

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20231201002

文章编号: 1672-9331(2024)02-0056-12

引用格式: 江亮, 汤五洋, 凡兵, 等. 主动进气格栅在混动车型应用的关键技术研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(2): 56-67.

Citation: JIANG Liang, TANG Wuyang, FAN Bing, et al. Research on the key technology of active grille shutters application in hybrid vehicle [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(2): 56-67.

主动进气格栅在混动车型应用的关键技术研究

江亮¹, 汤五洋², 凡兵¹, 田野¹, 林银辉¹

(1. 广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院 整车集成部, 广东 广州 511434;

2. 湖南湖大艾盛汽车技术开发有限公司 整车性能集成部, 湖南 长沙 410006)

摘要:【目的】主动进气格栅(active grille shutter, AGS)技术是优化整车热管理性能、风阻和油耗的重要手段之一, 但AGS在混动车型的应用价值尚未得到明确的多方位评估, 这导致主机厂对该技术的应用仍有疑虑。【方法】该文首次进行AGS在混动车型应用的多方位研究, 提出一种混动车AGS开度控制策略。基于某混动车型, 采用UltraFluidX、Amesim和Star CCM+等科学工具进行仿真, 并开展整车油耗试验, 多方位地评估AGS对整车风阻、热管理性能和油耗的影响。【结果】该混动车型在高速行驶时关闭AGS可有效降低整车风阻7.85%, 主要原因是气流无法进入机舱, 从而降低了机舱阻力; 在该混动车型上应用AGS可满足热管理系统的性能需求, 优化空调箱内循环比例, 进一步提升热管理系统性能; 安装AGS密封导流装置是改善机舱内热回流和防止冷空气逃逸的关键措施, 可提高格栅进气效率和热管理系统性能; 配备AGS并采用该文提出的AGS开度控制策略的该混动车型油耗比未配备AGS的对应车型的降低5.20%, 效果显著。【结论】AGS对混动车型的整车风阻、热管理性能和油耗等均有较大提升, 良好的AGS匹配设计和关联控制策略实施是促使未来混动车型能耗下降的关键之一。

关键词: 混合动力汽车; 主动进气格栅; 开度控制策略; 风阻; 热管理性能; 油耗

中图分类号: U462

文献标志码: A

Research on the key technology of active grille shutters application in hybrid vehicle

JIANG Liang¹, TANG Wuyang², FAN Bing¹, TIAN Ye¹, LIN Yinhui¹

(1. Department of Vehicle Integration, GAC Automotive Research & Development Center, Guangzhou 511434, China;

2. Department of Vehicle Performance Integration, Aisin Auto R&D Co., Ltd., Changsha 41006, China)

Abstract: [Purposes] Active grille shutter (AGS) technology is an important means to optimize vehicle's thermal management performance, wind resistance, and fuel consumption. However, the application of AGS in hybrid vehicles has not been clearly evaluated in all aspects, resulting in the original equipment manufacturers still having doubts about its application. [Methods] For the first time, a multi-directional research on the application of AGS in hybrid vehicles was conducted and an AGS drive control strategy for hybrid vehicles was proposed in this paper. Based on the selected hybrid model, UltraFluidX, Amesim, Star CCM+, and other scientific tools, were used to conduct simulation researches and fuel consumption tests were carried out. The effects of AGS's application

收稿日期: 2023-12-01; 修回日期: 2024-01-03; 接受日期: 2024-01-03

通信作者: 江亮(1989—)(ORCID:0009-0000-5423-322X), 男, 工程师。主要从事整车性能集成开发方面的研究。

E-mail: jiangliang@gacrnd.com

投稿网址: <http://csjgxbzk.csust.edu.cn/csldgxbzk/home>

on vehicle wind resistance, thermal management performance, and fuel consumption, were evaluated in various aspects. [Findings] When the hybrid vehicle was running at high speed, closing AGS could effectively reduce the wind resistance by about 7.85%. The main contribution was that the air could not enter the cabin, which reduced the cabin resistance. The application of AGS can meet the performance requirements of the thermal management system, optimize the circulation ratio in the air conditioner, and further improve the cooling performance of the thermal management system. The installation of an AGS sealing diversion device is a key measure to improve the heat return in the cabin and prevent the cold air from escaping, which can improve the efficiency of the grille air intake and the performance of the thermal management system. Employing AGS and the corresponding opening control strategy for hybrid vehicle, the fuel consumption of the hybrid model was reduced by 5.2%, which has a significant effect on energy consumption reduction. [Conclusions] The application of AGS in hybrid vehicles has great positive benefits on vehicle wind resistance, thermal management performance, and fuel consumption. Excellent AGS matching design and implementation of correlation control strategy are key measures to reduce the energy consumption of hybrid vehicles in the future.

Keywords: hybrid electric vehicle; active grille shutter; opening control strategy; wind resistance; thermal management performance; fuel consumption

Corresponding author: JIANG Liang (1989—) (ORCID: 0009-0000-5423-322X), male, engineer, research interest: integrated development of vehicle performance. E-mail: jiangliang@gacrnd.com

0 引言

进气格栅不仅是汽车前部的重要组成部件,还是前端冷却气流进入前舱的入口。以往的进气格栅的开口部分的尺寸大小主要由空调和冷却性能确定^[1],无法根据不同工况下热管理系统制冷需求来调节进气量。在汽车高速行驶的过程中,固定的进气格栅容易引起冷却气流过剩,导致机舱阻力过大,从而引起整车能耗增加^[2-4]。为了解决这一问题,工程师发明了主动进气格栅(active grille shutter, AGS)。AGS可通过控制步进电机调节 AGS 的百叶片角度(又称格栅开度),改变格栅开口面积,调节进气量,优化整车风阻和能耗^[5-7]。

AGS根据安装位置,可分为三类:

- 1) 独立式: AGS独立布置在整车前端的冷却模块与防撞梁之间;
- 2) 集成式: AGS布置在前保险杠(以下简称前保)后,与防撞梁进行集成;
- 3) 可见式: AGS直接作为前保的组成部分,外露在汽车前端^[8]。

