文章编号:1674-2974(2026)02-0136-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2026163

基于数字孪生的环境风洞试验场景研究

张英朝,王艺霖,王国华†,贾宇涵
(吉林大学 汽车底盘集成与仿生全国重点实验室,吉林 长春 130022)

摘 要:根据实际汽车环境风洞,建立了与其数字孪生的数字环境风洞模型,并根据实际汽车环境风洞流场性能评价指标,针对数字环境风洞的来流速度状态、边界层厚度、轴向静压梯度、车身表面压力分布进行仿真结果与汽车环境风洞试验数据对比验证,证明了数字环境风洞与实际汽车环境风洞在流场性能上有着高度的一致性,能够用于模拟汽车环境风洞内的各种试验场景.以车身表面压力分布实验为例,通过分析实际气动风洞中某SUV车型车身表面压力分布状态、自然环境仿真车身表面压力分布状态以及数字环境风洞中仿真测得的车身表面压力分布状态并将三者进行对比,最终证明本文所建立的数字环境风洞模型具有与实际汽车环境风洞相似的性能,能够用于相关研究,为开展汽车环境性能试验提供更为先进、便捷的方法,为数字孪生在汽车工业的应用提供良好的范例.

关键词:数字孪生;风洞;数值模拟;风洞试验;CFD模拟
中图分类号:U 463.851 **文献标志码**:A

Research on environmental wind tunnel test scenario based on digital twin

ZHANG Yingchao, WANG Yilin, WANG Guohua†, JIA Yuhan
(National Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: A digital environmental wind tunnel model, along with its digital twin, is established based on the actual automotive environmental wind tunnel. According to the performance evaluation index of the flow field in the actual automotive environmental wind tunnel, the simulation results of the digital environmental wind tunnel are compared and verified with the test data of the automotive environmental wind tunnel for incoming flow velocity, boundary layer thickness, axial static pressure gradient and body surface pressure distribution. It is proved that the flow field performance of the digital environment wind tunnel is highly consistent with that of the actual automobile environment wind tunnel, which can be used to simulate various test scenes in the automobile environment wind tunnel. Taking the body surface pressure distribution experiment as an example, the body surface pressure distribution state of an SUV model in the actual pneumatic wind tunnel, the body surface pressure distribution state of a simulated natural environment and the body surface pressure distribution state of a simulated digital environment wind tunnel are analyzed and compared. Finally, it is proved that the digital environmental wind tunnel model established in this paper has similar performance to the actual automotive environmental wind tunnel, which can be used in related research, provides a more advanced and convenient method for the environmental performance test of

* **收稿日期**:2025-01-04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52235006,52372355), National Natural Science Foundation of China(52235006,52372355)
作者简介:张英朝(1978—),男,河北石家庄人,吉林大学教授,博士
† 通信联系人,E-mail:wanggh@jlu.edu.cn

vehicles, and provides a good example for the application of digital twins in the automotive industry.

Key words: digital twin; wind tunnels; numerical simulation; wind tunnel test; computational fluid dynamics (CFD) simulation

汽车产业近些年的发展突飞猛进,新兴技术与体验层出不穷.如今消费者在选车购车时,不仅关注汽车的驾驶性能,还会考察其他方面的性能指标,这些方面一并成了影响消费者购买汽车的重要因素[1].在整个行业的巨大竞争压力下,众多车企不断压缩新车型的开发周期以追求新车型的高速迭代.在开发过程中,为了尽快暴露设计缺陷,需要对样车进行各项性能试验以验证其质量可靠性与行驶安全性.各项试验中,以汽车环境试验所需精力及成本投入最多.因此能实现汽车全气候环境试验的汽车环境风洞应运而生,成为汽车研发中的重要实验室之一[2].

汽车环境风洞可以对环境参数进行设置调节,在模拟气流与车辆之间相对运动的基础上,还增加了温湿度模拟、道路载荷模拟、热路面模拟及雨雪日照模拟等设备和功能,使得汽车环境风洞内的环境模拟能力能够基本覆盖全球各地的气候环境条件,因此可覆盖汽车的动力性、经济性、舒适性等方面测试[3].宝马公司建有一套由3个环境风洞组成的环境测试中心,分别用于高温试验、低温试验和雨雪天气模拟,该测试中心总的温度模拟范围覆盖-22~55 ℃,风速最高可达280 km/h[4].奥迪公司的汽车环境风洞最高风速可达300 km/h,能够模拟-25~55 ℃的环境温度以及雨雪和光照环境,光照辐射强度可达1 000 W/m^2[5].近些年我国的汽车环境风洞也陆续开始建成使用,填补了国内在该领域的空白,同济大学建立了国内首座汽车热环境风洞,其配备的可调面积喷口范围为7~14 m^2,最高风速可达200 km/h,能够模拟-20~55 ℃的温度区间以及0~95%的湿度范围,光照模拟强度最高可达1 200 W/m^2[6-9].中汽中心建立的汽车环境风洞,其喷口面积可在8.25~13.2 m^{2}之间调节,最高风速可达270 km/h,可以模拟-40~60 ℃的温度区间以及5%~95%的湿度范围,光照模拟强度最高同样可以达到1 200 W/m^2[10].汽车环境风洞可以模拟汽车开发所需的各种极端环境而不受自然条件及试验次数的限制,为汽车与其零部件进行舒适性、安全性和可靠性等多方面性能提供研究平台[11-12].相较于自然环境下开展试验,汽车环境风洞试验可以对试验环境进行精确的控制,使得试验复现性以及结果准确性更优,进而有效地提高了汽车开发的效率.

