



某中型皮卡发动机冷却风扇布局优化

秦东晨 刘司司 单王珍 李彬 张泽斌

Engine cooling fan layout study of a medium size pickup truck

QIN Dongchen, LIU Sisi, SHAN Wangzhen, LI Bin, ZHANG Zebin

引用本文:

秦东晨, 刘司司, 单王珍, 等. 某中型皮卡发动机冷却风扇布局优化[J]. 空气动力学学报, 2024, 42(7): 77–85. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2023.0219

QIN Dongchen, LIU Sisi, SHAN Wangzhen, et al. Engine cooling fan layout study of a medium size pickup truck[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2024, 42(7): 77–85. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2023.0219

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2023.0219>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

预冷型组合循环发动机技术

Technology analysis of pre-cooled combined-cycle engine

空气动力学学报. 2022, 40(1): 190–207 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0294>

轴流风扇动/静干涉噪声抑制的数值模拟与实验研究

Numerical and experimental study on rotor-stator interaction noise of an axial fan

空气动力学学报. 2021, 39(5): 44–52 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2020.0145>

基于深度置信网络与多目标粒子群算法的通用飞机机翼优化设计

Optimization design on the wing of a general aviation airplane based on deep belief network and multi-objective particle swarm optimization algorithm

空气动力学学报. 2023, 41(12): 16–27 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2023.0005>

考虑不同约束区间的风电场布局分级优化

Hierarchical wind farm layout optimization considering different constraint conditions

空气动力学学报. 2024, 42(5): 110–117 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2023.0138>

基于熵产理论设计方法的多目标翼型优化

Entropy generation theory based design methodology for multi-objective airfoil shape optimization

空气动力学学报. 2019, 37(5): 827–833 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2017.0055>

考虑滑流影响的分布式螺旋桨布局优化设计

Optimal design of distributed propeller layout considering slipstream effect

空气动力学学报. 2021, 39(3): 71–79 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2020.0189>

地址: 四川省绵阳市二环路南段8号11信箱9分箱

电话: 0816-2463375

Email: kqdlxxb@163.com



关注微信公众号

获得更多资讯信息

文章编号: 0258-1825(2024)07-0077-09

某中型皮卡发动机冷却风扇布局优化

秦东晨¹, 刘司司¹, 单王珍¹, 李彬², 张泽斌^{1,*}

(1. 郑州大学 机械与动力工程学院, 郑州 450001;

2. 郑州日产汽车有限公司 技术中心车型开发部整车技术科, 郑州 450000)

摘要:冷却风扇作为汽车发动机冷却模块的关键部件, 其空间位置直接影响机舱内的流场结构, 决定了通过散热器的空气流量, 进而影响发动机的散热性能。为了确定既定冷却风扇在某新车型机舱内的最佳布局, 以散热器流量及流量波动为目标, 以风扇的空间坐标位置为变量, 面向流场结构进行了布局优化。首先, 通过试验设计方法生成初始设计样本点并进行几何参数化建模; 然后, 针对实际工况需求, 选择关键车速条件, 进行发动机舱内流场的 CFD 仿真, 基于仿真结果建立 Kriging 代理模型; 最后, 以散热器进口流量和流速标准差为目标进行多目标优化, 通过遗传算法获取 Pareto 最优解集, 基于高维参变量可视化技术进行了结果分析, 为机舱内零部件的布局决策提供了有价值的参考。研究结果显示了冷却风扇沿车行进方向的位置改变与散热器流量的显著相关性, 为新车型冷却风扇的布置方案提供全局最优性的理论支撑。

关键词:代理模型; 冷却风扇; 多目标优化; 汽车机舱布局; 计算流体力学

中图分类号:U462.1 **文献标识码:**A **doi:** 10.7638/kqdlxxb-2023.0219

Engine cooling fan layout study of a medium size pickup truck

QIN Dongchen¹, LIU Sisi¹, SHAN Wangzhen¹, LI Bin², ZHANG Zebin^{1,*}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Vehicle Technology section, Model Development Department, Technology Center, Zhengzhou Nissan Automobile CO., LTD, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The cooling fan, a critical component of the automotive engine cooling module, holds utmost significance in influencing the engine's cooling efficiency, particularly in high-power diesel engines. Its precise positioning has a direct impact on the flow field structures in the engine compartment, the airflow through the radiator and consequently, the engine's heat dissipation performance. In this study, an optimization method is developed to determine the optimal placement of a cooling fan in a new engine compartment. This method aims to refine the layout and flow field structures by closely examining the radiator flow and flow fluctuations, with the fan's position as the variable. The optimization process begins by generating initial design sample points using experimental design methods, followed by geometric parametric modeling. Next, typical vehicle speeds are selected to simulate flow fields in the engine compartment under actual working conditions. A Kriging surrogate model is then established based on the simulation results. A multi-objective optimization is subsequently carried out, aiming to achieve the desired radiator inlet flow and standard deviation of flow rate. The Pareto optimal solution set is obtained through a genetic algorithm, and the results are analyzed using multi-dimensional parameter variable visualization method, which provides a valuable reference for the layout decision of parts in the cabin. The results demonstrate a significant correlation between the positional change of the cooling fan along

收稿日期: 2023-11-21; 修订日期: 2024-01-18; 录用日期: 2024-02-04; 网络出版时间: 2024-06-17

作者简介: 秦东晨(1965—), 河南温县人, 教授, 研究方向: 机械结构与多学科优化. Email: dcqin@zzu.edu.cn

通信作者: 张泽斌*, 副教授, 博导, 研究方向: 气动外形优化设计. E-mail: zebin.zhang@zzu.edu.cn

引用格式: 秦东晨, 刘司司, 单王珍, 等. 某中型皮卡发动机冷却风扇布局优化[J]. 空气动力学学报, 2024, 42(7): 77–85.

