

汽车风洞试验段非定常流场的试验

贾青, 王毅刚, 杨志刚

(同济大学 上海地面交通工具风洞中心, 上海 201804)

摘要: 采用三维热线风速仪测量了不同工况下某全尺寸汽车风洞 1:15 模型风洞试验段内的非定常流场。对测点自功率谱密度(PSD)分析表明,对于喷嘴风速小于 $37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低速工况,湍流能量主要集中在 20 Hz 附近,当喷嘴风速为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,该频率对应的 PSD 数值最大;喷嘴风速大于 $37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高速工况,湍流能量主要集中在 43 Hz 附近,当喷嘴风速为 $41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,该频率对应的 PSD 数值最大。无论是高速工况还是低速工况,气流从喷嘴到收集口处脉动速度的振动幅值都逐渐增加,且在高速工况下的脉动速度幅值增量明显大于低速工况。通过试验还发现脉动速度在收集口角度为 0° 的工况下的振动能量远高于收集口角度为 15° 的工况。

关键词: 汽车风洞; 试验段; 非定常流场; 风洞试验

中图分类号: U467.1

文献标识码: A

Test Research of Unsteady Characteristic of Flow Inside Test Section of Automotive Wind Tunnel

JIA Qing, WANG Yigang, YANG Zhigang

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

Abstract: Three dimensional hot-wire was used to test the unsteady characteristic of the flow inside the test section of an 1:15 scaled wind tunnel under different situations. By analyzing the power spectrum density (PSD) data of the test points, conclusions were drawn that when nozzle speed was lower than $37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ the turbulent density concentrates at the frequency of about 20 Hz. At the speed of $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ the PSD value was max. When nozzle speed was higher than $37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ the turbulent density was concentrate at the frequency of about 43Hz. At the speed of $41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ the PSD value was max. Under both low speed and high speed situations the peak of the velocity fluctuations were all enlarged along with the flow from nozzle to collectors. And the amplification was

larger under the situation of high speed. From test we also found that when the angle of the collectors was 0 degree the velocity fluctuations were much lower than that of 15 degree collectors.

Key words: automotive wind tunnel; test section; unsteady flow field; wind tunnel test

整车风洞是汽车空气动力学试验研究不可缺少的实验设施。传统的航空风洞通常都是闭口式风洞,汽车风洞通常采用 3/4 开口式风洞。该类风洞的特点是气流在喷嘴边缘处形成具有较大脉动量的射流剪切层。射流剪切层所围内部区域通常称为射流核心区,该处气流较为均匀,具有较低的湍流度,是模型的测试区域。具有较大脉动量的射流剪切层撞到收集口后,部分气流以压缩波的形式从收集口上或两侧返回喷嘴,激发新的大涡旋产生,从而形成尖劈反馈效应,其他部分气流沿着收集口进入扩散段。可见该处流动具有典型的非定常流动特性。以往的研究^[1-3]对试验段内的定常流场品质有了较深入的了解,但对于试验段内气流的非定常流动特性还没完全掌握,因此需要深入研究。

低速开口回流风洞中存在一个典型现象即试验段的低频振动^[4]。由于在全尺寸风洞中发生该现象的频率范围主要在 20 Hz 以下,因而称之为低频颤振。从声振角度来讲,该现象是由于风洞结构本身的声振频率与流场压力扰动频率一致时发生共振或者流场内部之间存在着耦合因素互相作用形成的,以往虽对该风洞的低频颤振现象进行过大量的研究^[5-6],其形成机理却尚未明确。对于流场特性的研究有助于从机理上解释低频颤振现象。为此,本文将在以往定常流动研究^[1,3]基础上,使用三维热线风速仪对试验段内的非定常流动进行测量,进一步弄清

