

doi: 10.7690/bgzd.2023.03.011

## 基于光纤式图像位移测试系统的研究

范庆辉, 张 强, 刘丹峰, 黄海莹

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 针对复杂结构狭小空间里的位移测量难题, 提出一种基于光纤式图像位移非接触式测试系统。分析该测试系统的测量原理和系统功能, 并对总体方案和硬件选型进行设计; 为实现图像位移计算, 根据光纤内窥镜拍摄图像的特点采取区域提取、图像校正、增强、二值化等数字化处理流程; 软件界面采用 C++语言、基于网络平台进行开发, 以对话框方式进行架构, 涵盖各项测量数据的显示; 最后对测试系统进行比对、离心、振动试验验证。试验结果表明: 该测试系统的测量精度可达  $10\ \mu\text{m}$ , 能够适应多种复杂环境下复杂结构狭小空间里的位移测量。

**关键词:** 光纤内窥镜; 图像位移; 非接触; 测量精度

**中图分类号:** TP206 **文献标志码:** A

## Research on Image Displacement Measurement System Based on Optical Fiber

Fan Qinghui, Zhang Qiang, Liu Danfeng, Huang Haiying

(Institute of General Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of displacement measurement in narrow space with complex structure, a non-contact measurement system of image displacement based on optical fiber is proposed. The measurement principle and system function of the test system are analyzed, and the overall scheme and hardware selection are designed. In order to realize the image displacement calculation, the digital processing processes such as region extraction, image correction, enhancement and binarization are adopted according to the characteristics of the image taken by the fiber optic endoscope. The software interface is developed by C++ language, based on the network platform, and constructed in the form of dialog box, covering the display of various measurement data. Finally, the test system is verified by comparison, centrifugal and vibration tests. The experimental results show that the measurement accuracy of the test system can reach  $10\ \mu\text{m}$ , and the system can adapt to the displacement measurement of complex structures in a narrow space in a variety of complex environments.

**Keywords:** fiber optic endoscope; image displacement; non-contact; measurement accuracy

### 0 引言

位移测量一般有接触式和非接触式 2 种测量方法<sup>[1]</sup>。针对复杂结构狭小空间里的位移测量, 采用接触式测量方法例如差动位移计可能对产品造成破坏, 如测量某些较软材质的结构, 差动位移计的测量杆需要顶在产品表面附近, 依靠对测量杆的挤压伸缩产生的感应电动势变化来测量位移变化; 同时, 需要支架来固定位移计, 可能对产品造成损坏。采用非接触式测量方法, 如激光位移计、电涡流位移计等又存在体积大、只能测量一个方向等问题<sup>[2]</sup>。李俊等<sup>[3]</sup>采用干涉测量法设计出一种 2 维传感器测量 2 个垂直轴向的位移值, 测量范围约为  $60\ \mu\text{m}$ ; 陈曦等<sup>[4]</sup>采用高速摄像机和光纤内窥镜相结合的方式对喷动床内部稠密相流场颗粒相运动参数进行了测量, 测量速度最小约为  $0.73\ \text{m/s}$ 。基于此, 笔者提出一种基于光纤式图像位移非接触式测试方法,

充分发挥光纤和图像位移算法的优势, 为复杂结构狭小空间里的位移测量提供解决方案。

### 1 测量原理和总体方案

#### 1.1 测量原理

复杂结构若是在静态环境下产生的位移变化, 因光纤固定在产品表面, 相当于对静态物体成像。这种情况下, 只要与光纤连接的相机分辨率满足要求即可。若是在高速振动环境下产生的位移变化, 测量的目的是分析每一振动周期内相对运动情况, 就需要高帧速相机。依据采样定理, 拍摄帧速要大于 2 倍的振动频率。如果运动状态可控, 只是检测周期中的某几个点, 可采用硬件触发相机的办法解决, 即振动到某相位时发出一脉冲信号, 相机即刻拍摄, 抓取此相位时刻的图像, 分析相对位移情况。根据实际运行情况, 复杂结构狭小空间里的位移运

收稿日期: 2022-11-27; 修回日期: 2022-12-26

基金项目: 国防技术基础科研项目 (JSHS2019212C001)

