

应用 star CCM+进行除霜 CFD 仿真分析

严 旭

长安汽车股份有限公司汽车工程研究院 CAE 所

摘要：本文以长安某车型除霜性能 CFD 分析为例，应用流体力学计算软件 star CCM+建立其除霜风管及乘员舱模型，利用多面体网格对控制方程进行空间离散，应用稳态计算对比出两种不同前除霜格栅情况下的前窗速度分布，并选出一种较优方案，着重应用 de-icing 模块对该方案冰层的熔化过程进行瞬态模拟，最终得到冰层厚度随时间的变化情况。

关键词：除霜 star CCM+ CFD 分析 多面体网格 瞬态

CFD Analysis of De-icing by star CCM+

Abstract：The paper introduced the process of CFD simulation of De-icing of a Chang an vehicle by star CCM+, including geometry construction of pipe and cabin, generation of polyhedra, comparison of the performance of two pair of grille under steady cases and transient case for the better one.

Key words：de-icing star CCM+ CFD polyhedra transient

1 前言

作为汽车在寒冷环境下行驶时对驾驶员视野、行车安全的必要保障，空调系统除霜除雾性能是整车开发中一项重要的指标，我国汽车试验标准 GB11555—94 中对除霜除雾系统的性能有着严格的规定，该标准要求 20 分钟时 A 区冰层除尽区域占 A 区面积的 80%以上，40 分钟时 B 区冰层除尽区域占 B 区面积的 95%以上。空调系统除霜是利用 HVAC 喷射出的暖风对玻璃进行加热，经过热量的传递，使玻璃表层的冰层逐渐熔化，从而达到恢复驾驶员视线，避免因视线受阻引起的交通事故的目的。

应用 CFD 分析可以在汽车设计开发过程中的数字样机阶段就预测各种方案的优劣，通过 CFD 优化得出性能较好的方案，大大减少后期的物理样机制作和物理试验，从而缩短设计开发时间和降低开发费用。因此 CFD 分析在汽车设计中具有举足轻重的作用，在前期开发和后期整改中都得到了广泛应用。

本文应用流体力学计算软件 star CCM+建立长安某款轿车除霜风管及乘员舱模型，利用多面体网格对控制方程进行空间离散，应用稳态计算对比了两种不同前除霜格栅情况下的前窗速度分布，并选出一种较好的方案，着重应用 de-icing 模块对该方案冰层的熔化过程进行瞬态模

拟，最终得到了冰层厚度随时间的变化情况。

2 除霜原理

除霜过程主要包括以下四个步骤：

1. 气流从除霜风管吹入乘员舱，在乘员舱内形成一个相对稳定的流场，温度场则随气流进口边界条件的变化而不断改变；
2. 乘员舱内部温度场对玻璃内表面的温升造成影响，进而引起玻璃内表面和外表面之间的热传导；
3. 处于玻璃外表面的冰层接受到热量，当接受到的热量到达冰层潜在熔化热量时，冰层开始熔化；
4. 冰层与环境的外部热交换。

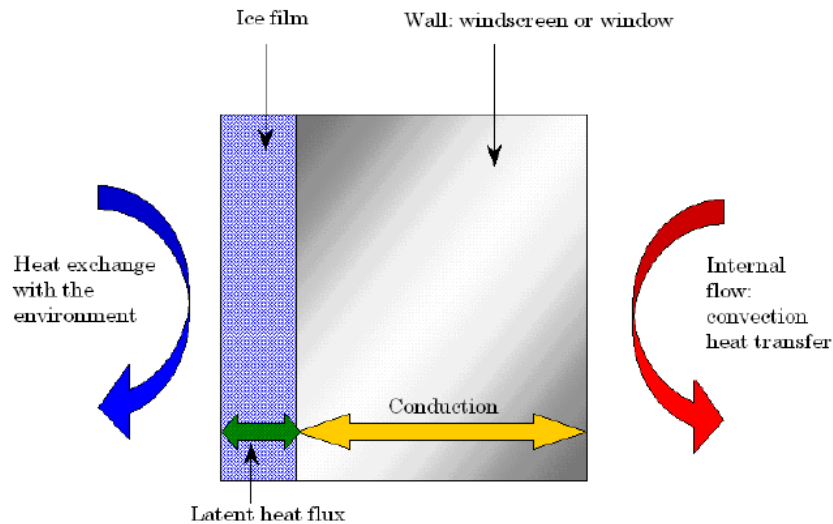


图1 冰层、玻璃及与环境热交换示意图

环境与壁面间的热交换可以用热传导和热辐射来描述：

$$\phi_c = h_e (T_{ext} - T_{ice}) ds, \quad \phi_r = \varepsilon \sigma (T_{ext}^r - T_{ice}^r) \quad (1)$$

