

DOI: 10.13382/j.jemi.B2205633

# 基于 MIMU 的输电塔损伤检测研究\*

杨金显 杨雨露 李田田 郑泽南 申刘阳  
(河南理工大学电气工程与自动化学院 焦作 454000)

**摘要:**为了进行输电塔结构损伤程度及损伤轴向检测,从而缩小检测范围并实现高效低成本的精准损伤定位,提出了一种基于 MIMU 的输电塔结构损伤检测方法。基于输电塔结构角度出发,利用 MIMU 微惯性测量系统监测输电塔结构变化,结合结构熵构建平动、转动熵矩阵,然后基于熵距及变异熵的损伤指标检测输电塔结构的损伤程度及损伤轴向,最后设计多种工况下的模拟输电塔和在役输电塔实验验证该算法的合理性。结果表明,衡量损伤程度的熵距指标的计算值与理论值误差低于 3%,可有效检测结构的损伤程度;衡量损伤轴向的变异熵指标较未损伤轴向高出 20%~53.9%,可有效检测结构的损伤轴向。该方法可为桁架结构损伤检测提供现实依据。

**关键词:** 输电塔;损伤检测;惯性测量;结构熵;平动/转动

**中图分类号:** TM754;TU323.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Damage detection of transmission tower based on MIMU

Yang Jinxian Yang Yulu Li Tiantian Zheng Zenan Shen Liuyang

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** To detect structural damage degree and damage axial direction, reduce detection range and achieve accurate damage location with high efficiency and low cost, a transmission tower structural damage detection method based on MIMU was proposed. Firstly, based on the Angle of transmission tower structure, the MIMU micro-inertial measurement system is used to monitor the structure change of transmission tower, and the translation and rotation entropy matrices are constructed combined with the structural entropy. Then, the damage degree and damage axial direction of transmission tower structure are detected by using the damage index of entropy distance and variation entropy. Finally, simulation and in-service transmission towers under various working conditions are designed to verify the rationality of the algorithm. The results show that the error between the entropy distance index and the theoretical value is less than 3%, which can effectively detect the damage degree of the structure. The variation entropy index of damaged axial direction is 20%~53.9% higher than that of undamaged axial direction, which can effectively detect the damaged axial direction of structures. This method can provide a practical basis for truss structure damage detection.

**Keywords:** transmission tower; damage detection; inertial measurement; structure entropy; translation/rotation

## 0 引言

电力传输过程中,输电塔起着承载输电线路的重要作用,它的安全性和可靠性直接关系到国家经济的命脉<sup>[1-2]</sup>。长期在外界的复杂影响下,结构连接螺栓受到不断变换的拉力、压力,造成螺栓孔间隙变大、螺栓弯曲甚

至失效,结构会出现不同程度的损伤,随着输电塔服役时间的增长,损伤会逐渐积累直至结构破坏并引起严重电力事故<sup>[3]</sup>,所以,及时有效的对输电塔结构的损伤状况进行提前判断至关重要。

鉴于输电塔损伤的起因为螺栓松动<sup>[4-5]</sup>,许多学者从螺栓角度构建各种松动检测方法,各有优缺点。由于螺栓极多,不可能针对单个螺栓进行检测松动,也不可能是

收稿日期: 2022-06-29 Received Date: 2022-06-29

\* 基金项目: 国家自然科学基金(41672363)、河南省高校科技创新团队(20IRTSTHN019)项目资助

单个螺栓松动,因此,基于螺栓角度进行结构的损伤检测存在局限性。近年来,MEMS 惯性测量系统广泛用于对结构振动测量进行状态监测<sup>[6-7]</sup>,可见,基于结构角度进行损伤分析逐渐广泛。其中,基于 MEMS 惯性测量系统的微型 MIMU 测量单元以其体积小、低成本、寿命长、抗冲击性强、集成化和可靠性高等优势迅猛发展<sup>[8-9]</sup>。杨金显等<sup>[10]</sup>基于 MIMU 测量输电塔倾斜状态;Zhu 等<sup>[11]</sup>基于 MEMS 加速度计设计一种新的标定技术测量土木结构的变形损伤;Zhan 等<sup>[12]</sup>基于 MEMS 加速度计和全球移动通信系统(GSM)组成的铁路紧固件检测系统检测出紧固件松动损伤;上述方法一定程度上可以进行状态监测,但需要多个传感器,没有针对性的采取全局多范围措施,不能达到高效低成本的结构损伤检测目的。

结合 MIMU 微惯性测量系统监测结构动力特性的优点,将信息熵理论引入到输电塔结构损伤检测中。信息熵用于确定随机变量的不确定性,是衡量系统混乱程度的度量<sup>[13]</sup>;若系统稳定性减弱,即混乱程度增强,那么信息熵值便增大。目前,信息熵在梁结构<sup>[14-15]</sup>、钢结构<sup>[16]</sup>等损伤检测领域得到广泛应用并取得了有效的损伤识别结果,但信息熵在输电塔等桁架结构的应用却很少,Tao 等<sup>[17]</sup>提出基于信息熵的结构损伤因果分析方法,并通过砂岩-桁架结构实验验证可行性;Chang 等<sup>[18]</sup>提出一种基于香农信息熵的桁架结构体系设计的定量度量方法,并演示了 6 种不同类型的桁架结构系统的可施工性评估,为信息熵解决桁架结构损伤检测的实际应用等问题提供了实验依据,但是针对输电塔结构的信息熵损伤分析方法,在行业中仍需要继续挖掘。

基于以上理论背景,本文从输电塔结构角度出发,结合结构运动特征与信息熵理论,提出一种基于结构熵的输电塔结构损伤检测新方法,且该方法仅使用一个传感器,高效低成本的缩小损伤识别范围。首先利用 MIMU 微惯性测量系统采集输电塔横向、纵向以及扭转变化引起的三轴加速度和角速度等结构运动特征变化数据,预处理后与信息熵结合构建为结构熵矩阵,加权融合获得更为有效的表征输电塔结构变化的平动、转动熵矩阵,采用双尺度分析法获得可以检测输电塔结构损伤程度的熵距指标,以及可以检测输电塔结构损伤轴向上的变异熵指标,最后设计模拟输电塔和在役输电塔验证所提方法的有效性。

## 1 MIMU 数据采集与处理

### 1.1 MIMU 测量系统

MIMU 微惯性测量系统可以提供运动载体的位置、速度和姿态信息,通过加速度计及陀螺仪可以测量物体三轴加速度以及三轴角速度信息,广泛应用于振动信息

的监测。将 MIMU 作为输电杆塔运动检测节点固定于杆塔上,如图 1 所示,通过监测杆塔运动状况输出陀螺仪测得的角速度及加速度计测得的加速度,为避免信号干扰丢失,将采集的数据经光纤传至监控中心或智能终端监测并保存运动数据,通过杆塔运动状况进行杆塔松动分析。



