

文章编号 1004-924X(2011)06-1207-06

# 大口径大曲率半径光学元件的高精度检测

杨李茗, 叶海仙\*

(成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

**摘要:**针对目前已有的光学检测设备无法实现大口径大曲率半径光学元件高精度检测的问题,提出利用长程轮廓仪(LTP)来进行大口径大曲率半径(正、负)光学元件的精确测量,并通过实验证明了LTP检测大曲率半径光学元件的优势。分析计算了LTP测量曲率半径的算法精度,设计了合理的机械结构进行旋转测量,得到了全口径的曲率半径分布。最后与球径仪、刀口仪的测量结果进行了对比。对 $R=37.108\text{ m}$ 和 $R=41.065\text{ m}$ 的球面镜测量结果显示,LTP的测量重复性在 $0.05\%$ 以内,与球径仪、刀口仪的测量值相差均在 $0.05\%$ 以内。研究结果表明,LTP可以用来解决目前几十米的大 $R$ 曲率半径光学元件难以高精度测量的难题。

**关键词:**长程轮廓仪;曲率半径测量;算法精度;旋转测量

**中图分类号:**TH74 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111906.1207

## High-precision metrology for optical components with large-apertures and large radii of curvature

YANG Li-ming, YE Hai-xian\*

(Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041, China)

\* Corresponding author, E-mail: yhaixian@163.com

**Abstract:** For lack of proper metrologic instruments to measure optical components with large-apertures and large radii of curvature, this paper investigates the feasibility to measure large radius of curvature (positive, negative) by using a Long Trace Profiler(LTP). The experiments are carried out to verify its advantages. The algorithmic precision of radius of curvature tested with the LTP is calculated, then the radius of curvature of full-aperture is figured out by a rotational measurement in a proper mechanical stage. Finally, obtained tested results are compared with those of a spherometer and a knife-edge tester. For the spherical surface with  $R=37.108\text{ m}$  and  $R=41.065\text{ m}$ , the repeatability of the LTP is in  $0.05\%$ , which means the relative discrepancy between the LTP and the spherometer or the knife-edge tester is under  $0.05\%$ . These results indicate that LTP is capable of measuring components with large radii of curvature in high-precision.

**Key words:** Long Trace Profiler(LTP); measurement of radius of curvature; algorithmic precision; rotational measurement

## 1 引言

大型光学观察系统和巨型激光装置都会使用大量的大口径长焦距球面或非球面透镜,特别是阵列式的巨型激光驱动装置对透镜焦距的一致性有很高的要求,精确测量这些长焦距透镜的各项参数是保证激光系统性能的前提。焦距可以通过透镜表面的曲率半径计算得到,所以,研制一种直接进行光学元件曲率半径检测的专用设备既能确保长焦距透镜的精度,又能提高制造过程的效率。

目前,光学加工车间测量大曲率半径光学元件主要是用刀口仪、球径仪、激光球面干涉仪或借用球面样板来复制相应的精度。这些方法可以对一定范围的曲率半径进行测量,有些方法虽具有较高精度,但有很多局限性<sup>[1]</sup>。比如大口径球面干涉仪检测精度高,可同时检测局部误差,但是需配备多级标准球面以及与半径等长的移动导轨,制造难度大、成本高;刀口仪相对精度高,非接触测量,但是测量精度与检测人员的操作经验密切相关,只能测凹面,测量环境需要比半径长;球径仪测量小曲率半径光学元件精度高,但测大曲率半径光学元件时精度降低,而且接触式测量会划伤表面。样板法属于定性测量,人眼观察,从同一块样板复制精度,精度低;接触式测量易划伤表面,只适用于加工前几道工序检测。所以对于曲率半径为几十米的大口径光学元件,需要寻找一种全新的检测设备,要求其不但测量范围大,而且能测凹凸球面,非接触测量,容易实现高精度、快速测量,适合光学加工过程中使用。

长程轮廓仪(LTP)最初是为了适应同步辐射光源迅速发展的需要而发展起来的,主要由美国布鲁克海文国家实验室研制开发而成。LTP从笔束干涉仪演变而来,经历十几年的改进发展,逐渐趋于成熟,已经是同步辐射光源领域通用的检测设备<sup>[2-3]</sup>。LTP的扫描式绝对检测不需要与被测件口径相当的参考镜<sup>[4]</sup>,也不需要高质量的大口径入射波前,降低了检测成本和难度;每次扫描最大行程可以达到 1 m,克服了普通检测设备测量大口径光学元件的主要困难<sup>[5]</sup>;利用两细光束干涉光斑定位,定位精度高,参考光束可消除部分系统误差,提高了检测精度<sup>[6]</sup>。根据长程轮廓仪的检测优势,本文提出了利用其进行大口径大曲

