

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.06.004

基于自激振动激励器的流动控制汽车减阻研究

吴勃夫, 陈自强, 孙亮, 吴姚烨, 徐晓

(合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为了降低汽车行驶时的空气阻力, 文章采用一种基于内部结构流固耦合的自激振动激励器以产生高速、高频的脉冲微射流进行主动流动控制。通过 ANSYS 双向流固耦合仿真模拟激励器的工作过程, 分析其产生的脉冲射流速度和频率, 再从不同工作参数和结构参数对其激励特性的影响进行研究; 将该激励器沿 Ahmed 类车体模型尾部的分离边缘布置, 研究其对车体尾迹区流动拓扑结构的影响, 并通过空气阻力系数分析其减阻效果。结果表明, 自激振动激励器产生的脉冲微射流可以有效地控制减阻, 最高可达 7.12% 的减阻效果。该研究为主动流动控制减阻提供了新思路。

关键词: 自激振动激励器; 脉冲微射流; 主动流动控制; 双向流固耦合; Ahmed 类车体

中图分类号: U461.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)06-0745-09

Research on aerodynamic drag reduction of vehicle with flow control based on self-excited vibration actuator

WU Bofu, CHEN Ziqiang, SUN Liang, WU Yaoye, XU Xiao

(School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to reduce the aerodynamic drag of traveling vehicles, a self-excited vibration actuator based on the fluid-structure coupling of internal structure was used to generate high-speed, high-frequency pulsed microjet for active flow control. The working process of the actuator was simulated by ANSYS bi-directional fluid-structure coupling method, the velocity and frequency of the pulsed jet produced by the actuator were analyzed, and then the influence of different working parameters and structural parameters on its excitation characteristics was studied. The actuator was arranged along the separation edge of the tail of the Ahmed body model, its influence on the flow topology of the wake area of the body was studied, and its drag reduction effect was analyzed through the air drag coefficient. The results show that the pulsed microjet generated by self-excited vibration actuator is effective in drag reduction, with a drag reduction effect up to 7.12%. The study provides a new idea for drag reduction with active flow control.

Key words: self-excited vibration actuator; pulsed microjet; active flow control; bi-directional fluid-structure coupling; Ahmed body

0 引言

随着新能源汽车的兴起, 汽车的能耗和电动车续航里程逐渐引起人们的关注, 同时由于燃油价格的迅速上涨和尾气排放对环境的影响, 通过

对汽车空气动力学的研究来降低汽车气动阻力变得十分重要。当车速达到 100 km/h 时, 空气阻力 80% 来源于汽车尾迹区产生的压差阻力^[1], 通过相关手段控制流动分离以减小尾迹区大小, 对改善汽车空气动力学特性具有重要的研究意义。

收稿日期: 2022-11-10; 修回日期: 2023-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875150); 合肥市自然科学基金资助项目(2022014)

作者简介: 吴勃夫(1980—), 男, 安徽太湖人, 博士, 合肥工业大学讲师, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: bbfwu@163.com.

现有的流动控制分为被动流动控制、主动流动控制以及主被动结合的流动控制系统。主动流动控制和被动流动控制的划分是根据是否有能量消耗和所涉及的控制回路^[2]。传统的被动控制有气动造型优化^[3-5]或增加气动附加装置,如添加后扰流板^[6]、涡流发生器^[7]、底部扩散器^[8]等以减少气动阻力,这些传统的被动流动控制方式一方面优化效果非常有限,另一方面环境适应能力差,甚至有可能对减阻产生负面效果。主动流动控制方式主要是在车身表面开孔后通过激励器产生壁面抽吸和射流实现流动控制以及利用激励器引入体积力实现控制等^[9]。

主动流动控制效果依赖于激励器的性能,激励器可以分为机械式、压电式、等离子体式等^[10]。文献^[11]以 Ahmed 为研究对象,利用电磁激励器阵列并将其布置在模型尾部,在壁面上产生振动的脉冲射流,减阻效果达到 4.3% 左右,但是激励效果易受电磁干扰;文献^[12]将压电合成射流激励器嵌入车体壁面,通过对激励器施加脉冲电压产生合成射流(零净质量射流),有效地控制流体湍流结构,但产生的合成射流速度较低且存在 1/2 个周期的占空期;文献^[13]将等离子体激励器应用在 Ahmed 类车体模型上,通过交流电产生等离子体形成离子风,进而引入体积力进行控制,减阻效果达到 4.58%,但诱导产生的离子风速最高仅 5 m/s 左右。

上述激励器的应用虽然可以达到一定的控制效果,但存在易受干扰、过多的消耗外部电源以及产生的射流速度低等问题。针对这些问题,本文采用一种体积小、鲁棒性好的自激振动激励器,其可以产生高频、高速的脉冲射流。通过仿真分析激励器产生的脉冲射流频率和速度,从不同工作参数和结构参数对其激励特性的影响进行研究,并将该激励器布置在 Ahmed 车体尾部,研究分析其减阻机理以及减阻效果。

1 自激振动激励器结构及分析

目前汽车主动流动控制广泛使用的多是压电合成射流激励器和等离子合成射流激励器,而关于脉冲射流激励器的研究较少。由于汽车周围流动结构复杂,合成射流激励器容易导致能耗过高且合成射流难以产生高频、高速的射流效果,而高速的射流更有利于流动掺混,对流场产生更大的扰动。