试验段内气流的流动状态,从而揭示试验段内气流的流动机理,为全尺寸汽车风洞设计如收集口角度的选取提供依据。

1 试验设施及试验方法

为了便于研究低速开口回流式汽车风洞的空气动力学性能,建设了上海市地面交通工具风洞中心全尺寸 3/4 开口回流式低速汽车风洞的 1:15 的模型风洞,如图 1 所示,喷口长、宽、高分别为 180,433,283 mm;收集口相应尺寸为 340,555,385 mm;试验段相应尺寸为 1 517,1 183,818 mm。该模型风洞与全尺寸风洞具有相似的结构,在此模型风洞中进行的气动性能的试验结果对全尺寸风洞具有重要参考价值。模型风洞采用变频器来控制实时调节风机的运行转速从而控制喷口风速,其最大喷口风速为 $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

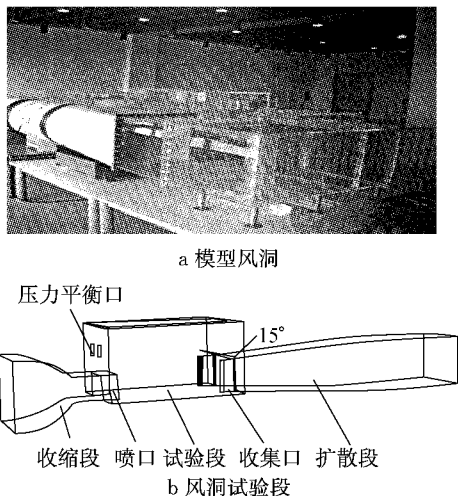


图1 模型风洞示意

Fig.1 Schematic of model wind tunnel

为得到风洞试验段内非定常流场的特性,此模型风洞配备了热线风速仪可对流场的瞬时速度进行测量。热线探头采用 Dantec 公司的恒温式热线风速仪 55R91,测量精度在 1.5% 之内。为了实现模型风洞试验段内热线探头的多点测量,研制了二维移测架用于测点的准确定位。

本文涉及模型风洞试验段内的多个测点测量,将试验段内坐标系定义为: x 方向(流动方向)的零点为喷口出口平面; y 方向(试验段宽度方向)零点为试验段纵向对称面,靠近观察窗一侧为正; z 方向(试验段高度方向)零点为试验段地面,试验段简图如图 2 所示。

为了了解试验段内从喷口到收集口之间流场的

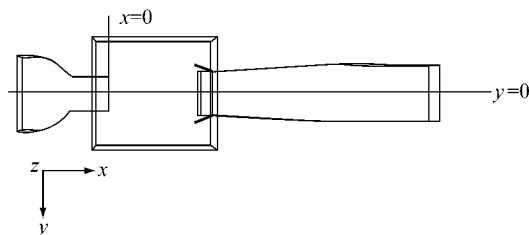


图2 风洞内测量坐标示意

Fig.2 Diagram of coordinate in the wind tunnel

流动特性以便于选取试验时的测点位置,本文首先对风洞试验段内的流场进行了定常数值计算。如图 3 所示,流体在喷口处形成射流,由于测试段内外气流具有较大的速度差,因此在喷口上板边和侧板边分别形成了很明显的射流剪切层,其内部脉动量较大。在气流遇到收集口后,一部分气流继续流动进入扩散段,一部分逆流回试验段,造成脉动量的加大。为全面涵盖脉动量明显的区域,最终确定了几个测量平面。具体为沿 x 方向分别取测量面: $x=0, 50, 250, 500, 750, 850, 900 \text{ mm}$;沿 y 方向每间隔 30 mm 取个测量面,靠近喷口处最大测量面为 $y=240 \text{ mm}$,收集口处较宽,其最大测量面为 $y=270 \text{ mm}$;沿 z 方向以 $z=20 \text{ mm}$ 为测量起始平面,每间隔 30 mm 取一个测量面,喷口处最高测量面为 $z=260 \text{ mm}$,收集口处最高测量面为 $z=380 \text{ mm}$ 。

