

基于 CFD 的某商用车除霜系统仿真优化

刘宁, 李龙勇, 闫鑫, 刘东, 梁建志, 万家乐, 孙艳宝, 王雷
一汽解放汽车有限公司商用车开发院

【摘要】 在某商用车空调除霜系统开发阶段, 首先采用基于计算流体力学的仿真分析方法, 建立该车除霜系统稳态仿真分析模型, 发现风窗玻璃表面风速覆盖性能不良问题, 同时进行物理样机除霜性能试验, 试验结果与仿真分析结果一致性较高, 验证了仿真准确性。随后, 根据该仿真方法对该除霜系统的除霜风道及除霜格栅结构进行优化, 获得了除霜性能优良的风道及格栅设计方案。最终, 该除霜系统一次性通过整车除霜性能试验。

【关键词】 CFD, 除霜系统, 仿真优化

Simulation and Optimization of a Commercial Vehicle Defrosting System Based on CFD

Liu Ning, Li Longyong, Yan Xin, Liu Dong, Liang Jianzhi, Wan Jiale, Sun Yanbao, Wang Lei

Commercial Vehicle Development Institute, FAW Jiefang Auto Co., Ltd.

Abstract: In this paper, aiming at the development stage of a commercial vehicle, a steady-state simulation analysis model of the defrosting system of the vehicle was established based on computational fluid dynamics simulation analysis method, and poor defrosting performance of the windshield surface was found. At the same time, through the physical prototype defrosting performance verification, the test results were in high consistency with the simulation analysis results. Then, according to the simulation method, the internal structure of the defrosting system was optimized, and a defrosting duct design scheme with excellent defrosting performance was obtained. Finally, the defrosting system passed the vehicle defrosting performance test at one time.

Key words: CFD, defrosting system, optimize

引言

汽车除霜功能是用户在使用车辆的过程中必不可少的功能之一, 汽车除霜性能的检测也是汽车产品强制性主动安全标准之一。GB 11555—2009《汽车风窗玻璃除霜和除雾系统的性能和试验方法》中, 明确规定了汽车风窗玻璃除霜的性能要求, 即试验开始后 20min, 风窗玻璃 A 区域有 80% 已完成除霜; 试验开始后 25min, A' 区域有 80% 已完成除霜; 试验开始后 40min, B 区域有 95% 已完成除霜。

然而, 传统的汽车除霜性能验证需要搭载整车样机在指定的环境试验舱内才能进行, 且对汽车除霜性能的优化也必须伴随除霜系统的拆车、装车, 这就导致除霜系统验证存在节点偏后、性能优化周期长、验证成本较高等问题。

虚拟仿真技术在各制造业领域中不断发展, 其工程应用的成熟度也越来越高, 在产品开发阶段所起到的作用日趋明显。王忠校等人的早期研究表明, 虚拟仿真技术在汽车产品开发阶段能够快速、准确地预测产品各项性能, 具有周期短、成本低、提高产品设计质量等显著优点^[1]。邓峰、谷正气等人的研究表明, 能够使用计算流体力学 (CFD) 方法对汽车除霜除雾过程进行模拟, 获得了风窗玻璃表面的除霜除雾效率和效果^[2]。

本文针对某商用车除霜系统开发阶段遇到的除霜效果不良问题, 使用 CFD 方法对该车除霜系统进行仿真分析及优化, 最终基于虚拟仿真获得很好的除霜系统方案, 且一次性通过了整车除霜性能验证, 为以后的除霜系统产品开发积累了丰富的工程应用经验。

1 除霜系统仿真技术流程

1.1 除霜系统介绍

汽车空调除霜系统是用来融化汽车风窗玻璃表面的霜或雾, 从而恢复驾驶员视野的系统^[3]。除霜系统组成包括空调箱体总成、除霜风道总成、出风格栅总成。

1.2 除霜系统仿真流程

从车辆实际化霜情况分析, 车辆风窗玻璃表面霜层能否化开, 主要受以下三方面影响。

- 1) 除霜系统风道出口的风量分配。
- 2) 风窗玻璃视野区的风速覆盖。
- 3) 除霜系统的出风温度。

三种因素缺一不可, 其中, 除霜系统出风温度来源于空调箱体内部暖风芯体, 其热量主要由外部热源提供。传统汽车受发动机出水温度影响较大, 新能源汽车受加热元件的功率影响较大, 而除霜系统风量分配以及风窗玻璃视野区风速覆盖属于除霜系统的出风性能, 完全受除霜系统设计方案影响, 所以, 可优先考虑除霜系统出风性能的开发及验证。

从 CFD 仿真分析角度来讲, 除霜系统出风性能可通过稳态分析获得, 理论计算模型较少 (只求解空气流动, 无需求解空气温度), 几何模型要求较少 (只需要除霜系统及驾驶室内部空气域), 计算时长也相对较少; 而驾驶室化霜性能仿真分析, 则需要通过瞬态分析获得, 理论模型较多, 几何建模的要求也较多 (除了除霜系统及驾驶室内部空气域, 还需要外部空气域、玻璃固体域、霜层域), 计算时长

