

激光与光电子学进展

平面反射式二维光栅测量系统研究

刘红忠^{1,2*}, 史永胜^{1,2}, 尹磊^{1,2}, 陈邦道^{1,2}, 雷彪^{1,2}, 蒋维涛^{1,2}, 牛东^{1,2}, 王兰兰^{1,2}, 姜维^{1,2},
李国俊^{1,2}, Chen Jinju³

¹机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

²西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049;

³纽卡斯尔大学工程学院, 英国 纽卡斯尔 NE1 7RU

摘要 针对超精密运动台的二维亚微米级精度同步测量需求, 提出并建立了平面反射式二维光栅测量系统, 研究了平面反射式二维光栅的平面位移同步测量方法, 分析了平面反射式二维光栅测量系统的误差传递模型。通过 Vold-Kalman 滤波算法, 对光栅信号中存在的高次谐波误差、幅值/相位误差进行实时修正和滤除。采用反正切细分算法和周期测量法对光栅正交脉冲的频率进行测量, 实现对被测目标的高分辨率测量和实时运动速度测量。同时, 构建了亚微米级测量精度的平面反射式二维光栅测量系统, 测量范围为 500 mm×500 mm, x 、 y 方向的定位精度为 $\pm 0.3 \mu\text{m}$, 测量分辨率为 $0.005 \mu\text{m}$ 。

关键词 测量; 平面反射式二维光栅; 反正切细分算法; 亚微米级测量

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222844

Research on Reflective Two-Dimensional Grating Measurement System

Liu Hongzhong^{1,2*}, Shi Yongsheng^{1,2}, Yin Lei^{1,2}, Chen Bangdao^{1,2}, Lei Biao^{1,2}, Jiang Weitao^{1,2},
Niu Dong^{1,2}, Wang Lanlan^{1,2}, Jiang Wei^{1,2}, Li Guojun^{1,2}, Chen Jinju³

¹State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

²School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China;

³School of Engineering, Newcastle University, Newcastle NE1 7RU, UK

Abstract Aiming at the requirement of two-dimensional sub-micron precision synchronous measurement for ultra-precision motion stage, a reflective two-dimensional grating measurement system is proposed and established. The synchronous measurement method of plane displacement of reflective two-dimensional grating is investigated, and an error transfer model of reflective two-dimensional grating measurement system is established. Through Vold-Kalman filtering algorithm, the high-order harmonic error and amplitude/phase error in the grating signal are corrected and filtered in real time. An arc-tangent subdivision algorithm and period measurement method are used to measure the frequency of the orthogonal pulse of the grating to realize the high-resolution measurement and real-time speed measurement. A reflective two-dimensional grating measurement system with sub-micron measurement accuracy is constructed, in the measurement range of 500 mm×500 mm, the positioning accuracy of the x -direction and y -direction is $\pm 0.3 \mu\text{m}$ and the resolution is $0.005 \mu\text{m}$.

Key words measurement; reflective two-dimensional grating; arc-tangent subdivision algorithm; sub-micron measurement

1 引言

随着科学技术的发展, 光栅测量不仅需要满足测量精度高的要求, 还需要朝着多自由度定位以及多维

度测量方向发展。平面光栅测量是在一维直线光栅测量基础上发展起来的, 不仅具有一维光栅测量系统测量精度高的优势, 还可以减小由多个线性测量系统引入的安装误差^[1]。德国 Heidenhain 公司在 1995 年成功

收稿日期: 2022-10-20; 修回日期: 2022-12-01; 录用日期: 2022-12-05; 网络首发日期: 2022-12-15

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3200203)、国家自然科学基金(51827805)

通信作者: hzliu@mail.xjtu.edu.cn

研制二维平面光栅并在其基础上开发出整套平面光栅测量系统^[2],该公司已经生产了多个系列产品。其中,典型的商用产品有 PP 系列二维反射式光栅测量系统以及 KGM 系列二维编码器^[2]。随后,美国 Opra 公司在 1999 年研制出型号为 Nano Grid XY 的二维反射式光栅微动平台,其重复测量精度可达到 5 nm^[3]。此外,美国 NanoWave 公司也研制出基于平面光栅的 SPPE 二维测量系统^[4]以及德国 JENA 公司生产的 LIK-2D 型二维测量系统^[4]。

在国外商业产品不断发展的同时,国内各研究机构也针对平面光栅测量系统进行相应的研究。Kao 等^[5]利用光的衍射原理和多普勒效应设计并制造了平面光栅,其测量范围为 100 mm×100 mm,经过电子脉冲插补,测量系统分辨率为 1 nm。合肥工业大学夏豪杰^[6]提出了一种以二维衍射光栅为测量基准的测量系统。该系统采用正交干涉原理,通过记录光栅干涉条纹,测量分辨率可达纳米级。此外,由于平面光栅的衍射特性,可以在 x 、 y 轴方向上产生对应的衍射光束,因此,Chung 等^[7]、Fan 等^[8]、Hsu 等^[9]等分别提出通过使用合适的光学结构搭建平面光栅干涉仪^[10]以实现平面光栅的双自由度测量。

在平面光栅测量系统中,测量精度一方面取决于系统中各部分的误差组成以及后续相应的误差补偿算法,另一方面取决于采用合适的细分算法和测量模型以实现高分辨率动态测量。主要体现为:1)高质量的光栅信号是影响光栅测量系统实现高精度、高分辨率测量的关键因素。光栅信号误差主要包括幅值不等、直流偏置、相位不正交以及高次谐波^[11-12],来源于光栅的制造误差、光电扫描系统的设计以及光栅读数头与光栅之间的相对位置关系等^[13]。因此,如何通过误差补偿算法对信号中存在的误差进行抑制和消除是研制亚微米级精度平面光栅测量系统亟待解决的关键问题。2)光栅信号细分技术是提高光栅测量系统分辨率不可或缺的技术,主要是对周期内正余弦光栅信号进行插值实现^[14-16],可以使测量系统分辨率不受光栅栅距的限制,实现纳米级分辨率测量。因此,需要采用合适的细分方法来提高平面光栅测量系统对平面二维光栅的测量精度。

