

文章编号: 1005-5630(2013)01-0048-06

## 光学系统像差的剪切干涉图样仿真\*

李 莉<sup>1</sup>, 李 刚<sup>1</sup>, 齐晓慧<sup>2</sup>, 刘秉琦<sup>1</sup>, 徐春梅<sup>1</sup>

(1. 军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003;

2. 石家庄机械化步兵学院 装备技术教研室, 河北 石家庄 050003)

**摘要:** 针对光学系统像差的判定问题, 提出从理论上对各种像差的剪切干涉图样进行仿真分析。此分析依据波像差理论, 结合剪切干涉在像差测量中的应用, 建立波像差与干涉条纹的联系, 采用计算机仿真手段对光学系统各种像差的典型剪切干涉图样进行了模拟, 包括初级像差和二级像差。仿真结果表明, 各种初级像差和二级像差均有其各自的典型剪切干涉图样, 根据特征图样可以直接判定主要的像差种类。研究所得出的各种像差典型干涉图可为判断光学系统存在哪种像差提供参考与依据。

**关键词:** 几何光学; 初级像差; 二级像差; 干涉图样; 仿真

**中图分类号:** O 435.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2013.01.010

## Simulation of aberration's shearing interference pattern

LI Li<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1</sup>, QI Xiaohui<sup>2</sup>, LIU Bingqi<sup>1</sup>, XU Chunmei<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic and Optical Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Teaching Research Section of Equipment and Technology, Shijiazhuang Mechanized Infantry Academy, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** To judge the aberration of optical system, a simulation of the shearing interference pattern of the aberration's was presented. The relationship of aberration and interferogram was constituted, which is based on the aberration theory and shearing interferometry. Interference patterns of primary aberrations and secondary aberrations were simulated. The simulation results showed that any primary or secondary aberration has its characteristic interference pattern, which can be used to judge the aberration. These results can provide evidence for judging which kinds of optical aberrations the optical systems have.

**Key words:** primary aberration; second aberrations; interference pattern; simulation

## 引 言

像差是光学系统中由透镜材料的特性或折射(或反射)表面的几何形状引起实际像与理想像的偏差。像差的存在,影响了光学系统成像的清晰度、相似性和色彩逼近等,降低了成像质量<sup>[1]</sup>。因此,在涉及到光学元件、光学系统的很多具体工作中都需要对像差进行测量判定,例如:光学系统的计算机辅助装调工作,需要对待调光学系统的像差进行实时检测<sup>[2]</sup>;光刻技术中,由于对光刻透镜的成像要求很高,也需要对成像透镜的像差进行检测<sup>[3]</sup>。在像差测量中,除了几何像差的测量之外,对波像差进行测量以评定光

\* 收稿日期: 2012-06-15

作者简介: 李 莉(1981-),女,河北邢台人,讲师,硕士,主要从事工程光学方面的研究。

学系统成像质量是一种更好的方法<sup>[4]</sup>。而由于剪切干涉法反映“波像差”信息全面,易于目视估值,使用方便,因此,对各种像差的典型剪切干涉图进行仿真,将对判断被测系统具有哪些像差是有益的。

像差典型干涉图的仿真多数是对初级像差进行的<sup>[5]</sup>,这对于普通光学系统来说,用初级像差描述其成像质量确已足够,但是对于需要接近甚至超过衍射极限的高性能光学系统来说,还必须考虑其高级像差的影响<sup>[6-8]</sup>。因此,需充分考虑初级像差和二级像差,给出更为完整的像差典型干涉图样仿真。

## 1 波像差函数的一般表达式

波像差初级像差和二级像差的函数表达式为<sup>[9]</sup>:

$$W(x, y) = a_{10}(x^2 + y^2) + a_{20}(x^2 + y^2)^2 + a_{30}(x^2 + y^2)^3 + a_{01}x + a_{11}x(x^2 + y^2) + a_{21}x(x^2 + y^2)^2 + a_{02}x^2 + a_{12}x^2(x^2 + y^2) + a_{03}x^3 \quad (1)$$

