

基于单目视觉的架空导线风致面内振动测试*

陈晓娟¹, 郭振东¹, 韩梦阳¹, 王璋奇², 王占南²

(1. 内蒙古科技大学机械工程学院 包头, 014010)

(2. 华北电力大学机械工程系 保定, 017013)

摘要 为降低架空导线振动测试系统的复杂度,减小在线传感器带来的负载效应,笔者设计了一种基于单目视觉原理的图像分析法。首先,以普通消费级相机为测试工具,以图像模板匹配目标定位技术为核心,开发架空输电导线面内振动位移的非接触测量方法;其次,开展导线模型在局部风场作用下沿跨多点面内位移时程信号测试实验,对导线面内振动位移与典型测点频谱规律进行详细分析;最后,讨论在局部涡激载荷作用下,导线模型面内振动位移时空演化规律与频谱特性。结果表明:该方法具有操作简单便捷、成本低廉等优势,且能够稳定提取长柔结构沿跨多点的同步瞬时位移,是对目前其他传统测试方法的有益补充;局部区域的涡激力可以引起整档导线的稳定面内运动,振型呈显著的驻波振动,具有明显的波腹和波节特征,测点频谱表现出单一模态主导的多频振动特性。

关键词 输电导线;图像分析;位移测量;局部涡激励;微风振动

中图分类号 O329; TM75; TH113

引言

架空输电线路是电力远距离传输的重要方式,而输电导线大跨、高柔、自阻尼小的结构特点,导致其在复杂环境载荷作用下常发生多种振动现象。其中,导线微风振动^[1]在线路运行中发生的概率大、持续时间长、振动频率高,严重影响导线的疲劳寿命,尤其当线路跨距大、地形开阔平坦时问题更为突出,危及线路安全运行^[2]。

线路振动测试结果是线路振动机理研究和减振优化设计的主要依据。笔者在前期研究中,考虑实际风载荷的垂直切变特性,提出了大跨越导线微风振动的局部锁定机理^[3-4],从理论层面分析了导线在局部点源激励下微风振动波的传播演化。基于前期研究,开展局部涡激载荷作用下的导线振动位移测试,是进一步验证大跨越导线微风振动局部锁定机理的有效途径。

目前,位移测试中常规接触式和非接触式技术已较为成熟。然而,导线的细长柔性悬索结构使得位移测试仍面临经济和技术上的双重挑战。一方面,接触式测试往往需要将传感器固定或紧贴在所测结构表面,给小直径的多股圆截面导线的安装造

成困难;另一方面,在进行多点测量时,传统动位移测试布线复杂、费用较高,且存在负载误差。非接触式测量技术分为主动感知系统和被动视频系统,主动感知系统如激光位移计,通过检测返回信号来获得导线的位置信息,测试中易受到多种条件的限制。因此,研究适用于导线风致振动的位移测量方法,获取振动相关参数,对国电力事业高速稳定发展具有重要意义。

视频图像法作为一种非接触测量方法,主要基于计算机视觉原理识别和描述实验现象,已成为一种有效的振动测试替代方案^[5-6]。文献[7]基于数字图像相关方法,开展了输电导线风致动态位移测试实验研究。文献[8]基于图像边缘识别,提出了一种面内振动位移测试新方法。文献[9]基于双目视觉原理,开发了输电线脱冰轨迹监测系统,研究了导线脱冰跳跃后的振动轨迹特征。文献[10]基于图像分析,提出了一种架空导线弧垂测量新方法。

本研究中,笔者采用自主开发的基于单目视觉原理的图像分析方法,对架空输电导线在局部涡激力作用下的面内振动进行测量与分析。采用普通消费级相机作为测试工具,设计可灵活进行多点、非接触式动位移测试的新方法。并通过搭建测试系统,

* 内蒙古自然科学基金资助项目(2019MS05009, 2024LHMS05023);内蒙古自治区直属高校基本科研业务费资助项目(2022QNJS054)

