# 夏季高温驻车后空调启动工况下前置摄像头模块流场研究

王博

（泛亚汽车技术中心有限公司，上海 200093）

【摘要】为保证行车过程中智能驾驶模块正常工作，以前置摄像头模块（FCM）为研究对象，建立整车模型，研究高温环境下其温度场和流场变化情况，对比了不同FCM罩盖设计方案对温度场和流场的影响。结果表明：在空调系统作用下，FCM模块的温度仍远高于周围环境温度；驻车后启动空调的瞬间，FCM模块温度持续上升，前置摄像头温度升高最为显著，最高温度为113 ℃（方案1），雨量传感器次之，最高温度为107 ℃（方案1）；方案3对前置摄像头的降温效果最明显，方案1对雨量传感器的降温效果最显著。

**关键词：自动驾驶　夏季高温　前置摄像头　雨量传感器**

**中图分类号：**U463.6　　**文献标志码：**A　　**DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20250001

# Study on Flow Field of FCM after High Temperature Parking in Summer

Wang Bo

(Pan Asia Technical Automotive Center Co., Ltd., Shanghai 200093)

【**Abstract**】The artificial intelligence autonomous vehicle identifies the vehicle environment based on communication, computer, network and control technology, and uses communication means to realize real-time and continuous control of the vehicle. However, the electronic module is prone to functional failure due to high temperature, and there are safety risks. In addition, after parking in the summer, the temperature of the passenger compartment rises sharply, and the internal electronic devices are in a high temperature state. Among them, the FCM is fixed on the front windshield and is exposed to direct sunlight, coupled with the influence of the black edge of the windshield, which is much higher than the surrounding ambient temperature. Therefore, taking FCM as the research object, a vehicle model is established to study the temperature and flow field changes in high-temperature environments, and the effects of different FCM cover designs on the temperature and flow field are compared. The results indicate that FCM is still much higher than the ambient temperature under the action of the air conditioning system. When the air conditioning is turned on after parking, the temperature of the FCM module continues to rise, and the front camera temperature increases most significantly, with a maximum temperature of 113 ℃ (Scheme 1), followed by the rain sensor, and a maximum temperature of 107 ℃ (Scheme 1). In addition, Scheme 3 has the most significant effect on reducing the temperature amplitude of the front camera, while Scheme 1 has the most significant effect on the rain sensor.

**Key words: Autonomous driving, High temperatures in summer, Front camera, Rain sensor**

【引用格式】王博. 夏季高温驻车后空调启动工况下前置摄像头模块流场研究[J]. 汽车工程师, 2026(8): 43-48.

WANG B. Study on Flow Field of FCM after High Temperature Parking in Summer[J]. Automotive Engineer, 2026 (8): 43-48.

## 1　前言

智能汽车能够在复杂道路环境和高速行驶条件下利用环境感知系统对周围车辆进行有效识别，以确保行车安全[1-4]，因此，环境感知系统在复杂驾驶环境下的稳定运行已成为各整车制造商重点关

注的问题[5]。

Han[6]采用雷诺平均方程和能量输运方程,通过布西内斯克(Boussinesq)近似,同时考虑温度对空气密度的影响,模拟了乘员舱制冷工况,并与试验结果进行了对比。Currle[7]利用多物理场计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)仿真软件STAR-CCM+对汽车乘员舱在自然对流、热传导及热辐射共同作用下的流场进行了研究。Shojaee等[8]建立整车模型,运用数值仿真方法对乘员舱温度场和速度场的分布情况进行了计算,并分析了不同边界条件下出风口对流场的影响。陈江平等[9]考虑周围环境通过车身与乘员舱进行热交换的影响,采用基于浮力修正的$k-\varepsilon$方程和对数壁面函数法则相结合的方法求解离散方程,通过数值模拟和试验研究了不同变量在流场中的耦合关系。芦克龙等[10]运用商业CFD软件Fluent分析在乘员舱空调系统作用下不同风量分配对假人流场的影响,以当量温度作为评价指标分析了人体各部位的热舒适性。张文灿等[11]通过数值模拟和试验方法对我国南方夏季高温环境下乘员舱降温过程中流场的动态特性展开研究,分析了冷空气作用下气流和壁面温度的变化速率。

