

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412580

新生儿胫骨超声导波频散曲线提取和 骨质评估方法研究*

李卿¹, Tho N. H. T. Tran¹, 郭佳林², 陈洪磊³, 他得安^{1,3}

(1. 复旦大学生物医学工程与技术创新学院 上海 200433; 2. 上海市同济大学附属第一妇婴保健院 上海 200092;
3. 复旦大学义乌研究院 浙江 322000)

摘要: 超声骨质评估对新生儿代谢性骨病的诊断和预防具有重要意义, 双能 X 射线吸收测定技术因存在电离辐射, 难以满足新生儿骨质状况长程监测的临床需求; 而生化指标检查作为有创性检测手段, 同样无法适用于新生儿骨质状况的评估。超声导波检测技术凭借非侵入性、无电离辐射的显著优势, 已被应用于骨质疏松症诊断和骨折状况评估, 但针对超声导波评估新生儿皮质骨骨质状况的临床研究仍需进一步深化。为此, 提出了一种基于矩阵束谱估计的超声导波波数频散提取方法, 旨在实现新生儿胫骨声速与皮质骨厚度的准确评估。首先, 通过数值仿真构建单层骨板模型及多通道超声相控阵导波波场, 实验结果显示: 该方法对 1、2 及 4 mm 厚度各向同性板参数的评估相对误差均 < 3%; 在信噪比分别为 10 和 5 dB 的条件下横向对比皮质骨厚度评估结果, 证实评估精度受噪声影响弱。进一步将该波数频散提取方法应用于新生儿胫骨皮质骨纵波速度评估, 结果表明: 所估计的皮质骨声速与临床超声测量仪检测结果的相对误差 < 10%, 且皮质骨检测厚度与新生儿各项体征测量值存在显著相关性 (p 值 < 0.001)。该研究论证了超声导波法在新生儿胫骨骨质状况评估中的临床应用价值, 有效拓展了超声导波法在临床上的适用范围。

关键词: 超声导波; 频散曲线; 皮质骨定征; 定量超声; 信号处理

中图分类号: TH77 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.99

Ultrasonic guided wave dispersion curve extraction method for neonatal tibia assessment

Li Qing¹, Tho N. H. T. Tran¹, Guo Jialin², Chen Honglei³, Ta De'an^{1,3}

(1. College of Biomedical Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. Shanghai First Maternity and Infant Hospital, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Yiwu Research Institute, Fudan University, Zhejiang 322000, China)

Abstract: Ultrasound bone evaluation is of great significance for the diagnosis and prevention of metabolic bone disease in neonates. Dual-energy X-ray absorptiometry, a routine clinical technique, is difficult to meet the clinical needs of long-term monitoring of neonatal bone status due to ionizing radiation. Biochemical index testing, as an invasive detection method, is likewise unsuitable for evaluating neonatal bone status. Ultrasonic guided wave detection technology, with its advantages of non-invasiveness and absence of ionizing radiation, has been applied to the diagnosis of osteoporosis and fracture evaluation. However, clinical research on applying ultrasonic guided waves to evaluate neonatal cortical bone quality still needs further development. To address this issue, we propose an ultrasonic guided wave wavenumber dispersion extraction method based on the Matrix Pencil spectral estimation, aiming to achieve accurate evaluation of the sound velocity and cortical thickness of the neonatal tibia. First, a single-layer bone plate model and a multi-channel ultrasonic phased array guided wave field were constructed through numerical simulation. Experimental results showed that the relative errors of thickness assessment for isotropic plates with thicknesses of 1, 2, and 4 mm were all less than 3%. A horizontal comparison of cortical thickness assessment results under signal-to-noise ratios of 10 and 5 dB verified that the evaluation accuracy was less affected by noise. Furthermore, this wavenumber dispersion extraction method was applied to evaluate the

收稿日期: 2024-03-05 Received Date: 2024-03-05

* 基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY24A040007) 项目资助

longitudinal wave velocity in neonatal tibial cortical bone. The results indicated that the relative error between the estimated cortical sound velocity and the clinical ultrasonic measurement results was less than 10%, and the detected cortical thickness was significantly correlated with various neonatal physical measurement values (p -value < 0.001). This study demonstrates the clinical application value of the ultrasonic guided wave method in assessing neonatal tibia bone quality and effectively expands its scope of application in clinical practice.

Keywords: ultrasonic guided waves; dispersion curves; cortical bone characterization; quantitative ultrasound; signal processing

0 引 言

代谢性骨病会引起新生儿骨质疏松、骨软化和佝偻病^[1],发展适用于新生儿的骨质状况无创评估方法对代谢性骨病的诊断与预防具有重要的意义。目前,临床使用的新生儿骨质评估方法主要有双能 X 射线吸收测定法(dualenergy X-ray absorptiometry, DXA)和生化指标检查^[2]。DXA 能够穿透软组织层,实现人体骨骼的高分辨率成像,是临床骨结构密度评估的金标准。然而,DXA 在新生儿骨质评估中存在诸多局限性。首先,DXA 存在电离辐射,尽管其辐射剂量相对较低,但仍不适用于新生儿骨质状况的长程监测。其次,DXA 主要反映骨矿密度(bone mineral density, BMD)状况,无法提供和骨质密切相关的弹性强度信息,不应用于新生儿骨骼发育动态监测。此外,DXA 设备体积较大,价格昂贵。生化指标检查通过新生儿血液与尿液中钙、磷和碱性磷酸酶等生化标志物的含量,反映骨形成和吸收的动态信息;但有创的血液采集方式制约了其在新生儿群体的运用,同时生化指标的检测结果易受饮食、药物、疾病等多种因素影响,特异性和敏感性相对较低,难以单独作为新生儿骨质状况评估的依据。

