

柔性飘带长度对 Ahmed 模型气动阻力的影响

薛鸿强, 许斌, 黄典贵

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 为降低汽车行驶过程中的气动阻力, 以尾部倾角为 25° 的 Ahmed 类车体模型为研究对象, 提出在其尾部垂直面下边缘添加不同长度柔性飘带的控制方法, 采用格子玻尔兹曼方法与有限元分析相结合的流固耦合计算方法, 探讨了柔性飘带长度对汽车气动阻力的影响。首先对汽车模型进行格子尺度优化, 得到模型的空气阻力系数; 然后研究了柔性飘带对汽车气动阻力的影响; 最后对模型尾部流场、柔性飘带附近流场以及模型尾部表面压力系数进行了分析。仿真结果表明: 在模型尾部添加适当长度的柔性飘带, 改善了尾流结构, 提升了尾部表面压力, 减小了车体的压差阻力, 减阻率最高为 12.25%。

关键词: Ahmed 模型; 被动控制; 柔性飘带; 气动阻力; 数值模拟

中图分类号: O 351 **文献标志码:** A

Effect of flexible ribbon length on aerodynamic drag of Ahmed model

XUE Hongqiang, XU Bin, HUANG Diangu

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to reduce the aerodynamic drag of the vehicle during driving, the Ahmed body model with a tail angle of 25° was taken as the research object. The control method of adding different lengths of flexible ribbons to the lower edge of the vertical plane of the tail was proposed. The fluid-solid coupling calculation method combining lattice Boltzmann method and finite element analysis was used to explore the influence of the length of the flexible ribbon on the aerodynamic drag of the vehicle. Firstly, the air resistance coefficient of the model was obtained by optimizing the lattice scale of the vehicle model. Then, the influence of the flexible ribbon on the aerodynamic drag of the vehicle was studied. Finally, the tail flow field of the model, the flow field near the flexible ribbon and the pressure coefficient of the tail surface of the model was analyzed. The simulation results show that adding a flexible ribbon of appropriate length to the tail of the model improves the wake structure, increases the pressure on the tail surface, and reduces the differential pressure resistance of the vehicle body. The maximum drag reduction rate is 12.25 %.

Keywords: Ahmed model; passive control; flexible ribbon; aerodynamic drag; numerical simulation

收稿日期: 2022-11-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52036005)

第一作者: 薛鸿强 (1997-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 流动控制与仿真. E-mail: hongqiangxue163@163.com

通信作者: 黄典贵 (1963-), 男, 教授. 研究方向: 流动控制与仿真、流体机械. E-mail: dghuang@usst.edu.cn

近年来,传统汽车的节能减排和燃油经济性引起人们关注。汽车气动阻力的大小与燃油经济性息息相关,风阻系数越小的汽车拥有越佳的燃油经济性,因而如何降低气动阻力成为热点研究。有研究发现,当汽车车速达到 70 km/h 时,汽车驱动力主要用来克服行驶过程中由车身表面流动分离和空气粘性作用产生的气动阻力^[1]。气动阻力又可分为压差阻力、摩擦阻力,而压差阻力占气动阻力的 85% 左右^[2-3]。Ahmed 等^[4]提出了模拟尾流结构的 Ahmed 简化车体模型,并且指出充分发展的气流将在模型尾部各锐边处发生流动分离,从而形成尾部回流区,压差阻力就是由于车身后部存在涡流区而产生的^[5]。

国内外诸多研究者采用流动控制方法,通过控制车身表面气流的流动分离,改善汽车尾流结构,提升汽车尾部压力,达到降低气动阻力的目的,进而提高汽车燃油经济性、降低能耗。流动控制方法主要分为主动控制和被动控制。主动控制方面,通常采用射流技术对尾部气流的分离进行主动控制,从而改变尾流结构,达到减阻目的。Zhang 等^[6]在 Ahmed 模型尾部设置射流口,实验结果表明,在适当的射流位置和射流速度下,可以实现最高 29% 的减阻效果,并指出主动射流控制可抑制模型两侧流向涡的尺度和强度,提高尾部压力。Joseph 等^[7]使用微机电系统(MEMS)脉冲射流对尾流的流动控制进行实验研究,最高可以达到 10% 的减阻效率。Wang 等^[8]基于大涡模拟方法对 25°Ahmed 模型进行数值分析,研究了不同射流频率下合成射流的减阻效果,结果表明减阻率达 13.6%。

