

光学学报

一种基于旋转光场的高精度角位移测量方法研究

付敏^{1*}, 陈凡^{1,2}, 朱革², 石海林^{1,2}, 魏晓波^{1,2}, 乔俊红^{1,2}, 冷从阳^{1,2}

¹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;

²重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400054

摘要 针对传统高精度角位移测量方法中,存在制造工艺复杂、多测头结构复杂且安装困难等问题,提出一种基于旋转光场且整周封闭的高精度角位移测量方法。该方法借鉴旋转磁场产生原理,在整个圆周面上均布正弦型透光面,等间隔地将整圈透光面分成 0°、90°、180°和 270°四组,用单路交变光场为整周封闭的透光面提供交变光强信号,经光电转换和微控移相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,实现了角度测量。通过搭建实验平台,对不同的原理样机进行对比实验,实验验证了制造精度和对极数对测量误差的影响,在整周 360°测量范围内,采用圆心角为 2°的等分透光栅面,测量误差可达±5.0"。由于测量误差主要由周期性误差成分组成,通过修正谐波误差以及提高光场分布质量,其测量精度还将有较大的提升空间。验证了该方法对制造和安装误差的抑制效果,为采用低精度制造工艺实现高精度测量提供了一种有效的实现方案。

关键词 测量; 旋转光场; 角位移; 交变光场; 光场分布

中图分类号 TP212.14

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1812001

High-Precision Angular Displacement Measurement Based on Rotating Optical Field

Fu Min^{1*}, Chen Fan^{1,2}, Zhu Ge², Shi Hailin^{1,2}, Wei Xiaobo^{1,2},
Qiao Junhong^{1,2}, Leng Congyang^{1,2}

¹Engineering 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;

²College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

Abstract To tackle the problems in traditional high-precision angular displacement measurement, such as complicated manufacturing process, complex multi-probe structure and difficult installation, this paper proposes a new relevant full-circle method based on the construction of a rotating optical field, inspired by the generation principle of a rotating magnetic field. A sinusoidal uniform grating surface on the full circle is divided by an equal interval into four groups of 0°, 90°, 180°, and 270°. Alternating light intensity signals are provided for the full-circle grating surface by a one-way alternating optical field, which are transformed into electric traveling wave signals via photoelectric conversion and micro-controlled phase shift. The angular displacement measurement is realized by the interpolation of the phase difference between reference signals and electric traveling wave signals with a high-frequency clock pulse. An experimental platform is established for the comparative experiment on different principle prototypes. The influence of manufacturing precision and number of pole pairs on the measurement error is verified by experiments. The measurement error can reach ±5.0" when the grating surface with a central angle of 2° is used

收稿日期: 2021-02-24; 修回日期: 2021-03-24; 录用日期: 2021-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(51875070)、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项目(clycx20202077)、中国博士后科学基金(2021M693749)

通信作者: *fum_0@cqut.edu.cn

in the full-circle measurement range. Since the measurement error is mainly composed of periodic error components, the measurement precision will be greatly improved after the correction of harmonic error and the quality improvement of optical field distribution. This paper verifies the suppressing effect of the proposed method on manufacturing and installation errors and provides an effective solution to the high-precision measurement for low-precision manufacturing processes.

Key words measurement; rotating optical field; angular displacement; alternating optical field; optical field distribution

OCIS codes 120.4570; 120.0280; 130.6010; 350.2770

1 引言

角位移是制造过程中需要测量的最基本的物理量之一,且随着先进制造业与测试计量等领域的快速发展,精密测量技术对测角系统的精度要求越来越高^[1],由此诞生了多种精密角位移测量装置,包括圆光栅、旋转变压器、容栅、磁栅等。由于精密加工过程中,受环境电磁干扰、振动、噪声等因素影响,容栅和磁栅的应用受限,因此,目前最常用的角位移测量传感器是以圆光栅和旋转变压器为主^[2-3]。

圆光栅以其精度高、动态性好、抗干扰强等优点,在角位移测量领域占据主导地位。其测量精度主要由光栅刻线精度与细分精度来决定^[4]。然而,随着测量精度要求的提高,直接减小栅距会使制造难度和制造成本急剧增高^[5],且受光刻衍射极限的限制,栅距不能无限制地减小。目前,我国购自德国海德汉公司的光栅,最高精度为36000线/周,型号为RON886,经4倍机械细分后栅距精度为9",最后经电子细分后整周精度为 $\pm 1''$,然而对于更高刻线精度的光栅,受国外技术封锁的影响,德国海德汉公司对我国禁售。因此,高精密栅线的加工、栅状感光集成芯片^[6-7]的制造等问题已成为国内圆光栅精度提高的主要障碍。为了在现有刻线技术的基础上进一步提高圆光栅测量精度,国内外学者对误差补偿方法进行了深入研究,试图通过误差修正和增加读数头求平均的方法来降低由分度误差和安装偏心误差引起的测量误差^[8-9]。为此,文献[10]提出了一种双读数头圆光栅偏心参数自标定方法;文献[11]又提出一种采用多读数头混合布局的方式来消除更多更高阶次误差的方法。结合误差理论模型,可知增加相应空间位置的读数头的数量固然能减小相应的谐波误差,但实际测量过程受安装工艺、温度、振动、噪声等因素的影响,测量误差的数学模型难以准确建立,且受多读数头安装误差的影响,这种多读数头消除误差的方法对测量精度提高的作用有限^[12]。

旋转变压器因其结构简单、成本低、可靠耐用得

到广泛的应用。其利用定子绕组使两相转子产生相关的调制信号,输出一个信号周期来实现整周测量^[13]。由于测量方法是整周封闭的,故可以用相对低的空间分度实现较高的测量精度。国内尚静等^[14]用20对极实现了57.6"测量精度,国外Bahari等^[15]提出一种新型永磁旋转变压器,实现了12对级27"的测量精度。然而,由于旋转变压器测量精度受定子和转子调制信号精度的影响,高精度调制信号又受传感器整周制造精度的影响^[16],传统机械开槽绕线的方法使得传感器各对极一致性难以得到保证,限制了旋转变压器测量精度的进一步提高。现阶段国内外高精度旋转变压器的测量精度约在6"左右^[17],与高精度光栅相比存在一定差距。

