汽车乘员舱多节点传热模型仿真方法的研究及应用

袁侠义[1,2] 袁 伟[1*] 罗泽轩[2] 肖 露[2] 黄俊杰[1] 张晓清[1]
1.华南理工大学机械与汽车工程学院,广州,510641
2.广州汽车集团股份有限公司,广州,511434

摘要:基于耦合的一维模型和三维模型建立了汽车乘员舱多节点传热模型的仿真方法,开展了乘员舱部件材料的热物性参数测试和整车环境仓热舒适性测试,并对该仿真方法的计算精度进行了分析。仿真与试验测试结果表明:相比单节点传热模型仿真,多节点传热模型仿真的乘员头部温度预测精度更高,误差在5%以内,可满足工程应用。对某MPV车型的空调出风口设计方案的评估表明,该仿真方法可有效指导汽车乘员舱热舒适性能开发与方案设计。

关键词:多节点传热模型;汽车乘员舱;热舒适性;空调出风口
中图分类号:TP182
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.07.031 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Research and Application of the Simulation Method for the Multi-node Heat Transfer Model of Vehicle Cabin

YUAN Xiayi[1,2] YUAN Wei[1*] LUO Zexuan[2] XIAO Lu[2] HUANG Junjie[1] ZHANG Xiaoqing[1]
1.School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510641
2.Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou, 511434

Abstract: Based on coupled 1D and 3D simulations, a multi-node heat transfer model for the vehicle cabin was established. Thermophysical properties of cabin materials were measured, and thermal comfort tests were conducted in an environmental chamber. The simulation accuracy was then validated. The results show that the multi-node model predicts occupant head temperature with higher accuracy (error within 5%) than the traditional single-node model, and meets engineering requirements. Evaluation of air conditioning outlet designs for an MPV model indicates that the proposed method can effectively guide the development and optimization of cabin thermal comfort performance.

Key words: multi-node heat transfer model; vehicle cabin; thermal comfort; air conditioning vent

收稿日期:2025-07-13
基金项目:国家自然科学基金(U22A20193);广东省自然科学基金(2023B1515120040)。

0 引言

智能座舱技术的快速发展使乘员舱的热舒适

[13] 王乃宁,张志刚. 汽轮机热力设计[M]. 北京:水利电力出版社,1987:169.
WANG Naining, ZHANG Zhigang. Thermodynamic Design of Steam Turbine[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1987:169.
[14] 石道中. 汽轮机设计基础[M]. 北京:机械工业出版社,1990:338.
SHI Daozhong. Fundamentals of Steam Turbine Design[M]. Beijing: China Machine Press, 1990: 338.
[15] 高雷. 船舶汽轮机叶栅气动性能优化与实验[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
GAO Lei. Optimization and Test on Aerodynamic Performance of Marine Steam Turbine Blade[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
[16] 唐敏锦,叶兴柱. 汽轮机汽缸蠕变-疲劳耦合寿命预测[J]. 计算机辅助工程,2018,27(1):55-60.
TANG Minjin, YE Xingzhu. Creep-fatigue Coupling Life Prediction of Steam Turbine Cylinder[J]. Computer Aided Engineering, 2018, 27(1): 55-60.

(编辑 张 洋)

作者简介:王洪鹏,男,1972年生,正高级工程师。研究方向为灵活燃煤发电技术、汽轮机设计。发表论文20余篇。E-mail:hongpengwang@126.com。田紫羊*(通信作者),女,1996年生,博士,助理研究员。研究方向为灵活燃煤发电技术、新型电力系统及储能。发表论文10余篇。E-mail:tianziqian@hrl.ac.cn。

本文引用格式:
王洪鹏,李文超,张迪,等. 多源进汽可变通流式汽轮机技术研究[J]. 中国机械工程,2026,37(7):1804-1813.
WANG Hongpeng, LI Wenchao, ZHANG Di, et al. Research on Variable Through-flow Turbine with Multiple Sources of Steam Intake[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(7): 1804-1813.

