

面向声学感知与识别的微纳光纤传感器研究进展

范计锋^{1*#}, 程钰博¹, 周世豪²

¹沈阳航空航天大学理学院, 辽宁 沈阳

²沈阳航空航天大学航空宇航学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年3月15日; 录用日期: 2026年4月9日; 发布日期: 2026年4月17日

摘要

作为人类信息交流最核心的媒介, 高精度、高鲁棒性的语音感知技术是推动人机交互与智能医疗发展的关键。传统电声传感器在复杂电磁环境、生物相容性及柔性集成等方面面临固有局限。微纳光纤凭借其亚波长尺度下的强倏逝场效应、高机械柔性及本质抗电磁干扰等独特物理特性, 已成为构建高灵敏度声学传感平台的研究热点。本文系统综述了面向声学感知与识别的微纳光纤传感器研究进展。首先阐述了微纳光纤的传感机理及其在微小振动与人体生理信号监测领域的奠基性应用; 随后, 重点梳理了其在声音信号检测及语音识别领域的探索性成果, 并深入探讨了适配光纤信号非线性特征的信号处理算法与机器学习模型, 旨在揭示从物理量提取到语义识别的转换逻辑。针对工程化应用, 本文进一步分析了不同制备工艺的规模化潜力, 以及封装材料对声学响应特性的调制作用。最后, 通过与成熟电声系统的多维度对比, 客观分析了光纤声学系统在成本、体积及功耗等方面的工程化瓶颈, 并提出通过光子集成技术(PIC)实现解调系统小型化、低成本化的未来演进方向, 为高性能光纤声学交互系统的开发提供参考。

关键词

微纳光纤传感器, 声学感知, 语音识别, 信号处理, 光子集成

Research Progress on Micro-Nano Fiber Optic Sensors for Acoustic Sensing and Recognition

Jifeng Fan^{1*#}, Yubo Cheng¹, Shihao Zhou²

¹College of Science, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

²College of Aeronautics and Astronautics, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

As the most natural and core medium for human information exchange, high-precision and robust speech perception technology is essential for the advancement of human-machine interaction and intelligent healthcare. Traditional electroacoustic sensors face inherent limitations in complex electromagnetic environments, biocompatibility, and flexible integration. Micro-nano fibers (MNFs), characterized by their strong evanescent field effects at the sub-wavelength scale, high mechanical flexibility, and intrinsic immunity to electromagnetic interference, have emerged as a prominent research focus for constructing highly sensitive acoustic sensing platforms. This paper systematically reviews the research progress of MNF-based sensors for acoustic sensing and recognition. First, the sensing mechanisms and foundational applications of MNFs in tiny vibration and human physiological signal monitoring are elaborated. Subsequently, the exploratory achievements in acoustic signal detection and speech recognition are summarized, with a detailed analysis of signal processing algorithms and machine learning models tailored to the nonlinear characteristics of optical fiber signals, aiming to reveal the transformation logic from physical measurement to semantic recognition. Addressing engineering applications, this paper further analyzes the scaling potential of various fabrication processes and the modulation effects of packaging materials on acoustic response characteristics. Finally, through multi-dimensional comparisons with mature electroacoustic systems, the engineering bottlenecks of fiber-optic acoustic systems in terms of cost, size, and power consumption are objectively analyzed. Future evolutionary directions, such as miniaturizing and cost-reducing demodulation systems via Photonic Integrated Circuits (PIC), are proposed to provide a reference for developing high-performance fiber-optic acoustic interaction systems.

Keywords

Micro-Nano Fiber Sensor, Acoustic Sensing, Speech Recognition, Signal Processing, Photonic Integration

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

作为人类信息交流最自然、最核心的媒介，语音凭借其高精度、高鲁棒性的感知与识别技术成为推动智能物联网、人机交互、医疗健康及安全认证等领域发展的关键[1]。当前，基于电容[2]-[4]、电阻[5][6]、压电[7]-[9]等原理的电声传感器虽已高度成熟并广泛应用，但其固有缺陷在日益复杂的应用场景下逐渐凸显：易受电磁干扰、防水性和生物相容性差、难以在保持高性能的同时实现柔性集成、由于组件老化和腐蚀而产生的可靠性问题等[10]。因此，探索基于新物理原理的声学传感平台，从信号采集的源头提升抗干扰能力与场景适应性，成为突破现有语音识别系统性能瓶颈的重要途径。

在此背景下，光纤声波传感器以其独特的物理机制展现出巨大潜力。它以光波为载体，通过声波引起的强度、相位、波长等光纤内光参量的变化实现探测，并通过光学解码读取信息，具备本质抗电磁干扰、耐腐蚀、可远距离传输、易于构成分布式网络等优势。近年来，随着微纳加工技术的进步，微纳光纤，一种直径接近或小于传输光波长的一维导波结构，正从传统的光通信载体演变为一种极具前景的高

灵敏度物理传感平台[11]。微纳光纤的核心优势源于其亚波长尺度：极强的倏逝场效应使光能量以较大比例渗透至光纤表面外部，实现与周围环境的高效相互作用；极小的质量和极高的机械柔性使其对微弱机械振动具有灵敏响应；同时，其直径依赖的波导色散特性为光学调控提供了额外自由度。这些特性使得 MOF 不仅在触觉感知[12]、生理信号监测[13]等振动传感领域表现出色，更预示着其在声波与语音信号感知方面的巨大应用潜力。

基于现有综述从干涉、光强调制等传感机理或水听器[14]、超声检测[15]等应用领域进行的宏观梳理，本文旨在聚焦“将聚合物微纳光纤的材料与结构优势，系统地转化为在复杂真实场景下实用的语音识别与说话人识别能力”这一前沿交叉领域，以“技术演进”为逻辑主线展开内容：第二章主要阐述微纳光纤作为通用高灵敏度振动传感平台的机理与成功应用。第三章聚焦聚合物材料，系统梳理其从普通光纤到微纳光纤(PMOF)在声学传感领域的探索路径，总结面向语音感知识别的研究进展，随后将当前 PMOF 语音传感的研究现状置于更广阔的坐标系中，通过与成熟的硅基微纳光纤声传感技术以及高度发展的电声语音识别系统进行多维度对比，清晰揭示其在系统性能、环境鲁棒性与评估体系等方面存在的巨大差距与核心挑战。最后，基于以上分析，对未来研究的关键方向进行展望。

2. 传感原理与结构设计

2.1. 微纳光纤传感原理

微纳光纤的传感机理根植于其独特的物理结构与光学特性。当光纤直径被缩减至微米乃至纳米尺度(接近或小于传输光波长)时，其光传输行为将发生根本性改变，从而产生卓越的传感特性：

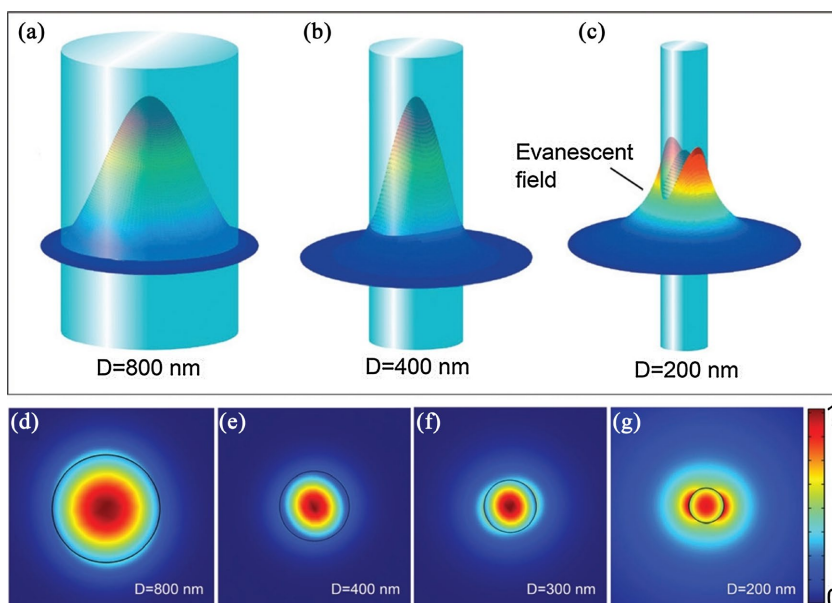


Figure 1. Z-direction Poynting vectors of silica MNFs at 633 nm wavelength with diameters of (a) 800 nm, (B) 400 nm, and (c) 200 nm in 3D view, and (d) 800 nm, (e) 400 nm, (f) 300 nm, (g) 200 nm in 2D view [16]