图 1 MIMU 布置图

Fig. 1 MIMU layout

### 1.2 MIMU 信号采集与预处理

通过 MIMU 微惯性测量系统测得三轴加速度、角速度,将三轴加速度  $a = \{a_x, a_y, a_z\}$  和三轴角速度  $\omega = \{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}$  分别记为  $X_a = \{x_1, x_2, x_3\}$ ,  $X_\omega = \{x_4, x_5, x_6\}$ , 其中,  $x_k = \{x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kj}, \dots, x_{kN}\}^T$ ,  $k = 1, 2, \dots, 6$ ,  $T = 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为时间序列长度。由于噪声信号一般为高频信号,所以采用巴特沃斯低通降噪将高频突变信号去除,从而保留低频振动信号;通过对滤波后的时间序列进行时间窗滑动分段处理以时间长度  $L$  为一组,在每一时间长度  $L$  上由时间窗  $l$  滑动并取平均,记为  $x'_{kj}$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ ,  $n = N/L$ 。将每段时间长度  $L$  内数据进行归一化处理,各指标归一化后的值记为  $y_{kj}$ :

$$y_{kj} = \frac{x'_{kj} - \min(x'_{kj})}{\max(x'_{kj}) - \min(x'_{kj})} \quad (1)$$

其中,  $\max(x'_{kj})$  和  $\min(x'_{kj})$  分别表示加速度和角速度时间序列中的最大值、最小值。

## 2 输电塔结构熵

为了对输电塔结构进行损伤检测,需要提取结构横向、纵向(平动)以及扭转(转动)特征量——三轴加速度和三轴角速度有直接关系。首先 MIMU 监测输电塔结构三轴加速度和角速度变化信息,结合信息熵理论构建结构熵,然后构建平动、转动熵矩阵检测输电塔结构损伤程度及损伤轴向。

### 2.1 结构运动特征

#### 1) 平动特征

输电塔结构横向和纵向变化时,分别会出现结构在

$x$ 、 $y$  和  $z$  轴方向的变化,如图 2 所示,变化幅度与输电塔所受外界冲击加速度有关,冲击加速度越大,结构变化幅度越大,变化幅度近似正比于输电塔变化加速度  $a$ ,因此,输电塔结构的横向和纵向变化必然会引起变化加速度监测数据的变化。将输电塔结构的横向、纵向变化统称为结构平动,选取三轴加速度信号时间序列作为结构平动特征量,记为  $a = \{a_x, a_y, a_z\}$ 。

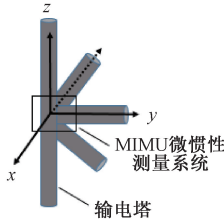


图 2 输电塔平动示意图

Fig. 2 Diagram of transmission tower translation

### 2) 转动特征

输电塔结构扭转变化时,  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向发生扭转,新坐标记为  $x'$ 、 $y'$ 、 $z'$ ,如图 3 所示,角速度  $\omega$  表示转动角的变化率,因此,输电塔结构的扭转变化必然会引起角速度监测数据的变化,选取角速度信号时间序列作为结构转动特征量,记为  $\omega = \{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}$

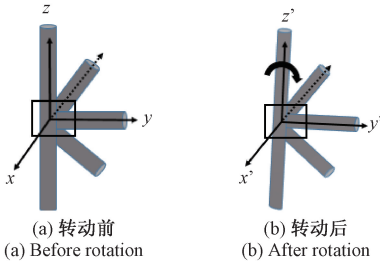


图 3 输电塔转动示意图

Fig. 3 Diagram of transmission tower rotation

## 2.2 结构熵

### 1) 基本原理

信息熵用于衡量系统混乱程度,将系统特征与信息熵理论结合可以衡量系统整体不确定性从而表征系统状态,如振幅熵<sup>[19]</sup>、多尺度排列熵<sup>[20]</sup>、能量熵<sup>[21]</sup>。输电塔结构的横向和纵向变化(平动)、扭转变化(转动)必然会引起结构加速度、角速度监测数据的变化,选取 MIMU 测得的三轴加速度和角速度分别作为结构平动、转动特征量。本文利用输电塔结构的平动、转动特征量三轴加速度、角速度与信息熵结合形成结构熵,用于衡量输电塔结构整体不确定性,从而检测结构损伤状况。结构熵包括自熵、互熵及耦合熵,其中,由加速度和角速度任一维序列变化所得熵称为自熵;由加速度任两维序列或角速度

任两维序列间共同作用所得熵称为互熵;由加速度任一维序列和角速度任一维序列间共同作用所得熵称为耦合熵。

结构自熵表示结构在平动或转动时,任一轴向特征量与信息熵结合的结构熵,表征结构向  $x$  轴或  $y$  轴或  $z$  轴发生平动、转动时结构的混乱程度。结构自熵:

$$h_{kk} = h(Y_k, Y_k) = - \sum_{j=1}^n p(y_{kj}) \log p(y_{kj}) \quad (2)$$

式中:  $y_{kj}$  为归一化后的加速度和角速度;  $p(y_{kj})$  为第  $k$  序列中各元素发生的概率,满足  $\sum_{j=1}^n p(y_{kj}) = 1; k = 1, 2, \dots, 6$ 。

结构互熵表示结构在平动或转动时,任两轴向间特征量一起与信息熵结合的结构熵,表征结构向  $xy$  轴或  $yz$  轴或  $xz$  轴发生平动、转动时结构的混乱程度。结构互熵:

$$h_{kk'} = h(Y_k, Y_{k'}) = - \sum_{j=1}^n p(y_{kj}, y_{k'j}) \log p(y_{kj}, y_{k'j}) \quad (3)$$

式中:  $y_{kj}, y_{k'j}$  分别为归一化后的加速度或角速度;  $p(y_{kj}, y_{k'j})$  第  $k, k'$  维序列中各元素一起发生的联合概率,满足  $\sum_{j=1}^n p(y_{kj}, y_{k'j}) = 1; k, k' = 1, 2, 3$  或  $k, k' = 4, 5, 6$ 。

在现实条件中,加速度数据会包含结构转动时的加速度信息,角速度数据会包含结构平动时的加速度信息,称为耦合。结构耦合熵表示结构在平动时任一轴向的特征量与转动时的任一特征量一起与信息熵结合的结构熵,表征结构各个轴向发生平动、转动耦合时结构的混乱程度。结构耦合熵:

$$i_{kk'} = i(Y_k, Y_{k'}) = - \sum_{j=1}^n p(y_{kj}, y_{k'j}) \log \frac{p(y_{kj}, y_{k'j})}{p(y_{kj})p(y_{k'j})} \quad (4)$$

