



基于螺旋形超材料的宽带心肺音听诊器件

陈政吉, 刘京京, 梁彬*, 杨京, 程建春

南京大学物理学院, 近代声学教育部重点实验室, 人工微结构科学与技术协同创新中心, 南京 210093

* 联系人, E-mail: liangbin@nju.edu.cn

2023-04-04 收稿, 2023-07-09 修回, 2023-07-10 接受, 2023-07-12 网络版发表

国家重点研发计划(2022YFA1404402, 2017YFA0303700)和国家自然科学基金(11634006, 12174190)资助

摘要 圆柱管听诊器具有结构简单、价格低廉、适用范围广等优势, 但其尺寸通常较大, 且工作频带难以覆盖心肺音频率范围. 本文基于螺旋形超材料提出了一种圆柱形的心肺音听诊器件的设计理论, 其尺寸可满足便携性要求(长度约1/5波长), 且工作频带能有效覆盖典型心肺音频率范围(20~1000 Hz). 所设计器件的基本工作原理是利用内置的螺旋形超材料增加声波的传播路径长度, 使不同频率下的等效声折射率均得到显著提升, 从而在有效缩减结构尺寸的同时保持极宽的工作频带. 基于等效媒质理论, 对该结构中的声传播过程进行了理论分析, 研究了其等效声学参数及灵敏度增益在不同频率下的变化特性, 并通过有限元方法进行了验证. 理论和仿真结果能够很好吻合, 证明所设计的心肺音听诊器在20~1000 Hz的宽频带内产生了平均10 dB的灵敏度提升. 基于此, 进一步分析了热黏滞损耗和结构参数变化对该器件的灵敏度和工作带宽的影响规律. 最后, 制备了心肺音听诊器样品并对其声学性能进行了实验测量, 结果表明心肺音听诊器相比于圆柱管听诊器在20~1000 Hz全频带具有更高的灵敏度, 在330~820 Hz频段的平均增益能够达到10 dB. 本研究所设计的心肺音听诊器件具有灵敏度高、工作带宽大、设计简单、结构强度高、材质选择自由、鲁棒性等特性, 为心肺音听诊器件的设计提供了新的思路, 在医学临床诊断和声学传感等领域具有广泛的应用前景.

关键词 螺旋形超材料, 宽带传感, 心肺音听诊, 高灵敏度

在COVID-19、H1N1等传染病患者的护理等重要场景下, 用以预防感染的防护服极大限制了传统听诊器的使用^[1]. 针对该问题, Zhu等人^[2]提出了一种简单的圆柱管听诊器设计. 该圆柱管听诊器由空薯片筒包覆消毒纸制成, 能够临床检测支气管痉挛, 具有经济、安全和方便使用的特点, 可作为传统听诊器在特殊情形下临床诊断的重要替代. Jiang等人^[3]进一步改进了圆柱管听诊器的结构设计, 通过调整圆管的直径和长度增强了心音采集的效果, 使心音听诊时采集到的声压级较原有结构得到了约3 dB的提升. 然而, 圆柱管听诊器的尺寸通常较大, 难以通过结构参数设计使其共振

频率处于典型心音频段. 近年来出现的声学超材料作为一类包含人工微结构的特殊复合材料, 提供了自然界中无法获得的反常声学性质^[4-8], 极大丰富了调控声波的方式^[9-15]. 尽管声学超材料的引入能够显著缩减圆柱管听诊器件的尺寸大小并提升心音的传感效果^[16], 但其有效工作频带的宽度仍然受到限制. 相比于20~200 Hz的典型心音频率范围^[17], 正常人的肺音频段为100~1000 Hz^[18], 其中包括代表异常的喘鸣声和喘息声. 因此, 如何在保持器件小型化的同时, 将圆柱管听诊器件的工作频带拓展至心肺音的典型频率范围, 具有重要的科学研究价值, 在医学检测等重要场景中的

引用格式: 陈政吉, 刘京京, 梁彬, 等. 基于螺旋形超材料的宽带心肺音听诊器件. 科学通报, 2023, 68: 3472–3481

Chen Z J, Liu J J, Liang B, et al. A helical metamaterial-based auscultation device for broadband cardiopulmonary sound detection (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 3472–3481, doi: 10.1360/TB-2023-0305

实际应用也具有显著价值。

本文提出了一种具有亚波长尺寸(小于 $\lambda_0/5$, λ_0 为工作频带的中心频率波长)的心肺音听诊器件的设计理论。该器件具有工作带宽大、灵敏度高、便携性好、结构强度高等重要优势。利用等效媒质理论分析了心肺音听诊器的声学传播过程,并研究了其等效声学参数及灵敏度增益在不同频率下的变化特性。理论和仿真结果证明心肺音听诊器能够在20~1000 Hz的宽频段实现平均10 dB的灵敏度提升。同时,本文分析了热黏滞损耗和结构的几何参数对灵敏度和工作带宽的影响规律。进一步的实验证明,心肺音听诊器在20~1000 Hz全频带相较于圆柱管听诊器具有更高的灵敏度,尤其是在330~820 Hz频段,平均增益达到10 dB。

1 基于螺旋形超材料的心肺音听诊器件的结构设计

所提出的螺旋形超材料听诊器件的典型结构及工作原理如图1所示。由图1(a)可看出,该器件通过将螺旋形超材料置于圆柱管外壳内形成,其下端开口与人体待听诊部位耦合,上端开口封闭,仅在中心开有直径为 $d=8\text{ mm}$ ^[19]的孔,用于接收声波信号。声波在螺旋形超材料中沿螺旋声路径传播,如图1(b),声传播距离远大于结构长度 L ,因此能够显著降低声波速度,实现高折射率。图1(c)为心肺音听诊器件剖面图,心、肺发出的声波经过听诊器与身体的耦合部位进入听诊器。螺旋形超材料的高折射率能够极大增加声波的传播路径并

有效降低结构尺寸,在心肺音频带内实现共振,从而实现更高的听诊灵敏度,以亚波长尺寸实现宽带声波的高效传感,而圆柱管听诊器的尺寸通常较大,难以通过结构参数设计使其共振频率处于典型的心肺音频段。心肺音听诊器的频率响应特性将在1.2节中详细讨论。