综上所述,高精度圆光栅加工难度大,对基础设施的要求高,旋转变压器精度不能与高精度圆光栅相媲美。本文结合圆光栅利用光学加工一致性和旋转变压器圆周封闭测量的优点,提出一种基于旋转光场且整周封闭的角位移测量新方法,利用整周效应减小空间调制对测量误差的影响,同时,发挥光学制造高精度的优点,用相对较大的“栅面”代替圆光栅精细的“栅线”,降低动盘与定盘的制造难度,用现有的工艺水平实现了低制造工艺、高测量精度的目标。

2 测量原理

2.1 旋转光场构造原理

文献[18-19]中提到行波信号可以由两列时间和空间正交的驻波信号合成得到,而驻波信号可以通过不同场强(如磁场、电场、光场等)的空间合成的方式来获得。其原理类似于旋转磁场^[20]的行波构造方法,因此,在光学测量领域构建一个空间和时间周期性的旋转光场,需要对光强进行时间和空间的调制。为构造出一个光强匀速变化的旋转光信号,设计如图1(a)所示的传感器结构,其由环形光源、动盘、定盘和光电接收装置四部分组成[分别如图1(a)中①、②、③、④所示],其结构特点分别如

下:1)环形光源①是由均匀分布在基体上的 LED 灯组成,并用 $I_m(1 + \cos \omega t)$ 激励信号对光源进行驱动,产生频率为 ω 的交变光强信号,其中 I_m 为激励信号的峰值,此过程为时间调制。2)动盘②是由整周等间隔分布的圆心角为 θ 的扇形栅面阵列组成。3)定盘③是由整周等间隔分布的透光面积随转动角度呈正弦规律变化的栅面组成,栅面对应的圆心角为 θ ,相邻透光面的间隔为 $\theta/2$ 。4)光电接收装置④被固定安装在定盘下方,分别用来接收动盘空间调制形成的 4 组空间位置的光通量。图 1(a)中⑤为动盘与定盘的空间调制图,当二者发生相对运动时透光面的相互关系见⑤的放大图,其中实线为动定盘调制后的 4 组相差 90° 的空间位置,将 4 组空间位置分别叫做 0° 、 90° 、 180° 、 270° ,虚线为发生相对运动后二者之间的相互关系。5)动盘和定盘相对转动引起的透光面积随旋转角度 δ 呈正弦关系变化,其定盘上、下栅面透光轮廓可用极坐标表示为 $\rho_1(\delta) = \sqrt{r^2 + 2A \sin(n\delta)}$ 与 $\rho_2(\delta) = \sqrt{r^2 - 2A \sin(n\delta)}$,其中 r 为栅面中心处

圆的半径, A 为幅值, n 为对极数,可由 $n = \pi/\theta$ 求得,如图 1(a)中⑥所示。

图 1(b)为行波信号合成原理图。经以上时间和空间调制,当动盘和定盘发生相对转动时,透光栅面的光通量在一个周期内的变化必须严格相差 90° 空间相位,通过放大电路采集 4 组透光栅面的光电流并将其转换为电压信号,如图 1(b)中⑦所示,4 组光电流信号对应的电压信号分别为 U_{0° 、 U_{90° 、 U_{180° 、 U_{270° ,4 路电压信号在时间上同相位,在空间上相位依次相差 90° ,再将 U_{0° 与 U_{180° 、 U_{90° 与 U_{270° 分别求差,如图 1(b)中⑧、⑨所示,可得两路时间上同相位、空间上相差 90° 的驻波信号,再对其中一路驻波信号作移相处理,如图 1(b)中⑩所示,处理后的驻波信号与另一路驻波信号在时间和空间相位上均相差 90° 。如图 1(b)中⑪所示,两路驻波合成可以获得类似于在空间中以恒定速度行进的行波信号。这个运动不是实际的空间运动,而是一种场强信号的空间和时间周期性变化,其效果与实际运动相同。

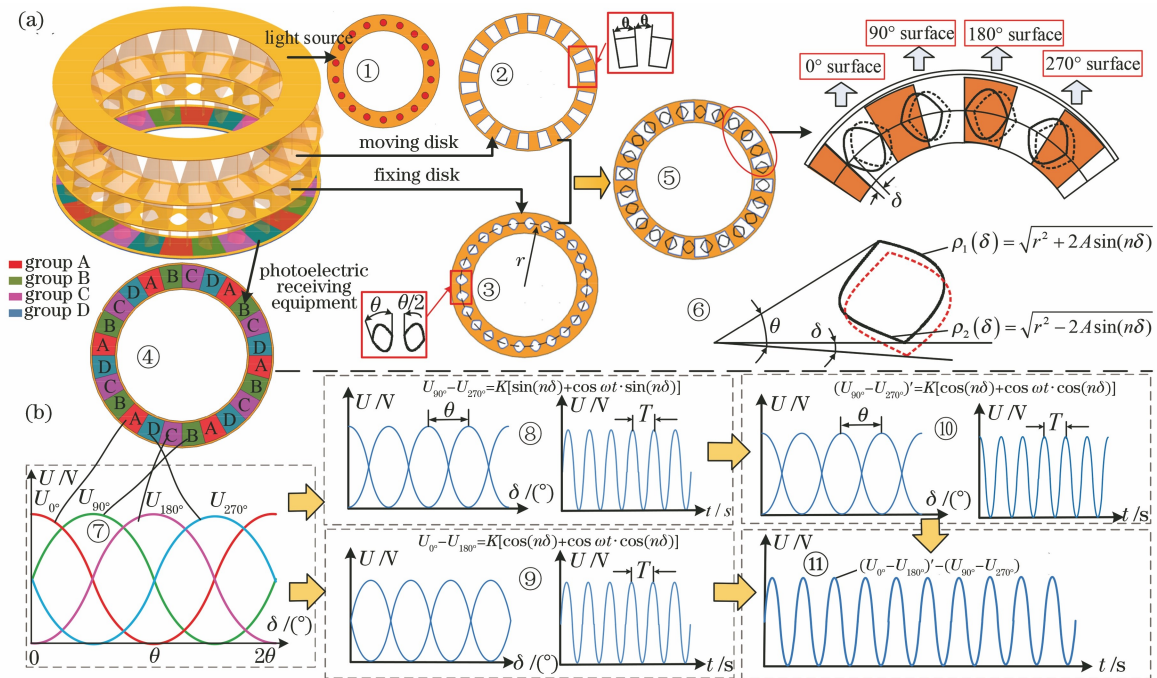


图 1 旋转光场构造原理。(a)光强空间调制原理图;(b)行波信号合成图

Fig. 1 Construction principle of rotating light field. (a) Schematic diagram of spatial modulation of light intensity; (b) composite diagram of traveling wave signal

