

二维光栅位移测量技术综述

尹云飞^{1,2}, 刘兆武¹, 吉日嘎兰图¹, 于宏柱¹, 王 玮¹, 李晓天¹, 鲍 赫¹, 李文昊^{1*}, 郝 群^{3*}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘要:超精密位移测量技术不仅是精密机械加工的基础, 在以摩尔定律飞速发展的芯片制造行业中也起到决定性的作用。以光栅栅距为测量基准的光栅位移测量系统被广泛应用于多维测量系统, 光栅位移测量系统与激光位移测量系统相比, 大大降低了对使用环境的湿度、温度和气压的要求。本文主要介绍了近年来国内外基于二维光栅的位移传感系统光学结构的发展现状, 从零差式和外差式光栅干涉测量原理入手, 综述了基于单块二维光栅的光学结构到多块二维光栅耦合设计的光学结构发展历程, 对比分析了二维光栅位移测量系统的优缺点, 并展望了二维光栅位移测量系统发展趋势, 总结了二维光栅位移测量系统的工程化进程。

关键词: 二维光栅; 光栅干涉技术; 精密位移测量

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2020-0237

Overview of 2D grating displacement measurement technology

YIN Yun-Fei^{1,2}, LIU Zhao-Wu¹, JIRIGALANTU¹, YU Hong-Zhu¹, WANG Wei¹,

LI Xiao-Tian¹, BAO He¹, LI Wen-Hao^{1*}, HAO Qun^{3*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)*

* *Corresponding author, E-mail: leewenho@163.com; qhao@bit.edu.cn*

Abstract: Ultra-precision displacement measurement technology is not only the basis of precision machin-

收稿日期: 2019-12-09; 修订日期: 2020-01-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2016YFB0500100), 吉林省科技发展计划 (No. 20190201021JC, No. 20190103158JH, No. 20190103157JH, No. 20190302047GX), 广东省重点领域研发计划项目 (No. 2019B010144001), 国家自然科学基金 (No. 61975255), 民用航天预研项目 (No. D040101)

Supported by the National Key R & D Plan (No. 2016YFB0500100); Jinlin Province Science and Technology Development Plan (No. 20190201021JC, No. 20190103158JH, No. 20190103157JH, No. 20190302047GX), R & D Projects in Key Areas of Guangdong Province (No. 2019B010144001), National Natural Science Foundation of China (No. 61975255), Civil Aerospace Pre-research Project (No. D040101)

ing, but also plays a decisive role in the chip manufacturing industry that is rapidly developing in Moore's Law. The grating displacement measurement system based on the grating pitch is widely used in multidimensional measurement system. Compared with the laser displacement measurement system, grating displacement measurement system greatly reduces the environmental requirements for humidity, temperature and pressure. In this paper, the development status of the optical structure of displacement sensing system based on two-dimensional grating in recent years is introduced. The principles of zero-difference and heterodyne grating interferometry are introduced. The optical structure based on single-block two-dimensional grating is reviewed. The development history of the optical structure in single-block two-dimensional grating to coupling designs of multi-block two-dimensional gratings is summarized, the advantages and disadvantages of several two-dimensional grating displacement measurement systems are compared and analyzed, and the development trend of two-dimensional grating displacement measurement system is prospected. The engineering process of two-dimensional grating displacement measurement system is summarized.

Key words: two-dimensional grating; grating interference technique; precision displacement measurement

1 引言

随着高端制造业的发展,对精密测量的精度要求也越来越高。目前常用的大量程超精密测量系统主要有激光位移测量系统和光栅位移测量系统。其中:激光位移测量系统以激光波长为测量基准,受使用环境的湿度、温度和气压变化的影响较大;光栅位移测量系统是以光栅栅距为测量基准,极大地降低了对使用环境的要求,测量精度从微米级到纳米级甚至亚纳米级,为超精密加工技术的发展提供了有效的技术支持^[1-10]。

基于衍射光栅的干涉位移测量技术经历了一个漫长的发展过程,1986年,德国 HEIDENHAIN 公司首次提出相位光栅,并于次年实现了分辨率为 $0.02\ \mu\text{m}$ 的干涉扫描直线光栅尺的首次应用,1995年,HEIDENHAIN 公司制造出栅距为 $8\ \mu\text{m}$ 的二维平面光栅,测量分辨率可达 $1\ \text{nm}$,精度等级 $\pm 2\ \mu\text{m}$ ^[11];2005~2012年,日本学者 Gao.W 用二维光栅分别实现了三维位移测量和三维角度测量^[12-17],并于2015年实现了二维光栅位移测量系统的高精度制造技术^[18]。2008年,荷兰的 ASML 公司利用两个正交的一维光栅实现了高精度二维测量^[6];随着光栅制造技术的发展,次年,该公司 NXT:1950i 型光刻机运用 HEIDENHAIN 公司所

研制的 $400\ \text{mm} \times 400\ \text{mm}$ 的大型二维平面光栅,扩大测量范围,累计加工误差由 $4.8\ \text{nm}$ 下降为 $2.5\ \text{nm}$ ^[19-20]。进一步巩固了 ASML 公司在光刻机制造领域的龙头地位。

高端芯片制造技术作为现代化高端装备制造技术的代表,已经成为衡量各个国家综合国力的指标,国际上针对高端芯片制造的竞争越来越激烈。基于二维光栅位移测量系统以其稳定性高、环境适应性好、维度多和体积小的优势,已成为芯片制造技术飞速发展的有力支持,也是各国在国际科技竞争中取胜的关键^[21-24]。

2 光栅位移测量系统原理及光学结构

光栅位移测量系统的核心元件是光栅,以光栅栅距为基准,结构紧凑、光路对称、光程短且对外界环境的敏感性低,可应用于多维度精密位移测量。从原理上,光栅位移测量系统可分为零差式光栅位移测量系统和外差式光栅位移测量系统^[25]。

2.1 零差式光栅位移测量系统

零差式光栅位移测量系统是最早的、最基础的、应用最广泛的光栅位移测量系统,其基于衍射干涉原理进行测量。图1(彩图见期刊电子版)为零差式光栅位移测量系统的基本结构。

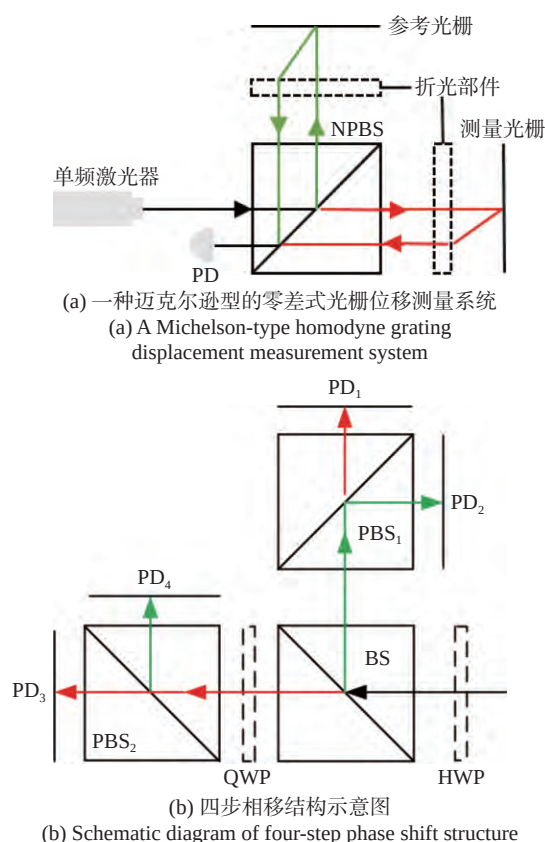


图 1 零差式光栅位移测量系统

Fig. 1 Homodyne grating displacement measuring system

图 1(a) 为迈克尔逊型的零差式光栅位移测量系统, 单频激光经非偏振分光棱镜 (NPBS) 分成测量光束和参考光束两束光, 分别入射测量光栅和参考光栅, 其中测量光束由测量光栅衍射, 参考光束以相同的角度由参考光栅衍射, 两束衍射光束以一定的衍射角返回, 通过折光元件后平行射出, 再次通过 NPBS 合束形成干涉信号, 被光电探测器 (PD) 接收^[26-28]。当测量光栅沿光栅矢量方向移动时, 其衍射光会发生频移现象, 使得测量光束和参考光束间出现相位差, 引起干涉强度变化, 利用信号处理系统可实现精密位移测量。零差式光栅位移测量法应用最广的是四步相移结构, 图 4(b) 为四步相移结构示意图。激光经二分之一波片 (HWP)、分光棱镜 (BS) 分光, 反射光经偏振分光棱镜 (PBS₁), 被探测器 PD₁ 和 PD₂ 接收, 光束以不同偏振态实现 0° 和 180° 相移检测。透射光入射至四分之一波片 (QWP), 经偏振分光棱镜 (PBS₂) 分光, 被探测器 PD₃ 和 PD₄ 接收, 光束以不同偏振态实现 90° 和 270° 的相移检测。零差

