

发动机机舱一维三维耦合热管理解决方案

朱天答¹, 杨书建¹, 陈桂杰², 李斌², 唐连伟², 钟修林²

(1. 郑州日产汽车有限公司, 河南省, 郑州市 邮编 450000; 2. 艾迪捷信息科技上海有限公司, 北京市 邮编 100020)

摘要: 对于发动机舱热管理分析, 一维三维耦合的解决方案适用于某些边界条件缺乏试验数据支持的仿真, 既可应用于车型设计阶段预测冷却系统布置, 也可应用于已有车型模拟与试验对比, 以及预测改款车型布置。这种解决方案可以有效得缩短研发周期, 提高生产效率。本文以我公司某车型为例, 首先使用 ANSYS Fluent 软件建立三维数值模型进行流场仿真, 以流场风量结果为依据使用 GT-SUITE 软件进行一维模拟, 标定进气格栅流量系数, 分析冷却系统匹配, 冷却模块布置的影响, 得到的冷却模块发热量等信息再传递给三维模型, 进行流场温度场仿真, 分析详细机舱模型。三维仿真网格模型由自动化网格流程生成, 前处理仿真效率大幅提升。耦合方法使得仿真与试验匹配度更高, 计算结果与试验结果吻合良好。

关键词: 热管理; 一维三维耦合; ANSYS Fluent; GT-SUITE; 自动化网格流程

1D and 3D Coupled Thermal Management Solution for Underhood

Zhu Tianda¹, Yang Shujian¹, Chen Guijie², Li Bin², Tang Lianwei², Zhong Xiulin²

(1.ZHENGZHOU NISSAN AUTOMOBILE CO., LTD., Zhengzhou, Henan 450000, China; 2. IDAJ-China Co. Ltd, Beijing 100020, China)

Abstract: For the underhood thermal management analysis, the 1D and 3D coupling solution is suitable for the simulation by the lack of experimental data in some boundary conditions. It can be applied to the prediction of the cooling system layout in the vehicle design phase and also to the comparison between the existing model simulation and experiment, as well as predicting the facelift model layout. This solution can effectively shorten the development cycle, improve production efficiency. Taking a car model of our company as an example, we firstly use ANSYS Fluent software to build a 3D model to simulate the flow field. Based on the results of flow field, we use GT-SUITE software to simulate 1D, calibrate the inlet grill flow coefficient, analyze the cooling system matching, the influence of the cooling module layout, the obtained cooling module heating and other information is passed to the 3D model, analyze the flow and temperature field simulation, and the detailed cabin model. The 3D simulation mesh model is generated by the automatic meshing process, and the efficiency of pre-processing simulation is greatly improved. Coupling method makes the simulation and experiment match degree higher, the calculated results agree well with the experimental results.

Keywords: thermal management; 1D and 3D coupled; ANSYS Fluent; GT-SUITE; automatic meshing process

1 引言

发动机冷却系统的作用是散掉与发动机有用功大致相当的热量。随着汽车设计技术的发展,对冷却系统设计也提出了更高的要求。发动机不断地提高功率,需要更大量的冷却空气;由于造型与空气动力学的需要,以及汽车紧凑设计的需要,留给发动机舱内散热器和冷却气流导管的空间也越来越小;为考虑其安全的车身前端的设计,气流受到保险杠和衡量的阻碍等,这些都是发动机冷却系统设计面临的新课题。因此,在各种要求下确保发动机的冷却性能,改善发动机舱的热环境就是一个非常重要的课题[1]。

一维仿真可以对整个热力系统的性能进行评估,而三维仿真可以分析发动机舱内的细节流动和热特性。将一维仿真与三维仿真的耦合分析的解决方案应用于整车热管理分析过程,可以同时评估整车热管理的系统设计和发动机舱的结构设计水平,在仿真分析过程中综合考虑热管理系统内各个组件的相互影响,从而在设计初期,对于系统布置、零部件选型、零部件设计进行仿真评估,提出潜在风险,找出设计方案的不足之处,并对之进行优化。从而规避设计风险,减少产品设计周期,提高产品质量。

2 一维仿真和三维仿真耦合解决方案

2.1 耦合仿真的优势

一维仿真和三维仿真耦合解决方案适用于一维仿真在设计阶段预测系统布置,然后三维仿真进行验证计算;也适用于与已有车型的仿真计算与试验对比,并利用当前一维仿真结果预测改款车型,并进行三维仿真验证。

本文一维仿真侧重整个冷却系统匹配、冷却模块布置的影响;三维仿真侧重于三维流场温度场分析,以及详细机舱模型分析。一维仿真使用的 GT-SUITE 软件是由美国 Gamma Technologies 公司开发的汽车仿真分析系列套装软件,在发动机、整车性能评估、热管理系统性能评估等方面有着广泛的应用。三维仿真使用 ANSYS Fluent 软件,这是一款目前处于世界领先地位的 CFD 软件之一,是一个用于模拟和分析在复杂几何区域内的流体流动与热交换问题的专用 CFD 软件[2],在外气动,机舱热管理等方面有很多成功案例,本文使用 Fluent Meshing 的脚本驱动的自动化网格流程对网格处理的效率非常高[3]。

2.2 耦合仿真流程

Fluent+GT-SUITE 联合仿真流程

1. 使用 Fluent 计算不同工况下机舱流场分布,获得流经散热器、中冷器、冷凝器风量;
2. 使用 Fluent 的风量计算结果对 GT-SUITE 机舱模型进行标定;
3. 使用 GT-SUITE 计算热管理系统流量、温度分布情况;
4. 基于 GT-SUITE 计算获得的散热器、中冷器入口水温和发热量等,使用 Fluent 计算机舱温度场。

