

一种测量非球面面形的新方法

王海明

(应用光学国家重点实验室, 长春130022)

提要: 本文发展了一种激光-CCD衍射谱分析系统, 利用衍射谱位相恢复方法测量非球面光学件的面形。本文的方法不需要产生非球面参考波前, 这就避免了通常干涉方法测量非球面的特殊困难。

关键词: 光学检测, 衍射

A novel method for measuring aspheric optics

Wang Haiming

(National Applied Optics Laboratory, P. O. Box 1024, Changchun)

Abstract: A simple laser-CCD diffraction spectrum analysis system has been developed. The phase retrieving of the diffraction spectra has been employed to measure the surface form of the aspheric optics. This method needs no aspheric reference wavefront which is required in the conventional interferometric aspheric measurements and is extremely difficult to be produced.

Key words: optical testing, diffraction

一、引 言

目前常用干涉方法测量光学表面面形。对于一般干涉方法, 必须产生一个与待测波前近似的参考波前以获得密度适中, 适合于计算机处理的干涉条纹。但对非球面和/或大口径光学系统, 要获得合适的参考波前是相当困难的, 这就使得用干涉方法测量非球面面形具有一些特殊的技术困难。

根据上述讨论, 本文作者发展了一种衍射谱分析技术, 用来测量光学系统的波像差和光学传递函数(OTF, Optical Transfer Function)^[1, 2]。利用一激光束照射一个狭缝, 狭缝产生的衍射图样通过待测光学系统后, 被测光学系统由于存在波像差, 衍射图样含有一定程度的变形。变形后的衍射图样被 CCD 线列阵接收从衍射图样数据中可以抽取出与光学系统性质有关的信息, 计算可以得到波像差和 OTF。

在本文中我们进一步发展了上述技术, 用来测量金刚石切削表面的面形。

二、表面面形和衍射图样之间的关系

设一束波长为 λ 的激光束照射一个狭缝, 狭缝产生的衍射图样被待测的金刚石切削表面反射后传播到远场, 然后由 CCD 线列阵接收, 如图 1 所示。假设衍射谱所在的平面为子午面, 待测表面与子午面相交可得一截线, 其方程为

$$F(x) = F_1(x) + E(x) \quad (2.1)$$

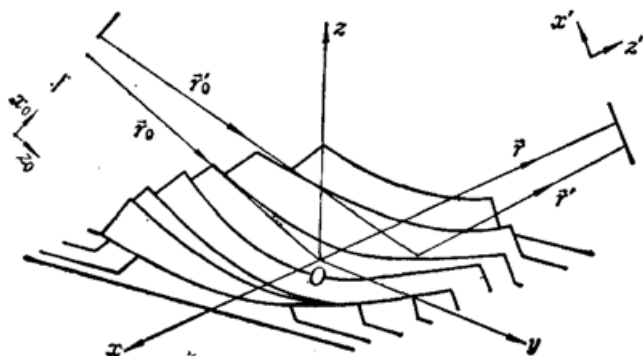


Fig. 1 Schematic of the diffraction spectrum analysis system

式中 $F(x)$ 是实际表面所得的截线, $F_1(x)$ 是我们所需的理想表面的截线, 可以在金刚石切削过程中由 CNC 系统设定, $E(x)$ 是加工误差函数。显然有

$$\|E(x)\| \ll \|F(x)\| \quad (2.2)$$

这里 $\|F(x)\|$ 表示函数 $f(x)$ 的模。假设误差函数 $E(x)$ 还满足

$$\|E(x)\| \ll \lambda \quad (2.3)$$

则由实际表面引起的波像差为

$$W(x) = W_1(x) + 2E(x) \quad (2.4)$$

式中 $W_1(x)$ 是相应的理想表面在光路中引起的波像差。

我们可以将图 1 中的距离展开以计算波像差:

$$r'_0 + r' = r_0 + r + W(x) - [(x/r_0)x_0 - (x'/r)x] \quad (2.5)$$

在 CCD 列阵接收面上的光场复振幅可表示为

$$u(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}(x_0/b) \text{rect}(x/a) \exp\{ik[r_0 + r + W(x)]\} \\ \times \exp\{-ik[(x/r_0)x_0 + (x'/r)x]\} dx_0 dx \quad (2.6)$$

b 是狭缝的宽度, a 是待测表面口径。将 (2.4) 式代入 (2.6) 式, 忽略常数位相因子, 可得

$$u(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}(x/a) \text{sinc}[(bx)/(\lambda r_0)] \exp[ikW_1(x)] [1 + i(4\pi/\lambda)E(x)] \\ \times \exp[-i(2\pi/\lambda r)x'] dx \quad (2.7)$$

