

汽车环境风洞和环境舱流场品质的对比研究

许翔, 张艺伦, 王丹, 李建, 韩佳伟, 牟连嵩, 刘学龙

(中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司 风洞中心, 天津 300300)

摘要: 汽车环境风洞和环境舱的流场品质直接影响汽车的各项热气动性能测试结果的准确性。采用试验与计算流体力学(CFD)仿真相结合的方法研究对比了环境风洞和环境舱的流场品质。试验测试了环境风洞和环境舱试验段特定区域的风速均匀性、边界层厚度、轴向静压梯度和动压稳定性等流场参数,使用CFD方法对环境风洞和环境舱进行流场三维数值模拟。通过对比环境风洞和环境舱的整体流场特征,分析了影响环境风洞和环境舱内流场差异的原因。试验和数值仿真结果表明:汽车环境风洞试验段流场的风速均匀性、边界层、轴向静压梯度、动压稳定性以及气流和风速分布等流场品质明显优于汽车环境舱。

关键词: 汽车环境风洞;汽车环境舱;流场品质;数值仿真

中图分类号: U467.13

文献标志码: A

Comparative Study on Flow Field Quality of Climatic Wind Tunnel and Climatic Chamber

XU Xiang, ZHANG Yilun, WANG Dan, LI Jian,

HAN Jiawei, MU Liansong, LIU Xuelong

(Wind Tunnel Center, CATARC (TianJin) Automotive Engineering Research Institute Co.,Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: The flow field quality of the vehicle climatic wind tunnel and climatic chamber directly affects the accuracy of the vehicle thermal and aerodynamic performance test results in a climatic laboratory. By combining experiment and the CFD method, the flow field differences between climatic wind tunnel and climatic chamber were studied. First, the primary flow field parameters, such as speed uniformity, boundary layer thickness, kinetic pressure stability and axial static pressure gradient were tested. Using the CFD method, the flow field numerical values were simulated for climatic wind tunnel and climatic chamber. By comparing the overall flow field characteristics of the climatic wind tunnel and climatic chamber, the factors affecting the

difference of flow field quality were analyzed. The experimental and numerical simulation results showed that the flow field quality of the climatic wind tunnel was obviously superior to that in the climatic chamber, such as speed uniformity, boundary layer, axial static pressure gradient, kinetic pressure stability, air flow, and wind speed distribution.

Key words: vehicle climatic wind tunnel; vehicle climatic chamber; flow field quality; numerical simulation

汽车环境实验室可以模拟高温、低温、湿热、阳光、雨、雪等气候环境条件,且不受自然环境条件、季节和地域等限制。环境模拟试验已成为汽车研发过程中评价其热平衡性能、热防护能力、空调性能、排放与能耗等性能的基础性试验^[1]。汽车在无风的道路上行驶时,汽车向前运动而空气和地面不动。汽车在环境实验室试验时,车身相对地面静止,利用实验室风机形成一定速度的流动空气,从而模拟汽车在道路行驶中的空气流动状态。因此,环境实验室内的流场品质对汽车环境模拟试验数据的真实性有十分重要的影响^[2]。

目前,环境风洞和环境舱是两种应用范围最广的汽车环境实验室。相对于汽车环境舱,环境风洞进行了专业的流场设计,其流场品质更接近实际道路环境条件,模拟环境条件更多样化,是目前行业内公认最佳的汽车环境实验室^[3]。国内外研究人员对汽车风洞的流场开展了很多试验和仿真研究^[4-11],但对汽车环境舱的流场研究很少。文献[12]采用计算流体力学(CFD)方法,研究了环境舱的风机不同安装高度对汽车底部空气流速和温度分布的影响。由于设计理念不同,导致环境风洞与环境舱的流场品质存在很大差异。目前,国内外未见关于环境风洞与环境舱内流场差异的研究论文。行业内普遍认为

收稿日期: 2022-12-15

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFE0208000);天津市科技支撑重点项目(20YFZCGX00580)

第一作者: 许翔(1978—),男,高级工程师,工学博士,主要研究方向为汽车热管理,数字风洞。E-mail: xuxiang@catarc.ac.cn

环境风洞的流场品质优于环境舱,但一直缺乏具体的试验或仿真数据进行验证。

本文采用试验与数值仿真相结合的方法,通过试验研究了环境风洞和环境舱试验段区域的风速、边界层、轴向静压梯度和动压稳定性等流场参数的差异,并通过环境风洞和环境舱的流场数值仿真,直观地显示了两种环境实验室内整体流场分布以及空气流动的方向和轨迹,分析了造成两种典型汽车环境实验室内流场差异的主要原因。本文的研究结论对环境风洞与环境舱试验结果的关联对比,以及汽车环境模拟试验结果的分析评估等具有重要参考价值。

