

# 一种自动高效的发动机舱热管理建模方法

訾昌陆<sup>1</sup>, 陈桂杰<sup>2</sup>, 唐连伟<sup>2</sup>, 钟修林<sup>2</sup>

(1. 浙江吉利汽车研究院有限公司, 浙江省, 宁波市 315336; 2. 艾迪捷信息科技上海有限公司, 北京市 100020)

**摘要:** 汽车发动机舱热管理的 CFD 分析需要对整车包含发动机舱内的众多零部件进行复杂的网格处理, 而现有的工作流程主要依赖手工方式进行, 工作量巨大, 因此迫切需要一种自动化流程来实现。本文以我司某车型为例, 利用 Fluent Meshing 的自动化网格流程来完成表面网格处理和体网格生成, 将原本需要 1~2 个月的网格处理工作缩短到 1 周之内完成, 且人工干预工作大大减少, 大幅提升了仿真工作的效率。该自动化网格流程内嵌最佳网格实践, 同时也可根据我司不同车型几何质量及管理规范进行二次封装以适应多种车型 (或改款) 的自动高效建模需求。通过这套建模流程可以获得高质量体网格, 模型计算结果 (热态工况) 与实验结果吻合较好。

**关键词:** 热管理; 快速建模; Fluent Meshing; 自动化网格流程; ANSYS Fluent; CHT

中图分类号: TP

## An Automatic and Efficient Modeling Method for Underhood Thermal Management Analysis

(1. Zi Changlu<sup>1</sup>, Chen Guijie<sup>2</sup>, Tang Lianwei<sup>2</sup>, Zhong Xiulin<sup>2</sup>)

(2. Geely Automobile Research Institute, Ningbo, Zhejiang 315336, China; 2.IDAJ-China Co. Ltd, Beijing 100020, China)

**Abstract:** CFD analysis of the underhood thermal management requires complex mesh processing for the vehicle that contains a large number of parts in the engine room. The existing CFD workflows rely heavily on manual processing, and the workload is huge and there is an urgent need for an automated process to achieve. In this paper, with the help of commercial software ANSYS Fluent, the meshing is processed by script to complete the surface mesh and body mesh generation. This example uses a scripted grid process by which the meshing period is reduced from 1~2 months to 2 weeks and the manual work is also highly reduced. The best practice is embedded into the automatic meshing process and it could be re-packaged to adapt to the needs of a variety of models' (or facelift's) automatic and efficient modeling based on different geometric quality and management specifications. . High quality mesh can be generated through this automatic process and the calculation results (with thermal condition) agree well with the experimental results.

**Keywords:** thermal management; automatic meshing process; ANSYS Fluent; fast modeling; CHT

## 0 引言

计算机仿真技术可以有效的缩短研发周期降低研发成本，在激烈的汽车市场竞争中发挥着重要作用。随着汽车工业的高速发展,人们对汽车安全性、舒适性、节能性和环保性的要求也越来越高。发动机舱热管理仿真是汽车行业数值仿真一个重要方向。发动机舱里布置了包括换热器模块，发动机，进排气系统，电子部件等众多流部件，其中发动机和排气系统是高温热源，热源附近的温度敏感部件（如线束、橡胶件、电子零件等）受到高温影响可能会导致零部件加速老化甚至性能损害，因此通过对发动机舱内部的流动和温度分布的仿真，对机舱内关键部件进行热害分析，并为空间布局优化提供技术支持。CFD 仿真可以缩短试验周期，降低试验成本。

发动机舱热管理分析需要对整车包含发动机舱内的众多零件进行网格处理，现有的 CFD 工作流程主要依赖手工包面的方式处理，这种方式需要包面之前对初始集合模型进行预处理，手动检测并修补发动机等零部件，手动预处理的工作量巨大，并且受人工影响因素大，表面网格质量很难保证，迫切需要一种自动化流程来实现。Fluent Meshing 的脚本驱动处理网格正是这样的自动化流程。它可以自动完成表面网格处理和体网格生成，需要人工干预的工作减少，大幅提升了仿真工作的效率。优化仿真中批量处理大规模模型的需求，更能体现出脚本处理的优势。该自动化网格流程适用于不同车型，可以积累最佳网格实践数据库，适应多种车型（或改款）的自动高效建模需求。

