

一种小型化纳米级单光栅位移测量系统的研制

杨东兴, 颜树华, 杜列波, 王国超, 林存宝, 邹鹏飞

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 随着纳米技术的广泛应用以及人们对纳米位移测量认识的不断深化, 光栅位移测量技术正在受到广泛的关注。在研究反射式光栅位移测量原理的基础上, 设计并实现了一种小型化纳米级单光栅位移测量系统, 对系统总体设计、光路布局以及软件算法进行了阐述, 最后, 利用电容位移传感器 ASP-10-ILA 等辅助仪器进行了对比实验。实验结果表明: 在两路信号不完全正交的情况下系统也能实现准确测量, 且理论上系统的位移测量分辨率达到 1 nm; 在电容位移传感器的量程范围内进行小位移对比试验, 系统测量均值与参考值最大偏差 118 nm, 且与拟合直线偏差均小于 100 nm; 当光栅发生 10 mm 以上的较大位移时, 测量结果与均值的偏差均小于 5 ppm。

关键词: 纳米测量; 单光栅; 光栅常数; 正交信号

中图分类号: TH744.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-1020-06

Design of a miniature single-grating displacement measuring system with nanometer resolution

Yang Dongxing, Yan Shuhua, Du Liebo, Wang Guochao, Lin Cunbao, Zou Pengfei

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: As the extensive application of nanotechnology and the deepened cognition of nanometer measurement, the measuring technologies of displacement with nanometer resolution were paid extensively attention to. On the basis of researching in working principle of the reflex-grating measurement, a miniature single-grating displacement measuring system with nanometer resolution was designed as well as realized. The overall design, optical structure, and software algorithm of the system were elaborated. In the end, comparative experiments were done with the help of auxiliary instruments which mainly included a capacitive displacement sensor named ASP-10-ILA. Experimental results show that the system can measure accurately when the two signals are not absolutely orthogonal, and the resolution of the system is 1 nm theoretically; the mean values of the measuring system deviates from the reference values by a maximum of 118 nm, and deviates from the fitting-line by no more than 100 nm when the grating displacement experiments are done within the range of capacitive displacement sensor; the deviations of the results are less than 5 ppm when the grating has displacement larger than 10 mm.

Key words: nanometer measurement; single-grating; grating parameter; orthogonal signal

收稿日期: 2012-08-14; 修订日期: 2012-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(50875258)

作者简介: 杨东兴(1983-), 男, 硕士生, 主要从事光电传感与检测方面的研究。Email: nudtyangdongxing@163.com

导师简介: 颜树华(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电传感与检测方面的研究。Email: yanshuhua996@163.com

0 引言

现代科学技术正朝着宏观和微观两个方向发展。纳米技术是微观领域的重要分支,纳米级位移测量技术是现代机械工业和军事工业的关键技术。尤其是超精密加工领域对其依赖日益显现,并且对它的要求也越来越高,体现在精度高、误差小、量程大、抗干扰能力强等方面。在众多的纳米级位移测量方法中,光栅测量法能够同时胜任大量程和高分辨率的要求^[1]。它具有下列优点:首先,该方法以实物形式提供测量基准,采用低热膨胀系数的石英或零膨胀玻璃等材料制作光栅,其测量基准稳定可靠、零点漂移极小。其次,该方法对环境条件要求比较低,信号处理相对简单且成本较低,易于实现仪器化。随着光栅刻制技术的发展,高质量、高精度光栅尺的出现将会使光栅测量法位移测量的精度大大提高,因此,光栅测量法具有很好的研究价值和应用前景^[2]。

文中介绍的小型化纳米级单光栅位移测量系统能够满足精密位移测量、标定和校准场合需要。它不仅具有分辨率高、量程大、精度高、测量速度快等优点,而且抗干扰能力强,表现为当两路正弦信号偏离正交态或信号幅值发生变化时系统仍能够实现准确测量。此外,它所采用的反射式光栅和小规格的光学元器件使系统小型化成为可能。

1 反射式光栅位移测量工作原理

图 1 为反射式光栅干涉测位移原理图。从激光器 L 出射的单色光被分光镜 BS 分为强度相等的两束光,其中反射光 P 直接入射到光栅上,透射光 Q 先是被反射镜 R 反射然后入射到光栅上。调整分光