1 汽车环境风洞和环境舱

1.1 汽车环境风洞

图1为某3/4开口回流式汽车环境风洞示意图。环境风洞内空气流经的区域主要包括风机1、四个导流片2、喷口3、收集口4、试验段5、换热器6、蜂窝器7等。环境风洞试验段尺寸是13.6 m(长) $\times$ 10 m(宽) $\times$ 7.5 m(高)。风洞喷口可根据试验的风速需求或车型尺寸调整至相应大小的喷口面积,当风洞喷口面积为8.25 m²时,对应喷口宽度为3.3 m、高度为2.5 m,模拟最高风速为250 km/h。风机功率为1600 kW,最大风量为585 m³/s。底盘测功机为75英寸(190.5 cm)四驱四电机测功机,前后轴吸收功率分别为300 kW和600 kW,速度测量精度 $\leq \pm 0.02$ km/h。温度模拟范围为 $-40 \sim +60$ °C,温度控制精度 $\leq \pm 0.5$ °C;湿度模拟范围为5%~95% RH,湿度控制精度 $\leq \pm 3$ % RH;阳光模拟强度为300~1200 W/m²。环境风洞测试车型涵盖了轿车、越野车、小货车、中巴、卡车等多种车型。

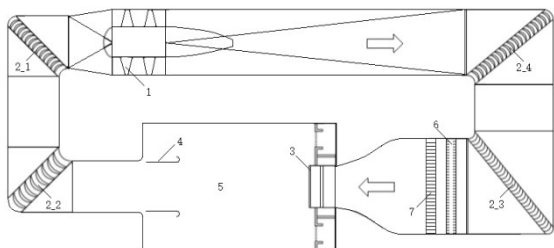


图1 汽车环境风洞示意图

Fig.1 Schematic diagram of vehicle climatic wind tunnel

1.2 汽车环境舱

图2为汽车环境舱示意图,主要由风机1、阳光模拟装置2、制冷机组3、环境舱体5和底盘测功机6

等组成。环境舱的尺寸为长(18 m) $\times$ 宽(8 m) $\times$ 高(5.3 m);风机出口尺寸为1.5 m $\times$ 0.7 m,风机出口面积1.05 m²,距地面高度为0.075 m,风速模拟范围为0~160 km/h。主风机功率为132 kW,最大风量为50 m³/s。底盘测功机为48英寸(121.9 cm)四驱两电机测功机,单轴最大吸收功率为220 kW,速度测量精度 $\leq \pm 0.03$ km/h。温度模拟范围为 $-40 \sim +60$ °C,温度控制精度 $\leq \pm 1.0$ °C;湿度模拟范围为10%~90% RH,湿度控制精度 $\leq \pm 5$ % RH;阳光模拟强度为500~1200 W/m²。环境舱测试车型主要包括轿车、越野车、小货车和小中巴等车型。

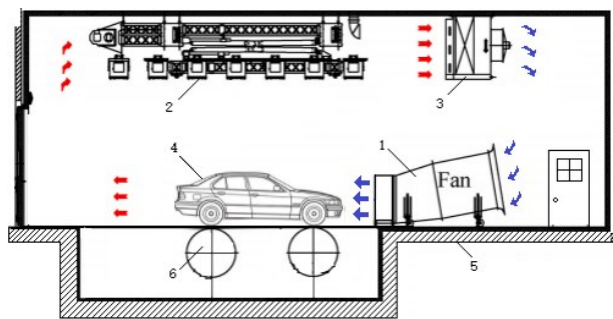


图2 汽车环境舱示意图

Fig.2 Schematic diagram of vehicle climatic chamber

2 环境风洞与环境舱的流场测试

2.1 试验方法

流场测试项目包括风速、边界层厚度、轴向静压梯度和动压稳定性等。在流场测试中,环境温度为25 °C、相对湿度为50%、阳光模拟关闭。待试验风速和环境温度稳定后,设定测试采样时间为1 min,采样频率为1 s采集10个数据。所有测试项目均在空舱无车状态下进行,测试范围为正对环境风洞喷口和环境舱风机出口的试验段区域。图3为流场测点布置示意图, x 轴代表气流方向; y 轴代表垂直于气流的水平方向; z 轴代表垂直于气流的高度方向。

