

仿生轴流风机气动噪声特性的实验研究

印 玮, 杨爱玲, 陈二云, 卢程程

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘 要: 针对轴流风机工作时产生的气动噪声问题, 运用仿生学原理对某轴流风机叶轮进行了仿生改型设计, 分别得到了尾缘锯齿式单结构仿生叶轮的轴流风机和前缘波齿、尾缘锯齿及表面脊状三结构耦合仿生叶轮的轴流风机。对两类风机以及原型风机进行了气动与噪声实验, 获得了风机的气动性能与辐射噪声的频谱特性。测试结果表明: 两类仿生风机的全压在全流量范围内均有不同程度的下降, 最高下降达 27%, 但尾缘锯齿风机可以提高中小流量工况下的效率, 而三结构耦合仿生风机效率低于原型风机; 两类仿生风机产生的辐射噪声 A 声级均低于原型光滑叶轮风机, 且尾缘锯齿风机降噪效果优于耦合仿生风机, 并且比 A 声级最大降噪值为 1.58 dB; 尾缘锯齿沿展向的分布长度越长, 效率越高, 降噪效果也越佳。

关 键 词: 锯齿分布; 尾缘锯齿; 耦合仿生; 轴流风机; 气动噪声;

中图分类号: TH432.1

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.10.006

[引用本文格式] 印 玮, 杨爱玲, 陈二云, 等. 仿生轴流风机气动噪声特性的实验研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(10): 51-59. YIN Wei, YANG Ai-ling, CHEN Er-yun, et al. Experimental study on aerodynamic noise characteristics of bionic axial flow fans[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(10): 51-59.

Experimental Study on Aerodynamic Noise Characteristics of Bionic Axial Flow Fans

YIN Wei, YANG Ai-ling, CHEN Er-yun, LU Cheng-cheng

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: Aiming at the aerodynamic noise caused by the axial flow fan, using the concept of bionics, the bionic modification design for an axial flow fan impellers was carried out, the axial flow fan with trailing edge serrated single-structure bionic impeller and the axial flow fan with leading edge wave teeth, trailing edge serration and surface ridge coupled bionic impellers were obtained respectively. Using aerodynamic noise test methods for two types of fans and prototype fan, the aerodynamic performance and the spectral characteristics of the radiated noise of the fans were obtained. The test results show that the total pressure of the two types of bionic fans decreases in different degrees in the full flow range, with the highest decrease of 27%, but the trailing edge serrated fan can improve the efficiency of the medium and small flow condition, while the efficiency of the three-element coupled bionic fan is lower than that of the prototype fan; the A-weighted sound level of radiated noise produced by the two types of bionic fans is lower than that of the prototype fan with smooth impellers, and the noise reduction effect of the trailing edge serrated fan is better than that of the coupled bionic fan, and the maximum noise reduction value of specific A-weighted sound level is 1.58 dB; the longer the trailing edge serrations are distributed along the spanwise

收稿日期: 2021-11-07; 修订日期: 2022-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(51106099, 50976072)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51106099, 50976072)

作者简介: 印 玮(1997-), 女, 江苏泰州人, 上海理工大学硕士研究生。

通讯作者: 杨爱玲(1969-), 女, 湖南岳阳人, 上海理工大学教授。

direction,the higher the efficiency is,and the better the noise reduction effect is.

Key words: serration distribution, serrated trailing edge, coupling bionics, axial flow fan, aerodynamic noise

引 言

为了抑制风机的气动噪声,国内外学者研究了猫头鹰在飞行中的静音作用,以及座头鲸鳍前缘的凸起结构和鱼鳍表面沟槽结构在运动中对噪声产生的影响,这些结构在流动控制中起到一定作用,因此提出采用仿生手段来控制气动噪声。Fish^[1]率先发现鲸前缘凸起结构在游泳中起到灵活转弯及滑行的作用。Graham^[2]对猫头鹰静音飞行的原理进行了深入研究,其翅膀的前缘梳状结构及尾缘流苏结构在飞行中起到了静音作用。Turner^[3]指出,气体流过带有波状前缘结构的叶片时会产生二次马蹄对涡,可有效降低压力脉动,进而抑制噪声。全帆^[4-5]研究发现,尾缘锯齿可以促进叶片压力面与吸力面气流的混合,抑制叶片尾缘处的涡脱落。王松岭^[6]研究发现脊状结构有效改善翼型边界层分离情况,抑制翼型尾迹处的涡脱落,使叶片表面压力脉动和远场声压波动得到降低。另外,Gruber 等人^[7-9]将前缘波齿、尾缘锯齿及脊状等 3 种仿生结构应用到旋转机械上,并进行了噪声测试实验,实验数据表明,进行仿生结构设计的旋转机械噪声均得到降低。

目前,国内不少学者也开始对多种仿生结构进行耦合,并开展了一系列研究。王雷等人^[10]发现,耦合仿生结构可以有效改善风机噪声。谢鸣^[11]将波状前缘、锯齿尾缘及表面脊状这 3 种仿生结构耦合,运用在 NACA0018 翼型上,采用数值模拟方法研究其流场及噪声特性,结果表明,在小攻角工况下 3 种结构耦合可以有效降低叶片的不稳定噪声。王绍兴^[12]研究了轴流风机有无前尾缘锯齿时的噪声机理发现,单一锯齿结构以及多锯齿结构耦合具有一定的降噪效果,噪声均降低 3 dB 左右。

