

超声成像物理原理：教材课后习题拾遗

Zichao Li & Gemini

2026 年 1 月 2 日

目录

1	前言：复习策略	2
2	第一部分：基础物理概念	2
2.1	声波的基本性质	2
2.2	声阻抗与反射 (Impedance & Reflection)	3
2.3	衰减 (Attenuation)	3
2.4	分辨率 (Resolution)	3
3	第二部分：主干知识考点	4
3.1	考点一：换能器与匹配层 (Transducer & Matching Layer)	4
3.2	考点二：多普勒效应计算 (Doppler Shift)	5
3.3	考点三：折射与斯涅尔定律 (Snell's Law)	5
4	第三部分：针对习题集的简答题攻略	5
4.1	简答题 1: 换能器部件图解	5
4.2	简答题 4: 阻抗匹配效率计算	6
4.3	简答题 3: 波长计算	6
4.4	简答题 7: 阵列延时计算 (Beamforming)	7
5	关键参数理解与速记	8
5.1	脉冲波必考参数 (Pulse Wave Parameters)	8
5.2	声束几何与发散 (Beam Geometry)	8
5.3	分辨率同义词速记 (LATA & LARRD)	9
5.4	强度、分贝与生物效应	9
5.5	波动物理术语补充	10
6	附录：习题集易错点速查	10
6.1	声速的决定因素 (Speed of Sound Rules)	11
6.2	B-Mode 图像坐标系与切片厚度	11
6.3	动态范围的比例计算	11
6.4	几个易混淆的定义	12

1 前言：复习策略

由于超声部分已经有了自包含的高质量中文教材，对于超声部分，无需再将教材上已有的教学材料进行重新归纳和总结。本讲义仅用于快速把握教材的主干内容，并帮助读者厘清课后题的重难点分布，以在有限的复习时间（10h）中达到**能够闭卷独立完成整个习题集**的熟练度。

请读者务必结合教材阅读。讲义中提到的题号是当前版本教材的习题集中的题号（即超声部分助教在群里限时开放下载的文件）。如果大家没有保存，也可以直接阅读教材原文，其中包含所提到的全部题目。

本讲义重点在于：

- **理解核心定义**：如分辨率定义、压电效应。
- **掌握三个关键计算**：声阻抗匹配、分贝 (dB) 换算、多普勒频移。这通常是大题的考点。
- **理解物理图像**：波的传播、反射、折射原理。

2 第一部分：基础物理概念

2.1 声波的基本性质

核心公式

$$c = f \cdot \lambda$$

- c : 声速 (Speed), 由**介质**决定（软组织平均 1540 m/s）。
- f : 频率 (Frequency), 由**声源 (探头)** 决定，在传播中不变。
- λ : 波长 (Wavelength), 随介质声速变化。

考点提示：

- **声速排名**：骨骼 (4080) > 肌肉 > 血液 > 软组织 (1540) > 脂肪 > 肺 (气体) (330)。(对应习题 35, 22)
- **波的分类**：声波是**机械纵波**，不能在真空中传播。(对应习题 11, 12, 16, 35)
- **频率范围**：
 - 次声波 (Infrasound): < 20 Hz
 - 可闻声 (Audible): 20 Hz – 20 kHz
 - 超声波 (Ultrasound): > 20 kHz
 - **诊断超声**: 通常 2 MHz – 12 MHz (对应习题 15, 38)

2.2 声阻抗与反射 (Impedance & Reflection)

这是超声成像的核心。图像上的“亮”点就是反射回来的回声。

声阻抗公式

$$Z = \rho \cdot c$$

单位: Rayl (瑞利), $1 \text{ Rayl} = 1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

反射系数 (垂直入射时):

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

- $Z_1 = Z_2$: 无反射 (无回声, 黑色, 如囊肿/液体)。(对应习题 1, 5, 25)
- $Z_1 \approx Z_2$: 弱反射 (软组织间, 灰色)。
- $Z_1 \ll Z_2$ 或 $Z_1 \gg Z_2$: 强反射 (气体/骨骼, 亮白, 甚至全反射)。(对应习题 30)

2.3 衰减 (Attenuation)

