

《动态数字图像相关法实验》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 112 室 实验日期 2024 年 12 月 12 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 实验测量原理、方法与测量过程	3
4.1 动态三维数字图像相关方法测量结构动态响应的基本原理	3
4.2 动态测量过程	4
4.3 实验测试内容	6
5 实验测量结果分析与讨论	7
5.1 标定结果	7
5.2 截面动态响应特征分析	7
5.2.1 一阶模态分析 (23Hz 激励)	7
5.2.2 二阶模态分析 (151Hz 激励)	9
5.3 点动态响应特征分析	9
5.3.1 一阶模态分析 (23Hz 激励)	9
5.3.2 二阶模态分析 (151Hz 激励)	9
6 数据误差分析与提高精度的方法	10

1 实验目的

1. 掌握数字图像相关法的基本原理，以及三维数字图像相关法测量物体表面位移场的方法和技术。
2. 了解三维数字图像相关系统的使用方法。
3. 熟悉采用动态数字图像相关法研究结构动态响应问题的实验装置及其有关的试验技术。
4. 了解铝板动态响应的特点。

2 实验装置、仪器及器材

1. 三维动态光学应变测量系统 (两台 FASTCAM SA-Z PHOTRON LIMITED 480K-M-16GB 高速相机、采集卡、GOM Correlate Professional 2017 软件、Photron FASTCAM Viewer 软件)
2. 标定板 (MV200, 尺寸 $250 \times 200 \text{mm}^2$)
3. 激振器 (Mini Shaker, Type 4810)
4. 功率放大器 (Bruel & Kjaer, Power Amplifier, Type 2718)
5. 信号发生器 (RIGOL, DG1022, 2Channel, 20MHz, 100MSa/s)
6. 光源 (两个, dedocool)
7. 铝板 (尺寸 $150.0 \times 246.5 \times 2.0 \text{mm}^3$)
8. DELL 笔记本电脑

3 实验内容

本实验测试对象为一个铝板，其尺寸为 $150.0 \times 246.5 \times 2.0 \text{mm}^3$ 。

1. 掌握三维动态光学应变测量系统的使用方法。
2. 针对铝板，采用激振器进行不同频率下的稳态激励，测试表面离面位移场随时间变化的分布。
3. 截取多个截面的表面位移场分布图，进行结构动态响应特征分析。
4. 从铝板表面提取出多个测点的位移随时间变化的曲线，进行结构局部动态响应特点分析。

4 实验测量原理、方法与测量过程

4.1 动态三维数字图像相关方法测量结构动态响应的基本原理

三维数字图像相关法 (DIC) 的实验装置和光路如图 1 所示。当白光照射到涂有散斑斑点的试件表面时, 表面的散斑会随着试件的变形而变化。通过相机拍摄试件变形过程中的散斑图的变化, 进行变形过程的跟踪, 进而反演出试件表面的实际变形。由左、右两个相机可以得到两个不同视角的试件表面的散斑图像, 通过测量图像之间的视差可以计算出试件表面的三维形貌, 实现立体摄影测量。

