

基于 STAR-CCM+的冷却风扇气动噪声分析

Cooling Fan Aerodynamic Noise Analysis Based on STAR-CCM+

訾昌陆 许志宝

江淮汽车股份有限公司技术中心

摘要: 运用三维计算流体力学 (CFD) 技术, 建立风扇在半消音室内的简化模型并划分网格。利用 STAR-CCM+ 流体软件, 对风扇模型进行稳态计算, 并根据获得的稳态流场数据利用软件中的 FW-H 噪声模型再对其进行瞬态分析, 得到风扇噪声监测点的声压级。最后对模拟数值和试验数据进行了对比, 结果表明使用 CFD 方法进行风扇气动噪声分析是完全可行的, 在整车开发初期可用于风扇噪声优化设计。

关键词: 汽车, STAR-CCM+, 冷却风扇, 气动噪声

Abstract: Application of computational fluid dynamics (CFD) technology, fan model in semi anechoic chamber is simplified and meshed. Using STAR-CCM+ software, this paper solve fan model of its steady state firstly, then according to the result of steady flow field data the transient analysis is calculated by the software of FW-H noise model, so we get the sound pressure level from fan noise monitoring points. At last the paper compares the numerical simulation with the test data, the results show that using the CFD method for fan aerodynamic noise analysis is feasible, and it can be used for fan noise optimization design at the initial stage of development for the vehicle development.

Key words: Vehicle, STAR-CCM+, Cooling fan, Aero-acoustic

1 引言

根据流体流动的物理量是否随时间变化, CFD 软件中的计算可以分为瞬态计算和稳态计算两大类。三维 CFD 软件 STAR-CCM+ 在整车开发空气动力学性能验证中得到较广泛的应用, 目前在整车外流场、发动机舱热管理、空调系统、进排气系统和冷却风扇等系统的速度场、压力场和气动噪声等气动性能等方面的研究较多, 而风扇的噪声分析大多集中在瞬态计算。风扇噪声是由于湍流、非定常涡流及流体中的固壁作用引起的噪声, 风扇扇叶暴露在高速气流中, 风扇周围会形成强大的压力脉动, 从而形成噪声。

本文应用 STAR-CCM+ 软件中, 先对其风扇模型进行稳态分析, 然后根据获得的稳态流场数据利用软件中的 FW-H 噪声模型再对其进行瞬态分析, 得到风扇噪声监测点的声压级。

2 计算模型

2.1 基本理论

理论上, 空气动力噪声可以直接求解可压缩流体的纳维-斯托克斯 (N-S) 方程得到。然而, 直接方法需要大量体积单元来计算包括声源和响应点在内的局部流体特性, 在实际中受到计算容量和时间的限制, 一般只适用于很小的流体区域和低频声学问题。

因此, 实际中常常采用间接方法, 把需要计算的区域分内区和外区两部分, 分两步计算空气动力噪声。

第一步, 计算内区的流体特性。在马赫数小 ($M < 3$) 的情况下, 内区仅是包围着结构一层相对较薄的区域, 其中包含声源。在这种情况下, 内区流体本身可近似认为不受声场的影响, 即可以忽略声场对流场的耦合, 因而可以使用不可压缩流体假设。这样一来, 流体计算被简化成求解非定常可压缩流体的纳维-斯多科 (NS) 方程。常用商业CFD软件都可以进行这方面的计算, 但流体压力计算精度受网格划分等因素影响很大, 流体压力计算精度直接影响下一步的声学计算。

第二步, 根据第一步计算出的结构表面非定常动力压力脉动, 使用莱特希尔 (Lighthill) 声学相似理论 (LAA) 或其同类理论 (L-C, FW-H等) 方程进行计算。Lighthill声学相似方程为:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \right) p' = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j}$$

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + (p - c^2 \rho) \delta_{ij} - \tau_{ij}$$

式中, $p' = p - p_0$ 为密度的变化; ρ_0 为周围环境密度; c 为声速; T_{ij} 是莱特希尔应力张量; u_i 是速度分量; p 是压力; τ_{ij} 是黏性应变; δ_{ij} 是脉冲出数。