相对较长。因此,从节约项目开发周期角度出发,可先对除霜系统进行出风性能分析,若除霜系统性能满足开发指标要求,再进行驾驶室化霜瞬态分析,从而节省项目计算时间、提高项目开发效率。

综上所述,在除霜系统开发阶段,首先通过 CFD 仿真

分析方法,对除霜系统的性能进行仿真分析验证,通过稳态仿真分析获取除霜系统出风性能情况,判断该除霜系统是否存在除霜性能缺陷的风险,再进行瞬态化霜分析,验证该除霜系统最终化霜性能是否满足国家标准的要求,为除霜系统设计方案的优化及确定提供数据支撑,主要流程见图 1。

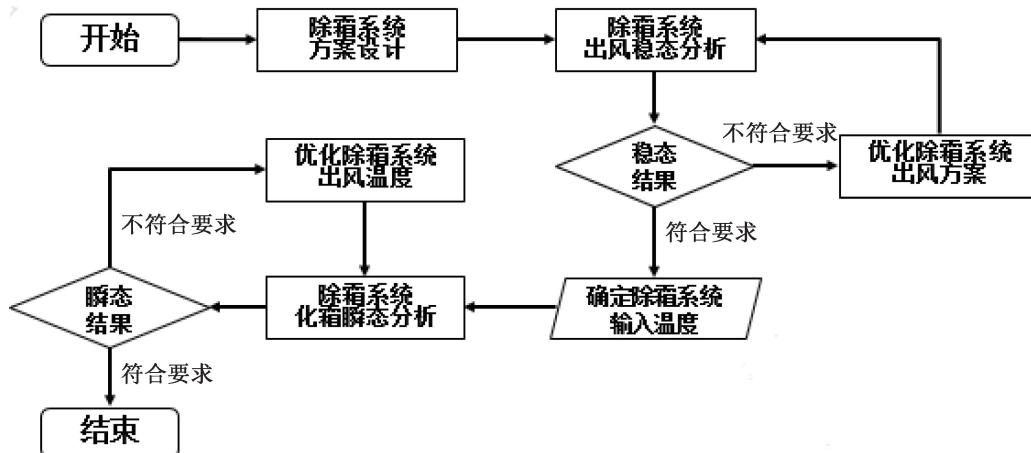


图 1 除霜系统性能仿真技术路线图

2 除霜系统仿真分析原理

除霜系统的 CFD 仿真分析包括稳态出风分析及瞬态化霜分析,属于计算流体动力学范畴中的一部分,遵循计算流体动力学的三大守恒定律^[4]: 质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。上述三大守恒定律属于基本理论公式,这里不再赘述,下面主要介绍本文中化霜分析所涉及的数学模型。

2.1 霜层融化数学模型

风窗玻璃表面霜层融化涉及的数学模型包括驾驶室内部温度场与玻璃内表面的对流传热、玻璃内表面到玻璃外表面的传导传热、霜层与外部空气及玻璃外表面的换热以及霜层本体的质量变化,霜层融化过程中的质量以及能量关系见图 2。

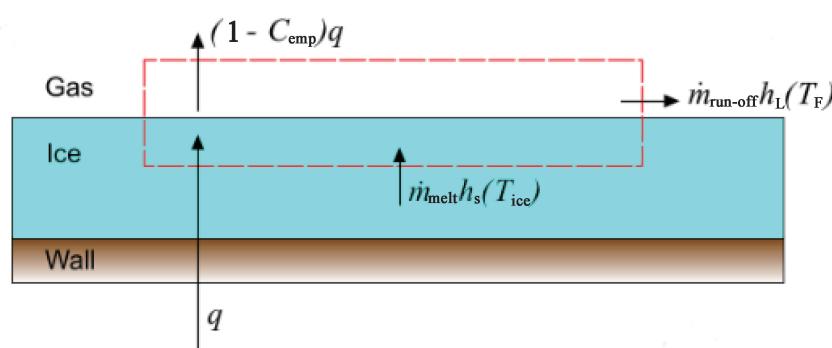


图 2 除霜仿真原理示意图

驾驶室内部温度场与玻璃内表面的对流传热表示为

$$\phi = hA(t_{w1} - t_{w2}) \quad (1)$$

式中, ϕ 为热流量; h 为表面传热系数; A 为表面面积; t_{w1} 为玻璃内表面附近空气温度; t_{w2} 为玻璃内表面温度。

玻璃内表面到外表面的热传导表示为

$$\phi = \lambda A(t_{w2} - t_{w3}) / d_x \quad (2)$$

式中, λ 为热导率; t_{w3} 为玻璃外表面温度; d_x 为玻璃厚度。

除霜过程的质量平衡方程为

$$\dot{m}_{\text{melt}} = \dot{m}_{\text{run-off}} \quad (3)$$

式中, \dot{m}_{melt} 为霜融化的质量; $\dot{m}_{\text{run-off}}$ 为水流走的质量。

除霜过程的能量平衡方程为

$$\dot{m}_{\text{melt}} h_s(T_{\text{ice}}) + q = \dot{m}_{\text{run-off}} h_L(T_F) + (1 - C_{\text{emp}}) q \quad (4)$$

