

文章编号 1004-924X(2016)05-1028-08

## 基于光敏阵列直接调制的单栅式时栅位移传感器

李彦<sup>1,2</sup>, 付敏<sup>2\*</sup>, 朱革<sup>2</sup>, 高宇<sup>2</sup>, 许现波<sup>2</sup>, 王林<sup>2</sup>, 昌驰<sup>2</sup>

(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:**针对传统叠栅形式光栅存在制造难度大、安装要求高等缺点,提出了一种用时间细分空间的单栅式时栅位移传感器。从光的粒子性出发,分析了用正交变化的光场信号合成光场电行波的方法;用点阵发光二极管(LED)模块作为交变光源,用空间正交的光敏阵列直接耦合光强信号获取了反应空间位移的电行波信号;最后,通过检测电行波信号与激励信号过零点之间的时间差,实现了对空间直线位移的测量。研制了原理样机,采用普通机械加工方法对其进行了实验验证。结果表明,在440 mm测量范围内,样机的测量精度可达 $\pm 2 \mu\text{m}$ 。该单栅式时栅位移传感器减少了叠栅式传感器对安装工艺的要求,提高了抗干扰能力;采用的测量技术避免了传统粗光栅技术存在的精度难以提高、动态特性差等缺点,为光学位移测量提供了一种不通过精密机械细分来提高测量精度的方法。

**关键词:**位移传感器;单栅式传感器;时栅传感器;位移测量;光敏阵列;直接调制

**中图分类号:** TP212.14; TH741.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162405.1028

## Single grate type time-grating displacement sensor based on photosensitive array direct modulation

LI Yan<sup>1,2</sup>, FU Min<sup>2\*</sup>, ZHU Ge<sup>2</sup>, GAO Yu<sup>2</sup>, XU Xian-bo<sup>2</sup>, WANG Lin<sup>2</sup>, CHANG Chi<sup>2</sup>

(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 Key Laboratory of Time-Grating Sensing and

Advanced Testing Technology, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

\* Corresponding author, E-mail: fum\_0@cqut.edu.cn

**Abstract:** Because conventional Moiré fringe gratings are difficult to be manufactured and assembled, this paper proposes a single grate type time-grating displacement sensor based on a time subdivision space. Based on the particle characteristics of light, a generation method of light field electronic traveling wave by light field signal with orthogonal transform was analyzed. Then, by using dot matrix Light Emitting Diode(LED) modules as alternating light sources, the electronic traveling wave signals to response the displacement values were obtained by coupling the space orthogonal photosensitive array with the receiving device. Finally, the space linear displacement was measured by

**收稿日期:** 2015-09-18; **修订日期:** 2015-10-30.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(No. 51505053); 国家重大科学仪器专项资助项目(No. 2013YQ220893); 重庆市教委科学技术研究项目(No. KJ1500909); 重庆市基础科学与前沿技术研究专项(No. cstc2015jcyjA40022)

detecting the time difference of zero-crossing between electronic traveling wave signal and excitation signal. A principle prototype was developed and validated experimentally by using a common mechanical processing method. The testing results demonstrate that measuring errors of the developed prototype are controlled within  $\pm 2 \mu\text{m}$  after error correction in a measuring range of 440 mm. The single grate type time-grating displacement sensor relaxes the requirements for installation process and improves its anti-interference ability. Moreover, the measurement technique avoids the weaknesses of traditional coarse grating technologies such as difficult to improve measuring accuracy and poor dynamic characteristics and provides a new method not to be depend on mechanical subdivision for improving the precision of optical displacement measurement.

