[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.04.009

冷却风机性能试验的仿真计算方法研究

才 旺¹, 尹明德¹, 肖 杰², 王立成², 徐招材¹, 杨 明²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 南京胜捷电机制造有限公司, 江苏 南京 211221)

摘 要:针对冷却风机在设计优化过程中存在试验成本高和效率低等缺点,课题组提出了基于 CFD 的风机性能试验仿 真方法。冷却风机性能试验仿真以 CATIA 建模软件和 FLUENT 流体仿真软件为基础,通过 CFD 计算,实现对冷却风机 气动性能参数的分析与研究。仿真的湍流模型采用 RNG K-E模型,旋转模型采用 MRF 多重参考坐标系模型,求解方法 选用 SIMPLE 算法。通过仿真数据与试验数据的对比,得出各性能参数的仿真误差均在 9% 以下,仿真精度在可接受范 围内。研究结果表明:冷却风机性能试验仿真的条件设置和计算方法可以满足一般工程应用;仿真模型具有一定的应用 价值,可以利用其研究冷却风机的气动性能。

关 键 词:冷却风机;计算流体动力学;RNG *κ-ε* 模型;SIMPLE 算法;FLUENT 流体仿真软件 中图分类号:TH42 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)04-0048-06

Research on Simulation Calculation Method of Cooling Fan Performance Test

CAI Wang¹, YIN Mingde¹, XIAO Jie², WANG Licheng², XU Zhaocai¹, YANG Ming²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
 2. Nanjing Shengjie International Manufacting Co., Inc., Nanjing 211221, China)

Abstract: Aiming at the disadvantages of high test cost and low efficiency in the design optimization process of cooling fans, a simulation method for fan performance test based on CFD was proposed. The cooling fan performance simulation test was based on CATIA modeling software and FLUENT fluid simulation software. Through CFD calculation, the analysis and research of the cooling fan aerodynamic performance parameters were realized. The simulated turbulence model used the RNG κ - ε model, the rotation model used the MRF multiple reference coordinate system model, and the solution method used the SIMPLE algorithm. By comparing the simulation data with the test data, it was concluded that the simulation error of each performance parameter was less than 9%, and the simulation accuracy was within an acceptable range. The results show that the condition setting and calculation method of the cooling fan performance test simulation can meet the general engineering application, the simulation model has certain application value, and it can be used to study the aerodynamic performance of the cooling fan.

Keywords: cooling fan; CFD(computational fluid dynamics); RNG κ - ε model; SIMPLE algorithm; FLUENT

冷却风机是一种将电机的机械能转化为气体的压力能以完成气体输送及冷却降温作用的机械设备。表征风机性能的主要参数有流量、压力、功率、效率和转速等,当风机的流量发生改变时,其他性能参数都会随之变化^[1]。工程上一般通过风机性能试验来获取风机在不同工况下的气动性能。以前风机性能试验需要

将风机实物生产出来,因此成本高且效率低^[2]。近年 来,随着 CFD 技术的不断改进和计算机技术的发展, CFD 软件的计算精度不断提高,使得基于 CFD 的风机 气动性能试验仿真成为可能^[3]。目前,我国很多高校 和研究单位对基于风管试验装置的风机性能 CFD 仿 真模型进行了研究,在风室试验装置的仿真模型建立

收稿日期:2019-11-13;修回日期:2020-05-19

第一作者简介:才旺(1994),男,吉林四平人,硕士研究生,主要研究方向为测控技术。通信作者:尹明德(1964),男,江苏南京人,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为机械可靠性设计。E-mail:ymd501@ nuaa.edu.cn

• 49 •

和算法设置方面还未进行过多探索。

1 风机性能分析流场模型搭建

1.1 风机气动性能试验

为了使风机性能分析流场模型与气动性能试验有 较好的对比性,课题组首先对风机性能试验过程进行 分析。风机性能试验台如图1所示,风室内部截面尺 寸为1210 mm×1210 mm。