可见波状前缘、脊状以及尾缘锯齿在噪声抑制上具有较好的效果,但鲜有学者将这 3 种结构结合应用在轴流风机上。并且现有研究^[13-14]表明,锯齿的参数对风机性能有一定影响,但对锯齿在叶片沿

展向的分布长度影响机理的研究较少,因此将这 3 种仿生结构同时应用在轴流风机叶片上,通过气动及噪声测试实验,分析 3 种结构耦合及只有单尾缘锯齿结构时对风机产生的影响,并与原型风机进行对比。同时,研究尾缘锯齿沿叶片展向的分布长度对风机气动声学性能的影响,对小型轴流风机降低气动噪声的设计具有一定的参考。

1 实验风机模型

原型风机简称为 L₀,几何参数如表 1 所示,其中 L₀在叶片叶根处的弦长为 55.37 mm,叶顶处弦长为 45.77 mm,叶片平均弦长为 50 mm。将尾缘锯齿应用于风机叶片设计出第 1 类仿生风机,为尾缘锯齿风机;将波状前缘、脊状表面及尾缘锯齿 3 种仿生结构应用于风机叶片,设计出第 2 类仿生风机,为耦合仿生风机。

表 1 原型风机的几何参数

Tab.1 Geometric parameters of prototype fan

设计流量/ m ³ · h ⁻¹	设计全 压/Pa	风机转速/ r · min ⁻¹	叶轮外径 R _t /mm	轮毂半径 R _h /mm	叶片数
36	619.6	1 830	115	60	7

Hsiao Mun Lee 等人^[15]在对螺旋桨叶片的研究中发现,锯齿沿展向的分布长度不同时对叶片噪声产生的影响不同。因此,为了研究尾缘锯齿的存在以及尾缘锯齿沿展向的分布长度对风机噪声特性的影响,在原型风机叶片的尾缘处布置锯齿,设计出 3 种尾缘锯齿风机,分别命名为 L₁, L₂, L₃,叶片剖面如图 1 所示。其中,H 为风机相对叶高,S 为锯齿开始位置距离叶根处的高度,W 为锯齿结束位置距离叶根处的高度。风机固定几何参数为齿高 8.8 mm、齿宽 4.4 mm,不同之处在于锯齿沿展向的分布长度及分布位置,L₁的锯齿尾缘始于 20% 相对叶高止于叶顶,L₂的锯齿尾缘始于 70% 相对叶高止于叶顶,L₃的锯齿尾缘始于 20% 相对叶高止于 85% 相对叶高处。以 L₂为例,其结构如图 2 所示。

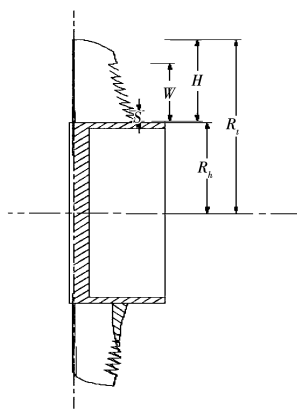
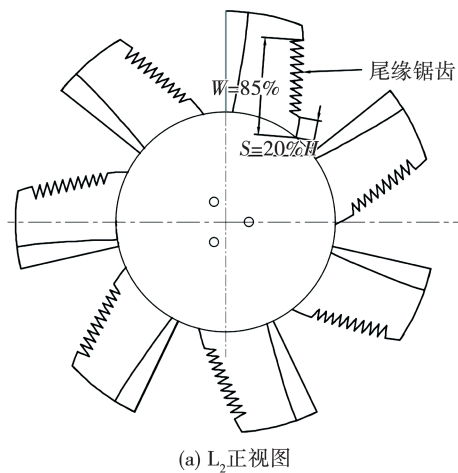
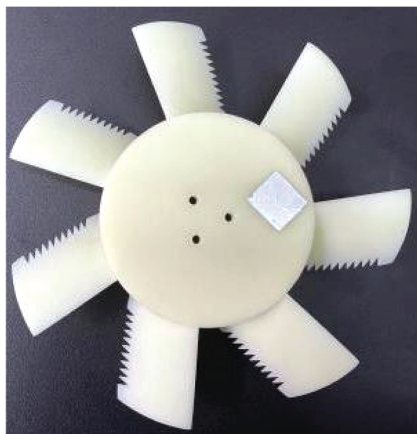


