

引用格式: WEI Zhengjie, ZHANG Di, WU Guanhao. Development of Miniature Optical Encoder for Precise Displacement Measurement[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0912001

魏正杰,张迪,吴冠豪.用于精密位移测量的微型光栅传感器开发[J].光子学报,2021,50(9):0912001

※封面论文※

用于精密位移测量的微型光栅传感器开发

魏正杰,张迪,吴冠豪

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京 100084)

摘要:基于双光栅干涉扫描原理,通过复用透射光栅实现干涉扫描型光栅位移传感器的小型化开发。开发了适用于精密位移测量的光栅传感器原理样机。传感器的电路系统包括信号转换放大电路模块和置于传感器 D-SUB 接口外壳内的信号处理电路模块。通过 15 pin 接口输出四路电平为 2.5 ± 0.5 V 的模拟差分信号,差分信号接口可用于高倍细分而达到高分辨率,具备 RS422 接口适配能力,可以提高传感器远距离传输的抗干扰能力。以电容传感器为基准,光栅位移传感器原理样机实现了 ± 30 nm 的重复性精度,满足 10 mm/s 的测量速度需求,10 s 短时位移稳定性达到 5 nm,6 h 的长时间稳定性达到 70 nm。

关键词:编码器;光栅;位移测量;稳定性;高精度仪器

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215009.0912001

Development of Miniature Optical Encoder for Precise Displacement Measurement

WEI Zhengjie, ZHANG Di, WU Guanhao

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the principle of double grating interference scanning, the miniaturized development of the interference scanning type grating encoder is realized by multiplexing transmission grating. A prototype grating encoder was developed suitable for precision displacement measurement. The circuit system of the sensor includes a signal conversion amplifier circuit and a signal processing circuit placed in the D-SUB shell. The 15-pin interface outputs four analog differential signals with a level of 2.5 ± 0.5 V, which can be used for high subdivision to achieve high resolution. With RS422 interface adaptability, it can also improve the anti-interference ability of the sensor in long-distance transmission. The capacitance sensor is used as the displacement reference. The principle prototype of the grating encoder achieves a repeatability accuracy of ± 30 nm, and meets the measurement speed requirement of 10 mm/s. The short-term displacement stability of 10 s reaches 5 nm, and the long-term stability of 6 hours reaches 70 nm.

Key words: Encoder; Grating; Displacement measurement; Stability; High precision instrument

OCIS Codes: 120.3930; 280.3420; 130.6010

0 引言

精密位移测量在机械加工、半导体制造和航空航天等领域具有关键作用。随着微机电系统(Micro-

基金项目:国家重点研发计划(No.2016YFF0101804),国家自然科学基金重点项目(No.51835007),佛山—清华产学研合作协同创新专项(No.2019THFS01)

第一作者:魏正杰(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为光学精密测量。Email:weizj14@foxmail.com

导师(通讯作者):吴冠豪(1981—),男,副教授,博士,主要研究方向为光学精密测量。Email:guanhaowu@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2021-05-09;**录用日期:**2021-06-17

<http://www.photon.ac.cn>

Electro-Mechanical System, MEMS)领域对精密加工精度的要求逐年提高,一些高端机床已经配备了超精密光栅位移传感器作为位移控制器件。在半导体加工中,诸如SMT贴片机、刻蚀机、光刻机等设备中也采用光栅传感器进行位移监测,提高光栅传感器的定位精度,对于突破半导体行业的集成电路摩尔定律具有重要意义^[1]。目前主流采用的高精度位移测量传感器主要有激光干涉仪和光栅位移传感器两种。

激光干涉仪和光栅位移传感器是两种超高精度、超高分辨率的位移测量传感器。激光干涉仪以激光波长为测量基准,1970年惠普公司(Hewlett-Packard)发布的HP5525双频激光干涉仪,在测量量程范围内达到79 nm的测量精度,成为工业精密测量、科研领域的首选测距设备^[2]。经过多年发展,目前安捷伦公司(Agilent)的干涉仪测量分辨率可达0.25 nm,激光干涉仪仍是科研领域的测距标准,但随着半导体工业和精密加工技术的迭代更新,激光干涉仪的一些劣势开始显现。一方面,干涉仪的体积较大,在精密加工设备中占据较大空间,不利于小型化。另一方面,激光干涉仪对于激光频率的稳定性,以及环境温度、折射率等参数的要求很高,需要通过复杂的补偿系统来提高其测量精度。清华大学的池峰为避免环境波动对干涉仪测量精度的影响,利用波长跟踪器和Elden公式补偿测量误差,实现双频干涉仪测量下1.61 nm的伺服精度^[3],但补偿系统的加入大大增加了测量系统的复杂度和制造成本。

光栅位移传感器以光栅的栅距为测量基准,内部光程较短,对光源稳定性和环境波动要求不高。近年来随着光栅材料、设计和半导体器件等各方位的提升,光栅位移传感器的测量性能已经可以与激光干涉仪相媲美,国际领先的光刻机厂家荷兰ASML已经在其新款光刻机中用光栅编码器替换激光干涉仪作为位移测量和反馈控制的核心设备,将 3σ 噪声水平由0.9 nm降低至了0.22 nm^[4]。

依据光电扫描方式的不同,光栅位移传感器可以分为成像扫描型和干涉扫描型两类,其中成像扫描型光栅位移传感器所使用的光栅栅距通常在20 μm 以上,干涉扫描型的栅距在8 μm 以下,精度和分辨率更高^[5]。干涉扫描型位移传感器历经了多年发展。德国的海德汉(HEIDENHAIN)公司于1987年实现了分辨率0.02 μm 的干涉型直线光栅尺,并在随后的几十年间推出多个系列的高精度光栅尺,成为业界的龙头企业。海德汉的光栅尺大多基于双光栅干涉扫描原理,其生产的LIP系列超高精度光栅尺测量精度为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$,分辨率达到1 nm。日本SONY在光栅尺领域掌握超高分辨率全息光栅制造技术,于1989年提出单光栅自准直光栅尺,通过分光镜和透射全息光栅实现二次衍射^[6],目前其最新产品已达到17 pm的分辨率。范光照教授课题组自2000年开始,发表了一系列关于线性衍射光栅干涉仪(Linear Diffraction Grating Interferometer, LDGI)的研究成果,用棱镜和波片组合实现反射型的二次衍射,分辨率为1 nm^[7-9],该系统的缺点是光学元件较多,系统复杂不易于小型化。美国的Micro E公司在小型化光栅位移传感器领域开发了一系列的微型传感器,其贴片式微型编码器尺寸在毫米级,广泛应用于SMT设备和激光雷达系统等对精度要求不高的场合。

