

某轿车气动性能试验与仿真分析研究

Aerodynamics Test and CFD Research of Sedan

刘鹏 昃强

(长城汽车股份有限公司技术研究院 CAE 部)

摘要: 通过试验研究了车辆在侧风、机舱风阻、地面效应、轮胎转动等影响情况下的空气动力学性能,测量了各工况下的车身表面压力系数,并与仿真做了相关性分析,总结了误差的根源。

关键词: 空气动力学 风阻系数 表面压力系数 STAR-CCM+

Abstract: Considering the influence to aerodynamic performance of side wind engine-hood resistance ground effect tire turning etc. Measured the pressure coefficient of 16 cases and correlated with CFD. Summarized the source of errors

Keywords: aerodynamics, drag coefficient, pressure coefficient, STAR-CCM+

汽车低速行驶时,只考虑汽车所受地面阻力就足够了,汽车所受的气动力常常可以忽略。随着汽车的行驶速度不断提高,研究气动力对汽车性能的影响具有重要的意义^[1]。其中中网的开口大小和角度,散热器、冷凝器及机舱内部件对气流的阻力,轮毂的形状及轮胎的花纹,地面效应,气坝的安装高度和形状,尾翼的形状和角度等对车辆的气动性能均有不同程度的影响;当汽车高速行驶在有侧向风作用的工况下,或会车时,由于高速气流的侧向气动力作用,汽车将会出现操纵稳定性问题,甚至有可能出现严重的交通事故。所以研究车辆的气动性能非常的复杂而又非常的必要。

1 气动性能试验研究

世界汽车工业发达国家(如美国、日本、德国等)都十分重视汽车空气动力学理论和试验的研究。风洞试验历来是进行汽车空气动力学研究最传统和有效的方法,据统计,为获得良好的气动外形,国外每种大批生产的轿车都需经过1000小时以上的风洞试验^[2]。

根据 SAE J1594 标准的定义,汽车风洞气动天平的测力中心在汽车模型四轮着地点组成的矩形中心,六个力(矩)分量的正方向如图 1 所示,气动力系数的定义如表 1 所示。

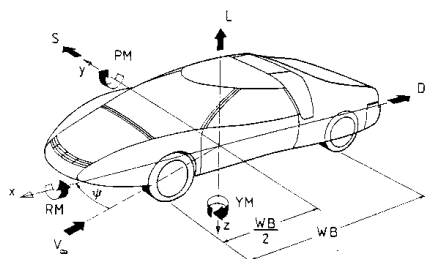


图 1 汽车空气动力学坐标系统(SAE J1594)

表 1 气动力系数定义式

C_D	阻力系数	$= D/q_\infty A$
C_S	侧力系数	$= S/q_\infty A$
C_L	升力系数	$= L/q_\infty A$
C_{RM}	滚转力矩系数	$= RM/q_\infty A \cdot WB$
C_{PM}	俯仰力矩系数	$= PM/q_\infty A \cdot WB$
C_{YM}	偏航力矩系数	$= YM/q_\infty A \cdot WB$

表 1 中:

D	阻力 (= F_x)
S	侧力 (= F_y)
L	升力 (= F_z)
RM	滚转力矩 (= $-M_x$)
PM	俯仰力矩 (= M_y)
YM	偏航力矩 (= $-M_z$)
q_∞	动压 (= $1/2\rho V_\infty^2$)
ρ	空气密度(根据风洞环境参数计算)
V_∞	风速(m/s)
A	模型正投影面积
WB	轴距

风洞天平的力心与图 1 定义重合。

在选定的汽车表面布置的测压点 (62 个) 可以测量相应位置的表面静压力 p_s , 无量纲化的压力系数定义:

$$c_{p_s} = \frac{p_s}{q_\infty}$$

试验在同济大学-上海地面交通工具风洞中心的“气动-声学整车风洞”中进行, 该风洞主要技术参数为:

- 喷口尺寸/面积: 6.5m(w)x4.25m(h) 27m²
- 最大风速: 250km/h

主要试验仪器设备包括:

- 1) 天平: 六分量/Horiba-Schenck, 静校准精度 0.005~0.01%
- 2) 转盘: 直径 9m, 角度定位精度+/-0.01 度
- 3) 滚动路面:

中央移动带宽度 1100mm, 长度 7000mm

车轮转动单元: 宽度 280mm, 长度 350mm

4) 风机系统：低噪声轴流风机/24 波变频驱动控制

5) 风洞测量仪器

风速测量：MKS Baratron 698A + 670B

环境参数测量：

大气压：MKS Baratron 690A + 670B

温湿度：Vaisala 330

6) 多通道(64ch)压力扫描阀

试验结果如表 2，气动阻力系数从 80km/h 到 160km/h 减小约 0.005，说明雷诺数效应比较小。

表 2 不同风速下的阻力系数 C_D

工况	U(km/h)	q_∞ (Pa)	C_D
1	80	307.25	0.3082
2	100	481.51	0.3088
3	120	691.86	0.3047
4	140	942.21	0.3051
5	160	1229.16	0.3031