超声导波检测技术具有无电离辐射、无创、操作便捷和成本低的优点,在工业无损检测^[3-5]和医学健康监测^[6-8]领域应用广泛,具有评估与监测皮质骨骨质状况的能力。与 DXA 相比,超声导波技术不仅避免了电离辐射,还能提供骨弹性的相关信息,且设备便携,适合床旁监测和长期随访,更适用于新生儿等脆弱人群。此外,超声导波检测过程快速、无创,无需特殊准备,有助于提高检测的依从性和普及性。受有限孔径问题制约,超声导波在体骨检测信号的频率波数分辨率和信噪比较低、导波模式混叠等增加了频散曲线准确提取的难度,降低了骨结构力学性质评估的精度。因此,研究鲁棒的频散曲线提取方法,实现皮质骨骨质参数的准确评估,对新生儿骨质状况的精确诊断具有重要的临床价值。

基于导波频散理论,超声导波检测技术通过对比分析检测导波信号波速/数频散与理论频散数据,实现波导结构力学性质的评估^[9-11]。信号频率-波速/数参数的准确提取是实现骨质准确评估的关键。2010 年 Minonzio

等^[12]采用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)算法增强检测信号的信噪比,实现低强度导波模式相速度的准确评估。2016 年 Xu 等^[13]提出了高波数分辨率的稀疏 SVD 方法,克服了有限孔径问题。2018 年 Chang 等^[14]使用矩阵束法实现各向同性和各向异性材料波导中频散曲线的高分辨率提取。2023 年 Chen 等^[15]发展了基于遗传算法的波形反演方法,实现混叠导波模式波数的准确提取和板状波导结构力学性质的精确评估。此外,研究人员提出了用于材料参数评估的信号时间-距离域到结构力学性质参数域变换算法。2018 年 Xu 等^[16]采用频散 Radon 变换建立导波信号距离-时间域到结构参数-频率域的映射,实现了导波频散曲线的高精度提取和在体胫骨材料参数评估;2021 年 Li 等^[17]通过多尺度卷积神经网络建立导波频散参数到皮质骨厚度及纵、横波速的映射,实现骨参数的快速评估。

超声导波在体骨质评估研究方面。2019 年 Minonzio 等^[18]采用基于 SVD 法的导波波数提取算法评估 201 例绝经妇女在体皮质骨的厚度及空隙率,论证了超声导波技术在体骨质评估的可行性。2022 年 Song 等^[19]利用 Burg 算法提取频散曲线对 10 例志愿者皮质骨的厚度、纵波速度与横波速度进行评估,结果表明骨厚度与横波速度对骨质疏松症的敏感性高。目前超声导波评价新生儿骨质状况的临床研究较少。

针对超声导波检测新生儿骨质的临床需求,为此本研究提出了一种基于矩阵束谱估计的导波波数提取算法,实现胫骨皮质骨厚度和声速评价。首先,通过单层骨板仿真模型验证了所提算法在骨厚度评估的有效性;随后,进行新生儿在体胫骨声速及结构厚度的超声导波实验检测研究,分析了皮质骨厚度与骨生理指标的相关性。

1 理论与方法

1.1 板中超声导波频散理论

超声体波在板状波导上下表面叠加耦合形成对称和反对称导波模式。零应力边界条件下,各向同性板中的 Rayleigh-Lamb 频散方程^[20]为:

对称模式:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(k^2 - q^2)^2} \quad (1)$$

反对称模式:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(k^2 - q^2)^2}{4k^2 pq} \quad (2)$$

式中: k 为波数; h 为板厚的一半。 p 和 q 的公式为:

$$\begin{cases} p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2 \\ q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: c_L 和 c_T 分别为纵波速度和横波速度; ω 为角频率。求解频散方程得到每个导波模式波数和频率厚度乘积的关系,即频散曲线。

1.2 二维傅里叶变换法

超声导波沿皮质骨轴向传播,使用相控阵探头采集得到导波的时间-空间域矩阵信号。利用 2D-FFT 将时间-空间域信号 $g(x, t)$ 转换到频率-波数域,得到信号的频率-波数谱 $H(\omega, k)$; 其中 x 和 t 分别为导波信号的接收位置和时间。2D-FFT 变换公式为:

$$H(\omega, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} g(x, t) e^{-j(\omega t + kx)} dt dx \quad (4)$$

频率-波数谱的频率分辨率和空间分辨率分别受导波信号的时间采样率和空间采样步长影响。超声导波检测中,相控阵探头尺寸、阵元数量及间隔决定信号的空间采样率,影响 2D-FFT 变换得到的频率-波数谱的分辨率。因此,发展高精度的频散曲线提取算法对骨结构力学性质的准确评估具有重要意义。

1.3 基于矩阵束法的超声导波频散曲线提取

基于矩阵束谱估计的超声导波频率波数提取技术是利用 SVD 分解将导波信号的自相关矩阵分解到信号和噪声子空间,通过子阵间的协方差矩阵求解矩阵束的广义特征值和各频率的波数^[21]。首先,对时空域信号矩阵 $g(x, t)$ 进行 1D-FFT 变换得到空间-频率域信号矩阵 $f(x, \omega)$ 。然后,计算子阵列的自相关矩阵 R_{xx} 和协方差矩阵 R_{xy} ,二者均为 Hermitian 矩阵。SVD 分解得到 R_{xx} 的特征向量与特征值,其中特征值可分为信号分量 A_s 与噪声分量 σ_n^2 ,特征向量分为信号子空间 U_s 与噪声子空间 U_n 。消除两个矩阵的噪声分量,即:

$$(R_{xx} - \sigma_n^2 I) - \lambda (R_{xy} - \sigma_n^2 Z) = U_s A_s (I - \lambda \Phi^H) U_s^H \quad (5)$$

