

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107016

# 基于机器视觉的连通管液位测量方法研究

刘昕宇 王雪梅 倪文波

(西南交通大学 机械工程学院 成都 610031)

**摘要:** 连通管液位测量是实现桥梁挠度检测的一种重要方式。针对传统连通管液位测量方法存在的实时性和测量精度不足的问题,基于机器视觉研究了一由液位观测管、光源、平行光板、工业相机、微型处理器和路由器等构成的连通管液位测量系统。通过图像预处理获取液位图像边缘轮廓,并采用亚像素边缘检测算法进一步精确定位液位图像边缘轮廓的底部坐标。提出了一种基于相对运动原理的液位高度标定测量方法,利用最小二乘法拟合得到液位图像边缘轮廓底部坐标与液位高度的函数关系。最后在实验室通过静态测量试验与拟桥振动试验验证了该液位测量方法的可行性、准确性和动态响应性,其最大绝对测量误差不超过 0.5 mm,能够满足连通管桥梁挠度测量的工程应用需要。

**关键词:** 液位测量;连通管;图像处理;亚像素边缘检测

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Research on liquid level measurement method of connecting pipe based on machine vision

Liu Xinyu Wang Xuemei Ni Wenbo

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The liquid level measurement of the connecting pipe is an important way to detect the deflection of the bridge. Aiming at the problems of insufficient real-time performance and measurement accuracy of traditional liquid level measurement methods for connected tubes, a liquid level measurement system for connected tubes was studied based on machine vision, which was composed of liquid level observation tube, light source, parallel light plate, industrial camera, microprocessor and router. The edge contour of the liquid level image was obtained by image preprocessing, and the sub-pixel edge detection algorithm was used to accurately locate the bottom coordinates of the edge contour of the liquid level image. A method for calibrating and measuring the liquid level height based on the principle of relative motion was proposed. The function relationship between the bottom coordinates of the edge contour of the liquid level image and the liquid level height was obtained by fitting with the least square method. Finally, the feasibility, accuracy and dynamic response of the liquid level measurement method are verified by static measurement test and pseudo-bridge vibration test in the laboratory. The maximum absolute measurement error is less than 0.5 mm, which can meet the engineering application needs of deflection measurement of connecting pipe bridges.

**Keywords:** liquid level measurement; connecting pipe; image processing; subpixel edge detection

## 0 引言

桥梁挠度是评价桥梁安全性的一项重要指标,准确的桥梁挠度测量能为桥梁结构的损伤识别和健康监测提供有效参数<sup>[1]</sup>,对于桥梁在长期荷载下的监测与维护具有重要意义。目前我国桥梁挠度测量主要采用连通管、GPS 和水准仪等,其中以连通管方式居多<sup>[2]</sup>。其利用连通管内液面水平的原理,沿梁体布设连通管道,通过测量各观测点处连

通管内液位的变化,从而换算得到桥梁挠度的变化<sup>[3]</sup>。其中液位的准确测量是关键,对于连通管液位高度的测量,一些学者尝试采用光电传感器<sup>[4-5]</sup>,虽然其理论精度可以达到毫米级,但是该类方法由于受到光源、光电探测器尺寸的限制,往往需要借助机械传动结构对连通管进行扫描,设备复杂昂贵,易损坏;也有采用半集成光电传感器,虽然其克服了机械传动结构带来的缺陷,但是其必须要借助浮标来反映液位的变化情况,同时浮标与管壁须有一定间隙,在实际

收稿日期:2021-06-22

测量中由于受到浮标的晃动、液体的可压缩性、光电探测器与光源尺寸等因素的影响,无法准确实时呈现液位的真实变化情况,在测量过程中引入了较多的误差影响因素<sup>[6]</sup>;也有采用超声波进行测量<sup>[7]</sup>,但其精度多为厘米级,且稳定性不好,易受到环境温度等干扰;还有采用压力传感器<sup>[8]</sup>,但其实时性较差,且设备也易受外界环境因素影响,不宜作为长期监测的手段。