**Key words:** displacement sensor; single grate sensor; time-grating sensor; displacement measurement; photosensitive array; direct modulation

## 1 引言

精密位移测量是精密加工领域的一项关键技术<sup>[1-3]</sup>。目前,工程上常见的位移测量装置以叠栅式光栅传感器为主。该传感器采用光栅副形成莫尔条纹,通过判断条纹明暗变化的次数实现位移的测量。其测量基准是按空间均分的周期性光栅刻线,栅线刻划得越密越好<sup>[4-5]</sup>,但受加工工艺水平和光学衍射极限的限制,栅线密度不可能无限制的增加,且随着栅线密度的增加,制作工艺和制作成本都将大幅度上升<sup>[6-8]</sup>;同时,为获取高质量的光栅信号,叠栅式光栅副的安装要求非常高(通常要求动尺和定尺的安装间隙不大于几十微米且严格保证相互平行),从而无法在振动、噪声、油污等相对恶劣的工作环境下使用。

为了在高精度测量的同时降低光栅制造的工艺难度,并提高光栅的抗干扰能力,20 世纪 70 年代末飞利浦公司提出了匀速扫描的粗光栅技术<sup>[9-10]</sup>。该方法试图采用单栅式结构和粗栅线形式,用电机驱动多面棱体对栅线进行匀速扫描,将栅线移动的相对位移大小转换为被测信号时间先后的变化关系,以实现低制造工艺高测量精度的目标。该方法减少了栅线制造难度,并大大降低了传感器的安装难度,使传感器可以在相对恶劣的工作环境下使用;但电机驱动方式导致传感器体积大、集成困难、且其匀速性无法保证测量精度,因此阻碍了该方案的进一步发展。为改善粗光栅的匀速扫描效果,从 20 世纪 80 年代末到本世纪初,人们提出了多种改进粗光栅的方案,其中最具代表性为重庆大学光电集成电路研究室提出

的图像扫描测量方法<sup>[11-12]</sup>。该方法用自扫描阵列对光信号进行匀速扫描,避免了电机驱动带来的弊端,但自扫描阵列的离散性结构会导致被测信号的细分误差变大、测量精度降低,且离散扫描形式的动态特性差、动态误差大<sup>[13-14]</sup>,从而限制了该方法的应用范围。

本文依据时栅传感器测量原理<sup>[15-16]</sup>,提出了一种光强时空耦合的测量方法。该方法以时间正交(即相位正交)的交变光场为测量媒介,采用大尺寸光敏阵列直接调制空间和时间正交变化的光强信号,合成一路反应空间位移变化的电行波信号,从而实现了基于高频时钟脉冲的空间位移精密测量。

## 2 光强时空耦合的时栅测量原理

时栅测量技术的关键在于如何获取一个包含位移信息的电行波<sup>[17]</sup>。光波本身是一种高频电磁波,利用其波动性可以获得一个理想的行波场,但因为频率太高(光波频率通常为  $10^{14} \sim 10^{15}$  Hz),目前尚不能直接测量光波频率。本文主要研究了如何利用光的粒子性,用调制的方式合成电行波信号。

最典型的光的粒子性现象是光电效应。该效应指的是:当入射光频率大于截止频率时,在入射光频率不变的条件下,光电流与入射光强度成正比<sup>[18]</sup>。即在一定入射角度下,其光通量与光源在单位时间内所发出的能量和受光面积相关。因此,在特定入射角度、固定接收面积下,光敏单元的光电流与光源所发出的能量和受光面积成正比。基于这个性质进行了光强时空耦合的时栅原理性实验,如图 1 所示。

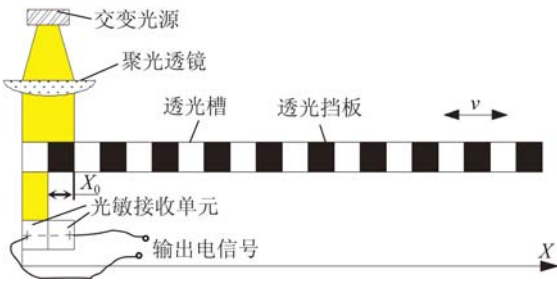


图 1 光强时空耦合测量原理

Fig. 1 Measurement principle of light intensity coupling of time and space

在直线方向有一点光源通过聚光透镜产生一束平行光,平行光经过一个透光挡板,在该挡板上等间距地加工尺寸相同的透光槽。平行光经过透光槽照射到光敏接收单元上,光敏接收单元由两个同样大小的光敏元组成,其直线方向的尺寸与透光槽尺寸相等。两个光敏元电极性相同的两端相互短接,另外两端用导线引出作为电信号输出。当透光挡板在光源发射部分和光电接收部分之间沿直线方向运动时,光敏接收单元的光电流将随光照射面积的变化而变化。若光源光场强度为  $I_A$ ,光敏单元接收表面为矩形,则光敏单元的光照面积将与直线的位移变化成正比。从图示位置开始,透光挡板从右往左运动,则光敏接收单元输出的电信号与位移的关系为:

$$U_A(x) = \begin{cases} -\frac{2\eta_A I_A}{X_0} \left[ x - \frac{X_0}{2} \right] & (0, X_0) \\ \frac{2\eta_A I_A}{X_0} \left[ x - \frac{3X_0}{2} \right] & (X_0, 2X_0) \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $X_0$  为单个光敏单元的直线尺寸,  $I_A$  为光场强度,  $\eta_A$  光敏单元的光电转换效率。函数  $U_A(x)$

$$U_B(x) = \begin{cases} \frac{2\eta_A I_B}{X_0} x & \left( 0, \frac{X_0}{2} \right) \\ -\frac{2\eta_A I_B}{X_0} (x - X_0) & \left( \frac{X_0}{2}, \frac{3X_0}{2} \right) \\ \frac{2\eta_A I_B}{X_0} (x - 2X_0) & \left( \frac{3X_0}{2}, 2X_0 \right) \end{cases}. \quad (5)$$

同样对  $U_B(x)$  进行傅里叶展开,取基波分量可得:

$$U_{B1}(x) = -\frac{8\eta_A I_B}{\pi^2} \sin \frac{\pi}{X_0} x. \quad (6)$$

当光场强度为交变正弦光场时,即  $I_B = A \sin \omega t$ ,代入式(6)可得:

$$U_{B1}(x, t) = -\frac{8\eta_A}{\pi^2} A \sin \omega t \sin \frac{\pi}{X_0} x. \quad (7)$$

满足狄里赫利条件,因此可以展开为傅里叶级数,即:

$$U_A(x) = \frac{8\eta_A I_A}{\pi^2} \left[ \cos \frac{\pi}{X_0} x + \frac{1}{3^2} \cos \left\{ \frac{3\pi}{X_0} x \right\} + \frac{1}{5^2} \cos \left\{ \frac{5\pi}{X_0} x \right\} \dots \right]. \quad (2)$$

由式(2)可知,电信号由 1 次基波电势分量,以及 3, 5 次等奇次谐波分量组成。因为高次谐波的幅值非常小,仅取基波分量进行讨论。式(2)的基波分量为:

$$U_{A1}(x) = \frac{8\eta_A I_A}{\pi^2} \cos \frac{\pi}{X_0} x. \quad (3)$$

若光场强度为交变余弦光场,即  $I_A = A \cos \omega t$ ,代入式(3)可得:

$$U_{A1}(x, t) = \frac{8\eta_A}{\pi^2} A \cos \omega t \cos \frac{\pi}{X_0} x. \quad (4)$$

式(4)可以看成是幅值被直线位移调制的时间余弦信号,也可以看成是幅值被时间调制的一个空间余弦信号。即在空间(直线)某一个确定位置上  $U_{A1}$  是一个幅值固定的时间余弦函数,幅值随所处的空间位置呈余弦变化;而在某一个确定的时刻  $U_{A1}$  是一个幅值固定的空间余弦函数,幅值随时间呈余弦变化。

若在同一直线位置放置另外一组光敏单元,其光敏单元的尺寸与光电特性不变,但在直线位置上互相错开半个光敏单元距离(即  $X_0/2$ );此时光场强度为  $I_B$ ,透光挡板尺寸和位置都不变,在透光挡板发生同样的位移变化时,则光敏单元所得的电信号与位移的关系为:

对式(4)和式(7)求差,可得:

$$U_1(x, t) = U_{B1}(x, t) - U_{A1}(x, t) = \frac{8\eta_A}{\pi^2} A \sin \omega t \sin \frac{\pi}{X_0} x + \frac{8\eta_A}{\pi^2} A \cos \omega t \cos \frac{\pi}{X_0} x = \frac{8\eta_A}{\pi^2} A \cos \left[ \omega t - \frac{\pi}{X_0} x \right]. \quad (8)$$