QIN D C, LIU S S, SHAN W Z, et al. Engine cooling fan layout study of a medium size pickup truck [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2024, 42(7): 77–85 (in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2023.0219

the vehicle's travel direction and the radiator flow. This correlation provides theoretical support for the global optimality of the layout scheme of the new model's heat dissipation module.

Keywords: surrogate model; cooling fan; multi-objective optimization; automotive compartment layout; CFD

0 引言

中型皮卡因搭载高功率发动机、工作环境苛刻等缘故,机舱热负荷远高于适用于城市工况的家用型轿车^[1],相应地,对冷却系统的散热性能提出了更高的要求^[2]。在机舱的发动机冷却系统中,冷却风扇用于增加或调节通过散热器的空气流量,是决定发动机冷却性能的关键部件^[3-4]。汽车发动机冷却系统为强制循环水冷系统,在高温工况下,发动机开启“大循环”模式,冷却液将发动机热量传递至散热器,通过与流经散热器的外部冷空气之间的热交换实现降温,并将热量排出车体外部。因此,在这一水热循环过程中,流经散热器的空气流量是影响冷却效果的关键参数,而高温工况下,机舱内空气流量主要由风扇来决定。因此,研究风扇在机舱中的布局有重要的现实意义。

实际工作中,由于机舱内零部件布局紧凑,流场结构极其复杂,同时,温度影响导致的多场耦合问题进一步增加了流场精确模拟的难度。但流场宏观结构的仿真相对更易于实现,并能保证一定精度,本研究据此选择流场宏观结构中的关键物理量作为优化目标,采用多因素耦合分析方法对风扇在发动机舱内的布局进行研究。

在实际生产中,发动机冷却风扇通常由整车制造商直接采购,其结构和性能参数已预先确定,因此,冷却风扇在发动机舱内的空间布局成为影响散热性能的关键因素^[5]。鉴于实车试验的高昂成本,采用CFD气动仿真手段,以掌握流场变化规律,进而提出冷却风扇的布局方案,有较好的可行性和较高的经济性。Lawrence在2001年利用STAR-CD软件模拟了发动机舱内流场,对比试验结果验证了CFD仿真方法的准确性^[6];刘传超等与东风公司合作,采用数值模拟方法成功解决了某型发动机舱的散热问题^[7];福特公司的Mehravarani和Zhong对发动机舱防风罩进行外形几何优化,改善了流场结构^[8]。针对冷却风扇的布置问题,段大禄和张玉珠指出风扇前端与散热器后端之间的距离为风扇直径的0.1至0.15倍时,可以实现良好的散热效果^[9];胡文成等的研究表明,风扇和散热器之间距离越大,散热器冷却空气流量增加越显著,对发动机舱的散热越有利^[10]。

在发动机舱复杂的三维空间环境中,受多因素影

响,为实现汽车高效热交换的需求^[11],理想环境下,汽车热系统应具备流场拓扑均质的大空间。然而,这一理想状态与现实工程情况相矛盾,需要对各个目标进行综合考虑。传统的基于经验或者一维流场分析的设计方法,虽能获得满足功能性要求的可行方案,但对于方案的最优性往往缺乏充分的论证。因此,采用优化方法成为寻找较优的设计方案的必要途径。本文基于流体仿真结果,采用代理模型方法和高维可视化技术,准确且全面地表达了冷却风扇布局与散热性能的映射关系。以此“遍历”所有可行的布局方案,探究各空间维度坐标对散热器气体流量及其均匀性的影响程度^[12]。

首先,采用近正交拉丁超立方(nearly orthogonal Latin hypercube, NOLH)抽样方法^[13-14]生成初始的试验设计点,对整车模型进行参数化处理,生成对应的几何模型并进行网格划分。其次,利用仿真软件对发动机舱内部流场进行气动特性仿真,获取流经散热器的空气流量,并基于后处理方法量化气流在散热器表面分布的均匀性。随后,根据仿真结果,建立Kriging代理模型预测目标函数值,使用遗传算法进行多目标优化设计。最后,采用基于自组织映射(self-organizing map, SOM)^[15]的高维参变量可视化技术对优化结果进行分析,为合理布置机舱流场空间提供优化方案。此项研究的意义不仅在于提升发动机冷却性能,还在于对多因素耦合作用下的复杂布局问题提供了直观的呈现。此外,本研究的方法和结论可为航空航天等领域中类似的多因素耦合布局分析和决策问题提供理论根据。

1 机舱内流场气动仿真及优化

在模块化设计理念指导下,汽车技术的创新聚焦于零部件方面,将发动机总成、变速箱总成等各项系统解耦为独立的模块,这些模块可根据不同车型的性能要求进行灵活组合。因此,在新车研发过程中,制造商需要在全球市场范围内,在满足设计预算的情况下,进行不同模块的选择和匹配,通过调整模块间的空间布局来优化设计方案。