针对目前相关研究的不足,本文研究了一种基于机器视觉和图像处理的连通管液位测量方法。该法实时采集液位图像,采用灰度处理、ROI 区域提取、阈值分割、形态学处理、Canny 边缘检测与亚像素边缘检测等算法对图像进行处理<sup>[9-10]</sup>,能够准确获取液位图像边缘轮廓的底部坐标;通过标定测量,建立连通管液位高度与液位边缘图像底部坐标之间的函数关系,据此可由图像检测和处理得到的液位边缘底部坐标换算得到连通管液位高度。该方法测量装置简单,对环境的适应性强,误差影响因素少,依靠先进的机器视觉和图像处理算法可以达到较高的测量精度,可实现连通管液位的实时自动化监测,为桥梁挠度测量提供辅助支持<sup>[11-12]</sup>。

## 1 连通管液位测量总体方案

### 1.1 连通管液位成像系统分析

由于连通管液位测量装置需沿连通管分散安装于桥梁上,为了方便现场安装和使用,测量装置应尽可能小巧且密封。考虑安装尺寸限制和简支梁公路桥最大挠度变化量<sup>[13]</sup>不超过 100 mm,对于液位成像系统,本文选取物距  $D=100$  mm,测量范围  $h=200$  mm 的结构参数,如图 1 所示是连通管液位成像光路原理。同时为了满足毫米级测量精度和实时监测的应用需求,光学成像器件应具有输出速度快、分辨率高、光学畸变小的特点,而 CMOS 图像传感器成本低、功耗低且输出响应速度快,故本文选用 200 万像素分辨率(1 920×1 080)、1/2.7"(感光尺寸长度  $u=5.27$  mm)规格的 CMOS 感光芯片以保证测量精度。

$$f = u * D / h \quad (1)$$

根据基本成像公式(1),选取焦距  $f=2.6$  mm 的低畸变镜头组成测量模块的成像系统。

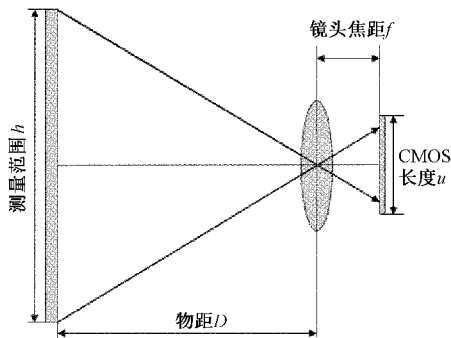


图 1 连通管液位成像光路原理

由以上成像参数可知图像测量系统的理论成像分辨率可达 0.1 mm/pixel,即 CMOS 图像传感器单个像素能分辨的被测液位的变化量,能够满足连通管液位测量的工程应用要求。

此外,在成像时好的光源能够突出连通管液位边缘区域,减少其他区域的干扰,提高检测效率,因此本文选用工业中常用的 LED 白光光源,并配合散光板将光场布满整个液位观测管,打光后液位边缘的图像效果如图 2 所示。可以看到测量视场中液位边缘图像清晰,与背景之间具有高的对比度。

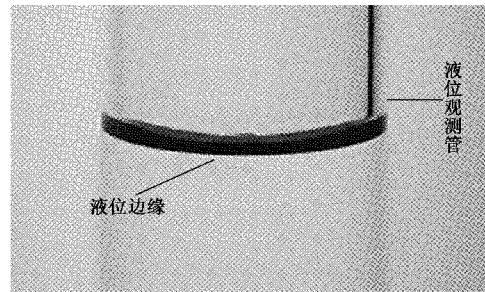


图 2 布置光场后液位边缘图像

### 1.2 液位测量系统组成及工作原理

连通管液位测量系统由测量模块、连通管道与通信模块 3 部分组成。其中测量模块由工业相机、液位观测管、白光光源(LED)、散光板和微型处理器(终端)等构成;通信模块采用无线路由器。考虑到实际工作环境复杂多变,整个测量系统封装在三防塑料基业箱内。