式中, $h_s(T_{\text{ice}})$ 为霜在初始状态下的焓; q 为乘员舱通过玻璃传递给霜的热量,即 $q = \phi dt$; $h_L(T_F)$ 为霜在刚好融化为水的临界状态下的焓; C_{emp} 为霜吸收热量占总热量的经验系数。

对于给定的 \dot{m}_{melt} , 霜层厚度 s 更新方程为

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{\dot{m}_{\text{melt}}}{\rho_s A} \quad (5)$$

式中, ρ_s 是冰层的密度。

3. 除霜系统稳态仿真分析

3.1 除霜出口风量分配稳态仿真分析

除霜系统的风量分配性能是影响风窗玻璃视野区内除霜风速覆盖多少的主要因素，在以往除霜系统的开发验证中，

也是先进行除霜系统的风量分配性能的台架验证，然后再进行整车验证。从仿真分析层面来看，除霜系统风量分配需要的几何模型以及网格模型数量较少，计算量也相对较少，因此，首先通过仿真分析验证除霜系统的风量分配性能，再进行风窗玻璃表面风速覆盖性能仿真，具体流程见图3。

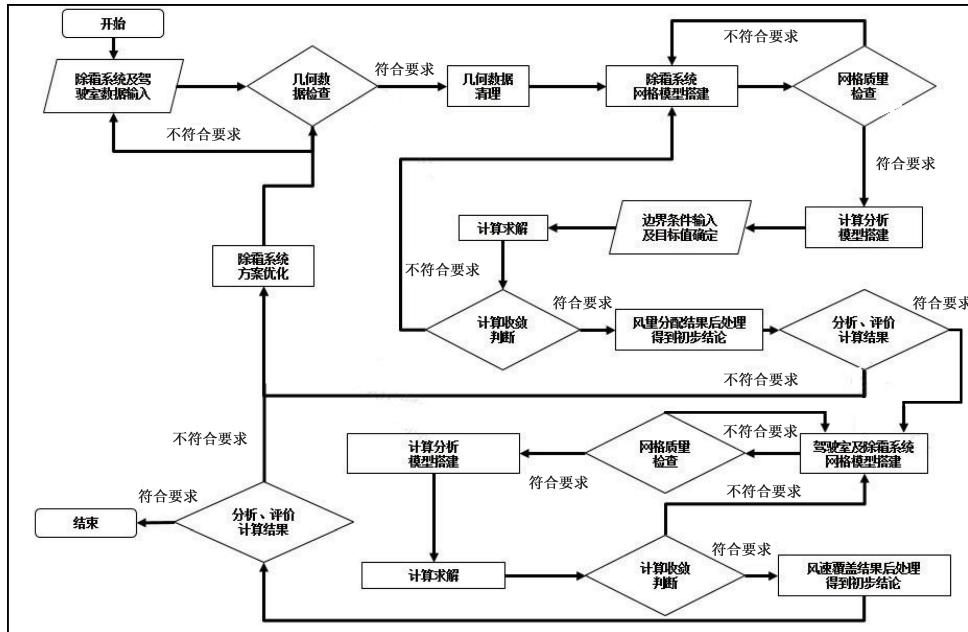


图 3 除霜系统出风性能稳态分析流程图

除霜系统 Case0 风量分配性能的 CFD 分析模型见图 4，包括空调箱体总成、除霜风道总成、出风格栅总成，其中，

除霜风道有五个出风口，包括三个前除霜出风口、左右侧除霜出风口各一个。

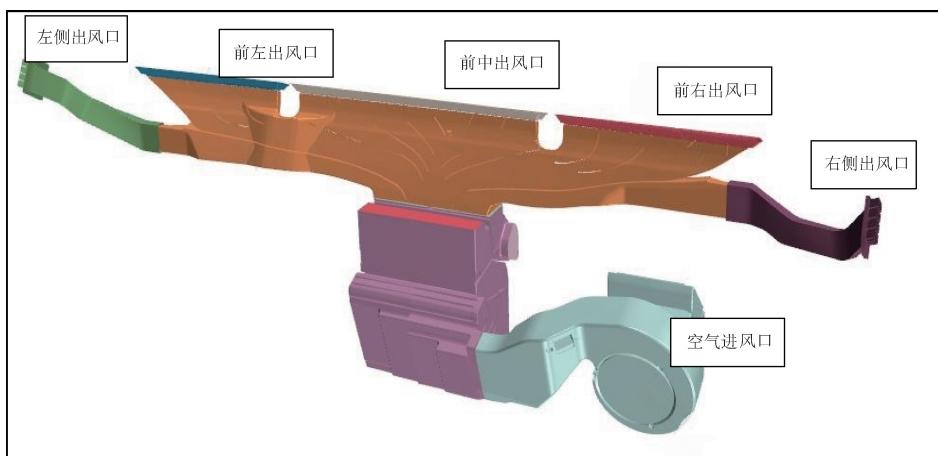


图 4 除霜系统 Case0 风量分配仿真分析模型

除霜系统风量分配仿真分析采用三维、稳态、常密度、不可压缩气体及 Realizable k-ε 模型，壁面处理类型采用全 y+壁面处理，边界条件见表 1，分析结果及指标见表 2。

