

基于 CFD 的商用车挡风玻璃的除霜性能分析

吴后吉, 黄玉婷, 纪绪北, 潘亚南

(比亚迪汽车工业有限公司, 广东 深圳 518118)

摘要:应用 CFD 仿真方法分析某纯电动客车的除霜效果,采用薄膜除冰模型,考虑冰霜厚度、温度、玻璃前冰层随除霜时间变化情况,对其进行稳态仿真和方案改进,并进行瞬态仿真和实车验证。

关键词:商用车; 挡风玻璃; 除霜性能; CFD 仿真

中图分类号: U463.85⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1006-3331(2023)02-0036-05

Analysis of Defrosting Performance for Commercial Vehicle Windscreen Based on CFD

WU Houji, HUANG Yuting, JI Xubei, PAN Yanan

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

Abstract: This paper uses the CFD simulation method to analyze the defrosting effect of a pure electric bus, which adopts a film de-icing model with considering the frost thickness, temperature and ice changes in the windscreen with the defrosting time to carry out the steady-state simulation analysis, and does transient simulation and real vehicle verification.

Key words: commercial vehicle; windscreen; defrosting performance; CFD simulation

车辆的除霜性能对车辆的安全行驶有着重要影响。现有标准大多针对乘用车,对于商用车的除霜要求,国标^[1]为非认证项,美标为认证项^[2]。本文通过对某商用车除霜管道的流场进行仿真分析,并与试验结果比较,提出不同的改进方案,改善了前挡风玻璃的除霜效果。

1 仿真分析

大部分的 CFD 仿真基于稳态分析,仅考虑流体速度分布情况^[3-10]。但由于除霜效果与温度密切相关,因此,分析瞬态温度场更为准确^[11-12]。本文采用 STAR-CCM+ 仿真软件,除进行稳态分析外还进行瞬态分析,瞬态分析中考虑了冰层厚度、温度、融冰随时间变化的情况。

