

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202403025



大客车尾翼的数值模拟与风洞试验

杨永柏¹, 王靖宇², 庄国华³

- (1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;
2. 吉林大学 汽车动态模拟国家重点实验室, 吉林 长春 130025;
3. 厦门金龙联合汽车工业有限公司, 福建 厦门 361023)

摘要: 为了研究尾翼对大客车气动特性的影响,采用数值模拟和风洞试验相结合的方法,从造型方案、位置布置、倾角变化等方面对大客车量产实车的3种尾翼进行研究。结果表明:布置在车身后围,与后围曲面过渡平顺,距后围距离恰当,倾角合适的尾翼能达到较好的减阻效果,可减小11.8%的气动阻力,产生一定节能效果,并具有后窗除尘的作用。

关键词: 大客车; 尾翼; 风洞试验; 气动特性; 数值模拟

中图分类号: U 461.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2024)04-0454-07

Numerical Simulation and Wind Tunnel Testing of Coach Rear Spoiler

YANG Yongbai¹, WANG Jingyu², ZHUANG Guohua³

- (1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China;
3. Xiamen Kinglong United Automotive Industry Limited Company, Xiamen 361023, China)

Abstract: To investigate the effect of rear spoiler on the aerodynamic characteristics of a coach, a combined method of numerical simulation and wind tunnel testing was employed. This study examined three types of rear spoiler for mass-produced coaches in terms of design schemes, positional arrangements and variations in inclination angles. The results indicated that a rear spoiler positioned on the rear wall of the coach body, with a smooth transition to the curved surface of the rear wall, an optimal distance from the rear wall, and an appropriate inclination angle, achieved significant drag reduction. Specifically, it reduced aerodynamic drag by 11.8%, produced energy-saving effects and facilitated dust removal in rear window.

Keywords: coach; rear spoiler; wind tunnel test; aerodynamic characteristics; numerical simulation

随着我国高速公路的发展,大客车的平均行驶速度不断增加,气动阻力对整车油耗的占比也随之增大,气动减阻变得更加重要。目前,空气动力学附加装置已广泛应用于乘用车和货车,并取得良好的效果^[1-12],但在商用客车上应用较少。此外,由于大客车车身造型与乘用车、货车有较大差异,无法直接移植乘用车和货车的空气动力学附加装置,需根据其自身特点进行研究^[13]。国内学者已就大客车的前围造型、圆角半径、尾部倾角等细部结构进行深入细致的试验和模拟研究^[14-17],但对空气动力学附加装置的研究较少,且少有实车的实际应用研究。基于此,本文对一款量产实车进行尾翼方案的数值模拟与风洞试验研究。

收稿日期: 2024-03-29

通信作者: 杨永柏(1971-),男,讲师,博士,主要从事汽车空气动力学的研究。E-mail: yyb717717@163.com。

基金项目: 华侨大学高层次人才科研启动项目(09BS613)

1 风洞试验

1.1 试验设备

在吉林大学汽车风洞试验室进行试验,该风洞为回流式风洞,有模拟地面效应的移动带装置,试验段尺寸(长×宽×高)为 8.0 m×4.0 m×2.2 m。

1.2 试验模型

选取 1:5 的实车缩比模型,客车试验模型,如图 1 所示。图 1 中: X, Y, Z 表示车身坐标。采用数控机床加工,与实车几何相似,装有后视镜、雨刷器、天窗与空调等附属装置,忽略了发动机舱、车身底部细部结构。



图 1 客车试验模型

Fig. 1 Test model of coach

3 种尾翼方案的造型和安装位置,如图 2 所示。图 2 中:尾翼用于干扰尾流,尾翼 1 安装于后围,尾翼 2,3 安装于顶盖。



图 2 3 种尾翼方案的造型和安装位置

Fig. 2 Designs and installation positions of three rear spoiler

1.3 试验内容

风洞试验主要是让安装不同尾翼的模型在各种横摆角情况下进行测力试验(横摆角试验主要是为了研究侧风的影响)。风洞试验方案,如表 1 所示。表 1 中: φ 为横摆角; v 为风速。

