

D 型体主被动结合流动控制研究

杨志刚^{1,2,3}, 韩业恺^{1,2}, 李启良^{1,2}, 单希壮^{1,2}

(1. 同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804; 2. 同济大学 上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室, 上海 201804; 3. 北京民用飞机技术研究中心, 北京 102211)

摘要: 以简化准三维模型 D 型钝体为研究对象, 通过数值仿真手段, 利用零质量合成射流器理论进行了 D 型体主动流动控制和主被动结合的流体控制研究发现, 在尾部分离点进行射流控制时, 高频射流有助于钝体减阻, 减阻效果可以达到 1.78%。主被动结合的锯齿和射流加强了尾迹三维流动结构, 破坏了准三维模型的展向流动结构, 使得减阻效果较好。采用主被动结合控制的射流为低频和高频时减阻效果为 20.86% 和 21.20%。

关键词: D 型体; 气动减阻; 主动控制; 合成射流

中图分类号: U467.1

文献标志码: A

Flow Control of Active and Passive Combination of D-Shaped Bluff Body

YANG Zhigang^{1,2,3}, HAN Yekai^{1,2}, LI Qiliang^{1,2}, SHAN Xizhuang^{1,2}

(1. Shanghai Automotive Wind Tunnel Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Beijing Aeronautical Science and Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: To explore the flow field of the vehicle and the strategies of drag reduction, this paper focuses mainly on numerical simulation of the flow structures of D-shaped bluff body. Based on the theory of zero mass synthetic jet, it studies the active flow control and the active-passive flow control of D-shaped bluff body. It is found that high frequency jet can reduce the drag of D-shaped bluff body, and the maximum drag reduction can reach 1.78%. The combination of active and passive splitter plates with tabs and synthetic jet strengthens the three-dimensional flow structure of wake, impedes the extended flow structure in

the wake of quasi-three-dimensional model, and makes the drag reduction perform better. The drag reduction effect is 20.86% at low frequencies and 21.20% at high frequencies.

Key words: D-shaped bluff body; drag reduction; active control; synthetic jet

针对 D 型体的被动控制研究开始于 20 世纪 60 年代末。Bearman 通过试验对 D 型体尾部加板进行了流动控制方面的研究^[1]。1981 年, Zdravkovich 将 D 型体尾部变为螺旋状, 降低了速度和力的波动^[2]。Park 等在 D 型体尾部加入竖直板的减阻研究, 在尾部分离点增加垂直流向的锯齿形状隔板, 给准三维流动中加入了三维流动效应, 使得减阻效果提高, 但是带来了噪声问题^[3]。Choi 等综合了圆柱面、钝后缘二维钝体、球面等钝体的控制方法; 介绍了近几年来钝体流动控制的主要成果, 如三维强迫控制、主动反馈控制、基于局部和全局不稳定性的控制以及合成射流控制; 讨论了一些如雷诺数依赖性、最小可能控制阻力和控制效率等问题^[4]。

Pastoor 在 D 型体上采用试验手段和合成射流研究了 D 型体周围湍流的减阻策略。利用一个降阶涡模型描述了剪切层和尾流动力学之间的相互作用, 并设计了一个有效的反馈控制设计方案。导出的反馈控制器使剪切层和尾流动力学产生相位差, 从而推迟了涡流的形成^[5]。Lorite 等通过试验和数值研究了在不同加速度和不同几何构型下, D 形钝体从静止开始, 达到雷诺数 $Re=20\ 000$ 的状态所引起尾流的瞬态发展。评估了直腔和优化的弯曲腔在

收稿日期: 2019-05-14

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(19DZ2290400); 上海市地面交通工具空气动力学与热环境模拟重点实验室项目(18DZ2273300)

第一作者: 杨志刚(1961—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学、气动声学、热管理、高速列车空气动力学、地效飞行器空气动力学。E-mail: zhigang.yang@sawtc.com

通信作者: 李启良(1980—), 男, 副研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车启动噪声。

E-mail: qiliang.li@sawtc.com



论文
拓展
介绍

瞬态流动条件下的性能。由于加速运动产生的气流吸力,气流首先形成对称的剪切层,初级涡流被吸引到机身底部。上、下剪切层之间的相互作用引起了流动的不稳定和尾流的对称性破坏^[6]。Krajnovi等采用大涡模拟(LES)方法,研究了主动流动控制应用于二维车辆几何结构的影响及其产生流动结构的机理。根据现有粒子图像测速(PIV)和力测量数据,对LES结果进行了验证,分析流动驱动对近尾迹流动的影响以及由此产生的气动力^[7]。Han等研究D型体的主动流控制问题,采用了基于零质量射流器控制的近壁部分平均Navier-Stokes(PANS)方法。研究表明,PANS法预测的减阻率约为15%,这比之前的LES结果更接近试验数据^[8]。Martin等用改善分离涡模型(IDDES)对D型体主动控制装置参数进行分析和优化^[9]。Parkin就D型体的开环主动控制进行研究,利用大涡模拟对准三维简化Ahmed body模型D型体进行主动控制,并分析了瞬态尾迹,关注了尾迹流的卡门涡模态和下游涡的发展。两种模式在所有情况下都是共存的,其叠加恢复了在流中观察到的大部分特征^[10]。Parkin关注地面效应对D型体主动控制的影响。在雷诺数 $Re=23\ 000$ 下,采用大涡模拟(LES)研究准三维D型体。一旦物体靠近移动地面,卡门涡控制方案的作用就基本消失。在自然来流时观察到阻力系数比远离地面的情况低。这可以解释为尾流涡度在上、下剪切层中的失衡,以及地面边界层存在干扰的结果^[11]。

