DOI: 10.3901/JME.2020.18.164

电子器件轴流冷却风扇气动噪声周向模态试验

孙宗翰¹ 田 杰^{1,2} 郑浩轩¹ 俞泽安¹ 欧阳华^{1,2}

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240;

2. 燃气轮机与民用航空发动机教育部工程研究中心 上海 200240)

摘要: 包含进口不规则形状的电子器件轴流冷却风扇的周向声模态尚不明确, 需要对其噪声特性有更加深入的认识。对电子器件散热领域常用的一款变速轴流风扇的气动噪声特性开展试验研究。首先分析了风扇远场噪声频谱特征和指向性, 进风一侧一阶叶片通过频率噪声幅值最大, 出风一侧三阶叶片通过频率噪声幅值最大, 显示进出口具有不同的离散单音影响因素。风扇驱动电机电源线在静叶支撑上的排线方式对总声压级和噪声指向性有明显的影响。然后基于 18 和 8 两种均布测点的模态校正方法, 准确识别了冷却风扇进出口前三阶叶片通过频率下的周向声模态分布, 在计及风扇进口导流罩非轴对称形状的基础上, 对传统的 TYLER-SOFRIN 动静干涉模态计算公式进行修正, 并通过试验证实其有效性。

关键词: 冷却风扇; 噪声频谱; 指向性; 模态识别

中图分类号: TH42

Azimuthal Mode Experiment of Aerodynamic Noise of Axial Flow Fan for Electronic Device Heat Dissipation

SUN Zonghan¹ TIAN Jie^{1,2} ZHENG Haoxuan¹ YU Zean¹ OUYANG Hua^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;

2. Engineering Research Center of Gas Turbine and Civil Aero Engine of Ministry of Education, Shanghai 200240)

Abstract: The azimuthal acoustic mode of the axial cooling fan with imported irregular shapes for electronic device is not clear yet, thus a deeper understanding of its noise characteristics is needed. An experimental study on the aerodynamic noise characteristics of a variable-speed axial flow fan commonly used in the field of electronic device heat dissipation is conducted. First, the far-field noise spectrum characteristics and directivity of the fan are analyzed. The amplitude of 1st order blade passing frequency is the largest on the inlet side while the largest is 3rd order blade passing frequency on the outlet side, indicating there are different influence factors of discrete single tones on the either side. It is found that the setting of the motor wire on the strut has a significant influence on the total sound pressure level and noise directivity. Afterwards, based on the mode correction method utilizing 18 and 8 uniform sampling points, the azimuthal acoustic mode distributions at 1st-3rd order blade passing frequencies on the inlet and outlet sides of the axial flow cooling fan are accurately identified. Considering the non-axisymmetric shape of the fan inlet shroud, the traditional TYLER-SOFRIN rotor-stator interaction formula is modified and its effectiveness is verified by experiments.

Key words: cooling fan; noise spectrum; directivity; mode identification

0 前言

计算机服务器和通信路由器机柜中由于电子器件排列紧密热流密度大, 大量采用多个变速轴流风扇串联或并联形成冷却散热单元进行散热。但是多个风扇同时高速运转会造成气动噪声超过限值。为

了提升产品竞争力, 如何在有限的空间内降低噪声成为一个需要解决的问题, 这要求对冷却风扇的噪声特性有更加深入的认识。

冷却风扇属于亚音速轴流风扇, 其典型结构包含动叶片、上游或下游静叶支撑、导流罩以及矩形外边框, 且导流罩通常被矩形边框切割成不规则形状。亚音速轴流风扇的气动噪声主要来自于叶片非定常气动力^[1-4], 声学频谱特性体现为离散单音噪声和宽频噪声的叠加, 其中离散单音噪声主要来源

于动静叶片干涉或动叶与进气畸变的干涉^[4]。在冷却风扇领域, HUANG 等^[5-8]对冷却风扇气动噪声机制进行了一系列研究, 指出冷却风扇的离散单音噪声主要来自进口畸变、流动分离、动叶尾缘散射和动静叶干涉四个方面^[6]。由于冷却风扇具有明显的动静干涉结构, 在大流量下离散单音噪声明显^[9]。此外, 也有学者针对冷却风扇的实际工作条件开展冷却风扇串联和下游带有挡板等工况对气动噪声影响的试验研究^[10-11]。而在冷却风扇的降噪方面, 目前主要采用改进风扇造型的被动降噪, 如修正进口边缘和下游支撑以减少流动畸变^[3,8]、采用不均匀叶片分布^[12-13]等。

