

# 格构式塔架结构多源异构监测数据融合及 动态位移重构研究

张庆, 付兴, 任亮, 李宏男

(大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 结构动态位移响应在结构健康监测和振动控制领域具有重要意义, 但格构式塔架动态位移的准确测量仍是一项具有挑战的任务。提出了一种综合利用高采样率加速度和低采样率应变的数据融合方法, 实现了格构式塔架动态位移的准确重构。提出适用于格构式塔架的应变-位移映射方法, 可以由若干个测点应变计算出任意点的动态位移; 使用多速率卡尔曼滤波算法将应变导出位移与加速度相融合, 以进一步提高位移采样率和精度。采用某输电塔结构作为数值算例, 结果表明: 在采样比为 100 和噪声信噪比为 5 dB 的情况下重构位移误差分别仅有 2.3% 和 2.11%, 证明了所提方法具有高精度。最后开展了某 54.5 m 高输电塔的真型试验, 实测结果进一步验证了所提方法的准确性和可靠性。

**关键词:** 位移重构; 数据融合; 格构式塔架; 多速率卡尔曼滤波; 应变-位移映射方法

**中图分类号:** TU311.3; TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)01-0001-09

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.01.001

## 引言

格构式塔架结构因其可用于无线和电视广播、电力和微波传输等实际工程, 在现代工业中有着不可或缺的作用, 针对格构式塔架开展结构健康监测和振动控制的相关研究是十分必要的<sup>[1-3]</sup>。动态位移作为一种可以直接衡量结构变形且和柔度相关的物理量, 对于研究格构式塔架的振动规律有着重要意义<sup>[4-5]</sup>。

动态位移的获取通常可分为直接测量和间接测量两种方法, 直接测量方法包括使用接触式和非接触式传感器<sup>[6-8]</sup>。接触式传感器中最常见的是线性可变差动变压器 (Linear Variable Differential Transformer, LVDT), 它能够保证位移的高精度测量但需要在结构上布置固定参考点, 而参考点在台风、暴雨等极端天气下或长期使用后往往会发生移动<sup>[9]</sup>。非接触式传感器可以在不接触被测结构的前提下测量位移。比如, 普通的 GPS 通过将卫星作为参考点代替安装在结构上的参考点<sup>[10]</sup>。余加勇等<sup>[11]</sup>分析了全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 用于桥梁动态变形监测的方法, 结果表明 GNSS 监测技术可以实现位移的高精度测量, 但缺点是使用数量较多的 GPS 会使成本成倍增加。

间接测量方法是指利用其他和位移有关系且容易获取的物理量, 通常包括加速度<sup>[12]</sup>、速度和应变<sup>[13]</sup>, 推导出结构动态位移。王体强等<sup>[14]</sup>采用高通滤波的方法对加速度积分结果进行修正, 获得了地震荷载下土体准确的高频位移。然而, 测量噪声的存在以及无法确定的初始位移和初始速度导致非零均值和伪静态位移的重构有很大误差。Wang 等<sup>[15]</sup>根据简支梁的应变振型计算出相应的位移振型, 并由振型叠加技术重构出动态位移。但在实际工程中, 应变响应的采样率往往较低, 这会导致无法准确计算位移的高频成分。

为了克服上述方法的局限性, 一些学者提出了基于卡尔曼滤波技术的数据融合算法<sup>[16-18]</sup>。Smyth 等<sup>[19]</sup>提出的多速率卡尔曼滤波算法将高采样率加速度和低采样率位移结合以提升位移的采样率, 引进的平滑技术可进一步提高精度。Xu 等<sup>[20]</sup>使用数据融合算法将加速度和 GPS 测量位移融合用以改善 GPS 的测量精度, 在汉伯桥上的现场实测数据验证了该方法的可行性。林旭等<sup>[21]</sup>提出了自适应的卡尔曼滤波算法以估计测量响应的噪声水平, 并实现了 GPS 信号和加速度响应的信息融合。以上方法虽然克服了单独使用一个物理量重构位移的局限性, 但将难以准确测量的结构位移作为算法的输入值仍会给位移重构带来一定难度。于是 Park 等<sup>[22]</sup>使用

振型叠加技术计算应变导出位移,将其引进 FIR 滤波器以指导加速度积分的过程,实现了加速度和应变的数据融合,使得该方法可用于非零均值动态位移的重构。Zhu 等<sup>[23]</sup>根据图乘法原理提出由应变直接计算位移的方法,再利用卡尔曼滤波算法将应变导出位移和加速度结合,实现超高层结构的动态位移重构,模型试验和现场实测均表明该方法可直接使用加速度和应变准确估计出位移。然而,这些方法大多将实际结构简化为等截面的简支梁或悬臂梁,对于格构式塔架这种截面尺寸沿高度明显变化的结构来说是不适用的。

至今,仍然没有一种准确测量格构式塔架结构动态位移的有效方法。因此本文提出一种适用于格构式塔架的位移重构方法,该方法以卡尔曼滤波算法为基础将加速度和应变融合。和已有研究不同的是,在考虑格构式塔架结构特点的前提下首先提出一种基于振型叠加的应变-位移映射方法,使其适用于变截面梁,可以方便地由应变推导出各个点的位移响应。然后以应变导出位移和测量加速度为输入值,使用多速率卡尔曼滤波算法重构出动态位移。数据融合的特点让该方法可以准确重构出位移中的高频和伪静态成分。所提方法的有效性通过格构式塔架的数值模拟得到了验证。最后,输电塔足尺模型的现场实测证明了该方法用于实际结构的可行性。