连通管液位测量系统工作原理如图 3 所示。终端通过串口通信的方式调取工业相机的图像数据,并对图像数据进行实时处理。通过灰度化、ROI 区域提取、双边滤波、阈值分割、形态学处理与 Canny 边缘检测等图像预处理手段排除图像的背景干扰,提取完整的液位图像边缘,并进一步使用 Zernike 正交矩的亚像素边缘检测算法获得液位图像边缘轮廓的底部坐标。最后通过液位高度标定测量把液位图像边缘轮廓的底部坐标换算成所测液位的高度,并把测量结果通过无线路由器以 TCP/IP 协议方式发送至上位机。

## 2 液位图像处理

### 2.1 液位图像预处理

为了得到高精度的液位测量结果,观测管中的液位边缘的底部坐标检测必须非常精确。因此,对液位图像进行准确、高效的预处理是非常重要的。图像预处理流程包括灰度处理、ROI 区域提取、双边滤波、阈值分割并配合形态学处理加强边缘特征,最后采用 Canny 边缘检测算法获得液位图像边缘轮廓。

#### 1) 灰度处理与 ROI 区域提取

在图像预处理中,灰度处理可过滤掉图像中的色彩信

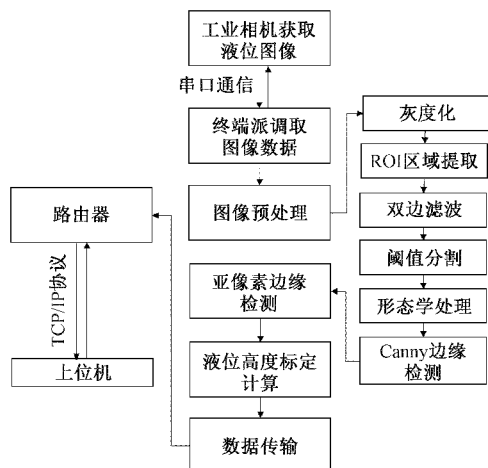


图 3 连通管液位测量系统工作原理

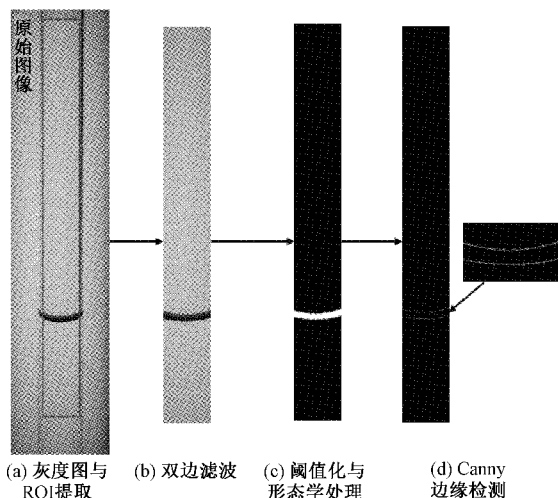


图 4 连通管液位图像预处理

息,简化图像矩阵的运算复杂度,从而提高图像处理速度。具体可通过加权平均法将 RGB 三个颜色转换成灰度图像。

由于检测图像的大小为  $1\ 920 \times 1\ 080$  像素,其中包含了大量的无效计算区域,为了减少终端的运算负荷,排除管壁等非目标区域对算法的干扰,以提高图像处理效率。利用 OpenCV 中的 Rect 函数截取图像中部目标区域,如图 4(a)中方框区域所示。

2) 双边滤波

在图像的采集与传输过程中,容易产生噪声干扰,双边滤波由于同时考虑了像素点空域信息和值域信息,因此能够在去除噪声的同时保护图像的边缘信息,滤波效果如图 4(b)所示。

3) 阈值分割与形态学处理

在双边滤波的基础上,利用 OpenCV 中自适应阈值法将液位图像边缘与背景做二值化处理,并通过形态学中开运算消除小的非关键区域,得到完整的液位边缘与背景分割图像,如图 4(c)所示。

