



基于实测的风电塔塔筒结构 振动分析

王英

南京工业大学

智能建造与管理系

2022年12月28日



目录

- 一 . 简介
- 二 . 在役风电塔实测
- 三 . 谐频激励干扰的振动信号分析
- 四 . 风机振动长期监测与数据分析
- 五 . 计算机视觉在结构振动研究中的应用



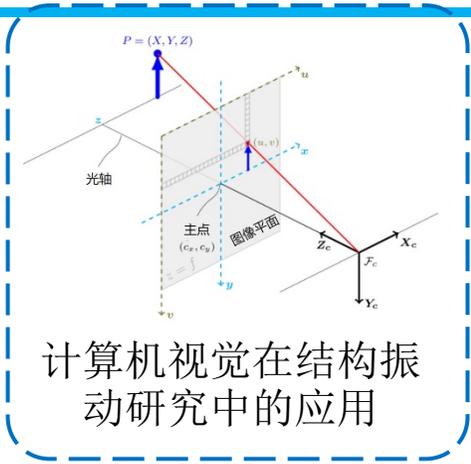
目录

- 一 . 简介
- 二 . 在役风电塔实测
- 三 . 谐频激励干扰的振动信号分析
- 四 . 风机振动长期监测与数据分析
- 五 . 计算机视觉在结构振动研究中的应用

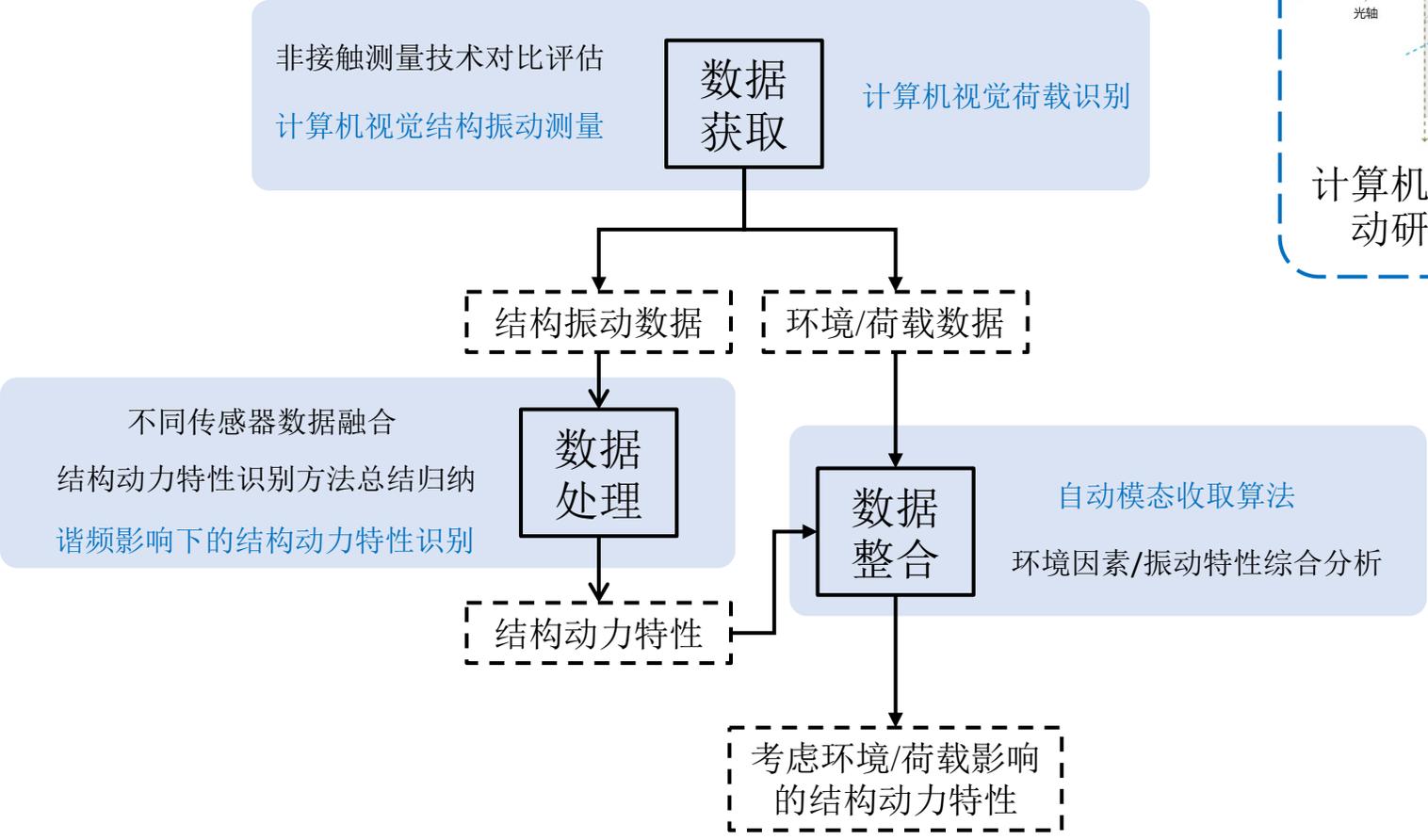
一. 简介



风电塔实测与谐频激励干扰的振动信号分析



计算机视觉在结构振动研究中的应用



屋顶小型风机振动监测与数据分析



目录

- 一 . 简介
- 二 . 在役风电塔实测
- 三 . 谐频激励干扰的振动信号分析
- 四 . 风机振动长期监测与数据分析
- 五 . 计算机视觉在结构振动研究中的应用

二. 在役风电塔实测



崇明风电塔

东台风电塔

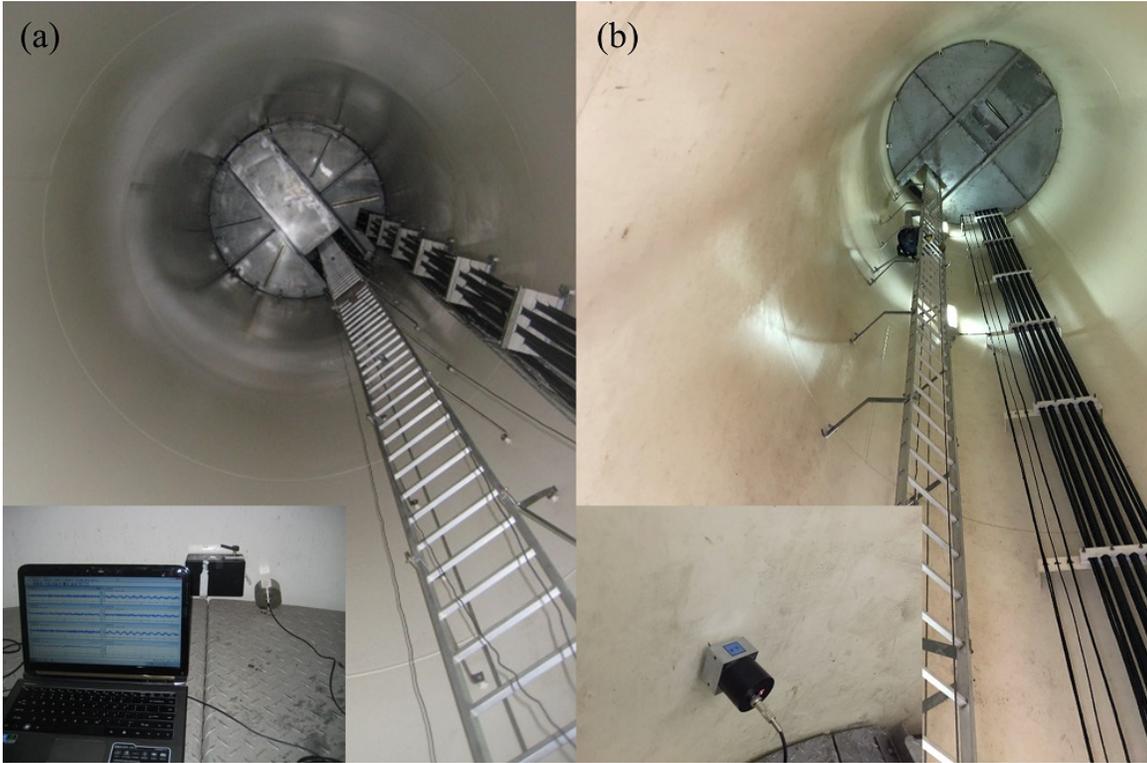
崇明风电塔:

- ✓ 三种传感器数据
- ✓ 停机状态与运行状态

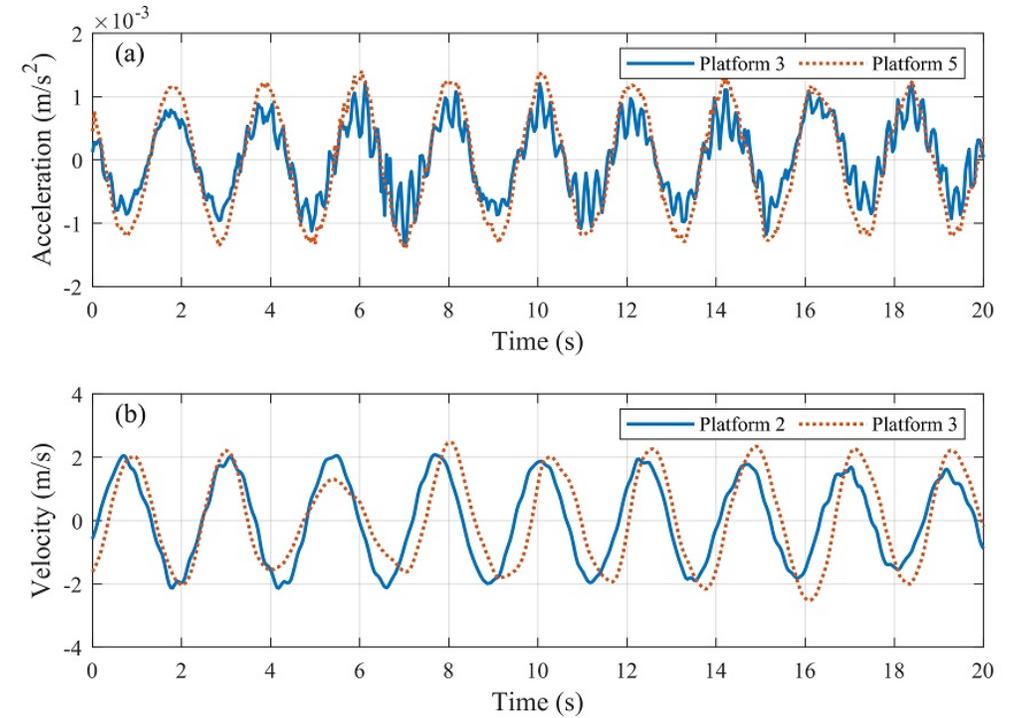
东台风电塔:

- ✓ 二种传感器数据 (LDV失效)
- ✓ 不同传感器同时测量

二. 在役风电塔实测



接触式传感器现场实测情况：
(a) 崇明风电塔，(b) 东台风电塔

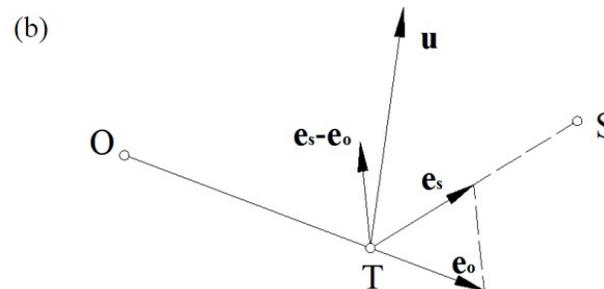
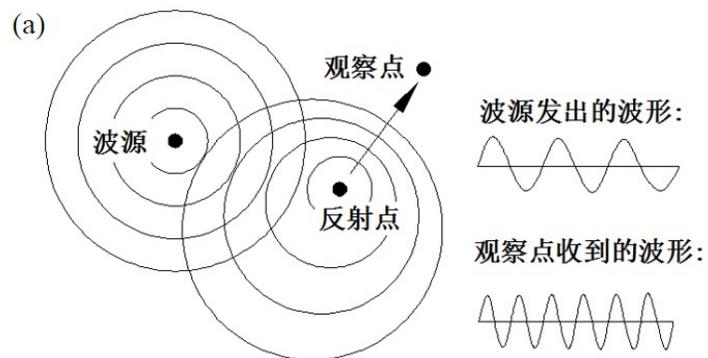


接触式传感器实测数据：
(a) 崇明风电塔，(b) 东台风电塔

二. 在役风电塔实测

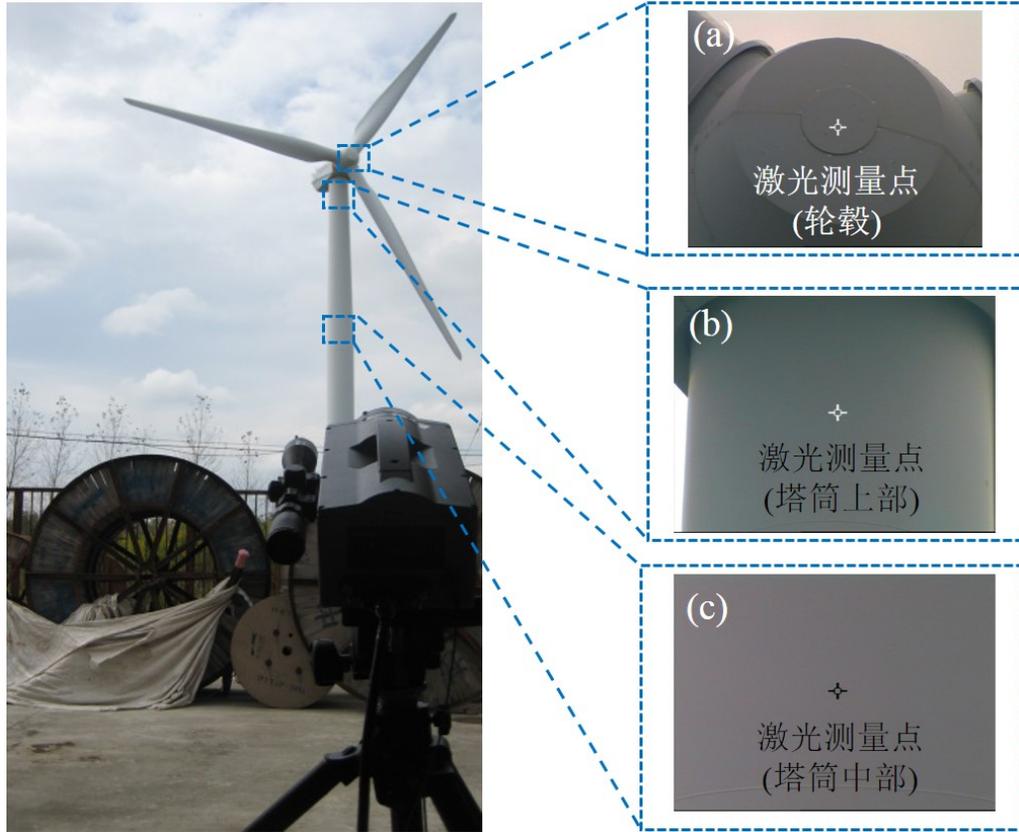


激光多普勒测振仪

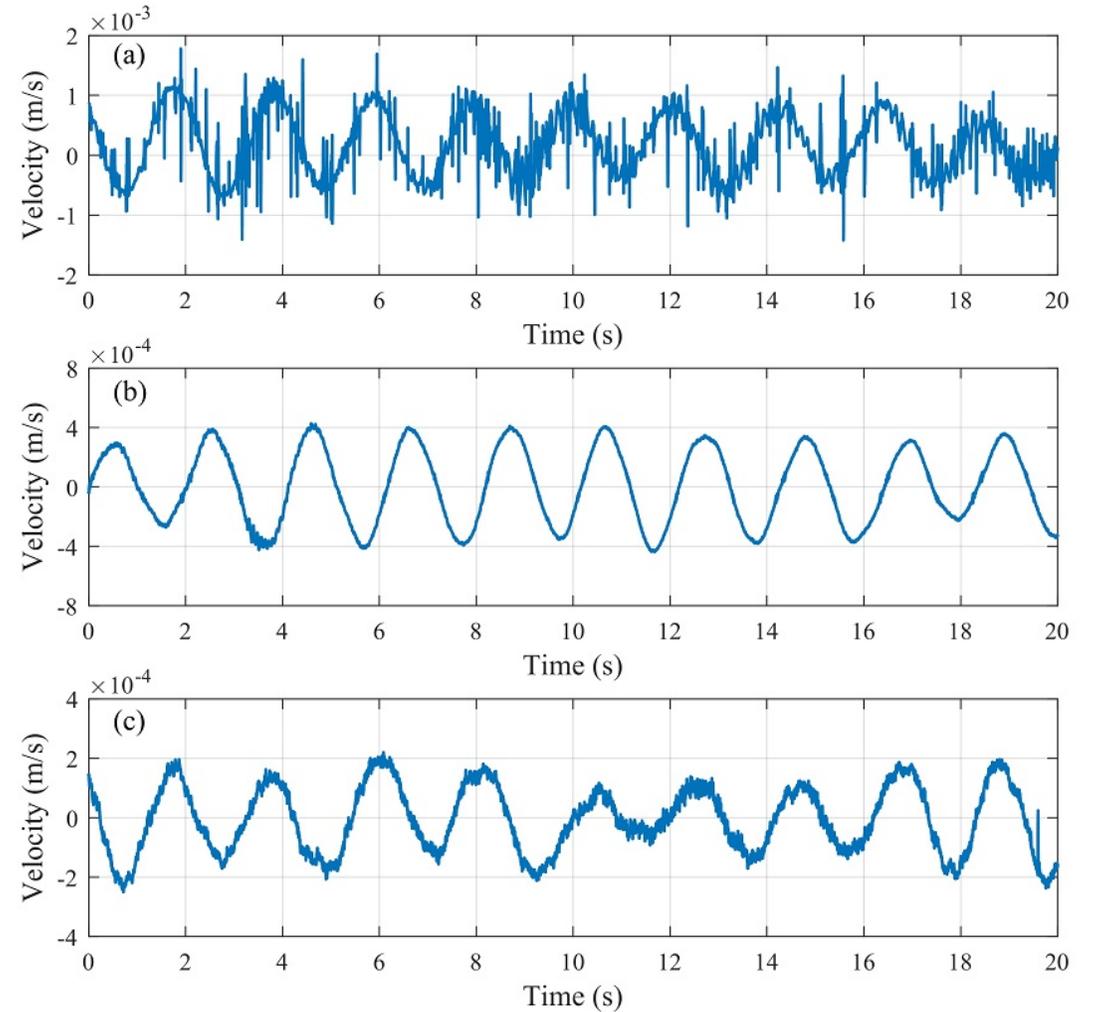


测量范围	5~300 m (具体视目标反射条件而定)
分辨率	$< 0.5 (\mu\text{m/s})/\text{Hz}^{1/2}$
频率范围	0~25 kHz
仪器重量	约30 kg (包含储存箱)

