

基于 STAR-CCM+ 的某轿车乘员舱热舒适性仿真分析

A Simulation Study of Passenger Thermal comfort in a car Based on STAR-CCM+

许志宝 陶其铭

(江淮汽车股份有限公司技术中心, 安徽 合肥, 230601)

摘要: 本文应用计算流体力学软件 STAR-CCM+对某轿车乘员舱的热舒适性进行分析, 简述了 FMV-PPD汽车热舒适性评价指标, 并采用该评价指标对轿车乘员舱的热舒适性进行了评价, 结果表明, 该轿车乘员舱内大多数乘客处于舒适状态, 只有副驾驶员处于微热状态。

关键词: STAR-CCM+ 热舒适性、FMV-PPD 乘员舱

Abstract: In this paper, Passenger thermal comfort of a car was analyzed by using STAR-CCM+ software. Discussed the FMV-PPD index appraisal target thermal comfort and Appraised the passenger thermal comfort of this car using FMV-PPD index. The studies indicated that Most passengers feel comfortable while the copilot feels slightly warm.

Key words: STAR-CCM+ Thermal Comfort, FMV-PPD Cabin

1 前言

随着汽车工业的发展, 乘员舱的热舒适性越来越被人们所重视。但是, 由于汽车乘员舱空间狭小, 结构复杂, 舱内空气品质对驾驶员及乘客的影响很大。长期在较差的汽车室内环境下停留, 极易使人产生头晕、胸闷等症状, 容易导致驾驶员精神恍惚, 注意力不集中, 增大了交通事故发生的可能性。

舒适性是一个比较广的概念, 汽车乘员舱环境的舒适性是指为乘员提供舒适愉快便利的乘坐环境与条件, 包括良好的平顺性、车内的低噪声、适宜的空气环境以及良好的驾驶操作性能。在乘员舱舒适性的评价体系中, 热舒适性是其中一个至关重要的因素。

热舒适性, 在美国供暖空调工程师学会的标准中已有明确的定义, 即: 热舒适是对热环境表示满意的意识状态。影响人体热舒适性的因素主要包括环境因素和人的因素, 其中环境因素主要包括: 空气温度、平均辐射温度、空气流速、空气相对湿度等; 人的因素包括: 人的新陈代谢和衣服的热阻。

2 汽车热舒适性的评价指标

关于热环境的舒适条件, 丹麦学者 PO Fange 教授等从 60年代就开始进行了大量的研究工作, 提出了热舒适的 FMV-PPD 指标体系。在 ISO 7730 标准中以 FMV-PPD 指标来描述和评价热环境, 该指标综合考虑了人体活动程度、衣服热阻(衣着情况)、空气温度、平均辐射温度、

空气流速、空气相对湿度等六个因素，以满足人体热平衡方程为条件，通过主观感觉试验确定出的绝大多数人的冷暖感觉等级，PM的分度如表 1 所示，PM指标（预期平均评价）代表了对同一环境绝大多数人的冷热感觉，因此可用PM指标预测热环境下人体的热反应，对于即使大多数人表示满意的热环境，由于人与人这间生理等方面的差别，仍然会有人感到不满意，为了说明这一关系，提出用PPD指标（预期不满意百分率）来表示对热环境不满意的百分率。

表 1 PM热感觉标尺

热感觉	热	暖	微暖	适中	微凉	凉	冷
PM值	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3

POFange教授利用人体热平衡原理，确定了PM的数学分析式，如式 1 所示，并用概率分析方法，确定了PM和PPD指标之间的数学关系，如式 2 所示：

$$PM = (0.303 \exp(-0.036M) + 0.028) \times [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}] \quad (1)$$

其中：M - 人体能量代谢率，决定于人体的活动量大小，单位是 W/m^2 ；

W - 人体所作的机械功，单位是 W/m^2 ；

H - 人体表面的对流、辐射的热损失，单位是 W/m^2 ；

E_c - 皮肤上的散热和出汗散热量，单位是 W/m^2 ；

C_{res} - 呼吸中的显热损失量，单位是 W/m^2 ；

E_{res} - 呼吸中的潜热损失量，单位是 W/m^2 ；

$$H = 3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \{ (t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 \} - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a)$$

$$E_c = 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99(M - W) - p_a] + 0.42 \times \{(M - W) - 58.15\}$$

$$C_{res} = 0.0014 \times M \times (34 - t_a)$$

$$E_{res} = 1.72 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - p_a)$$

T_{cl} - 衣服的表面温度，单位是 $^{\circ}C$ ；

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl} \{ 3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \times h_c (t_{cl} - t_a) \}$$

