

# 离鳍对方背体气动特性影响的数值模拟和试验

贾青, 杨美, 杨志刚

(同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

**摘要:** 对基于 Fiat New Panda 的方背体车身, 首先对不同高度和长度离鳍下的整车气动特性进行研究, 采用模型风洞试验测量了不同工况下的阻力系数和升力系数, 同时采用 Star CCM+ 中  $k-\epsilon$  湍流模型进行数值仿真. 研究表明, 离鳍高度覆盖整个 C 柱时, 可以有效地降低方背体车身的阻力系数和升力系数; 离鳍使流经 C 柱两侧的气流分离延迟, 降低尾流区的湍流强度, 降低能量耗散; 方背体尾流区得到更多的压力恢复, 降低了前后压力差, 进而降低车身阻力系数. 然后采用验证过的计算方法对不同形状的离鳍进行了数值仿真, 发现不同形状的离鳍均可使方背体汽车的气动性能有所提升. 但不规则形状离鳍对于汽车尾部气流造成了一定影响, 使得其性能表现不如普通矩形的离鳍.

**关键词:** 方背体车身; 离鳍; 计算流体力学(CFD); 模型风洞试验; 气动特性

**中图分类号:** U467.1

**文献标志码:** A

## Computational and Experimental Study on Aerodynamics of Finlets on a Square-back Body

JIA Qing, YANG Mei, YANG Zhigang

(Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** Finlets with varied length and height on square-back body based on Fiat New Panda were investigated firstly both by computational and experimental ways. The scale wind tunnel tests were performed to obtain the drag coefficient and lift coefficient and the correlations with computational fluid dynamics based on  $k-\epsilon$  turbulent model were studied. It indicated that finlets along the whole C pillar could reduce both the drag coefficient and lift coefficient of a square back body. Finlets could delay air flow separation around C pillars and then decreased the turbulence kinetic energy in the wake. More pressure recovery was realized on the square back body to reduce the pressure gradient of the car body and the drag coefficient can be decreased as a result. Then the finlets with varied figures were simulated and got the results that the all

the finlets can reduce the drag and lift coefficient but finlet with rectangle figure was the best.

**Key words:** square back body; finlets; computational fluid dynamics (CFD); scale wind tunnel test; aerodynamics

汽车的气动特性对动力性、燃油经济性和操控稳定性具有重要的影响<sup>[1]</sup>. 汽车周围的流场是三维流动, 气流的分离会引起压力损失, 并在尾流区产生漩涡, 耗散能量, 增加气动阻力.

汽车空气动力学的研究方法主要有理论分析、风洞试验和数值仿真<sup>[2]</sup>, 其中风洞试验和数值模拟是现今研究最主要的 2 个手段. 近年来随着计算机技术和数值模拟技术的发展, 研究者应用数值计算的方法对汽车的气动特性做了许多研究工作, 为改善汽车的气动特性提供了大量有价值的参考数据, 但同时也受到数值计算自身的限制, 数值计算结果的准确性和可信度在计算流体力学发展过程中一直备受关注. 风洞试验作为研究汽车空气动力学的重要手段之一, 可揭示汽车周围复杂流场的本质且能验证汽车空气动力学理论分析和数值计算结果.

离鳍是一种不可收放的小鳍, 位于背鳍和尾鳍之间的身体边缘部分, 其高性能的水动力特性吸引了生物学家和工程研究人员的广泛关注<sup>[3]</sup>, 被引入飞行器的设计中, 公开的学术发表及对其机理的研究比较匮乏<sup>[4-6]</sup>. 波音 737 和 747 上的 VC(vortex control)离鳍利用可控的湍流流动减小飞机的飞行阻力系数, 从而减小飞机的燃油消耗. 近年来, 研究人员开始将离鳍引入到汽车的设计中, 试图改变整车的气动特性. 目前的离鳍研究多见于企业的实际应用, 公开的学术发表以及对其机理的研究比较匮乏. 基于此, 本文对方背体上的离鳍进行研究. 试验在菲亚特风洞中心进行, 采用 Fiat New Panda 的 1:

收稿日期: 2014-10-24

基金项目: 上海市地面交通工具风洞专业技术服务平台项目(14DZ2291400)

第一作者: 贾青(1979—), 女, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为空气动力学. E-mail: qing.jia@sawtc.com

3 车模,对不同高度和长度的离鳍进行了阻力系数和升力系数的测量.同时,应用商业软件 star CCM+软件对 1:3 的车模进行数值模拟,研究离鳍对方背体气动特性和尾流区流动的影响,为离鳍的影响机理提供可靠的依据.

