

某纯电动客车的空气动力学特性仿真与试验研究

何雨凡, 潘亚南, 纪绪北, 程 洪, 申 朋

(比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳 518118)

摘 要:为解决纯电动客车在高速行驶时,气动阻力急剧增大带来的续驶里程焦虑问题,针对某纯电动客车的气动外流场特性进行仿真分析和风洞试验,分别研究部分外围造型对风阻系数的影响规律,以期构建纯电动大客车外观造型的减阻方案。

关键词:纯电动客车; 气动阻力; 风洞试验; CFD 仿真

中图分类号:U461.2

文献标志码:A

DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.01.003

Simulation and Experimental Study of Aerodynamic Characteristics of a Pure Electric Bus

HE Yufan, PAN Yanan, JI Xubei, CHENG Hong, SHEN Peng

(BYD Automobile Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract: When the pure electric bus is driving at high speed, the aerodynamic drag increases sharply and brings the problem of continuous mileage anxiety. The authors study aerodynamic characteristics of a pure electric bus through the CFD simulation and wind tunnel testing, and explore the influence law of partial peripheral modelling on aerodynamic drag, in order to build drag reduction scheme of the peripheral modelling of the pure electric bus.

Key words: pure electric; aerodynamic drag; wind tunnel test; CFD simulation

有研究表明,当车速达到 80 km/h 时,汽车克服风阻所消耗的动力约占整车能耗的 60%^[1-3]。国内外对乘用车的风阻研究已非常深入^[4-5],而对商用车的风阻研究起步较晚。相较于乘用车,客车的钝体外型具有迎风面积大(3~5 倍)、流线型差等特点,其风阻改善有较大的提升和优化空间^[6-8]。对纯电动客车而言,其风阻成为影响续驶里程、动力性、经济性的重要因素^[9-11]。

本文以仿真分析为基础,以风洞试验为验证手段,研究某纯电动客车实车造型及多个外围部件对外流场分布规律及气动阻力特性的影响,为客车空气动力学性能的优化提供参考依据和指导。

1 仿真分析

仿真分析采用 STAR-CCM+ 软件,通过建立流体来模拟实车状态下的流场。通过流线以及压力云图来分析客车外围部件对车辆风阻系数的影响。

1.1 模型建立

运用 HyperMesh 软件对整车几何模型进行前处理,封堵底盘、车顶空调、格栅,并对前灯、导雨槽和车轮花纹进行平滑和简化,使整车车身形成一个无缝隙的外表面。整车长 12 m,宽 2.5 m,高 3 m,按照空间域 x 向 120 m(车前 3 倍车长,车后 6 倍车长), y 向 25 m(10 倍车宽), z 向 15 m(5 倍车高)建立整车仿真的空间流体域,如图 1 所示。然后采用切割体网格(包

收稿日期:2024-08-08。

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2501700)。

第一作者:何雨凡(1998—),男,主要从事商用车空气动力学分析及其他流体分析工作。E-mail:974902451@qq.com。

含棱柱层网格)对整个仿真空间域进行网格划分,客车车身和流体域采用不同的网格尺寸,并在后视镜、导流罩区域设置加密网格。仿真模型体网格总数为4 500万个,节点数为6 000万个。

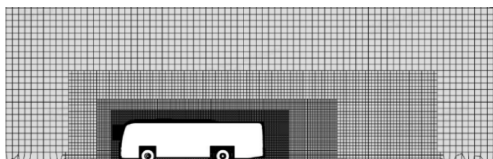


图1 客车气动特性 CFD 仿真模型

1.2 流体模型及边界条件

本文只进行稳态计算,稳态计算模型中的流体区域为不可压缩空气,恒密度 $\rho = 1.184\ 15\ \text{kg/m}^3$,粘度 $\mu = 1.855\ 08 \times 10^{-5}\ \text{Pa} \cdot \text{s}$,分离流。湍流模型选择 SST $\kappa-\omega$ 模型,在捕捉分离和近壁处理时的效果更好,从而可在进行客车外流场模拟时得到更准确的结果。边界条件主要设置见表1。

表1 边界条件主要设置

边界	边界设置
进口边界	进口速度 $v = 90\ \text{km/h}$
出口边界	压力出口 $P = 0$
地面	移动地面, $v = 90\ \text{km/h}$, 非滑移壁面
远场壁面	侧面+顶面为滑移壁面
车轮	不旋转