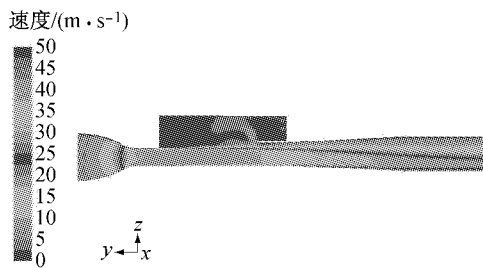


图3 风洞内数值计算流场云图

Fig.3 Velocity contour from simulation in the wind tunnel

根据以往的声学实验研究^[6]得到在收集口角度为 15° 时低频颤振现象具有相对最弱的性态,而收集口角度为 0° 是一基本状态,因此试验分别选取收集口的这 2 种典型工况进行测量。喷口风速从 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 开始,以 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为一个单位,每增加一个单位作为一个测试工况,最大喷口风速为 $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,进行了详细的实验研究。

2 结果分析与讨论

本文采用脉动速度的自功率谱密度(PSD)进行

频谱分析. 自功率谱密度是自相关函数的傅里叶变换, 表征了信号在不同频率的功率分布情况及信号的重复特性、随机结构和相对功率, 反映信号与其本身的频率移位信号之间的相似程度. 信号的自相关性越强, 信号的功率谱越集中, 所以自功率谱密度可以将强的信号有效分辨出来. 其具体公式如下:

$$p_{xx}(f) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} r_{xx}(m) e^{-j 2\pi f m} \quad (1)$$

式中: $r_{xx}(m)$ 为自相关函数, m 为时间序列; f 为频率.

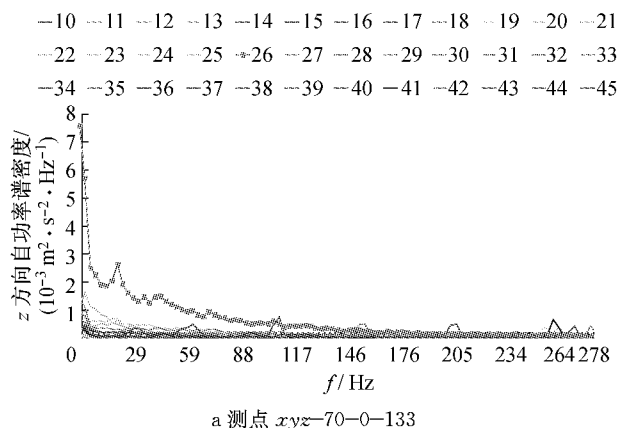
2.1 收集口角度为 0° 的实验结果分析

收集口角度为 0° 工况下喷口和收集口附近速度脉动较为明显, 脉动速度在频率段 $19 \sim 21$ Hz, $41 \sim 45$ Hz 出现峰值, 且当喷口风速位于 $24 \sim 26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 区间时, 20 Hz 附近出现速度脉动的最大值. 在频率段 $41 \sim 45$ Hz 间也出现峰值, 量值大小没有 20 Hz 附近高, 而出现该峰值的速度均大于 $37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 当喷口风速大于 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 峰值的频率范围仍然在 $19 \sim 21$ Hz, $41 \sim 45$ Hz, 但最大峰值集中在 43 Hz 附近, 且处在该峰值附近的速度工况为喷口风速大于 $39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的工况.

在收集口处脉动速度的幅值明显高于喷口处该速度工况下的幅值, 即随着气流的流动脉动速度的能量逐渐加大, 且在高速工况下的增幅大于在低速工况下的增幅.

收集口角度为 0° 工况下喷口和收集口附近相同测点的全风速 y, z 方向的脉动速度自功率谱对比如图 4、图 5 所示, 其中测点 $xyz-70-0-133$ 表示测点距喷口 70 mm、处于中心对称面上、距离地面 133 mm; 图例 $10 \sim 45$ 表示速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

从图 4 可以看到在喷口附近 y 方向脉动速度的自功率谱最大幅值仅有 $5.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$.



