

3/4 开口式模型风洞的被动式湍流发生器研究

贾春东¹, 贾青^{1,2}, 王艺锟^{1,2}, 朱剑月^{2,3}, 李彦龙¹, 韦欢夏^{2,4}

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 上海市地面交通工具空气动力与热环境模拟重点实验室, 上海 201804;

3. 同济大学轨道交通学院, 上海 201804; 4. 新加坡国立大学设计与工程学院, 新加坡 119077)

摘要: 为适应大多数汽车行驶工况的试验模拟, 通常风洞试验段内要求湍流度较低, 但随着道路交通研究的不断深入和细化, 行驶车辆的来流工况不能再单一地简化为低湍流度均匀来流工况, 而汽车在湍流度较高的实际环境中, 其气流结构和增阻机理等都会发生变化。为了能够提供更加符合这种道路工况的流场, 本研究设计了一种被动式湍流发生器, 用以模拟特殊工况下较高湍流度的自然来流情况。首先, 使用数值仿真方法分析湍流发生器产生的湍流效果, 并对比其与实际道路风谱的吻合度。然后, 对风洞测试段的流场品质和射流剪切层特性进行分析, 发现湍流发生器会使低频颤振现象变得明显, 为此结合抑振型海豹胡须喷嘴结构来进一步优化其湍流效果及流场特性。最后, 通过模型风洞试验对仿真结果以及所产生的湍流效果进行验证。结果表明, 被动式湍流发生器能够很好地模拟较高湍流度的自然来流, 同时仍然能维持风洞内较低的低频颤振水平。

关键词: 汽车空气动力学; 风洞试验; 湍流发生器

中图分类号: U467

文献标志码: A

Research on Passive Turbulence Generator Based on 3/4 Open Model Wind Tunnel

JIA Chundong¹, JIA Qing^{1,2}, WANG Yikun^{1,2}, ZHU Jianyue^{2,3}, LI Yanlong¹, WEI Huanxia^{2,4}

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Lab of Vehicle Aerodynamics and Vehicle Thermal Management Systems, Shanghai 201804, China; 3. School of Rail and Transportation, Tongji University, Shanghai 201804, China; 4. College of Design and Engineering, National University of Singapore, 119077 Singapore)

Abstract: Wind tunnel testing is a pivotal methodology for investigating automotive aerodynamics. In order to simulate test scenarios encompassing a broad spectrum of real-world driving conditions, wind tunnel test sections

typically demand a relatively low level of turbulence intensity. However, as road traffic research becomes increasingly intricate, the notion of simplifying vehicle inflow conditions to uniformly low turbulence is no longer adequate. On one hand, the evolution of autonomous driving technologies has led to reduced inter-vehicle spacing at high speeds, even giving rise to platooning scenarios. Under such conditions, the trailing vehicle contends with inflow characterized by heightened turbulence intensity. On the other hand, vehicles navigating through non-open-road environments, like those flanked by trees or buildings, confront inflow conditions that are far from being characterized by low, uniform turbulence. The aerodynamic flow structures and drag-increasing mechanisms experienced by vehicles in these high-turbulence real-world settings undergo transformation. To furnish a flow environment more closely aligned with these road conditions, this study has devised a passive turbulence generator, aimed at emulating elevated turbulence intensity scenarios prevalent in specific driving conditions. Initially, numerical simulation techniques were employed to assess the turbulence-generating efficacy of the generator, and its resemblance to actual road flow spectra was examined. Subsequently, an analysis of the wind tunnel test section's flow field quality and jet shear layer characteristics revealed the amplification of low-frequency flutter phenomena attributed to the turbulence generator. To address this issue, a vibration-damping variant of the harbor seal whisker nozzle structure was incorporated, further investigating its impact on turbulence and flow field characteristics. Finally, model-scale wind tunnel experiments were conducted to validate both the simulation outcomes and the generated turbulence effects. The results underscore the capability of the passive turbulence generator to aptly emulate the higher

收稿日期: 2023-12-15

基金项目: 新能源汽车及动力系统国家工程研究中心资助项目; 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 贾春东(2000—)男, 本科生, 主要研究方向为汽车空气动力学。E-mail: 2957954735@qq.com

通讯作者: 朱剑月(1973—)男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为空气动力学、气动噪声、轨道交通振动与噪声控制。

E-mail: zhujianyue@tongji.edu.cn

turbulence intensity natural inflow conditions while still maintaining low-frequency flutter at manageable levels within the wind tunnel environment.

Keywords: automobile aerodynamics; wind tunnel testing; turbulence generator

车辆在道路行驶时的工况是复杂多变的,为满足工程应用的定性化评价指标,风洞试验大多将道路行驶工况简单模拟为低湍流度均匀来流工况。但是,随着理论研究的不断深入和具体问题的不断细化,单一的低湍流度均匀来流不再能满足所有实际车辆行驶工况需求。所以,这就要求车辆在风洞中能够精确地模拟出地面风的作用,而湍流度作为影响空气阻力的一个十分重要的因素,更需要在风洞中被精确模拟。

在实际生活中,道路平均湍流强度为4%,沿海地区湍流强度最高可达20%,在跟车或超车时湍流强度可达28%^[1]。风洞中产生的试验风湍流度远远低于此数值,因此目前普遍采用后期修正的方法来提高风洞试验的湍流模拟准确性。后期修正的方法需要在试验前进行预先计算和测量,还需要对试验参数、试验环境等进行充分的控制和调节,因此在研究湍流度较大的工况时,仍采用此方法会比较困难和复杂。另外,随着汽车减阻机理研究的深入,及人们对各种特殊工况比如队列行驶、城郊行驶工况重视度的提升,发现汽车在这些湍流度较高的实际环境中的气流结构和增阻机理等都会发生变化。