式中: I 和 Z 分别为对角单位阵和下对角单位阵; λ 为最小特征值; Φ 为评估矩阵,其对角元素包含所需估计的参数。求解矩阵束的广义特征值,得到 Φ 解,即:

$$\Phi = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m) \quad (6)$$

式中: $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 为估计角度; m 为估计导波模式数目。通过波数与相位角的关系转换得到:

$$k_i = -\frac{\text{angle}(\theta_i)}{d} \quad (7)$$

式中: $\text{angle}(\cdot)$ 为相位角函数; i 为导波模式数目; d 为阵元间距。

超声导波频散曲线中导波模式数目随频率变化,固定的波数估计数目会影响频散曲线的提取精度。矩阵束谱估计采用导波信号矩阵的频率-波数谱作为掩膜筛选导波模式,通过提取大于阈值的高能量区域与矩阵束谱估计结果的交集减少评估误差。

1.4 皮质骨参数评估方法

超声导波骨评估方法主要包括:理论频率波数曲线数据库构建、检测导波信号的频率波数提取和基于检测频率波数曲线与理论数据库匹配分析的骨质参数评估。首先,使用 ElasticMatrix^[22] 计算得到不同结构力学性质骨板模型中导波的频率-波数曲线,构建皮质骨检测理论频散曲线数据库^[23-24]。依据临床超声测量结果,将皮质骨纵波速度设为 2 500~2 900 m/s、取值间隔 50 m/s; 根据文献[25],以 0.01 mm 为间隔将骨厚度设置为 1~3 mm。计算不同参数骨模型中的超声导波频率-波数频散曲线,得到 1 600 组数据,构建皮质骨结构力学性质评估数据库。

随后,采用基于矩阵束谱估计的超声导波频散曲线提取算法对检测导波时间-空间域信号矩阵进行处理,提取导波频率-波数。最后,将提取的波数与皮质骨结构力学性质评估参数库对比,其全局最小值对应的皮质骨参数值为评估结果。分析中通过优化实验提取波数与参数库中理论波数间的欧氏距离确定评估波数,计算公式为:

$$\min_s \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \|k_j^i - k_s^j\|^2 \quad (8)$$

式中: k 和 k_s 分别为实验提取波数与理论波数; s 为骨结构力学性质参数; N 为波数值数目。仿真信号分析时 s 为骨厚度,实验研究中 s 为骨厚度与纵波速度。

2 仿真与实验

2.1 仿真模型

通过数值仿真模型验证基于矩阵束谱估计的超声导波波数提取算法的皮质骨厚度评估效果。采用仿真软件 COMSOL 计算超声导波在单层各向同性骨板中的波场,模型结构示意图如图 1 所示。

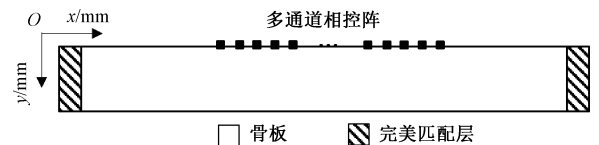


图1 单层骨板仿真模型结构

Fig. 1 Structural diagram of the simulation model of a single-layer bone plate

骨板左右两端设置用于减少边界反射的完美匹配层。激励信号为 3 周期高斯窗调制的 1 MHz 中心频率的正弦波。

骨模型密度为 $1\,850\text{ kg/m}^3$ 、纵波和横波的声速分别为 $4\,000$ 和 $1\,800\text{ m/s}$;以 0.01 mm 为间隔在 $1\sim 4.5\text{ mm}$ 间设置厚度,得到 $3\,501$ 个不同厚度的骨模型^[26]。以 0.675 mm 为间隔在模型上表面设置 45 个阵列点,用于模拟超声导波检测的多通道相控阵。控制前 5 个阵列点法向应力载荷的作用延时,形成 20° 的导波激励角;后 40 个阵列点用于超声导波信号检测。模型离散网格尺寸为 $0.533\sim 0.640\text{ mm}$ 、计算时间步长为 $0.05\text{ }\mu\text{s}$ 。

2.2 在体实验

对上海市同济大学附属第一妇婴保健院出生的 40 名新生儿(男婴 21 例,女婴 19 例)进行超声导波骨检测。实验得到了复旦大学和上海市同济大学附属第一妇婴保健院伦理委员会批准(伦理编号:KS21251)。临床实验由 1 名专业医师操作 Sunlight Omnisense 7000 (BeamMed Ltd, Israel) 骨超声检测仪、2 名研究人员操作多通道超声研究系统 (Verasonics, Kirkland, WA, USA) 进行。表 1 记录实验中受试者生理指标,包括胎龄、体重、身长、碱性磷酸酶、血清磷和皮质骨纵波速度。

表 1 新生儿体征测量值和生化检测指标

Table 1 Anthropometric measurements and biochemical indicators of neonates

生理指标	数值
胎龄/周	38 (34~41)
体重/kg	3.05 (2.33~4.00)
身长/cm	50 (44~51)
碱性磷酸酶/(IU·L ⁻¹)	159 (105~271)
血清磷/(mmol·L ⁻¹)	1.81 (1.55~2.23)
皮质骨纵波速度/(m·s ⁻¹)	2 721 (2 466~2 852)

图 2 为新生儿皮质骨在体检测实验图,通过线性阵列探头检测新生儿胫骨中的导波时空域信号。



图 2 超声导波新生儿胫骨骨质评估实验
Fig. 2 Experimental setup for ultrasonic guided wave evaluation of neonatal tibial bone quality

