

《风力机叶片模型的模态分析》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 203 室 实验日期 2024 年 12 月 02 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 实验原理与测量过程	3
4.1 实验原理	3
4.2 实验测量步骤	6
5 实验测量结果	6
5.1 测点位置	6
5.2 Periodic Chirp 信号处理	7
5.3 Pseudo Random 信号信号处理	8
6 结果分析与讨论	9
7 误差分析	11

1 实验目的

1. 了解激光测振仪的工作原理和使用方法。
2. 掌握激励器激振法及其特点。
3. 掌握激振器激振、激光测振仪拾振的频响函数测试方法及测试技术。
4. 掌握多自由度系统的固有频率、主振型、阻尼率等结构模态参数的识别方法。

2 实验装置、仪器及器材

1. 单点激光测振仪 (Poltttec, OFV-3001)
2. 激光发射器 (Poltttec GmbH, OFV-353)
3. 激振器 (Mini Shaker Type 4810)
4. 函数/任意波形发生器 (RIGOL, DG5072, 70MHz, 1GSa/s)
5. 电荷放大器 (HY1432, 秦皇岛海鹰科技开发有限公司)
6. 功率放大器 (Bruel & Kjaer, Power Amplifier, Type 2706)
7. USB 口多功能采集模块
8. 力传感器 (CL-YD-312 20523)
9. 风力机叶片模型 (上贴反光条)
10. 计算机 (ThinkPad)
11. 钢尺 (100cm, 北京五金工具十厂)
12. 导线若干

3 实验内容

用激光测振仪测得的 Periodic Chirp 周期线性调频脉冲激励信号与 Pseudo Random 伪随机激励信号测到的信号结果, 做 FFT 变换, 求频响函数, 得到风力机叶片模型的固有频率、振型、阻尼率, 进行分析、讨论。

4 实验原理与测量过程

4.1 实验原理

振动表征一种运动的物理量作时而增大时而减小的反复变化，从运动学的观点，是某些物理量（位移、速度、加速度）在某一数值附近随时间的变化关系。振动理论可用于响应分析，通过激励和系统特性，得出系统的响应，可为结构强度设计和设计提供依据；振动可用于系统识别，通过激励和响应来识别确定系统的特性参数；振动还可用于环境预测，通过系统特性和相应来确定激励，识别系统环境的震动环境特性。其中，系统的特性参数一般为系统结构模态参数，包括固有频率 ω ，固有振型 $\{\varphi_i\}$ ，阻尼率 ζ_i 等。

对于多自由度系统，有动力学方程

$$[M]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{f(t)\}. \quad (1)$$

对于无阻尼自由振动，方程退化为

$$[M]\{\ddot{x}\} + [k]\{x\} = 0. \quad (2)$$

设结构固有频率为 ω ，固有振型为 $\{\varphi_i\}$ ，则 $\{x\} = \{\varphi_i\} \sin(\omega t + \psi)$ 必然是上式的一个解。代入有

$$([k] - \omega^2[M])\{\varphi\} = \{0\}.$$

若有非零解，则 $|[k] - \omega^2[M]| = 0$ ，解出的特征值 ω_j 即为第 j 阶固有频率， $([k] - \omega_j^2[M])\{\varphi_j\} = \{0\}$ 解出的特征向量 $\{\varphi_j\}$ 解即为对应固有振型。方程 (2) 的通解为

$$\{x\} = \sum_{j=1}^n \{\varphi_j\}_j \sin(\omega_j t + \psi_j)$$

对方程 (1) 做傅里叶变换可得

$$(-\omega^2[M] + i\omega[c] + [k])\{X(\omega)\} = \{F(\omega)\}$$

则对应的位移频响应函数为

$$H_{ij}(\omega) = \frac{X_i(\omega)}{F_j(\omega)} = \sum_{k=1}^n \frac{\varphi_{ik}\varphi_{jk}}{m_k(\omega_k^2 - \omega^2 + 2i\zeta_k\omega\omega_k)}$$

系统的总频率响应函数为各阶态的频率响应函数之和。

由于速度为位移函数对时间的导数，因此有速度频响应函数为

$$H_{ij}^v(\omega) = \frac{\dot{X}_i(\omega)}{F_j(\omega)} = i\omega H_{ij}(\omega)$$

