

SYE 6014 — Asset and Maintenance Management

Homework #1

Due: Sep. 16, 2026 by 5 PM (Please upload your solution to Canvas. Late submissions will not be graded.)

Question 1 (70 Points)

Determine the location of the AE source (crack) in a metal plate for the following inputs:

Sensor	Sensor 1 (x_1, y_1) (m, m)	Sensor 2 (x_2, y_2) (m, m)	Sensor 3 (x_3, y_3) (m, m)	V (m/s)	t_1 (ms)	t_2 (ms)	t_3 (ms)
Value	(0.1, 0.1)	(2, 2)	(0.1, 3)	4500	0.42061	0.26440	0.47365

Question 2 (30 Points)

Please compare the Ultrasonic technique with the Eddy current technique on detecting a fatigue crack on a rivet hole at a maintenance depot in a typical commercial aircraft for:

- **(a)** physical working principle and procedure
- **(b)** accuracy
- **(c)** time to perform

解题笔记·零基础详细版

方框里是旁注，专门讲“为什么这么做”。正文只保留必要的计算步骤。

题目一（70 分）声发射源（裂纹）定位

0. 先搞懂：这道题到底在做什么

背景 金属板里有一条裂纹。裂纹在受力时会突然“裂开一点点”，把储存的能量以**弹性波**（可以在固体里传播的振动）的形式释放出来——这个现象就叫**声发射（Acoustic Emission, AE）**。我们在板上贴**3 个传感器（像 3 只耳朵）**，它们各自记录“波什么时候到达我这里”。

目标 根据这 3 个到达时间，反推裂纹的坐标 (x, y) 。

生活类比 打雷时，三个不同位置的朋友分别告诉你“我几点听到雷声”。听到的先后（时间差）不同，就能推算出雷的大致位置。这就是 AE 定位的几何思想，也叫**三角测量 / 双曲线定位**。

这类方法的性质：AE 是“被动”检测——传感器只是“听”，不主动发射任何东西（对比：超声 UT 是主动“发一声再听回声”）。

1. 把“到达时间”翻译成“距离”

已知： $V = 4500 \text{ m/s}$ ； $S1 (0.1, 0.1)$ 、 $S2 (2, 2)$ 、 $S3 (0.1, 3)$ ； $t_1 = 0.42061 \text{ ms}$ ， $t_2 = 0.26440 \text{ ms}$ ， $t_3 = 0.47365 \text{ ms}$ 。

波在板里以恒定速度 V 传播。设裂纹在 (x, y) 。传感器记录的到达时间是 t_i ，但**真实的传播时间 T_i** 比它多一个共同的未知偏移 τ ：

$$T_i = t_i + \tau \Rightarrow d_i = V \cdot T_i = V \cdot t_i + k, \text{ 其中 } k = V\tau$$

再套两点距离公式：

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 = d_i^2$$

为什么会有偏移 τ ？ 传感器不能提前知道裂纹“什么时候裂”。实际做法是设一个**电压门槛**：信号一旦超过门槛就开始记录，并且多存一小段“触发前”的数据。所以各通道记录的“绝对时刻”没有一个统一零点，差了一个未知常数。课件里把它写成 $T_i = t_i + \text{const}$ （Lecture 1 · AE 练习 p.31–32）。

为什么只有一个 τ ，不是三个？ 因为三个传感器用**同一套采集系统、同一个触发门槛**，这个常数对所有通道相同。

为什么要引入 $k = V\tau$ ？ V 和 τ 都是常数，乘积也是常数。用一个字母 k 代表它，式子更短。 k 的单位是米，物理意义是“距离补偿量”。

单位别搞错 t 给的是**毫秒(ms)**，要先换成**秒(s)**再乘 $V(\text{m/s})$ 。例： $0.42061 \text{ ms} = 0.42061 \times 10^{-3} \text{ s}$ ，乘 4500 得 1.892745 m。

速度 V 怎么来的？ 课件里是实验标定：把传感器“一发一收”，用 $V = D / \Delta t$ （两传感器距离 ÷ 声波走过的时间差）测出来。本题直接给定。