表 2 为线性阵列探头 (Wisonic, Shenzhen, China) 参数。探头有 0.675 mm 间隔的 128 晶元线性阵列、中心频率为 1 MHz 、 -6 dB 带宽为 $0.5\sim 1.5\text{ MHz}$ 。信号采样频率为 10 MHz 。使用超声耦合剂将探头耦合在受试者胫骨皮肤表面。每次测量采集 100 帧数据,通过信号平均进行降噪。

表 2 阵列探头参数

Table 2 Parameters of array transducer

探头参数	数值
中心频率/MHz	1
中心间距/mm	0.675
-6 dB 带宽/MHz	$0.5\sim 1.5$
阵元个数/个	128
采样频率/MHz	10
激励入射角度/($^\circ$)	20

3 实验结果及讨论

3.1 仿真结果

2 mm 厚度骨板模型中的导波时空域信号存在幅度衰减与波包混叠(如图 3 所示),因此需要将信号转换到频率-波数域进行分析。

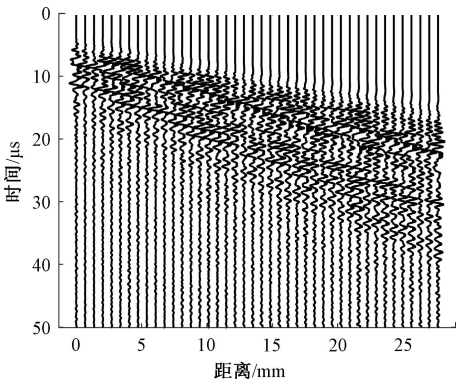


图 3 2 mm 厚骨板模型中的超声导波时空域信号
Fig. 3 Spatiotemporal signals of ultrasonic guided waves in a 2 mm thick bone plate model

图 4(a)~(c) 为无噪声、 $SNR=10\text{ dB}$ 与 $SNR=5\text{ dB}$ 超声导波时空域信号矩阵的归一化频率-波数谱图。波数谱脊线上绘制理论频散曲线,实线与虚线分别为超声导波反对称模式与对称模式。图 4(a)~(c) 中波数谱脊线周围有较强的噪声伪影,影响波数的提取精度;A1 和 S1 导波模式归一化谱值随着导波信噪比的增加而降低。图 4(d)~(f) 为信号波数频散曲线提取结果,其中评估

波数值与理论频散曲线显示出良好的一致性。基于降噪后的 2D-FFT 掩膜去除波数谱峰值周边的干扰部分,使分辨率低、幅度较小的 S0、A1 和 S1 导波模式的波数值同 A0 模式的波数均得到了较准确的提取。各导波模式波

数提取精度受信噪比影响较弱。与 2D-FFT 方法相比,基于矩阵束谱估计的超声导波频散曲线提取方法能够实现超声导波频率波数值的准确评估,且具有一定的抗噪能力。

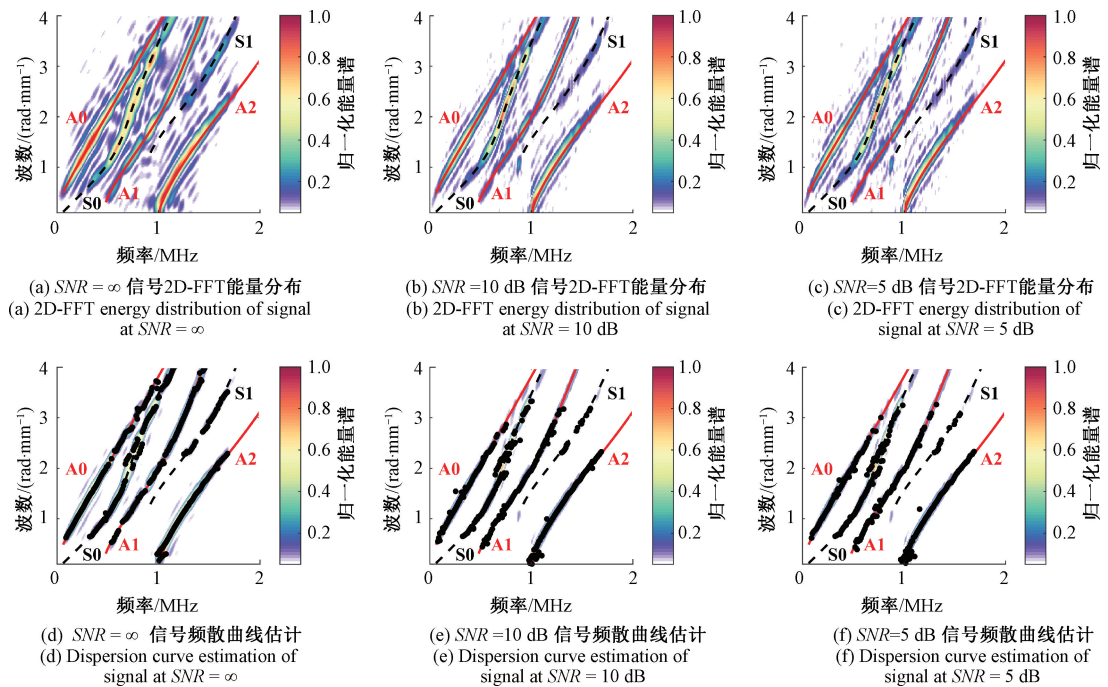


图 4 不同信噪比仿真信号的 2D-FFT 能量分布和频散曲线估计

Fig. 4 2D-FFT energy distributions and dispersion curve extractions of simulated signals with different SNRs

未利用 2D-FFT 能量轨迹控制评估导波数目时,提取的波数-频率点分布较为杂乱,影响骨厚度评估精度。提高能量阈值可以抑制噪声干扰。但过高的阈值会导致导波模式丢失。研究表明 2D-FFT 频谱阈值设置在 0.25 ~ 0.5 可取得理想的波数提取结果。

