汽车除霜系统性能的数值模拟与试验

The CFD Simulation and Experiment for Automotive Defrost System Performance

王俊

（武汉理工大学，中国武汉，430000）

摘　要: 本文通过 STAR-CCM+中的稳态计算来预测汽车空调的除霜性能。并用瞬态模拟，获得前挡风玻璃上随时间变化的除霜效果图，与试验结果进行对比，为汽车除霜系统性能的模拟工程提供了参考。

关键字: CFD，除霜分析，汽车空调，STAR-CCM+

Abstract : The performance of automotive defrost system is evaluated by using steady simulation in STAR-CCM+. Then, Implicit unsteady simulation is used to research the contours of liquid fraction on windshield, which is Benchmarked by the experimental result. This article provides a reference to the simulation on the defrost performance of automotive HVAC system.

Keywords: CFD, Defrost, Automotive HVAC system, STAR-CCM+

1 前言

挡风玻璃的除霜性能设计是汽车的重要安全性能指标之一，国家提出了相应的法规要求(GB11556-1994)。汽车挡风玻璃的除霜性能与除霜风道的设计有密切的关系。在汽车除霜风道的设计开发中，传统的方案是凭借经验进行设计，这需要在整车试制完成后才能进行试验测试，此时改变除霜风道，可能会涉及布置、内饰甚至模具的修改，成本和代价很大。因此，通过 CFD 的方法，可以反映车辆内部复杂流场中的流动特征并提供任意截面与位置上的流速、压力等参数。通过瞬态模拟，还可以获得随时间变化的除霜效果图。这些信息可用于指导车辆设计与改进，替代或部分替代耗费较大的模型或实车试验，为其深入研究提供有效手段。

本文通过商用 CFD 软件 STAR-CCM+来验算评估新车型开发过程中的空调系统的除霜性能，对计算结果进行分析讨论。通过瞬态融霜计算和试验对比来评估和分析算法的可靠性和精确性。

2 模型的建立和方案确定

2.1 前处理与网格划分

收集整理 CATIA 数模，包括车窗玻璃、内饰件、座椅和除霜风道等，在 Hypermesh 中修剪形成封闭的求解域并划分网格，导出.nas 的格式后输入到 STAR-CCM+中。在 STAR-CCM+中整理 Boundaries 并命名，方便前后处理。

图 1 表面网格

检查面网格，修改提示的错误，并提高网格质量使计算容易收敛。在 STAR-CCM+中划分 Trimmer 体网格，设置除霜风道的边界层为 4mm（3 层），采用多处局部加密，得到求解域的体网格数量为 2,827,498。

2.2 边界条件和计算设置

计算中假定空气为不可压缩气体，湍流模型为 Realizable K-epsilon 模型，空间离散采用二阶迎风差分格式，迭代方式选用 Simple 算法，计算边界条件如下所示：(1) 入口条件为 300m^3/h，温度为 313K；(2) 出口边界为自由出流；(3) 其他边界：壁面边界；(4) 初始条件：以进口条件给定，环境温度为 255K。

瞬态计算时，温度为随时间变化的曲线（试验前为借用同类车型），拉伸玻璃层 5 层，厚度为 5mm，霜层厚度为 0.5mm，设置玻璃和冰层物性，冰层壁面边界条件，计算 2400 秒，步进 1 秒，每步迭代 20 次。

3 稳态结果分析

正确地布置出风口和设计除霜风道形状，才能获得理想的除霜效果。除霜性能涉及除霜风量、出风速度和出风温度等因素。考查点包括流量分配、挡风玻璃上的气流击点位置和风速分布等方面，可以通过其分析某车型的除霜性能。

3.1 出风口的流量分配

除霜风道的设计对汽车挡风玻璃的除霜性能起着至关重要的作用。风道的形状决定了各个出风口的流量，流量的分配与除霜性能密切相关，其为关键的考查点之一。图 2 为风道各出风口示意图，通过 Reports 中的流量统计模块，获得风道各出口流量分配值，如表 1。