未知量清点 x 、 y 、 k 一共 3 个 → 至少需要 3 个传感器、3 个方程。这就是为什么用 3 个传感器。

2. 先算出 $V \cdot t_i$

i	传感器 (x_i, y_i), m	t_i , ms	$V \cdot t_i$, m
1	(0.1, 0.1)	0.42061	1.892745
2	(2, 2)	0.26440	1.189800
3	(0.1, 3)	0.47365	2.131425

为什么先算这个？ 因为 $d_i = V \cdot t_i + k$ 只差一个未知的 k 。把已知的 $V \cdot t_i$ 先算出来，问题就变成“3 个已知距离基准 + 同一个未知 k ”，后面会轻松很多。

3. 列出三个方程

$$(x - 0.1)^2 + (y - 0.1)^2 = (1.892745 + k)^2 \quad (1)$$

$$(x - 2)^2 + (y - 2)^2 = (1.189800 + k)^2 \quad (2)$$

$$(x - 0.1)^2 + (y - 3)^2 = (2.131425 + k)^2 \quad (3)$$

每个方程的含义 都是同一句话：“裂纹到第 i 个传感器的距离 = 波实际走过的距离”。左边是**几何距离的平方**（ (x, y) 到 (x_i, y_i) ），右边是**波走的距离的平方**（ $V \cdot t_i + k$ ）。

注意两边都要平方 左边本来就是平方的形式；右边 d_i 也要平方，得到 $(V \cdot t_i + k)^2$ 。

三个传感器摆成一个三角形（S1 在左下、S3 在左上、S2 在右边），这正是三角定位需要的最小配置。

4. 两两相减，消去未知的 k

以 (1) 为基准，分别减去 (2) 和 (3)：

(1) - (2)：

$$3.8x + 3.8y - 7.98 = d_1^2 - d_2^2$$

(1) - (3)：

$$5.8y - 8.99 = d_1^2 - d_3^2$$

为什么相减？ 三个方程里都含同一个 k ，把两个方程相减， k 就消失了，同时还消掉了共同的 τ 。这是 AE 定位最关键的一步。

手把手展开 ((1)-(2)) 先把括号展开：

- $(x - 0.1)^2 = x^2 - 0.2x + 0.01$

- $(y - 0.1)^2 = y^2 - 0.2y + 0.01$
- $(x - 2)^2 = x^2 - 4x + 4$
- $(y - 2)^2 = y^2 - 4y + 4$

相减时，两边的 x^2 、 y^2 互相抵消，剩下：

$$(-0.2x + 0.01 - 0.2y + 0.01) - (-4x + 4 - 4y + 4) = (-0.2x + 4x) + (-0.2y + 4y) + (0.02 - 8) = 3.8x + 3.8y - 7.98$$

更省事的一步 ((1)-(3)) 传感器 1 和 3 的 **x 坐标完全相同** (都是 0.1)，所以两式里含 x 的部分一模一样，相减后整体消失，只剩 y：

$$(-0.2y + 0.01) - (-6y + 9) = 5.8y - 8.99$$

小技巧：做题前先看 3 个传感器的坐标有没有“对齐”（同 x 或同 y），能省掉大量计算。

易错点 右边是 $d_1^2 - d_2^2$ (平方之差)，不是 $d_1 - d_2$ ！因为左边是距离的平方。

5. 解出 k

为什么右边是“k 的一次式”？展开看一下：

$$d_1^2 - d_3^2 = (V t_1 + k)^2 - (V t_3 + k)^2 = (V t_1)^2 + 2V t_1 k + k^2 - [(V t_3)^2 + 2V t_3 k + k^2] = (V t_1)^2 - (V t_3)^2 + 2k \cdot V(t_1 - t_3)$$

k^2 前后抵消，只剩含 k 的一次项。所以步骤 4 里的右边全都是 k 的一次式 → 推出的 y、x+y 也都是 k 的一次式。

怎么解？ 把 y 和 x+y 这两个“一次式”代回任意一个原始方程（这里用 (1)），就得到只含 k 的一元二次方程，解出两个根，取物理上合理的那个：

$$k = -0.18980 \text{ m} \quad (\tau = k / V = -0.04218 \text{ ms})$$

另一个根为什么舍去？ 另一根 $k = -3.518 \text{ m}$ 会让某些 d_i 变成负数，而距离不可能为负，故舍去。判据永远是：所有 $d_i \geq 0$ 。

k 是负数正常吗？ 正常。 $k = V\tau$ 只是距离补偿量， τ 可正可负。

另一种理解（双曲线视角） 其实我们只用到两个“距离差” $\{d_1 - d_2, d_1 - d_3\}$ 。每一对传感器确定一条双曲线，两条双曲线的交点就是裂纹——这是 AE 定位的标准几何解释，感兴趣可以搜“hyperbolic positioning”。

