

# 多层阻抗匹配理论在医用宽带超声探头设计中的应用

唐明

深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司, 中国·广东 深圳 518057

**摘要:** 超声成像是医学影像的重要分支, 超声探头作为医学成像系统的核心部件, 其性能直接影响诊断的准确性与可靠性。为了达成更好的分辨率与穿透力, 需要研发设计宽带超声探头, 但其设计面临声阻抗匹配、带宽扩展、信号保真、材料以及加工工艺等多重挑战。多层阻抗匹配理论通过构建渐变声阻抗层, 有效改善声波在不同介质间的传递效率, 是提升宽带探头性能的关键技术之一。本文系统阐述多层阻抗匹配理论的基本原理与数学模型, 分析其在宽带超声探头设计中的具体应用方法, 结合匹配材料特性、加工工艺方法等, 探讨该理论在提升探头综合性能方面的作用, 以期对超声诊断设备的研发与优化提供理论支持与工程参考。

**关键词:** 超声探头; 宽带设计; 多层阻抗匹配; 匹配材料与加工

## Application of Multilayer Impedance Matching Theory in the Design of Broadband Ultrasonic Transducers

Tang Ming

Shenzhen Mindray Bio-Medical Electronics Co., Ltd., China Guangdong Shenzhen 518057

**Abstract:** Ultrasonic Image is an important branch of medical image, As the core component of medical imaging systems, the performance of ultrasonic transducers directly affects the accuracy and reliability of diagnosis. To get better resolution and penetration, it is necessary to develop broadband ultrasonic transducers. However, their design faces multiple challenges such as acoustic impedance matching, bandwidth expansion, signal fidelity material and processing. By constructing a gradient acoustic impedance layer, the multilayer impedance matching theory can effectively improve the transmission efficiency of sound waves between different media, which is one of the key technologies for enhancing the performance of broadband transducers. This paper systematically expounds the basic principles and mathematical models of the multilayer impedance matching theory, analyzes its specific application methods in the design of broadband ultrasonic transducers, and discusses the role of this theory in improving the comprehensive performance of probes in combination with the material of matching layers and processing, so as to provide theoretical support and engineering reference for the research and development and optimization of ultrasonic diagnostic equipment.

**Keywords:** Ultrasonic probe; Broadband design; Multilayer impedance matching; Material and processing of matching layer

## 0 引言

医学影像技术包含 X 射线, 核磁, 超声等, 超声成像以其无辐射、实时性好、操作灵活等优势, 在临床诊断中扮演着日益重要的角色, 超声成像是医学影像的重要分支。超声探头作为超声系统与人体信号传播与接收的核心部件, 被誉为超声成像系统的眼睛探头, 其声学性能直接影响成像质量与产品质量。探头在分辨率与穿透深度之间存在固有矛盾, 而宽带探头通过拓展工作频带, 能够在不同成像模式下取得更好的平衡, 能够在临床方面兼顾更多的应用, 已成为当前超声技术发展的主要方向之一。然而, 探头的设计面临如何提升声能的传递效率、如何获取更强的回波信号、如何有效降低噪声和干扰大等挑战, 其中声阻抗失配是导致能量损失与信号畸变的重要原因。多层阻

抗匹配理论源于声学与振动工程领域, 旨在通过插入一系列声阻抗渐变的介质层, 实现声波在不同特性材料之间的高效传递。该理论近年来逐渐被引入医用超声探头设计中, 并结合材料以及工艺技术的提升, 成为提升宽带探头性能的有效途径。

## 1 匹配理论的基本原理

### 1.1 声阻抗及其在超声传播中的作用

声阻抗是描述介质声学特性的重要参数, 定义为介质密度与声速的乘积。在超声传播过程中, 当声波经过两种不同声阻抗的介质界面时, 会发生反射与透射现象。反射系数与透射系数的大小直接取决于两种介质的声阻抗差异。阻抗差异越大, 反射越强, 透射能量越低, 影响探头的灵敏度, 从而影响图像在组织中的穿透力。

