

矿用轴流通风机集流区域主动降噪试验

于琦^{1,2},王海桥^{1*},刘刚³,张任强¹,陈方兴¹,陈永平^{1,4},旷颖仑⁵

(1.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院,湖南 湘潭 411201;2.湖南理工职业技术学院 智能制造学院,湖南 湘潭 411104;
3.湖南科技大学 湖南省矿山通风与除尘装备工程技术研究中心,湖南 湘潭 411201;
4.桂林航天工业学院 能源与建筑环境学院,广西 桂林 541004;5.湘潭市生态环境局,湖南 湘潭 411100)

摘要:针对轴流通风机进行主动降噪,尚属于轴流通风机降噪领域的前沿问题.围绕该问题,以 YBT-5.5 型轴流通风机为试验对象,选取自由空间、对称分布受限空间、近壁面受限空间作为通风机试验环境,分析通风机集流区域的噪声分布,并对比了降噪前后的声压级、频谱特性.结果表明,集流区域正对方向,在自由空间下,降噪量可达 7.2 dB(A);受限空间下,空间对称分布时降噪量为 5.9 dB(A),近壁面处降噪量为 2.8 dB(A).在通风机集流区域,对于斜向 45° 的测点,左侧降噪难度高于右侧;相较两侧的测点,左侧降噪难度低于右侧.当通风机位置从自由空间变为受限空间时,集流区域的噪声能量变化集中在 100~500 Hz.

关键词:环境工程学;轴流通风机;集流区;主动降噪;频谱

中图分类号:X593

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2022)04-0072-07

Experimental Study on Active Noise Control in Intake Area of Mine Axial Fan

YU Qi^{1,2}, WANG Haiqiao¹, LIU Gang³, ZHANG Renqiang¹,
CHEN Fangxing¹, CHEN Yongping^{1,4}, KUANG Yinglun⁵

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Intelligent Manufacturing College, Hunan Vocational Institute of Technology, Xiangtan 411104, China;

3. Hunan Mine Ventilation and Dust removal Equipment Engineering Technology Research Center, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 4. Department of Energy Engineering and Building Environment,

Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China;

5. Xiangtan Bureau of Ecology and Environment, Xiangtan 411100, China)

Abstract: The research is about active noise control of axial flow fans, which is a frontier issue in the field of noise reduction of axial flow fans. In order to study this problem, the YBT-5.5 axial flow fan is used as the experiment object. Free space, restricted space with symmetrical distribution, and restricted space near the wall are selected as the noise measurement environment of the fan. The noise distribution of the fan intake area is analyzed, and the sound pressure level and frequency spectrum characteristics before and after noise reduction are compared. The data show that in the opposite direction of the intake area, in free space, the noise reduction can reach 7.2 dB(A). In the confined space, the noise reduction is 5.9 dB(A) when the space is symmetrically distributed, and the noise reduction near the wall is 2.8 dB(A). For the measuring points with an oblique angle of 45°, the noise reduction difficulty on the left side is higher than that on the right side. For the measurement points on both sides, the noise reduction difficulty of the left side is lower than that of the right side. When the

收稿日期:2022-03-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51864014);交通运输部交通运输行业重点科技项目清单(2021-MS5-126);广西交通运输行业重点科技项目清单(桂交便函[2021]148号18);湖南省自然科学基金资助项目

*通信作者,E-mail:hqwang1962@126.com

fan location changes from free space to confined space, the noise energy change in the intake area is concentrated in the range of 100~500 Hz.

Keywords: environmental engineering; axial flow fan; intake area; active noise control; spectrum

轴流通风机作为辅助通风设备,用途广泛.在矿井巷道等受限空间中,通风机噪声与反射噪声混叠,声场复杂,噪声污染严重.近年来,随着职业健康教育的普及,工业噪声防治措施成为重中之重^[1].因此,开展矿井通风机的降噪研究,尤其是主动降噪,对通风机噪声治理研究至关重要.

一般轴流通风机降噪通常围绕着消声隔声、叶片等^[2-3].对于风机的消声隔声,2008年,方建华等^[4]提出了较详细的隔声罩设计方案;2019年,王振国^[5]阐述了风机房的噪声治理对策;2019年,徐星^[6]提出了抗性消声器的改进方案,并具有良好的降噪效果;2020年,C Felix等^[7]研究微孔板式消声器的声学特性,在消声器保持相同的效率和压力时,可以有效规避高频噪声的产生.