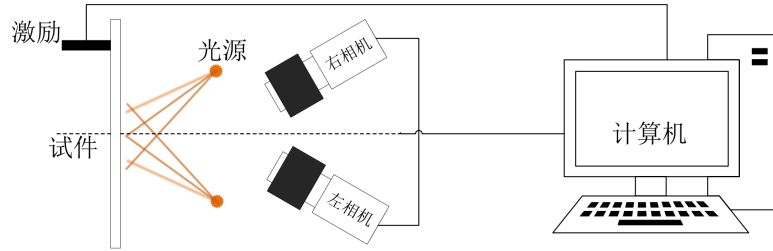


图 1: 三维数字图像相关法的实验装置

三维数字图像相关法的实验首先需要进行立体系统的建模和标定: 计算光线的交点; 保证光线必须在相同的坐标系中, 如图 2 所示。

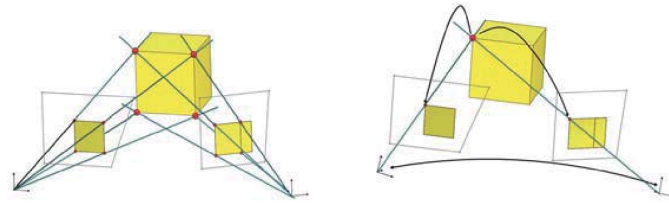


图 2: 立体摄影标定

对于二维 DIC 变形前后的两幅散斑图存在相关性。通过分析变形前后的散斑图, 可以得到散斑沿面内 x 和 y 方向的相对位移, 既物体沿横向和纵向的相对变形 (u, v) 。如图 3 所示, 设 (x, y) 是变形前的一点, (x', y') 是变形后的相应点, 则两者的关系为:

$$x' = x + u + \Delta x \frac{\partial u}{\partial x} + \Delta y \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (1a)$$

$$y' = y + v + \Delta x \frac{\partial v}{\partial x} + \Delta y \frac{\partial v}{\partial y}. \quad (1b)$$

若用函数 $f(x_i, y_i)$ 表示变形前某一点 (x_i, y_i) 处的灰度值, $g(x'_i, y'_i)$ 表示变形后对应点 (x'_i, y'_i) 处的灰度值, 则两者的相关系数为:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{m_s} \sum_{j=1}^{m_s} [f(x_i, y_i) - \bar{f}] [g(x_i, y_i) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m_s} [f(x_i, y_i) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{j=1}^{m_s} [g(x_i, y_i) - \bar{g}]^2}}. \quad (2)$$

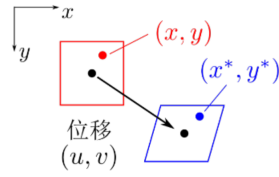


图 3: 变形前后散斑点对应图

其中 \bar{f} 和 \bar{g} 分别为 $f(x_i, y_i)$ 和 $g(x'_i, y'_i)$ 的平均值。 $0 \leq C \leq 1$; $C = 1$ 时两者完全相关; $C = 0$ 时两者完全不相干。只要两者相关, 则以位移为变量的相关函数 $C(u, v)$ 曲面为一单峰曲面。当位移 u 和 v 分别固定时, C 则为一正态分布曲线。

由于点 (x, y) 的像素值不具有唯一性, 所以, 以该点为中心选定一定邻域范围内的像素值的集合, 形成子区, 并进行匹配, 使子区内各像素在变形前、后图像中的对应灰度值最接近, 如图 4 所示。对于三维 DIC 方法的位移测量算法与二维 DIC 类似, 但是每个点需要 3 次 DIC 计算, 如图 5 所示。