## 1 多源异构监测数据融合方法

### 1.1 基于振型叠加的应变-位移映射方法

格构式塔架属于复杂的空间结构,难以直接进行位移重构,需要根据其结构特点简化为变截面悬臂梁。传统的振型叠加技术只适用于等截面梁,因此需要将其改进为基于振型叠加的应变-位移映射方法,以使其适用于变截面梁。

变截面悬臂梁某个位置  $x$  处的位移和应变响应可以分别表示为前  $n$  阶模态叠加的形式:

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(x) q_i(t) = \Phi_{M \times n} \mathbf{q}_{n \times 1} \quad (1)$$

$$\epsilon(x, t) = \sum_{i=1}^n \Psi_i(x) q_i(t) = \Psi_{M \times n} \mathbf{q}_{n \times 1} \quad (2)$$

式中  $u(x, t)$  表示  $t$  时刻  $x$  位置的位移响应;  $\Phi_i(x)$  表示  $x$  位置的第  $i$  阶位移振型的模态位移;  $\epsilon(x, t)$  表示  $t$  时刻  $x$  位置的应变响应;  $\Psi_i(x)$  表示  $x$  位置的第  $i$  阶应变振型的模态应变;  $q_i(t)$  表示  $t$  时刻对应的第  $i$  阶模态坐标;  $M$  表示测点数量。

显然,如果通过结构若干测点的应变响应识别

出应变振型  $\Psi_i(x)$ , 则可根据式(2)求解出模态坐标  $q_i(t)$ :

$$\mathbf{q}_{n \times 1} = (\Psi_{M \times n}^T \Psi_{M \times n})^{-1} \Psi_{M \times n}^T \epsilon_{M \times 1} \quad (3)$$

根据式(1)即可计算出结构的动态位移。如此一来,位移重构问题转化为应变振型和位移振型的识别问题。线性结构的应变振型识别有多种方法,但对于长期处于环境荷载作用下且有大量应变监测数据的实际结构来说,基于数据驱动的随机子空间识别(Stochastic Subspace Identification, SSI)方法是适用的<sup>[24]</sup>。由于 SSI 方法比较成熟,这里不再详细推导。将结构运动方程转化为应变格式下的连续时间状态空间模型,通过对系统矩阵的识别最终可得到应变模态参数:

$$f_i^\epsilon = \frac{\sqrt{\lambda_{icR}^2 + \lambda_{icI}^2}}{2\pi} \quad (4)$$

$$\xi_i^\epsilon = \frac{-\lambda_{icR}}{\sqrt{\lambda_{icR}^2 + \lambda_{icI}^2}} \quad (5)$$

$$\Psi = C_c^\epsilon \psi \quad (6)$$

式中  $f_i^\epsilon$  代表结构的第  $i$  阶频率;  $\xi_i^\epsilon$  表示结构第  $i$  阶阻尼比;  $\Psi$  代表结构的应变振型;  $C_c^\epsilon$  表示系统的输出矩阵;  $\psi$  表示特征向量;  $\lambda_{icR}$  和  $\lambda_{icI}$  是系统的两个共轭特征值。

在根据应变响应识别出结构的应变振型后,还需要进一步计算出相应的位移振型。根据材料力学中的梁弯曲理论:

$$\epsilon(x, t) = -y(x) \cdot \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} = -y(x) \cdot \sum_{i=1}^n \Phi_i''(x) q_i(t) \quad (7)$$

式中  $y(x)$  表示  $x$  处表面测点到中性层距离。等截面梁的这一参数始终为一常数,这也是等截面梁和变截面梁的不同之处。于是可以得到位移振型:

$$\Phi_i(x) = - \iint \frac{\Psi_i(x)}{y(x)} dx^2 + Cx + D \quad (8)$$

式中  $C, D$  是和结构边界条件有关的积分常数,悬臂梁结构的这两个常数均为 0。被积函数  $\Psi_i(x)/y(x)$  难以直接积分,考虑引进泰勒公式对被积函数进行多项式拟合来克服这一困难:

$$\frac{\Psi_i(x)}{y(x)} = f(x) = \frac{f(x_0)}{0!} + \frac{f'(x_0)}{1!} (x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!} (x - x_0)^2 + \dots + \frac{f^n(x_0)}{n!} (x - x_0)^n + R_n(x) \quad (9)$$

式中  $x_0$  为展开点,为了能用较少的展开阶数就达到较好的拟合效果,这里将展开点的位置选在变截面悬臂梁长度一半处,  $n$  为展开阶数,在保证计算效

率和拟合效果的前提下,可适当选取数值,  $R_n(x)$  为  $n$  阶泰勒余项。在被积函数从形式上变为多项式函数并代入积分常数后,可以方便地进行积分进而得到位移振型函数:

$$\Phi_i(x) = -\iint f(x) dx^2 \quad (10)$$

将得到的位移振型组装成矩阵形式,并将重构位移目标点的坐标  $x$  代入,最后和模态坐标  $q_i(t)$  相乘即可得到动态位移  $u(x, t)$ , 简记为  $u_{sd}$ 。

