

文章编号: 1000-8055(2007)11-1868-06

直背式轿车起动过程中气动现象的研究

蓝天, 康宁, 郑昊

(北京航空航天大学 汽车工程系, 北京 100083)

摘 要: 用计算流体力学方法对直背式轿车起动过程中的非定常外流场进行了数值模拟, 采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型及一阶迎风格式计算出两种加速度下气动阻力和阻力系数. 结果表明起动过程中气动阻力有较为显著的增加, 并在起动后很短时间达最大值. 当汽车行驶平稳时, 阻力趋于某一定值. 阻力系数在起动过程中急速下降, 起动结束后变化平缓, 也趋于某一定值. 起动过程中, 车尾部逐渐形成旋涡, 汽车头尾部压差逐渐变大, 行驶平稳后, 压差变小.

关 键 词: 直背式轿车; 空气动力学; 汽车外流场; 起动; 非定常流

中图分类号: U461.1

文献标识码: A

Study of aerodynamic characteristics of fastback car in starting process

LAN Tian, KANG Ning, ZHENG Hao

(Department of Automotive Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The unsteady flow field of a fastback car during starting process was simulated numerically with Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The aerodynamic drags and drag coefficients under two starting accelerations were calculated using $k-\varepsilon$ turbulent model and the first order upwind scheme. The results show that the aerodynamic drag increased significantly in the starting process and reached a maximum value in a very short period after starting. When the car ran steadily, the drag tended towards a constant value. The drag coefficient decreased rapidly during starting and became steadily after completion of starting. In the process of starting, wake vortex formed gradually and the pressure difference between the front and back of the car became bigger. After running steadily, the difference became smaller.

Key words: fastback car; aerodynamics; outflow field of a car; starting; unsteady flow

汽车加速性能是衡量汽车性能的一项重要指标. 汽车从静止状态突然开始加速起动, 引起周围流场的非定常变化. 在起动过程中, 存在边界层以及尾涡的形成、非定常流的发展、流动分离及尾涡脱落等特殊的空气动力学现象, 这些特殊现象对汽车加速性能有着很大的影响. 人们对汽车外部流动现象进行了很多的研究, 可是这些研究大多数都是针对汽车匀速行驶的情况, 而对于汽车起

动行驶的研究就较少. 汽车起动时的空气动力学特性对汽车加速性能的提高有着重要意义. 为了研究汽车起动时的气动现象, 本文对汽车加速起动时的外部流场进行了三维数值模拟.

本文采用与文献[1]中试验模型相同的直背式轿车模型作为研究对象, 应用商用 CFD 软件 Fluent 对两种不同加速起动工况情况下车身周围外部流场进行了三维数值模拟, 分析了起动时

收稿日期: 2006-10-24; 修订日期: 2006-12-28

作者简介: 蓝天(1980), 男, 天津人, 硕士生, 主要从事汽车空气动力学方向的研究.

间对阻力和阻力系数的影响、车身周围流场的变化以及由此造成的车身表面压力分布变化和车尾部涡流的变化情况。

1 控制方程及湍流模型

通常情况下,普通轿车车速低于 200 km/h, 车身周围外部流动空气可按不可压流体来处理。汽车在起动过程中的外部流场可视为等温、非定常不可压流动,且空气介质的物性参数为常数。本文采用工程上普遍应用的雷诺时均三维非定常不可压 N-S 方程,其一般形式为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \left(\mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \rho \overline{u_i u_j} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $i, j = 1, 2, 3$ 表示 3 个坐标轴方向; u_i 为速度分量, $\bar{u}_i$ 为平均速度分量, $\overline{u_i u_j}$ 为脉动速度分量, p 为平均压强, ρ 为密度。

普通的 N-S 方程可以演化出多种方程模型。对于汽车外部流场的计算,多采用 $k-\epsilon$ 两方程模型,该模型是目前使用最为广泛的湍流模型^[2]。标准的 $k-\epsilon$ 模型是在湍动能 k 方程的基础上,再引入一个关于湍动耗散率 ϵ 的方程。 $k-\epsilon$ 模型的输运方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (3)$$

其中, G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项, G_b 是由于浮力引起的湍动能 k 的产生项, Y_M 代表可压湍流中脉动扩张的贡献, $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 和 $C_{3\epsilon}$ 为经验常数, σ_k 和 σ_ϵ 分别是与湍动能 k 和耗散率 ϵ 对应的 Prandtl 数, S_k 和 S_ϵ 是用户自定义的源项。