本文针对超精密运动平台的二维亚微米级精度同步测量需求,提出并建立了平面反射式二维光栅测量系统,并针对制约该系统测量精度的误差模型及光栅信号细分算法进行了细致分析,构建了亚微米级测量精度的平面反射式二维光栅测量系统。

2 基本原理

2.1 平面光栅二维测量原理

平面光栅测量系统主要由二维平面光栅和读数头构成。二维平面光栅的栅线结构是由两个相互垂直的光栅栅线分别沿着两个维度方向阵列^[17]产生的。因

此,通过对光栅栅线进行计数即可实现 x - y 两个方向直线位移的同步测量。平面光栅的栅线结构是光栅测量系统的测量基准,而读数头在与平面光栅相对运动过程中,通过光电扫描将经过的栅线转换为以光栅栅距为测量基准的明暗变化的条纹^[18]。然后利用光电接收元件将明暗相间的条纹转换为正余弦电信号。最后,对产生的信号周期进行计数以及在信号周期内进行相应的细分算法处理即可得到实时相对运动的位移值。

本文在读数头设计过程中主要采用反射式测量光路设计方案。相比于透射式测量光路,反射式测量光路中各光学元件位于平面光栅的同一侧,光路组成的各光学元件相对独立,易于调节。由于光栅具有周期性结构,当光照射至光栅表面时会发生衍射现象,同时得到的光栅衍射光会在光栅附近干涉成像。目前,衍射式光栅成像原理可以分为成像扫描原理和干涉扫描原理。衍射光干涉扫描成像原理主要利用光栅衍射光进行干涉成像,光栅栅距越小,衍射效率越高,因此干涉扫描成像原理一般用于 4 μm 甚至更小栅距光栅的光路扫描系统设计。并且,为了提高 $+m$ 和 $-m$ 级衍射光的衍射效率,干涉扫描原理的光路扫描系统设计中一般使用相位光栅。

基于光栅衍射光成像扫描原理主要利用光栅在 Talbot 成像面上的 Talbot 光栅像或广义光栅像进行位移测量。当一束平面光照射至光栅表面时,在光栅后固定距离处会呈现光栅自身的像,这种现象被称为 Talbot 成像^[19-20]。Talbot 成像实质是在菲涅耳衍射区内的,光栅衍射光进行干涉成像,其成像示意图如图 1 所示。其中在平行光 A_0 照射下,Talbot 成像面 x_1 与指示光栅平面 x_0 的距离 z_0 ^[19] 表达式为

$$z_0 = \frac{2mp_0^2}{\lambda}, \quad (1)$$

式中: m 为整数(Talbot 成像次数); p_0 为标尺光栅的栅距(单位: μm); λ 为光源波长(单位: μm)。

基于 Talbot 成像扫描原理的反射式光栅测量系统的基本光路如图 1(b) 所示,以一维光栅为例,光源照射的光束经过准直透镜转变成平面光,平面光经过指示光栅照射到标尺光栅上。由于存在 Talbot 成像效应,指示光栅会在距离 z_0 处形成指示光栅的像。当标尺光栅位于指示光栅 Talbot 成像面处时,由于两者栅距相同,标尺光栅会与指示光栅的像产生莫尔条纹效应,最后通过光电接收元件转换为近似正弦的电信号。当指示光栅与标尺光栅相对移动一个栅距时,莫尔条纹也会相对移动一个周期产生一个周期的正余弦信号。

基于 Talbot 成像原理进行光学扫描可以提高读数间隙和安装容差。根据式(1)可得,Talbot 成像距离 z_0 与光栅栅距成正比,光栅栅距越小, z_0 越小,则读数头与标尺光栅之间的间距越小,需要满足的配合公差要

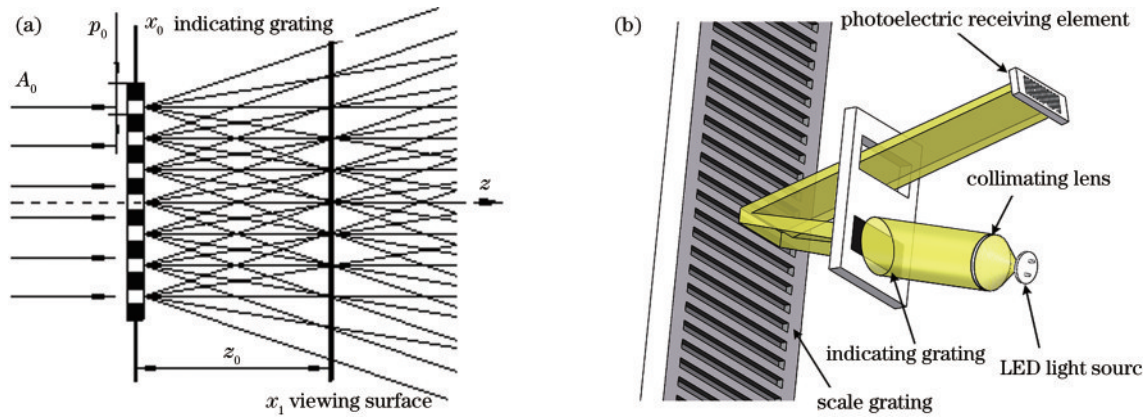


图 1 基于 Talbot 成像原理的反射式光栅测量光路。(a) Talbot 成像示意图；(b) 反射式光栅测量光路原理图

Fig. 1 Optical path of reflection gratings measurement based on Talbot imaging principle. (a) Scheme of Talbot imaging; (b) scheme of optical path for reflective grating measurement

