

基于 3D-DIC 的输电导线微风振动动弯应变计算方法优化

姜 岚^{1,2}, 陶文心^{1,2}, 杭翠翠³, 黄 荣^{1,2}, 叶卿辰^{1,2}

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 武汉 430070)

摘要: 针对输电导线微风振动下产生的动弯应变计算误差较大的问题, 基于三维数字图像相关(3D-DIC)技术对输电导线线夹出口处动弯应变进行测量试验, 改进使用末端挠度 A_{89} 计算动弯应变的方法。采用覆盖式贴涂法解决输电导线股间间隙应变计算困难的问题, 对 3D-DIC 设备的准确性以及其测量输电导线表面应变的可行性进行了试验验证。以 LGJ-120/20 为例, 通过激振系统和导线张力试验系统模拟微风振动工况, 利用 3D-DIC 技术揭示了导线微风振动下线夹出口处动弯应变分布规律, 并与公式计算值进行对比, 表明公式计算值存在较大误差(40%~60%), 进而分析了不同张力、振动频率对导线线夹出口动弯应变和振幅的影响, 从而对动弯应变计算公式中的长度和试验因数进行修正, 使动弯应变计算公式的误差降至 10%以内。

关键词: 3D-DIC 技术; 微风振动; 动弯应变; 应变观测; 参数修正

Optimization of Wind Vibration Dynamic Bending Strain Calculation Method of Transmission Wire Based on 3D-DIC

JIANG Lan^{1,2}, TAO Wenxin^{1,2}, HANG Cuicui³, HUANG Xing^{1,2}, YE Qingchen^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, Hubei Yichang 443002, China; 3. Economic Research Institute of State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to solve the problem of large error in dynamic bending strain calculation of transmission wire generated by breeze vibration, the dynamic bending strain measurement test at the outlet of transmission wire clamp is carried out based on 3D digital image correlation (3D-DIC) technology, and the method of calculating dynamic bending strain using end deflection A_{89} is improved. The overlay coating method is used to solve the problem of calculating the gap strain between strands of transmission wires. The accuracy of 3D-DIC equipment and the feasibility of measuring the surface strain of transmission wires are verified by experiments. The dynamic bending strain distribution at the outlet of the downline clamp of the wire is revealed by 3D-DIC technology. The results show that there is a large error (40%-60%) in the calculated value of the formula. The influence of different tension and vibration frequency on the dynamic bending strain and amplitude of wire clamp outlet is analyzed, and the length l and test factor in the dynamic bending strain calculation formula are modified, so that the error of the dynamic bending strain calculation formula is reduced to less than 10%.

Key words: 3D-DIC technology; breeze vibration; dynamic bending strain; strain observation; parameter modification

0 引言

微风振动是在较低的稳定风速条件下, 因涡脱作用, 发生的一种高频、低振幅的强迫振动。微风振动发生频繁、难以杜绝, 是引起输电导线疲劳断股、断线的主要原因。观测表明, 导线发生微风振动时, 线夹出口处附近的铝股将会承受

较大的往复作用, 产生交替应变, 导致导线在此区域断股断线^[1]。因此, 开展导线微风振动试验, 探索微风振动程度量化计算方法, 是实现导线疲劳寿命预测^[2], 提升导线微风振动控制水平的基础。

目前, 评价输电线路微风振动程度的指标主

要有振动角和动弯应变两种。相比于振动角,动弯应变更能直接反映导线微风振动强度,国际大电网会议以线夹出口处导线的动弯应变来评估导线的运行状况^[3]。国内外学者对于动弯应变也进行了相关研究,张昭^[4]提出了导线等效弯曲刚度,建立了微风振动条件下新的导线线夹出口动弯应变数学模型,揭示了铝钢比对疲劳断股的影响机制;司伟杰^[5]通过 ABAQUS 有限元软件对线夹出口 89 mm 长度的钢芯铝绞线进行建模仿真,分析了导线中铝线股及钢芯在微风振动时的受力磨损程度。上述研究利用精细化数值模型,分析了导线特性对疲劳寿命的影响,而在实际工程中,则需要更为简化、直接的计算方法。R Claren^[6]从导线静态弯曲变形推导得出线夹出口处动弯应变与导线弯曲振幅之间的关系,并确定动弯应变计算公式中的系数为 356.5,长期以来,国内外均沿用该结果来进行现场测振数据分析。上述计算方法是通过将线夹出口处 89 mm 内的导线看成悬臂梁,将振动视为均布载荷,利用末端挠度 A_{89} 来反算动弯应变,该方法思路清晰,计算简单,但是忽略了导线结构特征对结果的影响。卢明良^[7]指出,该方法所取的系数会让计算值小于实际值,某些情况误差极大。因此,对该表达式的修正与改进,提升计算精度,对合理布置减振措施,提升线路涡振疲劳寿命至关重要。要对动弯应变表达式进行修正,准确掌握导线微风振动线夹出口处动弯应变分布规律是关键。Tieyu Gao^[8]设计了一种基于金属箔应变片的动弯应变测量传感器,用于动弯应变监测,然而这种以电阻应变片为基础的监测手段,仅能获取某个特定点的应

变数据,难以体现线夹出口处的应变分布规律。

三维数字图像相关法即 3D-DIC 是一种基于数字图像相关技术的应变场非接触测量方法,具有光路简单、环境适应性好、测量范围广的优点,在结构表面应变场监测中具有广泛应用前景^[9]。目前,该技术已在防爆^[10]、岩土^[11]、冶金^[12]等领域得到了较多应用。3D-DIC 技术使得输电线路微风振动线夹出口处全场应变观测成为可能。然而,输电导线表面由于存在较多的股间间隙,导致在数据处理中难以准确识别区分散斑与股间阴影,影响 3D-DIC 应变场测量质量。

为了优化改进导线动弯应变计算方法,基于 3D-DIC 技术,揭示导线微风振动全场应变分布规律,提出覆盖式散斑贴涂法,解决股间间隙对计算结果的影响,采用试验方法,分析不同张力水平、振动频率对动弯应变分布的影响,在此基础上对动弯应变计算公式系数进行修正,以期线路运维提供参考。

