

文章编号 1004-924X(2024)22-3323-13

## 基于光场式时栅空间调制函数特征分析的 辅助装配调校系统研究

金重宇<sup>1,2,3</sup>, 付敏<sup>1,2,3</sup>, 邓晶月<sup>1,2</sup>, 苟李<sup>1,2\*</sup>, 冉茂明<sup>1,2</sup>

(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, 重庆巴南 401320;

2. 时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室, 重庆巴南 401320;

3. 浙江大学极端光学技术与仪器全国重点实验室, 浙江杭州 310058)

**摘要:** 位移传感器的装配精确性直接决定了传感器的测量精度, 而辅助调校系统是实现精确装配的关键。本文基于光场式时栅结构特征与测量原理, 分析其输出信号的空间调制函数与装配的关系, 提出了一种以传感器输出测量信号为安装指标的辅助装配调校系统。根据光场式时栅传感器测量原理, 结合实际装配结构, 研究了动定尺安装姿态对测量误差的影响, 确定以滚转角校准为安装姿态校准的主要目标; 建立滚转角与测量信号相关的数学模型, 基于该函数模型设计利用原始测量信号获得校准指标的辅助装配调校系统。实验表明: 该系统能够直观地给出滚转角调校参数, 帮助用户装配校准, 能够将光场时栅传感器的原始误差降低至  $\pm 1.3 \mu\text{m}$ , 具备环节简单、易于集成的优点。

**关键词:** 时栅; 光栅; 装配误差; 滚转角

中图分类号: TP205 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243222.3323

## Research on an auxiliary assembly and calibration system based on the analysis of the spatial modulation function features of the light field time-grid

JIN Chongyu<sup>1,2</sup>, FU Min<sup>1,2,3</sup>, DENG Jingyue<sup>1,2</sup>, GOU Li<sup>1,2\*</sup>, RAN Maoming<sup>1,2</sup>

(1. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Banan 401320, China;

2. Key Laboratory of Time-gate Sensing and Advanced Detection Technology of Chongqing, Banan 401320, China;

3. National Key Laboratory of Optical Technology and Instruments, Zhejiang University Group, Hangzhou 310058, China)

\* Corresponding author, E-mail: gouli2019@cqut.edu.cn

**Abstract:** The assembly precision of the displacement sensor directly determines the measurement accuracy, and an auxiliary calibration system is crucial for achieving precise assembly. This study analyzed the

收稿日期: 2024-08-22; 修订日期: 2024-11-08.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 52375526, No. 51875070); 重庆市教委重大项目 (No. KJZD-M202201103); 重庆市科委自然科学基金面上项目 (No. CSTB2022NSCQ-MSX0950); 重庆市自然科学基金项目 (No. cstc2021jcyj-msxmX0379)

spatial modulation function of the output signal and the assembly relationship based on the structural features and measurement principles of light field time-grid sensors. It proposed an auxiliary assembly calibration system that utilizes the measured signal of the sensor as an installation index. By considering the measurement principle of light field time-grid sensors and studying their influence on installation error, particularly in relation to roll angle calibration, a mathematical model related to the measurement signal was established. Subsequently, an auxiliary assembly calibration system was designed based on this model using original measurement signals to obtain calibration indicators. Experimental results demonstrate that this system provides intuitive roll angle calibration parameters, enabling users to calibrate effectively and reduce original errors in light field time-grid sensors to within  $\pm 1.3 \mu\text{m}$  with simple linkage and easy integration.

**Key words:** time gate; grating; assembly error; roll angle

## 1 引言

精密位移测量技术作为先进制造的先导,为现代制造业的精密化、集成化、智能化发展提供了重要支撑<sup>[1-2]</sup>。在众多位移测量方法中,光栅传感器因其具有精度高、不易受到环境因素的干扰等特点,在精密数控加工、测量等领域有广泛的应用<sup>[3]</sup>。为保证光栅测量的准确性与可靠性,国内外研究机构对栅尺装配姿态检测与装配矫正进行了大量的研究,现已从传统的手工检测与调整,进入了电子信息检测与自动调整阶段。对于一个六维空间的一维测量传感器而言,在装配上需要准确地检测 6 个自由度的偏转情况,给出具体调整的信息,并用装配结构约束除被测一维外的其余 5 个自由度,以保证一维测量的精度。因传感器测头空间有限,难以用各种精密的检测装置对各个自由度的偏差进行直接测量,现有各种辅助装配测试与调校系统,更多的是采用固定约束几个自由度并用辅助检测的方法,实现一维方向的可靠测量。总体而言,国外领先的传感器制造企业已将装配检测与调整做成一体化系统,并朝着在线实时状态监测的方向发展,而国内关于装配自动检测与校正依旧处于起步阶段,尚未形成独立系统为传感器测量提供支撑。

国外 iC-Haus, Renishaw, 海德汉<sup>[4-8]</sup>等业界知名企业,拥有较为成熟的产品化信号检测系统与操作平台,通过对当前信号的分析得到相应数据,辅助指导栅尺的安装。如 Renishaw 光栅搭配的 ADT 诊断工具,能够自适应检测其生产的不同型号的光栅,通过对增量信号的强度检测来指导其安装与校准。该系统是以实现测量所需信

号的要求作为安装校准指标,更易满足测量需求,提高测量精度。

而国内众多高校科研院所对栅尺安装的自动检测与矫正多数是利用测量系统外部的检测设备,对栅尺的安装姿态进行检测调整。刘帅等利用 CCD 镜头观察圆光栅与安装标记线的距离,轻敲边缘缓慢调整,从而实现圆光栅的安装校准<sup>[9]</sup>, YU H 等提出利用一种垂直图像传感器,获取光栅非垂直误差参数,从而校准光栅与测头之间的夹角<sup>[10]</sup>; WANG S T 等通过利用小型化 QFP 棱镜的自准直功能搭载于三自由度测量平台上,以减小安装导致光路变化带来的误差<sup>[11]</sup>。此类辅助校准系统有效地提高了安装精度,减小了安装导致的测量误差,但是需要在传感器的测量环节外部增加检测调校环节,每次校准都需要将辅助校准系统重新安装,且外部仪器装配也易引入新的安装误差。

误差补偿技术是另外一种降低安装误差的有效手段。王笑一等提出对径双测头数据搭配数学模型自标定的方式获取中心偏量,通过计算机补偿从而减小误差<sup>[12]</sup>;张润优化读数头的安装位置,利用多个读数头测量,抑制由于圆光栅偏心导致的多次谐波误差<sup>[13]</sup>;糜小涛利用 17 面棱体,将其与圆光栅安装在转轴上旋转一周,利用自准直仪重复测量,从而获得圆光栅的偏心误差规律,再进行误差修正<sup>[14]</sup>。李孕丽等根据安装误差的谐波特性,利用谐波补偿的方法降低误差<sup>[15]</sup>。对于圆光栅而言,还可以利用其本身测头结构,采取多测头法对安装误差进行补偿<sup>[16-17]</sup>。利用计算机技术的误差修正法拥有较高的集成度,但需要获取较为准确的误差参数才能实现有

