

基于短相干光干涉的平行平板型 光学元件面形测量

王军¹ 陈磊² 吴泉英¹ 臧涛成¹

(¹ 苏州科技学院数理学院, 江苏 苏州 215009)
(² 南京理工大学电光学院, 江苏 南京 210094)

摘要 为了解决使用激光干涉仪测量平行平板光学元件面形时会产生干扰条纹的问题,提出了一种利用短相干光干涉测量平行平板光学元件面形的方法。在泰曼-格林干涉仪中使用钠光为光源,由于钠光为短相干光源,当参考面与被测平板前表面光程匹配时,平行平板后表面的反射光无法与参考光和测试光干涉,从而避免了干扰条纹的产生。测量时采集到的为单幅干涉图,使用虚光栅移相叠栅条纹法从中提取波面数据,即可得到平行平板光学元件的面形数据。实验测量了一平行平板光学元件的面形,其面形数据与使用 Zygo 干涉仪测得的结果吻合。

关键词 测量; 平行平板; 短相干光; 虚光栅移相叠栅条纹法

中图分类号 O436.3; TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.122201

Surface Profile Measurement of Parallel Plates Based on Low-Coherence Light Interference

Wang Jun¹ Chen Lei² Wu Quanying¹ Zang Taocheng¹

¹ School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology,
Suzhou, Jiangsu 215009, China

² School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract The low-coherence light interferometry is used to avoid the spurious fringes when the surface profile of optical parallel plates is tested by laser interferometer. The sodium light, a low coherence light, is used on the Twyman-Green interferometer, therefore the lights reflected from the front and rear surfaces of optical parallel plates will not interfere with the reference light simultaneously. So the spurious fringes are avoided. The captured interferogram is processed with the virtual grating phase-shifting moiré fringe method. The front surface of a parallel plane is measured using Zygo phase-shifting interferometer, whose result coincides with the one obtained by the Twyman-Green interferometer.

Key words measurement; parallel plates; low coherence light; virtual grating phase-shifting moiré fringe method

OCIS codes 220.4840; 260.1440; 260.2130

1 引言

平行平板型光学元件(例如平行平板玻璃、晶体薄片)广泛地应用在光通信和光测量领域,在精密光学系统中,其面形偏差、光学均匀性等参数直接影响到系统的精度,而面形偏差亦会直接影响光学均匀性的测量^[1,2],因此精确测量平行平板光学元件的面形是保证系统精度的前提。

高精度测量光学元件面形的方法主要是移相干涉测量法,测量系统为激光干涉仪,要求被测平板型光学元件的前后表面有一定的楔角,以避免因激光良好的相干性而产生干扰条纹,所以该方法不易直接测量前后

收稿日期: 2012-06-05; 收到修改稿日期: 2012-07-10; 网络出版日期: 2012-09-11

基金项目: 江苏省“六大人才高峰”项目和苏州科技学院科研基金资助课题。

作者简介: 王军(1981—),男,博士,讲师,主要从事光学干涉测量方面的研究。E-mail: wjk31@163.com

表面平行度很好的光学元件的面形。目前解决该方法主要有:1)在平行平板光学元件的后表面涂覆凡士林油,以避免后表面反射光对测量的影响,从而消除干扰条纹的产生。该方法的问题在于测量后不易彻底清洗光学元件,且涂覆油脂会影响某些光学材料的表面质量。2)波长调谐干涉仪利用波长移相和傅里叶分析的方法可以测量平行度很好的平板型光学材料的前后表面的面形^[3],该方法需要昂贵的波长调谐干涉仪,数据处理周期较长。3)在非佐干涉仪上采集一幅三表面(参考面、平板前表面和平板后表面)干涉条纹图,根据三表面干涉时各表面的干涉条纹的调制度不同,从干涉图的频谱提取测试面的频谱,从而恢复被测面的面形^[4]。