2.2 测量机理分析

当动盘相对定盘顺时针转动 δ 角度时,如图 1(a)中⑥所示,利用极坐标求面积的方法可求出

4 组栅面 (0° 、 90° 、 180° 、 270° 栅面) 透光面积的变化规律,即

$$\left\{ \begin{array}{l} S(\delta)_{0^\circ} = \int_0^{\theta-\delta} \int_{\rho_2}^{\rho_1} r dr d\delta = 2(A/n) \cdot [1 + \cos(n\delta)], \quad \delta \in [0, 2\theta] \\ S(\delta)_{90^\circ} = \int_0^{\frac{\theta}{2}-\delta} \int_{\rho_2}^{\rho_1} r dr d\delta = 2(A/n) \cdot [1 - \sin(n\delta)], \quad \delta \in [0, 2\theta] \\ S(\delta)_{180^\circ} = \int_0^{\delta} \int_{\rho_2}^{\rho_1} r dr d\delta = 2(A/n) \cdot [1 - \cos(n\delta)], \quad \delta \in [0, 2\theta] \\ S(\delta)_{270^\circ} = \int_0^{\frac{\theta}{2}+\delta} \int_{\rho_2}^{\rho_1} r dr d\delta = 2(A/n) \cdot [1 + \sin(n\delta)], \quad \delta \in [0, 2\theta] \end{array} \right. \quad (1)$$

给光源加上交变的激励电流信号 $I = I_m(1 + \cos \omega t)$, 通过光电转换可获得 4 组透光栅面的电压信号 $U_{0^\circ}, U_{180^\circ}, U_{90^\circ}, U_{270^\circ}$, 其表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{0^\circ} = I \cdot S(\delta)_{0^\circ} = K[1 + \cos \omega t + \cos(n\delta) + \cos \omega t \cdot \cos(n\delta)], \quad \delta \in [0, 2\theta] \\ U_{90^\circ} = I \cdot S(\delta)_{90^\circ} = K[1 + \cos \omega t - \sin(n\delta) - \cos \omega t \cdot \sin(n\delta)], \quad \delta \in [0, 2\theta] \\ U_{180^\circ} = I \cdot S(\delta)_{180^\circ} = K[1 + \cos \omega t - \cos(n\delta) - \cos \omega t \cdot \cos(n\delta)], \quad \delta \in [0, 2\theta] \\ U_{270^\circ} = I \cdot S(\delta)_{270^\circ} = K[1 + \cos \omega t + \sin(n\delta) + \cos \omega t \cdot \sin(n\delta)], \quad \delta \in [0, 2\theta] \end{array} \right. \quad (2)$$

其中 $K = 2AI_m/n$, 再将 U_{0° 与 U_{180° , U_{90° 与 U_{270° 分别求差, 得到两路驻波信号的表达式为

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

将(3)式中的一路驻波信号进行 90° 移相处理, 再将这两路驻波信号求差, 可得一路电行波信号, 其表达式为

$$U = (U_{0^\circ} - U_{180^\circ})' - (U_{90^\circ} - U_{270^\circ}) =$$

$$2K\{\cos(n\delta) + \sin(n\delta)\} + \cos[\omega t + (n\delta)], \quad (4)$$

式中 $(U_{0^\circ} - U_{180^\circ})'$ 为 $(U_{0^\circ} - U_{180^\circ})$ 移相 90° 处理后的驻波信号, 滤除直流分量 $\Delta = 2K[\cos(n\delta) + \sin(n\delta)]$ 后, 行波表达式可简化为 $U = 2K \cos(\omega t + n\delta)$ 。当动盘与定盘发生相对转动时, 空间角位移出现偏差 $\Delta\delta$, 此时, 电行波信号可以写为

$$U = 2K \cos[\omega t + n(\delta + \Delta\delta)] = 2K \cos(\omega t + n\delta + \Delta\theta), \quad (5)$$

其中, δ 为初始角位移, $\Delta\theta = n\Delta\delta$ 为反映空间角位移的时间差, 因此, 可求得空间角位移为

$$\Delta\delta = \Delta\theta/n. \quad (6)$$

根据(6)式得到的 $\Delta\delta$ 即所测量的实际空间角度量, 通过上述原理可将位移测量转换为相位差测量, 所以当电行波信号用过零比较器整形滤波为方波信号后, 与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, 即通过调制传感器简单信号, 将模拟信号转换为易于处理的数字信号, 由此实现了角位移的测量, 如图 2 所示。