1 主动流动控制

1.1 仿真方法及试验对比

本文数值仿真均采用软件ANSYS FLUENT。特征长度为D型体高度 $H=0.072\text{ m}$ 。计算域长度为 $30H$,高度为 $7.71H$ 。计算域顶部采用对称性边界条件,以消除其壁面影响;左、右边界设置为周期性边界条件,以模拟展向为无限长度准三维D型体模型;地面设置为无滑移地面。无控制对标D型体总体网格数为1 287万,加入控制的D型体为1 589万网格。由于D型体周围流场有着大分离,并且其边界层情况以及近地时地面边界层较为复杂,采用大涡模拟能够较准确地捕捉到这些流动特征。大涡模拟亚格子模型为WALE,时间步长为 0.0005 s ,量纲一壁面网格厚度满足 $y^+=1$ 。本文采用的网格布置方式与D型体经典试验误差较小,数据对比如表1所示。表中, Re 为雷诺数, $C_{d,0}$ 为阻力系数, $C_{p,0}$ 为压力系数, Sr 为斯特劳哈尔数, θ 为边界层

厚度。本文工况为近地工况,但是网格布置方式均与对标数值仿真数据相同。

表1 仿真数据与试验对比

Tab.1 Comparison of simulation and experiment

研究方法	Re	$C_{d,0}$	$C_{p,0}$	Sr	θ
文献[1]	41 000	—	-0.57	0.24	0.017
文献[3]	40 000	—	-0.55	0.25	0.017
文献[5]	23 000	0.89	-0.53	0.23	0.017
本文对标数值仿真数据	72 000	1.04	-0.62	0.26	0.014

1.2 主动流动控制模型

针对D型体在近地工况,利用零质量射流器对D型体绕流问题进行主动流动控制研究。D型体的射流位置,如图1所示。分别在D型体前端和尾部安装4个射流器,射流器宽度均为5 mm。射流器S1和S2位于自由来流时D型体前端第一分离点的位置;射流器S3和S4位于尾部剪切层脱落位置。

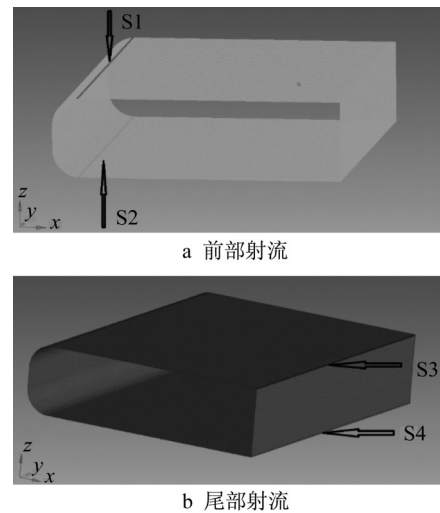


图1 主动流动控制射流口布置方式

Fig.1 Layout of jet port for active flow control

1.3 方案与减阻效果

表2是D型体主动流动控制的仿真工况及其对应的减阻效果。工况1~4为针对D型体头部第一分离点施加与来流速度相同的射流,频率分别采用较低的60 Hz和较高的500 Hz。从表中可以看出,在头部施加控制会对D型体整体增加阻力。低频相对较高频,阻力增加较小,故在头部进行控制难以取得较好的控制效果。为此在上部分离点和下部分离点单独施加射流发现,在D型体头部下端分离点施加射流对应的阻力变化不大,而在上部施加射流时却增加较大阻力。工况5~8为在D型体尾部上、下剪切层分别施加射流,频率分别采用60 Hz和500 Hz,射流速度为来流速度。此时可以看到,在尾部上、下剪

切层同时施加 500 Hz 射流时会产生一定的减阻效果,60 Hz 对应阻力增加较大。当上剪切层采用高频射流时,其增阻 1.96%;而当下剪切层单独射流时,其阻力增加了 4.01%。

表 2 主动流动控制减阻效果

Tab.2 Drag reduction effect of active flow control

工况编号	射流器 S1			射流器 S2			相位差	减阻比/%
	射流倾角/(°)	射流频率/Hz	(射流速度/来流速度)/%	射流倾角/(°)	射流频率/Hz	(射流速度/来流速度)/%		
1	0	60	100	0	60	100	0	-1.19
2	0	500	100	0	500	100	0	-0.62
3	0	0	0	0	60	100	0	-0.09
4	0	60	100	0	0	0	0	-1.15
工况编号	射流器 S3			射流器 S4			相位差	减阻比/%
	射流倾角/(°)	射流频率/Hz	(射流速度/来流速度)/%	射流倾角/(°)	射流频率/Hz	(射流速度/来流速度)/%		
5	0	60	100	0	500	100	0	-4.86
6	0	500	100	0	500	100	0	1.78
7	0	0	0	0	500	100	0	-1.96
8	0	500	100	0	0	0	0	-4.01

1.4 平均流场

通过对平均速度场和流线的对比,进一步分析射流对 D 型体绕流流场的影响。图 2 是针对 D 型体头部第一分离点处射流的一组方案。图中, X 为模型流向长度, H 为模型高度。从图 2a 中可以看出,当采用低频射流时, D 型体尾迹流场的改变不大,只是尾迹的涡相对对称性更好。另外,尾迹流线有明显的下洗趋势,比无控制时下洗作用增强,与地面作用增加造成其尾部压力降低应该是其阻力增大的主要原因之一。当施加了高频射流后,可以看到对头部地面的分离依然没有明显的改善,但是尾迹下方涡明显增强了,这是由于射流对下方剪切层的流量和能量进行补充导致下剪切层增强,上、下剪切层的不对称性减小导致尾部耗散增大,压差阻力上升。

从压力系数图 3 可以更明显地看出, D 型体在头部施加射流后,头部并没有大的变化。相反,当施加低频和高频时在尾迹所产生的低压区的分布产生了差异。低频控制时,在 D 型体尾迹产生的低压区较为对称(如图 3a);而高频控制时,靠近上剪切层的压力更低。这意味着当对头部分离点同时补充能量时,会使耗散最大的点向中线以上偏离。由于下剪切层具有更强的动能,单流量有限,因此与上剪切层的作用位置产生了一定变化,使低压区不对称(如图 3b)。