二. 在役风电塔实测



激光多普勒测振仪现场实测 (崇明风电塔)

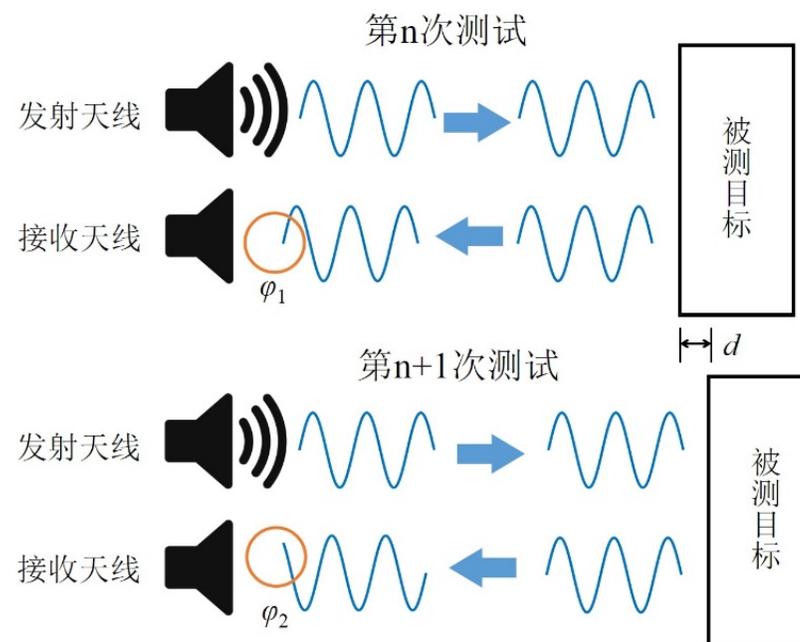


激光多普勒测振仪实测数据 (崇明风电塔)

二. 在役风电塔实测

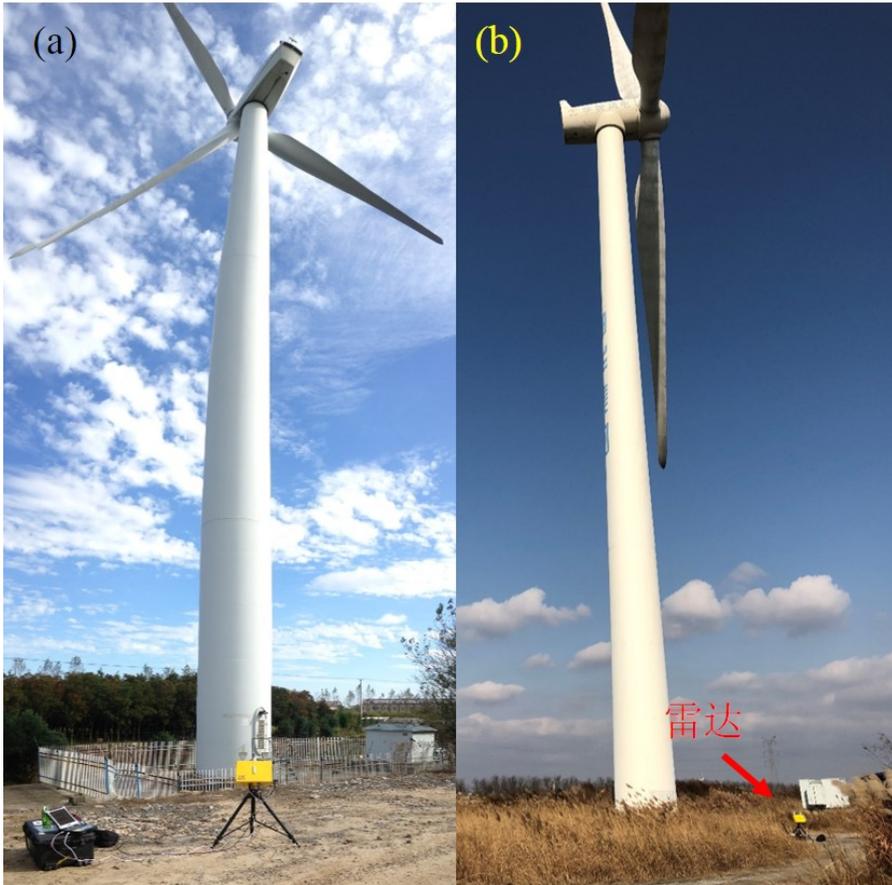


微波干涉雷达

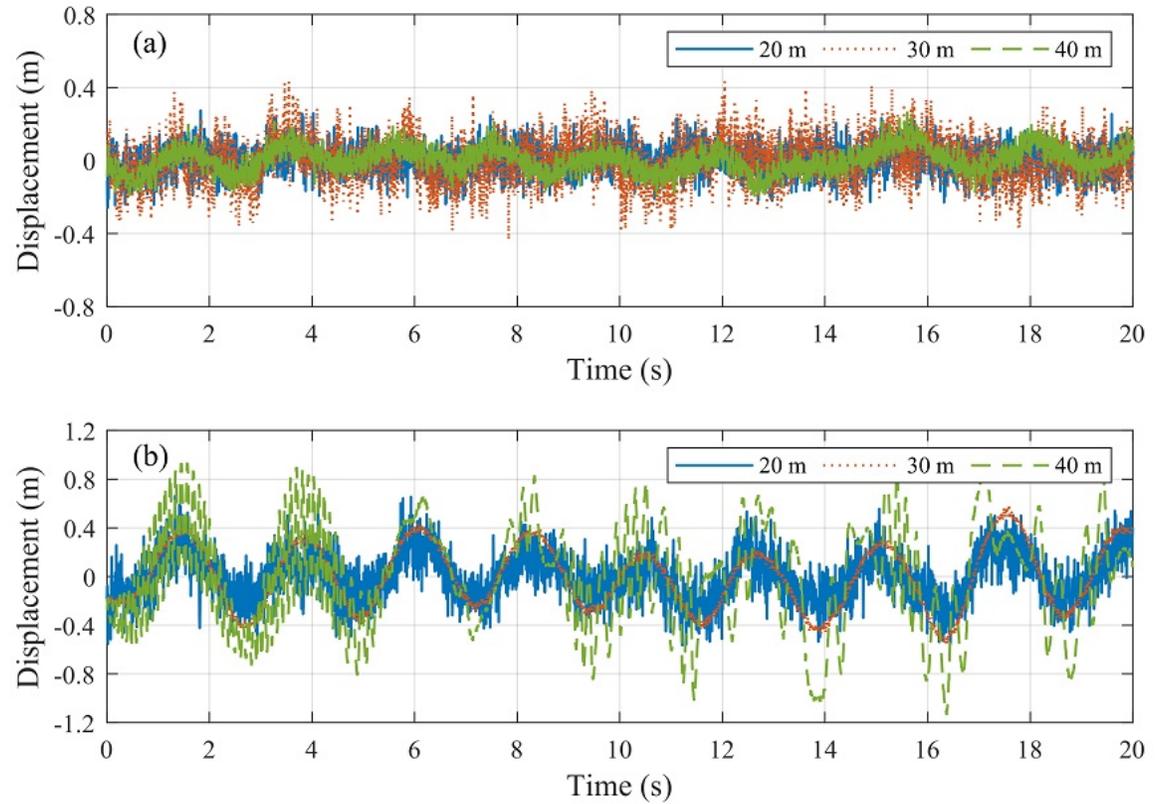


测量范围	0.01~2.0 km (具体视目标反射条件而定)
分辨率	0.01 mm
频率范围	0~200 Hz
仪器重量	20 kg

二. 在役风电塔实测



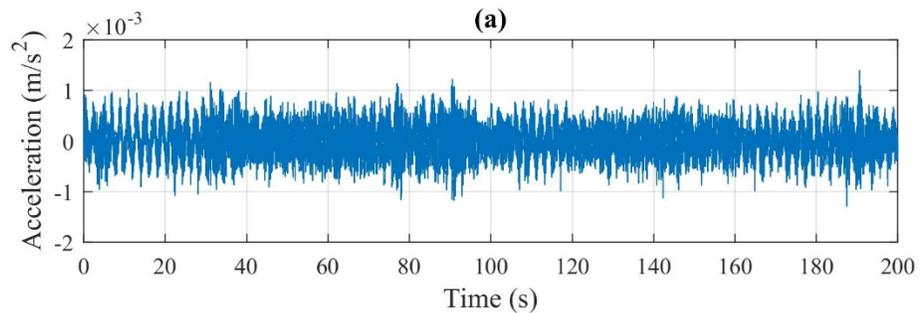
微波干涉雷达现场实测：
(a) 崇明风电塔，(b) 东台风电塔



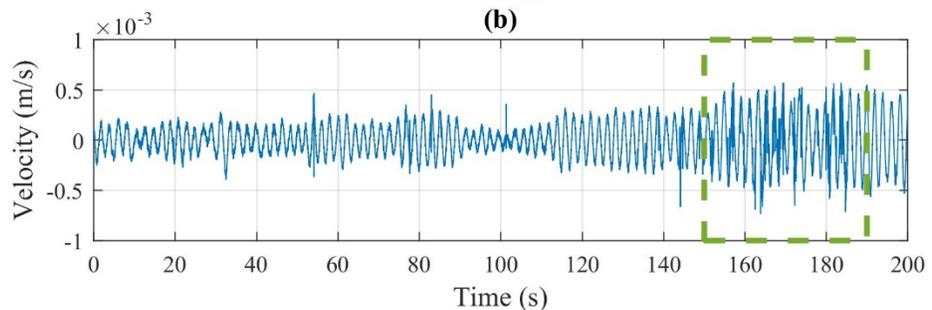
微波干涉雷达实测数据：
(a) 崇明风电塔，(b) 东台风电塔

二. 在役风电塔实测

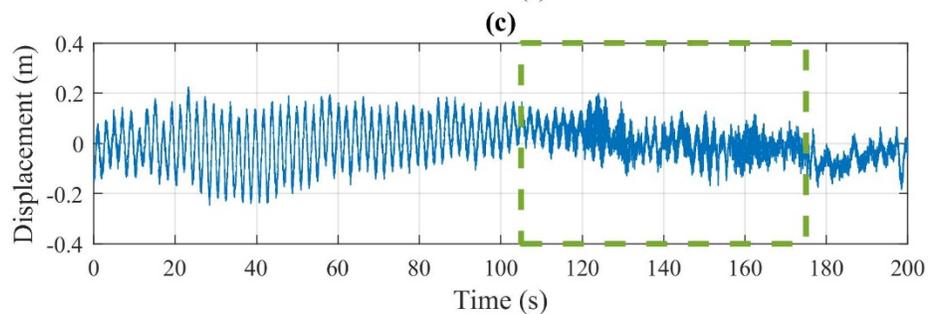
接触式传感器



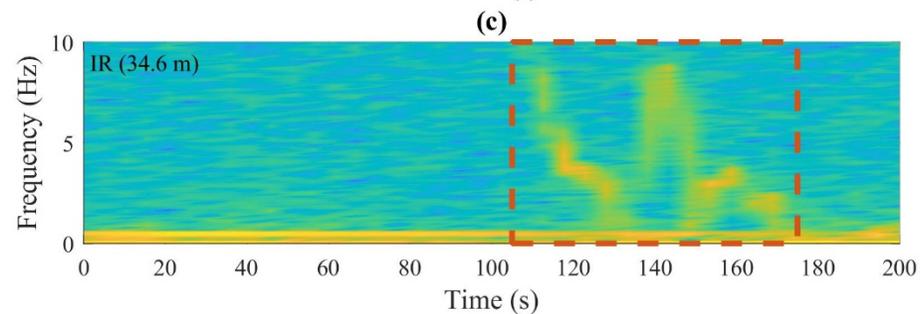
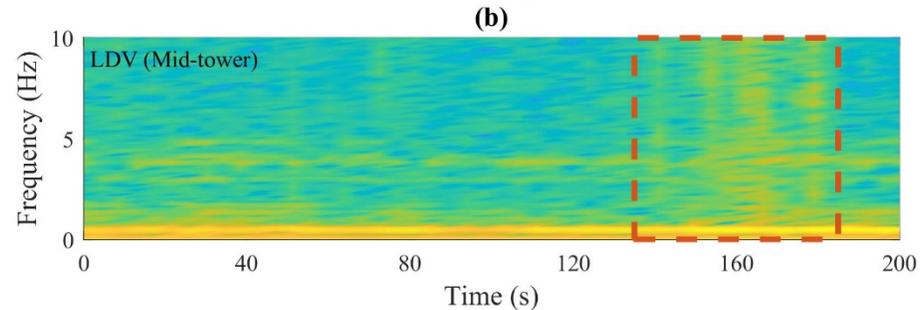
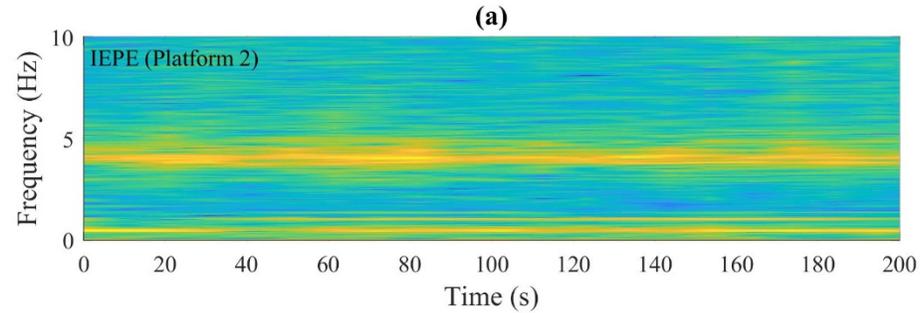
激光多普勒测振仪



微波干涉雷达



不同传感器数据时程 (崇明风电塔中部)



不同传感器数据时频谱 (崇明风电塔中部)



二. 在役风电塔实测

设状态向量： $\mathbf{x}(k) = \begin{pmatrix} x(k) \\ \epsilon(k) \end{pmatrix}$

其中： $x(k)$ 为时刻的位移， $\epsilon(k)$ 为补全状态向量的值，无实际物理含义；

相对应的状态空间方程可写为：

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(\dot{\mathbf{x}}_m(k) + \mathbf{w}(k)) \\ \mathbf{x}_m(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \end{cases}$$

其中，状态矩阵 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ，输入矩阵 $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \Delta t \\ 0 \end{bmatrix}$ ，观察矩阵 $\mathbf{C} = [1 \ 0]$ ， $\mathbf{w}(k)$ 和 $\mathbf{v}(k)$ 为噪声项。

将以上状态方程代入Kalman滤波过程：

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}(k|k) + \mathbf{B}\dot{\mathbf{x}}_m(k)$$

$$\mathbf{P}(k+1|k) = \mathbf{A}\mathbf{P}(k|k)\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}(k)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1|k+1) = \hat{\mathbf{x}}(k+1|k) + \mathbf{K}(k+1)(\mathbf{x}_m(k+1) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}(k+1|k))$$

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{C}^T(\mathbf{C}\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{C}^T + r)^{-1}$$

