

文章编号: 1000-8055(2008)07-1299-05

直背式轿车加速行驶气动阻力的计算

宗叶玲, 康 宁

(北京航空航天大学 汽车工程系, 北京 100083)

摘 要: 用 CFD 方法对直背式轿车加速过程中非定常外流场进行了数值模拟, 计算出不同速度及加速度情况下汽车的气动阻力. 结果表明某一速度和加速度情况下气动阻力主要与此刻的速度和加速度有关, 其他因素对它的影响较小, 并通过两次线性拟合, 得出阻力与速度及加速度的计算公式, 该公式可以直接计算出汽车在加速行驶时在某速度和加速度值下的气动阻力.

关 键 词: 气动阻力; 直背式轿车; 汽车外流场; 加速; 计算公式

中图分类号: U461.1

文献标识码: A

Computation of aerodynamic drag of a fastback car in accelerating process

ZONG Ye ling, KANG Ning

(Department of Automobile Engineering,

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

Abstract: Three dimensional unsteady flow field around a simplified fastback car in process of accelerating was simulated numerically with computational fluid dynamics (CFD) method. The aerodynamic drags were calculated at different speeds and different accelerations. The calculated results show that the aerodynamic drag at a certain speed and acceleration are closely related to the current speed and acceleration. Through twice linear fittings, the computational formula of aerodynamic drags was obtained. This formula could work out immediately the aerodynamic drag of the aerodynamic characteristics of a car in accelerating process at a certain speed and acceleration value.

Key words: aerodynamic drag; fastback car; outflow field of a car; accelerating; computational formula

气动阻力直接影响汽车的动力性、燃油经济性. 以往人们对气动阻力研究, 大多是针对匀速行驶情况, 而对加速行驶的研究较少^[1-4]. 对于汽车在变速时所受的加速阻力, 一般只是考虑了惯性力作用, 并没有考虑气动阻力的影响. 汽车在行驶时经常会遇到各种加速行驶情况, 比如启动、超车及变道等, 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空气动力学

现象, 这些现象对气动阻力有着很大的影响. 文献 [5] 对两种不同加速启动工况下车身受到的气动阻力进行了计算, 结果表明, 加速行驶到 27.8 m/s 时的气动阻力是匀速行驶时的两倍多, 因此对加速行驶时气动阻力的研究很有必要. 但该文献只研究了两种加速启动的情况, 所得的结果比较有限. 对于汽车在不同速度及加速度情况下行驶时所受的气动阻力, 有必要做更深入的研究, 进而

收稿日期: 2007-06-28; 修订日期: 2007-09-11

作者简介: 宗叶玲(1982-), 女, 河北石家庄人, 硕士生, 主要从事汽车空气动力学方向的研究.

得出一个计算公式,可以直接计算出在某一速度和加速度下的气动阻力. 本文的研究目的,就是通过三维数值模拟得到不同速度及加速度情况下汽车的气动阻力,并对阻力值进行数据拟合,从而得到计算公式.

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. 汽车在行驶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. 非定常不可压 N-S 方程为

连续方程

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{\Delta p}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} \tag{2}$$

式中 $\mathbf{v}$ 为速度矢量, p 为压力, ρ 为密度, μ 为动力粘性系数.

2 计算模型及网格划分

2.1 计算模型

本文采用与参考文献[5]完全一致的模型,为简化直背式汽车模型. 模型车身长为 512 mm,高为 138 mm,宽为 206 mm,为了减小计算量,保证计算的可行性,对车身进行了简化,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,而以简单曲面代替. 简化车身模型如图 1 所示.

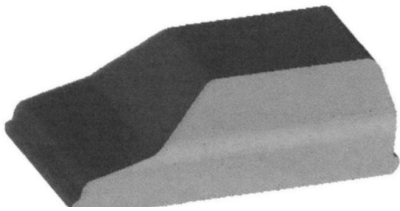


图 1 汽车模型
Fig.1 Car model

计算域为 2 750 mm × 1 100 mm × 520 mm, 见图 2. 计算域进口距离模型最前端 1 倍车身长,车侧面距离车身表面 2 倍车宽,模型后端至计算域出口 3 倍车身长,高度取 4 倍车身高,车模离地间隙 20 mm.