在超精密机床和航空航天等应用场景中,由于安装空间的限制,传感器通常需要采用反射式测量光栅,测量量程范围为数mm到数百mm,分辨率要求达到0.2 nm,且对测量稳定性要求高。比较三种典型光栅位移测量系统,SONY的自准直原理虽然可以满足亚纳米的分辨率需求,但透射式光栅和分体式读数头设计使其不适用于反射式测量场景。LDGI光学系统较为复杂,光学元件较多,小型化后结构尺寸依然在50 mm量级,不适用于小空间应用,且其输出信号通过离线计算得到位移,无法与后续的细分板卡等设备的1V_{pp} sin/cos模拟接口相连接。海德汉的LIP系列超高精度光栅尺栅距较大,在测量精度、分辨率以及结构适配性等方面存在不足。

为解决反射式光栅测量场景下,高精度光栅位移传感器的尺寸过大,精度较低和接口适配等方面存在的问题,本文设计并开发了基于双光栅干涉扫描光路的微型光栅位移传感器,通过测量光路和机械结构的创新设计,实现传感器的小型化集成,同时采用1 μm 周期的全息光栅和高速信号处理系统,开发了增量式差分输出电路接口,实现了高精度微型光栅传感器的研制。利用半导体激光器和透射光栅、反射光栅组成的双光栅光电扫描光路产生三路具有一定相位差的干涉信号,经算法处理后得到两路包含相移信息的模拟信号,将信号以差分形式输出,以降低背景光和噪声对信号的干扰,同时差分输出也有利于适配1 V_{pp}编码器接口。传感器最大尺寸为32 mm,生产了数套光栅位移传感器原理样机,实现了良好的测试指标。

1 双光栅干涉扫描位移测量原理

双光栅干涉扫描光路的主要部件是光栅对,透射式的相位光栅称为参考光栅,在光路中的作用是衍射分光 and 合光;反射式的相位光栅称为测量光栅,相对参考光栅平移运动时,其衍射光会产生频移,再次经过参考光栅衍射并合光形成干涉,从而得到包含相位变化的干涉信号。

在双光栅扫描光路中,光束一共经过三次衍射,如图1所示。激光透过参考光栅产生0级、+1级和-1级三个级次的衍射光,三路衍射光分别入射到测量光栅上。根据光栅相移定理和多普勒效应,当测量光栅

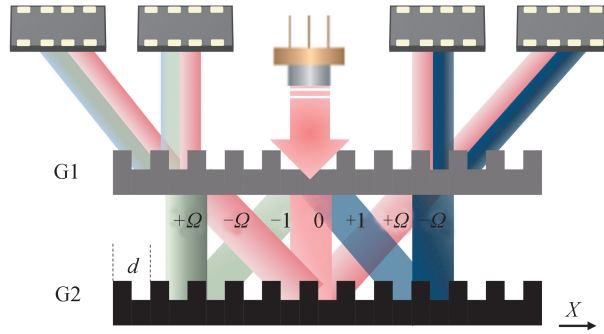


图1 双光栅衍射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of double grating diffraction

在X方向发生相对位移时,经测量光栅反射的+1级衍射光产生 $+\Omega$ 的相位变化,-1级衍射光产生 $-\Omega$ 的相位变化,该相位变化 Ω 与位移量X、栅距d,以及衍射级次呈正相关^[10]。

$$\Omega = 2\pi \times \frac{X}{d} \quad (1)$$

准直激光在双光栅系统中经过三次衍射,平行光入射到透射式参考光栅上产生第一次衍射,三路衍射光记为 B_{-1} 、 B_0 、 B_{+1} ;三路衍射光入射到测量光栅上,再次产生衍射并朝参考光栅方向反射,分别为 $B_{(-1,+1)}$ 、 $B_{(0,-1)}$ 、 $B_{(0,+1)}$ 、 $B_{(+1,-1)}$;经反射的衍射光在参考光栅处再次衍射,同方向的出射光将发生干涉。以右半边为例,光束 $B_{(0,+1)}$ 在参考光栅处衍射为 $B_{(0,+1,-1)}$ 和 $B_{(0,+1,0)}$,光束 $B_{(+1,-1)}$ 在参考光栅处衍射为 $B_{(+1,-1,+1)}$ 和 $B_{(+1,-1,0)}$,同方向出射的衍射光 $B_{(0,+1,-1)}$ 和衍射光 $B_{(+1,-1,0)}$ 、衍射光 $B_{(0,+1,0)}$ 和衍射光 $B_{(+1,-1,+1)}$ 两两之间产生干涉。干涉光的相位由两路衍射光相移之和决定,干涉光 I_1 的相位为 $2\Omega+2\varphi$;干涉光 I_2 的相位为 2Ω ;干涉光 I_3 的相位为 $2\Omega-2\varphi$ 。

三路干涉信号的干涉光强与相对位移之间的关系可以表示为

$$I_1 = a + b \cos\left(\frac{4\pi X}{d} + 2\varphi\right) \quad (2)$$

$$I_2 = a + b \cos\left(\frac{4\pi X}{d}\right) \quad (3)$$

$$I_3 = a + b \cos\left(\frac{4\pi X}{d} - 2\varphi\right) \quad (4)$$

式中, I_1 、 I_2 、 I_3 分别表示三路干涉光的光强数值, a 为直流量, b 为干涉信号振幅,X为待测位移,三个方程联立可以消除直流量 a 和交流振幅 b 对测量结果的影响,从而求解出位移 X ^[11]。通过读数头内部的光电池接收三路具有 2φ 相位差的余弦光强信号,转换为电信号并跨阻放大后,进入后级信号处理电路进行算法处理得到所需信号。