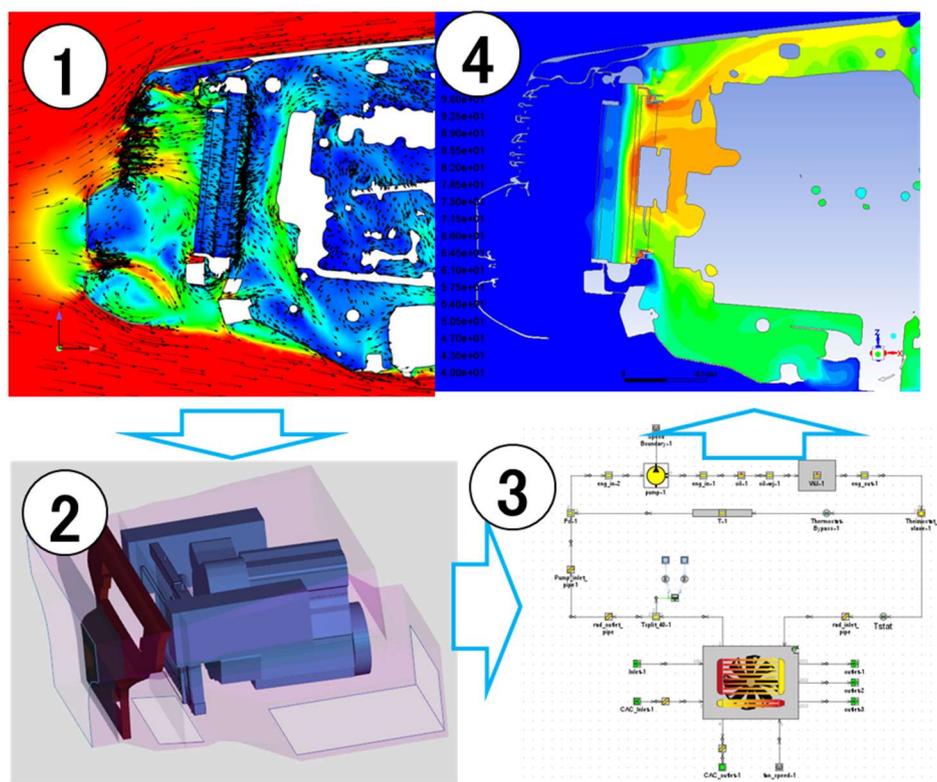


图1 耦合仿真流程

3 3D 仿真建模

3.1 几何模型

发动机舱热管理仿真要处理除乘员舱内部零件以外的全车数模，对车身，动力总成，冷却模块和机舱内部件等对几何边界进行预处理归类命名等工作，然后使用 Fluent Meshing 的自动化网格流程来得到用于计算的网格模型。初始几何模型的前端冷却模块等结构如下图所示：

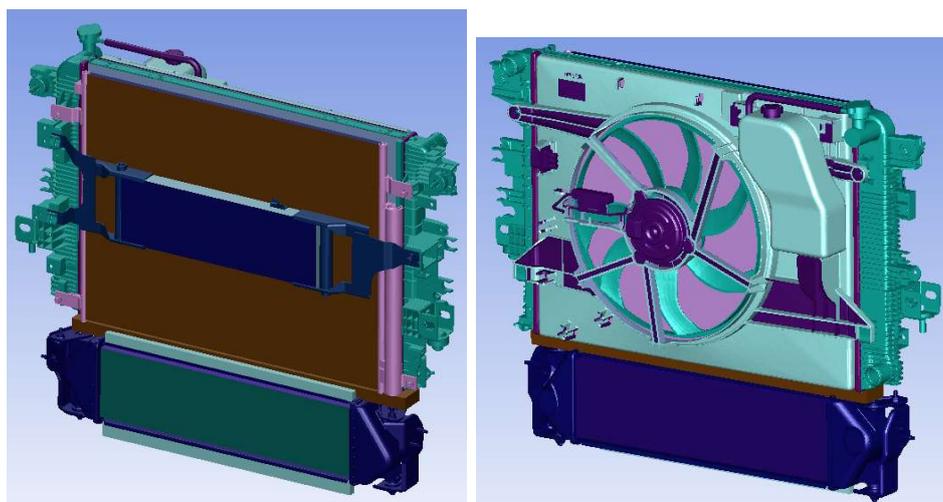


图2 冷却模块

为了准确的进行发动机舱热流体的解析，必须准确的模拟通过散热器的冷却风量。前端冷却模块的形

状，格栅的形状，保险杠的外形等的捕捉直接影响到机舱冷却特性的仿真。舱内零部件复杂的形状都对网格的质量要求很高，并且网格规模非常大。Fluent Meshing 的自动化网格处理可以依靠脚本驱动自动的实现发动机舱热管理这样复杂模型的处理，自动完成漏洞封闭、包面、重构、体网格划分及网格质量提升的工作。具体流程为首先导入初始几何，并对模型分区重命名，定义修改对象和特征线，调整合理的尺寸函数，可以得到合理的网格密度分布，通过编辑和运行脚本文件自动完成。这样网格处理方法可以大幅缩短热管理项目的前处理时间[3]。

