

## 激光三角法位移测量中数字散斑相关法的研究

沈磊,李顶根,褚俊,朱鸿茂

(华中科技大学 能源与动力工程学院,湖北 武汉 430074)

**摘要:** 在三角法位移测量中散斑是一种噪声,当成像光斑过弱而湮没于散斑中时,抑制散斑已没有意义;但散斑同样是位移信息的载体。为此针对激光三角法位移测量系统,研究数字散斑相关法;对强散射、粗糙界面的位移进行了实测,且进行了数据分析。结果表明,在激光三角法位移测量中运用数字散斑相关法对强散射、粗糙界面进行位移测量是可行的,测量范围可达微米级,测量误差小于 2%。此法可改善三角法位移测量系统在强散射、粗糙界面的情形下传统测量方法的缺陷,有效提高了测量精度,并扩展了激光三角法位移测量的实用范围。

**关键词:** 激光三角法; 位移测量; 散斑; 相关法

**中图分类号:** TH73    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0288-06

## Study on laser speckle correlation method applied in triangulation displacement measurement

Shen Lei, Li Dinggen, Chu Jun, Zhu Hongmao

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The laser speckle is a kind of noise in triangulation displacement measurement. It's meaningless to restrain speckles when the light spot is so weak that facular image can not be extracted from speckles. But the speckle is also a kind of carrier of displacement information. For the above reasons, digital correlation method was used in laser triangulation displacement measurement system to measure the displacement of rough surface with strong scattering and the results had been analyzed. The results show that the digital correlation method is feasible in triangulation displacement measurement system, the measuring range reached micron grade and the experimental errors are below 2%. This method can overcome the disadvantage of laser triangular displacement measurement system in rough surface with strong scattering, improve the accuracy and expand its range of application.

**Key words:** laser triangulation; displacement measurement; laser speckle; correlation method

收稿日期:2013-05-03; 修订日期:2013-06-03

基金项目:国家自然科学基金(11076013)

作者简介:沈磊(1989-),男,博士生,主要从事实验力学以及无损检测方面的研究。Email:shenlei198590@sina.cn

通讯作者:李顶根(1977-),男,副教授,博士,主要从事内燃机能源与控制方面的研究。Email:lidinggen@sina.com

## 0 引言

激光三角法位移传感器是一种非接触测量位移的重要传感器,广泛应用于三维轮廓、厚度、宽度、料位、及振动等测量。它将激光束投射到被测物面形成的漫反射光斑作为传感信号,用透镜成像原理将收集到的漫反射光汇聚到焦平面的光接收器上形成像点。该接收器可为电荷耦合器件 CCD,也可用位置敏感器件 PSD。当入射光斑随被测物面移动时,成像点在光接收器上作相应移动,根据像移大小和传感器的结构参数可以确定被测物面的位移量,或其振动振幅与频率。

## 1 激光三角法测量原理

以直射式三角法为例,其光路如图 1 所示。为提高精度,直入射光的散射角  $\theta$  和 CCD 与透镜法平面的夹角  $\phi$  必须满足 Scheimpflug 条件<sup>[1]</sup>,即像平面、物平面、透镜平面相交于一条直线,即

$$\tan\theta = \beta \tan\phi \quad (1)$$

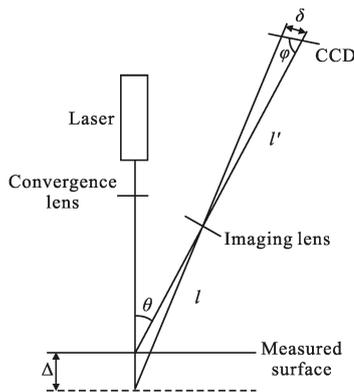


图 1 三角法位移测量基本原理图

Fig.1 Principle of triangulation displacement measurement

此时一定景深范围内的被测点都能正焦的成像在 CCD 上,从而保证了精度。其中  $\beta$  为横向放大率。根据三角关系可得到物面实际位移  $\Delta$  与 CCD 上像点移动距离  $\delta$  之间的关系为:

$$\Delta = \frac{l \sin\phi \delta}{l' \sin\theta \pm \delta \sin(\theta + \phi)} \quad (2)$$