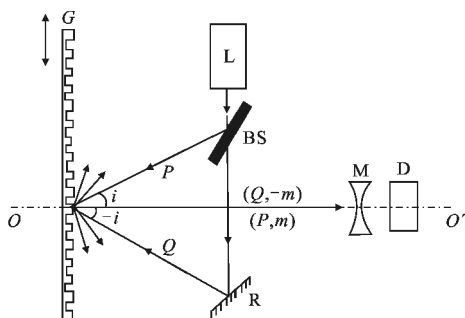


图 1 反射式光栅干涉测位移原理图

Fig.1 Working principle of reflex-grating interference measurement

镜 BS 和反射镜 R,使 P 光和 Q 光对称入射在光栅 G 上同一点,且 P 光被光栅 G 衍射的第 m 级衍射光(P, m)和 Q 光被光栅 G 衍射的第 -m 级衍射光(Q, -m)相互平行且沿光栅法线方向出射。光束(P, m)和(Q, -m)在自由空间发生干涉,经透镜 M 放大后在光电探测器 D 表面形成莫尔条纹。

设激光器 L 出射光的波长为 λ,若不考虑高斯包络调制的影响,其复振幅可表示为:

$$E = A \exp(j\omega t + \phi_0) \tag{1}$$

式中:A 为振幅;t 为时间;ω 为角频率;φ₀ 为初相位;j = √-1。经分光镜 BS 后,P 光和 Q 光到达光栅 G 前表面时复振幅分别为:

$$E_P = A_P \exp(j\omega t + \phi_0 - \pi) \tag{2}$$

$$E_Q = A_Q \exp\left(j\omega t + \phi_0 - \pi - \frac{2\pi}{\lambda} l\right) \tag{3}$$

式中:E_Q、A_Q 分别为 P 光和 Q 光的振幅;位相 π 为由于半波损失引入的位相变化;l 为分光镜 BS 到反射镜 R 间的光程。由公式(2)、(3)可知,当 P 光和 Q 光到达光栅 G 前表面的同一位置时位相差为:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} l \tag{4}$$

当光栅 G 在垂直于光轴 OO' 的方向上发生位移 X 时,由于多普勒效应,引起光束 P、Q 的光程差变化 ΔP 和 ΔQ 分别为:

$$\Delta P = -X \sin i \tag{5}$$

$$\Delta Q = X \sin i \tag{6}$$

式中:i 为入射角。由于衍射光束(P, m)和(Q, -m)沿光栅法线方向出射,位移 X 对它们不产生影响。则总位相差为:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (2X \sin i + l) \tag{7}$$

又有光栅方程:

$$d(\sin i \pm \sin \theta) = m\lambda \quad m=0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{8}$$

式中:d 为光栅栅距;θ 为第 m 级光的衍射角,由于(P, m)和(Q, -m)沿光栅法线方向出射,衍射角 θ=0。则公式(8)变为:

$$\sin i = \frac{m\lambda}{d} \tag{9}$$

将公式(9)代入公式(7)可得:

$$\Delta\phi = 2m \frac{2\pi}{d} X + \frac{2\pi}{\lambda} l = \Delta\phi_X + \Delta\phi \tag{10}$$

由公式(10)可知,总位相差由两部分组成,位相

投射区和入射区折射率。从公式(12)可以看出:在光栅周期 d 已知的情况下,入射角 α 、方位角 β 及光源波长 λ 越小, n_p/n_i 值越大,能够得到的衍射光级次 m 越高。该系统采用的光源是波长为 532 nm 的固体激光器,所用光栅的周期 d 为 10 μm 。经实验验证:当入射角 α 为 30°、方位角 β 为 0°时, ± 13 级衍射光依然清晰可见。系统取 $m=\pm 5$ 级衍射光为有用光。

为了得到理想的干涉效果,有必要对干涉条纹的对比度进行研究。在干涉图样中 C 点处的强度最大值和最小值分别为:

$$\begin{cases} I_{\max}=I^{(1)}(C)+I^{(2)}(C)+2\sqrt{I^{(1)}(C)I^{(2)}(C)}|\gamma_{12}(\tau)| \\ I_{\min}=I^{(1)}(C)+I^{(2)}(C)-2\sqrt{I^{(1)}(C)I^{(2)}(C)}|\gamma_{12}(\tau)| \end{cases} \quad (13)$$

