DF 创客社区 • “做中学 • 探未来”科学教育实践案例征集

震感捕手

用一块行空板 K10，把“看不见的震动”变成可读的数据

模拟地震波传播 · 振动方向识别 · 建筑共振 · 盲测定位



作品方向	地球奥秘（模拟地震波探测）
适用学段	初中 7–9 年级
核心硬件	行空板 K10（DFR0992-EN）
编程环境	Arduino IDE / PlatformIO（C++）；分析端 Python 3
建议课时	3 课时（原理 1 + 实验 1 + 分析发布 1）
材料成本	约 380 元/套（含 K10 与 TF 卡）

作者 / 学校：_____ 指导教师：_____

版本：v1.0 | 2026 年 11 月

一页看懂这个案例

一个钢球、一根纸筒、一块行空板 K10，加上两张拼起来的课桌，就能在教室里做出一次“可重复的地震”：落球在桌子一端制造震动，K10 在另一端把三轴加速度记成 200 Hz 的波形。学生改变距离、改变敲击方向、改变建筑模型，用一组组数据拟合出“振幅—距离”曲线，再用它盲测出未知震源的位置。

50 组	0.71	7.9%	约 380 元
有效数据	衰减指数 n	盲测平均误差	整套材料成本

> 文档状态与替换说明（重要）
>
> 本文档的方法、代码、图表与排版已经完成，但第 3 章的实验数据目前是**物理模型仿真的示例数据**，用于验证“采集—分析—成图—成文”的完整流程。
>
> 投稿前请完成三件事：① 用 K10 实测的 CSV 替换 03_数据/实测/ 下的文件，运行 analyze.py 与 build_doc.py，全文数字与图会自动更新；② 补入 2–3 张实物照片与 1 段演示视频（第 2 章已给出拍摄清单）；③ 在封面填写作者、学校与指导教师。
>
> 文中所有标注“示例”的图表，都应在实测后重新生成。

为什么值得做。 地震是初中科学“地球系统”中最难“动手”的内容：它尺度大、不可控、有安全风险。本项目没有停留在看视频、做手抄报，而是把地震的关键特征——**波在介质中传播、振幅随距离衰减、不同结构对振动的响应不同**——搬到一张桌子上，让学生用几十元材料、一块开源硬件，完整走一遍“提出问题—作出假设—设计实验—采集证据—建模预测—验证反思”的科学探究过程。

与其他作品的差别。 多数振动类作品止步于“震动报警器”。本项目多做了一步：把测到的振幅变成一条可外推的定量模型，并用**盲测**检验模型——预测三个未知距离，再用卷尺量真值。学生第一次体会到：科学结论不是“看起来对”，而是“能被下一次测量检验”。

本文怎么读。

- **第一章 项目介绍**：三个真实问题、四条科学原理，以及“为什么测振幅而不是走时”的取舍。
- **第二章 运行演示**：三步操作、屏幕界面、30 秒视频分镜脚本。
- **第三章 探究过程与结果**：三组定量实验 + 一次盲测，含数据表、拟合、误差分析。
- **第四章 清单与步骤**：BOM、连线、6 步制作、5 步部署、安全提示。
- **第五章 开源代码**：三段核心代码与附件说明。
- **第六、七章**：三课时教学安排、评价量规、四次迭代与教学反思。

一、项目介绍

1.1 创作背景：一次疏散演练后的三个问题

2025 年秋季学期，学校组织地震疏散演练。演练结束后，学生在楼道里讨论了三个问题：为什么二楼教室的吊灯晃得比一楼厉害？如果地震真的来了，我们在三楼还有多少时间？电视里的地震台，是怎么知道震中在哪里的？

这三个问题指向同一个对象——地震波。但真实地震不可预测、不可重复、更不可控，课堂上不可能“做”一次地震。于是我们把问题缩小成一个可以在教室里回答的形式：**能不能用一块行空板 K10，在两张课桌拼成的台面上，做出一次可重复、可测量、可比较的“模拟地震”？**

行空板 K10 恰好把需要的东西都集成在一块 51.6 × 83 mm 的板子上：SC7A20H 三轴加速度计、2.8 英寸彩屏、A/B 按键、RGB 灯、TF 卡槽和锂电池接口。不用面包板、不用杜邦线，学生把注意力放在“怎么问一个能被数据回答的问题”上，而不是“线有没有接错”。

1.2 驱动性问题链

我们把大问题拆成四个层层递进、每一个都能用本装置回答的小问题：

- **Q1 传播**：震动在桌面上传播时，振幅怎样随距离变化？能不能用一条曲线描述？
- **Q2 方向**：三轴传感器能不能分辨“上下抖”和“左右晃”？这和地震的 P 波、S 波有什么关系？
- **Q3 结构**：同样一次震动，为什么有的模型晃得厉害、有的很快停下来？
- **Q4 反演**：只用一个测点、一条曲线，能不能反推震源有多远？预测得准不准？

1.3 应用场景

- **课堂教学**：初中科学“地球系统”中“地壳运动与地震”一节；物理“振动与波”；信息科技“传感器、数据采集与可视化”；数学“用趋势线做预测”。
- **校园安全**：测量不同楼层、不同桌面的“震感差异”，为应急演练和家具固定提供依据。
- **家庭延伸**：理解手机地震预警为什么能“抢”出几秒到几十秒，以及家具固定、应急包的必要性。
- **社团与竞赛**：作为开源硬件、数据分析、工程实践的综合作品，可继续扩展为“校园震感地图”。

1.4 作品概览：一块板、一颗球、一张桌

整套装置只多花了几十元：一根 50 cm 的纸筒（定高落球管）、一颗直径 20 mm 的钢球、一片 100 × 60 × 2 mm 的钢片（震源）、一卷胶带、一把 3 m 卷尺。K10 平放在桌面测点上，屏幕朝上，Z 轴竖直；落球在 0 m 处敲击钢片，震动沿桌面传到测点。

按下 A 键后，K10 自动完成四件事：**等触发 → 记录触发前 1 s 与触发后 4 s 的三轴数据 → 写入 TF 卡 CSV（写卡失败时自动改走 USB 串口）→ 在屏幕上算出峰值加速度、主频和持续时长。**整个过程不需要连电脑，一块 3.7 V 锂电池就能脱机工作。

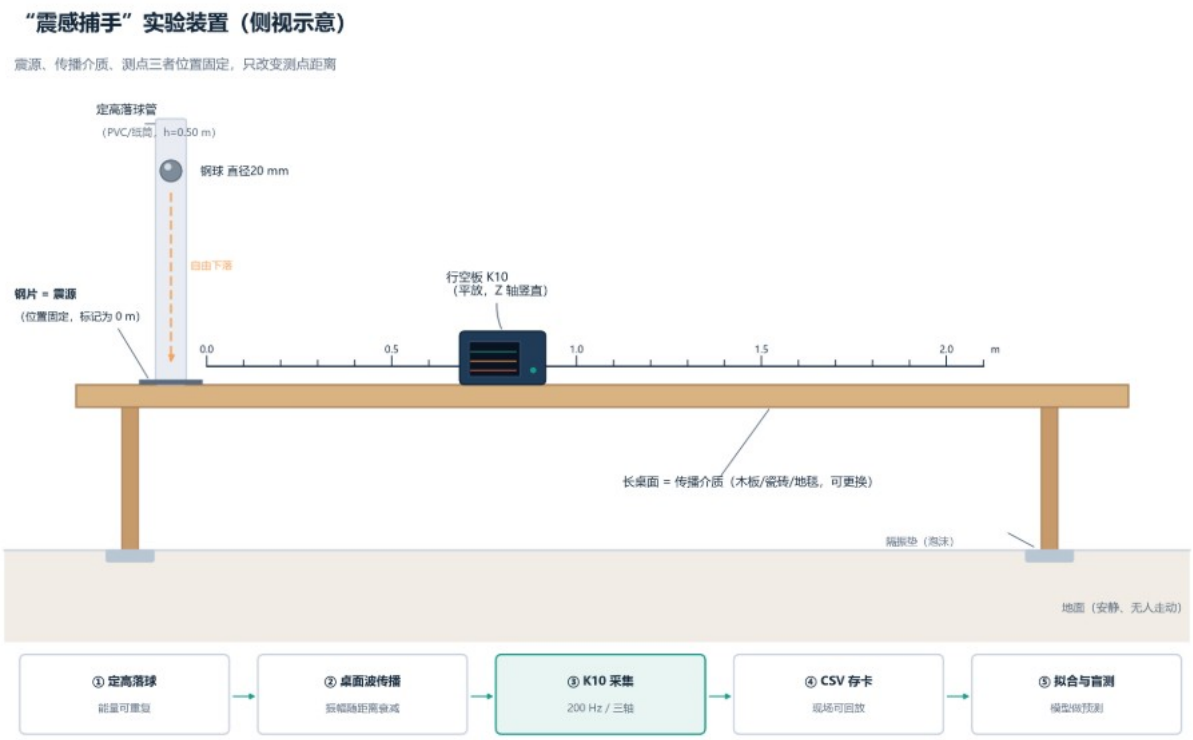


图 1　实验装置侧视示意：定高落球在 0 m 处激励，K10 沿桌面移动改变测距

几个关键设计。 ① 用“定高落球”代替手敲，保证每次输入能量接近；② 测点位置用记号笔画框，保证每次摆放一致；③ 桌腿垫泡沫，减少地面与楼板传来的干扰；④ 钢片把点冲击摊成面冲击，避免钢球直接砸桌面造成局部凹陷。