1.1 螺旋形超材料的声学性质

本文所涉及的螺旋形超材料由4个均匀分布且螺距固定的叶片、内部细圆柱及外壳组成,螺旋叶片分别与内部细圆柱以及外壳相连,将管道内空气分为4等份,最终形成4个螺旋声传播通道。结构参数 L 、 P 、 a 、 D 分别代表螺旋形超材料的长度、螺距、内部细圆柱直径、圆柱外壳直径。声波在螺旋结构内部传播的总路径远大于结构长度 L ,所用的时间远大于声波经过长度为 L 的空气介质所用的时间,这就是声波在高折射率材料中传播所发生的“慢声”现象。由于螺旋结构在三维方向上的空间尺度均在亚波长范围内,根据等效媒质理论,可将其等效为声速低于空气的圆柱状均匀媒质,其等效折射率可以通过螺旋路径长度和传播方向上的直线距离确定:

$$n_e = \sqrt{(\pi D_e)^2 + P^2} / P, \quad (1)$$

其中, D_e 为螺旋形声传播路径的等效直径。考虑将这种等效媒质作为中间层插入到均匀的空气介质中,则根据声传输线理论可以推导出声波的透射系数^[20]。

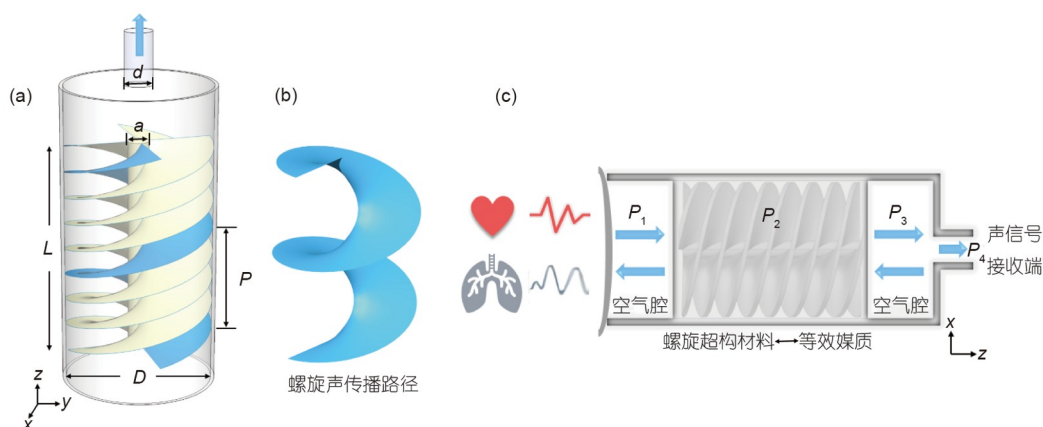


图1 结构示意图。(a) 基于螺旋形超材料构建的心肺音听诊器件的结构示意图。结构参数包括圆柱壳外直径 D 、螺旋结构长度 L 、螺距 P 、声信号接收端直径 d 和内圆柱直径 a ; (b) 螺旋形超材料内部声波的螺旋传播路径; (c) 心肺音听诊器的剖面示意图

Figure 1 The schematic of the structure. (a) The schematic diagram of the helical metamaterial-based cardiopulmonary auscultation device. The structural parameters include the outer diameter of the cylindrical shell D , the length of the helical structure L , the lead P , the diameter of the acoustic signal receiver d and the inner cylinder diameter a . (b) The helical propagation path of the acoustic wave inside the helical metamaterial. (c) The profile map of the cardiopulmonary stethoscope

$$T = \frac{4}{4\cos^2 k_e L + (\rho_e c_e / \rho_0 c_0 + \rho_0 c_0 / \rho_e c_e)^2 \sin^2 k_e L}, \quad (2)$$

其中, $k_e = 2\pi f / c_e$ 为媒质的等效波数, ρ_e 、 c_e 为轴向的等效质量密度和等效声速, ρ_0 、 c_0 为空气密度和声速. 若已知 Fabry-Pérot 共振的峰值频率和透射谷值, 则可以通过式(2)推导出等效参数的表达式:

$$\begin{aligned} c_e &= 2f_0 L, \quad n_e = c_0 / c_e, \\ \rho_e &= \rho_0 n_e / \sqrt{T_{\min}} + \rho_0 n_e / \sqrt{1/T_{\min} - 1}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, f_0 为 F-P 共振的基频, $T_{\min}$ 为透射谱的最小值. 考虑一个具体几何参数为 $L=96$ mm、 $P=16$ mm、 $d=6$ mm、 $D=42$ mm 的螺旋形超材料, 则根据式(3)可以计算其等效声速和质量密度分别为 $c_e=78.1$ m/s、 $\rho_e=48$ kg/m³, 表明螺旋形超材料可以视作具有慢声速和大质量密度的等效媒质.

对于长度 L 和外直径 D 确定的螺旋形超材料, 声波在结构内部的传播路径由螺距和内部细圆柱直径决定. 根据式(1)~(3)得到等效参数随螺距 P 的变化关系, 如图 2(a), (b), 可知等效声速与螺距近似为正比关系, 等效质量密度与螺距近似为反比关系, 同时等效声速远小于空气声速, 等效质量密度远大于空气密度. 保持结构长度和外直径不变, 当螺距 $P=20$ mm 时, 等效参数随内部细圆柱直径 a 的变化规律如图 2(c), (d), 等效声速随 a 的增大而减小, 等效质量密度则随之增加. 实际上, 当 a 增大时, 等效直径 D_e 变大, 因此根据式(1)可知等效折射率

上升, 等效声速下降. 另外, 在图 2(a), (b) 与 (c), (d) 的比较中发现, 等效参数随螺距的变化幅度更大, 表明螺距对等效参数的调节能力更强. 上述理论推导和分析为超材料听诊器件的设计提供了坚实的理论基础.

