

提高计算全息检测非球面量程的新技术

安培建

(西安应用光学研究所)

提 要

本文分析了宽条纹干涉型计算全息图的特点,提出了用宽条纹计算全息三级波面检测非球面的一项新技术。三级波面检测技术使全息图的条纹数减少约62%。实验结果证实了该技术的有效性和潜力。

一、引 言

计算机全息图(OGH)能够合成实际不存在而预知用数学描述的任何波面。这就为非球面的干涉检验提供了一条新的技术途径。各种类型的 OGH(如 Lohmann 型和 Lee 型)都已用于检验非球面。Birch 所提出的干涉型 OGH^[1] 更适合非球面检验,并在应用中有了进一步的发展^[2,3]。

由于计算全息图本身的分辨率有限,用计算全息检测非球面的波差范围也受到限制。扩展 OGH 检测非球面的测量范围,以适应检测深度(Steep)非球面的需要,这是近年来人们所关注的一个重要研究课题。传统的方法是附加光学补偿,但这增加了制作补偿系统的麻烦。附加离焦补偿虽然是一个有效的方法,但却存在着使干涉系统调试更加困难的问题^[4]。1979年 Yatagai 提出用双重 Lohmann 全息图的(1, 1)级波面检测非球面的技术,可使全息图所需的抽样单元数减少50%,因此把 OGH 检测非球面波差的测量范围扩大了二倍^[5]。

目前用计算全息检测非球面技术仍限于用一级重现波面对非球面作“零差检验”。Yatagai 所提出的双重一级波面检测技术也未突破传统的一级波面检测技术的“框架”。

本文提出了用宽条纹干涉型计算全息的三级波面检测非球面的新技术。其基本出发点是:

(1) 二元计算全息图的 m 级衍射波面的相位是原始级波面相位的 m 倍。

(2) 宽条纹干涉型 OGH 由于具有使二级以上偶次衍射波消失这个独特性质,因此用三级波面检测时,只需考虑三级和五级衍射波的分离,从而降低了对载频的要求。文中用实验结果证实了三级波面检测技术的有效性和潜力。该技术能使全息图所需条纹数减少约62%,从而把检测非球面波差的测量范围扩大了三倍。

二、宽条纹全息图的一级波面检测技术

众所周知,离轴参考束全息图的振幅透射函数为

收稿日期:1983年11月10日;收到修改稿日期:1984年2月6日

$$t(x, y) = R^2 + A^2(x, y) + 2RA(x, y)\cos[2\pi\nu x - \phi(x, y)], \quad (1)$$

式中, $R\exp[i2\pi\nu x]$ 表示参考平面波。物波表示为 $A(x, y)\exp[i\phi(x, y)]$ 。 R^2 项是由参考波产生的均匀“偏置”透射率。 $A^2(x, y)$ 项对重现物波没有贡献。用计算象全息图的方案把物波函数直接编码在全息图函数 $h(x, y)$ 中。二元干涉型计算全息图是实际干涉图形的二元变换。当引入一个偏置函数后, 全息图函数可用傅里叶级数表示^[6],

$$h(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{\sin \pi m Q(x, y)}{\pi m} \exp[im(2\pi\nu x - \phi(x, y))], \quad (2)$$

适当地选择偏置函数 $\cos \pi Q(x, y)$, 如 $Q(x, y) = \sin^{-1} A(x, y)/\pi$ 可对物波振幅进行调制。实际的光学波面仅具有位相变化。偏置函数 Q 用来确定全息图的衍射效率。对 $Q=1/2$ 的宽条纹全息图, 一级衍射效率可达 10%。

这时(2)式表示宽条纹全息图的透射函数

$$h(x, y) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sum_m \sin c\left(\frac{\pi m}{2}\right) \exp(i2\pi m \nu x) \exp[-im\phi(x, y)], \quad (3)$$

式中 $m = \pm 1, \pm 3, \dots$ 。

用宽条纹全息图的一级波面对非球面作“零差检验”时, 由(3)式可得, 全息图重现的一级波面透射函数,

$$h_{\pm 1}(x, y) = \frac{1}{\pi} [e^{i2\pi\nu x} e^{-i\phi} + e^{-i2\pi\nu x} e^{i\phi}], \quad (4)$$

