

《三层楼房模型的模态参数测试》实验报告

姓名 张家瑞 学号 2401111734 同组成员 沙铨骏、刘子赫
实验地点 力学楼 111 室 实验日期 2024 年 11 月 25 日

目录

| | |
|------------------------------------------------|----|
| 1 实验目的 | 2 |
| 2 实验装置、仪器及器材 | 2 |
| 3 实验内容 | 2 |
| 4 实验测量方法与测量过程 | 2 |
| 4.1 实验原理 | 2 |
| 4.2 实验步骤 | 4 |
| 4.3 实验参数 | 5 |
| 5 实验测量结果 | 5 |
| 5.1 测试不同锤帽（橡胶、尼龙、钢）力锤敲击的能量频带 | 5 |
| 5.2 单点敲击（橡胶锤帽） \Rightarrow 多点响应（SIMO） | 6 |
| 5.3 多点敲击（橡胶/尼龙锤帽） \Rightarrow 单点响应（多次的 SISO） | 8 |
| 5.3.1 橡胶锤帽正面锤击 | 8 |
| 5.3.2 尼龙锤帽侧面锤击 | 10 |
| 5.4 多点敲击（钢锤帽） \Rightarrow 单点响应（多次的 SISO） | 12 |
| 5.4.1 钢锤帽正面锤击 | 12 |
| 5.4.2 钢锤帽侧面锤击 | 14 |
| 6 结果对比、分析与讨论 | 17 |
| 7 误差分析 | 18 |

1 实验目的

1. 了解并掌握多自由度系统振动实验的原理和方法。
2. 掌握基于锤击法的频响函数测试方法，以及加速度传感器的测试技术。
3. 掌握多自由度振动系统频响函数的曲线拟合及模态参数识别分析方法。

2 实验装置、仪器及器材

1. 三层楼房模型（北大自研）
2. 力锤（LC 系列冲击锤，SINOCERA，江苏联能电子技术有限公司，并配备橡胶、尼龙、钢锤帽）、力传感器（CL-YD-303）
3. 加速度传感器（IEPE HD-501，四个，编号分别为 167549、167550、167551、167554）、转换器
4. 电荷放大器（HY1432 电荷放大器，秦皇岛海鹰科技开发有限公司）
5. 动态信号采集系统（HPDJ-8125，8CH，100KHz，南京贺普科技有限公司）
6. 动态信号测试分析系统（HP-DC8125）
7. 笔记本电脑（安装 STAP 信号测试分析处理系统软件）

3 实验内容

1. 探讨力锤锤帽材质（钢、尼龙、橡胶）与测试频带的关系。针对测试振型的频带范围，选取适合的锤帽进行测试。
2. 针对三层楼房模型，分别采用锤击法进行多次单点激励单点接收（SISO），以及单点激励多点接收（SIMO）的方式，测量模型在锤击脉冲激励下的激励与响应信号。
3. 通过对激励信号和测量的响应信号进行分析，获得频响函数，进而采用曲线拟合法，识别出三层楼房模型弯曲与扭转振型的各阶模态参数。

4 实验测量方法与测量过程

4.1 实验原理

本实验测试对象为一个三层楼房模型（图 1）。它是用四块厚铝板模拟楼板，并由四组夹芯薄钢板联结在一起构成的。其中，最下面一块铝板作为底板，固紧在刚性良好的基础上。每组夹芯薄钢板均由两片薄钢板夹一薄层高阻尼树脂材料而组成。若以弯曲振动为例，则该三层楼房模型可简化

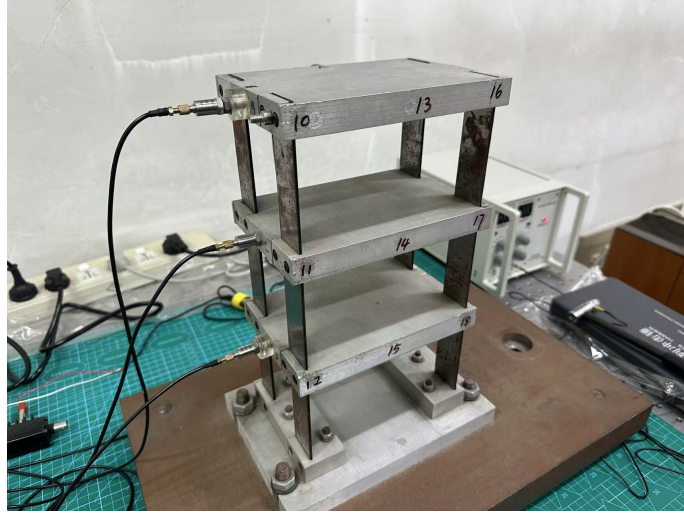


图 1: 三层楼房模型

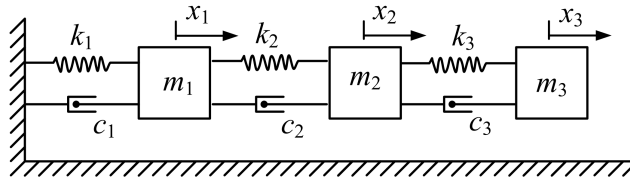


图 2: 三自由度计算模型

为图 2 所示的三自由度弹簧-质量-阻尼串联系统。其中质量 m_i 和刚度 k_i ($i = 1, 2, 3$) 可根据模型的材料和几何尺寸求出，但是，阻尼系数 c_i 则一般只能通过试验来测定。

该系统的动力学平衡方程为

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{Bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

当 $m_1 = m_2 = m_3 = m$, $c_1 = c_2 = c_3 = c_4$, $k_1 = k_2 = k_3 = k_4$ 时，阻尼矩阵 $[c]$ 与刚度矩阵 $[k]$ 成比例，此即所谓比例阻尼的一种典型情况，因而具有实模态振型。

若不考虑阻尼的影响，可根据动力学平衡方程求解无阻尼三自由度系统的特征值问题，进而得到该三自由度系统的固有圆频率分别为

$$\omega_1 = 0.445\sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \omega_2 = 1.247\sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \omega_3 = 1.802\sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

对应的特征向量为

$$\{\varphi\}_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1.802 \\ 2.247 \end{Bmatrix}, \quad \{\varphi\}_2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0.445 \\ -0.802 \end{Bmatrix}, \quad \{\varphi\}_3 = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1.247 \\ 0.555 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

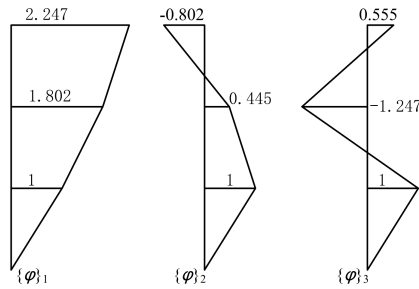


图 3: 三自由度模型的固有振型

得到的固有振型如图 3 所示。

若需要通过实验测试该模型的频响函数，具体的测试实验装置如图 4 所示。针对多自由度系统，若采用单点激励单点接收 (SISO) 的方法测试，则需要通过多次锤击不同点进行的频响函数的测量；若采用单点激励多点接收 (SIMO) 的方法测试，则仅需要一次锤击，多点同时测试，便也可以进行的频响函数的测量。

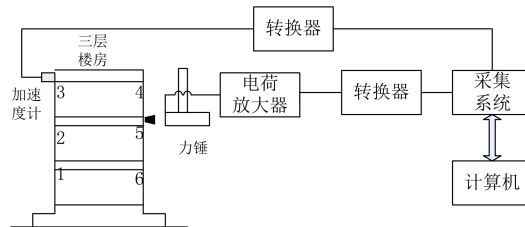


图 4: 实验装置图

4.2 实验步骤

1. 在力锤上先装好力传感器，并在三层楼房模型的输出点沿输出方向安装加速度传感器，其轴向灵敏度视其型号而定。
2. 力传感器通过电荷放大器接入动态信号采集系统的 1 通道；加速度传感器经转换器后接入动态信号采集系统的 2-5 通道。
3. 启动动态信号采集系统软件，先选“路径”，然后在“设置”中进行参数设置。
4. 测试时，先点“保存”选项，再按“采样”进入信号采集的等待状态。当锤头以垂直的方式敲击楼房模型激励点位置后，等待信号采集完毕，进行数据的保存。重复“采样”和敲击过程，进行 4 组重复性实验。
5. 最后进行数据浏览，将 1-5 通道的各实验数据导出，进行后续数据处理、频响函数确定和模态参数的识别。根据图 5 标注的各个测试点，进行如下实验测试。
6. 测试不同锤帽（橡胶、尼龙、钢）力锤敲击的能量频带。力锤分别选用橡胶、尼龙、钢三个锤帽，在模型正面敲击“4”号位置，得到力锤的激励信号，并进行 FFT 分析，得到不同锤帽力锤敲击的能量频带。