接下来, 我们将深入研究螺旋形超材料的频响特性. 螺旋形超材料的等效参数随频率变化的解析表达式为^[11]

$$c_e = 2\pi L / \sin^{-1}(\sqrt{-t_{12}t_{21}}), \quad \rho_e = c_e^{-1} \sqrt{t_{12}/t_{21}}, \quad (4)$$

其中, t_{12} 和 t_{21} 为材料两端声压与振速传输矩阵的分量. 式(4)表明可通过结构的反射、透射系数得到等效参数随频率的变化关系. 为研究螺旋形超材料的声学等效参数随频率的变化规律, 设计两种具有不同螺距的螺旋形超材料 ($P=12$ 、 20 mm), 其他结构参数均保持一致: $L=96$ mm、 $a=6$ mm、 $D=42$ mm. 二者的等效声速和等效质量密度随频率的变化曲线如图 3 所示. 可以看出, 两种超材料的等效参数由于螺距不同而存在差异. 同时, 在 100~6000 Hz 频段内两种结构的 c_e 和 ρ_e 仅发生较小变化, $P=12$ 、 20 mm 对应等效声速的变化范围分别为 56.8~60.2 和 85.7~94.8 m/s, 对应质量密度的变化范围分别为 118.9~124.0 和 25.7~29.4 kg/m³, 表明螺旋形超材料具有宽带低色散性质.

1.2 心肺音听诊器的理论研究

根据上面的分析将螺旋结构视为等效均匀媒质,

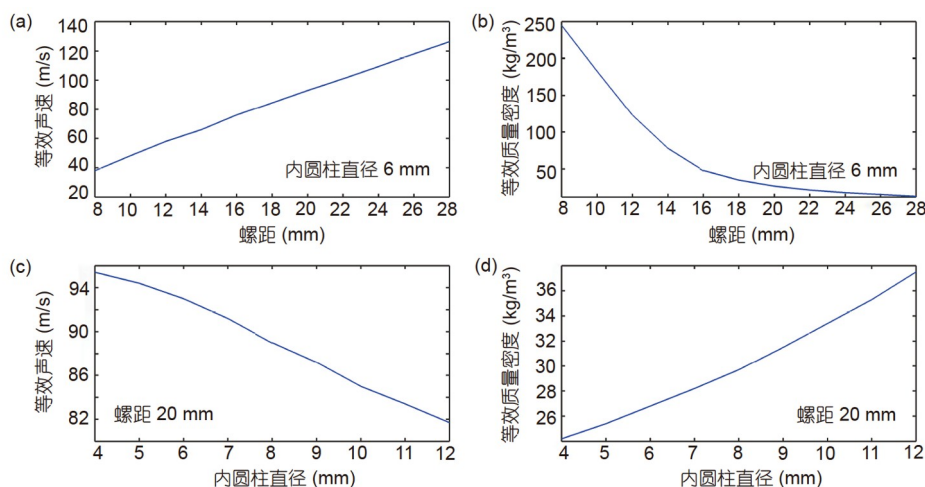


图 2 螺旋形超材料的等效参数. (a) 由式(1)计算得到的等效声速与螺距的关系; (b) 由式(3)计算得到的等效质量密度与螺距的关系; (c) 由式(3)计算得到的等效声速与内圆柱直径的关系; (d) 由式(3)计算得到的等效质量密度与内圆柱直径的关系

Figure 2 Effective properties of helical metamaterials. (a) The effective sound velocity c_e calculated by Equation (1) versus lead P . (b) The effective mass density ρ_e calculated by Equation (3) versus lead P . (c) The effective sound velocity c_e acquired by Equation (3) versus inner diameter a . (d) The effective mass density ρ_e calculated by Equation (3) versus inner diameter a

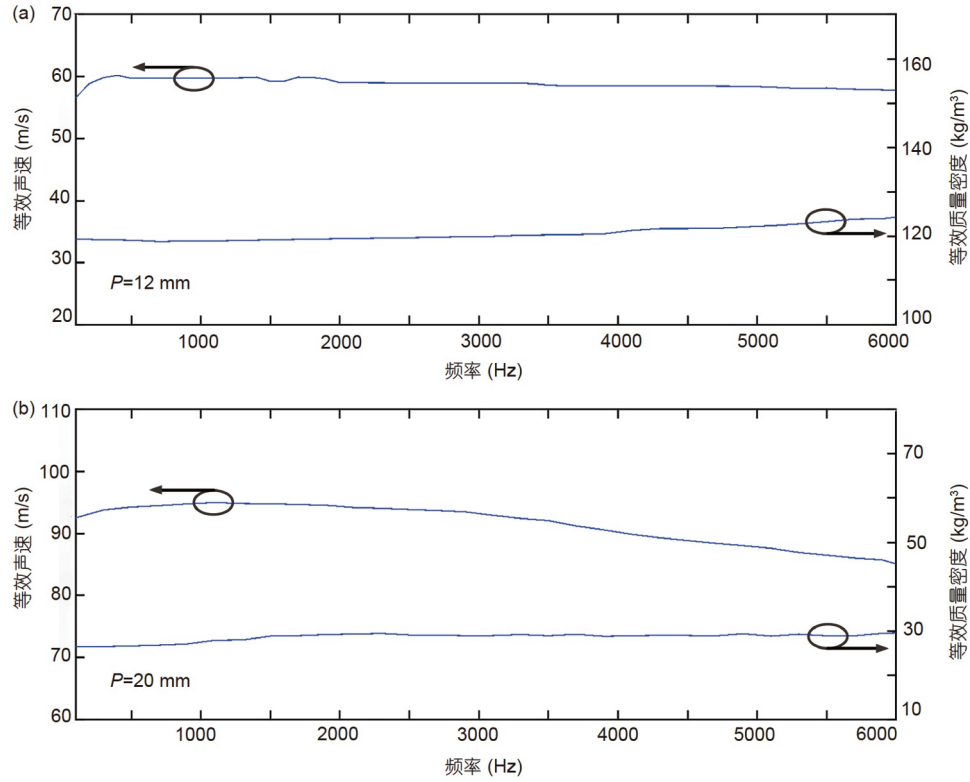


图 3 螺旋形超材料的等效参数随频率的变化规律. (a) $P=12$ mm; (b) $P=20$ mm. 较为平坦的参数曲线表明螺旋形超材料具有宽带低色散性质
Figure 3 The effective properties of helical metamaterials change with frequency. (a) $P=12$ mm; (b) $P=20$ mm. The relatively flat lines demonstrate the low-dispersive feature of the helical metamaterial