性成为用户购车的重要考虑因素[1]。大型多排座位车型特别是MPV明确要求设计乘员舱空间多温区的热舒适性。

当前的汽车乘员舱热舒适性仿真研究方法主要为一维仿真和三维仿真[2]。汽车乘员舱热舒适三维仿真方法的精度较高，但考虑热传导、热对流及热辐射导致网格体量较大、瞬态计算效率较低，且需完整的CAD数据，而在车型概念设计前期无法获得完整数据，因此仿真输入需求和计算时间都无法进一步缩短车型开发周期。一维模型仿真计算较快，能快速进行方案验证，但通常将乘员舱当作单节点处理[3-5]，即只考虑整个乘员舱的平均温度，无法评估车内细分空间的差异性，也无法判断不同出风口设计导致的流场变化带来的性能差异。邓志勇等[6]提出了一种多因素耦合的多层结构模型动态传热分析方法，以定量分析乘坐空间全天候的动态传热特性及规律。罗杨等[7]结合用户画像识别、PMV-PPD理论、专家经验和随机森林算法，提出汽车乘员舱个性化智能空调决策系统设计方法。PENNING等[8]通过建立整车热负荷和温度计算模型，研究了玻璃性能参数对整车热负荷的影响，进而获得对电动车续航的影响。

上述研究均基于一个传热节点，对乘员舱热负荷和传热的一维计算无法分析乘员舱空间的多温区热舒适性。本文基于耦合一维仿真与三维仿真的方法，建立乘员舱多节点传热模型，快速预测汽车乘员舱多区域的热舒适性温度，且该仿真方法在关键时刻点的仿真相对误差在5%以内，满足整车热舒适性开发应用要求，能有效指导整车舒适性优化方案设计。

1 乘员舱多维传热计算理论

计算乘员舱热负荷是汽车空调系统匹配的一个重要分析因数。如图1所示，乘员舱热负荷主要由汽车外部热环境、乘员舱内热环境、车身壁面包等因素决定：

$$Q_T=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4+Q_5 \tag{1}$$

式中：Q_T为汽车乘员舱热负荷；Q_1为传热负荷，即通过车身壁面传入车内的热量；Q_2为日照负荷，即太阳光照通过玻璃透射传入车内的热量；Q_3为换气负荷，即通过空调鼓风机外循环及车身缝隙泄漏进入车内的热量；Q_4为乘员放热，即乘员通过呼吸和皮肤散发到车内的热量；Q_5为电器负荷，即乘员舱内用电设备的散热量。

汽车空调系统开启状态下，乘员舱内的温度稳定时，根据能量守恒定律，空调系统制冷量与乘员舱热负荷达到热平衡：

$$Q_{Cooling}=Q_T \tag{2}$$

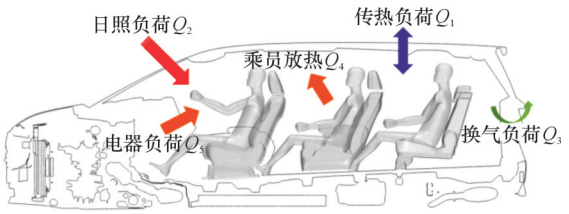


图1 乘员舱传热负荷组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of heat load components in the passenger compartment

式中：$Q_{Cooling}$为维持乘员舱的目标舒适温度时汽车空调系统在单位时间需要移除的总热量。

2 乘员舱多节点温度场的传热仿真方法

2.1 乘员舱多节点传热的仿真建模

采用一维仿真软件Amesim对乘员舱内的传热进行建模，采用三维仿真软件STAR-CCM+对乘员舱的内流场进行建模，乘员舱一维/三维耦合仿真可快速预测乘员舱温度的瞬态变化。一维/三维耦合仿真分析流程主要包括以下步骤：

1)确定并设置汽车乘员舱的外部边界条件和仿真计算工况，建立乘员舱的一维传热模型。将乘员舱空间按照座位划分为3个空间区域(一排、二排、三排)，并将3个空间区域等效为3个传热节点；在一排与二排的节点、二排与三排的节点之间建立数据交互节点；建立乘员舱内部件的一维传热模型，将玻璃、天窗、车门、顶棚、地板、座椅等物理部件均等效为传热节点，然后建立3个传热节点与各个部件的传热关系。

