

前阻流板对汽车气动性能影响的数值研究

Numerical Research on Influence of the Front Spoiler Lips on Automotive Aerodynamic Performance

刘学龙 蔡晓林 苏成谦

(天津一汽夏利汽车股份有限公司产品开发中心 天津 300190)

摘要: 本文针对某轿车模型,从整车减阻的目标出发,采用空气动力学数值模拟的方法,利用 STAR-CCM+软件,研究了汽车前部阻流板对整车气动阻力的影响。结果表明,通过在前车体下部添加阻流板,整车的气流状态得到改善,具有减小整车气动阻力、提高冷却模块的冷却性能等重要作用。阻流板的高度,位置是影响其减阻效果的关键因素。本研究通过添加前阻流板,封闭前格栅等措施,达到了整车预期的减阻目标。

关键词: 汽车、CFD、空气动力学、阻流板、STAR-CCM+

Abstract: A CFD method using STAR-CCM+ is used to do research on influence of the front spoiler lips on automotive aerodynamics performance. It shows that the overall flow structure around the vehicle changes when a front spoiler lips is fixed at front under body. And at the same time, the amount of air flow passes through the cooling module, including condenser and radiator, increases. The height of the front spoiler lips is an important parameter. The Cd value gets smaller as the height of the front spoiler lips increases. The target of decreasing Cd value is achieved by adding a front spoiler lips and closing part of the front grille.

Key words: automobile; CFD; aerodynamics; spoiler lips; STAR-CCM+

1 前言

欧美及日本学者通过大量的试验和数值模拟研究发现^[1-2],在汽车上安装气动附加装置可有效减少汽车的气动阻力,达到节能的目的。如文献[5]中用光滑底板、光滑汽车底面研究气动阻力,使空气阻力系数减少 0.045,并指出通过光滑底板及加前阻风板和轮轴、凹窝等局部细化,气动阻力系数可下降 0.07。

本文用数值模拟的方法研究在汽车前部下方添加阻流板对气动特性的影响,以及阻流板高度的改变对气动性能影响的规律,为该类车型气动附件的优化设计与气动减阻提供参考。

2 整车 CFD 几何模型建立

本文在整车详细模型（包含车身外表面、发动机舱内部、车体底部和底盘等全部细节）的基础上，应用流体软件 STAR-CCM+ 对整车进行 CFD 建模，生成体单元总数约为 2000 万。为减小风洞阻塞效应对计算结果的影响，计算中保证风洞尺寸足够大，如图 1 所示，其中，汽车的尺寸为：长*宽*高= $L*W*H$

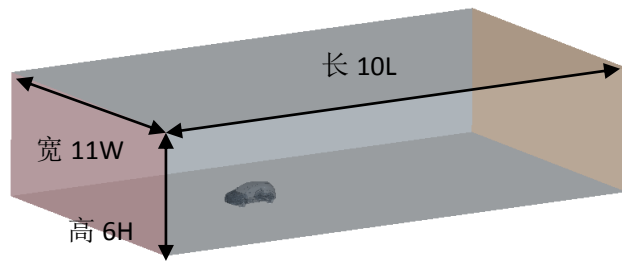


图 1 风洞尺寸

3 物理模型

(1) 采用基于流体质点微元的拉格朗日法，并使用有限体积法离散控制方程，车体附近为非结构四面体网格，物理量位于网格节点上，控制体取围绕网格节点的“虚拟”体积单元^[4]。

(2) 使用三维不可压缩雷诺平均 N-S（纳维-斯托克斯）控制方程：即当物体在水和空气等流体中运动时，在物体上产生阻力，其大小在低速时（ $Re \ll 1$ 与速度的一次方成正比，即斯托克斯法则成立；高速时（ $Re \gg 1000$ ），与速度的二次方成正比，即纳维尔阻力法则成立^[5]。