如图1(c)所示. 为便于实际应用中心肺声信号的接收并保持听诊舒适度, 在圆柱管两端均保留一段空气腔作为缓冲区域避免螺旋结构与患者及医生的直接接触. 分析可知, 管道截止频率大于3000 Hz^[20], 远高于本文所研究的工作频带20~1000 Hz, 同时由于声场不均匀区远小于声波波长, 管道中声波仅存在平面波模态, 这为我们通过声波导管理论分析心肺音听诊器的频响特性提供了理论依据. 将听诊器结构分为4个声学域 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 , 各域声压和振速可表示为

$$\begin{aligned} p_n &= A_n e^{-ik_n x} + B_n e^{ik_n x}, \\ v_n &= (A_n e^{-ik_n x} - B_n e^{ik_n x}) \rho_n^{-1} c_n^{-1}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $n=1,2,3,4$, $k_n=2\pi f/c_n$, c_1 、 c_3 、 c_4 和 ρ_1 、 ρ_3 、 ρ_4 为空气声速和空气密度, $c_2=c_e$ 和 $\rho_2=\rho_e$ 为螺旋形超材料的等效声速和等效密度. 根据声压和体积速度的连续性以及边界条件, 可得到声信号接收端处的声压级:

$$\text{SPL} = 20 \log_{10} |A_4| / P_{\text{ref}}, \quad (6)$$

$$A_4 = 2\rho_1 c_1 v_0 e^{ik_1(L+l)} / E, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} E &= i[2\cos(k_2 L)\sin(2k_1 l) + (z_{12} + z_{21})\sin(k_2 L)\cos(2k_1 l) \\ &\quad + (z_{12} - z_{21})\sin(k_2 L)] + 2S_1 \cos(k_2 L)\cos(2k_1 l) / S_0 \\ &\quad - S_1(z_{12} + z_{21})\sin(k_2 L)\sin(2k_1 l) / S_0, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, l 为两端空气柱高度, v_0 是与身体耦合处的边界法向振速, S_0 和 S_1 分别为心肺音听诊器和声信号接收端的横截面积, $z_{12}=z_1/z_2$, z_1 、 z_2 为空气和螺旋形超材料的声阻抗. 因此, 对于给定几何参数的心肺音听诊器, 可以通过式(7)快速准确地预测其典型的频率响应特性曲线.

2 数值研究

2.1 理论与无损耗仿真结果

利用COMSOL MULTIPHYSICTM有限元软件的声-结构相互作用模块对心肺音听诊器和圆柱管听诊器进行数值仿真. 心肺音听诊器的结构参数为 $L=96$ mm、 $P=20$ mm、 $a=6$ mm、 $D=42$ mm、 $l=20$ mm,

圆柱管听诊器长136 mm、直径为42 mm. 结构材料为光敏树脂, 密度 $\rho=1130 \text{ kg/m}^3$, 杨氏模量 $E=2.7 \text{ GPa}$, 泊松比 $\sigma=0.4$, 结构壁厚2 mm. 频响曲线的仿真结果如图4所示.

在20~1000 Hz的研究频段内, 心肺音听诊器和圆柱管听诊器频谱的数值仿真结果和理论计算结果保持高度一致, 充分验证了本文所提出的等效媒质理论方法的正确性, 同时证明在工作频带内, 厚度2 mm的光敏树脂相对于空气可被视为声学刚性材料. 相较于圆柱管听诊器, 心肺音听诊器在20~1000 Hz全频带范围内表现出更高的灵敏度, 尤其在共振频率附近的声压级增益超过了20 dB, 这证实了心肺音听诊器能够显著提升宽带听诊效果, 对于医学检测等重要场景的应用具有重要意义. 进一步由频响曲线可知, 增加频段内的共振次数可能是提升心肺音听诊器带宽的有效手段.

2.2 热黏滞损耗仿真结果

在以上的理论分析和数值仿真过程中, 我们并没有考虑声波在通过狭窄的螺旋通道时的热黏滞损耗效应, 接下来将分析热黏滞损耗对心肺音听诊器频谱和灵敏度的影响. 根据边界层理论, 在非理想流体中, 旋涡模式边界层厚度为^[20]

$$d_{\mu} = \sqrt{2l_v c_0 \omega^{-1}} = \sqrt{2\mu \omega^{-1} \rho_0^{-1}}, \quad (9)$$

式中, μ 为切变黏滞系数, l_v 为黏性特征长度, $l_v = \mu \rho_0^{-1} c_0^{-1}$.

热波衰减长度为

$$d_h = \sqrt{2l_h c_{s0} \omega^{-1}} = \sqrt{2K \rho_0^{-1} c_{p0}^{-1} \omega^{-1}}, \quad (10)$$

式中, l_h 为热导特征长度, $l_h = K \rho_0^{-1} c_{p0}^{-1}$, K 为热导率. 在20~1000 Hz频段, d_{μ} 、 d_h 的变化范围分别为(0.066 mm, 0.47 mm)和(0.079 mm, 0.6 mm), 而超材料内部螺旋声传输通道的高度为毫米量级, 并且存在共振现象, 因此研究热黏滞损耗对听诊灵敏度带宽的影响规律是非常必要的.

采用狭窄区域声学模块对3种具有不同螺距的心肺音听诊器的损耗谱进行研究, 分别记作 P_1 、 P_2 (P_2 的理论结果展示在图4)、 P_3 , 除螺距外, 其他参数完全相同. 表1给出了对应的等效参数.

