

汽车除霜风道的数值模拟仿真及结构优化

Numerical Simulation and Optimization Design on Vehicle Demist Vent

付宇, 蔡晓林, 苏成谦

(天津一汽夏利汽车股份有限公司产品开发中心)

摘要: 本文应用 STAR-CCM+ 软件对汽车除霜风道进行了数值模拟优化, 在稳态流场计算的基础上找出了当前除霜风道存在“死角”的三个原因。针对其原因对风道进行逐步优化, 从而得到了较优的除霜风道几何, 除霜率提高了 6.27%。

关键词: 汽车、除霜风道、几何优化、数值模拟

Abstract: the main context of this paper is to simulate and optimize the vehicle demist vent by using STARCCM+, based on result of steady state calculation, it founds out three reasons Leads to dead angle of demisting. In order to get a better geometry of demist vent, this paper dose the optimization by steps according to the reasons, the demist ratio increase of 6.27 percent.

keywords: vehicle; Defrost vent; Optimization Design on geometry; Numerical Simulation

空调系统的除霜性能是整车开发中的一项重要指标, 除霜性能的优劣直接影响着行车安全。国家标准 CB11555-200 中规定每辆汽车应装备除霜系统, 能够确保在寒冷天气条件下恢复风挡玻璃的能见度。具体应符合以下要求^[1]:

- (1) 试验开始后 20min, A 区域有 80% 已完成除霜;
- (2) 试验开始后 25min, A' 区域有 80% 已完成除霜;
- (3) 试验开始后 40min, B 区域有 95% 已完成除霜。

提高汽车除霜系统性能前人已作了种种研究。H. Taka-da 采用 12 V 电加热系统加热风挡玻璃, 防止在玻璃上积霜^[2]。AbdulNour, B. S. 采用等温流场求解的 CFD 除霜模拟方法^[3]。文献^[4]进行了详细的数学模型研究和基于求解焓法的瞬态除霜分析, 但是采用了非工程化的物理模型, 使分析结果无法试验验证。Bashar S. AbdulNour 采用两步法, 即分开求解等温流场和能量方程的方法对风挡玻璃除霜性能进行了模拟^[5], 但是在逐步分析优化除霜风道、研究不同风道下除霜效果方面未作进一步的研究。

在前期设计阶段采用 CFD 分析, 优化出性能较好的方案, 能够大大的缩短发时间、降低开发成本, 为后期样机试验提供方向性的依据。本文应用 STAR-CCM+软件建立某轿车除霜风道及乘员舱的网格及物理模型, 并对其进行求解计算。

1 除霜原理及优化思路

气流从除霜口进入乘员舱, 在舱内形成稳定的流场, 入口的热气流使舱内产生了热量交换, 温度场不断变化;

玻璃内外表面存在温差, 进而引起玻璃内外表面的热传导。

玻璃外表面的霜层接受能量, 累计的热量超过霜层潜在融化热量, 冰层开始融化;

霜层与环境的外部热交换^[6]。

环境与壁面间的热交换可以用热传导和热辐射来描述:

$$\varphi_c = h_e (T_{ext} - T_{ice}) dS, \quad \varphi_r = \varepsilon \sigma (T_{ext}^4 - T_{ice}^4)$$

式中: T_{ice} 表示冰层温度;

h_e 表示热对流系数;

T_{ext} 表示环境温度;

T_{ext}^r 表示环境辐射温度。

内部气流对壁面加热, 热流通过热传导和辐射的方式传递到玻璃内表面, 玻璃内部的热传导通过固体区域网格模拟计算得到。通过计算可以得到玻璃外表面的温度, 当 $T_{ice} < 0^\circ\text{C}$ 时, 忽略冰层和玻璃外表面之间的热阻, 近似认为玻璃外层温度等于冰层的温度; 当 $T_{ice} = 0^\circ\text{C}$ 时, 冰层开始在恒温下融化。冰层从固体变为液体的质量是在每个单元里通过冰层能量平衡方程计算的