其中,  $x$  和  $y$  为入射光线与入射光瞳平面交点的坐标;  $a_{10}(x^2 + y^2)$  为轴向离焦、初级场曲、二级场曲的波像差之和;  $a_{20}(x^2 + y^2)^2$  为初级球差、视场引起轴对称二级球差所产生的波像差之和;  $a_{30}(x^2 + y^2)^3$  为孔径二级球差所产生的波像差;  $a_{01}x$  为垂轴离焦量、初级畸变、二级畸变所产生的波像差之和;  $a_{11}x(x^2 + y^2)$  为初级彗差、视场引起二级彗差所产生的波像差之和;  $a_{21}x(x^2 + y^2)^2$  为孔径引起的二级彗差所产生的波像差;  $a_{02}x^2$  为初级像散与二级像散所产生的波像差之和;  $a_{12}x^2(x^2 + y^2)$  为视场引起非轴对称二级球差所产生的波像差;  $a_{03}x^3$  为视场引起二级子午彗差所产生的波像差。

## 2 横向剪切干涉条纹

横向剪切干涉利用被测波面自身实现干涉,如图1所示平行光横向剪切干涉仪,无需参考波,受环境影响小,因此应用广泛<sup>[10]</sup>。根据光干涉理论,及横向剪切干涉两干涉波振幅相等的特性,可得横向剪切干涉条纹图光强分布表达式为:

$$I(x, y) = 2A^2(x, y) \{1 + \cos[\Delta\varphi(x, y)]\} \quad (2)$$

其中  $A$  为两相干光的振幅,  $\Delta\varphi(x, y)$  为相位差。

而相位差  $\Delta\varphi(x, y)$  与光程差  $\Delta W(x, y)$  有一定关系:

$$\Delta\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta W(x, y) \quad (3)$$

当剪切量足够小时(例如取为 2 mm)有:

$$\Delta W = \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} \cdot S = P\lambda \quad (4)$$

其中,  $W(x, y)$  为被检波面(如式(1)所列),  $P$  表示干涉级次,  $\lambda$  表示光波波长,  $\lambda$  取值为 632 nm。

根据以上分析,可以通过包含不同像差的波面函数得到对应的横向剪切干涉条纹图。

## 3 各种像差的典型剪切干涉图样仿真及分析

### 3.1 球差

#### 3.1.1 初级球差或视场引起的轴对称二级球差

当系统存在的像差为初级球差或视场引起的轴对称二级球差或两者都有时,  $a_{20} \neq 0$ , 波像差表达式为:

$$W(x, y) = a_{20}(x^2 + y^2)^2 \quad (5)$$

光程差为:

$$\begin{cases} \Delta W_x = 4a_{20}x(x^2 + y^2)S = P_x\lambda \\ \Delta W_y = 4a_{20}y(x^2 + y^2)S = P_y\lambda \end{cases} \quad (6)$$

取  $a_{20} = 80\lambda$  时, 得到  $x$  方向和  $y$  方向的剪切干涉图分别如图 2(a)、图 2(b) 所示。

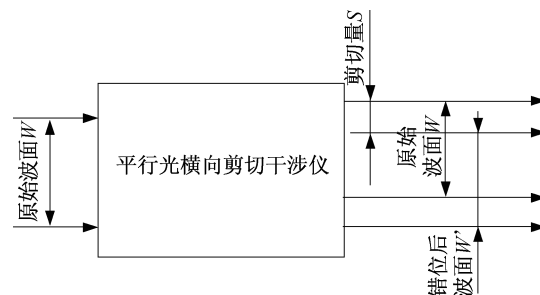


图1 横向剪切干涉仪

Fig. 1 Lateral shearing interferometer

从图 2 可以看出,  $x$  方向和  $y$  方向的干涉条纹图是正交的完全相同的图样, 说明了此时球差的轴对称性, 另外, 从光程差表达式也可以得出此时初级球差所对应的干涉条纹是一组与  $a_{20}$  有关的三次曲线。

当系统同时存在离焦时, 则  $a_{20} \neq 0$  且  $a_{10} \neq 0$ , 波像差表达式为:

$$W(x, y) = a_{20}(x^2 + y^2)^2 + a_{10}(x^2 + y^2) \quad (7)$$

光程差为:

$$\begin{cases} \Delta W_x = 4a_{20}x(x^2 + y^2)S + 2a_{10}xS = P_x \lambda \\ \Delta W_y = 4a_{20}y(x^2 + y^2)S + 2a_{10}yS = P_y \lambda \end{cases} \quad (8)$$

