

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2021.04.003

基于高速工况的燃料电池汽车发动机 舱内结构优化

陶 琦^{1, 2}, 汪怡平^{1, 2}, 陈 明³, 邓亚东^{1, 2}, 苏楚奇^{1, 2}, 王 硕^{1, 2}, 刘水长⁴

- (1. 武汉理工大学 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430070;
2. 武汉理工大学 湖北省新能源与智能网联车工程技术研究中心, 湖北 武汉 430070;
3. 东风汽车集团有限公司技术中心, 湖北 武汉 430056;
4. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 选取某燃料电池汽车为研究对象, 搭建 GT-COOL 和 STAR-CCM+ 联合仿真平台。使用一维和三维模型联合计算 100, 120, 150 km/h 工况下使用体积分数为 50% 的乙二醇溶液作为冷却介质时发动机舱内的温度特性, 并找到主要热害位置, 且通过安装导流板的方式来提高主散热器和左右散热器的进气量。计算结果表明, 安装导流板有效提高了进气流量, 降低了主散热器和左右散热器出口冷却介质的温度, 达到了提升散热性能的目的。

关键词: 高速工况; 燃料电池汽车; 发动机舱; 结构优化; 散热性能

中图分类号: U469.72⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2021)04-0016-06

引文格式: 陶 琦, 汪怡平, 陈 明, 等. 基于高速工况的燃料电池汽车发动机舱内结构优化 [J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(4): 16-21.

Structural Optimization of Fuel Cell Vehicle Engine Compartment Under a High Speed Condition

TAO Qi^{1, 2}, WANG Yiping^{1, 2}, CHEN Ming³, DENG Yadong^{1, 2},
SU Chuqi^{1, 2}, WANG Shuo^{1, 2}, LIU Shuichang⁴

- (1. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Research Center for New Energy & Intelligent Connected Vehicle, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
3. Dongfeng Motor Corporation Technical Center, Wuhan 430056, China;
4. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: With a fuel cell vehicle as the research object, a combined simulation platform of GT-COOL and STAR-CCM+ has thus been established. One-dimensional and three-dimensional models are combined together to calculate the temperature characteristics in the engine compartment with a volume fraction of 50% ethylene glycol

收稿日期: 2021-04-15

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (2018YFB0105301); 湖南省自然科学基金资助项目 (2019JJ60064); 湖南省教育厅科研基金资助重点项目 (18A270, 20A157)

作者简介: 陶 琦 (1990-), 男, 湖北应城人, 武汉理工大学博士生, 主要研究方向为燃料电池汽车整车热管理,
E-mail: taoqi313@163.com

通信作者: 汪怡平 (1984-), 男, 湖南衡阳人, 武汉理工大学教授, 博士, 主要从事汽车空气动力学方面的教学与研究,
E-mail: wangiyping@whut.edu.cn

under 100 km/h, 120 km/h, 150 km/h working conditions respectively. The calculation results show that the installation of the deflector can effectively improve the air flow rate, and reduce the temperature of the cooling medium at the outlet of the main radiator and the left and right radiators, thus achieving the purpose of improving the heat dissipation performance of the radiator.

Keywords: high speed condition; fuel cell vehicle; engine compartment; structural optimization; heat dissipation performance

0 引言

燃料电池汽车具有零排放、高效率、长续航、储氢能量密度高和加氢时间快等显著优势,是目前氢能应用的重要领域^[1]。我国的科研工作者们已经在相关的技术领域开展了大量的研究工作,并且掌握了一些关键技术,其中一些重要的零部件已经实现了国产,因而加速了燃料电池汽车产业的发展^[2]。其中的质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)在汽车领域中具有广阔的应用前景^[3]。

