

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.07

大量程高性能光栅位移测量技术

刘林, 刘兆武, 于宏柱, 王伟, 姜岩秀, 姜珊, 孙宇佳,

金思宇, 梁旭, 巴音贺希格, 李文昊*

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 高精度光栅位移测量系统具有纳米级重复精度、环境适应性强、维度易于扩展等优点, 可以满足精密制造行业对米级测量量程、亚微米级精度与多维测量能力融合的测量技术要求, 在高端制造、精密仪器等领域有重要应用。通过对测量光栅的各项参数进行研究, 提升了测量光栅的尺寸与制作精度; 提出高精度锥面衍射光栅位移测量、高倍细分转向干涉光栅位移测量、“品”字形拼接大量程光栅位移测量等技术, 实现了数百毫米测量量程亚微米级测量精度。从光栅制作到测量系统研制对提升精度、分辨力及量程提供了理论分析与技术验证。

关键词: 光栅位移测量; 锥面衍射; 转向干涉; 大量程拼接

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2023)01-0081-10

Large range and high performance grating displacement measurement technology

LIU Lin, LIU Zhaowu, YU Hongzhu, WANG Wei, JIANG Yanxiu, JIANG Shan

SUN Yujia, JIN Siyu, LIANG Xu, BAYANHESHIG, LI Wenhao*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China)

Abstract: High-precision grating displacement measurement system has the advantages of nanometer repetition accuracy, strong environmental adaptability, and easy expansion of dimensions. It can meet the measurement requirements of the precision manufacturing industry for the integration of meter-level measurement range, submicron-level accuracy and multi-dimensional measurement capability. It has important applications in high-end manufacturing, precision instruments and other fields. By studying the parameters of the measuring grating, the size and manufacturing accuracy of the measuring grating are improved. High-precision conical diffraction grating displacement measurement, high power subdividing steering interferometric grating displacement measurement, 品-shaped splicing large range grating displacement measurement and other technologies are proposed to achieve sub-micron measurement accuracy in hundreds of millimeter measurement range. From grating fabrication to measurement system development, theoretical analysis and technical verification are provided for improving measurement accuracy, resolution and range.

Key words: gating displacement measurement; conical diffraction; steering interference; large range splicing

收稿日期: 2023-01-09; **修回日期:** 2023-01-25

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(C类)(XDC04030100); 国家自然科学基金项目(U21A20509)

引用格式: 刘林, 刘兆武, 于宏柱, 等. 大量程高性能光栅位移测量技术[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 81-90.

Citation: LIU L, LIU Z W, YU H Z, et al. Large range and high performance grating displacement measurement technology[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43(1):81-90.



0 引言

超精密测量技术是现代加工及制造领域的基础,其量程和精度决定着制造的尺寸和精度^[1-4]。21世纪以来,集成电路、半导体制造等领域突飞猛进,它们代表着一个国家装备制造以及现代工业生产水平,尤其是集成电路产业的飞速发展,带动着现代智能制造以及信息技术的腾飞。高精度光栅位移测量系统^[5-6]以光栅为量尺,以光栅栅距为测量基准,相比于波长基准的激光干涉仪,光栅刻槽对环境变化的敏感度低;且光束入射到光栅上会覆盖数以千计的刻槽,起到了平均的作用,减少了由加工引起的基准微观形貌变化,从统计规律上提供了高精度的测量基准。

高精度光栅位移测量系统^[7-10]在航空航天、高端制造、精密仪器等领域具有广泛的应用,其性能直接决定高端精密仪器和装备制造业的水平。在航空航天领域,高性能载荷(如光谱仪)核心器件的加工制造离不开精进的光栅位移测量技术,测量的精准性直接影响其性能的优劣;在高端制造领域,光栅位移测量系统作为高档数控机床轴系、工作台及刀架等部件的高精度定位反馈装置,直接决定了机床加工精度;在精密仪器领域,光栅位移测量系统为多自由度位置测量及定位提供稳定可靠而紧凑的解决方案,是保障先进精密仪器高精度指标的核心前提条件。以上应用需求充分体现了高精度位移测量技术是中国高端制造的基石,决定着我国精密加工乃至整个工业制造和装备技术的制造精度,将对我国军工及民用各领域的发展产生深远影响。

德国海德汉公司基本垄断光栅测量技术与产品,其产品系列中顶端产品,一维传感器LIP382采用512 nm栅距的光栅,最大测量量程为270 mm,精度等级为 $\pm 0.5 \mu\text{m}$;LIP201系列采用2 μm 栅距光栅,可在最大量程1020 mm内实现 $\pm 1 \mu\text{m}$ 测量精度;KGM282为二维传感器,采用8 μm 栅距的二维光栅,可实现直径220 mm的二维测量。我国光栅测量行业集中于20 μm 的莫尔条纹测量产品,尚未有2 μm 栅距以下的光栅位移测量产品。

自21世纪以来,国内系统开展了高精度光栅

位移测量技术的研究,并在清华大学、哈尔滨工业大学、上海光机所、合肥工业大学以及长春光机所等单位的不懈努力下取得了长足的发展^[11-19]。但由于光栅制作工艺限制,无法制作大尺寸纳米精度的测量光栅,高精度光栅位移测量技术难以从实验室技术转化至产业技术,从测量光栅设计、制作、检测到批量化等全工艺链条未能实现自主可控。作者课题组依托国家光栅制造与应用工程技术研究中心丰富的光栅制作与检测经验,从光栅位移测量核心基准光栅的衍射特性与制作技术出发,在大尺寸纳米精度测量光栅研制及高精度光栅位移测量系统研究方面取得了重要进展。