关于叶片锯齿的研究,2010年,梁桂强^[8]得出叶片锯齿各参数对噪声的影响规律;2017年,为减小尾缘涡脱落对噪声的影响,唐俊等^[9]发现正弦锯齿尾缘在提升中小流量风机效率的同时,还对低频噪声有所改善;2020年,王雷等^[10]提出了耦合正弦型锯齿结构的仿鸢翼叶片尾缘,改善风机运转时的中低频噪声;2020年,叶学民^[11]阐述了锯齿尾缘的流场特性和降噪机理.另一方面,为有效控制气动噪声且使风机达到设计全压,2016年,通过加弯叶型对风机改进,潘虹宇等^[12]发现,升力系数提高,且气动噪声降低1.4 dB;同年,孙扬智等^[13]指出风机侧面的气动噪声值最小.对于不同进气条件下的噪声研究,2016年,Florian^[14]通过试验研究的方法,分析了畸变进气条件的噪声特性;2022年,Benedek^[15]研究了不同形状的进气口对噪声的影响.

从轴流通风机的频谱特性上看,能量谱集中在中低频^[16],且具有强穿透力特性,而被动降噪方式也影响着通风机气动性能.而降噪本质上是解决声音在空间的传播衰减问题,基于声波相消干涉原理的主动降噪为通风机噪声治理提供新思路^[17].然而,主动降噪技术多用于车内、公路隧道、变压器^[18-20],对于通风机降噪的相关研究较少.因此,本文开展轴流式通风机集流区域在自由空间及受限空间的噪声特性研究,进行主动降噪试验研究,揭示风机集流区域的噪声特性并评价降噪潜力.

1 噪声分布实验设计

1.1 通风机及噪声测量仪器

根据 GB/T 2888—2008 相关规定,搭建通风机试验平台,首先,为减少地面反射噪声对试验的影响,布设高度为 65 cm 的通风机支架,悬挂放置矿用 YBT-5.5 型轴流式通风机,以测定集流区域噪声,集流区域中心点高度为 100 cm.该型通风机的几何参数:轴向长 63 cm,径向长 45 cm;其中,集流区域,内径 40 cm,外径 48 cm.通风机性能参数如表 1 所示.试验设备主要包含矿用轴流式通风机、噪声测量设备,如图 1 所示.

表 1 轴流通风机性能参数

频率/Hz	电压/V	转速/(r/min)	相数	功率/kW	电流/A	全压/Pa	风量/(m ³ /min)
50	380/660	2 900	3	5.5	11.1~6.4	1 700~800	90~180



图 1 试验设备

噪声测量设备选用英国科塞乐公司 CEL-63X 型声级计,该声级计包含主机、防风球、传声器、放大器、数据线.具体参数如下:测量范围为 20~140 dB(A),且频率为 12.5~20 000 Hz,计权网络包括 A,C,Z,试验测量选用 A 计权网络,满足试验现场测量要求.声级计配套数据处理软件为 Casella Insight,主要功能是计算各等效声级下的声压级.

1.2 试验方案

为验证通风机在自由空间及受限空间下噪声的区别,风机位置布置条件可分为自由空间,对称式受限空间,靠壁面受限空间,具体开展以下工作:(1)测量风机集流区域不同测点的噪声强度;(2)测量不同环境下的风机集流区域噪声强度;(3)进一步对上述内容进行主动降噪试验.

以研究集流区域为目标,以风机中轴线为中线,环绕着轴流通风集流区域布设测点,在自由空间、对称式受限空间、近壁面受限空间分别布设 5,5,3 个测点,此试验共选取 13 个测点(如图 2 所示),所有测点均位于集流区域正前方 1 m 处,左右两侧各 1 m 处,左右两侧斜 45°且 1 m 处.主动降噪的测点与通风机噪声测点相同.

试验测量时环境温度为 10 ℃,环境大气压为 100.9 kPa,噪声测量 A 声级的标准偏差为 2 dB(A),采样时间 15 s,为保证实验数据可信度,对每个测点连续测量 5 次,取平均值以降低误差,其中测量的声压级误差在 0.01 dB(A)内,试验场地背景噪声远小于通风机噪声,根据 GB/T 2888—2008 相关规定,测量结果可不予修正.