1.1 激励器结构模型及工作原理

本文参考文献^[14]设计了一种应用于飞机主动流动控制的自激振动微型激励器,针对其原有模型的内部结构和微通道距离进行修改(由原先 0.02 mm 改为 0.06 mm),且对其工作参数和几何参数的影响进行分析。微型激励器可以在恒定压力入口和标准大气压出口下通过内部结构流固耦合产生高速的脉冲微射流。

微型激励器的内部结构和三维结构如图 1 所示,三维结构尺寸为 12 mm×5 mm×12 mm。

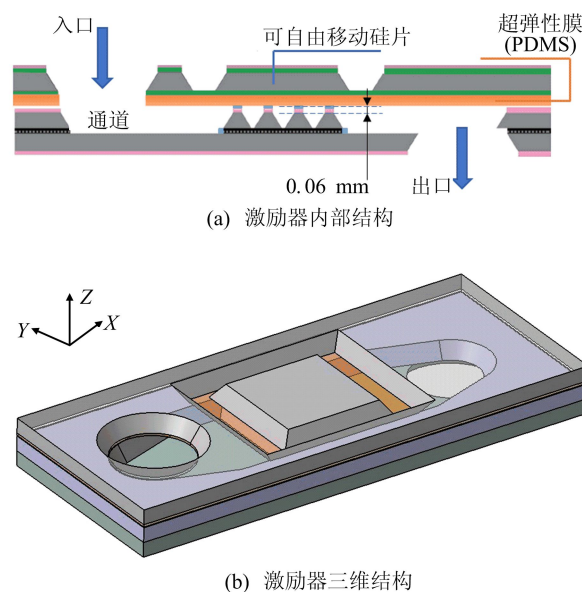


图 1 自激振动激励器结构示意图

微型激励器由 3 个独立加工的硅片(厚度均为 0.38 mm)和柔性膜(厚度为 0.06 mm)组成。其中 2 片硅片粘合在一起形成微通道部分,另一片粘合在柔性膜上;柔性膜采用超弹性材料聚二甲基硅氧烷(PDMS),其具有价格低廉、柔性好等优点,被广泛应用于微型激励器。将柔性膜涂在硅片上,待其固化后蚀刻硅片,形成依附在膜上的可自由移动硅块。

微型激励器在入口施加恒定压力时,微通道内静压增加使柔性膜发生膨胀,流体便可自由地通过激励器内部。由于可以自由移动硅块下方加工出的 4 个硅壁的作用,引入的压力在膜下方分布不均匀。膜下产生的不均匀分布压力与膜膨胀的拉应力之间相互耦合,形成激励器拉伸与扭转模态耦合的一种动态平衡,进而使膜上的硅块产生沿 Z 轴的向上移动和绕 Y 轴旋转的自激振动。对于此模态耦合自激振动存在一种临界条件,当内部诱导压力超过临界条件时,此动态平衡的振

动会由于系统阻尼的存在变为衰减的振动^[15]。

1.2 自激振动仿真模拟分析

为研究微型激励器的激励特性,需对激励器进行流固耦合模拟其工作过程。对于流固耦合的计算方式有单向和双向流固耦合分析,因为模型在恒定压力入口下超弹性膜会发生较大的膨胀变形,固体域变形对流场的影响不可忽略,且要研究出口速度和频率的瞬态状况,所以采用双向流固耦合分析。

1.2.1 流固耦合控制方程

分析流固耦合既要分析流体运动,又要分析固体的形变。因此流体区域和固体区域应分别满足其基本的控制方程。

由于气体密度变化较小,流体的基本控制方程采用不可压缩的连续性方程和不可压缩的 N-S 方程。

连续性方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

其中: u 、 v 、 w 分别为流体在 X 、 Y 、 Z 这 3 个方向上的速度分量。

动量方程为:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \mathbf{f} - \frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (2)$$

其中: \mathbf{V} 为流体的速度矢量; \mathbf{f} 为流体所受质量力矢量; p 为流体压强; ρ 为密度; ν 为运动黏性系数。

固体部分的控制方程为结构动力学方程,即

$$\mathbf{M}_s \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} + \mathbf{C}_s \frac{d\mathbf{r}}{dt} + \mathbf{K}_s \mathbf{r} + \boldsymbol{\tau}_s = 0 \quad (3)$$

其中: \mathbf{M}_s 为固体质量矩阵; \mathbf{C}_s 为固体阻尼矩阵; \mathbf{K}_s 为固体刚度矩阵; \mathbf{r} 为固体位移; $\boldsymbol{\tau}_s$ 为固体所受到的应力。

在流固耦合边界处,应遵循最基本的守恒原则,即应满足流体与固体的应力、位移、热流量、温度等变量相等,此模型不涉及热量传递,应满足如下方程组:

$$\begin{cases} \tau_f \mathbf{n}_f = \tau_s \mathbf{n}_s, \\ d_f = d_s \end{cases} \quad (4)$$

其中: τ 为应力大小; d 为位移; \mathbf{n} 为法向方向单位向量;下标 f 和 s 分别代表流体域和固体域。

1.2.2 双向流固耦合仿真及分析

由于二维模型无法模拟流体的横向不稳定性和一些漩涡的形成、耗散等复杂流动现象,也就难以模拟出整个模型产生脉冲射流的过程。因此本文采用三维模型建模,通过双向流固耦合仿真分