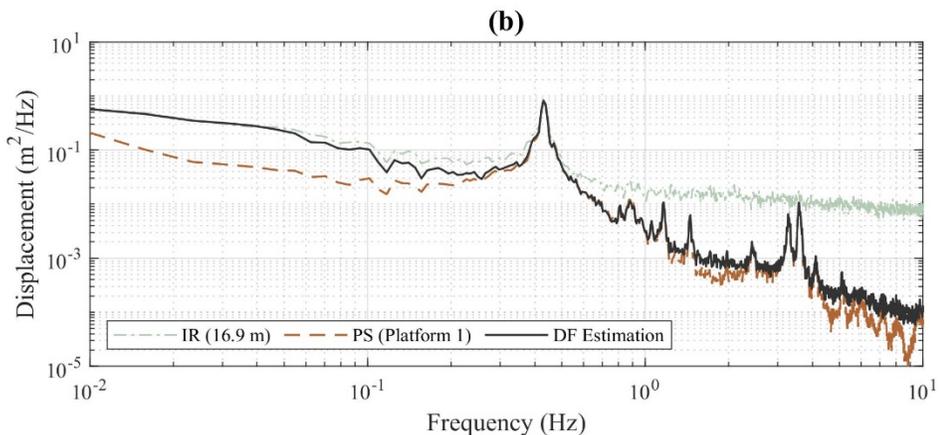
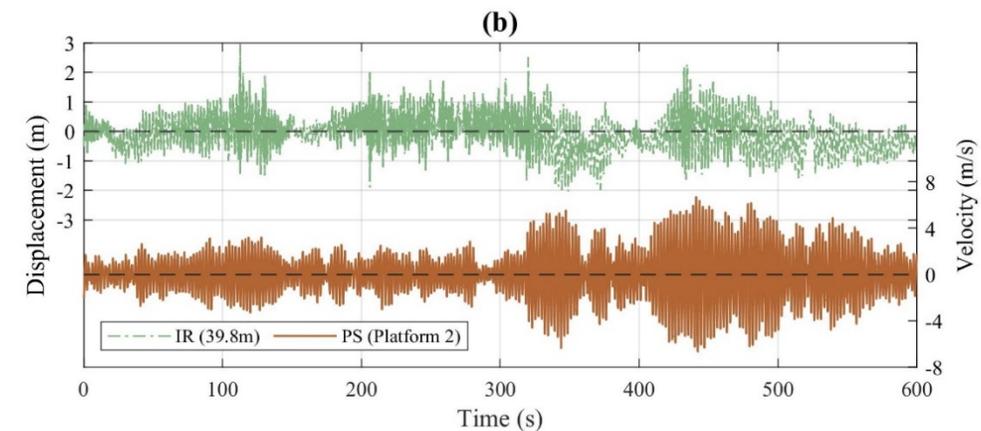
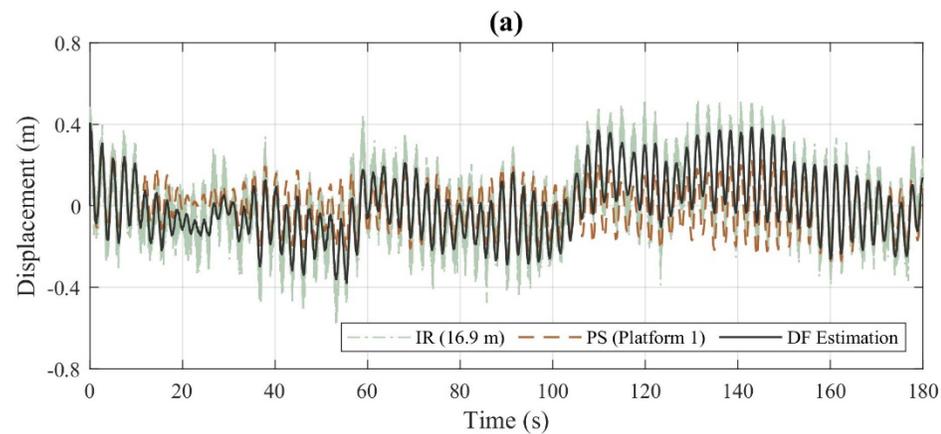
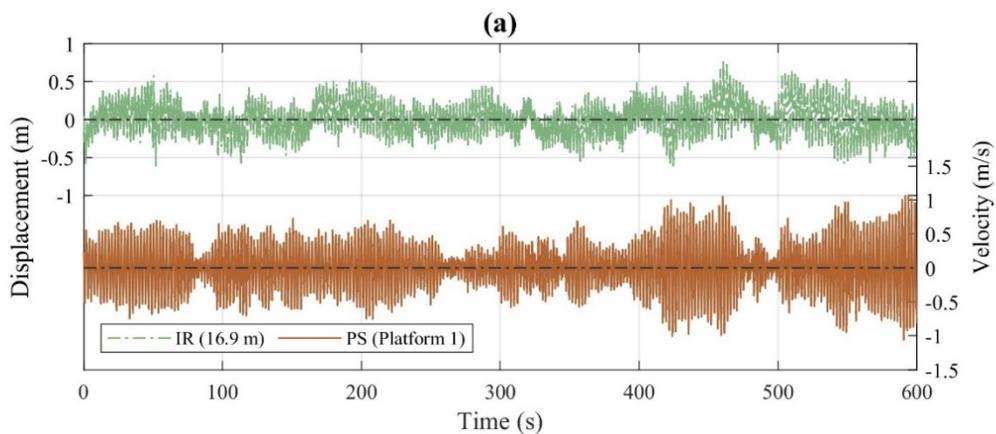
$$\mathbf{P}(k+1|k+1) = \mathbf{P}(k+1|k) - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{C}\mathbf{P}(k+1|k)$$

其中：

$$\mathbf{P}(k|k) = \mathbf{E}[(\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k))(\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k))^T]$$

$$\mathbf{Q}(k) = \mathbf{E}[\mathbf{B}\mathbf{w}(k)(\mathbf{B}\mathbf{w}(k))^T]$$

二. 在役风电塔实测



不同传感器数据时程对比

不同传感器数据融合



目录

- 一 . 简介
- 二 . 在役风电塔实测
- 三 . 谐频激励干扰的振动信号分析
- 四 . 风机振动长期监测与数据分析
- 五 . 计算机视觉在结构振动研究中的应用



三. 谐频激励干扰的振动信号分析

运动微分方程：
$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{Z}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{F}\mathbf{u}(t)$$

$$\Phi^T \mathbf{M} \Phi = \text{diag} [m_1 \cdots m_r \cdots m_n]$$

$$\Phi^T \mathbf{K} \Phi = \text{diag} [k_1 \cdots k_r \cdots k_n]$$

$$H_{lp}(\omega) = \frac{X_l(\omega)}{F_p(\omega)} = \sum_{r=1}^n \frac{\phi_{lr} \phi_{pr}}{k_r - \omega^2 m_r + j\omega z_r}$$

结构频率（无阻尼）： $f_{nr} = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_r}{m_r}}$

结构频率（低阻尼）： $f_{dr} = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$

结构阻尼比： $\zeta = \frac{z_r}{2\sqrt{m_r k_r}}$

状态空间方程：
$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{Z}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = \mathbf{F}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) - \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) = 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{x}(t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}(t) \\ \dot{\mathbf{q}}(t) \end{Bmatrix}$$

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k + w_k \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\mathbf{u}_k + v_k \end{cases}$$

$$\mathbf{A} = \Psi \Lambda \Psi^T$$

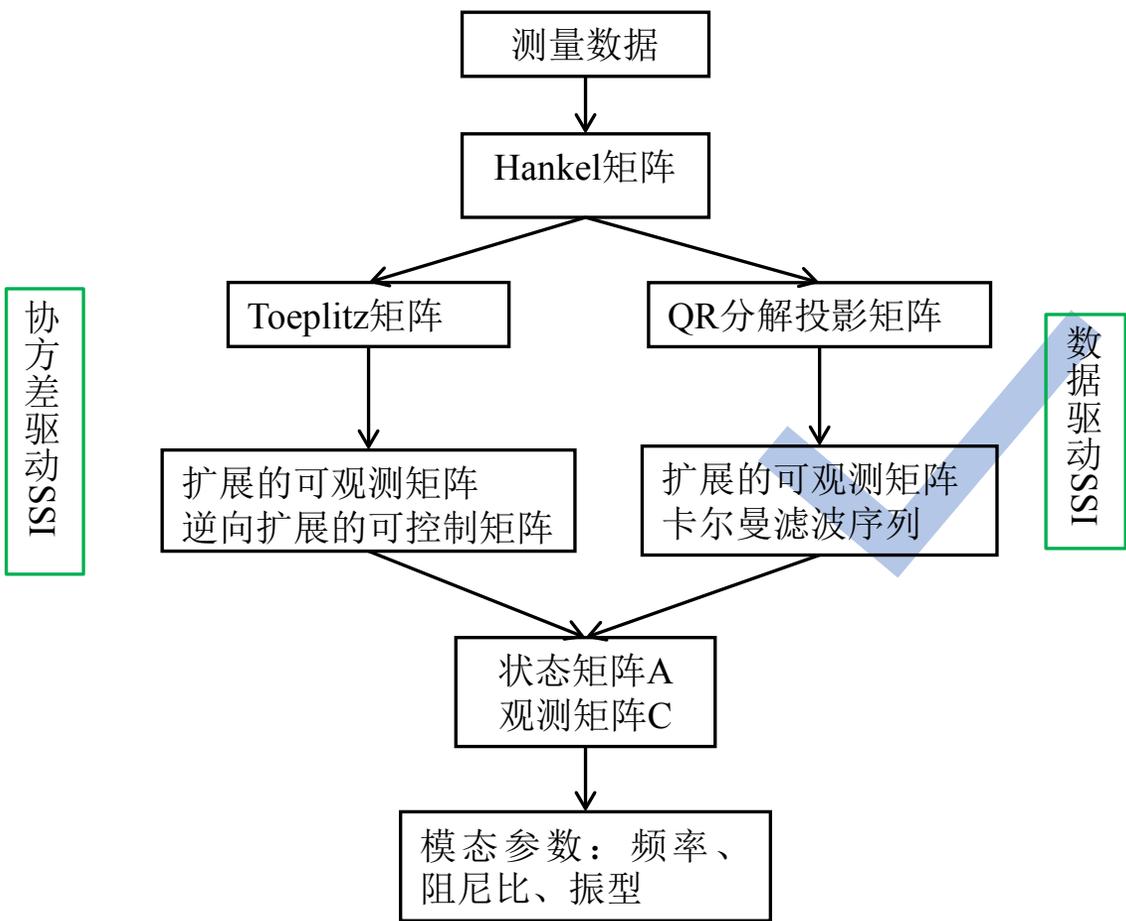
结构振型： $\Phi = \mathbf{C}\Psi$

结构频率： $\omega_i = \sqrt{(\lambda_{ci}^R)^2 + (\lambda_{ci}^I)^2}$

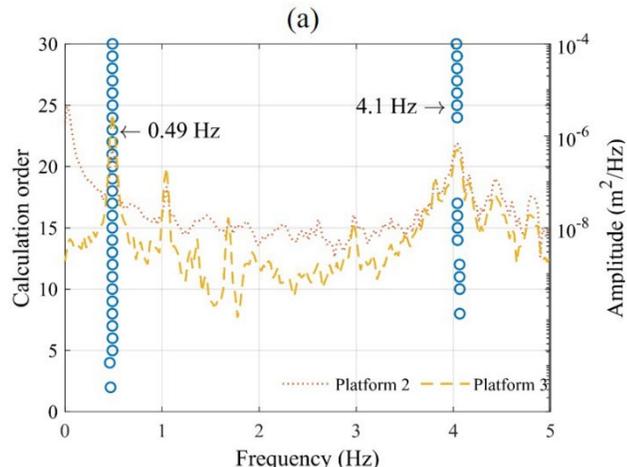
结构阻尼比： $\zeta_i = -\frac{\lambda_{ci}^R}{\omega_i}$

优点		缺点
峰值拾取法	原理简单、计算简便、实现容易	阻尼需配合半功率法计算，不能区分相近模态
贝叶斯FFT法	在得到识别结果的同时给出不确定性	需要事先确定计算频段
特征系统实现算法	可用于白噪声激励响应与脉冲激励响应	需配合NEXT 或RDT 使用，计算过程所需参数较多
随机子空间识别	结果对计算参数的选取不敏感，便于实现自动化拓展	测点较多时计算速率较低

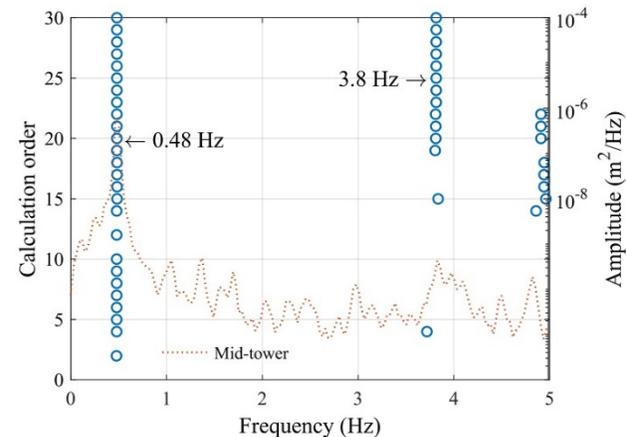
三. 谐频激励干扰的振动信号分析



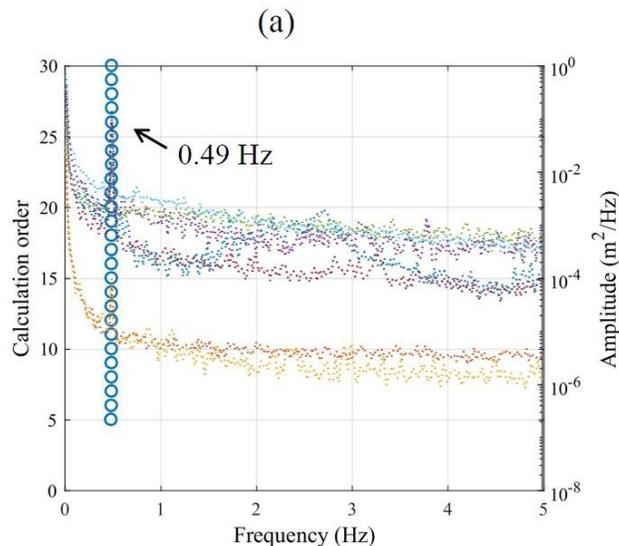
随机子空间识别算法 (SSI) 示意图



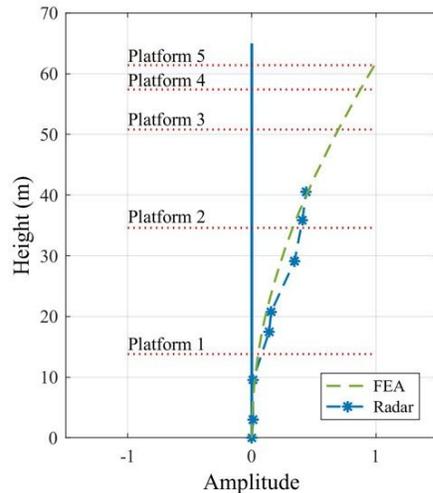
接触式传感器



激光多普勒测振仪



微波干涉雷达



随机子空间识别稳定图 (崇明风电塔)

三. 谐频激励干扰的振动信号分析

Tower	A								
Mode order	1 st				2 nd				
Sensor		IEPE	LDV	IR	FE		IEPE	LDV	FE
Frequency (Hz)	0.49	0.48	0.49	0.48		4.1	3.8	5.07	
Damping ratio	2%	2%	1%			3%	3%		

Tower	B								
Mode order	1 st			2 nd					
Sensor		PS		IR	FE		PS		FE
Frequency (Hz)	0.43		0.43	0.44		3.6		4.17	
Damping ratio	1%		2%			1%			

- 接触式传感器能够获得风电塔结构的前二阶动力特性;
- 激光多普勒测振仪能够得到风电塔结构第二阶动力特性但与接触式传感器结果有一定差别;
- 风电塔结构的阻尼水平较低;
- 简化程度较高的有限元模型一阶动力特性仍然可信。

风电塔结构动力特性识别结果 (停机状态)

三. 谐频激励干扰的振动信号分析

原始数据:

$$\mathbf{y}_k = U_{ha}\bar{\phi}_{ea}\sin(2\pi f_h t_k + \theta_{ha}) + U_{eak}\bar{\phi}_{ea}\sin(2\pi f_{ea} t_k + \theta_{eak})$$

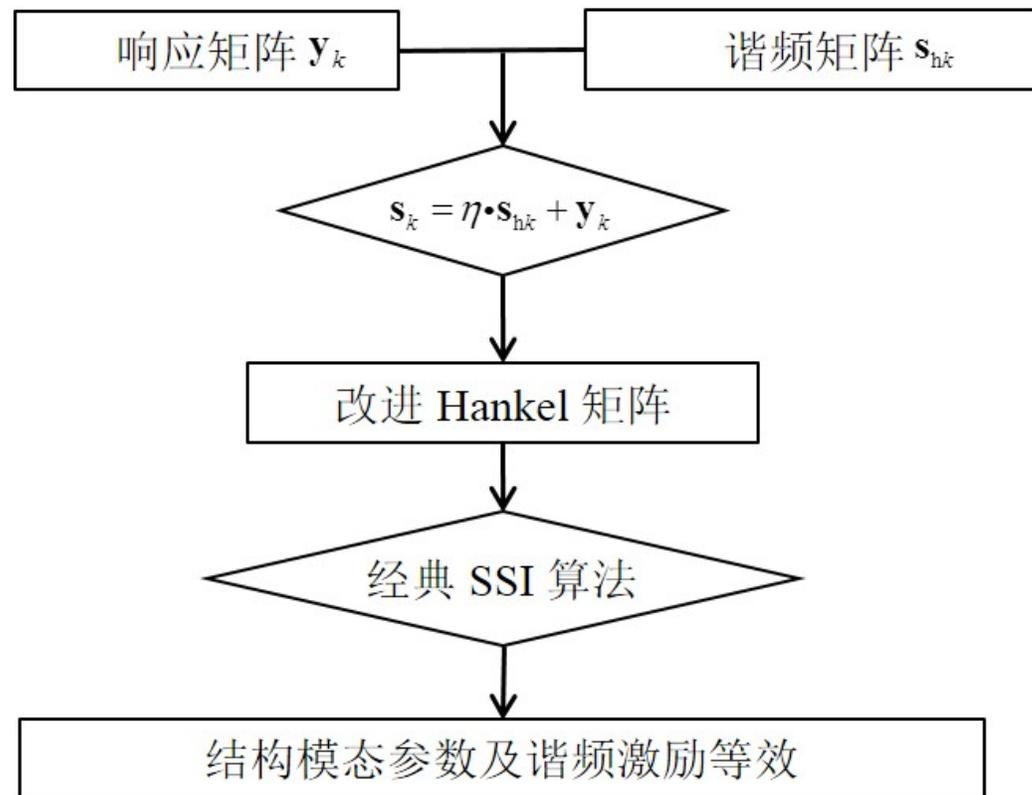
引入谐频矩阵:

$$\mathbf{s}_k = \eta \mathbf{s}_{hk} + \mathbf{y}_k = \{s_{k1}, s_{k2}, \dots, s_{kr}, \dots, s_{km}\}^T$$

$$\mathbf{s}_{hk} = \begin{Bmatrix} \sin(2\pi f_h t_k) \\ \sin(2\pi f_h t_k) \\ \dots \\ \sin(2\pi f_h t_k) \end{Bmatrix}_{m \times 1} = \mathbf{I}_{m \times 1} \sin(2\pi f_h t_k)$$

