

基于透射式激光空气隙干涉的纳米分辨率 精密位移测量

王子轩^{***}, 冀聪, 王晶, 杨钢, 王肖隆^{*}, 林强^{**}

浙江工业大学理学院光学与光电子研究中心, 浙江 杭州 310023

摘要 基于透射式激光空气隙干涉原理, 建立微位移测量系统, 实现纳米分辨率的物体微小位移测量。利用外加微小位移并将前后光强度相减的图像处理方法, 有效地提高激光干涉图像的信噪比, 将淹没于杂散噪声中的干涉条纹提取出来。实验结果表明, 该系统的相对位移测量分辨率优于 10 nm, 绝对位移测量不确定度优于 5%。该系统结构紧凑, 安装、使用方便, 测量分辨率达到 nm 级, 可实现快速、便捷、稳定的测量, 适用于临时性的高分辨率精密位移测量需求。

关键词 测量; 微位移测量; 激光干涉; 图像处理; 高分辨率; 空气隙干涉仪

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0904006

Precision Displacement Measurement with Nanometer Resolution Based on Transmissive Laser Air-Wedge Interference

Wang Zixuan^{***}, Ji Cong, Wang Jing, Yang Gang, Wang Xiaolong^{*}, Lin Qiang^{**}

Center for Optics and Optoelectronics Research, College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract A micro-displacement measurement system is established based on transmissive laser air-wedge interference. The system realizes displacement measurement in one dimension with nanometer resolution. We use an image processing method, applying an extra small displacement and calculating the light intensity difference, to extract the interference patterns buried in stray light and noise, and effectively improve the signal-to-noise ratio of the laser interferometric images. Results show that the relative displacement resolution of the system is better than 10 nm and the absolute displacement measurement uncertainty is better than 5%. The measuring system is compact in structure, easy to install and use, and the measuring resolution reaches the nanometer level. It realizes fast, convenient and stable measurement, and is suitable for temporary demand of high resolution and precision displacement measurements.

Key words measurement; micro-displacement measurement; laser interference; image processing; high-resolution; air-wedge interferometer

OCIS codes 120.2830; 120.3180; 100.2000; 350.5730

1 引言

高分辨率的微小位移测量被广泛应用于科研和工业生产的相关领域^[1-3], 该测量技术主要分为非光学测量技术和光学测量技术两大类。非光学测量技术主要包括以电阻法、电容和电感法、电涡流法为代

表的电学测量技术^[4]和以扫描隧道显微镜、原子力显微镜等显微测量为代表的显微镜测量技术^[5]; 光学测量技术主要包括光杠杆法、激光干涉法^[6-8]、光栅尺测量法^[9-10]和光纤位移测量法^[11-13]等。激光干涉微小位移测量技术因具有分辨率高、响应速度快、非接触等优点而被广泛应用。而传统的激光干涉测

收稿日期: 2019-04-02; 修回日期: 2019-04-24; 录用日期: 2019-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(61875175, 61727821)、国家重点研发计划项目(2017YFC0601602, 2016YFF0200206)、中国科学院重点实验室开放项目(A109018237)

* E-mail: xlwang@zjut.edu.cn; ** E-mail: qlin@zjut.edu.cn; *** E-mail: WangZX7123@163.com

量法多采用迈克耳孙干涉仪,通过测量干涉仪臂长的改变量以确定被测物体的位移。但干涉仪结构较复杂,设置成本高,对于临时产生的、有成本限制的测量需求,往往难以满足。

空气隙干涉仪是一种结构简单的光学干涉仪器,其核心测量结构为两块光学平板,适用于快速高分辨率位移测量的实验需求。传统空气隙干涉仪多采用反射式结构,或利用光学镀膜以提高空气隙干涉仪的精细度。本文将传统空气隙干涉仪进一步简化,采用无镀膜的普通玻璃构成结构更简单的透射式空气隙干涉结构,利用图像处理方法消除干涉图像中背景光、杂散光的干扰,提高干涉图样的信噪比,从而获得被测物体的位移信息。