2 光栅位移传感器原理样机设计

2.1 双光栅干涉扫描测量系统

光栅位移传感器结构如图2,系统分为读数头、测量光栅和信号处理电路接口板三个组成部分,其中读数头是传感器的主要测量部件,实现位移信号的光电转换和传输。为了实现传感器的小型化布置和利于连接使用,将前置信号放大电路板布置在读数头内部,信号处理电路集成到15Pin D-SUB连接器插头中。

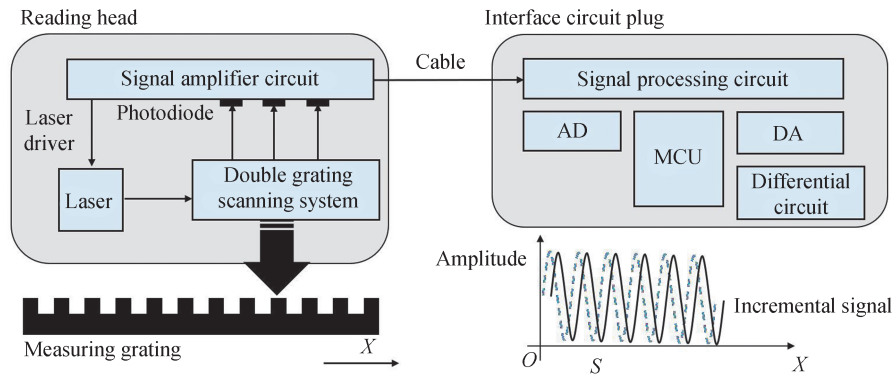


图2 双光栅干涉扫描测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of double grating interferometric scanning measurement system

读数头的双光栅扫描光路包含光源模块和光栅衍射干涉系统,光源模块使用小体积、高功率的TO封装半导体激光二极管(LD),LD经小尺寸非球面透镜准直为平行光,平行光透过参考光栅和反射光栅组成的双光栅系统后,合束后的三路干涉光准确入射到前级放大电路板的PIN光电探测器上。光电探测器将光强信号转换为微安级大小的光电流,然后经过跨阻放大电路进行I-V转换和信号放大,得到可供后续信号处理使用的电压信号,通过8Pin多芯屏蔽电缆传输至后级信号处理电路。

后级信号处理接口板主要完成干涉信号的算法计算和处理工作,三路电压信号经AD转换为数字信号,进入MCU进行算法处理后输出,传感器并不直接输出位移测量值,而是输出表征相移量 Ω 的信号 $A=\sin 2\Omega$ 和信号 $B=\cos 2\Omega$ 。更进一步,为了适配1Vpp的工业编码器接口,两路具有 90° 相位差的增量信号A和B,经DA转换后再经差分电路处理,最终输出A+、A-、B+、B-四路模拟信号。

2.2 衍射光栅模块

光栅位移传感器的衍射光栅模块分为参考光栅和测量光栅两部分,作为传感器的测量基准和信号生成元件,光栅的设计对于传感器的测量尤为重要。一方面,光栅的衍射效率影响参与干涉的两路衍射光的强度,从而影响干涉光的干涉对比度,可通过光束的衍射效率设计组合实现较高的干涉对比度。另一方面,光栅的衍射效率设计优化对于提升信噪比也有帮助,在电路噪声水平相对恒定的情况下,干涉信号对比度越大,信噪比越小。为便于说明,将双光栅光路的衍射传播过程展开为如图3所示。

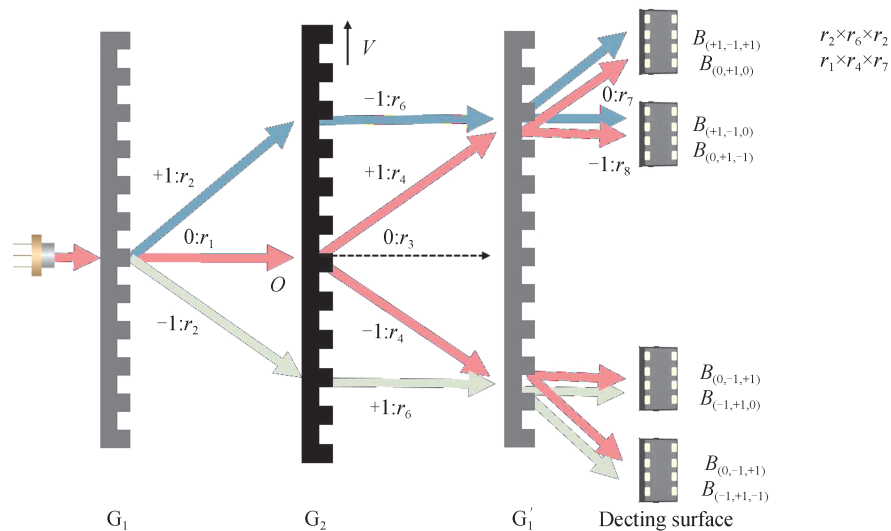


图3 双光栅系统的衍射效率示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the diffraction efficiency of the dual grating system

当垂直入射参考光栅G1时,设0级透射衍射光的衍射效率为 r_1 , ± 1 级衍射光的衍射效率为 r_2 ;对于测量光栅G2,0度入射时的 ± 1 级衍射效率为 r_4 , θ 角入射时的 ± 1 级衍射效率为 r_6 ;随后入射参考光栅G'1,光束