生成的面网格总数为 898 万，体网格总数为 3584 万。主流域和风扇域的网格类型为四面体，换热器芯体（油冷器，中冷器，冷凝器，散热器）为六面体类型。

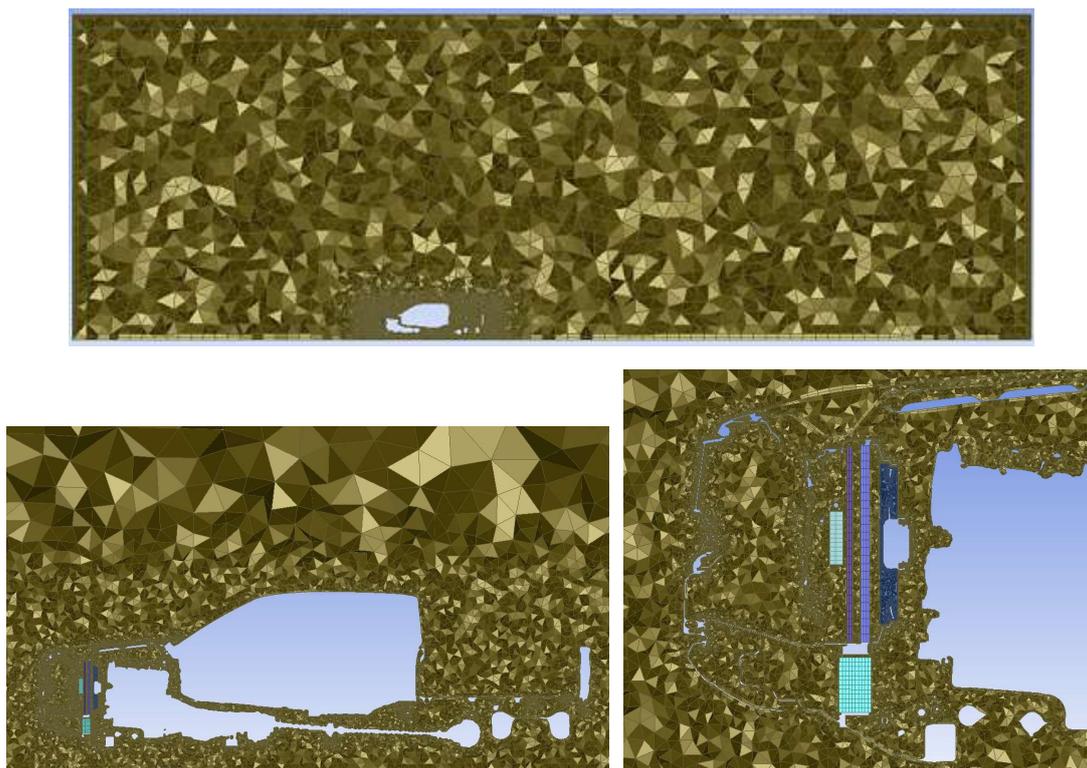


图 3 体网格截面及局部放大图

3.3 分析设定

本次仿真计算两个工况，分别是高速工况，车速为 120kph，爬坡工况车速为 60kph。风扇转速为 2550rpm，使用 MRF 模拟。换热器芯体定义为多孔介质。流体工质为空气。

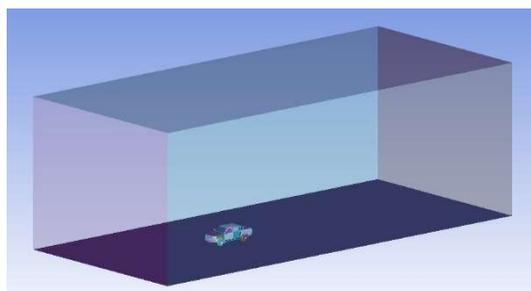
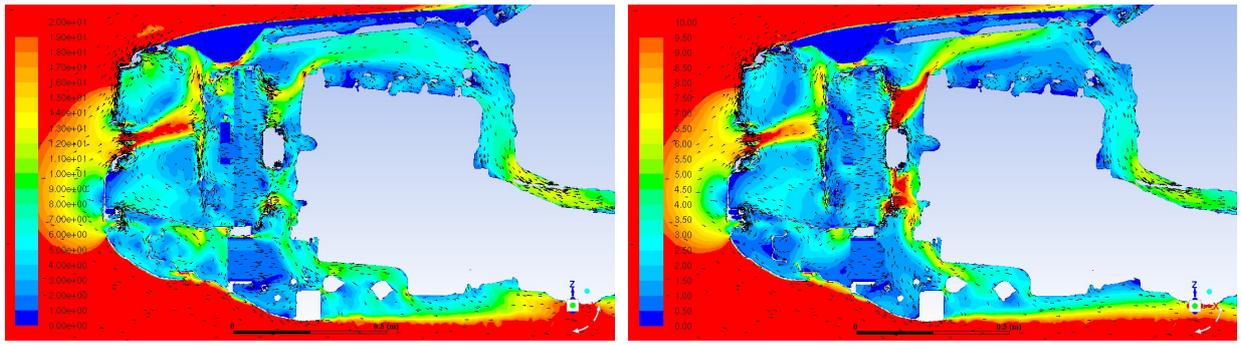