作者简介: 范庆辉(1990—), 男, 河北人, 硕士, 工程师, 从事光学测量测试技术研究。E-mail: badivne@126.com。

动主要可分解为周向运动和径向运动，其中产品结构的左右移动为周向，上下移动为径向，对应产生的位移为周向位移和径向位移，如图 1 所示。

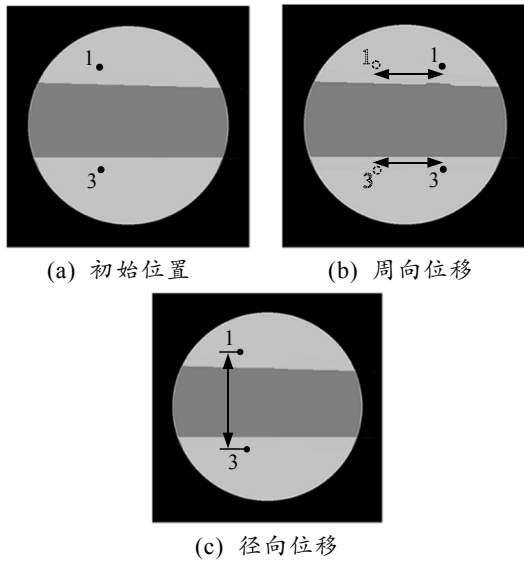


图 1 周向和径向位移

由于需要测量 2 个方向的位移变化情况，因此需要设计不同的标志点形状以进行区分。在图像处理时，采用模板匹配的方式进行识别定位，不同标志点形状示意如图 2 所示。标志点制作成背面粘贴形式，图形大小约 1 mm (形状大小在实际测量效果中进行调整，以达到最优效果)；在实验时，标志点贴在产品表面，在开始实验时记录一组标志点坐标原始数据作为基准数据，在实验过程中将标志点的坐标数据与基准数据进行比对，得到相对的偏移量即为所需监测的径向、周向位移数据。

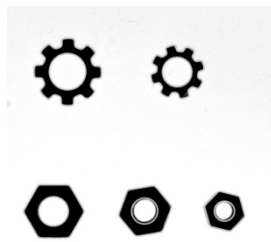


图 2 不同形状、大小的模板匹配

### 1.2 总体方案

内窥镜因其直径小、探头可弯曲等特点被广泛应用于复杂结构狭小空间里的裂纹、腐蚀等情况的探查<sup>[5-6]</sup>，但在 3.0 mm 直径以下，电子镜内窥镜受限于 CCD 或 CMOS 个体大小原因无法短时间内微型化，这时便可使用微型光纤内窥镜<sup>[7-8]</sup>。

本测试系统由被测目标、光纤内窥镜、适配器、高分辨率数字相机和计算机等组成，如图 3 所示。

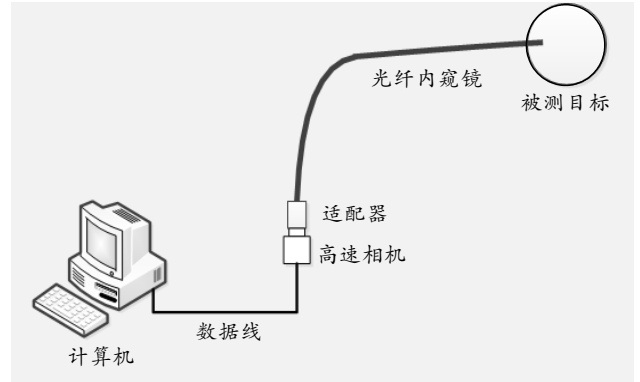


图 3 测试系统结构组成

将光纤内窥镜伸入被测物体内部，并在内窥镜目镜端安装一个高分辨率的数字相机<sup>[9]</sup>，对光纤内窥镜里的影像实时采集<sup>[10]</sup>，实物如图 4 所示。软件对采集的图像进行实时分析，并根据已经标定的相机成像物理关系，将图像位移距离(单位 像素)转换成实际物理尺寸(单位  $\mu\text{m}$ )。如需与其他设备实时通信，可以将数据或控制信号及时通知其他设备<sup>[11-12]</sup>。

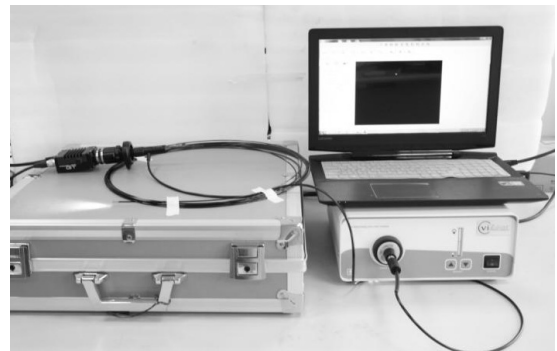


图 4 光纤内窥镜实物

### 1.3 硬件选型设计

根据测试系统的要求，选择的光纤内窥镜直径 2.5 mm，长度 10 m，像元数大于 30 000。由于相机的选择对图像的处理和计算尤为关键，下面对相机选型进行详细的理论计算。

视场大小：设拍摄距离 5 mm，视场角  $70^\circ$ ，则视场范围  $F=2\tan 35^\circ \times 5 \text{ mm} \approx 7 \text{ mm}$ ，光纤像元为圆形排列，像元素为  $\geq 30\ 000$  根，按 30 000 计算，则有  $\pi d^2/4=30\ 000$  根，在直径方向约有  $d \approx 195$  根，拍摄精度为一个像素  $7 \text{ mm}/195 \approx 36 \mu\text{m}$ 。对于视野大小为  $10 \times 10 \text{ mm}$  的场合，要求精度为  $0.036 \text{ mm/pixel}$ ，分辨率则为  $277 \text{ pixel/mm}$ ；然而考虑到相机边缘视野的畸变以及系统的稳定性要求，一般不会只用一个像素单位对应一个测量精度值，一般选择倍数为 4 或者更高，这样相机单方向分辨率为  $1\ 110 \text{ pixel/mm}$ ，

