

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.056

基于表面粗糙度修正的冷却风扇数值模拟方法研究

傅佳宏, 张宇, 肖宝兰, 张旭方, 左强

(浙江大学城市学院 工程学院, 杭州 310015)

摘要: 为了进一步提高冷却风扇多重参考坐标系(MRF)模型的数值模拟精度, 结合壁面函数进行粗糙度修正, 并分析 MRF 模型的影响因素。首先, 以黏性底层中第一层网格离壁面的无量纲速度 u^+ 与距离 y^+ 相等为依据, 得到粗糙度常数、粗糙度高度与 y^+ 之间的代数关系; 根据实际壁面类型, 得到修正后的 y^+ 值与第一层网格高度, 将其带入标准壁面函数进行近壁面修正。最后, 以某型号冷却风扇为例, 研究湍流模型、网格数量、表面粗糙度修正等因素对风扇数值模拟结果的影响。结果表明, 模型可以更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大的流动, 更适合风扇的旋转流动, 对风扇等旋转机械的模拟具有更高的准确性; 过密的网格数量会使得计算结果出现波动; 表面粗糙度修正改善了性能曲线上的一些畸点, 在风扇常用工况范围内, 使得试验值与仿真值的偏差由 5% 降低到修正后的 3% 以内。

关键词: 冷却风扇; MRF 方法; 粗糙度; 数值模拟; 壁面函数

中图分类号: TK424.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2021)05-018-08

Numericals simulation method of cooling fan based on surface toughness correction

FU Jiahong, ZHANG Yu, XIAO Baolan, ZHANG Xufang, ZUO Qiang

(School of Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, P. R. China)

Abstract: In order to further improve the numerical simulation accuracy of the multi-reference frame(MRF) model of cooling fan, the roughness of the model was modified by the wall function, and the influential factors of the MRF model were analyzed. Firstly, the algebraic relationship among roughness constant, roughness height and y^+ was obtained based on the dimensionless velocity u^+ and distance y^+ of the first layer mesh from the wall in the viscous sublayer. Then, according to the actual wall type, the revised y^+ value and the first layer mesh height were obtained, and they were substituted into the standard wall function for near wall correction. Finally, taking a cooling fan as an example, the effects of turbulence model, mesh number and surface roughness correction on the numerical simulation results of the fan were studied. The results show that the model can better deal with the flow with high strain rate and bending streamline, and is more suitable for the rotating flow of fans, and has higher accuracy for the simulation of rotating machinery such as fans. Over-dense mesh number will make the calculation results fluctuate. Surface roughness correction improves some abnormal points on the performance curve, and within the

收稿日期: 2020-01-24 **网络出版日期:** 2020-04-30

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LQ20E060003, LQ19A020004, LGG18E060001)。

Supported by Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LQ20E060003, LQ19A020004, LGG18E060001).

作者简介: 傅佳宏(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事强化传热理论及其工程应用研究, (E-mail) fujh@zucc.edu.cn。

range of fan common operating conditions, the deviation between test values and simulation values reduced from 5% to 3% after correction.

Keywords: cooling fan; MRF method; roughness; numerical simulation; wall function

轴流式冷却风扇在工业领域具有广泛的应用,对其性能进行精准的数值模拟研究,在冷却系统匹配、节能减排、气动噪声抑制等方面具有重要的工程应用意义^[1-2]。风扇旋转时,通过具有不同压力曲线的风扇叶片与空气、护风罩之间复杂的双向流固耦合^[3-4]及周期性作用,形成旋转流场与风扇前后的静压升。

