

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.10.016

基于 FLUENT 的离心风机中 无厚度风轮模拟研究*

黄 朴, 肖林辉, 乌胜斌

(广东中山百得厨卫有限公司, 广东 中山 528478)

摘要:针对离心风机在仿真模拟过程中的准确性和简便性问题, 基于 FLUENT 软件, 采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 结合 SIMPLEC 速度-压力算法, 求解了离心风机内部稳态流场。采用大涡模拟结合 FW-H 声学方程, 求解了瞬态远场噪声场; 研究了在模拟过程中, 忽略离心风轮的厚度将其作为曲面处理, 在模型简化、网格划分以及性能计算上所带来的影响; 与实际测量的风量噪声性能值进行了比较。研究表明: 相比于有厚度风轮, 无厚度风轮在前期模型处理上更为简便, 生成的非结构性网格数量更少、质量更高; 在后期计算中, 两者产生的内部流场和出口风量基本一致, 与实际测量风量值误差仅 1.6%; 由于叶片边缘湍流影响, 有厚度风轮计算的噪声值要比无厚度风轮噪声值高 2.8%, 但无厚度风轮噪声值更接近实际测量的噪声值。

关键词: 计算流体力学; FLUENT; 离心风机; 无厚度风轮; 气动噪声

中图分类号: TH432

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2020)10-1220-05

Simulation of the non-thickness wind wheel in centrifugal fan based on FLUENT

HUANG Pu, XIAO Lin-Hui, WU Sheng-Bin

(Guangdong Zhongshan Baide Kitchen Co., Ltd., Zhongshan 528478, China)

Abstract: Aiming at the accuracy and simplicity of centrifugal fan in simulation process. RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and SIMPLEC velocity-pressure algorithm were used to solve steady internal flow and LES combined with FW-H acoustic equation were used to solve transient far-field noise by software FLUENT. The effects of the thickness of wind wheel on model simplification, mesh generation, performance calculation was studied, which were compared with the actual measured value. The results show that wind wheel without thickness is superior to wind wheel with thickness in processing model and generating unstructured mesh. Flow distribution and volume flow rate of centrifugal fan are constant, the error is only 1.6% compared to actual value. Due to the influence of turbulence surrounded blades, the noise of wind wheel with thickness is 2.8% higher than that of wind wheel without thickness, however, the noise of wind wheel without thickness is closer to the actual measured noise.

Key words: computational fluid dynamic(CFD); FLUENT; centrifugal fan; non-thickness wind wheel; flow noise

0 引 言

随着计算流体力学(CFD)的发展,在风道系统开发时,工程师会运用 CFD 技术进行流体仿真分析,通

过仿真模拟得到气体在风机中的流动状态,从而为实际生产优化提供理论支持^[1]。罗凯^[2]采用 FW-H 声学模型结合大涡模拟,计算了蜗舌半径、叶片数、叶片进口角度对离心风机风量和噪声的影响。陈昊^[3]利用 FLUENT 软件对吸油烟机内部流场进行了研究,所

收稿日期:2020-01-08

基金项目:中山市科技发展专项资金资助项目(180301091906082)

作者简介:黄朴(1994-),湖南汨罗人,男,工程师,主要从事油烟机风道系统开发方面的研究。E-mail:17378252983@163.com

得仿真结果与实验所测数据误差在 6.5% 以内,并结合流场流动状态提出了噪声优化的主要方向。

在 CFD 技术中,模型的前处理和网格划分要花费 80% 的时间和精力,特别是针对于离心风轮这种相对尺寸很小的模型,在网格划分过程中将会使网格数量非常大,且网格质量难以提升,从而大大地影响计算和收敛^[4]。

基于 FLUENT,笔者对一款离心风机进行风轮无厚度模拟,在 CREO 前处理过程中,忽略风轮的厚度将其作为曲面进行处理,并导入 ICEM 中进行非结构性网格生成,然后在 FLUEN 中进行风量、噪声的模拟计算,并与有厚度风轮及实际测量数据对比,研究风轮的厚度在模拟过程中所带来的影响。