表 1 风洞试验方案

Tab. 1 Scheme of wind tunnel testing

| 试验模型 | $\varphi/(^\circ)$ | $v/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ |
|----------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 原模型 | 0, ± 5 , ± 10 , ± 15 | 100 |
| 原模型+尾翼 1 | 0, ± 5 , ± 10 , ± 15 | 100 |
| 原模型+尾翼 2 | 0, ± 5 , ± 10 , ± 15 | 100 |
| 原模型+尾翼 3 | 0, ± 5 , ± 10 , ± 15 | 100 |

1.4 试验结果分析

当风速为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,不同尾翼造型下阻力系数随横摆角的变化,如图 3 所示。图 3 中: C_d 为阻力系数。由图 3 可知:车身加装尾翼后,阻力系数不一定会降低,阻力系数变化情况与尾翼造型有关;尾翼 1 具有较好的减阻效果,尾翼 2,3 未起到减阻作用,反而使气动阻力增加;当横摆角度为 0° 时,与原模型相比,尾翼 1 使阻力系数降低了 2.58%,尾翼 2 使阻力系数增加了 7.38%,尾翼 3 使阻力系数增加了 4.93%。这是因为尾翼 1 布置于后围,将车顶来流更顺畅地导向后围,减少气流分离,减小车尾尾涡,降低阻力;尾翼 2,3 布置于车顶,自身产生了一定的形状阻力,未能很好地引导气流流向后围,致使阻力增加。

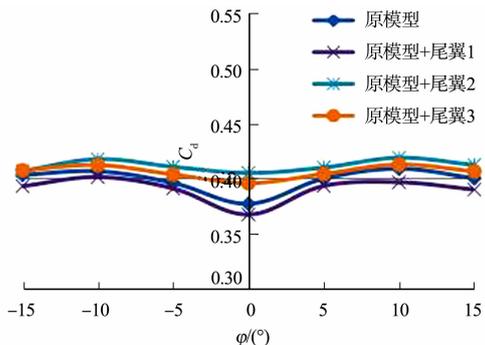


图 3 不同尾翼造型下阻力系数随横摆角的变化
Fig. 3 Variation of drag coefficients with yawing angles under different rear spoiler designs

2 数值模拟

对风洞试验中的原模型和 3 种尾翼方案进行仿真分析。

2.1 网格划分

建立计算域后,采用 STAR-CCM+ 的切面体网格模型(Trimer)生成体网格,车身表面拉伸 6 层边界层,并对车身表面和尾翼部位进行加密处理,总网格数约为 1 200 万。

车身对称面网格,如图 4 所示。尾翼网格加密,如图 5 所示。

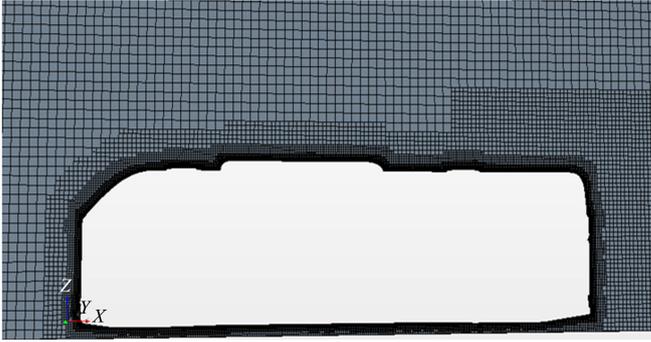


图 4 车身对称面网格

Fig. 4 Mesh of coach body on symmetrical plane

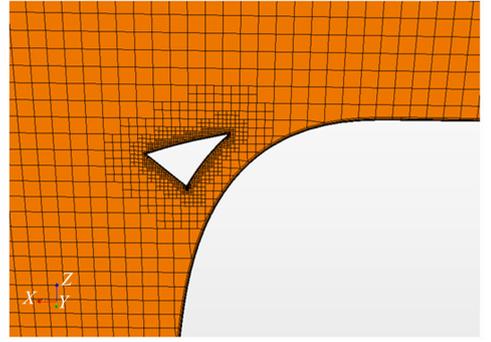


图 5 尾翼网格加密

Fig. 5 Mesh refinement of rear spoiler

2.2 计算设置

计算边界条件设置:速度入口为 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$;出口为压力出口;底面为滑移壁面;左右侧面及顶面为固定壁面;车身表面为固定壁面。湍流模型为 SST- $k-\omega$ 。

