

基于无人机的桥梁索力快速识别方法与应用

贾鹏飞

(上海市建筑科学研究院有限公司, 上海市 201108)

摘要: 桥梁拉索索力的传统检测方法存在效率低、风险高、成本高等问题, 现有非接触测量技术亦常受限于设备成本、视野或环境鲁棒性。针对此瓶颈, 提出一种基于无人机平台与计算机视觉的拉索索力快速识别方法。该方法首先利用无人机机动采集拉索高清视频, 并通过光流法追踪特征点亚像素位移以提取振动信号; 其次采用信号处理与频谱分析方法来识别信号的固有频率; 最终依据振动理论来反演索力。以某实桥为例进行验证后发现, 识别结果与传统检测报告结果吻合良好, 说明该方法在实际工程中具有准确性和可靠性, 可为桥梁拉索的快速巡检与健康状态评估提供新的技术方案。

关键词: 桥梁索力识别; 无人机; 计算机视觉; 拉索频率; 振动识别; 桥梁检测

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0316-05

UAV-Based Method for Rapid Identification of Cable Force in Bridges and Its Application

JIA Pengfei

(Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The traditional detection methods for the force of bridge stay cables have problems such as low efficiency, high risk and high cost. The existing non-contact measurement technologies are also often limited by equipment cost, field of view or environmental robustness. Aiming at this bottleneck, a rapid identification method for cable force based on unmanned aerial vehicle (UAV) platform and computer vision is proposed. In this approach, the high-definition videos of bridge cables are acquired via a UAV. The optical flow method is then applied to track the sub-pixel displacements of feature points, thereby extracting vibration signals. Subsequently, the natural frequencies are identified through signal processing and spectrum analysis to invert cable force based on vibration theory. After verification with a real bridge as an example, it is found that the recognition results are in good agreement with the results of the traditional detection report, indicating that this method is accurate and reliable in actual engineering, which can provide a new technical scheme for the rapid inspection and health status assessment of bridge cables.

Keywords: identification of bridge cable force; unmanned aerial vehicle (UAV); computer vision; cable frequency; vibration identification; bridge inspection

0 引言

桥梁作为现代交通网络的枢纽, 其结构安全与长期服役性能至关重要。斜拉桥与悬索桥作为大跨径桥梁的主要形式, 其结构承载与稳定性能高度依赖于拉索系统。拉索作为核心受力构件, 其内部索力的准确分布与变化是评估桥梁整体健康状况、预警潜在风险的关键指标。因此, 对拉索索力进行高

效、精准的识别与监测, 已成为桥梁工程运维领域一项基础且紧迫的任务^[1]。

传统索力检测主要依赖于人工布设的加速度传感器, 通常需要搭设脚手架或使用桥检车, 存在作业风险高、效率低、对交通影响大等问题。为克服接触式方法的局限, 近年来工程中逐步引入多种非接触式挠度测量仪器, 如激光位移计、高精度全站仪、地面三维激光扫描仪、多点动态位移检测设备以及基于靶标的近景摄影测量系统等。这些设备虽能在一定程度上实现远程位移监测, 但仍普遍存在成本高、视场受限、需人工布设靶标或反射棱镜等不足^[2-3]。随着计算机视觉与无人机技术的快速发展, 基于视频的振动测量方法因其无需专用靶标、部署灵活、可

收稿日期: 2026-04-20

基金项目: 上海市科委社发项目(23DZ1202901); 上海市数据局项目(202401069)

作者简介: 贾鹏飞(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁检测运维工作。

获取全场或多点响应等优势,展现出了巨大潜力;但其实际应用仍常受限於拍摄视角、测点纹理特征的稳定性,以及在光照变化、风致抖动、背景干扰等复杂环境下的鲁棒性与测量精度问题。目前已有一些相关研究,如林运飞等^[4]提出了一种基于边缘检测的非接触、有靶标结构视频位移测试方法,并与数字图像相关性算法测试结果进行了对比,验证了基于边缘检测算法应用于工程结构位移测试的可行性。徐旻杰等^[5]使用边缘识别,实现了模拟试验条件下基于视频对斜拉桥频率 1~4 阶的识别,但尚未在复杂实桥环境中得到充分验证。黄智德等^[6]用激光测振仪实现了对斜拉索索力的识别,最大频率误差达 10%,而且设备昂贵、需人工瞄准并依赖于专用反射靶标,实际工程中部署效率与成本制约明显。周子杰^[7]基于测试的视频,完成了亚像素模板匹配算法的索力试验,最大误差不超过 6%,但其依赖人工预选模板,在纹理缺失或光照变化场景中稳定性不足,且尚未系统解决无人机抖动等实际采集干扰。总体而言,现有方法在实桥复杂环境适应性、系统轻量化与工程实用性方面仍有明显不足。