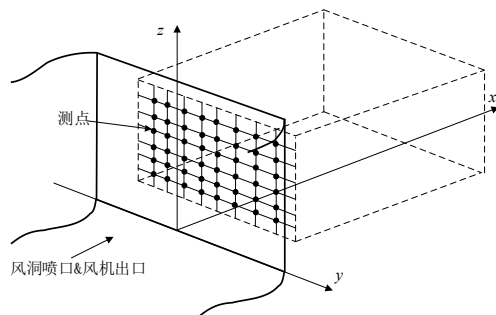


图3 流场测点示意图

Fig.3 Schematic diagram of flow field measuring points

气流的静压、总压和动压等是影响环境实验室流场品质的重要因素。通过测量不同位置空气的静压和总压,间接计算环境风洞和环境舱内的风速、边界层厚度、轴向静压梯度及动压稳定性系数等流场参数。图4为测量风速的L型皮托管。L型皮托管顶部为椭圆形,前端为总压测量探孔,侧面的小孔为静压测量探孔,通过测量气流的总压和静压,总压减去静压得到动压,再通过伯努利方程计算风速。测量时,L型皮托管的椭圆头部应面对平行气流方向。



图4 L型皮托管

Fig.4 L-type pitot tube

图5为边界层测量原理图。边界层厚度是指从地面开始,到气流速度达到自由来流速度的99%的位置距离地面的高度。边界层耙用于测量贴近地面的气流压力、速度及边界层厚度。边界层耙上安装了60根沿竖直方向分布的总压测量管,跨越高度为320 mm。在边界层耙顶部安装了一个L型皮托管,用于测量自由来流速度。通过边界层耙上的总压测量探针和顶部L型皮托管,测得垂直于地面高度方向上的气流速度分布和自由来流速度,可以计算出边界层的厚度。

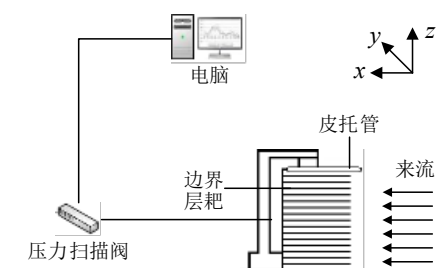


图5 边界层测量原理

Fig.5 Principle of boundary layer measurement

2.2 风速测量

环境实验室的风速及其分布均匀性对整个试验段内的流场以及汽车热平衡等性能的试验结果都有

重要的影响^[13]。利用安装在试验段的皮托管测量气流的静压和总压,通过式(1)计算风速。

$$V = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho_s}} \quad (1)$$

式中: V 为风速, m/s; ρ_s 为空气密度, kg/m³; P_t 为总压, Pa; P_s 为静压, Pa。

图6是试验风速为120 km/h、距离环境风洞喷口和环境舱风机出口1 m处风速分布图。由图6(a)可知,环境风洞的风速分布非常均匀,最大风速为119.8 km/h,最小风速为119.0 km/h,平均风速为119.5 km/h,平均风速与设定风速的偏差小于0.5%。由图6(b)可知,环境舱风机出口的风速分布极不均匀,不同位置的风速差异较大,最大风速为122 km/h,最小风速为87.9 km/h;风机出风口上部的风速最低,从风机中心向左右两侧风速逐渐增大。对比可知,环境风洞与环境舱出风口的风速分布均匀性差异巨大。环境风洞出口风速分布均匀的主要原因是:环境风洞的流道长、喷口面积大,气流经过长距离的流道以及蜂窝器等装置的整流后,风速非常均匀。环境舱风机出口风速分布不均匀的主要原因包括:风机出风口尺寸小、风机叶片旋转产生的离心力、风机流道狭窄、流道很短以及气流未经充分整流等。

图7为环境舱和环境风洞试验段中心轴向($y=0$ m),距地面高度为0.17 m(位置1)和0.61 m(位置2)处,在试验风速为80 km/h时沿气流方向不同测点的实测风速值。由图可知,沿着气流方向,环境舱内风速衰减明显,在位置1和位置2两个测点,从距离风机出口0.2 m到6.5 m的位置,风速衰减率分别为18.7%和20.2%。在环境风洞试验段中心轴向,沿气流方向风速几乎无衰减,风速的一致性很高。

由图6和图7可知,环境舱和环境风洞的风速均匀性和一致性相差很大。由于环境舱内风速分布不均匀,且沿气流方向衰减明显,将导致进入汽车进气格栅、机舱以及汽车底部的冷却风量减少,进而影响汽车的冷却散热能力和热平衡性能。

2.3 边界层测量

空气在流经汽车车身和试验段地面时会形成边界层。边界层效应会对汽车环境模拟试验尤其是对汽车的气动性能等产生不利影响^[14]。设计风洞时为了减小地面边界层的厚度,一般会在风洞的喷口处安装水平或垂直边界层抽吸装置,将边界层的厚度控制在较小的范围。在设计环境舱时很少考虑流场品质的要求,一般没有安装边界层抽吸装置,导致试

