

# 单交变光场的微控移相精密直线位移测量方法

朱革<sup>1</sup>, 蒲治伟<sup>1,2</sup>, 付敏<sup>2\*</sup>, 李昌利<sup>1,2</sup>, 余小雨<sup>1,2</sup>, 张双亚<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400054;

<sup>2</sup>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** 针对现有多交变光场的光源一致性差、体积大、难集成的问题,提出一种单交变光场的驻波合成电行波的微控移相精密直线位移测量方法。该方法利用单路交变光源与四路正弦栅面空间调制获得四路光强信号;通过微控移相电路获得时间上严格相差 $90^\circ$ 的两路驻波信号,并合成一路电行波信号;最后利用高频时钟脉冲对参考信号与电行波信号的相位差进行插补,实现位移测量。文中分析微控移相测量原理,并针对移相精度和光场分布建立理论模型和仿真模型,明确了传感器因移相精度和光场分布引起的一次、二次误差产生的原因。实验结果表明,所研制的原理样机,在 $0.6\text{ mm}$ 的短周期内原始测量精度为 $\pm 0.26\ \mu\text{m}$ ,经误差修正和优化后,在 $500\text{ mm}$ 测量范围内,测量精度与RENISHAW激光干涉仪基本一致。集成化的结构和高精度测量结果为该传感器下一步工程化应用提供了良好的基础。

**关键词** 测量; 位移测量; 传感器; 交变光场; 光场分布

中图分类号 TP212.14

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0212001

## Measurement Method for Micro-Controlled Phase-Shifting Precise Linear Displacement of Single-Alternating Light Field

Zhu Ge<sup>1</sup>, Pu Zhiwei<sup>1,2</sup>, Fu Min<sup>2\*</sup>, Li Changli<sup>1,2</sup>, Yu Xiaoyu<sup>1,2</sup>, Zhang Shuangya<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

<sup>2</sup>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** To resolve the issues of poor consistency, large volume, and difficult integration for a multi-alternating light source, a precise linear displacement measurement method for micro-controlled phase shift is proposed based on the electric traveling wave synthesized from the standing wave of single-alternating light field, herein. The proposed method uses a single-alternating light source and the spatial modulation of a four-channel sinusoidal grid to obtain four-channel light intensity signals, resulting in two-channel standing wave signals with a strict phase difference of  $90^\circ$  by the micro-controlled phase-shifting circuit. A one-channel traveling wave signal is synthesized from the two-channel standing wave signals. Finally, the phase difference between the reference signal and the electric traveling wave signal is interpolated by a high-frequency clock pulse to realize a displacement measurement. In addition, the principle of micro-controlled phase-shifting measurement is analyzed, the theoretical and simulation models of phase-shifting accuracy and light-field distribution are established, and the causes of primary and secondary errors introduced by phase-shifting accuracy and light-field distribution of the sensor are clarified. Experimental results demonstrate an original measurement accuracy of  $\pm 0.26\ \mu\text{m}$  for the prototype in a short period of  $0.6\text{ mm}$ ; after applying error correction and optimization, the resultant measurement accuracy is basically similar to that of the RENISHAW laser interferometer over a measurement range of  $500\text{ mm}$ . This integrated structure and high-precision measurement results provide a solid foundation for future engineering applications of these sensors.

**Key words** measurement; displacement measurement; sensor; alternating light field; light-field distribution

**OCIS codes** 120.4570; 120.5060; 130.6010; 350.2770

收稿日期: 2019-07-18; 修回日期: 2019-08-27; 录用日期: 2019-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(51875070)、国家重大科研仪器研制项目(51827805)、重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201801105)、重庆理工大学研究生创新创业项目(ycx20192033, ycx20192022, ycx20192032)

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

# 1 引 言

现代精密制造已从微米级加工发展到纳米级的超高精度加工,为此,需要同样甚至更高精度的位移测量装置来满足其发展需求。目前应用于制造业高精度、高分辨率测量的位移传感器主要为光栅传感器<sup>[1-2]</sup>。光栅传感器通过对指示光栅与标尺光栅形成的莫尔条纹进行计数和细分得到位移变化量<sup>[3-4]</sup>。为提高测量精度,光栅传感器通常有两条途径,即进一步减小栅距或提高栅距内的细分倍数。栅距减小会使得制造难度和成本迅速提高,且栅距受衍射极限限制而不能进一步减小,因此,通过细分来提高测量精度成为更有效的方法,主要方法包括电子学细分、单场扫描、光学滤波和误差补偿等<sup>[5-7]</sup>。

为提高光栅信号的质量和抗干扰能力,德国海德汉公司率先提出用单场扫描取代四场扫描的测量技术。该技术能较为有效地提高信号质量,从而提高细分倍数和测量精度,但涉及高精密栅线刻划、栅状感光集成芯片的制造等<sup>[8-9]</sup>。为此,英国雷尼绍公司提出一种光学滤波和图像处理的方法,采用光学滤波提高光栅信号质量,同时结合高速图像处理,以提高细分倍数<sup>[10]</sup>,但图像处理的实时性不高,且复杂的解算方法增加了信号处理的难度,因而限制了该方法的推广。由于直接提高光栅信号质量的难度较大,国内外学者开展了对光栅信号误差分析和补偿的研究工作<sup>[11]</sup>。冯英翹等<sup>[12]</sup>提出一种精码莫尔条纹光电信号细分误差修正方法;高旭等<sup>[13]</sup>提出一种光栅条纹光电信号正弦性偏差的自动补偿方法。这些细分方法直接受光栅工作状态影响,无法准确建立实际工况下光栅信号误差模型,也就无法准确

补偿测量误差<sup>[14]</sup>。因此,光栅细分方法实质上受制于制造工艺、制造成本和复杂算法等因素限制,其细分倍数也难以进一步得到有效的提高。

为减轻测量精度对制造工艺、细分算法等的依赖性,文献<sup>[15]</sup>提出一种用两个正交交变光场、双排正弦面空间调制的测量方法,但因双排安装结构给传感器安装带来困难,同时设计覆盖整个测量面的均匀光源难度大,这影响了传感器的整体性能。文献<sup>[16]</sup>提出一种4路LED交变光源的单排正弦面空间调制结构,该结构较好地解决了光源准直、光强均匀分布、结构安装等问题,用0.6 mm栅距、180 mm量程实现了 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 的测量精度,但因多路光源的一致性和正交性难以控制,同时多路光源使得传感器体积大,难以集成,影响传感器的工程化应用,测量精度则难以进一步提高。本文在以上研究基础上,提出一种单交变光场微控移相直线位移的测量方法。该方法采用单光场解决多光场的一致性问题,用微控移相电路实现相位精确控制,利用时间测量精度高的优势提高测量精度。

## 2 传感器结构模型及测量原理

### 2.1 传感器结构模型

多交变光场(以下简称多光场)传感器与单交变光场(以下简称单光场)传感器结构对比如图1所示,这两种传感器都是由光源、动尺、定尺与光电接收器组成。图1(a)中,多光场传感器定尺采用单排上下双半正弦栅面,在空间上相互错开 $a/2$ 的栅距宽度,构成空间上 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ 四个空间位置。图1(b)中,单光场位移传感器定尺是由四组上下双半正弦栅面阵列组成,在空间上相差 $a/2$ 、 $a$ 的栅距