2)建立乘员舱三维模型来计算乘员舱的内流场。如图2所示，按三排将乘员舱划为3个容腔，并在两排之间建立虚拟交界面，开展三维仿真计算并输出虚拟交界面的风量。

3)建立一维/三维仿真的数据接口，并将三维计算的交界面风量输入一维模型中的数据交互节点。

4)设置模型参数，开展一维仿真计算。

5)输出汽车乘员舱各排的乘员头部温度变化曲线。

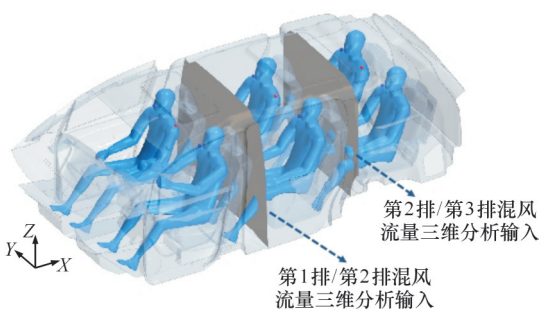


图2 一维/三维仿真建模

Fig.2 1D/3D simulation modeling

三维仿真主要用于计算乘员舱内的空气对流换热，包括空气与零部件表面换热和乘员舱内空间交界面的对流换热；三维仿真获得相邻两排空间区域之间的风量交互数据，并将其输入给一维模型，如图3所示。

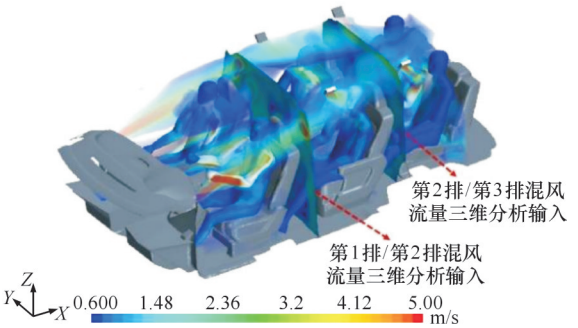


图3　乘员舱空间交界面流量的计算结果

Fig.3　Flow rate results at cabin zone interfaces

2.2　一维模型关键材料的参数

一维仿真的准确性受乘员舱部件材料热物性参数的准确度影响。从影响乘员舱热舒适性的关键部件中取样，确定11种材料样品的物性参数，如表1所示。吸收率、反射率和透射率是描述材料热辐射传热属性的重要参数，且三者之和等于1。本文通过材料的短波辐射吸收率和透射率计算反射率。玻璃类材料和遮阳帘之外的其他部件均为不透光材料，透射率为0。

表1　主要零部件的物性参数测试值

Tab. 1　Measured physical properties of key components

序号	部件	厚度/mm	热导率W/(m·K)	密度/(g·cm^{-3})	比热J/(kg·K)	吸收率/%	透射率/%
1	顶棚	8.36	0.059	0.15	1367.3	55.33	0
2	地毯(灰)	6.14	0.050	0.19	302.1	97.80	0
3	地毯(白)	6.14	0.050	0.19	302.1	54.10	0
4	门内饰板(软包)	5.22	0.097	0.65	28.2	94.91	0
5	内饰硬塑料(黑)	2.37	0.361	1.07	1202.0	94.77	0
6	座椅靠背(非皮)	10.13	0.064	0.11	7653.6	95.83	0
7	仪表板表面(黑)	5.89	0.097	0.75	858.7	95.61	0
8	遮阳帘	0.60	0.410	0.44	1318.2	49.84	0.05
9	天幕玻璃(双银)	4.82	0.817	2.24	1480.7	60.98	4.22
10	单层玻璃	3.85	2.415	2.47	991.9	34.25	58.17
11	夹层玻璃	4.87	0.880	2.25	871.1	40.02	52.42

为了解材料的热辐射性能，分析了材料传热参数与波长的关系。由图4可知，玻璃对可见光(波长380～780 nm)的透射效果非常好，透射率高达85%；在近红外波段(波长780～2500 nm)也有良好的透射效果，透射率在30%和65%之间。由图4可知，手套箱盖板(非透明部件)的光谱吸收率比玻璃高。

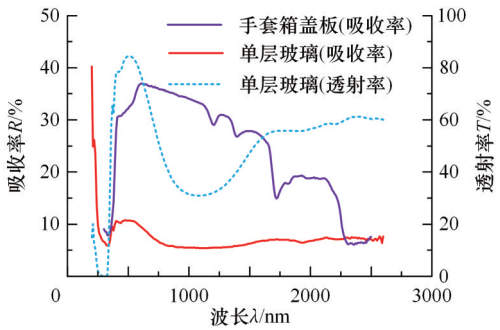


图4　单层玻璃光谱透射率与吸收率

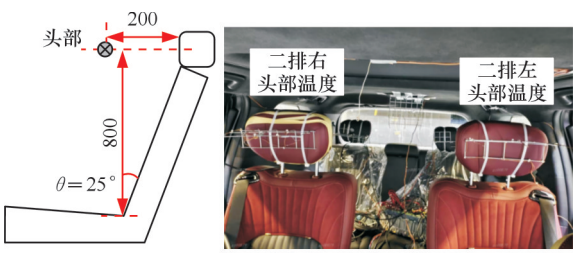
Fig.4　Transmittance and absorption of single-pane glass