1 模型前处理

1.1 模型简化

离心风机一般由风柜、风轮、出风口座和电机组成,其模型如图 1 所示。

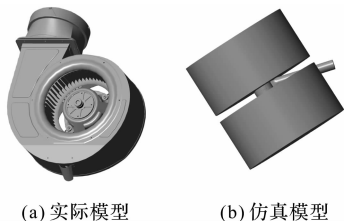


图 1 离心风机模型

其主要的几何参数有:

风轮外径 $D_0 = 250$ mm;蜗壳厚度 $B = 132$ mm;叶片数量 $Z = 60$;叶片厚度 $h = 0.4$ mm;进风口直径 $d = 209$ mm;出风口座出口直径 $d_1 = 170$ mm。

笔者利用 CREO 软件对离心风机进行结构简化后,提取了内部流动区域;同时为防止回流现象的发生,在进口处增加了两个流体域,并延长了出口流体域,最后得到了仿真模型。

1.2 网格划分

笔者采用 ICEM 进行流体域网格的生成,考虑风机模型的复杂性,对于风轮旋转的动域将采用非结构性网格划分,对于风柜静域采用结构性网格划分。

风轮风柜网格模型如图 2 所示。

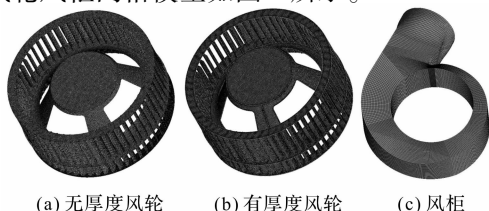


图 2 风轮风柜网格模型

无厚度风轮最终生成的非结构性网格数量为 3.63×10^6 ,最低网格质量为 0.27,所花费的时间约为 5 min。在同样的全局网格尺寸设置下,有厚度风轮生成的非结构性网格数量为 4.85×10^6 ,最低网格质量为 0.2,花费时间也延长为 10 min。风柜静域生成的结构性网格数量为 2.2×10^5 ,网格质量达到 0.64。

综上所述,无厚度风轮在 ICEM 非结构性网格生成过程中,相比于有厚度风轮具有明显优势。

无厚度风轮网格划分优势如表 1 所示。

表 1 无厚度风轮网格划分优势

风轮模型	网格数量 /个	网格质量	划分过程	网格生成 速度/min
无厚度风轮	3.63×10^6	0.27	简易	5
有厚度风轮	4.85×10^6	0.2	繁杂	10

2 FLUENT 模型算法

2.1 流场算法

基于 FLUENT,采用 RANS^[5] 方程进行流场计算,求解器类型选择为压力求解器 (pressure based)。为便于后续分析,笔者引入张量中的指标符号,得到其运动方程如下:

用张量指标形式表示的时均连续方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Reynolds 方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \\ & - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + S_i \end{aligned} \quad (2)$$

标量 Φ 的时均输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_j \Phi'} \right) + S \quad (3)$$

式中: p —静压力; ρ —流体密度,此处为常量 1.225 kg/m^3 ; u —速度矢量; μ —湍动粘度; x_i, x_j —位置坐标; t —时间; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ —Reynolds 应力项。

其中,以上各方程中, i, j 的取值范围为 $(1, 2, 3)$ 。

上述方程中,共有 6 个 Reynolds 应力和 5 个时均未知量,所以方程组不封闭,需要引入新的湍流模型^[6]。

笔者采用 RNG k- ε 湍流模型^[7],压强-速度关联采用 SIMPLEC 算法,更易收敛,离散格式采用二阶迎风格式,松弛因子保持默认^[8];边界条件均采用压力进口和压力出口,相对压力设为 0;风机动静域之间的耦合采用多重参考系模型 Frame Motion,动域转速设置