图 1. 二氧化硅微纳光纤在 633 nm 波长下的 Z 方向坡印廷矢量：三维视图中直径为(a) 800 nm、(b) 400 nm 和(c) 200 nm；二维视图中直径为(d) 800 nm、(e) 400 nm、(f) 300 nm 和(g) 200 nm [16]

(1) 强倏逝场和表面场增强效应。在标准光纤中，光场被紧密束缚在纤芯内。而在微纳光纤中，由于直径极小，光无法被完全限制，会有很大一部分能量以倏逝场的形式渗透到光纤表面的外部空间中，如图 1 所示。这部分环绕光纤的倏逝场就像一个极其敏感的“触角”，其强度、分布和相位会强烈地受到

外界环境(如折射率、介质接触、表面吸附)的扰动。同时,在亚波长尺度下,光纤表面的光场能量密度被显著放大,即产生“表面场增强”,这进一步放大了光与周围物质相互作用的信号。

(2) 高机械灵敏度和弹光效应。微纳光纤本身具有极小的质量和极高的柔韧性(机械强度依然优良)。任何作用在其上的微弱机械力(如声压、振动、触摸)都能引起光纤微小的形变(拉伸、弯曲或直径变化)。这种形变会直接改变光纤的传输特性:一是通过弹光效应,即应力导致光纤材料折射率发生变化;二是改变光纤的几何结构,从而调制其内部传输的光波。这两种机制都会最终转化为输出光信号(强度、相位或波长)的可测变化。

2.2. 微纳光纤传感器结构

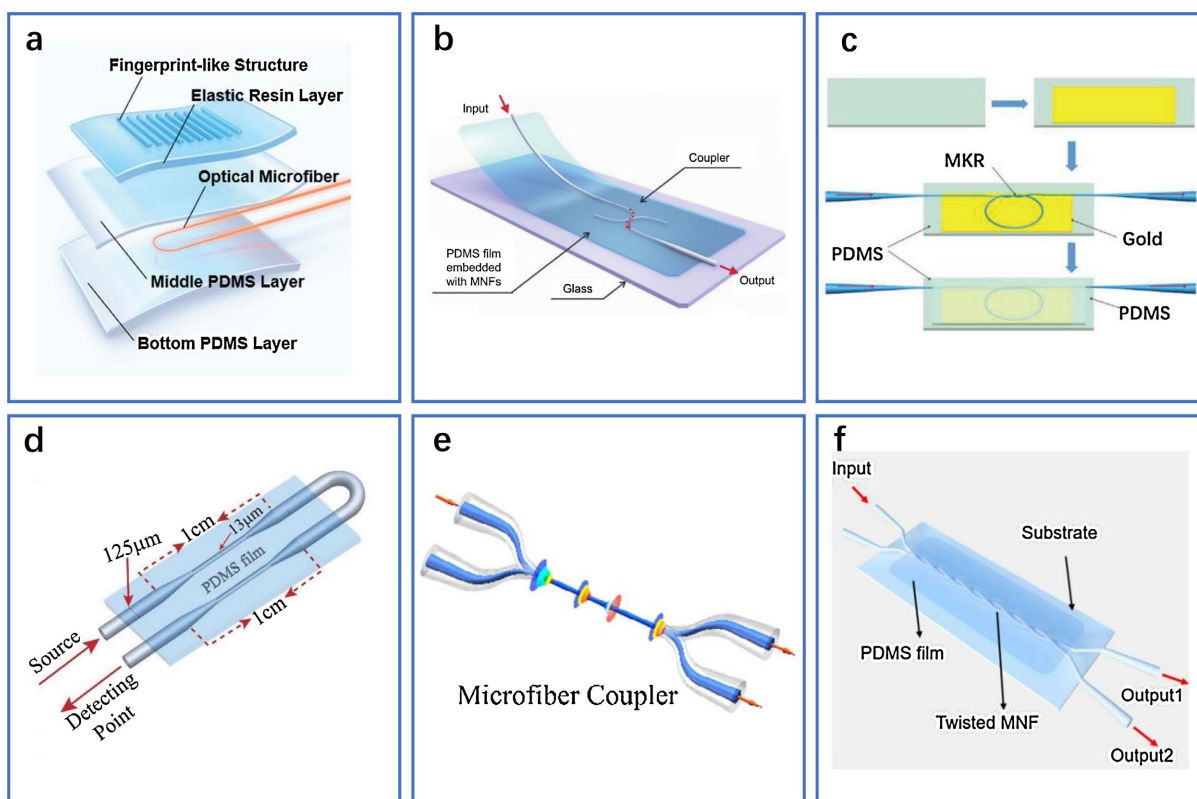


Figure 2. (a) The multilayer structures with stiffness contrast in the sensor mimics the epidermis and dermis, and the parallel-ridge patterns of the sensor is similar to the fingerprint, and the optical microfiber detects tactile stimuli analogous to the sensory receptors [17]. (b) Schematic diagram of a strain sensor structure [18]. (c) Wearable sensor based on a HPMKR [19]. (d) Schematic of UCMI [20]. (e) Structure of flexible microfiber coupler sensor [21]. (f) Schematic diagram of the temperature sensor [22]

图 2. (a) 该传感器的多层结构具有刚度差异,其模拟了皮肤的表皮和真皮层;传感器上的平行脊纹图案类似于指纹;而光学微纤维能够检测类似于感觉受体的触觉刺激[17]。(b) 应变传感器结构示意图[18]。(c) 基于高精度微惯性测量单元的可穿戴传感器[19]。(d) UCMI 的原理图[20]。(e) 柔性微纤维耦合传感器的结构[21]。(f) 温度传感器的原理图[22]

基于光纤的高机械灵活性,可以根据不同传感原理及应用场景,设计不同结构的光纤传感器。Jiang 等人[17]研究了一种受指尖皮肤启发的柔性光学(FIFO)传感器(图 2(a)),将直径约 $1.2 \mu\text{m}$ 的微纳光纤弯曲成 U 形并嵌入柔性封装。当对传感器施加压力导致光纤产生微小弯曲形变时,光纤内部的光传输模式随之发生改变,更多的芯模能量会辐射至外界,引起检测光强显著衰减,进而提升传感灵敏度。凭借其其对弯曲损耗的高度敏感性,该传感器可用于检测力与滑动信号,并已成功应用于机械臂的抓取力度测量与

物体滑移检测。Yu 等人[18]提出了一种基于倏逝场耦合的微纳光纤应变传感器,基于热拉锥技术将标准光纤拉伸成锥区直径约 $0.9\ \mu\text{m}$ 的微纳光纤,并制备成由两个 U 型结构反向平行放置的光纤耦合器,如图 2(b)所示。由于两根光纤接触部分的倏逝场处于重叠状态,即使极小的耦合间距变化也会对该结构的耦合效率造成极大影响。微小的应变造成的传感器柔性基底拉伸,增大了两根光纤间的距离,耦合效率的变化导致输出光强发生改变。基于这一耦合机制,该传感器具有时间频率响应快(30 kHz)、压力灵敏度高($102\ \text{kPa}^{-1}$)等特点,能实时检测声音振动、人体指尖脉搏等微弱信号。Li 等人[19]报道了一种基于混合等离子体微纳光纤结谐振器(HPMKR)的可穿戴传感器,如图 2(c)所示,将微纳光纤打结形成微结谐振器,再将其放置在金膜表面,用 PDMS 薄膜进行封装。该传感器结合谐振波长漂移机理与强度解调,实现了脉搏、呼吸率等微弱人体生理信号的检测。Mishra 等人[20]制成了一种基于 U 型级联微纳光纤干涉仪(图 2(d)),利用弯曲应变导致光传输模式的有效折射率发生改变而引起干涉光谱漂移这一原理,实现了实时监测人体颈部弯曲和关节运动。该传感器在光纤不同位置分别进行拉伸处理,并将光纤弯曲成 U 型使两个锥区平行,用 PDMS 薄膜进行封装进一步增强了传感器对外部扰动的灵敏度。Wang 等人[21]提出了一种应变传感器,将两根标准光纤并排加热熔融拉锥,制成了具备 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 耦合区的微纳光纤传感器(图 2(e))。由于经熔融后两根光纤的模式场发生重叠形成耦合,该结构输出光功率在两根光纤之间呈现周期性分布,通过计算输出端的耦合比变化,可以实现对多种微弱外界信号的高灵敏度检测。Song 等人[22]研究了一种基于扭转微纳光纤的高灵敏度温度传感器,如图 2(f)所示,通过将两根微纳光纤的锥区扭转缠绕成紧密接触的耦合结构,同时利用硅光纤光热系数小和 PDMS 材料负光热系数较大的特点,成功将传感器应用于微小温度变化引起的机器人避障测试和微流控芯片内液体温度的实时监测。Ge 等人[23]制作了一种基于双 U 型锥形塑料光纤的弯曲传感器,将微纳光纤的锥区进行两次反向弯曲,并用 PDMS 材料封装。在发生弯曲应变时,多个锥区位置同时产生显著弯曲损耗,极大增强了传感器对弯曲角度和弯曲速度的响应灵敏度。Yuan 等人[24]提出了一种 PDMS 封装的微纳光纤耦合器的可变光衰减器(VOA),将两根微纳光纤平行放置,通过精密操作在 $3\ \text{mm}$ 耦合长度内使两根光纤的锥区保持 $2.5\ \mu\text{m}$ 的间距,基于 PDMS 材料的光弹效应,实现了器件在 $0.4\ \text{dB}$ 至 $15.3\ \text{dB}$ 衰减范围的连续可调。

