

文章编号: 1002-2082(2004)05-0062-05

光学非球面器件检测新方法探究

段存丽^{1,2}, 田爱玲², 陈志超²

(1. 西安交通大学 电信学院, 陕西 西安 710068; 2. 西安工业学院 光电科学与工程学院, 陕西 西安 710032)

摘要: 阐述了光学投影式检测非球面的基本原理, 提出了利用计算机模拟光学检测过程的方法, 明确了计算机模拟的目的及可达到的目标。在模拟过程中, 选取了适合非球面的参考球面, 利用光学基本理论和数学推导进行了理论分析及精密计算, 得出非球面和参考球面的垂轴距离与接收屏上的待测距离的计算公式。根据理论计算公式, 利用计算机C语言编程, 对垂轴距离用于计算机进行了模拟, 并利用excel制表作图, 做出了非球面的模拟曲线, 得到了和理论结果相符的模拟效果, 模拟的精度达到 $\pm 0.001 \mu\text{m}$ 。

关键词: 光学检测; 非球面器件; 理论计算; 模拟计算

中图分类号: TH74-34

文献标识码: B

Simulation Calculation of Measuring Optical Aspheric Surface Based on Light Pattern Projection

DUAN Cun-li^{1,2}, TIAN Ai-ling², CHEN Zhi-chao²

(1. Telecom Institute of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710068, China;

2. Photoelectricity science and engineering college, Xi'an Institute of Technology, Xi'an 710032, China)

Abstract: In this thesis, the fundamental of optical projection measurement for aspheric surface is explained, the simulation calculation with computer is put forward and the aim of simulation is defined. We choose the reference sphere fitting into asphere, deduced the calculation expressions of the vertical axis distance and measured the distance in the reception screen according to the optical theory and math formula. And also we simulated the vertical axis distances with C programme and obtained the simulation asphere curve using excel. The simulation calculation result is in accordance with the theoretical calculation and meets the accuracy of $\pm 0.001 \mu\text{m}$.

Keywords: optical check; aspheric surface device; theoretical calculation; simulation calculation

引言

非球面光学元件的制造和检测技术是近几年研究的热点。在光学系统中, 利用非球面光学元件可消除多种像差, 减少光能损失, 从而获得高质量的图像效果和高品质的光学特性。非球面的检测方法很多: (1) 激光线扫描法(简称光切法), 其测量精度较高, 但此方法对被测物体实现全场扫描测量时, 必须借助三坐标测量机的运动方能实现, 且也只适用于测量静态物体^[1]; (2) 激光单点测量法, 其测量精度高, 但效率极低, 只适合于测量静态物

体; (3) 莫尔条纹法, 其测量精度不高, 装置复杂, 离实际应用尚有一段距离^[2]; (4) 激光干涉法, 其测量精度高, 但它要求光源有良好的空间相干性和时间相干性^[3]。随着计算机应用技术的发展, 在进行复杂实验前, 可利用计算机进行大量的数据计算, 数学模拟及可行性分析是非常有必要的。

1 基本原理

本文所提出的光学非球面测试装置是利用计算机软件控制空间光调制解调器(SLM)形成检

收稿日期: 2004-05-28; 修回日期: 2004-06-20

作者简介: 段存丽(1972-), 女, 陕西省富平人, 西安交通大学在读硕士研究生, 西安工业学院光电科学与工程系讲师, 主要从事光信息处理及光学设计研究工作。