## 1.2 基于多速率卡尔曼滤波的动态位移重构算法

上述基于振型叠加的应变-位移映射方法虽然可以由若干个测点的应变计算出任意点的位移,但其采样率和应变的采样率却是相同的,而实际工程中应变的采样率往往较低,为了得到更高采样率的位移,考虑采用卡尔曼滤波算法将具有高频信息的加速度响应融合进来。结构某个测点的速度和位移响应可以表示成:

$$\dot{x}(k) = \dot{x}(k-1) + \ddot{x}(k-1) \cdot \Delta t + v(k-1) \quad (11)$$

$$x(k) = x(k-1) + \dot{x}(k-1) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{x}(k-1) \cdot \Delta t^2 + w(k-1) \quad (12)$$

式中  $\ddot{x}(k-1)$  是第  $k-1$  时间步测量加速度;  $\dot{x}(k-1)$  和  $x(k-1)$  分别表示第  $k-1$  时间步的速度和位移;  $\dot{x}(k)$  和  $x(k)$  代表第  $k$  时间步的速度和位移;  $w(k-1)$  和  $v(k-1)$  分别表示与加速度和速度相关的噪声,分别假设成方差为  $q$  和  $r$  的零均值高斯白噪声;  $\Delta t$  表示采样间隔。

将位移和速度作为连续时间状态空间模型的状态变量:

$$\mathbf{X}(t) = [x(t) \quad \dot{x}(t)]^T \quad (13)$$

式中  $x(t)$  为位移;  $\dot{x}(t)$  为速度。

将上述连续时间状态空间模型离散化:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(k) &= \mathbf{A}\mathbf{X}(k-1) + \mathbf{B}\ddot{x}(k-1) + \boldsymbol{\theta}(k-1), \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.5\Delta t^2 \\ \Delta t \end{bmatrix}, \\ \boldsymbol{\theta}(k-1) &= \begin{bmatrix} w(k-1) \\ v(k-1) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

式中  $\mathbf{A}$  为离散时间状态转移矩阵;  $\mathbf{B}$  为控制矩阵。离散时间状态空间模型的一步状态向量预测为:

$$\mathbf{X}(k|k-1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k-1|k-1) + \mathbf{B}\ddot{x}(k-1) \quad (15)$$

式中  $\mathbf{X}(k-1|k-1)$  表示第  $k-1$  时间步状态向量,  $\mathbf{X}(k|k-1)$  表示由第  $k-1$  时间步状态向量预测的第  $k$  时间步状态向量。预测的状态向量是存在误差的,一步状态预测的协方差阵可以表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k|k-1) &= \mathbf{A}\mathbf{P}(k-1|k-1)\boldsymbol{\Phi}^T + \mathbf{Q}, \\ \mathbf{Q} &= q \begin{bmatrix} \Delta t^3/3 & \Delta t^2/2 \\ \Delta t^2/2 & \Delta t \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

式中  $\mathbf{P}(k-1|k-1)$  表示第  $k-1$  时间步状态向量预测的协方差阵,  $\mathbf{P}(k|k-1)$  表示由第  $k-1$  时间步状态向量预测的第  $k$  时间步状态向量的协方差矩阵,  $\mathbf{Q}$  表示离散时间域上的随机噪声协方差矩阵。式(15)和(16)称为卡尔曼滤波的预测阶段,在获取结构测点的应变响应后,可以使用应变-位移映射方法计算出任意位置的位移响应  $u_{sd}$ , 并利用应变导出位移进行卡尔曼滤波的测量更新过程,也称为修正过程。修正过程中的位移可用观测方程表示为:

$$z(i) = u_{sd} = \mathbf{H}\mathbf{X}(i|i-1) + d(i) \quad (17)$$

式中  $z(i)$  表示观测位移,和应变导出位移相等,观测矩阵  $\mathbf{H} = [1 \quad 0]$ ,  $d(i)$  表示测量噪声,假设噪声为平稳的零均值高斯过程,协方差矩阵为  $\mathbf{R} = r/\Delta t$ 。因此,测量更新过程中的状态估计向量  $\mathbf{X}(i|i)$  和状态估计协方差矩阵  $\mathbf{P}(i|i)$  分别为:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(i|i) &= \mathbf{X}(i|i-1) + \mathbf{K}(i) \cdot \\ & [u_{sd} - \mathbf{H}\mathbf{X}(i|i-1)] \end{aligned} \quad (18)$$

$$\mathbf{P}(i|i) = (\mathbf{I} - \mathbf{K}(i)\mathbf{H})\mathbf{P}(i|i-1) \quad (19)$$

$$\mathbf{K}(i) = \mathbf{P}(i|i-1)\mathbf{H}^T(\mathbf{H}\mathbf{P}(i|i-1)\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (20)$$

式中  $\mathbf{K}(i)$  代表第  $i$  时间步卡尔曼增益矩阵。测量更新过程得到的状态向量  $\mathbf{X}(i|i)$  包含了重构的动态位移。

## 2 数值模拟验证

### 2.1 输电塔结构有限元模型

为了验证所提方法的有效性,以白鹤滩-江苏±800 kV 特高压直流线路中某耐张塔为工程背景,塔身杆件的截面形式均为角钢,主材钢材型号为 Q420,主材角钢规格分别为 L200 mm×18 mm, L200 mm×20 mm, L200 mm×24 mm 和 L220 mm×24 mm,塔高 54.5 m,是典型的格构式塔架结构。采用 ANSYS 有限元软件建立该塔的三维有限元模型,用 beam188 单元模拟塔架结构各杆件,如图 1 所示。沿塔架结构的高度方向均匀布置 9 个应变响应提取点,加速度和位移响应提取点各布置 1 个,将输电塔简化为变截面悬臂梁后,假想中性层位于两根主材之间,如图 2 所示。对模型施加随机荷载,激励持续时间 50 s,激励方向为 Z 向,应变响应的采样率设为 80 Hz,加速度和位移的采样率设为 400 Hz。