对于单自由度系统的速度频响应函数，可以得到以下曲线：

对于多自由度系统，当模态不密集时，根据得到的速度频响应函数的实频曲线（图 2）由峰值 p_k 处的频率得到对应的固有频率 ω_k 。

由于

$$H_{ij}^v(\omega) = \frac{i\omega\varphi_{ik}\varphi_{jk}}{m_k(\omega_k^2 - \omega^2 + 2i\zeta_k\omega\omega_k)}$$

$$\text{Re } H_{ij}^v(\omega) = \frac{2\zeta_k\omega_k\omega^2\varphi_{ik}\varphi_{jk}}{m_k(\omega_k^2 - \omega^2 + 4\zeta_k^2\omega^2\omega_k^2)}$$

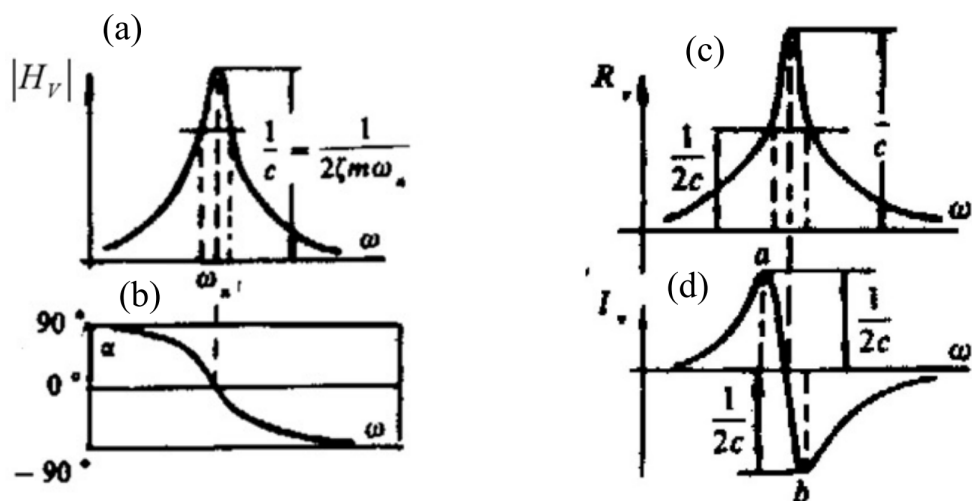


图 1: 速度频响应函数图: (a) 幅频曲线; (b) 相频曲线; (c) 实频曲线; (d) 虚频曲线

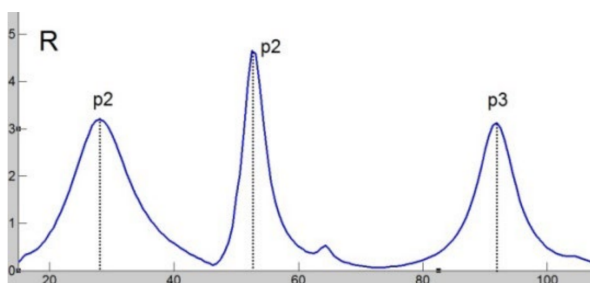


图 2: 实频曲线置

令 $A_{ij}^k = \frac{\varphi_{ik}\varphi_{jk}}{m_k}$, 则

$$\text{Re } H_{ij}^v(\omega) = \frac{2\zeta_k \omega_k \omega^2 A_{ij}^k}{\omega_k^2 - \omega^2 + 4\zeta_k^2 \omega^2 \omega_k^2}$$

当 $\omega = \omega_k$ 时,

$$A_{ij}^k = 2\zeta_k \omega_k \text{Re } H_{ij}^v(\omega_k)$$

可设 $m_k = 1$, 则 $\varphi_{ik} = A_{ij}^k / \varphi_{jk}$ 。其中, A_{ij}^k 正比于速度频响应函数的实部, j 为激振点 (此处为单个激振), k 为共振阶数, φ_{jk} 为定值。因此, k 阶固有振型实 φ_{ik} 则为所有测点处的实频曲线的第 k 个峰值所连成的曲线。

值得指出的是, 振动测试往往是一点激励、多点测振, 或多点激励、一点测振, 且激振点与测振点不同。对于一点激励、多点测振的模态分析, $H_{ij}^v(\omega) = \frac{X_j(\omega)}{F_j(\omega)}$ (j 表示激振点此处无测振) 无法获得, 导致 φ_{ik} 无法获得。但是, 仅需要测振点处的振型幅值即可描述振型, 而无需关心激振点处振型幅值。因此, 在振型分析过程中可令 $\varphi_{ik} = 1$ (前提: 激振点不是振型节点, 该要求在实际振动测试中是比较关键的)。