在这三种 AGS 中,可见式 AGS 的降风阻效果

最好,集成式 AGS 的次之,独立式 AGS 的最差^[9-10]。如果在汽车冷启动阶段关闭 AGS,汽车不仅可以节省 40.00% 的发动机暖机时间,还可以降低发动机的低温磨损和整车油耗^[11-13]。在满足发动机冷却需求的前提下,在汽车高速行驶时,若 AGS 开度为 30°,则该车的气动阻力会保持在较低水平。当汽车车速降低时,则应增大 AGS 开度^[14]。采用优秀的 AGS 开度控制策略,可进一步优化整车能耗。陈石人等^[15]提出一种基于冷却需求的 AGS 多开度控制模型。该模型在极限工况下,可将冷却流量优化 49.00%,在典型工况下能节油约 0.1 L。BOUILLY 等^[16]提出了一种在 25 °C 与 -7 °C 的环境温度下的 AGS 开度控制策略,采用该策略的燃油车在新欧洲驾驶循环周期工况(new european driving cycle, NEDC)下的燃油经济性比没有采用该策略燃油车的分别提高 1.70% 与 2.40%。杨勤超等^[17]提出一种基于纯电动车的 AGS 开度控制策略。其研究表明,在高温(30 °C)全球轻型车辆测试循环(world light vehicle test cycle, WLTC)工况下,车辆热管理能耗下降 0.32%,整车能耗下降 1.30%;在低温(-7 °C)工况下,车辆热管理能耗下降 2.85%,整车能耗下降

3.76%。环境温度越低,车辆能耗下降越大。可见,AGS对整车能耗下降有显著影响。目前,AGS的研究大多基于燃油车和电动车,基于混合动力汽车AGS的研究鲜见^[18]。混动车的系统更复杂,其热管理系统也更复杂,整车能耗影响因素更多,亟需更加精细的AGS开度控制策略,对混动车用AGS进行全面研究。因此,本文采用多种仿真分析工具及试验测试手段,对在混动车上应用AGS及其开度控制策略进行全方位研究。

本文先使用UltraFluidX三维仿真软件对AGS的风阻影响进行分析,分析AGS对风阻的降低作用;再使用Amesim一维仿真软件与Star CCM+对车辆进行热管理性能仿真分析和热流场分析,以确保当前设计下的热性能达标;最后,提出一种混动车的AGS开度控制策略,并结合控制策略,开展整车油耗试验,进行整车能耗分析。本文全面评估AGS对混动车风阻、热管理性能和整车油耗的影响,分析在混动车上应用AGS降低能耗的核心技术要点,为后续混动车搭载AGS提出指引方向。本文涉及风阻分析、热管理分析、能量流分析与能量流测试,采用众多分析软件,以期混动车搭载AGS提供借鉴。

1 整车参数

本文基于某混动车型进行AGS应用的相关研究,并与市场同级别配备AGS混动车型(竞争车型A、B)进行对比研究,如图1所示。三款混动车型的部分整车配置参数见表1。

表1 部分整车配置参数表

Table 1 Partial configuration parameters of the vehicle

	整备 质量/kg	轴距/ mm	胎压/ kPa	滚动半径/m	
本车型	1 670	2 750	230	0.359	(235/60 R18)
竞争车型A	1 641	2 661	前胎 230 后胎 210	0.359	(235/60 R18)
竞争车型B	1 670	2 690	220	0.353	(225/60 R18)

本文研究的混动车机舱下车体布置如图2所示。车辆前端冷却气流从外造型前保格栅经由AGS导向,流过前端冷却模块,实现对热管理系统的散热。AGS密封导流装置可改善机舱内热回流并防止冷空气逃逸。前端冷却模块由冷凝器、低

温散热器、发动机散热器和冷却风扇依次安装集成。AGS的开度范围为 $0^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 。当AGS开度为 0° (格栅全关)时,格栅没有进气量;当AGS开度为 100° (格栅全开)时,格栅进气量达到最大。AGS和风扇均可调节车辆前端冷却模块的进气量,一般优先调节AGS开度,以降低风扇能耗。前端冷却模块的冷凝器、低温散热器和发动机散热器三者的散热需求通常不一致,对进气量的需求也不同。因此,AGS开度控制策略至少需综合考虑这三者的散热需求。

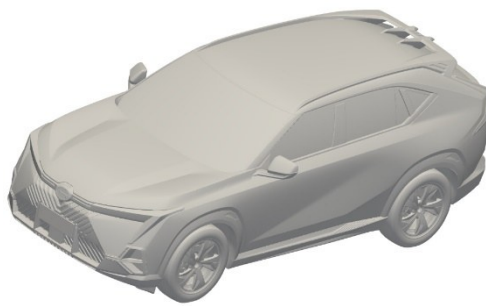


图1 某混动车型外观图

Fig. 1 Appearance of a hybrid vehicle

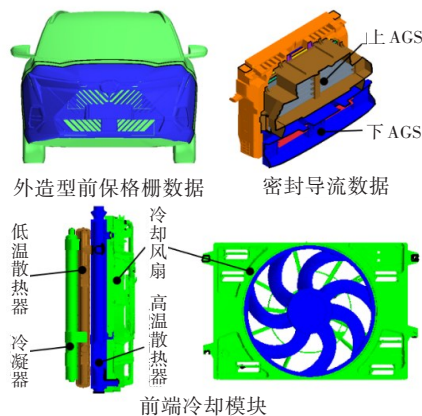


图2 机舱与下车体布置数据

Fig. 2 Engine room and car body layout data

2 风阻仿真模型搭建及分析

为探究在混合动力汽车上应用AGS对车辆风阻系数及风流场特性的影响,本文利用UltraFluidX仿真软件,分别对在高速行驶中的未配备AGS的本车型车辆、配备AGS的本车型车辆及同类竞争车型车辆进行仿真与对比研究。

2.1 仿真模型搭建

风阻仿真分析模型研究的是车辆的全尺寸整

车模型,考虑车辆机舱内流、底盘、挡泥板结构与车轮转动,如图3所示。从图3中可以看出,设定该车长为 L 、宽为 W 、高为 H ,并综合考虑车辆阻塞效应与计算机计算能力,该模型的长、宽、高分别为 $12L$ 、 $10W$ 、 $10H$ (车头前部为 $3L$,车尾后部 $8L$,车身左右居中,车身顶部为 $9H$)。

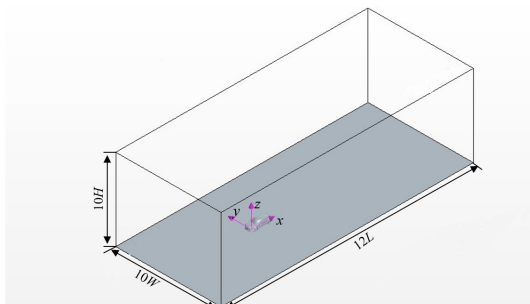


图3 计算域示意图

Fig. 3 Schematic diagram of calculation domain

采用UltraFluidX仿真软件对该风阻模型进行仿真分析。在粒子生成过程中,对车身周围的网格进行逐层加密,该模型粒子单元总数约为1.2亿。基于格子玻尔兹曼的瞬态计算方法,采用大涡模拟(large eddy simulation, LES)湍流模型进行计算。