式中: $I^{(1)}(C)$ 、 $I^{(2)}(C)$ 分别为两束光的强度, $\gamma_{12}(\tau)$ 为两束光的相干度。得到 C 点干涉条纹的对比度 $V(C)$ 为^[5]:

$$V(C)=\frac{I_{\max}-I_{\min}}{I_{\max}+I_{\min}}=\frac{2\sqrt{I^{(1)}(C)}\sqrt{I^{(2)}(C)}}{I^{(1)}(C)+I^{(2)}(C)}|\gamma_{12}(\tau)| \quad (14)$$

假设干涉光的相干度 γ_{12} 为不随时间变化的常数。由公式(14)可知,当两束干涉光强度相等时可以得到最大条纹对比度。这正是选择透射率和反射率均为 50%的分光镜和相同级次衍射光的原因。

2.3 软件细分法

光学倍频数确定后,系统的分辨率主要取决于软件细分的倍数。软件细分的基础首先是得到两路正交信号。得到两路正交信号的方法有移相法、希尔伯特变换法^[6]等,该系统采用四象限探测器间隔 1/4 条纹周期排列在干涉条纹的横向以接收信号,经过差分放大后得到两路幅值相当的正交信号^[7]。但是当光栅发生轻微形变或者光路部分发生微小变化时条纹周期会发生很大变化,从而引起两路信号位相差和幅值的变化。实际的条纹光电信号很难保证绝对正交,有时偏离正交态很严重。

该系统软件细分方法为基于反正切变换的高精度细分法。它的位移计算公式为:

$$X=\left(\text{count}+\frac{\theta_{\text{end}}-\theta_{\text{init}}}{360^\circ}\right)\frac{d}{2m} \quad (15)$$

式中: count 为大数计数; $(\theta_{\text{end}}-\theta_{\text{init}})/360^\circ$ 为小数计数; $d/2m$ 为系统光学分辨率,即探测信号变化一个周期对应的光栅位移量。为确保大数计数准确,必须限制每批次处理的采样数据个数,使其对应采样时间内相位值的变化量小于 180°。由于外界环境等因素的干扰,信号中存在随机噪声,从而影响小数计数的精

确度。去除噪声的方法有小波阈值法^[8]等,该系统软件采用均值法进行去噪处理。当采样的数据足够多且每批次处理的数据量适中的情况下噪声被抵消掉,从而得到准确的小数计数。系统硬件部分 DSP 为双缓存结构,大大提高了数据处理速度,有效缓和了系统测量速度与测量精度之间的矛盾。实验表明,当两路正弦信号位相差介于 70°~110°时系统仍能准确测量。图 5 为两路位相差为 82.72°、幅值比约为 5:4 的正弦信号波形和李萨育图。

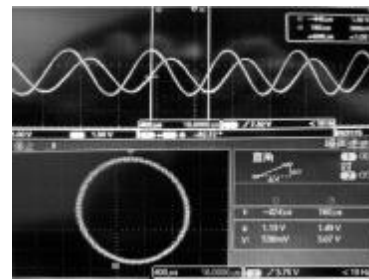


图5 两路正弦信号和李萨育图

Fig.5 Two sinusoidal signals and Lissajou

系统光栅栅距 d 为 10 μm ,光学倍频数为 10,软件细分倍数为 1000。整个系统可以实现对光栅栅距的 10000 倍细分,系统理论分辨率可以达到 1 nm。

3 实验

实验在常温、常压以及水泥基底防振光学平台上进行。测试时间特意选在夜晚,并在周围环境噪声较小的情况下进行实验。利用辅助仪器进行对比测试实验,并对系统性能给予评价。对比测试实验系统如图 6 所示。其中辅助设备为卓立汉光仪器有限公司生产的由 KSA150-12-X 电控平移台和 MC600-2B 平移台控制箱构成的精确定位系统,MTI 公司生产的由 ASP-10-ILA 电容式探头和 AS-9000 双通道放大器构成的高精度测量系统,以及 Agilent 公司生产的 34410A 六位半数字万用表。其中 KSA150-12-X 电控平移台与 MC600-2B 平移台控制箱构成的精确定位系统为光栅元件提供水平直线位移量,它的闭环分辨率为 1 μm 。ASP-10-ILA 电容式探头和 AS-9000 双通道放大器构成的高精度测量系统与 34410A 六位半数字万用表结合实现对光栅元件水平直线位移量的高精度测量,作为该系统的位移参考系统,其量程为 254 μm ,精度为 $\pm 0.1\%$ (± 250 nm),线性度为 $\pm 0.05\%$ (± 204 nm)。