定义空间频率为

$$v = x/(\lambda r) \quad (2.8)$$

则衍射图样的光强分布可以表示为

$$I(x') = \text{PSD}[G(v)] \quad (2.9)$$

式中 PSD 是功率谱函数, 定义为

$$\text{PSD}[f(v)] = \frac{1}{L} \left| \int_{-L/2}^{L/2} f(v) \exp(i2\pi vx') dv \right|^2 \quad (2.10)$$

而且

$$G(v) = \text{rect}[(\lambda rv)/a] \text{sinc}(Mbv) [1 + i(4\pi/\lambda)E(\lambda rv)] \\ \times \exp\{i(2\pi/\lambda)W_1(\lambda rv)\} \quad (2.11)$$

$$M = r/r_0 \quad (2.12)$$

是待测表面的横向放大率。

三、波像差函数 $W(x)$ 的决定

我们将测量系统的几何关系从图 1 中抽取出来,如图 2 所示。由图 2 显然有

$$\left. \begin{aligned} r'_0 + x_0 &= r_0 + x \\ r' + x &= r + x' \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

从(3.1)式可得

$$\left. \begin{aligned} r'_0 &= r_0 \{1 + (2r_0 \cdot x / r_0^2) - (2x_0 \cdot x / r_0^2) \\ &\quad - [(x_0^2 + x^2) / r_0^2]\}^{1/2} \\ r' &= r \{1 - (2r \cdot x / r^2) - (2x \cdot x' / r^2) \\ &\quad + [(x^2 + x'^2) / r^2]\}^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

在(3.2)式中我们应用了关系式

$$r_0 \cdot x_0 = r \cdot x' = 0 \quad (3.3)$$

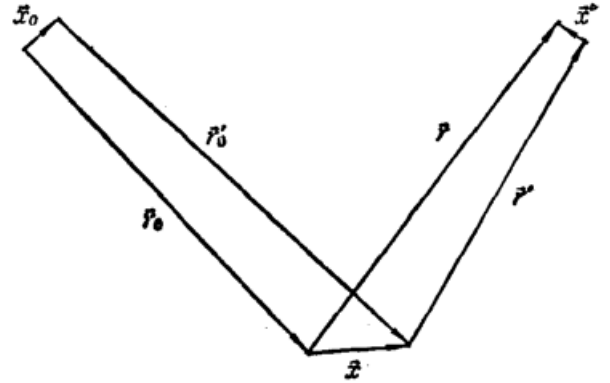


Fig. 2 Geometry of Fig. 1

略去与 x_0^4 、 x^4 以及 x'^4 以上各项成正比的高阶像差,可将波像差表示为

$$\begin{aligned} W(x) &= [-(x/r_0)x_0 - (x'/r)x] + [(r_0 - x_0)/r_0^2 - (r + x')/r^2] \cdot x \\ &\quad + [(x_0^2 + x^2)/(2r_0^2) + (x^2 + x'^2)/(2r^2)] \\ &\quad - \frac{1}{2} \{[(x_0 \cdot x)^2 - (r_0 \cdot x)^2]/r_0^3 + [(r \cdot x)^2 + (x \cdot x')^2]/r^3\} \\ &\quad - \frac{1}{8} \{(x_0^2 + x^2)^2/r_0^3 - (x^2 + x'^2)^2/r^3\} \end{aligned} \quad (3.4)$$

在(3.4)式中相当于我们保留了离焦和初级球差。由于和测量距离 r_0 和 r 相比,狭缝宽度 b 和待测表面孔径 a 都很小(参见下面第 4 节),初级球差已经是以描述测量用小孔径、小视场光学系统。当然,如果像差比较大,只要在(3.4)式中多展开几项高阶项即可。无论在上述两种中任何一种情况下,我们都可把表面误差函数展开为多项式。应用迭代法,即可解出函数 $E(x)$ [1~3]。

四、测量结果和讨论

测量系统如图 3 所示。由激光电源(1)和氦氖激光器(2)组成的光源发生波长为 632.8 nm 的激光束照射狭缝(3);被测样品(4)装在夹持器(5)上,夹持器可以沿图中箭头所示方向移动以测量表面上的不同部分;衍射谱由 CCD 线阵列(8)(2048 单元,灵敏波段为 400 nm 至 900 nm,成像单元宽度为 13 μm)接收;CCD 器件装在一个阿贝比长仪(6)上,上面有两个读数显微镜(7),当 CCD 器件移动时,可以由读数显微镜读出移动距离;CCD 器件由驱动电路(9)控制;CCD 输出的光电信号送入 NF 高速数据采集系统(10),经 A/D 变换、放大、滤波后,一路送入示波器(11)显示波形,另一路送入微机 HP 9816 (12)处理。

我们测量了 5 个样品: 2 个铝平面样品(样品 No. 1 和 No. 2); 一个铜平面样品(样品 No.