1.5 科学原理：四个必须讲清楚的概念

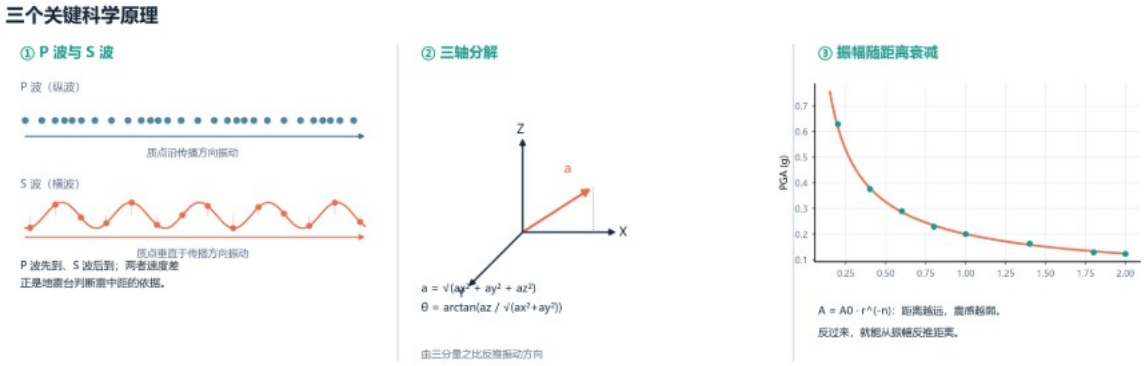


图 2　三个关键原理：P/S 波的质点振动、三轴分解、振幅随距离的幂律衰减

（1）P 波与 S 波：地震台为什么能“算”出震中距

地震发生时，震源同时发出两种体波。**P 波是纵波**，质点沿传播方向前后振动，介质被压缩和拉伸，速度约 6 km/s；**S 波是横波**，质点垂直于传播方向振动，速度约 3.5 km/s。P 波先到、S 波后到，两者的到时差 Δt 随震中距增大而增大。地震台正是用 Δt 和走时曲线反推震中距，再用多个台站的资料交汇出震中位置。

（2）本项目的取舍：为什么测“振幅”而不是“走时”

这是整个项目最需要说明的一处科学建模。真实地震的震中距几十到几百公里，P 波与 S 波的到时差有几秒到几十秒，很容易测。但在我们的桌面上，距离只有 2 m，桌面波速在千米每秒量级，走时只有零点几毫秒；而 K10 的采样间隔是 5 ms（200 Hz），**根本测不准走时差**。

所以本项目换了一个“可测的替代量”：**振幅随距离的衰减**。它同样携带距离信息，而且对采样率的要求低得多。这不是“偷懒”，而是科学探究中常见的做法——当直接观测量超出仪器能力时，选择一个与目标量单调相关、且能被可靠测量的替代量，并说明它的适用条件。我们会在第 3.6 节专门讨论这个替代带来的局限。

（3）三轴分解：从三个数到一个方向

K10 的 SC7A20H 同时测量 X、Y、Z 三个方向的加速度。合加速度 $a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$；去掉重力后，振动方向角 $\theta = \arctan\left(a_z / \sqrt{a_x^2+a_y^2}\right)$。θ 接近 90° 说明以垂直振动为主，接近 0° 说明以水平振动为主。这正好对应 P 波（垂直分量强）与 S 波（水平分量强）的偏振差异——真实地震台用三分向记录判断波的类型，用的就是同一个道理。

（4）衰减与共振：两个能“算”的规律

衰减：波从点源向外传播，能量摊在越来越大的面上，振幅随距离下降。二维面波近似 `A ∝ r^(-0.5)`，三维体波近似 `A ∝ r^(-1)`；再叠加材料内摩擦，实际的指数会介于两者之间。本项目用 `A = A0 · r^(-n)` 拟合，n 就是要测的未知数。

共振：把建筑模型看成一个单自由度振子，固有频率 `f0 = (1/2π)·√(k/m)`，k 是刚度、m 是质量。当外界振动频率接近 f0 时，顶部振幅被放大，这就是共振。阻尼比 `ζ` 描述“能量耗散得快不快”，可由自由衰减曲线的对数衰减率估算：`ζ ≈ δ / (2π)`，`δ` 是相邻两个峰值的对数比。

二、运行演示

2.1 成品外观

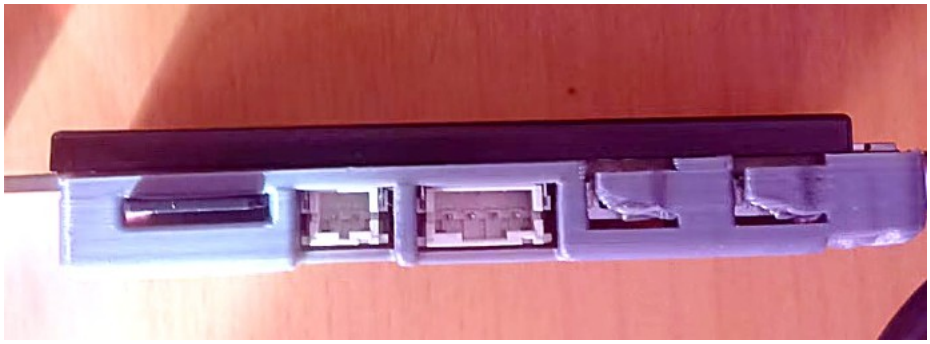
成品由三部分组成：**震源**（纸筒 + 钢球 + 钢片）、**传播面**（长桌 + 刻度）、**测点**（K10 + 锂电池）。全部可拆装，一个书包就能带到教室或走廊。下面三张是上电实测的实拍照片（调试阶段为英文界面，正式版已支持中文，见 2.3 节界面图）。



实物图 1　成品实拍：K10 平放在桌面上电运行，屏幕显示监测页与实时峰值



实物图 2　屏幕特写：状态、峰值 0.128 g 与实验编号（调试版英文界面）



实物图 3　侧面接口：TF 卡槽、两组 3Pin、Type-C 供电与下载，全部板载，无需杜邦线

2.2 三步操作

步骤	操作	屏幕反馈	要点
① 上电	插入电池或 USB-C，按 RST	启动中 → 监测中，RGB 灯亮	TF 卡可选，不插也能跑
② 待机	K10 平放，屏幕朝向自己	三轴波形 + PGA 实时刷新	静置读数 < 0.005 g
③ 记录	按 A 键 → 落球 → 等待	等待触发 →（红灯亮）→ 记录完成	落球后不要碰桌子，等 4 s

记录完成后，屏幕显示本次的 PGA、主振方向、主频估计和持续时长，按 B 键回到待机。数据优先写 TF 卡（路径 `S:/E1_d060_t1.csv`）；没插卡或挂载失败时，同一段 CSV 会从 USB 串口整块输出，电脑端用 `serial_capture.py` 接住并落盘。