本文在泰曼-格林干涉仪上使用钠光光源,当被测平板光学元件的前表面(被侧面)的反射光与参考光干涉时,由于钠光的相干长度短,平板后表面的反射光无法同时与参考光干涉,对于厚度超过钠光相干长度的平板元件,前后表面的反射光也无法干涉,从而有效地避免了干扰条纹的产生。测量中采集到的是被侧面与参考面反射光形成的单幅干涉图,利用虚光栅移相叠栅条纹法,从中提取被测波面数据,从而解决了平行平板光学元件表面面形的测量问题。

2 原理

2.1 测试系统

测试系统如图 1 所示,泰曼-格林干涉仪上使用短相干光源,此时必须控制干涉仪两干涉臂的光程相匹配,才能得到对比度良好的干涉图。调整平面参考镜 R 面逐渐增加参考光的光程,当参考面 R 与被测平板前表面 A 处于干涉仪的等光程位置时,由 R 面反射的参考光和由 A 面反射的测试光干涉,条纹对比度达到最好。而平板后表面 B 的反射光与参考光的光程差超出光源的相干长度,因此该两束光不会产生干涉条纹;同时,若平板的厚度也大于光源的相干长度,则 A 面和 B 面的反射光也不会产生干涉;因此,CCD 采集到仅为参考光和携带 A 面面形信息的测试光干涉产生的条纹图,避免了干扰条纹的产生。

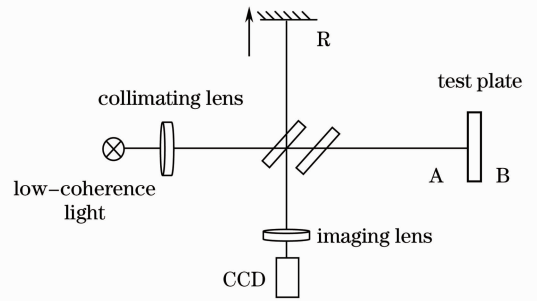


图 1 平行平板面形测试光路

Fig. 1 Testing setup of parallel plates' optical profile

测量中 CCD 采集得到的是单幅干涉图,为了从单幅干涉图中提取面形信息,这里利用虚光栅移相叠栅条纹法处理提取单幅干涉图的波面信息,下面介绍该方法的原理。

2.2 虚光栅移相叠栅条纹法原理

单幅干涉图的相位提取方法主要有空间载频移相法^[5,6]、傅里叶变换法^[7~10]和虚光栅移相叠栅条纹法^[11~13]等。空间载频移相法对一个条纹内的像素数要求严格,比如一个条纹内 4 pixel,而且它对静态噪声非常敏感;傅里叶变换法适用于处理数据点为 2^n 个的矩形区域;虚光栅移相叠栅条纹法是一种结合了移相技术、叠栅技术、虚光栅技术和载频技术的相位提取方法,对所加载频的要求不如空间载频移相法那样严格,可以处理区域连通的任意形状的干涉图。因此选用虚光栅移相叠栅条纹法处理测量采集到的干涉图。

在测量过程中,倾斜参考面 R,视场中的条纹数量与条纹密度随之增加,在干涉图中引入了线性载频 f ,其光强表达式为

$$I(x, y) = a + b \cos[2\pi f x + \phi(x, y)], \quad (1)$$

式中 a 和 b 为位置坐标 (x, y) 的函数, a 为干涉图背景, b/a 为干涉图对比度, $\phi(x, y)$ 为待测相位。

利用计算机生成 4 幅与待测干涉图对应的参考干涉图,即虚光栅,其光强表达式为

$$I_r(x, y) = 1 + \cos(2\pi f_r x + \phi_r), \quad (2)$$

式中 f_r 称为参考载频, $\phi_r = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 为初始相位。

将虚光栅与被测干涉图作乘法运算,得到叠栅条纹图像,其光强表达式为

$$S_0(x, y) = a + 0.5b \cos[2\pi(f - f_r)x + \phi - \phi_r] + 0.5b \cos[2\pi(f + f_r)x + \phi + \phi_r] + a \cos(2\pi f x + \phi_r) + b \cos(2\pi f_r x + \phi_r), \quad (3)$$