取  $a_{20} = 80\lambda$  且  $a_{10} = 800\lambda$  和  $a_{10} = -800\lambda$  时, 所对应的  $x$  方向剪切干涉图分别如图 3(a)、图 3(b) 所示。

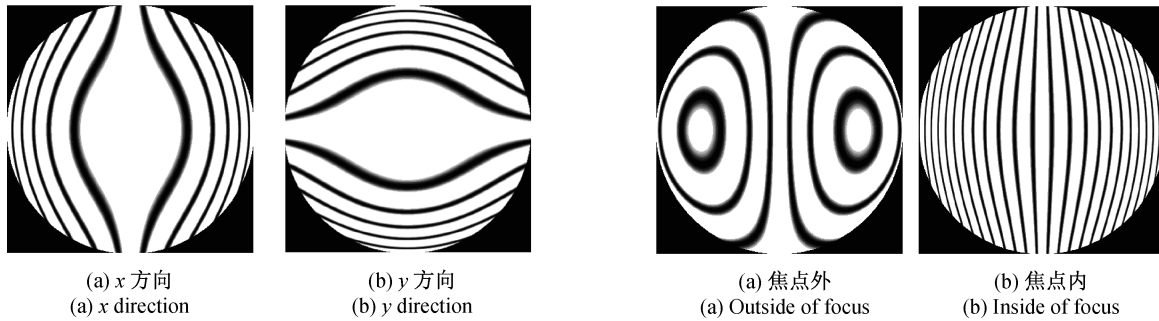


图 2  $a_{20} = 80\lambda$  时剪切干涉图  
Fig. 2 Shearing interferogram of  $a_{20} = 80\lambda$

图 3 同时有离焦存在时的  $x$  方向剪切干涉图  
Fig. 3 Shearing interferogram in  $x$  with  $a_{20} = 80\lambda$  and  $a_{10} \neq 0$

从图 3 可以看出, 当出现离焦项时, 干涉条纹形状发生了较大的变化。

### 3.1.2 孔径二级球差

当系统存在的像差为孔径二级球差时,  $a_{30} \neq 0$ , 波像差表达式为:

$$W(x, y) = a_{30}(x^2 + y^2)^3 \quad (9)$$

光程差为:

$$\begin{cases} \Delta W_x = 6a_{30}x(x^2 + y^2)^2 S = P_x \lambda \\ \Delta W_y = 6a_{30}y(x^2 + y^2)^2 S = P_y \lambda \end{cases} \quad (10)$$

取  $a_{30} = 24\lambda$  得到  $x$  方向和  $y$  方向的剪切干涉图分别如图 4(a)、图 4(b) 所示, 取  $a_{30} = 80\lambda$  得到  $x$  方向和  $y$  方向的剪切干涉图分别如图 4(c)、图 4(d) 所示。

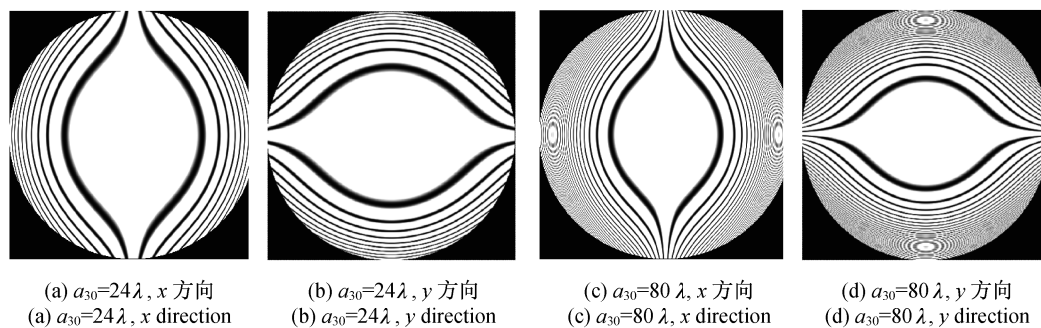


图 4  $a_{30} \neq 0$  时剪切干涉图  
Fig. 4 Shearing interferogram of  $a_{30} \neq 0$

对比图 4 和图 2 可以发现, 两种情况下干涉条纹图变化趋势非常相似, 但对于孔径二级球差来说, 像面边缘处条纹更为细密, 尤其是当孔径二级球差增大时, 如图 4(a)、图 4(b) 与图 4(c)、图 4(d) 的对比, 像面边缘条纹更加密集, 可以据此来区分初级球差和孔径二级球差。