$$d\varphi = \varphi_c + \varphi_r - \varphi_{cond};$$

式中: φ_{cond} 是指从玻璃外表面到冰层的热传导流量。

通过上述能量平衡方程, 可以算出已融化冰层的质量密度 $dm(\text{kg}/\text{m}^3)$ 和冰层厚度的减小值 $d\delta$:

$$dm = \Delta t \cdot d\varphi / C_L, \quad d\delta = dm / \rho_{ice}$$

式中: C_L 是冰层融化所需的热量, J/kg ; ρ_{ice} 是冰层密度, kg/m^3 。

冰层融化成水后不再考虑该部分液体的流动情况, 一旦冰层融化, 玻璃外表面就直接与外界环境进行热交换, 玻璃温度也会随之上升, 直到整个热传递达到平衡。

本文采用以下方法进行仿真模拟，首先进行稳态计算，在不考虑玻璃层的前提下只对空气域进行计算，得到该方案下前窗速度分布情况，可以初步预测出当前方案存在的问题。在上一步获得的稳态流场基础上，将玻璃层纳入求解域。在全部计算域进行流动、换热计算，应用De-Icing除霜模型，开始除霜瞬态计算，从而得到该方案下冰层厚度随时间的变化情况及其最终处理效果。找到当前风道下除霜的“死角”区域，通过分析对风道进行优化变形，从而得到最优的风道设计方案。