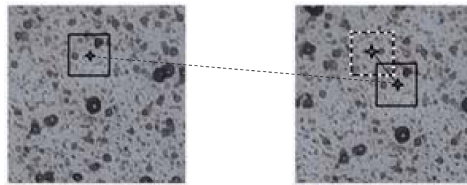


图 4: 子区的匹配

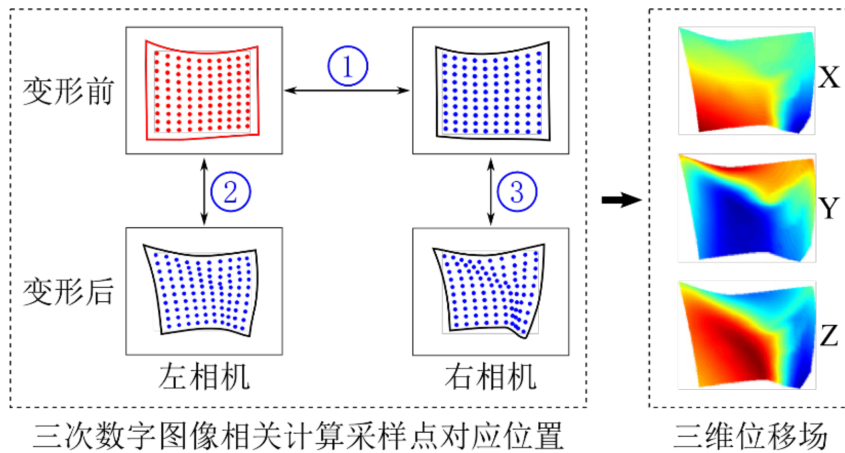


图 5: 三维 DIC 位移场计算

4.2 动态测量过程

1. 高速摄影系统的安装和设置

- a) 高速摄影系统的固定与数据线连接。三脚架立于试件前方, 固定左右相机于支架上, 通过 Netgear 开关, 把两个相机连接到笔记本电脑。

b) 启动高速摄影系统。打开左右高速相机电源，预热相机 10 分钟。笔记本电脑关闭防火墙，禁用无线网络。确保系统连接成功，检查 Netgear 网线接口是否灯亮和网络本地连接是否启用并处于“未识别的网络”状态。双击“PFV(Photron FASTCAM Viewer)”软件图标，启动高速摄影软件。

c) 配置立体相机同步系统。左相机为主相机，右相机为从相机，左侧相机给右侧相机提供触发及同步信号。将 PFV 切换到 LIVE 模式，选择主相机 Camera No.1，点击 Camera Option，在弹窗里选择 I/O，并 GENERAL OUT 1 设置为 SYNC POS；选择从相机 Camera No.2，点击 Camera Option，在弹窗中选择 I/O，并将 SYNC IN 设置为 ON CAM POS。在 PFV 软件实时视图里查看是否为右侧相机启用了 E-Sync。由此可保证两个相机的同步性能。

2. 相机标定

选择 $250 \times 200\text{mm}^2$ 标定板 MV200，调节两个相机的夹角为 $25^\circ\text{-}35^\circ$ 。

a) 在整个标定过程中，两个相机选用全屏模式（最大相机分辨率），精度 Revolution 选择 1024×1024 。

b) 曝光调节：点击快门 (Shutter)，曝光时长选择为 $1/38095\text{s}$ 。

c) 触发模式设置：相机菜单里点击 Trigger Mode，选择 Random，设置记录数量为 1，使得每遥控触发一次，只摄取一幅图像。

d) 聚焦调节：点击鼠标右键，选择 Cursor，点击 Show 以调出十字光标，再次点击鼠标右键，选择 Cursor，点击 Lock at Central all view，将左右十字光标都定在各自视窗的中心。通过移动三脚架和相机滑轨，调整双相机与试件的角度和距离，始终保持左右相机视图的十字中心处于待测物表面同一位置。

e) 标定图像：按图 6 指定的标定板的 13 个不同方向拍摄标定板的 13 幅图像。然后，将标定图像输入到 GOM Correlate Professional 软件里，并进行标定评估。通过调整到合适的位置，当相机靠近标定板时，对应的位置刻度为 43cm；当相机远离标定板时，对应的位置刻度为 50cm；当相机测量体积中心点时，对应的位置刻度为 46.5cm。

f) 具体标定操作步骤：在相机菜单中 LIVE（实时）模式里点击 Record（记录），界面切换为 Trigger In（触发）。按图 6 调整标定板位置，每次通过按击遥控按键（或点击 Trigger In）控制图像记录，PFV 软件记录左右相机各一幅图像。记录完 13 幅标定图像后，点击 Rec Done（记录完成）以结束记录过程。

g) 保存记录的标定图像：记录完成后，PFV 软件自动切换到 SAVE（保存）模式。检查记录的 0 到 12（13 幅图像）是否完整。点击 Save 进行标定图像转存，在弹出的窗口里选择 tiff 格式和 Option 图像分辨率 8bit。