图 1 叶片剖面结构图

Fig. 1 Structural diagram of blade profile



(a) L_2 正视图



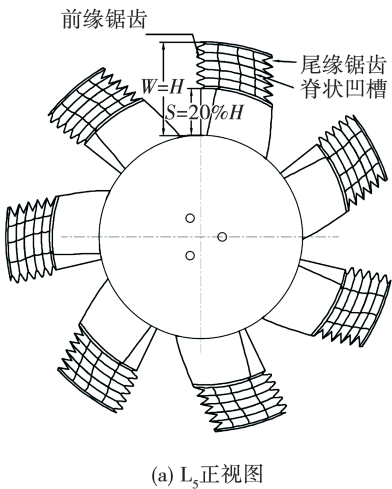
(b) L_2 实物图

图 2 L_2 尾缘锯齿风机结构

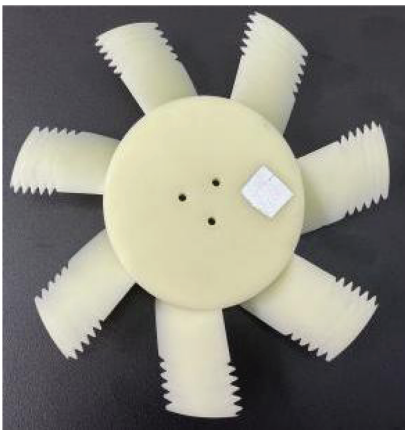
Fig. 2 The structure of tailing edge serrated fan L_2

耦合仿生风机采用单叶片设计^[11],在原型风机叶片的前缘及尾缘处布置锯齿,并在叶片表面设计脊状凹槽,表面脊状凹槽深度为 1 mm。为了研究 3 种仿生结构耦合以及耦合后锯齿沿展向的分布长

度对风机噪声特性的影响,设计了 2 种耦合仿生风机,分别命名为 L_4 和 L_5 。 L_4 和 L_5 的区别在于锯齿沿展向的分布长度,其中 L_4 为前缘和尾缘锯齿在叶片的叶高方向上全部布置, L_5 为前缘尾缘锯齿始于 50% 相对叶高止于叶顶。以 L_5 为例,其结构如图 3 所示。所有实验风机结构参数汇总如表 2 所示。



(a) L_5 正视图



(b) L_5 实物图

图 3 L_5 耦合仿生风机结构

Fig. 3 The structure of coupled bionic fan L_5

表 2 实验风机汇总

Tab. 2 Summary of experimental fans

风机类别	编号	S/H	W/H	脊状凹槽深度/mm
原型风机	L_0	—	—	—
第 1 类	L_1	0.20	1.00	—
	L_2	0.70	1.00	—
	L_3	0.20	0.85	—
第 2 类	L_4	0	1.00	1.00
	L_5	0.50	1.00	1.00

2 实验研究方法

2.1 气动试验台

风机的流量 Q - 全压 p 与流量 Q - 效率 η 曲线由上海理工大学小型通风机气动性能测试台测试得到。出气侧风室试验台是按 GB/T 1236-2000^[16] 标准搭建的小流量低压头通风机气动性能测试台,由待测风机、风室、喷嘴流量计、稳流网和辅助风机等组成,风室直径为 0.5 m,待测风机的最大测量流量为 1 200 m³/h,待测风机的流量和压力分别根据图 4 中的压差计读数 p_{e2} 、 p_{e1} 计算而得,具体计算方法参见 GB/T 1236 - 2000。小流量低压头通风机气动性能测试台的基本结构如图 4 所示。

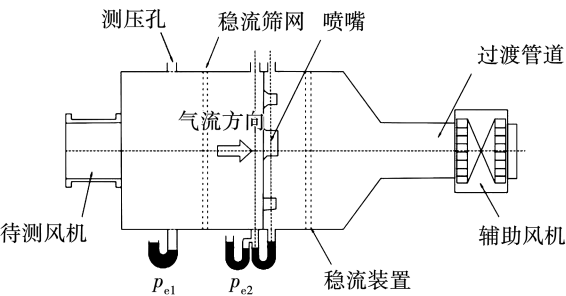


图 4 出口侧风室式风机气动性能试验装置
Fig. 4 Layout of fan aerodynamic performance experimental device of outlet crosswind chamber

图 5 为原型风机的流量 - 全压测试结果,图中 Q_s 为风机设计流量。可见,4 次重复实验获得的性能曲线基本吻合,最大偏差不超过 2.0%,这表明气动试验台具有较强的可信度。

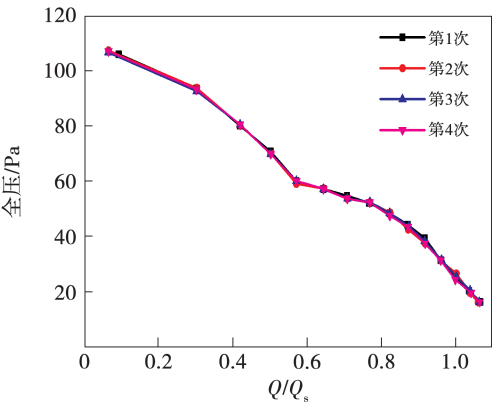


图 5 原型风机多次气动试验曲线
Fig. 5 Several aerodynamic test curves of the prototype fan

2.2 噪声试验台

风机排气噪声测量在上海理工大学半消声室进行。半消声室背景噪声为 22.8 dB,截止频率为 80 Hz,风室空间尺寸为 3.74 m × 3.34 m × 3.15 m。