声波在传播过程中能量减弱, 单位是分贝 (dB)。

- **三大原因**: 吸收 (主要, 转为热能)、反射、散射。(对应习题 14, 48)
- **软组织衰减系数**: $0.5 \text{ dB}/(\text{cm} \cdot \text{MHz})$ 。频率越高, 衰减越快, 穿透力越差。(对应习题 20, 54)
- **dB 计算口诀** (对应习题 4, 10, 40):
 - $3 \text{ dB} \approx \text{功率} \times 2$ (幅值 $\times 1.414$)
 - $10 \text{ dB} = \text{功率} \times 10$ (幅值 $\times \sqrt{10} \approx 3.16$)
 - $20 \text{ dB} = \text{幅值} \times 10$ (功率 $\times 100$)
 - $-3 \text{ dB} = \text{功率减半}$

2.4 分辨率 (Resolution)

分辨两个相邻物体的能力。(对应习题 2)

- **轴向分辨率 (Axial)**: 沿波束方向。

$$\text{Axial Res} = \frac{\text{SPL (空间脉冲长度)}}{2} = \frac{\lambda \cdot n}{2}$$

口诀: 频率越高 \rightarrow 波长越短 \rightarrow 脉冲越短 \rightarrow 分辨率越好。(数值越小越好)

- **横向分辨率 (Lateral)**: 垂直于波束方向。

$$\text{Lateral Res} = \text{波束宽度 (Beam Width)}$$

在焦点 (Focus) 处最好。

3 第二部分：主干知识考点

这部分包含“不在习题文档中但可能是主干知识”的内容，以及复杂的计算题。

3.1 考点一：换能器与匹配层 (Transducer & Matching Layer)

背景：PZT 晶体的阻抗 ($Z_{PZT} \approx 30 - 40 \text{ MRayls}$) 远大于皮肤/软组织 ($Z_{tissue} \approx 1.5 - 2 \text{ MRayls}$)。如果不匹配，80% 的能量会被反射回探头，无法进入人体。

匹配层两大定律 (必背)

1. 最佳阻抗 (Geometric Mean):

$$Z_{\text{matching}} = \sqrt{Z_{PZT} \cdot Z_{\text{tissue}}}$$

(对应习题简答题 4, 填空 10)

2. 最佳厚度 (Quarter Wavelength):

$$\text{Thickness} = \frac{1}{4} \lambda_{\text{matching}}$$

(对应习题 38, 简答题 2)

为什么要用 1/4 波长厚度? (2021 级超声大题)

• 作答逻辑:

1. 当声波在匹配层内传播时，会在匹配层前后两个界面发生反射。
2. 设匹配层厚度为 d 。声波往返一次的路程是 $2d$ 。
3. 如果 $d = \lambda/4$ ，则往返路程 $2d = \lambda/2$ (半个波长)。
4. 这意味着，在匹配层内部产生的多次反射波，与刚进入匹配层的波之间存在 180° 的相位差。
5. **相消干涉 (Destructive Interference):** 对于反射回探头的波，它们相互抵消，从而减少了反射。
6. **相长干涉 (Constructive Interference):** 根据能量守恒，减少反射意味着增加了透射进入人体的能量。

3.2 考点二：多普勒效应计算 (Doppler Shift)

这是另一个极高概率的“主干知识大题”。

多普勒方程

$$f_D = f_r - f_t = \frac{2 \cdot f_t \cdot v \cdot \cos(\theta)}{c}$$

- f_D : 多普勒频移 (Doppler shift)
- f_t : 发射频率 (Transmitted frequency)
- v : 血流速度
- θ : 声束与血流方向的夹角 (入射角)
- c : 声速

关键考点：

1. 角度影响：

- 当 $\theta = 0^\circ$ ($\cos 0 = 1$)：频移最大，测速最准。
- 当 $\theta = 90^\circ$ ($\cos 90 = 0$)：**没有多普勒频移**，测不出速度。(对应习题 49 的变体)
- 临床通常要求 $\theta < 60^\circ$ 。

2. 公式当中 2 的来源：声波先撞击红细胞 (接收)，红细胞再作为声源反射 (发射)，发生两次多普勒效应。

3.3 考点三：折射与斯涅尔定律 (Snell's Law)