综上,国内外学者对乘员舱流场的动态特性和人体热舒适性展开了研究,但对整车电子模块在不同环境下的温度场变化情况研究较少,其中,对环境感知模块的相关研究更为少见。为此,本文以夏季高温环境下乘员舱前置摄像头模块(Front Camera Modula,FCM)流场动态变化特性为研究对象,基于NX建立乘员舱模型,通过Hyper-Mesh细化流体域网格,考虑太阳辐射、热传导和自然对流的影响,利用STAR-CCM+模拟FCM冷却过程中的动态特性,并对比不同FCM罩盖设计方案对流场的影响。

## 2 模型建立

乘员舱内的气流受仪表板、转向盘、座椅等分布的影响,同时,太阳辐射通过车窗将能量传递至室内空气使温度升高,加之空调系统冷空气向下流动,使得舱内的流场极为复杂。因此,合理可靠的多物理场耦合求解模型对FCM流场的研究极为重要。为此,本文在考虑零件细节特征对流体扰动的基础上,对计算模型进行简化:保留出风口水平位置以上零件,忽略水平位置以下部分零件,如加速踏板、空调旋钮、换挡手柄等;舱内气体为可压缩气体,考虑物性参数随温度和压力的变化;乘员舱内除泄压阀外,密闭性良好。

### 2.1 物理模型

本文的研究对象为某轿车乘员舱内FCM,乘员舱模型如图1所示。

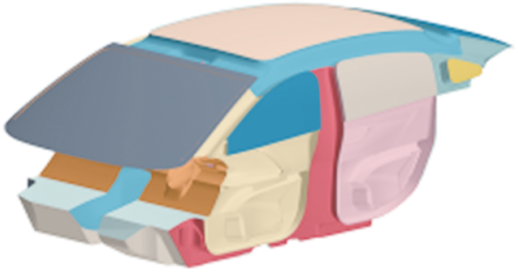


图1 乘员舱模型

### 2.2 网格模型

CFD求解结果的准确性受算法、收敛残差、时间步长、网格划分等因素影响。其中,合理的网格划分至关重要,其用于计算连续流体介质的空间分布情况,且为计算数据存储载体:单位空间内网格密度越高,即网格尺寸越小,求解结果越精确,但计算资源需求量显著上升,求解效率大幅下降;网格尺寸较大将导致模拟结果不收敛,甚至不能捕捉近壁面流体的流动特征,使虚拟仿真与试验结果偏差较大[12-13]。因此,需控制模型不同区域的网格尺寸,在减少网格数量的同时对影响流动特性的几何特征进行细化[14]。

捕捉乘员舱表面小平面体,以确定模型空间位置,利用表面重构生成表面网格,采用非结构化多面体网格对由多个表面网格封闭所组成的空间生成三维网格,并在壁面处通过拉伸生成边界层网格。以FCM罩盖为例,网格创建过程如图2所示,网格截面如图3所示。

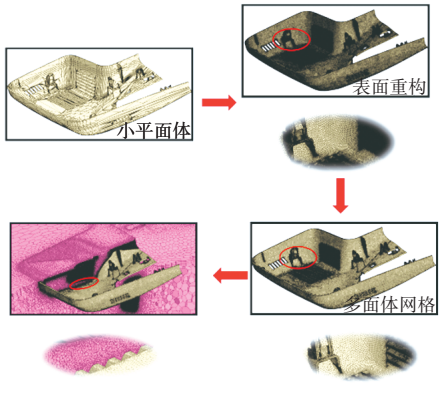



图2 STAR-CCM+网格创建过程

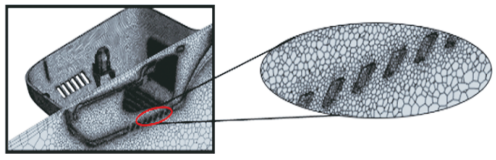
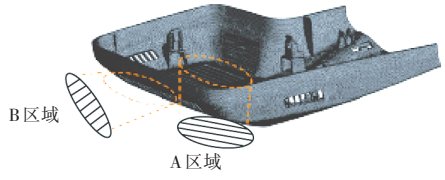
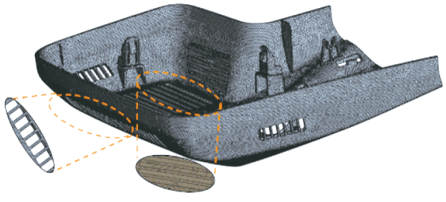