图 5 为不同信噪比超声导波信号提取波数与理论波数欧式距离的归一化误差图。图 5 中实线为无噪声仿真信号,短虚线为 SNR=10 dB,点虚线为 SNR=5 dB。不同信噪比超声导波信号的骨厚度评估结果均为 2.02 mm,与理论值的相对误差为 1.0%;验证了矩阵束谱估计的导波波数提取算方法评估皮质骨厚度的可行性。

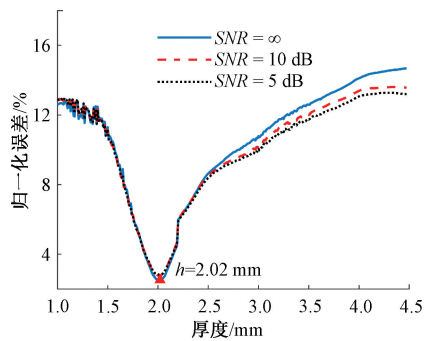


图 5 仿真信号骨厚度估计结果

表 3 对比了不同骨板模型厚度的评估误差,1、2、4 mm 厚骨板厚度的评估相对误差分别为 1.0%、1.0%和 2.75%,误差较小。说明所提出算法对皮质骨厚度的评估具有鲁棒性。

表 3 不同骨板模型厚度评估误差

Table 3 Thickness estimation errors of bone plate models with different thicknesses

信号组别	理论厚度/mm	估计厚度/mm	相对误差/%
第 1 组	1	1.01	1.00
第 2 组	2	2.02	1.00
第 3 组	4	3.89	2.75

由此可见,基于矩阵束谱估计算法对薄皮质骨中导波频率波数的提取效果较好,适于新生儿皮质骨评估条件。4 mm 厚皮质骨模型中导波模式数更多,不同模式叠加增加了波数提取的难度。同时,算法对初始参数的选择较为敏感,不合适的初始参数会导致局部最优解,导致评估误差较大。后续可以通过导波模式分离算法及自适应参数调整来优化该算法,以减小较厚骨板结构材料参数的评估误差。

Fig. 5 Estimated bone thickness from simulated signals

3.2 在体实验结果

图 6 为新生儿皮质骨在体实验检测导波时空域信号。受在体检测环境及软组织的影响,新生儿皮质骨在体实验检测超声导波信号比仿真信号幅度的衰减更大。

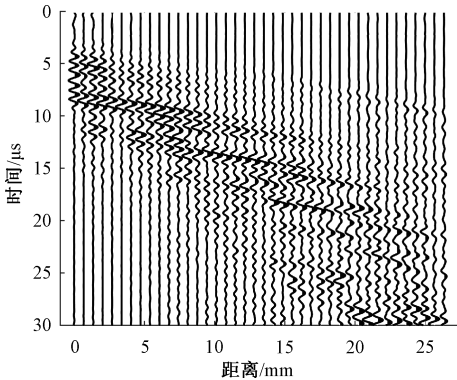


图 6 新生儿皮质骨在体实验检测导波时空域信号
Fig. 6 Spatiotemporal guided waves signals in vivo
experimental detection of neonatal cortical bone

随后,采用基于矩阵束算法的超声导波骨质检测算法对新生儿在体检测超声导波信号进行分析。

图 7 为超声导波在体骨质评估分析图,其中,图 7(b)、(e)和(i)为不同纵波速度模型下骨厚度评估结果。

表 4 对比了 3 名新生儿的测量体征与皮质骨参数评估结果。实验评估的纵波速度与骨超声检测仪测量速度的误差分别为 0.63%、0.07%和 0.5%。当骨超声速度减小时,皮质骨检测厚度亦呈变薄的趋势,基于超声导波的皮质骨参数评估结果与临床观察相吻合。部分误差来源于皮质骨模型建模时的声速增量步长较大。

图 7(c)、(f)和(j)对比了骨质评估结果相关理论频散曲线与估计频散曲线。该算法主要提取了在体实验检测超声导波信号中的 A1、S1 及部分 A2 导波模式,所有提取到的波数值均用于参数评估。与仿真信号相比,实验检测信号估计波数点不完全与理论波数吻合,但能量集中的 S1 模式与理论频散曲线重合程度高,表明了该方法对新生儿胫骨皮质骨厚度评估的应用潜力。