式光栅位移测量法的原理简单、光源易于选型, 但相应的相敏检测器光学结构复杂、体积大, 并且对杂散光和光强变化很敏感, 不能完全消除环境对被测信号的干扰^[29-33]。

2.2 外差式光栅位移测量系统

外差式光栅位移测量系统光源采用双频激光^[34-36]。图 2(彩图见期刊电子版) 为迈克尔逊型外差式光栅位移测量系统, 双频激光器出射的具有一定频差 (f_1, f_2) 的正交线偏振光被分光棱镜 (BS) 分为两束。反射光 ($f_1 - f_2$) 经过偏振片后发生干涉, 干涉信号被光电探测器 PD_r 接收, 作为参考信号。透射光经偏振分光棱镜 PBS 分成两束光, 分别入射测量光栅和参考光栅, 其中测量光束由测量光栅衍射, 参考光束以相同的角度由参考光栅衍射, 两束光通过折光元件后, 再次通过 PBS 合束形成干涉信号 ($f_1 - f_2 \pm \Delta f$), 被光电探测器 (PD_m) 接收, 作为测量信号, 测量信号与参考信号做差分计算, 即得到光栅位移量^[37-39]。外差式光栅位移测量系统利用拍频信号差分计算位移, 抗干扰能力强, 单个 PD 即可实现位移信号的采集、辨向和细分, 但双频光源比单频光源结构复杂, 信号处理难度大, 并且 PBS 的偏振分离性能不佳会引入几纳米到几十纳米的周期性非线性误差^[40-43], 限制了外差式光栅位移测量系统的发展。

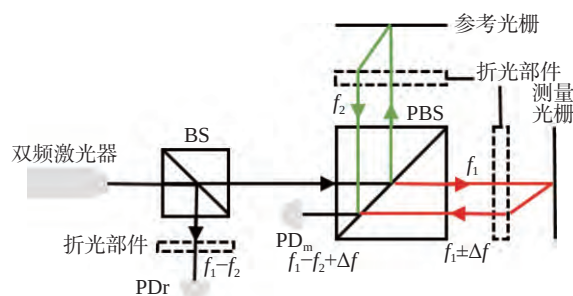


图 2 一种外差式光栅位移测量系统

Fig. 2 A heterodyne grating displacement measuring system

3 二维光栅位移测量系统的发展

国际上, 德国的 HEIDENHIN、北美的 MICROE、OPTRA 和日本的 MITUTOYO 等都属于高精度光栅位移测量装置制造商, 在二维光栅位移测量技术方面占据国际领先地位^[18, 44]。近年

来,国内多个高校及科研机构,在二维光栅位移测量技术方面进行了大量的研究,在理论研究方面已经获得了很多重要成果^[45-48]。

3.1 单二维光栅

最早的基于光栅的二维位移测量系统由两个正交的一维光栅组成,由于利用两个一维光栅实现二维位移测量会大大增加系统的复杂程度,且无法避免由角度误差引起的阿贝误差,故其无法满足市场便捷式的应用需求。随着二维光栅的发展,利用单块二维光栅的二维位移测量系统逐渐涌现并形成产品。该系统可提高测量精度,增加测量维度,但测量系统的结构较复杂,在实现位移测量的超高精度和高度集成化方面还有很长的路要走。

2003年,华中科技大学的王选择等学者利用正交式二维光栅和迈克尔逊型干涉原理,设计了一种二维位移测量系统,如图3所示^[46]。

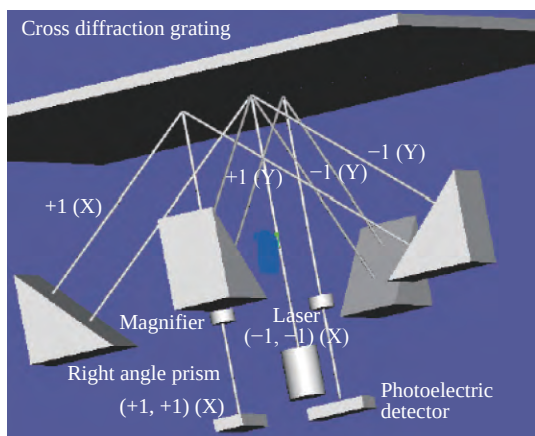


图3 正交衍射光栅工作原理图

Fig. 3 Working principle diagram of orthogonal diffraction grating

测量系统包括 X 向和 Y 向两个结构,激光垂直入射至测量光栅,衍射为 $+1(X)$ 、 $-1(X)$ 、 $+1(Y)$ 和 $-1(Y)$ 级衍射光,分别经直角棱镜反射形成二次衍射,分别为 $(-1, -1)(X)$ 、 $(+1, +1)(X)$ 、 $(-1, -1)(Y)$ 和 $(+1, +1)(Y)$ 垂直出射;其中 $(-1, -1)(X)$ 和 $(+1, +1)(X)$ 垂直入射光电探测器形成干涉; $(-1, -1)(Y)$ 和 $(+1, +1)(Y)$ 垂直入射光电探测器形成干涉。此方法将一个二维光栅等同为两个一维光栅,运用顶点坐标变化法给出定量和定性理论分析,实现

二维位移测量,是运用二维光栅进行位移测量的常规方法^[47]。

2018年,林存宝等学者设计出一种基于对角线衍射光束的差分光栅干涉仪(Heterodyne Grating Interferometer),其与相位解耦相结合,可获得高信号对比度和高信噪比,实现8倍的光学细分,理论位移测量分辨率可达 0.125 nm ,短程往返 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时, X 和 Y 方向上位移重复性分别达 2.35 nm 和 3.24 nm ^[48]。采用对角线衍射光束的光学结构如图4(彩图见期刊电子版)所示。塞曼激光器发出有一定频率偏差的正交线偏振光,由分光棱镜分为两束。反射光经偏振片后干涉作为参考信号。透射光垂直入射测量光栅,利用对角线方向 $(-1, -1)$ 、 $(-1, 1)$ 、 $(1, -1)$ 、 $(1, 1)$ 衍射光,通过平面反射镜、偏振分束棱镜和偏振片调制, $(-1, -1)$ 级的 f_1 、 f_2 分别与 $(1, 1)$ 级的 f_2 、 f_1 相互干涉,产生两路测量信号 I_1 和 I_2 , $(1, -1)$ 级的 f_1 、 f_2 分别与 $(-1, 1)$ 级的 f_2 、 f_1 相互干涉,产生两路测量信号 I_3 和 I_4 。 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 均带有2倍光学细分的 X 和 Y 方向的位移信息,经相位解耦后得到8倍光学细分二维位移值。虽然同时实现了高信号对比度和高信噪比,但并未考虑因偏振分离性能引起的周期非线性误差的影响。

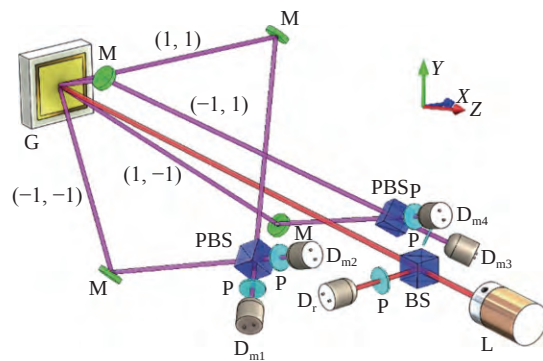


图4 基于对角线的HGI的光学结构图

Fig. 4 Optical structure of HGI based on diagonal

2019年,谭久彬、胡鹏程等学者提出了一种空间分离结构的外差式光栅位移测量系统,分辨率优于 0.122 nm ,可消除周期非线性误差^[49-51]。图5(彩图见期刊电子版)为空间分离式外差二维平面光栅位移测量系统的光学结构。