求越严格。此外,光栅栅距 p_0 越小,衍射现象越严重,高级次衍射光干涉形成的高次谐波比重越大,信号高次谐波失真越严重。因此,基于 Talbot 成像扫描原理,一般用 $10\sim 200\ \mu\text{m}$ 栅距的振幅光栅进行光路扫描系统设计。最后,综合考虑光栅的制作工艺和测量量程,本文采用光栅栅距为 $20\ \mu\text{m}$ 、基于成像扫描原理的反射式测量光路。

平面反射式光栅测量系统光路如图 2 所示。该光路由横向栅线测量光路和纵向栅线测量光路组成,其中每部分测量光路分别由 LED 光源、准直透镜、指示光栅以及光电接收单元组成。如图 2 所示,由于平面光栅栅线结构类似于直角坐标系,其中单个栅线单元类似于坐标轴上的单位长度,因此横向栅线测量光路与纵向栅线测量光路也应相互垂直布置,从而保证对两个垂直方向上的相对位移进行同时测量。

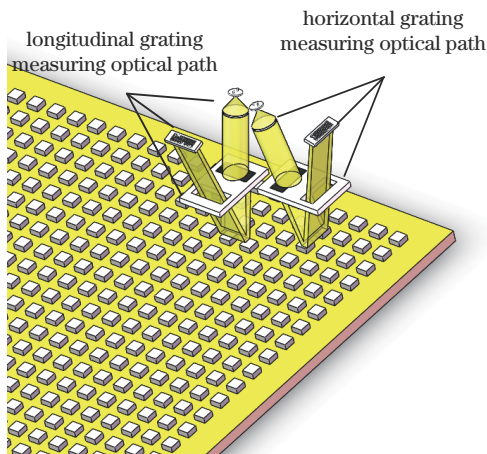


图 2 平面反射式光栅测量系统光路图

Fig. 2 Optical path of plane reflection grating measuring system

2.2 平面光栅测量信号的误差修正

在基于 Talbot 成像原理光栅测量光路中,光电接收元件(栅状光电池)将明暗变化的莫尔条纹信号转换为近似正弦的四路信号,其中每路信号由多个栅状光

电池共同产生,信号相位分别相差 90° 。为了减小其他杂散光以及高阶光栅衍射光对信号质量的影响,通常对四路信号中相位差为 180° 的两组光栅信号进行差分放大,从而得到一对相位差为 90° 的正余弦电信号 $u_s(\theta)$ 、 $u_c(\theta)$ ^[21]。当读数头与平面光栅做相对二维运动时,光栅读数头可以产生以标尺栅距 p_0 为基准、带有 x - y 方向位移信息的两对正余弦光栅信号。下面以单方向上的光栅信号为例进行分析:当读数头相对运动一个光栅栅距 p_0 时,产生一个周期的正余弦信号;当两路信号相位角从 0° 到 360° 变化或者反向从 360° 到 0° 变化时,光栅信号的整周期计数值会进行加 1 或者减 1;当相对运动的位移处在信号周期内时,可以根据正余弦光栅信号进行相应变换求得相位角 θ ,然后通过比例运算即可求解得到一个栅距内的位移。最终,相对运动位移 x 可以表示为

$$x = Np_0 + p_0 \frac{\theta}{2\pi}, \quad (2)$$

式中: N 为正余弦光栅信号的整周期计数值; θ 为周期内正余弦信号相位角(单位:rad)。

位移的测量原理决定了测量系统中测量误差的来源,对式(2)进行微分运算可以得到式(3)。通过对式(3)进行分析可以得出系统中测量误差主要来源为标尺栅距 p_0 引入的长度累积误差、周期计数误差以及周期内相位角 θ 引入的细分误差^[22]。此外,除了上述介绍的测量误差外,光栅测量系统还容易受外界环境的影响引入一定的测量噪声以及机械定位中平面光栅的安装误差。

$$dx = Nd p_0 + p_0 dN + \frac{p_0}{2\pi} d\theta, \quad (3)$$

式中: dx 为位移测量误差; $d p_0$ 为栅距基准误差; dN 为周期计数误差,通常不作考虑; $d\theta$ 为细分误差。

平面光栅信号的细分主要是对光栅信号的幅值、相位和波形进行分割、插值细分,从而得到比光栅周期信号更高分辨率的细分值。本文采用的反正切细分方法是一种开环的细分方法,虽然在一定程度上可以提

高测量分辨率,但是该细分方法对光栅信号质量要求较高。特别是当需要进行高精度测量时,反正切细分算法对信号中存在的各项偏差更为敏感。下面,本节将针对上述光栅信号中存在的各项波形偏差所引起的细分误差进行详细分析。

分别对各项误差所引起的细分误差进行推导以及提出相应的指标,这样使得后续通过修正算法对信号各项误差进行修正具有指导意义。此外,上述得到的结果和指标是在理想情况下分析得到的,与实际的细分误差间仍存在较大的偏差。为了综合显示各项误差对测量细分误差的影响,本文将对公式 $\theta = \arctan(u_s/u_c)$ 进行微分,可得

$$d\theta = \frac{1}{r^2}(u_c \times \delta_s - u_s \times \delta_c), \quad (4)$$

式中: r 为正余弦信号幅值(单位: V); $d\theta$ 为细分误差(单位: rad); δ_s 为正弦信号误差(单位: V), $\delta_s = u'_s - u_s$; δ_c 为余弦信号误差(单位: V), $\delta_c = u'_c - u_c$ 。

假设正弦信号幅值为 0.5 V,余弦信号幅值为 0.55 V,信号幅值误差比为 10%,正余弦信号直流偏置为 0.01 V,直流偏置量与误差比为 2%,相位偏差为 0.5° ,二次谐波幅值为 0.1 V。将上述波形偏差参数代入式(4),可以得到如图 3 所示的细分误差曲线。图 3(a)为上述单项误差引起的细分误差曲线,图 3(b)为在多项误差综合作用下引起的细分误差曲线。