表 1 Case0 风量分配仿真边界条件

边界条件名称	边界设置
空气密度	1.184kg/m ³ (25℃)
大气压力	101325Pa (标准大气压)

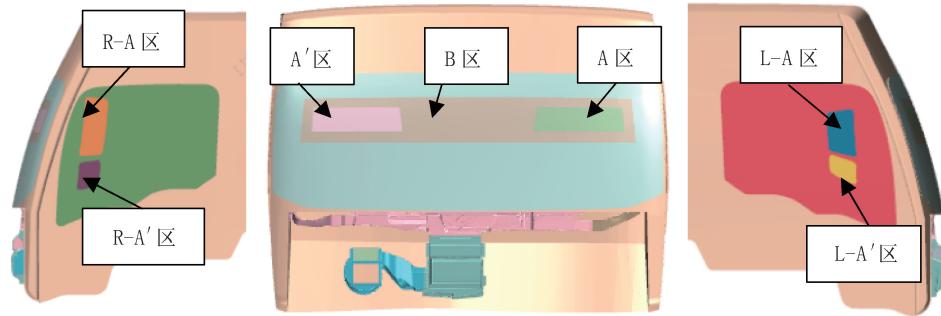
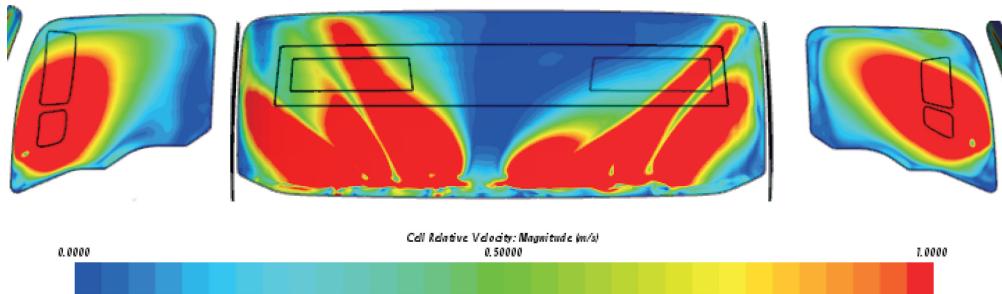
边界条件名称	边界设置
空调箱体进口	质量流量进口 (0.1kg/s)
除霜风道出风口	压力出口, 0Pa (相对标准大气压)
蒸发器芯体	多孔介质
暖风芯体	多孔介质

表 2 Case0 风量分配仿真计算结果

除霜风道出风口	风量分配比例	设计目标
左侧出风口	12%	13%±2%
前左出风口	20%	19%±2%
前中出风口	38%	36%±2%
前右出风口	19%	19%±2%
右侧出风口	11%	13%±2%

通过表 2 仿真分析结果可知, 该除霜系统的风窗风量分配满足设计目标要求。

- 1) 风窗玻璃的风量占据主要比例。
- 2) 两侧车窗玻璃风量比例较为平均。
- 3) 驾驶员侧风量比例大于副驾驶员侧风量比例。

**图 5 除霜风速覆盖性能仿真分析模型****图 6 除霜风速覆盖性能风速分布云图****表 3 Case0 风窗玻璃视野区风速覆盖仿真计算结果**

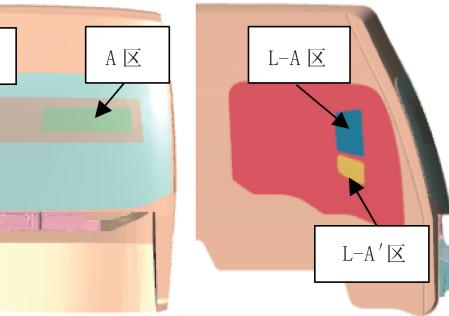
视野区	1.0m/s 风速覆盖比例	目标
A 区	19.2%	≥75%
A'区	29.3%	≥75%
B 区	22.5%	≥75%
L-A 区	76.9%	≥75%
L-A'区	100.0%	≥75%
R-A 区	59.2%	≥75%
R-A'区	100.0%	≥75%

通过图 6 及表 3 可以看出, Case0 除霜系统的风窗玻璃表面风速覆盖性能存在问题, 从视野区风速覆盖比例数据统计结果来看, 仅有 L-A 区、L-A'区、R-A'区视野区风速覆盖

3.2 玻璃视野区风速覆盖稳态仿真分析

基于 Case0 除霜系统风量仿真分析模型, 加入风窗玻璃总成以及驾驶室内部简化模型, 建立驾驶室除霜系统风窗玻璃风速覆盖仿真分析模型, CFD 分析模型见图 5。其中, 风窗玻璃视野区 A 区、A'区、B 区依照 GB 11555—2009《汽车风窗玻璃除霜和除雾系统的性能和试验方法》中第 4 部分的规定划分, 车门玻璃视野区 L-A 区、L-A'区、R-A 区、R-A'区参考 GB 11555—2009 中眼椭圆点位以及车辆后视镜外轮廓连线形成的锥面与车门玻璃内表面的交界面划分得到。