(3) 采用基于 $k-\omega$ 模型的 SST(剪切应力输运) 湍流模型来封闭纳维-斯托克斯方程。该模型综合了 $k-\omega$ 和 $k-\epsilon$ 湍流模型在边界层内外计算的优点，能够准确及时预测分离的特性。能适应压力梯度变化的各种物理现象，并可应用粘性内层，通过壁函数的应用，精确地模拟边界层的现象^[6]。

(4) 实际气体有粘性，这是汽车气动阻力产生的根源。为了模拟气体粘性对整车气动阻力的影响，在车体近壁面添加了多层边界层单元，用于模拟因气体粘性产生的剪切应力对整车气动阻力的影响。

(5) 轿车周围的流体是空气，当风速小于三分之一声速时，也就是在风速小于 408km/h 时，可以认为是不可压缩气体^[7]。本计算中，汽车速度为 100km/h，远低于声速，故计算中假设气体是不可压缩的。

(6) 为捕捉到更小的涡流扰动，提高计算精度，对关键区域（主要是流动分离区域）单元进行加密处理。

4. 公式、定义

$$\text{气动阻力系数: } C_D = \frac{\text{阻力}}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

公式 (1-1)

D—阻力

ρ —空气密度

V_{∞} —风速（车速）

A—迎面投影面积

$\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2 A$
—动压

无量纲压力系数： $C_p = \text{相对静压} / \text{动压} = \frac{P - P_{\infty}}{\frac{1}{2}\rho V^2} = 1 - \left(\frac{V^2}{V_{\infty}^2}\right)$ 公式（1-2）

P—气流中汽车表面的压力

P_{∞} —无穷远处参考点压力，基准静压

V —当地气流流速

5 初始、边界条件设定

表 1 初始、边界条件设定

流动边界条件	车速	100 km/h
	车轮转动	考虑
	地面运动	考虑
	风扇转动	不考虑
	换热器（散热器、冷凝器）	多孔介质模型
空气物性	密度	1.18415 kg/m ³
	黏度	1.85508 Pa•s

6 原模型计算结果

6.1 物理模型标定

为了验证本计算中所选物理模型的准确性，本文在整车简化模型（造型面）的基础上，通过风洞试验实测 Cd 值对计算工况下的仿真模型进行标定，如表 2 所示。结果表明，仿真值与试验值的偏差在 1%以内，说明本计算中所选的物理模型能够较准确的反映整车气动阻力特性。

表 2 整车气动阻力系数仿真值与试验值对比

试验值	仿真值	误差
0.359	0.362	0.8%

6.2 前阻流板对整车气动性能的影响

F.K.Schenkel 的试验表明，当强气流吹袭到车前部的阻流板上时，在其迎风面上将产生正压力，

而在尾流部位将出现涡流，形成负压力。阻力作用于阻流板本身，但在大多数情况下，作用在阻流板上的正负压力的绝对值越大，则阻流板对减小阻力愈有效。换言之，虽然阻流板构成一部分新的阻力，但它仍可减小全车总的阻力。这是由于安装阻流板使车辆周围的气流得到改善所降低的全车总阻力，远超过阻流板本身所增加的阻力。一个有效的阻流板，应能使整车阻力的减小大于其本身所产生的阻力。即^[8]：

$$D_a < D_0 - D \tag{1-3}$$

式中： D_a ——阻流板本身的阻力
 D_0 ——无阻流板时整车的阻力
 D ——有阻流板时整车的阻力

本文在原整车详细模型的基础上，保证车身其他结构及尺寸均不变，在车体前部下方增加阻流板，其中阻流板的高度用 H 表示，分析其对整车气动性能的影响，如图 2 所示。

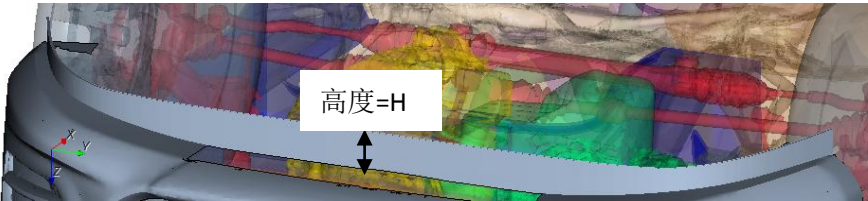


图 2 前阻流板结构尺寸

通过计算发现，当在车体前部下方添加一个高度 $H=68\text{mm}$ 的阻流板时，整车风阻系数下降了 3.8%。可见，增加前部阻流板满足公式(1-3)，即整车阻力的减小大于阻流板本身所产生的阻力，整车阻力系数下降。