### 3.1.3 非轴对称二级像差所引起的球差

当系统存在的球差为非轴对称二级像差所引起时,  $a_{12} \neq 0$ , 波像差表达式为:

$$W(x, y) = a_{12}x^2(x^2 + y^2) \quad (11)$$

光程差为:

$$\begin{cases} \Delta W_x = 2a_{12}(2x^3 + xy^2)S = P_x \lambda \\ \Delta W_y = 2x^2y = P_y \lambda \end{cases} \quad (12)$$

取  $a_{12} = 200\lambda$  时, 得到的  $x$ 、 $y$  方向的干涉图如图 5(a)、图 5(b) 所示。

从图 5 可以看出, 对于  $x$  方向的干涉图, 其变化趋势与上述两种球差所引起的干涉图样变化趋势相似, 但对于非轴对称二级像差所引起的球差, 由于其非轴对称性, 在  $x$  方向和  $y$  方向上引起的干涉图样是完全不同的。由此, 可将非轴对称二级像差所引起的球差分辨出来。

## 3.2 彗差

### 3.2.1 初级彗差或视场引起的二级彗差

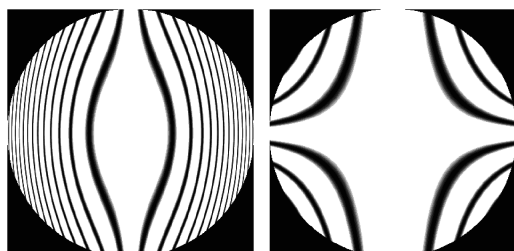
当系统存在的像差为初级彗差或视场引起的二级彗差或两者都有时,  $a_{11} \neq 0$ , 波像差表达式为:

$$W(x, y) = a_{11}x(x^2 + y^2) \quad (13)$$

光程差为:

$$\begin{cases} \Delta W_x = a_{11}(3x^2 + y^2)S = P_x \lambda \\ \Delta W_y = 2a_{11}xyS = P_y \lambda \end{cases} \quad (14)$$

取  $a_{11} = 300\lambda$  时, 得到的  $x$ 、 $y$  方向的干涉图如图 6(a)、图 6(b) 所示。

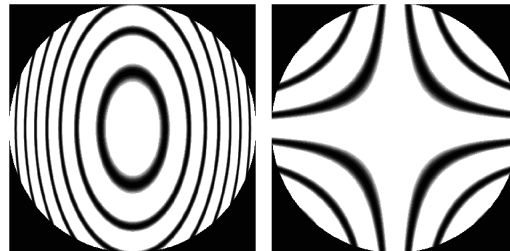


(a) x 方向  
(a) x direction

(b) y 方向  
(b) y direction

图 5  $a_{12} = 200\lambda$  时剪切干涉图

Fig. 5 Shearing interferogram of  $a_{12} = 200\lambda$



(a) x 方向  
(a) x direction

(b) y 方向  
(b) y direction

图 6  $a_{11} = 300\lambda$  时剪切干涉图

Fig. 6 Shearing interferogram of  $a_{11} = 300\lambda$

从图 6 可以看出, 由于初级彗差或视场引起的二级彗差的非对称性,  $x$ 、 $y$  两个方向上的干涉图样完全不同, 并且根据光程差表达式可以得出  $x$  方向上的剪切干涉条纹为椭圆形的圆环,  $y$  方向上的剪切干涉条纹为双曲线。

当系统同时存在离焦时, 则  $a_{11} \neq 0$ ,  $a_{10} \neq 0$ , 波像差表达式为:

$$W(x, y) = a_{11}x(x^2 + y^2) + a_{10}(x^2 + y^2) \quad (15)$$

光程差为:

$$\begin{cases} \Delta W_x = a_{11}(3x^2 + y^2)S + 2a_{10}xS = P_x \lambda \\ \Delta W_y = 2a_{11}xyS + 2a_{10}yS = P_y \lambda \end{cases} \quad (16)$$