可见,用两组空间上互相错开 1/4 周期的矩形光敏单元,分别接收时间正交的交变光场信号。

在与被测透光挡板发生相对位移时,通过空间周期变化的光照面积和时间交变的光强信号的调制,对光敏单元产生的基波电信号进行合成,可以获得一个幅值恒定的电行波信号。而高次谐波分量相对基波而言,幅值很小,在测量过程中通过谐波修正法,可以消除谐波误差的主要成分。因此,用上述方法调制矩形透光槽的光通量变化,可以获取较好的电行波信号,再结合高次谐波消除方法,即可实现用时间测量空间的目标。

### 3 时栅系统设计

#### 3.1 基于光敏阵列直接调制的单栅式时栅结构设计

根据以上分析,用矩形形状的光敏阵列作为光电接收单元,设计单栅式时栅的结构原理,如图 2(a)所示。单栅式时栅分成光电接收和光源发射两部分,其中光电接收部分由两组互相错开半个光敏单元尺的光敏阵列组成,每组光敏阵列有 20 个沿直线方向排列的光敏二极管,分成上下两排,每排 10 个光敏二极管,其电势同极性端互相短接,如图 2(b)所示。光源由两组定制的红色点阵 LED 模块组成,分别用时间正交的交流电源信号驱动。为了使发出的光尽量平行,在 LED 模块做好后通过树脂进行封装,采用透镜式的封装样式,封装的树脂具有透镜作用,由此省去了光学系统,使整体结构尺寸更紧凑。

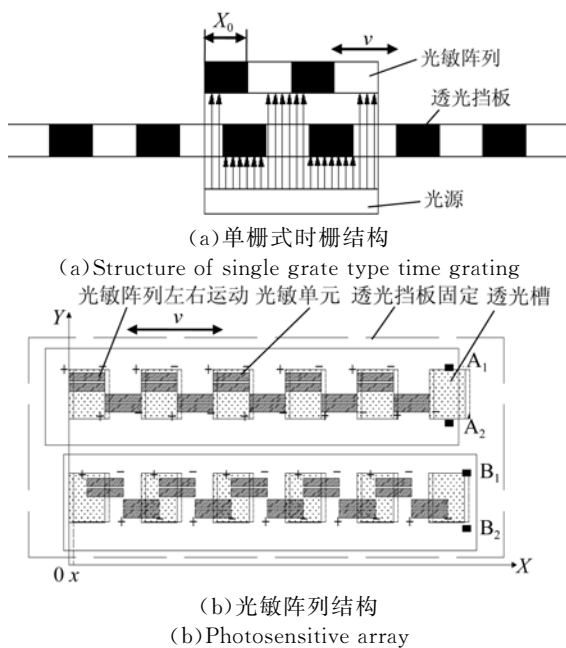
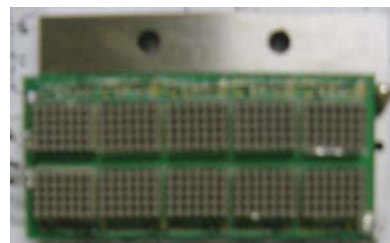


图 2 光敏阵列构成的单栅式时栅结构原理图

Fig. 2 Schematic diagram of single grating type time grating composed of photosensitive array

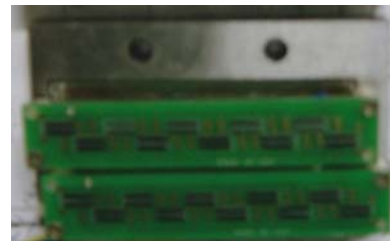
时栅与传统光栅在结构和原理上有着本质的区别。传统光栅通常采用叠栅结构,获取明暗相间的莫尔条纹信号,以实现位移测量;而图 2 所示结构为一单栅结构,用差动的光敏阵列直接接收光通量变化实现位移测量,该结构可以有效降低叠栅形式传感器的安装难度以及减少对栅距精细刻划的工艺要求。