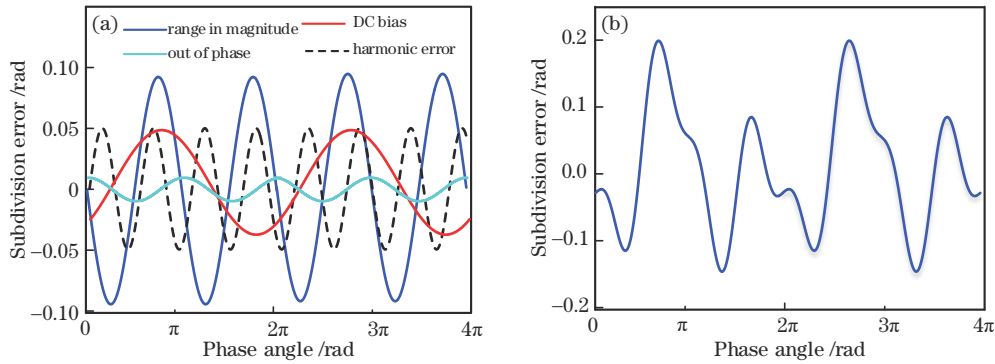


图 3 波形误差引起的细分误差。(a) 单项误差; (b) 多项误差综合

Fig. 3 Interpolation error induced by the signal waveform error. (a) Single error; (b) multiple error synthesis

如图 3 所示,当上述单项误差综合作用在光栅信号时,所引起的细分误差约为 ± 0.2 rad,与整周期相位 2π 的比值为 0.03,在后续细分时造成的测量误差较大。因此,从多项误差综合引起的细分误差曲线可以看出,单独消除一项波形偏差以减小细分误差是不合实际的,应从源头上通过修正算法消除光栅信号中存在的全部误差。此外,图 3 所示的细分误差曲线具有非线性、不稳定性的特点,很难后续对误差进行补偿。

针对细分误差特点,本文提出一种数字滤波与波形校正相结合的误差修正方法,对信号中存在的谐波误差和幅值/相位误差进行修正。在谐波误差滤除方面,本文对 Vold-Kalman 算法进行改进,构建一个截止

带宽随信号基频变化的滤波器。在波形校正方面,主要采用 Heydemann 修正方法的思路,通过对信号中存在的幅值/相位误差进行解算并代入至原始信号中,从而完成对幅值/相位误差的修正。图 4 为所提光栅信号误差实时修正流程框图。首先,原始光栅信号 $s_0(\theta)$ 、 $c_0(\theta)$ 经过 Vold-Kalman 滤波算法对信号中存在的高次谐波误差进行实时滤除,得到滤波后光栅信号 $s_1(\theta)$ 、 $c_1(\theta)$,改进的 Vold-Kalman 算法不受光栅信号频率影响。然后,通过解算滤波算法的中间参数得到幅值/相位信息,并将其代入滤波后光栅信号中,完成信号误差的全部修正,得到理想的光栅信号 $s_2(\theta)$ 、 $c_2(\theta)$ 。

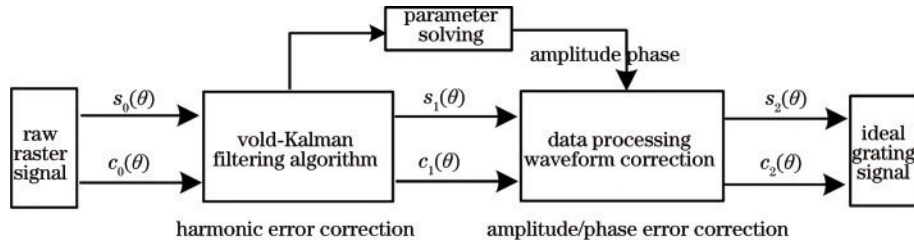


图 4 光栅信号误差实时修正流程框图

Fig. 4 Flow chart of real time correction of grating signal error

在前端硬件电路部分采用差分输入形式,模/数(A/D)采集模块接收的光栅信号中直流偏置误差可以忽略不计,光栅信号 $u_s(\theta)$ 、 $u_c(\theta)$ 可以表示为

$$\begin{cases} u_s(\theta) = a_1 \sin(\theta + \varphi) \\ u_c(\theta) = b_1 \cos(\theta) \end{cases}, \quad (5)$$

式中: a_1 、 b_1 为正余弦光栅信号的幅值(单位:V); φ 为正余弦信号的正交误差(单位:rad)。

本文所采取的信号修正方法的基本原理如图 5 所示。将采集得到的离散数据送入信号参数求解模块进行相应转换从而得到相应的特征参数 a_1 、 b_1 、 φ 。然后将两路信号的特征参数代入下式,从而完成修正得到修正后信号 $u'_s(\theta)$ 和 $u'_c(\theta)$ 。

$$\begin{cases} u'_s(\theta) = \frac{(b_1/a_1)u_s(\theta) - \sin\varphi \cdot u_c(\theta)}{\cos\varphi} \\ u'_c(\theta) = u_c(\theta) \end{cases}. \quad (6)$$

