

文章编号:1000-8055(2009)07-1606-04

周向前弯叶片对轴流风扇气动声学性能影响

李 杨

(青岛科技大学 机电工程学院, 青岛 266061)

摘 要: 通过试验获得低压轴流风扇前弯叶片声压级曲线和设计点 1/3 倍频程频谱,研究了叶片前弯角对风扇气动噪声的影响.通过数值方法,获得叶轮出口尾迹宽度的分布,分析了叶片前弯角对其影响.结果显示,随着叶片前弯角度的增加,风扇出口尾迹宽度呈现“先减小后增加”的变化特点,导致气动噪声也出现相同的变化规律,其中最低气动噪声出现在前弯 $6^{\circ} \sim 8^{\circ}$. 气动噪声差异主要发生在 300~4000 Hz.

关 键 词: 低压轴流风扇; 周向前弯角度; 气动声学性能; 尾迹宽度

中图分类号: V232

文献标识码: A

Effect of circumferential forward skewed blade on aeroacoustic performance of axial fan

LI Yang

(College of Electromechanical Engineering,
Qingdao Science and Technology University, Qingdao 266061, China)

Abstract: Low pressure axial fan with forward-skewed rotor blade was studied. The relationship between sound pressure level and flow rate and 1/3 octave spectrum at design condition was obtained through aerodynamic noise experiment. The effects of blade forward skew angle on aerodynamic noise were analyzed. The distributions of wake width at outlet of rotors were obtained from simulation. The effects of blade forward skew angle on wake width were also analyzed. The results show that, with the increase of blade forward skew angle, the wake width declines and then increases, leading to similar relationship curves between aerodynamic noise measurement data and flow rate. The lowest aerodynamic noise occurs at forward skew angle between 6° and 8° . The difference of aerodynamic noise among the rotors occurs mainly at frequency zone between 300 Hz and 4000 Hz.

Key words: low pressure axial fan; circumferential forward skew angle;
aeroacoustic performance; wake width

许多学者对低压轴流风扇气动噪声进行了研究.最具代表性是日本学者深野教授等^[1],研究指出,低压轴流风扇主要是紊流噪声,并给出了预测紊流噪声声压级的分析方法,同时通过试验验证了叶片尾迹宽度是产生紊流噪声的主要因素之一.

在叶轮机械研究领域应用弯掠叶片技术具

有提高气动效率、减小流动损失和降低气动噪声等显著优点^[2-4].但对于应用在低压轴流风扇上的弯掠叶片,其内部流动与风扇气动噪声关系的研究还很不够.深野教授也只是从气动声学理论入手分析了叶轮机构以及叶片外形对声压级的影响,并未从叶轮风扇的内部流动入手进行研究^[5-6].

收稿日期: 2008-05-23; **修订日期:** 2009-05-18

基金项目: 青岛科技大学科研启动基金(0022358)

作者简介: 李杨(1973-),男,辽宁沈阳人,副教授,博士,主要从事旋转机械内部流场及气动声学研究.

本文通过试验手段,获得了前弯叶轮的气动声压变化规律以及设计工况下 1/3 倍频程的频谱.利用数值方法,分析了叶轮出口的尾迹宽度分布.

1 研究对象

研究对象是基于 T35 的改进叶轮.在这里称之为原始或径向叶轮.保持该叶片几何参数(叶片数、弦长和进口安装角等)不变,取消该叶片前弯角后将叶片沿周向弯曲分别得到其它 3 个前弯叶片——前弯 6.1° 叶轮、前弯 8.3° 叶轮和前弯 12° 叶轮.主要设计参数包括额定转速 1440 r/min,叶轮外径 500 mm,叶片数 5 个,轮毂比 0.35,进口安装角 25°,重心积迭线为直线+圆弧(如图 1),叶顶间隙径高 2.4 mm.