其中,  $y_{kj}$  为归一化后的加速度;  $y_{k'j}$  为归一化后的角速度;  $k = 1, 2, 3, k' = 4, 5, 6$ 。

### 2) 平动熵矩阵

为有效表征输电塔结构变化并进行损伤检测,对结构熵矩阵中各元素的变异系数进行加权融合,构建表达输电塔结构有效变化的平动、转动熵矩阵。在实际条件下,由于输电塔存在微风振动、输电线路舞动、螺栓松动等各种因素影响,无法获取到输电塔的理想初始结构状态,所以本文将以任一时刻的输电塔结构状态作为初始状态,并对以后各个时间序列下的输电塔结构状态与初始状态作比较,通过判断输电塔在外界环境影响下的结构变化衡量输电塔当前损伤程度。

首先,选取表征输电塔结构平动的三轴加速度时间序列,对预处理后的任一  $t_i$  段时间序列的数据进行结构熵计算。在现实条件中,加速度数据并不只是结构平动时的加速度信息,还耦合着转动时的加速度信息,故构建

结构熵矩阵  $H_a$  时需消除二者耦合部分:

$$H_a = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} - \lambda_1 \begin{bmatrix} i_{14} & i_{15} & i_{16} \\ i_{24} & i_{25} & i_{26} \\ i_{34} & i_{35} & i_{36} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $\lambda_1$  为结构熵矩阵  $H_a$  的耦合系数。

通过  $t_i$  与  $t_{i-1}$  时刻的结构熵矩阵  $H_a$  对比 ( $i \geq 1$ ), 将输电塔结构平动变化作为新结构熵矩阵  $\hat{H}_{ai}$ :

$$\hat{H}_{ai} = H_{ai} - \hat{H}_{a(i-1)} = \begin{bmatrix} h_{ai11} & h_{ai12} & h_{ai13} \\ h_{ai21} & h_{ai22} & h_{ai23} \\ h_{ai31} & h_{ai32} & h_{ai33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

变异系数可以反映振动信号波动性及离散程度的分布特点<sup>[22]</sup>, 各结构熵数据对应的变异系数越大, 其携带的输电塔结构变化信息越多, 应当占据越大的权重。在刚体平动时, 质元的变化状态具有统一性, 可以选取刚体中任一质元的变化来表示刚体变化<sup>[23]</sup>, 所以将新结构熵矩阵  $\hat{H}_{ai}$  内的元素概括为  $x, y, z$  这 3 个轴向变化。

变异系数:

$$c_k = \frac{\sigma(\sum_{i=1}^n \sum_{k'=1}^3 h_{aik'k'})}{\mu(\sum_{i=1}^n \sum_{k'=1}^3 h_{aik'k'})} \quad (7)$$

其中,  $\sigma, \mu$  分别为输电塔新结构熵矩阵  $\hat{H}_{ai}$  内每一行元素的标准差、均值;  $k = 1, 2, 3$ ; 采用归一化变异系数的方法计算权重  $\hat{c}_k$ :

$$\hat{c}_k = \frac{\beta_1 \cdot c_k}{\sum_{k=1}^3 |c_k|} \quad (8)$$

式中:  $\beta_1$  为放大系数;  $\hat{c}_k = \{\hat{c}_1, \hat{c}_2, \hat{c}_3\}$ ,  $\sum_{k=1}^3 |c_k| = 1$ 。

加权后的平动熵矩阵  $\tilde{H}_{ai}$ :

$$\tilde{H}_{ai} = \begin{bmatrix} \hat{c}_1 \cdot h_{ai11} & \hat{c}_1 \cdot h_{ai12} & \hat{c}_1 \cdot h_{ai13} \\ \hat{c}_2 \cdot h_{ai21} & \hat{c}_2 \cdot h_{ai22} & \hat{c}_2 \cdot h_{ai23} \\ \hat{c}_3 \cdot h_{ai31} & \hat{c}_3 \cdot h_{ai32} & \hat{c}_3 \cdot h_{ai33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

3) 转动熵矩阵

首先, 选取表征输电塔结构转动特征量三轴角速度时间序列, 构建结构熵矩阵  $H_\omega$ :

$$H_\omega = \begin{bmatrix} h_{44} & h_{45} & h_{46} \\ h_{54} & h_{55} & h_{56} \\ h_{64} & h_{65} & h_{66} \end{bmatrix} - \lambda_2 \begin{bmatrix} i_{14} & i_{15} & i_{16} \\ i_{24} & i_{25} & i_{26} \\ i_{34} & i_{35} & i_{36} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $\lambda_2$  为结构熵矩阵  $H_\omega$  的耦合系数。

通过  $t_i$  与  $t_{i-1}$  时刻的结构熵矩阵  $H_\omega$  对比 ( $i \geq 1$ ), 将输电塔结构转动变化作为新结构熵矩阵  $\hat{H}_{\omega i}$ 。

$$\hat{H}_{\omega i} = H_{\omega i} - H_{\omega(i-1)} = \begin{bmatrix} h_{\omega i44} & h_{\omega i45} & h_{\omega i46} \\ h_{\omega i54} & h_{\omega i55} & h_{\omega i56} \\ h_{\omega i64} & h_{\omega i65} & h_{\omega i66} \end{bmatrix} \quad (11)$$

刚体转动时, 刚体上每个质元的状态都不同, 需要考虑每个质元的变化, 才能得到刚体的转动规律<sup>[23]</sup>, 所以需要新考虑新结构熵矩阵  $\hat{H}_{\omega i}$  内每一个元素。

变异系数:

$$c_{kk'} = \frac{\sigma(\sum_{i=1}^n h_{\omega i k k'})}{\mu(\sum_{i=1}^n h_{\omega i k k'})} \quad (12)$$

其中,  $\sigma, \mu$  分别为新结构熵矩阵  $\hat{H}_{\omega i}$  内所有元素的标准差、均值;  $k, k' = 4, 5, 6$ 。采用归一化变异系数的方法计算权重  $\hat{c}_{kk'}$ :

$$\hat{c}_{kk'} = \frac{\beta_2 \cdot c_{kk'}}{\sum_{k=4}^6 \sum_{k'=4}^6 |c_{kk'}|} \quad (13)$$

式中:  $\beta_2$  为放大系数;  $\hat{c}_{kk'} = \{\hat{c}_{44}, \dots, \hat{c}_{46}, \hat{c}_{54}, \dots, \hat{c}_{56}, \hat{c}_{64}, \dots, \hat{c}_{66}\}$ ,  $\sum_{k=4}^6 \sum_{k'=4}^6 |c_{kk'}| = 1$ 。

加权后的转动熵矩阵  $\tilde{H}_{\omega i}$ :

$$\tilde{H}_{\omega i} = \begin{bmatrix} \hat{c}_{44} \cdot h_{\omega i44} & \hat{c}_{45} \cdot h_{\omega i45} & \hat{c}_{46} \cdot h_{\omega i46} \\ \hat{c}_{54} \cdot h_{\omega i54} & \hat{c}_{55} \cdot h_{\omega i55} & \hat{c}_{56} \cdot h_{\omega i56} \\ \hat{c}_{64} \cdot h_{\omega i64} & \hat{c}_{65} \cdot h_{\omega i65} & \hat{c}_{66} \cdot h_{\omega i66} \end{bmatrix} \quad (14)$$