相机的分辨率=1 110×1 110≈123 万，所以选用 200 万像素的相机即可满足。

选择 200 万像素分辨率的网络接口的彩色相机，像素是 1 620×1 234，像元尺寸是 4.4 μm。相机感光芯片的靶面尺寸是 1/1.8 英寸(7.128×5.429 mm)，最小曝光时间 25 μs，最大曝光时间 1 s。

选择理由如下：选用的光纤内窥镜最高分辨率是 30 000 px，即光纤束是有 30 000 根光纤纤维构成，相当于 200×200 的分辨率。相机分辨率在单方向的分辨率是其 6.17~8.1 倍，因此完全满足要求。

从成像的角度看，假设光纤内窥镜的光学放大倍率是 1.0，相机成像精度是 4.4 μm/pixel。例如：视场是 7.128 mm，相机侧成像也是 7.128 mm，所以相机的分辨率是 7.128 mm/1 624 pixel=4.4 μm/ pixel。即使不考虑光纤分辨率的限制，所选用的相机亦可满足要求，最小曝光时间可小至 25 μs，能够对高速运动的物体清晰成像，避免因高速运行引起的图像拖尾模糊。

#### 1.4 系统功能分析

该测试系统从架构到功能的设计都充分考虑了维护、扩充、组件化等要求，具有良好的软件开放性，主要功能如下，后续可支持根据需求的变化新增功能。

##### 1) 相机连接。

相机连接采用相机 SDK 开发，相机初始化连接在图像采集软件启动时进行，连接状态在主界面上显示。连接完成后，相机采图程序线程开启。相机的相关参数在此模块中进行设置或者获取，如相机连接的 IP 地址可设置，相机的增益、图像宽高等基本参数可在此界面进行设定。

##### 2) 图像显示和存储。

将采集的实时图像在界面中进行显示，由于是彩色图像，未压缩时图像文件大小比较大，约 14 M，因此在制作成 avi 视频时需要对其进行压缩。压缩比例可进行设置，存储的文件按日期时间命名，如 20191103\_1256.avi。保存的路径在软件中可自行设定。历史图像视频也可在显示界面中进行显示回放。对实验过程中采集的图片，在保存后可转换成.avi 视频。

##### 3) 数据分析。

数据分析功能函数线程在相机连接成功后启动，分析间隔时间在软件中进行设置，如间隔 5 s 分析一次或每 5 帧分析一次。当间隔时间到时，数据分

析线程将图像采集线程中的图像进行分析，并将结果反馈到界面中时进行显示，同时将分析数据进行存储，存储类型为 Access 数据库。数据分析功能分在线分析和离线分析 2 种模式；在线分析是在“开始工作”后触发，离线分析是将存储下来的图像进行分析处理。

##### 4) 日志。

对相机状态，采集信号触发时间，采集状态等关键状态信息进行记录，方便维护或者故障诊断。日志文件按日期命名，格式为 YYYY-MM-DD.log。

## 2 图像数字化处理过程

相机经光纤内窥镜采集到的图像受外界环境和自身缺陷的影响会有噪声产生，造成图像的降质，例如对比度降低、画质模糊、背景和目标难以区分等现象，给后续的分析带来困难；因此，需要对采集的图像进行数字化处理，改善图像质量<sup>[13-14]</sup>。

### 2.1 区域提取

对于相机采集的图像，光纤镜成像的图像区域只占图片的局部部分；因此，可通过设置图像感兴趣区域(region of interest, ROI)来减少图像处理的计算量，从而加快标志点的识别速度。图像感兴趣区域的设置通过画矩形区域的方式，对采集的图像进行设置，截取标志点区域图像，如图 5 所示。以图像的左上角为原点，向右为 X 轴正方向，向下为 Y 轴正方向，根据图像的具体长宽大小每个特征点的中心位置坐标值取 3 位小数。使用 draw\_rectangle1 算子在图像中手动画出感兴趣的区域后，再使用 gen\_rectangle1 算子生成一个矩形区域，最后使用 reduce\_domain 算子获得感兴趣的图像。



图 5 区域提取

### 2.2 图像矫正

由于光纤镜的固有特性，为使拍摄到的靶面尽

可能大，光线内窥镜的物镜采用了小孔径、大视场和大景深的设计原则；因此，相机在目镜处采集到的图像会存在 30%左右的球形畸变，需要对图像进行畸变校正<sup>[15-16]</sup>。笔者采用点阵样板标定的方法对光纤内窥镜图像进行校正，采用 `gen_image_to_world_plane_map` 函数对图像进行校正，如图 6 所示。标定过程采用 `halcon` 标定方法，标定时需要在视野范围内将标定板放置在不同位置进行拍摄，根据行业经验，将标定图像看成一个田字，田字的每一个交叉点代表一个姿态位置；因此，图像数据至少要求 9 张，以保证精度。该标定方法可校正到 95%左右，误差 10 个像素，根据标定关系与采用的亚像素计算方法，实际约为 5  $\mu\text{m}$ ，测试允许的不确定度为 50  $\mu\text{m}$ ，满足试验要求。