2 机舱进风阻力及地面效应对车辆风阻系数的影响

一些气动性能优秀的轿车，在满足机舱散热的条件下都充分考虑了机舱进风阻力对车辆气动性能的影响，为得到该方面定量数据，开展了该方面的试验研究，分别测试机舱中网打开和封闭以及路面效应的影响，如表 3 所示。

表 3 机舱进风阻力及地面效应对车辆风阻系数的影响

工况	U(km/h)	q_∞ (Pa)	C_D	C_D 变化幅度	C_D 变化率
原车状态+路面效应	120	691.86	0.3047	0	0
原车状态+不考虑路面效应	120	690.06	0.3114	6.7 counts	2.06%
中网封闭+路面效应	120	693.61	0.2640	40.7 counts	12.53%
中网封闭+不考虑路面效应	120	691.91	0.2776	27.1 counts	8.34%

注：通过与实际风速相一致的宽度为 1100mm，长度 7000mm 的地面中央移动带的移动来模拟路面效应。

从试验结果来看，路面效应能减小车辆的风阻系数 6 个 counts 以上，机舱的进风阻力对风阻系数有比较大的影响，在 40 个 counts 以上。

3 侧向风对车辆风阻系数及升力系数的影响

由于汽车车身上部和下部气流流速不同，使车身上部和下部形成压力差，从而产生升力和纵倾力矩，气动升力对汽车高速行驶稳定性的影响很重要。即使是在无风时，当轿车车速达到 160km/h 时，

气动升力也可以轻易地达到车重的 20%~25%。当有横向风时(通常状况下是有横向风的)，由于阵风的作用，气动升力的影响会更大，这样就会使汽车产生危险和转向问题。车辆在-10°~25° 偏角下的风阻系数、侧向力系数及升力系数如表 4 所示。

表4 不同偏角下的气动性能参数

工况	偏角 (°)	q_{∞} (Pa)	U(km/h)	C_D	C_S	C_L
1	-10	692.73	120	0.3225	-0.3476	0.2903
2	-5	691.97	120	0.3167	-0.1305	0.2511
3	0	691.86	120	0.3047	-0.0041	0.1914
4	5	691.76	120	0.3124	0.0792	0.2448
5	10	688.66	120	0.3219	0.2362	0.2860
6	15	691.76	120	0.3519	0.3965	0.4113
7	20	685.40	120	0.3626	0.5410	0.6190
8	25	687.66	120	0.3639	0.7326	0.7797

从试验结果来看，随着侧偏角的增大风阻系数在增大，偏角超过 10° 以后对侧向力和升力系数有较大的影响，在设计前期需要考虑其对操纵性的影响。

4 车身表面压力系数分布

车身表面的压力系数分布表征了车身气动性能设计的合理性，从图 2 可以看出，保险杠 1~4 点处为正压分布，机舱盖 5~10 点为负压，前风挡 11~15 点为正压，顶棚至后风挡玻璃及车身侧围大部分为负压，而后保险杠左右侧面 44 点处出现了较高的正压，提升了车辆的气动性能，机舱内的 55~62 点在将中网封闭前后表现出正负不同的压力，在后续的 CFD 分析中可以作为考虑机舱通风时的对标参考数据。



图 2 某轿车车身表面压力测点布置

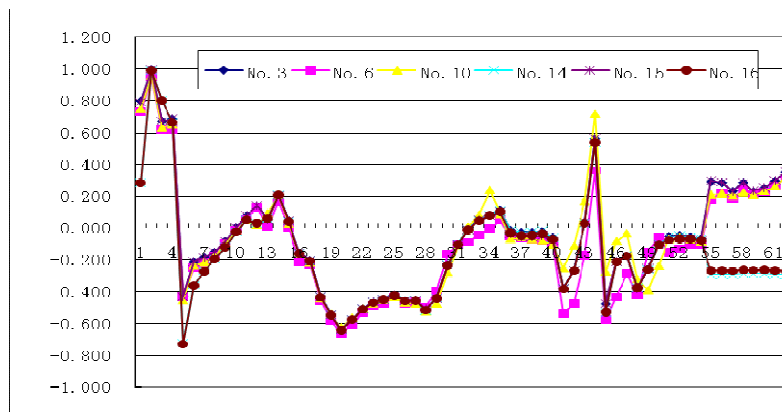


图3 车身表面的压力系数分布

5 气动性能试验与仿真的相关性研究

汽车空气动力学研究主要有两种方法，一种是进行风洞试验；另一种就是利用 CFD 软件进行数值模拟。传统的风洞试验结果一般可靠性比较高，但由于它有许多局限性，如成本高、周期长等缺点，阻碍了它在汽车设计中的应用。