光源和光敏阵列实物如图 3 所示。光源采用透光方式,在透光挡板上根据光敏阵列的直线位置,开设两排透光槽,透光槽的宽度与光敏单元的长度相等。通过透光槽与光电接收单元之间相对位置的变化,获得变化的电信号,并将所得电信号求差,可以得到式(8)中的电行波信号。



(a)LED 点阵光源

(a)LED array light source



(b)光敏阵列模块

(b) Modules of photosensitive array

图 3 LED 点阵模块与光敏阵列实物图

Fig. 3 Photos of LED dot matrix module and photosensitive array

#### 3.2 系统框图

单栅式时栅位移传感器系统由激励信号源、交变光源、透光挡板、光敏阵列、信号处理电路以及时栅控制器等部分组成,如图 4 所示,用以实现光信号产生、接收、转换、比相以及位移计算和显示等功能。其中,时栅控制器负责测量电行波信号与激励信号过零点的时间差,结合式(8)换算成实际的直线位移,并进行相关误差的修正运算,将测量结果送至上位机显示。两路光电信号实际合成的电行波信号如图 5 所示。

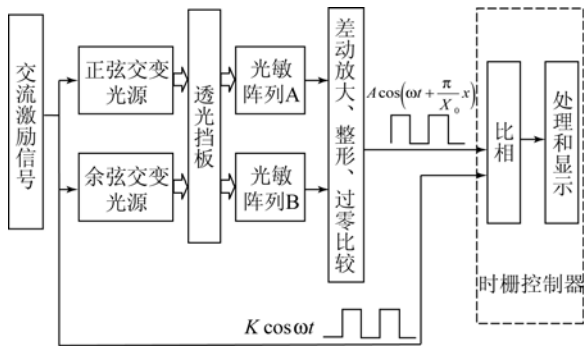


图 4 单栅式时栅系统框图

Fig. 4 Block diagram of single grate type time grating system

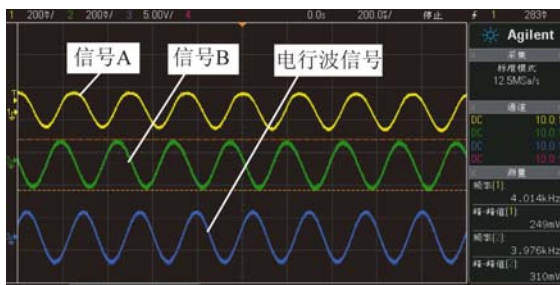


图 5 感应的电信号与合成的电行波信号

Fig. 5 Inductive electric signal and composite electric travelling wave signal

## 4 实验与分析

### 4.1 实验研究

如图 6 所示,单栅式时栅传感器的实验测试平台包括直线丝杠导轨、雷尼绍激光干涉仪 (ML10)、交流伺服电机及数显控制箱、时栅控制箱和时栅传感器 6 个部分。时栅透光挡板固定安装在大理石平台上,端面经过精密磨削保证水平,总有效测量范围为 440.01 mm,两端用等高支撑块与导轨垂直安装,保证透挡板与导轨平行,并用千分表检测与导轨之间的平行度。透光槽采用线切割和精密铣削加工,精度等级为 IT6,透光槽的槽距为 10.20 mm。光敏阵列单个光敏元的尺寸为 10.20 mm×0.90 mm,两组光敏阵列沿直线方向错开半个单元距离 (5.10 mm),光源采用红色点阵 LED 模块,与光敏阵列相对应分成两组,用相互正交的两路 4 kHz 交变激励信号驱动。交变光源与光敏阵列固定在透光挡板上下两侧,随滑块与光敏阵列一起做直线运动,使光敏阵列接收到空间、时间周期变化的光信号。



图 6 单栅式时栅测量实验平台

Fig. 6 Experimental apparatus of measurement with single grate type time grating

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光敏阵列固定板上,随滑块一起运动。实验中由时栅电气控制箱采集光场时栅的测量值,并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,得到光场时栅的测量误差。在整个测量范围 (440.01 mm) 内,控制伺服电机每走 1 mm 采集一组数据,共采集 440 组数据,比较测量结果,得到图 7 所示的误差曲线。