针对速度频响应函数的实频曲线, 可通过半功率点 a 、 b (见图 3, 处于实频曲线峰值的 $\frac{1}{2}$ 处), 得到阻尼率

$$\zeta = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_0}$$

对于实验测量过程, 激光测振仪是发出一束激光, 照射到振动的物体表面上, 利用多普勒效应, 从反射回来的激光的频率就可以得到被测点的运动速度, 并可根据测得的速度积分或求导获得位移

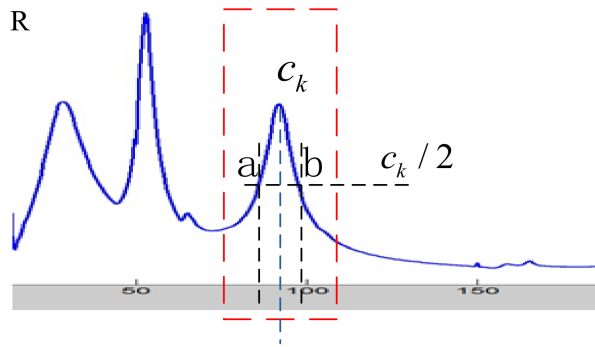


图 3: 实频曲线的半功率点

或加速度。本试验通过激励器激振法进行振动测试。计算机控制输出特定的激励信号，通过功率放大器输入给激励器，激励器根据激励信号振动，给予模型单点激励，同时激光测振仪通过扫描结构测点获得结构各测点的振动速度响应信号。经过分析激励信号和速度响应信号，可以获得频率响应函数和结构振动的模态参数。图 4 为实验测试装置示意图。

