

基于风扇叶型周向参数化的优化研究

朱立夫, 金英子, 赵屹, 吴泳敏, 孙哲

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘要: 选取直叶片叶型小型轴流风扇为研究对象,以静压为优化目标,优化方法为遗传算法和近似函数方法,优化计算得到性能更优的风扇模型,分析研究优化前后风扇静特性及流场的变化,利用风扇测试系统对优化前后风扇进行静特性实测,并与数值模拟结果进行对比。结果表明:优化后得到了不同参数化方法的优化模型 A 和 B,分别为倾斜叶型和弯曲叶型,两模型的静压均较优化前提高了近 20%,静特性和流场状况也均优于原始模型,实验数据和数值计算结果趋势相同且数值接近,达到了对周向参数优化以提高风扇性能的目的。

关键词: 小型轴流风扇; 优化设计; 叶型参数化; 遗传算法; 风洞试验

中图分类号: TM925.11 **文献标志码:** A

0 引言

小型轴流风扇是计算机和航空航天设备必要的冷却元器件。这种旋转机械散热利用强制对流的方式,为电子元器件降温冷却,是电子产品最有效、最便捷的散热手段。为了提高风扇性能,风扇叶片常采用弯、掠、扭、倾斜等设计。国内外学者针对叶型设计技术,如端壁子午成型^[1]、端弯技术^[2]、前掠叶片和弯扭叶片^[3]等开展了大量研究,取得了很多研究成果^[4-6]。对叶型优化设计是设计者研究的重点和难点,当前优化设计多是针对改进二维叶型,对三维叶型参数化并改进可以达到更直观更准确的优化效果。

本文选取叶片叶型小型轴流风扇进行优化设计,利用 NUMECA 的 DESIGN-3D 模块对叶片进行参数化,基于人工神经网络 BP 算法和遗传算法的数值优化方法,以风扇静压性能为优化目标,通过寻找合适的周向弯曲角度,从而得到性能更优的风扇模型,对优化前后的叶片参数、静特性和流场进行对比分析,最后对优化前后风扇进行实验测定,并与数值模拟结果进行对比。

1 叶片参数化造型

叶片参数化造型方法是优化设计的基础,该方法可以对设计对象进行建模,并提供设计变量。叶片几何形状的定义和控制是叶片气动优化设计的一个重要步骤。研究人员可以很方便地通过控制几何参数的变化来实现模型的改型。对于风扇三维模型的优化,如果直接针对以离散型或者 CAD 模型形式存在的叶型,则是无法实现的,因为需要控制的参数可能是成千上万。但通过拟合得到的参数化的叶型,仅需对某几个参数进行自动调整和控制,便可以优化得到合理叶型形状。叶片气动优化设计的成败在很大程度上取决于叶片参数化方法的选择。在参数化时,为提高优化速度,一般要求达到用较少的设计参数确定出定性合理、可变性较大的叶型。实际上设计参数越多,叶型可变性越大,但优化计算工作量也越大^[7]。

1.1 翼型参数

轴流风扇所选用的叶片翼型大都为航空翼型。已有的性能优良的机翼翼型或螺旋桨翼型均可用于叶片的设计上^[8]。所以对于小型轴流风扇通常采用孤立翼型设计法。

收稿日期: 2012-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(51276172);浙江省科技计划项目(2011C16038,2011C11073);浙江省自然科学基金项目(51006090)

作者简介: 朱立夫(1990-),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事流体力学及工程方面的研究。

通信作者: 金英子,电子邮箱: jin.yz@163.com

中弧线是根据给定的参考长度或子午面范围在无量纲构造面中定义的,然后转换到流面上。中弧线的形状可通过几个控制点或者角度来进行调整和控制。小型轴流风扇适合采用简单 Bezier 曲线构造中弧线,控制中弧线的变量有三个:安装角、进口几何角和出口几何角,如图 1 所示。压力面、吸力面曲线拟合有两种模式:(1) 厚度控制模式,利用 Bezier 曲线或 B 样条曲线拟合压力面吸力面一侧的厚度;(2) 构造线模式,该模式下对压力面吸力面曲线控制点分别控制,有两个控制参数:控制点和点间距,如图 2 所示。控制点参数是指控制型线的构造点,点间距参数则是指所添加的控制点之间的拉伸因子。

