

文章编号 1004-924X(2017)08-2011-12

交变光场时空耦合型位移测量系统的研制

朱 革,张 超,付 敏*,潘帅嘉,雷 川

- (1. 重庆理工大学 机械工程学院,重庆 400054;
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:针对现有光栅精密刻划加工难度大制约测量精度的问题,设计了一种以交变光场为测量媒介的时空耦合线性位移测量系统。该测量系统利用四路正交的交变光场与四组正交的正弦透光面调制耦合形成电行波信号实现高精度位移测量。在对测量系统测量原理分析的基础上,建立了该系统的理论模型和误差模型,通过仿真详细分析了该系统在时间相位不交、空间相位不交以及结构安装不平行时的误差规律。开展实验验证了一次、二次和四次谐波的产生原因,根据误差来源改进了测量装置的结构,优化了相应的参数。实验结果表明:在 180 mm 测量范围内,用栅距 0.6 mm 的测量系统实现了 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 的测量精度。该测量系统规避了现有光栅精密刻划的问题,结构简单、安装方便,为光学位移测量提供了新思路。

关键词:位移测量;交变光场;时空耦合;行波合成;误差分析

中图分类号:TP212;TH741.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172508.2011

Development of alternating light field space-time coupling type displacement measuring system

ZHU Ge, ZHANG Chao, FU Min*, PAN Shuai-jia, LEI Chuan

- (1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;
2. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, 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_o@cqut.edu.cn

Abstract: Regarding the restriction of precision ruling process difficulty on the measurement precision, a linear space-time coupling displacement measuring system was designed, taking an alternating light field as the measuring medium. The measuring system coupled four orthogonal alternating light fields and four orthogonal sinusoidal light transmitting surface into electrical traveling wave signal, thus achieving high precision displacement measurements. Through analysis of the measuring principle of the system. The theory model and error model of this measurement system were established, and the measuring error characteristic was analyzed in detail by model simulation when time phase and space

收稿日期:2016-12-27;修订日期:2017-02-10.

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

phase were not orthogonal and mechanical installation was inaccurate respectively. Experiments were conducted for verification of the origins of the first harmonic, the second harmonic and the fourth harmonic. According to which, the measuring equipment was improved and its parameters were optimized. The experiment result shows that the measuring errors of the optimized measuring system are controlled within $\pm 0.4 \mu\text{m}$ in the measuring range of 180 mm with grating pitch of 0.6 mm. The system avoids precision ruling process of current grating, and has simple structure and easy installation, which provide an excellent approach for optical displacement measurements.

Key words: displacement measurement; alternating light field; space-time coupling; travelling wave synthesis; error analysis

1 引言

光栅广泛应用于精密位移测量领域,它通过对标尺光栅和指示光栅相对运动形成的摩尔条纹进行计数实现位移测量。其测量基准为光栅尺上等间隔平行的刻线,因此栅尺刻线的精度决定了光栅的位移测量精度^[1]。精密的栅线刻划依赖于高精度的光刻技术,对基础设施投入和制造工艺要求特别高。目前,高精度、低成本的光刻技术还处于研究阶段^[2-4],使得光栅的位移测量精度难以进一步提高^[5]。因此,研究低刻线密度的栅尺实现高精度位移测量的方法有着重要的意义。

目前,规避高刻线密度方式的光学位移测量方法有很多,文献[6-8]采用 CCD 成像法实现光学位移测量,利用细密的光敏单元提高测量的精度和分辨力,但 CCD 成像法易受环境因素影响,不能在油污、粉尘环境下使用,在激光强光照下还会造成永久性破坏和暂时性失真等问题^[9]。文献[10-12]利用低刻线密度的栅尺与高倍数的细分实现位移测量,然而常用的软件细分法的细分精度受轴系精度、波形正交性、刻线均匀性和系统噪声等影响^[13-14];硬件倍频法不仅难以实现高次倍频,而且会引入随机的轴系噪声^[10-11]。文献[15]研究了一种光敏阵列直接调制的单栅式测量系统,该测量系统利用时栅^[16-17]实现了时间测量空间的方法,避免了精密刻线与机械细分,但矩形栅面会带入比较多的高次谐波,光敏阵列自身的干扰比较多,测量精度也不高。文献[18]提出了一种光强正交调制的光学位移测量方法,采用毫米量级的矩形栅面和相对容易加工的半正弦透光面实现位移测量。但该测量方法采用上、下两排

“栅面”的结构,难以保证透过每个透光面光强的均匀性和一致性,而且两次做差、一次求和的信号处理电路设计比较复杂。

本文设计了一种交变光场时空耦合型位移测量系统。在结构上采用更大面积的单排上、下双半正弦透光面,有效抑制了光的边缘散射、折射效应,增加了透过每个透光面光强的均匀性和一致性;在电路上采用直接合成的处理方式,简化了电路设计,降低了电路元器件引起的噪声干扰。通过研究该系统的测量原理、理论模型与误差模型,分析了误差的产生原因,并优化了测量装置的结构参数。

2 测量系统的结构模型与工作原理

2.1 结构模型

如图 1 所示,交变光场时空耦合型位移定在基体导轨平台上,定极板固定在光学实验平台上。

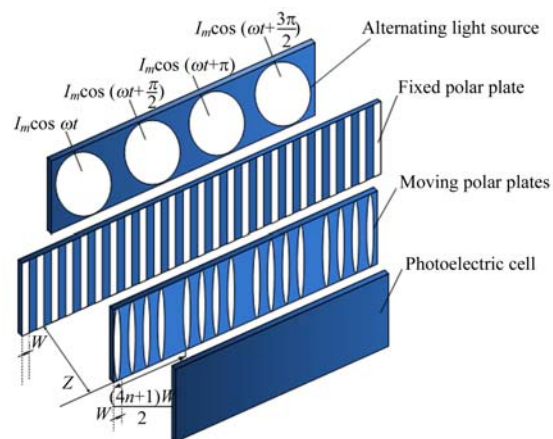


图 1 交变光场时空耦合型位移测量系统结构图

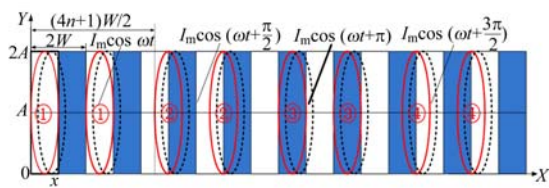
Fig. 1 Structure diagram of alternating light field space-time coupling type displacement measuring system