与风洞试验相反，CFD 几乎克服了它的所有局限性。目前，CFD 可以分析从层流到湍流、定常到非定常、不可压到可压、无粘性到有粘性的几乎所有的流动现象。先进的 CFD 分析技术使新车型的空气动力学设计更加方便灵活，开发周期也得到缩短。

CFD 最主要的问题在于精度不如风洞试验，但目前许多大型商业通用软件已经很好地解决了这一难题，而某些专用的 CFD 软件在解决某些汽车流场计算时可以达到更高的精度。

基于国内在车辆空气动力学方面的研究现状，现阶段开展该方面的试验与仿真相关性研究是非常必要的。

应用 Star CCM+软件，选定流体计算域车前 2 倍车长，车后 4 倍车长，宽度共 6 倍车宽，高度为 5 倍车高；边界层设 3 层，总厚度为 4.6mm，总网格数为 25000，车辆处于半载状态，设定进口风速为 30m/s，模型中模拟路面效应及轮胎的转动，选用 $k-\epsilon$ 湍流模型^[3]。该车型油泥模型的风阻系数为 0.233，试验值为 0.264；误差为 31 个 counts，原因是我们对车辆的地板做了较大的简化处理，同时去掉了排气系统、传动系统及悬架系统等的影响。如将这些系统考虑进去，误差应该在可控范围之内。

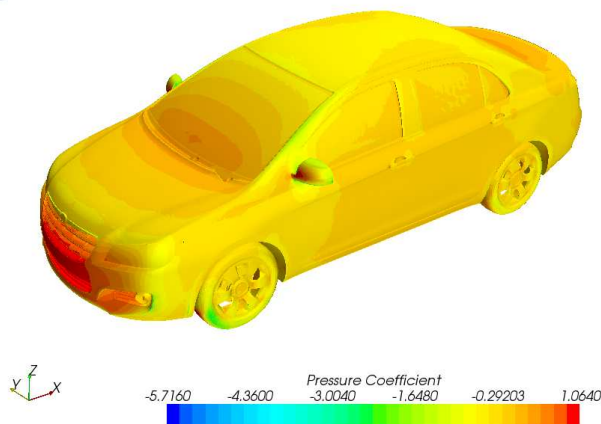


图4 油泥模型压力系数分布

整车状态的 CFD 分析采用与油泥模型相同的边界条件、模型细化方法及湍流模型，半载状态下的 CFD 风阻系数分析结果为 0.325，试验结果为 0.304；误差为 21 个 counts，造成误差的主要原因是机舱的风阻模拟与实际情况存在一定的差距，特别是冷凝器和散热器的风阻模拟是下一步需要详细标定的模块。

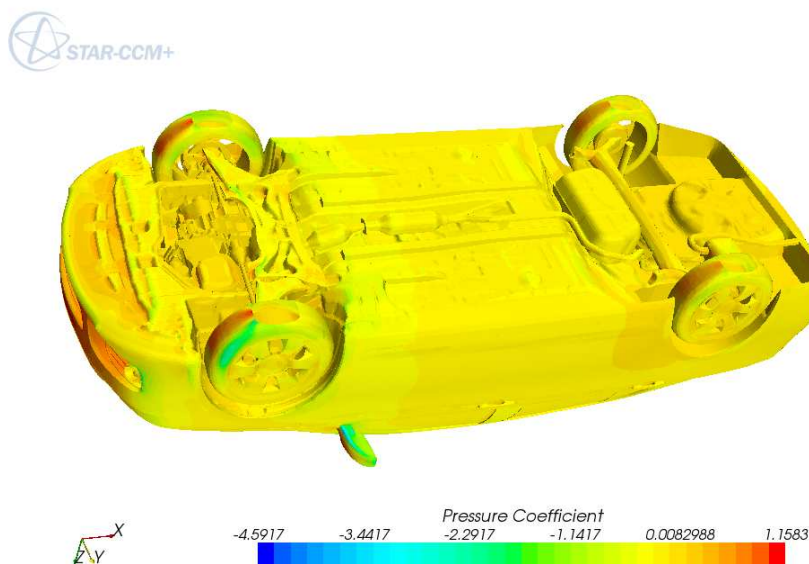


图 5 整车模型压力系数分布

6 总结

对某轿车的空气动力学性能进行了试验研究，同时进行了部分试验与仿真的相关性分析。

(1) 机舱的通风风阻对车辆的风阻系数有较大影响，也是仿真误差存在的主要部位，需要在设计和分析时综合考虑；

(2) 车辆的侧风稳定性是衡量车辆高速状态下的重要性能指标，设计中要考虑风压中心的分布位置对车辆操纵稳定性的影响。

7 参考文献

- [1] 韩善灵 朱平 林忠钦，侧向气动力对汽车稳态响应的影响，上海交通大学学报，第39 卷 第9 期，2005 年9 月
- [2] 姜乐华 谷正气，CFD 在汽车空气动力学研究中的应用，湖南大学学报，第24卷第4期
1 9 9 7 年8 月
- [3] STAR-CCM+帮助文档