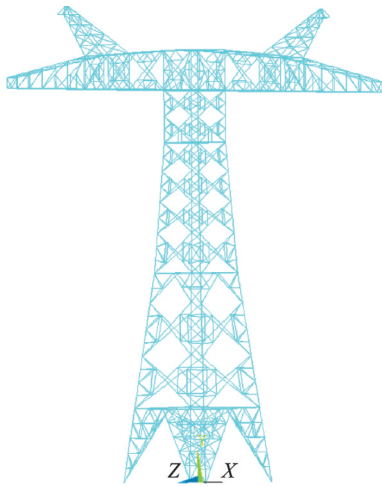


图1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

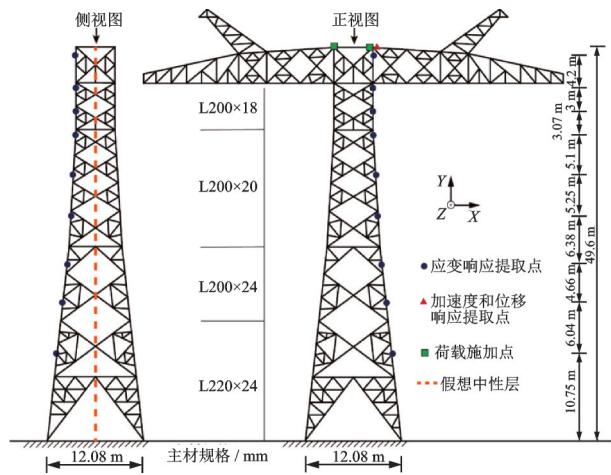


图2 测点布置图

Fig. 2 Measurement point deployments

## 2.2 结果分析

使用SSI算法处理ANSYS提取的应变和加速度响应,得到的稳定图如图3所示。图中“○”表示频率、阻尼比、振型全部稳定的点,从图中可以看出,“○”容易聚集在结构固有频率处形成稳定轴,如果单纯从频谱或稳定图中识别结构模态参数可能出现

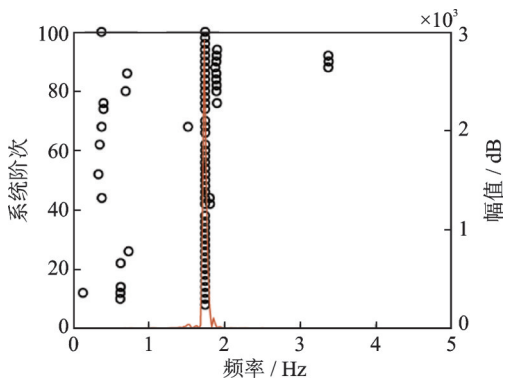


图3 稳定图

Fig. 3 Stability diagram

误判的情况,而将两者结合起来作为综合判据并且考虑振型识别结果的合理性,就能有效避免这一情况。从图中可以看出,结构此次振动中一阶模态占据绝大部分能量,因此后续位移重构过程也以一阶模态为主。

使用本文所提基于振型叠加的应变-位移映射方法处理应变数据,可以得到结构整体位移振型。为了方便对比,提取8.5, 20.6, 28.6, 40.5和49.6 m处的模态位移值并按最大值归一化。同时提取ANSYS模态分析中对应节点的模态位移并归一化,两者对比如图4所示。可明显看到两条振型曲线非常接近,表明提出的应变-位移映射法计算的位移振型和ANSYS结果吻合很好,证明了该方法的有效性。

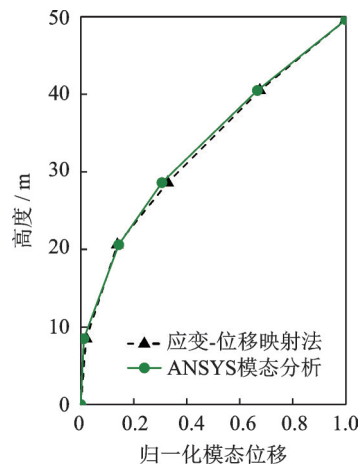


图4 位移振型对比

Fig. 4 Comparison of displacement mode shapes

为了证明所提数据融合方法的有效性,分别使用应变-位移映射方法和数据融合方法计算塔顶测点的动态位移,并和ANSYS提取位移作对比,图5为不同方法计算的位移时程对比图。从图中可以看出,应变-位移映射法和数据融合方法计算的位移均和ANSYS提取的位移参考值吻合较好,这表明将格构式塔架结构简化为变截面悬臂梁是可行的。局部放大图表明数据融合方法重构的位移不仅提高了应变导出位移的采样率,也改善了精度,说明所提数据融合算法可以综合利用应变和加速度包含的信