析激励器射流特性。

忽略设计的激励器三维结构模型的固定硅片部分,把可以自由移动的硅块及其所依附的超弹性膜作为固体域部分。提取硅微通道形成的内流道部分作为流体域部分,同时为了更好地使流体入口和出口充分发展,将流体域的入口和出口分别延长 1.5 mm 和 3.0 mm。

简化的流场和超弹性膜结构场的耦合仿真模型如图 2 所示。

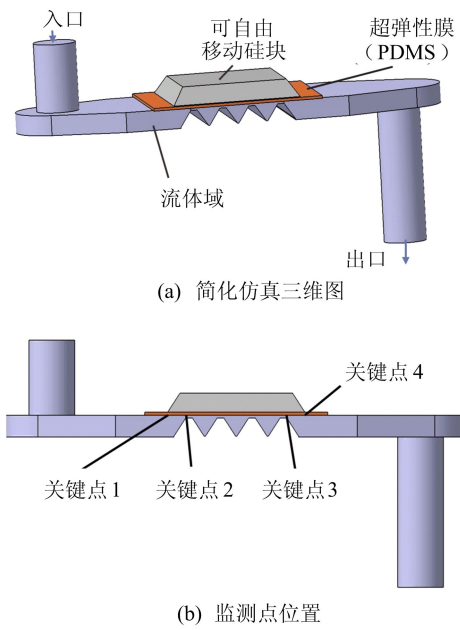


图 2 激励器仿真模型

本文采用 ANSYS 平台的 Fluent 和 Transient Structural 模块进行双向流固耦合仿真模拟激励器工作过程。

流体域模型在 ANSYS-Fluent 中采用瞬态压力基 (pressure-based) 进行求解。在微尺度下,流动雷诺数远小于临界雷诺数,属于层流流动^[16],因此采用层流模型。

边界条件设置如下:入口压力为 0.01 MPa (相对压力),出口压力为 0,工作压力为 101 325 Pa。压力速度选择耦合 (Coupled) 算法求解,相较于其他算法,耦合算法有较好的收敛性和较高的精度。打开动网格的网格重构和网格光滑设置,时间步长设置为 5×10^{-7} s,总时间步为 0.004 s。

固体域仿真所采用的超弹性膜是聚二甲基硅氧烷 (PDMS),其性能取决于与固化剂的混合比,本文仿真采用 1:1 的混合比模型。在非线性和大应变区,二阶 Ogden 材料模型能更精确地描述 PDMS 弹性体的力学行为,因此采用二阶 Ogden

材料模型。

本文所采用的硅和 PDMS 的材料参数见表 1 所列。其中, MU1、MU2、A1、A2 均为二阶 Ogden 材料模型的材料常数。

表 1 材料参数

类别	参数	数值	
		硅	PDMS
材料属性	密度/(kg/m ³)	2 329	1 000
	弹性模量/MPa	162 700	
	泊松比	0.270	
二阶 Ogden 材料模型	MU1/MPa	63.489	
	A1/10 ⁻¹⁰	6.371	
材料模型	MU2/MPa	0.041	
	A2	3.812	

边界条件设置如下:超弹性膜的四周固定,同时考虑重力,硅块与超弹性膜的接触为绑定,时间与流体域的计算时间步同步。

耦合分析过程中,每个时间步都要进行流体域与固体域的求解和数据传递,同时该时间步的结果作为下一时间步的初值进行计算,继而完成所有时间步的求解。

1) 激励器振动响应分析。对于 1.0 mm 出口孔径的激励器,通过仿真结果查看其工作过程,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,在恒定的入口压力下,激励器靠近入口端先向上移动,然后两端同时向上移动膨胀,最后转换成沿 Z 轴向上移动且绕 Y 轴振动的耦合过程。

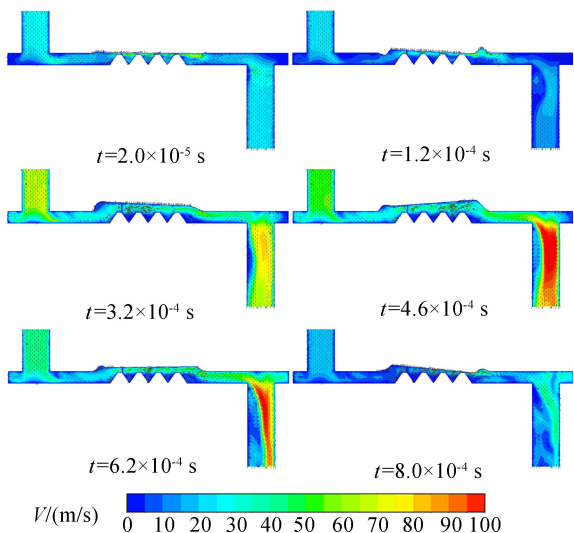
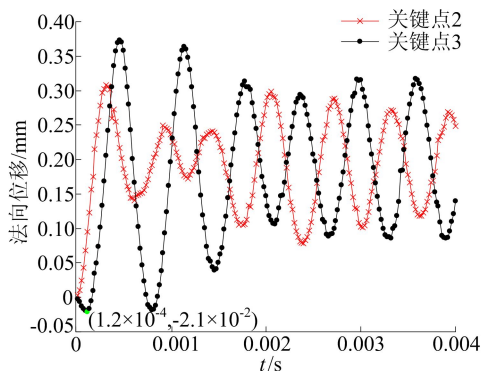


