

文章编号: 1001-3806(2010)05-0661-04

## 光栅干涉位移测量技术发展综述

王国超, 颜树华\*, 高雷, 谢学东, 田震  
(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

**摘要:** 介绍了经典双光栅测量系统、非对称双级闪耀光栅测量系统、单光栅测量系统、基于2次莫尔条纹的光栅测量系统、同心圆光栅2维位移测量系统、2维光栅位移测量系统的测量原理, 阐述了各系统的关键问题及不足之处。同时结合双频激光干涉仪外差干涉思想, 在单光栅测量系统的基础上, 提出了双波长单光栅式纳米级位移测量方法, 并通过分析系统特点指出该方法能实现大量程测量、获得纳米级的精度和分辨力。在对各种测量方法进行综合比较之后, 总结了光栅测量的关键问题, 并展望了光栅干涉位移测量的未来发展方向。

**关键词:** 测量与计量; 位移; 光栅; 干涉条纹

**中图分类号:** TH741 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.023

### Development of displacement measurement technologies based on grating interferometry

WANG Guo-chao, YAN Shu-hua, GAO Lei, XIE Xue-dong, TIAN Zhen

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

**Abstract:** Methods of displacement measurement based on grating interferometry, including classical dual-grating measurement systems, nonsymmetrical doubly blazed reference grating measurement systems, single grating measurement systems, grating measurement systems based on the 2nd harmonic Moiré fringes, concentric-circle grating two-dimension displacement measurement systems, and the two-dimension grating measurement systems, were introduced. The key problems and disadvantages of each system were presented as well. According to dual-frequency laser interferometer, the dual-wavelength single grating nanometer displacement measurement was put forth based on the single grating measurement system. After analyzing its characteristics, it was pointed out that it could realize the measurement with a wide range, nanometer precision and nanometer resolution. After a general comparison among these methods, a conclusion of key technologies was drawn, and an outlook of displacement measurement based on grating interferometry was presented.

**Key words:** measurement and metrology; displacement; grating; interferometric fringe

## 引言

光栅位移测量起源于20世纪50年代, 1953年英国Ferranti公司的爱丁堡实验室建立了第1个利用莫尔条纹系统测量位移的工作样机。1954年, GUILD在其著作“The interference system of crossed diffraction gratings”中首次提出莫尔干涉的思想。1967年, POST首次根据GUILD提出的原理, 把1块粗光栅和1块细光栅组合到一起, 通过合理地选择衍射光的级次, 实现了条纹倍增, 得到了相当于采用200line/mm光栅的测量灵敏度。20世纪80年代初期, POST等人用Lloyd

反射镜和光栅构造了一个简单的莫尔干涉系统, 实现了相当于采用4000line/mm光栅的灵敏度, 这才使莫尔干涉位移测量真正走上了实用的阶段<sup>[1]</sup>。

随着人们对大量程、高分辨力和高精度的测量要求的不断深化, 光栅位移测量技术正在受到越来越广泛的重视。相比于其它高精度位移测量方法, 光栅位移测量在结构、光路、电路和数据处理方面都比较简单、紧凑, 整个系统体积小、成本低、易于仪器化、适合于推广应用<sup>[2]</sup>; 同时, 它以实物形式提供测量基准, 既可以采用低热膨胀系数的石英或零膨胀玻璃等材料作为基体, 也可以采用具有和钢等材料非常接近的热膨胀系数的玻璃或金属材料作为基体, 稳定可靠, 零点漂移极小, 对环境条件的要求低, 对实验研究及工程应用都非常方便, 在位移测量领域具有广阔的发展前景。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875258)

作者简介: 王国超(1985-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光电检测及传感技术方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: yanshuhua996@163.com

收稿日期: 2009-10-29; 收到修改稿日期: 2009-12-27

## 1 几种光栅干涉位移测量技术

### 1.1 经典双光栅测量系统

双光栅干涉系统<sup>[3-6]</sup>最早是由德国海德汉因公司推出的,当时代表了国际上光栅位移测量系统的最高水平,测量分辨率可以稳定地达到1nm。这种方式构成的系统主要采用了两根高线数的光栅,一根长度较短的集成在读数头中,称之为参考光栅,另外一根较长的光栅单独封装,它的长度决定了测试量程范围,称之为标尺光栅。