针对现有技术在实际工程应用中面临的效率、成本与适用性瓶颈,本文旨在研究并提出一种基于无人机平台的桥梁拉索索力快速识别方法。该方法通过集成无人机机动平台与高精度机载视觉传感器,实现对高空拉索振动的非接触、快速采集;进而结合光流法与频率分析法,能够快速分析索力,评估桥梁结构安全。

1 方法原理和技术流程

1.1 技术路线

本研究采用基于无人机视觉感知与计算机视觉信号处理相结合的技术路线,实现桥梁拉索索力的非接触式智能识别,其整体流程如图 1 所示。首先,通过搭载高清摄像头的无人机,对桥梁拉索进行近距离的视频拍摄;其次,选定振动明显区段中的特征点作为分析测点,并运用计算机视觉技术,从视频序列中追踪并解算出测点亚像素级的振动时程信号,然后对该振动信号进行降噪、滤波等预处理,并通过快速傅里叶变换将其转换至频域,从而精确识别出拉索的前若干阶振动频率;最终,将这些频率特征与拉索的基本参数相结合以计算出索力,实现从动态视频到静态索力的端到端智能解算。

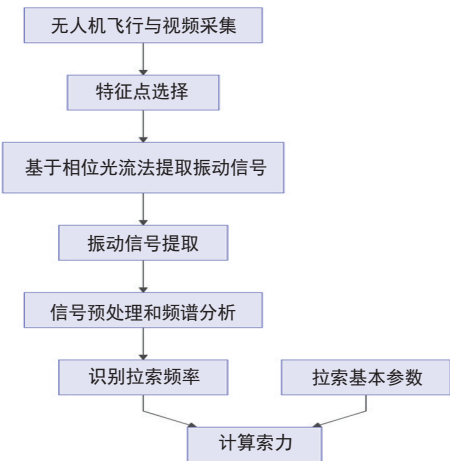


图 1 索力识别流程图

1.2 拉索振动视频采集

为确保从视频序列中有效提取拉索的振动信号,获得稳定、可靠的亚像素级位移数据,无人机视频采集必须满足以下要求:

(1)空间分辨率与构图要求。拉索应该在视频画面中占据足够视野,以保证拉索的振动能够被清晰识别。因此无人机应尽可能贴近拉索拍摄,或者采用长焦镜头,变焦进行拍摄。拍摄过程中须确保目标段始终位于画面中央区域,避免因振动或无人机漂移导致目标移出视野。

(2)表面纹理与光照要求。所选择的拍摄拉索段应具备清晰、稳定的视觉纹理特征,如钢丝缠绕的周期性纹路、防护套表面的斑驳图案或特定标记点。这些特征将作为后续光流追踪算法的关键依据。同时,应选择光照均匀的时段进行采集,避免强反光、深重阴影或逆光条件,以保证特征点在视频序列中持续可见且对比度良好。

(3)时间采样率要求。拉索的低阶固有频率通常处于 1~15 Hz 范围内。根据奈奎斯特采样定理,视频帧率必须大于目标最高分析频率的 2 倍。因此,建议采集帧率不低于 30 Hz,以避免频率混叠。同时,为在频域中获得足以区分相邻模态的清晰谱峰,视频时长应足够长。建议单次连续拍摄时长不少于 15 s,以确保频率分辨率满足精度需求,并能涵盖拉索在环境激励下的典型振动响应。

图 2 展示了满足上述技术要求的现场视频截图实例。显然,图中拉索成像清晰、纹理明显,且画面稳定。

1.3 图像特征追踪算法

图像特征追踪算法是实现亚像素级位移提取的核心环节,直接决定了振动时程信号的精度和可靠



(a) 典型识别场景——单吊杆(定焦拍摄)



(b) 典型识别场景——单吊杆(变焦拍摄)



(c) 典型识别场景——双吊杆(定焦拍摄)

图2 满足识别要求的视频截图

性,是从视频数据获取高精度位移数据的关键步骤。

特征点的选择是算法性能的先决条件,需同时满足显著性、稳定性和鲁棒性的要求。特征点应避免选取在拉索光滑区域或均匀纹理处,确保在振动幅值变化和频率波动条件下持续可追踪。特征点在图像中应具有高梯度、独特纹理,在振动过程中对光照、视角偏移不敏感,能有效抵抗风致抖动或背景杂波的环境干扰,如拉索表面钢丝缠绕接缝或金属纹理突变处。