2 计算模型

本文采用模型为简化的直背式汽车模型(见图 1),此模型为与参考文献[1] 完全一致的 1:8 缩尺模型。模型忽略了车轮、后视镜、门把手,雨水槽、排气管等外凸装置和复杂曲面,并将车身底部简化为平面^[3]。

模型的具体参数如下:车长为 512 mm,车宽为 206 mm,车高为 138 mm。

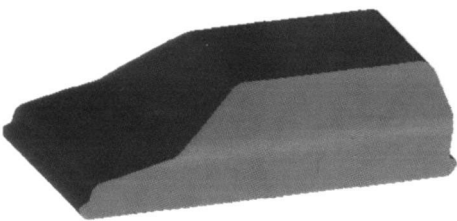


图 1 汽车模型

Fig.1 Car model

3 计算方法

3.1 计算域

计算域为包围汽车模型的长方体,长为 2 750 mm,宽为 1 100 mm,高为 520 mm,如图 2 所示。具体是车前为 1 倍车身长,车侧为 2 倍车身宽,车后为 3 倍车身长,高度为 4 倍车身高,车身离地面距离为 20 mm。

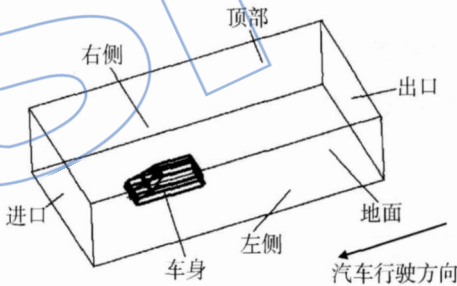


图 2 计算域示意图

Fig.2 Computational domain

3.2 网格划分

采用六面体结构网格对计算域进行网格划分,靠近车身的网络比较密集,远离车身的网格比较稀疏。这样可以更好地模拟车身表面附近边界层内的流动,而且可以减小因网格过于平均造成的网格的浪费,有利于提高计算效率。网格数约为 70 63 万,图 3 为车身纵向对称面内车身附近的网格分布图。

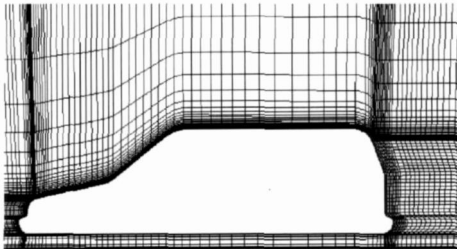


图 3 车身纵向对称面内的网格划分

Fig.3 Grids in the longitudinal section of symmetry

3.3 边界条件及初始条件设定

3.3.1 边界条件

进口: 位于汽车前端 500 mm 处, 为入流边界, 速度大小为汽车加速行驶的速度(见图 2).

出口: 距汽车后端 2 250 mm 处, 为出流边界, 在该边界上流向梯度为零.

地面: 为无流边界, 采用无滑移边界条件, 速度与进口速度一致.

车身: 为无流边界, 采用无滑移边界条件, 速度为零.

其它面: 采用滑移边界条件, 速度与进口速度一致.

3.3.2 初始条件

初始时整个计算域均为空气介质, 速度为零, 压强为一个标准大气压.

3.4 求解方法及离散格式

采用非稳态耦合隐式求解方法, 离散格式为一阶迎风格式. 湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型.

3.5 计算参数

本文的具体计算参数详见表 1.

表 1 计算参数设置

Table 1 Computational parameters

参数变量	设置值
时间步长/步数	0.01 s/1 000(工况 1) 0.01 s/500(工况 2)
松弛因子	湍动能松弛因子为 0.8 湍流粘度松弛因子为 1
空气密度/(kg/ m ³)	1.225
空气动力粘性系数 /(10 ⁻⁵ Pa · s)	1.789 4
残差标准	0.000 1

近似认为汽车从静止开始做匀加速行驶, 加速结束后的速度为 100 km/h 或 27.8 m/s, 工况 1 为 10 s 内加速到 100 km/h, 加速度为 2.78 m/s²; 工况 2 为 5 s 内加速到 100 km/h, 加速度为 5.56 m/s².

3.6 非定常流动计算方法及判别准则

本文非定常流动的计算方法如下: 进口速度从静止开始匀加速增加, 在第一时间步内进行迭代直至收敛, 然后以此次迭代的结果作为第二时

间步的初始值再进行迭代直至收敛, 以此类推, 直到稳定行驶后阻力系数趋于定值.