国内外学者也将被动减阻控制方法应用在汽车减阻领域中。Wang 等^[9]研究了在 25°Ahmed 模型斜面上安装扰流板对气动阻力的影响,指出扰流板的存在会削弱斜面上低压区域的漩涡强度,减小压差阻力,随着扰流板高度的增加,尾涡被明显抑制,减阻率可达 7.2%。Beaudoin 等^[10]在 Ahmed 模型后背两侧边缘添加可变角度的襟翼,当襟翼与后背角度接近 70°时,襟翼影响了斜侧边缘产生的纵向涡流,降低了涡的强度,从而使模型尾部压强升高,降低压差阻力。郭鹏^[11]在 Ahmed 模型尾部斜面上添加门字形隔板,研究隔板的宽度及安装位置对模型气动阻力的影响,研究表明门字形隔板可有效抑制两侧拖曳涡的发

展,同时指出隔板宽度对气动阻力的影响较为明显,隔板宽度越宽,减阻效果越好。李斌斌等^[12]选择 30°Ahmed 模型为研究对象,在模型尾部安装涡流发生器,以此控制流动分离,结果表明安装涡流发生器后,模型的相对压差减小,气动阻力降低。除此之外,仿生表面^[13-14]、运动表面^[15]等控制方法也被应用于汽车气动减阻研究中,且得到了较为可观的减阻效果。主动控制方法往往采用能量输入改变尾流结构,通常需要增加额外的装置,增加系统复杂性及不稳定性。相比于此,被动控制方法不需要增加装置或者系统,结构简单、投入成本小,在现实实践中更加便于实施应用。也有学者采用格子玻尔兹曼方法进行柔性物摆动的研究,刘钊等^[16]利用格子玻尔兹曼方法(LBM),研究柔性旗帜在流场中的变形,结果证明了 LBM 能得到柔性旗帜的阻力系数和摆动的无量纲频率。Afra 等^[17]基于格子玻尔兹曼方法和浸没边界法,研究了不同雷诺数下柔性细丝在自由来流中摆动的影响。

本文选择尾部倾角为 25°的 Ahmed 模型为研究对象,采用耦合大涡模拟的格子玻尔兹曼与有限元分析方法,对在模型尾部垂直面下边缘添加微小柔性飘带的 Ahmed 模型进行流固耦合计算。拟通过柔性飘带在流场中摆动,抑制尾部流动分离,改善尾流结构,从而起到减阻的作用。

1 仿真方案及格子验证

1.1 数值模拟方法

采用流体仿真软件 XFlow 2019x 和有限元分析软件 Abaqus2018 进行流固耦合模拟计算。在 Abaqus 中创建柔性飘带模型,并在 Abaqus 的 plug-ins 工具栏中导出柔性飘带模型的 STL 格式,然后导出 Abaqus-inp 文件到工作目录下(Abaqus 和 XFlow 必须在同一工作目录下)。在 XFlow 软件结构分析选项中选择 Abaqus,柔性飘带模型结构耦合选项中选择双向。XFlow 和 Abaqus 是外部仿真环境,需要通过计算机命令行窗口进行 FSI_II_std_css 服务调动,具体操作为:首先打开计算机命令行窗口,然后调动流固耦合文件所在的工作路径,最后依次输入 `abaqus cse -configure FSI_II_std_css-listenerport 1024` 和 `abaqus -job FSI_II_std -input Job-1.inp -double -csedirector localhost:1024 -`

int 语句, 按此操作设置好耦合接口后, 仿真计算开始运行。

XFlow 软件采用 LBM 作为流场仿真分析的方法, LBM 是基于分子运动论发展而来的介观模型模拟方法, 该方法认为流体由大量离散的、存在质量的粒子团组成, 这些粒子团在随机地进行着迁移和碰撞, 通过统计大量粒子团的行为, 来模拟流体在宏观上的运动状态^[18]。格子玻尔兹曼方程是基于介观尺度, 描述流体粒子的运动轨迹的一种物理方程, 其简化方程^[19]为

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \xi \cdot \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{K}{m} \cdot \frac{\partial f}{\partial \xi} = -\frac{1}{\tau} (f - f^{eq}) \quad (1)$$

式中: $f=f(x,\xi,t)$ 是流体粒子随时间空间变化的分布函数; x 是流体粒子的位置向量; ξ 是流体粒子的速度向量; m 是流体粒子的质量; K 是流体粒子受到的外力; τ 是与碰撞相关的松弛时间; f^{eq} 是粒子的平衡态分布函数。

双向流固耦合技术是指流体域和固体域方程有序进行迭代求解, 流体域通过求解流体力学方程获得流场结果, 再基于耦合边界将求解获得的速度、压力值传递给固体, 固体域通过求解固体力学方程获得位移数据, 同时将位移基于耦合边界传递给流场, 两者进行数据的相互传递, 通过不断迭代计算达到收敛要求, 从而获得双向流固耦合结果^[20]。