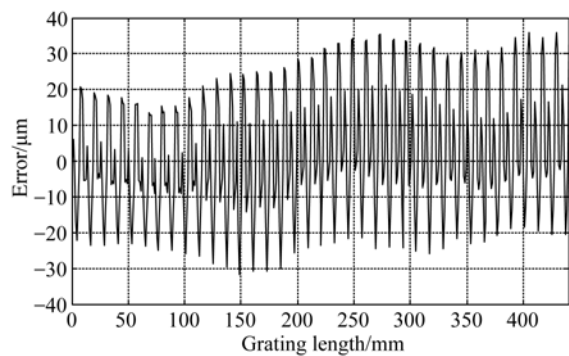


图 7 全程原始误差曲线

Fig. 7 Original error curve

### 4.2 误差分析与修正

由图 7 可以看出,从时域分析的角度可将误差成分分成两部分:整个测量范围的低频测量误差和高频周期性误差,即长周期误差和短周期误差。长周期误差主要由测量系统加工误差、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,可以有效避免违背阿贝结构造成的一次误差。但受安装工艺的影响,光敏阵列固定板、LED点阵模块固定板以及透光挡板在安装过程中,与导轨无法完全平行,同时导轨的传导方向与激光器瞄准方向也无法保持一致,这会在测量过程中带来固定的低频误差。另外,测量系统中的透光挡板、透光槽、光敏阵列和交变光源安装板均采用较为普通的机械加工方式,其加工精度不高。此外,每组光敏单元由10个同类型的光敏元组成,从而构成多测头测量方式,实现对同一测量周期内误差的平均;但对于相邻测量周期,由于加工带来的误差无法平均,因此测量中难免存在相当一部分的加工误差。热膨胀误差主要为由于直线时栅金属材料随环境温度变化的影响会产生热胀冷缩,致使机械变形而产生的线性误差。安装误差在误差曲线上表现为一定规律变化的低频误差成分;加工误差为测量过程中的固定误差成分,在误差曲线上表现为加减一个固定值;热膨胀误差主要由材料温度变化引起,表现为线性误差。这几部分误差从全量程范围看是一种系统误差,可以通过线性拟合建立数学模型来修正。其他误差包括机械、电气、光敏特性等方面带来的随机误差,这部分误差成分对测量的影响较小,可以采用卡尔曼滤波算法加以解决<sup>[19]</sup>。

短周期误差在测量范围内表现为明显的周期性,有低频和高频两种成分。一方面,由前面关于光场行波产生原理上可以看出,本文采用矩形光敏阵列接收矩形透光面积的光通量变化,所得电行波信号中含有高次谐波成分,其中以3次谐波成分的影响最大;另一方面,因为光敏阵列本身的加工精度、光源不均匀、光电饱和、激励信号的直流干扰成分以及电气等因素也会影响电行波信号的质量。这些因素的成因多、测试困难,在误差成分中所占比重较大,是误差标定的重点。处理时根据信号的周期性对原始数据进行傅里叶变化,对信号中幅值系数较大的误差成分建立数学模型并进行修正。这里通过分析传感器测量原理和实际测试结果,对信号中影响大的3次和5次谐波进行了修正。

图8为线性拟合后的误差曲线,图9为对周期性误差进行补偿后的误差曲线。从图9可以看出,经过两次误差修正后,测量误差可以控制在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 以内,由此说明本文关于长周期误差和短