7. 单点敲击（橡胶锤帽） \Rightarrow 多点响应（SIMO）

力锤选用橡胶锤帽，在模型正面锤击“4”号位置，经过多次测试，得到另一面 B、C、D 三个点对应的采集通道的响应信号。

8. 多点敲击（橡胶/尼龙锤帽） \Rightarrow 单点响应（多次的 SISO）

a) 力锤选用橡胶锤帽，在模型正面分别锤击“4”、“5”、“6”号位置，通过多次测试，在另一面的 B 点测得相应的响应信号。

b) 力锤选用尼龙锤帽，在模型侧面分别锤击“13”、“14”、“15”号位置，通过多次测试，在另一面的 A 点测得相应的响应信号。

9. 多点敲击（钢锤帽） \Rightarrow 单点响应（多次的 SISO）

a) 力锤选用钢锤帽，分别在模型正面锤击“1”、“2”、“3”、“7”、“8”、“9”号位置，通过多次测试，在模型侧面的 A 点测得相应的响应信号。

b) 力锤选用钢锤帽，分别在模型侧面锤击“10”、“11”、“12”、“16”、“17”、“18”号位置，通过多次测试，在模型正面的 B 点测得相应的响应信号。

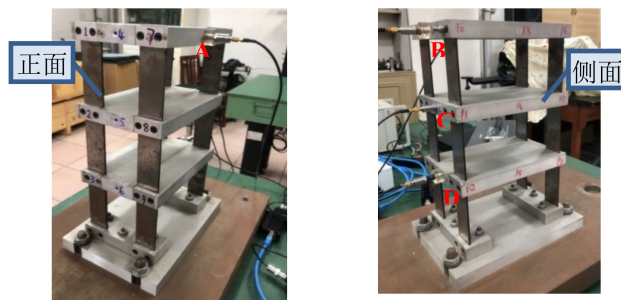


图 5: 测点的标注位置

4.3 实验参数

电荷放大器的放大倍数选取为 400 倍。

A 通道加速度传感器修正系数 0.098619；B 通道加速度传感器修正系数 0.1002；C 通道加速度传感器修正系数 0.097752；D 通道加速度传感器修正系数 0.098619。

触发选择为内部触发；触发方式为高电平触发；触发设置为力传感器 CH1 通道，触发幅值为 5N，提前/滞后-50 点；采集时长 0.5s，采样频率 8000Hz。

5 实验测量结果

5.1 测试不同锤帽（橡胶、尼龙、钢）力锤敲击的能量频带

首先，测试了不同锤帽（橡胶、尼龙、钢）对力锤敲击的能量频带影响，激励点位于模型正面“4”号位置。首先对采集的数据进行时域可视化，得到力锤的激励信号，如图 6(a-c) 所示。随后，进行 FFT 分析，并对频域数据进行平均化处理，得到不同锤帽力锤敲击的能量频带，如图 6(d) 所示。从分析结果可以看出，随着频率的增加，激励信号的强度逐渐减小。此外，硬度不同的材料在激励

信号的频带宽度上也表现出明显差异。材料硬度越大，激发的信号频带越宽，且频率分布由低频到高频的变化较为平缓。不同锤头产生的激励信号带宽有所不同，其中橡胶锤头的激励信号带宽最高约为 1000 Hz，尼龙锤头的激励信号带宽约为 2500 Hz，而钢锤头的激励信号带宽则可达到 4000 Hz 以上。根据采样定理，本实验的采样频率为 8000 Hz。

因此，在测量固有频率较低的结构时，应选择较橡胶的锤头，以便将激励能量集中在低频范围，从而获得更好的测量结果；而在测量固有频率较高的结构时，应选择较尼龙或者钢锤头，以确保在测量所需频率范围内仍有足够强的激励信号。

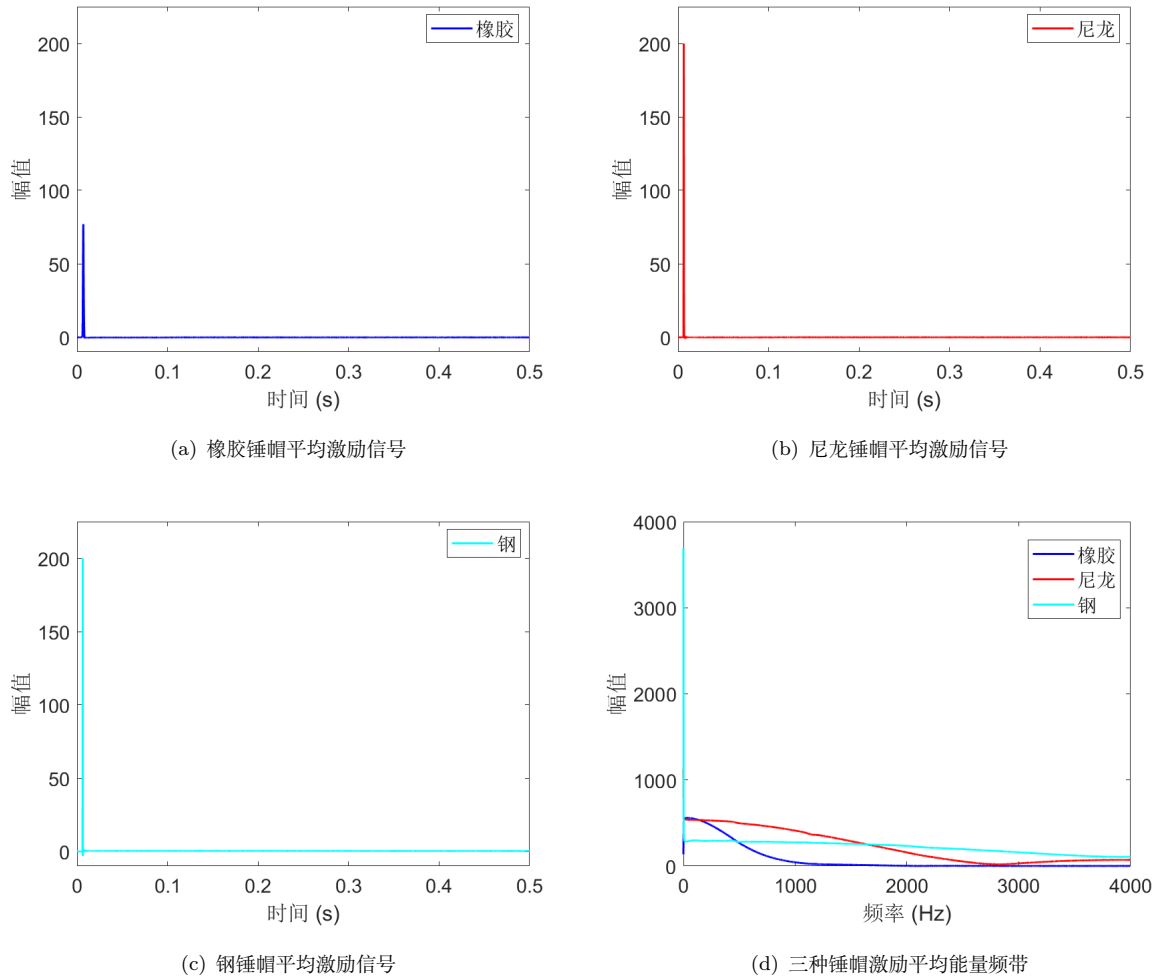


图 6: 橡胶锤帽、尼龙锤帽、钢锤帽得到的激励信号以及能量频带

5.2 单点敲击（橡胶锤帽） \Rightarrow 多点响应（SIMO）

在此部分中，力锤选用了橡胶锤帽，并在模型正面“4”号位置进行敲击。经过多次测试，采集了另一面 B、C、D 三个点对应的响应信号。通过快速傅里叶变换（FFT），得到平均后的频响函数，如图 7 所示。

在本实验中，我们使用加速度传感器测量了对应点的加速度，因此其对应的虚频曲线的幅值相连即为振动模式的振型。为进一步分析，我们对得到的幅值进行了归一化处理，将 D 通道的信号幅值设定为 1，从而可以准确地绘制出成比例的幅值图，如图 8 所示。对应的振动模式为：

