

文章编号 1004-924X(2014)04-0956-07

基于时间参考点的差动式线阵 CCD 位移传感器

付 敏¹, 彭东林^{1,2*}, 鲁 进², 陈锡侯², 郑方燕²

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆理工大学 机械检测技术与装备教育部工程中心, 重庆 400054)

摘要:为了将线阵 CCD 应用于实际工程的大尺寸位移测量, 利用线阵 CCD 像元空间与输出时间的对应关系, 提出了一种差动式测量的线阵 CCD 位移传感器测量系统。分析了线阵 CCD 位移测量存在的问题, 结合线阵 CCD 中像元空间与驱动脉冲之间的对应关系, 提出一种以时间为参考点的差动式测量方法。该方法用两个空间上对齐、时间上错开半个积分周期的线阵 CCD 检测透光挡板上等间距分布的透光光线的位置变化; 通过计算两个 CCD 上输出光信号的时间差, 用匀速扫描测量原理实现对空间位移的测量。用雷尼绍激光干涉仪对所研制的线阵 CCD 位移传感器进行了校准, 结果显示: 在有效测量范围(600.05 mm)内, 经过修正后的测量误差可控制在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 以内, 验证了用差动法实现线阵 CCD 大尺寸精密位移测量的可行性。

关键词:光电式传感器; CCD 位移传感器; 时间参考; 位移测量

中图分类号: TP212.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142204.0956

Differential and linear CCD displacement sensors based on time reference points

FU Min¹, PENG Dong-lin^{1,2*}, LU Jin², CHEN Xi-hou², ZHENG Fang-yan²

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment of the Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

* Corresponding author, E-mail: pdl@cqut.edu.cn

Abstract: To realize the large displacement measurement in the practical engineering by using the linear CCD sensors, a measuring system of linear CCD displacement sensors based on the differential measurement method is proposed. According to the problem existing in the linear CCD displacement measurement and the relationship between pixel space and drive pulse in the linear CCD sensors, a differential measurement method which uses time as a reference point is proposed. This method uses two linear CCD sensors aligned in a space and staggered with half of integration period in time to test position changes of the light transmission which is equally spaced in the light baffle. By calculating the value of time difference of optical signals from the two linear CCD sensors and using the uniform scanning measurement principle, the spatial displacements are obtained. After the calibration of the Ren-

收稿日期: 2013-11-12; 修订日期: 2014-01-13.

基金项目: 国家自然科学基金仪器专项资助项目(No. 51127001); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2012AA041202), 重庆市“两江学者”计划专项经费资助项目

ishaw laser interferometer, the measuring errors of the developed linear CCD displacement sensors are controlled within $\pm 2 \mu\text{m}$ for an effective measuring range of 600.05 mm. It concludes that the feasibility of large precision displacement measurement using the linear CCD sensors is verified with the differential method.

Key words: photoelectric sensor; CCD displacement sensor; time reference; displacement measurement

1 引言

目前工程上常用的精密大量程位移传感器按工作原理可分为栅式和极式两种^[1]。栅式位移传感器以光栅和磁栅为典型代表,通过对栅线数目的记录来实现位移的测量,要求栅距加工“又细又精”,精密的刻划工艺造成传感器的制作成本大幅度提高;极式位移传感器的代表是旋转变压器、同步感应器和容栅等,采用调制方式在极距内生成正余弦电信号,通过对电信号的解算实现对位移的测量,对极距的加工要求“不细只精”,同时要求正余弦信号尽量纯净,这就对除了机械分度以外的其他产生电、磁信号的制造技术提出了更高要求。

线阵 CCD 是精密测量中广泛采用的一种光学传感器,主要应用于表面轮廓图像扫描^[2-4]、用激光三角法实现微小线位移测量^[5]、以及非接触运动速度测量^[6-7]等领域。虽然目前线阵 CCD 像元的制作工艺已经达到微米级,而且随着亚像元细分技术的深入发展^[8-10],线阵 CCD 的分辨力已经达到亚微米水平,但受线阵 CCD 本身尺寸和内部像元结构的限制,在位移测量过程中,往往需要在测量范围内提供一个位置参考点^[11],导致线阵 CCD 仅适用于微小位移或精密尺寸的测量,尚未见有将线阵 CCD 应用于加工过程大尺寸(1 m 以上)直线位移测量的报导。

