

DOI:10.16136/j.joel.2022.02.0283

基于高速摄像技术的管系振动位移测量

俞树荣*, 李勇霖, 薛睿渊, 尹思敏

(兰州理工大学 石油化工学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:针对试验中高速摄像技术在远距离测量振动响应精度较低的问题,提出结合双三次插值法与 Sobel 算子边缘检测图像技术的方法,用其处理测得图像来提高测量精度。首先,设计了采用高速摄像与加速度计两种测量系统的管系振动台试验。然后,对高速摄像系统测得的图像与加速度计测得的加速度振动响应进行处理并提取位移振动响应数据。最后,从时域和频域两个角度对比高速摄像与加速度计两种测量系统测得的位移振动响应数据,对高速摄像系统测得数据的准确性进行分析。结果表明,结合双三次插值法与 Sobel 算子边缘检测图像处理技术优化高速摄像技术测得的图像可以获得满足测量与使用要求的高精度位移振动响应数据。

关键词:振动分析;超高速测量;图像增强;阀门管道系统;振动台

中图分类号:TP319 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2022)01-0181-06

Vibration displacement measurement of pipe system based on high-speed photography technology

YU Shurong*, LI Yonglin, XUE Ruiyuan, YIN Simin

(College of Petroleum and Chemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: Aiming at the low precision of the problem of high-speed photography technology at a long-distance measurement of the vibration response in the test, a method combining bicubic interpolation with Sobel operator edge detection image technology is proposed to improve the measurement precision. At first, the shaking table test of pipe system with two measuring systems, high-speed photography and accelerometer, is designed. Secondly, the image measured by the high-speed camera system and the acceleration vibration response measured by the accelerometer are processed, and the displacement vibration response data is extracted. Finally, the displacement vibration response data measured by high-speed photography and accelerometer are compared in time domain and frequency domain, and analyzing the accuracy of data measured by high-speed photography. The results show that the image measured by optimizing high-speed photography technology combined with bicubic interpolation and Sobel operator edge detection image processing can obtain high-precision displacement vibration response data to meet the measurement and use requirements.

Key words: vibration analysis; ultrafast measurement; image enhancement; pipeline valve system; vibration table

1 引 言

在土木工程、机械工程和核电等领域地震的影响是不可忽视的,为研究构筑物或设备的抗震性能,研究人员通常采用振动台试验对它们进行抗震鉴定^[1,2]。振动位移响应是振动台试验中重要的测量参数,由于位移测量通常较困难且复杂,多采用加速度计系统测量的振动加速度响应转化

为振动位移响应的方式。加速度计系统具有灵敏度高和造价低等优点,但是它受噪声影响大、布置复杂、适用范围有限且对构件特性有一定的影响^[3]。随着高速摄像技术和图像处理技术的发展,高速摄像技术凭借着受噪声影响小、布置方便、对构件特性影响小和能够直接测量位移响应等优点,已在各个领域做了大量的研究与实践^[4-7]。但是由于振动台试验存在振动台规模较

* E-mail: yusr@lut.edu.cn

收稿日期:2021-04-28 修订日期:2021-05-30

2.2 图像处理原理

双三次插值法常用于图像或视频的缩放,该方法可以在保留细节质量的同时提高测量的精度,但是会增加振动响应测量的误差。Sobel 算子边缘检测技术具有抗噪能力好、边缘定位准确等优点,采用该技术可以降低振动响应的测量误差。图像处理中结合这两种方法进行图像处理可以提高振动响应精度的同时,并将误差控制在允许范围内。

1) 双三次插值法

双三次插值法是以待求像素点为中心,根据 4×4 领域中像素的加权平均值计算得到待求像素值的方法^[13],可以描述为:

$$W(x) =$$

$$\begin{cases} 1 - 2.5|x|^2 + 1.5|x|^3, 0 \leq |x| < 1 \\ 2 - 4|x| + 2.5|x|^2 - 0.5|x|^3, 1 \leq |x| < 2, \\ 0, & 2 \leq |x| \end{cases} \quad (1)$$

$$f(P) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 f(G_{ij}) \cdot W(u_{ij}) \cdot W(v_{ij}), \quad (2)$$