其中， 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。

当壁面被内部气流加热时，热流就通过热传导和辐射的方式传递到壁面，也就是玻璃内表面，而玻璃内部的热传导是通过固体区域网格模拟，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，近似认为玻璃外层的温度就等于冰层的温度，而当 $T_{ice} = 0^\circ\text{C}$ 时，冰层开始在恒温下融化，而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：

$$d\phi = \phi_c + \phi_r - \phi_{cond} \quad (2)$$

其中 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 $dm[kg/m^2]$ 和冰层厚度的减小值 $d\delta$:

$$dm = \Delta t \cdot d\phi / C_L, \quad d\delta = dm / \rho_{ice} \quad (3)$$

这里 $C_L[J/kg]$ 是冰层熔化所需的热量, $\rho_{ice}[kg/m^3]$ 是冰层密度。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。

3 star CCM+在除霜分析中的应用

star CCM+具有界面友好, 条款清晰, 易于操作的特点, 而且多面体网格具有良好的贴体性, 可以更真实地模拟出风管、格栅及乘员舱的外形。此外, 多面体网格对网格数的依赖性也远远低于四面体网格, 且收敛较快。以下是运用 star CCM+进行除霜稳态分析和瞬态分析的具体步骤。

3.1 几何模型建立

应用前处理软件 Hypermesh 对该车型乘员舱及除霜风管分别搭配图 2、图 3 所示的两种格栅方案进行几何清理, 形成封闭腔体, 并生成表面网格, 如图 4

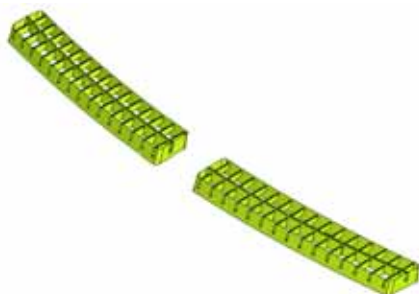


图 2 格栅方案一

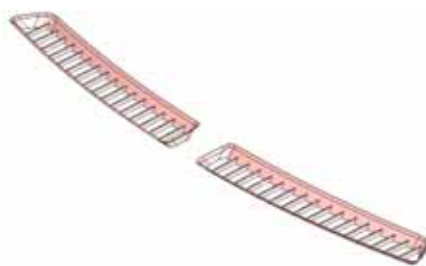


图 3 格栅方案二

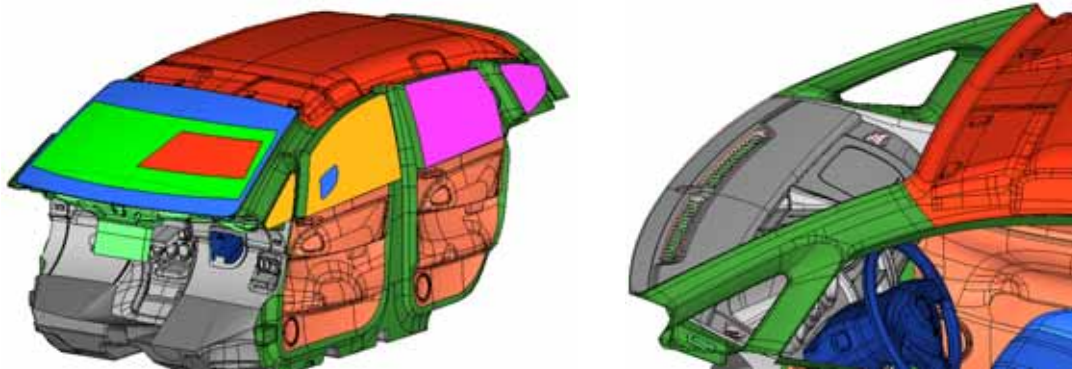


图 4 乘员舱及除霜风管几何外形

3.2 网格生成

将经前处理得到的外型导入 star CCM+中, 利用其自带的体网格划分功能, 生成多面体网格约 90 万。多面体网格具有良好的几何外形适应能力, 能够较精确地反应格栅等细微区域的几何特征, 如图 5。瞬态分析还需要在玻璃处向外法线方向拉伸 5 层共 5mm 厚的体网格, 定义拉伸的网格为固体玻璃区域, 并启用 thin film 模块, 设定玻璃表面冰层的厚度。如图 6