交变光源为在时间上依次错开的正弦激励信号激光光源。定极板是以 W 为栅距宽度交替透光、遮光的单排矩形“栅面”阵列结构,动极板相应设置 4 组用于透光面调制的单排上、下双半正弦形“栅面”阵列结构,动、定极板“栅面”的空间分布与其对应的光场分布如图 2 所示。动极板的 4 组正弦“栅面”(①~④)在空间相位上依次错开 $W/2$,使得“栅面”组(①~④)在某一特定时刻处于 4 个不同的固定空间相位角,“栅面”组①与“栅面”组②、“栅面”组③和“栅面”组④的空间相位分别相差 $\pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$ 。

交变激光光源输出为时间上依次错开的交变光场分别透过相应错开 $W/2$ 栅距宽度而且固定的单排“栅面”组,当基体导轨平台运动时,交变光源、动极板与光电池相对于定极板发生移动,光电池接收透过 4 组经过定极板“栅面”与动极板“栅面”调制后的光通量,它们分别称为余弦正驻波、正弦负驻波、余弦负驻波和正弦正驻波。然后,采用直接合成的方式把 4 组信号合成一路反应位置的电行波信号,最后通过计算电行波信号与固定相位激励信号的相位差,可以实现对空间位移的测量。

由图 2(b)可以看出,透过栅面组①的光通量最大;透过栅面组③的光通量为零;透过栅面组②与栅面组④的光通量分布颜色一致,所以它们的光通量相等且为透过栅面组①的一半,这与理论空间分布相吻合。

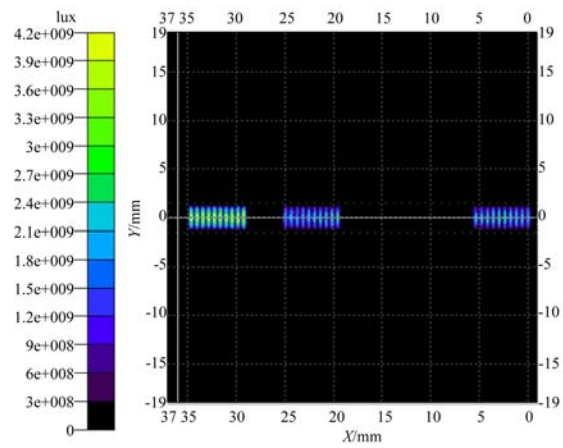
相比文献[18]中的方法,本文采用更大面积的单排上、下双半正弦透光面,4 组并列的单排“栅面”使透光面处于光斑中心,避免处于光斑边



(a) 初始时刻极板的空间分布

(a) Spatial distribution of polar plates at initial moment

$$\begin{cases} S(x)_{\cos \omega t} = 2 \left(\int_0^W A \sin \frac{\pi}{W} x dx - \int_0^x A \sin \frac{\pi}{W} x dx \right) = 2 \frac{W}{\pi} A \cdot \left(1 + \cos \frac{\pi}{W} x \right), x \in [0, 2W] \\ S(x)_{\cos(\omega t + \pi/2)} = 2 \int_0^{\frac{W}{2} + x} A \sin \frac{\pi}{W} x dx = 2 \frac{W}{\pi} A \cdot \left(1 + \sin \frac{\pi}{W} x \right), x \in [0, 2W] \\ S(x)_{\cos(\omega t + \pi)} = 2 \int_0^x A \sin \frac{\pi}{W} x dx = 2 \frac{W}{\pi} A \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi}{W} x \right), x \in [0, 2W] \\ S(x)_{\cos(\omega t + 3\pi/2)} = 2 \int_0^{\frac{W}{2} - x} A \sin \frac{\pi}{W} x dx = 2 \frac{W}{\pi} A \cdot \left(1 - \sin \frac{\pi}{W} x \right), x \in [0, 2W] \end{cases} \quad (1)$$



(b) 初始时刻极板的光场分布

(b) Light field distribution of polar plates at initial moment

图 2 初始时刻的极板分布情况

Fig. 2 Distribution of polar plates at initial moment

缘的上、下两排透光面光场产生均匀性与一致性比较差的问题,且单排结构的安装比较简单。此外,正弦透光面的面积更大,透光面所接受的光通量也越多,这在一定程度上抑制了由光发生在透光面边缘的散射、折射现象所引起的误差。光电信号处理电路采用直接合成的方式,大幅度简化了电路,避免了两次求和、一次做差的复杂电路设计,降低了由电路元器件引起的噪声干扰。

2.2 工作原理

如图 2(a)所示,若动极板由初始时刻(实线位置)开始由左至右移动 x (虚线位置)时,且上半正弦“栅面”(实线包围区域的上半部分)与位移之间满足: $y = A \sin \frac{\pi}{W} x$,其中 A 为半正弦“栅面”高度, W 为正弦透光面的宽度, x 为栅面位移。利用 4 组“栅面”透光面积的变化和空间位移之间的相互关系,可以得到各个“栅面”组($\cos \omega t, \cos(\omega t + \pi/2), \cos(\omega t + \pi), \cos(\omega t + 3\pi/2)$)透光面面积的变化规律为:

当光强信号为时间上相互正交的交变信号, 然后各自透过 4 组经过定、动极板空间调制的透

光“栅面”, 最后通过光电转换可以获得 4 组透光“栅面”组的电信号分别为:

$$\begin{cases} U_{\cos(\omega t)} = I_m \cos \omega t \cdot S(x)_{\cos(\omega t)} = K \cdot (\cos \omega t + \cos \omega t \cdot \cos \frac{\pi}{W}x), x \in [0, 2W] \\ U_{\cos(\omega t + \pi/2)} = I_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \cdot S(x)_{\cos(\omega t + \pi/2)} = -K \cdot (\sin \omega t + \sin \omega t \cdot \sin \frac{\pi}{W}x), x \in [0, 2W] \\ U_{\cos(\omega t + \pi)} = I_m \cos(\omega t + \pi) \cdot S(x)_{\cos(\omega t + \pi)} = -K \cdot (\cos \omega t - \cos \omega t \cdot \cos \frac{\pi}{W}x), x \in [0, 2W] \\ U_{\cos(\omega t + 3\pi/2)} = I_m \cos(\omega t + \frac{3\pi}{2}) \cdot S(x)_{\cos(\omega t + 3\pi/2)} = K \cdot (\sin \omega t - \sin \omega t \cdot \sin \frac{\pi}{W}x), x \in [0, 2W] \end{cases}, \quad (2)$$

