

基于 CFD 仿真技术的城市客车除霜系统合理性评价

曹红军¹, 胡子康², 朱红军¹, 吴永卓¹, 胡俊杰¹

(1. 中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007;

2. 武汉华夏理工学院, 武汉 430223)

摘 要:在设计初期采用 CFD 仿真与理论验算对城市客车前风挡玻璃除霜效果进行模拟,验证了除霜系统设计的合理性,并以此为基础对除霜风道系统进行优化。该优化方案在满足前风挡玻璃除霜要求的同时,能够节省制造成本并缩短研制周期。

关键词:城市客车; 除霜; 对流换热系数

中图分类号:U469.1; U463.85⁺1 **文献标志码:**A **DOI:**10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.01.009

Rationality Evaluation of City Bus Defrosting System Based on CFD Simulation Technology

CAO Hongjun¹, HU Zikang², ZHU Hongjun¹, WU Yongzhuo¹, HU Junjie¹

(1. CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China;

2. Wuhan Huaxia Institute of Technology, Wuhan 430223, China)

Abstract: In the initial design stage, the authors simulate the defrost effect of the front windshield glass using CFD simulation and theoretical verification to verify the rationality of the defrost system and optimize the defrost air duct system to meet the defrost requirements of the front windshield glass. Meanwhile, it can save manufacturing costs and shorten the development cycle.

Key words: city bus; defrost; convective heat transfer coefficient

城市客车前风挡玻璃必须为驾驶员提供良好的视野环境。若前风挡玻璃结霜或结雾将严重影响车辆行驶的安全性^[1]。因此, JT/T 216—2020《客车空调系统技术条件》^[2]对 M₃ 类客车的前风挡玻璃除霜提出了明确要求, 规定必须在限定时间内清除指定范围内的霜雾。

众多学者^[3]针对城市客车前风挡玻璃的除霜效果开展了多因素分析, 并基于分析结果优化除霜风道结构。这为同类车型的除霜系统设计提供了重要依据与实践指导。与此同时, 随着计算机辅助设计的成熟应用, 除霜除雾仿真理论模型不断完善, 分析精度显著提高。在此背景下, 不少学者^[4-5]借助 CFD 仿真技术对前风挡玻璃除霜结构进行评估, 其仿真结果与试验数据吻合度较高, 进一步验证了该方法的可靠性。基于此, 本文采用 CFD 仿真技术, 对某新车型除霜系统的合理性进行评估。

1 除霜系统结构与仿真模型

某 7 m 城市客车前风挡玻璃除霜结构如图 1 所示。图 1 中的仪表台风腔从左至右(左侧为驾驶员侧)共设有 6 个出风口。为适应前围安装空间约束, 该风腔进风端通过一段异型风管与除霜器出风口相连。在仿真建模中, 为简化计算并聚焦于风道与风窗的流动分析, 未建立除霜器本体的详细三维模型, 而将其出风口等效为 2 个直径为 100 mm 的圆孔, 以保证总出风面积与实际状态一致。本文以 JT/T 216—2020 标准定义的前风挡玻璃除霜区域(A 区、A' 区与 B 区)为研究对象, 通过计算其规定时间节点的除霜面积占比, 实现了对暖风除霜效果的量化评估。具体除霜指标如下: 除霜试验开始 20 min 后, A 区除霜面积应超过 80%; 除霜试验开始 25 min 后, A' 区除霜面积应超过 80%; 除霜试验开始 40 min 后, B 区除霜面积应超过 95%。

收稿日期: 2025-03-14。

第一作者: 曹红军(1984—), 男, 工程师, 主要从事 CFD 仿真相关工作。E-mail: 314081668@qq.com。

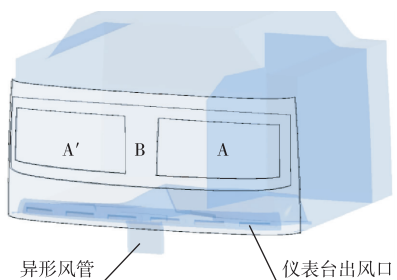


图1 前风挡玻璃除霜系统仿真模型

2 除霜热功率评估

除霜器的工作原理是加热空气并使其流动。因空气中水蒸气含量较低,在能量分析中可忽略其相变潜热,故除霜器热功率^[6]与进出口空气温升的函数表达式可简化为式(1)。

$$\Delta T = P_{in} / (\rho \cdot v \cdot A \cdot C) \quad (1)$$

式中: ΔT 为空气通过除霜器的温升(出口与进口温度之差),K; P_{in} 为除霜器制热功率,kW; ρ 为空气密度,取 1.293 kg/m^3 ; v 为除霜器出口风速,依据试验数据取值为 7 m/s ; A 为除霜器出风口面积,取值为 15700 mm^2 ; C 为空气比热容,取值为 $1004 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