### 3 输电塔结构损伤检测

#### 3.1 损伤检测算法流程图

在外界环境不断冲击下, 输电塔连接螺栓松动加剧、结构刚度下降, 从而造成结构出现横向、纵向以及扭转等不同程度的损伤。为获取输电塔结构变化情况进行输电塔损伤检测, 由 MIMU 微惯性系统测量的三轴加速度、角速度数据进行预处理, 结合信息熵理论形成结构熵并构建结构熵矩阵, 为突出表示输电塔结构损伤有效信息, 计算结构熵矩阵中各元素的变异系数进行加权融合, 构建出表达输电塔有效损伤的平动、转动熵矩阵; 分别利用平动、转动熵矩阵计算欧氏距离及修正余弦距离获得熵距指标, 进行输电塔结构损伤程度检测; 分别利用平动、转动变异系数矩阵计算损伤趋势及波动程度获得变异熵指标, 进行输电塔结构损伤轴向检测。输电塔结构损伤检测流程如图 4 所示。

#### 3.2 损伤程度检测原理

输电塔结构损伤加剧, 伴随着刚度降低且稳定性减弱, 若不能在结构出现明显形变之前对其微损伤程度进行预判, 便会影响输电塔运行且错过最佳维修时机。由于输电塔平动时, 任一质点变化可表征整体变化状况, 欧氏距离可以度量质点间的空间距离, 所以可由欧氏距离衡量不同时间下平动熵矩阵的变化情况; 输电塔转动时,

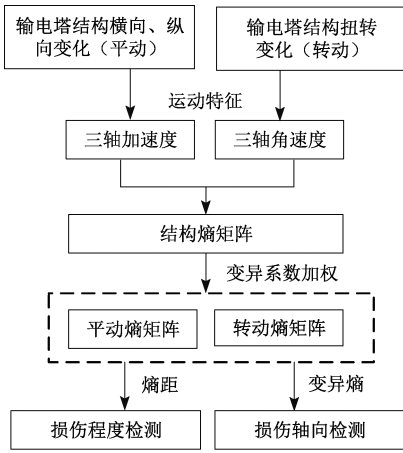


图 4 输电塔结构损伤检测流程

Fig. 4 Damage identification process of transmission tower structure

质点变化均不同,每一个质点会出现距离以及方向变化,相比欧氏距离,修正余弦距离注重两个向量在距离以及方向上的差异,所以,可由修正余弦距离和衡量不同时间下转动熵矩阵的变化情况。

欧氏距离  $D_1$ :

$$D_1 = \|\tilde{H}_{a(i-1)}\|_2 = \sqrt{\sum_{k=1}^3 \sum_{k'=1}^3 (\hat{c}_k \cdot h_{aik'} - \hat{c}_{k'} \cdot h_{a1kk'})^2} \quad (15)$$

修正余弦距离  $D_2$ :

$$D_2 = 1 - \frac{\sum_{k=4}^6 \sum_{k'=4}^6 [(\hat{c}_{kk'} \cdot h_{\omega ikk'} - \hat{c}_{kk'} \cdot h_{\omega ikk'})]}{\sqrt{\sum_{k=4}^6 \sum_{k'=4}^6 (\hat{c}_{kk'} \cdot h_{\omega ikk'} - \hat{c}_{kk'} \cdot h_{\omega ikk'})^2}} \cdot \frac{(\hat{c}_{kk'} \cdot h_{\omega 1kk'} - \hat{c}_{kk'} \cdot h_{\omega 1kk'})}{\sqrt{\sum_{k=4}^6 \sum_{k'=4}^6 (\hat{c}_{kk'} \cdot h_{\omega 1kk'} - \hat{c}_{kk'} \cdot h_{\omega 1kk'})^2}} \quad (16)$$

式中:  $\overline{\hat{c}_{kk'} \cdot h_{\omega ikk'}}$ 、 $\overline{\hat{c}_{kk'} \cdot h_{\omega 1kk'}}$  分别为转动熵矩阵  $\tilde{H}_{\omega i}$ 、 $\tilde{H}_{\omega 1}$  内元素的平均值。

输电塔损伤变化产生的熵距  $D$ :

$$D = \gamma_1 \cdot D_1 + \gamma_2 \cdot \frac{\max(D_1)}{\max(D_2)} \cdot D_2 \quad (17)$$

式中:  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$  分别为系数;  $\max(D_1)$ 、 $\max(D_2)$  分别为欧氏距离、修正余弦距离的最大值。

输电塔损伤程度  $I$ :

$$I = \frac{D}{\max(D)} \cdot 100\% + \varepsilon \quad (18)$$

式中:  $\max(D)$  为熵距最大值,即输电塔处于濒临倒塌状况时的熵距;  $\varepsilon$  为误差因子。

通过输电塔平动熵矩阵所得欧氏距离以及转动熵矩

阵所得修正余弦距离的双尺度综合分析,获得熵距  $D$  并求得输电塔结构损伤程度指标  $I$ ,  $I$  越小时,输电塔结构熵变化越小,即输电塔输电塔结构损伤程度越轻微;  $I$  越大时,输电塔结构熵变化越大,即输电塔结构损伤程度越严重。

### 3.3 损伤轴向检测原理

变异系数可以反映振动信号波动性及离散程度的分布特点,即变异系数矩阵可以反映结构以及  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴向的波动规律。使用变异系数矩阵代替平动、转动熵矩阵,不仅可以减少计算量,还可以有效衡量输电塔结构变化状况。

平动变异系数矩阵:

$$\hat{C}_a = \begin{bmatrix} \hat{c}_1 & \hat{c}_1 & \hat{c}_1 \\ \hat{c}_2 & \hat{c}_2 & \hat{c}_2 \\ \hat{c}_3 & \hat{c}_3 & \hat{c}_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中:矩阵内元素为  $\hat{c}_k, k = 1, 2, 3$ 。

转动变异系数矩阵:

$$\hat{C}_\omega = \begin{bmatrix} \hat{c}_{44} & \hat{c}_{45} & \hat{c}_{46} \\ \hat{c}_{54} & \hat{c}_{55} & \hat{c}_{56} \\ \hat{c}_{64} & \hat{c}_{65} & \hat{c}_{66} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中:矩阵内元素为  $\hat{c}_{kk'}, k, k' = 4, 5, 6$ 。

根据象形化的时间序列特征提取方法,综合考虑轴向损伤趋势及波幅度衡量轴向损伤程度。平动变异系数矩阵  $\hat{C}_a$  内的元素具有统一性,任一元素均可表示结构整体的变化状态,可以表征输电塔结构各轴向损伤趋势;转动变异系数矩阵  $\hat{C}_\omega$  内元素具有各异性,每个元素表征结构在各个部分的波动变化,可以表征输电塔结构轴向波动幅度。