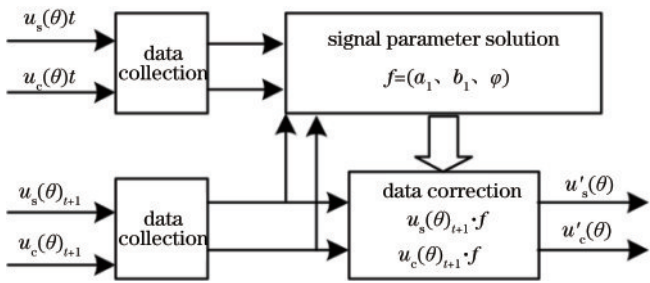


图 5 光栅信号修正基本原理

Fig. 5 Basic principle of the grating signal correction

通过上述介绍可以得出,后续光栅信号修正的关键问题是如何获取光栅信号的特征参数。在傅里叶变换中,周期函数都可以通过傅里叶级数^[12]表示为

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(jnx), \quad (7)$$

式中: A_n 为复幅度可以表示为 $(\text{Re} + j\text{Im})$; $\exp(jnx)$ 为应用欧拉公式可以表示为 $\cos(nx) + j\sin(nx)$ 。此外,在上述滤波过程中,本文通过滤波算法求解得到仅含有基频信号幅值包络信息,并根据式(7)完成信号重建,从而实现其他高次谐波的滤除。因此,提取后的光栅信号可以按式(8)形式表示为

$$u(\theta) = [\cos(\theta) + j\sin(\theta)](\text{Re} + j\text{Im}) + [\cos(\theta) + j\sin(\theta)](\text{Re} - j\text{Im}). \quad (8)$$

将式(8)化简,并通过三角函数中的辅助角公式进行转换可得

$$\begin{cases} u(\theta) = 2\sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} \sin(x + \varphi) \\ \varphi = \arctan \frac{\text{Im}}{\text{Re}} \end{cases}. \quad (9)$$

根据式(9)可得,光栅信号幅值 $(a_1, b_1) = 2\sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2}$, 相位误差 $\varphi = \pi/2 - (\varphi_1 - \varphi_2)$ 。因此,将滤波算法中求得的幅值包络按式(9)进行相应转换,然后将求得的信号参数代入式(6),即可完成光栅信号的波形修正。

2.3 平面光栅测量系统的构建

本文设计了如图 6 所示的硬件系统。该硬件系统通过对差分后的两路光栅信号进行 A/D 采集从而实时得到光栅信号值。随后将采集得到的数字信号送入现场可编程逻辑门阵列(FPGA)中的编写细分模块和脉冲计数模块完成对光栅信号中位移值、速度值信息提取。最后,通过 RS232 传输接口将测得的位移值、速度值以等间隔时间送入上位机中的动态信息提取模块,完成对被测目标的位移、速度和加速度的求解,并在上位机完成实时显示。

基于该硬件流程图最终搭建的实验平台如图 7 所

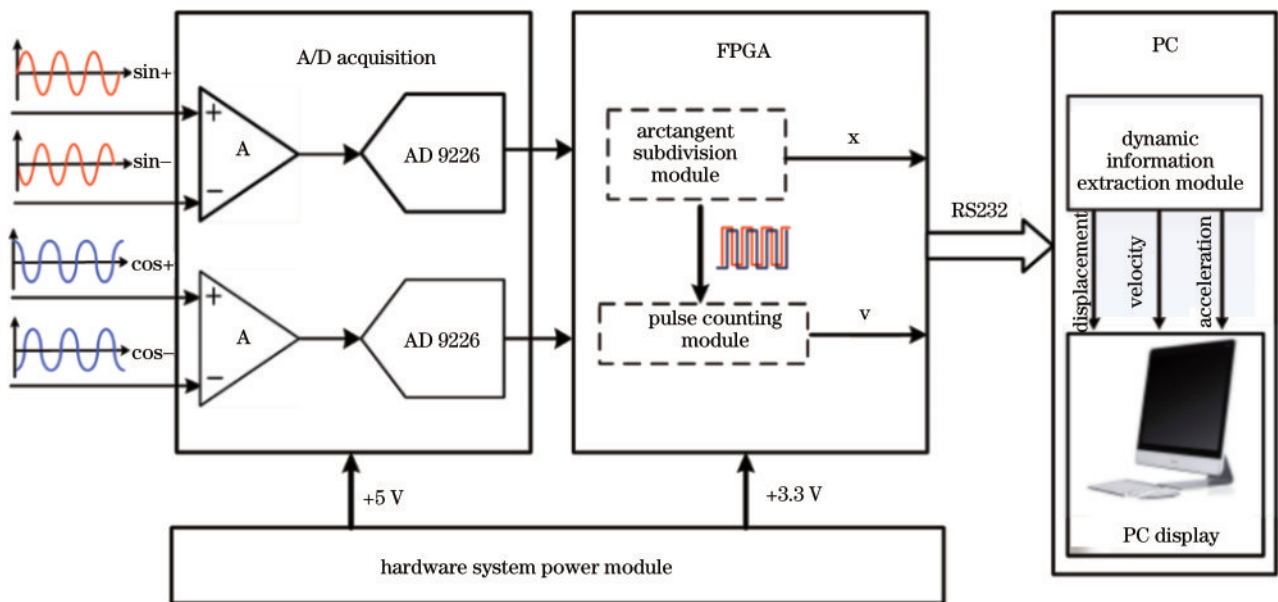


图 6 光栅动态测量系统硬件流程图

Fig. 6 Hardware configuration for the grating dynamic measurement system

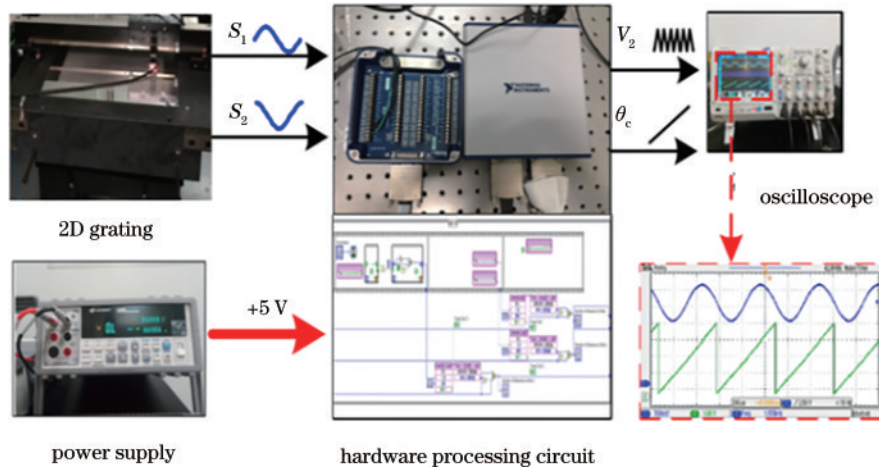


图 7 光栅动态测量系统实验平台搭建

Fig. 7 Establishment of experimental platform for grating dynamic measurement system