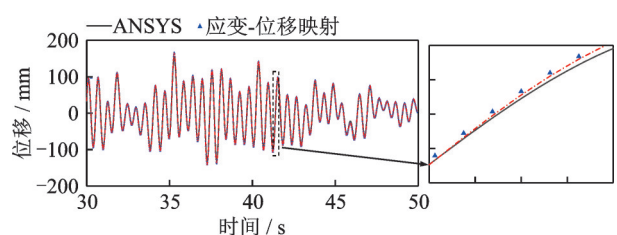


图5 位移时程对比

Fig. 5 Comparison of displacement time history

息,进而准确计算出格构式塔架的动态位移。

### 2.3 参数分析

现有服役的健康监测系统中,加速度和应变的采样率往往相差较大,因此研究所提方法在不同采样率下的鲁棒性是非常必要的。定义采样率之比  $N=f_a/f_s$ ,其中  $f_a$  为加速度采样率,  $f_s$  为应变采样率。加速度和位移采样率仍设为 400 Hz,应变采样率分别设为 80, 20, 4 Hz,也就是  $N$  分别为 5, 20, 100。三种采样率之比对应的位移时程和理论位移如图 6 所示,可明显看出,采样比越大,重构位移和理论位移相差越大。同时由于应变采样率过低,应变-位移映射法计算的位移只有若干数据点,虽然和同时刻参考位移吻合很好,但无法反映出高频位移的变化过程。而采用所提数据融合算法则可以准确重构出动态位移。

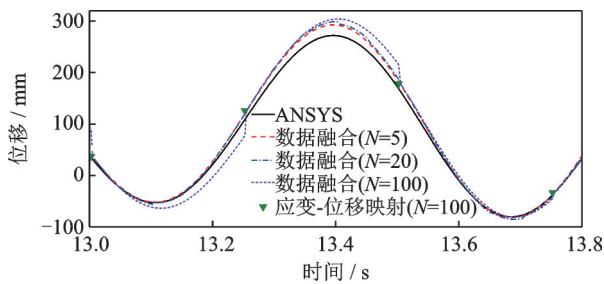


图6 13~13.8 s的位移时程对比

Fig. 6 Comparison of displacement time history for 13~13.8 s

采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)来比较各种工况下重构位移的准确程度,计算公式如下:

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ri} - x_{ci})^2}}{\sqrt{\max(x_r)}} \times 100\% \quad (21)$$

式中  $x_r, x_c$  分别代表位移参考值和重构位移值,  $n$  代表数据点数。

不同采样比下的均方根误差如表 1 所示,随着  $N$  从 5 增加到 100,均方根误差从 1.68% 增加到 2.3%,这是因为随着应变采样率的降低,数据融合算法的测量更新过程缺失了更多应变导出位移的数据。即使如此,误差最大也仅有 2.3%,说明所提算法可以最大限度地利用低采样率应变和高采样率加速度信息,高效可靠地重构出动态位移。

此外,实际工程中采集的数据往往包含很多噪声,因此检验所提算法在噪声干扰情况下的重构精度是十分必要的。在 ANSYS 软件提取应变和加速度时程,并分别添加信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)为 5, 20 和 100 dB 的高斯白噪声,然后使用所提方法进行位

表 1 不同采样比的均方根误差

Tab. 1 RMSEs of different sampling ratios

$N$	RMSE/%
5	1.68
20	1.86
100	2.30

移重构,并和 ANSYS 提取的理论位移进行对比,其中  $SNR=5$  dB 时的重构位移和理论位移对比如图 7 所示。从图中可以看出,即使受到噪声干扰,所提方法依然可以准确重构出输电塔结构的动态位移。

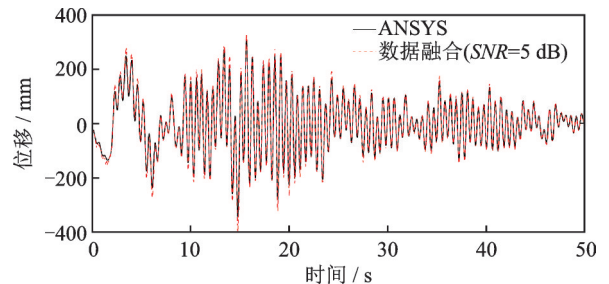


图7 位移时程对比(SNR=5 dB)

Fig. 7 Comparison of displacement time history (SNR=5 dB)

不同噪声工况下重构位移的均方根误差如表 2 所示。由表可知,随着 SNR 从 100 dB 变化到 5 dB,均方根误差从 1.74% 增大到 2.11%。这是因为应变和加速度中的噪声逐渐增大,导致重构位移的精度有所降低,但即使在 5 dB 的噪声干扰下,重构位移误差也仅有 2.11%,表明所提算法具有良好的噪声鲁棒性。

表 2 不同信噪比的均方根误差

Tab. 2 RMSEs of different SNRs

SNR/dB	RMSE/%
100	1.74
20	1.91
5	2.11

## 3 真型塔现场实测验证

### 3.1 试验介绍

为了进一步验证所提数据融合方法的正确性,以数值模拟部分所述输电塔为原型制作足尺真型试验塔。在河北霸州特高压杆塔试验基地搭建试验平台,开展真型塔的加载试验,加载方式为分级加载,加载方向为 Z 向,根据该输电塔所处目标区域和气象条件,确定最大风速和覆冰厚度,然后根据相关规范<sup>[25]</sup>计算荷载,视为 100% 设计荷载值。具体加载方案如表 3 所示。

表 3 加载方案

Tab. 3 Loading scheme

加载点编号	100% 荷载值/kN	加载阶段
1	28.06	0 → 50% →
2	28.06	
3	174.52	75% → 90% →
4	174.52	95% → 100%