从图 4a 可以看到,当对尾迹施加低频射流时,流场整体变化较小,但是尾迹区域变短;同时下洗作用变弱,尾迹流线没有明显向下的趋势,而是向后发展。除此以外,尾迹的曲率半径减小预示着阻力的增加。当施加高频射流时(如图 4b),上剪切层脱落后与沿流向方向的射流合成,增加了上剪切层的能量。从流线图可

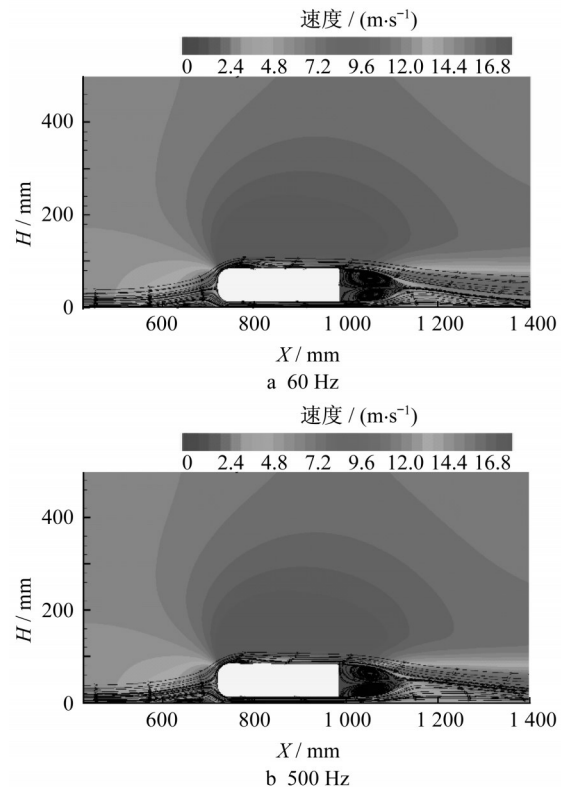


图 2 第一分离点控制速度流线图

Fig.2 Streamline of control speed at the first separation point

以较明显地看出尾迹上方涡的增大。这种补充使上、下剪切层的不对称性增加,导致上剪切层耗散减小,较容易向后发展,减小了垂流方向上的耗散,形成了向后发展的趋势,曲率半径增大、尾迹延长。

从压力系数图 5a 可以发现,当直接对尾部上下剪切层施加低频射流时,射流孔周围会产生较小的

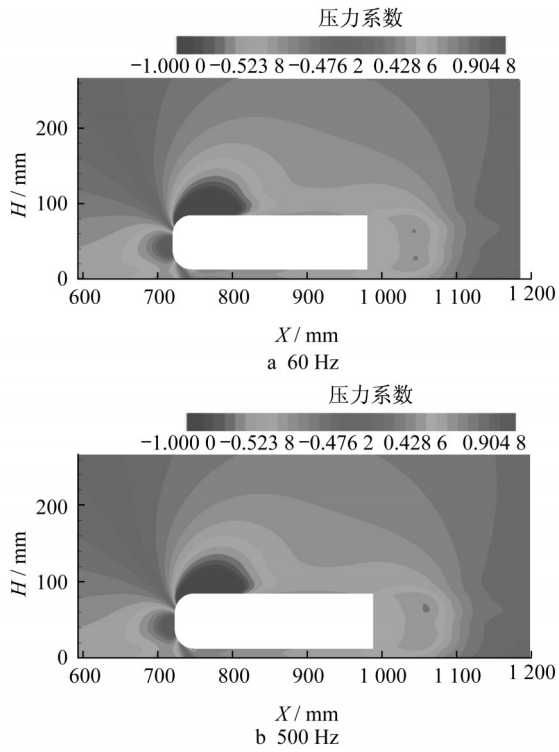


图3 第一分离点主动流动控制压力系数
Fig.3 Pressure coefficient of active flow control at the first separation point

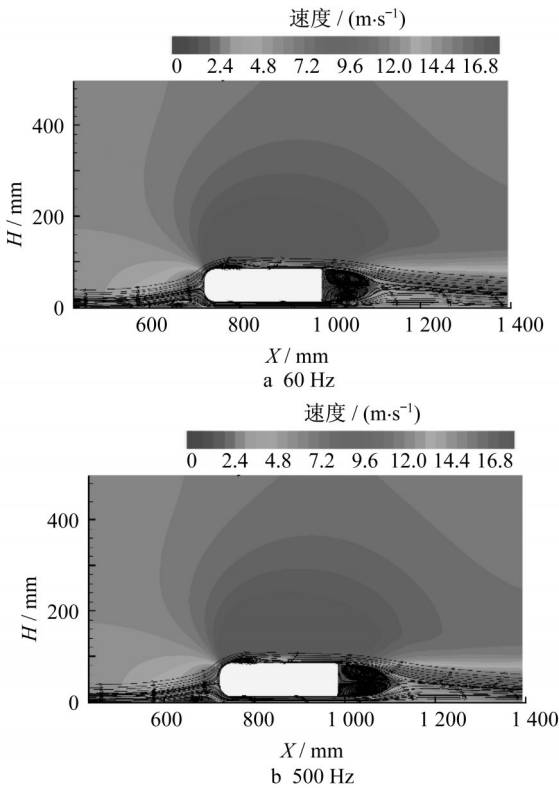


图4 尾部剪切层控制速度与流线图
Fig.4 Control velocity and streamline of tail shear layer

低压区。同时,射流直接补充了上、下剪切层的动能和流量,使得下剪切层又被加速,上剪切层的角度发生了变化,导致其低压区不对称,向上偏移。而当施加高频控制时,射流孔周围依然产生了较小的低压区,但是由于高频射流没有带来明显的尾迹压力的不对称,使D型体底部低压区增加。