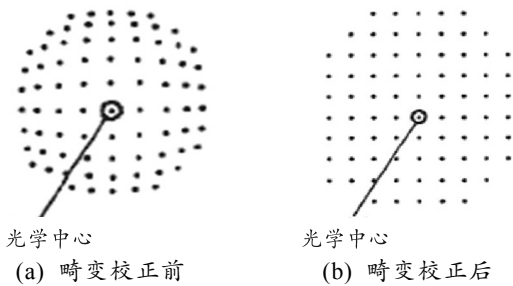
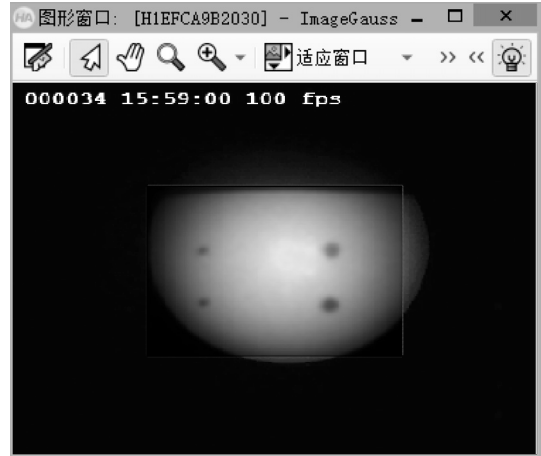


图 6 畸变校正

### 2.3 图像处理

在本课题中，光纤镜成像拍摄的图像，包含有很多光纤束形状，呈蜂窝状，对标志点产生一定的干扰；因此，需要对图像中的光纤束进行滤波、增强二值化等过程处理<sup>[17-18]</sup>。

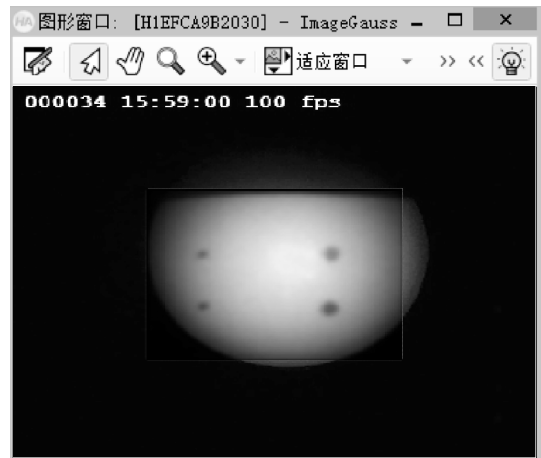
采用 `gauss_filter` (`GrayImage`, `ImageGauss`, 7) 算子对图像进行高斯滤波，滤波效果如图 7 所示，设置过滤器大小等级为 7。



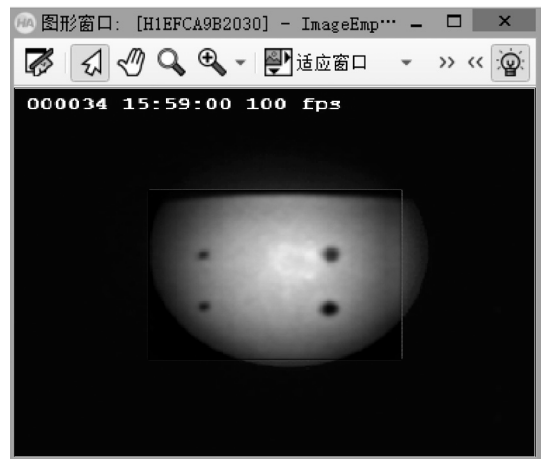
(b) 图像滤波处理后

图 7 图像滤波处理

使用 `emphasize` (`ImageGauss`, `ImageEmphasize`, 27, 27, 1) 算子对图像进行增强，增强效果如图 8 所示。