为 760 r/min, 转速为实际所测量的风轮转速; 风轮设置为 Moving Wall, 采用无滑移的壁面条件^[9], 旋转绝对速度也设置为 760 r/min, 输出结果设置 Volume flow rate(风量)监控。

2.2 噪声场算法

在定常计算的基础上, 笔者采用大涡模拟(LES)计算非定常湍流流场, 得到噪声声源项, 然后采用 FW-H^[10]声类比方程, 得到远场噪声场。

FW-H 方程是将 Navier-Stokes 方程按波动方程的形式重新整理而成, 经过严谨的推导及数学演绎, 具有广泛的适用性, 表示如下^[11]:

$$\frac{1}{C_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} [pH(f)] - \nabla^2 [pH(f)] = \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho_0 V_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \delta(f) \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[p_{ij} \frac{\partial f}{\partial x_j} \delta(f) \right] + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} [T_{ij} H(f)] \quad (4)$$

式中: $H(f)$ —Heaviside 广义函数^[12]; C_0 —音速; t —时间; p —声压; ∇^2 —拉普拉斯算子; ρ_0 —未扰动空气密度; p_{ij} —压应力张量; T_{ij} —Light hill 应力张量。

离心风机动静域之间的耦合采用滑移网格 Mesh Motion, 时间步长 Δt 设为 0.000 2 s, 其他设置与流场算法一致。

以上设置得到的是噪声的时域解, 在实际后处理过程中, 通过傅里叶变换可以将其转换为噪声频域解^[13]。

噪声的计算步长 Δt 和捕捉噪声的最高频率 f_s 关系如下^[14]:

$$f_s = \frac{1}{2 \cdot k \cdot \Delta t} \quad (5)$$

式中: f_s —噪声最高频率; k —噪声读写频率, 通常设为 1; Δt —计算步长。

人类所能听到的声音最大频率为 20 000 Hz, 此处最大的捕捉案例可算得为 2 500 Hz。远场噪声接收点由全球包络法^[15]确定, 以风机中心为中心点, 画一个半径为 1.414 m 的球面, 4 个测试点 A(前)、B(左)、C(后)、D(右)分别处于比风机中心低 1 m 的水平平面上, 与球面表面相交形成均匀分布的 4 个位置。此处风机模型坐标原点即为中心, 可得 4 个噪音接收点位置坐标分别为: (0, -1, 1), (-1, -1, 0), (0, -1, -1), (1, -1, 0)。

3 试验及结果分析

3.1 流场分析

基于 CFD-POST, 笔者对离心风机内部气流流动状态进行分析, 得到风轮速度云图如图 3 所示。

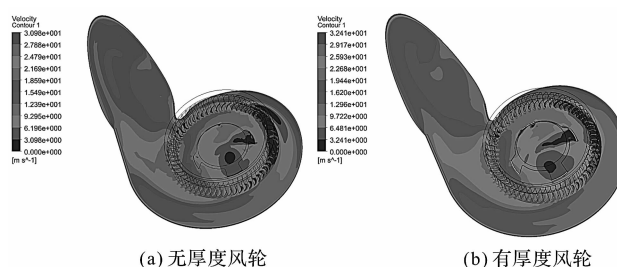


图 3 风轮速度云图

从图 3 中可以看出:

(1) 两者的速度云图相差甚小, 表明在模拟过程中, 忽略叶片的厚度进行模拟计算, 对风机内部的整体流场不会有很大影响; (2) 风机内部气流最大速度可达 30 m/s, 位置位于靠近风机出口的风轮外边缘处; (3) 无厚度风轮在出口的气流速度平均值为 15.26 m/s, 而有厚度风轮在出口的气流速度平均值为 15.38 m/s, 相差甚小。

