

汽车环境风洞试验能力综述

赵丰, 孙津鸿, 牟连嵩, 张艺伦, 许翔

(中汽研(天津)汽车工程研究院有限公司, 天津 300300)

摘要: 环境适应性试验是车辆研发验证过程中必不可少的环节, 而汽车环境风洞已经成为环境适应性开发验证的重要设施。简述了车辆环境适应性测试方法以及汽车环境风洞的发展历史; 详细介绍了汽车环境风洞实验室的组成以及各个子系统的功能和参数; 重点介绍了汽车环境风洞的试验能力, 包括可以开展的试验车型和试验项目, 特别是依托环境风洞才能完成的汽车极限气候性能模拟试验, 以及达到这些能力所需要的设备指标。并结合目前行业现状, 对汽车环境风洞的使用和发展进行了总结和展望。

关键词: 环境风洞; 发展历史; 试验能力

中图分类号: U467.5+2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)10-0104-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.10.017

Introduction for the Test Ability of Automotive CWT

ZHAO Feng, SUN Jin-hong, MU Lian-song, ZHANG Yi-lun, XU Xiang

(China Automotive Technology and Research Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

ABSTRACT: Environmental adaptability test is an essential link in the vehicle development and verification process. CWT has become an important facility for environmental adaptability development and verification. CWT can simulate various environmental conditions of vehicles driving on the road, including temperature, humidity, solar, airflow, driving resistance, rain, snow, road thermal radiation, etc., to realize the vehicle environmental adaptability test without being restricted by seasons, regions and time. The test conditions of the CWT are easy to control and have good repeatability, which can improve the efficiency and accuracy of vehicle environmental adaptability development and verification, which can greatly shorten the development cycle of vehicles and reduce development costs. It is of great significance to the research and development of complete vehicles and parts. This paper introduces the basic structure, functions, test models, and test items that can be carried out in the CWT. It focuses on extreme climate performance simulation test of the automobile that can be completed by relying on the CWT, and combines the current industry status to summarize the use and development of the CWT.

KEY WORDS: CTW; development history; test ability

车辆环境适应性试验是贯穿于车辆研制、定型、生产、使用等过程中的一项重要基础性工作, 是汽车

环境适应性设计的基础和有效手段^[1]。现阶段, 车辆环境适应性试验可通过道路试验法、虚拟环境试验法

收稿日期: 2021-05-10; 修订日期: 2021-07-20

Received: 2021-05-10; Revised: 2021-07-20

基金项目: 天津市科技支撑重点项目 (20YFZCGX00580)

Fund: Tianjin Science and Technology Support Key Project (20YFZCGX00580)

作者简介: 赵丰 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为整车热管理。

Biography: ZHAO Feng (1990—), Male, Master, Engineer, Research focus: vehicle thermal management.

引文格式: 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 Feng, SUN Jin-hong, MU Lian-song, et al. Introduction for the test ability of automotive CWT[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(10): 104-109.

和环境实验室试验法实现。道路试验法可以真实地反应车辆行驶的实际情况，但是受环境条件的影响较大；虚拟环境试验法是通过建立各种虚拟边界条件，来模拟车辆行驶环境，使用方便，精度较高，但是边界条件的设定属于理想化条件，与真实情况存在一定差异；环境实验室验证法主要依托于环境风洞和环境舱，利用实验室来模拟车辆遇到的温度、湿度、风速等环境条件，该试验方法的环境条件易于控制，重复性非常高，试验结果的一致性非常好。相对于环境舱，环境风洞具有更优越的流场品质、控制精度以及更完备的环境条件^[2]，能够更真实地模拟车辆在道路上行驶的真实情况。重点介绍中国汽车技术研究中心有限公司（以下简称中汽中心）的汽车环境风洞实验室。

1 汽车环境风洞的功能及组成

1.1 汽车环境风洞的功能

环境适应性试验是车辆研发验证过程中必不可少的环节，而汽车环境风洞已经成为环境适应性开发验证的重要设施。汽车环境风洞能够真实地复现车辆在道路上行驶的环境条件，能够根据开发工作的需要随时模拟试验所需的温度、湿度、光照强度、道路阻力、降雨、降雪等环境条件，真正实现不受季节和地域的限制。汽车环境风洞可以多次模拟车辆相同的试验条件，能够重现车辆在行驶过程中的问题，有利于研发人进行数据分析，进而提供有效的改进方案^[3]。