2.3 屏幕界面

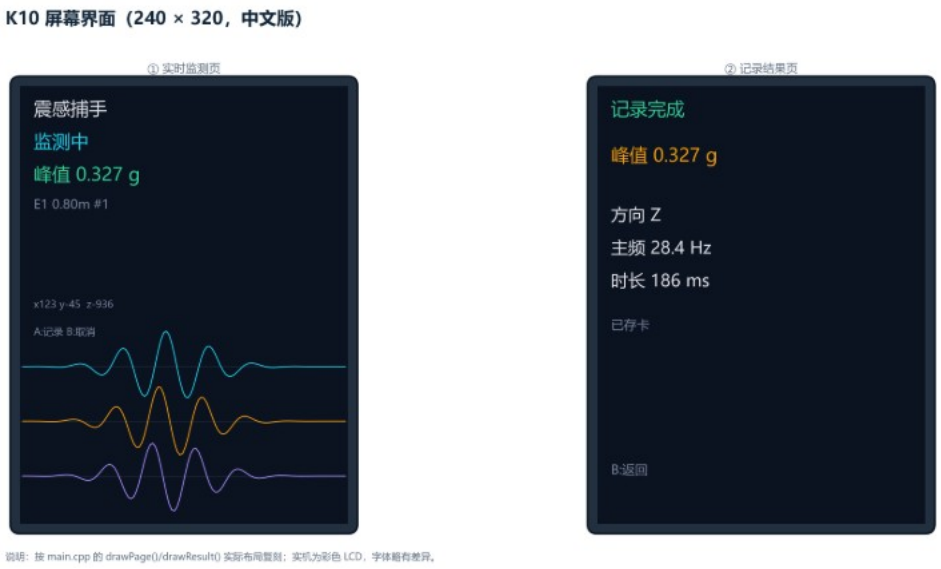


图 3　K10 屏幕界面（240 × 320）：左侧为实时监测页，右侧为单次记录结果页

界面按“一眼能读”的原则设计：顶部是标题与状态，中部是三条不同颜色的波形（X 青、Y 橙、Z 紫），下方大数字是当前 PGA；结果页只保留五个最关键的指标，避免在小屏幕上堆信息。

中英文可切换。 界面默认中文（震感捕手 / 监测中 / 峰值 / 方向 / 主频 / 时长）。K10 的 `canvasText()` 使用固件内置字库，个别 BSP 版本对中文支持不一致；如果实机上中文显示为方块或乱码，把 `main.cpp` 顶部的 `UI_CN` 改成 0 即可切回英文，其余代码不用动。实物图 1、2 是调试阶段的英文界面，正式版为中文。

2.4 演示视频分镜脚本（30 秒）

时间	画面	解说词
0 – 5 s	演练场景 / 学生提问	一次地震，为什么近处晃得凶，远处只是轻轻一颤？
5 – 12 s	装置全景，镜头推近落球	一根纸筒、一颗钢球、一块行空板 K10，我们把地震搬到了桌子上。
12 – 20 s	落球 → K10 屏幕波形跳动 → 显示 PGA	0.56 g。震动沿着桌面传了 2 米，振幅只剩五分之一。
20 – 26 s	电脑上的拟合曲线与盲测结果	用这条曲线，我们猜出了三个未知震源的位置，平均误差 8%。
26 – 30 s	三种建筑模型对比 / 学生面对镜头	房子不是越硬越好——要调频，也要耗能。

拍摄要点：波形跳动的镜头用手机慢动作（120 fps）再降速播放；屏幕反光时用一张白纸做柔光；落球瞬间用另一机位拍特写，后期做画中画。

三、探究过程与结果

> 数据来源说明
>
> 本章图表与数字由 03_数据/分析结果/metrics.json 自动生成，当前为**示例数据（物理模型仿真）**。标注“示例”的图仅用于展示分析流程与版式；实测后重新运行脚本即可替换。

3.1 实验设计

整个探究分成“三组定量实验 + 一次盲测验证”。三组实验各自只改变一个变量，其余条件尽量保持一致；盲测则把前面得到的模型拿去做“能不能用”的检验。

实验	自变量	因变量	控制变量	重复
一、距离衰减	测点距离 r（0.20 – 2.00 m，10 档）	峰值加速度 PGA	落球高度、钢球、桌面、测点朝向	每档 5 次
二、振动方向	敲击方向（垂直 / 水平 / 45° ）	三轴 PGA、方向角 θ	距离 0.60 m、落球高度	每种 5 次
三、建筑结构	模型结构（A / B / C）	固有频率 f0、阻尼比 ζ、顶部 PGA	模型尺寸、敲击点、力度	每种 5 次
四、盲测	未知震源位置（3 处）	预测距离与相对误差	同实验一	每处 3 次

数据处理流程（每一步都可以在课堂上讲清楚“为什么”）：

- **去重力**：每轴减去触发前 0.5 s 的均值。K10 平放时 Z 轴有约 9.8 m/s² 的重力分量，不去掉的话，微弱震动会被 1 g 的直流完全淹没。
- **算峰值**：取三轴合成加速度的最大值，除以 9.80665 换算成 g。用合成值而不是单轴，是为了不依赖敲击方向。
- **算方向角**：分别取三轴峰值，`θ = arctan(az / √(ax²+ay²))`。
- **算频谱**：对自由衰减段做 FFT，峰值对应固有频率 f0；用 Hilbert 包络的对数斜率估阻尼比 ζ。
- **拟合**：对 `ln A` 与 `ln r` 做最小二乘直线拟合，斜率取负即衰减指数 n。
- **信噪比筛选**：用触发前 0.5 s 的噪声有效值算 SNR，`analyze.py --min-snr 5` 会丢掉噪声里捞出来的记录，并报告丢了几条。场地不理想时，这一步比多测 10 次更管用。
- **留一交叉验证**：每次去掉一个距离点，用其余 9 点拟合去预测被去掉的点，看模型“没见过的地方”预测得怎么样——这比 R² 更能说明模型的真实预测能力。

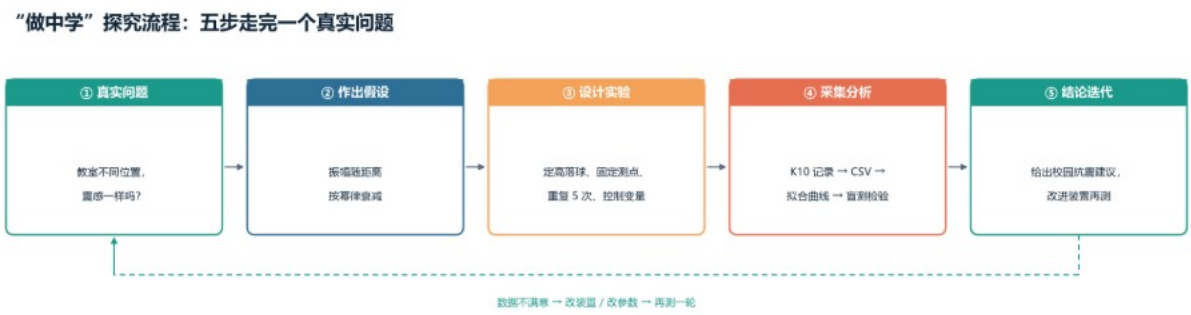


图 4　五步探究流程：从真实问题到结论，再回到问题

误差来源与应对。把“可能出错的地方”提前列出来，是实验设计的一部分：

误差来源	影响	应对办法
落球高度不一致	冲击能量变化，PGA 波动约 ±5%	纸筒定高，球从筒口自由释放，不施加初速度
测点位置偏差	近距离时相对误差可达 3%	桌面画框，四角对齐；卷尺每次复核
桌面边界反射	形成驻波，PGA 随位置起伏	固定同一张桌子；测点避开桌边 20 cm
传感器噪声	约 0.002 g，远距离信噪比下降	每档重复 5 次取平均；远处增加重复次数
采样率不足	200 Hz 可能漏掉冲击峰值	同时记录主频，只对 80 Hz 以下成分做定量分析
环境振动	脚步、关门、说话	实验时清场；桌腿垫泡沫；取触发前基线

3.2 实验一：振幅怎样随距离衰减

在 0.20 m 到 2.00 m 之间取 10 个测点，共 50 次记录。每次记录 5 s（触发前 1 s + 触发后 4 s），由 K10 自动存成 CSV。