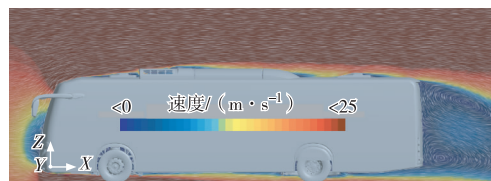
1.3 外围部件对客车风阻影响的仿真结果及分析

1.3.1 车顶空调前导流罩的影响

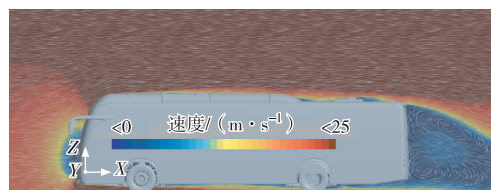
客车空调通常放置于车顶中部,空调整体高出车顶一定距离。空调高出车顶的部分会使气流无法紧贴车身流动。当车顶空调无前导流罩时(见图2(a)),车辆顶部气流从车头流向车尾会受到天窗与空调外壳的影响,气流的速度与方向均发生突变,车顶气流从前天窗开始向上分离,经过空调时气流分离加剧,导致动量损失较大,增大整车风阻系数。

在车头处增加前导流罩(见图2(b)),前导流罩高度、宽度与空调平齐,与车前部用大曲率半径圆弧连接。增加前导流罩后,车辆顶部气流从车头流向车尾时会受到前导流罩的引导作用,气流紧贴着导流罩、空调外壳流动,直到后天窗区域,气流受到后天窗

影响向上分离,且后天窗处的气流低速区明显变小。



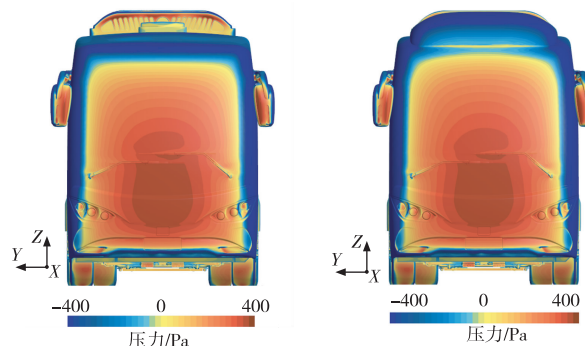
(a) 无前导流罩



(b) 有前导流罩

图2 有无空调前导流罩时车身外流场速度云图

同时根据图3所示的外流场压力云图可知,增加前导流罩会加大车头前部的负压区,显著地降低车头前部正压力,使得车头部与车尾部的压差减小,从而降低了风阻系数。通过增加前导流罩,整车风阻系数降低了0.022。



(a) 无前导流罩

(b) 有前导流罩

图3 有无空调前导流罩时车身外流场压力云图

1.3.2 车顶空调后导流罩的影响

若车顶空调无后导流罩(见图4(a)),空调外壳与车顶有高度差,气流离开空调时会在空调后部形成一个涡流,这会导致动量损失,增大整车风阻系数。

在空调后方增加后导流罩(见图4(b)),后导流罩的高度、宽度与空调齐平,与车顶用大曲率半径圆弧连接。增加空调后导流罩后,气流由空调上表面经后导流罩表面平滑过渡到车顶,有效地减少气流分离涡及动量损失,降低了空调前后的压差阻力。通过增