该计算域边界包括入口、出口、地面和其他面,具体边界设置见表2。设以整车左右中心对称面为 xoz 面;垂直于 xoz 且平行通过车体纵梁平面或地板大面的平面为 xoy 平面;垂直 xoz 平面同时垂直 xoy 平面且过整备状态轮心的平面为 $yozy$ 平面。 u 、 v 、 w 分别为速度在 x 、 y 、 z 方向的分量。

表2 边界条件表

Table 2 Table of boundary conditions

边界名称	边界设置
入口边界	入口速度,分量 $u=120$ km/h, $v=w=0$ km/h
出口边界	出口压力 $P=0$ Pa
地面	移动地面,速度 $u=120$ km/h, $v=w=0$ km/h
其他面	固定无滑移壁面

2.2 模型求解

目前,描述流体运动的4个方程,即连续性方程、纳维-斯托克斯方程组、能量方程和状态方程,其表达式分别如下

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \cdot \text{div}(uU) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad } u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_{Mx} \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho \cdot \text{div}(vU) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad } v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_{My} \\ \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho \cdot \text{div}(wU) = \text{div}(\mu \cdot \text{grad } w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_{Mz} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体的密度; p 为流体的压力; U 为流体的总速度; μ 为运动黏度; S_{Mx} 、 S_{My} 和 S_{Mz} 均为动量方程的广义源项。

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho \frac{\partial(u_i h)}{\partial x_i} = \text{div}(K \cdot \text{grad } T) + \frac{\partial u_i \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中: T 为温度; K 为热传导系数; τ_{ij} 是 i 面上 j 方向剪切应力; u_i 为 u 在 x 方向上速度分量; e 为内能; h 为焓; e 与 h 满足关系式:

$$h = e + \frac{(u^2 + v^2 + w^2)}{2} + \frac{P}{\rho} \quad (4)$$

$$f(\rho, p, T_0) = 0 \quad (5)$$

由于该方程组含有较多未知数,不能直接得到解析解,因此引入一些假设条件来得到方程的解析解。本文采用LES对其进行求解。

通过求解该流体运动方程组,可得到车辆风力的截面速度、表面压力和气动阻力等信息,再得到整车的风阻系数:

$$C_D = \frac{2D}{\rho v^2 A} \quad (6)$$

式中: C_D 为风阻系数; D 为气动风阻; A 为车辆迎风面积。

2.3 风阻分析

在高速行驶工况下,配备AGS的本车型车辆将完全关闭AGS以降低行驶风阻。为研究AGS影响该款混动车辆的风阻过程,该仿真研究了在风速120 km/h时配备AGS的本车型车辆和未配备AGS的本车型车辆的风阻过程,其对比结果如图4所示。

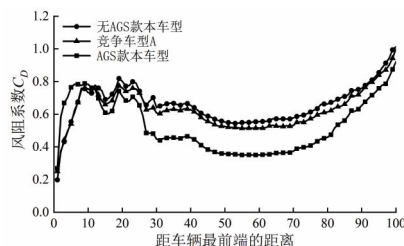
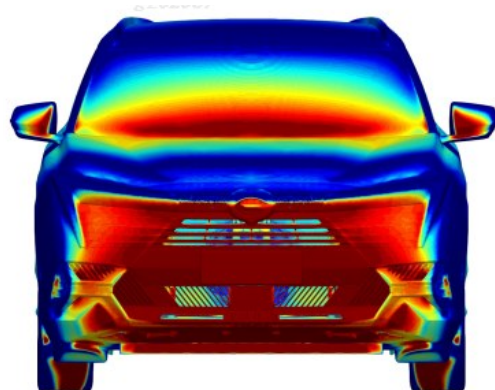


图4 整车风阻系数发展曲线

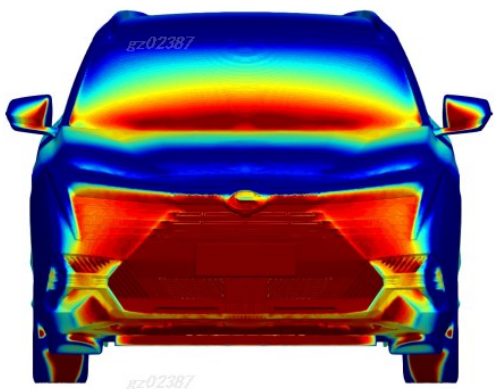
Fig. 4 Development curve of vehicle wind drag coefficient

为便于对比,整车风阻系数发展曲线中的距离按照各自车长100进行归一化处理,风阻系数按未配备AGS的本车型车辆最终风阻系数1.0进行归一化处理。从图4可以看出:相对未配备AGS的本车型车辆,配备AGS的本车型车辆的风阻系数在车头曲线处的上升幅度更大。

整车的外流场云图如图5所示。从图5可以看出,配备AGS的本车型车辆在车辆前风挡和前唇气坝位置处的高压区略有缩小,但其前保高压区明显增大,故车头处风阻系数快速增加。关闭AGS使气流无法进入机舱,避免在机舱内形成高速气旋,减小机舱阻力,将整车风阻降低8.02%,风阻系数发展曲线呈快速下降的趋势。最终,配备AGS的本车型车辆的风阻系数相对于未配备AGS的本车型车辆的降低7.85%,AGS降低风阻作用明显。在高速行驶工况下,关闭AGS能有效降低整车风阻的关键在于气流无法进入机舱,从而导致机舱阻力降低。因此,应该避免因制造公差和装配间隙所导致的AGS叶片之间无法完全封闭的问



(a) 未配备 AGS



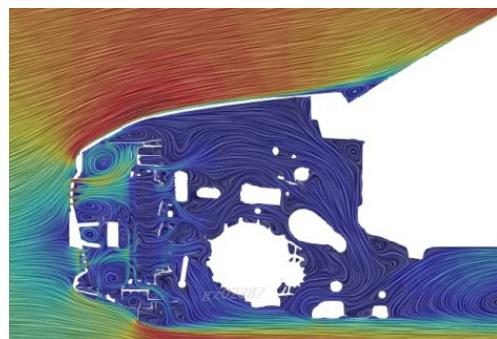
(b) 配备 AGS

图5 整车外流场云图

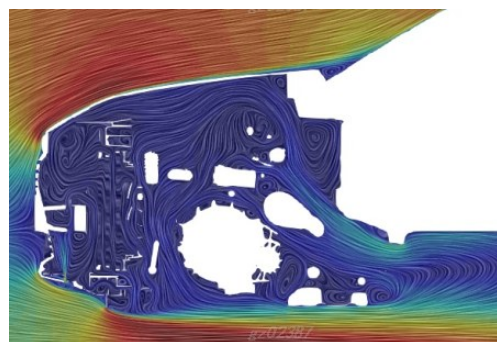
Fig. 5 Cloud image of vehicle exterior flow field

