

两种出风格栅对乘员热舒适性影响的对比研究

Comparative research on the influence of two cases of nozzle grille to the human thermal comfort

王俊

(武汉理工大学, 中国武汉, 430000)

摘要: 运用k- ϵ 湍流模型对载人轿车内三维流场进行了数值模拟, 其中考虑了太阳辐射、壁面间热辐射、空气含湿量及人体散热对速度场和温度场的影响。通过计算获得了气流组织形式、速度场和相对湿度分布, 并且对两种出风格栅对乘员舱温度和乘员热舒适性的影响进行对比分析。研究结果为轿车内气流组织的优化设计和改善热舒适性提供了技术支持。

关键字: 热舒适性; 出风格栅; CFD; STAR-CCM+

Abstract: By using K-epsilon turbulence model, a numerical simulation on 3D airflow field and temperature field inside a car is performed, taking solar radiation, surface-to-surface radiation, air humidity and heat dissipation of human body into account. The airflow distribution, velocity scalar and Relative Humidity (RH) distribution was obtained by simulation. Moreover, the analysis was taken for the impact of two cases of nozzle grille to the temperature of the cabin and human thermal comfort. The results provide technique supports for optimizing in-car airflow and improving comfort of the car.

Keywords: thermal comfort, nozzle grille, CFD, STAR-CCM+

1 前言

乘员舱内的热舒适环境对于乘员非常重要, 驾驶员在热舒适的环境中驾驶可以增加安全性。同时, 乘客可以获得良好的精神状态。当前, 车室内热舒适程度不仅是汽车豪华程度的标志, 而且是提高汽车产品竞争力的重要手段。车内温度和气流流速是决定热环境的重要指标。由于车内气流流速较低, 准确测试流场分布比较困难, 用CFD计算车内流场, 成为一种有效研究方法。另外, 在产品开发前期通过CFD技术进行模拟计算, 可以缩短车辆开发周期。

本文以三维轿车为研究对象, 对车室内稳态空气流场和温度场进行了分析。研究了考虑自然对流换热、太阳辐射、固体壁面及室内物体间的热辐射、人体散热和空气含湿量对车内温度的影响。为了定量分析太阳辐射的影响, 太阳辐射在车内的计算采用射线追踪法^[1~3]。通过两种出风格栅对乘员热舒适性的影响对比, 对重要的分析要素进行归纳总结后运用于实际。

2 模型的建立和方案确定

2.1 前处理与分析条件

收集整理 CATIA 数模, 包括车窗玻璃、内饰件、座椅、通风风道和假人等, 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。

如图 1 所示, 方案 2 的格栅的外部导风片由方案 1 的 7 片变成 6 片, 并且内部导风片角度进行了偏转。除了格栅外, 两方案其他部分数模均一样。



图 1 两种出风口格栅模型

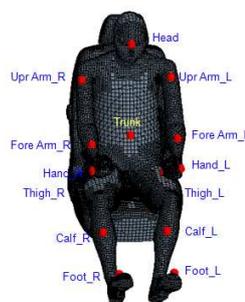


图 2 测点位置

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 1,635,646。在人体各个重要部位布置监控温度的测点, 如图 2 所示。

2.2 车室热边界条件的处理

2.2.1 太阳辐射的处理

在数值计算中, 太阳辐射的准确计算是关键之一。对于太阳辐射不能穿过的部分, 如车顶、侧围等, 由于太阳辐射使车身外表面温度升高, 相当部分热量将传入车内, 构成车身热负荷的一部分。因此, 可以将太阳辐射能量转化成相当的温度形式, 与车外温度迭加在一起, 组成太阳照射表面综合温度, 取名日照表面综合温度 t_c 。用 t_c 来进行车身壁面传热计算就比较简单^[4]。车身顶面的表面综合温度 t_{c1} 和车身侧面的表面综合温度 t_{c2} 分别为:

$$t_{c1} = t_0 + [\rho * (I_{SH} + I_{GH}) / (\alpha + k)] \quad (1)$$

$$t_{c2} = t_0 + \frac{1}{2} [\rho * (I_{SH} + I_{GH} + I_{SV} + I_{GV}) / (\alpha + k)] \quad (2)$$

两式中: t_0 —车外温度; α —车外空气与日照表面的对流换热系数; k —传热系数; ρ —车室外表面吸收系数, 与车身颜色相关, 可取 0.9; I_{SH} 、 I_{GH} —太阳在水平面的直射强度和散射强度; I_{SV} 、 I_{GV} —太阳在垂直面的直射强度和散射强度;