3. 实验测试

a) 把试件在加载装置上固定好。试件采用一边固定、三边自由的边界约束方式，动态外载荷由激振器激励（激励频率采用 23Hz 与 151Hz，对应的功率放大器分别为 2V 与 2.5V），由三维数字图像相关系统采集图像。

b) 点击鼠标右键，选择 Cross Cursor，点击 Central at all view，调出中央十字光标，调整双相机与试件的角度和距离，使左右相机视图的十字中心处于试件表面同一位置。

c) 调节左右光源投射角度，使得被测区域光强明亮均匀。

d) 选择触发模式，在 Trigger Mode 里选择 Start 触发模式，记录触发后的图像。



图 6: 标定图的拍摄方位

e) 在 Frame Rat 里选择合适的图像采集频率（激励频率采用 23Hz 与 151Hz, 对应的采样频率分别为 500Hz 与 3000Hz）。

f) 在 Shutter 里选择合适的曝光时间, 使散斑黑白分明（23Hz 激励下, 左右相机曝光速度为 1/38095s; 151Hz 激励下, 左右相机曝光速度为 1/30769s）。

g) 在 PFV 相机菜单 Live 模式里点击 Record, 按键转为 Trigger In 等待触发状态。检查系统, 若无问题, 点击 Trigger In 进行图像采集。界面显示图像数量持续增加, 待相机内存被填满后自动结束图像采集。点击 Rec Done (记录完成) 以结束记录过程, PFV 软件自动切换到 Save 模式, 同样的操作进行图像保存。

4. 图像处理, 结果输出

a) 动态实验测试标定计算: 打开 GOM Correlate Professional 软件, 创建一个项目, 导入由 Photron 相机记录的标定图像并用软件进行标定计算。

b) 试件表面变形分析: 使用功能输入三维图像系列, 可将使用外部三维立体相机系统拍摄的图像输入到 GOM 软件。首先选择“曲面成分”, 选择要分析的曲面区域。之后定义合适的坐标系。选择需要的截面或者点, 将 Z 坐标的数值从针对固定值改为针对参考阶段, 选择合适的参考时间, 以保证位移曲线的对称性。

c) 结果输出: 输出选择截面与选择点的位移坐标等信息。

4.3 实验测试内容

1. 激励 23Hz, 功率放大器 2V, 采样频率 500Hz, 曝光时长 1/38095s

2. 激励 151Hz，功率放大器 2.5V，采样频率 3000Hz，曝光时长 1/30769s

5 实验测量结果分析与讨论

针对每种激励方式，我们选取了不同截面及测量点的动态响应进行分析。在相同实验参数条件下，考虑了两个时刻（相差半个周期）的振动状态进行对比。

5.1 标定结果

标定过程中，采样频率设置为 500Hz，曝光时间为 1/38095 秒。实验标定结果如图 7 所示。



图 7: 实验标定结果

从图 7中可以看出，实验标定结果符合预期，标定过程成功完成。

5.2 截面动态响应特征分析

5.2.1 一阶模态分析 (23Hz 激励)

我们考虑了两个时刻（相差半个周期）的振动情况，并通过位移云图进行展示，如图 8 所示。为便于比较，图中的两个云图均采用相同标度的颜色条。可以观察到，对于一端固支的铝板，其一阶模态呈现典型的弯曲形态，即随着纵向的增大，振动幅值逐渐增加。

在图 8 中，我们选取了三个截面，提取其沿 z 坐标方向的位移信息，结果如图 9 所示。截面 1 与截面 2 沿纵向分布，可以清晰地观察到弯曲模态；截面 3 则沿横向分布，能够展示潜在的扭转模