### 1 试验设置

实验平台为意大利菲亚特集团的 1:3 气动声学模型风洞.该模型风洞是 3/4 开口式回流风洞,最大风速可达  $270 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . 喷口面积  $4 \text{ m}^2$ ,试验段长、宽、高分别为  $4 \text{ m}, 2 \text{ m}, 2 \text{ m}$ ,7 分力天平可以分别测量车身和车轮的气动力.移动带系统和边界层控制系统可以更好地反映汽车与空气的相对运动以及地面的影响作用.试验模型为 Fiat New Panda 的 1:3 缩比模型,通过固定车轮的 4 个水平支架和固定车身的竖直支架安装,如图 1 所示.

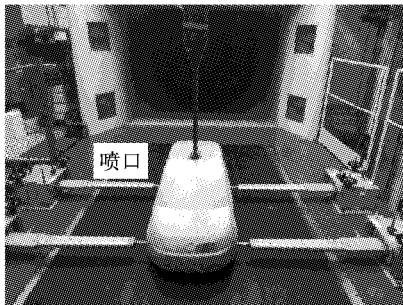


图 1 试验模型安装图  
Fig.1 Test model

试验中用硬板模拟离鳍,主要安装在 C 柱上,其高度  $h$  定义为沿 C 柱的长度(C 柱总高度为  $130 \text{ mm}$ ),长度  $l$  定义为从 C 柱到离鳍边缘的水平距离,如图 2 所示.

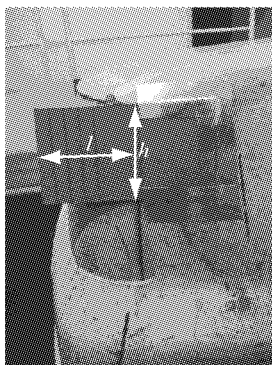


图 2 离鳍高度和长度的定义  
Fig.2 Finlets' Length and height definition

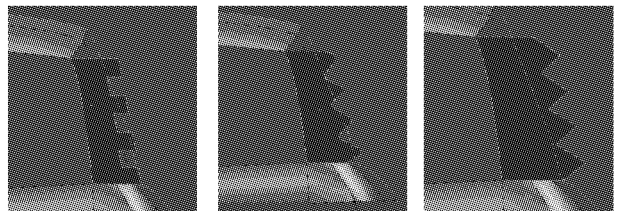
试验中测量了不同高度和长度组合下的气动

力,宽度分别为  $130 \text{ mm}$  和  $65 \text{ mm}$ ,对应每个宽度都设置长度为  $30, 40, 50, 60, 70 \text{ mm}$ . 试验时喷口速度  $140 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} (38.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$ ,对应雷诺数  $Re=3 \times 10^6$  (基于车长).

### 2 数值模拟

与风洞试验模型一致,数值仿真中也使用 Fiat New Panda 的 1:3 的缩比模型,应用 Star CCM+软件进行网格生成和数值计算.对应计算了与试验相同的离鳍长度和高度.计算域为长方体,采用对称结构,设置计算域为车前  $4L$  ( $L$  为车长),车后  $10L$ ,车侧  $2.5W$  ( $W$  为车宽),车上方  $5H$  ( $H$  为车高).计算域阻塞比为  $3\%$ ,可保证尾流充分发展,避免流动受到其他边界影响.在计算方法得到有效验证后,又对不同形状离鳍进行数值仿真,分别选取长城形(I)、波浪形(II)、锯齿形(III),如图 3.