1.2 几何模型

Ahmed 提出了一种简化的汽车模型^[4], 称为 Ahmed 模型。采用三维软件平台建立 Ahmed 三维模型, 模型长度 L_0 为 1044 mm, 宽 W_0 为 389 mm, 高 H_0 为 288 mm, 模型尾部斜面长为 222 mm, 模型距离地面的距离为 50 mm。汽车模型几何参数如图 1 所示。

Ahmed 模型由钝体前端、中间部分、尾部垂直面和斜面及 4 根立柱组成。Ahmed 模型因结构简单、尾部的流动结构可以真实反映汽车行驶过程中的尾部流动状态而被诸多学者广泛研究。以尾部倾角为 25° 的 Ahmed 模型为基础, 在尾部垂直面下边缘添加柔性飘带。柔性飘带材料为常见的 TPU 薄膜, 设材料为各向同性弹性材料, 飘带模型材料的密度为 1190 kg/m³, 杨氏模量为 18.1 MPa, 泊松比为 0.47。柔性飘带的安装位置如图 2 所示, 其中 x 为工况 Casex 下柔性飘带与模型尾部垂直面下边缘的距离。

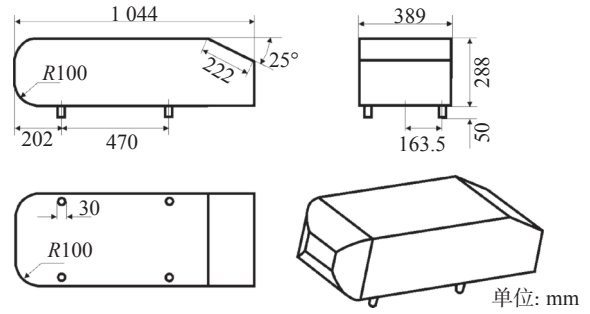


图 1 汽车模型几何参数示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geometric parameters of automobile model

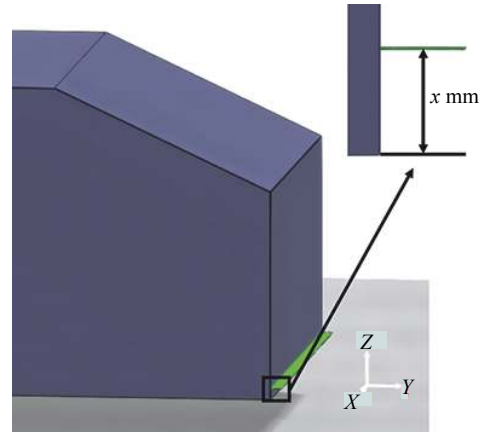


图 2 柔性飘带安装位置

Fig. 2 Installation position of flexible ribbon

1.3 计算域及边界条件设置

采用矩形虚拟风洞模拟外流场, 虚拟风洞尺寸为 8 m×2 m×2 m, Ahmed 模型头部距离虚拟风洞入口 2.5 m, 模型尾部距离虚拟风洞出口 5.456 m, 模型中心距离虚拟风洞两侧各 1 m。Ahmed 模型沿来流方向的投影面积为 0.115 m², 风洞阻塞比为 2.88%。虚拟风洞流体材料设置为空气, 温度为 288.15 K, 密度为 1.0 kg/m³, 动力粘度为 1.46014×10⁻⁵ Pa·s, 雷诺数 Re 为 4.29×10⁶ (特征长度为车长), 湍流强度小于 0.5%。湍流模型采用 Smagorinsky 模型进行湍流模拟。在 Ahmed 模型表面采用 Non-Equilibrium enhanced Wall-function (非平衡增强壁面函数) 模拟边界层, 该函数考虑了壁面周围的压力梯度, 更适用于模拟汽车尾部气流的流动分离现象^[21]。仿真时间为 1 s, 库朗数选择软件默认值 1, 时间步长 $\Delta t = 1.35135 \times 10^{-4}$ s, 文件保存频率为 100 Hz。仿真采用了自适应精化功能, 以满足计算收敛性要求。计算边界条件见表 1。

在 25° Ahmed 模型尾部垂直面下边缘添加厚度

表 1 边界条件

Tab.1 Boundary conditions

名称	设定
虚拟风洞入口	速度入口, 60 m/s
虚拟风洞出口	压力出口, 0 Pa
虚拟风洞地面	固定壁面边界条件
虚拟风洞顶部	远场速度
虚拟风洞侧面	周期性边界条件
车身表面	壁面边界条件