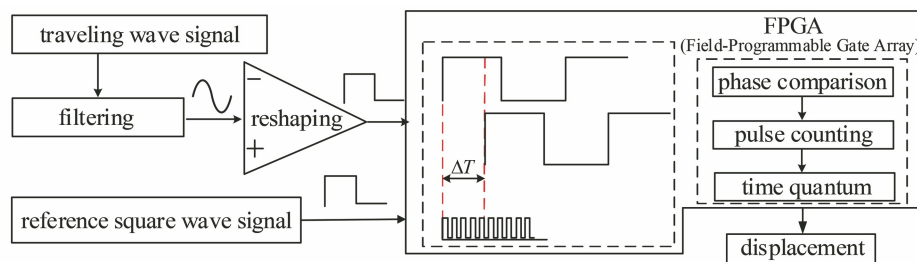


图 2 传感器输出信号处理图

Fig. 2 Sensor output signal processing diagram

3 实验验证与分析

3.1 实验平台搭建

为了验证上述测量方法的可行性, 搭建如图 3(a)所示的实验测试平台, 该平台主要包括传感

器样机、圆光栅、交流伺服电机等。圆光栅采用海德汉公司的 RON886(精度 $\pm 1''$) 作为参考基准。交流伺服电机采用科尔摩根无刷三相同步伺服电机(6SM100K)。图 3(b)为传感器样机细节图, 其中: ①为 LED 阵列环形光源, 固定于传感器上方, 用

1 kHz 的正弦激励信号驱动为传感器提供交变光场;②为动盘和定盘,利用光学镀膜的方式形成角度为 10° 的扇形栅面和上下双半类正弦栅面。所设计的传感器样机的基本参数为: $r=15\text{ mm}$, $n=18$,动盘有 18 个透光扇形栅面,定盘有 24 个透光类正弦栅面,动盘转动 20° 为一个信号周期,共有 18 个周期,每一个栅面对应一个光电池,如图 3(b)中③所示,用来接收该栅面的光信号。实验中,由控制系统控制电机带动转台作回转运动,传感器样机随转台同步回转,同步测量、记录转台转过的角位移,将测量结果通过串行通信发送到上位机,利用上位机对测量结果进行处理,获得校准后的角度值。

定盘和动盘的“栅面”均采用光刻、镀膜的加工工艺。加工过程中,利用集成电路图形设计软件 Tanner 生成相应的矩形“栅面”图形和类正弦“栅面”图形,然后采用刻蚀镀膜制作工艺进行复制,制作过程根据图形形状一次成型,制作难度不会因为图形形状的不同而变得复杂。同时,由于光刻加工过程中,光栅分辨率取决于最小图形特征尺寸大小,而本文中采用较大特征尺寸的“栅面”形式,其中类正弦“栅面”中心处圆对应的弧长为 2.6 mm ,高度为 1.28 mm ,扇形“栅面”上底弧长为 3.14 mm ,下底弧长为 2.09 mm ,其制作难度要远低于常规光栅的精密栅线加工。

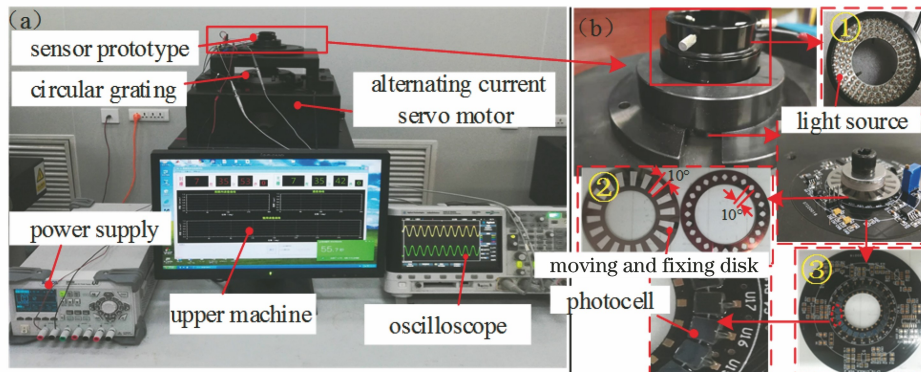


图 3 实验平台。(a)测试平台;(b)传感器样机细节图

Fig. 3 Experimental platform. (a) Test platform; (b) detail of sensor prototype

3.2 原理验证

利用以上实验平台,设定转台转速为 0.1 r/min ,得到传感器的驻波信号以及电行波信号

如图 4 所示。从图中可以看出,两路驻波信号的相位差为 90° ,当动盘相对定盘转动一个对极 20° 时,合成行波信号与参考信号之间的相位变化 360° 。

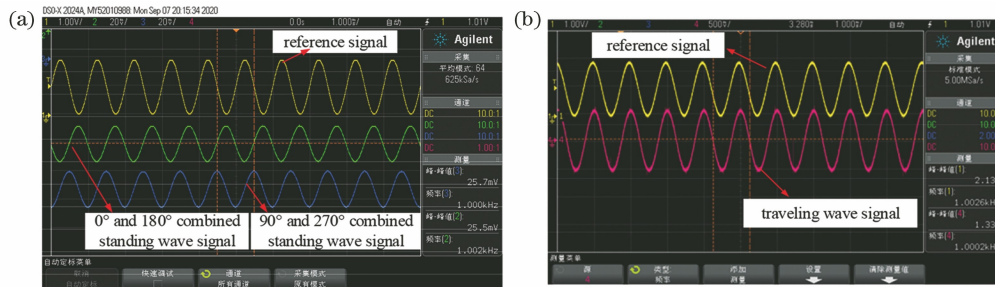


图 4 驻波信号与电行波信号实验效果测试图。(a)驻波信号;(b)电行波信号

Fig. 4 Experimental results of standing wave signal and traveling wave signal. (a) Standing wave signal; (b) traveling wave signal

由于所选光栅测量精度比原理验证阶段的被测传感器精度高,因此将光栅测量值设定为基准值,光栅的测量值与实际测量值之差为传感器测量误差。用交流伺服电机驱动转台转动,等角度分别读取光栅和传感器的测量值,并将其差值记录下来拟合成误差曲线。实验过程中,首先进行对极内误差测试,对每个对极(20°)采集 200 个测量值并拟合成误差曲线,实验结果如图 5(a)所示:误差曲线的峰峰值

为 $-5.8''$ 和 $5.6''$ 。对测量误差曲线进行了傅里叶级数变换,可以得出测量误差的主要误差频次为一次和二次。然后,在 360° 整周测量范围内进行测量,采集 3600 个测量值,得到整个周期的误差曲线如图 5(b)所示,测量误差约 $\pm 8.9''$ 。以上实验现象验证了用时间和空间正交调制的方式构造运动光场,实现角位移测量的可行性,但该方法存在明显的周期性误差。