发生条件：1. 斜入射 (Oblique incidence)。2. 两种介质**声速不同** ($c_1 \neq c_2$)。(注意：与阻抗无关，只看声速！)

公式：

$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{c_2}{c_1}$$

- 如果 $c_2 > c_1$ (如从软组织射入骨骼)，则 $\theta_t > \theta_i$ (折射角变大)。
- 临界角 (Critical Angle)：当折射角达到 90° 时，发生全反射。

4 第三部分：针对习题集的简答题攻略

4.1 简答题 1：换能器部件图解

题目：简单画一张换能器主要部件图。解释每一部分起什么作用。

作答要点 (请手绘一个矩形，分层标注)：

1. **匹配层 (Matching Layer)**: 位于最前方。作用: 减少阻抗差异, 增加透射进入人体的声能。厚度为 $\lambda/4$ 。
2. **压电晶体 (PZT / Active Element)**: 核心部件。作用: 利用**压电效应**进行电能与声能的互换 (发射和接收)。厚度通常为 $\lambda/2$ 。
3. **背衬材料 (Backing Material / Damping)**: 位于晶体后方。作用: 吸收晶体背面的振动, 缩短脉冲长度 (SPL), 从而**提高轴向分辨率**, 但会降低灵敏度。
4. **导线 (Wire)**: 传输电信号。
5. **外壳 (Case)**: 保护内部并在电学上绝缘屏蔽。

4.2 简答题 4: 阻抗匹配效率计算

题目: 已知 $Z_{PZT} = 38, Z_{tissue} = 2, Z_{match} = 10$ 。求效率。

计算步骤: 需要计算两次界面的透射率, 然后相乘。

$$\text{反射系数 } R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2, \quad \text{透射系数 } T = 1 - R$$

界面 1: PZT \rightarrow 匹配层

$$R_1 = \left(\frac{38 - 10}{38 + 10} \right)^2 = \left(\frac{28}{48} \right)^2 = \left(\frac{7}{12} \right)^2 \approx 0.34$$

$$T_1 = 1 - 0.34 = 0.66 \quad (66\%)$$

界面 2: 匹配层 \rightarrow 组织

$$R_2 = \left(\frac{10 - 2}{10 + 2} \right)^2 = \left(\frac{8}{12} \right)^2 = \left(\frac{2}{3} \right)^2 \approx 0.44$$

$$T_2 = 1 - 0.44 = 0.56 \quad (56\%)$$

总透射效率:

$$T_{total} = T_1 \times T_2 = 0.66 \times 0.56 \approx 0.37 \quad (37\%)$$

结论: 如果没有匹配层, 直接 $38 \rightarrow 2$, 反射率 $R = ((36/40)^2 = 0.81$, 透射仅 19%。匹配层将效率从 19% 提升到了 37%。

4.3 简答题 3: 波长计算

题目: 10MHz 超声在骨骼 ($c = 4080 \text{ m/s}$) 中的波长?

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{4080 \text{ m/s}}{10 \times 10^6 \text{ Hz}} = 408 \times 10^{-6} \text{ m} = 0.408 \text{ mm}$$

(注意单位换算: 1 MHz 对应 mm 和 μs 更方便, 即 $c = 4.08 \text{ mm}/\mu s$, 则 $\lambda = 4.08/10 = 0.408 \text{ mm}$)

4.4 简答题 7: 阵列延时计算 (Beamforming)

题目：计算几何图形阵元波束合成所需的延时。

这题考查**电子聚焦**原理。由于阵元排成直线，边缘阵元到焦点距离 (L) 比中心阵元到焦点距离 (d) 要远。

$$\Delta d = \sqrt{x^2 + d^2} - d$$

其中 x 是阵元距离中心的距离， d 是焦距。所需的时间延时 (Time Delay) 为：

$$\Delta t = \frac{\Delta d}{c}$$

边缘的阵元需要先发射（或接收信号后先等待），中间的后发射，这样波阵面才能在焦点处汇聚。

5 关键参数理解与速记

5.1 脉冲波必考参数 (Pulse Wave Parameters)