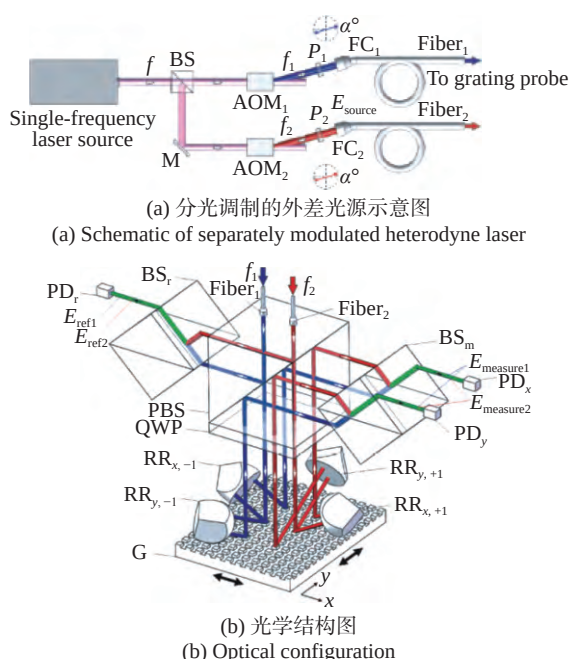


图 5 空间分离式外差二维平面光栅位移测量光学结构
Fig. 5 Optical structure of displacement measurement for spatially heterodyn 2D planar grating

图 5(a) 中, 单频激光器发射激光经分光棱镜 (BS) 分光, 反射光经平面镜出射至声光调制器 (AOM₁), 透射光至声光调制器 (AOM₂), 分别调制为 f_1 和 f_2 ; 经过偏振片 (P_1 和 P_2) 和光纤耦合器 (FC₁ 和 FC₂) 进入保偏光纤 (Fiber₁ 和 Fiber₂), 实现 f_1 和 f_2 的空间分离。图 5(b) 中, f_1 和 f_2 垂直入射至偏振分光棱镜 (PBS), 反射光经参考分光棱镜 (BS_r) 合束入射至光电探测器 (PD_r) 作为参考信号 ($E_{\text{ref}1}$ 和 $E_{\text{ref}2}$), 透射光垂直入射至测量光栅在 X 向与 Y 向各生成两束衍射光, 经 4 个角锥棱镜 (RR₁₋₄) 反射形成二次衍射, 衍射光分别为: $(-1, -1)_X$, $(-1, -1)_Y$, $(1, 1)_X$, $(1, 1)_Y$, 4 路衍射光在空间位置上两两对称出射, 经 PBS 反射和测量分光棱镜 (BS_m) 合束, $(-1, -1)_X$ 与 $(1, 1)_X$, $(-1, -1)_Y$ 与 $(1, 1)_Y$ 两两形成干涉信号, 入射至光电探测器 PD_X 和 PD_Y, 实现 X 向和 Y 向的位移测量。该系统采用空间分离技术消除了周期非线性误差, 同时利用空间角锥棱镜调制光束以实现两次衍射和测量光束的空间耦合, 增加了光学细分倍数, 提高了测量精度, 但对光能利用率较低, 仍有进一步提升的空间。

3.2 双二维光栅

双二维光栅位移测量系统是在单二维光栅测

量系统的基础上增加了参考光栅, 该系统可以分别解算出对称级次的衍射光因光栅运动引起的相位变化, 进而可以测量更多维度的位移信息。2005~2015 年, 日本学者 Gao.W 等所在的团队利用双二维光栅研制了基于二维光栅的三维位移测量系统和三维角度测量系统, 实现多维测量的平面编码器技术^[12]。图 6(彩图见期刊电子版)为三维位移测量原理图, 入射光经偏振分光棱镜分光, 反射光经四分之一波片入射至参考光栅, 透射光经四分之一波片入射至测量光栅, 参考光栅 X 向 ± 1 级衍射光 (U_{rX+1})、(U_{rX-1}) 和 Y 向 ± 1 级衍射光 (U_{rY+1}) 分别与测量光栅相应级次的衍射光 (U_{sX+1})、(U_{sX-1})、(U_{sY+1}) 干涉, 被探测单元 A、B、C 接收, A 所探测信号包含 X 正向位移和 Z 方向位移信息, B 所探测信号包含 X 负向位移和 Z 方向位移信息, C 所探测信号包含 Y 正向位移和 Z 方向位移信息, 三组信息解耦即可实现三维位移测量, 最高可分辨 5 nm 步进运动^[13-14]。

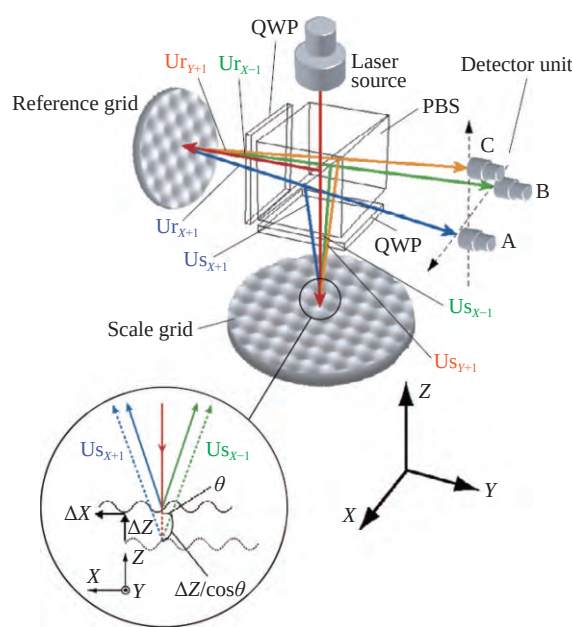


图 6 三维位移测量原理图

Fig. 6 Schematic diagram of 3D displacement measurement system

图 7 为三轴角度测量编码器原理图^[15], 设计的初衷是用于检测沿 Z 轴移动的精密线性位移台的角误差。激光二极管 (LD) 的 S 偏振光经过准直透镜 (CL), 由偏振分光棱镜 (PBS) 进行转折。经四分之一波片 (QWP) 转化为圆偏振光, 垂直入

射到光栅上。衍射光栅衍射出的 0 级和 1 级衍射光束, 经 QWP 转换为 P 偏振光, 通过 PBS 到达位于准直物镜 (CO) 焦平面上的两个位置探测器 (I, II), 从而实现两个衍射光斑 X 向和 Y 向位移检测。0 级衍射光入射探测器 I, 其 X 向和 Y 向的输出可分别检测俯仰误差 $\Delta\theta_x$ 和偏航误差 $\Delta\theta_y$ 。1 级衍射光入射探测器 II, 从探测器 II 和 I 的 Y 方向输出的差异获得滚转误差 $\Delta\theta_z$ 。与商用自准直仪对比实验证明, 此系统在 3 个转动维度上都能够分辨 0.01 弧秒的角度误差。但该系统也存在缺陷, 由于 1 级衍射光以一定的角度入射自准直单元, 线性位移台 Z 方向行程受自准直单元尺寸限制。

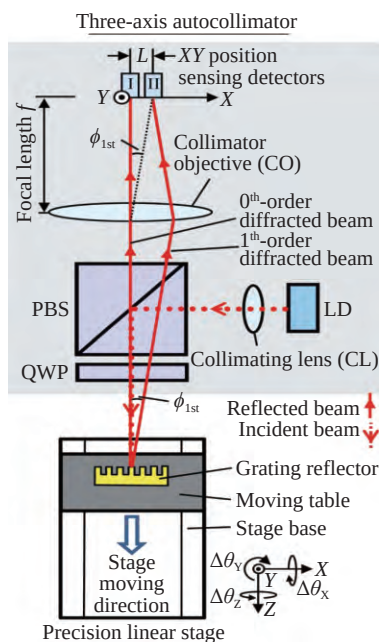


图7 三维角度测量原理图

Fig. 7 3-D angle measurement principle diagram

在三维位移测量系统和三维角度测量系统的基础上, 将二者相结合, 实现六维测量^[16-17]。图 8(a) (彩图见期刊电子版) 为六维平面编码器样机, 编码器由 XY 平面光栅和光学传感器组成, 测量光栅安装在运动元件的背面, 传感器安装在台基上。图 8(b) (彩图见期刊电子版) 为传感器部分示意图, 激光二极管和准直透镜输出平行光束, 经偏振分光棱镜 (PBS) 分光, 分别入射至参考光栅和测量光栅, 两光栅衍射的 ± 1 级衍射光经分光棱镜 (BS_1) 反射至三维位移测量装置, 部分 0 级和 -1 级