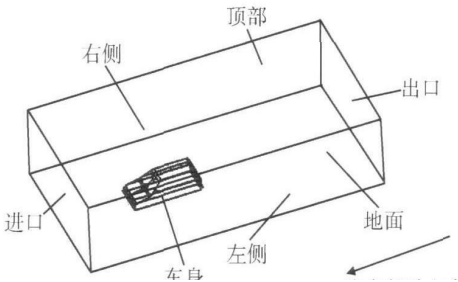


图 2 计算域示意图
Fig.2 Computational domain

2.2 网格划分

对此计算模型采用六面体结构网格. 在本文中,为了更好地在计算过程中模拟附面层,对贴近轿车表面网格进行加密,如图 3. 网格密度由轿车表面向计算域外边界是由密到疏的过渡,解决了网格过多计算时间过长的问题. 整个网格数量为 70 万.

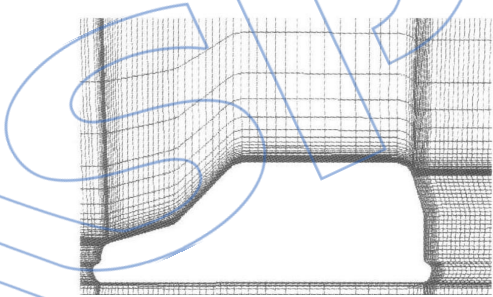


图 3 车身纵向对称面内的网格划分
Fig.3 Grid in the longitudinal section of symmetry

3 边界条件及初始条件设定

3.1 边界条件

整个流场流体材料设置为空气,空气密度为 1.225 kg/m³,动力粘性系数为 1.789 4 × 10⁻⁵ (kg/m · s).

计算域进口面位于汽车前端 500 mm 处,为来流速度入口,速度大小为汽车加速行驶速度(见图 2).

出口面距汽车后端 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.

3.2 初始条件

初始时整个计算域均为空气介质,速度根据具体工况而定,压强为一个标准大气压.

3.3 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.

4 计算结果与分析

文献[5]对汽车匀速行驶时计算的阻力系数 C_{D0} 与实验结果做了对比,计算得到的 C_{D0} 约为 0.453,与实验结果的相对误差为 7.2%,满足误差要求.

本文目的是要得到汽车行驶过程中,在某一速度和加速度值时的阻力或阻力系数的计算公式.为了能够在工程实际中更方便地应用,该公式中只出现速度和加速度两个变量,并不涉及到其他因素,如该时刻之前的加速时间、初速度等.

为了得到这个公式,分如下 4 步进行.

第 1 步,通过数值模拟计算得出某一速度和加速度情况下的气动阻力,并验证该阻力值主要与此刻的速度和加速度有关,其他因素对它的影响较小.

第 2 步,用数值模拟得出以不同加速度加速到某个相同的末速度值时的阻力值,再做线性拟合,得出这个末速度下的阻力与加速度的拟合公式;为了进而得出最终公式,对三个末速度工况进行了计算,分别得出三个拟合公式.

第 3 步,将上一步中得出的三个公式中的系数做进一步拟合,最终得出阻力与速度和加速度的拟合关系式.

第 4 步,将通过拟合公式计算得出的阻力结果和数值模拟得出的阻力结果作比较,验证拟合公式的准确性和可靠性.

4.1 阻力值的影响因素

为了验证以不同速度或加速度达到同一加速度和速度值的情况下,汽车受到阻力差值的大小,对两种加速度下的工况进行了计算.工况 1 加速度 a 为 5.56 m/s^2 ,工况 2 为 2.78 m/s^2 .对这两种工况,汽车都是分别以 0, 5.56, 11.12, 16.68, 22.24 m/s (即 0, 20, 40, 60, 80 km/h) 的初速度 v_0 做匀加速行驶,加速结束后的末速度 v 都为 27.8 m/s.

表 1 为加速度为 5.56 m/s^2 时计算的阻力值 D .表中, D_0 为以 27.8 m/s 速度匀速行驶所受到

的阻力,其值为 6.1 N; D_{01} 为以零初速度加速到 27.8 m/s 时受到的阻力,其值为 13.12 N.该表还给出了 D 与 D_0 的比值和 D 与 D_{01} 的相对差值.