2 测量原理及实验装置

2.1 微位移测量原理

空气隙干涉仪是一种基于光的等厚干涉原理的干涉仪。采用两块无镀膜的楔形光学平板玻璃组成透射式空气隙干涉仪,测量光源采用一带准直透镜的 780 nm 半导体激光二极管。由于无镀膜的玻璃平面无法组成高精度度的等厚干涉系统,所以透射式空气隙干涉图像被背景光、杂散光等噪声完全淹没。为了恢复干涉条纹图样,利用外加微小位移变化,将前后光强分布相减的图像处理方法来消除背景光、杂散光和噪声,并建立测量模型。

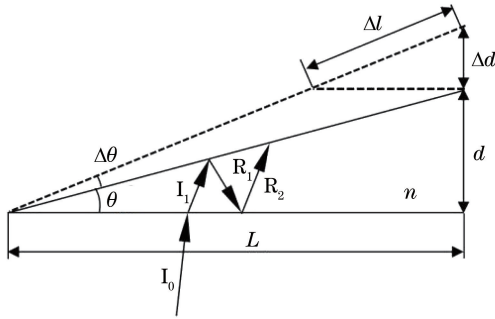


图 1 透射式激光空气隙干涉型纳米位移测量装置原理图

Fig. 1 Schematic of micro-displacement measurement apparatus based on transmissive laser air-wedge interference

如图 1 所示,根据光的等厚干涉原理可知,若光 I_0 由介质的下表面入射,在介质内产生入射光 I_1 和一级反射光 R_1 ,反射光 R_1 穿过介质后在介质下表面产生二级反射光 R_2 ,反射光 R_2 再次穿过介质与入射光 I_1 产生干涉(未镀膜的光学玻璃表面,忽略二级以上反射影响),透射光强度分布可表示为

$$I_{\text{int}} = I_{I_1} + I_{R_2} + 2\sqrt{I_{I_1}I_{R_2}} \cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda}\right), \quad (1)$$

式中: I_{I_1} 和 I_{R_2} 分别为入射光 I_1 和反射光 R_2 的光强; δ 为反射光经过介质后入射光 I_1 和反射光 R_2 之间的光程差; λ 为入射光波长。

对于未镀膜的光学玻璃材料,有 $I_{I_1} \gg I_{R_2}$, (1) 式可简化为

$$I_{\text{int}} \approx I_{I_1} + 2\sqrt{I_{I_1}I_{R_2}} \cos\left(\frac{2\pi\delta}{\lambda}\right), \quad (2)$$

式中: $\delta = 2n(dx)/L$, n 为介质折射率,空气介质的折射率近似为 1, L 为空气隙长度, x 为空间位置, d 为位移量。

(2) 式中交变项强度远小于 I_{I_1} , 因此透射光中的干涉图像会受到背景光、杂散光的严重干扰^[14], 难以通过成像方法直接测量。为了克服背景光等因素的影响,在被测位移上施加一微小的变化量 Δd , 并将施加变化量前后获得的强度信息相减。施加变化量 Δd 后,相应的透射光强度分布变为

$$I'_{\text{int}}(x) = I_{I_1} + 2\sqrt{I_{I_1}I_{R_2}} \cos\left[\frac{4n\pi x}{\lambda L}(d + \Delta d)\right]. \quad (3)$$

将(2)式和(3)式相减,可得透射光强度差值的分布为

$$\begin{aligned} I_{\text{dif}}(x) &= I'_{\text{int}} - I_{\text{int}} = \\ &= 2\sqrt{I_{I_1}I_{R_2}} \left\{ \cos\left[\frac{4n\pi(d + \Delta d)x}{\lambda L}\right] - \cos\left(\frac{4n\pi d x}{\lambda L}\right) \right\} = \\ &= 2\sqrt{I_{I_1}I_{R_2}} \sin\left[\frac{2n\pi(2d + \Delta d)x}{\lambda L}\right] \sin\left(\frac{2n\pi\Delta d x}{\lambda L}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