其中 $K = 2A \cdot W \cdot I_m / \pi$ 。经过合成后 4 路电信号为:

$$\begin{aligned} U &= U_{\cos(\omega t)} + U_{\cos(\omega t + \pi/2)} + U_{\cos(\omega t + \pi)} + U_{\cos(\omega t + 3\pi/2)} = \\ &2K \cdot (\cos \omega t \cdot \cos \frac{\pi}{W}x - \sin \omega t \cdot \sin \frac{\pi}{W}x) = \\ &2K \cdot \cos(\omega t + \frac{\pi}{W}x). \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)为测量所需的电行波信号。如图 3 所示, 把电行波信号经过滤波、整形转换为方波信号, 然后通过 FPGA 输出的参考方波信号进行比相, 利用高频时钟脉冲计数得到两路时间信号的相位差, 即时间量, 便可以获得动极板和定极板的相对位移, 从而实现时间量对位移量的测量。

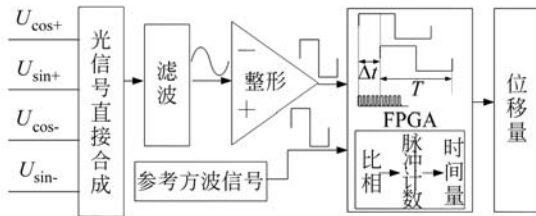


图 3 光电信号处理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of photoelectric signal processing

3 测量系统误差分析

由测量系统的工作原理可知, 电行波的质量与因子 K 、时间量 t 、空间量 x 有关, 即其中的一个量或者多个量引入不必要的增量都将影响电行波的质量, 从而引入测量误差。与时间量 t 相关的因素是正弦激励信号的时间相位调制; 与空间量 x 相关的因素是动极板与定极板“栅面”的空间相位调制; 与因子 K 相关的因素有 4 路正弦激励信号的幅值、动极板与定极板的透光面宽度等。

3.1 交变光场时间调制正交性误差分析

交变光场的正交性与交变光源激励电信号有关。时间相位的正交性虽然能够利用现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)实现精确控制, 但很难保证 4 路激励信号的相位在后续模拟电路的一致性。假设图 2(a)中的“栅面”组①的激励信号相位存在偏差, 由式(2)建立的误差模型为:

$$\begin{aligned} U &= K \cdot [(1 + \cos \frac{\pi}{W}x) \cdot \cos(\omega t + \Delta t) + (1 - \\ &\cos \frac{\pi}{W}x) \cdot \cos(\omega t + \pi) + (1 + \sin \frac{\pi}{W}x) \cdot \cos(\omega t + \\ &\frac{\pi}{2}) + (1 - \sin \frac{\pi}{W}x) \cdot \cos(\omega t + \frac{3\pi}{2})], \end{aligned} \quad (4)$$

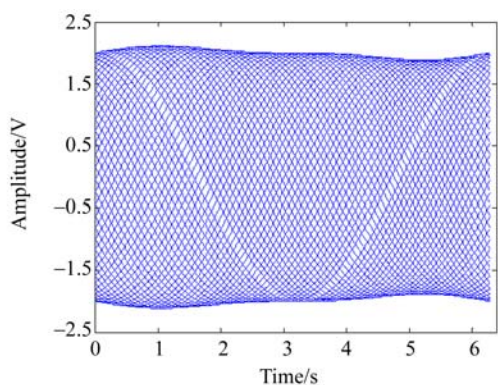
其中 $K = 2I_m AW / \pi$ 。由式(4)获得的电行波仿真波形与谐波成分如图 4 所示。

由图 4 可知, 4 路时间相位不正交的光驻波信号合成的电行波引入了随周期呈一次和二次变化的分量, 根据测量系统的电行波合成原理可知, 这必然导致测量结果中存在一次和二次谐波。从图 4(b)可以看出, 时间相位不正交引入的一次谐波更为明显。

3.2 极板空间调制正交性误差分析

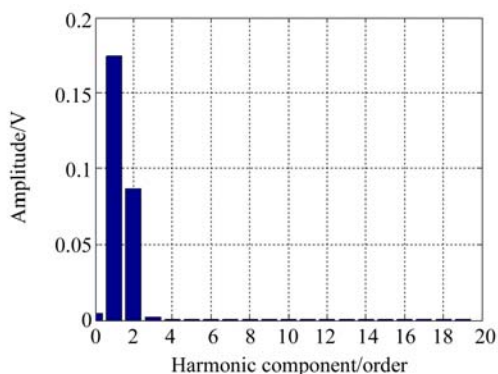
动极板 4 组“栅面”正弦透光面宽度与定极板的矩阵透光面宽度不相等, 这为极板空间的调制作用引入了误差分量。图 5 给出了极板透光面宽度不相等时的空间分布与光场分布。

如图 5(a)所示, 若动极板的每个正弦透光面小于定极板矩形透光面的宽度, 则有: (1) 每个“栅面”组的每一个透光面与理想状态在同一时刻有着不同的变化规律, 光场分布表现为每个透光面与理想状态下透过的光通量不相等; (2) 每个“栅面”组内每个正弦透光面在同一时刻都将以不同的变化规律发生调制作用, 光场分布表现为每个“栅面”组内每个透光面透过的光通量不相等。