目前,工程领域的主流风扇性能预测模型是多重参考坐标系(MRF)计算模型,该模型将风扇流动区域定义在旋转坐标系下,其它区域定义在静止参考系下,通过坐标系的不断重建来模拟风扇的旋转。由于模型中包含详细的风扇叶片几何信息,可以直接模拟出压力阶跃以及旋转流场等风扇特性,在预测精度及计算资源的消耗方面具有相当的优势^[5-6]。由于采用了定常的近似求解,如何对MRF方法进行修正,进一步提高其模拟精度仍然面临着挑战。Wang等^[7]研究了风扇旋转区的选择对其性能的影响,认为风扇旋转区应该为护风罩所包含区域,而不仅仅是风扇直径与厚度形成的圆柱区。Shankar等^[8]采用MRF模型建立了风扇的数字风洞实验室用以进行实际风扇的修正。Gullberg等^[9-11]认为对于风扇旋转流体区域的选择要包括与风扇有剧烈相互作用的区域和风扇附近非对称旋转部件,并提出将风扇转速提高14%所得的数值模拟结果可很好地与实验值进行匹配。Sengupta等^[12]指出,通过MRF模型旋转流体区域、紊流模型、风扇网格质量进行一定的适应性修正后,完全可以达到工程实际的需求。耿丽珍等^[13]采用MRF进行了风扇噪声分析方法的数值仿真研究。肖红林等^[14]研究指出可以采用减小风扇和导风罩之间的间隙的方法来提高风扇模拟的精度。倪计民等^[15]采用MRF方法研究了风扇与导风罩之间相对位置关系对于冷却风扇性能的影响,得到不同风扇具有不同最佳安装参数的结论。石海民等^[16]进行了多风扇之间的MRF建模方法研究。

在上述的MRF计算模型修正中,都将风扇表面作为水力光滑面处理,而实际风扇表面粗糙度对于风扇表面涡的流动阻力以及壁面函数都有一定的影响。文中结合壁面函数,通过第一层网格离壁面的无因次距离 y^+ ,在湍流计算中加入粗糙度函数对壁面律做出修正,使得风扇表面更贴近实际情况,进一步提高风扇的数值模拟精度。

1 风扇表面粗糙度修正

通常粗糙度由表征粗糙颗粒类型的粗糙度常数 C_s 与粗糙度高度 K_s 决定,共同组成了粗糙度影响因子 ΔB ,对于风扇叶片表面,影响公式为^[17]

$$\Delta B = \frac{1}{k} \ln \left[\frac{K_s^+ - 2.25}{87.75} + C_s K_s^+ \right] \cdot \sin [0.4258 (\ln K_s^+ - 0.811)], \quad (1)$$

其中,无量纲粗糙度高度 K_s^+ 的定义式为

$$K_s^+ = \frac{K_s \cdot u_\tau}{\nu}, \quad (2)$$

其中, ν 为流体运动粘度。粗糙度影响因子 ΔB 的定义式为

$$\Delta B = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{E}{f_{K_s}} \right), \quad (3)$$

其中, $k=0.42$, $E=9.0$, f_{K_s} 为粗糙度函数,对于风扇表面, $2.25 < K_s^+ < 90$, $f_{K_s} = (0.253 \cdot K_s^+)^a$,

$$a = \sin \left[\frac{\pi}{2} \frac{\log \left(\frac{K_s^+}{2.25} \right)}{\log \left(\frac{90}{2.25} \right)} \right], u_\tau \text{ 是壁面摩擦速度,通过迭代式(1)与式(3)可以得到 } K_s^+ \text{ 与 } C_s \text{ 值。}$$

引入无量纲参数 u^+ 与 y^+ ,分别为第一层网格离壁面的无因次速度与距离:

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau}, \quad (4)$$

$$y^+ = \frac{\Delta y \rho u_\tau}{\mu}, \quad (5)$$

其中： u 是流体的时均速度； Δy 是到壁面的距离； μ 是流体的动力粘度。

对于黏性底层有 $u^+ = y^+$ ，从而得到风扇叶片表面摩擦速度 u_τ 为

$$u_\tau = \sqrt{\frac{u \cdot \mu}{\Delta y}}, \quad (6)$$

联立式(5)与式(6)可得到粗糙度高度 K_s 与风扇叶片第一层网格高度 Δy 的迭代方程组：

$$\begin{cases} \Delta y = \frac{y^+ \cdot \mu}{\rho \cdot u_\tau}, \\ K_s = \frac{K_s^+ \cdot \nu}{u_\tau}, \\ u_\tau = \sqrt{\frac{u \cdot \mu}{\Delta y}}. \end{cases} \quad (7)$$

