

# 振动测试应用案例

李丹

东南大学土木工程学院

2026 年 2 月 26 日



# 目录

---

- ① 框架结构模态分析
- ② 飞机机翼振动测试
- ③ 电动车电池振动测试
- ④ 小结

# 足尺钢筋混凝土框架试验简介

---

- 试验对象：4 个两跨两层足尺钢筋混凝土框架，代表典型办公建筑。
- 目的：研究原始结构与不同加固方案在地震荷载下的整体破坏机制。
- 激励方式：
  - 线性惯性激振器（LIS）：屋顶水平激励，模拟地震侧向荷载。
  - 偏心质量激振器（EMS）：用于在线估计自振频率、跟踪刚度演化。
- 实测响应：屋顶/楼层加速度、位移，应变与局部构件响应。

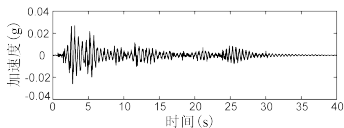
# 试验结构与传感器布置



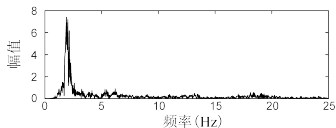
图: 钢筋混凝土框架结构模型



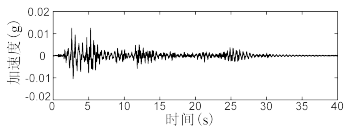
# 加速度时程与频谱



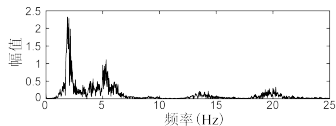
(a) 104-A1加速度时程



(b) 104-A1加速度频谱



(c) 1-CH0加速度时程



(d) 1-CH0加速度频谱

图: 典型加速度时程与频谱 (0-10 Hz 内响应显著)

- 建模：Euler-Bernoulli 梁单元二维有限元模型，23 节点、24 单元；柱脚固结，考虑钢筋-混凝土复合截面。
- 参数化：选取 5 个与混凝土浇筑工序对应的刚度变量

$$\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^5, \quad \theta_i \text{ 表示第 } i \text{ 区域刚度相对变化,}$$

以及 2 个阻尼比参数  $\boldsymbol{\zeta} \in \mathbb{R}^2$  (Rayleigh 阻尼)。

- 模型缩减：Guyan 模型缩减  $\rightarrow$  15 个测量自由度。
- 数值积分：基于缩减模型用 Newmark- $\beta$  法计算响应。
- 约束条件： $-0.3 \leq \theta_i \leq 0.3$ ,  $0.001 \leq \zeta_i \leq 0.2$ ，保证刚度/阻尼物理合理。

## UKF 与 CUKE 参数识别结果 (1/2)

---

- 方法对比：标准 UKF 与带参数约束的 CUKE (Constrained UKF)。
- 识别目标：同时估计结构状态与刚度、阻尼参数。
- 结果特征：
  - 刚度与阻尼在前 5 s 内迅速调整，随后逐步收敛。
  - CUKE 始终保持参数在约束区间内，UKF 会出现  $\theta_1 < -0.3$ 、 $\zeta_1 > 0.2$  等不合理情况。
  - CUKE 识别出的阻尼比落在钢筋混凝土典型范围 (约 0.05-0.10) 内。

