

文章编号 : 0253-2239(2002)10-1224-05

衍射型长程大型非球面轮廓测量仪

李 直 赵 洋 李达成

(清华大学精密仪器与机械系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

肖体乔 夏绍建

(上海同步辐射装置工程指挥部, 上海 201800)

摘要: 分析了基于衍射准直技术的 $f-\theta$ 系统的特点, 在此基础上提出了一种新型长程面形仪用以实现对大型非球面光学表面, 特别是同步辐射中掠入射光学元件的高精度轮廓测量。成功地研制了样机, 目前新型长程面形仪样机的纵向扫描范围可达 370 mm, 分辨率优于 $0.25 \mu\text{rad}$, 单点稳定性小于 $0.7 \mu\text{rad}/200 \text{ s}$, 全程测量精度可达 $1.14 \mu\text{rad}$, 全扫描的重复精度为 $0.09 \mu\text{rad}$ 。样机测试结果表明, 新型长程面形仪轮廓测量方案能够胜任对第三代及后继同步辐射光源中各种非球面光学元件的轮廓测量任务。

关键词: 非球面; 大型光学元件; 轮廓测量; 长程面形仪

中图分类号: TH74 文献标识码: A

1 引 言

大型非球面光学表面的应用日益广泛, 尤以应用于同步辐射、高能激光系统的掠入射反射镜、单色器等为代表。这类光学元件一般均为横向较窄而轴向呈长条状, 其轴向长度可达数百至上千毫米。由于承受热负荷较大, 零件结构通常较为复杂以保证其有良好的散热能力和机械强度^[1, 2]。同时由于反射镜的表面形貌对束线性能有较大的影响, 因此其设计指标要求轮廓斜率误差在 $1 \mu\text{rad}$ 量级。这一轮廓公差指标不仅对制造业是一个难题, 而且对测量仪器也提出了更高的要求^[3]。

实现轮廓测量的策略基本上可以分为两类: 干涉测量法和顺序扫描法^[4]。干涉轮廓测量法原理上是二维的, 而且测速快, 但将其应用于非球面轮廓测量时, 需要高质量的入射波前和与待测表面相匹配的参考表面, 因此对大型非球面光学表面, 应用干涉法难以达到较高的分辨率和精度。顺序扫描轮廓测量法原理上是一维的, 测速较慢, 但由于其克服了干涉法的上述两个重要缺陷, 因而在大型非球面光学表面形貌测量问题中得到了广泛应用。

基于顺序扫描法实现轮廓测量的各种轮廓仪本质上是一个角度-位移变换系统(简记为 $f-\theta$ 透镜系

统)。当系统的基本结构参量确定, 且不考虑导轨运动误差、变换透镜的制造误差等系统误差时, 轮廓仪的分辨率和精度主要受限于对位于变换透镜后焦面上的光电探测器件所接收到的光斑图样位移的分辨率和精度。采用单准直激光束扫描被测表面无疑是扫描轮廓仪的基本结构^[5]。为进一步提高精度, Bieren^[6]将一两臂固定的迈克耳孙干涉仪引入其扫描轮廓仪中, 使得探测器上接收到的光斑图样为干涉条纹, 从而使得轮廓仪的分辨率大为提高。Takacs、钱石男、Irick 等^[7, 8]对这一工作进行了完善, 并将这种轮廓仪命名为长程面形仪(long trace profiler)。有别于前述长程面形仪, 本文将衍射准直技术引入基本 $f-\theta$ 透镜系统, 而提出了一种新型长程面形仪的方案。

2 基于衍射准直技术的 $f-\theta$ 透镜系统分析

考查如图 1 所示的 $f-\theta$ 透镜系统。准直光源出射的激光束, 入射至衍射光学元件[透过率函数为 $T(x, y)$]透射之衍射光束经过分光镜 BS 直接探测被测工件(object)。自工件表面反射回来的探测光束再经分光镜 BS 折转, 投射至傅里叶变换透镜(FT lens), 而后在傅里叶变换透镜后焦面上形成测量束斑。记衍射光学元件至傅里叶变换透镜间探测光束的光程为 d , 衍射光学元件至被测非球面的距