在环境风洞发展的初期，各国风洞通常模拟其本国的气候条件，随着汽车市场的全球化，工况范围逐步扩展，目前各国风洞的温度范围通常为-40~+60℃，相对湿度范围为10%~90%，最大太阳辐射强度为1200W/m²，基本上覆盖了全球的气候条件；此外，近年新建的风洞增加了对雨雪、热路、振动、偏航、沙尘等的模拟，不断完善其功能。早期建设的一些汽车环境风洞，并未考虑到能源多样性的影响，无法覆盖全部新型能源汽车试验，如氢燃料电池汽车试验^[4]。中汽中心的汽车环境风洞不仅能进行传统的燃油车试验，还能够进行纯电动汽车、混合动力汽车试验，以及氢燃料电池汽车试验。表1为世界各企业汽车环境风洞的主要参数。

1.2 汽车环境风洞的组成

汽车环境风洞主要由钢流道系统、保温板系统、主风机系统、阳光模拟系统、底盘测功机系统、温度控制系统、湿度控制系统、电气系统、控制系统、降雨系统、降雪系统等组成。中汽中心汽车环境风洞的整体布局如图1所示。

钢流道系统：钢流道为风洞内气流循环的载体，主要包括喷口、回风口、扩散段、风机进口段、风机出口段、风机扩散段、沉降舱、收缩段、四个转角、谐振腔等。钢流道外部另有四层工艺处理，不仅具有

表 1 世界各企业环境风洞参数					
Tab.1 CWT parameters of enterprises around the world					
序号	企业	速度/ (km·h ⁻¹)	温度/ ℃	相对 湿度/ %	最大辐 照强度/ (W·m ⁻²)
1	BMW	≤250	-20~55	10~95	1200
2	FORD	≤180	-40~50	5~95	1040
4	VOLVO	≤200	-40~50	0~95	1200
5	奔驰	≤265	-10~60	10~95	1200
6	同济大学	≤200	-20~55	0~95	1200
7	重庆汽研	≤200	-40~60	5~95	1200
8	中汽中心	≤250	-40~60	5~95	1200

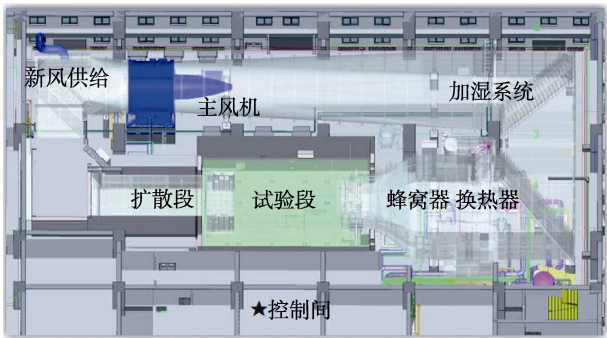


图 1 中汽中心汽车环境风洞整体布局
Fig.1 CWT overall layout of the CATARC

保温的作用，还具有防火、防潮的功能。

保温板系统：保温板主要安装在汽车环境风洞试验段和进车段。试验段和进车段分别是车辆试验及车辆进出的位置，需要考虑称量，所以采用混凝土结构支撑，保温板安装在混凝土四周内壁，不仅具有保温的作用，还具有降噪、阻燃的功能。

主风机系统：主风机是汽车环境风洞的心脏，为风洞内气流的循环提供动力。中汽中心汽车环境风洞的风机选用8叶片结构，额定功率高达1600kW，风机直径为4750mm，最大风量为585m³/s，从风机启动到满负荷加速只需要19s。

阳光模拟系统：阳光模拟系统安装在试验段顶部，可以模拟车辆在道路上行驶的辐照强度，目前行业内建设的风洞光照强度通常为500~1200W/m²，采用全光谱模拟。中汽中心汽车环境风洞的阳光模拟系统光谱范围更广，为300~1200W/m²，前后排及两侧灯架能够翻转45°，模拟侧照功能，且具有乌云模拟和隧道模拟的功能。

底盘测功机系统：底盘测功机系统安装在试验段地面，可以模拟车辆在道路上行驶的行驶阻力。环境舱通常使用1.2192m（48英寸）转鼓，只能进行乘用车相关的试验。中汽中心汽车环境风洞采用1.905m（75英寸）四驱四电机转鼓，轴距在2.3~6m之间连续可调，模拟惯量范围为600~50000kg，测试车型跨度非常大，不仅能满足知豆，smart等小型乘用车