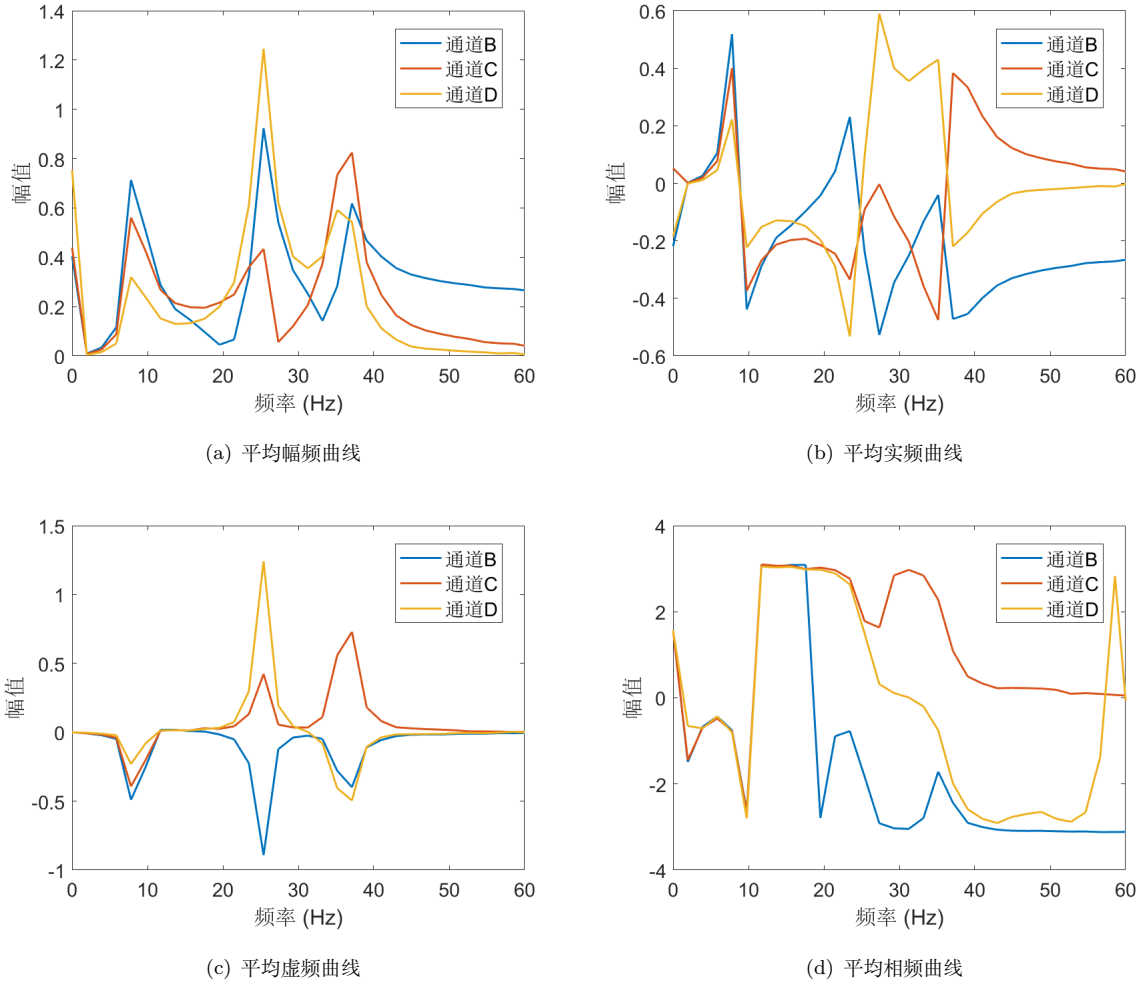


图 7: 橡胶锤帽正面锤击 SIMO 频响应函数曲线

$$\{\varphi\}_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1.709 \\ 2.133 \end{Bmatrix}, \quad \{\varphi\}_2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0.341 \\ -0.719 \end{Bmatrix}, \quad \{\varphi\}_3 = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1.472 \\ 0.806 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

实频函数的零点与虚频函数的极值点对应的频率即为结构的固有频率。因此，通过这些频率信息，我们可以获得该结构在敲击方向上进行弯曲振动时的前三阶固有频率，如表 1 所示。

| 阶数 | 一阶 | 二阶 | 三阶 |
|-----------|--------|---------|---------|
| 通道 B (Hz) | 7.8125 | 25.3906 | 37.1094 |
| 通道 C (Hz) | 7.8125 | 25.3906 | 37.1094 |
| 通道 D (Hz) | 7.8125 | 25.3906 | 37.1094 |
| 平均 (Hz) | 7.8125 | 25.3906 | 37.1094 |

表 1: 橡胶锤帽正面锤击 SIMO 前三阶固有频率

阻尼比可以通过实频曲线的波峰和波谷对应的频率来进行计算。根据阻尼比的计算公式（公式 5），其中 ω_a 与 ω_b 分别为实频曲线的波峰与波谷对应的频率， ω_0 为虚频曲线的波峰或波谷

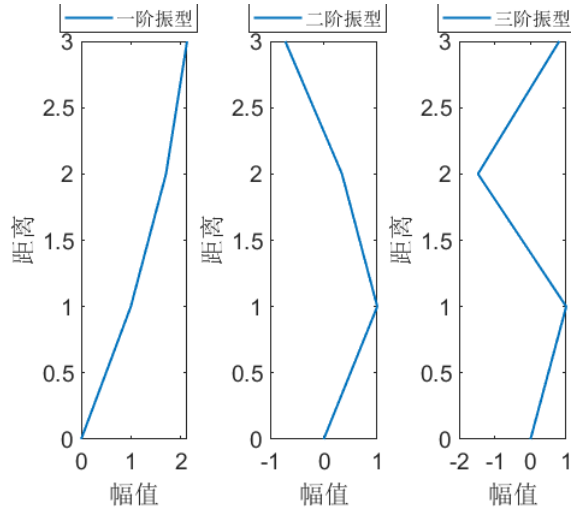


图 8: 橡胶锤帽正面锤击 SIMO 振型图

对应的频率。通过这一计算方法，可以得到各阶模态对应的阻尼比，如表 2 所示。

$$\zeta = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_0} \quad (5)$$

| 阶数 | 一阶 | 二阶 | 三阶 |
|------|--------|--------|--------|
| 通道 B | 0.1250 | 0.0769 | 0.0263 |
| 通道 C | 0.1250 | 0.0769 | 0.0263 |
| 通道 D | 0.1250 | 0.0769 | 0.0263 |
| 平均 | 0.1250 | 0.0769 | 0.0263 |

表 2: 橡胶锤帽正面锤击 SIMO 阻尼比

5.3 多点敲击（橡胶/尼龙锤帽）⇒ 单点响应（多次的 SISO）

5.3.1 橡胶锤帽正面锤击

首先力锤选用橡胶锤帽，在模型正面分别锤击“4”、“5”、“6”号位置，通过多次测试，在另一面的 B 点测得相应的响应信号。通过快速傅里叶变换，得到平均后的频响函数，如图 9 所示。

同上一节中的处理操作，同时对得到的幅值进行归一化处理，即让点 4 对应的幅值设定为 1，进而可以准确画出成比例的幅值图，如图 10 所示。且对应的振动模态为

$$\{\varphi\}_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1.959 \\ 2.719 \end{Bmatrix}, \quad \{\varphi\}_2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0.371 \\ -0.737 \end{Bmatrix}, \quad \{\varphi\}_3 = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1.444 \\ 0.742 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

实频函数的零点和虚频函数的极值点对应的为固有频率，据此我们可以得到该结构在敲击方向做弯曲振动时的前三阶固有频率，如表 3 所示。

阻尼比可通过实频曲线的波峰波谷对应的频率来计算。从根据阻尼比的计算公式 5，其中 ω_a 与 ω_b 为实频曲线的波峰与波谷对应的频率， ω_0 为虚频曲线波峰或波谷对应的频率。可得各阶模态对应阻尼比如表 4 所示。