通过对风扇表面粗糙度的修正，可以让风扇的数值模拟更接近实际情况，结合网格、湍流模型等因素进一步分析修正后风扇数值模拟结果，并进行实验验证。

2 风扇数值模型的构建

2.1 MRF 模型

通过风扇三维实体模型建立风扇数值仿真模型，采用 MRF 模型进行风扇性能仿真，其主要方法是在风扇流体区域建立多重参考坐标系，坐标系能够随着流体的旋转而不断重建。固定坐标系与移动坐标系中的速度矢量按照如下关系转换^[18]：

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{v} - (\mathbf{V}_t + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}), \quad (8)$$

式中， \mathbf{V}_r 为移动坐标系参考速度； \mathbf{v} 为绝对坐标系速度； \mathbf{V}_t 为坐标系移动速度； $\boldsymbol{\omega}$ 为旋转角速度； \mathbf{r} 为风扇半径。

根据以上变换，在风扇旋转流体区域中，控制方程组为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{V}_r &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \rho \mathbf{v} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}_r \mathbf{v}) + \rho [\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{v} - \mathbf{V}_t)] &= -\nabla p + \nabla \tau + \mathbf{F}. \end{aligned} \quad (9)$$

2.2 边界条件的设置

以某半径为 762 mm 的车用冷却风扇为例，采用风扇周期性边界条件，分析紊流模型、叶片表面粗糙度、近壁面网格处理、网格无关性等对于风扇数值模拟结果的影响，从而提高风扇数值仿真精度。模拟风扇共有 10 片叶片，风扇直径为 762 mm，转鼓直径为 245 mm，给定风扇转速为 2 100 r/min，如图 1 所示。

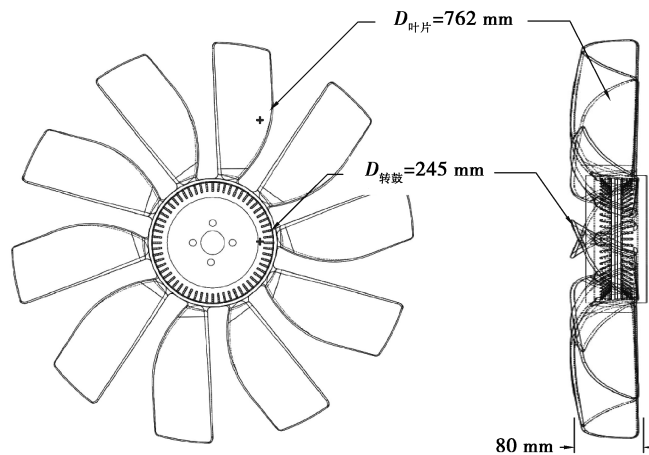


图 1 风扇几何模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fan geometric model

设置初始迭代条件为 y^+ , 得到 $\Delta y = 0.000\ 892\ \text{m}$, $K_s = 0.000\ 046\ 4\ \text{m}$, 因此, 在设置边界层网格时, 取边界层网格厚度为 $0.9\ \text{mm}$, 叶片表面摩擦度高度为 $0.046\ 4\ \text{mm}$ 。

风扇采用周期性旋转边界建立风扇数值模拟风洞, 风扇为十叶片均布, 风扇的旋转偏移角为 36° , 设置风扇入口段半径与风扇半径一致, 出口段为了使风扇的流动能够充分发展, 取其半径与长度皆为入口段的 2 倍, 如图 2 所示。

