

电动客车车顶布置对整车风阻影响的仿真与优化研究

郑兴华, 张湘敏, 潘亚南, 纪绪北, 赵 强

(比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳 518118)

摘 要:针对电动客车行驶过程中气动阻力在整车能耗中占比较高的问题,本文采用计算流体动力学(CFD)数值模拟方法,系统分析顶置空调启停状态、车顶部件布局及导流结构对整车气动性能的影响。通过构建精细化三维仿真模型并进行多工况对比验证,结果表明:顶置空调运行会显著改变车顶流场,使风阻系数增加2.8%;前导流罩与前挡风玻璃采用连续性曲面设计,可有效抑制气流分离;前天窗顶罩与空调前端之间的最优间距为300 mm;后导流罩通过延后气流分离点并与后天窗配合,可降低能量损耗,实现最低整车风阻。本文为空调启动时电动客车低风阻造型设计提供了理论依据与工程实践方案,对提升新能源客车续驶里程具有显著应用价值。

关键词:电动客车;数值模拟;车顶布置;顶置空调启动;空气动力学性能

中图分类号:U461.1

文献标志码:A

DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.02.004

A Simulation and Optimization Study on the Effect of Roof Layout on the Aerodynamic Drag of Electric Buses

ZHENG Xinghua, ZHANG Xiangmin, PAN Yanan, JI Xubei, ZHAO Qiang

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

Abstract: To address the issue that aerodynamic drag accounts for a relatively high proportion of the total energy consumption of electric buses during driving, this paper employs computational fluid dynamics (CFD) numerical simulation methods to systematically analyze the influence of the rooftop air-conditioner activation status, roof component layout, and deflector structures on the vehicle's aerodynamic performance. By constructing a detailed 3D simulation model and conducting comparative verification under multiple operating conditions, the results show that the operation of the rooftop air-conditioner significantly alters the roof flow field, increasing the drag coefficient by 2.8%. A continuous curved surface design between the front deflector and the windshield effectively suppresses airflow separation. The optimal distance between the front skylight cover and the front end of the air-conditioner is 300 mm. By delaying the airflow separation point and coordinating with the rear skylight, the rear deflector reduces energy loss and achieves the minimum overall vehicle drag. This paper provides a theoretical basis and engineering practice solutions for the low-drag styling design of electric buses during air-conditioner activation, offering significant application value for enhancing the range of new energy buses.

Key words: electric bus; numerical simulation; roof layout; rooftop air-conditioner activation; aerodynamic performance

1 概 述

在国家“双碳”战略及新能源汽车产业政策驱动下,电动客车作为公共出行领域节能减排的核心载

体,其能耗性能直接影响运营经济性与市场竞争力。相关研究表明,在高速工况下,车辆空气动力学性能对能耗的贡献率可达30%~50%^[1]。然而,受GB 7258—2017《机动车运行安全技术条件》^[2]对车辆外

收稿日期:2025-06-23。

第一作者:郑兴华(1984—),男,工程师,主要从事客车及卡车整车集成技术的开发与应用工作。E-mail:huahua841108@163.com。

廓尺寸的限制, 客车普遍形成了大迎风面积与方正造型, 导致其基础风阻系数显著高于乘用车^[1]。因此, 亟须通过局部气动外形优化实现性能突破, 并借助有效的降阻控制技术进一步提升整车性能。

汽车空气动力学优化包括主动降阻控制技术和被动降阻控制技术两类^[3-4]。在商用车领域, 主动控制技术(如主动射流控制^[5]、主动式后扰流尾翼^[6]、主动式底盘控制系统)应用较少, 目前主要以被动控制技术为主。现有被动控制技术主要围绕车身主体与气动附件展开, 具体包括: 增大前挡风玻璃倾角、增加前围顶部圆角曲率、优化导流罩型面、加装底盘护板及导流附件等。前挡风玻璃倾角和前围顶部圆角对风阻影响显著^[7-9]; 风阻系数随前挡风玻璃倾角增大而减小; 圆角曲率半径从0增至200 mm时, 风阻系数可降低0.161。通过优化顶导流罩前端型面曲率, 使其与车顶光滑连续过渡, 可使整车风阻系数降低6.84%, 同时削弱空调外机对上游流场的干扰^[10-11]。底盘气流平整性至关重要, 采用前保险杠底部斜坡、导流翅片及前轮阻风板, 均可优化尾流结构, 使风阻系数最大降低0.011^[12-16]。

然而, 研究表明低风阻和散热优化相互制约^[17]。为保证较优的散热性能, 往往需要较高的空调进风量, 而这又会增加空气阻力。目前, 车顶附加装置的气动干扰机制仍缺乏研究, 尤其在空调运行工况下, 气流组织变化对风阻的附加影响常被忽略。