式中: $l$  为物距; $l'$  为像距。若待测面由基准位置下移,式中取“-”,反之取“+”号。

运用上述激光三角法理论测量物体表面的位移时,在弱散射情况下,在经过硬件滤波和软件滤波之

后,可以通过重心法求出位移前后光斑信号的重心变化,得到光斑在 CCD 上的位移值,进而求出物面的实际位移值。但物体表面较粗糙,发生强散射时,CCD 上所接收到的测点散射光斑将淹没在散斑噪声中,这时采取抑制散斑效应的技术措施将作用不大。故文中试图应用数字散斑相关法来计算光斑的位移,此法可有效利用散斑反映被测表面结构信息的特点,将数字散斑相关法应用于强散射情形的三角法系统中将有助于提高光斑位移测量的精度,进而提高被测物面位移的精度。

## 2 三角法中的散斑相关法理论

近年来不断发展的电子散斑干涉法(ESPI)被广泛应用于物体面内位移、离面位移、应变、振动模式等方面的测量<sup>[2-3]</sup>。但是,以上测量散斑位移的各种方法大多是对区域内前后散斑图干涉所形成的条纹的分析、处理和计算的基础上进行的,这类测量方法在进行单点测量的激光三角法位移测量中难以实施。这是因为激光三角法是对点的测量,不是对区域的测量,所以不能形成干涉条纹。而不需进行干涉条纹处理的散斑相关法,将物面位移前后 CCD 接收到的散斑信号组成矩阵进行相关处理,可得到精确的位移量信息。

在三角法测量中,对于粗糙度较低的弱散射界面,首先应对系统硬件,即成像系统和前置放大器滤波功能进行设计;然后在软件方面进行数字滤波和平滑,剔除随机性大的误差数据,再研究应用数字滤波中的中值滤波方法<sup>[4-6]</sup>,以及数字化求重心法计算 CCD 像点的准确位置<sup>[7]</sup>。这种测量方法可抑制散斑效应,提高测量精度。平方加权重心法公式为:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=n_1}^{n_2} x_i f^2(x_i)}{\sum_{i=n_1}^{n_2} f^2(x_i)} \quad (3)$$

式中: $\bar{x}$  为重心的横坐标; $x_i$  为各个象元的横坐标; $f(x_i)$  为其纵坐标,为该象元接收到的光强值。继而可得到 CCD 上光点的移动距离:

$$d = \bar{x}_2 - \bar{x}_1 \quad (4)$$

$\bar{x}_1$ 、 $\bar{x}_2$  分别为位移前和位移后光强分布图像的重心值。如图 2 所示,横坐标为 CCD 上的像元序号,纵坐标为光强值。CCD 接受到弱散射界面的散斑信号呈带宽极窄的锐角三角形,符合重心法的使用范围。

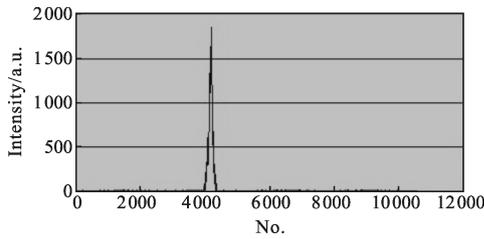


图 2 弱散射界面时的光斑信号图

Fig.2 Signals with weak scattering

对于相对光波很粗糙的被测物面, CCD 上所接收到的测点散射光斑将淹没在散斑中, 这时采取抑制散斑效应的技术措施将作用不大, 此时重心法将不再精确。物面运动时, 其散射空间的散斑将随之作有规律的运动, 据此, 测量出相应散斑的位移, 就可得到对应物面的位移。信号处理中, 关于目标检测的算法设计有很多<sup>[8-9]</sup>, 在三角法位移测量中, CCD 各像元所接受到的散斑光强转换成一维数字矩阵, 当散斑沿 CCD 像元排列方向位移时, 这一维矩阵的数字分布基本不变, 但各数字对应的空间坐标已发生改变。在位移前的一维数字矩阵中取一定宽度的窗函数将信号截断, 取能反映散射界面信息的数据(例如包含主峰的 300 个像元宽度)作为样本子区间, 运用相关运算在位移后的一维数字矩阵中寻找相同宽度的连续目标子区间(1-300, 2-301, 3-302, ..., 10 251-10 550)。通过一维数字相关运算, 辅以插值处理, 当搜寻到与样本子区间相关系数最大值的位置, 就可测得散斑位移。其测量结果是快速的, 并可精确到亚像素级, 强散射情况如图 3 所示, 横坐标为 CCD 上的像元序号, 纵坐标为光强值。在上文的弱散射情况下, 由于散斑颗粒较少, 数组中数字缺失较多, 因而不宜采用相关法。