对于地板, 没有受到太阳辐射的影响, 但是受到地面反射热的影响, 可取: $t_{c3} = t_0 + 3^\circ\text{C}$ (3)

2.2.2 门窗玻璃的热边界条件

乘用车的玻璃窗所占的面积很大, 太阳辐射所带来的问题显著, 准确确定其热边界条件, 对模拟结果的准确性影响很大。太阳辐射通过车窗玻璃传入的热量由两部分组成, 即由车内外温差以对流方式而传入的热量和由太阳透过玻璃的辐射热量。

(1) 由于车内外温差而引起的热流密度:

$$Q_1 = K_{\text{Glass}} * (t_0 - t_B) \quad (4)$$

式中: K_{Glass} — 玻璃窗的传热系数; t_B — 车内温度。

(2) 由于太阳辐射通过玻璃而引起的热流密度:

$$Q_2 = (\tau + \rho * \alpha_B / \alpha_H) * I * S \quad (5)$$

式中: τ — 太阳辐射通过玻璃窗的透射比; ρ — 玻璃对太阳辐射的吸收比; α_B — 内表面放热系数; α_H — 外表面放热系数; I — 车窗外表面总的太阳辐射强度; S — 遮阳修正系数。

2.2.3 人体热边界条件确定

人体皮肤表面温度和热流密度(即人体的热边界条件)直接决定人体热舒适性, 并控制人体调节机构作出相应的反应。有关资料表明, 人体发热量几乎与室温无关, 约为 116W, 驾驶员约为 176W^[6]。但室温变化时, 人体以传热、对流、辐射等方式的显热散热和由于出汗等湿交换引起蒸发散热将发生变化。由于人体生理特点和人的个性差异, 为简化计算, 建议在汽车中乘员不分驾驶员与乘客, 都按 116W 的发热量进行计算^[4]。

2.3 边界条件和计算设置

本文仿真计算的湍流模型为 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, 数值计算中考虑空气含湿量, 计算边界条件如下所示:

- (1) 入口流量为 350m³/h, 温度为 283K, 相对湿度 50%;
- (2) 出口边界为自由出流;
- (3) 采用太阳辐射模型, 直射强度 1000W/m², 散射强度 100W/m², 方位角 90 度, 高度角 90 度;
- (3) 壁面边界按照 2.2 中的方法来处理;
- (4) 初始条件: 以进口条件给定, 环境温度为 313K, 相对湿度 50%。

3 计算结果分析

正确地布置出风口位置和出风格栅设计, 才能获得理想的空调效果。一般而言, 出风口的位置与仪表板造型设计及布置相关, 其改动容易受到限制, 以及引起的成本较大。出风格栅的设计则自由得多, 可以通过调整出风格栅的角度和宽度来改善乘员舱的气流组织形式, 获得更优的热舒适性。

3.1 气流组织形式分析

出口位置和出风格栅可以基本决定乘员舱的气流组织形式，气流的分布决定了压力、温度和湿度在乘员舱的分布情况，对热舒适性起到决定性的作用。

从图 3 的气流组织形式可知，风道出口的四股气流的主流均未受到前排乘员的阻挡，而直接到达后排区域，为后排提供大量的冷空气。由于扩散的作用，射流的外围低速风可以带走前排的热量，避免高速冷风直接吹向乘员而造成局部过度散热。因此，前后排均较舒适，且后排舒适区域大于前排。

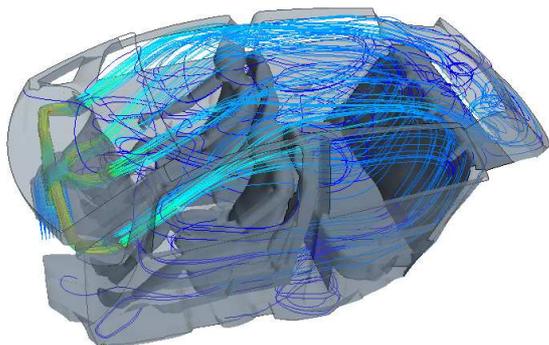


图 3 乘员舱流线图（方案 1）

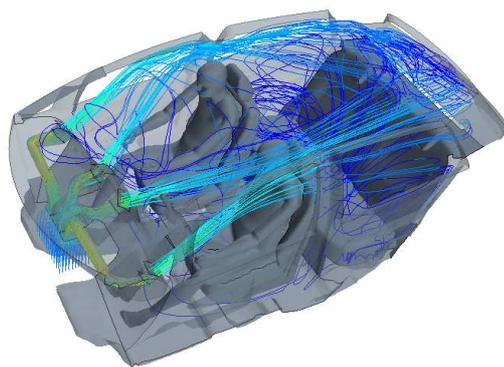


图 4 乘员舱流线图（方案 2）

从图 4 的气流组织形式可知，中间风道出口的两股气流的主流斜向吹到乘员头部，分别与两侧风道吹出的气流相遇，交汇点约在乘员头部。乘员头部一侧附近气流速度较大，导致脸部一边较凉，另一边较热。该气流组织形式破坏了四个风道出口的独立性，导致后排甚至整个乘员舱温度的均匀性变差。