衍射光经 (BS_1) 透射至三维角度测量装置。通过分光棱镜把位移测量装置和角度测量装置结合在一起, 传感器尺寸为 $95\text{ mm}(X) \times 90\text{ mm}(Y) \times 25\text{ mm}(Z)$, 实现了六维测量, ΔX 、 ΔY 和 ΔZ 上可分辨 2 nm 位移步进运动, θ_x 、 θ_y 上可分辨 0.1 弧秒角度步进运动, θ_z 上可分辨 0.3 弧秒角度步进运动, 但远程测量系统稳定性不佳, 在输出中存在周期性误差。

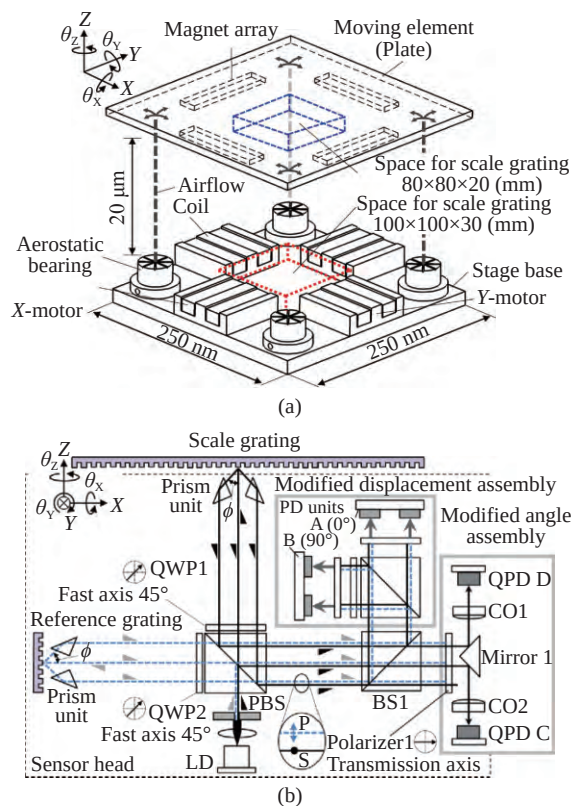


图8 (a) 六维平面编码器样机及 (b) 传感器设计示意图

Fig. 8 (a) 6-D planar encoder prototype and (b) schematic diagram of sensor

3.3 多二维光栅

多二维光栅位移测量系统是在双二维光栅测量系统中增加二维光栅进行分光或在单二维光栅上增加多个二维光栅结构获得的, 其可以解算衍射光或透射光因光栅运动而产生的相位变化, 进而进行多维度的位移测量。中国台湾国立中央大学 Hsieh 等学者设计了一种基于准共光路 (QCOP) 的外差光栅位移测量系统, 结合二维透射光栅可实现三维位移测量, 理论分辨率可达 0.1 nm , 在 10 min 内面外检测稳定性优于 30 nm , 面内检测

稳定性约 $40 \text{ nm}^{[52]}$ 。2015 年, Hsieh 等人在 QCOP 结构基础上, 通过面内采用迈克尔逊干涉测量结构、面外采用光栅剪切干涉测量结构, 提出一种基于二维光栅的六维测量系统。在考虑电噪声的前提下, 该系统的位移和角度测量分辨率分别为 2 nm 和 $0.05 \mu\text{rad}^{[53]}$ 。

图 9(a) 为三维位移测量原理图, 入射光经电光调制器 (EOM) 进行外差调制, 经扩束镜、分光棱镜分光。反射光经偏振片 (P) 和平面镜 (M) 后, 透射至探测器 (D4) 作为参考光束; 透射光经快轴呈 45° 和 145° 放置的半波片 (HWP), 调制为 4 个

偏振方向不同的外差光束, 经聚光透镜透射于二维半透半反光栅, 其中反射光经聚光透镜透射, 通过 BS 反射至探测器 (D4), 与参考光束干涉, 实现对 Z 轴位移测量; 透射光经二维光栅衍射, 每束衍射光包含 4 个不同偏振态的衍射光, 选择 +1(X) 向衍射光、-1(Y) 向衍射光分别与 0 级衍射光干涉, 被探测器 D2、D3 接收, D1 (4 个不同偏振状态的 0 级衍射光) 所探测的信号作为参考信号, D2 所探测信号包含 X 正向位移信息, D3 所探测信号包含 Y 负向位移信息, 通过对信息解耦可实现 X 和 Y 向位移测量。

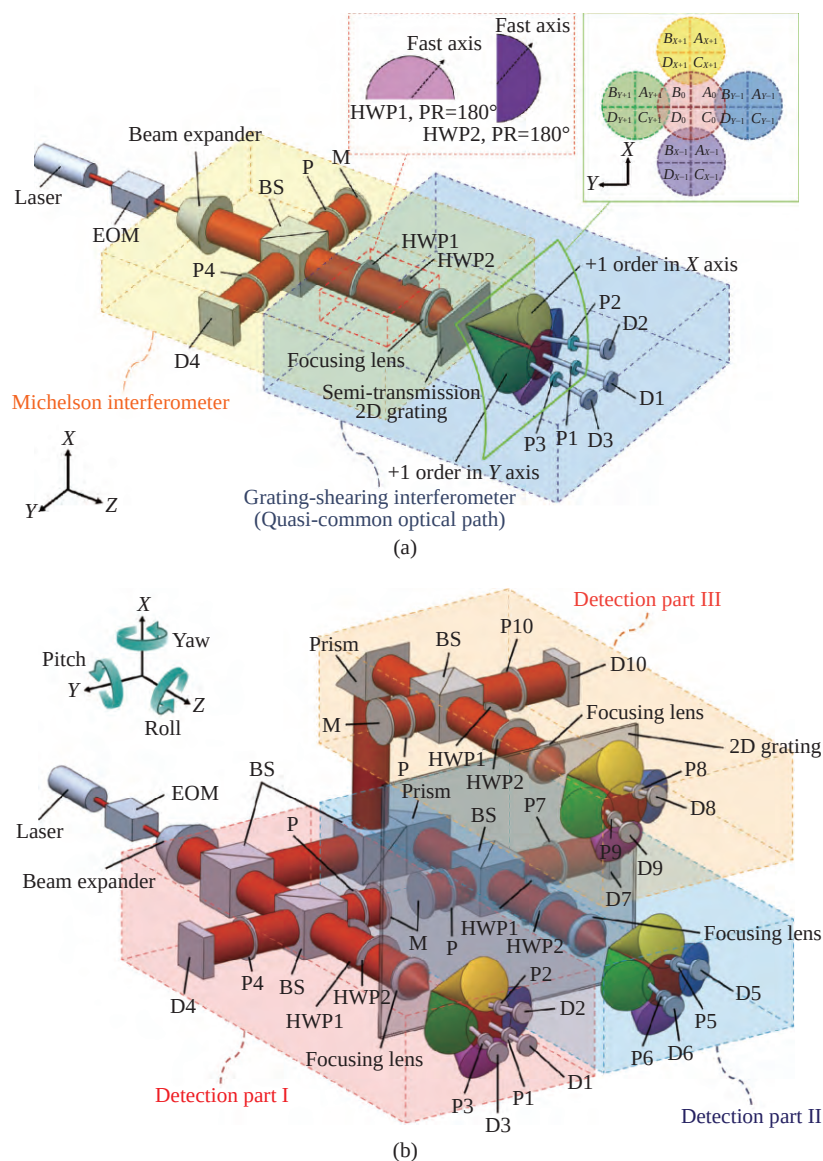


图 9 Hsieh 等人设计的(a)三维位移测量原理图及(b)六维测量原理图

Fig. 9 Principle diagrams of (a) 3D and (b) 6D displacement measurement proposed by Hsieh et al.