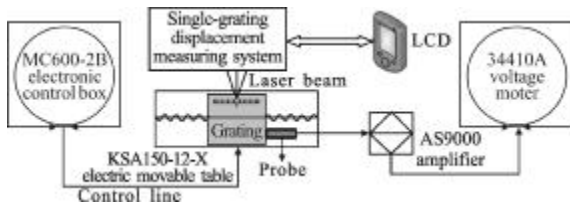


图 6 对比测试实验系统示意图
Fig.6 System of contrasted experiment

3.1 小位移测量实验

实验中，小位移是指小于参考系统量程 $254\ \mu\text{m}$ 的位移。需要注意的是，小位移测量中选择电容传感器线性度较好的 $30\sim 210\ \mu\text{m}$ 位移区间段。控制电控平移台正向移动，速度为 $1\ \text{mm/s}$ ，位移间隔取 $20\ \mu\text{m}$ ，当电控平移台停止移动时记录数据。数据记录方法为：每次位移记录 20 组数据，记录时间间隔为 5 s，然后取其均值。MATLAB 对数据进行直线拟合，如图 7 所示。

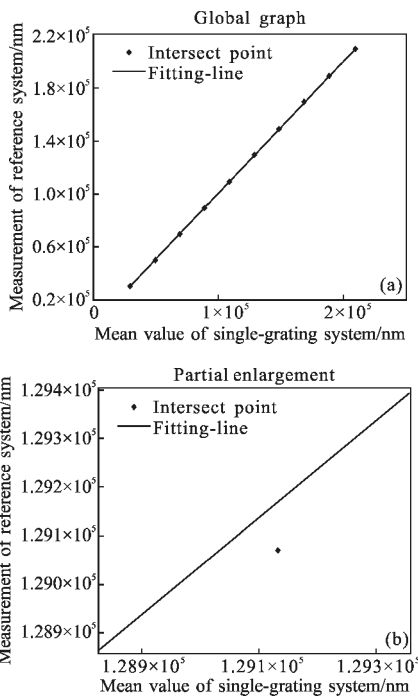


图 7 小位移测量直线拟合图
Fig.7 Fitting-line of tiny displacement measuring

MATLAB 计算得到拟合直线方程为：

$$V=0.9998\times U+62.1078 \quad (16)$$

式中： U 为系统位移均值； V 为参考系统测量值。电控平移台每产生一次位移，系统均值与参考系统测量值作对比，其对比结果以及系统位移均值与拟合直线的偏差值如表 1 所示。

表 1 小位移测量实验数据

Tab.1 Experimental data of tiny displacement

No.	Reference values/nm	Mean values of single-grating system/nm	Deviations of mean values from reference values/nm	Deviations of mean values from fitting-line /nm
1	30 035	29 936	-99	-43
2	49 758	49 687	-71	-19
3	69 649	69 548	-101	-53
4	89 295	89 236	-59	-15
5	108 841	108 879	38	78
6	129 071	129 132	61	97
7	148 777	148 798	21	53
8	168 947	168 996	49	77
9	188 858	188 766	-92	-68
10	209 011	208 893	-118	-98

3.2 大位移测量实验

实验中，大位移是指大于电容位移传感器量程 $254\ \mu\text{m}$ 而小于光栅有效工作长度的位移。开始测量后，立即记录系统显示的 50 个测量值作为起始点稳定性的评价数据，然后通过电控平移台分两次移动光栅，每次自动进给量为 $10\ \text{mm}$ 。由于所使用的精密电控平移台的重复定位精度只有 $3\ \mu\text{m}$ ，每次实际位移量在 $9.997\sim 10.003\ \text{mm}$ 范围内。每次进给完成后记录 50 组数据，记录时间间隔为 5 s。图 8 是电控平移台位移量分别为 $10\ \text{mm}$ 和 $20\ \text{mm}$ 时的实验数据稳定性分析图。