利用这套方法 Volvo S80 车型仅用 3 天时间就可获得整车网格，并且这套一体化网格可以进行包括外气动，发动机舱热管理，共轭传热等计算[1]。这种全新高效的建模流程极大提升了 Volvo 热管理分析的效率，也更加印证了自动化网格流程的发展趋势。

现在对我司某车型利用自动网格流程进行发动机舱热管理仿真，对关注部件进行热害预测。

## 1 自动化网格流程

自动化网格流程就是对初始几何模型运行一套已经准备好的脚本文件，就可以自动完成表面漏洞封闭、包面、面网格重构、体网格划分及网格质量提升的全套工作。

发动机舱热管理仿真的零部件众多，要仿真空气从格栅进入在整个发动舱内的流动和温度分布，需要通过包面的方式提取出流体域的边界。要对空气域进行包面，就需要把空气域处理成一个单连通的区域，这样就需要对发动机，乘员舱等主要区域的表面进行漏洞检测，封闭表面漏洞。传统的网格处理方式中漏洞封闭的过程全部需要工程师手动处理，工作量巨大，对于一个整车模型，网格处理需要一到两个月的时间。网格处理的工作时长和网格质量受工程师使用软件的熟练程度影响，差别较大。

## 1.1 自动化网格流程的优势

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, 使用者只需要对初始网格模型进行模型分区命名等准备工作, 调整合理的尺寸函数后, 运行脚本文件即可。这样网格处理的时间可以缩短到 1 周之内完成, 并且其中手动准备时间更少, 其余都是自动运行的 CPU 时间, 大幅提升了工作效率。

自动化网格流程的自动封闭漏洞功能非常强大。以发动机为例, 通过参数设定, 我们可以控制检测漏洞的尺寸, 运行网格流程后自动封闭所有小于指定尺寸的漏洞, 得到封闭的发动机外表面, 免去了繁杂重复的漏洞检测和堵洞的手工操作。

自动化网格流程中可以根据车外造型自动生成加密区域, 包括贴体加密区域, 前端加密区域和尾流加密区域, 并且可以通过调整参数控制加密区域的形状, 尺寸和密度[2]。

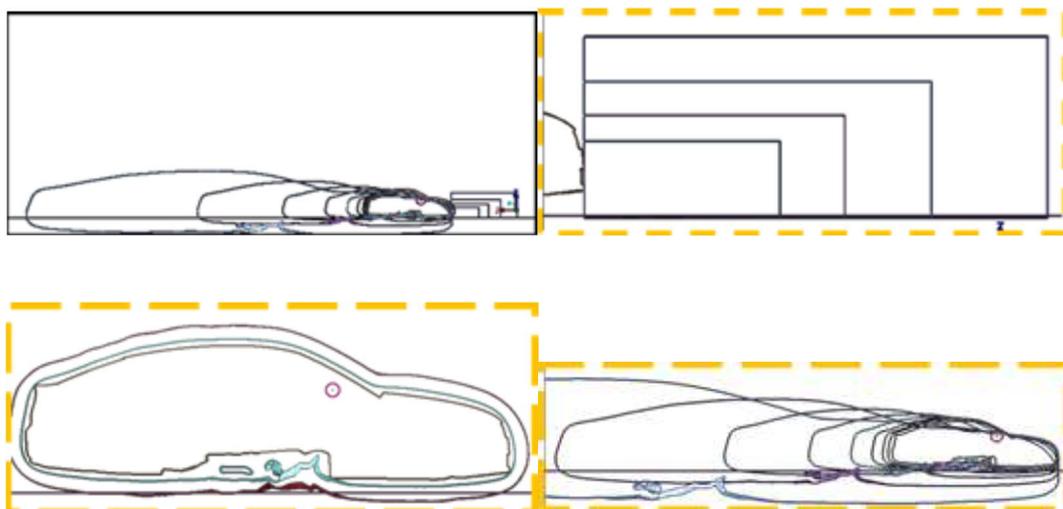


图 1 自动生成加密区域

自动化网格流程中的一个特色功能是自动缝隙封闭的功能, 可以针对指定的对象按照定义的标准寻找并封闭缝隙, 对于外气动或者发动机舱热管理分析中如外造型面上不同部件间的缝隙封补非常有用[2]。