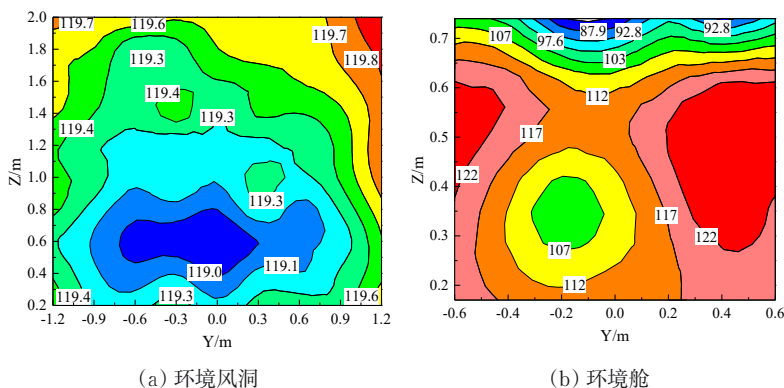


图6 环境风洞和环境舱出口的风速分布

Fig.6 Wind speed distribution at the outlet of CWT and climatic chamber

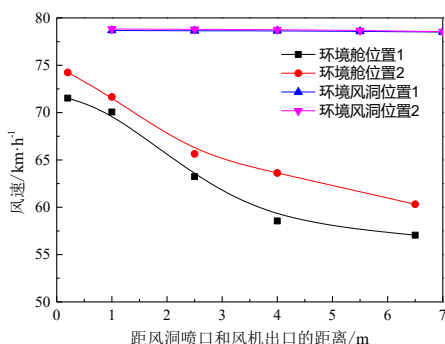


图7 环境风洞和环境舱风速沿气流方向变化

Fig.7 Wind speed change in the test section of CWT and climatic chamber

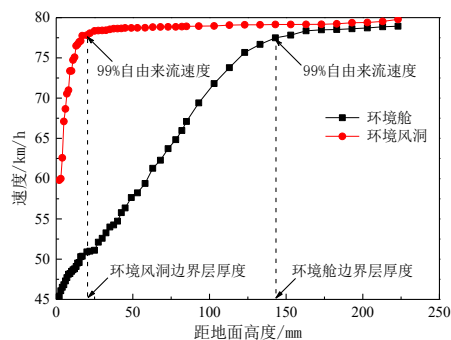


图8 环境风洞与环境舱边界层厚度对比

Fig.8 Comparison of boundary layer between CWT and climatic chamber

验段地面边界层较厚。

图8为距离环境风洞喷口和环境舱风机出口中心1 m处($x=1$ m, $y=0$ m), 试验风速为80 km/h时, 垂直于地面高度方向的气流速度的变化。由图可知, 环境风洞和环境舱内气流速度达到自由来流速度99%时, 分别距地面高度约为22 mm和140 mm, 该高度即为该位置在80 km/h试验风速下的边界层厚度。

在相同位置和风速下, 环境风洞的边界层厚度明显小于环境舱, 主要原因是环境风洞内安装了边界层垂直抽吸装置, 而没有安装边界层抽吸装置的环境舱地面边界层很厚。地面边界层效应会降低近地面气流的速度, 进而对汽车前端冷却模块以及底部的流场分布等造成一定干扰, 进而影响进入汽车机舱和底部的冷却空气流量。

2.4 轴向静压梯度

环境实验室的结构和内部设施会对气流产生干扰和阻碍效应, 导致气流压力沿流动方向逐渐降低, 从而引起试验段内的静压在轴线方向上的变化。轴向静压系数和梯度是评估汽车环境实验室流场品质

的重要参数之一, 是表征试验段静压沿着轴向(即气流方向)上变化率的重要参数^[15-16], 计算公式如下:

$$C_p(x_i) = \frac{p_{x_i} - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2} = \frac{p_{x_i} - p_\infty}{p_0 - p_\infty} \quad (2)$$

$$\frac{dC_p(x_i)}{dx_i} = \frac{C_p(x_{i+1}) - C_p(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \quad (3)$$

式中: C_p 为被测点沿 x 轴方向的静压系数; p 为各测点的静压值, Pa; p_∞ 为参考点的静压, Pa; p_0 为远离气流干扰的驻点压力, Pa; ρ_∞ 为参考点空气的密度, kg/m^3 ; V_∞ 为参考点的气流速度, m/s ; x 为测点到参考点的距离, m 。

表1为环境风洞和环境舱在120 km/h试验风速下, 试验段距地面高度1 m的中心轴向位置上轴向静压梯度测试结果的对比。由表可知, 环境风洞的轴向静压系数和静压梯度明显比环境舱小, 环境风洞轴向静压梯度的变化范围很小, 表明环境风洞试验段的流场品质更高。由于环境舱风机的尺寸和功率、流道长度等和环境风洞差异巨大, 以及环境舱整体空间较小、试验设施较多等原因, 气流压力沿流动