式中, 第一项为 +1 级衍射波面的透射分量, 第二项为 -1 级波面的透射分量。用原倾斜参考平面波 $\exp[i2\pi\nu x]$ 照射全息图, 重现的 -1 级波面位相即为原物波面位相,

$$e^{i2\pi\nu x} \cdot h_{-1}(x, y) = \frac{1}{\pi} e^{i\phi(x, y)}. \quad (5)$$

确定宽条纹全息图条纹位置的方程为

$$\nu_c x - W(x, y) = n \mp Q/2, \quad (6)$$

式中用波长为单位表示波差函数 $W(x, y)$ 。其中 $\nu_c = 1/T$ 是载频, T 是沿 x 方向的平均抽样间距, n 为整数。(6)式右端的负号和正号用来确定宽条纹的前沿和后沿位置。 $Q=0$ 时, 由(6)式可得窄条纹全息图的条纹位置方程。

二元化处理是一个高度非线性过程。二元全息图产生了具有增大带宽的高次衍射波。宽条纹全息图具有一种独特性质, 使二级以上的偶次衍射波消失。当用宽条纹全息图的一级波面检测非球面时, 只需考虑一级与三级衍射波的分离, 降低了对载频的要求。

一级波面检测所需的载频带宽比(ν_c/B_x):

1. 窄条纹全息图: 理论值为 1.5; 实用值为 2。

2. 宽条纹全息图: 理论值为 1; 实用值为

$$\nu_c/B_x = 1.5, \quad (7)$$

式中 B_x 是波差函数沿 x 方向的频带宽度。W. H. Lee 给出了上述的载频条件^[6], 但并未用宽条纹全息图作实际检测。(7)式的取值是作者根据实验给定的。与传统的窄条纹全息图相比, 用宽条纹全息图的一级波面检测时, 由于载频减少 1/4, 因此全息图的条纹数减少 25%。我们对一个 $f/1.8$, 口径 160 mm 的抛物面镜制作了宽条纹全息图, 如图 1 所示, 并用一级波面检测作了实际检验。所得干涉图如图 2 所示^[7]。



图1 宽条纹干涉型 CGH
Fig. 1 The interference-type
CGH of wide fringes



图2 宽条纹全息图的一级波面检测干涉图
Fig. 2 Interferogram of testing from first-
order wavefront obtained with the hologram
of wide fringes

三、三级波面检测技术

由(3)式第一个指数函数 $\exp(i2\pi m\nu x)$ 是相应于倾斜的一个线性相位因子。第二个指数函数 $\exp[-im\phi(x, y)]$ 表明高级波面相位具有随衍射级次增高而增大的性质。高级奇次衍射波的光强随级次增加按倒数的平方关系衰减。三级衍射波的效率约为 1%。

用三级波面检测非球面时, 全息图重现的三级波面透射函数为,

$$h_{\pm 3}(x, y) = -\frac{1}{3\pi} [e^{i2\pi(3\nu)x} \cdot e^{-i3\phi} + e^{-i2\pi(3\nu)x} \cdot e^{i3\phi}]. \quad (8)$$

当用大倾角的参考平面波 $\exp[i2\pi(3\nu)x]$ 照射全息图时, 重现的 -3 级波面位相 $\phi_{-3}(x, y)$ 是原物波面位相的三倍,

$$e^{i2\pi(3\nu)x} \cdot h_{-3}(x, y) = -\frac{1}{3\pi} e^{i3\phi}, \quad (9)$$

$$\phi_{-3}(x, y) = 3\phi(x, y). \quad (10)$$

因此, 用同一张全息图或条纹间距 T 相同的全息图对非球面作“零差检验”时, 与一级波面检测相比, 三级波面检测能把对被检非球面波差的测量范围扩大三倍。

对同一被检非球面, 用三级波面检测作“零差检验”时, 则三级波面的位相应等于被检理想波面的位相 $\theta(x, y)$ 。所以,

$$\phi(x, y) = \frac{1}{3} \theta(x, y). \quad (11)$$

可见, 应将全息图的原始记录波面位相缩小三倍。也就是说, 用三级波面检测时, 只需用三分之一的波象差就可产生与一级波面检测相同的所需波面 $\theta(x, y)$ 。由于波面频带宽度与波差函数的导数成正比, 因此三级波面检测的频带宽度也相应地减小到一级波面检测带宽的 1/3,