此经典系统使用光栅常数比为2的两根高线数光栅,由独特的双光栅结构实现了光学4细分,使光学位移分辨率达到标尺光栅栅距的1/4,加上高倍电子细分,使最终的位移分辨率达到1nm,其测量范围等于标尺光栅的长度。该系统在位移测量时要注意的几个问题是:(1)为获取莫尔条纹的高对比度,第2个光栅必须位于第1个光栅的Talbot平面内<sup>[7]</sup>,且两光栅的间隙安装误差必须小于Talbot周期的10%;(2)当光栅周期为 $2\mu\text{m}$ 、光源波长为 $900\text{nm}$ 时,两个光栅之间的间隙的安装误差必须小于 $0.45\mu\text{m}$ ,并且在实际应用中,光栅周期不能小于 $10\mu\text{m}$ ;(3)测量范围取决于标尺光栅的长度,测量分辨率取决于标尺光栅的栅距,由于受较长的高线数光栅制作工艺的限制,经济成本高,进一步推广应用的难度较大。

### 1.2 非对称双级闪耀光栅测量系统

为了解决大量程测量中灵敏度的问题,POST提出了非对称双级闪耀光栅位移测量的方法,实质是用双级闪耀参考光栅来实现莫尔条纹倍增<sup>[8]</sup>。如图1所示, $G_1$ 为细光栅,也称参考光栅或指示光栅,一般用闪

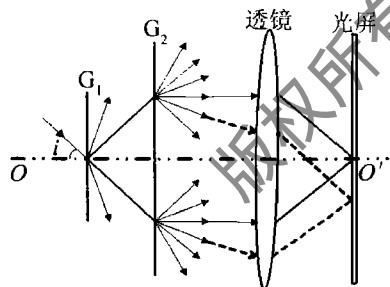


图1 双光栅测量系统示意图

耀光栅,栅距为 $d_1$ ;  $G_2$ 为粗光栅,也称标尺光栅,栅距为 $d_2$ ,且有 $d_2 = 2\beta d_1$ ,  $\beta$ 为大于1的整数。该系统利用粗细两根闪耀光栅组成位移测量结构,可以实现相当于粗光栅栅距 $\beta$ 倍的条纹倍增。

这种测量方法的条纹灵敏度等于细光栅的栅距,而量程由粗光栅的长度决定,很好地解决了高线数光栅不能做得太长所带来的问题,在不降低测量分辨率的条件下可实现大量程测量。但是该系统也存在一些问题<sup>[9]</sup>:非对称双级衍射光的产生,要求光束的入射角必须在一定的偏差范围内,因此光路调整困难;受光

栅制作技术的限制,光栅闪耀角难以精确控制,当闪耀光栅线数增加时,非对称双级衍射光的强度相差较大,影响条纹对比度,因此,实用的非对称双级闪耀光栅位移测量系统的光学分辨率受到限制;此外,细光栅之间的距离调整直接影响莫尔条纹的有无,因此对安装要求苛刻。

### 1.3 单光栅测量系统

单光栅位移测量是利用单根大长度计量光栅,合理选取光束入射角,借助光栅的两束高级次衍射光形成莫尔干涉条纹,进而构成具有高光学倍频数的光路系统<sup>[10-11]</sup>。图2是由国防科学技术大学学者对非对

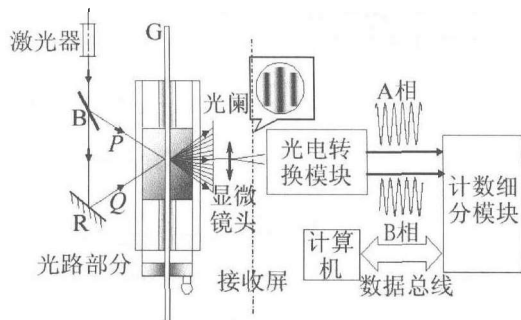


图2 单光栅测量系统结构图

称双级闪耀光栅系统进行深入研究后,用普通光栅代替闪耀光栅而构成的单光栅位移测量系统。其基本原理为:激光器出射波长为 $\lambda$ 的单色相干光被分光镜B分成强度相等的P光和Q光,它们分别被分光器B和反射镜R反射后入射光栅的同一位置。仔细调整P光和Q光入射光栅G的角度,可以使两束级次为 $m$ 的衍射光( $P, m$ )和( $Q, -m$ )沿光栅法线方向出射,经光阑和透镜后在接受屏的光电探测器表面形成莫尔干涉条纹。