冷却风扇的动静干涉结构会产生叶片通过频率 (Blade passing frequency, BPF) 及其谐波下的不同周向声模态, 模态识别对理解风扇气动噪声机理以及改进风扇动静叶片数设计至关重要。周向模态的研究主要来源于压气机相关领域, 如 TYLER 和 SOFRIN 的动静干涉理论^[14], 压气机旋转失稳的周向模态分析^[15-19]以及压气机故障诊断^[20]等。传统的基于空间傅里叶变换 (Spatial Fourier transform, SFT) 的周向模态分解方法要求测点数大于模态数 2 倍以上^[21], 试验设备往往达不到要求, 为了弥补测点的不足, 发展出了不同的模态测量方法^[22-26]。现有对冷却风扇的研究中, 通常认为 BPF 处离散单音主要来自于动静干涉, 对于进口不均匀性等的的影响尚不明确, 文献[5]中提到冷却风扇进口不规则形状干涉引起的噪声相比远离进口的特征干涉所产生噪声可能占主导地位, 但其对于周向声模态的影响不明确, 仍缺乏详细的周向声模态测量和分析。

本文对一款散热用变速轴流风扇的气动噪声特性进行测量和分析。首先分析设计转速下冷却风扇远场噪声频谱特征和指向性分布。然后, 基于双均布测点的模态测试技术^[26]准确获取冷却风扇进出口周向声模态, 加入进口效应影响对传统 TYLER-SOFRIN 动静干涉模态计算公式进行修正, 据此分析冷却风扇周向声模态的产生原因。

1 研究对象和研究方法

1.1 研究对象

本文研究对象为市场上常见的一款电子器件散热用变速轴流风扇, 如图 1 所示。风扇具有 7 个动叶片和 11 个静叶支撑, 设计转速 9 000 r/min, 详细设计参数如表 1 所示。由于冷却风扇进口导流罩

被矩形边框切割, 其部分弧形进气边被矩形边代替, 进口呈现四处不规则形状, 如图 1 中 A、B、C、D。冷却风扇的电机电源线固定在静叶支撑上。

图 1 测试风扇结构

表 1 风扇主要设计参数

设计参数	数值
动叶数 B	7
静叶数 V	11
通流直径 D/mm	116
叶顶间隙比 (%)	4.7
轮毂比	0.55
设计转速/(r/min)	9 000
外形尺寸/(mm × mm × mm)	120 × 120 × 38
电压/V	48
电流/A	1.8

1.2 声学指向性测量

试验在上海交通大学航空发动机研究院气动半消声室内进行, 消声室面积 400 m², 背景噪声小于 20 dB(A), 截止频率 100 Hz。声学试验主要包括了气动噪声频谱测量、远场指向性测量和进出口周向声模态测量。远场声学指向性测量装置如图 2 所示, 风扇中心高度离地超过 1 m, 7 个传声器布置在与风扇旋转轴等高的平面内, 距离风扇旋转中心为 1 m, 风扇出风口正对的方向流场干扰明显不布置测点, 传声器加装防风罩以避免流场影响。测点布置符合《GB/T 2888—2008 风机和罗茨鼓风机噪声测量方法》的相关规定^[27]。

声学测量采用 B&K 4189 传声器接 B&K 2671 前置放大器, 传声器测试不确定度为 0.30 dB。声压信号通过 NI PXIe 1085 机箱和 2 块 NI PXIe-4499 采集卡(16 通道同步采样输入, 24 位分辨率)采集。采样频率 20 kHz, 采样点数 20 k, 窗函数为 Hanning 窗。传声器的标定使用 B&K 4231, 每次试验前进行标定。每次测量待风扇稳定工作后连续采集 20 s, 通过 RMS 平均消除测量随机误差带来的影响。

图 2 试验装置及指向性测点布置

1.3 周向模态分析测试方法

周向模态的测量采用同步测量方式, 在正对冷却风扇的垂直于旋转轴的环面上均匀布置多个传声器, 如图 3 所示。传声器所处圆周直径为 400 mm, 是风扇通流直径的 3 倍以上, 可以避免风扇流场对声学麦克风测量的影响。周向模态的提取方法为对时域信号进行空间傅里叶变换, 对于每个离散频率 f , 声压 p 可以分解为不同周向声模态的叠加进行求解

$$p_f(\theta) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} A_{mf} \exp(im\theta) \quad (1)$$

$$A_{mf} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p_f(\theta_n) \exp(im\theta_n) \quad (2)$$