上述方程的解是:

$$p(x, t) = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{T_{ij}(y, t - \frac{|x-y|}{c})}{4\pi|x-y|} d^3y$$

式中, V 为包含声源的流体体积; x 为响应点的位置矢量 (传声器位置); y 为声源的位置矢量; $t - \frac{|x-y|}{c}$ 为时间滞后。

如果把上面的解应用到流体中固体障碍物表面, 就得到Lighthill-Curle (L-C) 的解:

$$p(x, t) = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{T_{ij}(y, t - \frac{|x-y|}{c})}{4\pi|x-y|} d^3y - \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{P(y, t - \frac{|x-y|}{c})}{4\pi|x-y|} d^2y + \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{\rho u(y, t - \frac{|x-y|}{c}) n}{4\pi|x-y|} d^2y$$

式中, 第一项代表四极子声源; 第三项代表双极子声源; 第三项代表单级子声源。

实际计算中, 常常根据具体问题作进一步的简化。例如考虑在马赫数小 ($M < 3$) 的情况下, 四极子声源的影响小, 可以忽略不计, 同时只考虑“形状-结构透射”噪声情况, 及单极子声源影响很小, 可以忽略不计, 那么双极子声源就成为主导声源, 其在远场的声压就可以近似表示为:

$$p(x, t) = \frac{1}{4\pi} \int_V \frac{n, r}{r^2} \frac{\partial P_j}{\partial t} ds$$

2.2 计算模型

为了使模拟计算情况与测试时的实际情况尽可能的一致，建立的几何模型有详细的护风罩、风扇模型，并且计算域和半消音室几何尺寸一致。计算域是以风扇中心为坐标原点，风扇旋转轴为X轴，风扇下游方向为X轴正方向，并建立了十个噪声监测点，建立好的风扇计算模型如图1所示。

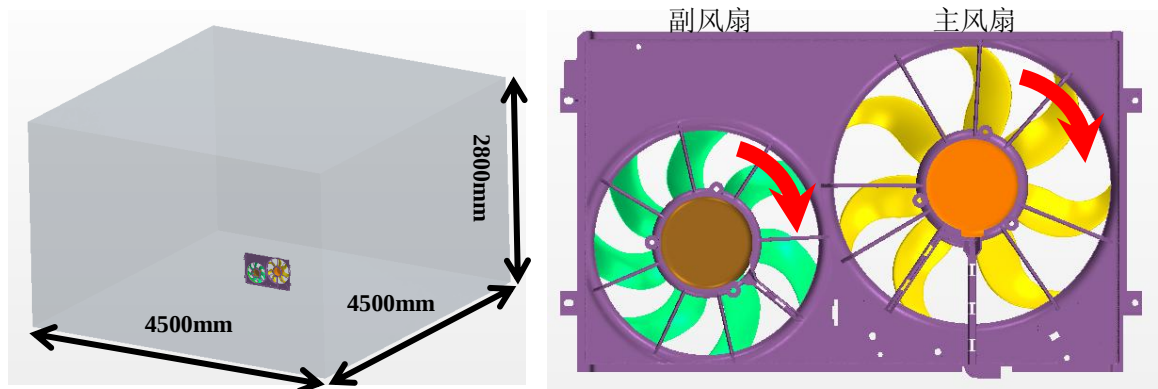


图1 计算域和风扇模型

本次计算模型中，有主、副风扇两个风扇模型，模型组成关系和旋转风向如图1所示。

风扇噪声模拟分析噪声监测点的设置尤为重要，由于本次分析结果最后和试验时间进行对比，因此噪声监测点坐标须与试验监测点坐标一致，另外为了获得更多点的噪声值，本次分析中还在风扇顶部和中心也建立监测点。监测点建立位置如图2所示。