轴向损伤趋势  $U_1$ :

$$U_1 = \hat{c}_k \quad (21)$$

轴向波动程度  $U_2$ :

$$U_2 = \frac{\sum_{k'=4}^6 (\hat{c}_{(k+3)k'} - \overline{\hat{c}_{(k+3)k'}})^2}{2} \quad (22)$$

式中:  $\overline{\hat{c}_{(k+3)k'}}$  为转动变异系数矩阵内元素的平均值;  $k = 1, 2, 3$ 。

利用轴向损伤趋势及波动程度综合分析,可以表征输电塔结构  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴向的综合损伤状况。输电塔安装初期,为增强铁塔各杆件连接的刚度、紧密性和稳定性,会施加适当的螺栓预紧力<sup>[24]</sup>,确保输电塔处于稳定状态;随后,长期受外界环境影响而处于振动状态下的输电塔,随着部分螺栓预紧力消失且轴向力超出摩擦力,此时部分螺栓出现滑移变形并导致输电塔刚度开始下降<sup>[25]</sup>,输电塔便进入损伤中期,但由于此时松动螺栓的数量及程度并不严重,所以输电塔轴向损伤趋势及波动程度很微

弱,未出现明显形变;若长期未加干预,输电塔螺栓损耗达到一定值时,输电塔将进入损伤后期,大量松动螺栓出现塑性变形、断裂破坏并导致输电塔刚度大幅下降<sup>[26]</sup>,即输电塔轴向损伤趋势及波动程度持续增大,产生明显形变甚至倒塌等严重后果。

为寻找输电塔结构损伤微特征,即在输电塔产生明显形变之前对其进行预判以达到及时检修的目的,所以主要分析输电塔损伤中期。输电塔损伤中期时轴向损伤趋势及波动程度并非简单的线性关系,损伤趋势在最初会变化非常缓慢,随着输电塔损伤加剧所造成螺栓松动加速的恶性循环趋势,呈现近似指数增长形势,所以构造变异熵模型  $U$  :

$$U = \gamma_3 \cdot U_2^{\frac{1}{2}} \cdot e^{\gamma_4 \cdot U_1} \quad (23)$$

式中:  $\alpha_3, \alpha_4$  为系数;  $k = 1, 2, 3$  时所求得的变异熵分别为输电塔结构  $x, y, z$  轴, 记为  $U = \{U_x, U_y, U_z\}$ 。

变异熵大小与结构轴向的损伤程度呈正相关,依据最小择近原则,比较  $x, y, z$  轴向间的变异熵大小,将变异

熵值最大的轴向作为损伤轴向指标,记为  $\hat{U}$  :

$$\hat{U} = \max U \quad (24)$$

## 4 实 验

为了验证基于结构熵的输电塔结构损伤程度及轴向检测方法的有效性,设计不同螺栓松动比的多工况下进行模拟输电塔和在役输电塔实验验证。采集任意一组输电塔损伤过程中的 MIMU 惯性数据,由于测量环境干扰,需要滤波消除信号中的噪声干扰和偏差,所以对三轴加速度、三轴角速度数据进行低通滤波预处理,原始数据与滤波后的效果如图 5 所示,可以看出预处理后可以有效减少随机噪声、尖峰和毛刺等现象。对预处理后的数据平滑分段处理,取  $L = 30$ ,采用 max-min 对分段处理后的数据进行归一化,从而将加速度角速度数据范围限制在  $[0, 1]$ ,便于后续进行熵值计算,三轴加速度与三轴角速度的处理如图 6 所示。

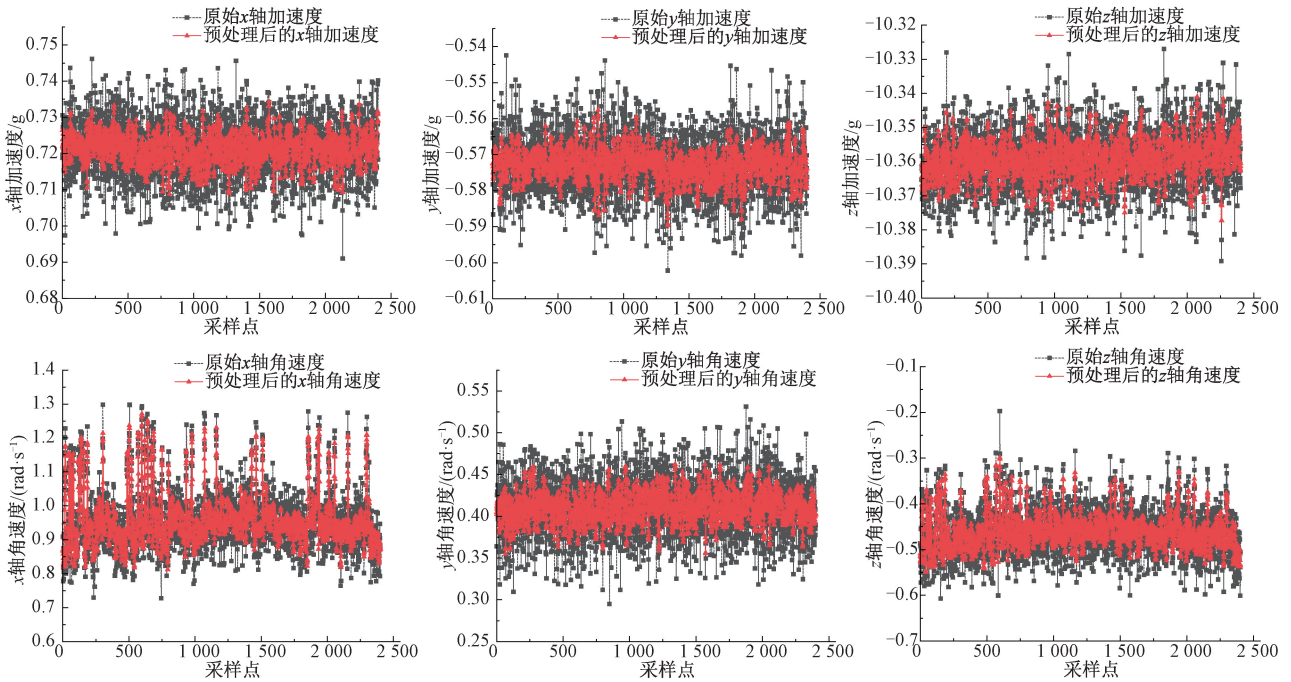


图 5 原始数据及预处理结果

Fig. 5 Raw data and pre-processing results

### 4.1 模拟输电塔实验

设计了一定比例的模拟输电塔结构模型,将实验室设计的 MIMU 微惯性测量系统固定在模型上,搭建如图 7 所示的模拟输电塔结构损伤检测系统,通过监控中心或智能终端监测并保存数据。