式中, $W(x)$ 为参数取 -0.5 的 bicubic 函数, x 为待求像素点与参考像素点的距离, $f(P)$ 为该点像素值, G_{ij} 为整数位置像素点, u_{ij} 和 v_{ij} 分别为 P 与 G_{ij} 的纵向距离和横向距离。

2) Sobel 算子边缘检测

由于试验构件的跨度较长、管道与背景的灰度值相差较大并且振动响应主要沿着垂直方向,所以 Sobel 一阶边缘检测算子更适合本试验高速摄像技术中图像的优化。Sobel 算子以待处理像素为中心,对待处理像素点周围 4 个方向的像素灰度值进行加权运算,得出待处理像素的灰度值^[14],可以描述为:

$$\begin{aligned} f'_x(x, y) = & f(x-1, y+1) + 2f(x, y+1) + \\ & f(x+1, y+1) - f(x-1, y-1) - \\ & 2f(x, y-1) - f(x+1, y-1), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f'_y(x, y) = & f(x-1, y-1) + 2f(x-1, y) + \\ & f(x-1, y+1) - f(x+1, y-1) - \\ & 2f(x+1, y) - f(x+1, y+1), \end{aligned} \quad (4)$$

$$G[f(x, y)] = |f'_x(x, y)| + |f'_y(x, y)|, \quad (5)$$

式中, $f(x, y)$ 为输入图像的灰度值, $f'_x(x, y)$ 和 $f'_y(x, y)$ 分别为水平和垂直方向的一阶微分值, $G[f(x, y)]$ 为边缘梯度幅值。

2.3 加速度计系统数据处理原理

高速摄像系统测得的数据为位移振动响应数据,加速度计系统测得的数据为加速度响应数据,因此需要将加速度响应数据处理得到位移振动响应数据再进行对比。加速度信号在任一频率的傅里叶分量可以表达为^[15]:

$$a(t) = Ae^{j\omega t}. \quad (6)$$

初速度与初位移分量均为 0 时,对加速度信号的傅里叶分量两次积分可得出位移分量为:

$$x(t) = \int_0^t \left[\int_0^\tau a(\lambda) d\lambda \right] d\tau, \quad (7)$$

式中, $a(t)$ 为加速度信号在频率的傅里叶分量, A 为 $a(t)$ 对应的系数, j 为虚数, $x(t)$ 为速度信号在频率 ω 的傅里叶分量。

利用式(6)将加速度响应数据作傅里叶变换,然后利用式(7)将变换结果在频域里进行二次积分,最后经傅里叶逆变换得到位移振动响应数据。

3 结果分析

3.1 图像处理效果对比

图像处理效果对比图如图 3 所示。处理后图像的管道构件与背景区分度更加明显,提高了振动响应数据的测量准确度,从而降低了数据的误差。处理后图像的像素长度为 $0.11 \text{ mm} \sim 0.13 \text{ mm}$,即测量

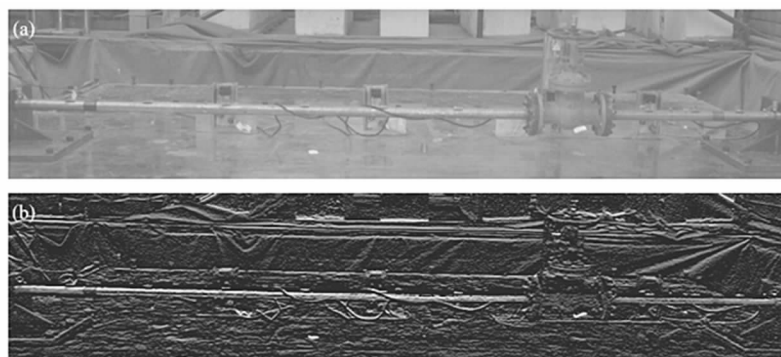


图3 图像处理效果对比图:(a) 原图像;(b) 处理图像

Fig. 3 Results of image processing effect: (a) Original image; (b) Processed image