1 3D-DIC 应变观测原理

二维数字图像相关法即拍摄承载灰度信息的散斑图像,通过建立变形模型和应用相关函数进行匹配运算,对变形前后的图像像素进行逐点匹配,得到被测表面的位移场和应变场信息。三维数字图像相关法则是在二维数字图像相关法的基础上增加了三维重建的步骤,可将二维平面的计算结果映射到三维坐标系中,具体流程见图 1。

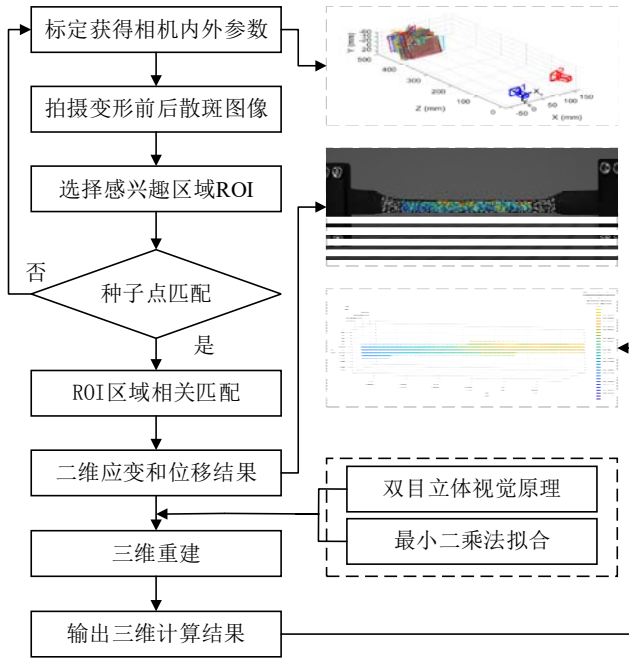


图 1 三维数字图像相关法流程图

Fig. 1 Flow chart of 3D digital image correlation method

1.1 双相机标定

3D-DIC 需要至少两个相机组成立体相机系统，通常基于张氏标定法或 DLT(direct linear transformation)法来实现相机标定，从而获得相机的内外参数^[13~14]。其中 DLT 法的具体步骤包括：投影方程的建立、构建方程组和矩阵方程以及奇异值分解。

DLT 方法的输入数据是已知的三维—二维点对，一般通过拍摄特殊标定板上的点来获得。如图 2 所示，假设所使用的两个相机分别为左相机 C_0 和右相机 C_1 。

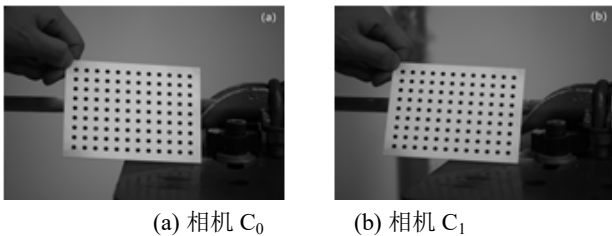


图 2 双相机标定图像

Fig. 2 Dual camera calibration images

像平面上的投影坐标为 (u, v) 。摄像机投影方

程可以表示为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中： P 是一个 3×4 的摄像机投影矩阵，该矩阵包含相机的内参数和外参数。

其次是构建方程组和矩阵方程。对于 n 个已知的三维点和对应的二维点，可以构建 $2n$ 个方程

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X_{c1} \\ Y_{c1} \\ Z_{c1} \\ 1 \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} u_n \\ v_n \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X_{cn} \\ Y_{cn} \\ Z_{cn} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中，每个方程表示一个点的投影关系。

对上述方程组进行整理可得到一个矩阵方程

$$M \cdot \text{vec}(P) = 0 \quad (3)$$

式(3)中： M 为一个 $2n \times 12$ 的矩阵， $\text{vec}(P)$ 是摄像机投影矩阵展开后的一维向量。

最后对矩阵 M 进行奇异值分解(SVD)，得到 3 个矩阵 U , Σ , VT 。摄像机投影矩阵 P 可以从矩阵 V 的最后一列中提取得到。然后，通过适当的归一化和调整，可得到相机的内外参数。这就是整个基于 DLT 法对相机进行标定的原理。

通过标定得到成像系统的内参和外参后，3D-DIC 算法通过搜索散斑图像间的立体和时序对应关系，重建被测物体的三维形貌^[15]，并将变形前后的三维形貌进行对比，得到三维位移和应变。图像匹配的流程是使用相关函数计算参考图像中感兴趣区域(ROI)即被测区域中某一点在变形后图像中具有最高相似性的最优匹配位置，然后通过相关函数的峰值位置和滑动窗口的偏移量等信息得

到位移信息，再对位移场进行差分运算计算出应变，当对整个被测区域中所有的点都完成计算后，就能得到待测物体的二维位移和应变。

三维重建则是基于双目立体视觉原理实现的。双目立体视觉技术的基本原理是从两个不同的空间点对同一个目标进行观测，从而得到不同角度的影像，再通过三角形几何法得到像素数据，从而得到目标的空间信息。以空间点为基本构成要素，其三维立体结构先由点组成线，然后由线组成面，最后再由面组成。因此，在双目立体视觉系统中，对空间点的位置进行测量是最为重要的^[16]。

双目立体视觉测量模型见图 3。如图 3 所示，从双目立体视觉模型可知，像素坐标系中的任一点可以对应相机坐标系中的一条直线，因此不能简单的由像素平面上的一点，通过投影矩阵 M 得到世界坐标系中的目标点。双目立体视觉采用两个摄像机机来进行图片拍摄，利用最小二乘法^[17]实现三维重建。

