

# SYE 6014 线下实验课（Lab Session）准备手册

| 项目 | 内容                                                                                |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 课程 | SYE6014 Asset and Maintenance Management（2026/27 Semester A, Canvas course 72280） |
| 时间 | 2026-09-29（周二） 19:00 – 21:50                                                      |
| 地点 | YEUNG-P7303                                                                       |
| 授课 | 姓名已隐去                                                                             |

本手册 = 公告翻译 + 背景知识详解。

@lidong1793

# 第一部分 Lab 公告完整翻译

## 英文原文

Dear all,

We will have our SYE 6014 lab session next Tuesday from 7:00 PM to 9:50 PM. This lab session will be held in room YEUNG-P7303. Please join us, and at least one member from each team should come to collect the data. Please do bring your own laptop for some on-site testing of the algorithm.

Many thanks, Course instructor

## 中文完整翻译

各位同学：

我们将在**下周二晚上 7:00 至 9:50** 进行 SYE 6014 的实验课（lab session）。本次实验课将在 **YEUNG-P7303 室** 举行。请各位参加，并且**每个小组至少要有一名成员到场采集数据**。请务必**自带笔记本电脑**，以便现场对算法进行测试。

姓名已隐去

## 关键信息

| 项目 | 内容                                                |
|----|---------------------------------------------------|
| 时间 | 2026-09-29（周二）19:00–21:50，约 3 小时                  |
| 地点 | YEUNG-P7303（课程日历确认：本学期 <b>唯一</b> 一次 Lab Session）  |
| 人员 | 每组 <b>至少 1 人到场</b> ；建议负责数据/算法的同学务必出席              |
| 任务 | 现场 <b>采集数据</b> （collect the data）                 |
| 设备 | <b>自带笔记本电脑</b> （on-site testing of the algorithm） |
| 目的 | 现场跑（测试）delay-and-sum 损伤检测算法                       |

## 第二部分 背景知识详解

这一部分假设你没有任何超声/信号基础，从零开始讲。每一节先给一个生活比喻，再给严谨说法。

### 0. 整件事一句话在做什么？

给结构做一次“B 超 / 体检”。

想象一块金属板（比如机翼蒙皮、钢板、复合材料板）就是一个需要体检的“病人”：

- 1. 我们在板上贴几片“小喇叭 + 小耳朵”（压电片）；
- 2. 让“小喇叭”在板上敲出一阵**振动波**，波在板里跑；
- 3. 如果板里有裂缝、孔洞、脱粘等**损伤**，波撞到损伤会**散射/反弹**；
- 4. “小耳朵”录下这些波，我们比较“健康时的录音”和“现在的录音”的差别，反推出**损伤在哪里**。

这套“主动发波、收波、判断损伤”的系统，专业名称叫 **Active Sensing SHM（主动传感结构健康监测）**。

- SHM = Structural Health Monitoring，结构健康监测；
- Active Sensing = 主动传感，指**自己发出激励信号**，不是被动等损伤自己发声（后者叫 AE，声发射）。

Lecture 4 把整个系统拆成**硬件 + 软件**两块：

| 部分 | 要做的事                                          |
|----|-----------------------------------------------|
| 硬件 | 确定传感层（sensor layer）→ 安装传感器 → 接线 → <b>采集数据</b> |
| 软件 | 用 <b>delay-and-sum（DAS）算法</b> 识别结构中的损伤        |

明晚 lab 的核心，就是把这两块**亲手走一遍**：采集真实数据，再在笔记本上跑 DAS。

### 1. 什么是波？什么是超声波？

- **波**：振动在介质中的传播。你拍一下桌子，振动从手传到桌边——传的是**能量和信息**，不是桌子本身跑过去。
- **声波**：需要介质（空气、水、固体）才能传播；真空中听不到声音。
- **超声波**：频率高到人耳听不见的声波。人耳能听 **20 Hz – 20 kHz**，超过 20 kHz 就是超声。
- **波速（常识数值）**：空气约 **0.332 mm/μs**，水约 **1.47 mm/μs**（25℃）。

单位小知识：1 μs = 10<sup>-6</sup> 秒；1 mm/μs = 1000 m/s。课件里喜欢用 mm/μs，因为超声在固体里走几毫米只要几微秒，用它算起来数字好看。