#### 1) 损伤程度检测实验

将螺栓松动个数所占螺栓总数的比例称为螺栓松动

比,模拟输电塔实验时,通过改变输电塔构件连接处的螺栓松动比来模拟输电塔损伤程度。在保证外部环境基本一致的前提下,对模拟输电塔 3 个轴向的螺栓松动位置、程度等做到尽可能的均匀对称的损伤处理。采集不同参数条件的 12 种工况下的输电塔损伤数据,设置采样时间 10 min、MIMU 系统温度 21 °C、环境风速 30 km/h,其余实验参数设置如表 1 所示,对归一化后的数据计算得出结

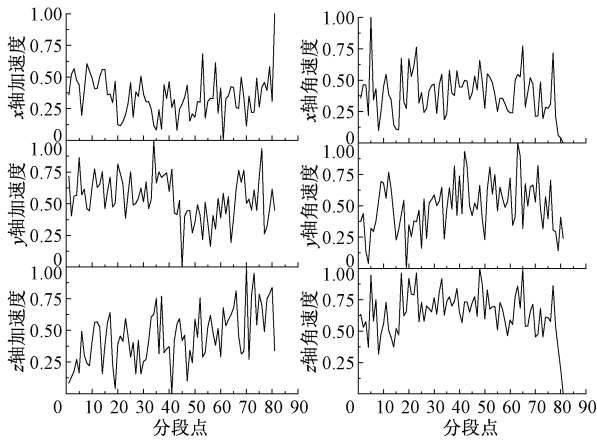


图 6 归一化后的加速度及角速度

Fig. 6 Normalized acceleration and angular velocity

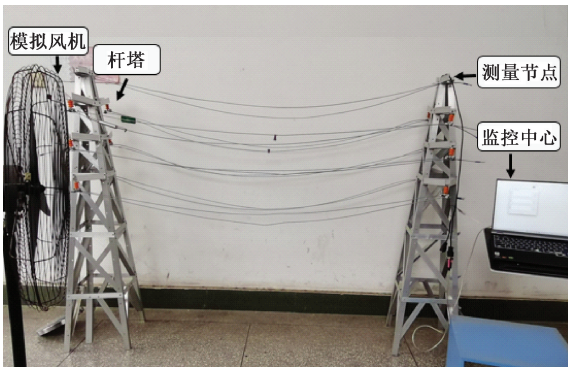


图 7 模拟输电塔实验

Fig. 7 Simulate transmission tower experiment

构熵矩阵,利用输电塔平动、转动熵矩阵所得的欧氏距离、修正余弦距离计算出输电塔结构熵距,以预紧力为  $100\text{ N}\cdot\text{m}$  的 4 种工况为例进行分析,结果如图 8 所示,12 种工况下输电塔结构损伤程度如图 9 所示。

表 1 模拟输电塔-损伤程度-参数设置

Table 1 Simulation transmission tower-damage degree-parameter setting

工况	参数		工况	参数	
	螺栓松动比/%	预紧力/ $(\text{N}\cdot\text{m})$		螺栓松动比/%	预紧力/ $(\text{N}\cdot\text{m})$
1	0	50	7	20	100
2	10	50	8	30	100
3	20	50	9	0	150
4	30	50	10	10	150
5	0	100	11	20	150
6	10	100	12	30	150

由图 8 可以看出,在预紧力为  $100\text{ N}\cdot\text{m}$  条件下,随着螺栓松动比的增大,结构刚度降低,欧氏距离、修正余弦距离以及熵距值都呈正相关趋势的增长,说明螺栓松动加剧的确影响输电塔损伤程度;随着结构损伤加剧,修

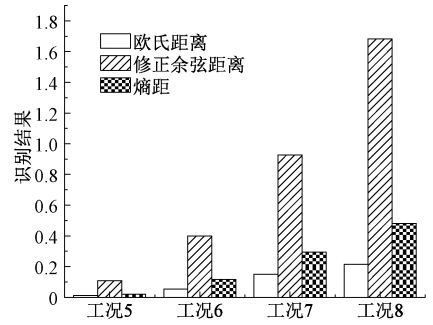


图 8  $100\text{ N}\cdot\text{m}$ -模拟输电塔-损伤程度检测结果

Fig. 8  $100\text{ N}\cdot\text{m}$ -simulate transmission tower-damage degree identification results

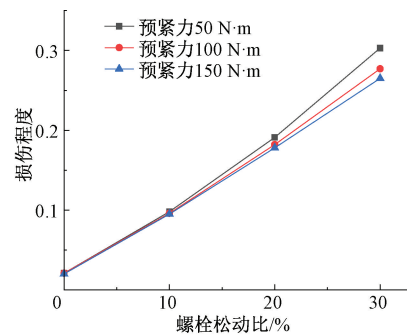


图 9 模拟输电塔-损伤程度

Fig. 9 Simulate transmission tower-damage degree

正余弦距离比欧氏距离的计算值明显偏高,说明结构刚度的改变伴随着的结构扭转多于结构横向、纵向变化;相比于衡量结构平动的欧氏距离以及衡量结构转动的修正余弦距离,熵距与输电塔螺栓松动比契合度更高。

由图 9 可以看出,在预紧力为  $50\text{ N}\cdot\text{m}$  条件下,工况 1~4 随着螺栓松动比的变化,结构损伤程度误差在  $0.7\% \sim 2.5\%$  范围内;在预紧力为  $100\text{ N}\cdot\text{m}$  条件下,工况 5~8 随着螺栓松动比的变化,结构损伤程度误差在  $0.5\% \sim 2\%$  范围内;在预紧力为  $150\text{ N}\cdot\text{m}$  条件下,工况 9~12 随着螺栓松动比的变化,结构损伤程度误差在  $0.4\% \sim 1.9\%$  范围内;不同预紧力、不同螺栓松动比条件下,误差控制在 3% 以内,考虑到外部环境影响、模拟输电塔设计误差以及测量装置误差,符合工程实验要求,表明该方法有很好的检测效果。

### 2) 损伤轴向检测实验

分别设置模拟输电塔单个轴向的螺栓松动比为 20%、30%,其余两轴不松动,采集 6 种工况下的输电塔损伤数据,设置采样时间  $10\text{ min}$ 、MIMU 系统温度  $21\text{ }^\circ\text{C}$ 、环境风速  $30\text{ km/h}$ 、预紧力  $100\text{ N}\cdot\text{m}$ ,其余实验参数设置如表 2 所示,对归一化后的数据计算得出结构熵矩阵,利用输电塔平动、转动变异系数矩阵所得的损伤趋势及波

动性计算出输电塔结构变异熵,从而检测输电塔结构轴向损伤程度,计算所得结构轴向损伤情况如图 10 所示。

表 2 模拟输电塔-损伤轴向检测-参数设置

Table 2 Simulation transmission tower-axial damage identification-parameter setting

工况	参数		工况	参数	
	螺栓松动比/%	松动轴向		螺栓松动比/%	松动轴向
1	20	X	4	30	X
2	20	Y	5	30	Y
3	20	Z	6	30	Z