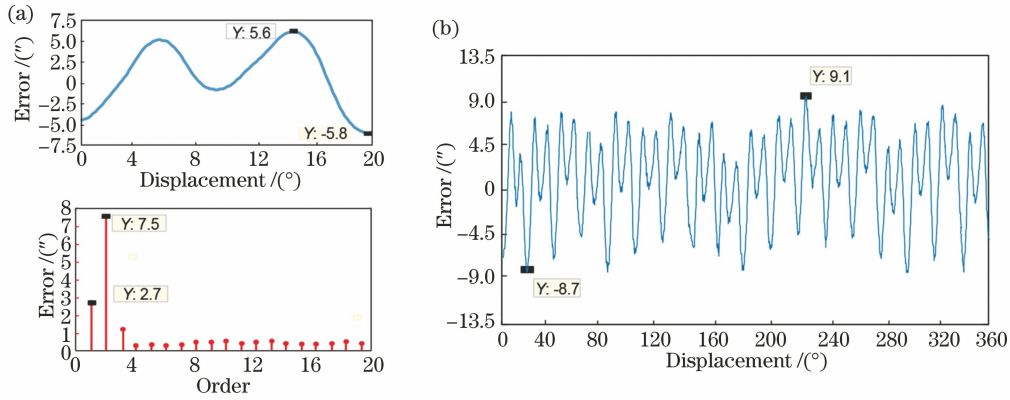


图5 实验结果。(a)对级内误差曲线与谐波成分;(b)整周期误差曲线

Fig. 5 Experimental results. (a) Intra-level measurement error and harmonic component; (b) whole circle error curve

3.3 实验分析

3.3.1 误差分析

以上实验结果表明,采用旋转光场构造电行波信号实现角位移测量的原理是可行的,但测量结果中呈现出明显的一次、二次误差成分。从原理上来讲,所述电行波信号是由4路时间与空间调制的光信号合成,因此测量误差主要来源于光强的时间调制和空间调制。由于时间调制可以通过电路进行处理,其调制精度可以得到一定的保证,因此,本研究主要考虑空间调制引起的误差。由于空间调制是由动、定盘的相对转动来实现的,所以动、定盘的制造精度与对极数对空间调制精度有直接影响。

动、定盘的制造精度会对栅距附加一个误差,即实际栅距与理想栅距位置之差,称之为圆分度误差,用 $\delta(\alpha)$ 表示,每当动盘转过一个标准栅距时,每个实际栅距可以表示为

$$\alpha = f(\alpha) + \delta(\alpha), \quad (7)$$

式中 α 为实际栅距值, $f(\alpha)$ 为标准栅距值, $\delta(\alpha)$ 为圆分度误差。当定盘上整周等间隔分布 x 个透光栅面时,如图6(a)所示,其圆周分度误差的总和为

$$\sum_{i=1}^x \delta_i(\alpha) = \left(\sum_{i=1}^x \theta_i + \sum_{i=1}^x \alpha_i \right) - 360^\circ, \quad (8)$$

式中 $\sum_{i=1}^x \theta_i$ 为透光栅面对应的圆心角总和,由于开始刻线(0°)与最末刻线(360°)总是重合的,故

$$\sum_{i=1}^x \theta_i + \sum_{i=1}^x \alpha_i = 360^\circ, \quad (9)$$

则有

$$\sum_{i=1}^x \delta_i(\alpha) = 0. \quad (10)$$

由(10)式可知,定盘透光栅面整周等间隔分布时圆周分度误差的总和为零。保持栅面大小不变,

对应圆心角为 θ ,非整周排布时的栅面分布图如图6(b)所示,其栅面有 y ($y < x$)个,参与空间调制的总角度为 $360^\circ - \beta$,由(8)式可知,圆周分度误差的总和为

$$\sum_{i=1}^y \delta_i(\alpha) = \left(\sum_{i=1}^y \theta_i + \sum_{i=1}^y \alpha_i \right) - (360^\circ - \beta). \quad (11)$$

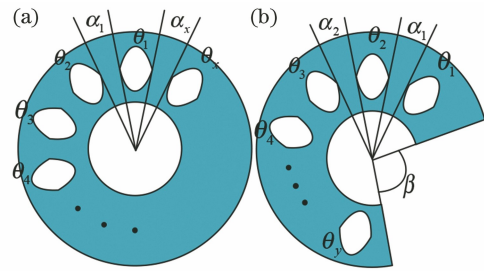


图6 栅面排布方式。(a)整周均匀排布;
(b)非整周均匀排布

Fig. 6 Grid layout mode. (a) Whole circle uniform layout; (b) non-circular uniform layout

由以上分析可知,非整周分布时始末刻线不重合,导致空间调制的总角度 $360^\circ - \beta$ 与 $\sum_{i=1}^y \theta_i + \sum_{i=1}^y \alpha_i$ 不相等,传感器累计分度误差无法消除,这将给测量结果带来累积误差。所以定盘栅面采用整周均匀分布可以有效地避免动、定盘制造带来的误差。当动、定盘发生相对转动时,任意位置的定盘栅面的测量误差 $\Delta\theta_m$ 在 360° 整周测量具有周期性,因此可以将其分成各阶谐波误差之和,即

$$\Delta\theta_m = \sum_{j=1}^{\infty} e_j \sin j\theta_m, \quad (12)$$

式中 j 为谐波阶次, e_j 为第 j 阶谐波幅值, m 为栅面位置, θ_m 为 m 栅面位置相对于零点位置的转角,则 n 个对极谐波误差和的平均数为

$$\frac{\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 + \dots + \Delta\theta_m + \dots + \Delta\theta_n}{n} =$$

$$\frac{1}{n} \left\{ \sum_{j=1}^{\infty} e_j \sin j\theta + \sum_{j=1}^{\infty} e_j \sin \left(j\theta + j \frac{\pi}{n} \right) + \dots + \sum_{j=1}^{\infty} e_j \sin \left[j\theta + j(n-1) \frac{\pi}{n} \right] \right\} =$$