先看单次波形。落球瞬间出现一个尖锐的初动，随后是几十毫秒的振荡衰减；X、Y 轴只有 Z 轴的一小部分，说明这次激励以垂直方向为主。

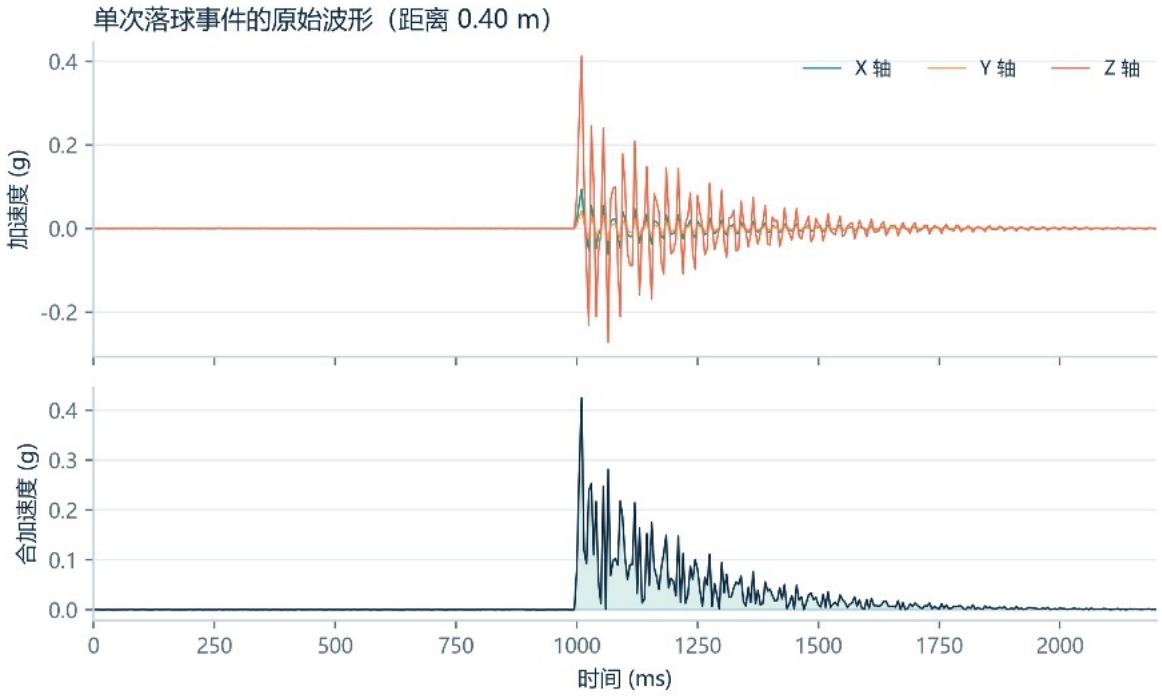


图 5　单次落球事件的原始波形（示例数据，距离 0.40 m）

50 次测量的汇总如下（PGA 为三轴合成峰值，单位 g）：

距离 r (m)	PGA 均值 ± 标准差 (g)	变异系数	次数
0.2	0.563 ± 0.050	8.9%	5
0.4	0.383 ± 0.045	11.7%	5
0.6	0.302 ± 0.031	10.3%	5
0.8	0.226 ± 0.015	6.7%	5
1.0	0.197 ± 0.011	5.6%	5
1.2	0.177 ± 0.006	3.5%	5
1.4	0.147 ± 0.011	7.8%	5
1.6	0.149 ± 0.012	8.1%	5
1.8	0.120 ± 0.004	3.3%	5
2.0	0.113 ± 0.006	5.3%	5

把这 10 个点画在坐标纸上，不是直线，而是一条向下弯的曲线；取对数后变成直线，说明它服从幂律。拟合结果为：

> 拟合结果
>
> $A = 0.194 \cdot r^{(-0.706)}$　　$R^2 = 0.989$
>
> 从 0.20 m 到 2.00 m，PGA 从 0.563 g 降到 0.113 g，衰减为原来的 1/5.0。
>
> 留一交叉验证的平均绝对误差为 6.4%，说明模型在“没测过的距离”上也有预测能力。

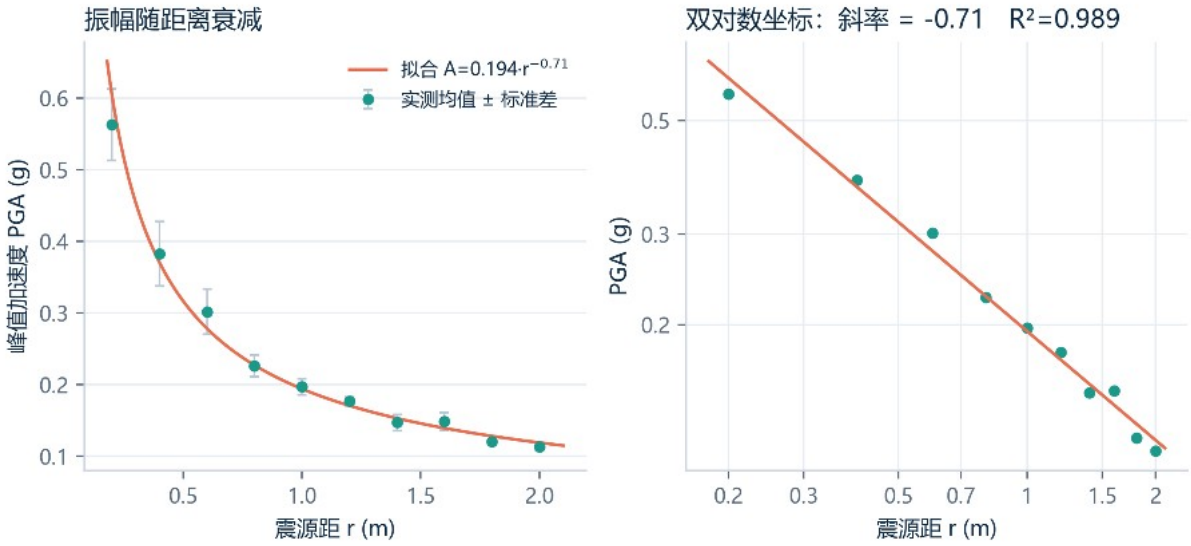


图 6　振幅随距离的衰减与幂律拟合（左），双对数坐标下的线性关系（右）；示例数据

怎么解释 n ≈ 0.71？ 如果能量只沿桌面这一张“二维面”摊开，振幅应按 r^(-0.5) 衰减；如果能量向桌子内部的“三维体”扩散，则按 r^(-1) 衰减。实测的 0.71 介于两者之间，说明桌面上同时存在沿表面的波和穿过板厚的波，再加上木材内摩擦把高频成分消耗掉，最终表现为一个“混合”的衰减指数。这与真实地震中面波（n 小、传得远、破坏大）与体波（n 大、衰减快）并存的情形是相通的。

一个容易被忽略的细节：1.4 m 与 1.6 m 两档的均值几乎相等（0.147 g 与 0.149 g），曲线在这里“翘”了一下。这不是测量失败，而是桌面边界反射形成的驻波——某些位置振幅被加强、某些位置被抵消。它提醒我们：**单点测量永远带有位置噪声**，所以后面的盲测要在每个位置重复 3 次取平均。

3.3 实验二：三轴能不能分辨振动方向

固定距离 0.60 m，用三种方式激励：垂直落球（Z 方向）、水平敲击桌面侧面（X 方向）、45° 斜击。每种方式重复 5 次，比较三轴峰值和方向角 θ。

激励方式	X 轴 PGA (g)	Y 轴 PGA (g)	Z 轴 PGA (g)	Z/水平	方向角 θ
垂直落球	0.025	0.017	0.415	13.87	85.9°
水平敲击	0.296	0.049	0.055	0.18	10.4°
45° 斜击	0.248	0.051	0.262	1.04	46.0°

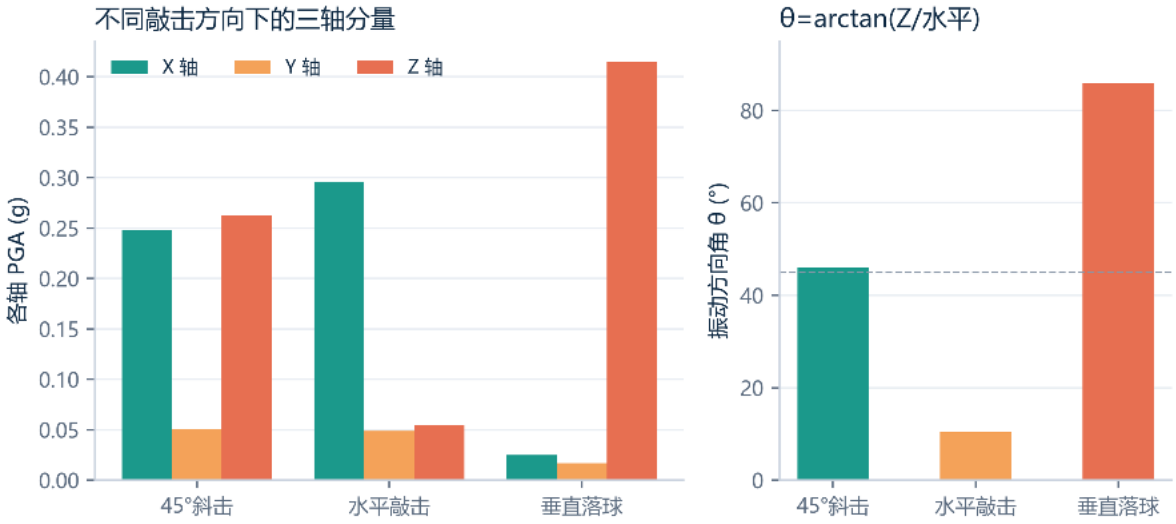


图 7　三种激励方式下的三轴分量与方向角（示例数据）

结果与讨论。 垂直落球的 θ 约为 86°，水平敲击约 10°，45° 斜击约 46°，与设定角度吻合；Z/水平 的比值分别为 13.9、0.18、1.04，相差两个数量级。这说明三轴传感器不仅能“感到震”，还能判断“往哪个方向震”。