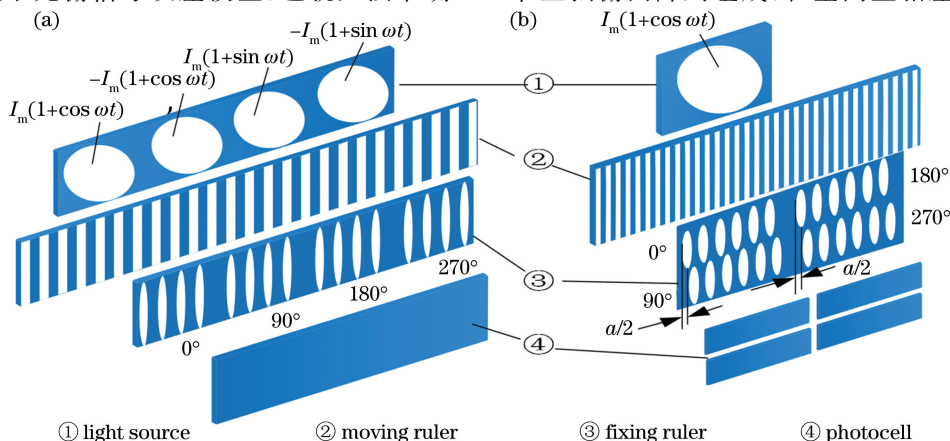


图1 传感器结构模型图。(a)多交变光场传感器结构示意图;(b)单交变光场传感器结构示意图

Fig. 1 Schematics of sensor structural model. (a) Schematic of sensor structure with multi-alternating light field; (b) schematic of sensor structure with single-alternating light field

宽度,构成  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  四个不同的空间位置,分布于定尺的四个象限。动尺均是交替透光、遮光的单排矩形栅面阵列,且矩形栅面宽度为  $a$ ;光电接收器均为光电池。多光场光源分别以  $I_m(1+\cos \omega t)$ 、 $-I_m(1+\cos \omega t)$ 、 $I_m(1+\sin \omega t)$ 、 $-I_m(1+\sin \omega t)$  四个不同激励信号进行驱动;单光场光源利用  $I_m(1+\cos \omega t)$  激励信号进行驱动,其中  $I_m$  为激励信号的峰值, $\omega$  为激励信号的角频率, $t$  为时间。

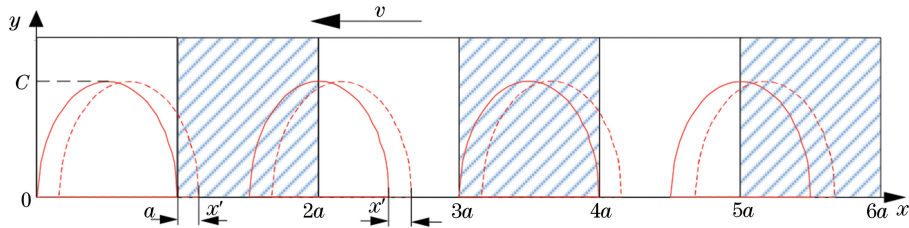


图 2 正弦栅面面积变化示意图

Fig. 2 Schematic of area change of sinusoidal grid

用四个不同位置的正弦栅面切割矩形栅面,通过面积变化关系可以得到四组正弦栅面 ( $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ ) 透光面积的变化规律,即

$$\left\{ \begin{array}{l} S(x)_{0^\circ} = 2 \left[ \int_0^a C \sin(\pi x/a) dx - \int_0^x C \sin(\pi x/a) dx \right] = 2(a/\pi) \cdot C \cdot [1 + \cos(\pi x/a)], x \in [0, 2a] \\ S(x)_{90^\circ} = 2 \int_0^{\frac{a}{2}-x} C \sin(\pi x/a) dx = 2(a/\pi) \cdot C \cdot [1 - \sin(\pi x/a)], x \in [0, 2a] \\ S(x)_{180^\circ} = 2 \int_0^x C \sin(\pi x/a) dx = 2(a/\pi) \cdot C \cdot [1 - \cos(\pi x/a)], x \in [0, 2a] \\ S(x)_{270^\circ} = 2 \int_0^{\frac{a}{2}+x} C \sin(\pi x/a) dx = 2(a/\pi) \cdot C \cdot [1 + \sin(\pi x/a)], x \in [0, 2a] \end{array} \right. \quad (1)$$

光源由交变信号  $I_m(1+\cos \omega t)$  进行驱动,因此光电接收器的四组透光栅面的电信号分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{0^\circ} = I_m(1+\cos \omega t) \cdot S(x)_{0^\circ} = K \cdot [1 + \cos \omega t + \cos(\pi x/a) + \cos \omega t \cdot \cos(\pi x/a)], x \in [0, 2a] \\ I_{90^\circ} = I_m(1+\cos \omega t) \cdot S(x)_{90^\circ} = K \cdot [1 + \cos \omega t - \sin(\pi x/a) - \cos \omega t \cdot \sin(\pi x/a)], x \in [0, 2a] \\ I_{180^\circ} = I_m(1+\cos \omega t) \cdot S(x)_{180^\circ} = K \cdot [1 + \cos \omega t - \cos(\pi x/a) - \cos \omega t \cdot \cos(\pi x/a)], x \in [0, 2a] \\ I_{270^\circ} = I_m(1+\cos \omega t) \cdot S(x)_{270^\circ} = K \cdot [1 + \cos \omega t + \sin(\pi x/a) + \cos \omega t \cdot \sin(\pi x/a)], x \in [0, 2a] \end{array} \right. \quad (2)$$

式中:  $K = 2C \cdot a \cdot I_m/\pi$ 。测量信号构造过程如图 3 所示。

当动、定尺发生相对运动时透光面发生变化,此时 A、B、C、D 四个光电接收器分别产生  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  四路变化的电流信号,电流信号需要经跨阻电路后转换为对应的  $U_{0^\circ}$ 、 $U_{90^\circ}$ 、 $U_{180^\circ}$ 、 $U_{270^\circ}$  的电压信号,在图 3 中分别对应 ①、②、③、④。将  $U_{0^\circ}$  与  $U_{180^\circ}$ 、 $U_{90^\circ}$  与  $U_{270^\circ}$  分别求差,得到两路驻波信号,

## 2.2 微控移相测量原理

单光场传感器定尺的上半正弦栅面的函数表达式  $f(x)$  与移动距离  $x$  之间满足  $f(x) = C \sin(2\pi x/2a)$ ,其中  $C$  为半正弦栅面的高度, $x'$  为动尺相对于定尺运动的距离, $2a$  为矩形栅面的栅距。动尺与定尺二者发生相对运动,由初始时刻(实线位置)移动  $x'$  距离(虚线位置),如图 2 所示,其中  $y$  为矩形栅面的高度, $v$  为动尺与定尺相对运动的速度。

