

文章编号: 0258-7025(2005)03-0394-05

# 基于光栅成像投影的微位移检测方法

曾爱军, 王向朝

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 提出了一种基于光栅成像投影的微位移检测方法, 利用光学傅里叶变换原理给出了具体的理论分析。准直激光束照明的光栅通过一个  $4f$  系统成像投影在被测物体表面上, 光栅投影经过被测物体表面反射后由另一个  $4f$  系统成像在探测光栅上。探测光栅由一个透镜组成像在光电探测器上, 其中采用由起偏器、光弹调制器和检偏器组成的偏振调制单元对探测光强进行调制。通过在  $4f$  系统的频谱面上设置滤波光阑, 在光电探测器上获得了与被测物体的微位移成正弦关系的光强变化, 检测出光电探测器上的光强变化即可以获得被测物体的位移量。实验验证了该检测方法的可行性, 其重复测量精度小于  $25 \text{ nm}$  ( $1\sigma$ )。

**关键词** 测量与计量; 微位移; 光栅; 傅里叶变换; 成像投影; 光弹调制器

**中图分类号** TN 247 **文献标识码** A

## Micro-Displacement Measurement Based on Grating Projection

ZENG Ai-jun, WANG Xiang-zhao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** A method to measure micro-displacements based on grating projection is proposed and analyzed theoretically. A grating is illuminated by a collimated laser beam and projected onto an object to be measured through a  $4f$  optical system with an aperture in its frequency plane. The grating projection is imaged on a detection grating through another  $4f$  optical system after reflected by the surface of the object. The detection grating is imaged on a detector and its imaging beam is modulated by a photoelastic modulator. The micro-displacement of the object is obtained by detecting the light intensity on detector. In experiments, the feasibility is verified and the repeatability of the method is less than  $25 \text{ nm}$  ( $1\sigma$ ).

**Key words** measurement and metrology; micro-displacements; grating; Fourier transform; projection; photoelastic modulator

## 1 引言

在微位移精密测量技术领域, 光学检测方法的研究倍受重视。其中主要的两种是光学干涉技术、光栅计量技术。光学干涉测量已有 F-P 干涉仪、外差干涉仪、偏振干涉仪、半导体激光调频干涉仪等多种成熟技术, 其检测精度可以达到纳米甚至亚纳米量级<sup>[1~3]</sup>。光栅计量技术已有数十年的历史, 随着光栅刻制技术的发展和莫尔条纹细分技术的完善, 光栅计量技术的研究取得了飞速进展, 进入了大量程的纳米计量研究阶段<sup>[4]</sup>, 但由于条纹信号的近似正弦性, 其细分能力受到了一定的限制<sup>[5]</sup>。光学干

涉用于微位移检测时一般需要在被测物体的上方形成垂直入射光路, 而传统的光栅计量技术需要将光栅和被测面连接在一起形成接触式测量。当被测物体的上方有遮挡而使得检测空间很小, 无法构成干涉光路或形成接触测量时, 则光学干涉和传统的光栅计量都不能进行。本文针对此种情况提出了光栅成像投影式微位移检测技术。

## 2 检测原理

利用光栅成像投影技术进行微位移检测的原理

收稿日期: 2003-12-23; 收到修改稿日期: 2004-03-30

作者简介: 曾爱军(1975—), 男, 湖南人, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 研究方向为精密光电检测技术与光学仪器。E-mail: aijunzeng@siom.ac.cn

如图 1 所示。位于透镜  $L_1$  前焦面上的投影光栅被准直激光束垂直照明,透镜  $L_1$  的光轴和被测物体表面构成掠入射,透镜  $L_1$  和  $L_2$  组成的  $4f$  系统 1 将投影光栅成像投影在位于透镜  $L_2$  焦点附近的被测表面上。由于被测面的镜面反射,光栅像通过  $4f$  系统 2 再次成像在探测光栅上,形成光栅莫尔条纹。当被测表面产生微位移时,莫尔条纹发生变化,也就改变了