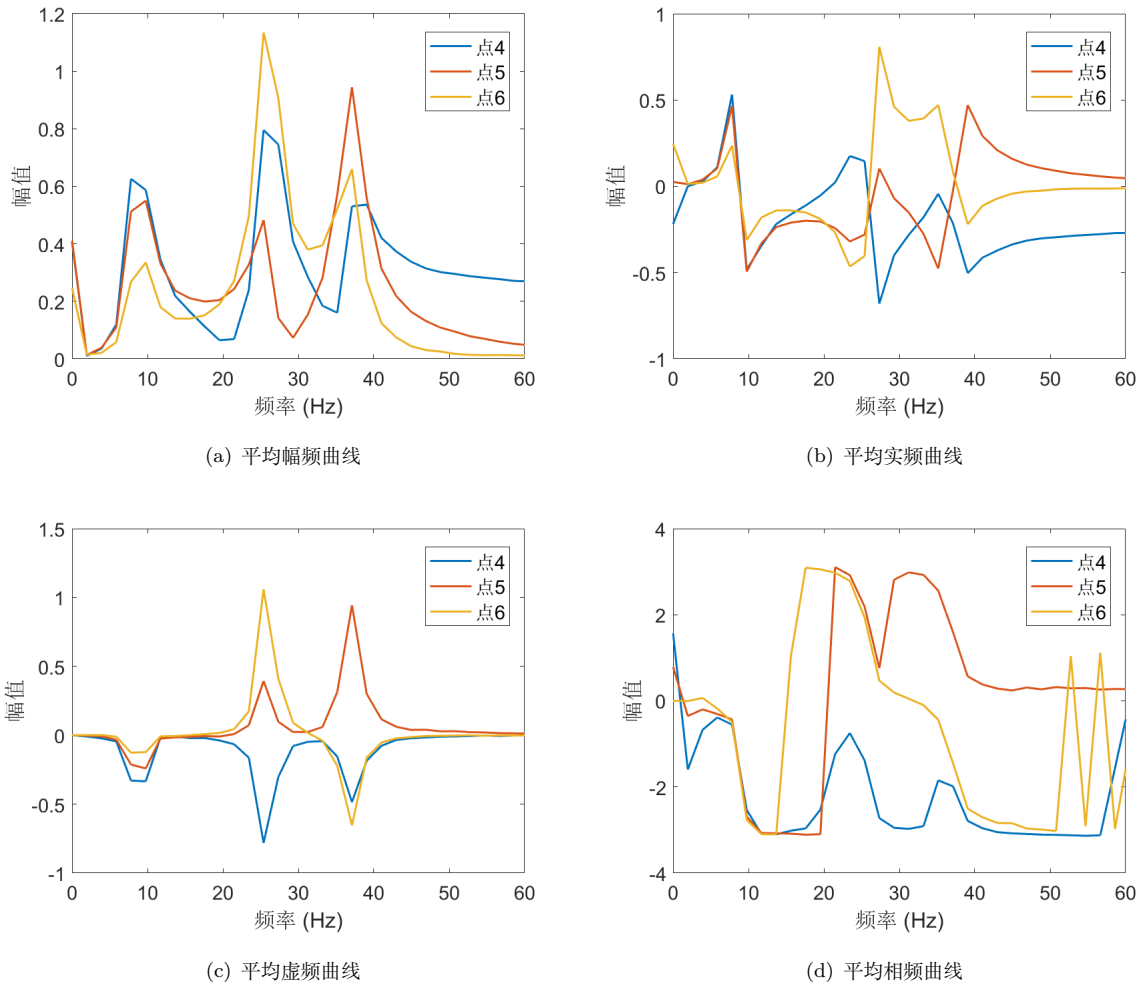


图 9: 橡胶锤帽正面锤击 SISO 频响应函数曲线

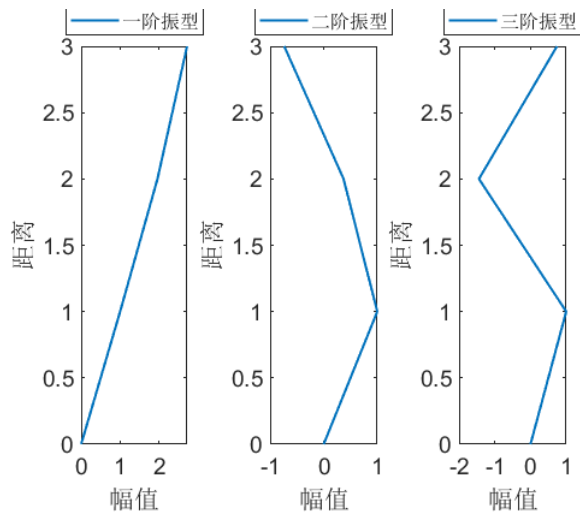


图 10: 橡胶锤帽正面锤击 SISO 振型图

| 阶数 | 一阶 | 二阶 | 三阶 |
|-------------|--------|---------|---------|
| 锤击 4 点 (Hz) | 9.7656 | 25.3906 | 37.1094 |
| 锤击 5 点 (Hz) | 9.7656 | 25.3906 | 37.1094 |
| 锤击 6 点 (Hz) | 9.7656 | 25.3906 | 37.1094 |
| 平均 (Hz) | 9.7656 | 25.3906 | 37.1094 |

表 3: 橡胶锤帽正面锤击 SISO 前三阶固有频率

| 阶数 | 一阶 | 二阶 | 三阶 |
|--------|--------|--------|--------|
| 锤击 4 点 | 0.1000 | 0.0769 | 0.0527 |
| 锤击 5 点 | 0.1000 | 0.0769 | 0.0527 |
| 锤击 6 点 | 0.1000 | 0.0769 | 0.0527 |
| 平均 | 0.1000 | 0.0769 | 0.0527 |

表 4: 橡胶锤帽正面锤击 SISO 阻尼比

5.3.2 尼龙锤帽侧面锤击

接着力锤选用尼龙锤帽，在模型侧面分别锤击“13”、“14”、“15”号位置，通过多次测试，在另一面的 A 点测得相应的响应信号。通过快速傅里叶变换，得到平均后的频响函数，如图 11 所示。

同前面的处理操作，同时对得到的幅值进行归一化处理，即让点 15 点对应的幅值设定为 1，进而可以准确画出成比例的幅值图，如图 12 所示。且对应的振动模式为

$$\{\varphi\}_1 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 2.737 \\ 3.887 \end{Bmatrix}, \quad \{\varphi\}_2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0.803 \\ -0.959 \end{Bmatrix}, \quad \{\varphi\}_3 = \begin{Bmatrix} 1 \\ -1.005 \\ 0.433 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

实频函数的零点和虚频函数的极值点对应的为固有频率，据此我们可以得到该结构在敲击方向做弯曲振动时的前三阶固有频率，如表 5 所示。

| 阶数 | 一阶 | 二阶 | 三阶 |
|--------------|---------|---------|----------|
| 锤击 13 点 (Hz) | 175.781 | 605.469 | 1104.422 |
| 锤击 14 点 (Hz) | 175.781 | 605.469 | 1104.422 |
| 锤击 15 点 (Hz) | 175.781 | 605.469 | 1104.422 |
| 平均 (Hz) | 175.781 | 605.469 | 1104.422 |

表 5: 尼龙锤帽侧面锤击 SISO 前三阶固有频率

阻尼比可通过实频曲线的波峰波谷对应的频率来计算。从根据阻尼比的计算公式 5，其中 ω_a 与 ω_b 为实频曲线的波峰与波谷对应的频率， ω_0 为虚频曲线波峰或波谷对应的频率。可得各阶模态对应阻尼比如表 6 所示。