车的试验,还能满足大巴、卡车等商用车的试验^[5-7]。

环境控制系统:环境控制系统为风洞的经络,可以模拟车辆在道路上行驶的温度、湿度等条件,同时也为各个设备的运行提供冷却。中汽中心汽车环境风洞的环境控制系统由低温包、高温包以及普冷系统组成。低温包主要为汽车环境风洞提供低温环境条件,制冷主机采用集成式双机头,盐水离开最低温度可低至 -45°C 。高温包主要由屋顶冷却水塔和中央换热器构成,可以利用自然冷源为汽车环境风洞提供冷却条件。按照北方的气候条件,高温包每年可以使用3个季度,能达到节约能源的目的。普冷系统主要为汽车环境风洞的各个设备提供冷却,包括转鼓电机冷却回路、风机电机冷却回路、风机驱动冷却回路等设备。图2为环境控制系统的三维模型。

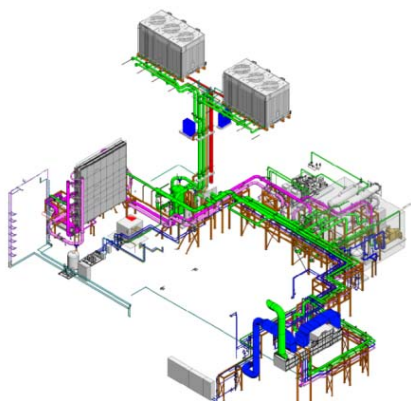


图2 环境控制系统三维模型
Fig.2 The 3D mold of environmental control system

降雨系统:降雨系统为汽车环境风洞特有的功能,能够模拟车辆在道路上行驶的降雨环境,通常采用在喷口处架设雨架的形式,沿着气流的方向喷射出经过处理的水和压缩空气的混合物,通过控制水和压缩空气的混合比来控制降雨流量大小。中汽中心汽车环境风洞的雨模拟系统分为两种方式,分别是降雨系统和轮胎喷淋系统。降雨系统流量为 $0\sim 90\text{ L/min}$,雨架架设在环境风洞喷口前,如图3所示,由5套30个喷嘴组成,每个喷嘴流量可调,单个喷嘴最大流量可达 4.5 L/min 。轮胎喷淋系统由安装在底盘测功机地面的喷淋系统组成,喷淋流量为 $0\sim 3\text{ L/min}$ 。



图3 中汽中心汽车环境风洞降雨系统
Fig.3 The Rain system of CATARC CWT

降雪系统:降雪系统同样为汽车环境风洞特有的功能,可以模拟车辆在道路上行驶的降雪环境,降雪系统通常只控制水和压缩空气的混合,遇到环境风洞内的低温环境,凝结成雪花。中汽中心汽车环境风洞的降雪系统分为两种方式,分别是吹雪模拟和落雪模拟。吹雪模拟时在环境风洞的喷口收缩段之前伸出一根管路,喷嘴上升到流道正中央,逆风吹出水 and 压缩空气的混合物,吹雪最大水流量可达 45 L/min ,最大吹雪空气流量可达 $3.83\text{ m}^3/\text{min}$ 。落雪模式是通过在喷口处架设雪架的形式,模拟雪花自然下落的状态,最大落雪的水流量可达 20 L/min ,最大落雪的空气流量可达 $1.26\text{ m}^3/\text{min}$ 。

2 汽车环境风洞试验能力

2.1 试验车型

环境风洞可以开展的试验车型及项目主要取决于风洞的尺寸、设备的能力、配套的报警及消防措施等^[8]。中汽中心汽车环境风洞配备两个喷口,喷口面积分别为 8.25 m^2 和 13.2 m^2 ,对应的最高车速可达 250 km/h 和 170 km/h ,同时配备 1.905 m (75英寸)四驱四电机底盘测功机,轴距 $2.3\sim 6\text{ m}$ 可调,模拟惯量范围为 $600\sim 50\,000\text{ kg}$,可以开展轿车、越野乘用车、多用途乘用车、中巴、大巴、皮卡、轻卡、重卡等车型的试验。

中汽中心汽车环境风洞在试验段内配备两套共6个四波段的火焰探测器以及高压细水雾系统,在试验段顶部和车身周围配备氢气传感器,同时尾排风机采用防火花结构风机,能够进行汽油车、柴油车、纯电动汽车、混合动力汽车以及氢燃料电池汽车试验^[9-11]。