风轮叶片往往对风机性能有很大的影响。笔者对叶片附近气流流动进行了分析, 得到风轮叶片的速度矢量图如图 4 所示。

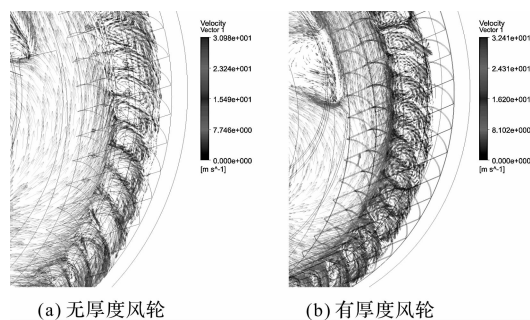


图 4 风轮叶片速度矢量图

从图 4 中可以看出: 有厚度风轮叶片处的气流比无厚度风轮叶片处的气流流动得更加紊乱, 并且在叶片圆弧处的涡流现象会更加明显。

FLUENT 中忽略风轮厚度进行模拟时, 计算得到的风量与有厚度风轮基本一致, 数值为 18.9 m³/min。对裸风机进行实验时, 得到风量实测值为 18.6 m³/min, 误差仅 1.6%, 这也从侧面验证了笔者仿真模型和模拟方法的准确性。

3.2 噪声场分析

从机理的角度上, 气动噪声可以划分为湍流噪声和旋转噪声^[16-18]。

风轮表面噪声源分布如图 5 所示。

从图 5 中可以看出: 有厚度风轮和无厚度风轮表面的噪声源分布基本一致, 但无厚度风轮最大噪声源值为 67.8 dB, 而有厚度风轮最大噪声源值达到了

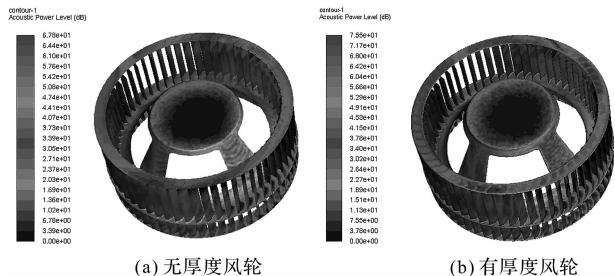


图 5 风轮表面噪声源分布

75.5 dB,分布在风轮细小的厚度区域。其主要原因是相比于无厚度风轮,有厚度风轮的叶片边缘处气体湍流更加强烈(由图 4 也可看出),所以其湍流噪声往往较之更加强烈。

涡量是描写漩涡运动最重要的物理量,而气体湍流运动是旋转噪声的主要来源。

风轮表面涡量分布如图 6 所示(其涡量强度都为 $2\,000\text{ s}^{-1}$)。

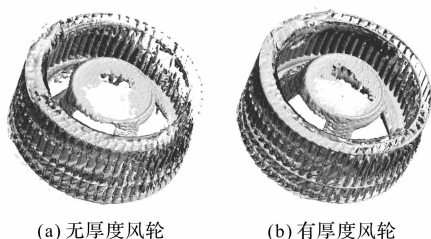


图 6 风轮表面涡量分布

从图 6 中可看出,在同一涡量强度下,有厚度风轮比无厚度风轮在叶片处的涡量分布会更加密集,即会产生更多的涡流,所以有厚度风轮表面噪声源会更大^[19]。

在 FLUENT 中,通过大涡模拟 LES 结合 FW-H 声学方程,可自动捕捉声源附近的压力脉动信息,随后将捕捉得到的信息导入波动方程中,计算得到远场监测点的声压级大小。

因为人耳对不同频率的噪声感受不一样,为了使计算得到的声压级和人耳听到的感觉一样,笔者在 FLUENT 中对噪声进行 A 计权^[20]。

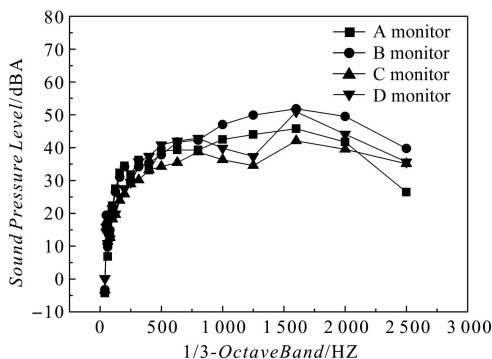
A 计权噪声 1/3 倍频图如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,经过 A 计权计算后风机噪声基本集中在 500 Hz ~ 2 000 Hz 之间,无厚度风轮与有厚度风轮声压级噪声值大小及其变化趋势基本相同。