(a) 时间相位不正交行波仿真波形

(a) Simulated traveling wave of time phase non-orthogonality

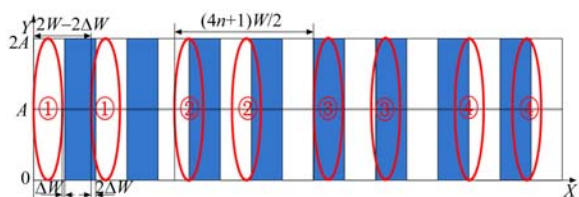


(b) 谐波成分

(b) Harmonic components

图 4 时间相位调制误差

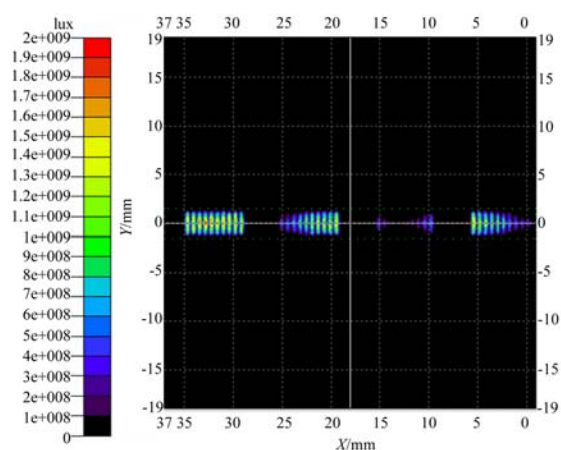
Fig. 4 Error of time phase modulation



(a) 极板透光面宽度不相等空间分布

(a) Spatial distribution for non-equal grating width of light transmitting surfaces of polar plates

$$S(x)_{\cos\omega t} = \begin{cases} 2 \int_0^{W-\Delta W} A \sin \frac{\pi}{W-\Delta W} x dx = 2K, & x \in [0, \Delta W] \\ 2 \left(\int_0^{W-\Delta W} A \sin \frac{\pi}{W-\Delta W} x dx - \int_0^x A \sin \frac{\pi}{W-\Delta W} x dx \right) = K \left(1 + \cos \frac{\pi}{W-\Delta W} x \right), & x \in [\Delta W, W] \\ 0, & x \in [W, W + \Delta W] \\ 2 \int_0^x A \sin \frac{\pi}{W-\Delta W} x dx = K \left(1 - \cos \frac{\pi}{W-\Delta W} x \right), & x \in [W + \Delta W, 2W] \end{cases}, \quad (5)$$



(b) 极板透光面宽度不相等光场分布

(b) Light field distribution for non-equal grating width of light transmitting surfaces of polar plates

图 5 极板空间位置误差

Fig. 5 Error of spatial modulation of polar plates

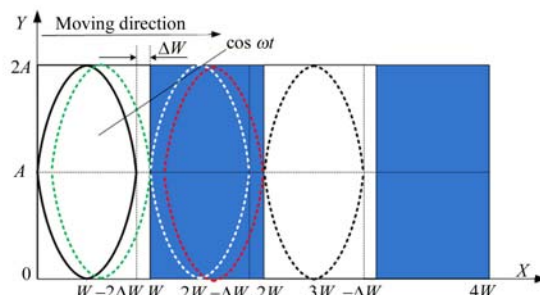


图 6 动极板与定极板相对运动过程

Fig. 6 Relative motor process of fixed and moving polar plates

设极板正弦透光面的宽度为 $W - \Delta W$ ，“栅面”与位移之间的关系为： $y = A \sin \frac{\pi}{W - \Delta W} x$ ，其中 A 为半正弦透光面的高度， $W - \Delta W$ 为动极板实际正弦透光面的宽度， x 为栅面位移。图 6 给出了图 5(a) 中动极板“栅面”组①的第一个透光面与定极板发生一个周期相对位移的具体过程。采用分段积分法获得余弦正驻波透光面的透光面积 $S(x)_{\cos\omega t}$ 的变化情况，即有：

其中 $K=2I_m A(W-\Delta W)/\pi$ 。由式(2)可得余弦正驻波电信号为:

$$U_{\cos\omega t} = I_m \cos(\omega t) \cdot S(x)_{\cos\omega t}, x \in [0, 2W]. \quad (6)$$

以此类推,可得图 5(a)中正弦负透光面、余弦负透光面和正弦正透光面的透光面积及其电信号的变化情况。4 组“栅面”透光面积随位移的变化情况与相应的激励信号随时间的变化情况如图 7 所示。

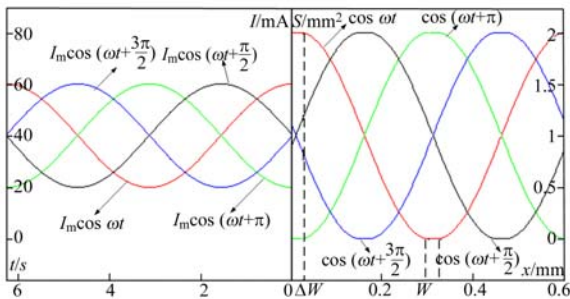
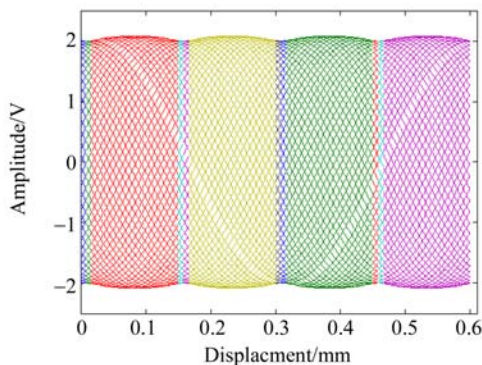


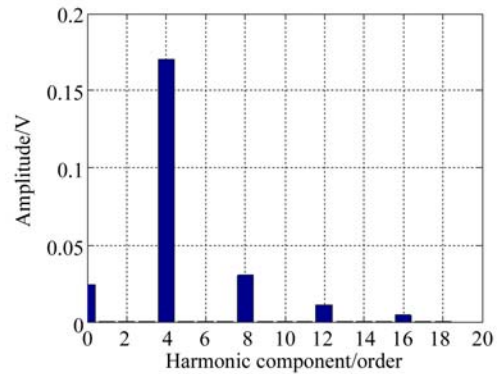
图 7 光强时间调制与透光面积空间调制的变化情况
Fig. 7 Changes in light intensity time modulation and spatial modulation of light transmission area respectively

