

用于迷你无人飞行器探测的硅基 MEMS 轮形振膜 光纤声传感器研制

纪康宁^{1,2}, 胡昕宇^{1,2}, 熊林森^{1,2}, 汪海波^{1,2}, 祁志美^{1,2,3*}

¹中国科学院空天信息创新研究院传感技术国家重点实验室, 北京 100190;

²中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049;

³中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 针对迷你无人飞行器(mini-UAV)探测难度大的问题,仿真设计并制作了谐振频率接近 mini-UAV 噪声特征频率的硅基微机电系统(MEMS)轮形振膜,结合精密机械加工制作了光纤法布里-珀罗干涉式声传感器。测试结果表明,该光纤声传感器的谐振频率为 7.279 kHz,与仿真结果基本一致,其在频率为 7 kHz 声波正入射的条件下的灵敏度为 1.8 V/Pa,信噪比为 71 dB,最小可探测声压为 99 $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{0.5}$ 。值得强调的是,该声传感器对声波的响应呈现“8”字形的方向依赖性,表明其具有识别声源方向的能力。进一步在户外测试了该光纤声传感器对 mini-UAV 的探测能力,结果表明,声传感器能够在 65 m 的范围内探测到 mini-UAV 噪声,其探测距离是商用驻极体声传感器的 3 倍左右。所研制的硅基 MEMS 轮形振膜光纤声传感器为解决实践中 mini-UAV 探测难的问题提供了一种简单有效的工具。

关键词 传感器; 光纤声传感器; MEMS 轮形振膜; 迷你无人飞行器探测

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231721

1 引言

迷你无人飞行器(mini-UAV)具有体积小、成本低、操作简便、灵活性强等优点,被广泛地应用在科研和娱乐中^[1]。然而,mini-UAV 的“滥飞”给公共安全、个人隐私安全造成了很大隐患^[2-3]。因此,针对 mini-UAV 探测和监视的迫切需求,采用无线电^[4-5]、雷达^[6]、图像识别^[7-8]等的探测方法相继被提出。由于 mini-UAV 飞行高度低、速度慢、反射截面小,使用雷达很难在复杂背景干扰下快速地探测到它;低空环境的电磁波干扰严重,无线电探测很容易出现误报;采用卷积神经网络的图像识别方法虽然有很高的检测精度,但是受图像分辨率影响,其精确分辨鸟类和 mini-UAV 的能力有待提高。上述方法虽然可以满足 mini-UAV 探测需求,但是设备复杂、探测成本高、实时性较差。相比之下,声学探测方法^[9-11]可以在嘈杂的低空环境中快速地对 mini-UAV 的噪声信号进行探测,具有实时性好、设备简单和成本低的优势,在 mini-UAV 探测中有很大的潜能。

声学传感器是 mini-UAV 声学探测的重要工具,而驻极体麦克风是常见的声学传感器,占据着大部分的应用市场。目前,大多数驻极体麦克风灵敏度低、抗

电磁干扰能力较弱。近年来,光纤声传感器因具有灵敏度高、结构紧凑、抗电磁干扰等优点^[12-14],受到了越来越多的关注和研究;它与微机电系统(MEMS)具有良好的兼容性^[10-15],可以批量制造高一致性的麦克风。目前,光纤声传感器通常使用周界固定的圆膜作为声敏感单元,结构简单、容易制作,且具有平坦的频响。提高光纤声传感器灵敏度的主要方法是调整圆膜的半径和厚度^[16]。然而,光纤声传感器的封闭背腔导致阻抗效应增大,灵敏度受到限制^[17]。为了提高设计的灵活性,研究人员设计出具有开放声学背腔的光纤声传感器。例如:Liu 等^[18]制备了微悬臂梁的光纤水声传感器,在谐振峰附近获得很高的灵敏度;Ren 等^[19-20]和刘欣等^[10]采用 MEMS 工艺制备了具有对称悬臂梁结构的仿生光纤声传感器,该传感器在弯曲模式下具有“8”字形的指向性和声源定位功能,但是其双法布里-珀罗(FP)干涉腔的初始腔长很难保证一致;祁志美团队^[17,21-22]制备了不锈钢和玻璃材质的轮形振膜光纤声传感器,在谐振频率附近获得很高的声压灵敏度;Li 等^[23-24]制备了小尺寸的轮形硅基振膜,可以在超声频段实现对变压器异常放电的监测。相比之下,轮形振膜的光纤声传感器具有开放的声学背腔,因此在谐振峰附近具有高灵敏度探测能力,能针对特殊应用场景

收稿日期: 2023-10-31; 修回日期: 2023-12-02; 录用日期: 2023-12-13; 网络首发日期: 2023-12-23

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB32007300)、北京市自然科学基金(4224095)

通信作者: *zhimei-qi@mail.ie.ac.cn

灵活设计和定制,具有很大的应用价值。

针对 mini-UAV 辐射噪声探测问题,本文制作了硅基 MEMS 轮形振膜光纤声传感器。与现有轮形振膜光纤声传感器相比,该传感器具有更高的灵敏度和信噪比、更简易的制作流程,并且可以在可听声区间内实现对 mini-UAV 的远距离探测。本文主要介绍硅基 MEMS 轮形振膜光纤声传感器的设计、有限元仿真和 MEMS 制备流程、传感器组装和性能表征,以及 mini-UAV 噪声的实验测试。

2 原理与方法

2.1 硅基 MEMS 轮形振膜结构分析

所设计的硅基 MEMS 轮形振膜的结构示意图如图 1(a)所示,它由中心振膜、外部固定环以及 4 个对称的连接臂构成,图 1(b)所示的中心振膜和连接臂的厚

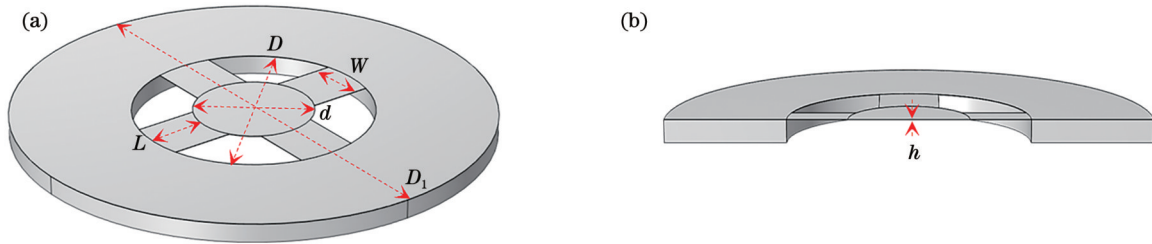


图 1 硅基 MEMS 轮形振膜。(a)结构示意图;(b)振膜切面视图

Fig. 1 Silicon-based MEMS wheel-shaped diaphragm. (a) Structural schematic; (b) diaphragm section view

2.2 硅基 MEMS 轮形振膜的有限元仿真

根据上述轮形振膜结构的理论,硅基 MEMS 轮形振膜的声学传感特性取决于其几何结构。无人机辐射的声场频率主要分布在 20 Hz~15 kHz,并且在 2~7 kHz 频段内,无人机声信号与背景噪声存在明显差异^[27-28]。因此,本文针对 mini-UAV 噪声的探测,设计了轮形硅基振膜,振膜的几何形状如图 1 所示。结合式(1)和式(2),确定振膜的有效直径 $D=4$ mm、中心膜直径 $d=2$ mm、悬臂梁宽度 $W=1$ mm、长度 $L=(D-d)/2=1$ mm、振膜和悬臂梁的厚度均为 $h=10$ μm 时,硅基振膜的固有频率 $f_0=7395$ Hz。利用有限元仿真软件分析轮形振膜的固有频率和频率响应等特性,图 2(a)所示为轮形振膜的一阶振动模态。建立如图 2(b)所示的有限元仿真模型进行频率响应仿真;将模型放置在一个空气球壳内,在空气球壳的表面设置入射声波辐射场,根据振膜的实际应用场景,声源与振膜的距离远远大于振膜的几何尺寸,因此满足声波远场辐射条件,则入射声波近似为平面波^[29]。在声压大小为 1 Pa,且垂直于振膜平面入射的条件下,分别计算 500~10000 Hz 频率范围内振膜中心点的位移振幅,仿真结果如图 2(c)所示。当频率在 7380 Hz 附近时,振膜的中心位移振幅达到峰值,与振膜的一阶固有频率相当,该仿真结果与理论计算结果基本一致,证明了仿真模型的有效性。