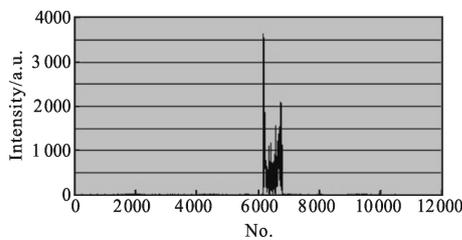


图 3 强散射界面时的光斑信号图

Fig.3 Signals with strong scattering

从图 3 可见, CCD 接收到的强散射粗糙界面的散斑波形比较杂乱, 带宽较宽。此时使用重心法处理

将不再精确, 但符合相关算法的使用范围。

进行相关运算有多种公式<sup>[10]</sup>, 文中在强散射界面的三角法位移测量的数据处理中采用一维标准化协方差相关函数公式:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m [f(x_i) - \bar{f}] \cdot [g(x_i') - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [f(x_i) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m [g(x_i') - \bar{g}]^2}} \quad (5)$$

式中:  $f(x_i)$  为样本子区间, 是物面位移前 CCD 所接收到的散斑信号中截取的一维矩阵;  $g(x_i')$  为目标子区间, 是物面位移后 CCD 所接受到的散斑信号中截取的一维矩阵;  $m$  为截取的象元总数;  $x_i' = x_i + u$  以及  $\bar{f} = \sum_{i=1}^m f(x_i) / m$ ,  $\bar{g} = \sum_{i=1}^m g(x_i') / m$ ; 相关系数  $C$  的取值范围为  $[-1, 1]$ 。当两个矩阵完全一致时, 相关系数为 1; 完全不一致时, 相关系数为 0; 完全相反时, 相关系数为 -1。将  $f(x_i)$  与  $g(x_i)$  进行相关运算, 相关系数  $C$  达到最大值时所计算得到的距离即为像点在 CCD 上的位移值。

### 3 传感器的实现及系统设置

#### 3.1 实验系统组成

图 4 所示为直射式三角法位移测量光路示意图和实物图, 激光器发出光线, 经汇聚透镜聚焦后, 垂直入射到被测物体表面上, 物体移动或者表面变化, 导致入射光点沿入射光轴移动。接收透镜接收来自入射光点处的散射光, 并将其成像在光点位置探测器(CCD)的敏感面上。对位移前后 CCD 上的数据进行处理, 即可得到光斑在 CCD 上的位移, 进而精确得到物面位移量。

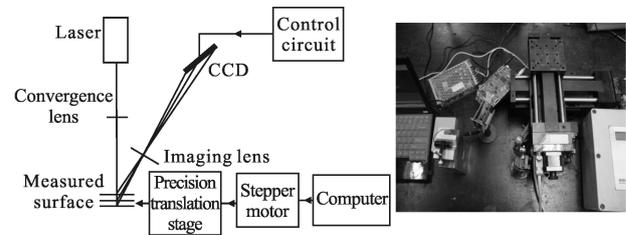


图 4 激光三角法光路示意图和实物图

Fig.4 Optical path and actual device of laser triangulation

图 4 中, 由步进电机控制精密平移台的移动, 其最小分辨率为  $1 \mu\text{m}$ , 其位移量将作为参考值与相关法测量进行比较, 以检测相关法测位移的精度和效果。