由图 7 可知,由于动极板的正弦透光面小于定极板矩形透光面 ΔW 的宽度,一个周期内透光面积有两个 ΔW 的宽度呈现非正弦型调制,表现为停滞状态。通过透光面积空间上的变化与光场时间上的变化的调制耦合,可得到相对位移的电行波波形以及谐波成分,如图 8 所示。



(a) 空间相位不正交行波仿真波形

(a) Simulated traveling wave of spatial phase non-orthogonality



(b) 谐波成分图

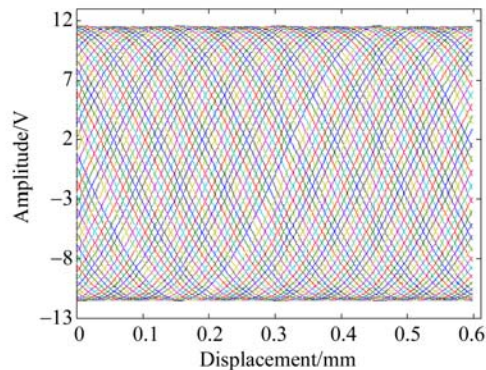
(b) Diagram of harmonic components

图 8 空间相位调制误差

Fig. 8 Error of spatial phase modulation

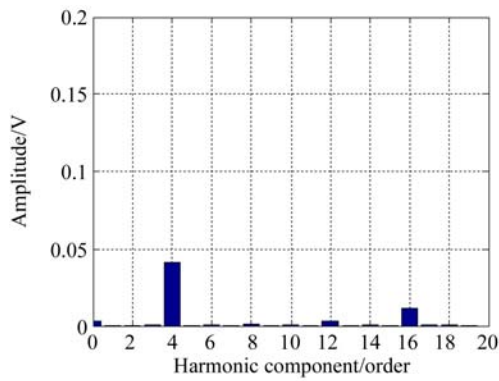
从图 8 可以看出,极板透光面宽度不相等主要给电行波信号带入了随周期呈四次和八次等变化的误差分量,这必然使测量结果中存在四次和八次等谐波,且四次谐波更为明显。

每个“栅面”组内每个正弦透光面在同一时刻都将以不同的变化规律进行调制,这是指每个“栅面”组每个透光面是从同一空间相位周期的不同位移点开始调制,而且间隔宽度为 $2\Delta W$ 。合成的电行波信号就是同一时刻所有光信号的叠加。设 1 个“栅面”组内有 10 个正弦透光面(10 个正弦透光面的仿真结果最佳),极板透光面宽度不相等时相对位移空间距离的电行波仿真波形以及谐波成分如图 9 所示。由图 9 可以看出,当每个“栅面”组有 10 个正弦透光面时,四次谐波最小,因此成为消除大部分四次谐波的一种有效手段。



(a) 多透光面行波仿真波形

(a) Simulated traveling wave for multiple light transmitting surfaces



(b) 谐波成分

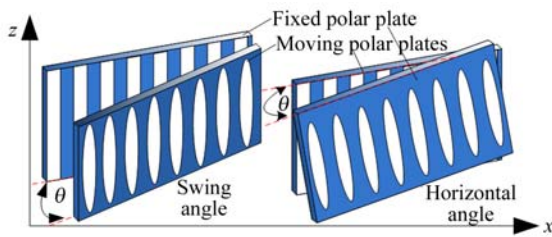
(b) Diagram of harmonic components

图 9 多透光面空间调制误差

Fig. 9 Error of spatial phase modulation of multiple light transmitting surfaces

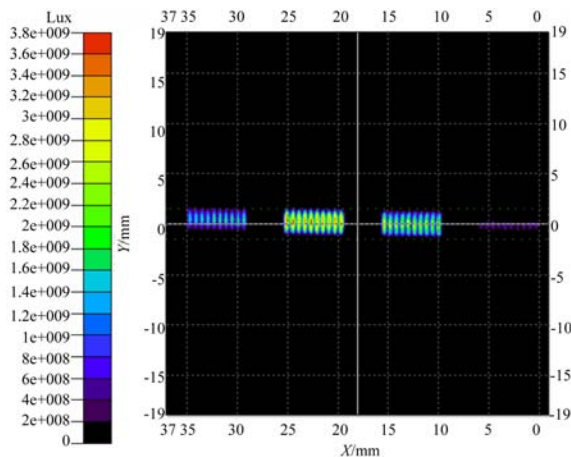
3.3 测量系统结构安装的平行性误差分析

动极板与定极板安装虽然比较简单,但难以避免极板间的不平行现象。图10给出了极板不



(a) 极板安装不平行位置分布

(a) Spatial distribution of plates with non-parallel installation



(b) 极板安装不平行时的光场分布

(b) Light field distribution of polar plates with non-parallel installation

图 10 机械安装不平行

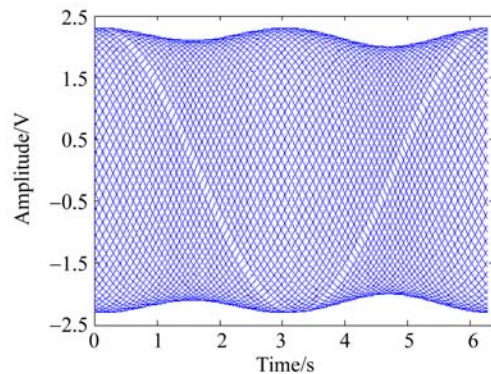
Fig. 10 Non-parallel mechanical installation of polar plates

平行的空间分布与相应的光场分布,即极板在各方向上存在一个倾角 θ ,使得光电池接收到的 4 路光强信号的幅值不完全一致,即式(2)中的值不相同。

当动极板与定极板不平行,即偏摆角、水平角不为零时,“栅面”组在初始时刻每个透光面透过的光通量都与理想情况有差异,这就导致在透光面调制过程中,光电池接收到的 4 路光强信号幅值不相等,即上文所提到的 K 值不相同。设 K 分别为 K_1, K_2, K_3, K_4 ,由式(2)建立误差模型:

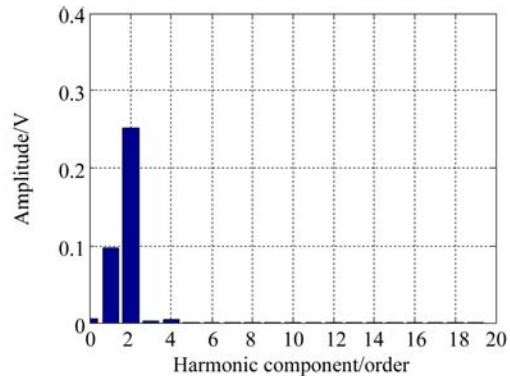
$$U = K_1(1 + \cos \frac{\pi}{W}x) \cdot \cos(\omega t) + K_2(1 - \cos \frac{\pi}{W}x) \cdot \cos(\omega t + \pi) + K_3(1 + \sin \frac{\pi}{W}x) \cdot \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) + K_4(1 - \sin \frac{\pi}{W}x) \cdot \cos(\omega t + \frac{3\pi}{2}). \quad (7)$$

由式(7)获取极板不平行时的电行波仿真波形与谐波成分如图 11 所示。由图 11 可知,动极



(a) 极板不平行时的电行波仿真波形

(a) Traveling wave for non-parallel polar plates



(b) 谐波成分

(b) Harmonic components

图 11 机械安装误差

Fig. 11 Mechanical installation error

板与定极板不平行给电行波信号带入了随周期呈一次与二次变化的误差分量,这必然导致测量结果中存在一次和二次谐波。从图 11(b)可以看出,由于机械安装导致动极板和定极板不平行引入的二次谐波更为明显。

4 实验研究与系统优化

4.1 实验平台搭建

为了验证理论分析的正确性,搭建了如图 12 所示的实验系统。实验采用 FPGA 产生 4 路频率为 1 kHz、幅值相等、相位依次相差 90° 的激励

信号驱动并行排列的激光光源,从而获得 4 路正交的交流光场。定极板与动极板采用光学镀膜的方式分别定制栅距宽度为 0.6 mm 的正弦透光面与矩形透光面。实验选用 AREOTECH 公司的 PRO225LM 精密直线导轨平台驱动动极板。定制相应尺寸的光电池作为光电信号接收器件,并将它焊接在前置接收板上,固定于动极板背面。光电信号通过前置接收板处理后由示波器观察感应波形,并送入位移测量系统,将行波信号转换为位移数据。利用 RENSHAW XL-80 激光干涉仪的测量值作为参考,对测量数据进行分析 and 处理,得到误差曲线并进行波形分析。



图 12 交变光场时空耦合型位移测量系统实验平台

Fig. 12 Experimental platform of alternating light field space-time coupling type displacement measuring system

4.2 实验步骤及相关参数优化

实验步骤如下:

(1) 利用精密直线导轨平台以 0.01 mm 的步长驱动动极板,使动极板相对定极板发生相对移动,以便于分析误差成分。移动距离取两个对极长度为 1.2 mm,即在位移测量系统中采集 120 个点,每个点的值就是实际的位移测量值。

(2) 把采集的实际位移测量值与激光干涉仪的测量值求差获得误差值。实际测量的初始误差曲线以及由误差曲线得到的谐波成分如图 13 所示。由图 13 可知,初始测量误差的峰峰值在 $11 \mu\text{m}$ 之间,以一次、二次和四次谐波为主,且四次谐波最大,一次谐波次之,二次谐波相对最小。通过改进实验装置的结构,按照从大到小的顺序依次优化谐波分量,并按照实验步骤分别获得实际误差曲线与谐波成分进行理论验证。

4.2.1 空间调制正交性优化

根据前面的分析可知,四次谐波是由于极板透光面宽度不相等引起的。为了验证以上理论分析的正确性,加工相同结构的动极板,要求加工透

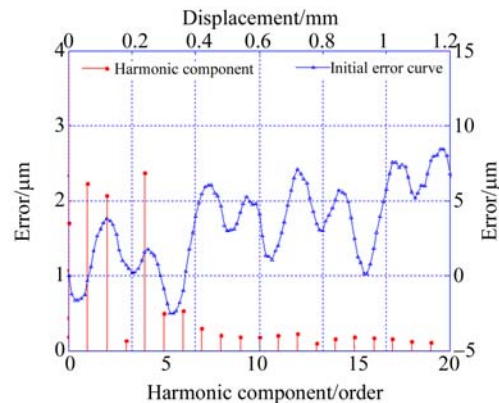


图 13 初始误差曲线及谐波成分

Fig. 13 Initial error curves and harmonic components

光面宽度的误差在 $1 \mu\text{m}$ 内(原始加工误差为 $10 \mu\text{m}$)。根据理论分析,并且考虑到光斑尺寸,加工透光面的数量由 4 个增加到 10 个,然后用黑色遮光材料遮挡住每个“栅面”组中的 6 个透光面,由此在和原始透光面数量相等的情况下(4 个)进行实验,得到的误差曲线与谐波成分如图 14 所示。

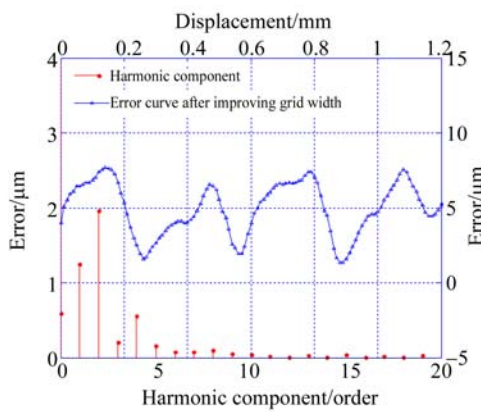


图 14 改善透光面宽度后的误差曲线与谐波成分
Fig. 14 Error curves and harmonic components after improving light transmitting surfaces

由图 14 可以看出,四次谐波相比原始误差有明显的减小,这验证了极板透光面宽度不相等是产生四次谐波的主要原因。不过即使改善了透光面的宽度也不能完全消除四次谐波,选择 10 个透光面进行实验,得到的误差曲线和谐波成分如图 15 所示。由图 15 可以看出,四次谐波在经过多个透光面的平均效应后已经大幅度减少,这也验证了理论分析的正确性。