示。该实验采用本课题组自行研制的 $20\ \mu\text{m}$ 栅距高精度反射式光栅尺和读数头作为信号源提供的标准 $1\ \text{V}_{\text{pp}}$ 正弦光栅信号。本实验主要采用西安交通大学机械系统工程国家重点实验室现有高精度测量机实验台作为运动平台。该测量机采用稳定性高的天然

分别将光栅读数头与气浮导轨滑块固定连接,将光栅固定于大理石表面,使其方向与导轨运动方向平行。同样借助 NI 数据采集卡中的 A/D 模块和 Labview-FPGA 模块以实现本文所提位移和速度测量算法,并借助示波器实时观察相应信号波形。最后借助 Labview 编程语言实现上位机的功能以及实时测量结果的显示。

3 分析与讨论

基于上述搭建的光栅动态测量实验平台,本文采用激光干涉仪作为测量基准,对所提光栅测量系统进行精度标定,从而保证标定结果的准确性和可溯源性。雷尼绍公司的 XL-80 激光干涉仪采用的激光波长可溯源至国际标准,激光稳频精度在 1 h 内可达 $\pm 0.02 \times 10^{-6}$ 。在运动测量范围内,测量精度可达 $0.4\ \mu\text{m}/\text{m}$,干涉仪系统以 50 kHz 频率对测量结果进行实时读取,线性测量精度为 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$,测量时最高运动速度为 4 m/s。

本文在开发的光栅测量系统硬件 FPGA 部分中增加了同步触发模块。光栅测量系统内部对生成的正交脉冲进行计数,当计数值等于设定的位移值时,便会产生一个触发脉冲,同时触发激光干涉仪记录当前位移值。两路光栅信号经过本文所提的细分模块得到细分值记为 x_c ,激光干涉仪测得位移值记为 x_L 。假设预先设定的触发位移为 Δx ,因此,细分模块的细分值 x_c 每隔 Δx 便会产生触发脉冲信号,记录激光干涉仪测量值 $x_{L,n}$ 。进行误差标定实验测试过程中,以激光干涉仪测量值为基准,本文提出的细分模块的测量误差为 $x_{c,n} - x_{L,n}$,也等同于 $n\Delta x - x_{L,n}$, n 为产生触发脉冲次数。

大理石制造,导轨采用高精度、高刚度模块化多孔质气体静压轴承,导轨的刚性高和稳定性好,运动过程中无摩擦和无振动,移动过程非常平滑,运动精度高。该气浮平台刚度为 $1000\ \text{N}/\mu\text{m}$,精度为 $0.1\sim 0.5\ \mu\text{m}/100\ \text{mm}$ 。

在实验过程中,只需设定触发位移值 Δx ,将触发模块与激光干涉仪相连,就可以使运动滑块平稳沿单方向运行。

周期内细分误差测试实验主要测试短行程(在一个栅距周期内)光栅测量系统的误差标定情况。实验设置触发位移 $\Delta x = 0.4\ \mu\text{m}$,在一个栅距为 $20\ \mu\text{m}$ 的周期内需要采集 50 个数据点。本次进行实验的光栅测量系统的细分倍数设为 4000 倍,测量分辨率为 $0.005\ \mu\text{m}$ 。采用上述动态标定模式对测量系统进行误差测试,并对每次测量数据进行绘制,最终得到如图 8 所示曲线。

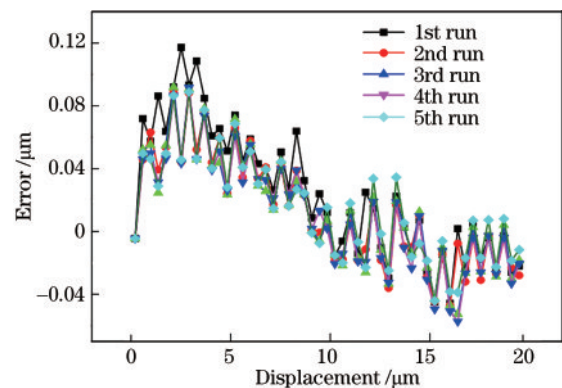


图 8 周期内细分误差曲线

Fig. 8 Interpolation error curve within a period

图 8 为基于光栅信号进行位移测量的周期内细分误差曲线,分别展示了 5 次测量下的周期内测量误差曲线。可以看出,进行位移测量的周期内测量细分误差小于 $0.12\ \mu\text{m}$ 。周期内细分误差具有一定的线性规

律,多个周期的细分误差测试显示,该线性规律具有一致性。在光栅测量中,周期内细分误差主要取决于细分算法,其误差补偿是研究热点。研究团队正在针对此现象开展系统性研究,通过优化细分算法进行误差补偿,初步结果显示,细分误差的降低效果明显。

长周期测量误差测试实验主要是为了测试平面光栅测量系统在长行程内的测量精度,并借助激光干涉仪分别对平面光栅 x 方向、 y 方向测量误差进行标定。在对一个方向误差进行标定过程中,可借助另一方向测量值对平面光栅位置进行调整,减少余弦误差对后续测量误差造成的影响。实验设置运动范围为 500 mm,采用