以三维位移测量为基础, 研制了六维测量系统, 其原理图如图 9(b) 所示。激光经 EOM 调制, 经第一 BS 分光, 第一透射光入射至检测单元 I; 第一反射光经第二 BS 分光, 第二透射光由平面镜入射至检测单元 II; 第二反射光经平面镜入射至检测单元 III。3 个检测单元采用同一光源, 结构一致。通过检测单元 I 和 II 面内干涉测量得到的 Z 向位移差异可获得滚转角度 θ_z 。在 Y 轴上, 通过检测单元 I 和 II 的面外干涉测量得到的 X 向的输出差异可获得俯仰角度 θ_x ; 在 X 轴上, 通过检测单元 II 和 III 的面外干涉测量得到的 Y 向的输出差异可获得偏航角度 θ_y 。结合检测单元 I, 可实现六维测量。次年, Hsieh 等学者以外差式光栅位移测量系统为基础, 结合 Wollaston 棱镜和 QCOP 结构设计了位移测量系统, 测量系统位移分辨率可达 2 nm, 位移重复性精度为 1 nm, 可以 1 100 $\mu\text{m/s}$ 速度实现宽度为 50 mm 的长行程测量和垂直方向为 1.2 mm 测量^[54]。虽然实现了六自由度位移测量, 但是光学结构复杂, 受聚焦透镜焦深限制垂直方向上测量范围小, 且需要运用大面积的光栅拼接技术, 技术实现难度高、制造成本大。

哈尔滨工业大学的林杰等学者基于多二维光栅实现多维位移测量。理论上, 光路核心部分可集成在 4 mm×4 mm×2 mm 的立方体内, 三维同步测量系统的 Z 向分辨率可达 4 nm; 测量系统中 X 向和 Y 向位移信息不耦合, X 向, Y 向均实现了 2 倍光学细分, 不进行电学细分, 则 X 向和 Y 向分辨率可达 $2\sqrt{2} \mu\text{m}$ ^[55-61]。图 10(a) (彩图见期刊电子版) 为四通道探测器三维测量系统原理图。入射光经分束部分分为 4 束, 4 束光平行入射至偏振分光棱镜 (PBS1) 进行分光, 之后, 4 束光经四分之一波片以及折光元件以 Littrow 角入射至二维参考光栅。反射光经四分之一波片和折光元件后以 Littrow 角入射至二维测量光栅, 测量光与参考光原路返回从 PBS 另一侧出射, 参考光栅 $\pm 1(X)$ 、 $\pm 1(Y)$ 级衍射光与测量光栅 $\pm 1(X)$ 、 $\pm 1(Y)$ 级衍射光两两干涉, 入射至四步相移结构, 实现三维位移测量。其中, 分束部分采用一个二维透射光栅和三个一维透射光栅, 入射光经二维透射光栅分为 4 束, 以一定入射角至一维透射光栅, 分别出射 4 束平行光, 4 束衍射光的能量在理论上相等。折光元件由 4 个结构一致的台阶式一维光栅和光阑

组成, 4 束平行入射光的偏折角度相同, 经光阑入射至二维测量光栅, 光阑用于遮挡杂光。分束部分用以保证出射光平行可靠便于调节。所设计光学结构简单, 稳定性较好, 可测量系统光能利用率低, 信噪比低, 未考虑 Z 轴的位移测量量程。

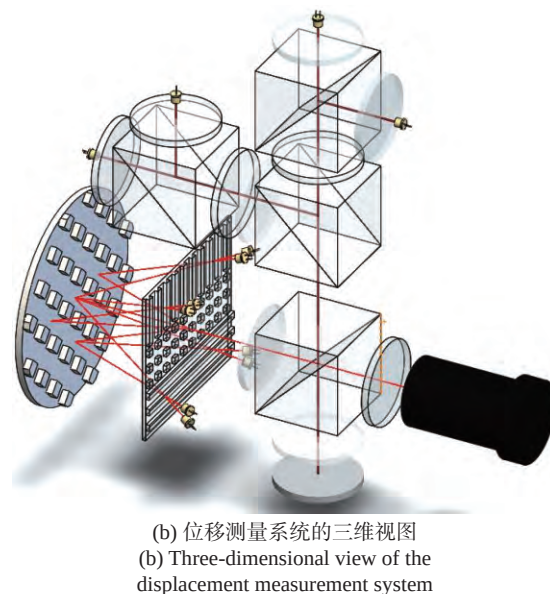
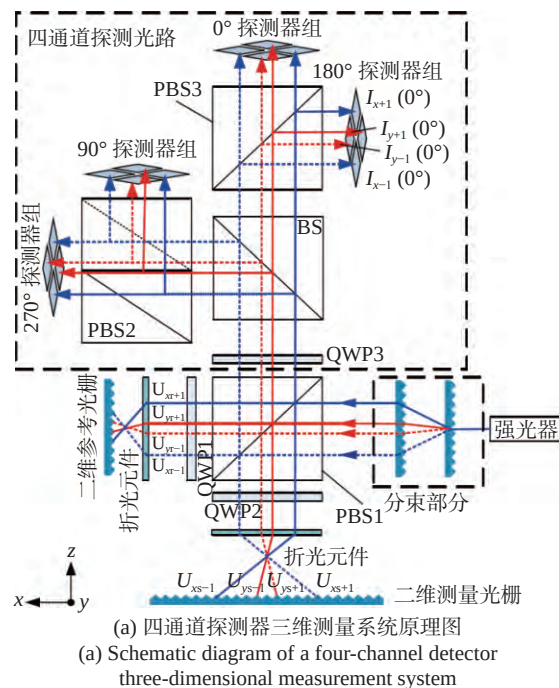


图 10 林杰等学者提出的位移测量结构图

Fig. 10 Structural diagram of displacement measurement system by Lin Jie et al

同年, 哈尔滨工业大学的陆振刚等学者基于二维光栅设计如图 10 (b) (彩图见期刊电子版) 所

示的位移测量系统的三维视图^[62]。折光单元由两个相互垂直的一维透射光栅和一个透射型二维光栅组成,其中二维透射光栅用于分光,一维透射光栅用于合光,二维测量光栅放置位置与折光单元呈 45° ,二维测量光栅的光栅周期约为二维透射光栅的 0.707 倍。入射光经四分之一波片入射至偏振分光棱镜,透射光经四分之一波片透射至折光单元,4 束衍射光以一定角度入射至与轴线方向呈 45° 放置的二维测量光栅,形成多次衍射,经折光单元,衍射光分别为: (0, 0)、(0, +1)、(0, -1)、(+1, 0)、(-1, 0)。反射光经四分之一波片透射、平面镜反射,再经偏振分光棱镜透射与 (0,0) 级衍射光干涉,最终入射至四步相移结构实现 Z 轴位移测量;二维测量光栅沿 X 矢量方向运动,二维测量光栅衍射光 (+1, 0)、(-1, 0) 与 (+1, 0)、(-1, 0) 干涉,X 轴上的探测器只包含 X 轴位移信息;二维测量光栅沿 Y 矢量方向运动,二维测量光栅衍

射光 (0, +1)、(0, -1) 与 (0, +1)、(0, -1) 干涉,沿 Y 轴的探测器只包含 Y 轴位移信息。分别对 3 组信息解耦可实现三维位移测量。与之前利用衍射分光进行干涉测量的方法相比,此方法采用先分光,再衍射的途径,虽然测量系统杂散光影响较小,但由于需运用多次衍射,光能利用率低,对测量系统误差考量也并不完善。

此外,国内外还有很多高校、科研院所及高科技企业均进行基于光栅位移测量系统的研究,如清华大学^[63-64],中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(长春光机所)^[65-66],中国科学院上海光学精密机械研究所^[67],日本的索尼公司^[68-69],德国的 HEIDENHAIN 公司^[70-72]等。综上所述,光栅位移测量系统已经从一维光栅的多维测量发展为二维光栅的多维测量,同时可得到纳米或皮米分辨率,本文对几种典型二维光栅位移测量系统的性能进行对比,如表 1 所示。