h_c - 对流换热系数，单位是 W/m^2K ；

$$h_c = 2.38 \times (t_{cl} - t_a)^{0.25} \quad \text{for } 2.38 \times (t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1 \times v_{ar}$$

$$h_c = 12.1 \times v_{ar} \quad \text{for } 2.38 \times (t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1 \times v_{ar}$$

f_{cl} - 人体着装后实际表面与其裸身人体表面积之比，即着衣面积系数；

$$f_{cl} = 1.0 + 1.290 I_{cl} \quad \text{for } I_{cl} < 0.078$$

$$f_{cl} = 1.05 + 0.645 I_{cl} \quad \text{for } I_{cl} > 0.078$$

I_{cl} - 服装的热阻，单位是 m^2K/W ；

t_r - 平均辐射温度，单位是 $^{\circ}C$ ；

v_{ar} - 风速，单位是 m/s ；

t_a - 人体周围空气温度，单位是 $^{\circ}C$ ；

p_a - 人体周围空气的水蒸气分压力，单位是 Pa 。

$$PPD=100- 95 \times \exp[-(0.03353 \times FM^4 + 0.2179 \times FM^2)] \quad (2)$$

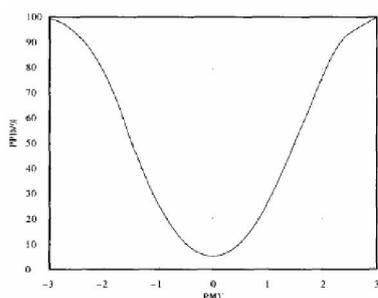


图 1 FM与 PPD的关系

PPD和FM之间的关系可用图 1表示：在FM=0时，PPD为5%，这意味着即使车厢内环境为最佳热舒适状态，但由于人们生理等各方面的差别，还有5%的人会感到不满意。

3 模型的建立与边界条件

3.1 模型建立

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，处理后的模型如下图所示：

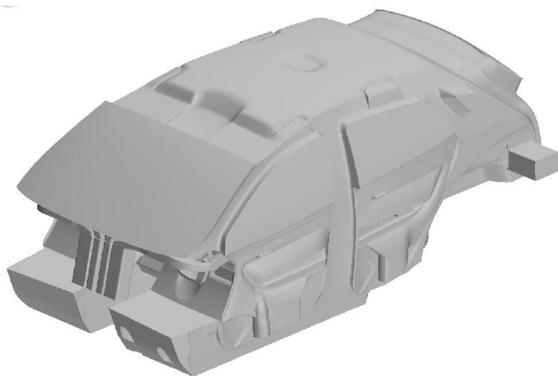


图 2 乘员舱热舒适性分析网格模型

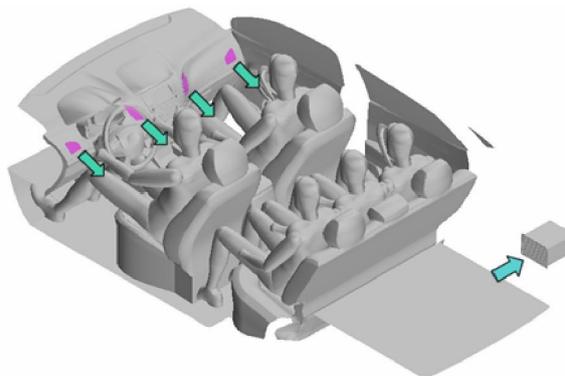


图 3 乘员舱热舒适性分析的边界

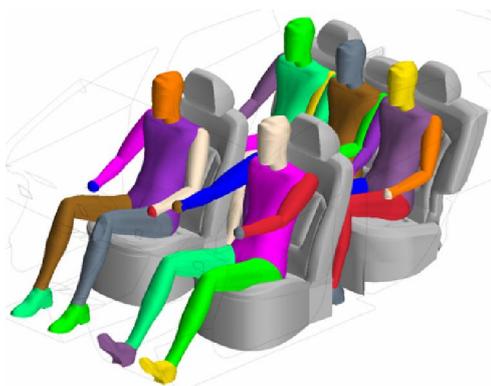


图 4 假人模型示意图

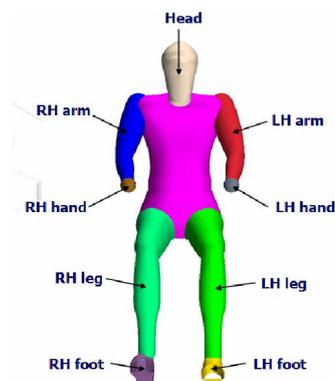


图 5 假人的测点位置

在STAR-CCM#中划分体网格，并在人体各个重要部位布置监控温度的测点，如图5所示，

共设置 9 个测点。

3.2 边界条件

仿真计算的湍流模型为 k- high Reynolds mode 模型，选用 Simple 算法，采用二阶迎风差分格式，边界条件如下：

- (1) 入口流量为 520CMH, 环境温度为 43 ，相对湿度 40% ；
- (2) 出口边界为压力出口 ；
- (3) 采用太阳辐射模型，直射强度 1000W/m², 方位角 90 度，高度角 90 度 ；