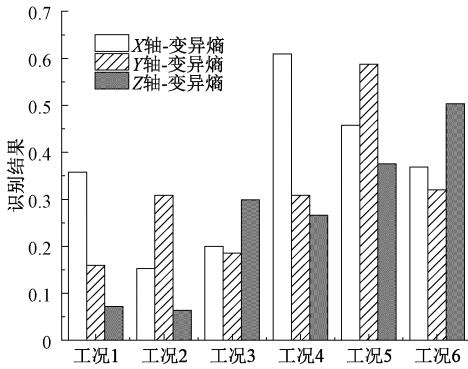


图 10 模拟输电塔-轴向损伤检测

Fig. 10 Simulate transmission tower-axial damage identification

由图 10 可以看出,随着螺栓松动比增加,结构刚度下降,各轴变异熵值呈正相关趋势增长,说明螺栓松动加剧的确影响输电塔轴向损伤程度;松动轴向的变异熵值明显高于两个未松动轴向,螺栓松动比为 20% 时差距控制在 20.1%~49.5%,螺栓松动比为 30% 时差距控制在 23.2%~53.9%,相比之下,两个未松动轴向的变异熵值相差不大,可以明显检测出结构损伤轴向,并且与理想结论吻合,表明该方法有很好的检测效果。

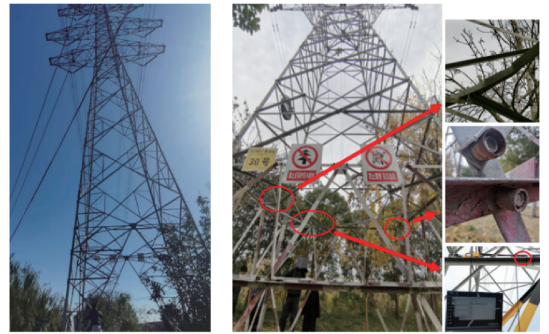
#### 4.2 在役输电塔实验

选取河南焦作某两个 220 kV 在役塔,输电塔实物如图 11 所示。图 11(a) 为在役且健康的输电塔,图 11(b) 为在役且局部老化的输电塔。

##### 1) 损伤程度检测实验

熵距及损伤程度分析方法同模拟实验一致,采集两种工况下的输电塔损伤数据,设置采样时间 10 min、MIMU 系统温度 21 °C、环境风速 30 km/h,其余实验参数设置如表 3 所示,计算所得结构损伤程度如图 12 所示。

由图 12 可以看出,工况 1、工况 2 的输电塔由于在役年限、健康状态、损伤程度不同,计算所得欧氏距离、修正余弦距离以及熵距存在明显不同;随着输电塔损伤程度增大,熵距值趋于增大,所测结构损伤程度分别为 3.2%、11.1%,综合考虑实际使用寿命、外部环境影



(a) 健康 (a) Health (b) 局部老化 (b) Local ageing

图 11 在役输电塔实验

Fig. 11 In-service transmission tower experiment

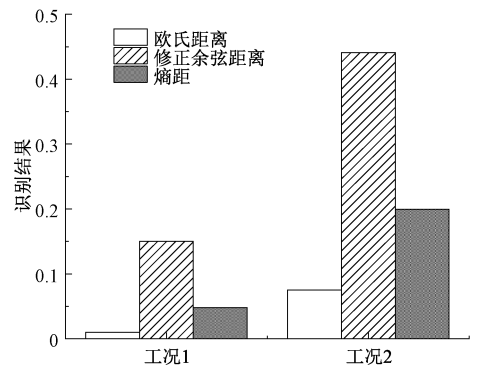


图 12 在役输电塔-损伤程度

Fig. 12 In-service transmission tower - damage degree

差以及计算误差,满足误差要求,再次表明利用熵距指标衡量输电塔结构损伤程度的可行性。

##### 2) 损伤轴向检测实验

变异熵及轴向损伤分析方法同模拟实验一致,实验参数设置如表 3 所示,计算所得结构损伤轴向如图 13 所示。

表 3 在役输电塔-参数设置

Table 3 In-service transmission tower-parameter setting

工况	输电塔状况
1	在役、健康
2	在役、局部老化

由图 13 可以看出,工况 1、工况 2 的输电塔由于在役年限、健康状态、损伤程度不同,计算所得各轴向变异熵明显不同;随着输电塔轴向损伤程度增大,变异熵值趋于增大,工况 1 中,输电塔轴向间变异熵相差仅 12.5%~15.8%,不能明显看出松动轴向,表明在役输电塔结构处于稳定阶段,各轴向趋于平衡且未进入微损伤阶段;工况 2,输电塔轴向间变异熵相差 33.2%~39.8%,可以明显看出损伤轴向为 X 轴,综合考虑实际使用寿命、外部环境影



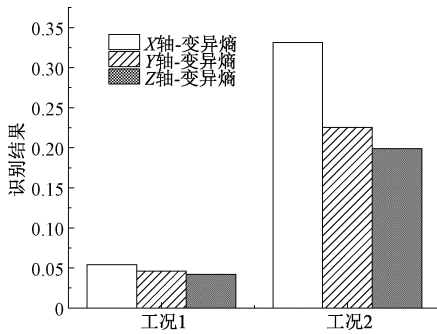


图13 在役输电塔-轴向损伤检测

Fig. 13 In-service transmission tower-axial damage identification

利用变异熵指标衡量输电塔结构损伤轴向的可行性。

通过模拟输电塔和在役输电塔实验,表明熵距及变异熵指标构建的合理性,可以为输电塔结构损伤检测提供参考依据。

## 5 结论

本文通过MIMU微惯性测量系统测量结构变化信息,提出了一种基于结构熵的输电塔结构损伤检测新方法,可以检测出结构损伤程度及轴向,并通过多种工况下的模拟输电塔及在役输电塔实验验证该方法的可行性,主要结论如下:

1) 从输电塔结构角度分析,基于结构熵分析结构变化时混乱程度衡量结构损伤程度及损伤轴向,以此缩小损伤检测范围,从而实现高效低成本的损伤检测。

2) MIMU微惯性测量系统仅需设置一个测点就可达到输电塔结构损伤检测的目的,便捷高效。

3) 提出了基于双尺度分析的熵距指标检测输电塔结构损伤程度,以及变异熵指标检测输电塔结构损伤轴向。

4) 设计不同工况下的模拟输电塔及在役输电塔实验,实验结果表明所提算法能够有效检测输电塔损伤程度及轴向,且可为其他桁架结构的损伤检测提供现实依据。

## 参考文献

[1] 张卓群,李宏男,李士锋,等. 输电塔-线体系灾变分析与安全评估综述[J]. 土木工程学报,2016,49(12):75-88.

ZHANG ZH Q, LI H N, LI SH F, et al. Disaster analysis and safety assessment on transmission tower-line system: An overview [J]. China Civil Engineering Journal, 2016,49(12): 75-88.