## 1.2 多层阻抗匹配的理论模型

多层阻抗匹配通过在两种阻抗差异较大的介质之间插入若干过渡层,使声阻抗呈现梯度变化,从而降低界面反射,提高声能传输效率。理论上,若匹配层的声阻抗一定规律分布与设计,结合压电晶片的振动模式设计,可有效提升透射率,提升带宽。其数学模型可基于传输线理论或波动方程推导,通常涉及层数、厚度、声阻抗值及频率响应等多参数优化问题。

## 2 多层阻抗匹配在宽带超声探头设计中的应用

多层阻抗匹配理论应用于宽带超声探头的设计,其核心目标是在宽频率范围内,最大限度地实现声能从压电晶片向人体组织的高效传输,同时优化回波信号的接收灵敏度。这一过程并非简单的材料堆叠,而是一个涉及声学、材料科学、精密加工工艺与临床需求深度融合的系统工程。其设计与评估需严格遵循医疗产品机械系统所强调的安全性、可靠性、精准性及全生命周期经济性原则。

### 2.1 匹配层材料的选择与设计

匹配层材料的选择与设计是阻抗匹配技术实现的基础与首要挑战。其核心矛盾在于,理想的声学性能要求往往与材料的机械性能、加工工艺存在权衡。

#### 2.1.1 声学性能的核心参数

材料的声阻抗( $Z$ )是决定性参数,理论上,对于单层匹配,最佳声阻抗为压电材料与负载介质声阻抗的几何平均值( $Z_{match} = \sqrt{Z_{piezo} \cdot Z_{load}}$ )。对于多层结构,各层阻抗需形成一条从晶体到组织的平滑过渡曲线。此外,材料的声衰减系数必须尽可能低,以确保高频信号在匹配层中传播时能量损失最小;声速则影响匹配层的四分之一波长厚度( $t = \lambda / 4 = c / (4fc)$ ,其中 $fc$ 为中心频率),进而决定最优工作频点,同时,需要结合探头的频率要求,材料的阻抗要求,合理选择合适声速的材料,这样匹配材料的厚度才会在一个合理区间,便于加工,也提升探头的可靠性。

#### 2.1.2 常用材料体系及其特性分析

环氧树脂基复合材料:这是最传统和广泛使用的体系。通过掺杂不同粒径、比例的钨粉、氧化铝或空心玻璃微珠等填料,可以精确调控复合材料的声阻抗(通常范围在2-15 MRayl)和密度。其优势在于工艺成熟、成本较低、易于成型,然而,该类材料也有一定缺点,在混料和固化过程中,材料的一致性和均匀性较难保证,同时,加工难度也较高,在磨削,切割过程中,尺寸精度也较难保证。

特种陶瓷材料:部分特种陶瓷以其优异的阻抗特性、机械性能,可作为两层尤其三层匹配材料的选择之一,该类材料的优点是材料一致性好,成本也较低,该类材料的缺点在于,加工难度较大,尤其匹配材料需要切割后改善探头阵元的指向角,陶瓷材料硬度高,加工难度大,对切割刀片的损耗也较大。

特种高分子材料:例如某些具有特定分子链结构的工程塑料或交联聚合物,其本身声阻抗较低且衰减较小。通过物理或化学发泡技术,可以在其中引入微米或纳米级气孔,进一步降低其声阻抗和密度,制造出接近水或软组织的超低声阻抗匹配层(<3 MRayl)。这类材料在实现优异的声学渐变和宽带匹配方面潜力巨大,但多孔结构的机械强度较弱,耐磨性和长期稳定性需通过表面封装或复合增强技术予以保证,以确保临床使用中的安全与耐用<sup>[1]</sup>。