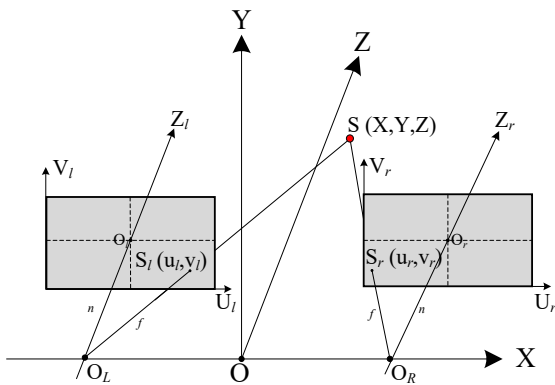


图 3 双目立体视觉测量模型

Fig. 3 Binocular stereo vision measurement model

假设空间一点 $S(X, Y, Z)$ 在左右相机上的投影像素坐标分别为 $S_l(u_l, v_l)$ 和 $S_r(u_r, v_r)$ ，可以得到：

$$A = \begin{pmatrix} m_{l31}u_l - m_{l11} & m_{l32}u_l - m_{l12} & m_{l33}u_l - m_{l13} \\ m_{l31}v_l - m_{l21} & m_{l32}v_l - m_{l22} & m_{l33}v_l - m_{l23} \\ m_{r31}u_r - m_{r11} & m_{r32}u_r - m_{r12} & m_{r33}u_r - m_{r13} \\ m_{r31}v_r - m_{r21} & m_{r32}v_r - m_{r22} & m_{r33}v_r - m_{r23} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$A = \begin{pmatrix} m_{l31}u_l - m_{l11} & m_{l32}u_l - m_{l12} & m_{l33}u_l - m_{l13} \\ m_{l31}v_l - m_{l21} & m_{l32}v_l - m_{l22} & m_{l33}v_l - m_{l23} \\ m_{r31}u_r - m_{r11} & m_{r32}u_r - m_{r12} & m_{r33}u_r - m_{r13} \\ m_{r31}v_r - m_{r21} & m_{r32}v_r - m_{r22} & m_{r33}v_r - m_{r23} \end{pmatrix} \quad (5)$$

消去 Z_l 、 Z_r 并表示成矩阵形式为： $A \cdot S = B$ ，

其中：

$$A = \begin{pmatrix} m_{l31}u_l - m_{l11} & m_{l32}u_l - m_{l12} & m_{l33}u_l - m_{l13} \\ m_{l31}v_l - m_{l21} & m_{l32}v_l - m_{l22} & m_{l33}v_l - m_{l23} \\ m_{r31}u_r - m_{r11} & m_{r32}u_r - m_{r12} & m_{r33}u_r - m_{r13} \\ m_{r31}v_r - m_{r21} & m_{r32}v_r - m_{r22} & m_{r33}v_r - m_{r23} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$S = (X \quad Y \quad Z)^T \quad (2)$$

$$B = \begin{pmatrix} m_{l14} - m_{l34}u_l \\ m_{l24} - m_{l34}v_l \\ m_{r14} - m_{r34}u_r \\ m_{r24} - m_{r34}v_r \end{pmatrix} \quad (3)$$

根据最小二乘法，解得空间点 S 的坐标为：

$$S = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (4)$$

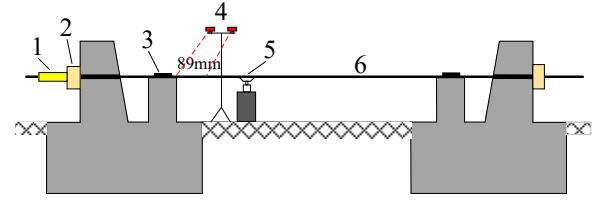
2 导线微风振动应变分布规律分析

2.1 试验设备

为了揭示导线微风振动动弯应变在线夹出口处动弯应变的分布规律，设计了基于 DIC 的动弯应变观测试验。

根据试验要求设计的试验测量平台见图 4，根据设计要求搭建的导线微风振动时线夹出口处动弯应变测量现场^[18-20]见图 5。试验档距^[21]为 12 m，有效档距为 8.6 m，所选用的钢芯铝绞线型号为 LGJ-120/20，导线直径为 15.07 mm，截面积为

134.49 mm²，铝绞线截面积为 115.67 mm²，钢芯截面积为 18.82 mm²，额定拉断力(RTS)为 41 kN。由于文中主要测量导线表面在振动过程中产生的应变，故取表面铝合金弹性模量为 68 MPa，泊松比为 0.32。



1—张拉端；2—固定端；3—悬挂固定端；4—3D-DIC 测量系统；5—激振系统；6—输电导线。

图 4 导线微风振动动弯应变测量平台

Fig. 4 Wind vibration dynamic bending strain measurement platform of wire



图5 导线微风振动动弯应变测量现场

Fig 5 Wire wind vibration dynamic bending strain measurement site

整个试验平台参照IEEE试验指南^[22]设计，由张拉端、固定端、悬挂固定端、激振系统以及3D-DIC测量系统组成。固定端参照GB/T 1179—2017《圆线同心绞架空导线》^[23]标准中介绍的树脂浇铸法制作的环氧树脂端头。张拉端采用丝锥和夹片固定，利用千斤顶进行张拉，并使用索力计实时监测试验导线张力。在整个试验过程中，导线张力保持稳定。除固定端和张拉端外，档中还设有与导线型号相匹配的线夹作为悬挂固定端，从而模拟导线在振动情况下线夹出口处情况。研究表明^[24]，导线微风振动激励力为

$$F_{\text{风}} = \frac{C_L \rho D V^2}{2} \sin \omega_s t \quad (10)$$

式(10)中： C_L 为微风升力系数； ρ 为空气密度，kg/m³； D 为导线直径，m； ω_s 为斯托罗哈圆频率， $\omega_s = 2\pi S V / D$ ，rad/s； V 为激振风速，m/s； S 为斯托罗哈常数； t 为时间，s。

由式(10)可知，微风激励力实际上是一种正弦

简谐力，其大小与风速、导线直径以及微风升力系数有关。当导线背风侧产生稳定的涡激力时，导线会做竖向周期性谐振。因此，可通过室内振动台为输电导线施加正弦激励力来模拟导线微风振动。激振系统由东华的 DH1301 型号的信号发生器、DH5874 型号的功率放大器以及 DH40200 型号的激振器组成，该激振系统具有 200 N 的激振力，能提供 1~1000 Hz 的正弦扫频、线性扫频和对数扫频激励信号，其额定峰-峰振幅为 10 mm，能够满足本次试验的要求，而且符合 IEEE 规范^[25]中对于激励力的要求。3D-DIC 测量系统由补光灯、两台高速摄像机以及包含软件分析的电脑组成，两台相机的分辨率均为 4096 pixel×3000 pixel，焦距为 50 mm，最大采集频率 60 fps。