系统首先通过前端光路设计将光栅栅距 $d$ 进行 $2m$ 倍光学细分,得到分辨率 $1\mu\text{m}$ 的条纹信号,然后配合任意位相差条纹信号计数细分法,实现1000倍的电子细分,从而达到1nm分辨力。整个系统结构简单,提高了光路效率,同时采用条纹图整周期裁剪法,提高了傅里叶变换法的相位提取精度,实现了位移的动态测量,在100mm的量程范围内,实际系统可以达到50nm的精度指标。整个系统测量灵敏度与栅距 $d$ 成正比,与衍射级次 $m$ 成反比。因此,要提高系统灵敏度,可使用细栅距光栅或高级次衍射光。但是,当栅距 $d$ 小于入射光波长 $\lambda$ ,将只存在零级衍射光,因此,系统中光栅的最小栅距只能为 $d = \lambda$ 。虽然理论上可以使用任意高级次衍射光,但由于衍射光功率随衍射级次的增加迅速减小, $m$ 的选取必须满足系统信噪比要求。

### 1.4 基于2次莫尔条纹的光栅纳米测量系统

采用2次莫尔条纹法也能够实现高倍数的莫尔条



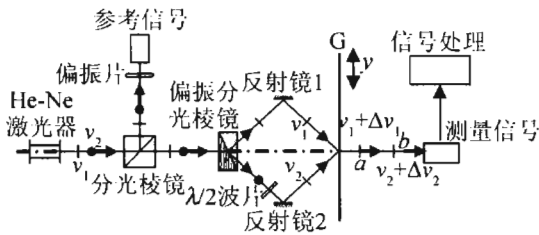


图6 双波长单光栅式纳米级位移测量系统

要达到的性能指标为分辨力 0.5nm、精度 5nm、量程 100nm ~ 200nm。

双波长单光栅干涉测量方法的测量基准是光栅栅距  $d$ ，而不是光波波长  $\lambda$ 。采用双波长激光，给干涉条纹随位移（或时间）的变化引入一个载波，使普通单光栅干涉测量的直流信号系统转变为双波长单光栅干涉测量的交流信号系统，从而大大增强系统的抗干扰能力和稳定性，并具有对光强波动不敏感、响应速度快、信噪比高和交流放大器具有高增益等优点，易于实现高精度测量，提高了系统的环境适应性和抗干扰能力<sup>[23-24]</sup>。

理论上采用单根光栅构成位移测量系统，光栅间距的不均匀也会给测量精度带来一定的影响。但由于本系统采用的是低线数长光栅（50line/mm），光栅间距的不均匀性要优于同等长度的高线数光栅。另外，系统中参加干涉的两路光信号，同时照射到长光栅的同一区域，其中有些光栅制作误差由于两路信号的差频过程而部分被消除，这些都为获得高的测量精度创造了条件。

## 2 结论与展望

以上介绍的几种光栅干涉位移测量方法，其中双光栅干涉系统由于要求高线数的标尺光栅，其量程不可能太大；非对称双级闪耀光栅测量方法由于对安装定位的特殊要求，使用起来条件非常苛刻；2次莫尔条纹干涉方法的理论分辨力和精度都能达到纳米水平，但量程由于其光路对称结构的要求而受到很大限制，并且要得到好的结果，必须很高的加工精度和安装精度来形成高质量的1次莫尔条纹；同心圆光栅和2维光栅这两种2维位移测量方法都是近几年提出的位移测量方法，其在理论上扩展了位移测量的维数，解决了多系统测多维数带来的阿贝误差，但是其在分辨力和精度上都还很难达到纳米级水平；单光栅测量系统尽管量程与分辨力都能达到理想要求，但是精度上没有得到很好的实现；双波长单光栅式纳米级位移测量系统不仅继承了单光栅系统的优点，而且通过引进双频载波大大增强系统的抗干扰能力和稳定性，再配合经典的外差相位细分方法，使系统达到了纳米精度要求。