然而,随着汽车环境风洞试验的需求增加,资源日渐紧张,无论是高昂的试验费用还是稀缺的条件资源,都增加了新车型开发过程中的各项成本.伴随着汽车开发工业过程中这一不可避免且亟待解决的困境,数字孪生出现并逐渐融入了生产开发的过程.所谓数字孪生,即具有数据连接的特定物理实体或过程的数字化表达,这二者之间状态能够保持同速率收敛并持续相互作用,这种数字化表达包括数据建模、数据仿真、算法控制等途径[13].从真实路况到仿真试验台测试,这其中往往存在偏差,需要我们对于多因素进行综合考虑验证[14].张钦国等[15]搭建虚拟风洞并与数值模拟相结合,预测排气系统对动力舱热环境和散热器性能的影响,对装载机散热系统设计和结构优化并缩短研发周期提供指导性意义;高镇海等[16]采用格子玻尔兹曼方法建立热环境数字风洞并通过试验研究提出一套适用于发动机冷却系虚拟标定的仿真流程,并对发动机舱散热效率进行了优化改进.截至目前,针对汽车开发过程中环境风洞试验数字化研究的不足,基于数字孪生,将数值模拟方法与汽车环境风洞试验相结合,成为整车性能开发的常用手段,在此基础上对新车型不断开发优化,从而达到节省开发成本同时提升开发效率的目的.因此本文使用STAR-CCM+软件将实际汽车环境风洞数字化,构建与其对应的数字孪生模型并进行数值模拟分析,相较于传统数值模拟分析方法,可以更好地还原实际的试验场景,利用数值模拟仿真对数字环境风洞在流场方面的基本性能进行验证并与实际汽车环境风洞试验的结果表现进行了对比,并以车身表面压力分布为例进行实际汽车风洞试验、自然环境仿真与数字环境风洞仿真三者联合对比,验证了数字环境风洞模型的准确性.为汽车工业的开发流程提供了更为先进、便捷、经济的方法,也为数字孪生汽车开发与环境风洞试验方面的应用提供了更好的范本.

1 理论及仿真模型

1.1 理论计算公式

1.1.1 来流速度均匀性偏差公式

在风洞流场性能验证中,对数字环境风洞与实际汽车环境风洞的来流速度状态进行对比,是验证数字环境风洞在来流速度上的仿真精度和准确性的重要步骤.除了对来流速度进行检测对比,我们还需要根据试验测得的来流速度数据,对采集面内的来流速度均匀性进行验证,来流速度均匀性偏差公式如下:

$$\Delta v = \frac{|v_i - \bar{v}|}{\bar{v}} \tag{1}$$

式中:$\bar{v}$为数据采集面平均风速;v_i为各个采集点所采集到的风速.

1.1.2 轴向静压梯度表现验证公式

静压梯度是衡量风洞试验段内流场品质的重要指标,且对被测模型的气动力测量结果准确性有较大的影响.因此需要对数字环境风洞与实际汽车环境风洞的试验段内轴向静压梯度状态进行对比,验证数字环境风洞在试验段内轴向静压梯度上的表现是否能够达到汽车环境风洞试验状态的性能要求.试验段内的静压梯度主要受到试验段长度、喷口尺寸、收集口尺寸及角度等结构因素的影响.静压梯度是由静压系数按公式推导得来,静压系数及静压梯度的定义如式(2)和式(3)所示.

$$C_p = \frac{P_{si} - P}{P_d} \tag{2}$$

式中:P_{si}为测点位置的静压;P为参考点的静压;P_d为参考点的动压.

$$\frac{dC_p}{dx} = \frac{\Delta C_p}{\Delta x} \tag{3}$$

式中:ΔC_p为测点位置与参考点的静压系数差值;Δx为测点位置与参考点的距离差值.

1.2 数字环境风洞模型及 CFD 仿真模型

为提升资源利用效率,节省汽车试验开发成本,基于数字孪生的设计思想概念,本文依托中汽中心的汽车环境风洞建立与其孪生交互的数字环境风洞模型,参照其实际结构布置搭建数字化的汽车环境风洞模型.本文构建的环境风洞数字孪生体系如图1所示.由于重点关注的问题和内容均集中在汽车环境风洞的试验段内,因此为了节约计算资源,提升研究效率,本文数字环境风洞侧重于还原汽车环境风洞的试验段布局,模型共包含整个试验段及内部的喷口结构、收集口、光照模拟系统及扩散段,并在保证整体布置与实际汽车环境风洞相一致的基础上,另将一些对试验段内流场影响较小的维护及支撑结构进行了一定的简化,其数字孪生模型展示如图2所示,其基本尺寸参数如表1所示.