(a) 内部截面形状

(b) 试验台外观风室



Figure 1 Cooling fan performance test bench

试验时,首先用测试工装将被测风机安装在风室 入口,确保测试过程中不会出现漏风现象,并且被测风 机的风向和风室空气流向保持一致。然后启动风机测 试软件,进入软件操作流程,测试系统会根据设定的参 数对工况进行自动调节和判定。本套测试系统是通过 "定静压"的方式来进行风机性能试验的,即通过设置 不同的静压值来实现工况间的转换。试验开始时,由 稳压直流电源对测试风机供电,测试风机旋转,风室内 静压值改变;由静压变送器、PID 控制器、变频器和辅 助风机形成闭环,通过 PID 算法闭环控制静压值来实 现工况的调节。为模拟冷却风机实际使用环境,提升 测试效果,测试过程中保持测试风机电压值恒定。风 机性能试验台原理图如图2所示。



1-试验风机;2-静压采集点;3-稳流装置;4-差压采集点;5-喷 嘴;6-辅助风机。

图 2 风机性能试验台原理图

Figure 2 Schematic of fan performance test bench

选用胜捷电机制造有限公司 380 系列冷却风机为 研究对象,其结构外形如图 3 所示。风机叶片数为 8, 叶片非等距布置,其性能试验结果如表 1 所示。



图 3 测试冷却风机 Figure 3 Teste of cooling fan 表 1 风机性能试验结果

 Table 1
 Performance test results of cooling fan

静压/Pa	转速/	空气密度/	流量/	Th 귷 /₩/	静压效
	$(r\boldsymbol{\cdot}^{-1})$	$(kg\boldsymbol{\cdot}m^{-3})$	$(m^3 \cdot h^{-1})$	功平/ w	率/%
0	2 733	1.191	3 221.2	228.74	0.00
49	2 673	1.191	2 784.2	248.40	15.26
59	2 658	1.191	2 695.2	252.30	17.51
70	2 632	1.191	2 610.4	258.49	19.64
80	2 620	1.191	2 523.0	263.15	21.31
90	2 620	1.191	2 416.9	261.34	23.12
100	2 618	1.191	2 322.2	263.15	24.51
109	2 609	1.190	2 232.0	267.03	25.31
120	2 598	1.190	2 181.2	268.32	27.10
130	2 592	1.190	2 120.5	272.72	28.08
140	2 582	1.189	2 048.9	277.90	28.67

1.2 风机性能分析流场模型搭建

使用 CATIA 对上文试验的冷却风机进行等比例 建模,为减少计算工作量,对仿真计算结果影响不大的 几何特征进行简化(将模型中的部分圆角修改为直 角,对轮毂上的孔洞和用于连接的螺纹孔进行填充处 理等)^[4]。为了模拟风机旋转时的流场环境,还应根 据试验装置结构建立风机性能分析的流场模型。风机 性能分析流场模型如图4所示。图中旋转流体区为一 个包围风机的圆柱体,是多重参考坐标系(MRF)方法 中定义转速的一部分流场,该圆柱体的底面直径为 400 mm,高为60 mm,风机位于圆柱体的中心处。需 要注意的是,此区域创建的是包围风机的流体域,并不 需要风机实体,圆柱体创建之后需要和风机实体进行 布尔移除操作,以提取旋转流体域。

相比于试验装置,风机性能分析流场模型省略了 很多部件,但同时也增加了试验装置中本来没有的模型:在试验装置中,风机左侧直接与大气接触,属于自 由进口,但是进口仿真模型不能只建立到风机进口位 置,否则流量测量平面处于风机的紊流影响区,不能提 取准确的数值,所以在风室流场模型中增加一个长方 体模型;模型尺寸与出口区一致,但只通过风机旋转区



1一进口区(大气);2一测试风机;3一旋转流体区;4一出口区 (风室)。

图4 风机性能分析流场模型

Figure 4 Flow field model of fan

performance analysis

与出口区连通,称作进口区。将进口区的左侧面定义 为压力进口边界。

1.3 网格划分

使用 ANSYS Mesh 模块进行网格划分,考虑到风 机流场不同部分的不同情况,采用分区划分网格策略, 总的来说进出口管道部分网格尺度最大,中间的旋转 流体区网格尺度最小,各部分具体的划分细则如下:

1)旋转流体区。该区域的网格是整个仿真的关键,不规则几何结构较多,因此选择几何适应性较好的四面体网格并尽量细化。外表面网格基本尺寸设为5mm,风机表面曲面特征较多,流场梯度较大,且叶片较薄,所以要求网格尺寸较小。在 Mesh 中可以将 Sizing设置下的 Size Function 设置成"Proximity and Curvature"来进行局部网格的细化,将 Curvature Normal Angel设置为18°,Num Cells Across Gap设置为3。旋转流体区网格如图5(a)所示。创建好的四面体网格可进一步导入 FLUENT 中,利用 Convert domain to polyhedra 功能将其转换为多面体网格。转换后的网格数量可以降至原来的1/3 左右,同时可以提高网格质量。以风机表面为例,其多面体网格模型如图5(b)所示。

2)进口区和出口区。这两部分区域形状比较规则且实际流场平稳均匀,因此选择六面体网格,风室的长方体结构可以划分出质量很高的六面体网格。进口和出口部分均采用20 mm 基本网格尺寸,并从中心向外尺寸逐渐增大实现过渡。风机流场整体网格如图6 所示。

经过网格无关性验证后最终划分网格数为 207 万,网格的正交质量和歪斜度的平均值分别为 0.90 和 0.17,边界值也均在可接受范围内。



图5 旋转流体区网格

Figure 5 Mesh of rotating fluid zone



图 6 风机流场整体网格 Figure 6 Mesh of fan flow field

2 仿真模型选择与参数设置

2.1 边界条件设置

风机性能测试过程中,风机的入口为自由大气,故 将入口边界设置为压力入口,相对压力设置为0Pa。 出口边界条件设置为压力出口,并将压力设置为测得 的静压值,以模仿风机试验时空气流动在风室中受到 的阻力。进出口管道和旋转流体区外表面设置为静止 的壁面边界;风机表面则需要设置为旋转壁面,旋转轴 需要与旋转流体区保持一致,旋转速度相对旋转流体 区静止,均为实际工况下的风机转速。因为旋转流体 区和进出口区在建模时是切开的,存在物理边界,所以 将旋转流体区与出入口管道的交界面设置为 Interface。

2.2 风机旋转模型

文中的旋转模型选用多重参考坐标系模型 (multiple reference frame),简称 MRF 模型。其基本思 想就是把风室内的流场简化为风机叶轮在某一位置的 瞬时流场,用定常方法来解决非定常问题^[5]。风机及 其附近区域定义在旋转坐标系下,其他区域定义在静 止坐标系下,风机相对于旋转坐标系是静止的。

2.3 仿真参数设置^[6]

将标准 κ-ε 模型用于强旋流或带有弯曲壁面的流 动时,会出现一定的失真^[7],因此本仿真试验选用的 是 RNG κ-ε 模型。为了更快地获得收敛,求解算法选 用压力修正算法 SIMPLE。动量采用一阶迎风格式,湍 流动能和湍流耗散率选择二阶迎风格式,各松弛因子 采用 FLUENT 默认值。设置最大迭代次数为2000,各 残差收敛条件为1×10⁻³。当然迭代残差曲线和最大 迭代步数并不能作为判断收敛的唯一准则,当进出口 质量流量的监控值趋于稳定且差值小于0.5%时也可 认为计算收敛^[8]。

3 仿真结果分析

3.1 仿真结果

为获得完整的风机性能曲线,需要对多个工况下 的风机进行仿真分析。每个工况稳定时,风室内的气 体流动状态基本相同,因此课题组选取静压值为49 Pa 的工况的结果进行分析,图 7 所示为该工况下的计算 过程监测曲线。从图中可以看出所有残差曲线均已达 到 1 × 10⁻³以下,残差值随着迭代过程变化量不大,部 分曲线接近平行于 *x* 轴,也有部分曲线上下振荡但是 幅度较小,并且出口流量的监控值随着迭代步数的增 加也趋于稳定,可以认为计算达到收敛。