3　整车测试及仿真模型的精度标定

3.1　整车乘员舱的热舒适性测试

在外界环境影响因素可控的情况下开展测试才能获得用于研究和仿真精度标定的稳定数据。乘员舱热舒适性测试在环境模拟舱中开展，测试车辆为某三排座位的MPV。

基于整车环模测试，采集乘员舱头部位置与出风口的温度，其中，出风口温度作为整车热舒适性温度仿真模型精度标定的输入，头部温度作为模型标定的目标。图5a、图5b分别为乘员头部温度测试的布点位置示意图和热电偶安装图。



(a)头部温度布点位置　　(b)热电偶安装图

图5　头部温度布点示意图

Fig.5　Head Temperature Measuring Point Layout Diagram

整车乘员舱热舒适性测试环境条件见表2。试验开始前对车辆进行浸车。浸车主要分为2个阶段。第一阶段(30 min)设置环境舱环境温度为40 ℃，不开启光照，车门窗全开，鼓风机开启中速

内循环，出风模式为吹面模式，压缩机关闭，环境舱风速为40 km/h。第二阶段（直至头部平均温度达到(60±1) ℃）设置环境舱环境温度40 ℃、相对湿度(55±5)%，开启光照（强度(1160±50) W/m²），车门窗全关，鼓风机关闭，环境舱风速为0。测试阶段内，启动车辆、开启空调，空调设为内循环、最大风速、最低温度，调整空调出风口角度，使气流从脸颊两侧吹过，试验车速曲线如图6所示。

表2 关键时刻点的乘员头部温度

Tab.2 Passenger head temperature at critical moments

时间/min		10	40	60	90
一排头温	试验/(℃)	29.1	24.0	21.9	24.6
	仿真/(℃)	29.2	24.1	21.7	24.0
	误差/%	0.34	0.42	−0.91	−2.44
二排头温	试验/(℃)	31.9	25.9	23.4	25.6
	仿真/(℃)	31.4	25.7	23.2	25.1
	误差/%	−1.57	−0.77	−0.85	−1.95
三排头温	试验/(℃)	34.8	27.9	25.4	26.7
	仿真/(℃)	34.8	27.4	25.5	26.2
	误差/%	0.00	−1.79	0.39	−1.87

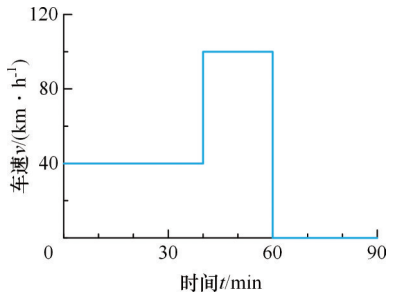


图6 车速曲线

Fig.6 Vehicle speed curve

如图7所示，快速制冷10 min（评价时间点）后，1～3排的头温分别为29 ℃、31.9 ℃、34.8 ℃。根据人体舒适性的理论分析可知，三排乘员的热舒适性差距非常大，因此用一个温度代表各排的头部温度，无法准确评估各排乘员的热舒适性。此外，前挡风玻璃表面温度、前天窗表面温度和乘员头部温度的温度差异很大，两者的温差达30 ℃，说明在高温环境下汽车乘员舱内的温度梯度很大；乘员头部温度主要依靠空调的强制对流冷空气实现。如图8所示，浸车完成（制冷试验开始即0时刻）后，仪表板表面的温度达到95 ℃，副驾座椅表面温度约52 ℃。仪表板位于前档玻璃下方，更多的太阳辐射透过前档玻璃被仪表板吸收。空调制冷后，车内空气温度下降最快，副驾座椅表面和仪表板表面的温度下降相对较慢。