测光学零件非球面所需图样的。此调制图样经过光学系统投射到非球面光学零件上,从而实现对非球面反射图样的系统数据处理。该系统可完成非球面

反射图像的自动采集、判读处理、波差值及波面三维立体图,原理框图如图1所示。

为了更好地实现设计所提出的要求,实验

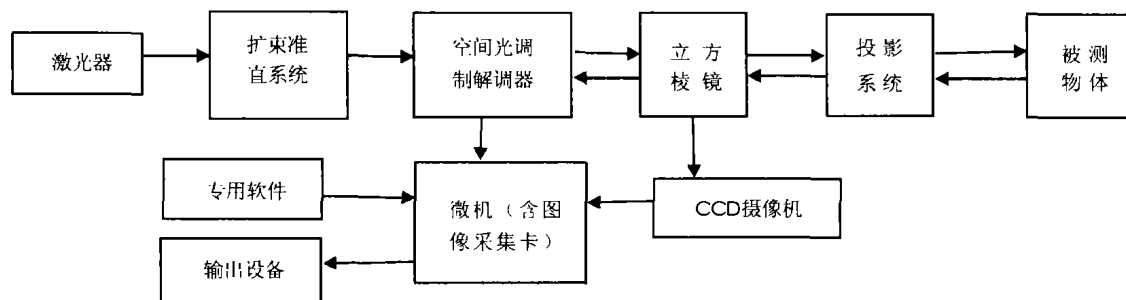


图1 非球面测试装置的原理框图

Fig. 1 Principle diagram of aspherical test setup

前,需进行计算机数值模拟。模拟的主要光学过程:投影系统投射的平行光线经非球面被测件反射、投影系统透射及立方棱镜反射最后到达CCD摄像机接收面。

对光学过程进行计算机模拟的目的:

(1) 完成理论计算,找出被测件与参考球面垂轴距离 y 与CCD摄像机接收面上检测距离 d 的理论计算关系;

(2) 根据理论计算公式,利用计算机进行模拟,借助C语言编程,模拟出垂轴距离与理论计算出的垂轴距离的关系,并列出相应的输出数据;

(3) 根据输出数据,利用Office工具的excel制表,作出理论计算的非球面曲线和模拟非球面曲线。

2 理论计算

如图2所示,一束平行光 HA 经半透半反镜 P' 入射到单透镜 L 上,经透镜 L 透射汇聚到透镜 L 的后焦点 O 。经非球面反射的光线与光轴交于 O' 点,并与透镜 L 交于 A 点。取参考球面的球心为点 O ,半径为 O 点到非球面与光轴的焦点的距离,则光线经参考球面反射必原路返回。若参考球面与非球面的同球心误差为 h ,则经非球面反射后的光线与光轴交于 O' 点,经透镜 L 会聚后的光线为 BG ,经 P' 反射到接收面 M ,与透镜的距离为 l 。平行光 HA 与非球面反射光线 BG 在接收面上的距离为 d ,由于非球面及参考球面都是轴对称的,因此可取其中任意

截面来研究。在任一截面上,参考球面的曲线方程为圆方程,取非球面的曲线方程为抛物线来进行研究。

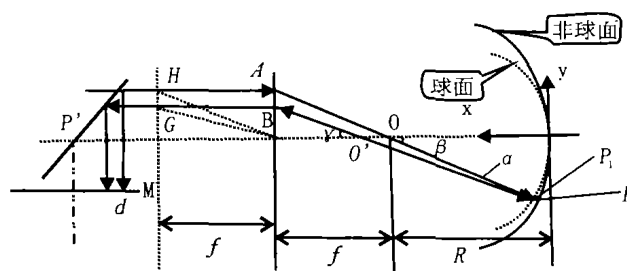


图2 光路计算示意图

Fig. 2 Schematic diagram of light route calculation

(1) 已知非球面截面的曲线方程,选定参考球面的截面,计算接收屏上的待测距离 d 。

选用的非球面曲线方程为

$$y^2 = 2px, (\text{焦点为}(p/2, 0)) \quad (1)$$

参考球面的选择有方法多种,例如近似法、牛顿迭代法和最小二乘法^[4]。本文选用的近似法如图2所示,实曲线是非球面曲线,虚线是参考球面曲线,参考球面球心位于 $O(R, 0)$,半径为 R 。设非球面上任一点 $P(x_0, y_0)$ 与 y 方向垂轴,且与参考球面交于 $P_1(x_0, y_1)$ 点,则非球面与参考球面 y 轴方向的偏离量为 $\delta = y_1 - y_0$,若待测非球面的最大口径为 $D_{\max}$,对应的 x 轴坐标为 $x_{\max}$, ϵ 是可控制的某数值,于是球面对应的最大孔径为 $D_{0\max} =$

$\sqrt{R^2 - (R - x_{\max})^2}$,则此时要求:

$$\delta_{\max} = \left| D_{\max} - \sqrt{R^2 - (R - x_{\max})^2} \right| \leq \epsilon \quad (2)$$

由此可得出的参考球面半径为

$$\frac{(D_{\max} + \epsilon)^2 + x_{\max}^2}{2x_{\max}} \geq R \geq \frac{(D_{\max} - \epsilon)^2 + x_{\max}^2}{2x_{\max}} \quad (3)$$