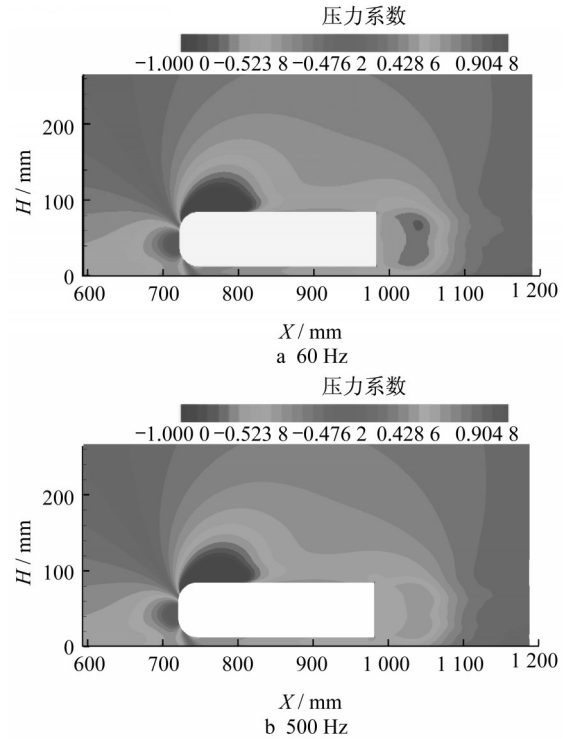


图5 尾部剪切层控制压力系数
Fig.5 Control pressure coefficient of tail shear layer

当对剪切层的单侧射流进行控制时,平均流场及流线结果,如图6所示。当对D型体尾迹上剪切层施加高频射流时,增加了上剪切层的能量,而此时新的合成流与下剪切层产生了相互作用,在尾部产生了更大的涡,造成了其尾迹变短且涡量增加。

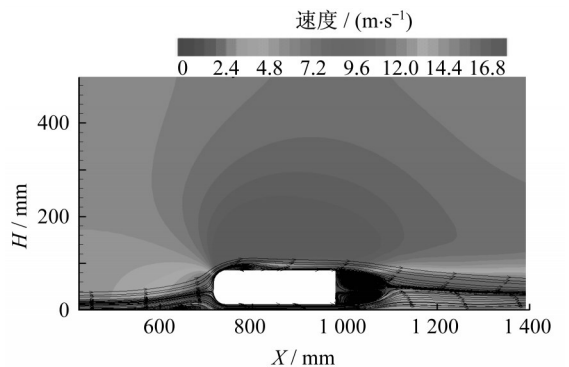


图6 尾上部剪切层单侧射流控制速度流线图(500 Hz)
Fig.6 Streamline of velocity control of single side jet in upper shear layer of tail (500 Hz)

从图7的压力系数图中可以看到,由于上剪切层的能量和角度发生了改变,造成了尾迹不对称,而且由于与下剪切层的耗散进一步增加,导致尾迹压力降低且低压区域进一步加大,因而压差阻力增加。

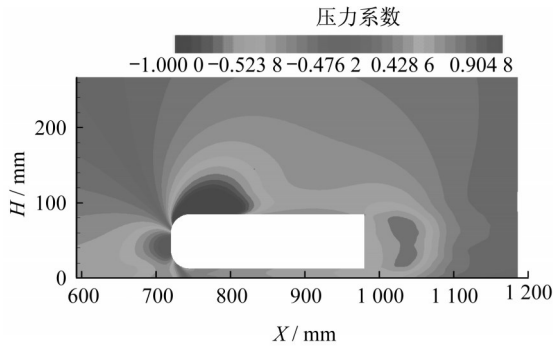


图7 尾部上剪切层单侧射流控制压力系数(500 Hz)
Fig.7 Control pressure coefficient of single side jet in upper shear layer of tail(500 Hz)

1.5 雷诺应力

从雷诺应力可以看出流场在传递动能上的差异。当D型体头部分离点存在低频射流时可以看到,其头部上方的雷诺应力降低,但尾迹的雷诺应力有一个较明显的提高,尾迹上剪切层动能传递量增加,如图8a所示。当头部采用高频射流时可以看到,头部分离点雷诺应力有所加强,且尾迹上、下剪切层雷诺应力都有所加强,因而传递的动能均有所增加,这导致尾部的耗散增加,阻力上升。

当采用尾迹低频射流时,可以看到图9a所显示的下剪切层明显被增强,其传递动能有较大的增加。由于这个效应导致上剪切层也有了较大变化,即雷诺应力影响范围在流向上增长。采用尾部高频射流可以看到,如图9b中头部分离的动能被增加,且上、下剪切层传递动能的位置向后推迟,这导致背部压力损失较小,低压区压力恢复,阻力升高。

当尾部采用单侧高频射流时,可以看到如图10所示的头部分离变化不大,尾迹上剪切层的动能传递明显加强,而下剪切层由于上剪切层的增加导致动能传递量变大,使得上、下剪切层的作用反而有所增加,在尾迹产生了较强的雷诺应力区,这对于背压的升高明显不利,因而导致了阻力值的增大。

1.6 瞬态流场

从瞬态流场可以进一步看出,射流对两个分离点处流场的相互影响。如图11a中,当头部采用低频射流时,可以看到头部的分离泡由于射流补充而增大,尾部的上、下剪切层由于能量增加,配对时呈不