收稿日期:2023-03-11;修回日期:2023-06-14

开展局部涡激力作用下导线模型沿跨多点瞬时位移的测试与分析,探讨导线风致位移响应的演化规律和频谱特性,为输电导线微风振动机理及其风致位移响应研究提供参考。

1 单目视觉位移测量方法

单目视觉原理的位移测量方法是基于数字图像技术对运动目标进行检测,实质是利用计算机对单目相机采集的视频信息进行处理,获得视频的数字图像帧序列文件。以改进的图像模板匹配算法对图像序列之间的待检测目标进行识别,并计算其垂直方向偏移量,从而得到检测目标的运动信息。

在灰度图像模板匹配方法^[11]的基础上,采用判断相似性分层匹配算法,以快速、准确地提取导线数字图像信息中待测目标点的边缘特征。该算法的基本原理是认为帧序列图像中相邻图形的背景区域基本不变,并采用先粗后精的匹配定位方法,判断两个灰度矩阵的相似性,进而判断两幅图像的相似性。

图 1 为基于单目视觉的导线振动测量。首先,

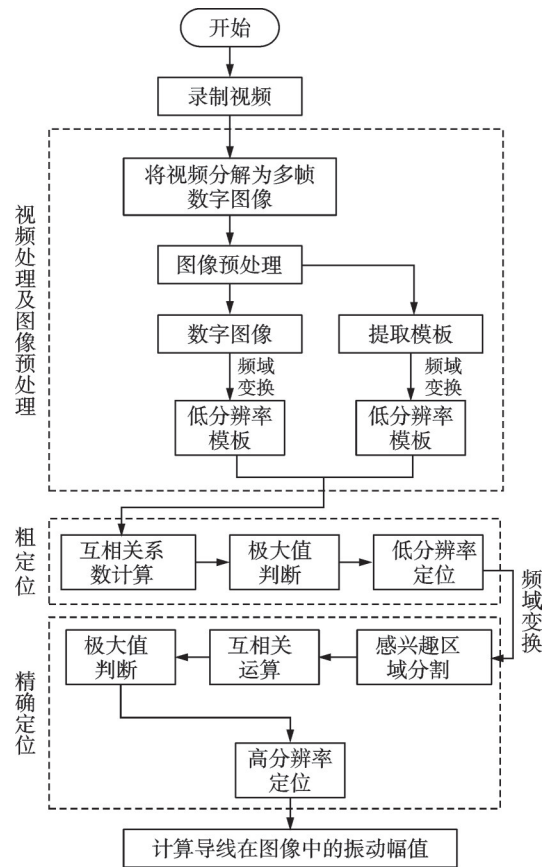


图 1 基于单目视觉的导线振动测量
Fig.1 Measurement of conductor vibration based on monocular vision

利用小波提升算法在频域中降低目标模板和图像序列的分辨率,再通过互相关运算得到低分辨率下的目标定位点;然后,将感兴趣区域划分为小尺寸图像传递给精确匹配环节。小波提升算法对图像频域变换时,将初始图像信号分裂为偶序列和奇序列,先通过对奇序列的信号处理进行偶序列预测,再通过预测偶序列的误差反过来更新奇序列,反复此过程完成一级小波提升变换。

采用小波提升变换算法进行频域内的信号变换,以构建低分辨率图像。在低清晰度的待检测图像序列中,对经过小波处理的待检测目标物体模板进行全局匹配,获得匹配坐标的位置并完成低精度定位。随后,将粗定位得到的坐标位置信息反馈到高清图像序列中进行感兴趣区域分割,减少高清待检测目标物体模板匹配的检测区域,缩短目标检测时间,得到待检测目标物体高精度的定位信息。

2 局部风场作用下导线面内振动实验

2.1 实验系统介绍

实验在华北电力大学输电线路工程实验室进行,以大跨越连续体单导线模型为实验对象,模拟大跨越单导线在局部涡激载荷作用下的振动特性。图 2 为实验系统示意图,展示了架空输电导线模型在局部涡激力作用下的微风振动测试实验装置。实验系统主要由导线模型、图像采集系统和局部风场装置 3 部分组成。