(1) 车体底部气体流动状态改变

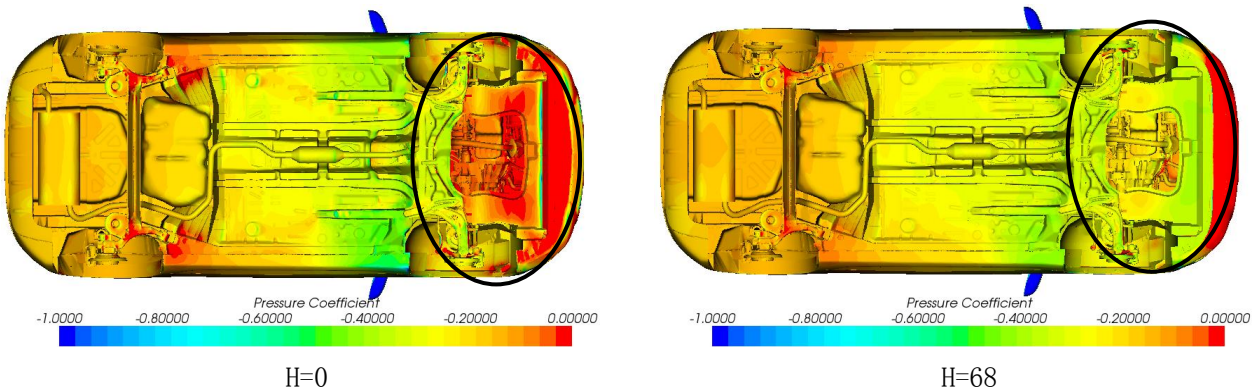


图 3 车体底部压力系数云图

增加前阻流板后，一方面使得车体底部的气流通过量明显减少，流速降低，气体对前机舱底部凸起部件的冲击减弱，从而使得底部阻力明显降低；另一方面，前阻流板使得车体底部高速气流在车体前部的流动分离提前，高速气流远离车身底部，这也使得底部阻力有所降低，如图 3 所示。

(2) 车体周围的气流分离减弱

如图 4 所示, 添加前阻流板后, 车体周围, 尤其是前轮罩后部的气流速度升高, 气流分离减弱, 改善了车体周围的气流状态。

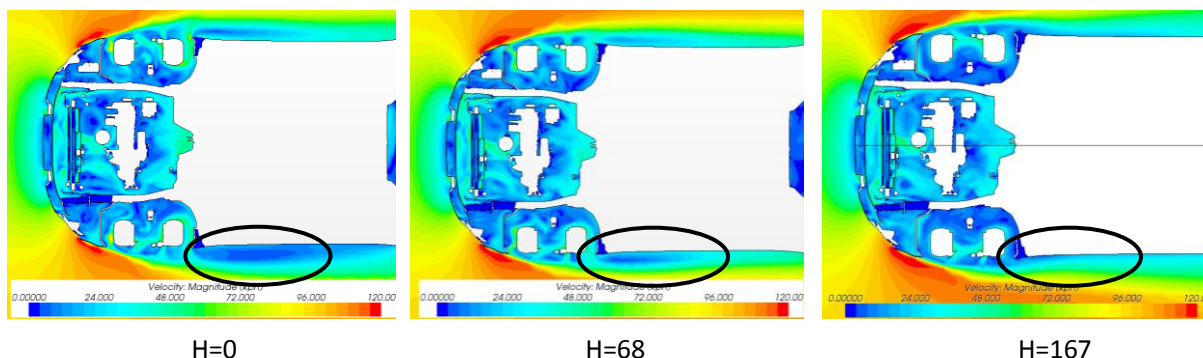


图 4 车体周围气体速度云图

(3) 车体尾部压力增大

前面提到, 增加前阻流板后, 车体底部的气流通过量减少, 使得到达车身尾部的气流整体也减少了, 气流的平均速度降低, 静压增加, 整体上减小了汽车前后的压差阻力, 从而使气动阻力系数降低^[9], 如图 5 所示。

