

基于视频亚像素模板匹配算法的索力试验

周子杰

(上海市建筑科学研究院有限公司, 上海市 201108)

摘 要: 针对索结构的索力测试, 基于室内试验对比了计算机视觉方法和传统加速度传感器方法, 探讨了计算机视觉方法的适用性。研究采用伺服静载锚固试验机张拉单根斜拉索钢绞线, 简化模拟索张拉受力状态, 通过相机摄影的非接触测量方法测量拉索动态响应, 结合亚像素模板匹配算法识别拉索动态变形、基频和索力, 并与传统的加速度传感器测试结果进行对比。研究表明, 计算机视觉方法识别的拉索振动频谱峰值明显, 基频识别结果与加速度传感器测试结果基本一致, 索力识别结果与实测值相比最大误差不超过 6%, 具备开展实际结构索力测试的能力。

关键词: 索力; 非接触测量; 计算机视觉; 模板匹配; 室内试验

中图分类号: U443.38

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)12-0140-04

0 引 言

索结构在建筑和桥梁设施中有不少应用。索力检测是一项索结构运营阶段重要的安全保障工作^[1]。常规索力检测的方法包括振动法、压力环法、磁通量法、雷达法等^[2-3], 其中又以振动法为主。振动法通过测量索体的振动频率, 基于索体索力和索体振动频率的理论关系得到索力^[4]。有的时候, 甚至不经索力换算直接以测量得到的拉索振动基频作为评价索体运营性能的主要指标。

振动法测量索力需要检测人员将加速度传感器放置在索体上, 然后测量环境随机激励或者外界强迫激励下拉索的动态响应, 属于单点接触式测量。近年来, 随着基于计算机视觉的非接触测量技术的兴起^[5], 通过影像方式远距离测量索体动态响应成为许多学者尝试的新方法。

Dongming Feng 等^[6]利用相机拍照方式对佛罗里达一座体育场施工过程中的索体索力进行了非接触测量, 并与测力计的实测结果比较, 结果显示误差在 5.6% 以内。大连理工大学 Xuefeng Zhao 等^[7]采用每秒 30 帧的智能手机对试验室内的一根斜拉索模型的振动特性进行了视频测试分析, 并与智能手机内自带的加速度传感器测试结果进行比较, 测试的

精度误差小于 $\pm 5\%$ 。广州大学李昆伦等^[8]采用每秒 240 帧的手机自带相机对一座缩尺斜拉桥模型的拉索进行振动识别, 试验结果与理论计算的频率相比最大误差 2.6%。河海大学 Wenkang Du 等^[9]采用二值化方法识别拉索上提前安装好的靶标, 进而分析拉索自身的振动特性和索力, 并在缩尺斜拉桥模型上进行多目标识别试验, 结果表明最大误差为 3.05%。

研究利用“单根钢绞线 + 夹片锚 + 静载锚固装置”的试验方案, 简化模拟了一根索张拉受力状态, 通过基于计算机视觉的非接触测量技术(以下简称“视觉法”)测量索体的动态响应, 得到索体的基频, 并传统采用加速度的振动法(以下简称“加速度法”)的测量结果进行比较, 初步验证视觉法的可行性, 并讨论应用于工程实际的相关问题。

1 试验方案

试验索体采用单根由 7 股钢丝聚合成的低松驰预应力钢绞线, 公称直径 15.2 mm, 抗拉强度设计值 1 860 MPa。索体通过夹片锚固方式与静载锚固装置相连接, 如图 1 所示。加载装置采用上海华龙测试仪器有限公司 WJM-6500 型电液伺服静载锚固试验机, 最大加载力为 6 500 kN, 加载精度为 1 N。

试验过程中, 钢绞线采用分级张拉方式, 按照 10 kN 一级的加载间隔进行, 从 20 kN 加载到 50 kN, 共 4 级。每级加载完成持荷, 待稳定后分别同步开展基于视觉法和加速度法的索响应测量。

其中, 视觉法测量设备采用感光底片大小为

收稿日期: 2021-03-11

基金项目: 上海科委技术带头人项目(20XD1432400); 上海建科集团科研创新项目(KY10000038.2019004)