本文基于车顶区域的可优化空间, 采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法展开研究。首先重点解析顶置空调运行引起的局部流场畸变效应, 并量化其对风阻的增量贡献。然后研究前导流罩造型参数在空调启停工况下的气动响应特性, 分析前天窗顶罩布置参数对整车风阻系数及空调进风量的影响, 并探讨后导流罩参数对风阻的作用机制, 从而为顶置空调运行工况下新能源客车的气动优化设计提供理论依据。

2 模型与方法

2.1 模型建立

整车计算模型如图1所示, 车长 $L=12$ m, 车宽 $W=2.5$ m, 车高 $H=3$ m。客车车顶普遍安装顶置空调和天窗, 其中顶置空调因凸出明显、迎风面积大而显著增加风阻。为降低其影响, 通常在空调前后加装

空气动力学优化部件。前导流罩造型、前天窗顶罩外形、后导流罩造型是影响车顶风阻的关键因素, 因此本文对各部件的布置参数进行了系统研究。

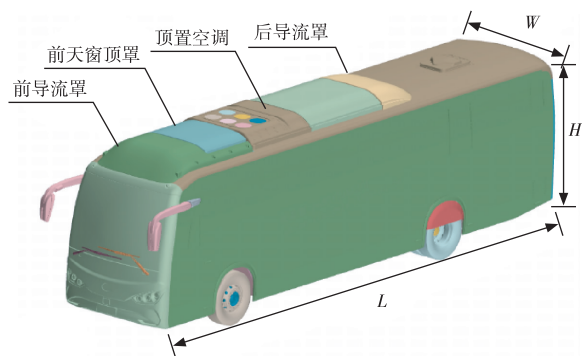


图1 整车计算模型

2.2 仿真方法

整车模型包含大量细小部件, 会显著降低网格质量, 故对各个系统进行合理简化, 去除对风阻影响较小的部件(如螺栓、螺母)。由于车前特征对风阻影响较大, 保留前舱盖、前保险杠、大灯等车前部件连接的凹槽特征, 其余车身缝隙用平滑曲面连接。本文建立的流体计算域尺寸如下: 入口距车前 $3L$, 出口距车后 $7L$, 两侧距车身 $5W$, 顶部距车顶 $5H$ 。考虑车轮满载后的径向变形, 并忽略横向变形^[18], 在车轮与地面之间建立3 mm的竖直过渡面, 车轮模型处理如图2所示。整车计算模型采用切割体网格划分, 顶置空调风扇采用多面体网格, 后视镜单独设置加密区域, 整车进行三层体积加密, 最终得到的网格总数为7 800万个。 $Y=0$ mm截面网格示意图如图3所示。

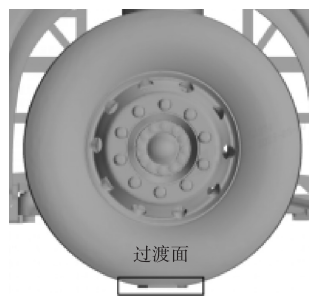


图2 车轮处理局部放大图



图3 $Y=0$ mm 截面网格示意图

本文采用STAR-CCM+软件, 在三维、稳态、不可压缩流及分离流的条件下进行仿真, 以计算整车风阻

系数。湍流模型选用 SST k- ω 模型,因其能准确模拟近壁流动并有效捕捉流动分离;模型参数基于已有研究设置,并经风洞试验验证,仿真误差小于 3%^[19-20]。流体介质为空气,其密度为 1.184 15 kg/m³,动力黏度为 1.855 08×10⁻⁵ Pa·s。计算域、车轮及顶置空调风扇的边界条件见表 1,其中车轮旋转速率根据其滚动半径设定。

表 1 边界条件设置

边界	边界条件	数值
入口	速度入口	90 km/h
出口	压力出口	0 Pa
两侧及上侧	静止滑移壁面	—
地面	移动壁面	90 km/h
车轮	旋转	47.08 rad/s
顶置空调风扇	旋转	3 380 r/min

由于缺乏冷凝器内部的详细几何结构,将其简化为多孔介质模型,并代入实测的风速-压降曲线,以反映其阻力特性。本文仅考虑空调出风对整车风阻的影响,下文将空调工作和不工作称为空调启动和空调停止。

2.3 模型验证

为验证数值仿真方法的精度和可靠性,本文采用油泥模型风洞试验对优化方案进行多工况验证。试验在 3/4 开口风洞中进行,测试段长 18 m,采用带式移动地面模拟行驶,环境温度为 25 ℃。待风阻系数稳定后,记录其数值。

选取两种代表性配置开展仿真与试验的对比:图 4(a)为集成前导流罩与前天窗顶罩的基准工况 1,图 4(b)为移除上述组件的对比工况 2。通过建立全参数化仿真模型,并设定与试验一致的边界条件,仿真与试验的对比结果见表 2。两种工况下风阻系数的仿真值与试验值偏差均小于 3%,满足工程精度要求,从而验证了计算模型与方法的可靠性。