计算完成后即可进行后处理,查看试验风机以及 风室内部的流场细节,这样有助于更加直观地理解冷 却风机的运行机理和气体的流动状态,同时也可以验证仿真模型的合理性。这里将通过流场迹线、速度矢量和压力云图等3个方面对数值计算得到的仿真流场进行分析。

3.1.1 流场迹线

流线属于瞬态参数,是表示某一时刻速度矢量方向的曲线,而迹线是流场内质点的运动轨迹。对于定常流动而言,气体的流动状态与时间无关,所以流线与迹线是重合的^[9]。风室内的流场迹线如图8所示。风室内的流线基本可以反应气体的实际流动状态,气流在进口处基本属于层流运动,到了风机入口处开始变得不稳定,经过风机的作用之后,气流在出口处呈现螺旋状并且有不断向外扩散的趋势,在风机旋转区域流体速度达到最大,进入出口区后速度不断减小并逐渐趋于平稳。靠近壁面处的气流会受到流体域壁面的约束而产生乱流和回流现象。



图8 风室流场迹线图



3.1.2 速度矢量

速度是流场分析中很重要的一个参数,只有速度 矢量符合实际才能做进一步的分析。风机表面的速度 矢量分布如图9所示,气流在风机作用下速度方向发 生改变,随着风机的旋转,速度矢量分布呈现螺旋状。 风机叶片上的速度从叶根到叶尖逐渐增大,叶尖处流 体速度达到最大值;而轮毂是由一整块实体壁面构成, 且与流体主速度方向垂直,故轮毂表面的气流速度较 小。从图中可以看出速度分布是符合实际流场特性的。



图9 风机表面速度矢量图



3.1.3 压力云图

压力也是流体分析的一个重要的参数,如图 10 所 示为风机压力面和吸力面的静压分布。从图中可以看 出,在风机吸力面上,叶片前缘静压值小于叶片后缘静 压值,叶尖中部静压值最小。在风机压力面上,叶片前 缘和后缘静压值最小,叶片中部静压值最大,叶环部分 的静压分布较均匀。



图 10 风机表面压力分布云图

Figure 10 Pressure distribution nephogram on fan surface

3.2 仿真结果与试验结果对比分析

压力/Pa

769.2

448.5

127.8

-193.0

-513.7

-834.4

选取与试验方案对应11个工况点,按照上文所述

(a) 吸力面

的仿真模型和设置进行数值仿真,试验数据与仿真结 果的对比如表2所示。

Table 2 Comparison of experimental values and simulation values of fan performance parameters

静压/Pa —	流量/(n	流量/(m ³ ・h ⁻¹)		功率/W		功率误	静压效率/%		效率误
	试验值	仿真值	差/%	试验值	仿真值	差/%	试验值	仿真值	差/%
0	3 221.2	3 189.1	-0.99	228.74	221.94	-2.97	0.00	0.00	0.00
49	2 784.2	2 603.4	-6.50	248.40	238.80	-3.86	15.26	15.14	-0.79
59	2 695.2	2 510.7	-6.85	252.30	247.41	-1.94	17.51	16.91	-3.43
70	2 610.4	2 419.4	-7.32	258.49	254.78	-1.44	19.64	18.46	-6.01
80	2 523.0	2 344.7	-6.25	263.15	262.27	-0.33	21.31	19.87	-6.76
90	2 416.9	2 259.0	-6.53	261.34	268.20	2.62	23.12	21.06	-8.91
100	2 322.2	2 185.0	-5.91	263.15	269.77	2.52	24.51	22.50	-8.20
109	2 232.0	2 131.2	-4.52	267.03	276.69	3.62	25.31	23.54	-6.99
120	2 181.2	2 254.8	3.37	268.32	284.89	6.17	27.10	26.38	-2.66
130	2 120.5	2 197.4	3.63	272.72	291.03	4.79	28.08	27.27	-2.88
140	2 048.9	2 071.4	1.10	277.90	293.81	5.72	28.67	27.42	-4.36