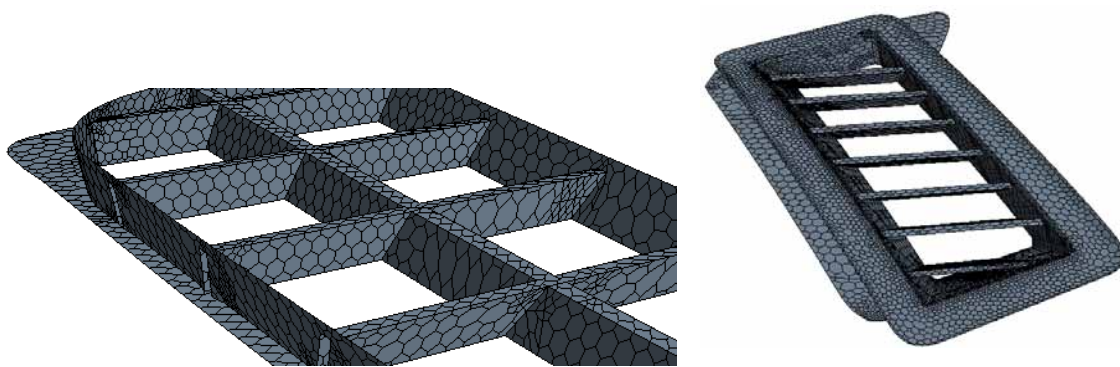


图 5 格栅处多面体网格

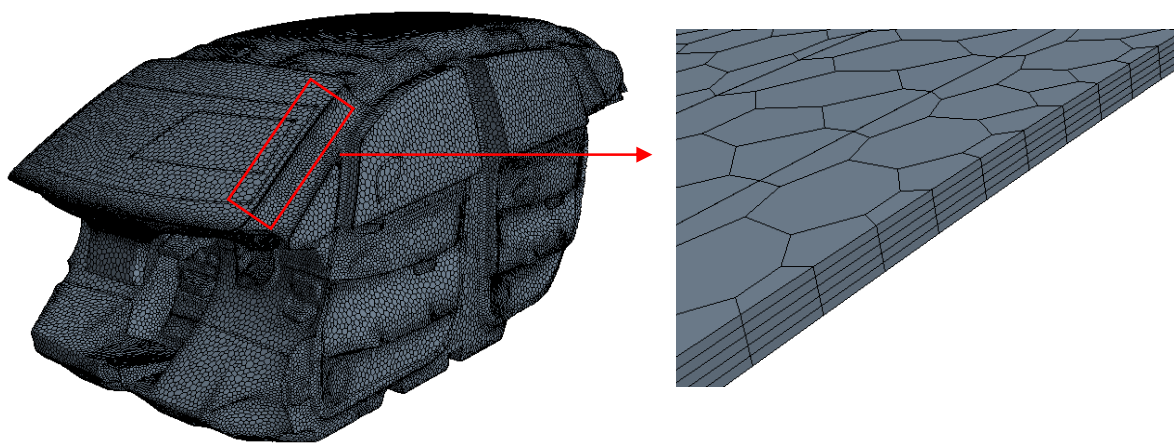


图 6 瞬态分析网格模型

3.3 边界条件及初始化

模型使用除霜风管的进口作为流量进口边界, 稳态分析给定流量; 瞬态分析给定流量及温度曲线, 如图 7, 玻璃壁面采用热对流边界条件, 外界温度取 -18°C , 其余壁面采用绝热边界条件。出口处使用压力边界条件。