把这件事放到真实地震里：P 波到达时，地面以垂直晃动为主；S 波到达时，以水平晃动为主。地震台正是靠三分向记录的偏振差异来识别 P 波和 S 波的。本实验用可控的敲击方向“复现”了这种差异，让一个抽象的偏振概念变成了屏幕上可读的角度。

误差在哪里。 水平敲击时，Y 轴仍有约 0.04 g 的读数，说明敲击方向并不严格沿 X 轴；45° 斜击的 θ 为 46°，略大于 45°，是因为落球点偏离桌面中线，能量在 X、Y 之间分配不均。这些偏差恰好可以作为“如何把敲击做得更准”的讨论素材。

3.4 实验三：三种建筑模型的共振与响应

用雪糕棒和热熔胶搭三个四层模型，底板 12 × 12 cm，层高 6 cm：**A** 无斜撑；**B** 每层加 X 形斜撑；**C** 在 B 的基础上加 60 g 顶部配重。把 K10 平放在楼顶，用手指轻敲顶层，记录 4 s 的自由衰减；每种模型重复 5 次。

自由衰减曲线看起来像一条“越来越小的波浪”。对它做 FFT，峰值就是固有频率 f0；对包络取对数，斜率就是阻尼比 ζ。三个模型的结果如下：

模型	固有频率 f0 (Hz)	阻尼比 ζ	顶部 PGA (g)	相对 A 的 PGA 变化
A 无斜撑	3.07	0.038	0.335	—
B X 形斜撑	5.78	0.063	0.134	-60%
C 斜撑 + 配重	4.25	0.132	0.174	-48%

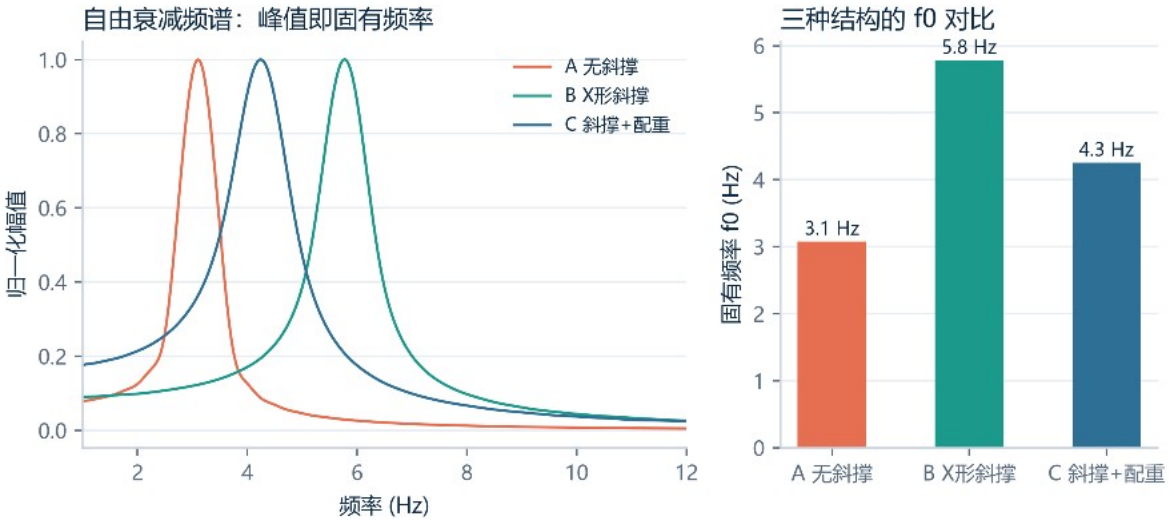


图 8　三种模型的自由衰减频谱与固有频率对比（示例数据）

斜撑的作用最直接。 B 的 f0 从 3.07 Hz 提高到 5.78 Hz，说明加斜撑让结构“更刚”，刚度 k 增大、固有频率上移；同样一次敲击下，顶部 PGA 下降约 60%，因为更刚的结构不容易被激起大幅晃动。

配重的作用更微妙。 C 的 f0 比 B 低（4.25 Hz），因为质量增大让频率下降；但它的阻尼比从 0.063 提高到 0.132，衰减明显更快。有趣的是，C 的顶部 PGA 反而比 B 高约 30%，因为更大的质量带来更大的惯性力。**所以“抗震”不是简单地“越硬越好”，而是要在刚度、质量、阻尼之间做权衡**——这正是结构抗震设计中最核心的思想。

和真实地震的联系。 常见多层建筑的自振频率大约在 1–5 Hz，而地震波的主频也常在这个范围。如果两者接近，就会发生共振，顶部振幅被放大数倍。A 模型的 3.1 Hz 正好落在“危险区”，B 模型把频率提高到 5.8 Hz，避开了常见地震波的主频段——这与抗震规范中“结构自振周期应避开场地卓越周期”的要求是一致的。

3.5 盲测：模型到底能不能用

前面的拟合只能说明“数据看起来有规律”，还不能说明“模型能预测”。于是我们设计了一次盲测：请另一组同学把落球装置移到三个未知位置（0.5–1.8 m 之间），操作者不看卷尺，只根据测到的 PGA 用拟合式反推距离，最后再量真值。

编号	测得 PGA (g)	模型预测 (m)	卷尺真值 (m)	相对误差
u1	0.283	0.59	0.65	-9.9%
u2	0.174	1.17	1.15	1.9%
u3	0.146	1.50	1.70	-12.0%

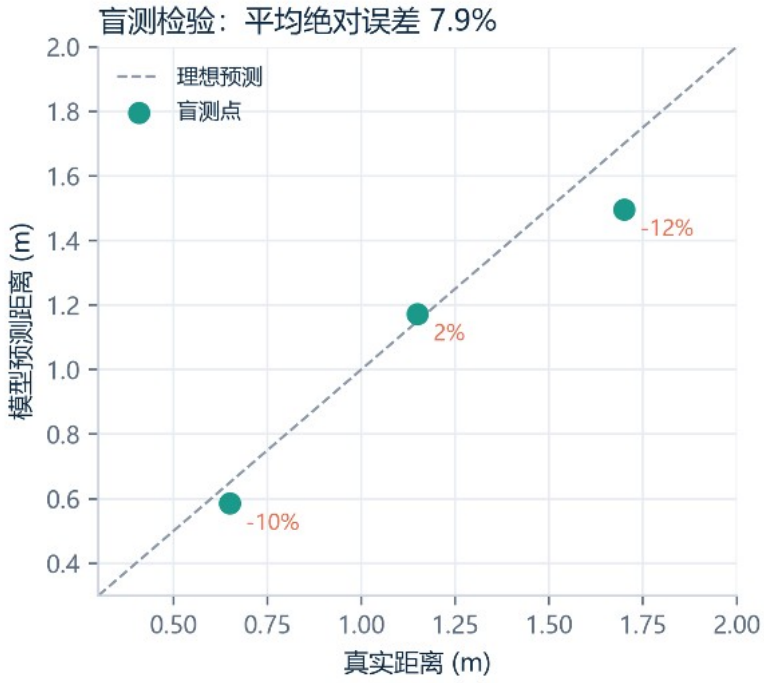


图 9　盲测检验：预测距离与真实距离越接近虚线，说明模型越准（示例数据）

三次盲测的平均绝对误差为 **7.9%**，最远的一次（1.70 m）被低估了约 12%。误差随距离增大而增大，原因很清楚：远处 PGA 只有 0.1 g 左右，而传感器噪声约 0.002 g，信噪比下降；同时桌面边界反射在远处造成更大的起伏。改进办法不是“调参把误差压小”，而是**增加重复次数、在远处多测几组取平均**，并把测量不确定度如实写进结论。