离为 L 。显然,当 L 远小于轮廓测点的曲率半径 ρ_T 时,被测非球面轮廓对衍射波前的扰动可以忽略不计^[6]。以下的分析即是在此基础上展开。

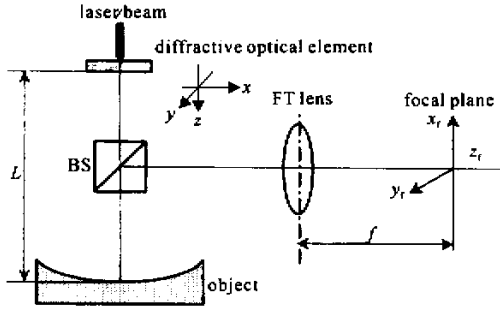


Fig. 1 A typical f - θ system combined with diffraction alignment technique

记准直系统的出射光束波前为 $u_0(x, y)$, 并设菲涅耳近似在 d 内成立,若曲面测点法矢 n_T 与探测光束平行,且忽略分光镜 BS 的孔径效应,则变换透镜前的光场分布^[9]为

$$U(x, y) = \frac{\exp(i kd)}{i \lambda d} \iint u_0(x_1, y_1) T(x_1, y_1) \times \exp\left\{i \frac{k}{2d} [(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1. \quad (1)$$

其中 k 代表波数。忽略透镜的孔径效应,可得傅里叶变换透镜后焦面上的光场分布 $U_f(x_f, y_f)$:

$$U_f(x_f, y_f) = \frac{\exp[i(k/2f)(x_f^2 + y_f^2)]}{i \lambda f} \mathcal{F}\{U(x, y)\}, \quad (2)$$

式中 f 为傅里叶变换透镜的焦距。

从而,傅里叶变换透镜后焦面上的强度分布为

$$I_f(x_f, y_f) = U_f(x_f, y_f) U_f^*(x_f, y_f). \quad (3)$$

记

$$g(x, y) = \iint u_0(x_1, y_1) T(x_1, y_1) \times \exp\left\{i \frac{k}{2d} [(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1,$$

弃去常数项相位因子,并记 $G(u, v) = \mathcal{F}\{g(x, y)\}$ 则(3)式可转换为

$$I_f(x_f, y_f) = \frac{1}{\lambda^2 d^2} \left| \mathcal{F}\{g(x, y)\} \right|^2 = \frac{1}{\lambda^2 d^2} \left| G\left(\frac{x_f}{\lambda f}, \frac{y_f}{\lambda f}\right) \right|^2. \quad (4)$$

由(4)式可见,若被测轮廓在扫描全程范围内有斜度变化,即使得探测光束有相移 $\exp[i2\pi(f_x x_1 + f_y y_1)]$,则位于傅里叶变换透镜后焦面上的光电探测器接收到的光斑图样发生线性位移:

$$I(x_f - s_x, y_f - s_y) = \frac{1}{\lambda^2 d^2} \left| G\left(\frac{x_f}{\lambda f} - f_x, \frac{y_f}{\lambda f} - f_y\right) \right|^2. \quad (5)$$

显然,若能精确获得傅里叶变换透镜后焦面上光斑的位移 s_x, s_y , 则

$$f_x = s_x / (\lambda f), \quad f_y = s_y / (\lambda f). \quad (6)$$

综合(4)式~(6)式可知,基于衍射准直原理的 f - θ 系统具有以下特点:

1) 当衍射光学元件相对于傅里叶变换透镜发生位移时,变换透镜后焦面上的光斑图样分布保持不变,但光强幅值将依平方关系增强或衰减。这一点在轮廓仪的设计及光电接收器件选型时值得注意。

2) 若衍射光学元件至被测非球面的距离 L 远小于轮廓测点的曲率半径 ρ_T 时,基于衍射准直原理的 f - θ 系统能够无原理性误差地给出被测轮廓的斜度信息。

3) 原则上衍射光学元件结构可以任意选取,以有利于提高系统分辨率及精度为目的。

3 新型长程面形仪原理

在前述分析的基础上,本文提出了一种基于衍射准直原理的新型长程面形仪,图2给出了该轮廓仪的光学系统原理图。半导体激光器发出的激光束,经单模光纤准直系统准直后,波前为

$$U(x, y) = A \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{R}\right),$$

其中 R 为光束的“ $1/e^2$ ”半径。准直激光束投射至一块相位板上,该相位板具有如下形式的相位分布:

$$T(x, y) = \begin{cases} 1, & 0 < x < \infty, -\infty < y < \infty \\ \exp(-i\pi), & -\infty < x < 0, -\infty < y < \infty \end{cases} \quad (7)$$