2.3 计算结果分析

2.3.1 车身表面压力 车身表面压力(p)分布,如图 6 所示。由图 6 可知:空调、天窗迎风面存在较大的正压区,产生较大形状阻力,使总阻力比无空调、天窗时增加了 12.5%。

车身表面的流线分布,如图 7 所示。由图 7 可知:气流在空调及天窗转角处都发生了分离,而这部分分离的气流沿着车身向后发展,与尾流混合在一起,使尾流变得更加复杂。

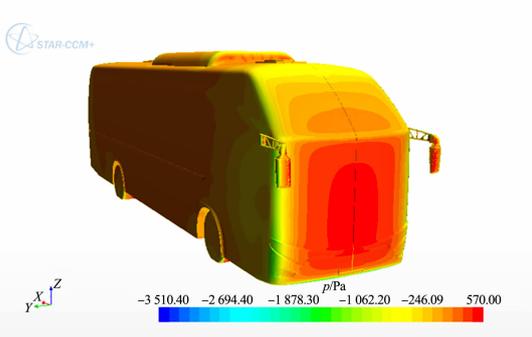


图 6 车身表面压力分布

Fig. 6 Pressure distribution on surface of coach body

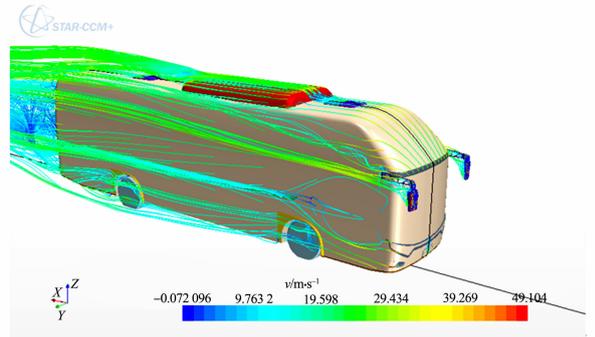


图 7 车身表面流线分布

Fig. 7 Streamlines distribution on surface of coach body

2.3.2 尾翼方案对比 1) 阻力系数变化。通过模拟计算,可得 3 种尾翼相对于未加尾翼的阻力系数变化,如表 2 所示。表 2 中: $\Delta C_{d,s}$ 为数值模拟阻力系数变化; $\Delta C_{d,t}$ 为风洞试验阻力系数变化。由表 2 可知:尾翼 1 可降低客车的阻力系数,尾翼 2,3 使客车的阻力系数增加,模拟结果与试验结果相差无几。这表明采用的模拟方案可行,后续的尾翼优化也沿用此方案。

表 2 3 种尾翼阻力系数变化

Tab. 2 Variation of drag coefficients of three rear spoilers

| 参数 | 尾翼 1 | 尾翼 2 | 尾翼 3 |
|-----------------------|-------|-------|-------|
| $\Delta C_{d,s} / \%$ | -2.38 | +8.85 | +5.17 |
| $\Delta C_{d,t} / \%$ | -2.58 | +7.38 | +4.93 |

2) 车身压力图、速度图分析。车身尾部压力分布图,如图 8 所示。由图 8 可知:尾翼 3 安装于车顶,其迎风面存在正压区,产生形阻,造成整车阻力增加(尾翼 2 情况类似);尾翼 1 位于后围,具有扰动尾流的作用,达到一定的减阻效果。