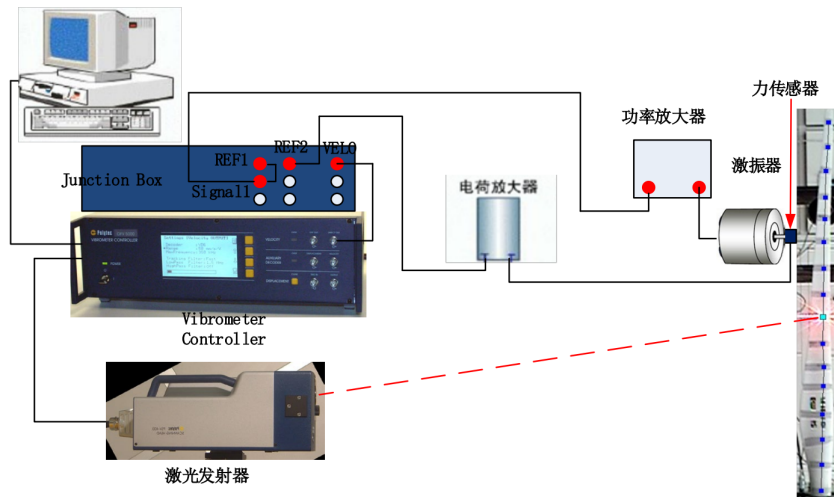


图 4: 实验装置示意图

激励器激励的信号有以下两种：

- a) Periodic Chirp 周期线性调频脉冲激励信号

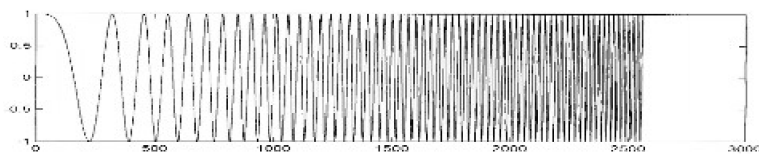


图 5: Periodic Chirp 周期线性调频脉冲激励信号

信号载频在一给定的时间间隔内线性增大或减小，使得发射信号的频谱占据一个带宽的范围。

- b) Pseudo Random 伪随机激励信号

信号在周期 T 内具有随机性，而大于一个周期则显示非随机性。伪随机激励信号具有快速、可变焦、无波漏，以及良好的波峰因子和信噪比。

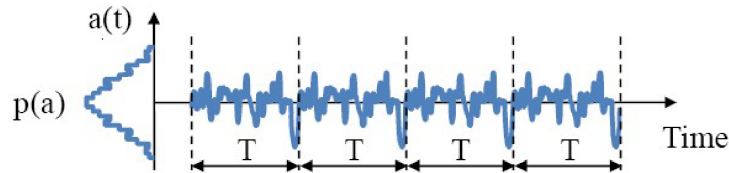


图 6: Pseudo Random 伪随机激励信号

4.2 实验测量步骤

1. 按照实验装置示意图安装试件、连接仪器、固定风力叶片，做好实验准备（已事先安装完成）。
2. 在风力机叶片上选择了贴有反光条的 15 个测点，通过钢尺量取各个测点的位置。
3. 在信号发生器中，选择周期 0.5s 的 Periodic Chirp 周期线性频调脉冲激励信号。
4. 使用仪器配套软件 InstaCal 进行数据采集，设置通道为 CH0 到 CH3，其中 CH3 为力传感器输入，CH2 为激光测振仪输出的速度通道。调节 A/D 范围为 $\pm 2V$ ，采样频率 5000Hz，采样数 2048，采样模式为 Single，采样时间为 3s。进行测试，观察各通道的信号。确认采集过程顺利后，通过调节激光发射器，使得对共 15 个测试点进行测试，并记录数据。
5. 在波形发生器中，选择周期项 0.5s 的 Pseudo Random 伪随机激励信号。注意在切换激励信号的时候，要把功率放大器的幅值调到最低。重复上一步流程。

5 实验测量结果

5.1 测点位置

本次实验共考虑 15 个测试点，以风机叶片底部为基准点，从下到上为正方向。则 15 个测点的位置如图 7 所示。

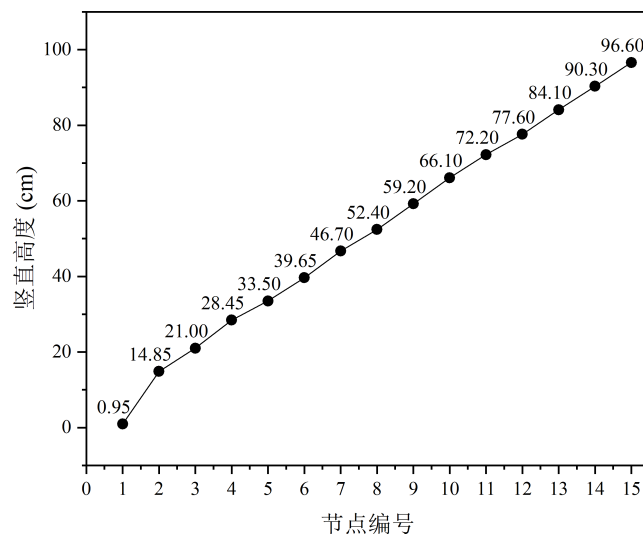


图 7: 测点位置坐标图

5.2 Periodic Chirp 信号处理

首先，我们分析了周期性调频脉冲激励信号（Periodic Chirp）。为了确保实验结果的准确性，每个测点进行了三次重复测量实验。通过对输入和输出信号进行快速傅里叶变换（FFT），并将输出信号与输入信号进行除法处理，我们得到了每个测点的平均频响函数。在信号处理过程中，采用了矩形窗函数进行窗口处理，以减少频谱泄漏效应。

