

# 基于时序推延的线阵 CCD 动态位移测量方法研究

付 敏 朱 革 郑方燕 许现波 高 宇 昌 驰

重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心, 时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室, 重庆 400054

**摘要** 针对传统线阵 CCD 测量方法仅适用于静态图像采集或低速位移测量的问题, 在分析 CCD 动态测量过程中动态误差产生原因的基础上, 提出一种驱动时序互相推延的多个 CCD 同步测量方法。该方法实现了在一个积分周期内的等时间多个位移值测量, 等效于减少单个 CCD 积分时间, 从而提高线阵 CCD 的动态测量范围。设计了一个由 5 个线阵 CCD 沿圆周均布的, 时序推延的角位移传感器, 并完成相应实验系统的搭建。通过与高精度圆光栅在不同速度下动态误差的检定, 得出随着运动速度的提高, 时序推延测量方法的动态特性要明显优于传统测量方法。结果表明, 时序推延测量法在 30 r/min 时与传统方法 10 r/min 的动态误差水平相当, 验证了时序推延测量方法对提高 CCD 动态特性的可行性。

**关键词** 测量; 线阵 CCD; 时序推延; 动态测量

**中图分类号** O438

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0212003

## Dynamic Displacement Measurement Method Research of Linear CCD Based on Timing Delay

Fu Min Zhu Ge Zheng Fangyan Xu Xianbo Gao Yu Chang Chi

Chongqing Key Laboratory of Time-Grating Sensing and Advanced Testing Technology, Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

**Abstract** The traditional linear CCD measurement method is only suitable for static image acquisition or displacement measurement at low speed. On the basis of the CCD dynamic error analysis in the process of dynamic measurement, a drive timing delay method which is synchronous measured by multiple CCD is proposed. This method uses multiple linear CCD arranged from beginning to end in a space and straggles with each other in time to realize multiple displacement values measurement, so as to improve the dynamic measurement range of linear CCD. To verify the validity of the scheme, a timing delay angular sensor is designed by a circular array which is constituted by five linear CCD sensors of the same tape, and the construction of the corresponding experimental system is completed. By measuring compare with high precision circular grating in the different rotational speeds, with the increase of speed, the timing delay measurement method of dynamic characteristics is obviously superior to the traditional measuring method. The results indicate that the level of dynamic error of the timing delay method in 30 r/min is equal to the traditional method in 10 r/min. It concludes that the feasibility of linear CCD dynamic characteristics improvement is verified with the timing delay measurement method.

**Key words** measurement; linear CCD; timing delay; dynamic measurement

**OCIS codes** 120.4570; 100.2000; 120.5060; 120.4825

## 1 引 言

线阵 CCD 具有成本低、分辨力高、速度快、精度高等优点, 是精密测量中被广泛采用的一种光学传感

收稿日期: 2015-09-14; 收到修改稿日期: 2015-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(51505053, 51505052)、国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ220893)、重庆市基础科学与前沿技术研究专项项目(cstc2015jcyjA1467)

作者简介: 付 敏(1981—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: fum\_0@cqu.edu.cn

器。然而,线阵 CCD 是基于电荷耦合的图像处理器件,其输出电信号是光敏阵列一段时间内(即积分周期)电荷积分的效果。因此,线阵 CCD 获取的图像信息是一种与被测对象运动速度相关的光信号,其像元灰度值会随被测目标运动速度的变化而变化,导致其仅局限于静态或低速位移的测量。基于以上原因,线阵 CCD 主要应用于表面轮廓图像扫描<sup>[1-4]</sup>、激光三角法实现微小位移测量<sup>[5-7]</sup>、空间精确定位测量<sup>[8-10]</sup>以及非接触运动速度测量<sup>[11-12]</sup>等领域。

文献[13]从线阵 CCD 测量原理着手,讨论了线阵 CCD 积分时间、快速电路对动态测量精度和动态范围的影响,指出要减少动态测量误差和提高动态测量范围,必须减少 CCD 积分时间,而在光源功率不发生变化时,积分时间减少会影响光信号积分效果,降低输出电信号质量,从而增加 CCD 测量误差。因此,单纯地减少 CCD 积分时间并不能完全改善 CCD 的动态特性,常规的方法是选用更高扫描频率的 CCD 器件。目前,诞生的很多高速 CCD 器件,常采用“硬件分段同步驱动”的设计思想,例如,RL188D 器件分 16 段并行驱动输出的 1024 像元线阵 CCD,若每段工作频率为 40 MHz,则行频可以达到 40 kHz。但这种用硬件分段同步测量方法,一方面 CCD 像元的积分时间大幅度减少,要求选用非常高效率的光敏元才能达到普通 CCD 成像效果,造成 CCD 成本和制造难度大幅度上升;另一方面,高速与高分辨率往往难以兼得,即高分辨率 CCD 由于像元个数多难以实现高速测量,而高速 CCD 因为并行分段电路多和工艺复杂需要降低对像元分辨率要求<sup>[14]</sup>。

综上所述可知,如何在不增加 CCD 制造难度与不降低像元分辨率的前提下,提高 CCD 动态特性,是 CCD 应用于动态位移测量中需要解决的问题。本文提出一种由多个线阵 CCD 沿圆周均布,驱动时序互相推延的多 CCD 同步测量方法。用软件分段同步测量的方法,在不通过减少 CCD 积分时间的同时,大幅度提高 CCD 动态位移测量范围。