每一时间步收敛的判别方法: 在每一时间步内当残差小于给定残差标准时, 即为收敛. 当汽车加速结束后, 即行驶平稳时, 当残差小于残差标准, 或阻力系数曲线趋近于某一定值(变化在 1% 左右), 即视为收敛.

4 计算结果与分析

4.1 计算结果与实验结果对比

为验证本文数值计算结果的准确性, 对汽车匀速行驶时计算的阻力系数 C_d 与文献[1]中的实验结果做了对比. 实验得到的 C_d 为 0.421, 而在两种工况下稳定行驶时计算得到的 C_d 均约 0.453, 两者相对误差在 7.2%, 满足误差要求. 计算的条件设置均是模拟试验时的条件, 所以本计算具有可行性.

4.2 阻力和阻力系数分析

为研究起动时间对汽车气动阻力的影响, 本文对两种工况进行了数值模拟. 图 4 和图 5 分别为工况 1 和工况 2 的气动阻力 D 和阻力系数 C_d 随时间的变化情况.

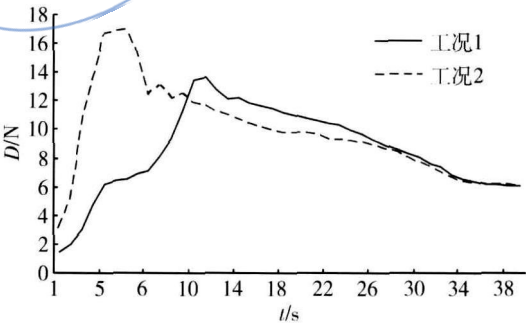


图 4 两种工况下的气动阻力

Fig. 4 Aerodynamic drags under two conditions

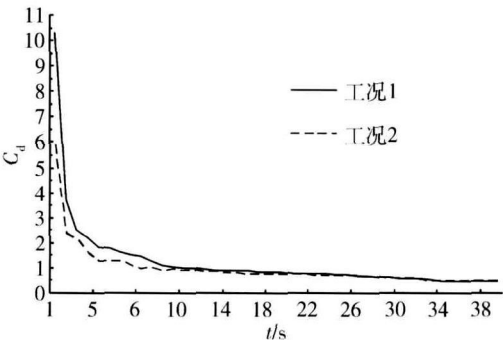


图 5 两种工况下的气动阻力系数

Fig. 5 Aerodynamic drag coefficients under two conditions

从图 4 可以看出,从汽车开始起动到起动结束过程中,汽车所受到的阻力随着时间的增加而增大.在加速行驶结束后很小时间内阻力达到最大值,然后随着汽车做匀速行驶,阻力开始减少,最终趋于一常值.工况 1 滞后时间约为 1 s,工况 2 约为 0.5 s.工况 2 所达到的阻力最大值约为匀速行驶时阻力值的 2.8 倍,工况 1 为 2.2 倍.由于加速起动时间不同,工况 2 的阻力最大值出现在工况 1 之前,当行驶到 28 s 以后,汽车平稳行驶,则两曲线变得相当接近,在约 36 s 以后,则基本重合.

由图 5 可知,在起动初期,阻力系数 C_d 较大,随着行驶速度的增加,阻力系数迅速下降.这是由于阻力系数与速度平方成反比,在起动初期,速度较小,因而阻力系数很大;在起动后期,速度较大,因而阻力系数也变得很小.而且加速过程中,由于工况 2 的加速度大于工况 1 的加速度,所以在同一时刻下它的速度也大于工况 1 的速度,工况 2 的阻力系数就小于工况 1.但由于气动阻力系数主要由汽车的形状决定^[4],所以,当汽车运行平稳后,阻力系数变化逐渐平缓,值趋于 0.453.

4.3 流场分析

为更清楚地了解在加速起动过程中汽车周围流动的发展历程,图 6 和图 7 分别给出了两种工况下,在不同时刻汽车尾部的三维流线图.

为了便于观察,图中只画出了半侧车身周围

流线图,另外半侧基本与之对称.