#### 2.1.3 设计中的系统性权衡

材料的选择绝非孤立追求最优声阻抗值。设计者必须在声学性能、机械强度、加工可行性、成本之间进行系统性权衡。例如,为实现特定的阻抗渐变曲线,可能需要使用非标准配比的复合材料,这可能带来工艺不稳定的风险;又如,为了匹配不同的压电材料,比如单晶材料与常规PZT材料的声阻抗不同,匹配材料的阻抗也需要随之调整。因此,匹配层材料设计必须纳入产品整体的DFX(面向X的设计)框架,特别是面向可靠制造(DFM)和面向可靠性(DFR)的设计,确保从实验室样品到批量生产的产品性能一致性与长期稳定。

## 2.2 结构参数的影响机理

确定了材料体系后,如何配置这些材料(层数、厚度、阻抗序列)以获得最优的宽带性能,是一个典型的多变量、多目标优化问题。

层数:增加层数理论上能实现更平滑的阻抗过渡和更宽的带宽。然而,层数增加会带来结构复杂性、装配难度、界面增多导致的能量损失以及成本上升。层数增加,粘接,切割等加工工艺难度也随之大幅提升,实践中,医用探头的匹配层通常为2层或3层。

厚度:每层的最优厚度通常为其中心频率处声波波长的四分之一。但在宽带设计中,需考虑其对整个目标频带(如-6dB带宽)的覆盖效果,厚度偏差会显著影响谐振频率和带宽,通常会根据系统对频谱形态及时域波形的要求进行匹配厚度设计与调整。

阻抗分布:阻抗值在各层间的分布规律是关键。线性递增分布设计简单,但宽带效果有限;指数分布能提供更

好的宽频匹配；而基于传输线理论的切比雪夫型或二项式分布，则能在指定带宽内实现最平坦的透射响应，是追求极致性能时的首选，但对其厚度和阻抗公差要求也最为苛刻，从而带来加工工艺难度的增加。

### 2.3 性能评估与测试验证

匹配的设计，最终都是为了得到一个良好的声学波形以及频谱，并且满足相关法规以及产品性能，成本，可靠性等要求。因此，一个经过优化设计的匹配层结构最终都需要经过严格的测试，才能应用于相关产品。这是将设计转化为合格医疗产品的最终关口。

#### 2.3.1 核心电声性能评估

电学阻抗分析：通过测量探头的输入阻抗频率特性与理论模型的对比，可以验证匹配层对压电谐振特性的调节效果，初步评估其带宽扩展能力，同时，也需要分析整个探头与整机系统的匹配，发挥探头的最大能力。

声场测量与脉冲-回波响应测试：脉冲-回波测试则让探头对准标准反射靶，通过脉冲发射器和精密工装，控制单个阵元的发射，同时接收其回波信号，该方法测量中心频率、-6dB带宽、脉冲长度（与轴向分辨率相关）等，用于评估灵敏度、信噪比和时域波形（脉宽、振铃）等<sup>[2]</sup>。同时，通过水槽中标准水听器在不同位置的接收，配合软件，可绘制出声压分布图。

成像分辨率以及穿透力测试：使用包含精细结构（如线对靶、点靶）的超声仿体进行成像实验，直接评估系统的轴向与侧向分辨率、对比度分辨率和穿透深度。这是对匹配层设计临床效用的终极检验。

#### 2.3.2 可靠性、安全性与环境适应性验证

根据医疗产品机械系统的可靠性原则与安全性优先原则，匹配层作为关键部件，必须经受一系列严苛测试：

声功率测试：法规对声功率有限制要求，主要是温度与机械指数要求，因此需要对探头进行声功率测试，以确保温度和机械指数均在安全范围内。

机械可靠性测试：包括振动试验（模拟运输和使用中的振动）、机械冲击试验、疲劳测试（模拟探头长期、重复的按压操作）以及层间结合力测试，以确保结构在生命周期内不发生失效。