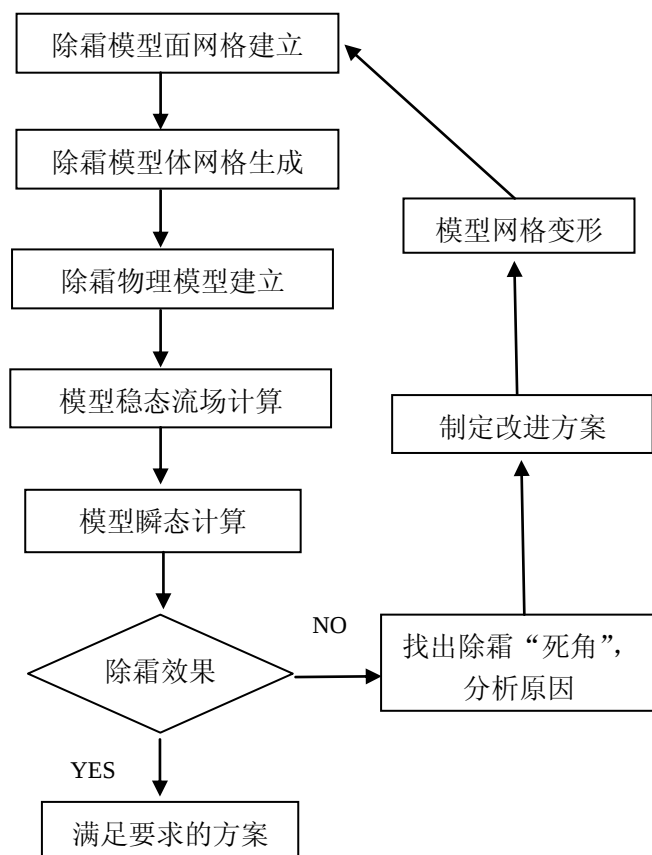


图 1 优化设计流程图

2 除霜模型的建立及计算

为使计算精确，能够正确反应除霜性能改变的趋势，建了整个乘员舱的模型。对仪表板、座椅及相应部件进行了保留。

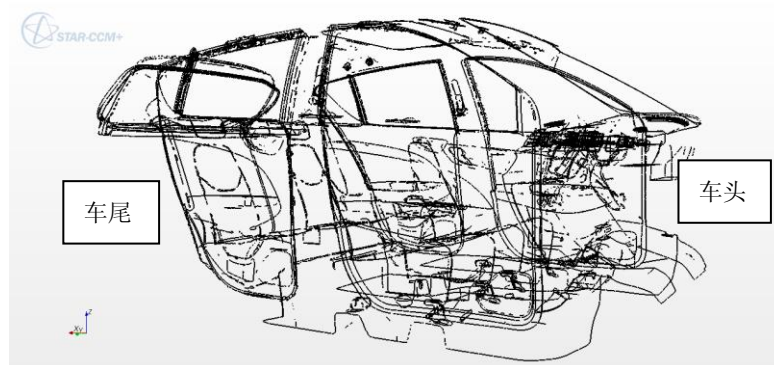


图 2 除霜模型轮廓图

该除霜风道有三个出口，Pa. side 与 Dr. side 分别吹两个侧窗，Middle. side 吹前窗。国家标准中未对侧窗的除霜效果进行规定，因此在保证风道出口风量分配合理的前提下，本文主要针对前窗的除霜性能进行优化。

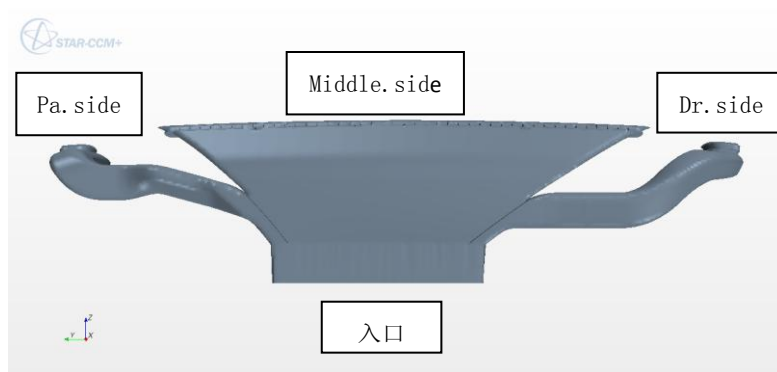


图 3 除霜风道模型图

2.1 网格生成

对乘员舱及除霜风道模型进行处理，应用 STAR-CCM+中的包面及 remesh 技术，使其生成封闭腔体的面网格。体网格选用 Trimmer 网格，设置两层边界层。为模拟瞬态计算中的能量传递，需对前风玻璃进行网格拉伸，总厚度为 5mm，共计 5 层。乘员舱外侧未划分网格，体网格数约为 260 万左右。

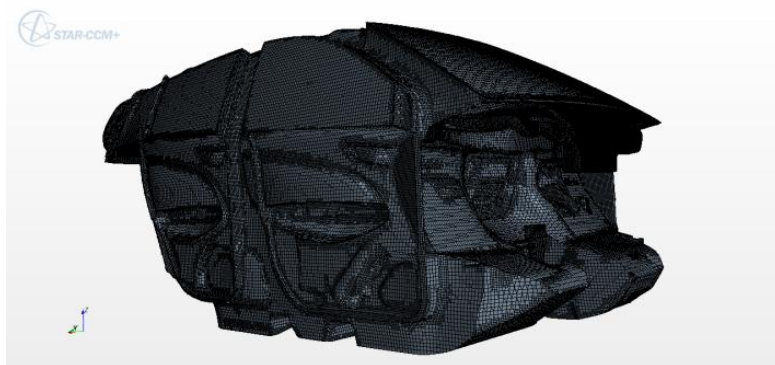


图 4 体网格模型

2.2 边界条件及介质属性设置

入口边界类型为 Velocity Inlet，速度 3.8757m/s，温度 40℃。出口边界类型为 Flow-split outlet，压力 0Pa。其他壁面边界类型为 wall，玻璃壁面采用热对流边界条件，外界温度取-15℃，其余壁面采用绝热边界条件。

表 1 介质属性表

入口温度 (℃)	环境温度 (℃)	空气密度 (kg/m ³)	空气流量 (m ³ /h)	霜层厚度 (m)	玻璃传热系数 (W/m ² ·K)
40	-15	1.128	285	5.00E-04	10.0