思考题（课件原文）：铝和钢，哪个里面声速更快？—— 一般**钢更快**（更硬、更致密，弹性模量高）。

## 2. 在固体里，波有好几种：P 波、S 波、Lamb 波

为什么固体里更复杂？因为固体能抵抗"挤压"也能抵抗"剪切"，所以振动方向可以不同：

- 纵波（P 波，压缩波）：粒子振动方向和传播方向一致，像一队人前后推挤着传递。
- 横波（S 波，剪切波）：粒子振动方向和传播方向垂直，像抖动一根绳子。
- 液体和气体不能有效传横波（所以水里主要是纵波）。

薄板里的特殊产物——Lamb 波（兰姆波）：

当板很薄（厚度比波长小一个量级左右）时，P 波和 S 波会在板的上下表面之间反复反射、叠加，形成一种沿着板面传播的整体波，这就是 **Lamb 波**（属于"超声导波 guided waves"的一种）。它的粒子运动发生在"传播方向 + 板厚方向"组成的平面里。

比喻：把薄板想成鼓面。你在鼓面敲一下，出现的不是简单的"一下就过"，而是整个鼓面一起起舞的复杂振动花样——Lamb 波就是这种在板里"跳舞"的波。

Lamb 波有两种基本"花样"（模态 mode）：

| 模态    | 记号                | 直观印象                        |
|-------|-------------------|-----------------------------|
| 对称模态  | $S_0, S_1, \dots$ | 板上下表面振动 <b>对称</b> （像呼吸一伸一缩） |
| 反对称模态 | $A_0, A_1, \dots$ | 板上下表面振动 <b>反对称</b> （像挥手上下弯） |

（下标 0、1、2... 是第几条分支，一般低频下主要就是  $S_0$  和  $A_0$  两种。）

为什么要关心模态？因为  $S_0$  和  $A_0$  的传播速度不同、对损伤的敏感度也不同。接收信号里常常两种模态混在一起，需要靠频率、波形去区分。

怎么看得到 Lamb 波？课件提到可用**激光多普勒测振仪（LDV）**把波的传播可视化出来。

## 3. 为什么速度会变？——频散（Dispersion）

这是最容易困惑、但**最关键**的概念。

在空气中，声音速度几乎是常数。但在板里，Lamb 波的速度**取决于"频率 × 板厚"**（记作  $f \cdot d$ ）：

$$c = \text{速度} = \text{函数}(f \cdot d)$$

也就是说：

- 同一个板，**不同频率的波，跑的速度不一样**；
- 同一个频率，**板越厚，速度也变**；
- 一个真实的脉冲信号里含有很多频率成分，它们各跑各的速度，于是**波包会越跑越“散开”**、变宽。

这种现象叫**频散 (dispersion)**。

比喻：一束白光射进棱镜，不同颜色（频率）的光折射角度不同，于是散成彩虹。Lamb 波里的不同频率分量在板里速度不同，脉冲会“散开”——道理类似。

实际影响：频散会让“波峰到达时间”变模糊，如果用了错误的波速去算飞行时间（TOF），成像位置就会偏。课件练习题专门考了这一点。

这套速度关系由 **Rayleigh-Lamb 方程描述**（由板的上下表面“零应力”边界条件推出）。你不需要现在手解，只要知道：课程和软件里的**群速度曲线**就是从这个方程算出来 / 或实测拟合出来的。

## 4. 怎么在板上“发声”？——压电换能器（PZT）

要把电信号变成板的振动、再变回来，用的是**压电材料**（常见 PZT 陶瓷）。

**压电效应（正效应）**：对压电材料**施加压力/形变** → **表面产生电荷（电压）**。→ 用来做**传感器**（把振动变成电信号）。

**逆压电效应**：对压电材料**加电压** → **它发生形变（伸缩）**。→ 用来做**激励器/执行器**（把电信号变成振动）。

- 1880 年居里兄弟在**天然晶体**上发现压电效应；
- 后来发现**人工陶瓷**（如 PZT）压电性能更好；
- 第一个实际应用是**水下声纳**。

比喻：压电片就像一块“会唱歌又会听的薄片”。给它电压它会动（喇叭），让它动它会发电（麦克风）。

用压电片激发 Lamb 波，分 3 个阶段（Lecture 4）：

1. **Induced-strain actuation（诱导应变激励）**：电输入 → 压电激励器产生应变，带动板表面变形；
2. **Ultrasonic guided wave propagation（超声导波传播）**：胶层被剪切 → 应力波进入板基体传播；
3. **Strain sensing（应变传感）**：远处的压电传感器感受到机械应变 → 转回电输出。