当  $a_{11} = 300\lambda$ , 且  $a_{10} = 300\lambda$  时, 所对应的  $x$ 、 $y$  两个方向上干涉图分别如图 7(a)、图 7(b) 所示, 当取  $a_{11} = 300\lambda$ , 且  $a_{10} = -300\lambda$  时, 所对应的  $x$ 、 $y$  两个方向上干涉图分别如图 7(c)、图 7(d) 所示。

从图 7 可以看出, 存在离焦时, 对干涉图样的形状无影响, 但会使干涉图偏移, 表现出不对称性, 且当  $|a_{10}|$  相等时, 在焦内和焦外表现为图形偏移量相同, 偏移方向相反。

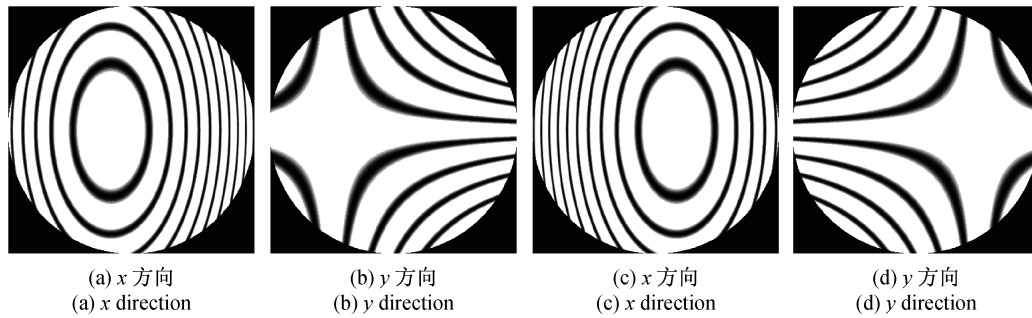


图 7 同时有离焦存在时的剪切干涉图

Fig. 7 Shearing interferogram of  $a_{11} = 300\lambda$  and  $a_{10} \neq 0$

### 3.2.2 孔径引起的二级彗差

当系统存在的像差为孔径引起的二级彗差时,  $a_{21} \neq 0$ , 波像差表达式为:

$$W(x, y) = a_{21}x(x^2 + y^2)^2 \quad (17)$$

光程差为:

$$\begin{cases} \Delta W_x = a_{21}(5x^4 + 6x^2y^2 + y^4)S = P_x \lambda \\ \Delta W_y = 4a_{21}(xy^3 + x^3y)S = P_y \lambda \end{cases} \quad (18)$$

取  $a_{21} = 100\lambda$  时, 得到的  $x$ 、 $y$  方向的干涉图如图 8(a)、图 8(b) 所示。

对比图 8 和图 6 可以看出,  $x$ 、 $y$  方向的干涉图样变化趋势非常相似, 但孔径引起的二级彗差所对应的干涉图样在像面边缘条纹更加细密, 并且在  $45^\circ$  和  $-45^\circ$  方向的一定范围内, 曲线斜率近似为  $-1$  和  $1$ , 即在这些范围内, 曲线近似为直线, 由此可以区分孔径引起的二级彗差和初级彗差。

### 3.2.3 视场引起的二级子午彗差

当系统存在的像差为视场引起的二级子午彗差时,  $a_{03} \neq 0$ , 波像差表达式为:

$$W(x, y) = a_{03}x^3 \quad (19)$$

光程差为:

$$\begin{cases} \Delta W_x = 3a_{03}x^2S = P_x \lambda \\ \Delta W_y = 0 = P_y \lambda \end{cases} \quad (20)$$