从(3)式可以看出,叠栅条纹图中包含有多种频率分量,选用合适的滤波器滤掉不必要的高频分量,可提取出

含有待测量的叠栅信息。滤波后干涉图的光强表达式为

$$S(x, y) = a + 0.5b\cos[2\pi(f - f_r)x + \phi - \phi_r]. \quad (4)$$

由计算机生成的4幅虚光栅图可严格使其位相依次相差 $\pi/2$,即 $\phi_r=0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$,因此滤波后得到的4幅干涉图的相位也依次严格相差 $\pi/2$,分别记为 $S_1(\phi_r=0), S_2(\phi_r=\pi/2), S_3(\phi_r=\pi), S_4(\phi_r=3\pi/2)$ 。

最后使用4步移相法^[14]即可得到被测位相值

$$\phi(x, y) = \arctan[(S_2 - S_4)/(S_1 - S_3)]. \quad (5)$$

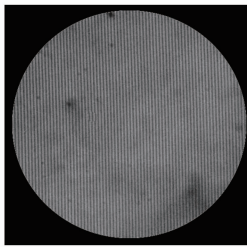
根据(5)式得到的是待测波面的包裹相位波面信息,利用解包算法进行解包处理^[15,16],就可得到待测连续相位波面。

3 实 验

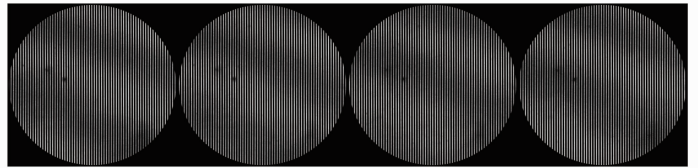
3.1 测试系统的构建及干涉图的采集

基于上述测量平行平板光学元件面形的原理,在N230型通光口径为140 mm的泰曼-格林干涉仪上搭建测量系统,光源为钠光灯,用CCD取代观测目镜采集干涉图。实验测量了一块前后表面平行度很好的平板光学玻璃的前后表面的面形,其口径为75 mm,厚度为13 mm。

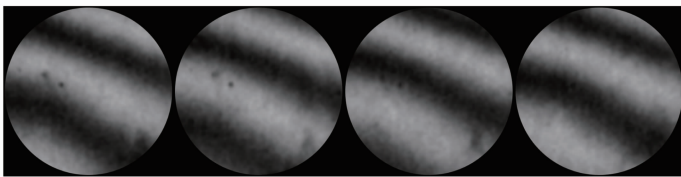
将被测平板置于泰曼-格林干涉仪的测试光路,调整参考平面的位置,使参考光路的光程明显小于测试光路的光程。继续调整参考平面的位置,逐渐增加参考光路的光程,当干涉条纹对比度达到最佳时,参考平面与被测平板的前表面处于等光程位置。通过倾斜参考平面,在干涉图中引入横向载频,即得到竖直的载频干涉图,如图2(a)所示,利用虚光栅叠栅条纹法处理该干涉图即可获取被测平板前表面的面形信息。



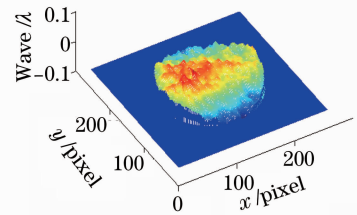
(a) carrier-frequency interferogram



(b) four moiré interferograms



(c) four phase-shifting interferograms



(d) wave-front data ($\lambda=589.3$ nm)

图2 利用虚光栅叠栅条纹法提取干涉图波面

Fig. 2 Interferogram wavefront acquired by the virtual grating moiré fringe method