效的误差补偿,不同使用场景下的传感器的安装结构与安装环境有所不同,补偿参数也会有所差异,需要进行多次的测量分析计算才能获得,极大限制了生产效率。

上述两种方法都是实验室环境下对栅尺姿态辅助校准的有效手段,在工业应用过程中,存在难以集成,操作复杂的问题,因此相关企业选择利用测量信号本身随装配姿态变换的特征,作为其栅尺装配的调校基准。刘瑞星等设计发明了一种基于空间光路的自校准光栅定位方法,通过检测双路光栅能否有效输出信号,从而判断光栅是否安装到空间光路中,实现自校准的功能<sup>[18]</sup>。重庆建设工业集团张平等设计通过检测圆光栅双测头信号强度,以指示灯的形式指导用户调整测头安装<sup>[19]</sup>。曹海霞等以观察中阶梯光栅衍射出的各衍射级次的光斑在校准装置上的位置,调节校准位置,使得光斑重合,实现姿态的校准<sup>[20]</sup>。此类方法对比前者,其调整精度较为有限,但是方法简单,指明明确通俗,易于操作。

因此,利用传感器输出信号的变化特征作为对安装姿态检测调校的基准,是传感器调校系统的发展趋势。本文基于光场式时栅直线位移传感器的结构特征与数学模型,设计了一种通过对传感器输出的测量信号进行检测并分析处理,获得传感器装配调校参数的辅助安装校准系统,该系统无需增加外部设备,易于集成。

## 2 光场式时栅结构及装配结构误差分析

### 2.1 光场式时栅装配结构与测量原理

文献[21]提出了一种利用光强时间和空间调制的光场式时栅测量方法,根据时栅测量原理,单光场时栅位移传感器需要对随时间交变的单光源进行时间与空间调制,构造一个光强随着时间变化的运动坐标系。传感器装配结构如图1所示,主要由一个光源,一对动尺和定尺,以及一个光电接收器件组成,其中定尺由装配工件固定,紧贴光电接收器件,假设动尺相对定尺沿X方向运动为正向。理想状态中,动尺与定尺应相互平行,栅面周期严格正对,实际工作中,动尺与定尺存在绕不同坐标轴偏转的安装误差,现定义

绕空间x轴的角度偏转称为俯仰角,绕空间z轴的角度偏转称为偏摆角,绕空间y轴的角度偏转称为滚转角,如图1左图所示。

因光场式时栅是利用时间和空间对光强进行正交调制,从而实现将位移测量转换为被测信号的时间先后测量<sup>[21]</sup>,任何引起最终光强调制变化的因素,都有可能对最终测量结果带来误差。其中,光强的时间调制可以用数字信号对光源激励实现光强的精确控制,因此,对光强调制影响最大的因素为装配结构引起的空间调制误差。理想情况下,光强空间调制的4路信号,在空间上呈现互相正交的关系,如图1右图所示,0°栅尺透光面积为正向负向1/2正弦栅面,180°栅尺透光面积为正向1/2正弦栅面,90°栅尺透光面积为最大透光面积,270°栅尺为最小透光面积。当定尺和动尺发生相对位移时,0°栅尺透光面积呈现正向正弦规律变化,180°栅尺透光面积呈现负向正弦规律变化,90°栅尺透光面积与270°栅尺透光面积分别呈现正向和负向余弦规律变化,此变化规律的函数表达式即为空间调制函数。若传感器没有装配误差,4组透光面的光强信号将呈现理想的正弦与余弦规律变化,结合光强时间调制,利用电路处理可生成两路幅度随位移变化的信号,即驻波信号,最终可以获得幅度不变相位随位移变化的信号,此信号即为能够理想的反映被测对象运动的电行波信号,测量此电行波信号与0°相位角的参考信号过零点时间的间隔,即可实现被测对象变化位移的测量,测量原理如图2所示,其中 $\omega$ 为时间调制频率, $A$ 为光源驱动参数, $W$ 为正弦栅尺半周期, $H$ 为光电转化参数。

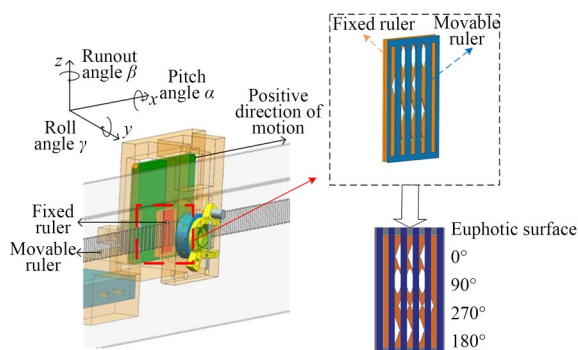


图1 单光场时栅直线位移传感器结构图

Fig. 1 Structural diagram of grid linear displacement sensor in single light field

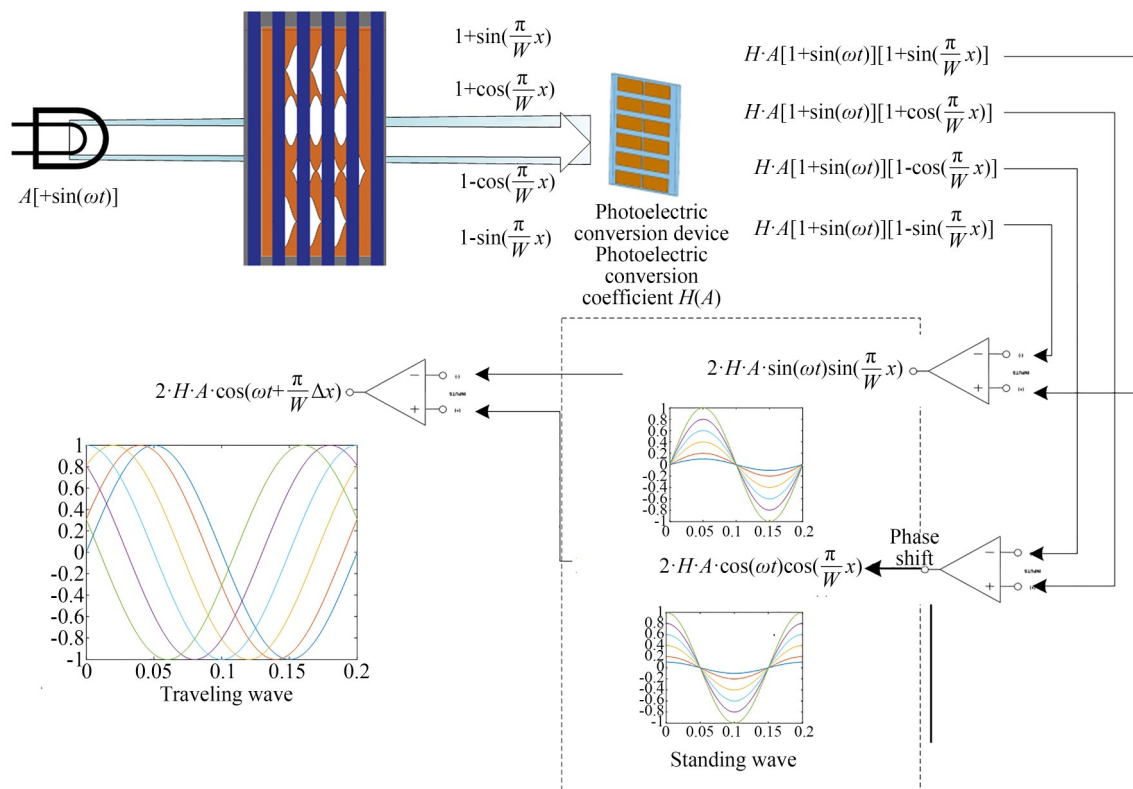


图 2 光场式时栅测量原理

Fig. 2 Principle of light field time grid measurement

2.2 装配结构引入测量误差分析

实际工作过程中,由于动尺与定尺存在装配问题,导致光强空间调制存在误差,从而引起相应的测量误差。受到图 1 所示的装配结构限制,定尺、光电池与光源的相对姿态关系始终保持不变,光电池实际接收到的光斑变化主要由于动尺的姿态变化导致,又由于测头工装的半包围设计,实际动尺在三个角度上的偏转是有限的,根据实际尺寸计算可得,动尺在偏摆角与俯仰角上所允许的最大误差为  $\pm 3^\circ$ ,滚转角所允许的最大误差为  $\pm 5^\circ$ 。基于此,分析因装配问题引起的各种误差。