(a) 集成前导流罩和前天窗顶罩



(b) 去掉前导流罩和前天窗顶罩

图 4 试验测试图

表 2 不同方案风阻系数的仿真值与试验值

状态	试验值	仿真值	偏差/%
工况 1	0.994	1	0.6
工况 2	1.021	1.019	0.2

为进一步验证车身表面的仿真精度,在车身布置了多个压力测点(如图 5 所示),部分压力测点仿真值与试验值的对比结果如图 6 所示。

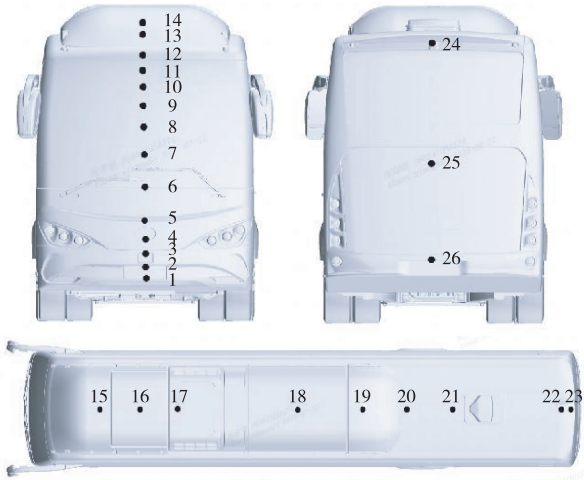


图 5 部分压力测点布置图

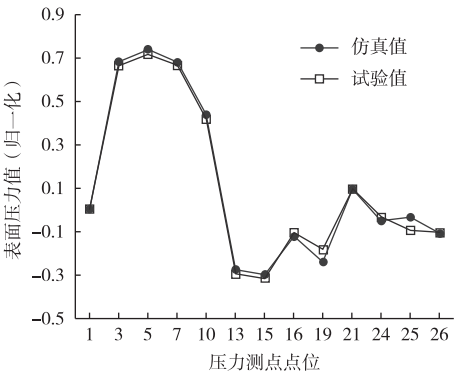


图 6 部分压力测点的仿真值与试验值

由图 6 可知,压力测点的仿真值和试验值整体趋

势一致。其中, 19 号测点偏差较大, 该点位于后导流罩顶部的缝隙附近。此区域气流经空调与后导流罩之间的空隙发生分离后再附着到后导流罩表面, 存在较大的压力梯度, 致使测点坐标误差被放大。尾部 25 号测点的压力也存在偏差, 这主要是因为车顶与底部末端气流分离后形成低压尾流区, 而复杂的底盘部件使得建模存在偏差, 导致仿真中底部分离点的位置与实际情况不一致, 进而影响背压。

综上所述, 该仿真方法可信度较高。鉴于整车风阻风洞试验周期长、成本高, 本文后续研究均采用该仿真方法。

3 结果与分析

3.1 空调工作状态对车顶局部流场结构的影响

图 7 为无车顶空气动力学部件时, 空调停止与启动状态下整车流场在 $Y=0$ mm 截面处的线积分卷积图。图中方形框标出了空调顶部及周围环境的局部流场变化区域。整体来看, 两种状态下空调顶部都存在明显的气流分离。这是因为气流撞击空调前部后发生分离, 无法继续附着于车体表面, 从而影响了车顶及车尾的流场分布。因此, 有必要在空调前后加装导流部件以降低风阻。

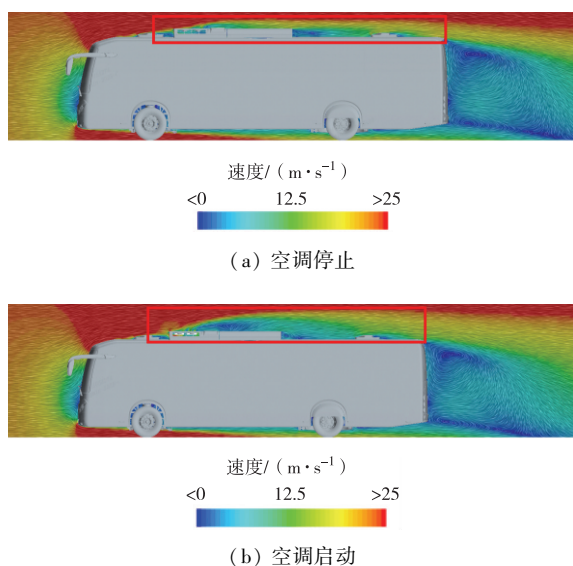


图 7 空调停止和启动时 $Y=0$ mm 截面线积分卷积图

图 8 为空调停止和启动状态下, $Y=0$ mm 截面处空调顶部的局部放大速度矢量图。从图 8(b) 可知, 空调启动时其顶部流场发生明显畸变, 扰乱了周围气流分布; 风扇旋转在局部产生附加扰动, 使前方来流