通过探测光栅的光强。探测光栅经过一个透镜  $L_5$  成像在光电探测器的光敏面上,则随位移变化的光强信号被光电探测器所接收,通过探测光强变化得到被测物体的位移量。透镜  $L_5$  之前的起偏器、光弹调制器和检偏器形成偏振调制单元,用以提高检测信号的信噪比。

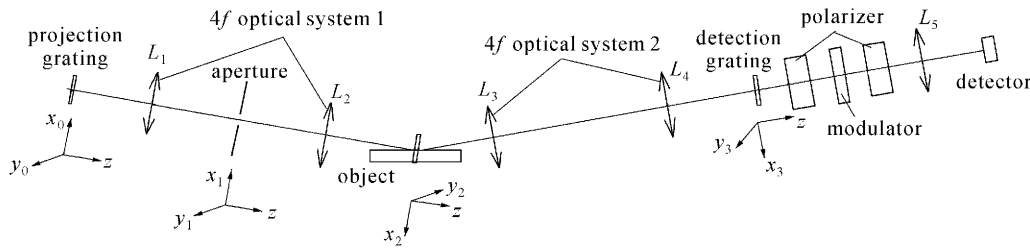


图 1 基于光栅成像投影的微位移检测系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of micro-displacement measurement system based on grating projection

以垂直于光栅刻线的坐标轴为  $x_0$  轴,并且使光栅中心和光轴重合,则对于栅距为  $p$ ,线宽为  $p/2$  的振幅型光栅,其透射率函数  $t(x_0)$  可以写为

$$t(x_0) = \text{rect}\left(\frac{x_0}{p/2}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_0 - p}{p/2}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_0 + p}{p/2}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_0 - 2p}{p/2}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_0 + 2p}{p/2}\right) + \dots, \quad (1)$$

其中  $\text{rect}()$  表示矩形函数。光栅置于  $4f$  系统透镜  $L_1$  的前焦面上,设入射光强为单位强度,即物面的振幅分布  $E(x_0)$  为

$$E(x_0) = t(x_0), \quad (2)$$

则在透镜  $L_1$  的后焦面(即频谱面)上形成频谱函数

$$\begin{aligned} \tilde{E}(u) = & \frac{1}{2}\delta(u) + \frac{1}{\pi}\delta(u - 1/p) + \frac{1}{\pi}\delta(u + 1/p) + \\ & \frac{1}{3\pi}\delta(u - 3/p) + \frac{1}{3\pi}\delta(u + 3/p) + \dots, \quad (3) \end{aligned}$$

其中  $u = x_1/\lambda f$ ,  $f$  为  $4f$  透镜的焦距。如果在透镜  $L_1$  的后焦面上设置光阑使零级和  $\pm 1$  级谱通过,即采用滤波器

$$\tilde{\tau}(u) = \text{rect}\left(\frac{u}{2/p}\right)_{u=\frac{x_1}{\lambda f}}, \quad (4)$$

即通过光阑的频谱函数为

$$\begin{aligned} \tilde{E}'(u) = \tilde{E}(u) \cdot \tilde{\tau}(u) = & \frac{1}{2}\delta(u) + \\ & \frac{1}{\pi}\delta(u - 1/p) + \frac{1}{\pi}\delta(u + 1/p). \quad (5) \end{aligned}$$

通过  $4f$  系统的第二个透镜  $L_2$  后,在其后焦面

(即投影光栅的像场)得到复振幅分布

$$E(x_2) = F[\tilde{E}'(u)]_{x_2=\lambda f u} = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{p}x_2\right), \quad (6)$$

其中  $F[\ ]$  表示傅里叶变换,对应的光强分布为

$$i(x_2) = |E(x_2)|^2 = \frac{1}{4} + \frac{2}{\pi^2} + \frac{2}{\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{p}x_2\right) + \frac{2}{\pi^2} \cos\left(\frac{4\pi}{p}x_2\right). \quad (7)$$