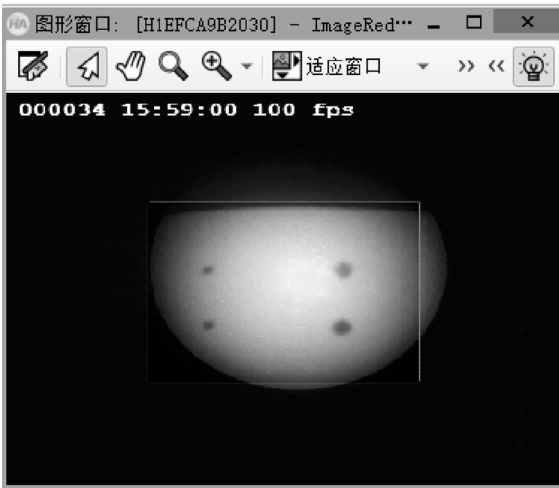


(a) 图像增强处理前



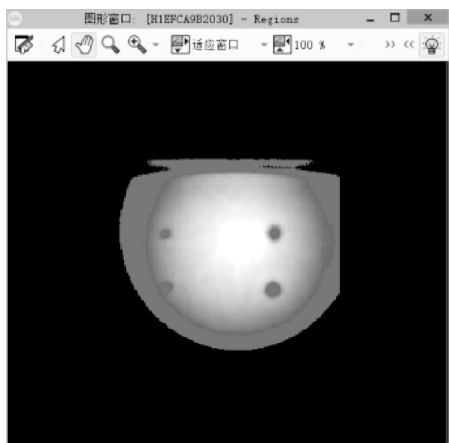
(b) 图像增强处理后

图 8 图像增强处理

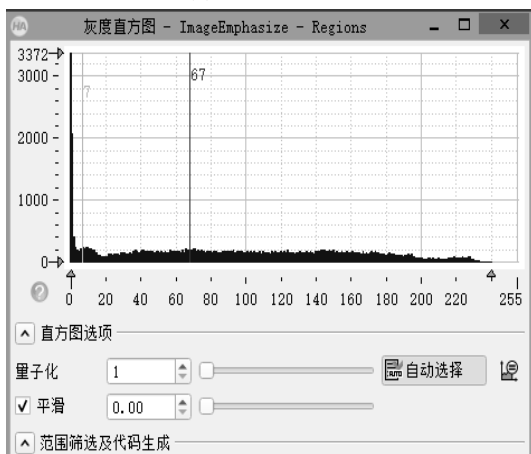


(a) 图像滤波处理前

使用 `threshold` (`ImageEmphasize`, `Regions`, 10, 67) 算子对图像进行二值化处理，过程如图 9 所示。



(a) 二值化图像



(b) 灰度直方图

图 9 图像二值化处理

标志点经过图像处理, 和背景对比非常明显。再采用基于亚像素的边缘检测 `edges_sub_pix` 算子(精确到 0.1 像素)提取标志点轮廓, 然后对圆点轮廓进行圆心拟合或重心计算方式提取圆心位置中心坐标<sup>[19]</sup>, 如图 10 所示。

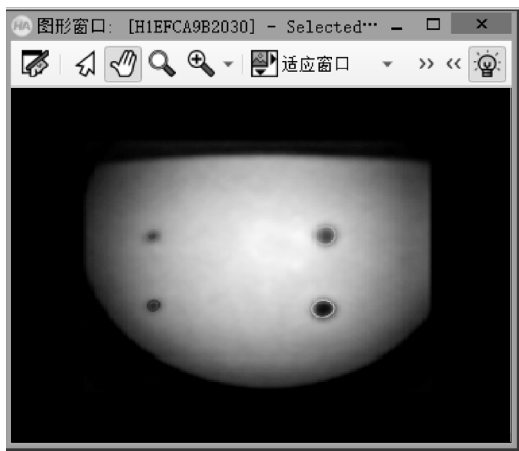


图 10 图像边缘轮廓提取

## 2.4 位移计算

通过上述数字化处理流程提取目标图序列标志

点的轮廓然后计算出中心坐标 $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ , 以及基准图上相应标志点的中心坐标 $(x_1', y_1')$ ,  $(x_2', y_2')$ , 便可以计算复杂结构的周向  $X$  变化量和径向  $Y$  变化量, 其中周向  $X$  位移  $x=x_1-x_1'$ , 径向  $Y$  位移  $y=(y_1-y_1')+(y_2-y_2')$ 。

## 2.5 软件设计

软件采用 C++ 语言, 基于网络平台开发, 主要用于连接 AVT 工业相机, 进行图像采集、保存, 相机曝光量、增强、白平衡、Gamma 参数设定等操作, 以及不同背景下图像特征点的识别和坐标计算。采用对话框方式进行架构设计, 在线、离线分析测量分别设计一个界面, 涵盖各项测量的数据显示。相机图像采集设计成单独的类, 每个相机生成一个相机实例, 相机的图像采集采用多线程采集。

利用系统 API(Kernel32.dll) 和 CPU 多核, 运行指定线程在指定 CPU 核心, 定时器独占一个 CPU 核心。通过计算每次调用程序的间隔, 实现高精度定时。图像采集采用 halcon 进行开发, 对 JPG 图像可进行按照 100%、80%、60%、40%、20% 进行压缩和保存; 视频转换采用 OpenCV 进行二次开发, 利用 `CV.VideoWriter` 函数, 将图片转换成视频流, 进行视频保存。相应组件安装完毕后桌面出现位移测量系统图标, 启动测量软件, 能够进入到主界面, 且绑定的相机能够显示画面则安装成功。系统安装后, 需要对软件进行配置, 如不同相机的名称, 系统需根据配置信息来寻找相机。配置文件在安装目录里名为 `config.xml` 的文件, 双击打开后, 对相应参数进行修改或添加。软件界面如图 11 所示。



图 11 软件界面

## 3 试验测试与数据分析

### 3.1 验证试验

#### 3.1.1 试验目的

验证图像位移测试系统的精度和准确性。

### 3.1.2 试验条件

利用精密位移平台模拟产品结构的周向和径向位移, 采用现有的差动型差动位移传感器与图像位移测试系统在精密位移平台上进行比对验证。验证方法: 通过光纤内窥镜进行图像采集, 运用位移测试软件对采集的图像进行计算分析, 将得出的位移值与差动位移传感器测出的值进行比对。