计算网格为多面体网格,并在车身表面生成边界层网格,为了更好地模拟汽车周围的流场并提高计算效率,对车身周围网格进行加密,最终网格数量为 350 万.



a 长城形      b 波浪形      c 锯齿形  
图 3 离鳍形状

Fig.3 Finlets with different figures

计算中采用 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型,其中  $k$  为湍动能, $\epsilon$  为湍动能耗散率,边界条件设置如表 1 所示, $u, v, w$  为速度 3 个方向分量,其中  $u$  为主流方向速度分量.

表 1 边界条件设置

Tab.1 boundary conditions	
区域	边界条件
进口	速度入口 ( $u=38.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, v=w=0$ )
出口	压力出口 (0)
侧壁和顶壁	固体壁面(无切应力)
地面	移动壁面 ( $u=38.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, v=w=0$ )
对称面	对称
车身	固定壁面
离鳍	界面-障壁
车轮	局部旋转壁面 ( $\omega=408.421053 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )

### 3 结果分析与讨论

#### 3.1 风洞试验结果分析

试验测得的原始车阻力系数为 0.344. 图 4 给出了风洞试验中测出的整车阻力系数  $C_d$  随不同长度离鳍的变化曲线. 离鳍高度为 65 mm 时,  $C_d$  的变化较为平缓, 且比原始车的  $C_d$  提高约 0.001 左右; 离鳍高度为 130 mm 时,  $C_d$  随离鳍长度的增加而逐渐减小, 和原始车相比, 不同长度的离鳍使整车的  $C_d$

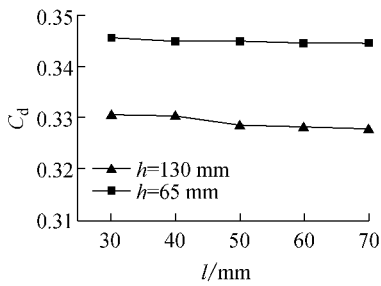


图 4 阻力系数

Fig.4 Drag coefficient

#### 3.2 数值仿真结果分析

数值计算中得到的  $C_d$  如图 6, 当  $h=130$  mm 时,  $C_d$  随长度增加而逐渐减小, 当  $l=60$  mm 时达到最小, 之后有所上升; 当  $h=65$  mm 时,  $C_d$  随长度增加一直下降. 与试验结果对比可见, 数值计算所得的阻力系数的变化趋势与试验较一致, 但数值比风洞试验测得的数据偏低. 这是由于 CFD 计算中气流物性可以一直保持恒定, 且没有试验中支架的影响, 因此  $C_d$  比试验中偏小, 且两者误差均在 1% 以内, 因而可以验证数值计算方法的准确性和合理性.

阻力系数的大小与流场特性和涡流结构有密切关系, 因此需对带有离鳍的汽车的流场结构进行分析. 通过计算可知, 以 130 mm 的离鳍为例, 其  $C_d$  最小为 0.321 5, 图 7 比较了对称面上原始车 A 与带有离鳍的车 B 的压力分布和流线分布. 带有离鳍的整车其背部压力比原始车的高, 意味着离鳍可以使方背体实现更多的压力恢复. 其尾部的展向涡较小, 尾流区压力较高, 通过车身底部进入死水区的气流质量增加, 补充一部分动能, 尾流区底部的气流与上方回流作用形成了与大的展向涡反向旋转的小涡.

图 8 对比了原始车 A 和带离鳍车 B 的纵向对称面湍动能云图. 从图中可以明显看出 B 车身尾流区的湍动能较 A 车有所降低, 这是由于离鳍可以使流经 C 柱两侧的气流附着, 延迟分离, 减少两侧气流

有所降低, 降幅在 0.013 和 0.016 之间.

图 5 给出了不同配置的离鳍对整车升力系数的影响. 其中升力系数差值 ( $\Delta C_l$ ) 等于有离鳍工况升力系数 ( $C'_l$ ) 与原始工况升力系数 ( $C_l$ ) 的差值. 与原始车相比, 离鳍可以使整车前后的升力系数有所下降, 提高整车的下压力, 进而有助于改善操控稳定性. 在  $h=130$  mm 工况下, 相应升力系数的改变量约为  $h=65$  mm 时的 2.5 倍. 从图中还可以看出, 离鳍对后轴升力系数改变量约为对前轴的 3 倍.