风窗玻璃风速覆盖性能仿真分析, 采用三维、稳态、常密度、不可压缩气体及 Realizable k-ε 模型, 壁面处理类型采用全 y+壁面处理, 风速分布云图见图 6、风速覆盖比例见表 3。

**图 5 除霜风速覆盖性能仿真分析模型**

比例达到目标要求, 视野区 A 区、A'区、B 区、R-A 区的风速覆盖比例较目标值相差较大, 从视野区风速分布的趋势看, 视野区 A'区、L-A 区、R-A 区的风速分布趋势较好, 视野区 A 区、B 区风速分布情况较差, 说明该除霜系统无法将除霜气流合理地覆盖到风窗玻璃的视野区域内, 导致最终整车的化霜性能无法满足国家标准要求。

3.3 Case0 仿真与试验一致性验证

为了进一步验证除霜系统出风性能稳态分析结果的准确性, 以便后续实施基于该仿真方法的除霜系统优化工作, 对 Case0 除霜系统的物理样件进行以下性能验证。

- 1) 风量分配性能验证。
- 2) 整车除霜性能验证。

风量分配试验装置见图 7, 结果见表 4, 除霜性能验证参照 GB 11555—2009《汽车风窗玻璃除霜和除雾系统的性

能和试验方法》中 6.1 的要求, 化霜结果见图 8。

试验结果显示除霜系统的风量分配性能、挡风玻璃视野区化霜轨迹与仿真分析结果一致性很好, 说明后续能够基于 CFD 仿真分析方法, 对 Case0 进行优化及仿真验证。



图 7 Case0 风量分配台架试验图

表 4 Case0 风量分配台架验证结果

除霜风道出风口	风量分配比例
左侧出风口	12%
前左出风口	22%
前中出风口	36%
前右出风口	20%
右侧出风口	11%



图 8 化霜试验 20min 风窗玻璃化霜效果

3.4 Case0 问题分析

由 1.1 可知, 能够影响风窗玻璃视野区化霜性能的三方面因素为除霜系统风量分配、风窗玻璃视野区风速覆盖以及除霜系统出风温度。

由 3.3 可知, Case0 的除霜系统的风量分配性能满足目标值要求。

通过物理样机的除霜性能试验, 也获得了该除霜系统的出风温升曲线 (见图 9), 数据显示该除霜系统的除霜出风温升情况满足车辆除霜出风温度要求, 由此确定问题出现在风窗玻璃视野区风速覆盖性能上。

在除霜系统中, 能够影响驾驶室风窗玻璃视野区风速覆盖的是除霜风道总成以及除霜格栅总成, Case0 的除霜风道总成及除霜格栅总成模型见图 10, 风道内部导流板见图 11。

从图 12 除霜风道及驾驶室内部除霜气流流线来看, 气流经除霜风道进口后, 前除霜风道内部气流向左右两边导向严重, 中间没有出风, 导致风窗玻璃所有视野区风速覆盖不足。右侧除霜气流射向右车门玻璃角度与+X 方向角度偏小, 导致 R-A 区风速覆盖偏少。由此可以得出, 除霜风道以及除霜出风格栅没能起到良好的气流导向作用, 需要对除霜风道及除霜格栅进行优化。

