后视镜与车身表面的气动特性关系, 根据计算数据提出以下2种改进方案。

**方案1** 本方案中保证镜面横向宽度等其它数据不变, 只去除后视镜与车身之间的台阶, 改变后视镜形状如图2所示。

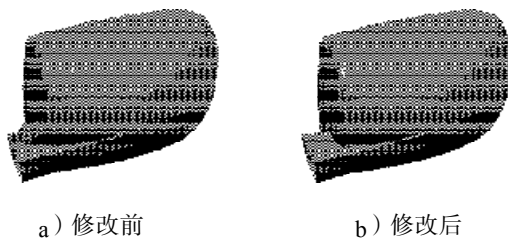


图2 后视镜形状修改图

Fig. 2 Modification shape of the rearview mirror

**方案2** 本方案中保证后视镜镜面的横向宽度  $l$  不变, 也不去除后视镜与车身之间的台阶, 只改变后视镜与车身之间的横向距离  $d$ , 横向宽度  $l$  和横向距离  $d$  如图3所示。

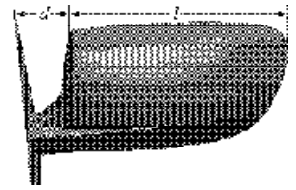


图3  $d$  改变示意图

Fig. 3 Schematic diagram of changed  $d$

### 4 计算结果与分析

#### 4.1 计算与实验结果

对图1所示汽车模型的计算, 结合风洞试验结果, 得出在有无后视镜情况下的气动阻力系数见表1。

表1 气动阻力系数

Table1 Aerodynamic drag coefficients

数值计算值		风洞试验值	
无后视镜	有后视镜	无后视镜	有后视镜
0.258 6	0.269 6	0.270 5	0.280 1

数值计算得出后视镜对整车气动阻力系数的贡献量为0.011 0, 占整车的4.08%; 风洞试验得出后视镜对整车气动阻力系数贡献为0.009 6, 占整车的3.43%。两者结果比较接近, 验证了数值计算的准确性。

图4为车身表面的压力云图, 后视镜迎风面有一明显的正压区域。由于后视镜后部存在大量的分离区, 造成侧窗以及后视镜根部压力梯度比较大, 因而涡量损失大, 气动阻力就大。



图4 汽车车身表面压力分布

Fig. 4 Surface pressure distributed on car

图5为后视镜周围三维流场分布, 从图可以清楚地看到后视镜后部存在大量的回流区, 形成了2个明显的分离涡系, 该漩涡不会立刻消失耗散, 而是沿着车身表面向后运动, 最后汇入汽车尾部的纵向涡系, 相互作用直至消失。后视镜尾涡同样会增加汽车尾部的涡量损耗。

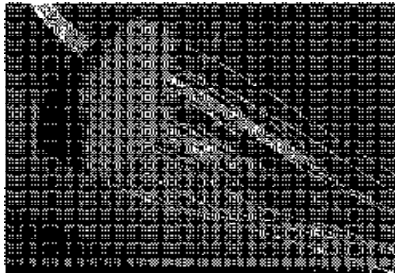


图5 后视镜三维流场分布

Fig. 5 3D flow field distribution of rearview mirror

图6为后视镜处某截面的二维流场与速度场分布,从图可了解后视镜与侧窗间的相互作用关系。由A柱及远方来的气流在后视镜根部减速,在其最外端因拐角有明显加速,在此分离形成一大尺度涡,在其根部因该大尺度涡诱发而形成一次生涡。大尺度涡与次生涡的形成与发展是后视镜气动噪声产生的主要原因。



图6 后视镜截面二维流场与速度场分布

Fig. 6 2D flow field and velocity field distribution of rearview mirror section

通过以上分析可知后视镜使整车气动阻力增加主要有2方面原因:一方面后视镜突出于车身之外,增加了整车的迎风面积,形成了压差阻力;另一方面由于其尾部出现了明显的气流分离,使侧窗附近以及车尾流场更为紊乱,增加了整车的涡量损耗。而这2方面的影响是相互制约的。

#### 4.2 结果分析

方案1通过去除后视镜处的台阶,一方面减小了后视镜的迎风面积,使得气动阻力减小;另一方面去除台阶可以减少后视镜尾部涡系,使得后视镜压差阻力减小的同时,也能适当地减小车尾的能量损失,降低车身的压差阻力,相对于原车型气动阻力系数减小2.55%,图7为改进前后后视镜压力云图。

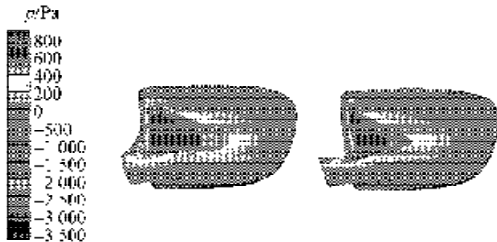


图7 方案1后视镜压力云图对比图

Fig. 7 The contrast pressure image of rearview mirror of scheme 1

方案2通过改变后视镜与车身的横向距离 $d$ (共计8组数据),得出气动阻力系数曲线变化如图8所示。

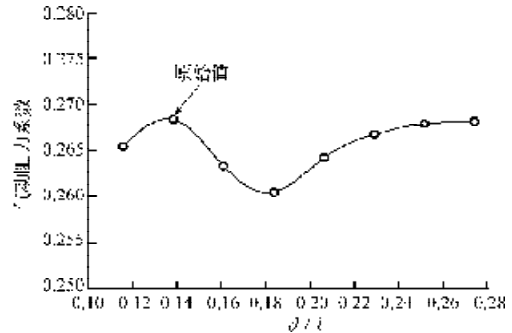
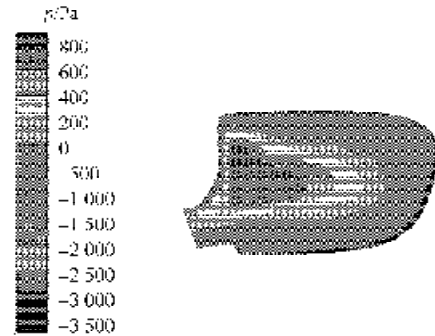