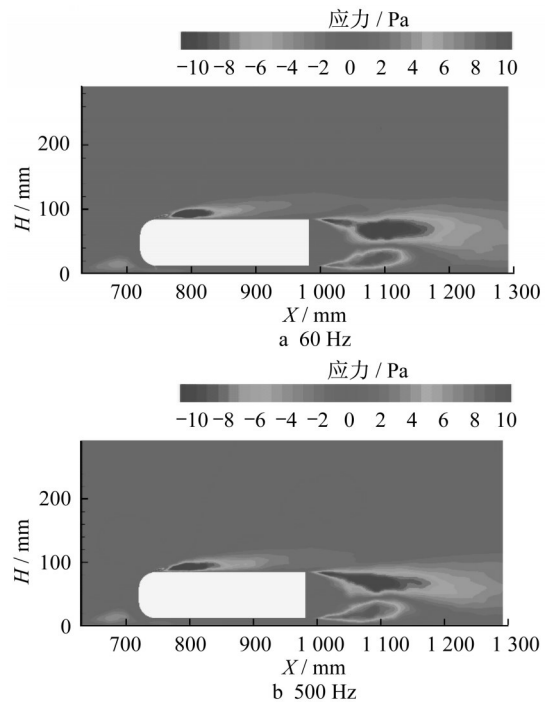


图8 第一分离点射流控制雷诺应力
Fig.8 Reynolds stress controlled by jet at the first separation point

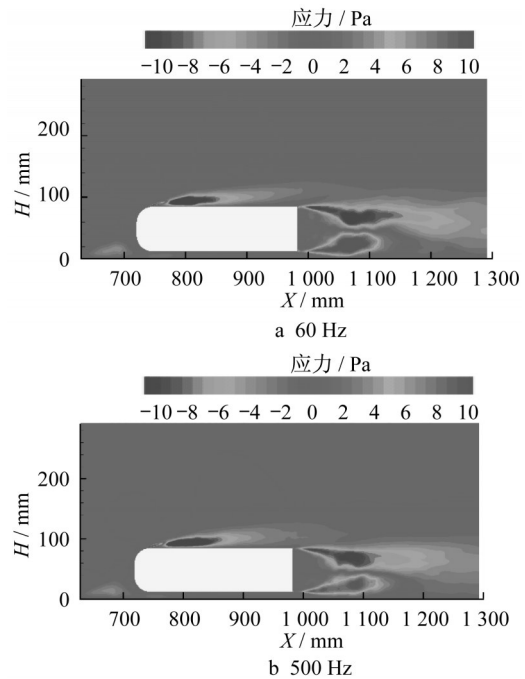


图9 尾部剪切层控制雷诺应力
Fig.9 Reynolds stress controlled by tail shear layer

对称性下降,导致其向内有较明显的弯曲,意味着其相互作用的增强。头部施加高频射流时,头部的高频射流使得头部分离泡变小,附着性增强,这也导致尾迹剪切层能量的增加,使得相互作用增加,耗散进一步加大。

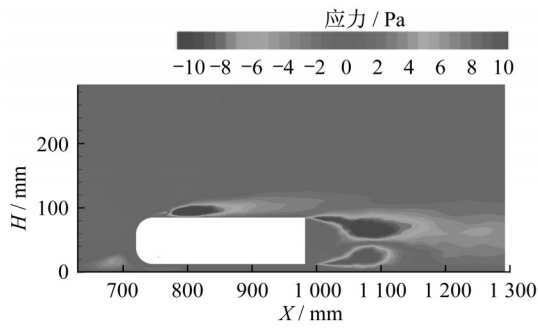


图10 尾而上剪切层单侧射流控制雷诺应力(500 Hz)
Fig.10 Reynolds stress controlled by a single jet in upper shear layer of the tail (500 Hz)

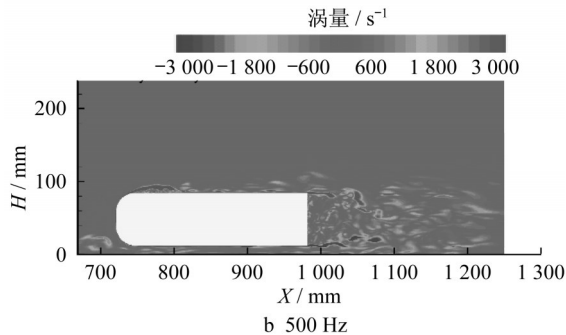
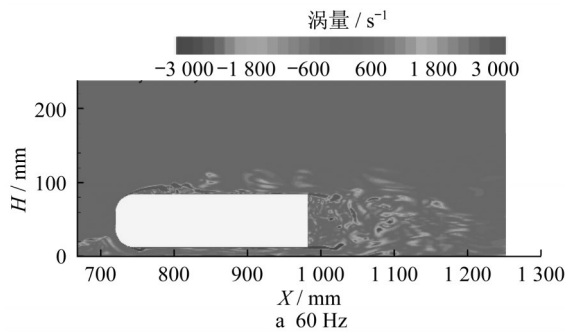


图11 第一分离点射流控制的瞬态涡量
Fig.11 Transient vorticity controlled by jet at the first separation point

当在尾迹施加低频射流时,如图12a所示,尾迹的低频射流引起了D型体表面的边界层不稳定,逆压梯度加大,使得头部分离增加。从尾迹涡量图可以看出,剪切层长度减小,相互作用位置靠近背部。当采用尾迹高频射流时,反而抑制了头部第一分离点的流体分离,并且由于动能大幅提升,尾迹上剪切层的长度被延长,下剪切层长度也相应增加,作用位置向延后,如图12b所示。

当在尾迹施加单边的高频射流时,如图13所示,上剪切层附近的射流使得其涡量增加,头部产生了较大的分离。这意味着在尾迹施加单边高频射流时会引起D型体单边边界层的不稳定性,导致其头部分离进一步加大。这样的耗散会使尾迹的上剪切