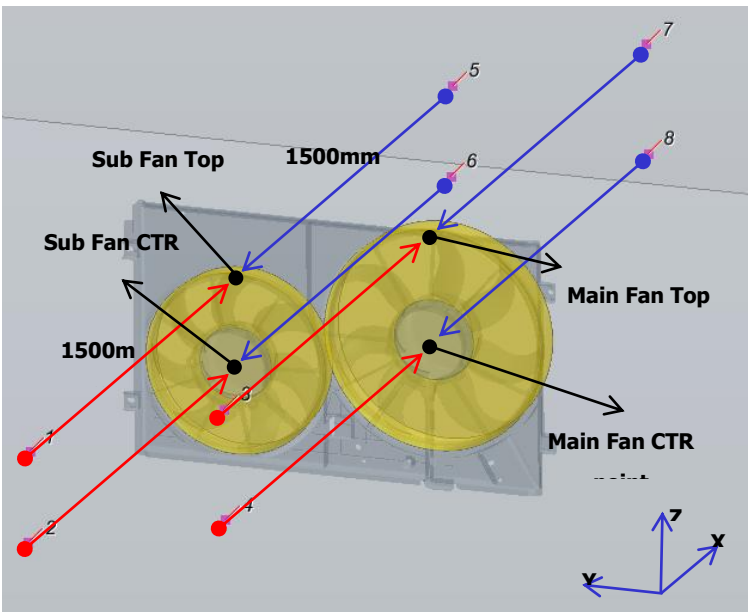


图2 风扇噪声监测点示意图

2.3 边界条件

使用多面体网格，网格数约695万，计算域四周均设置为壁面边界，计算采用 RNG $\kappa-\epsilon$ 湍流模型，Ffowcs Williams-Hawkings unsteady声学模型，SIMPLE算法和标准壁面函数，且各离散对流项均采用二阶迎风格式。主风扇转速为：2500rpm，副风扇转速为：3100rpm，均为额定转速，计算物理时间为0.5秒。

