

应用 STAR-CCM+进行风扇排气性能分析

李义林 余小东 贾宏涛

长安汽车股份有限公司汽车工程研究院 CAE 所

摘要：本文描述了应用 star CCM+对长安某混合动力汽车燃料电池的风扇及排气管道散热性能的分析过程，根据分析结果做出了优化方案，并且对优化方案进行了分析验证。本次分析采用了 moving reference frame 对风扇旋转区域进行模拟计算。

关键词：风扇 Moving Reference Frames STAR-CCM+ CFD 分析 多面体网格

Analysis of Exhausting Fan by star CCM+

Abstract : The performance of exhausting fan and pipe, which was used for the batteries of a Changan HEV vehicle, was analyzed. A modification was made and its effect was checked by a new round simulation. All the simulations were performed in star CCM+. The fan zone was modeled by using moving reference frame.

Key words : fan Moving Reference Frames star CCM+ CFD polyhedral

1 前言

燃料电池的散热性直接影响着混合动力汽车的电池的寿命及整车的可靠性，故在新车型开发时，电池的散热问题是重点关注的问题之一。而与燃料电池相连的风扇的排气性能，是散热性能的最重要指标。因为燃料电池系统布置空间较小，散热风扇叶片直径受限；而过高的风扇转速又会引起过大的气动噪声。所以，对电池散热风扇及其相连的排气管道的优化是最有效地解决电池散热问题的途径之一。

应用 CFD 分析可以在汽车设计开发前期对整车及零部件的相关性能进行预测，能有效地发现存在的风险，还可以根据 CFD 分析结果得到最优方案。大大减少后期的物理样件、样机制作和物理试验。从而提高了设计成功率，减小了开发费用并缩短了设计开发周期。因此 CFD 分析在汽车设计中具有十分重要的作用，在汽车开发中得到了广泛应用。

本文以长安某混合动力车型的电池散热性能分析为例，介绍了如何应用流体力学软件 star CCM+中的 Moving reference frame 模型对散热风扇及排气管道的排气性能进行分析，根据分析结果提出优化方案，并对优化方案进行了分析验证。

2 风扇旋转区域 CFD 计算原理

本次分析主要采用 MRF (moving reference frame) 模型对风扇旋转区域进行模拟计算。MRF 模型用于计算区域中 (通常是定常计算) 含有相对运动 (旋转) 的子区域, 比如风扇系统中叶片相对于风扇框架的转动, 马达转子相对定子的转动等都可以利用 MRF 模型进行模拟。

MRF 模型基本思路为: 建立一个与旋转系统一起运动的相对坐标系, 在相对坐标系上建立流体运动的控制方程, 通过相对坐标与绝对坐标之间的坐标变换, 便可以得到在绝对坐标系中流体运动的控制方程。

如下图所示, $\vec{\omega}$ 为旋转流体绕旋转轴的旋转速度, 右边的坐标系是一个旋转坐标系, 其旋转情况旋转区域相同。

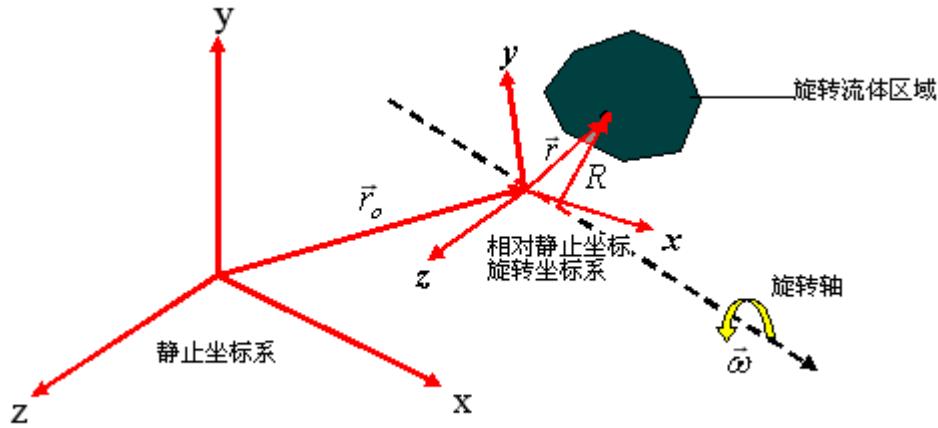


图 1 静止坐标与相对运动坐标

假设 \hat{a} 为旋转矢量单位, 则有:

$$\vec{\omega} = \omega \hat{a}$$

相对速度可以用绝对速度表示为:

$$\vec{v}_r = \vec{v} - \vec{u}_r$$

其中:

$$\vec{u}_r = \vec{\omega} \times \vec{r}$$

式中 \vec{v}_r 表示相对速度, \vec{v} 表示绝对速度, \vec{u}_r 表示旋转区域转动速度。

于是控制方程（以连续性、动量守恒方程为例）在相对坐标系的表达形式为：

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v}_r = 0$$

动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}_r) + \nabla \cdot (\rho \vec{v}_r \vec{v}_r) + \rho(2\vec{\omega} \times \vec{v}_r + \vec{\omega} \times \vec{\omega} \times \vec{r}) = -\nabla p + \nabla \vec{\tau}_r + \vec{F}$$

而在相对坐标系里的表达形式为：

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v}_r = 0$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{v} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}_r \vec{v}) + \rho(\vec{\omega} \times \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \vec{\tau} + \vec{F}$$

3 应用 star CCM+进行风扇排气性能分析

3.1 几何模型准备

如下图所示，红色的为排气管道，管道的右边接燃料电池散热口。故下图所示管道的右边为气流入口，气流通过安装在左边的风扇旋转向外排气。风扇的马达安装于出口位置。

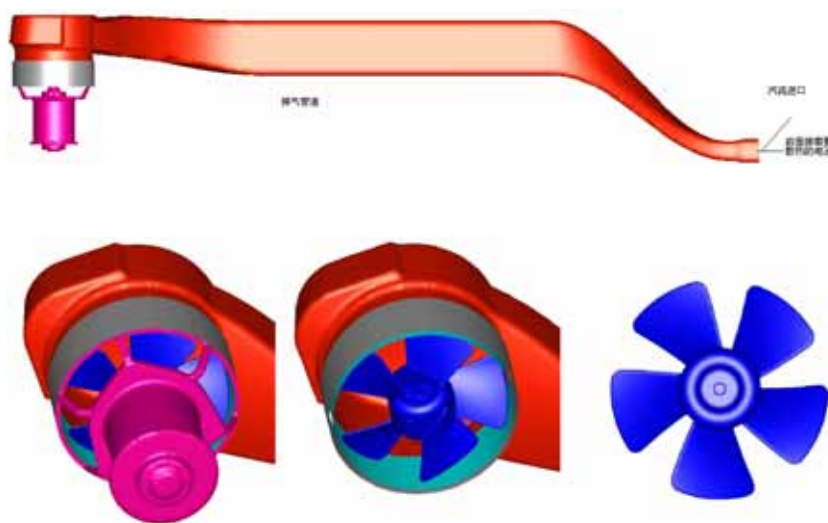


图 2 风扇及相连的排气管道模型

3.2 网格生成

利用 HYPERMESH 对 CAD 数据进行几何清理，并生成封闭的表面网格导入到 Star CCM+中。利用 Star CCM+进行表面网格重画(surface remesh)以提高表面网格的质量。因为整个风扇排气系统几何形状比较复杂，所以采用多面体体网格进行体网格划分。多面体网格具有良好的几何外形适应能力，能够较精确地反应格栅等细微区域的几何特征，利用 Star CCM+简明的用户界面，可以比较简单地从表面网格直接生成多面体。