## 2 线阵 CCD 动态位移测量 3 误差分析

### 2.1 动态灰度分布曲线引起的测量误差

当狭缝作为成像目标,由于存在衍射效应,狭缝在线阵 CCD 上成像的灰度值呈高斯分布为

$$g(x) = A \exp\left(\frac{-x^2}{2\omega^2}\right), \quad (1)$$

式中  $\omega$  为高斯光束的束腰,  $A$  为最大光强。

设目标的移动速度为  $v_0$ ,则在 CCD 的积分时间  $t_0$  内目标的移动位移为

$$x_0 = v_0 t_0. \quad (2)$$

由于受积分均化效应的影响,  $t_0$  时间内 CCD 得到的灰度曲线如图 1 所示。对比图 1(a)和 1(b)可以看出,随着目标移动位移  $x_0$  的增大,目标灰度分布曲线逐渐变平变宽。因此,在动态测试过程中,狭缝边缘的灰度值会随运动速度的变化而变化,不能作为位移测量的依据,而常常通过摄取灰度分布曲线的对称中心来判断被测目标变化的位移。

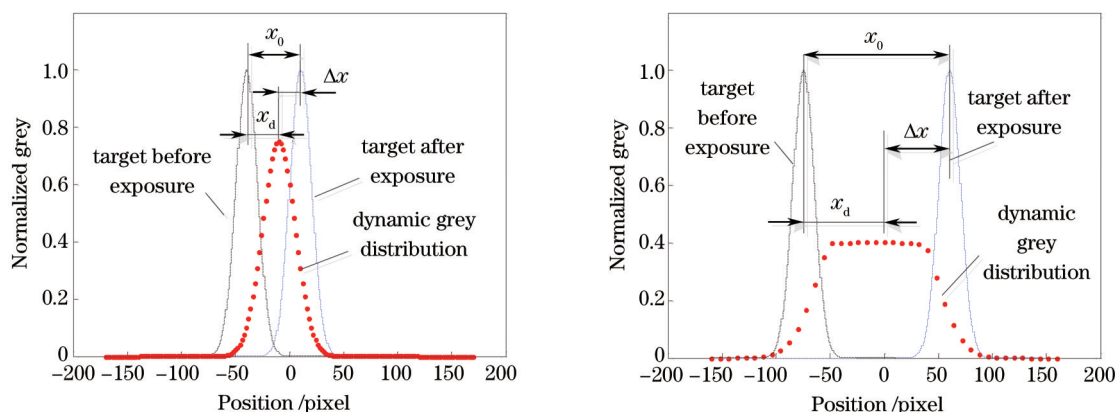


图 1 动态灰度分布中心引起的动态误差

Fig.1 Dynamic error caused by dynamic grey distribution center

从图 1 中可以看出,被测目标实际移动的位移  $x_0$  与动态灰度分布曲线的对称中心变化的位移不相等,其

差值为线阵 CCD 主要的动态测试误差为

$$\Delta x = x_0 - x_d, \quad (3)$$

式中  $\Delta x$  为获取动态灰度分布中心引起的误差,  $x_d$  为动态灰度分布中心在  $t_0$  时间内变化的位移。由图 1 可以看出, 在曝光时间  $t_0$  不变情况下,  $x_0$  越大, 引起的动态测量误差便越大, 即运动速度越大, 测量误差越大。

## 2.2 按比例中心算法动态误差分析

灰度曲线分布中心通常用内插法、形心法、灰度质心法、阶梯法和按比例求中心法等<sup>[15-16]</sup>方法来确定, 但这些方法大部分是针对静态或变化很缓慢的图像测量提出的。为提高亚像元分辨率, 同时兼顾动态响应速度, 采用相对简单的按比例求取中心算法, 其测量原理如图 2 所示。

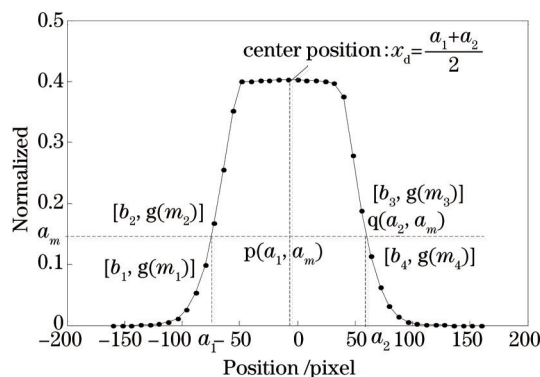


图2 按比例中心算法示意图

Fig.2 Proportion of center algorithm schematic diagram

对 CCD 采集到的光信号, 选取一个合适的阈值  $a_m$ ,  $a_m$  与图像交于  $p$  和  $q$  两点, 找出  $p$ 、 $q$  两点相邻的两个像素的位置  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$ , 和它们的灰度值  $g(m_1)$ 、 $g(m_2)$ 、 $g(m_3)$ 、 $g(m_4)$ , 如图 2 所示。由下面插值公式可以确定  $p$  和  $q$  相对应的  $a_1$ 、 $a_2$  的位置。计算如下:

$$a_1 = b_2 - \frac{(b_2 - b_1)[g(m_2) - a_m]}{g(m_2) - g(m_1)}, \quad (4)$$

$$a_2 = b_3 - \frac{(b_3 - b_4)[g(m_3) - a_m]}{g(m_3) - g(m_4)}, \quad (5)$$

则灰度曲线的中心位置为

$$x_d = \frac{a_1 + a_2}{2}. \quad (6)$$

因为实际测试过程中, 每个灰度值都会有一定噪声, 令四个像元的灰度噪声值分别为  $g_n(m_1)$ 、 $g_n(m_2)$ 、 $g_n(m_3)$ 、 $g_n(m_4)$ , 则附带噪声后的计算公式为

$$a'_1 = b_2 - \frac{(b_2 - b_1)\{[g(m_2) + g_n(m_2)] - a_m\}}{g(m_2) - g(m_1) + g_n(m_2) - g_n(m_1)}, \quad (7)$$

$$a'_2 = b_3 - \frac{(b_3 - b_4)\{[g(m_3) + g_n(m_3)] - a_m\}}{g(m_3) - g(m_4) + g_n(m_3) - g_n(m_4)}, \quad (8)$$

由噪声引起的灰度中心位置变化误差为

$$\Delta x_d = \frac{a'_1 + a'_2}{2} - \frac{a_1 + a_2}{2}. \quad (9)$$

令  $g_n(m_2) > g_n(m_1)$ ,  $g_n(m_3) > g_n(m_4)$ , 结合以上(4)~(9)式可得

$$\Delta x_d < \frac{g_n(m_2)}{g(m_2) - g(m_1)} + \frac{g_n(m_3)}{g(m_3) - g(m_4)}. \quad (10)$$

因此, 结合(3)式可知附带噪声的动态测量误差为

$$\Delta x = x_0 - x_d + \Delta x_d. \quad (11)$$

由(11)式可知, 线阵 CCD 动态误差主要由两部分组成, 即动态灰度分布中心获取的原理性误差, 以及由

灰度噪声引起的灰度曲线中心提取误差。灰度噪声是由于 CCD 在成像过程会受暗电流的影响,引起像元灰度值波动所导致的随机误差,对位移测量精度有重要影响。文献[17-18]给出了灰度噪声随机误差的表达式,并指出此随机误差与相邻像素间灰度梯度呈反比。灰度梯度越大,随机误差越小,灰度梯度越小,随机误差越大。结合图 1 可知,被测目标运动速度越大,灰度分布曲线越平,灰度梯度越小,灰度噪声引起的随机误差便越大,最终引起位移测量误差便越大。

由以上分析可知,引起 CCD 动态测量误差的两个主要因素,都与被测目标运动速度直接相关,且速度越大两部分误差越大。由(2)式可知,改变积分时间  $t_0$  与改变目标移动速度  $v_0$  对  $x_0$  以及  $\Delta x$  所产生的效果等同。在积分时间  $t_0$  为一常量时,动态测量误差会随运动速度变大而增大;另一方面,减少积分时间  $t_0$ ,对同一运动速度下引起的动态测量误差要减少。

### 3 时序推延测量原理

如图 3 所示,假设在空间紧密排列有  $N$  个线阵 CCD,每个线阵 CCD 的有效单元长度为  $W_0$ ,被测对象为一无限长的挡板,挡板上每隔  $W_0$  距离刻有一条透光缝隙,当挡板在线阵 CCD 阵列上方发生相对位移时,透过透光缝隙的透光光线随挡板一起在线阵 CCD 阵列上方移动,经光电转换后,通过读取透光光线在 CCD 输出信号的上升沿时刻,判断透光光线移动的位移,从而测量挡板移动的位移。

具体测量原理为用时序推延的方法,对空间排列的线阵 CCD 按时间先后依次驱动,使相邻两个 CCD 驱动时序相差  $T_{SH}/N$  ( $T_{SH}$  表示线阵 CCD 的一个积分周期),将  $N$  个线阵 CCD 输出信号合成一路信号输出,从第一个线阵 CCD 开始依次读取每个 CCD 的输出信号,读完整个阵列的时间为  $T_{SH}$ ,这就相当于在一个积分周期内,采集了  $N$  次不同的位移值,等效于将积分周期减少为原来的  $1/N$ ,从而大幅度提高线阵 CCD 的动态性能。

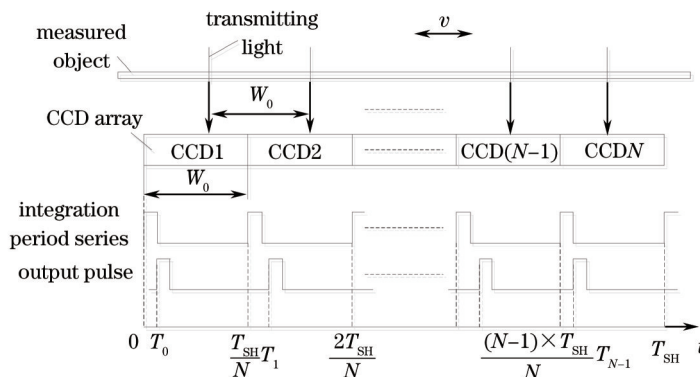


图 3 时序推延的 CCD 驱动时序与输出脉冲关系

Fig.3 Relationship between the CCD driving timing and the output pulse of the timing delay