为 0.144 mm($1/2000H_0$)、宽度与模型宽度一致、不同长度的柔性飘带。取 Ahmed 模型 $0.5\%L_0$ (5.22 mm) 设定为柔性飘带长度的 $1L$ ，柔性飘带的具体长度参数见表 2。采用有限元分析软件设置柔性飘带非线性大变形分析：柔性飘带网格单元类型选择 C3D10M 单元，采用四面体单元进行网格划分，时间步选取动力显示分析步进行计算，计算终止时间和文件保存频率均与流体域的设置相同。另外考虑空气和柔性飘带的耦合作用，将柔性飘带和流场交界面设置为流固协同仿真边界。实际上柔性飘带固定在 Ahmed 模型表面上，因此将柔性飘带与 Ahmed 模型交接处的端部设置为固定边界条件，即约束所有移动。

表 2 柔性飘带长度参数

Tab.2 Length parameters of flexible ribbon

柔性飘带	1L	2L	3L	4L	5L	6L
长度/mm	5.22	10.44	15.66	20.88	26.10	31.32

1.4 格子生成及独立性验证

LBM 格子划分采用笛卡尔网格，格子按层级分布，下一级格子尺寸为上一级的两倍。流体域格子划分如图 3 所示，定义 3 种格子尺度：远场格子、近壁面格子及尾流格子。

计算 4 种格子尺寸下 Ahmed 模型阻力系数，并与 Ahmed 实验测得的阻力系数进行比较。在计算资源允许的条件下，将远场格子尺寸设为恒值 0.08 m， $t = 0.3$ s 时，Ahmed 模型的阻力系数均值与格子数量的函数关系如图 4 所示。当近壁面格子尺寸为 0.01 m 时，仿真计算得到的阻力系数为 0.292 87，Ahmed 在风洞实验测得的阻力系数为 0.285 60^[4]。数值模拟得到的阻力系数与风洞实验测得的阻力系数相比，误差为 2.5%，相对较小，数值模拟的结果接近实验值，在工程允许误差范围 5% 以内，

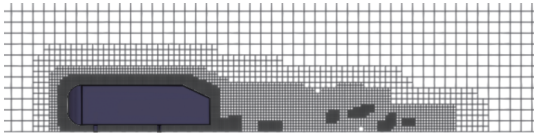


图 3 格子示意图

Fig. 3 Lattice diagram

由此认为本文采用的计算格子尺寸和数值模拟方法是可靠的。本文使用的远场格子尺寸为 0.08 m，近壁面格子尺寸、尾流格子尺寸为 0.01 m，下文均为该尺寸下的仿真实验结果。

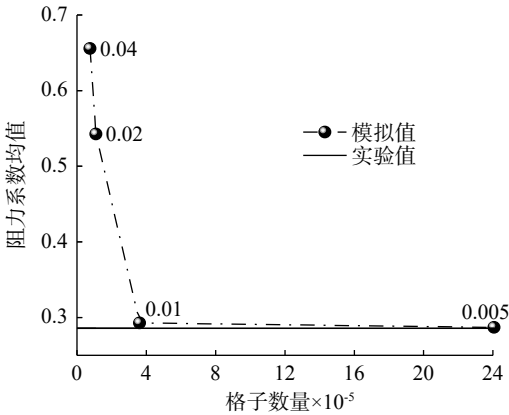


图 4 不同近壁面格子数量的阻力系数

Fig.4 Drag coefficient of different near-wall lattice numbers

2 仿真结果分析

图 5 为两种工况下，添加不同长度柔性飘带的 Ahmed 模型与原始模型阻力系数均值对比图。由图 5(a)可知，添加不同长度飘带后模型的阻力系数均值均低于原始模型，柔性飘带起到了一定的减阻效果；且随着柔性飘带长度的增加，模型的阻力系数呈现先下降后上升的趋势。当柔性飘带长度为 3L 时，模型阻力系数最小，为 0.261 051，对应的减阻率为 10.86%。由图 5(b)可得，在 Case15 工况下，随着柔性飘带长度的增加，模型的阻力系数均值总体呈现逐渐下降的趋势，且与原始模型相比，有较大幅度减小，实现了较好的减阻效果；当柔性飘带长度为 6L 时，阻力系数均值为 0.257 004，减阻率为 12.25%。综上所述，在模型尾部添加不同长度的柔性飘带可以降低模型的阻力系数，柔性飘带长度会对阻力系数产生一定影响。在特定工况下，选择合适的飘带长度，可以实现比较可观的减阻效果。