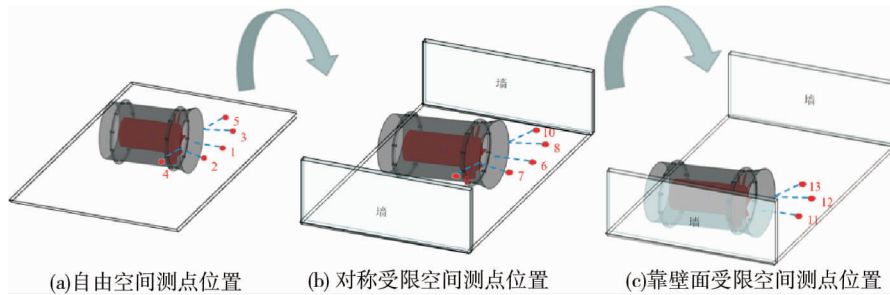


图 2 实验测点

2 自适应主动降噪装置

2.1 硬件介绍

自适应降噪系统结构图如图 3 所示,通过使用参考麦克风采集原始噪声,经自适应滤波器计算后,扬声器发出等幅反相的次级声源抵消原始噪声,误差麦克风用来采集残余噪声.

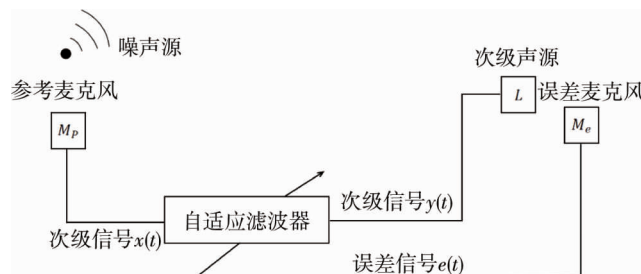


图 3 自适应降噪系统结构

试验所用轴流式通风机的主动降噪装置,如图 4 所示.主要包括如下,图 4a 为核心处理模块、图 4b 为初级声源采集模块、图 4c 为次级声源发出模块.此外,还配套有 TI 公司的 Code Composer Studio 6.1.3,该软件具有编码编译、调试、仿真、实时分析、烧录等功能.为有效减少来自主动降噪设备体积对通风机气流和噪声的影响,采集原始噪声的麦克风通过长跳线连接初级声源采集模块,同时,连接扬声器与次级声源发出模块,最后通过支架将扬声器固定在测点位置.