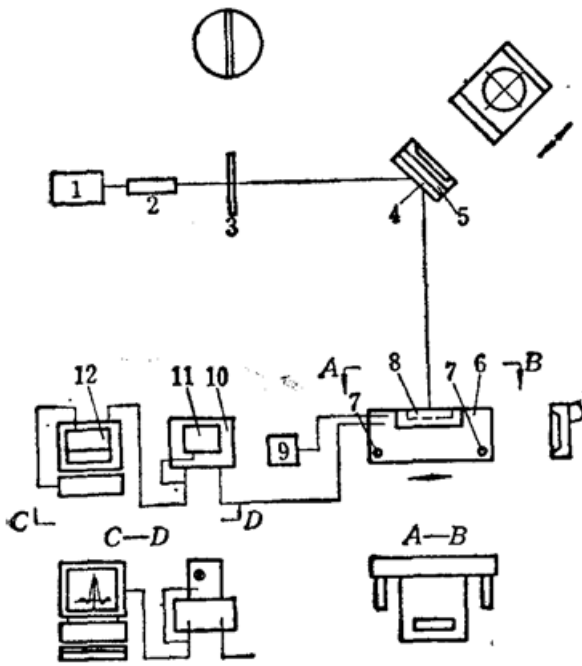


Fig. 3 Configuration of the measurement system

3), 半径为 100 mm; 一个铜球面样品(样品 No. 4); 以及一个铝锥面样品(样品 No. 5), 顶角为 85° 。其中除了非球面样品(No. 5)之外的四个样品, 都与激光数字干涉仪 ZYGO Mark III 的测量结果进行了比较。

部分测量结果表示在图 4 和图 5 中。为清楚起见, 我们将测得的表面误差函数以波长 ($\lambda = 632.8$ nm) 为单位的相对表面误差函数 E/E_0 表示, 其中 E_0 即波长。图中实线是由衍射谱方法测得的, 虚线是由 ZYGO Mark III 干涉仪测得的。由于我们的 ZYGO Mark III 干涉仪很难测量非球面, 在图 5 中只给出了样品 No. 5 的衍射谱方法测量曲线。从图 4, 图 5 的结果可见, 对于平面样品, 衍射谱方法与干涉方法测得的散差小于 $\lambda/10$, 对于球面样品, 二者的散差也大致在 $\lambda/8$ 左右。这表明衍射谱分析方法

可以有效地测量表面面形, 特别是可以方便地用于测量非球面, 如图 5 所示。

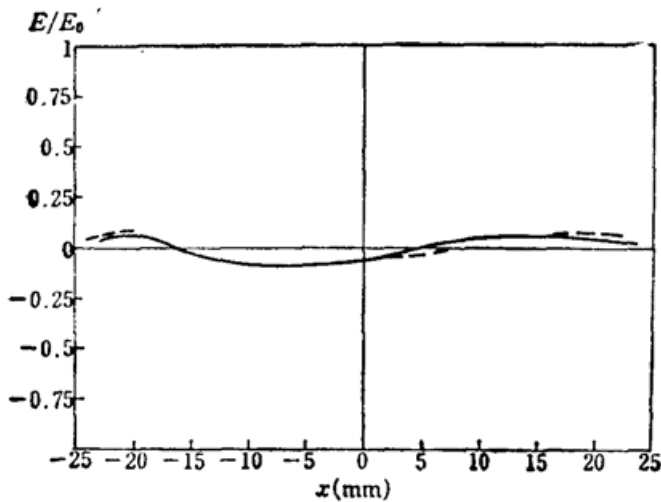


Fig. 4 The relative deviation function (E/E_0) vs. the surface position (x) for sample No. 3. Solid line: measured by the diffraction analysis method; dashed line: measured by the ZYGO Mark 3 interferometer