使被测表面位于透镜  $L_2$  的后方焦点附近, $4f$  系统 1 和被测表面成掠入射状态,透镜  $L_1$  前焦面上的光栅经过  $4f$  系统 1 成像投影在被测物体表面上,那么投影光栅像的光强分布即为  $i(x_2)$ 。在被测表面法线的另一侧对称地放置由透镜  $L_3$  和  $L_4$  组成的  $4f$  系统 2,透镜  $L_3$  和透镜  $L_2$  的光学参数完全相同并且焦点重合,投影光栅像经过被测表面的反射后将再次成像在透镜  $L_4$  的后焦面上。当透镜  $L_3$  和透镜  $L_2$  的公共焦点位于被测表面上时,被测表面所在的位置不妨定为检测系统的零平面,那么像光栅在透镜  $L_4$  的后焦面上的光强分布为

$$i(x_3) = |E(x_3)|^2 = \frac{1}{4} + \frac{2}{\pi^2} + \frac{2}{\pi} \cos\left(\frac{2\pi}{p}x_3\right) + \frac{2}{\pi^2} \cos\left(\frac{4\pi}{p}x_3\right). \quad (8)$$

当被测表面相对于零平面发生位移时,设位移量为  $x$ ,两  $4f$  系统光轴夹角为  $2\theta$ ,则光栅像在透镜  $L_4$  后焦面上的位移变化  $\Delta x_3$  为

$$\Delta x_3 = 2 \cdot x \cdot \sin\theta, \quad (9)$$

那么光栅像在透镜  $L_4$  后焦面上的光强分布为

$$i(x_3) = \frac{1}{4} + \frac{2}{\pi^2} + \frac{2}{\pi} \cos \left[ \frac{2\pi}{p} (x_3 + 2x \sin \theta) \right] + \frac{2}{\pi^2} \cos \left[ \frac{4\pi}{p} (x_3 + 2x \sin \theta) \right]. \quad (10)$$

实际上,光栅像除了在垂轴方向产生位移变化  $\Delta x_3$  以外,其轴向位置也会发生变化,由于采用了掠入射的投影方式,轴向位移变化远小于垂轴方向的位移变化,并且可以用透镜  $L_4$  的焦距来消除其影响。在  $L_4$  的后焦面放置一个和投影光栅参数相同的探测光栅,并使探测光栅的刻线方向和轴  $x_3$  垂直,则像光栅和探测光栅产生光栅莫尔条纹。不妨使探测光栅的中心位置和  $4f$  系统 2 的光轴在坐标轴  $x_3$  的方向上错位  $p/4$ ,即探测光栅的光强透过率  $t_1(x)$  为

$$t_1(x) = \text{rect} \left( \frac{x_3 - p/4}{p/2} \right) + \text{rect} \left( \frac{x_3 - 5p/4}{p/2} \right) + \text{rect} \left( \frac{x_3 - 3p/4}{p/2} \right) + \text{rect} \left( \frac{x_3 - 9p/4}{p/2} \right) + \dots, \quad (11)$$

那么像光栅通过线数为  $N$  的检测光栅后的总光强为

$$I = N \int_0^{p/2} i(x_3) dx_3 = N \cdot \left[ \left( \frac{p}{8} + \frac{p}{\pi^2} \right) + \frac{2p}{\pi^2} \sin \left( \frac{2x \sin \theta \cdot 2\pi}{p} \right) \right], \quad (12)$$

从(12)式可以看出,透过探测光栅的光强和被测物体的位移量成正弦关系,因此只要探测出这种光强变化即可以检测出位移变化。

探测光栅通过一个透镜  $L_5$  成像在光电探测器上,则经过探测光栅的光强被探测器所接收。探测光栅后的起偏器、光弹调制器和检偏器形成偏振调制,用于减小杂散光和光强起伏的影响。起偏器和检偏器的透光轴正交,并和光弹调制器的快慢轴成  $45^\circ$  夹角。将光弹调制器的最大延迟量调整为  $\pi/2$ ,则其产生的相位调制为

$$\delta(t) = \frac{\pi}{2} \sin \omega t, \quad (13)$$

其中  $\omega$  为调制频率,设起偏器输出的光强为  $I_{in}$ ,那么调制后的光强  $I_{out}$  为<sup>[6]</sup>

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{2} (1 - \cos \delta t), \quad (14)$$