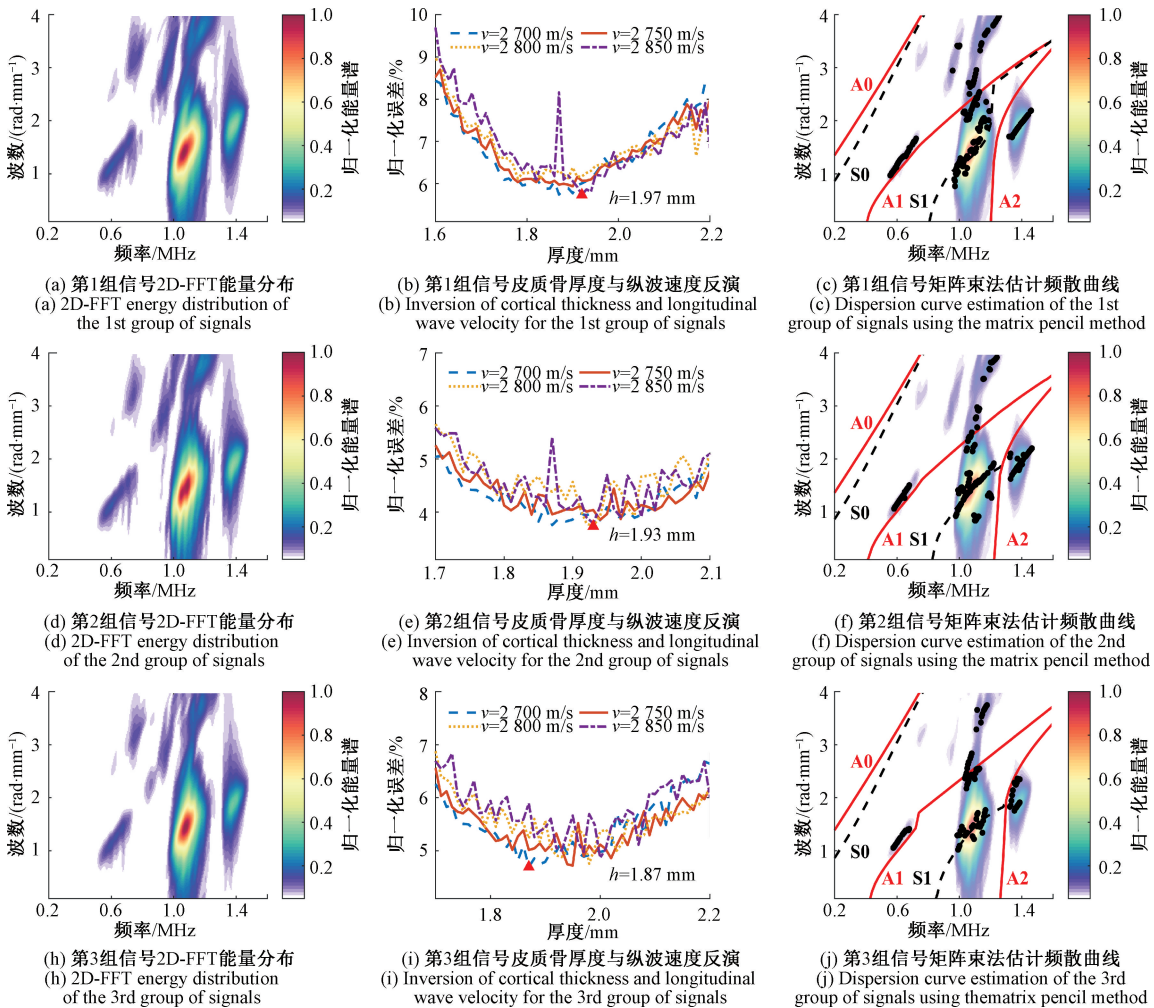


图 7 超声导波在体骨质评估分析

Fig. 7 Analysis diagrams of in vivo bone quality assessment using ultrasonic guided waves

表 4 新生儿体征数据与骨质评估结果

Table 4 Neonatal anthropometric date and bone assessment results

信号组别	胎龄 /周	体重 /kg	体长 /cm	碱性磷酸酶 /(IU·L ⁻¹)	血清磷 /(mmol·L ⁻¹)	医用设备纵波 速度测量值 /(m·s ⁻¹)	导波法纵波 速度估计值 /(m·s ⁻¹)	导波法厚度 估计值 /mm
第 1 组	37	3.41	50	141	2.03	2 832.13	2 850	1.97
第 2 组	38	3.07	50	114	1.99	2 798.08	2 800	1.93
第 3 组	35	2.81	48	213	1.55	2 686.62	2 700	1.87

采用 Spearman 相关性分析新生儿胫骨骨厚度评估值与生理指标,揭示了骨厚度与多项生理指标间的动态关联特征,如图 8 所示。

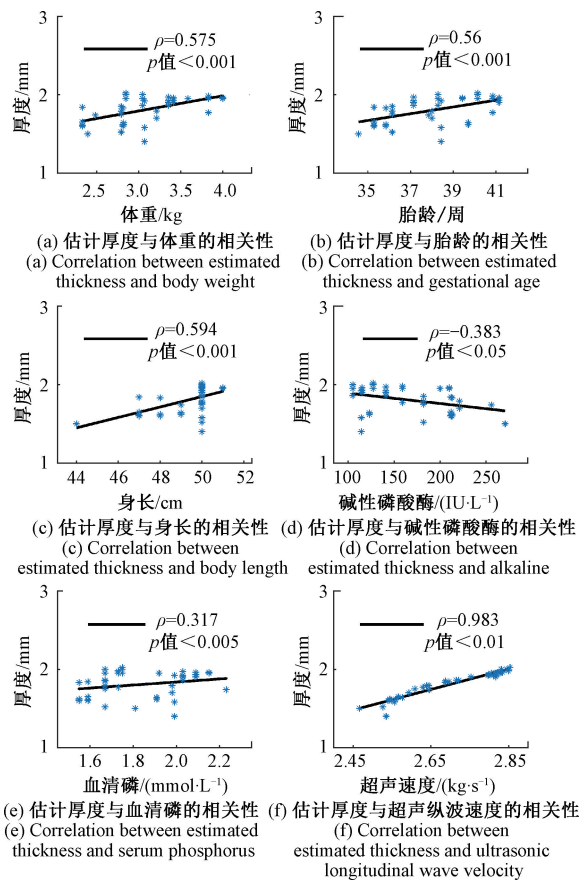


图 8 新生儿胫骨厚度评估结果与生理指标回归分析

Fig. 8 Regression analysis of estimated neonatal tibial thickness and physiological indicators

图 8 中 ρ 为相关系数,其绝对值越接近于 1,相关性越大; p 值为参数间不相关零假设的检验,其值越接近于 0,相关性越显著。图 8(a) ~ (c) 给出了骨厚度与体重、胎龄和身长的相关性, ρ 分别为 0.575、0.56 和 0.594, p 值均 <0.001 ,说明皮质骨厚度与体征测量值存在显著正相关性。图 8(d) ~ (e) 为骨厚度与碱性磷酸酶和血清磷的相关性,二者 p 值均 <0.05 ,说明胫骨骨厚度