式中, m 为周向模态, θ 代表周向角度, A_{mf} 为频率 f 处的模态振幅。若频谱信号中某个峰值对应的真实模态数 m_x 满足 $|m_x| > N/2$, 则测得的模态数会混叠至 $N/2$ 范围内, 由下式计算求解

$$m = m_x + \lambda \cdot N \quad \lambda = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

图 3 周向模态测量装置及测点布置

2 冷却风扇远场噪声特性

2.1 远场噪声频谱

风扇额定转速下进出口 $\pm 45^\circ$ 的远场噪声窄带谱结果, 如图 4 所示。图 4 中可见明显的叶片通过频率(BPF)、转子频率(RF)以及各阶倍频的单音噪声峰值。风扇进风口和出风口远场噪声频谱呈现不同特征, 图 4a 和 4b 所示出风口以三阶 BPF 单音噪声为主导, 而图 4c 和 4d 所示进风口以一阶 BPF 单音噪声为主导。频谱中的 RF 主要来源于转子不平衡, 其频谱特征上体现了某种调制现象, 但 SPL 幅值较小不是主要单音噪声。7 个测点平均的

(a) 测点 P_1 噪声窄带谱

(b) 测点 P_7 噪声窄带谱 (c) 测点 P_3 噪声窄带谱 (d) 测点 P_5 噪声窄带谱

图 4 冷却风扇不同测点噪声窄带谱

总声压级、离散总声压级和宽频总声压级分别为 75.6 dB(A)、74.3 dB(A)和 69.6 dB(A), 离散单音噪声是主要的气动噪声源。

2.2 噪声指向性特征

风扇远场噪声总声压级指向性分布如图 5a 所示, P_5 处噪声明显大于 P_3 , 且与其他测点总声压级相差超过 2 dB(A), 指向性分布呈明显的不对称性。在风扇出风口的 P_1 和 P_7 也存在类似的不对称, 但差距不明显。上文提到, 冷却风扇有两个明显的设计特点: 被外边框切割的不完整进风口和下游静叶支撑上携带的电源线。前者会引起不必要的进气畸变, 但其属于对称结构; 后者会与动叶片发

生干涉形成额外的噪声^[6], 造成该不对称性的原因很可能来自于此。改变下游静叶支撑上的电源线所处位置, 将其从原型冷却风扇的静叶 1 位置调整到图 5b 所示的静叶 2 位置上。

图 5 原型机总声压级极坐标图和两种电源排线

排线 2 对应 P_3 和 P_5 的窄带谱如图 6 所示。与图 4 中 P_3 和 P_5 窄带谱对比发现, 改变电源线位置后, P_3 的前两阶 BPF 噪声幅值增加而三阶 BPF 降低, P_5 的前三阶 BPF 幅值均减小, 二阶和三阶 BPF 峰值不再突出。分别计算 P_3 和 P_5 的噪声总声压级, 原型机 P_3 和 P_5 处总声压级分别是 75.9 dB(A)和 78.7 dB(A), 而排线 2 对应 P_3 和 P_5 处总声压级则变为 78.6 dB(A)和 75.7 dB(A), 电源线所处方向的噪声声压级更大。 P_1 和 P_7 也有类似变化但变化值较小。因此, P_3 和 P_5 的频谱特征

(a) 排线 2 对应测点 P_3 噪声窄带谱

图6 排线位置2对应 P_3 和 P_5 的噪声窄带谱

与静叶上携带的电源排线位置有对应关系, 电源线的存在给风扇带来了额外的噪声, 改变了冷却风扇远场辐射噪声的指向性。

3 周向声模态分析

3.1 周向声模态校正

对于冷却风扇, 当仅考虑动静叶干涉影响的时候, 其典型的周向声模态由 TYLER-SOFRIN 动静干涉理论确定

$$m = nB + kV \quad n = 1, 2, \dots \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (4)$$

式中, $k = 0$ 表征仅有旋转动叶影响而没有干涉影响。冷却风扇产生的旋转声模态数 m 由动叶数 B 及静叶数 V 决定, 如表2所示。通常高阶模态对应较低的幅值, 因此表中仅列出部分低阶模态。冷