图5展示了在考虑热黏性损耗时 P_1 、 P_2 、 P_3 心肺音听诊器相对于圆柱管听诊器在20~1000 Hz频段内的灵敏度提升情况. 不难看出, 3种不同螺距的心肺音听诊器平均可以实现20~1000 Hz全频带灵敏度10 dB的极大提升, 其中 P_1 在96~188、306~378 Hz频段, P_2 在200~700 Hz频段, P_3 在732~938 Hz频段的灵敏度增益均超过了10 dB. 相较于图4的理论结果, P_2 的频谱发生了共振频率和共振峰的变化, 2个共振频率分别向低频移动10和16 Hz, 共振峰值分别降低4和8.6 dB, 表明热黏滞损耗会降低灵敏度提升效果, 这可能会导致工作带宽下降, 但相对于圆柱管听诊器仍有较大提升. 共振频率向低频移动的原因是热黏滞损耗导致了螺旋形超

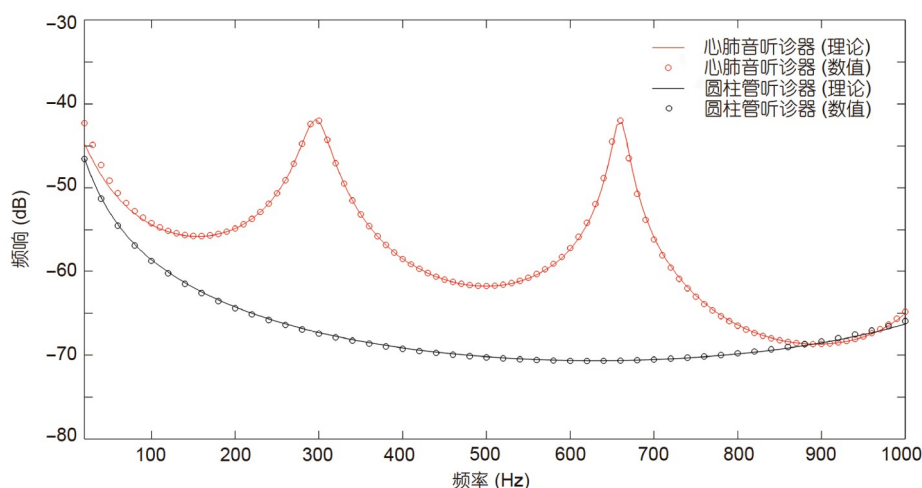


图4 心肺音听诊器和圆柱管听诊器的频响曲线. 理论结果和声学耦合边界条件下的数值结果分别用实线和空心圆表示. 心肺音听诊器的共振频率及对应峰值分别为(296 Hz, -41.8 dB)和(660 Hz, -41.8 dB)

Figure 4 The frequency response curves of the cardiopulmonary stethoscope and the cylindrical stethoscope. Theoretical results and numerical results at acoustic-solid interaction conditions for both stethoscopes are shown by solid lines and hollow circles, respectively. The resonant frequencies and peaks of the cardiopulmonary stethoscope are (296 Hz, -41.8 dB) and (660 Hz, -41.8 dB)

材料等效折射率的提高. 在非理想流体中, 声模式的波数为

$$k \approx \frac{\omega}{c_0} - i[(\gamma - 1)l_h + l_v] \frac{\omega^2}{2c_0^2} \equiv k_0 - i\alpha, \quad (11)$$

式中, γ 为比热比, α 为吸声系数, 则可得声速:

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega k_0}{k_0^2 + \alpha^2} + i \frac{\omega \alpha}{k_0^2 + \alpha^2}. \quad (12)$$

因此, 损耗导致声波在黏滞螺旋通道中传播时具有更小的声速, 这将进一步增大螺旋形超材料的等效折射率. 根据理论可知, 结构的等效折射率越高, 共振频率越低.

比较 P_1 、 P_2 、 P_3 的频谱发现, 螺距越小, 共振频率越低, 可以在低频产生更好的灵敏度提升效果, 但也意味着声能量的损耗更大, 共振峰更低. 因此, 可以通过改变螺距调整心肺音听诊器的共振频率, 在目标频段获得更高的听诊声压级, 但当螺距过小时, 也会引入很

大的传输损耗从而降低灵敏度和带宽.

2.3 灵敏度增益和工作带宽随螺距的变化规律

接下来, 我们将进一步研究心肺音听诊器的螺距对其共振基频、灵敏度增益和工作带宽的影响, 工作带宽根据图5的灵敏度增益谱峰值的半高频带宽度确定. 如图6所示, 随着螺距的增加, 心肺音听诊器的共振基频由120 Hz增大到500 Hz, 同时损耗的影响逐渐下降, 所以灵敏度的最大增益逐渐增加, 这与前面的结论是一致的. 然而当螺距增大时, 带宽先上升后下降, 表明需要在共振频率、最大增益和带宽之间做出取舍: 螺距较小时, 低频共振会导致较低的灵敏度增益; 螺距过大引起共振频率上升则会导致较窄的带宽, 中频共振也会出现低频和低频灵敏度提升较低的问题.

尽管本文基于螺旋形超材料的心肺音听诊器是一种被动无源的声学传感器件, 但有望结合可调式超材

表1 具有3种不同螺距的螺旋形超材料的声学等效参数

Table 1 Acoustic effective properties of 3 helical metamaterials with different leads

编号	螺距(mm)	等效声速(m/s)	等效声质量密度(kg/m ³)
P_1	12	59	119.8
P_2	20	93	26.8
P_3	80	245	2.8

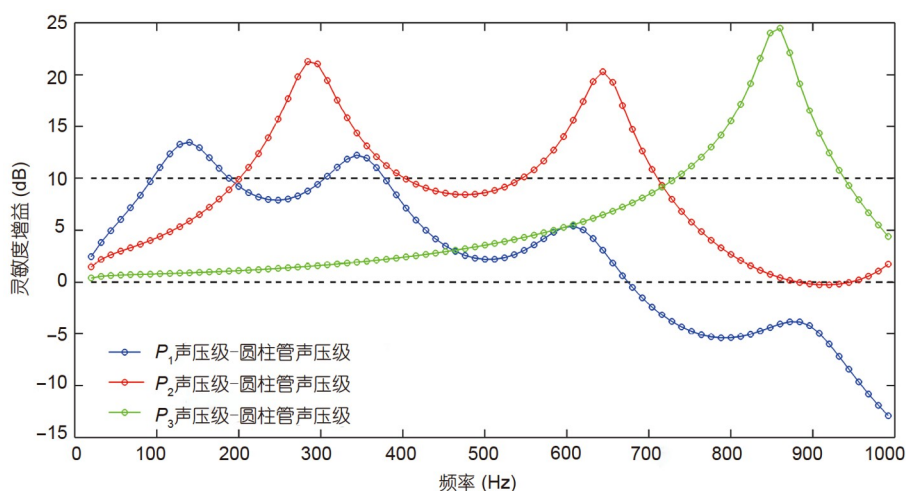


图5 灵敏度增益谱. 螺距分别为12、20、80 mm的3种心肺音听诊器的灵敏度增益曲线, 其他几何参数与图4对应参数相同. 灵敏度的增益为心肺音听诊器的传输声压级与圆柱管听诊器声压级的差值