3 计算结果及分析

经过近2000步的稳态计算和50000步的瞬态计算，得到了计算域的速度场、压力场和监测点声压级等相关结果。

图3是切片截面示意图，其中切片A-A为副风扇轴心切片截面，B-B为主风扇轴心切片截面。如不作特别说明，下文所有图片切片截面均如图3所示：

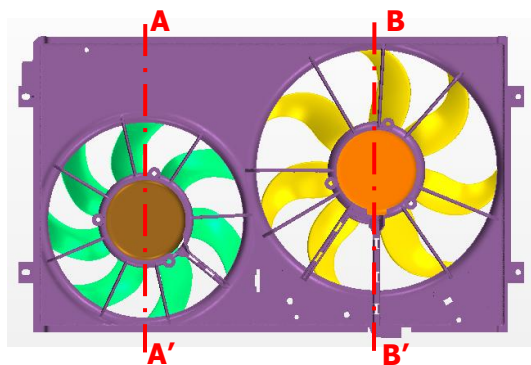


图 3 切片截面示意图

3.1 速度分布场

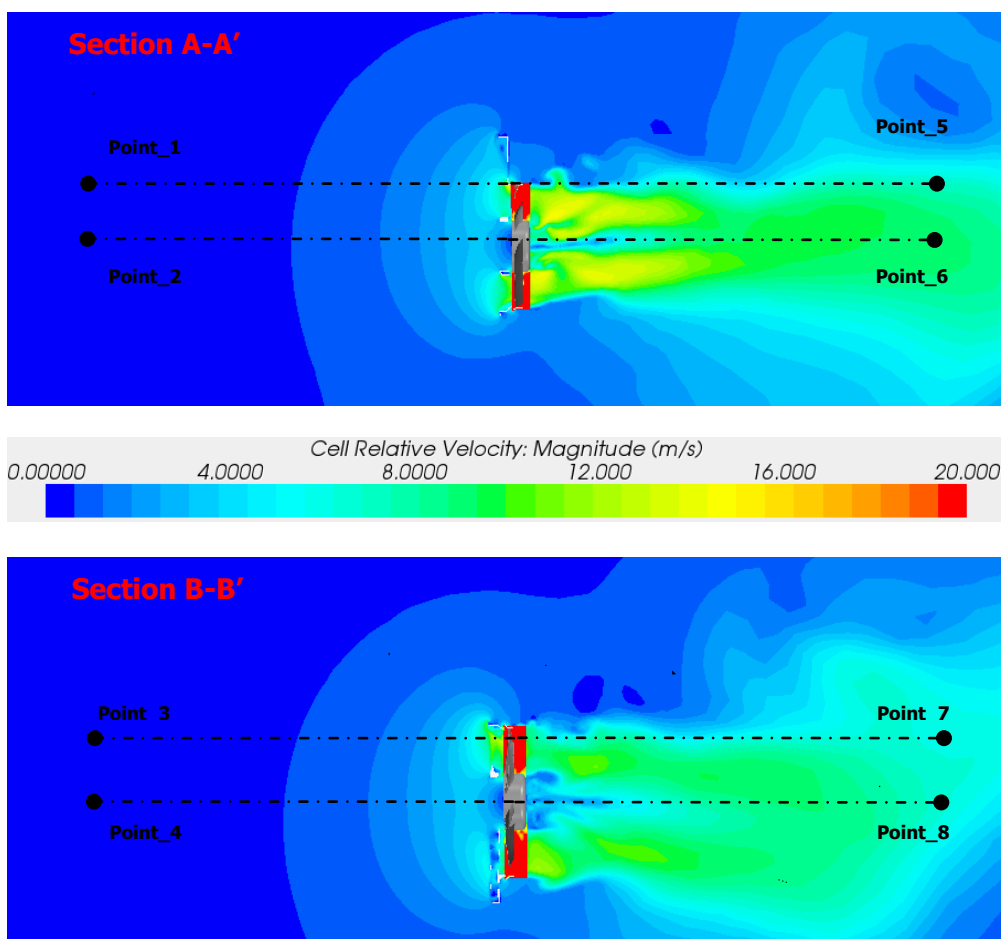


图 4 切片速度分布图

从图4可知，副风扇由于转速较高，风扇后区速度比主风扇高，且速度变化比较剧烈。

3.2 压力分布场

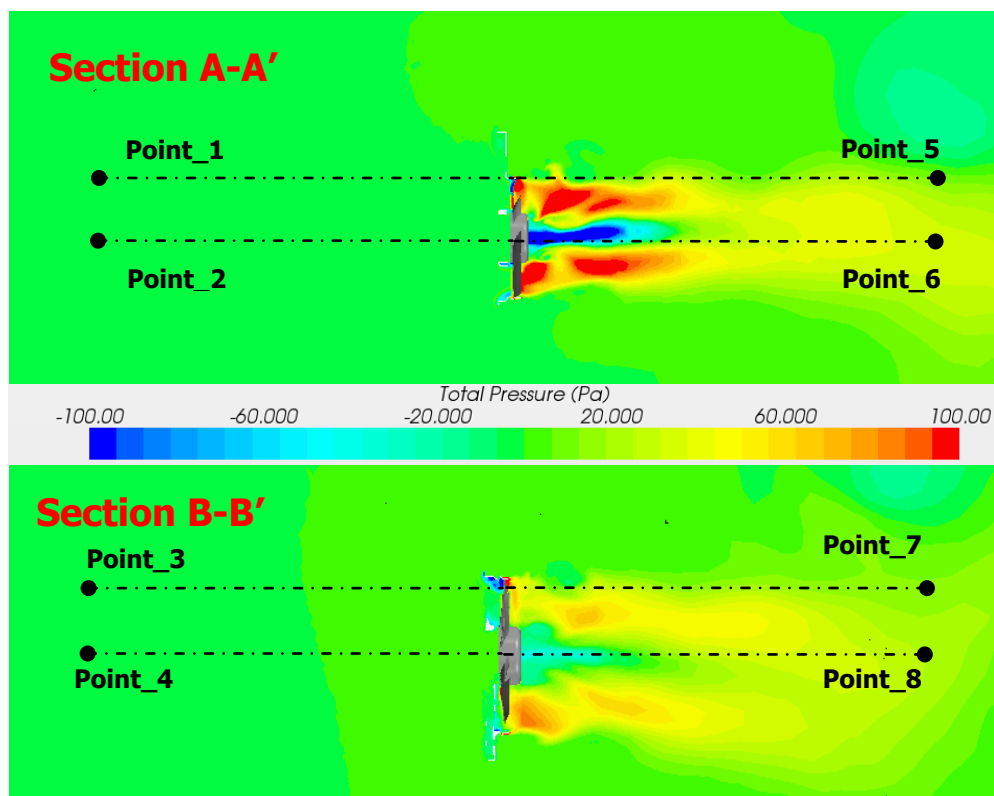


图 5 切片压力分布图

从图5可知，副风扇由于转速较高，风扇后区压力比主风扇高，压力变化比较剧烈，且负压区比较大；而主风扇中心截面压力变化比较平缓，负压区较小。

3.3 监测点声压级