3.2 基于试验测试数据的精度分析

基于乘员舱热舒适性多节点仿真模型，按测

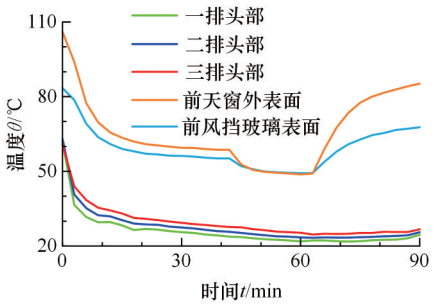


图7 头部温度和玻璃表面温度曲线

Fig.7 Temperature curves of head and glass surface

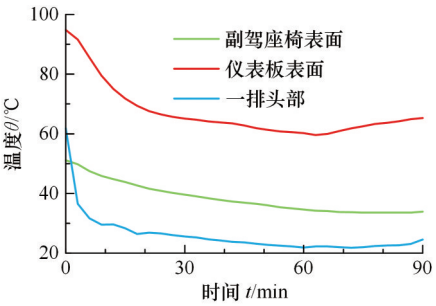
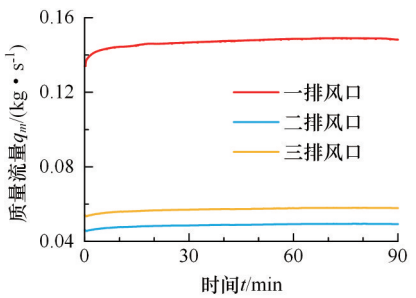


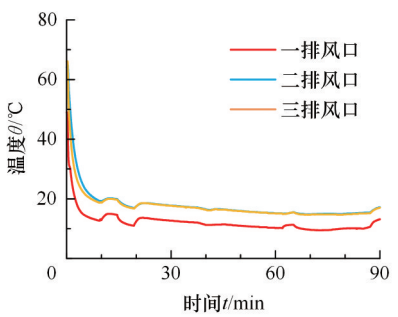
图8 环境模拟舱测试车内零件温度

Fig.8 Temperature of vehicle components tested in environmental simulation chamber

试工况输入仿真边界及工况参数。其中，将暖通空调（heating, ventilation and air conditioning, HVAC）出风口的空气参数（温度、风量和湿度）作为乘员舱热舒适性仿真的输入。三维仿真标定用到的空调出风口流量和风温如图9所示。



(a)空调出风口流量曲线



(b)空调出风口温度曲线

图9 仿真计算输入

Fig.9 Simulation input

通过整车三维流场计算，得到与乘员舱有热交换部件（前挡风玻璃、顶棚天窗、侧窗等）的表面风速，如图10a所示；得到交界面的空气流量参

数，如图10b所示。

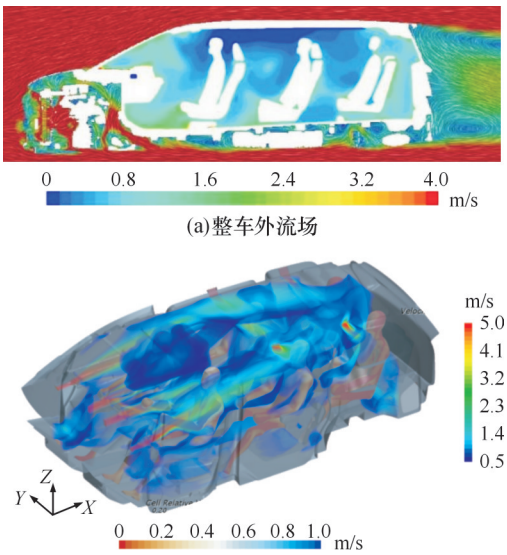


图10　整车流场仿真示意图

Fig.10　Schematic of Full Vehicle Flow Field Simulation

根据表1所示的材料参数对一维仿真模型进行标定[9-10]，通过一维/三维耦合仿真，得到各排头温仿真结果，并将其与乘员舱单一温度节点头温仿真结果、整车测试各排头温结果进行对比，如图11所示。各排头部温度的仿真误差如图12所示。相比于乘员舱单一温度节点仿真，多节点仿真的计算精度更高。此外，在前60 s内，各乘员头部温度的仿真误差相对较大，接近10%。如表2所示，乘员头部温度在关键时刻点（试验开始10 min、40 min、60 min、90 min）的仿真相对误差在5%以内。这表明该汽车乘员舱多节点仿真具有工程有效性，能满足整车乘员舱热舒适性开发的仿真精度要求。