3. 微纳光纤传感器在信号检测中的应用

基于前两部分对微纳光纤传感机理与结构设计的系统阐述,本文第三部分将进一步梳理其从基础振动感知向声学检测乃至语音识别应用的技术演进路径。得益于强倏逝场与高机械柔性所带来的卓越灵敏度,微纳光纤已在触觉感知、生理信号监测等微小振动检测领域取得显著进展。这一能力为其向声学传感扩展奠定了物理基础。在此基础上,部分研究开始尝试将微纳光纤的感知能力延伸至语音识别这一高阶信息处理任务。本节将沿着这一递进脉络,依次综述相关研究进展。

3.1. 触觉微小振动感知与人体微弱生理信号检测

Yu 等人[25]报道了一种纳米光纤(ONF)悬臂梁结构的超灵敏微力传感器,将 ONF 与金微片(GMF)相结合,制作成一个微力天平,可用于检测皮牛量级的微小压力。如图 3(a)所示,在该天平的 GMF 托盘上逐粒放置质量为 $5\ \text{ng}$ 的 PMMA 微粒,结果显示,随着 PMMA 微粒数量的增加,光透射率有三个明显的变化。Zhang 等人[26]提出了一种以悬挂模式工作的类皮肤可穿戴光纤传感器,如图 3(b)所示,即使质量为 $1\ \text{mg}$ 的水滴低落在传感器上而不引起传感器产生明显形变,仍然能够通过光透射率的变化进行检测。Tang 等人[27]研制的基于微纳光纤的紧凑型触觉传感器对压力变化的灵敏度高达 $0.108\ \text{mN}^{-1}$,分辨率达 $0.031\ \text{mN}$,基于其高灵敏度与快速响应特性,该传感器可区分硬度差小于 4 Shore A 的聚二甲基硅氧烷样品。Xie 等人[28]开发了一种具有亚毫米弯曲半径的 U 型微纳光纤传感器,并在锥区处增加了 PDMS 材

质的圆顶形突起用于提高传感器灵敏度,赋予了该传感器对剪切力的方向响应。图 3(c)展示了固定在玻璃基板上并倒置的传感器,在不同周期和高度的栅板上滑动时所检测到的光信号变化,证明了该传感器可用于纹理识别。Tang 等人[29]在 U 型微纳光纤传感器锥区正上方的 PDMS 突起顶部附着了直径 $500\ \mu\text{m}$ 的玻璃珠,将传感器以恒定速度在 CD、菲涅尔透镜、牛仔裤表面拖动,根据输出光谱功率图中的最显著频率计算出不同材料表面的纹理波长,实现了纹理识别。

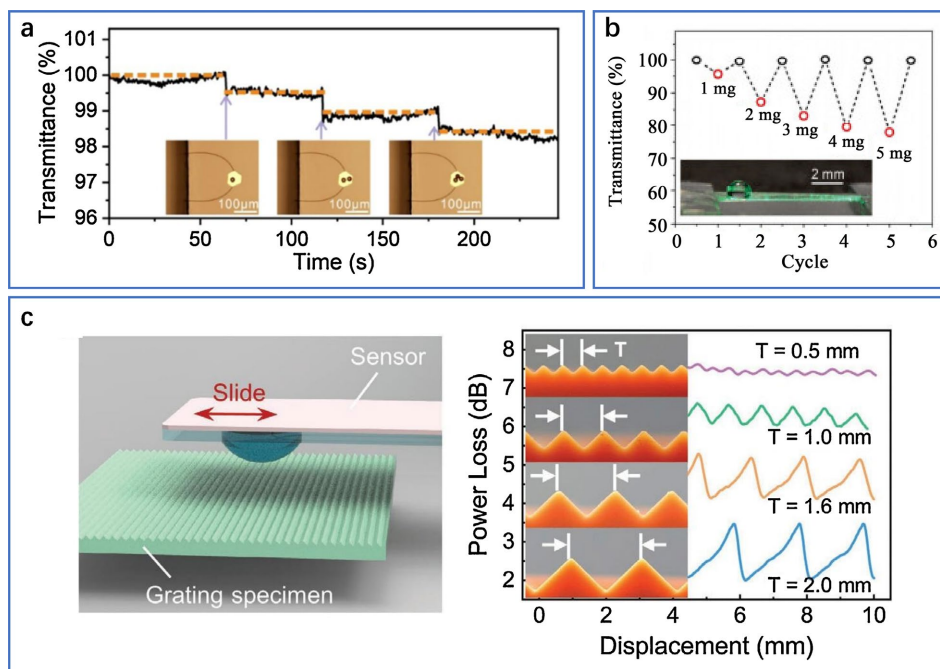


Figure 3. (a) The optical response of the picobalance to the loading of PMMA microparticle [25]. (b) Response of a suspended SLWOS to water droplets with different weights [26]. (c) Schematic illustration of texture recognition by sliding the sensor over a grating [28]

图 3. (a) 微天平对聚甲基丙烯酸甲酯微粒加载的光响应情况[25]。(b) 悬浮式 SLWOS 对不同重量水滴的反应[26]。(c) 通过将传感器在光栅上滑动进行纹理识别的示意图[28]

Wang 等人[21]设计了一种应变传感器,图 4(a)展示了应用该传感器检测人体颈部、手腕、指尖、脚踝等部位脉搏信号的场景。传感器输出信号的耦合比可以清晰显示出各部位的脉搏波形,且检测结果与人体对应部位的真实脉搏信号特征相一致。Wang 等人[30]报告了一种波形聚合物可穿戴光纤传感器,可用于检测人体不同部位的微弱生理信号。如图 4(b)所示,将传感器固定在志愿者胸部,对人体站立状态时的呼吸率与心率进行了实时监测。利用傅里叶变换对原始信号进行处理,可提取出 11.2 BPM 的呼吸率信号与 59.8 BPM 的心率信号。Liu 等人[31]研究了一种基于双模态微纳光纤的协同传感器,用 PDMS 薄膜对两根不同直径的微纳光纤进行分层封装,可用于对压力和湿度进行协同传感。凭借其对环境湿度的高敏感性,该传感器可被用于呼吸检测,同时图 4(c)中结果也证实了其在高湿度条件下的检测可逆性。Pan 等人[32]研究了一种波浪形可拉伸光学传感器,该结构为传感器的拉伸和弯曲提供了很大的灵活性。将该传感器应用于人的呼吸检测,可以清晰分辨出运动前后的呼吸差异,且在深呼吸模式下,输出波形的幅度显著增加。Zhu 等人[33]提出了一种基于波浪形微光纤的可拉伸传感器。如图 4(d),利用范德华力将传感器贴附在手腕桡动脉处,搭配商用 ECG 模块,同时获得脉搏波与心电信号。通过两种信号的时间差计算出血压值,实现了人体血压动态监测。Guo 等人[34]提出了一种基于嵌入薄 PDMS 膜中间的环形微纤维结构的可穿戴传感器,利用该传感器检测手腕桡动脉处的脉搏,可以得到清晰的脉搏波波形,且