2.3 计算设置

采用 Realizablek- ϵ 湍流模型，稳态计算收敛后，瞬态分析计算 25min，时间步长取 1s，内迭代步数为 20 步。

3 结果分析

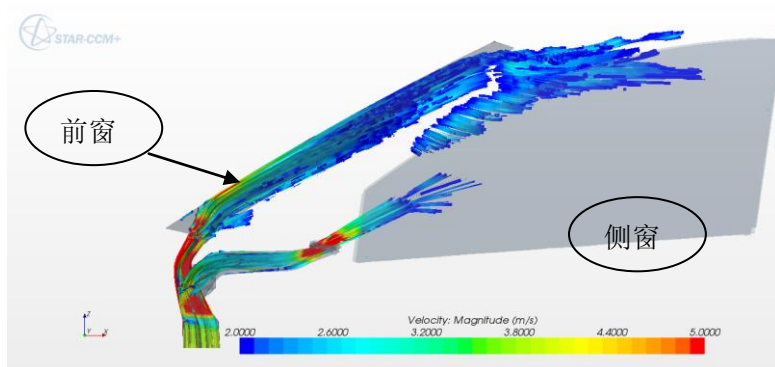


图5 速度-流线侧向分布图

从侧向的速度一流线图可以看出气流很好的沿着风挡玻璃流动，未出现“分离”现象。若气流从挡风玻璃上分离出来，在风挡玻璃和仪表盘之间循环，不仅会影响除霜效果，还会影响乘客头部的舒适性^[7]。

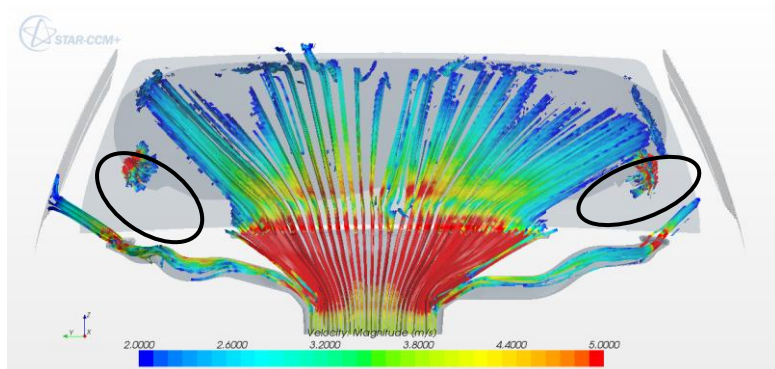


图6 速度-流线正向分布图

中间风道的气流大部分都吹到了前窗的中间区域，形成“扇形”的覆盖面。气流分布存在“死角”，即玻璃左下角及右下角气流吹过较少，这会在一定程度上影响除霜效果，当前风道尚存在可优化的空间。

(1) 由于中间风道两侧的壁面与水平面的夹角较大，气流沿着壁面流动以较大的角度冲出风道口，前窗的左下角及右下角未有气流通过，影响除霜效果。因此，应考虑改变风道两侧壁面的弧度。