即

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{0^\circ} - U_{180^\circ} = 2K \cdot \cos(\pi x/a) + \cos \omega t \cdot \cos(\pi x/a), x \in [0, 2a] \\ U_{90^\circ} - U_{270^\circ} = -2K \cdot \sin(\pi x/a) + \cos \omega t \cdot \sin(\pi x/a), x \in [0, 2a] \end{array} \right. \quad (3)$$

得到两路时间上同相位、空间上相差  $90^\circ$  的驻波信号,即图 3 中 ⑤ 和 ⑥ 所示。对其中一路驻波信号 ⑤

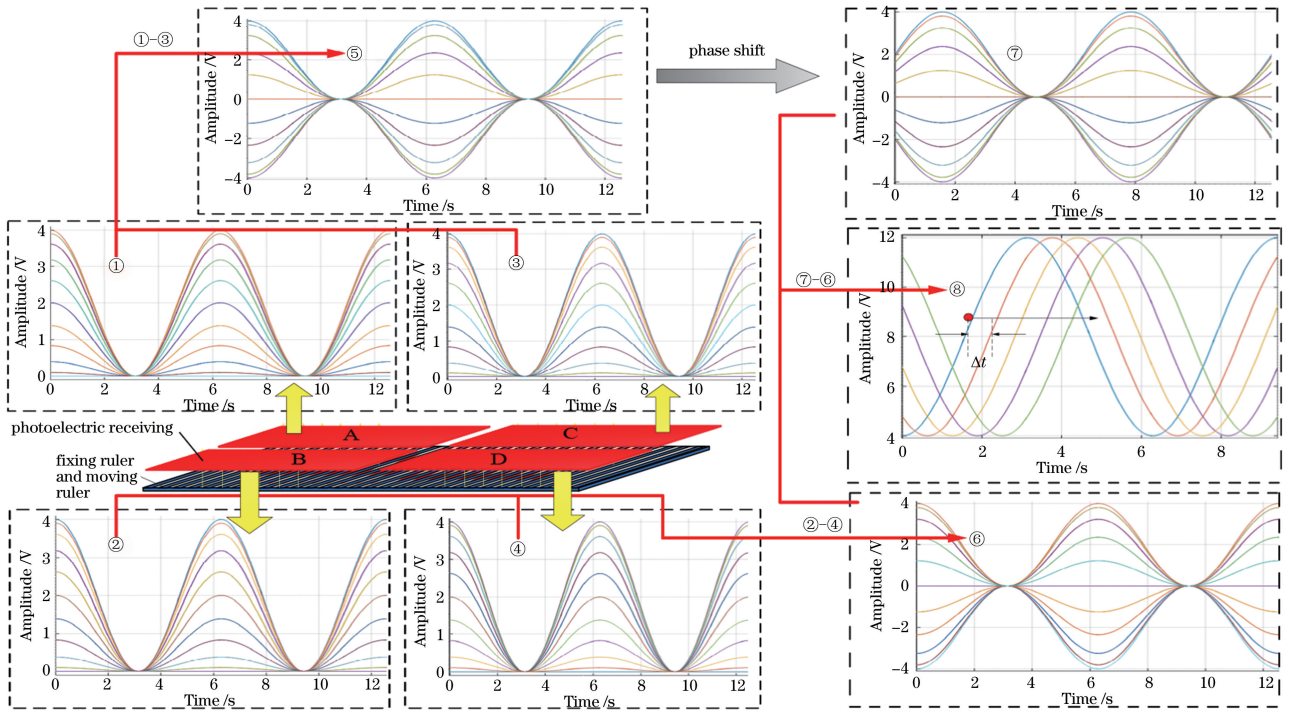


图 3 单交变电场传感器电行波信号合成原理

Fig. 3 Principle of electric traveling wave signal synthesis of single-alternating light field sensor

通过微处理器控制移相  $90^\circ$  实现信号时间上的正交, 获得移相后的驻波信号如图 3 中的曲线⑦所示, 此时获得的驻波信号⑦与驻波信号⑥在时间和空间上均相差  $90^\circ$ 。将驻波信号⑦与驻波信号⑥作差可得电行波信号⑧, 其测量信号表达式为

$$U = (U_{0^\circ} - U_{180^\circ})' - (U_{90^\circ} - U_{270^\circ}) = 2K \{ [\cos(\pi x/a) + \sin(\pi x/a)] + \sin[\omega t + (\pi x/a)] \}, \quad (4)$$

式中:  $(U_{0^\circ} - U_{180^\circ})'$  为  $(U_{0^\circ} - U_{180^\circ})$  移相  $90^\circ$  后的驻波信号。为简便处理, (4) 式可以看作  $U = A + u$ , 其中  $A = 2K [\cos(\pi x/a) + \sin(\pi x/a)]$ ,  $u = 2K \sin(\omega t + \pi x/a)$ 。A 属于直流分量, 可通过滤波器滤除, 因此  $u = 2K \sin(\omega t + \pi x/a)$  为微控制器移相方法获得的行波表达式。当动、定尺之间发生相对运动, 即传感器出现空间位移差  $\Delta x$ , 此时电行波信号为

$$u = 2K \sin[\omega t + \pi(x + \Delta x)/a] = 2K \sin(\omega t + \pi x/a + \Delta\theta), \quad (5)$$

式中:  $\Delta\theta = \pi\Delta x/a$ 。则可将空间位移差反映为时间相位差, 因此

$$\Delta x = \Delta\theta \cdot a/\pi. \quad (6)$$

(6) 式得到的  $\Delta x$  即为所测量的位移值。通过上述原理可知位移测量转换为相位差测量, 所以当电行波信号通过过零比较器整形滤波为方波信号后, 可与现场可编程门阵列 (FPGA) 输出的参考方

波信号进行比相, 然后通过高频时钟脉冲对相位进行插补得到两路信号的相位差, 结合 (6) 式即可实现位移的测量。

### 3 误差分析与仿真

根据单光场传感器测量原理, 传感器测量精度由电行波信号质量决定, 而移相角度与光场分布会直接影响电行波信号的质量。下面根据理论推导, 对电行波的变化规律进行分析。

#### 3.1 微控移相精度对测量的影响

多光场传感器采用四个不同的激励, 所以在行波构造过程中不需要进行移相处理, 但是采用多个激励难以保证信号的一致性, 所以采用单光场结构。单光场中比较重要的是移相角度的准确性, 但是一般的移相电路移相精度并不高, 所以选用微处理器控制移相电路, 它能够在移相过程中达到一个比较精确的移相角度值。如果标准的移相角度为  $90^\circ$ , 但是实际移相角度为  $90^\circ + \theta$ , 那么此时产生了  $\theta$  的相位误差, 此时移相后的信号表达式为

$$(U_{0^\circ} - U_{180^\circ})' = 2K \cdot [\cos(\pi x/a) + \cos(\omega t + 90^\circ + \theta) \cdot \cos(\pi x/a)], \quad x \in [0, 2a]. \quad (7)$$