Hz^{-1} , 由于来流具有一定的不均匀性, 所以在此处尚存在不同频段的脉动扰动, 因此导致频率成分复杂, 没有规律性. 在收集口附近则出现了和 x 方向同一点处相同的自功率谱特点, 振动幅值仅在 $41 \sim 45$ Hz 这个频率段出现, 最大值为 0.34, 和 x 方向的值在同一量级, 可以和 x 方向振动能量相互作用.

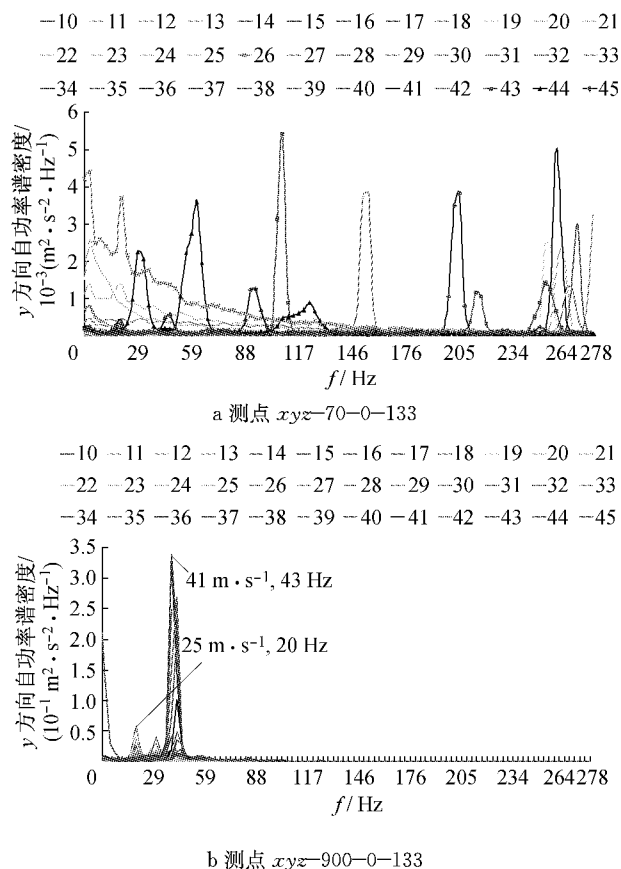


图 4 测点 y 方向脉动速度分量的自功率谱密度
Fig.4 PSD of fluctuated velocity in y direction

从图 5 可以看到, 在喷口附近 z 方向的脉动速度没有出现振动峰值, 而在收集口附近出现了和 x, y 方向同一点处相同的自功率谱特性, 但量值小于

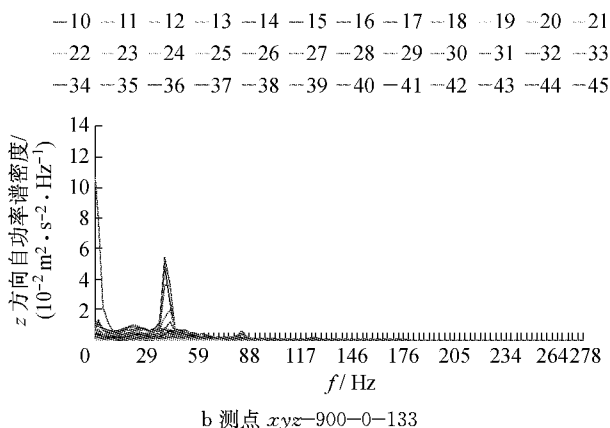


图 5 测点 z 方向脉动速度分量的自功率谱密度
Fig.5 PSD of fluctuated velocity in z direction

其他2个方向,最大峰值仅为 x 方向的10%左右,可见此方向速度脉动影响较小。

而由于脉动速度多由射流剪切层结构引起,因此在射流剪切层内选取一点速度脉动量较大的点进行脉动速度3个分量的自功率谱特性分析。而根据以往的研究得到,在收集口侧板边附近位于剪切层内的点 $x=900\text{ mm}$, $y=210\text{ mm}$, $z=133\text{ mm}$ 处具有较明显的速度脉动量,如图6所示。