### 3.2 三角法位移测量系统的参数设置

同重心法类似,在三角法系统中应用数字散斑相关法时依然要考虑其各项光学参数对成像的影响。根据公式(2)中物面实际位移与 CCD 像点移动距离之间的关系可以进一步推出位移放大率为:

$$\frac{d\delta}{d\Delta} = \frac{l'l'\sin\theta\sin\phi}{(l\sin\phi \mp \Delta\sin(\phi+\theta))^2} \quad (6)$$

其中,物面上移取负号,下移取正号。如图 5 所示。

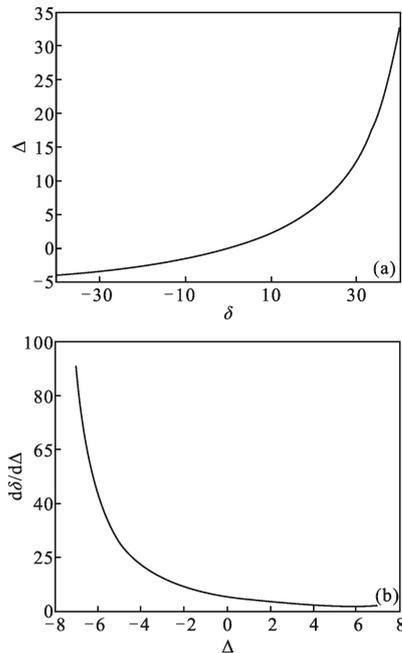


图 5 像点移动距离与实际位移的关系和实际位移与放大倍率的关系

Fig.5 Relation between actual displacement and light spot displacement and relation between actual displacement and the displacement magnification

图 5(a)中所显示的是像点移动距离与实际位移的关系,图 5(b)为实际位移与放大倍率的关系。由图可知  $\Delta$  与  $\delta$  之间为非线性关系。根据透镜成像规律,为了使成像清晰稳定以致减小误差,系统中像点放大倍率一般在 1.2~2.5 之间。文中要使物面位移测量的范围在微米级,所以实验中成像放大倍率取  $\beta=2.5$ 。

文中实验中采用大恒光电生产的型号为 GCL-304( $F=20\text{ mm}$ )的透镜。根据放大率求出物距和像距分别为 28 mm 和 70 mm。由图 1 可得,散射角  $\theta$  过大则会导致像散和失真等问题,故文中实验中散射角设定为  $30^\circ$ 。

由于位移放大的非线性,光学成像系统对 CCD 长度提出了很严格的要求,由公式(2)可得出 CCD

长度公式为:

$$l_{ALL} = \frac{\Delta l' \sin\theta}{l\sin\phi - \Delta\sin(\phi+\theta)} + \frac{\Delta l' \sin\theta}{l\sin\phi + \Delta\sin(\phi+\theta)} \quad (7)$$

实验中所用的 CCD(型号 TCD1501D,像元距离  $4\ \mu\text{m}$ )的长度为 55 mm,高度为 66 mm。根据公式反解可得,当被测面位移在正负 3.5 mm 以内时,其精度可达到微米级。

## 4 实验测量结果及分析

### 4.1 实验结果

按照图 4 的光路图和 3.2 节设置的参数布置光路进行实验研究,可以分别得到弱散射和强散射界面情况下位移前后的光信号强度图,如图 6、7 所示。

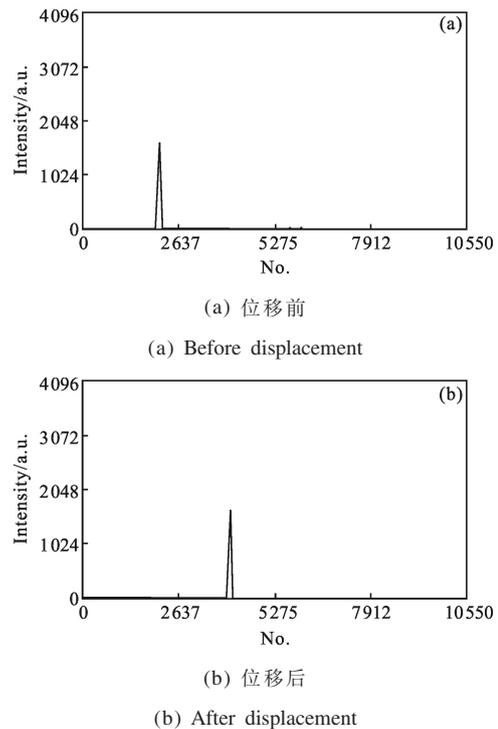


图 6 弱散射界面时位移前后的光斑信号图

Fig.6 Signals with weak scattering

在光滑镜面上涂上细铝粉模拟粗糙界面,此时处于强散射物面,对该物面进行 10 次不同的位移,由公式(2)~(5),分别用重心法和相关法对数据进行处理,结果如表 1 所示。