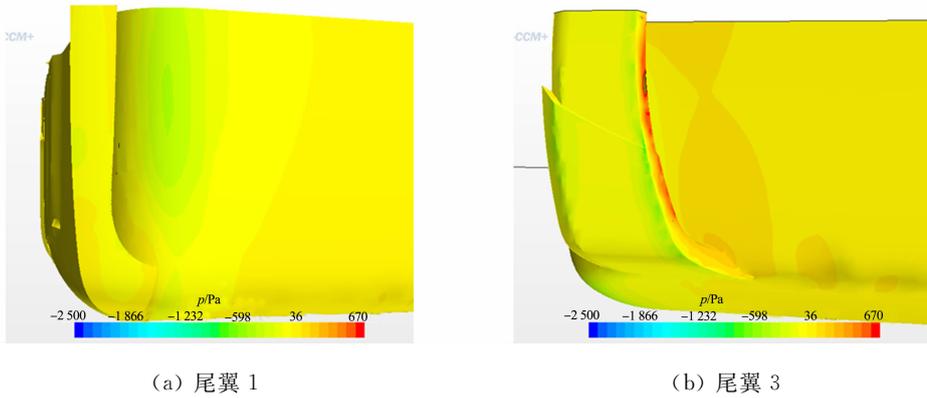


图 8 车身尾部压力分布图

Fig. 8 Pressure distribution diagram at rear of coach body

车身尾部纵向对称面的速度分布图,如图 9 所示。由图 9 可知:未加尾翼之前,车身尾部后面尾涡区域(红色区域)较大,采用尾翼 1 后,尾涡区域明显减少,尾涡能量耗散减少,这对减少客车阻力是有利的;采用尾翼 2,3 后,车身尾部尾涡虽有改善,但在靠近尾翼 2,3 区域却出现尾涡,故车身阻力增大。