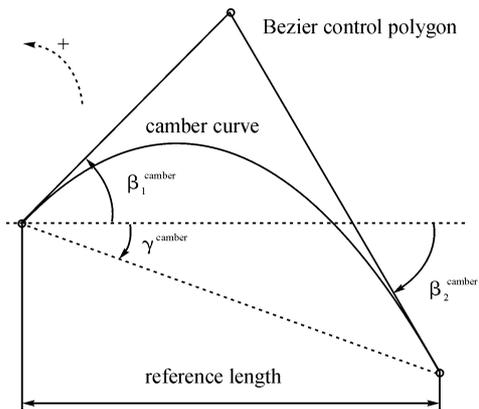
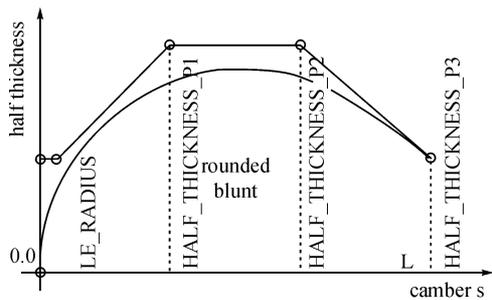
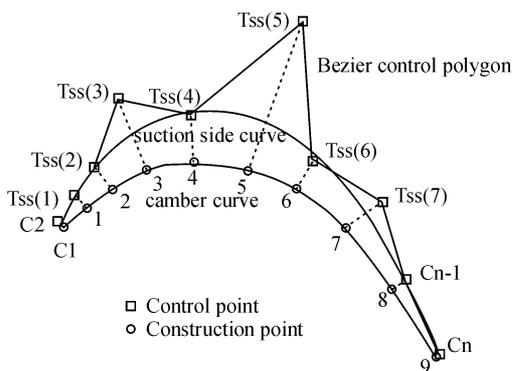


图 1 翼型中弧线设计



(a) 厚度控制模式



(b) 构造线模式

图 2 吸力面、压力面设计

1.2 叶素积叠参数

从叶根到叶顶,不同径向剖面的翼型组合成一组叶素,所谓叶片积叠线即是沿径向连接叶素的曲线。积叠线的形状与位置在很大程度上可以反映出叶片的变形情况,特别是弯掠变化。叶素积叠方式有前缘积叠、尾缘积叠、重心积叠、最大厚度积叠,弦长中心积叠。小型轴流风扇常采用前缘积叠和重心积叠。

1.3 弯掠设计参数

子午定位用于定位子午面投影方向叶片的前后缘线位置,可实现不同规律的前后掠叶片。拟合方法有两种:(1) 前后掠规律:利用 Bezier 或直线多控制点拟合,同时给定每一个截面的参考长度(中弧线长度)以确定三维叶片;(2) 前后缘迹线规律:可采用单角度控制规律(两组坐标点及一个角度)或双角度控制规律(两组坐标点,两个角度及长度参数)。小型轴流风扇采用第二种方法,如图 3 所示。