4) Canny 边缘检测

最后利用 OpenCV 中的 Canny 边缘检测算法提取得到液位的完整边缘轮廓,如图 4(d)所示,完成液位图像的预处理。

2.2 亚像素边缘检测

当获取液位边缘轮廓后,为了提高液位测量精度,本文通过亚像素边缘检测算法将液位边缘轮廓的底部坐标定位精度由像素级提升至亚像素级。常用的亚像素边缘检测算法主要分为矩方法、拟合法与插值法 3 类<sup>[14]</sup>。矩方法因其计算速度快、精度高和鲁棒性强等优点受到广泛关注。在矩方法中由于 Zernike 矩的正交特性不会产生冗余信息,且计算简单,故本文将 Zernike 矩亚像素法应用于液位边缘轮廓底部的高精度定位。

Zernike 正交矩亚像素边缘检测算法<sup>[15]</sup>是通过将图像边缘建立理想阶跃灰度模型,计算图像 3 个不同阶次的正

交矩,将模型中 4 个参数映射到 3 个正交矩中,再通过正交矩计算图像边缘所在直线参数,从而实现精确定位图像边缘的亚像素坐标。如图 5 所示,假设单位圆的中心点  $O(x, y)$  为图像的某个像素点中心坐标,液位图像的边缘  $L$  经过该像素点区域, $l$  为像素中心点到边缘线  $L$  的垂直距离,交点  $P(x_s, y_s)$  即为该像素点  $O(x, y)$  的亚像素坐标。图 5 中  $\theta$  为  $l$  与  $x$  轴的夹角,设  $r$  为背景部分的灰度, $k$  为液位边缘图像部分与背景部分的阶跃灰度值,则液位边缘图像部分的灰度值为  $r+k$ 。

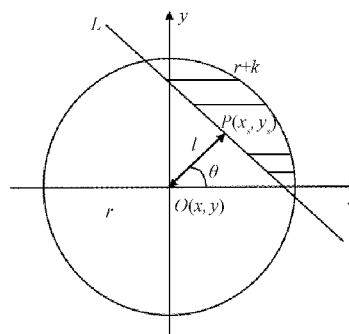


图 5 亚像素边缘检测理想阶跃模型

图像的  $p$  阶  $q$  次 Zernike 正交矩定义<sup>[16]</sup>为:

$$Z_{pq} = \frac{p+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) V_{pq}^*(\rho, \theta) dx dy \quad (2)$$

式中: $f(x, y)$ 为点  $O(x, y)$  处的灰度值; $V_{pq}^*(\rho, \theta)$  为极坐标系单位圆内的 Zernike 多项式  $V_{pq}(\rho, \theta)$  的复共轭。单位圆内, $Z_{pq}$  的离散条件可以表示为:

$$Z_{pq} = \sum_x \sum_y f(x, y) V_{pq}^*(\rho, \theta) \quad (3)$$

由于 Zernike 矩具有旋转不变性,图像顺时针旋转角度  $\theta$ , 则旋转前后的 Zernike 矩  $Z_{pq}$  和  $Z'_{pq}$  有如下关系:

$$Z'_{pq} = Z_{pq} e^{-iq\theta} \quad (4)$$

Zernike 矩亚像素边缘检测算法通过计算 3 个不同阶

次的 Zernike 矩进行边缘定位,分别记为  $Z_{00}$ 、 $Z_{11}$  和  $Z_{20}$ ,这 3 个矩所对应的积分核函数多项式分别如式(5)所示。

$$V_{00} = 1, V_{11} = x + iy, V_{20} = 2x^2 + 2y^2 - 1 \quad (5)$$

并且  $Z_{00}$ 、 $Z_{11}$ 、 $Z_{20}$  与  $Z'_{00}$ 、 $Z'_{11}$ 、 $Z'_{20}$  在旋转前后有如下关系:

$$Z'_{00} = Z_{00}, Z'_{11} = Z_{11}e^{i\theta}, Z'_{20} = Z_{20} \quad (6)$$

根据 Zernike 矩的定义和旋转前后 Zernike 矩的关系可计算出  $Z_{00}$ 、 $Z_{11}$  和  $Z_{20}$ ,再联立求出理想阶跃边缘模型的 4 个参数为:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}[Z_{11}]}{\text{Re}[Z_{11}]} \right) \quad (7)$$

$$l = \frac{Z_{20}}{Z'_{11}} \quad (8)$$

$$k = \frac{3Z'_{11}}{2(1-l^2)^{3/2}} \quad (9)$$

$$r = \frac{Z_{00} - \frac{k\pi}{2} + k \sin^{-1}(l) + kl \sqrt{1-l^2}}{\pi} \quad (10)$$

