

车辆舱室流动传热及温度场分析

黄强¹, 朱玉琴^{1,2}, 张云¹, 谢兰川¹

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.环境效应与防护重庆重点实验室, 重庆 400039)

摘要: **目的** 全面获得车舱流动传热分析的流场和温度场分布。**方法** 以某车辆舱室为研究对象, 对车舱进行合理简化, 建立空气流动与传热的计算流体力学(CFD)模型。针对车舱内温度分布特点, 采用标准的 κ - ϵ 湍流模型描述舱内的空气流动, 利用 FLUENT 软件对车舱在太阳辐射下进行温度场仿真研究。**结果** 得到了温度场的分布与车载运行时间的变化规律, 并利用实车跑车试验结果与仿真结果进行了对比, 对比最大误差约为 12%。**结论** 随着外部环境温度的升高, 车舱内部温度均呈现梯度变化, 不同位置温度差异最大为 5 °C。CFD 能为计算和预测温度场分布提供有效的技术支持。

关键词: 舱室; CFD; 气流; 温度场

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.04.003

中图分类号: TJ85; TK414

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)04-0010-05

Flowing Heat Transfer and Temperature Field of Vehicle Compartment

HUANG Qiang¹, ZHU Yu-qin^{1,2}, ZHANG Yun¹, XIE Lan-chuan¹

(1.Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China;

2.Key Laboratory of Environmental Effects and Protection, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: Objective To obtain flow and temperature distribution in flowing heat transfer analysis of vehicle compartment. **Methods** A vehicle compartment was taken as the research object and the compartment was reasonably simplified. The computational fluid dynamic (CFD) model for computing air flow and heat transfer in the armored compartment was established. Air flow in the compartment was described with the standard κ - ϵ two-equation turbulence model. With software Fluent, simulation study on the temperature field was carried out for vehicle compartment in solar radiation. **Results** The relationship between distribution of temperature field and vehicle running time was obtained. The results were compared between the simulation and proving ground test, the maximum contrast error was about 12%. **Conclusion** With the increase of environment temperature, the temperature of vehicle compartment shows a gradient change, and the maximum temperature difference is 5 °C in different position inside the vehicle compartment. CFD can provide technical support for calculation and prediction of temperature field distribution.

KEY WORDS: vehicle compartment; CFD; airflow; temperature field

人体热舒适性是乘员最关注的问题之一。某车辆舱室内部空间狭小, 外部环境复杂, 驾驶舱和乘员舱内热环境舒适与否对人员的战斗力及人因可靠性起着决定性的作用。关于驾驶舱及乘员舱的舒适性问题也引起了研究者的关注, 文献[1-3]研究了空调对车舱

内流场及温度场的影响, 通过直观地显示部件的内部空间和各个横截面上的流场和温度场来改善乘员的舒适性^[4-5]。因此, 为确保车舱温度场分布均匀, 避免出现温度过高或过低区域, 文中利用 CFD 方法对某车辆舱室进行仿真计算与分析, 以太阳辐射、热特

性参量、送风流速和大气周围环境为输入参数，求得舱内温度分布以及随时间变化的情况，从而找出舱内温度最高的部位和冷却气流流速及方向的变化，为改善气流分布、避免余热，提高车舱乘坐舒适性提供参考。

1 模型及计算方法

1.1 几何模型

文中基于 CATIA 建立了车舱实体模型，车舱主要由驾驶舱、动力舱、乘员舱构成。建立模型时，由于舱体外壁面对动力舱内空气流动影响很小，对其进行了适当的简化与填充，对几何尺寸很小或对空气流动和换热作用影响不强烈的部件也进行了适当的简化和省略^[6]。综合考虑各部件对车舱温度的影响，对空间主体及其内部主要部件按照设计尺寸构建三维模型，从而形成空气流动计算区域。某车辆内舱结构（俯视）如图 1 所示，其计算简化模型如图 2 所示。