如图 3 所示,当动尺与定尺存在三种不同角度的装配误差时,其透光面的变化规律也不相同,由于定尺与光电池光源固定,定尺的透光部分不变,实际光电池接收光斑的变化主要为动尺透光面的变化,其中  $\alpha$  表示俯仰角误差,  $\beta$  表示偏摆角误差,  $\gamma$  表示滚转角误差。

当只存在俯仰角的安装误差时,动尺上下两端一端靠近定尺一端远离定尺,透过动尺光斑的

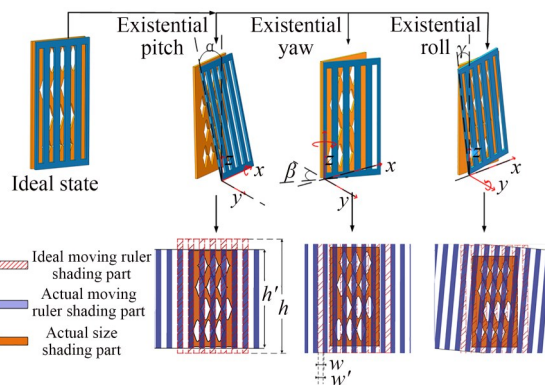


图 3 三种安装姿态引起的透光面变化情况 (a) 三种安装误差姿态示意; (b) 装配误差导致的面积变化示意图

Fig. 3 Variation of transparent surface caused by three installation postures (a) schematic of three installation error postures; (b) schematic diagram of area variation caused by assembly error

高度发生变化,俯仰角度越大,动尺光斑的高度越矮,基本变化关系满足:

$$h' = h \cdot \cos \alpha. \tag{1}$$

当  $h'$  小于定尺高度时,光斑会由于动尺透光光斑高度过短发生截断现象,根据动尺栅面的高度尺寸计算可得,当动尺偏摆达到  $73^\circ$  时才会发生截断现象,否则光斑形状不变,在测头工装的限制下,俯仰角的允许角度远小于此要求,因此可得出结论:俯仰角的装配误差对光电池实际接收的光斑形状没有影响,光强空间调制与理想状态一致。

当只存在偏摆角的安装误差时,在所允许的偏摆角度范围内,实际透过动尺的光斑宽度发生

$$\left\{ \begin{array}{l} U_0 - 180 = H \cdot A (1 - \sin \omega t) \cdot [2B \cdot F_1(\gamma) \cdot f(\beta)] \cdot W \left( \frac{4}{\pi} \sin \frac{\pi}{W} x + \theta(\gamma) + \lambda(\beta) \right) \\ U_{90} - 270 = H \cdot A (1 - \cos \omega t) \cdot [2B \cdot F_2(\gamma) \cdot f(\beta)] \cdot W \left( \frac{4}{\pi} \cos \frac{\pi}{W} x + \theta(\gamma) + \lambda(\beta) \right) \\ U_{\Delta x} = 2 \cdot H \cdot A \cdot [B \cdot f(\beta) \cdot \sqrt{F_1(\gamma)^2 + F_2(\gamma)^2}] \cdot W \cos(\omega t + \lambda(\beta) + \theta(\gamma) + \arctan \frac{F_1(\gamma) \tan \frac{\pi}{W} \Delta x}{F_2(\gamma)}) \\ f(\beta) = \sqrt{[1 + \cos(W \cdot \cos \beta - W)]^2 + \sin(W \cdot \cos \beta - W)^2} \\ \lambda(\beta) = \arctan \left( \frac{\sin(W \cdot \cos \beta - W)}{1 + \cos(W \cdot \cos \beta - W)} \right) \end{array} \right. \quad (3)$$

其中:  $F$  表示由于滚转角带来的驻波幅度变化,  $\theta$  表示滚转角带来的驻波相位变化,  $\beta \in [-3^\circ, 3^\circ]$ ;  $\gamma \in [-5^\circ, 5^\circ]$ 。

基于时栅测量原理,此时空间位移已经转变为测行波信号时间上的相位,测得位移前后的相位差即可求得实际位移值,在受工装结构限定的范围内,偏摆角对于行波表达式中与位移  $\Delta x$  相关的相位部分线性关系没有影响,只对行波的幅度有影响;当存在滚转角时,在影响行波幅度的同时改变行波相位与位移  $\Delta x$  之间的线性关系。针对上述行波表达式  $U_{\Delta x}$ ,令  $\alpha, \beta, \gamma$  三个自变量中任意两个为 0,另外一个自变量为一非 0 常数,即可表示只存在其中一个安装角度误差时的行波状况,对三种情况下的行波表达式进行位移解算,并与理想状态下的位移测量误差测得值做差,即可得到不同安装姿态误差下的位移误差。在实际的电路应用中,鉴相所用的方波边沿是将行波信号与信号地通过比较器获取,其比相结果也受到行波信号幅度与噪声的影响,从而影响测量误差,可在仿真过程中引入高斯噪声模拟该影响。

由于测头工装对装配关系的限制,因此依据

变化,偏摆角度越大,动尺光斑宽度越窄,基本变化关系满足:

$$w' = w \cdot \cos \beta. \quad (2)$$

当只存在滚转角的安装误差时,在所允许的滚转范围内,透过动尺与定尺的光斑图像发生变化。根据光场式时栅的测量原理,当透光面发生变化时,合成电行波的两路驻波信号表达式也会发生变化,实际结构的安装角度误差对两路驻波信号以及最终电行波信号的影响如式(3)所示:

三种姿态所允许的最大偏差角度,分别均代入仿真,则得到三种姿态下栅尺一个对极内的误差曲线如图 4 所示,理想状态下栅尺一个对极的测量值为 0.2 mm。当只存在俯仰角时,测量误差主要成分为信号噪声影响鉴相效果而引入的随机误差,且随机误差的大小与俯仰角度无关;当只存在偏摆角时,测量误差主要成分为信号噪声引入的随机误差,且随着偏摆角增大,随机误差也随之增大,但误差量级非常小,最大引入误差约为  $\pm 2$  nm,对于测量结果而言影响较小;当只存在滚转角时,测量误差的主要成分为二次谐波误差,且随着滚转角度增大,误差增大,当存在  $4^\circ$  滚转角时可在一个测量对极内引入  $\pm 0.025$  mm,对测量结果影响较大。

三种安装姿态对两路驻波信号的影响以及与测量误差的关联如表 2 所示,可得出结论,在三种空间角度的安装误差中,俯仰角与偏摆角对驻波信号影响较小,滚转角的存 在 则 会 导 致 驻 波 信 号 的 幅 度 不 相 等, 从 而 对 测 量 引 入 二 次 谐 波 误 差, 因 此, 本 文 所 设 计 的 安 装 姿 态 校 准 系 统 主 要 针 对 滚 转 角 进 行 检 测 校 准。