对比试验数据和仿真结果可以发现,风机各个性 能参数的仿真值均存在不同程度的误差。出现误差可 能的原因如下:①文中选取的 RNG κ-ε 湍流模型和 MRF 模型都属于近似的数学模型^[10],存在局限性;② 边界条件是一种理想的状态,与试验条件有着不可避 免的差异^[11];③网格疏密度作为网格质量的一个指 标,对计算结果有较大的影响,对于风机叶片的网格, 为了很好的适应风机叶片的复杂曲面,采用了四面体 网格,计算精度上较六面体结构网格略低,虽然已经对 其进行了局部加密,但是仍存在误差;④在创建流场分 析模型时,为减少计算量,对风机的部分特征进行了简 化处理,也会对仿真结果产生一定影响。

根据表2试验数据和仿真数据作出不同工况下的 对比曲线,如图11所示。

由对比曲线图可以看出,风机仿真模拟的计算结 果规律性相对较差,随着工况的改变,各性能参数仿真 结果的变化趋势和试验保持一致,符合实际情况。其 中静压效率的仿真曲线和试验曲线吻合性较好。流量 的仿真结果与试验数值的相对误差基本保持在8%以 下;功率的相对误差保持在7%以下;静压效率的相对





误差相对较大,但仍基本保持在9%以下。可以认为 本文的仿真计算方法可以满足一般工程应用,仿真模 型具有一定的应用价值,可以利用其研究冷却风机的 气动性能。

4 结论

课题组基于 FLUENT 软件进行了风机性能试验的 模拟仿真,仿真模型按照试验装置和试验方法建立。 对比仿真结果和试验结果,各性能参数的仿真误差均 在9%以下,验证了仿真模型和数值模拟方法的准确 性。通过对仿真结果的分析,得到了试验过程中风室 内部流线分布、风机压力分布以及速度矢量分布等流 场特征。仿真试验为冷却风机的优化设计提出了更加 便捷有效的方法。由于时间的限制,本文中仅进行了 风机性能试验过程的数值模拟分析。后续研究可进一 步计算出影响各系列风机性能的主要参数,结合 CFD 仿真和风机性能试验,形成一套完整的冷却风机设计 优化方案。

参考文献:

- 諸双磊.用于轴流风机的轴流叶轮气动性能试验研究[J].流体机 械,2014,42(4):6-10.
- [2] 刘涛,王冬.基于 CFD 的发动机冷却风扇气动性能仿真研究[J]. 中国工程机械学报,2018,16(3):278-282.
- [3] 李明高,李明. ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社,2012:4-5.
- [4] 孟庆林,尹明德,朱朝霞.基于 STAR-CCM + 的发动机冷却风扇 CFD 仿真分析[J].机械工程与自动化,2015(3):64-66.
- [5] 朱传敏,吴秀丽.基于 CFD 的发动机冷却风扇性能仿真分析[J]. 中国工程机械学报,2014,12(1):18-22.
- [6] 何小笛,纪爱敏,彭利平,等. 离心通风机内部流场的数值分析[J]. 机电工程,2018,35(6):566-571.
- [7] 丁欣硕,刘斌. FLUENT 17.0 流体仿真从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社,2018:104-107.
- [8] 杨先锋.发动机冷却风扇失速的数值模拟研究[D].广州:华南理 工大学,2018:27.
- [9] 万星荣.发动机冷却风扇气动性能的 CFD 分析与仿真流程优化 [D].广州:华南理工大学,2013:35.
- [10] 唐彪. 汽车发动机冷却风扇优化设计研究[D]. 广州:华南理工 大学,2016:18-19.
- [11] 祁丽,张军,黄冠星. 基于 FLUENT 和 Workbench 的蒸汽喷射器 流场分析和结构参数优化[J]. 流体机械,2014,42(5):35-38.