3.2 单幅载频干涉图的处理

对图2(a)所示的干涉图取中间一行做横向一维傅里叶变换并计算一级频谱位置,即可获得载频 $f^{[11]}$,并令计算机生成的虚光栅的参考载频 $f_r=f$ 。图2(b)为干涉图与计算机生成的虚光栅相乘后生成的4幅移相叠栅条纹图,利用空域高斯滤波器滤除叠栅条纹图中不必要的高频分量^[13],仅保留含有波面信息的低频分量,图2(c)为滤波后生成的4幅移相干涉图。利用4步移相算法即可提取波面信息,即平板前表面的面形分布,如图2(d)所示,其中取钠光的波长 $\lambda=589.3$ nm,面形峰谷值 $d_{PV}=0.112\lambda=66.0$ nm,面形均方根值 $\epsilon_{rms}=0.027\lambda=17.1$ nm。将被测平板前后表面位置互换,即可用同样的方法实现后表面面形的测量。

3.3 实验比对

为验证该方法的正确性,在Zygo GPI干涉仪上,用涂抹凡士林油法测量同一平板的表面面形,前表面

数据如图 3 所示,干涉仪光源为氦氖激光器, $\lambda' = 632.8 \text{ nm}$, $d_{PV} = 0.104\lambda' = 65.8 \text{ nm}$, $\epsilon_{rms} = 0.025\lambda' = 15.8 \text{ nm}$,与在泰曼-格林干涉仪上使用虚光栅叠栅条纹法测得的结果相吻合。

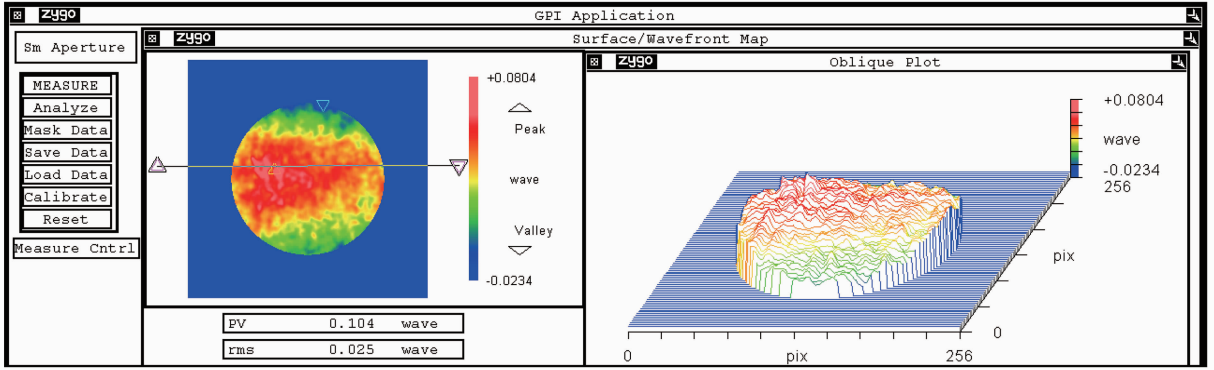


图 3 Zygo GPI 干涉测得面形结果

Fig. 3 Surface profile of test plate acquired by Zygo GPI interferometer

4 分 析

4.1 钠光光谱对测量的影响

钠光的光谱分布包含中心波长分别为 $\lambda_1 = 589.0 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 589.6 \text{ nm}$ 的两条窄带谱线,可以简化成图 4 所示的情形,其中 $\Delta\lambda$ 为两条窄带谱线的宽度,产生的总干涉光强为

$$I = I_1 + I_2 = 4I_0 \left[1 + \frac{\sin\left(\Delta k \frac{z}{2}\right)}{\Delta k \frac{z}{2}} \cos \frac{\delta k}{2} z \cos kz \right], \quad (6)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, Δk 为两条窄带谱线的宽度, $\delta k = k_1 - k_2 \leq k$, 由(6)式可得条纹的对比度为

$$K = \frac{\sin\left(\Delta k \frac{z}{2}\right)}{\Delta k \frac{z}{2}} \cos \frac{\delta k}{2} z = \frac{\sin\left(\frac{\pi\Delta\lambda}{\lambda^2} z\right)}{\frac{\pi\Delta\lambda}{\lambda^2} z} \cos \frac{\delta\lambda}{\lambda^2} \pi z, \quad (7)$$