虽然燃料电池汽车是未来的发展趋势,但是其热管理问题是其面临的主要技术挑战之一^[4]。燃料电池的工作温度通常在 60~80 ℃,温度过低会使得欧姆极化增强,内部阻抗增加,燃料电池性能降低。相反,温度过高会使得电池内部膜脱水,影响电池寿命。同时,燃料电池汽车发动机舱内的部件较多,散热空间有限,导致散热困难,因此热管理问题是燃料电池汽车的主要技术难点^[5]。

早期的汽车开发中,主要采用实验的方法进行研究,需要消耗较多的研发时间和研究经费。特别是高速工况的实验测试,具有较大的难度,因此,本文选取了某燃料电池汽车,对其进行发动机舱内的热管理仿真研究,分析了不同工况下燃料电池汽车发动机舱内的温度场和速度场,并且通过增加导流板,使更多的气流进入主散热器和左右散热器,以提升散热器的散热性能,以期为燃料电池汽车的研究提供一定的参考依据。

1 仿真与分析

1.1 控制方程选择

汽车的行驶速度相对于声速来说很小,空气被视为不可压缩黏性流体,其控制方程如下。

连续性方程:

$$\operatorname{div} \vec{u}=0, \quad (1)$$

式中 $\vec{u}$ 为流体速度。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u_i \vec{u}) = \operatorname{div}(\mu \cdot \operatorname{grad} u_i) - \frac{\partial p}{\partial x_i}, \quad (2)$$

式中: t 为时间;

p 为流体微元上的压强;

μ 为流体黏度;

$i=1, 2, 3$, 为坐标轴序号。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u} T) = \operatorname{div}\left(\frac{k}{c_p} \cdot \operatorname{grad} T\right) + S_T. \quad (3)$$

式中: c_p 为比热容;

T 为温度;

k 为流体的传热系数;

S_T 为黏性耗散项。

标准 $k-\varepsilon$ 模型在时均应变特别大的情形下不会导致负的正应力,为保证计算结果的可实现性,计算湍流动力黏度计算式中的系数应当不是常数,而应当与应变率联系起来^[6]。Realizable $k-\varepsilon$ 模型可以用于计算有旋的均匀剪切流、平面混合流等^[7]。由于汽车各部件表面形状及流线变化较大,流动复杂,因此,本文选择 Realizable $k-\varepsilon$ 模型^[8-10]模拟汽车发动机舱内的湍流及流动分离。

1.2 模型简化处理

燃料电池汽车发动机舱外壳及舱内模型如图 1 和图 2 所示。

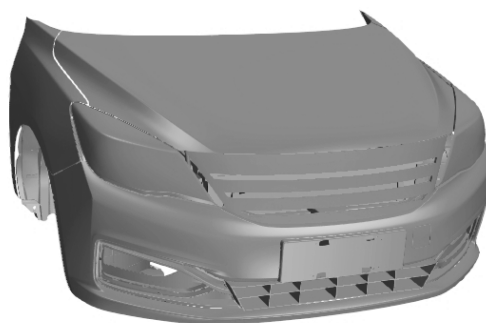
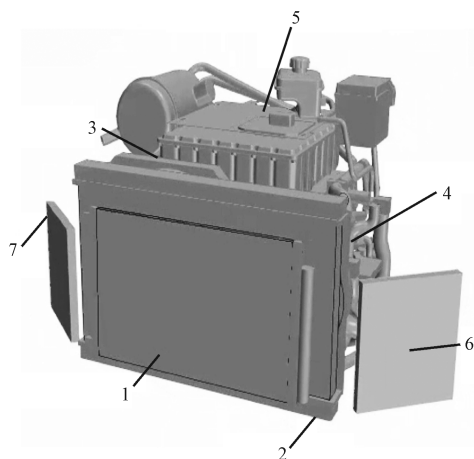