目前,国内外的有些风洞试验室已经采用了湍流发生装置来提高试验风的湍流度,使其能够更好地模拟地面风。斯图加特大学全尺寸航空风洞中采用FKFS swing系统^[2],来模拟大范围的湍流长度、尺度和频率;加拿大交通部和加拿大国家研究委员会(NRC)进行合作,开发了一个用于NRC 9 m风洞的道路湍流系统(RTS)^[3];斯图加特大学IVK模型尺度风洞安装过6个垂直横跨风口的机翼,用以模拟自然随机侧风^[4];杜伦大学的2 m风洞中安装了一种主动升降的湍流发生系统^[5];宾西法利纳大学设计了一种收缩上游的湍流产生系统(TGS)^[6];西南交通大学闭环低速风洞中安装了网格状的正方形被动网格,用于产生湍流^[7]。

本研究基于3/4开口式模型风洞设计了一种被动式湍流发生器,采用CATIA软件对风洞和被动式湍流发生器进行了建模,并使用STAR CCM+软件

进行了仿真;通过本征正交分解(POD)分析和傅里叶分析来评估湍流产生效果,得到了被动式湍流发生器产生的风谱;另外,还对流场质量和剪切层特性进行了分析。研究发现,与原风洞相比,被动式湍流发生器引入了轻微的低频颤振现象。为了消除这一现象,从而使风洞试验的模拟工况更加符合实际,本研究借鉴了抑振型海豹胡须装置^[8]方法,然后再次进行仿真。结果显示,这种方法既能满足湍流度要求,又能在一定程度上减轻低频颤振现象。其后,开展了一组模型风洞试验,对仿真结果以及湍流效果进行了验证。

1 被动式湍流发生装置

1.1 湍流发生装置选型

本研究在湍流发生器结构选取过程中主要考察了两种较为合适的结构:网格状和尖顶状结构,如见图1所示。表1提供了测试风的3个方向(u , v , w)的湍流强度(I_u , I_v , I_w),以及纵向相关的湍流长度尺度(L_{xu} , L_{xv} , L_{xw})。



图1 网格状和尖顶状结构^[3]

Fig.1 Grid-like and spire-like structures

表1 不同结构下的湍流强度及长度尺度^[3]

Tab.1 The turbulence intensity and length scale under different structures

结构情况	$I_u/\%$	$I_v/\%$	$I_w/\%$	$L_{xu}/\%$	$L_{xv}/\%$	$L_{xw}/\%$
SMTH	0.6	1.0	1.1	0.098	0.079	0.086
C7F	3.2	3.8	4.4	0.035	0.077	0.117
C6Q	3.8	4.8	5.0	0.036	0.081	0.104
VB	4.1	3.9	3.8	0.016	0.012	0.010
C3W	4.6	6.2	6.0	0.039	0.108	0.082
C3S8	5.5	7.7	7.1	0.047	0.156	0.117

注:“SMTH”情况代表风洞的标准平流条件;“VB”代表网格状结构情况;“C”代表尖顶结构情况;C7F是一个由美国国家标准局设计的具有棱角形状的尖顶结构;C6Q是一个由美国国家标准局设计的具有六面体形状的尖顶结构;C3W是一个由美国国家标准局设计的具有三角形状的结构;C3S8是一个由美国国家标准局设计的具有三角形状的结构,有8个面且每个面都具有倾斜的角度。

由表1可知,VB网格状结构产生的湍流强度还可以,但是湍流尺度明显不如尖顶状结构,而地面风

的湍流尺度明显是更大的;并且地面风是具有垂直梯度的,即垂直方向上流体的速度和温度都是变化的。尖顶状的结构能够产生垂直梯度,而网格状的结构不能。根据实际道路测试出的湍流强度和湍流尺度综合评价来看,C3W结构最为接近实际测量结果,所以本文选用C3W尖顶状结构展开研究。

1.2 湍流发生装置尺寸及摆放位置

湍流发生装置C3W为三角形尖顶状。根据本研究中模型风洞喷口尺寸,设计每个三角形尖顶为等腰三角形,尺寸为底宽20 mm,高190 mm,三角形底边间距30 mm,共8个,均布摆放在喷口出口位置处,如图2所示。

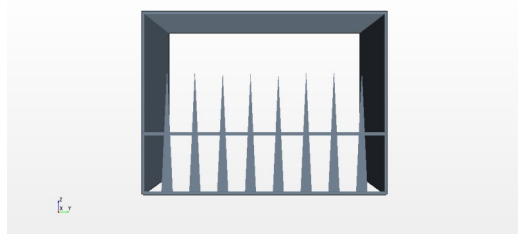


图2 三角形尖顶结构模型示意图

Fig.2 Triangle apex structure model schematic diagram

2 数值仿真

2.1 数值仿真设置

仿真所采用的风洞几何模型及三角形尖顶障碍物加装位置如图3所示。在压力平衡口位置处设置了两个压力平衡点,其参考压力均设置为标准大气压。网格设置采用12 mm的切割体网格,边界层为首层0.1 mm,增长率为1.1的10层网格,设置了3个分别为3.0 mm、6.0 mm、1.5 mm的加密区,加密区网格如图4所示,单元网格总数为2 134万。仿真采用同课题组之前验证过的仿真模型^[9],定常仿真采用Realizable $k-e$ 黏性模型。在定常仿真结果收敛后,将其作为非定常数值仿真的初始,采用大涡模拟(LES)方法进行计算,时间步长为 1.0×10^{-3} s。数值仿真到1.0 s稳定后,开始采样,总采样时间为1.0 s。

2.2 测点设置

取 $y=0$ m的中截面为采样平面(y_0),并设置20个采样点,如图5所示。记录其速度与压力分布情况。

在风洞测试段内,共设置了13个采样点,其分

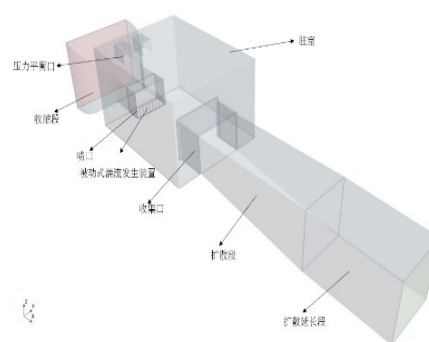


图3 风洞几何模型及三角形尖顶障碍物加装位置

Fig.3 Geometric model of wind tunnel and installation locations of triangular apex obstacles