考虑到风机气动性能试验台的辅助风机噪声对待测风机噪声的测量有影响,因此待测风机噪声的测量采用王永生^[17]设计的进口面积可调的方形风室。如图 6 所示,风机安装于风室面板,且使风机出口中心位于半消声室反射面的中心,风机出口噪声监测点位于距离风扇中心前方 1 m 处,与排气方向成 45° 夹角。测试过程中,保持待测风机转速不变,调节风室进口面积改变流量,测得此时的风室压力以及风机出口测点处的噪声声压级。然后,根据同一转速下风机 $Q - p$ 测试曲线,利用插值法获得对应工况点的流量。依次调节风室进口面积,获得不同流量下风扇的排气噪声。

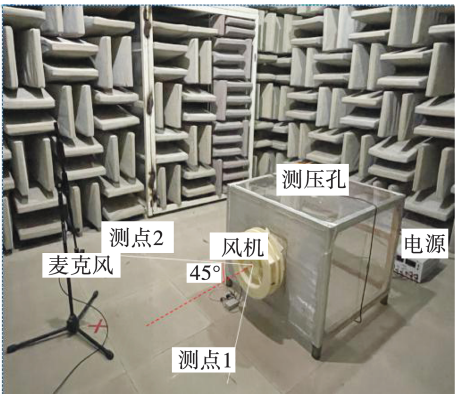


图 6 噪声测试台示意图
Fig. 6 Diagram of noise test bench

测量过程中,高频噪声信号由最高采样率为 102.4 kHz、带宽为 20 kHz 的 LMS SCADAS Mobile 系统进行采集。声压传感器为北京声望公司的 MPA201 型传感器,噪声测量均使用 A 计权,其参数如表 3 所示。实验中为避免测试设备对声音的反射,测试结果通过网线传往室外的计算机。

表 3 传感器参数
Tab. 3 Sensor parameters

灵敏度/ mV · Pa ⁻¹	响应频 率/kHz	A 计权动态 范围/dB	最大误 差/dB
51.3	3 ~ 20	17 ~ 146	< 0.2

图 7 给出了原型风机在测点 1 处声压级随流量的分布曲线,从图可知,原型风机的最低噪声出现在 $Q/Q_s=0.91$ 处,且 4 次噪声重复实验所得性能曲线基本吻合,实验偏差不得超过 0.372%,可见噪声测试台实验准确度高。

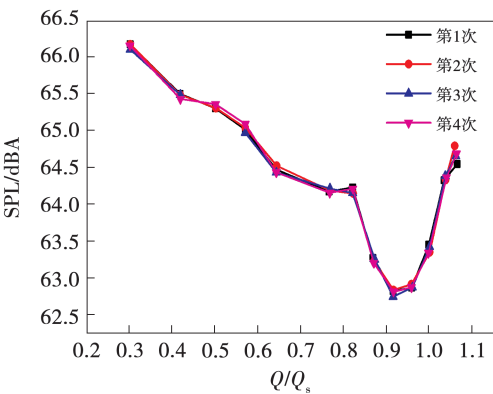


图 7 原型风机多次噪声对比曲线

Fig. 7 Multiple noise comparison curves of prototype fan

图 8 为在 1 830 r/min 及 1.1 倍设计流量时,电机有无风机负载时测点 1 处的 A 计权声压级频谱曲线。由图可见,原型风机 L_0 的 A 声级的时均值为 64.7 dB,而背景噪声 A 声级的时均值为 36.3 dB。该图表明,由测试环境和电机组成的背景噪声 A 声级的时均值远小于原型风机,超过 20 dB。从频谱曲线也看出,风机的声压级主要集中在中低频段 (128 ~ 3 753 Hz),在该频段内,背景噪声较小,可忽略背景噪声对风机排气噪声测试产生的影响。

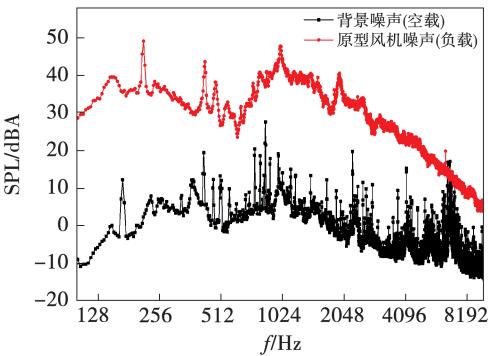


图 8 背景噪声频谱图

Fig. 8 Spectrum of background noise

3 测试结果分析

3.1 风机气动性能

3.1.1 尾缘锯齿风机气动特性

图 9 为原型风机和尾缘锯齿风机的效率随流量的变化曲线。对比图中曲线发现,原型风机和尾缘锯齿风机的最高效率点基本发生在相同运行工况,对应的 Q/Q_s 约为 0.77, L_1 的最高效率值为 37.2%,高于 L_0 ,但 L_2 和 L_3 的最高效率值低于 L_0 。相比 L_0 , L_1 和 L_3 的效率随流量的分布趋势有较为明显的变化。当 $Q/Q_s < 0.77$ 时, L_1 和 L_3 的效率明显上升, L_1 最高提升了 11.7%。 $Q/Q_s > 0.77$ 后, L_1 和 L_3 的效率明显下降。