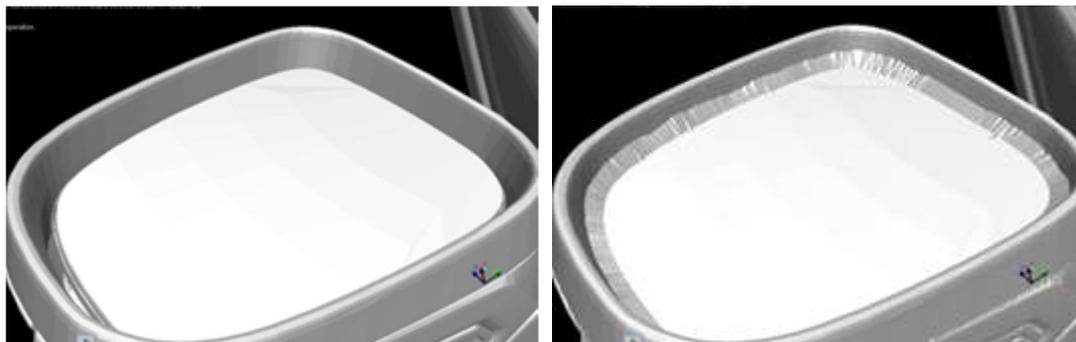


图2 自动缝隙封闭[1]

此外，自动化网格工具还包含同时生成固体网格的功能，用于流固耦合传热计算。自动匹配交界面等工具，省去了发动机舱热管理仿真中众多交界面的选择和匹配工作。

对于发动机舱的优化仿真，往往需要进行批量的模型处理，这些模型如果在命名规则一致的前提下，就可以不再重复模型的尺寸函数等设定工作，直接运行脚本，实现批量处理。

使用自动化网格流程可以不断积累针对不同车型的最佳网格实践，同时也可根据我司不同车型几何质量及管理规范进行二次封装以适应多种车型以及改款车型的自动高效建模需求。

## 1.2 自动化网格流程的流程

自动化网格流程使用的 Fluent Meshing 脚本语言易读易用，使用者不需要精通编程语言就可以编辑使用。使用这套网格流程，从包面到体网格生成再到网格质量提升都自动完成，网格处理时间更短，人工干预更少，网格质量更有保证。

脚本化网格的流程如下图所示：



图3 脚本化网格流程

## 2 数学模型

计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD) 是目前流体力学领域的重要技术之一。采用 CFD 方法研究问题时, 常用方法是把空间区域离散成若干三维空间, 以形成一个个立体网格(或者格点), 然后在网格上应用相应的算法来解连续方程、运动方程(对于无粘流体求解欧拉方程, 对于粘性流体求解纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes equations)、能量方程及组分输运方程等, 对于瞬态过程现象, 还要添加物理变量对时间的离散项, 在离散的时间步长进行计算。目前在工程领域 CFD 方法已经得到广泛的应用。

### 2.1 湍流模型介绍

本文发动机舱热管理仿真用到的湍流模型是工程仿真分析中使用最广泛的是  $k-\varepsilon$  系列湍流模型。 $k-\varepsilon$  模型是一种两方程湍流模型, 它通过求解两个附加输运方程(湍动能  $k$  和湍动能扩散率  $\varepsilon$ ), 再以此为基础得到湍流粘度, 从而对雷诺时均 RANS 方程中的附加雷诺应力项进行模化, 使整个方程组封闭。标准  $k-\varepsilon$  模型自它被提出以来就在诸多实际工程流动计算中扮演重要的角色, 它以其良好的计算经济性、宽广的实用性以及合理的精度被许多工程技术人员广泛使用。

湍动能  $k$  和湍动能耗散率  $\varepsilon$  从以下运输方程得到:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2)$$