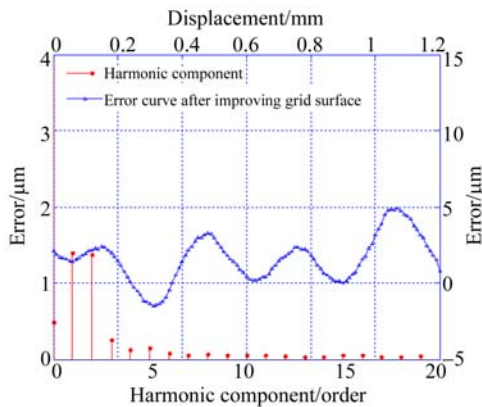


图 15 增加透光面后的误差曲线与谐波成分
Fig. 15 Error curves and harmonic components after increasing number of light transmitting surface

4.2.2 时间调制正交性优化

由分析可知,一次谐波主要由于时间相位不正交引起。FPGA 输出实现了相位的精确控制,经过中间模拟环节(放大、滤波、跟随等)后输入至激光光源的四路交变信号的相位差(与 0°作为参考)发生了一定程度的改变。为了削弱此中间环节对相位的影响,在不改变电路原理设计的情况

下减少滤波环节,使用精密电容和电阻来改进电路设计。经过中间环节后的原始信号与优化后的信号的相位差对比如表 1 所示,优化后的误差曲线与谐波成分如图 16 所示。

表 1 信号相位差对比

Tab. 1 Comparison of phase difference between initial and optimal alternating signals (°)

Phase difference	Ideal value	Initial value	Optimal value
Between 90 and 0	90.000	90.218	89.998
Between 180 and 0	180.000	179.803	180.000
Between 270 and 0	-90.000	-90.392	-90.000

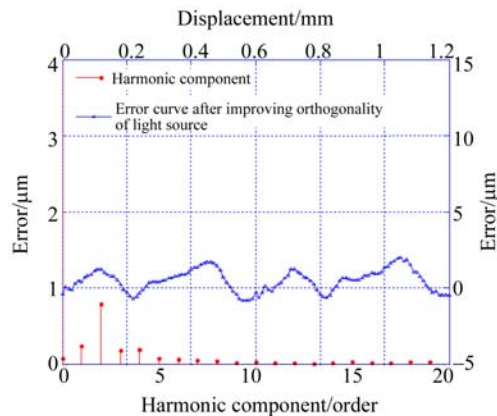


图 16 改善光源正交性后的误差曲线与谐波成分
Fig. 16 Error curves and harmonic components after improving orthogonality of light source

根据表 1 可知,优化后的相位已经非常接近理想状态。从图 16 可知,一次谐波大幅度地减少,少部分二次谐波也被削减,从而验证了光源的相位不正交是产生一次谐波的主要原因。

4.2.3 机械安装平行性优化

由分析可知,二次谐波主要由于机械安装的不平行引起。因此,用塞尺调整好动极板与定极板之间的距离,利用五维精密位移微调架调整极板间的水平角和偏摆角,使动极板与定极板满足一定的平行性,使得 4 路光信号的幅值差异降到最小。从而获得的误差曲线与其谐波成分如图 17 所示。

由图 17 可以看出,二次谐波已经大幅度减少,少部分一次谐波也被削减,这验证了极板的不平行是产生二次谐波的主要原因。测量系统在两个对极长度范围内的误差为 1 μm,剩下的误差成分通过傅里叶谐波修正法进行实时修正^[19-20],该

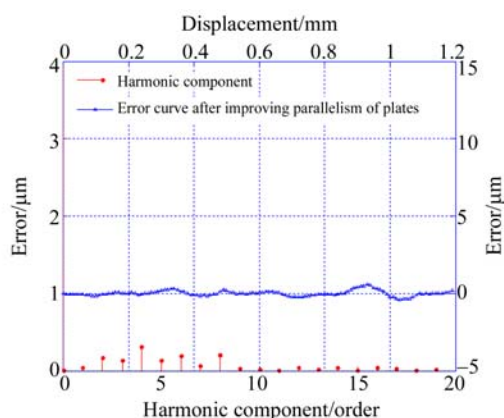


图 17 改善极板平行性后的误差曲线与谐波成分
Fig. 17 Error curves and harmonic components after improving parallelism of polar plates

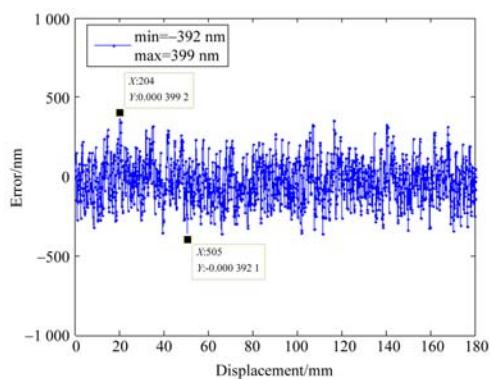


图 18 位移测量误差曲线
Fig. 18 Error curve of displacement measurement

参考文献:

- [1] 刘小康, 陈自然, 王先全, 等. 空间精密位移信号软细分方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(3): 540-545.
LIU X K, CHEN Z R, WANG X Q, *et al.*. Soft interpolating method of precision spatial displacement signals[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(3): 540-545. (in Chinese)
- [2] 王一光, 陈兴林, 李晓杰. 光刻机工件台宏动三自由度建模及自适应神经网络控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 132-140.
WANG Y G, CHEN X L, LI X J. Three degrees of freedom modeling and adaptive neural network control for long-stroke wafer stage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 132-140. (in Chinese)
- [3] 李文昊, 张成山, 巴音贺希格, 等. 莫尔条纹法精确控制全息光栅光栅常数的研究[J]. 仪器仪表学

报, 2013, 34(12): 2867-2873.
LI W H, ZHANG CH SH, BAYANHESHIG, *et al.*. Study on precisely controlling the grating constant of holographic grating with Moire pattern method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(12): 2867-2873. (in Chinese)

[4] 司新春, 唐燕, 胡松, 等. 基于复合光栅的大范围高精度对准方法[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0105003.
SI X CH, TANG Y, HU S, *et al.*. High-precision alignment technique with large measurement range based on composite gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0105003. (in Chinese)

[5] 陈自然, 刘小康, 郑永, 等. 精密位移动态测量信号特征辨识及细分新方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2224-2230.
CHEN Z R, LIU X K, ZHENG Y, *et al.*. Study

