

绪论

李丹

东南大学土木工程学院

2026 年 2 月 26 日



目录

- ① 振动概述
- ② 工程系统中的振动
- ③ 振动分析与建模的基本方法
- ④ 振动测试的基本手段与仪器
- ⑤ 振动测试分析的工程意义
- ⑥ 小结

什么是振动？

- **振动**：系统状态（位移、速度、应力等）随时间作**往复或周期/准周期**变化的现象。
- **机械振动**：力学与工程中主要关注的，是结构在受力或平衡被扰动后产生的运动。
- 能量在**动能**与**势能**之间反复交换；若无阻尼可持续振荡，现实中因阻尼存在振动会衰减或达到稳态。
- 振动既可能是**有害**（疲劳、噪声、舒适性差），也可能被**有益利用**（乐器、传感器、测试技术）。

振动的常见分类

- **自由振动 vs 受迫振动**

- 自由振动：仅有初始扰动，无持续外力；频率由系统固有特性决定。
- 受迫振动：存在外部持续激励，响应受激励频率与幅值控制。

- **无阻尼 vs 阻尼振动**

- 理想无阻尼：无能量损失，恒幅振动。
- 阻尼振动：因摩擦、材料阻尼等能量耗散，振幅随时间衰减。

- **线性 vs 非线性振动**

- 线性：控制方程线性，可用叠加原理，模态分析等工具适用。
- 非线性：存在非线性元件/关系，可能出现周期倍化、混沌等复杂现象。

- **确定性 vs 随机振动**

- 确定性：激励是时间的确定函数。
- 随机：激励不可精确预测，需用统计方法表征（风、地震、交通等）。

土木工程结构中的振动

- 主要来源：地震、风荷载、交通荷载、机器运行、人群活动等。
- 地震：地基运动激励上部结构，可能导致严重破坏。
- 风致振动：高层建筑与长跨桥梁在特定风速下可能发生涡激共振。



图：赛格大厦



图：虎门大桥

机械结构中的振动

- 主要来源：
 - 旋转/往复式部件不平衡（离心力、惯性力）。
 - 冲击载荷、装配误差、外部振源耦合。
- 影响：
 - 结构疲劳、磨损加剧、寿命缩短。
 - 降低加工/运行精度（机床、精密设备等）。
 - 伴随噪声，影响舒适性与健康。



图: 动车组列车振动与乘坐舒适性

- 振动来源：
 - 气动力与乱流激励（机翼颤振等气动弹性问题）。
 - 发动机旋转部件不平衡、燃烧不稳定。
 - 火箭发射时的声振环境与推力振动。
 - 在轨微振动（动量轮、机构运动、微流星体撞击等）。
- 要求：
 - 关键结构固有频率避开主要激励频率，防止共振失稳。
 - 精密仪器需安装在减振平台上，隔离强烈振动。

质量-弹簧-阻尼单自由度模型

- 最基本的振动模型：质量 m 、阻尼 c 、刚度 k 。
- 状态变量：位移 $q(t)$ 。

$$m\ddot{q}(t) + c\dot{q}(t) + kq(t) = p(t).$$

- 左侧依次为惯性力、阻尼力与弹性恢复力，右侧为外激励。
- 是典型二阶线性常微分方程，可解析或数值求解，得到 $q(t)$ 。

多自由度与模态分析

- 复杂结构可等效为由多个质量-弹簧-阻尼单元组成的**多自由度系统**。
- 特点：
 - 存在多个**固有频率**与**对应振型**（模态）。
 - 可通过模态分析将耦合方程组对角化，实现按模态解耦。
- 工程意义：
 - 预测共振、指导调整刚度和质量分布，使固有频率避开激励频带。
 - 为后续模态试验与模型修正（第 5-9 章）提供理论基础。

