

# 三维激光扫描技术在危旧桥梁健康监测中的应用研究

尹恒<sup>1,2</sup>, 王立娟<sup>1,2</sup>, 裴尼松<sup>1,2</sup>, 姜丽丽<sup>3</sup>, 刘欢<sup>1,2</sup>

(1. 四川省安全科学技术研究院, 四川 成都 610045; 2. 重大危险源测控四川省重点实验室; 3. 四川顺荣建筑工程有限公司)

**摘要:**针对现有桥梁健康监测手段主观性强、使用限制大、耗时长和经济性低等缺陷,以大邑县虎跳河大桥为试验对象,采用三维激光扫描技术进行危旧桥梁健康监测研究。通过控制测量、靶标布设、数据预处理、拼接优化等过程控制,使得2次扫描采集点云的拼接精度均优于1.5 mm;通过一定宽度的固定面分割点云数据,采用外侧点绘制桥梁的横断面图和桥墩轮廓线,最低点绘制拱肋拱腹线,复原了桥梁缺失的二维图件,并将拱腹线和轮廓线应用于后续的桥梁变形分析;通过点云结合影像数据制作正射影像图,采用边缘增强和雕刻化的图像处理方法增强病害表征,而后进行裂缝、水迹线、缺陷等的识别、测量和变化对比;利用点云数据制作的桥面模型进行垂向变化对比,结果显示桥墩附近沉降较小,在±1.5 mm内,桥台部分沉降较大,部分区域大于±8.0 mm,−3.0~0.0 mm沉降范围占比最大,达72.03%;通过拱腹线不同跨径位置进行垂向位移分析,结果显示平均沉降为5.08 mm;通过定距等分点的桥墩轮廓线位移分析,结果显示平均水平位移为3.56 mm,位移为0.02~6.24 mm的区间总占比达89.95%;通过桥墩轮廓线计算质心点进行水平位移分析,结果显示桥墩质心向213.81°,即虎跳河下游移动了3.11 mm,位移量结果与轮廓线分析的平均值接近。

**关键词:**三维激光; 危旧桥梁; 健康监测; 二维图件; 病害检测; 位移监测

## 1 前言

GPS测量、全站仪及电子水准仪技术是现阶段桥梁工程测量和监测的三大核心技术,这3种方法的原理、精度具有天生局限,如受天气等外界条件影响大、需要通视、操作繁琐等,因此决定了其在桥梁健康监测中的适用范围较小;桥面病害无损检测技术有半电池电位法、探地雷达法、冲击回波法、红外热成像法等,目前存在主观性高、耗时长和引起交通堵塞,检测结果信息有限且不能做到定期和实时检测,检测准确率有待提高等多类问题;针对伸缩缝变化检测,有学者研究了采用CCD拍摄下伸缩缝的影像,而后利用图像相关法进行宽度变化分析,其分析精度受相机畸变、光源和桥梁振动的影响较大;以人工目测为主的外观损伤检测,存在工作强度大、效率低、借助支架和检测车才能接近结构面,人员专业要求高的缺点。新建桥梁为保证建设和运营期的安全,一般同步建设包含桥址环境、外部作用、结构安全性和特殊部位等内容的桥梁健康监测

系统,但安装设备较多导致建设费用偏高。据统计,截至2011年中小桥数量占中国桥梁总数的90%以上,2010年国省县道危桥18 689座;20世纪90年代及以前修建的桥梁约占总数的40%,一般桥梁建成投入使用后20~30年为病害集中爆发期。因此,如何针对大量危旧桥梁建立经济适用、高效率、客观性强的桥梁健康监测技术成为亟待解决的问题。

近年来三维激光扫描技术迅猛发展,因其高精度、高速率、高密度、非接触和多源数据融合的特性,在文物、矿山、隧道、建筑等领域应用成效越发明显。也有学者开始将其应用于桥梁领域,如B. Riveiro描述了一种基于地面三维激光扫描仪获取桥梁真实三维几何模型的方法,并将其用于结构分析;J. Valença结合图像处理和地面激光扫描技术,提出了一种称作MCrack-TLS的新方法来自动提取混凝土桥梁裂缝;Hao Yang等利用三维激光进行了桥梁变形监测和表面建模,结果表明表面模型精度与混凝土粗糙度有关,但可以通过优化提取和点云过滤提高精度;已有很多学者基于三维激光点云数据,进行建筑物、工业设