度均为 h 。首先,利用弹性力学理论对轮形振膜进行建模和分析,其固有频率 ω_0 取决于连接臂的弹性系数 k 和振膜的有效质量 m ^[25-26],计算公式为

$$k = 2EW \left(\frac{h}{L} \right)^3, \quad (1)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2)$$

式中: E 表示硅的杨氏模量; L 、 W 、 h 分别表示轮形振膜每个连接臂的长度、宽度和厚度。由于振膜为对称结构,振膜的有效质量可以表示为 $m=(\pi d^2 h \rho)/4$,其中 ρ 为材料密度,则轮形振膜的谐振频率 $f=\omega_0/(2\pi)$ 可表示为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{8EWh^2}{\pi d^2 L^3 \rho}}. \quad (3)$$

所制作的传感器具有开放的声学背腔,进入背腔的声波与振膜的下表面相互作用,同时由于空气阻尼的存在,振膜上下表面之间存在压差,因此振膜具有特定的指向性^[17]。利用所提轮形振膜仿真模型模拟不同声波频率下轮形振膜的中心位移响应随声源入射角的变化规律。如图 2(b)所示,平面声波在振膜平面以倾角 $\theta(0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ)$ 入射,设定入射声压为 1 Pa,声源频率分别为 6、7、8 kHz。模拟声源从圆心为振膜中心、半径为 R 的球面上入射,并监测振膜中心点位移在不同声波入射角 θ 下的振幅,如图 2(d)所示。MEMS 轮形振膜的中心点位移振幅随着声源入射角 θ 的变化而变化,该振幅变化在极坐标系中呈现“8”字形,即在声波入射角为 0° 和 180° 时振幅达到最大值,在 90° 和 270° 时振幅达到最小值。

2.3 硅基 MEMS 轮形振膜光纤声传感器的工作机理

如图 3(a)所示,硅基 MEMS 轮形振膜的中心和单模光纤(SMF)端面构成 FP 干涉腔;图 3(b)展示了 FP 干涉测量原理,硅基 MEMS 轮形振膜在声波作用下产生形变,进而改变 FP 干涉腔的长度,从而将声信号转换为 FP 干涉腔长度的周期性变化 $\Delta L(t)$ 。由 FP 干涉理论可知,入射光 I_0 在 SMF 端面分为两部分:端面反射光 I_1 和透射光 I_2 。透射光在轮形振膜表面的中心区域发生反射并再次进入光纤,满足干涉条件的两束光(I_1 和 I_2) 在光纤内部发生干涉,干涉信号^[30-31]可以表示为

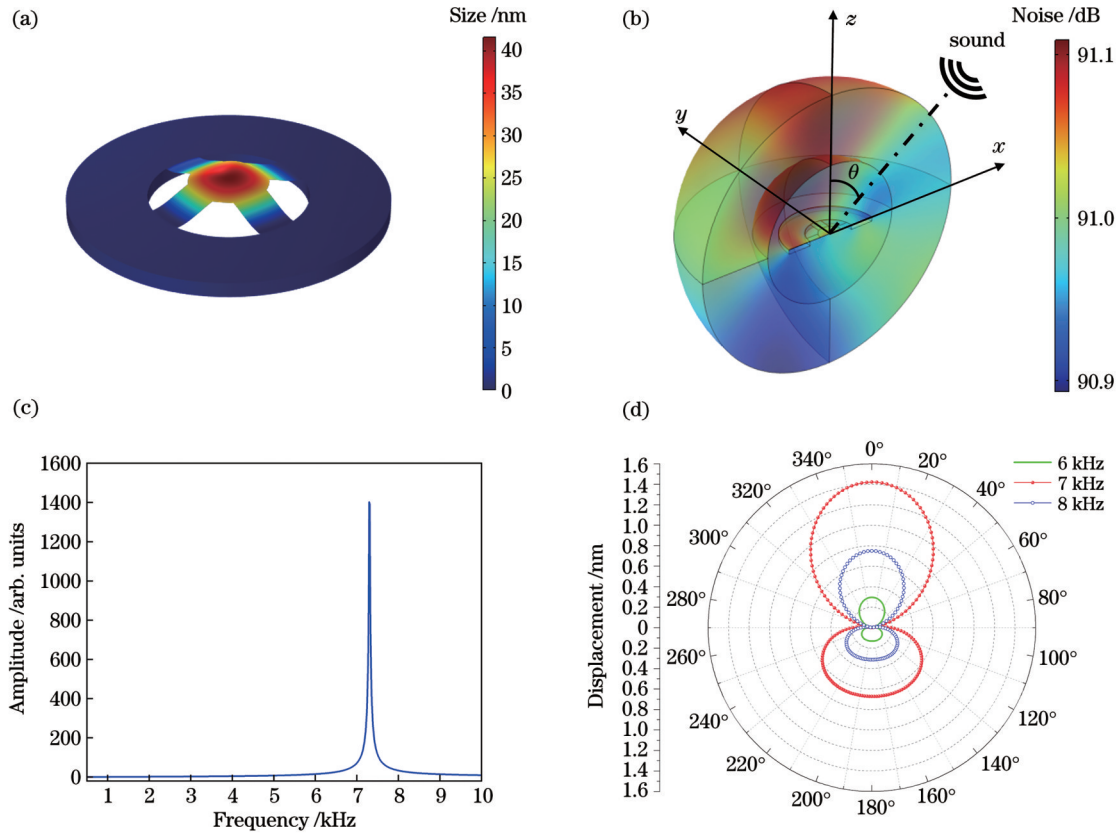


图 2 硅基 MEMS 轮形振膜的有限元仿真。(a)一阶振动模态;(b)仿真模型;(c)频率响应曲线;(d)不同频率下的指向性
Fig. 2 Finite element simulation of silicon-based MEMS wheel-shaped diaphragm. (a) First order vibration mode; (b) simulation model; (c) frequency response curve; (d) directivity at different frequencies

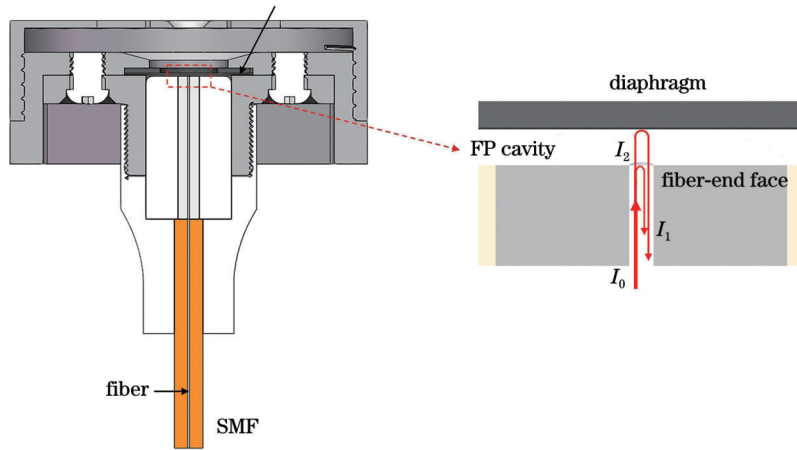


图 3 硅基 MEMS 轮形振膜光纤声传感器结构示意图。(a)传感器结构剖视图;(b)FP干涉原理示意图
Fig. 3 Schematic of silicon-based MEMS wheel-shaped diaphragm fiber-optic acoustic sensor structure. (a) Cross-sectional view of sensor structure; (b) schematic of FP interferometric principle

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left\{\frac{4\pi n}{\lambda} [L_0 - \Delta L(t)]\right\} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \left\{ \cos\left(\frac{4\pi n}{\lambda} L_0\right) \cos\left[\frac{4\pi n}{\lambda} \Delta L(t)\right] + \sin\left(\frac{4\pi n}{\lambda} L_0\right) \sin\left[\frac{4\pi n}{\lambda} \Delta L(t)\right] \right\}, \quad (4)$$