$B_{(+1,-1)}$ 的衍射效率同G1,光束 $B_{(0,+1)}$ 的0级衍射光衍射效率为 r_7 ,±1级衍射效率为 r_8 ,则最终探测器PD1上的两束衍射光光强分别可表示为 $r_2 \times r_6 \times r_2$ 、 $r_1 \times r_4 \times r_7$,则干涉信号 I_1 的光强可以表示为

$$I_1 = r_2 r_6 r_2 + r_7 r_4 r_1 + 2r_2 \sqrt{r_1 r_4 r_6 r_7} \cos\left(\frac{4\pi}{d} X + 2\varphi\right) \quad (5)$$

光栅设计中,通过对两块光栅不同衍射级次光线,以及不同角度入射光的衍射效率设计,使参与干涉的两路衍射光光强尽量一致,提高干涉信号对比度。以 I_1 为例,假设除 r_1 以外的衍射效率为设计值,当 r_1 在0.1~0.5之间变化时,信号 I_1 的干涉对比度先升高后降低, r_1 为0.35时对比度最高,如图4所示。

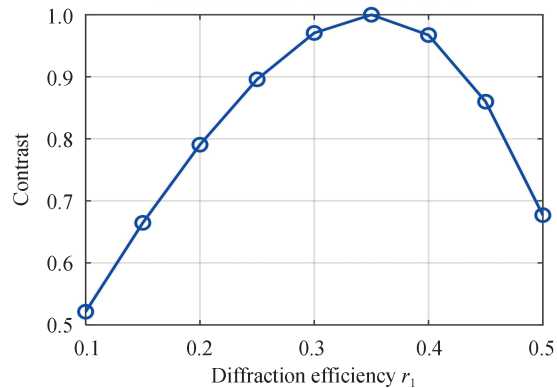


图4 干涉信号 I_1 对比度与衍射效率 r_1 的关系曲线

Fig. 4 Curve of interference signal contrast of I_1 and diffraction efficiency r_1

根据干涉信号对比度尽量大的原则,清华大学光栅与测量实验室根据各衍射级次的衍射效率、光栅周期等参数设计了参考光栅和测量光栅模块,光栅周期设计为1 000 nm,基体材料为熔融石英玻璃,根据安装需求,测量光栅尺寸为25 mm×15 mm×3 mm,参考光栅尺寸为18 mm×13 mm×1 mm,制作完成的测量光栅和参考光栅如图5所示,经测试其各项指标与设计相符,可用于传感器总装。

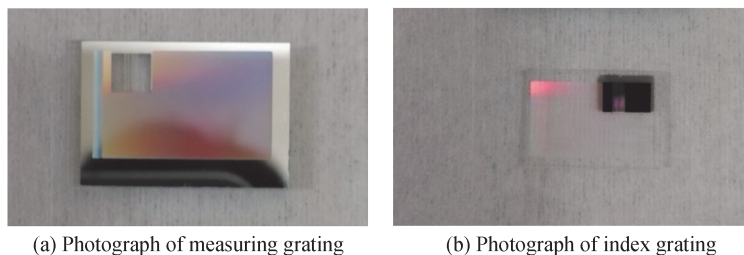


图5 光栅元件实物图

Fig. 5 Physical image of grating element

2.3 光栅位移传感器原理样机加工

通过双光栅干涉扫描光路的光学设计和公差分解,设计并加工了尺寸满足 $<40 \text{ mm} \times 28 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的光栅尺读数头。该型读数头可用于不同尺寸规格的 $1 \mu\text{m}$ 栅距反射式测量光栅,如图6所示,栅尺长度可以根据具体需求定制,并可以加入零位探测光路实现绝对位置测量。

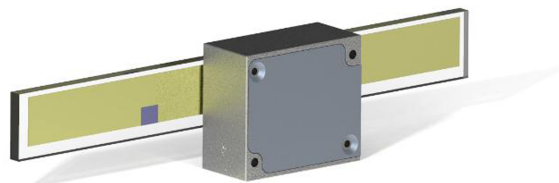


图6 光栅位移传感器的读数头与测量光栅

Fig. 6 Reading head and measuring grating of grating displacement sensor

信号处理电路根据应用需求,光栅位移传感器的信号输出接口采用 15Pin D-SUB 模拟信号输出接口,输出信号为 1 V_{pp} 的增量差分信号。差分输出可以提高远距离信号传输的稳定性,抗干扰能力强,并能有效抑制电磁干扰(EMI)^[12]。同时为了尽量减小系统的复杂度,适配后续设备的电子电路接口,做到传感器系统即插即用,将信号处理电路集成在 D-SUB 接口外壳中。图 7(a)为信号处理接口板的实物图,通过 15Pin D-SUB 端子与接头外壳连接,其输出的 A+、A-、B+、B- 四路信号为 $2.5\text{ V} \pm 0.5\text{ V}$ 的模拟差分信号,如图 7(b)所示。