作者简介: 周子杰(1990—), 男, 博士, 工程师, 从事桥梁检测、监测和评估工作。

24.9 mm × 16.6 mm、像素 2 610 万的富士 XT3 相机和等效焦距 38 mm 镜头。加速度法测量设备采用北京东方振动和噪声技术研究所生产的压电传感器,分辨率 0.000 1 m/s²,量程 10 g。



图 1 试验装置布置

2 图像分析算法

研究采用基于归一化相关系数的模板匹配(template match)图像识别算法,并通过差值实现亚像素识别精度。算法的主要流程如图 2 所示。

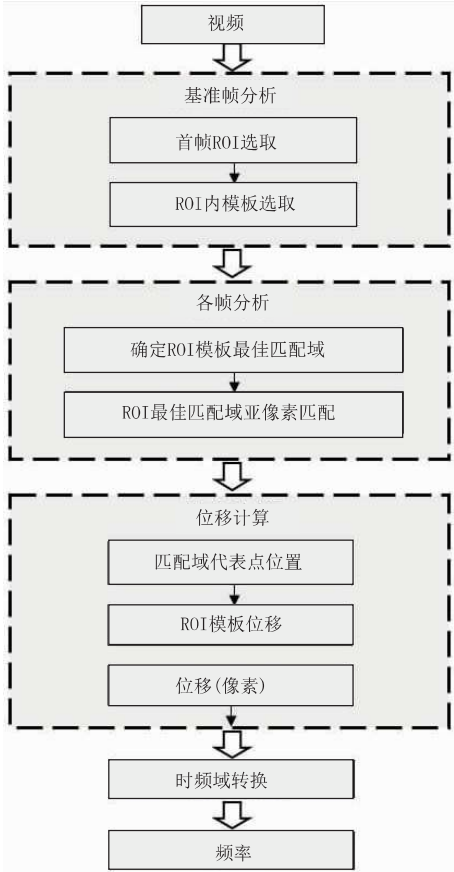


图 2 亚像素模板匹配算法流程

首先以首帧为基准帧,在首帧图像中选定拉索索体振动响应的关注范围 ROI (region of interest)。其次,逐帧分析视频图像中和首帧 ROI 相似度最高的区域,通过归一化相关系数指标来判定最佳匹配区域。再次,进一步采用亚像素差值方法拟合最佳匹

配区域内的极值,作为识别位置。如此分析完各帧后,将各帧中识别位置的坐标和对应各帧的记录时间组成索体振动的时域分析结果。最后,通过时频域转化分析可得索体的振动特性。

一般情况下,为了消除相机自身抖动对识别结果产生的影响,会进行相机抖动剔除计算。本次试验由于在试验室进行,基本排除了相机振动问题,因此算法中未考虑这部分内容。

另外,上述整个算法中,亚像素差值拟合式的选取对识别精度和计算速度有较大影响,且一般对精度和速度两者的影响规律是相反的。为了平衡识别算法的精度和速度,本研究以某一次试验数据为基础,对比了目前常用的四类差值(最邻近插值、双线性插值、双三次插值和 Lanczos 差值)拟合方法的信噪比(频谱中峰值部分面积和其他部分面积比)和分析时间。分析结果如图 3 所示。由对比结果可知,双线性插值在有效提高信噪比的同时,也不显著增加计算时长。因此,选取双线性插值方法对试验中所有图像数据进行亚像素计算。

