

# 一种朗契检验新方法

席庆奎<sup>1,2</sup> 陈 磊<sup>1</sup> 李迎春<sup>1</sup> 白雪莲<sup>1</sup> 朱日宏<sup>1</sup>

(1 南京理工大学电光学院, 南京 210094)

(2 南京农业大学, 南京 210095)

**摘 要** 为了较快、较高准确度地检验大波差的非球面或球面, 将一个液晶显示器作为低频光栅和移相装置被用于朗契检验, 在小液晶显示器上由计算机生成光栅图, 代替普通光栅和步进电机. 消除了因电机移动引起的移相误差, 消除了因转动光栅的角度不能正好达到 90° 而引起的误差. 以一个非球面为例, 做了移相测试及波面复原. 实验表明液晶显示器可作为一个光栅和移相装置.

**关键词** 光电子学; 朗契检验; 液晶显示器; 移相干涉

**中图分类号** TB96 **文献标识码** A

## 0 引言

朗契检验是 1923 年意大利人威斯科·朗契最早提出的, 但当时仅是作为定性测量的一种方法. 从 1984 年起, 人们开始利用朗契检验法对光学系统进行定量研究. 1984 年日本的 YATAGAI T 利用正弦朗契光栅, 根据几何光学原理和相位检测技术, 获得了非球面波像差的一维分布<sup>[1]</sup>. 1988 年 YATAGAI T 用一般的方波朗契光栅, 根据朗契检验的物理光学原理, 用 10 步移相得到的 10 幅朗契图, 获得了非球面镜波像差的二维分布<sup>[2]</sup>. 1996 年林桂粉等在 YATAGAI T 1988 年工作的基础上, 通过 Zernike 多项式拟合算法求得了光学系统的波像差<sup>[3]</sup>. 1998 年钟金刚推导出了定量分析朗契图的四步相移算法, 为朗契检测法定量进行像质评价提供了一种简单有效的方法<sup>[4]</sup>. 以上这些实验大都采用步进电机分别沿 X 轴或 Y 轴驱动光栅; 并且在测量 X 轴方向的相位变化之后, 还要将光栅旋转 90°, 再测 Y 轴方向的数据, 测量中的平移和转动都将带来误差. 本文提出将小型液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD) 连接到计算机上, 并由计算机在显示器上生成一个矩形光栅, 放入朗契检验装置中, 通过程序让光栅图像平移或转动, 实现对朗契图较高准确度的定量测量.

## 1 原理

### 1.1 用液晶显示器光栅进行朗契检验的原理

实验所用器件是液晶显示器(LCD). 其中含有两种光栅, 一种是由计算机生成的朗契光栅(一维光栅). 当在液晶板上生成朗契光栅后, 可通过程序让光栅沿侧向移动, 形成一个可平移的光栅. 由于此

光栅是计算机生成的, 所以可将其严格旋转 90°. 另一种光栅是 LCD 固有的, 是一种二维的正交光栅. 由于 LCD 是由许多液晶像素组成的, 在每二个相邻像素之间有一个间隔, 这许多间隔连在一起构成了二维的正交光栅.

对此光栅, 可看做它由许多单缝并排形成一多缝光栅, 再由两个多缝光栅相互垂直叠加而成的一种光栅. 当两个多缝光栅叠加成正交光栅时, 光强度是两个单独光栅的光强度之积, 它的光强公式为<sup>[5,6]</sup>

$$I = I_0 \left[ \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right]^2 \left[ \frac{\sin (N\delta/2)}{\sin (\delta/2)} \right]^2 \left[ \frac{\sin \beta}{\beta} \right]^2 \cdot \left[ \frac{\sin (N\sigma/2)}{\sin (\sigma/2)} \right]^2 \quad (1)$$