由近似法知参考球面截面的曲线方程为

$$(x - R)^2 + y^2 = R^2 \quad (4)$$

式中, 取 $R = P$ 。

建立如图2所示的坐标系, 非球面与参考球面在原点处相切, 取非球面截面曲线上的任意点 $P(x_0, y_0)$, 则 P 点的垂轴距离为

$$y_0 = \pm \sqrt{2Px_0} \quad (5)$$

连接 P 点与球面球心 $O(R, 0)$, OP 的连线交

球面于 $P_1(x_1, y_1)$, 其中, $x_1 = \frac{R(h + x_0)}{R + h}$, $y_1 = \frac{Ry_0}{R + h}$ 。代入(4)式计算可得:

$$h = \sqrt{R^2 + x_0^2} - R \quad (6)$$

在接收屏 M 上与 P 点对应的点为 $P_2(x_2, y_2)$, 其中,

$$y_2 = \frac{y_1 f}{R - x_1}。$$

由几何常识知, 若非球面截面曲线在 P 点的切线与球面截面在 P_1 点切线间的夹角为 θ , 则非球面截面曲线在 P 点的切线方程为

$$\frac{y - y_0}{1} = \frac{x - x_0}{\sqrt{2x_0/P}} \quad (7)$$

球面截面在 P_1 点的切线方程为

$$\frac{y - y_1}{1} = \frac{x - x_1}{\sqrt{2Rx_1 - x_1^2/R - x_1}} \quad (8)$$

则两切线夹角的余弦为

$$\cos\theta = \frac{\left| \frac{\sqrt{2x_0} \sqrt{2Rx_1 - x_1^2} + 1}{\sqrt{P} R - x_1} \right|}{(\sqrt{\frac{2Rx_1 - x_1^2}{(R - x_1)^2} + 1})(\sqrt{\frac{2x_0}{P} + 1})} \quad (9)$$

设 P 点反射光线偏离入射光线的夹角为 α , 由几何关系, 则有 $\alpha = 2\theta$; 选定透镜的焦距为 f , 接收屏与透镜距离为 L , 令

$$\sin\alpha \approx \frac{AB}{AP}$$

$$\text{其中: } \begin{cases} AB = (\sqrt{y_2^2 + f^2} + R + h) \sin\alpha \\ HG = (\sqrt{y_2^2 + f^2}) \times \sin\alpha \end{cases} \quad (10)$$

由几何关系可求得待测距离 d 为

$$d = \frac{HG \times L - AB \times (L - f)}{f} \quad (11)$$

(2) 若已测量出接收屏距离 d , 则可计算出对应非球面与参考球面的垂轴距离。

对于选定的光学系统, 透镜的焦距为 f , 接收屏与透镜距离为 L , 由光学基本原理可得:

$$\begin{cases} x_1 = R - \sqrt{R^2 - y_1^2} \\ y_1 = \frac{Ry_2}{\sqrt{y_2^2 + f^2}} \end{cases} \quad (12)$$

由几何关系可得:

$$\frac{HG - d}{AB - d} = \frac{L - f}{L}$$

$$\text{式中} \begin{cases} AB = \sqrt{y_2^2 + f^2} + R + h \sin\alpha \\ HG = (\sqrt{y_2^2 + f^2}) \times \sin\alpha \end{cases} \quad (13)$$

化简(13)式可得

$$\sin\alpha = \frac{df}{f \sqrt{y_2^2 + f^2} - R(L - f)} \quad (14)$$

若 OP 与光轴的夹角为 β , $O'P$ 与光轴的夹角为 γ ,

由几何关系得:

$$\tan\beta = \frac{y_2}{f}, \gamma = \beta - \alpha \quad (15)$$

在三角形 $OO'P$ 中

$$OO' = \frac{\sin\alpha(R + h)}{\sin\gamma} \quad (16)$$

在三角形 $O'PM$ 中

$$\tan\gamma = \frac{(R - x_0)\tan\beta}{OO' + R - x_0} \quad (17)$$

交换(16)式可得:

$$x_0 = \frac{R \tan\beta - (OO' + R) \tan\gamma}{\tan\beta - \tan\gamma} \quad (18)$$

由几何关系得:

$$h = R - \frac{R - x_0}{\cos\beta} \quad (19)$$

由于 OO' 的计算式中包含有 h , 又由于 $h \ll R$, 因此 OO' 的初始值为 $R \sin\alpha / \sin\gamma$ 。代入上式公式计

算, 然后用 $h = \sqrt{R^2 + x_0^2} - R$ 进行循环补偿 10 次左右, 最后确定 h 值的输出。然后由几何关系计算出垂轴距离:

$$y_0 = y_1 + h \sin\beta \quad (20)$$

3 计算机模拟

对以上计算分两步进行了计算机模拟。本文选定的参数如下: $P=R=100\text{ mm}$, $f=100\text{ mm}$, $l=120\text{ mm}$ 。