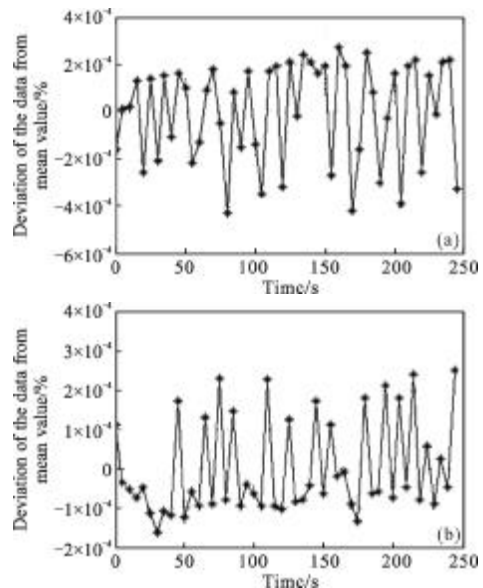


图 8 位移为 $10\ \text{mm}$ 和 $20\ \text{mm}$ 时实验数据稳定性分析图
Fig.8 Data analysis of stability when the displacement are $10\ \text{mm}$ and $20\ \text{mm}$

当电控平移台位移量为 10 mm 时,单光栅位移测量系统测量最大值为 10 000 795 nm,最小值为 10 000 725 nm,均值为 10 000 767.64 nm,方差为 451 nm。

当电控平移台位移量为 20 mm 时,单光栅位移测量系统测量最大值为 20 002 582 nm,最小值为 20 002 499 nm,均值为 20 002 531.54 nm,方差为 585.4 nm。

4 结论

研制了一种小型化单光栅位移测量系统,它的分辨率达到了纳米级。进行了系统性能对比测试实验,实验结果表明:(1)从小位移测量实验数据可以看出,系统测量均值与参考值偏差介于-118~61 nm之间,与拟合直线偏差介于-98~97 nm之间,均小于电容位移传感器的精度,系统测量值可信;(2)从大位移测量实验数据可以看出,每次位移测量时间内测量值最大值与最小值相差小于 100 nm,分布相对集中,方差小,稳定性较好。两次位移测量值分别位于 9.997~10.003 nm 和 19.997~20.003 nm 范围内,测量值可靠。

在系统研制、调试、实验的过程中发现一些问题,主要有:光学元器件非标准化,不便于光路的调整和固定。此外,光在自由空间传播过程中,其光程易受空气扰动的影响,因此有必要进一步研究空气扰动对系统测量误差的影响。同时,可以尝试利用光纤传感技术对光路结构进行进一步优化。

参考文献:

- [1] Su Shaojing. Research on theory and key technologies of long-range displacement measuring with nanometer resolution by grating [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001: 5-11. (in Chinese)
苏绍璟. 大量程纳米级光栅位移测量理论及关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2001: 5-11.
- [2] Wang Guochao, Yan Shuhua, Zhou Weihong, et al. Effect of non-ideal performance of lasers in dual-wavelength single-grating nanometer measurement [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6): 1119-1124. (in Chinese)
王国超, 颜树华, 周卫红, 等. 双波长单光栅纳米测量中激光器性能非理想的影响 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1119-1124.
- [3] Yan Shuhua. Design of Diffractive Micro-optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 177-178. (in Chinese)
颜树华. 衍射微光学设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 177-178.
- [4] Chu Xingchun. Research on key technologies of nanometer displacement measurement by grating interferometry [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005: 36-37. (in Chinese)
楚兴春. 纳米光栅干涉位移测量关键技术的研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005: 36-37.
- [5] Born M, Wolf E. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light [M]. 7th ed. Translated by Yang Xiasun. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 472-473. (in Chinese)
马科斯·波恩, 埃米尔·沃尔夫. 光学原理 [M]. 第 7 版. 杨葭荪, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006: 472-473.
- [6] Wang Fengpeng, Zhao Chengguo, Liao Zhimeng, et al. Interferometry for length measurement based on video image [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40 (6): 1133-1137. (in Chinese)
王凤鹏, 赵成果, 廖志孟, 等. 采用视频图像的激光干涉测长技术 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1133-1137.
- [7] Huang Qianghui, Cao Yiping. New method for detecting orthogonal signals of laser interference fringes using four-quadrant detector [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5): 1166-1170. (in Chinese)
黄强辉, 曹益平. 采用四象限探测器检测干涉条纹正交信号的新方法 [J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1166-1170.
- [8] Sun Lei, Zhang Zhili, Tan Lilong, et al. Denoising method of dynamic grating Moire signal based on wavelet threshold [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39 (3): 576-580. (in Chinese)
孙磊, 张志利, 谭立龙, 等. 采用小波阈值的时变光栅莫尔信号去噪方法 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3): 576-580.