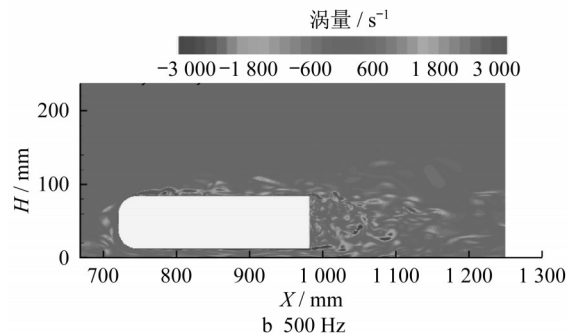
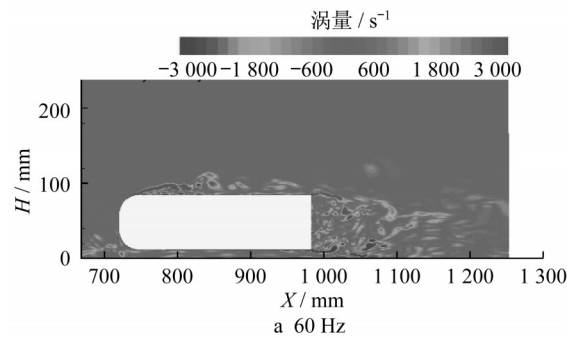


图12 尾部剪切层射流控制的瞬态涡量
Fig.12 Transient vorticity controlled by jet in tail shear layer

层能量降低,不对称性下降,造成形成能量相当的配对,使得尾部耗散上升。

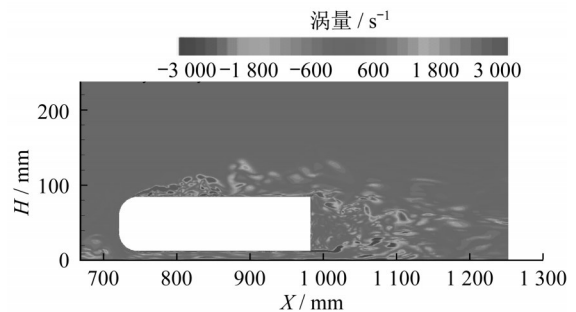


图13 尾而上剪切层单侧射流控制瞬态涡量(500 Hz)
Fig.13 Transient vorticity controlled by a single jet in upper shear layer of tail(500 Hz)

2 主被动流动控制

2.1 主被动流动控制模型

为了进一步D型体减阻探索,本节开展了主被动流动控制相结合的研究。选取了近地减阻效果较好的被动控制措施:加锯齿板。在其尾部增加射流器从而形成主动和被动流动控制结合控制模型,如图14a所示,尾部锯齿射流器尺寸如图14b所示。

2.2 方案与减阻效果

从表3中可以明显看到主被动流动控制结合的

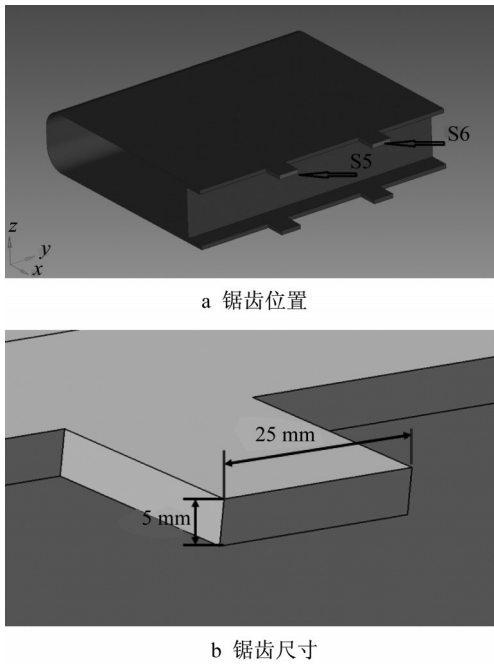


图14 主被动流动控制模型

Fig.14 Model for active and passive flow control

优势。当在尾部加锯齿基础上,采用流向与来流速度相同的低频射流时,其减阻达到20.86%;当采用高频射流时,其减阻效果进一步增加到21.20%。可见主被动结合流动控制方案具有较大的减阻潜力。

2.3 平均流场

通过图15的平均速度及流线图可以看到,当采用主被动结合的控制方案时,尾迹的长度增加,涡对出现的位置后移,这是板对边界层分离延后和射流的共同作用。更重要的是,头部分离因被动控制装置的加入而消失,D型体上表面的边界层不再产生较大的分离。尾迹下洗作用减弱,流线方向比较水平。通过图15a和15b对比可以看出,高频射流可以延长尾迹的长度,增大曲率半径,这都是有利于阻力减小的平均场流动结构特征。

由于主被动流动控制结合方式的加入,使得D型体背部压力大幅下降。低压区大幅度后移,且低压区产生的低压也有明显的恢复,而且D型体头部的地面边界层分离不再存在,这是被动控制所带来的,如图16所示。

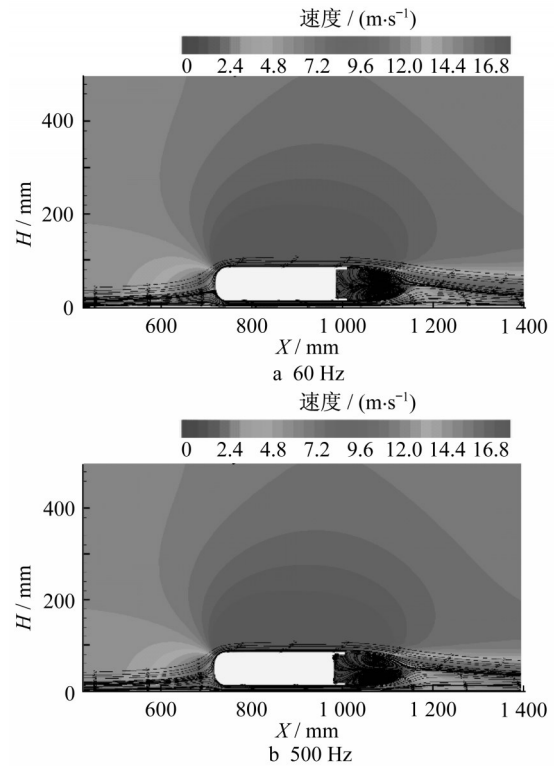


图15 主被动结合尾迹射流控制平均速度及流线
Fig.15 Control of average velocity and streamline by combining active and passive wake jet