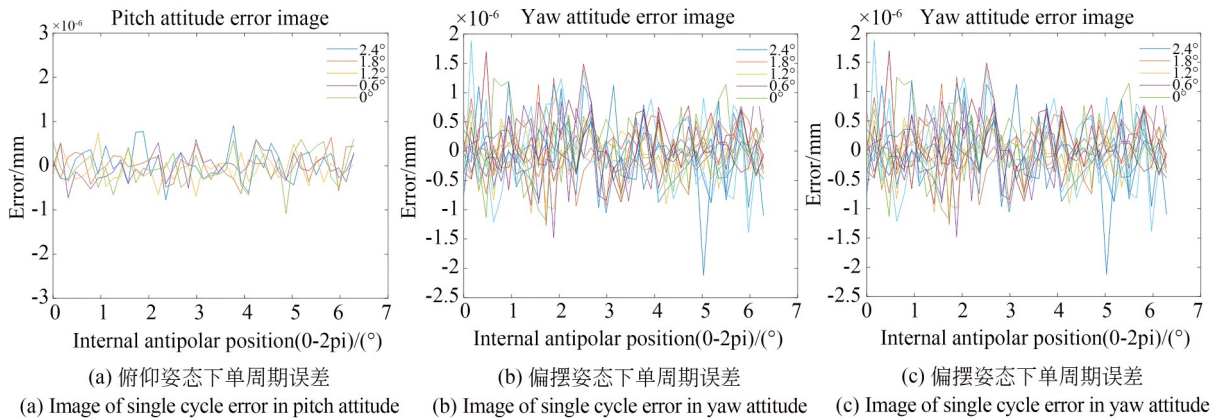


图 4 各种姿态下单周期误差图。

Fig. 4 Order cycle error diagram of various gestures.

表 2 安装姿态误差对驻波与误差关联结果表

Tab. 2 Association results of mounting attitude error and error

Spatial angle	Pitch angle $\alpha$	Yaw angle $\beta$	Roll angle $\gamma$
Standing wave phase relation	Orthogonality	Orthogonality	Orthogonality
Standing wave amplitude relation	Equality	Equality	Vary
Error	Less influence	Less influence	Second harmonic error

### 3 辅助装配校准系统原理与方案设计

#### 3.1 与装配误差相关联的函数模型建立与仿真

由前文可知,当存在滚转角上的安装误差时,光栅副的透光面形状发生变化,因此,通过计算滚转角与透光面积随位移变化函数,即光场式

时栅空间调制函数之间的关系,就能建立与滚转角误差关联的函数模型。但实际求解滚转姿态下的空间调制函数非常困难,本文参考平面几何学求解不规则图形面积时常用的割补转化思想,以存在某种角度大小的滚转角安装误差的光栅透光面为例,如图 5 所示(彩图见期刊电子版)。

当存在滚转角时,实际透光面积  $S$  为图 5

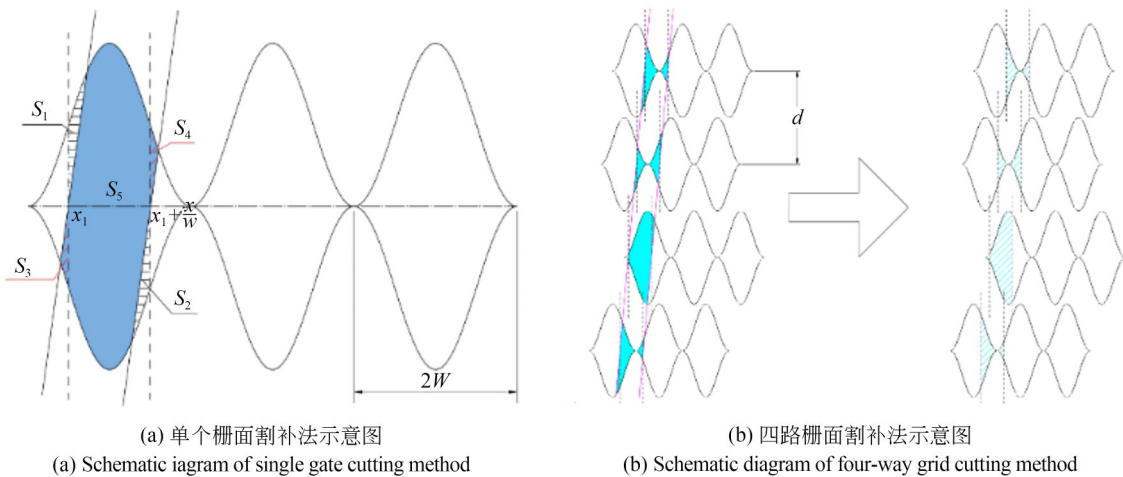


图 5 割补法面积转换示意图。

Fig. 5 Schematic diagram of cut area conversion.

(a)中蓝色区域面积,  $S=S_3+S_4+S_5$ ,以动尺透光部分左边轮廓与定尺正弦透光面的水平轴交点  $x_1$  作一条垂直辅助线,在  $x_1+\pi/W$  处作第二条垂直辅助线,可将透光面积  $S$  等效于  $S_5+S_1+S_2$ ,即  $S\approx S_5+S_1+S_2$ 。则利用割补转

$$\begin{cases} S(x)_n = 2 \int_{x-\frac{d1}{\tan(90^\circ-\gamma)}}^{x-\frac{d1}{\tan(90^\circ-\gamma)}+W} B \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi x}{W} + \frac{\pi}{2}\right) \right] = 2BW \times \left\{ 1 + \frac{2}{\pi} \sin\left[\frac{\pi}{W}x + \theta\right] \right\}, \\ \theta = \angle n + \frac{\pi}{W} \cdot d \cdot \tan(\gamma) \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $\gamma$  表示滚转角误差,  $d$  为各组栅面与  $0^\circ$  栅面的垂直距离,  $\angle n$  为对应栅面理想状态下与  $0^\circ$  栅面空间调制函数存在的相位差。由该数学模型可见,当动定尺安装存在滚转角误差  $\gamma$  时,四路透光面积随位移变化的函数存在相位差,相位差的大小与滚转角度以及正弦栅面垂直距离正相关。

利用计算机软件通过数值描述的方法验证上述公式,构建分布与实际定尺栅面一致的四组正弦函数,用以仿真定尺栅面,自上而下为  $0^\circ$  栅面,  $90^\circ$  栅面,  $270^\circ$  栅面,  $180^\circ$  栅面。相邻两组栅面垂直距离为固定值  $D$ ,  $D=0.45 \text{ mm}$ 。分别构造

化思想等效后的四路透光面积如图 5(b) 所示。

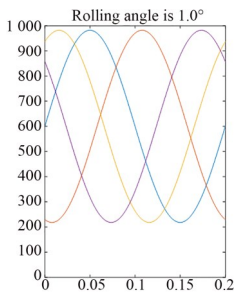
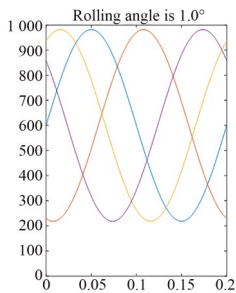
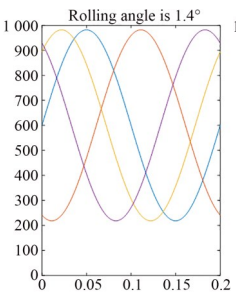
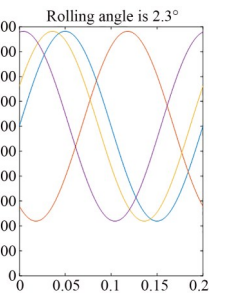
通过割补转化的思想,将等效后的图像与理想状态下的扇面图像做对比,以  $0^\circ$  栅面为基准,其余栅面的空间调制函数满足:

两条与  $x$  轴垂直,间距为正弦的二分之一周期的直线,用以仿真动尺透光面,并且使其旋转在  $0^\circ$  到  $5^\circ$  的范围内随机旋转,对其与所构造的正弦图像围成的部分求解积分,观察每次旋转后四组积分结果的幅度与相位,其结果如表 3 所示。

根据仿真结果可见,滚转角度越大,透光面积随位移变化函数之间的相位差越大,滚转角度固定时,正弦栅面在竖直方向上距离越远,存在相位差越大,与公式(4)建立的数学模型描述一致,结论正确,从而可知,当安装存在滚转角误差时,空间调制函数的相位会发生改变,因此,可以

表 3 数值仿真结果表

Tab. 3 Table of numerical simulation results

Roll angle (clockwise)	$0^\circ$	$0.1^\circ$	$1.4^\circ$	$2.3^\circ$
$\tan(\gamma)$	—	0.001 7	0.024 4	0.040 1
Graphics				
Four sets of amplitude ratios	1:1:1:1	1:1:1:1	1:1:1:1	1:1:1:1
$\varphi_{90^\circ} - \varphi_{0^\circ}$ (Vertical distance $D$ )	$90^\circ$	$91.41^\circ = 90^\circ + 1.41^\circ$	$109.80^\circ = 90^\circ + 19.8^\circ$	$122.53^\circ = 90^\circ + 32.53^\circ$
$\varphi_{270^\circ} - \varphi_{0^\circ}$ (Vertical distance $2D$ )	$-90^\circ$	$-87.17^\circ = -90^\circ + 2.83^\circ$	$-50.40^\circ = -90^\circ + 39.6^\circ$	$-24.93^\circ = -90^\circ + 65.07^\circ$
$\varphi_{180^\circ} - \varphi_{0^\circ}$ (Vertical distance $3D$ )	$180^\circ$	$184.24^\circ = 180^\circ + 4.81^\circ$	$239.40^\circ = 180^\circ + 59.4^\circ$	$277.60^\circ = 180^\circ + 97.6^\circ$

利用所测空间调制函数的相位差,求解得到近似的滚转角结果,近似满足公式:

$$\gamma = f(\theta) \approx \arctan\left(\frac{\theta - \angle n \cdot W}{d} \cdot \frac{\pi}{\pi}\right). \quad (5)$$

以栅距  $W$  为 0.1 mm,  $0^\circ$  栅面与  $90^\circ$  栅面垂直距离为 0.45 mm 的定尺为例,当测得  $0^\circ$  栅面与  $90^\circ$  栅面的空间调制函数相位差为  $109.8^\circ$  时,利用式 (5) 可计算得到存在的滚转角度数约为  $1.4002^\circ$ ,将所测得相位与假设存在  $1.4^\circ$  滚转进行仿真得到的对应栅面空间调制函数相位差值进行比较,所得相位差与列举的相位差接近,证明公式 (5) 的滚转角计算模型较为可靠。

### 3.2 辅助装配校准系统方案设计

由前文可知,空间调制函数相位差与安装存在滚转角的误差满足公式 (5),若需要对滚转角安装误差进行监测校准,需要对多个透光面的空间调制函数实现监测。

经由光电接收区直接输出的信号,即传感器第一级信号,包含了时间调制函数  $f(t)$  以及空间调制函数  $S(x)$ ,令时间调制函数  $f(t)$  为常数,可使第一级信号只反映空间调制函数的特征,即:

$$U_n' = H \cdot f(t') \cdot S(x)_n = H \cdot T \cdot S(x)_n. \quad (6)$$

而对模拟信号的测量,本质上是测模拟信号的电压随时间的变化,若要测得信号随位移的变化,需要将位移  $x$  与时间  $t$  关联。令动尺以匀速  $v$  运动,可得:

$$U_n' = H \cdot T \cdot S(x)_n = H \cdot T \cdot S(vt)_n. \quad (7)$$

因此,只需要将信号采集卡的采样频率与传感器输出信号的频率一致,使得信号采集卡所测得的电压是每个时间周期内的同一个时间节点  $t'$  的信号电压,满足式 (6) 的要求,再利用电机控制动尺以低速作匀速运动,从而满足式 (7),利用上位机对测得数据作拟合,便可实现对空间调制函数的检测与提取。

在获得空间调制函数后,需对理想状态下正交的两路信号相位差进行分析,将拟合求得的相位差代入式 (5) 可近似得到当前安装姿态下滚转角的方向与度数,通过上位机界面输出所求得的结果,给调整滚转角误差提供依据。

此外,相位分析可用李萨育曲线体现。李萨育曲线是两个沿着互相垂直方向的正弦波合成的轨迹,其不同相位差下输出的图像如图 7 所

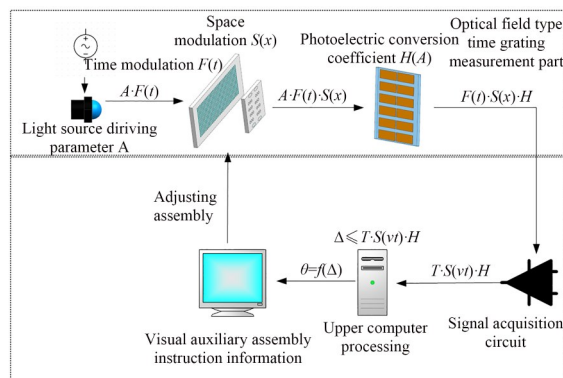


图 6 辅助装配调校系统框图

Fig. 6 Block diagram of the auxiliary assembly and adjustment system

示,其中,  $x$  与  $y$  的取值范围取决于正弦信号的幅度与偏移,  $y$  信号的相位始终滞后  $x$  信号的相位,当两路信号相位差在  $(0^\circ, 90^\circ)$  范围时,李萨育图形沿着以圆心为坐标原点的一三象限方向偏转,且与  $90^\circ$  差值越大,椭圆横纵轴比越大;当两路信号相位差在  $(90^\circ, 180^\circ)$  范围时,李萨育图形沿着以圆心为坐标原点的二四象限方向偏转,且与  $90^\circ$  差值越大,椭圆横纵轴比越大;当相位差为刚好  $90^\circ$  时,椭圆的长轴与短轴分别与坐标横轴纵轴平行。

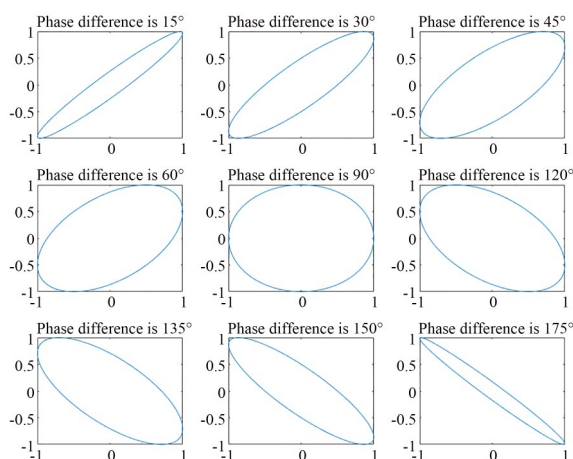


图 7 不同相位差下的信号李萨育图

Fig. 7 Lisayot plots of signals at different phase differences

在实际的安装调整中,可利用李萨育图像配合系统输出的指导参数一同指导滚转角姿态校准。将两路理想状态下空间调制函数相位差为  $90^\circ$  的信号输入,将其中相位超前的信号作为  $x$  信号,较为滞后的信号作为  $y$  信号,用所作李萨育图