图 1 发动机舱外壳模型

Fig. 1 Engine compartment of the external model



1—冷凝器；2—主散热器；3—大风扇；4—小风扇；
5—燃料电池发动机；6—左侧散热器；7—右侧散热器

图2 舱内部件简化模型

Fig. 2 Engine compartment of the internal model

由于原始的燃料电池汽车发动机舱的模型较为复杂,为了减少计算资源,对发动机舱内的各个部件进行了简化处理:保留各个部件的主要包络面,去掉螺栓和直径小于 5 mm 的管路,前部进气格栅分为上格栅和下格栅,在两侧雾灯区域开孔,以使气流进入发动机舱。

三维仿真分析的计算域如图 3 所示,图中 L 为车身长度, W 为车身宽度, H 为车身高度。从图中看出,计算域入口距车头 2 倍车长,计算域出口距离发动机舱尾部 6 倍车长,左侧和右侧壁面距离发动机舱的左侧和右侧 3.5 倍车宽,计算域顶部距离发动机舱顶部 4 倍车高。

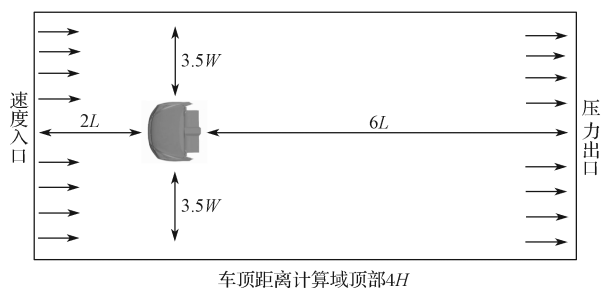


图3 三维仿真分析计算域平面图

Fig. 3 3D Simulation of the calculation zone

1.3 网格生成

对燃料电池汽车各个部件进行网格划分,发动机舱的剖面网格划分如图 4 所示。其中,冷凝器、主散热器、左散热器、右散热器、风扇的网格大小均为 1~2 mm,燃料电池系统的网格大小为 1~4 mm,发动机舱外壳的网格大小为 1~5 mm,网格总数为 4 436 万。

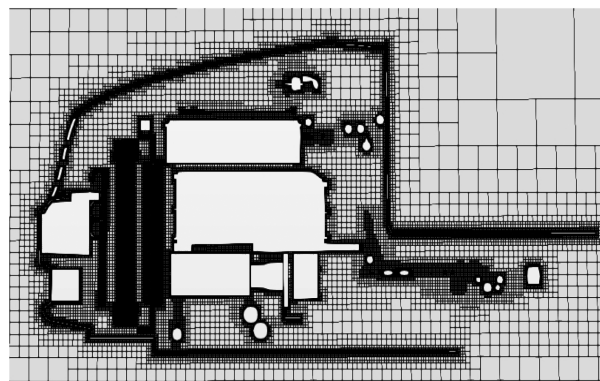


图4 发动机舱剖面网格划分图

Fig. 4 Section meshing of the engine compartment

1.4 边界条件设置

根据发动机舱内三维仿真分析的要求,将计算域的入口设置为空气速度入口,其值设置为 100, 120, 150 km/h。计算域的出口设置为压力出口,设置为 0 Pa。仿真中环境温度设置为 40℃,散热器使用双流体散热器模型,地面使用无滑移壁面,顶面及侧面设置为对称界面。主散热器、左右散热器和冷凝器的迎风面风速和压强损失的数据,由供应商提供数据进行拟合后,得到多孔黏性阻力系数和多孔惯性阻力系数,如表 1 所示。

表1 多孔黏性与多孔惯性阻力系数值

Table 1 Porous viscosity and inertial resistance coefficient values

部件	多孔黏性阻力系数 / ($\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{s})^{-1}$)	多孔惯性阻力系数 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-4}$)
主散热器	658.97	149.86
左右散热器	849.41	159.75
冷凝器	691.38	120.31

体积分数为 50% 乙二醇溶液的动力黏度、导热系数、密度、比热容、运动黏度、导热系数等物理属性参数如表 2 所示。

表2 冷却介质物理属性

Table 2 Physical properties of the coolant

参 数	取 值
动力黏度 / ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	9.8×10^{-4}
导热系数 / ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	0.411
密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 038.46
比热容 / ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$)	3 512
运动黏度 / ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	9.44×10^{-7}
导热系数 / ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	1.13×10^{-7}