却风扇的周向声模态测量使用的传声器数量最大为18个, 由于成本及传声器阵列大小限制, 更多的传声器无处安装, 如图3所示。因此, 可分解的周向模态范围为 $[-8, 9]$ 。从表2中可见, 仅有BPF处的模态7和-4, 二阶BPF处的模态3和-8以及三阶BPF处的模态-1满足NYQUIST采样定律, 而其他周向模态数会发生模态混叠, 使得周向模态数无法准确判断, 影响对冷却风扇气动噪声机理的分析。本文采用文献[26]提出的基于双均布传感器的模态校正方法, 其优势是可以有效减少测量高阶模态所需的传声器数量。试验采用 $N_1 = 18$ 和 $N_2 = 8$ 的两种不同的均布传声器阵列分别进行周向声模态测量, 校正可能存在的高阶模态。测量时, 进风和出风口传声器环面与风扇中心平面平行且同轴, 两平面轴向距离为50 mm。

表2 基于T-S动静干涉的理论周向声模态

谐波数 n	谐波频率 $n\text{BPF} / \text{Hz}$	系数 k				
		0	1	-1	-2	-3
1	1 050	7	18	-4	-15	-26
2	2 100	14	25	3	-8	-19
3	3 150	21	32	10	-1	-12

测量并计算得到对应前三阶BPF的周向模态振幅, 如图7和图8所示。均布18测点和8测点模态振幅分布大体相似, 在幅值上有些许差距。在进风口BPF的模态振幅较大, 而出风口二阶和三阶BPF模态振幅较大, 进出口呈现不同的周向模态分布。提取各阶BPF下不同均布测点得到周向模态

图7 进风口前三阶BPF噪声模态振幅

图 8 出风口前三阶 BPF 噪声模态振幅

振幅最大的前两阶模态数, 如表 3 所示, 表中列前模态具有最大模态振幅。均布 18 测点和 8 测点测得模态振幅最大的前两阶模态数对应相等, 仅在出风口 BPF 处, 对应均布 18 测点周向模态结果为 -1、0, 而均布 8 测点结果为 0 和 -1。无论是均布 18 测点还是均布 8 测点, -1 和 0 模态幅值差距很小。后文的分析中, 仍然将这种情况视为不同均布测点得到模态数相同。

表 3 18 和 8 测点周向模态分解结果

测点数 N	进风口			出风口		
	1BPF	2BPF	3BPF	1BPF	2BPF	3BPF
18	-1, 3	-1, 2	-2, -1	-1, 0	2, 0	2, -2
8	-1, 3	-1, 2	-2, -1	0, -1	2, 0	2, -2

根据文献[26], 若真实模态数为 m_x , 不同均布测点测得模态数相等 $m_1 = m_2$, 则

$$m_x = m_1 + i \cdot S = m_2 + i \cdot S, \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5)$$

式中, S 为两种不同均布测点数的最小公倍数, 此处 $S = 72$ 为 $N_1 = 18$ 和 $N_2 = 8$ 的最小公倍数。由式 (5), 可能的真实模态相差 S 的整数倍, 以进风口一阶 BPF 为例, 对应 -1 模态可能为 71、-1、-73..., 3 模态可能为 75、3、-69..., 间隔为 72。显见 -1、3 应为真实模态结果。以此类推, 表 3 所列不同均布测点测量得到周向模态即为真实模态结果。对比表 3 实测结果和表 2 所示的动静干涉理论分析结果, 仅在三阶 BPF 处进风口存在的 -1 模态可以与理论计算吻合, 且该模态对应振幅非最大。

实测结果和理论预测结果的不符合表明, 在冷却风扇的噪声分析中仅考虑动静叶片数的干涉影响是不充分的。

3.2 周向声模态分析

在大风扇管道声学研究中, 在有进口支撑、动叶和静叶的情况下, 周向声模态会受到进口支撑的改变^[28-29]。FITZGERALD 和 LAUCHLE^[2]、HUANG 等^[6]研究发现冷却风扇进口边不规则形状对气动噪声影响类似于动静叶的干涉, 但没有关于模态的分析。第 3.1 节中模态与动静干涉理论的不符合主要来自于进口影响。将进口不规则形状的影响加入到式 (4) 的 TYLER-SOFRIN 动静干涉模型中, 得到

$$m = nB + kV + iS \quad k, i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (6)$$