收稿日期:2020-01-20

基金项目:四川省科技计划项目(编号:2018GZ0051,2019YFS0073,2018SZ0290,2018JY0425)

作者简介:尹恒,男,硕士,工程师, E-mail:156852610@qq.com

备的轮廓图、平立面图绘制,常用方法有:① 利用三角网或 NURBS 曲面建立扫描对象的三维网格,而后通过剖切网格形成平立面图;② 在点云数据上人工采集足够轮廓点,然后绘制立面图;③ 通过点云模型,制作正射投影图,然后人工勾绘边界形成轮廓图,但这些方法存在勾勒不准确、表面失真和点选错位等缺陷。目前公开报道中,三维激光扫描技术在桥梁健康监测中的应用还较少,未制定成熟可靠的技术方法或规程。

为加强危旧桥梁检测并保障桥梁健康安全运行,该文以四川省成都市大邑县虎跳河大桥为例,研究三维激光扫描技术在桥梁的二维图件绘制、病害检测和变形分析等健康监测方向的应用,提供一种无损、三维、可视、数字化的技术方案,为桥梁管养技术提供有效补充,保障桥梁安全运行。

2 虎跳河大桥概况

虎跳河大桥位于四川省成都市大邑县新场镇虎跳村,东经 103°22′5.55″,北纬 30°32′57.91″,是县道安(安仁镇)出(出江镇)路的控制性桥梁,跨越岷江支流西河。大桥于 1982 年建成通车,桥梁结构形式为 2×40 m 的混凝土土拱桥,桥面宽度 8.4 m,桥梁净矢高 5 m,主拱圈截面高 120 cm,宽 2 m,设计荷载为汽车—13 级。大桥处于中国南北地震带上,历史上周边区域地震多发,近十多年就有汶川 Ms8.0 地震、芦山 Ms7.0 级地震、九寨沟 Ms7.0 级地震等 3 场强震事件;加上社会发展导致车辆荷载及通行频率的增加,极端天气下洪水对桥墩桥台冲刷严重,桥梁结构发生损伤与劣化,影响行车安全。

3 数据采集与处理方法

3.1 使用仪器简介

Z+F IMAGER 5010C 是德国 Zoller+Frohlich 公司生产的一款基于相位式测距原理的三维激光扫描仪,测距范围为 0.3~187.3 m,线性误差≤1 mm,分辨率为 0.1 mm,角度精度为 0.007°,根据扫描质量和角度分辨率 2 个参数组合,共设置了 21 种扫描模式,最高扫描速度可达 1.016×10<sup>6</sup> pts/s。采用的全站仪为 Leica Nova TM 50,测角精度为 0.5″,测距精度为 0.6 mm+1 ppm。

3.2 数据采集

桥梁三维激光扫描的流程分为现场踏勘、控制测

量和实施扫描 3 个步骤。

3.2.1 现场踏勘

查看桥梁周边地形地质条件,选择通视、稳定、不宜破坏的地点用作控制点埋设;调研桥梁主要病害类型、病害位置、程度与规模,据此设计扫描参数和站点,控制扫描精度水平。绘制包含扫描对象、控制点布设、扫描站位置的现场草图,为后续数据处理准备。

3.2.2 控制测量

为保证位移监测的准确性,在虎跳河大桥的上下游和左右岸,共布设了 3 个带基桩和强制对中盘的控制点(图 1),平面控制测量按三角形网二等精度要求,高程控制测量按二等水准精度要求,采用独立平面和高程坐标系,建立桥梁的控制网。经观测和平差后,控制点坐标见表 1。

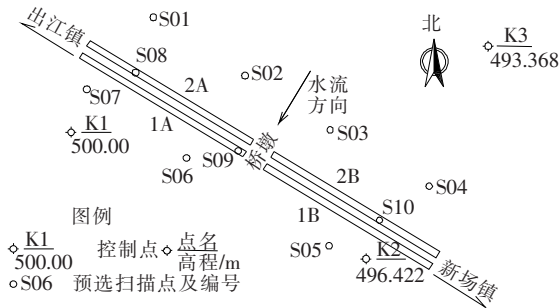


图 1 控制点布设及拱肋编号示意图

表 1 控制测量成果

| 点号  | E/m       | N/m       | H/m     | 位置   |
|-----|-----------|-----------|---------|------|
| K1  | 1 000.000 | 2 000.000 | 500.000 | 下游右岸 |
| K2  | 1 083.254 | 1 964.479 | 496.422 | 下游左岸 |
| KV3 | 1 117.760 | 2 024.161 | 496.368 | 上游左岸 |