根据式(1)计算,当 $P_{in}=5 \text{ kW}$ 时, $\Delta T \approx 35 \text{ }^\circ\text{C}$;当 $P_{in}=8 \text{ kW}$, $\Delta T \approx 56 \text{ }^\circ\text{C}$ 。实车测试表明,除霜器出风口温度超过 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,前挡风玻璃的除霜效果较好。为确保在 25 min 内达到规定的除霜面积要求,需保证 8 kW 除霜器的进风口空气温度不低于 $-6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。当车辆运行地区冬季日最低温低于 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 的累计天数占比超过 30% 时,建议为车辆配备带自加热功能的前风挡玻璃。

3 除霜效果评估

当除霜器热功率满足前风挡玻璃除霜需求时(具体表现为出口温度不低于 $50 \text{ }^\circ\text{C}$,且配置为普通前风挡玻璃),即可进入除霜效果的仿真评估阶段。

基于三维实体模型建立前风挡玻璃除霜流场仿真模型并对除霜效果进行仿真评估^[7]。仿真模型边界信息如下:①壁面条件:乘员舱与除霜风道壁面设为固定、无滑移的绝热壁面;前风挡及侧窗玻璃设为固定、无滑移壁面,并赋予对流换热条件。②出口条件:压力出口的静压设为 101.325 kPa (标准大气压)。③入口条件:速度入口的速度设为 7 m/s ,温度设为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 。④初始条件:前风挡玻璃表面的初始霜

层厚度设为 0.5 mm 。

3.1 仪表台出风口出风角度影响评估

图2所示的仪表台出风口采用扁平化结构,且出风方向可调。为此,本文对比分析了高角度与低角度两种出风方案对除霜效果的影响^[8]。

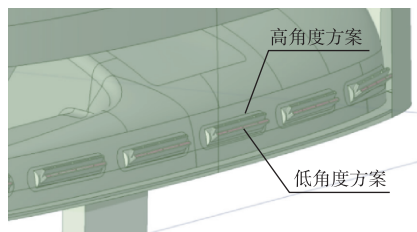


图2 仪表台出风口结构

基于图2中的两种方案进行除霜系统流场仿真分析,并得到前风挡玻璃近壁面流速的仿真结果(见图3)。

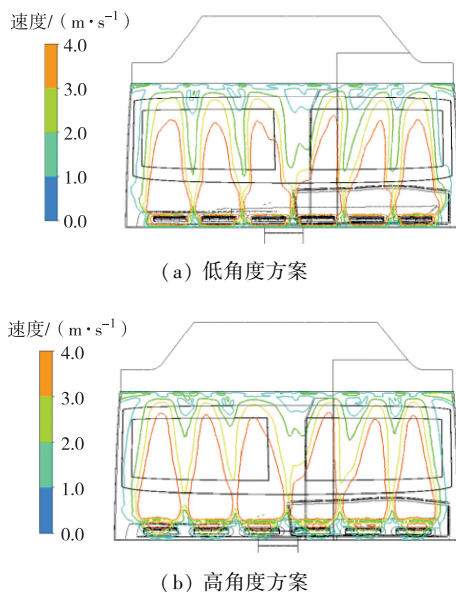


图3 前挡风玻璃近壁面流速分布图

分析图3可知,近壁面流速的降低会导致其局部对流换热系数减小,致使单位时间内传递给霜层的热量不足,从而延缓了霜层的融化速度。为保证A区、A'区与B区等重点除霜区域的除霜效率,应控制这些区域的近壁面流速不低于 1.5 m/s 。

仿真结果(见图3)表明,高角度方案的近壁速度分布优于低角度方案,能更有效地提升除霜效果。具体数据显示,在各区域(A区、A'区和B区)内,低角度和高角度方案近壁速度高于 2 m/s 的面积占比分别为 72.5% 和 81.4% 。这说明提高出风角度对该车型的除霜性能具有积极影响。