图 3 不同时刻激励器对称面速度矢量云图

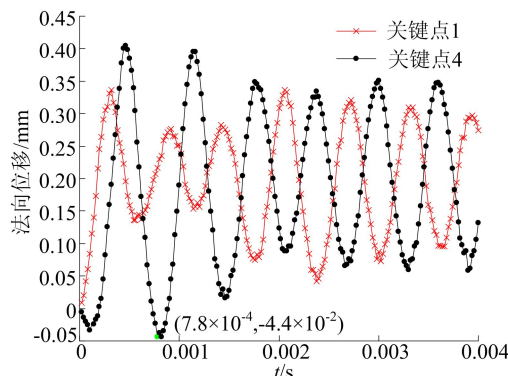
由于流动间隙较小,针对膜下表面设置 4 个

关键点(图 2b),监测其时域下的法向位移响应历程,如图 4 所示。4 个关键点均位于激励器对称面的膜下方处,且关键点 1 与关键点 4、关键点 2 与关键点 3 分别位于可自由移动硅块绕 Y 轴振动时的左、右对应部分。

从图 4 可以看出,整个仿真过程中关键点 4 产生了最大的向下法向位移 0.044 mm,而通道设置为 0.06 mm,因此超弹性膜不会与硅壁发生碰撞。



(a) 关键点2和关键点3



(b) 关键点1和关键点4

图 4 关键点法向位移响应历程曲线

2) 激励器射流特性分析。为研究激励器的激励特性,需要分析激励器在恒压入口下的出口射流特性。

在仿真模型出口中心处设置监测点,监测出口速度随时间的瞬态变化情况,1.0 mm 出口孔径激励器的射流速度和频率如图 5 所示。

从图 5a 可以看出,激励器出口射流在一段时间后出现较明显的周期变化,产生的脉冲射流速度平均在 47.4 m/s 上下波动,且最大速度达到 62.7 m/s;通过快速傅里叶变换对出口速度进行频谱分析,结果见图 5b,从图 5b 可以看出,自激振动激励器出口速度的波动主频率(即射流的频率)为 1 250 Hz。

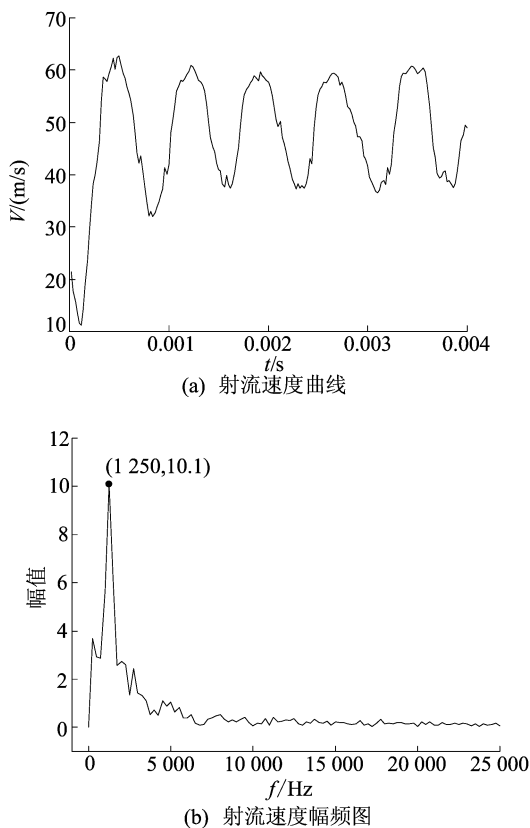


图 5 1.0 mm 孔径激励器的出口速度分析

2 激励器射流特性影响因素分析

为进一步分析激励器的射流特性,对激励器的激励特性可能存在的影响因素进行研究。由于激励器发生自激振动的临界条件与激励器的内部压力有关,而对于给定的激励器几何形状,内部压力与入口压力、出口孔径有关,因此下文通过不同的入口工作条件和出口几何参数对激励器的射流特性影响进行研究分析。

2.1 工作条件对激励特性的影响

激励器在不同工作条件下会表现出不同的激励特性,入口压力是对激励器实时控制的主要参数。激励器在不同的入口压力下,膜会产生大小不同的变形,进而激励器所表现的射流特性也就不同。以 1.0 mm 出口孔径的激励器为研究对象,入口压力从 0.01 MPa 变化到 0.04 MPa,研究射流速度、频率与入口压力的关系。

不同入口压力下,出口射流特性见表 2 所列,出口射流速度曲线如图 6 所示。

从表 2 可以看出:随着入口压力的增大,出口的脉冲射流峰值速度和平均速度都会增加,同时也会伴随着更高的脉冲频率;但当入口压力增加到一定程度后,射流频率将不再变化,此时射流频

率已接近系统的固有频率。

表 2 不同工作条件下的射流特性

入口压力/MPa	0.01	0.02	0.03	0.04
射流频率/Hz	1 250	2 000	2 000	2 000
峰值速度/(m/s)	62.69	88.25	117.27	133.24
平均速度/(m/s)	47.43	73.39	97.41	106.30

从图 6 可以看出,当入口压力在 0.04 MPa 时,出口速度呈现出随时间变化的衰减特性。出现此现象的原因是结构内部诱导压力过大,超过自激振动的临界条件,即失去了原有的动平衡状态,振动会由于系统的阻尼存在而逐渐衰减,最终趋于稳定。