题,更应该避免完全关闭AGS后的叶片在高速气流作用下发生相对运动或变形而导致流量泄露的问题。

该整车的内流场云图如图6所示。



(a) 未配备 AGS



(b) 配备 AGS

图6 整车内流场云图

Fig. 6 Cloud image of vehicle interior flow field

3 热管理系统仿真模型搭建及分析

本文研究的混动车热管理架构如图7所示。从图7可以看出,空调回路(实线)实现乘员舱和电

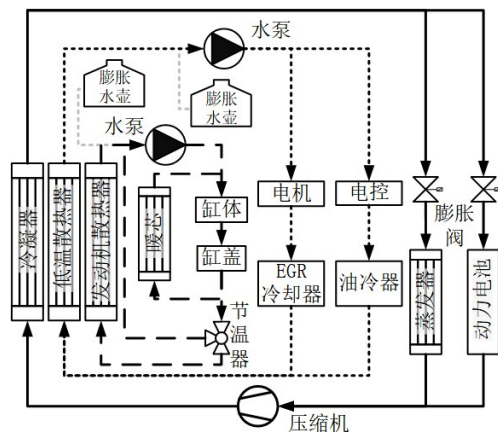


图7 本混车型热管理架构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of thermal management architecture of this hybrid vehicle

池包的制冷;电机冷却回路(点线)通过低温散热器实现电机电控等电气元件的冷却;发动机冷却回路(虚线)通过发动机散热器实现发动机的冷却,利用节温器实现旁通或连通发动机散热器,以实现发动机暖机不同程度散热;发动机废热通过暖风芯体实现乘员舱的采暖。

整车热管理分析主要分析 AGS 在最大开度下能否保证车辆的空调性能。本文采用 Star CCM+、三维仿真和 Amesim 一维仿真进行研究,主要考核在 3 个核心工况下(表 3)的车辆空调性能。车辆的关键零部件技术参数见表 4,散热器水阻曲线如图 8 所示。

表 3 热管理系统性能考核工况表

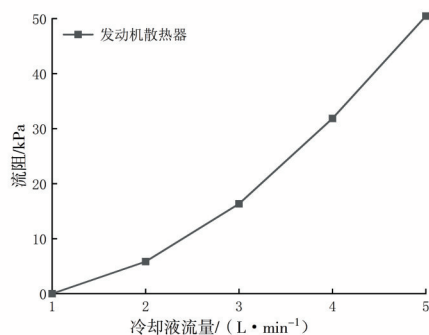
Table 3 Performance assessment conditions of thermal management system

序号	考核工况	环境温度/℃	环境湿度/%	日照/(W·m ⁻²)	空调状态
1	中低速爬坡工况	40.0	40.0	950	外循环、最大制冷
2	怠速工况 (中低速爬坡后怠速)	40.0	40.0	950	外循环、最大制冷
3	高速爬坡工况	45.0	40.0	950	内循环、最大制冷

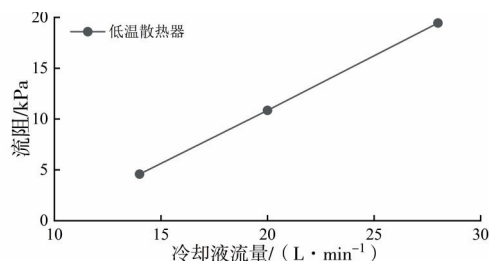
表 4 关键零部件技术参数

Table 4 Technical parameters of key components

冷却模块	芯体规格/mm	风扇转速/(r·min ⁻¹)	风扇功率/W
冷凝器	668.0×426.0×12.0	2 500	650
低温散热器	672.5×434.0×21.0	2 500	650
发动机散热器	703.0×466.0×21.0	2 500	650



(a) 发动机散热器水阻曲线



(b) 低温散热器水阻曲线

图 8 散热器水阻曲线

Fig. 8 Water resistance curve of the radiator

3.1 热管理三维仿真模型搭建

分析全尺寸整车模型,主要考虑影响机舱流动特性的部分,即机舱内流、前格栅、散热器、冷凝器和风扇等,但不考虑车轮转动。设整车高度为 H 、整车宽度为 W 、整车长度为 L ,考虑硬件计算能力和阻塞效应,该模型计算域长、宽、高分别为 $6L$ 、 $5W$ 和 $5H$ 。其中,车头前部长度为 $1.5L$,车尾后部长度为 $3.5L$,车身左右居中,车身顶部为 $4H$ 。采用 Trimmer 网格对计算域进行划分,采用 Star CCM+ 软件对该模型进行计算。在网格划分过程中,对车身周围的网格进行逐层加密,模型体网格单元总数约为 3 400 万,网格示意图如图 9 所示。

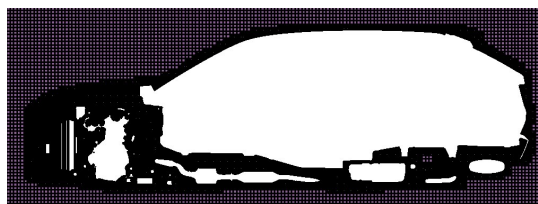


图 9 Star CCM+ 体网格示意图

Fig. 9 Star CCM+ volume grid diagram

3.2 热管理一维仿真模型搭建

本混动车型热管理系统冷却回路包括发动机散热器、低温散热器和水泵等热管理部件,以及发动机、电机和电控等热管理对象。该系统分为电机冷却回路和发动机冷却回路两部分,其连接方式如图 7 所示。通过 Amesim 软件建立冷却系统各部件的仿真模型,如图 10 所示。

冷却回路相关部件的物理结构及关键匹配参数见表 5。本研究分别以发动机散热器与低温散热器的出水温度对发动机和电机的电控冷却性能进行评价。

表5 散热器热源边界信息

Table 5 Heat source boundary information of radiator

工况	发动机散热量/kW	发动机冷却液流量/(L·min ⁻¹)	低温散热量/kW	低温散热器冷却液流量/(L·min ⁻¹)	车辆关键状态描述	
中低速爬坡	34.5	100	8.0	32	导流密封、冷却风扇最大功率	水泵最大功率
高速爬坡	39.0	100	12.2	32		