生成的多面体网格如下所示：

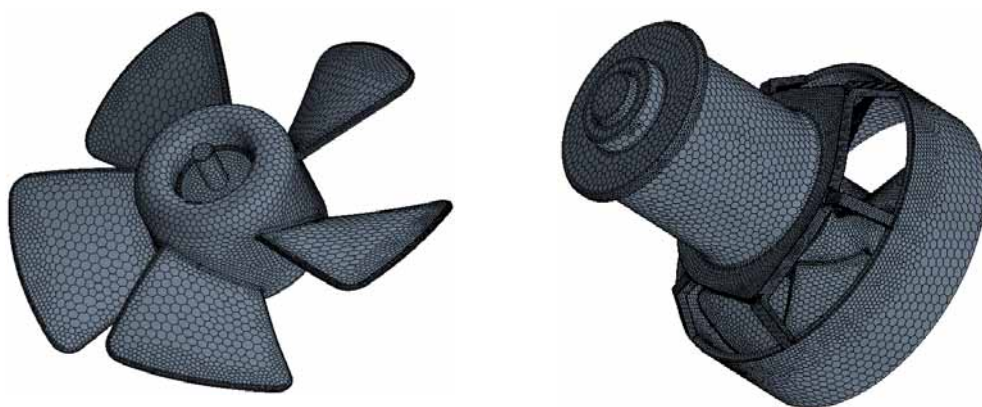


图 3 风扇及马达处多面体网格

3.3 计算区域

为准确模拟风扇出口处外部流场区域，于出口处建立一个圆柱形计算区域。如下图所示，圆柱直径为风扇直径的 8 倍，高为风扇直径的 5 倍。

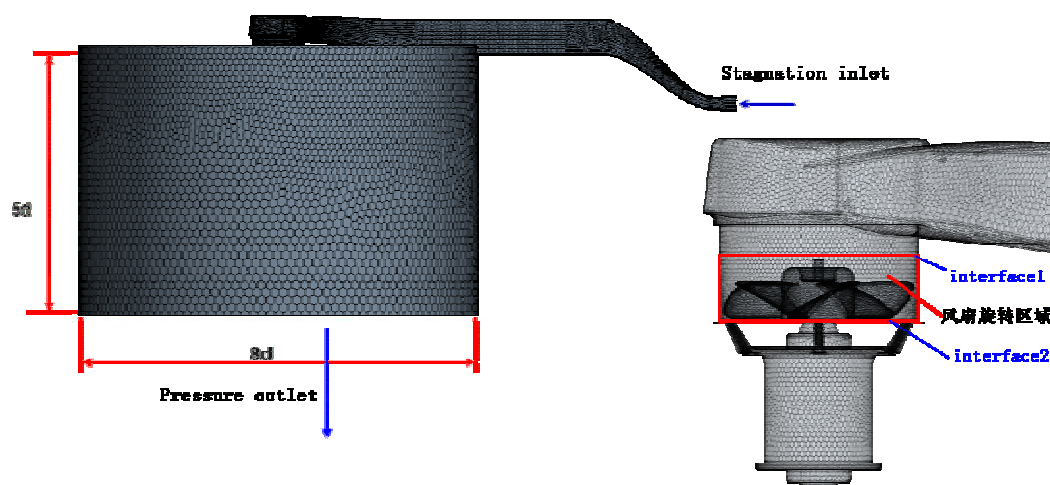


图 4 外部计算域及风扇旋转区域

这样，整个分析模型包括三个流体区域(Regions)，分别为排气管道区域、风扇旋转区域及外部计算区域。排气管道通过 interface1 与风扇旋转区域相连，而风扇旋转区域通过 interface2 与外部计算区域相连。三个区域总共多面体网格数量为 27.4 万。

3.4 计算设置及边界条件

选用 Moving reference frame 模型对风扇区域进行模拟，采用 RANS 算法中的 realizable k- ϵ 湍流模型，差分格式采用二阶迎风格式，壁面函数采用 high y+壁函数处理。