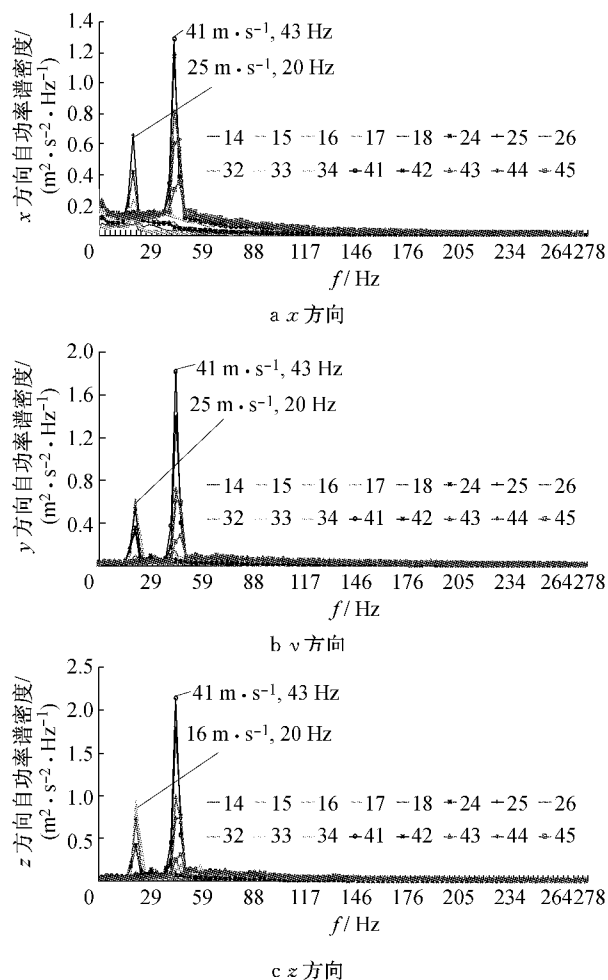


图6 测点 $xyz-900-210-133$ 的脉动速度自功率谱密度
Fig.6 PSD of fluctuated velocity at measurement point $xyz-900-210-133$

从图6看到3个方向的脉动速度分量的自功率谱都处于同一量值范围内,低速时的最大峰值均出现在喷口风速为 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度工况,而高速时最大峰值均出现在喷口风速为 $41\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度工况。因此下面给出试验段内在这2种喷口风速工况下不同位置处脉动速度 x 分量的自功率谱特性(图7)。

由图7可见,脉动速度振动幅值最大的3个位置为 $xyz-500-0-323$, $xyz-900-0-263$, $xyz-900-0-378$,均位于剪切层内,当速度为 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,最大

幅值位于20 Hz附近,而当速度为 $41\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,最大幅值位于43 Hz附近。脉动速度振动幅值都是随着气流的流动而增加的,且在高速工况下增加的幅度较低速工况下大。