其后衍射光束由反射镜 RP_1 折转形成测量基准。此基准光束被分光镜 BS 分为两路,一路经五角棱镜折转 90° 投射至被测表面 SUT,探测测点相对于基准光束的斜度变化,反射回来的探测光束再经五角棱镜、分光镜 BS、反射镜 RP_2 投射至傅里叶变换透镜,从而在位于傅里叶变换透镜后焦面的 CCD 上形成测量光斑,计算扫描过程中测量光斑图样的相对位移 s_x ,即可求得被测非球面的轮廓;另一路经由参考直角棱镜(ref. RP)及反射镜 RP_2 直接入射至傅里叶变换透镜,然后在 CCD 上形成参考光斑用

以补偿扫描过程中由于激光器角漂、环境噪声等扰动所引入的测量误差。

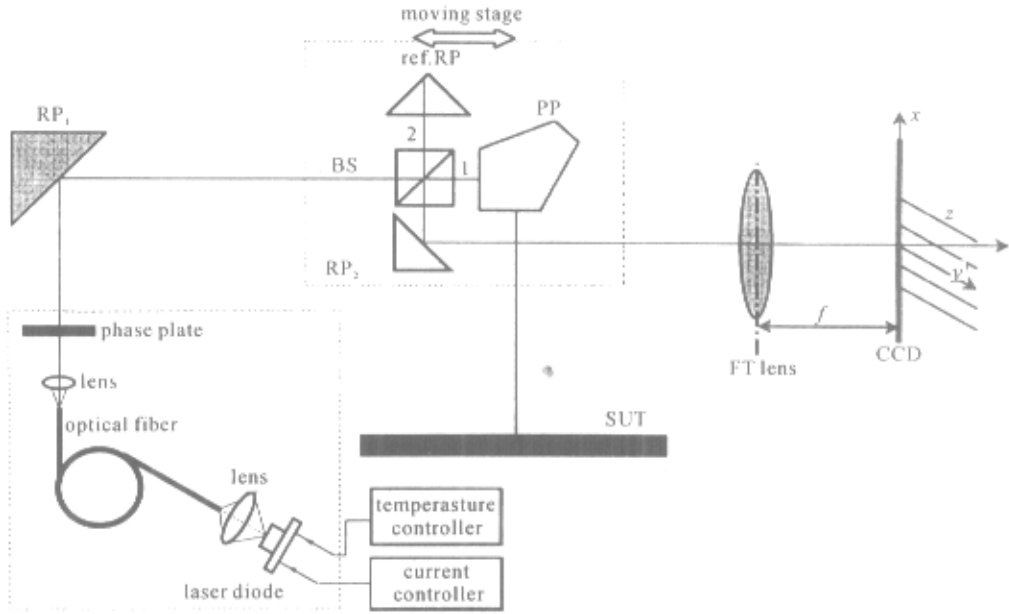


Fig.2 Schematic of the optical system of the novel LTP

扫描五角棱镜由导轨导向。五角棱镜对其俯仰运动误差不敏感,而且对同步辐射用光学元件,特别是掠入射反射镜,其轮廓的曲率半径通常在数千米以上,而新型长程面形仪的光学扫描头距被测轮廓通常在几百毫米以内,因此五角棱镜的滚动误差对测量精度的影响可以忽略。综上考虑,测量系统可选用普通型精密滚动导轨。

注意到图2中所示光路,对每一测点相位板至傅里叶变换透镜的距离不变,因而对任一理想平面反射镜,在扫描全长内参考光斑图样分布及强度均保持不变,从而使得测量系统避免了潜在的数据处理误差。

3.1 关于测量(参考)光斑图样的讨论

由于依(4)式难于给出测量(参考)光斑的强度分布的解析角,这里仅对其定性分析。将(7)式代入 $g(x, y)$ 可得

$$g(x, y) = AC(y) \int_0^{\infty} [f(x_1, x) - f(-x_1, x)] dx_1, \quad (8)$$

式中:

$$f(x_1, x) = \exp\left(-\frac{x_1^2}{\sigma^2}\right) \exp\left[i \frac{k}{2d}(x_1 - x)^2\right].$$