1.5 一维仿真分析

基于 GT-COOL 搭建燃料电池系统模型,求出不同工况下主散热器的散热功率,如图 5 所示。

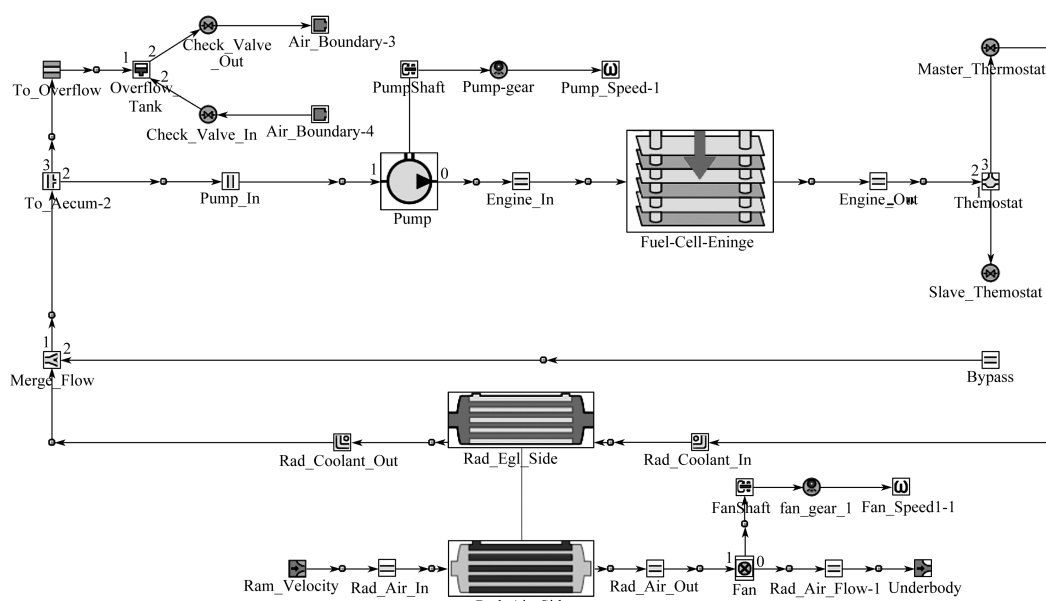


Fig. 5 One-dimensional model of the fuel cell system

经过系统模型模拟,得知当车速分别为 100, 120, 150 km/h 时,主散热器的散热功率分别为 30.23, 41.38, 58.3 kW。

1.6 仿真结果与分析

利用 STAR-CCM+ 进行仿真, 所得 100 km/h 工况下 Y 截面和 Z 截面的温度分布云图如图 6 所示。

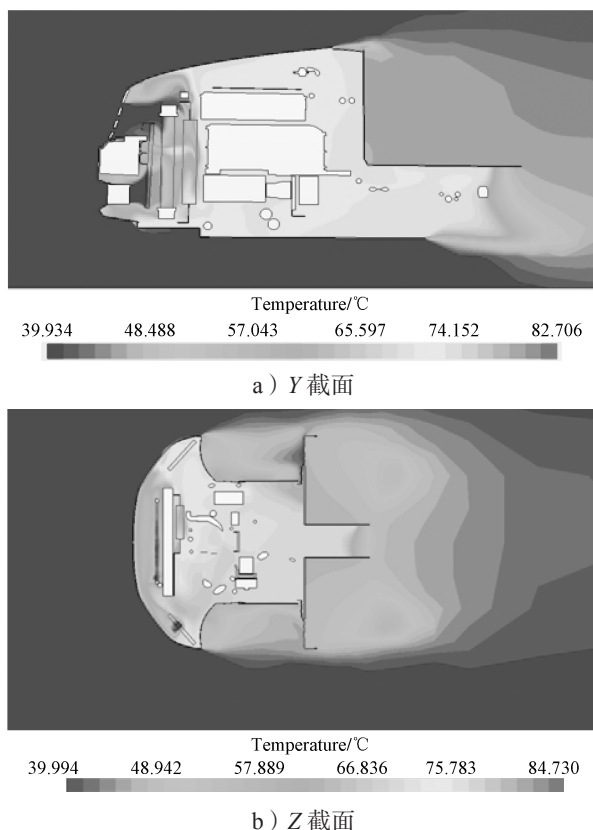