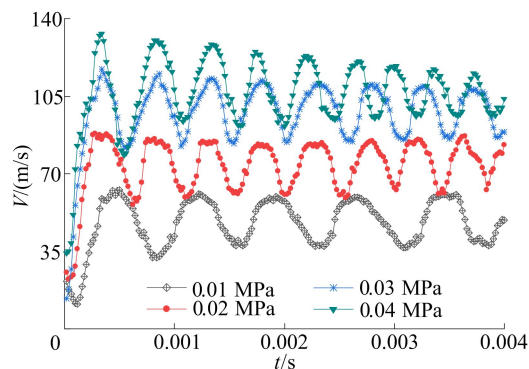


图 6 不同工作条件下的射流速度曲线

2.2 几何参数对激励特性的影响

激励器几何参数不同,其激励特性也会发生改变,出口孔径大小是影响射流速度和频率的重要因素。保持几何总体结构不变,对不同出口孔径的激励器进行研究。在入口压力为 0.02 MPa 的工况下,0.8、1.0、1.2、1.5 mm 4 种不同的出口孔径对激励器射流速度和出口频率的影响见表 3 所列。

表 3 不同几何参数下的射流特性

出口孔径/mm	0.8	1.0	1.2	1.5
射流频率/Hz	2 000	2 000	1 750	1 500
峰值速度/(m/s)	99.15	88.25	75.00	63.84
平均速度/(m/s)	74.12	73.39	62.53	50.69

从表 3 可以看出:由于伯努利原理的存在,随着出口孔径的增加,激励器产生的脉冲射流峰值速度和平均速度均有所下降;同时由于内部诱导压力也会变小,其产生的脉冲频率也有所下降;但是出口孔径为 0.8 mm 时激励器在 0.02 MPa 的入口压力下已出现振动衰减的情况。

3 Ahmed 模型流动控制效果验证

汽车空气动力学的研究方法有仿真分析和风洞试验 2 种。风洞试验的结果虽然较为真实可靠,但也有成本较大和试验周期较长的缺点。仿真分析成本低、周期短,且更容易实现。因此本文采用仿真方法进行研究,同时将数值仿真的结果与其他研究的实验结果进行对比,验证本文仿真方法的有效性。

3.1 仿真精度验证

本文所选取的流动控制对象是后背倾角为 25° 的 Ahmed 类车体模型。模型前部呈倒圆状,可避免气流的分离,尾部由斜面和垂直面组成,会诱导产生复杂的三维流动结构,是导致压差阻力的主要原因,因此 Ahmed 类车体常作为汽车空气动力学研究对象。

Ahmed 类车体模型的几何结构和主要尺寸如图 7 所示。模型长为 1 044 mm,宽为 389 mm,高为 288 mm,前部倒圆角半径为 100 mm,模型采用 4 个直径 30 mm、高 50 mm 的圆柱体来支撑。

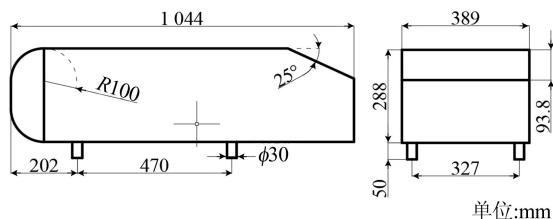


图 7 Ahmed 类车体模型几何尺寸

整个计算域总长为 9 倍车长,车头距离流体入口 3 倍车长,车尾距离流体出口 5 倍车长,计算域总高为 5 倍车高,计算域总宽为 7 倍车宽。经过计算该计算域的阻塞比为 2.8%,符合汽车风洞试验对阻塞比的要求。模型采用四面体网格划分,并设置边界层网格为 5 层棱柱网格,以尽可能准确地模拟边界层的流动,同时又逐层添加了加密区域,保证仿真的精度。

计算域入口类型设为速度入口,出口类型设为压力出口,湍流模型选择可实现的 $k-\epsilon$ 湍流模型,采用分离求解器进行求解。仿真的来流风速工况设为按 5 m/s 的速度增加,范围为 20~40 m/s。

通过仿真模拟得到各来流风速工况下的空气阻力系数,本文计算结果与文献[17]实验结果的对比如图 8 所示。

从图 8 可以看出,本文仿真结果与实验得到

的趋势基本吻合。随着来流风速的增加,Ahmed 的阻力系数表现为逐渐下降的趋势,这种现象是由雷诺数效应引起的。从误差来看,当来流风速为 40 m/s 时,本次仿真结果与文献[17]实验结果存在最大误差,为 2.18%,该值小于工程误差的允许范围。

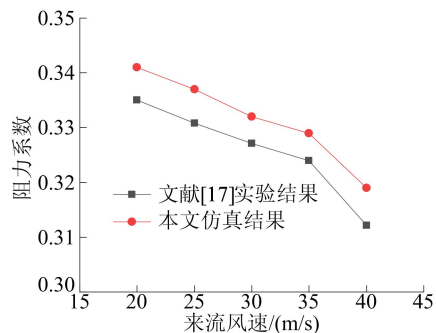


图 8 Ahmed 阻力系数仿真与实验结果的对比

3.2 激励器减阻机理及效果分析

通过对 Ahmed 模型阻力的计算分析发现, 25° 的 Ahmed 类车体模型气动阻力主要来源于模型尾部斜面上方气流分离形成的分离涡与模型侧面生成的 C 柱涡造成的前后压差阻力,因此减阻的关键在于如何控制这 2 种涡流系统。本文通过将激励器沿 Ahmed 类车体模型尾部的分离边缘布置,控制尾部流动分离状态并研究减阻机理,以降低 Ahmed 模型的气动阻力。在尾部 A、B、C (距边缘线 15 mm) 3 个可能产生减阻效果的位置布置激励器,分析流动控制的机理,具体如图 9 所示。