的 X 方向速度减小, 顶部出现拖曳状斜上方气流。同时, 风扇转动驱动空调内部气流经空隙向上回流 (见框线区域), 这阻碍了空调顶部气流流动, 进一步增大空气阻力。此外, 风扇转动还提高了空调进气口进风量, 改变了空调前部流场, 进而影响整车风阻。

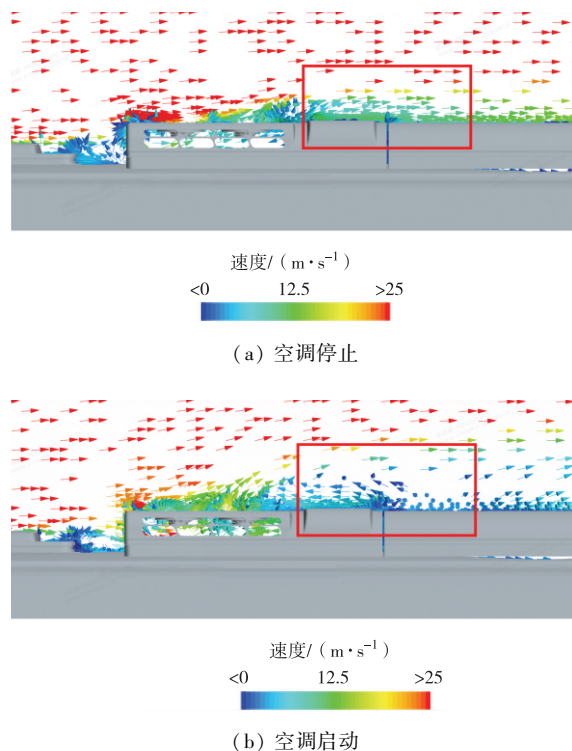


图 8 空调停止和启动时 $Y=0$ mm 截面空调顶部局部放大速度矢量图

综上所述, 无车顶空气动力学部件时, 空调启动状态下的风阻系数比空调停止状态高 0.01。这一增量表明, 空调运行带来的风阻影响不可忽略。

3.2 前导流罩造型对整车风阻的影响

本节研究空调启动和停止状态下, 前导流罩造型对整车风阻的影响。方案 A1、A2 与 A3 通过改变导流罩的曲率半径来实现造型差异, 具体如图 9 所示; 方案 A4 对前导流罩进行重新设计, 曲率半径进一步增大并加宽两侧臂; 方案 A5 在原始导流罩基础上去掉两侧臂。不同前导流罩的几何模型如图 10 所示, 方案对比见表 3。



图 9 不同曲率半径的前导流罩几何模型图

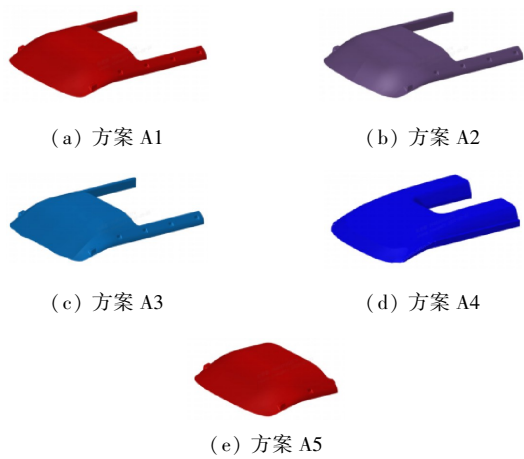


图 10 不同前导流罩几何模型

表 3 不同前导流罩造型方案对比

方案	内容
A0	无前导流罩
A1	原始前导流罩
A2	前导流罩曲率半径减小
A3	前导流罩曲率半径增大
A4	新前导流罩,曲率半径进一步增大
A5	原始前导流罩去掉两侧臂

不同前导流罩的风阻系数对比曲线如图 11 所示。前导流罩对风阻贡献显著:方案 A0 的风阻系数最大;采用方案 A1 的整车,在空调停止工况下风阻系数较方案 A0 降低 0.011,在空调启动工况下降低 0.003。由方案 A1、A2、A3 三种导流罩的对比可知,在同一基础造型下,曲率半径越大,风阻系数越小,方案 A4 相比方案 A3 曲率半径进一步增大,因此方案 A4 的风阻系数最小。该结果证实,增大曲率半径有利于降低风阻。对比方案 A1 与 A5 可知,两侧臂可以起到收拢并引导气流的作用,去掉两侧臂后风阻系数明显升高。