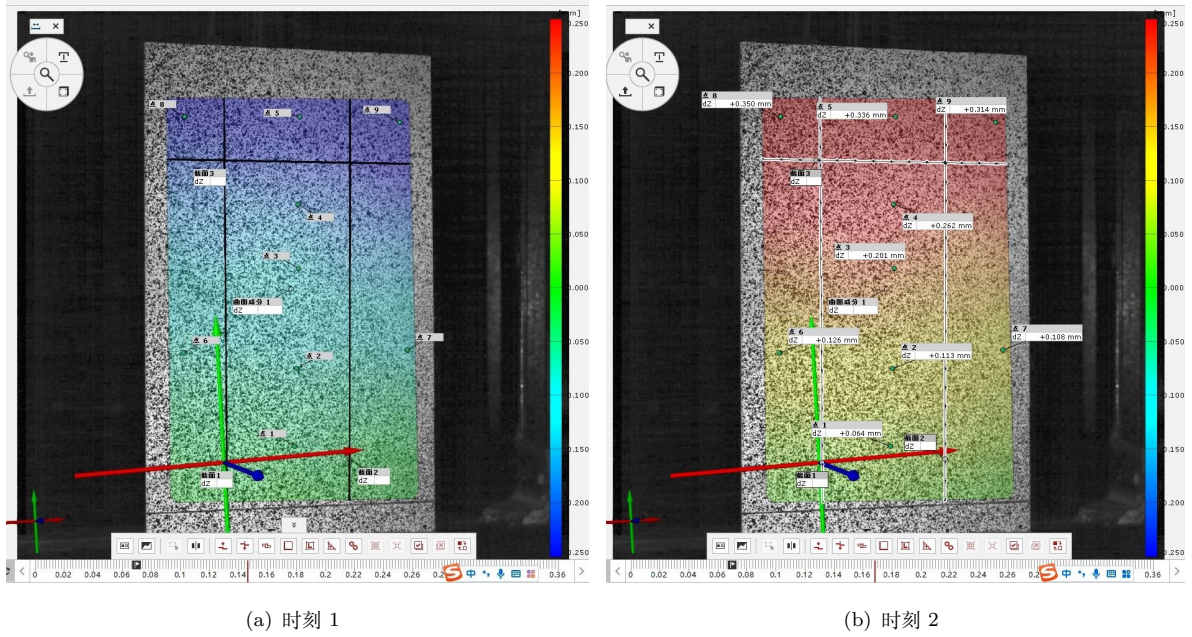


图 8: 一阶模态云图

态。从图中可以看出，在相同时刻下，截面 1 与截面 2 的位移曲线非常接近，表明它们的振动特征相似。由于本实验的主要目的是观察板的弯曲模态，因此在截面 3 上不同位置的 z 方向位移差异较小，验证了板的扭转模态并未显著激发。

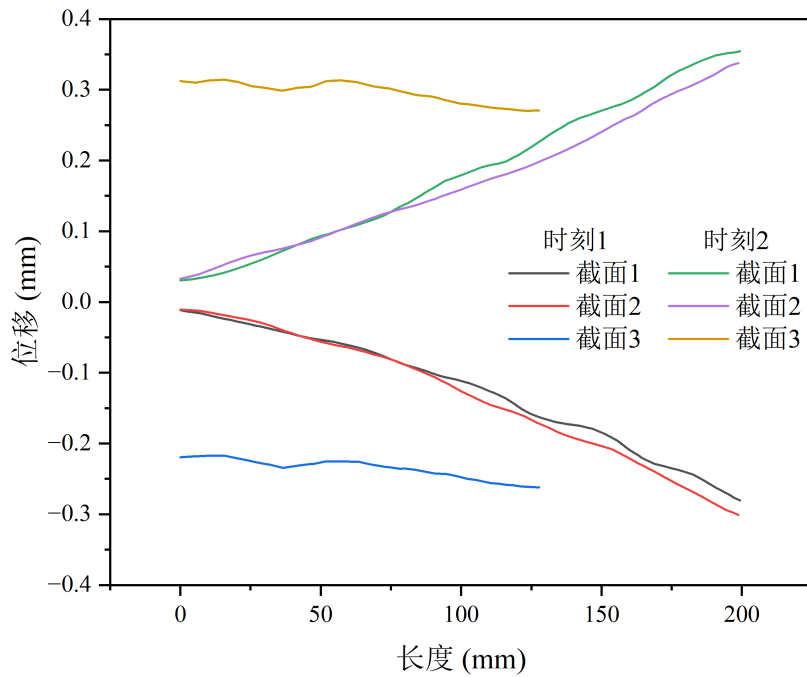


图 9: 一阶模态选取截面位移图

5.2.2 二阶模态分析 (151Hz 激励)