6. 回代求出坐标

$$d_1 = 1.702945 \text{ m}, \quad d_2 = 1.000000 \text{ m}, \quad d_3 = 1.941625 \text{ m}$$

$$y = (d_1^2 - d_3^2 + 8.99) / 5.8 = 1.400 \text{ m}$$

$$x + y = (d_1^2 - d_2^2 + 7.98) / 3.8 = 2.600 \text{ m} \Rightarrow x = 1.200 \text{ m}$$

答案： $(x, y) = (1.200, 1.400) \text{ m}$

这两条公式怎么来的？ 就是把步骤 4 的两个式子移项整理：把含 $x+y$ （或 y ）的项单独放一边，其余移到等号右边。

结果合理吗？ 裂纹离 S2 最近 ($d_2 = 1.000$ m)，而传感器 2 的到达时间 $t_2 = 0.26440$ ms 也确实是最小——谁先听到，谁就离得近。这个“常识检查”能立刻验证答案方向对不对。

验算（写在思路里，供自查；不作为解答过程）

- **代回原方程：**把 $(x, y) = (1.200, 1.400)$ 分别代回三个距离方程核对：
- 到 S1: $\sqrt{1.1^2 + 1.3^2} = 1.703$ m, 与 $d_1 = 1.703$ m 相符 ✓
- 到 S2: $\sqrt{0.8^2 + 0.6^2} = 1.000$ m, 与 $d_2 = 1.000$ m 相符 ✓
- 到 S3: $\sqrt{1.1^2 + 1.6^2} = 1.942$ m, 与 $d_3 = 1.942$ m 相符 ✓
- **时间差核对：** $d_1 - d_2 = V(t_1 - t_2) = 0.703$ m; $d_2 - d_3 = V(t_2 - t_3) = -0.942$ m ✓
- **为什么用“时间差”验算最好？** 整个定位只依赖时间差，而时间差与偏移 τ 无关（自带基准）。只要由 (x, y) 反推的各距离之差能对上 $V \times$ 时间差，答案就稳。
- **常识检查：**裂纹离 S2 最近 (d_2 最小)，且 t_2 也是三者中最小——谁先听到谁就近，方向合理。

题目二 (30 分) UT 与 ECT 检测铆钉孔疲劳裂纹对比

题干 (原文) Please compare the Ultrasonic technique with the Eddy current technique on detecting a fatigue crack on a rivet hole at a maintenance depot in a typical commercial aircraft for: (a) physical working principle and procedure; (b) accuracy; (c) time to perform.

题干 (中文翻译) 请就"在典型商用飞机的维修基地检测铆钉孔疲劳裂纹"这一场景, 对比超声法 (UT) 与涡流法 (ECT) 在以下三个方面: (a) 物理工作原理与操作流程; (b) 精度; (c) 检测耗时。

先认识两种方法 (零基础版)

无损检测 (NDT) 是什么? 不破坏零件、就能发现里面缺陷 (裂纹、腐蚀、脱粘等) 的一类检测手段。飞机上大量零件不能拆坏, 所以 NDT 是航空维修的命脉。课件 Lecture 1 列出了航空常用的 9 种 NDT 方法。

超声法 UT (Ultrasonic Testing) —— "像蝙蝠一样发一声听回声" 探头 (压电换能器) 往构件里发射高频声波, 声波遇到缺陷或界面会反射回来。通过回波什么时候回来 (飞行时间) 和多强 (幅值) 来判断缺陷的位置和大小。- 优点: 穿透深, 能查内部/次表面缺陷, 还能测厚度。