式中： n 、 λ 分别表示空气折射率和激光器波长； L_0 为FP干涉腔的静态腔长； $\Delta L(t)$ 为腔长的变化量。

$$\Delta L(t) = A \cos(2\pi ft),$$

式中： A 为声压作用下产生的位移振幅； f 为声信号频率。为了保证灵敏度最高和信号不失真，需要传感器工

(5) 作在正交工作点附近，此时 λ 和 L_0 满足如下关系：

$$L_0 = \frac{2m+1}{8n} \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

通常情况下 $A \ll \lambda$, 空气中 $n=1$, 此时 $\sin\left[\frac{4\pi}{\lambda} A \cos(2\pi ft)\right] \approx \frac{4\pi}{\lambda} A \cos(2\pi ft)$ 。当 L_0 满足正交工作条件时, 干涉信号的交流分量 $I_{AC}(t)$ 被声信号调制^[17], 表示为

$$I_{AC}(t) = 2\sqrt{I_1 I_2} \sin\left[\frac{4\pi}{\lambda} A \cos(2\pi ft)\right] \approx \frac{8\pi}{\lambda} \sqrt{I_1 I_2} A \cos(2\pi ft) \quad (7)$$

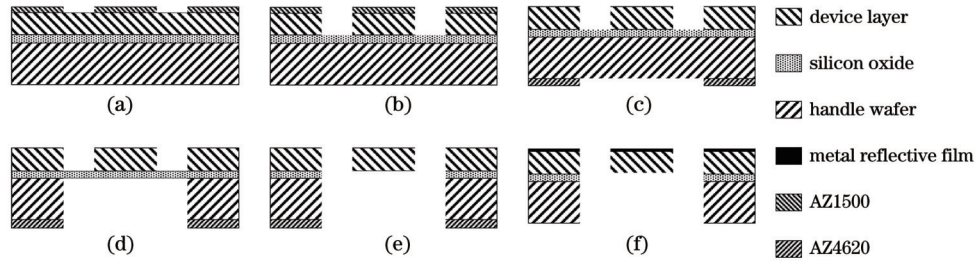


图 4 硅基 MEMS 轮形振膜的制备工艺流程。(a)光刻(器件层);(b)DRIE(器件层);(c)光刻(基底层);(d)DRIE(基底层);(e)RIE(埋氧层);(f)溅射(器件层)

Fig. 4 Fabrication process of silicon-based MEMS wheel-shaped diaphragms. (a) Photolithography (device layer); (b) DRIE (device layer); (c) photolithography (handle wafer); (d) DRIE (handle wafer); (e) RIE (silicon oxide); (f) sputtering (device layer)

第一步,对 SOI 晶圆片的器件层进行光刻,采用分辨率较高的正性光刻胶 AZ1500,曝光显影后得到的轮形结构如图 4(a)所示,利用图形化的光刻胶作为硅刻蚀的图形化掩模。第二步,采用深反应离子刻蚀(DRIE)工艺对器件层硅进行刻蚀,得到的振膜正面结构如图 4(b)所示。第三步,采用正性光刻胶 AZ4620 对基底层硅光刻进行图形化,如图 4(c)所示。由于器件层厚度只有 $10 \mu\text{m}$,背面采用大面积的空腔结构,为了防止轮形振膜在刻蚀过程中碎裂,需要对器件层进行保护。第四步,采用 DRIE 工艺对基底层硅进行刻蚀,形成 MEMS 轮形振膜背面的深腔结构,如图 4(d)所示。第五步,采用 RIE 工艺释放埋氧层,如图 4(e)所示。在埋氧层释放干净后,再次清洁 SOI 圆片,去除残留的光刻胶。第六步,采用磁控溅射技术在圆片的器件层表面溅射 20 nm 的金属铬(metal reflective film),如图 4(f)所示,从而提高振膜的光反射率,优化传感器的声信号探测性能。第七步,利用激光加工技术对制备好的轮形振膜进行划片,得到的单个振膜结构如图 5(a)所示。在完成硅基 MEMS 轮形振膜的制备后,利用机械加工制作了金属支座(metal anchorage)、保护罩(cover)以及超薄垫片(gasket),并组装得到硅基 MEMS 轮形振膜光纤声传感器,如图 5(b)所示。如图 5(c)所示,圆形凹槽和螺纹孔分别用来对 MEMS 振膜和 SMF 进行固定和限位。首先,将 MEMS 振膜

3 实验与测试平台

3.1 硅基 MEMS 轮形振膜制备与传感器组装

利用 MEMS 工艺,在 SOI 晶圆片上制备了轮形硅基 MEMS 振膜。MEMS 工艺流程如图 4 所示。SOI 晶圆的基底层硅(handle wafer)厚度为 $360 \mu\text{m}$ 、埋氧层(silicon oxide)的厚度为 $1 \mu\text{m}$ 、器件层硅(device layer)的厚度为 $10 \mu\text{m}$ 。对 SOI 晶圆表面进行清洁处理,通过有机溶剂清洗和反应离子刻蚀(RIE)工艺去除晶圆表面的有机污染物,由于所使用的器件不会涉及金属电极的制作,故无需使用酸洗去除金属残留物;将清洗干净的 SOI 晶圆片干燥后备用。

安装在金属支座的圆形凹槽中;然后,将超薄垫片放置在振膜上,利用小螺丝将经过特殊处理的方形 SMF 连接法兰(fiber flange)[图 5(c)]和装有振膜的金属支座进行连接固定,振膜下表面在超薄垫片的限制下和法兰平面形成空气腔室;最后,将商用 FC-APC 型 SMF 的 FC 平面插入光纤法兰,利用 FC 光纤平面和振膜下表面形成 FP 干涉腔。为了控制 FP 干涉腔的初始腔长 L_0 ,使传感器满足正交工作条件:通过特殊的精密加工方法制作了超薄垫片,通过增加或者减少垫片数量,控制振膜和光纤法兰之间的初始腔长;由 $L_0 = \lambda_1 \lambda_2 / (2|\lambda_2 - \lambda_1|)$ ^[32]可知,根据传感器使用激光器的波长 λ 可计算出合适的初始腔长 L_0 ,并将一定数量的超薄垫片安装在传感器中。相比于一次成型的光纤声传感,硅基 MEMS 轮形振膜光纤声传感器无需光纤切割、研磨、熔接,以及复杂的振膜黏合流程^[17,21-22],该组装方法可以实现振膜和光纤的灵活更换,全程采用微机械组装方式,显著简化了光纤声传感器的组装流程。

利用图 6(a)所示的 FP 干涉光谱测量系统测量 FP 干涉腔长度的变化;光谱测量系统由宽带光源(ASE; 纤联科技-SLED-OS8145)、高分辨率光谱仪(OSA; Yokogawa-AQ6370B)以及光环形器(circulator)组成。通过 OSA 测量出 FP 干涉光谱,如图 6(b)所示,利用干涉光谱相邻的两个峰值和谷值对应的波长 λ_1 和 λ_2 ,可算出初始腔长 L_0 。

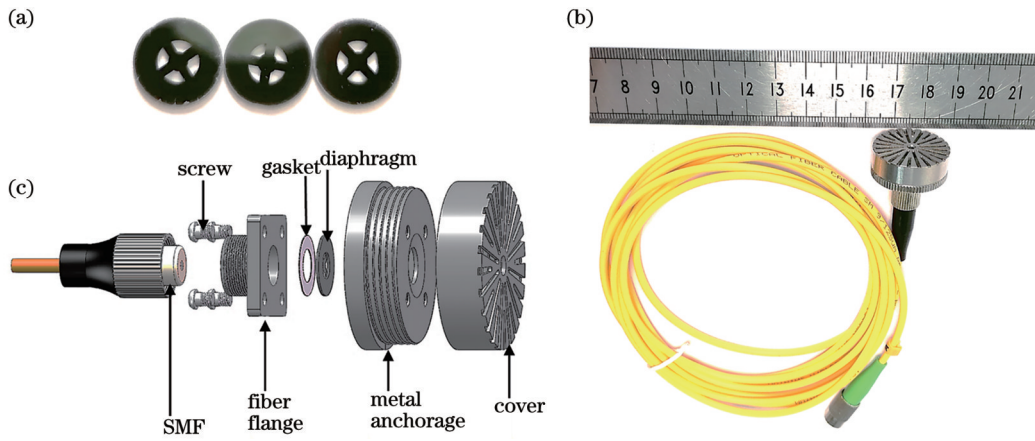


图 5 硅基 MEMS 轮形振膜光纤声传感器。(a)硅基振膜;(b)传感器实物;(c)结构示意图

Fig. 5 Fiber-optic acoustic sensor with a silicon-based MEMS wheel-shaped diaphragm. (a) Silicon-based diaphragm; (b) physical sensor; (c) schematic of structure