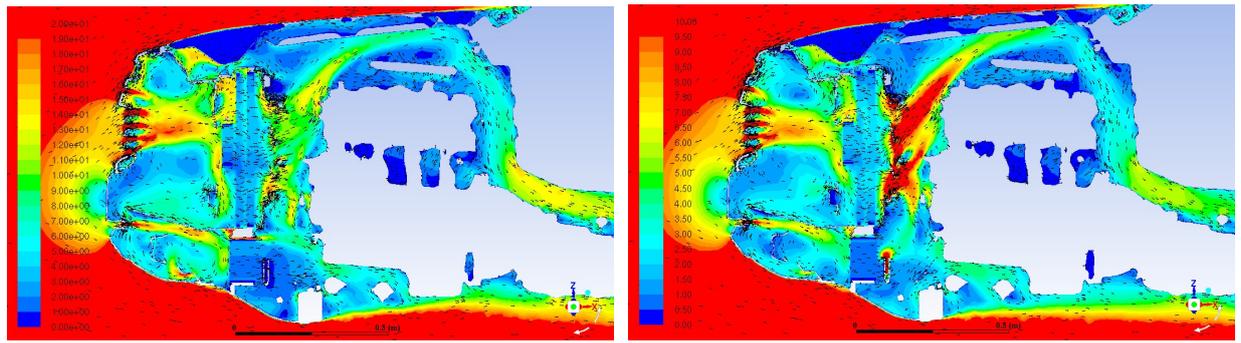
图 4 计算域



高速

爬坡

截面一（过风扇）

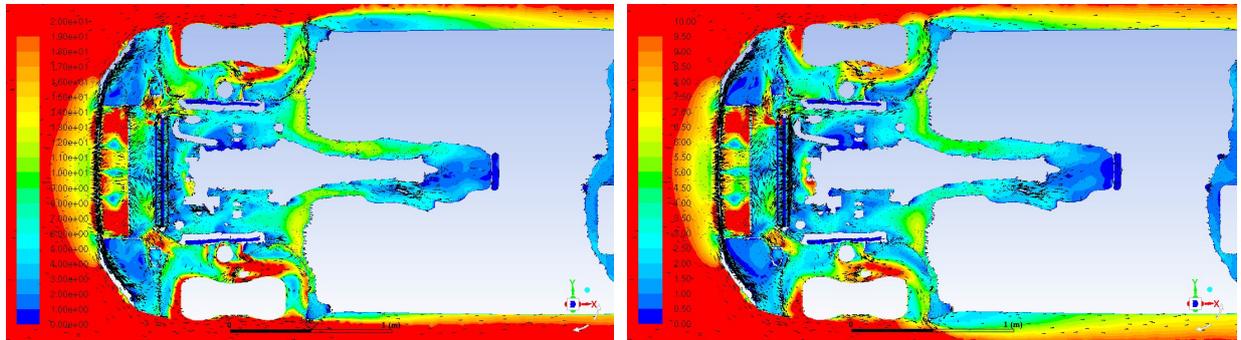


高速

爬坡

截面二

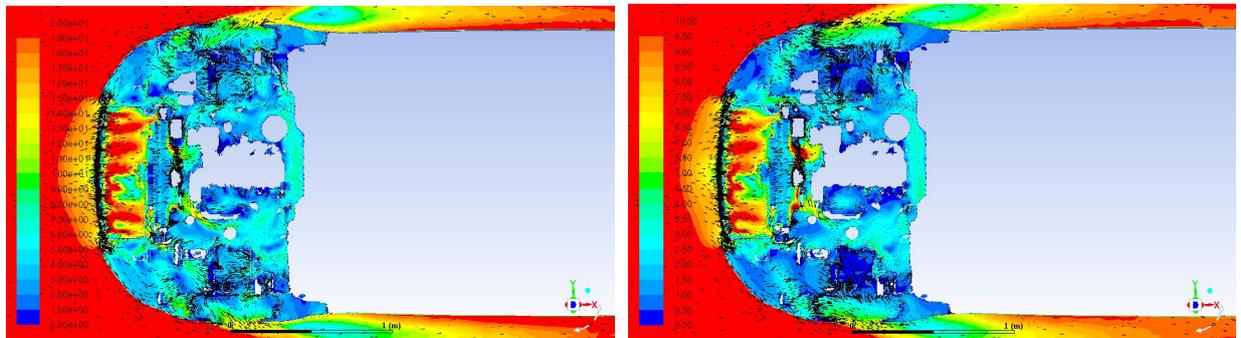
图 7 两种工况下 Y 方向截面速度云图和矢量图



高速

爬坡

截面三（过下格栅）



高速

爬坡

截面四（过上格栅）

图 8 两种工况下 Z 方向截面速度云图和矢量图

根据冷却模块芯体表面的速度分布和发动机舱内的流场分布，可以分析从格栅进风的有效利用率，辅助分析机舱布置的合理性。提取冷却模块的风量结果，应用于一维仿真模型标定。

4 一维热管理模型

4.1 一维仿真模型

一维仿真主要工作：利用 GT-SUITE 软件，基于当前实车的冷却系统设计方案及参数，建立当前车辆的发动机冷却系统模型和准 3D 动力舱模型，计算发动机冷却系统宏观参数，包括冷却液流量及其分布，散热器散热功率，发动机出水温度、节温器开度等。

发动机冷却系统模型包括系统管路布置、水泵扬程曲线、发动机流动阻力特性、节温器参数、膨胀水壶等，用于计算发动机冷却系统流量分布和压力分布，结合发动机散热量、散热器进风量（三维流场仿真结果）、环境温度等参数计算冷却系统水温，并为准 3D 模型提供冷却液水温、流量等边界条件。