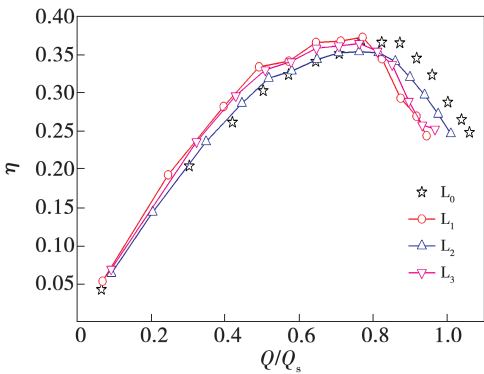


图 9 $L_0 \sim L_3$ 的流量 - 效率曲线

Fig. 9 Flow-total efficiency curves of L_0 to L_3

图 10 为原型风机和尾缘锯齿风机的全压随流量的分布曲线。该图表明,所有风机的全压分布趋势基本不变,在大流量下,尾缘锯齿风机相比于原型风机全压都有所降低,最高下降了 27%, L_2 的全压最接近 L_0 ,并且在 $Q/Q_s = 0.09$ 时, L_2 的全压比 L_0 高 5.9%。

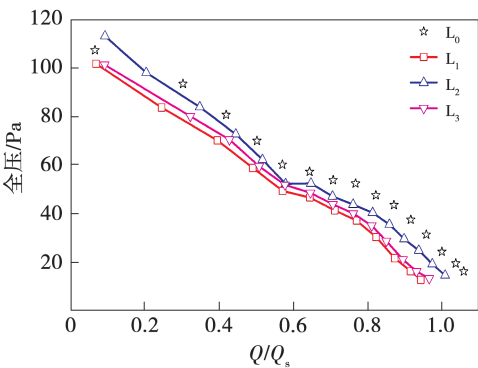


图 10 $L_0 \sim L_3$ 的流量 - 全压曲线

Fig. 10 Flow-total pressure curves of L_0 to L_3

3.1.2 耦合仿生风机气动特性

图 11 为原型风机和耦合仿生风机的效率随流量的变化曲线。同样发现,耦合仿生风机的最高效率点工况也为 $Q/Q_s = 0.77$ 。 $Q/Q_s < 0.77$ 时,耦合仿生风机效率与原型风机相近, $Q/Q_s > 0.77$ 时,耦合仿生风机效率低于原型风机。

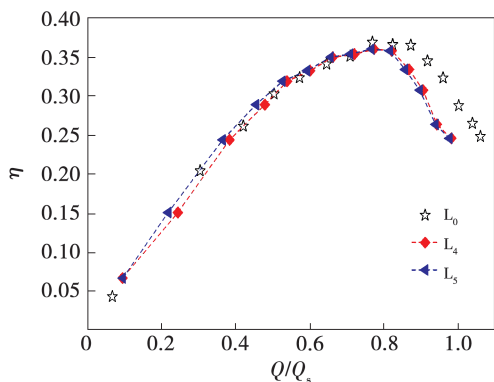


图 11 L_0, L_4, L_5 的流量-效率曲线

Fig. 11 Flow-total efficiency curves of L_0, L_4 and L_5

图 12 为原型风机和耦合仿生风机的全压随流量的分布曲线。由图可知,耦合仿生风机呈现的分布趋势与原型风机相同,但 L_4, L_5 相比于 L_0 全压均有下降,在大流量工况时下降幅度较大,最高下降 25%。

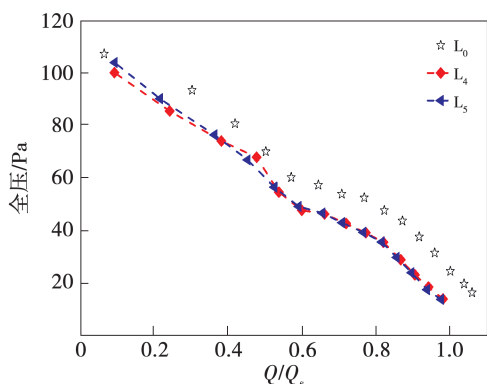


图 12 L_0, L_4, L_5 的流量-全压曲线分布

Fig. 12 Flow-total pressure curves of L_0, L_4 and L_5

两类仿生风机全压下降的主要原因在于前缘及尾缘锯齿结构减小叶片的有效气动面,导致风机叶片做功能力降低,进而导致风机全压降低。

风机的气动性能曲线表明,尽管两类仿生风机的全压下降,但尾缘锯齿风机可以提高中小流量工

况的效率,并且发现锯齿沿展向的分布长度增加有利于提高效率。

3.2 风机噪声特性分析

3.2.1 尾缘锯齿风机噪声特性

图 13 为原型风机 L_0 和 L_1, L_2, L_3 3 种尾缘锯齿风机在监测点 1 处的 A 声级随流量的变化曲线。由图可见,相比于原型风机,尾缘锯齿风机总声压级的最小工况点向左偏移,出现在 $Q/Q_s = 0.87$ 附近。声压级最小值并未发生在效率最高点 $Q/Q_s = 0.77$ 对应的工况,因为随着流量增大风机尾迹处的流动状态逐渐改善,因此噪声最低点较效率最高点偏后;此外,随着锯齿沿叶片尾缘展向长度的增加,监测点的总声压级越小, L_1 的降低幅度最大,最高降低 4.3 dB。