常用的图像特征追踪算法包括模板匹配法、角点检测法、光流法等^[8-9]。模板匹配法实现简单,计算效率高,但受限于固定模板区域,易受振动幅度波动和背景杂波影响,追踪稳定性差^[10]。角点检测法计算的精度较高,但依赖于特征点分布,在拉索纹理稀疏区域易出现点丢失^[11-12]。光流法是利用图像序列中像素在时间域上的变化以及相邻帧之间的相关性来找到上一帧跟当前帧之间存在的对应关系,从而计算出相邻帧之间物体运动信息的一种方法^[13-14]。Lucas-Kanade算法是一种典型的稀疏光流算法,对特征点的特征依赖较小,能自适应拉索表面纹理动态变化,对低幅值振动的追踪精度可达到0.1像素,且计算效率高,可满足30 fps实时视频流需

求^[15]。因此,本研究优先采用光流法作为主算法,以有效平衡精度与鲁棒性,为后续频域分析提供连续、可靠的振动时程信号。

1.4 振动信号处理

从视频中提取的原始信号为特征点的位移时程数据,单位为像素。该信号通常包含多种干扰成分,如飞机的低频摆动、背景杂波及环境噪声等。为准确获取拉索的振动特征,需结合其频域特性对原始信号进行系统处理,具体步骤如下:

(1)2次微分,计算加速度信号。通过对位移时程信号进行2次微分,将其转换为加速度信号。加速度信号能更有效地突显结构振动成分,有助于后续频域分析与模态识别。

(2)趋势项去除。采用多项式拟合或滑动平均方法去除信号中的趋势项,以抑制由飞机缓慢摆动或摄像机微小移动引起的基线漂移,确保振动信号零均值化。

(3)高通滤波。设计合适截止频率的高通滤波器,滤除信号中的低频扰动成分,保留拉索结构自身的中高频振动信息,为后续频率提取与参数识别提供清洁信号基础。

该处理流程可以逐步分离并增强拉索的真实振动响应,为后续的索力分析与评估提供可靠数据。

1.5 频率和索力识别

基于处理后的加速度时域信号,本研究通过快速傅里叶变换实现拉索自振频率的高精度识别。在频率识别基础上,结合拉索的基本参数及边界条件,采用考虑抗弯刚度的拉索振动理论公式计算索力 T :

$$T = \mu \left(\frac{2Lf_n}{n} \right)^2 - \frac{EI}{L^2} \quad (1)$$

式中: L 为索长; μ 为拉索的线密度; f_n 为第 n 阶自振频率; n 为振动阶数; EI 为索截面的抗弯刚度。

为提升频率识别的可靠性,本研究对同一根拉索上多个特征点的频域信号进行平均处理,以显著抑制随机噪声,提高信噪比。

2 西藏某悬索桥索力识别

2.1 桥梁概况

西藏某悬索桥主跨256 m,采用钢桁架加劲梁,一侧设置14 m×2钢筋混凝土现浇板边跨,桥梁全长380 m(见图3)。两岸锚碇均采用重力式地锚。主缆经塔顶主索鞍后进入锚碇前锚室,再经散索鞍后进入拉萨岸锚碇前锚室。主桥纵向为漂浮体系,加劲

梁与桥塔之间设置竖向支座和纵向阻尼器。全桥索对称布置于两侧,每侧 21 根,最长索长度 50 m,采用有 PE 防护层的平行钢丝束制成。索的编号由大桩号方向从 1 开始,左侧依次为 L1、L2、L3 等,右侧为 R1、R2、R3 等。



图 3 桥梁照片

2.2 数据采集和分析

硬件上选用了 DJI Matrice 4TD 无人机作为飞行平台,搭载广角、长焦和红外 3 类镜头。数据采集过程中,为保障影像质量与振动识别的有效性,需选择晴朗、光照充足且风速较低的天气条件进行作业,并优先在桥面有车辆通行的时间段拍摄,以利用车辆激励增强拉索振动,便于后续识别。

无人机在拍摄时悬停于距离目标拉索约 8~10 m 的位置,采用其 14 倍光学变焦相机进行视频录制。本次试验共获取 L1~L8、R1~R8 共计 16 组拉索视频数据,每段视频时长约 30 s,帧率为 30 fps,分辨率为 1 920×1 080,为后续基于视频的振动分析提供了清晰、稳定的影像基础。