2.2 试验项目

车辆在汽车环境风洞中可进行动力性试验、经济性试验、舒适性等试验。一般重点测试整车空调性能试验、整车热管理性能试验、极限工况或气候性能试验。

2.2.1 整车空调性能试验

整车空调性能试验主要包括:整车采暖性能试验、整车空调降温性能试验、汽车空调风霜玻璃除霜除雾性能试验、整车空调系统制冷剂加注量试验、整车空调系统抗结霜性能试验。以上试验主要验证整车的空调性能,对试验环境条件有非常高的要求,试验环境条件可参照相关国家标准^[12-15]。

2.2.2 整车热管理性能试验

1) 乘用车热平衡性能试验。乘用车热平衡试验为目前环境风洞的主流试验项目,GB/T 12542-2009《汽车热平衡能力道路试验方法》中规定了详细的试验环境条件、试验要求、试验方法及判定依据,各个汽车企业参考国标制定了自己的环境舱、环境风洞的

试验标准。通常，各企业会根据车辆销售区域、出口国家等来制定相应的试验工况，进行研发验证^[16-20]。

2) 商用车热平衡性能试验。相比于乘用车，由于商用车的外形和质量较大，且牵引力远大于乘用车，试验工况更恶劣，所以对试验设备要求较高，必须考虑车辆进出通道及设备载荷等问题。中汽中心汽车环境风洞配备有商用车专用喷口，宽度为 3.3 m，高度为 4 m，完全满足商用车迎风面积的需要，且采用 1.905 m（75 英寸）四驱四电机底盘测功机，轴距在 2.3~6 m 之间连续可调，模拟惯量范围为 600~50 000 kg，对应的最高车速可达 170 km/h，完全能够满足商用车的测试需求，而且具有最大为 6 t 的液压加载装置，能够给商用车一个主动的下压力，如图 4 所示，防止车辆出现打滑现象。



图 4 商用车专用液压加载装置
Fig.4 Special hydraulic loading device for commercial vehicles

3) 整车热害性能试验。整车热害性能试验主要通过热路面模拟系统及边界层抽吸系统来完成。热路面模拟系统可以模拟除高温空气外，高温路面带来的额外热辐射，真实还原高温路面给车底零部件，如排气系统带来的热害挑战。调查研究表明，当环境温度相同时，不同材质的路面，所呈现的地表温度完全不同（见表 2）。以柏油路面、水泥路面和泥沙路面为例，当环境温度为 40 ℃ 时，路面的温度相差非常大。通过模拟计算得出，柏油路面工况下，发动机舱内最高温度较不考虑路面热辐射的情况高约 7.3 ℃，水泥路面工况下，发动机舱内最高温度较不考虑路面热辐射的情况高约 4.9 ℃，而泥沙路面工况下，发动机舱内温度较不考虑路面辐射变化不大。在考虑柏油路面热辐射的情况下，油底壳的表面温度分布要比不考虑路面辐射的情况下普遍要高一些，最高温度要高约 5.8 ℃^[21]。由此可见，热路面模拟系统对整车热害性能相关的测试试验是非常必要的，中汽中心汽车环境风洞的热路面模拟系统能够模拟 20~80 ℃ 的热路面。

边界层抽吸系统：风洞边界层厚度可以通过边界层抽吸系统大大减少^[22-23]，在某些特定速度甚至可以接近消除，最恶劣工况下边界层厚度也可以减少至 4 mm。车底流场与实际流场非常接近^[24]。

表 2 不同路面所呈现的特性
Tab.2 Characteristics of different road surfaces

路面材质	环境温度/℃	路面吸收系数	路面辐射系数	路面温度/℃
柏油路面	40	0.87	0.94	62
水泥路面	40	0.73	0.79	55
泥沙路面	40	0.69	0.75	45

通过环境风洞的温度模拟和热路面模拟功能，可以真实地模拟汽车行驶在高温环境道路上的工况。如图 5 所示，通过温度传感器监控重点零部件温度，通过热成像仪监控整个车底温度场，考察整车热害情况，重点考察动力系统及其相关附件的热害情况，是否存在零部件过热失效的风险。