涡流法 ECT (Eddy Current Testing) —— "像金属探测器一样" 一个通着交流电的线圈靠近金属, 会通过电磁感应金属表层感应出涡流。如果金属里有裂纹, 涡流被"挡住"、路径改变, 线圈的阻抗就变了, 仪器读出这个变化就知道有缺陷。- 优点: 对小裂纹灵敏, 只能查导电材料的表面/近表面, 不用接触材料、速度快。

为什么这题是"铆钉孔疲劳裂纹"? 飞机蒙皮靠成千上万个铆钉连接。铆钉孔边是应力集中的地方, 容易萌生疲劳裂纹, 而且裂纹从孔壁表面开始 —— 这正好是"表面/近表面 + 铝 (导电)", 命中 ECT 最擅长的区间。

PPT 原文 (答题依据, Lecture 1 p.16-17)

p.16 Non-Destructive Testing (NDT) techniques are crucial in the aerospace industry for ensuring the integrity and safety of components and structures without causing damage. ... 1. Ultrasonic Testing (UT) 2. Radiographic Testing (RT) 3. Eddy Current Testing (ECT) 4. Magnetic Particle Testing (MT) 5. Liquid Penetrant Testing (PT) 6. Thermographic Testing (TT) 7. Acoustic Emission Testing (AET) 8. Shearography 9. Structural Health Monitoring (SHM)... *Each method has its specific applications, advantages, and limitations, making it important to choose the appropriate technique based on the material, defect type, and inspection requirements.*

p.17 Eddy Current Testing (ECT) • Description: Employs **electromagnetic induction** to detect **surface and near-surface defects in conductive materials**. • **Applications:** Inspecting aircraft skins, detecting cracks and corrosion in metal structures, and evaluating heat treatment conditions. • **Advantages:** Sensitive to small cracks and defects, rapid inspection, and no need for contact with the material.

p.17 Ultrasonic Testing (UT) • Description: Uses **high-frequency sound waves** to detect **internal flaws** or characterize materials. • **Applications:** Inspecting composite materials, detecting delaminations, voids, and cracks in metal structures, and evaluating bond integrity in bonded

joints. • **Advantages: High penetration depth, accurate detection of subsurface defects, and capability to measure material thickness.**

三问怎么对应 PPT 字段（照抄对应关键词即可）

- (a) 原理 → 各方法的 **Description**；流程 → **Applications + Advantages**（ECT 的 "no need for contact" 决定它可插孔扫查、无需耦合剂）。
- (b) 精度 → **Advantages**：ECT "sensitive to small cracks and defects"；UT "accurate detection of subsurface defects"。
- (c) 耗时 → **Advantages**：ECT "rapid inspection"；UT 未给速度，据其"穿透深/测厚度"的特点可知逐点扫查相对慢。

Solution — Question 2 (English, quoting the PPT wording)

(a) Physical working principle and procedure

	Ultrasonic Testing (UT)	Eddy Current Testing (ECT)
Working principle	"Uses high-frequency sound waves to detect internal flaws or characterize materials."	"Employs electromagnetic induction to detect surface and near-surface defects in conductive materials."
Procedure at a rivet hole	The probe is coupled to the skin (couplant required) and the beam is scanned around the rivet; echoes from the crack are analysed (PPT: "detecting ... cracks in metal structures").	A bolt-hole / rotating eddy-current probe is inserted into the rivet hole and scanned; there is "no need for contact with the material", and no couplant is required.

(a) 对照翻译

English (PPT wording)	中文对照
"Uses high-frequency sound waves to detect internal flaws or characterize materials."	利用 高频声波 检测内部缺陷，或对材料进行表征。
"Employs electromagnetic induction to detect surface and near-surface defects in conductive materials."	利用 电磁感应 检测 导电材料 中的 表面与近表面缺陷 。
The probe is coupled to the skin and the beam is scanned around the rivet; echoes from the crack are analysed.	探头需与蒙皮耦合，声束绕铆钉扫查，分析裂纹回波。
A bolt-hole probe is inserted into the rivet hole and scanned; "no need for contact with the material".	螺栓孔 探头插入孔内扫查； 无需与材料接触 。

(b) Accuracy

- **ECT** — "Sensitive to small cracks and defects"; the method targets "surface and near-surface defects in conductive materials". A rivet-hole fatigue crack initiates at the **bore surface of the aluminium**

skin, which is exactly this case (PPT Application: "*Inspecting aircraft skins, detecting cracks and corrosion in metal structures*"), so ECT gives the higher sensitivity and repeatability.