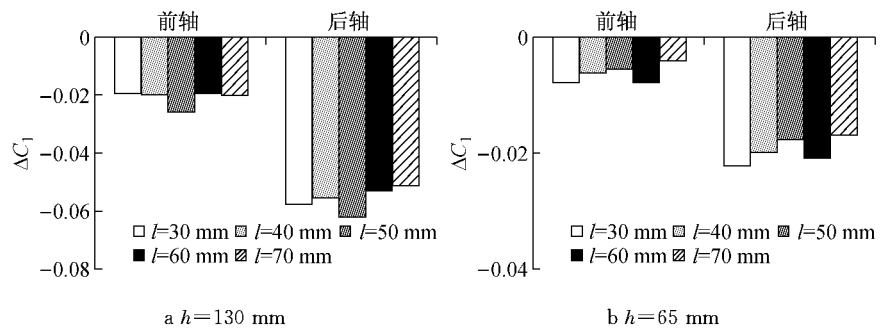


图 5 升力系数

Fig.5 Lift coefficient

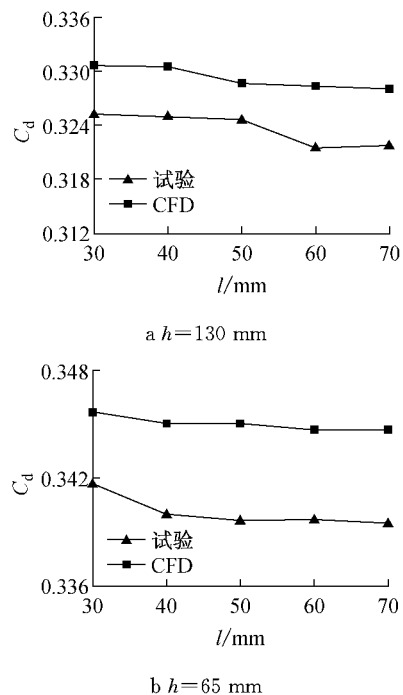
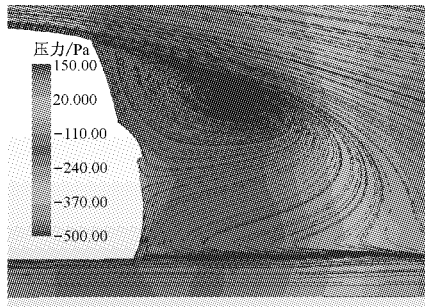


图 6 计算和试验对比

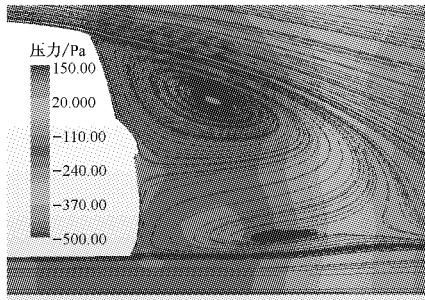
Fig.6 Comparison between CFD and test

回流进入尾流区, 进而减小湍动能, 降低能量耗散, 减小动能损失, 促进尾流区的压力回升, 减小车身后后压力差, 降低阻力系数.