(2) 风道出口的两侧有一个直角区域，气流吹到直角区域后速度减小并产生了一定的分离，未得到合理利用。

(3) 出风口的导叶片对气流能够起到很好的导引作用，因此可以改变导叶片的角度，使气流得到较合

理的分配。

4 优化方案计算结果分析

结合上述分析在考虑装配空间及工程可实施性的前提下，逐步优化出三套风道方案，即 ALT_1、ALT_2、ALT_3。

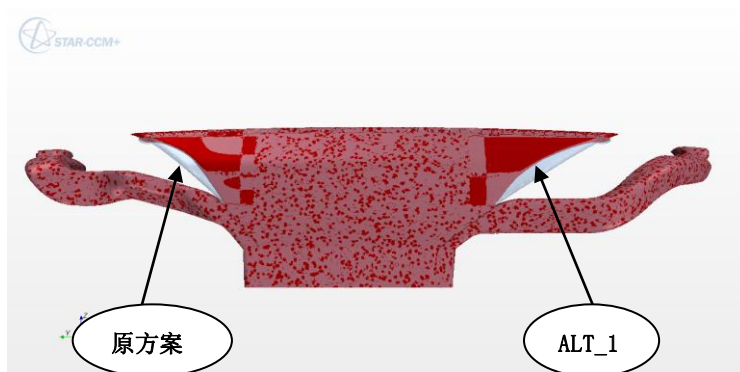


图 7 ALT_1 与原方案模型对比图

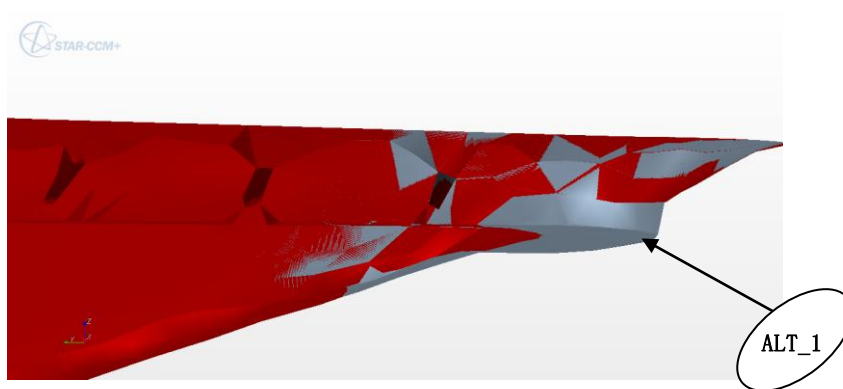


图 8 ALT_2 与 ALT_1 模型对比图

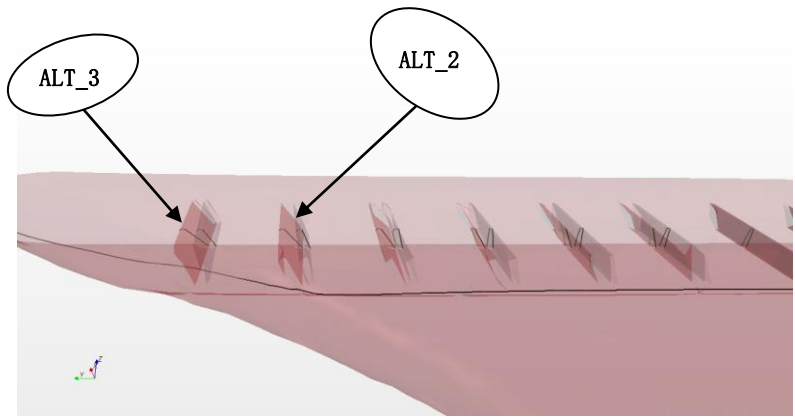


图 9 ALT_3 与 ALT_2 模型对比图

ALT_1 在原方案的基础上改变中间风道出口两端的弧度，使其向内侧凹陷（红色为 ALT_1，灰色为原方案）。ALT_2 在 ALT_1 的基础上去掉中间风道出口两端的直角部分，使其变得更加平顺，对气流起到更好的导引作用（红色为 ALT_2，灰色为 ALT_1）。ALT_3 在 ALT_2 的基础上调整中间风道两端出口六个导叶片的角度，使其向外侧倾斜 20°（红色为 ALT_3，灰色为 ALT_2）。