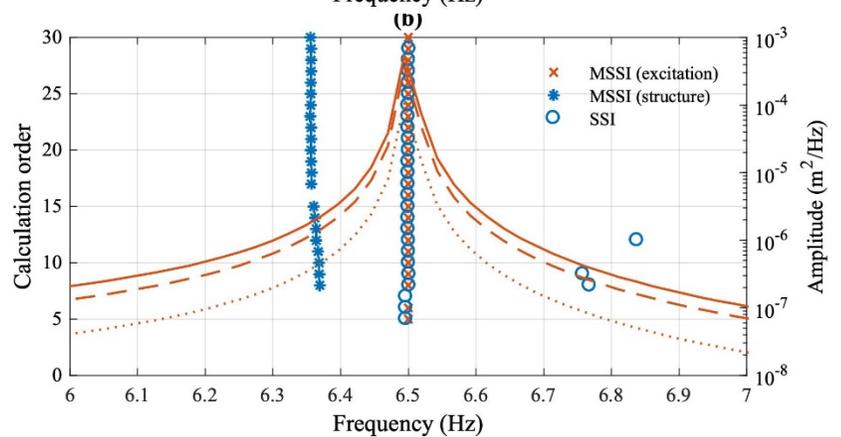
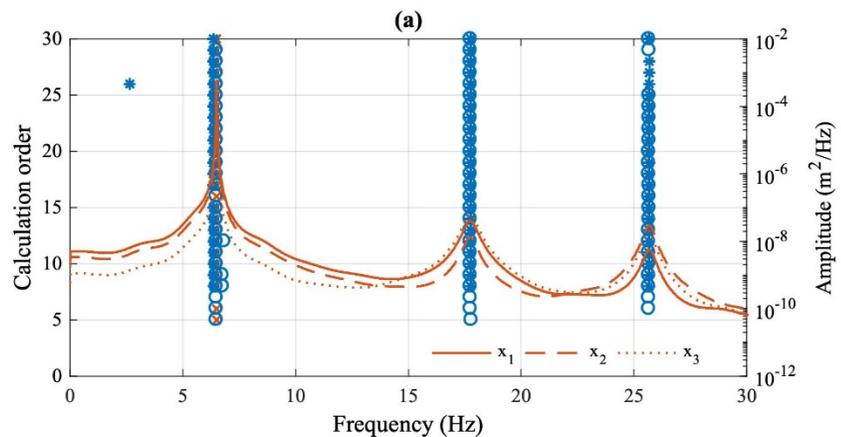
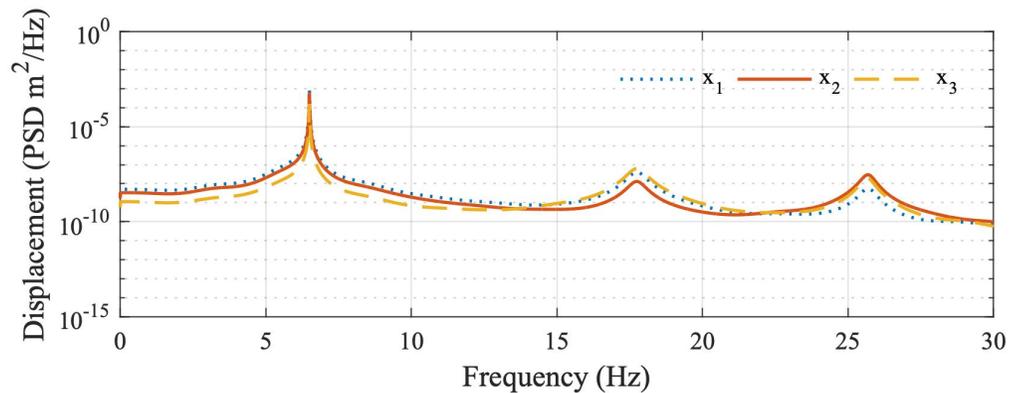
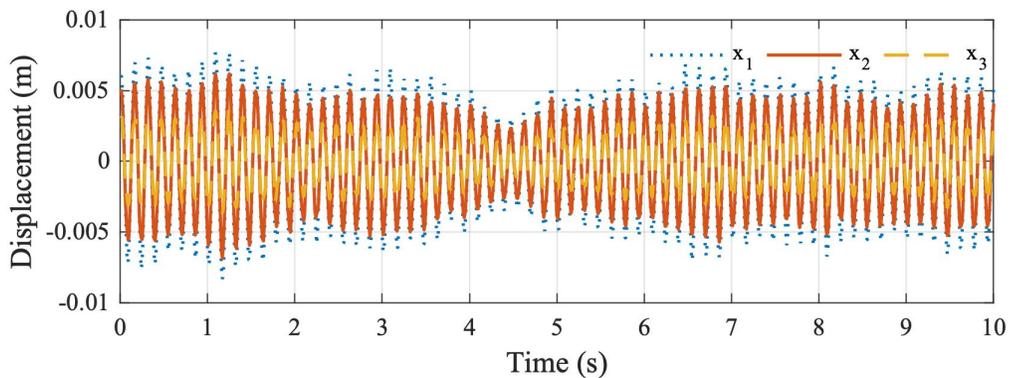
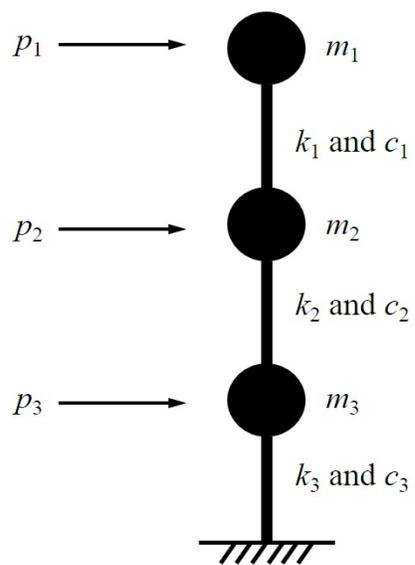
$$\tilde{\phi}_{vr} = \left\{ (\eta \tilde{\phi}_{hr})^2 + (U_{ha} \bar{\phi}_{ear})^2 + 2U_{ha} \bar{\phi}_{ear} \cos \theta_{ha} \right\}^{1/2}$$

$$\mathbf{s}_k = \tilde{\phi}_v \sin(2\pi f_h t_k + \theta_{vr}) + U_{eak} \bar{\phi}_{ea} \sin(2\pi f_{ea} t_k + \theta_{eak})$$



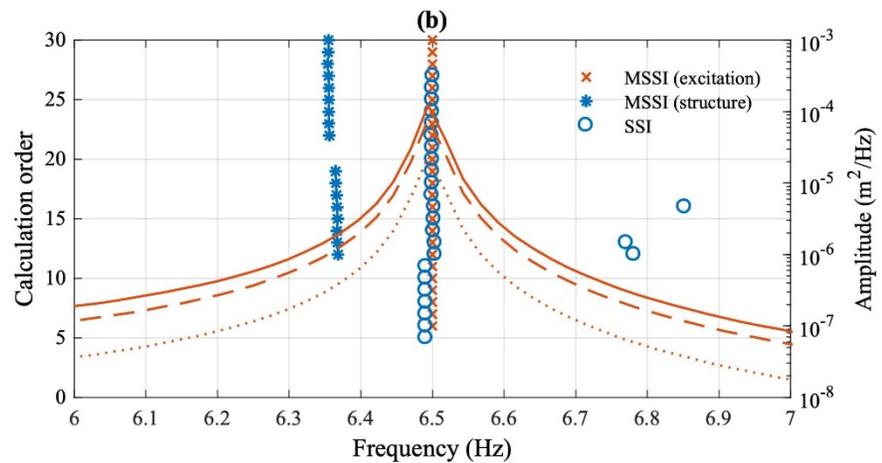
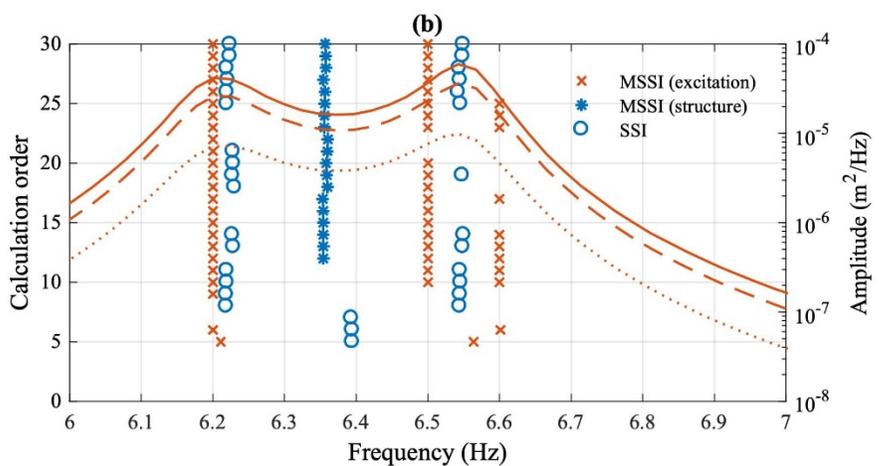
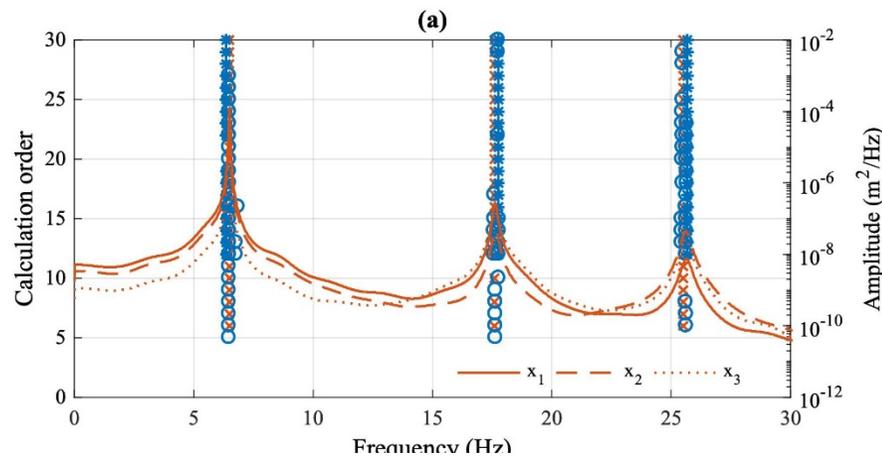
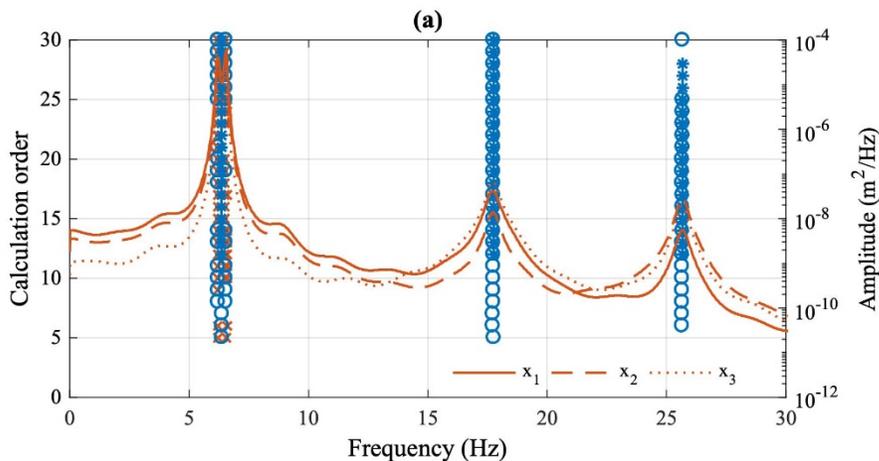
改进SSI算法原理

三. 谐频激励干扰的振动信号分析



改进SSI算法数值试验验证 (单一谐频干扰)

三. 谐频激励干扰的振动信号分析

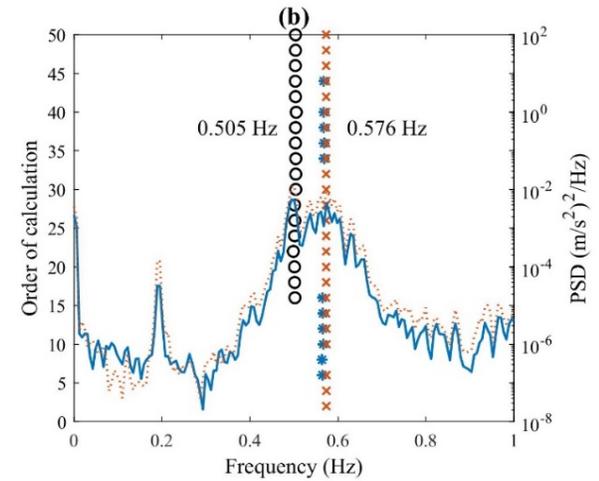
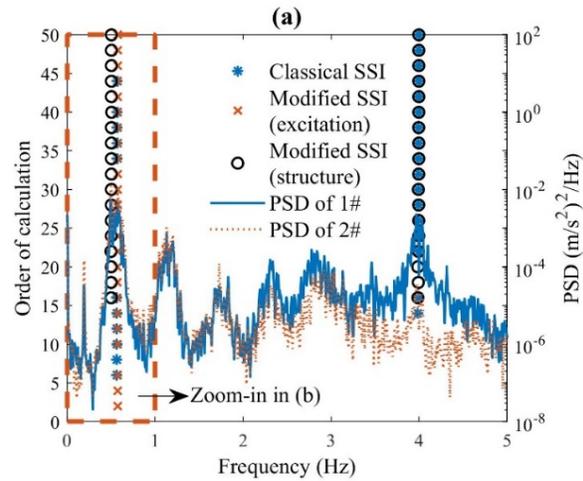
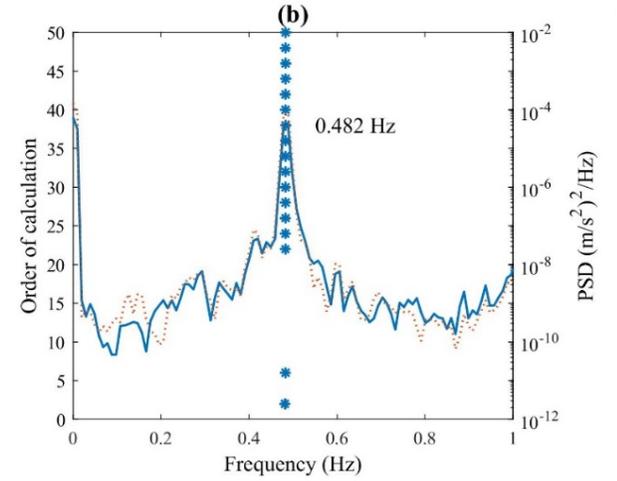
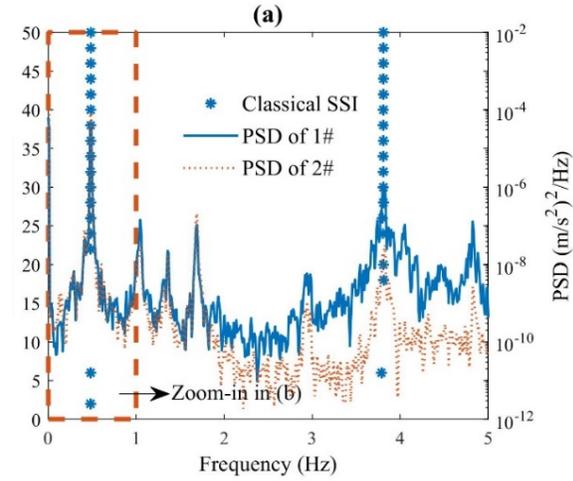
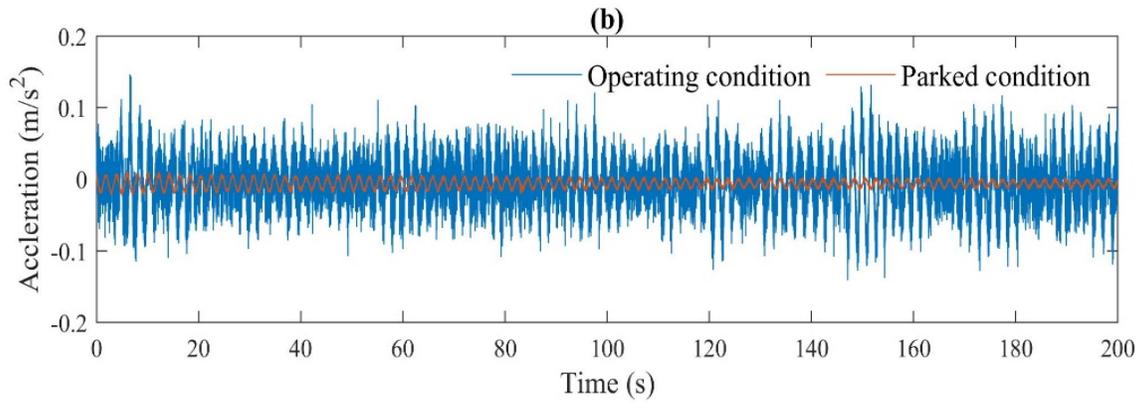
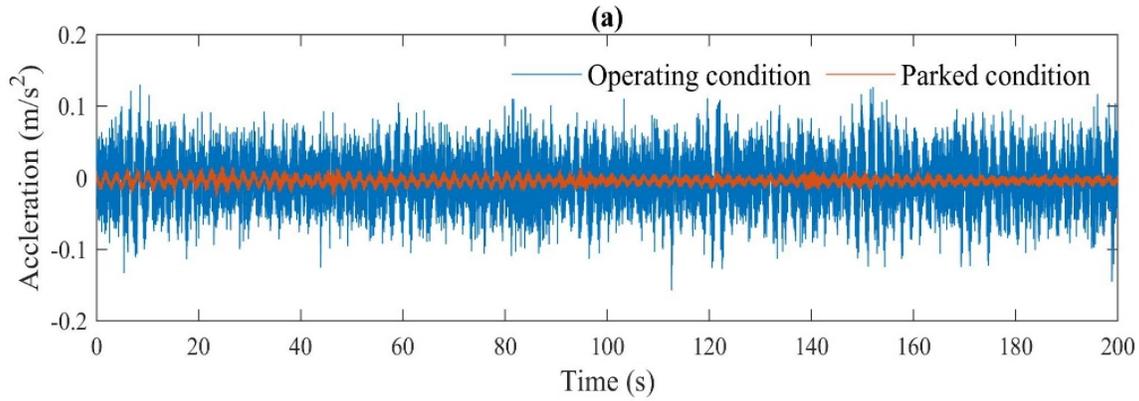