3.2.3 实施扫描

预选 10 个扫描站点(图 1),实际扫描过程中,根据现场河水、河床、植被和通行条件等适当增减;在扫描距离范围内,按不同距离、高度布设 4~8 个靶标,相邻两个扫描站点间,尽量保证有 3 个靶标重叠;用全站仪测量靶标中心点;以适当的高度架设扫描仪,采用 Superhigh-High 模式进行 360°全景扫描;扫描中不宜在脚架周边走动,注意是否有人或车辆遮挡扫描仪,记录靶标与扫描站间关系;扫描后观察点云完整程度,是否需要补扫或重复扫描。重复上述步骤,直至完成整座桥梁的扫描。于 6 月 19 日完成汛期前的第一次扫描,共扫描 16 站;11 月 2 日,完成汛期后的第二次扫描,共扫描 12 站。

3.3 预处理

车辆、行人、植被、灰尘等噪音点没有反映桥梁实体特性,增加了电脑内存负担,降低数据计算和使用效率,因此采用孤立点、反射率、无效点、厚度、镜面等方法,配合不同的参数设置,自动过滤点云数据中的噪音点;对遮挡桥梁的点云数据,采用手动框选删除。

根据文献[18]试验结果可得,扫描对象与扫描仪距离在 20 m 内,水平中误差优于 1.0 mm,高程中误差优于 1.5 mm,可进行三级变形测量,满足规范[19]对中小型桥梁监测的要求。故删除扫描仪中心 20 m 外的点云,以保证变形监测质量。

3.4 数据拼接

以人机交互的方式选取所有靶标点,后处理软件自动识别靶标中心点,并根据点云数量、距离、倾斜角度等计算识别质量,软件采用同名点、Cloud to Cloud 和 Plane to Plane 等方法计算转换参数,根据布尔沙公式[式(1)]进行自动拼接,按式(2)~(8)评价拼接精度,拼接结果与质量见表 2,由表 2 可见最大偏差均小于 1.5 mm,表示 2 次扫描点云拼接精度较高,满足危旧桥梁变形监测要求。

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = (1+m) \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \epsilon_z & -\epsilon_y \\ -\epsilon_y & 0 & \epsilon_x \\ \epsilon_y & -\epsilon_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

(1)

$$dx_i = x_{ti} - x_{ri}$$

(2)

$$dy_i = y_{ti} - y_{ri}$$

(3)

$$dz_i = z_{ti} - z_{ri}$$

(4)

$$d_i = \sqrt{dx_i^2 + dy_i^2 + dz_i^2}$$

(5)

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N}$$

(6)

$$MD = \frac{\sum |d_i - \mu|}{N}$$

(7)

$$D = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - \mu)^2}$$

(8)

式中: $X_1$ 、 $Y_1$  和  $Z_1$  为扫描仪坐标系; $X_2$ 、 $Y_2$  和  $Z_2$  为拼接坐标系; $X_0$ 、 $Y_0$  和  $Z_0$  为平移参数; $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  和  $\epsilon_z$  为旋转系数; $m$  为放大系数; $dx_i$ 、 $dy_i$  和  $dz_i$  为第  $i$  个靶标原始  $x$ 、 $y$  和  $z$  坐标与拼接后坐标的偏差; $d_i$  为第  $i$  个靶标原始坐标与拼接后坐标的偏差; $\mu$  为所有靶标偏差的平均值; $MD$  为平均偏差; $D$  为标准差。

通过数据预处理、拼接,最终形成桥梁点云如图 2 所示,点云平均点间距为 3.1 mm,基于此可进行后续的桥梁健康监测研究。

表 2 扫描拼接精度(2014 年)

| 时间       | 扫描站/站 | 使用靶标数/个 | 平均偏差 (MD)/mm | 标准偏差 (D)/mm | 最大偏差/mm |
|----------|-------|---------|--------------|-------------|---------|
| 6 月 19 日 | 16    | 88      | 1.10         | 0.39        | 1.08    |
| 11 月 2 日 | 12    | 63      | 1.30         | 0.65        | 1.32    |