式中, S 为进口不规则形状的个数, 如图 1 所示 $S_s = 4$ 。式 (6) 中, 当 $k = 0$ 时, 表明只有进口效应与动叶的干涉影响; 而 $i = 0$ 时, 则表明只有出口静叶和动叶的干涉影响。 k 和 i 值选取表征进出口干涉效应对冷却风扇周向声模态的影响。

基于式 (6) 的模型分析冷却风扇的周向声模态, 结果如表 4 所示, 实测结果与式 (6) 完全吻合。分析结果显示, 前两阶 BPF 下有多个模态对应系数 $k = 0$, 尤其在进风口 BPF 下两个主要模态均为动叶数与进口不规则形状数的组合, 这反映了前两阶 BPF 下不规则进口形状与动叶的干涉效应影响较为显著。三阶 BPF 下仅进风口 -1 模态对应 $i = 0$, 更多体现在不规则进口、动叶和静叶共同作用的影响。进出口周向声模态的不同主要是由于在

风扇上下游, 动叶与进口不均匀或静叶的干涉影响程度不同。另外, 在本文研究的风扇中巧合地出现 $B + S = V$, 这使得出风口对应前两阶 BPF 的周向声模态中出现了零模态。低阶零模态一般具有较高的能量, 且不易截止, 对冷却风扇噪声不利。可以通过改变动静叶片数以及进口不规则形状个数避免零模态出现, 这对控制冷却风扇噪声及其传播有积极的意义。

表 4 风扇的周向声模态分析

谐波数 n	进风口			出风口		
	实测模态 m	系数 k	系数 i	实测模态 m	系数 k	系数 i
1	-1	0	-2	-1	0	-2
	3	0	-1	0	-1	1
2	-1	-1	-1	2	0	-3
	2	0	-3	0	-2	2
3	-2	-1	-3	2	-1	-2
	-1	-2	0	-2	-1	-3

4 结论

本文对某型轴流冷却风扇的气动噪声特性进行测量, 得到风扇的噪声频谱和指向性特点, 探究了指向性的影响因素。利用模态校正方法, 得到进出口周向声模态分布, 并分析了与冷却风扇的结构特点的关联, 主要结论如下。

(1) 冷却风扇主要噪声为离散单音噪声。风扇远场噪声具有明显的不对称性, 电源线排线对其有显著影响。

(2) 计及风扇进口导流罩不规则形状特点, 加入进口效应对传统的 TYLER-SOFRIN 动静干涉模态计算公式进行修正, 与实测周向声模态结果吻合好。

(3) 冷却风扇前两阶 BPF 下进口与动叶的干涉影响较为显著, 进口不均匀数目与动叶的加和等于静叶数目, 导致了出风口前两阶 BPF 对应的周向声模态中出现零模态, 不利于风扇降噪。

参 考 文 献

- [1] MUGRIDGE B D, MORFEY C L. Sources of noise in axial flow fans[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1972, 51(5A): 1411-1426.
- [2] FITZGERALD J M, LAUCHLE G C. Reduction of discrete frequency noise in small, subsonic axial-flow fans[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1984, 76(1): 158-166.
- [3] MORFEY C L. Rotating blades and aerodynamic

sound[J]. Journal of Sound and Vibration, 1973, 28(3): 587-617.

- [4] 乔渭阳. 航空发动机气动声学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- [5] QIAO Weiyang. Aeroacoustics of aero-engine[M]. Beijing: Beihang University Press, 2010.
- [6] HUANG Lixi. Characterizing computer cooling fan noise[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2003, 114(6): 3189-3200.
- [7] HUANG Lixi, WANG Jian. Acoustic analysis of a computer cooling fan[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2005, 118(4): 2190-2200.
- [8] LU H Z, HUANG Lixi, SO R M C, et al. A computational study of the interaction noise from a small axial-flow fan[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2007, 122(3): 1404-1415.
- [9] WANG Jian, HUANG Lixi. Quantification and control of noise sources in a small axial-flow fan[J]. Noise Control Engineering Journal, 2006, 54(1): 27-32.
- [10] HODGSON M. Experimental study of the noise emission of personal computer cooling fans[J]. Applied Acoustics, 2006, 67(9): 849-863.
- [11] WANG Chen, ZHANG Weihao, HUANG Lixi. Noise source analysis and control of two axial-flow cooling fans in series[J]. Noise Control Engineering Journal, 2016, 64(5): 677-687.
- [12] WANG Chen. Noise source analysis for two identical small axial-flow fans in series under operating condition[J]. Applied Acoustics, 2018, 129: 13-26.
- [13] LÉWY S. Theoretical study of the acoustic benefit of an open rotor with uneven blade spacings[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1992, 92(4): 2181-2185.
- [14] BOLTEZAR M, MESARIC M, KUHELJ A. The influence of uneven blade spacing on the SPL and noise spectra radiated from radial fans[J]. Journal of Sound & Vibration, 1998, 216(4): 697-711.
- [15] TYLER J M, SOFRIN T G. Axial flow compressor noise studies[J]. Transaction of the Society of Automotive Engineers, 1962, 70: 309-332.
- [16] LIU J, HOLSTE F, NEISE W. On the azimuthal mode structure of rotating blade flow instabilities in axial turbo-machines[C]// Aeroacoustics Conference. 1996: 1741.
- [17] PARDOWITZ B, TAPKEN U, ENGHARDT L. Time-resolved rotating instability waves in an annular