这次盲测让学生真正理解了“模型”两个字的含义：模型不是把已知数据画得漂亮，而是**对没见过的数据做出可检验的预测**。预测错了，恰恰是最有价值的学习发生的地方。

3.6 结论、局限与改进

主要结论：

- 在桌面上，振幅随距离呈幂律衰减，拟合式为 A = 0.19 • r^(-0.71)，R^2 = 0.989；2 m 处的振幅约为 0.2 m 处的 1/5。
- 三轴加速度计可以可靠地区分振动方向：垂直、水平、45° 三种激励的方向角分别约为 86°、10°、46°，与设定一致。
- 结构刚度、质量、阻尼共同决定地震响应：斜撑使 f0 上移、顶部 PGA 下降约 60%；配重使 f0 下降但阻尼增大，PGA 反而回升。
- 基于振幅的“单点反演”可行，三次盲测平均误差 7.9%，可作为课堂级别的定量探究。

必须承认的局限：

- **尺度效应**：2 m 的桌面不是半空间场地，边界反射、桌子共振都会污染信号，结论不能直接外推到真实场地。
- **单点限制**：只有一块 K10，无法测走时差，也就做不了真正的三台站交汇定位；本项目的“定位”本质上是“用振幅反演距离”。
- **采样不足**：200 Hz 对冲击瞬间的高频成分是欠采样的，PGA 可能被低估几个百分点。
- **样本量小**：每档 5 次，置信区间较宽；换一张桌子、换一个季节，n 可能变化。
- **缩尺相似性**：建筑模型没有严格满足相似准则，只能做定性比较，不能换算成真实楼层响应。

下一步可以怎么做：

- 做第二、第三块 K10 测点，测同一事件的走时差，实现真正的三台站交汇定位。
- 加一个小型激振器做扫频，画出完整的频响曲线，而不只是自由衰减的一个峰。
- 把数据通过 Wi-Fi 上传到 SIoT 或校园服务器，做一张持续的“校园震感地图”。
- 用手机慢动作视频做独立的时间标定，检验 K10 的触发延迟。

四、软硬件清单与制作步骤

4.1 硬件清单

序号	名称	型号 / 规格	数量	参考价	用途
1	行空板 K10	DFR0992-EN（ESP32-S3，板载 SC7A20H）	1	约 ¥299	主控、采集、显示、存盘
2	钢球	直径 20 mm，轴承钢	1	¥3	定高落球，激励震源
3	纸筒 / PVC 管	内径 25 mm，长 500 mm	1	¥5	定高导向
4	钢片	100 × 60 × 2 mm	1	¥5	把点冲击摊成面冲击
5	卷尺	3 m	1	¥8	标定测点距离
6	雪糕棒	114 × 10 × 2 mm	约 120 根	¥10	搭建三个建筑模型
7	热熔胶枪 + 胶棒	普通 7 mm	1 套	¥15	模型粘接
8	泡沫垫	10 mm 厚，A4 大小	4 片	¥10	桌腿隔振
9	TF 卡	16 GB，FAT32	1	¥25	存 CSV 原始数据
10	锂电池	3.7 V，PH2.0 插头，≥1000 mAh	1	选配	脱机记录

软件清单：Arduino IDE 2.x + UNIHIKER K10 BSP（板卡支持包，装好后即可选板编译），或 PlatformIO + `DFRobot/platform-unihiker`；程序语言为 C++（Arduino 框架）。电脑端 Python 3.10+，依赖 numpy、pandas、scipy、matplotlib、python-docx、openpyxl、pyserial。所有依赖都可用 `pip install -r requirements.txt` 一次性装好。

4.2 连线图：零外接

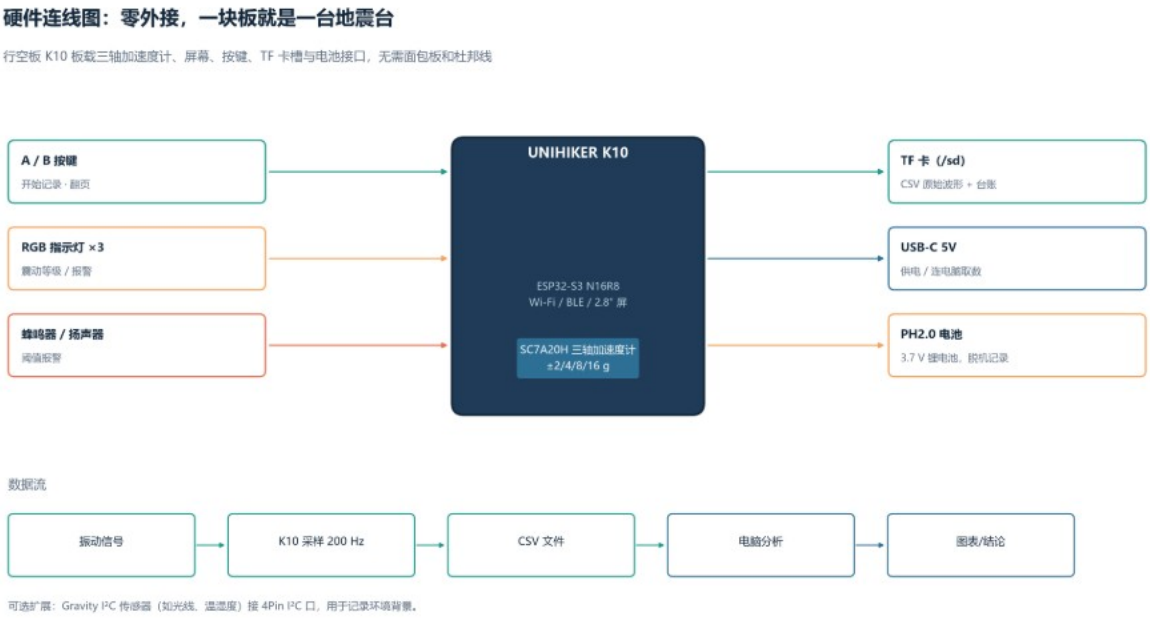


图 10　硬件连线图：传感器、屏幕、按键、存储全部板载，无需面包板

本作品最大的工程优势是**零外接**：三轴加速度计、屏幕、按键、RGB 灯、TF 卡槽、电池接口全部集成在 K10 上。学生不需要认识杜邦线、不需要焊接，把“接线时间”省下来做实验。若后续要扩展，可使用板载的 4Pin I²C 口接光线、温湿度等 Gravity 传感器，记录实验环境背景。

4.3 制作步骤

步骤	做什么	关键尺寸 / 要点	耗时
1	搭实验台	两张课桌拼成 ≥2.2 m；桌腿下垫泡沫；靠墙但不贴墙	10 min
2	固定震源	纸筒垂直固定在桌面一端，筒口距桌面 50 cm；钢片贴在落点，用胶带封边	10 min
3	画刻度	卷尺沿桌边拉直，从钢片中心起每 10 cm 贴一条胶带，标 0.2 – 2.0 m	10 min
4	定测点	在常用测点位置用记号笔画出 K10 外框，保证每次摆放方向一致	5 min
5	搭模型	雪糕棒四层，层高 6 cm，底板 12 × 12 cm；B 加 X 斜撑，C 加 60 g 配重	40 min
6	调试	静置读噪声（应 < 0.005 g）；试落 3 次，检查 CSV 是否完整	10 min

模型制作的小技巧：每层用四根立柱 + 一块楼板，胶水只点在节点上，避免整根粘死；斜撑剪成 45° 斜口，长度比对角线略短 1 mm，靠胶水张力顶紧；配重用螺母或硬币，粘在顶层中心，保证重心不偏。

4.4 程序部署（5 分钟）

Arduino IDE 路线（推荐给师生）：

- **装 BSP**：文件 → 首选项 → 附加开发板管理器网址填入 `https://downloadcd.dfrobot.com.cn/UNIHIKER/package_unihiker_index.json`；再到“开发板管理器”搜索 unihiker 安装。
- **选板**：工具 → 开发板 → UNIHIKER K10；端口选 K10 对应的 COM 口。
- **编译上传**：打开 `main.cpp`（或把内容粘进新建的 sketch，存成 `SeismoCatcher.ino`），点上传。
- **改参数**：只改文件顶部的 `EXP_ID / DIST_M / TRIAL_NO / NOTE_TXT` 四个宏。
- **脱机运行**：拔掉 USB，插上锂电池，按 RST；实验结束取 TF 卡，或用串口脚本抓数。