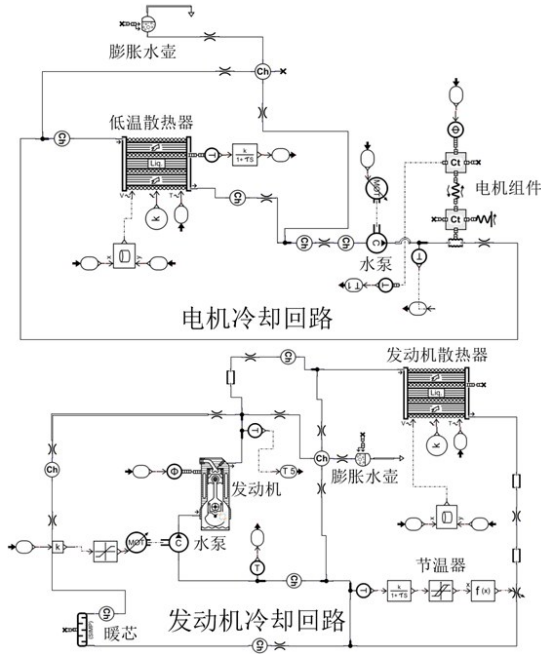


图10 Amesim一维仿真模型示意图

Fig. 10 Schematic diagram of Amesim one-dimensional simulation model

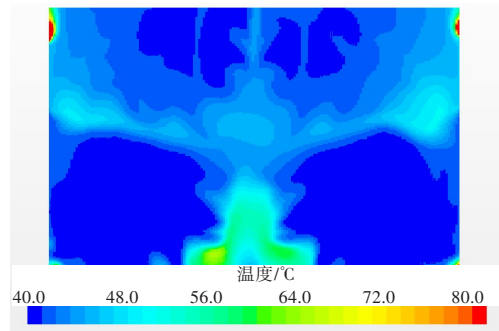
3.3 结果分析

3.3.1 热管理性能达成分析

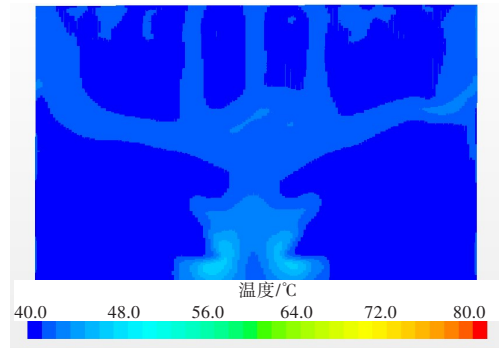
本文基于3个核心工况(表3),分别对空调制冷性能、电驱电控冷却性能和发动机冷却性能进行一维与三维仿真研究。

本文利用Star CCM+空调制冷性能的关键参数对冷凝器表面进风风温进行仿真,结果如图11所示。

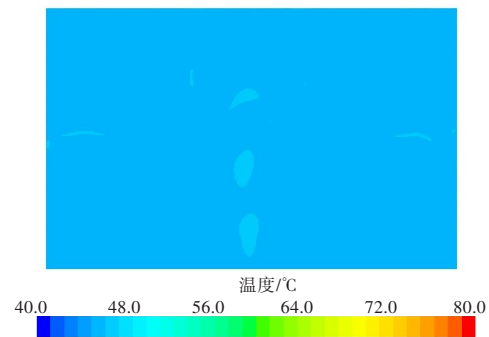
在怠速工况下,环境温度为40.0℃,冷凝器表面进风平均风温约43.0℃,等于目标值43.0℃,满足空调制冷要求。平均进风速度为1.90 m/s,低于目标风速2.00 m/s。在中低速爬坡工况下,热回流效应降低,冷凝器表面平均风温降低至41.3℃,平均进风速度提高至2.26 m/s,目标风速2.50 m/s。在高速爬坡工况下,环境温度为45.0℃,冷凝器进风风速不均匀,平均风速达4.57 m/s,热回流效应继续下降,平均进风温度相对环境温度只提高了0.6℃,满足空调制冷要求。



(a) 怠速工况(平均风温 $T=43.0^{\circ}\text{C}$)



(b) 中低速爬坡工况(平均风温 $T=41.3^{\circ}\text{C}$)



(c) 高速爬坡工况(平均风温 $T=45.6^{\circ}\text{C}$)

图11 冷凝器表面风温分布云图

Fig. 11 Cloud picture of wind temperature distribution on condenser surface

电机电控冷却性能是通过低温散热器的出水温度来评价的(怠速时电机不工作,故无须考核怠速工况下的电机电控冷却性能)。本文采用Star CCM+联合Amesim软件,对低温散热器的出水温度进行仿真。首先利用Star CCM+仿真得到低温散热器表面风温分布云图,结果如图12所示。

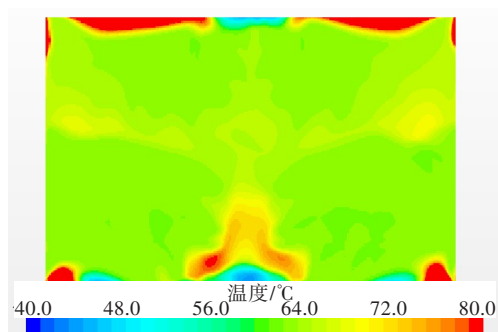
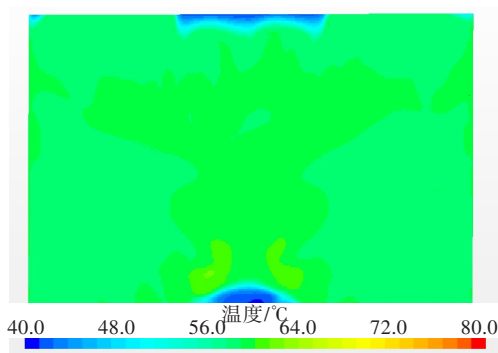
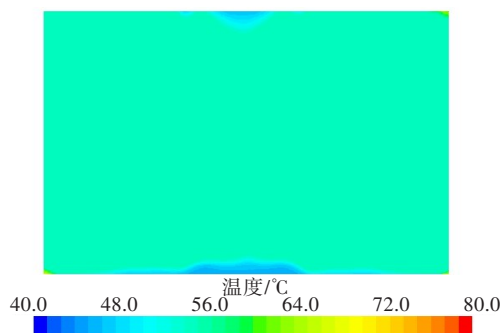
(a) 怠速工况(平均风温 $T=64.7\text{ }^{\circ}\text{C}$)(b) 中低速爬坡工况(平均风温 $T=58.4\text{ }^{\circ}\text{C}$)(c) 高速爬坡工况(平均风温 $T=54.3\text{ }^{\circ}\text{C}$)

图 12 低温散热器表面风温分布云图

Fig. 12 Cloud picture of wind temperature distribution on the surface of low-temperature radiator

将图 12 中的平均进风温度输入 Amesim 仿真模型,得到低温散热器的进出水温度,结果见表 6。由表 6 可知,在中低速爬坡工况下,低温散热器出水温度为 $69.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (空调模式为外循环模式),大于目标温度 $65.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,不满足要求;若空调模式改为内循环模式,则低温散热器出水温度为 $63.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时可满足要求。只要优化内循环比例,低温散热器出水温度即可满足电机电控冷却需求。在高速爬坡工况下,低温散热器出水温度为 $64.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,小于目标值 $65.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,满足电机电控冷却需求。

