

STAR-CD 风扇子程序在汽车冷却系统设计上的应用

Application of STAR-CD Fan Subroutine in the Vehicle Cooling System Design

张辉香 付 杰

(奇瑞汽车股份有限公司汽车工程研究院 CAE 部 芜湖 241009)

摘 要: 在如今的数字化设计时代,前期匹配整车冷却系统、预测性能的意义重大。本文基于 STAR-CD 软件,应用风扇子程序,实现了对某款缺少风扇详细数模的轿车发动机舱冷却流场的仿真分析。结果表明,通过加载不同的 P-Q 曲线及调整冷却系统的结构设计能够匹配出合适的冷却风扇,并能有效地优化冷却系统的设计,提高冷却性能。

关键词: 冷却系统、STAR-CD、风扇子程序、匹配设计

Abstract: Matching the design of cooling system and predicting performance of the vehicle in early stage are significantly important in modern time of digital design. This paper describes the cooling flow field analysis for under-hood based on STAR-CD. The cooling system airflow is simulated by using fan subroutine without the detailed model. It is shown that the cooling fan can be properly designed by using P-Q curve and adjusting the design of cooling system. This approach can also efficiently optimize the design of cooling system and improve the cooling performance.

Keywords: Cooling system, STAR-CD, Fan subroutine, Matching design

1 引言

随着顾客对高品质、高性能汽车的不断追求,国内各汽车厂商的发动机功率和性能不断提升,整车的负荷也随之增加,对轿车尤其是紧凑型轿车的冷却性能的要求也越来越高。冷却系统主要依靠冷空气通过散热器带走热量而实现冷却,然而由于发动机舱内空间狭小,布置紧凑,空气流通不畅,散热较为困难,冷却性能不良已经成为影响整车性能的重要问题之一^[1]。

在传统的汽车设计中,大多依靠试验的手段来验证解决冷却问题,这种方式不仅试验费用高昂、周期较长,而且设计更改困难。对于需要多次试验进行优化设计时,由于样车等资源限制,试验实施起来是非常困难的。随着 CFD 技术的发展,CFD 在前期预测和优化设计方面发挥越来越重要的作用,其可以在较短的时间内完成多种方案的优化分析,已经成为现代汽车设计中的重要手段。与试验相比,CFD 分析具有预先研究、不受条件限制、信息丰富、成本低和周期短等优点。然而在设计的前期,冷却模块尤其是冷却风扇不一定都有具体的三维数模,这给前期冷却系统的匹配和冷却性能的预测带来了很大的困难。此时,利用风扇子程序来替代实际数模进行模拟计算就显得十分必要了。STAR-CD 风扇子程序对风扇数模的要求简单,只需要风扇域的基本尺寸以及风扇的 P-Q 曲线即可。本文即运

用 STAR-CD 软件及其风扇子程序对缺少风扇数模的前期整车设计模型进行模拟分析, 分析结果能够帮助我们进行风扇选型以及优化前端冷却模块, 提高整车冷却性能。

2 基本理论

2.1 风扇子程序原理

STAR-CD 风扇子程序使用 Fortran 语言编写, 其基本原理可以概括如下: 首先给风扇域一个动力源项, 也就是给定风扇一个初始速度 (这个初始速度可根据风扇在舱内的运行环境, 按照实际工程经验给出。如果给定的初始速度越接近此模型的实际值, 则越有利于计算收敛。), 然后根据速度计算风扇的前后压差 (也就是压降), 再将这个速度和压降与风扇 P-Q 曲线对比, 看这个点是否落在 P-Q 曲线上。如果落在曲线上, 则计算收敛, 如果落在曲线以外, 则返回继续迭代, 直至找到那个落在 P-Q 曲线上的平衡点。

2.2 控制方程

基于所研究汽车运动的实际情况, 可以认为汽车流场为三维、定常、等温、不可压粘性湍流流动, 其控制方程为不可压雷诺平均 N-S 方程^[2]:

$$\frac{\partial \rho \psi}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V} \psi - \Gamma_{\psi} \cdot \text{grad} \psi) = q_{\psi} \quad (2.2.1)$$