脉搏信号与标准桡动脉搏动周期一致。Yao 等人[35]研究了一种用于同时测量温度和压力的单一光学微纤维触觉传感器，用于对人体脉搏信号和体温进行检测。基于光纤高阶模式截止波长峰值和长波长区域输出光谱强度分别对温度和压力的有效响应，可以解决信号串扰问题，实现对脉搏信号的准确分析。

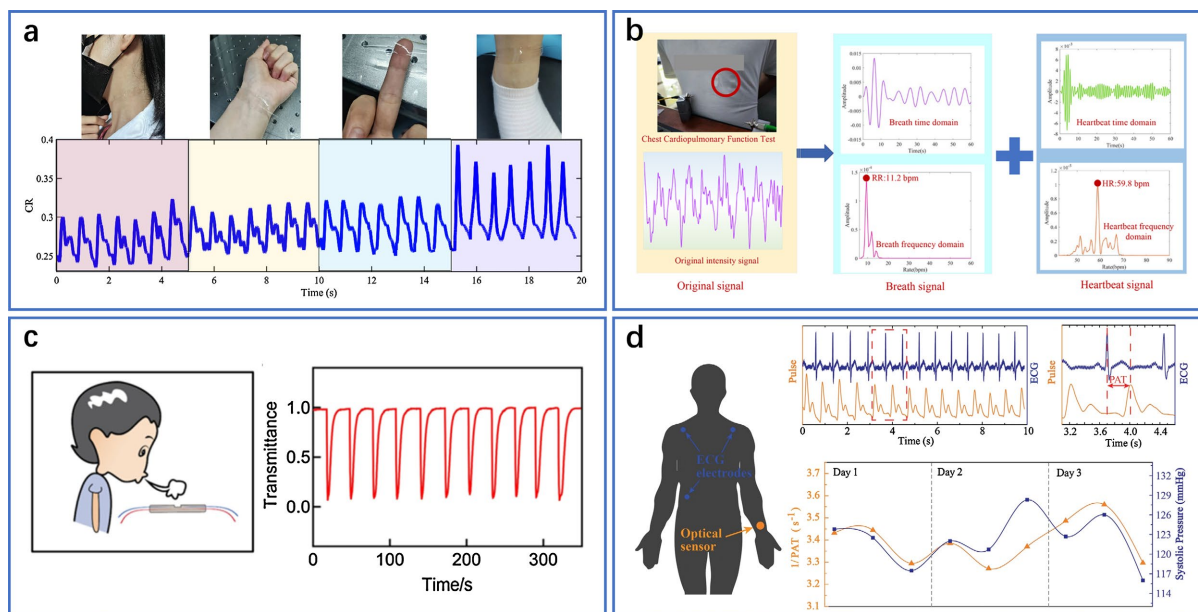


Figure 4. (a) Monitoring a volunteer's pulse signals at various body sites: finger, neck, wrist, and ankle [21]. (b) (Left) Pulse test on the chest and the original signal collected from the WPOMF sensor; (middle) respiratory signal obtained by the Fourier transform; (right) heartbeat signal obtained by Fourier transform [30]. (c) Schematic of respiration sensing [31]. (d) Schematic diagram of the blood pressure monitoring [33]

图 4. (a) 监测志愿者在身体不同部位(手指、颈部、手腕和脚踝)的脉搏信号[21]。 (b) (左)胸部脉冲测试以及从 WPOMF 传感器获取的原始信号; (中)通过傅里叶变换得到的呼吸信号; (右)通过傅里叶变换得到的心跳信号[30]。 (c) 呼吸感应原理[31]。 (d) 血压监测的示意图[33]

3.2. 声音信号检测

上述研究表明，微纳光纤凭借其优异性能已在触觉感知、生理信号监测等振动检测领域展现出卓越性能。值得注意的是，声音本质上是空气介质传播的机械振动，因此微纳光纤对微小振动的灵敏响应能力可自然延伸至声学探测。基于这一物理共通性，研究者开始探索将微纳光纤应用于不同场景的声波检测，并取得了系列进展。

Yu 等人[18]设计了一种基于微纳光纤耦合器的声音检测系统，图 5(a)显示利用该系统可以检测到距离传感器 2 cm 处的扬声器发出的不同频率和不同强度的正弦声波信号。Wang 等人[21]利用熔融的耦合微纳光纤传感器同时对人体脉搏信号和扬声器播放的语音信号进行检测，随后利用频域滤波技术对原始混合信号进行处理，如图 5(b)，提取出的声音信号与原始音频信号相似，验证了传感器在声音检测方面的高保真度。Yang 等人[36]提出了一种高灵敏度超声波微纳光纤传感器，利用微纳光纤的强倏逝场特性及其与 PDMS 的弹光效应协同作用，通过马赫-曾德尔干涉仪(MZI)结合相位反馈稳定技术进行解调，如图 5(c)，将传感器输出光的相位变化线性转换为强度变化，实现了 3.5 mV/kPa 的超声波灵敏度。Chen 等人[37]介绍了一种基于耦合结构的光纤超声波传感器，分别将传感器放置在水中和安装在玻璃纤维增强环氧树脂板上，均能对超声信号实现实时感知。该传感器可以表面安装或嵌入，用于复合材料和土木结构的非破坏性评估。

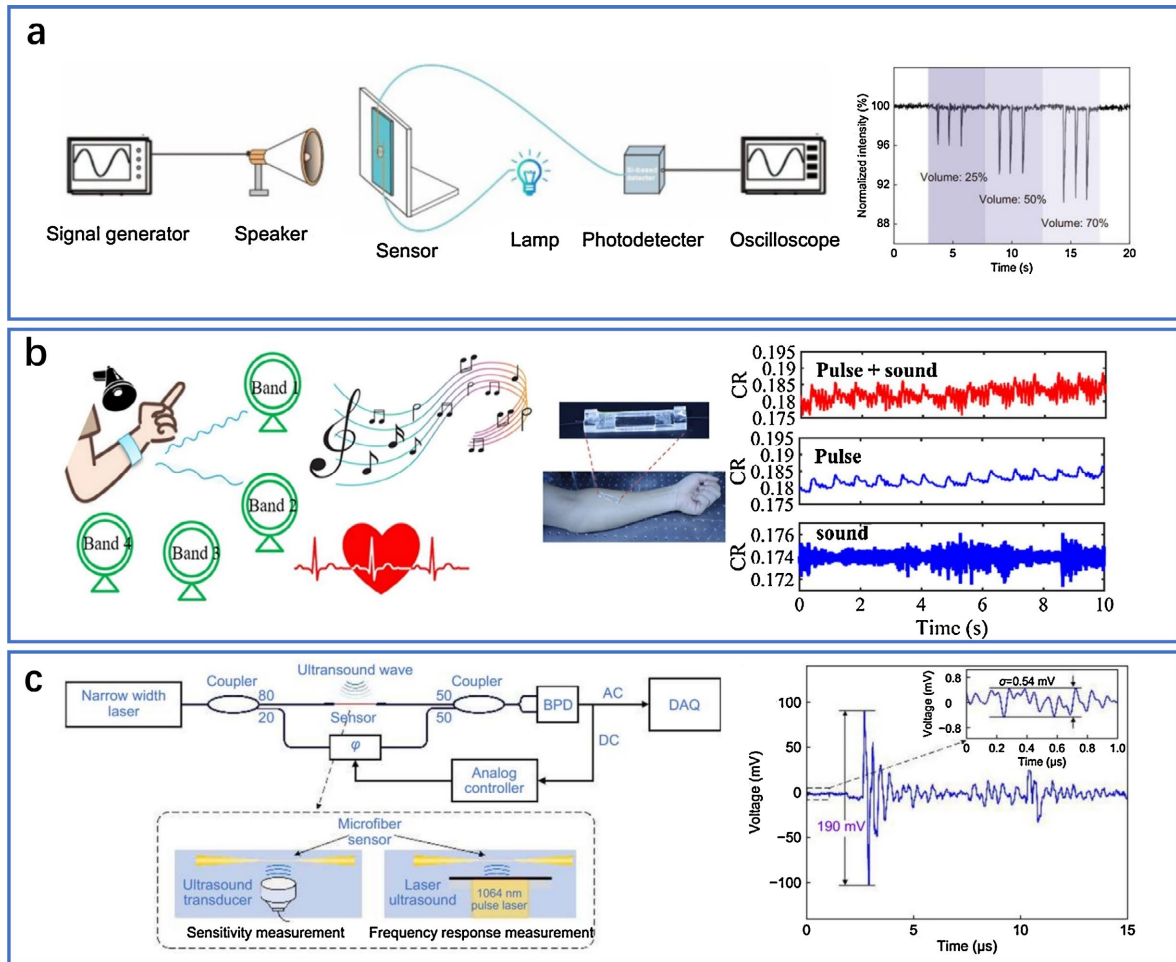


Figure 5. (a) Schematic diagram of the experimental setup for sound detection and the device response to a metronome at three different volumes (25%, 50%, and 70%) [18]. (b) Frequency division multiplexing mechanism based on the proposed strain sensor [21]. (c) The diagram of ultrasound detection system and time response of the sensor to an ultrasound pulse [36]. **图 5.** (a) 声音检测实验装置的示意图以及该设备在三种不同音量(25 分贝、50 分贝和 70 分贝)下对节拍器的响应情况 [18]。 (b) 基于所提出的应变传感器的频分复用机制[21]。 (c) 超声检测系统的示意图以及传感器对超声脉冲的响应时间曲线[36]