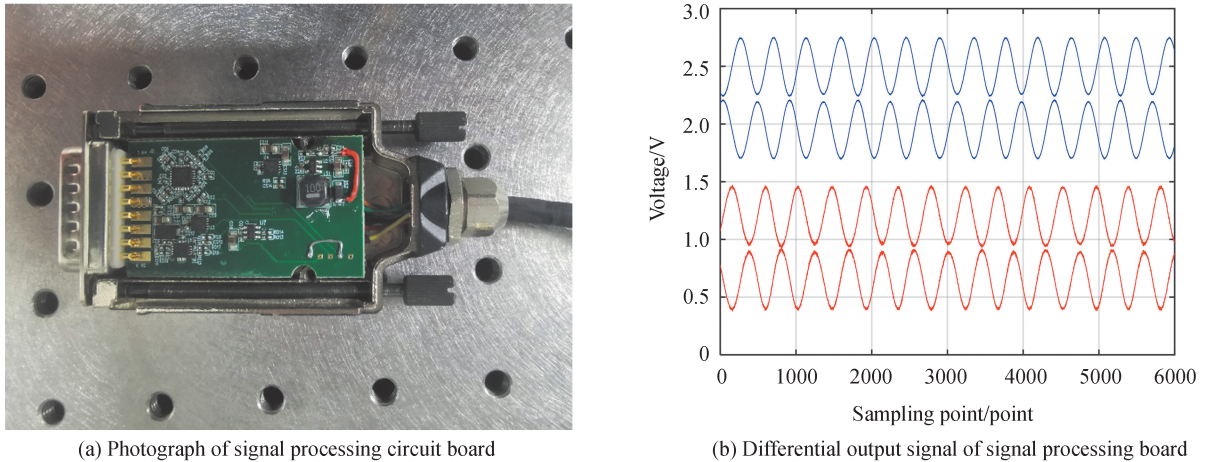


图7 信号处理电路板及其信号输出
Fig. 7 Signal processing circuit board and its signal output

读数头、测量光栅和接口电子电路组成光栅位移传感器,读数头与信号处理电路接口之间通过 8 pin 电缆连接,完成系统组装后的原理样机实物如图 8 所示。在实际测量应用中,读数头通过背部的 2.5 mm 螺孔安装在固定机构上,测量光栅通过光栅安装座结构安装于运动部件上,完全对准时,读数头与测量光栅之间的距离设置为 $2\text{ mm} \pm 0.2\text{ mm}$ 。本文研制的光栅位移传感器可抵抗较大的姿态偏摆,具有较大的对准容差,安装简便,且易于调试出符合测量标准的输出信号。

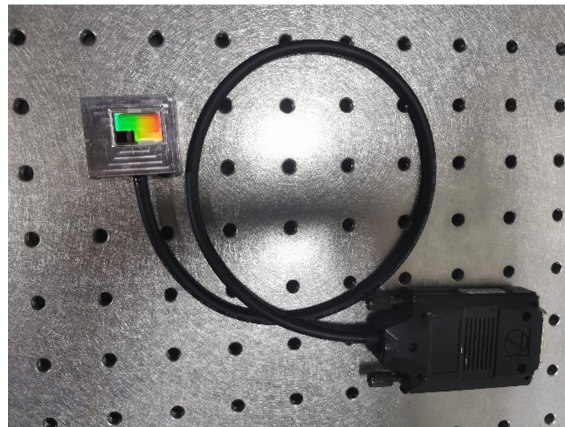


图8 光栅位移传感器原理样机
Fig. 8 Principle prototype of grating displacement sensor

3 传感器性能测试实验

3.1 位移测试平台

为了评估光栅位移传感器的增量测量性能,使用 PI 精密位移台进行了传感器性能测试,实验平台如图 9 所示,主要包括:

- 1) 位移测量标准:PI 公司的 P-621.1CD 型压电陶瓷定位器内置的电容传感器,位移台的分辨率为 0.4 nm ,

线性误差0.02%,重复精度为 ± 1 nm。

2) 光学调整架:用于调节读数头相对测量光栅俯仰的Z轴旋转台;调节偏摆相对姿态的Y轴角位移台;以及调节滚转的测量光栅安装座。

3) 光栅位移传感器:由传感器读数头,测量光栅以及15Pin D-SUB插头接口电子电路组成。

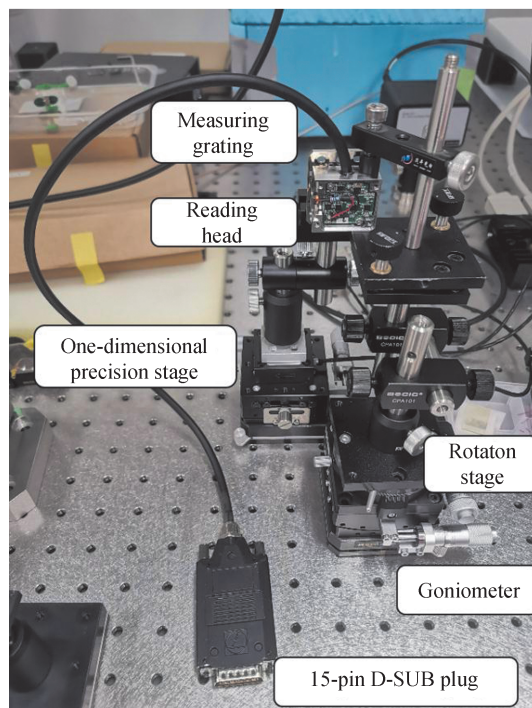


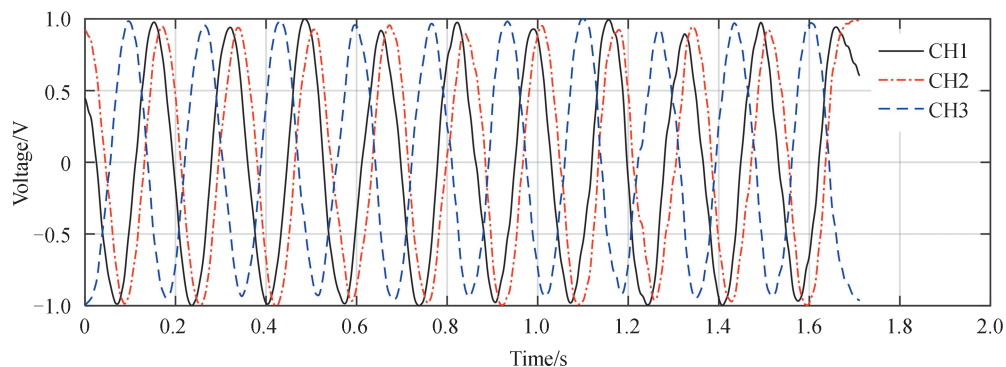
图9 传感器性能测试实验装置

Fig. 9 Sensor performance test experimental device

3.2 位移测量信号处理方法

根据式(2)~(4),来自前置放大电路的三路干涉电压信号经AD转换后,需要满足直流量和振幅相等才能进行三步移相计算,而在实际的系统中,由于光源稳定性、光电池个体差异和放大倍数差异等因素的影响,三路干涉信号的直流量和振幅有一定差距,会造成计算误差。在信号处理电路中,通过归一化算法处理,消除直流偏置和振幅的差异,从而避免该计算误差。传感器输出信号为 $1 V_{pp} \sin/\cos$ 信号,而非直接输出位移数值,在实验测试中,为了评估位移测量的性能,将信号采集后进行位移计算,下面为算法处理流程:

归一化处理。通过调节跨阻放大器的放大倍数,可以使三路干涉信号的直流、振幅接近一致,但无法做到完全一致。因此在对三路干涉信号AD采样计入MCU后,首先进行归一化计算,将三路信号的直流偏置消除,将振幅调整到一致化水平,图10(a)为归一化处理后的三路干涉信号。



(a) Normalization of three interference signal

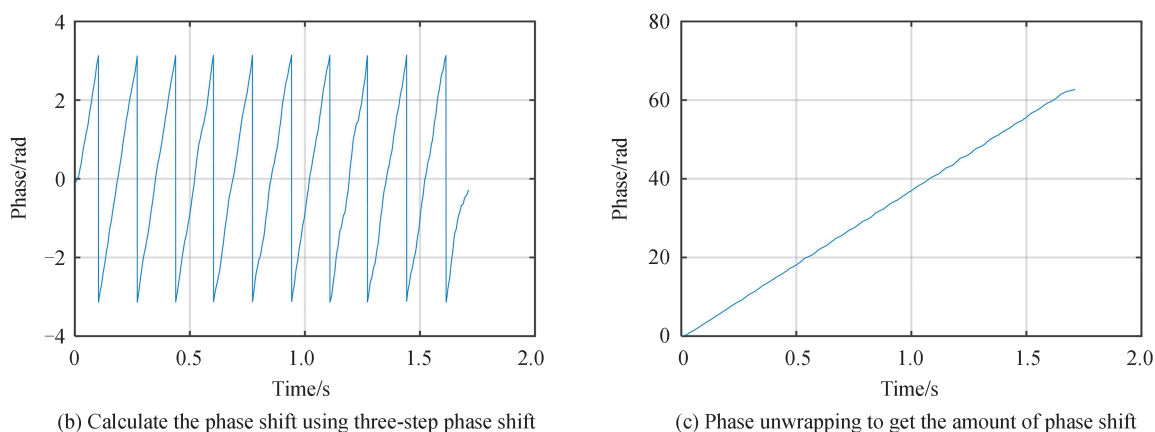


图10 传感器性能测试的信号处理流程

Fig. 10 Signal processing flow of sensor performance test

反正切计算相移。得到归一化后的三路信号后,联立式(2)、(3)、(4),根据每一点的光强值,即可计算出位移引入的相移量 Ω ,解包裹后根据 Ω ,即可计算得到测量位移值 X 。

3.3 传感器性能测试结果

为了评估增量式光栅位移传感器的位移测量性能指标,本文以纳米位移台内置的电容传感器监测位移作为基准,评估原理样机的位移测量精度。在实验环境下,采集传感器开机6 h内的输出信号,以评估其长时稳定性和短时稳定性。用高速位移台带动测量光栅以大于10 mm/s的速度运动,采集传感器输出信号,评估传感器是否满足10 mm/s的最大速度测量需求。

3.3.1 重复性精度实验结果

在实际的位移测量系统中,通过信号细分板卡实时采集并处理光栅位移传感器输出的模拟信号,从而实时计算当前位移值。在本文的性能测试实验中,通过采集卡采集下传感器的输出信号,离线进行反正切计算,得到传感器样机的位移测量值。驱动纳米位移台每次运动约5 μm 位移,重复5次,记录光栅尺的位移计算结果,与纳米位移台的测量结果进行对比,光栅位移传感器的5次测量标准差在30 nm左右,如表1所示。

表1 光栅传感器与电容传感器的位移测量结果

Table 1 Displacement measurement results of grating encoder and capacitive sensor

Tests	Displacement measured by grating encoder	Displacement measured by capacitive sensor
1	4.956	4.847
2	4.928	4.812
3	4.998	4.870
4	4.953	4.841
5	4.921	4.839
Standard deviation/ μm	0.030 5	0.020 8

光栅位移传感器的测量光栅和电容传感器的轴线之间存在一定夹角,因此表1中的电容传感器测量位移相比光栅传感器位移稍小,属于线性误差,可通过补偿修正。通过数据标定进行误差补偿,预先测量记录下电容传感器和光栅传感器的10次位移测量值,计算二者10次测量值之差的平均值作为补偿量,修正光栅尺的测量位移。在单次测量中,以电容传感器位移为基准,可知传感器的位移误差约为 ± 30 nm,如图11所示。

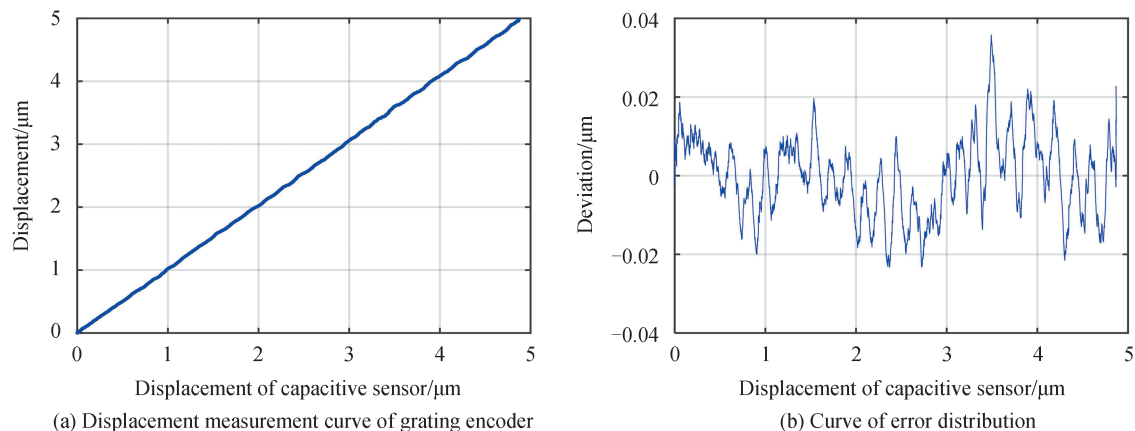


图 11 光栅位移传感器与电容传感器测量结果对比

Fig. 11 Comparison of measurement results of grating encoder and capacitance sensor