此时与另外一路未移相的驻波信号作差, 合成的电行波信号为

$$\begin{aligned}
 U' &= (U_{0^\circ} - U_{180^\circ})' - (U_{90^\circ} - U_{270^\circ}) = \\
 &2K \{ [\cos(\pi x/a) + \sin(\pi x/a)] + \sin(\omega t + \theta) \cos(\pi x/a) + \cos \omega t \sin(\pi x/a) \} = \\
 &2K \{ [\cos(\pi x/a) + \sin(\pi x/a)] + \sqrt{[\cos \theta \cos(\pi x/a)]^2 + [\sin \theta \cos(\pi x/a) + \sin(\pi x/a)]^2} \sin(\omega t + \varphi) \} = \\
 &2K \{ [\cos(\pi x/a) + \sin(\pi x/a)] + \sqrt{1 + 2\sin \theta \cos(2\pi x/a)} \sin(\omega t + \varphi) \}, \tag{8}
 \end{aligned}$$

式中,  $\varphi = \arctan\{\tan \theta + [\tan(\pi x/a)/\cos \theta]\}$ 。从(8)式可以看出行波表达式会随  $\cos(2\pi x/a)$  的变化引入一个二次变化分量。当  $\theta$  较小时,  $\varphi$  与  $\theta$  可近似看作线性变化关系, 若与(4)式相比较, 则直接引入了  $\theta$  的误差。若按照静态处理, 当移相角度出现  $1^\circ$  的误差, 且正弦栅面的栅距为  $0.3 \text{ mm}$  时, 产生的测量误差为  $0.3 \text{ mm} \times (1^\circ/360^\circ) \approx 0.835 \mu\text{m}$ , 由此

看出移相精度对测量精度的影响, 因此选用微控制器来进行移相显得极为重要。利用 Matlab 对行波表达式进行波形仿真, 令时间轴为  $x$  轴, 其仿真效果如图 4 所示, 行波幅值呈二次变化, 这会在测量结果中引入一个二次误差。接下来将进一步讨论光场分布不均匀对测量的影响。

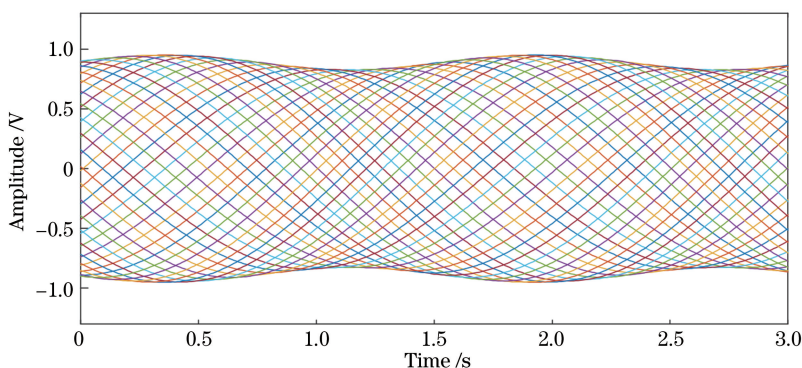


图 4 含有移相误差的行波信号 Matlab 仿真波形图

Fig. 4 Matlab simulation waveform of traveling wave signal containing phase-shifting error

### 3.2 光场分布不均对测量的影响

理论上单光场式传感器的光源的光斑面积大且整个光照区域光强一致, 但实际上传感器中使用的光源为 LED 光源, 其光强分布可近似看作朗伯分

布, 其分布特点是中间区域光强较强, 四周光强较弱, 所以光强分布不均匀。理想光源与 LED 光源仿真结果如图 5 所示, 从图中可以看到 LED 光源的光斑均匀性与理想光源的光斑均匀性存在较大偏差。

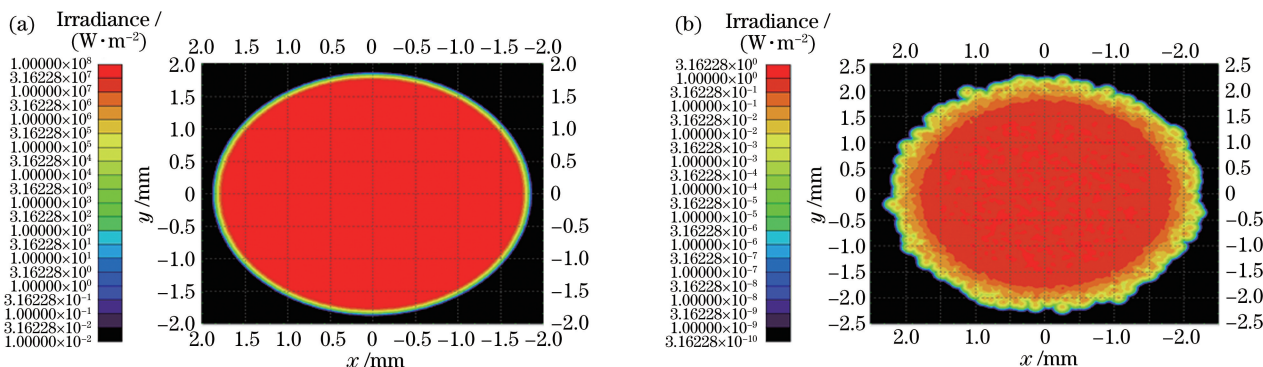


图 5 光源光强分布。(a)理想点光源仿真光斑;(b) LED 光源仿真光斑

Fig. 5 Intensity distribution of light source. (a) Simulated spot of ideal point light source; (b) simulated spot of LED light source

单光场传感器中定尺上下双半正弦透光面的光通量的大小能直接反映四路信号的幅值大小。光强分布不均直接导致四路信号的幅值不等, 为便于分

析, 将四路信号的幅值变化分别设为  $K_1, K_2, K_3, K_4$ , 参照(4)式得到行波表达式为

$$\begin{aligned}
 (U_{0^\circ} - U_{180^\circ})' - (U_{90^\circ} - U_{270^\circ}) &= (1 + \sin \omega t)[K_1 - K_3 + (K_1 + K_3)\cos(\pi x/a)] - \\
 &(1 + \cos \omega t)[K_2 - K_4 - (K_2 + K_4)\sin(\pi x/a)] = (K_1 + K_3)\sin \omega t \cdot \cos(\pi x/a) + \\
 &(K_2 + K_4)\cos \omega t \cdot \sin(\pi x/a) + \sin \omega t \cdot (K_1 - K_3) - \cos \omega t \cdot (K_2 - K_4) = \\
 &(K_1 + K_3)\sin \omega t \cdot \cos(\pi x/a) + (K_2 + K_4)\cos \omega t \cdot \sin(\pi x/a) + \\
 &\sqrt{(K_1 - K_3)^2 + (K_2 - K_4)^2} \sin\left[\omega t + \arctan\frac{(K_2 - K_4)}{(K_1 - K_3)}\right] = \\
 &\sqrt{[(K_1 + K_3)^2 + (K_2 + K_4)^2]/2 + \cos(2\pi x/a) \cdot [(K_1 + K_3)^2 - (K_2 + K_4)^2]/2} \cdot \\
 &\sin\left\{\omega t + \arctan\left[\frac{(K_2 + K_4)\tan(\pi x/a)}{(K_1 + K_3)}\right]\right\} + \\
 &\sqrt{(K_1 - K_3)^2 + (K_2 - K_4)^2} \sin\{\omega t + \arctan[(K_2 - K_4)/(K_1 - K_3)]\}. \tag{9}
 \end{aligned}$$