将(14)式进行贝塞耳函数展开得到<sup>[7]</sup>

$$I_{out} = \frac{I_{in}}{2} [1 - J_0(\pi/2) - 2J_2(\pi/2) \cos 2\omega t + \dots], \quad (15)$$

其中  $J_0, J_2$  分别表示零阶、二阶贝塞耳函数。可见,在光电探测器的信号处理中提取二倍频分量,则可以得到需要的光强信号。

### 3 实验结果与误差分析

实验装置如图 1 所示。波长 632.8 nm 的 He-Ne 激光经过准直以后垂直照到栅距为 100  $\mu\text{m}$ ,线宽为 50  $\mu\text{m}$  的投影光栅上,  $4f$  系统 1 的光阑直径为 3 mm,透镜  $L_1$  的焦距、通光孔径分别为 120 mm, 20 mm。采用置于手动微动平台上的反射镜作为被侧面,被侧面高度可通过转动平台上的微动螺杆进行微调。  $4f$  系统 1 的光轴在被测反射镜上的入射角度为  $84.5^\circ$ ,  $4f$  系统 2,探测光栅分别和  $4f$  系统 1,投影光栅的光学参数相同。光弹调制器的调制频率为 50 kHz,采用光电二极管接收光强。实际上,  $4f$  系统 2 所成的光栅像在探测光栅上也产生衍射,投影光栅和探测光栅采用栅距为 100  $\mu\text{m}$  的粗光栅则可以使衍射角度变小,成像透镜  $L_5$  可以通过更多的衍射级次,使经过探测光栅的光强全部被光电探测器接收,以降低检测原理误差。同时,可以增大无周期计数情况下的检测量程。

调整光路使反射镜两端的  $4f$  系统的光轴同轴,并使探测光栅的中心偏离光轴  $1/4$  个栅距,以此处作为检测系统的零位。实验中,转动微动螺杆使反射镜上升,即使反射镜产生微位移,利用实验装置检

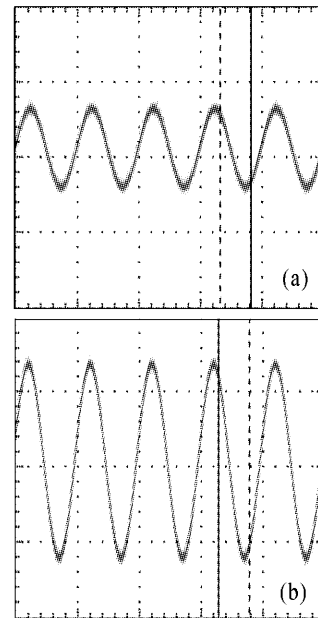


图 2 两个不同测量点处的检测信号波形图  
Fig. 2 Waveform of measurement signal at two measured points