图 2 拼接形成桥梁点云数据

3.5 二维图件绘制

由于桥梁建设时间久远、管理机构多次更迭、纸质资料保管不善等原因,造成大部分中小型的危旧桥梁图纸缺失,使得桥梁的维护、保养、改扩建等极为不便。该文通过设置点云的固定面、分割面附近一定宽度(如 5 mm)的点云,而后通过算法按内侧点、外侧点、最高点、最低点或平均点等类型连接点云形成轮廓线,解决了因点云错选漏选而造成桥梁结构轮廓失真的弊病。此次研究中,主要采用外侧点绘制桥梁的横断面(图 3)和桥墩轮廓(图 4),最低点绘制拱肋拱腹线(图 5)等二维图件;在横断面图(图 3)中,可对主要结构尺寸和名称进行标注,形成适用于日常管理的工作用图。通过对图 4、6 的进一步加工,还可用于后续维护和变形分析。

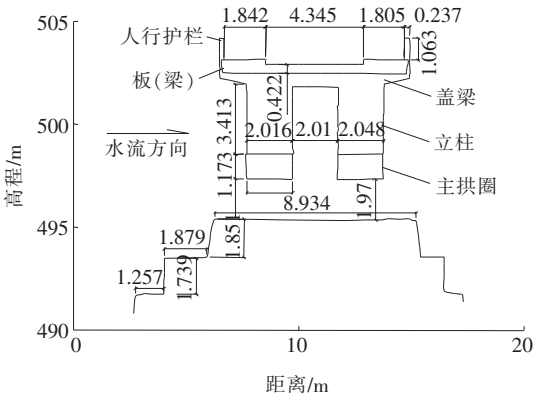


图 3 桥梁横断面图



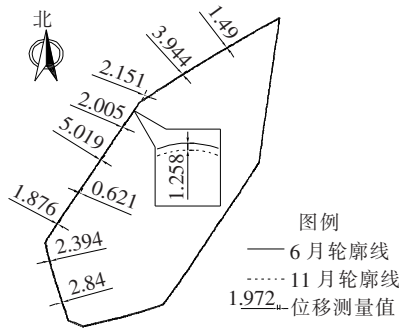


图 4 桥墩轮廓线位移检测示意图(单位:mm)

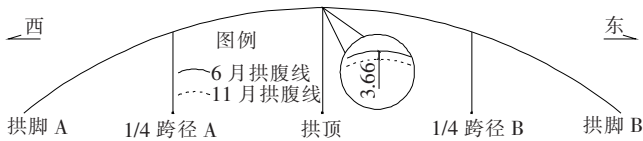
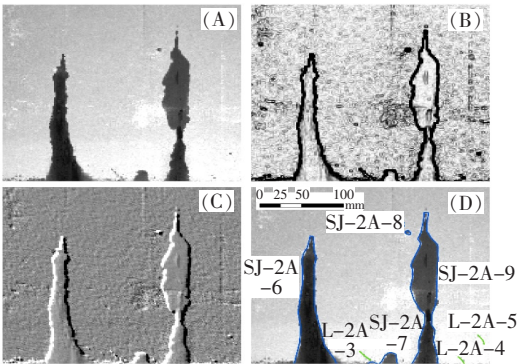


图 5 不同跨径沉降检测示意图(单位:m)

4 结果与分析

4.1 病害检测

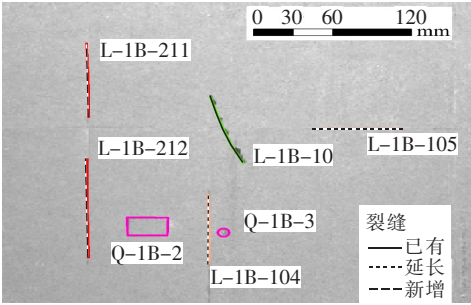
混凝土桥梁的病害主要分为表层缺陷和裂缝两大类,混凝土剥落、表层成块掉落、露筋、空洞等是表面缺陷的主要形式;裂缝可从安全、成因、力学机理、结构承载力等角度进行划分。基于三维激光技术进行病害检测主要方法有 2 类:① 对点云处理后再进行检测;② 联合点云和相片数据处理为正射影像图,再通过图像处理的方法进行裂缝检测。该文采用文献[22]的方法,制作桥梁拱腹面的正射影像图,将正射影像图进行边缘化、雕刻化等专业图像处理,再进行人机交互的裂缝、水迹线、缺陷的识别与测量,获得的结果如图 6 所示。多次扫描并按同一参数处理后,即可分析裂缝的