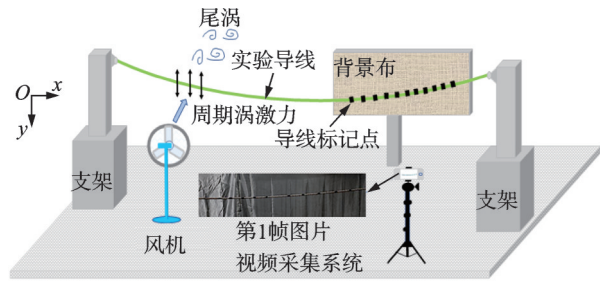


图 2 实验系统示意图
Fig.2 Schematic diagram of experimental system

2.1.1 导线模型

受实验室空间条件限制,导线模型采用缩尺模型。考虑到大跨越导线的长柔特性,基于实验模型的几何相似和边界相似特性,在导线模型长径比限定的条件下,采用抗弯刚度较小的圆截面多股绞绳代替实验导线,导线模型等高悬挂于反力架上。实验导线相关参数如表 1 所示。

表 1 实验导线相关参数				
Tab.1 Parameters of testing conductor				
实验挡距/m	长度/m	直径/mm	密度/(kg·m ⁻³)	长径比
8.7	8.94	10	0.065	894

2.1.2 局部风场模拟

为模拟导线展向局部区域来流风速与导线结构之间可能存在的涡振锁定现象^[12],通过一台自制三挡调频风机在导线展向区域施加局部风场。如图 2 所示,为降低来流风场的湍流度,制作了三叶平直扇叶结构,扇叶外罩直径为 0.8 m。考虑局部锁定的随机性,结合实验目标,扇叶中心距左侧挡端 2.5 m,外罩前端面距离导线 0.5 m。实验中风扇叶面与导线轴线保持平行。

实验前,在风扇外罩前端 0.5 m 处反复多次测试来流风速,实验挡条件下风扇中心风速均值为 3.9 m/s,左侧扇叶中部风速均值为 3.5 m/s,边缘风速均值为 2.9 m/s。实验风场雷诺数为

$$Re=du/\nu$$

(1)

其中: d 为导线直径; u 为来流风速; ν 为空气运动黏度,取 $14.8\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ 。

Re (在 1 959~2 635 范围)处于涡激振动发生的亚临界区^[13],实验设计与实际导线微风振动流场性力相似。

2.1.3 视频采集装置

采用视频图像法采集局部风场作用下导线的面内振动位移响应。使用普通相机为工具,依托自主编程的视频图像分析程序,对导线标记点的面内运动轨迹进行提取分析。为提高标记点信号采集的准确性,在视频采集区域安装与标记点具有反差色的纯色背景布。采样前调整摄像头高度和角度,保证所有标记点包含在画面内。

2.2 实验方法与测点布置

实验中,调节导线模型张力和风扇功率,以实现反复观察到导线模型在局部来流风作用下发生垂直平面内稳定振动的目的。为准确描述导线的波动特征,同步采集了导线展向标记测点的运动视频信号。以自主开发的基于单目视觉原理的多帧图像分析法为手段,分析导线面内振动波的图像信号。

布置测点时须保证多测点振动信号的同步性,全部测点均包含在同一视频画面中,避免测点出现在画面边缘。受画面视域范围限制,在对导线稳定运动实验现象多次观察后,最终选择在导线振动的

一个波节附近和其中一节波腹区域布置测点,分别采集导线 2 个局部区域的振动波形,称为区域 1 和区域 2,两区域内紧密布置有效目标测点 11 个,以便准确捕捉波动区域的特征信息。为方便后续提取标记目标图像,预先将标记点涂黑。

3 动力响应特性

3.1 区域 1 测点振动信号分析

图 3 为标记测点的面内振动轨迹,展示了区域 1 导线的相关情况,图中横、纵坐标均为无量纲像素坐标。受初始弧垂的影响,各测点在图像中的初始 y 像素坐标有所不同,图中自左向右的 11 条线对应导线自左向右的 11 个标记点的横向运动轨迹。图中标注数字为各测点横向振幅的峰值,测点 1 到测点 3 的振幅分别从 18 个像素坐标逐次降低到 12 个。测点 4 的像素幅值最小,其次是测点 5,测点 6 到测点 11 的振幅像素坐标从 12 个逐步增大到 22 个。