Fig. 6 *Y* and *Z* section temperature distribution under 100 km/h

从图 6 所示截面温度分布云图中可以看出, 当车速为 100 km/h 时, 发动机舱内的最高温度为 82.7 °C, 且温度较高的区域主要集中在主散热器底部和右侧散热器区域。

仿真所得 120 km/h 工况下 Y 截面和 Z 截面的温度分布云图如图 7 所示。

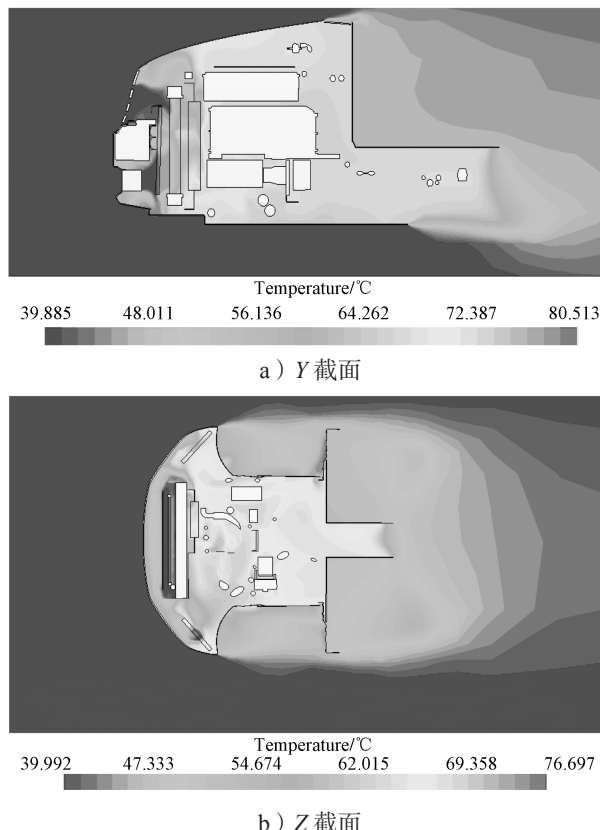


Fig. 7 *Y* and *Z* section temperature distribution under 120 km/h

从图 7 所示 Y、Z 截面温度分布云图中可以看出,当车速为 120 km/h 时,发动机舱内的最高温度为 80.5 ℃,温度较高区域同样主要集中在主散热器底部和右侧散热器区域。