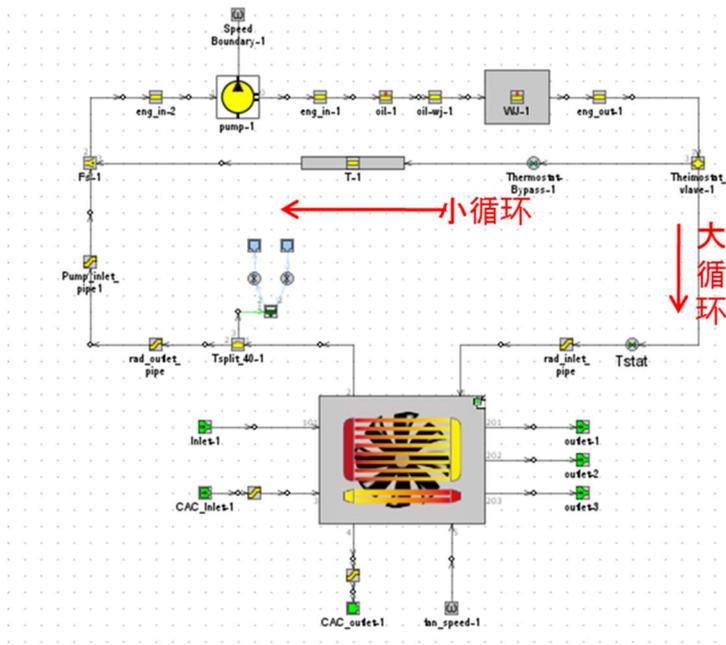


图9 一维冷却系统仿真

根据动力舱结构布置搭建准 3D 模型，包括：进气格栅、散热器、冷凝器、中冷器、风扇、发动机等。准 3D 模型主要用于计算由于动力舱结构布置带来的对空气流量的影响。根据三维仿真计算标定后得到的外部空气流量和环境温度，结合发动机冷却系统模型提供的冷却液进口水温和流量，计算散热器散热量和冷却液出口温度。

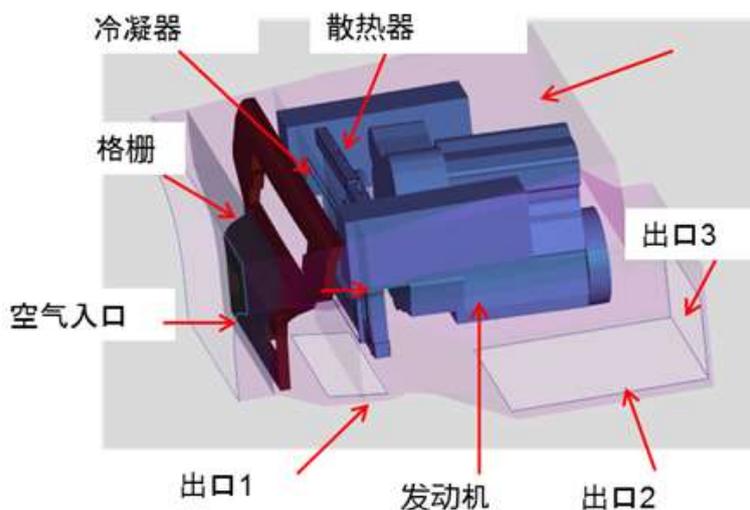


图 10 发动机舱准 3D 模型

4.2 一维仿真结果

一维冷却回路的系统温度分布如下图所示：

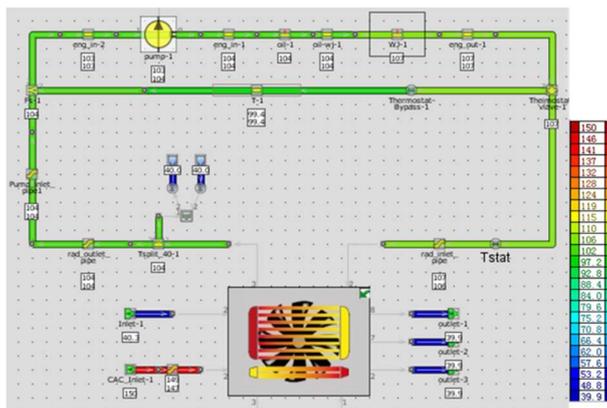


图 11 一维冷却系统温度分布

4.3 仿真结果与实验对比

一维仿真可以得到散热器水流量、进出口温度和发热量以及发动机水套进出口温度等结果，并且有部分试验数据可以与仿真结果对比。仿真结果如下表所示：

表 1 一维仿真结果

工况	散热器 进口水 温 $^{\circ}\text{C}$	散热器出 口水温 $^{\circ}\text{C}$	散热器 散热量 kW	中冷器 散热量 kW
高速	102.40	95.96	41.81	3.85
低速 爬坡	107.48	101.03	20.69	3.19

高速工况试验的环境温度在 $39.7\sim 43.2^{\circ}\text{C}$ 之间，发动机转速为 $3300\sim 3400\text{r/min}$ ，测量该工况下的散热器冷却液进口和出口温度（水箱进出口）。试验测量的水箱进出口温度变化曲线如图 12 所示。