对于连续方程:

$$\psi = 1, \quad \Gamma_{\psi} = 0, \quad q_{\psi} = 0 \quad (2.2.2)$$

对于 x 方向的动量方程:

$$\psi = u, \quad \Gamma_{\psi} = \mu_{\text{eff}}, \quad q_{\psi} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial \vec{V}}{\partial x}) \quad (2.2.3)$$

y、z 方向具有类似的表示。

除了求解 N-S 方程的连续方程和动量方程之外, 还需求解附加的两个反映湍流运动尺度的方程, 即湍动能方程及湍动能耗散率方程。

求解标准 $k-\varepsilon$ 模型具有如下形式:

湍动能方程:

$$\psi = k, \quad \Gamma_{\psi} = \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k}, \quad q_{\psi} = G_k - \rho \varepsilon \quad (2.2.4)$$

湍流耗散率方程:

$$\psi = \varepsilon, \quad \Gamma_{\psi} = \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_{\varepsilon}}, \quad q_{\psi} = \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \varepsilon) \quad (2.2.5)$$

其中:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_l + \mu_t = \mu_l + \rho C_{\mu} k^2 / \varepsilon \quad (2.2.6)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \quad (2.2.7)$$

各常数为

$$(C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon) = (1.44, 1.92, 0.09, 1.0, 1.22)$$

3 分析模型

3.1 模型建立

整个冷却分析模型包括车身外部、发动机舱内部件、底盘系统、动力总成、进气格栅、冷却系统等影响前舱空气流动的主要部件，其中在进气格栅、冷却系统、水箱横纵梁等位置进行了细化处理，最终生成了约 850 万流体单元。模型如图 1 所示。

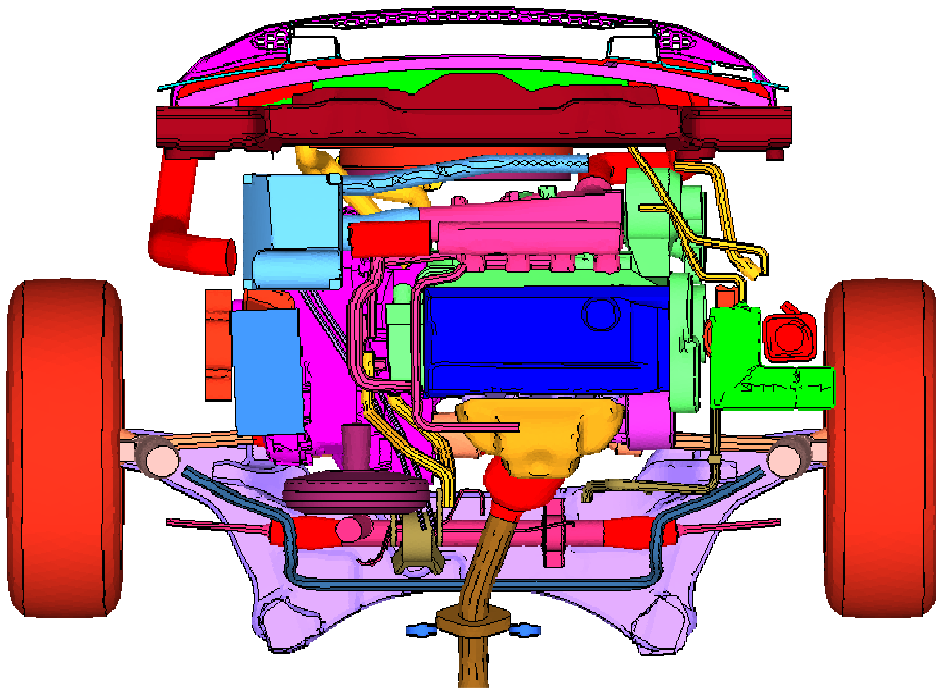


图 1 冷却分析中的发动机舱内模型

3.2 风扇模型处理

风扇子程序对模型要求不高，只需要大致的轮廓尺寸即可，即风扇的大致直径和厚度，但风扇域的网格却要经过一定的处理。风扇域网格必须使用六面体网格，且不能是 0 型六面体网格，因为此子程序在计算 0 型网格的通量时会发生方向错乱。风扇域的六面体网格可以在 ICEM-CFD 里做出来，也可以在 STAR-CD 里基于四边形面网格直接拉伸。