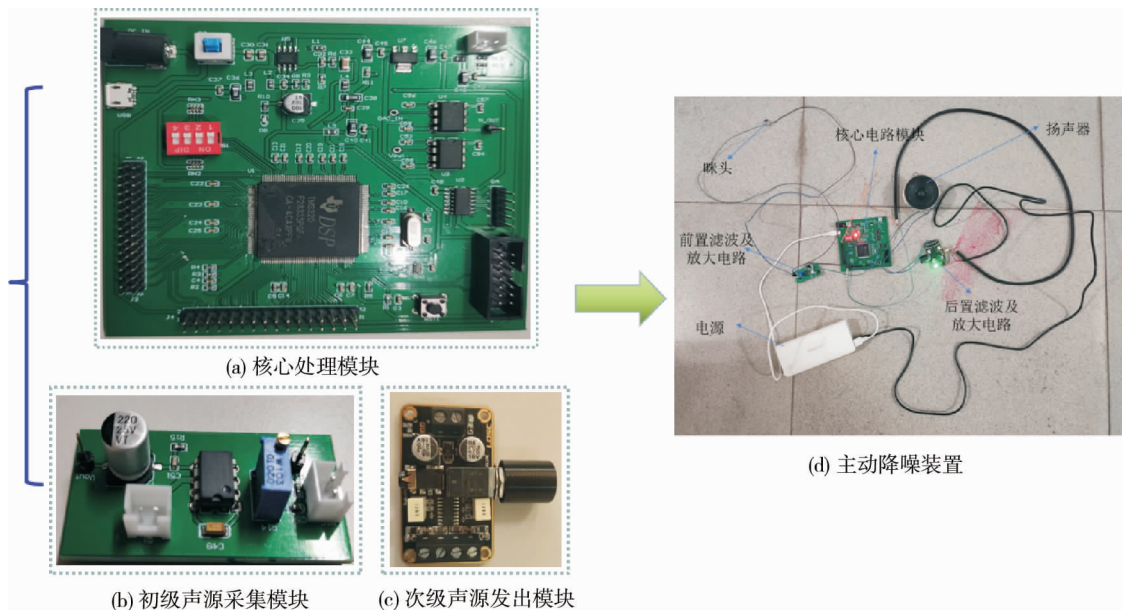


图4 主动降噪装置及其主要模块

2.2 算法介绍

主动降噪装置中,核心处理模块搭载 LMS 算法,即一种基于随机梯度的算法^[21],并在平方误差信号的瞬时梯度的负方向上,通过对误差信号均方值,直接估计得到瞬时均方值,采用梯度估计值,来调整滤波系数.LMS 算法的迭代公式为

$$y(n) = \mathbf{W}^T(n) \mathbf{X}(n); \quad (1)$$

$$e(n) = d(n) - y(n); \quad (2)$$

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}^T(n) + 2\mu e(n) \mathbf{X}(n). \quad (3)$$

式中: $\mathbf{W}(n)$ 为自适应滤波器的系数向量; $\mathbf{X}(n)$ 为输入信号; $e(n)$ 为误差信号; μ 为步长,分别可表示如下式:

$$\mathbf{W}(n) = [w_1(n), w_2(n), \dots, w_L(n)]^T; \quad (4)$$

$$\mathbf{X}(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-L+1)]^T. \quad (5)$$

式中: L 为滤波器阶数,步长取值可参考式(6):

$$0 < \mu < \frac{1}{\lambda_{\max}}. \quad (6)$$

式中: λ_{\max} 为 \mathbf{R} 的最大特征值, \mathbf{R} 为输入信号自相关矩阵.为了方便计算,可通过 $E[x^2(n)]$ 求和替代,此时得到:

$$0 < \mu < \frac{1}{\sum_{n=1}^L E[x^2(n)]}. \quad (7)$$

式中: $E[x^2(n)]$ 为输入信号 $x(n)$ 的强度.

3 通风机噪声分析

3.1 声压级分析

依图2排序采集各测点声压级,结合自由空间及受限空间的通风机3种布设位置进行分析,如图5所示.

在图5中,横轴的变化量“测点”,在纵轴上是“声压级”,其单位为dB(A),区域①中均为自由空间下的声压级,区域②表示对称受限空间下的声压级,区域③表示近壁面受限空间的声压级.由图5可知,通风

机噪声集流区域各位置的噪声具有的起伏特性呈现出一定的差异。

对于风机两侧的点,如区域①中测点4和测点5,区域②中测点9和测点10,当风机位置从区域①变化为区域②时,对风机两侧的声压级影响不大;但是,对于斜向45°的测点,如区域①中的测点2和测点3,区域②中的测点7和测点8,当风机位置从区域①变化为区域②时,声压级大幅提高,且通风机左侧的声压级低于右侧声压级。

此外,当通风机位置处于近壁面受限空间,发现区域③的测点较区域①和区域②测点,声压级大幅提升,而造成区域③的测点声压级显著增大的原因是,噪声声波在遇到近壁面后反射,入射波和反射波相互干涉,混叠的声波振幅增大,故测量的声压级增大.进一步分析可知,3个区域中的测点1,6,11的噪声均为对应区域的最高声压级,说明在3种空间位置中,正对通风机的集流区域的测点声压级最大,将测点1,6,11称为“典型点组”.接下来,为明确风机处于不同空间位置的噪声能量变化,以高声压级“典型点组”为研究对象,进行频谱分析。