假设 Zernike 矩模板为  $N \times N$ ,考虑到模板放大效应<sup>[17]</sup>,需要将垂直距离  $l$  放大  $N/2$  倍,得到最终亚像素边缘点  $P(x_s, y_s)$  的检测公式(11)。

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \frac{Nl}{2} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (11)$$

通过上述亚像素边缘检测算法定位液位图像边缘轮廓最低点的坐标  $P_{low}(x, y)$ 。如图 6 所示,图中每个箭头方向代表该位置像素点亚像素边缘的灰度阶跃方向,箭头尾部点代表其亚像素边缘点的位置,而最低点的亚像素坐标则用方框标出。通过亚像素边缘检测算法处理后得到的液位图像边缘轮廓最低点坐标  $P_{low}(x, y)$  相较于传统算法更加精确,理论像素定位精度达到 0.1 pixel。

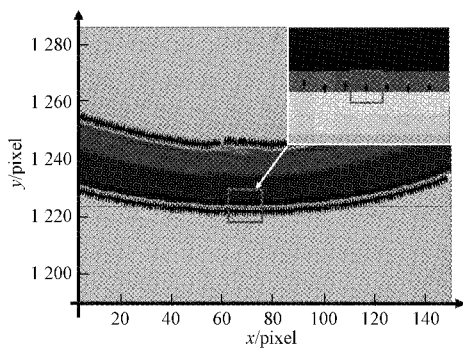


图 6 液位图像亚像素边缘检测与最低点坐标获取

### 3 液位高度标定与测量

获得液位图像亚像素边缘的底部坐标  $P_{low}(x, y)$  后,提取其  $y$  轴坐标值作为液位图像边缘轮廓高度坐标值。为了实现连通管内实际液位高度测量,还需借助高精度的激光位移传感器建立实际液位高度与液位图像边缘轮廓高度坐标值之间的对应关系。由于提供非常准确的液位变化

较为困难,且激光位移传感器无法直接测量透明液体的高度,因此本文提出通过固定观测管中液位高度,而改变精密升降台上工业相机高度进行液位高度标定的方案,标定测量原理如图 7 所示。通过光源、平行光板与液位观测管搭建一个在相机视角中只有液位会随相机高度变化而变化,其余背景信息都相对稳定的环境,并通过 2.1 节所述图像处理手段对液位检测图像进行预处理,最终可以获得不同高度下的液位图像,如图 8 所示。

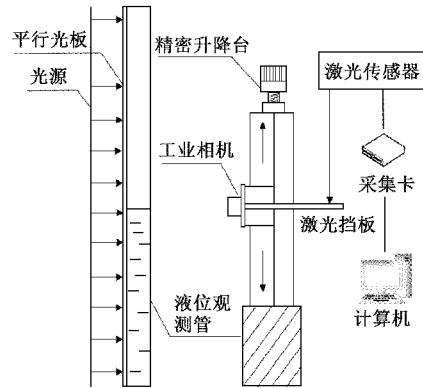


图 7 液位高度标定原理

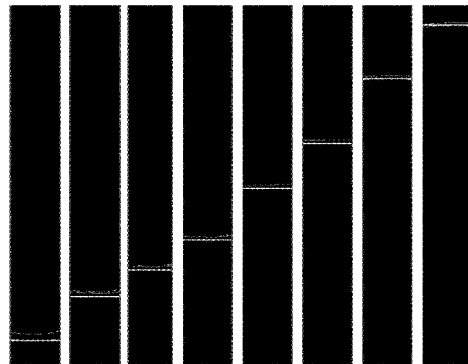


图 8 不同高度下获取的液位图像

其中激光位移传感器采用 KEYENCE-IL-600,重复精度为  $50 \mu\text{m}$ ;精密升降台移动精度为  $0.01 \text{ mm}$ 。激光位移传感器用于测量工业相机的实际高度,其可映射为液位高度;同时视觉测量模块获取液位图像边缘轮廓高度坐标值。设激光位移传感器测量得到的高度值为  $h_i (i=1 \sim n)$ ,相应的液位图像边缘轮廓高度坐标值为  $y_i (i=1 \sim n)$ 。以  $y$  和  $h$  分别作为横、纵轴,绘制散点图,如图 9 所示,可以看到其在测量范围内呈很好的线性关系。