其中二阶固有频率与前面求得的相同，但一阶与三阶偏高。

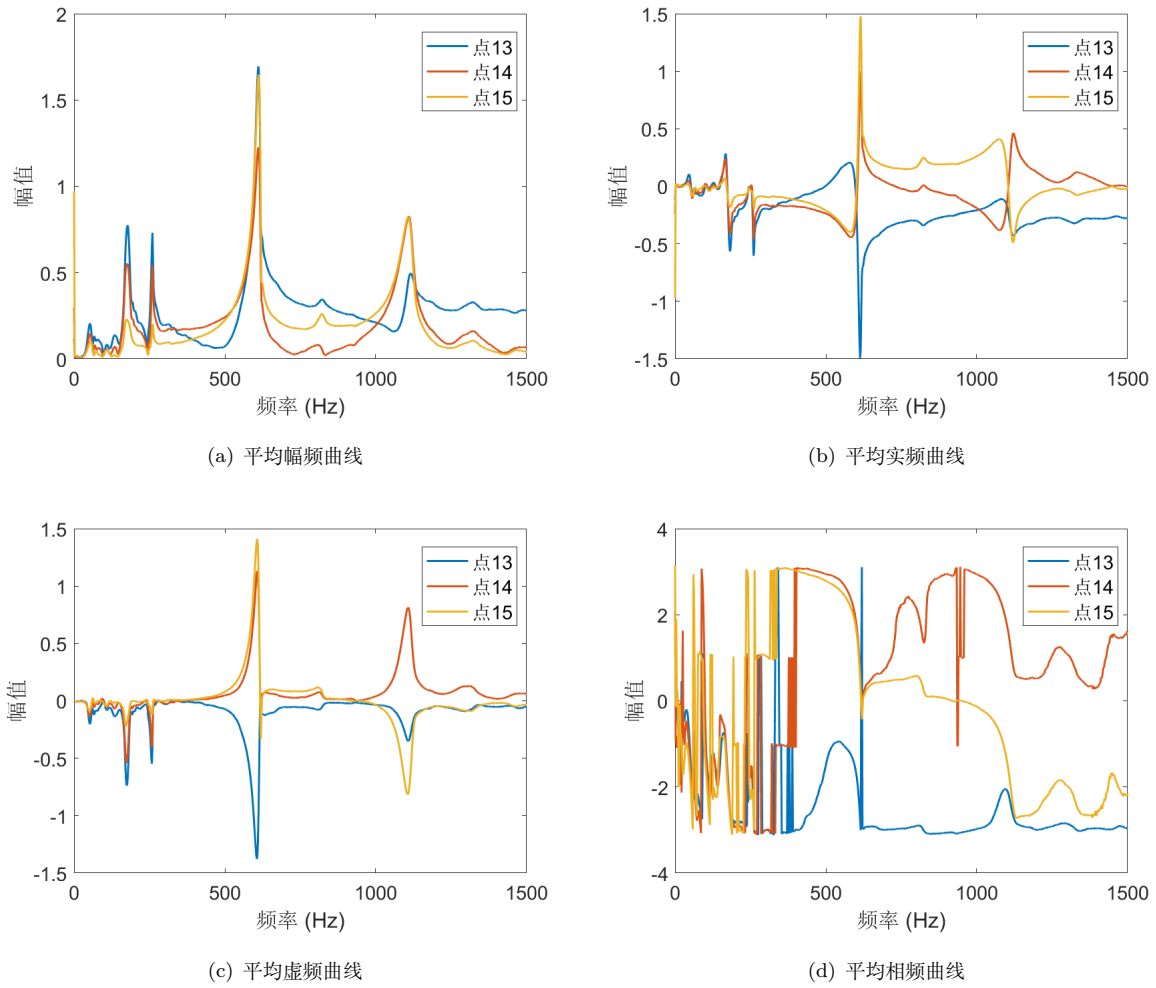


图 11: 尼龙锤帽侧面锤击 SISO 频响应函数曲线

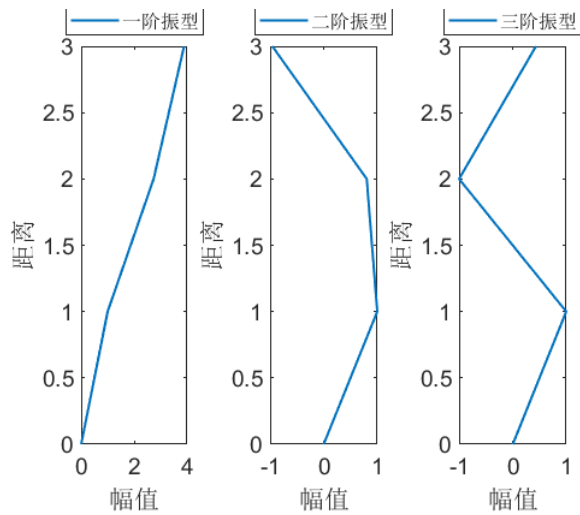


图 12: 尼龙锤帽侧面锤击 SISO 振型图

| 阶数 | 一阶 | 二阶 | 三阶 |
|---------|--------|--------|--------|
| 锤击 13 点 | 0.0389 | 0.0291 | 0.0177 |
| 锤击 14 点 | 0.0445 | 0.0258 | 0.0212 |
| 锤击 15 点 | 0.0500 | 0.0274 | 0.0212 |
| 平均 | 0.0445 | 0.0274 | 0.0200 |

表 6: 尼龙锤帽侧面锤击 SISO 阻尼比

5.4 多点敲击 (钢锤帽) \Rightarrow 单点响应 (多次的 SISO)

5.4.1 钢锤帽正面锤击

力锤选用钢锤帽, 分别在模型正面锤击“1”、“2”、“3”、“7”、“8”、“9”号位置, 通过多次测试, 在模型侧面的 A 点测得相应的响应信号。通过快速傅里叶变换, 得到平均后的频响函数, 如图 13 与图 14 所示。

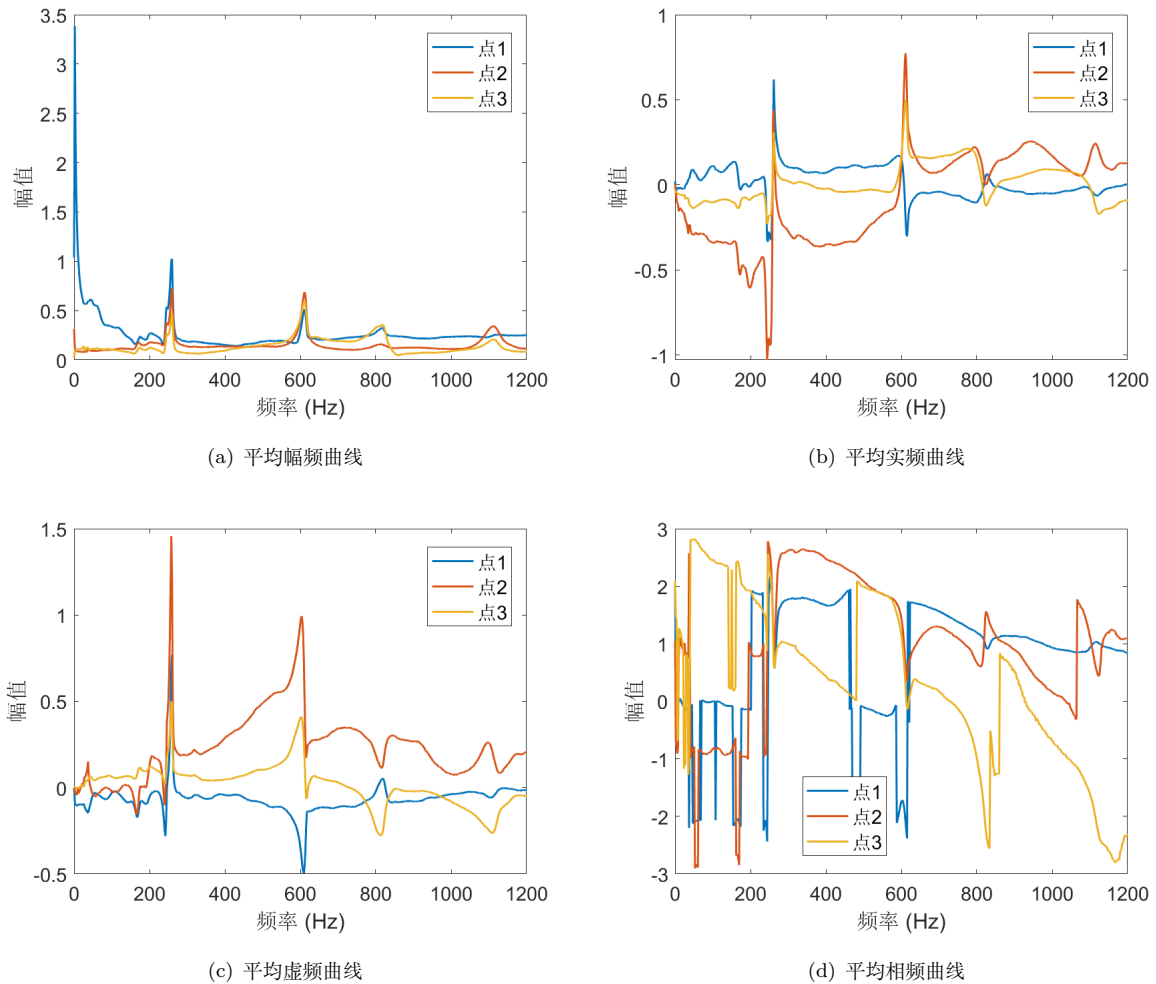


图 13: 钢锤帽正面锤击 SISO 频响函数曲线 (点 1、2、3)

同前面的处理操作, 同时对得到的幅值进行归一化处理, 即让点 3 与点 9 对应的幅值设定为 1, 进而可以准确画出成比例的幅值图, 如图 15 与图 16 所示。其中图 15 为位于同一竖直线上的点构