图3　FCM罩盖网格截面

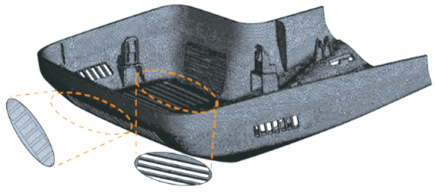
工作模式下,FCM主要通过冷空气自然对流降低自身温度,加之罩盖影响,冷空气仅通过散热孔进入,故散热孔的位置分布是影响FCM流场的主要因素。因此,以当前设计方案(方案1)为基础,对罩盖不同区域的散热孔进行密封,对比不同罩盖设计方案对FCM温度场的影响,其中,方案2对A区域散热孔进行密封,方案3对B区域散热孔进行密封,网格模型如图4所示,乘员舱和罩盖网格数量分别为约2 621万个、约16万个。




(a)方案1



(b)方案2



(c)方案3

图4　3种设计方案FCM罩盖网格模型

## 2.3　多物理场耦合模型

多物理场耦合求解可视为物质在质量守恒方程、动量守恒方程及能量守恒方程共同控制下的数值仿真:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)+f_i \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j T)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{k}{c_p}\frac{\partial T}{\partial x_j}\right)+S_T \tag{3}$$

式中:$u$为流速,$x$为空间坐标,$p$为压力,$\rho$为流体密度,$\mu$为流体黏性系数,$T$为温度,$t$为时间,$i$、$j$为爱因斯坦求和指标,$f$为体积力,$k$为热导率,$c_p$为定压比热容,$S_T$为源项。

湍流求解的本质是雷诺应力的计算,Boussinesq[15]提出涡黏性假设,将雷诺应力等效为湍流涡黏性系数与时均速度应变率的乘积,仅需采用湍流模型进行求解。相较于二方程模型,一方程模型对长度尺度敏感性较弱,无法预测分离流动,且计算资源需求高,故采用二方程模型。其中,$k$-$\omega$模型通过求解湍动能$k$和湍流频率$\omega$来描述湍流特性,其原始边界层计算对$\omega$的取值非常敏感。因此,选择可处理高应变率和流线弯曲程度较大流体运动的可实现(Realizable)$k$-$\varepsilon$双层模型对乘员舱内流体的分布情况进行仿真。

## 2.4　载荷模型

### 2.4.1　热传导

物体通过微观颗粒间的相互作用将内部能量由高温区域向低温区域传递:

$$Q=-kA(\mathrm{d}T/\mathrm{d}x)t \tag{4}$$

式中:$Q$为单位面积在单位时间内通过的热量,$k$为导热系数,$A$为传热面积。

### 2.4.2　自然对流

由温度差异引起的物质间能量转移现象称为自然对流:

$$Q=hA(T_s-T_f) \tag{5}$$

式中:$h$为对流换热系数,$T_s$为表面温度,$T_f$为流体温度。

### 2.4.3　热辐射

热辐射指物体间由于温差而发生的能量转移现象:

$$Q=\sigma\alpha A(T_s^4-T_f^4) \tag{6}$$

式中:$\sigma$=5.67×10$^{-8}$ W/(m$^2$·K$^4$)为斯特藩-玻尔兹曼常数,$\alpha$为发射率。

## 2.5　环境参数

夏季高温驻车后,乘员进入驾驶舱启动空调吹面模式快速降温,此时FCM的温度会在急剧上升后缓慢下降。

为模拟乘员舱在空调吹面模式下的流场分布情况,将空调出风口温度设置为16 ℃,外部环境温度参考重庆市历史最高温度设置为44 ℃,在乘员舱外添加热源模拟太阳辐射,辐射照度为1 367 W/m$^2$,设置乘员舱不同零件材料、传热系数、吸收率及发射率等,如图5所示。



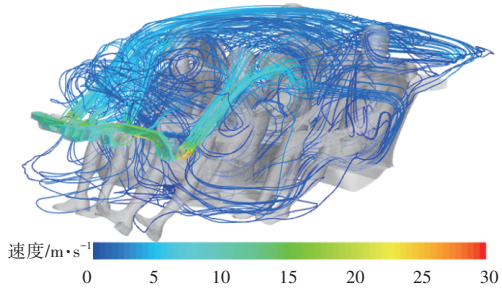

图5　环境参数

## 3　仿真分析

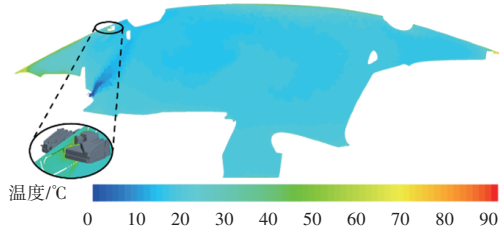
基于乘员舱仿真模型模拟舱内流场分布情况,对比分析不同散热孔位置对FCM温度场和气流分布的影响。