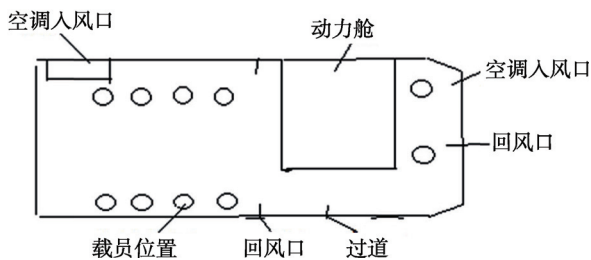


图 1 某车辆及车舱内部

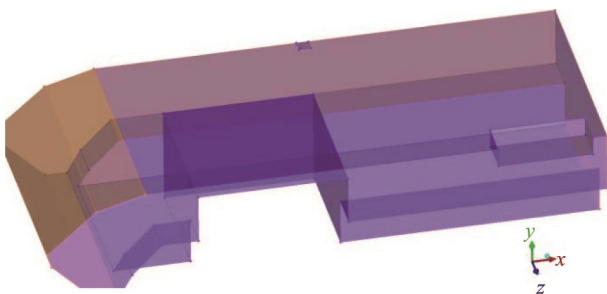


图 2 计算简化模型

1.2 计算方法

由于描述能量交换的体系庞杂，特征模型又包含

非线性影响因素较多，因此只能运用数值方法获得模型的解。针对研究对象的温度分布，考虑到车舱内的空气流动和传热非常复杂，在数值模拟前进行了如下假设：车舱主要发热源包括发动机舱和车舱顶部，车舱内设备运行稳定；通过空调进入到车舱内的空气温度恒定，车舱外部温度恒定；默认空气密度不变，在每个工况下为不可压缩稳态定常流动^[7]，空调入风口流速不高，视为不可压黏性流动，流体流动的控制方程组如下：

连续性方程：

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial \mu_i} + \frac{\partial \mu_j}{\partial \mu_j} + \frac{\partial \mu_k}{\partial \mu_k} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial \mu_i}{\partial t} + \mu_i \frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} + \mu_j \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \mu_k \frac{\partial \mu_i}{\partial x_k} = f_{x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \mu_i}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 \mu_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 \mu_i}{\partial x_k^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mu_j}{\partial t} + \mu_i \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} + \mu_j \frac{\partial \mu_j}{\partial x_j} + \mu_k \frac{\partial \mu_j}{\partial x_k} = f_{x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \mu_j}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 \mu_j}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 \mu_j}{\partial x_k^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mu_k}{\partial t} + \mu_i \frac{\partial \mu_k}{\partial x_i} + \mu_j \frac{\partial \mu_k}{\partial x_j} + \mu_k \frac{\partial \mu_k}{\partial x_k} = f_{x_k} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_k} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \mu_k}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 \mu_k}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 \mu_k}{\partial x_k^2} \right) \quad (4)$$

式中： ρ 为空气密度； μ_i, μ_j, μ_k 分别为坐标系 3 个方向的时均速度； x_i, x_j, x_k 分别为直角为角坐标的 3 个系坐标； p 为压力。为了准确模拟车舱的空气流动，选用标准 κ - ε 湍流模型^[7-8]，模型中湍流黏度包括湍流动能 κ 和耗散率 ε ，且都包含对流和扩散项。

2 CFD 数值仿真

2.1 网格划分

数值模拟区域为空气从空调进风口进入舱内，到出风口离开车舱而流过的所有区域。文中提取车舱的内表面及各部件的外表面组成车内空气流动域。网格划分是数值模拟的关键步骤，网格质量的好坏也直接影响 CFD 计算结果的精度。利用 ICEM CFD 软件对模型进行网格划分，为了保证网格质量，网格划分采用六面体网格，最大网格尺寸取 40 mm，对网格进行等尺寸失真等角失真的质量检查，并通过加密流动复杂区域，使计算更加准确，符合实际情况。网格划分结果如图 3 所示。

2.2 边界及工况条件

在计算区域的入口处，应用速度入口边界条件，输入空气入口速度为 2 m/s，并且水平进风，输入进口边界处的空气总压、总温和湍流参数。在计算区域的出口处，应用质量出口边界条件。由于发动机舱本身具备散热条件，高温往往集中在舱内顶部，对于机舱壁面，应用壁面热流量边界条件。对于车框架边界，由于车顶部受太阳辐射，温度往往高于其他车框部件，文中应用已知的外部平均温度作为边界条件输入，各壁面的辐射传热不计^[9-10]。同时，文中采用了太阳辐射模型，太阳辐射的直射强度为 1000 W/m²，散射强度为 400 W/m²，方位角为 90°，高度角为 90°。

实车跑车测试测得的某白天日照条件下温度随时间变化的趋势如图 4 所示，可以看出，随着工况的进行，车舱内温度变化是一个动态过程，这主要是由于外部温度、车舱运行状况、空调入风口温度等原因造成的。考虑到 1 h 内变化温度大约 1 °C，瞬态计算量将十分庞大，采用拉格朗日插值法，对于外部环境温度每 10 min 取一个插值点，各壁面的边界条件采用运行工况下最后温度平衡时刻的试验壁温，对典型工况稳态条件下的车内外能量平衡时刻进行仿真计算。