(1) 已知选定参考球面的非球面曲线方程,可计算出接收屏上的待测距离。

对于任意点 P 选取不同的 x_0 值,根据基本原理的公式推导,利用C语言编程实现计算模拟。流程框图如图3所示。

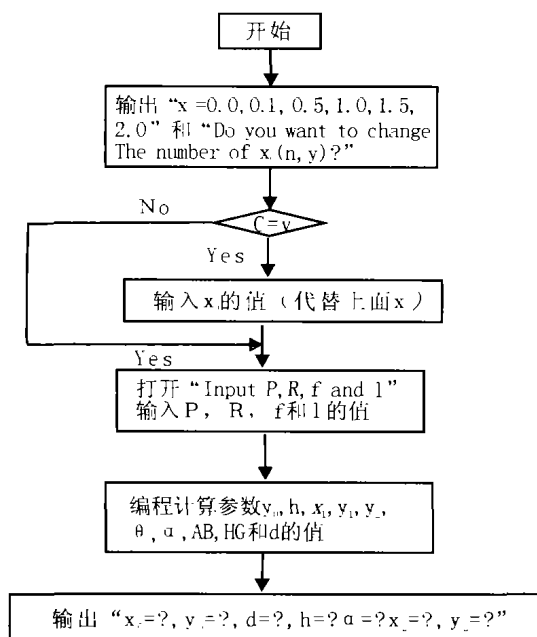


图3 计算模拟流程图(1)

Fig. 3 The flow chart of calculating simulation

(2) 若已测量的距离为 d , 计算对应非球面与参考球面垂轴距离。

把图3编程输出结果(d 值和 y_2 值)输入到下一步的编程计算中,流程框图如图4所示。

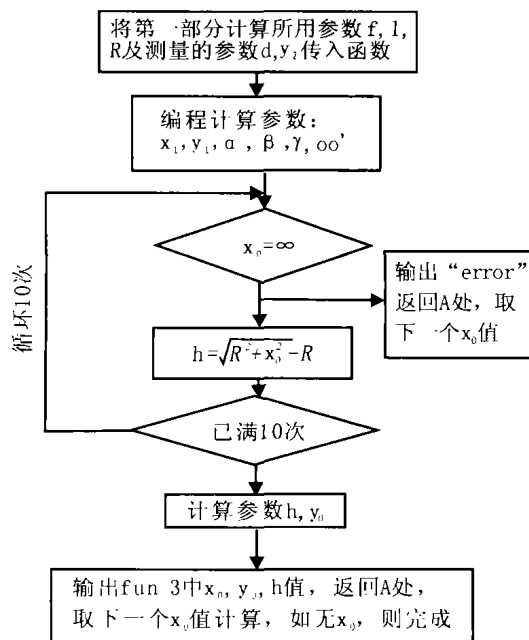


图4 计算模拟流程图(2)

Fig. 4 The flow chart of calculating simulation

3 输出结果

在模拟计算中,选用12组数据时行模拟计算。经过计算机模拟后,模拟垂轴距离与理论距离的输出数据,如表1所示。

表1 模拟计算输出结果

Table. 1 The output raseults of simulation calculation

输入 x_0 值	输入 y_1 值	输出 x_0 值	输出 y_0 值	y_0 的误差(μm)
0	0	0	0	0
0.1	4.472 136 020 66	0.100 000 002 9	4.472 135 955	0.000 006 57
0.5	10.000 000 000 0	0.500 000 000 0	10.0	0
1	14.112 135 620 1	0.999 999 999 995	14.142 135 62	0.000 000 1
1.5	17.320 508 957 3	1.500 000 148 1	17.325 080 8	0.000 877 31
2	19.999 999 999 8	2.000 000 000 0	20	-0.000 000 1
3	24.494 897 842 9	3.000 000 095 6	24.494 897 43	0.000 412 95
4	28.284 271 239 6	3.999 999 998 1	28.284 271 25	-0.000 010 6
5	31.622 776 029 7	4.999 999 836 9	31.622 776 6	-0.000 570 3
6	34.641 017 926 8	6.000 000 541 4	34.641 016 15	0.001 776 76
7	37.416 572 559 3	6.999 999 578 2	37.416 573 87	-0.001 310 7
8	40.000 000 001 5	7.999 999 999 9	40	0.000 000 151