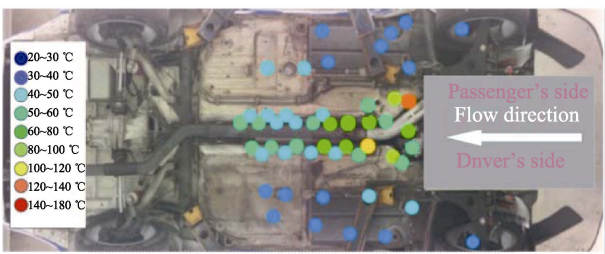


图 5 热成像仪下车底温度场
Fig.5 Temperature field under the car under the thermal imaging camera

2.2.3 极限工况或气候性能试验

1) 极限高速性能试验。中汽中心环境风洞的设计最高车速和风速可达 250 km/h，这种车速在整车模拟环境仓或道路试验场是很难实现的。因此，汽车极限高速性能试验一般都在环境风洞中进行^[25-28]。

2) 雨吸收性能试验。模拟车辆在降雨条件下，在不同的车速、风速、雨量下，通过无线摄像头的记录对比试验前后汽车发动机舱溅水和积水情况，称量并记录空气滤清器的滤芯在试验前后的质量变化，判定车辆机舱及进气系统是否会进水导致发动机及车辆故障，无法正常工作。

3) 雨刮性能试验。模拟车辆在降雨条件下，在不同的车速、风速、雨量下，通过高速摄像机记录以及试验人员标记，计算雨刷的挂刷频率与刮刷面积，判定雨刷对挡风玻璃的清洁能力及其喷头的喷雾性能，并确保雨刷的抬升能力。

4) 污染物飞溅试验。模拟车辆在积水、泥泞道路上行驶时，在不同的车速和风速条件下，通过记录对比车身、后视镜、前大灯、制动尾灯和车门把手等位置是否存在污染物，判定其是否能够满足相关车辆舒适性和安全性标准的要求。

5) 雪吸收试验。模拟车辆在降雪条件下，在不同的车速、风速和雪量大小下，通过观察空滤中的积雪是否影响发动机的进气量，导致发动机功率下降；积雪是否在机舱前端会出现聚集或结冰现象，降低散

热器、油冷器等散热模块的散热效果,进而导致水温、油温过高而限制发动机扭矩,判定其是否能够满足相关车辆在雪天行驶要求。

6) 静态除雪试验。模拟车辆在降雪条件下,通过落雪设备模拟车辆在暴雪环境中停车状态。在落雪达到规定雪量时启动车辆,考察车辆在该状态下的启动及行驶性能。通过观察车辆能否正常启动行驶,除雪性能,以及低温易损零部件的工作情况等,来判定汽车的除冰能力及车辆零部件的低温抗雪能力是否能够满足汽车相关性能试验标准的要求。

2.2.4 氢燃料电池汽车性能试验

氢气被认为是宇宙中最丰富的清洁能源,现阶段世界各地已经开始利用氢能源作为车辆的燃料。然而氢气在空气中的体积分数在 4.0%~75.6%之间时,遇火源就会爆炸。因此氢燃料电池汽车的试验需要完备的氢气检测设备、排放设备以及应急处理方案。中汽中心汽车环境风洞配备氢气传感器系统、防爆尾排系统、新风系统、换气系统等来确保试验的安全运行^[29-30]。

氢气传感器:在试验段顶部、车辆周围、底盘下、乘员舱、前机舱、排水口/排气口布置各种型号、不同的限值要求的氢气传感器。表3为各个位置氢气传感器的限值要求。当风洞本身传感器检测到氢气体积分数达到 4×10^{-3} 为一级警报,此时,环境风洞会发出声音报警;当检测到氢气体积分数达到 1×10^{-2} 为二级警报,此时,环境风洞会发出声音和灯光报警,并停止设备运行,开启扫风系统,关闭人员进入门,防止人员进入。

表3 各个位置氢气传感器限值要求

Tab.3 Hydrogen sensor limit requirements at various locations

安装位置	安装要求	检测条件	限值要求
前机舱	氢气管路、阀体、接头、供应排放氢部件连接处	静态停车(熄火 2 min 后)	5×10^{-5}
		电堆运行中	1×10^{-4}
乘员舱/行李箱	行李箱/驾驶室内任意位置	静态停车(熄火 2 min 后)	5×10^{-5}
		电堆运行中	1×10^{-4}
底盘下	氢气管路、阀体、接头、加氢口	静态停车(熄火 2 min 后)	5×10^{-5}
		电堆运行中	1×10^{-4}
车身周围	车身周围	静态停车(熄火 2 min 后)	5×10^{-5}
		电堆运行中	1×10^{-4}
排气口/排水口	排气口延长 100 mm 处	静态停车(熄火 2 min 后)	5×10^{-5}
		电堆运行中	4×10^{-2}
环境风洞内氢气传感器安装位置	环境风洞内安装的氢气传感器	任何状态	4×10^{-4}