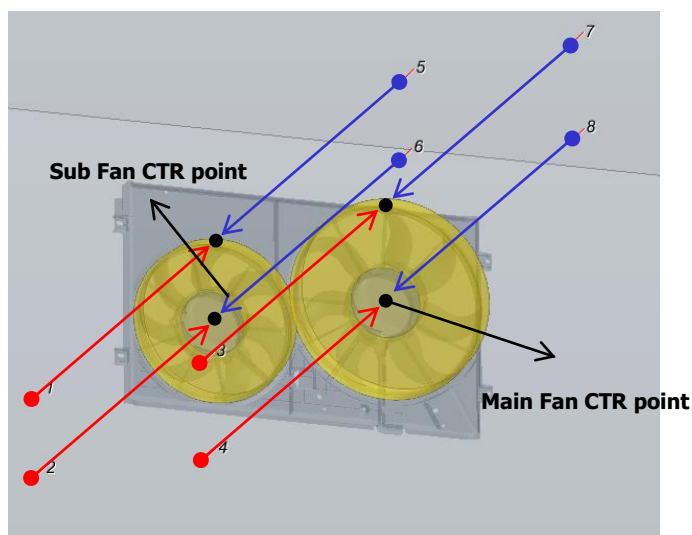


图 6 监测点示意图

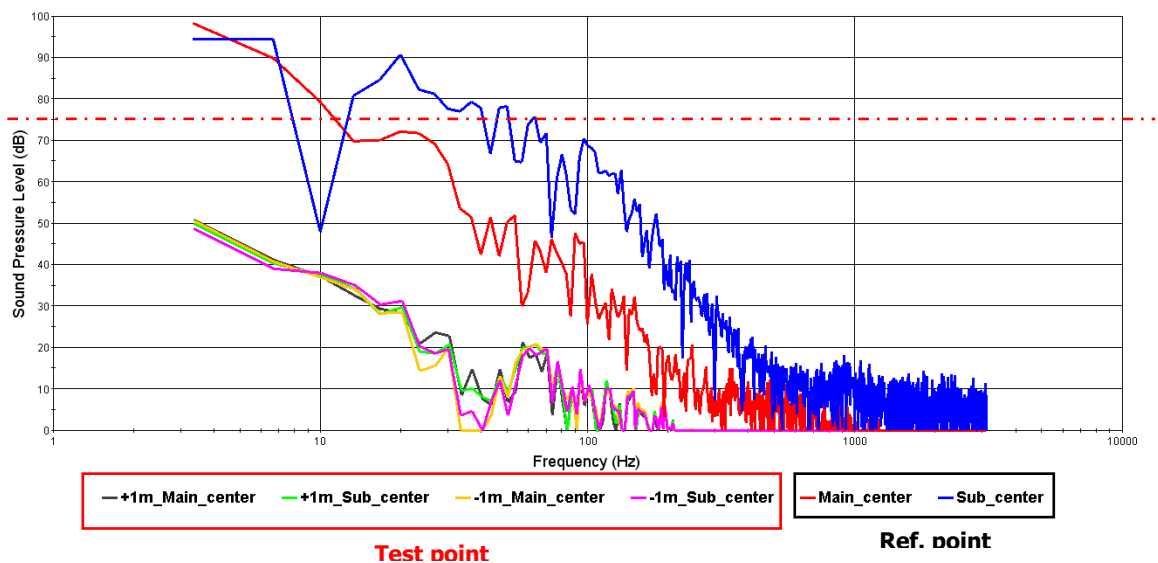


图 7 监测点 2、4、6、8 和风扇中心声压级曲线

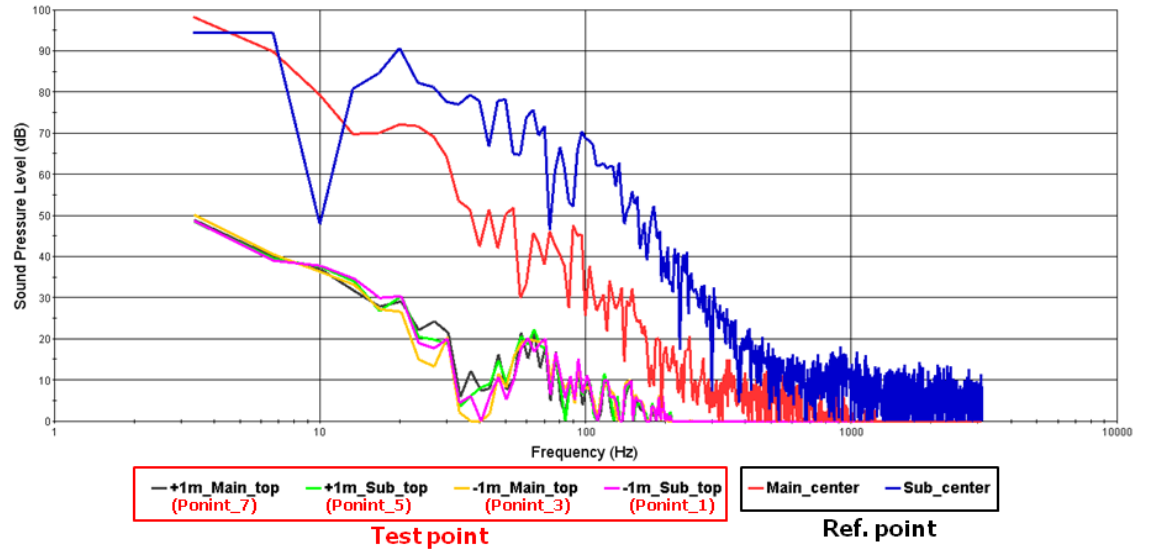


图 8 监测点 1、3、5、7 和风扇中心声压级曲线

从图7和图8可以得出风扇中心声压级较高，远远高于其它监测点声压级，监测点1、3、5和7声压级基本相等，主要是四个点同在X轴上相同坐标位置，且四个点位置相差很近。

3.4 风扇噪声试验测试值

表 1 PWM 冷却风扇各占空比的性能

PWM 冷却风扇各占空比的性能				
序号	占空比	主风扇转速	副风扇转速	噪音（dB）
1	20%	1009	1327	47.4
2	50%	1662	2136	49.2
3	80%	2312	2914	52
4	100%	2569	3184	55.7

表 1 中主风扇转速 2569rpm，副风扇转速 3184rpm 时和本文分析的边界条件比较接近，从试验结

果可以看出,在监测点处的噪声值为 55.7dB,和分析结果中的监测点 1、3、5 和点 7 处声压级 50dB 非常吻合。分析结果偏小 5.7dB,是由于分析模型被进行了一些简化。

4 结论

通过以上分析可知:

- (1) 通过分析可以得到速度场、压力场和声压级曲线等关键结果;
- (2) 本文使用 FW-H 声学模型监测测量点声压级完全可行的;
- (2) 运用 STAR-CCM+软件进行风扇噪声分析结果与试验结果比较表明有较高的模拟精度。

5 参考文献

- [1] 张英朝.汽车空气动力学数值模拟技术【M】.北京:北京大学出版社,2011.6
- [2] 范士杰等.车用风扇气动噪声的 CFD 分析与实测.2007 中国汽车工程学会年会论文集,2007
- [3] 王益有等.基于 CFD 的发动机冷却风扇噪声计算.机械工程师,2009.11
- [4] 庞剑等.汽车噪声与振动【M】.北京:北京理工大学出版社,2006.6