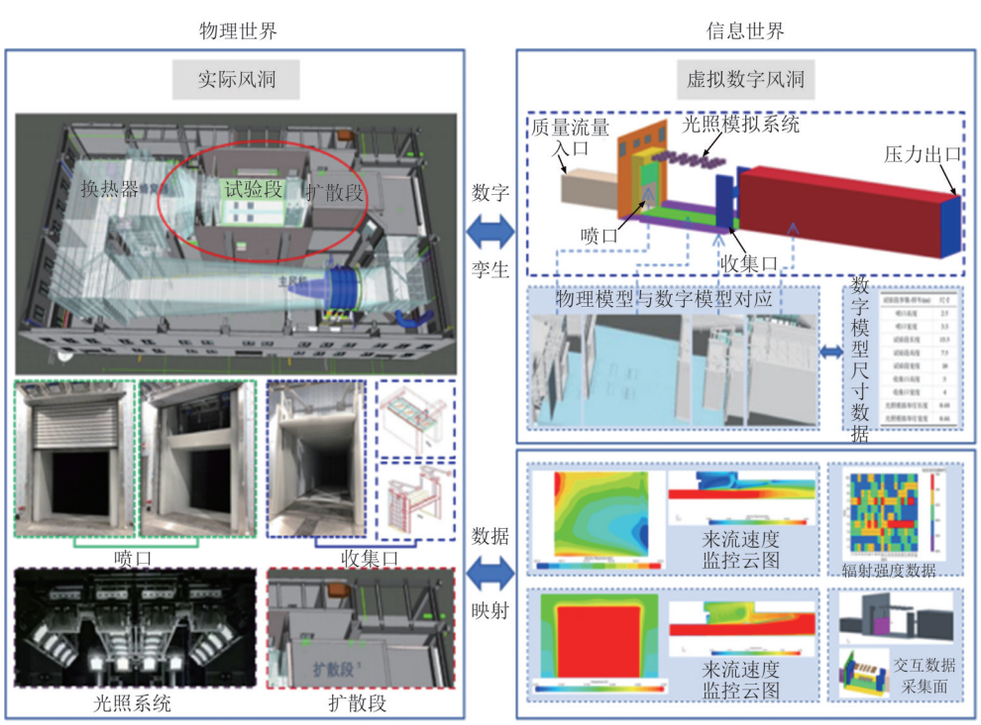


图1 环境风洞的数字孪生模型

Fig.1 A digital twin of an environmental wind tunnel

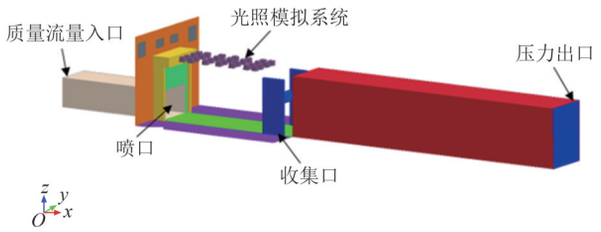


图 2　数字环境风洞模型示意

Fig.2　Digital environment wind tunnel model

表 1　数字环境风洞基本尺寸参数

Tab.1　Basic dimension parameters of digital environment wind tunnel

试验段参数-轿车	取值
喷口高度/m	2.5
喷口宽度/m	3.3
试验段长度/m	13.5
试验段高度/m	7.5
试验段宽度/m	10
收集口高度/m	5
收集口宽度/m	4
光照模拟单灯长度/m	0.48
光照模拟单灯宽度/m	0.46

1.3　网格划分、边界条件及求解器设置

网格质量对仿真计算的准确性有非常大的影响,合适的网格尺寸及良好的网格质量能够保证仿真计算的准确性并提升计算速度.因此本文采用切割体网格生成及棱柱层网格生成方式,生成数字环境风洞的体网格,整体网格尺寸设置在 5 mm 至 200 mm 之间,棱柱层网格设置为 15 层 20 mm,第一层厚度为 2 mm.并在数字环境风洞中设置了 4 层加密域,分别对喷口、收集口、射流剪切层等位置进行加密以准确捕捉试验段内的气流流动情况,加密尺寸分别为 25 mm、50 mm、100 mm 和 150 mm,最终得到的体网格数量为 792 万,图 3 为数字环境风洞中的体网格及加密域示意图.

为使数字环境风洞的流动状态更加符合实际汽车环境风洞的流动情况,将数字环境风洞的来流入口设置为质量流量入口,入口延长段设置为滑移壁面,其余壁面均为非滑移,气流出口设置为压力出口,另外对试验段中心区域地面设置边界层网格,边界层发展位置与实际汽车环境风洞一致,图 4 为数字环境风洞边界条件示意图.同时结合来流速度及试验状态,计算得出雷诺数的数量级在 10^7 之上,属于高雷诺数流动状态,又由于边界层内黏性底层和过渡层的流动属于低雷诺数流动,综合考虑最终选择可实现的 K-Epsilon 两层模型进行求解,其余相关参数如表 2 所示.

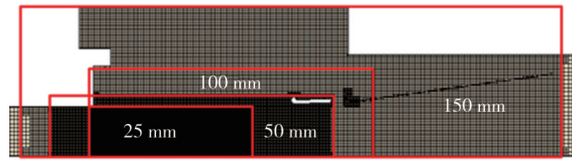


图 3　数字环境风洞体网格及加密域情况

Fig.3　Digital environment wind tunnel body grids and encryption domain

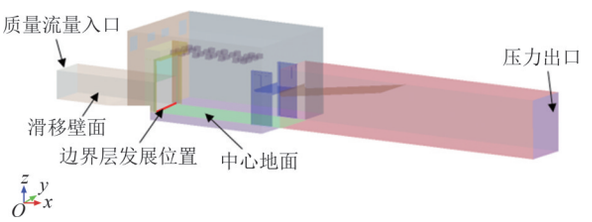


图 4　数字环境风洞边界条件示意

Fig.4　Digital environment wind tunnel boundary conditions

表 2　相关参数设置

Tab.2　Related parameter setting

参数	参数设置
时间	定常
气体	空气
气体密度/(kg·m^{-3})	1.184 15
气体动力黏度/(Pa·s^{-1})	1.855 08×10^{-5}
重力/(m·s^{-2})	[0.0, 0.0, -9.81]

2　数字环境风洞性能验证

在验证环境风洞流场性能方面,来流速度、边界层厚度、轴向静压梯度、车身表面压力分布是评价风洞流场性能优良与否的基本指标,因此本文围绕这几方面验证数字环境风洞的流场性能,将仿真结果与试验结果进行对比,从而验证数字环境风洞的流场性能是否满足实际汽车环境风洞的性能要求.

2.1　来流速度状态验证

在来流速度的对比验证方面,需要对数字环境风洞与实际汽车环境风洞的来流速度状态进行对比,验证数字环境风洞在来流速度上的仿真精度和准确性,因此需要对二者的来流速度及来流速度均匀性偏差进行对比.

进行对比验证前,由于二者坐标定义一致,故用数字环境风洞中的坐标定义进行介绍.坐标原点定

义在试验段对称面与喷口底部中心位置相交处,喷口射流方向为x方向,垂直试验段地面方向为z方向,y方向则根据右手定则来确定,坐标定义如图5所示.