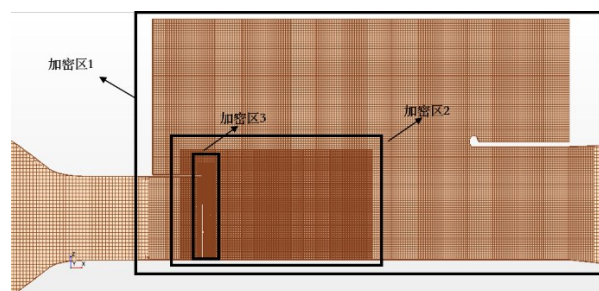


图4 加密区网格

Fig.4 Encrypted area grid

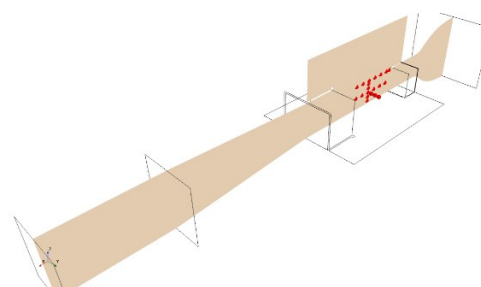


图5 采样平面与采样点

Fig.5 Sampling plane and sampling points

布特征如下:①1号至6号采样点位于同一平面,纵向(Y向)和垂直向(Z向)坐标值均为0 m,水平向(X向)坐标分别为1.3 m、1.4 m、1.5 m、1.6 m、1.7 m、1.8 m;②7号至9号采样点水平向(X向)坐标为1.6 m,纵向坐标为0 m,垂直向(Z向)坐标分别为0.05 m、0.1 m和0.15 m;③10号至13号采样点水平向(X向)坐标均为1.6 m,纵向坐标为0 m,垂直向(Z向)坐标分别为0.05 m、0.1 m、-0.05 m和-0.1 m;④在射流剪切层中,设置有7个采样点,这些测点的纵向(Y向)坐标为0 m,垂直向(Z向)坐标为0.13 m,水平向(X向)坐标分别为1.25 m、1.30 m、1.40 m、1.50 m、1.60 m、1.70 m和1.80 m。

2.3 仿真结果分析

2.3.1 湍流强度

由数值仿真,得到20个采样点的流体速度、 x 向分速度、 y 向分速度、 z 向分速度、压力。由式(1)计算出每个采样点 x 、 y 、 z 三个方向的湍流强度,并绘制对比图,如图6所示。

$$T_i = \frac{u'}{\bar{U}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: T_i 为湍流强度; u' 为流速在 x 、 y 、 z 三个方向波动分量的平均方差; \bar{U} 为流速的平均值。

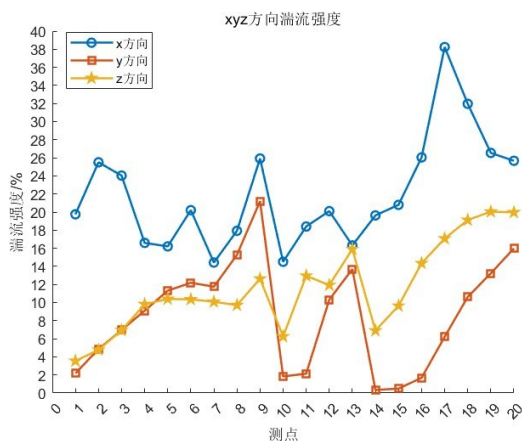


图6 x 、 y 、 z 三个方向的湍流强度

Fig.6 Turbulence intensity in the x , y , and z directions

由图6可以看出,该被动式湍流发生器能够使模型风洞的试验风具有较高的湍流度,且 x 向的湍流强度是三个方向中最大的,其中测点14到测点20

湍流强度较高,这是因为其位于射流剪切层内。而测试段内的测点, x 向湍流强度均在14%~26%, y 向湍流强度均为2%~21%, z 向湍流强度均为3%~16%。总湍流强度可由式(2)算出。

$$T = \sqrt{T_u^2 + T_v^2 + T_w^2} \quad (2)$$

式中: T 为总湍流强度; T_u 为 x 向湍流强度; T_v 为 y 向湍流强度; T_w 为 z 向湍流强度。

总湍流强度的计算结果如图7所示,与图8提供的真实道路湍流强度相比,具有较好的贴合度。将图7与图8对比,可以得出以下结论:该试验风能够较好地满足引言中所提到的地面风湍流强度,尤其对于队列行驶情况下的地面风湍流强度,能够达到较好的模拟效果。

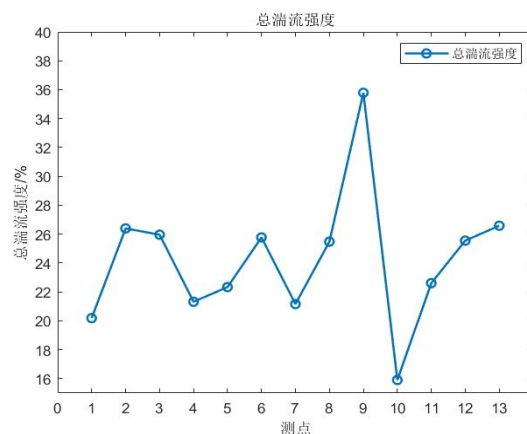


图7 测试段内13个测点的总湍流强度

Fig.7 The total turbulence intensity at 13 measurement points within the test section

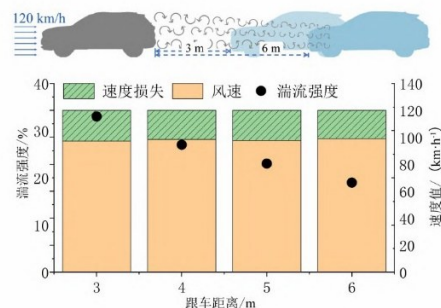
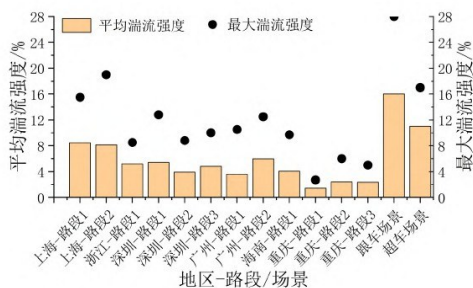