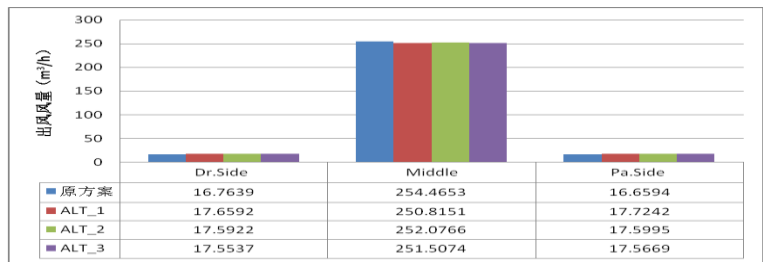


图 10 风道出口流量分配图

通过计算得到风道出口的流量分配，司机侧与乘客侧的两侧窗吹风流量分配均匀，较为合理。

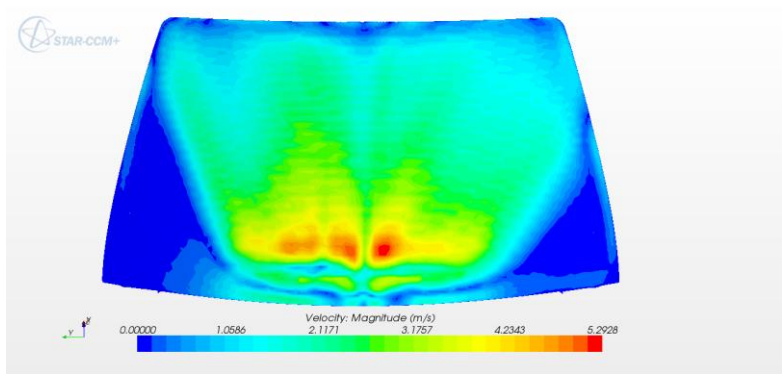


图 11 原方案前窗玻璃附近速度云图

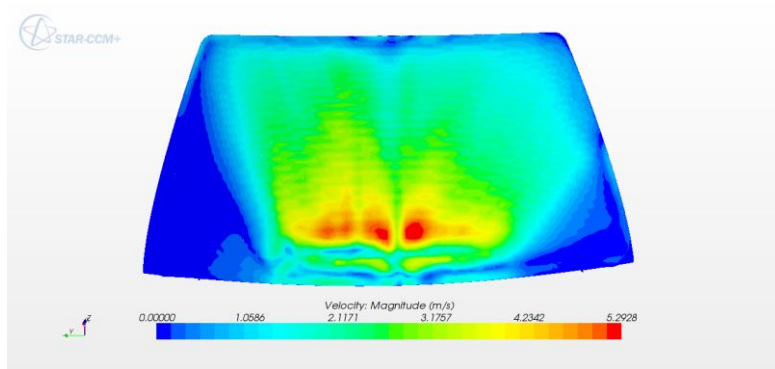


图 12 ALT_1 前窗玻璃附近速度云图

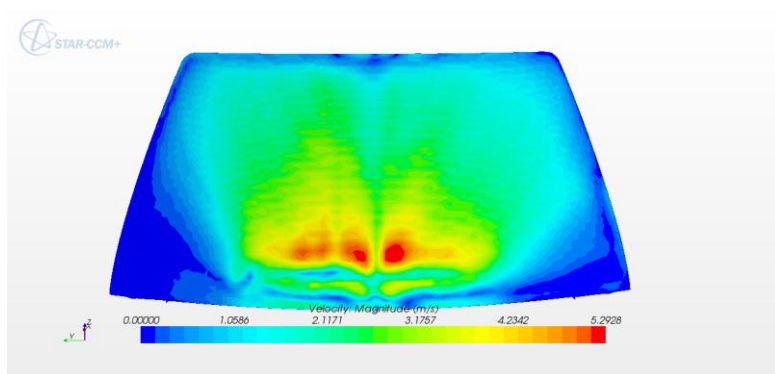


图 13 ALT_2 前窗玻璃附近速度云图

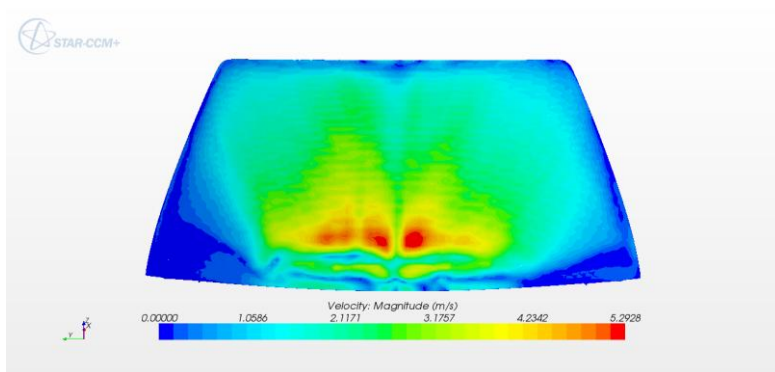


图 14 ALT_3 前窗玻璃附近速度云图

原方案前窗的两个“死角”区域为低速区，且覆盖的面积较大，这将会严重影响除霜效果。除霜器除霜性能的设计参数^[7]有除霜器喷嘴出口位置、气流冲撞角度、喷嘴的截面积和几何形状等，喷嘴出口的数量还取决于相关空间。由侧向速度-流线图分析可知当前风道下喷出的气流能够很好的沿着风挡玻璃流动，未见明显的分离现象。因此，可以在保留当前的气流与玻璃的冲撞角度前提下提

高气流速度及改变气流方向，确保从除霜器喷嘴出来的气流速度有所提高并覆盖的区域最大。与原方案相比ALT_1的低速区有了明显的减小，部分气流已吹到了原来的“死角”区域，说明改变风道的弧度对改善除霜性能方面能够起到一定的积极作用。ALT_2去掉出口两端的直接部分，引导气流直接沿着壁面冲出。ALT_3通过改变风道的几何形状及出口导叶片的方向，气流吹过覆盖的面积变大，吹出的气流得到了合理有效的利用。