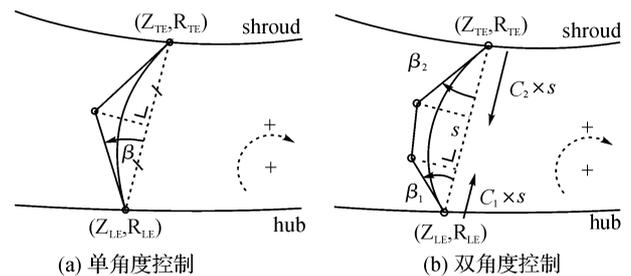


图 3 前缘后缘线定位规律形式

周向定位用于定义叶片沿周向的弯曲规律。弯曲规律线分为:三控制点 Bezier 曲线、线性变化、Bezier 曲线和直线复合线,如图 4 所示。

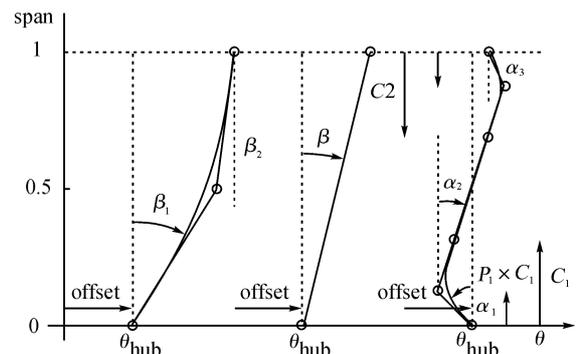


图 4 周向定位设计

2 优化方法

本文优化策略为 NUMECA/Design3D 模块中的近似函数技术。Design3D 的优化设计模块是 Optimization,核心主要是人工神经网络和遗传算法,它可以在较短时间内实现遗传算法及 3D N-S

计算的结合,如图 5 所示。同时引入并行神经网络的思想,即对于同一个输入向量,用多个具有相同或不同的拓扑结构和不同的权值矩阵的单元网络映射多个非线性输出,其中每个单元网络映射一个输出,拓扑结构如图 6 所示。单元网络采用 3 层 BP 网络,传递函数分别为双极性 Sigmoid 函数和线性函数,学习算法采用共轭梯度反向传播算法。

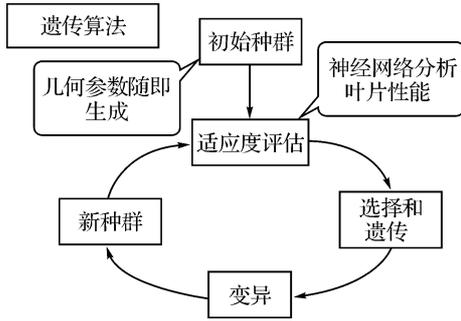


图 5 遗传算法流程

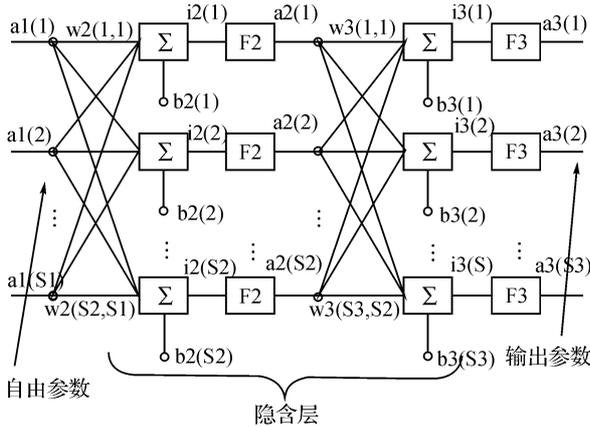


图 6 神经网络拓扑结构

3 算例及结果分析

3.1 优化方案

本文选取直叶片叶型为原始模型,就风扇周向参数进行优化,优化目标为静压。几何和性能参数如表 1 所示,其中效率和风压是额定流量下测得的数据,模型在安装机匣后叶顶间隙为 1 mm。

表 1 几何和性能参数

| 外径/mm | 内径/mm | 轮毂比/mm | 叶片数 | 转速/(r/m) |
|-----------|-------|--------|-----------|----------|
| 72 | 32 | 0.44 | 11 | 3 000 |
| 流量/(kg/s) | 效率/% | 静压/Pa | 叶根安装角/(°) | |
| 0.014 4 | 26.5 | 13.12 | 18.5 | |

本文着重考虑叶片的周向变化,即叶片弯曲的特点,由于初始模型是直叶片,所以可以选择直线和简单贝塞尔曲线两种方法来拟合周向变化,如图 4 所示。将这两种参数化方法设为方法 A 和方法 B,

这两种方法的其他参数化设定均一致,包括流面定义、积叠规律定义、子午面定位、二维叶型定位。

方法 A 利用直线定义周向变化,故产生的样本均为倾斜叶片,只有 BEAT 一个可变参数,设定倾斜角 BEAT 范围为 -30° 到 30° 。

方法 B 采用简单贝塞尔曲线拟合,由 BEAT1、BEAT2 两个参数控制周向弯曲,所产生的样本是弯曲叶片(当两个参数中有一个为零时即为倾斜叶片),将这两个参数作为可变参数,可变范围分别为 -30° 到 30° , -40° 到 40° ,此种范围下能覆盖几乎全部风扇的周向弯曲的形状。