3.2 频谱分析

首先,明确分析“典型点组”的频谱特性,结果如图6所示,横坐标为频率,纵坐标为声压级.重点研究旋转噪声,尤其是基频前的低频段的噪声特征。

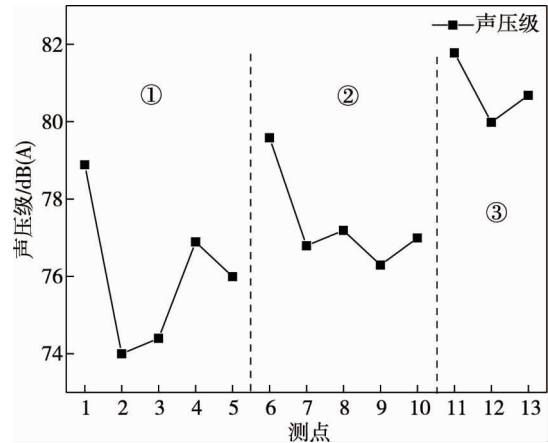


图5 实验测点

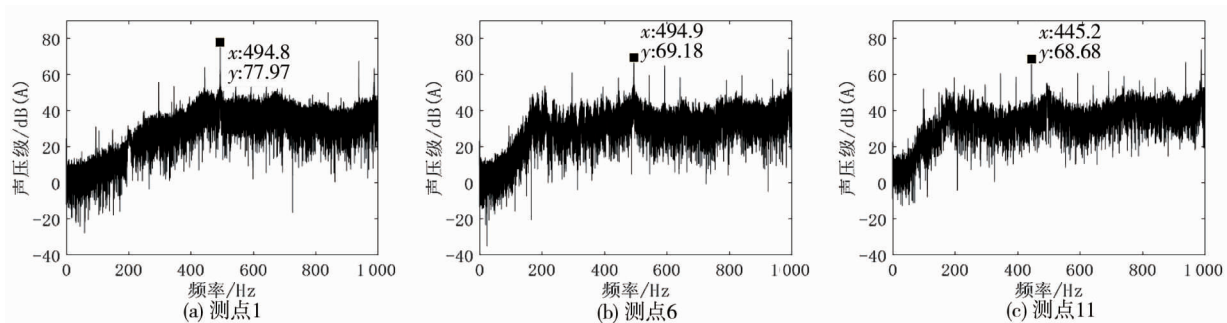


图6 典型点组的频谱

在图6a与图6b中,此时两基频分别为494.8 Hz和494.9 Hz,可见此时的风机位置的变化几乎不改变基频位置.由图6c可知,基频向横轴的负半轴方向发生迁移,这是由于近壁面的存在,结合集流区域负压区和间隙区域负压区,通风机周围会存在严重的回流现象,即通风机从出风口的风流流回集流口,造成风流动能损失^[22],该回流现象在频谱中的表现为基频位置发生显著变化,此时变化为445.2 Hz。

当通风机的位置从自由空间变为受限空间时,基频处的声压级减小;在受限空间下,通风机位置由两侧对称分布变为近壁面时,基频处的声压级有小幅度减小,发生此变化的主要原因是通风机靠近壁面时集流区域的流场形态发生显著的改变,而通风机的主要噪声分为旋转噪声及涡流噪声,此时,在风机转速减小的同时,基频处的旋转噪声在通风机整体噪声的占比减小.但是,根据实测的测点1,6,11的声压级,发现声压级逐渐增加.而在100~300 Hz,噪声声压级大幅提升;在200~500 Hz,增加多个噪声峰值,受限空间对声场的影响表现在该频段,这是基频处声压级变低而通风机整体噪声声压级变高的原因。

4 通风机主动降噪实验

4.1 降噪后的声压级变化

按照通风机位置及测点顺序进行降噪,并对降噪后的声压级进行测量,得到图7.图7显示,在区域①和

区域②中,测点5和测点10分别为对应区域的最高声压级点,其中,“典型点组”测点1,6,11的声压级变化最大,由3个区域均为最高点变化为仅在③区域为最高点.测点1由78.9 dB(A)降低为71.7 dB(A),测点6由79.6 dB(A)降低为73.7 dB(A),测点11由81.8 dB(A)降低为79.0 dB(A),“典型点组”的降噪平均值达5.3 dB(A).

由图7可知,风机噪声降噪量不同,说明受涡流噪声影响,各个测点的降噪难度亦不相同,例如,从降噪前测点2的声压级小于测点3,变为测点2声压级大于测点3.为评价各点的降噪难度,对比各测点的降噪量,绘制表2.