图8 气动阻力系数变化曲线

Fig. 8 The variation curve of aerodynamic drag coefficient

当 $d/l=0.1837$ 时,气动阻力系数减小量达到最大的2.76%,图9为该位置时后视镜的压力云图。

图9 方案2横向距离 $d/l=0.1837$ 时后视镜压力云图Fig. 9 The pressure image of rearview mirror of scheme 2 ( $d/l=0.1837$ )

当 $d/l < 0.1383$ 时,随着横向间距 $d$ 减小,一方面减小了后视镜的迎风面积使得气动阻力减小;另一方面由于横向间距的减小,气流在该处速度加快,后视镜尾部分离涡更严重,能量损耗增加,后视镜以及车尾尾部负压增大。但前者占优,两者综合起来的效果是总气动阻力减小。

当 $d/l > 0.1383$ 时,随着横向间距 $d$ 增大,一方面增大了后视镜迎风面积使得气动阻力增大;另一方面由于横向间距的减小,气流在该处速度减慢,后视镜与车身表面的干涉较小,分离涡系减少,能量损耗降低。当 $0.1383 < d/l < 0.1837$ 时,后者占优,两者综合起来的效果是总气动阻力减小;当 $d/l > 0.1837$ 时,随着横向间距 $d$ 的进一步增加,由于后视镜迎风面积增加导致的附加气动阻力越来越大,所以整车的气动阻力就越来越大。

## 5 结论

通过对汽车外流场以及后视镜气动干涉阻力特性的计算分析可知,本文所建立的计算模型以及所采用

的计算方法比较成功, 计算精度满足工程的需要。数值计算结果对于指导汽车后视镜的设计与改进提供了参考数据, 有一定的工程应用价值, 计算结果表明:

1) 汽车后视镜是车身附件干涉阻力的主要组成部分, 占整车气动阻力系数的4.08%;

2) 在后视镜安装位置一定的情况下, 后视镜的形状和相对车身的横向距离是影响气动干涉阻力特性的主要参数;

3) 后视镜形成的压差阻力以及由其引起的涡量损耗是气动阻力增加的主要原因;

4) 尽管后视镜造型各异, 但都存在气动干涉阻力, 所以该分析方法是通用的。对于不同的车型, 后视镜产生的尾涡大小和位置各异, 对此还要进行具体的分析。

#### 参考文献:

- [1] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
Gu Zhengqi. Automobile Aerodynamics[M]. Beijing: China Communications press, 2005.
- [2] 赛伯-里尔斯基. 汽车空气动力学[M]. 杨尊正, 邹仲贤, 译. 北京: 人民交通出版社, 1984.  
Scibor Rylski. Automobile Aerodynamics[M]. Yang Zunzheng, Zou Zhongxian, Translated. Beijing: China Communications press, 1984.
- [3] Cogotti Antonello, Gregorio Fabrizio De. Presentation of Flow Field Investigation by PIV on A Full-Scale Car in the Pininfarina Wind Tunnel[EB/OL]. [2000-03-30]. <http://www.sae.org/technical/papers/2000-01-0870>.
- [4] Howell Jeff, Windsor Steve, Good Geoff Le. A Novel Test Rig for the Aerodynamic Development of Door Mirror [EB/OL]. [2006-04-30]. <http://www.sae.org/technical/papers/2006-01-0340>.
- [5] Leuschen Jason, Cooper Kevin R. Full-Scale Wind Tunnel Tests of Production and Prototype, Second-Generation Aerodynamic Drag-Reducing Devices for Tractor-Trailers [EB/OL]. [2006-10-30]. <http://www.sae.org/technical/papers/2006-01-3456>.
- [6] Duncan Bradley D, Senthoooran Sivapalan, Hendriana Dena, et al. Multi-Disciplinary Aerodynamics Analysis for Vehicles: Application of External Flow Simulations to Aerodynamics, Aeroacoustics and Thermal Management of A Pickup Truck [EB/OL]. [2007-04-30]. <http://www.sae.org/technical/papers/2007-01-0100>.
- [7] 陈小东, 詹樟松. 长安轿车空气动力学性能的CFD研究[J]. 汽车工程, 2007, 29(10): 873-875.  
Chen Xiaodong, Zhan Zhangsong. A Study on the Aerodynamic Performance of A Chang'an Car Using CFD Technology[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(10): 873-875.
- [8] 涂尚荣, 张扬军, 谢今明, 等. 汽车外流场仿真的复杂网格系统生成[J]. 汽车工程, 2002, 24(5): 408-411.  
Tu Shangrong, Zhang Yangjun, Xie Jinming, et al. Grid Generation for CFD Simulation of Vehicle Aerodynamics[J]. Automotive Engineering, 2002, 24(5): 408-411.
- [9] 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.
- [10] 谷正气, 龚旭, 贾新建, 等. 轿车尾随集装箱车外流场计算仿真分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(1): 30-34.  
Gu Zhengqi, Gong Xu, Jia Xinjian, et al. Numerical Simulation Analysis of the External Flow Field of Automotive Trailing A Container Truck[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(1): 30-34.

(责任编辑: 邓光辉)