边界条件设置如下：

进口：Stagnation inlet；

出口：Pressure outlet；

风扇转速：4400 rpm。

3.5 结果分析

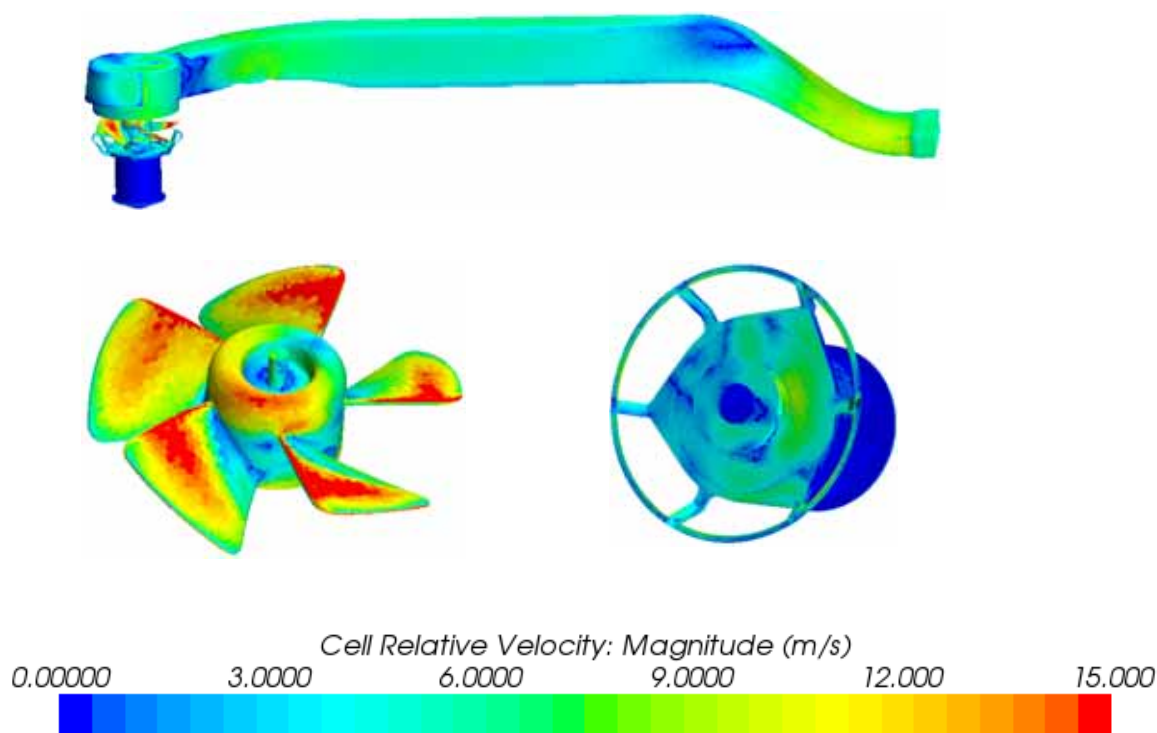


图 5 近壁速度分布云图

从速度分布云图可以看到，管道进口附近速度较大，这是由于管道进口段直径较小以及扭曲所造成的。

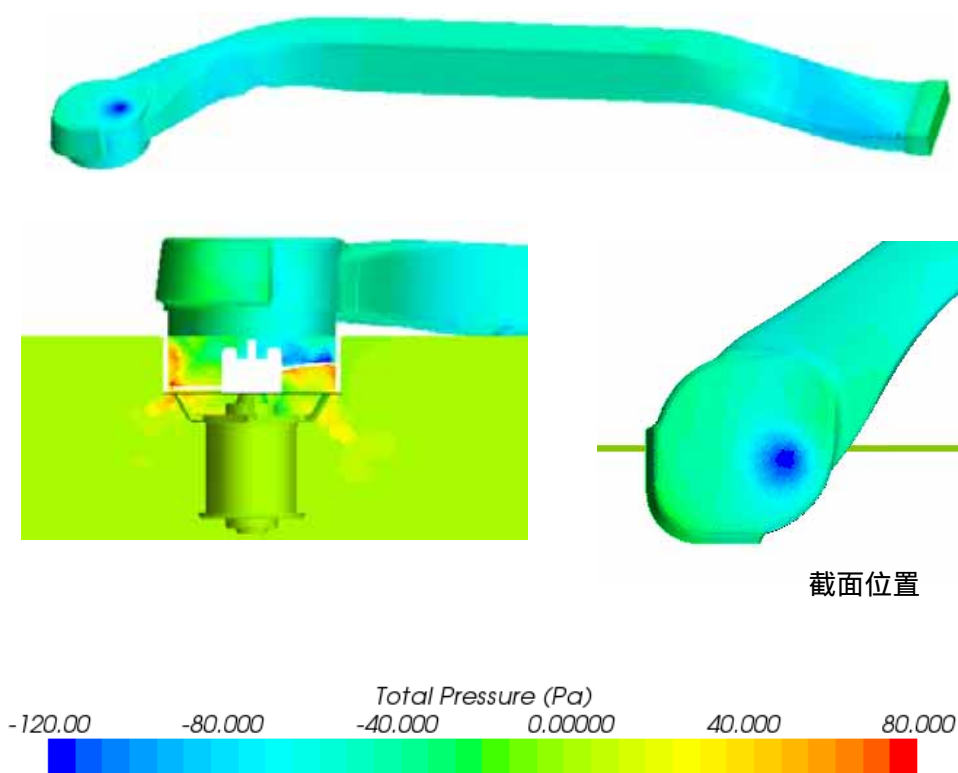


图 6 管道及风扇出口处总压分布

从上图可以看到，管道进口处压力损失较小。由于马达安装于出风扇气流出口方向，所以在出口处有较为明显的压力损失。管道的流量为 0.0217 kg/s 。

3.6 优化分析

从第一次分析结果可以看到，由于风扇出口受到马达的封堵，出口处压力损失较为明显。为在同样的转速下获得更高的流量，增大马达与风扇出口之间的距离，以减小风扇出口处的压力损失。几何形状修改如下：