- cascade[C]// 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (33rd AIAA Aeroacoustics Conference). 2012: 2132-2145.
- [17] PARDOWITZ B, TAPKEN U, SORGE R, et al. Rotating instability in an annular cascade: detailed analysis of the instationary flow phenomena[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2014, 136(6): 061017.
- [18] PARDOWITZ B, TAPKEN U, NEUHAUS L, et al. Experiments on an axial fan stage: Time-resolved analysis of rotating instability modes[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2015, 137(6): 062505.
- [19] 周迪, 王晓宇, 陈俊, 等. 转子叶栅非同步振荡发声特性研究[J]. *航空学报*, 2015, 36(3): 737-748.
- ZHOU Di, WANG Xiaoyu, CHEN Jun, et al. Investigation of sound generation by non-synchronously vibrating rotor blades[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(3): 737-748.
- [20] 程礼, 杨武奎, 梁涛, 等. 基于声模态的压气机/风扇气路故障诊断[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(13): 38-44.
- CHENG Li, YANG Wukui, LIANG Tao, et al. Failure diagnosis on gas path of fan/compressor based on acoustic mode[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(13): 38-44.
- [21] 王良锋, 乔渭阳, 纪良, 等. 轴流风扇/压气机管道周向声模态的测量[J]. *航空动力学报*, 2014, 29(4): 917-926.
- WANG Liangfeng, QIAO Weiyang, JI Liang, et al. In-duct circumferential acoustic mode measurement of axial fan/compressor[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(4): 917-926.
- [22] SIJTSMA P, ZILLMANN J. In-duct and far-field mode detection techniques[C]// 13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (28th AIAA Aeroacoustics Conference). 2007: 3439-3451.
- [23] HUANG Xun. Compressive sensing and reconstruction in measurements with an aerospace application[J]. *AIAA Journal*, 2013, 51(4): 1011-1016.
- [24] YU Wenjun, HUANG Xun. Compressive sensing based spinning mode detections by in-duct microphone arrays[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(5): 055901.
- [25] YU Wenjun, MA Zhengyu, LAU A S H, et al. Analysis and experiment of the compressive sensing approach for duct mode detection[J]. *AIAA Journal*, 2018, 56: 648-657.
- [26] TIAN Jie, YAO Dan, WU Yadong, et al. Experimental study on rotating instability mode characteristics of axial compressor tip flow[J]. *Experiments in Fluids*, 2018, 59(4): 63-75.
- [27] 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. GB/T 2888—2008 风机和罗茨鼓风机噪声测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 2888—2008 Methods of noise measurement for fans blowers compressors and Roots blowers[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [28] DOUGHERTY R, MENDOZA J. Nacelle in-duct beamforming using modal steering vectors[C]// 14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference). 2008: 2812-2825.
- [29] CALDAS L, BACCALA L A, CUENCA R G, et al. In-duct beamforming noise source estimation mode detection university of s ão paulo fan rig[C]// 21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 2015: 2233-2243.

作者简介: 孙宗翰, 男, 1995 年出生。主要研究方向为叶轮机械气动声学。

E-mail: szhdjaccount@sjtu.edu.cn

欧阳华(通信作者), 男, 1973 年出生, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为航空发动机不稳定流动及气动声学、风扇/压气机内部流动试验与数值模拟等。

E-mail: oyh@sjtu.edu.cn