3.2 速度场分析

风速是热环境中的一个重要指标。人在舒适温度范围内，一般当气流速度达到 0.15m/s 时，就可感到空气清新而产生新鲜感。反之，即使室内气温适宜，但气流速度很小，也会使人感到沉闷。并且，增大乘员舱内的风速会让乘员感觉凉快，人在 1m/s 的风速下会觉得温度下降 1℃。

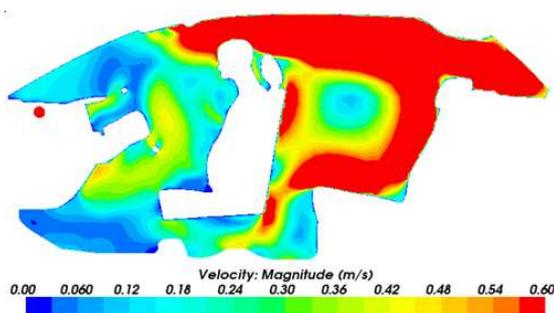


图 5 驾驶员截面的速度标量图(方案 1)

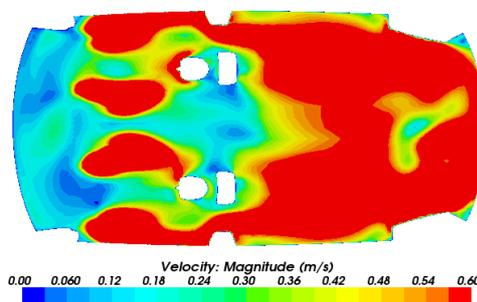


图 6 鼻部水平截面的速度标量图(方案 1)

由图 5 和图 6 可知，因为气流从驾驶员头顶吹过，其额头以上部位的气流速度较大。在酷热的

环境中, 头部的风速可以稍大 ($\leq 3\text{m/s}$), 让乘员感觉凉快。鼻部属于对冷气最为敏感的部位, 应控制其附近的风速。驾驶员鼻部附近气流速度约为 $0.24\text{m/s} \sim 0.42\text{m/s}$, 处于较舒适范围内 ($0.2\text{m/s} \sim 0.6\text{m/s}$)。副驾驶鼻部附近气流速度大于 0.6m/s , 可见气流速度过大, 处于不舒适区间内, 需要稍微调整副驾驶侧格栅角度。同时应该考虑到, 乘员的身高和姿式的不同将会影响该结论。

由图 7 和图 8 可知, 驾驶员头顶部位的气流速度较大, 其鼻部附近气流速度约为 $0.12\text{m/s} \sim 0.16\text{m/s}$, 处于舒适范围内。副驾驶鼻部附近气流速度约为 $0.14\text{m/s} \sim 0.18\text{m/s}$, 处于舒适范围内。

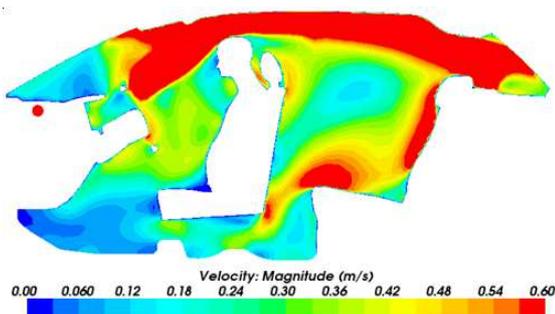


图 7 驾驶员截面的速度标量图(方案 2)

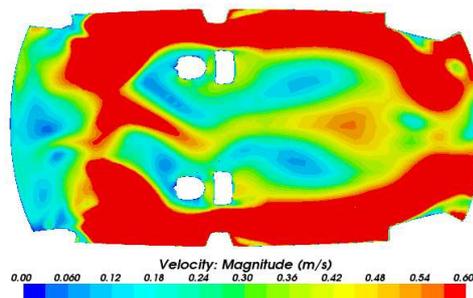


图 8 鼻部水平截面的速度标量图(方案 2)