周期误差的修正方法是有效的。以上误差修正工作在测量系统中用DSP实现,可以实时完成测量误差的修正。

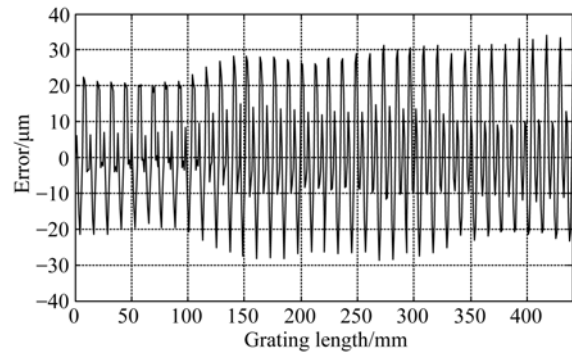


图8 线性拟合后的误差曲线

Fig. 8 Error curve after linear fitting

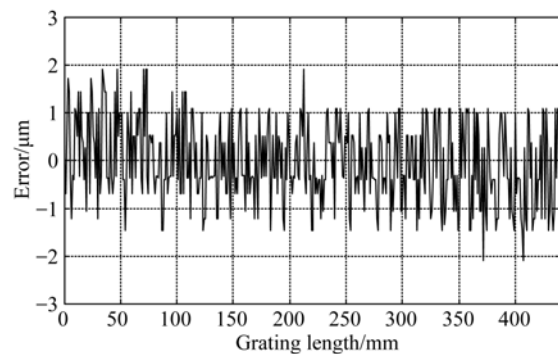


图9 谐波修正后的误差曲线

Fig. 9 Error curve after harmonic wave correction

## 5 结 论

本文采用“时栅传感器的测量思想+磁栅和感应同步器的激励方式+粗光栅的结构形式”的技术方案,融合了多种传感测量方法的优点。采用交变光场时空耦合、光敏阵列直接调制并合成反应空间位移变化的电行波信号的方式,避免了传统粗光栅技术中匀速扫描方法带来的不能集成、精度难以提高、动态特性差的缺点;设计大尺寸光敏阵列直接调制的单栅式结构,减少了叠栅式传感器对安装工艺的要求,提高了传感器的抗干扰能力;采用高频时钟脉冲作为位移测量基准,解决大尺寸透光面的空间分辨力问题。通过对时间交变、空间正交的光场信息进行调制,用高精度时钟脉冲提高空间分辨力,可以实现大尺寸透光面的精确细分,避免了精密“栅线”的刻划,降低了

传感器的制造难度;同时也避免了由精密栅线刻划引起的衍射极限问题。

通过实验验证,在 IT6 级机械加工精度条件下,在 440 mm 大尺寸范围内实现了  $\pm 2 \mu\text{m}$  的测量精度。由于机械加工误差较大,透光面的一致性较

差,造成传感器误差成分较为复杂,若改用光刻加工工艺,几毫米透光面的加工难度是非常低的,加工精度比机械加工高很多,能够较大幅度地提高传感器的测量精度。因此,该方法的测量精度还有很大的提高空间,具体工作还在进一步的研究中。