本文利用线阵 CCD 像元空间与输出时间的对应关系,用匀速扫描的测量思想,构建了一个由两个线阵 CCD 组成的光电接收单元,时序上依次驱动、空间上首尾对齐的差动式检测直线位移传感器。该传感器以时间为参考点,避开空间位置参考点的约束,通过检测两个 CCD 单元获取光信号的时间差,得到被测物体移动的直线位移大小,减少了对传感器极距加工精度的依赖,实现了大尺寸增量式精密位移测量的目标。

2 线阵 CCD 位移测量存在的问题

线阵 CCD 具有精密排列的光敏单元,而且随着各种亚像元技术的研究,已有达到 0.01 像元分辨力测量算法的报道^[12],但工程上尚未将线阵 CCD 直接作为位移传感器来实现测量。原因主要有两方面:(1)线阵 CCD 的首尾存在一定数量的哑元单元,导致其初始位置和结束位置难以准确的确定;(2)正常驱动的 CCD,在一个驱动周期开始和结束时刻存在一定数量的空驱动脉冲,导致 CCD 时序驱动的有效起始时刻和结束时刻难以确定。以一个正常驱动(linear)的线阵 CCD 为例,若其像元总长度为 W ,有效像元长度为 W_0 ,正常驱动后其积分周期为 T_{sh} ,其中哑元驱动时间为 T_1 ,有效像元驱动时间为 T_0 ,空脉冲运行时间为 T_x ,则该 CCD 的像元空间与时序之间的关系如图 1 所示。从图中可以看出,一个正常驱动(linear)的线阵 CCD,只有在其有效像元范围内才满足像元空间与驱动时钟脉冲一一对应的关系,才能用所测电信号时间变化来表示被测位移的大小。

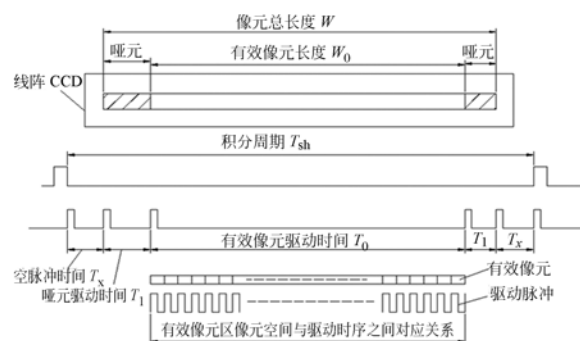


图1 线阵 CCD 正常时序与像元关系

Fig. 1 Relationship between normal timings and pixel in the linear CCD

因此,要将线阵 CCD 作为位移传感器实现测量,需在 CCD 单元有效像元区域确定一个位置参

考点或者时间参考点。常见的应用线阵 CCD 实现位移测量的方式中,多采用以位置信号作为参考点,例如激光三角法位移测量中的基准表面,通过检测被测表面与基准面之间的距离和方向实现位移测量,如图 2 所示。这种方法会使测量范围局限于线阵 CCD 的尺寸。也有如文献[13]所提出的采用多个线阵 CCD,用分段测量的方法来实现大尺寸的测量。但该方法光路复杂,且光路直接暴露于空气中,受环境影响较大,同时多个线阵 CCD 位置安装困难,难以适应工程上对位移测量的需要。