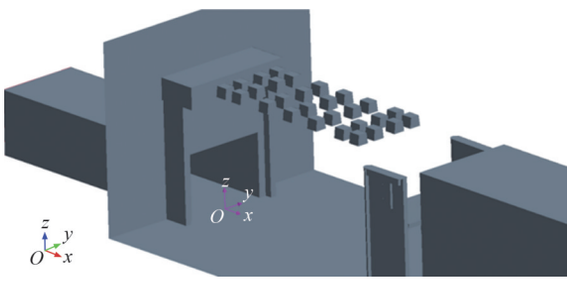


图5 风洞坐标定义

Fig.5 Wind tunnel coordinate definition

来流速度状态验证所布置的数据采集面位于风洞喷口正前方1 m处(x=1 m),y轴方向宽度为2.4 m(y=−1.2~1.2 m),z轴方向高度为1.8 m(z=0.2~2.0 m).采集面中各采集点按照y轴方向间隔0.3 m,z轴方向间隔0.2 m均匀布置,共设置了90个采集点进行测量.试验时来流速度设置为120 km/h,待来流速度达到设定值并经过30 s的稳定后,采集2 min内的来流速度数据,经过平均化处理后得到各个采集点的速度数据如图6所示.经计算,数据采集面平均风速为119.4 km/h,随后得到汽车环境风洞来流速度偏差结果如图7所示,根据式(1)计算得出来流速度均匀性偏差.

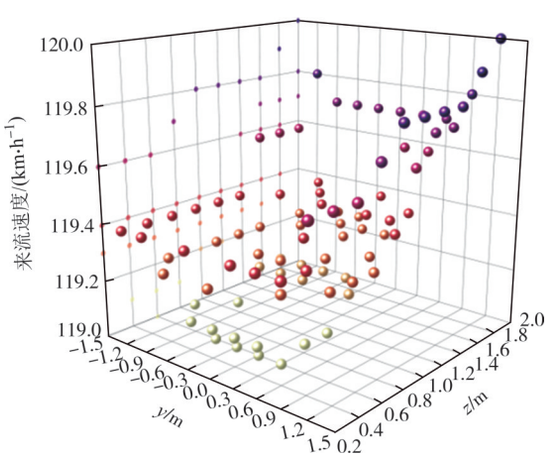


图6 汽车环境风洞来流速度

Fig.6 Automobile environment wind tunnel freestream velocity

观察数据及计算后可得,汽车环境风洞试验段流场中心区域的流速均匀性偏差控制在0.5%以内,来流速度均匀性良好.

接下来在数字环境风洞中对相同工况进行仿真分析.将试验时的前置条件及设备布局置于数字环境风洞,数据采集面的位置及覆盖范围如图8所示,设置来流入口的质量流率为325.641 2 kg/s,对应试验来流速度120 km/h,仿真迭代步数设置为3 000,各个采集点所采集的数据分布如图9所示.经计算,数字环境风洞内数据采集面平均风速为120.2 km/h,与试验值相比偏差为0.7%,一致性良好.随后得到汽车环境风洞来流速度偏差结果如图10所示,根据式(1)计算得到数字环境风洞来流速度均匀性偏差与试验值相比偏差控制在0.5%以内,可知数字环境风洞能够较为准确地复现汽车环境风洞试验时的来流状态.

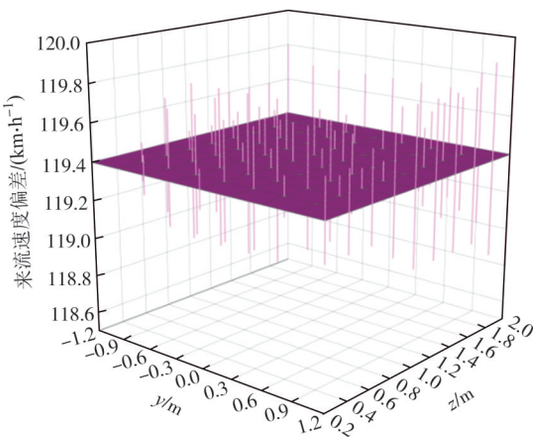
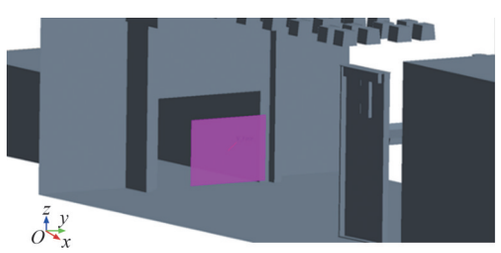
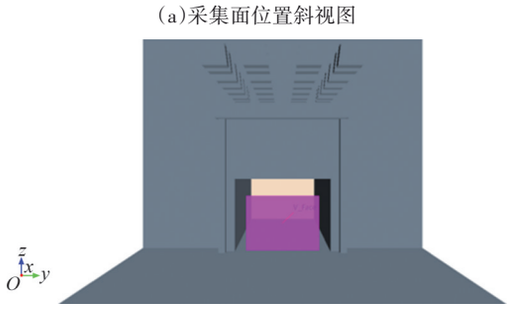


图7 汽车环境风洞来流速度偏差

Fig.7 Velocity deviation of freestream velocity in automotive environmental wind tunnel



(a)采集面位置斜视图



(b)采集面位置正视图

图8 数字环境风洞中来流速度数据采集面示意图

Fig.8 Data acquisition surface of freestream velocity in digital environment wind tunnel