的偏转方向表征滚转方向,用长轴与短轴比表征滚转程度,当李萨育图存在偏转时,说明空间调制函数存在因滚转角导致的相位误差,李萨育图长短轴比越大,则说明空间调制函数的相位误差越大,滚转角越明显。

### 4 系统的搭建与验证

#### 4.1 系统的构成与搭建

为验证三种空间角度安装误差对测量误差的影响以及本文设计的校准辅助系统可行性验证,利用六自由度转台,精密位移平台以及激光干涉仪,设计如图8所示的测量实验系统。

辅助装配校准系统主要由信号处理电路,信号采集与上位机通信模块,以及上位机构成,其中信号处理电路主要实现对光电池输出信号的滤波降噪以及后续测量用的行波合成处

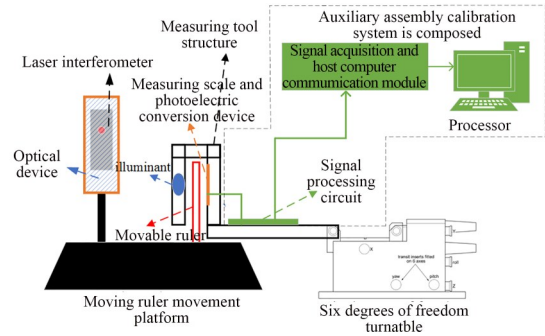


图 8 实验系统设计

Fig. 8 Design of experimental system

理的功能,信号采集与上位机模块实现将处理电路输出的降噪后信号采集并转化成数字信号传递给上位机进行处理。上位机对所得信号进行分析,拟合并计算得到时栅的空间调制函数以及相关的特征参数,上位机页面如图9所示。

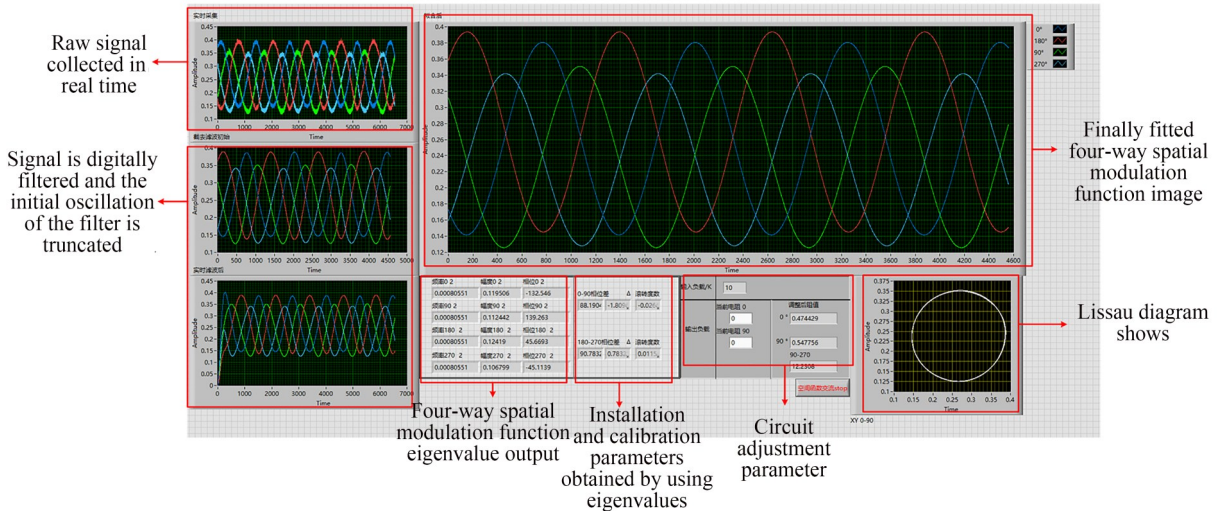


图 9 辅助装配系统上位机显示图

Fig. 9 Display of the auxiliary assembly system

页面主要向用户展示通过对实时采集的原始信号图像、分析获得的四路栅面输出的空间函数图像,以及经过数字滤波与拟合的最终空间函数图像,输出四路正弦函数的幅度,频率与相位,同时输出求得相位差与可能存在的滚转角度数作为安装校准指标,并且辅以对应信号的李萨育图辅助用户判断,当输出的安装校准指标小于 $\pm 0.1^\circ$ ,且李萨育图无明显偏转,则认为滚转角调整完毕。整套安装姿态辅助调校系统环节简

单,没有引入新的设备仪器,电路部分只有两个环节,方便与时栅原本的测量电路集成。

如图10所示,实验测量系统主要由时栅测量系统与激光干涉仪测量系统组成。动尺与激光干涉仪的反射镜固定在运动平台上,利用激光干涉仪的测量数据作为误差基准,与时栅测量结果比较,得到时栅测量误差值,位移平台选用AEROTECH精密位移平台,最低可实现10 nm/s的匀速运动控制。定尺装配工件固定在六自由

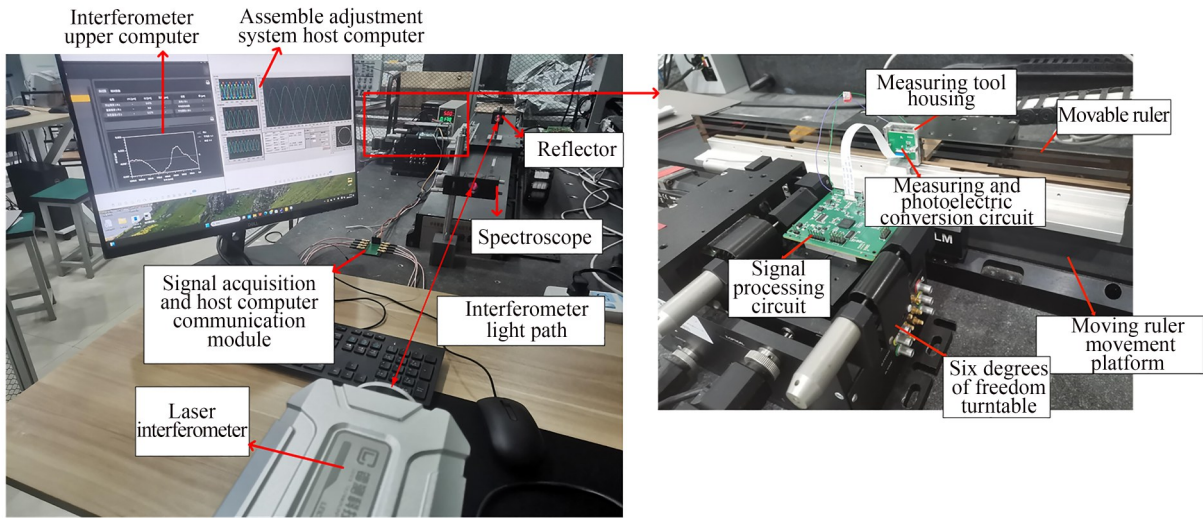


图 10 实验系统搭建

Fig. 10 Experimental system setup

度运动平台上, 以实现滚转姿态的控制, 六自由度运动平台选用 THORLABS MAX683 运动控制平台, 实际实验中, 利用其配套的千分转轴, 控制调整定尺工装结构的装配姿态, 从而调整定