初始时计算域及外界环境温度均设为 -18°C , 整个流场速度设为 0 m/s 。

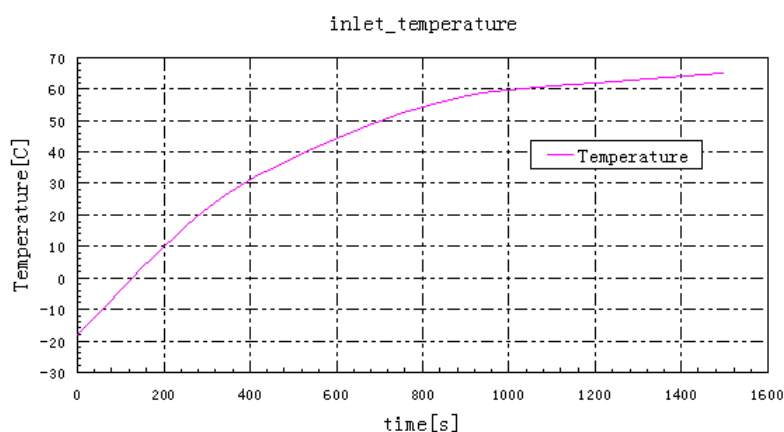


图 7 进口温度曲线

3.4 计算设置

采用 RANS 方法，二阶离散精度，realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型，近壁采用 high y+壁函数处理。瞬态分析时间总共为 1500s，时间步长取 10s，第一个时间步长内迭代步数为 200 步，以后每个时间步长的内迭代步数为 25 步。

3.5 结果分析

3.5.1 稳态分析

通过稳态计算，得到两套不同前除霜格栅方案下的前窗速度分布及风量分配，如图 8、9、10。可以看到通过格栅片形状的调整，视野区域的速度明显增大，速度分布变得更加合理，因此选择方案 2 的格栅可以提高前除霜性能，同时可以看到风管的速度分布及压力分布，如图 11、12。可见，在设计初期，需要横向比较多种方案时，通过 CCM+仿真计算预测除霜除雾性能，是一种方便快捷、直观有用的手段，能够大大降低因设计方向错误导致的成本增加。