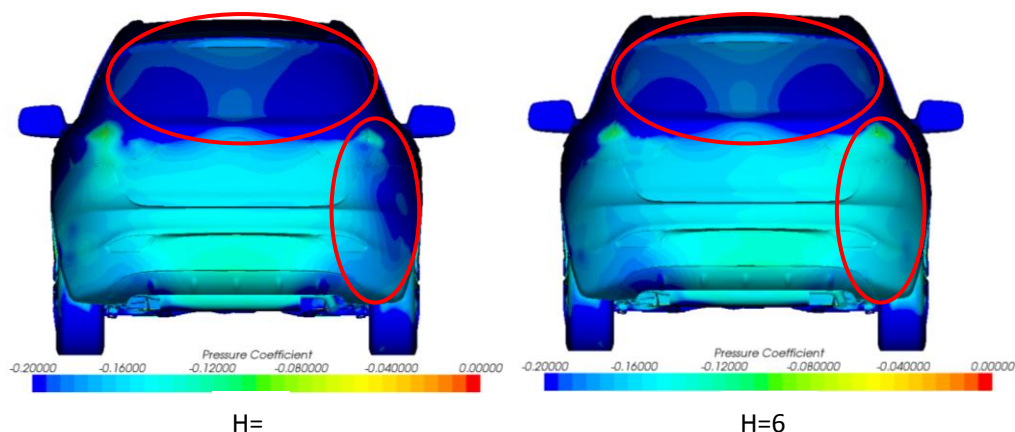


图 5 车身背部压力系数云

结果表明, 阻流板对底部气流具有整流作用, 能改善整车的气流状态。在车前端周围很容易产生涡流, 安装阻流板可以抑制涡流的产生, 并使汽车周围的气流状态得到改善, 有助于减小阻力和升力。

6.3 前阻流板对汽车冷却性能的影响

对本车而言, 增加前部阻流板不仅使得整车 C_d 值下降, 同时也使得冷却模块进出口的压差增大, 进而增加了冷却模块的通风量, 对于改善整车冷却性能, 提高换热效率具有明显的效果, 如图 8 所示。

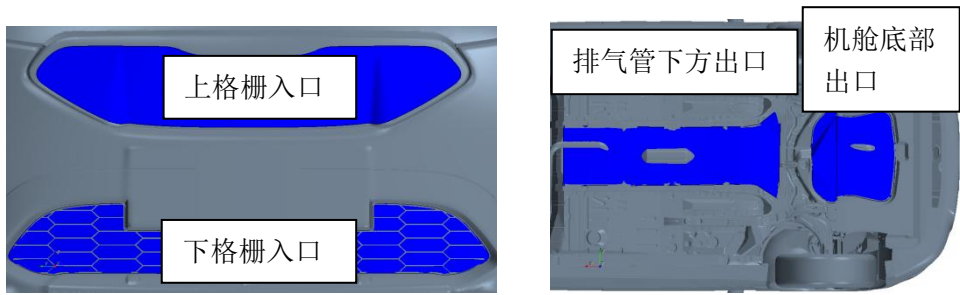


图 6 冷却模块进出口示意图

由图 7 可以看出，增加前阻流板后，冷却模块进出口的静压力均有所降低，但出口压力尤其是机舱底部的出口压力比上下格栅入口压力下降的幅度更大，使得冷却模块最终的前后压差增大，通风量增加。