$$B_x^{(3)} = \frac{1}{3} B_x^{(1)}. \quad (12)$$

考虑到三级与五级衍射波的分离, 三级检测的载频带宽比应为,

$$\nu_c^{(3)} / B_x^{(3)} \geq 2. \quad (13)$$

为使三级与五级波有足够分离, 实用时可取

$$\nu_c^{(3)}/B_x^{(3)} \approx 2.2 \sim 2.5. \quad (14)$$

由(6), (12)和(14)式可得, 三级波面检测的载频比一级波面检测的载频减少约一半。因此用宽条纹全息图对同一被检非球面作“零差检验”时, 与一级波面检测技术相比, 三级波面检测能使全息图的条纹数减少约 50%。

四、实验结果

用三级波面检测技术, 在一个修正型的 Twyman-Green 干涉仪上, 对 $f/3$, 口径 100 mm 的抛物面镜作了检验。检验结果所得干涉图如图 3 所示。对同一抛物面镜用宽条纹干涉型 CGH 的一级波面检测技术作了对比检验。所得干涉图如图 4 所示。三级波面检测中, 当载频带宽比取 2.5 时, 全息图所需条纹数为 $N_3=39$; 一级检测中, 取 $\nu_c/B_x=1.5$ 时, $N_1=70$; 三级检测使全息图的条纹数减少 56%。当 $\nu_c^{(3)}/B_x^{(3)}=2.2$ 时, $N_3=34$, 此时全息图的条纹数减少 49%。



图 3 三级波面检测干涉图

Fig. 3 Interferogram of testing from third-order wavefront



图 4 一级波面检测干涉图

Fig. 4 Interferogram of testing from first-order wavefront

实验结果表明:

(1) 宽条纹干涉型 CGH 的偶次衍射波(除零级外)不仅在理论上而且在实际上消失了。

(2) 用同一全息图或抽样间距相同的计算全息图检测时, 与传统的一级波面检测技术相比, 三级波面检测能把被检非球面波差的测量范围扩大三倍。

(3) 用宽条纹全息图检测时, 三级波面检测与一级检测相比, 使全息图的条纹数减少约 50%; 考虑到一级波面检测时, 宽条纹全息图的条纹数比窄条纹全息图的条纹数减少 25%; 综合起来, 对同一非球面或波差相同的非球面作“零差检验”时, 与传统的窄条纹一级波面检测技术相比, 本文提出的三级波面检测技术能使全息图所需的条纹数减少约 62%。

检测深度非球面的困难在于, 随着波面深度加大, 全息图所需的条纹数急剧增多。由于制作全息图的绘图仪精度(分辨率)受到一定限制, 为了保证重现波面的精度, 应尽量减少全息图的条纹数。三级波面检测技术为检测深度非球面提供了一项新的有效技术。

刘淑珍、桂怀谷、李勤学、张尔韬等同志曾参与了某些有关部分的工作。陶纯堪同志与作者就某些问题作过有益的讨论。在此仅致谢意。

参 考 文 献

- [1] K. G. Birch, F. J. Green; *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1972, **5**, No. 11 (Nov), 1982.
- [2] T. Yatagai, H. Saito; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 4 (Feb), 558.
- [3] A. F. Fercher; *Opt. Act.*, 1976, **23**, No. 5 (May), 347.
- [4] T. Yatagai *et al.*; *Japan. J. Opt.*, 1974, **3**, No. 1 (Jan), 132.
- [5] T. Yatagai, H. Saito; *Opt. Act.*, 1979, **26**, No. 8 (Aug), 985.
- [6] W. H. Lee; *«Progress in Optics»*, E. Wolf, ed. (North-Holland, Amsterdam, 1978, **XVI**), 156.
- [7] 安培建等; *«中国激光»*, 1984, **11**, No. 3 (Mar), 140.

**A new technique for extending ranges of aspheric surfaces
test by computer-generated hologram**

AN PEIJIAN

(*Xian Institute of Applied Optics*)

(Received 10 November 1983; revised 6 February 1984)

Abstract

This paper discussed features of the interference type computer-generated holograms with wide fringes. A new technique by using third order wavefront of the computer-generated holograms with wide fringes for testing aspheric surfaces has been proposed. It makes one possible to decrease the holographic fringe numbers about 62%. The feasibility and potentiality of the technique have been verified by the experimental result.