#### 参考文献:

- [1] 裘祖荣,石照耀,李岩. 机械制造领域测量技术的发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 1-11. QIU Z R, SHI ZH Y, LI Y. Research on the development of measurement technology mechanical manufacture[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(14): 1-11. (in Chinese)
- [2] 袁巨龙,张飞虎,戴一帆,等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177. YUAN J L, ZHANG F H, DAI Y F, *et al.*. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(15): 161-177. (in Chinese)
- [3] 谭久彬. 超精密测量技术与仪器工程研究的几个热点问题[J]. 中国机械工程, 2000, 11(3): 257-261. TAN J B. Some major concern questions in the research of super precision measuring technique and instrument engineering[J]. *China Mechanical Engineering*, 2000, 11(3): 257-261. (in Chinese)
- [4] HEIDENHAIN. *Exposed Linear Encoder*[OL]. www.heidenhain.com/en\_us/products-and-applications/linear-encoders/exposed-linear-encoders/. [2014-10-09].
- [5] HEIDENHAIN. *Angle Encoder with Integral Bearing*[OL]. www.heidenhain.de/de-EN/documentation-information/brochures/popup/media/file/view/file-0023/file.pdf. [2014-10-09].
- [6] CUI ZH. *Nanofabrication: Principle, Capabilities and Limits*[M]. Germany: Springer, 2008.
- [7] GROTHJOHANN T, TESTA I, LEUTENEGGER M, *et al.*. Diffraction-unlimited all-optical imaging and writing with a photochromic GFP[J]. *Nature*, 2011, 478: 204-208.
- [8] BAXTER J. Super-resolution imaging: beyond the limit[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 342.
- [9] 杨国光. 近代光学测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- YANG G G. *Model Optical Testing Technology*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1986. (in Chinese)
- [10] 于在仁,王中祐. 荷兰飞利浦粗光栅测量系统介绍[J]. 机床, 1974(2): 51-54. YU Z R, WANG ZH K. Introduction of the Dutch philips coarse grating measuring system[J]. *Machining Tool*. 1974(2): 51-54. (in Chinese)
- [11] 吕果林,袁祥辉,陈小强. 新型精密位移传感器用的 CG200 型 SSPA 器件[J]. 光电工程, 1995(3): 53-58. LÜ G L, YUAN X H, CHEN X Q. CG200 SSPA device used in novel precision displacement sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995(3): 53-58. (in Chinese)
- [12] 袁祥辉. 用光学扫描器构成的新型精密位移测量系统[J]. 传感技术学报, 1989(3): 43-48. YUAN X H. A new precision displacement measuring system with opto-scanner[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 1989(3): 43-48. (in Chinese)
- [13] 林鹏,陈小强,袁祥辉,等. 粗光栅位移测量系统细分误差补偿前后的精度分析[J]. 计量学报, 2002(1): 26-29. LIN P, CHEN X Q, YUAN X H, *et al.*. Precision analysis on the coarse grating linear encoder before and after eliminating the subdivision error[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2002(1): 26-29. (in Chinese)
- [14] 林鹏,陈小强,袁祥辉. 粗光栅位移测量系统细分误差的来源与消除分析[J]. 现代计量测试, 1996(1): 42-50. LIN P, CHEN X Q, YUAN X H. Analysis on source and elimination of the subdivision error of coarse grating displacement measuring system[J]. *Modern Measurement and Test*, 1996(1): 42-50. (in Chinese)
- [15] 彭东林,刘成康,谭为民. 时空坐标转换理论与时栅位移传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2000, 21(4): 338-342. PENG D L, LIU CH K, TAN W M. Study on the

theory of time-space coordinate transformation and the time grating displacement sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2000, 21(4): 338-342. (in Chinese)

- [16] 彭东林, 张兴红, 刘小康, 等. 基于时空转换的精密位移测量新方法与传统方法的比较[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(4): 423-426.

PENG D L, ZHANG X H, LIU X K, *et al.*. Comparison between the principle of the new precision displacement measurement method based on time space coordinate transformation and tradition method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(4): 423-426. (in Chinese)

- [17] 刘小康, 彭凯, 王先全, 等. 纳米时栅位移传感器的理论模型与误差分析[J]. *仪器仪表学报*, 2014,

35(5): 1136-1142.

LIU X K, PENG K, WANG X Q, *et al.*. Theoretical model and error analysis of nanometer time grating displacement sensor[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(5): 1136-1142. (in Chinese)

- [18] 郝道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011. (in Chinese)

- [19] 李邦宪. *动态系统预测的多层递阶方法*[M]. 北京: 气象出版社, 1996.

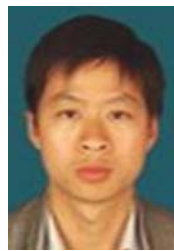
LI B X. *Multi-level Recursive Method of Dynamic System Prediction*[M]. Beijing: Meteorological Press, 1996. (in Chinese)

#### 作者简介:



李彦(1976—),男,湖南岳阳人,教授,1997年于重庆理工大学获得学士学位,2003年于重庆大学获得硕士学位,主要研究方向为传感器与物联网。E-mail: ly@cqut.edu.cn

#### 通讯简介:



付敏(1981—),男,湖南娄底人,助理研究员,2004年于桂林电子工业学院获得学士学位,2009年于西华大学获得硕士学位,2014年于重庆大学获得博士学位,主要研究方向为智能仪器与传感器。E-mail: fum\_0@cqut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)