精度等级约为0.1 mm,满足振动响应数据的精度要求。

3.2 最大振动响应测点分析

由于振动台试验测点较多,故选取最大振动响应测点与台面振动响应这两组具有代表性的数据进行对比分析。本文从时域分析与频域分析两种角度对振动响应数据进行分析,在频域分析中采用功率谱密度进行分析,功率谱密度(power spectrum density,PSD)是随机振动数据处理中常用的分析方法,它主要通过快速傅里叶变换将时域数据进行计算转换为频域数据。图 4 所示为最大振动响应测点与台面振动响应的振动位移时程图,表 1 所示为相应振动信号特征值,图 5 所示为相应振动位移的功率谱密度图。

由图 4 可知,应用图像处理方法测得的振动响应数据精度高于原始测得数据的精度。处理后的振动位移时程图与加速度计的振动位移时程图趋势相似,得到了较为准确的振动响应数据。

由表 1 最大振动位移测点的振动信号特征值可知,图像处理前的峰度与图像处理后的峰度变化较小,与加速度计的峰度差值约为 0.05。图像处理后的均方根(RMS,root mean square)与峰-峰值更接近加速度计相应的特征值,均方根差值从 0.18 mm 降至 0.02 mm、峰-峰值差值从 1.04 mm 降至 0.42 mm。由表 1 台面振动信号特征值可知,图像处理后的振动信号特征值更接近加速度计的特征值,均方根差值从 0.07 mm 降至 0.00 mm、峰度差值从 0.25 降至 0.12、峰-峰值差值从 1.84 mm 降至 1.31 mm。

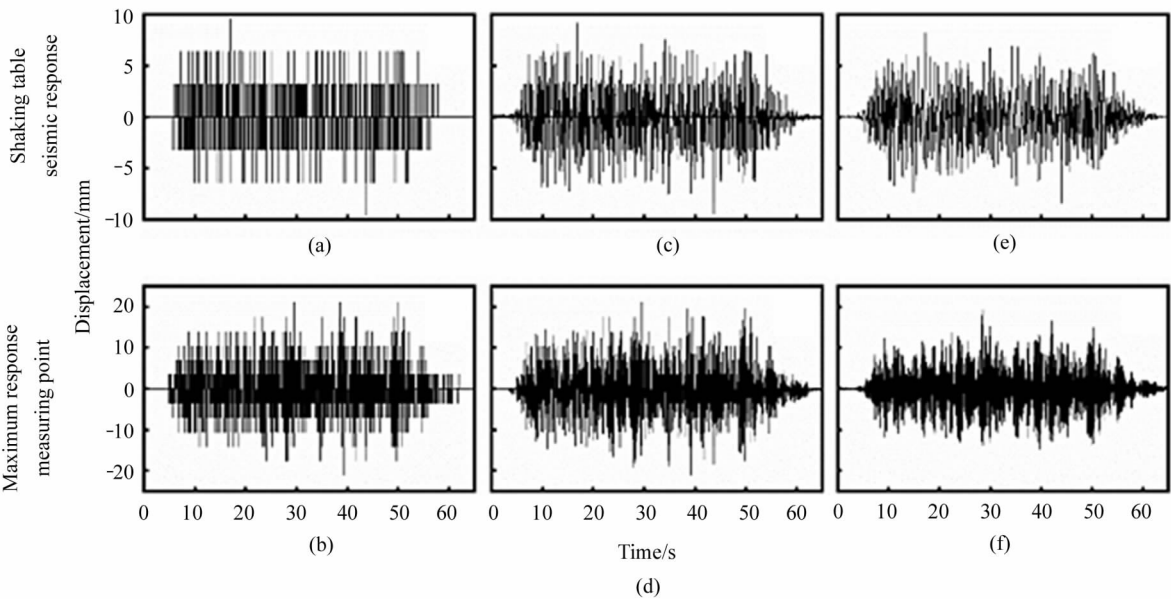


图 4 振动位移时程图:(a)(b) 原图像;(c)(d) 处理图像;(e)(f)加速度

Fig. 4 Vibration displacement diagrams:(a)(b) Original image;(c)(d) Processed image;(e)(f) Accelerometer