上表的实验数据表明,在强散射界面时在激光三角法中应用散斑相关法处理数据是可行的。其精度优于重心法处理结果,计算结果精确到微米级,误差在 2% 以内。

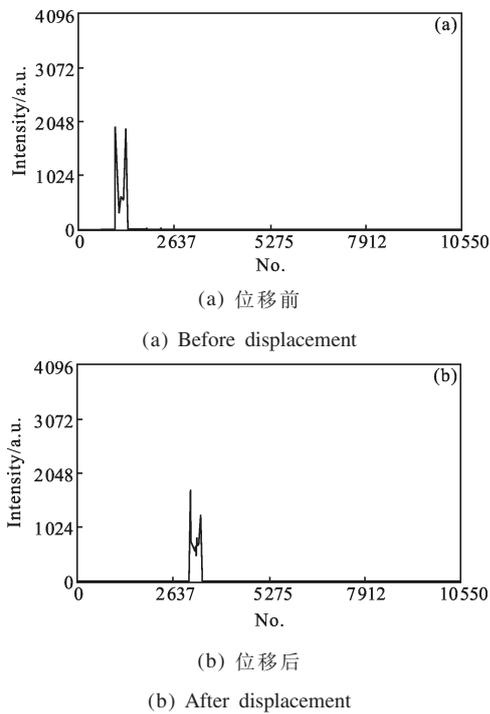


图 7 强散射界面时位移前后的光斑信号图  
Fig.7 Signals with strong scattering

表 1 相关法与重心法测量结果比较

Tab.1 Results comparison of centroid method and correlation method

Measurement No.	1	2	3	4	5
Actual value/mm	0.337	0.740	1.145	1.361	1.667
Centroid method value	0.346	0.721	1.104	1.324	1.630
Centroid method error	2.8%	2.6%	3.6%	2.7%	2.2%
Correlation method value/mm	0.341	0.755	1.130	1.384	1.645
Correlation method error	1.2%	2%	1.3%	1.7%	1.3%
Measurement No.	6	7	8	9	10
Actual value/mm	1.944	2.183	2.548	2.739	3.239
Centroid method value	1.890	2.133	2.477	2.665	3.135
Centroid method error	3.3%	2.3%	2.8%	2.7%	3.2%
Correlation method value/mm	1.909	2.159	2.499	2.703	3.194
Correlation method error	1.8%	1.1%	1.9%	1.3%	1.4%

#### 4.2 误差分析

在整个实验系统中,组成测量系统的光学部件

本身的误差主要来源于球差、彗差、象散、场曲和畸变等,它们会使实际成像点偏离理想成像点,这些误差主要靠制造工艺来消除或减小。在光学器件一定的情况下,测量精度主要受下面两个方面的影响:

##### (1) 被测物体表面倾斜度

同重心法类似,随着被测表面倾斜角的不同,入射光点所产生的散射空间分布将发生变化,从而使强散射时的相关性产生影响。这样实际结果与三角法测量原理公式的理论结果有一定的偏差量。文中在强散射界面进行大量实验,运用相关法得到在物面分别倾斜  $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $-10^\circ$ 、 $-20^\circ$ 、 $-30^\circ$  六种情况下与未倾斜情况下比较的误差,如图 8 所示。