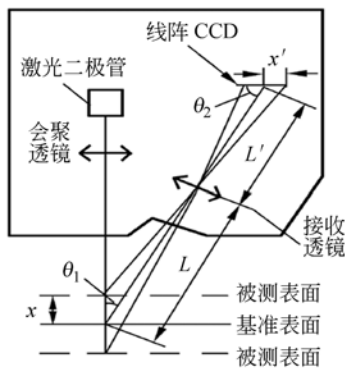


图 2 线阵 CCD 激光三角法位移测量原理
Fig. 2 Principle of linear CCD laser triangulation

3 差动式线阵 CCD 位移传感器系统结构设计

3.1 基于时间参考点的差动式检测方法

针对线阵 CCD 位移测量存在的问题,利用匀速扫描测量原理,提出一种以时间为参考点的差动式位移测量方法。差动式线阵 CCD 位移传感器的结构如图 3 所示,其由光信号发射部分和光信号接收部分组成。光信号发射部分采用透光方式,在直线透光挡板上,按 L_0 等间距加工透光缝隙,强度均匀的光线从透光挡板的缝隙透射出去,在直线空间产生固定位置的线性透光光线。光信号接收部分由线阵 CCD₁ 和线阵 CCD₂ 组成,安装时将两个 CCD 的有效像元并排对齐,单个 CCD 像元总长度为 W (包括哑元和有效像元),其中有效像元的长度为 W_0 (其中 W_0 略大于 L_0), CCD 模块在透光挡板上方以任意速度 v 作直线

运动,在运动过程中保证 CCD₁ 和 CCD₂ 上总能接收到相同的透光光线。

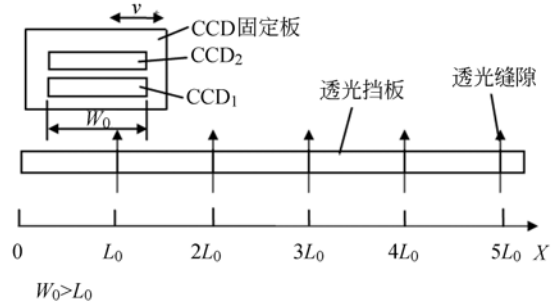
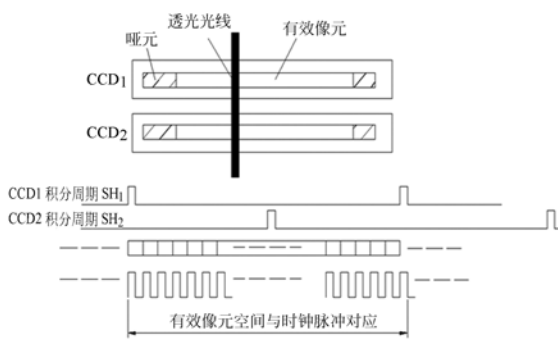


图 3 差动式检测的线阵 CCD 传感器
Fig. 3 Differential detection of linear CCD sensor

为了实现能在 CCD 有效像元区设定一个时间的参考点,使两个 CCD 的驱动时序互相错开半个积分周期 T_{sh} ,那么在两个 CCD 上,将沿时间先后交替获取反应透光缝隙位置的电信号 OS_1 和 OS_2 。取线阵 CCD 光敏单元随时间扫描的方向为正向,当两个 CCD 输出信号 OS_1 和 OS_2 之间的时间差等于 $T_{sh}/2$ 时,表示被测对象没有发生相对位移;当时间差大于 $T_{sh}/2$ 时,表示被测对象的运动方向与光电扫描方向一致,沿正向发生位移;当时间差小于 $T_{sh}/2$ 时,表示被测对象的运动方向与光电扫描方向相反,沿负向发生位移。因此,只要确定这种时间差的大小与位移大小之间的关系,便可以实现以时间为参考点的位移测量。

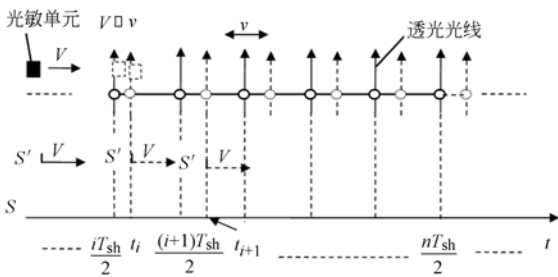
对于两个同类型的线阵 CCD,只要驱动频率相同,则其像元空间与时序之间的关系就是一致的。而两个 CCD 上获取的光信号位置,必定位于两个 CCD 的有效像元区域,因此可以假设这种交替测量的过程始终都在一组有效的像元之间实现,不存在空驱动和哑元,将这样排列的有效像元展开成一条直线,其像元空间与驱动时钟脉冲之间的关系为一个时钟脉冲对应一个像元距离,如图 4(a)所示。像元扫描速度为 $v=W_0/T_0$, W_0 为线阵 CCD 有效像元长度, T_0 为线阵 CCD 有效像元驱动时间。因此,在不考虑这种光敏阵列排列的间隙,以及光敏单元的分辨力的情况下,可以进一步用匀速扫描的方法来描述以上两个 CCD 差动测量的过程:

假设空间有无数条固定在一起,两两相距为 $X = \frac{T_{sh}}{2} v$ 的透光光线,在直线空间以任意速度 v



(a) 等效的理想像元空间与时序关系

(a) Ideal equivalent relationship between pixel space and timing



(b) 相对匀速扫描双坐标系

(b) Relatively uniform scanning double coordinate system

图 4 基于时间参考点的差动式测量原理

Fig. 4 Differential measuring principle based on time reference point

运动,在此空间有一光敏单元,以速度 v 匀速扫描,其中 $(V \gg v)$,那么与每条透光光线相遇时,会分别在不同的时刻得到高电平信号。以大地为静止坐标系,以光敏单元为匀速运动坐标系,构建相对运动的双坐标系如图 4(b)所示,图中静止坐标系横坐标是以时间为刻度表示的。当透光光线与大地保持相对静止时,光敏单元每隔 $T_{sh}/2$ 时间与透光光线相遇一次;当透光光线与大地发生相对位移时,光敏单元与相邻两条透光光线相遇的时刻分别为 t_i 和 t_{i+1} ,由匀速运动与位移之间的关系,可知其相对位移为:

$$x = v[(t_{i+1} - t_i) - \frac{T_{sh}}{2}] = V(\Delta T_i - \frac{T_{sh}}{2}) \quad (1)$$

式(1)表示前后两个电信号的时间差 ΔT_i ,相对周期信号 $T_{sh}/2$ 引起的时间上的增量,若从零时刻开始累计 ΔT_i 引起的时间增量,则可以得到这种增量方式的位移为:

$$x_i = \sum_1^i V(\Delta T_i - T_{sh}/2) \quad (2)$$

从式(2)可以看出,位移测量精度取决于匀速扫描的匀速性、光敏单元的分辨率以及时间测量的精度;而光敏单元分辨率由像元算法、光照条件和本身尺寸决定,匀速性由线阵 CCD 光敏元固定尺寸和驱动周期决定,这些量在系统确定以后可以认为是固定的。因此,通过高频时钟插补的方法提高时间测量的精度,可以提高位移测量的精度。

由以上分析可知,利用匀速扫描测量原理实现差动线阵 CCD 位移测量,为线阵 CCD 提供一个时间上的参考点。将两个 CCD 输出信号合成,通过检测当前反应透光位置光信号与前一个光信号之间的时间差,用式(2)便可以得到这个时间段的位移,同时当前光信号又是下一次测量时间上的起始点。因为线阵 CCD 光敏单元具备匀速扫描的特点,所以这种时间参考点通过速度的转换,具备有空间位置参考点同样的效果;同时,时间参考点不需在空间设定固定的测量位置,随着线阵 CCD 本体移动,可以实现大尺寸的增量式位移测量。

3.2 系统框图

系统控制框图如图 5 所示,由光学系统、线阵 CCD 驱动模块、线阵 CCD 输出信号处理以及位移计算并处理模块组成。为提高测量精度,同时获取较高光敏元细分精度,对 CCD 输出信号采用高速 A/D 采样,然后用按比例求取中心算法^[14]来确定光信号的中心位置,该算法的细分精度可达 0.1 个像元。通过对中心位置的获取,转换为数字的方波信号,用高频时钟脉冲对两个 CCD 电信号的时间差进行测量,并实现位移的计算和与上位机的通信。

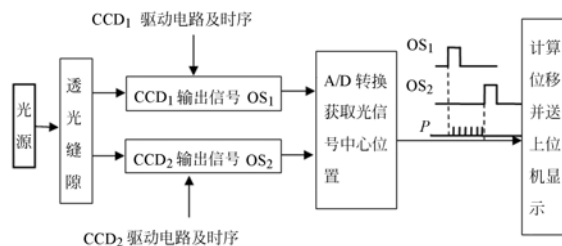


图 5 线阵 CCD 位移传感器系统框图

Fig. 5 Schematic diagram of linear CCD sensor

4 实验与分析

4.1 实验研究

差动式线阵 CCD 位移传感器(简称 CCD 传感器),选用东芝公司的 TCD1501D,该 CCD 由 5 000 个有效光敏元组成,像元间距为 $7 \mu\text{m}$,总有效长度为 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 。设计实验及校准装置如图 6 所示,主要由 CCD 传感器、丝杠导轨、伺服电机及控制系统、CCD 传感器电气控制箱、CCD 传感器位置控制系统、雷尼绍激光干涉仪(ML10)和干涉仪控制系统组成。