以 L3 索的数据分析为例,需要先在索特征明显的位置选择测点(见图 4),然后进行分析。

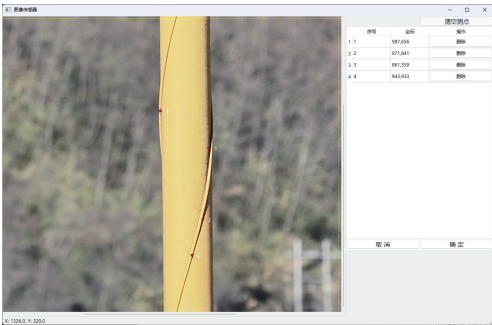
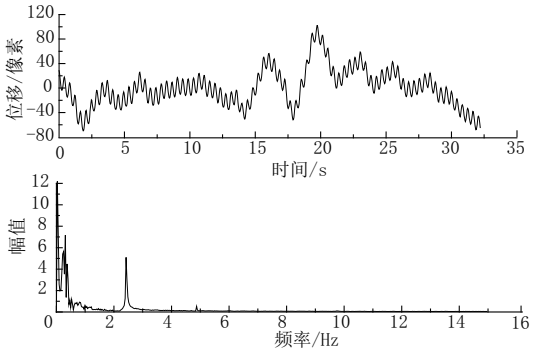


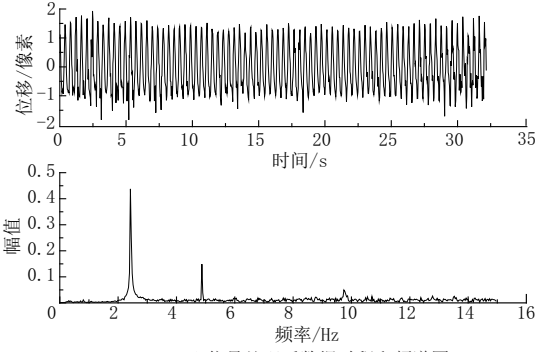
图 4 选择测点

以测点 1 为例,信号处理前后的时程曲线与频谱对比结果如图 5 所示。从时域信号可以看出,经数据处理后,原始信号中幅值较大的低频漂移成分已被有效去除,振动波形趋于稳定,呈现出更明显的周

期性特征。在频域方面,频谱图中的低频背景噪声得到显著抑制,使得主要反映结构振动特性的 1 阶峰值更加突出,其幅值较处理前显著提高,信噪比明显改善。同时,在处理后的频谱中,2 阶振动成分也得以清晰显现,这为进一步分析结构的动力特性提供了更丰富的信息。该结果表明,所采用的信号处理方法能够有效提取出隐含在强噪声中的关键振动成分,有助于更准确地识别结构的模态特征。



(a) 信号处理前数据时程和频谱图



(b) 信号处理后数据时程和频谱图

图 5 L3 索力识别测点 1 数据处理前后对比

采用 Lucas-Kanade 光流算法进行测点的追踪,经数据预处理和滤波处理后,获取其余 3 个测点的时域与频域图像,如图 6 所示。

综合分析表明,该索各测点识别到的频率一致,1 阶频率为 2.420 Hz,2 阶频率为 4.871 Hz。

2.3 结果对比分析

采用本方法进行各索频率识别,并将其与 2024 年 10 月该桥梁检测报告进行对比分析,结果见表 1。由表 1 可见,两者最大误差在 R3 索,先前检测结果为 2.334 Hz,本次测量结果为 2.237 Hz,误差为 4.16%。对比结果整体表现出良好的一致性和可靠性,充分验证了本方法在实际桥梁监测中的可靠性和稳定性。