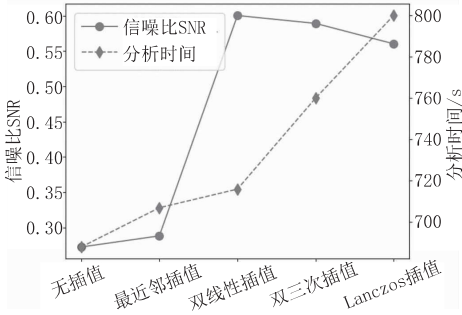


图 3 不同插值算法计算时间和频谱信噪比

3 频率识别结果

基于上述算法,研究将试验结果进行位移计算和时频域转化。典型的位移识别结果如图 4 所示。由于研究关注频率,因此位移识别结果以像素为单位,未进行长度尺寸转换。

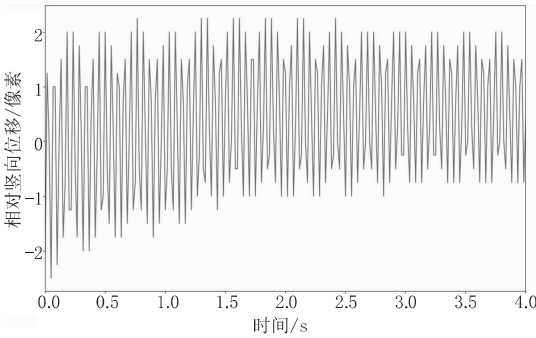


图 4 视频竖向位移识别结果(局部)

基于视觉法和加速度法的基频识别结果如图 5 所示。在不同的张拉力下,基于视觉法的测试结果均

较好地识别出索体的振动基频。视觉法的频谱峰值明显,且与加速度法的识别结果基本一致,初步验证了视觉法的可行性。

当然,对比视觉法和加速度法的频谱图形可知,虽然两者的频率峰值均非常明显,但相较而言,视觉法频率上有一定的毛刺(噪声),而加速度法较为光滑。研究进一步采用上一节中定义的频谱信噪比分析两种方法的信号噪声,计算结果见表1。对比可知,基于灵敏的加速度传感器的加速度法测试结果噪声极小,而基于视觉法的噪声相对较大。相同条件下,两者有数量级的差异。

这里必须指出的是,试验中加速度法传感器自身的高精度(分辨率 $0.000\ 1\ \text{m/s}^2$)和高采样频率($512\ \text{Hz}$)是其高信噪比的主要原因。对比试验中,视觉法的传感器设备,其采样频率为 $60\ \text{Hz}$,且镜头画

表1 频谱信噪比对比

序号	张拉力/kN	视觉法	加速度法
1	20.7	0.60	27.71
2	31.8	0.74	19.03
3	40.4	0.40	31.62
4	50.5	0.80	39.71

面中拉索的占比较低,导致单位像素下对应的物理位移量较大,影响了视觉法的信噪比。这为后续视觉法提高识别精度从传感器侧提出了可改进的思路。

4 索力计算结果

得到索体基频后,可根据索体自振频率域索力的理论关系计算得到索力。根据上海市地方标准 DB 31/T973—2016^[10],两端铰支的受拉索索力 T 的计算公式如式(1)所示。