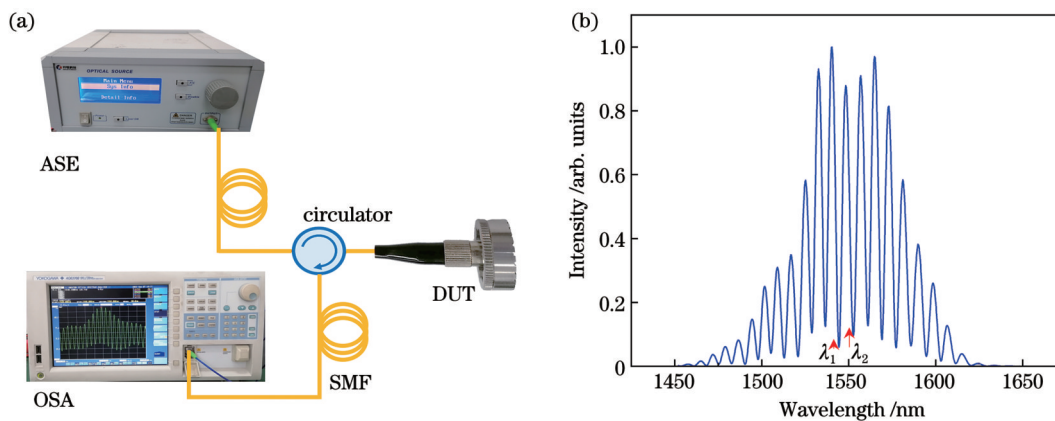


图 6 轮形振膜的光纤声传感器 FP 腔长测量实验。(a)测试平台;(b)传感器测得的干涉光谱

Fig. 6 Fiber-optic acoustic sensor FP cavity length measurement of wheel-shaped diaphragm. (a) Test platform; (b) interferometric spectrum measured by the sensor

利用图 6(a)所示的光谱测试装置测量了光纤声传感器的干涉光谱,测试结果如图 6(b)所示。选择相邻的波长 $\lambda_1=1544.4 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2=1552.7 \text{ nm}$, 可以计算出传感器的初始腔长 $L_0=144.457 \mu\text{m}$ 。由正交工作点条件可知,传感器工作在正交工作点附近。

3.2 传感器性能测试系统

所搭建的光纤 FP 干涉式声传感器测试系统如图 7(a)所示。该测试系统包括:具有声传感器信号采集和测试信号输出功能的多通道采集分析仪(B&K-3160-A-042)、标准压力场声传感器(B&K-4193)、声强

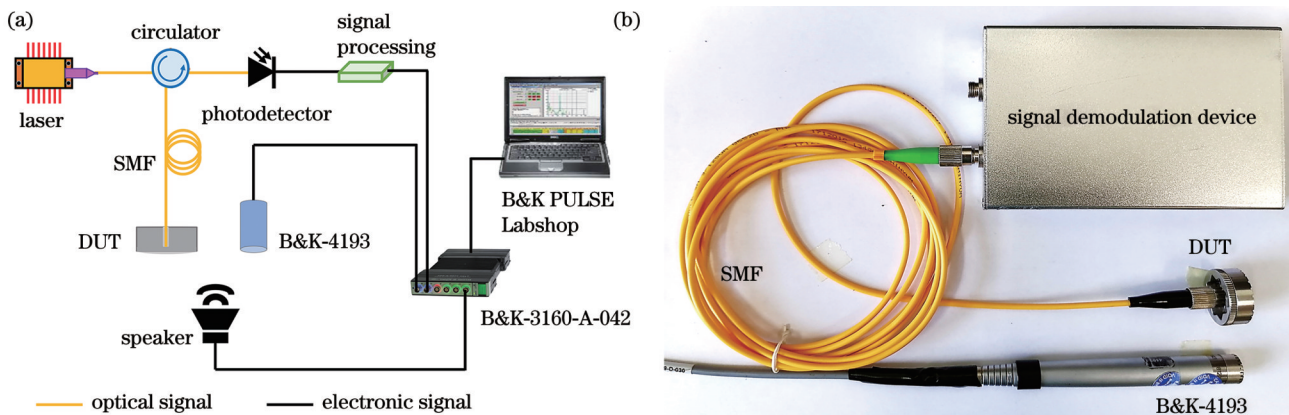


图 7 硅基 MEMS 轮形振膜光纤声传感器测试系统。(a)测试系统示意图;(b)部分测试装置实物图

Fig. 7 Test system for fiber-optic acoustic sensor with a silicon-based MEMS wheel-shaped diaphragm. (a) Schematic of test system; (b) photo of part of test device

校准软件(B&K PULSE Labshop)和测试用声源。测试系统的部分实物如图 7(b)所示。为了减小激光在 SMF 中的传输损耗,本实验采用的光源为分布式反馈(DFB)激光器,固定波长 $\lambda=1550$ nm。测试前,首先采用光纤依次连接激光器、环形器、光纤 FP 干涉式声传感器以及光电探测器,形成 FP 干涉测试光路;然后,将待测的光纤 FP 干涉式声传感器(DUT)和标准声传感器 B&K-4193 并排放置在同一个声场环境中,二者的振膜平面垂直于声波入射方向且距离声源 30 cm。开始测试时,首先将声源辐射的声波频率 f 测试范围设置为 0.1~10 kHz,频率分辨率 $\Delta f=2$ Hz,利用控制软件驱动测试声源发声;然后,使用 B&K-3160-A-042 同时采集 B&K-4193 与待测光纤 FP 干涉式声传感器的信号,并使用声强校准软件 B&K PULSE Labshop 进行分析。

4 结果与讨论

4.1 硅基 MEMS 轮形振膜光纤声传感器频响测试

基于图 7(a)所示的光纤 FP 干涉式声传感器测试系统,测试得到光纤 FP 干涉式声传感器的声波频率响应结果,如图 8 所示。传感器频响曲线的谐振峰出现在 7279 Hz 处,在低于谐振频率的 2~6 kHz 频率区间内光纤 FP 干涉式声传感器的响应较为平坦。实验测

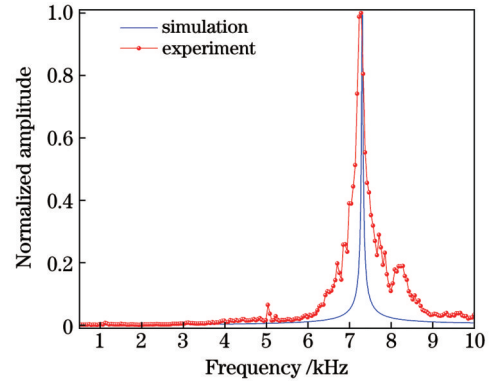


图 8 硅基 MEMS 轮形振膜光纤声传感器频响曲线
Fig.8 Frequency response curves of fiber-optic acoustic sensor with a silicon-based MEMS wheel-shaped diaphragm

试结果和模型的仿真结果基本一致。

4.2 最小可探测声压和灵敏度测试

采用图 7(a)所示的声学测试平台测试光纤 FP 干涉式声传感器的最小可探测声压(MDP)。测试时,保持声源垂直于声传感器平面。图 9(a)~(c)所示为轮形振膜光纤声传感器分别在 4、7、10 kHz 声波激励下的时域响应波形和对应的频谱。可以看出,在不同频率声波的激励下,光纤 FP 干涉式声传感器的时域响应都是均匀对称的,频谱均准确地显示了该频率的信号。