### 3.1　乘员舱内流场分析

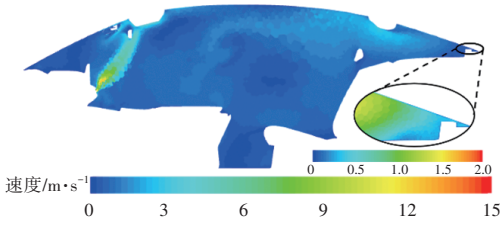
乘员舱流场分布情况仿真结果如图6所示。




(a)流线




(b)温度场




(c)速度场

图6　乘员舱流场分布

由图6a可知:流体经空调系统冷却后,由风道分配流量,至出风口处速度到达最大值,约为25.5 m/s;进入乘员舱后,压力减小,速度下降,假人面部位置的流速约为3.2 m/s,下降约87.45%。由图6b和图6c可知,后风窗玻璃温度最高(约为89.7 ℃),前风窗玻璃次之(约为69.9 ℃),这是因为风窗玻璃与车身交界处气体流动性较差,流速分别为约0.3 m/s和约0.2 m/s,加之空调系统在乘员舱前端,冷空气优先与前风窗玻璃换热,故前风窗玻璃温度较后风窗玻璃低。此外,前置摄像头最高温度约为54.2 ℃,远高于其环境温度。因此,需对前置摄像头在乘员舱降温过程中的温度变化进行研究。

### 3.2　乘员舱内冷却过程分析

在乘员舱降温过程中,前置摄像头和雨量传感器温度变化曲线如图7和图8所示。

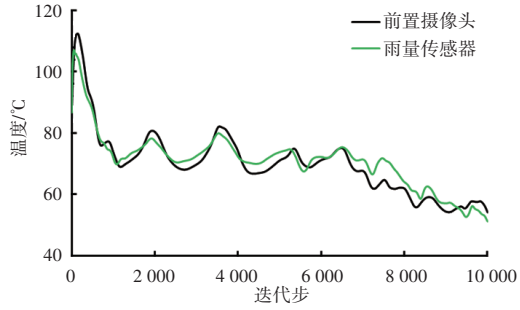
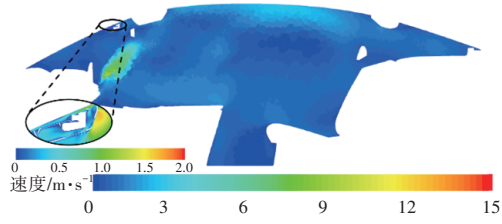
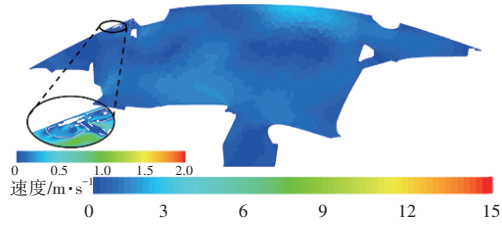



图7　FCM降温曲线




(a)前置摄像头




(b)雨量传感器

图8　FCM速度场

由图7可知,当空调开启后,前置摄像头和雨量传感器的温度分别由85.0 ℃、85.0 ℃上升至112.4 ℃和107.1 ℃,这是因为夏季高温环境下乘员舱温度上升至约85 ℃并保持平衡,当车辆起动后,前置摄像头和雨量传感器开始工作并散发一定热量,到达最高温度前,乘员舱内流场温度部分下降,但二者周围环境温度仍较高。

由图8可知,前置摄像头和雨量传感器周围流场最高速度分为约1.3 m/s和约0.4 m/s,这是因为FCM布置空间较小且罩盖限制了该区域流体运动,加之吹面模式的影响,气流不能沿前风窗玻璃由FCM前端散热孔直接进入内部,多种因素