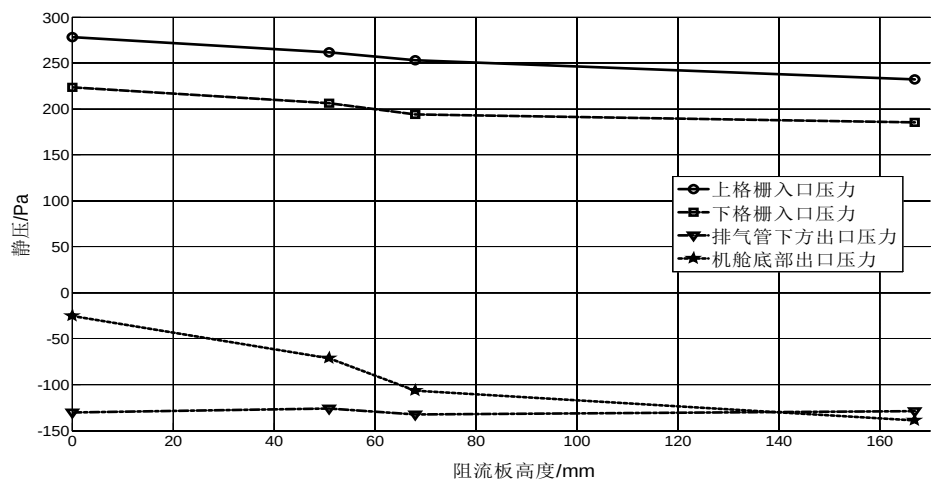


图 7 冷却模块进出口压

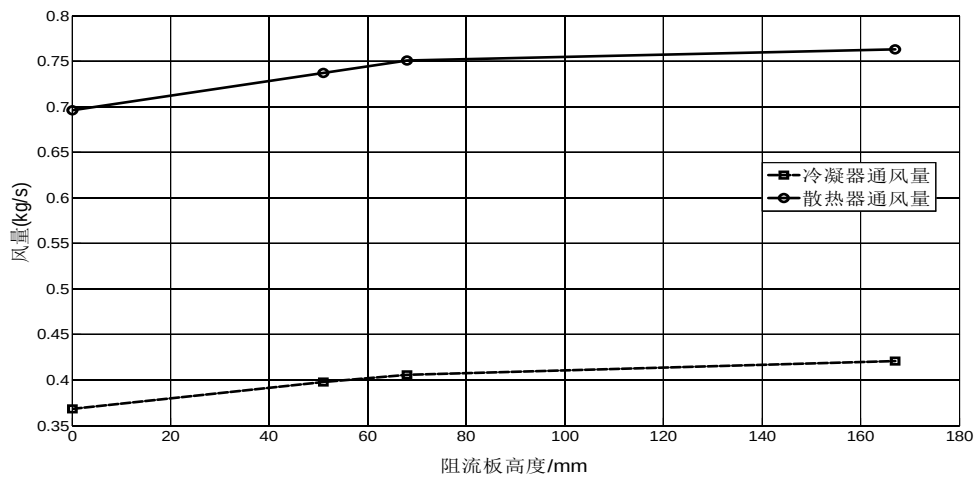


图 8 换热器（冷凝器、散热器通风量）

6.4 前阻流板高度对整车气动性能的影响

前面提到，添加前阻流板有助于降低整车气动阻力、增加通过换热器芯体的冷却风量等，那么，是不是添加任意高度的阻流板，均能减小整车气动阻力系数呢？下面我们将重点研究整车气动阻力

随前阻流板高度变化的规律。

在保证车身其他结构及尺寸均不变,仅改变前阻流板高度,随着前阻流板高度的增加,阻流板离地间隙减小,车体底部气流流量降低。整车气动阻力系数与前部阻流板距离地面高度成正比,即其高度越高,离地间隙越小,Cd 值也越小,如图 9 所示。

整车气动阻力系数随前阻流板高度的增加而减小,原因在于:

(1) 前机舱底部阻力随着前阻流板高度的增加而减小,如图 10 所示。

随着前阻流板高度的增加,车体底部气流流量减小,流速降低,从而减小了对前机舱底部凸起部位的冲击作用,阻力下降。

(2) 前轮罩处的阻力随着前阻流板高度的增加而减小,如图 11 所示。

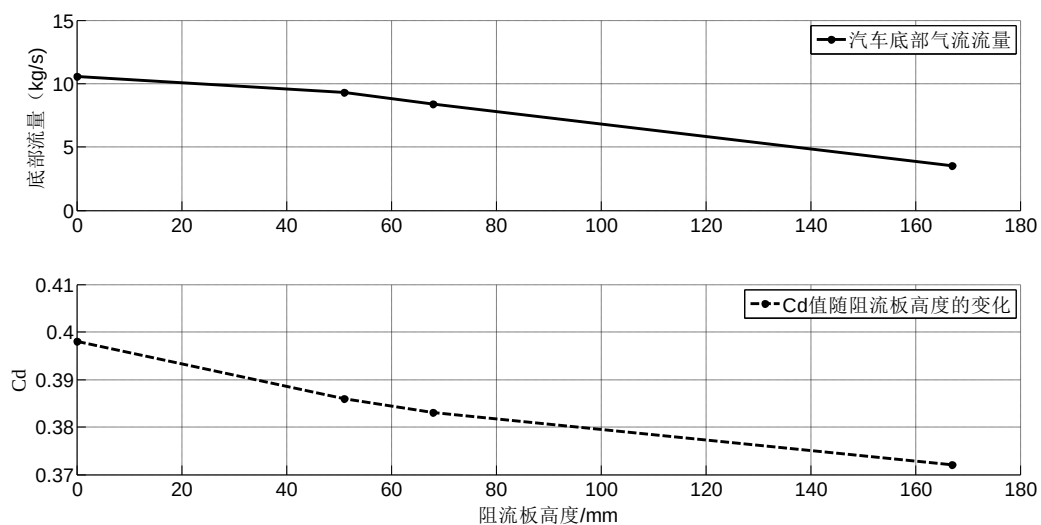


图 9 车体底部气流流量、Cd 值随阻流板高度的变化

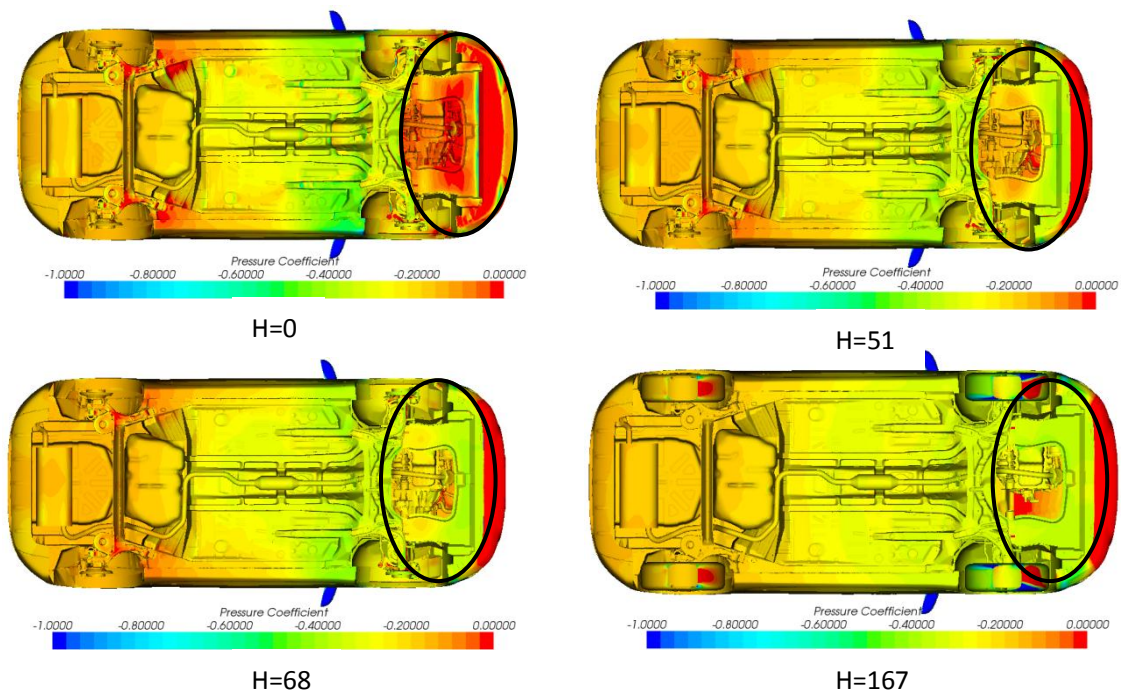


图 10 车体底部压力系数云图

这与前机舱底部阻力降低的原因相同，随着前阻流板高度的增加，车体底部气流流量减小，从底部流向前轮罩的气流也相应减小，使得气流对前轮罩的冲击作用减弱，阻力下降。

(3) 车体周围的气流分离随阻流板高度的增加而减弱。如图 4 所示。

(4) 车体背部压力增大，车身后后压差降低，阻力减小，如图 12 所示。

前阻流板高度增加后，车体底部的气流通过量进一步减少，到达车身背部的气流也减少了，气流的平均速度降低，静压增加，汽车前后的压差阻力减小，从而气动阻力系数降低。

添加前阻流板后，随着前部阻流板高度增加，流向车体底部及前轮罩的气流量减小，使得机舱底部，前轮罩、以及车体背部的阻力均减小，超过阻流板本身迎风面积增大所增加的阻力，整车气动阻力系数降低。因此，设计合适的前阻流板，在不影响整车通过性（如接近角）的基础上，可获得更好的整车气动性能。