由于我们事实上并不关心 y 方向上行射的光强分布,因而这里不再给出 $AC(y)$ 的表达式。由(8)式可见函数 $g(x, y)$ 关于 x 为奇对称,即 $g(-x, y) = -g(x, y)$,于是由傅里叶变换的基本性质可知, $G(u, v)$ 亦关于 u 为奇对称,从而 $I(x_i, y_i)$ 为关于

x_i 偶对称,且

$$I(0, y_i) = 0. \quad (9)$$

3.2 测量数据综合

设在某次测量过程中,得到测量光斑的相对位移序列 $\{s_{xi}\}$ 及参考光斑的相对位移序列 $\{r_{xi}\}$,于是可得被测轮廓的斜度序列

$$S = \left\{ \frac{s_{xi} + r_{xi}}{f} \right\}. \quad (10)$$

式中 i 为测点序号。

4 新型长程面形仪样机测试结果及讨论

应用第3节所述原理,我们研制了新型长程面形仪样机,其基本结构参数为:傅里叶变换透镜焦距 $f = 400 \text{ mm}$,轮廓最大扫描长度 $l = 370 \text{ mm}$ 。CCD选用Pulnix TM-1040,其像元尺寸为 $9.0(H) \times 9.0(V) \mu\text{m}$,总像元数为 $1024(H) \times 1024(V)$ 。应用先进灰度图像处理方法,可得测量(参考)光斑图样主极小的分辨率 $\delta s_x < 0.1 \mu\text{m}$,从而仪器的斜度测量分辨率

$$\delta S = \delta s_x / f < 0.25 \mu\text{rad}.$$

由于新型长程面形仪完成一次全长扫描所需时间小于 200 s ,因此这里给出仪器在 200 s 内单点稳定性测试结果,如图3所示。由图可见,由于测量环境较差,长程面形仪单点稳定性为 $\sigma_s = 0.7 \mu\text{rad}/200 \text{ s}$ 。进一步改善测量环境,如引入隔振气浮平台、减小空气扰动等措施,则仪器的单点稳定精度有望得到提高。

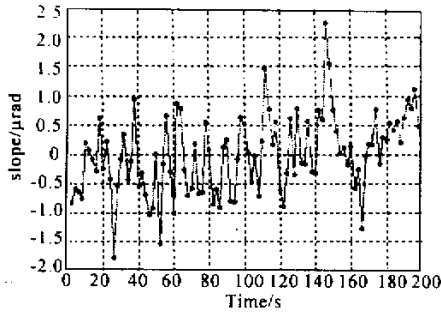


Fig. 3 Stability test on the novel LTP

我们使用中国计量科学研究院长度处提供的长平晶(编号:8806#)对长程面形仪样机进行了标定。图4给出了该长平晶的离散轮廓误差高度值。

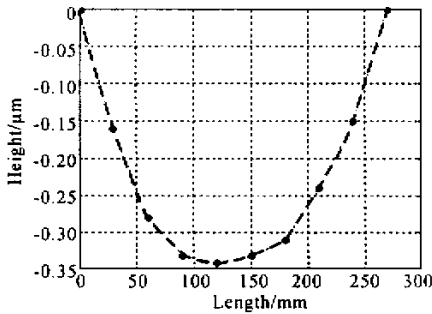


Fig. 4 Discrete profile of a standard flat

为方便比对,对图4作三次样条逼近后将其转换为轮廓斜度误差,如图5曲线A所示。图5曲线B给出了长程面形仪样机的实测结果。经中国计量

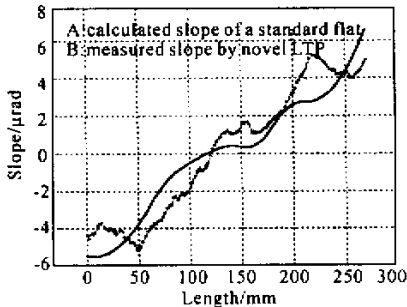


Fig. 5 Calibration of the novel LTP with a flat

科学研究院检定,样机的测量精度可达 $1.14 \mu\text{rad}$, 测量重复精度为 $0.09 \mu\text{rad}$ 。

结论 本文介绍了一种基于衍射准直技术的新型长程面形仪。该轮廓仪能够胜任大型非球面光学表面,特别是用于同步辐射、高能激光系统的掠入射光学元件的高精度轮廓测量。相对于干涉轮廓测量法而言,新型长程面形仪应用于非球面测量时继承了顺序扫描法的优点,即不需要与被测非球面相匹配的参考表面和高质量的入射参考波前;相对于目前基于顺序扫描原理的各种轮廓仪,新型长程面形仪的光学系统原理简洁,潜在误差源大为减少,有利于系统精度的进一步提高。目前新型长程面形仪样机的纵向扫描范围可达 370 mm ,分辨率优于 $0.25 \mu\text{rad}$,单点稳定性小于 $0.7 \mu\text{rad}/200 \text{ s}$,全程测量精度可达 $1.14 \mu\text{rad}$,全长扫描的重复精度为 $0.09 \mu\text{rad}$ 。