(A)原始图像;(B)边缘增强;(C)雕刻化;(D)病害识别;SJ 表示水迹线;L 代表裂缝;2A 代表拱肋编号)

图 6 拱腹面裂缝识别与测量

新增、延长与收缩、消失情况,结果如图 7 所示。对不同缺陷进行编号,以便后续持续对比分析。



注:Q 代表缺陷;1B 代表拱肋编号

图 7 裂缝变化情况分析

4.2 垂向位移

为充分发挥点云数据相对于全站仪和 GNSS 单点监测的优点,分别利用面状和线状测量结果进行桥面与拱腹面的垂向位移分析。

4.2.1 桥面变化

选取两次扫描中桥面的同一位置点云数据,采用点云后处理软件进行高程异常点的初次过滤,建立初步表面模型,而后删掉表面异常峰值,形成最终桥面模型。以 6 月桥面为基础,对比 11 月表面,得到桥面垂向变化(图 8)。可见桥面沉降为 $+8 \sim -8$  mm(“+”代表桥面上升,“-”代表桥面下降),桥面中部位置靠近桥墩处总体沉降较小,为 $-1.5 \sim +1.5$  mm;桥面两侧变化幅度较大,部分区域超过 $\pm 8$  mm。

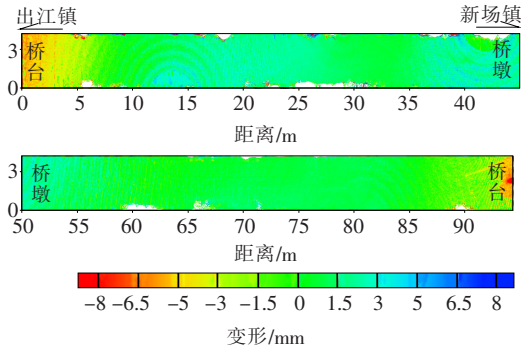


图 8 桥面垂向变形量图

提取桥面每一点的沉降幅度(共计 4 374 627 点),按一定分组间距可得到每个区间的百分比,如图 9 所示。从图 9 可知: $-3.0 \sim -1.5$  mm、 $-1.5 \sim 0$  mm 两个区间所占比例最大,两者之和为 72.03%;沉降幅度大于 $\pm 5.0$  mm 的较少,约占 1.84%。

4.2.2 拱腹线沉降

设固定的竖直平面通过每个肋拱,拱肋编号见图

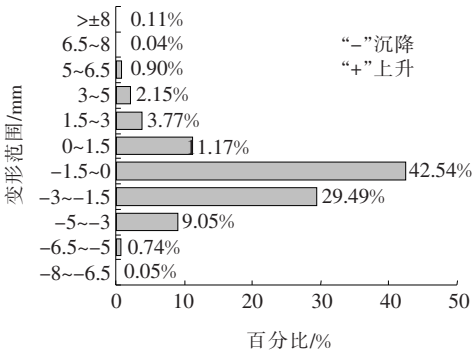


图 9 桥面垂向变形范围比例图

1. 绘制拱腹线,在每条拱腹线的拱脚、1/4 跨径和拱顶等 5 个固定位置,测量 2 次扫描形成拱腹线的距离(图 5),即为垂向位移,结果如表 3 所示。选定的竖直剖面 and 不同跨径监测位置可持续利用,有利于今后持续进行沉降测量和分析。

表 3 拱腹线不同位置沉降统计表

| 拱肋<br>编号 | 沉降/mm  |             |      |             |      |
|----------|--------|-------------|------|-------------|------|
|          | 拱脚 A   | 1/4<br>跨径 A | 拱顶   | 1/4<br>跨径 B | 拱脚 B |
| 1A       | -7.80  | -0.91       | 9.00 | 10.35       | 3.33 |
| 1B       | 9.35   | 4.92        | 9.00 | 7.87        | 6.84 |
| 2A       | -11.46 | 0.73        | 7.40 | 13.24       | 6.86 |
| 2B       | 4.33   | 4.52        | 8.00 | 7.48        | 8.61 |