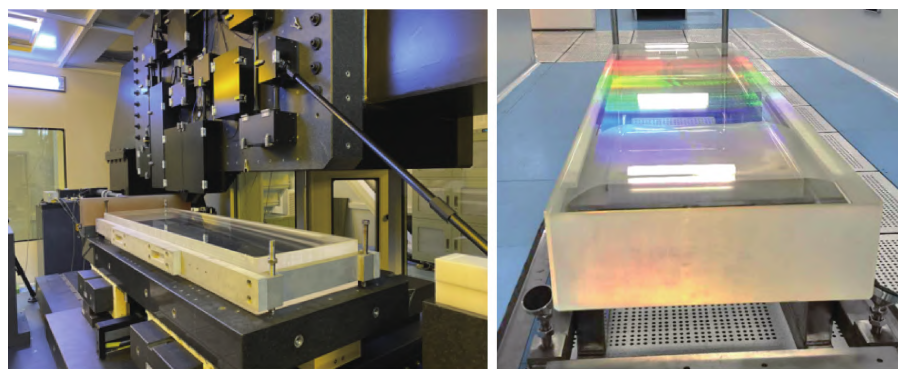
本课题组所提出的高精度锥面衍射光栅位移测量、高倍细分转向干涉光栅位移测量、“品”字形拼接大量程位移测量等技术结合大尺寸高精度测量光栅制作工艺,实现数百毫米量程亚微米级的测量精度。后文将详细介绍作者课题组在大尺寸测量光栅研制及三种高性能光栅位移测量技术中取得的成果,并简要分析未来的工作方向,预测精密光栅位移测量发展前景。

1 大尺寸高精度测量光栅制作技术

在国家自然科学基金委国家重大科研仪器设备研制专项的支持下,由长春光机所国家光栅制造与应用工程技术研究中心研制出了拥有制作最大面积650 mm × 1700 mm单体无拼缝全息光栅能力的扫描干涉场曝光系统,解决和突破了扫描曝光干涉场超精密测量控制及相位锁定、长程重载工作台超精密定位等十几项基础问题和关键技术^[20-23],具备米级尺寸纳米级栅线精度的测量光栅制作能力,如图1所示。大尺寸高精度测量光栅研制关键技术如下:

1) 高掩模均匀性控制技术

提出了光学系统拓扑结构及光学参数综合优化方法,实现了曝光光束角度和位置误差的解耦,并创建了新型动态增益调整迭代算法,通过压缩初始光束参数超调量和加快收敛速度,解决了光束对准超调量不易控制、调整迭代时间长的难题,实现了曝光光束角度稳定误差小于1 μrad ,位置稳定误差小于5 μm ,保障了曝光对比度与掩模均匀性。



(a) 扫描干涉曝光系统
(a) SIBL system

(b) 扫描曝光制作的光栅
(b) Grating made by scanning exposure

图1 扫描干涉曝光系统和扫描曝光制作的光栅

Fig.1 SIBL system and Grating made by scanning exposure

2) 高精度刻线位置控制技术

建立了扫描干涉场曝光条件下光栅刻线分布数学模型,提出了采用差频测量技术提取基准光栅相位信息并基于基准光栅的干涉条纹非线性度和方向的测量调整方法,结合曝光光束姿态和波前调控,实现了干涉条纹非线性度优于7 nm,方向优于9 μrad ,对光栅刻线位置产生的影响小于1 nm。

3) 高精度刻线检测拼接技术

提出了分束棱镜位移与探测光强同步时基高速(50 kHz)采集,并将带通滤波、数据插值和频谱分析方法相结合,提高了测量重复性和抗干扰能力,使干涉条纹周期测量误差小于 10^{-6} 。提出了利用四合一棱镜的干涉条纹相位外差式对称测量方法,创建了扫描干涉场动态相位锁定参考值模型,通过硬件及以太网高速互联的分布式控制系统进行协同控制,对曝光过程中干涉条纹相位误差进行动态补偿,相位锁定误差小于3 nm,保证了光栅刻线的精准拼接。

4) 超大量程纳米级二维定位技术

开发了伸缩式多级嵌套测量光路密封结构,实现了从曝光光束到测量光束的全光路封闭传输,降低了环境扰动对测量精度的影响。提出了X轴测量镜面形三点正逆积分检测方法,研制了以700 mm单轴测量镜实现正交双轴测量镜功能的新型在线检测系统,避免了工作台Y轴长达1800 mm测量镜的使用,降低了装备的复杂度。提出了利用三路激光干涉仪的检测结构,实现了X轴测量镜面形误差数据实时在线补偿,确保了光栅衍射波前质量。

5) 超长行程超重载荷工作台系统研制

优化了扫描干涉场双层工作台结构,突破了高比刚度氧化铝陶瓷材料的烧结、研磨、钻孔等技术和工艺难题,研制了一致性极高的氧化铝陶瓷导轨组件,采用现场边精研、边检测、边装调的工艺方案,实现了装调过程中的误差校准和误差修正,提高了工作台的总体输出精度,有效行程为1700 mm的X向导轨直线性优于0.1",载重1347 kg的工作台X向定位误差小于50 nm,有效行程为650 mm、载重278 kg的工作台Y向运行速度稳定性优于1%。