- 解析方法：
 - 对简单系统可给出闭式解（SDF、简单 MDF、部分连续体）。
 - 有助于理解参数对频率/响应的影响关系。
- 数值方法：
 - Newmark- β 等时程积分方法（后续章节将详细讨论）。
 - 有限元法（FEM）求解特征值问题与响应分析。
- 一般分析流程：
 - ① 建立合理动力学模型（质量、刚度、阻尼、边界）。
 - ② 推导运动微分方程。
 - ③ 求解响应（解析或数值）。
 - ④ 评估振动特性，与设计要求比对并优化。

振动测量传感器：MEMS 加速度计

- MEMS 加速度传感器是当今结构振动测量的主流技术：
 - 体积极小、功耗低、成本低，可三轴测量。
 - 量程可达 $\pm 200g$ ，频响可覆盖 0-10 kHz。
 - 高精度器件噪声低至 $\mu g/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级。
- 工作原理：微型悬臂或质量块在加速度作用下产生位移，通过电容/压阻/压电等方式转换为电信号。

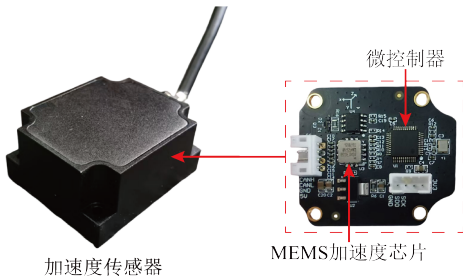


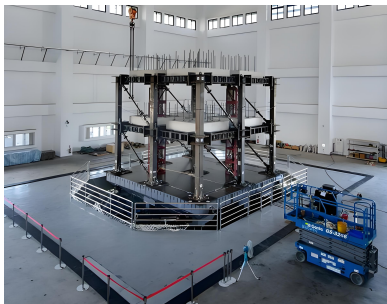
图: MEMS 加速度传感器

传感器安装与数据采集注意事项

- 安装方式：粘接、螺栓、磁吸等，需保证足够刚度，避免附加共振与信号失真。
- 电缆效应：不当布线会给结构引入附加约束，应尽量减少电缆拉力与摆动。
- 数据采集：
 - 多通道同步采样，采样频率满足采样定理。
 - 量程与动态范围应覆盖预期振动水平，避免饱和。

振动激励与测试方法

- 冲击锤激励：
 - 通过带力传感器的锤击产生宽频激励，适合中小型结构模态试验。
 - 测得冲击力与响应，可计算 FRF 识别模态参数。
- 振动台激励：
 - 地震模拟振动台：液压/电动系统模拟多向地面运动。
 - 用于评估建筑、桥梁、设备在真实地震工况下的动力响应与抗震性能。



图：地震模拟振动台

- 设计阶段：
 - 通过模态分析避开共振，确保安全与可靠性。
 - 调整刚度、质量与阻尼分布，实现目标振动性能。
- 振动控制：
 - 被动控制：TMD、阻尼器、隔振基座等。
 - 主动/半主动控制：利用致动器与控制算法抑制振动。
- 现代重大工程（超高层、长大桥梁、航空发动机等）都离不开详细的振动分析与试验验证。

- 机械设备故障诊断：
 - 振动信号中包含丰富的健康状态信息。
 - 通过频谱/包络/时频分析识别不平衡、对中不良、轴承与齿轮故障等。
- 结构健康监测（SHM）：
 - 通过长期监测模态参数变化识别刚度劣化与损伤。
 - 广泛应用于桥梁、大楼、塔架、航空结构等。
- 趋势：结合无线传感网络与智能算法，实现在线监测与预警。

本章小结

- 介绍了振动的基本概念、分类与在土木、机械、航空航天等工程系统中的主要来源。
- 概述了从单自由度到多自由度、从解析到数值的振动建模与分析基本思路。
- 说明了振动测试的主要手段（传感器、激励设备）及其在工程实践中的重要性。
- 强调了振动测试分析在设计优化、故障诊断与结构健康监测中的核心作用。

谢谢！