1.1 仿真模型建立

首先对几何模型进行前处理,简化除霜器内模型,并对不影响分析精度的车身内部、顶部、驾驶员后

围区域进行适当简化;保留风窗玻璃、风腔、风口、仪表台的详细数模,形成封闭的计算域。图 1 为网格划分前经过适当简化的几何模型。

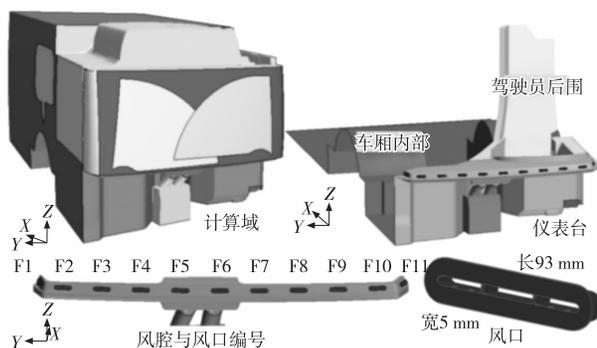


图 1 经过适当简化的几何模型

然后再进行网格划分。整个计算域采用切割体网格,包含拉伸网格与棱柱层网格,并对风口、风腔、风窗玻璃进行网格加密。求解的体网格数量为 3 733 324。

收稿日期: 2022-10-29。

第一作者: 吴后吉(1986—),男,硕士;主要从事汽车空气动力学、汽车 CAE 仿真技术工作。E-mail: wu.houji@byd.com

通讯作者: 黄玉婷(1996—),女,硕士;主要从事汽车空气动力学、汽车 CAE 仿真技术工作。E-mail: huang.yuting3@byd.com。

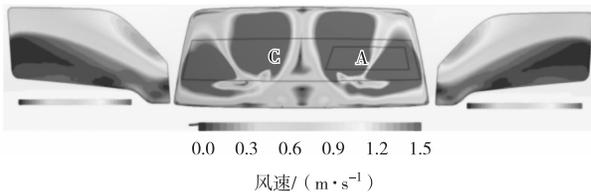
1.2 稳态仿真分析及方案改进

1.2.1 原方案仿真分析

稳态分析主要研究流体域中空气的流动情况, 为方案改进及瞬态分析奠定基础。

首先对材料、边界条件、计算参数进行设置。稳态计算模型中流体区域为不可压缩空气, 恒密度, 分离流, 湍流 Realizable K-Epsilon Two-Layer 模型, Simple 迭代算法。入口为质量流量入口: 0.1069 kg/s ($325 \text{ m}^3/\text{h}$), 根据风机的风量试验曲线与仿真匹配所得, 方向垂直于入口边界; 出口为压力出口 $P=0 \text{ Pa}$; 其他边界为壁面边界。初始速度为 0 m/s , 温度为 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 。稳态仿真结果如下。

除霜器风量为 0.098679 kg/s ($300 \text{ m}^3/\text{h}$), 图 2 为原方案的除霜速度图, 根据稳态分析结果, 风速 $\geq 1.5 \text{ m/s}$ 的玻璃区域分布于前窗两侧, 侧窗表面风速偏低。



注: 前挡风玻璃黑色区域为玻璃表面风速 $\geq 1.5 \text{ m/s}$ 区域。

图 2 原方案除霜速度图

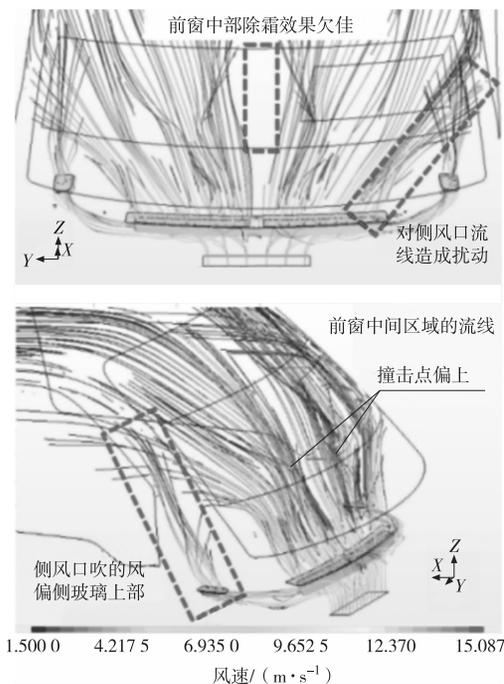


图 3 原方案风除霜流线图

根据风速流线图(图 3)可更直观地看到除霜情况, 颜色由浅到深表示速度值由小到大。前窗中部基本没有流线, 且风吹至玻璃的撞击点偏上, 除霜效果差; 前风口两侧的流线对侧风口的流线产生扰动, 且侧风口未较好地朝向侧窗视野区, 风大部分吹向侧窗上部, 多种因素导致侧窗视野区基本没有风速 $\geq 1.5 \text{ m/s}$ 的风吹过。

1.2.2 方案改进

根据除霜分析结果和对速度流线的分析, 分别对仪表台、前风口、风腔和侧风口进行了针对性的改进, 如图 4、图 5 和图 6 所示。

如图 4 所示, 将仪表台上的侧风口向车后方向移动, 减小侧风口与视野区的距离, 可以提高侧除霜效果。对于前风口两侧扰流问题, 通过堵住两边三角区域风口, 可有效减少对侧风口流线的扰动。前窗中部除霜效果欠佳与前风口内的导风板角度有关, 因此将导风板方向调整为垂直, 增加对前窗中间区域的除霜风量。针对前风口撞击点偏上的情况, 采用微调前风口导风板弧度的方式, 可有效降低吹出风碰撞点的位置。