**硬件接线要点（Lecture 4 明确列出的问题）**：确定传感层（sensor layer，如 Acellent 的 Smart Layer 薄膜）、怎么**安装传感器**（粘贴/嵌入）、怎么**接线**（连线到采集设备）、怎么**采集数据**。

## 5. 用什么信号去“敲”？——五音 burst（Five-Tone Burst）

我们不发送连续不断的正弦波，而是发送短促的一串：5 个周期的正弦脉冲，叫 **五音 burst (5-cycle tone burst)**。

为什么用 burst 而不是连续波？

- burst 的能量集中在一个很窄的频带里 → 便于控制用哪一段速度、便于区分模式；
- 短脉冲在时间上容易分辨到达时刻（便于测 TOF）；
- 减少连续波带来的驻波、干扰。

比喻：对着山谷喊一声短促的“喂——”比一直持续尖叫，回声更容易听清、也更容易判断回声什么时候回来。

**频率：**课件示例用 200 kHz 的激励与接收信号。频率越高，波长越短，对小损伤越敏感，但衰减也越快。

**采样率 (sampling frequency,  $f_s$ )：**采集设备每隔多久记录一个点。课件练习题指出：采样率从 10 MHz 降到 1 MHz，图像空间分辨率变差；不改硬件时可借助插值/上采样、匹配滤波等信号处理方法缓解。

6. 收到的是什么信号？（含三个成分）

接收信号大致是几部分的叠加：

| 成分                        | 说明                 | 用途       |
|---------------------------|--------------------|----------|
| 激励/直达波 Direct wave        | 从激励器直接跑到传感器的波，最快到达 | 作为时间基准   |
| 边界反射波 Boundary reflection | 撞到板边缘反弹回来的波        | 干扰，需识别   |
| 缺陷散射波 Scattered wave      | 撞到损伤后散射到传感器的波      | 损伤信息就在这里 |

常用时域特征：

- **TOF (Time of Flight, 飞行时间)：**波从激励器出发、经某点、到传感器所花的时间。DAS 就是靠 TOF 来反推位置。
- **峰峰值 (Peak-to-Peak Amplitude)：**波形的最高点到最低点的幅值，反映能量强弱。

**基线 (Baseline,  $B(t)$ )：**结构健康（无损伤）时录到的响应。它是后面做“差分”的参照。

**损伤信号 (Damage signal,  $D(t)$ )：**结构出现损伤后录到的响应。

7. 核心概念：相速度 vs 群速度（最容易搞混）

Lamb 波有两个“速度”，算 TOF 一定要用对：

| 名称                 | 符号                          | 含义                                | 比喻             |
|--------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------|
| 相速度 Phase velocity | $c_p = \omega/k = f\lambda$ | 单个频率成分的 <b>相位/波峰</b> 前进的速度        | 一个浪峰前进的快慢      |
| 群速度 Group velocity | $c_g = d\omega/d\xi$        | 一群频率成分组成的 <b>波包整体（能量/信息）</b> 前进速度 | 一整排浪（能量包）前进的快慢 |