图 12 高速工况试验测量水箱进出口温度

水温数值取稳定段平均值，高速试验工况及测量结果如下表所示。从对比结果可以看出，仿真结果与试验数据非常吻合，散热器进口温度偏差 0%，出口温度偏差 0.042%。

表 2 高速工况试验测量散热器进出口温度（水箱进出口）

项目	说明
环境温度	39.7~43.2℃
发动机转速	3300~3400r/min
散热器进口平衡温度	102.4℃
散热器出口平衡温度	96℃

低速工况下试验的环境温度在 39.4~41.6℃之间，发动机转速为 2100~2200r/min，测量该工况下的散热器水侧进口和出口温度（水箱进出口）。试验测量的水箱进出口温度变化曲线如图 13 所示。

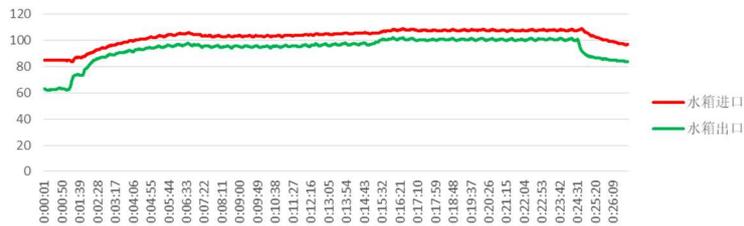


图 13 爬坡工况试验测量水箱进出口温度

水温数值取稳定段平均值，爬坡试验工况及测量结果如下表所示。从对比结果可以看出，仿真结果与试验数据非常吻合，散热器进口温度偏差 0.2%，出口温度偏差 0.43%。

表 3 爬坡工况试验测量散热器进出口温度（水箱进出口）

项目	说明
环境温度	39.4~41.6℃
发动机转速	3300~3400r/min
散热器进口平衡温度	散热器进口 107.7℃
散热器出口平衡温度	散热器出口 100.6℃

高速工况下，由于机舱进气量较大，散热器散热能力充足，散热器进口水温较低；低速爬坡工况下，由于机舱进气量较小，散热器进出口水温升高，进口温度达到 107.7℃（仿真结果为 107.48），略高于设计要求，这也是后续冷却模块优化的重要参考。

5 三维温度场仿真

5.1 换热器模型及数据传递

换热器模型采用 Fluent 中 Macro 模型只需要创建一套网格单元，真实的单元用于主流体（冷却流体）一侧，macros 用于辅助流体（热流体）一侧，在发动机舱热管理仿真中是普遍使用的模型[4]。一维计算的散热器散热量和入口流量，温度结果定义在三维仿真中的换热器模型里[5]。