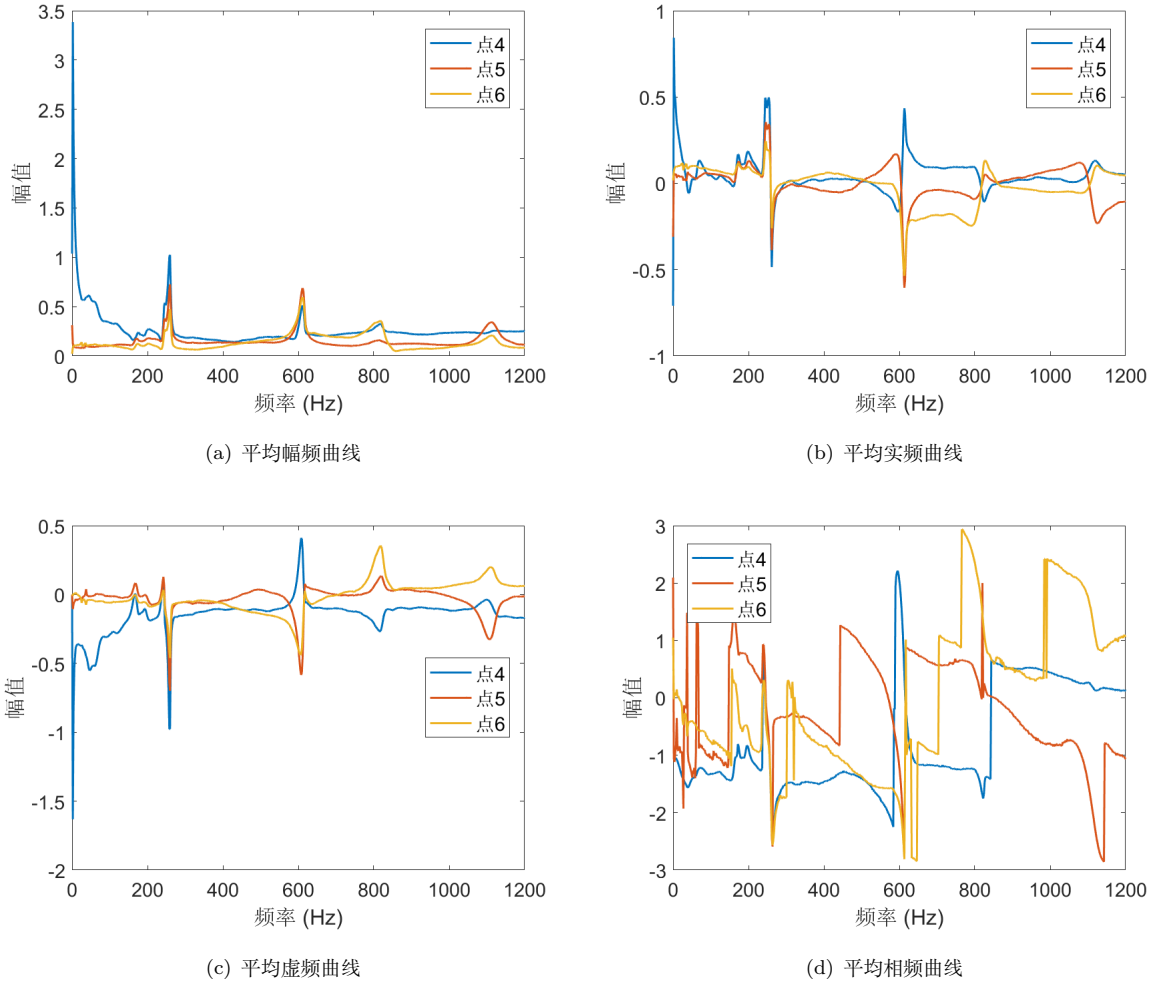


图 14: 钢锤帽正面锤击 SISO 频响应函数曲线 (点 4、5、6)

成的模态图, 图 16为完整的三维模态图。

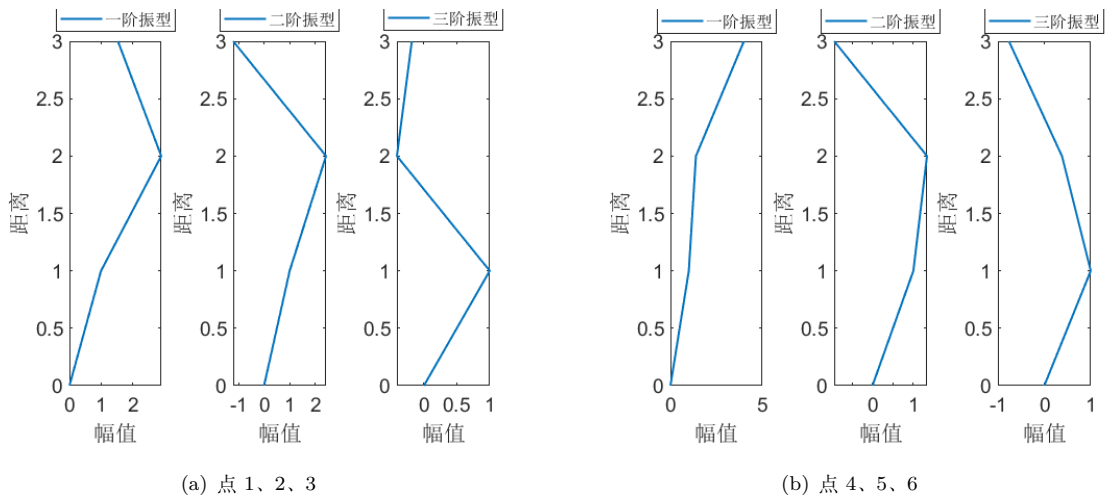


图 15: 钢锤帽正面锤击 SISO 振型图

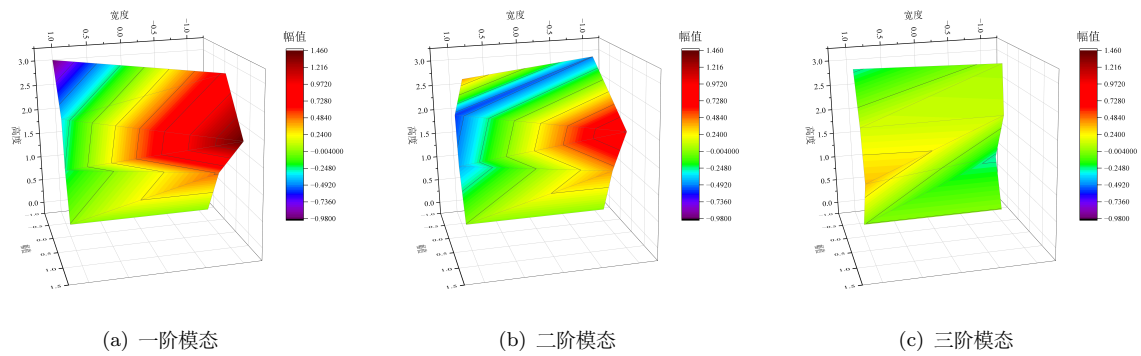


图 16: 钢锤帽正面锤击 SISO 振型图 (三维图)

实频函数的零点和虚频函数的极值点对应的为固有频率，据此我们可以得到该结构在敲击方向做扭转振动时的前三阶固有频率如表 7 所示。

| 阶数 | 一阶 | 二阶 | 三阶 |
|-------------|---------|---------|---------|
| 锤击 1 点 (Hz) | 259.766 | 609.375 | 818.359 |
| 锤击 2 点 (Hz) | 257.813 | 603.516 | 816.406 |
| 锤击 3 点 (Hz) | 257.813 | 601.563 | 812.500 |
| 锤击 4 点 (Hz) | 257.813 | 607.422 | 816.406 |
| 锤击 5 点 (Hz) | 259.766 | 607.422 | 820.313 |
| 锤击 6 点 (Hz) | 259.766 | 605.469 | 818.359 |
| 平均 (Hz) | 258.790 | 605.795 | 817.057 |

表 7: 钢锤帽正面锤击 SISO 前三阶固有频率

阻尼比可通过实频曲线的波峰波谷对应的频率来计算。从根据阻尼比的计算公式 5。可得各阶模态对应阻尼比如表 8 所示。

| 阶数 | 一阶 | 二阶 | 三阶 |
|--------|--------|--------|--------|
| 锤击 1 点 | 0.0151 | 0.0209 | 0.0191 |
| 锤击 2 点 | 0.0190 | 0.0243 | 0.0180 |
| 锤击 3 点 | 0.0190 | 0.0292 | 0.0193 |
| 锤击 4 点 | 0.0152 | 0.0129 | 0.0144 |
| 锤击 5 点 | 0.0150 | 0.0177 | 0.0144 |
| 锤击 6 点 | 0.0150 | 0.0274 | 0.0215 |
| 平均 | 0.0164 | 0.0221 | 0.0178 |

表 8: 钢锤帽正面锤击 SISO 阻尼比

5.4.2 钢锤帽侧面锤击

力锤选用钢锤帽，分别在模型侧面锤击“10”、“11”、“12”、“16”、“17”、“18”号位置，通过多次测试，在模型正面的 B 点测得相应的响应信号。通过快速傅里叶变换，得到平均后的频响函数，如图 17 与图 18 所示。