经瞬态计算得到各个方案的最终除霜效果：

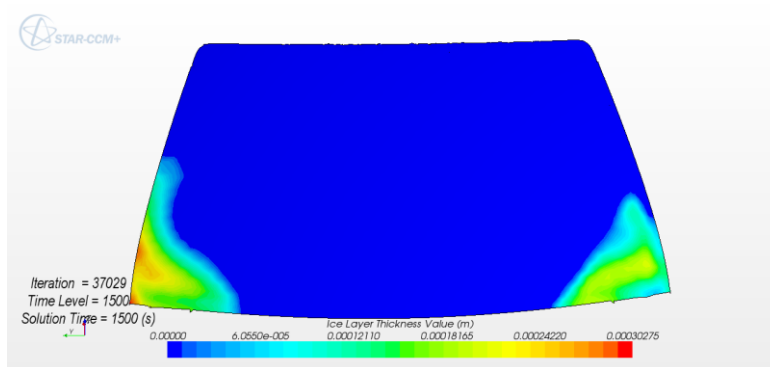


图 15 原方案除霜效果（1500s）

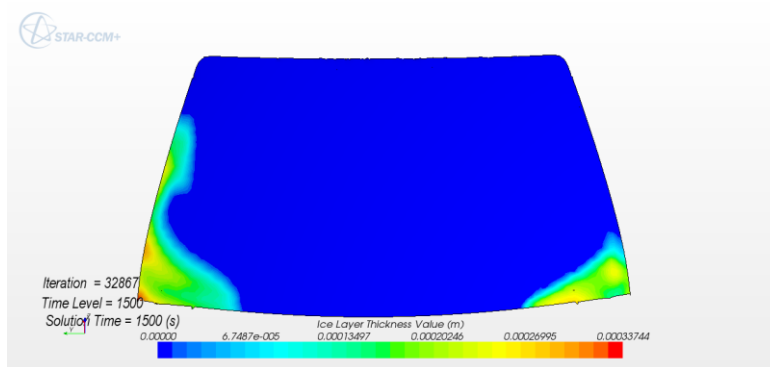


图 16 ALT_1 除霜效果（1500s）

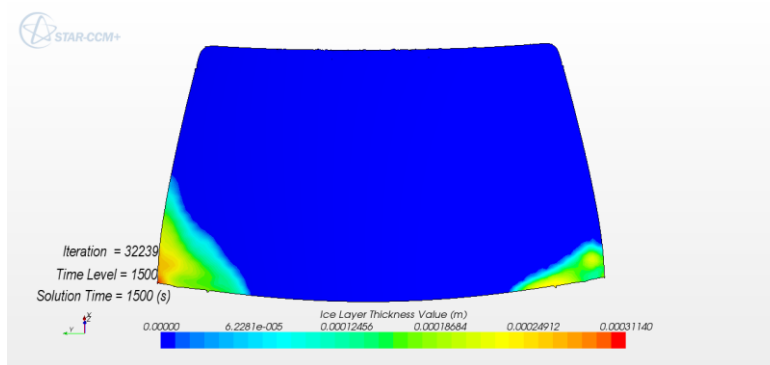


图 17 ALT_2 除霜效果 (1500s)

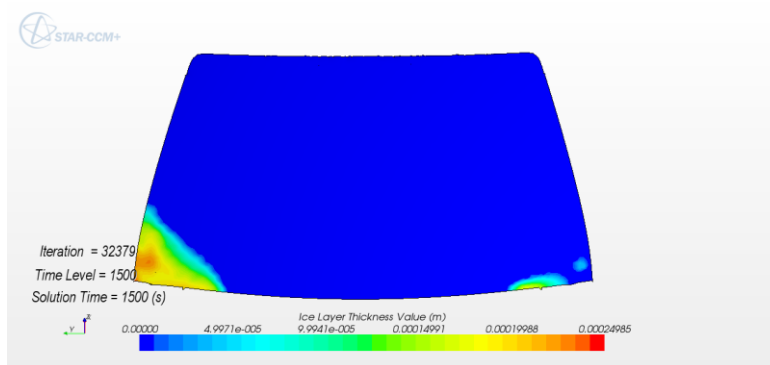


图 18 ALT_3 除霜效果 (1500s)

经计算得到原方案在 25min 时除霜面积达到 88.98%，从图中可以明显的看出玻璃的左、右下角除霜效果较差，与之前分析的结果吻合。ALT_1 改变风道的弧度后，1500s 时除霜率达到 90.01%，除霜效果有了明显的改善，尤其是靠近司机的一侧。ALT_2 方案在 1500s 时除霜率达到了 92.69%，较 ALT_1 方案有了明显的提高。ALT_3 去掉出口两端的直角部分、调整导叶片方向后 1500s 时除霜率达到了 95.25%。

5 结论

对原方案先进行稳态的流场计算，再应用 STARCCM+ 中的 De-Icing 模块对该方案冰层的融化过程进行瞬态模拟，得到了前窗玻璃附近的速度分布及霜层融化情况。

针对原方案中存在的三个问题，通过改变风道的几何形状及导叶片的方向来调整气流流动方向改善了除霜效果。ALT_3 方案视野区域的速度明显增大，速度分布变得更加合理，25min 除霜率由原来的 88.98% 提高到 95.25%，能够达到 20min 除尽 A 区的 80%，满足法规要求。

从 ALT_1 到 ALT_3 的逐步优化过程中, 除霜效果有了逐步的改善, 说明该优化方向对该风道的适用性较强, 在 ALT_3 的基础上仍有可优化的空间。

6 参考文献

- [1] 汽车风挡玻璃除霜系统的性能要求及试验方法[S]. GB11556-9.
- [2] H Takada. Antifrost System of Windshield[G]// H.Takada, SAE 890024.
- [3] B S AbdulNour. Numerical Simulation of Vehicle De-froster Flow Field, Automotive Climate Control[G]//SAE Publication SP-1347, SAE Paper No.980285.
- [4] 邓峰, 谷正气, 杨易. 汽车前风挡玻璃除霜除雾数值模拟分析和研究. 汽车工程, 2009, 31 (2): 175~179.
- [5] S Bashar. AbdulNour. CFD Prediction of AutomotiveWindshield Defrost Pattern[G]// SAE1999-01-1203.
- [6] 张英朝. 汽车空气动力学数值模拟技术. 北京大学出版社, 2011 年 6 月, 166-172.
- [7] 张晓兰, 陈江平. 汽车空调除霜风道的数值优化. 能源技术, 2007, 28 (2)