加空调后导流罩,整车风阻系数下降了 0.004。

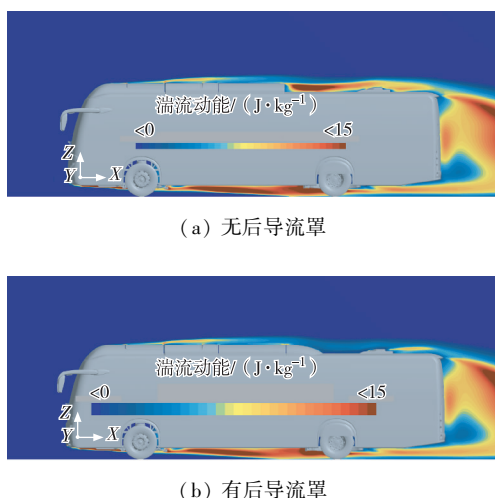


图4 有无空调后导流罩时车身外流场湍流动能云图

1.3.3 后视镜座后导流特征的影响

设计后视镜安装座后三种导流特征方案如图5所示,分别为:无导流特征、薄片式导流特征(厚12 mm)、斜面式导流特征(厚端厚100 mm,薄端厚8 mm)。



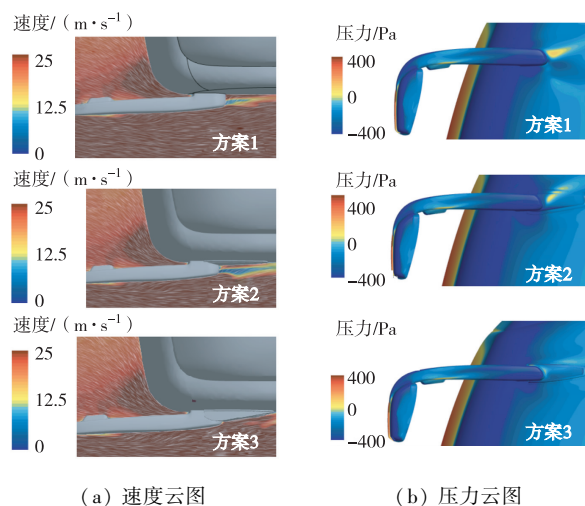
图5 后视镜安装座三种导流特征方案

三种方案的速度云图如图6(a)所示。其中,对于方案1,气流受到后视镜安装座阻碍作用,气流方向、速度均发生突变,气流发生分离;对于方案2,由于薄片式导流特征和后视镜支座存在高度差,气流在后视镜安装座区域仍然会发生分离;对于方案3,斜面式导流特征前端面与后视镜安装座匹配较好,且后部平滑过渡到车身表面,起到了很好的导流作用,使气流紧贴着车身流动,没有发生分离。

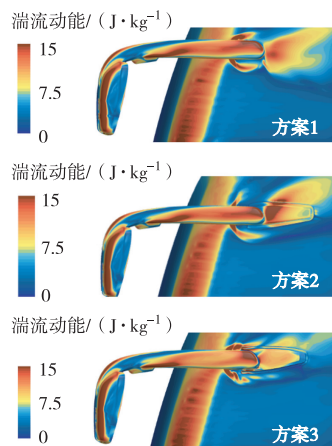
三种方案的表面压力云图如图6(b)所示。对于方案1,气流紧贴后视镜支座流动,由于后视镜支座与车身的距离差较大,气流经过后视镜支座后斜向上撞击车身,对车身区域形成正压;对于方案2,薄片式导流特征对于后视镜支座与车身外表面的距离改善甚微,导致附近车身同样出现正压;对于方案3,斜面

式导流特征有效地减小了后视镜支座与车身外表面的距离,后视镜支座受到的正压力减小、气流分离减小。

三种方案的湍流动能云图如图6(c)所示。其中,方案1的后视镜后部车身区域湍流动能损失区域大;方案2的薄片式导流特征加大了后视镜安装座的正迎风面积,且对沿后视镜支座流动的气流无导流作用,后视镜后部区域湍流动能损失增大;方案3的斜面式导流特征同样加大了后视镜安装座的正迎风面积,但其对气流有着良好的导向作用,后视镜后部区域湍流动能损失减小。



(a) 速度云图 (b) 压力云图



(c) 湍流动能云图

图6 三种后视镜导流方案的流场计算结果

总体来看,斜面式导流特征可以明显改善后视镜风阻性能,使整车风阻系数降低了 0.005 5。

1.3.4 后轮罩的影响

为避免车身两侧气流的分离,降低风阻系数,在

不造成其他影响的条件下,增加后轮罩可以避免过多侧向气流进入到轮胎中,而轮罩的外形也影响着侧向气流的流动。因此,轮罩的外形设计应更加流线型。如图 7 所示,新轮罩方案对轮罩侧边外形进行了流线型优化,轮罩与车身连接过渡更加平滑,进一步减少了侧向气流分离。图 7 中后轮罩新方案的风阻系数比旧方案的风阻系数低了 0.003 5。