- **UT** — "*High penetration depth, accurate detection of subsurface defects, and capability to measure material thickness.*" It is better suited to internal / volumetric defects and composite laminates; for a small **surface** crack at a hole edge its sensitivity is lower.

(b) 对照翻译

English (PPT wording)	中文对照
"Sensitive to small cracks and defects" ... "surface and near-surface defects in conductive materials" ... " <i>Inspecting aircraft skins, detecting cracks and corrosion in metal structures.</i> "	对小裂纹和缺陷灵敏.....适用于导电材料的表面/近表面缺陷.....应用：检查飞机蒙皮、检测金属结构中的裂纹与腐蚀。（铆钉孔裂纹起于蒙皮孔壁表面，正属此列，故 ECT 更灵敏、重复性更好。）
"High penetration depth, accurate detection of subsurface defects, and capability to measure material thickness."	穿透深度大、能准确检测次表面缺陷，并可测量材料厚度。（更适合内部/体积型缺陷与复合材料；对孔边浅小裂纹灵敏度较低。）

(c) Time to perform

- **ECT** — "*rapid inspection*": each hole is scanned in seconds, so a full rivet row is fast, which suits **depot-level** scheduled inspection.
- **UT** — the PPT gives no speed statement; because a couplant and point-by-point scanning are needed, inspection is **slower** and more operator-dependent.

(c) 对照翻译

English (PPT wording)	中文对照
" <i>rapid inspection</i> "	快速检测：每孔数秒完成，整排铆钉很快，适合维修基地例行检查。
The PPT gives no speed statement; a couplant and point-by-point scanning make it slower.	PPT 未给速度；因需耦合剂与逐点扫查，较慢、更依赖操作者经验。

Conclusion. Following the PPT selection rule — "*choose the appropriate technique based on the material, defect type, and inspection requirements*" — a **surface / near-surface fatigue crack at a rivet hole in conductive aluminium** is best detected by **ECT (sensitive and rapid)**; **UT** is preferred for **subsurface / volumetric defects and composite structures**.

（结论）对照翻译 依照 PPT 的选型原则——“依据材料、缺陷类型和检测要求选择合适的检测方法”——对导电铝材铆钉孔的表面/近表面疲劳裂纹，最佳选择是 **ECT（灵敏且快速）**；**UT** 更适合次表面/体积型缺陷与复合材料。

答题思路 题目三问（原理/流程、精度、耗时）正好对应课件描述每种方法的三个维度。答题时尽量引用课件原文关键词，容易拿分。

课件原文依据（Lecture 1 · NDT Techniques in Aerospace Applications p.16–17）

- **UT**: "uses high-frequency sound waves to detect internal flaws"; 优点 "high penetration depth, accurate detection of subsurface defects, capability to measure thickness".
- **ECT**: "employs electromagnetic induction to detect surface and near-surface defects in conductive materials"; 应用 "Inspecting aircraft skins"; 优点 "sensitive to small cracks and defects, rapid inspection, no need for contact".
- 第 16 页的选型原则: 按材料、缺陷类型、检测要求来选方法。

一句话记忆 孔壁表层裂纹 + 铝 (导电) → **ECT**; 内部/深层 + 复合材料 → **UT**。

本课知识点小抄 (自用)

- **AE 声发射**: 被动"听"缺陷释放的弹性波; 真实到时 $T_i = t_i + \text{const}$; 距离 $d = V \cdot T$; 速度标定 $V = D/\Delta t$; 定位靠时间差 (消掉未知偏移), 几何上是双曲线交点。
- **三传感器定位**: 未知量 x 、 y 、 τ 共 3 个, 需 3 个传感器。消元技巧: 两两相减消 k , 利用坐标对齐可再简化。
- **UT vs ECT**: UT 主动声波、查内部/次表面、需耦合剂、较慢; ECT 电磁感应、查导电材料表面/近表面、非接触、快、对小裂纹灵敏。
- **NDT 与 SHM 的区别** (Lecture 1 p.18): 传统 NDT 靠人工、离机、通用; SHM 是内建传感网络 + 自动化 + 连续监测、依赖具体结构。