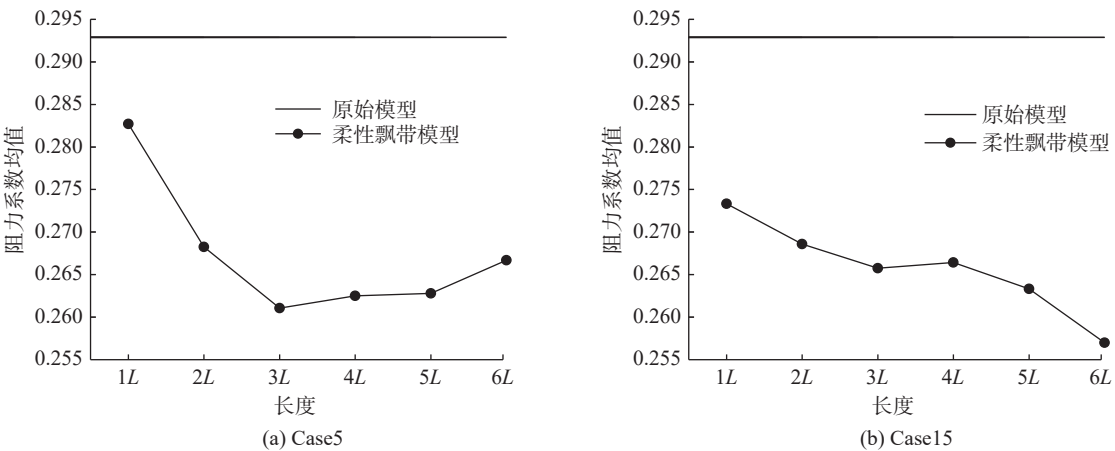


图5 阻力系数结果

Fig.5 Results of resistance coefficient

2.1 尾部流场分析

基于 Ahmed 原始模型，采用数值模拟方法获得阻力系数随时间的变化曲线以及尾部对称平面瞬态流场结构，如图 6 所示。可以看出，阻力系数呈随机的脉动变化，尾部流场结构具有非定常特性，故应考察不同时刻下的瞬态流场。

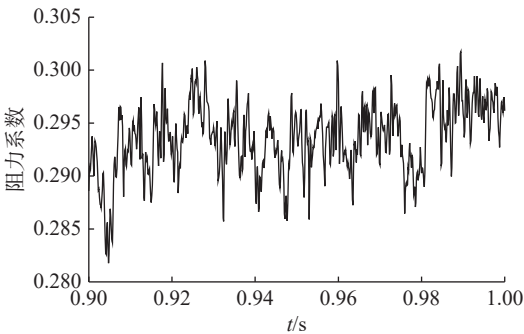


图6 阻力系数随时间的变化

Fig.6 Variation of drag coefficient with time

图 7 为不同时刻下的模型尾部纵对称面瞬态流线图，图右上角为局部细节放大图。由图 7(a)原始模型流场图可知，气流流经模型尾部时，一部分气流从斜背上分离，从而向下游移动形成漩涡，此漩涡呈顺时针旋转；另一部分气流在车底平直流动至尾部发生分离，形成上卷气流，此处涡流呈逆时针旋转，并于斜背分离的气流在尾部垂直面后相互作用，形成尾部回流区。尾部回流区内漩涡的发展会消耗能量，导致尾部压力降低，带来较大的气动阻力。上方顺时针漩涡随着时间的推移一直存在于汽车尾部，并没有向下游发展的趋势。下方逆时针的漩涡随着时间的推移，不断地形成并向下游发展。

由图 7(b)、(c)可以看出，在 Case5 工况下添

加柔性飘带之后，尾部下方逆时针的气流在柔性飘带的影响下，沿飘带上表面向尾部后方移动，并与车底尾部分离的气流在飘带尾端相融合。与原始模型底部气流平直流向下游形成的尾流区相比，融合后的流体逐渐有向尾部上方移动的趋势，这有利于缩小尾部下游回流区的面积，减小能量消耗，使尾部压力升高。随着时间的推移，上方顺时针漩涡一直存在与汽车尾部，下方交汇的气流在柔性飘带的影响下，不断形成，逐渐向尾部上方移动并向下游发展。在 Case5 工况下，柔性飘带的安装位置距尾部垂直面下边缘较近，易受模型底部高速气流的影响。由图 7(b)、(c)右上角局部放大图可以看出，长度为 3L 的柔性飘带受高速气流影响较小，随着时间的推移，飘带发生形变变化较为稳定；6L 的柔性飘带较长，受高速气流的影响较大，在飘带摆动过程中，产生了较大幅度的形变，会对尾部漩涡产生较大的扰动，在柔性飘带大幅摆动的过程中，飘带会向下飘动（见图 7(c)中第四时刻流线图），这会导致尾部逆时针漩涡气流沿柔性飘带上表面向下方移动，使得回流区面积有所增加，这将不利于实现减阻效果。