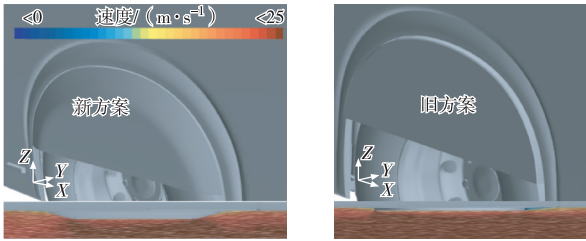


图 7 后轮罩方案及其附近速度云图

2 风洞试验验证

在气动风洞实验室完成了本车不同仿真状态的油泥模型的气动特性试验。为节省试验时间,先试验采取 1.3.1~1.3.4 节优化措施后的综合最优方案,然后根据控制变量法(优化方案为单一变量),分别拆除单一优化方案或更换为旧方案进行相同项目试验。风洞试验的烟流场景如图 8 所示。



图 8 风洞烟流试验照片

1) 表 2 是不同方案风阻系数的仿真值与相应油泥模型的风洞试验值。从表中可以看出仿真结果精度较高,与试验值的误差在 3%以内。

表 2 不同方案风阻系数仿真值与试验值

状态	仿真值	试验值
综合最优方案	0.990	1.000
仅去掉前导流罩方案	1.070	1.096
保留前导流罩,仅去掉后导流罩方案	1.001	1.012
保留前、后导流罩,仅无后视镜最佳导流特征方案	0.995	1.017
保留前、后导流罩及后视镜最佳导流特征,仅轮罩采用旧方案	0.997	1.011

2) 由于现实中的流场具有复杂性和动态性,难以直接观察和记录其全部特征。因此,本文采用了一种间接但有效的方法来验证车身周围的流场,即通过测量车身外表面的空气压力值,并将这些测量值与仿真结果进行对比。在综合最优方案风洞试验油泥模型车身上布置 30 个空气压力测点,如图 9 所示。仿真和试验的部分结果见表 3(具体压力值已用归一法进行处理)。

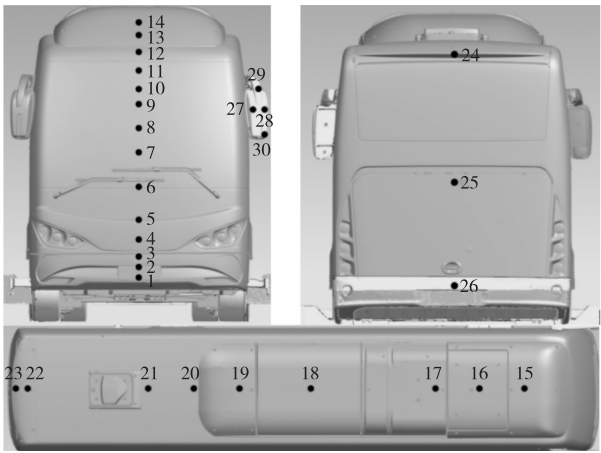


图 9 空气压力测点布置图

表 3 部分点位压力仿真值与试验值

点位	仿真值	试验值	点位	仿真值	试验值
1	0.006 3	0.005 0	20	0.175 0	0.001 3
4	0.900 0	0.880 0	21	0.112 5	0.120 0
7	0.842 5	0.832 5	24	-0.060 0	-0.045 0
10	0.542 5	0.522 5	25	-0.042 5	-0.117 5
13	-0.342 5	-0.367 5	26	-0.135 0	-0.127 5
16	-0.150 0	-0.137 5	27	0.825 0	0.850 0
19	-0.300 0	-0.227 5	30	-0.472 5	-0.492 5

整体看来,各测点处压力的仿真值与试验值基本一致,说明 CFD 仿真有较高的精度。个体来看,车身顶部 20 号测点压力的仿真值与试验值差异较大(具体值见表 3),这是因为测点 20 位于后导流罩尾端车身处,部分气流经过此处时受到了后导流罩的导向作用,部分气流直接撞击到车身,导致测点 20 处产生一定的压力。而风洞试验与仿真相比,采用的油泥模型为缩比模型(2:1),由于油泥模型后导流罩 Z 向高度仅有仿真数模的一半,沿后导流罩撞击到车顶上的气流较少,导致 20 号测点压力的试验值很小。另外,

车辆后部 25 号测点压力的仿真值与试验值差异也较大,是因为车辆背压取决于尾涡的强度和其涡心的位置,而尾涡的模拟精度主要取决于对车尾部分的模拟精度,CFD 仿真中客车车体较长、底盘部分零部件众多且零部件形状不规整,造成车底尾部分离点的建模不准确,而这对气流的影响又较大,从而导致 25 号测点压力的仿真值与试验值相差较大。