当 $\Delta d \ll d$ 时,则有 $2d + \Delta d \approx 2d$ 且 $\sin[2n\pi\Delta d/(\lambda L)]$ 项的空间变化周期远大于 $\sin[2n\pi x(2d + \Delta d)]/(\lambda L)$ 。当成像探测区域很小时,可认为 $\sin[2n\pi x(2d + \Delta d)]/(\lambda L)$ 项为常数,透射光强度差 I_{dif} 的空间频率 $\omega(d) = 4n\pi d/(\lambda L)$ 只与 d 相关,为了防止干扰干涉图像,将施加微小位移变化量前后的光强相减,消除背景光、杂散光等因素以恢复空间干涉信息。

2.2 实验装置

基于上述微位移测量模型,设计和构建微位移测量的实验装置,如图 2 所示。微位移测量系统主要包括光学部分和数据处理部分,其中光学部分主要包括激光系统、透射式激光空气隙干涉系统和成像系统。

实验中采用的光学系统构造非常简单,选用波长为 780 nm、功率为 5 mW、带耦合透镜的半导体激光二极管作为干涉光源;空气隙由两个未镀膜的

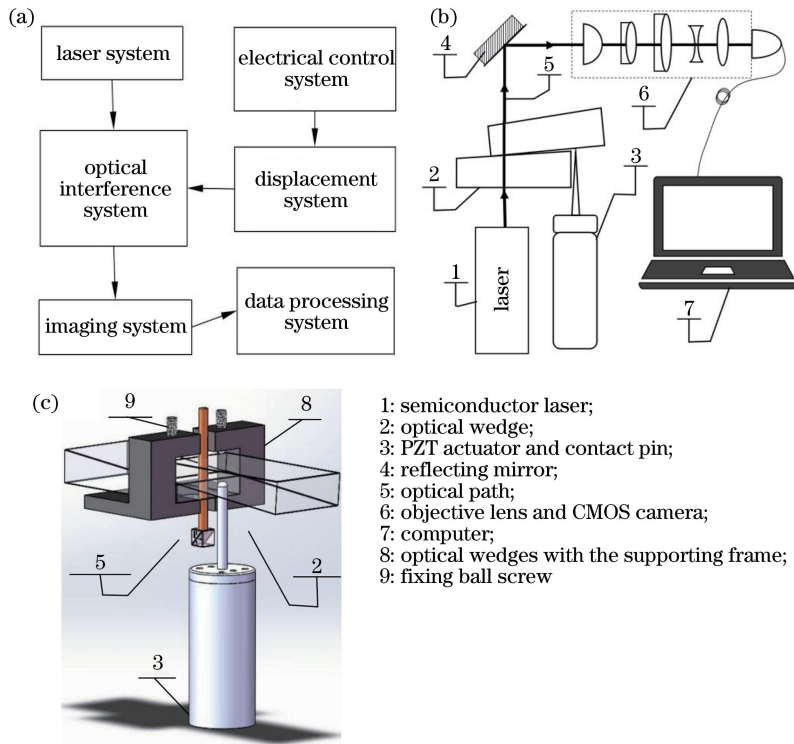


图 2 微位移测量仪器。(a)测量实验装置示意图;(b)干涉微位移测量仪器示意图;(c)光学干涉装置

Fig. 2 Micro-displacement measuring instrument. (a) Schematic of measurement and test apparatus; (b) schematic of interferometric micro-displacement measuring instrument; (c) optical interferometer structure