## UKF 与 CUKE 参数识别结果 (2/2)

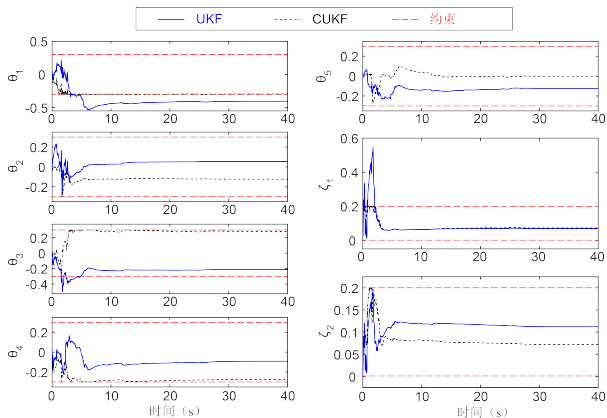


图: UKF 与 CUKE 的参数修正时程

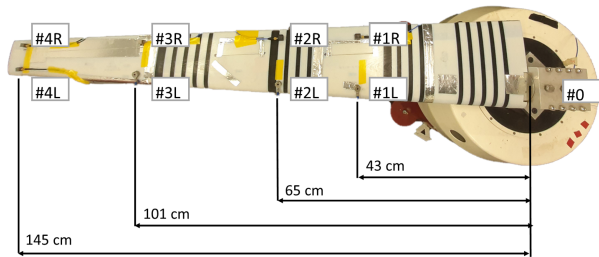
## XB-2 高展弦比机翼模型

---

- 研究对象：Cranfield 大学 XB-2 高展弦比柔性机翼缩比模型（基于 A320 类飞机优化翼型）。
- 结构构成：
  - 主翼梁：6082-T6 铝合金；连接与管件：不锈钢。
  - 蒙皮：3D 打印 Digital-ABS + Agilus 30，基于 NACA 23015 翼型。
- 主要几何：翼展约 1.5 m，平均气动弦长约 0.017 m，高展弦比、柔性显著。
- 目的：在 BeARDS 试验系统中评估柔性机翼的模态特性与非线性振动行为。

## 试验布置与加速度计位置

- 激励：随机激励，RMS 取 3 个水平（低/中/高），频带 2-400 Hz。
- 支承：软支撑悬挂，尽量接近自由-自由边界，避免刚体模态干扰。
- 采集：9 个沿展向布置的加速度计，采样频率 256 Hz。



图：柔性机翼结构加速度计布置

## FRF 与稳定图

- 计算 FRF:

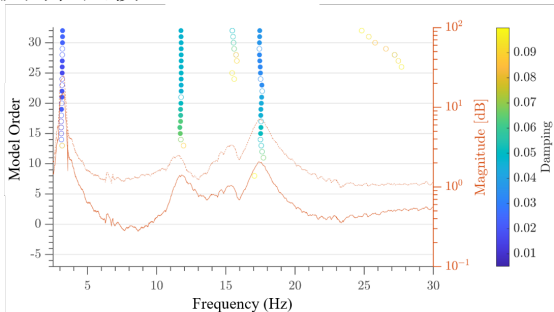
$$H(f) = \frac{S_{fx}(f)}{S_{ff}(f)},$$

其中  $S_{fx}(f)$  为互谱、 $S_{ff}(f)$  为自谱；采用 Savitzky-Golay 滤波平滑。

- 模态识别：模型阶数从 3 提高到 32，满足

$$|\Delta f|/f < 1\%, \quad |\Delta\zeta|/\zeta < 5\%, \quad \text{MAC} > 0.95$$

的极点视为稳定模态。







- 典型流程：
  - 低幅正弦扫频：识别主要固有频率，避免共振。
  - 随机振动耐久：长时间、多方向随机工况，模拟 10 万英里等效路况。
  - 必要时叠加冲击试验，评估极端工况。
- 监测：布设多通道加速度计，应变片；同步采集电压、温度、BMS 报警等安全信号。
- 模态分析用途：
  - 检查一阶固有频率是否高于目标阈值（如 30-35 Hz）。
  - 将实验模态与有限元模态对比，用于**电池包结构模型修正与设计优化**。

## 本章小结

---

- 通过三个案例展示振动测试在**土木工程**、**航空柔性机翼**和**电动车电池包**中的应用。
- **足尺钢筋混凝土框架**：结合 UKF/CUKF 与参数约束，实现有限元模型刚度与阻尼的识别和修正。
- **柔性机翼**：基于 FRF 稳定图与模态识别，揭示结构非线性与软化行为。
- **电池包**：通过模态测试与耐久振动试验评估结构可靠性，并指导有限元模型更新与结构改进。

谢谢！