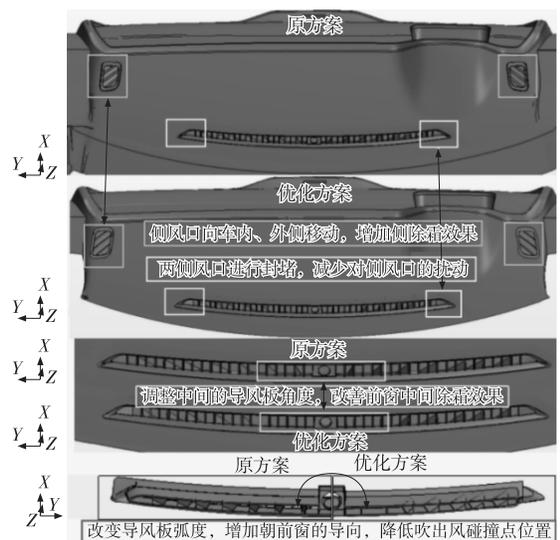


图 4 对仪表台和前风口导风板的优化

受仪表台不可调整的影响, 仅微调侧风口的位置无法有效改善侧除霜效果, 因此通过改变风腔形状来增加对侧窗除霜的效果。原侧风口下的风腔空间大, 风道仅有垂直向上 (Z 轴) 的导向, 易在侧风口下形成漩涡低速区, 且风吹出后易发散, 较难吹至侧窗视野区。如图 5 所示, 通过减小风腔尾部空间, 风道增加

朝向侧窗的倒角,对导流至侧窗具有重要影响,且风口具有朝向侧窗的倾角,对风流畅地吹向侧窗具有加成作用。

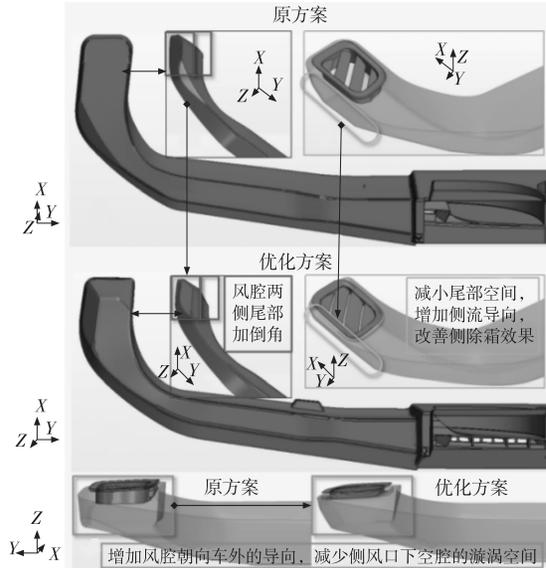


图5 对风腔的优化

此外,侧风口的格栅对风向和导向也具有影响。如图6所示,将格栅的法向方向对准侧窗视野区,可增加导向。同时,增加格栅宽度,使俯视风口时无法看见风腔内部结构,可有效减少发散流线,加强风的导向。

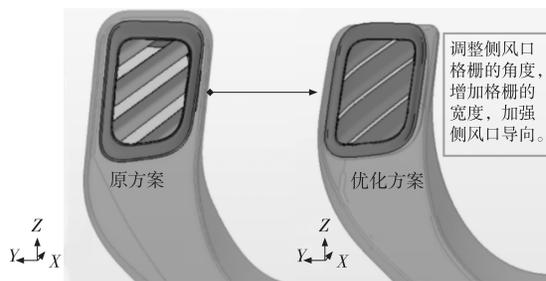
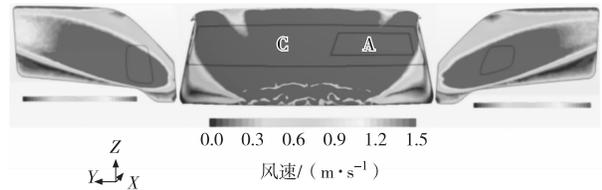