取  $a_{03} = 300\lambda$  时, 得到的  $x$ 、 $y$  方向的干涉图如图 9(a)、图 9(b) 所示。

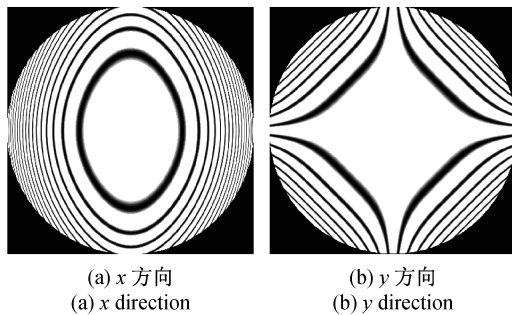


图 8  $a_{21} = 100\lambda$  时剪切干涉图

Fig. 8 Shearing interferogram of  $a_{21} = 100\lambda$

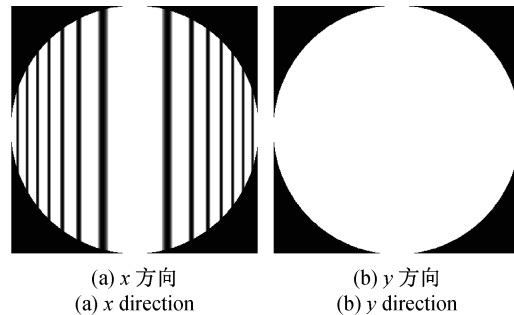


图 9  $a_{03} = 300\lambda$  时的剪切干涉图

Fig. 9 Shearing interferogram of  $a_{03} = 300\lambda$

从图 9 中可以看出,  $x$  方向上的干涉条纹为垂直于  $x$  轴的不等距的直条纹,  $y$  方向上视场内无干涉条纹, 为一片亮场。

### 3.3 像散

当系统存在的像差为初级像散或二级像散或几项之和时,  $a_{02} \neq 0$ , 波像差表达式为:

$$W(x, y) = a_{02}x^2 \quad (21)$$

光程差为:

$$\begin{cases} \Delta W_x = 2a_{02}xS = P_x \lambda \\ \Delta W_y = 0 = P_y \lambda \end{cases} \quad (22)$$

取  $a_{02} = 300\lambda$  时,得到的  $x$ 、 $y$  方向的干涉图如图 10(a)、图 10(b)所示。

从图 10 可以看出,存在像散时  $x$  方向上的干涉条纹为垂直于  $x$  轴的等距直条纹, $y$  方向上视场内无干涉条纹,为一片亮场。

当系统同时存在离焦时,则  $a_{02} \neq 0, a_{10} \neq 0$ ,波像差表达式为:

$$W(x, y) = a_{02}x^2 + a_{10}(x^2 + y^2) \quad (23)$$

光程差为:

$$\begin{cases} \Delta W_x = 2a_{02}xS + 2a_{10}xS = P_x \lambda \\ \Delta W_y = 2a_{10}yS = P_y \lambda \end{cases} \quad (24)$$

取  $a_{02} = 300\lambda$ ,且  $a_{10} = 300\lambda$  时,所对应的  $x$ 、 $y$  方向的干涉图分别如图 11(a)、图 11(b)所示。



(a)  $x$  方向  
(a)  $x$  direction

(b)  $y$  方向  
(b)  $y$  direction

图 10  $a_{02} = 300\lambda$  时的剪切干涉图

Fig. 10 Shearing interferogram of

$$a_{02} = 300\lambda$$



(a)  $x$  方向  
(a)  $x$  direction

(b)  $y$  方向  
(b)  $y$  direction

图 11 同时有离焦项存在时的剪切干涉图

Fig. 11 Shearing interferogram of

$$a_{02} = 300\lambda \text{ and } a_{10} = 300\lambda$$

从图 11 可以看出,当同时存在离焦时, $x$  方向上的干涉条纹仍然为垂直于  $x$  轴的等距直条纹, $y$  方向上视场内不再为一片亮场,而是出现了垂直于  $y$  轴的等距直条纹,但两个方向上的条纹间距不同。

### 3.4 场曲

当系统存在的像差为初级场曲或二级场曲的一种或多种时, $a_{10} \neq 0$ ,波像差表达式为:

$$W(x, y) = a_{10}(x^2 + y^2) \quad (25)$$

光程差为:

$$\begin{cases} \Delta W_x = 2a_{10}xS = P_x \lambda \\ \Delta W_y = 2a_{10}yS = P_y \lambda \end{cases} \quad (26)$$