进一步将按以上方法驱动的相邻两个线阵 CCD 的驱动时序和输出信号的关系表示如图 4 所示。当被测目标静止时,相邻两个线阵 CCD 输出信号的时间差为  $T_{SH}/N$ ,当被测目标在 CCD 表面发生相对位移时,相邻两个线阵 CCD 输出信号的时间差为便发生相应的增加或减少,其增加或减少的量乘以 CCD 积分时间对应的空间当量便可以得出该时间段被测对象移动的位移大小,其差值的符号便表示位移的方向。因此,可以得出位移测量值的表达式为

$$x_j = \frac{W_0}{T_{SH}} \left( \Delta T_{xj} - \frac{T_{SH}}{N} \right). \quad (12)$$

式中  $\Delta T_{xj} = |T_{(i+1)j} - T_{ij}|$ ,为相邻两 CCD 输出信号上升沿的时间差,  $x_j$  为正时表示被测对象运动方向与线阵 CCD 阵列的排列方向同向,为负时表示反向。 $N$  个线阵 CCD 的输出信号并行输出,以前一个输出信号的上升沿为时间参考点,从零时刻开始累计  $\Delta T_{xj}$  引起的时间增量,则可以得到这种增量方式的位移为

$$x = \sum x_j = \sum_1^j \frac{W_0}{T_{SH}} \left( \Delta T_{xj} - \frac{T_{SH}}{N} \right), \quad (13)$$

由以上分析可知,采用  $N$  个线阵 CCD 的时序推延测量方法,通过检测相邻两个 CCD 输出信号光信号之间的时间差,可以实现一个积分周期内等时间均分的  $N$  个位置信号的检测,等效于将单个 CCD 积分时间减少为

1/N,从而大幅度提高线阵 CCD 的动态特性。

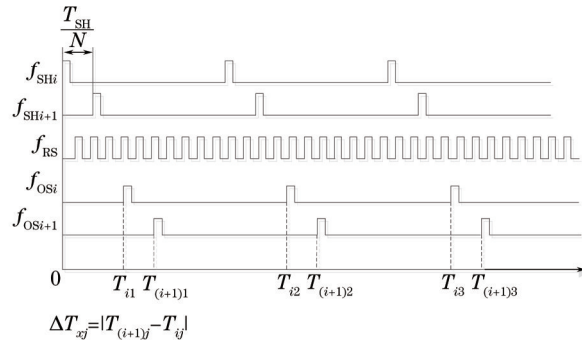


图 4 相邻线阵 CCD 的驱动时序与输出信号的关系

Fig.4 Relationship between driving timing and output signal of adjacent linear CCD

## 4 传感器结构与实验研究

### 4.1 传感器结构设计

由以上分析可知,为实现多线阵 CCD 的时序推延测量,需要将多个线阵 CCD 的有效像元空间直线排列,且要求该区域光强分布均匀,这对光源设计和测头设计都有难度。因此,为验证方案的可行性,设计一种多个线阵 CCD 沿圆周均布的结构,如图 5 所示。在侧光光纤固定板上开一个圆环形嵌线槽,槽内嵌入侧光光纤,并盖上透光镜片,用红色半导体激光器提供光源,在空间形成一个分布均匀的圆环形光斑;圆环形光斑通过透光挡板的透光缝隙,缝隙宽度为 0.1 mm,沿圆周均布成 10 条透光光线,由 CCD 固定板上的线阵 CCD 根据接收到的透光光线的时刻,确定转轴转动的角度大小;其中 CCD 固定板上沿圆周固定 5 个同型号的线阵 CCD,其安装位

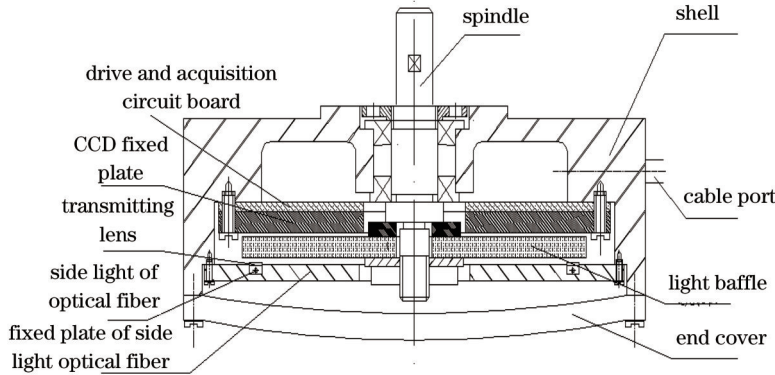


图 5 时序推延传感器装配结构图

Fig.5 Assembly diagram of timing delay sensor

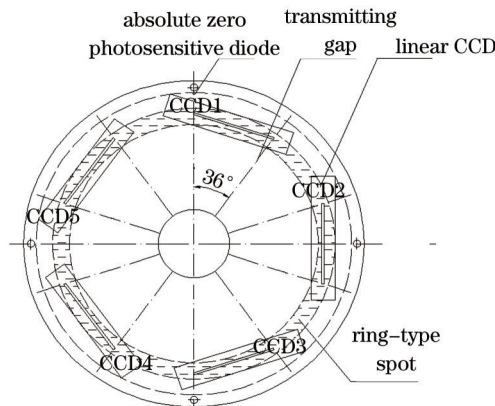


图 6 线阵 CCD 固定板与透光缝隙的关系图

Fig.6 Relationship between CCD fixed plates and transmitting gaps

置与透光挡板的透光缝隙之间的关系如图6所示,以保证在转轴带动透光挡板与线阵 CCD 之间产生相对角位移时,每个线阵 CCD 有效光敏区域都能接受到唯一一条透光光线的光信号。