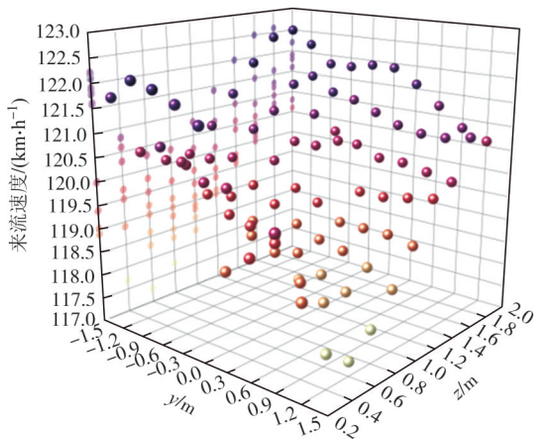


图 9　数字环境风洞来流速度

Fig.9　Digital environment wind tunnel freestream velocity

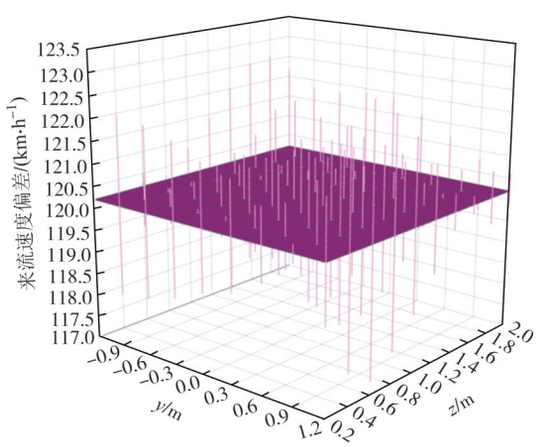


图 10　数字环境风洞来流速度偏差

Fig.10　Velocity deviation of freestream velocity in digital environment

2.2　边界层厚度验证

黏性流体流经固体边壁时,在壁面附近形成的流速梯度明显的流动薄层便是边界层,而边界层厚度是指从边界层壁面起始,直到壁面切向流动速度达到自由来流速度 99% 位置的垂直于壁面的高度.为验证数字环境风洞在边界层特性上的表现是否能够与汽车环境风洞的性能表现接近,需要对二者边界层厚度状态进行对比.

在对二者边界层厚度状态进行对比验证中,对于汽车环境风洞试验,需要将边界层探针放置于喷口正前方 1 m 处(x=1 m)且位于风洞中心线上的地面处,边界层耙的高度为 225 mm,试验时的来流速度为 80 km/h,待来流速度达到设定值并保持稳定 30 s 后开始采集试验数据.将同样的试验条件复现于数字环境风洞中,在数字环境风洞中建立一条长 225 mm、分辨率为 50 的探测线,放置位置与试验中边界层耙的布置位置保持一致,如图 11 所示.来流质量流率设置为 217.094 2 kg/s,对应来流速度 80 km/h,其他设置与上节保持一致,仿真得到结果后与试验数据进行对比,如图 12 所示.可以看出数字环境风洞中的边界层厚度变化状态与汽车环境风洞试验得到的边界层厚度变化状态几乎一致,试验时自由来流速度为 79.89 km/h,99% 自由来流速度对应的边界层厚度为 22.5 mm,仿真时自由来流速度为 79.88 km/h,99% 自由来流速度对应的边界层厚度为 22.6 mm,边界层厚度的仿真值与试验值偏差为 0.4%,结果数据一致性良好,说明数字环境风洞可以准确地复现汽车环境风洞试验时的边界层状态.

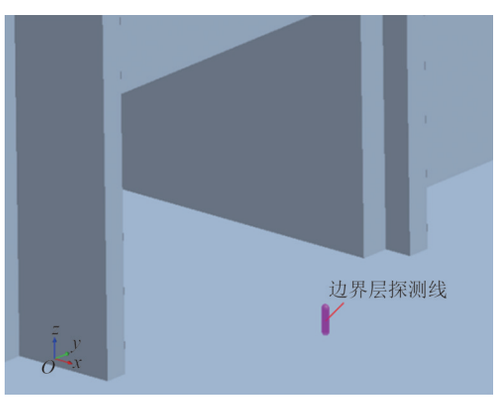


图 11　边界层探测线在数字环境风洞中的位置

Fig.11　Position of boundary layer probe line in digital environment wind tunnel

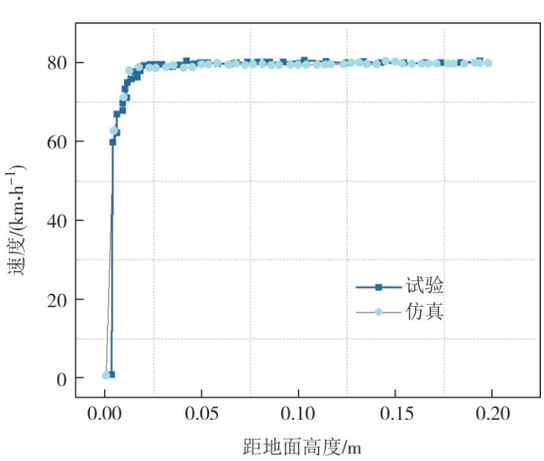


图 12　边界层厚度结果对比

Fig.12　Comparison of boundary layer thickness results

2.3　轴向静压梯度验证

静压梯度是衡量风洞试验段内流场品质的重要指标,因此本节对于数字环境风洞在试验段内轴向静压梯度上的表现与汽车环境风洞试验段进行对比验证.在汽车环境风洞中进行轴向静压梯度试

验时,设定的测量区域为风洞中心线上沿x轴方向且距离地面1 m高度(z=1 m),自x=1 m至x=9 m的区域,沿x轴每隔0.25 m设定一个采集点,采集不同工况下的压力数据,如图13所示.进行轴向静压梯度试验时,共采集了三组不同来流速度下的数据,来流速度分别为100 km/h、140 km/h和200 km/h,同样地,待来流速度达到设定值并保持稳定30 s后开始采集试验数据,随后在仿真测试中复现试验条件及准备工作.将数字环境风洞的来流质量流率分别设置为271.367 7 kg/s、379.914 8 kg/s和542.735 4 kg/s,分别对应来流速度100 km/h、140 km/h和200 km/h,得到结果后与试验数据进行对比,如图14所示.