4　某MPV车型的温度计算与优化

将上述方法用于某6座MPV的乘员舱热舒适性开发，即通过仿真分析明确设计方案对三排座位降温的贡献度。乘员舱温度分布受舱内流场的影响很大，而出风口的布置直接影响乘员舱的流场，故本文主要分析一二排出风口的布置对乘员舱内温度分布的影响。图13中，长方形表示二排的出风口，正方形表示IP仪表台的出风口。方案A考虑中控大屏的使用便利性，将一排中间的出风口布置在中-控屏下方且低于方向盘中心线；一排两侧的出风口布置在仪表板上且高于方向盘中心；二、三排出风口对称布置于乘员舱顶棚。方案B将一排中间的出风口移动到中控大屏的上方，其他出风口位置与方案A相同。方案C是在方案B的基础上，分别在两侧B柱增加一个出风口。三个方案的空调出风口流量分配见表3。

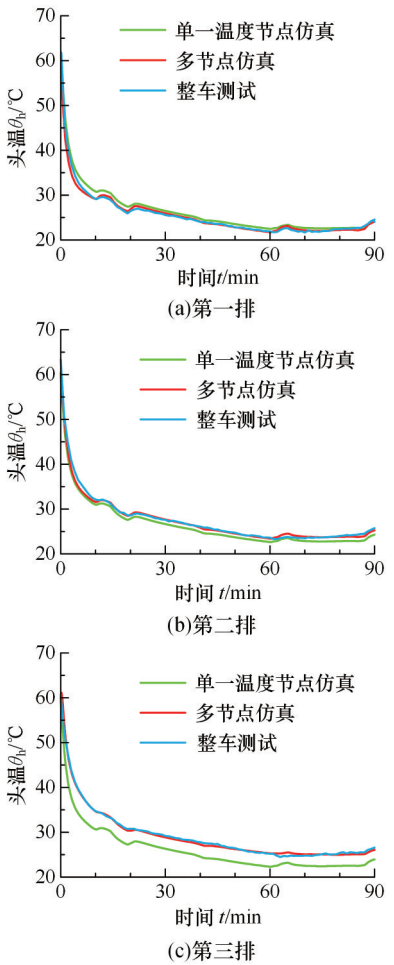


图11　乘员头部温度变化

Fig.11　Changes in passenger head temperature

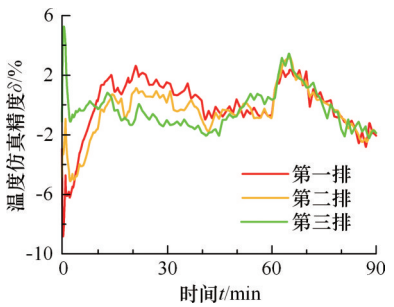


图12　各排温度仿真误差

Fig.12　Simulation error of temperature in each row

在概念设计阶段，根据整车乘员舱的长、宽、高、Y0断面、座椅数量及乘员的坐姿建立乘员舱三维流场计算的简化模型，如图14所示。

图15为三维流场仿真结果示意图，表4记录了3种方案交界面的风量计算结果。方案B将一排中间的出风口抬高400 mm，这有利于增大一排出风口气流的流动距离，使一排到二排的风量增大到360 m^3/h。方案C中，B柱出风口流量为83.2 m^3/h，由于空调箱总风量均为696 m^3/h，因此一排IP出风口的风量为200 m^3/h，小于方案B。

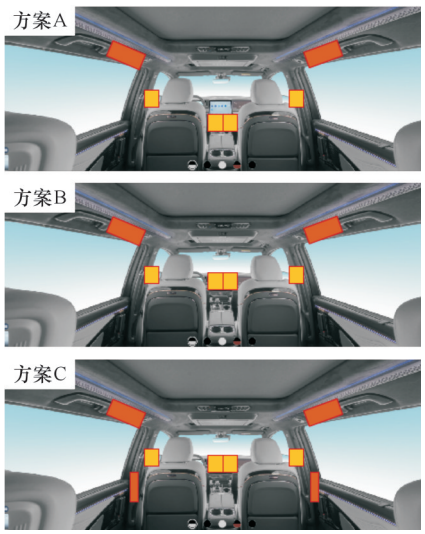


图13 风口方案示意图

Fig.13 Schematic Diagram of Air Vent Layout

表3 风量分配表

Tab.3 Airflow Distribution m^3/h

		方案A	方案B	方案C
一排风口	IP风口左	104.0	104.0	83.2
	IP风口中左	104.0	104.0	83.2
	IP风口中右	104.0	104.0	83.2
	IP风口右	104.0	104.0	83.2
二排风口	顶棚二排左	70.0	70.0	70.0
	顶棚二排右	70.0	70.0	70.0
	B柱二排左	0.0	0.0	41.6
	B柱二排右	0.0	0.0	41.6
三排风口	顶棚三排左	70.0	70.0	70.0
	顶棚三排右	70.0	70.0	70.0
总计		696.0	696.0	696.0