该足尺模型采用 V 型钢索模拟绝缘子, 4 个加载点分别位于塔顶和钢索上, 通过试验塔前后两侧的加载架拖拽加载点实现单向加载。在实验过程中由于加载所用钢索行进速度不一致、螺栓滑移等因素, 导致输电塔在某些时刻会出现一定程度的振动。虽然钢索的加载速率非常慢, 但也是一个动态过程, 所以整个加载方式并不是严格意义上的静力加载, 结构存在一定的动力行为。沿输电塔高度方向布置 7 个应变传感器和 5 个无线加速度传感器。由于塔顶动态位移难以直接测量, 而塔顶偏转角和位移呈正相关, 因此在塔顶布置一个倾角仪采集动态转角响应, 同时当加载到保载段时, 采用全站仪观测塔顶测点位移。传感器布置方式和加载点位置如图 8 所示。

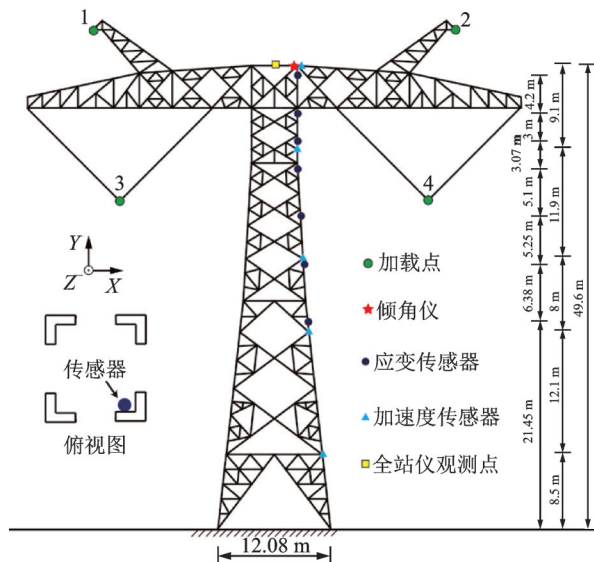


图 8 传感器布置及加载点示意图

Fig. 8 Schematic diagram of sensors layout and loading points

光纤应变传感器因具有抗电磁干扰能力强、灵敏度高和传输距离远等优点, 近年来被广泛用于结构健康监测和振动测量领域<sup>[26]</sup>。因此, 本次试验采用光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, 简称 FBG) 传感器来测量结构应变, 并采用课题组自主研发的光电同步解调仪实现对光纤信号的实时采集和存储<sup>[27]</sup>, 应变采样率为 10 Hz, 加速度和倾角仪的采样率为 100 Hz。传感器均布置在角钢内侧, 输电塔和

各类型传感器如图 9 所示。



图 9 输电塔和传感器实拍图

Fig. 9 Photograph of the transmission tower and sensors

### 3.2 结果分析

位于塔顶的加速度和应变传感器采集的时程响应如图 10 所示。从图 10(b) 中可以看出整个加载过程出现了 5 个明显的保载段, 说明近似于静力加载, 但图 10(a) 表明在某几个时间段输电塔出现了振动

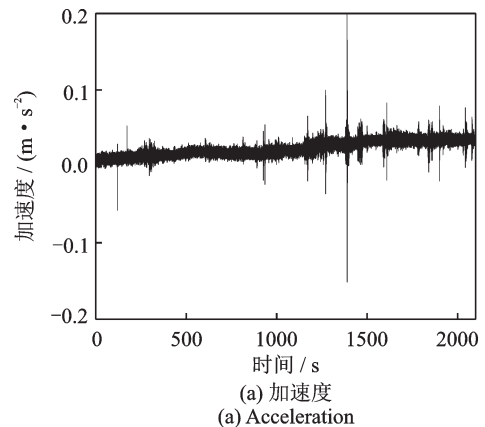
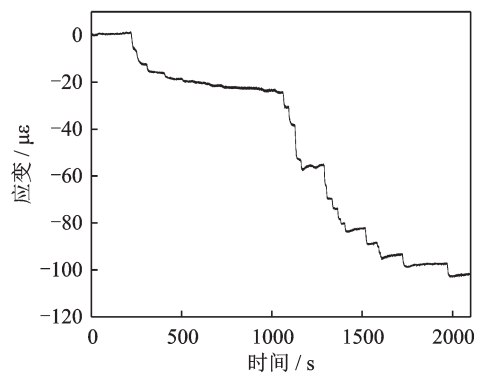
(a) 加速度  
(a) Acceleration(b) 应变  
(b) Strain

图 10 塔顶传感器时程

Fig. 10 Tower top sensor time history

现象,这是由于钢索加载过程结构存在一定程度振动,为后续模态参数识别提供了便利。

使用SSI算法处理采集到的应变响应,得到稳定图如图11所示。可以看出真型试验塔仍是以一阶模态振动为主。

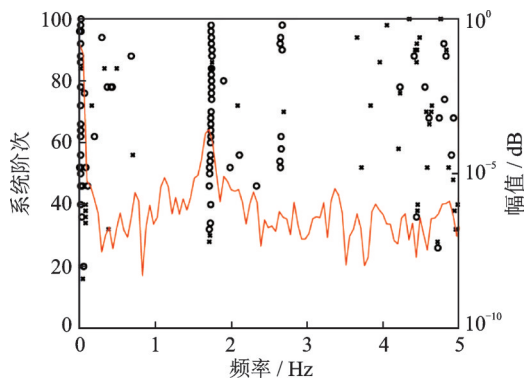


图11 稳定图

Fig. 11 Stability diagram

从稳定图中可提取一阶应变振型,然后利用所提应变-位移映射法可计算出结构整体一阶位移振型曲线,同时使用SSI算法处理5个加速度传感器采集的数据以识别出参考的位移振型。再将加速度传感器的高度坐标代入计算出的振型曲线中,两者对比如图12所示。由图可知,所提应变-位移映射法可以准确地计算出结构的应变振型进而识别出相应的位移振型,和数值模拟部分的结论一致。