式中前二个括号分别为 X 方向的衍射、干涉因子, 后二个括号表示 Y 方向的衍射、干涉因子. 图 1 表示正交光栅与它的频谱图. LCD 固有的正交光栅作为物(G), 它在谱面上产生了一系列分立的谱点(F). 因此, LCD 对成像的影响, 可看作是 LCD 固有的正交光栅与计算机在 LCD 上所生成朗契光栅的叠加效应. 图 2 是二种光栅的混合频谱图, 图中‘·’点表示由朗契光栅引起的衍射, ‘+’点表示由正交光栅引起的衍射. 由于正交光栅的频率为高频, 远大于朗契光栅频率. 且测试过程中只有朗契光栅的平移对干涉图光强产生调制, 而 LCD 固有正交光栅并

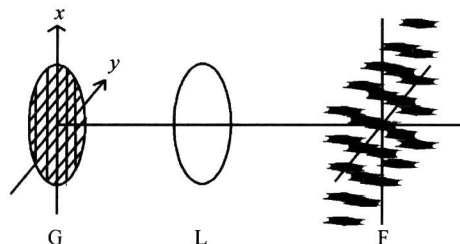


图 1 正交光栅和它的频谱图

Fig. 1 Perpendicular grating and its Fourier spectrum

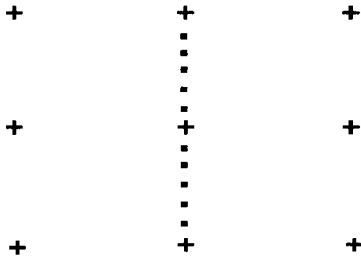


图 2 二种光栅混合频谱图

Fig. 2 A mixture of Fourier spectrum of two gratings

不移动. 本文是采用计算机生成的朗契光栅实现朗契检验的.

朗契光栅放在被测透镜焦平面附近, 入射的平行光束经过被测透镜, 会聚在光栅平面上, 因光栅的衍射作用而形成一种叠栅条纹性质的图案, 即朗契图. 此朗契图反映了被测透镜的面形质量.

### 1.2 条纹扫描检测技术

实验采用了条纹扫描检测技术定量测量波面(波像差函数)<sup>[7]</sup>. 当朗契光栅面垂直光轴放置时, 使栅线平行于 Y 轴, 那么朗契图光强分布为

$$g(x, \varphi) = 1 + r \cos \left[ \frac{2\pi}{d} (x_1) + \varphi \right] \quad (2)$$

式中,  $d$  为栅距,  $\varphi$  为光栅的初始位相,  $r$  为光栅栅线条纹对比度.

朗契检验的波像差与几何像差关系式为<sup>[3]</sup>

$$x_1 = R \frac{\partial W(x, y)}{\partial x}, y_1 = R \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} \quad (3)$$

式中  $W(x, y)$  为被测系统出瞳处波像差函数,  $x_1, y_1$  为横向几何像差在像面  $x_1 - y_1$  坐标上的分量,  $R$  为参考球面曲率半径, 朗契图光强分布为

$$g(x, \varphi) = 1 + r \cos \left[ \frac{2\pi}{d} \left( R \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \right) + \varphi \right] \quad (4)$$

将式(4)展开, 得到

$$G(x, \delta_i) = a_0 + a_1 \cos \left( \frac{2\pi}{d} \delta_i \right) + b_1 \cos \left( \frac{2\pi}{d} \delta_i \right) \quad (5)$$

式中

$$a_1 = r \cos \left( \frac{2\pi}{d} R \frac{\partial W}{\partial x} \right) \quad (6)$$

$$b_1 = r \sin \left( \frac{2\pi}{d} R \frac{\partial W}{\partial x} \right)$$

$$\delta_i = \frac{d}{N} i, (i=1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

若朗契光栅在 LCD 上移动时, 在一个周期内移动  $N$  次, 就有  $N$  个  $G(x, \delta_i)$  值, 由此可求出

$$a_1 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N G(x, \delta_i) \cos 2\pi \frac{i}{N} \quad (8)$$

$$b_1 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N G(x, \delta_i) \sin 2\pi \frac{i}{N}$$