$$\frac{e_j}{n} \sum_{j=1}^{\infty} \left\{ \sin j\theta \cdot \left[1 + \cos \left(j \cdot \frac{\pi}{n} \right) + \cos \left(2j \cdot \frac{\pi}{n} \right) + \dots + \cos \left[(n-1)j \cdot \frac{\pi}{n} \right] \right] + \right.$$

$$\left. \cos j\theta \cdot \left[\sin \left(j \cdot \frac{\pi}{n} \right) + \cos \left(2j \cdot \frac{\pi}{n} \right) + \dots + \sin \left[(n-1)j \cdot \frac{\pi}{n} \right] \right] \right\} =$$

$$\frac{e_j}{n} \sum_{j=1}^{\infty} \left[\sin j\theta \cdot \frac{\sin j\pi}{\sin(j\pi/n)} \cdot \cos \frac{(n-1)j\pi}{2n} + \cos j\theta \cdot \frac{\sin j\pi}{\sin(j\pi/n)} \cdot \sin \frac{(n-1)j\pi}{2n} \right] =$$

$$\frac{e_j}{n} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\sin j\pi}{\sin(j\pi/n)} \cdot \sin \left[j\theta + \frac{(n-1)j\pi}{2n} \right]. \quad (13)$$

当 $j = cn$ (c 为正整数) 时,

$$\frac{e_j}{n} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\sin j\pi}{\sin(j\pi/n)} \cdot \sin \left[j\theta + \frac{(n-1)j\pi}{2n} \right] \approx e_j, \quad (14)$$

当 $j \neq cn$ 时,

$$\frac{e_j}{n} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\sin j\pi}{\sin(j\pi/n)} \cdot \sin \left[j\theta + \frac{(n-1)j\pi}{2n} \right] = 0. \quad (15)$$

由(13)~(15)式分析可知,当动盘整周均匀分布 n 个对极时,能够去除对极数整数倍 cn 以外的各

次谐波误差,因此,采用更多的对极可进一步对其误差进行补偿。

现设计两种不同对极栅面,图7为整周均匀分布的18对极与90对极动、定盘模型图,接收板光电电池位置不变。90对极动盘是将18对极中 10° 明暗交替的扇形栅面替换为 2° 明暗交替的扇形栅面,定盘是把18对极中每 10° 栅面替换为3个间隔 2° 的栅面,且设连续的3个栅面为一组,其中每两组栅面之间的角度为 5° 。

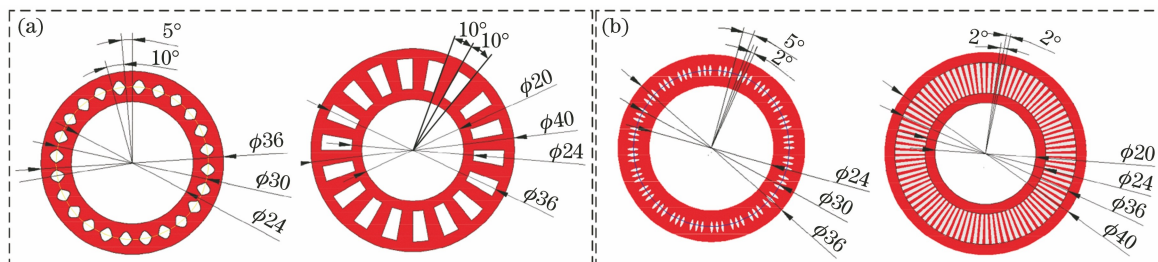


图7 动盘和定盘栅面模型图。(a) 18对极;(b) 90对极

Fig. 7 Models of grid surface of moving disk and fixing disk. (a) 18 pairs; (b) 90 pairs

利用 Tracepro 对图 1(a) 结构模型与图 7 栅面模型图进行仿真分析,18 对极取 $n = 18$, 栅距 $\theta = 10^\circ$, 90 对极取 $n = 90$, 栅距 $\theta = 2^\circ$, 再用 Matlab 对仿真数据进行处理。获得 4 组光电信号、行波信号和行波包络误差频次,如图 8 所示。

由图 8 可知,对比 90 对极与 18 对极行波信号发现,当对极数增加时,调制耦合后的行波信号质量更加平缓,这说明透过 4 组栅面的光通量的正弦性较好,且 4 组栅面的光通量变化通过傅里叶变化后的一次、二次谐波误差有所减小,因此增加对极数可以减小误差。

3.3.2 对比实验

图 9(a) 为 90 对极动、定盘栅面实物图,采用与

上述 18 对极验证实验相同的方法进行实验,同样在对极内采取 200 个点,其实验误差曲线如图 9(b) 所示。

观察图 9 可知,当对极数由 18 增加到 90 时,一个对极内测量误差由原来的 $\pm 5.7''$ 降低为 $\pm 3.9''$,对极数增加时二次谐波误差明显减小。剩余误差主要由光场分布均匀性和准直性引起,由于篇幅有限,在此不做进一步详细分析。接下来,在相同条件下对 90 对极栅面进行 $0^\circ \sim 360^\circ$ 整周测量,采集 3600 个测量值,得到整圆周的误差曲线如图 10 所示。