以上技术充分证明了大尺寸测量光栅制作技术在理论与制作上的高可靠性与准确度,并能够为一维、二维及大尺寸光栅测量系统提供大尺寸高精度高刻线密度的测量光栅。

2 高精度光栅位移测量方法

光栅在运动过程中,光源发出的光与接收器接收的光存在多普勒效应引起的频移,如图2所示。式(1)中, f_0 为光源的出射频率, f_s 为光栅处频率,测量光束的频率 f_r 变化与光栅运动速度 v 、衍射级次 m 和光栅栅距 d 有关,通过解算测量光束的频率变化可求解出光栅运动的位移,且仅与光栅栅距 d 有关,光栅栅距越小,位移分辨力越小。

$$f_r = f_0 - \frac{vm}{d} \quad (1)$$

以外差式光栅位移测量光路为例,如图3所示,双频光源发出具有两束不同频率的正交偏振

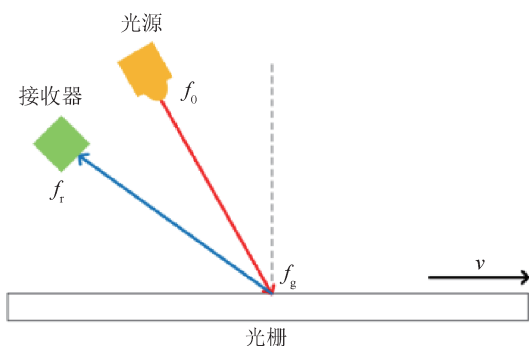


图2 光栅运动的多普勒效应

Fig.2 Doppler effect of grating motion

光束，先通过分束镜分为两束，反射的两束光经偏振片整合到统一光轴发生干涉，经分束镜分束后的透射光束入射至测量结构中，由偏振分束镜进行分光，一束入射至测量光栅，另一束入射至参考光栅以保证两束测量光束等光程，最后通过偏振分束镜汇聚至有偏振片的探测器，此时便可得到两束干涉的信号，公式为

$$I_r \propto A_{1r}^2 + A_{2r}^2 + 2A_{1r}A_{2r} \cos[2\pi(f_1 - f_2)t] \quad (2)$$

$$I_m \propto A_{1m}^2 + A_{2m}^2 + 2A_{1m}A_{2m} \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \Delta f]$$

式中： A_1 ， A_2 为不同频率光振幅； I_r 为参考光束强度； I_m 为测量光束强度； Δf 为位移引起的频率变化。

将参考光 I_r 与测量光 I_m 连接至信号处理系统，便可求解出频率变化，根据多普勒效应中频率与运动的关系即可求解出光栅的位移信息。

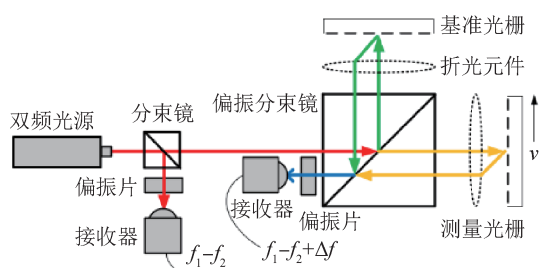


图3 外差式光栅位移测量光路

Fig.3 Optical path of heterodyne grating interferometer

2.1 高精度锥面衍射光栅位移测量技术

在光栅精密测量系统中，激光入射方式主要有：垂直入射和倾斜入射（常用为利特罗入射），如图4所示。垂直入射时，光栅上只有一个衍射点，可明确计算得出光栅面形误差干扰。但垂直入射方式所使用的光栅刻线密度受到光栅方程限制，高刻线密度光栅与高相干光源存在矛盾。

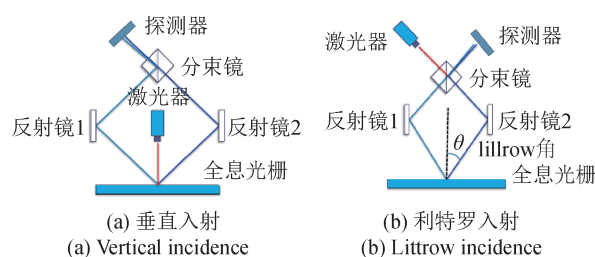


图4 激光入射方式

Fig.4 Laser incidence mode

如图4(b)所示，倾斜入射中入射光从对称方向以利特罗角入射到光栅上，衍射光沿原路返回读数头。对于相同波长的激光，利特罗入射可使用更高刻线密度的光栅，这样更有利于提高系统的光学分辨力。但该结构存在两类问题，一是两束测量光在光栅表面共点引起的反、衍射光信号混叠会引入额外的相位误差；二是波片加工与装调偏差会引入多阶非线性误差。两类问题共同限制了利特罗式结构测量精度。

无论是垂直入射还是倾斜入射，都存在不可忽视的问题。基于此，作者所在课题组提出了一种新的入射方式—锥面入射^[24-25]。如图5所示，将入射光与光栅截面设置一定的方位角，反射光与各级衍射光在空间实现分离，即锥面衍射状态。这种入射方式可综合垂直入射和倾斜入射的优点，既可使用更高刻线密度的光栅，又避免了利特罗倾斜入射时遇到的测量光混叠，且由于入射到光栅上的是同一点，排除了光栅面形误差对测量结果的影响。