改进SSI算法数值试验验证
(3个谐频成分对应同一阶结构模态)

改进SSI算法数值试验验证
(3个谐频成分对应同一阶结构模态)



三. 谐频激励干扰的振动信号分析



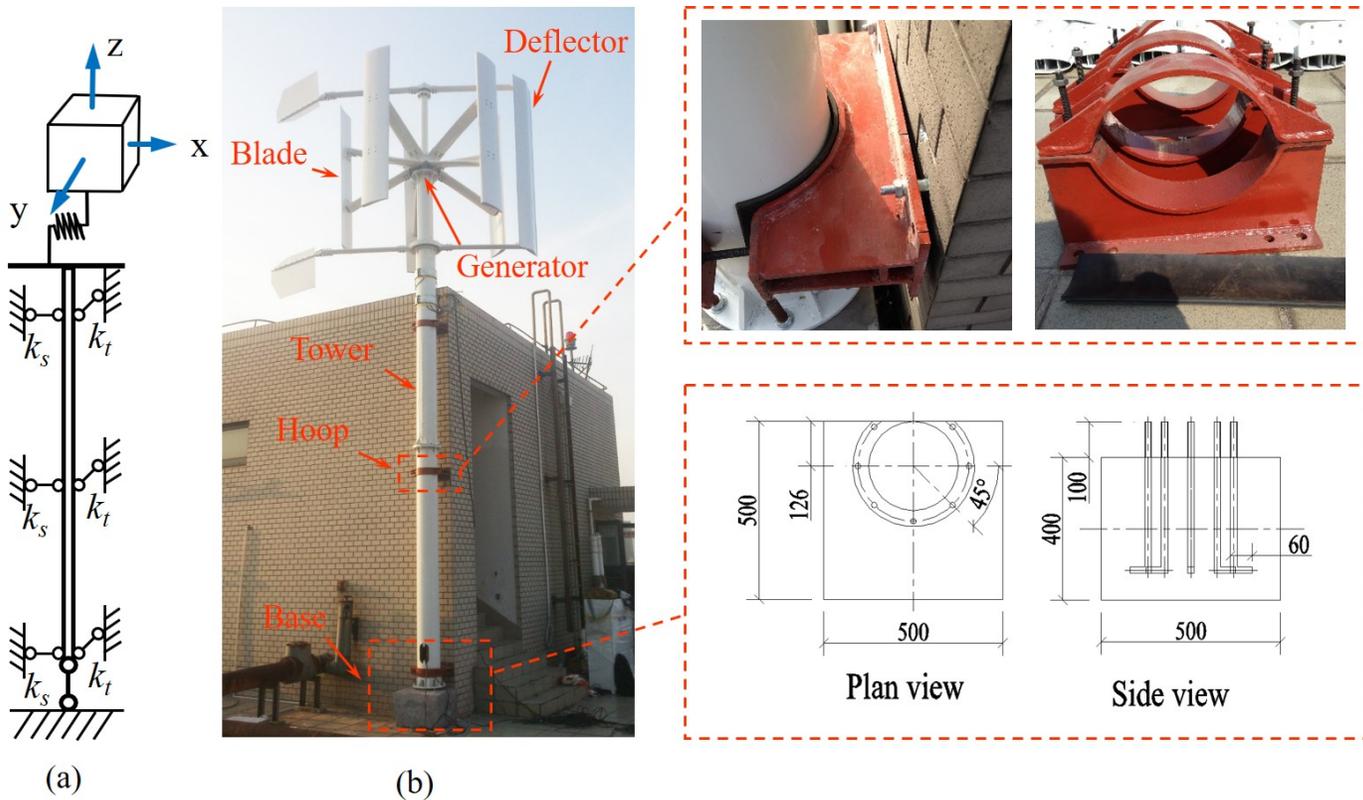
改进SSI算法应用于风电塔运行状态下的实测数据处理



目录

- 一 . 简介
- 二 . 在役风电塔实测
- 三 . 谐频激励干扰的振动信号分析
- 四 . 风机振动长期监测与数据分析**
- 五 . 计算机视觉在结构振动研究中的应用

四. 风机振动长期监测与数据分析

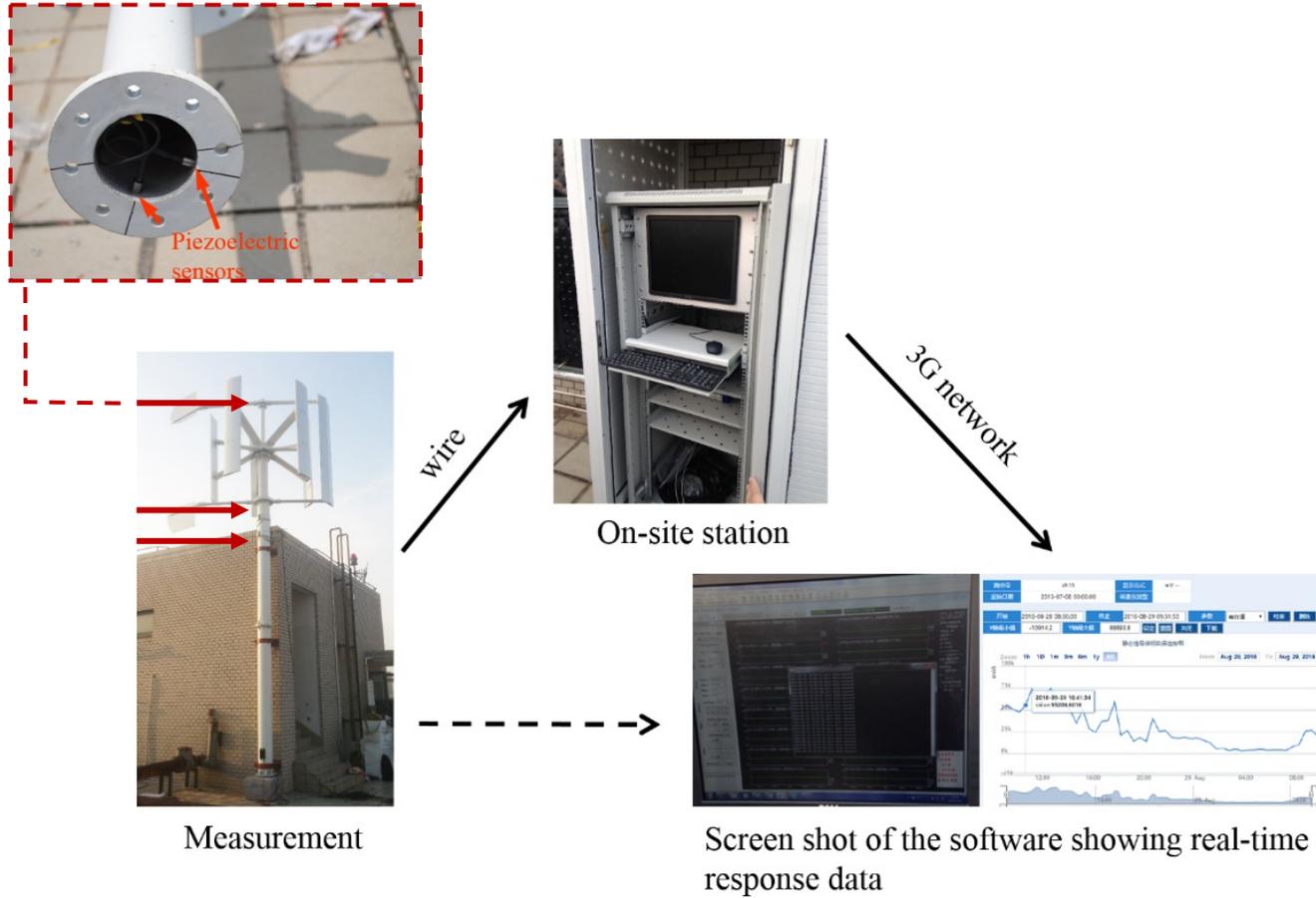


屋顶小型风机振动监测系统搭建

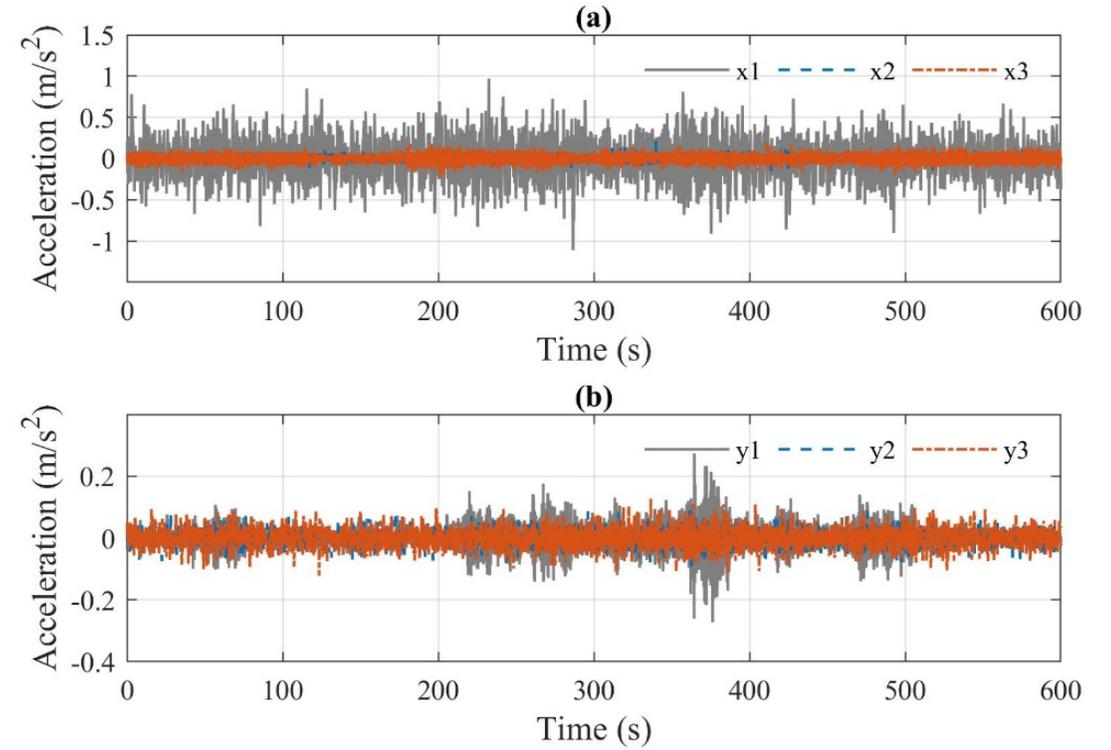
屋顶风机主要参数

项目	参数
额定功率	2 kW
额定转速	250 rpm
额定风速	25 m/s
最大设计风速	32 m/s
叶片高度	2 m
叶片跨度	2.2 m
重量 (发电机 + 叶片)	240 kg