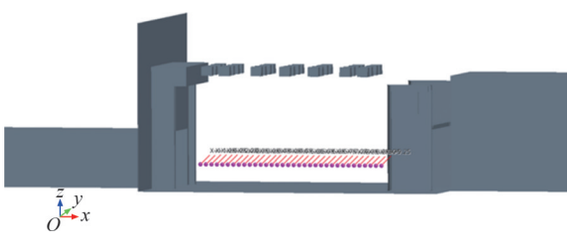
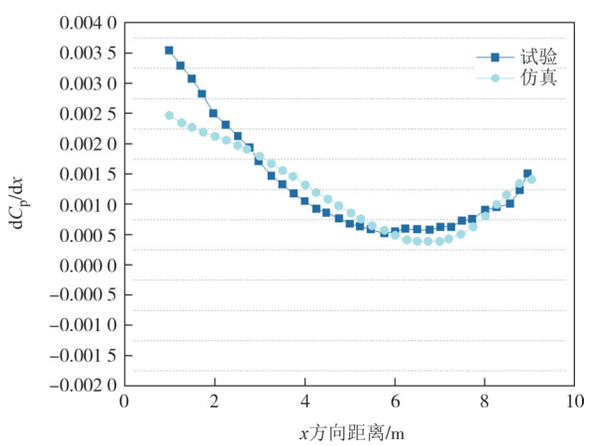
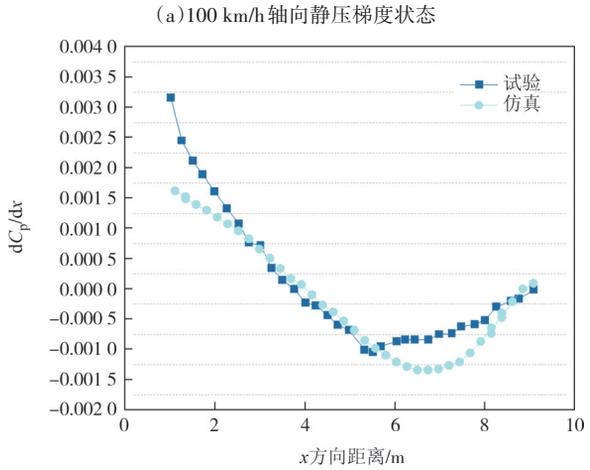


图13 数字环境风洞试验段中数据采集点位置

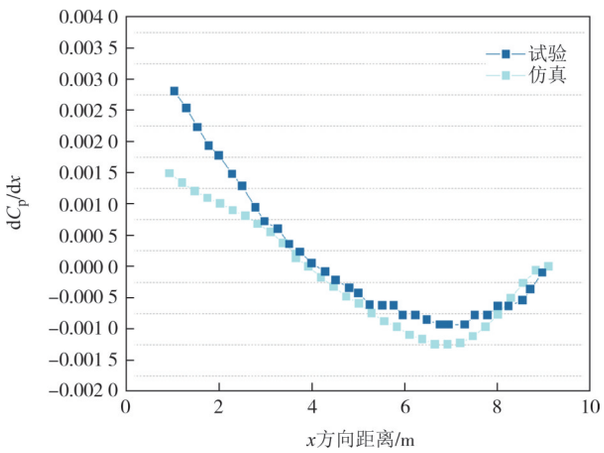
Fig.13 Location of data collection points in digital environment wind tunnel test section



(a)100 km/h轴向静压梯度状态



(b)140 km/h轴向静压梯度状态



(c)200 km/h轴向静压梯度状态

图14 轴向静压梯度状态对比

Fig.14 Axial static pressure gradient state comparison

从以上几组不同工况数据对比图中可以看出,数字环境风洞试验段内的轴向静压梯度表现与实际汽车环境风洞试验段内的轴向静压梯度表现较为相似,变化也保持着较为一致的趋势.但由于数字环境风洞并未对实际汽车环境风洞中的收缩段进行建模,导致二者来流入口结构有一定差异,在测量起始区域附近的静压梯度偏差较大,而中后段测试区域的静压梯度趋势一致性较好,综合考虑可得数字环境风洞试验段内的轴向静压梯度表现满足实际汽车环境风洞的性能要求.

3 车身表面压力分布试验验证

为验证数字环境风洞试验段内有车放置的情况下其流场状态是否能够达到汽车环境风洞的性能要求,需要进行车身表面压力分布试验.由于并未在实际汽车环境风洞中进行车身表面压力分布试验,本文引入一对照组,由气动风洞试验与自然环境仿真两方面内容构成,通过对实际汽车风洞试验、自然环境仿真与数字环境风洞仿真三者联合对比,验证数字环境风洞在流场性能方面的准确性.

3.1 气动风洞压力分布试验

首先在实际气动风洞中对某SUV车型进行车身表面压力分布试验,如图15所示.选取汽车对称中截面位置布置压力采集点,并通过压力贴片与压力测量管与压力扫描系统连接进行车身表面的压力测量,共布置了35个压力采集点.试验时的来流速度为120 km/h,待来流速度稳定后进行多次压力数据

采集,经过平均化处理后得到车身表面的压力分布试验数据.



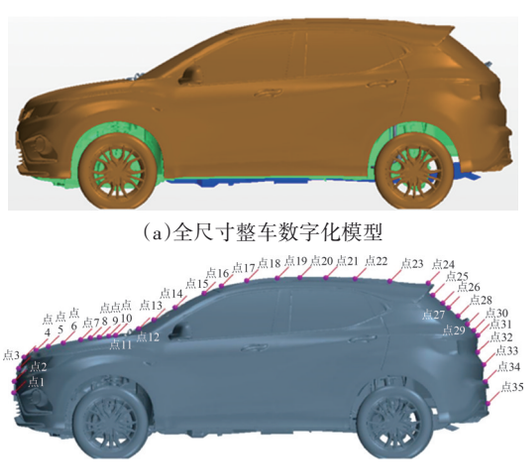
图 15　表面压力试验示意图

Fig.15　Surface pressure test diagram

3.2　自然环境压力分布仿真

3.2.1　仿真模型建立

仿真中使用的汽车模型为试验所用车型的全尺寸整车数字化模型,并在整车模型车身表面布置数量及位置都与试验相同的压力测点,如图 16 所示,该点位的布置与之后数字环境风洞仿真时车身表面压力测点布置一致.