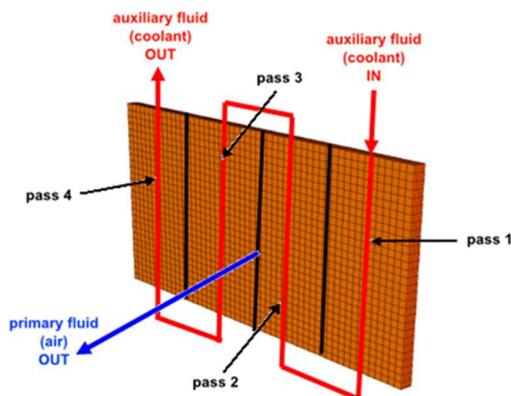


图 14 换热器模型示意图

5.2 三维温度场结果

散热器使用换热器模型，环境温度为 40℃，计算两种工况下换热器芯体迎风面和背风面的温度分布如下图所示：

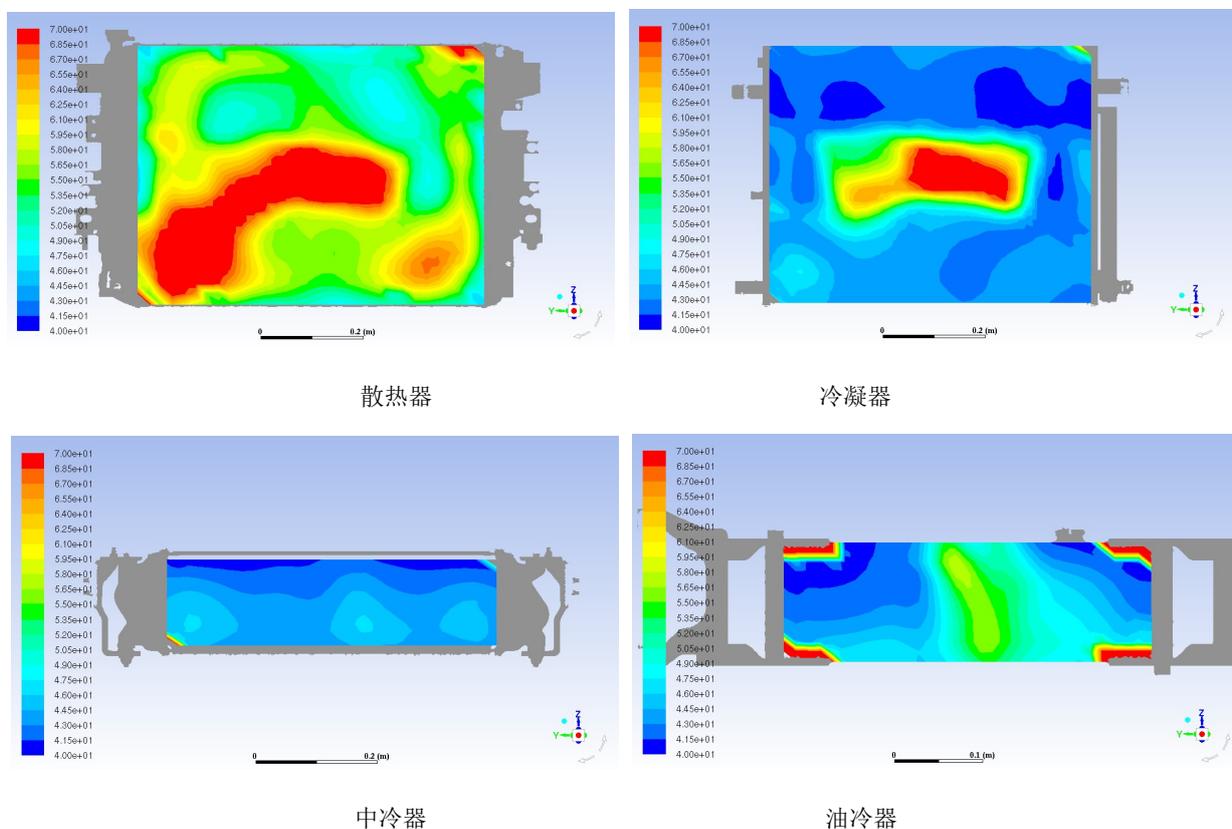


图 15 高速工况下换热器芯体迎风面温度云图

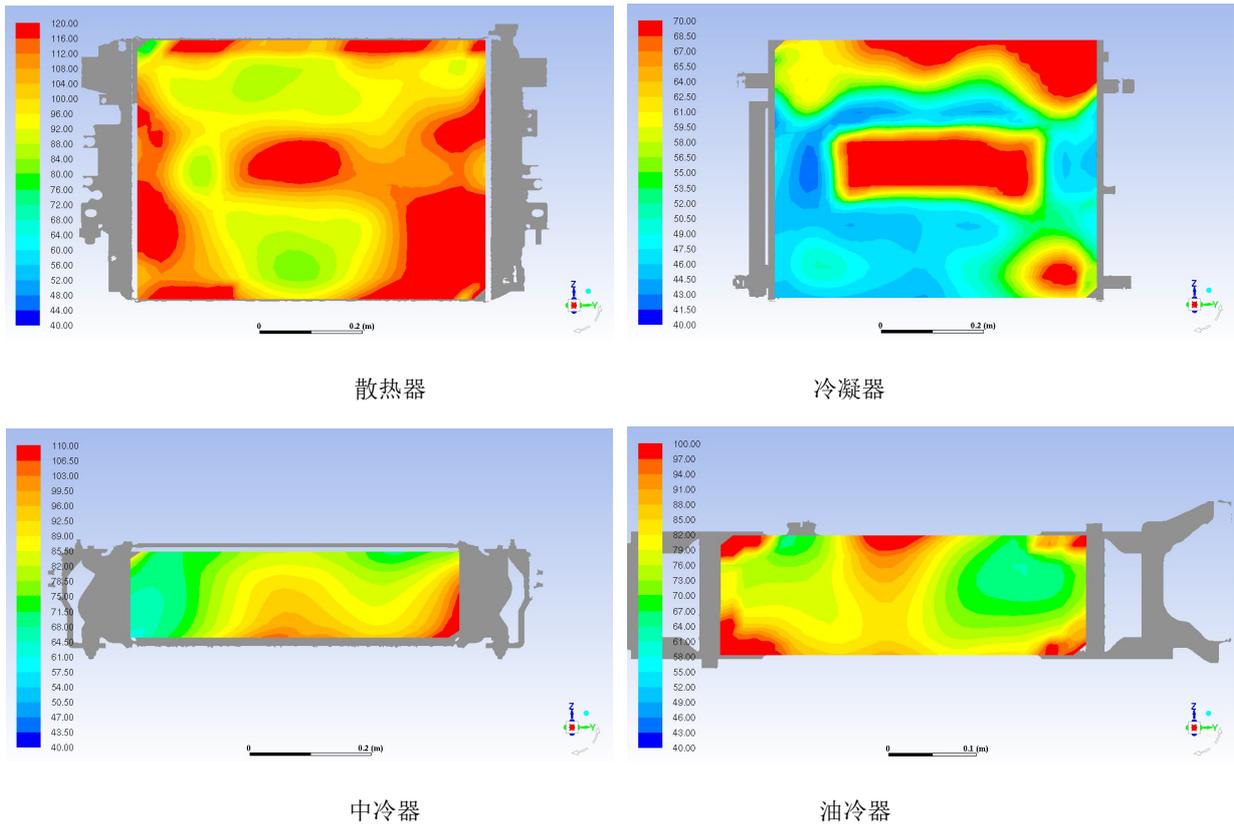


图 18 爬坡工况下换热器芯体背风面温度云图

两种工况下经过风扇的 Y 方向截面上温度分布如下图所示：

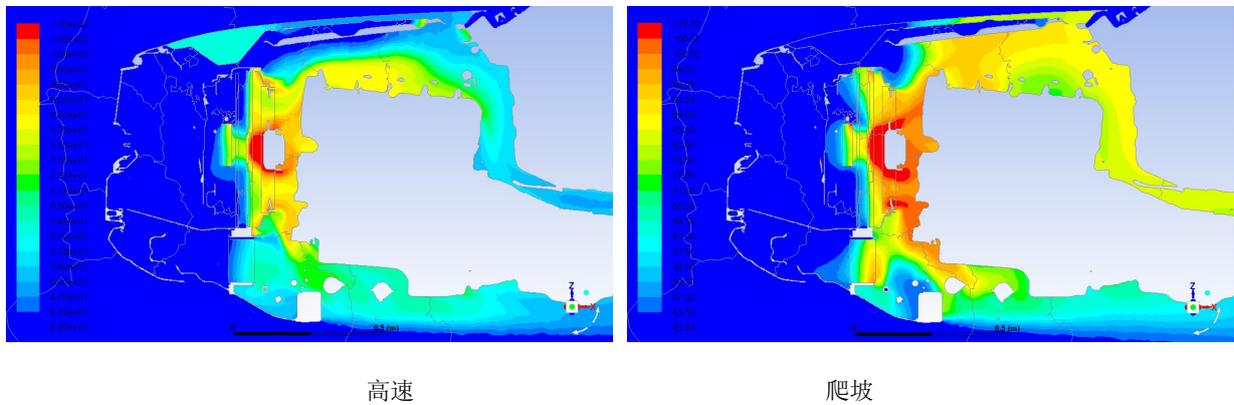


图 19 两种工况下 Y 向截面温度云图

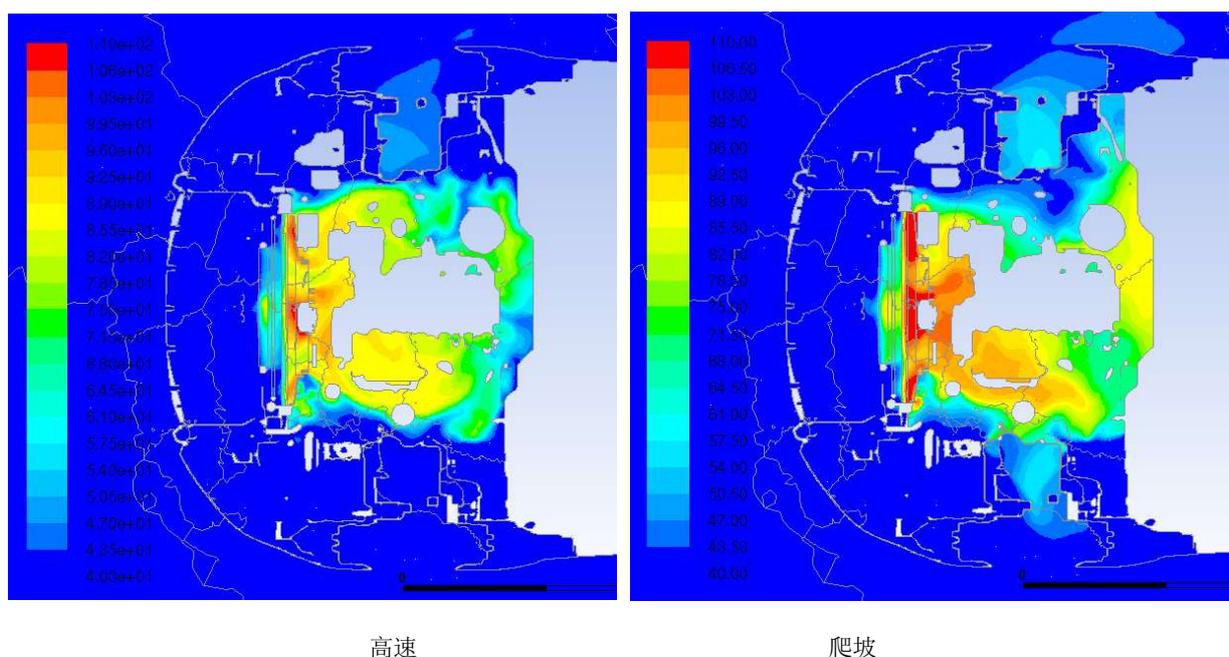


图 20 两种工况下 Z 向截面温度云图

三维温度场仿真可以得到发动机舱内详细的温度分布，冷却模块的温升等结果，并与一维仿真的结果互相印证。结合模型一维和三维仿真结果，可以制定新的冷却模块优化布置方案。如散热器参数继承一维标定过的结果，对新冷却模块布置方案进行三维建模仿真验证，预测流场和温度场的结果，这样可以对改款车型设定等工作提供很大帮助。

6 总结

一维仿真可以快速得分析冷却模块布置和冷却系统的匹配，从而快速的得出优化方案，并且一维仿真的结果可以直接应用于改款车型进行三维仿真。

三维自动化网格处理的前处理效率非常高，三维仿真可以得到发动机舱内的详细流场和温度场分布，还可以预测潜在热害等。

一维和三维耦合的解决方案中，一维仿真定义准 3D 模型，根据三维风量结果进行标定，得到的风量和温度结果更准确；三维仿真利用一维计算的发热量和流量等信息，冷却模块的输入信息更加准确，这样最终仿真结果与试验的匹配度更高。

参考文献 (References):

- [1] 傅立敏. 汽车设计与空气动力学 机械工业出版社, 2011年.
Fu Limin. Automobile Design and Aerodynamics China Mechine Press 2015
- [2] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD软件原理与应用 北京: 清华大学出版社, 2004.
Wang Fujun, Computational Fluid Dynamics Analysis - CFD Software Principles and Applications
Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)
- [3] ANSYS. Automated Meshing using Scripts
- [4] Ansys Fluent Theory Guide(R17), 2016.
- [5] IDAJ-China. 基于ANSYS Fluent的发动机舱热管理解决方案
IDAJ-China. Underhood Thermal Management Solution Based on ANSYS Fluent