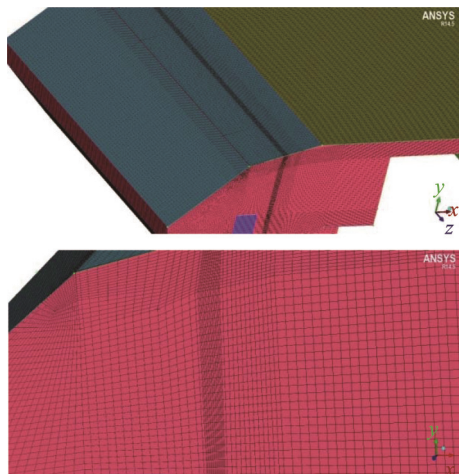


图 3 网格划分模型

2.3 车舱温度场、流场分析

通过对某车辆舱室内部温度场进行数值模拟，可以比较全面地分析车舱内的温度场和流场。考虑到车舱温度场主要受外部环境温度和发动机舱温度的影响，一般情况下发动机舱运行时间越长，温度越高，变化范围在 60~80 °C 之间，文中以时间为 14:00，环境温度为 35 °C、车载顶部温度为 80 °C 进行数值模拟和比较分析。

为了方便分析车舱的舒适性能否满足要求，文中分析了车舱的温度是否出现过高和过低的区域。图 5

为某工况下，z 截面为 0.3 m，1.5 m，2.4 m，y 截面为 0.4 m 的温度云图，图 6 为车舱内空气流线图。

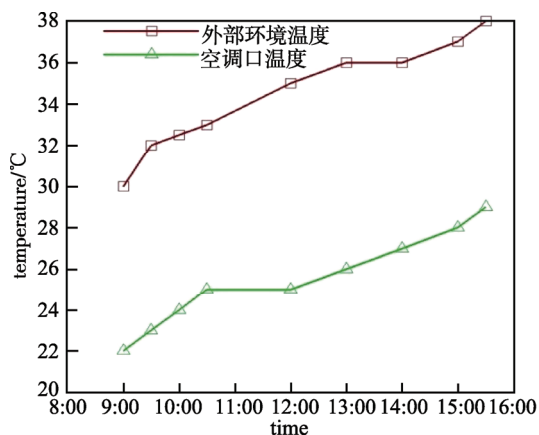


图 4 温度与时间的变化关系

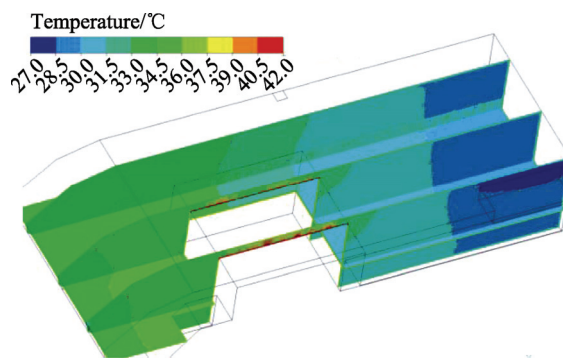


图 5 温度云图

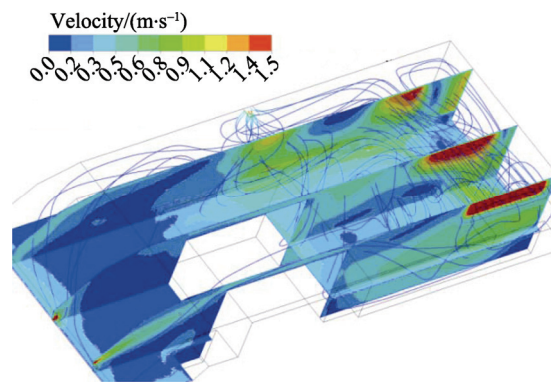


图 6 进风流线图

由图 5 和图 6 可知，通过对该工况下舱室内部温度场进行数值模拟，可以较全面地分析车舱内部温度情况。由上面的流线与温度分布可看出：驾驶员舱空调出风口的流量较小，并且部分空气直接流向乘员舱，导致散热情况不明显，驾驶员舱的平均温度高于乘员舱 2 °C 左右；发动机舱附近温度偏高，从流线分布可以看出，在空调风扇的作用下，大量空气经进风口沿该车舱上表面后经过侧面、顶端流出回风口，导致驾驶员舱的空气流动不明显。