尺与动尺之间的相对关系, 由于是针对定尺作的调整, 因此六自由度运动平台与动尺之间的安装误差并不会影响测量。

下面进行实验验证, 实验步骤如下图 11 所示。

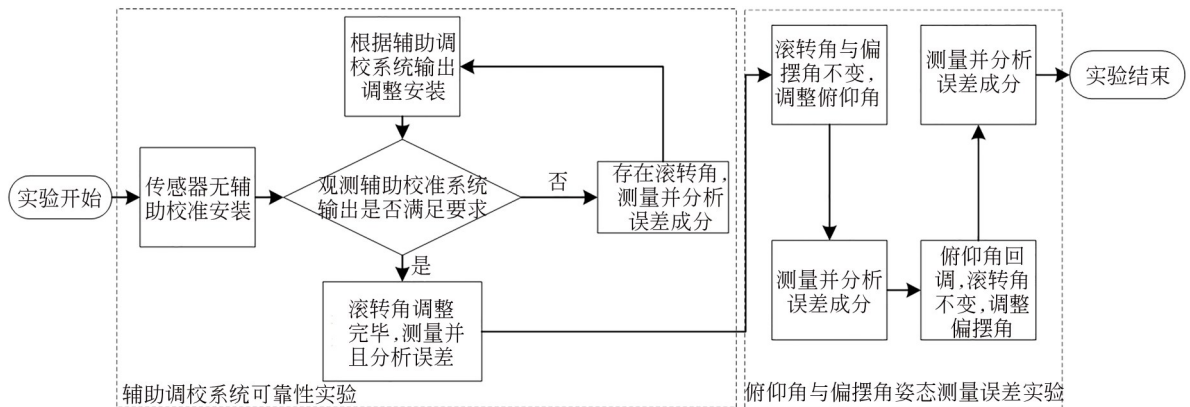


图 11 实验流程图

Fig. 11 Experimental flow diagram

#### 4.2 辅助调校系统的角度检测与调校实验

首先验证本文设计的辅助校准系统对滚转角检测与调校效果。当光场式时栅传感器简单安装完毕, 利用辅助校准系统进行检测, 上位机获取所求的空间调制函数幅度, 频率与相位, 利用式(5)求得存在的滚转角度数。此时系统检测到存在滚转角安装误差, 输出指导的调准角度约为顺时针  $0.27^\circ$ , 系统输出与李萨育图如图 12 所示。将此时的时栅测量数据与激光干涉仪做比

对, 此状态下, 对极内的原始测量误差大约为  $3.6 \mu\text{m}$ , 二次谐波误差占主要成分, 如图 13。

接着根据系统给出的辅助参数, 利用六自由度位移平台, 控制测头顺时针滚转, 并用辅助检测系统再次测量, 此时, 辅助校准系统输出的指导参数为  $0.015^\circ$ , 小于六自由度平台的控制精度<sup>[22]</sup>, 李萨育图输出图形无明显偏转, 其输出的误差曲线与频谱分析如图 12 所示。此时对极内原始测量误差约为  $2.7 \mu\text{m}$ , 二次谐波相比调整前

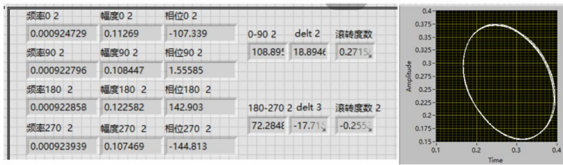


图 12 无校准安装下的辅助系统输出图

Fig. 12 Output diagram of the auxiliary system without calibration installation

制偏摆角度不变,只调整俯仰角度对应的转轴步进 1 mm,此时三个安装角度只存在俯仰角上的安装误差,进行测量并分析,其误差与频谱图如图 15(a)所示。之后回调转轴后退 1 mm,使得俯仰角恢复原状,将控制偏摆角的转轴步进 1 mm,此时三个安装角度只存在偏摆角上的安装误差,通过测量与分析,其单周期内误差频谱图如图 15 (b)所示。

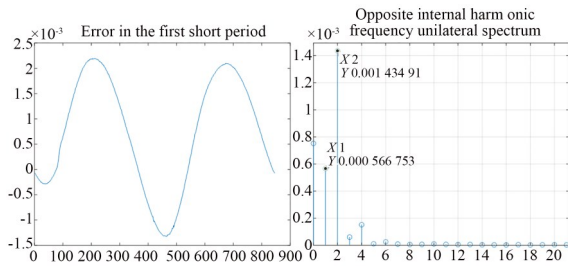


图 13 无校准安装下的误差以及频谱分析图

Fig. 13 Images of error and spectral analysis under no calibration mounting

降低约 30%,后续再次进行多次校准,残余二次谐波误差并未得到有效降低,可认为此时残余的二次误差由测量系统其他环节引入,并非滚转角安装导致,滚转角调校完毕。

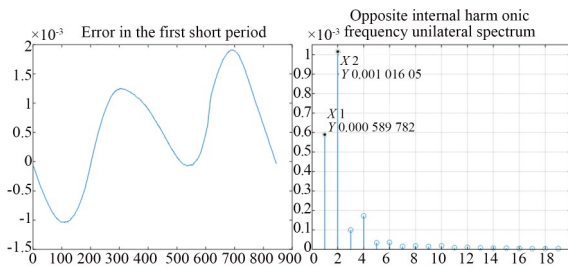


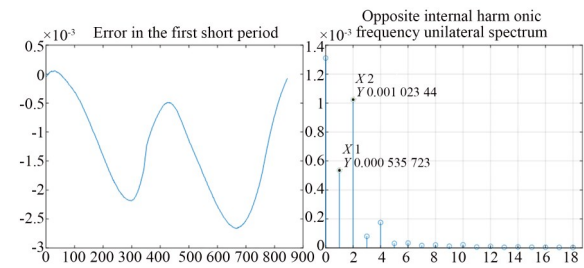
图 14 滚转角校准后的测量误差分析图

Fig. 14 Diagram of measurement error analysis after the roll Angle calibration

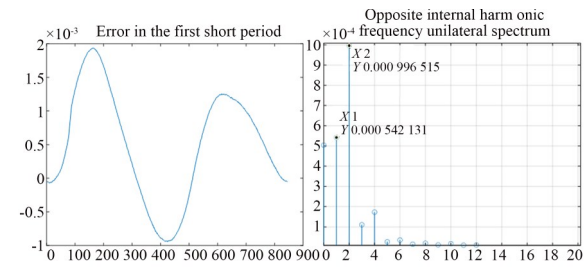
实验证明,利用本文所设计的辅助装配调校系统,可以实现滚转角的装配校准,有效降低因滚转角存在引入的二次谐波误差。

### 4.3 俯仰角与偏摆角姿态测量误差实验

此时系统装配滚转角调校完毕,验证偏摆角与俯仰角不引入测量误差。利用六自由度转台的千分转轴,控制滚转角不变,分别调整俯仰角与偏摆角,依据设备手册<sup>[22]</sup>,对应角度控制的千分转轴步进约 1 mm,控制角度转动 1°。首先控