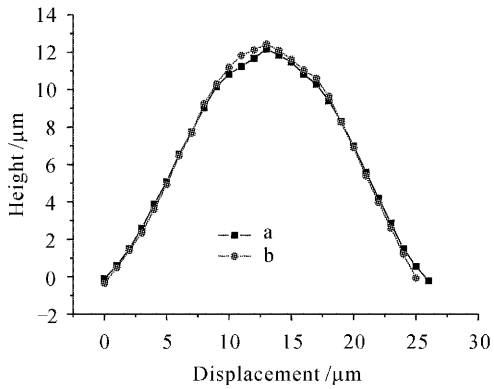


图3 位移检测数据

Fig. 3 Measurement result

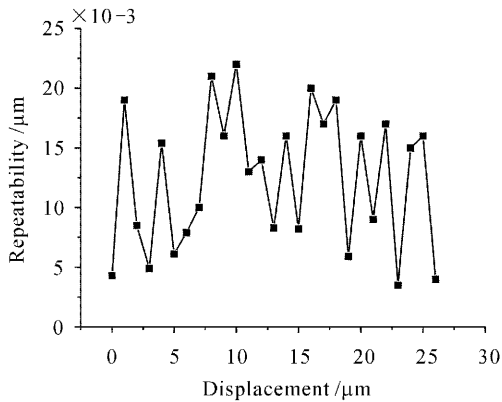


图4 位移重复测量精度

Fig. 4 Repeatability measurement

测反射镜的位移量,被检测的微位移即为反射镜的高度变化。在两个不同的测量点处,示波器上观察到的检测信号的波形如图2中(a),(b)所示。图2(a),(b)中的波形是利用光弹调制器进行偏振调制的结果,其振幅差异显示了两测量点之间的位移量。微动螺杆相继转动26格,使反射镜上升 $26\ \mu\text{m}$ ,27个测量点处的高度数据和重复测量精度( $1\sigma$ )分别如图3,图4所示。图3中的a,b两条曲线是不同时间段内的测量结果,其高度值是将检测光强直接线性转换后的结果,即将公式(12)的正弦函数近似为线性函数后计算反射镜的高度值,可以看出高度测量数据和反射镜的位移成正弦关系并且具有良好的再现性,和式(12)非常吻合,从而很好地验证了检测原理。对于 $100\ \mu\text{m}$ 的光栅栅距和 $84.5^\circ$ 的入射角,由式(12)可以计算出正弦波形的半个周期应为 $25.116\ \mu\text{m}$ ,而图3中的总位移量为 $26\ \mu\text{m}$ ,其检测误差的存在主要由微动平台的手动误差所引起。从图4可以看出,在所有测量点上,位移检测的最大重复测量误差( $1\sigma$ )小于 $25\ \text{nm}$ ,可见这种检测方法具

有较高的测量精度。实验中的重复测量误差源主要是光源的不稳定、信号处理电路噪声和环境影响等,如果减小这些因素的影响,可以进一步提高重复测量精度。

对于测量精度而言,除了上述影响重复测量精度的误差源以外,还有光栅的刻划误差、偏振调制误差和光路调整误差。由于光栅的刻划误差和偏振调制误差在实际应用中可以进行标定以消除其影响,在分析检测方法本身的测量精度时,只需要考虑光源的不稳定性、光路调整误差和信号处理电路噪声和漂移引起的光强检测误差。设投影光栅上的入射总光强为 $I_0$ ,根据式(12)可知位移量 $x$ 的计算公式为

$$x = \frac{p}{4\pi\sin\theta} \arcsin\left(\frac{\pi^2 I}{2I_0} - \frac{\pi^2}{16} - \frac{1}{2}\right), \quad (16)$$

则位移量 $x$ 的测量误差计算公式为

$$\begin{aligned} \delta_x^2 = & \left[ \frac{p\pi I}{8I_0 \sin\theta \sqrt{1 - \left(\frac{\pi^2 I}{2I_0} - \frac{\pi^2}{16} - \frac{1}{2}\right)^2}} \cdot \frac{\delta_I}{I} \right]^2 + \\ & \left[ \frac{p\pi I}{8I_0 \sin\theta \sqrt{1 - \left(\frac{\pi^2 I}{2I_0} - \frac{\pi^2}{16} - \frac{1}{2}\right)^2}} \cdot \frac{\delta_{I_0}}{I_0} \right]^2 + \\ & \left[ \frac{p \cos\theta \cdot \arcsin\left(\frac{\pi^2 I}{2I_0} - \frac{\pi^2}{16} - \frac{1}{2}\right)}{4\pi \sin^2\theta} \cdot \delta_\theta \right]^2, \quad (17) \end{aligned}$$