方向下降明显,静压在轴向上变化率大,从而导致风速衰减明显,试验段流场品质变差。

表 1 环境风洞和环境舱轴向静压梯度的差异
Tab.1 Difference of axial static pressure gradient in CWT and climatic chamber

测点位置/m	轴向静压系数		轴向静压梯度	
	环境风洞	环境舱	环境风洞	环境舱
$x=2.15$	0.002 45	0.022 62	0.002 21	0.010 22
$x=3.60$	0.002 63	0.046 25	0.000 12	0.016 29
$x=4.70$	-0.001 90	0.065 00	-0.004 11	0.017 04

2.5 动压稳定性

环境实验室试验段的流场动压稳定性是表征气流速度不稳定性的一个重要参数指标,动压稳定性采用动压稳定性系数表征。动压稳定性系数是指在规定的时间间隔(1 min)内,瞬时动压最大值和最小值的

差与其和的比值,即:

$$\eta=\frac{P_{\max}-P_{\min}}{P_{\max}+P_{\min}} \tag{4}$$

式中: η 为动压稳定性系数; $P_{\max}$ 为最大动压,Pa; $P_{\min}$ 为最小动压,Pa。

表 2 为距离环境风洞喷口和环境舱风机出口相同距离、相同高度的测点位置($x=2.0\text{ m}$ 、 $y=0\text{ m}$ 、 $z=0.353\text{ m}$)上,动压稳定性系数随测试风速的变化。由表可知,环境风洞试验段内的动压稳定性系数明显小于环境舱,其中环境风洞试验段内的动压稳定性系数均 ≤ 0.003 ,环境舱试验段内的动压稳定性系数高出环境风洞近 100 倍。环境风洞和环境舱试验段的动压稳定性系数均随风速的增大而逐渐减小,表明在高风速工况下,试验段内气流速度的稳定性更好。

表 2 不同风速下环境风洞和环境舱动压稳定性系数 Tab.2 Kinetic pressure stability coefficient of CWT and climatic chamber at different wind speeds							
风速/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	40	60	80	100	120	140	160
环境舱动压稳定性系数	0.397 2	0.350 3	0.313 7	0.301 5	0.256 7	0.247 6	0.241 3
环境风洞动压稳定性系数	0.003 0	0.002 6	0.002 5	0.002 3	0.002 2	0.002 2	0.002 0

3 环境风洞与环境舱流场数值仿真

3.1 模型概述

CFD 数值模拟是研究环境风洞和环境舱内流场分布的理想辅助工具。根据汽车环境风洞和环境

舱的组成结构、尺寸以及主要设施和设备的安装位置等,对环境风洞和环境舱体以及试验段内的底盘测功机、阳光模拟装置、制冷机组、汽车固定支架等进行 1:1 的 CAD 建模,如图 9 所示。

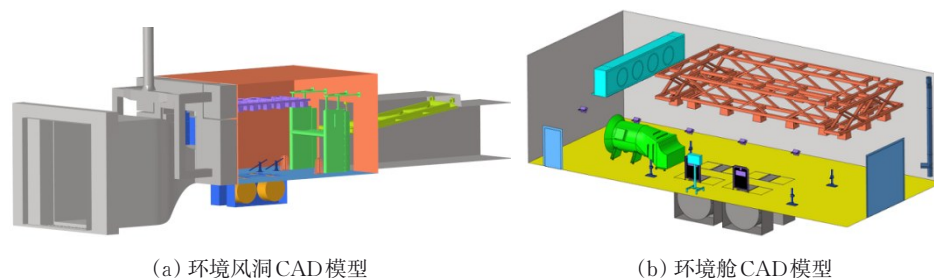


图 9 环境风洞和环境舱的 CAD 模型

Fig.9 CAD model of CWT and climatic chamber

3.2 网格及计算模型

如图 10 所示,在环境风洞和环境舱计算域内生成三角形面网格,采用六面体生成体网格,为了更好地模拟近壁面处边界层,在壁面生成了 2 层边界层网格,对风机、试验段、阳光模拟装置、测功机等局部区域进行了网格加密,整个计算域网格尺寸控制在 2~200 mm 范围内,生成的环境风洞体网格数量约为 3 916 万,环境舱的体网格数量约为 1 623 万。

数值仿真时将环境风洞的喷口和环境舱风机出

口设置为入口速度边界条件,环境风洞的扩散段出口和环境舱的风机入口均设置为出口压力边界条件,壁面边界条件取为固定壁面。数值仿真采用 CFD 商业软件 Star-CCM+,湍流计算模型选取 K-Epsilon 湍流模型,计算精度和收敛残差控制在 10^{-4} 以下。