由于输出信号为风机叶片上各测点的速度信号，我们通过分析频响函数的实频域部分来确定固有频率、模态和阻尼比。实频曲线如图 8 所示。

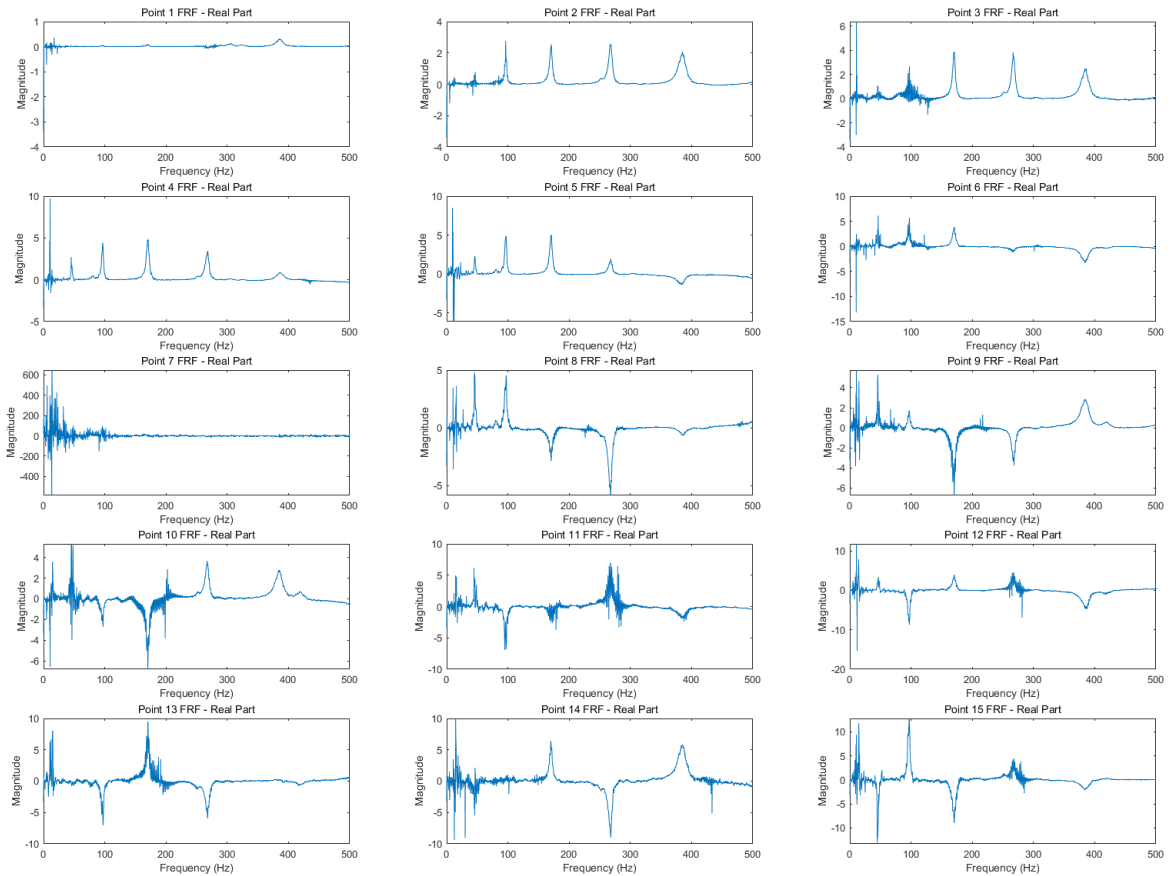


图 8: Periodic Chirp 输入信号对应的平均实域曲线

根据实频域曲线的峰值对应的频率，我们可以确定固有频率。通过半功率点法进一步计算得到的前五阶固有频率和阻尼比，如表 1 所示。

阶数	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶
固有频率 (Hz)	14.0381	46.0002	97.1070	170.5525	268.6360
阻尼率	0.04347	0.04644	0.02043	0.03937	0.02499

表 1: Periodic Chirp 输入信号对应的固有频率与阻尼率

通过将各阶固有频率下各测点处的实频峰值相连，我们可以得到风机叶片在振动时的各阶振型。为了归一化处理，我们将最下面的节点的位移设定为 1，并对其他节点的位移进行等比例缩放，从而得到前五阶模态的归一化振型图，如图 9 所示。