当采用锥面衍射时，选择合适的方位角与入射角可使衍射光的偏振态旋转一定角度，偏振态

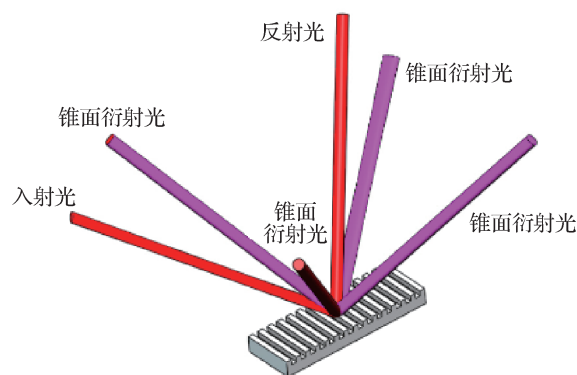


图5 光栅锥面入射

Fig.5 Conical incidence of diffraction grating

变化可用严格耦合波方法进行仿真分析。此效应应用于光栅位移测量中,可替代四分之一波片,减少系统中由四分之一波片性能不佳和装配误差引起的多阶非线性误差。

基于锥面衍射将衍射光与反射光分离且进行偏振调制的特性,创新性地提出了基于锥面衍射结构的光栅干涉测量方法。测量结构如图6所示,激光器出射的激光,经过偏振分束棱镜(PBS)后,分为透射的P偏振光与反射的S偏振光,以P偏振光(紫色)为例,透射的P偏振光经反射镜以入射角 45° ,方位角 45° 入射至光栅,其-1级衍射光以特定方位角及衍射角出射,方位角及衍射角可由锥面衍射下的光栅方程得到,蓝色为0级衍射反射光。-1级衍射光垂直入射至光栅,经反射镜垂直反射再次锥面入射至光栅,第二次衍射光与入射光路相同,再次经反射镜返回至PBS,由于光栅在锥面衍射下的调制功能,两次衍射后的衍射光偏振态发生改变,为椭圆偏振光,衍射光中的S偏振态分量将由PBS反射,进入后续信号处理部分。同理,反射的S偏振光,图中为红色,沿相似路径发生两次衍射,偏振态发生改变,从PBS透射至信号处理部分。

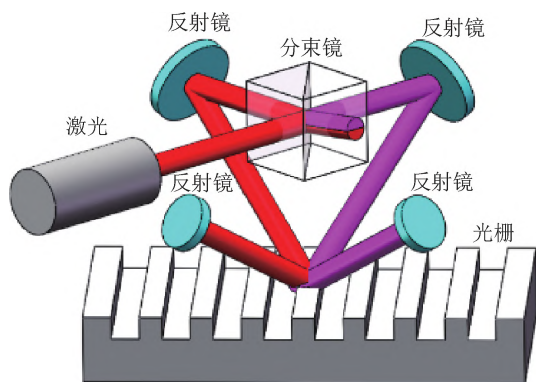
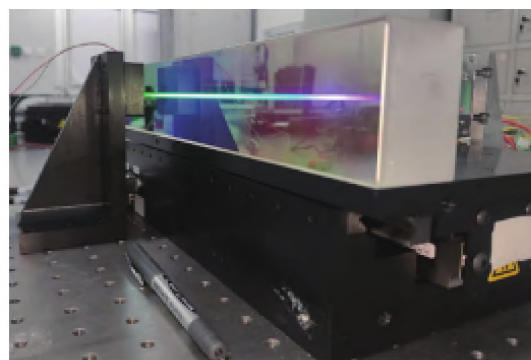


图6 锥面衍射光栅位移测量

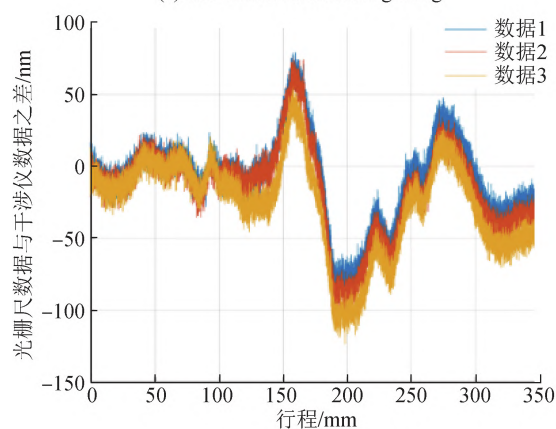
Fig.6 Conical diffraction grating interferometer

作者所在课题组基于锥面衍射原理进行了原理性位移测量系统的搭建与实验,分析与补偿重复测量中的误差,43 mm量程的测量误差为45 nm。并依托扫描干涉曝光技术研制了有效测量尺寸大于300 mm、光栅刻线密度1800 gr/mm的一维测量光栅,如图7(a)所示,并基于此研制了测量量程大于300 mm、误差小于200 nm的一维光栅线位



(a) 300 mm测量光栅

(a) 300 mm measurement grating



(b) 全量程测量误差

(b) Full range measurement error

图7 基于锥面衍射的高精度光栅测量系统

Fig.7 High precision grating interferometer by conical diffraction

移传感器,全量程误差示意图如图7(b)所示,验证了锥面位移测量技术的高重复精度。

2.2 高倍细分转向干涉光栅位移测量技术

传统二维光栅位移测量方式通过直接或间接检测对称级次衍射光的相位变化解算出二维位移信息,单次衍射仅能实现二倍光学细分,测量分辨率受限于测量波长和光栅栅距。通过多次衍射可提高光学细分倍数,但会导致测量光路结构复杂、稳定性差,且由于多点多次入射至测量光栅,测量信号中会引入不同点处光栅的面形误差和刻线误差,并且随着读数头运动误差耦合会变得更加严重,难以解耦分离。

作者课题组提出光栅衍射光转向干涉测量信号调制技术^[26],将对称级次的差频光交叉干涉,监测双向多普勒频移,一次衍射即可实现四倍光学细分,并且转向结构的引入使得光路结构更加

紧凑,易于小型化设计,提高了测量的可靠性。测量原理如图8所示。

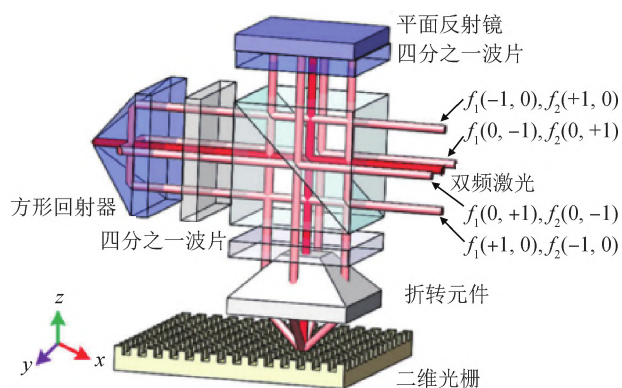


图8 单次衍射四倍光学细分的二维光栅位移测量

Fig.8 Schematic diagram of 2D grating displacement measurement with single diffraction quadruple optical subdivision