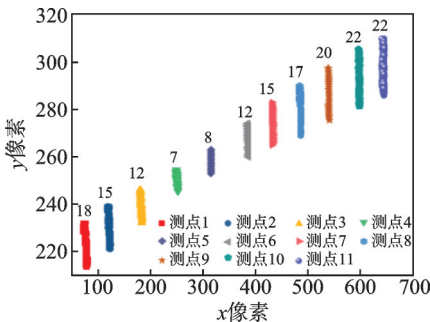


图 3 标记测点的面内振动轨迹
Fig.3 In-plane vibration tracks of measuring points

为直观表达导线的波动形态,消除初始弧垂对波动形态的影响,绘制了标记测点的面内相对振幅,如图 4 所示。图中可清晰观察到各测点以不同幅值在其平衡位置横向运动。

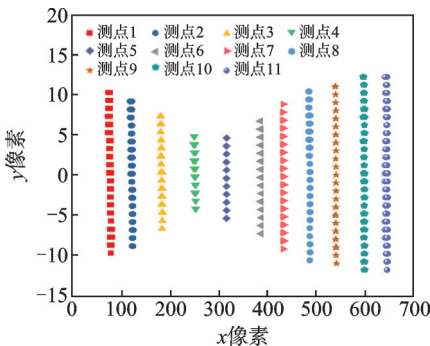


图 4 标记测点的面内相对振幅
Fig.4 Relative amplitude of measuring points

图5为测点1~11时程信号图,图中自下而上的11条曲线分别对应导线模型中自左向右的11个测点。在局部涡激载荷下,各测点在其平衡位置的时程信号具有较好的周期性和稳定性。与其他测点相比,测点4和测点5的横向振幅较小,且测点4、5两侧的目标测点振动频率基本一致但相位相反。由此可知,测点4、5附近为驻波的理想波节位置,这与图4中观察到的现象一致。