仿真所得 150 km/h 工况下 Y 截面和 Z 截面的温度分布云图如图 8 所示。

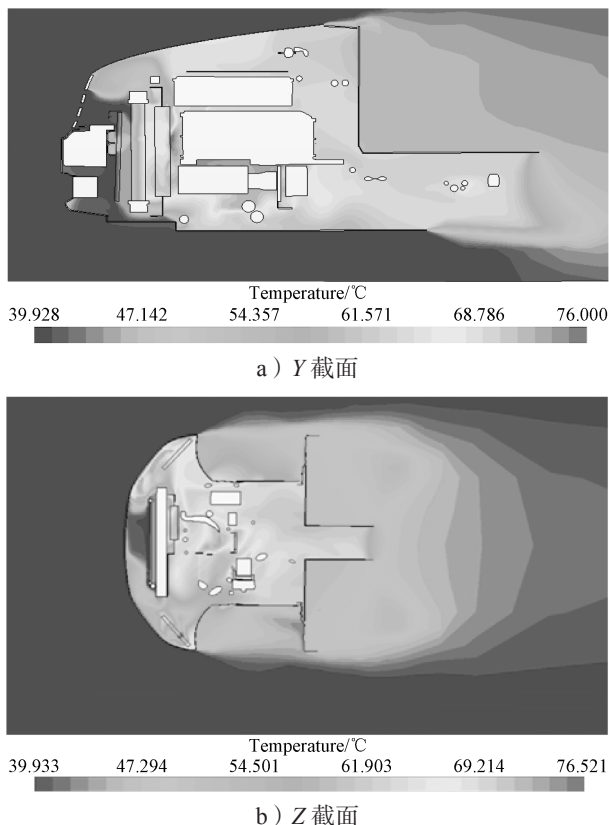


图 8 150 km/h 工况下 Y、Z 截面温度分布

Fig. 8 Y and Z section temperature distribution under 150 km/h

从图 8 所示 Y、Z 截面温度分布云图中可以看出,当车速为 150 km/h 时,发动机舱内的最高温度为 76 ℃,温度较高的区域还是主要集中在主散热器底部和右侧散热器区域。

由图 6~8 可知,不同工况下,温度较高的区域均集中在主散热器底部和右侧散热器区域,而发动机舱内的最高温度随车速的增加而减小。通过对温度场结果进行分析,发现气流经过进气格栅进入散热器的空气,一部分经过散热器散发出去,还有一部分沿着散热器表面切向流出,造成了散热器进气量不足。

2 改进设计

针对上面的问题,对发动机进行改进,即在左右两侧散热器分别增加导流板设计(如图 9 所示),以增加散热器的进气流量。

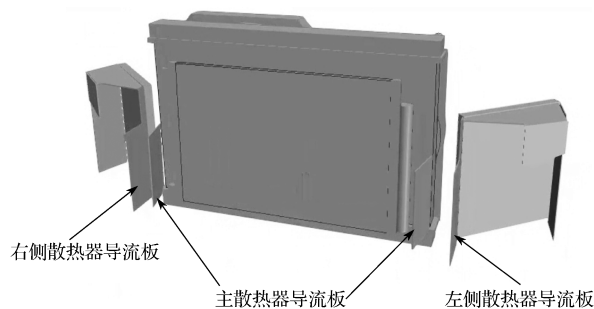


图 9 散热器导流板

Fig. 9 Radiator guide plate

由于中间散热器主风扇出风量大,受燃料电池系统零部件的遮挡,一部分吹出的热风流向右散热器,造成右侧散热器温度较高。针对此情况,设计了左右散热导风罩,使气流全部导向左右散热器,同时主风扇靠右散热器一侧增加导风板,使热风不吹向右散热器。为了增加冷却气流流向主散热器的进气量,同时减小内循环阻力,因此设计导流板以将气流全部导入主散热器,优化后的速度云图,如图 10 所示,可见绝大部分气流在导流板作用下进入了主散热器和左右散热器。

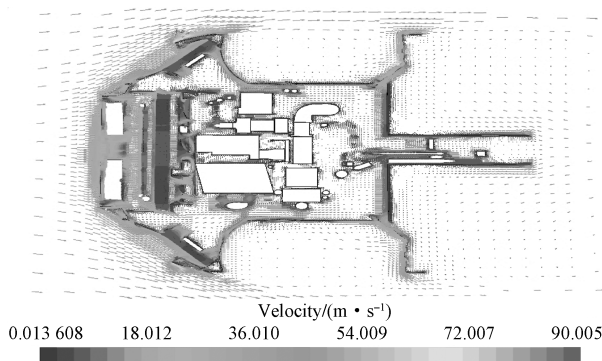


图 10 优化后速度云图

Fig. 10 Velocity distribution of post-optimization

增加主散热器导流板之后,仿真监测得出,中间散热器的进气量为 1.84 kg/s,大于未改动时的中间散热器进气量(为 1.63 kg/s)。同时,由于进气量的增大,中间散热器的出口温度检测为 75.24 ℃,低于未改动时的温度(为 78.59 ℃)。增加右侧导流板之后,使得右侧散热器的出口温度为 65.16 ℃,接近工作温度,与之前未增加导风罩相比,出口温度约下降了 7 ℃。左侧散热器的出口监测温度为 59.48 ℃,与之前相比,温度降低了 4 ℃。

