

SYE6014 Lab 零基础理解指南

公开学习版 · @lidong1793

这类实验在做什么：向板结构中发送振动波，比较健康状态和发生变化后的接收信号，再用程序估计引起变化的位置。

这份指南适合没有学过超声、信号处理或 MATLAB 的同学。先弄清实验的因果关系，再理解公式和代码。公开版保留概念与方法，省略真实实验参数、过程数值、定位结果、结果图和小组内部记录。

1. 先把整件事想成“给金属板做体检”

假设有一块板，某个位置出现了变化。我们希望知道位置，却不想把整块板拆开检查。

一种办法是在板上贴能发波、也能收波的小元件，让波在板中传播。如果波遇到损伤，传播的样子可能改变，一些波会被散射，接收器记录的信号也可能与健康状态不同。

程序要解决的是：**根据收到的信号和到达时刻，倒推变化可能发生在哪里。**

可以用“在屋里发出短响，再听回声”来理解。不过这里传播的是板中的弹性振动；接收器测量转换后的电信号，而非麦克风录到的空气声音。

- 硬件：激励、接收和采样，让波传播并记录数据。
- 算法：给每个候选位置计算一个分数。
- 验证：检查模型、干扰和独立证据，判断结果能说明什么。

我们寻找的是“导致波形变化的位置”，并没有直接拍出损伤的照片。

理解路线



2. PZT 是什么，激励器和接收器如何分工

PZT 是压电换能器，能在电信号和机械振动之间转换。给它电压，它能产生形变并带动结构振动；结构的振动传到它，它能产生可记录的电信号。

- **Actuator, 激励器：**在当前测量中负责发波。

- **Sensor, 接收器**: 在当前测量中负责收波。

同一个换能器可以在不同测量中承担不同角色。用 $A \rightarrow S$ 表示 A 发波、S 接收; $S \rightarrow A$ 则表示交换角色后再测一次。

传感器坐标、板的尺寸和扫描区域是计算所需的输入。坐标系和单位应保持一致, 具体布置应以实际实验资料为准。这里不公开真实布置或传感器坐标。

波的传播模型与实际损伤施加方式是不同问题。不能仅凭模型或一段问答稿, 推断现场使用了孔洞、贴附物或其他模拟损伤方式。

3. 电脑录到的是数字, 为什么它能帮助定位

接收器输出随时间变化的信号。采集设备反复记录数值, 把连续波形变成离散的采样点。手机录音也可以这样理解: 文件保存各个时刻的测量值, 画出来就是波形。

激励频率描述波振动得多快; **采样率**描述电脑记录数值有多密。它们既不同, 也都不等于波的传播速度。

理论上, 采样间隔是采样率的倒数; 一个振动周期中的采样点数约为采样率除以激励频率。这是一般关系, 不是本实验的参数。

数据表中, 行通常对应采样时刻, 列可能对应通道或不同类型的信号。读取数据前必须确认列映射、时间起点和单位, 不能凭列号猜测路径。

这些数字帮助程序判断: 哪个时间附近有明显振动, 振动有多强。若导出数据没有明确幅值单位, 就不能擅自将数值标成电压。

4. 为什么要同时有 baseline 和 damage

Baseline, 基线 $B(t)$: 健康状态的参照记录。

Damage, 变化后的记录 $D(t)$: 结构发生变化后, 在对应条件下得到的记录。

两种状态必须按相同激励频率、相同测量路径配对。不要把不同频率或不同路径的信号直接相减。

变化后的接收波形中不仅有损伤相关散射波, 还可能包含直达波、边界反射和噪声。因此程序先做减法:

$$\text{残差 } R(t) = D(t) - B(t)$$

这可以理解为两张背景相近的照片相减, 更容易看到发生变化的部分。但残差不自动等于“纯损伤信号”。采集噪声、时间偏差、幅值漂移或接触条件变化, 也可能留下差异。

$R(t)$ 表示两次记录的差异; 哪些差异来自损伤, 还要结合其他证据判断。 公开版不使用真实实验波形作示例。

5. DAS 怎样从时间倒推位置

先猜一个位置, 再检查记录是否支持这个猜测。 程序不知道损伤坐标, 会依次检查扫描区域中的候选点。

对候选点 P，它问：如果变化发生在这里，波从激励器 A 到 P，再从 P 到接收器 S，应该走多久？到了对应时刻，残差信号强不强？

$$\text{TOF}(P) = [\text{距离}(A,P) + \text{距离}(P,S)] \div \text{群速度}$$

$$\text{取样时刻} = \text{激励参考时刻 } t_a + \text{TOF}(P)$$

理解计算顺序即可：读取几何关系，算出两段距离及总路程，按模型中的群速度求传播时间，再加上激励参考时刻，最后读取该时刻的残差包络。

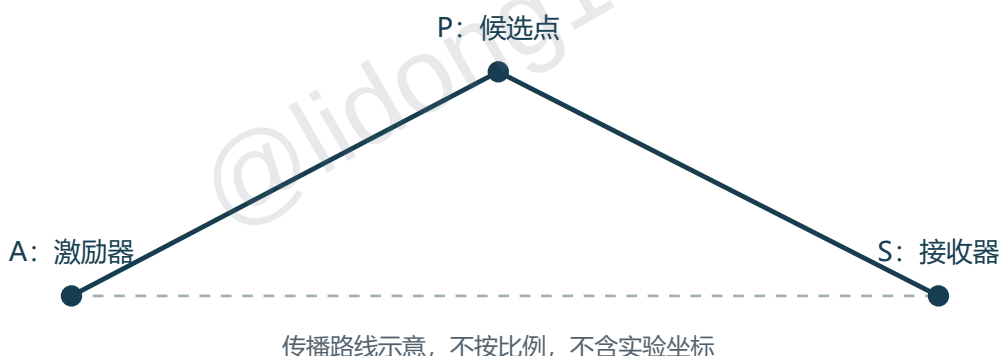
若这时包络较强，这条路径给 P 较高分；较弱，则给较低分。**不要把传播时间直接当成记录中的取样时刻，必须明确记录零点与激励参考时刻的关系。**

为什么使用群速度

薄板中的导波可能有不同模式，例如 S₀、A₀；速度还可能随频率、板厚等条件改变，这叫频散。

把波包想成一队向前走的人：要估计“整队什么时候到达”，对应群速度。相速度描述单个相位的推进，两者概念不同。

速度表及模式假设需要与实际参与成像的波包相符。若假设不合适，程序可能在错误时刻取值，位置估计也可能偏移。不能把一个固定速度无条件用于所有材料和频率。



6. 包络是什么，为什么不直接加原波形

残差会快速正负振荡，直接叠加带正负号的波形可能相互抵消。包络给振幅勾勒一个外轮廓，便于比较某个时刻的振动强弱，同时仍保留时间信息。

程序对各条有效路径取出候选时刻的包络值，再按约定方式合成：

P 点的成像强度

$$= \text{各路径在预测到达时刻的残差包络值之和} \div \text{路径数}$$

这个平均值是 P 点的分数。对所有候选点重复，就得到位置分数图。

DAS = Delay-and-Sum，延迟叠加。“延迟”确定每条路径该检查哪个时刻，“叠加”合成这些时刻的强度。代码不必真的把波形平移画出来，按预测下标读数也能完成计算。

使用包络函数时要核对其定义和默认行为。MATLAB 的 `envelope` 与直接使用 `abs(hilbert(x))` 在均值处理方面可能不同；存在直流偏置时，不能默认两种写法等价。参考文末官方说明。

7. 为什么一条路径画出条带，而不是一个点

对一条 $A \rightarrow S$ 路径，多个位置可能具有相同的“到 A 的距离 + 到 S 的距离”。在均匀速度模型下，这些位置形成椭圆，也具有相同的理论传播时间。

波包并非无限窄的单个时刻，相近时间内也可能有较强信号，所以理想椭圆往往表现为有宽度的亮带。多个有效、不同几何关系的路径共同约束，才更有机会缩小候选范围。

测量次数不等于独立几何约束的数量。 对交换角色的 $A \rightarrow S$ 和 $S \rightarrow A$ ，理想几何路程和相同，不能把它们自动视为完全独立的位置约束。

若模板排除了某条路径，应核查依据。没有证据时，不能自行解释为某个传感器损坏。

8. 颜色、峰值标记和阈值各代表什么

成像图中的坐标轴描述候选位置，颜色描述算法计算出的强度。峰值标记指向当前模型与当前数据下分数最高的位置。

常见归一化方式是将每张图除以自身最大值：

归一化强度 = 原成像强度 ÷ 本图最大成像强度

归一化使不同图都能显示明显的高值区，但也会丢失绝对强度的直接可比性。**两张图一样亮，不说明原始信号一样强，也不说明一样可靠。** 如果最大值为零，应单独处理，不能直接相除。

阈值只是决定保留哪些高值点的门槛。在归一化图上，它表示相对本图最高强度的筛选条件，并不是损伤概率或置信水平。

- 高值区不是损伤的真实外形或尺寸。
- 多个高值块不直接等于多个损伤。
- 网格步长是计算分辨间隔，不自动等于定位精度。
- 仅对计算后的图作阈值截断时，峰值保留可能只是操作性质，不能单独证明位置正确。