表 1 基于二维光栅位移测量系统性能对比表

Tab. 1 Performance comparison of two-dimensional grating displacement measurement system

光栅分类	研究单位/公司/ 研究者	X与Y向分辨率/nm	光学传感器尺寸/ 测量范围	系统稳定性	特点
单二维光栅	华中科技大学王选 择等学者	—	50 mm×50 mm	—	同时进行X和Y向测量,在空间位置上实现同向测量。
	国防科技大学林存宝 等学者	分辨率优于0.125 nm; 往返10 μm 内,X向和 Y向达2.35 nm和3.24 nm。	X向与Y向测量幅度 可达:9.981 μm 和 9.978 μm 。	在10分钟内的系统稳定 性分别优于4 nm和6 nm。	同时实现高对比度和高信噪比; 可获得八倍光学细分,未考虑因 偏振分离性能引起的周期非线性 误差的影响。
	哈尔滨工业大学谭久 彬等学者	分辨率优于0.122nm。	125 mm×125 mm;可 对X和Y方向上30 μm 的位移进行测量。	机械振动引起的实时测 量误差不超过0.15 μm , 且测量重复性优于 $\pm 57\text{nm}$ 。	成本低,可实现两次衍射;可消 除周期非线性误差;增强测头的 角度容差,不过信噪比较低,受 振动影响较大。
双二维光栅	日本Gao.W等学者	X轴与Y轴分辨率均在 1 nm以上。	光学传感器尺寸约为 50 mm(X)×50 mm(Y)× 30 mm(Z)。	X、Y和Z方向上的峰谷振 幅误差分别为 $\pm 10\text{ nm}$ 、 $\pm 10\text{ nm}$ 和 $\pm 3\text{ nm}$ 。	系统原理简单,分别可实现三维 位移测量和三维角度测量,受自 准直单元尺寸限制,未考虑非线性 误差分量的影响。
	日本Li.X等学者	可分辨 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 方向上的2 nm步 进运动; θ_X 、 θ_Y 方向 上的0.1角秒步进运 动; θ_Z 方向上0.3角秒 步进运动。 两轴分辨率优于3nm, 实现六维测量,位移 和角度测量分辨率分 别为2nm和0.05 μrad 。	传感器头的尺寸为 95mm(X)×90mm(Y)× 25mm(Z)。	X、Y和Z方向上,偏振间 误差的峰谷振幅分别为 $\pm 6\text{ nm}$ 、 $\pm 7\text{ nm}$ 和 $\pm 6\text{ nm}$ 。	测量范围大,可实现六维测量, 且对远程测量系统稳定性不佳。
多二维光栅	中国台湾国立中央大 学Hsieh等学者	实现六维测量,位移 和角度测量分辨率分 别为2nm和0.05 μrad 。 X向和Y向实现光学	闭环配置驱动压电平 台,可实现X,Y和Z方向 上1 μm 的移动距离。	在1小时内分辨率稳定性 可达14 nm。	同时实现六维测量和长行程测 量,测量精度高,且结构复杂,稳 定性较差,测量范围小。
	哈尔滨工业大学林 杰、陆振刚等学者	X向和Y向实现光学 2细分,不进行电学细 分下,检测分辨力为 2 $\sqrt{2}\mu\text{m}$ 。	两方向运动范围均为 100 μm ,Z向的运动 范围为20 mm。	稳定性较好	杂散光影响小

4 二维光栅位移测量技术展望

目前, 二维光栅位移测量技术尚存在的主要问题有: (1) 高精度、大面积二维光栅制造难度大。对于光栅制造来说, 同时获得高精度和大面积是个很大的挑战; (2) 传感部分多维协同性响应速率相对低。仪器设备的响应速度是当前工业或科研场所对其硬件条件提出的重要硬性指标之一, 一维光栅测量系统较为成熟, 但二维光栅测量系统传感响应速度还有待提高; (3) 小型化的需要难以满足。小型化是超精密位移测量产品的一个重要应用特征, 现阶段二维光栅测量系统体积较大, 且大部分处于实验室研究阶段, 从尺寸角度也无法满足使用要求; (4) 高倍细分不够完善, 提高光路和电路的高倍细分的有效性, 实现测量精度的进一步提升; (5) 多维度测量实现难度大, 多维度测量技术研究刚刚起步, 六维的测量系统仍处于实验室阶段; (6) 标定和补偿不够成熟, 二维光栅测量系统的高精确标定技术尚未成熟, 且二维光栅测量系统的误差分析和补偿技术还未完善。

综上所述, 二维光栅位移测量系统需要在以下几个方面进行研究:

(1) 高精度、大面积二维光栅制造技术。光栅制造途径有两种, 其一是直接采用全息方法制造大面积二维光栅, 其二是采用小光栅面阵拼接方法制造大面积二维光栅。这两种方法都是高精度、大面积二维光栅制造技术未来要重点研究的技术问题。目前, 德国 HEIDENHAIN 公司通过 DIADUR 光刻复制工艺, 可以制造 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ 大面积光栅, 位移测量系统精度等级 $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$; 国内, 长春光机所国家光栅制造与应用工程技术研究中心具有高精度、大面积一维光栅制造能力, 且正在研究二维位移测量系统用二维光栅制造工艺技术。

(2) 传感部分多维协同性响应速率相对低。响应速率的提高主要有两种途径: 其一为提高读数头的转接速度; 其二为提高测量光栅的扫描速度。这两种方式都是提高响应速率的有效途径。目前, 国内外在二维光栅位移测量技术方面, 响应

速率并没有形成完善的体系, 基于二维平面衍射光栅, ASML 公司的光刻机 NXT: 1950i 扫描速度可达 0.61 m/s 。

(3) 小型化设计。小型化设计是现在研究的难点和热点。目前, 国内外, 基于一维光栅衍射干涉原理的光栅位移测量系统的小型化设计已经形成样机。基于二维光栅理论, 集成化的二维光栅测量系统的尺寸可达 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 。

(4) 光路和电路的高倍细分技术。实现高倍细分主要是聚焦于光路, 电路细分已经很完善, 在外界影响极小的情况下, 光路细分方式主要有两种, 其一为二级衍射, 使用二级衍射光来实现高倍细分; 其二为二次衍射, 使用角锥棱镜等实现高倍细分。目前, 国外, HEIDENHAIN 公司的光栅位移测量分辨率已达到 1 nm 。国内, 长春光机所实验室搭建的光栅位移测量系统分辨率可达到 2 nm 分辨率, 而其工程化及产品化正在进行。

(5) 多维度技术。实现多维度测量有多种方法, 主要体现为新技术的运用和测量系统的分立两种模式。目前, 国内外基于二维光栅的位移测量可实现六维测量, 其测量分辨率可达 2 nm , 但这种系统研究仍处于实验阶段。

(6) 精确标定和补偿技术。位移测量系统最常用的高精度标定方法是传统的十字标定技术和自标定技术。而在二维光栅位移测量领域, 主要应用的是基于传统的十字标定技术, 而针对二维光栅测量系统自标定技术尚未完善。误差主要包括, 二维光栅制造误差、光学及机械结构误差、电学误差、算法误差以及环境误差等。目前, 二维光栅位移测量系统的误差还处于分析阶段, 并没有形成一套特定的误差补偿理论, 误差的分析还不够全面, 需要研究整体系统的误差集成及拟合, 为误差补偿提供有效的数据基础。

在二维光栅位移测量技术方面, 现在最为成熟的是将新型光学结构运用于二维光栅位移测量系统, 而本课题组后续的报道中, 主要聚焦于二维光栅位移测量系统中有效利用双衍射光路技术, 提高系统测量精度方面的研究。未来有望: 将二维光栅镶嵌于光纤之内, 利用小角度入射和光纤耦合技术, 缩小系统的光学结构; 采用单次衍射实

现高倍光学细分;实现二维位移测量系统的小型化和产品化。

5 结 论

光栅位移测量技术研究在测量领域具有重要意义,尤其在超精密位移测量方面已成为必不可少的测量手段。本文通过研究国内外二维光栅位移测量相关技术,综述了基于单块二维光栅的光学结构到多块二维光栅耦合设计的光学结构发展历程,对比分析了几种二维光栅位移测量系统的优缺点。单二维光栅可实现二次衍射,也可消除周期非线性误差,分辨率都优于 0.1 nm,可高信噪