图8 不同场景与不同跟车距离下测出的湍流强度^[1]

Fig.8 The turbulence intensity measured under different scenarios and varying following distances

2.3.2 风谱分析

在离待测车辆较近的位置选取两个采样点来进行风谱分析。本研究选取图5中采样点4(1.6 m、0 m、0 m)及采样点8(1.6 m、0.1 m、0 m)进行风谱分析。本文中使用功率谱密度方法(PSD)进行风谱分析。

析,由于本文研究对象为模型风洞,具有缩尺比,因此需要根据相似性准则进行转换,其频谱转换过程式如下:

$$f_r = \frac{f \times L_{ref}}{U_{ref}} \quad (3)$$

式中,根据相似性准则,参考尺度 L_{ref} 为1/15。 U_{ref} 取模拟车速(25 m/s)。由此,经归一化的PSD可由式(4)所得:

$$PSD(f_r) = \frac{PSD_f}{U_{ref} \times L_{ref}} \quad (4)$$

对比实际路段中测出的风谱图^[3]。在实际路段测量中,分别进行4个场景的测量,即低交通密度(light traffic)、中等交通密度(moderate traffic)、高交通密度(dense traffic)和重卡尾流(HDV wake)。在这4个场景中,其湍流强度依次增加。现给出采样点4、采样点8的 x 、 y 、 z 三个方向速度风谱的拟合曲线与实际路段测出的 x 、 y 、 z 三个方向速度风谱的对比图,如图9—图11所示。

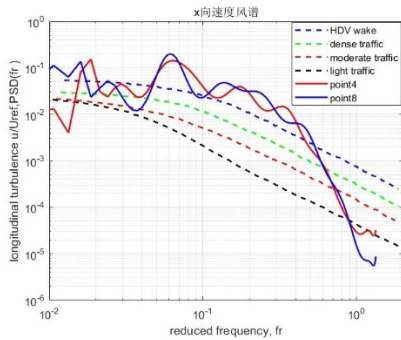


图9 x 向速度风谱对比图

Fig.9 Comparison graph of velocity spectra in the x -direction

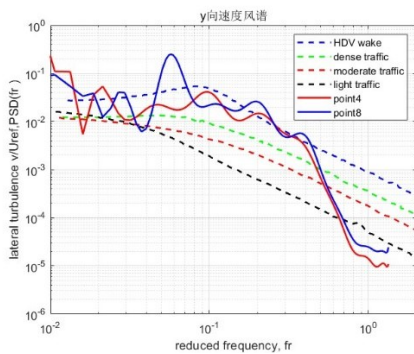


图10 y 向速度风谱对比图

Fig.10 Comparison graph of velocity spectra in the y -direction

由于本研究设计的被动式湍流发生器产生的湍流强度较大,由图9—图11也可以看出,其风谱图与“重卡尾流(HDV wake)”场景的风谱图较为吻合,二者趋势基本一致,只是高频分量相对较少。因此,在后续的研究中考虑以下几种方法,来增加风谱图中的高频分量,以提高对地面风的模拟效果。

(1)优化尖顶的几何形状:尖顶的几何形状对

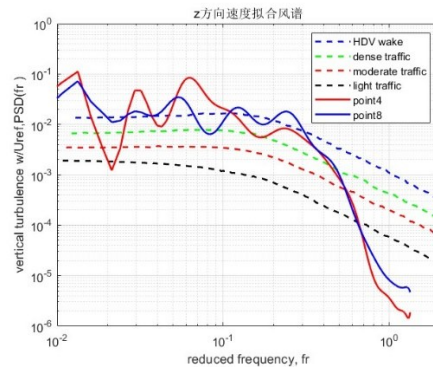


图11 z 向速度风谱对比图

Fig.11 Comparison graph of velocity spectra in the z -direction

风洞内的湍流特性有着显著影响。进一步优化尖顶的几何形状,并对不同几何形状下产生的风谱图进行分析。旨在找到最适合的尖顶几何形状。

(2)调整尖顶的安装位置:尖顶的安装位置对风场的湍流特性具有重要影响。尝试不同的安装位置,以找到能够增强高频分量存在和整体湍流强度的最佳位置。

(3)控制风洞内部流动:风洞内部流动模式对湍流分布产生显著影响。有意识地引入精心设计的风洞内部流动控制机制,以有效地调节内部流动动态,从而增强湍流的均匀性。

通过这些有针对性的优化途径,本研究旨在全面提升风洞环境中的湍流特性,从而在模拟复杂的实际驾驶场景时能获得更高的模拟精度。综上所述,安装了本研究设计的被动式湍流发生器的风洞,能够提供风谱在0.01~1.30 Hz范围内的地面风模拟条件。

2.4 低频颤振分析

由上述分析可知,被动式湍流发生器产生的湍流强度,湍流尺度与风谱可模拟湍流度范围在10%~30%、风谱范围在0.01~1.3 Hz的地面风。但考虑到3/4开口式风洞特有的低频颤振现象与喷口来流湍流度的密切关系^[10],这里需要对本研究形成的湍流发生装置对低频颤振的影响进行评估。

2.4.1 y_0 平面脉动量分析

低频颤振现象发生时,伴有强烈的周期性速度脉动与压力脉动^[11],这里从速度场的角度来分析这一现象。现对 y_0 平面的采样区域进行 u 、 w 两个速度分量的本征正交分解(POD)分析。采样区域量纲为一的尺寸:长 $3.571 < X/Dh < 6.255$,高 $-0.413 < Z/Dh < 1.100$,包含喷口到收集口之间的流场。