可通过最小二乘法拟合得到线性回归方程:

$$h = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 y \quad (12)$$

其中,

$$\hat{\beta}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 \sum_{i=1}^n h_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n y_i h_i}{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n h_i \right)^2} \quad (13)$$



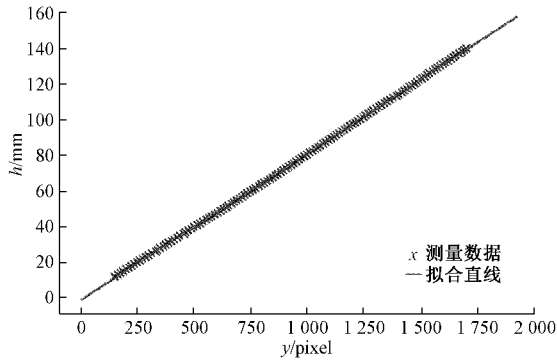


图 9 液位高度  $h$  与图像边缘坐标  $y$  的函数关系

$$\hat{\beta}_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i h_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n h_i}{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2} \quad (14)$$

使用时将工业相机检测得到的液位图像边缘轮廓高度坐标值  $y$  代入上述拟合方程中,即可计算得到实际液位高度  $h$ 。该液位测量方法的重复测量误差大小不超过 0.25 mm。需要注意的是,通过上述液位高度标定测量得到的线性回归方程与标定测量系统的安装视距等参数有关,如果成像系统相关参数发生改变,需重新进行标定测量。

### 4 试验研究

#### 4.1 液位高度静态测量试验

为了检验本文提出的液位高度测量方法的可行性,利用注射器、步进电机和滚珠丝杠搭建了如图 10 所示的液位高度静态测量试验系统。步进电机通过滚珠丝杠控制注射器稳定输出一定量的液体,其进给精度为 0.001 mm,进给速度为 10 mm/s。试验时,将已知体积量的液体注入连通管,注射器分别以 1 mm(试验 1)、5 mm(试验 2)、10 mm(试验 3)的进给量改变液位观测管中液位高度。液面理论位移量等于注射进给的定量液体体积换算得到的液位观测管中的液位位移量。测量结果如表 1 所示,测量的最大绝对误差不超过 0.5 mm,平均误差为 0.119 mm,最大相对误差不超过 5%。测量结果验证了本文提出的液位高度测量方法的可行性,并且测量精度满足工程应用要求。