表 6 低温散热器出水温度 Amesim 仿真输出表

Table 6 Amesim simulation output table of outlet water temperature of low-temperature radiator $^{\circ}\text{C}$

工况	低温散热器进水温度	低温散热器出水温度
中低速	67.8 (内循环)	63.7 (内循环)
爬坡	73.4 (外循环)	69.3 (外循环)
高速爬坡	70.3	64.1

发动机冷却性能是通过发动机散热器的出水温度来评价的(怠速时发动机不工作,故无须考核怠速工况下的发动机冷却性能)。本文采用 Star CCM+联合 Amesim 进行了发动机散热器的出水温度仿真。首先利用 Star CCM+得到了发动机散热器表面风温分布云图,如图 13 所示。

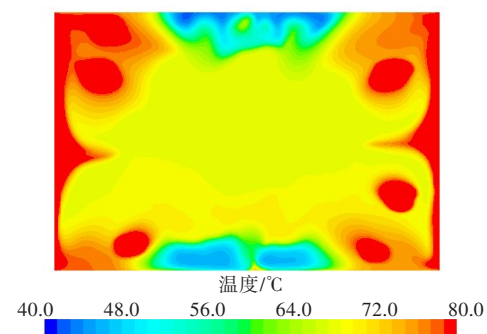
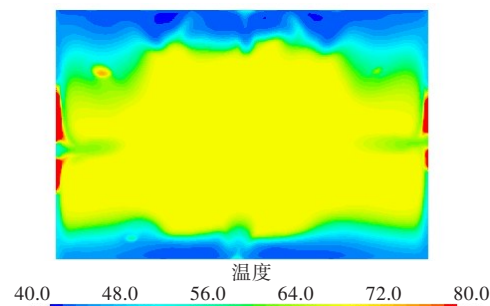
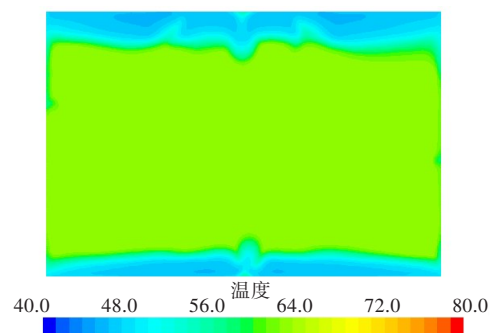
(a) 怠速工况(平均风温 $T=69.7\text{ }^{\circ}\text{C}$)(b) 中低速爬坡工况(平均风温 $T=61.6\text{ }^{\circ}\text{C}$)(c) 高速爬坡工况(平均风温 $T=59.9\text{ }^{\circ}\text{C}$)

图 13 发动机散热器表面风温分布云图

Fig. 13 Cloud picture of wind temperature distribution on engine radiator surface

将得到的平均进风温度和速度输入 Amesim 仿真模型,可得到发动机散热器的出水温度,结果见表7。

表7 发动机散热器出水温度 Amesim 仿真输出表

Table 7 Amesim simulation output table of outlet water temperature of engine radiator $^{\circ}\text{C}$

工况	发动机散热器进水温度	发动机散热器出水温度
中低速爬坡	110.8	105.2
高速爬坡	95.9	89.6

由表7可知,在中低速爬坡工况下,发动机散热器出水温度为 105.2°C ,小于目标值 115.0°C ,满足发动机冷却需求;在高速爬坡工况下,发动机散热器出水温度 89.6°C ,小于目标值 115.0°C ,满足发动机冷却需求。综上所述,AGS在最大开度下均能

满足本混动车型车辆的空调制冷、电驱电控冷却和发动机冷却的需求,若优化空调箱内循环比例,可进一步降低低温散热器和发动机散热器的进风温度,提高电驱电控和发动机回路冷却性能。

3.3.2 AGS密封导流装置的影响

AGS上的密封导流装置可以将通过 AGS 的冷却气流传导到前端冷却模块上,增加前端冷却模块进风量,提高热管理系统性能。为评估密封导流装置带来的效益,分别在3种核心工况下,对有无密封导流装置的流场和温度场进行仿真分析,结果见表8。需要注意的是,格栅进气利用率须大于 70.00% ,车辆怠速工况下冷凝器进气温度须不高于 45.0°C 。

表8 有无密封导流装置的流场和温度场对比表(归一化后)

Table 8 Comparison table of flow field and temperature field with or without sealed flow guide device after normalization

工况		格栅进气流量	散热器进气流量	格栅进气利用率/% (目标 ≥ 70.00)	冷凝器进风温度/ $^{\circ}\text{C}$ (怠速目标 ≤ 45.0)
怠速工况	无密封	0.611	0.892	—	49.9
	有密封	0.749	0.834	—	42.6
中低速爬坡工况	无密封	1.029	0.925	89.89	41.1
	有密封	1.006	0.987	98.11	41.0
高速爬坡工况	无密封	2.413	1.391	57.65	45.7
	有密封	2.108	1.850	87.76	45.6

由表8可知,在怠速工况下,无密封装置机舱的内热回流,冷却气流泄漏严重,机舱内高温区域较有密封装置机舱的高温区域大幅增加。气体回流阻碍了外界冷却气流进入格栅,无密封装置的进气量比有密封格栅的进气量下降了 18% ,而加热后的气流回流进入了散热器,散热器的进气量虽然增加了,但进气温度上升了 7.3°C ,达到 49.9°C 的高温水平,不满足冷凝器进风温度的要求(不高于 45.0°C)。在中低速爬坡工况下,相比于无密封装置,有密封装置机舱内高温区域明显缩小,散热器进风量增加,格栅进气利用率从 89.89% 上升至 98.11% ;进风温度基本无变化,冷凝器和散热器散热能力提升。在高速爬坡工况下,相比于无密封装置,有密封装置的高温区域大幅度缩小,散热器进风量大大幅度增加了 33% ,格栅进气利用率由不达标的 57.65% 上升至 87.76% ,大幅超过了格栅进气利用率 70.00% 的目标;进风温度基本无变化,冷凝器和散热器散热能力得到了大幅度的提升。综上所述,安装 AGS 密封导流装

置效益较大,是改善气体热回流、避免冷却气流逃逸和提高格栅进气利用率的关键措施之一。

4 整车油耗研究

研究表明 AGS 对降低整车能耗有显著影响。目前,AGS 开度控制策略大多是基于燃油车和电动车进行研究,鲜有基于混合动力汽车的。混动车动力系统比燃油车和电动车更复杂,其热管理系统也更精细,整车能耗影响因素更多,AGS 开度控制策略需更细致。本文提出一种应用于混动车的 AGS 控制策略,并对多款车型的油耗进行对比测试,以研究 AGS 控制策略的影响。