新风和尾排系统:采用 6 kg/s 的最大新风量参与环境风洞内的换气,并且尾排风机采用防火花结构,避免产生火花导致爆炸情况的发生。

换气系统:环境风洞配备 5 个换气口,当氢气体积分数达到报警限值时,能够立刻换气,并且在 10 min 内把环境风洞内所有的空气进行置换。

3 结语

简述了汽车环境风洞的基本构成,着重讲述了环境风洞的测试能力,包括试验车型、试验项目及与其相匹配的试验设备,并且简述了降雨试验和降雪试验的试验方法。目前国内许多车企及检测机构已经拥有环境风洞实验室,但是对于环境风洞的试验应用技术研究还不是很深入,未来应该基于环境风洞的能力开发出与其相匹配的试验方法,制定相应的试验标准,建立环境风洞实验室统一的试验评价体系,更好地为车辆开发设计、性能测试提供平台。

参考文献:

- [1] 许翔, 张众杰, 凤蕴, 等. 汽车环境适应性试验综述[J]. 装备环境工程, 2013, 10(1): 61-65.
XU Xiang, ZHANG Zhong-jie, FENG Yun, et al. Review of automobile environmental worthiness test[J]. Equipment environmental engineering, 2013, 10(1): 61-65.
- [2] 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 Yi-lun, MU Lian-song, ZHAO Feng. Introduction to the design of automotive CWT[J]. Equipment environmental engineering, 2020, 17(8): 17-22.
- [3] 张英朝. 基于仿真与试验的汽车风洞修正研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
ZHANG Y (C/Z). Automotive wind tunnel corrections based on numerical simulation and test[D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [4] 王磊, 梁婷, 郭瑞庭, 等. 汽车环境风洞试验室的发展与应用[J]. 科技创新导报, 2020, 17(2): 88-89, 95.
WANG Lei, LIANG Ting, GUO Rui-ting, et al. Development and application of automobile environmental wind tunnel laboratory[J]. Science and technology innovation herald, 2020, 17(2): 88-89, 95.
- [5] 牟连嵩, 张森, 赵丰, 等. 汽车风洞底盘测功机选型研究[J]. 汽车实用技术, 2018(10): 50-52.
MU Lian-song, ZHANG Miao, ZHAO Feng, et al. Research on the model selection of dynamometer in the wind tunnel[J]. Automobile applied technology, 2018(10): 50-52.
- [6] 孙涛, 耿金涛, 徐兰欣. 整车环境风洞试验室的应用[J]. 汽车工程师, 2013(4): 20-22.
SUN Tao, GENG Jin-tao, XU Lan-xin. Application of vehicle climatic wind tunnel testing room[J]. Auto engineer, 2013(4): 20-22.
- [7] 付松青, 高章, 刘双喜, 等. 重型车底盘测功机测试方