图1所示为机舱内空间布局及关键部件。该布局的调整不仅影响各零部件的安装,还关乎流场分

布。因此，如何合理布置机舱中的各模块成为新车研发中的重要议题。

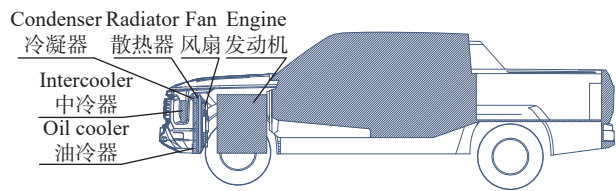


图 1 整车截面示意图
Fig. 1 Cross section of a vehicle

1.1 机舱流场数值离散及仿真方法

汽车发动机舱内部零部件众多且布局紧凑，流场结构形状复杂，因此采用非结构化网格进行流场的离散化。测试工况为车速 60 km/h、风扇转速 2430 r/min。鉴于发动机舱内空气流速较低，选择雷诺平均纳维-斯托克斯 (Reynolds averaged Navier-Stokes, RANS) 方程进行求解，并采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型。通过 ANSYS-Fluent 求解器进行仿真计算，选择 SIMPLE 压力修正方法，离散格式采用二阶迎风格式 (second order upwind)。

根据厂商提供的车型数据，在整车模型外建立长方体计算域，为尽量避免风洞试验中的洞壁干扰、阻塞效应、雷诺数效应等影响，计算域设定为：前、后部分均为 1 倍车长，总长为 3 倍车长；左右宽度均为 1 倍车宽，总宽为 3 倍车宽；总高度是车身高度的 2 倍。网格划分在 ANSYS-Workbench 平台上进行，使用 3 种网格划分方案进行网格密度无关性验证，网格数量分别为 2010 万、3224 万、4270 万。综合考虑散热器进口流量和冷却风扇多重参考系 (multiple reference frame, MRF) 中旋转部分的进口处静压随网格变化的波动情况，最后选择 4270 万的网格作为初始的网格划分标准。

网格设置如下：车身整体网格尺寸设置为 20 mm，对模型的关键部分进行细化处理，中网、格栅处网格尺寸为 3 mm，风扇叶片网格尺寸为 1 mm。同时为提高计算精度，在各实体零件表面，包括风扇、散热器、中冷器和车身等，应用 Smooth transition 方法，设置生成三棱柱层网格，增长率为 1.2。最终网格数量约为 4270 万。图 2 显示了计算域入口位置和出口位置、车身部分的网格以及风扇局部棱柱层的示意图。

计算域边界类型设置入口为速度入口 (Velocity-inlet)、出口为压力出口 (Pressure-outlet)，风扇部分设定为 MRF 模型，计算域壁面设置为固定壁面 (Wall)，入口速度、风扇转速、求解方法等设置如表 1 所示。

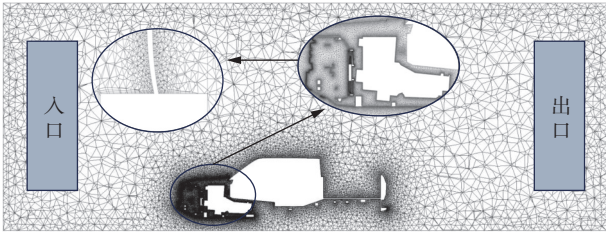


图 2 网格模型示意图
Fig. 2 Computational mesh

表 1 CFD 计算设置
Table 1 CFD simulation setups

计算条件	设置
计算域入口边界条件	气流速度同车速 60 km/h
风扇转速	2430 r/min
压力修正方法	SIMPLE
湍流模型	$k-\varepsilon$ 模型
出口边界条件	压力出口

中冷器、冷凝器、油冷器和散热器采用多孔介质模型，惯性阻力系数和黏性阻力系数根据工程数据库中的速度和压力损失，通过拟合成不含常数项的一元二次函数得到，拟合公式如下：

$$\frac{\Delta p}{\Delta n} = \frac{\mu}{\alpha} v + \frac{1}{2} \rho C_2 v^2 \tag{1}$$

式中： Δp 为空气主流向压力损失； Δn 为空气主流向长度，在此模型中为车身水平纵向，数值大小为换热器厚度； $1/\alpha$ 为黏性阻力系数； C_2 为惯性阻力系数； v 为通过气流速度； ρ 为空气密度； μ 为空气黏度。其中，空气密度和空气黏度均基于制造商提供的实验数据确定： $\rho = 1.1108 \text{ kg/m}^3$ ， $\mu = 1.93365 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

由式 (1) 可以计算得到各多孔介质模型的黏性阻力系数和惯性阻力系数，结果如表 2 所示。

表 2 惯性阻力系数和黏性阻力系数
Table 2 Inertial and viscous resistances

换热器	黏性阻力系数 $1/\alpha$	惯性阻力系数 C_2
中冷器	3.2112×10^{-7}	259.751
油冷器	4.6079×10^{-7}	378.556
冷凝器	3.2020×10^{-7}	457.628
散热器	5.6255×10^{-7}	349.031

1.2 试验设计和优化建模方法

理想的空間填充设计旨在使设计点在实验空间均匀分布，并充分覆盖整个实验空间，从而更有利于对整个模型进行探索和分析，尤其是在输出响应不确定的情况下。

为了在有限的计算点数下最大程度地捕捉流场

物理特性信息,采用试验设计的方法进行布点,使计算点在设计空间中的分布满足均匀性和正交性^[16]。基于上述考虑,本文采用 NOLH 抽样方法来生成试验设计点。相对于拉丁超立方抽样(Latin hypercube sampling, LHS)^[13]和均匀采样^[17],NOLH 不仅在一维投影上满足均匀性,在整个设计空间范围内也满足很好的均匀性以及一定程度的正交性,能更有效地发挥样本点的作用。

代理模型可以近似模拟出设计变量与响应值的黑箱关系。工程上常用的代理模型有多项式响应面模型、人工神经网络模型和 Kriging 模型等。与其他代理模型相比,Kriging 模型不仅能提供未知点处的预测值,还能提供预测值的误差估计,同时具备良好的非线性近似能力^[18]。因此,本文选择采用 Kriging 模型。