其中,  $G_k$  是由于平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项,  $G_b$  是由于浮力引起的湍动能  $k$  的产生项,  $Y_M$  代表湍流中的脉动扩张的贡献,  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$  和  $C_{3\varepsilon}$  为经验常数,  $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  分别是与湍动能  $k$  和耗散率  $\varepsilon$  对应的 Prandtl 数,  $S_k$  和  $S_\varepsilon$  是用户定义的源项[3]。

### 2.2 传热和辐射模型介绍

传热在各工业领域都存在广泛的应用。称从空间中占据一个区域的物质的热能到空间中占据不同区域的物质称为热传递。传热可以通过三种主要方法进行: 导热, 对流和辐射。本文发动机舱热管理仿真要计算传热和辐射。

当流体运动时, 自身携带热量, 这称为对流。传热是跟流体流动耦合在一起的。当能量和流体流动方程都被激活就意味着计算了对流。当能量方程激活时, 流体内的导热也进行了计算。

能量运输方程

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(\mathbf{E} + \mathbf{p})] = \nabla \cdot \left[ k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j J_j + \tau_{eff} \cdot \mathbf{V} \right] + S_h \quad (3)$$

其中,  $k_{eff}$  是有效导热率 ( $k+k_t$ , 其中  $k_t$  是根据所使用的湍流模型定义的湍流热导率),  $J_j$  是组分  $j$  的耗散通量。右侧的前三项分别表示由于传导, 组分扩散和粘性耗散引起的能量传递 [4]。

辐射传热是一种通过电磁波传递能量的能量传输模式。热辐射覆盖 0.1~100um 的电磁光谱部分。对于半透明物体 (如玻璃、燃烧废气), 辐射可以从体内发射, 因此是一种体现象。对于不透明物体, 辐射是一种表面现象, 因为体内发射的电磁波都在本体内部被吸收。

在一个模拟中, 如果辐射换热热流跟对流和导热传热处于相同数量级时需考虑辐射。

$$q_{rad} = \sigma \varepsilon (T_{max}^4 - T_{min}^4) \quad (4)$$

其中,  $\sigma$  是史蒂芬-玻尔兹曼常数, 等  $5.6704 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

通常在高温条件下符合这种情况。但某些较低温度的情况下也符合, 具体取决于应用对象。可先根据下式估计系统中导热或对流传热的量级, 再将  $q_{rad}$  与  $q_{conv}$  进行比较。

$$q_{conv} = h(T_{wall} - T_{bulk}) \quad (5)$$

Fluent 中的辐射模型包括 P1 模型, DTRM(Discrete Transfer Method)模型, S2S(Surface to surface model)模型, DO(Discrete ordinates model)模型等。

在选择辐射模型前, 先要确定光学厚度:

$$\text{光学厚度} = (a + \sigma_s)L \quad (6)$$

其中  $a$ : 吸收系数 ( $\text{m}^{-1}$ ), (注意:  $\neq$  表面吸收率),  $\sigma_s$ : 散射系数 (一般=0),  $L$ : 平均射线长度( $\text{m}$ ): (相互对的两个面之间的代表距离)。

光学厚度小意味着流体介质对辐射接近透明, 辐射仅在计算域的边界上互相传递。光学厚度大意味着流体介质会吸收辐射, 并再次发射辐射。

DO 模型对计算资源要求最高的辐射模型, 同时适用性最广, 精度最高。当光学厚度 = 0 时, S2S 具有与 DO 模型相当的精度, 但所需计算资源更少。P1 模型计算资源要求中等, 精度尚可。DTRM 模型比 DO 模型计算代价小, 但不支持并行, 因此很少使用。对于发动机舱热管理仿真, 可以选择 S2S 模型。

### 3 仿真建模

#### 3.1 几何模型

发动机舱热管理需要处理全车数模（乘员舱内部件除外），按照车身，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，为运行自动化网格流程做准备。初始几何模型外造型面,前端冷却模块和动力总成结构如下图所示：