Figure 5 The sensitivity-gain spectra. The sensitivity-gain curves of three cardiopulmonary stethoscopes with leads of 12, 20 and 80 mm respectively while other geometric parameters are consistent with Fig. 4. The sensitivity gain is determined by the difference of SPL between the cardiopulmonary stethoscope and the cylindrical stethoscope

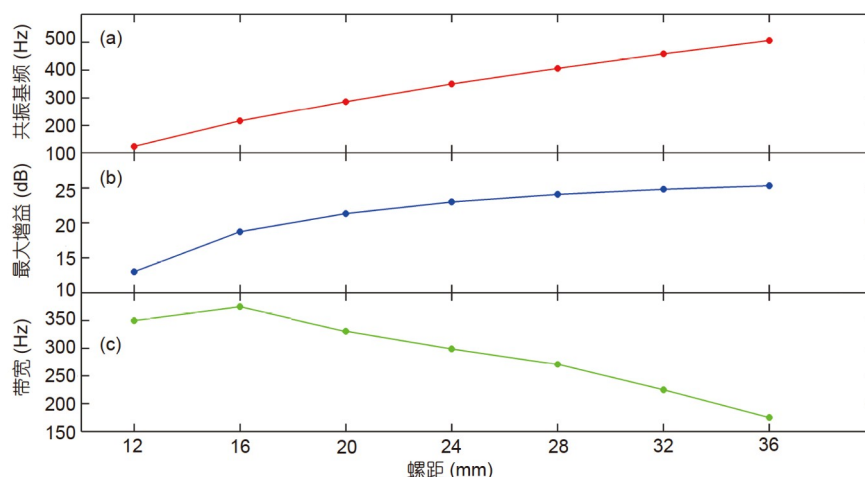


图6 具有不同螺距 P 的心肺音听诊器对应的共振基频(a)、最大灵敏度增益(b)和工作带宽(c). 共振基频和最大灵敏度增益可以由图5直接得到, 工作带宽由图5灵敏度增益谱峰值的半高频带宽度确定

Figure 6 The fundamental resonant frequency (a), maximum sensitivity gain (b) and working bandwidth (c) with respect to different leads P . The fundamental resonant frequency and maximum sensitivity gain are obtained by Fig. 5 directly, and the working bandwidth is determined by using the half maximum bandwidth of the sensitivity-gain spectrum obtained in Fig. 5

料技术实现对几何参数和声学等效参数的调控, 做到按实际需求调制灵敏度和工作带宽^[21-23].

3 实验研究

3.1 实验系统的构建

下面我们将实验测量所设计的心肺音听诊器的声学性能. 实验在消声室中进行, 实验样品包括一个心肺音听诊器和一个圆柱管听诊器, 它们的几何参数与图4数值研究频响特性所采用的结构参数相同. 样品通过3D打印加工制成, 打印精度0.2 mm.

所构建的实验系统如图7(a)所示, 选择直径2英寸的扬声器作为声源, 与实验样品耦合, 并发射典型心肺音(20~1000 Hz)频段的白噪声信号. 在声信号接收端使用一个1/4英寸Brüel & Kjær Type 4961型麦克风进行信号采集. 将麦克风固定在听诊器的监测端以减少声能量泄漏.

3.2 实验结果与讨论

实验测得心肺音听诊器和圆柱管听诊器的频率响应如图7(b)所示. 可以看出, 基于螺旋形超材料设计的心肺音听诊器几乎在20~1000 Hz全频段内相对于圆柱管听诊器展现出更高的灵敏度. 心肺音听诊器的频谱在330~520和700~820 Hz之间分别存在一个共振峰, 它放大了接收到声波的声强. 为了直观展示心肺音听诊

器的高灵敏度听诊性能, 在图7(c)中绘制了心肺音听诊器相对于圆柱管听诊器的灵敏度增益谱, 结果表明其在330~820 Hz频带内的平均灵敏度提升超过10 dB.

不难发现, 心肺音听诊器和圆柱管听诊器的实验测量结果和理论结果均存在一定偏差, 尤其是在246 Hz附近圆柱管听诊器也存在一个共振峰, 导致心肺音听诊器在此频率附近的灵敏度增益降低. 这主要是由于实验中的实际边界条件与数值计算中所设定的边界条件不同, 数值仿真中将心肺音听诊器和圆柱管听诊器与声源的接触部分设置为恒定振速边界, 而实验中应为一特定的阻抗边界. 然而即使在阻抗边界条件下, 心肺音听诊器在20~1000 Hz全频带具有较高的灵敏度提升, 尤其是在330~820 Hz频带内实现了平均10 dB的增益, 证明了所设计的心肺音听诊器的鲁棒性.

4 总结

本文设计出一种心肺音听诊器, 利用内置的螺旋形超材料的高折射率增加声波的传播路径并有效降低结构尺寸, 实现了高灵敏度听诊和极宽的工作频带. 利用等效媒质理论分析了心肺音听诊器的声学传播过程, 并研究了其声学等效参数和灵敏度增益随频率的变化规律, 理论和仿真吻合很好, 证明了具有亚波长尺寸的心肺音听诊器能够在20~1000 Hz频带实现平均灵敏度10 dB的提升. 本文研究了热黏滞损耗和螺距对频响曲