式中 $\delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 0.6 \text{ nm}$, 一般认为钠光相干长度为 $L = \lambda^2/\delta\lambda \approx 0.6 \text{ mm}$, 因此对于 13 mm 的平板而言, 利用钠光可有效避免干扰条纹的产生。

在实际测量过程中,钠光干涉条纹的对比度随光程差 z 变化的规律是以 sinc 函数调制的余弦变化,如(7)式所示,因此,对于厚度为 13 mm 的被测平板,在测量其前表面时,平板后表的反射光与前表面的反射光、参考光都会干涉,但产生的干涉条纹对比度很差,如图 5 所示,可看做干涉图的背景。此外,处理干涉图使用的是虚光栅移相叠栅条纹法,由(5)式的右端可以看出,背景在计算过程中被减掉,所以,前面提到的两

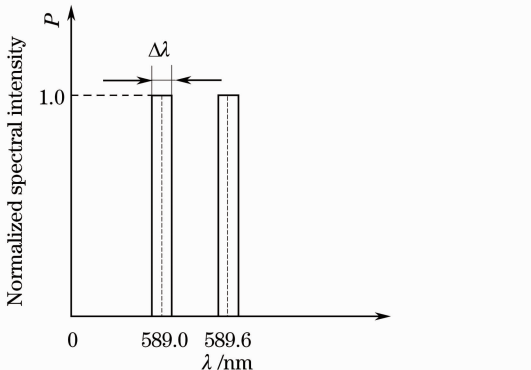


图 4 简化的钠光光谱

Fig. 4 Simplified spectrum of sodium light

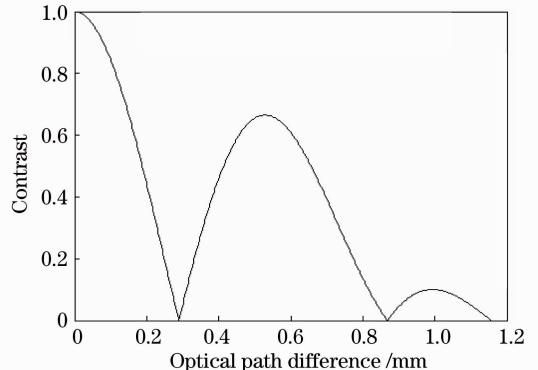


图 5 钠光干涉条纹对比度

Fig. 5 Contrast of sodium light interferogram

组叠加在干涉图上的背景条纹不会对计算结果产生影响。

4.2 虚光栅叠栅条纹法对测量的影响

在实际测量过程中,应该控制载频干涉图的条纹数量在一定的范围内,若条纹数量太少,高频分量和低频分量不能充分分离;若条纹数量过多,干涉图中每根条纹占有的像素采样点过少,且干涉图的对比度会严重下降,严重影响波面数据的复原。综合以上的分析和测量经验,测试时将条纹数控制在 60~80 之间为宜。

虚光栅叠栅条纹法的空域滤波是通过卷积实现的,在对图像边缘数据进行卷积运算的时候,卷积核要和部分无效数据卷积,因此在图像边缘区域滤波后会带来比较大的误差。为了避免边缘区域的误差,在原测量区域的基础上取 90% 有效区域以后,边缘波面数据与 Zygo 干涉仪测得的结果吻合度明显提高。

5 结 论

在泰曼-格林干涉仪上使用钠光光源,利用钠光相干长度短的特点解决了平行平板型光学元件表面面形的测量问题。该方法测量结构简单,无需在被测件表面涂抹凡士林油,无需价格昂贵的波长调谐干涉仪。在 Zygo GPI 干涉仪上通过涂抹凡士林油测量同一块光学平板,其面形测量结果(峰谷值、均方根值)与该方法得到的结果相一致,其正确性得以验证。该方法可测量的光学元件的厚度与光源的相干长度有关,为测量厚度更小的光学元件,可采用相干长度更短的 LED 光源。