双频激光器出射 (f_1, f_2) 频率的正交线偏振光,经偏振分光镜(PBS)分光,反射光 f_1 经四分之一波片(QWP)、平面镜(M)反射后改变偏振态,经偏振分光镜透射;透射光 f_2 经四分之一波片、方形回射器垂直射出,经偏振分光镜反射。测量光垂直入射至光栅出射八束衍射光, f_1 为 $(+1, 0)$, $(-1, 0)$, $(0, +1)$ 和 $(0, -1)$; f_2 为 $(+1, 0)$, $(-1, 0)$, $(0, +1)$ 和 $(0, -1)$ 。

沿 X 方向, $f_1(+1, 0)$ 衍射光经折转元件、四分之一波片,于PBS反射,经四分之一波片和方形回射器的两次反射,经PBS透射,入射至接收器; $f_2(-1, 0)$ 衍射光经折转元件、四分之一波片,于PBS透射,经四分之一波片和平面镜反射,经PBS反射,入射至接收器,与 $f_1(+1, 0)$ 衍射光发生干涉,得到 X 方向 $+2\Delta f$ 的频移量; $f_1(-1, 0)$ 沿相似路径与 $f_2(+1, 0)$ 衍射光发生干涉,得到 X 方向 $-2\Delta f$ 的频移量;对 X 向的两路干涉信号进行解耦计算,可得到光栅 X 向位移。

同理,沿 Y 方向, $f_2(0, -1)$ 与 $f_1(0, +1)$ 衍射光发生干涉, $f_1(0, -1)$ 沿相似路径与 $f_2(0, +1)$ 衍射光发生干涉,可得 Y 方向的两组频移量;计算后可得到光栅 Y 向位移。

在二维光栅制作方面,首次采用 Moire 条纹比较干涉法实现了光栅常数精确调整,获得高精度光栅周期;首次采用高频激光调频技术实现干涉场长时间曝光情况下的干涉条纹锁定技术,实现

了大口径全息光栅制作;首次将离子束抛光及化学抛光手段引入光栅刻槽粗糙度改善中,获得低杂散光光栅,提高了光栅信噪比。制造出 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 二维平面光栅,刻线间距 555.6 nm ,其刻线间距不一致性不大于 27.7 nm ,如图9所示。

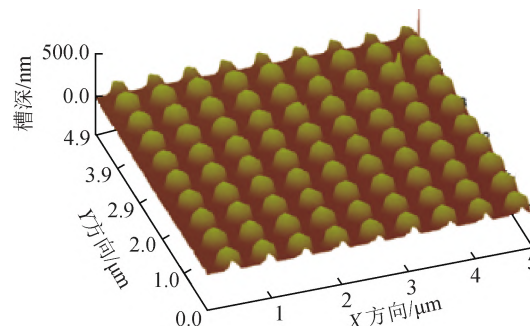


图9 二维平面光栅原子力测试图

Fig.9 AFM image of two dimensional plane grating

采用高端测量光栅制作技术,研制了有效测量面积 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$,光栅刻线密度 1200 gr/mm 的大尺寸高精度二维平面测量光栅,衍射波前优于 0.25λ 。并搭建了单次衍射四倍细分测量读数头样机,如图10所示。

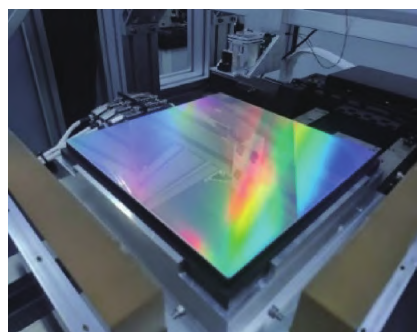


图10 大尺寸二维测量光栅及测量系统

Fig.10 Large size two-dimensional measuring grating and displacement measurement system

在超净实验室环境下进行了全量程的测量并与激光干涉仪进行对比,实现了 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 测量量程、 0.2 nm 测量分辨率, X 与 Y 方向 200 nm 的测量误差,如图11所示。

2.3 “品”字形拼接大量程位移测量技术

高精度光栅位移测量系统中光栅的长度决定了测量系统的量程。对于莫尔条纹原理光栅尺,由于其精度和分辨力低,所用光栅周期较大,对光栅质量要求比较宽松,因此光栅可做到很长。但是采用衍射干涉原理的光栅位移测量系统,系