(a) 俯仰姿态下单周期误差  
(a) Image of single cycle error in pitch attitude



(b) 偏摆姿态下单周期误差  
(b) Image of single cycle error in yaw attitude

图 15 俯仰与偏摆姿态下的单周期测量误差。

Fig. 15 Single-cycle measurement error at pitch and off-set pose

可见,两种姿态下的安装误差与调整前误差差异较小约为  $(2.7 \pm 0.3) \mu\text{m}$ ,误差成分差异较小,均以二次误差为主,因此可证明,偏摆角与俯仰角对测量误差影响较小。

通过上述两组实验结果,证明了三种空间角度安装误差中,偏摆角与俯仰角对测量误差影响较小,滚转角误差是安装引入测量误差的主要来源,主要为测量结果引入二次谐波误差,本文设计的系统能够有效地辅助滚转角的姿态校准,从而减小由于装配导致的测量误差,使得时栅传感器的原始测量误差控制在  $\pm 1.3 \mu\text{m}$ 。

## 5 结 论

本文立足光场式时栅传感器测量原理,对空间三角度,即偏摆角、俯仰角、滚转角的安装对测量引入的误差进行分析,计算并证明了安装引入的误差主要成分是滚转角引入的二次谐波误差,建立以滚转角度为自变量的空间调制函数相位变化数学模型,并利用数学仿真证明,

同时基于此模型设计了一种滚转角辅助装配系统,通过直接输出滚转方向与滚转角度的估计值,并辅以李萨育图指示校准。经过实验测试,本文设计的滚转角辅助装配系统能够有效地辅助滚转角的安装与校准,可将传感器的原始测量误差降低到 $\pm 1.3 \mu\text{m}$ 内,对比传统基于机器识别的安装校准系统,具备环节简单,容易集成的优势。

### 参考文献:

- [1] 付敏,朱革,郑方燕,等. 基于时序推延的线阵 CCD 动态位移测量方法研究[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0212003.  
FU M, ZHU G, ZHENG F Y, *et al.* Dynamic displacement measurement method research of linear CCD based on timing delay[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0212003. (in Chinese)
- [2] 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.  
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. (in Chinese)
- [3] 周维来. 光栅干涉仪在高精密测量中的技术和应用[J]. 工具技术, 1994, 01: 37-42.  
ZHOU W L. Technology and Application of Grating Interferometer in High Precision Measurement[J]. *Tool Technology*, 1994, 01: 37-42.
- [4] [4]Renishaw Co. L. 规格手册 SiGNUM™光栅系统[Z]. 2010.  
Renishaw Co. L. Specification Manual SiGNUM™ Raster System [Z]. 2010.
- [5] iC-Haus Co. L. SinCosYzer2\_datasheet\_A6en\_OVERVIEW[Z]. 2015.
- [6] 海德汉携子公司 ETEL 即将亮相 SEMICON 展会[J]. 电子工业专用设备, 2020, 49(3): 82-86.  
HEIDENHAIN and its subsidiary ETEL will appear at SEMICON Exhibition [J]. *Special Equipment for Electronic Industry*, 2019, 49(03): 82-86. (in Chinese)
- [7] 雷尼绍:全新增量式 QUANTiC 光栅[J]. 今日制造与升级, 2018, (8): 58.  
Renishaw: New incremental QUANTiC Grating [J]. *Manufacturing & Upgrading Today*, 2018, (8): 58.
- [8] NISHIMURA T, KUBOTA Y, ISHII S, *et al.* Encoder incorporating a displaceable diffraction grating: US5038032[P]. 1991-08-06.
- [9] 刘帅. 圆光栅编码器安装与对准[J]. 电子工业专用设备, 2018(4): 46-48.  
LIU S. Installation and alignment of circular grating encoder [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2018(4): 46-48. (in Chinese)
- [10] YU H, WAN Q H, ZHAO C H. A novel self-correction method for linear displacement measurement based on 2-D synthesis mechanism[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 7007608.
- [11] WANG S T, LIAO B Q, SHI N N, *et al.* A compact and high-precision three-degree-of-freedom grating encoder based on a quadrangular frustum pyramid prism[J]. *Sensors*, 2023, 23(8): 4022.
- [12] 王笑一,王永军,雷贤卿,等. 非对径安装双读数头圆光栅偏心测角误差修正[J]. 光学精密工程, 2021, 29(5): 1103-1114.  
WANG X Y, WANG Y J, LEI X Q, *et al.* Correction method for angle measurement error of eccentric encoder with double read-heads installed non-diametrically opposite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(5): 1103-1114. (in Chinese)
- [13] ZHANG R, BAO W H, ZHAO H N, *et al.* Self-calibration Method of Precision Shafting Angle Measurement Error Based on Multiple Reading Heads[C]. *Tenth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation*. August 8-10, 2018. Kunming, China. SPIE, 2019.
- [14] 糜小涛,高胜英. 圆光栅偏心对仿真转台角位置精度的影响[J]. 长春理工大学学报(自然科学

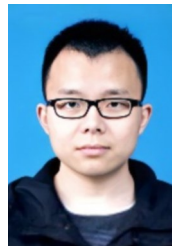
- 版), 2014(3): 9-12.
- MI X T, GAO S Y. Effect of eccentric of circular gratings on angular position accuracy of simulator [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2014 (3): 9-12. (in Chinese)
- [15] 李丞丽, 薛梓, 黄焱, 等. 圆光栅测角系统示值误差分析与补偿[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(5): 59-65.
- LI G L, XUE Z, HUANG Y, *et al.* Indication error analysis and compensation of circular grating angle measurement system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(5): 59-65. (in Chinese)
- [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] GECKELER R D, LINK A, KRAUSE M, *et al.* Capabilities and limitations of the self-calibration of angle encoders[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(5): 055003.
- [18] 刘瑞星, 李宏光, 宫经珠, 等. 一种基于空间光路的自校准光栅定位装置及标定方法: 中国, 202210482680. X [P]. 2022-08-19.
- LIU R X, LI H G, GONG J Z, *et al.* A self-calibrating grating positioning device and calibration method based on spatial light path: *China*, 202210482680. X [P]. 2024-02-27.
- [19] 张平, 罗钧, 刘学明, 等. 一种开式双读数头圆光栅系统快速安装调整机构: 中国, 201910119102. 8 [P]. 2024-06-21.
- ZHANG P, LUO J, LIU X M, *et al.* An open double reading head circular grating system quick installation adjustment mechanism: *China*, 201910119102. 8 [P]. 2024-06-21.
- [20] 曹海霞, 赵英飞, 夏钟海, 等. 一种中阶梯光栅小型固定装置及姿态调整方法: 中国, 113566961B [P]. 2023-10-13.
- CAO H X, ZHAO Y F, XIA Z H, *et al.* A small fixing device and attitude adjustment method of middle ladder grating: *China*, 202110782919. 0 [P]. 2023-10-13.
- [21] FU M, LI C L, ZHU G, *et al.* A high precision time grating displacement sensor based on temporal and spatial modulation of light-field [J]. *Sensors*, 2020, 20(3): 921.
- [22] MAX600 Series NanoMax 6-Axis Flexure Stage User Guide[Z]2022.

#### 作者简介:



金重宇(2000—),男,江苏淮安人,硕士研究生,2022年于南京理工大学紫金学院获得学士学位,主要研究方向为智能仪器与传感器。E-mail: 1713550735@qq.com

#### 通讯作者:



苟李(1988—),男,重庆人,博士,助理研究员,2019年于合肥工业大学获得博士学位,现为重庆理工大学机械工程学院助理研究员,主要从事精密测量与智能传感器研究。E-mail: gouli2019@cqu.edu.cn