图 9 所示为  $h=130$  mm 时不同长度离鳍下对称面上的流线图, 展示了不同尺寸的离鳍对流场的



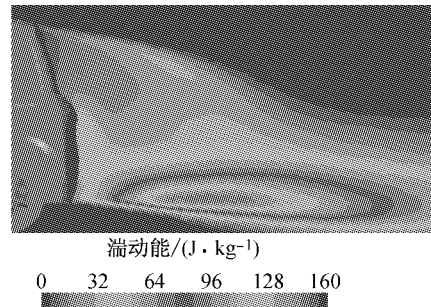
a 车 A



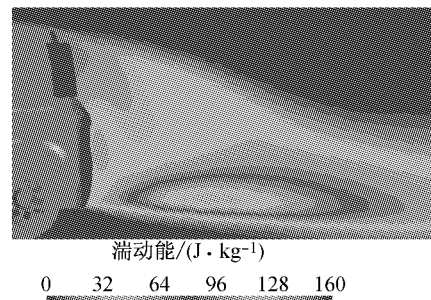
b 车 B

图 7 压力分布与速度流线图

Fig.7 Pressure distribution and velocity streamline



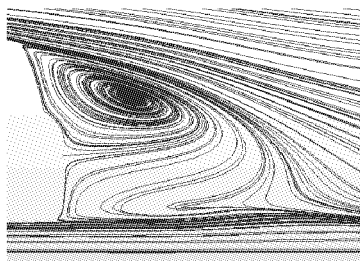
a 车 A



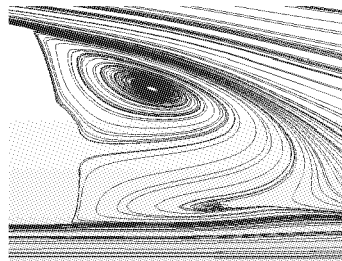
b 车 B

图 8 湍动能云图

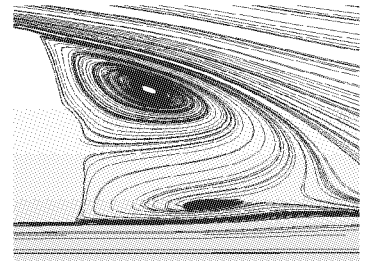
Fig.8 Turbulence kinetic energy contour



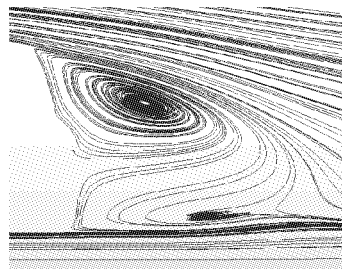
a  $l=30$  mm



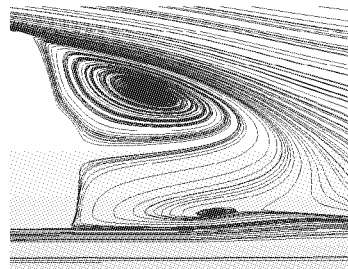
b  $l=40$  mm



c  $l=50$  mm



d  $l=60$  mm



e  $l=70$  mm

图 9 速度流线

Fig.9 Velocity streamline

影响.当长度较小为 30 mm 时(见图 9a),尾流区只存在 1 个大展向涡.随着长度的增加,离鳍可以使更多的气流附着,推迟分离,底部气流流量增加,进入死水区,与上方回流相互作用,形成小涡.从图中可以看出  $l$  从 30 mm 增加到 60 mm 时,中心展向涡越来越松散;底部小涡随着长度的增加而变大,70 mm

时再有所减小.这是由于离鳍长度过长时,上方气流回流逐渐向后推移,底部气流进入死水区之后与回流相互作用的质量减小,底部小涡有所减小.