图6 对侧风口的优化

1.2.3 方案改进效果

优化后,对其进行除霜分析,图7的除霜速度分布结果表明,前窗中部除霜效果得到改进,侧窗视野区也能有较多风吹过,除霜效果得到较大提高。图8的除霜流线图表明,前风口中部有流线分布,且撞击点有所降低;前风口两侧的风对侧风口不再产生干扰,且恰好覆盖分布于前窗视野区;侧风口吹出的风的流线也朝向侧窗视野区,除霜效果显著增强。



注:黑色区域为玻璃表面风速 ≥ 1.5 m/s区域。

图7 优化方案除霜速度

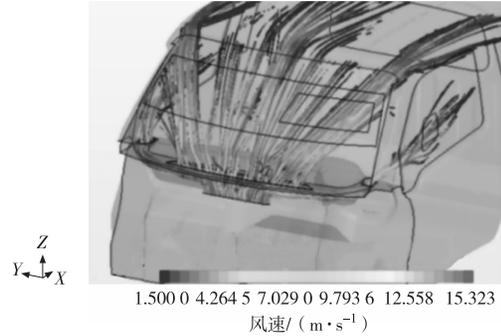


图8 优化方案的除霜流线图

通过对各个影响因素的微调,既不大改仪表台和风道,也不影响已经完成的仪表台制作,仅通过小改达到除霜要求。方案改进后,前窗C区玻璃表面风速 ≥ 1.5 m/s的区域面积占比由85.1%提高至99.9%,A区由57.6%提高至92.0%,主驾侧窗视野区由0%提高至100%,副驾由0%提高至90.6%。

1.3 瞬态仿真分析

在稳态分析的基础上进行瞬态分析,求能量方程,确定计算域的温度场分布和风窗玻璃上的冰层随时间融化的过程。

1.3.1 瞬态仿真分析前处理

利用Thin Film中的DeIcing模块处理除霜问题^[13]。采用基于边界热流的经验算法:当热气流吹至挡风玻璃时进行对流换热,挡风玻璃将热量传至玻璃外的冰层,玻璃外表面的温度一旦高于冰层温度冰就会开始融化,即除霜过程。

对于空气、风窗玻璃、冰层的物理物性见表1。

表1 空气、风窗玻璃、冰层的物理物性

	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	动力粘度/ ($\text{Pa}\cdot\text{S}$)	比热容/ [$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	导热系数/ [$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]
空气	1.127	1.86E-05	1 003.6	0.026
玻璃	2 700	-	800	0.760
冰层	920	334 960	1 960	-

考虑车窗玻璃与周围环境进行换热, 其对流换热系数的计算公式如下:

$$h = 0.6 + 6.64\sqrt{v} \quad (1)$$

式中: h 为对流换热系数; v 为车辆静止时来流风速。

首先对车窗玻璃前的冰层进行建模, 拉伸车窗玻璃层 5 层, 厚度为 5 mm, 瞬态计算设霜层厚度为 0.5 mm, 计算所得玻璃对流换热系数为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

边界条件与计算参数设置: 采用薄冰模型、恒定固体密度、不定常模型。步进 1 s, 每步迭代 10 次, 计算 1 800 s。对于出风口入口温度, 采用出风温度曲线数据, 如图 9 所示。