图 7 为车舱截面 y=1.1 m 处的温度分布云图。该

截面位于驾驶员头部附近，温度偏高，截面的最高温度为 37℃，最低温度位于空调口，温度大约为 25℃。图 8 为车舱截面 $y=0.5\text{ mm}$ 处的空气温度分布云图。此截面位于载员的腿部附近，此截面的最高温度为 35.2℃，为了便于直观地表现车舱内部的温度变化规律，取车舱的 12 个横截面处的平均温度，如图 9 所示。图 10 为 x 方向上各截面的平均温度变化曲线。由曲线可知，驾驶舱的平均温度高于乘员舱 5℃左右，乘员舱入风口位置温度最低。这是因为驾驶舱出风口流量较小，并且部分空气直接流向乘员舱，导致散热情况不明显，乘员舱在空调风扇的作用下，大量空气经进风口后沿该车舱上表面后经过侧面、顶端流来回风口，过道位置气流分布略不足。

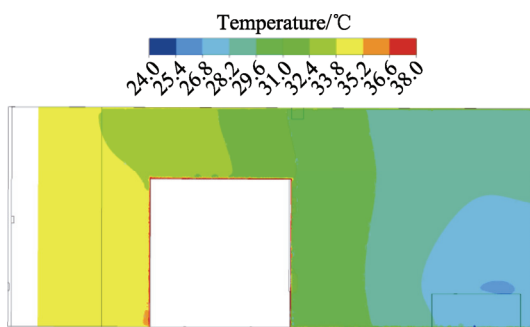


图 7 截面 $y=1.1\text{ m}$ 温度分布云图

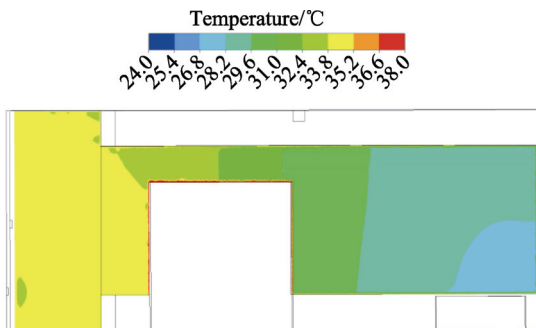


图 8 截面 $y=0.5\text{ m}$ 温度分布云图

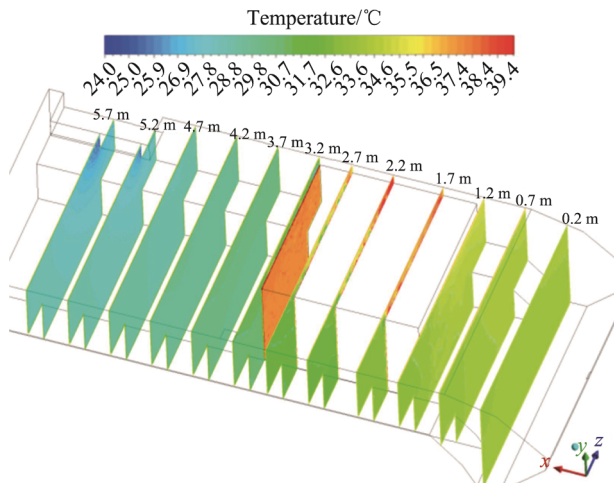


图 9 车舱截面位置

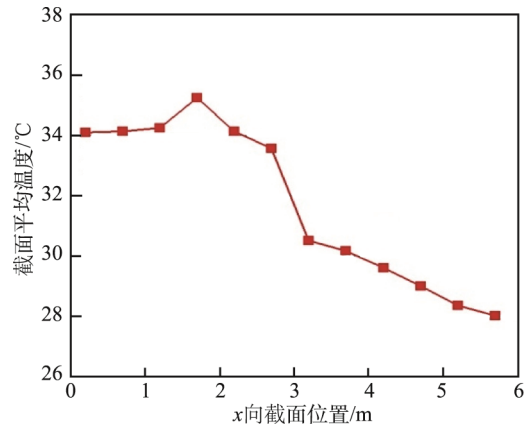


图 10 舱室 x 向各截面平均温度变化曲线

3 试验与结果分析

针对舱室人体热舒适性的研究途径分为两种：数值模拟、试验研究。文中基于 CFD 方法，对舱室在日照高温环境下进行数值模拟，如图 11 所示。计算发现，随着外界环境温度和车载运行时间的增加，各舱室位置温度有阶跃，总体为增加趋势。根据装备环境测试要求，对车辆舱室进行环境温度测试。试验中测取舱室主要位置的温度点，测量点应分布在每个相应独立空间的微环境单元中，传感器必须置于空气中而不能置于仪器或结构的表面，随着温度采集仪的一体化和便携式，车舱在三种环境工况下进行测量，测量值和计算值对比如图 12 所示。