其中 $\delta_I/I$ 为光强检测的相对误差, $\delta_{I_0}/I_0$ 为光源的不稳定度, $\delta_\theta$ 为光路调整中的角度误差。从式(12),(17)可知,光强随位移变化的半个周期内,测量误差随着位移量的增加而变大。将测量范围取为测量曲线的似线性段

$$x \leq p/(16\sin\theta), \quad (18)$$

即 $\pm 6.279\ \mu\text{m}$ 以内。在信号处理电路中,探测器输出的电信号经过放大电路后由锁相放大器相敏检波获得光强大小,由于锁相放大器的噪声为纳伏量级,因此光强检测的误差源主要是放大电路的增益变化。将放大电路的增益进行标定并校准,可以使光强的检测误差控制在 $0.05\%$ 以内。实时测量激光器的功率变化并校正位移检测结果,光源的不稳定性影响可以控制在 $0.2\%$ 以内。利用内调焦望远镜调整光路,其角度调整误差小于 $6'$ 。在式(18)确定的测量范围内,将栅距 $100\ \mu\text{m}$ ,角度 $84.5^\circ$ ,光强检测误差 $0.05\%$ ,光源的不稳定性影响 $0.2\%$ 以及角度调整误差 $6'$ 代入式(16),(17),得到最大测量误差为 $42.5\ \text{nm}$ ,其中影响最大的是光源的不稳定性。如果对光栅莫尔条纹进行移相、细分,则可以消除光

源的不稳定性影响以提高测量精度,同时结合周期计数技术还可以拓宽测量范围。在我们的实验中,激光器的功率稳定性为 3%,同时环境的影响不能忽略,故其重复测量精度不是很理想。

## 4 结 论

提出了一种基于傅里叶变换光学原理的光栅成像投影式微位移检测方法,采用投影实现的非接触式测量突破了以往的接触式光栅计量技术。通过在  $4f$  系统的频谱面上设置滤波光阑,获得了和位移真正成正弦关系的检测光强信号,改变了现有光栅计量技术中的近似正弦信号,有利于光栅测量信号的细分。光栅在被测面上的投影采用了掠入射的方式,此技术非常适合于上方有遮挡而使检测空间很小的被测物体的位移检测。同时,实验验证了检测原理的可行性,并获得了较高的重复测量精度。如果增加信号细分和周期计数功能,可以进一步提高这种检测技术的检测精度和测量量程。

## 参 考 文 献

- 1 Xuefeng Wang, Xiangzhao Wang, Hongbin Lu *et al.*. Laser diode interferometer used for measuring displacements in large range with a nanometer accuracy [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, **33**:219~223
- 2 Wang Ming, Nie Shouping, Li Dacheng. Optical feedback interferometry of semiconductor laser for sensing application [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(12):1122~1126  
王 鸣,聂守平,李达成. 半导体激光器的光学反馈干涉及传感应用[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(12):1122~1126
- 3 Ma Junshan, Wang Xiangzhao, Fang Zujie *et al.*. Experimental study on self-mixing interferometer in laser diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(1):29~32  
马军山,王向朝,方祖捷 等. 激光自混合干涉仪的实验研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(1):29~32
- 4 Yu Wenxin, Hu Xiaotang, Zou Ziqiang. Research on systematic error correction in grating-based nanometrology [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2002, **23**(2):101~105  
余文新,胡小唐,邹自强. 光栅纳米测量中的系统误差修正技术研究[J]. *计量学报*, 2002, **23**(2):101~105
- 5 Wei Xiaorong, Liu Fengwen. Influence of two Moiré fringe signals on measuring accuracy of grating system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2002, **29**(6):43~45  
魏晓蓉,刘丰文. 两种莫尔条纹信号对光栅系统测量精度的影响[J]. *光电工程*, 2002, **29**(6):43~45
- 6 J. C. Cheng, L. A. Nafie, S. D. Allen *et al.*. Photoelastic modulator for the 0.55~13- $\mu\text{m}$  range [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(8):1960~1965
- 7 Song Song, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng *et al.*. Real-time micro-vibration measurement using synchronous phase detection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8):753~756  
宋 松,王向朝,王学锋 等. 采用同步相位检测的微小振动实时测量[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(8):753~756

1 Xuefeng Wang, Xiangzhao Wang, Hongbin Lu *et al.*. Laser