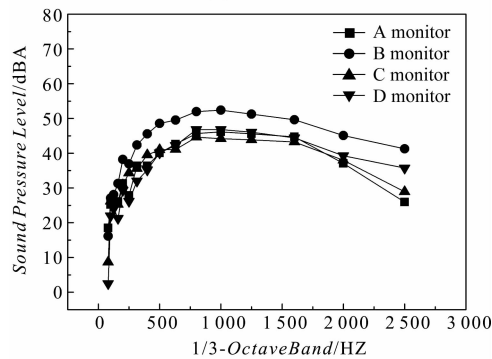
将其声压值取平均值后转换为声功率值,其声压值和声功率值关系如下^[21]:

$$L_w = L_p + 10\lg(4\pi r^2) \quad (6)$$

式中: L_w —声功率值; L_p —声压值; r —声源点到监控



(a) 无厚度风轮



(b) 有厚度风轮

图 7 A 计权噪声 1/3 倍频图

点的距离。

笔者通过数值模拟得到风轮噪声值后,与实验测量的噪声值进行比较,得到了风轮的噪声值如表 2 所示。

表 2 风轮噪声值

模型	A(L_p)	B(L_p)	C(L_p)	D(L_p)	L_w
无厚度风轮	55.03	57.93	52.05	55.16	69.04
有厚度风轮	55.61	61.5	55.5	55.32	70.98
实际值	57.4	55.0	54.8	54.4	69.4

从表 2 中可以看出:无厚度风轮模拟噪声声功率值为 69.04 dB,有厚度风轮模拟噪声声功率值为 70.98 dB,相比增大了 1.94 dB,这是由于有厚度风轮在叶片边缘产生的湍流噪声较大的缘故。

依据国际标准 IEC 651 TYPE II,笔者用噪声仪进行了风机噪声实际测量,最终得到噪声功率值为 69.4 dB,这与无厚度风轮模拟出的噪声值 69.04 dB 十分接近,误差仅为 0.52%。

虽然模拟得到的声功率噪声值与实际测量值差别微小,但是仿真得到的 4 个监控点噪声值与实际测量的 4 个监控点噪声值,并未有一一对应的趋势,其每个点的仿真误差都在 4.3% 左右。这也是因为 FLUENT 软件在模拟远场噪声时存在局限性,无法精确地捕捉到远场监控点的具体噪声值。

4 结束语

针对离心风机在仿真模拟过程中的准确性和简便性问题,基于 FLUENT,笔者对一款离心风机进行了风轮无厚度模拟,研究了风轮的厚度在模拟过程中所带来的影响。得到以下结论:

(1)在非结构性网格划分的数量、质量及简便性方面,无厚度风轮比有厚度风轮更具优势;

(2)在模拟计算中,无厚度风轮与有厚度风轮产生的内部流场几乎一致,但是有厚度风轮叶片附近涡流更加明显,两者模拟出的风量均为 $18.9 \text{ m}^3/\text{min}$,与实际值误差仅为 1.6%;

(3)离心风机 A 计权噪声集中在中频 $500 \text{ Hz} \sim 2\,000 \text{ Hz}$ 区域,有厚度风轮比无厚度风轮噪音值高 1.94 dB,无厚度风轮噪声值为 69.04 dB,更接近实际测量的噪声值,误差仅为 0.52%。

参考文献 (References):