POD分析选用1 000张采样频率为1 000 Hz的瞬时速度场,总采样时间为1 s。

POD分析结果如图12所示。图12展示了前20阶速度模态的能量占比,前20阶模态共占总能量的64.87%,其中第一阶能量占比最高,为22.17%。为了探究加装被动式湍流发生器对风洞试验风速度场的影响,取其前三阶模态时间系数进行傅里叶频谱分析,并与未加装被动式湍流发生器的原始风洞频谱图进行对比,如图13所示。其中,Model1、Model2、Model3为加装被动式湍流发生器后的前三阶模态,Model01、Model02、Model03为原始风洞的前三阶模态。

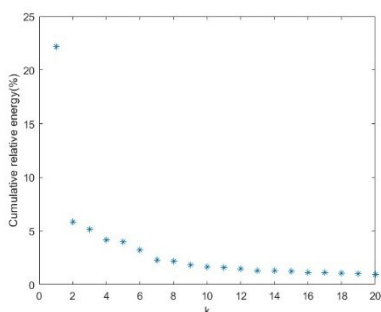


图12 前20阶速度模态能量占比

Fig.12 Percentage of energy contributed by the first 20 velocity modal orders

由图13可以看出,原始风洞前三阶模态具有相同的21 Hz的峰值频率,并且其功率谱密度量级也很大,所以原始风洞低频颤振现象较为明显。加装了被动式湍流发生器后的前三阶模态也具有相同的峰值频率,为23 Hz,其功率谱密度量级也很大。并且,在70 Hz处还有一个小峰值。与原始风洞对比来看,

其峰值频率有向后的略微偏移,但在70 Hz又产生了一个小峰值。所以其低频颤振现象并没有减轻,甚至略有加强。

2.4.2 射流剪切层涡环结构时空演化分析

为了进一步对射流剪切层涡环结构时空演化规律进行分析,对模型风洞展向中截面(y_0 平面)进行Q准则涡分析,如图14所示。采样频率为1 000 Hz,将图14中第一张图所在时刻定义为 $t=0$ s,通过1、2区域可以看出射流剪切层中的涡环结构时空演化规律。 $t=0$ 时刻,在图中位置1处发生涡环的脱落现象,产生涡环1,并且在图中位置2处也有一些小涡环在不断产生。在随后的时间内,涡环1在逐渐变大,位置2处也不断地在有小涡环的产生与破碎。直到大约0.042 s时,大涡环1由于三维不稳定性破碎成大量小涡环,而新的涡环1又将从喷口处产生,开始新一轮循环。涡环的形成发展是造成低频颤振的主要原因之一^[12]。

3 结合抑振型海豹胡须装置的被动式湍流发生装置

在上述分析中可以得出以下结论:加装了被动式湍流发生装置的模型风洞可以产生研究所需的特殊工况下的试验风,但是其低频颤振现象略有加强。为此,这里结合抑振型海豹胡须装置对湍流发生装置进行改进。

3.1 数值仿真

仿真所采用的模型风洞几何模型与上述一致,只是在喷口处加装了抑振型海豹胡须装置,如图15

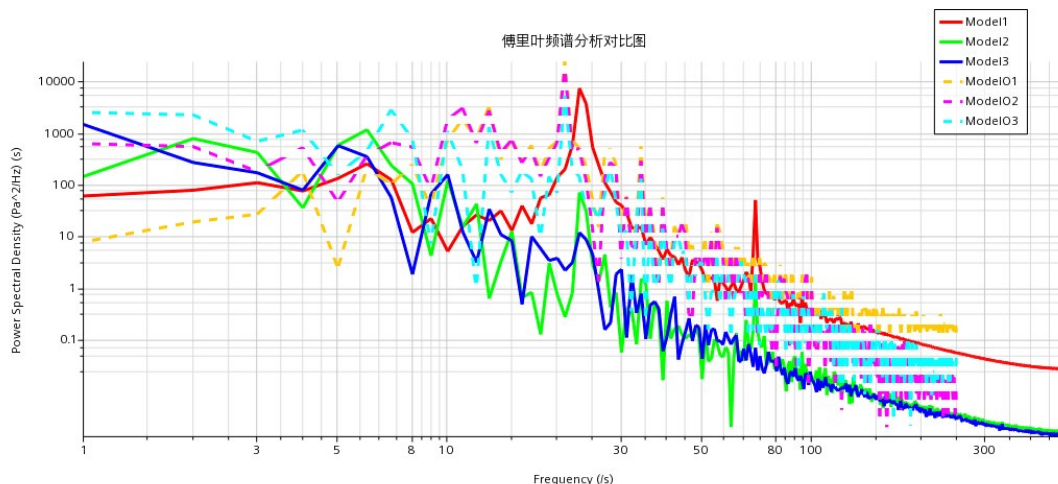


图13 傅里叶频谱分析对比

Fig.13 Comparison of Fourier spectrum analysis

所示。初始条件设置、网格设置、采样时间与采样步长设置、采样平面设置、采样点设置均与 2.1 和 2.2 节所述一致。

3.2 结果分析

3.2.1 湍流强度

仿真采样点与图 5 一致。依照 2.3.1 节所述的方式对数据进行处理,分别得到 x 、 y 、 z 方向的湍流强度和湍流尺度图,如图 16 所示。由图 16 可以看出,测试段内的湍流强度仍能保持上文中未安装抑振型海豹胡须装置的状态,因此可以满足特殊工况地面湍流要求。

3.2.2 风谱分析

依然选取采样点 4(1.6 m, 0.0 m, 0.0 m)及采样点 8(1.6 m, 0.1 m, 0.0 m)进行风谱分析,如图 17—图 19 所示。由图可以看出,加装了抑振型海豹胡须装置后,其风谱图与安装在原始喷口上的基本一致,并且与“重卡尾流(HDV wake)”场景的风谱图也较为吻合,二者趋势基本一致,依然是缺少一些高频分量。综上所述,加装海豹胡须柱结构对于喷口出来流湍流度的影响不大。