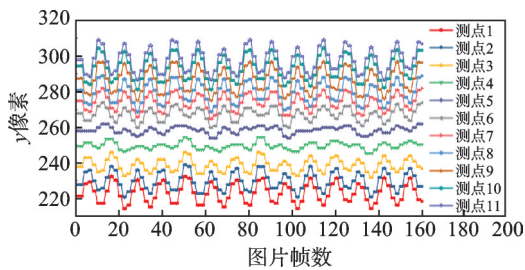


图5 测点1~11时程信号图

Fig.5 Time history signal diagram of measuring points 1—11

图6为目标测点2、3、4、5、9、11的幅频响应图。尽管实验中导线振动呈现出稳定的驻波运动,但实际测试发现,除主频外,导线的运动中还存在着多种其

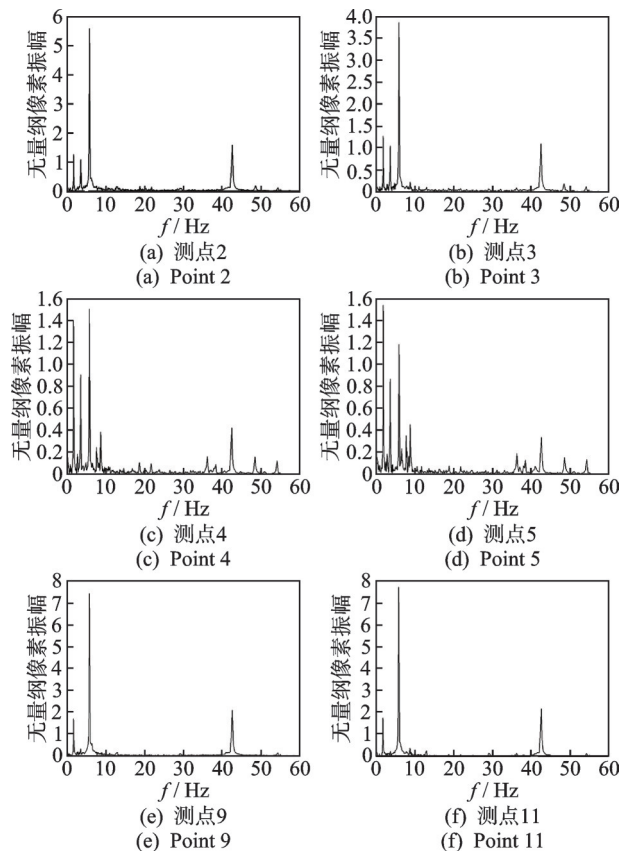


图6 目标测点2、3、4、5、9、11的幅频响应图

Fig.6 Amplitude-frequency responses of measuring points 2, 3, 4, 5, 9, and 11

他频率成分。测点2、3、9、11为分布在波节两端的典型测点,由图6(a)、(b)、(e)、(f)知,振动频率表现为以 $f=6.11$ Hz为主导的多频振动特性。如图6(c)、(d)所示为节点附近测点4、5的幅频响应,两测点的振动频率成分复杂,不再存在显著的单一卓越频率。

实验 Re 范围内,斯特劳哈数 St 近似恒定在0.2。圆柱结构尾涡脱落频率为

$$f_s = St u / d \quad (2)$$

实验风速下理论涡脱频率在5.8~7.8 Hz间。实验中图像识别的导线稳定振动主频率为6.11 Hz,与理论涡脱频率基本吻合。这说明整挡导线的运动是由尾涡激励引起,表明局部涡激力可引起整挡导线的稳定驻波运动,验证了笔者提出的导线微风振动局部锁定理论的合理性^[12]。此外,吻合结果也说明基于单目视觉的图像测试精度可用于导线微风振动频率的识别。

与理论计算涡脱频率均值的6.8 Hz相比,实测频率略偏低。笔者认为原因在于中心风速偏大。实际上,风扇直径区域中端部风场对整体风速影响更为显著,故实测导线频率略低于计算均值是合理的,这证实了识别的频率结果是可靠的。

为更加清晰地描述该区域内导线的横向波动形态,绘制了如图7所示的一定时间内导线波节区域时空信号图。图中横坐标为实验中标记测点在图像中的 x 像素坐标,纵坐标为测点的横向相对像素坐标,图中曲线反映了某一时刻导线的运动形态,不同颜色曲线代表不同时刻导线的所处位置。在水平像素坐标300附近,导线的运动轨迹表现出小幅度的振动,约为7个像素坐标。在导线右侧水平像素坐标650附近,为导线振动的波腹位置,约为22个像素坐标,与后文采集的波腹信号基本一致。

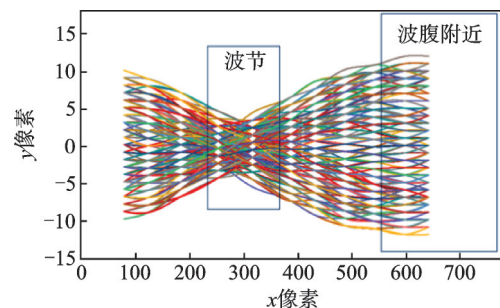


图7 一定时间内导线波节区域时空信号图

Fig.7 Space-time signals of conductor wavenode region for a period of time

3.2 区域2测点振动信号分析

实验观察到在局部风激励作用下,整挡导线形

成了稳定的驻波振动。受条件限制,图7仅采集到导线部分区域的振动形态,未能将整档导线的驻波运动在一部视频中完全展示。为更好地描述整档导线的运动形态,实验同时采集了导线另一局部区域的振动信号。图8为导线区域2标记测点的振动轨迹图,图中测点1和测点11的位移峰峰值均为7个像素坐标,测点6、7、8的像素坐标分别为20、21、20个,与区域1采集的最大和最小振幅值基本一致。

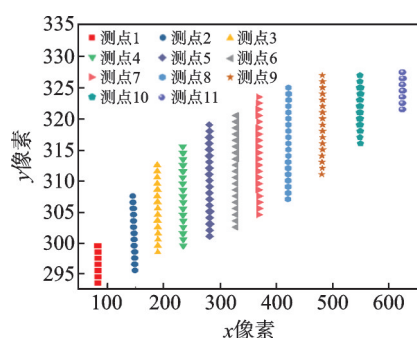


图8 导线区域2标记测点的振动轨迹图

Fig.8 Vibration tracks of measuring points in region 2

图9为一定时间内导线波腹区域时空信号图,图中每条曲线反映了某一时刻导线的运动形态,不同颜色曲线代表不同时刻导线的位置。图中可清晰观察到导线驻波振动的波腹和波节特征。