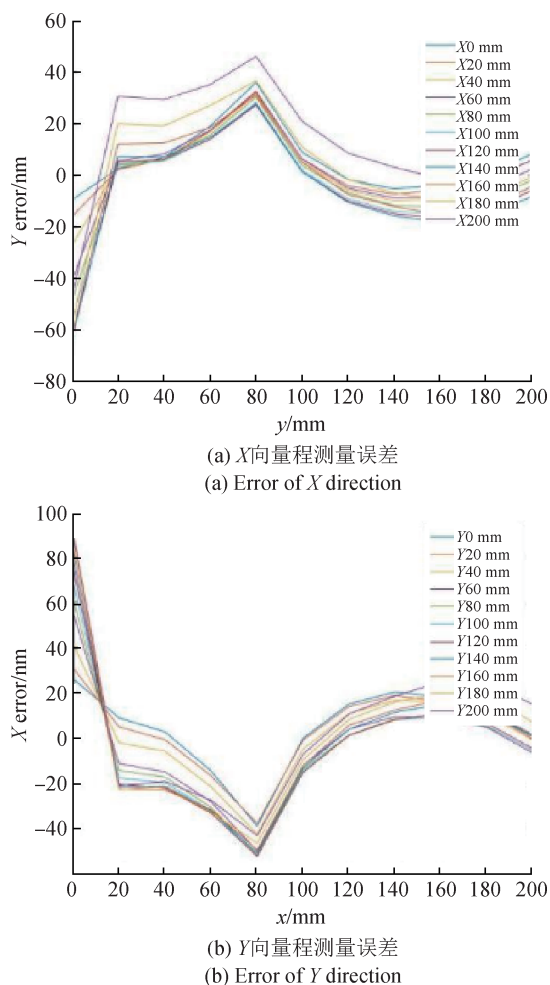


图11 200 mm × 200 mm 量程位移测量数据

Fig.11 Displacement measurement data in 200mm×200mm range

统的分辨力和精度高，光栅的周期小，光栅的质量严重影响位移测量精度，受到光栅制造水平的限制，单体大尺寸高精度高刻线密度的光栅制作困难，因此难以获取极大量程高精度的光栅位移测量系统。

针对这一瓶颈，提出了高精度光栅“品”字形拼接技术，通过使用多块小尺寸高精度光栅上下分布，形成“品”字形排列，扩展了光栅测量量程^[27-28]。测量读数头如图12所示，“品”字形光栅测量系统在测量过程中，测量信号分别经过不同光栅，且各光栅有一定的重合区域，此重合区域用于前后光栅的数据拼接和切换。

如图12所示，采用光学仿真设计软件ZEMAX模拟了“品”字形光栅的拼接过程。其拼接步骤概括为：①先调节零级：去倾斜（消除光栅矢量方向的旋转误差 $\Delta\theta_x$ ）→调疏密（消除绕光栅刻线

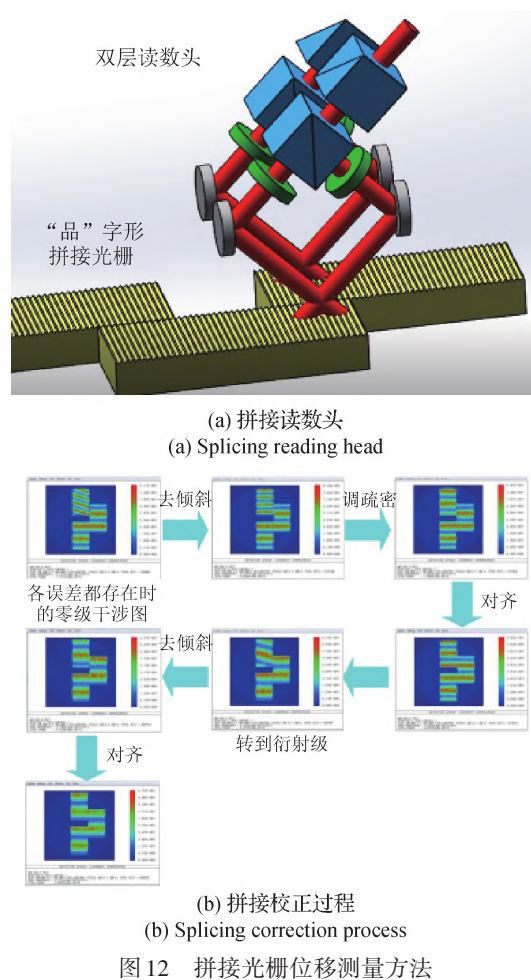


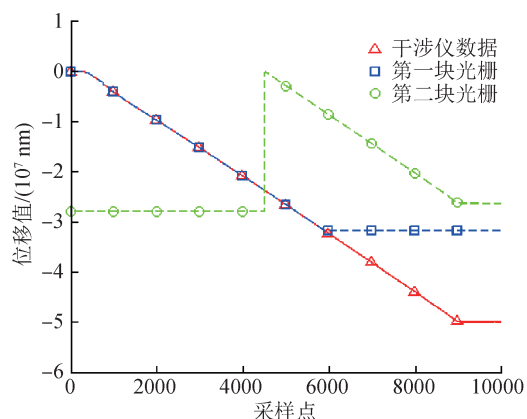
图12 拼接光栅位移测量方法

Fig.12 Splicing grating displacement measurement

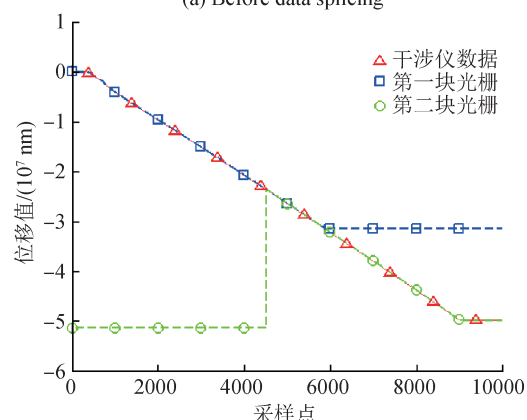
方向的旋转误差 $\Delta\theta_x$)和对齐条纹（消除光栅法线方向的平移 Δz ）；②再调节衍射级：去倾斜（消除绕光栅法线方向的旋转误差 $\Delta\theta_z$ ）→对齐条纹（消除沿光栅矢量方向的平移误差 Δx ），再以调节完成光栅为基准，调节后续光栅。

测量过程中，针对目前拼接系统中存在的拼接缝隙以及姿态不一致引起的测量误差，提出了品“字”形拼接测量结构中拼接缝隙以及拼接姿态的溯源以及解决方法，数据拼接校正效果如图13所示，50 mm测量量程拼接误差在纳米级别。