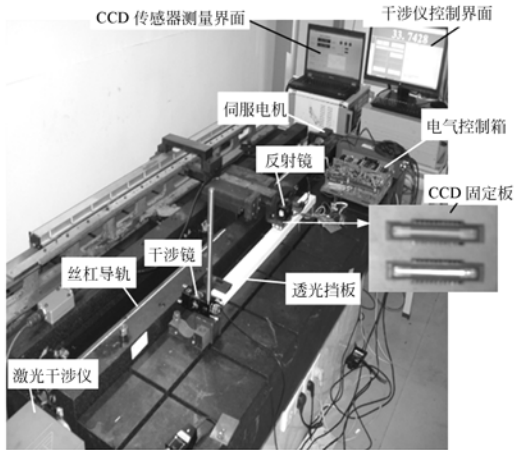


图 6 CCD 传感器实验平台

Fig. 6 Experiment platform of linear CCD sensor

在大理石工作平台上,分别固定丝杠导轨、透光挡板,在滑块上固定线阵 CCD 固定板,采用富士交流伺服电机(型号 GYS751DC2-T2C)带动丝杠转动,驱动滑块作直线运动。CCD 固定板用精密铣削加工 2 个线阵 CCD 安装槽,CCD 安装时通过调节槽内垫片来保证 2 个 CCD 的平面度,用千分表检查最终安装平面度,然后使用分辨率小于的千分螺杆校准器对两 CCD 对齐距离进行校准。透光槽和透光挡板采用 IT10 加工精度,透光挡板有效测量范围为 600.05 mm ,透光槽宽度为 0.5 mm ,按等间距 34.90 mm 分布在透光挡板上。在透光槽下方,沿直线方向安装侧光光纤,用红色半导体激光器提供光源,使光线在整个测量范围保持均匀。透光挡板固定在大理石平台上,

用千分表检查与丝杠导轨之间的平行度。

测量过程中用雷尼绍激光干涉仪进行校准,干涉仪的反射镜安装在 CCD 固定板上,随滑块一起运动。实验中由电气控制箱采集 CCD 传感器的测量值,送上位机保存和显示,同时记录激光干涉仪的测量值,将两个值进行比较,得到 CCD 传感器的测量误差。在整个测量范围(600.05 mm)内,控制伺服电机每 1 mm 采集一组数据,共采集 600 组数据,比较测量结果,得到图 7 所示误差曲线,测量误差峰峰值约 $8 \mu\text{m}$ 。

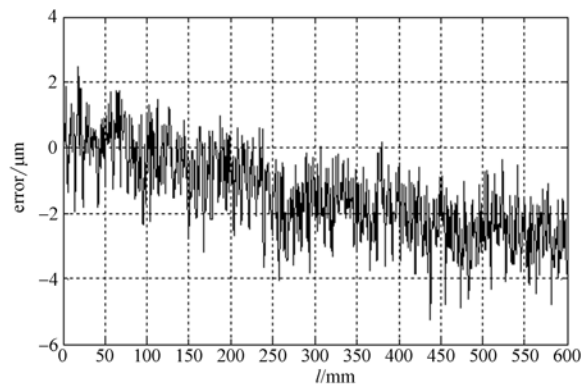


图 7 原始误差曲线

Fig. 7 Original error curve

4.2 误差分析与修正

从图 7 可以看出,测量结果的误差成分主要由高频误差和线性低频误差组成。下面对这两种误差成分产生原因进行分析并修正。

(1) 高频误差在测量范围内表现为一定的周期性,这是因为被测物边缘经 CCD 成像后的信号由于光的衍射效应、光源不均匀、光电饱和等原因,并不是刚好在相邻两个像元上发生突变,而往往是在相邻好几个像元处渐变,从而造成同一透光缝隙在 CCD 不同位置成像时的情况不一致,而造成对成像中心位置的误判。这种误差成分的随机性比较大,测试困难,主要通过改善光源稳定性、提高控制算法的自适应能力进行修正。针对这种误差成分,对激光器采用智能稳压电源供电,保证光源的稳定性,同时采取在原有按比例求中心算法基础上,根据实时光信号强度大小调节比较的阈值电平,以减少因光源不稳定和光的衍射造成光强变化的影响。