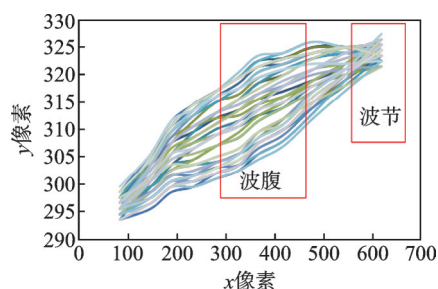


图9 一定时间内导线波腹区域时空信号图

Fig.9 Space-time signals of conductor wavebelly region for a period of time

为消除初始弧垂的影响,进一步绘制了一定时间内导线波腹区域相对位移时空信号图,如图10所示。综合分析可知,实际导线振动中,波节处并不是理想的静止状态,而是表现出一定幅度的小幅振动。局部激励以行波的形式向导线内输入能量,行波的传播依靠导线各点的横向振动来实现,因而实际导线中展向各点均会发生振动。分析可知,局部风激励发出的脉冲波沿导线展向以行波方式向两侧档端传播,传播到固定约束的档端时以反射波形式返回。若系统没有损耗,两列反射波相遇后,便形成

理想波节,即节点处不发生运动,而波腹处的振幅为两列波的叠加。实际导线阻尼的存在必然引起波的衰减,波节必然发生运动,其振幅等于入射波和反射波之差。波节振幅和波腹振幅的比值反映了导线内能量的损耗,比值越大,导线系统阻尼越大。

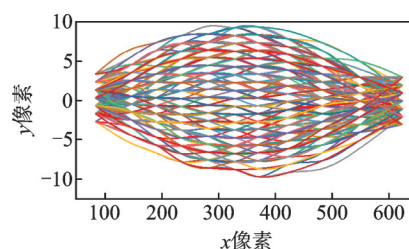


图10 一定时间内导线波腹区域相对位移时空信号图

Fig.10 Space-time signals of relative displacement in the wavebelly region of the conductor for a period of time

图11为目标测点3、6、9、11的幅频响应图。图11(a)、(b)、(c)中,频率响应均表现出单一频率主导的多频振动特性。图11(d)中,靠近波节处的测点11未出现明显的卓越频率,而是表现出复杂的多频振动特征,与区域1测点幅频响应特性完全一致。