2.4 雷诺应力

通过雷诺应力(图17)可以看到,当加入主被动结合装置时,D型体头部分离基本消失,雷诺应力区变得很小。在低频射流时(图17a),由于频率较低导致尾部形成了不太光滑的雷诺应力的区域。加入高频射流后(图17b),其尾迹雷诺应力区在流向上有较小的延后,这说明高频可以更加延后涡的作用位置。

2.5 瞬态流场

由瞬态的涡量图可以较清晰地看到尾迹射流对瞬态流场的影响。图18是低频和高频射流的瞬态涡量图。通过对比可以看到,当采用高频射流时,D型体上表面的分离减弱,边界层较为稳定。低频时能看到在头部有较小的分离趋势。其次,低频时尾迹的涡量较大,下剪切层较长;而高频时上剪切层下洗作用明显,尾迹涡量比较大,但是位置相对靠后。

表3 主被动结合控制减阻效果

Tab.3 Active and passive control of drag reduction

工况编号	射流器S5			射流器S6			相位差	减阻比/%
	射流倾角/(°)	射流频率/Hz	(射流速度/来流速度)/%	射流倾角/(°)	射流频率/Hz	(射流速度/来流速度)/%		
1	0	60	100	0	60	100	0	20.86
2	0	500	100	0	500	100	0	21.20

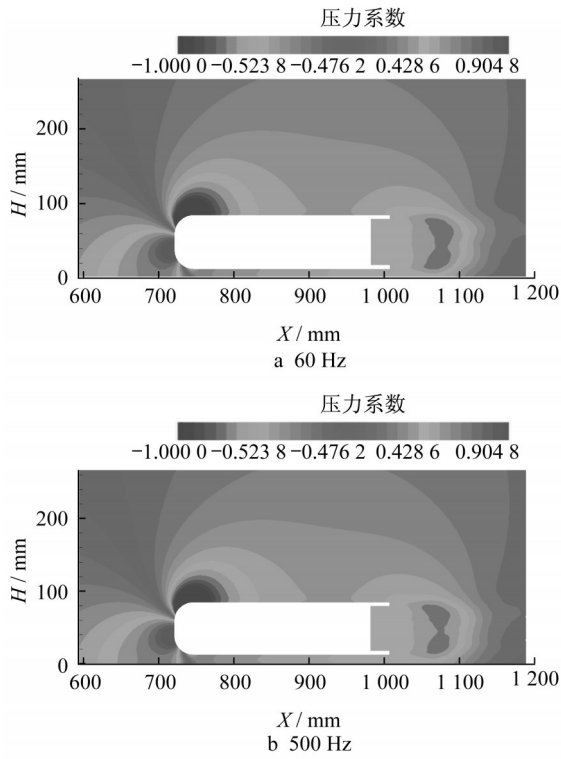


图16 主被动结合尾迹射流控制压力系数
 Fig.16 Control pressure coefficient of active and passive combined wake jet

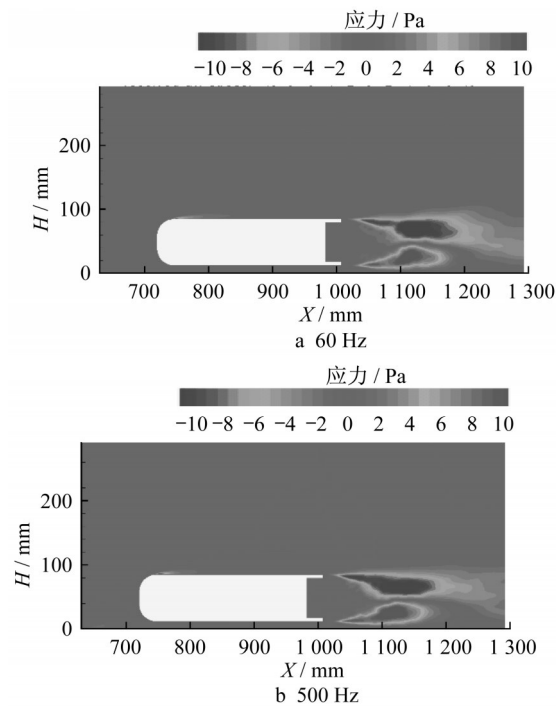


图17 主被动结合尾迹射流控制雷诺应力
 Fig.17 Control of Reynolds stress with active and passive wake jet

从三维涡量图19中可以更明显地看出,主被动流动控制结合带来的流动变化。由于有锯齿板对流

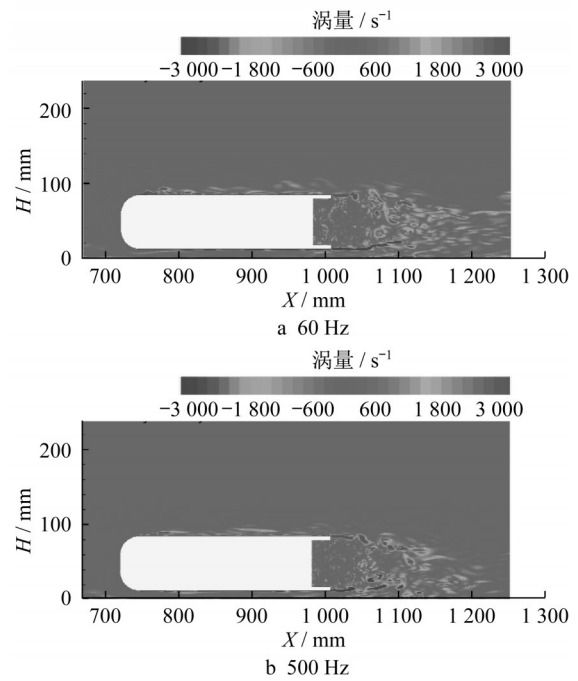


图18 主被动结合尾迹射流控制瞬态涡量
 Fig.18 Control of transient vorticity with active and passive wake jet