的作用导致FCM流场内流体流动性差、散热能力弱,可能导致前置摄像头或雨量传感器超过其温度限值,不能正常工作,从而影响行车安全。

### 3.3 不同FCM罩盖对温度的影响

图9、图10所示为采用3种FCM罩盖设计方案时前置摄像头和雨量传感器的温度变化曲线。

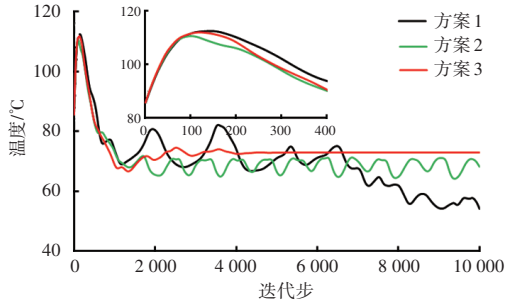



图9 前置摄像头降温曲线

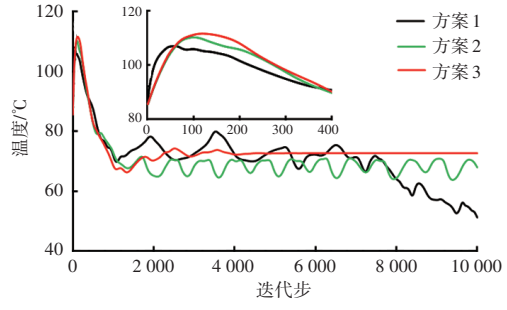



图10 雨量传感器降温曲线

由图9可知:对于前置摄像头,方案1在降温过程中温度上升幅值最大(27.4 ℃),方案3次之(26.9 ℃),方案2最小(25.5 ℃);当温度趋于稳定后,方案1温度最低,方案2次之,方案3最高,分别为54.2 ℃、64.2 ℃、66.6 ℃。由图10可知:对于雨量传感器,方案3在降温过程中温度上升幅值最大(26.6 ℃),方案2次之(25.2 ℃),方案1最小(22.0 ℃);当温度趋于稳定后,降温过程中最低温度变化趋势与前置摄像头相同,即方案1最低,方案2次之,方案3最大。

## 4 结束语

本文以乘员舱FCM流场动态变化特性为研究对象,提出了3种FCM罩盖设计方案,考虑热传导、自然对流及热辐射建立复杂多物理场耦合模型,并基于STAR-CCM+模拟舱内冷却过程流场动态变化情况,分析了不同罩盖设计方案对前置摄像头和雨量传感器温度场和速度场的影响。结论如下:

a. 驻车后,在空调启动瞬间,前置摄像头、雨量传感器温度将持续上升,前置摄像头温度提高最为显著。

b. 当温度稳定后,FCM罩盖采用方案3时前置摄像头和雨量传感器温度最高,采用方案1时二者温度最低。

c. 需基于FCM中不同电子元件的冷却要求及优先程度选择对应的罩盖设计方案,以满足整车性能需求。

## 参 考 文 献

[1] 李学鋆, 章菊, 陈小兵. 自动驾驶车辆转向系统设计[J]. 机械强度, 2019, 41(6): 1429-1435.
LI X Y, ZHANG J, CHEN X B. Design of Steering System for Autonomous Vehicle[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(6): 1429-1435.

[2] 张扬, 李守成, 陈华. 基于智能前视摄像头的ACC目标车辆探测[J]. 制造业自动化, 2017, 39(9): 8-11.
ZHANG Y, LI S C, CHEN H. ACC Target Vehicle Detection Based on Intelligent Front Camera[J]. Manufacturing Automation, 2017, 39(9): 8-11.

[3] 于文汐. 网络攻击下自动驾驶汽车的路径跟踪控制研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
YU W X. Research on Path-Following Control of Autonomous Vehicles under Cyber Attack[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2023.

[4] 郭剑鹰, 陈晓, 高升. 高级驾驶辅助系统前视摄像头硬件在环测试[J]. 光学仪器, 2018, 40(3): 22-27.
GUO J Y, CHEN X, GAO S. Hardware-in-the-Loop Test System for Front-View-Camera of Advanced Driver Assistance System[J]. Optical Instruments, 2018, 40(3): 22-27.

[5] 李欣然, 李修贤, 李莉. 环境信息处理在无人驾驶中的发展与应用[J]. 自动化博览, 2023, 40(12): 26-30.
LI X R, LI X X, LI L. Environmental Information Processing in Autonomous Driving: Its Development and Application[J]. Automation Panorama, 2023, 40(12): 26-30.