A、B 两种方法优化目标设定一致,为单目标优化,具体设置为:优化目标静压值等于 40 Pa(目标值选择 40 Pa 只是提供静压变化的一个趋势,只要选择高于原始模型静压,并且很难达到即可),进口流量 0.014 kg/s,离散层取样,初始样本数为 10,优化迭代次数为 50。

计算流场为三维不可压缩粘性流动,采用体积差分格式并结合湍流模型对坐标系下的三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程进行求解,计算中采用 Spalart-Allmaras 湍流模型,采用显式四阶 Runge-Kutta 法时间推进以获得定常解,使用了多重网格技术和隐式残差平均速度等方法来加快时间推进速度。

3.2 优化前后参数对比

如图 7 所示为两次最佳优化结果导出的三维模型,可变参数优化前后对比见表 2 和表 3,模型 A 的 BEAT 角度为 14.761° 为倾斜叶片,模型 B 的 BEAT1 和 BEAT2 分别为 7.486° 和 12.371° ,为弯曲叶片,可以发现模型 A、B 的倾斜角度和弯曲角度都是正向的,这一点与文献中所述的前弯叶片性能普遍优于后弯叶片的观点相一致^[5]。

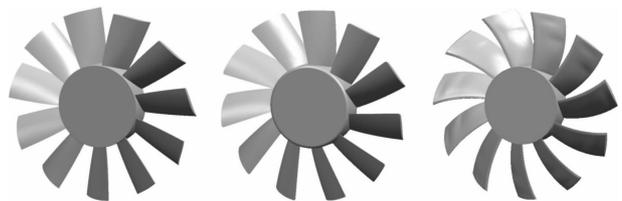


图 7 优化前后模型

表 2 可变参数优化前后对比

| 可变范围/目标值 | 优化前 X | 优化后 A |
|---------------|---------------|--------|
| LEAN_BEAT/(°) | $-30 \sim 30$ | 0 |
| 静压/Pa | 40 | 13.128 |

优化前模型 X 静压为 13.128 Pa,优化后模型 A、B 的静压分别为 16.078 Pa 和 15.764 Pa,较优化

前提高了近 20%，优化效果比较理想。

表 3 可变参数优化前后对比

| | 可变范围/目标值 | 优化前 X | 优化后 B |
|----------------|----------|--------|--------|
| LEAN_BEAT1/(°) | -30~30 | 0 | 7.486 |
| LEAN_BEAT2/(°) | -40~40 | 0 | 12.371 |
| 静压/Pa | 40 | 13.128 | 15.764 |