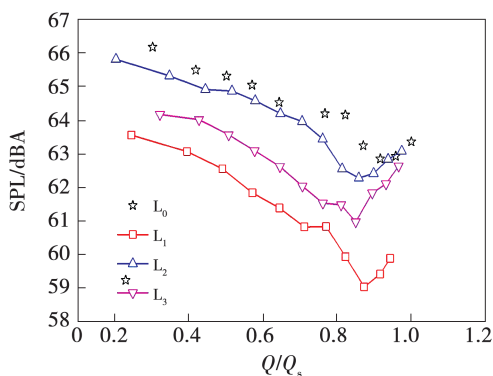


图 13 $L_0 \sim L_3$ 的 A 声级分布

Fig. 13 A-weighted sound level distributions of L_0 to L_3

由于仿生风机的气动性能不同,为了对比不同风机的噪声特性,引入无量纲数比 A 声级,比 A 声级随流量变化曲线如图 14 所示。由图可知,尾缘锯齿沿展向长度分布最短的 L_2 在中高流量段 ($Q/Q_s > 0.44$),比 A 声级明显高于 L_0 ,效果较差;随着锯齿沿展向长度的增加, L_1, L_3 在 $Q/Q_s < 0.77$ 时,比 A 声级均小于 L_0 ,其中 L_1 最高下降 1.58 dB, L_3 最高下降 0.84 dB。可见,尾缘锯齿沿展向的分布长度增加,有利于降低噪声水平。

图 15 为在效率最高点 ($Q/Q_s = 0.77$),监测点 1 处各风机的噪声频谱曲线。从图 15 中可以发现,在全频段内 L_1 和 L_3 降噪效果显著,尤其在中低频段, L_1 和 L_3 有效降低原型风机峰值噪声,这与文献[18]

研究结果一致,在低频段时锯齿尾缘可有效降低噪声。1 000 Hz 处, L_0 噪声存在明显峰值,其值为 46.44 dB。在此频率处,3 个仿生风机的峰值噪声随着锯齿沿尾缘展向长度的增加而减小, L_1, L_3 分别降低 6.17 和 6.36 dB。在高频段内, L_1, L_3 有效改善了 L_0 存在的宽频噪声。而 L_2 在中高频段 (745 ~ 10 000 Hz) 声压级明显高于 L_0 , 与图 14 比 A 声级呈现结果相同,在单位流量、单位压力时 L_2 降噪效果较差。可见,尾缘锯齿风机相比于原型风机具有一定降噪效果,并且随着尾缘锯齿沿展向的分布长度增加,降噪效果变好。

L_5 在监测点 1 处的 A 声级随流量的变化曲线。可以发现,耦合仿生风机和尾缘锯齿风机的 A 声级曲线趋势相同,两种耦合仿生风机最低工况点向左偏移, L_4 的 A 声级最低点偏移量较小,而 L_5 最低点则提前到 $Q/Q_s = 0.86$ 。 L_4 降噪效果优于 L_5 , 在 $Q/Q_s = 0.81$ 时, A 声级最高降低 2.7 dB。

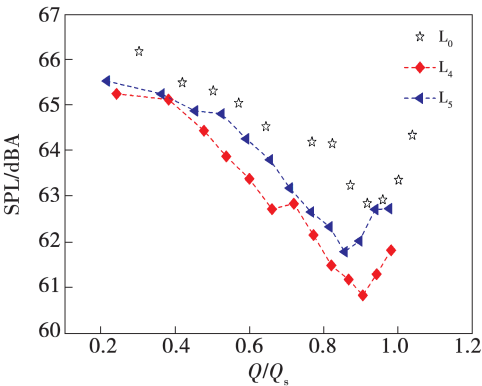
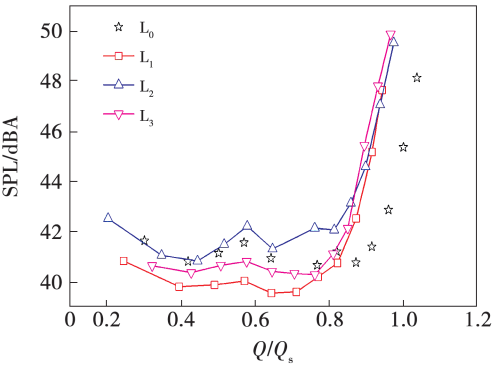


图 14 $L_0 \sim L_3$ 的比 A 声级分布

图 16 L_4, L_5 的 A 声级分布

Fig. 16 A-weighted sound level distributions of L_4 and L_5

L_4, L_5 的比 A 声级曲线如图 17 所示。 L_4, L_5 的比 A 曲线趋势与 L_0 一致,但比 A 声级明显高于 L_0 。与图 9 效率曲线变化规律相吻合,在 $Q/Q_s < 0.77$ 时, L_4 比 A 声级与 L_0 接近,当超过效率最高点工况 ($Q/Q_s = 0.77$) 时,比 A 声级开始超过 L_0 。