与生化指标均显示出较弱相关性,其中与碱性磷酸酶呈负相关,表明碱性磷酸酶具有作为骨形成标志物的可行性,其水平升高预示着骨转换加速导致的相对骨量减少;而血清磷作为矿化基质的重要成分,其浓度与骨沉积效率直接相关。这一发现为建立多模态骨质评估模型提供了新的生物标志物组合思路。图 8(f) 为厚度与临床超声速度测量值的相关性, ρ 为 0.983, p 值 <0.001 ,呈显著正相关。值得注意的是,在体实验结果与文献[27]中使用 CT 检测早产儿皮质骨厚度、体征测量值的相关性一致,表明超声导波评估新生儿骨质状况为临床无创、动态的骨代谢监测提供了有利工具。后续研究将结合生理参数建立校正模型,例如采用多元回归方程建立不同孕周、体重新生儿的骨发育参考曲线。

新生儿骨骼处于快速生长发育阶段,其皮质骨材料结构和力学性能具有明显的各向异性。在体实验与分析中假设皮质骨为各向同性板状材料,忽略了皮质骨在不同方向上的力学性能差异,从而影响对其强度的准确评估。后续研究中可采用基于医学影像的个性化骨骼建模提升研究的精准性。通过高分辨率 CT 或 MRI 等影像技术获取新生儿骨骼的详细结构信息,建立包含皮质骨厚度、几何结构、各向异性特性等参数的个性化骨骼模型,结合超声导波检测技术,有望进一步提高新生儿皮质骨骨质状况评估的准确性。

4 结 论

基于矩阵束谱估计的超声导波频散曲线提取算法实现了新生儿胫骨厚度与纵波波速的临床评估。结合超声导波频率-波数谱能量轨迹掩膜,提高超声导波频率波数谱分辨率,实现导波信号频散曲线的高精度提取。与传统 2D-FFT 方法相比,所提出方法能够在低信噪比条件下实现皮质骨厚度的准确评估;新生儿在体实验中,所提超声导波皮质骨检测方法评估的纵波速度与临床超声速度有较好的一致性,估计厚度与新生儿胎龄、体重和身长等体征测量值之间存在显著相关性。所提出方法为新生儿骨质健康状况评估提供了新的工具。未来工作将进一步

探讨超声导波对早产儿、佝偻病患者与健康足月儿皮质骨参数检测的特异性和敏感性。

参考文献

[1] 常艳美, 林新祝, 张蓉, 等. 早产儿代谢性骨病临床管理专家共识 (2021 年) [J]. 中国当代儿科杂志, 2021, 23(8): 761-772.

CHANG Y M, LIN X ZH, ZHANG R, et al. Expert consensus on clinical management of metabolic bone disease of prematurity (2021) [J]. Chinese Journal of Contemporary Pediatrics, 2021, 23(8): 761-772.

[2] PROKOP-PIOTRKOWSKA M, MARSZALEK-DZIUBA K, MOSZCZYNSKA E, et al. Traditional and new methods of bone age assessment-an overview[J]. Journal of Clinical Research in Pediatric Endocrinology, 2021, 13(3): 251-262.

[3] 刘稳, 刘立帅, 项延训, 等. 基于超声导波虚拟时间反转的多层异质金属粘接结构损伤定位[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 111-119.

LIU W, LIU L SH, XIANG Y X, et al. Damage localization in multilayer heterogeneous metal bonded structures based on virtual time reversal of ultrasonic guided wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(6): 111-119.

[4] 王晓娟, 杨帆, 王错, 等. 面向超声导波检测的管道腐蚀建模及仿真实现[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(5): 71-80.

WANG X J, YANG F, WANG C, et al. Pipeline corrosion modeling and simulation for guided-waves-based inspection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(5): 71-80.

[5] 王丙泉, 赵勃. 复合材料板的空耦超声 Lamb 波原位应力测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(8): 100-108.

WANG B Q, ZHAO B. In-situ stress measurement method for composite plate based on air-coupled ultrasonic Lamb wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(8): 100-108.

[6] 周鲜成, 李鹏飞, 李杰, 等. 基于宽带相干信号子空间方法的超声导波长骨评价[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 166-176.

ZHOU X CH, LI P F, LI J, et al. Evaluation of long bone with ultrasound guided waves using wideband

coherent signal subspace method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(6): 166-176.

[7] MAZZOTTI M, KOHTANEN E, ERTURK A, et al. Optimizing transcranial ultrasound delivery at large incident angles by leveraging cranial leaky guided wave dispersion[J]. Ultrasonics, 2023, 128: 106882.

[8] 刘畅, 孙贺, 任佳豪, 等. 用于动脉血压监测的柔性超声换能器阵列[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(12): 225-234.

LIU CH, SUN H, REN J H, et al. Flexible ultrasonic transducer array for arterial blood pressure monitoring[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 225-234.

[9] 许凯亮, 张正罡, 刘丹, 等. 高分辨率超声 Lamb 波频散曲线测量与板厚估计[J]. 数据采集与处理, 2017, 32(2): 286-292.

XU K L, ZHANG ZH G, LIU D, et al. High-resolution ultrasonic lamb waves dispersion measurement and plate thickness evaluation[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2017, 32(2): 286-292.

[10] 刘丹, 许凯亮, 李大为, 等. 超声导波定量评价长骨骨折状况[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 682-690.

LIU D, XU K L, LI D W, et al. Quantitative evaluation of long bone fractures by ultrasonic guided waves[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2014, 44: 682-690.

[11] MAZZOTTI M, SUGINO C, KOHTANEN E, et al. Experimental identification of high order Lamb waves and estimation of the mechanical properties of a dry human skull[J]. Ultrasonics, 2021, 113: 106343.