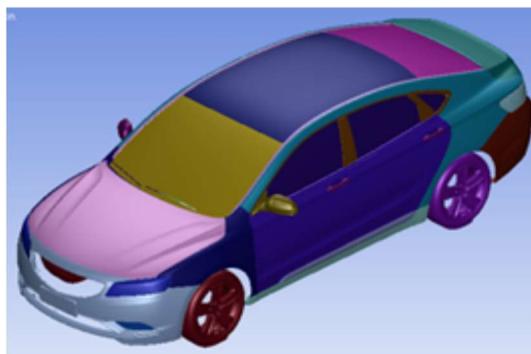


图4 整车外造型面

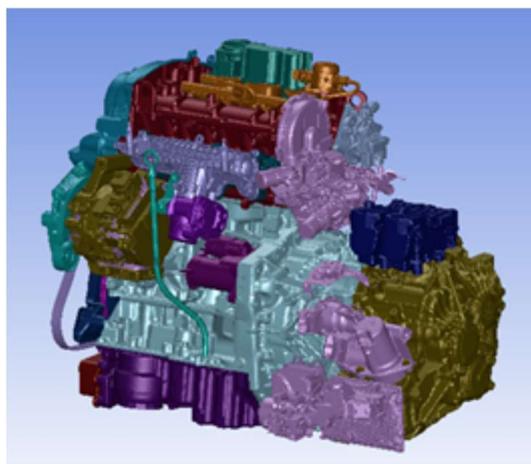


图5 发动机

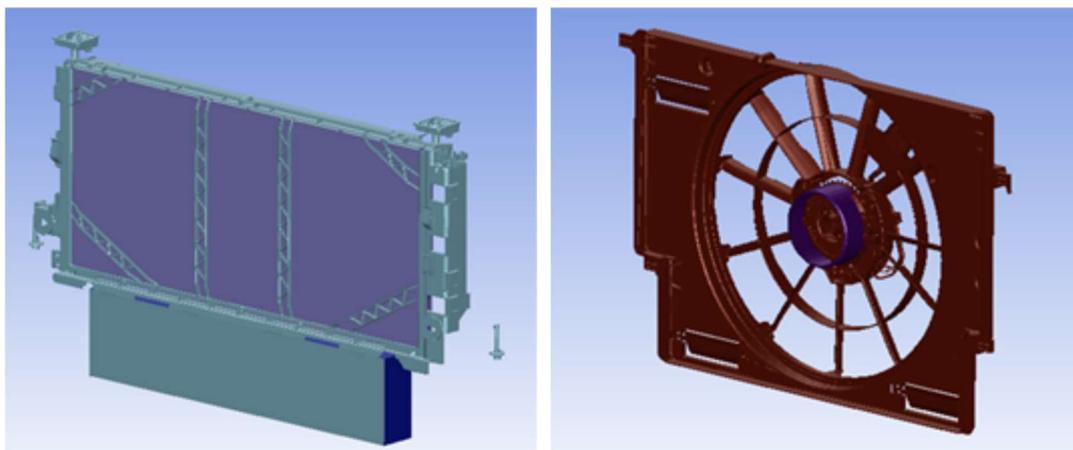


图 6 冷却模块

### 3.2 网格模型

利用自动化网格流程包面并重构之后的面网格数量约 1500 万，其中换热器模块和风扇域边界等部件的最小尺寸为 0.5mm。面网格如下图所示：

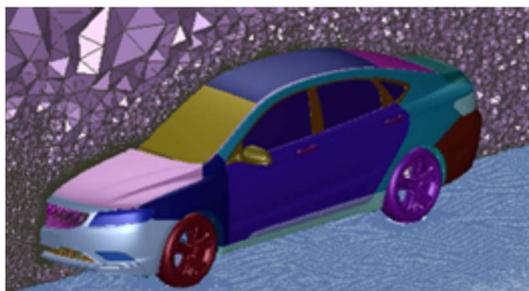


图 7 外造型面网格

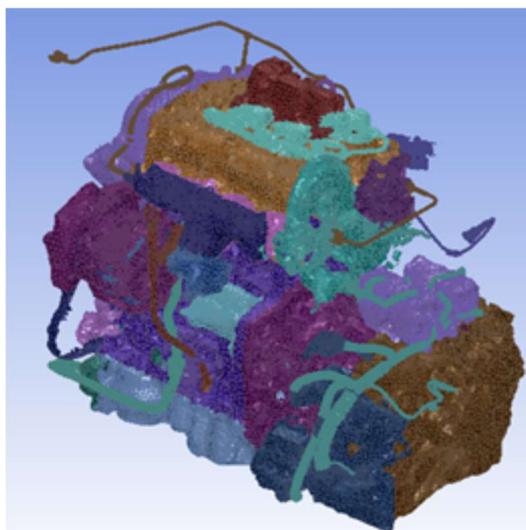


图 8 发动机舱网格

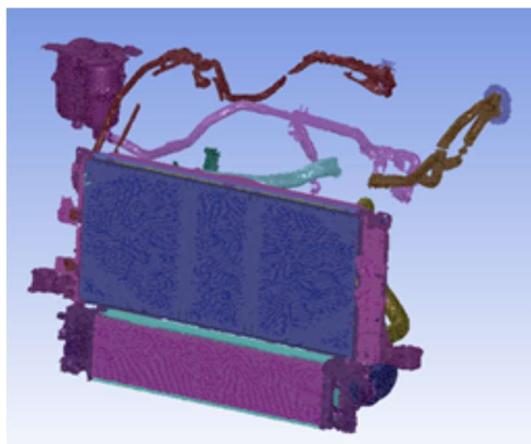


图9 冷却模块

主流体域空间体网格类型为四面体网格和边界层，单独划分换热器网格和风扇域网格以及隔热罩固体网格，组合脚本自动化生成的流体域网格，体网格总数约 6000 万。体网格截面如下图所示：