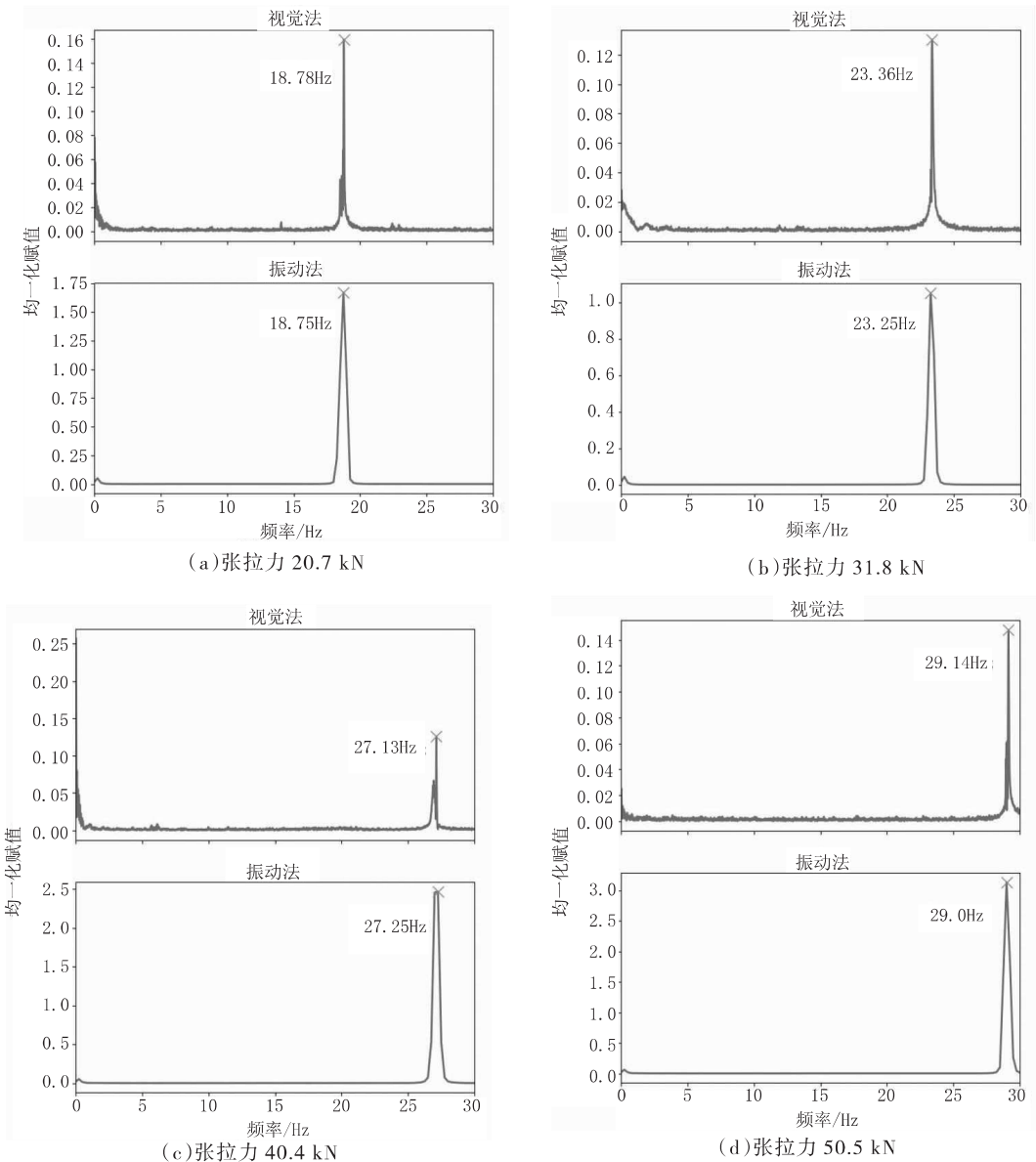


图5 不同张拉力下拉索基频识别结果对比

$$T=4mL^2(f_n/n)^2-n^2EI\pi^2/L^2 \quad (1)$$

式中: m 为拉索单位长度的质量; L 为拉索的计算长度; f_n 为第 n 阶振动频率; n 为拉索自振频率的阶数; E 为拉索钢丝弹性模量; I 为拉索截面抗弯惯性矩。

本次试验拉索的锚固长度实测为3.65 m。将试验得到的拉索频率和相关参数值带入式(1)计算得到基于振动频率分析结果的拉索索力测量值,并与静载锚固试验机的张拉力读数进行比较,结果如图6所示。

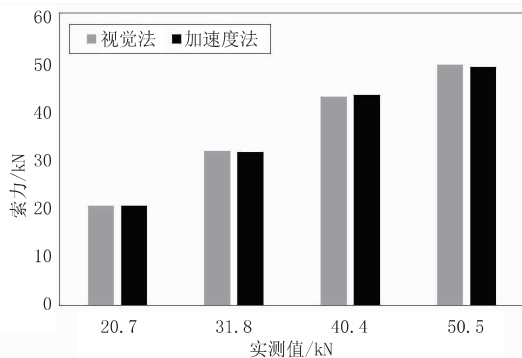


图6 索力识别结果对比

基于视觉法的索力识别结果与实测值相比,最小误差0.98%,最大误差5.94%。对比传统加速度法,索力识别结果的最小误差1.24%,最大误差6.88%。对比计算结果可知,视觉法具备开展实际结构索力测试的能力,且测量精度基本能满足工程实际需求。