光学玻璃楔块构成;成像系统由长工作距离的显微镜物镜(Seiwa Optical, M-PlanApo-50x, 工作距离为 18.3 mm)、250 mm 焦距平凸透镜和通用 CMOS(互补金属氧化物半导体)相机构成。被测位移由压电型纳米微动平台(天津三一精控, NS-Z25-01)进行模拟。实验中通过对压电陶瓷(PZT)施加电压,在被测位移上施加微小的位移改变量,记录位移改变前后的干涉图像信息并使用逐差相减的方法进行处理,可将淹没在背景光、杂散光等不利影响中的干涉图像恢复出来,并获得被测位移信息。

3 实验分析与讨论

3.1 实验方法

为保证测量模型在实验中的有效性,利用显微镜分划板对实验装置中的压电型纳米微动平台上施加的电压信号与其伸长量之间的关系进行测量,如图 3 所示。测量结果表明,该平台的伸长量在较大的电压范围内呈现较好的线性特性,因此可对平台施加一很小的电压信号(为 10 mV),使平台发生约 2 nm 的微小长度变化,且每次测量的变化幅度保持一致。

使用如图 2 所示的光学系统,可获得如图 4(a)所示的原始图像,由空气隙造成的干涉条纹图样完

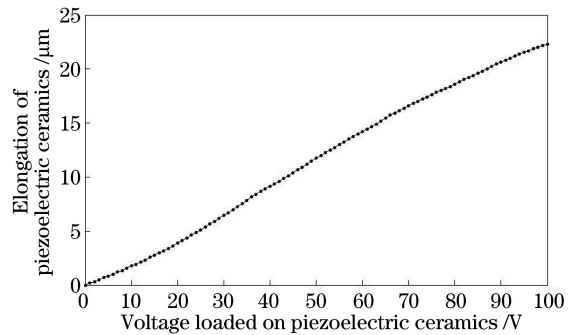


图 3 压电型纳米微动平台外加电压与相应位移的关系
Fig. 3 Displacement of the piezo-type nanometer translation stage as a function of applied voltage

全淹没在背景光、杂散光、显微镜物镜中光学元件的干涉条纹等干扰和噪声中。当在被测位移量另加一微小位移时,背景光、杂散光等因素大多不发生变化,因此可将光强度相减以消除此类共模干扰因素的影响,从而提高信噪比。图 4(b)所示为对原始图像进行强度相减处理,并将相减后的强度差值进行归一化,获得的光强度差值空间信息(100 次测量结果平均),发现可以较好地恢复处理后的空气隙干涉条纹。计算如图 4 所示的处理前后图像在条纹方向积分光强度的噪声功率谱,并进行对比,在经强度差值处理后,信噪比提高 35~40 dB。

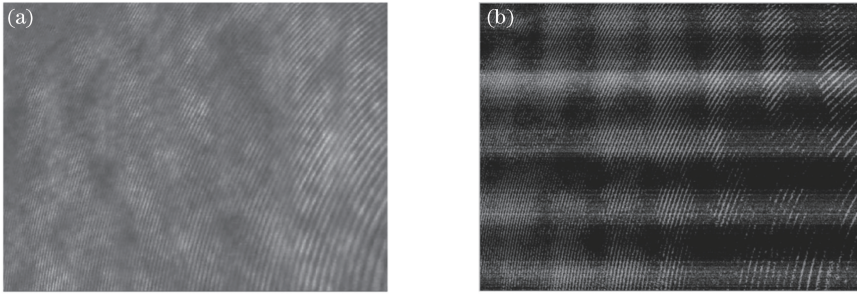


图 4 实验图样和经图像处理图样。(a)实验原始图像;(b)经过强度相减处理、归一化后所得的强度差值图样
Fig. 4 Experimental image and image after image processing. (a) Raw measured image; (b) image obtained by intensity subtraction and normalization