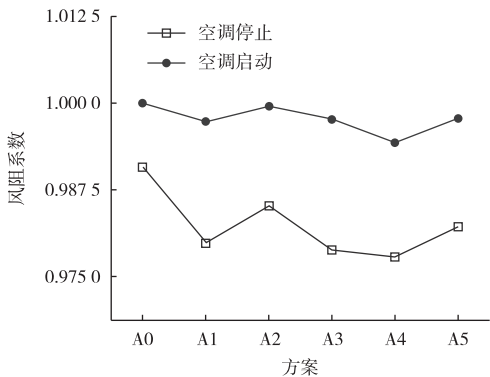


图 11 不同前导流罩风阻系数对比曲线

从不同前导流罩压力云图(图 12)可以看出,前导流罩正迎风面的压力直接影响风阻。方案 A2 的正迎风面压力最高,因此风阻最大;而方案 A4 的正迎风面压力较低、作用面积较小,且整个前导流罩表面的压力分布较均匀,有利于气流平滑过渡,从而有效降低风阻。

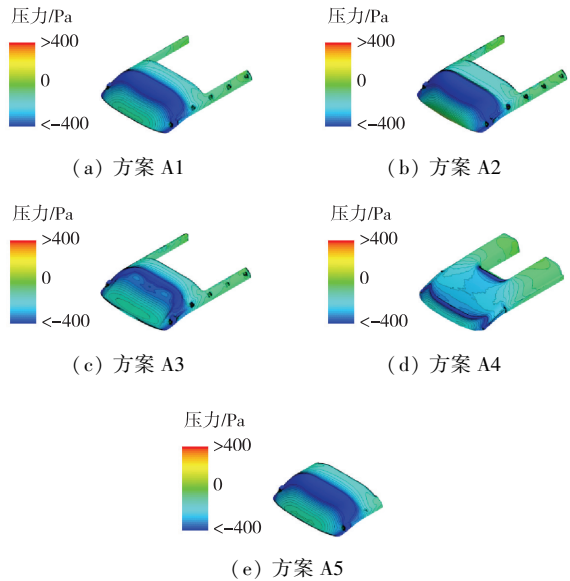
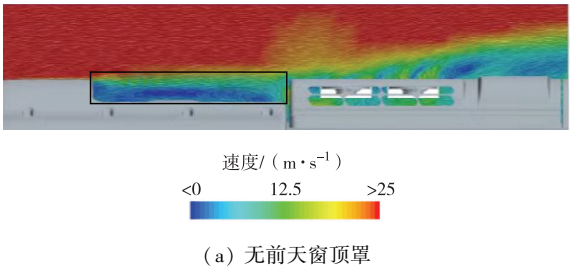


图 12 空调启动工况下不同前导流罩压力云图

综上所述,前导流罩的造型应满足以下几点:采用接近流线型设计,前段与前挡风玻璃保持曲面连续性;中后段保持水平,并与空调顶部同高;两侧臂高度应与整体造型协调,避免过高或过低。

3.3 前天窗顶罩布置参数对风阻的影响

首先分析有无前天窗顶罩对整车风阻及流场的影响。图 13 为空调启动工况下,无前天窗顶罩和有前天窗顶罩在 $Y=0\text{ mm}$ 截面的局部放大速度矢量对比图。无顶罩时,前天窗上部出现多涡流区(见方框标注),空调顶部及尾部回流区面积增大,导致风阻增大。加装前天窗顶罩后,可有效引导经前导流罩的气流,避免形成较大负压区,减小空调前部的气流分离,同时减少空调顶部的回流区,从而有利于降低风阻。



(a) 无前天窗顶罩

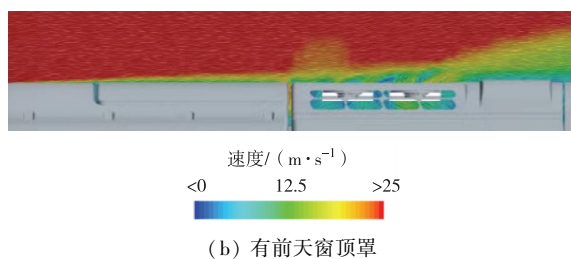


图 13 空调启动时有无前天窗顶罩 $Y=0$ mm 截面局部放大速度矢量图

然后分析前天窗顶罩与空调前端之间距离(简称间距 S)对整车风阻系数的影响。图 14 为间距 S 的示意图(图中 $S=200$ mm)。综合考虑安装可行性与气流组织长度,本文选取了 $S=0$ mm、100 mm、200 mm、300 mm 四种方案(分别命名为 S0、S100、S200、S300)。以空调启动且 $S=0$ 时的风阻系数为基准,不同间距下的风阻系数变化曲线如图 15 所示。