表 1 振动信号特征值

Tab. 1 Vibration signal features

Vibration signal features	RMS/mm		Kurtosis		Peak-to-peak value/mm	
	Maximum	Shaking	Maximum	Shaking	Maximum	Shaking
	response	table	response	table	response	table
	measuring point	seismic response	measuring point	seismic response	measuring point	seismic response
Original	4.62	2.39	3.55	3.99	35.21	19.31
Processed	4.42	2.32	3.56	3.87	34.59	18.78
Accelerometer	4.44	2.32	3.51	3.74	34.17	17.47

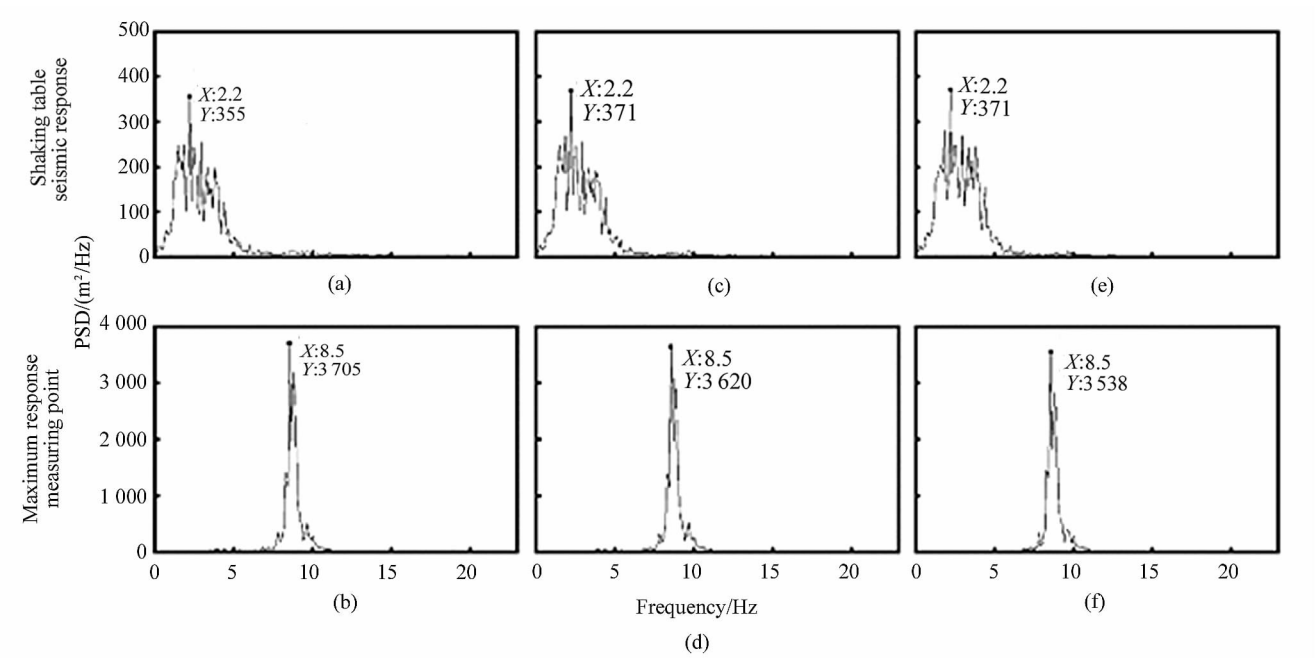


图5 振动位移 PSD 图:(a)(b) 原图像;(c)(d) 处理图像;(e)(f) 加速度

Fig. 5 PSD diagram of vibration displacement:(a)(b) Original image;(c)(d) Processed image;(e)(f) Accelerometer

由图5最大振动位移测点的振动可知,最大振动响应测点的功率谱密度图各频率能量分布大致相同,峰值所在频率均为8.5 Hz,图像处理后的频谱峰值比原始图像的数据更接近加速度计的数据,峰值差值从157 m²/Hz降至72 m²/Hz。由图5台面振动响应可知,台面的功率谱密度图各频率能量分布大致相同,峰值所在频率均为2.2 Hz,图像处理后的频谱峰值比原始图像的数据更接近加速度计的数据,峰值差值从16 m²/Hz降至0 m²/Hz。