参 考 文 献

- 1 Chiayu Ai, James C. Wyant. Measurement of the inhomogeneity of a window[J]. *Opt. Engng.*, 1991, **30**(9): 1399~1404
- 2 Guo Peiji, Yu Jingchi, Ding Zhezhao *et al.*. Absolute testing method of the homogeneity of optical glass [J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(3): 26~27
郭培基, 余景池, 丁泽钊 等. 光学玻璃光学均匀性绝对测量技术 [J]. 激光杂志, 2003, **24**(3): 26~27
- 3 Leslie L. Deck, Chris Van Peski, Richard D. Eandi. Measurements of hard pellicles for 157 nm lithography using Fourier transform phase-shifting interferometry[C]. *SPIE*, 2003, **5130**: 555~562
- 4 Xu Jiancheng, Shi Qikai, Chai Liqun *et al.*. Effect reduction of spurious fringes in interferometric measurement system[J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2006, **18**(11): 1783~1786
徐建程, 石琦凯, 柴立群 等. 干涉测量系统中杂散条纹影响的抑制[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(11): 1783~1786
- 5 Zhang Lei, Liu Sining, Lin Dianyang *et al.*. The progress of extracting phase information based on spatial carrier fringe pattern analysis [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(1): 90~93
张磊, 刘斯宁, 林殿阳 等. 基于空间载波条纹图的相位提取方法研究进展[J]. 激光技术, 2005, **29**(1): 90~93
- 6 Xu Jiancheng, Du Yahui, Xu Qiao *et al.*. Fourier analysis of phase-masked spatial carrier interferogram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0512004
徐建程, 杜雅薇, 许乔 等. 相位掩模空间载波干涉图的傅里叶分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0512004
- 7 Jesús Muñoz-Maciel, Francisco J. Casillas-Rodríguez, Miguel Mora-González *et al.*. Phase recovery from a single interferogram with closed fringes by phase unwrapping [J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(1): 22~27
- 8 M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1982, **72**(1): 156~160
- 9 Claude Roddier, Francois Rodier. Interferogram analysis using Fourier transform techniques[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(9): 1668~1673
- 10 Mingjun Dai, Yan Wang. Fringe extrapolation technique based on Fourier transform for interferogram analysis [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(7): 956~958
- 11 Wu Xuhua, Study on Key Techniques of $\varphi 300$ mm Phase-Shifting Interferometer [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. 26~30
武旭华. 300 mm 移相干涉仪的关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2007. 26~30
- 12 Meng Xiaochen, Hao Qun, Zhu Qidong *et al.*. Influence of interference Fringe's spatial frequency on the phase measurement accuracy in digital Moire phase-shifting interferometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **28**(10): 1008008
孟晓辰, 郝群, 朱秋东 等. 干涉条纹空间频率对数字叠栅移相干涉测量精度的影响[J]. 中国激光, 2011, **28**(10): 1008008
- 13 Wang Jun, Chen Lei, Wu quanying. The wavefront acquirement of single interferogram using the virtual grating Moire

fringe method with Gaussian filter in the spatial domain[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(5): 0508005

王 军, 陈 磊, 吴泉英. 利用空域滤波虚光栅叠栅法提取干涉图波面[J]. *中国激光*, 2012, **39**(5): 0508005

14 D. Malacara. *Optical Shop Testing* [M]. 3rd Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007. 552~557

15 Wan Wenbo, Su Junhong, Yang Lihong *et al.*. Phase unwrapping algorithm for image processing of interferogram [J]. *J. Applied Optics*, 2011, **32**(1): 70~74

万文博, 苏俊宏, 杨利红 等. 干涉条纹图像处理的相位解包新方法[J]. *应用光学*, 2011, **32**(1): 70~74

16 Xu Fuchao, Xing Tingwen. Unwrapping algorithm with high noise immunity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(1): 011001

徐富超, 邢廷文. 抑制大噪声的解包算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(1): 011001