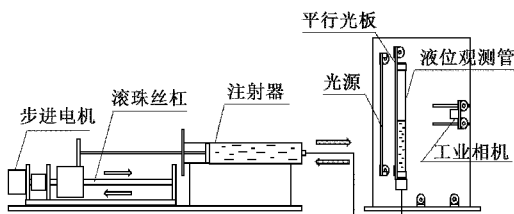


图 10 液位高度标定方案验证试验原理

#### 4.2 连通管系统拟桥振动试验

为了进一步检验该液位测量方法在桥梁连通管上能否

表 1 精度测试

	理论位移/ mm	测量位移/ mm	绝对误差/ mm	相对 误差/%
	1.36	1.41	0.05	3.84
	2.72	2.59	-0.13	4.69
	4.08	4.14	0.05	1.28
	5.44	5.33	-0.12	2.16
	6.81	6.85	0.04	0.62
	8.17	8.13	-0.03	0.40
	9.53	9.49	-0.04	0.45
试验 1	10.89	10.94	0.05	0.48
	12.25	12.29	0.04	0.35
	13.61	13.49	-0.12	0.86
	14.97	15.02	0.05	0.35
	16.33	16.22	-0.12	0.72
	17.69	17.74	0.04	0.24
	19.06	19.10	0.04	0.22
	20.42	20.30	-0.12	0.58
	6.81	7.10	0.29	4.26
	13.61	13.40	-0.21	1.54
	20.42	20.51	0.09	0.44
	27.22	27.51	0.29	1.07
	34.03	34.43	0.40	1.18
	40.83	40.93	0.10	0.24
试验 2	47.64	47.74	0.10	0.21
	54.44	54.54	0.10	0.18
	61.25	61.51	0.26	0.42
	68.06	68.00	-0.06	0.09
	74.86	74.96	0.10	0.13
	81.67	81.76	0.09	0.11
	88.47	88.74	0.27	0.31
	95.28	95.54	0.26	0.27
	13.61	13.80	0.19	1.37
	27.22	27.42	0.20	0.72
	40.83	41.03	0.20	0.48
试验 3	54.44	54.82	0.38	0.69
	68.06	68.13	0.08	0.11
	81.67	81.69	0.03	0.03
	95.28	95.23	-0.05	0.05
	108.89	108.78	-0.10	0.10

准确实时反映其低频的振动,在实验室搭建了拟桥试验台进行振动测试。试验系统结构及工作原理如图 11 所示,连通管 B 端为模拟桥墩处,将该处连通管固定;将装有偏心轮的伺服电机放置于连通管 A 端底部,当伺服电机带动偏心轮转动,A 端平台高度随之呈谐波样变化,以此模拟桥梁的振动。在 A 端平台上安装激光传感器与液位测量装置,并

把激光传感器测量的平台振动位移与本文的液位测量值进行比较。

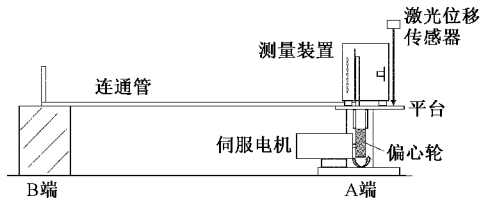


图 11 连通管系统拟桥振动试验原理图

根据连通管原理,A 端的液位位移可以反映 A 端的平台位移,试验结果如图 12(a)所示。考虑到实际桥梁振动的不规则性,在伺服电机稳定工作的情况下,引入干扰因素,人为的改变 A 端平台的高度,以检验该测量方法的稳定性,测试结果如图 12(b)所示。可以看到,两种情况下本文研究的液位测量方法都能很好地跟随振动源的位移变化,与激光位移传感器测量结果具有很好的一致性,测量结果能准确反应拟桥试验台的低频振动情况。

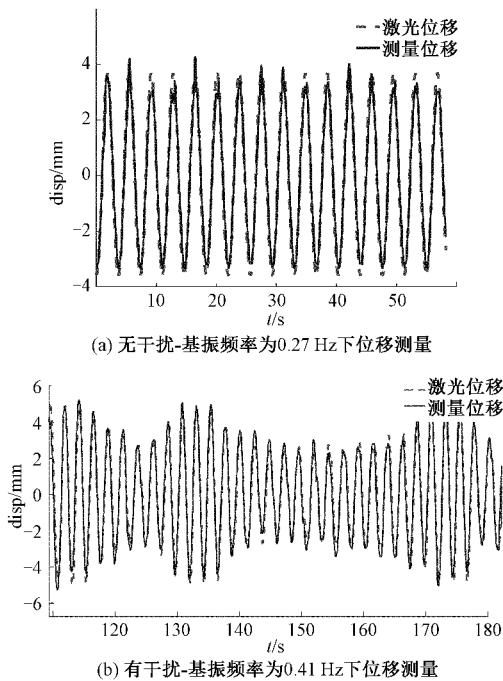


图 12 低频拟桥振动测试结果

## 5 结 论

本文基于机器视觉与图像处理技术,设计了由连通管道、液位观测管、光源、平行光板、工业相机和微型处理器等构成的连通管液位测量系统。采用灰度处理、ROI 区域提取、阈值分割、形态学处理、Canny 边缘检测与亚像素边缘检测等算法对液位图像进行处理,准确提取得到液位图像边缘轮廓的底部坐标。提出基于相对运动原理的液位高度标定测量方法,并采用最小二乘法拟合得到液位高度