2.2 3D-DIC 测量精度的验证

为了验证文中 3D-DIC 方法及系统的应变观测精度，设计了不锈钢棒拉伸试验及导线振动应变观测试验，钢棒拉伸试验场景见图 6。

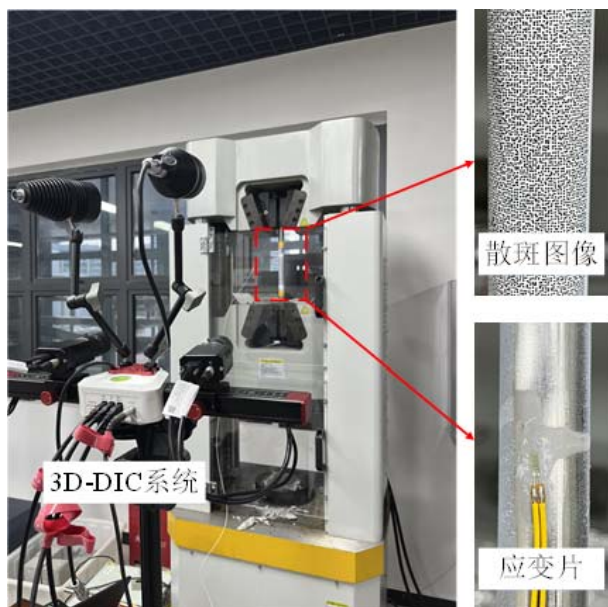


图 6 3D-DIC 验证试验

Fig. 6 3D-DIC validation test

测量前，首先进行相机标定，标定的结果见表 1、2。重投影误差为 0.07 pixel，这意味着标定的相机参数能够将三维空间中的点投影回图像平面，与实际观测到的图像点非常接近。

表 1 相机的内参

Table 1 Internal parameters of the camera

相机	内参矩阵	径向畸变
C_0	$A_0 = \begin{bmatrix} 14419.8 & 0 & 2012.68 \\ 0 & 14415 & 1520.37 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$(-0.07521, 6.01515)$
C_1	$A_1 = \begin{bmatrix} 14421 & 0 & 2089.9 \\ 0 & 14412.3 & 1529.86 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$(-0.14111, 10.2673)$

表 2 相机的外参

Table 2 External parameters between cameras

旋转向量/(°)	平移向量/mm	重投影误差/pixel
$[-0.000\ 930, 0.232\ 200, 0.002\ 031]$	$[-213.501\ 00, -0.608\ 99, 42.398\ 60]$	0.07

标定完成后，在试件表面喷涂均匀的散斑，并将电阻应变片固定于试件的背面进行对比观测。开启拉伸试验机，让相机拍摄与应变片处于

同一高度位置的散斑区域，记录实心钢棒变形及破坏全过程，应力应变测量结果见图7。

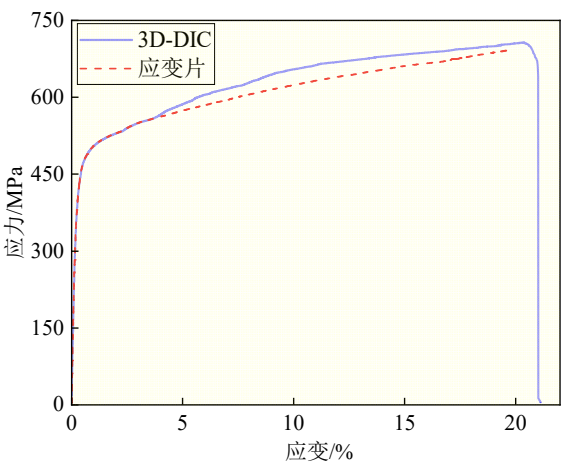
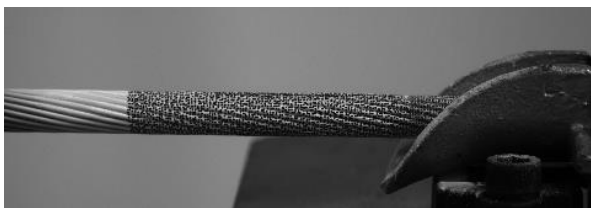


图 7 验证试验对比结果

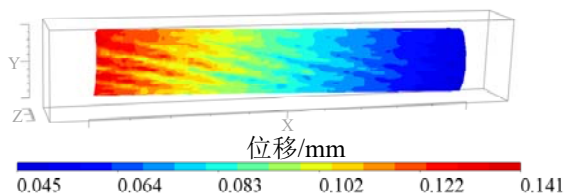
Fig. 7 Verify the comparative results of the test

由图7可见，弹性阶段和弹塑性阶段，3D-DIC 与应变片测量结果高度吻合，表明文中采用的3D-DIC方法及系统具有较高计算精度。此外，与应变片观测相比，3D-DIC不仅能观测弹性及塑性阶段的应变分布，还能够观测到试件破坏的下降段的结果。

因导线与钢棒在结构构造上有较大的区别，开展了导线振动应变观测对比试验。导线表面存在股间间隙，因此设计了一种新的散斑制作方法即覆盖式贴涂法，即先在导线表面喷涂白色哑光漆直至遮盖导线的股间缝隙，让导线表面更加平整，在后续测量中由于间隙处和股线处的应变和位移不一样，故能从测量结果中轻易区分出来。喷完底漆后再通过MATLAB生成随机斑点图像打印出来做成贴纸覆盖式的贴在导线上，尤其是在股间间隙处需要紧密的贴合在一起，不能留有空隙，否则在测量时，空隙处不仅会产生过高的曝光，而且测量值会远远脱离实际值。测量时 also 需要注意，像导线这样不光滑的表面在自然光照下会有亮度不均匀的情况，尤其是在股间间隙处，需要使用多个补光灯让导线整体的亮度统一。最终制作出来的散斑以及测量结果见图8。