对于工况 1 来说,由图 6 可以看出汽车从静止开始加速起动过程中,在 1 s 时(图 6(a)),车身上的流线在汽车尾部向下弯曲,车身侧面的流线向车身中部弯曲,且在汽车尾部并没有产生尾流涡.在 6 s 时(图 6(b)),车身上面流线弯曲程度加大,几乎与车尾面平行;侧面流线向车中部弯曲也变大,车尾有产生涡流的趋势.在 11 s,即阻力达最大值时(图 6(c)),汽车产生一个较明显的气流旋涡.当汽车行驶平稳的时候(图 6(d)),可以看到,先前生成的旋涡更加明显,并且在汽车尾部下方,又产生了一个清晰的气流旋涡.上面的旋涡主要由车身上面和侧面的气流产生;而下面的旋涡主要由于车底部的气流形成.

对于工况 2,也能得到与上面相似的结果,只是此种工况下,车身周围尾涡变化得更快.图 7 为工况 2,不同时刻汽车尾部的流线图.

4.4 压力分布图

以下各图为工况 1,不同时刻车身表面的压力分布图.

图 8(a)和(b)为刚起动 1 s 时的车身表面压强分布图,汽车尾部压强约在 -60 Pa,头部压强约为 8 Pa(此压强值为相对压强,且图上标出的数值为局部小区域的平均压力值,下同),压差约为 68 Pa.图 9(a)和(b)为 6 s(约为总起动时间的