注:“+”代表沉降,“-”代表上升。最大值为 13.24,最小值为-11.46,平均值为 5.08。

由表 3 可知:拱腹线沉降平均值为 5.08 mm;最大沉降值为 13.24 mm,位于 2A 拱肋的 1/4 跨径 B;最小沉降值为-11.46 mm,位于 2A 拱肋的拱脚 A。

4.3 水平位移

设置一个通过中心桥墩且高于一般洪水位,高程为 494.746 m 的固定平面,制作桥墩轮廓线,采用轮廓线和质心等 2 种方案进行桥墩水平位移监测。

4.3.1 轮廓线位移

按 0.1 m 定距等分轮廓线,在等分点位置测量 2 次轮廓线间距离,即为桥墩水平位移数据(图 4),共获得 418 个位移测量数据。

对测量结果进行统计,桥墩最大位移量为 27.43 mm,最小为 0.01 mm,平均为 3.56 mm(表 4)。将位移量划分为 11 组,统计每组所占百分比,形成图 10。由图 10 可见位移量为 2.09~3.13 mm 所占比例最大,为 20.10%;位移量为 0.02~6.24 mm 的 6 个区

间所占比例都大于 10%,总占比达 89.95%。

表 4 轮廓线位移统计 mm

| 平均   | 标准差  | 最小值  | 最大值   |
|------|------|------|-------|
| 3.56 | 2.64 | 0.01 | 27.43 |

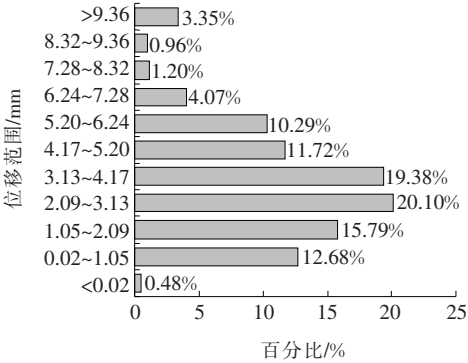


图 10 轮廓线位移范围比例图

4.3.2 质心点

根据前文获取桥墩轮廓线,采用文献[23]的方法计算桥墩 2 次扫描轮廓线的质心点,由此可计算桥墩质心位移量及方向(图 11),获得结果见表 5。由表 5 可见桥墩质心向 213.81°方向(西河下游)移动了 3.11 mm,位移距离与通过轮廓线计算的平均值很接近,进一步说明了此方法的有效性。

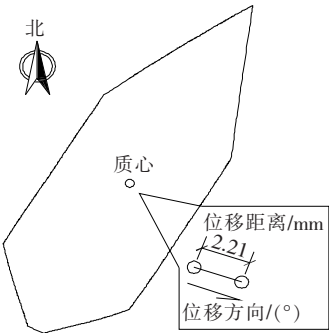


图 11 桥墩质心位移检测示意图

表 5 质心位移统计(2014 年)

| 监测<br>时间/<br>(月、日) | 质心点坐标       |             |           | 位移<br>量/<br>mm | 位移<br>方位<br>角/(°) |
|--------------------|-------------|-------------|-----------|----------------|-------------------|
|                    | E/m         | N/m         | H/m       |                |                   |
| 06.19              | 1 050.925 3 | 1 996.276 9 | 494.746 0 |                |                   |
| 11.02              | 1 050.923 6 | 1 996.274 3 | 494.746 0 | 3.11           | 213.18            |
| 变化量                | -0.001 7    | -0.002 6    | 0         |                |                   |

注:以 6 月 19 日数据为参照基准。

## 5 结语

利用三维激光扫描技术,对大邑县虎跳河大桥进行了健康指标分析,复原了缺失的桥梁二维图件,并制作了拱肋拱腹线和桥墩轮廓线用于变形分析;结合点云数据和图像分析方法,进行了桥梁混凝土表面病害的识别、测量和对比。桥面垂向变化分析结果显示:桥墩附近沉降较小、桥台附近沉降幅度较大;拱腹线不同位置处的沉降平均值为 5.08 mm。通过定距等分轮廓线检测的桥墩平均水平位移为 3.56 mm;通过桥墩质心分析的水平位移为 3.11 mm,方向为向西河下游。两种方法分析的位移量相近。

上述试验与分析结果表明:采用合理的控制测量、靶标布设、采集参数、数据处理和资料分析方法,三维激光点云数据的精度可达到较高水平,满足危旧桥梁病害检测和变形监测的技术要求。