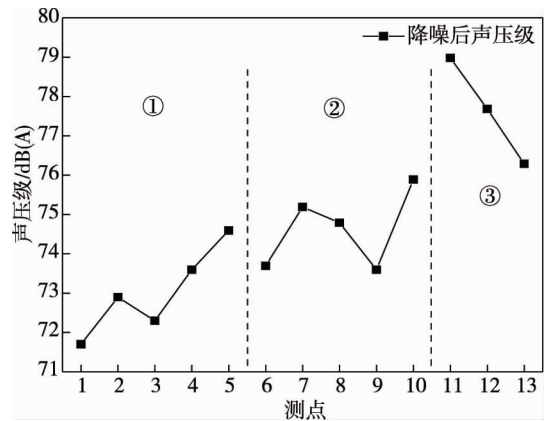


图7 各测点降噪后声压级

表2 各测点降噪量

测点	降噪量/dB(A)	测点	降噪量/dB(A)	测点	降噪量/dB(A)
1	7.2	6	5.9	11	2.8
2	1.1	7	1.6	12	2.3
3	2.1	8	2.4	13	4.4
4	3.3	9	2.7	-	-
5	1.4	10	1.1	-	-

对于斜向45°的测点,在对测点进行降噪后,发现测点2的降噪量小于测点3的降噪量,测点7的降噪量小于测点8的降噪量,可见,以通风机中轴线为中线,通风机集流左侧区域降噪难度大于右侧.对于风机两侧的点,例如测点4和测点5,测点9和测点10,降噪后,发现测点4的降噪量大于测点5的降噪量,测点9的降噪量大于测点10,发现通风机左侧的降噪难度小于右侧.对于近壁面受限空间的测点,比较降噪量发现,测点13的降噪量为3个测点的最大值.对于“典型点组”的测点的降噪量,测点1>测点6>测点11,可见近壁面使测点11的声场更复杂,不仅造成测点声压级的增大,还提高了该测点的降噪难度.

结合各测点的降噪难度,为保证降噪效果,自由空间、对称式受限空间的扬声器布设在集流右侧区域以及风机的左侧区域;对于近壁面的风机,扬声器可布设在风机的侧面.若仅考虑降噪效果,在3种空间位置下,扬声器可放置在集流区域正对方向.

4.2 主动降噪后的频谱变化

对采集的“典型点组”测点进行频谱分析发现,测点1,6,11基频处的声压级分别降低至75.62,66.02,64.52 dB(A).为了清晰观察降噪前后差异,对频谱图进行简化处理,得到图8.

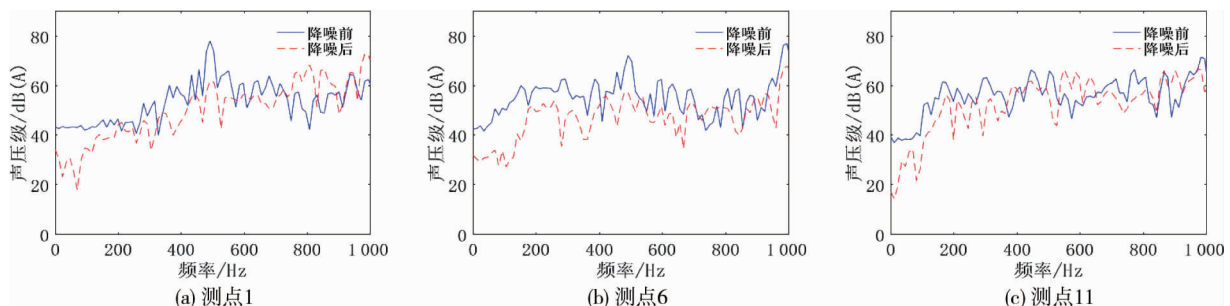


图8 典型点组降噪前后频谱

从图8可知,各频段范围内的声压级各不相同,0~200 Hz时,声压级较小;当超过200 Hz时,声压级大幅提升;在中频段的声压级中,基频处声压级均为最高.当对“典型点组”进行降噪后,中低频段有较好的降噪效果,而部分高频段出现降噪后的噪声声压级上升的情况,总的来说,“典型点组”的中低频段的降噪

效果好于高频段,尤其是0~200 Hz,对于自由空间和对称受限空间的基频附近范围声压级大幅下降.当风机位置处于近壁面受限空间时,经近壁面作用后的声场复杂,导致中频段的降噪效果减弱,故导致测点11的降噪量远低于测点1和测点6.