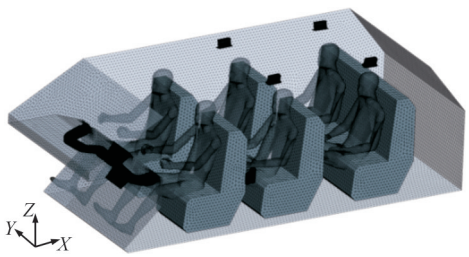


图14 乘员舱三维仿真简化模型

Fig.14 Simplified 3D simulation model of passenger cabin

对二排乘员，相比仪表板风口，B柱风口到头部距离更小，到达头部的风速及风温均衰减更小，因而对二排的制冷效果更好。

将三维仿真得到的交界面流量代入乘员舱一维仿真模型进行传热计算，得到3种方案下乘员头温的变化，如图16所示。方案A和B的第一排头温差在0.3 ℃以内，方案B的第二排头温比方案A至少下降1 ℃，因此方案B的二排降温性能更优。方案C在二排增加了B柱出风口，二排的头

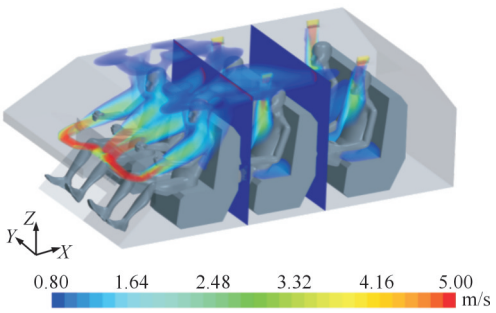


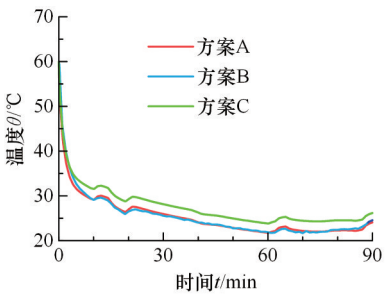
图15 三维流场仿真结果示意图

Fig.15 Diagram of 3D Flow Field Simulation Results

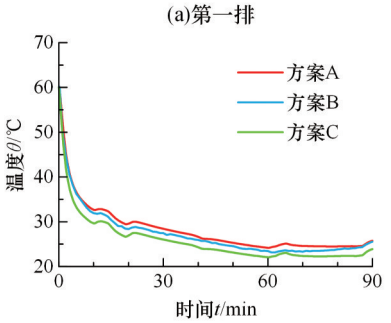
表4 三种方案的交界面风量计算结果

Tab.4 Comparison of air volume calculation results at the interface of three schemes m^3/h

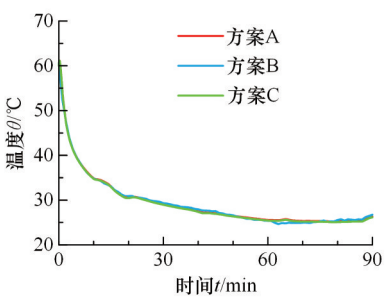
风量	方案A	方案B	方案C
一排到二排	159	360.0	200.0
二排到一排	159	360.0	283.6
二排到三排	0	32.0	0



(a)第一排



(b)第二排



(c)第三排

图16 三种方案的各排头温变化

Fig.16 Head temperature changes of passengers in each row under three different schemes

温比方案A至少下降2 ℃，温降结果最好，但一排风量的减少使一排头温平均上升2 ℃，所以要想保证一排的降温，需增加一排的风量，即增加前排

HVAC的总风量。综上所述，在项目开发前期可采用乘员舱多节点传热仿真方法评估空调出风口布置方案和空调系统能力是否满足不同座位的温度需求，为乘员舱热舒适性方案的优化提供参考依据。