由于线阵 CCD 获得的位移为直线位移,需将(2)式中直线位移转换为相应的角位移值,线阵 CCD 测量直线位移与角位移的关系如图7所示,图示位置角度 $\alpha$ 为

$$\alpha(t) = 18^\circ - \arctan \left[ \frac{R \sin 18^\circ - x(t)}{H} \right], \quad (14)$$

式中 $\alpha(t)$ 为随时间变化的动态角位移, $R$ 为圆周半径, $H$ 为线阵 CCD 像元接收面的弦高, $x(t)$ 为(13)式得到的动态直线位移值。

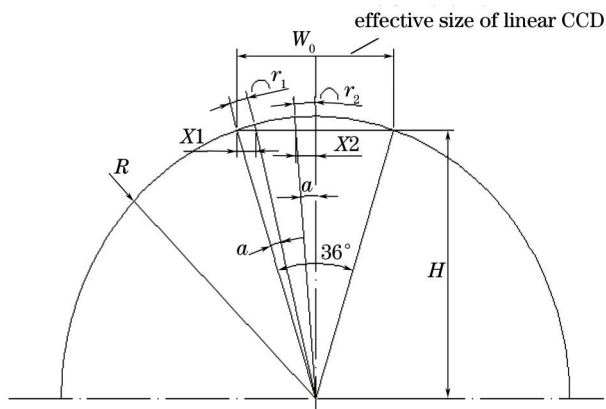


图7 角位移与直线位移的对应关系

Fig.7 Relationship between linear displacement and angular displacement

#### 4.2 系统框图

设计 CCD 角位移传感器系统框图如图8所示,由光学系统、CCD 驱动模块、CCD 输出信号处理及时钟插补

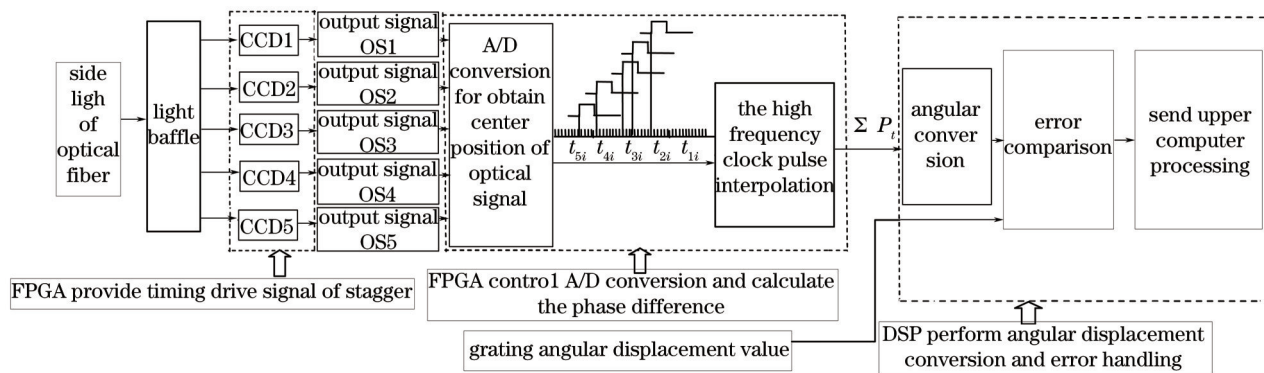


图8 CCD角位移传感器系统框图

Fig.8 CCD angular displacement sensor system block diagram

模块、角度测量值转换及误差处理模块和上位机通信模块组成。控制流程为:由现场可编程门阵列(FPGA)提供5组时序错开1/5个积分周期的CCD驱动信号,CCD接收透过透光挡板的光信号并转换成5个时间先后的电信号输出,将5个输出信号消除直流分量后合成一路模拟信号,经模数(A/D)转换为数字量;再由FPGA对采样的数字量用按比例取中心算法,分别输出对应像元中心的方波信号;然后,用高频时钟脉冲计算相邻两个方波上升沿之间的时间差,用数字信号处理器(DSP)结合(13)式与(14)式计算该时间段发生的角位移变化量;最后,由DSP将CCD测量的角位移值与光栅值进行比较,得到误差值,并将测量结果送上位机处理。

#### 4.3 实验系统

实验工作台如图9所示,其中包括机械转台、海德汉圆光栅、CCD角位移传感器和交流伺服电机四部分。CCD角位移传感器与光栅采用高精度弹性连轴节连接、分度转台和基准光栅同轴安装。采用科尔摩根三相同步无刷伺服电机(6SM100K)带动分度转台转动,以便驱动回转轴带动圆光栅和CCD角位移传感器做