为了更好地表达表1输出的结果,本文利用excel制表作图,根据表1的输出数据,作出的结果

如图5所示(y 轴的负半轴值与正半轴值大小相同,符号相反)。

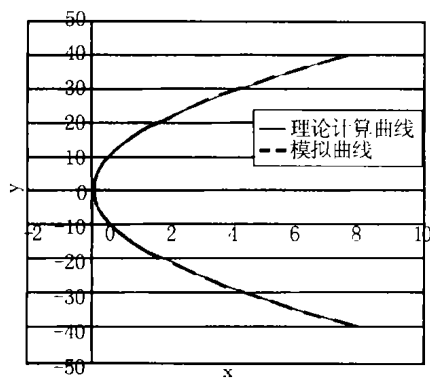


图5 理论计算曲线与模拟曲线对比图

Fig. 5 Contrast diagram of theoretical calculating curve and simulation curve

结果分析:

(1) 图中 —— 线表示理论计算的非球面曲线, ---- 线表示模拟非球面曲线。

(2) 非球面和参考球面的垂轴距离 y_0 与理论计算出的垂轴距离 y_0 的模拟计算的误差为 $\pm 0.001 \mu\text{m}$ 。

(3) 模拟的非球面曲线与理论计算的非球面曲线几乎是重合的,模拟效果很好。

4 结论

(上接第61页)

图中曲线1的阴极面入射照度为 $5.40 \times 10^{-4} \text{ lx}$, 曲线2的阴极面入射照度为 $1.10 \times 10^{-4} \text{ lx}$, 曲线3的阴极面入射照度为 $1.25 \times 10^{-5} \text{ lx}$ 。

从图3可以看出,随着输入图像空间频率的增加,图像传递信噪比将随之下降。这主要是因为低频条件下像管的调制传递函数MTF接近1,对输出

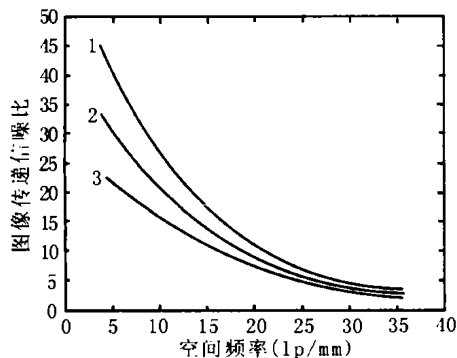


图3 图像传递信噪比与空间频率关系曲线

Fig. 3 The relation curve of image transfer signal-to-noise ratio and spatial frequency

出图像的信噪比影响不大;而在高频时,由于MTF

(1) 利用光学投影和数学基本理论对投影式光学检测过程进行了理论计算及分析,并利用计算机C语言及excel工具完成了数据模拟计算,输出结果中非球面和参考球面的垂轴距离 y_0 与理论计算出的垂轴距离 y_0 的模拟计算的误差为 $\pm 0.001 \mu\text{m}$,因此模拟过程是成功的。

(2) 进行光学检测实验之前,利用光学和数学基本理论进行理论计算,以计算机作为辅助工具对复杂的计算过程进行模拟,避免了前期大量的复杂试验,为实际的光学检测提供了理论依据和测量目标。

参考文献:

- [1] 朱秋冬,郝群.激光束偏转法非球面面形测量和计算[J].光学技术,2002,28(1):22-25.
- [2] 施宇清.用莫尔测偏法在线快速检测非球表面形貌[J].振动、测试与诊断,2002,22(1):15-19.
- [3] YUN Z S, LIU Z B, LI Y L. Aspheric surface testing with a liquid compensatory interferometer [J]. Opt Eng, 1998, 37(4): 1364-1367.
- [4] 杜玉军,任海霞,等.光学非球面元件非球面度计算方法[J].应用光学,2002,23(5):42-45.

较小,对信号和噪声都有影响,但对信号的影响更大,从而降低了图像传递信噪比。

3 结束语

本文所介绍的像增强器图像传递信噪比测试系统以CCD作为探测接收器件,利用数字图像采集与处理技术,在一幅典型图像中可实现不同空间频率下图像传递信噪比的测试。测试结果可以通过数值或图表形式直观显示,具有较高的自动化程度。多次测试结果表明,相同测试条件下的不确定度在 $\pm 3\%$ 以内。

参考文献:

- [1] 邹异松.电真空成像器件及理论分析[M].北京:国防工业出版社,1989.
- [2] 左印方.EBCCD微光成像系统综合性能评价[D].北京:北京理工大学,2003.
- [3] 王庆有.CCD应用技术[M].天津:天津大学出版社,2000.