如图 10(a) 所示,90 对极整周排布时, 360° 测量范围的测量误差幅值为 $\pm 5.0''$,与图 5(b) 的整周期

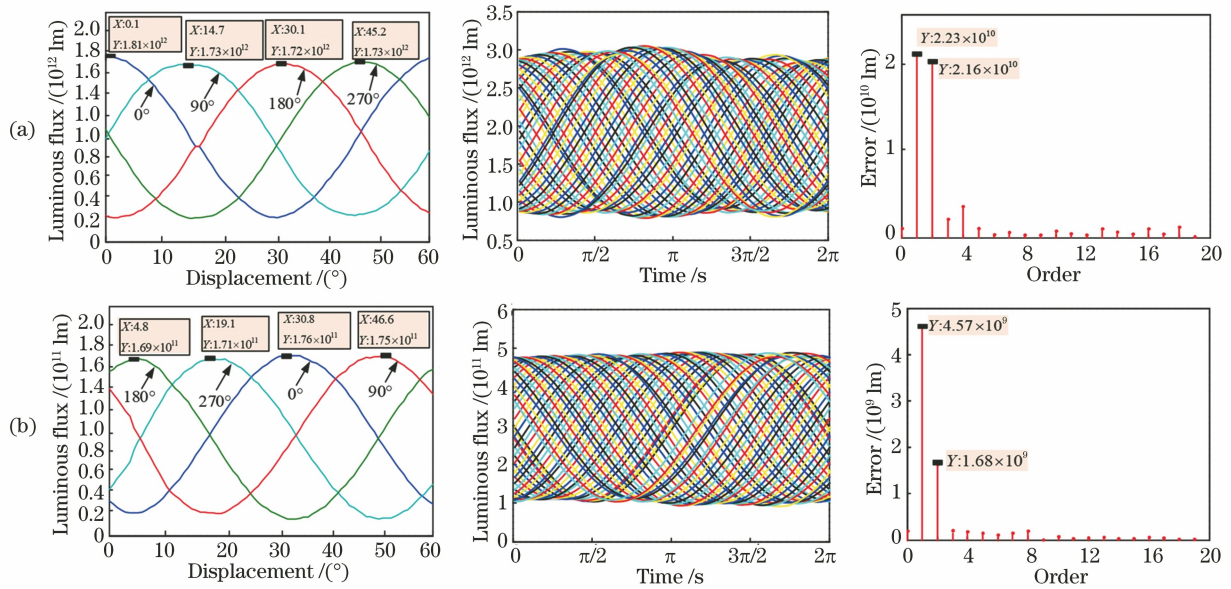


图 8 光电信号、行波信号与误差频次图。(a) 18 对极;(b) 90 对极

Fig. 8 Photoelectric signals, traveling wave signals and error frequency figures. (a) 18 pairs; (b) 90 pairs

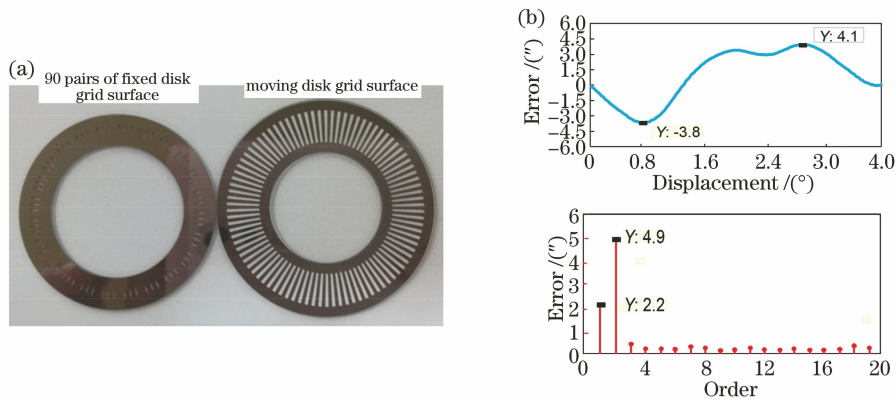


图 9 90 对极栅面实物图与实验结果。(a)实物图;(b)对极内误差曲线与谐波成分

Fig. 9 Physical drawing of 90 pairs of grid surfaces and experimental results. (a) Physical drawing; (b) intra-level measurement error and harmonic component

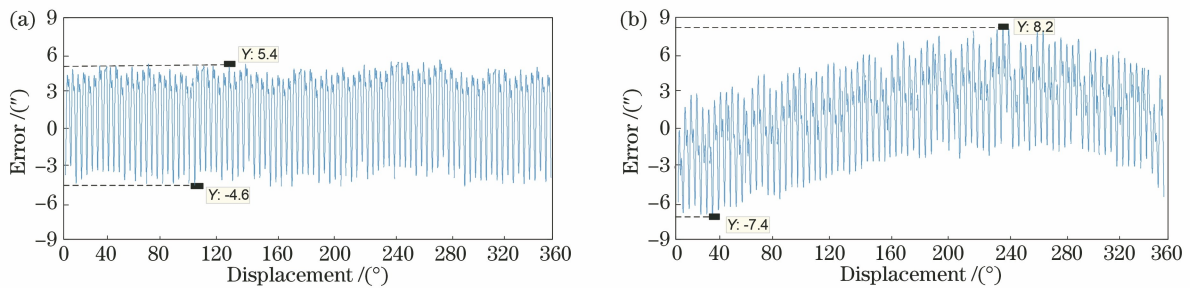


图 10 整周期误差曲线。(a)整周排布;(b)非整周排布

Fig. 10 Whole period error curves. (a) Whole circle uniform layout; (b) non-circular uniform layout

误差进行对比发现,增加整周平均的对极数,一方面可以减小对极内谐波误差,另一方面可以增强整周平均效应,减小整周误差值。再将定盘透光栅面遮住 $3/4$ 进行实验,此时定盘为非整周排布,同样,动

盘转动 360° 采集 3600 个测量值,得到误差曲线如图 10(b)所示,这种非整周排布结构在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 整周测量范围内的测量误差约 $\pm 7.8''$ 。对比图 10(a)和图 10(b)可知,总的测量误差由对极内的周期性

误差即图中的高频误差成分,以及对极之间的长周期误差即图中的低频误差成分两部分组成,而低频的长周期误差通常由传感器制造或安装误差引起。结合上述理论分析和实验结果可知,整周封闭测量因为能实现 360° 平均,可以更有效地平均由加工或安装带来的误差。剩余误差主要为周期性误差成分,可采用谐波误差修正方法进一步减小或消除。

表1 三种不同角位移传感器测量误差对比

Table 1 Comparison of measuring errors of three different angular displacement measurement devices

Angular displacement measurement method	Based on rotating optical field		Based on circular grating		Based on rotary transformer	
	18	90	$l=18000$	$l=36000$	16	32
Accuracy /($''$)	± 8.9	± 5.0	± 2.69	± 1.0	± 25	± 30