同样，对于铝板的二阶模态分析，我们考虑了两个时刻（相差半个周期）的振动情况，并通过位移云图进行展示，如图 10所示。为便于比较，图中的两个云图均采用相同标度的颜色条。从图中

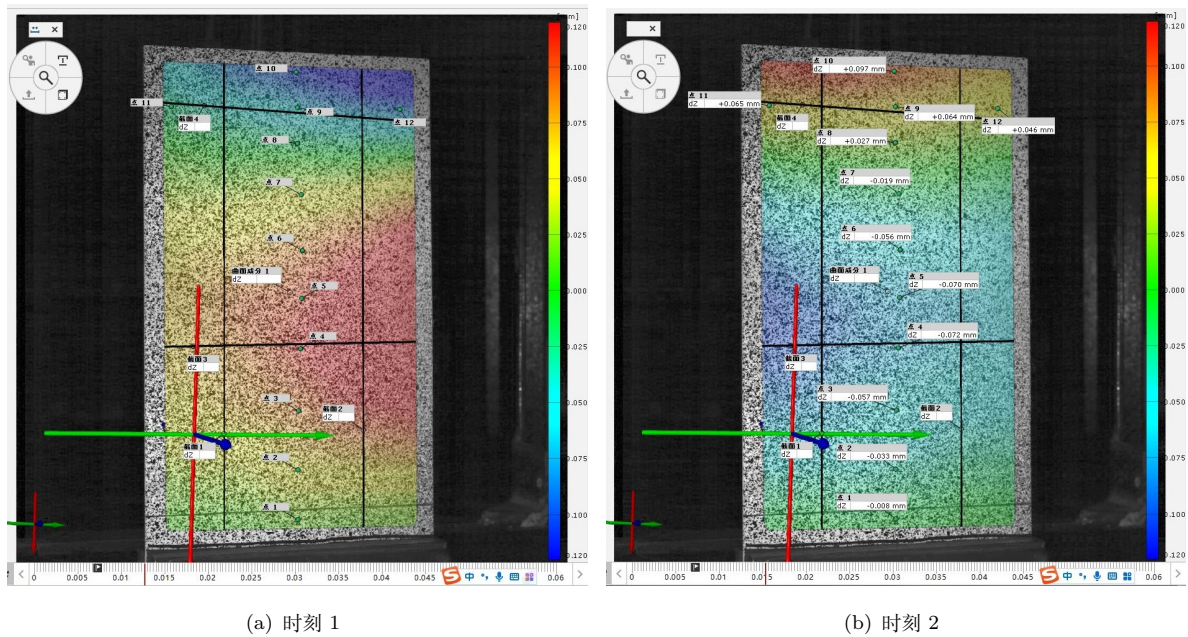


图 10: 二阶模态云图

可以观察到，对于一端固支的铝板，其二阶模态表现为，沿板纵向振动幅值先增大后减小，并且在板的中部存在一个水平截面上 z 方向位移为零的节点。

在图 10中，我们选取了四个截面，提取其沿 z 坐标方向的位移信息，结果如图 11所示。截面 1 与截面 2 沿纵向分布，可以观察到弯曲模态；截面 3 与截面 4 则沿横向分布，用于观察潜在的扭转模态。通过对比可见，在同一时刻下，截面 1 与截面 2 的位移曲线轮廓非常相似，但在幅值上存在轻微偏差。这可能是由于激励位置的原因，导致铝板出现了一定的扭转现象。截面 3 与截面 4 上不同位置的 z 方向位移差异，能够明显反映出这一点。