Tu 等人[38]研究了一种受昆虫触角启发的微光学天线(MOA)多模态传感器,采用表面张力驱动技术将微纳光纤组装成具有悬臂梁结构的触角状几何构型,并用功能性聚合物薄膜进行封装。图 6(a)所示的结构中,聚合物薄膜响应声波产生受迫振动,带动 MOA 悬臂结构振动,微纳光纤产生的弯曲损耗被反映在输出光信号中。该传感器的频率响应范围可覆盖 10 Hz 至 10 MHz,且在 100 Hz 处能精确分辨 0.01 Hz 的频率差异。Yu 等人[39]将两根标准单模光纤并排加热熔融拉锥,制成了具备直径约 2 μm 耦合区微纳光纤声学传感器。图 6(b)展示了传感器具有 25 kHz 的最大可检测频率,且在人类听觉频谱检测中展现出高频率信噪比和良好的声波强度分辨能力。

3.3. 语音识别应用

当前,微纳光纤在声波检测中已展现出可行性与独特优势,然而,声波检测仅停留在接收信号层面,而语音识别则需要从连续声音信号中提取语义内容乃至说话人身份特征,对传感器的频响特性、信噪比、环境鲁棒性及与后端算法的协同提出了更高要求。近年来,部分研究开始尝试将微纳光纤用于语音识别,

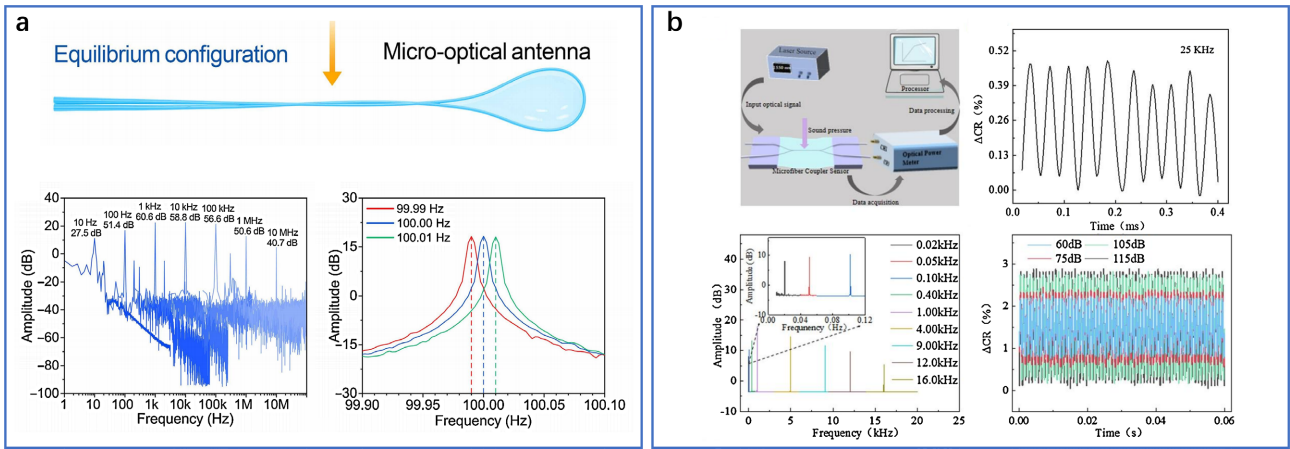


Figure 6. (a) Bioinspired design of an MOA [38]. (b) Schematic of the experimental setup for acoustic signal measurement [39]
图 6. (a) 仿生 MOA 的设计[38]。(b) 声学信号测量实验装置的示意图[39]

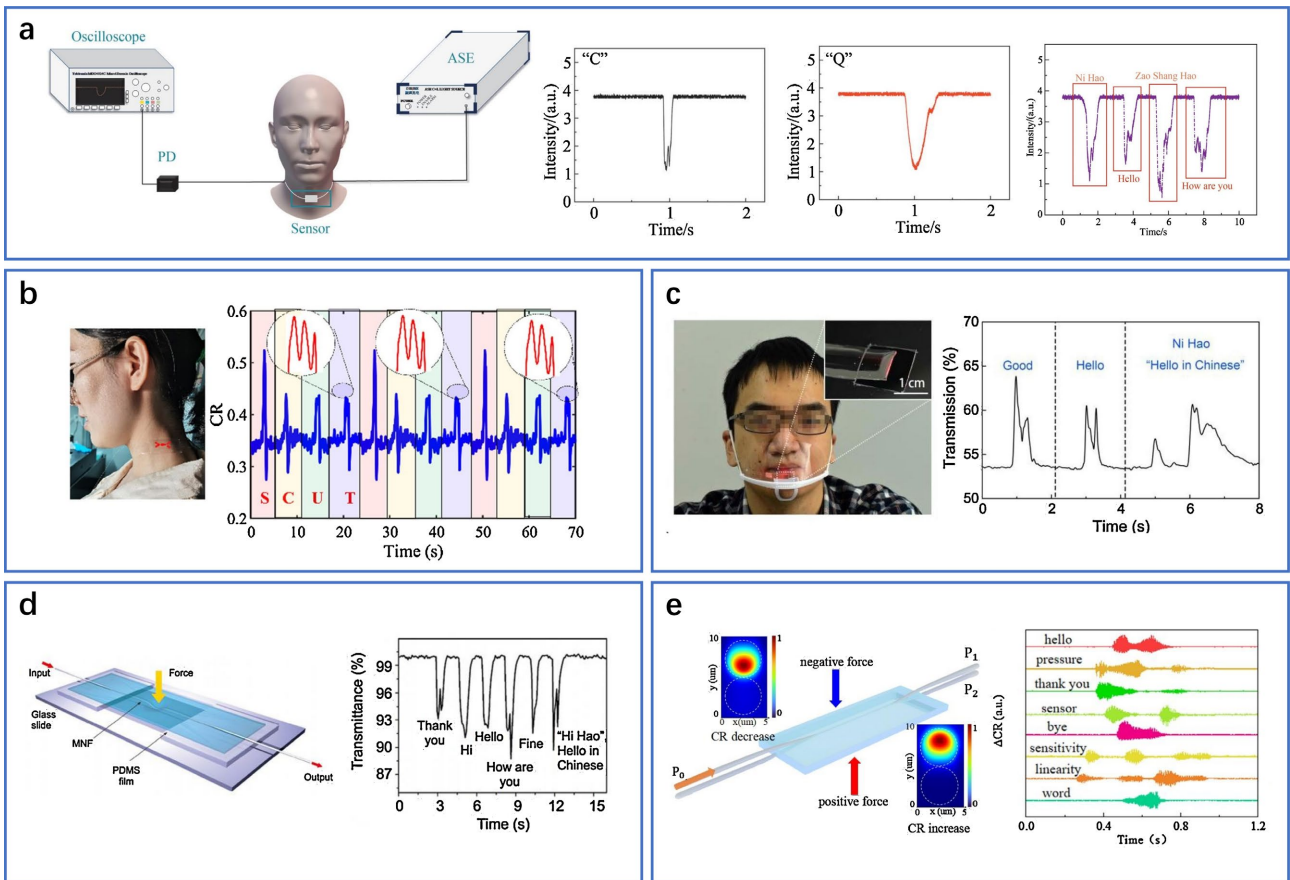


Figure 7. (a) Test for vocal cord speech signal [40]. (b) Monitoring the tiny epidermis and muscle movement during speech for phonation recognition [21]. (c) Various voice patterns recorded by the MNF-enabled airflow sensor [41]. (d) Response of a suspended SLWOS to acoustic vibrations from human voice [26]. (e) Normalized response waveforms of eight different words were recorded using the fiber-optic sensor [39]