四. 风机振动长期监测与数据分析



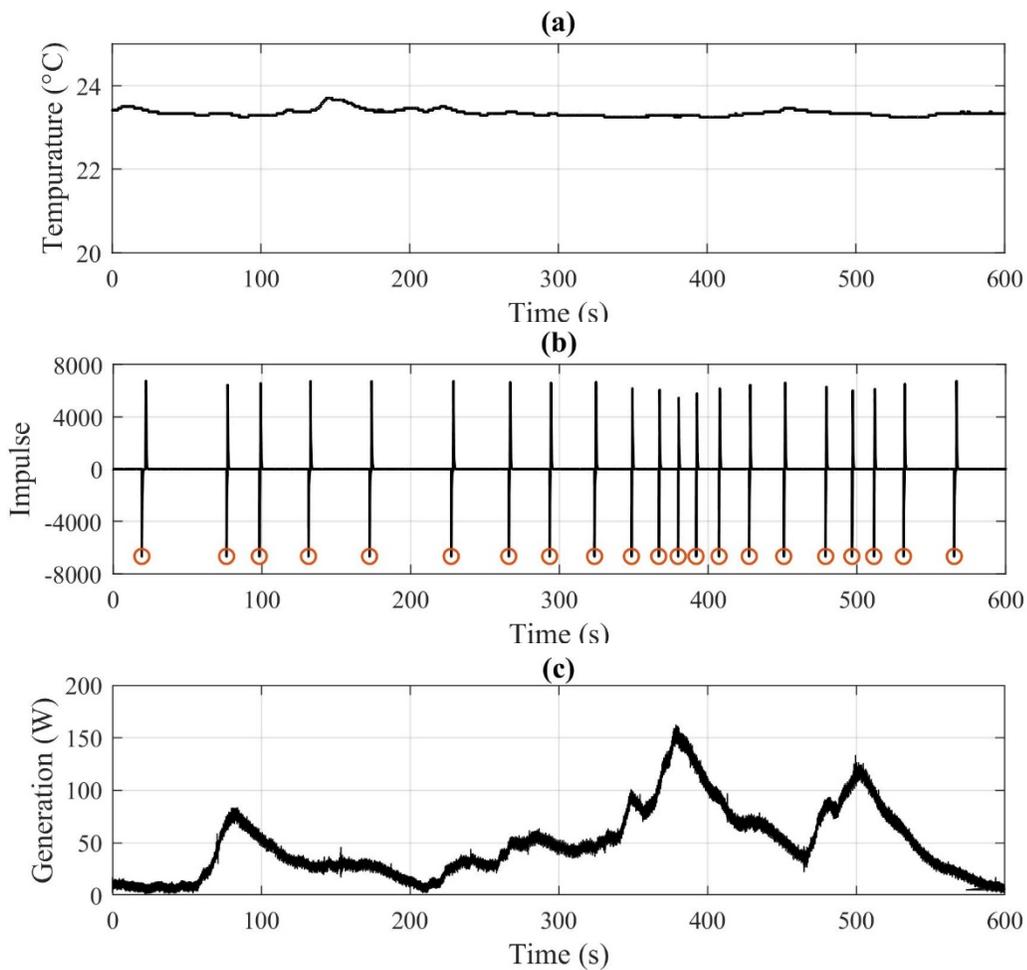
屋顶风机振动监测系统搭建



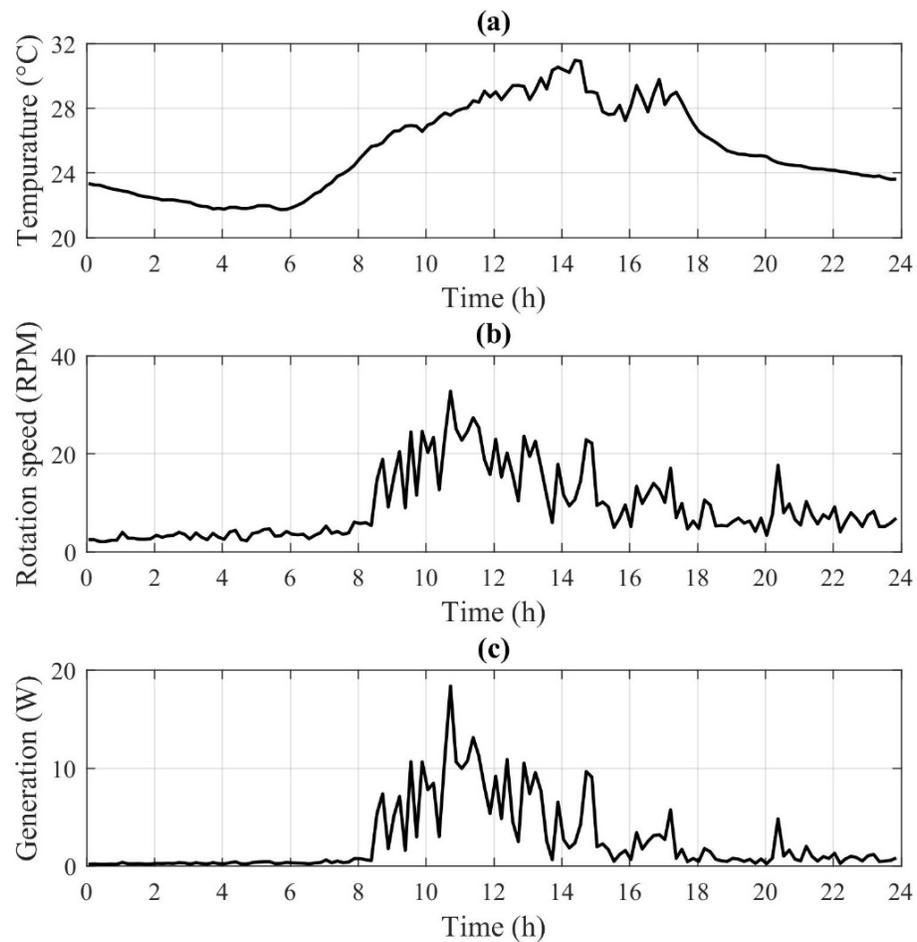
屋顶风机振动数据时程



四. 风机振动长期监测与数据分析

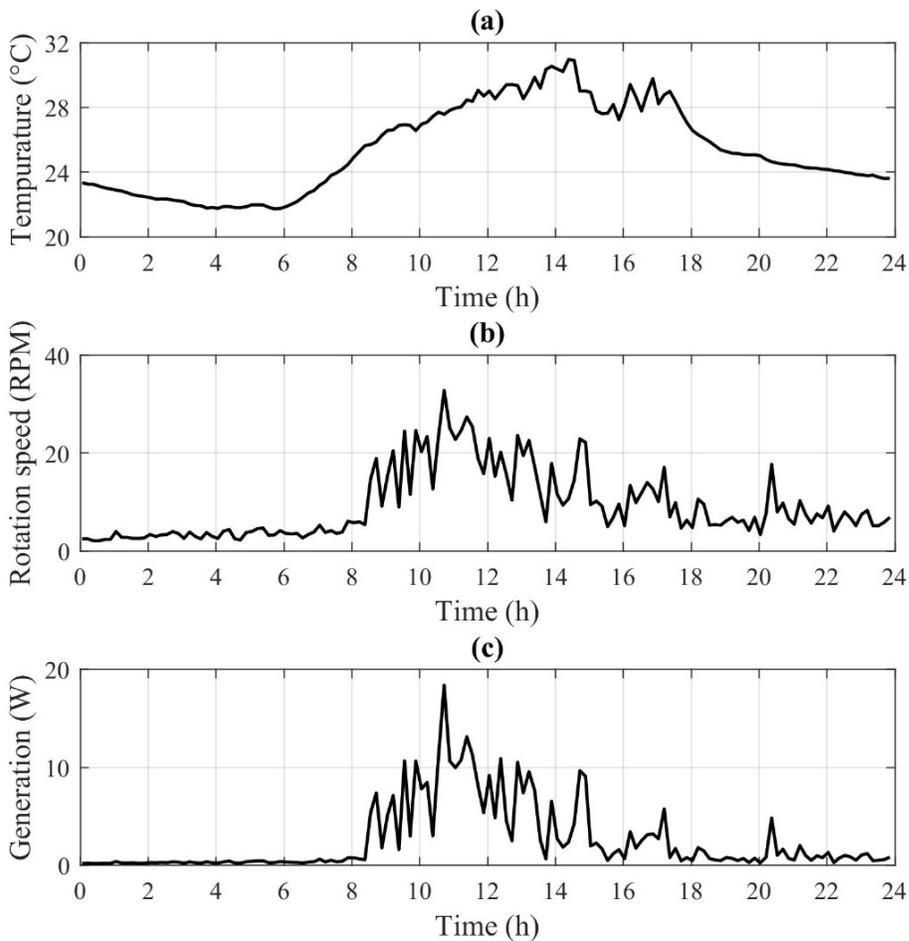


10 min 数据：(a) 温度，(b) 转速，(c) 发电量

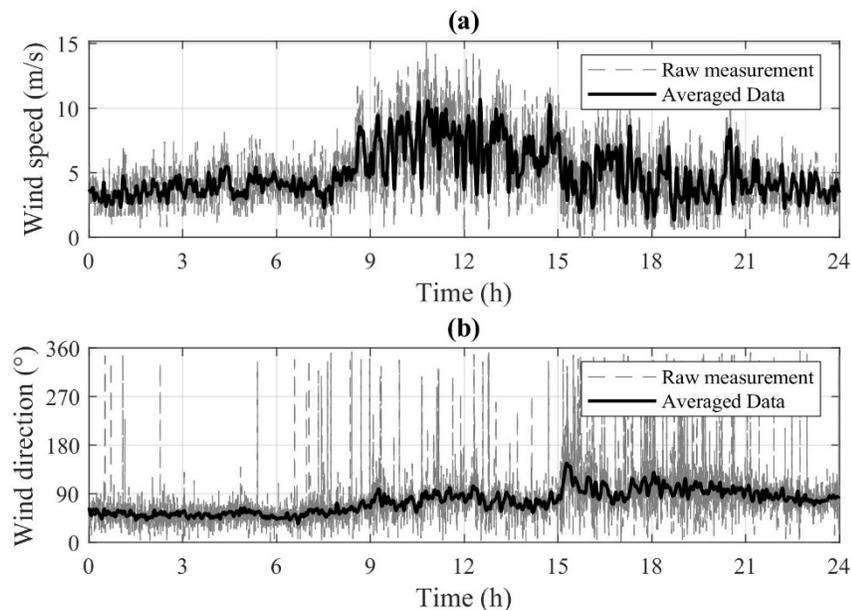


24 h 数据：(a) 温度，(b) 转速，(c) 发电量

四. 风机振动长期监测与数据分析



24 h 数据：(a) 温度，(b) 转速，(c) 发电量



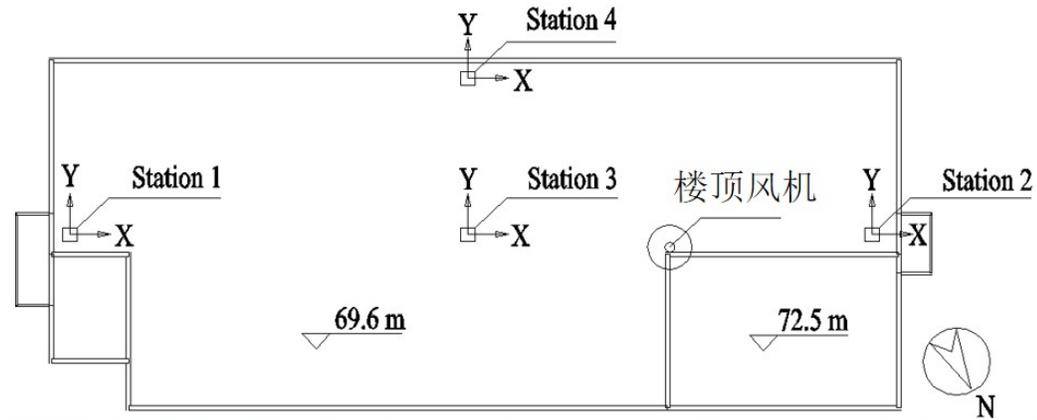
24 h 数据：(a) 风速，(b) 风向

风机转速/风速/环境温度的相关性

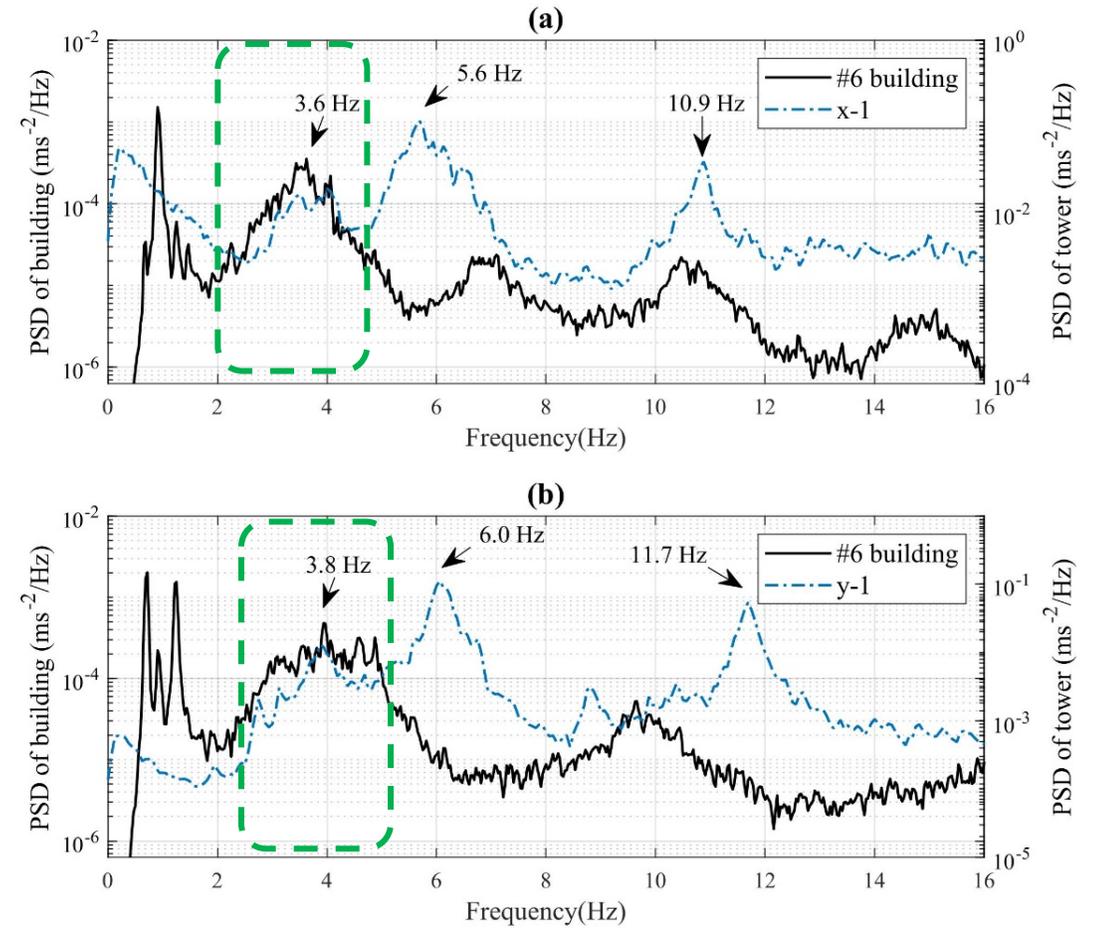
相关系数	风机转速	风速 (原始数据)	环境温度
风机转速	1	0.581	0.757
风速	0.581	1	0.516
环境温度	0.757	0.516	1

相关系数	风机转速	风速 (平滑数据)	环境温度
风机转速	1	0.888	0.757
风速	0.888	1	0.677
环境温度	0.757	0.677	1

四. 风机振动长期监测与数据分析

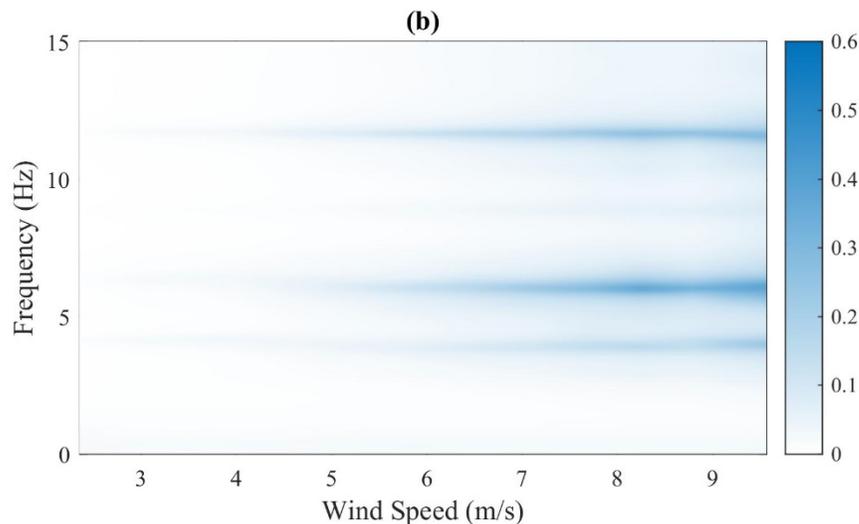
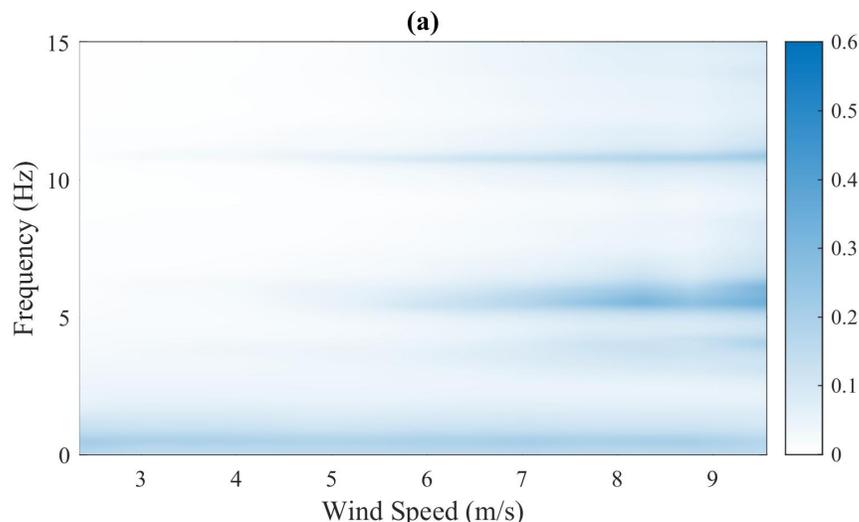


屋顶风机所在建筑振动实测

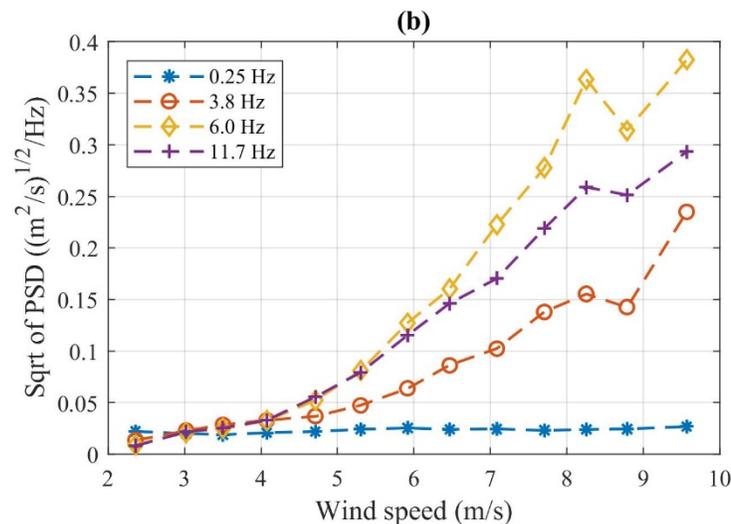
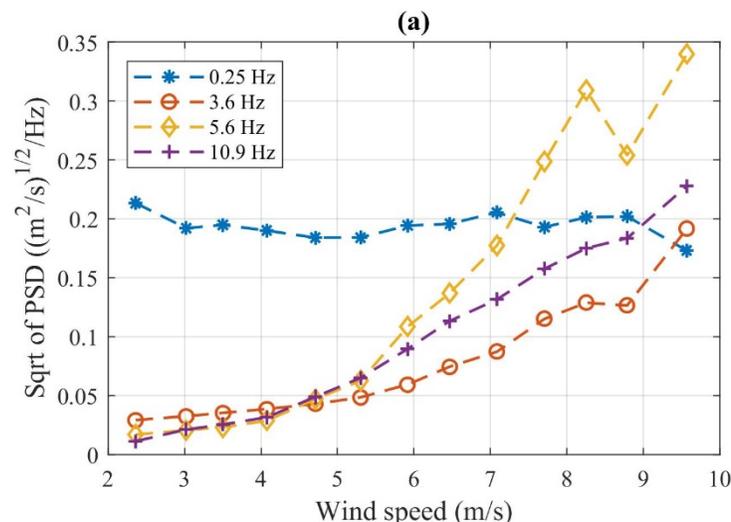


屋顶振动与风机振动对比：(a) x方向，(b) y方向

四. 风机振动长期监测与数据分析

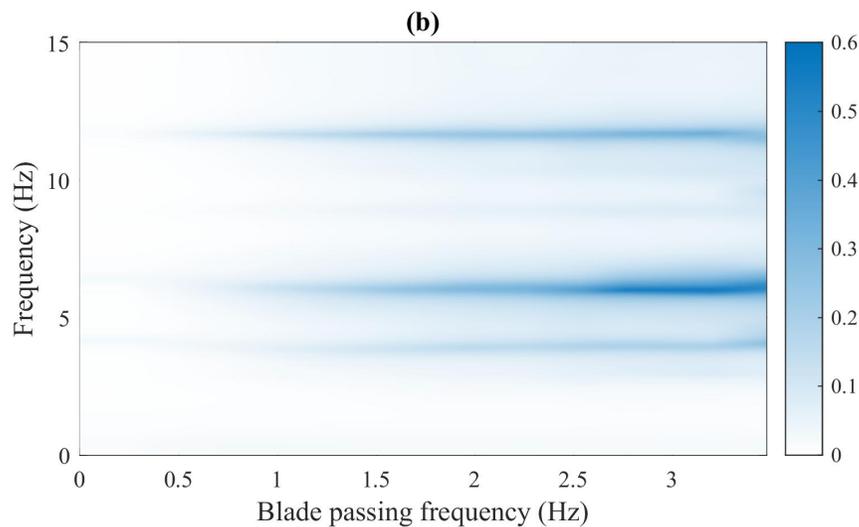
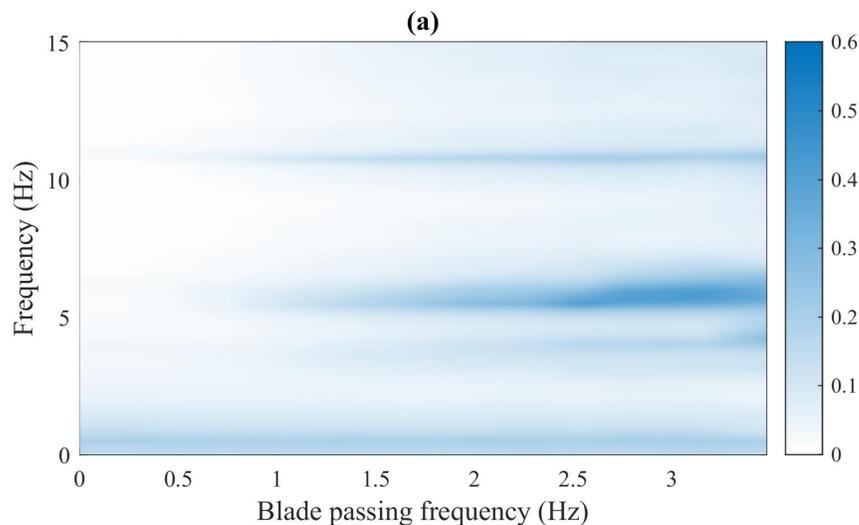