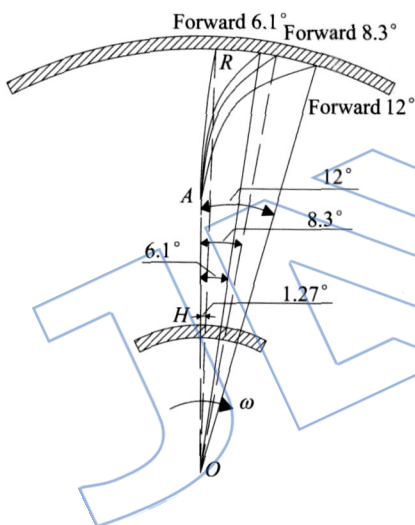


图 1 叶片重心积迭线和周向前弯角度

Fig. 1 Sketch of blade stacking line and circumferential forward skew angle

2 研究方法

试验在气动消声室内进行.风扇的气动性能试验台根据 GB/T 1236-2000^[7] 搭建.风扇电机直联,通过改变频率控制转速,并由非接触式数字转速表测量.采用消声节流锥调节流量.它能防止外界噪声由风筒末端进入消声室而引起声学性能测试的误差.声学性能测试系统包括精密声级计和 1/3 倍频程频谱分析仪所组成,遵循 GB/T 2888-91 标准测量^[8].

计算区域分为主流通道和叶顶间隙.整个模型的计算网格点数共为 216 111.计算流场为三维

不可压缩黏性流动,采用时间相关法求解雷诺平均 Navier-Stokes (N-S) 方程组加湍流方程.选用 Spalart-Allmaras (S-A) 一方程湍流模型.采用守恒形式的有限体积法,中心差分格式进行空间离散.时间推进采用四步 Runge-Kutta (R-K) 法.边界条件为:进口总压、总温;出口质量流量和静压.计算结果收敛标准:全局残差达到 1×10^{-5} ;进、出口质量流量误差小于 5×10^{-4} .

3 结果分析

对比叶轮全压升试验和数值计算结果显示,二者相对误差小于 3%.表明研究叶轮的气动性能和流场的计算与试验值吻合很好,计算结果能够反映流场的实际情况.

3.1 叶轮气动声学性能

图 2 为叶轮的声压级对比曲线.图中横坐标 ϕ 为叶轮的流量系数,其定义为

$$\phi = \frac{q}{\pi u_t r_t^2}$$

式中 q 为流量 (m^3/s); u_t 为叶轮叶尖旋转线速度 (m/s); r_t 为叶轮半径 (m).

为比较风扇的噪声特性,引入比 A 声级 L_{SA}

$$L_{SA} = L_A - 10 \lg Q(p_t/9.8)^2 \quad (1)$$

式中 L_A 为总声压级 (dB); p_t 为总压 (Pa); Q 为流量 (m^3/min).

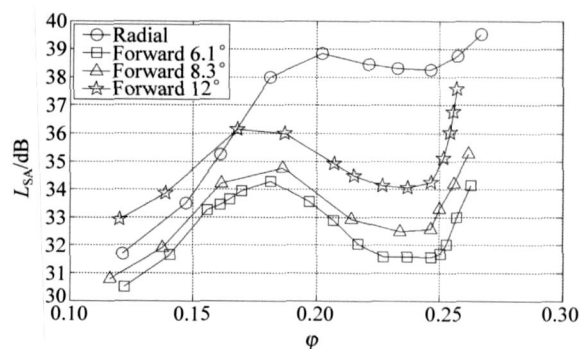


图 2 声压级对比曲线

Fig. 2 Comparison of sound pressure level

总体看,原始叶轮气动噪声最高,前弯 12° 叶轮次之,前弯 6.1° 叶轮最低.在稳定工况,叶轮最低噪声值对应着效率最高点.这与能量分析结果一致.变工况下,4 个叶轮声压级变化情况不尽相同.与原始叶轮相比,其它叶轮变化规律相似.当叶片弯角小于 6.1° 时,弯角对叶轮气动声学性能

影响较大,弯角变化约 5°,气动噪声变化 6.7 dB;当叶片弯角超过 6.1°,对叶轮气动声学性能的影响不是很大,弯角变化约 5°,气动噪声变化 2.68 dB.