5.3 点动态响应特征分析

5.3.1 一阶模态分析 (23Hz 激励)

针对点分析，我们选取的测量点位置信息如图 8所示，其中 1-5 号点沿着垂直于板面且固定的方向纵向排列，且大致位于板的中线上。可以观察到，1-5 号点的振动频率和相位几乎相同，振动幅值逐渐增加，这与之前的线分析结果相一致。对于近似处于同一水平位置的 2、6、7 号点，其振动频率、相位和振幅几乎一致。同样地，5、8、9 号点也表现出相似的振动特征。

此外，通过频率分析，我们可以得出振动频率。在 0.304 秒的采样时间内，样本经过了 7 个周期，因此振动频率约为 23.026Hz，这与施加的激振频率 23Hz 非常接近。

5.3.2 二阶模态分析 (151Hz 激励)

对于另一组点分析，我们选取的测量点位置信息如图 10所示，其中 1-10 号点同样沿着垂直于板的固定方向纵向排列，并且大致位于板的中线上。从图中可以看到，1-10 号点的振动频率几乎相

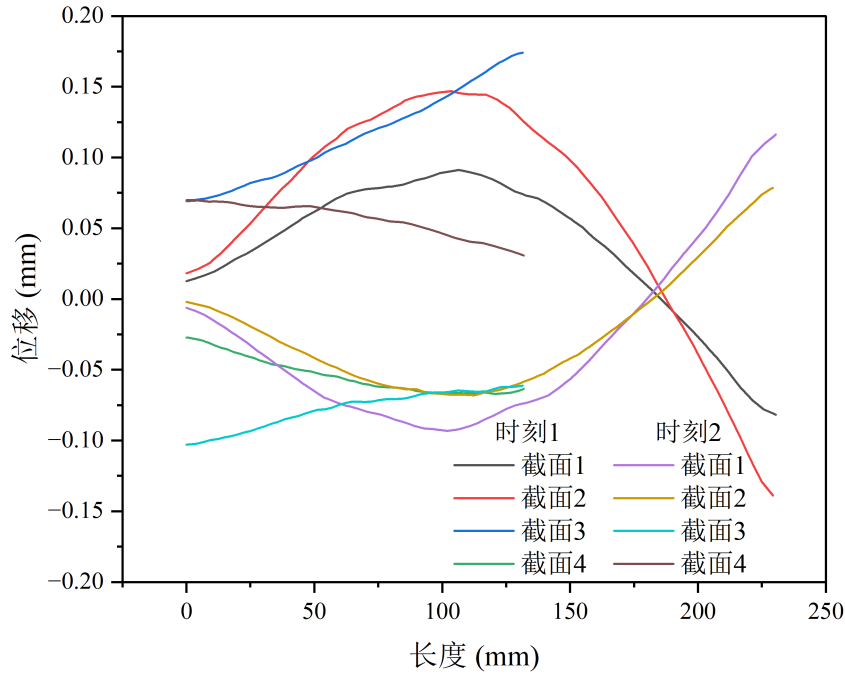


图 11: 二阶模态选取截面位移图

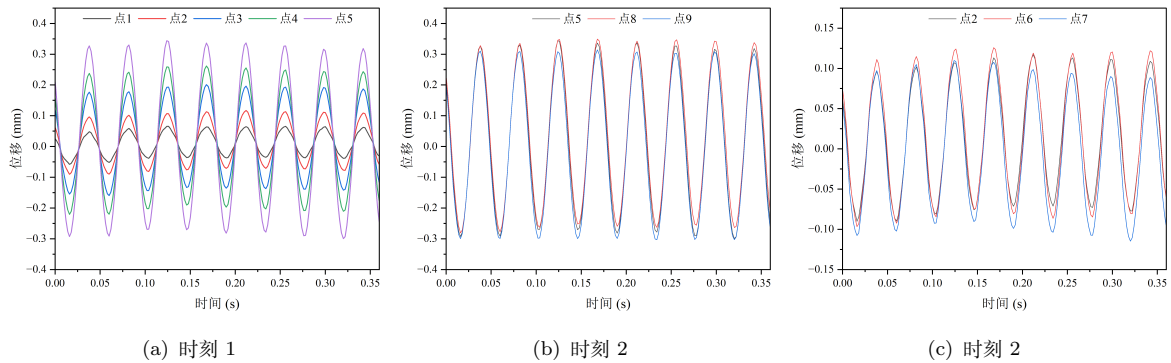


图 12: 一阶模态选取点位移图