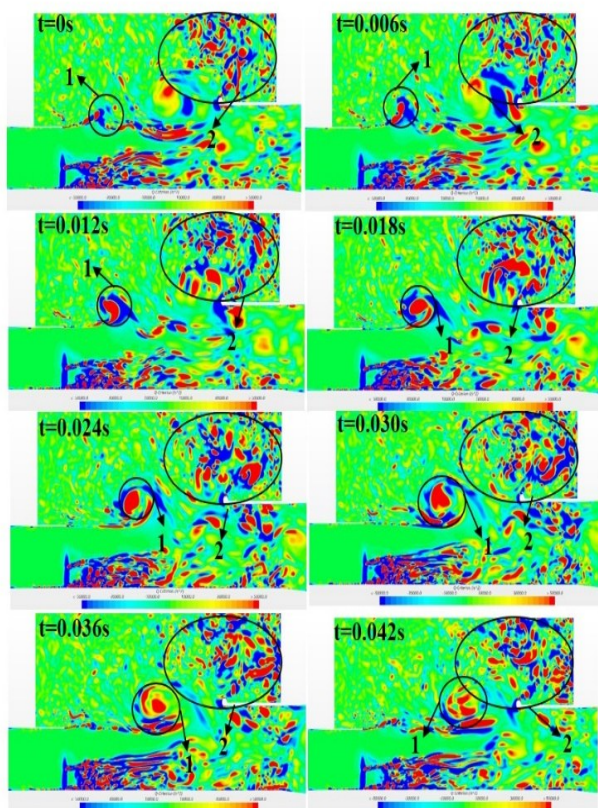


图 14 中截面(y_0 平面)Q 准则涡分析图

Fig.14 Vortex analysis plot of the mid-section (y_0 plane) based on the Q-criterion

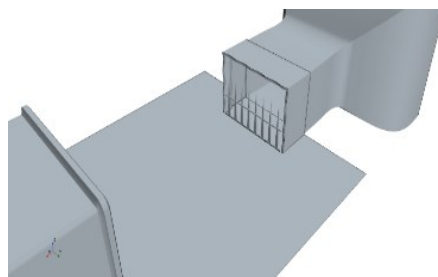


图 15 加装抑振型海豹胡须装置与被动式湍流发生器后的几何模型

Fig.15 Geometric model with added vibration-reducing seal whiskers and passive turbulence generators

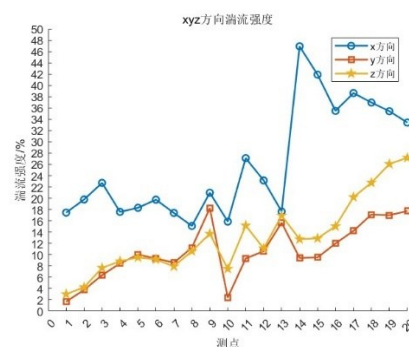


图 16 加装抑振型海豹胡须装置后 x 、 y 、 z 三个方向的湍流强度

Fig.16 Turbulence intensity in the x , y , and z directions after installing vibration-reducing seal whiskers

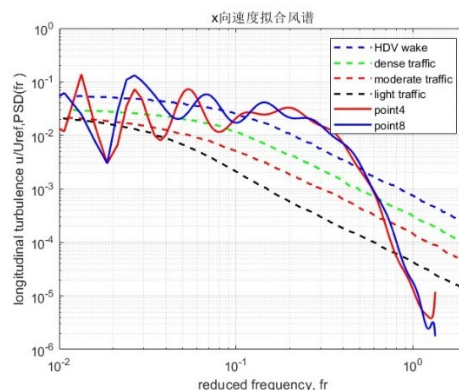


图 17 加装了抑振型海豹胡须装置后 x 向速度风谱对比
Fig.17 Comparison of velocity spectra in the x -direction after installing vibration-reducing seal whiskers

3.3 低频颤振分析

3.3.1 y_0 平面脉动量分析

依然对 y_0 平面的采样区域进行 u 、 w 两个速度分量的 POD 分析。分析发现,前二十阶能量模态共占

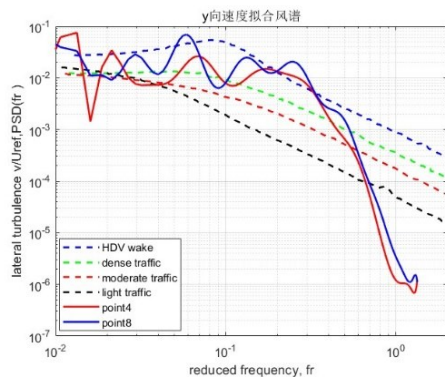


图18 加装了抑振型海豹胡须装置后 y 向速度风谱对比
Fig.18 Comparison of velocity spectra in the y -direction after installing vibration-reducing seal whiskers

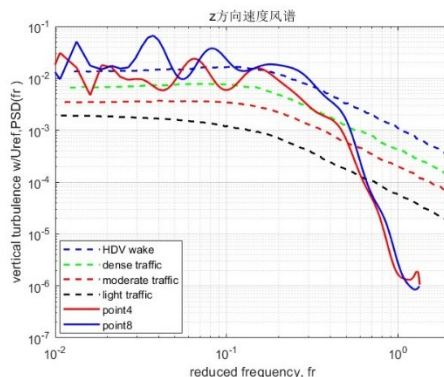


图19 加装了抑振型海豹胡须装置后 z 向速度风谱对比
Fig.19 Comparison of velocity spectra in the z -direction after installing vibration-reducing seal whiskers

总能量的 60.81%, 依然是第一阶模态能量占比最高。

取其前三阶模态时间系数进行傅里叶频谱分析, 并与只安装了被动式湍流发生器而未安装抑振型海豹胡须装置的频谱图进行对比, 如图 20 所示。

其中, model1、model2、model3 为在原始喷口上安装被动式湍流发生器后, 前三阶速度模态的傅里叶频谱图, model1_s, model2_s, model3_s 为在加装了抑振型海豹胡须装置的喷口上, 再安装被动式湍流发生器后, 前三阶速度模态的傅里叶频谱图。