取  $a_{10} = 300\lambda$  时,得到的  $x$ 、 $y$  方向的干涉图如图 12(a)、图 12(b)所示。

从图 12 可以看出, $x$  方向上的干涉条纹为垂直于  $x$  轴的等距的直条纹, $y$  方向上的干涉条纹为垂直于  $y$  轴的等距的直条纹,且两方向上的条纹间距相等。

### 3.5 畸变

当系统存在的像差为垂轴离焦、初级畸变、二级畸变中的一种或多种时, $a_{01} \neq 0$ ,波像差表达式为:

$$W(x, y) = a_{01}x \quad (27)$$

光程差为:



(a)  $x$  方向  
(a)  $x$  direction

(b)  $y$  方向  
(b)  $y$  direction

图 12  $a_{10} = 300\lambda$  时的剪切干涉图

Fig. 12 Shearing interferogram of  $a_{10} = 300\lambda$

(下转第 64 页)

比较这两个波形可知,所建立的全光纤电流互感器系统的仿真模型是正确可行的。全光纤电流互感器模型的建立,可以将高压端的被测电流幅值和相位大小真实的反映出来,因此对全光纤电流互感器的特性评估具有实际应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 狐晓宇. 光电互感器与电磁互感器的比较[J]. 电力学报, 2005, 20(3): 295—296.
- [2] 梁铨廷. 物理光学[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 101—102.
- [3] 姜雪松. 高压大功率变频器中光纤电流电压检测系统的研究[D]. 辽宁: 沈阳工业大学, 2005: 20—21.
- [4] 王政平, 康 崇, 张雪原, 等. 光学电流互感器的问题与解决对策[J]. 传感器技术, 2005, 24(3): 5—6.
- [5] 徐明远, 邵玉斌. MATLAB 仿真在通信与电子工程中的应用[M]. 2 版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010: 29—43.
- [6] 张广军. 光电测试技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 2003: 15—16.
- [7] 陈 辉. 虚拟光纤电力互感器测试系统设计及实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007: 12—13.
- [8] ZHANG C Y, ZHANG C X, WANG X X, *et al.* Signal processing system for digital closed-loop fiber optic current sensor[J]. *Proceeding of the CSEE*, 2009, 29(30): 42—46.
- [9] WANG L H, YANG Z X, YIN M H, *et al.* Simulation and test of dynamic performances of digital closed-loop fiber optic current transducer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(8): 1890—1895.

=====

(上接第 53 页)

$$\begin{cases} \Delta W_x = a_{01} = P_x \lambda \\ \Delta W_y = 0 = P_y \lambda \end{cases} \quad (28)$$

从上式可以看出,  $x$ 、 $y$  方向均不会有干涉条纹图出现, 视场内都将是一片亮场, 而且  $x$  方向视场内光强会随着  $a_{01}$  的增大而变大。

#### 4. 结 论

在波像差初级像差和二级像差的函数表达式基础上, 根据横向剪切干涉原理, 利用计算机编程仿真了 5 种像差包括初级像差和二级像差分别在  $x$  方向和  $y$  方向上的剪切干涉图, 给出了各个像差所对应的典型干涉图样, 并总结分析了条纹特征, 为初步判断被测系统的像差种类提供了依据。

#### 参考文献:

- [1] 萧泽新. 工程光学设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [2] 巩 盾, 田铁印, 王 红. 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1754—1759.
- [3] 刘 克, 李艳秋. 极紫外光刻投影物镜波像差在线检测技术[J]. 中国激光, 2009, 36(12): 257—262.
- [4] 王之江. 现代光学应用技术手册(下册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [5] 王 栋, 杨洪波, 陈长征. 光学表面面形的计算机仿真[J]. 计算机仿真, 2007, 24(2): 298—301.
- [6] 陈 旭. Offner 补偿器的结构与装调[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 88—93.
- [7] 徐 挺, 朱国强. 基于波像差理论的光学系统评价函数[J]. 光学仪器, 2010, 32(3): 55—59.
- [8] 胡肖彦, 吕丽星. 基于平面对称光学系统像差理论的折反射全景成像系统优化设计[J]. 光学仪器, 2012, 34(1): 45—49.
- [9] 王之江. 实用光学技术手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [10] 杨国光. 近代光学测试技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1997: 43—44.