PlatformIO 路线（推荐给熟悉 VS Code 的老师）：把 `platformio.ini` 与 `src/main.cpp` 放好，Build → Upload 即可。`platformio.ini` 里已写好 `board = unihiker_k10`、`framework = arduino` 和 USB CDC 相关宏。

数据怎么取：① 插了 TF 卡且能挂载时，程序会写 `S:/E1_d060_t1.csv`，拔卡用读卡器拷；② 没插卡或写卡失败时，程序会自动把同一段 CSV 从 USB 串口整块输出，电脑端运行 `python serial_capture.py --port COM7` 即可存成同名文件。两条路任选其一，数据格式完全一致。

4.5 安全与课堂管理

- 钢球只做自由下落，不许抛掷、不许对着人；落点下方必须是钢片，不能直接砸桌面或玻璃。
- 搬桌子两人一组，先清空桌面；桌腿垫泡沫后要检查是否平稳。
- TF 卡插拔前先断电，避免文件损坏；实验结束先按 RST 停止程序再拔卡。
- 锂电池不要短路、不要挤压；充电时有人看管。
- 分组建议 4 人：操作员、记录员、安全员、计时员，每 10 分钟轮换一次。

五、开源代码

5.1 代码结构

文件	运行位置	作用	规模
K10 端/main.cpp	行空板 K10	采集、触发、存盘、屏幕界面（Arduino C++）	约 440 行
K10 端/platformio.ini	工程配置	PlatformIO 板卡与编译选项	12 行
分析端/analyze.py	电脑	去重力、PGA/主频/阻尼、拟合、盲测、出图	约 440 行
分析端/serial_capture.py	电脑	从 USB 串口抓 CSV（没插卡时用）	约 110 行
分析端/simulate_demo.py	电脑	生成示例数据，验证流程	约 180 行
分析端/make_figures.py	电脑	生成装置图、原理图、连线图、界面图	约 460 行
分析端/build_doc.py	电脑	把数据与图表写进本 Word 文档	约 480 行
分析端/make_xlsx.py	电脑	生成实测记录表	约 230 行

代码全部使用 MIT 许可，可自由修改与再发布。K10 端是**纯 C++（Arduino 框架）**，只调用官方 BSP 提供的 `UNIHIKER_K10` 类，不依赖任何第三方库；Mind+ 的代码模式、Arduino IDE、PlatformIO 都可以直接编译这份 `main.cpp`。电脑端只依赖 numpy / pandas / scipy / matplotlib。

5.2 核心片段一：触发与预触发缓冲

地震记录最怕“丢初动”。如果等震动超过阈值才开始记，最初的几毫秒已经过去了。程序开了一个长度为 1 s 的环形缓冲区：一直记、一直覆盖最旧的，一旦触发就把缓冲区按时间顺序搬到结果数组，触发前的数据也被保留下来。触发前还会先测 0.5 s 的**静止基线**——板子倒放或桌面不平时，Z 轴可能读到 −1000 mg，如果写死“减 1 g”，PGA 会一直停在 1.9 g 左右。相对基线算偏离量就不会有这个问题。

main.cpp • runRecord() 节选

```
// 采样：用绝对时间戳对齐，保证 200 Hz 不漂
g_nextUs += g_periodUs;
int32_t d = (int32_t)(g_nextUs - micros());
if (d > 0) delayMicroseconds((uint32_t)d);
else       g_nextUs = micros();

// 记录前先测 0.5 s 静止基线（板子可能倒放、倾斜，不能假设 Z=+1000）
calibrateBaseline();
drawPage("WAIT TRIGGER", 0, nullptr, 0);

Sample s;
readAcc(s.x, s.y, s.z);                    // 单位 mg，1000 = 1 g
pushRing(s);                               // 环形缓冲只保留最近 1 s

// 相对基线算偏离量：倒放、倾斜都不会误触发
float dx = (s.x - g_bx) * ACC_TO_G;
float dy = (s.y - g_by) * ACC_TO_G;
float dz = (s.z - g_bz) * ACC_TO_G;
float dev = sqrtf(dx*dx + dy*dy + dz*dz);
over = (dev > TRIG_G) ? over + 1 : 0;      // 连续 3 个点超阈值才认

if (over >= TRIG_HOLD) {
  triggered = true;
  trigIdx   = ringCount - 1;
  copyRingToBurst();                       // 预触发数据一并保留
  n = ringCount;
}
```

5.3 核心片段二：去重力与峰值

K10 平放时 Z 轴读数约 1000 mg（1 g）。如果直接取最大值，得到的永远是重力，微弱震动完全看不见。程序先算触发前 0.5 s 的基线，再逐点相减，最后取三轴绝对值的最大值。库的返回值单位是 mg，所以换算只要乘 0.001；如果你的 BSP 版本返回 m/s²，把 `ACC_TO_G` 改成 `1.0f / 9.80665f` 即可。

main.cpp • analyse() 节选

```
int baseN = (trigIdx > 20) ? trigIdx / 2 : 1;
float bx = 0, by = 0, bz = 0;
for (int i = 0; i < baseN; i++) {          // 触发前基线
  bx += burst[i].x;  by += burst[i].y;  bz += burst[i].z;
}
bx /= baseN;  by /= baseN;  bz /= baseN;

float pga = 0;  char axis = 'X';
for (int i = i0; i < i1; i++) {            // 只看触发后 0.05~1.5 s
  float ax = fabsf((burst[i].x - bx) * ACC_TO_G);
  float ay = fabsf((burst[i].y - by) * ACC_TO_G);
  float az = fabsf((burst[i].z - bz) * ACC_TO_G);
  if (ax > pga) { pga = ax; axis = 'X'; }
  if (ay > pga) { pga = ay; axis = 'Y'; }
  if (az > pga) { pga = az; axis = 'Z'; }
}
```

5.4 核心片段三：幂律拟合与盲测（电脑端）

现场只算 PGA、主频、时长；拟合与盲测放在电脑端做，这样学生可以在课堂上改参数、立刻看到曲线怎么变。对 `ln A` 与 `ln r` 做直线拟合，斜率取负就是衰减指数 n；反过来解出 `r = (A0/A)^(1/n)`，就能从一次振幅测量反推距离。

analyze.py • analyse_e1() 节选

```
x = np.log(grp["dist"].to_numpy())
y = np.log(grp["mean"].to_numpy())
slope, logA0 = np.polyfit(x, y, 1)
n = -slope                          # A = A0 * r^(-n)
A0 = float(np.exp(logA0))
r2 = 1 - np.sum((y - (logA0 - n*x))**2) / np.sum((y - y.mean())**2)

# 盲测：从振幅反推距离
est = (A0 / pga) ** (1.0 / n)
```

5.5 附件清单

附件	说明
K10 端/main.cpp	K10 端完整 C++ 程序（中文注释）
K10 端/platformio.ini	PlatformIO 工程配置（Arduino 框架）
serial_capture.py	串口抓数脚本，把 CSV 存到 03_数据/实测/
analyze.py	数据分析与出图，一条命令跑完
simulate_demo.py	示例数据生成器（仅用于验证流程）
make_figures.py	本文章节配图生成器
build_doc.py / doc_content.py	本文档生成器
make_xlsx.py	实测记录表生成器
实测记录表.xlsx	学生填写的实验记录模板

附件	说明
示例数据/	89 个 CSV，物理模型仿真，仅用于演示

六、教学实施建议

6.1 三课时安排

课时	环节	学生做什么	教师做什么
第 1 课时	情境与原理	看演练视频，提出三个问题；用手压桌面感受振动；拆解 P/S 波	引出驱动性问题；演示装置；不讲公式，先讲现象
第 2 课时	分组实验	4 人一组，按任务单完成实验一与实验二；记录异常	巡视；只回答“怎么保证公平”，不直接给答案
第 3 课时	分析与发布	用记录表算均值与拟合；做盲测；写 200 字结论	引导对比“预测 vs 真值”；组织互评

6.2 学习单（节选）

- **Q1** 你觉得“震感”强弱跟哪些因素有关？写出三个，并说明你打算怎么控制它们。
- **Q2** 为什么每次都要从同一个高度落球？如果换成手敲，数据会变成什么样？
- **Q3** 你的拟合式能预测 3 m 处的振幅吗？为什么？说说你的依据。
- **Q4** 盲测中哪个点误差最大？是模型错了，还是测量错了？怎么判断？
- **Q5** 如果给学校提一条抗震建议，你会提什么？用你的数据支持它。