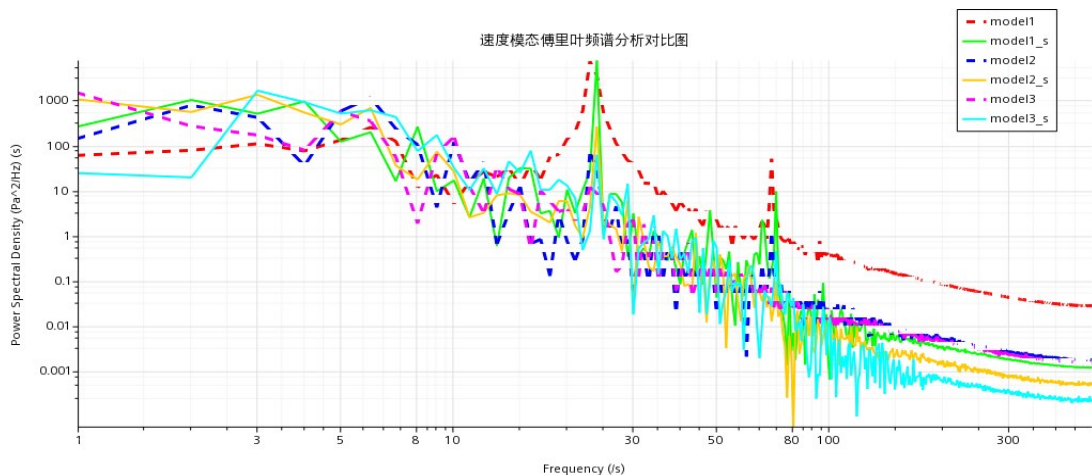
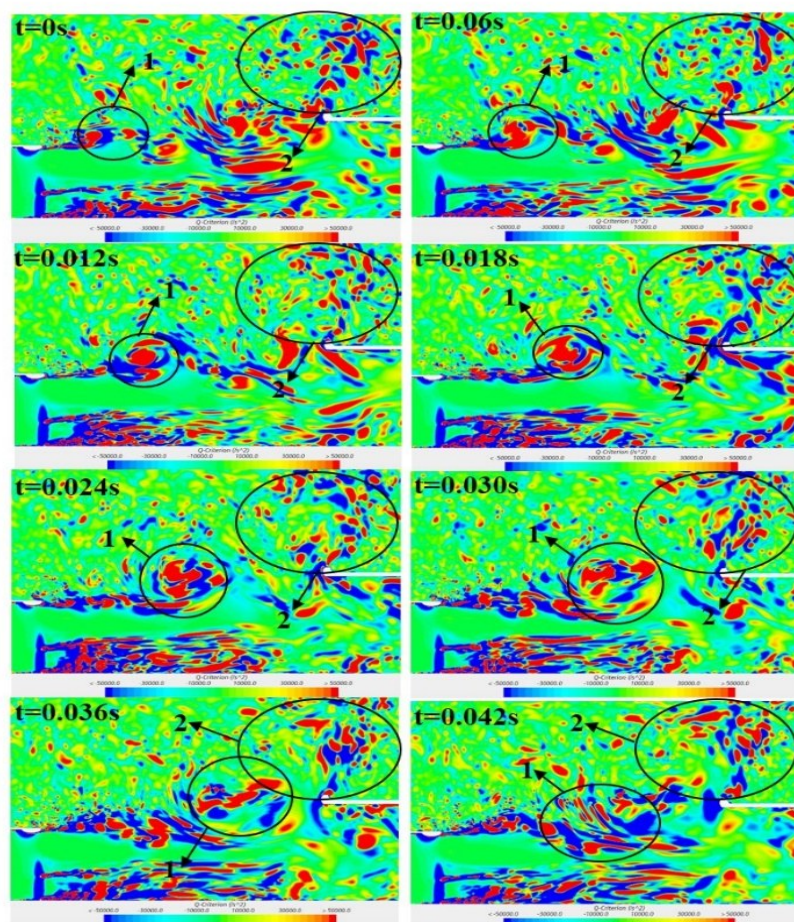


图20 速度模态傅里叶频谱分析对比
Fig.20 Comparison of Fourier spectrum analysis of velocity modes

由图可以看出, 安装了抑振型海豹胡须装置的共同峰值频率在 24 Hz, 未安装的共同峰值频率在 23 Hz, 海豹胡须柱结构可以将峰值频率朝远离低频颤振敏感频率 (23 Hz) 的方向偏移。另外, 70 Hz 处的安装与未安装相比有一个明显的下降, 一阶模态小峰值从 $50.7 \text{ Pa}^2/(\text{Hz}\cdot\text{s})$ 降低到 $9.6 \text{ Pa}^2/(\text{Hz}\cdot\text{s})$ 。除此之外, 过了 24 Hz 以后可以看到, 安装与未安装相比, 功率谱密度值有 2 个数量级程度的下降。因此, 在引入抑振型海豹胡须装置后, 低频颤振现象得到了一定程度的改善, 但仍存在进一步提升的空间。

3.3.2 射流剪切层涡环结构时空演化分析

与 2.4.2 节相同, 对模型风洞展向中截面 (y_0 平面) 进行 Q 准则涡分析, 如图 21 所示。 $t=0$ 时刻, 在图中位置 1 处发生涡环的脱落现象, 产生涡环 1, 并且在图中位置 2 处也有一些小涡环在不断产生。接下来的时间内涡环 1 在不断增大, 与 3.2.3 节的涡环结构时空演化图相比, 位置 2 处小涡环的数量与起伏明显要小了很多。说明抑振型海豹胡须装置对流场起到了一定的改善作用。

图 21 中截面(y_0 平面)Q准则涡分析图Fig.21 Vortex analysis plot of the mid-section (y_0 plane) based on the Q-criterion

4 模型风洞试验

前述通过数值仿真计算验证了被动式湍流发生器的湍流生成效果以及流场品质,并结合了抑振型海豹胡须装置进一步探究了其湍流效果与流场特性,下面继续开展了一组模型风洞试验来验证其试验风效果。