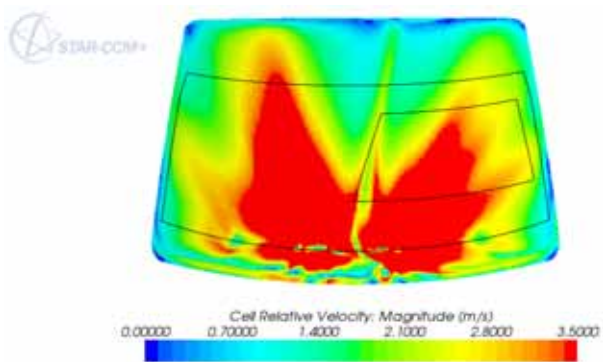


图 8 方案一前窗气流速度分布

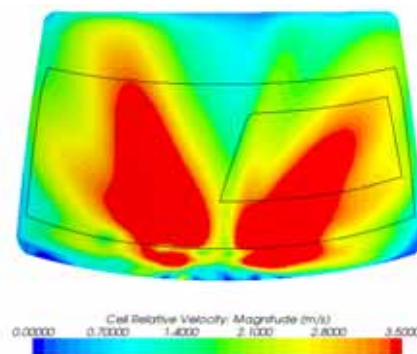


图 9 方案二前窗气流速度分布

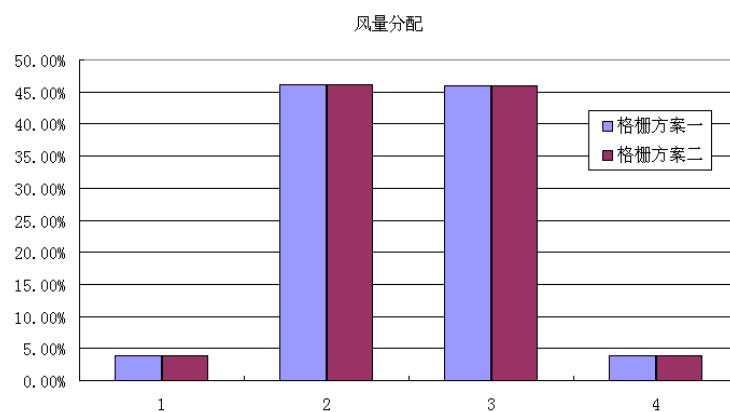


图 10 风量分配

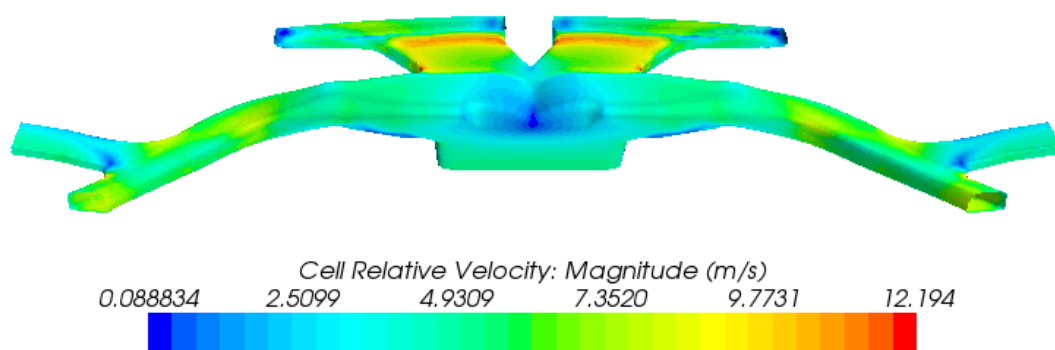


图 11 风管速度分布

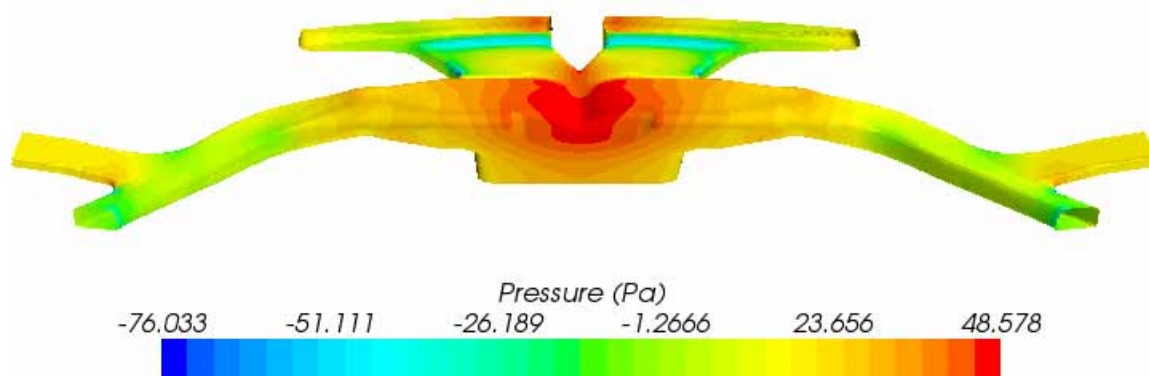


图 12 风管压力分布

3.5.2 瞬态分析

通过稳态计算结果的比较，挑选除霜性能较好的第二种格栅方案做瞬态除霜模拟，得到前窗冰层厚度随时间变化而变化的情况，如图 13。

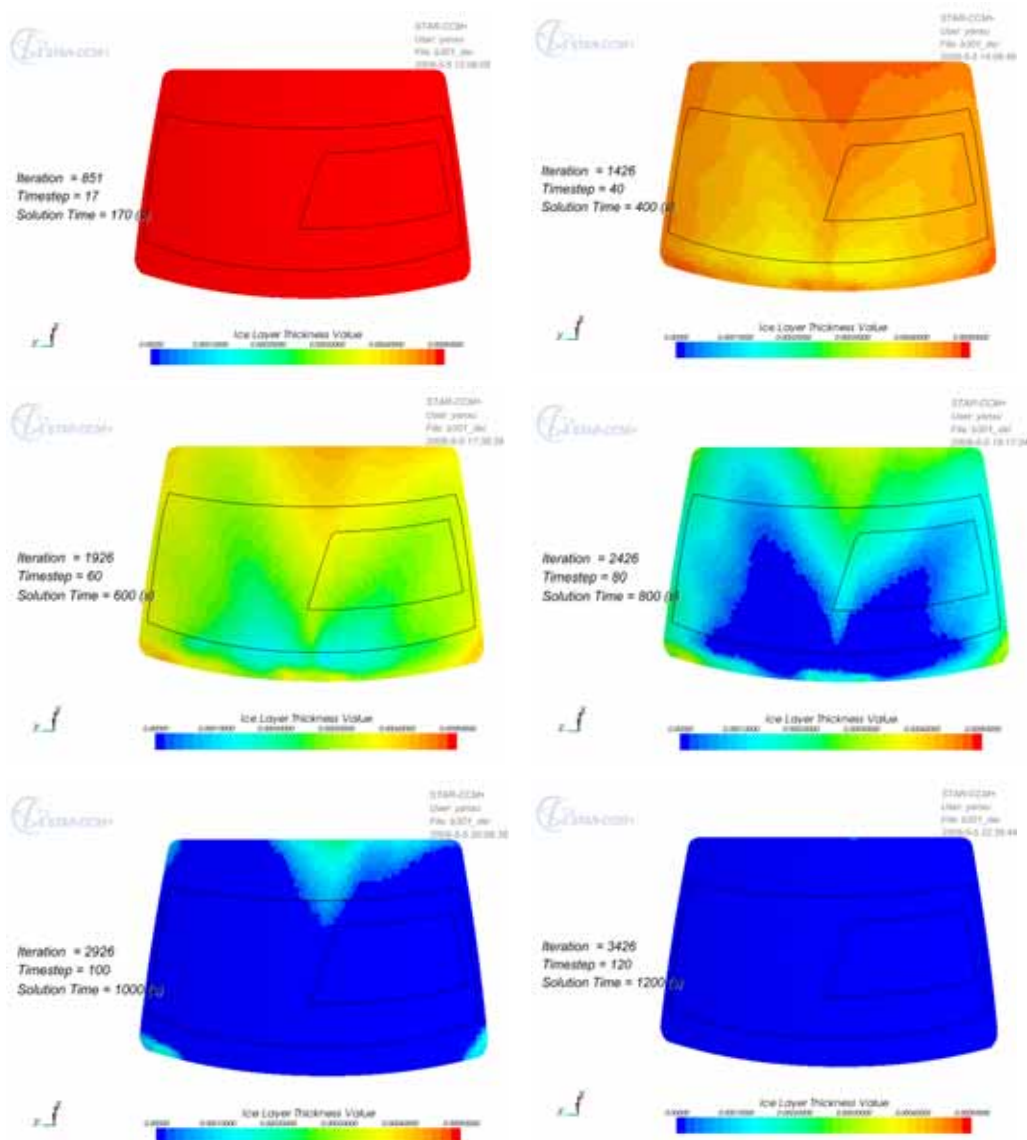


图 13 前窗冰层厚度

从图中看出，前除霜能够在 20 分钟内除尽所有的冰层，能够达到 20 分钟除尽 A 区 80%，40 分钟除尽 B 区 95%的国家法规要求。