由(9)式可以看出,光源光强分布不均导致各路信号幅值  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$  不相等。公式由两部分叠加组成,前一部分与(8)式中的二次误差成分类似,含  $\cos(2\pi x/a)$  幅值变化的二次误差,后一部分为

$\sin \omega t$  引起的一次误差,因此根据测量原理,其测量结果中会含有一、二次误差成分。利用 Matlab 对行波信号进行仿真,(9)式仿真效果如图 6 所示,行波信号会给测量结果带来一次和二次误差。

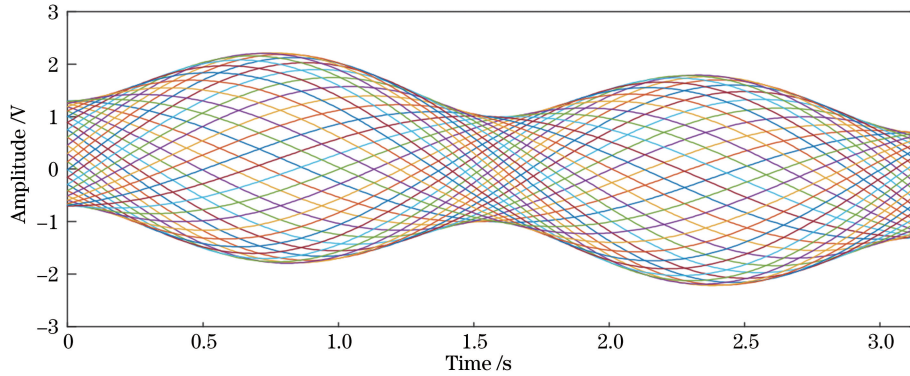


图 6 光场分布不一致的行波信号 Matlab 仿真波形图

Fig. 6 Matlab simulation waveform of traveling wave signal with inconsistent light-field distribution

## 4 实验分析与优化

### 4.1 实验平台搭建

为了验证单光场微控移相直线位移测量方法和误差规律分析的正确性,搭建如图 7 所示的实验平台。实验光源是利用 FPGA 产生一路频率为 1 kHz 的余弦激励信号驱动散射角为  $4.5^\circ$  的 LED 光源,从而获得单交变光场。利用光学镀膜的方式形成宽度为 0.3 mm 的矩形栅面和上下双半正弦的透光面构成动尺与定尺。利用美国 AEROTECH 公司 PRO225LM 精密直线工作平台驱动动尺移动,定制与上下双半正弦透光面对应的光电池作为光电接收器,并将其焊接在信号接收电路上,固定于定尺的背面,以接收正弦透光面变化的光强信号。光强信号通过前置处理电路送入信号处理电路中获得电行波信号,将电行波信号接入 FPGA 信号处理系统中。将 RENISHAW XL-80 激光干涉仪测量值作

为参考值,RENISHAW XL-80 激光干涉仪系统位移测量准确性可达到  $\pm 0.5 \times 10^{-6}$  (线性模式)和 1 nm 的分辨率。对传感器测量数据进行分析和处理,得到误差曲线后分析其与波形的关系。

### 4.2 实验分析

#### 4.2.1 单光场微控移相测量方法原理验证

实验平台搭建完成后,依次测试激励信号、驻波信号、行波信号。其中  $0^\circ$  与  $180^\circ$  信号作差形成的驻波信号需要进行移相  $90^\circ$  处理,利用高精度相位计(其精度为  $0.01^\circ$ )测量移相角度并进行数据测量。精密直线导轨以 0.01 mm 的步长驱动动尺,使得动尺与定尺之间发生相对运动,动尺透光面宽度为 0.3 mm,一个周期移动距离为 0.6 mm,即测试系统中采样 60 个点,每个点对应传感器实际的位移测量值。当移相角度为  $90^\circ$  时,如图 8(a)所示,电路部分测试完成后将采集的实际位移值与激光干涉仪的参考值求差获得误差值。此时测量误差曲线如图 8(b)

所示。由上述分析可知移相角度未达到精确的  $90^\circ$  时会引入误差,为了验证移相角度对实验结果的影响,

将驻波信号移相一个较大误差的角度  $92^\circ$ ,其他实验条件不变,实验误差曲线如图 9(b)所示。

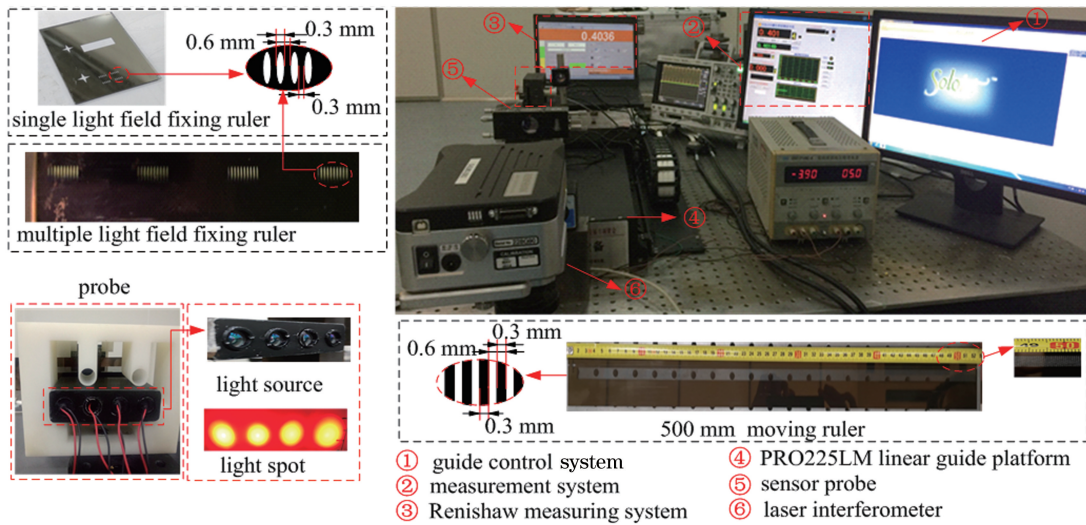


图 7 单交变光场式传感器装置与实验平台

Fig. 7 Device and experimental platform for single-alternating light field sensor