5 结论

1)集流区域正对方向,在自由空间下,降噪量可达7.2 dB(A);受限空间下,空间对称分布时降噪量为5.9 dB(A),近壁面处降噪量为2.8 dB(A).

2)在通风机集流区域,对于斜向45°的测点,左侧降噪难度高于右侧;对于两侧的测点,左侧降噪难度低于右侧.为达到较好的降噪效果,扬声器可布设在集流右侧区域以及风机的左侧区域.

3)当通风机位置从自由空间变为受限空间时,噪声能量变化集中在100~500 Hz.

参考文献:

- [1] 肖军.工业噪声的控制及职业耳聋的预防[J].中国个体防护装备,2017(3):50-55.
- [2] 韩进,王启立.煤矿通风机噪声分析与降噪治理[J].煤炭技术,2016,35(5):265-267.
- [3] GRACE S M. Fan broadband interaction noise modeling using a low-order method[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 346: 402-423.
- [4] 方建华,姜在斌.罗茨鼓风机噪声采集分析及其隔声罩设计[J].风机技术,2008(1):36-40.
- [5] 王振国.煤矿风机房噪声治理针对性对策[J].当代化工研究,2019(15):21-22.
- [6] 徐星.矿用主风机消声器的选择与改进[J].机电工程技术,2019,48(12):253-254.
- [7] WIELONG C Z, FLOSS S, KALTENBACHER M, et al. Influence of a micro-perforated duct absorber on sound emission and performance of axial fans[J]. Applied Acoustics, 2021, 174: 1-15.
- [8] 梁桂强.轴流风机降噪技术的仿生学试验[J].机械设计与研究,2010,26(6):132-133.
- [9] 唐俊,王军,隗智辉,等.正弦锯齿尾缘对轴流风机尾迹及气动性能的影响[J].工程热物理学报,2017,38(10):2145-2150.
- [10] 王雷,刘小民,刘刚,等.轴流风机仿生耦合叶片降噪机理研究[J].西安交通大学学报,2020,54(11):81-90.
- [11] 叶学民,张锐星,张超,等.锯齿尾缘叶片对轴流风机气动噪声及性能的影响[J].动力工程学报,2020,40(3):239-246.
- [12] 潘虹宇,杨爱玲,游骏杰,等.加弯叶型在轴流风机噪声控制中的应用研究[J].热能动力工程,2016,31(1):99-104.
- [13] 孙扬智,肖世德,徐鑫凯,等.轴流风机旋转叶片的气动噪声分析[J].噪声与振动控制,2016,36(4):124-128.
- [14] FLORIAN J, ANDREAS R, MARCUS B, et al. Experimental investigation of the noise emission of axial fans under distorted inflow conditions[J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 383: 124-145.
- [15] BENEDEK T, VAD J, LENDVAI B. Combined acoustic and aerodynamic investigation of the effect of inlet geometry on tip leakage flow noise of free-inlet free-exhaust low-speed axial flow fans[J]. Applied Acoustics, 2022,187:108488.
- [16] 年嗣凤.压风机进气口噪声分析及其有源抑制方法的研究[J].煤矿环境保护,1990(3):14-16.
- [17] 刘秋洪,祁大同,曹淑珍.风机降噪研究的现状与分析[J].流体机械,2001(2):29-32.
- [18] 张频捷,张立军,孟德建,等.汽车车内噪声主动控制系统扬声器与麦克风布放优化方法[J].振动与冲击,2017,36(5):169-175.
- [19] 魏庆朝,张雪峰,臧传臻,等.公路隧道内主动降噪声场研究[J].中国公路学报,2017,30(1):77-82.
- [20] 王晋伟,应黎明,刘勤,等.基于扰动跟踪法的变压器有源降噪系统研究[J].电工技术学报,2018,33(1):1-8.
- [21] 邹艳碧,高鹰.自适应滤波算法综述[J].广州大学学报(自然科学版),2002(2):44-50.
- [22] 黄光球,陆秋琴.矿山井下风机安装位置周围的风流特性分析[J].化工矿物与加工,2017,46(6):44-50.