(a) 线夹出口处散斑图



(b) 3D-DIC 测量结果样图

图 8 线夹出口处散斑图像以及测量结果样图

Fig. 8 Image of speckle at the outlet of clamp and sample of measurement results

使用激振系统让导线产生小频率的正弦振动，测量对比结果见图 9，两种方法测量的应变曲线高度吻合，以应变片观测结果为准，3D-DIC 平均测量误差约为 0.96%，表明覆盖式贴涂法能解决股间间隙问题，获得较高的观测精度。

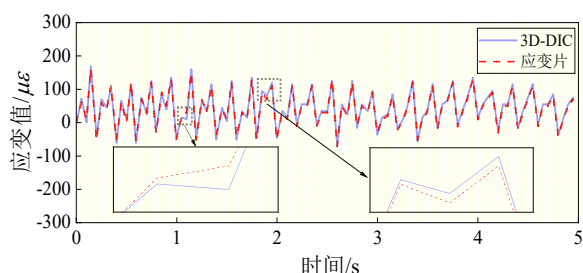


图 9 应变片与 3D-DIC 对导线测量结果对比

Fig. 9 Comparison of wire measurement results between strain gauge and 3D-DIC

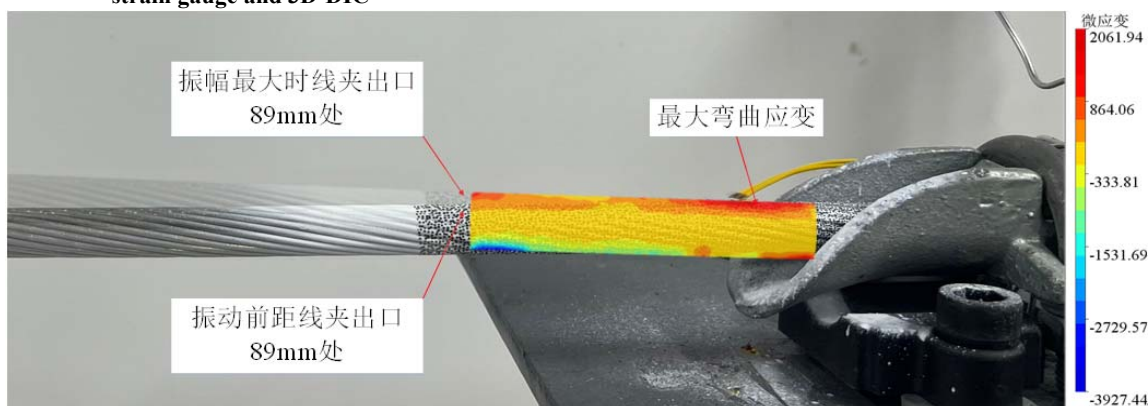


图 11 振幅最大时线夹出口处 89mm 内应变分布情况

Fig. 11 The strain distribution within 89mm at the outlet of the clamp when the amplitude is maximum

图 11 测量结果中，导线发生竖向振动时，上下边缘线股的应力最大，中间部分应变较小，符

2.3 线夹出口处动弯应变测量

工程实践中，架空输电线路导线运行张力一般不超过 25%RTS。用 3D-DIC 系统测量 25%RTS 下导线线夹出口处的应变，测量结果见图 10。线夹出口处的应变随着张力的增大而增大，当张力稳定时，应变也达到稳定值 $1487.4\mu\epsilon$ ，该应变值即为张力作用下导线产生的应变。

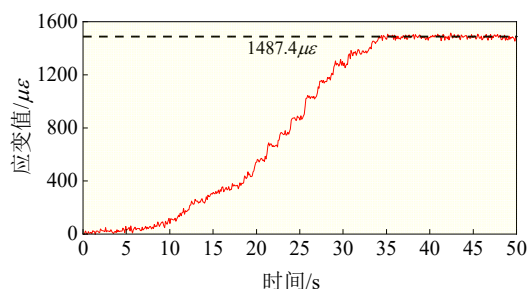


图 10 基于 3D-DIC 测量的张力作用下的应变

Fig. 10 Strain under tension based on 3D-DIC measurement

导线微风振动频率通常在几赫兹到几十赫兹之间，本次试验采用激振器产生振动，根据导线特征，选取张力为 25%RTS、频率为 35 Hz 作为试验工况，导线振动时的应变分布情况见图 11。

合受弯构件应变分布规律。沿导线方向，最大应变分布在线夹出口处附近一定的区域内，这与工程中导线因微风振动发生断股的位置一致。

3 动弯应变分析及计算方法优化

动弯应变是指导线在往复加载下的最大弯曲应变，一般通过测量线夹出口处 89 mm 的振幅 A_{89} 计算。文[26]中提出了动弯应变的计算表达式，对于不同的导线类型以及不同型号的导线均能进行计算，因此在工程中广泛应用，其表达式为

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \alpha \cdot \frac{4A_{89}C}{l^2} = \pm 1.4 \times 505 \times 0.5dA_{89} \times 10^{-6} \quad (11) \\ &= 354dA_{89} \times 10^{-6}\end{aligned}$$

式(11)中： α 为试验因数 1.4； d 为绞线外层股径。

式(11)的理论依据是将导线线夹出口处视为长 $l=89$ mm 的悬臂梁，认为其振动时在固定端产生最大弯曲应变即动弯应变。

LGJ-120/20 导线通过 3D-DIC 测量的线夹出口 89 mm 处位移变化曲线以及振幅最大时应变聚集区域的应变变化曲线见图 12。当振幅最大值为 0.3

2 mm 时，线夹出口处的最大弯曲应变值达到 2106.53 $\mu\varepsilon$ 。

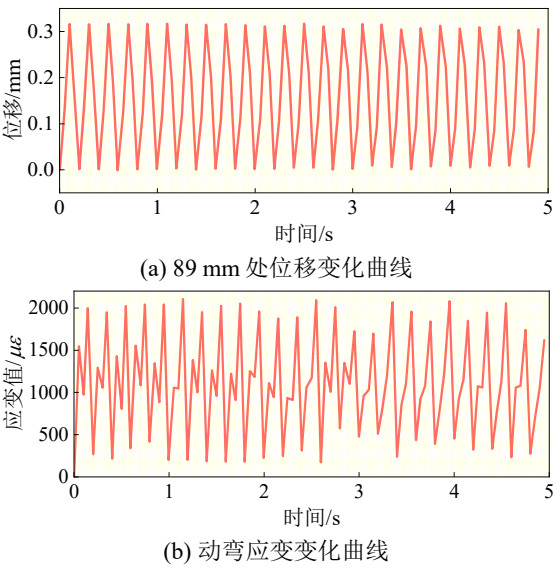


图 12 基于 3D-DIC 测量的位移和应变变化曲线
Fig. 12 Displacement and strain curves based on 3D-DIC measurements