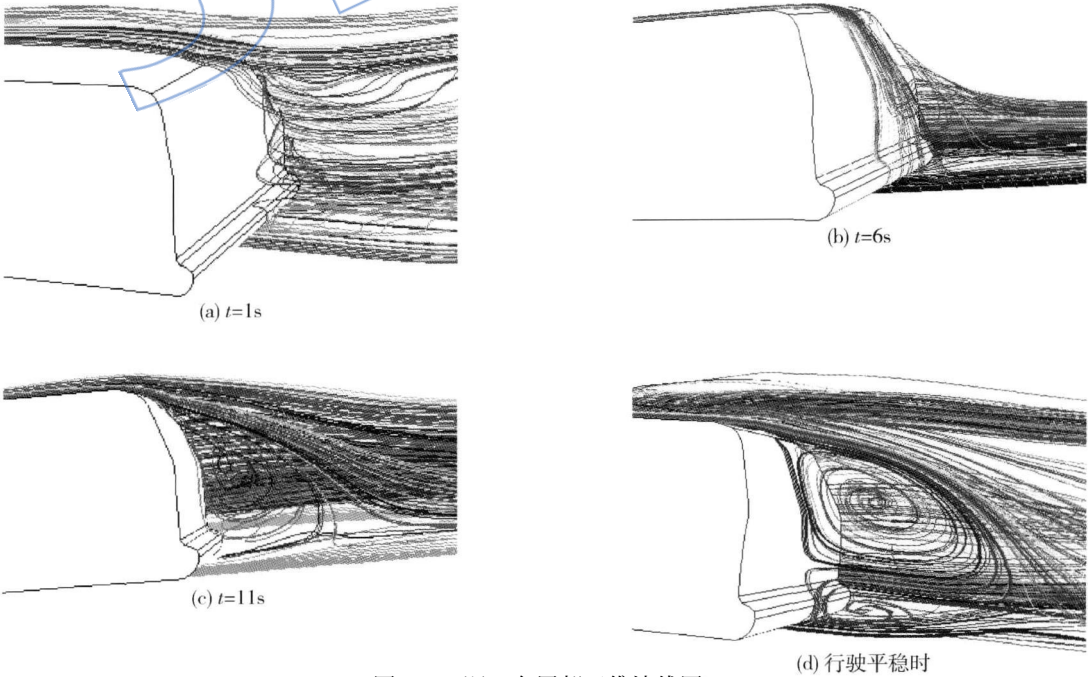


图 6 工况 1 车尾部三维流线图
Fig. 6 3D streamlines under condition 1

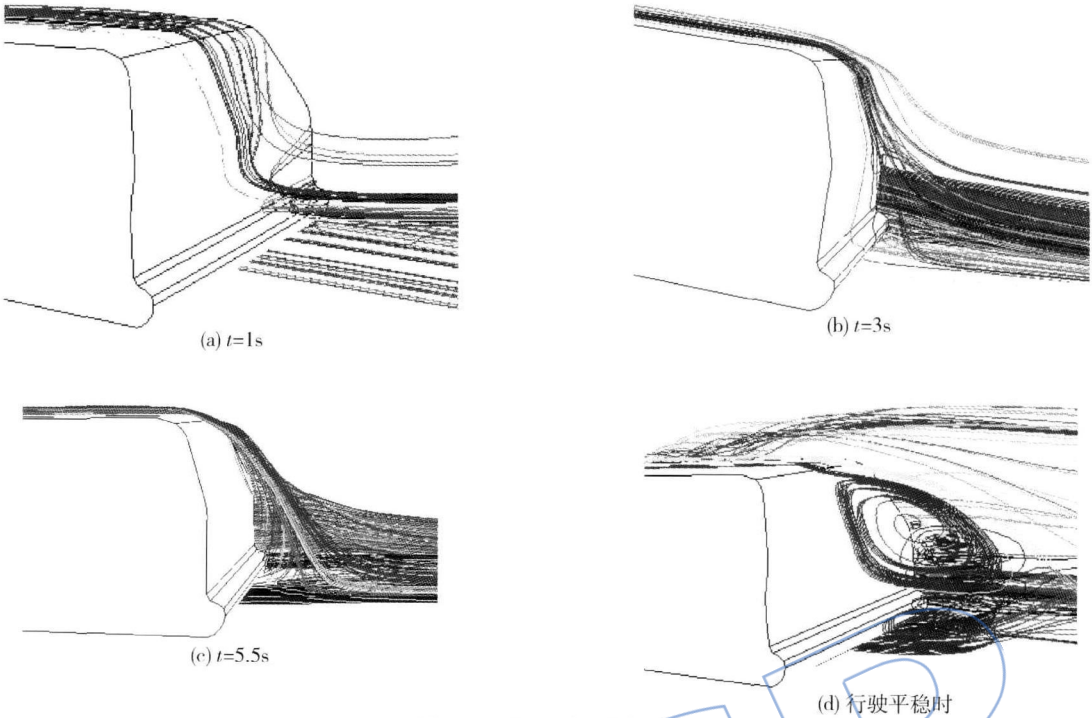


图 7 工况 2 车尾部流线
Fig. 7 3D streamlines under condition 2

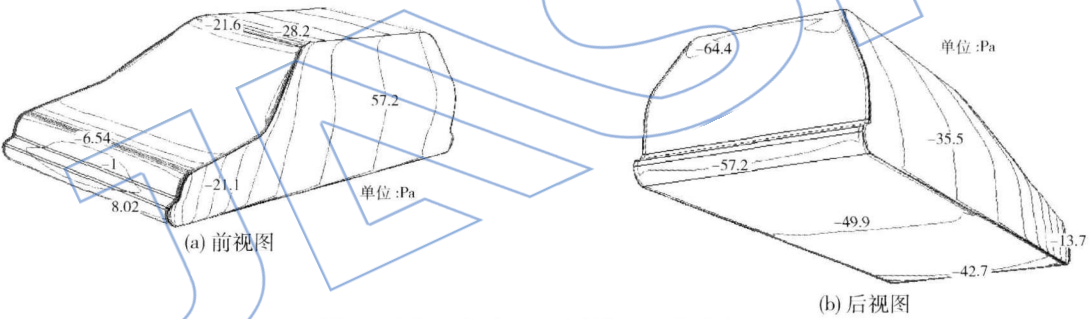


图 8 工况 1 起动 1 s 时车身表面压力分布
Fig. 8 Surface pressure distributions under condition 1(starting 1 s)

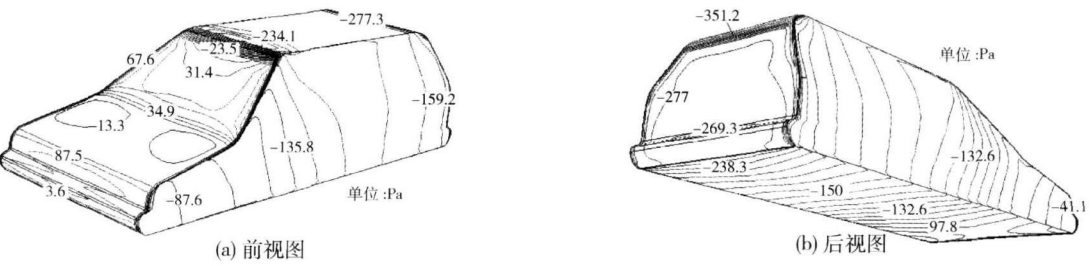


图 9 工况 1 起动 6 s 时车身表面压力分布
Fig. 9 Surface pressure distributions under condition 1(starting 6 s)

一半) 时车身表面压强分布图, 尾部压强值约-300 Pa, 头部压强约 90 Pa, 压差约为 390 Pa. 图 10(a) 和(b) 为起动完成后阻力达最大值时(11 s) 的车身表面压强分布图, 尾部约在-700 Pa, 而头

部约在 140 Pa, 压差约为 840 Pa. 图 11(a) 和(b) 为起动后运行平稳时车身表面压强分布图, 尾部压强值在-180 Pa, 头部在 200 Pa 左右, 压差约为 380 Pa.