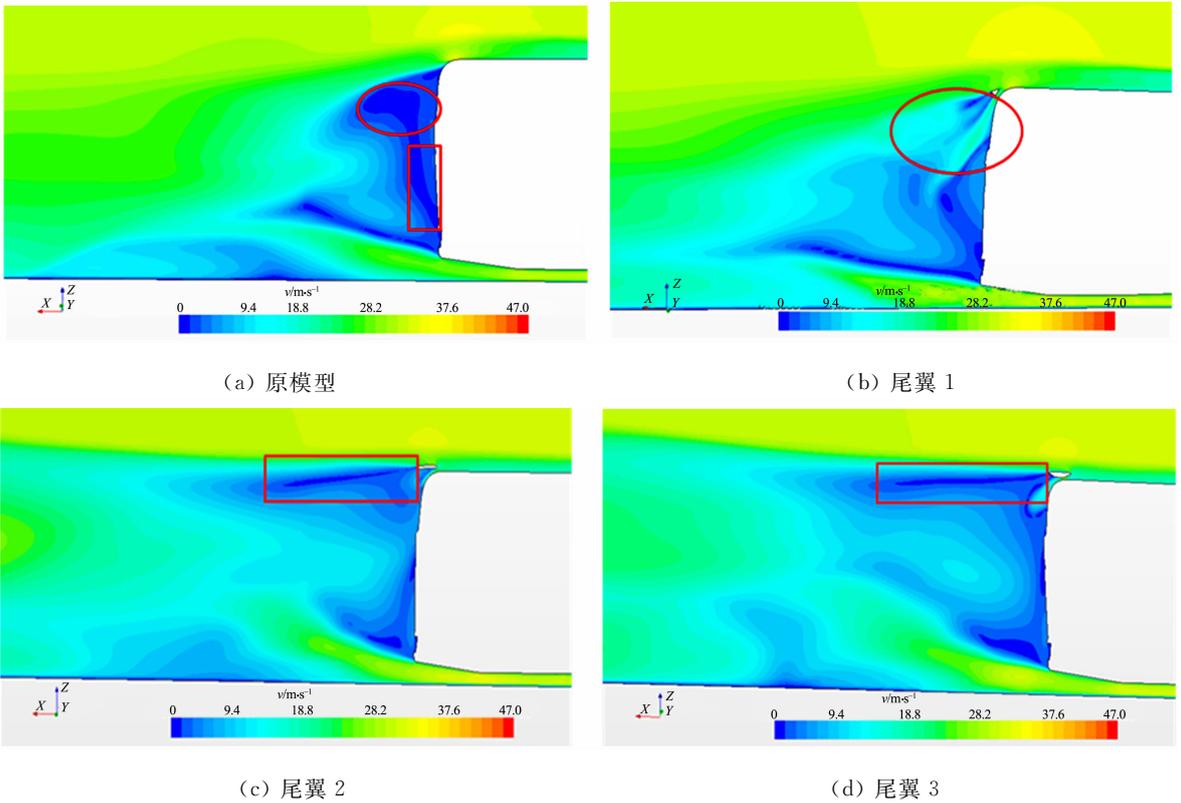


图 9 车身尾部纵向对称面的速度分布图

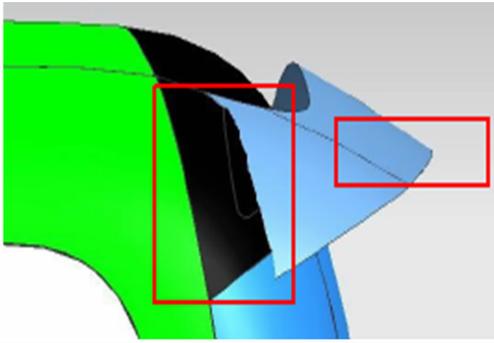
Fig. 9 Velocity distribution diagram of longitudinal symmetrical plane at rear of coach body

2.3.3 尾翼优化 由以上风洞试验和数值模拟可知,尾翼 1 有一定减阻效果。为了得到更好的减阻效果,对尾翼 1 进行优化,优化工作主要从造型和安装位置两方面展开。

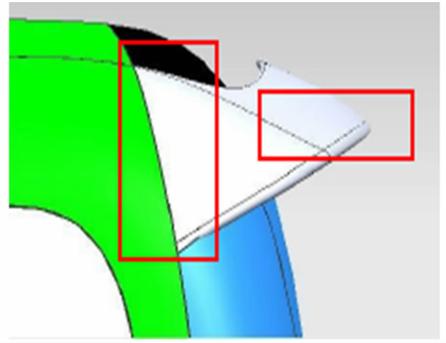
1) 造型优化。为了使气流不在尾翼与后围结合处发生分离,对其进行修改。

尾翼 1 修改前、后的侧视图,如图 10 所示。由图 10 可知:修改后尾翼过渡更加平顺,且将尾翼前、后沿尖角倒圆。

将尾翼截面的三角形形状下端一角截断,使其截面由三角形变为四边形。尾翼修改前、后尾部对称面速度分布图,如图 11 所示。由图 11 可知:尾翼修改后,阻力下降 11.8%,原因是尾翼修改后,尾翼后方的尾涡变小,故阻力变小。



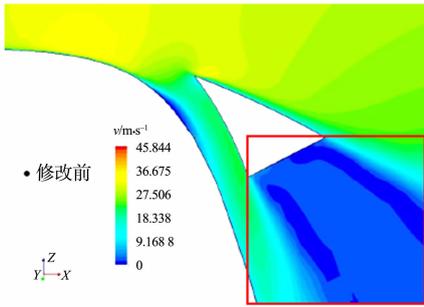
(a) 修改前



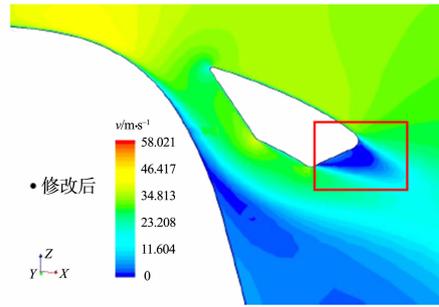
(b) 修改后

图 10 尾翼 1 修改前、后的侧视图

Fig. 10 Side view of rear spoiler 1 before and after modification



(a) 修改前



(b) 修改后

图 11 尾翼修改前、后尾部对称面速度分布图

Fig. 11 Velocity distribution diagram of rear symmetrical plane before and after modification of rear spoiler

2) 安装位置优化。i) 调整尾翼与后围的距离。尾翼与后围的距离示意图,如图 12 所示。图 12 中: L 为尾翼与后围的距离。

经计算可知,尾翼与后围的距离分别为 10, 20, 30, 40, 48.67, 50, 80, 100 mm, 对应的阻力系数变化分别为 0%, 0%, -0.16%, 0%, 0%, 0%, +0.32%, +0.48%。