Kriging 方法是一种基于统计学理论的插值方法,其模型包含均值项和随机项。前者通常选择常数、一次或二次多项式;后者为遵循特定预设概率分布的随机变量,用于表征模型预测的不确定性,可通过相关函数进行表达。即:

$$\hat{y}(x) = F^T(x)\beta + z(x) \quad (2)$$

式中: $\hat{y}(x)$ 为未知点的函数估计; β 为回归系数; $F^T(x)$ 为关于 x 的多项式,用于模拟随机过程的期望值函数,通常使用常数、一次或二次多项式; $z(x)$ 为随机项,表征模型预测的不确定性,其随机分布规律决定了模型理论误差的分布规律。

基于试验数据构建近似模型,选择二次多项式作为回归函数以及高斯相关函数来描述数据点之间的相关性。以此模型为基础,可以通过调用优化算法对模型进行多目标寻优,从而获取帕累托(Pareto)最优解集,为工程设计提供参考依据^[19]。

2 复杂机舱环境下的冷却风扇布置及流场分析

2.1 冷却风扇布置分析

鉴于汽车发动机舱的空间限制和零部件安装的复杂性,冷却风扇的布置通常仅能满足基本的空间要求,可调范围有限。然而,已有研究证实,冷却风扇位置对于散热性能的影响不可忽视。布置冷却风扇时,除了要避免零件之间的干涉,还要保证流场流经散热器的总流量及流体分布的均匀性。根据相关研究^[20],在达到相同散热效果的前提下,散热器表面流速不均匀性越强,需要消耗的能量也越多,且散热器的散热性能与通过散热器的空气流量呈正相关。因此,选取

散热器进口面气流的不均匀性和散热器进口流量 Q 作为优化设计的目标函数。取散热器进口表面各点流速值的标准差 σ 来衡量流速不均匀性,在 Fluent 软件中设置监测点以获取散热器进口面流量 Q 的数据。

2.2 发动机舱流场分析

将计算结果在 CFD-Post 软件中进行后处理,生成 $y=0$ 截面处的静压云图(图3)和速度矢量图(图4)。



图3 车身横向中间位置典型静压分布云图

Fig. 3 Instantaneous static pressure contours at the middle transverse section

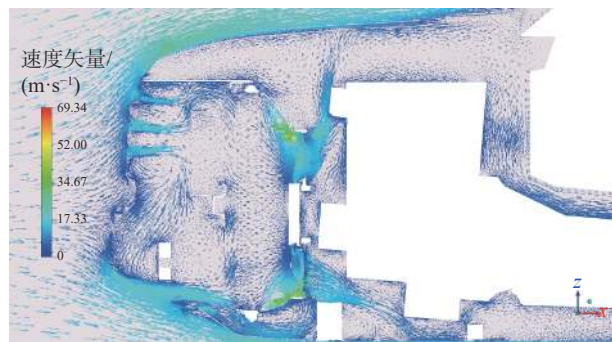


图4 车身横向中间位置典型速度矢量图

Fig. 4 Instantaneous velocity vectors at the middle transverse section

由图3分析可知,在60 km/h工况下,相较于其他部位,车头外形的中网和格栅处压力最大,说明该车型设计能够最大程度确保冷却空气从中网和格栅处进入。风扇的转动将前方热空气向后抽吸,导致散热器与风扇之间的区域以及护风罩内部形成较低负压环境。仿真时,散热器采用多孔介质模型,一定程度上阻碍了气流的流动,导致散热器前后存在压力差,从图中可以明显看到散热器内部压力呈现阶梯状递减趋势。

由图4可知,风扇区域的最高速度达到69.34 m/s。冷却空气从车头格栅上下进入机舱后,依次流经中冷器、油冷器、冷凝器和散热器等换热器,在此过程中进行热量交换。由于护风罩的设计,绝大部分热空气被风扇抽吸并向后流动,经过发动机的上下表面。风

扇与发动机之间流场较为复杂, 存在较多涡流。其原因在于此位置处, 风扇与发动机距离较小, 风扇排出的空气难以向四周流动, 遇到发动机表面时速度降低并反弹, 在风扇与发动机之间的狭小空间内形成涡流。

同时散热器与护风罩之间并不是完全封闭的, 在未封闭区域存在气流泄露的情况。为了更好地分析机舱内气流的流动情况, 可以在后处理过程中通过构建泄露区域面的方式将散热器与护风罩之间的泄露情况可视化, 如图 5 所示。

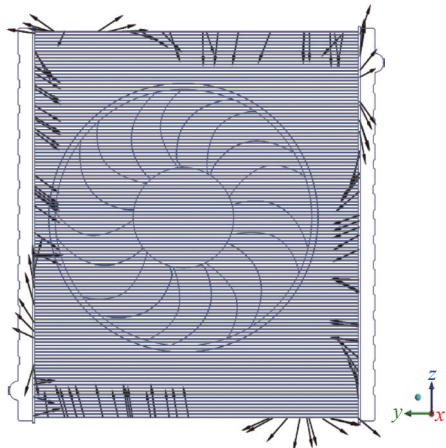


图 5 散热器与护风罩未封闭区域气流泄露示意图
Fig. 5 Air leakage between radiator and shield

冷却风扇的主要作用是提高机舱散热性能, 通常安装在散热器后方。当汽车行驶时, 发动机产生的大量热量需要借由流经散热器的冷却介质与舱内空气的热交换来散发。在低速工况下, 由于车头前部格栅处进气量不足, 散热器中的冷却液与空气之间的热交换不充分, 导致发动机温度升高。此时, 需要通过启动冷却风扇保证流经散热器的气体流量, 从而达到散热效果。而在高速工况下, 发动机舱内部进气量足够大, 风扇不再能有效提升进气量, 且当车速超过一定限值时, 风扇会产生反向压力梯度, 从而增加汽车行驶的内部阻力。图 6 展示了风扇在机舱内两个不同位置的静压变化曲线。为了更清楚反映变化情况, 压力值采用增量形式而非实际压力值来表达, 标准大气压看作零增量基准。