- 法的研究[J]. 北京汽车, 2011(1): 16-19, 23.
- FU Song-qing, GAO Zhang, LIU Shuang-xi, et al. Research on testing method of chassis dynamometer for heavy vehicle[J]. Beijing automotive engineering, 2011(1): 16-19, 23.
- [8] SODERBLOM D, ELOFSSON P, HYVÄRINEN A. Numerical investigation of blockage effects on heavy trucks in full scale test conditions[C]//SAE technical paper series. Warrendale, PA, United States: SAE International, 2016.
- [9] IYINOMEN D O. Numerical and experimental analyses of ablation measurements in expansion wind tunnel facilities using a new plasma pre-heating technique[J]. International journal of thermofluids, 2020, 3-4: 100-109.
- [10] 张英朝, 李杰, 张喆, 等. 汽车风洞试验段尺寸参数对试验的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 40(2): 346-350.
- ZHANG Ying-chao, LI Jie, ZHANG Zhe, et al. Effect of wind tunnel test section geometry on test result[J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2010, 40(2): 346-350.
- [11] SOUSSI N, KRIAA W, MHIRI H, et al. Reduction of the energy consumption of a tunnel kiln by optimization of the recovered air mass flow from the cooling zone to the firing zone[J]. Applied thermal engineering, 2017, 124: 1382-1391.
- [12] 刘学莉, 耿金涛, 孙华锋. 汽车环境风洞试验室初期建设[J]. 汽车工程师, 2014(3): 16-17.
- LIU Xue-li, GENG Jin-tao, SUN Hua-feng. Primary construction on vehicle climatic wind tunnel[J]. Auto engineer, 2014(3): 16-17.
- [13] 吴子牛, 王兵, 周睿, 徐珊妹. 空气动力学-上册[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- WU Zi-niu, WANG Bing, ZHOU Rui, et al. Aerodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [14] 童钧耕. 工程热力学[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- TONG Jun-geng. Engineering thermodynamics[M]. 4th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [15] BENDER T, HOFF P, KLEEMANN R. The new BMW climatic testing complex - the energy and environment test centre[C]//SAE technical paper series. Warrendale, PA, United States: SAE International, 2011.
- [16] SARDOU M. The sensitivity of wind-tunnel data to a high-speed moving ground for different types of road vehicles[C]//SAE technical paper series. Warrendale, PA, United States: SAE International, 1988.
- [17] DUELL E, KHARAZI A, NAGLE P, et al. Scania's new CD7 climatic wind tunnel facility for heavy trucks and buses[J]. SAE international journal of passenger cars - mechanical systems, 2016, 9(2): 785-799.
- [18] 孙涛, 郭辉, 宋安. 汽车环境风洞实验室的性能评价与分析[J]. 汽车科技, 2019(3): 73-78.
- SUN Tao, GUO Hui, SONG An. Performance evaluation and analysis of automotive environmental wind tunnel laboratory[J]. Auto sci-tech, 2019(3): 73-78.
- [19] 吕骋予, 赵志军, 张笑雷. 低速高温风洞设计及性能测试[J]. 能源研究与信息, 2018, 34(1): 51-55.
- LYU Cheng-yu, ZHAO Zhi-jun, ZHANG Xiao-lei. Design and test of a wind tunnel with high temperature and low speed[J]. Energy research and information, 2018, 34(1): 51-55.
- [20] SARGISON J E, WALKER G J, ROSSI R. Design and calibration of a wind tunnel with a two dimensional contraction[C]//15th Australasian fluid mechanics conference. 2004.13-17.
- [21] PORTER J S, SARGISON J E, HENDERSON A D. Design and calibration of a facility for film cooling research[C]//16th Australasian fluid mechanics conference. Crown Plaza, Gold Coast: [s. n.], 2007.
- [22] DODSON M G. An historical and applied aerodynamic study of the wright brothers' wind tunnel test program and application to successful manned flight[R]. Defense Technical Information Center, 2005.
- [23] 王文奎, 石柏军. 低速风洞洞体设计[J]. 机床与液压, 2008, 36(5): 93-95.
- WANG Wen-kui, SHI Bai-jun. The design of low speed wind tunnel[J]. Machine tool & hydraulics, 2008, 36(5): 93-95.
- [24] 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, 38(3): 422-426.
- LI Qi-liang, ZHENG Zhi-qiang, JIA Qing, et al. Two methods to improve the axial static pressure coefficient of automotive wind tunnel[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2010, 38(3): 422-426.
- [25] ARNETTE S A, BUCHANAN T D, ZABAT M. On low-frequency pressure pulsations and static pressure distribution in open jet automotive wind tunnels[C]//SAE technical paper series. Warrendale, PA, United States: SAE International, 1999.
- [26] GERHAND W, WILHELM V H, STEPHEN W. Wind tunnel pulsation and their active suppression[J]. SAE Transactions, 2000(6): 1403-1416.
- [27] SHIH T H, LIOU W W, SHABBAR A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. Computers & fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [28] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1974, 3(2): 269-289.
- [29] CALAUTIT J K, CHAUDHRY H N, HUGHES B R, et al. A validated design methodology for a closed-loop subsonic wind tunnel[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2014, 125: 180-194.
- [30] MOONEN P, BLOCKEN B, ROELS S, et al. Numerical modeling of the flow conditions in a closed-circuit low-speed wind tunnel[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2006, 94(10): 699-723.