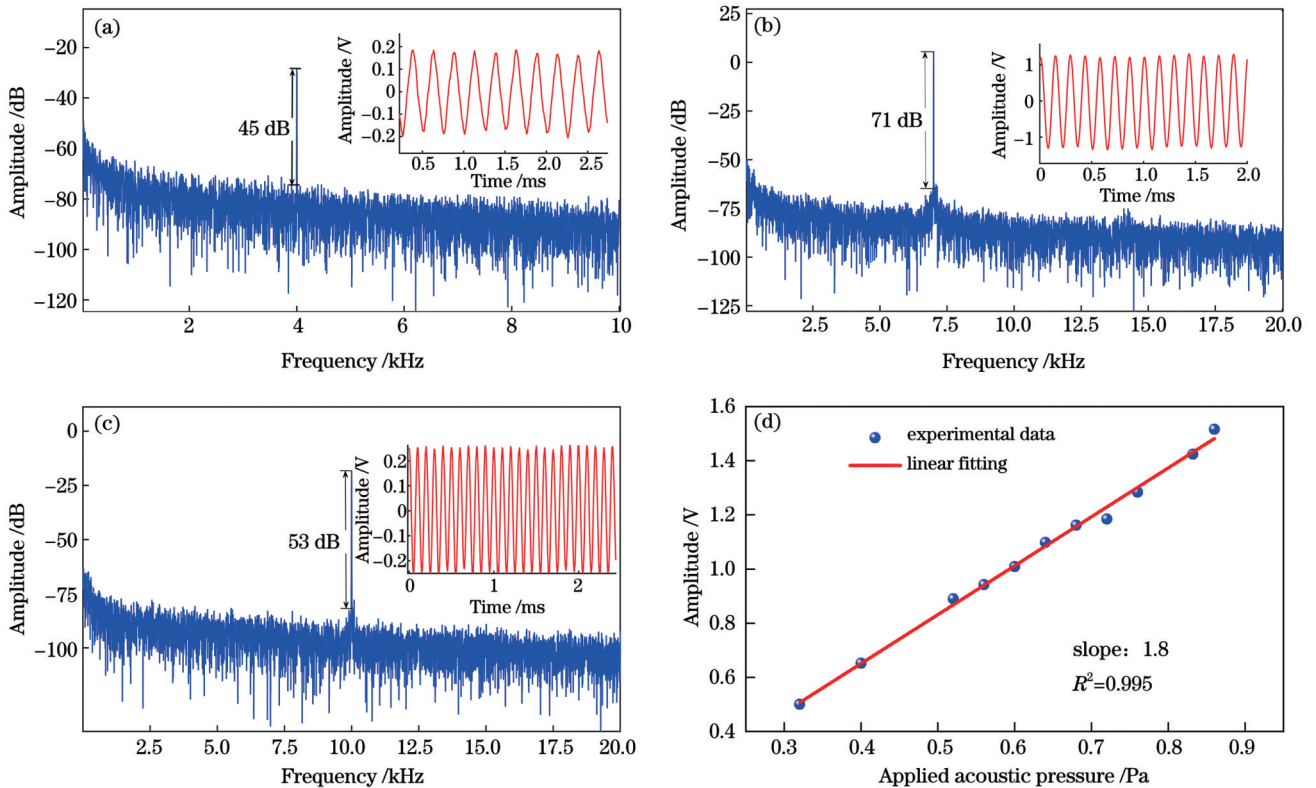


图 9 不同声波激励下的硅基 MEMS 轮形振膜光纤声传感器的声波响应曲线。(a) 4 kHz;(b) 7 kHz;(c) 10 kHz;(d) 7 kHz 下的声压灵敏度曲线

Fig.9 Acoustic response curves of fiber-optic acoustic sensor with a silicon-based MEMS wheel-shaped diaphragm under different acoustic excitations. (a) 4 kHz; (b) 7 kHz; (c) 10 kHz; (d) acoustic pressure sensitivity curve under 7 kHz excitation

从频谱信息还可以看出,被测光纤 FP 干涉式声传感器的频域响应曲线中不包含明显的二倍频信号,说明它工作在正交工作点^[33-34]。

分别计算不同频率声波信号的 MDP(M_{DP}),结果如表 1 所示。传感器在 7 kHz 声波激励下的信噪比 $S_{NR}=71$ dB, $M_{DP}=99 \mu\text{Pa}/\text{Hz}^{0.5}$,说明传感器对 7 kHz 附近的声波有很好的声学敏感性能。图 9(d)所示为待测光纤 FP 干涉式声传感器在 7 kHz 下受到不同声压激励时的响应幅度,可见在 0.3~1.0 Pa 声压范围内,响应幅度与声压呈良好的线性关系,利用线性拟合得出传感器在 7 kHz 声波激励下的声压灵敏度为 1.8 V/Pa,说明制作的轮形 MEMS 振膜在谐振频率附近不仅有较高的声压灵敏度,而且对声压的敏感性能很好。

表 1 MDP 测试条件和结果统计
Table 1 Test conditions and result statistics for MDP

f/kHz	P/mPa	$\Delta f/\text{Hz}$	S_{NR}/dB	$M_{DP}/(\text{mPa}\cdot\text{Hz}^{-0.5})$
4	427	1	45	2.401
7	500	2	71	0.099
10	600	2	53	0.949

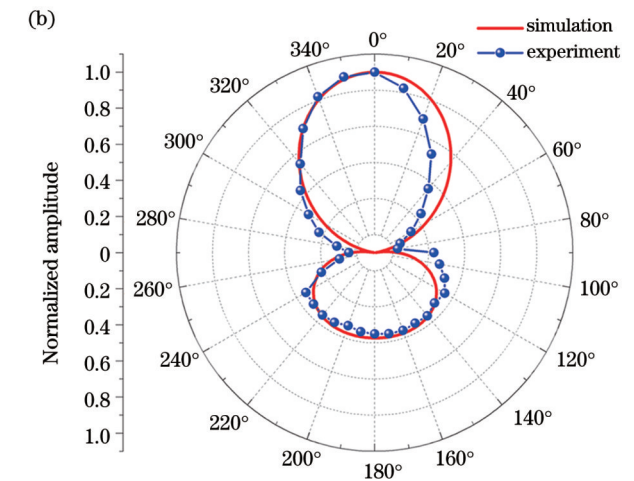
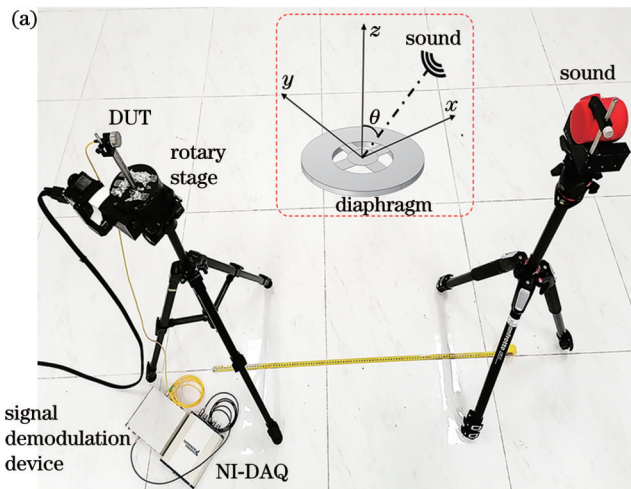


图 10 硅基 MEMS 轮形振膜光纤声传感器方向响应测试。(a) 测试装置照片;(b) 7 kHz 时实验测试和模型仿真的方向响应曲线
Fig. 10 Directional response testing of fiber-optic acoustic sensor with a silicon-based MEMS wheel-shaped diaphragm. (a) Photo of test setup; (b) experimental and simulated direction response curves at 7 kHz

采用图 10 所示的测试系统,设定声源频率为 7 kHz,采用 LabView 程序驱动旋转台顺时针以 10° 为步长旋转 360° ,同时采集并记录旋转过程中传感器的时域信号和频域信号。对传感器在不同声源入射角下的响应值进行处理。如图 10(b)所示,在 7 kHz 声源的激励下,所制作的声传感器的方向响应和仿真结果基本一致,声传感器的方向响应呈现出“8”字形变化趋势,分别在 $\theta=0^\circ$ 和 $\theta=180^\circ$ 时响应幅度最大,在 $\theta=90^\circ$ 和 $\theta=270^\circ$ 时响应幅度最小,说明其在谐振峰附近具有更好的响应性能。