由式(6)可得

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = \frac{d}{2\pi R} \arctan \frac{b_1}{a_1} \quad (9)$$

式(9)就是波像差函数  $W(x, y)$  在 X 方向的斜率波面. 同理, 如果将光栅线平行于 X 轴放置, 按上述处理, 也可得

$$\frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = \frac{d}{2\pi R} \arctan \frac{b_2}{a_2} \quad (10)$$

式中

$$a_2 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N G(\delta_i, y) \cos 2\pi \frac{i}{N} \quad (11)$$

$$b_2 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N G(\delta_i, y) \sin 2\pi \frac{i}{N}$$

那么, 一方面, 由式(9)、(10)所得的波像差一阶偏导数所表征的两个正交的朗契图, 可用 Zernike 多项式拟合<sup>[3,7]</sup>

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \sum_{k=1}^N B(k) Z_k(x, y), \frac{\partial W}{\partial y} = \sum_{k=1}^N C(k) Z_k(x, y) \quad (12)$$

另一方面, 实验所要求的波像差函数  $W(x, y)$  也可用 Zernike 多项式来表示

$$W(x, y) = \sum_{k=1}^N A(k) Z_k(x, y) \quad (13)$$

由式(13)可见, 只要知道系数  $A(k)$  值, 就可求得波像差函数  $W(x, y)$ . 为此就要求  $A(k)$  和已知值  $B(k)$ 、 $C(k)$  之间的关系, 将式(13)分别对  $x, y$  求偏导数, 然后将其偏导数分别重新组合成 Zernike 多项式, 并与式(12)作同类项比较, 可得出系数  $A(k)$  由  $B(k)$ 、 $C(k)$  所表达的值. 由此可得到被测波面的  $W(x, y)$ <sup>[3,8~10]</sup>.

## 2 实验结果

### 2.1 实验装置

实验装置如图 3. 测试时, 从 He-Ne 激光器发出的一束激光经扩束镜扩束后, 照射到准直透镜上形成一准直的光束, 该平行光照射到被测镜上. 在被测镜的焦平面处, 放有一 LCD. 在 LCD 上, 事先由计算机生成朗契光栅(图 4), 当光通过它后, 就在屏幕上形成朗契图. 朗契光栅的光栅周期为 12 像素, 每条纹宽度为 6 个像素. 这是一个频率为 6.414 lp/mm 的低频方波光栅. 此液晶显示器是日本 SONY 公司制造的, 大小为  $26.62 \times 19.62 \text{ mm}^2$ ,

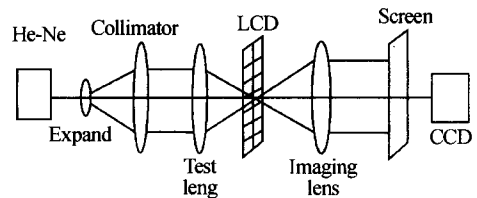


图 3 朗契检验实验装置

Fig. 3 Structural scheme of ronchi test

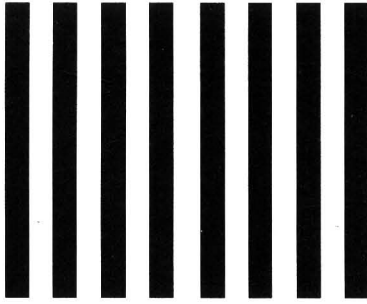


图4 朗契光栅图形  
Fig. 4 Image of Ronchi grating

像素为  $1024 \times 768$ 。

## 2.2 测试与结果

本实验测试了有效口径为 55 mm 的非球面透镜,其数学方程为

$$y = \frac{0.0324x^2}{1 + \sqrt{1 - 0.0042385x^2}}$$

实验中利用多步长(一周期 12 步相移)的条纹扫描检测技术,通过 Zernike 多项式拟合计算,求得了被测透镜的波像差。实验时,先放置一个 LCD 朗契光栅,让光栅线与 X 轴平行,拍下一幅朗契图;然后让光栅在 LCD 上沿 Y 方向移动一个像素,再拍下另一幅图;这样一共重复 12 次,记录 12 幅图。图 5 为其中的一幅。相应地,由计算机将光栅逆时针旋转  $90^\circ$  后,也可得到 12 幅相应的朗契图。最后,求朗契