同步转动,使得光栅和 CCD 传感器保持相同角位移。线阵 CCD 选用东芝公司的 TCD1501D,该 CCD 由 5000 个有效光敏元组成,像元间距为  $7\ \mu\text{m}$ ,总有效长度 35 mm。为提高 CCD 像元的读取速度,将 CCD 的复位频率和采样保持频率都设置为 10 MHz,其行扫描频率约为 2 kHz。为了检验时序推延测量方法的动态测量误差,采用了更高精度的海德汉光栅和配套细分卡作标定。标定采用 Heidenhain 36000 线,精度为  $\pm 1''$  的 ROD880 圆光栅连同 Heidenhain 专用细分卡做测量标准。Heidenhain 细分卡采用专用配套 IBV660B 细分盒对原始信号进行 100 倍细分。为进一步提高光栅信号的分辨率,再将细分后的光栅脉冲通过数字电路进行 4 倍细分,细分后的脉冲信号的最终分辨率为  $0.09''$ 。采取动态特性相对较好的按比例求取中心算法,其静态信号最高细分精度约 0.1 个像元<sup>[9]</sup>,实际测试过程中因动态信号影响会比 0.1 个像元距离更大。由(14)式可知 0.1 个像元距离对应的角度误差大小约为  $2.5''$ ,同时由 CCD 直线位移转换为角位移的计算会带来误差、信号灰度噪声随机误差、动态测试的灰度中心提取误差等因素的影响,使得理论误差会大于  $2.5''$ 。因此,所检测的光栅的精度高于被检测 CCD 传感器至少 3 倍以上,能够实现角度误差检测。检测方法是:直驱电机带动被测传感器与基准光栅在匀速转动下同轴转动,采集系统采集被测传感器与角度基准源的数据并做差,得到被测传感器的误差数据。将此数据传输到电脑中,用 VC++ 软件编写接收程序,将误差数据以坐标形式显示。

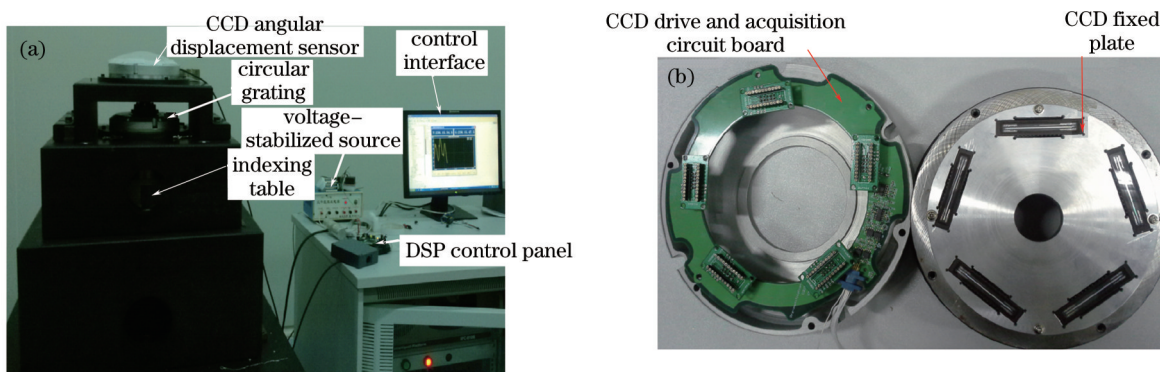


图9 实验系统与 CCD 结构图

Fig.9 Experimental platform and CCD structure diagram

#### 4.4 实验分析

为验证时序推延测量方法对 CCD 动态特性的改进效果,在不同速度下对比传统单一 CCD 测量方法与多个 CCD 时序推延测量方法的误差曲线。实验中的传统测量方法是只让其中一个 CCD 工作,断开其他 CCD 采样的数据,这样保证两种方法的比较实验是在同一实验系统下完成,具有同样的系统误差特性。实验过程中根据选择的比较阈值和 A/D 采样的像元值,代入(4)~(9)式可得到附带噪声像元中心位置值,再结合(13)式得到当前透光光线在 CCD 表面发生的直线位移值,最后经(14)式得到相应的角位移值。为了保证对比实验的可靠性,在同一速度下,先采用传统测量方法进行误差测量,在一周范围内根据光栅测量值等空间间隔采集 360 个数据,用一同步时钟同时锁定 CCD 传感器转换输出的角位移值,两者求差得到相应位置的误差值;为减少机械转动过程中的随机误差,对同一速度下采集多组误差值进行平均;然后用同样的方法对时序推延测量方法的误差值进行测量;最后,将同一速度下,所测得的两种方法的误差值表示到同一误差曲线图上,测试结果如图 10 所示。图 10 中分别为  $v=5, 10, 20, 30\ \text{r/min}$  时  $0^\circ\sim 360^\circ$  的全周误差曲线对比图,图中黑线(圆点连接曲线)为时序推延误差曲线,红线(星型连接曲线)为传统测量方法误差曲线。

由前文分析可知,线阵 CCD 动态测量误差主要由两部分组成:灰度曲线中心提取的原理性误差和灰度噪声引起的随机误差。这两种误差成分在实际测试过程中是混合在一起的,即每次由 A/D 采用获得的像元灰度值都是携带当前运动状况下的随机灰度噪声的灰度值。因此,无法用公式对两种误差成分进行分别定量的计算,但可以定性的分析两种误差的变化规律,分别为随速度提高灰度中心提取误差的正偏移量增大,以及由随机误差引起的误差值增大。

从图 10 比较测试结果可以看出,两种测量方法的灰度中心提取误差和灰度随机噪声误差变化规律均随运动速度增大而增大,其中正误差偏移量主要由灰度中心提取方法引起,总误差大小主要由灰度噪声误差