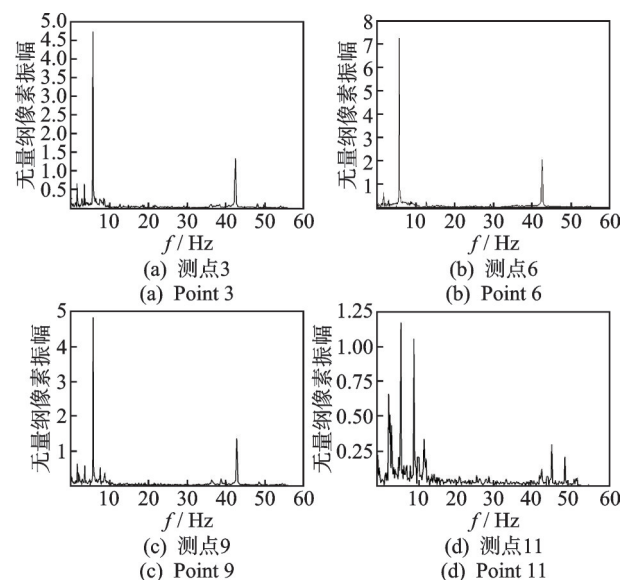


图11 目标测点3、6、9、11的幅频响应图

Fig.11 Amplitude-frequency responses of measuring points 3, 6, 9, and 11

4 结论

1) 笔者自主编程的图像测量技术能够灵活稳定地进行多点同步位移数据采集,测量工作量少,便于实现且成本低,识别的面内振动主频率与理论涡激频率具有较好的一致性。

2) 实验测量结果证实,局部涡激力可引起整挡导线面内稳定驻波振动。实际导线阻尼使得驻波运动中不存在理想波节,即不存在波质点为零的情况。

3) 局部涡激力作用下,整挡导线的频率响应表现出单一频率主导的多频振动特征,特别是在波节处,表现出相对复杂的多种频率成分特征,具有非线性振动特性。

参 考 文 献

- [1] 孙晓光,安利强. 架空导线的振动分析及计算机仿真[J]. 电瓷避雷器, 2007(3): 17-19, 23.
SUN Xiaoguang, AN Liqiang. Vibration analysis of overhead wires and simulate realism[J]. Insulators and Surge Arresters, 2007(3): 17-19, 23. (in Chinese)
- [2] 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, 830-831.
ZHANG Zhao, ZHOU Lixian, QI Yi, et al. The main influencing factors of the vibration intensity of large crossing conductor under aeolian vibration[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(4): 710-714, 830-831. (in Chinese)
- [3] 陈晓娟,王孟,王璋奇,等. 大跨越导线在局部激励下微风振动的格林函数解[J]. 振动工程学报, 2019, 32(5): 822-829.
CHEN Xiaojuan, WANG Meng, WANG Zhangqi, et al. Green's function solution for aeolian vibration of long-span conductors under local excitation[J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(5): 822-829. (in Chinese)
- [4] 陈晓娟,王璋奇. 大跨越导线在局部激励下微风振动的波动特性[J]. 振动工程学报, 2021, 34(2): 262-270.
CHEN Xiaojuan, WANG Zhangqi. Response characteristics for aeolian vibration of long-span conductors under local excitation[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(2): 262-270. (in Chinese)
- [5] CHEN J, DAVIS A, WADHWAN, et al. Video camera-based vibration measurement for civil infrastructure applications[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2017, 23(3): B4016013.
- [6] 周云,程依婷. 基于数字图像相关理论的非接触式结构位移测量方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(5): 1-9.
ZHOU Yun, CHENG Yiting. Non-contact structural displacement measurement based on digital image correlation method[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 48(5): 1-9. (in Chinese)
- [7] 王述良,梁枢果,邹良浩,等. 基于三维数字图像相关法(DICM)的输电导线风致动态位移测试及分析[J]. 空气动力学学报, 2016, 34(4): 503-510.
WANG Shuliang, LIANG Shuguo, ZOU Lianghao, et al. Measurement and analysis of wind-induced dynamic displacements of transmission conductors based on 3-D DICM[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2016, 34(4): 503-510. (in Chinese)
- [8] 韩玉迎,王晨,杜金香,等. 基于图像边缘识别的面内振动位移测试方法[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(3): 470-475.
HAN Yuying, WANG Chen, DU Jinxiang, et al. In-plane vibration displacement measurement method based on image edge recognition[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2021, 41(3): 470-475. (in Chinese)
- [9] 黄增浩. 基于双目立体视觉技术的导线脱冰跳跃轨迹监测研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [10] 薛博. 基于图像处理的“三跨”架空线弧垂测量研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [11] 张星,王孟,王政,等. 基于单目测量方法的架空导线弧垂实验研究[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(5): 65-69.
ZHANG Xing, WANG Meng, WANG Zheng, et al. Experimental study of overhead conductor sag based on monocular measurement[J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(5): 65-69. (in Chinese)
- [12] 陈晓娟. 考虑垂直风切变的大跨越架空导线微风振动机理研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [13] BLEVINS R D. Flow-induced vibration[M]. 2nd ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990: 29-115.



第一作者简介:陈晓娟,女,1982年10月生,博士、副教授。主要研究方向为输电线路工程。曾发表《大跨越导线在局部激励下微风振动的波动特性》(《振动工程学报》2021年第34卷第2期)等论文。
E-mail: cxj2008@imust.edu.cn

通信作者简介:王璋奇,男,1964年5月生,博士、教授、博导。主要研究方向为输电线路工程。
E-mail: wangzq2093@163.com