4 结 论

针对高速摄像技术远距离测量振动响应精度较低的问题,提出采用双三次插值法与Sobel算子边缘检测对高速摄像技术远距离测得图像处理的方法,并通过时域分析与频域分析的角度对图像处理前、图像处理与加速度计的振动响应数据进行分析。结果表明,采用图像处理法对高速摄像技术测得的图像进行处理,能够得到精度较高、数据误差较低并满足测量要求的振动响应数据。研究结果为高速摄像技术在远距离测量试验构件高精度位移振动响应提供参考,拓宽了高速摄像技术的应用范围。

参考文献:

[1] KAI S, WATAKABE T, KANEKO N, et al. Study on piping seismic response under multiple excitation[J]. Journal of

Pressure Vessel Technology, 2018, 140(3):031801.

[2] XIN C L, WANG Z Z, GAO B, et al. Shaking table tests on seismic response and damage mode of tunnel linings in diverse tunnel-void interaction states[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2018, 77:295-304.

[3] WANG L C, LUO J, ZHAO R, et al. Research on a vibration frequency measurement method based on high-speed vision[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2020, 31(5):488-493.

王力超, 罗建, 赵瑞, 等. 基于高速视觉的振动频率测量方法研究[J]. 光电子 • 激光, 2020, 31(5):488-493.

[4] GUO J, ZHU C A. Dynamic displacement measurement of large-scale structures based on the Lucas-Kanade template tracking algorithm[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 66-67:425-436.

[5] LEI N, SOSHI M. Vision-based system for chatter identification and process optimization in high-speed milling[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(9):2757-2769.

[6] WANG Y H, DAN X Z, HU Y, et al. Car-pedestrian impact test based on high speed digital image correlation[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2017, 28(1):81-86.

王永红, 但西佐, 胡悦, 等. 基于高速数字图像相关的人车碰撞伤害实验研究[J]. 光电子 • 激光, 2017, 28(1):81-86.

- [7] GONG M, WU H J. High-speed photography image acquisition system in tunnel blasting and parameters study on precisely controlled blasting [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(5): 3-12.
- 龚敏, 吴昊骏. 隧道爆破现场高速图像采集与精确控制爆破参数研究[J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(5): 3-12.
- [8] LEI X J, JIN Y, GUO J, et al. Vibration extraction based on fast NCC algorithm and high-speed camera [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(27): 8198-8206.
- [9] LIU B Y, ZHANG D, GUO J, et al. Vision-based displacement measurement sensor using modified Taylor approximation approach [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(11): 114103-114103-10.
- [10] ZHANG Y, BIEGING E, TSUI H, et al. Efficient and effective extraction of vocal fold vibratory patterns from high-speed digital imaging [J]. *Journal of Voice*, 2010, 24(1): 21-29.
- [11] FERRER B, POMARES J C, IRLLES R, et al. Image processing for safety assessment in civil engineering [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(18): 4385-4390.
- [12] PENG C, ZENG C, WANG Y G, et al. Phase-based non-contact vibration measurement of high-speed magnetically suspended rotor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(7): 4807-4817.
- [13] MA Y, ZHANG C Z, LIU Y, et al. Polarization imaging of space target based on bicubic interpolation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(12): 2555-2563.
- 马岩, 张超子, 刘也, 等. 采用双三次插值的空间目标偏振成像 [J]. *光学精密工程*, 2019, 27(12): 2555-2563.
- [14] YANG B B. Study on sub-pixel edge detection method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015: 11-12.
- 杨兵兵. 采用双三次插值的空间目标偏振成像 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015: 11-12.
- [15] WANG J, HU X. Application of MATLAB in vibration signal processing [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005: 104-107.
- 王济, 胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 104-107.

作者简介:

俞树荣 (1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事承压类特种设备强度与安全方面的研究。