整个风扇域需要分解成三个域，即入口域、旋转域和出口域。入口域和出口域至少需要有一层六面体网格，主要用于计算速度和压力。在整个分析模型中，风扇域是六面体网格，其余部分为

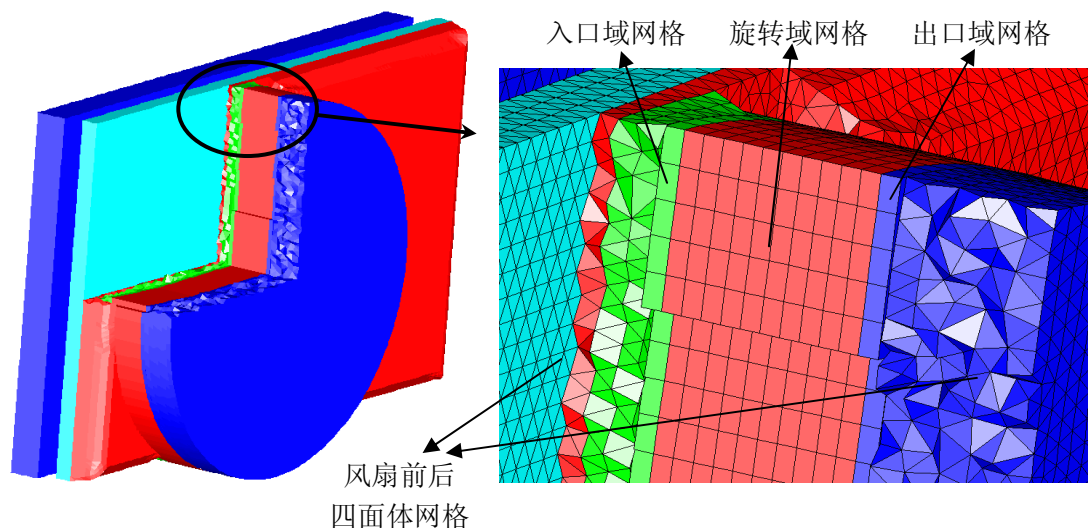


图 2 风扇模型网格处理

四面体网格，因此风扇入口面和出口面的网格需要与外围四面体网格做 couple 处理，以保证体网格的连通性。做好后的风扇六面体网格及前后相接的四面体网格模型如图 2 所示。

3.3 数学模型

汽车流场空气流动是低马赫、高雷诺数、三维不可压缩粘性流动，因此采用标准高雷诺数 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型建立数学模型。此湍流模型包含的非线性构成关系能够较好地处理流场中湍流的各向异性等困难问题。流动控制方程用有限体积法进行离散，用中心差分法求解^[3]。方程的对流项采用中心差分格式与迎风差分格式的混合格式，二阶中心差分格式处理扩散项，以提高计算精度。近壁面采用非平衡壁面函数处理。

3.4 边界条件

计算工况为 40km/h、坡度 12%，冷凝器和散热器由于结构复杂均采用多孔介质模型模拟，其主要参数粘性阻抗和惯性阻抗可由试验数据拟合获得^[4]。风扇采用风扇子程序模拟^[5]。

4 风扇子程序编译

整个风扇子程序分成两大部分，即用于加载动力源项的“sormom”和用于计算及后处理的“posdat”。在“sormom”程序段里的主要工作就是定义风扇旋转域体网格，然后赋上初始速度参考值。这个初始值可根据给定的风扇 P-Q 曲线及风扇的实际运行环境进行调整。根据实际的模型参数调整好后，接下来就可以在 STAR-CD 的源项里启动该子程序。

“posdat”是整个风扇子程序的核心，在这个程序里有一些重要的参数需要设定。需要单独定义的有风扇出口域、旋转域和出口域体网格号、空气密度、风扇出口面积、通量积分方向以及风扇 P-Q 曲线拟合公式等。dppq 方程是