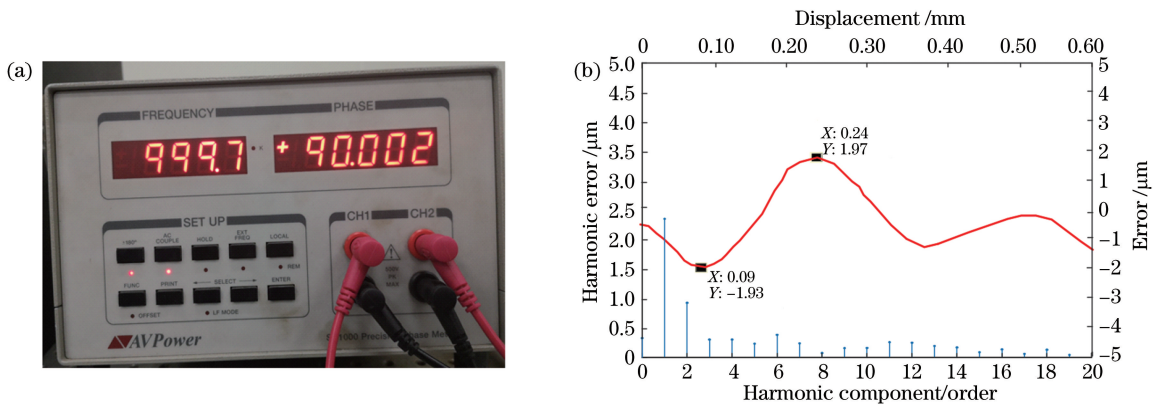


图 8 移相角度  $90^\circ$  测量误差曲线。(a)移相角度  $90^\circ$ ; (b)位移测量误差曲线

Fig. 8 Measurement error curve with phase-shifting angle of  $90^\circ$ . (a) Phase-shifting angle of  $90^\circ$ ; (b) error curve of displacement measurement

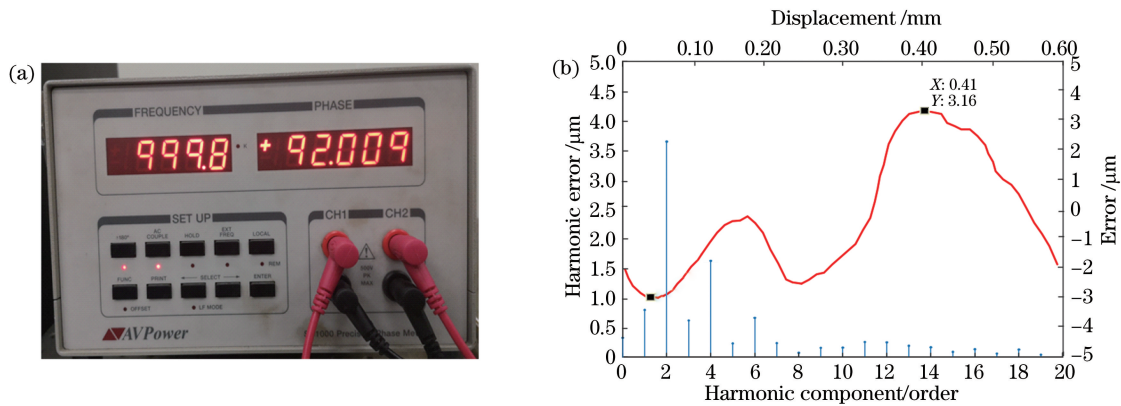


图 9 相位角存在偏差的测量误差曲线。(a)移相角度  $92^\circ$ ; (b)位移测量误差曲线

Fig. 9 Measurement error curve with phase-shifting angle deviation. (a) Phase-shifting angle of  $92^\circ$ ; (b) error curve of displacement measurement

通过图 8 与图 9 可以较为明显地看出,移相角度无偏差时测量误差为  $\pm 2 \mu\text{m}$ ,相位角存在偏差时测量误差为  $\pm 3 \mu\text{m}$ ,一次误差有所减小,但二次误差明显增大。由此看出相位角的精确控制不仅仅会影响误差的峰峰值,而且在移相角度不准时会引入二次谐波分量,最终反映在测量结果上也是二次误差较为明显,表明理论分析的正确性。为减小多光场传感器光源不一致的影响,单光场传感器只用一个光源,为了验证单光场的效果是否明显,下面进行单光场与多光场传感器的对比实验。

#### 4.2.2 单光场与多光场光源一致性对比实验

通过上述实验,单光场微控移相直线测量方法的可行性得到了验证。为验证单光场是否能够减小

光源一致性,在单光场传感器的基础上更换定尺与激励源,其余实验装置不变。单光场中光源只让四路光源中的一路工作,多光场中四路光源都工作,由此保证实验条件的一致性。多光场的定尺和光源实验装置如图 7 所示。搭建实验平台进行实验,多光场和单光场传感器动尺栅面宽度均为  $0.3 \text{ mm}$ ,一个周期距离为  $0.6 \text{ mm}$ 。利用 PRO225LM 直线电机平台驱动动尺移动  $0.6 \text{ mm}$ ,并且每移动  $0.01 \text{ mm}$  采样一点,测试系统中采样 60 个点,与激光干涉仪测量值作为参考值进行比较得到误差曲线。经分别测试,得到单光场和多光场传感器的测量误差曲线如图 10 所示。

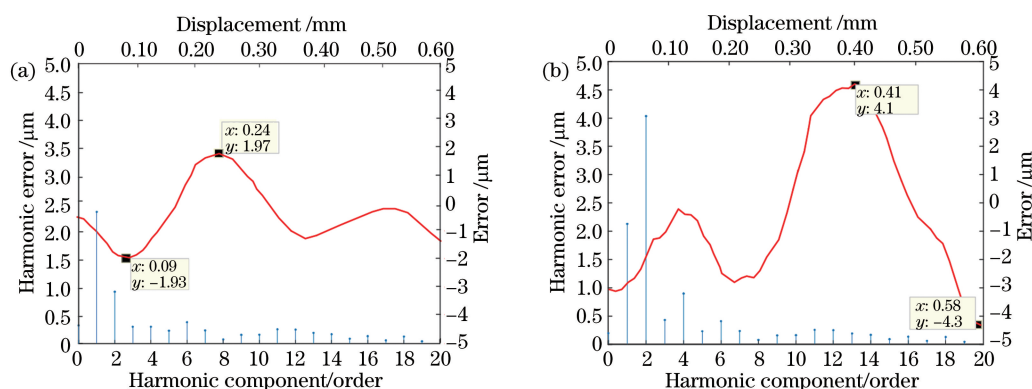


图 10 多光场与单光场实验误差曲线。(a)单光场测量误差曲线;(b)多光场测量误差曲线

Fig. 10 Experimental error curves of multi-alternating light field and single-alternating light field. (a) Measurement error curve of single-alternating light field; (b) measurement error curve of multi-alternating light field

通过对比实验发现,在同样测试条件下,单光场传感器测量误差曲线峰值误差在  $\pm 2 \mu\text{m}$  以内,多光场传感器周期内误差曲线峰值误差为  $\pm 4.2 \mu\text{m}$ 。单光场传感器的测量误差比多光场传感器至少减小了  $1/2$ ,其中由光源一致性引起的一、二次误差明显减小,说明通过单光场优化后,光源不一致的影响得到了有效抑制。但是由于光源自身的特性,需要进一步解决光强分布不一致的问题。