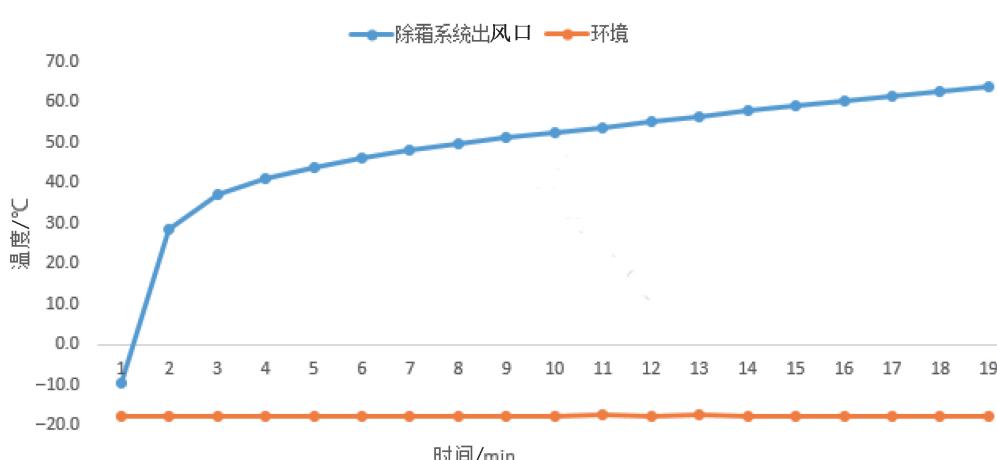


图 9 除霜系统出风温升曲线

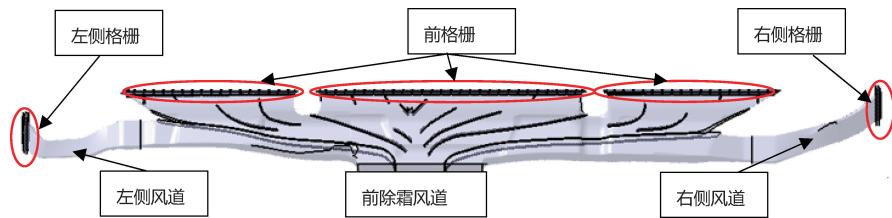


图 10 Case0 除霜风道总成及格栅总成模型



图 11 Case0 前除霜风道内部导流板示意图

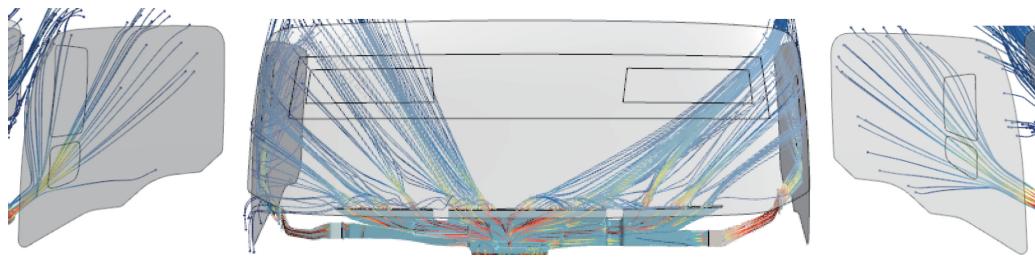


图 12 Case0 除霜系统出风流线图

4 方案优化及仿真验证

4.1 优化方案

根据 3.4 开发方案问题分析结论, 对前除霜、左侧除霜、右侧除霜格栅尺寸, 前除霜风道内部导流板, 以及左侧、右侧除霜风道结构进行优化, 优化方案见表 5。

表 5 优化方案

方案名称	优化内容
Case1	导流板、两侧风道及格栅
Case2	导流板、前格栅
Case3	导流板、前格栅、两侧风道及格栅

4.2 优化方案稳态仿真结果

优化方案除霜系统稳态风量分配仿真结果见表 6, 风速覆盖云图见图 13~图 15, 视野区风速覆盖比例见表 7。

表 6 优化方案风量分配仿真计算结果

除霜风道出风口	Case0	Case1	Case2	Case3
左侧出风口	12%	11%	12%	14%
前左出风口	20%	24%	22%	19%
前中出风口	38%	32%	34%	35%
前右出风口	19%	20%	20%	18%
右侧出风口	11%	13%	12%	14%

表 7 优化方案风窗玻璃视野区风速覆盖仿真计算结果

视野区	Case0	Case1	Case2	Case3
A 区	19%	20%	56%	77%
A' 区	29%	36%	48%	82%
B 区	22%	22%	52%	78%
L-A 区	76%	80%	80%	98%
L-A' 区	100%	99%	99%	100%
R-A 区	59%	75%	80%	90%
R-A' 区	100%	99%	100%	100%

根据 Case1、Case2、Case3 的计算结果可以看出, 通过对除霜风道结构以及内部流板尺寸、导风角度、间隔、数量和除霜格栅尺寸的几轮优化, 在保证了除霜系统风量分配性能的前提下, 该除霜系统的风窗玻璃视野区风速覆盖性能均得到一定提升, 其中, Case3 的各项性能均优于其他方案, 且优于开发目标要求, Case3 风道模型见图 16、内部导流板见图 17, 下一步进行瞬态化霜计算。

4.3 优化方案瞬态仿真结果

以 Case3 的除霜系统玻璃视野区风速覆盖稳态仿真分析模型为输入, 进行化霜瞬态仿真计算, 环境温度 -18℃, 霜层厚度 0.44mm, 进风温度采用 3.4 中除霜系统出口温升曲线, 瞬态化霜结果见图 18。根据瞬态化霜结果得出, 除霜