环境试验：进行高低温循环、湿热老化试验，验证材料性能的稳定性和结构完整性。特别是对于可能接触化学消毒剂的部位，需进行耐化性测试。

生物相容性与安全性测试：若部分特殊探头设计，让匹配材料直接接触人体，则需要对每一个接触人体的材料

进行生物相容性测试。此外，整个探头需通过电气安全测试（如耐压、漏电流）和电磁兼容性测试。

## 3 发展趋势与展望

### 3.1 材料及加工技术的进一步发展

多层匹配材料理论，要持续提升在医用探头上的应用，需要匹配材料以及加工技术的发展来支撑，比如复合材料技术，可以进一步改善材料的阻抗特性，衰减特性等。特种加工技术如激光，精密研磨技术等，可以持续改善材料的表面质量，尺寸精度等，持续提升探头的性能以及一致性。

### 3.2 智能化优化设计

随着人工智能与机器学习技术的发展，多层阻抗匹配结构的设计将向智能化方向发展。通过构建大数据驱动的设计模型，整合材料特性、工艺参数、临床需求等多维度数据，利用深度学习算法自动优化多层匹配结构的参数，实现设计方案的快速迭代与精准优化。例如，基于生成对抗网络（GAN）生成多层阻抗匹配结构的设计方案，结合有限元仿真进行性能预测，显著提升设计效率与可靠性。同时，智能化超声探头将集成实时性能监测模块，通过传感器采集声学参数与结构状态数据，利用AI算法动态调整匹配结构的工作参数，实现自适应阻抗匹配，适配不同临床场景与患者个体差异<sup>[3]</sup>。

### 3.3 微型化与介入应用

在精准医疗与微创手术的推动下，宽带超声探头将向微型化、植入式方向发展，多层阻抗匹配理论需适配微型化设计的需求。微型化探头的多层匹配结构需采用超薄材料与微纳加工工艺，实现层数少、厚度薄、声阻抗梯度优化的设计，在有限空间内保证宽频性能与能量传输效率。例如，心腔内超声和血管内超声探头（直径 < 4mm）可采用3层超薄匹配结构，通过磁控溅射工艺制备纳米级厚度的匹配层，满足血管内、体腔内等微创诊断场景的需求。

### 3.4 绿色化与可持续设计

在“双碳”目标背景下，医疗设备的绿色化与可持续设计成为发展趋势，多层阻抗匹配结构的设计将更加注重环保与资源节约。一方面，尽量减少如含铅等对环境有害物质的应用；另一方面，通过模块化设计与标准化生产，提升医用探头的可维修性与可回收性，延长产品生命周期，降低资源消耗。同时，优化加工工艺，降低能耗与污染物排放，实现医疗超声装备产业的可持续发展<sup>[4]</sup>。

## 4 结语

宽带宽的医用超声探头，可有效改善图像的分辨率与

穿透力，覆盖更多临床应用范围。多层阻抗匹配理论为宽带超声探头的性能提升提供了重要理论支撑与技术路径。其在探头设计中的应用，不仅涉及声学、材料、加工工艺等科学的交叉融合，也必须遵循医疗产品设计中的安全性、可靠性、精准性与人性化等核心原则。未来，随着计算仿真、智能算法与先进材料以及加工技术的进一步发展，多层阻抗匹配将在更广泛的高性能医疗超声设备中发挥关键作用，推动医学影像技术向更精准、更智能、更可持续的方向发展。

#### 参考文献：

[1] 吴珂, 李俊杰, 张琳娟. 超声探头快速复用热封系统的设计与研发[J]. 四川大学学报(医学版), 2024, 55(03): 762-768.

[2] 吕灿. 超小型超声相控阵检测系统设计[D]. 天津大学, 2022.

[3] 张浩. 医疗超声探头辅助上膜装置的设计与优化[D]. 长春工业大学, 2021.

[4] 赵雁, 滕永平. 水浸宽带聚焦超声探头的研制[J]. 北方交通大学学报, 2001, (06): 42-44.

基金项目：深圳市科技计划重大项目 - 面阵超声换能器关键技术开发与应用（编号：JSGGZD20220822095200002）。

作者简介：唐明（1982-），男，汉族，四川资阳，中级职称，研究生，研究方向：超声换能的研发及其应用研究。