图 3 为前弯叶轮设计工况下 1/3 倍频程频谱试验曲线.在整个频段,前弯 6.1°叶轮的声压级都低于原始叶轮.在大部分频段内,当叶片的弯角超过 6.1°时,随着叶片前弯角度的增加,叶轮的声压级逐渐提高,其中在 300 Hz 到 4000 Hz 的频段上差异最明显.另外,对比前弯 8.3°叶轮和前弯 6.1°叶轮的噪声频谱,相差并不非常明显.

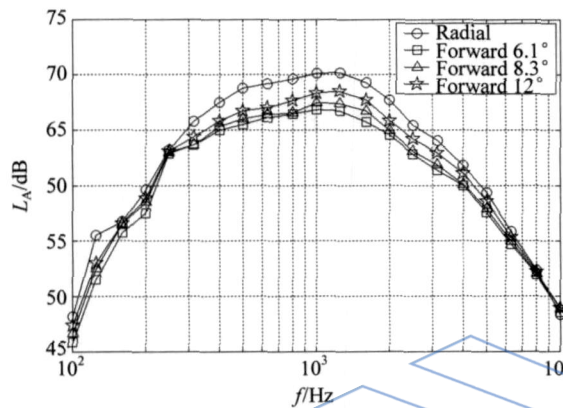


图 3 设计工况下叶轮 1/3 倍频程频谱
Fig.3 One third octave spectrum at design condition

3.2 叶轮气动噪声预测

利用轴流风扇尾涡脱落宽频噪声的声功率计算模型^[1]来估测叶轮的宽频噪声

$$E = eB = \frac{B\pi\rho_0}{1200a_0^3} \int_{an} \delta \cdot W^6 dR \quad (2)$$

式中 B 为叶片数; ρ_0 为流体密度 (kg/m^3); a_0 为当地声速 (m/s); δ 为尾迹宽度 (m); W 为气流相对速度 (m/s).

表 1 为叶轮噪声测量与计算值比较.二者吻合很好,原始叶轮几乎完全吻合,最大差异的叶轮也不超过 1 dB.结果表明,带有周向前弯叶片的低压轴流风扇,其气动噪声的主要影响因素仍然是出口相对速度和尾迹宽度.

3.3 叶轮尾迹宽度分布

图 4 为前弯叶轮出口相对尾迹宽度沿叶高分布数值结果. D 表示栅距 (m); λ 表示相对叶高,即径向位置与叶片高度的比值; δD 表示相对尾迹宽度,为径高位置尾迹宽度与栅距比值.图 5 为

表 1 前弯叶轮气动噪声测量与计算值比较
Table1 Comparison between experimental and computational results of forward-skewed rotors

	原始叶轮	前弯 6.1° 叶轮	前弯 8.3° 叶轮	前弯 12° 叶轮
测量值/dB	79.8	73.4	73.6	74.6
计算值/dB	79.8	74.1	74.3	75.0

叶片相对尾迹宽度随叶片弯角变化关系. δ_{sk} 表示叶片周向弯曲角度 (°); $\overline{\delta D}$ 表示叶片相对尾迹宽度,为叶轮相对尾迹宽度的径向平均值.如图 4、图 5 所示,前弯叶轮的相对尾迹宽度沿叶高方向有逐渐减小的趋势,在叶顶附近 (99% 叶高) 随着弯角的增加,相对尾迹宽度逐渐减小,但在其它径高,相对尾迹宽度并未出现上述变化规律.从相对尾迹宽度的径向平均结果来看,前弯 6.1° 叶轮最小,但与前弯 8.3° 叶轮很接近,二者相差 0.8%,原始叶轮明显大于其它叶轮,其中与相对尾迹宽度最大的前弯 12° 叶轮也有 8.1% 的差距,另外,与前弯 8.3° 叶轮相比,前弯 12° 叶轮的相对尾迹