由于空气隙干涉仪是一种典型的等厚干涉仪器,处理后获得的强度差值图样与激光干涉条纹相似,同为的一组亮暗相间的平行条纹。将图样中的强度差值在平行于干涉条纹的方向上积分,可进一步消除强度差值中残存的杂散光等因素,从而获得更清晰的空间分布信息,如图 5 所示,可以发现强度的空间分布呈现较好的正弦函数分布,与测量模型理论分析一致。根据测量模型对结果进行正弦函数拟合,得到其变化的空间频率,从而获得待测位移量信息。

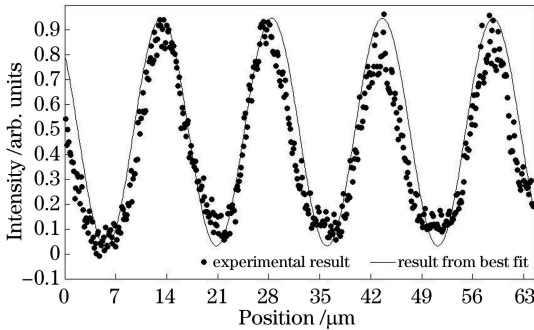


图 5 微位移测量激光干涉光强分布和拟合结果
Fig. 5 Measured and fitted laser interference fringes in micro-displacement measurements

实验中改变被测位移 d 时,利用强度相减方法获得的干涉条纹发生了明显的移动,如图 6 所示。对条纹移动幅度进行简单的线性标定后,可有效地对位移 d 的相对变化量进行测量。实验中发现,在现有的信噪比条件下,位移 d 相对测量分辨率优于 10 nm,测量重复率为 1 Hz。

3.2 绝对测量精度和不确定度分析

通过扫描纳米微动平台电压信号,直接使用显微镜成像测量空气隙在微动平台作用下发生的位移,可以实现连续变化的位移 d 的测量,在此过程中,利用强度相减的方法获得一系列激光干涉条纹

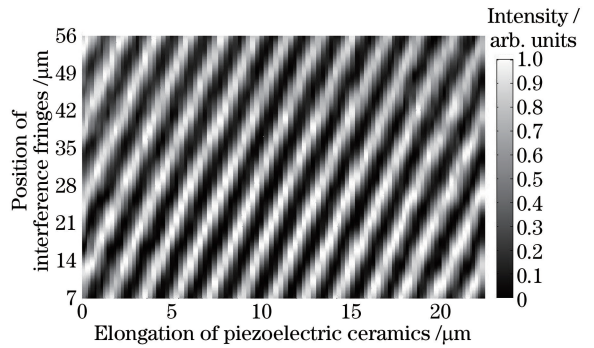


图 6 干涉条纹随压电陶瓷伸长量的变化情况
Fig. 6 Variation of interference fringes with the elongation of piezoelectric ceramics

并进行拟合,得到条纹空间周期并计算得到位移绝对值。将光学成像法测量所得的位移与通过本方法测量数据计算得到的位移量进行对比,结果如图 7 所示。图 7 中参考直线的斜率为 1,位移绝对测量相对理论值的误差在 5% 以内。微位移测量结果的不确定度如表 1 所示。测量结果的不确定度几乎全部来自空气隙长度 L 的测量误差(采用拍照并与分

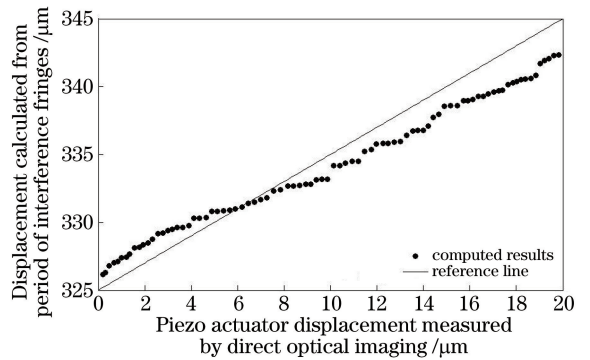


图 7 压电陶瓷伸长量变化时的干涉条纹空间周期计算所得位移
Fig. 7 Displacement obtained by calculating the spatial period of interference fringes for scanned elongations of piezoelectric ceramics