3.3 模型验证

图 11 所示为试验风速 120 km/h 工况、环境风洞中心轴向上距离地面 1 m 高度处风速的试验值与仿

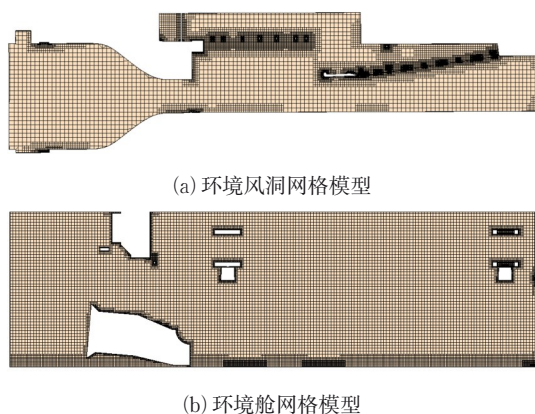


图 10 计算域内体网格模型示意图

Fig.10 Schematic diagram of the mesh model in computational domain

真值对比,最大相对误差为 1.5%。由图可以看出,试验测得的风速和数值仿真得到的风速基本一致,表明环境风洞的数值模型具有很高的仿真精度。

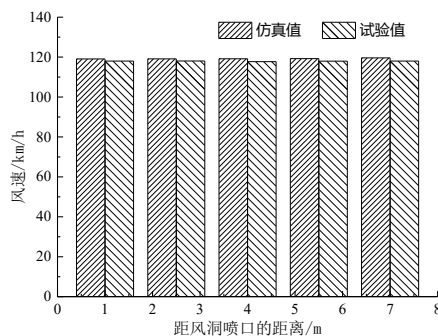


图 11 环境风洞风速试验与仿真对比

Fig.11 Comparison of wind speed test and simulation in CWT

图 12 所示为试验风速 120 km/h 工况、距离环境舱风机出口 1 m、距离地面高度 0.17 m 处,垂直于气流方向不同测点的风速试验值与仿真值对比,试验测得的风速和数值仿真得到的风速基本一致,最大相对误差为 3.5%,表明环境舱数值模型具有较高的仿真精度。

3.4 仿真分析

图 13 为设定风速 120 km/h、环境风洞试验段的速度仿真云图。由图可知,在无车状态下,正对着环境风洞喷口的试验段内气流速度变化很小,且一直保持直到进入收集口后,气流受到收集口和扩散段的阻碍风速才逐渐降低。在整个环境风洞试验段内风速分布均匀,沿气流方向和垂直于地面方向的速度梯度均很小,风速的一致性非常高,无明显的衰减。

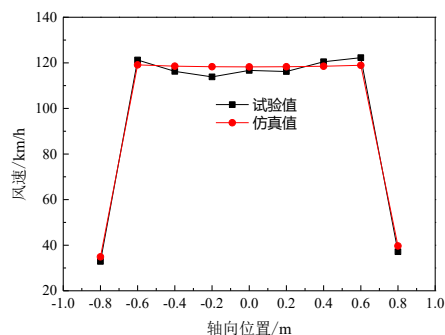


图 12 环境舱风速试验与仿真对比

Fig.12 Comparison of wind speed test and simulation in climatic chamber

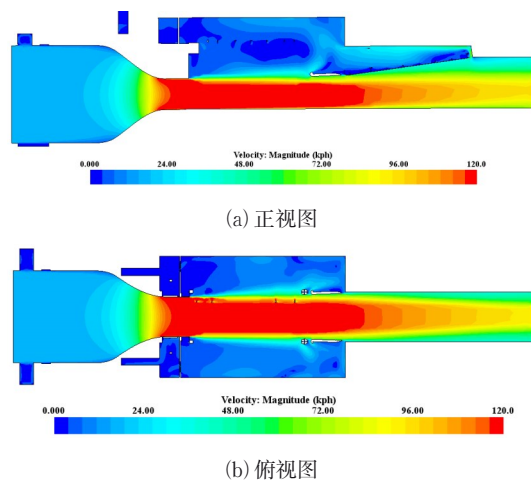


图 13 环境风洞风速仿真云图

Fig.13 Simulation cloud image of wind speed in CWT

由于环境风洞喷口处安装了边界层抽吸装置,使整个汽车试验段内边界层的厚度均保持在很小的范围。

图 14 为设定风速 120 km/h、环境舱的速度仿真云图。由图可知,气流从环境舱风机流出以后呈现发散射流状态,风机后气流速度面较窄且与风机出口高度一致,由于风机功率限制及气流的沿程阻力损失,从风机出口沿着气流方向风速逐渐减小,垂直于地面高度方向上气流存在较大的速度梯度。由于环境舱风机安装在距离地面约 0.07 m 的位置,而且地面没有边界层抽吸装置,导致汽车试验段内边界层的厚度很大,而且边界层的厚度沿着气流方向不断增大。