其中： $\omega = 2\pi f$ （角频率）， $k = 2\pi/\lambda$ （波数）， $\xi$  为波数记号。

**记牢：DAS 定位用的是群速度  $c_g$** ，因为我们要测的是"波包什么时候到达"，那是能量到达的时间，对应群速度。

常见误区：用相速度去算 TOF → 定位会偏。现场老师给的、软件里用的都是**群速度曲线**。

## 8. 从"原始信号"到"损伤信息"：残差与包络

### 第一步：相减得残差（Residual signal）

$$R(t) = D(t) - B(t) \quad (\text{损伤信号} - \text{基线信号})$$

理想情况下，健康部分两边都有、相减就抵消了，剩下的主要是**损伤引起的散射波**。

比喻：先在身体健康时拍一张 X 光片（基线），生病后再拍一张（损伤），两张相减，剩下的阴影就是"变化/病灶"。

### 第二步：取包络（Envelope）

原始波是正负快速振荡的，不容易直接比较"大小"。用**希尔伯特变换（Hilbert transform）** 把它的"外轮廓线"画出来：

$$E(t) = | \text{Hilbert}\{ R(t) \} |$$

$E(t)$  是一条平滑的、只在有波到达时才鼓起来的曲线，**波到达的时刻就是它的峰**。

比喻：包络就像给一段震荡的声音画出它的"音量包络"，一眼能看出"什么时候变响了"。

## 9. Delay-and-Sum（DAS）成像算法（现场要在笔记本上跑的核心）

### 9.1 基本思想

对板上**每一个可能的点 P**，我们都问一句："如果损伤就在 P，那么波应该走多少时间到达每个传感器？"然后把实际信号在对应时刻的强度**加起来 (sum)**：

- 如果 P 真的是损伤点 → 每个通道的信号**恰好都在该时刻出现波峰** → 叠加结果很高（亮）；
- 如果 P 不是损伤点 → 各通道的时刻对不上 → 叠加结果很低（暗）。

把整块板扫描一遍，得到一张"亮点图"，最亮处就是损伤位置。这就是 **delay-and-sum** ("按延迟对齐后再叠加")。

## 9.2 五个步骤

**第 1 步：准备群速度曲线  $c_g(\theta)$**  用 Rayleigh-Lamb 方程数值计算，或对实测做拟合得到"速度随角度/频率"的曲线。

**第 2 步：对任意像素点  $P(x_p, y_p)$  计算飞行时间 TOF**

设激励器 A 坐标  $(x_a, y_a)$ ，传感器 S 坐标  $(x_s, y_s)$ ：

$$t_p(x_p, y_p) = \sqrt{((x_p - x_a)^2 + (y_p - y_a)^2) / c_g(\theta_{a_p})} + \sqrt{((x_p - x_s)^2 + (y_p - y_s)^2) / c_g(\theta_{p_s})}$$

即：**A→P 的时间 + P→S 的时间**（因为波是"激励器 → 损伤 P → 传感器"这条折线路径）。

**第 3 步：求残差并取包络**  $R(t) = D(t) - B(t)$ ， $E(t) = |\text{Hilbert}\{R(t)\}|$ （见第 8 节）。

**第 4 步：多路径概率叠加**（共 N 条"激励器-传感器"路径）

$$P(x_p, y_p) = (1 / N) \cdot \sum_{i=1..N} E_i(t_p(x_p, y_p))$$

也就是把每条路径在"该点应到达时刻"的包络值取出来，求平均。

**第 5 步：阈值化成像** 把概率图做阈值处理，最亮的点/区域就是**最可能的损伤位置**。

## 9.3 为什么至少需要 3 条路径？

单独看一条"激励器-传感器"路径，满足"同一条时间"的所有可能点 P，构成一个**以激励器和传感器为两个焦点的椭圆**（因为椭圆定义就是"到两定点距离之和为常数"）。整条椭圆上的点，TOF 都一样、概率都一样 → 只能确定"损伤在这条椭圆上"，**无法定位到点**。

当**多条路径的椭圆相交**时，交集才收缩成一个点。理论上**至少 3 条路径**的椭圆相交，才能唯一确定损伤位置。

比喻：只有一条"距离和固定"的线索 → 得到一圈椭圆；再加入另一条独立的线索 → 两点；再加一条 → 锁定一点。

## 9.4 什么会影响成像结果

- **群速度取值**：取 5102 m/s 还是 5488 m/s，成像位置/形状会不同；
- **频散**：真实波速变慢 → 散射波峰值到达时刻偏离理论值 → 损伤强度  $I(P)$  被低估/位置偏移；