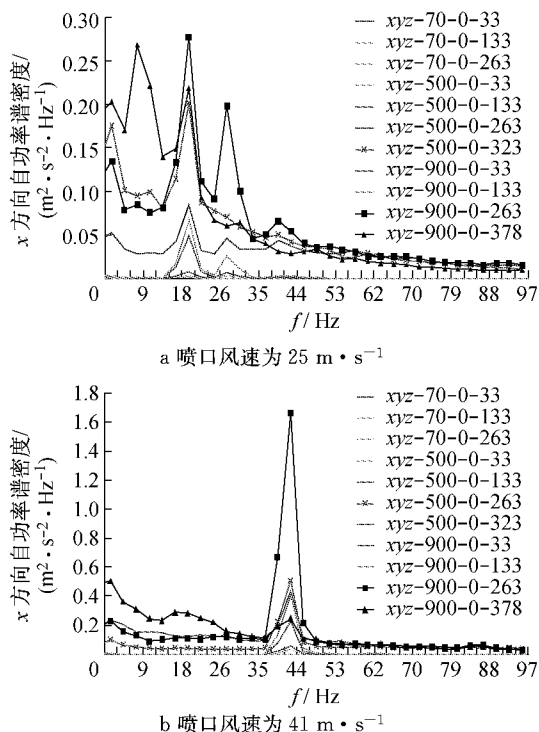


图7 不同喷口风速的脉动速度自功率谱密度
Fig.7 PSD of fluctuated velocity at different wind speeds

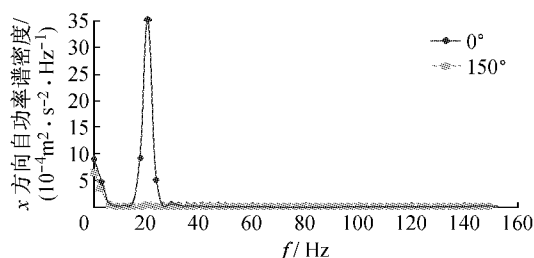
2.2 收集口角度为 0° 和 15° 的结果对比

在射流剪切层内喷口和收集口处选取2个测点, $xyz-70-0-133$ 和 $xyz-900-0-263$,对它们 x 方向的脉动速度分量进行收集口角度为 0° 和 15° 工况下自功率谱特性对比分析,如图8所示。无论在喷口处还是在收集口处,脉动速度振动幅值在收集口角度为 15° 的工况下的量值远小于收集口角度为 0° 的工况。下面具体给出收集口角度为 15° 时,剪切层内测点脉动速度3个方向分量的全风速段自功率谱特性对比图,如图9。

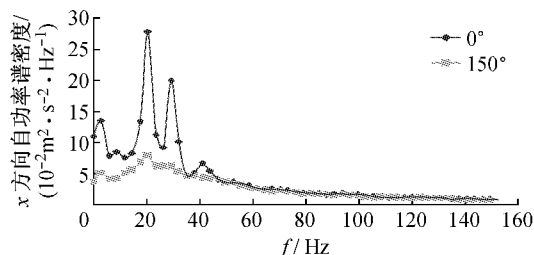
比较图9发现在收集口角度为 15° 的工况下, x 方向最大幅值减小了82.9%, y 方向的最大幅值减小了91.8%, z 方向的最大幅值减小了91.7%。

3 结论

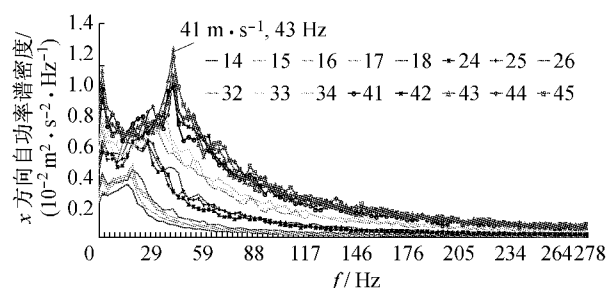
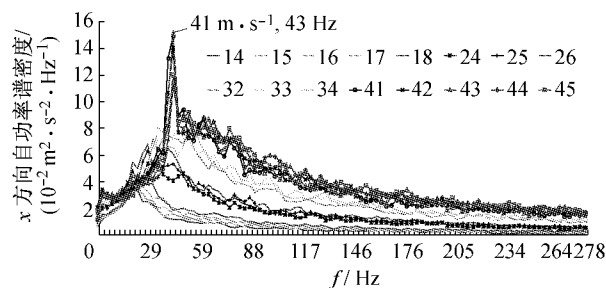
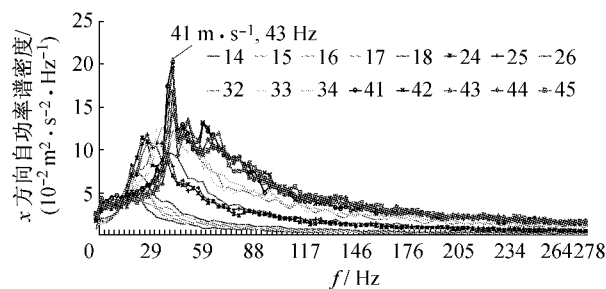
以热线风速仪为测量工具对风洞试验段内流场的瞬时速度进行了不同工况的测量,对实验所得数据进行了频谱分析,得出结论如下:



a 测点 xyz-70-0-133



b 测点 xyz-900-0-263

图8 测点 x 方向脉动速度分量的自功率谱密度Fig.8 PSD of fluctuated velocity in x directiona x 方向b y 方向c z 方向图9 收集口为 15° 时脉动速度的自功率谱密度Fig.9 PSD of fluctuated velocity at angle 15° of collector

(1)脉动速度能量是三维的,3个方向脉动速度的分量具有相同的频率特征,共同构成了风洞试验段内整体脉动速度场的能量分布.但射流区域和剪切层区域脉动速度表现出明显不同的特性.在射流区域,沿 x 和 y 方向的脉动速度量级相当,但 z 方向小一个量级;而剪切层内脉动速度在3个方向量级相当.这一结果对识别射流区的非定常流动特性具有重要的参考价值.

(2)在剪切层内脉动速度振动能量较大,在低速段脉动速度能量随气流的流动而增加,振动能量集中在20 Hz附近,且在喷口风速为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时得到最大值;在高速时增加的幅度明显高于低速工况.在高速段能量集中在 $40 \sim 45 \text{ Hz}$ 附近,且在喷口风速为 $41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时得到最大幅值.

(3)脉动速度在3个分量上的振动幅值的量值在收集口角度为 15° 的工况下均明显小于收集口角度为 0° 工况.

参考文献:

- [1] 贾青,杨志刚.不同收集口角度下模型风洞试验段内流场的数值模拟与实验研究[J].实验流体力学,2007,12(1):93.
JIA Qing, YANG Zhigang. Simulation and test research for model wind tunnel test section at different collector angles[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2007,12(1):93.
- [2] 贾青,杨志刚.压力平衡口对开口式汽车模型风洞驻室流场影响的数值仿真[J].计算机辅助工程,2007,16(3):92.
JIA Qing, YANG Zhigang. Numerical Simulation on effects of breather on flow field of open-jet automotive model wind tunnel [J]. Journal of Computer aided Engineering, 2007, 16(3):92.
- [3] 李启良,郑志强,贾青,等.两种改善汽车风洞轴向静压系数的方法[J].同济大学学报:自然科学版,2010,3(38):422.
LI Qiliang, ZHENG Zhiqiang, JIA Qing. Two methods to improve the axial static pressure coefficient of automotive wind tunnel[J]. Journal of Tongji University : Natural Science, 2010, 3(38):422.
- [4] YANG Zhigang, JIA Qing. Assessment of wind tunnel test section dimensions using CFD[R]. [S. l.]: AIAA, 2008.
- [5] 郑志强,彭为,靳晓雄.汽车风洞声学控制研究[J].噪声与振动控制,2006,26(3):64.
ZHENG Zhiqiang, PENG Wei, JIN Xiaoxiong. The study of automotive wind tunnel acoustic control [J]. Noise and Vibration Control, 2006,26(3):64.
- [6] 郑志强,王毅刚,杨志刚.一种抑制低频颤振的控制方法在模型风洞中的试验研究[J].汽车工程,2007,29(5):369.
ZHENG Zhiqiang, WANG Yigang, YANG Zhigang. An experimental study on the suppression of the low-frequency pulsation of model wind tunnel[J]. Automotive Engineering, 2007, 2007, 29(5):369.