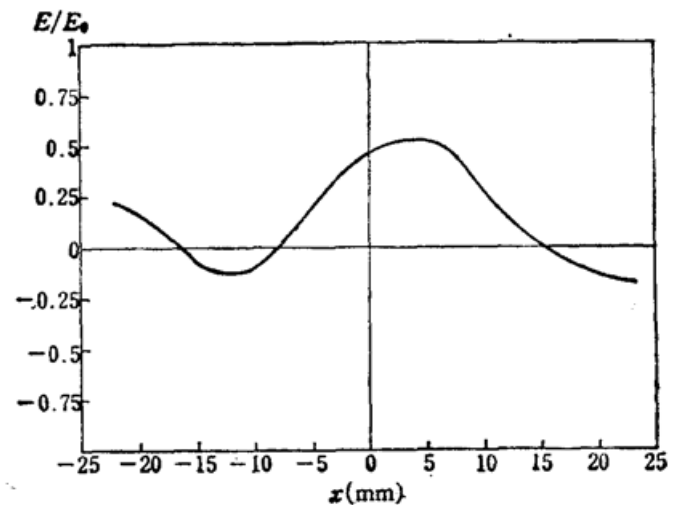


Fig. 5 The relative deviation function (E/E_0) vs. the surface position (x) for sample No. 5. Solid line: measured by the diffraction analysis method

从文献[2]的结果可见, 为了精确恢复至表面误差 $E(x)$, 狭缝宽度 b 必须满足

$$b \leq [1/(Mf_{\max})] \cdot (\pi/4) \quad (4.1)$$

其中 f_{\max} 是最大空间频率, 取为 $200(1/\text{mm})$ 已经足够了, M 在本文中也可不小于 $1/5$, 因此狭缝宽度有 $b \leq 20 \mu\text{m}$ 。在本文中取 $b = 20 \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- 1 王海明, 激光杂志, 8(2), 125 (1987)
- 2 王海明, 米航宇, 中国激光, 15(11), 683 (1988)
- 3 L. R. Rabiner, R. W. Schafer, D. Dlugos, "Correlation Method for Power Spectrum Estimation", in "Programs for Digital Signal Processing", Digital Signal Processing Committee, IEEE Acoustic, Speech, and Signal Processing Society ed., IEEE Press, New York, 1979



《中国激光》入选“中国自然科学核心期刊”

中国自然科学核心期刊研究课题组最近公布了使用“引文法”鉴定的 100 种“1990~1991 年中国自然科学核心期刊”,《中国激光》杂志入选,名列第 70 位。这一结果是对 1990、1991 年中国出版的 20 种代表性学术期刊发表的学术论文所引用的各种中文自然科学期刊被引用量进行客观统计后得到的,详尽的评述发表在中国科学院自然科学期刊编辑研究会主办的《中国科技期刊研究》1992 年第四期。目前我国每年出版 3000 多种科技期刊,核心期刊比例仅占 3.33%。

1990~1991 年中国自然科学核心期刊百名表

1 科学通报	35 南京大学学报(自然科学版)	69 动物学杂志
2 中国科学	36 中国稀土学报	70 中国激光
3 化学学报	37 地质论评	71 气象
4 物理学报	38 光学学报	72 生物物理学报
5 高等学校化学学报	39 催化学报	73 化学物理学报
6 植物学报	40 应用化学	74 结构化学
7 药学学报	41 数学年刊	75 冰川冻土
8 生物化学与生物物理学报	42 生物化学杂志	76 上海医科大学学报
9 植物生理学报	43 色谱	77 云南植物研究
10 分析化学	44 地球物理学报	78 中华血液学杂志
11 生理学报	45 化学试剂	79 兰州大学学报(自然科学版)
12 遗传学报	46 石油化工	80 自然杂志
13 化学通报	47 半导体学报	81 地理科学
14 地质科学	48 北京医科大学学报	82 中国地质科学院院报
15 气象学报	49 吉林大学自然科学学报	83 波谱学杂志
16 有机化学	50 古生物学报	84 分析实验室
17 动物学报	51 作物学报	85 力学学报
18 物理	52 遗传	86 分子科学与化学研究
19 地理学报	53 药物分析杂志	87 厦门大学学报(自然科学版)
20 数学学报	54 地球科学	88 海洋与湖沼
21 大气科学	55 武汉大学学报(自然科学版)	89 中国药科大学学报
22 物理化学学报	56 高原气象	90 动物学研究
23 中草药	57 生理科学进展	91 地理研究
24 植物生理学通讯	58 地震地质	92 中国区域地质
25 地质学报	59 中华内科杂志	93 中国药学杂志
26 中国药理学报	60 微生物学报	94 北京大学学报(自然科学版)
27 中华医学杂志	61 中国农业科学	95 中国科技大学学报
28 高分子学报	62 金属学报	96 应用数学学报
29 实验生物学报	63 中华肿瘤杂志	97 古脊椎动物与古人类
30 生物化学与生物物理进展	64 沉积学报	98 两栖爬行动物学报
31 地球化学	65 生物工程学报	99 军事医学科学院院刊
32 中国医学科学院学报	66 物理学进展	100 解剖学报
33 无机化学	67 中山大学学报(自然科学版)	
34 岩石学报	68 海洋学报	