在 60 km/h 工况下, 进气栅格处由于气体流速急剧降低, 会形成较强驻点区域。如图 6 所示, 气体通过栅格后, 压力降低至低于大气压的水平。气体流经散热器并经过加热, 在多孔介质和风扇上游产生的负压的双重作用下, 压力进一步显著降低。气体流过风扇时, 叶片对气流做功, 压力升高; 在风扇下游, 气流在发动机前端面再次形成驻点区域, 在逆向压力梯度作用下, 气体向径向流动, 通过机舱下方区域排出, 从而带走热量。

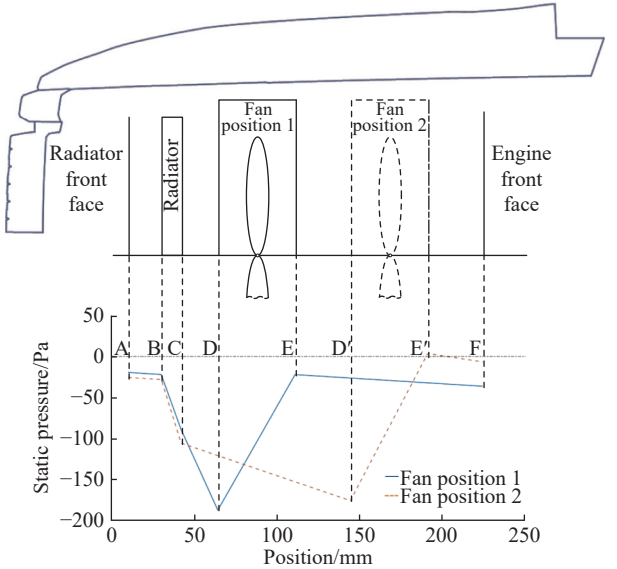


图 6 风扇不同位置的静压变化曲线
Fig. 6 Pressure variations downstream of the radiator front face

风扇位置变化对上述流动过程有显著影响。由图 6 可知, 当风扇位于位置 2 时, 散热器至风扇上游的压力梯度明显趋缓(图 6 折线图中位置 C 到位置 D/D'处)。这种平缓的压力变化改善了沿气体流向的流场结构均匀性, 局部涡流能量较小, 压力损失有所降低。为了寻找冷却风扇的最佳布局, 本研究采用前述方法进行布局优化。

2.3 针对散热器空气流量的优化设计

汽车冷却系统设计的主要目标之一是降低能量损耗并提高散热效率。当散热器的进口流量越大、流速不均匀性越小时认为散热效果越好, 优化目标的优化方向如表 3 所示。

表 3 优化目标及优化方向 Table 3 Optimization principle	
优化目标	优化方向
散热器进口表面流量标准差	最小化
散热器进口流量	最大化

在冷却风扇的性能均已确定的情况下, 风扇空间位置的优化对提高整车散热性能至关重要。因此, 选取冷却风扇的空间位置作为设计变量, 其取值范围如表 4 所示。

表 4 设计变量变化范围 Table 4 Variable ranges			
设计变量	x	y	z
风扇位置/mm	(-20, 60)	(-70, 70)	(-70, 70)

其中, 设计变量均相对于参考布局的初始位置的

原点变动, x 方向为车辆水平纵向, y 方向为车辆水平横向, z 方向为车辆竖直方向。

使用 NOLH 方法生成 17 组样本点, 样本点的分布示意图如图 7 所示。

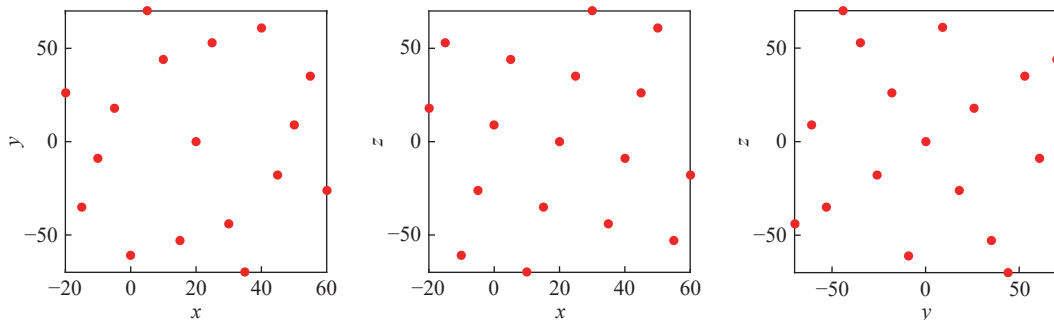


图 7 NOLH 生成初始设计点示意图

Fig. 7 Distribution of initial design points generated by NOLH method

本研究构建的 Kriging 代理模型可以快速预测设计空间中任意点的目标响应, 其计算时间相较于样本点的 CFD 仿真时间可以忽略不计。因此, 可采用大量样本点进行寻优。本研究选择第二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行多目标优化设计。优化算法初始个体设置为 8000, 变异概率为 0.1, 中止迭代次数为 20。优化结束后, 共获得 103 个 Pareto 最优解, 如图 8 所示。其中: 红色点代表初始个体, 共 8000 个, 在此数量下, 可以认为对设计空间有充分且近似均匀的填充; 黑色的点代表 Pareto 最优解集。