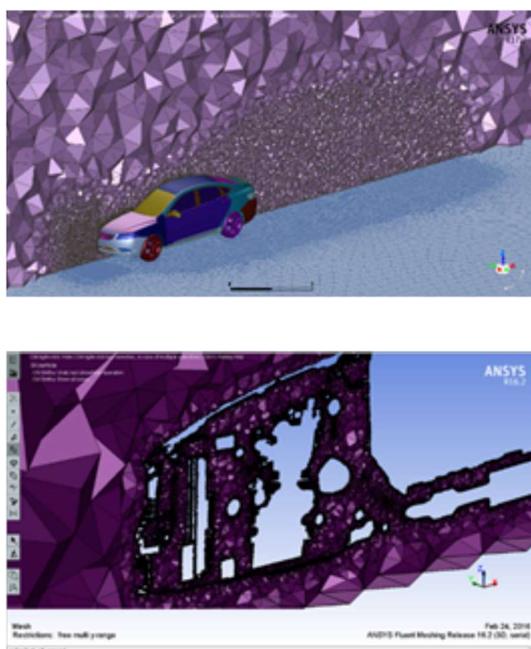


图10 体网格截面图

### 3.3 分析设定

计算工况为低速爬坡，车速 50km/h，环境温度 38℃。空滤吸气量为 457.78kg/h，风扇转速为 2650rpm。换热器芯体定义多孔介质模型，发动机和排气系统设定温度热源，并考虑辐射影响。散热器采用 Fluent 的换热器模型定义。

### 3.3.1 换热器模型

换热器模型用于预测发动机舱环境中换热器组件的冷却效果，如预测辅助流体入口温度或者整体发动机放热量。ANSYS Fluent 中有两种可用的换热器模型：Macro 模型和 Dual-Cell 模型。

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。Dual-Cell 模型需要创建重叠单元，一个代表主流体一个代表辅助流体，可以预测辅助流体的流动和特性。[5]