将 d 和测量得到的 A_{89} 代入式(11)，得到动弯应变值为 269.6 $\mu\varepsilon$ ，而实际测量值为 2106.53-1487.4=619.13 $\mu\varepsilon$ ，计算值误差为 56.45%。为确保试验结果的可靠性和全面性，将张力分为 18%RTS、22%RTS、25%RTS，频率从 5 Hz 到 45 Hz 分为 9 组，每组间隔 5 Hz，开展多工况下的动弯应变观测，结果见表 3。

表 3 不同张力、频率下用公式计算动弯应变的误差

Table 3 Error of dynamic bending strain calculated by formula under different tension and frequency

张力/N	频率/Hz	误差/%		频率/Hz	误差/%		频率/Hz	误差/%	
		改进前	改进后		改进前	改进后		改进前	改进后
18%RTS	5	52.82	0.51	20	50.63	7.27	35	54.27	3.42
	10	48.45	9.35	25	39.66	10.24	40	52.70	5.74
	15	51.87	5.52	30	56.5	5.75	45	52.61	6.37
22%RTS	5	55.3	4.78	20	51.82	8.21	35	44.00	11.14
	10	55.74	6.14	25	47.45	10.67	40	50.61	10.00
	15	46.29	13.65	30	48.30	10.43	45	49.89	9.81
25%RTS	5	43.96	10.11	20	44.30	8.01	35	56.45	7.86
	10	41.53	9.96	25	53.33	1.39	40	51.30	9.40
	15	55.32	5.88	30	52.04	3.34	45	54.17	11.47

由表 3 的试验结果可知, 按照式(11)计算得到的动弯应变值与观测值相比, 误差均都在 40%~60%之间, 该结论与文[7]的观点一致。

在式(11)中, C 取 $0.5d$, d 绞线外层股径; A_{89} 是实际测量出来的距线夹出口 89 mm 处的振幅; A_{89} 和 d 在测量准确的情况下误差极小, 因此误差较大的原因在于 l 和 α 这两个因素。相关研究^[27]也表明, 式(11)误差来源于常系数会随着频率、张力和刚度等因素变化, 而在本质上, 频率和张力的变化实际上影响的是振幅。常系数由悬臂梁长度 l 和试验因数 α 决定, 因此文中考虑通过试验结果来修正 l 和 α 值。

不同振幅下最大弯曲应变的分布情况见图 13, 最大弯曲应变产生的位置(下文统称为弯曲位置)与固定端之间有一定距离, 与式(11)的假定存在差异, 因此将弯曲位置作为固定端, 由此确定 l 更具合理性。

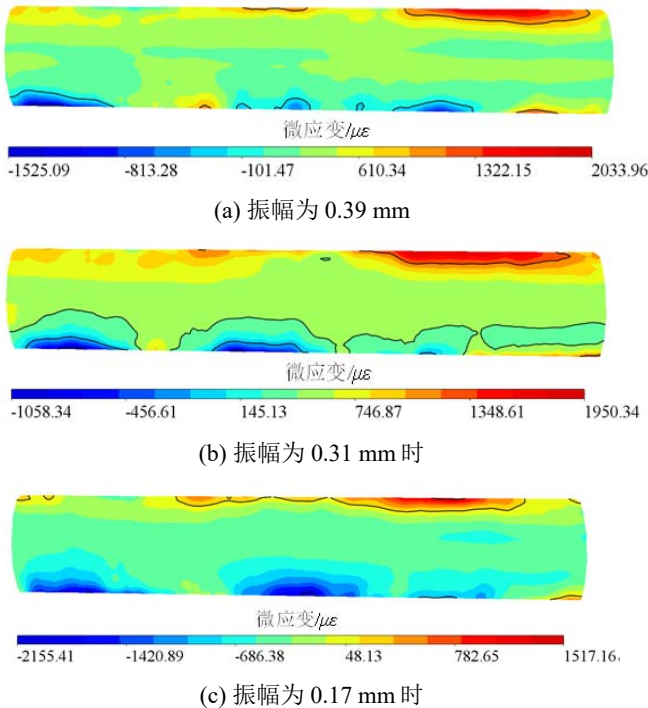


图 13 不同振幅下动弯应变分布位置

Fig. 13 Position of dynamic bending strain distribution under different tension and frequency

除去频率和张力等因素, 导线横截面直径对弯曲位置也存在影响。基于此, 文中将式(11)改进为

$$\varepsilon = \alpha_0 \cdot \frac{4A_{89}C}{(89-k \cdot r)^2} \quad (12)$$

式(12)中: C 与改进前的原公式相同, 为导线外表面到弯曲中性层的距离, 取 $0.5d$; α_0 为修正后的试验因数; r 为导线截面半径; k 为与振幅 A_{89} 相关的弯曲系数。

式(12)是根据型号为 LGJ120/20 的钢芯铝绞线在试验过程中表现出来的振动特征进行修正的, 其中, 修正后的 r 以及绞线外层股径 d 的取值均由导线的线型决定, 同时 k 的取值具有不确定性, 旨在让修正后的公式能够适用于不同型号钢芯铝绞线的动弯应变计算, r 的引入也让不同线型导线的动弯应变计算结果更加精确。

在式(12)中采用弯曲系数和截面半径的乘积来表示弯曲位置, l 也相应的修正为原长度减去弯曲位置即 $89-k \cdot r$, 根据试验得到的表 4 中不同振幅下的弯曲位置数据利用最小二乘法拟合得到

$$k = -4.172 \cdot A_{89} + 1.656 \quad (13)$$

表 1 不同工况下的弯曲位置

振幅 A_{89}/mm	弯曲位置/mm
0.054	13.37
0.100	9.41
0.150	6.06
0.180	5.02
0.230	4.23
0.310	3.07
0.320	2.57
0.340	2.14
0.390	1.22