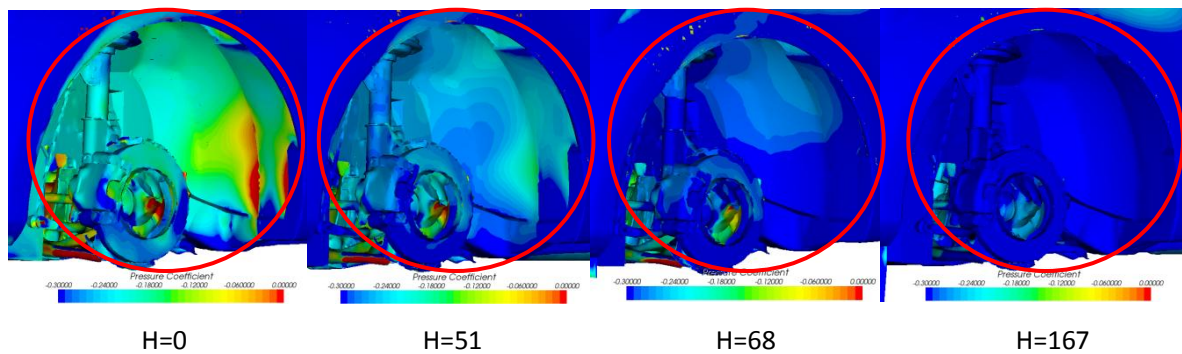


图 11 前轮罩区域压力系数云图

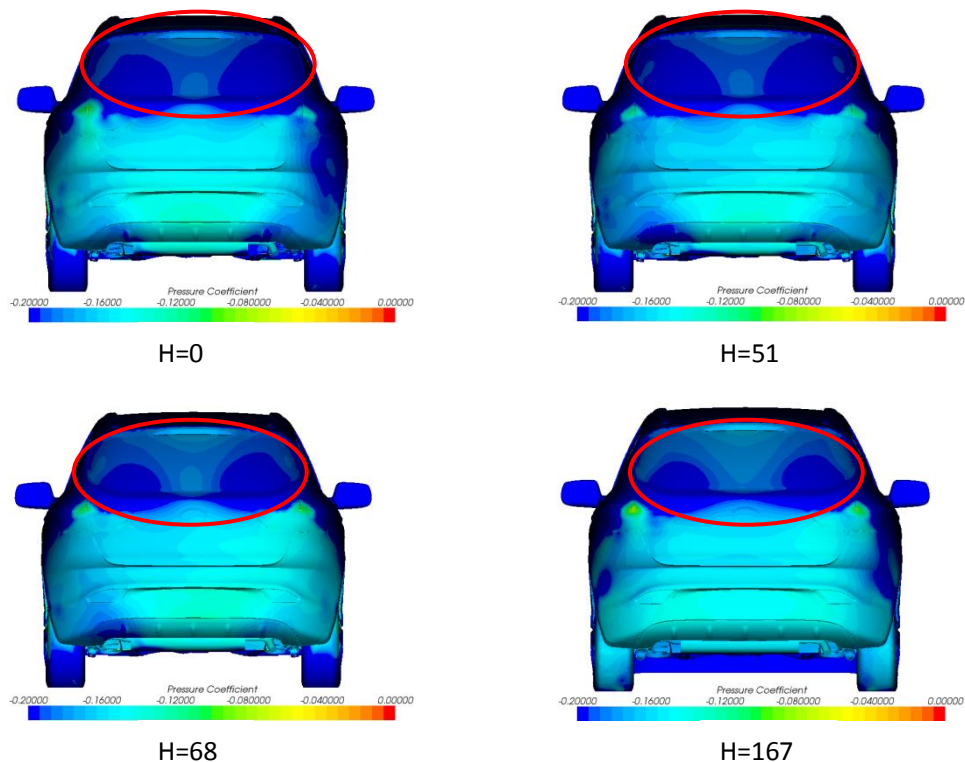


图 12 车体背部压力系数云图

7 小结

由于地面效应和车轮旋转效应的影响,汽车底部的复杂流动对于整车外部流场结构和气动性能具有很大的影响。通过在车体前部下面增加前阻流板,可以有效的控制和改善底部气流,降低气动阻力,原因在于:

(1) 流过底部气体流量减小,高速气流远离底部,使得气流对底部凸出部件的冲击减弱,同时,前轮罩区域的阻力也明显降低。

(2) 车体周围的流动分离减弱。

(3) 到达车身尾部的气流整体减少,使得气流的平均速度降低,静压增加,整体上减小了汽车前后的压差阻力,从而使气动阻力系数降低。

同时,添加前阻流板,使得冷却模块进出口的压差增大,增加了冷却模块的冷却风量,有助于提高冷却系统的冷却性能。

前阻流板的高度是影响其改善气动性能效果的重要因素。前阻流板高度的改变,会影响车体底部气流的流通面积,进而使得车体底部通过气流的流量、流速和流场分布发生变化,影响整车的气动特性。

8 参考文献

- [1] 吴志刚,魏琪,加藤征三等. 利用导流装置降低大后壁车辆气动阻力的实验研究[J]. 空气动力学学报 2003, 21(4):391 - 398
- [2] 刘畅,王靖宇,桑涛等. 大型载货汽车驾驶室与货厢间隙对气动力特性的影响[J]. 吉林大学学报:工学版 2007, 37(2):280 - 285
- [3] Hucho Wolf-Heinrich. Aerodynamics of Road Vehicles[M], 1987
- [4] 罗建曦,张扬军. 《汽车底部复杂流场数值模拟》.汽车工程, 2003
- [5] 罗惕乾. 《流体力学》. 机械工业出版社, 2007
- [6] Menter F R. Multiscale Model for Turbulent Flows. In 24th Fluid Dynamics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics , 1993
- [7] 扶原放. 《轿车外流场的数值模拟》. 吉林大学, 2002
- [8] 武藤真理. 《汽车空气动力学》. 吉林科学技术出版社, 1989
- [9] 龙钢. 《某车型车身造型设计及空气动力学仿真研究》[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010