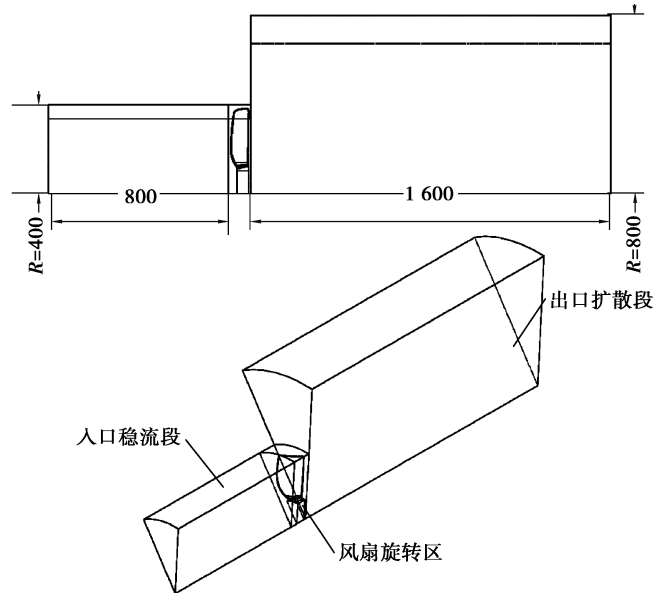


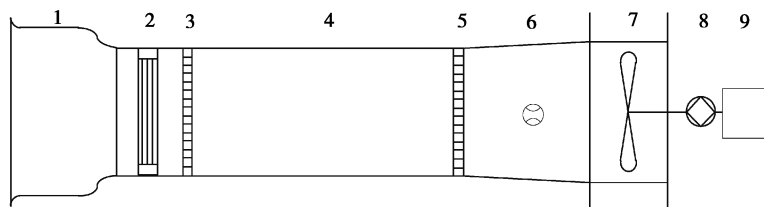
图 2 风扇数值模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fan numerical model

风扇流场采用 MRF 模型进行稳态数值计算, 由于没有热交换器参与热交换, 忽略能量方程, 设置流动介质空气的物性参数为常物性; 入口与出口分别设为压力入口与压力出口, 表压设置为 $0\ \text{Pa}$; 采用基于压力修正的 SIMPLEC 算法进行流场计算, 采用二阶迎风格式进行网格的离散, 当残差小于等于 10^{-4} 次方时认为计算收敛。数值模拟在 20 核, 32 G 内存, 2 T 硬盘高性能工作站上进行, 每个 case 根据网格数量的多少大约在 $1.5\sim 3.0\ \text{CPU}$ 时收敛。

3 实验验证

按照如图 3 所示的工业通风机标准化风道上进行数值模型的试验验证。试验时通过改变调速电机的转速来控制风扇转速, 通过改变节流加载板的孔隙率来改变风道的进气阻力, 从而得到风扇在不同转速 n 下的风扇流量 q_v 与静压 H 曲线。具体可参照文献[19]。



注: 1. 锥形集流器; 2. 节流加载板; 3、5. 整流器; 4. 试验风筒; 6. 空气流量计; 7. 风扇; 8. 扭矩转速传感器; 9. 调速电机

图 3 风扇风筒试验台示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fan wind tunnel test system

风扇全压 p_{tp} 为冷却空气通过风扇后总压的升高量, 包括冷却空气静压与动压之和, 可表示为

$$p_{tp} = \left[p_{out} + \frac{1}{2} \rho c_{out}^2 \right] - \left[p_{in} + \frac{1}{2} \rho c_{in}^2 \right], \quad (10)$$

风扇静压 H 表示为

$$H = p_{tp} - \frac{1}{2}\rho c_{out}^2 = p_{out} - p_{in} - \frac{1}{2}\rho c_{in}^2 \quad (11)$$