[2] 吴华,梁方正,刘草,等. 输电杆塔弱纹理部件的可迁移式检测[J]. 仪器仪表学报,2021,42(6):172-178.

WU H, LIANG F ZH, LIU C, et al. Transferable detection

for low texture components of transmission tower [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(6): 172-178.

[3] 张玉玺,周兴广,邓哲,等. 测力螺栓与手持测量设备设计与实现[J]. 电子测量技术,2020,43(8):42-48.

ZHANG Y X, ZHOU X G, DENG ZH, et al. Design and implementation method of the axial force measuring screw and its hand-held testing equipment [J]. Electronic Measurement Technology, 2020,43(8):42-48.

[4] 杨风利,王旭明,朱彬荣. 低温及大温差区输电铁塔螺栓扭矩及横向振动试验研究[J]. 振动与冲击,2020,39(12):257-264.

YANG F L, WANG X M, ZHU B R. An experimental study on the construction torque and transversal vibration of bolted joints of transmission towers in low temperature regions with high temperature difference [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(12):257-264.

[5] HE X L, SHE T L. A new identification method for bolt looseness in wind turbine towers [J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 1-10.

[6] HASHIMOTO K, SHIOTANI T, MITSUYA H, et al. MEMS vibrational power generator for bridge slab and pier health monitoring [J]. Applied Sciences, 2020, 10(22): 8258-8271.

[7] ALBARBAR A, BADRI A, SINHA J K, et al. Performance evaluation of MEMS accelerometers [J]. Measurement, 2009, 42(5): 790-795.

[8] 杨金显,杨闯,李双磊,等. 基于MIMU的输电线路振动分析[J]. 振动与冲击,2018,37(11):230-236.

YANG J X, YANG CH, LI SH L, et al. Vibration analysis of transmission lines based on MIMU [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(11): 230-236.

[9] 马星河,毕文龙,朱行,等. 改进SHAKF算法消除IMU随机误差的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(12):59-67.

MA X H, BI W L, ZHU H, et al. Research on improving SHAKF algorithm to eliminate random error of IMU [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021,35(12):59-67.

[10] 杨金显,阎朝鹏. 基于MIMU的输电塔倾斜测量方法[J]. 传感器与微系统,2020,39(6):58-61.

YANG J X, YANG CH P. Vibration analysis of transmission lines based on MIMU [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020,39(6):58-61.

[11] ZHU J X, WANG W F, HUANG S P, et al. An improved calibration technique for MEMS accelerometer-based inclinometers [J]. Sensors, 2020, 20(2): 452-475.

- [12] ZHAN Z K, SUN H, YU X D, et al. Wireless rail fastener looseness detection based on MEMS accelerometer and vibration entropy [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 20(6): 3226-3234.
- [13] 李丽娟, 明飞, 宋学科, 等. 熵不确定度关系综述[J]. *物理学报*, 2022, 71(7): 25-41.  
LI L J, MING F, SONG X K, et al. Review on entropic uncertainty relations [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(7): 25-41.
- [14] TAN C J, ELHATTAB A, UDDIN N. Wavelet-entropy approach for detection of bridge damages using direct and indirect bridge records [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2020, 26(4): 1-13.
- [15] XIANG C S, LI L Y, ZHOU Y, et al. Damage identification method of beam structure based on modal curvature utility information entropy [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020(5): 1-20.
- [16] XIE B, LI J, ZHAO X. Research on damage detection of a 3D steel frame model using smartphones [J]. *Sensors*, 2019, DOI: 10.3390/s19030745.
- [17] TAO K, ZHENG W, JIANG D. Entropy method for structural health monitoring based on statistical cause and effect analysis of acoustic emission and vibration signals [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 172515-172525.
- [18] CHANG M C, SHIH S G, SCHMITT G. Information theory-based approach for constructability assessment in truss structural systems [J]. *Automation in Construction*, 2017, 82: 84-102.
- [19] ZHAN Z K, SUN H, YU X D, et al. Wireless rail fastener looseness detection based on MEMS accelerometer and vibration entropy [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 20(6): 3226-3234.
- [20] 陈东宁, 张运东, 姚成玉, 等. 基于 FVMD 多尺度排列熵和 GK 模糊聚类的故障诊断 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54(14): 16-27.  
CHEN D N, ZHANG Y D, YAO CH Y, et al. Fault diagnosis based on FVMD multi-scale permutation entropy and GK fuzzy clustering [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(14): 16-27.
- [21] 许昕, 李磊磊, 潘宏侠, 等. 基于优化 MCKD 与能量熵在柴油机故障诊断中的应用 [J]. *国外电子测量技术*, 2022, 41(2): 132-137.  
XU X, LI L L, PAN H X, et al. Application of optimized MCKD and energy entropy in diesel engine fault diagnosis [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2022, 41(2): 132-137.
- [22] 何浩祥, 张小福, 王小兵. 基于滑动统计特征的信号非平稳度评价和比较 [J]. *振动. 测试与诊断*, 2018, 38(4): 679-686, 868.  
HE H X, ZHANG X F, WANG X B. Evaluation and comparison of nonstationary signals based on moving statistical characteristics [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(4): 679-686, 868.
- [23] 秦晨, 张伟仁. 刚体平动和刚体定轴转动中力学问题的对比研究 [J]. *山西大同大学学报(自然科学版)*, 2015, 31(4): 25-28.  
QIN CH, ZHANG W R. The comparative study on the mechanical issues in rigid body translation and rigid body fixed-axis rotation [J]. *Journal of Shanxi Datong University(Natural Science)*, 2015, 31(4): 25-28.
- [24] 何生成. 铁塔螺栓松动检测技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.  
HE SH CH. Research on bolt loosening detection technology of iron tower [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [25] 付焱磊. 输电铁塔用螺栓连接的力学性能研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016.  
FU Y L. Research on mechanical properties of transmission tower bolted connection [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [26] 常星亚. 风载作用下输电铁塔螺栓连接松动特性研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015.  
CHANG X Y. Research on loose characteristics of bolted joint used on transmission tower under the action of wind [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

## 作者简介



**杨金显**(通信作者), 1999~2008 年于哈尔滨工程大学获得学士、硕士和博士学位, 现为河南理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为 MEMS 惯性测量及在随钻、电网舞动和变形监测中的应用研究。

E-mail: yangjinxian@hpu.edu.cn

**Yang Jinxian**(Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree from Harbin Engineering University from 1999 to 2008. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in Henan Polytechnic University. His main research interests include inertial measurement and its application in MWD, power grid movement and deformation monitoring.



**杨雨露**, 2020 年于郑州轻工业大学获得学士学位, 现为河南理工大学硕士在读研究生, 主要研究方向为电网舞动和变形监测中的应用研究。

E-mail: 1731664668@qq.com

**Yang Yulu** received B. Sc. from Zhengzhou University of Light Industry in 2020. Now she is a M. Sc. candidate in Henan Polytechnic University. Her main research interests include power grid movement and deformation monitoring.