### 3.1.3 试验数据

差动型位移计传感器技术指标: 测量范围为 5 mm; 测量分辨率为 1 μm; 比对曲线如图 12、13 所示。其中: *WX* 代表差动型位移计测量的 *X* 向数据; *WY* 代表差动型位移计测量的 *Y* 向数据; *TX* 代表图像位移测试系统的 *X* 向; *TY* 代表图像位移测试系统的 *Y* 向, 以下类推。*CW* 位移计和图像位移测试系统的位移测量曲线, 两者基本重合, 说明图像位移测试系统测量位移方法可行, 测试结果真实可靠。

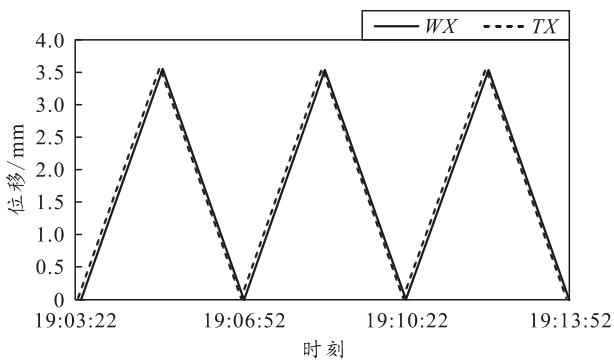


图 12 位移计和图像位移测试系统 X 向的位移曲线

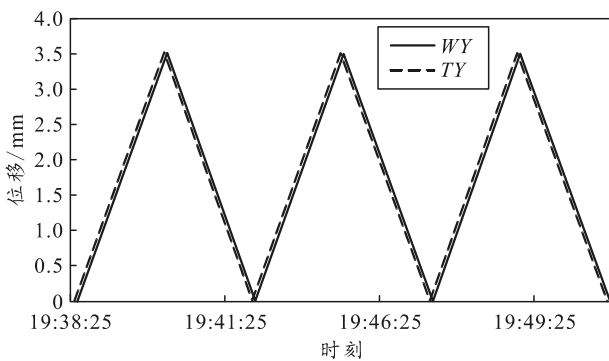


图 13 位移计和图像位移测试系统 Y 向的位移曲线

对图像位移测试数据进行计算可得本测试系统的技术指标, 如表 1 所示。

表 1 系统主要技术指标

方向	量程/mm	线性误差	基本误差/%	重复性误差/%	扩展不确定度/mm
X 向	0~7	-0.31	-0.22	1.41	0.017 (K=2)
Y 向	0~7	-0.25	-0.31	1.70	0.020 (K=2)

从上表中数据可看出, 在 0~7 mm 量程内系统的最大扩展不确定度为 0.020 mm, 可满足绝大多数工程应用的精度需要。其中 *K* 为包含因子, 根据测量的置信水平来选择, 参考美国 NIST 和西欧 WECC 的标准一般情况下取 2, 表示置信水平约 95%。该测试系统可实现复杂产品结构的无损原位测试, 运用范围广泛。

### 3.2 离心试验

根据实际项目需求, 在某离心试验中加入该光纤内窥镜, 进行内部结构的位移测试。本试验中原已设计并安装差动式位移计进行位移测量, 可同时进行光纤内窥镜的环境考核和比对测试。

#### 3.2.1 试验目的

对图像位移测试系统在高速离心环境下的适应性进行研究。

#### 3.2.2 试验条件

某实验的离心条件按 20%、40%、60%、80%、90% 和 100% 分级加载, 离心加载控制基准点允许误差: 加速度 ±3%, 载荷保载时间为 2 min。

#### 3.2.3 试验数据

如图 14 和图 15 所示, 试验按 20%、40%、60%、80%、90% 和 100% 进行分级加载的位移变化, 说明图像位移测试系统经受住了离心环境的考核。

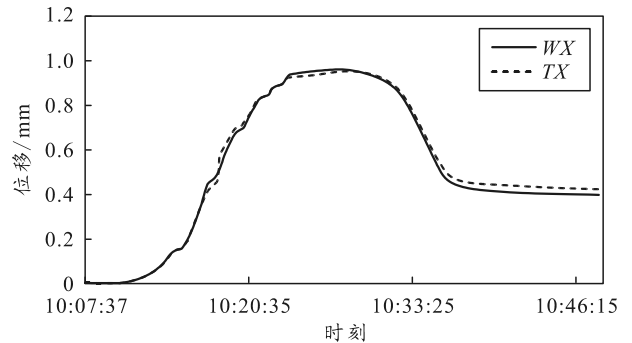


图 14 离心试验 X 向位移变化

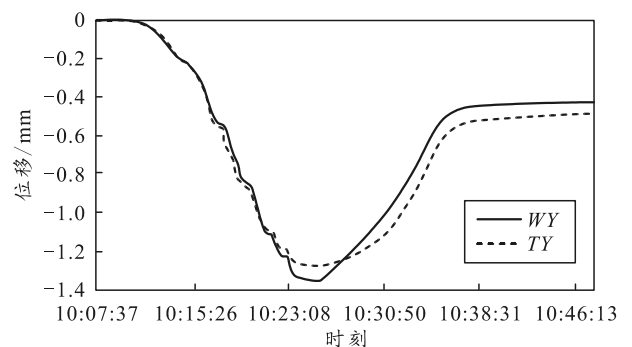


图 15 离心试验 Y 向位移变化

从差动位移计和图像位移测试系统各自测量的数据来看， $X$ 向和 $Y$ 向的位移变化在加载前期较吻合，在保载和卸载过程中有偏差，经分析在高 $G$ 值情形下，相机镜头与光纤内窥镜目镜的连接方式可能有松动，较初始位置产生相对位移，导致标定参数不准，数据产生偏差，后续将改进这种连接方式；也可能由于光源不能均匀照射在特征点靶面上，在离心机逐级加载过程中，特征点从光弱处逐渐移动到光强处，2处软件识别的特征点边缘不尽相同，识别的坐标点会有偏差，后续采用反光度尽量小的标签纸，使整个特征点靶面感光度尽量一致。