4 计算结果

乘员舱热舒适性的计算是在外环境参数、车室内几何参数、车体材料的热物理特性和空调风道等输入参数的基础上，首先利用传热学基本原理，进行太阳辐射、车室内热辐射以及冷却循环系统的计算与分析，然后再利用流体力学基本方程，计算出乘员舱内三维流场和温度场，获得乘员舱内空气温度、流速分布，这些值作为人体生理模型的输入信息，用于计算人体的皮肤温度，以便去评价人体的热舒适性。

4.1 速度场分布

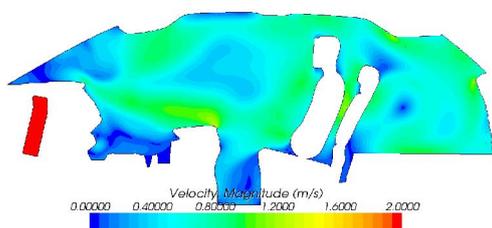


图 6 Y=0mm 截面速度分布图

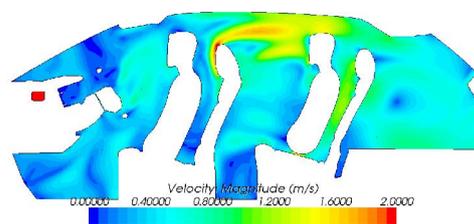


图 7 Y=320mm 截面速度分布图

由于进风口的速度较大，可以看到非常明显的进风口射流现象，也可以看到 Y=0mm 平面及 Y=320mm 截面上的流速分布是不均匀的。

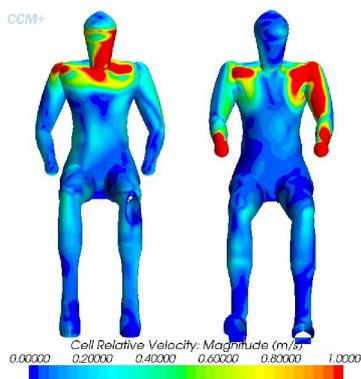


图 8 前排座椅假人表面速度分布

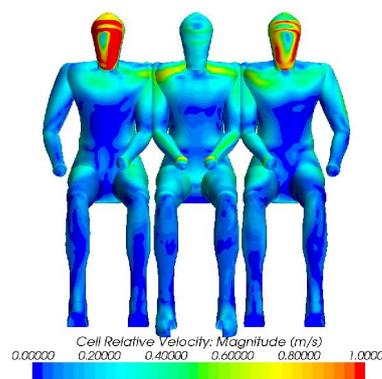


图 9 后排座椅假人表面速度分布

4.2 温度场分布

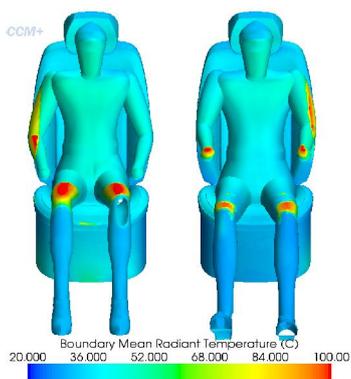


图 10 前排座椅假人表面温度分布

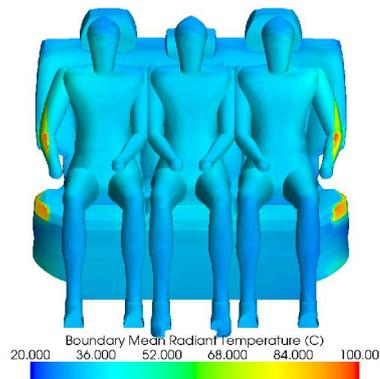


图 11 后排座椅假人表面温度分布

由于太阳通过玻璃直接照射的原因，使假人的膝盖、胳膊部位温度偏高。

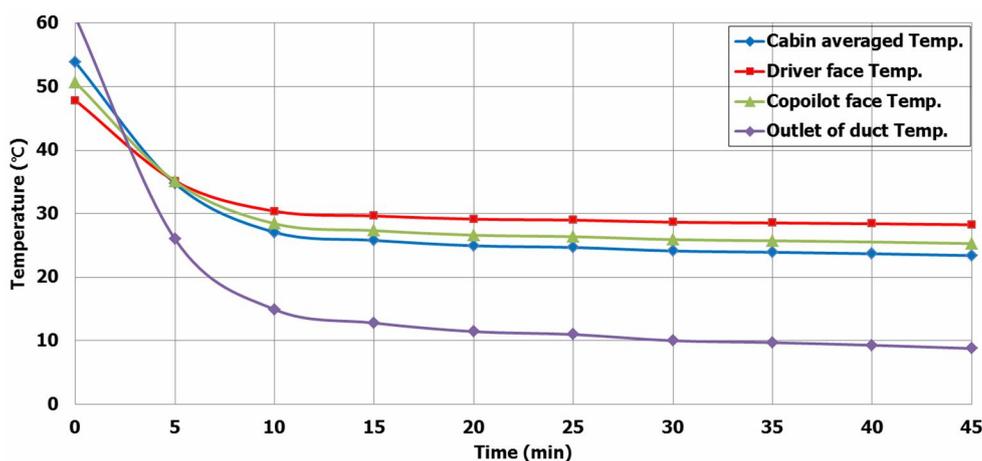


图 12 主要关注点温度随时间变化曲线

从图中可以看出，由于太阳的辐射，当 $t=0\text{min}$ 时，乘员舱内的温度较高，随着空调的运行，制冷的作用，乘员舱内的温度逐渐降低，最终达到稳定状态，处于热平衡，使人体处于比较舒适的环境中。

4.3 FMV及 PFD计算结果

表 2 FMV及 PFD计算结果

Part	Driver		Copilot		LH Passenger		RH Passenger		MID Passenger	
	FMV	PPD(%)	FMV	PPD(%)	FMV	PPD(%)	FMV	PPD(%)	FMV	PPD(%)
Dummy	0.5	9.8	1.2	25.6	0.1	5.2	0.2	5.8	0.3	6.8
Head	0.11	5.2	-0.3	6.8	-0.3	6.8	-0.7	13.9	0.1	5.2
Body	0.6	11.8	0.8	16.2	-0.2	5.8	-0.1	5.2	0	5.0