(a)全尺寸整车数字化模型

(b)压力点布置示意图

图 16　全尺寸整车模型及压力点布置示意图

Fig.16　Full size vehicle model and pressure points layout diagram

3.2.2　计算域及边界条件设置

进行自然环境下车身表面压力分布仿真分析时,需建立一足够大的计算域来保证汽车的气动特性不被计算域边界影响,因此建立的计算域尺寸为:长度为 13 倍车长,且车头距计算域入口的距离为 4 倍车长、车尾距计算域出口的距离为 8 倍车长,宽度为 11 倍车宽,高度为 4 倍车高,计算域尺寸设置如图 17 所示.

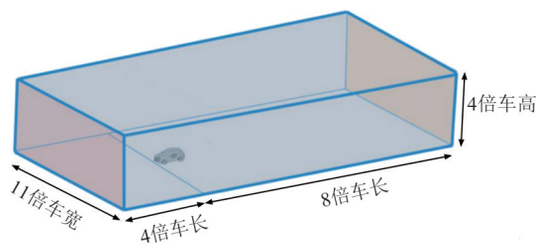


图 17　自然环境计算域尺寸示意

Fig.17　Natural environment calculation domain size schematic

为了提高仿真的准确性以及计算效率,也需要对汽车周围的空间进行加密处理,经过加密后的自然环境仿真模型体网格如图 18 所示,其中加密尺寸从小到大分别为 25 mm、50 mm、100 mm 及 150 mm,与数字环境风洞的模型加密尺寸一致.

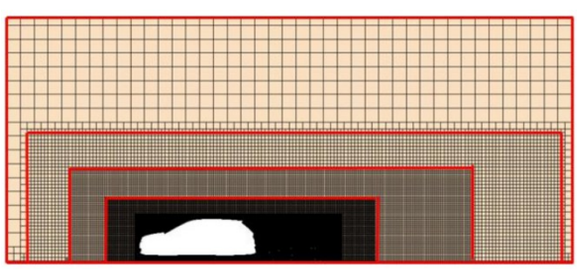


图 18　自然环境仿真体网格示意

Fig.18　Natural environment simulation body grids

仿真模型的边界条件设置如图 19 所示,来流速度设置为 120 km/h,车身表面的边界层设置为 4 层 5 mm,非滑移壁面处的边界层设置为 10 层 20 mm,其他条件设置与上节所描述的保持一致.自然环境仿真的准备工作完成后即可进行仿真计算,并收集车身表面的压力分布数据用于之后的验证分析.

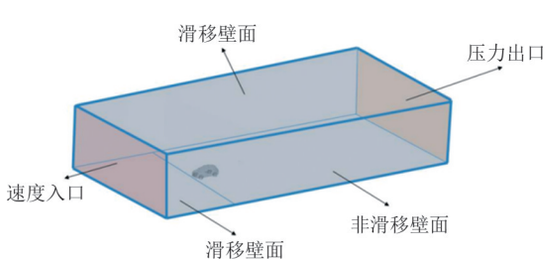


图 19　自然环境计算域边界条件示意

Fig.19　Natural environment calculation domain boundary conditions schematic

3.3　数字环境风洞压力分布仿真

最后进行数字环境风洞内车身表面压力分布的仿真分析时,将整车模型置于数字环境风洞的试验

段中,如图20所示.前车轮中心距风洞喷口的x向距离为2 m,车辆的对称中心面与风洞y=0截面重合,确保车头垂直于喷口放置.风洞来流速度同样设置为120 km/h,车身表面的边界层网格设置与自然环境仿真中一致,为4层5 mm,设置完毕进行仿真计算.

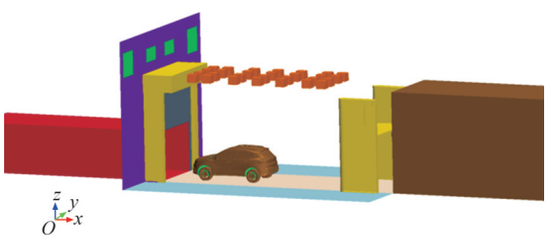


图20 数字环境风洞内车辆布置示意

Fig.20 Vehicle layout in digital environment wind tunnel

3.4 结果对比分析

经过气动风洞试验、自然环境仿真和数字环境风洞仿真后,得到了三组车身表面压力分布数据,处理后得到三组压力系数数据,如图21所示.经过观察可得,以自然环境仿真数据为参照,在数字环境风洞中测得的压力系数要高于自然环境仿真中测得的压力系数,而气动风洞试验时测得的压力系数又低于自然环境仿真所测得的压力系数,但三种环境下压力分布趋势有较好的一致性.这是由于气动风洞和数字环境风洞的试验段内均有一定的轴向静压梯度变化,而理想的开放路面上速度在各个位置均相同,流场压力也保持一致,因此并无随位置变化而产生的压力梯度,从而造成了后半部分压力分布趋势相似但数值表现不够一致的问题.由此可判断本文所建立的数字环境风洞在流场表现上可以达到实际汽车环境风洞的流场性能要求,能够用于进一步研究.

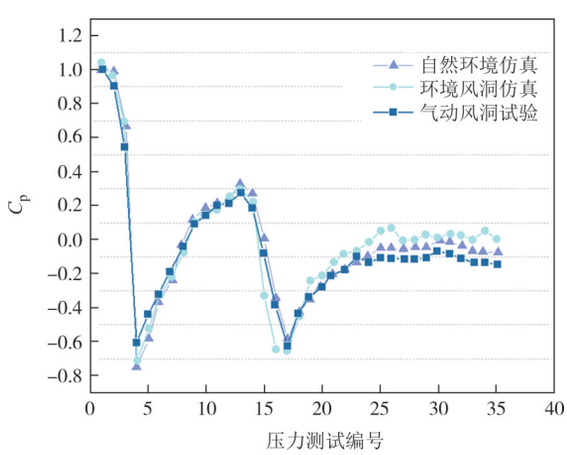


图21 车身表面压力分布状态数据对比

Fig.21 Comparison of body surface pressure distribution state data

4 结 论

本文依托实际汽车环境风洞建立与其数字孪生交互的数字环境风洞模型,并对其流场性能进行了仿真研究,并与实际汽车环境风洞的试验结果进行对比,以确保其仿真结果具有可信性和准确性,能够作为与现实物理世界环境风洞试验进行数据交互研究的信息世界虚拟模型,从而可以用于后续的汽车试验开发,提升研究效率.研究表明:

1)在来流速度均匀性方面,数字环境风洞内数据采集面平均风速为120.2 km/h,与试验值相比,偏差为0.7%,数字环境风洞试验段流场中心区域的流速均匀性偏差同样控制在0.5%以内,均能较为准确地复现汽车环境风洞试验时的来流状态.