4.1 AGS 开度控制策略

混动车 AGS 开度控制策略如图14所示。从图14可看出,控制器分别读取空调压力、发动机冷却液温度、电机冷却液温度和前端进风温度4个状态参数。查表可获取4个开度值,取其最大值作为 AGS 目标开度 A ,若目标开度 A 小于 0° 或大于

100°,则相应直接输出0°或100°作为目标值并调节AGS开度;反之,判断空调压力升高是否超过阈值 T_1 、发动机水温升高是否超过阈值 T_2 、电机水温升高是否超过阈值 T_3 。若这三者中有一项超过其对应阈值,则在目标开度 A 的基础上,增加 K_1 作为目标值(大于100°按100°计)来调节AGS开度;若这三者均未超过其对应的阈值,则判断空调压力降低是否超过阈值 T_4 、发动机水温降低是否超过阈值 T_5 、电机水温降低是否超过阈值 T_6 。若三者均未超过,则将目标开度 A 作为目标值来调节AGS开度;反之,则在目标开度 A 的基础上减去 K_2 作为目标值(小于0°按0°计)来调节AGS开度。

根据AGS控制器获取的空调系统压力、发动机冷却液温度、电机冷却液温度和前端进风温度等物理参数,查表并计算最佳AGS目标开度。通过脉宽调制(pulse-width modulation, PWM)信号控制电机调节AGS开度以实现最佳的进气量,在满足热管理系统性能需求的同时,降低整车气动阻力,从而降低整车油耗,提升整车续航能力。

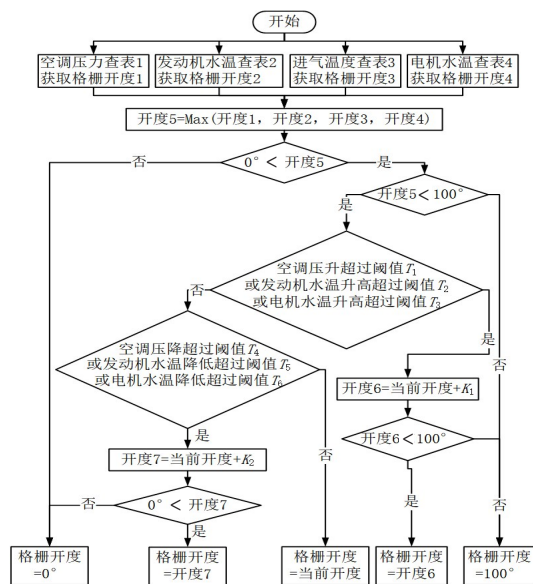


图14 AGS开度控制策略流程图

Fig. 14 Flowchart of AGS opening control strategy

4.2 AGS对油耗的影响

为了评估本AGS应用对于降低整车油耗的贡献,本文依据《轻型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法》(GB/T 19753—2021),分别对配备AGS的本车型、未配备AGS的本车型、同类型竞争车型A和B进行整车油耗测试,测试实拍图如图15所

示。该试验在6个循环WLTC工况下进行。为降低试验误差,取3次重复试验结果的平均值作为最终试验结果。为了便于对比,按未配备AGS的本车型整车油耗为1,对数据进行归一化处理。整车油耗测试结果见表9。

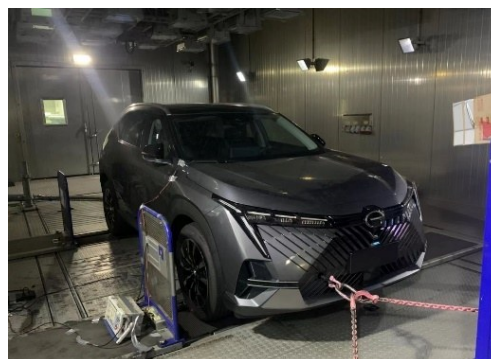


图15 油耗测试实拍图

Fig. 15 Real shot of fuel consumption test

表9 整车油耗测试结果对比表(归一化后)

Table 9 Comparison table of vehicle fuel consumption test results after normalization

类型	工况	本车型		竞争	竞争
		未配备AGS	配备AGS	车型A	车型B
油耗	WLTC	1.000	0.948	1.135	1.077

未配备AGS的本车型的整体油耗相对于竞争车型A和B整车油耗分别降低11.90%和7.10%,未配备AGS的本车型优势明显,具有较强的市场竞争力。当本车型加装AGS并采用本文提出的AGS开度控制策略,油耗在原有基础上降低5.20%,油耗降低效果显著。可见,优异的AGS匹配设计和关联控制策略实施是未来混动车型降低能耗的关键措施。

5 讨论

研究结果表明车速影响前端模块进气量。此外,环境温度不同导致整车驱动及热管理系统对AGS策略需求有所差异^[8]。因此,本文提出的AGS开度控制策略还需进一步细化,并可将环境温度区间和车速纳入考虑因素中,车辆油耗有望得到进一步降低。由于AGS控制因素增加,如果采用传统的试验测试标定技术将会大大提高开发工作量,可以通过系统仿真和虚拟标定技术协同开发来降低标定难度和减少开发工作量。

6 结论

本文首次对混动车型应用AGS降低能耗的关键技术进行了研究,使用UltraFluidX、Amesim和Star CCM+等软件分别对风阻、流场、热流场和热管理系统性能进行仿真,提出一种混动车AGS开度控制策略,并开展整车油耗试验进行多车型油耗对比测试,全面评估了AGS应用对风阻、热管理系统性能对整车油耗的影响,分析降低能耗的关键技术。研究结果表明:

1) 在高速行驶工况下,关闭AGS能有效降低整车风阻7.85%,以降低不必要的机舱进气与机舱阻力。实际应用需要着重关注AGS叶片间的密封性,保证在AGS完全关闭时,不会因制造公差、装配间隙和高速气流的作用导致气流泄漏。

2) 安装AGS密封导流装置是改善机舱内热回流和防止冷却气流逃逸的关键措施之一。此措施既可提高格栅进气利用率,也可降低格栅开口需求,还可以在满足热管理系统性能的前提下降低整车风阻。

3) 本车型AGS在最大开度下可满足热管理系统性能需求,若优化空调箱内循环比例的控制策略,可进一步降低散热器进风温度,提高热管理系统冷却性能。

4) 配备AGS的本车型的油耗,在采用本文提出的AGS开度控制策略之后,比未配备AGS的本车型的降低5.20%。显然其油耗降低幅度大,同类竞争力大幅提高。因此,合理的AGS匹配设计和优异的AGS开度控制策略是混动车型降低能耗的关键优化方向。