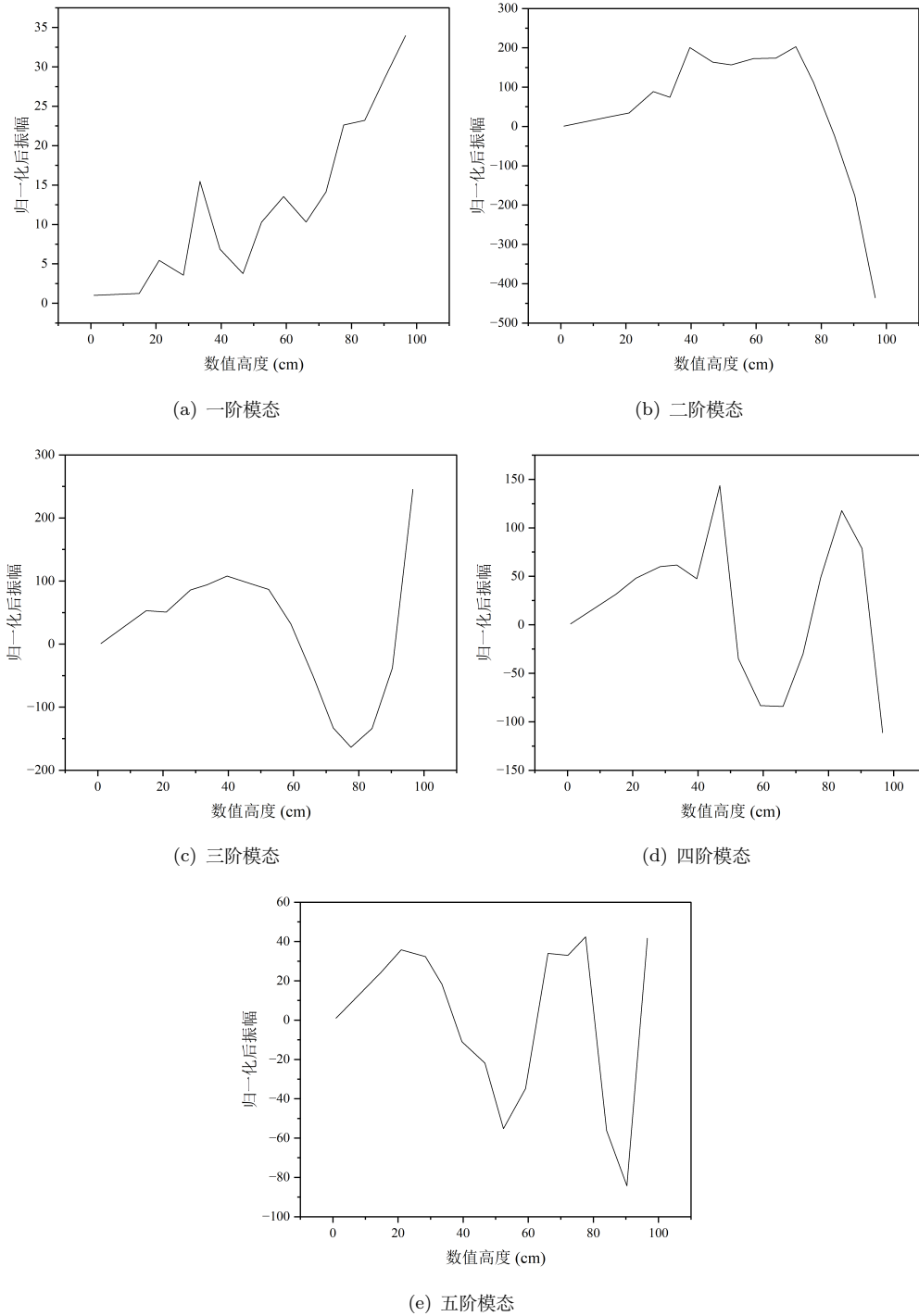


图 9: Periodic Chirp 输入信号对应的前五阶固有模态

5.3 Pseudo Random 信号信号处理

接下来，我们分析了伪随机激励信号 (Pseudo Random)。与周期线性调频脉冲激励信号一样，每个测点进行了三次重复测量实验。通过对输入和输出信号进行快速傅里叶变换 (FFT)，并将输出信号与输入信号进行除法处理，我们得到每个测点的平均频响函数。在信号处理过程中，采用了矩形窗函数以减少频谱泄漏。