其拟合曲线以及残差分布情况见图 14，由图 14(a)可知，大部分实际数据点与拟合曲线非常贴近；而图 14(b)中 A_{89} 的残差随机分布在 $y=0$ 附近，表明该改进公式没有忽略重要的变量，且拟合得当。

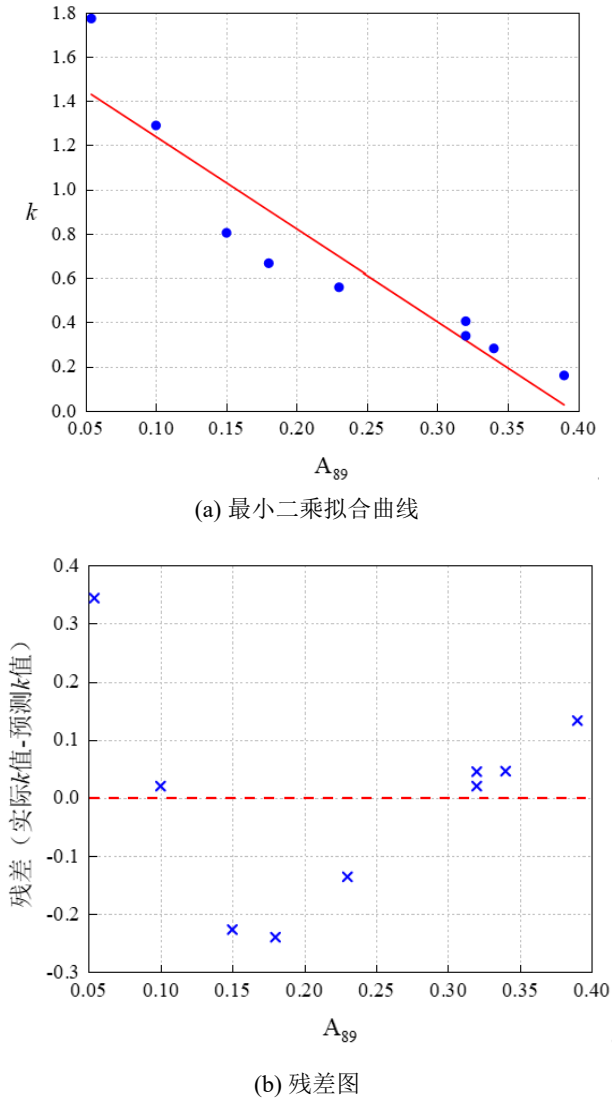


图 14 拟合曲线及残差图
Fig. 14 Fit curves and residual plots

修正 l 后的动弯应变计算公式误差有所减小，但仍然不够贴近实测值，因此，文中还对验因数 α 进行了修正。应用多个不同的 α 值计算理论动弯应变，并将其与实际测量值进行比较，使用线性回归模型来评估各个 α 值的效果。在此过程中，回归分析精确地确定了最适合的试验因素 α_0 。拟合优度(即 R^2)是一个衡量模型对数据拟合程度的统计指标，取值范

围在 0 到 1 之间。结果显示，当试验因子 α 设定为 2.67 时，回归模型的拟合优度为 0.933，代表该模型能够解释数据方差的 93.3%，证明了修正后的试验因数在很大程度上能够准确匹配实验数据与理论模型之间的关系。用改进后的公式重新计算各个工况下的动弯应变，并实际值进行对比，误差显著降低(表 3)。

4 结论

通过 3D-DIC 验证试验和线夹出口处动弯应变测量值与计算值的对比试验可以得出以下结论：

1)3D-DIC 技术可清晰、准确测量输电导线微风振动动弯应变分布情况，为输电线路的结构监测提供了一种新的非接触测量手段。

2)试验研究表明，传统动弯应变计算表达式计算值存在较大误差。以 LGJ-120/20 型导线在试验过程中表现出来的振动特征为基础，对公式中的常数 l 和 α 进行修正，提出了一种导线动弯应变的改进计算公式。试验结果对比分析表明，修正后的计算公式能够将计算精度提高到 90%以上，验证了该改进公式的合理性。

参考文献：

- [1] 齐 翼，芮晓明，朱宽军，等. 特高压大跨越输电线路防振设计系统的研究[J]. 中国电力，2017，50(2): 5-10.
QI Yi, RUI Xiaoming, ZHU Kuanjun, et al. Research on anti-vibration design system for UHV large crossing transmission line[J]. Electric Power, 2017, 50(2): 5-10.
- [2] 张国栋，赵彦芬，薛 飞，等. P91 钢蠕变-疲劳交互作用应变特征与寿命预测[J]. 中国电力，2011，44(10): 54-59.
ZHANG Guodong, ZHAO Yanfen, XUE Fei, et al. Strain performance and Life prediction for P91 steel under creep-fatigue interaction[J]. Electric Power, 2011, 44(10): 54-59.
- [3] 黄新波，赵 隆，舒 佳，等. 输电线路导线微风振动在线监测技术[J]. 高电压技术，2012，38(8): 1863-1870.