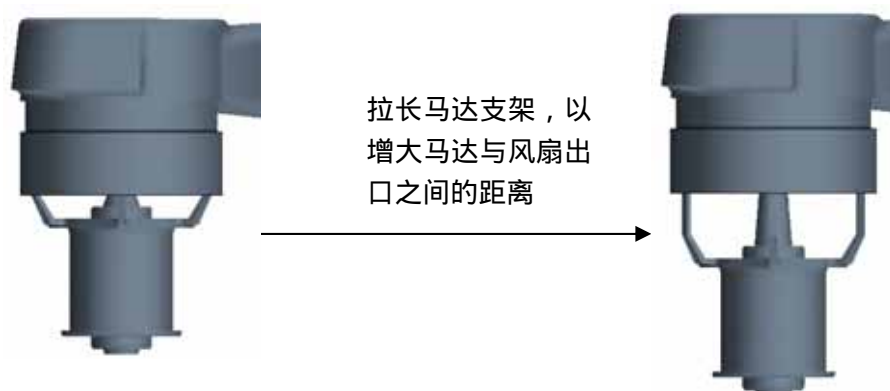


图 7 几何形状优化

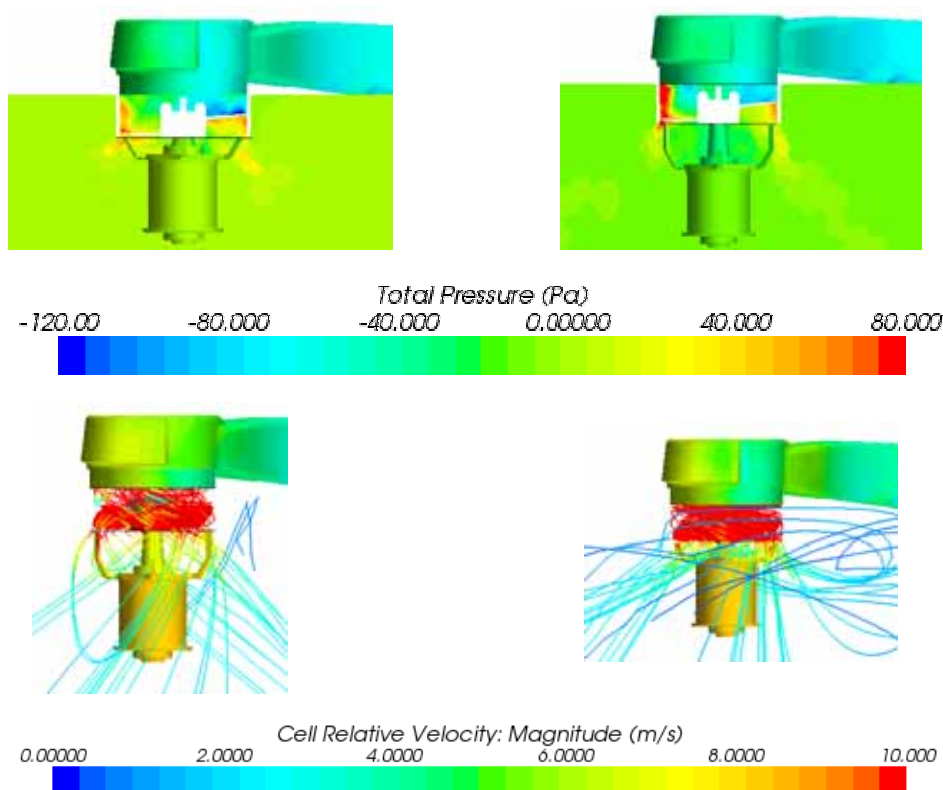


图9 风扇出口处总压、流线对比

通过风扇出口的总压对比可以看到，马达支架拉长后，因为受到马达阻挡而产生的总压损失变小；风扇出口流线也因为马达与风扇之间距离变远而变得较为收拢（马达阻挡影响变小）。

结论

本文应用 starCCM+对燃料电池散热风扇及排风管道进行了分析，根据模拟结果对原方案提出了初步优化建议：增大风扇和马达的距离，并对优化建议进行了模拟验证。经初步优化后，排气量比原方案增大了 2.25%，为提高散热性能提供了指导建议。

利用 Star CCM+良好的用户界面及其强大的网格划分、模拟计算功能，能简便、准确地对风扇系统进行网格划分及对风扇区域模拟计算。由于其基于工作流程的菜单构架，使用者能对自己工作进程一目了然，并且尽可能地减小了不必要的失误。当需要进行优化分析时，只需要将优化好的几何表面重新导入（代替原始几何模型），便可以一键重新生成体网格及以原始设置进行分析计算。这样大大缩短了工程优化分析的时间，从而提高了产品优化设计效率。

参考文献

- [1] 王福军. 计算流体动力学分析. 北京: 清华大学出版社, 2004.9
- [2] starCCM+用户帮助文档