通过对比发现本文提出的旋转光场角位移测量方法,采用与传统旋转变压器类似的对极数,其测量误差比传统旋转变压器低2倍以上,相比每周上万线的光栅而言,制造难度大幅降低,但随着对极数增加、光场分布精度提高,测量误差将有较大的降低空间。

4 结 论

提出一种基于运动光场实现高精度角位移测量的新方法。该方法结合了旋转变压器与光栅制造的优点,采用圆周封闭测量原理,实现了以低精度制造工艺获取高精度测量结果的目标。实验结果表明,采用90对极,圆心角为 2° 的透光面,当透光面整周排布时,整周(360°)内实现了 $\pm 5.0''$ 测量误差,对极内实现了 $\pm 3.9''$ 测量误差,获得了比类似对极数传统旋转变压器高2倍以上的测量精度,验证了采用低精度制造工艺实现高精度测量的可行性。同时,本文研制的传感器,在制造工艺和误差修正上还将有非常大的提升空间,下阶段将重点针对光场分布和透光面优化做进一步的研究。因此,所提的方法可以基于国内较低的光刻水平,为高精度刻线技术提供一种解决方案,故具有较好的理论意义和实用价值。

参 考 文 献

- [1] Yu H, Wan Q H, Sun Y, et al. A high precision image angular displacement measurement device with self-adaptive installation[J]. Chinese Optics, 2020, 13(3): 510-516.
于海, 万秋华, 孙莹, 等. 一种自适应安装的高精度图像式角位移测量装置[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 510-516.
- [2] Xu B, Lei B, Fan C C, et al. Internal error compensation method based on high-frequency angular displacement for high-resolution optical satellite images[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0928002.
许斌, 雷斌, 范城城, 等. 基于高频角位移的高分辨率光学卫星影像内部误差补偿方法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0928002.
- [3] Zhai Z S, Cheng Z, Zhang Y H, et al. Optical analysis of moiré fringes of concentric-circle gratings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 070501.
翟中生, 程壮, 张艳红, 等. 同心圆光栅莫尔条纹的光学分析[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 070501.
- [4] Zhang W Y, Zhu H R, Li M X, et al. Real-time *in situ* calibration for angle measuring sensor based on autocollimator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0404005.
张文颖, 朱浩然, 李美莹, 等. 基于自准直仪的测角传感器实时在位校准方法[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0404005.
- [5] Zhu G, Pu Z W, Fu M, et al. Measurement method for micro-controlled phase-shifting precise linear displacement of single-alternating light field[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0212001.
朱革, 蒲治伟, 付敏, 等. 单交变光场的微控移相精密直线位移测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0212001.
- [6] 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.
- [7] Zhu J P, Hu S, Yu J S, et al. Theoretical analysis of photolithography alignment and calibration method

- based on moiré fringes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0607001.
- 朱江平, 胡松, 于军胜, 等. 基于叠栅条纹的光刻对准理论分析及标定方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0607001.
- [8] Zhu F, Wu Y M, Liu C C. Eliminating influence of grating encoder's eccentricity and vibration to moiré fringes signal by four reading heads[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0412008.
- 朱帆, 吴易明, 刘长春. 四读头法消除码盘偏心 and 振动对叠栅条纹相位测量的影响[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0412008.
- [9] Zhang W Y, Lao D B, Zhou W H, et al. Self-calibration method based on multi-head reading layout [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0812001.
- 张文颖, 劳达宝, 周维虎, 等. 基于多头读数布局的圆光栅自校准方法研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0812001.
- [10] Feng C P, Zhu L Q, Pan Z K, et al. New self-calibration method of circular grating eccentric parameters [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(11): 2459-2464.
- 冯超鹏, 祝连庆, 潘志康, 等. 一种新的圆光栅偏心参数自标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(11): 2459-2464.
- [11] Zhang W Y, Lao D B, Zhou W H, et al. Suppression method for angle measurement error of mixing-layout multiple reading head [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(9): 2339-2346.
- 张文颖, 劳达宝, 周维虎, 等. 多读数头混合布局测角误差抑制方法[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(9): 2339-2346.
- [12] Ren X, Du S P, Chen K, et al. Error source and spectrum analysis for angle measurement of circular grating encoder [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(17): 171205.
- 任曦, 杜升平, 陈科, 等. 圆光栅编码器测角误差源及频谱分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(17): 171205.
- [13] Zhang J J, Zhang Z Y, Liu J C. Novel method of calibrating the angle-measurement error of resolver [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(1): 149-153.
- 张京娟, 张仲毅, 刘俊成. 一种新型的旋转变压器测角误差标定技术[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(1): 149-153.
- [14] Shang J, Wang H, Liu C J, et al. Design and magnetic principle analysis of one kind of dual channels total magnetic coarse-exact reluctance resolver [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(13): 3938-3944.
- 尚静, 王昊, 刘承军, 等. 粗精耦合共磁路磁阻式旋转变压器的电磁原理与设计研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(13): 3938-3944.
- [15] Bahari M, Davoodi A, Saneie H, et al. A new variable reluctance PM-resolver [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(1): 135-142.
- [16] Jiao Y, Dong Z G, Ding Y, et al. Optimal arrangements of scanning heads for self-calibration of angle encoders [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(10): 105013.
- [17] Hajmohammadi S, Alipour-Sarabi R, Nasiri-Gheidari Z, et al. Influence of different installation configurations on the position error of a multturn wound-rotor resolver [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(11): 5785-5792.
- [18] Fu M, Zhang S Y, Zhu G, et al. Study of a high-precision displacement sensor based on a configured moving light field with uniform scanning [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(7): 075105.
- [19] 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.
- [20] Chen Z R, Zhao J, Tian W, et al. Measurement error analysis and system design for the excitation signals of high-precision magnetic-field time-grating sensors [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2018, 31(10): 1527-1534.
- 陈自然, 赵建, 田伟, 等. 高精度磁场式时栅传感器激励信号对测量误差的影响分析及系统设计[J]. *传感技术学报*, 2018, 31(10): 1527-1534.