图 7. (a) 声带语音信号测试[40]。(b) 监测说话过程中皮肤表层和肌肉的微小动作，以实现语音识别[21]。(c) 由支持 MNF 技术的气流传感器记录下来的各种声音模式[41]。(d) 悬浮式声学激光水成像系统的对人声引起的声波振动的响应[26]。(e) 使用光纤传感器记录了八个不同单词的归一化响应波形[39]

3.3 节将系统梳理相关研究成果，并通过与成熟电声系统的多维对比，揭示当前研究的关键差距。

Wang 等人[40]研究了一种用于声带振动信号识别的 S 型结构微纳光纤柔性可穿戴设备，利用该设备对英文字母和单词发音进行了检测和识别。图 7(a)展示了实验系统以及部分字母和单词的强度响应谱曲线，并借助 YOLOv8 深度学习模型成功实现了对 26 个英文字母和 4 个常用单词的识别，准确率分别为 96.8%和 97.75%。Wang 等人[21]将微光纤耦合器固定在志愿者颈部，以监测发音过程中微小的表皮和肌肉运动。如图 7(b)，传感器可准确捕捉和区分不同字母的发音信号，且具有良好的可重复性。Zhang 等人[41]设计了一种薄 PDMS 悬臂梁结构，并嵌入直径为 600 nm 的 U 型微纳光纤，利用该结构不仅可以制作实现气流传感的风速计，还可用于呼吸和语音检测。如图 7(c)所示，将该传感器安装在带孔面罩中，通过对说话时的气流变化检测，可以对不同的说话内容进行区分。Zhang 等人[26]制作了一种悬空式的类皮肤可穿戴光纤传感器，该传感器不仅可以实现 20 kHz 的高频振动响应，响应时间达到 100 μs ，还对在空气中以声波形式传播的声音具有高度敏感性，可用于检测不同单词发音的声波信号，图 7(d)。Yu 等人[39]用微纳光纤传感器对单词发音声信号进行了检测识别。图 7(e)展示了由光纤传感器记录的八个不同单词的归一化响应波形，分别呈现出独特的特征峰。结合深度学习算法，实现了对不同单词 97%的识别准确率。Wang 等人[30]将波形聚合物网站传感器固定在喉部，通过感知喉部肌肉机械振动信号进行语音检测，并结合一维卷积神经网络实现了对不同医疗词汇的分类识别，识别准确率为 89%。上述研究使微纳光纤传感器在疾病监测、康复医学、物联网等领域具有广阔的应用前景。

为了更直观地评价不同结构微纳光纤传感器在声学感知领域的综合表现，表 1 对文中提及的关键研究成果进行了标准化汇总，从多维度对比了传感器的声学传感性能。

Table 1. Comprehensive performance comparison of typical micro-nano fiber acoustic sensors

表 1. 典型微纳光纤声学传感器性能综合对比

传感器结构	传感机理	封装方式	核心性能指标	已验证应用场景
熔融型微纳光纤耦合器[18]	倏逝场耦合调制	PDMS 柔性基底嵌入	压力灵敏度: 102 kPa^{-1} ; 频率响应: 30 kHz	声音振动监测、人体脉搏检测
S 型微纳光纤结构[40]	弯曲损耗调制	柔性贴附式封装	字母识别准确率: 96.8%; 单词识别准确率: 97.75%	声带振动信号提取、语音识别
仿生微光学天线[38]	机械谐振耦合	功能性聚合物薄膜	7 响应带宽: 10 Hz~10 MHz; 频率分辨率: 0.01 Hz	多模态声学感知、精密频率分析
悬浮式微纳光纤[26]	倏逝场强度调制	悬空类皮肤封装	响应时间: 10 μs ; 振动响应上限: 20 kHz	极微弱声波探测、人声词汇检测
波形聚合物微纳光纤[30]	强度调制	PDMS 薄膜封装	医疗词汇识别率: 89%; 心率/呼吸率同步监测	智能医疗监控、语音指令交互

尽管微纳光纤传感器研究在基础振动感知方面具有独特优势，且逐渐应用于语音识别，但与成熟的电声语音识别系统相比仍在以下维度存在差距：1) 分类识别任务层级。Liu 等人[42]研究了一种用于喉部语音测试的压电式传感器，结合 T-SNE 算法，实现了对日常对话长句的检测识别，准确率达到 99.8%。相比之下，现有微纳光纤语音识别研究多局限于字母、简单词汇或有限指令的检测，尚未见针对连续语音识别任务的系统性探索。2) 环境鲁棒性验证。Liu 等人[42]将传感器与商用麦克风置于相同环境下同步采集语音信息，通过改变环境噪声验证传感器的抗噪性能。二者响应结果显示，商用麦克风在 85 dB 噪声环境下已无法区分人声和噪声，而传感器检测结果与安静环境中(40 dB)的基本一致。Dinh Le 等人[43]研制的压阻式传感器在安静和嘈杂环境中的语音识别准确率均能保持在 90%以上，充分证明了其抗干扰

性能。而当前微纳光纤声传感研究绝大多数在实验室安静环境下进行,其在真实噪声场景中的抗干扰能力尚未得到实验验证。3) 说话人身份识别维度。Jin 等人[44]设计了一种受蜘蛛毛发启发的柔性压电声学传感器,结合高斯混合模型(GMM)实现了对来自 40 个不同说话人的语音数据的分类识别,准确率达到 95.3%。Chen 等人[45]提出了一种基于 $MXene/MoS_2$ 柔性振动传感器的语音识别平台,设计并训练了基于机器学习的人工神经网络(ANN),实现了较高的说话人识别准确率(99.1%)。然而,微纳光纤传感器在说话人身份识别方面还尚未进行深入研究。

3.4. 面向语音识别的信号处理与机器学习方法

语音识别的核心在于从连续的物理信号中提取稳健的语义特征。当前的微纳光纤语音传感研究正经历从简单的“波形映射”向深度“特征解耦”的转变[1]。传统电声系统多依赖梅尔频率倒谱系数(MFCC)或线性预测倒谱系数(LPCC)来模拟人类听觉感知的对数特性。然而,微纳光纤传感器由于其独特的倏逝场调制机制,输出的光强信号往往表现出显著的非线性响应和特定的频带增益特性[39],这要求后端算法必须具备更强的信号修复与特征补偿能力。

针对微纳光纤信号的特殊性,研究者开始探索定制化的算法框架[42]。一方面,利用时域包络信号的瞬态响应捕捉辅音的爆发特征,结合短时傅里叶变换(STFT)获取的时频域特征图谱,能够有效弥补聚合物封装带来的高频信号损耗[30],提升信号的还原度。另一方面,针对微纳光纤在特定谐振频段的高灵敏度,开发基于注意力机制的卷积神经网络(CNN)或长短期记忆网络(LSTM),可以自动强化关键频带的语义特征。建立端到端的深度学习模型,并引入物理增强的预处理算法(如针对弹光效应的非线性补偿),是突破当前孤立词识别局限、迈向复杂环境连续语音识别的关键逻辑。

为了更直观地评价不同结构微纳光纤传感器在声学感知领域的综合表现,下表对文中提及的关键研究成果进行了标准化汇总。对比维度涵盖了物理结构、封装工艺、关键性能指标(如灵敏度、频率响应、识别准确率)以及具体的测试工况。

4. 工程化应用与集成挑战

4.1. 制备工艺的可扩展性

目前微纳光纤主要采用热拉锥法制备,虽能获得极高的表面光洁度和场增强效应,但其在大批量生产中的机械一致性仍是限制其规模化应用的主要瓶颈。相比之下,探索更具稳定性的制造工艺,并结合半导体光刻技术实现芯片级集成,是提升光纤传感器工程化水平的关键。此外,建立标准化的性能评价体系,确保不同批次器件在灵敏度与频响特性上的高度统一,是该技术走向工业界的先决条件[11]。

4.2. 封装材料与声学性能调制

封装不仅是保护微纳光纤免受环境干扰的屏障,更是调制其声学响应的关键环节。研究表明,通过模拟人体皮肤的层级结构(如表皮与真皮的刚度差异)进行柔性封装,可以有效提升传感器对微弱机械扰动的感知能力[17]。此外,系统地梳理各种功能性聚合物(如 PDMS、弹性树脂)及其微结构设计对声学阻尼、频响带宽的影响,对于开发面向特定频率范围(如高频超声或低频语音)的定制化传感器具有重要指导意义[10]。