引起。由图 10(a)和 10(b)可知,当运动速度较低时,两种测量方法的误差变化规律大致相同,只是传统测量方法随运动速度提高,动态误差增加更为明显;验证了前面分析的当速度较低时,由于 CCD 的行扫描频率远大于被测对象运动速度,动态误差中的灰度中心提取误差和灰度噪声随机误差受速度影响较小的规律。图 10(c)表示当运动速度进一步提高到 20 r/min 时,时序推延测量方法的正误差偏移量为 11",总误差值为 26.2",略大于 10 r/min[图 10(b)]时的 6.2"和 22.04"。而传统测量方法的正偏移量和误差值分别为 15.2"和 35.9",动态误差迅速增加;说明当运动速度进一步提高时,时序推延测量方法因为增加同一曝光时间内的图像采集信息量,相当于减少了单一 CCD 的曝光时间,扩大了 CCD 动态测量范围。当速度进一步提高到 30 r/min 时,如图 10(d)所示,相比图 10(c)而言,时序推延测量方法的误差正偏移量和误差值进一步增加,分别为 13.5"和 30.2"。而传统测量方法的正偏移量和误差值则迅速增加,分别为 25.1"和 42.3"。进一步验证了前文分析的正确性。一方面时序推延测量方法可以有效提高线阵 CCD 的动态特性,另一方面,其测量误差正偏移量与误差值都随测量速度的提高而增大。表 1 列出了不同速度下传统测量方法与时序推延方法的误差正偏移量和总误差值的结果对比。

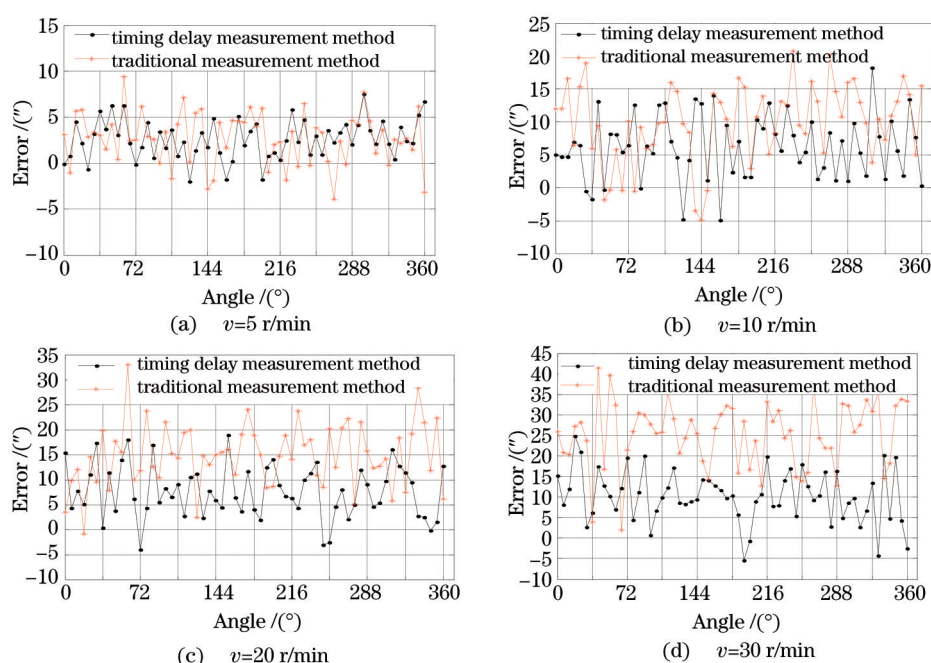


图 10 传统方法与时序推延测量方法动态误差对比

Fig.10 Dynamic error comparisons of traditional method with timing delay method

表 1 实验结果对比

Table 1 Comparison of results

Speed /(r/min)		5	10	20	30
Traditional measurement method	Positive error offset /(")	3.1	10.6	15.2	25.1
	Error range /(")	14.03	28.05	35.9	42.3
Timing delay measurement method	Positive error offset /(")	1.7	6.2	11	13.5
	Error range /(")	11	22.04	26.2	30.2

从表 1 可以看出,CCD 动态误差的正误差偏移量和随机误差均随运动速度增大而增大,采用时序推延法的动态误差要明显小于传统位移测量方法,其中 30 r/min 时的动态误差与传统方法 10 r/min 时的动态误差水平相当。因此,验证了关于线阵 CCD 动态误差分析以及改善方法的正确性。

## 5 结 论

详细分析了线阵 CCD 动态测量时,引起动态测量误差的两个主要因素:动态灰度分布曲线中心提取的原理性误差和像元灰度噪声引起的随机误差,并揭示了两者与运动速度之间的变化规律;提出一种时序推



延的动态位移测量方法,构建一个由5个线阵CCD同步测量的角位移传感器结构,实现同一曝光时间内多个位移值采集的目标,等效于将单一CCD曝光时间减少了4/5,从而提高CCD的动态特性;通过与高精度圆光栅在不同运动速度下进行动态测量误差检定,对比本文提出的时序推延测量方法与传统测量方法的动态误差特性,验证了关于CCD动态误差变化规律分析的正确性,同时,验证了时序推延测量法对提高CCD动态特性的有效性。结果表明,时序推延测量法在30 r/min时与传统方法10 r/min的动态误差水平相当,说明本方法可以在不减少CCD积分时间的前提下,有效提高其动态特性。

以上研究结论揭示了CCD动态位移测量的误差特性,验证了时序推延测量方法对提高线阵CCD动态特性的可行性,较大幅度的提高了线阵CCD的动态测量范围,为线阵CCD应用于常规动态位移测量提供了一种有效的解决方案。