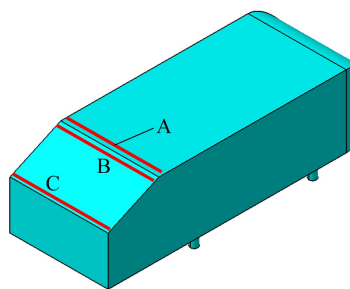


图 9 激励器安装位置示意图

3.2.1 流动控制减阻机理分析

为分析射流速度和射流频率分别对减阻效果的影响,将 7 组不同的脉冲射流在尾部 B 位置施加射流控制,定量分析射流速度和频率的减阻机理。不同工况的脉冲射流参数见表 4 所列。

保持工况 0~工况 3 这 4 种工况的平均速度

和脉冲幅度不变,通过改变频率来分析射流频率的减阻机理。不同射流频率在距尾部 0.022 m 且垂直于来流方向平面的涡量云图的对比如图 10 所示。

保持工况 3~工况 6 这 4 种工况的射流频率和脉冲幅度不变,通过改变平均速度来分析射流速度的减阻机理。不同射流速度的尾部流动速度云图的对比如图 11 所示。

表 4 不同工况脉冲射流参数

工况	峰值速度/(m/s)	平均速度/(m/s)	频率/Hz
0	50	50	0
1	70	50	1 000
2	70	50	1 500
3	70	50	2 000
4	80	60	2 000
5	90	70	2 000
6	100	80	2 000

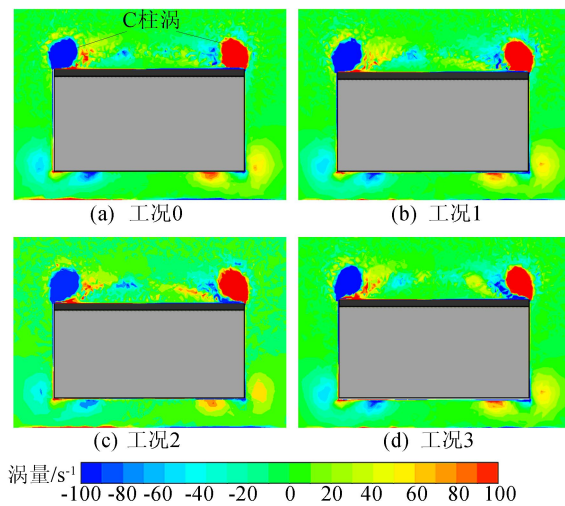


图 10 不同脉冲射流频率的尾部涡量云图

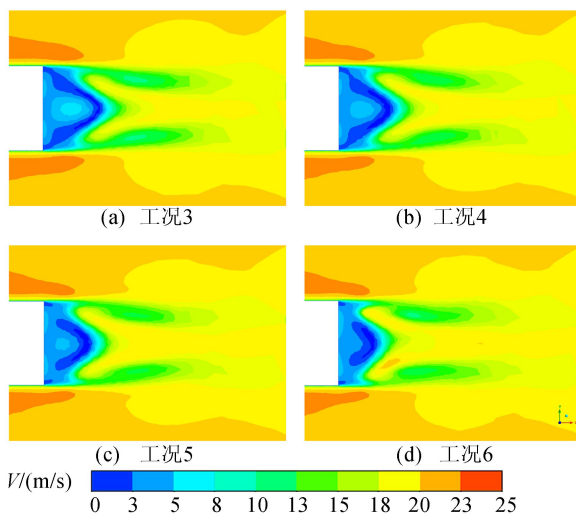


图 11 不同脉冲射流速度的尾部速度云图

从图 10 可以看出,当射流频率增大时,由于动态高低速射流促进附面层内外掺混,斜背部所产生的这对旋向相反的 C 柱涡变小且逐渐向上方偏移。因此 C 柱涡在斜背部产生的负压会减小,进而影响到车体的前后压差阻力。

从图 11 可以看出,随着射流速度的提升,由于尾部注入的动量增多,车体尾部由流动分离所产生的分离区逐渐变小,尾部整体压力有所提升,进而影响气阻力系数。

3.2.2 激励器减阻效果研究

根据上文激励器特性和流动控制减阻机理的研究,入口与出口压差为 0.02 MPa 和出口孔径为 1.0 mm 时,激励器会表现出较高的脉冲射流速度、射流频率以及良好的不衰减振动特性,因此本文采用上述几何参数和工作条件下的激励器进行减阻研究。

将激励器安装在 A、B、C 不同的位置,通过数据拟合其输出的射流特性,根据其对 Ahmed 尾迹流动结构的影响以及 Ahmed 气动阻力的变化来研究激励器的减阻特性。

1) 在 20 m/s 的来流风速下,对激励器不同的安装位置进行仿真模拟。通过定量分析对比模型在上述不同激励器安装位置下的尾迹涡结构和空气阻力系数大小,确认最佳的激励器安装位置,同时对激励器产生流动控制效果的机理进行深入阐述。