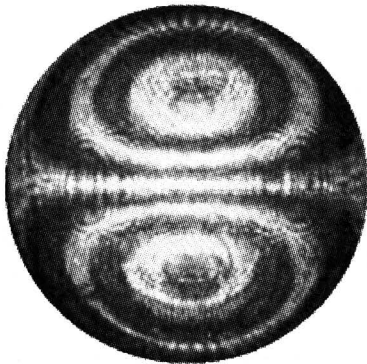


图5 实验所得朗契图  
Fig. 5 The Ronchigram of the test

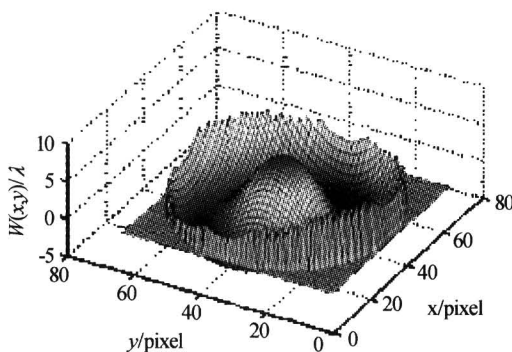


图6 波像差的三维立体图  
Fig. 6 Three-dimensional stereo picture of the wavefront aberration

表1 被测透镜波像差的 Zernike 多项式系数

序号	系数	序号	系数	序号	系数
A1	0	A7	-0.0058	A13	0.0073
A2	0	A8	0.2559	A14	0.0036
A3	0	A9	0.0019	A15	-0.0340
A4	0.0301	A10	0.0117	A16	-0.0009
A5	0.0756	A11	0.0003	A17	0.0125
A6	-0.0675	A12	-0.0049	A18	0.0044
序号	系数	序号	系数	序号	系数
A19	-0.0004	A25	0.0048	A31	-0.0007
A20	-0.0024	A26	-0.0010	A32	0.0005
A21	0.0031	A27	0.0002	A33	0.0010
A22	-0.0006	A28	0.0032	A34	0.0003
A23	-0.0026	A29	-0.0003	A35	-0.0011
A24	0.0053	A30	-0.0022	A36	0

图所表示的波像差斜率  $\partial W/\partial x, \partial W/\partial y$ 。利用条纹扫描检测技术和 Zernike 多项式拟合算法,由两斜率面复原出被测透镜波像差函数  $W(x, y)$ 。经 Zernike 多项式拟合计算,得到拟合的 Zernike 多项式系数  $A(k)$  如表 1。被测透镜波像差的三维立体图如图 6。其 Z 轴代表了波像差函数  $W(x, y)$ ,  $x, y$  轴的坐标点是  $64 \times 64$  像素 (pixel), 波像差单位为  $(\lambda = 0.6328 \mu\text{m})$ 。经计算,最大波差值  $[W(x, y)]_{\max} = 7.45(\lambda)$ , 位于网格坐标的  $x=39, y=41$  处;最小波差值  $[W(x, y)]_{\min} = -4.1(\lambda)$ , 坐标是  $x=20, y=50$ ;峰谷值  $P-V=11.55(\lambda)$ ;标准偏差  $\text{rms}=2.73(\lambda)$ 。