3.3 优化前后静特性分析

图 8 和图 9 分别是风扇优化前后的静压-流量图($P-Q$ 曲线)和效率-流量图($\eta-Q$ 曲线)。

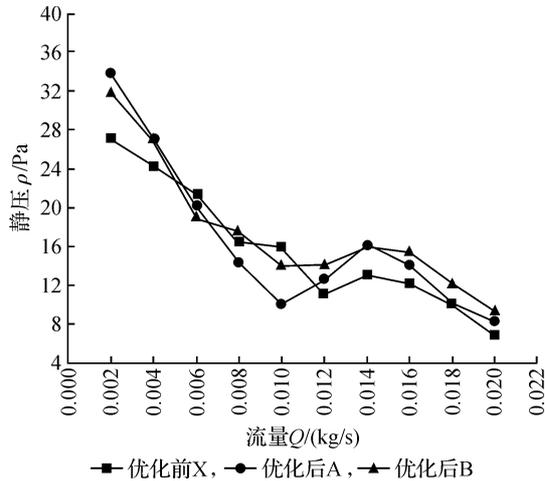


图 8 $P-Q$ 曲线

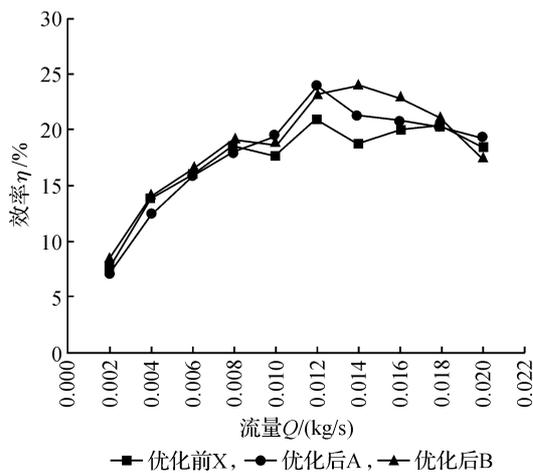


图 9 $\eta-Q$ 曲线

分析优化前后的 $P-Q$ 曲线可知: 在低流量段 (0.002~0.006 kg/s), 优化前静压值低于优化后, 差距 5 Pa 左右; 经过 0.006 kg/s 流量以后, 优化前模型 X 的静压值下降较缓慢, 在 0.012 kg/s 达到最低值, 模型 A 静压值有一个大幅下降, 在 0.010 kg/s 处达到最低值, 模型 B 曲线较平缓, 静压值比其他两个模型高; 在流量 0.010 kg/s 以后, 三个模型进入稳定工作段, 模型 A 和 B 静压值明显高于模型 X 的静压值。在额定流量 0.014 kg/s 时, 优化前模型 X、优化后模型 A 和 B 的静压值分别为 13.128 Pa、

16.073 Pa 和 15.764 Pa, 这与优化计算时得出的数据几乎一样; 流量大于 0.014 kg/s 之后, 三个模型的静压值开始降低, 模型 B 一直保持着最高的静压值。由此可见, 优化后的模型静压较优化前有较大优势, 特别是模型 B 的静压一直最高。

分析优化前后的 $\eta-Q$ 曲线可知: 优化前后模型在 0.012 kg/s 流量以后达到最高效率, 模型 X、A 在 0.012 kg/s 流量达到最高效率, 模型 B 在 0.014 kg/s 时达到最高, 最高效率分别为 20.799%、23.973%、23.761%, 可见较模型 X、A, 模型 B 的最高效率点的流量较大。在小流量段, 优化前后的效率区别不大, 模型 A 的效率较其他模型低。在 0.012 kg/s 开始, 模型 X 效率开始下降, 而模型 A、B 效率继续上升, 这以后, 优化后模型效率明显高于优化前。可见优化后的风扇叶型能降低损失, 较优化前提高了工作效率。

3.4 优化前后流场分析

如图 10 为径向中心截面的速度流线图。当前流量为 0.014 kg/s, 图 10 可以看出优化前后回流区域分布比较相似, 优化前模型叶片之间的流线在叶根处有较小回流区域, 这主要是叶片间压力不均匀导致的, 流场在靠近吸力面处形成了低压区, 流体自动补充形成了回流。这种回流会造成能量的损失, 做功能力下降, 表现为风扇效率降低, 静压降低。优化后风扇的速度流线比较稳定, 没有明显的回流区, 不过由于弯叶片使叶片长度增加, 加强了对机匣壁面和叶片之间流场的扰动, 使模型 B 在叶顶间隙处存在流场不稳定区域。三个模型比较后发现, 叶片周向的正弯曲改变了空气与叶片撞击的气流角, 避免气流垂直打在叶片上, 使其具有一定的角度, 这样就抑制了回流区的产生, 有利于流场稳定, 提高风扇性能。

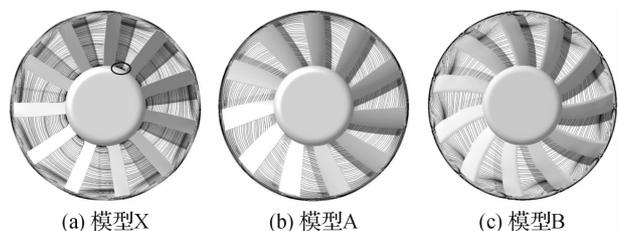


图 10 优化前后径向中心截面速度流线

图 11 为子午面相对速度分布图, 当前流量为 0.014 kg/s。空气受到叶片的冲击, 由右边入口向左边出口流动。因为同时受到外壁的限制, 气流在叶顶间隙处的流场最为复杂, 常常会产生二次流或涡流^[9], 所以风扇大部分的能量损失或者噪声都是