表 1 加速度为 5.56 m/s^2 的阻力值比较

Table 1 Comparison of aerodynamic drags at acceleration of 5.56 m/s^2

$v_0/(\text{m/s})$	D/N	$\frac{D}{D_0}$	$\left[\frac{D-D_{01}}{D_{01}}\right]\%$
0	13.12	2.15	0
5.56	13.35	2.19	1.75
11.12	13.37	2.19	1.91
16.68	13.42	2.2	2.29
22.24	13.59	2.23	3.58

表 2 为加速度为 2.78 m/s^2 时计算的阻力值 D .表中, D_{02} 为以零初速度加速到 27.8 m/s 时受到的阻力,其值为 12.89 N.该表也给出了 D 与 D_0 的比值和 D 与 D_{02} 的相对差值.

表 2 加速度为 2.78 m/s^2 的阻力值比较

Table 2 Comparison of aerodynamic drags at acceleration of 2.78 m/s^2

$v_0/(\text{m/s})$	D/N	$\frac{D}{D_0}$	$\left[\frac{D-D_{02}}{D_{02}}\right]\%$
0	12.89	2.11	0
5.56	13.19	2.16	2.33
11.12	13.27	2.18	2.95
16.68	13.34	2.19	3.49
22.24	13.54	2.22	5.04

由表 1, 表 2 可以看出,汽车以不同初速度、两种加速度加速到 27.8 m/s 时所受到的阻力,与匀速行驶时的阻力作对比,比值在 2.11~ 2.23 之间,汽车加速行驶时的气动阻力是匀速行驶时的两倍多,与文献[3]的结论相符.

表 1, 表 2 中计算的阻力值,与以零初速度加速到 27.8 m/s 时的阻力比较,相对差值在 5.04% 以内,变化范围都较小.这就验证了某时刻气动阻力主要与此刻速度和加速度有关,其他因素对它的影响较小.这样就可以不考虑汽车行驶过程对某一时刻所受阻力的影响,以简化和方便工程应用.

4.2 阻力与加速度的拟合公式

由于很难一步得出含有速度和加速度两个变量的公式,因此需要先推出某一末速度下阻力与加速度的关系式.

对三种末速度下的工况进行了计算.这三种工况的末速度分别为 19.46, 27.8, 36.14 m/s, 初速度均为零,加速度分别都为 2.78, 3.707, 5.56, 11.12 m/s² (即百公里加速时间分别为 10, 7.5, 5, 2.5 s).

图 4 至图 6 分别给出了三种工况下计算的阻力值及其线性拟合图.

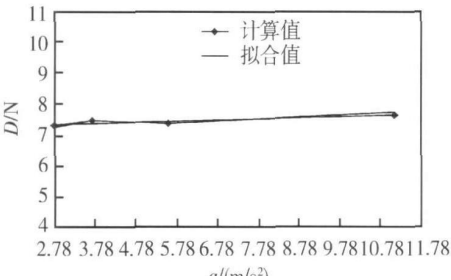


图 4 末速度为 19.46 m/s 时的 D-a 图
Fig. 4 D-a graph at end velocity of 19.46 m/s

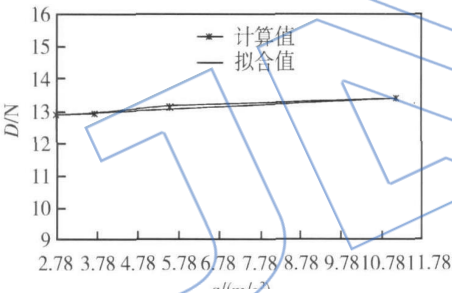


图 5 末速度为 27.8 m/s 时的 D-a 图
Fig. 5 D-a graph at end velocity of 27.8 m/s

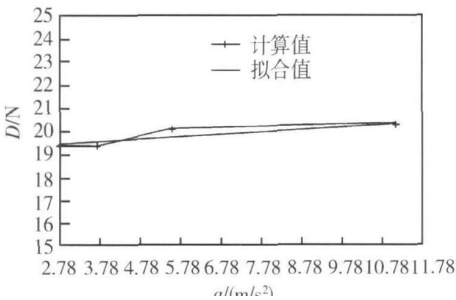


图 6 末速度为 36.14 m/s 时的 D-a 图
Fig. 6 D-a graph at end velocity of 36.14 m/s

用最小二乘法分别对三种工况下的阻力值做线性拟合,得出形式如下的拟合公式

$$D = bD_0 + k(a - 2.78) \tag{3}$$

则可得末速度为 19.46 m/s 时的拟合公式

$$D = 1.203 4D_0 + 0.035 5(a - 2.78), \tag{4}$$

末速度为 27.8 m/s 时的拟合公式

$$D = 2.116 3D_0 + 0.058 1(a - 2.78), \tag{5}$$

末速度为 36.14 m/s 时的拟合公式

$$D = 3.189 6D_0 + 0.109 9(a - 2.78), \tag{6}$$

从图 4 至图 6 中可以看出,数值模拟值和拟合公式值吻合的较好,同一速度时的阻力值基本上都随加速度的增大而线性增大.