5　结论

1)由三排座位MPV的乘员头温仿真结果可知，相比于乘员舱单节点传热模型仿真，乘员舱多节点传热模型仿真能更好反映各排位置的乘员头部温度，可满足日益精细的乘员舱舒适性开发需求。

2)汽车乘员舱多节点传热模型头部温度的仿真结果与试验结果的最大相对误差在5%以内，仿真精度满足整车热舒适性开发应用要求。

3)汽车空调出风口布置方式影响多排座位MPV乘员舱不同位置的热舒适性，在项目开发前期可采用乘员舱多节点传热仿真方法评估不同位置乘员的热舒适性，并快速进行优化方案设计。

参考文献：

[1] JunmengLYU, YANG Yuxin, SHI Yongxiang, et al. Application-driven Development of a Thermal Imaging-based Cabin Occupant Thermal Sensation Assessment Model and Its Validation[J]. Building Simulation, 2024, 17(8): 1401-1417.

[2] 程思淇. 基于热舒适性的汽车空调系统能耗分析[D]. 长春：吉林大学，2024.
CHENG Siqi. Energy Consumption Analysis of Automobile Air Conditioning System Based on Thermal Comfort [D]. Changchun: Jilin University, 2024.

[3] BAYRAKTAR I. Computational Simulation Methods for Vehicle Thermal Management[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 36: 325-329.

[4] LI Wenhua, SUN Jian. Numerical Simulation and Analysis of Transport Air Conditioning System Integrated with Passenger Compartment[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 37-45.

[5] LAN Fengchong, CHEN Haiwen, CHEN Jiqing, et al. Effect of Urban Microclimates on Dynamic Thermal Characteristics of a Vehicle Cabin[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 49: 103162.

[6] 邓志勇，兰凤崇，陈吉清，等. 多因素耦合的多层结构传热模型及车舱内动态传热特性[J]. 机械工程学报，2019，55(6)：145-155.
DENG Zhiyong, LAN Fengchong, CHEN Jiqing, et al. Multi-factor Coupled Heat Transfer Model with Multi-layer and Dynamic Heat Transfer Characteristics in Vehicle Cabin[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 145-155.

[7] 罗杨，刘平，刘明杰，等. 汽车乘员舱个性化热舒适智能空调决策系统设计[J]. 汽车工程，2024，46(6)：1114-1124.
LUO Yang, LIU Ping, LIU Mingjie, et al. Decision System Design of Personalized Thermal Comfortable Intelligent Air Conditioning for Automobile Passenger Cabin[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(6): 1114-1124.

[8] PENNING A K, WEIBEL J A. Assessing the Influence of Glass Properties on Cabin Solar Heating and Range of an Electric Vehicle Using a Comprehensive System Model [J]. Applied Energy, 2023, 339: 120973.

[9] 蔡致鹏，王新阁，张晓康，等. 基于热舒适性的乘员舱气流组织设计[J]. 空军工程大学学报，2023，24(1)：59-67.
CAI Zhipeng, WANG Xinge, ZHANG Xiaokang, et al. An Air Distribution Design of Crew Cabin Based on Thermal Comfortt[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(1): 59-67.

[10] 王国华，桑国辉，张英朝，等. 汽车乘员舱热舒适性影响因素多参数优化分析[J]. 汽车工程，2023，45(11)：2023-2033.
WANG Guohua, SANG Guohui, ZHANG Ying) Chao|Zhao), et al. Multi-parameter Optimization Analysis of Factors Influencing Thermal Comfort in Automobile Passenger Compartment[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(11): 2023-2033.

（编辑　张 洋）

作者简介：袁侠义，男，1983年生，博士研究生，高级工程师。研究方向为汽车空气动力学与热管理。发表论文20余篇。E-mail:yuanxiayi83@163.com。**袁　伟***（通信作者），男，1983年生，教授、博士研究生导师。研究方向为节能、新能源和新型储能等先进制造技术。发表论文160余篇。E-mail:mewyuan@scut.edu.cn

本文引用格式：

袁侠义，袁伟，罗泽轩，等. 汽车乘员舱多节点传热模型仿真方法的研究及应用[J]. 中国机械工程，2026，37(7)：1803-1809.

YUAN Xiayi, YUAN Wei, LUO Zexuan, et al. Research and Application of the Simulation Method for the Multi-node Heat Transfer Model of Vehicle Cabin[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(7): 1803-1809.