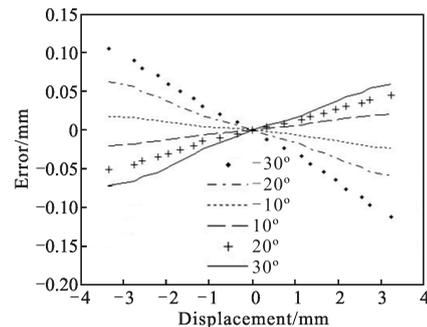


图 8 不同倾角对强散射界面相关法处理结果的影响  
Fig.8 Errors in strong scattering with different oblique angles

由图 8 的实验结果可见,位移相同时,倾角幅度越大则误差越大。倾角相同时,位移越大,误差则会随之增加。

##### (2) 被测物表面颜色

由于不同的表面颜色对传感器的激光器发出的红外光的吸收程度不一,因此测量结果将受到一定的影响。实验中对不同色素的实验材料(红、橙、黄、青、紫五种颜色)分别进行实验测量。实验发现,随着粗糙界面反射光波长不断减小,CCD 采集到的信号强度逐渐减弱,且随着发射光强度的变化呈线性分布。

## 5 总结

文中建立了激光三角法测量系统,从数字散斑相关法测量的角度出发,对强散射粗糙界面的位移进行了实测,且与传统的重心法进行了比较。结果表明,在激光三角法测量中运用数字散斑相关法对强散射粗糙界面进行位移测量是可行的,其测量范围

达到微米级,测量误差小于2%,计算结果优于重心法计算值。文中提出的方法可改善三角法系统在强散射粗糙界面的测量缺陷,提高三角法位移测量在强散射情形下的测量精度。

#### 参考文献:

- [1] Zou Zhenshu, Li Xizeng, Zhang Jinghe, et al. Non contact measurement of laser optical probe [J]. *Opt Precision Eng*, 1997, 5(3): 84-90. (in Chinese)  
邹振书, 李喜增, 张景和, 等. 非接触测量激光光学探头 [J]. *光学精密工程*, 1997, 5(3): 84-90.
- [2] Nakadate S, Yatagai T, Saito H. Computer-aided speckle pattern interferometry[J]. *Appl Opt*, 1983, 2(2): 237-243.
- [3] Diaz F V, Kaufmann G H. Impact-induced transient deformation analysis by means of digital speckle interferometry[J]. *Exp Mech*, 1999, 39(4): 311-316.
- [4] Mobley Curtis D, Zhang Hao, Kenneth J. Voss effects of optically shallow bottoms on upwelling radiances: bidirectional reflectance distribution function effects[J]. *Limnol Oceanogr*, 2003, 48(12): 337-345.
- [5] Maradudin A. Backscattering Effects in the Elastic Scatter of Polarized Light from a Large-Amplitude Random Metallic Hrating. Scattering in Volumes and Surface[M]. North-Itolland: Elsevier Science Publishers BV, 2000: 157-174.
- [6] Francis D, James S W, Tatam R P. Surface strain measurement of rotating objects using pulsed laser shearography with coherent fibre-optic imaging bundles [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(10): 1-13.
- [7] Xu Xiuzhen, Li Zitian, Xue Lijun. Analysis and processing of CCD noise[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(4): 343-347. (in Chinese)  
许秀贞, 李自田, 薛利军. CCD 噪声分析及处理技术[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(4): 343-347.
- [8] Wang Yang, Zheng Qinbo, Zhang Junping. Real time detection of small target in IR grey image based on mathematical morphology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(1): 28-32. (in Chinese)  
汪洋, 郑亲波, 张钧屏. 基于数学形态学的红外图像小目标检测[J]. *红外与激光工程*, 2003, 32(1): 28-32.
- [9] Zhao Nanxiang, Hu Yihua, Lei Wuhu, et al, Small target imaging method based on laser echo waveform analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 742-748. (in Chinese)  
赵楠翔, 胡以华, 雷武虎, 等. 激光回波波形分析小目标检测成像方法[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(4): 742-748.
- [10] Jin Guanchang, Meng Libo, Chen Junda, et al. Development and application of digital speckle correlation technique [J]. *Experimental mechanics*, 2006, 21(6): 689-702. (in Chinese)  
金观昌, 孟利波, 陈俊达, 等. 数字散斑相关技术进展与应用[J]. *实验力学*, 2006, 21(6): 689-702.