#### 4.2.3 单光场传感器光源优化实验

由误差分析可知,光强分布不均会引起测量误差,单光场与多光场传感器实验中采用的光源均为 LED 光源。其光斑如图 11(a)所示,LED 可以看作是一个点光源,其光强分布满足朗伯分布<sup>[17]</sup>,所以光强表现为中间位置光强较强,周围光强较弱,存在光源分布不均的问题。如果选用光强分布更为均匀的光源,传感器的精度能进一步提高。常见的光源还有红外光源、激光光源。红外光源特性与 LED 类似,也是满足朗伯分布,与一般 LED 的光强分布区

别并不明显,而激光光源由于激光的发射原理及产生过程的特殊性决定激光比普通光源有更好的单色性、相干性、方向性<sup>[18]</sup>,因此激光光源的光强分布应该优于 LED 光源,其光斑如图 11(b)所示。通过图 11(a)与(b)可以明显看出 LED 的光斑强度在中间位置稍微均匀但是在边缘位置强度有不同程度的降低,而激光光源整个光斑的强度分布基本一致。并且通过光强分布曲线也能明显看出激光光源的中间位置更为平坦,说明激光光源的光强分布优于 LED 的光强分布。

为了验证光强分布对测量精度的影响,在移相角度严格为  $90^\circ$  的基础上,首先将 LED 光源更换为散射角度为  $2^\circ$  的 LED 光源,其分布依旧满足朗伯分布,但光斑效果优于最初使用散射角为  $4.5^\circ$  的 LED 光源,其测量误差曲线如图 12(a)所示;将光源更换为光强分布更均匀的激光光源,其余实验装置不变,得到最终的误差曲线如图 12(b)所示。



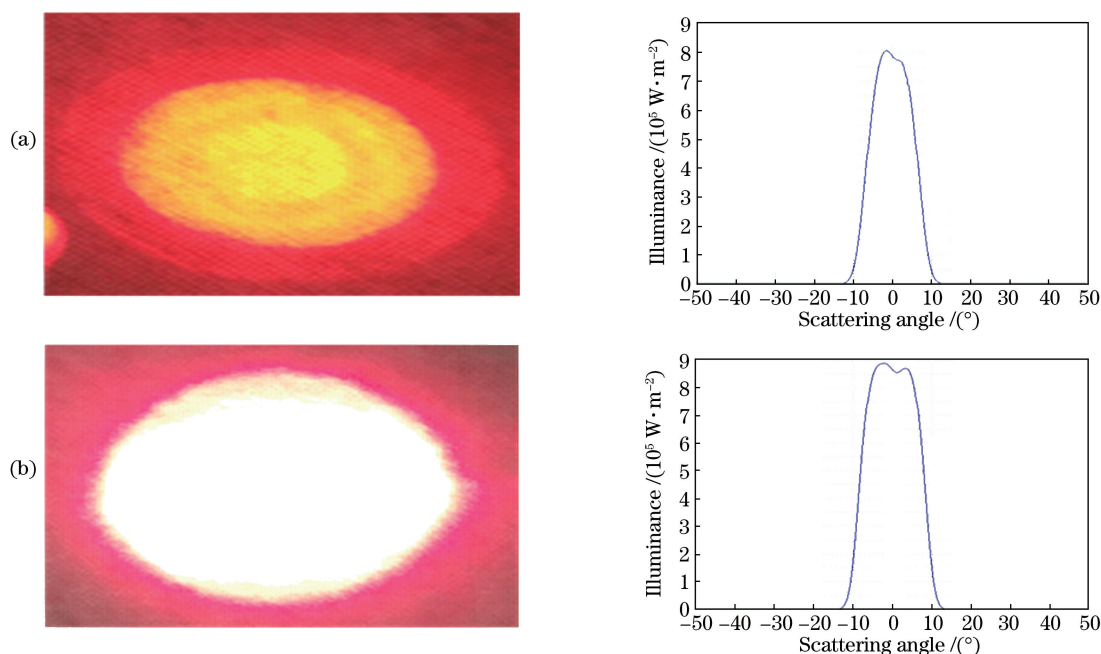


图 11 不同光源光斑及光强分布曲线。(a) LED 光斑及光强分布曲线;(b)激光光斑及光强分布曲线  
Fig. 11 Light spots of different sources and distribution curves of light intensity. (a) Light spot of LED and distribution curve of light intensity; (b) laser spot and distribution curve of light intensity

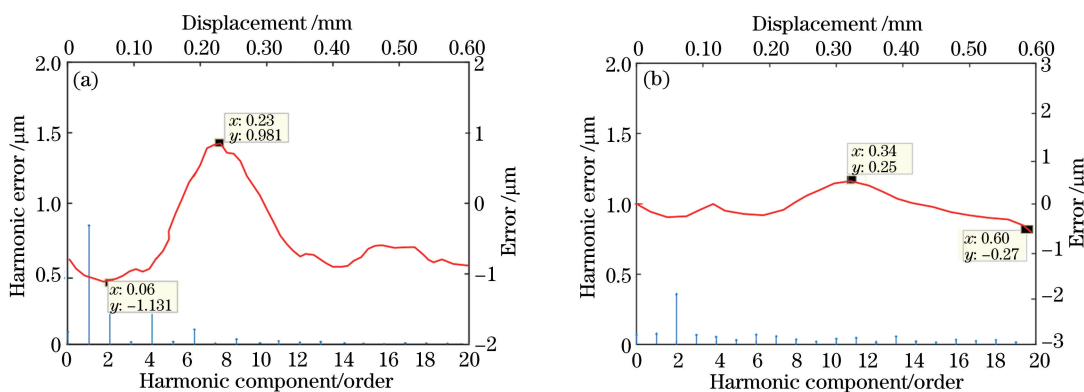


图 12 不同光源测量误差曲线。(a)散射角度为  $2^\circ$  的 LED 测量误差曲线;(b)激光光源测量误差曲线  
Fig. 12 Measurement error curves of different light sources. (a) Measurement error curve of LED beam with scattering angle of  $2^\circ$ ; (b) measurement error curve of laser beam

通过图 12(a)与图 12(b)的测量误差曲线与谐波分析可以看到两次光源更换后误差明显降低,更换散射角更小的 LED 光源其误差达到  $\pm 1.1 \mu\text{m}$ ,更换分布更为均匀的激光光源时其误差为  $\pm 0.26 \mu\text{m}$ 。使用 LED 进行测量时,经误差频谱分析得到测量误差曲线主要为一次、二次和三次误差;使用激光光源进行测量时,经误差频谱分析得到测量误差曲线主要为微小的二次误差为主,通过比较发现激光光源与 LED 测量时的一次误差有明显的减小。由此可以看出光源的光强分布对测量结果具有很大的影响,理论分析得到了验证。通过对移相角度的精准控制以及光源的改善,并优化传感器和实验方法,最

终测量的位移数据主要表现为规律性的二次误差,通过对二次误差进行补偿,并利用傅里叶谐波修正,在长周期为 500 mm 的测量范围内进行测量,并将测量结果与激光干涉仪的测量值进行对比分析,得到整个长周期的误差曲线如图 13 所示。