比和高稳定性不能兼顾;双二维光栅可实现多维测量,分辨率优于 1 nm,可器件的定位和安装要求高;多二维光栅可同时进行多维角度和多维位移测量,可测量范围和光能利用率都会相应降低。

目前,二维光栅位移测量技术理论方面的发展非常快,理论分辨率已达到亚纳米量级,但是基于二维光栅的位移测量系统的工程化还尚未成熟,使其将高精度、高速度、大量程及小型化等性能融为一体仍是一项迫切需要攻关的难题,这也是二维光栅位移测量技术未来发展方向。新型光学元件制造及应用技术的发展,也为基于二维光栅的位移测量系统的工程化和小型化提供了有效地技术基础。

参考文献:

- [1] BAI Y, HU P CH, LU Y F, *et al.*. A six-axis heterodyne interferometer system for the Joule balance[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(6): 1579-1585.
- [2] HORI Y, GONDA S, BITOU Y, *et al.*. Periodic error evaluation system for linear encoders using a homodyne laser interferometer with 10 picometer uncertainty[J]. *Precision Engineering*, 2018, 51: 388-392.
- [3] DENG J L, YAN X N, WEI CH L, *et al.*. Eightfold optical encoder with high-density grating[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10): 2366-2375.
- [4] 卢兴吉, 曹振松, 黄印博, 等. 3.53 μm 激光外差太阳光谱测量系统[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(8): 1846-1854.
LU X J, CAO ZH S, HUANG Y B, *et al.*. Laser heterodyne spectrometer for solar spectrum measurement in the 3.53 μm region[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1846-1854. (in Chinese)
- [5] 姜一民. 激光干涉仪的应用——激光干涉仪技术综述之五[J]. *工具技术*, 2015, 49(2): 79-85.
XIAN Y M. Applications of laser interferometer——Summary of laser interferometer technology[J]. *Tool Engineering*, 2015, 49(2): 79-85. (in Chinese)
- [6] VAN DER P E A F, LOOPSTRA E R. Position measurement unit, measurement system and lithographic apparatus comprising such position measurement unit: US, 7362446[P]. 2008-04-22.
- [7] FAN K CH, LIAO B H, CHUNG Y CH, *et al.*. Displacement measurement of planar stage by diffraction planar encoder in nanometer resolution[C]. *Proceedings of 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, IEEE, 2012: 894-897.
- [8] 王韵致, 谢芳, 陈龙辉, 等. 用于高精度测量位移等参量的光纤多波长激光器[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(9): 2036-2042.
WANG Y ZH, XIE F, CHEN L H, *et al.*. Research on optical fiber multi-wavelength laser for measuring displacement precisely[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(9): 2036-2042. (in Chinese)
- [9] 高旭, 李舒航, 马庆林, 等. 光栅精密位移测量技术发展综述[J]. *中国光学*, 2019, 12(4): 741-752.
GAO X, LI SH H, MA Q L, *et al.*. Development of grating-based precise displacement measurement technology[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 741-752. (in Chinese)
- [10] 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.
LV 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)
- [11] Optra Inc. The Nano grid principle of Measure[EB/OL]. [2019-04-12]. https://www.heidenhain.com.cn/zh_CN/company/.

- [12] GAO W, DEJIMA S, KIYONO S. A dual-mode surface encoder for position measurement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 117(1): 95-102.
- [13] KIMURA A, GAO W, ARAI Y, *et al.*. Design and construction of a two-degree-of-freedom linear encoder for nanometric measurement of stage position and straightness[J]. *Precision Engineering*, 2010, 34(1): 145-155.
- [14] KIMURA A, GAO W, ZENG L J. Position and out-of-straightness measurement of a precision linear air-bearing stage by using a two-degree-of-freedom linear encoder[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(5): 054005.
- [15] KIMURA A, GAO W, KIM W J, *et al.*. A sub-nanometric three-axis surface encoder with short-period planar gratings for stage motion measurement[J]. *Precision Engineering*, 2012, 36(4): 576-585.
- [16] GAO W, SAITO Y, MUTO H, *et al.*. A three-axis autocollimator for detection of angular error motions of a precision stage[J]. *CIRP Annals*, 2011, 60(1): 515-518.
- [17] LI X H, GAO W, MUTO H, *et al.*. A six-degree-of-freedom surface encoder for precision positioning of a planar motion stage[J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(3): 771-781.
- [18] GAO W, KIM S W, BOSSE H, *et al.*. Measurement technologies for precision positioning[J]. *CIRP Annals*, 2015, 64(2): 773-796.
- [19] 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, 28(1): 37-42.
ZHOU W L. Technology and application of grating interferometer in high precision measurement[J]. *Tool Engineering*, 1994, 28(1): 37-42. (in Chinese)
- [20] 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*, 2013, 7640: 76401N.
- [21] 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 ZH, *et al.*. 2D Nano-displacement measurement with diffraction grating[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2007, 5(4): 311-314. (in Chinese)
- [22] 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. (in Chinese).
- [23] 曹向群. 光栅计量技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1992.
CAO X Q. *Grating Measurement Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992. (in Chinese)
- [24] 尚平, 夏豪杰, 费业泰. 衍射式光栅干涉测量系统发展现状及趋势[J]. 光学技术, 2011, 37(3): 313-316.
SHANG P, XIA H J, FEI Y T. Research status and developing trends of diffraction grating interferometer measurement system[J]. *Optical Technique*, 2011, 37(3): 313-316. (in Chinese)
- [25] 张善钟. 计量光栅技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
ZHANG SH ZH. *Metrology Grating Technology*[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1985. (in Chinese)
- [26] 祝宏彬, 陈俊雷, 郭冬梅, 等. 零差激光干涉仪的大范围位移测量与精度分析[J]. 光电子技术, 2016, 36(1): 5-11.
ZHU H B, CHEN J B, GUO D M, *et al.*. Large-range displacement measurement and accuracy analysis of homodyne laser interferometer[J]. *Optoelectronic Technology*, 2016, 36(1): 5-11. (in Chinese)
- [27] ELLIS J D. *Field Guide to Displacement Measuring Interferometry*[M]. Bellingham, UK: SPIE Press, 2014.
- [28] FREIDAH J T, CAHILL R F, JOSEPH A A, *et al.*. Passive homodyne optical grating demodulator: principles and performance[J]. *Proceedings of SPIE*, 1986, 566: 114-121.
- [29] WU C C, CHENG CH Y, YANG Z Y. Optical homodyne common-path grating interferometer with sub-nanometer displacement resolution[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7791: 779105.
- [30] GUPTA P, SPEIRS R W, JONES K M, *et al.*. Effect of imperfect homodyne visibility on multi-spatial-mode two-mode squeezing measurements[J]. *Optics Express*, 2020, 28(1): 652-664.
- [31] GAO W, KIMURA A. A three-axis displacement sensor with nanometric resolution[J]. *CIRP Annals*, 2007, 56(1): 529-532.
- [32] WANG L J, ZHANG M, ZHU Y, *et al.*. A novel heterodyne grating interferometer system for in-plane and out-of-plane displacement measurement with nanometer resolution[C]. *Proceedings of the 29th Annual Meeting of the American*