3 结束语

本文研究了某客车空气动力学部件对风阻系数的影响,并基于风洞试验对 CFD 仿真精度进行了评估。结果表明,前导流罩、空调后导流罩、后视镜导流特征以及后轮罩均对整车风阻有重要影响。将风阻仿真结果与风洞试验结果进行了对标,总体误差小于 3%,表明可以通过该仿真模型进行系列方案的优化分析。后续将进一步研究该仿真技术与风洞试验在个别位置的对标精度问题,不断改进仿真方法,提升其可信度。

参考文献:

[1] 王佳. 纯电动汽车能量管理关键技术及高压安全策略研究

[D]. 北京:北京理工大学,2014.

- [2] 马浩然,李佳辉,毕崑. 新能源汽车热管理研究综述[J]. 汽车实用技术,2023(8):1-9.
- [3] 王博. 汽车车身造型与风阻特性优化研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.
- [4] 李林,林强,陈建超,等. 基于 STAR-CCM+ 的某轿车减阻优化研究[J]. 汽车技术,2016(9):4-8.
- [5] 杨芯萍,宋春华,曾孟兰,等. 空气动力学对汽车外形设计的影响综述[J]. 汽车实用技术,2020(6):123-125.
- [6] 方忠,吴长风,于霖冲,等. 前围造型对 12 m 客车空气动力学性能影响研究[J]. 客车技术与研究,2018,40(2):5-8.
- [7] 梅进明. 空气动力学在客车造型设计中的应用[J]. 客车技术与研究,2017,39(2):29-31.
- [8] 陶莉莉. 基于流固耦合的高速客车气动特性研究[D]. 济南:山东大学,2014.
- [9] 江涛,高嵩,汪怡平,等. 客车基本形体的空气动力学特性研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2015,39(6):1233-1236.
- [10] 胡汉桥. 12 米旅游客车气动特性分析与优化[D]. 厦门:厦门理工学院,2016.
- [11] 夏应波. 电动客车外流场的数值模拟[J]. 客车技术与研究,2014,26(3):17-19.

(上接第 9 页)

模式,不仅解决了单踏板加减速迟缓的问题,还在不改变整车紧急制动安全性能的前提下,提高了驾驶舒适性,改善了整车经济性,且不影响整车动力性。

参考文献:

- [1] 卢雄,欧阳智,杨杰君,等. 纯电动汽车单踏板控制系统研究与实现[J]. 客车技术与研究,2022,44(6):10-13.
- [2] 余志生. 汽车理论[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社,2009:2-17.
- [3] 何洪文,楼金彪. 单踏板再生制动控制研究[J]. 车辆与动力技术,2022(2):1-6.
- [4] 中华人民共和国工业和信息化部. 再次公开征求《乘用车制动系统技术要求及试验方法》强制性国家标准意见[R/OL]. [2024-09-20]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/zhys/qcgy/art/2024/art_c20dfec760b04cad999ac5270f80b61a.html.

- [5] 马欢欢,王伟,曲辅凡. 纯电动汽车单踏板制动关键技术研究[C]//中国汽车工程学会. 2019 中国汽车工程学会年会论文集(4). 北京:机械工业出版社,2019:1765-1769.
- [6] 黄灵辉,杨顺,陈小强,等. 电控制动系统响应时间测试系统设计与应用[J]. 专用汽车,2021(5):63-65.
- [7] 刘倩. 新能源汽车电子控制的关键性技术研究[J]. 中国新通信,2019,21(21):228.
- [8] 何水龙,陈科任,叶明松,等. 基于 MATLAB 的商用车平顺性优化与分析[J]. 机械设计与制造,2021(1):224-227.
- [9] 刘威,祁宏钟,刘新田,等. 纯电动汽车串联式再生制动控制策略建模与仿真[J]. 轻工机械,2019,37(1):70-73.
- [10] 王锐,何洪文. 基于 Cruise 的整车动力性能仿真分析[J]. 车辆与动力技术,2009(2):24-26.
- [11] 王银,张灏琦,孙前来,等. 基于自适应 MPC 算法的轨迹跟踪控制研究[J]. 计算机工程与应用,2021,57(14):251-258.