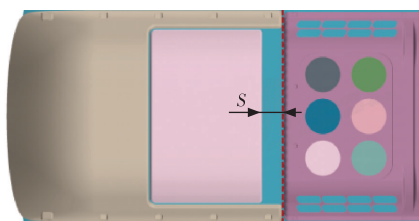


图 14 间距 S 示意图

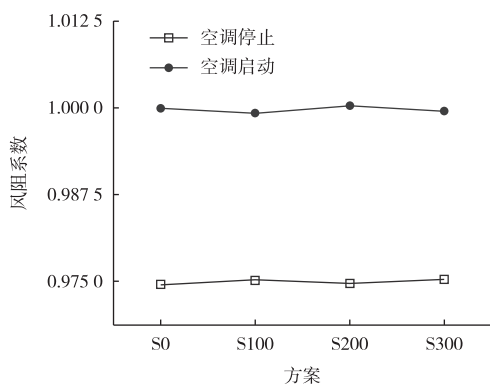


图 15 不同间距下风阻系数变化曲线

从图 15 可以看出,当空调停止时,方案 S100 和 S300 的风阻系数较高;当空调启动时,风阻系数按 $S100 < S300 < S0 < S200$ 的顺序递增。对比两种状态可知,空调启动和停止时的风阻系数变化趋势相反。这一现象表明,当空调启动时,空调前部预留不合适的空间尺寸反而会增大风阻系数。

风阻系数的变化主要受两个因素影响:一是涡旋在 $Y=0$ mm 截面沿 X 方向的切向速度对主流高速气流的干扰程度;二是涡旋对周围壁面的冲击程度。空

调启动时,各方案在 $Y=0$ mm 截面的局部速度云图与速度矢量图分别如图 16 和图 17 所示。

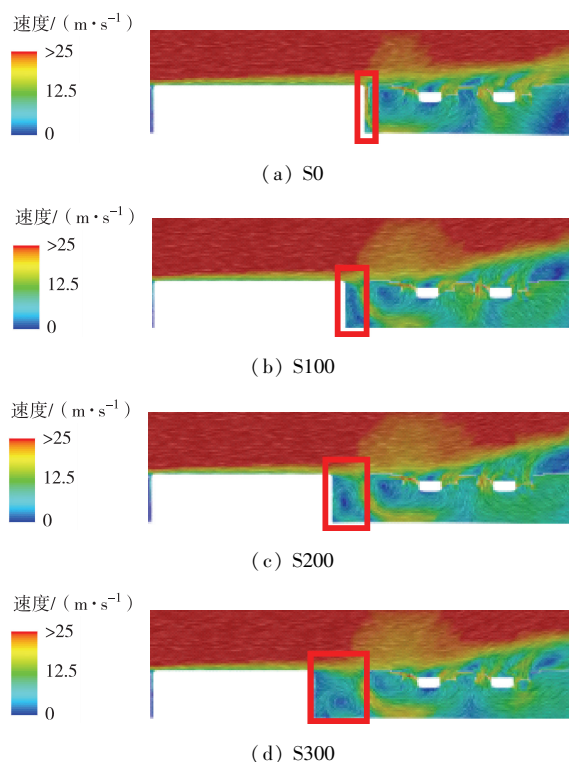


图 16 空调启动时各方案 $Y=0$ mm 截面局部速度云图

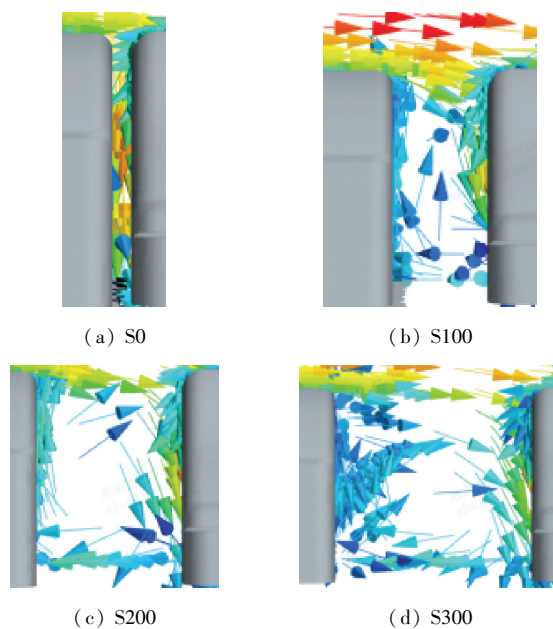


图 17 空调启动时各方案 $Y=0$ mm 截面局部速度矢量图

由图 16 可知,气流经过顶罩末端后产生分离,在高速气流和顶罩末端之间形成了低速气流区。结合图 17 可见,方案 S100 在顶部区域的高速气流占比最

大,这表明其间距内部涡旋产生的阻力最小,对主流方向气流速度影响也最小。因此,方案 S100 的风阻系数最低。方案 S200 和 S300 均产生了完整的涡旋,但二者对顶罩末端壁面的冲击程度不同。方案 S300 的涡旋旋转平稳,对周围壁面的冲击力较小,而方案 S200 的涡旋结构使得大部分高速气流冲向顶罩末端壁面,增加了顶罩和空调之间的阻力。因此,方案 S200 的风阻系数最高。