## 参 考 文 献

- 1 Gao Lina, Hu Xiaodong. High precision edge detecting algorithm and realization of linear CCD based on FPGA[J]. *Advances in Information Sciences and Service Sciences*, 2012, 4(20): 318-325.
- 2 He Fujun, Zhang Ruijie, Lan Shuang, *et al.*. Measurements of non-contact external tapered thread based on linear array CCD[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2008, 40(7): 1169-1172.  
何富君,张瑞杰,兰爽,等.圆锥外螺纹的线阵CCD非接触检测方法[J].哈尔滨工业大学学报,2008,40(7):1169-1172.
- 3 Miao Jianyu, Zhang Liping, Tian Tiejun, *et al.*. Realizable technology of light-machine structure for three-line array CCD tridimensional mapping camera[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(10): 2183-2189.  
苗健宇,张立平,田铁印,等.三线阵CCD立体测绘相机结构实现技术[J].仪器仪表学报,2011,32(10):2183-2189.
- 4 Li Yapeng, He Bin. Improving image quality by using CCD subpixel imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2):0211001.  
李亚鹏,何斌.采用CCD错位成像技术提高图像质量[J].光学学报,2015,35(2):0211001.
- 5 Chen Ji, Wang Xin, Cao Jiuda, *et al.*. Development of high-speed CCD laser displacement sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(4): 611-616.  
陈骥,王鑫,曹久大,等.高速CCD激光位移传感器[J].光学精密工程,2008,16(4):611-616.
- 6 Fang Ping, Ding Fan, Li Qipeng. Research on a novel micro-displacement sensor based on linear CCD[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(1): 74-77.  
方平,丁凡,李其朋.基于线阵CCD的新型微位移传感器的研究[J].传感技术学报,2006,19(1):74-77.
- 7 Sun Dongming, Dong Wei, Guo Wenbin, *et al.*. A testing method for a MOEMS optical switch using CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(3): 346-350.  
孙东明,董玮,郭文滨,等.采用CCD技术的微型光机电系统光开关测试方法[J].光学学报,2005,25(3):346-350.
- 8 Zhang Yu. Two improving methods of object orientation precision by CCDs[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2003, 14(10): 1118-1120.  
张宇.提高CCD空间定位精度的两种方法[J].光电子·激光,2003,14(10):1118-1120.
- 9 Ao Lei, Tan Jiubin, Cui Jiwen, *et al.*. Fast and precise center location for circle target of CCD laser autocollimator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 253-258.  
敖磊,谭久彬,崔继文,等.一种快速高精度激光CCD自准直仪圆目标中心的定位方法[J].光学学报,2007,27(2):253-258.
- 10 Qian Yixian, Hong Xueting, Jin Weimin. Motion measurement of dual-CCD imaging system based on optical correlator [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0708002.  
钱义先,洪雪婷,金伟民.光学相关的双CCD成像系统图像运动位移测量[J].中国激光,2013,40(7):0708002.
- 11 Guo Jingjing, Zhao Xuwen, Li Min, *et al.*. A novel rotational velocity transducer based on linear CCD[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2012, 23(8): 1478-1481.  
郭晶晶,赵绪文,黎敏,等.基于线阵CCD的新型转速传感器[J].光电子·激光,2012,23(8):1478-1481.
- 12 Zheng Lina, Zhang Tao, Kuang Haipeng, *et al.*. Image motion velocity measurement technique based on spatial filtering effect of line CCD for aerial camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1112002.  
郑丽娜,张涛,匡海鹏,等.基于线阵CCD空间滤波效应的航空相机像移速度测量方法[J].光学学报,2012,32(11):1112002.
- 13 Li Changgui, Liu Jinghai, Lin Youna, *et al.*. Study on using linear CCD array in real-time dynamic measurement[J]. *Optical Technology*, 1999, (2): 4-7.

- 李长贵, 刘敬海, 林幼娜, 等. 线阵 CCD 用于实时动态测量技术研究[J]. 光学技术, 1999, (2): 4-7.
- 14 Wang Qingyou. Photoelectric Sensor Application Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2014.  
王庆有. 光电传感器应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- 15 Chen Tingzheng, Lü Haibao. CCD subdivision method and application[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(11): 1396-1399.  
谌廷政, 吕海宝. CCD 细分技术方法研究及应用[J]. 光学学报, 2002, 22(11): 1396-1399.
- 16 Yang Yong, Wang Yanlei, Li Ming, *et al.*. Research of high-accuracy digital image correlation measurement system[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(2): 197-201.  
杨 勇, 王琰蕾, 李 明, 等. 高精度数字图像相关测量系统及其技术研究[J]. 光学学报, 2006, 26(2): 197-201.
- 17 Wang Zhiyong, Wang Lei, Guo Wei, *et al.*. Optimal size of speckle spot in digital image correlation method[J]. Journal of Tianjin University, 2010, 43(8): 674-678.  
王志勇, 王 磊, 郭 伟, 等. 数字图像相关方法最优散斑尺寸[J]. 天津大学学报, 2010, 43(8): 674-678.
- 18 Wang Zhiyong, Li Hongqi, Tong Jingwei, *et al.*. Statistical analysis of the effect of intensity pattern noise on the displacement measurement precision of digital image correlation using self-correlated images[J]. Exp Mech, 2007, 47(5): 701-707.
- 19 Wang Wenting. Research of High-Speed CCD Data Acquisition System and Image Spots Location[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.  
汪文婷. 高速线阵 CCD 数据采集系统与像点定位研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.

栏目编辑: 何卓铭