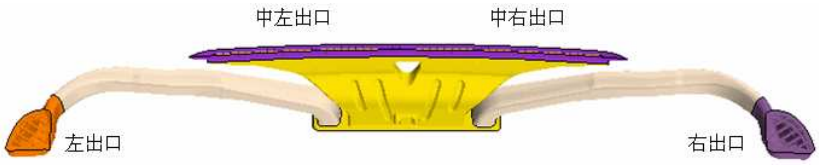


图 2 风道各出风口示意图

对比项目开发的目标值，各个出口的流量分配比例合理，满足流量分配的设计要求，这为除霜要求奠定了基础。可以通过变更中风道导流片的参数（形状、位置和数量）及侧风道的入口截面积，来改变流量分配比例，使其达到设计目标。

表 1 各个出风口的流量分配值

出口位置 / 流量分配	左出口	中左出口	中右出口	右出口
目标值	8% ~12%	38% ~ 42%	38% ~ 42%	8% ~12%
计算值	11.7%	38.2%	38.3%	11.8%

3.2 前挡风窗除霜性能的分析

通常情况下，最有效的除霜方法是使热风在到达挡风玻璃后尽快地达到湍流流动，并且尽可能覆盖挡风玻璃表面，增加换热面积。稳态的计算结果可以用来判定气流击点位置和速度分布是否合理及如何修改。

考察出风方向与前挡风玻璃之间的夹角 β 值（见图 3），建议其值为 30°±5°[1]。可以通过改变出风口前后摆角来调整 β 值。β 值和出口风速等因素的综合作用将影响气流击点的位置。如果气流击点的位置偏下会使风量衰减过快且不利于气流的散开，但是位置偏上将减少有效的覆盖面积，合理的气流击点弧线位于 B 区下边框线稍上的位置。如果气流击点位置不合适，一般可以通过调整 β 值来达到目标。

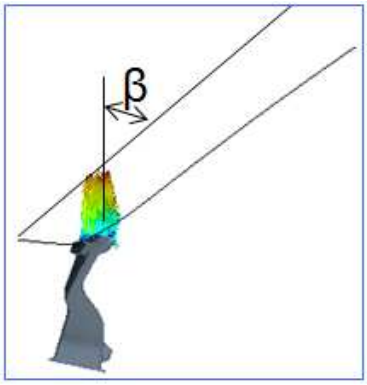


图 3 出风方向与前挡风玻璃的夹角 β

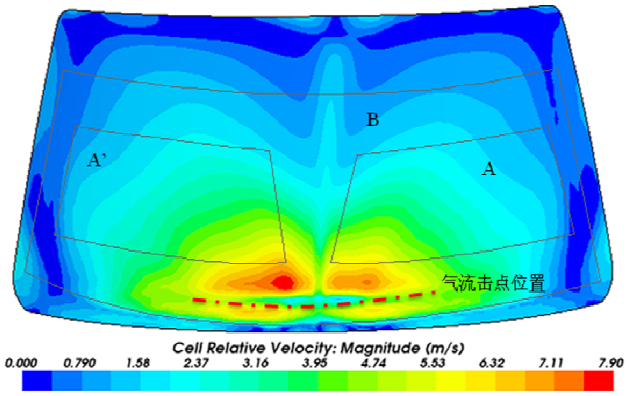


图 4 前挡风玻璃的速度标量图

由图 4 的速度分布图可以看出，A 区和 A’区基本对称，这与除霜风道对称有关。左右气流分别呈扇形散开，边缘有回流。由于气流击点位置合适，速度分布的形状比较合理，除霜区域内基本不存在死区，大部分的 A 区、A’区及 B 区都有合理的气流速度。其中，速度在 2.0 m/s 以上的区域约占 A 区和 A’区的 80%。法规要求 A 区和 A’区在规定的时间内 80%面积的霜除净，那么从稳态上预测，除霜性能是能满足要求的。但是，还是需要瞬态来协助分析及试验验证。