在今后相当长一段时间内，光栅干涉位移测量

技术仍将是人们研究的热点，同时该领域也仍然存在诸多要深入探索的问题：（1）研究新的原理方法，包括新的光栅测量原理，新的适合纳米测量的莫尔条纹细分方法，以及与其它位移测量方法相结合所产生的新方法等；（2）进行误差理论的研究分析，如光栅衍射特性对测量分辨力和精度的影响机理，光栅制作误差对测量精度的影响机理，温度等环境因素变化所引起的误差，电子细分误差等，并在量化分析的基础上研究合适的补偿技术；（3）研究精密机械装定技术，系统要想达到纳米级甚至亚纳米级的水平，必须具备纳米级的定位和导轨系统；（4）在保证系统分辨力和精度的基础上，实现动态条件下的多维位移的测量；（5）研究新的光栅制作技术，包括大量程超高线数的衍射光栅，2维及多维光栅等。可以预见，光栅干涉位移测量将以其高分辨力、高精度、体积小、成本低和易于仪器化等诸多优点在工程测量领域将发挥更大的作用。

## 参 考 文 献

- [1] WALKER C A. Historical review of Moiré interferometry[J]. *Experimental Mechanics*, 1994, 34(4): 281-299.
- [2] CAO J L. Research on the displacement measurement technology of wide range high resolution with the grating[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 4-5 (in Chinese).
- [3] SU Sh J, LIU H, LU H B, et al. Doppler analysis for double-grating displacement measurement system with nanometer resolution[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 17-21 (in Chinese).
- [4] JIE D G, LIU Y J, SUN L N, et al. A novel high speed/high precision displacement measurement method using double grating scales for a micro driven system[C]//IEEE Robot & Automat Society, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Kunming, China: IEEE, 2006: 1588-1593.
- [5] JOURLIN Y, JAY J, PANIAUX O. Compact diffractive interferometric displacement sensor in reflection[J]. *Precision Engineering*, 2002, 26(1): 1-6.
- [6] van GORP B, ONARAN A G, DEGERTEKIN F L. Integrated dual grating method for extended range interferometric displacement detection in probe microscopy[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(8): 100-106.
- [7] TORCAL-MILLA F J, SANCHEZ-BREA L M, BERNABEU E. Talbot effect with rough reflection gratings[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(18): 3668-3673.
- [8] CHEN Z F, LU H B, ZHANG Sh Z. A novel wide range nano-resolution ultra-precise diameter measurement instrument[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2001, 37(4): 32-34 (in Chinese).
- [9] CHU X Ch. Research on key technology of nanometer displacement measurement by grating[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005: 12-14 (in Chinese).
- [10] XU D M, WENG C F, LEI M R. Research on the high accuracy displacement measuring and display system[C]//Chinese Society Modern Technology Equipment 7th International Symposium on Test and Measurement. Beijing: International Academic Publishers, 2007: 3515-3518 (in Chinese).

(下转第716页)

多色 GSM 光束被硬边光阑衍射后谱强度的近似解析公式。通过对近似公式数值计算与直接对交叉谱密度函数传输公式数值积分结果的比较,证实了所得近似公式在保证计算精度的前提下,具有大大地节省机时的优点。改变空间相关参量 $\beta$ 对所得近似公式成立的菲涅耳数 $N_2$ 的取值范围影响不大。当光阑效应不可忽略时,近似公式成立的 $N_2$ 的取值范围随截断参量 $\delta$ 的增加而减小。出现误差的原因是由于复高斯函数不能完全准确地描述硬边光阑的窗口函数<sup>[14]</sup>,可以通过对硬边光阑窗口函数更好的拟合来提高计算精度。该方法也可用于其它光束被硬边光阑衍射后谱强度的计算,且使得在微机上计算光束被多个硬边光阑衍射后的谱强度成为可能。