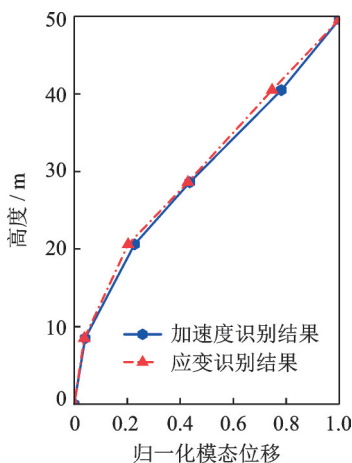


图12 位移振型对比

Fig. 12 Comparison of displacement mode shapes

然后采用所提数据融合算法重构加载过程中的动态位移,并和倾角仪数据以及全站仪观测值进行对比,结果如图13所示。从图中可以看出,角度的变化趋势和数据融合方法计算的位移变化趋势基本一致,全站仪读取的6个静态位移值也分别和重构位移时程在6个保载段的平均值非常接近。保载段重构位移的最小相对误差仅为6.8%,最大

相对误差为14.8%,说明所提方法在现场复杂环境干扰下,仍可以根据应变和加速度数据准确地重构出格构式塔架结构的动态位移,具有优良的工程适用性。

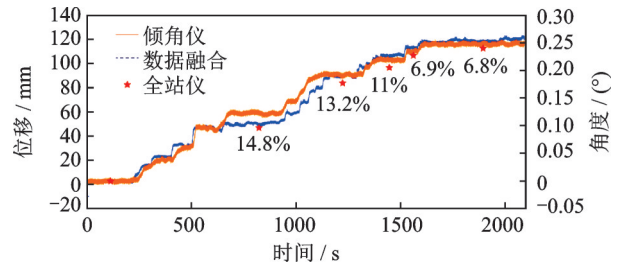


图13 角度和不同位移对比

Fig. 13 Comparison between angle and different displacements

## 4 结论

本文提出了一种适用于格构式塔架结构位移重构的应变-位移映射法,在此基础上将多速率卡尔曼滤波算法与之相结合形成一种新的多源异构数据融合方法。数值模拟结果表明所提应变-位移映射法可以根据9个测点的应变准确计算出格构式塔架任意点的动态位移,建立的数据融合方法则进一步提高了重构结果的采样率和精度,同时参数分析验证了所提方法在加速度和应变采样率相差较大时也具备很高的重构精度。最后,开展的真型塔试验证明该方法在实测复杂环境下仍可实现准确的位移重构。综合数值模拟和现场实测来看,所提方法对于高频位移和伪静态位移均可做到准确重构。

### 参考文献:

- [1] 李宏男,任月明,白海峰. 输电塔体系风雨激励的动力分析模型[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(30): 43-48.  
Li Hong-nan, Ren Yue-ming, Bai Hai-feng. Rain-wind-induced dynamic model for transmission tower system [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(30): 43-48.
- [2] 李宏男,石文龙,贾连光. 考虑导线影响的输电塔侧向简化抗震计算方法[J]. 振动工程学报, 2003, 16(2): 101-105.  
Li Hongnan, Shi Wenlong, Jia Lianguang. Simplified aseismic calculation method considering effects of lines on transmission tower [J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(2): 101-105.
- [3] 李宏男,白海峰,伊廷华,等. 输电杆塔阵风响应实测与准静态设计研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8):