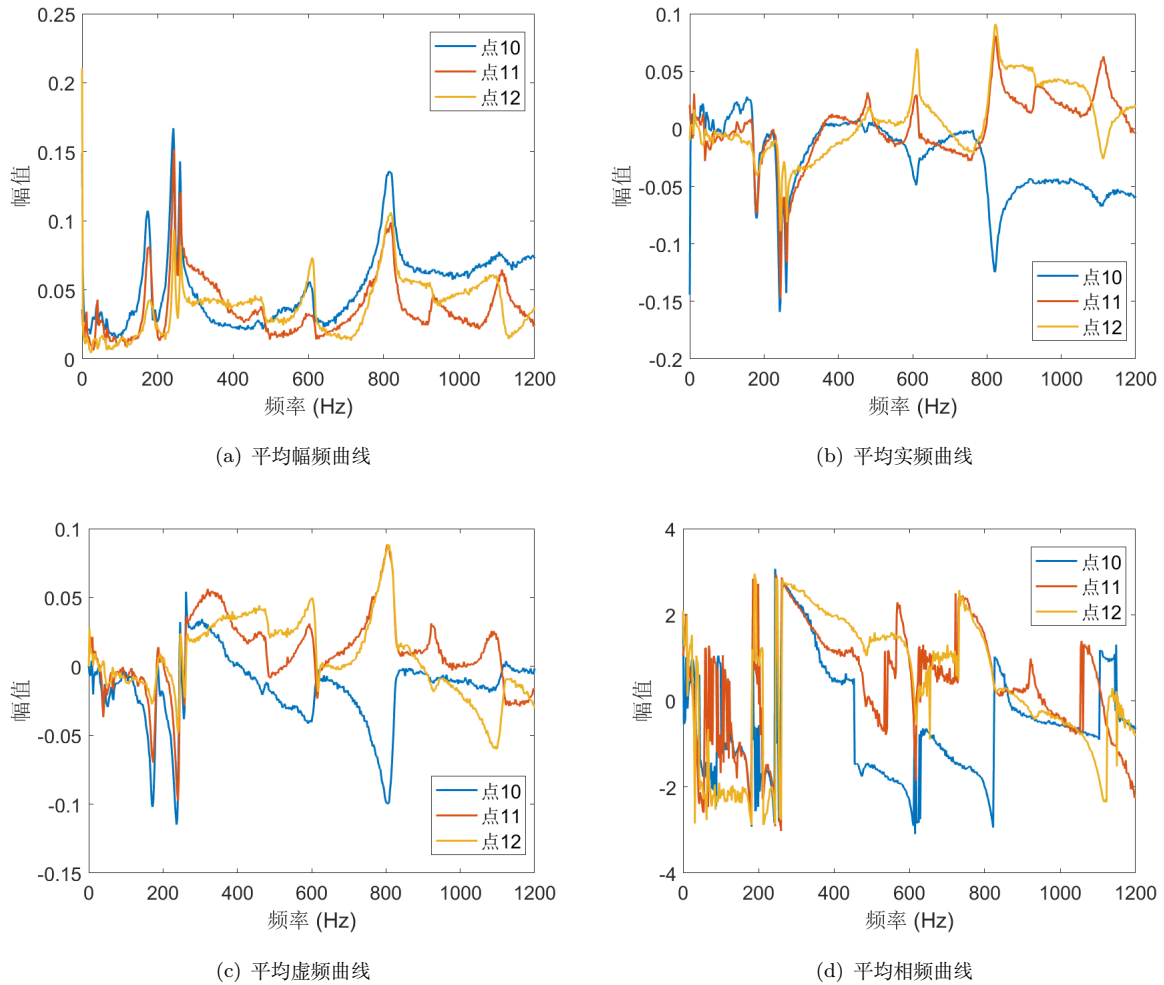


图 17: 钢锤帽侧面锤击 SISO 频响应函数曲线 (点 10、11、12)

同前面的处理操作，同时对得到的幅值进行归一化处理，即让点 12 与点 18 对应的幅值设定为 1，进而可以准确画出成比例的幅值图，如图 19 与图 20 所示。其中图 19 为位于同一竖直线上的点构成的模态图，图 20 为完整的三维模态图。

实频函数的零点和虚频函数的极值点对应的为固有频率，据此我们可以得到该结构在敲击方向做扭转振动时的前三阶固有频率如表 9 所示。

| 阶数 | 一阶 | 二阶 | 三阶 |
|--------------|---------|---------|---------|
| 锤击 10 点 (Hz) | 236.328 | 599.609 | 802.734 |
| 锤击 11 点 (Hz) | 240.234 | 593.750 | 802.734 |
| 锤击 12 点 (Hz) | 240.234 | 601.563 | 804.688 |
| 锤击 16 点 (Hz) | 257.813 | 605.469 | 806.641 |
| 锤击 17 点 (Hz) | 257.813 | 607.422 | 810.547 |
| 锤击 18 点 (Hz) | 259.766 | 607.422 | 810.547 |
| 平均 (Hz) | 248.698 | 602.539 | 806.315 |

表 9: 钢锤帽侧面锤击 SISO 前三阶固有频率

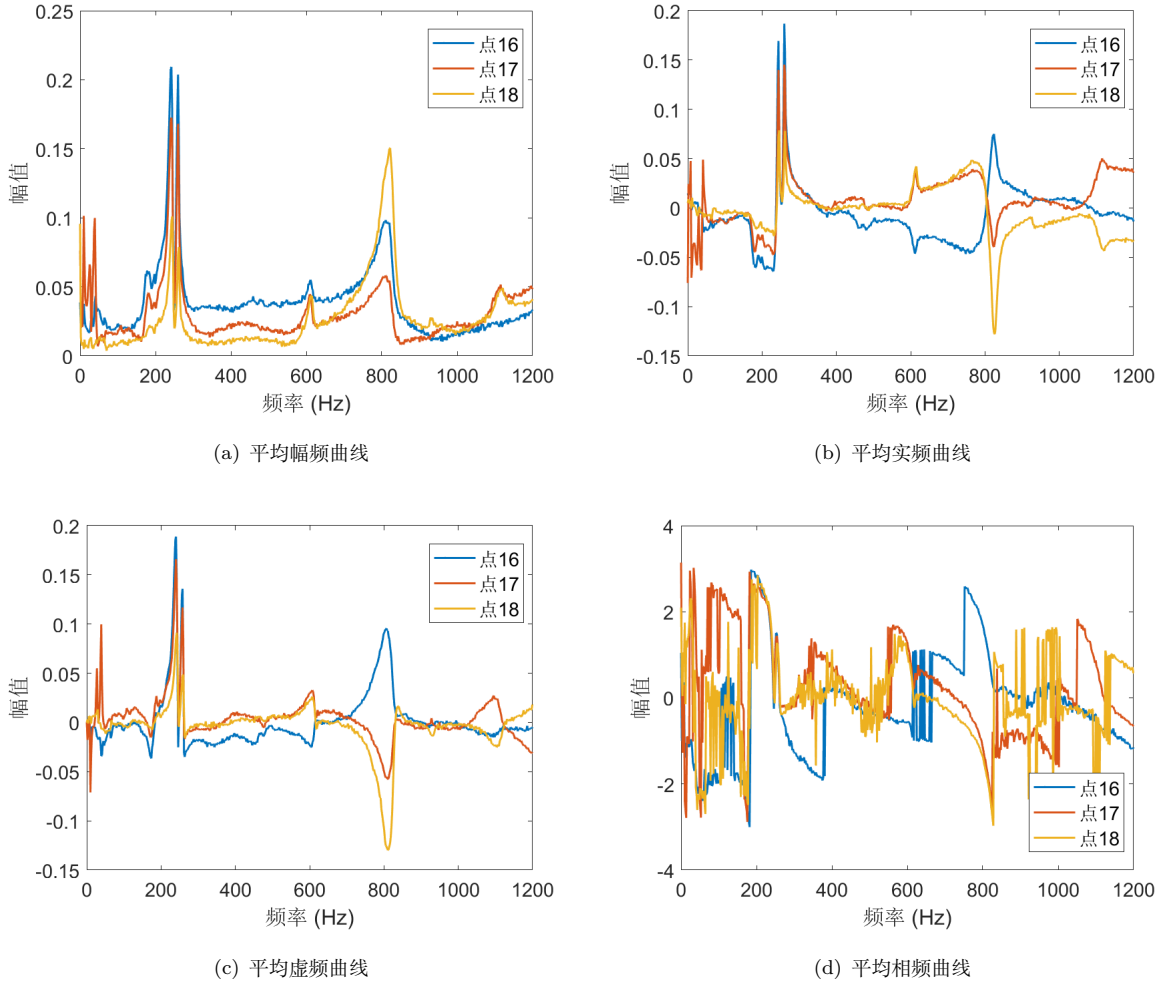


图 18: 钢锤帽侧面锤击 SISO 频响应函数曲线 (点 16、17、18)