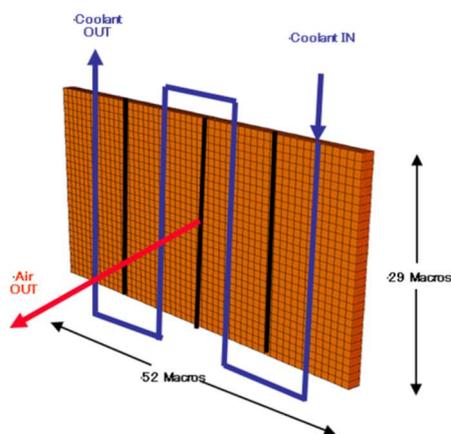


图 11 换热器模型示意图

### 3.3.2 大规模并行计算

在并行计算规模不断增大的背景下，ANSYS Fluent 软件在 HPC 并行能力上持续发展，求解器优化，计算更快，并行效率更高。在硬件不变的条件下，软件并行效率的提升帮助我们在处理大规模计算时摆脱硬件的限制。Fluent 目前是超级计算多核并行的世界纪录保持者。[6] ANSYS 具有 GPU 并行的功能，对于计算量较大的模型还可以选择性得使用分解的 CPU 区域和 GPU 区域。

## 4 仿真结果分析

### 4.1 流场结果分析

流场分析可以得到发动机舱内的三维详细流场特点并分析其潜在影响。我可以输出的结果包含前端冷却模块(冷凝器、散热器、中冷器和风扇)的计算风量、机舱内关键部件周边的流场状况。

统计格栅的进风量，计算通过冷却模块的风量占格栅进风量的比重，可以辅助分析出冷却模块的冷却效果。例如可以通过增加导风板，调整冷却模块局部布局等方式提高进风量，从而提升冷却能力。

以下是 Y 向截面的速度分布：

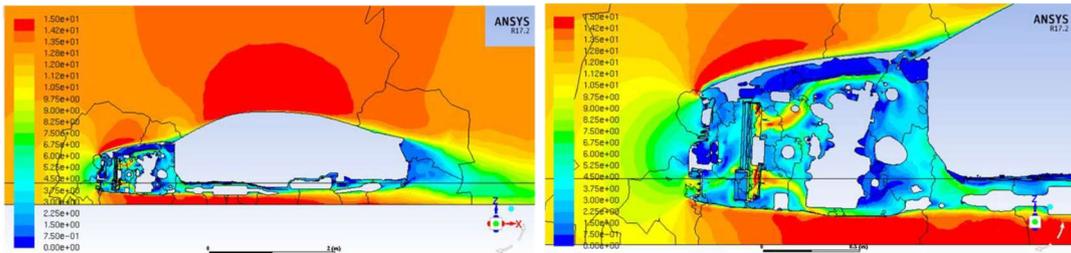


图 12 速度云图

发动机后方的排气系统属于高温部件，排气附近的风速较小会导致局部温度过高，因此可以调整发动机装饰罩等部件的位置及形状，增大发动机后方的空气速度，有助于降低热害风险。通过分析发动机舱内重点关注部件附近的流场分布，可以辅助发动机舱内的优化布局，再结合热态计算的结果，可更直观更准确的分析温度结果，预测潜在热害。