## 3 结论

实验表明,可用液晶显示器的光栅代替普通光栅和步进电机,对球面或非球面镜作朗契检验。本实验方法有几个特点。第一,没有用步进电机驱动光栅,不会出现因电机移动引起的移相误差;也没有采用机械方法转动光栅,不会出现因转动角度不能严格达到  $90^\circ$  而引起的误差;也不会出现由电机自身运转引起的振动干扰,因此测量准确度比较高。第二个特点是光栅条纹的移动过程仅为一种显示屏幕图像的电子刷新过程,而不是一种机械运动过程,所以其速度较快。另外,影响本实验误差的主要因素为:同步检测过程中受随机噪音,光源的稳定性,条纹的可见度,同步检测时积累的抽样点数等误差。

## 参考文献

- 1 Yatagai I T. Fringe scanning Ronchi test for a spherical surfaces. *Applied Optics*, 1984, **23**(20):3676~3679
  - 2 Yatagai I T. Phase measuring Ronchi test. *Applied Optics*, 1988, **27**(3):523~528
  - 3 林桂粉,陈磊,陈进榜.朗契检验相位探测和波面恢复.光子学报,1996, **25**(12):1125~1230
- Lin G F, Chen L, Chen J B. *Acta Photonica Sinica*, 1996,

- 25(12):1125~1130
- 4 钟金刚. 用于定量分析朗契图的四步相移算法. 南昌大学学报(工科版), 1998, **20**(4):97~102  
Zhong J G. *Journal of Nanchang University (Engineering and Technology)*, 1998, **20**(4):97~102
- 5 郁道银. 工程光学. 北京: 中国机械出版社, 1999, **10**: 100~330  
Yu D Y. *Technology optics*. Beijing: China Machine Press, 1999, **10**:100~300
- 6 张善钟. 计量光栅技术. 北京: 中国机械出版社, 1985, **12**: 48~50  
Zhang S Z. *Metrology Grating Technology*. Beijing: China Machine Press, 1985, **12**:48~50
- 7 潘君骅. 计量测试技术手册: 第 10 卷. 北京: 中国计量出版社, 1997. 666~668, 677~678
- Pang J H. *Handbook of Measurement Technology: Volume 10*. Beijing: China Metrology Press, 1997. 666~668, 677~678
- 8 陈磊, 高志山, 何勇. 红外光学透镜焦距测量. 光子学报, 2004, **33**(8):986~988  
Chen L, Gao Z S, He Y. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(8):986~988
- 9 Ding X X. An adaptive wavelet transform via lifting for image compression. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 225~228
- 10 孙琛, 沈亦兵, 白剑. Ronchi 光栅 Talbat 效应长焦距测量的准确度极限研究. 光子学报, 2004, **33**(10):1214~1217  
Sun S, Shen Y B, Bai J. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10):1214~1217

## A New Ronchi Test Method

Xi Qingkui<sup>1,2</sup>, Chen Lei<sup>1</sup>, Li Yingchun<sup>1</sup>, Bai Xueliang<sup>1</sup>, Zhu Rihong<sup>1</sup>

1 School of Electron and Photoelectron, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094

2 Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095

Received date: 2005-05-15

**Abstract** A small liquid crystal display that acted like a grating and phase-shifting device was used on Ronchi test, to measure a spheric or an aspheric of large wavefront aberration, more quickly and accurately. Instead of a common grating and a step motor, a movable image of grating is shown on the liquid crystal display. This gets rid of the phase-shifting error caused by the motor moving, and the error caused by grating revolve angle not being just  $90^\circ$ . A phase-shifting algorithm is used to test an aspheric, and the wavefront aberration of the aspheric is restored. The experiment shows that a small liquid crystal display can be used a grating and phase-shifting device.

**Keywords** Optoelectronics; Ronchi test; Liquid crystal display; Phase-shifting interference



**Xi Qingkui** was born in Jiangsu Province, China. Doctorial candidate. He graduated from School of Electron and Photoelectron, Nanjing Univ. of Science and Technology. His research interests include optical measurement and computer image processing.