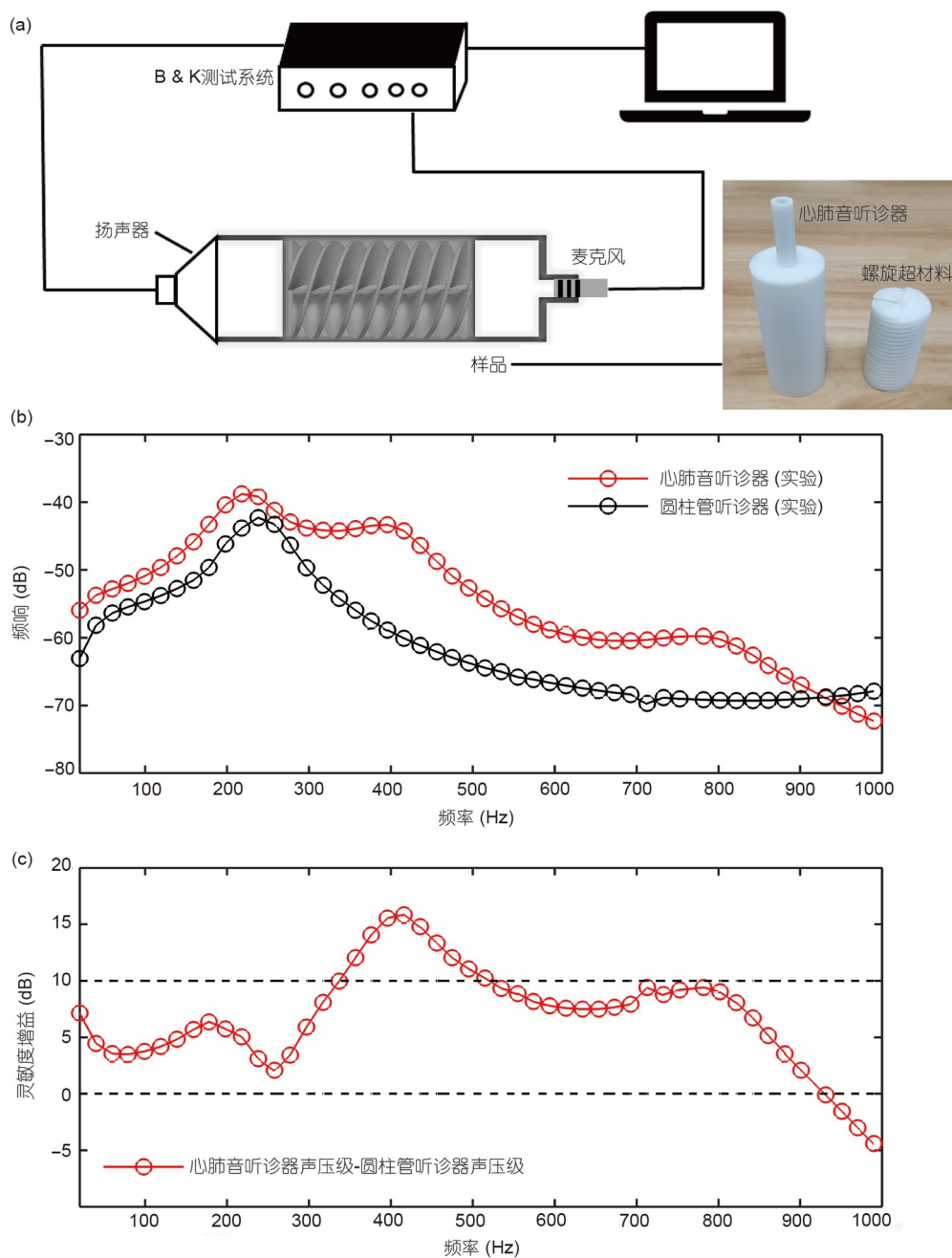


图 7 实验装置示意图和实验结果. (a) 实验装置示意图; (b) 实验测得的心肺音听诊器和圆柱管听诊器的频响曲线; (c) 心肺音听诊器的灵敏度增益谱

Figure 7 Schematic diagram of the experimental setup and the experimental results. (a) The schematic diagram of the experimental setup. (b) The frequency response curves of the cardiopulmonary stethoscope and the cylindrical stethoscope measured by experiments. (c) The sensitivity-gain spectra of the cardiopulmonary stethoscope

线和灵敏度的影响规律, 分析了共振频率、灵敏度增益和工作带宽之间的关系. 实验证明, 这种心肺音听诊器在20~1000 Hz全频带能实现更高的灵敏度, 尤其在330~820 Hz频段平均增益达到了10 dB. 本研究提出的

心肺音听诊器具有高灵敏度、宽带、设计简单、结构强度高、鲁棒性等重要特性, 为心肺音听诊器件的设计提供了一个新思路, 在医学临床诊断和声学传感领域有着广泛的应用前景.

参考文献

- 1 Otter J A, Donskey C, Yezli S, et al. Transmission of SARS and MERS coronaviruses and influenza virus in healthcare settings: The possible role of dry surface contamination. *J Hospital Infect*, 2016, 92: 235–250
- 2 Zhu J, Tan Y, Huang B, et al. Don't throw the stethoscope away! *Eur Heart J*, 2021, 42: 10–12
- 3 Jiang C, Zhao J, Huang B, et al. A basic investigation into the optimization of cylindrical tubes used as acoustic stethoscopes for auscultation in COVID-19 diagnosis. *J Acoust Soc Am*, 2021, 149: 66–69
- 4 Liu Z, Zhang X, Mao Y, et al. Locally resonant sonic materials. *Science*, 2000, 289: 1734–1736
- 5 Fang N, Xi D, Xu J, et al. Ultrasonic metamaterials with negative modulus. *Nat Mater*, 2006, 5: 452–456
- 6 Ding Y, Liu Z, Qiu C, et al. Metamaterial with simultaneously negative bulk modulus and mass density. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 093904
- 7 Lee S H, Park C M, Seo Y M, et al. Acoustic metamaterial with negative density. *Phys Lett A*, 2009, 373: 4464–4469
- 8 Liang Z, Li J. Extreme acoustic metamaterial by coiling up space. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 114301
- 9 Li Y, Liang B, Gu Z, et al. Reflected wavefront manipulation based on ultrathin planar acoustic metasurfaces. *Sci Rep*, 2013, 3: 2546
- 10 Liang B, Yuan Y, Cheng J C. Recent advances in acoustic one-way manipulation (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2015, 64: 094305 [梁彬, 袁樱, 程建春. 声单向操控研究进展. 物理学报, 2015, 64: 094305]
- 11 Zhu X, Li K, Zhang P, et al. Implementation of dispersion-free slow acoustic wave propagation and phase engineering with helical-structured metamaterials. *Nat Commun*, 2016, 7: 11731
- 12 Weng J, Ding Y, Hu C, et al. Meta-neural-network for real-time and passive deep-learning-based object recognition. *Nat Commun*, 2020, 11: 6309
- 13 Feng L Y, Chen J J, Huang H B. Progress on nonreciprocity of acoustic metamaterials (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 1214–1222 [冯陆洋, 陈久久, 黄宏波. 声学超材料的非互易性研究进展. 科学通报, 2022, 67: 1214–1222]
- 14 Li H X, Liang B, Cheng J C. Recent advances in the artificial structure-based manipulation of the acoustic field (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2022, 52: 244302 [李瀚翔, 梁彬, 程建春. 声人工结构的声场调控研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 244302]
- 15 Wu K, Liu J J, Ding Y, et al. Metamaterial-based real-time communication with high information density by multipath twisting of acoustic wave. *Nat Commun*, 2022, 13: 5171
- 16 Chen Z J, Liu J J, Liang B, et al. Acoustic meta-stethoscope for cardiac auscultation. 2023, arXiv: 2306.01374
- 17 Nowak L J, Nowak K M. An experimental study on the role and function of the diaphragm in modern acoustic stethoscopes. *Appl Acoustics*, 2019, 155: 24–31
- 18 Bohadana A, Izbicki G, Kraman S S. Fundamentals of lung auscultation. *N Engl J Med*, 2014, 370: 744–751
- 19 Hammershøi D, Møller H. Sound transmission to and within the human ear canal. *J Acoust Soc Am*, 1996, 100: 408–427
- 20 Morse P M C, Ingard K U. Theoretical Acoustics. Princeton: Princeton University Press, 1986
- 21 Fakheri M H, Rajabalipanah H, Abdolali A. Spatiotemporal binary acoustic metasurfaces. *Phys Rev Appl*, 2021, 16: 024062
- 22 Chen S, Fan Y, Fu Q, et al. A review of tunable acoustic metamaterials. *Appl Sci*, 2018, 8: 1480
- 23 Chen Z, Peng Y, Li H, et al. Efficient nonreciprocal mode transitions in spatiotemporally modulated acoustic metamaterials. *Sci Adv*, 2021, 7: eabj1198