4.3 阻力计算公式

为了使公式中体现出阻力与速度和加速度的关系,将式(4)至式(6)中的系数 b 和 k 值分别做线性拟合.图 7 和图 8 给出了 b 和 k 值及其线性拟合图.

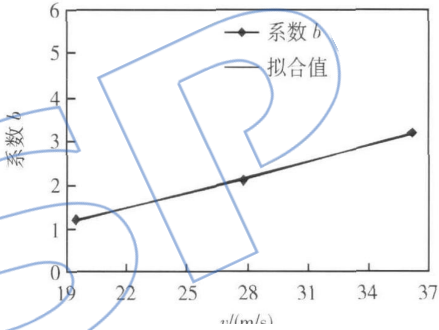


图 7 系数 b 的拟合图
Fig. 7 Curve fitting of coefficient b

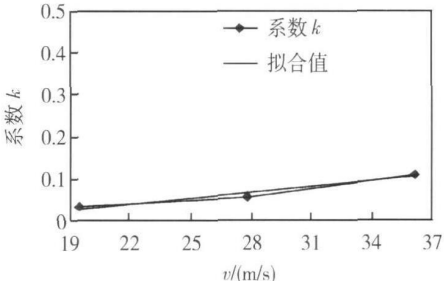


图 8 系数 k 的拟合图
Fig. 8 Curve fitting of coefficient k

通过线性拟合得出,系数 b 和 k 的拟合公式分别为

$$b = 0.119 1v - 1.140 6 \tag{7}$$

$$k = 0.004 5v - 0.056 2 \tag{8}$$

将公式(7)和(8)代入公式(3),得出最终的阻力计算公式

$$D = (0.119 1v - 1.140 6) D_0 + (0.004 5v - 0.056 2)(a - 2.78) \tag{9}$$

则气动阻力系数为

$$C_D = [(92.045v - 881.501)C_{D0} + (0.2585v - 3.228)(a - 2.78)]/v^2 \quad (10)$$

上两式中, $2.78 \text{ m/s}^2 \leq a \leq 11.12 \text{ m/s}^2$;
 $19.46 \text{ m/s} \leq v \leq 36.14 \text{ m/s}$;
 D_0 —以 27.8 m/s 速度匀速行驶的气动阻力;
 C_{D0} —匀速行驶的气动阻力系数.

5 结 论

通过三维数值模拟得到了不同速度及加速度情况下汽车的气动阻力. 验证了某一速度和加速度情况下的气动阻力主要与此刻速度和加速度有关, 其他因素如该时刻之前的加速时间、初速度等对它的影响较小. 推导拟合出了以同一初速度、不同加速度加速到某个相同速度值时阻力与加速度的关系式, 进而拟合得出阻力与速度及加速度的关系式.

本文是以直背式轿车模型作为研究对象进行模拟分析, 推导出气动阻力在限定的加速度和速度范围内的计算公式, 为以后的研究提供了一种新的思路和方法. 对于其它车型的阻力计算公式, 还有待于进一步研究.

参考文献:

[1] 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.

[2] 谷正气. 汽车空气动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
GU Zhengqi. Automotive aerodynamics[M]. Beijing: China Communications Press, 2005. (in Chinese)

[3] 傅立敏, 吴允柱, 贺宝琴. 队列行驶车辆的空气动力特性[J]. 吉林大学学报, 2006, 36(6): 871-875.
FU Limin, WU Yunzhu, HE Baoqin. Aerodynamic characteristics of vehicle platoon[J]. Journal of Jilin University, 2006, 36(6): 871-875. (in Chinese)

[4] 周伟, 谷正气. 超车情况下外流场计算仿真分析与研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(3): 344-346.
ZHOU Wei, GU Zhengqi. Simulation analysis and study on external flow field around vehicle in overtaking[J]. Automotive Engineering, 2005, 27(3): 344-346. (in Chinese)

[5] 蓝天, 康宁. 直背式轿车起动过程中气动现象的研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(11): 1868-1873.
LAN Tian, KANG Ning. Study of the aerodynamic characteristics of a car in process of starting[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11): 1868-1873. (in Chinese)