MDP 的计算公式为

$$M_{DP} = \frac{P}{10^{\frac{S_{NR}}{20}} \sqrt{\Delta f}}, \quad (8)$$

式中: P 表示声压; S_{NR} 为信噪比; Δf 为频谱分辨率。

4.3 指向性测试

为了测试光纤 FP 干涉式声传感器的指向性,搭建了图 10(a)所示的测试系统。将待测的声传感器固定在电控水平旋转台(DaHeng CGD-011100 M)上,旋转台放置在三脚架上并与计算机连接;声源采用 SONY SRS-XB10 蓝牙音响,同样将声源放置在三脚架上,并调整声源与待测传感器在相距 1 m 的同一水平高度上,调节传感器振膜平面和声源出声孔平行,定义此时声源入射角为 $\theta=0^\circ$ 。信号解调和采集部分由光电驱动解调模块和 NI 数据采集卡(NI-DAQ)组成,光电驱动解调模块为光纤 FP 干涉式声传感器提供光源和信号解调电路;NI 数据采集卡与计算机连接,用于采集解调电路输出的电信号。测试过程中,在声源固定的情况下,通过旋转台水平旋转来改变待测声传感器和声源的相对角度 θ ,模拟待测声传感器在不同声压入射角下的响应情况。

4.4 mini-UAV 探测实验

为了测试轮形振膜光纤声传感器在户外 mini-UAV 的探测效果,在户外操场搭建了图 11(a)所示的测试系统。mini-UAV 的辐射噪声由 Drone F84 四轴无人机产生(该 mini-UAV 翼展 25 cm,质量为 120 g);使用商用驻极体麦克风(AWA14423,灵敏度为 47.86 mV/Pa)和硅基 MEMS 轮形振膜的光纤声传感器同时采集 mini-UAV 发出的噪声信号(声波垂直于入射方向)。

首先,利用驻极体麦克风采集实验场地[图 11(a)]的背景噪声,如图 11(b)所示。在 20 Hz~4 kHz 范围

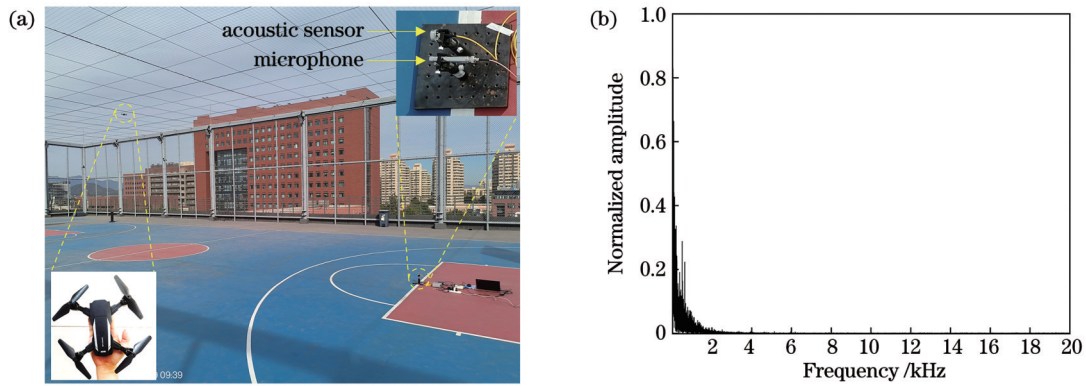


图 11 mini-UAV 辐射噪声测试。(a)测试环境;(b)实验场地的背景噪声

Fig. 11 Test experiment of mini-UAV noise. (a) Test environment; (b) background noise of experimental site

内,背景噪声较强,不利于实验探测;在 4~20 kHz 范围内,背景噪声较弱。然后,将无人机悬停在距离声传

感器约 1 m 的位置,利用驻极体麦克风和轮形振膜光纤声传感器同步采集 mini-UAV 噪声,如图 12 所示。

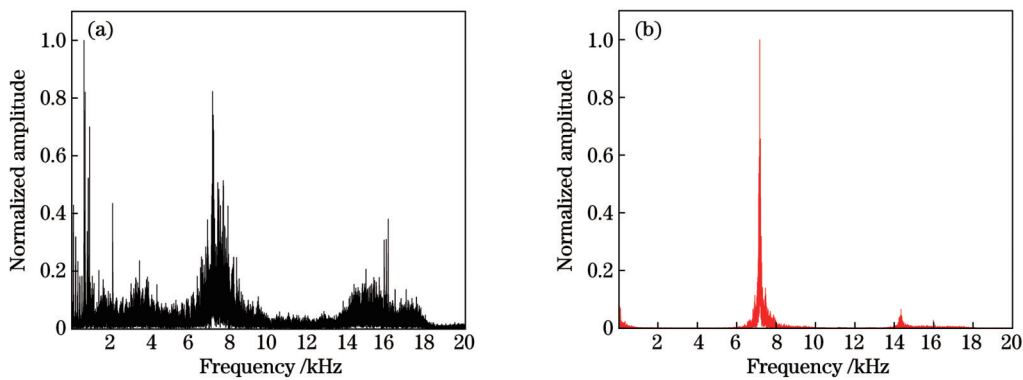


图 12 mini-UAV 辐射噪声谱。(a)驻极体麦克风采集的噪声谱;(b)轮形振膜光纤声传感器采集的噪声谱

Fig. 12 Mini-UAV radiation noise spectra. (a) Noise spectrum acquired by electret condenser microphone; (b) noise spectrum acquired by wheel-shaped diaphragm fiber-optic acoustic sensor

从图 12(a)可以看出,mini-UAV 辐射的噪声几乎覆盖了整个可听声范围,在 1 kHz、3 kHz、7 kHz 附近存在特征峰,并且在 7 kHz 附近的特征噪声较强。对比测试结果可知,轮形振膜光纤声传感器的特殊振膜结构在谐振峰(7 kHz)附近对 mini-UAV 噪声信号非常灵敏,而在远离谐振峰的范围几乎对噪声不敏感,起到了很好的滤波效果,如图 12(b)所示。相较于驻极体麦克风,轮形振膜光纤声传感器在 mini-UAV 噪声探测方面具有非常大的优势。

为了测试轮形振膜光纤声传感器对 mini-UAV 辐射噪声的探测性能,在图 11(a)所示的实验场地进行了不同距离下悬停 mini-UAV 的探测实验。在 1~70 m 的距离上,使用驻极体麦克风和轮形振膜光纤声传感器同时采集噪声信号,结果如图 13 所示。商用驻极体麦克风仅在 20 m 范围内有较为明显的 mini-UAV 噪声特征谱,在 20 m 之外几乎无法探测到噪声特征谱;轮形振膜光纤声传感器在 65 m 范围内依然具有很明显的噪声特征峰[图 13(b)]。轮形振膜光纤声传感器的探测能力是商用驻极体麦克风的 3 倍左右,具有很高的灵敏度,在特殊的应用场景下更具优势和发展

前景。

5 结 论

针对 mini-UAV 辐射噪声探测问题,设计制备了硅基 MEMS 轮形振膜,利用微机械组装的方式,将振膜、金属支座、商用 SMF 组装成基于硅基 MEMS 轮形振膜的光纤声传感器。首先,针对 mini-UAV 辐射噪声的特征谱在 7 kHz 附近明显区别于背景噪声的特点,结合振膜的声波振动理论设计了具有谐振工作特点的轮形振膜,并结合有限元分析软件仿真分析了轮形硅基振膜的频响特性和指向性。其次,通过 MEMS 加工工艺,成功制备出厚度为 10 μm 的轮形硅基振膜,还利用精密的机械加工制作了金属支座和超薄金属垫片,并利用微机械组装的方法成功制作了基于硅基 MEMS 轮形振膜的光纤声传感器。最后,对制得的传感器进行性能表征和 mini-UAV 辐射噪声测试实验。结果表明,制备的光纤声传感器的声学共振频率为 7279 Hz,与理论计算和仿真结果基本一致。当 7 kHz 声源垂直入射时,声压灵敏度为 1.8 V/Pa,信噪比为 71 dB,最小可探测声压为 99 $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{0.5}$ 。在指向性测