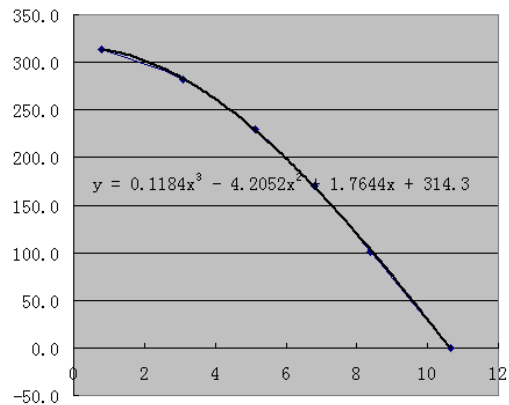


图 3 dppq 方程二次多项式拟合

风扇子程序的关键部分之一，其方程拟合需要风扇 P-Q 曲线以及风扇出口面积等数据。横坐标为速度 (m/s)，纵坐标为压降 (Pa)。方程拟合方式为二次、3 阶多项式拟合。如图 3 所示。

5 计算结果

5.1 原风扇及布置形式分析结果

对原车稳态冷却流场进行详细分析，结果显示：从进气格栅流入的冷却空气有相当大的一部分从发动机舱盖与水箱横梁之间、水箱横梁与散热器之间等的各处缝隙及侧面流入发动机后舱。冷却系统的布置形式不佳和风扇能力不足导致各热交换器的通风量很低，无法满足设计目标值。如图 4 所示。

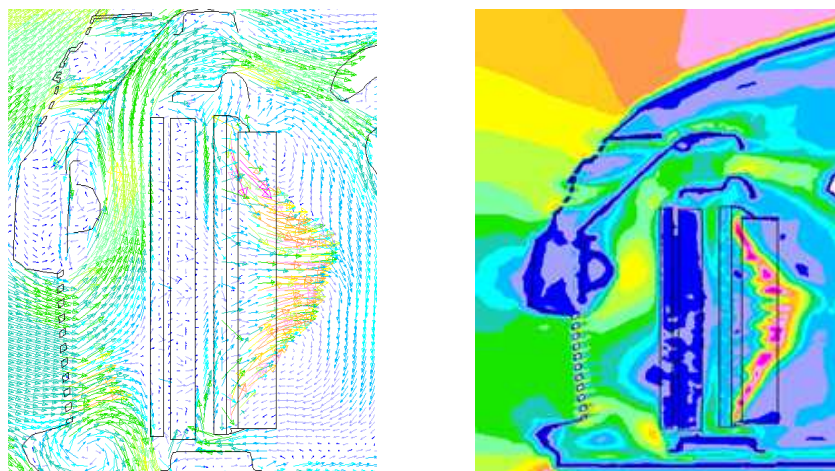


图 4 发动机舱冷却系统速度图

5.2 新风扇及布置优化后分析结果

此冷却系统包括中冷器、冷凝器、散热器和冷却风扇等。由于舱内拥挤，布置空间有限，前期采用了热交换器同轴布置形式，造成热交换器的通风阻力很大。经过首轮冷却性能分析后发现问题相当严重。