不同安装位置的激励器施加控制后尾部速度云图如图 12 所示。

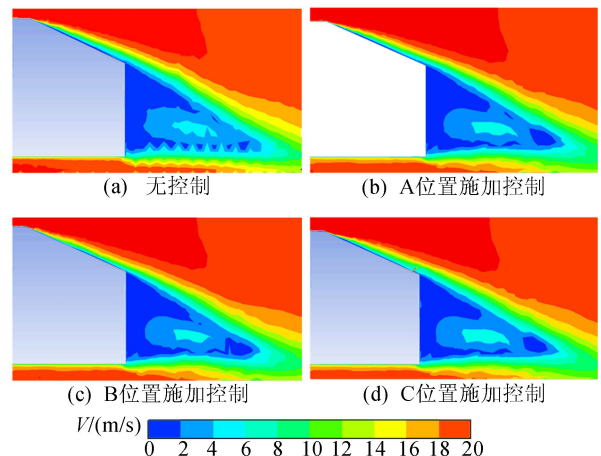


图 12 激励器不同位置施加控制时的尾部速度云图

从图 12 可以看出:未施加激励器控制时,气流在斜面处发生流动分离直至模型尾部垂直面,并在模型尾部形成尾迹真空区;而在尾部安装射

流激励器施加控制时,气流达到斜面末端时重新附着在斜面上,且尾部的分流区域有所减小,进而导致其阻力的降低;在 B 位置施加控制时,斜面上的分离得到有效的改善,这是由于激励器产生的射流在近壁面边界层中注入动量,提高了近壁面流速,促进了高、低速气流的掺混,推迟了气流分离,并且有效减小了分离区的大小。

有、无控制和激励器在不同位置施加控制时的空气阻力系数和减阻效果见表 5 所列。从表 5 可以看出,B 位置安装激励器获得最大减阻率为 7.04%。

表 5 不同安装位置空气阻力系数及减阻率

安装位置	无控制	A 位置	B 位置	C 位置
空气阻力系数	0.341	0.319	0.317	0.320
减阻率/%	0	6.45	7.04	6.16

2) 为进一步研究不同风速时激励器的控制效果,分别在来流风速为 15、20、25、30、35 m/s 的情况下,在 B 位置安装激励器进行流动控制减阻研究。

不同来流风速的减阻效果见表 6 所列。

表 6 不同来流风速的减阻效果

来流风速/(m/s)	15	20	25	30	35
减阻率/%	6.43	7.04	7.12	6.63	6.08

从表 6 可以看出,随着来流风速的增大,在 B 位置安装激励器施加脉冲射流控制,减阻效果呈先增大后减小的趋势,并且在来流风速为 25 m/s 时可以获得 7.12% 的最大减阻率。

4 结 论

本文采用一种自激振动微型激励器产生脉冲射流对 Ahmed 类车体模型进行主动流动控制,研究其减阻机理,得到以下结论。

1) 激励器在一定的入口压力条件下,通过内部结构耦合形成拉伸和扭转模态耦合的自激振动,可以产生平均速度 73.39 m/s、频率 2 000 Hz 的稳定脉冲射流。

2) 自激振动激励器所产生的脉冲射流速度和频率与激励器的入口压力、几何结构有关。当入口压力超过临界条件时,激励器产生的射流会由自激振动转变成有阻尼的衰减振动;出口孔径的大小同样会影响自激振动临界条件。

3) 基于脉冲射流的主动流动控制,通过在

Ahmed 尾部分离区注入能量,提高壁面流速,推迟壁面流动分离,有效地减小了尾部分离区域,最高减阻率可以达到 7.12%,为主动流动控制减阻提供了一种新思路。

考虑到汽车实际行驶工况的复杂性,所采用激励器可以作为闭环流动控制的执行器,通过相应的动态压力传感器检测车体表面压力,并通过控制器控制稳定气源给激励器提供的入口压力大小,进而控制激励器进出口压差,实现动态的闭环实时控制。

[参 考 文 献]

- [1] SIVARAJ G, PARAMMASIVAM K M, SUGANYA G. Reduction of aerodynamic drag force for reducing fuel consumption in road vehicle using basebleed[J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2018, 11(6): 1489-1495.
- [2] MOHAMMADIKALAKOO B, SCHITO P, MANI M. Passive flow control on Ahmed body by rear linking tunnels[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 205: 104330.
- [3] VIGNESH S, GANGAD V S, JISHNU V, et al. Windscreen angle and Hood inclination optimization for drag reduction in cars[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 30: 685-692.
- [4] 薛学栋. 轿车局部外形气动减阻优化设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [5] PAPOUTSIS-KIACHAGIAS E M, ASOUTI V G, GIANNAKOGLU K C, et al. Multi-point aerodynamic shape optimization of cars based on continuous adjoint[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2019, 59(2): 675-694.
- [6] CHENG S Y, CHIN K Y, MANSOR S. Experimental study of yaw angle effect on the aerodynamic characteristics of a road vehicle fitted with a rear spoiler[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2019, 184: 305-312.
- [7] SELVARAJU P N, PARAMMASIVAM K M. Empirical and numerical analysis of aerodynamic drag on a typical SUV car model at different locations of vortex generator[J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2019, 12(5): 1487-1496.
- [8] HUMINIC A, HUMINIC G. Aerodynamic study of a generic car model with wheels and underbody diffuser[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2017, 18(3): 397-404.
- [9] MUKUT A N M M I, ABEDIN M Z. Review on aerodynamic drag reduction of vehicles[J]. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*, 2019, 4(1): 1-14.
- [10] WANG L, LUO Z B, XIA Z X, et al. Review of actuators for high speed active flow control[J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(8): 2225-2240.