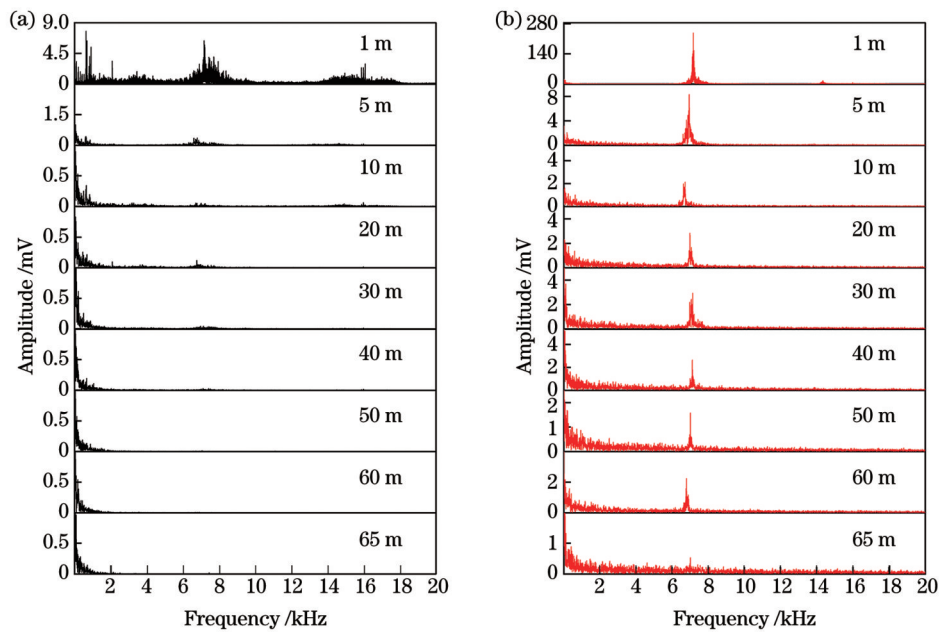


图 13 不同距离下 mini-UAV 测试结果。(a)驻极体麦克风测试结果;(b)轮形振膜的光纤声传感器测试结果

Fig. 13 Mini-UAV test results at different distances. (a) Test results by electret condenser microphone; (b) test results by wheel-shaped diaphragm fiber-optic acoustic sensor

试中,该传感器具有“8”字形的指向性,和仿真结果一致,表明它具有识别声源方向的能力。值得一提的是,在 mini-UAV 辐射噪声探测实验中,所研制的光纤声传感器可以在 65 m 范围内实现对 mini-UAV 噪声的准确探测,其探测能力是商用驻极体的 3 倍左右,表明它在 mini-UAV 探测等一些特殊场合更具应用优势和潜力。

致谢 感谢北方工业大学张萌颖博士在 MEMS 加工过程中提供的帮助。

参 考 文 献

- [1] 王传云, 司可意. 低空空域小型无人机目标检测算法[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2023, 40(2): 54-62.
Wang C Y, Si K Y. Detection algorithm of small UAV target in low altitude airspace[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2023, 40(2): 54-62.
- [2] Kang H G, Joung J G, Kim J Y, et al. Protect your sky: a survey of counter unmanned aerial vehicle systems[J]. IEEE Access, 2020, 8: 168671-168710.
- [3] 罗俊海, 王芝燕. 无人机探测与对抗技术发展及应用综述[J]. 控制与决策, 2022, 37(3): 530-544.
Luo J H, Wang Z Y. A review of development and application of UAV detection and counter technology[J]. Control and Decision, 2022, 37(3): 530-544.
- [4] Van Nguyen H, Rezatofighi H, Vo B N, et al. Online UAV path planning for joint detection and tracking of multiple radio-tagged objects[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019, 67(20): 5365-5379.
- [5] Ai X F, Zhang L Y, Zheng Y Q, et al. Passive detection experiment of UAV based on 5G new radio signal[C]//2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), November 21-25, 2021, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2021: 2124-2129.
- [6] Kapoulas I K, Hatziefremidis A, Baldoukas A K, et al. Small fixed-wing UAV radar cross-section signature investigation and detection and classification of distance estimation using realistic parameters of a commercial anti-drone system[J]. Drones, 2023, 7(1): 39.
- [7] 王君, 张德育, 康鑫英. 改进 Faster-RCNN 的低空小型无人机检测方法[J]. 沈阳理工大学学报, 2021, 40(4): 23-28.
Wang J, Zhang D Y, Kang X Y. Improved detection method of low altitude small UAV by faster-RCNN[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2021, 40(4): 23-28.
- [8] 包文歧, 谢立强, 徐才华, 等. 基于 YOLOv5 的微型无人机实时探测方法[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(5): 232-237.
Bao W Q, Xie L Q, Xu C H, et al. Real-time detection method of micro UAV based on YOLOv5[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(5): 232-237.
- [9] Wu G M, Xiong L S, Dong Z F, et al. Development of highly sensitive fiber-optic acoustic sensor and its preliminary application for sound source localization[J]. Journal of Applied Physics, 2021, 129(16): 164504.
- [10] 刘欣, 蔡宸, 董志飞, 等. 基于硅基微电子机械系统仿生振膜的光纤麦克风[J]. 物理学报, 2022, 71(9): 094301.
Liu X, Cai C, Dong Z F, et al. Fiber-optic microphone based on bionic silicon micro-electro-mechanical system diaphragm[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(9): 094301.
- [11] Case E E, Zelnio A M, Rigling B D. Low-cost acoustic array for small UAV detection and tracking[C]//2008 IEEE National Aerospace and Electronics Conference, July 16-18, 2008, Dayton, OH, USA. New York: IEEE Press, 2008: 110-113.
- [12] Chen M M, Masoudi A, Brambilla G. Performance analysis of distributed optical fiber acoustic sensors based on φ -OTDR[J]. Optics Express, 2019, 27(7): 9684-9695.
- [13] Chen W J, Jiang J F, Liu K, et al. Self-copy-shift-based differential phase extracting method for fiber distributed acoustic sensing[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(8): 081201.
- [14] 张刚, 吴许强, 汪辉, 等. 共光声池腔芯轴型空气衬底光纤麦克风[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0206001.
Zhang G, Wu X Q, Wang H, et al. Air-backed mandrel fiber optic microphone with a resonant photoacoustic tube[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0206001.
- [15] 蒋冰莉, 杨坤涛, 王江安, 等. MOEMS 低频声传感器的设计