静态标定模式,每隔 40 mm 测试一次,如此进行往复运动。图 9 为一个运动行程内, x 方向和 y 方向测量误差曲线,结果显示,两个方向的定位精度为 $\pm 0.3 \mu\text{m}$,且误差曲线没有明显的线性与周期性。该定位精度主要受制于光栅线纹制造精度以及精度测试中的测量误差。其中,精度测试过程中的激光干涉仪漂移是重要因素之一。据测试,每组测试实验(行程 500 mm,正、反向运动)耗时 2 h,激光干涉仪的漂移约 $\pm 60 \text{ nm}$ 。研究团队正在就搭建更稳定的测试环境、抑制激光干涉仪漂移误差,以及误差分离算法开展研究,以期达到更高的测试精度。

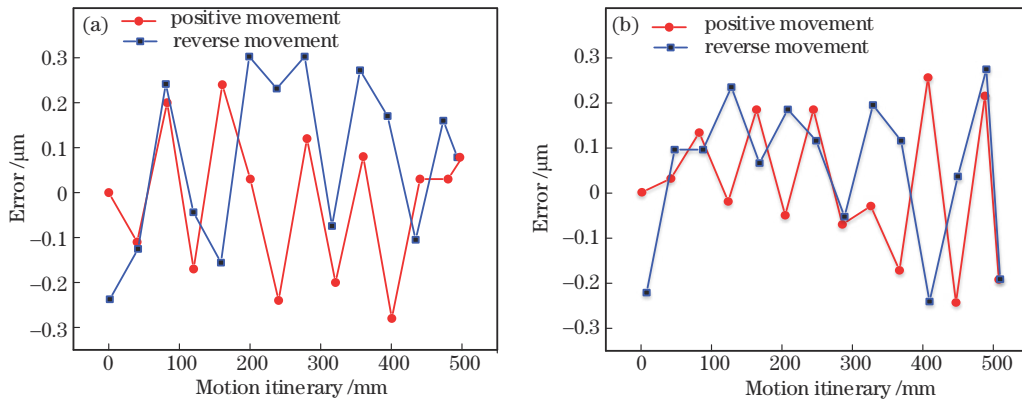


图 9 长行程测量误差曲线。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig. 9 Long-stroke measurement error curve. (a) In x direction; (b) in y direction

动态特性测试实验主要借助高精度一维测长机实验平台完成基于光栅信号的速度值、加速度值测试实验。本文预先设定实验参数:直线伺服电机做匀速直线运动,运动行程为 50 mm,运动速度为 5 mm/s,运动加速度为 50 mm/s^2 ,采样时间间隔为 0.004 s。

图 10(a)、(b)分别为匀速运动时测得的速度、加速度

曲线,可以看出各测量曲线符合预先设定的运动趋势。通过对速度测量曲线和加速度测量曲线进行分析可得:在稳定运动状态时,速度测量均值为 4.960 mm/s ,标准偏差为 0.066;加速度测量均值为 45.909 mm/s^2 ,标准偏差为 2.980。

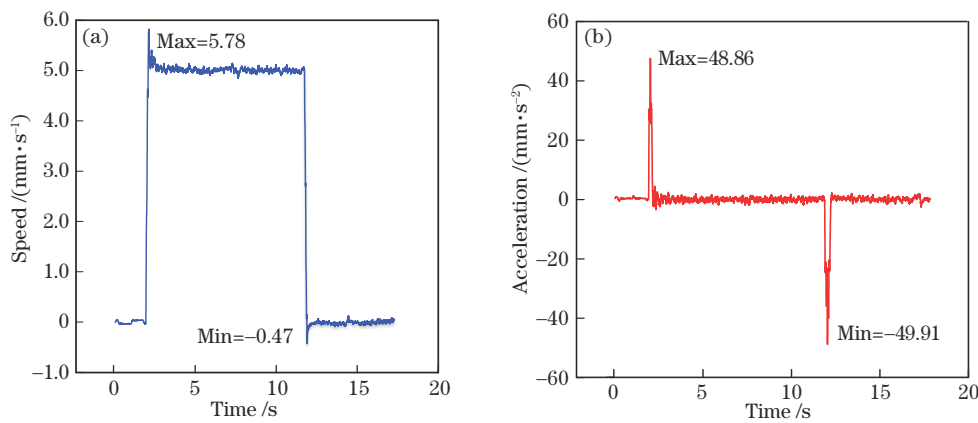


图 10 匀速运动情况下光栅动态测量曲线。(a)速度曲线;(b)加速度曲线

Fig. 10 Grating dynamic measurement curve under uniform motion. (a) Velocity curve; (b) acceleration curve

为了进一步探究在往复运动过程中光栅测量系统的动态测量性能,本文预先设定实验参数:往复运动行程为 100 mm、运动速度为 10 mm/s 、运动加速度为 50 mm/s^2 。图 11(a)、(b)分别为往复运动时测得的速

度、加速度曲线。通过对速度测量曲线和加速度测量曲线进行分析可得:在稳定运动状态时,速度测量均值为 5.006 mm/s ,标准偏差为 0.042;加速度测量均值为 51.542 mm/s^2 ,标准偏差为 3.160。