5 结 语

研究通过一台静载锚固装置和一根钢丝绳简化模拟了索体在结构中张拉受力的状态。分别采用基于计算机视觉的视觉法和基于传统加速度传感器的振动法开展了索体在不同张拉力下的自振频率测量工作,对比了试验结果,有如下结论:

(1)研究采用基于插值法的亚像素模板匹配算法,

(上接第139页)

得到明显好转。

(3)正交异性板钢桥面铺装容易损坏,当铺装再次损坏时,桥面积水会再次下渗,使钢箱梁螺栓断裂,因此采用新材料延长桥面铺装使用寿命才是保证高强度螺栓安全正常使用的关键。

参考文献:

- [1] 侯兆新,龚超,梁梓豪,等.钢结构高强度螺栓连接技术新进展[J].钢结构(中英文),2021(1):1-16.
- [2] 赵中伟,樊雄涛,吴刚.高强螺栓抗剪连接滑移数值模型[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(12):1707-1716.
- [3] 郭珍珠,赵伟.公路钢桥高强度螺栓松动检测技术研究进展[C]//中

通过对比计算效率和频谱信噪比选择了双线性插值等算法作为亚像素差值方法。

(2)试验室测试对比结果表明,视觉法识别的拉索振动频谱峰值明显,基频和索力识别结果与实测值相比,最大误差不超过6%,具备开展实际结构索力测试的能力。

为了进一步提高视觉法的识别精度、识别范围和有效信号强度,采用高分辨率底片、高光学放大率镜头和高采样频率的设备是设备侧改进的方向。

参考文献:

- [1] 樊燕燕,李子奇.在役斜拉桥索力测试研究[J].城市道桥与防洪,2009,9:78-80.
- [2] 张华平,魏良军,汪劭祯.斜拉桥索力测试方法及原理综述[J].公路交通科技(应用技术版),2011(10):268-269.
- [3] 王翔,潘中明,王波.基于雷达的斜拉索索力非接触遥测技术研究[J].世界桥梁,2019,47(3):49-53.
- [4] 孙利民,焦美菊,孙守旺.基于长期监测的拉索可靠性评估[C]//全国随机动力学学术会议.中国振动工程学会;中国建筑学会;中国力学学会,2012.
- [5] Billie F. Spencer Jr., Vedhus Hoskere, Yasutaka Narazaki. Advances in computer vision-Based civil infrastructure inspection and monitoring[J]. Engineering, 5(2):199-222.
- [6] Feng D, Scarangelo T, Feng M Q, et al. Cable tension force estimate using novel noncontact vision-based sensor [J]. Measurement, 2017, 99:44-52.
- [7] Xuefeng Z, Kwang R, Niannian W. Experimental Verification for Cable Force Estimation Using Handheld Shooting of Smartphones[J]. Journal of Sensors, 2017, 2017:1-13.
- [8] 李昆伦,袁向荣,徐旻杰,等.视频图像检测技术对斜拉索的三维振动研究[J].工业建筑,2018,48:748-751.
- [9] W. Du, D. Lei, P. Bai, F. Zhu, Z. Huang. Dynamic measurement of stay-cable force using digital image techniques[J]. Measurement, 2019, 151.
- [10] DB 31/T973—2016,基于环境振动激励的桥梁拉索索力测试方法规范[S].

国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第17届(ISSF-2021)学术交流暨教学研讨会论文集.北京:工业建筑杂志社,2021.

- [4] 王连彬,刘旭.峡谷地区钢桁梁高强度螺栓施拧质量控制[J].公路,2020,65(12):73-77.
- [5] 郭飞毅,韩亚国,丁磊,等.高强度螺栓断裂失效问题研究[C]//第十七届中国航空测控技术年会论文集.北京:测控技术杂志社,2020
- [6] 焦丽,赵英军,张伟民,等.12.9级高强度螺栓断裂原因分析[J].热处理,2020,35(04):42-45.
- [7] 石永久.中美建筑钢结构设计方法比较——螺栓连接[J].钢结构(中英文),2020,35(08):33-56.
- [8] 张忠伟,赵彦芬,赖云亭,等.核电厂高强度螺栓的氢脆和应力腐蚀问题[J].中国电机工程学报 2021(4):1-15.