6.3 评价量规

维度	优秀	合格	待改进
科学观念	能用地壳运动、波、共振解释现象，并指出模型与真实的差异	能说出基本概念，解释较完整	只能复述名词
探究实践	变量控制严谨，重复足够，能处理异常数据并说明理由	能按步骤完成实验，数据基本完整	操作依赖指令，数据缺失
数据与建模	能完成拟合，用 R^2 与盲测评估模型，并讨论误差	能画图并读出趋势	只罗列数据，无分析
态度与工程	主动改进装置，考虑安全与成本，能清楚表达	能参与合作，完成分工	参与度低，表达不清

七、迭代过程与教学反思

7.1 四次迭代

版本	遇到的问题	怎么改的	效果
v1.0	手敲桌面，力度不可控	加纸筒定高，钢球自由下落	输入能量稳定，数据可比
v1.1	只记触发后的数据，初动丢失	加 1 s 预触发环形缓冲	波形完整，能看清起振
v1.2	USB 连电脑记录，线缆干扰、场地受限	改 TF 卡存 CSV，锂电池供电	可搬到走廊、操场
v1.3	只有 PGA，说不清“方向”和“结构”	加三轴比值、方向角、FFT 与阻尼	一次采集，三种分析

7.2 反思：三个“没想到”

第一个没想到：最难的不是写程序，而是让实验“公平”。 一开始学生抢着敲桌子，结果同一距离的数据能差三倍。后来大家自己提出“要让球从同一个高度掉下来”，才有了纸筒。控制变量不是老师讲出来的，是被糟糕的数据“逼”出来的。

第二个没想到：学生最兴奋的时刻是“预测错了”。 盲测中 1.70 m 被猜成 1.50 m，有学生第一反应是“改一下参数让它对”。我们没有允许，而是让他解释：为什么远处会低估？他最后自己说出“远处信号小，噪声占比大”。这比做对十道题更有价值。

第三个没想到：一块板子能撑起跨学科。 科学课讲地震波，物理课讲振动与共振，数学课讲对数与拟合，信息课讲传感器与数据，美术课做模型——同一个装置，四门课都能用。这也是“做中学”最迷人的地方：知识不再是分科的条目，而是解决一个真实问题时顺手拿起的工具。

7.3 还可以怎么做

- 把装置做成“可折叠地震台”，装进一个行李箱，到不同学校做对比实验。
- 用三块 K10 做三台站，测走时差，真正实现“交汇定位”。
- 把一学期的数据积累成“校园震感地图”，在安全教育周展出。
- 与语文、美术结合，做一份给低年级看的“地震安全绘本”。

7.4 写在最后

这套案例包最想留下的，不是一条漂亮的拟合曲线，而是一种做科学的方法：先把大问题缩到能测，再把能测的量测准，最后用没见过的数据检验自己的模型。我们在这件事上失败了两次——第一

次想直接测走时差，第二次想用单点做三角定位——两次都因为仪器分辨率不够而放弃，也两次都逼出了更好的替代方案。

如果只能带走一句话，我们希望是：**当仪器测不到你想测的东西时，换一个能测的，并说清楚为什么可以换、换完丢掉了什么。**

附录

附录 A　CSV 数据格式

K10 输出的 CSV（节选）

```
# device=UNIHIKER K10
# exp=E1
# dist_m=0.600
# trial=1
# note=wood
# fs=200.0
# unit=mg
# trig_idx=199
# pga_g=0.3012
# f_hz=28.40
# dur_ms=186.0
t_ms,ax,ay,az
-1000.0,13,6,1013
-995.0,12,6,1014
...
0.0,301,52,1288
...
```

以 `#` 开头的是元数据；`t_ms` 是相对时间（毫秒），0 点就是触发时刻，所以会出现负值。三轴单位是 **mg（1000 = 1 g）**，表头里的 `unit=mg` 告诉分析脚本怎么换算；早期的 Python 示例数据是 m/s²，没有 `unit` 字段时脚本按 m/s² 处理。实验编号、距离、次数一定要在 `main.cpp` 顶部改对。

附录 B　常见问题

- **编译报错**：`unihiker_k10.h: No such file`——BSP 没装好。重新在“开发板管理器”安装 UNIHIKER K10，或检查 PlatformIO 的 `platform` 地址是否写对。
- **上传失败 / 找不到端口**：按住 BOOT 再插 USB 进下载模式；Windows 设备管理器里看是否出现新串口；换一根能传数据的 USB 线。
- **屏幕不亮或方向不对**：改 `main.cpp` 顶部的 `SCREEN_DIR`（0 – 3）；确认 `k10.initScreen()` 已调用。
- **按 A 没反应**：程序在 `MONITOR` 页才响应 A 键；若停在结果页，先按 B 返回。
- **没有生成 CSV**：先确认 TF 卡是 FAT32；若 `S:/` 挂载失败，程序会自动把数据从串口输出，用 `serial_capture.py` 接住即可。

- **PGA 一直是一个固定值（比如 1.936 g）**：屏幕底部有一行 `x… y… z…` 原始读数，先看 z 是不是接近 −1000 或 +2900。程序已改为相对静止基线计算，重新上电会自动校准；如果还不对，把这行数抄下来再排查。
- **PGA 一直是 0.000**：静置时 Z 轴应约为 1000（mg）。如果读到 9.8 左右，说明你的 BSP 返回 m/s²，把 `ACC_TO_G` 改成 `1.0f / 9.80665f`。
- **数据噪声大**：远离风扇、空调外机；桌腿垫泡沫；每档多测几次。
- **拟合结果离谱**：检查距离单位是否统一为 m；是否把 0 m 的点代入了对数。

附录 C　参考与延伸

- 中华人民共和国教育部.《义务教育科学课程标准（2022 年版）》. 北京师范大学出版社, 2022.（核心概念 10“地球系统”、13“工程设计与物化”）
- 教育部.《义务教育阶段科学教育“做中学”领航行动指南》.
- DFRobot. 行空板 K10 官方文档：https://www.unihiker.com.cn/wiki/k10
- USGS. “How much bigger is a magnitude 8.7 earthquake than a magnitude 5.8 earthquake?”（地震能量与振幅关系的科普说明）
- Bolt, B. A. Earthquakes. W. H. Freeman.（地震波与震源定位的经典入门读物）

附录 D　条件受限时的替代方案

不是每间教室都能凑出 2.2 m 的长桌和安静的环境。下面三套降级方案用的是同一套装置、同一份代码，只换变量；数据依然能支撑一个完整的小课题，前提是把条件写清楚。

限制	会出什么问题	改用哪个方案
桌子不到 1.5 m	测点少、边界反射强、远端信号弱	方案 A：缩到 1.2 m，6 个测点
房间吵、有人走动	噪声大、容易误触发	方案 A + 降噪清单；太吵改方案 C
只有 30–40 分钟	重复次数不够	6 点 × 8 次 = 48 次，够拟合
没有 TF 卡	取数麻烦	串口 serial_capture.py
连长桌都没有	做不了距离衰减	方案 B（材质）或方案 C（共振）

方案 A：缩小版距离衰减。 1.2 m 桌面，测点 0.2/0.4/0.6/0.8/1.0/1.2 六个，每点 8 次；钢片下垫瓷砖，桌腿垫毛巾；触发阈值提到 0.08 g；分析时加 `--min-snr 5` 剔除噪声记录。拟合仍然给 n、R^2 和留一误差，只是把“1.2 m 以内”写进结论。

方案 B：固定距离换材质。 0.4 m，木桌 / 瓷砖 / 泡沫垫三种介质，各 8 次，比较 PGA 与主频：硬介质衰减小、高频保留多；软介质衰减快。只需要 40 × 40 cm 的台面，结论可以直接解释“隔振垫为什么有用”。

方案 C：把建筑共振当主线。 30 cm 见方就能做，3 个模型 × 5 次轻敲，测 f0、ζ、顶部 PGA。敲击信号强、信噪比高，是最不受场地限制的方案；如果房间太吵，可以把 C 当主线，距离衰减只做 0.2/0.6/1.0 三个点作为演示。

> 写进文档的三句话
>
> ① 条件写到别人能复现（桌面尺寸、材质、噪声峰值、温湿度、落球高度、重复次数）；② 每个数后面带不确定度（± 或样本数）；③ 结论加限定语——“在本实验条件下”，而不是“普遍规律”。