(2) 线性低频误差主要由测量系统安装误差、加工误差和材料热膨胀误差以及其他随机误

差成分组成。在实验中,采用激光干涉仪作为校准装置,使测量方向和校准方向在同一方向上来有效避免违背阿贝结构造成的一次误差。但因为线阵 CCD 的安装无法保证与导轨完全平行,同时导轨的运动方向无法保证与激光器瞄准方向一致,会带来一定的测量误差,另外丝杠导轨带来的传导误差和材料热膨胀带来的误差也会给测量精度带来影响。这些误差主要表现为一次线性误差,用线性拟合的方法可以将误差的主要部分修正掉。

结合以上分析,得到经过误差修正后的测量误差曲线如图 8 所示,同时,取 20 组实测数据对比如表 1 所示。从测量结果可以看出,除个别数据以外,在整个测量范围内测量误差控制在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 以内,比修正前误差减少了一倍,说明以上关于高频误差和低频误差修正的方法是有效的。

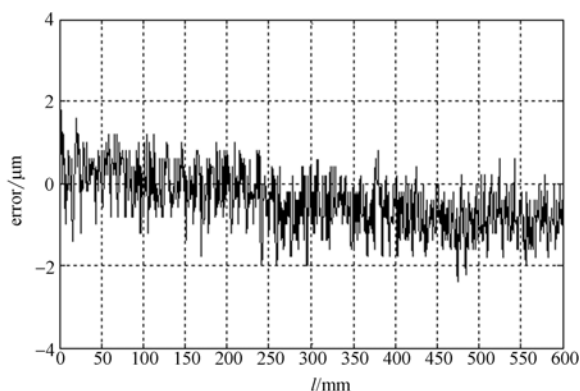


图 8 修正后的测量误差曲线

Fig. 8 Measurement error curve after error correction

参考文献:

- [1] 彭东林. 时栅位移传感器与新型机床动态检测系统 [M]. 北京:科学出版社,2010.
PENG D L. *Time Grating Displacement Sensors and Novel Dynamic Testing System for Machine Tool* [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [2] 李佳列,丁国清,颜国正,等. 采用 CCD 的非接触测量中提高精度的一种方法[J]. 光学精密工程, 2002,10(3):281-284.
LI J L, DING G Q, YAN G ZH, *et al.*. Method

表 1 CCD 传感器与干涉仪部分实测数据对比

Tab. 1 Comparison of partial measured data between CCD sensors and interferometer

CCD /mm	干涉仪 /mm	误差 / μm	CCD /mm	干涉仪 /mm	误差 / μm
0.000 5	0.000 1	0.4	300.086 8	300.087 1	-0.3
30.054 5	30.054 0	0.5	329.990 7	329.991 5	-0.8
60.042 1	60.042 0	0.1	359.975 9	359.976 7	-0.8
90.029 2	90.029 3	-0.1	390.096 7	390.097 6	-0.9
119.940 8	119.941	-0.2	420.068 9	420.069 9	-1.1
150.167 3	150.168	-0.7	450.176 6	450.177 2	-0.6
180.057 9	180.058 1	-0.2	480.143 8	480.145	-1.2
210.048 8	210.048	0.8	510.067 6	510.069 2	-1.6
240.309 5	240.310 7	-1.2	539.990 1	539.991 3	-1.2
270.736 7	270.737 8	-1.1	570.038 5	570.039 1	-0.6