(下转第 772 页)

条件下,器件内部的自旋极化电流先增大,在偏压大于 0.2 V 后自旋极化电流分布在 $7 \mu\text{A}$ 左右,并且仍能够保持几乎 100% 的自旋极化率。在 0.1 V 偏压的条件下,当外加栅极电压在 0~0.5 V 之间时,器件内电流随着栅极电压的增大而减小。当外加栅极电压大于 0.5 V,三端器件内电流截止,实现了栅极电压对器件电子输运能力的调控。同时,当器件中“碳—硅—碳—硅”四聚体内部角度变化量(压力形变)小于 6.7%,器件内部的电子透射能力几乎不受影响,表明“品”型器件具有一定的结构及电学稳定性。上述研究为未来自旋电子学器件领域中自旋过滤相关器件设计提供了有力的理论依据。

[参 考 文 献]

- [1] WOLF S A, AWSCHALOM D D, BUHRMAN R A, et al. Spintronics; a spin-based electronics vision for the future [J]. *Science*, 2001, 294(5546): 1488-1495.
- [2] HAN W, OTANI Y C, MAEKAWA S. Quantum materials for spin and charge conversion [J]. *Quantum Materials*, 2018, 3(1): 1-16.
- [3] 于笑潇, 资剑, 王兵, 等. 自旋电子学研究的现状与趋势[J]. *科技中国*, 2018(5): 7-10.
- [4] JIANG P, TAO X, HAO H, et al. Tuning a zigzag SiC nanoribbon as a thermal spin current generator[J]. *2D Materials*, 2017, 4(3): 035001.
- [5] 陈兴, 赵晗, 张艳, 等. 具有连续反量子点的石墨烯纳米带中纯自旋流的实现[J]. *物理学报*, 2021, 70(19): 321-328.
- [6] KARUBE S, TEZUKA N, KOHDA M, et al. Anomalous spin-orbit field via the Rashba-Edelstein effect at the W/Pt interface [J]. *Physical Review Applied*, 2020, 13(2): 024009.
- [7] PAI C F, LIU L, LI Y, et al. Spin transfer torque devices utilizing the giant spin Hall effect of tungsten [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(12): 122404.
- [8] SONG T, CAI X, TU M W Y, et al. Giant tunneling magnetoresistance in spin-filter van der Waals heterostructures [J]. *Science*, 2018, 360(6394): 1214-1218.
- [9] STEPHEN G M, LANE C, BUDA G, et al. Electrical and magnetic properties of thin films of the spin-filter material CrVTiAl [J]. *Physical Review B*, 2019, 99(22): 224207.
- [10] NETO A H C, GUINEA F, PERES N M R, et al. The electronic properties of graphene [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(1): 109.
- [11] MAK K F, LEE C, HONE J, et al. Atomically thin MoS₂: a new direct-gap semiconductor [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(13): 136805.
- [12] WU X, XIONG L, FENG Y, et al. The half-metallicity and the spin filtering, NDR and spin Seebeck effects in 2D Ag-doped SnSe₂ monolayer [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2019, 150(6): 064701.
- [13] ZHANG L, CHEN J, ZHENG X, et al. Gate-tunable large spin polarization in a few-layer black phosphorus-based spintronic device [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(24): 11872-11878.
- [14] SUN L, LI Y, LI Z, et al. Electronic structures of SiC nanoribbons [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2008, 129(17): 174114.
- [15] LOU P, LEE J Y. Band structures of narrow zigzag silicon carbon nanoribbons [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2009, 113(29): 12637-12640.
- [16] BUTTIKER M, IMRY Y, LANDAUER R, et al. Generalized many-channel conductance formula with application to small rings [J]. *Physical Review B*, 1985, 31(10): 6207.
- [17] DATTA S. *Electronic transport in mesoscopic systems* [M]. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1997.
- [18] ZHENG X, CHEN X, ZHANG L, et al. Perfect spin and valley polarized quantum transport in twisted SiC nanoribbons [J]. *2D Materials*, 2017, 4(2): 025013.
- [19] BREY L, FERTIG H A, SARMA S D. Diluted graphene antiferromagnet [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(11): 116802.
- [20] CHAN J A, MONTANARI B, GALE J D, et al. Magnetic properties of polymerized C₆₀: the influence of defects and hydrogen [J]. *Physical Review B*, 2004, 70(4): 041403.

(责任编辑 张 镗)

(上接第 752 页)

- [11] VIARD R, TALBI A, GHOUILA-HOURI C, et al. Magneto-mechanical micro-valve for active flow control [J]. *Sensors and Actuators A(Physical)*, 2020, 316: 112387.
- [12] TOUNSI N, MESTIRI R, KEIRSBULCK L, et al. Experimental study of flow control on bluff body using piezoelectric actuators [J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2016, 9(2): 828-838.
- [13] 王靖宇, 耿亚, 林惠政, 等. 基于等离子体流动控制的方背式汽车模型减阻研究 [J]. *汽车工程*, 2020, 42(6): 753-758.
- [14] DUCLOUX O, TALBI A, GIMENO L, et al. Self-oscillation mode due to fluid-structure interaction in a micromechanical valve [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(3): 034101.
- [15] 师汉民, 黄其柏. *机械振动系统分析、建模、测试、对策: 下* [M]. 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2019: 260-268.
- [16] 李晓龙. *固液界面相互作用对微尺度流动与传热影响规律的研究* [D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- [17] 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.

(责任编辑 胡亚敏)