图 13 的误差曲线表明在 500 mm 的测量范围内,经误差修正和优化处理后,与激光干涉仪对比的测量误差约为  $\pm 0.3 \mu\text{m}$ ,由于激光干涉仪长周期误差较大(约为  $\pm 0.25 \mu\text{m}/500 \text{ mm}$ ),所以传感器在长周期上与激光干涉仪精度相当。这表明该方法在长周期上表现了较好的精度稳定性,由此看出单光场位移传感器能够实现一个较高的测量精度。

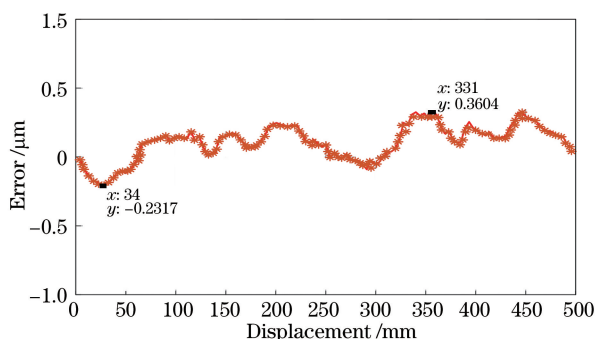


图 13 单光场传感器长周期误差曲线

Fig. 13 Long-period error curve of single-alternating light field sensor

## 5 结 论

对微控移相直线位移测量方法及单光场式位移传感器的结构、测量机理以及存在的误差源进行详细分析。微控移相减少了光源数量,实现多光场到单光场的优化,最大程度地简化了传感器结构,消除了光源一致性问题对测量信号的影响,测量信号的质量和传感器测量精度得到较大幅度的提升;结合理论与仿真分析,明确了单光场传感器主要误差产生的原因,并通过实验进行验证,提出了相应的优化方法。实验结果表明,同等条件下微控移相单光场传感器测量精度优于多光场传感器 1 倍以上,短周期内原始测量精度达到  $\pm 0.26 \mu\text{m}$ ,最终在栅距为 0.6 mm、长周期为 500 mm 测量范围内,测量精度与 RENISHAW 激光干涉仪测量精度相当,说明本方法能够采用亚毫米制造工艺实现亚微米精度的测量。以上结论很好地表明微控移相测量方法的可行性,为高精度光学位移测量提供了一种新方法,为该传感器的进一步工程化应用推广打下了基础。

## 参 考 文 献

[1] Zhou L, Wang Z H, Sun D C, et al. Present situation and development of modern precision measurement technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1869-1878.  
周亮, 王振环, 孙东辰, 等. 现代精密测量技术现状及发展 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1869-1878.

[2] Guan J, Köchert P, Weichert C, et al. A high performance one-dimensional homodyne encoder and the proof of principle of a novel two-dimensional homodyne encoder [J]. Precision Engineering, 2013, 37(4): 865-870.

[3] Zhao S S, Hou C L, Zhang J, et al. A high-

resolution displacement sensor based on a grating interferometer with the phase modulation technique [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(10): 105102.

- [4] Gao J L, Zong M C. Development of symmetrical double-grating interferometric displacement measuring system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0904003.  
高金磊, 宗明成. 一种对称式双光栅干涉位移测量系统的研制 [J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0904003.
- [5] Feng Y Q, Wan Q H, Song C, et al. Interpolation of small photoelectric encoder based on coordinate rotation digital computer algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0205001.  
冯英翘, 万秋华, 宋超, 等. 基于坐标旋转数字计算算法的小型光电编码器细分 [J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0205001.
- [6] Grotjohann T, Testa I, Leutenegger M, et al. Diffraction-unlimited all-optical imaging and writing with a photochromic GFP [J]. Nature, 2011, 478(7368): 204-208.
- [7] Qiao D, Xu Z J, Wu H S, et al. A method for compensating interpolation error of absolute linear encoder [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112008.  
乔栋, 续志军, 吴宏圣, 等. 绝对式光栅尺细分误差补偿方法 [J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112008.
- [8] Su Y R, Wang Q, Yan F B, et al. Subdivision error analysis and compensation for photoelectric angle encoder in a telescope control system [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015: 967034.
- [9] Sun Q. Progress and technical features of absolute grating with high precision [J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2012(5): 72-73.  
孙强. 高精度绝对式光栅尺研究进展及技术难点 [J]. 世界制造技术与装备市场, 2012(5): 72-73.
- [10] Soref R A, de Leonardis F, Passaro V M N, et al. On-chip digital Fourier-transform spectrometer using a thermo-optical Michelson grating interferometer [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(22): 5160-5167.
- [11] Lin D K, Chen H Y, Liu Z K, et al. Errors analysis of flat-field gratings fabricated by EBL-NFH and errors compensation [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(5): 0505003.  
林达奎, 陈火耀, 刘正坤, 等. 电子束光刻-近场全息法制作平焦场光栅的误差分析及补偿方法 [J]. 光学学报, 2018, 38(5): 0505003.
- [12] Feng Y Q, Wan Q H, Sun Y, et al. Interpolation error correction of moiré fringe photoelectric signals

- in the approximate form of triangle wave[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0812001.
- 冯英翘, 万秋华, 孙莹, 等. 近似三角波莫尔条纹光电信号的细分误差修正[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0812001.
- [13] Gao X, Wan Q H, Lu X R, et al. Automatic compensation of sine deviation for grating fringe photoelectric signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0712001.
- 高旭, 万秋华, 卢新然, 等. 光栅条纹光电信号正弦性偏差的自动补偿[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0712001.
- [14] Ye S L, Zhang Q, Zhu W B. Study on quadrature error real-time compensation for grating moiré signal[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(1): 57-64.
- 叶树亮, 张潜, 朱维斌. 光栅莫尔信号正交误差实时补偿研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(1): 57-64.
- [15] Peng D L, Fu M, Zhu G, et al. Study on a novel linear displacement sensor based on the orthogonal modulating light intensity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1212007.
- 彭东林, 付敏, 朱革, 等. 一种光强正交调制的新型线性位移传感器研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1212007.
- [16] Zhu G, Zhang C, Fu M, et al. Development of alternating light field space-time coupling type displacement measuring system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 2011-2022.
- 朱革, 张超, 付敏, 等. 交变光场时空耦合型位移测量系统的研制[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 2011-2022.
- [17] Chen H W, Wen S S, Ma B X, et al. Design of plant lighting LED lamp with freeform surface substrate based on light quantum theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(2): 0222001.
- 陈浩伟, 文尚胜, 马丙戌, 等. 基于光量子学的植物照明用自由曲面底板 LED 光源设计[J]. *光学学报*, 2017, 37(2): 0222001.
- [18] Song J, Gao X, Yan H Y, et al. Thermal lens effect of high power semiconductor laser waveguide and its influence on beam divergence angle of slow axis[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10): 1005004.
- 宋健, 高欣, 闫宏宇, 等. 大功率半导体激光器波导热透镜效应及对慢轴光束发散角的影响[J]. *中国激光*, 2018, 45(10): 1005004.