发生在叶顶间隙处。从图 11 可以看出,从叶根到叶顶,相对速度逐渐增大,在靠近叶顶处流速达到最大。优化前模型速度在脱离叶片时有数值上的突变,高速气流被甩出,在叶顶间隙处有二次流产生,二次流产生了和主流方向相反的气流,形成了漩涡,削弱了叶片推送流体的能力。在优化后模型中叶顶间隙的二次流减弱很多,特别是模型 A,叶顶区域速度梯度较小,气流趋于平缓,优化后风扇流动状况得到较大改善。

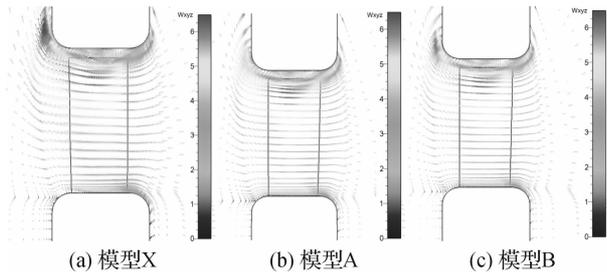
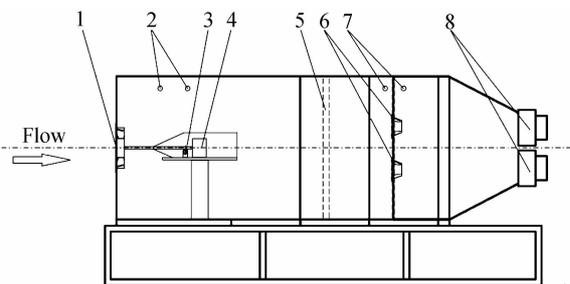


图 11 子午面相对速度分布

4 风扇静特性实测结果分析

测试风扇性能采用的风洞测试系统主要包括主体、整流网、喷嘴、辅助风机、压力传感器等。

如图 12 所示,小型风扇试验转子安装在风洞进口 1 处,静压探头 2 和扭矩转速传感器 3 用来采集风扇的静压和扭矩,驱动马达 4 用来带动转动,整流网 5 用来整流径向速度,留下轴向速度使风洞内的气体流动更加平稳,两个喷嘴 6 用来产生压差,压力探头 7 用来测量喷嘴参数的压差,辅助风机 8 由变频器控制从而改变转速,以达到调节风洞内风量的目的。



1. 试验风扇, 2、7. 压力传感器, 3. 扭矩转速传感器,
4. 驱动电机, 5. 整流网, 6. 喷嘴, 8. 辅助风机

图 12 风洞结构示意图

图 13 所示为三个模型的实验与数值模拟关于 $P-Q$ 曲线的对比图。由图 13 可以看出,实验数据与数值模拟数据趋势相似,随着流量的增大,静压值减小,在额定工作流量附近有小幅波动。在整体流量阶段,实验值普遍低于数值模拟值,这也是因为数值

模拟是理想状况下,并未考虑实际试验中的空气阻力、粘滞力以及模型表面粗糙度等影响。在低流量段,实验数据比计算数据平均低 5 Pa 左右,相差比较大;到了中流量段,计算数据有一比较大的波动,如模型 A 在 0.01 kg/s 流量时突降到 10 Pa 的低值,而实验数据变化的较为平缓,这个时候,实验数据与计算值比较相近,特别是模型 B 吻合得比较好;在高流量段,计算数据有一个平稳再降低的过程,而实验数据直接下降,数值大小普遍低于计算值。

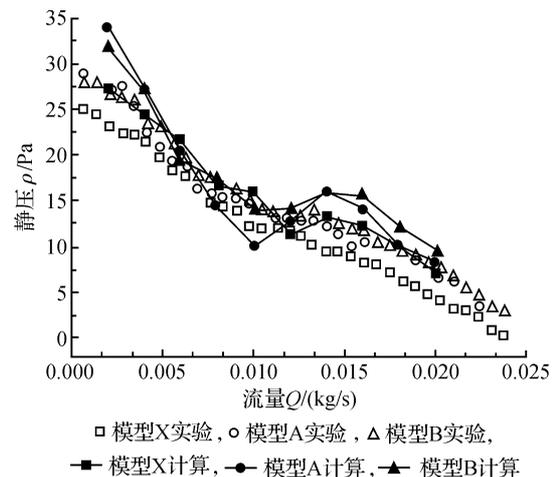


图 13 $P-Q$ 曲线

总体来说实验数据基本可以反映模型静压变化情况,实验和计算值都显示,优化后模型都要比优化前静压值高,可见新模型达到了优化静压的目的;同时可以发现弯曲叶片 B 不管在静压表现上还是稳定工作范围都优于倾斜叶片 A,而计算结果很难判断 A、B 模型的好坏。