由图 7(d)、(e)可以看出，在 Case15 工况下安装柔性飘带后，流体在柔性飘带下表面形成了极小的涡，尾部下方逆时针的气流与车底尾部分离的气流在飘带尾端相交汇，交汇后的流体有明显地向尾部上方移动的趋势。随着时间推移，尾部下方交汇的漩涡不断生成，向尾部上方移动并向下游发展，这有利于缩小了尾部下方回流区的面积，减小能量耗散，提高尾部压力。在 Case15 工况下，柔性飘带的安装位置距尾部垂直面下边缘较远，受模型底部高速气流的影响较

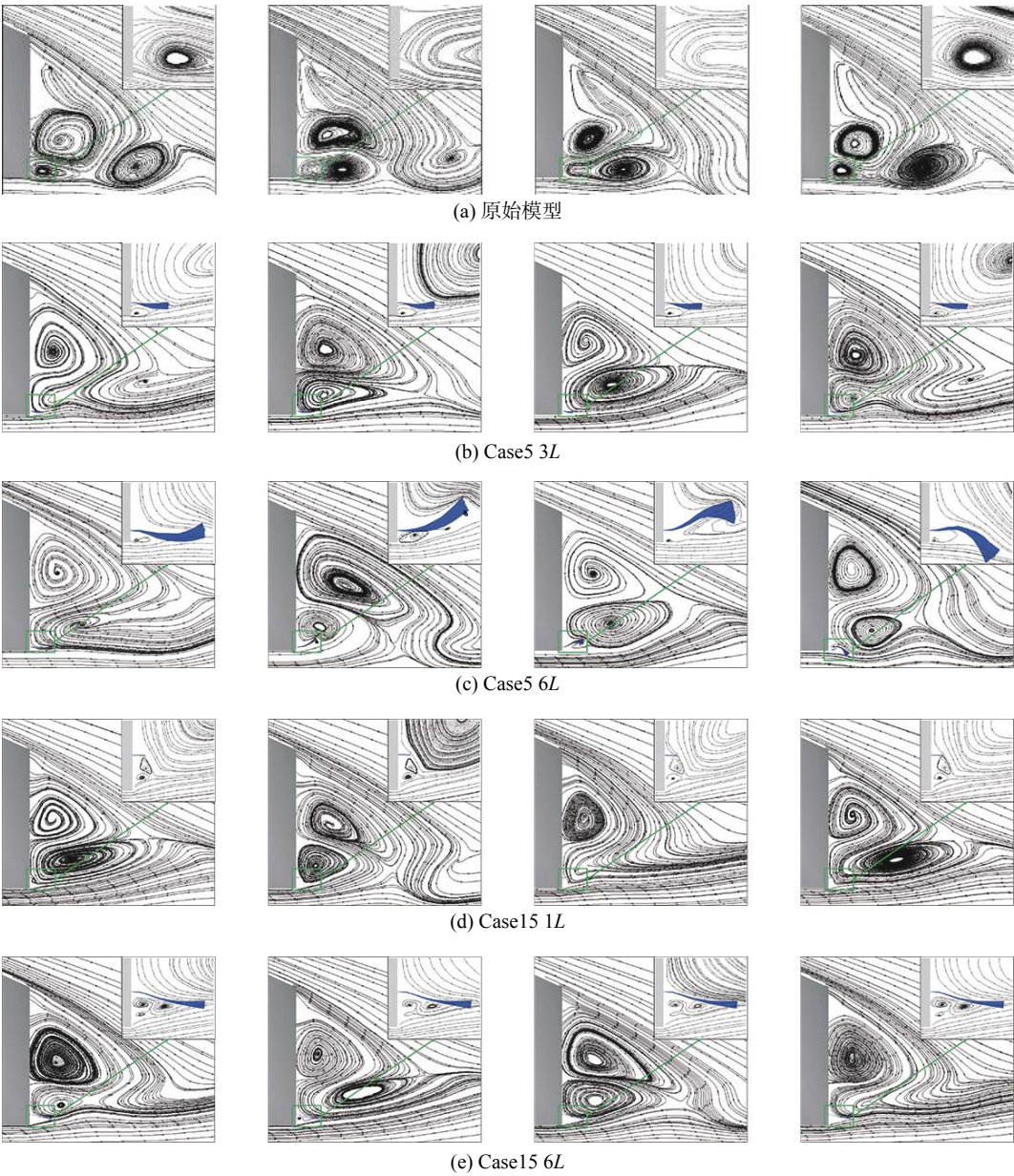


图 7 不同时刻下的尾部纵对称面瞬态流线图(右上角为局部放大图)