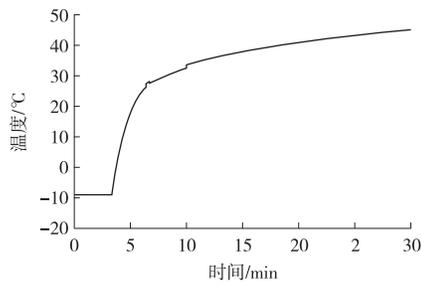
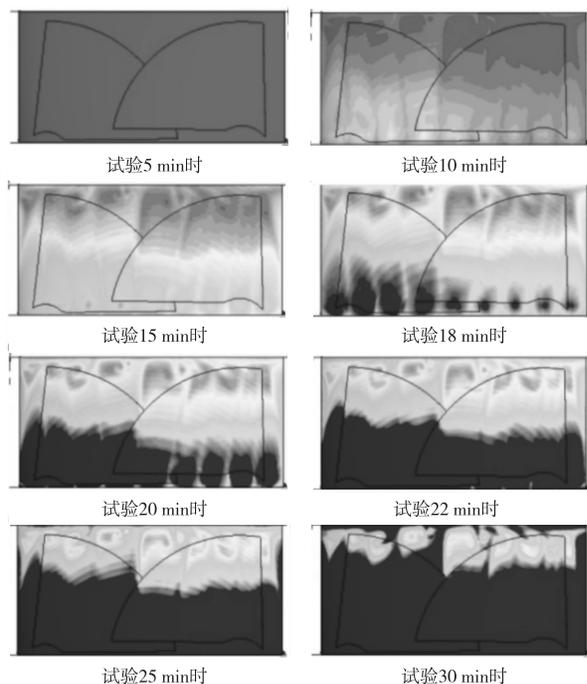


图 9 风机出风温度曲线

1.3.2 瞬态仿真结果

在稳态分析的基础上, 瞬态分析考虑了玻璃前的霜层厚度、冰层随时间融化效果, 结果如图 10 所示。



注: 黑色区域为霜层厚度 = 0 mm 区域。

图 10 除霜仿真霜层厚度随时间变化图(从车外看)

从瞬态仿真结果可知: 20 min 时除霜面积不大于 50%, 30 min 时除霜面积大于 80%; 主驾与副驾的风窗玻璃除霜效果不对称, 副驾比主驾玻璃除霜效果好。

2 实车试验验证

实车试验及仿真分析的融霜等值线结果分别如图 11 和图 12 所示。对比两图可知, 瞬态除霜前 15 min, 仿真结果的融霜速度比试验结果慢; 15 min 后, 仿真结果的融霜速度慢慢增加, 在 20 min 时与试验结果基本一致; 20 min 后仿真结果的融霜速度比试验融霜速度快; 30 min 时的仿真融霜效果与 35 min 时的试验效果基本一致。

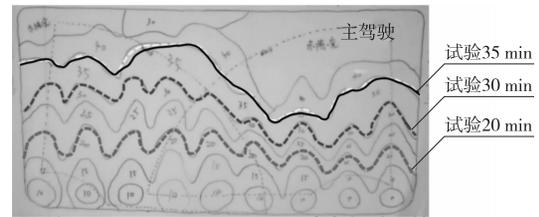


图 11 试验的融霜等值线结果(从车外看)

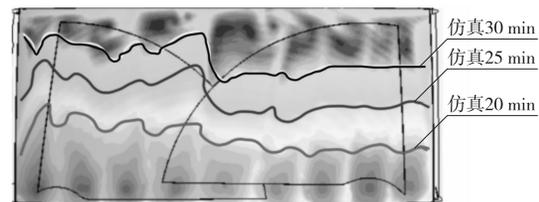


图 12 仿真的融霜等值线结果(从车外看)

仿真结果与试验结果存在差异的原因可能有: ①整车气密性影响; ②模型存在一定的误差; ③仿真输入的出风温度为风口的出风温度, 在除霜器和风腔风道中存在一定的温度损失, 导致误差。虽然不可避免会存在一定的误差, 但此仿真方法的结果与试验结果趋势基本一致。

3 结束语

通过瞬态和稳态 CFD 方法对某商用车的除霜系统进行分析, 提出改进方案, 提高了正挡风玻璃的除霜效果, 尤其是对侧面除霜的出风格栅进行了优化, 侧窗除霜的效果明显改善, 并大大减少新车研发时间和成本。

参考文献:

- [1] 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,2020:6-10.
- [2] SAE. Windshield Defrosting Systems Test Procedure and Performance Requirements-Trucks, Buses, and Multipurpose Vehicles; J381_200901 [S]. Warrendale: SAE International, 2009:4-6.
- [3] VERSTEEG H K. MALALASEKERA W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics; the Finite Volume Method[M]. New York: Wiley, 1995:50-91.
- [4] JEONG Un Yong, KOH Hyun Moo, LEE Hae Sung. Finite element formulation for the analysis of turbulent wind flow passing bluff structures using the RNG $k-\epsilon$ model[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(3):151-169.
- [5] 傅立敏, 扶原放. 轿车外流场车轮转动时侧风效应的数值模拟研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(2):147-150.
- [6] 刘杰, 刘继兰. 客车采暖与前风窗玻璃除霜系统的设计[J]. 客车技术与研究, 2000, 22(1):17-18.
- [7] 扶原放, 张晓斌. 某轻型客车除霜性能优化[C]//2014 中国汽车工程学会年会论文集. 北京:北京理工大学出版社, 2014:1486-1489.
- [8] 王应奇, 俞立新. 客车车厢冬季除霜除湿的分析与计算[J]. 客车技术与研究, 2010, 32(6):31-33.
- [9] 俞立新, 柴浩. 高寒地区客车前风窗玻璃除霜分析及改进[J]. 客车技术与研究, 2008, 30(2):35-38.
- [10] 叶立, 张梦伢, 叶欢, 等. 基于 CFD 的新能源汽车 HAVC 除霜模式研究[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2020, 35(2):17-22.
- [11] 任岗, 宁红. 汽车空调除霜除雾性能测试方法研究[J]. 汽车实用技术, 2019(7):59-61.
- [12] 张大伟, 林伟, 李金磊, 等. 某客车除霜风口设计布置及 CFD 仿真分析[J]. 客车技术与研究, 2017, 39(4):43-45.
- [13] 孔祥梅, 韩艳美. 基于 CFD 分析的汽车除霜风道优化设计[J]. 企业科技与发展, 2014(13):55-56.
- [3] 王琛, 于嘉浩. 基于 UG 的双离合自动变速器运动仿真分析[J]. 林业机械与木工设备, 2021, 49(11):33-35.
- [4] 尹辉俊, 徐武彬, 罗玉军, 等. 基于 UG 的车桥差速器的运动仿真[J]. 装备制造技术, 2004(3):32-34.
- [5] 王成成. 基于 UG NX8.0 的曲柄摇杆机构运动仿真与分析[J]. 中国新技术新产品, 2018(19):5-6.
- [6] 王国法, 徐亚军, 孙守山. 液压支架三维建模及其运动仿真[J]. 煤炭科学技术, 2003, 31(1):42-45.
- [7] 张朋举, 张纹, 陈树人, 等. 八爪式株间机械除草装置虚拟设计与运动仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4):56-59.
- [8] 魏新华. 汽车模具冲压运动仿真系统研究[J]. 内燃机与配件, 2018(1):118-119.
- [9] 张晋西, 郭雪琴. 齿轮三维参数化建模与加工运动仿真[J]. 机械设计, 2002, 19(3):33-35.
- [10] 李超, 余洋, 赵嫚. 涡旋压缩机的虚拟建模与运动仿真[J]. 流体机械, 2012, 40(1):17-21.
- [11] 赵舒红, 蒋恩臣, 闫以勋, 等. 小麦播种机开沟器双向平行四杆仿形机构的设计及运动仿真[J]. 农业工程学报, 2013(14):26-32.
- [12] 张学军, 吴成武, 王旭东, 等. 残膜分离筛机构的运动仿真与分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7):113-116.
- [13] 王健, 袁江松, 李丹彤, 等. DMU 运动仿真在汽车设计开发中的应用[J]. 北京汽车, 2017(6):23-26.
- [14] 宋晓华, 马晓丽, 汪建平. 利用 UG 实现机构的运动仿真和分析[J]. 实验技术与管理, 2005, 22(3):65-68.
- [15] 林波. 浅谈 CATIA 运动仿真在汽车设计中的应用[J]. 中国机械, 2016(1):55.

(上接第 35 页)