- HUANG Xinbo, ZHAO Long, SHU Jia, et al. Online monitoring conductor aeolian vibration of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1863-1870.
- [4] 张 昭, 周立宪, 齐 翼, 等. 大跨越导线微风振动强度影响因素[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(4): 710-714.
- ZHANG Zhao, ZHOU Lixian, QI Yi, et al. Study on working frequency band of six-axis accelerometer based on stewart derivative configuration[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(4): 710-714.
- [5] 司伟杰, 黄新波, 赵 隆, 等. 输电导线微风振动疲劳损伤机理[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 108-114.
- SI Weijie, HUANG Xinbo, ZHAO Long, et al. Fatigue damage mechanism on breeze vibration of transmission conductors[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 108-114.
- [6] CLAREN R, DIANA G. Dynamic strain distribution on loaded stranded cables[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, PAS-88(11): 1678-1690.
- [7] 卢明良. 夹头出口处导线动弯应变与弯曲振幅关系的理论分析[J]. 东北电力技术, 1995(4): 7-10.
- LU Mingliang. Theoretical analysis of the relationship between dynamic bending strain and bending amplitude of conductor at clamp outlet[J]. Northeast Electric Power Technology, 1995(4): 7-10.
- [8] GAO T, XIA Q. Experimental and numerical study of a shunt structure for large dynamic strain measurement[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(23): 8403-8411.
- [9] 谢瑞丽, 许 巍, 陈 新, 等. 基于单高速相机 3D-DIC 的涡轮叶片全场振动测量[J]. 振动、测试与诊断, 2024, 44(1): 18-23.
- XIE Ruili, XU Wei, CHEN Xin, et al. Full-field vibration of turbine blade based on single-camera high-speed 3D digital image correlation[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(1): 18-23.
- [10] 程月华, 吴 昊, 薛一江, 等. 高速 3D-DIC 测试技术在装甲钢贯穿试验中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(10): 109-123.
- CHENG Yuehua, WU Hao, XUE Yijiang, et al. Application of high-speed 3D-DIC measurement technology in perforation test of armor steel[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(10): 109-123.
- [11] 范 杰, 朱 星, 胡桔维, 等. 基于 3D-DIC 的砂岩裂纹扩展及损伤监测试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1009-1019.
- FAN Jie, ZHU Xing, HU Jiewei, et al. Experimental study on crack propagation and damage monitoring of sandstone using three-dimensional digital image correlation technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4): 1009-1019.
- [12] YIN Yuanjie, HE Wei, XIE Huimin, et al. High-temperature fatigue crack propagation study of superalloy GH4169 by single-lens 3D digital image correlation[J]. Science China Technological Sciences, 2020, 63(4): 693-704.
- [13] 李光乐, 黄文有, 刘青松, 等. 面向水下双目视觉的改进张氏标定方法及实验[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 211-216.
- LI Guangle, HUANG Wenyou, LIU Qingsong, et al. Improved zhang's calibration method and experiments for underwater binocular stereo-vision[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 211-216.
- [14] 邓 斌, 林文文, 于兰英, 等. 基于双目视觉的接触网绝缘子三维位置重建[J]. 高压电器, 2017, 53(10): 105-110.
- DENG Bin, LIN Wenwen, YU Lanying, et al. The 3D Reconstruction of catenary insulator based on binocular vision[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 105-110.
- [15] 叶 沛, 张 梅, 马万龙, 等. 用于数字图像相关位移测量的一种改进爬山算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 279-285.
- YE Pei, ZHANG Mei, MA Wanlong, et al. Improved climbing algorithm for digital image correlation displacement measurements[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 279-285.
- [16] 陈 念, 李 进, 王海晖. 双目立体视觉测量系统的研究与实现[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(5): 101-105.
- CHEN Nian, LI Jin, WANG Haihui. Research and implementation of measurement system based on binocular stereo vision[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2011, 33(5): 101-105.
- [17] 尚 倩, 阮秋琦, 李小利. 双目立体视觉的目标识别与定位[J]. 智能系统学报, 2011(4): 303-311.
- SHANG Qian, RUAN Qiuqi, LI Xiaoli. Target recognition and location based on binocular stereo vision[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2011(4): 303-311.
- [18] 卢 冰, 张 军, 王 昊, 等. 输电线路微风振动在线监测装置计量标准器的研制[J]. 高压电器, 2016, 52(9): 143-147.

- LU Bing, ZHANG Jun, WANG Hao, et al. Development of online monitoring reference devices for transmission line aeolian vibration[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9): 143-147.
 - [19]黄新波, 潘高峰, 司伟杰, 等. 基于压电式加速度计的导线微风振动传感器设计[J]. 高压电器, 2017, 53(4): 92-99.
HUANG Xinbo, PAN Gaofeng, SI Weijie, et al. Design of traverse breeze vibration sensor based on the piezoelectric accelerometer[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4): 92-99.
 - [20]陈文轩, 覃兆宇, 潘哲哲, 等. 全光纤微风振动监测传感器研制[J]. 高压电器, 2016, 52(5): 109-115.
CHEN Wenxuan, QIN Zhaoyu, PAN Zhezhe, et al. Development of fiber-grating breeze vibration monitoring sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 109-115.
 - [21]汪晶毅, 潘春平, 朱映洁. 国内外架空输电线路档中线间距设计的对比研究[J]. 中国电力, 2017, 50(11): 90-95.
WANG Jingyi, PAN Chunping, ZHU Yingjie. Comparative research on mid span clearances of overhead transmission lines design between domestic and foreign standards[J]. Electric Power, 2017, 50(11): 90-95.
 - [22] IEEE guide for laboratory measurement of the power dissipation characteristics of aeolian vibration dampers for single conductors: IEEE Std 664—1993[S].1993.
 - [23] 圆线同心绞架空导线: GB/T 1179—2017[S].2017.
Round wire concentric lay overhead electrical stranded conductors: GB/T 1179—2017[S].2017.
 - [24]汪 峰, 彭 章, 黄欲成, 等. 防振锤对大跨越输电线路微风振动影响的试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(3): 563-569.
WANG Feng, PENG Zhang, HUANG Yucheng, et al. Experimental study on the influence of vibration dampers on the aeolian vibration of transmission lines[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(3): 563-569.
 - [25]YIN W, LIN L. Study on vibration monitoring and anti-vibration of overhead transmission line[J]. Nonlinear engineering, 2021, 10(1): 395-403.
 - [26]孟遂民, 孔 伟, 唐 波. 架空输电线路设计[M]. 第 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2015.
MENG Suimin, KONG Wei, TANG Bo. Design of overhead transmission lines[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
 - [27]邵天晓. 架空送电线路的电力学计算[M]. 第 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2003.
SHAO Tianxiao. Wire mechanics calculation of overhead transmission lines[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- 姜 岚(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事输电线路工程结构振动与控制方向的研究工作 (E-mail: jl@ctgu.edu.cn).
- 陶文心(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事基于图像处理的输电线路动力学工作(E-mail: 1534694572@qq.com)。