仿真 15min 后, 风窗玻璃、两侧车窗玻璃视野区的全部霜层融化, 化霜效果优于国家标准要求, 所以, 将 Case3 作为选定试制方案。

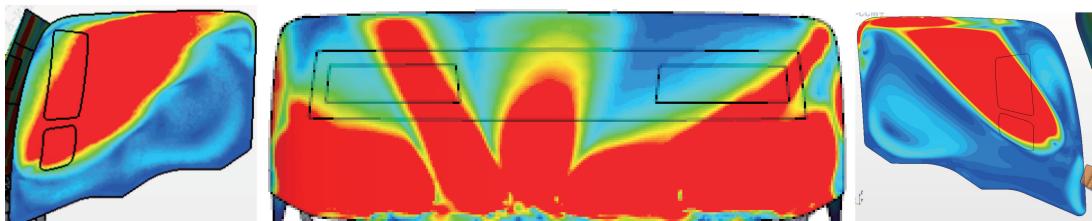


图 13 Case1 视野区风速覆盖云图

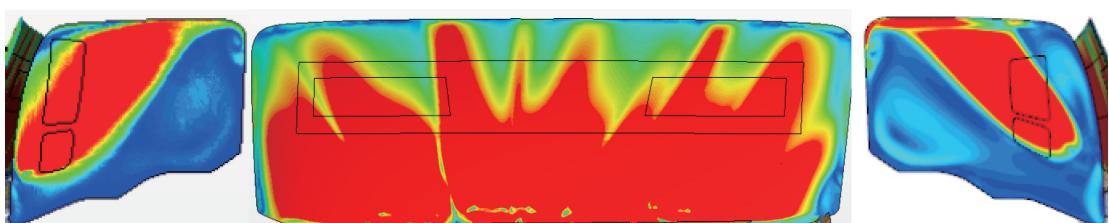


图 14 Case2 视野区风速覆盖云图

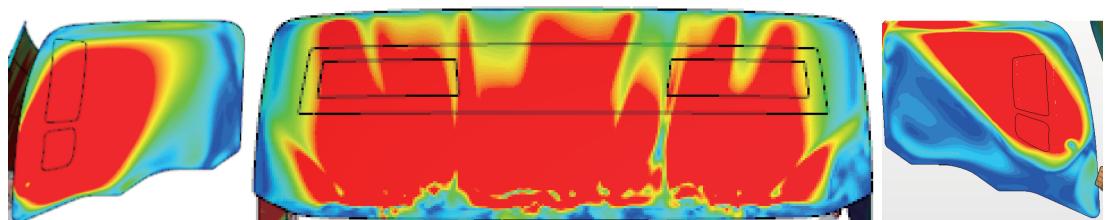


图 15 Case3 视野区风速覆盖云图



图 16 Case3 除霜风道及格栅模型图

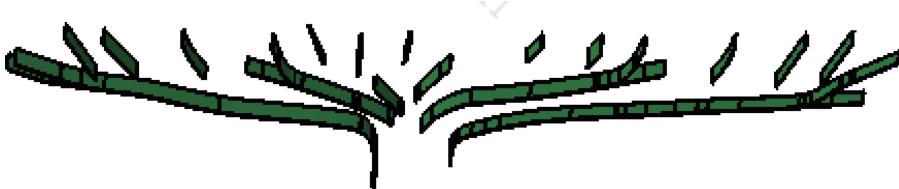


图 17 Case3 前除霜风道内部导流板示意图

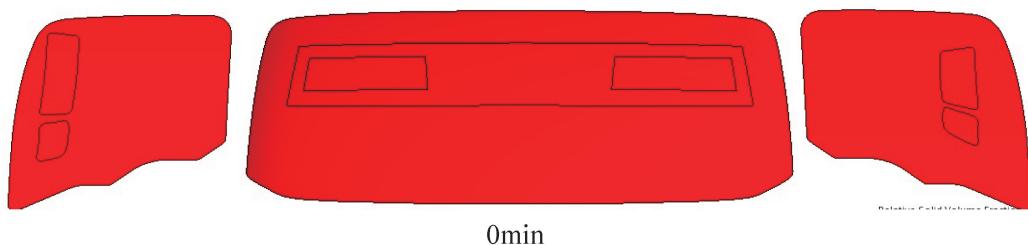


图 18 Case3 风窗玻璃瞬态化霜云图

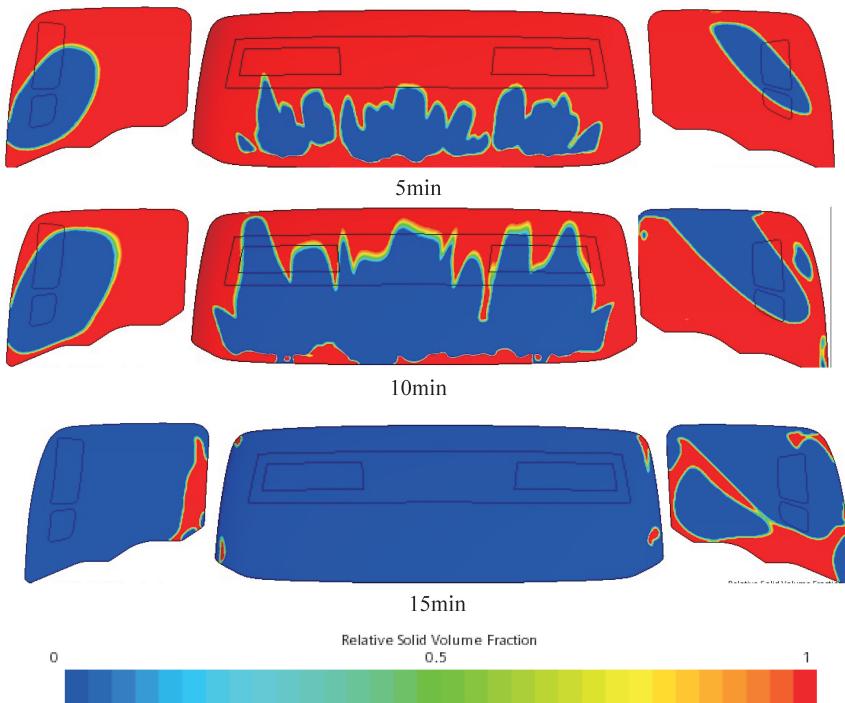


图 18 Case3 风窗玻璃瞬态化霜云图（续）

5 优化方案整车除霜性能验证

将 Case3 除霜风道总成及除霜格栅总成试制物理样件后，搭载在实车上进行环境温度为 -18℃ 的整车除霜试验，

试验结果见图 19。试验结果显示，Case3 的实车除霜试验结果与该方案的瞬态化霜结果基本一致，风窗玻璃及两侧玻璃视野区均在 15min 内完成全部化霜，效果优于国家标准要求，满足了该除霜系统产品开发要求。

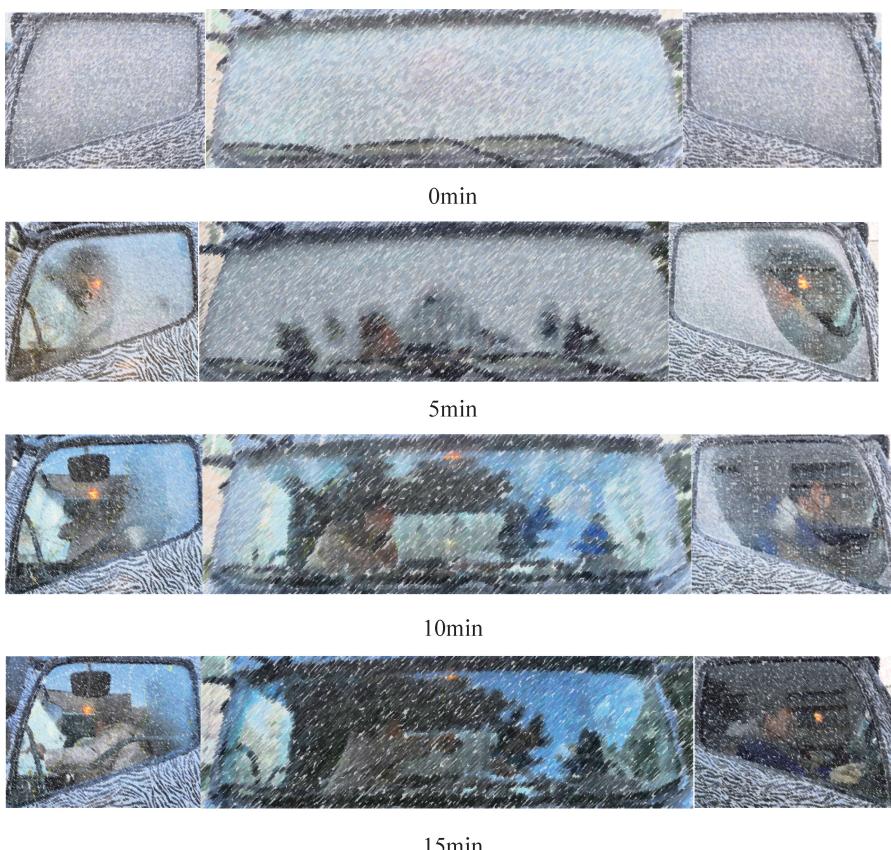


图 19 Case3 除霜系统实车除霜性能试验化霜效果