- Society for Precision Engineering*, ASPE, 2014: 173-177.
- [33] SHIMIZU Y, ITO T, LI X H, *et al.*. Design and testing of a four-probe optical sensor head for three-axis surface encoder with a mosaic scale grating[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(9): 094002.
- [34] LIN J, GUAN J, WEN F, *et al.*. High-resolution and wide range displacement measurement based on planar grating[J]. *Optics Communications*, 2017, 404: 132-138.
- [35] 金涛, 刘景林, 杨卫, 等. 线性位移台直线度高精密外差干涉测量装置[J]. 光学精密工程, 2018, 26(7): 1570-1577.
- JIN T, LIU J L, YANG W, *et al.*. High-precision straightness interferometer for linear moving stage[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1570-1577. (in Chinese)
- [36] 赵博, 晏磊, 郝德阜. 一种二维光栅干涉仪的研究[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(3): 271-276.
- ZHAO B, YAN L, HAO D F. Experimental study about a type of gratings interferometer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(3): 271-276. (in Chinese)
- [37] 朱煜, 张鸣, 王磊杰, 等. 一种双频光栅干涉仪位移测量系统: 中国, 102937411A[P]. 2013-02-20.
- ZHU Y, ZHANG M, WANG L J, *et al.*. Double-frequency grating interferometer displacement measurement system: CN, 102937411A[P]. 2013-02-20. (in Chinese).
- [38] 朱煜, 王磊杰, 张鸣, 等. 一种二自由度外差光栅干涉仪位移测量系统: 中国, WO2014/201950A1[P]. 2013-03-20.
- ZHU Y, WANG L J, ZHANG M, *et al.*. A two-degree-of-freedom heterodyne grating interferometer displacement measurement system: CN, WO2014/201950A1[P]. 2013-03-20. (in Chinese).
- [39] 王芳, 齐向东. 高精度控制光电光栅刻划机的光栅外差干涉仪[J]. 激光技术, 2008, 32(5): 474-476, 526.
- WANG F, QI X D. Grating heterodyne interferometer of high accuracy controlling photoelectric grating ruling engine[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5): 474-476, 526. (in Chinese)
- [40] 于梅, 刘爱东, 何闻, 等. 衍射光栅外差激光干涉法角振动校准技术研究[J]. 计量学报, 2015, 36(6): 561-564.
- YU M, LIU A D, HE W, *et al.*. Angle vibration calibration technology by diffraction grating heterodyne laser interferometry[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2015, 36(6): 561-564. (in Chinese)
- [41] 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]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(12): 2975-2985. (in Chinese)
- [42] 王磊杰, 张鸣, 朱煜, 等. 面向浸没式光刻机的超精密光学干涉式光栅编码器位移测量技术综述[J]. 光学精密工程, 2019, 27(9): 1909-1918.
- WANG L J, ZHANG M, ZHU Y, *et al.*. Review of ultra-precision optical interferential grating encoder displacement measurement technology for immersion lithography scanner[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(9): 1909-1918. (in Chinese)
- [43] 王磊杰, 张鸣, 朱煜, 等. 扫描干涉光刻机的超精密移相锁定系统[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1765-1773.
- WANG L J, ZHANG M, ZHU Y, *et al.*. Ultra-precision phase-shifting locking system of scanning beam interference lithography tool[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(8): 1765-1773. (in Chinese)
- [44] LEE C B, LEE S K. Multi-degree-of-freedom motion error measurement in an ultraprecision machine using laser encoder-review[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27(1): 141-152.
- [45] HU P CH, 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.
- [46] 王选择, 郭军, 谢铁邦. 以正交衍射光栅为计量标准器的二维微位移工作台[J]. 光学精密工程, 2003, 11(5): 492-496.
- WANG X Z, GUO J, XIE T B. 2D-platform with cross diffraction grating as displacement measurement sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(5): 492-496. (in Chinese)
- [47] WANG X Z, DONG X H, GUO J, *et al.*. Two-dimensional displacement sensing using a cross diffraction grating scheme[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2004, 6(1): 106-111.
- [48] LIN C B, YAN SH H, DING D, *et al.*. Two-dimensional diagonal-based heterodyne grating interferometer with enhanced signal-to-noise ratio and optical subdivision[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(6): 064102.

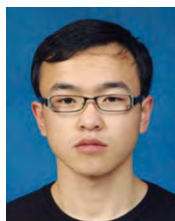
- [49] 邢旭, 常笛, 谭久彬, 等. 空间分离式外差二自由度平面光栅干涉仪[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1727-1736.
XING X, CHANG D, TAN J B, *et al.*. Spatially separated heterodyne grating interferometer for in-plane displacement measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(8): 1727-1736. (in Chinese)
- [50] 朱凡, 谭欣然, 谭久彬, 等. 高分辨力与高输出稳定性自准直系统设计[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 109-116.
ZHU F, TAN X R, TAN J B, *et al.*. Design of high resolution and output stability autocollimation system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 109-116. (in Chinese)
- [51] 崔继文, 刘雪明, 谭久彬. 超精密级二维工作台的自标定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1960-1966.
CUI J W, LIU X M, TAN J B. Self-calibration for 2-D ultra-precision stage[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(9): 1960-1966. (in Chinese)
- [52] HSIEH H L, PAN S W. Three-degree-of-freedom displacement measurement using grating-based heterodyne interferometry[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(27): 6840-6848.
- [53] HSIEH H L, PAN S W. Development of a grating-based interferometer for six-degree-of-freedom displacement and angle measurements[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2451-2465.
- [54] HSIEH H L, CHEN W. Heterodyne Wollaston laser encoder for measurement of in-plane displacement[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8693-8707.
- [55] 徐敏儿. 基于衍射光栅的高分辨力位移测量系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
XU M E. *Research on and high-resolution displacement measurement system based on diffractive grating*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese).
- [56] 王超群. 具有绝对零位的三自由度光栅位移测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
WANG C Q. *Research on three-degree-of-freedom grating displacement measurement with absolute zero alignment*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese).
- [57] 邱晶晶. 基于衍射光栅的高精度位移测量系统的设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
DI J J. *Design of high-precision displacement measurement system based on diffractive grating*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese).
- [58] 关健. 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. (in Chinese).
- [59] 魏培培. 基于双光栅干涉的三维位移测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
WEI P P. *Research on 3-D displacement measurement technology based on double grating interference*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese).
- [60] 温凤. 基于平面光栅的三维位移测头研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
WEN F. *The three-dimensional displacement scanner based on planar grating*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese).
- [61] 陈航. 外差式光栅粗/细位移测量系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
CHEN H. *Research on heterodyne grating displacement measurement system with high/low displacement resolution*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese).
- [62] WEI P P, LU X, QIAO D CH, *et al.*. Two-dimensional displacement measurement based on two parallel gratings[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(6): 065105.
- [63] LIN D J, JIANG H, YIN CH Y. Analysis of nonlinearity in a high-resolution grating interferometer[J]. *Optics & Laser Technology*, 2000, 32(2): 95-99.
- [64] WANG L J, ZHANG M, ZHU Y, *et al.*. Construction and accuracy test of a novel heterodyne grating interferometer system for two-dimensional displacement measurement[J]. *Laser*, 2013, 89(3): 69.
- [65] LV Q, LIU ZH 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.
- [66] 吕强. 基于衍射光栅的外差 Littrow 式精密位移测量系统关键技术研究[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.

- LV Q. Study on key technology of heterodyne grating-based precision displacement measurement system with Littrow structure[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese).
- [67] LU Y C, WEI CH L, JIA W, *et al.*. Two-degree-freedom displacement measurement based on a short period grating in symmetric Littrow configuration[J]. *Optics Communications*, 2016, 380: 382-386.
- [68] KURODA A. Optical displacement measurement system for detecting the relative movement of a machine part: US, 6166817[P]. 2000-12-26.
- [69] AKIHIRO K. Optical displacement measurement system: US, 6407815[P]. 2002-06-18.
- [70] HOLZAPFEL W. Advancements in displacement metrology based on encoder systems[C]. *Proceedings of the 23rd Annual ASPE Meeting*, 2008.
- [71] THIEL J, SPANNER E. Interferential linear encoder with 270 mm measurement length for nanometrology[C]. *Proceedings of the 1st International Conference and general meeting of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, 1999.
- [72] LOF J, DERKSEN A T A M, HOOGENDAM C A, *et al.*. Lithographic apparatus and device manufacturing method: US, 6819400B2[P]. 2005-10-21.

作者简介:



尹云飞(1995—),男,山西临汾人,博士研究生,2018年于中北大学获得学士学位,主要从事二维光栅位移测量等方面研究。E-mail: 1920924393@qq.com



刘兆武(1987—),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士,副研究员,2006年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2017年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事全息光栅研制和精密位移测量等方面研究。E-mail: zhaowuliu@ciomp.ac.cn



李文昊(1980—),男,内蒙古赤峰人,博士,研究员,2002年于陕西科技大学获学士学位,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事平面、凹面全息光栅的理论设计及制作工艺等方面的研究。E-mail: leewenho@163.com



郝群(1968—),女,博士,教授,1998年于清华大学获得工学博士学位,主要从事智能光电感测技术、精密光学测量及仪器等方面的研究。E-mail: qhao@bit.edu.cn