其中: p_{out} 、 p_{in} 分别为风扇出口和进口处静压,通常 p_{out} 与大气环境相连,可认为 $p_{out}=0$; c_{in} 、 c_{out} 分别为风扇进出口轴向速度,由于风扇进出口截面积大致相等,可认为 $c_{in}=c_{out}$; ρ 为空气密度; n 为风扇转速, r/min ; q_v 为风扇流量, m^3/s 。

4 数值仿真结果分析

4.1 网格无关性分析

不同网格密度下得到的风扇网格无关性分析,如图 4 所示。图 4(a)为当风扇转速为 2 100 r/min ,流量为 0.5 m^3/s 时,风扇的静压值随着网格密度变化的规律。图 4(b)为风扇转速为 2 100 r/min 时,不同网格密度下得到的风扇性能曲线。

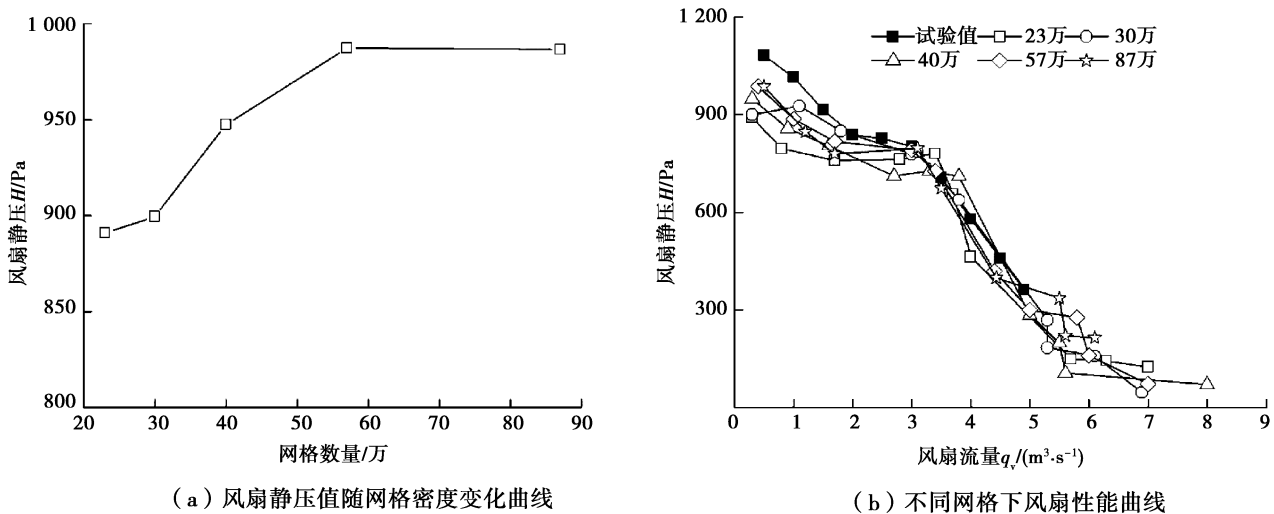


图 4 风扇数值模型网格无关性分析

Fig. 4 Grid independence analysis of fan model

可以看出,随着风格的增加,静压值不断增加,当风扇旋转流体区域网格增加到 57 万时,随着网格的增加,风扇静压值几乎不变。在各个网格密度下,风扇性能曲线趋势基本一致,主要在曲线的两端距试验值有一定的偏差,当网格数量小于 30 万时,数值仿真结果偏差较大,随着网格数量的增加,偏差逐渐减小;然而当网格密度达到 87 万时,数值仿真结果并没有显著的改善,反而在流量超过 5 m^3/s 时,静压值上出现了明显的流量波动。因此,最后选取风扇旋转流体区域网格为 57 万。

4.2 湍流模型对比分析

在计算风扇旋转流场等有强旋流和有弯曲壁面的流动时,可能出现时均应变率特别大的情形,采用标准 $k-\epsilon$ 模型时,针对此情形有可能产生负的正应力,从而导致流动失真,因此,在对具有旋转流动的流场进行数值模拟时,通常采用考虑旋转流场的 RNG $k-\epsilon$ 模型或者能够反映主流时均应变率的 Realizable $k-\epsilon$ 模型。