- 与实验研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(10): 1096-1100.
- Jiang B L, Yang K T, Wang J A, et al. Design and experimental research of the MOEMS low frequency sensor[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(10): 1096-1100.
- [16] 李汉正, 吴高米, 马振钧, 等. 光纤干涉次声传感器研制[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(15): 150603.
- Li H Z, Wu G M, Ma Z J, et al. Preparation of fiber-optic interferometer based infrasound sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(15): 150603.
- [17] Wu G M, Hu X Y, Liu X, et al. Fabrication of glass diaphragm based fiber-optic microphone for sensitive detection of airborne and waterborne sounds[J]. *Sensors*, 2022, 22(6): 2218.
- [18] Liu J, Yuan L, Lei J C, et al. Micro-cantilever-based fiber optic hydrophone fabricated by a femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2459-2462.
- [19] Ren D P, Liu X, Zhang M Y, et al. Low-frequency bi-directional microphone based on a combination of bionic MEMS diaphragm and fiber acousto-optic transducer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(13): 14655-14665.
- [20] 李雪萍, 王双, 张鹏, 等. 基于振膜耦合增益原理的飞轮型光纤 F-P 声矢量传感器[J]. 光学学报, 2023, 43(20): 2006002.
- Li X P, Wang S, Zhang P, et al. Flywheel-like fiber-optic Fabry-Perot acoustic vector sensor based on diaphragm coupling gain principle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(20): 2006002.
- [21] Qi X G, Wang S, Jiang J F, et al. Flywheel-like diaphragm-based fiber-optic Fabry-Perot frequency tailored acoustic sensor[J]. *Journal of Physics D*, 2020, 53(41): 415102.
- [22] Qi X G, Wang S, Jiang J F, et al. Study on the sensitization effect of flywheel-like diaphragm on fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensor[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 99286-99293.
- [23] Li H Y, Lü J M, Li D L, et al. MEMS-on-fiber ultrasonic sensor with two resonant frequencies for partial discharges detection[J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 18431-18439.
- [24] Li H Y, Wang X J, Li D L, et al. MEMS-on-fiber sensor combining silicon diaphragm and supporting beams for on-line partial discharges monitoring[J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29368-29376.
- [25] Saxena S, Sharma R, Pant B D. Dynamic characterization of fabricated guided two beam and four beam cantilever type MEMS based piezoelectric energy harvester having pyramidal shape seismic mass[J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(12): 5947-5958.
- [26] Geng Y Q, Wang J Q, Zhang J R, et al. A probe-based force-controlled nanoindentation system using an axisymmetric four-beam spring[J]. *Precision Engineering*, 2019, 56: 530-536.
- [27] 曹惠茹, 陈玮, 成海秀, 等. 轻型四旋翼无人机声场特性研究[J]. 中国测试, 2019, 45(5): 43-46, 53.
- Cao H R, Chen W, Cheng H X, et al. Study on acoustic field characteristics of light quadrotor unmanned aerial vehicle[J]. *China Measurement & Test*, 2019, 45(5): 43-46, 53.
- [28] Kartashov V, Oleynikov V, Koryttsev I, et al. Processing and recognition of small unmanned vehicles sound signals[C]//2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), October 9-12, 2018, Kharkiv, Ukraine. New York: IEEE Press, 2018: 392-396.
- [29] 何祚镛, 赵玉芳. 声学理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981: 61-109.
- He Z Y, Zhao Y F. *Fundamentals of acoustic theory*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1981: 61-109.
- [30] Chen K, Yu Z H, Yu Q X, et al. Fast demodulated white-light interferometry-based fiber-optic Fabry-Perot cantilever microphone[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3417-3420.
- [31] 夏菁, 江俊峰, 王双, 等. 用于分布式光纤声传感的薄壁圆筒声增敏实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(7): 0706003.
- Xia J, Jiang J F, Wang S, et al. Experimental study on acoustic sensitization of thin-walled cylinder for distributed optical fiber acoustic sensing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(7): 0706003.
- [32] Liu B, Zhou H, Liu L, et al. An optical fiber Fabry-Perot microphone based on corrugated silver diaphragm[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(8): 1994-2000.
- [33] Dong Z F, Hu X Y, Ren D P, et al. Judgment and compensation of deviation of the optical interferometric sensor's operating point from the interferometer quadrature point[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(21): 7008-7017.
- [34] 熊林森, 张萌颖, 董志飞, 等. 光栅干涉集成麦克风研究[J]. 光学学报, 2023, 43(7): 0723001.
- Xiong L S, Zhang M Y, Dong Z F, et al. Integrated grating interferometric microphone[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(7): 0723001.

Development of Fiber-Optic Acoustic Sensors with Silicon-Based MEMS Wheel-Shaped Diaphragm for Mini-Unmanned Aerial Vehicle Detection

Ji Kangning^{1,2}, Hu Xinyu^{1,2}, Xiong Linsen^{1,2}, Wang Haibo^{1,2}, Qi Zhimei^{1,2,3*}

¹State Key Laboratory of Transducer Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective Mini-unmanned aerial vehicle (Mini-UAV) is widely employed in scientific research and entertainment due to its small size, low cost, easy operation, and high flexibility. However, the “abuse” of mini-UAVs has caused great hidden

dangers to public security and personal privacy. Therefore, radio, radar, image recognition, and other detection methods have been proposed to meet the urgent need for mini-UAV detection and surveillance. However, since mini-UAVs have low altitudes, low speeds, and a small reflective cross-sectional area, it is difficult for radars to detect them quickly under the interference of the complex background. Additionally, radio detection is prone to false alarms due to severe electromagnetic interference at low altitudes. Although CNN-based image recognition has a high detection accuracy, the ability to accurately distinguish between birds and mini-UAVs is affected by image resolution, which needs to be improved. Meanwhile, the above methods have complex equipment, high detection costs, and poor real-time performance. In contrast, the mini-UAV can be quickly detected in noisy low-altitude environments by acoustic detection, which features sound real-time performance, simple equipment, and low cost. However, the current acoustic sensors adopted for acoustic detection have low sensitivity and do not recognize the sound source direction. Therefore, we fabricate a fiber-optic acoustic sensor with a resonant MEMS wheel-shaped diaphragm to detect acoustic signals with high sensitivity and high signal-to-noise ratio (SNR) near the resonance peak. The sensor has an “8” shaped directional response, which allows for the identification of the sound source direction. Finally, a new method is provided for mini-UAV detection.

Methods To improve the sensitivity of optical fiber acoustic sensors and reduce the damping effect caused by the enclosed back cavity of the circular diaphragm, we adopt a wheel-shaped diaphragm with an open acoustic back cavity as the acoustic sensing diaphragm. The wheel-shaped diaphragm consists of a central diaphragm connected to four symmetrically distributed connecting arms on an outer base ring. Firstly, the geometric structure of the wheel-shaped diaphragm is modeled by acoustic vibration theory. According to the characteristics of the mini-UAV's radiated noise spectrum, the diaphragm eigenfrequency is set near the mini-UAV noise fingerprint frequency, and the geometric parameters of the wheel-shaped diaphragm at this frequency are calculated. The acoustic characteristics are simulated and verified via finite element analysis software. Then, the wheel-shaped diaphragm is fabricated using MEMS processing technology. Meanwhile, to optimize the sensor performance, we sputter a metal on the diaphragm surface to improve the optical reflectivity of the diaphragm. Finally, the fiber optic acoustic sensor of the silicon-based MEMS wheel diaphragm is assembled by mechanical micro-assembly. In addition, the cavity length of its static Fabry-Pérot (FP) interference cavity is adjusted to make the sensor work at the quadrature point, which ensures high sensitivity without signal distortion.

Results and Discussions A fiber optic acoustic sensor is fabricated using the designed silicon-based MEMS wheel-shaped diaphragm (Fig. 5). The FP static cavity length is measured using interferometric spectroscopy. The experiment shows that when the laser wavelength is 1550 nm, the FP static cavity length is 144.457 μm , which meets the quadrature point (Fig. 6). An acoustic testing system is built to characterize the performance of the wheel-shaped diaphragm fiber-optic acoustic sensor (Fig. 7). The sensor has a resonance peak at 7.279 kHz and a relatively flat response in the frequency range of 2–6 kHz below the resonant frequency (Fig. 8). At normal incidence of 7 kHz sound, the sound pressure sensitivity is 1.8 V/Pa, the SNR is 71 dB, and the minimum detectable sound pressure is 99 $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{0.5}$ (Fig. 9). In outdoor mini-UAV detection experiments, mini-UAV noise can be accurately detected within a range of 65 m, with a detection capability about three times that of commercial ECM (Fig. 13).

Conclusions To detect the radiation noise of mini-UAVs, we design and fabricate a fiber-optic acoustic sensor with a silicon-based MEMS wheel-shaped diaphragm. The wheel-shaped diaphragm consists of a central vibrating membrane and four symmetrically distributed joint arms, and it has high sensitivity near the resonance frequency and the ability to detect mini-UAV at a distance. The sensor has a resonance peak at 7.279 kHz. At the normal incidence of 7 kHz sound, the sound pressure sensitivity is 1.8 V/Pa, the SNR is 71 dB, and the minimum detectable sound pressure is 99 $\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{0.5}$. Additionally, it has an “8” shaped directional pattern, which indicates its ability to identify the sound source direction. It can accurately identify the noise of mini-UAVs within a range of 65 m, and the detection ability is about three times that of commercial ECM. This indicates its advantages and potential in applications such as mini-UAV detection in some special situations.

Key words sensors; fiber-optic acoustic sensors; MEMS wheel-shaped diaphragm; mini-unmanned aerial vehicle detection