Summary for “基于螺旋形超材料的宽带心肺音听诊器件”

A helical metamaterial-based auscultation device for broadband cardiopulmonary sound detection

Zhengji Chen, Jingjing Liu, Bin Liang^{*}, Jing Yang & Jianchun Cheng

Department of Physics, Nanjing University, Key Laboratory of Modern Acoustics of Ministry of Education, Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, Nanjing 210093, China

^{*} Corresponding author, E-mail: liangbin@nju.edu.cn

The use of conventional stethoscopes in crucial situations when caring for patients with infectious disorders like COVID-19 and H1N1 is significantly limited by protective garments for infection protection. In order to solve this issue, a straight cylindrical stethoscope design is proposed that uses an empty potato chip canister coated in sterile paper and is inexpensive, safe, and practical to use. The design can be used as a significant substitute for conventional stethoscopes for clinical diagnosis in unique circumstances. By adjusting the diameter and length of the tube, the cylindrical tube stethoscope's structural design gets further optimization which improves the effect of heart sound acquisition and raises the sound pressure level of cardiac auscultation by about 3 dB in comparison to the original structure. However, the dimension of the cylindrical stethoscope is often quite large, it might be challenging to design the structural elements so that the resonance frequency falls within the heart sound frequency range. The development of acoustic metamaterials, a class of composite materials with artificial microstructures, offers anomalous acoustic features not found in nature, considerably expanding the modulation possibilities for sound waves. The width of the effective operating frequency band is still constrained, despite the fact that the use of acoustic metamaterials can greatly reduce the size of cylindrical auscultation devices and enhance the auscultation effect of heart sounds. Normal lung sounds fall within the frequency range of 100–1000 Hz, as opposed to the typical heart sound range of 20–200 Hz. Hence, it is highly beneficial for research to efficiently expand the cylindrical auscultation device's operational frequency band to the typical frequency range of heart and lung sounds while keeping the device's compactness.

In this study, a novel design theory for a cardiopulmonary auscultation device with sub-wavelength size (less than $1/5\lambda_0$, where λ_0 is the wavelength of the frequency band's core frequency) is proposed. Large operational bandwidth, great sensitivity, exceptional mobility, and high structural strength are some of its benefits. The equivalent medium theory is used to evaluate the acoustic propagation within the helical metamaterial, and the variation law of the acoustic equivalent parameters at various frequencies is investigated. According to theoretical and simulation results, the helical-based cardiopulmonary stethoscope can improve its sensitivity by more than 10 dB over a broad frequency range between 20 and 1000 Hz. At the same time, the influence of thermal viscous loss and geometrical parameters on sensitivity, resonance frequency, and operation bandwidth with lead are simulated. Ultimately, the experimental results prove that the cardiopulmonary stethoscope can almost achieve higher sensitivity in the entire frequency band of 20–1000 Hz and average gain of 10 dB in the range of 330–820 Hz.

The basic working principle of the designed device is to lengthen the propagation path length of acoustic waves by using the built-in helical metamaterial, which has high equivalent refractive index within operating bands and can effectively reduce the structure size while maintaining an extremely wide operating frequency band. Following an analysis of the equivalent acoustic characteristics of the helical metamaterial using the equivalent medium theory, the acoustic propagation process of the cardiopulmonary stethoscope is examined, and the cardiopulmonary stethoscope's frequency response curve is inferred. Theoretical and simulation findings show that the proposed stethoscope with a subwavelength size can achieve an average sensitivity improvement of 10 dB in the frequency range of 20–1000 Hz. The impact of thermal viscous loss and lead on the bandwidth and sensitivity is then investigated, along with the connection between the resonant frequency, sensitivity increase, and working bandwidth. Finally, experimental investigations are used to validate the cardiopulmonary sound stethoscope's acoustic performance.

Important features of the cardiopulmonary auscultation device developed in this research include high sensitivity, a wide operating bandwidth, a straightforward design, high structural strength, free material selection and robustness. It offers a fresh approach to the construction of cardiopulmonary auscultation devices and has extensive application prospect in the areas of acoustic sensing and clinical diagnosis.

helical metamaterial, broadband sensing, cardiopulmonary auscultation, high sensitivity

doi: [10.1360/TB-2023-0305](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0305)