由此可知,随着尾翼与后围的距离的变化,阻力系数基本没有变化。

尾部对称面的速度分布,如图 13 所示。

由图 13 可知:当 $L=10$ mm 时,由于尾翼与后围间隙较小,气流无法通过间隙;当 $L \geq 80$ mm 时,气流直接掠过尾翼,流向车尾;当 20 mm $\leq L \leq 50$ mm,顶盖干净的气流通过间隙冲刷后窗玻璃尘土,起到除尘作用。

因此,尾翼与后围的设计距离可以定为 20~50 mm。

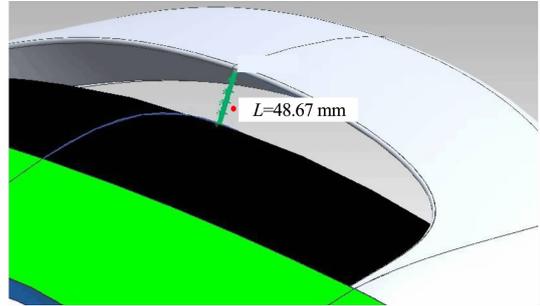
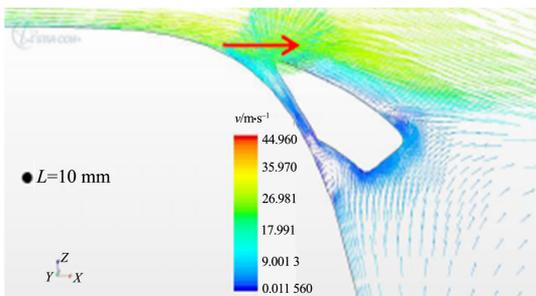
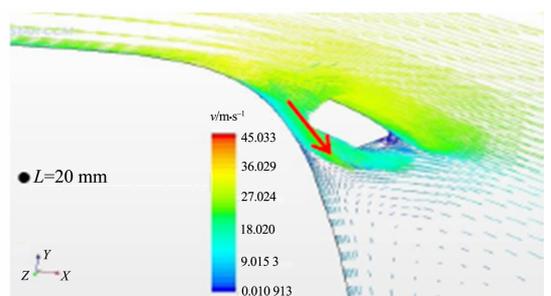