相同风扇旋转流体区域下,分别采用 RNG $k-\epsilon$ 模型和 Realizable $k-\epsilon$ 模型进行风扇数值模拟,不同的紊流模型对于风扇数值模拟精度的影响如图 5 所示。为了减小网格因素对于仿真精度的影响,采用加密网格进行数值计算,加密后,风扇网格数量为 59 万,计算工况为风扇转速 2 100 r/min 。

从图 5 中可以看出,相比 Realizable $k-\epsilon$ 模型,RNG $k-\epsilon$ 模型具有更高的仿真精度,在风扇工作范围内 (2~5 m^3/s),仿真值与试验值吻合较好,误差小于 5%,但在低流量区域 (0~2 m^3/s) 误差较大。因为在低流量、高静压工况下,湍流模型自身的局限性及风扇叶片压力面和吸力面之间的高压力梯度,RNG $k-\epsilon$ 紊流模型在极端情况下不能很好地模拟出风扇的流动特性,但在风扇常用工况点,该模型具有足够的精度,具有一

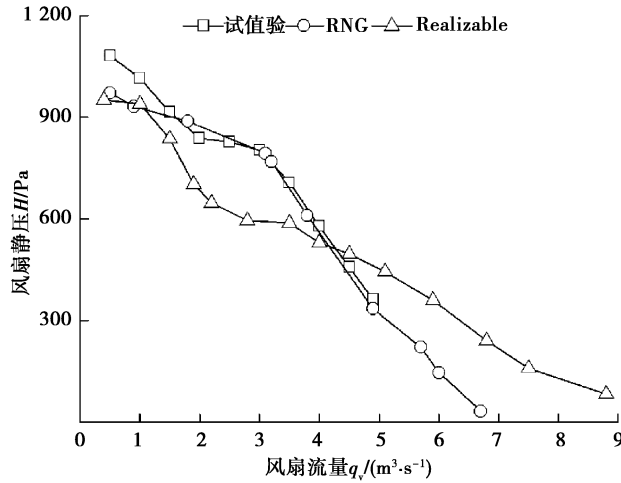


图 5 不同紊流模型下风扇数值模拟结果对比

Fig. 5 An CFD results at different turbulence model

定的工程实用价值。

Realizable $k-\epsilon$ 模型在整体趋势上能够模拟出风扇的气动特性,但是存在较为明显的过度模拟现象,主要表现为在中低流量工况($0\sim 4\text{ m}^3/\text{s}$)下,仿真静压值要明显小于试验值,但是在高流量工况($>4\text{ m}^3/\text{s}$)下,仿真静压值又要明显大于试验值,因为数值仿真将光滑风扇叶片进行了人为的离散,无法完全模拟出光滑表面,在局部可能出现高曲率的情况,导致应变率出现极值点,影响了整个风扇的数值仿真精度。

4.3 粗糙度修正结果分析

采用近壁面粗糙度修正与仅采用简单壁面函数的风扇数值仿真结果与试验值的对比如图 6 所示。可以明显看出,在增加了近壁面处理后,数值仿真结果更接近试验值,因为其流动更符合实际情况,虽然在低流量区域静压值与试验值还是存在 100 Pa 左右的偏差,但经过近壁面处理后风扇性能曲线更为平顺,改善了未经过近壁面处理时产生的一些畸点,且在风扇常用工况范围内($2\sim 5\text{ m}^3/\text{s}$),试验值与仿真值的偏差在 3% 以内,完全可以满足工程应用的需要。