3 结论

1) 本文选取了某燃料电池汽车作为研究对象,通过仿真分析研究 100, 120, 150 km/h 3 种车速下燃

料电池汽车发动机舱内的温度分布情况,并找到了危害区域。

2)通过流场分析发现,进入散热器的气流一部分经过散热器,还有一部分沿散热器表面切向流出,造成散热器进气量不足。

3)增加主散热器和左右两侧散热器的导流板,可以有效地提高进入散热器的进气量,降低散热器出口温度,有效提高散热器的散热能力。

参考文献:

- [1] 王建建,胡辰树.我国氢燃料电池专用车发展现状与趋势分析[J].专用汽车,2021(4):51-55.
WANG Jianjian, HU Chenshu. Development Status and Trend Analysis of Hydrogen Fuel Cell Special Purpose Vehicles in China[J]. Special Purpose Vehicle, 2021(4): 51-55.
- [2] 黎冲森.燃料电池车市蓄势待发[J].汽车纵横,2021(3):25-34.
LI Chongsen. Fuel Cell Vehicle Market Get Ready[J]. Auto Review, 2021(3): 25-34.
- [3] 蒋诚.车用燃料电池热管理系统设计开发与性能验证[D].长春:吉林大学,2020.
JIANG Cheng. Design Development and Performance Verification of Automotive Fuel Cell Thermal Management System[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [4] 李菁,汪怡平,陶琦,等.全功率燃料电池汽车散热系统设计、建模与分析[J].汽车工程学报,2019,9(6):462-467.
LI Jing, WANG Yiping, TAO Qi, et al. Design, Modeling and Analysis of Heat Dissipation System for Full-Power Fuel Cell Vehicles[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(6): 462-467.
- [5] 郑文杰,杨径,朱林培,等.车用燃料电池热管理性能仿真与试验研究[J].汽车工程,2021,43(3):381-386.
ZHENG Wenjie, YANG Jing, ZHU Linpei, et al. Simulation and Experimental Study on Thermal Management System of Vehicle Fuel Cell[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(3): 381-386.
- [6] THOMAS B G, NAJJAR F M. Finite Element Modelling of Turbulent Fluid Flow and Heat Transfer in Continuous Casting[J]. Applied Mathematical Modelling, 1991, 15(5): 226-243.
- [7] 陶文铨.数值传热学[M].第二版.西安:西安交通大学出版社,2018年:374-375.
TAO Wenquan. Numerical Heat Transfer [M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2018: 374-375.
- [8] 李喆隆,李涛,李现今.电动汽车机舱散热问题CFD仿真分析优化及试验验证[J].汽车工程学报,2019,9(6):400-407.
LI Zhelong, LI Tao, LI Xianjin. Improvement of Cooling Capability for Electric Vehicles Using CFD Simulation of Under-Hood Flow[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(6): 400-407.
- [9] 沈宏丽.轿车发动机舱热管理仿真分析及优化[D].重庆:重庆交通大学,2016.
SHEN Hongli. Simulation Analysis and Optimization of Thermal Management of Vehicle Engine Compartment[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [10] 简贵平.汽车机舱热管理仿真分析研究[D].长沙:湖南大学,2015.
JIAN Guiping. Simulation and Analysis of Thermal Management in Engine Compartment. Changsha[D]: Changsha: Hunan University, 2015.

(责任编辑:申剑)