LH Arm	0.12	5.3	1	21.0	0.32	7.1	0.4	8.2	0.3	6.8
RH Arm	0.3	6.8	2.2	27.4	0.3	6.8	0.3	6.8	0.3	6.8
LH Hand	-0.23	6.1	2.1	30.2	0.6	11.8	0.6	11.8	0.2	5.8
RH Hand	-0.22	6.0	1.7	33.0	0.3	6.8	0.7	13.9	0.2	5.8
LH Leg	0.4	8.2	0.21	5.9	0.1	5.2	0.3	6.8	0.4	8.2
RH Leg	0.35	7.5	0.85	17.4	0.1	5.2	0.4	8.2	0.5	9.8
LH Foot	0.1	5.2	0.5	9.8	0.1	5.2	0.4	8.2	0.2	5.8
RH Foot	0.1	5.2	0.6	11.8	0.2	5.8	0.5	9.8	0.2	5.8

按照 ISO7730中 PMV-PPD指标的推荐值,当 PMV处于 -0.5~ 0.5, PPD小于 10%时,人体处于舒适状态;当 PMV=0, PPD=5%时,人体处于最佳舒适状态。

从表 2可以看出,乘员舱内的乘客大多处于舒适状态,只有副驾驶员处理微热状态。

5 结论

以一款实际车型为研究对象,引入了假人模型,设置流场边界、热边界,根据 ISO7730中的 PMV-PPD指标,通过乘员舱内热环境的计算,得出该款轿车乘员舱内的舒适状况,为改善轿车乘员舱热舒适性环境提供技术指导。

参考文献

- [1] 王保国, 靳艳梅, 刘淑艳. 车室内热环境的计算模型与数值模拟 [J]. 人类工学. 2005, 11(1): 1-4.
- [2] ISO7730. Moderate thermal environment - determination of the PMV and PPD indices and specification of the condition for thermal comfort[S]. Geneva: International Standard Organization, 1984.
- [3] Fanger P O. Thermal Comfort. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [4] 彭荣强. 太阳辐射下车辆内外温度场数值模拟 [J]. 暨南大学学报(自然科学版) 2008, 29(10): 20-24.
- [5] 郭莉钰. 汽车室内热环境自然通风预冷过程模拟 [D]. 吉林: 吉林大学. 2005
- [6] 郭利华, 朱能, 蒋薇. 人体热舒适性的实验研究 [C]. 全国暖通空调制冷 2002年学术文集. 2002