与液位图像边缘轮廓底部坐标之间的函数关系。通过在实验室对该液位测量方法进行静态测量验证和低频拟桥振动试验,验证了该液位高度测量方法的可行性、准确性与实时跟随性。测量误差不大于 0.5 mm,满足工程应用要求。

在实际桥梁挠度监测过程中,由于存在多点激励且遍布连通管各个位置,振动激励源与干扰源并存等情况,这必然会引入其他噪声信号,导致液位测量值无法真实反应桥梁的挠度变化。未来的工作发展可以从如下几个方面展开:1)进一步研究连通管液位测量系统在多点激励情况下的液位值与桥梁挠度值之间的关系;2)尝试通过多传感器融合的方式剔除多干扰源带来的噪声信号。

## 参考文献

- [1] 魏斌,王强. 大跨度桥梁挠度监测方法评述[J]. 中外公路, 2015, 35(6): 164-169.
- [2] 孙丰春. 大跨径桥梁挠度变形监测技术应用实践[J]. 海洋测绘, 2020, 40(4): 77-82.
- [3] 梁天霄. 桥梁挠度自动测量方法研究综述[J]. 居业, 2017, (5): 36-37.
- [4] ZHANG C, ZHU Y, HUANG M, et al. Development of automatic water level monitor for reservoir based on image recognition[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1176(5): 052032.
- [5] 邹洪波. 基于图像识别技术的水位测量误差分析[J]. 广西水利水电, 2020(4): 36-39.
- [6] 朱世峰,周志祥. 测点处倾角对液位连通管式竖向位移测量的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(15): 185-190.
- [7] 常俊杰,罗文斌,曾雪峰,等. 基于空气耦合超声对储油罐液位的检测[J]. 中国测试, 2020, 46(9): 34-39.
- [8] 易汉斌,张冬兵,曾国良,等. 大跨径斜拉桥挠度监测系统实施方案研究[J]. 公路, 2015, 60(1): 62-66.
- [9] 宋帅帅,黄锋,江燕斌. 基于机器视觉几何量测量技术研究进展分析[J]. 电子测量技术, 2021, 44(3): 22-26.
- [10] 牛敏,邹战军,牛燕雄,等. 一种基于排序统计理论的快速图像中值滤波法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(6): 60-63.
- [11] 付耀衡,彭泳卿,刘鹏,等. 基于图像处理的液位测量技术研究现状与发展趋势[J]. 遥测遥控, 2020, 41(4): 18-27.
- [12] 周子佳. 基于图像识别的非入侵式液位测量方法[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2017, 37(4): 234-238.
- [13] 侯天宇,李文杰,赵君黎,等. 在役混凝土桥梁安全性评估目标可靠指标研究[J]. 公路, 2017, 62(3): 66-72.
- [14] 杨滨峰,李亚文,赵杰. 物体形状检测的亚像素细分

- 算法综述[J]. 计算机与数字工程, 2011, 39(11): 17-20.
- [15] 陈璐, 关立文. 基于改进 Zernike 矩的亚像素钻铆圆孔检测方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2019, 59(6): 438-444.
- [16] 刘明佩, 朱维斌, 叶树亮. 基于改进 Zernike 矩的小模数齿轮亚像素边缘检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 259-267.
- [17] 刘悦, 朱均超. 基于改进 Zernike 矩的光斑图像亚像素边缘检测算法[J]. 激光杂志, 2021, 42(5): 32-35.

### 作者简介

**刘昕宇**, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉技术及其应用。

E-mail: 602133534@qq.com

**王雪梅**(通信作者), 工学博士, 副教授, 主要研究方向为现代测控技术及应用。

E-mail: xmwang2012@home.swjtu.edu.cn

**倪文波**, 工学博士, 教授, 主要研究方向为机车车辆主动控制技术、列车制动技术。

E-mail: nwb@home.swjtu.edu.cn