本文展示的高角度方案并非最佳方案,仪表台出风口角度需继续向上抬高,扩大A区、A'区和B区近壁高速风区域。受篇幅所限,本文未展示最佳角度方案的仿真结果,该方案中出风口延伸线与前风挡玻璃的交汇点位于B视区下沿。

3.2 前风挡玻璃外表面热边界影响评估

热风从仪表台出风口流出后,吹拂前风挡玻璃表面进行加热,从而达到融化霜层的目的。前风挡玻璃内侧高温气体流线图如图4所示。在前风挡玻璃内表面受高温气体加热的同时,前风挡玻璃外表面通过对流和辐射向环境散热,抵消部分加热效果。分析表明,除霜效能最终取决于内表面加热与外表面散热之间的净热通量。因此,要保证玻璃获得足够的除霜净热通量,系统就必须确保加热功率在运行时始终高于热损失。

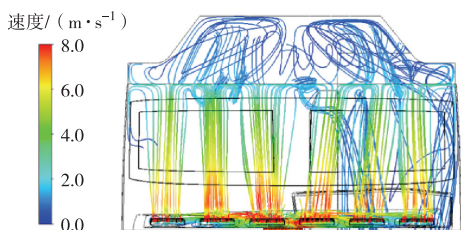


图4 前挡风玻璃内侧高温气体流线图

在自然对流情况下,壁面对流换热系数约为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,并随风速增大而显著增加。例如,风速超过 10 m/s 时,最大对流换热系数可达 $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 以上。为量化外表面对流换热对除霜效果的具体影响,本节基于3.1节的高角度方案,对比分析了前风挡玻璃两种热边界条件下的除霜效果:一种为外表面无对流换热,另一种为外表面对流换热系数 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。两种工况的除霜效果对比如图5与图6所示。

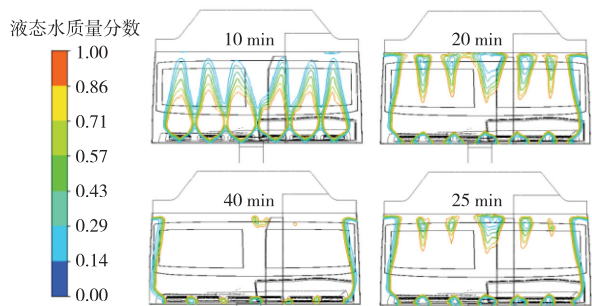


图5 外表面无对流换热的除霜效果

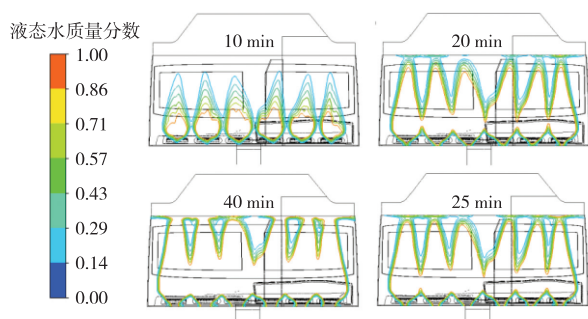


图6 外表面对流换热系数为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 的除霜效果

基于仿真结果提取的精准融霜面积数据显示,当外表面无对流换热时,除霜试验开始 20 min 、 25 min 与 40 min 后,A区、A'区及B区的融霜面积比分别为 87.67% 、 95.31% 和 93.13% ;而当外表面对流换热系数增至 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,对应时间节点的融霜面积比则分别下降至 61.77% 、 73.06% 和 74.98% 。对比可见,在三个关键时间节点,各区域融霜面积比均降低 18% 以上。上述对比说明,在寒冷且多风的地区,高速气流会显著增强外表面对流换热,从而使常规除霜效果大幅减弱。为保证行车视野安全,建议为此类地区的车辆配置带自加热功能的前挡风玻璃,以提供辅助除霜能力。

由图5可知,前风挡玻璃左右圆弧处除霜效果不佳,导致除霜试验开始 40 min 后B区仍残留较多霜层,其融霜面积未达到 95% 的技术要求。结合图3(b)分析,该区域除霜效果不佳的直接原因在于其近壁流速较低,单位时间内由热空气传递给霜层的热量减少,导致除霜效果差。

3.3 仪表台出风口布置优化

为解决图3(a)所示的前风挡玻璃两侧圆弧处除霜效果不佳问题^[9],本次改进参考了某车型的设计方案,即在仪表台两侧增加直径 50 mm 的圆形出风口(见图7)。该出风口的尺寸较小,便于在圆弧面仪表台上安装。