最后,对比分析了空调启动时不同间距 S 下的进风量。相关结果表明,随着间距 S 的增大,进风量逐渐增大。与不增加前天窗顶罩的情况相比,方案 S0 的总进风量减小了 $2\,302\text{ m}^3/\text{h}$,方案 S300 的进风量较方案 S1 增加了 $1\,067\text{ m}^3/\text{h}$,而风阻仅增加了 $0.000\,3$ 。

综合风阻系数与进风量两方面因素,前天窗顶罩与空调前端之间最佳距离为 300 mm 。

3.4 后导流罩造型对整车风阻的影响

后导流罩方案包括:无后导流罩(H0)、基准造型(H1)、曲率半径较 H1 小且末端为竖直切面(H2)、开口式设计(H3),其几何模型如图 18 所示。本文在前导流罩最优方案(方案 A4)的条件下,分析空调启动和停止状态下不同后导流罩对整车风阻的影响。

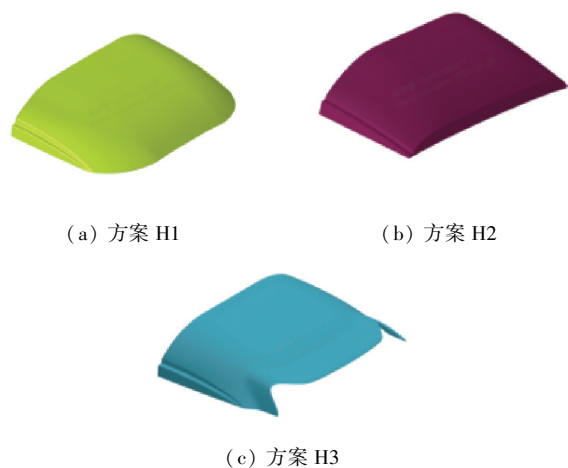


图 18 不同造型的后导流罩几何模型

图 19 为不同后导流罩风阻系数对比曲线。从图中可知,在空调停止状态下,方案 H2 的风阻系数最低,较方案 H0 降低了 $0.004\,5$;而在空调启动状态下,方案 H1 的风阻系数最低,较方案 H0 降低了 0.002 。

由于本文基于最优前导流罩(方案 A4)进行分析,气流经过空调后几乎无分离。在空调停止状态下,气流流经 H2 方案的后导流罩后虽提前分离,但能再度贴合车顶流动,从而使其风阻系数最低。