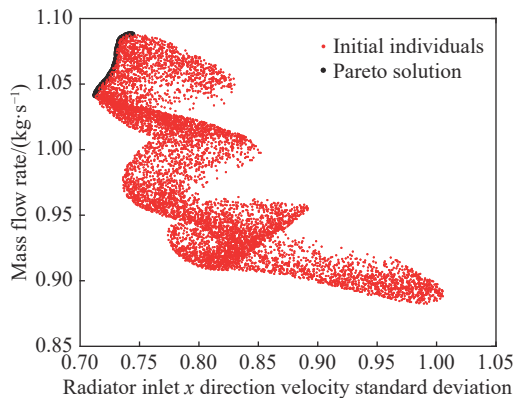


图 8 Pareto 最优解集示意图

Fig. 8 Pareto solution

经过代理模型的函数映射, 如图 8 所示, 初始个体在由“流量-标准差”构成的目标空间中呈现出显著的分层现象, 而非均匀分布。这说明设计空间到目标空间的映射关系并非线性, 而是存在某些主导变量的影响。为了展现出位置坐标与目标变量的多维数据映射关系, 采用 SOM 方法对 8000 个初始个体进行聚类分析。SOM 方法可将多维数据转换为相同维数的二维图像, 其中每个图像的颜色反映了相应变量的幅值, 而每个设计点在所有图像中的相对位置保持一致。通过这种方式, 可以直观地观察设计变量和目标

函数变量之间的相关性。本文 SOM 图基于 8000×5 的数据矩阵计算得到, 以颜色表示数据幅值的大小, 得到的五维数据如图 9 所示。

图 9(a~c)反映了风扇分别在 x 、 y 和 z 轴的相对位置坐标变化, 图 9(d)和图 9(e)分别反映了这 8000 个初始样本的标准差 σ 和流量 Q 。通过观察这些子图中同一位置处的颜色即可获取任一样本的数值。分析图 9 可知, 散热器流量和标准差与风扇在 x 轴方向上的位置变化呈现出显著的相关性。 x 越大, 即风扇越远离散热器, 散热器流量越大, 标准差越小。相比之下, 风扇在 y 、 z 方向的位置变化与两个目标变量无明显相关性。

同样, 采用 SOM 方法对 Pareto 最优解集进行多维映射表达, 结果如图 10 所示。图 10 反映出仅包含非支配解集的局部空间的五维映射关系, 然而由于不同空间位置映射关系不同, 图 9 和图 10 所展现出来的 SOM 图呈现的关系有所不同。

如图 10 所示, σ 和 Q 与风扇在 x 方向上的位置变化仍然存在明显的正相关关系, 即当 x 取值越大时, σ 和 Q 均呈现上升的趋势。同时, 可以看到 σ 和 Q 的变化也与风扇在 y 方向上的位置变动存在一定联系, 当 y 取值较小时, σ 和 Q 会取到较大的数值。最优解集中两个优化目标的变化趋势显示出一致性, 表明两个目标无法同时达到最优, 同时也无法比较优劣, 因此需要根据实际工况选择目标的最优解。

为了在 Pareto 最优解集中找出最优解, 受到稳健设计领域信噪比概念的启发, 将反映气流流速不均匀性的标准差 σ 与流量 Q 的比值 ξ 作为最优解的选择标准, 即:

$$\xi = \frac{\sigma}{Q} \quad (3)$$

基于式(3), 对 Pareto 最优解集中的数据进行处

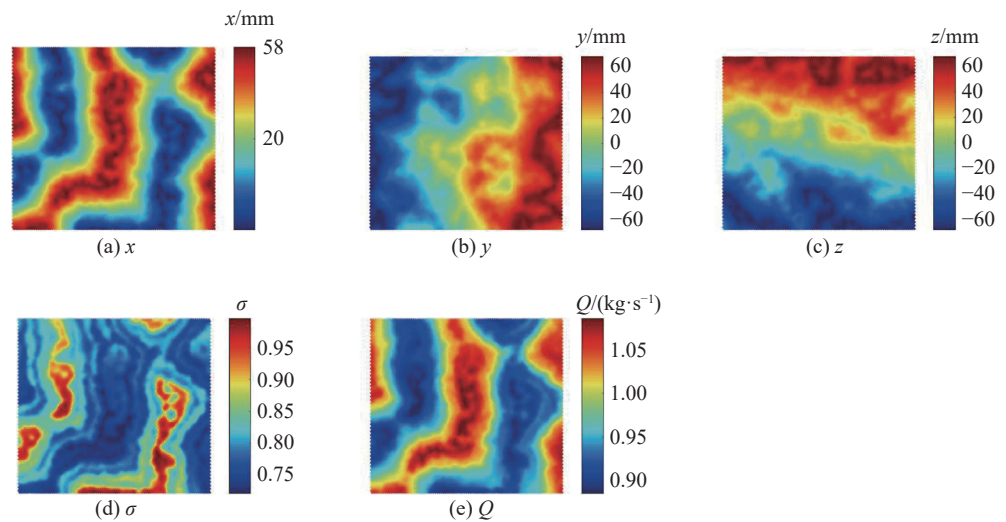


图 9 设计空间随机样本的 SOM 图

Fig. 9 SOM visualization of random samples

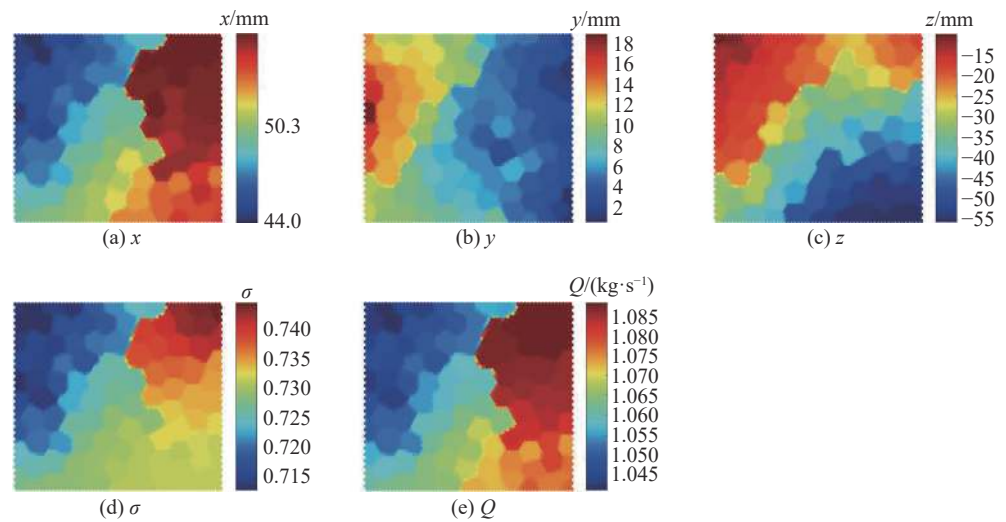


图 10 Pareto 最优解集的 SOM 图

Fig. 10 SOM visualization of Pareto front

理和圆整，得到如表 5 所示的最优解，这些解在图 10 中的位置也已标注，以便于识别。

表 5 最优解与初始位置的结果对比					
Table 5 Comparison between the reference and optimal solution					
	x/mm	y/mm	z/mm	σ	$Q/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$
初始位置	0	0	0	1.020 3	0.911 5
最优解位置	56	2	-42	0.763 2	1.072 1
优化程度				-25.20%	17.62%

为了直观说明整个优化设计的优越性，将最优解模型预测值与初始位置计算值进行比较，可以看到，优化设计使得反映散热器进口面流速不均匀性的标准差 σ 降低了 25.20%、流量 Q 提升了 17.62%，大大提升了整车的散热性能。

2.4 结果验证

在确定最优解之后，对最优解精度进行验证。根据最优解的位置数据，在参数化的模型中生成新模型并依照之前的流程进行 CFD 仿真计算。将仿真计算的结果与 Kriging 模型预测的结果进行比较，分析模型误差，其对比结果如表 6 所示。表 6 展示了最优解位置的模型预测值和仿真计算值的对比结果，可以看到，两个优化目标的误差均在 5% 以内，表明所建立

表 6 最优解误差验证表		
Table 6 Verification of optimization results		
	σ	$Q/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$
Kriging 模型预测值	0.733 8	1.084 4
CFD 仿真计算值	0.763 2	1.072 1
误差	-3.85%	1.15%

的模型在预测最优解位置的性能方面具有较高的精度,其最优解结果能够作为辅助设计冷却风扇在发动机舱内空间位置的依据。

3 结 论

针对皮卡类汽车发动机舱有限空间环境下的复杂流场结构,本文探讨了一种能从全局层面表达关键流场特性与零部件空间布局关系的优化方法。此方法应用于发动机冷却风扇的布局,以散热器出口流量 Q 及流量标准差 σ 为优化目标,以风扇的空间坐标位置为变量,进行布局及流场结构优化,取得了较好的结果。

1) 从方法上,将 Kriging 代理模型方法与 CFD 方法相结合,以少量初始设计点的 CFD 计算结果插值得到样本空间内所有的函数响应值,配合遗传算法能够近似实现在全样本空间内的寻优设计,且代理模型预测误差均在 5% 以内,两个优化目标分别实现了 25.20% 和 17.62% 的提升。基于 SOM 图实现了多维参变量可视化分析,为机舱内零部件的布局决策提供了有价值的参考。

2) 从应用上,发现和证实了冷却风扇在发动机舱布置的关键影响因素,即沿车辆行驶方向的坐标位置,并通过高维数据表达的方法,阐明了散热器流量及其波动与行驶方向的显著相关性。在此方向上,冷却风扇与散热器的距离增加, Q 呈现单调上升的趋势, σ 则呈现近似单调下降的趋势。相对来说,冷却风扇在其他方向的变动影响较小。结合工程实际情况,冷却介质在重力影响下分布不均匀,风扇在竖直方向偏下位置会取得更好的冷却效果。综上,冷却风扇在该型号车型中,应该布置在离散热器较远、在车身横向靠近散热器中心且竖直方向上相对于散热器中心偏下的位置。

本研究结论和所采用的方法对其他汽车零部件的布置问题以及航空航天工程中的类似布局问题有一定的参考价值。

致谢: 本文项目研究所需的计算资源受到国家超级计算郑州中心支持,谨此致谢。

参 考 文 献:

- [1] 李峥峥. 基于冷却部件布置的重型卡车机舱内流特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
LI Z Z. Research of internal flow characteristics of underhood for heavy-duty truck based on layout of cooling modules[D]. Changchun: Jilin University, 2012(in Chinese).
- [2] 耿亚林. 基于一维/三维联合仿真的商用车机舱散热研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
GENG Y L. Research on heat dissipation of commercial vehicle engine compartment based on 1D/3D co-simulation[D]. Changchun: Jilin University, 2021(in Chinese).
doi: 10.27162/d.cnki.gjlin.2021.004205
- [3] 袁侠义, 谷正气, 杨易, 等. 汽车发动机舱散热的数值仿真分析[J]. 汽车工程, 2009, 31(9): 843–847, 853.
YUAN X Y, GU Z Q, YANG Y, et al. Numerical simulation on vehicle underhood cooling[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(9): 843–847, 853(in Chinese).
- [4] ZHANG Z, BUISSON M, FERRAND P, et al. Meta-model based optimization of a large diameter semi-radial conical hub engine cooling fan[J]. Mechanics and Industry, 2014, 16(1): 102.
doi: 10.1051/meca/2014063
- [5] 刘传波, 鲁力, 莫易敏, 等. 汽车发动机舱散热组件布局仿真优化[J]. 汽车工程, 2018, 40(3): 245–250, 258.
LIU C B, LU L, MO Y M, et al. Simulation and optimization of cooling assembly arrangement in vehicle engine compartment[J]. Automotive Engineering, 2018, 40(3): 245–250, 258(in Chinese).
- [6] LAWRENCE V. Underhood airflow simulation of a passenger car using computational fluid dynamics: 2001-01-3800[R]. SAE Technical Paper, 2001.
doi: 10.4271/2001-01-3800
- [7] 刘传超, 张彬乾, 孙静, 等. 大型载货车气动阻力计算与流场分析[J]. 汽车科技, 2005(4): 24–26.
LIU C C, ZHANG B Q, SUN J, et al. Aerodynamic drag computation and numerical analyses of aerodynamic characteristics about camion[J]. Automobile Science and Technology, 2005(4): 24–26(in Chinese).
- [8] MEHRAVARAN M, ZHANG Y. Optimizing the geometry of fan-shroud assembly using CFD: 2015-01-1336[R]. SAE Technical Paper, 2015.
- [9] 段大禄, 张玉珠. 汽车冷却系统布置方式研究[J]. 机械, 2017, 44(1): 40–44.
DUAN D L, ZHANG Y Z. Study of auto cooling system arrangement[J]. Machinery, 2017, 44(1): 40–44(in Chinese).
- [10] 胡文成, 王良模, 邹小俊, 等. 风扇布置对载货汽车散热性能的影响[J]. 汽车技术, 2014(10): 22–27.
HU W C, WANG L M, ZOU X J, et al. Influence of fan arrangement on truck heat dissipation performance[J]. Automobile Technology, 2014(10): 22–27(in Chinese).
- [11] 胡兴军, 罗雨霏, 金昕, 等. 商用车机舱热管理组合因素影响研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(4): 38–47.
HU X J, LUO Y F, JIN X, et al. Research on influence of combined factors on thermal management in commercial vehicle cabin[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(4): 38–47(in Chinese).
doi: 10.16339/j.cnki.hdxzbk.2023152
- [12] 周东辉, 罗仁宏, 王之丰. 某商用车发动机舱冷却模块布局优化[J]. 汽车安全与节能学报, 2022, 13(2): 378–385.
ZHOU D H, LUO R H, WANG Z F. Layout optimization of cooling modules in a commercial vehicle engine compartment[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2022, 13(2): 378–385(in Chinese).
- [13] CIOPPA T M, LUCAS T W. Efficient nearly orthogonal and space-filling Latin hypercubes[J]. Technometrics, 2007, 49(1): 45–55.
doi: 10.1198/004017006000000453
- [14] 王焱. 正交拉丁超立方体设计的子设计选择[D]. 长春: 东北师范大学, 2019.
WANG Y. Sub-design selection for orthogonal Latin hypercube design[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2019(in Chinese).
- [15] 张泽斌, 张鹏飞, 李瑞珍. 基于自组织映射的高维优化参变量相关性研究[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(3): 677–684.

- ZHANG Z B, ZHANG P F, LI R Z. SOM-Based High-Dimensional Design Spaces Mapping for Multi-Objective Optimization[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2020, 38(3): 677–684(in Chinese).
- [16] 张泽斌, 张鹏飞, 郭红, 等. Kriging 序贯设计方法在滑动轴承优化中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(7): 178–183.
- ZHANG Z B, ZHANG P F, GUO H, et al. Implementation of Kriging model based sequential design on the optimization of sliding bearing[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(7): 178–183(in Chinese).
- [17] FANG K T, LIN D K J, WINKER P, et al. Uniform design: Theory and application[J]. Technometrics, 2000, 42(3): 237–248.
doi: [10.1080/00401706.2000.10486045](https://doi.org/10.1080/00401706.2000.10486045)
- [18] ZHANG Z B, DEMORY B, HENNER M, et al. Space infill study of Kriging meta-model for multi-objective optimization of an engine cooling fan[C]//ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, Düsseldorf, Germany, 2014.
doi: [10.1115/GT2014-25281](https://doi.org/10.1115/GT2014-25281)
- [19] 张泽斌, 景世钊, 袁少朋, 等. 变速条件下流体动压效应稳健性分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(4): 1219–1228.
- ZHANG Z B, JING S Z, YUAN S P, et al. Robust analysis of hydrodynamic performance under variable rotation speeds[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(4): 1219–1228(in Chinese).
doi: [10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0480](https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0480)
- [20] 冯玮, 刘新续, 张振东, 等. 车用散热器表面气流不均匀性及其影响[J]. 农业装备与车辆工程, 2017, 55(8): 35–39.
- FENG W, LIU X X, ZHANG Z D, et al. Heterogeneity of vehicle exchanger's surface velocity and its influence[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2017, 55(8): 35–39(in Chinese).
- (本文责编: 张天航)