由于输出信号为风机叶片上各测点的速度信号，我们通过分析频响函数的实频域部分来确定固

有频率、模态和阻尼比。实频曲线如图 10所示。

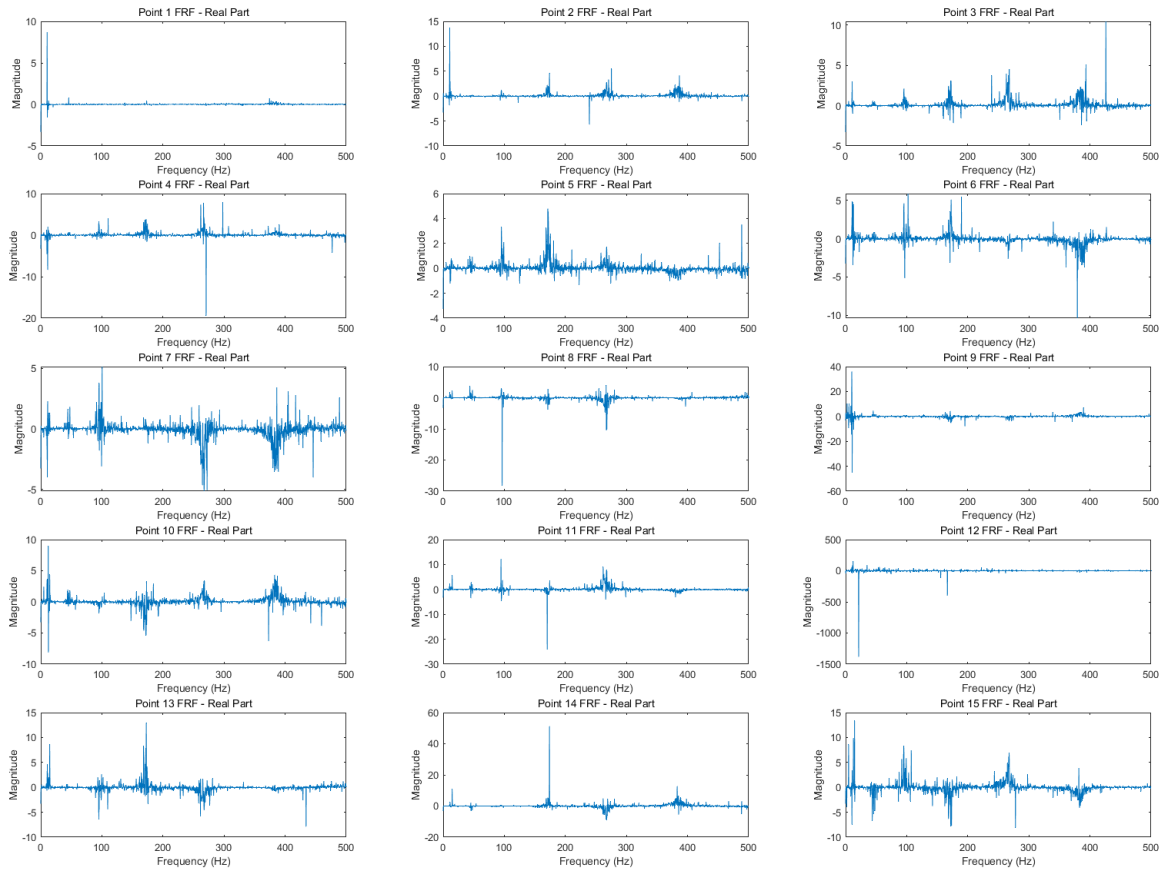


图 10: Pseudo Random 输入信号对应的平均实域曲线

与前述相同，通过分析实频域曲线的峰值对应的频率，我们得到了前五阶的固有频率和阻尼比。测得的平均固有频率与阻尼比如表 2所示。

阶数	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶
固有频率 (Hz)	14.2619	45.0236	95.2962	172.5056	267.6595
阻尼率	0.02140	0.03377	0.03203	0.01304	0.03649

表 2: Pseudo Random 输入信号对应的固有频率与阻尼率

通过将各阶固有频率下各测点处的实频峰值相连，我们可以得到风机叶片在振动时的各阶振型。为了归一化处理，我们将最下面的节点的位移设定为 1，并对其他节点的位移进行等比例缩放，从而得到前五阶模态的归一化振型图，如图 11所示。

6 结果分析与讨论

在本次实验中，我们分别使用了周期性线性调频脉冲激励信号 (Periodic Chirp) 和伪随机激励信号 (Pseudo Random) 测量了叶片模型的固有频率、阻尼比以及振动模态。实验得到的固有频率和阻尼比如表 3与表 4所示。

从结果中可以看出，在两种激励方式下所测得的固有频率基本相同。这表明，固有频率是结构或系统的固有特性，不受外部激励信号形式的影响。因此，针对不同的实验环境，可以选择不同的