5 结语

a) 本文分别选用直线和简单贝塞尔曲线对叶片周向定位进行参数化拟合,以静压为优化目标对风扇进行了优化设计,得到了不同参数化方法的优化模型 A 和 B,分别为倾斜叶型和弯曲叶型。优化前静压为 13.128 Pa,优化后两模型的静压分别为 16.078 Pa 和 15.764 Pa,较优化前提高了近 20%,可见周向弯曲参数对风扇气动性能具有显著影响效果,应用优化参数方法来提高风扇性能是可行的。

b) 运用风扇测试系统对优化前后风扇进行静特性实测,将实测结果与数值模拟结果进行比较,发现数值计算结果和实验数据趋势相同且数值接近,并且在稳定工作流量下,优化后风扇模型 A 和 B 的静压均比优化前有所提高,从实验的角度论证优化

结果的准确性,为风扇的设计改进提供依据。

参考文献:

- [1] Deich M E, Zaryankin A E, Filippov G A, et al. Method of increasing the efficiency of turbine stage with short blades[J]. A E I Translation, 1960: 2916.
- [2] Wisler D C. Loss reduction in axial flow compressors through low-speed model testing[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1985, 107(2): 354-363.
- [3] Wang Zhongchi, Lai Shengkai, Shu Wenyuan. Aerodynamic calculation of turbine stator cascades with curvilinear leaned blades and some experimental results[C]// Fifth ISABE, Bangalore, India, 1981.
- [4] 杨波, 刘富斌, 钟芳源, 等. 轴流式前弯动叶的变工况气动性能实验研究[J]. 实验流体力学, 2005, 19(1): 40-46.
- [5] 李杨, 欧阳华, 杜朝晖. 周向弯曲低压轴流风机叶顶泄漏流动数值研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(2): 240-242.
- [6] Grimesr, Quin D A. Theoretical and experimental investigation of the scaling of micro fan performance[C]// ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition. Washington DC, USA: ASME Press, 2003: 1-8.
- [7] 周建辉, 杨春信. CPU 轴流风扇参数化设计模拟及其应用[J]. 电子学报, 2008, 36(8): 1526-1531.
- [8] 吴秉礼, 李文洲. 轴流通风机的工程设计方法[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2007: 212-215.
- [9] Jameson A, Schmidt W, Turkel E. Numerical solutions of the euler equations by finite volume methods using Runge-Kutta time-stepping schemes[J]. AIAA Paper, 1981, 81: 1259.

Study on the Optimization of Small Axial Fan Based on the Circumference of Blade Profile Parameterization

ZHU Li-fu, JIN Ying-zi, ZHAO Yi, WU Yong-min, SUN Zhe

(School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In this paper, the authors select the straight blade of a small axial flow fan as the research object, set the static pressure as optimal objective and use genetic algorithm and approximate function method as the optimization methods, get better performance of the fan model by optimization calculation as well as analyze the static characteristics and the change in the flow field by comparing with archetypal rotor blade. Then, the authors take the use of wind tunnel test system to survey the characteristics of fans before and after optimization, and compare numerical simulation results. The results show that the authors get optimization model A and model B by different parameter methods, i. e., the oblique blade and bend blade; the static pressure rises by nearly 20%; the static characteristics and the flow field conditions of the models after optimization are better than that of the original model; the experimental data and the numerical results have the same trend and the values are approximate. The authors can make the aerodynamic performance of blade improved by optimizing circumferential parameters.

Key words: small axial fan; optimization design; blade profile parameterization; genetic algorithm; wind tunnel test

(责任编辑: 朱松英)