2.4 方法优势和局限性分析

本次针对西藏某悬索桥的现场试验,验证了无人机视觉索力识别方法在真实复杂环境下的适用性。从实施角度看,本方法展现出显著的工程便捷

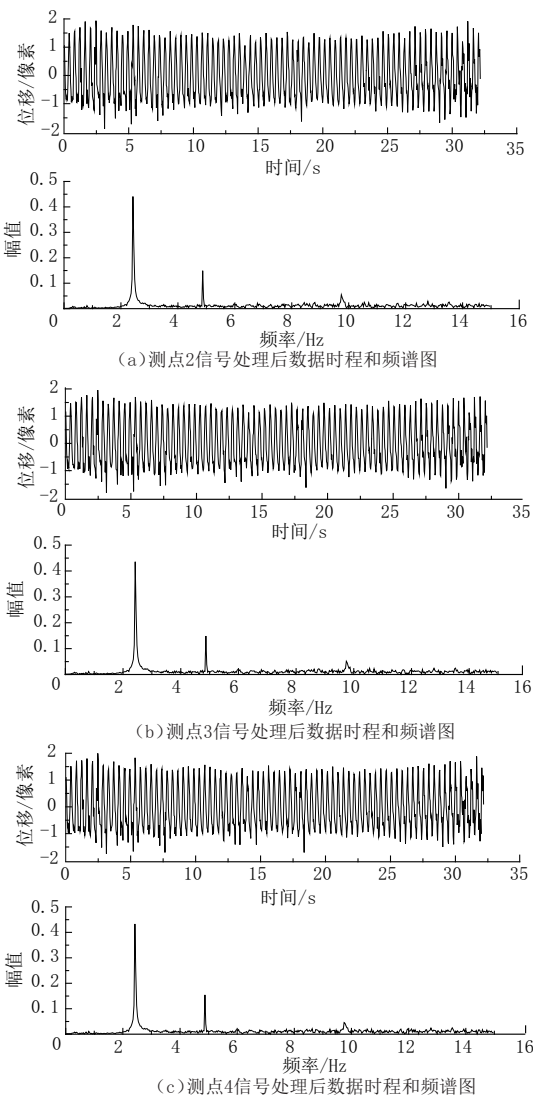


图 6 L3 索力识别测点 2~4 信号处理后的结果

表 1 识别结果对比

编号	上次结果/Hz	本次结果/Hz	误差/%
L1	2.073	2.011	2.99
L2	2.358	2.266	3.90
L3	2.490	2.420	2.81
L4	2.681	2.605	2.83
L5	3.126	3.030	3.07
L6	3.500	3.370	3.71
L7	4.064	4.092	0.69
L8	4.244	4.135	2.57
R1	1.865	1.841	1.29
R2	2.367	2.379	0.51
R3	2.334	2.237	4.16
R4	2.753	2.775	0.80
R5	3.197	3.087	3.44
R6	3.442	3.427	0.44
R7	3.929	3.767	4.12
R8	4.383	4.333	1.14

性,无需任何地面交通管制或桥面设施搭设,无需安装测量设备,整个数据采集工作在数小时内即可完成,单根拉索的有效分析时长约 5~10 min,为高海拔、艰险山区桥梁的快速巡检提供了高效且安全的技术手段。

然而,本次试验也反映出该方法在特定条件下的局限性。首先,测量精度易受现场环境干扰,尤其是环境风致无人机抖动与复杂光照条件会直接影响图像稳定与特征识别,这是导致个别测点误差增大和识别失效的主要因素;其次,本方法依赖于拉索表面的自然纹理特征,部分索因 PE 护套表面纹理均匀、缺乏显著特征,导致稳定追踪点稀少,对后续光流分析与振动提取提出了挑战;同时,对于长度短于 20 m 的索,由于其在环境激励下的振动位移幅值通常较小,在图像中对应的像素位移也更为有限,特征追踪的精度与稳定性的难度更大。后续可通过采用更高分辨率的成像设备、优化亚像素位移提取算法,或结合微动放大等视频处理技术予以改善。

3 结 语

本研究提出并验证了一种基于无人机视觉的桥梁拉索索力快速识别方法。该方法通过无人机采集振动视频,结合光流法与频域分析,实现了对拉索频率与索力的非接触、高效识别。现场实测表明,其识别结果与传统方法对比误差小于 4.2%,整体表现出良好的一致性和可靠性,充分验证了该技术在复杂工程环境下的适用性和准确性。

相较于传统手段,该方法在作业效率、安全性与成本方面具有显著优势,为桥梁拉索的日常巡检、定期检测和特殊事件后快速评估提供了一种极具潜力的新型技术手段。它不仅能作为传统检测方式的有效补充,更有望推动桥梁健康监测向更智能化、常态化、低成本化的方向发展。

参考文献:

[1] 项海帆.21 世纪世界桥梁工程的展望[J].土木工程学报,2000(3): 1-6.

[2] 程斌,程辉.基于数字图像处理技术的多点动态位移检测系统试验研究[J].江汉大学学报(自然科学版),2020,48(5):89-96.

[3] 王亚飞,杨钧羽,钟继卫,等.桥梁结构状态评估方法研究现状与展望[J].公路工程,2024,49(1):45-52.

[4] 林运飞,陈琳,李倍安,等.基于边缘检测与数字图像相关的桥梁结构变形测试[J].公路工程,2024,49(3):13-21.

[5] 徐旻杰,袁向荣,刘辉,等.视频图像测振技术对斜拉索索力的应用[J].实验室研究与探索,2017,36(11):7-10;14.

(下转第 336 页)