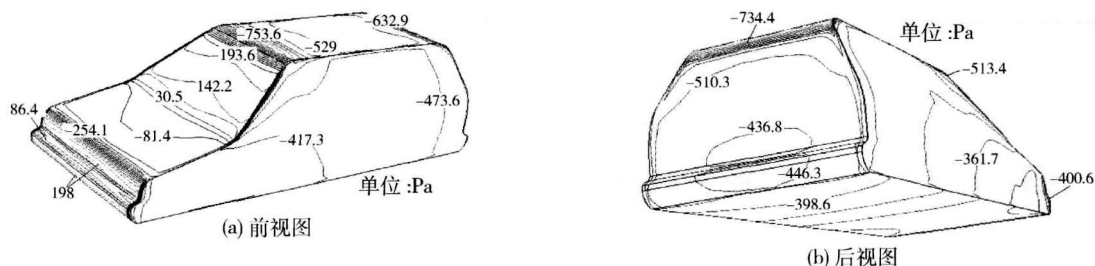


图 10 工况 1 起动 11 s 时车身表面压力分布

Fig. 10 Surface pressure distributions under condition 1 (starting 11 s)

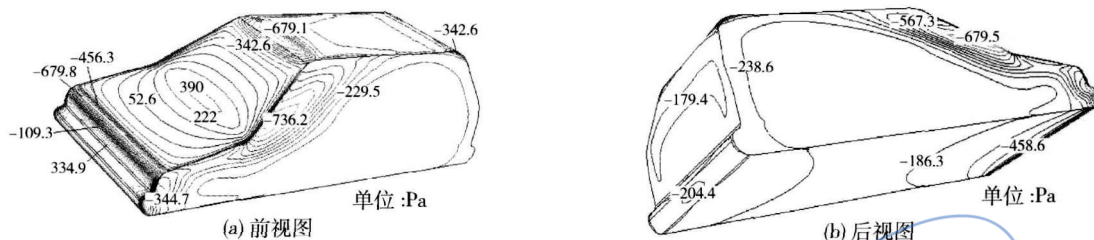


图 11 汽车行驶平稳时车身表面压力分布

Fig. 11 Surface pressure distributions under condition 1 (at constant speed)

从以上分析可以看出,在加速起动过程中,随着时间推进,车身头尾部压差不断变大,且变化幅度也变大,在 11 s 时达最大值。汽车稳定行驶时,头尾部压差变小。

5 结 论

汽车在起动过程中的阻力随时间而不断增加,在起动结束后很短时间达到最大值,其中工况 2 所达到的阻力最大值约为匀速行驶时阻力值的 2.8 倍,工况 1 则为 2.2 倍,然后开始逐渐下降,逐渐趋近于一定值。工况 1,起动结束到阻力达最大值的滞后时间约为 1 s;工况 2,滞后时间约为 0.5 s;起动过程中的阻力系数随时间而不断下降,在起动结束后趋于平缓,稳定时约为 0.453。

汽车起动过程中,车身上面和侧面的气流,在汽车尾部形成的尾流涡逐渐成形并增大。在汽车行驶平稳时,还可以看到在车身尾部下方,由于车底部气流,又产生了一个较清晰的旋涡。加速起动过程中车前后压差随时间而变大,两时刻间的变

化幅度也随时间增大。平稳时,压差变小。

参考文献:

- [1] 谢金法. 高速轿车车身绕流场的三维数值模拟及试验研究[D]. 长春: 吉林工业大学, 2000.
XIE Jinfa. Study on the three dimensional numerical simulations and experiment of flow field around a high speed car body[D]. Changchun: Jilin University of Technology, 2000.
- [2] 王福军. 计算流体动力学分析 CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
WANG Fujun. Analysis of computational fluid dynamics the principle and application of CFD software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [3] 李广辉. 带行李架的旅行车的空气动力学计算与分析[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006.
LI Guanghui. The aerodynamic calculation and analysis of the beach wagon with carrier[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.
- [4] 傅立敏. 汽车空气动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
FU Limin. Automotive aerodynamics [M]. Beijing: China Machine Press, 1998.