依据以上拼接测量方法，如图14所示，研制了1020 mm量程的光栅线位移传感器，利用3块360 mm，刻线密度1800 gr/mm的高刻线密度光栅将位移测量系统量程扩展至1020 mm，通过实验验证了其原理的正确性和测量的精确性。此方法理论上测量量程可无限扩展，为扩展至数米量程提供了理论指导和技术支撑。



(a) 数据拼接前
(a) Before data splicing



(b) 切换与拼接后测量数据
(b) After switching and splicing

图13 拼接区域测试数据

Fig.13 Measurement data of splicing area

3 结论

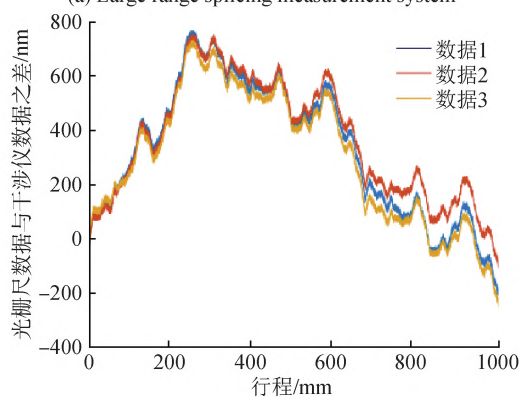
作者所在课题组攻克了锥面衍射高精度测量、转向干涉高倍细分和光栅拼接量程扩展等瓶颈技术,突破了国外技术壁垒,开发了高刻线密度光栅位移测量系统并逐步实现产业化,在该领域达到了国内先进水平。以自主研制的高性能一维、二维衍射光栅为基础,先后研制了多套具有高精度、高稳定性、高环境适应性、大量程的光栅位移测量系统。高精度光栅位移测量系统可在光栅研制过程中提供高精度定位,研制出的光栅应用于“羲和号”、“天问一号”、“风云三号”等航天卫星以及高端精密仪器与装备中,打破了国外垄断,为我国超精密制造领域发展提供了技术支持。

随着精密及超精密加工制造领域的不断发展,以及国内对光刻机等高端制造装备的迫切需求,



(a) 大量程拼接测量系统

(a) Large range splicing measurement system



(b) 1020 mm测量误差

(b) Measurement error in 1020 mm

图14 “品”字形拼接大量程位移测量技术

Fig.14 Large range displacement measurement technology of "Pin" shape splicing

高精度光栅位移测量系统的性能还需要进一步提升。未来几年,大量程、高精度、高分辨力光栅位移测量系统的量程将取决于光栅的尺寸,分辨力和精度将取决于光栅的质量,随着光栅制造水平的提高,高精度大尺寸的光栅的应用必定会提高光栅位移测量系统的量程、精度及分辨力;新的测量结构及测量原理的提出,使光栅位移测量系统不仅仅局限于测量一维位移、二维位移、三维位移,更高维度的高精度测量都可实现;体积大,结构复杂的光栅位移测量系统的稳定性和可靠性很难提高,应用范围会严重受限,小型化、产品化的位移测量系统必定是未来的发展趋势。光栅位移测量系统未来的目标将着眼于更大量程、更高精度、更高分辨力、更高稳定性和更小型化,为国内高端装备制造提供坚实的技术储备。

参考文献

- [1] 乔晓旭, 罗怡, 王晓东. 精密测量和加工中的激光技术[J]. 计测技术, 2021, 41(5): 74-83.
QIAO X X, LUO Y, WANG X D. Laser technology in precision measurement and manufacture[J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(5): 74-83. (in Chinese)
- [2] 张书练, 谈宜东. 第三代激光干涉仪—固体微片激光自混合测量技术的突破[J]. 计测技术, 2018, 38(3): 43-59.
ZHANG S L, TAN Y D. Laser third-generation laser interferometer—breakthrough in solid-state microchip laser self-mixing measurement technology [J]. Metrology and measurement technology, 2018, 38(3): 43-59. (in Chinese).
- [3] CASTENMILLER T, VAN DE MAST F, DE KORT T, et al. Towards ultimate optical lithography with NXT: 1950i dual stage immersion platform[C]//Optical Microlithography XXIII: volume 7640. International Society for Optics and Photonics, 2010: 76401N.
- [4] SHIMIZU Y, MATSUKUMA H, GAO W. Optical sensors for multi-axis angle and displacement measurement using grating reflectors[J]. Sensors, 2019, 19(23): 5289.
- [5] 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.
LYU Q, LI W H, BAYANHESHIG, et al. Interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating[J]. Chinese optics, 2017, 10(1): 39-50. (in Chinese)
- [6] 尹云飞, 刘兆武, 吉日嘎兰图, 等. 二维光栅位移测量技术综述[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1224-1238.
YIN Y F, LIU Z W, JIRIGALANTU, et al. Overview of 2D grating displacement measurement technology[J]. Chinese optics, 2020, 13(6): 1224-1238. (in Chinese)
- [7] CUI J N, HE Z Q, TAN J B, et al. Realization of a robust homodyne quadrature laser interferometer by performing wave plate yawing to realize ultra-low error sensitivity [J]. Optics express, 2016, 24: 23505-23518.
- [8] SEYBOLD J, BÜLAU A, FRITZ K P, et al. Miniaturized optical encoder with micro structured encoder disc [J]. Applied sciences, 2019, 9(3): 452.
- [9] 武腾飞, 韩继博, 白毓, 等. 双光梳绝对距离测量实验研究[J]. 计测技术, 2022, 42(3): 50-55.
WU T F, HAN J B, BAI Y, et al. Research on absolute distance measurement experiment of double optical comb [J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(3): 50-55. (in Chinese)
- [10] 蔡引娣, 王路辉, 高英豪, 等. 线性运动平台多自由度几何运动误差测量技术[J]. 计测技术, 2021, 41(5): 42-51.
CAI Y D, WANG L H, GAO Y H, et al. Laser technique of measuring multi-degree-of-freedom geometric motion errors of linear stages [J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(5): 42-51. (in Chinese)
- [11] CHANG D, HU P C, TAN J B. Fused-like angles: replacement for roll-pitch-yaw angles for a sixdegree-of-freedom grating interferometer [J]. Frontiers of information technology & electronic engineering, 2021, 22(12): 1677-1684.
- [12] CHANG D, XING X, HU P C, et al. Double-diffracted spatially separated heterodyne grating interferometer and analysis on its alignment tolerance[J]. Applied sciences, 2019, 9(2): 263.
- [13] WEI P P, LU X, QIAO D C, et al. Two-dimensional displacement measurement based on two parallel gratings[J]. Review of scientific instruments, 2018, 89(6): 65105.
- [14] YANG F Z, ZHANG M, ZHU Y, et al. Two degree-of-freedom fiber-coupled heterodyne grating interferometer with milli-radian operating range of rotation[J]. Sensors, 2019, 19(14): 3219.
- [15] 王磊杰, 张鸣, 朱煜, 等. 超精密外差利特罗式光栅干涉仪位移测量系统[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 2975-2985.
WANG L J, ZHANG M, ZHU Y, et al. A displacement measurement system for ultra-precision heterodyne Littrow grating interferometer [J]. Metrology & optics and precision engineering, 2017, 25(12): 2975-2985. (in Chinese)
- [16] YE W N, ZHANG M, ZHU Y, et al. Ultraprecision real-time displacements calculation algorithm for the grating interferometer system [J]. Sensors, 2019, 19(10): 2409.
- [17] LI X H, SHI Y P, XIAO X, et al. Design and testing of a compact optical prism module for multidegree-of-freedom grating interferometry application [J]. Applied sciences, 2018, 8(12): 2495.
- [18] 尚平. 高精度衍射光栅干涉式测量系统的主要误差分析与仿真[J]. 工具技术, 2015, 49(9): 85-89.
SHANG P. Main error analysis and simulation of high precision diffraction grating interferometer measurement sys-