### 3.3 振动试验

根据实际项目需求，采用某振动试验条件，设计相关夹具，进行产品结构的位移测试。

#### 3.3.1 试验目的

对图像位移测试系统在高频振动环境下的适应性进行研究。

#### 3.3.2 试验条件

按某实验的正弦振动加速度谱图曲线和随机振动加速度功率谱密度曲线进行试验；其中：正弦振动试验 10 min，随机振动 5 min，最大振动频率 2 kHz。

#### 3.3.3 试验数据

在电动位移平台台面粘贴特征点，在正弦和随机振动试验中驱动电动位移平台移动，通过图像位移测试系统计算分析特征点的位移变化。

实际测试时，通过设计的电动位移平台给出 0-1 mm-1.5 mm-1 mm-0 的位移变化曲线， $D$  代表驱动位移曲线， $SD$  代表正弦振动位移变化曲线， $RD$  代表随机振动位移变化曲线，将 2 种位移变化曲线与驱动位移曲线进行对比，试验数据如图 16 和 17 所示。

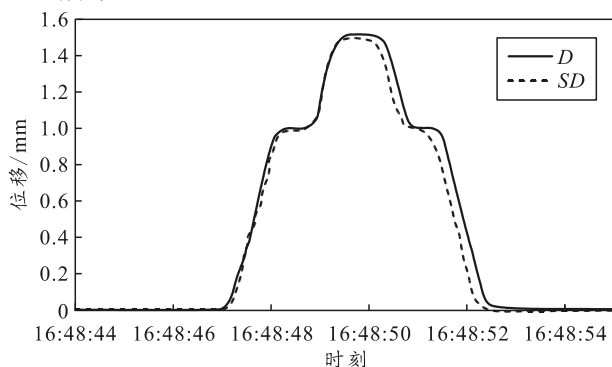


图 16 正弦振动位移变化曲线

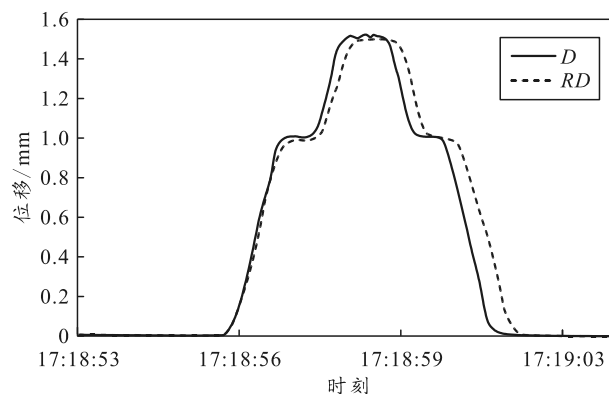


图 17 随机振动位移变化曲线

分析 2 条曲线，在位移产生之前和之后，数据稳定在 0 附近，位移产生后所测位移与给出的位移变化曲线基本一致，说明图像位移测试系统在振动环境下测量是可行的。

从驱动位移曲线和图像位移测试系统测量的数据来看，随机和正弦振动位移变化在前期较吻合，在后期有偏差，可能由于台面的振动产生了位移导致特征点的坐标与标准位移相比产生偏差，也可能由于光亮的不均匀导致特征点的边缘识别有偏差，后续将在固定减震和光照均匀 2 方面进行改善。由于随机振动较正弦振动产生位移更大，因此在随机振动时位移测量偏差也更大。

## 4 结束语

笔者设计的光纤式位移测试系统可实现复杂产品结构长距离、低损伤、高精度的位移测量，相比传统位移测量方式，可同时实现 2 个方向的位移测量，产品破坏性小，基本实现无损原位测试。试验结果表明，该测试系统的测量精度可达 10  $\mu\text{m}$ ，且能够适应离心、振动等多种环境下复杂产品结构狭小空间里的位移测量。通过深入挖掘图像处理算法和技术，改进图像位移测试中相机镜头与光纤内窥镜目镜的连接方式，减弱特征点标签的反光程度，使特征点靶面感光均匀，相机采用高速相机，可进一步提高位移测量的精度，该测试系统在位移测试行业具有一定的参考和推广价值。

### 参考文献：

- [1] 高向军, 田联房, 王立非. 利用 Matlab 实现医学图像处理与分析[J]. 计算机应用研究, 2008(6): 1747-1749.
- [2] 王琦楠, 赵丽琴, 崔健. 基于激光位移传感器的非接触三坐标测量机的设计[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(1): 220-223.
- [3] 李俊, 李嘉伟, 张鼎博. 45°光纤微反射镜聚焦离子束

加工及多轴位移检测研究[J]. 应用光学, 2021, 42(3): 557-564.