3.3.2 稳定性实验结果

光栅位移传感器的稳定性主要受环境低频扰动和光栅尺信号噪声的影响,目前国际领先的光栅位移传感器已经在一定范围内实现了纳米级的稳定性^[13]。本文在实验室环境下,进行了光栅位移传感器的短时稳定性实验和长时稳定性实验,以定量评估环境波动对传感器测量结果的影响。如图 12 所示,传感器 6 小时长时稳定性大约在 70 nm 左右,10 s 内的短时位移稳定性波动在 5 nm 左右。

在长时稳定性实验中,用数据采集卡以 1 Hz 的频率采集光栅位移传感器的输出信号,持续采集 6 h,得到如图 12(a)所示的位移测量数据,可见传感器的输出信号在前 3 h 左右存在缓变,3 h 后输出数据趋于稳定。一方面是因为光栅尺开机后需要一定的预热时间,温度稳定后测量结果趋于稳定;另一方面,栅尺和读数头分别通过螺钉安装于栅尺平台和读数头平台上,进行稳定性测量,螺钉紧固后工装存在应力释放的过程,因此对于纳米级的测量来讲,应力释放会导致栅尺和读数头之间产生微小位移,再加上温漂的影响,造成了约 70 nm 的长时位移稳定性。3 h 后应力释放完毕且温度达到平衡,光栅传感器的位移稳定性约为 5 nm。

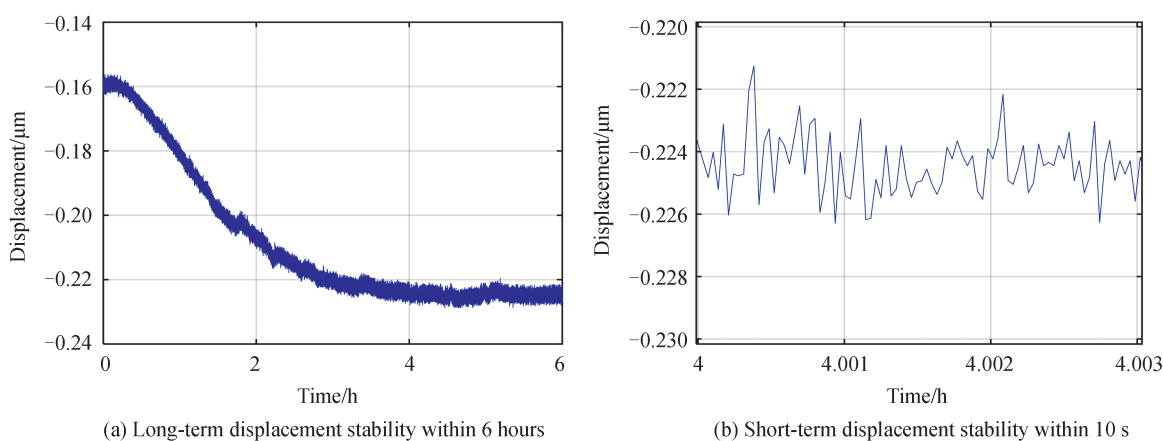


图 12 传感器位移测量稳定性

Fig. 12 Displacement measurement stability of the sensor

稳定性测试结果表明,所研制的光栅位移传感器原理样机的测量稳定性很好,短时位移稳定性达到 5 nm,具有较好的环境鲁棒性,抗环境干扰能力强。

3.3.3 测量速度实验结果

测量速度是光栅传感器开发中必须考虑的指标。在超精密加工设备中,可以通过光栅位移测量等技术对调节结构进行实时测量和补偿^[14],从而提高加工精度。本文光栅传感器的最大速度指标为 10 mm/s,移动速度对光栅位移传感器的数据处理性能和数据输出速率提出要求,根据式(1),光栅读数头和测量光栅每相

对运动一个栅距 $d(d=1\ \mu\text{m})$ 的位移,将产生两个信号周期,则在最大运动速度下,光栅尺信号频率为

$$f = \frac{V \times 1}{d} \times 2 = 20\ \text{kHz} \quad (6)$$

光栅尺的信号处理板在参数设计时满足信号频率要求,在速度测量实验中,位移台以 $10\ \text{mm/s}$ 的速度运动,采集卡以 $1\ \text{MHz}$ 的采样率记录信号处理板输出信号,得到如图 13 所示的输出信号差分测量结果。从图中可得,在 $0.0005\ \text{s}$ 的时间内采集到 12 个信号周期,即测量得到的运动速度为

$$V = \frac{1}{0.0005\ \text{s}} \times 12 \times 500\ \text{nm} = 12\ \text{mm/s} \quad (7)$$

从图 13 可以看出,光栅尺的测量速度完全满足 $10\ \text{mm/s}$ 的运动速度要求,测量中采用 OptoSigma 的 OSMS(CS)26-100(X) 系列位移台作为运动位移台,其在高速运动时不是匀速运动,运动速度具有周期性波动,因此图中的速度计算结果大于 $10\ \text{mm/s}$ 。

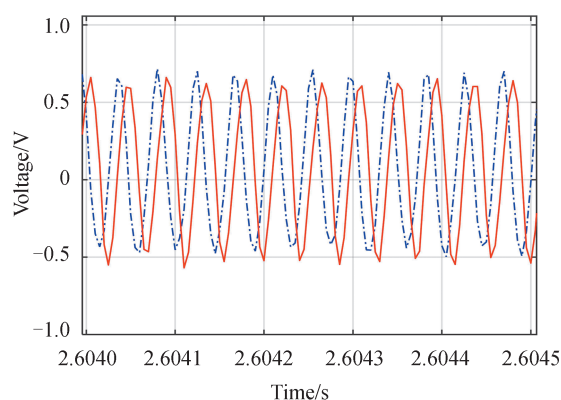


图 13 $10\ \text{mm/s}$ 速度下传感器输出信号

Fig. 13 The output signal of the encoder at a speed of $10\ \text{mm/s}$

根据测试结果,光栅位移传感器实现了小型化集成和高精度位移测量,表 2 展示了所研制的原理样机与 LDGI 系统、海德汉 LIP481 商用光栅尺等传感器的部分参数对比。