4.3. 可穿戴环境下的信号解耦

在实际语音采集场景中,运动伪影和环境噪声是光纤传感器面临的巨大挑战。开发具有本质抗干扰特性的传感结构,例如通过仿生自清洁表面或特定的力学解耦设计,可以显著提升系统在复杂噪声环境

下的语音识别准确率[43]。同时,探讨长期的生物相容性、机械疲劳寿命以及在动态穿戴过程中的实时校准协议,是实现高性能光纤语音交互终端工程化应用的核心任务。

5. 总结与展望

综上所述,微纳光纤声学传感器在强电磁干扰屏蔽、柔性贴附以及高频瞬态感知方面展现了电声系统难以比拟的物理优势。然而,从工程应用的角度客观审视,该技术若要实现从实验室样机向消费电子或工业级市场的跨越,仍需克服系统级的严峻挑战。

首先是系统复杂性与成本瓶颈。相比于产业链极其成熟、单价极低的 MEMS 电声麦克风,目前微纳光纤传感系统高度依赖高性能窄线宽激光源、高精度光电探测器及高速数据采集模块,这些后端解调设备不仅成本高昂,且体积庞大、功耗显著,难以满足移动终端对厘米级尺寸和毫瓦级待机功耗的严苛要求;其次是信号稳定性与标定难题。聚合物封装材料在长期应用中的老化、温湿度漂移以及可穿戴场景下的肢体伪影,都会对光学解调产生非相干扰动,导致信号基线漂移。

针对上述瓶颈,未来研究应从以下维度协同推进:1) 光子集成芯片(PIC)化:借鉴硅基光子学或磷化铟(InP)集成平台,将激光源、干涉耦合结构及探测器集成在平方毫米级的芯片上。这不仅是实现解调系统小型化、低成本化的核心路径,也是提升系统稳健性的必然选择。2) 边缘计算与智能化解耦:开发适配微纳光纤非线性特征的轻量化神经网络模型,在前端实现信号预处理与运动伪影抑制,降低对后端计算资源的依赖。3) 差异化场景渗透:避开与传统电声系统的同质化竞争,深挖医疗级核磁共振环境下的语音通信、高压输电线监测以及深海声学感知等特种领域,充分发挥其本质安全与长距离传输的优势。

通过系统级的优化与集成技术的引入,微纳光纤声学传感器有望在智能交互生态中扮演不可替代的角色。

基金项目

2025 年辽宁省科技厅项目应用于人体健康监测的智能可穿戴光纤传感器研究(项目编号:纵20250328)。

参考文献

- [1] Zhang, Q. and Tong, K. (2023) Vocal Cord Vibration Signal Recognition Model Based on Feature Engineering Preprocessing. *IEEE Sensors Journal*, **23**, 31380-31388. <https://doi.org/10.1109/jsen.2023.3321987>
- [2] Xu, H., Lv, Y., Qiu, D., Zhou, Y., Zeng, H. and Chu, Y. (2019) An Ultra-Stretchable, Highly Sensitive and Biocompatible Capacitive Strain Sensor from an Ionic Nanocomposite for On-Skin Monitoring. *Nanoscale*, **11**, 1570-1578. <https://doi.org/10.1039/c8nr08589g>
- [3] Zhu, Y., Zhou, R., Yao, Y., Su, S., Wang, Z. and Yan, H. (2022) Fabrication of Robust Convex Array Microstructured PDMS-Based Capacitance Sensor Molded by Laser Patterned Silicon for Human-Being Acoustic Monitoring. *Materials Technology*, **37**, 2011-2021. <https://doi.org/10.1080/10667857.2022.2031491>
- [4] Lee, S., Roh, H., Kim, J., Chung, S., Seo, D., Moon, W., et al. (2022) An Electret-Powered Skin-Attachable Auditory Sensor That Functions in Harsh Acoustic Environments. *Advanced Materials*, **34**, Article ID: 2205537. <https://doi.org/10.1002/adma.202205537>
- [5] Gong, S., Yap, L.W., Zhu, Y., Zhu, B., Wang, Y., Ling, Y., et al. (2020) A Soft Resistive Acoustic Sensor Based on Suspended Standing Nanowire Membranes with Point Crack Design. *Advanced Functional Materials*, **30**, Article ID: 1910717. <https://doi.org/10.1002/adfm.201910717>
- [6] Kang, D., Pikhitsa, P.V., Choi, Y.W., Lee, C., Shin, S.S., Piao, L., et al. (2014) Ultrasensitive Mechanical Crack-Based Sensor Inspired by the Spider Sensory System. *Nature*, **516**, 222-226. <https://doi.org/10.1038/nature14002>
- [7] Wang, H.S., Hong, S.K., Han, J.H., Jung, Y.H., Jeong, H.K., Im, T.H., et al. (2021) Biomimetic and Flexible Piezoelectric Mobile Acoustic Sensors with Multiresonant Ultrathin Structures for Machine Learning Biometrics. *Science Advances*, **7**, eabe5683. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe5683>

- [8] Swansborough-Aston, W.A., Soltan, A., Coulson, B., Pratt, A., Chechik, V. and Douthwaite, R.E. (2023) Efficient Photoelectrochemical Kolbe C-C Coupling at BiVO₄ Electrodes under Visible Light Irradiation. *Green Chemistry*, **25**, 1067-1077. <https://doi.org/10.1039/d2gc04423d>
- [9] Xu, C., Chen, J., Zhu, Z., Liu, M., Lan, R., Chen, X., *et al.* (2024) Flexible Pressure Sensors in Human-Machine Interface Applications. *Small*, **20**, Article ID: 2306655. <https://doi.org/10.1002/sml.202306655>
- [10] Zhang, L., Zhen, Y. and Tong, L. (2024) Optical Micro/Nanofiber Enabled Tactile Sensors and Soft Actuators: A Review. *Opto-Electronic Science*, **3**, Article ID: 240005. <https://doi.org/10.29026/oes.2024.240005>
- [11] 童利民. 微纳光纤技术: 近期研究进展[J]. 光学学报, 2022, 42(17): 108-120.
- [12] 范成磊, 罗彬彬, 吴德操, 邹雪, 饶洪承, 周富, 黄玲, 石胜辉, 胡新宇. 基于微纳光纤的柔性仿生微结构触觉传感器研究[J]. 光学学报, 2023, 43(21): 67-77.
- [13] Jha, R., Mishra, P. and Kumar, S. (2024) Advancements in Optical Fiber-Based Wearable Sensors for Smart Health Monitoring. *Biosensors and Bioelectronics*, **254**, Article ID: 116232. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2024.116232>
- [14] Guan, B.-O., Tam, H.-Y., Lau, S.-T. and Chan, H.L.W. (2005) Ultrasonic Hydrophone Based on Distributed Bragg Reflector Fiber Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, **17**, 169-171. <https://doi.org/10.1109/lpt.2004.838141>
- [15] Qiao, X.-G., Shao, Z.-H., Bao, W.-J. and Rong, Q.-Z. (2017) Fiber-Optic Ultrasonic Sensors and Applications. *Acta Physica Sinica*, **66**, Article ID: 074205. <https://doi.org/10.7498/aps.66.074205>
- [16] Wu, X. and Tong, L. (2013) Optical Microfibers and Nanofibers. *Nanophotonics*, **2**, 407-428. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2013-0033>
- [17] Jiang, C., Zhang, Z., Pan, J., Wang, Y., Zhang, L. and Tong, L. (2021) Finger-Skin-Inspired Flexible Optical Sensor for Force Sensing and Slip Detection in Robotic Grasping. *Advanced Materials Technologies*, **6**, Article ID: 2100285. <https://doi.org/10.1002/admt.202100285>
- [18] Yu, W., Yao, N., Pan, J., Fang, W., Li, X., Tong, L., *et al.* (2022) Highly Sensitive and Fast Response Strain Sensor Based on Evanescently Coupled Micro/Nanofibers. *Opto-Electronic Advances*, **5**, Article ID: 210101. <https://doi.org/10.29026/oea.2022.210101>
- [19] Li, J., Chen, J. and Xu, F. (2018) Sensitive and Wearable Optical Microfiber Sensor for Human Health Monitoring. *Advanced Materials Technologies*, **3**, Article ID: 1800296. <https://doi.org/10.1002/admt.201800296>
- [20] Mishra, P., Kumar, H., Sahu, S. and Jha, R. (2023) Flexible and Wearable Optical System Based on U-Shaped Cascaded Microfiber Interferometer. *Advanced Materials Technologies*, **8**, Article ID: 2200661. <https://doi.org/10.1002/admt.202200661>
- [21] Wang, X., Zhou, H., Chen, M., He, Y., Zhang, Z., Gan, J., *et al.* (2023) Highly Sensitive Strain Sensor Based on Microfiber Coupler for Wearable Photonics Healthcare. *Advanced Intelligent Systems*, **5**, Article ID: 2200344. <https://doi.org/10.1002/aisy.202200344>
- [22] Song, X., Wang, Q., Liu, Q., Yu, L., Wang, S., Yao, N., *et al.* (2023) Twisted Optical Micro/Nanofibers Enabled Detection of Subtle Temperature Variation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **15**, 47177-47183. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c07831>
- [23] Ge, Q., Zhou, T., Gong, T., Liang, Y., Augustine Ngiejungbwen, L. and Chen, M. (2023) Highly Sensitive Measurement of Finger Joint Angle Based on a Double-U Tapered POF Embedded in PDMS Film. *Optical Fiber Technology*, **76**, Article ID: 103236. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2023.103236>
- [24] Yuan, Z., Fang, H., Xie, Y., Zhang, J., Liu, K., Guo, X., *et al.* (2024) Variable Optical Attenuator Based on a PDMS-Embedded Microfiber Coupler. *IEEE Photonics Technology Letters*, **36**, 449-452. <https://doi.org/10.1109/lpt.2024.3367035>
- [25] Yu, W., Zhu, J., Xu, Y., Tu, X., Tong, Y., Xie, Y., *et al.* (2024) Optical Nanofiber-Enabled Self-Detection Picobalance. *ACS Photonics*, **11**, 2316-2323. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.4c00216>
- [26] Zhang, L., Pan, J., Zhang, Z., Wu, H., Yao, N., Cai, D., *et al.* (2020) Ultrasensitive Skin-Like Wearable Optical Sensors Based on Glass Micro/nanofibers. *Opto-Electronic Advances*, **3**, Article ID: 190022. <https://doi.org/10.29026/oea.2020.190022>
- [27] Tang, Y., Liu, H., Pan, J., Zhang, Z., Xu, Y., Yao, N., *et al.* (2021) Optical Micro/Nanofiber-Enabled Compact Tactile Sensor for Hardness Discrimination. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **13**, 4560-4566. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c20392>
- [28] Xie, Y., Pan, J., Yu, L., Fang, H., Yu, S., Zhou, N., *et al.* (2024) Optical Micro/Nanofiber Enabled Multiaxial Force Sensor for Tactile Visualization and Human-Machine Interface. *Advanced Science*, **11**, Article ID: 2404343. <https://doi.org/10.1002/advs.202404343>
- [29] Tang, Y., Yu, L., Pan, J., Yao, N., Geng, W., Li, X., *et al.* (2023) Optical Nanofiber Skins for Multifunctional Humanoid