5 结 论

方法已经很成熟, 在这里不赘述, 获得的位移测量误差曲线如图 18 所示。图 18 表明: 在 180 mm 的测量范围内, 误差修正后测量系统的精度可以达到 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 。

本文对交变光场时空耦合型位移测量系统的结构、工作原理以及误差特性进行了详细的分析。分析结果表明: 利用时间上依次相差 90° 的交变光源与空间上依次错开 90° 的正弦“栅面”阵列结构的调制作用, 可以耦合为一路实现高精度时间量测量空间位移的电行波信号; 利用单排“栅面”阵列结构有效地消除了边缘散射、折射效应, 增强了透光面光强的均匀性和一致性; 利用直接合成的方式简化了电路设计。由误差模型的仿真分析与实验验证可知: 一次谐波和二次谐波主要是由于交变光源时间相位的不正交和极板结构安装的不平行引起的; 四次谐波的产生原因是极板空间相位的不正交。最后对测量装置结构进行了优化, 优化后在 180 mm 的测量范围内, 栅距为 0.6 mm 的测量系统能实现 $\pm 0.4 \mu\text{m}$ 的测量精度。实验结果验证了理论分析的正确性以及以交变光场时空耦合方式实现高精度时间对空间位移测量的可靠性, 也为提高交变光场时空耦合型位移测量系统的测量精度提供了可靠的理论依据。

- on the novel characteristic identification and subdivision method for precision displacement dynamic measurement signals[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(10): 2224-2230. (in Chinese)
- [6] 冯金扬, 叶雄英, 陈烽, 等. 集成双光栅干涉微梁位移测量方法[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(8): 1747-1753.
FENG J Y, YE X Y, CHEN F, *et al.*. Interferometric displacement measurement of microcantilevers based on integrated dual gratings[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(8): 1747-1753. (in Chinese)
- [7] 张磊, 郭劲. 分体式激光扩束系统平行度测量装置的设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4): 789-795.
ZHANG L, GUO J. Design of parallelism measuring equipment for laser beams from independent laser expanding beam system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 789-795. (in Chinese)
- [8] 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.
QIAN Y X, HONG X T, JIN W M. Motion measurement of dual-CCD imaging system based on optical correlator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(7): 0708002. (in Chinese)
- [9] 张震, 周孟莲, 张检民, 等. CCD 中的激光光斑阴影现象及机理[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1365-1371.
ZHANG ZH, ZHOU M L, ZHANG J M, *et al.*. Shadows of laser spots in CCD and their mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1365-1371. (in Chinese)
- [10] 常丽. 莫尔条纹纳米级细分关键技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
CHANG L. *Research on Key Technology of Moire Fringe Nanoscale Subdivision*[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [11] 宋玉龙, 楚广生, 马天翔, 等. 一种基于软件倍频的编码器细分方法[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(6S): 142-146.
SONG Y L, CHU G SH, MA T X, *et al.*. Encoder subdivision method based on the software frequency doubling[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(6S): 142-146. (in Chinese)
- [12] SUGIYAMA Y, MATSUI Y, TOYODA H, *et al.*. A 3.2 kHz, 14-bit optical absolute rotary encoder with a CMOS profile sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(8): 1430-1436.
- [13] 王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 379-386.
WANG X J. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 379-386. (in Chinese)
- [14] HANDEL P. Parameter estimation employing a dual-channel sine-wave model under a Gaussian assumption[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, 57(8): 1661-1669.
- [15] 李彦, 付敏, 朱革, 等. 基于光敏阵列直接调制的单栅式时栅位移传感器[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(5): 1028-1035.
LI Y, FU M, ZHU G, *et al.*. Single grate type time-grating displacement sensor based on photo-sensitive array direct modulation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1028-1035. (in Chinese)
- [16] 鲁进, 陈锡侯, 汤其富, 等. 变耦型时栅传感器及测头姿态对测量误差的影响[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 2271-2282.
LU J, CHEN X H, TANG Q F, *et al.*. Variable coupling time grating sensor and effects of sensor-head attitudes on measuring errors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2271-2282. (in Chinese)
- [17] 杨洪涛, 章刘沙, 周姣, 等. 寄生式时栅安装误差对传感器测量精度的影响[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 319-326.
YANG H T, ZHANG L SH, ZHOU J, *et al.*. Effect of installation error of parasitic time grating on sensor measuring accuracy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 319-326. (in Chinese)
- [18] 付敏, 彭东林, 朱革, 等. 光强正交调制型位移传感器的数学模型与误差分析[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3): 784-793.
FU M, PENG D L, ZHU G, *et al.*. Mathematical model and error analysis of light intensity orthogonal modulation type displacement sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 784-793. (in Chinese)
- [19] 彭东林, 孙世政, 高忠华, 等. 时栅位移传感器的误差分离与补偿方法研究[J]. *自动化仪表*, 2012,

33(1): 15-17.

PENG D L, SUN SH ZH, GAO ZH H, *et al.*.

Research on error separation and compensation for time-grating angular displacement sensor [J].

Process Automation Instrumentation, 2012, 33 (1): 15-17. (in Chinese)

[20] 彭东林, 刘小康, 张兴红, 等. 基于谐波修正法的

高精度时栅位移传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(1): 31-33.

PENG D L, LIU X K, ZHAGN X H, *et al.*.

High-precision time-grating displacement sensor based on harmonic wave correcting method [J].

Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(1): 31-33. (in Chinese)

作者简介:

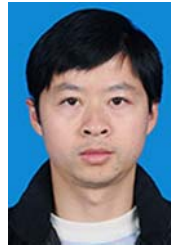


朱 革(1970—),男,四川宣汉人,教授,硕士生导师,1992年于合肥工业大学获得学士学位,1999年、2003年于重庆大学分别获得硕士、博士学位,主要从事精密测试技术方面的研究。E-mail: gezhuge@cqut.edu.cn



张 超(1993—),男,重庆垫江人,硕士研究生,2015年于西北民族大学获得学士学位,主要研究方向为光电检测与信号处理。E-mail: zhangchao328207@163.com

通讯作者:



付 敏(1981—),男,湖南娄底人,博士,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