参 考 文 献

- [1] Hills. High heat load synchrotron optics. *Proc. SPIE*, 1992, **1739**: 456~463
- [2] Anthony. High heat load optics: On historical overview. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(2): 313~320
- [3] Sostero G, Cocco D, Qian S N. Metrological challenges of synchrotron radiation optics. *Proc. SPIE*, 1999, **3739**: 310~316
- [4] Weingartner I, Schulz M, Elster C. Novel scanning technique for ultraprecise measurement of topography. *Proc. SPIE*, 1999, **3782**: 306~317
- [5] Yu Jingchi, Xu Jinqiang, Zhang Xuejun *et al.*. Surface contour measurement using an optical scanner. *Proc. SPIE*, 1995, **2536**: 192~199
- [6] Von Bieren. Pencil beam interferometer for aspherical optical surfaces. *Proc. SPIE*, 1982, **343**: 101~108
- [7] Takacs P Z, Qian S N, Colbert J. Design of a long trace surface profiler. *Proc. SPIE*, 1987, **749**: 59~64
- [8] Steve Irick. Long trace profiler survey results. *Proc. SPIE*, 1999, **3782**: 275~282
- [9] Goodman J W. *Introduction of Fourier Optics*. San Francisco: McGraw-Hill, 1968. 61~62

A Diffractive Long Trace Profiler for Large Aspherical Optics

Li Zhi Zhao Yang Li Dacheng

(State Key Lab of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Xiao Tiqiao Xia Shaojian

(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai 201800)

(Received 14 February 2001; revised 17 June 2001)

Abstract : Characteristics of the $f-\theta$ lens system based on diffraction alignment technique are analyzed , thereafter a novel diffractive long trace profiler (DLTP) for large aspherical optics , especially for those optical component used in synchrotron radiation , is introduced. Details of the DLTP such as the principle of its optical subsystem , characteristics of the diffraction pattern , data processing methods are investigated. A prototype of the DLTP has been developed , its scanning range is 370 mm , and the slope resolution is better than $0.25 \mu\text{rad}$. Experimental results show that the prototype has excellent stability and precision even in rather poor circumstance without temperature controller and air condition , and the measurement stability is about $0.7 \mu\text{rad}/200 \text{ s}$, measurement precision within whole scanning range is $1.14 \mu\text{rad}$.

Key words : aspheric ; large optics ; profilometry ; long trace profiler

研制高新产品 弘扬太科激情 太科光电在蓉召开“激光干涉仪产品研讨会”

2002年8月20日,成都太科光电科技有限责任公司在成都召开了“太科光电激光干涉仪产品研讨会”。

本次会议受到了各级科技主管部门和光学界同仁的重视和支持。四川省科技厅科技处、成都高新区博士创业园、中科院光电技术研究所有关领导亲临会场指导。来自全国各地光学界的专家学者会聚一堂,认真地对太科激光干涉仪产品进行了全面深入地研讨。

在研讨会上,太科公司总经理王涛博士简要地介绍了公司的发展概况以及产品技术,展示了太科光电自主研制、生产的激光干涉仪产品系列,虚心地听取了与会领导和专家精辟的意见。会后,与会领导和专家还参观了太科公司和公司主要的生产车间。

太科公司是国内领先的专业化的激光干涉仪的研制、生产企业。公司具有雄厚的科技力量、丰富的科研经验和精湛的工艺生产水平。此次推出的激光干涉仪产品系列,是公司承集成都精密光学工程研究中心历经十年耕耘的国家级科研成果,并在其深厚的技术和生产工艺积累的基础上研发生产出的高新科技产品。在研讨会上,太科公司的激光干涉仪产品系列,受到与会领导和专家的一致好评,大家认为,太科公司的激光干涉仪技术性能优越,生产工艺精湛,人机界面友好,是光学加工制造领域先进的检测设备。

这次会议时间虽短,但成效显著。较好地展示了太科光电的形象,介绍了太科光电的产品,加强了与同行企业之间的信息交流。整个会议,都充满了激情,充满了友谊,充满了与时俱进、开拓创新的时代精神。

成都太科光电科技有限责任公司