体的黏滞作用,导致在锯齿板周围形成了许多流向涡柱,这些涡柱导致以展向涡为主的准三维模型的流动结构被撕扯。涡柱形成后在尾迹可以看到许多U型涡结构,且上剪切层的展向涡结构基本被完全破坏,流动结构更趋向于以流向涡为主的流动。当施加高频射流时该现象更为明显,在尾迹基本为流向的涡柱,展向涡破碎形成较多小的流向涡结构,此举减小了上剪切层在尾部配对时的能量,流动结构增加。因而展向涡的破坏是此控制方法比较重要的减阻原因之一。

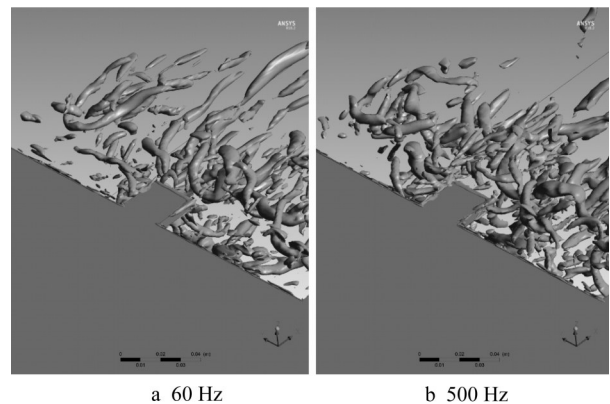


图19 主被动结合尾迹射流控制瞬态三维涡量
 Fig.19 Control of transient three-dimensional vorticity with active and passive wake jet

3 结论

本文探讨了D形钝体的主动流动控制和主被动流动控制结合的减阻效果,其目的是进一步研究D形钝体在近地条件下不同流动控制装置下的流动控制效果,并由此给出控制机理。为了更好地识别近地流动结构的物理机制和流动不稳定性的差异,通过数值仿真分析了雷诺数 $Re=72\ 000$,离地间隙为 $G/H=0.17$ 的平均和瞬时流场,结论如下:

(1) D型钝体的主动流动控制主要以控制其两次分离为主。在头部的第一分离点施加射流会使其尾部流场结构得到改变。低频时头部分离泡会增大,导致尾迹下剪切层动能交换增加,耗散增加;高频时头部分离泡变化不大,而尾迹向后延伸,但总体阻力变化不大。在尾部分离点对上、下剪切层进行射流控制发现高频射流增加了上、下剪切层的夹带效果,有助于钝体减阻,最大减阻可以达到1.78%。

(2) 在尾迹采用高频射流控制剪切层时,发现由于射流增加,导致上剪切层下洗作用被抑制,射流阻碍了上剪切层的发展,形成了较大的雷诺应力,使其耗散有所上升。同时下剪切层弯曲程度加大,涡形成位置和压力下降区域进一步靠近背部,压差阻力增大。

(3) 利用被动控制可以减小头部分离和头部地面边界层分离的特点,同时利用锯齿和射流同时增加三维流动结构,很大程度上破坏了准三维模型的展向流动结构,对于减阻的效果提升较大。采用主被动结合控制时,射流为低频和高频对应减阻效果分别为20.86%和21.20%,减阻效果相差不大。从节省能源的角度来讲,选择低频射流可能更好。

参考文献:

- [1] BEARMAN P W . Investigation of the flow behind a two-dimensional model with a blunt trailing edge and fitted with splitter plates[J]. Journal of Fluid Mechanics Digital Archive, 1965, 21(2):15.
- [2] LI H. Review on the control of flow over a bluff body using splitter plates[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(4):391.
- [3] PARK H, LEE D, JEON W P, *et al.* Drag reduction in flow over a two-dimensional bluff body with a blunt trailing edge using a new passive device[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 563: 389.
- [4] CHOI H, JEON W P, KIM J. Control of flow over a bluff body[J]. Annu Rev Fluid Mech, 2008, 40: 113.
- [5] PASTOOR M , HENNING L , NOACK B R , *et al.* Feedback shear layer control for bluff body drag reduction[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2008, 608:161.
- [6] LORITE-DÍEZ M, JIMÉNEZ-GONZÁLEZ J I, GUTIÉRREZ-MONTES C, *et al.* Effects of rear cavities on the wake behind an accelerating D-shaped bluff body[J]. Physics of Fluids, 2018, 30(4):044103.
- [7] KRAJNOVIC S, FERNANDES J. Numerical simulation of the flow around a simplified vehicle model with active flow control[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2011, 32(1):192.
- [8] HAN X , SINIŠA K , BASARA B . Study of active flow control for a simplified vehicle model using the PANS method[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2013, 42(8):139.
- [9] Martín-Alcántara A, SANMIGUEL-ROJAS E, GUTIÉRREZ-MONTES C, *et al.* Drag reduction induced by the addition of a multi-cavity at the base of a bluff body[J]. Journal of Fluids & Structures, 2014, 48:347.
- [10] PARKIN D J , THOMPSON M C , SHERIDAN J . Numerical analysis of bluff body wakes under periodic open-loop control[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 739:9.
- [11] PARKIN D , SHERIDAN J , THOMPSON M C . Numerical analysis of periodic open-loop flow control on bluff bodies in ground proximity[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2015, 145:339.