图 12 尾翼与后围之间的距离示意图

Fig. 12 Schematic diagram of distance between rear spoiler and rear wall

(a) $L=10$ mm(b) $L=20$ mm

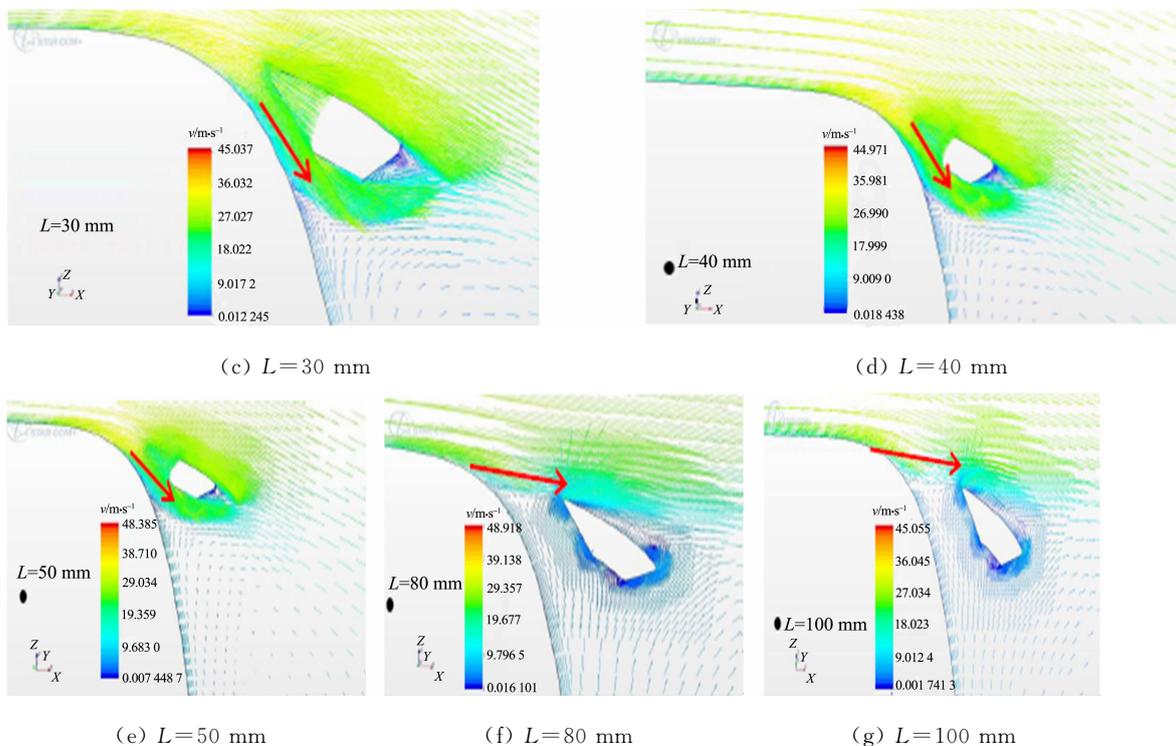


图 13 尾部对称面的速度分布

Fig. 13 Velocity distribution of rear symmetrical plane

ii) 调整尾翼倾角。将尾翼与水平面间夹角(即尾翼倾角 θ)改变为 $4^\circ, 8^\circ, 12^\circ, 16^\circ, 20^\circ, 25^\circ$, 车尾不同尾翼倾角示意图, 如图 14 所示。

不同尾翼倾角下阻力系数的变化, 如表 3 所示。

由表 3 可知: 尾翼倾角从 4° 增加到 16° , 整车阻力系数呈下降趋势; 尾翼倾角从 16° 增加到 25° , 阻力系数呈上升趋势; 当尾翼倾角为 16° 时, 相对不加尾翼的车身, 阻力系数下降最多, 达 11.8%。

文献[18]的结果表明, 客车风阻系数降低 10% 以上, 油耗可降低 4% 以上, 100 km 油耗可节省约 1.0 ~ 1.5 L, 节能效果较为可观。

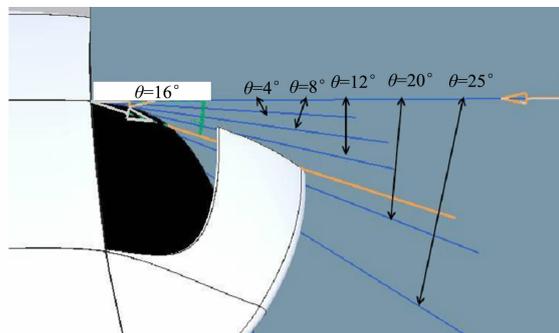


图 14 车尾不同尾翼倾角示意图

Fig. 14 Schematic diagram of different inclination angles of rear spoiler at rear of coach

表 3 不同尾翼倾角下阻力系数的变化

Tab. 3 Variation of drag coefficients under different inclination angles of rear spoiler

| 参数 | 原模型 | $\theta=4^\circ$ | $\theta=8^\circ$ | $\theta=12^\circ$ | $\theta=16^\circ$ | $\theta=20^\circ$ | $\theta=25^\circ$ |
|-------------------|-----|------------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $\Delta C_d / \%$ | 0 | -6.4 | -6.2 | -9.5 | -11.8 | -9.5 | -1.4 |

3 结论

对大客车尾翼进行风洞试验和数值模拟研究, 并对尾翼进行优化, 可得以下 3 个结论。

- 1) 尾翼最好布置在后围, 以避免布置在顶盖部位产生形阻。
- 2) 尾翼与车身的结合部应尽量平顺, 外形边角尽量圆滑化, 避免出现尖的棱角。
- 3) 尾翼在后围的安装位置也需优化, 使其达到最佳气动效果, 如优化后可有利于后风窗除尘, 并可减阻 11.8%, 节能效果明显。