Fig.7 Transient streamlines of the longitudinal symmetry plane at different moments (partial enlarged view at upper right)

小，在此工况下柔性飘带的摆动幅度较小。随着柔性飘带长度的增加，逆时针的气流流经柔性飘带上表面的距离越长，与底部气流相融合也就越晚，推动漩涡向下游脱落，使漩涡的低压中心远离模型表面，提高尾部压力，从而降低阻力系数均值。

2.2 尾部表面压力系数分析

模型前后产生压差阻力的主要原因在于模型尾部气流相互作用形成的回流区影响尾部压力分布，因此需要提升尾部压力，从而减小模型前后的压差阻力，达到减阻的目的。图 8 为所研究模型尾部 Y 方向坐标位置示意图，下文均基于此示意图对 Ahmed 模型尾部的表面压力系数 C_p 进行研究。

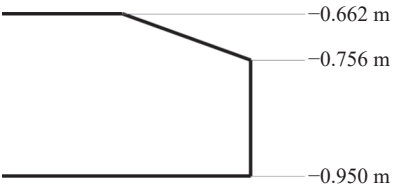


图 8 尾部 Y 坐标位置示意图

Fig.8 Y Coordinate position diagram at tail

图 9(a)为原始模型在 Case5 工况下添加长度分别为 3L 和 6L 柔性飘带模型的尾部表面压力系数。由图可知，尾部添加 3L 和 6L 柔性飘带模型的表面压力系数明显高于原始模型，这主要是由于柔性飘带使尾部交汇气流向上方移动并向下游

发展,从而使尾流区面积减小,尾部压力上升所导致。此外,观察尾部 Y 坐标位置 $-0.95\sim-0.925\text{ m}$ 可知, $6L$ 柔性飘带模型的表面压力系数低于 $3L$ 柔性飘带模型的表面压力系数。原因在于 $6L$ 柔性飘带受底部高速气流影响较大,柔性飘带

产生了较大的形变,对流场扰动较大;且柔性飘带在摆动过程中会使尾部下方逆时针漩涡向下方移动,不利于尾部压力的提高,故减阻效果逊色于 $3L$ 柔性飘带模型。此压力变化与图 7(c)流线图相吻合。

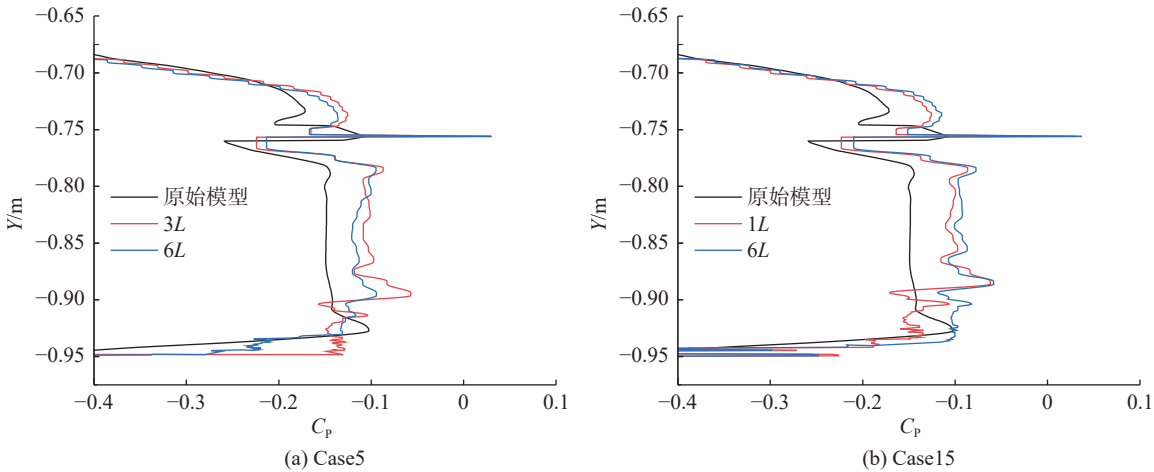


图 9 表面压力系数
Fig.9 Surface pressure coefficient

图 9(b)为原始模型在 Case15 工况下添加长度分别为 $1L$ 和 $6L$ 柔性飘带模型的尾部表面压力系数。加装柔性飘带模型的表面压力系数均高于原始模型,表明添加柔性飘带后,模型尾部压力有所上升,这有利于降低汽车前后压差阻力,实现了减阻的效果。此外, $6L$ 柔性飘带模型的表面压力系数总体上要高于 $1L$ 柔性飘带模型的表面压力系数,表面压力提高,降低了模型阻力系数均值,这也符合图 5(b)显示的变化规律。