图 10 给出了 400 mm 时 OXY 截面上的压力分布.从图中可以看出,后窗表面附近的压力随着长度的增加而变大,且尾流区负压区域越来越小.在 C 柱

两侧,由于离鳍使 C 柱两侧的气流分离延迟,有助于其压力恢复,因而随着长度的增加,C 柱附近分离逐

渐推迟,压强也逐渐增加。

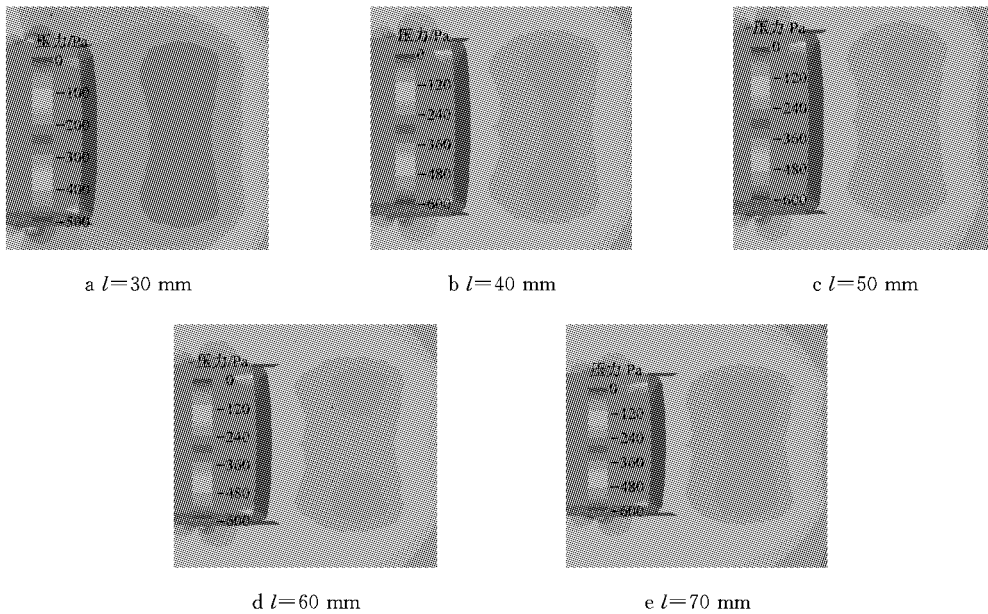


图 10 压力分布

Fig.10 Pressure contour

表 2 给出不同离鳍形状下整车  $C_d$  值,研究不同形状离鳍对整车气动性能的影响. 通过比较发现,不同形状离鳍均会降低整车气动阻力,几种形状的离鳍对气动阻力的改善效果相差不大,而其中矩形离鳍的改善效果相对较好. 可见文中所选形状对于整车气动性能的改善效果不如离鳍尺寸的变化带来的影响大。

表 2 多种形状离鳍的阻力系数对比

Tab.2  $C_d$  comparison

工况	$C_d$	差值/%
无离鳍	0.290	0
矩形离鳍	0.280	3.448
长城形	0.282	2.759
波浪形	0.281	3.103
锯齿形	0.282	2.759

### 4 结论

基于 Fiat New Panda 的 1:3 缩比模型的方背体车身,采用模型风洞试验和数值计算 2 种方法研究了离鳍对整车气动性能的影响,主要结论如下:

(1) 无论数值模拟还是风洞试验,离鳍高度覆盖整个 C 柱(130 mm)可以使整车的气动阻力系数平均下降 0.015 左右,且阻力系数随着长度的增加逐渐减小;而离鳍高度覆盖 C 柱上半部分(65 mm)时,整车气动阻力系数略有增加,但影响很小。

(2) 所有配置的离鳍均可以使整车前后的升力系数降低,后轴减少量为前轴的 3 倍左右;高度为 130 mm 的离鳍对升力系数的改变约为 65 mm 的 2.5 倍。

(3) 离鳍使尾涡湍流强度降低,减小了能量耗散,实现了方背体尾部的压力回升,减小车身前后压力差,进而降低整车的气动阻力系数。

(4) 离鳍使车身两侧 C 柱附近的气流重新附着,且长度越大,气流分离越晚. 后窗和 C 柱附近的压力随着离鳍长度的增加而升高,减小了能量耗散。

(5) 由于离鳍的影响,在中心展向涡的下方形成了一个反方向旋转的小涡,在一定范围内随着长度的增加而逐渐变大。

(6) 对不同形状离鳍的数值模拟结果表明,尽管形状不同,但对方背体汽车的气动性能都有提升. 但是由于离鳍不规则形状对于汽车尾部气流还是造成了一定影响,使得其性能表现不如普通矩形离鳍。

### 参考文献:

[1] Emmanuel G. Computational study of flow around a simplified car body [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008,96(6/7): 1207.  
 [2] 傅立敏. 汽车空气动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2006.  
 FU limin. Vehicle aerodynamics[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.