- Tactility. *Advanced Intelligent Systems*, **5**, Article ID: 2200203. <https://doi.org/10.1002/aisy.202200203>
- [30] Wang, Z., Chen, Z., Ma, L., Wang, Q., Wang, H., Leal-Junior, A., *et al.* (2024) Optical Microfiber Intelligent Sensor: Wearable Cardiorespiratory and Behavior Monitoring with a Flexible Wave-Shaped Polymer Optical Microfiber. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **16**, 8333-8345. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c16165>
- [31] Liu, H., Song, X., Wang, X., Wang, S., Yao, N., Li, X., *et al.* (2022) Optical Microfibers for Sensing Proximity and Contact in Human-Machine Interfaces. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **14**, 14447-14454. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c23716>
- [32] Pan, J., Zhang, Z., Jiang, C., Zhang, L. and Tong, L. (2020) A Multifunctional Skin-Like Wearable Optical Sensor Based on an Optical Micro-/Nanofibre. *Nanoscale*, **12**, 17538-17544. <https://doi.org/10.1039/d0nr03446k>
- [33] Zhu, H., Zhan, L., Dai, Q., Xu, B., Chen, Y., Lu, Y., *et al.* (2021) Self-Assembled Wavy Optical Microfiber for Stretchable Wearable Sensor. *Advanced Optical Materials*, **9**, Article ID: 2002206. <https://doi.org/10.1002/adom.202002206>
- [34] Guo, Y., Wang, W., Shi, G., Wu, J., Sun, D. and Ma, J. (2025) Optical Smart Wearable Sensor: Pulse Waveform and Pulse Rate Monitoring with a Flexible Loop Optic-Microfiber. *Journal of Lightwave Technology*, **43**, 1462-1468. <https://doi.org/10.1109/jlt.2024.3473944>
- [35] Yao, N., Wang, X., Ma, S., Song, X., Wang, S., Shi, Z., *et al.* (2022) Single Optical Microfiber Enabled Tactile Sensor for Simultaneous Temperature and Pressure Measurement. *Photonics Research*, **10**, Article No. 2040. <https://doi.org/10.1364/prj.461182>
- [36] Yang, L., Li, Y., Fang, F., Li, L., Yan, Z., Zhang, L., *et al.* (2022) Highly Sensitive and Miniature Microfiber-Based Ultrasound Sensor for Photoacoustic Tomography. *Opto-Electronic Advances*, **5**, Article ID: 200076. <https://doi.org/10.29026/oea.2022.200076>
- [37] Chen, R., Fernando, G.F., Butler, T. and Badcock, R.A. (2004) A Novel Ultrasound Fibre Optic Sensor Based on a Fused-Tapered Optical Fibre Coupler. *Measurement Science and Technology*, **15**, 1490-1495. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/15/8/010>
- [38] Tu, X., Qian, C., Feng, T., Zhen, Y., Cui, B., Li, T., *et al.* (2025) Insect-Inspired Micro-Optical Antenna Enables Ultrasensitive Multisensory Perception. *Science Advances*, **11**, eaec4252. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aec4252>
- [39] Yu, Y., Tian, N., Wang, Z., Gan, X., Luo, J. and Xiao, T. (2025) Ultrasensitive Fiber-Optic Sensor for AI-Enhanced Voice Recognition and 360° Acoustic Detection. *IEEE Sensors Journal*, **25**, 19302-19307. <https://doi.org/10.1109/jsen.2025.3560745>
- [40] 王智君, 黄崑, 李昆, 杨杨, 陈复旦, 罗彬彬, 吴德操, 邹雪. 基于S型微纳光纤的声带振动传感器及语音智能识别研究[J]. *光子学报*, 2025, 54(5): 28-39.
- [41] Zhang, Z., Kang, Y., Yao, N., Pan, J., Yu, W., Tang, Y., *et al.* (2021) A Multifunctional Airflow Sensor Enabled by Optical Micro/Nanofiber. *Advanced Fiber Materials*, **3**, 359-367. <https://doi.org/10.1007/s42765-021-00097-5>
- [42] Liu, T., Zhang, M., Li, Z., Dou, H., Zhang, W., Yang, J., *et al.* (2025) Machine Learning-Assisted Wearable Sensing Systems for Speech Recognition and Interaction. *Nature Communications*, **16**, Article No. 2363. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-57629-5>
- [43] Dinh Le, T., An, J., Huang, Y., Vo, Q., Boonruangkan, J., Tran, T., *et al.* (2019) Ultrasensitive Anti-Interference Voice Recognition by Bio-Inspired Skin-Attachable Self-Cleaning Acoustic Sensors. *ACS Nano*, **13**, 13293-13303. <https://doi.org/10.1021/acs.nano.9b06354>
- [44] Jin, B., Cao, H., Sheng, T., Gong, Z., Dong, Z., Gai, Y., *et al.* (2025) Flexible Hair-Like Piezoelectric Acoustic Particle Velocity Sensor with Enhanced Sensitivity for Speaker Recognition. *Advanced Functional Materials*, **35**, Article ID: 2417164. <https://doi.org/10.1002/adfm.202417164>
- [45] Chen, J., Li, L., Ran, W., Chen, D., Wang, L. and Shen, G. (2023) An Intelligent MXene/MoS₂ Acoustic Sensor with High Accuracy for Mechano-Acoustic Recognition. *Nano Research*, **16**, 3180-3187. <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4973-3>