改变风挡玻璃上的速度分布是一项系统工程，由于涉及到气流击点位置、风道导流片的参数（形状、位置和数量）、出风口格栅高度和形状及整体风道走向等，一般需要经历多次的变更和验算。同时，风道设计成非对称性的更利于达到国标[2]要求，但是设计难度也会加倍的提高。

4 瞬态结果分析与试验对比

4.1 前挡风窗的除霜瞬态分析

瞬态计算可以直观对照国标而判定除霜性能是否合格，便于在设计阶段掌控风险，同时也是承启稳态计算和试验验证的必要步骤。计算所用算法是：当热风吹至风窗玻璃进行对流换热，玻璃将热能传导至霜层，一旦玻璃与霜层的边界上累计的热流超过了霜层的初始能量，霜层就会消失[3]。

霜层的初始能量的计算公式为：$E_{initial}=\rho_i * t * A *(c_p * T + L)$ （1）

式（1）中 $E_{initial}$ －初始能量；ρ_i －霜层密度；t －霜层厚度；A －边界面积；c_p －霜层比热；T －温度；L －潜热。

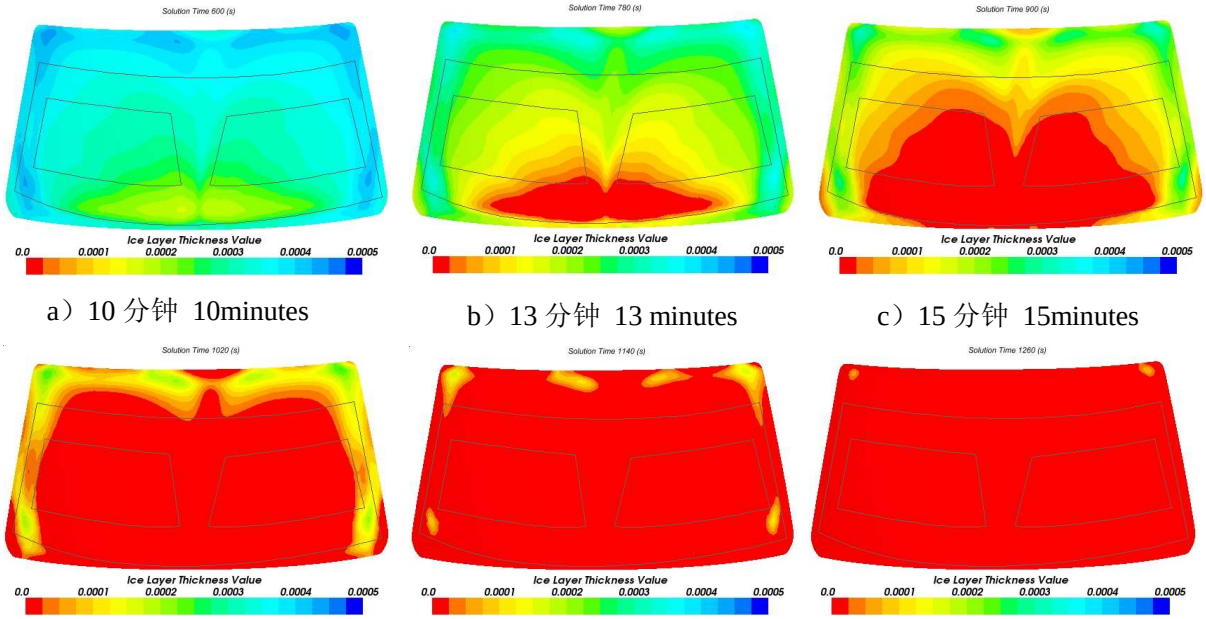
累计边界热流为：$q_{loss}=\int_0^{\tau} C_{emp} * A * q_w(\tau) d\tau$ （2）