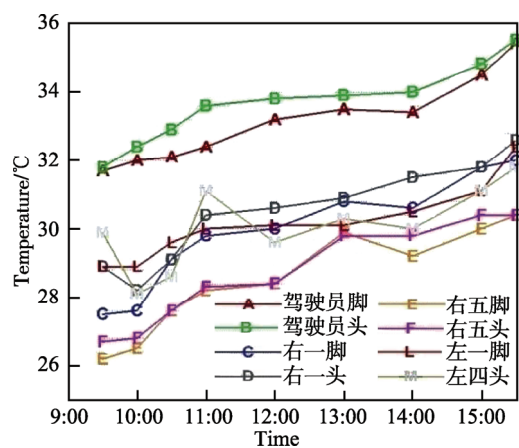


图 11 乘员舱位置温度随时间变化曲线

由图 12 可知，车舱的仿真计算结果与试验结果比较吻合，最大误差约为 12%。对比结果表明，仿真计算值一般高于试验值。主要原因包括：对车舱框架的材料及传热性能缺乏具体了解；对车舱各个壁面、内部设备的传热及辐射进行了忽略；忽略了乘员人体温度的影响。由于仿真计算受多种因素的影响，误差值在可接受范围之内，仿真模型能为试验提供参考。

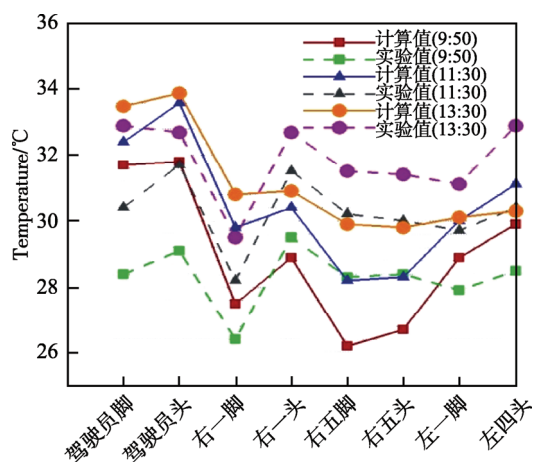


图 12 三种工况下仿真值与试验值对比

4 结论

文中针对乘员舒适性问题,对某车辆舱室空气流场及温度场进行了数值模拟和温度场分析,并将仿真计算值与试验值进行了对比,得出了以下结论。

1) 建立了某舱室空气流场与温度场的 CFD 计算模型,应用了商业软件 Fluent 进行三维数值求解,CFD 的计算值与试验值对比显示最大误差约为 12%,基本满足工程要求。

2) 在空调风扇的作用下,气流能够较好地带走热量,在典型截面分析的基础上,通过 Fluent 能清楚地得到舱室温度分布情况和空气流动情况,CFD 技术能够较好地反应空气流动及温度分布情况,是一种有效、便捷的预测分析手段,为计算和改进温度场分布提供了技术支持,本文的分析结果可以为车舱温度场

设计、优化提供科学的方法和理论依据。

参考文献:

- [1] 向立平,王汉青. 空调客车内气流分布的人体热舒适性研究[J]. 中南大学学报, 2009, 40(5): 1194-1198.
- [2] VIVEK P A, ABDUL N, NAGPURWALA Q H. Numerical Studies on the Effect of Cooling Vent Setting and Solar Radiation on Air Flow and Temperature Distribution in a Passenger Car[R]. SAE, 2009-28-0048, 2009.
- [3] HAN T Y, CHEN K H, KHALIGHI B, et al. Asscssment of Various Environmental Thermal Loads on Passenger Thermal Comfort[R]. SAE, 2010-01-120, 2010.
- [4] 任承钦,蔡德宏,刘敬平. 汽车发动机舱散热性能实验及数值研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2012, 39(4): 38-41.
- [5] LIN C H, LELLI M A, HAN T. A Experimental and Computational Study of Cooling in a Simplified GM-10 Passenger Compartment[R]. SAE Paper No.910216, 1991.
- [6] 江宇,宋福员,李彦军,等. 船舶机舱通风数值模拟分析[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(8): 52-55.
- [7] 苏红春,袁春,潘小兵,等. 静音型电源车车载发电机散热分析及试验研究[J]. 汽车工程学报, 2014, 4(1): 61-65.
- [8] 王宪成,索文超,张更云. 电动装甲车动力舱内空气流场模拟及结果改进分析[J]. 兵工学报, 2007, 28(6): 744-748.
- [9] 黄小辉,毕小平. 计算流体力学在车辆冷却风道设计中的应用[J]. 兵工学报, 2008, 29(11): 1281-1285.
- [10] 王飞. ZL50 型装载机动力舱空气流动与换热分析[D]. 长春: 吉林大学, 2010.