图 15 为设定风速 120 km/h、环境风洞和环境舱内气流的迹线图。气流迹线图直观地反映了环境风洞与环境舱内部气流的流动方向和路线,环境风洞和环境舱的流场差异非常明显,环境风洞内的气流向收集口一个方向流动,基本上没有回流。整个环

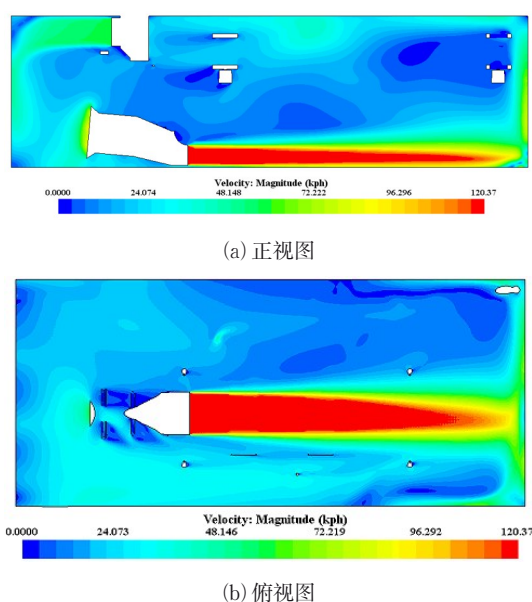


图 14 环境舱风速仿真云图

Fig.14 Simulation cloud image of wind speed in climatic chamber

环境舱内的流场非常紊乱,气流在主风机和制冷风机的驱动下在环境舱内循环流动,不同方向的气流交汇,气流被环境舱后墙阻挡后形成的回流对试验段的气流造成干扰。相对于环境风洞,汽车环境舱流场品质较差的主要原因包括:主风机功率小,导致气流在环境舱试验段速度衰减明显;风机出风口的尺寸小、风机流道狭窄且长度短,风机吹出的气流未经充分整流直接影响风速分布的一致性和稳定性;环境舱整体空间较小,且试验附属设施较多,环境舱体及各种试验附属设施对气流运动产生干扰;地面边界层较厚降低了试验段气流的速度。

4 结论

(1) 通过对比汽车环境风洞和环境舱内风速分布、边界层厚度、轴向静压梯度和动压稳定性等流场测试数据,表明环境舱的流场品质较差。由于风机的尺寸和功率、流道长度、试验段内设施设备等因素的影响,环境舱气流和风速分布的均匀性不高,试验段内边界层很厚,风速沿气流方向的衰减明显。

(2) 环境实验室的流场特性,尤其是正对试验车辆的中心区域内气流速度及压力分布,对通过进气格栅进入汽车散热器和机舱内的冷却风量有直接影响,进而影响汽车冷却和空调系统的各项性能。由于环境舱试验段内气流速度衰减明显、流场紊乱、风速分布不均匀以及地面边界层很厚等,将对汽车