式（2）中 C_{emp} －经验系数；A －边界面积；$q_w(\tau)$ －单位面积边界热流。

霜层开始融化后，其剩余霜层的厚度为：$S = t *[1-(q_{loss}/E_{initial})]$ （3）

式（3）中 t －霜层厚度；q_{loss} －累计边界热流。

应用瞬态计算进行前挡风玻璃上的除霜模拟分析，获得不同时刻的融霜图，考察除霜性能。图 5 为不同时刻所对应的霜层厚度分布图。由此可知早期的融霜图与稳态计算的速度分布图很相似，回流使部分风窗边缘的霜层融化。10 分钟时，霜层整体变薄。15 分钟时，A 区的霜层融化约 50%左右。17 分钟时，A 区的霜层融化约 98%左右。19 分钟时，A 区和 A’区的霜层全部融化，B 区 95%以上融化。21 分钟时，完成前风挡的除霜。可以满足国标[2]要求。



a）10 分钟 10minutes　b）13 分钟 13 minutes　c）15 分钟 15minutes

d）17 分钟 19minutes　e）19 分钟 19minutes　f）21 分钟 22minutes

图 5　前挡风玻璃的融霜图

4.2 前挡风窗的除霜试验结果

在环境舱中进行零下 18℃的除霜试验，间隔 5 分钟描绘融霜迹线图，得到试验结果图 6。将试验结果对比国标和仿真结果。图 6 的试验结果表明，10 分钟时，A区的霜层融化约 10%左右，15 分钟时，A区的霜层融化约 60%左右。19 分钟时，前风挡的霜层全部融化。可以满足国标[2]要求。

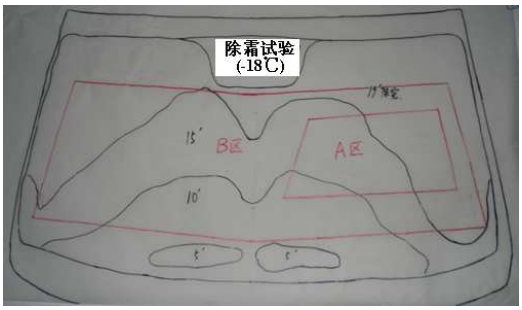


图 6　前挡风玻璃的除霜试验迹线图

对标试验与计算，除霜前期 10 分钟，试验融霜速度明显快于 CFD 计算的融霜速度；10 分钟以后，试验融霜速度稍快于 CFD 计算的融霜速度，整体约快了约 2 分钟。CFD 计算的融霜速度是恒定的，而实际的融霜速度是变慢的，因此出现融霜差距缩短的状况。毕竟该 CFD 算法是基于边界热流的经验算法，在处理传热和相变问题上作出了大量的简化，并且没有考虑冰水的流动与滑落等。虽然时间上有些差异，但是融霜的趋式和分布上来看，CFD 计算和试验是基本相符。此外从试验时实测的温度随时间变化的曲线来看，其温度稍高于借用温度曲线的同时刻的温度。

5 结论

（1）一般而言，合理的流量分配是保证除霜性能的基本条件。在分析除霜性能前，进行除霜风道的流量分配计算，可以节省资源和缩短开发周期。

（2）通过稳态计算可以初步定性除霜性能，提供判定和修改依据。气流击点位置的合理性是除霜区域的流速分布合适的前提条件。调整气流击点位置应该放在首位，随后才是优化风道导流片的参数、出风口格栅高度和形状。合适的气流分布才能确保优秀除霜性能。

（3）利用瞬态进行融霜分析，得到前风挡玻璃上不同时刻对应的霜层厚度，可以对比试验结果。本文中CFD计算的融霜速度整体稍慢约2分钟。虽然时间上有些差异，但是融霜的趋式和分布上来看，CFD计算和试验是基本相符。该算法的准确度还需要通过更多的分析和试验来修正经验值。

6 参考文献

[1] 梁学文,王丽华.除霜除雾风管及格栅的设计方法[J].企业科技与发展,2005,33(11):77～79.

[2] 国家发展和改革委员会. GB11556—1994. 汽车风窗玻璃除霜系统的性能要求及试验方法[S]. 1994.

[3] STAR-CCM+帮助文档。