振动频谱随风速变化情况：
(a) X方向，(b) Y方向

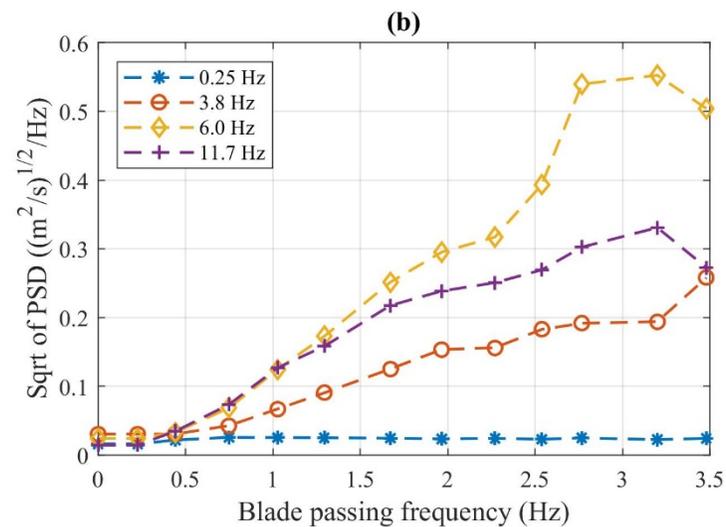
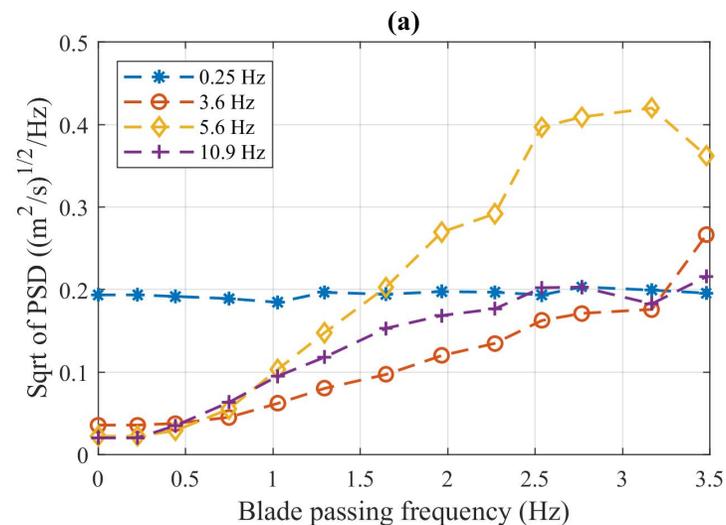


振动频谱随风速变化情况 (剖面)：
(a) X方向，(b) Y方向

四. 风机振动长期监测与数据分析

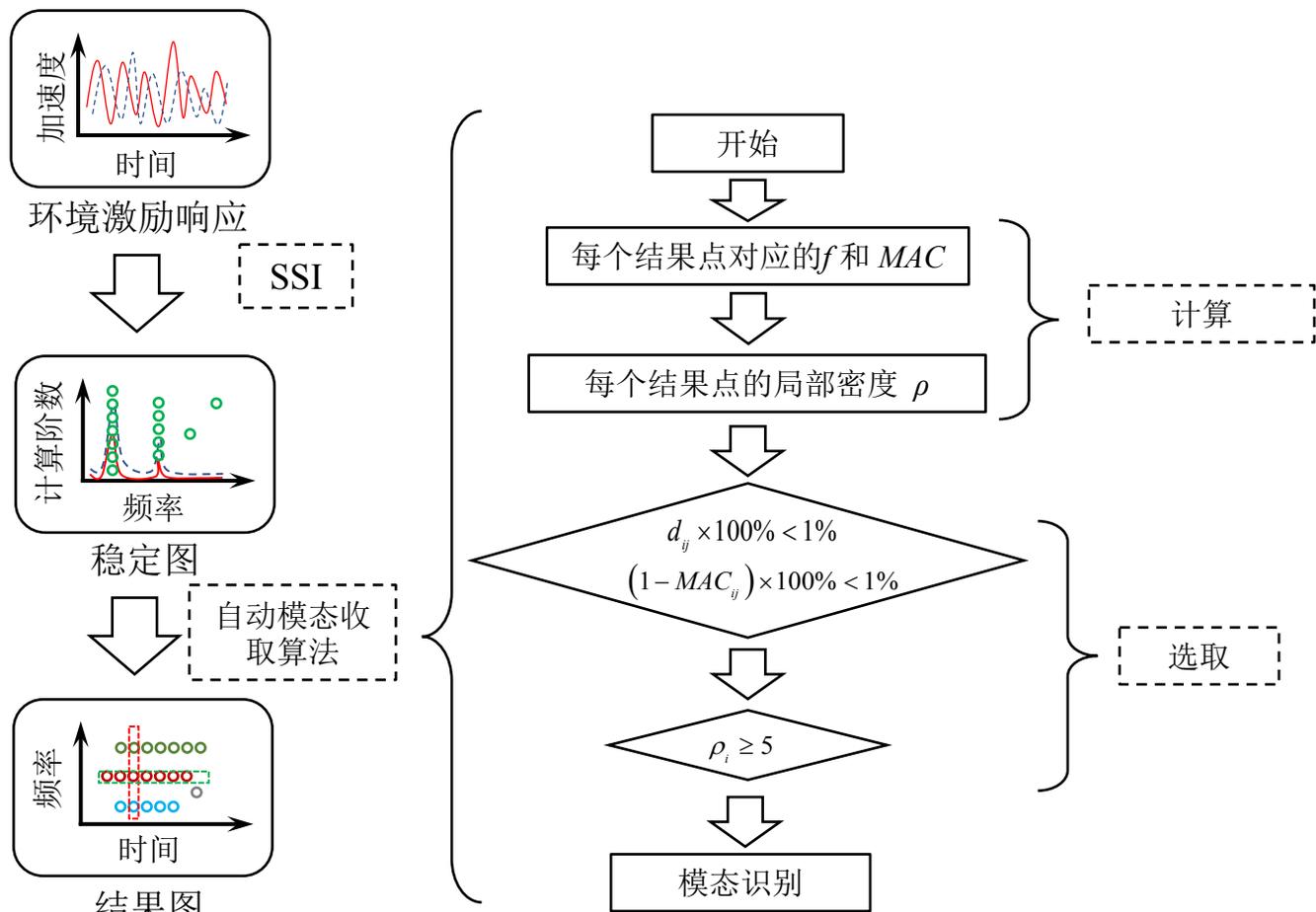


振动频谱随叶片通过频率变化情况：
(a) X方向，(b) Y方向

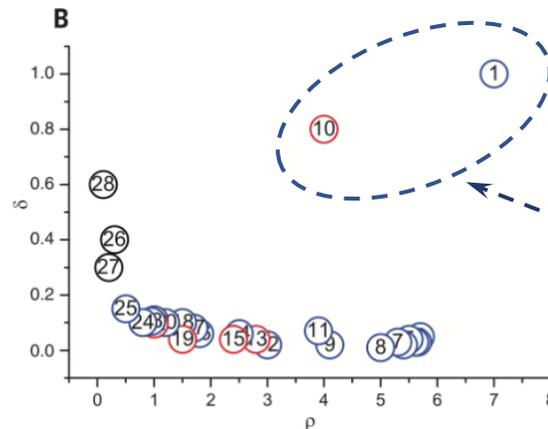
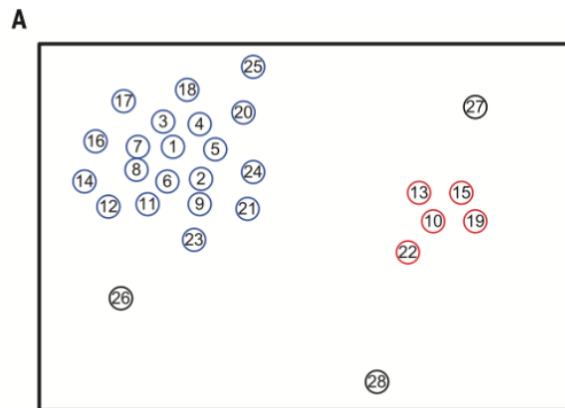


振动频谱随叶片通过频率变化情况 (剖面)：
(a) X方向，(b) Y方向

四. 风机振动长期监测与数据分析



结构动力特性自动识别方法流程



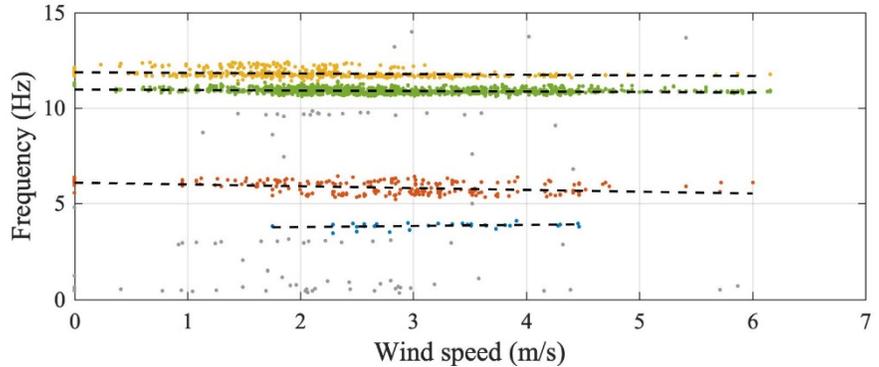
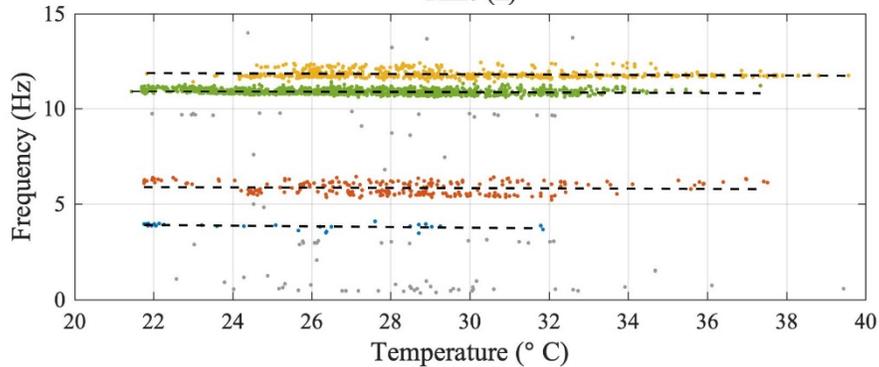
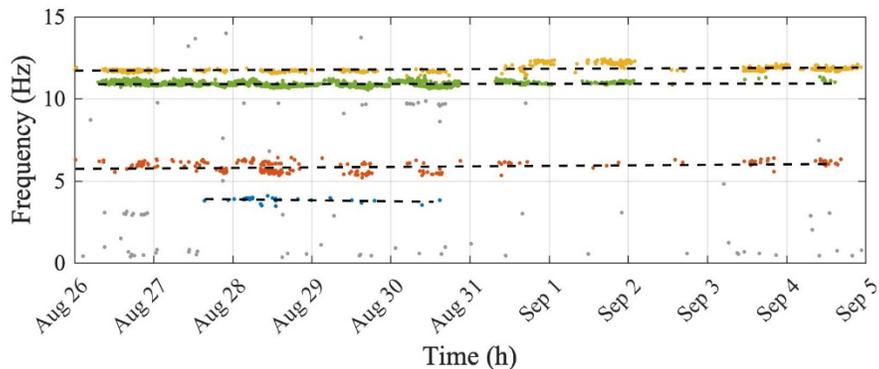
聚类中心:
 • 局部密度足够高;
 • 距离其他点足够远。

距离指标计算:

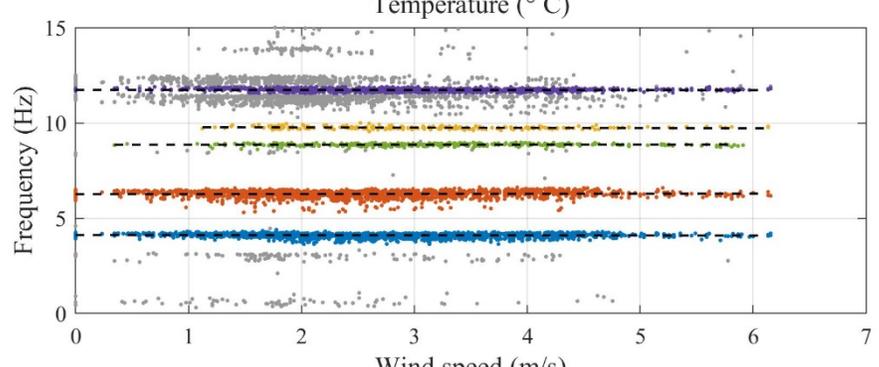
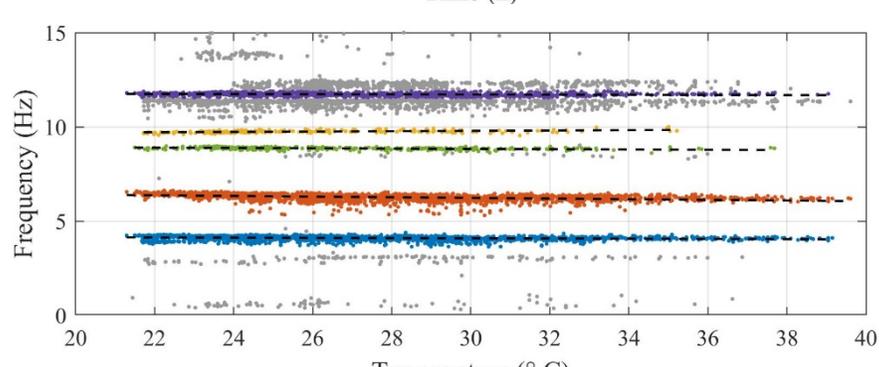
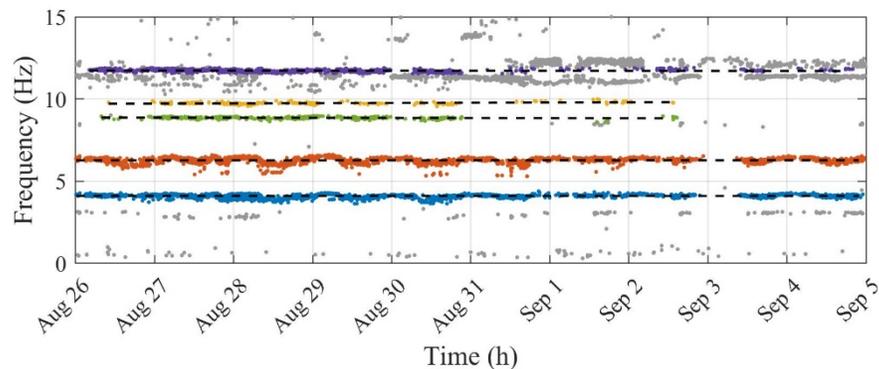
$$d_{ij} = \left| \frac{f_i - f_j}{f_j} \right| \quad MAC_{ij} = \frac{(\boldsymbol{\varphi}_i^T \boldsymbol{\varphi}_j)^2}{(\boldsymbol{\varphi}_i^T \boldsymbol{\varphi}_i)(\boldsymbol{\varphi}_j^T \boldsymbol{\varphi}_j)}$$



四. 风机振动长期监测与数据分析

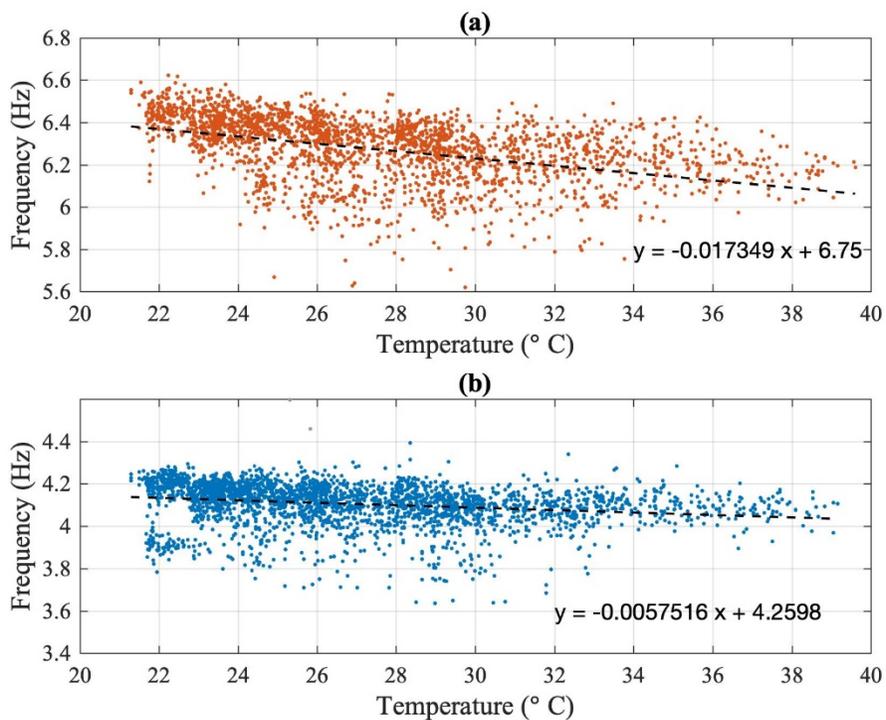


屋顶风机动力特性识别结果 (x方向)