6 结论

数字化模拟技术已经深入各类制造业的产品开发过程中，随着仿真模拟技术在工程应用中的不断成熟，其提高效率的作用越发明显。

本文基于某商用车空调除霜系统开发过程中遇到的性能问题，采用 CFD 方法，获得了与物理验证一致性较高的风量分配性能以及驾驶室风窗玻璃表面的风速覆盖性能，并确定了该除霜系统性能不合理的原因，进而有针对性地对该除霜系统进行了结构优化。

然后，通过 CFD 仿真模拟，在该除霜系统三维数据设计阶段，提前模拟验证了该除霜系统优化方案的各项性能，最终，该除霜系统一次性通过了实车除霜性能验证，满足了项目开发要求。

综上所述，在汽车除霜系统产品开发过程中，采用 CFD 仿真方法能够准确地预测产品性能，快速发现产品性能缺陷，直观地找到问题原因，同时能够及时地验证产品优化方案，极大地缩短了产品开发周期、降低了多轮样件试制、台架及整车试验成本，能够有效地支撑产品开发，为汽车空调产品数字化开发赋能。

参 考 文 献

- [1] 王忠校, 郭茂林. 车身产品开发过程中 CAE 分析的应用 [J]. 汽车工程, 2007, 29 (7): 549-554.
- [2] 邓峰, 谷正气, 杨易, 等. 汽车前风窗玻璃除霜除雾数值模拟分析和研究 [J]. 汽车工程, 2009, 31 (2): 175-188.
- [3] 全国汽车标准化技术委员会. 汽车风窗玻璃除霜和除雾系统的性能和试验方法: GB 11555—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [4] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.