表 2 光栅传感器与其他系统的部分性能对比

Table 2 Partial performance comparison between grating sensor and other systems

Performance	Grating encoder	LDGI system	HEIDENHAIN LIP481
Size	$32\ \text{mm} \times 28\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$	$50\ \text{mm} \times 45\ \text{mm} \times 24\ \text{mm}$	$28\ \text{mm} \times 18\ \text{mm} \times 24\ \text{mm}$
Grating pitch	$1\ \mu\text{m}$	$1\ \mu\text{m}$	$4\ \mu\text{m}$
Signal period	$500\ \text{nm}$	$500\ \text{nm}$	$2\ \mu\text{m}$
Repeatability	$\pm 30\ \text{nm}$	$\pm 10\ \text{nm}$	$\pm 0.5\ \mu\text{m}$
Short-term stability	$5\ \text{nm}$	—	$2\ \text{nm}$

原理样机实现了读数头的小型化开发,最大尺寸为 $32\ \text{mm}$,解决了 LDGI 系统不满足高端装备空间限制的问题。由于采用了 $1\ \mu\text{m}$ 栅距的全息光栅,并通过光路实现二倍频,得到 $500\ \text{nm}$ 的信号周期,实现了一维位移的高精度测量。经测试,原理样机的短时稳定性为 $5\ \text{nm}$,相比于海德汉的 LIP481 的 $2\ \text{nm}$ 左右较差,这是因为电路噪声的限制,在下一步迭代中主要工作是提升电路性能以降低噪声水平。

4 结论

本文基于双光栅干涉扫描原理,设计了高精度光栅位移传感器原理样机,实现高精度增量位移测量。传感器以差分形式输出两路相位差 90° 的 $1\ \text{V}_{\text{pp}} \sin/\cos$ 模拟差分信号 A 和 B ,即 $A+$ 、 $A-$ 和 $B+$ 、 $B-$,可以适配 RS422 接口细分卡,并可提高系统的抗干扰能力。搭建了微型光栅位移传感器原理样机,尺寸为 $32\ \text{mm} \times 28\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$,将信号处理电路板集成到 15Pin D-SUB 插头中,实现传感器的高度集成。对原理样机进行了设计指标性能测试,与纳米位移台中的电容传感器比对,光栅位移传感器实现了 $\pm 30\ \text{nm}$ 的重复性精度;

传感器同时具有较好的稳定性,10 s短时位移稳定性可达5 nm;传感器满足10 mm/s的最大测量速度需求。本文探索了高精度光栅位移传感器的开发,搭建了原理样机,实现了高精度、高稳定性的位移测量,未来拟进一步优化光路设计和电路设计,降低信号噪声,以将稳定性提高到1 nm以内,并可加入零位测量光路实现绝对位置测量^[15],以扩大产品的适用范围。

参考文献

- [1] PIRATI A, SCHOOT J V, TROOST K, et al. The future of EUV lithography: enabling Moore's Law in the next decade [J]. *Advanced Lithography*, 2017, 10143: 101430G.
- [2] RUDD A F, WARD M J. Laser transducer systems for high-accuracy machine positioning[J]. *Hewlett Packard Journal*, 1976, 27(6): 2-6.
- [3] CHI Feng, ZHU Yu, ZHANG Zhiping, et al. Environment compensation technologies in dual-frequency laser interferometer measurement system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(4):190-196.
池峰, 朱煜, 张志平, 等. 双频激光干涉测量中的环境补偿技术 [J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 190-196.
- [4] CASTENMILLER T, MAST F V D, KORT T D, et al. Towards ultimate optical lithography with NXT: 1950i dual stage immersion platform [J]. *Advanced Lithography*, 2010, 7640:76401N.
- [5] WANG Guochao, YAN Shuhua, GAO L, et al. Development of displacement measurement technologies based on grating interferometry[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(5): 661-664+716.
王国超, 颜树华, 高雷, 等. 光栅干涉位移测量技术发展综述[J]. *激光技术*, 2010, 34(5): 661-664+716.
- [6] AKIHIRO K. Optical displacement measurement system: US, 6407815B2[P]. 2002-06-18.
- [7] CHENG Fang, FAN K C. Linear diffraction grating interferometer with high alignment tolerance and high accuracy [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(22): 4550-4556.
- [8] 刘玉圣. 高精度线性衍射光栅干涉仪系统的研制 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [9] FAN K C, LIB K, LIU C H. A diffraction grating scale for long range and nanometer resolution[C]. *SPIE*, 2008, 7133(1): 44-48.
- [10] GAO Jinlei, ZONG Mingcheng. Development of symmetrical double-grating interferometric displacement measuring system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9):126-132.
高金磊, 宗明成. 一种对称式双光栅干涉位移测量系统的研制[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 126-132.
- [11] WANG Shenghuai, YANG Xudong, XIE Tiebang. Principle and application of double diffraction grating displacement sensor [J]. *Metrology Technology*, 2008, (6): 7-10.
王生怀, 杨旭东, 谢铁邦. 双衍射光栅位移传感器原理及应用[J]. *计量技术*, 2008, (6): 7-10.
- [12] 陈建华. PCB传输线信号完整性及电磁兼容特性研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [13] DENG J, YAN X, WEI C, et al. Eightfold optical encoder with high-density grating[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10): 2366.
- [14] 李朋志. 压电促动器的纳米级精度控制及其在光刻物镜中的应用研究 [D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
- [15] MAO X, ZENG L. Design and fabrication of crossed gratings with multiple zero-reference marks for planar encoders[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(2): 025204.