5 结 论

利用线阵 CCD 具备的像元空间与驱动时序之间的对应关系,根据匀速扫描测量原理,实现了差动式测量方法的线阵 CCD 位移传感器的设计。该方法利用匀速扫描的性质,将时间作为线阵 CCD 位移测量的参考点,使得位移测量范围不局限于线阵 CCD 自身尺寸大小,拓展了线阵 CCD 位移测量的应用领域;同时,充分利用线阵 CCD 已有排列精密的光敏阵列和高效的亚像素算法,提高线阵 CCD 测量分辨率,避开精密位移测量中对机械加工工艺水平的依赖,用较低的机械加工精度实现了较高的位移测量精度。实验中,用激光干涉仪对所研制传感器进行校准,在大尺寸测量范围内实现了测量精度,满足工程实际精密位移测量的要求,具有广泛的应用价值。

for improving precision in noncontact measurement by linear CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10 (3):281-284. (in Chinese)

- [3] 徐正平,翟林培,葛文奇,等. 亚像元的 CCD 几何超分辨率方法[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2447-2453.
XU ZH P, ZHAI L P, GE W Q, *et al.*. CCD geometric super-resolution method based on subpixel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (12): 2447-2453. (in Chinese)
- [4] 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.

- MIAO J Y, ZHANG L P, TIAN T Y, *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. (in Chinese)
- [5] 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.
- CHEN J, WANG X, CAO J D, *et al.*. Development of high-speed CCD laser displacement sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 611-616. (in Chinese)
- [6] 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.
- GUO J J, ZHAO X W, LI M, *et al.*. A novel rotational velocity transducer based on linear CCD [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(8): 1478-1481. (in Chinese)
- [7] 王苗, 李华. CCD 立靶测量系统目标捕获性能研究 [J]. *光子学报*, 2009, 38(6): 1539-1542.
- WANG M, LI H. Capturing of CCD vertical target measurement system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(6): 1539-1542. (in Chinese)
- [8] 王和顺, 陈次昌, 黄惟公. 提高 CCD 测量精度的方法研究 [J]. *光电子·激光*, 2010, 21(1): 63-65.
- WANG H SH, CHEN C CH, HUANG W G. Research the method to improve CCD measurement accuracy [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(1): 63-65. (in Chinese)
- [9] 胡晓东, 马娜. 亚像元边缘检测系统的 FPGA 实现 [J]. *光子学报*, 2010, 39(1): 173-177.
- HU X D, MA N. Realization of measuring the sub-pixel edge system based on FPGA [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(1): 173-177. (in Chinese)
- [10] 姚新程, 李兆霖, 郭红莲, 等. 一种实现 CCD 亚像元位移分辨率的新方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2002, 23(1): 60-63.
- YAO X CH, LI ZH L, GUO H L, *et al.*. A new method with CCD Sub-pixel resolution [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, 23(1): 60-63. (in Chinese)
- [11] 周森, 郭永彩, 高潮. 用于大尺寸工件的动态长度测量系统 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2472-2478.
- ZHOU S, GUO Y C, GAO CH. Dynamic length measuring system for large scale work pieces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2472-2478. (in Chinese)
- [12] 郭玉波, 姚郁, 逄晓光. 一种改进的亚像素算法 [J]. *光电工程*, 2006, 33(10): 137-140.
- GUO Y B, YAO Y, DI X G. Improved sub-pixel algorithm [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(10): 137-140. (in Chinese)
- [13] 李雅倩, 付献斌, 周坤. CCD 分段测量的光学位移测量系统 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9): 2036-2042.
- LI Y Q, FU X B, ZHOU K. Optical displacement measuring system by CCD segmental measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2036-2042. (in Chinese)
- [14] 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.
- WANG W T. *Research of High-speed CCD data acquisition system and image spots location* [D]. Wuhan: Wuhan University of technology, 2009. (in Chinese)

作者简介:



付敏(1981—),男,湖南娄底人,2004年于桂林电子工业学院获学士学位,2009年于西华大学获得硕士学位,主要研究方向为智能仪器与传感器。E-mail: fum_0@sina.com

导师简介:



彭东林(1952—),男,重庆人,教授,博士生导师,1988年、1992年于重庆大学分别获得硕士、博士学位。重庆市首批学术学科带头人、重庆市“两江学者”,主要研究方向为计算机辅助测试技术与仪器、智能传感器。E-mail: pdl@cqut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)