2)在边界层厚度方面,数字环境风洞中的边界层厚度变化状态与汽车环境风洞试验得到的边界层厚度变化状态几乎一致,边界层厚度的仿真值与试验值偏差为0.4%,能准确复现汽车环境风洞试验时的边界层状态.

3)在轴向静压梯度方面,数字环境风洞与实际汽车环境风洞在不同来流速度下保持较为一致的变化趋势,中后段测试区域的静压梯度趋势一致性较好,可认为满足实际汽车环境风洞的性能要求.

4)在车身表面压力分布验证方面,三种环境下压力分布趋势有较好的一致性,虽由于风洞结构导致个别点位数据表现有偏差,但整体可认为数字环境风洞流场表现可达到实际汽车环境风洞性能要求,这为汽车工业的开发提供了更为先进、便捷、节省的方法,也为数字孪生汽车开发与环境风洞试验方面的应用提供了更好的范本.

参考文献

[1] 傅立敏.汽车设计与空气动力学[M].北京:机械工业出版社,2011:205-208.
FU L M. Automobile design & aerodynamics[M]. Beijing:China Machine Press,2011:205-208.(in Chinese)

[2] 李建. 汽车环境风洞数字化建模与仿真研究[D].天津:河北工业大学,2023:1-3.
LI J. Research on digital modeling and simulation of automotive climate wind tunnel[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2023: 1-3.(in Chinese)

[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): 104-109.
ZHAO F, SUN J H, MU L S, et al. Introduction for the test ability of automotive CWT[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(10): 104-109. (in Chinese)

[4] LEGUAY S, MORIN C, TORO ESCOBAR J L, et al. Analyzing and modeling of carbon footprint and life cycle assessment for a climatic wind tunnel[M]//Energy and Exergy for Sustainable and Clean Environment, Volume 1. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 633-646.

[5] BENDER T, HOFF P, KLEEMANN R. The new BMW climatic testing complex-the energy and environment test centre[C]// SAE World congress, SAE Technical Paper Series. Warrendale, PA, United States: SAE International, 2011: 167-178.

[6] 付强, 杨志刚, 梁长裘, 等. 整车气动声学风洞数值模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(增刊1): 107-113.
FU Q, YANG Z G, LIANG C Q, et al. Numerical simulation of vehicle aeroacoustics wind tunnel[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(Sup.1): 107-113. (in Chinese)

[7] 宋宇尧. 汽车热环境风洞系统仿真与能耗分析[D]. 上海: 同济大学, 2010.
SONG Y Y. Simulation and energy consumption analysis of climatic wind tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2010. (in Chinese)

[8] 梁媛媛. 汽车环境风洞热力学模型及控制特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
LIANG Y Y. Study on the thermodynamic model and control characteristics of vehicle climate wind tunnel [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese)

[9] 许翔, 王远, 于镒隆, 等. 汽车在环境风洞内流场的数值模拟与实验研究[J]. 汽车工程, 2024, 46(3): 536-545.
XU X, WANG Y, YU Y L, et al. Numerical simulation and experimental research on the flow field of automobile in environmental wind tunnel[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(3): 536-545. (in Chinese)

[10] 张艺伦, 牟连嵩, 赵丰. 汽车环境风洞设计概述[J]. 装备环境工程, 2020, 17(8): 17-22.
ZHANG Y L, MU L S, ZHAO F. Introduction to the design of automotive CWT [J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(8): 17-22. (in Chinese)

[11] GHANI S A A A, AROUSSI A, RICE E. Simulation of road vehicle natural environment in a climatic wind tunnel [J]. Simulation Practice and Theory, 2001, 8(6/7): 359-375.

[12] 许翔, 张艺伦, 王丹, 等. 汽车环境风洞和环境舱流场品质的对比研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(增刊1): 89-96.
XU X, ZHANG Y L, WANG D, et al. Comparative study on flow field quality between automobile environmental wind tunnel and environmental cabin [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(Sup.1): 89-96. (in Chinese)

[13] 中国电子技术标准化研究院, 树根互联技术有限公司. 数字孪生应用白皮书[R]. 北京: 中国电子技术标准化研究院, 2022: 1-4.
China Electronics Standardization Institute, Rootcloud Technology Co., Ltd., Digital twin application white paper [R]. Beijing: China Electronics Standardization Institute, 2022: 1-4. (in Chinese)

[14] SCHMIDT H, PROKOP G. 驾驶性能虚拟验证的动力总成试验台特性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(增刊1): 9-19.
SCHMIDT H, PROKOP G. Characterization of a powertrain test bed in the context of virtual validation of drivability[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2024, 52(Sup.1): 9-19. (in Chinese)

[15] 张钦国, 秦四成, 杨立光, 等. 基于虚拟风洞的装载机动力舱热环境预测分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(1): 50-56.
ZHANG Q G, QIN S C, YANG L G, et al. Thermal environment prediction of loader engine cabin in a virtual wind tunnel [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(1): 50-56. (in Chinese)

[16] 高镇海, 杨洋, 胡兴军, 等. 基于数字风洞的整车热管理性能开发[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2025, 52(2): 20-27.
GAO Z H, YANG Y, HU X J, et al. Development of vehicle thermal management performance based on digital wind tunnel[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2025, 52(2): 20-27. (in Chinese)