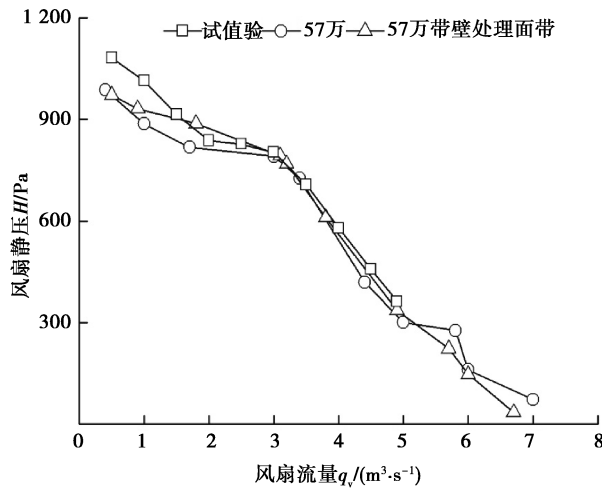


图 6 壁面处理前后计算结果对比

Fig. 6 Alculation results before and after wall treatment

图 7 所示为比较得到的相对较好的 57 万网格数量, RNG $k-\epsilon$ 紊流模型,表面粗糙度修正之后,风扇在各个转速下的数值模拟结果与试验值的对比,从中可以看出,除了高压低速区,试验值与模拟值都能较好的吻合,可见文中提出的风扇数值模拟方法可以提高全工况范围内风扇性能的数值模拟精度。

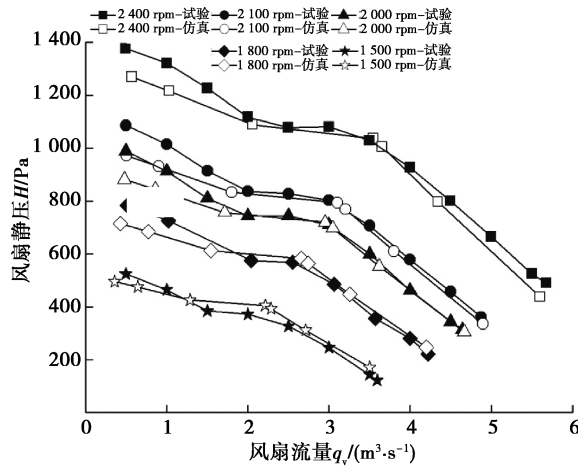


图 7 风扇性能试验值与理论计算值对比

Fig. 7 An performance gained by test theoretical calculation

5 结 论

1) 分析比较了 Realizable $k-\epsilon$ 紊流模型与 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型对于风扇数值仿真精度的影响, 发现后者在常用工况点具有足够的精度与计算效率。

2) 常用风扇 MRF 计算模型基础上增加了风扇叶片表面摩擦度修正, 提高了风扇数值仿真精度。

3) 通过全转速下的风扇模拟与试验验证, 证明了该方法的普适性, 可以采用风扇相似定理得到不同转速下的风扇性能。

参考文献:

- [1] Kim J H, Hur N, Kim W. Development of algorithm based on the coupling method with CFD and motor test results to predict performance and efficiency of a fuel cell air fan[J]. *Renewable Energy*, 2012, 42: 157-162.
- [2] 张毅, 陆国栋, 俞小莉, 等. 商用车多风扇冷却模块匹配研究[J]. *汽车工程*, 2014, 36(5): 552-555, 565.
Zhang Y, Lu G D, Yu X L, et al. A study on the matching of multi-fans cooling module for commercial vehicles[J]. *Automotive Engineering*, 2014, 36(5): 552-555, 565. (in Chinese)
- [3] 李丽, 潘扬, 胡丹梅. 5MW 风力机塔影效应双向流固耦合分析[J]. *动力工程学报*, 2018, 38(5): 400-405, 424.
Li L, Pan Y, Hu D M. Two-way fluid-structure interaction analysis of tower shadow effect of a 5MW wind turbine[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2018, 38(5): 400-405, 424. (in Chinese)
- [4] 张帅, 高丽敏, 郑天龙, 等. 基于双向流固耦合方法的某风扇特性数值研究[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(8): 1683-1691.
Zhang S, Gao L M, Zheng T L, et al. Numerical investigations on characteristic of fan based on two-way fluid-structure interaction approach[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(8): 1683-1691. (in Chinese)
- [5] 傅佳宏, 俞小莉, 刘震涛, 等. 工程机械分离式冷却系统流动传热数值仿真[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(6): 2119-2124.
Fu J H, Yu X L, Liu Z T, et al. Numerical study of flow and heat transfer on construction machinery detached vehicular cooling system[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(6): 2119-2124. (in Chinese)
- [6] 傅佳宏, 俞小莉, 药凌云, 等. 工程机械独立式冷却模块流动传热仿真对比[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2016, 46(2): 451-456.
Fu J H, Yu X L, Yao L Y, et al. Numerical comparison of flow and heat transfer in detached cooling module for construction machinery[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2016, 46(2): 451-456. (in Chinese)
- [7] Wang A, Xiao Z H, Ghazialam H. Evaluation of the multiple reference frame (MRF) model in a truck fan simulation[C]// SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2005.

- [8] Natarajan S, Mulemane A, Dube P. Underhood and underbody studies in a full vehicle model using different approaches to model fan and predict recirculation[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2008.
- [9] Gullberg P, Löfdahl L, Nilsson P, et al. Continued study of the error and consistency of fan CFD MRF models[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2010.
- [10] Gullberg P, Lofdahl L, Nilsson P. Cooling airflow system modeling in CFD using assumption of stationary flow[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2011.
- [11] Gullberg P, Löfdahl L, Nilsson P. Fan modeling in CFD using MRF model for under hood purposes[C]//Proceedings of ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, July 24-29, 2011, Hamamatsu, Japan. 2012: 931-942.
- [12] Gullberg P, Sengupta R. Axial fan performance predictions in CFD, comparison of MRF and sliding mesh with experiments[C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States: SAE International, 2011.
- [13] 耿丽珍,袁兆成,李传兵,等.轿车发动机冷却风扇CFD仿真分析及降噪研究[J].汽车工程,2009,31(7):664-668.
Geng L Z, Yuan Z C, Li C B, et al. A study on CFD simulation analysis and noise reduction for the cooling fan of car engine[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(7): 664-668.(in Chinese)
- [14] 肖红林,石月奎,王海洋,等.大型车辆冷却风扇数值模拟的研究[J].汽车工程,2011,33(7):636-640.
Xiao H L, Shi Y K, Wang H Y, et al. A study on the numerical simulation for the cooling fan of large vehicle[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(7): 636-640.(in Chinese)
- [15] 徐锦华,倪计民,石秀勇,等.车用冷却风扇安装位置对其性能影响的分析研究[J].汽车技术,2012(1):1-5.
Xu J H, Ni J M, Shi X Y, et al. Investigation on the effects of mounting position on performance of automobile engine cooling fan[J]. Automobile Technology, 2012(1): 1-5.(in Chinese)
- [16] 石海民,俞小莉,黄钰期,等.多风扇冷却模块导风罩深度结构研究[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(9):1844-1850,1860.
Shi H M, Yu X L, Huang Y Q, et al. Shroud depth structure of multi-fans cooling package[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(9): 1844-1850,1860.(in Chinese)
- [17] Heinzelmann B, Indinger T, Adams N, et al. Experimental and numerical investigation of the under hood flow with heat transfer for a scaled tractor-trailer[J]. SAE International Journal of Commercial Vehicles, 2012, 5(1): 42-56.
- [18] Fluent Inc. ANSYS FLUENT 14 User's guide[M]. Pittsburgh:ANSYS Press, 2012: 312-336.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.工业通风机用标准化风道性能试验 GB/T 1236—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, Industrial fan—Performance testing using standardized airways. GB/T 1236—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)