3 结 论

以尾部倾角为 25° 的 Ahmed 模型为研究对象,提出了在模型尾部垂直面下边缘添加微小柔性飘带进行减阻的方法,探究了两种工况下,柔性飘带的长度参数对气动减阻的影响,通过数值模拟研究得到了以下结论:

a. 模型尾部尾流区的存在直接影响压差阻力。在模型尾部添加柔性飘带,能有效地干扰尾部逆时针漩涡与底部气流的相互作用,能够缩小回流区的面积,有助于使漩涡负压中心远离模型表面,有效提升模型尾部压力,从而减小了模型前后压差阻力,达到降低气动阻力的目的。

b. 在 Case5 工况下,柔性飘带的安装位置距离

尾部垂直面下边缘较近时,柔性飘带会受模型底部高速气流的影响。当柔性飘带长度为 $3L$ 时, Ahmed 模型阻力系数均值为 $0.261\ 051$,减阻率为 10.86% 。

c. 在 Case15 工况下,随着飘带长度的增加,阻力系数呈逐渐下降的趋势。当柔性飘带长度为 $6L$ 时, Ahmed 模型阻力系数均值为 $0.257\ 004$,对应的减阻率为 12.25% ,实现了较好的减阻效果。

参考文献:

[1] SCHNEPF B, SCHÜTZ T, INDINGER T. Further investigations on the flow around a rotating, isolated wheel with detailed tread pattern[J]. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 2015, 8(1): 261–274.

[2] HUCHO W, SOVRAN G. Aerodynamics of road vehicles[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1993, 25: 485–537.

[3] 傅立敏. 汽车设计与空气动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

[4] AHMED S R, RAMM G, FALTIN G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake[R]. *SAE Transactions*, 1984: 473–503.

[5] CHOI H, LEE J, PARK H. Aerodynamics of heavy vehicles[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014, 46: 441–468.

[6] ZHANG B F, LIU K, ZHOU Y, et al. Active drag

- reduction of a high-drag Ahmed body based on steady blowing[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 856: 351–396.
- [7] JOSEPH P, AMANDOLESE X, EDOUARD C, et al. Flow control using MEMS pulsed micro-jets on the Ahmed body[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, 54(1): 1442.
- [8] WANG B X, YANG Z G, ZHU H. Active flow control on the 25° Ahmed body using a new unsteady jet[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2019, 79: 108459.
- [9] WANG H F, YU Z, CHAO Z, et al. Aerodynamic drag reduction of an Ahmed body based on deflectors[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 148: 34–44.
- [10] BEAUDOIN J F, AIDER J L. Drag and lift reduction of a 3D bluff body using flaps[J]. *Experiments in Fluids*, 2008, 44(4): 491–501.
- [11] 郭鹏. 基于尾部流动结构的车辆气动减阻技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [12] 李斌斌, 姚勇, 印帅, 等. 基于涡流发生器的 Ahmed 模型分离流被动控制实验 [J]. *西南科技大学学报*, 2016, 31(3): 95–101.
- [13] HOWELL J, SIMS-WILLIAMS D, SPROT A, et al. Bluff body drag reduction with ventilated base cavities[J]. *SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems*, 2012, 5(1): 152–160.
- [14] 谢非, 丁玉梅, 秦柳, 等. 车身非光滑表面凹坑排布对气动性能的影响 [J]. *应用数学和力学*, 2015, 36(5): 505–514.
- [15] MODI V, DESHPANDE V. Aerodynamics of a building with momentum injection[C]//Proceedings of the 19th AIAA Applied Aerodynamics Conference. Anaheim: AIAA, 2001.
- [16] 刘钊, 刘刚, 江雄, 等. 基于浸润边界-格子波尔兹曼通量求解器的柔性结构流固耦合数值模拟 [J]. *空气动力学学报*, 2019, 37(5): 705–714.
- [17] AFRA B, DELOUEI A A, MOSTAFAVI M, et al. Fluid-structure interaction for the flexible filament's propulsion hanging in the free stream[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, 323: 114941.
- [18] 许鹤林. 格子 Boltzmann 方法理论及其在流体动力学中的应用研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2010.
- [19] BHATNAGAR P L, GROSS E P, KROOK M. A model for collision processes in gases. I. Small amplitude processes in charged and neutral one-component systems[J]. *Physical review*, 1954, 94(3): 511–525.
- [20] 江民圣. ANSYS Workbench 19.0 基础入门与工程实践 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019.
- [21] 李明达, 隗海林, 门玉琢, 等. 复杂底部结构下的重型载货汽车气动阻力 [J]. *吉林大学学报:工学版*, 2017, 47(3): 731–736.

(编辑: 董 伟)