[4] 陈曦, 钟文琪, 陆勇. 基于光纤内窥镜和高速摄影联用测量喷动床颗粒速度研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(2): 278-281.

[5] 赵敬, 潘燕, 李桥. 测量距离和角度与喉动态镜图像关系的实验研究[J]. 生物医学工程研究, 2005(1): 21-22, 27.

[6] 尹兰. 基于数字图像处理技术的混凝土表面裂缝特征测量和分析[D]. 南京: 东南大学, 2006.

[7] 陈方圆, 李平平, 李向阳. 侵入式光纤照相法测量气泡尺寸分布[J]. 过程工程学报, 2016, 16(3): 361-366.

[8] 陆勇, 钱龙, 钟文琪. 气固两相流颗粒相特性参数的测量及其不确定分析[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(7): 1481-1486.

[9] 张继彬, 陆勇, 钟文琪. 颗粒相运动参数的光纤式高速摄影测量方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 910-914.

[10] QIAN L, LU Y, ZHONG W, et al. Developing a novel fibre high speed photography method for investigating solid volume fraction in a 3D spouted bed[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2013, 91(11):

1793-1799.

[11] 许友林, 姚智刚, 熊玲. 内窥镜检测技术在舰船发动机状态检测中的应用: 中国造船工程学会学术论文集[C]. 北京: 中国造船工程学会, 2005: 9.

[12] 季云峰. 结构动位移测试的计算机视觉方法实现[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(11): 1670-1674.

[13] 周锋, 陈述, 赵力. 基于图像亚像素二次定位的电缆护套厚度精确测量[J]. 电测与仪表, 2015, 52(17): 17-22.

[14] 雷碎朱. 基于机器视觉的微位移检测系统的研究与实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.

[15] 宋璐, 卫亚博, 冯艳平. 医用电子内窥镜图像畸变校正方法的研究[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(12): 2480-2483.

[16] 张树华. 医用电子内窥镜畸变实时校正与自动亮度控制硬件系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.

[17] 钟国舜, 钟四成, 李明. 基于图像传感器的图像画质增强算法研究[J]. 半导体光电, 2017, 38(4): 580-584.

[18] 赵高长, 张磊, 武风波. 改进的中值滤波算法在图像去噪中的应用[J]. 应用光学, 2011, 32(4): 678-682.

[19] 李蕴奇. 基于目标与背景信息分割的图象增强算法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2011, 29(5): 498-503.

\*\*\*\*\*

(上接第 25 页)

[2] 樊洁茹, 李东光. 有人机/无人机协同作战研究现状及关键技术浅析[J]. 无人系统技术, 2018, 2(1): 39-47.

[3] 陈杰, 辛斌. 有人/无人系统自主协同的关键科学问题[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(9): 1270-1274.

[4] 李磊. 国外典型有人机/无人机协同作战项目发展分析[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 83-90.

[5] 申超, 李磊, 吴洋, 等. 美国空中有人/无人自主协同作战能力发展研究[J]. 战术导弹技术, 2018(1): 16-21.

[6] 丁士拥, 常天庆, 高波. 多 Agent 系统规划协作过程研究[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(9): 2158-2160, 2223.

[7] 关世义. 导弹智能化技术初探[J]. 战术导弹技术, 2004(4): 1-7.

\*\*\*\*\*

(上接第 52 页)

[5] 张素萍, 高照阳, 张建芬. 基于 FPGA 的可配置 IIC 总线接口设计[J]. 电子器件, 2016, 39(4): 866-873.

[6] 万文杰, 周建斌, 费鹏, 等. 高速 SPI 通信在多道能谱仪中的实现[J]. 核电子学与探测技术, 2017, 37(1): 29-32, 42.

[7] 钱小东, 宣浩, 葛鹏. 一种基于 MLVDS 的 SPI 通信路设计[J]. 数字技术与应用, 2021, 39(6): 13-15.

[8] 周中鑫, 张印强, 李丽娟, 等. 基于 FPGA 的 MEMS 陀螺阵列信号采集系统[J]. 仪表技术与传感器, 2020(9): 101-105.

[9] 秦丽, 江旭东, 李锦明. 基于 AVR 单片机+FPGA 的 U 盘记录器设计[J]. 电子器件, 2016, 39(5): 1232-1236.

[10] 肖希, 尹得智, 王文俊, 等. 基于 FPGA 的 LCD 驱动器设计与实现[J]. 兵工自动化, 2022, 41(2): 57-59.

[11] 徐园, 梅勇, 龚俊, 等. 基于改进的 OCSVM 算法的工控网络异常检测算法[J]. 兵工自动化, 2022, 41(4): 49-52.

[12] 秦友伦, 袁强, 刘峰, 等. 一种国产化多接口便携式测试设备[J]. 兵工自动化, 2023, 42(2): 42-45.

[13] 邹姗蓉, 李杰, 王丽平, 等. 基于 FPGA 的智能分区存储系统设计[J]. 电子器件, 2016, 39(6): 1402-1406.