- **采样率**：太低会降低空间分辨率 ( $10\text{ MHz} \rightarrow 1\text{ MHz}$ )，可用插值/匹配滤波缓解。

@lidong1793

10. 术语中英对照速查表

| 中文        | 英文                                            | 一句话理解                     |
|-----------|-----------------------------------------------|---------------------------|
| 结构健康监测    | SHM (Structural Health Monitoring)            | 给结构做长期"体检"                |
| 主动传感      | Active Sensing                                | 自己发波、自己收波                 |
| 声发射       | AE (Acoustic Emission)                        | 被动听损伤自己发出的声               |
| 超声导波      | Ultrasonic guided wave                        | 在板/管里长距离传播的超声             |
| 兰姆波       | Lamb wave                                     | 薄板里的一种导波                  |
| 对称/反对称模态  | Symmetric / Anti-symmetric mode ( $S_0/A_0$ ) | 两种振动花样                    |
| 频散        | Dispersion                                    | 不同频率速度不同，波包散开             |
| 相速度 / 群速度 | Phase / Group velocity                        | 波峰速度 / 波包整体速度（算 TOF 用群速度） |
| 压电效应      | Piezoelectric effect                          | 受力生电；逆之加电生形变              |
| 压电换能器     | Piezoelectric transducer (PZT)                | 既当喇叭又当麦克风的薄片              |
| 五音脉冲      | Five-tone burst                               | 5 个周期的短脉冲激励               |
| 飞行时间      | TOF (Time of Flight)                          | 波走一趟花的时间                  |
| 峰峰值       | Peak-to-Peak amplitude                        | 波形上下摆幅                    |
| 损伤散射波     | Scattered wave                                | 撞到损伤后偏折的波                 |
| 基线 / 损伤信号 | Baseline / Damage signal (B/D)                | 健康时 / 损伤后录的信号             |
| 残差信号      | Residual signal $R=D-B$                       | 两者相减，剩下损伤信息               |
| 希尔伯特变换    | Hilbert transform                             | 求信号包络的数学工具                |
| 包络        | Envelope $E(t)$                               | 信号的"外轮廓线"                 |
| 延迟叠加      | Delay-and-Sum (DAS)                           | 定位损伤的成像算法                 |

11. 公式速查（考试/现场常用）

相速度：  $c_p = \omega / k = f \cdot \lambda$       ( $\omega = 2\pi f$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ )

群速度：  $c_g = d\omega / d\xi$

残差：  $R(t) = D(t) - B(t)$

包络：  $E(t) = | \text{Hilbert}\{ R(t) \} |$

TOF：  $t_p = (A \rightarrow P \text{ 距离}) / c_g + (P \rightarrow S \text{ 距离}) / c_g$

概率叠加:  $P(x_p, y_p) = (1/N) \sum_i E_i(t_p)$

## 12. 常见误区提醒

1. 用相速度算 TOF → 错, 要用**群速度**。
2. 忘了**减基线** → 残差里全是直达波和反射波, 看不出损伤。
3. 只有 1-2 条路径就想**定位** → 只能得到椭圆/区域, **至少 3 条**。
4. 忽略**频散** → 同一"到达时刻"对应不同速度, 成像会糊。
5. **坐标/几何搞错** (激励器、传感器位置记错) → 椭圆完全画偏。
6. **采样率太低** → 分辨率差; 现场注意采集设备的  $f_s$ 。

@lidong1793

# 附录 参考来源

| 内容                        | 文件 / 位置                                                                          |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Lab 时间地点要求                | Canvas 公告 "SYE 6014 Lab Session next Tuesday" (2026-09-23 发布)                    |
| 课程日历 (唯一 Lab = 9/29, 橙圈)  | 01_Lectures/SYE6014 Lecture 1 2627A.pdf 第 2 页                                    |
| 课程结构 / 评分 / 教室            | 同上, 第 3-5 页 (Lecture 地点 YEUNG P4701)                                             |
| 主动 SHM 系统硬件 + 软件          | 01_Lectures/SYE6014 Lecture 4 Canvas.pptx ("Build an Active Sensing SHM System") |
| 压电效应与 PZT                 | 01_Lectures/SYE6014 Lecture 3 Canvas.pdf                                         |
| Lamb 波 / 群速度 / TOF / 信号特征 | 01_Lectures/SYE6014 Lecture 4 Canvas.pptx                                        |
| DAS 算法与成像流程               | 01_Lectures/Delay and Sum Algorithm.pdf                                          |
| 实验室安全前置培训                 | Canvas 组织课 "Safety Training for Students (SYE)" (41899)                          |

注：课件只给出上课教室 **YEUNG P4701**；Lab 房间 **YEUNG-P7303** 仅见公告。