对比图 5 和图 7 可知, 方案 2 的后排空间的高流速区域明显小于方案 1, 后排座椅附近气流速度的均匀性差于方案 1。对比图 6 和图 8 可知, 方案 2 在鼻部水平截面上气流速度的均匀性差于方案 1, 特别是在后排流速的均匀性差更为明显, 高流速区域明显小于方案 1, 后排乘员的舒适性难以保证, 在夏天将会感觉非常炎热。

3.3 相对湿度分析

空气相对湿度对人体的热平衡和温热感有重大作用, 其将从一定程度上影响人体热感觉和皮肤的湿润度^[5]。降低湿度会使皮肤表面的汗液加快蒸发, 使人感觉凉快。一般情况下, 空气相对湿度在 $30\% \sim 70\%$ 之间为宜。

由图 9 可知, 驾驶员头部附近的湿度约为 $37\% \sim 46\%$, 后排为 $49\% \sim 58\%$, 推荐值为 $30\% \sim 70\%$, 且夏季小于 55% 更佳, 可见湿度较为合适。同样通过截取副驾驶员的垂直截面, 副驾驶员头部附近的湿度约为 $46\% \sim 52\%$, 后排为 $52\% \sim 61\%$, 可见湿度可以满足要求。

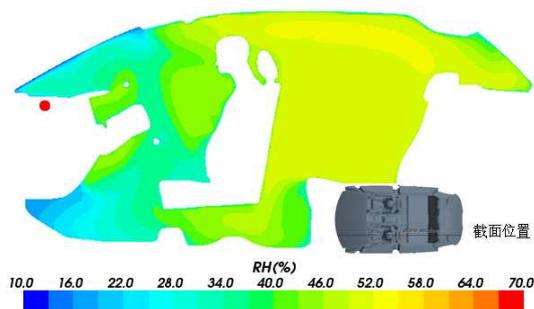


图 9 驾驶员截面相对湿度云图(方案 1)

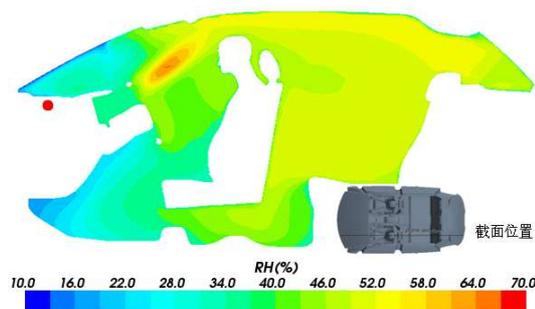


图 10 驾驶员截面相对湿度云图(方案 2)

由图 10 可知，驾驶员头部附近的湿度约为 42%~48%，后排为 46%~50%，可见湿度较为合适。同样可知，副驾驶员头部附近的湿度约为 44%~48%，后排为 46%~55%，可见湿度可以满足要求。

3.4 热舒适性分析

空气温度对人体热舒适性的影响很大，是衡量热舒适性的一项重要指标。由于车内温度场和速度场的不均匀性，通过计算人体不同部位的 EHT（Equivalent Homogenous Temperature）值来评估人体的热舒适性^[1]。

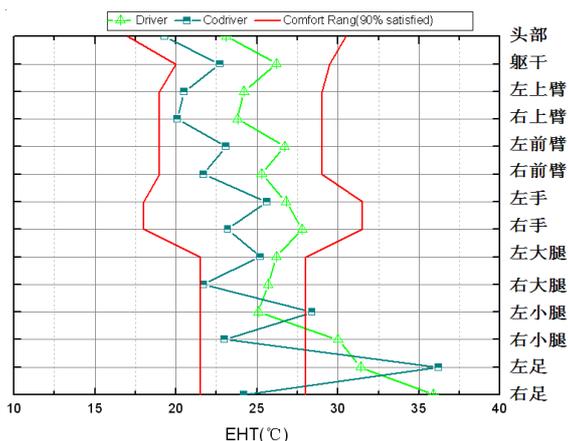


图 11 前排乘员的 EHT 值（方案 1）

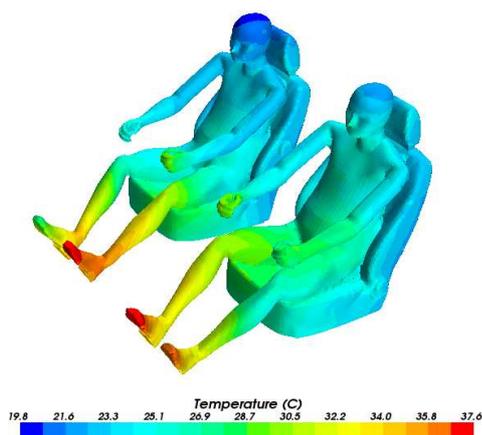


图 12 前排乘员的体表温度值（方案 1）

分析图 11 和图 12 可知，驾驶员小腿以上部位的温度明显高于副驾驶员，驾驶员小腿部位的温度略低于副驾驶员。太阳辐射透过前风挡照射在前排乘员的小腿和足部，使其温度明显高于其他部位。喷口出来的冷空气从前排乘员头部上方喷到后排，使乘员头部温度最低。头部和足部的温度差达到了约 17 °C，一般基于“头凉脚暖”的原则，头部温度比脚以下温度低 4~6 °C 为宜，显然温差过大，需要开启吹脚模式。