现有三维激光扫描技术对裂缝宽度的测量还较为困难,这将是今后仪器性能提升和分析方法改进的主要方向;基于图像处理技术进行裂缝识别,已提出阈值分割、边缘检测、监督学习等自动识别方法,今后将朝着计算机视觉、卷积神经网络等人工智能识别的方向发展。

## 参考文献:

- [1] 吴迪军. 桥梁工程测量技术现状及发展方向[J]. 测绘通报, 2016(1).
- [2] 杨国玉. 三种桥梁变形监测方法的对比研究[J]. 测绘技术装备, 2016(3).
- [3] 郭成超, 许朋飞, 崔璨. 桥面铺装病害检测技术研究[J]. 中国工程科学, 2017(6).
- [4] 高少强, 刘利生, 杨新伟. 数字图像相关法在桥梁伸缩缝监测预警中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2018(S2).
- [5] 贺拴海, 赵祥模, 马建, 等. 公路桥梁检测及评价技术综述[J]. 中国公路学报, 2017(11).
- [6] 闫志刚, 岳青, 施洲. 沪通长江大桥健康监测系统设计[J]. 桥梁建设, 2017(4).
- [7] 李万恒. 桥梁养护的形势与任务[J]. 中国公路, 2011(23).
- [8] 王莫. 三维激光扫描技术在故宫古建筑测绘中的应用研

- 究[J]. 故宫博物院院刊, 2011(6).
- [9] 刘昌军, 赵雨, 叶长锋, 等. 基于三维激光扫描技术的矿山地形快速测量的关键技术研究[J]. 测绘通报, 2012(6).
- [10] 尹恒, 封全宏, 廖紫骅, 等. 基于三维激光扫描技术的病害隧道监测[J]. 地下空间与工程学报, 2014(4).
- [11] 吴静, 靳奉祥, 王健. 基于三维激光扫描数据的建筑物三维建模[J]. 测绘工程, 2007(5).
- [12] RIVEIRO B, MORER P, ARIAS P, et al. Terrestrial Laser Scanning and Limit Analysis of Masonry Arch Bridges[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(4): 1 726—1 735.
- [13] VALENÇA J, PUENTE I, JÚLIO E, et al. Assessment of Cracks on Concrete Bridges Using Image Processing Supported by Laser Scanning Survey[J]. Construction and Building Materials, 2017, 146: 668—678.
- [14] YANG H, OMIDALIZARANDI M, XU X, et al. Terrestrial Laser Scanning Technology for Deformation Monitoring and Surface Modeling of Arch Structures[J]. Composite Structures, 2017, 169: 173—179.
- [15] 王延亮, 夏国芳, 胡春梅. 利用三维激光扫描技术进行工业设备三维重建及变形分析[J]. 测绘通报, 2012(2).
- [16] 尚涛, 孔黎明. 古建筑保护方法的数字化研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006(1).
- [17] 吕磊, 邢汉发, 王叙泉. 三维激光扫描技术在城市建筑竣工测量中的应用研究[J]. 城市勘测, 2014(1).
- [18] 刘欢, 施富强, 郭万佳, 等. 相位式地面三维激光扫描仪变形监测试验研究[J]. 西安科技大学学报, 2017(6).
- [19] JGJ 8—2016 建筑变形测量规范[S].
- [20] 金玉泉. 桥梁的病害及灾害[D]. 同济大学硕士学位论文, 2006.
- [21] TURKAN Y, HONG J, LAFLAMME S, et al. Adaptive Wavelet Neural Network for Terrestrial Laser Scanner-Based Crack Detection[J]. Automation in Construction, 2018, 94: 191—202.
- [22] 褚平进. 基于三维激光扫描数据的单圆盾构隧道内壁影像生成算法[J]. 浙江水利水电学院学报, 2016(1).
- [23] 李玉冰, 郝永杰, 刘恩海. 多边形重心的计算方法[J]. 计算机应用, 2005(S1).
- [24] 邵艳, 余绍淮, 徐乔. 基于机载激光扫描的山区高速公路环保选线研究[J]. 中外公路, 2019(3).
- [25] 张霄, 罗博仁, 明洋. 基于车载激光扫描与卫星图像测量协同的公路改扩建勘测设计方法研究[J]. 中外公路, 2018(2).