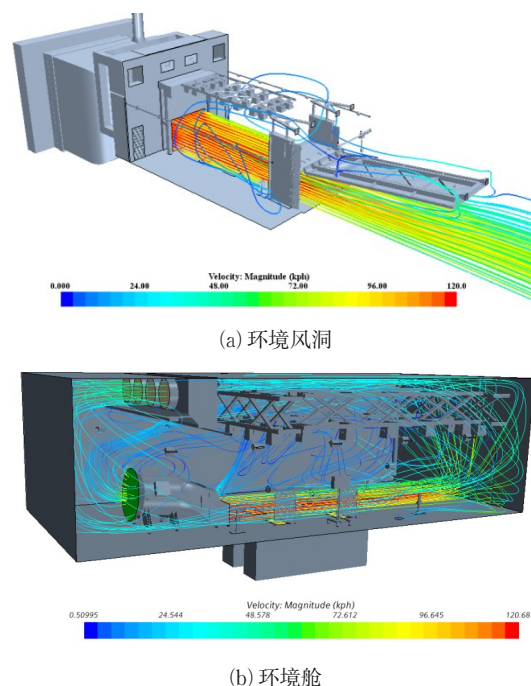


图 15 环境风洞和环境舱气流迹线图

Fig.15 The flow trace diagram of CWT and climatic chamber

在环境舱内的热性能试验产生不利影响,最终导致汽车环境模拟试验结果失真。

(3) 利用汽车环境实验室全尺寸 CFD 数值仿真,可以直观地显示环境风洞和环境舱内气流压力、速度、流动方向和轨迹等流场特征,揭示两种典型环境实验室内流场差异的主要原因,对环境风洞与环境舱试验结果的关联对比,以及试验结果的分析评估都有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] GHANI S, AROUSSI A, RICE E. Simulation of road vehicle natural environment in a climatic wind tunnel [J]. Simulation Practice and Theory, 2001, 8(6/7): 359.
- [2] 王宏朝,单希壮,杨志刚. 地面效应模拟对环境风洞中车辆冷却系统试验影响的数值模拟[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017,47(5):1373.
WANG Hongchao, SHAN Xizhuang, YANG Zhigang. Numerical simulation of the influence of ground effect simulation on vehicle cooling system experiment in climate wind tunnel [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology), 2017,47(5):1373.
- [3] 赵丰,孙津鸿,牟连嵩,等. 汽车环境风洞试验能力综述[J]. 装备环境工程, 2021,18(10):104.
ZHAO Feng, SUN Jinhong, MU Liansong, *et al.* Introduction for the test ability of automotive CWT [J]. Equipment Environmental Engineering, 2021,18(10):104.

- [4] LJUNGSKOG E, SEBBEN S, BRONIEWICZ A. Inclusion of the physical wind tunnel in vehicle CFD simulations for improved prediction quality[J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2020, 197: 104055.
- [5] LJUNGSKOG E, SEBBEN S, BRONIEWICZ A, *et al.* A parametric study on the influence of boundary conditions on the longitudinal pressure gradient in CFD simulations of an automotive wind tunnel[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2017, 31(6): 2821.
- [6] Sebald J, Reiss J, Kiewat M, *et al.* Experimental and numerical investigations on time-resolved flow field data of a full-scale open-jet automotive wind tunnel [J]. *SAE Paper*, 2021(1):0939.
- [7] 梁媛媛, 朱宇骁, 陈江平, 等. 汽车环境风洞的流场数值模拟[J]. *汽车工程*, 2016, 38(12):1434.
LIANG Yuanyuan, ZHU Yuxiao, CHEN Jiangping, *et al.* Numerical simulation on the flow field in vehicle climate wind tunnel[J]. *Automotive Engineering*, 2017, 39(4):418.
- [8] 宋昕, 李舒雅, 严杰, 等. 数值风洞仿真与开阔路面仿真的关联性研究[J]. *汽车工程*, 2020, 42(6):759.
SONG Xin, LI Shuya, YAN Jie, *et al.* Study on the correlation between digital wind tunnel simulation and open road simulation [J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(6):759.
- [9] 王宏朝, 单希壮, 杨志刚. 环境风洞阻塞比对冷却模块空气侧流场的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(9): 1372.
WANG Hongchao, SHAH Xizhuang, YANG Zhigang. Effect of climate wind tunnel blockage on air-side flowfield of cooling module [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(9):1372.
- [10] 贾青, 黄磊, 鞠树彬, 等. 阻塞比对开口式风洞喷口风速测量方法的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(11):1641.
JIA Qing, HUANG Lei, JU Shubin, *et al.* Influence of blockage ratio on nozzle wind speed measurement method in open-jet wind tunnel[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(11):1641.
- [11] LONG P T. Design a small, low-speed, closed-loop wind tunnel: CFD approach [C]// *Select Proceedings of ICOMMA 2020. Modern Mechanics And Applications*, 2022: 663.
- [12] FERNÁNDEZ-YÁÑEZ P, ARMAS O, MARTÍNEZ-MARTÍNEZ S, *et al.* Impact of relative position vehicle-wind blower in a roller test bench under climatic chamber [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 106: 266.
- [13] Z WANG, J HAN, A ALAJBEGOVIC. Nozzle effects in thermal wind tunnels [C]// *Proceedings of ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*. Montreal: ASME, 2010:1.
- [14] 张英朝, 詹大鹏, 赵婧, 等. 汽车风洞地面效应模拟系统影响的研究[J]. *汽车工程*, 2016, 38(12):1434.
ZHANG Yingchao, ZHAN Dapeng, ZHAO Jing, *et al.* A study on the influence of ground effect simulation system in automotive wind tunnel [J]. *Automotive Engineering*, 2016, 38(12):1434.
- [15] 李启良, 戴文童, 杜开颜, 等. 风洞结构对试验段静压系数和静压梯度的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(10):1506.
LI Qiliang, DAI Wentong, DU Kaiyan, *et al.* Influence of wind tunnel structure pressure coefficient and static gradient of the test section on static pressure [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(10):1506.
- [16] 曾翌, 鲍欢欢, 陈军, 等. 汽车模型风洞研究[J]. *机床与液压*, 2019, 47(16):40.
ZENG Yi, BAO Huanhuan, CHEN Jun, *et al.* Study on automotive reduced scale wind tunnel [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2019, 47(16):40.