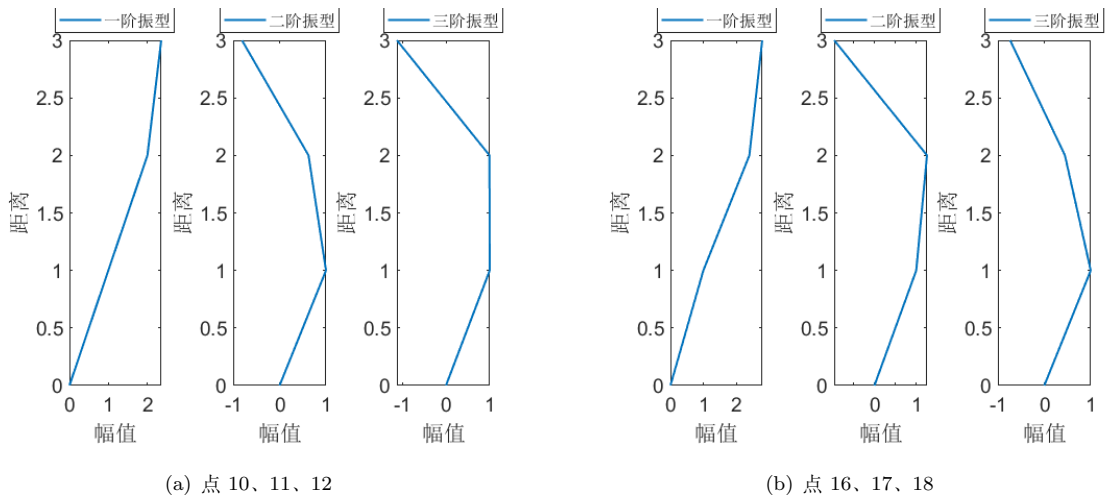


图 19: 钢锤帽侧面锤击 SISO 振型图

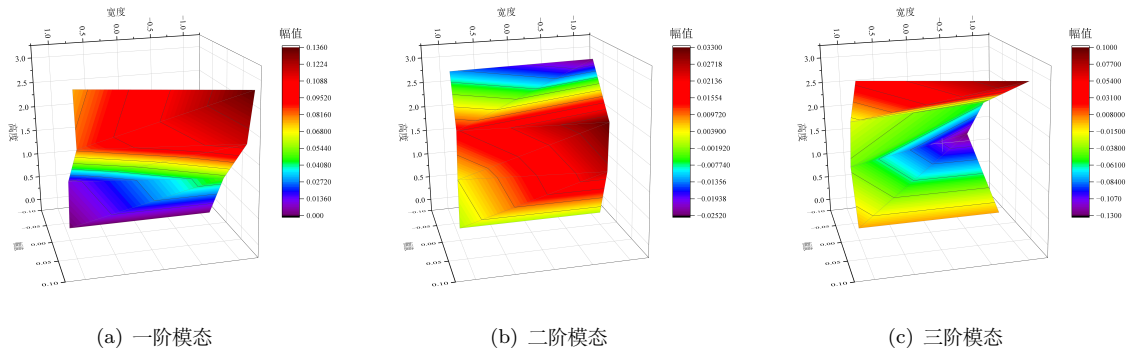


图 20: 钢锤帽侧面锤击 SISO 振型图 (三维图)

阻尼比可通过实频曲线的波峰波谷对应的频率来计算。从根据阻尼比的计算公式 5。可得各阶模态对应阻尼比如表 10 所示。

| 阶数 | 一阶 | 二阶 | 三阶 |
|---------|--------|--------|--------|
| 锤击 10 点 | 0.0455 | 0.0659 | 0.0268 |
| 锤击 11 点 | 0.0407 | 0.0477 | 0.0243 |
| 锤击 12 点 | 0.0488 | 0.0325 | 0.0243 |
| 锤击 16 点 | 0.0462 | 0.0344 | 0.0237 |
| 锤击 17 点 | 0.0500 | 0.0351 | 0.0251 |
| 锤击 18 点 | 0.0444 | 0.0367 | 0.0237 |
| 平均 | 0.0459 | 0.0421 | 0.0247 |

表 10: 钢锤帽侧面锤击 SISO 阻尼比

6 结果对比、分析与讨论

1. 本次实验中，我们首先测试了不同锤帽（橡胶、尼龙、钢）对力锤敲击能量频带的影响。通过对采集的力锤信号进行 FFT 分析，并对频域数据进行平均化处理，得到不同锤帽力锤敲击的能量频带。从分析结果可以看出，随着频率的增加，激励信号的强度逐渐减小。此外，硬度不同的材料在激励信号的频带宽度上表现出明显差异。材料硬度越大，激发的信号频带越宽，且频率分布由低频到高频的变化较为平缓。不同锤头产生的激励信号带宽有所不同，其中橡胶锤头的激励信号带宽最高约为 1000 Hz，尼龙锤头的激励信号带宽约为 2500 Hz，而钢锤头的激励信号带宽则可达 4000 Hz 以上。因此，在测量固有频率较低的结构时，应选择较软的橡胶锤头，以便将激励能量集中在低频范围，从而获得更好的测量结果；而在测量固有频率较高的结构时，应选择较硬的尼龙或钢锤头，以确保在测量所需频率范围内仍有足够强的激励信号。
2. 从分析 5.2 与 5.3.1 的结果可知，针对橡胶锤帽，SIMO 和 SISO 两种测量方式得到的振型、固有频率和阻尼比基本保持一致（见表 11）。但在一阶固有频率与三阶阻尼比上略有偏差。这可能是由于采样频率的限制，尤其是在较低频率范围内，经过 FFT 变换后的数据点较为稀疏，导致在确定固有频率和阻尼比时可能出现一定误差。整体阻尼比随着固有频率的增加而减小。同时，测得的数据与三自由度系统阻尼振动的固有频率和固有振型的理论计算结果基本一致。

| 阶数 | 一阶 | 二阶 | 三阶 |
|------------------|--------|---------|---------|
| SIMO 测得固有频率 (Hz) | 7.8125 | 25.3906 | 37.1094 |
| SISO 测得固有频率 (Hz) | 9.7656 | 25.3906 | 37.1094 |
| SIMO 测得阻尼比 | 0.1250 | 0.0769 | 0.0263 |
| SISO 测得阻尼比 | 0.1000 | 0.0769 | 0.0527 |

表 11: 橡胶锤帽 SIMO 与 SISO 测得模型弯曲固有频率与阻尼比

3. 从分析 5.3.1与5.3.2的结果可知, 针对橡胶和尼龙锤帽, 使用 SISO 方式测得的振型基本一致 (见表 12)。然而, 尼龙锤帽通过侧面敲击测得的固有频率明显高于橡胶锤帽正面敲击测得的固有频率。这一差异可能与连接三层楼模型的铁片刚度差异有关。由于铁片在两个方向上的刚度差异较大, 因此导致弯曲固有频率的不同。

| 阶数 | 一阶 | 二阶 | 三阶 |
|-------------------|---------|---------|----------|
| 橡胶锤帽正面敲击固有频率 (Hz) | 7.8125 | 25.3906 | 37.1094 |
| 尼龙锤帽侧面敲击固有频率 (Hz) | 175.781 | 605.469 | 1104.422 |
| 橡胶锤帽正面敲击阻尼比 | 0.1250 | 0.0769 | 0.0263 |
| 尼龙锤帽侧面敲击阻尼比 | 0.0445 | 0.0274 | 0.0200 |

表 12: 橡胶锤帽正面敲击与尼龙锤帽侧面敲击测得模型弯曲固有频率与阻尼比

4. 从分析 5.4.1与5.4.2的结果可知, 通过钢锤帽, 使用 SISO 方式测得的正面扭转与侧面扭转的固有频率基本一致 (见表 13)。从扭转的角度分析, 由于底座固定, 一个面限制了扭转自由度, 因此正面和侧面测得的扭转模态应为相同的扭转方向。因此, 这两种测量方式的模态应该是相似的。然而, 振型上仍然存在一定的差异。这一方面可能是由于数据读取时的误差, 另一方面也可能是由于敲击方向的不同导致振型有所不同, 但总体趋势大致相同。

| 阶数 | 一阶 | 二阶 | 三阶 |
|---------------|---------|---------|---------|
| 正面敲击固有频率 (Hz) | 258.790 | 605.795 | 817.057 |
| 侧面敲击固有频率 (Hz) | 248.698 | 602.539 | 806.315 |
| 正面敲击阻尼比 | 0.0164 | 0.0221 | 0.0178 |
| 侧面敲击阻尼比 | 0.0459 | 0.0421 | 0.0247 |

表 13: 钢锤帽正面敲击与侧面敲击测得模型扭转固有频率与阻尼比

7 误差分析

1. 由于锤击法对实验操作人员的要求较高, 每次敲击时必须保持力度一致, 且避免连击。因此, 在敲击过程中可能会产生小的操作失误, 从而影响数据的有效性和准确性。
2. 每次敲击时锤头未必能保证垂直于敲击面, 这可能导致产生的振动不完全是一维的, 进而影响振动模态的准确性。
3. 每次敲击时, 锤击点位置可能无法完全处于结构的正中间。例如, 在测试弯曲固有频率时, 如果锤击点发生偏移, 可能会同时激发弯曲和扭转振动, 进而干扰数据的读取。为了避免这一问

题，可以使用机械敲击来确保锤击点的精确定位。

4. 仪器本身的测量误差也可能对结果产生一定的影响，可以通过提高仪器精度从而减小误差。
5. 对于低频固有频率的测量，由于采样频率的限制，FFT 变换后的数据在低频域内可能较为稀疏，导致在处理时难以精确判断频率峰值。低频域数据点的稀疏性会影响固有频率的准确提取，从而产生误差。