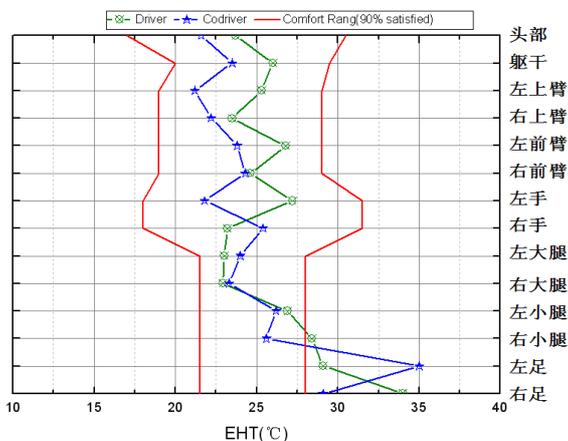


图 13 前排乘员的 EHT 值（方案 2）

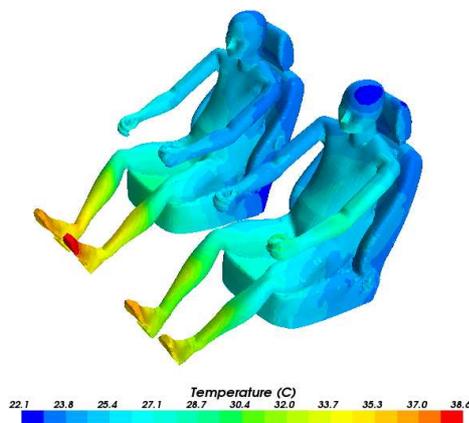


图 14 前排乘员的体表温度值（方案 2）

分析图 13 和图 14 可知, 方案 2 的前排乘员的温度分布规律与方案 1 基本相同。但是, 对比方案 1, 方案 2 驾驶员温度分布的均匀性变差, 并且整体温度较方案 1 要高 1~2 °C。对于这种严苛的条件下考查乘员舱热舒适性, 必须开启吹脚模式, 降低小腿以下部位的温度, 同时, 开启吹脚模式后, 会降低吹面风道的流量值, 有利于降低头部附近的气流速度, 避免明显的吹风感。

4 结论

本文通过考虑太阳辐射、固体壁面间的热辐射、人体散热和空气含湿量来进行两种出风格栅对乘员热舒适性的影响, 更符合实际情况, 并对重要的分析要素进行归纳总结后运用于实际, 可以为工程实例作指导。

(1) 方案 1 的气流组织形式较为合理。气流的独立性确保了整个乘员舱气流分布的均匀性, 也是温度均匀分布的前提条件, 其在后续的速度场和温度场的分析中得到了验证。

(2) 对于该工况下, 太阳透过前挡风窗照射在足部附近, 足部温度会较高, 此时需要开启吹脚模式来缓解高温。下一步可以考虑进行开启吹脚模式的分析。

(3) 由于考虑的更全面和细致, 可以在现有分析基础上进行瞬态降温分析, 所得到的结果更为精确, 可用于对标和验证环境舱中的降温实验。同时通过反推, 使得热舒适性分析的验证变得可行。

5 参考文献

- [1] Hara J, Fujitani K, et al. Computer Simulation of Passenger Compartment Air-flow[C]. SAE paper 881749, 1988.
- [2] Tohru Komoriya. Analysis of Vehicle Passenger Compartment Ventilation Using Experimental and Numerical Model[C]. SAE paper 890312, 1989.
- [3] Han T. Three-dimensional Navier-stokes Simulation for Passenger Compartment Cooling[J]. Int. J. of Vehicle Design, 1989, 10(2).
- [4] 韩占忠, 等. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [5] 王东屏, 兆文忠, 刘刚, 许乔奇. 考虑空气含湿量的列车空调系统数值仿真[J]. 大连交通大学学报, 2008, 29(5), 68-72.
- [6] 陈江平, 孙召璞, 阔雄才, 等. 载人车室内部空气流场温度场的数值模拟[J]. 汽车工程, 1999, 21(5).