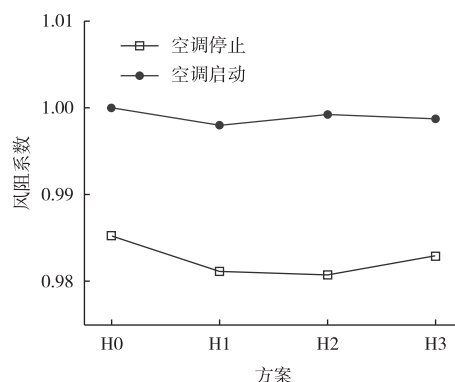


图 19 不同后导流罩风阻系数对比曲线

在空调启动时,不同后导流罩造型 $Y=0\text{ mm}$ 截面局部速度云图和压力云图如图 20 和图 21 所示。

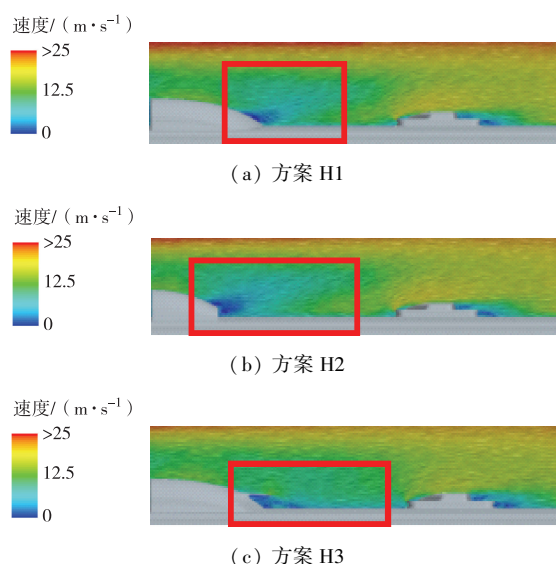


图 20 不同后导流罩造型 $Y=0\text{ mm}$ 截面局部速度云图

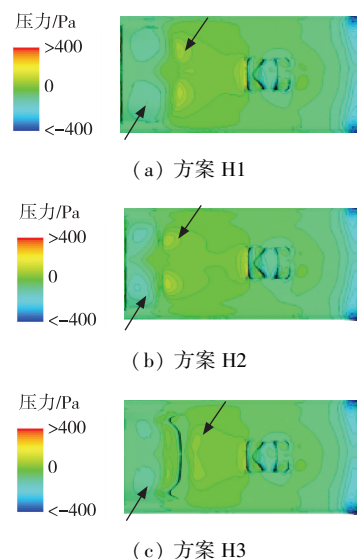


图 21 不同后导流罩造型 $Y=0\text{ mm}$ 截面局部压力云图

从图 20 可知, 空调引发的气流分离可延伸至后天窗区域。此时, 使气流分离点延后的方案 (H1、H3) 能与后天窗处的气流更好地配合, 从而降低风阻。

从图 21 可以看出, 方案 H1 的车顶高压区占比更大, 正压区域靠后, 且后导流罩与后天窗之间的压力分布更为规则, 这意味着能量损失较低, 因此其风阻系数最低。

综上所述, 后导流罩应选择末端封闭、中后部表面曲率圆滑、气流贴附强的造型更有利于降低风阻。

4 结束语

本文研究了空调启动和停止状态下, 前导流罩造型、前天窗顶罩布置参数及后导流罩造型对整车风阻的影响。通过细化分析局部流场变化规律, 量化了空调启动导致的风阻增量与空调进风量变化。本文弥补了空调启动状态下车顶附加装置气动干扰机制研究的不足, 为该状态下客车车顶空气动力学附件的优化提供了理论支撑与工程实践方案。

后续将进一步完善空调内部模型, 建立冷凝器等关键部件的详细外造型数模。同时, 将考虑变工况参数对整车风阻的影响, 研究瞬态工况下风阻特性及其优化方案所引发的流场变化。此外, 还将探讨在车顶增设其他空气动力学附件 (如在尾翼位置增加导流套件) 的可行性, 以期全面提升降阻效果, 提高客车产品的市场竞争力。

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: 1-4, 180-182.
- [2] 中华人民共和国公安部. 机动车运行安全技术条件: GB 7258—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-50.
- [3] 刘锦生, 徐胜金, 王庆洋, 等. 基于物理模型的汽车空气动力学研究综述[J]. 实验流体力学, 2020, 34(1): 38-48.
- [4] 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.
- [5] ZHANG B F, LIU K, ZHOU Y, et al. Active drag reduction of a high-drag Ahmed body based on steady blowing[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2018(856): 351-396.
- [6] 李喆隆, 王翼飞, 成云, 等. 某超低风阻轿车主动尾翼气动特性研究[C]//中国汽车工程学会汽车空气动力学分会. 2024 中国汽车工程学会汽车空气动力学分会学术年会论文集. 2024: 274-279.
- [7] 廉玉波, 罗秋丽, 张风利, 等. 基于形体优化方法的汽车空气动力学开发[J]. 汽车工程, 2022, 44(10): 1619-1626.
- [8] 曹东硕, 杨明, 徐铖, 等. 基于 CFD 的某特种电动汽车空气动力学分析与改进设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62(11): 53-57.
- [9] 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.
- [10] 唐经添. 基于 CFD 的商用车顶导流罩减阻优化[J]. 时代汽车, 2025(13): 139-141.
- [11] 张锦宙, 马志强. 基于整车风阻优化与导流罩开发的仿真研究[J]. 时代汽车, 2020(12): 128-129.
- [12] 党岩, 梅肖. 汽车底板板空气动力学性能研究及优化[J]. 汽车科技, 2025(3): 8-12.
- [13] 黄传海, 周思, 柏国杰, 等. 某微型货车的风阻分析和优化研究[J]. 客车技术与研究, 2024, 46(6): 41-44.
- [14] 石咏薇, 杨婷, 夏超, 等. 低阻附件对某低风阻车型气动影响研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022(增刊 1): 59-66.
- [15] 曾瑜, 党岩. 某纯电轿车后护板涡流发生器气动性能分析和优化[J]. 上海汽车, 2025(6): 8-13.
- [16] 斯洋. 一种新型扰流器的研究及气动性能优化[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2018.
- [17] 刘文涛, 夏正廷. 电动汽车外形低风阻及降温散热一体化设计优化路径探析[J]. 专用汽车, 2025(4): 78-80.
- [18] 廖洪. 车轮结构参数及其气动套件对整车风阻的影响分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [19] 张铃欣. 汽车车轮区域流动不稳定性及其气动外形优化减阻方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
- [20] 何雨凡, 潘亚南, 纪绪北, 等. 某纯电动客车的空气动力学特性仿真与试验研究[J]. 客车技术与研究, 2025, 47(1): 10-14.