- tem[J]. Tool engineering, 2015, 49(9): 85 – 89. (in Chinese)
- [19] DENG J L, YAN X N, WEI C L, et al. Eightfold optical encoder with high-density grating [J]. Applied optics, 2018, 57(10): 2366 – 2375.
- [20] 刘兆武, 李文昊, 巴音贺希格, 等. 扫描曝光系统中二维工作台x轴测量镜的面形在线检测[J]. 中国激光, 2017, 44 (1): 231 – 236.
- LIU Z W, LI W H, BAYANHESHIG, et al. Profile on-line detection for two-dimensional stage x axis mirror in scanning exposure systems[J]. Chinese journal of lasers, 2017, 44(1): 231 – 236. (in Chinese)
- [21] 王玮, 巴音贺希格, 宋莹, 等. 扫描干涉场曝光光束自动对准及其收敛性分析[J]. 中国激光, 2016, 43 (12): 176 – 183.
- WANG W, BAYANHESHIG, SONG Y, et al. Beam alignment and convergence analysis of scanning beam interference lithography systems[J]. Chinese journal of lasers, 2016, 43(12): 176 – 183. (in Chinese)
- [22] LIU Z W, YANG H, LI Y B, et al. Active control technology of a diffraction grating wavefront by scanning beam interference lithography [J]. Optics express, 2021, 29 (23): 37066 – 37074.
- [23] 姜珊, 巴音贺希格, 潘明忠, 等. 扫描干涉场曝光系统中干涉条纹周期精确测量方法[J]. 光学学报, 2015, 35 (7): 55 – 64.
- JIANG S, BAYANHESHIG, PAN M Z, et al. An accurate method for measuring interference fringe period in scanning beam interference lithography system [J]. Acta optica sinica, 2015, 35(7): 55 – 64. (in Chinese)
- [24] LIU L, LIU Z W, JIANG S, et al. Polarization-modulated grating interferometer by conical diffraction[J]. Optics express, 2022, 30(2): 689 – 699.
- [25] LYU Q, LIU Z W, WANG W, et al. Simple and compact grating-based heterodyne interferometer with the Littrow configuration for high-accuracy and long-range measurement of two-dimensional displacement [J]. Applied optics, 2018, 57(31): 9455 – 9463.
- [26] YIN Y F, LIU Z W, JIANG S, et al. Grating-based 2D displacement measurement with quadruple optical subdivision of a single incident beam [J]. Optics express, 2021, 29(15): 24169 – 24181.
- [27] LYU Q, LIU Z W, WANG W, et al. Fast method to detect and calculate displacement errors in a Littrow grating-based interferometer [J]. Applied optics, 2019, 58 (12): 3193–3199.
- [28] 吕强, 王玮, 刘兆武, 等. 五维自由度衍射光栅精密测量系统(英文)[J]. 中国光学, 2020, 13(1): 189 – 202.
- LYU Q, WANG W, LIU Z W, et al. Grating-based precision measurement system for five-dimensional measurement [J]. Chinese optics, 2020, 13(1): 189 – 202. (in Chinese)

(本文编辑: 田艳玲)



第一作者: 刘林 (1996—), 男, 中科院特别研究助理, 博士, 主要从事高性能光栅位移测量研究。



通讯作者: 李文昊 (1980—), 男, 研究员, 博士, 主要从事各类高精度光栅设计及研制、高性能光栅位移测量研究。