#### 4.2 热态结果分析

以下分别是动力总成系统的温度分布和 Y 向截面的速度分布：

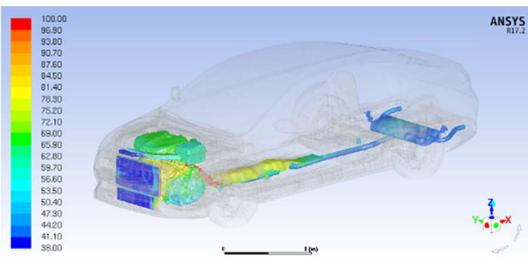


图 13 动力总成温度分布

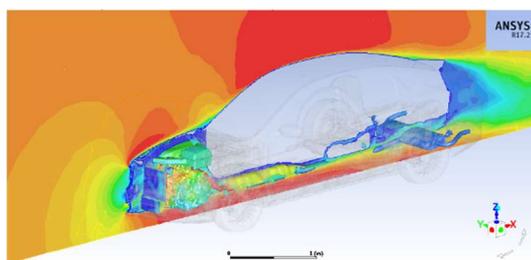


图 14 Y 向截面速度分布和部件表面温度分布云图

下图是散热器迎风面和背风面的温度分布：

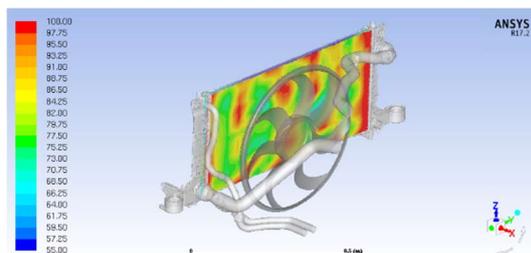
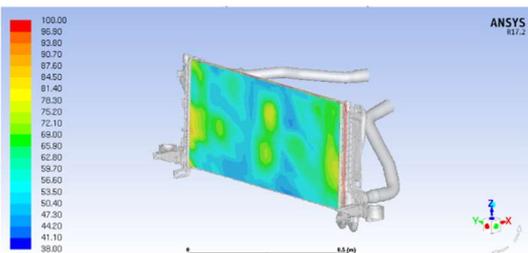


图 15 散热器迎面温度分布

图 16 散热器背面温度分布

以下是散热器通道分布，以及模拟出的水侧发热量分布：

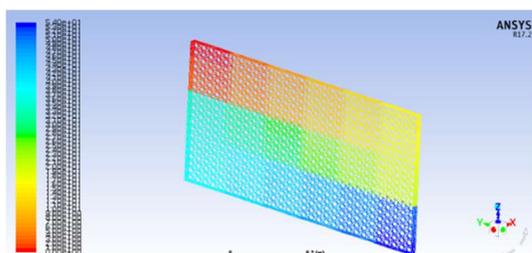


图 17 散热器通道

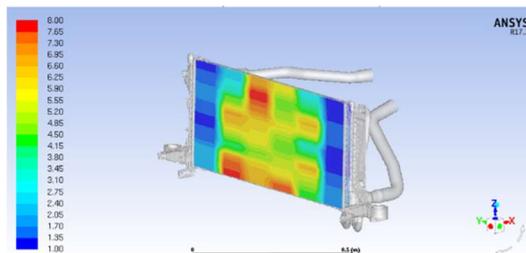


图 18 水侧发热量分布（单位 W）

## 5 结论及展望

发动机舱热管理仿真可以分析机舱内的流场分布,如果结合一维软件比如 GT 还可以进行一维三维耦合,计算换热器的匹配。温度场分析可以预测关注部件的潜在热害,为机舱的优化提供仿真依据。

自动化网格流程大幅缩短了仿真前处理工作的周期,对于提升仿真工作效率,缩短研发周期起到了重要的推进作用。本文的模型中包含了仅隔热罩的固体模型,我们后期会尝试增加更多的固体模型,开展流固耦合传热计算。后续我们会继续拓展自动化工作的流程,尝试将模型设定也通过脚本驱动来自动完成,进一步完善自动化建模流程。

基于脚本化的网格流程,ANSYS 已经开发了 ACT 模块,它是基于最佳实践的快速网格生成模板,导入几何文件再输入部分管理数据,可对复杂的几何模型进行包面和体网格生成,支持发动机舱、气动外流场、舱室冷却的网格生成。ACT 模块可以最小化人工干预设置,伴随生成过程自动生成 Excel 表格以进行输入数据的重用。我们在积累自动网格流程经验的基础上,进一步尝试 ACT 模块的应用。

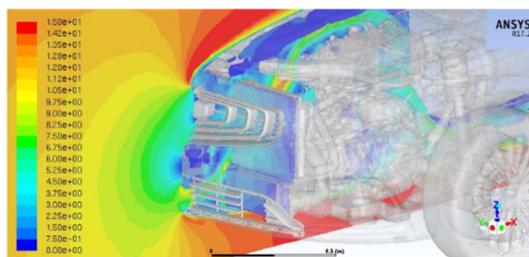


图 19 外造型面及速度云图

参考文献 (References):

- [1] Torbjörn Virdung, Peyman Davoudabadi, Total Vehicle Simulation of the Volvo S80 with a New Common Model Approach Automotive Simulation World Congress 2015
- [2] ANSYS. Automated Meshing using Scripts
- [3] 王福军. 计算流体力学分析-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)
- [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
- [6] IDAJ-China. 高级整车级前处理建模/高性能计算解决方案  
IDAJ-China. Advanced Vehicle Level Preprocessing Modeling/High Performance Computing Solution