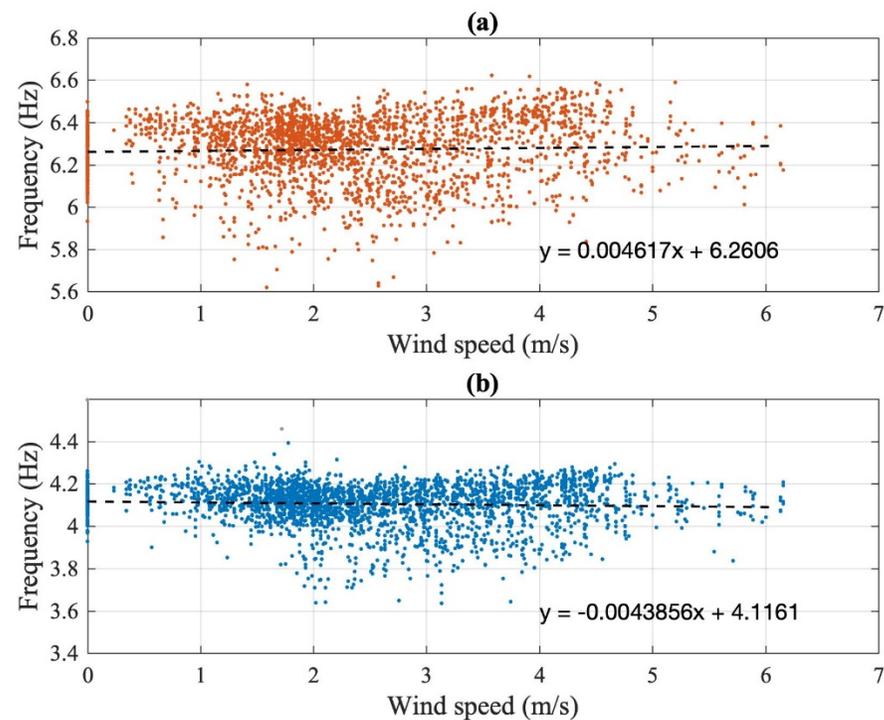


屋顶风机动力特性识别结果 (y方向)

四. 风机振动长期监测与数据分析



屋顶风机动力特性随温度变化情况



屋顶风机动力特性随风速变化情况

- 温度、风速相关性较高，但结构动力特性随二者的变化趋势仍有所区别。
- 垂直轴风机频率随温度变化的相关性更强，且随温度升高而下降；



目录

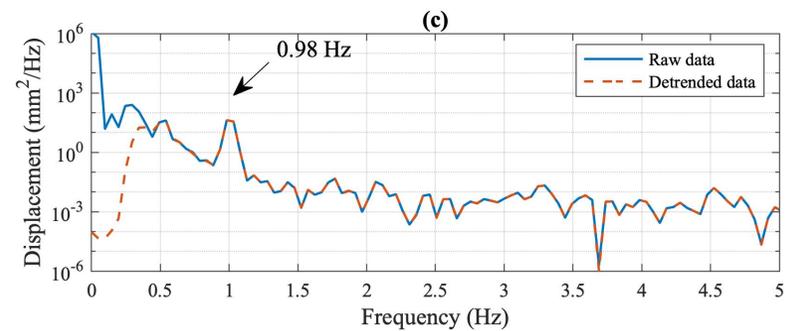
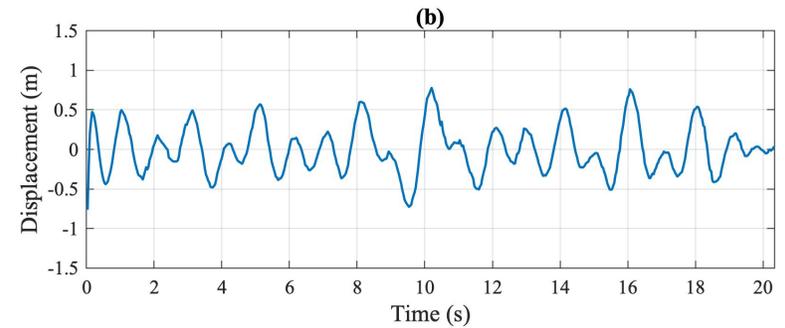
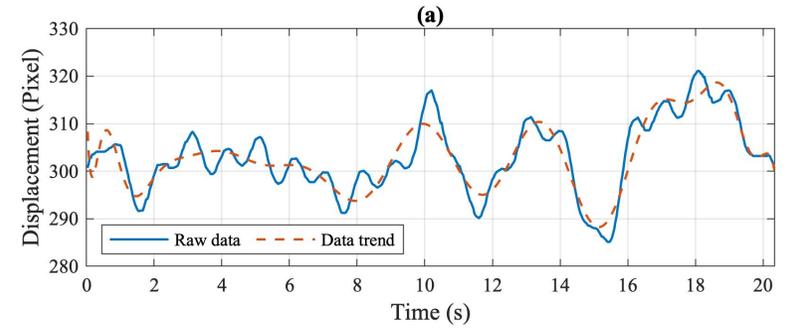
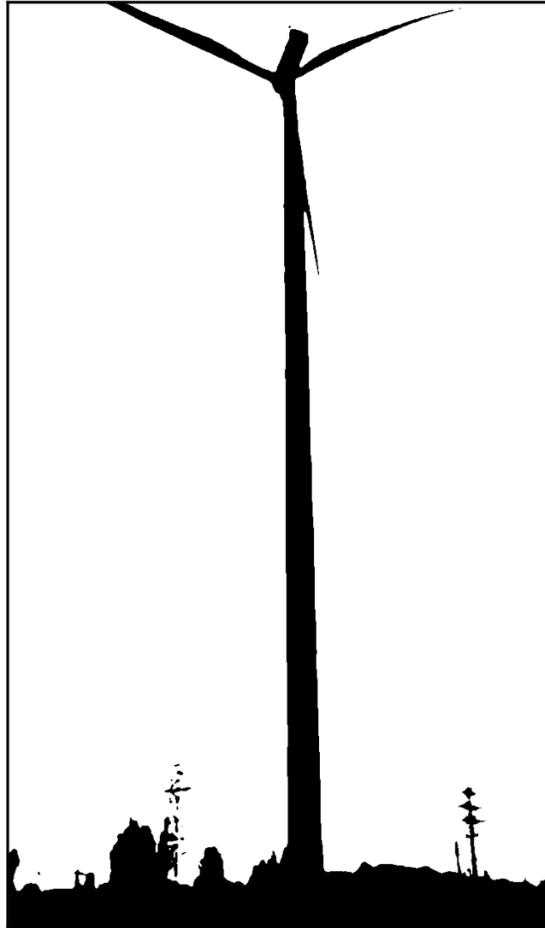
- 一 . 简介
- 二 . 在役风电塔实测
- 三 . 谐频激励干扰的振动信号分析
- 四 . 风机振动长期监测与数据分析
- 五 . 计算机视觉在结构振动研究中的应用

五. 计算机视觉在结构振动研究中的应用

Original



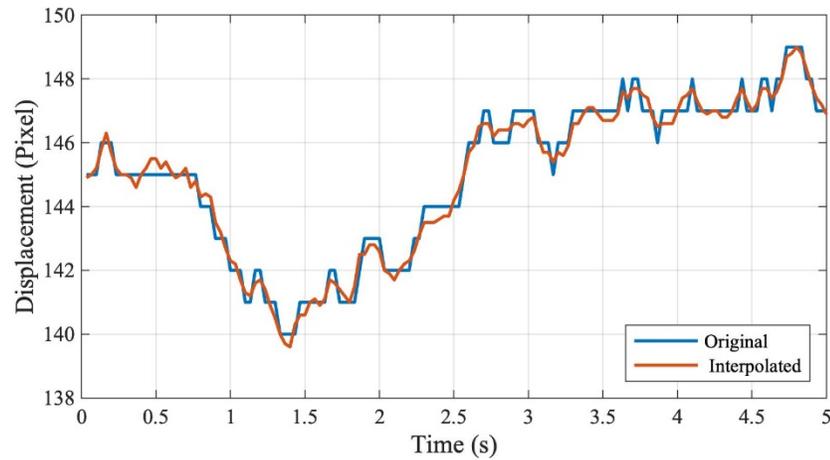
Binary



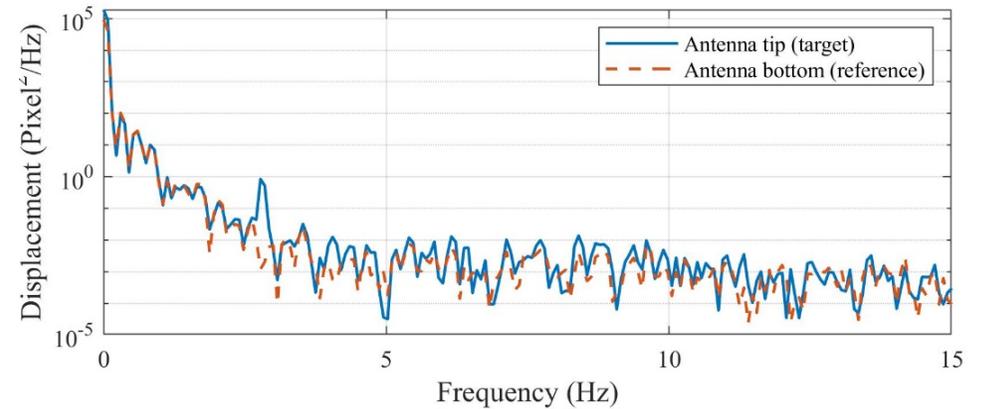
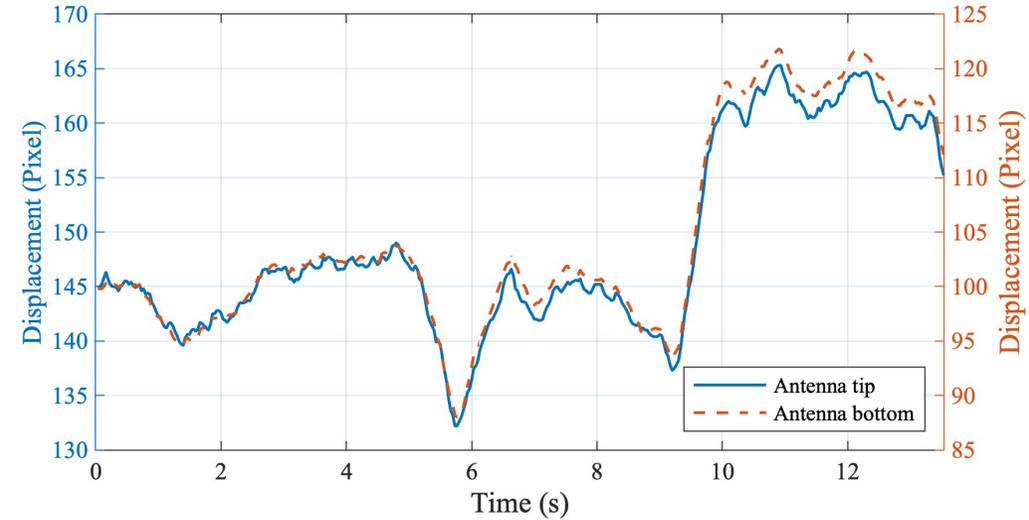
五. 计算机视觉在结构振动研究中的应用



- 视频**分辨率较低**
- 天线**振动幅度较小**，数据趋势项不可忽略

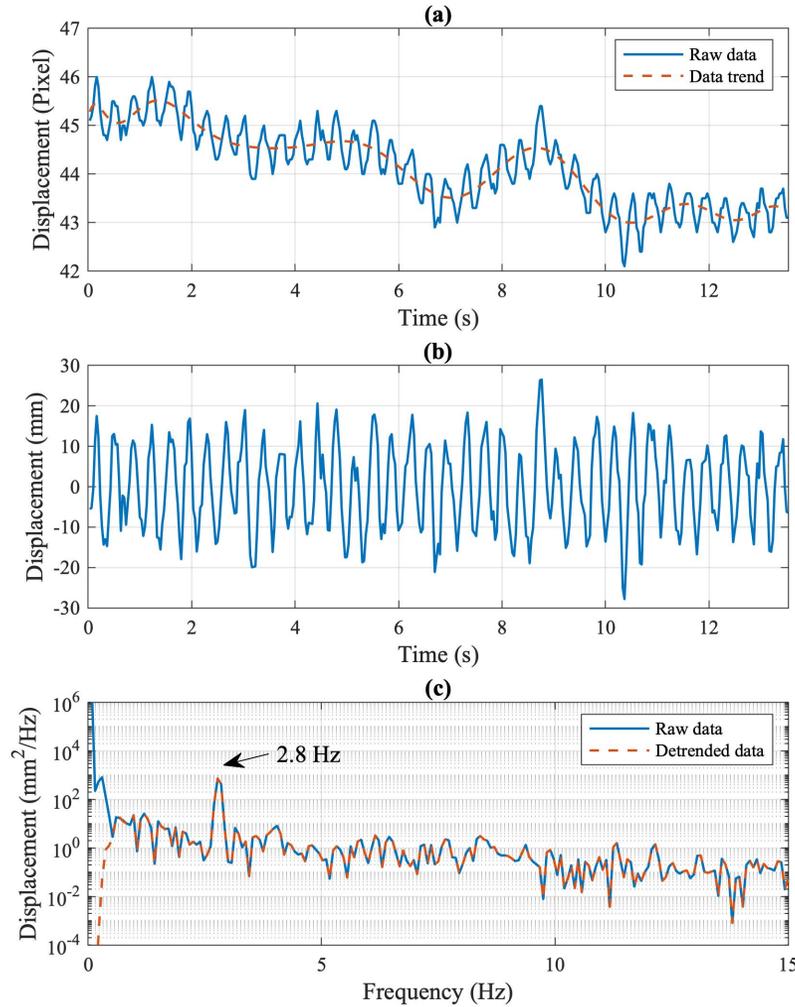


原始数据与像素插值数据对比

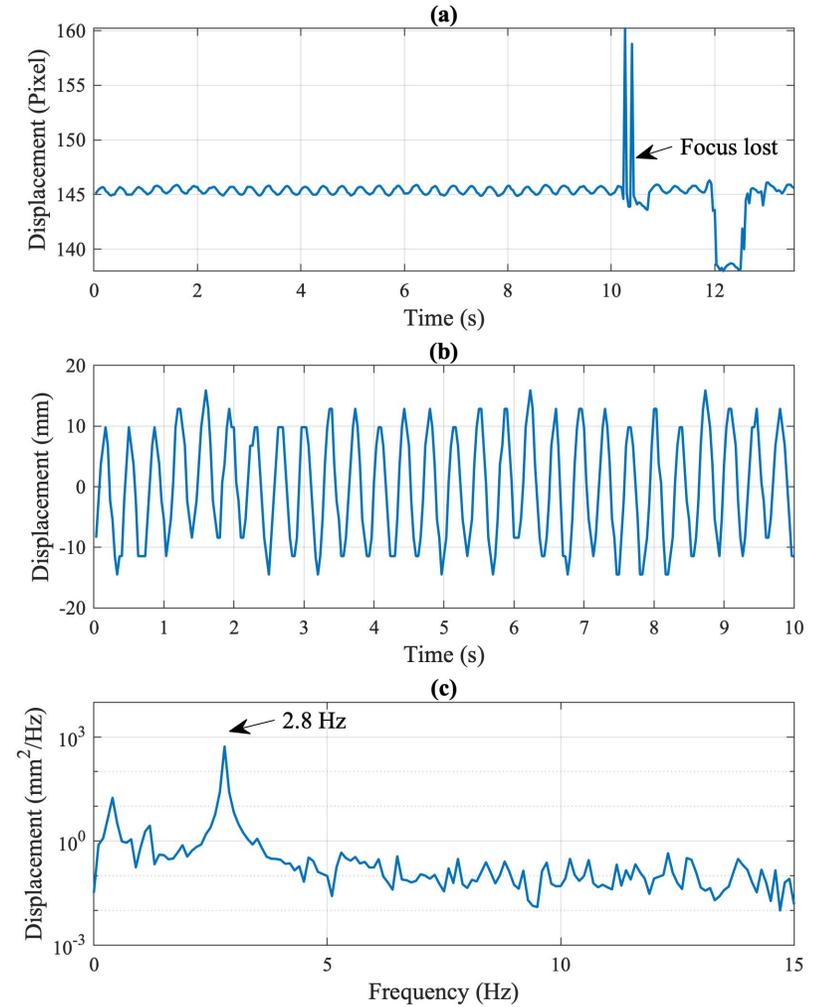


视频处理获得天线振动数据

五. 计算机视觉在结构振动研究中的应用



参考点法视频处理结果



图像对齐法视频处理结果



谢谢！