针对：选择题 3, 填空题 8, 26, 48

超声成像不使用连续波，而是发射短脉冲。这引入了全新的时间参数：

脉冲波关键定义

- **脉冲重复频率 (PRF)**: 每秒发射的脉冲个数 (Number of pulses per second)。
 - **区别**: f (频率) 是波内的震动快慢 (MHz 级); PRF 是发射脉冲的节奏 (kHz 级)。
 - **深度关系**: 深度越深，回波回来得越慢，PRF 必须降低。
- **脉冲重复周期 (PRP)**: 两个相邻脉冲开始的时间间隔。 $PRP = 1/PRF$ 。
- **脉冲宽度 (PD, Pulse Duration)**: 一个脉冲持续的时间 (Transmit time)。
- **占空比 (Duty Factor, DF)**: 换能器工作的时间比例。

$$DF (\%) = \frac{PD (\text{脉冲宽度})}{PRP (\text{重复周期})} \times 100\%$$

(注：成像超声的 DF 极低，约 $0.1\% - 1\%$ ，大部分时间在接收；连续波 CW 的 DF 为 100%)

5.2 声束几何与发散 (Beam Geometry)

针对：填空题 1, 28, 39, 46, 50

声束不是直的，形状像一个沙漏。

- **近场 (Near Zone / Fresnel Zone)**: 从探头到焦点的区域。波束逐渐收窄。
- **焦点 (Focus)**: 波束最窄处。

$$\text{焦点处波束宽度} = \frac{1}{2} \times \text{换能器直径}$$

- **远场 (Far Zone / Fraunhofer Zone)**: 过了焦点后，波束开始发散。
- **重要几何规律 (必考)**:
 1. 在 **1 倍近场长度 (1 NZL)** 处：波束最窄 ($= 1/2$ 探头直径)。
 2. 在 **2 倍近场长度 (2 NZL)** 处：波束发散回 **原始探头直径**。
 3. 超过 2 NZL：波束宽度 $>$ 探头直径。

5.3 分辨率同义词速记 (LATA & LARRD)

针对：选择题 18, 填空题 28, 29

英文教材中习惯用首字母缩写来记忆同义词，考试中常互换使用。

横向分辨率 (Lateral Resolution)

记忆口诀：LATA

- **L**ateral (横向)
- **A**ngular (角度方向)
- **T**ransverse (横断方向)
- **A**zimuthal (方位角方向)

取决于：波束宽度 (*Beam Width*)。

轴向分辨率 (Axial Resolution)

记忆口诀：LARRD

- **L**ongitudinal (纵向)
- **A**xial (轴向)
- **R**ange (范围/距离)
- **R**adial (径向)
- **D**epth (深度)

取决于：空间脉冲长度 (*SPL*)。

解题技巧：选择题 18 问“哪个不是横向？”，选项有径向 (Radial)，根据 LARRD，Radial 属于轴向，所以选它。

5.4 强度、分贝与生物效应

针对：选择题 10, 32, 填空题 47

1. 强度的定义

$$\text{强度 (Intensity)} = \frac{\text{功率 (Power)}}{\text{面积 (Area)}} \quad (\text{W/cm}^2)$$

推论：如果波束面积减半（聚焦），功率不变，则强度翻倍。

2. 分贝 (dB) 的精确换算

- **功率/强度形式** ($10\log$): $10 \text{ dB} = 10 \text{ 倍}$, $3 \text{ dB} = 2 \text{ 倍}$ 。

- 幅度/电压形式 ($20 \log$):

$$\text{dB} = 20 \cdot \log \left(\frac{A_2}{A_1} \right)$$

- 必背: 幅度增大 2 倍 $\rightarrow 20 \cdot \log(2) \approx 20 \times 0.3 = 6 \text{ dB}$ 。

3. 生物效应 (Bioeffects)

- 热效应 (Thermal): 组织吸收声能生热。
- 空化效应 (Cavitation): 机械效应的一种。声波导致微气泡形成、震荡或破裂 (可能导致生物损伤)。