[6] HAN T. Three-Dimensional Navier-Stokes Simulation for Passenger Compartment Cooling[J]. International Journal of Vehicle Design, 2014, 10(2): 175-186.

[7] CURRLE J. Numerical Simulation of the Flow in a Passenger Compartment and Evaluation of the Thermal Comfort of the Occupants[J]. SAE Transactions, 1997, 106(6): 806-816.

[8] SHOJAEE M H, TEHRANI F P H, NOORPOOR A R, et al. Analysis of Vehicle Passenger Compartment HVAC Using Simulation[J]. SAE Technical Paper, 2004-01-1505, 2004.

[9] 陈江平, 陈芝久, 阙雄才. 空调轿车室内热微环境的数值模拟与实验研究[J]. 汽车工程, 1999(3): 171-176+133.

CHEN J P, CHEN Z J, QUE X C. Numerical Simulation and Experimental Study of the Temperature Field and Air Flow Inside the Air-Conditioned Passenger Compartment [J]. Automotive Engineering, 1999(3): 171-176+133.

[10] 芦克龙, 谷正气, 贾新建, 等. 某重型货车空调系统对乘员舱热舒适性影响的分析与改进[J]. 汽车工程, 2011, 33(2): 162-166.
LU K L, GU Z Q, JIA X J, et al. Analysis and Improvement of the Effects of Air Conditioning System on the Thermal Comfort of Passenger Compartment in a Heavy Truck[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(2): 162-166.

[11] 张文灿, 陈吉清, 兰凤崇. 汽车乘坐空间热环境降温过程动态特性分析研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(14): 116-124.
ZHANG W C, CHEN J Q, LAN F C. Study on Thermal Environment Dynamic Characteristics within a Vehicle Cabin during the Cooling Period[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(14): 116-124.

[12] 缪维跑. 台风环境下风力机流固耦合响应及叶片自适应抗风性研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2019.
MIAO W P. Study of Fluid Structure Interaction Response of Wind Turbine in Typhoon Environments and Wind Resistance of Adaptive Blade[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2019.

[13] WANG B, XU Z F, LI C, et al. Hydrodynamic Characteristics of Forced Oscillation of Heave Plate with Fractal Characteristics Based on Floating Wind Turbine Platform[J]. Ocean Engineering, 2020, 212.

[14] 刘青松, 陈福东, 李春, 等. 柔性弹片控制翼型流动分离的流固耦合研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1954-1963.
LIU Q S, CHEN F D, LI C, et al. Study on Fluid-Structure Interaction for Flow Separation Control of Airfoil with Flexible Flap[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1954-1963.

[15] HINZE J O. Turbulence[M]. New York: McGraw-Hill, 1975.

（责任编辑　弦　歌）

修改稿收到日期为2025年3月31日。

（上接第42页）

ZONG Y T, GUO L, SHI Y. Analysis and Research on Aerodynamic Drag of a New Energy Light Truck[J]. Auto Time, 2018(11): 74-78.

[8] 尚文强, 张风利, 王文江, 等. 湍流模型参数对气动力仿真精度影响研究[J]. 汽车工程, 2025, 47(9): 1752-1762.
SHANG W Q, ZHANG F L, WANG W J, et al. Study on Effect of Turbulence Model Coefficients on Accuracy of Aerodynamic Simulation[J]. Automotive Engineering, 2025, 47(9): 1752-1762.

[9] 余天行. 基于多维协同仿真的商用车尾翼优化及燃油经济性研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2025.
YU T X. Research on the Fuel Economy of Commercial Vehicles Based on Multi-System Simulation and Optimization of Body Attachment Parameters[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2025.

[10] 马德术, 文书涵, 李世强, 等. 基于CFD的新能源商用车续航分析与场景验证[J]. 专用汽车, 2024(6): 29-34.
MA D S, WEN S H, LI S Q, et al. Endurance Analysis and Scenario Verification of New Energy Commercial Vehicles Based on CFD[J]. Special Purpose Vehicle, 2024(6): 29-34.

[11] SAE International. Wind Tunnel Test Procedure for Trucks and Buses: SAE J1252_201207[S]. Warrendale, Pa, USA: SAE International, 2012.

[12] 宋晓东. 队列行驶智能商用车低风阻气动外形优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
SONG X D. Research on Aerodynamic Shape Optimization of Intelligent Commercial Vehicle Platoon with Low Wind Resistance[D]. Changchun: Jilin University, 2024.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2026年5月14日。