为了增加冷却系统的进风量，提高冷却性能，更换了能力更强的风扇，并且冷却系统的布置形式也进行了优化（见图 5）。

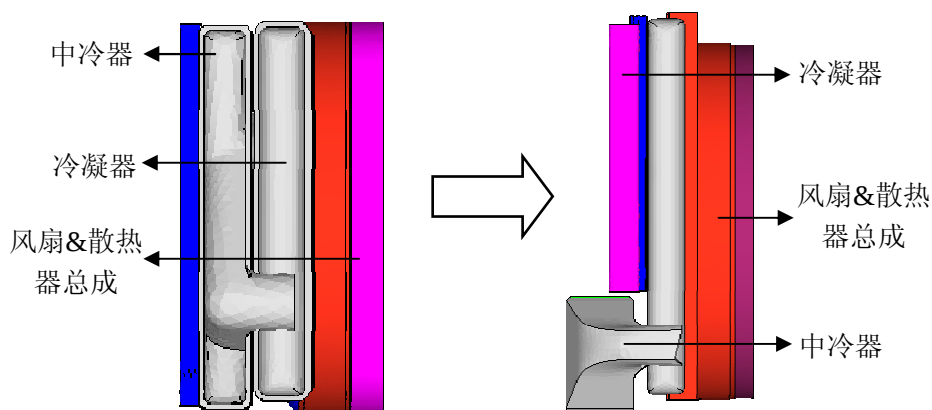


图 5 冷却模块布置更改示意图

如图 6 所示, 计算结果显示新风扇的抽风能力和优化后的布置形式效果非常好, 性能明显优于之前的设计方式。各热交换器的迎风风速有明显提高, 整个冷却系统的通风量显著增加, 通风能力得到较大幅度的增强。

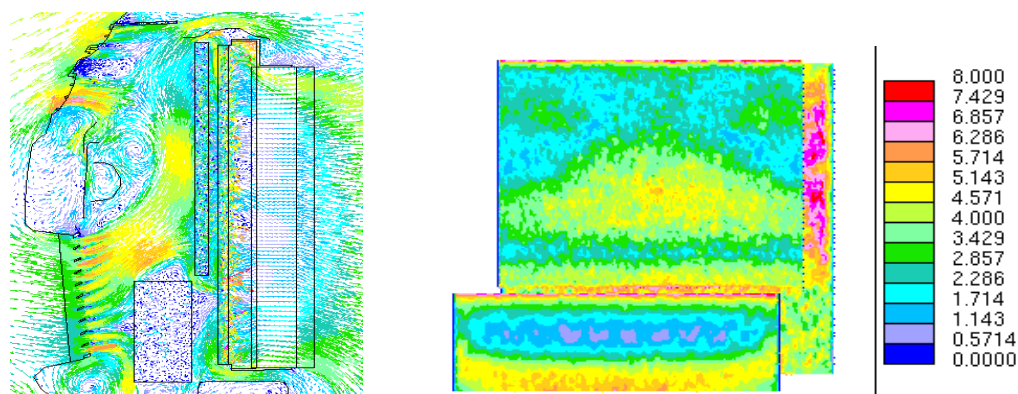


图 6 优化后发动机舱流速及热交换器迎风风

表 1 各关键部件进气量对比 (m^3/s)

部件 方案	上格栅	下格栅	中冷器	冷凝器	散热器	风扇
原风扇及布置形式	0.340	0.963	0.092	0.152	0.331	0.334
更改后	0.437	1.085	0.102	0.346	0.529	0.525

由表 1 可知, 新风扇及优化后的布置形式不仅使整个冷却进气量有较大幅度的提高, 而且之前进气量未能满足设计要求的冷凝器、散热器等的进气量都有了近一倍的提升, 效果显著。当然, 进气量也并非越多越好, 舱内进气量增大, 会使风阻系数升高。在满足设计目标值的前提下, 进气格栅进气量应该适当减小。

6 结论

- 1) STAR-CD 风扇子程序能够在设计前期且缺少风扇数模的情况下进行整车冷却性能分析。结果表明, 通过拟合输入不同性能的风扇 P-Q 曲线, 能够优选出合适型号的风扇, 能够对冷却系统的匹配设计提供有力支持。
- 2) 利用 CFD 技术, 能够在汽车设计的初期预测整车性能, 并且能够快速便捷地对不同方案进行优化分析, 从中选出最优的方案进行产品设计, 避免开发后期出现难以解决的问题, 从而加快开发速度, 节省开发费用。

7 参考文献

- [1] 汽车工程手册编辑委员会. 汽车工程手册设计篇[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001
- [2] 朱国林、王开春、郭应钧, 小轿车绕流场数值计算和分析[J]. 空气动力学学报, 1998
- [3] 王志, 汽车发动机进气道三维解析与优化[J]. 清华大学学报, 2004
- [4] WeiDing, Jack Williams and Dinakara Karanth. CFD Application in Automotive Front-End Design[J]. SAE 2006-01-0337, 2006
- [5] User Guide of Computational Fluid Dynamics Software STAR-CD version 3.2, 2004