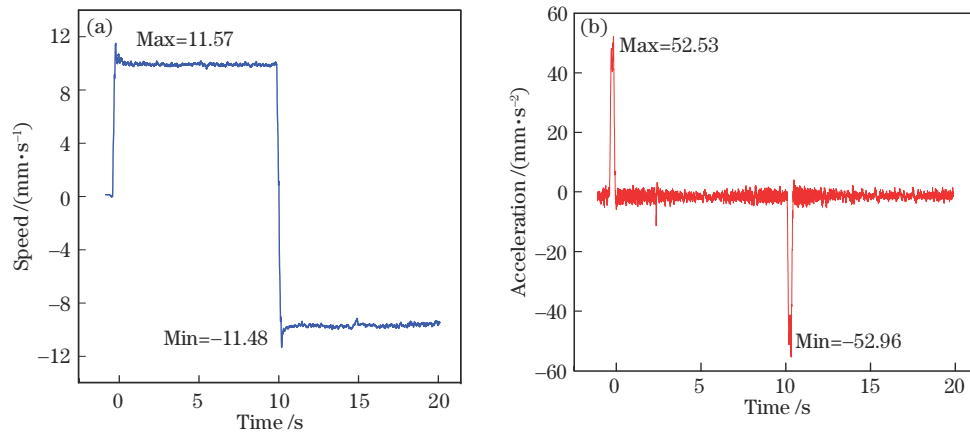


图 11 往复运动情况下光栅动态测量曲线。(a)速度曲线;(b)加速度曲线

Fig. 11 Grating dynamic measurement curve under reciprocating motion. (a) Velocity curve; (b) acceleration curve

4 结 论

本文重点研究了平面反射式二维光栅测量原理及误差组成,构建了具有亚微米级测量精度的平面反射式二维光栅测量系统。针对平面反射式二维光栅测量系统的信号误差,采用数字滤波和波形修正相结合的方式,对光栅信号中存在的波形误差进行修正。通过改进的Vold-Kalman滤波算法,对光栅信号中的高次谐波进行实时滤除。通过傅里叶级数展开以及对Vold-Kalman滤波算法的中间参数提取,对光栅信号的波形误差进行补偿。本文完成了平面反射式二维光栅测量系统的硬件与软件测试,测试结果表明,在 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 量程范围内, x 、 y 方向的定位精度为 $\pm 0.3\text{ }\mu\text{m}$,测量分辨率为 $0.005\text{ }\mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- [1] 于风军. 二维光栅衍射图样的特性分析[J]. 大学物理, 2016, 35(8): 32-35.
Yu F J. The characteristic analysis of the diffraction pattern of two-dimensional grating[J]. College Physics, 2016, 35(8): 32-35.
- [2] Castenmiller T, van de Mast F, de Kort T, et al. Towards ultimate optical lithography with NXT: 1950i dual stage immersion platform[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 76401N.
- [3] 关键. 基于二维光栅的高精度三维位移测量系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
Guan J. High-precision 3-dimensional displacement measurement system based on 2-dimensional grating[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [4] 陈晓峰. 二维衍射光栅系统的误差分析及精度保证[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
Chen X F. Error analysis and accuracy guarantee of two-dimensional diffraction grating system[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [5] Kao C F, Lu S H, Lu M H. High resolution planar encoder by retro-reflection[J]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(8): 085110.
- [6] 夏豪杰. 高精度二维平面光栅测量系统及关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
Xia H J. Research on precise 2-D plane grating measurement system and key technology[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.
- [7] Chung Y C, Fan K C, Lee B C. Development of a novel planar encoder for 2D displacement measurement in nanometer resolution and accuracy[C]//2011 9th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21-25, 2011, Taipei, China. New York: IEEE Press, 2011: 449-453.
- [8] Fan K C, Liao B H, Chung Y C, et al. Displacement measurement of planar stage by diffraction planar encoder in nanometer resolution[C]//2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, May 13-16, 2012, Graz, Austria. New York: IEEE Press, 2012: 894-897.
- [9] Hsu C C, Chen H, Chiang C W, et al. Dual displacement resolution encoder by integrating single holographic grating sensor and heterodyne interferometry [J]. Optics Express, 2017, 25(24): 30189-30202.
- [10] Hu P C, Chang D, Tan J B, et al. Displacement measuring grating interferometer: a review[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2019, 20(5): 631-654.
- [11] Heydemann P L. Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers [J]. Applied Optics, 1981, 20(19): 3382-3384.
- [12] Tan K K, Zhou H X, Lee T H. New interpolation method for quadrature encoder signals[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(5): 1073-1079.
- [13] Sanchez-Brea L M, Morlanes T. Metrological errors in optical encoders[J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(11): 115104.
- [14] Kim J A, Kim J W, Kang C S, et al. An optical absolute position measurement method using a phase-encoded single track binary code[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(11): 115115.
- [15] 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.
- 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.
- [16] 卢少武, 唐小琦, 马泽龙, 等. CORDIC算法在光栅莫尔条纹细分中的应用[J]. 自动化仪表, 2010, 31(5): 23-25.
- Lu S W, Tang X Q, Ma Z L, et al. Application of CORDIC algorithm in subdivision of grating Moiré fringe [J]. Process Automation Instrumentation, 2010, 31(5): 23-25.
- [17] 夏豪杰, 费业泰, 范光照, 等. 基于衍射光栅的二维纳米位移测量技术[J]. 纳米技术与精密工程, 2007, 5(4): 311-314.
- Xia H J, Fei Y T, Fan G Z, et al. 2D nano-displacement measurement with diffraction grating[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2007, 5(4): 311-314.
- [18] 吕强, 李文昊, 巴音贺希格, 等. 基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 39-50.
- Lü Q, Li W H, Bayanheshig, et al. Interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating[J]. Chinese Optics, 2017, 10(1): 39-50.
- [19] Kim M S, Scharf T, Menzel C, et al. Talbot images of wavelength-scale amplitude gratings[J]. Optics Express, 2012, 20(5): 4903-4920.
- [20] Oreb B F, Dorsch R G. Profilometry by phase-shifted Talbot images[J]. Applied Optics, 1994, 33(34): 7955-7962.
- [21] Song J H, Kim K C, Kim S H, et al. New error-compensation method in a linear encoder using phase-shifted grating[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3740: 124-127.
- [22] Bitte F, Mischo H, Pfeifer T. Error sources, measurement uncertainties and calibration techniques in high-precision metrology[J]. Biomedizinische Technik Biomedical Engineering, 1994, 39(4): 85-92.