[参考文献]

- [1] 李惠,常印坤,施晓光.汽车进气格栅对发动机舱热管理的影响[J].小型内燃机与车辆技术,2019,48(2):37-39. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0630.2019.02.008.
- LI Hui, CHANG Yinkun, SHI Xiaoguang. The influence of automobile intake grille on engine compartment thermal management [J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2019, 48(2): 37-39. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0630.2019.02.008.
- [2] 黄晓珍,和昌静,郭涛.某前置后驱车型发动机舱热管理优化[J].时代汽车,2021(12):28-30,78. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9668.2021.12.012.
- HUANG Xiaozhen, HE Changjing, GUO Tao. Thermal management optimization of the engine compartment of a front-rear-drive vehicle [J]. Auto Time, 2021(12): 28-30, 78. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9668.2021.12.012.
- [3] ZHANG C H, UDDIN M, ROBINSON A C, et al. Full vehicle CFD investigations on the influence of front-end configuration on radiator performance and cooling drag [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 1328-1340. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.086.
- [4] 严金霞.主动进气格栅对汽车性能的影响[J].山东理工大学学报(自然科学版),2018,32(5):42-45. DOI: 10.13367/j.cnki.sdgc.2018.05.009.
- YAN Jinxia. Influence of active grille shutter on vehicle performance [J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 32(5): 42-45. DOI: 10.13367/j.cnki.sdgc.2018.05.009.
- [5] LI J C, DENG Y D, WANG Y P, et al. CFD-Based research on control strategy of the opening of Active Grille Shutter on automobile [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2018, 12: 390-395. DOI: 10.1016/j.csite.2018.05.009.
- [6] 史怀远,袁晓红.基于主动进气格栅的燃料电池汽车能耗研究[J].武汉理工大学学报,2023,45(7):124-131.
- SHI Huaiyuan, YUAN Xiaohong. Research on energy consumption of fuel cell vehicle based on active grille shutter [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2023, 45(7): 124-131.
- [7] DUTTA N, SPENLEY M, CROMBACK-DUGENY P, et al. Active grille shutters control and benefits in medium to large SUV: a system engineering approach [C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2020. DOI: 10.4271/2020-01-0945.
- [8] 姚一鸣,杨家伟,陈慧娥.可见式主动进气格栅开发研究[J].上海汽车,2020(8):39-43. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4554.2020.08.08.
- YAO Yiming, YANG Jiawei, CHEN Huie. Development of visible active shutter [J]. Shanghai Auto, 2020(8): 39-43. DOI: 10.3969/j.issn.1007-4554.2020.08.08.
- [9] 王锦艳,刘晓莹,卢振东,等.某车型主动进气格栅(AGS)技术降油耗研究[J].汽车制造业,2021(9):38-39,41.
- WANG Jinyan, LIU Xiaoying, LU Zhendong, et al. Study on reducing fuel consumption by active air intake grille (AGS) technology of a certain vehicle [J]. Automobil Industrie, 2021(9): 38-39, 41.

- [10] 朱春州. 某车型主动进气格栅的设计与优化[J]. 山东工业技术, 2019(11): 1-2. DOI: 10.16640/j.cnki.37-1222/t.2019.11.001.
ZHU Chunzhou. Design and optimization of active air intake grille for a vehicle model [J]. Shandong Industrial Technology, 2019(11): 1-2. DOI: 10.16640/j.cnki.37-1222/t.2019.11.001.
- [11] 于李, 黄文龙, 莫易敏. 某MPV车型主动进气格栅的匹配研究[J]. 企业科技与发展, 2020(1): 62-65, 69. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0688.2020.01.023.
YU Li, HUANG Wenlong, MO Yimin. Study on matching of active air intake grille of an MPV vehicle [J]. Sci-Tech & Development of Enterprise, 2020(1): 62-65, 69. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0688.2020.01.023.
- [12] 端方勇. 主动进气格栅对整车采暖性能影响研究[J]. 汽车电器, 2022(6): 74-75. DOI: 10.13273/j.cnki.qcdq.2022.06.026.
DUAN Fangyong. Study on the influence of active air inlet grille on vehicle heating performance [J]. Auto Electric Parts, 2022(6): 74-75. DOI: 10.13273/j.cnki.qcdq.2022.06.026.
- [13] 黄柳升, 朱海龙, 彭有荣. 主动进气格栅对整车油耗和排放的影响[J]. 汽车科技, 2018(2): 32-35. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2550.2018.02.005.
HUANG Liusheng, ZHU Hailong, PENG Yourong. The effect of active grille shutter for vehicle emissions and fuel consumption [J]. Auto Sci-Tech, 2018(2): 32-35. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2550.2018.02.005.
- [14] 刘传波, 刘康, 占魁, 等. 汽车主动进气格栅开启角度的匹配优化[J]. 机械设计与制造, 2021(9): 160-163, 167. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2021.09.036.
LIU Chuanbo, LIU Kang, ZHAN Kui, et al. Optimization of the opening angle of the vehicle's active grille shutter [J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(9): 160-163, 167. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2021.09.036.
- [15] 陈石人, 黄勇, 肖曦, 等. 基于经济性和热平衡的主动进气格栅策略开发(续2)[J]. 汽车工程师, 2021(12): 18-20. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6546.2021.12.007.
CHEN Shiren, HUANG Yong, XIAO Xi, et al. Development of active air intake grille strategy based on economy and heat balance (continued 2) [J]. Automotive Engineer, 2021(12): 18-20. DOI: 10.3969/j.issn.1674-6546.2021.12.007.
- [16] BOUILLY J, LAFOSSAS F, MOHAMMADI A, et al. Evaluation of fuel economy potential of an active grille shutter by the means of model based development including vehicle heat management [J]. SAE International Journal of Engines, 2015, 8(5): 2394-2401. DOI: 10.4271/2015-24-2536.
- [17] 杨勤超, 张风利, 张荣荣, 等. 纯电动汽车主动进气格栅策略开发及能耗贡献量研究[J]. 汽车工程学报, 2023, 13(2): 244-252. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2023.02.13.
YANG Qinchao, ZHANG Fengli, ZHANG Rongrong, et al. Strategy development and energy consumption contribution analysis for active grille shutter in electric vehicles [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2023, 13(2): 244-252. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2023.02.13.
- [18] 孔德宇. 主动进气格栅对混合动力汽车动力特性的影响[D]. 济南: 山东大学, 2019.
KONG Deyu. Effect of active grille shutter on dynamic characteristics of hybrid vehicle [D]. Jinan: Shandong University, 2019.

(责任编辑:李脉;校对:赵冰 彭三军;英文编辑:彭卓寅)