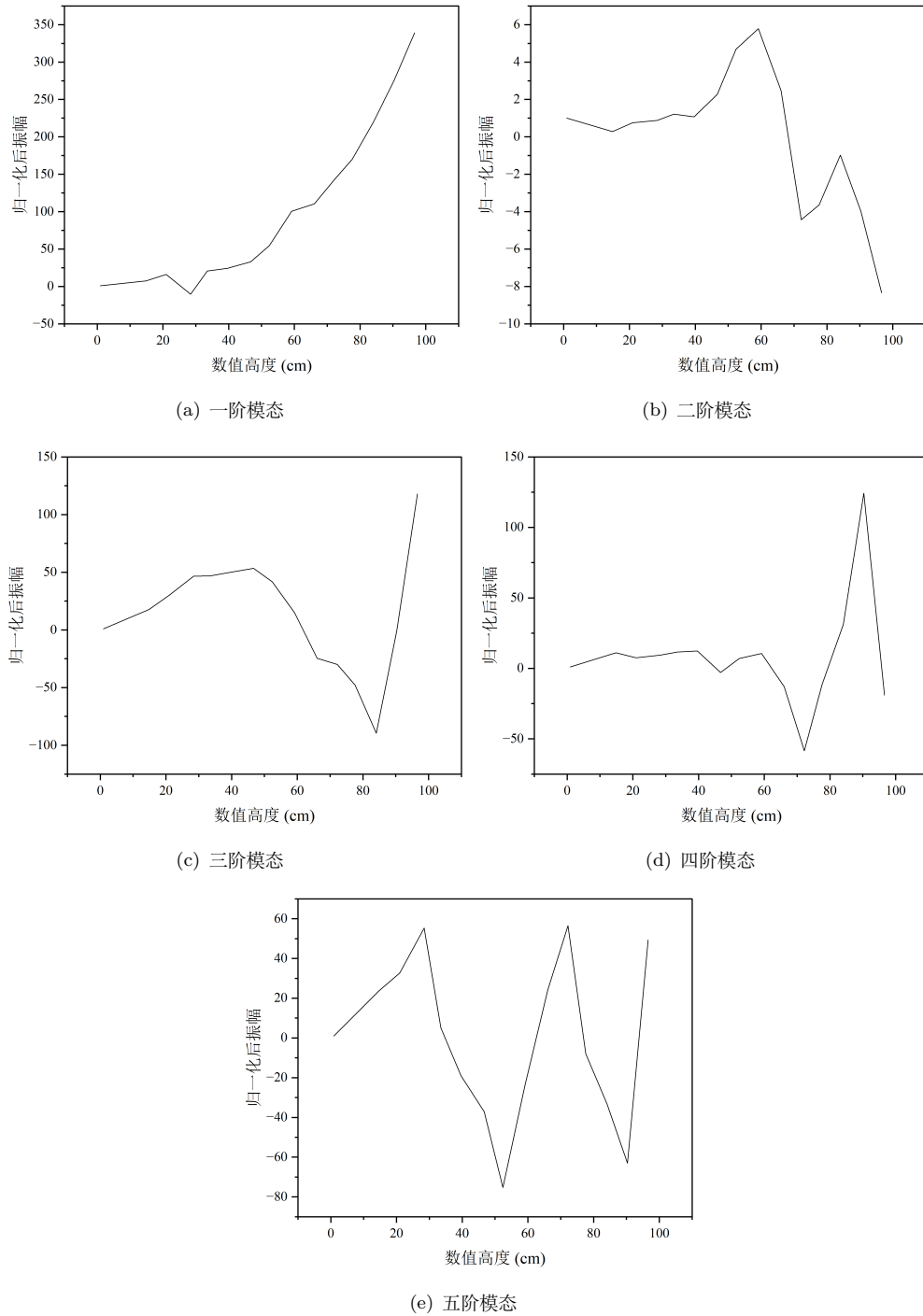


图 11: Pseudo Random 输入信号对应的前五阶固有模态

阶数	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶
Periodic Chirp 激励 (Hz)	14.0381	46.0002	97.1070	170.5525	268.6360
Pseudo Random 激励 (Hz)	14.2619	45.0236	95.2962	172.5056	267.6595

表 3: 两种输入信号测得的叶片模型固有频率

阶数	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶
Periodic Chirp 激励	0.04347	0.04644	0.02043	0.03937	0.02499
Pseudo Random 激励	0.02140	0.03377	0.03203	0.01304	0.03649

表 4: 两种输入信号测得的叶片模型阻尼率

激励方式来测量结构或系统的模态参数，并且所得结果应具有一致性和有效性。同时，所得到的模态振型符合前五阶模态的特征，且风力机叶片的振动模态阵型图与悬臂梁的阵型图具有相似性，振型的节点数与模态阶数保持一致。

然而，测得的阻尼比存在较大偏差。我们认为，线性周期调频脉冲激励信号的结果相对更为可信。对于伪随机激励信号，所得到的实频曲线呈现出更多的波动和毛刺，这可能导致在识别固有频率和半功率点时出现一定的误差，进而影响阻尼比的准确计算。

7 误差分析

1. 由于激光发射器的高度固定，在对竖直摆放的叶片模型进行测量时，不同测点之间可能会因为激光发射器与模型表面之间角度的偏差，而产生一定的测量误差。
2. 由于激励位置和叶片摆放的影响，实际模型中可能不仅存在弯曲振动，还可能激发扭转振动。这种振动模式的混合可能导致固有频率和半功率点的识别出现偏差，从而影响实验结果的准确性。
3. 本次实验中选取的测量点数量为 15 个，相对较少。增加测量点的数量可能有助于提高实验的精度，从而获得更为准确的模态参数。
4. 风力机叶片本身并非完全对称，因此在选择测量点时，由于左右位置的选取可能会引入一定的误差。
5. 外界环境因素，如温度、湿度、振动等干扰，也可能对实验测量结果产生影响。这些因素可能导致传感器的性能波动，进而影响测量的准确性。
6. 在使用激光测振仪进行速度测量时，部分测量点的信号强度可能较低，尤其是在选择位置不当的情况下。这可能导致激光测振仪无法获得足够的反射信号，从而影响数据的准确性和可靠性。