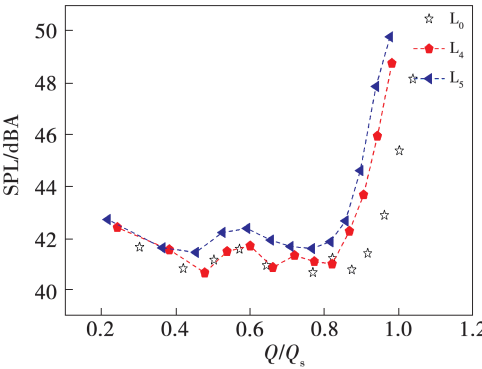
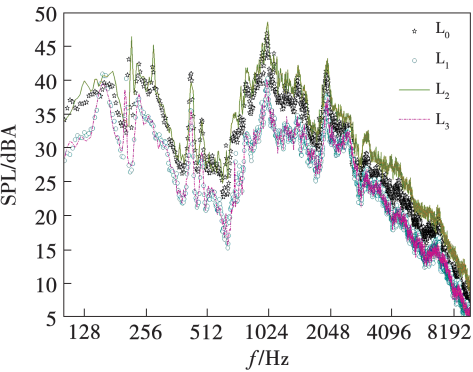


图 15 $Q/Q_s = 0.77$ 工况下 $L_0 \sim L_3$ 监测点 1 的 A 声级
频谱曲线

图 17 L_4, L_5 的比 A 声级分布

Fig. 17 Specific A-weighted sound level distributions
of L_4 and L_5

对两种耦合仿生风机的规律特性进行研究,同样选取效率最高工况点 ($Q/Q_s = 0.77$) 进行分析。图 18 为 L_4, L_5 在 $Q/Q_s = 0.77$ 时的 A 计权声压级频

3.2.2 耦合仿生风机的噪声特性

图 16 为原型风机 L_0 和两种耦合仿生风机 $L_4,$

Fig. 15 A-weighted sound level spectrum curves of
 L_0 to L_3 at monitoring point 1 under $Q/Q_s = 0.77$

谱分布。由图可见,在效率最高工况点时, L_4 、 L_5 在中低频段(200 ~ 1 000 Hz)降噪显著,在 425,1 001 Hz 时,耦合仿生风机噪声峰值均比原型风机低 4 dB 以上,但在高频段声压级上升,高于 L_0 。 L_4 整体降噪效果优于 L_5 ,相较而言, L_4 的 3 种结构分布在整个叶高方向,锯齿沿展向的分布长度越长,噪声越小。同时,耦合仿生风机中的前缘锯齿与脊状表面的结合改变了叶片表面分布,气流流经叶片前缘时能够平稳地流经叶片表面,从而改善了气流对叶片前缘的冲击,对噪声产生一定影响,锯齿在展向上长度的分布也改变了噪声的辐射。

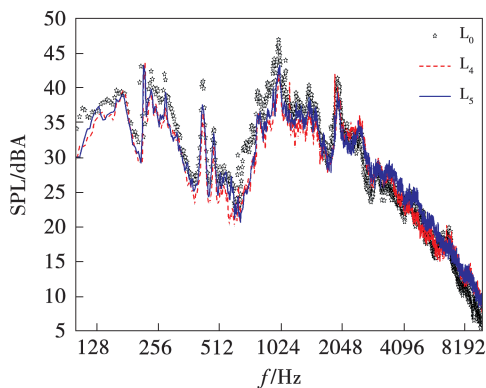


图 18 $Q/Q_s = 0.77$ 工况下 L_4 、 L_5 监测点 1 的 A 声级
频谱曲线

Fig. 18 A-weighted sound level spectrum curves of L_4
and L_5 at monitoring point 1 under $Q/Q_s = 0.77$

4 结 论

将前缘波齿、尾缘锯齿及脊状结构应用到轴流风机上,设计了尾缘锯齿风机和耦合仿生风机,分别与原型风机进行对比,通过实验得到各风机气动和噪声特性,结论得出:

(1) 与原型风机相比,尾缘锯齿结构使风机全压降低,提高风机在中小流量工况下的效率;在全频段内,尾缘锯齿风机噪声降低,并且在效率最高点工况时的降噪幅度最大,其中 L_1 的 A 声级最高下降 4.3 dB。

(2) 与原型风机相比,耦合仿生结构使风机全压和效率均降低,但小流量工况下效率与原型风机

差别不大。耦合仿生风机同样在效率最高点工况下的降噪幅度最大,其中 L_4 的 A 声级最高下降 2.7 dB。耦合仿生风机主要降低中低频段噪声,高频段降噪效果较差,导致比 A 声级反增。

(3) 在不同的仿生风机中,锯齿沿展向的分布长度同样影响风机的性能。锯齿沿展向的分布长度增加有利于提高效率,并且风机辐射的噪声下降。

参考文献:

- [1] FISH F E, BATTLE J M. Hydrodynamic design of the humpback whale flipper[J]. *Journal of Morphology*, 1995, 225(1): 51–60.
- [2] GRAHAM R R. The silent flight of owls[J]. *Journal of the Royal Aeronautical Society*, 1934(38): 837–843.
- [3] TURNER J, KIM J W, PARUCHURI C C, et al. Towards understanding aerofoils with dual-frequency wavy leading edges interacting with vortical disturbances [C]. France: 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2016.
- [4] 全 帆, 乔渭阳, 王良锋, 等. 仿生学翼型尾缘锯齿降噪机理[J]. *航空学报*, 2015, 36(9): 2911–2922.
TONG Fan, QIAO Wei-yang, WANG Liang-feng, et al. Noise reduction mechanism of bionic airfoil trailing edge serrations[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(9): 2911–2922.
- [5] 全 帆, 乔渭阳, 纪 良, 等. 尾缘锯齿降低叶栅噪声的数值模拟[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(4): 894–902.
TONG Fan, QIAO Wei-yang, JI Liang, et al. Numerical simulation on noise reduction for the cascade with trailing edge serrations[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(4): 894–902.
- [6] 王松岭, 李曙光, 刘 梅, 等. 带脊状结构的 NACA0018 翼型气动噪声特性[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(7): 166–171.
WANG Song-ling, LI Shu-guang, LIU Mei, et al. Aerodynamic noise characteristics of NACA0018 airfoil with ridged structure[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(7): 166–171.
- [7] GRUBER M. Airfoil noise reduction by edge treatments[D]. Britain: University of Southampton, 2012.
- [8] ARNDT R. Effect of leading edge serrations on noise radiation from a model rotor [C]. Pennsylvania: Society of Naval Architects and Marine Engineers, and US Navy, Advanced Marine Vehicles Meeting, 1972.
- [9] 陈 坤. 三种鸮形态学、飞行运动学特征规律及其仿生研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
CHEN Kun. Morphology, flight kinematics and bionics of silent

flight owl[D]. Changchun: Jilin University, 2012.

[10] 王 雷,刘小民,刘 刚,等. 仿生耦合叶片降噪机理研究[J]. 西安交通大学学报,2020,54(11):88-97

WANG Lei, LIU Xiao-min, LIU Gang, et al. Noise reduction mechanism of bionic coupled blades of axial flow fan[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(11): 88-97.

[11] 谢 鸣. 耦合仿生叶片流场与噪声特性研究及其应用[D]. 上海:上海理工大学,2021.

XIE Ming. Research on flow field and noise characteristics of coupled bionic airfoils and its application[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2021.

[12] 王绍兴. 地铁轴流风机仿生学降噪研究[C]. 呼和浩特:中国西部声学学术交流会,2017.

WANG Shao-xing. Metro axial fan bionics noise reduction research[C]. Hohhot: Western China Acoustics Academic Exchange, 2017.

[13] 刘小民,汤 虎,王 星,等. 苍鹰翼尾缘结构的单元仿生叶片降噪机理研究[J]. 西安交通大学学报,2012,46(1):35-41.

LIU Xiao-min, TANG Hu, WANG Xing, et al. Noise-reduction mechanism of bionic coupling blade based on the trailing edge of goshawk wing[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(1): 35-41.

[14] 杨景茹. 叶片锯齿尾缘对绕流流场及噪声的影响机制[D]. 上海:上海理工大学,2016.

YANG Jing-ru. Effects of airfoil aerodynamic noise by the use of trailing edge serrations[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2016.

[15] LEEH M, LIM K M, XIE Jing-long, et al. Experimental study on the half flat tip serrated trailing edge for stand fan[J]. Archives of Acoustics, 2020, 45(2): 359-365.

[16] GB/T1236-2000, 工业通风机用标准化风道进行性能实验[S].

GB/T1236-2000, Industrial fan-performance testing using standardized airways[S].

[17] 王永生. 小型轴流风扇流动噪声特性的研究[D]. 上海:上海理工大学,2010.

WANG Yong-sheng. Study on flow noise characteristics of small axial flow fan[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2010.

[18] ARINA R, RINALDI R D R, LOB A, et al. Numerical study of self-noise produced by an airfoil with trailing-edge serrations[C]. Colorado Springs: 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2012.

(丛 敏 编辑)

(上接第 40 页)

[3] 杨俊兰,吴依彤,王晨曦,等. CO₂跨临界水-水热泵系统实验研究[J]. 低温与超导,2020,48(4):79-84.

YANG Jun-lan, WU Yi-tong, WANG Chen-xi, et al. Experimental study on transcritical CO₂ water to water heat pump system[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2020, 48(4): 79-84.

[4] 祝银海,李聪慧,姜培学. 跨临界 CO₂热泵高温热水器性能实验研究[J]. 工程热物理学报,2018,39(10):2113-2117.

ZHU Yin-hai, LI Cong-hui, JIANG Pei-xue. Experimental investigation of transcritical CO₂ heat pump high-temperature water heater[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(10): 2113-2117.

[5] 胡余生,刘雪涛,李敏霞,等. CO₂跨临界热泵系统特性再分析[J]. 化工进展,2020,39(4):1252-1258.

HU Yu-sheng, LIU Xue-tao, LI Min-xia, et al. Reanalysis of characteristics of CO₂ transcritical heat pump system[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(4): 1252-1258.

[6] SARKAR J, BHATTACHARYYA S, GOPAL M R. Simulation of a transcritical CO₂ heat pump cycle for simultaneous cooling and heating applications[J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 29(5): 735-743.

(丛 敏 编辑)