4.1 试验模型

试验模型采用加装海豹胡须柱及湍流发生装置的结构,如图 22 所示。工况采用与数值仿真相同的工况,来流选为 25 m/s,两个采样点分别选为: a(1.3 m, 0.0 m, 0.0 m), b(1.6 m, 0.0 m, 0.0 m)。

4.2 试验结果分析

对 4.1 节中所述的采样点 a、b 进行速度采集,并绘制频谱图,如图 23 所示。将两个采样点仿真拟合曲线与实验数据拟合曲线进行对比,同时计算其平均相对误差。采样点 a 的平均相对误差为 30.32%,采样点 b 的平均相对误差为 41.22%。由此可见,仿

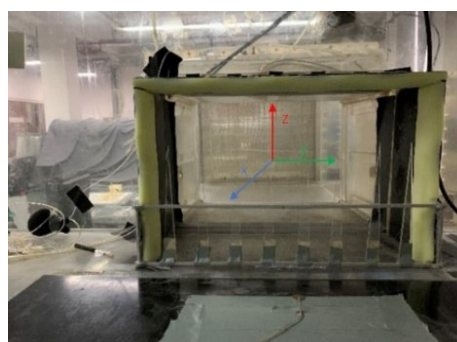


图 22 加装了抑振型海豹胡须装置的喷嘴

Fig.22 Jet nozzle with installed vibration-reducing seal whiskers

真曲线与实验曲线呈现整体趋势的一致性,虽然二者绝对值之间存在一定差异,但采样点 a 实验与仿真结果的差距,与采样点 b 实验与仿真结果的差距基本一致。这种一致性的差距可能是仿真工具的精度问题或者具有共同影响因素造成的。但整体来看,仿真与实验结果是具有较好的切合度的。

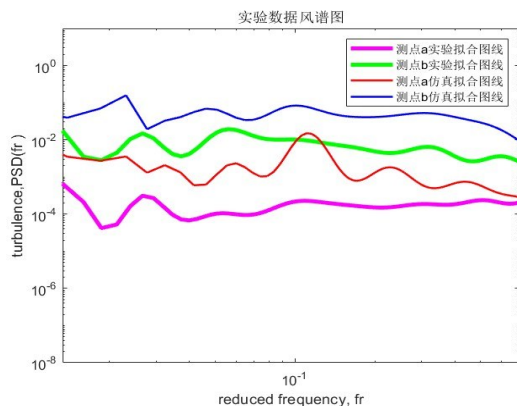


图23 试验测点风谱图

Fig.23 Spectral plot of experimental measurement points

5 结语

本研究设计了一种被动式湍流发生器,旨在提高风洞试验中的湍流度,以更好地模拟地面风场,特别是在城市环境下汽车的队列行驶状态。首先根据路面风谱特性及相关文献研究选择了适合本研究的湍流发生器结构,基于此结构进行了初步计算,分析了其湍流强度及风谱特性,发现尽管该被动式湍流发生器在提高湍流度方面表现出色,但也引入了低频颤振现象。然后,对该模型进行改进,结合了抑振型海豹胡须装置,发现该装置能够在一定程度上改善低频颤振情况,但仍有进一步提升的空间。最后,将此模型进行了模型风洞试验验证。结果表明,被动式湍流发生器能够很好地模拟较高湍流度的自然来流,并仍然能维持风洞内较低的低频颤振水平。

参考文献:

- [1] 周建文,黄滔,徐磊,等. 汽车风洞双车试验来流湍流特征研究[J]. 汽车工程学报, 2023, 13(2): 201.
ZHOU Jianwen, HUANG Tao, XU Lei, *et al.* Study on oncoming turbulence characteristics in automotive wind tunnel double vehicle test [J]. Journal of Automotive Engineering, 2023, 13(2): 201.
- [2] REINHARD B, NILS W, JOCHEN W, *et al.* New FKFS technology at the full-scale aeroacoustic wind tunnel of University of Stuttgart [J]. SAE International Journal of Passenger Cars- Mechanical Systems, 2015, 8(1): 294.
- [3] McAULIFFE B R, D'AUTEUIL A. A system for simulating road-representative atmospheric turbulence for ground vehicles in a large wind tunnel [J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2016, 9(2): 817.
- [4] STOLL D, WIEDEMANN J. Active crosswind generation and its effect on the unsteady aerodynamic vehicle properties determined in an open jet wind tunnel [J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2018, 11(5): 429.
- [5] MANKOWSKI O, SIMS-WILLIAMS D, DOMINY R. A wind tunnel simulation facility for on-road transients [J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2014, 7(3): 1087.
- [6] YANG Y, LI M S, SU Y, *et al.* Aerodynamic admittance of a 5:1 rectangular cylinder in turbulent flow [J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2019, 189: 125.
- [7] COGOTTI A. Generation of a controlled level of turbulence in the pininfarina wind tunnel for the measurement of unsteady aerodynamics and aeroacoustics [J]. SAE Technical Paper, 2003, 2003-01-0430.
- [8] WANG Yikun, JIA Qing, XIA Chao, *et al.* Seal vibrissa based 3/4 open-jet wind tunnel nozzle optimization [J]. Journal of Automobile Engineering (accepted).
- [9] WANG Y, HUANG L, JIA Q, *et al.* Explorative gradient method-based research on the optimization of nozzle flow-guiding devices [J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2023, 16(8): 1587.
- [10] 郑志强, 王毅刚, 杨志刚. 开口式汽车气动声学风洞的低频颤振现象 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(2): 253.
ZHENG Zhiqiang, WANG Yigang, YANG Zhigang. Low-frequency flutter phenomenon of open-type automotive aero-acoustic wind tunnel [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2009, 37(2): 253.
- [11] JIA Q, ZHU Y, BAO D, *et al.* On the low frequency pressure fluctuation in a 3/4 open jet automotive wind tunnel [J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2019, 12(5): 1359.
- [12] BAO D, JIA Q, YANG Z. Effect of vortex generator on flow field quality in 3/4 open jet automotive wind tunnel [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 10(1): 224.