- [1] ABBASPOUR M, RADMANESH A R, SOLTANI M. R. Unsteady flow over offshore wind turbine airfoils and aerodynamic loads with computational fluid dynamic simulations [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2016, 13(6): 624-631.
- [2] 罗 凯,罗 鑫,黄 闯. 基于 Fluent 的多翼式离心风机性能分析[J]. *流体机械*, 2014, 42(7): 25-29.
- [3] 陈 昊,季俊生. 基于数值仿真的吸油烟机流场研究与验证[C]. 2018 年中国家用电器技术大会. 中国浙江宁波, 2018.
- [4] RAMDANI M. Levant. ICEM model extraction: a case study [C]. *Electromagnetic Compatibility*, 2004. Berlin: [s. n.], 2004.
- [5] KE J H. RANS and hybrid LES/RANS simulations of flow over a square cylinder [J]. *Advances in Aerodynamics*, 2019, 1(1): 5-9.
- [6] 姚国英,柯永胜. RANS 方法预报对转桨非定常水动力性能研究 [J]. *应用科技*, 2019, 46(3): 7-12.
- [7] VICTOR Y, STEVEN A O. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory [J]. *Journal of Scientific*

Computing, 1986, 1(1): 3-51.

- [8] ZHAO X W, CHEN Q Y. Inverse design of indoor environment using an adjoint RNG k- ϵ turbulence model [J]. *Indoor Air*, 2019, 29(2): 5-11.
- [9] 肖 彪,李 彬,董术海. 吸油烟机用离心风机蜗壳降噪优化设计[J]. *流体机械*, 2017, 45(7): 38-42.
- [10] THILO K, FRANK T. *Turbulence and Interactions* [M]. Germany: Springer Group Press, 2014.
- [11] 钱振超. 基于 FW-H 方程风力机旋转叶片噪声的预测 [D]. 南京:南京航空航天大学航空宇航学院, 2013.
- [12] PAUL J N. Oliver Heaviside: an accidental time traveller [J]. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 2018, 376(2134): 223-256.
- [13] 张宇飞,刘瑞环,邓烨明. 基于大涡模拟和 FW-H 方程的气动噪声分析[C]. 2016 年度全国气动声学学术会议, 中国北京, 2016.
- [14] CYNTHIA D. Calibrating Noise to Sensitivity in Private Data Analysis [C]. *Proceedings of the Third conference on Theory of Cryptography*. Oxford: Oxford University Press, 2006.
- [15] 郑 华,陈凤义,罗建平. 浅析《通风机声功率级的测定: 包络面法》的国际标准[J]. *风机技术*, 2012, 22(5): 23-25.
- [16] 郑 欣. 离心风机气动噪声数值模拟与降噪设计[D]. 四川:电子科技大学机械学院, 2015.
- [17] 张远深,蔺相伟,范超超. 基于 Fluent 的静压轴承结构优化及温度特性研究[J]. *液压气动与密封*, 2019(1): 26-29.
- [18] 李永安. 一种射流油阀的设计与流场数值分析[J]. *液压气动与密封*, 2018(8): 27-29.
- [19] CHORIN, ALEXANDREJOEL. *Vorticity and turbulence* [M]. Berlin: Springer Group Press, 2005.
- [20] PIETRZKO S, HOFMANN R F. Prediction of A-weighted aircraft noise based on measured directivity patterns [J]. *Applied Acoustics*, 2001, 23(1): 29-44.
- [21] 彭 强,宋俊龙. 噪声声压级与声功率级评价的分析对比[C]. 第十一届全国电冰箱(柜)、空调器及压缩机学术交流大会. 中国安徽滁州, 2012.

[编辑:冯黎雅]

本文引用格式:

黄 朴,肖林辉,乌胜斌. 基于 FLUENT 的离心风机中无厚度风轮模拟研究[J]. *机电工程*, 2020, 37(10): 1220-1224.

HUANG Pu, XIAO Lin-Hui, WU Sheng-Bin. Simulation of the non-thickness wind wheel in centrifugal fan based on FLUENT[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020, 37(10): 1220-1224.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>