## 参 考 文 献

- [1] WOLF E. Invariance of the spectrum of light on propagation[J]. Phys Rev Lett, 1986, 56(13):1370-1372.
- [2] WOLF E, JAMEST D F V. Correlation-induced spectral changes[J]. Reports on Progress in Physics, 1996, 59(6): 771-818.
- [3] PU J X, ZHANG H H, NEMOTO S J. Shifts and spectral switches of partially coherent light passing through an aperture[J]. Opt Commun. 1999,162(8): 57-63.
- [4] YATAGAI T, KAWAI S, HUANG H. Optical computing and interconnects[J]. Proc IEEE,1996,84(2):825-852.
- [5] POPESCU G, DOGARIU A. Spectral anomalies at wave-front dislocations[J]. Phys Rev Lett, 2002,88(18): 183902/1-183902/4.
- [6] ROYCHOWDHURY H, WOLF E. Effects of spatial coherence on near-field spectra[J]. Opt Lett, 2003,28(3):170-172.
- [7] YADAV B K, RIZVI S A M, KANDPAL H C. Experimental observation of spectral changes of partially coherent light in Young's experiment[J]. Journal of Optics, 2006, A8(1):72-76.
- [8] ZHAO G P, LÜ B D. Influence of hard-edge aperture on the spectral switch of polychromatic vector beams[J]. Laser Technology,2006,30(2):142-144(in Chinese).
- [9] YADAV B K, RIZVI S A M, RAMAN S, *et al.* Information encoding by spectral anomalies of spatially coherent light diffracted by an annular aperture[J]. Opt Commun,2007, 269(9):253-260.
- [10] ZHAO G P, LÜ B D. Spectral switches and effect in singular optics with polychromatic light field[J]. Acta Physica Sinica,2008, 57(4): 2229-2235(in Chinese).
- [11] ZHAO G P, ZHANG E T, LÜ B D. Spectral switches of partially coherent nonparaxial beams diffracted at an aperture[J]. Opt Commun,2009, 282(2):167-171.
- [12] ZHAO G P, LÜ B D. The influence of nonparaxiality on the spectral behavior in Young's experiment illuminated by partially coherent light[J]. Chinese Physics,2009,B18(8):3466-3472.
- [13] WOLF E, SHIRAI T, CHEN H, *et al.* Coherence filters and their uses: 1. Basic theory and examples[J]. Journal of Modern Optics, 1997, 44(7): 1345-1354.
- [14] SHIRAI T, WOLF E, CHEN H, *et al.* Coherence filters and their uses:2. One-dimensional realizations[J]. Journal of Modern Optics, 1998, 45(4): 799-816.
- [15] WEN J J, BREAZEALE M A. A diffraction beam field expressed as the superposition of Gaussian beams[J]. J Acoust Soc Amer, 1988, 83(5):1752-1756.
- [11] CHU X Ch, LU H B, ZHAO Sh H. Wide range grating interferometer with nanometer resolution [J]. Opto-electronic Engineering, 2008,35(1):56-59(in Chinese).
- [12] MA X Sh, FEI Y T, CHEN X H, *et al.* Theory study of a new nanometrology grating [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(2):159-164(in Chinese).
- [13] CHAN H M, YEN K S, RATNAM M M. Crack displacement sensing and measurement in concrete using circular grating Moiré fringes and pattern matching[J]. Proc SPIE, 2008, 7155:715529/1-715529/8.
- [14] PARK Y C, KIM S W. Optical measurement of spindle radial motion by Moiré technique of concentric-circle gratings [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,1994,34(7):1019-1030.
- [15] LATIME P. Talbot plane patterns: grating image or interference effects[J]. Appl Opt, 1993, 32(7):1078-1083.
- [16] XIA H J, FEI Y T. Error analysis of 2-D diffraction grating interferometer for high-resolution displacement measurement[J]. Proc SPIE, 2008, 7130:13052-13055.
- [17] WANG X Z, DONG X H, GUO J, *et al.* Two-dimensional displacement sensing using a cross diffraction grating scheme[J]. Journal of Optics,2004, A6(1):106-111.
- [18] ZHAO B, YAN L, HAO D F. Experimental study about a type of gratings interferometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(1):271-274(in Chinese).
- [19] ZHU M Ch, ZHOU Zh F, ZHANG T. Research of the He-Ne laser-wave interferometer[J]. Laser Technology, 2004, 28(5):531-533(in Chinese).
- [20] LEE J Y, CHEN H Y, HSU C C, *et al.* Optical heterodyne grating interferometry for displacement measurement with subnanometric resolution[J]. Sensors and Actuators, 2007,137(1):185-191.
- [21] FERHANOGLU O, TOY M F, UREY H. Two-wavelength grating interferometry for MEMS sensors[J]. Photonics Technology, 2007, 19(21/24):1895-1897.
- [22] WANG F, QI X D. Grating heterodyne interferometer of high accuracy controlling photoelectric grating ruling engine[J]. Laser Technology, 2008, 32(5):474-476(in Chinese).
- [23] QIAO N Sh, ZHAO H J, CAI X H, *et al.* Study of profilometry based on two-frequency grating[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2008, 19(1):74-77(in Chinese).
- [24] WANG X H, HE X D, FU Y J. The real-time measurement by two-frequency grating[J]. Laser Technology, 2007, 31(4):384-387(in Chinese).

(上接第 664 页)