侧窗没有强制的法规要求，但对于驾驶人员视野同样很重要，图 14、15 显示的是两侧窗在 15 分钟时的冰层厚度。视野区域的冰层基本除尽，效果良好。

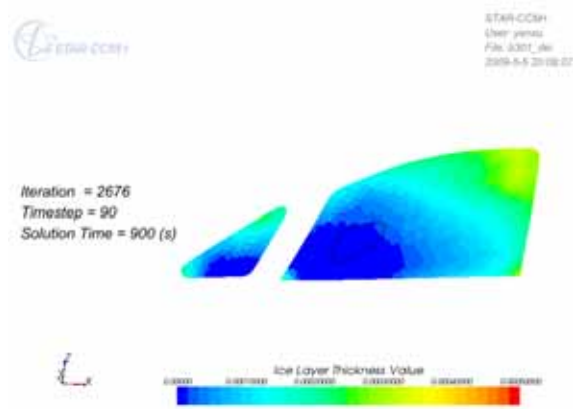


图 14 15 分钟时驾驶侧冰层厚度

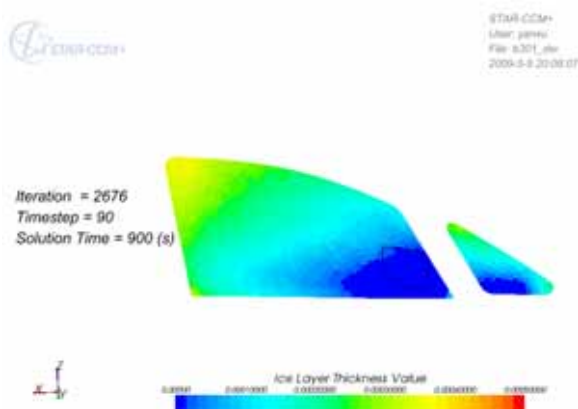


图 15 15 分钟时副驾驶侧冰层厚度

小结

Star CCM+软件能够模拟计算除霜除雾稳态和瞬态过程，其独创的多面体网格拥有更强的贴体性，一键生成也让建模变得方便快捷，可视化后处理让用户轻松提取计算后需要的各项结果。Star CCM+能够轻松地对风管、格栅等进行持续优化，在产品开发前期，对于指导产品设计具有方向性的重要利用价值。

参考文献

- [1] 中国国家标准 GB 11555-1994. 汽车风窗玻璃除霜系统的性能要求及试验方法. 1994
- [2] star CCM+除霜除雾教程