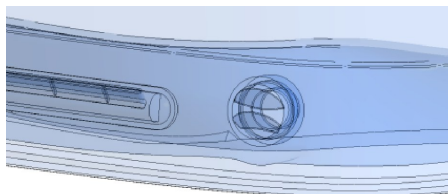


图7 仪表台常用圆形出风口结构

基于某车型同类设计的仿真结果(见图8)可知,在仪表台两侧增加圆形出风口能显著提升前风挡玻

璃左右圆弧处的近壁风速。因此,本次改进预计能达到类似效果,从而改善目标车型该区域的除霜性能。

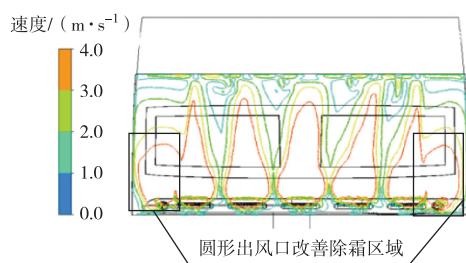


图8 某同类车型近壁风速分布

4 结束语

城市客车除霜系统的设计是一项综合性工程,涵盖除霜器选型与安装、连接管路及仪表台风腔设计,以及前风挡玻璃外形结构等多个相互关联的方面。在新车型设计初期,面对复杂的系统耦合关系,仅凭经验往往难以保证设计方案的合理性。因此,在开发早期引入CFD仿真分析与理论验算进行正向设计至关重要。本文正是通过系统地应用这一方法,对除霜系统进行了设计与优化。实践表明,应用这一正向设计流程,可在提升设计质量与可靠性的同时,有效控制成本并缩短开发周期,进而为提升产品市场竞争

力提供关键技术保障。

参考文献:

- [1] 莫荣博. 基于CFD的某商用车HVAC除雾性能分析及优化[J]. 企业科技与发展, 2019(5): 56-58.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 客车空调系统技术条件: JT/T 216—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020: 15-17.
- [3] 郭旭光, 汤波, 罗杨, 等. 汽车风窗玻璃除霜影响因素分析[J]. 轻型汽车技术, 2016(11): 22-24.
- [4] 刘宁, 李龙勇, 闫鑫, 等. 基于CFD的某商用车除霜系统仿真优化[C]//中国汽车工程学会. 2023中国汽车工程学会年会论文集(4), 2023: 552-560.
- [5] 王东. 汽车风挡玻璃除霜效果CFD分析[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(10): 71-72.
- [6] 于翰林. 基于Star-CCM+的轻型卡车空调除霜性能数值模拟及试验探究[J]. 机械设计, 2021, 38(S1): 115-119.
- [7] 孙城, 李文超. 出风道性能优化对挡风玻璃除霜性能影响分析[J]. 机械设计与制造, 2026(1): 77-83.
- [8] 吴宾, 郭鹏, 辛俐, 等. 汽车除霜格栅角度对前风窗玻璃的除霜性能影响[C]//第十四届全国水动力学学术会议暨第二十八届全国水动力学研讨会文集(上册), 北京: 海洋出版社, 2017: 824.
- [9] 崔行振. 电动汽车空调除霜风道系统流场分析及优化研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [5] 杨东. 智能车辆自动驾驶域控制器设计与实现[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.
- [6] 殷玮. 智能驾驶系统的混合架构设计[J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(1): 37-40.
- [7] International Organization for Standardization. Road vehicles—data communication between sensors and data fusion unit for automated driving functions—logical interface: ISO 23150:2023[S]. 2nd ed. Geneva: ISO, 2023: 19-25.
- [8] 周文鹏, 路林, 王建明. 多传感器信息融合在无人驾驶中的研究综述[J]. 汽车文摘, 2022(1): 45-51.
- [9] International Organization for Standardization. Road vehicles—unified diagnostic services(UDS)—Part 1: application layer: ISO 14229-1:2020[S]. 3th ed. Geneva: ISO, 2020: 3-25.
- [10] 韩玉, 马晓磊, 陶砚盟, 等. 面向驾驶需求的多任务集成式决策控制方法[J]. 中国公路学报, 2024, 37(10): 249-266.
- [11] 徐洋. 先进驾驶员辅助驾驶系统关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [12] PALLIERER R, SCHMELZ B. 适用于高性能车载计算平台的自适应AUTOSAR[J]. 汽车与配件, 2019(3): 43-45.

(上接第33页)