同，振动幅值呈现出先增大后减小的趋势。特别地，在点 7 与点 8 之间，存在一个 $\pi/2$ 的相位突变，这反映了板的二阶模态中存在一个位移为零的节点，且该节点两侧的 z 方向位移是完全相反的，这也与前述的线分析结果一致。对于大致位于同一水平位置的 11、12 号点，其振动频率几乎相同，但在相位和振幅上略有差异，这可能与激励导致的扭转模态相关。

通过频率分析，我们发现，在 0.053 秒的采样时间内，样点经过了 8 个周期，因此振动频率约为 150.943Hz，这与施加的激振频率 151Hz 相符。

6 数据误差分析与提高精度的方法

1. 在本次实验中，低频激励下测得的一阶模态结果较为理想。然而，在较高频激励下，观察到混合的扭转模态现象。通过振动频率分析，铝板上各点的振动频率与激励频率较为接近，符合实验预期。同时，各点的振动幅值也符合预期的变化规律。

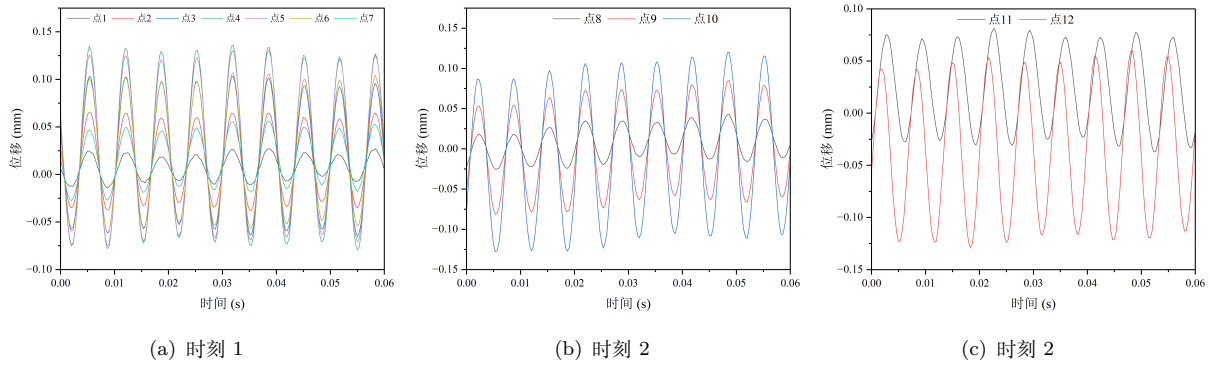


图 13: 二阶模态选取点位移图

2. 相机标定过程中可能存在一定的误差，影响图像的准确性。
3. 在图像处理过程中，选择曲面成分时，应尽可能选取较大的区域，以采集更多的位置信息，从而降低误差的影响。
4. 激振器的位置可能会对模态测量结果产生影响，应当确保激振器的作用方向经过板的弯曲中心，以最大限度地消除扭转效应。
5. 若板固支端存在松动或激振器与板之间的接触不紧密，可能会引入误差，影响实验结果的准确性。为了更准确地测量板的弯曲模态并减少扭转模态的影响，应改善固支端的夹持均匀性与牢固性。