参考文献:

[1] 邵景峰, 左辉辉, 胡兴军. 某 SUV 气动减阻优化及其流场机制[J]. 汽车工程, 2024, 46(2): 356-365. DOI: 10. 19562/

- j. chinasa. qcgc. 2024. 02. 018.
- [2] 查云飞,石小山,吴昊,等. 基于主动倾斜式尾翼的车辆气动特性研究[J]. 汽车工程,2023,45(3):489-500. DOI:10.19562/j. chinasa. qcgc. 2023. 03. 016.
- [3] 张源,王禹臣. 某轻型卡车风阻优化及试验验证[J]. 装备制造技术,2023(3):118-121,129. DOI:10.3969/j. issn.1672-545X. 2023. 03. 029.
- [4] BEIGMORADI S,VAHDATI M. Optimal configuration of a hatchback rear end considering drag and stability objectives[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,2019,41:334. DOI:10.1007/s40430-09-1837-01.
- [5] KAJIWARA S. Passive variable rear-wing aerodynamics of an open-wheel racing car[J]. Automotive and Engine Technology,2017,2:107-117. DOI:10.1007/s41104-017-0021-9.
- [6] 许建民,范健明. 厢式半挂汽车列车附加减阻装置的减阻效果及机理分析[J]. 公路交通科技,2019,36(12):134-144. DOI:10.3969/j. issn.1002-0268. 2019. 12. 017.
- [7] 赖晨光,斯洋,陈祎,等. 一种新型车用导流器的研究及其气动性能优化[J]. 汽车工程,2020,42(5):600-607. DOI:10.19562/j. chinasa. qcgc. 2020. 05. 006.
- [8] 王庆洋,黄文鹏,赖晨光,等. 基于气动附件的重型货车空气动力学减阻研究[J]. 汽车工程,2020,42(6):746-752. DOI:10.19562/j. chinasa. qcgc. 2020. 06. 006.
- [9] 张英朝,李昀航,郭子瑜,等. 长头重型卡车气动减阻优化[J]. 吉林大学学报(工学版),2022,52(4):745-753. DOI:10.13229/j. cnki. jdxbgxb20200931.
- [10] 许建民,莫靖宇,龚晓岩,等. 侧风环境下减阻装置对重型货车气动特性的影响[J]. 公路交通科技,2022,39(1):136-145. DOI:10.3969/j. issn.1002-0268. 2022. 02. 018.
- [11] 庄超,王欢,王晓宇,等. 平头卡车气动减阻设计及试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(6):45-52. DOI:10.16339/j. cnki. hdxzbkb. 2023168.
- [12] 杨小龙,龚繁,龚政,等. 基于非稳态模拟的SAE车模气动减阻降噪研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2023,50(2):198-208. DOI:10.16339/j. cnki. hdxzbkb. 2022208.
- [13] 曹茂波. 基于市场分析的我国客车行业发展趋势预测[J]. 全国流通经济,2022(13):125-128. DOI:10.16834/j. cnki. issn1009-5292. 2022. 13. 015.
- [14] 彭倩,胡汉桥,黄红武,等. 前围造型对大客车气动特性影响研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(6):158-162,176. DOI:10.3969/j. issn.1674-0696. 2016. 06. 32.
- [15] 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):48-53. DOI:10.15917/j. cnki. 1006-3331. 2018. 02. 002.
- [16] 陆润明,廖抒华,覃紫莹,等. 尾部空气动力附加装置对客车气动阻力的影响[J]. 广西科技大学学报,2019,30(4):5-8,13. DOI:10.16375/j. cnki. cn45-1395/t. 2019. 04. 008.
- [17] 许建民,赵军. 基于CFD的客车空气动力学分析[J]. 集美大学学报(自然科学版),2012,17(3):195-199. DOI:10.19715/j. jmuzr. 2012. 03. 007.
- [18] 胡兴军,王靖宇,杨博. 汽车空气动力学[M]. 北京:人民交通出版社,2022.

(责任编辑:钱筠 英文审校:吴跃勤)