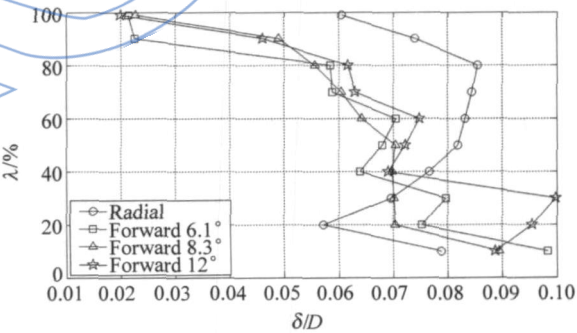


图 4 相对尾迹宽度沿叶高分布
Fig.4 Distribution of relative wake width

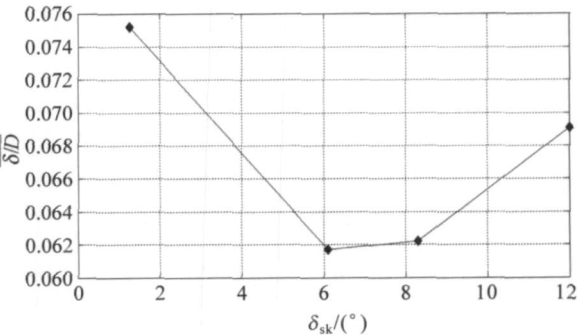


图 5 叶片相对尾迹宽度随叶片弯角变化
Fig.5 Blade relative wake width and blade forward skew angle

宽度增加了近 10 %。结果表明,低压轴流风扇叶片的弯角在 $6^{\circ} \sim 8^{\circ}$,出口流场的尾迹宽度最小,过小或过大的弯角都会增大出口尾迹宽度。

4 结 论

1) 随着叶片前弯角度的增加,低压轴流风扇气动声学性能在 $6^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 之间的某一角度最好,随着叶片弯角继续增加,气动声学性能逐渐变差。差异表现在 $300 \sim 4000$ Hz 频段上。

2) 对于低压轴流风扇,不论叶片的周向前弯角度如何,叶轮出口相对速度和尾迹宽度的大小始终是决定其气动噪声大小的两个最重要因素。

3) 对于不同前弯叶轮,尾迹宽度随着叶片前弯角度的增加都呈现“先减后增”的变化;对于同一前弯叶轮,出口尾迹宽度沿径向有逐渐减小的趋势。

参考文献:

- [1] Fukano T, Kodama Y, Takamatsu Y. Noise generated by low pressure axial flow fans: I—Modeling of the turbulent noise[J]. Journal of Sound and Vibration, 1977, 50(1): 63-74.
- [2] Beiler M, Carolus T. Computation and measurement of the flow in axial flow fans with skewed blades[J]. Journal of Turbomachinery, Transactions of ASME, 1999, 121(1): 59-66.
- [3] Sasaki T, Breugelmans F. Comparison of sweep and dihedral effects on compressor cascade performance[J]. Journal of Turbomachinery, Transactions of ASME, 1998, 120(3): 454-464.
- [4] 欧阳华, 李杨, 杜朝辉, 等. 周向弯曲方向对弯掠叶片气动声学性能影响的实验研究[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 668-674.
OU YANG Hua, LI Yang, DU Zhaohui, et al. Experimental study on aerodynamic and aero-acoustic performance of low pressure axial flow fan with circumferential skewed blades[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4): 668-674. (in Chinese)
- [5] Fukano T, Kodama Y, Takamatsu Y. Noise generated by low pressure axial flow fans: II—Effects of number of blades, chord length and camber of blade[J]. Journal of Sound and Vibration, 1977, 50(1): 75-88.
- [6] Fukano T, Kodama Y, Takamatsu Y. Noise generated by low pressure axial flow fans: III—Effects of rotational frequency, blade thickness and outer blade profile[J]. Journal of Sound and Vibration, 1978, 56(1): 261-277.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 1236-2000 工业通风机—用标准化风道进行性能试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 1236-2000 Industrial fans—Performance testing using standardized airways [S]. Beijing: Standard Press of China, 2001. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 2888/91 风机和罗茨鼓风机噪声测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Methods of noise measurement for fans, blower compressors and roots blower [S]. Beijing: Standard Press of China, 1992. (in Chinese)