5.5 波动物理术语补充

针对: 填空题 49, 51

- 纵波的微观状态:
 - 压缩 (Compression): 质点密集, 高压区。
 - 稀疏 (Rarefaction): 质点稀疏, 低压区。
- 入射角术语:
 - 垂直入射 (Perpendicular / Normal Incidence / Orthogonal): 入射角为 0° (相对于法线), 波阵面与界面夹角 90° 。
 - 斜入射 (Oblique Incidence): 任何非 90° 的角度。

6 附录: 习题集易错点速查

- Q6 波长变化: 波长 $\lambda = c/f$ 。周期 ($T = 1/f$) 变则频率变, 波长变; 介质变则声速 c 变, 波长变。唯有幅度 (Amplitude) 变化不影响波长。选 D (但在原题 OCR 中似乎选项有误, 请确认题目逻辑, 通常振幅不影响波速和波长)。
- Q21 换能器转换: 发射时: 电 \rightarrow 声; 接收时: 声 \rightarrow 电。
- Q30 反射能量估算: $Z_1 = 1.6, Z_2 = 5.5$ 。

$$R = \left(\frac{5.5 - 1.6}{5.5 + 1.6} \right)^2 = \left(\frac{3.9}{7.1} \right)^2 \approx 0.55^2 \approx 0.30$$

选 B (30%)。

- Q54 频率与穿透: 频率越高, 分辨率越高 (好), 穿透深度越浅 (差)。

6.1 声速的决定因素 (Speed of Sound Rules)

针对：填空题 53, 选择题 22, 35

虽然我们记住了“骨骼 > 软组织 > 气”的排名，但为了应对填空题，需要知道其背后的物理公式：

$$c = \sqrt{\frac{K_{stiffness}}{\rho_{density}}}$$

- 两个决定因素：介质的 **硬度 (Stiffness)** 和 **密度 (Density)**。
- **硬度 (Stiffness/Bulk Modulus)**：介质抗压缩的能力。
 - 规律：硬度越高，声速越快。
 - 权重：硬度的影响 远大于密度的影响。
- **密度 (Density)**：单位体积的质量。
 - 规律：密度越高，声速越慢（因为惯性大，难推动）。
- **解释骨骼为什么快**：虽然骨骼密度大（本应慢），但它**极度坚硬**（非常快），硬度因素占主导，所以声速最快。

6.2 B-Mode 图像坐标系与切片厚度

针对：填空题 30

当我们看 B 超屏幕时，图像是二维的，但换能器探测的是三维空间：

屏幕显示对应关系

- **轴向平面 (Axial)** → 屏幕的 **垂直轴 (Y 轴)** (代表深度)。
- **横向平面 (Lateral)** → 屏幕的 **水平轴 (X 轴)** (代表侧向位置)。
- **高向平面 (Elevation)** → 对应切片的 **厚度 (Slice Thickness)**。

注：高向分辨率 (Elevation Resolution) 决定了图像是否会受到“切片厚度伪影”的影响（比如膀胱内出现假的回声）。

6.3 动态范围的比例计算

针对：填空题 40

题目逻辑分析：题目给出“动态范围 10000:1”，这是一个无单位的比值。已知最大信号 10V (电压)，求最小信号。

- **原则**：在超声习题中，如果给的是“电压 (Voltage)”或“幅度 (Amplitude)”，且比例是直接给出的（非 dB），通常指**电压比**。

- 计算:

$$\frac{V_{max}}{V_{min}} = 10000$$

$$V_{min} = \frac{10 \text{ V}}{10000} = 0.001 \text{ V} = 1 \text{ mV}$$

- 进阶理解 (如果考 dB): 如果问 10000:1 的电压比等于多少 dB?

$$\text{dB} = 20 \log(10000) = 20 \times 4 = 80 \text{ dB}$$

(注: 如果是功率比 10000:1, 则是 $10 \log(10000) = 40 \text{ dB}$)

6.4 几个易混淆的定义

- 频率 (Frequency): 单位时间内完成完整振动 (周期) 的次数。(对应填空 52)
- 占空比 (Duty Factor): 脉冲波所用的时间占整个脉冲重复周期 (PRP) 的百分比。(对应填空 8)
- 吸收 (Absorption): 声波能量转化为热量的过程。(对应填空 48)
- 垂直入射: = 零度角入射 (Incidence angle is 0° to the normal line)。(对应填空 49)