9. 如何理解多频率一致性与融合

这一节介绍一般分析思路，省略具体频率组合、筛选半径、阈值、峰值坐标及区域统计。下述方法不表示某次实验已得到可靠定位。

先分别成像，再比较位置一致性

用各频率对应的健康与变化记录分别运行 DAS，再比较位置估计是否集中。频率会影响波包、模态、频散、散射响应和干扰；结果不一致时，应检查原因。

筛选位置接近的候选频率，需要预先说明距离准则、中心定义和筛选方法。经验条件既不是已标定的误差界限，也不能自动证明所选频率准确。多个频率可能共同受到同一种干扰。

比较共同高值区域

对各张图按约定阈值筛选，再取交集，就只保留所有所选频率都满足条件的位置。条件越严格，留下的区域通常越小，但区域大小不是实测损伤面积。

若使用网格点数描述区域，应说明网格定义及统计方法。区域边界也不意味着边界内每个点都被保留。

融合整张图，再寻找峰值

融合图 = 所选归一化图之和 ÷ 所选图的数量

融合位置 = 融合图最大值所在位置

这是等权融合。**平均整张图后再找峰值，和直接平均峰值坐标是两种不同操作。**还应说明归一化、权重选择及弱信号的影响。

留一分析能说明什么

每次去掉一个频率，再观察剩余频率的融合结果，可以检查结果是否过度依赖某一个频率。这是敏感性或稳健性检查。

若所用频率来自同一套数据和模型，且此前已经按一致性筛选，留一分析就不是独立准确性验证。

10. 为什么不同频率的图可能不同

先考虑可能原因，不要急于把其中某个认定为已查明的事实：

- 频率改变，波长、散射响应和接收波包可能改变。
- 波速或模态假设不合适，可能导致取样时刻偏移。
- 残差可能包含反射、噪声、基线不一致或其他模态。
- 每张图独立归一化，可能放大弱信号的视觉显著性。

集中又明亮的区域只能说明程序在该处给了较高分。要进一步证明定位准确，需要独立的真实位置，或核查多条路径中的波包与模型预测是否相符。

没有独立依据时，不应将估计点当作真实位置，也不应报告未经验证的定位误差、准确率或真实损伤尺寸。

11. 把代码当成一条流水线来读

不用先掌握全部 MATLAB 语法，先认出每段的作用：

- fa、fs、threshold：配置激励频率、采样率和筛选门槛。
- baseline / damage：读取对应条件下的记录。
- baseline_scan_steps：说明数据列与测量路径的映射。
- pzt_coordinates / cgs：提供几何与群速度模型。
- sensor_residual：接收信号相减，提取变化。
- envelope：获得便于读取强度的包络。
- t_a、TOF、sample_index：确定候选点对应的取样时刻。
- P：累加并平均路径支持强度。
- P_th：归一化并筛选高值区域。
- 峰值与图像导出：输出算法估计和可视化结果。

单频程序不自动完成多频率筛选、融合和留一分析。方法写在汇报中，并不等于提交的程序已实现它；应核对实际代码。

运行前确认输入位置、列映射、依赖函数、单位、下标和越界处理。公开版不包含内部文件路径、数据包清单、运行环境记录或组内代码。

12. 需要时再查的术语

- **SHM, Structural Health Monitoring**：结构健康监测，利用测量判断结构状态。
- **PZT**：压电换能器，可承担激励或接收角色。
- **Guided wave, 导波**：受结构边界约束传播的波。
- **Lamb wave, 兰姆波**：板结构中的一类导波。
- **Residual, 残差**：两种状态记录相减后的差异。
- **Envelope, 包络**：描述振幅外轮廓的信号。
- **TOF, 飞行时间**：沿指定传播路线所需的时间。
- **Normalization, 归一化**：按约定尺度调整数值，便于比较或显示。
- **Threshold, 阈值**：决定哪些高值点被保留的门槛。
- **Fusion, 融合**：按约定权重合成多张图。
- **Ground truth, 真值**：独立获得、用来检查算法的实际位置或状态。

参考与适用范围

本指南据课程项目说明、DAS 算法讲义及结构健康监测课程内容整理，侧重解释方法。课程原始资料请通过有权限的课程渠道查阅。

包络函数参考：MathWorks 官方 envelope 说明，<https://www.mathworks.com/help/signal/ref/envelope.html>。

不同作业的数据与目标不能混用：导波飞行时间分析与二维位置成像是不同任务，输入记录、几何模型和验证标准也可能不同。

公开版不包含真实实验数据、数值结果、结果截图、小组身份、内部文件名或个人联系方式；公开署名仅为 @lidong1793。

@lidong1793