划板比对的方法测量,仪器测量误差为 $20\ \mu\text{m}$,相对误差约为 5% 。在后续工作中,改善空气隙长度 L 的测量方法,降低其测量不确定度,可将本方法的绝对测量不确定度降低到 1% 以内。

表 1 微位移测量结果的不确定度

Table 1 Uncertainty of micro-displacement measurement results

Uncertainty source	Relative uncertainty / %
Wedge length L	about 5.0
Laser wavelength λ	0.1
Fitted fringe interval	0.3

4 结 论

设计和建立一套基于透射式空气隙激光干涉的微位移测量实验装置,并通过该装置准确测量物体的微小位移变化,结果表明相对位移测量分辨率优于 $10\ \text{nm}$,绝对位移测量不确定度优于 5% 。通过设计一种外加微小位移变化,并对外加位移前后的激光强度分布求差的方法,提高了干涉信号的信噪比,将淹没在背景光、杂散光等干扰和噪声中的干涉图样提取出来。相比传统的反射式空气隙干涉仪,透射式空气隙激光干涉仪的结构紧凑,设置方便,特别适用于临时性的高分辨率位移测量需求。

参 考 文 献

[1] Füzessy Z, Abramson N. Measurement of 3-D displacement: sandwich holography and regulated path length interferometry [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(2): 260-264.

[2] Massonnet D, Feigl K L. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface[J]. *Reviews of Geophysics*, 1998, 36(4): 441-500.

[3] Sharma S, Eiswirth P, Petter J. Electro optic sensor for high precision absolute distance measurement using multiwavelength interferometry [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 3443-3451.

[4] Singh A K, Pedrini G, Peng X, *et al.* Nanoscale measurement of in-plane and out-of-plane displacements of microscopic object by sensor fusion [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(12): 121722.

[5] Liu W W, Zhao H. Microscopic displacement detection method based on the imaging technology and its application in stiffness measurement [J]. *Journal of Translucation Technology*, 2005, 18(2): 385-387, 405.

刘伟文, 赵辉. 基于图像技术的微位移检测方法及其应用 [J]. *传感技术学报*, 2005, 18(2): 385-387, 405.

[6] Fu H J, Ji R D, Hu P C, *et al.* Measurement method for nonlinearity in heterodyne laser interferometers based on double-channel quadrature demodulation[J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 2768.

[7] Yang S L. Measurement of diffusivity of nanometer material by means of laser photothermal displacement technique[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1): 29-30.

杨淑连. 基于激光光热位移技术纳米材料热扩散率的测量[J]. *激光技术*, 2007, 31(1): 29-30.

[8] Wang X F, Tan R X, Jiang C L, *et al.* Micro-displacement measurement based on multiple self-mixing interference technology [J]. *Journal of Modern Optics*, 2017, 64(16): 1632-1638.

[9] Wang G C, Yan S H, 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.

[10] Li Y H, Guan K S, Hu Z H, *et al.* An optical fiber lateral displacement measurement method and experiments based on reflective grating panel [J]. *Sensors*, 2016, 16(6): 808.

[11] Ahmad H, Aidit S N, Ooi S I, *et al.* Supercontinuum micrometer-displacement sensor using single-multi-air-gap-single mode fiber as sensing probe[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(20): 8275-8279.

[12] Guan K S, Li Y H, Chen Y X, *et al.* A novel optical fiber displacement measurement system[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 599/600/601: 684-688.

[13] Suhadolnik A, Petrisic J. Displacement measurement using optical fiber reflection sensors[J]. *Informacije Midem-Journal of Microelectronics Electronic Components and Materials*, 2002, 32(3): 186-188.

[14] Wang Z X, Wu J, Dai C J. Effect of Environment and medium on temperature measurement [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(7): 2128-2132.

王子轩, 吴坚, 戴长建. 环境和介质对测温结果的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(7): 2128-2132.