- 17-21.
- Li Hong-nan, Bai Hai-feng, Yi Ting-hua, et al. Field measurement and quasi-static studies on gust response of transmission tower [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(8): 17-21.
- [4] Fu X, Li H N, Li G, et al. Failure analysis of a transmission line considering the joint probability distribution of wind speed and rain intensity[J]. *Engineering Structures*, 2021, 233: 111913.
- [5] Fu X, Li H N, Li G, et al. Fragility analysis of a transmission tower under combined wind and rain loads[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 199: 104098.
- [6] Park J W, Lee J J, Jung H J, et al. Vision-based displacement measurement method for high-rise building structures using partitioning approach[J]. *NDT & E International*, 2010, 43(7): 642-647.
- [7] Khuc T, Catbas F N. Structural identification using computer vision-based bridge health monitoring [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144 (2) : 04017202.
- [8] 吴锦武, 姜哲. 基于PVDF压电传感器测量振动结构体积位移[J]. *振动工程学报*, 2007, 20(1): 73-78.  
Wu Jin-wu, Jiang Zhe. Measurement of volume displacement of vibration structure based on PVDF piezoelectric sensors [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2007, 20(1): 73-78.
- [9] Ozdagli A I, Liu B D, Moreu F. Measuring total transverse reference-free displacements for condition assessment of timber railroad bridges: experimental validation [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2018, 144(6) : 04018047.
- [10] Yi T H, Li H N, Gu M. Recent research and applications of GPS-based monitoring technology for high-rise structures[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2013, 20(5): 649-670.
- [11] 余加勇, 邵旭东, 晏班夫, 等. 基于全球导航卫星系统的桥梁健康监测方法研究进展[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(4): 30-41.  
Yu Jia-yong, Shao Xu-dong, Yan Ban-fu, et al. Research and development on Global Navigation Satellite System technology for bridge health monitoring[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(4) : 30-41.
- [12] Park K T, Kim S H, Park H S, et al. The determination of bridge displacement using measured acceleration [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27(3): 371-378.
- [13] 马烨璇, 徐万海, 徐增伟. 基于多项式拟合的细长梁结构振动位移重构方法[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(11): 152-157.
- Ma Yexuan, Xu Wanhai, Xu Zengwei. Displacement reconstruction of slender beam based on polynomial fitting method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(11): 152-157.
- [14] 王体强, 王永志, 袁晓铭, 等. 基于振动台试验的加速度积分位移方法可靠性研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(S1): 565-573.  
Wang Ti-qiang, Wang Yong-zhi, Yuan Xiao-ming, et al. Reliability analysis of acceleration integral displacement method based on shaking table tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(S1): 565-573.
- [15] Wang Z C, Geng D, Ren W X, et al. Strain modes based dynamic displacement estimation of beam structures with strain sensors[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(12): 125045.
- [16] Zheng Z, Qiu H, Wang Z, et al. Data fusion based multi-rate Kalman filtering with unknown input for on-line estimation of dynamic displacements[J]. *Measurement*, 2019, 131: 211-218.
- [17] Kim K, Choi J, Chung J, et al. Structural displacement estimation through multi-rate fusion of accelerometer and RTK-GPS displacement and velocity measurements [J]. *Measurement*, 2018, 130: 223-235.
- [18] 韩厚增, 王坚, 孟晓林. GPS与加速度计融合桥梁变形信息提取模型研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(3): 549-556.  
Han Houzeng, Wang Jian, Meng Xiaolin. Reconstruction of bridge dynamics using integrated GPS and accelerometer[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2015, 44(3): 549-556.
- [19] Smyth A, Wu M L. Multi-rate Kalman filtering for the data fusion of displacement and acceleration response measurements in dynamic system monitoring [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(2) : 706-723.
- [20] Xu Y, Brownjohn J M W, Hester D, et al. Long-span bridges: enhanced data fusion of GPS displacement and deck accelerations [J]. *Engineering Structures*, 2017, 147: 639-651.
- [21] 林旭, 罗志才. 位移和加速度融合的自适应多速率Kalman滤波方法[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(5) : 1608-1615.  
Lin Xu, Luo Zhi-cai. A new adaptive multi-rate Kalman filter for the data fusion of displacement and acceleration [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(5) : 1608-1615.



- [22] Park J W, Sim S H, Jung H J. Displacement estimation using multimetric data fusion[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(6): 1675-1682.
- [23] Zhu H, Gao K, Xia Y, et al. Multi-rate data fusion for dynamic displacement measurement of beam-like super-tall structures using acceleration and strain sensors[J]. Structural Health Monitoring, 2019, 19(2): 520-536.
- [24] Zhang Q, Fu X, Ren L, et al. Modal parameters of a transmission tower considering the coupling effects between the tower and lines[J]. Engineering Structures, 2020, 220: 110947.
- [25] 架空输电线路荷载规范: DL/T 5551—2018[S]. 北京:中国计划出版社, 2018.  
Load specification for overhead transmission lines: DL/T 5551—2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018.
- [26] 李宏男, 田亮, 伊廷华, 等. 大跨斜拱桥结构健康监测系统的设计与开发[J]. 振动工程学报, 2015, 28(4): 574-584.  
Li Hong-nan, Tian Liang, Yi Ting-hua, et al. Design and development of structural health monitoring system for long span skew arch bridge[J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(4): 574-584.
- [27] 李宏男, 杨礼东, 任亮, 等. 大连市体育馆结构健康监测系统的设计与研发[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(11): 40-49.  
Li Hongnan, Yang Lidong, Ren Liang, et al. Design and development of structural health monitoring system for the Dalian Stadium[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(11): 40-49.

## Multi-source heterogeneous monitoring data fusion and dynamic displacement reconstruction of lattice tower structures

ZHANG Qing, FU Xing, REN Liang, LI Hong-nan

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

**Abstract:** The dynamic displacement of a structure is of great significance in the field of structural health monitoring and vibration control, but the accurate measurement of the dynamic displacement of the lattice tower remains a challenging task. A data fusion method using high sampling rate acceleration and low sampling rate strain is proposed to realize the accurate reconstruction of the dynamic displacement of the lattice tower. First, a strain-displacement mapping method suitable for lattice towers is developed, and the dynamic displacement of any point can be calculated from the strain of several measurement points. Then the strain-derived displacement and acceleration are combined through the proposed multi-rate Kalman filtering algorithm to further improve the displacement sampling rate and accuracy. A certain transmission tower structure was used as a numerical example, the results show that when the sampling ratio is 100 and the noise signal-to-noise ratio is 5 dB, the reconstruction displacement error is only 2.3% and 2.11%, respectively, which proves that the proposed method has high accuracy. Finally, a true model experiment of a 54.5-m high transmission tower was carried out, and the actual measurement results further verified the accuracy and reliability of the proposed method.

**Key words:** displacement reconstruction; data fusion; lattice tower; multi-rate Kalman filtering; strain-displacement mapping method

**作者简介:** 张庆(1995—), 男, 博士研究生。E-mail: zhang37qing@163.com。

**通讯作者:** 付兴(1988—), 男, 副教授。电话: (0411)84706909; E-mail: fuxing@dlut.edu.cn。