[12] MINONZIO J G, TALMANT M, LAUGIER P. Guided wave phase velocity measurement using multi-emitter and multi-receiver arrays in the axial transmission configuration[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 127(5): 2913-2919.

[13] XU K L, MINONZIO J G, TA D AN, et al. Sparse SVD method for high-resolution extraction of the dispersion curves of ultrasonic guided waves[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(10): 1514-1524.

[14] CHANG C Y, YUAN F G. Extraction of guided wave

- dispersion curve in isotropic and anisotropic materials by Matrix Pencil method[J]. *Ultrasonics*, 2018, 89: 143-154.
- [15] CHEN H L, LING F Y, ZHU W J, et al. Waveform inversion for wavenumber extraction and waveguide characterization using ultrasonic Lamb waves [J]. *Measurement*, 2023, 207: 112360.
- [16] XU K L, LAUGIER P, MINONZIO J G. Dispersive radon transform [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, 143(5): 2729-2743.
- [17] LI Y F, XU K L, LI Y, et al. Deep learning analysis of ultrasonic guided waves for cortical bone characterization[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2021, 68(4): 935-951.
- [18] MINONZIO J G, BOCHUD N, VALLET Q, et al. Ultrasound-based estimates of cortical bone thickness and porosity are associated with nontraumatic fractures in postmenopausal women: A pilot study [J]. *Journal of Bone and Mineral Research*. 2019, 34(9):1585-1596.
- [19] SONG X J, FAN T, ZENG J D, et al. Nonlinear inversion of ultrasonic guided waves for in vivo evaluation of cortical bone properties [J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(7): 074301.
- [20] 罗斯 J L. 固体中的超声波[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 82-92.
- ROSE J L. *Ultrasonic waves in solid media* [M]. Beijing: Science Press, 2004:82-92.
- [21] 江灿, 武丹, 舒孟炯, 等. 采用矩阵束方法的复合材料圆管周向导波频散数据获取[J]. *声学学报*, 2024, 49(3): 472-479.
- JIANG C, WU D, SHU M J, et al. Acquisition of dispersion features of circumferential guided wave in a circular composite material pipe based on the matrix pencil method[J]. *Acta Acustica*, 2024, 49(3): 472-479.
- [22] RAMASAWMY D R, COX B T, TREEBY B E. ElasticMatrix: A MATLAB toolbox for anisotropic elastic wave propagation in layered media [J]. *SoftwareX*, 2020, 11: 100397.
- [23] YAN Y ZH, LI Q M. Predictive model and physical interpretation of asymmetric features in pyroshock signals[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 199: 110447.
- [24] ORTA A H, KERSEMANS M, VAN DEN ABEELE K. A comparative study for calculating dispersion curves in viscoelastic multi-layered plates [J]. *Composite Structures*, 2022, 294: 115779.
- [25] PAFUNDI D, RAJON D, JOKISCH D, et al. An image-based skeletal dosimetry model for the ICRP reference newborn—internal electron sources[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2010, 55(7): 1785-1814.
- [26] BOSSY E, TALMANT M, LAUGIER P. Effect of bone cortical thickness on velocity measurements using ultrasonic axial transmission: A 2D simulation study[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, 112(1): 297-307.
- [27] TOKURIKI S, IGARASHI A, OKUNO T, et al. Postnatal changes in humerus cortical bone thickness reflect the development of metabolic bone disease in preterm infants[J]. *Disease Markers*, 2016: 2176594.

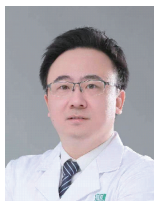
作者简介



李卿, 2024 年于复旦大学获得硕士学位, 主要研究方向为骨超声、皮质骨定征和超声导波信号处理。

E-mail: liqinglq2021@163.com

Li Qing received her M. Sc. degree from Fudan University in 2024. Her main research interests include bone ultrasound, cortical bone characterization and ultrasonic guided wave signal processing.



郭佳林, 2011 年于上海复旦大学医学院获得硕士学位, 2022 年于同济大学医学院获得博士学位。现为同济大学附属妇产科医院儿科主任医师, 主要研究方向为儿童保健、早产儿和新生儿相关疾病。

E-mail: guojialin78@hotmail.com

Guo Jialin received his M. Sc. degree from Shanghai Medical College of Fudan University in 2011, and his Ph. D. degree from the School of Medicine at Tongji University in 2022. He is currently a chief physician in the Department of Pediatrics at the Obstetrics and Gynecology Hospital, Tongji University. His main research interests include child healthcare and diseases related to preterm infants and newborns.



陈洪磊(通信作者),2020 年于北京工业大学获得博士学位,同年进入复旦大学从事博士后研究工作;2023 年至今为复旦大学义乌研究院青年研究员。主要研究方向为超声骨表征、超声成像、超声和光声检测技术。

E-mail: hongleichen@fudan.edu.cn

Chen Honglei (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Beijing University of Technology in 2020, and joined Fudan University for postdoctoral research in the same year. Since 2023, he has been a young researcher at the Yiwu Research Institute of Fudan University. His main research interests include bone ultrasonic characterization, ultrasonic imaging, and ultrasonic/photoacoustic detection technologies.



他得安,1999 年于陕西师范大学获得硕士学位,2002 年于同济大学获得博士学位。现为复旦大学教授,主要研究方向为骨超声、生物医学超声和诊断系统、医学信号处理和数值技术在超声中的应用。

E-mail: tda@fudan.edu.cn

Ta De'an received his M. Sc. degree from Shaanxi Normal University in 1999, and his Ph. D. degree from Tongji University in 2002. Now he is a professor at Fudan University. His main research interests include bone ultrasound, biomedical ultrasound and diagnosis systems, medical signal processing, and the applications of numerical techniques in ultrasound.