率半径光学元件检测的可行性,进行了相应的实验验证,并给出了验证结果。

## 2 LTP 的检测原理

LTP 发展至今,已经升级到第二代,增加了参考光路来抵消部分系统误差。其原理如图 1 所示:

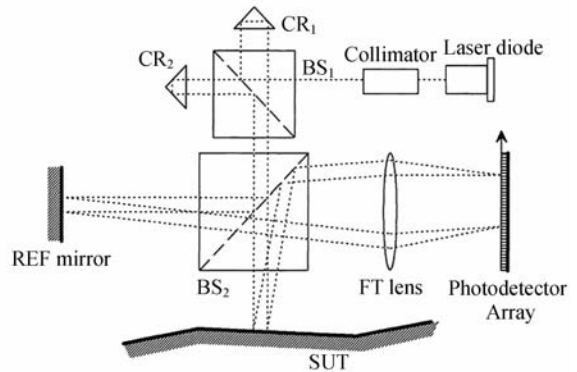


图 1 LTP II 原理图和实物图

Fig. 1 Principle and physical figures of LTP II

激光器发出的激光从准直器出来,被分束器  $BS_1$  分成两束光,分别入射到直角棱镜  $CR_1$  和  $CR_2$  上,反射后成为两束相距 1 mm 左右的笔束平行光;经过第二个分束器  $BS_2$  透射,垂直入射到被测光学元件表面上。反射后再次经过  $BS_2$ ,入射到傅里叶透镜上,在透镜后焦面上相遇生成干涉条纹。条纹信息经过空间滤波器(一个光阑)和显微物镜被探测器接收。计算机分析探测器上条纹的中心位置,计算出被测点斜率信息。光学头在气浮导轨上移动完成一维扫描测量。被  $BS_2$  反射的光束入射到参考镜上,反射后透过  $BS_2$ ,与测量光束经过同一个透镜到达探测器上,作为参考光束消除部分系统误差。该光学系统的最大特

点就是零程差分束器,零程差可以降低设备对空气扰动的敏感性。LTP 测量的是扫描线上各点的斜率数据,沿着扫描轴对斜率积分就可以得到高度函数  $H^{[7]}$ 。对  $H$  数据,使用最小二乘法可拟合出曲率半径  $R$ 。

### 3 实验设计及测量过程

将 LTP 应用于大口径大曲率半径光学元件的精确检测,首先要解决测试方式、工装、以及各种测试姿态下的测试精度和可重复性的问题。针对目前 LTP 只能完成一维扫描测量,本文选择使用旋转台,每旋转一个角度扫描一次,旋转  $360^\circ$  后完成全口径测量。测量不同倾斜状态下的曲率半径,观察 LTP 测量的非线性区域以及测量曲率半径的下限。

#### 3.1 旋转测量全口径的曲率半径 $R$ 及倾斜测量

实验元件为  $\Phi = 150 \text{ mm}$ , 曲率半径  $R = 37.108 \text{ m}$ ,  $R = 41.065 \text{ m}$  的球面镜。这是由于大口径光学元件运输不便,在实际使用中,LTP 经常用来测试 1 米多的元件,如果小口径球面镜可以在 LTP 上得到高精度的测试结果,那么只要配备相应的机械平台就可以完成大口径球面镜的测试。由理论计算,  $D/R = 0.032$ , 当  $D = 600 \text{ mm}$  时,  $R_{\min} = 18.75 \text{ m}$ , 所以测量几十米的大曲率半径是没有问题的。

实验设备为合肥同步辐射国家实验室的 LTP II。首先,背面贴白纸进行光轴对准。调节二维倾斜台,尽量让干涉图靠近探测器中心。旋转并观察干涉图的变化,调节倾斜台,直到旋转一周的过程中干涉图移动最小,即完成了对中心。扫描轨迹及测量示意图如图 2 所示:

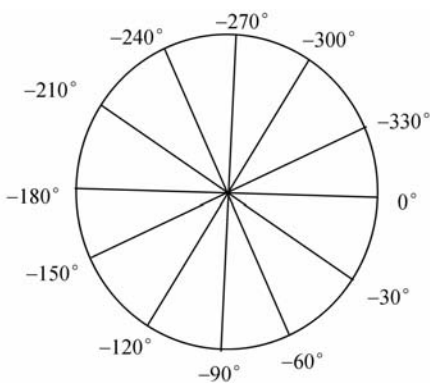


图 2 扫描轨迹及测试装置

Fig. 2 Scanning trail and measuring facility

软硬件设置完毕后,从  $0^\circ$  开始,每旋转  $30^\circ$  扫描一次;每次扫描  $146 \text{ mm}$ ,记录每条扫描线的曲率半径值  $R$ 。

每个角度扫描线的测量值及全口径平均值如表 1 所示:

表 1 不同位置下的  $R$  值

Tab. 1  $R$  results at different positions

位置/ $^\circ$	$R/\text{m}$	
	37.108 m	41.065 m
0	37.110	41.058
-30	37.067	41.029
-60	37.095	41.060
-90	37.109	41.064
-120	37.108	41.060
-150	37.104	41.045
-180	37.108	41.052
-210	37.085	41.051
-240	37.098	41.063
-270	37.100	41.076
-300	37.103	41.048
-330	37.094	41.047
平均值	37.098	41.054
标准偏差	0.012	0.012

左右倾斜  $1 \text{ cm}$ , 做相同的旋转扫描测量。逐次增加倾斜量,直到干涉图在探测器上偏离明显增大。表 2 给出旋转台位于  $60^\circ$  时,不同倾斜状态下的曲率半径变化。从图 3 看到,随着倾斜量的增大,曲率半径值有增大趋势,也就是干涉图越靠近探测器边缘,非线性表现越明显。

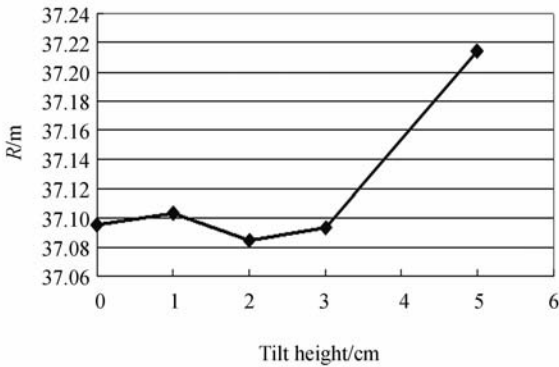
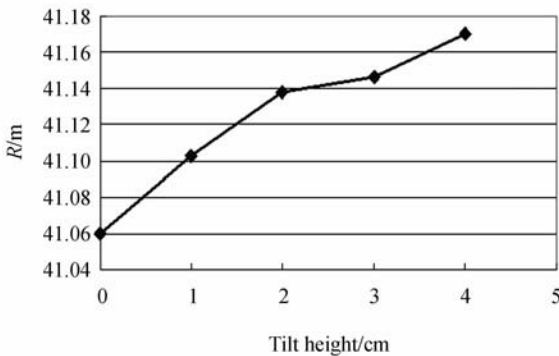
表 2 不同倾斜下的  $R$  值Tab. 2  $R$  results at different tilts

倾斜高度/cm	37.108 m 测得的 $R$ /m	41.065 m 测得的 $R$ /m
0	37.095	41.060
1	37.103	41.103
2	37.085	41.138
3	37.093	41.146
5	37.214	41.170

表 3 对比测量结果

Tab. 3 Comparison of measuring results

$R$ /m	检测设备	测得值/m	与 LTP 相对差值
37.108	刀口仪	37.108	0.03%
	球径仪	37.099	0.003%
	LTP II	37.098	
41.065	刀口仪	41.065	0.03%
	球径仪	41.030	0.06%
	LTP II	41.054	

(a)  $R=37.108$  m 时的趋势线(a) Trendline of  $R=37.108$  m(b)  $R=41.065$  m 时的趋势线(b) Trendline of  $R=41.065$  m图 3  $R$  随倾斜高度变化趋势图Fig. 3  $R$ -tilt trendlines

### 3.2 对比测量结果

使用球径仪进行对比测量<sup>[8]</sup>, 选择了  $D=120$  mm 的测环。手动旋转约  $45^\circ$  测量一次, 测量 8 组数据, 取平均值。标注值是刀口仪测量值, 与 LTP 对比结果如表 3 所示:

### 3.3 重复性测量实验

任取一条中心线, 每次都沿相同方向扫描, 重复扫描 11 次, 比较曲率半径不同的两块球面镜在 LTP 上测试重复性的异同。全口径测量及重复性结果如表 4 所示, 加工车间要求的曲率半径精度一致性为 0.25%, 而 LTP 测试结果的一致性比所要求的精度高一个数量级, 说明可以用于光学加工车间的检测。

表 4 全口径平均值及重复性测量结果

Tab. 4 Average results of full aperture and repeatability results

$R$ /m	全口径平均值/m	相对标准不确定度	重复性平均值/m	相对标准不确定度
37.108	37.098	0.032%	37.095	0.038%
41.065	41.054	0.029%	41.115	0.022%

## 4 LTP 测量大曲率半径的精度分析

LTP 直接得到的是扫描线上的斜率数据  $S$ 。对  $S$  数据进行基于最小二乘法的线性拟合, 若是理想球面, 拟合结果是一条直线; 然后对该拟合函数积分, 得到高度函数  $h$ 。再次运用最小二乘拟合算法, 对各个扫描点对应的高度值进行拟合, 计算出  $R$ 。LTP 已经是很成熟的检测设备, 很多文献都有各类机械误差的计算方法及结果, 本文不再赘述, 下面只对曲率半径的拟合过程进行精度分析。

首先用线性函数  $y=ax+b$  拟合离散数据  $S(x_i, y_i)$ , 根据最小二乘法<sup>[9]</sup>, 有  $\epsilon_1^2 = \sum_{i=0}^n (ax_i + b - y_i)^2$ ,  $\frac{\partial \epsilon_1^2}{\partial a} = 0$ ,  $\frac{\partial \epsilon_1^2}{\partial b} = 0$ 。拟合精度的评估有很多种方法, 这里用  $\epsilon_1^2$  来评估拟合精度, 即 matlab 中的 normr 值。当  $R=37.108$  m,  $0^\circ$  位置,  $\text{normr} = 4.2388 \times 10^{-5}$  (rad<sup>2</sup>), 拟合误差足够小。

然后对  $S$  函数积分,得到高度函数  $h = \frac{a}{2}x^2 + bx$ 。根据误差合成原理,可以根据  $x$  的测量误差计算出  $h$  的间接测量误差<sup>[10]</sup>:

$$(\delta h)^2 = (ax)^2(\delta x)^2 + b^2(\delta x)^2,$$

代入  $\delta x = 1 \mu\text{m}$ ,  $a, b, x$  值,(由于线性拟合精度足够高,在此不计  $a, b$  的误差,单独考虑  $x$  误差对  $h$  的影响。)有  $\delta h = 1.97 \text{ nm}$ ,由此给  $R$  引入的相对误差为  $0.016\%$ ,完全满足加工精度要求。

最后用最小二乘法将高度数据拟合成圆,计算  $R$ ,同时算出拟合精度:

$$\epsilon_2^2 = \sum_{i=1}^n (x_i^2 + h_i^2 + cx_i + dh_i + e)^2.$$

在该位置有  $\epsilon_2^2 = 1.3414e-16(\text{m}^2)$ ,接近于 0,该拟合圆的算法也满足精度要求。

## 5 结 论

通过在 LTP II 上添加带倾斜、旋转等功能的机械调节台,测量了  $R=37.108 \text{ m}$  和  $R=41.065 \text{ m}$

两块球面镜的全口径曲率半径,相对精度均在  $0.05\%$  以内,比加工要求高一个数量级。进行了重复性测量,重复性精度也在  $0.05\%$  以内,满足加工车间检测要求。测量了不同倾斜状态下的曲率半径,可以明显观察到非线性对测量结果的影响。

与球径仪、干涉仪等设备进行了比对测量。结果显示两块球面镜的相对差值都在  $0.06\%$  以内。这些研究结果表明 LTP 测量大曲率半径光学元件的扩展应用是可行的,可以解决目前几十米的大  $R$  曲率半径难以高精度测量的难题。尤其是 LTP 测量  $R$  越大的元件精度越高,凹凸元件均可测,这些特性都是其他检测设备所不具备的。从一维扫描结果可以看出,若要获得二维面形,还需要进一步设计扫描轨迹和拟合算法。

本文没有深入讨论 LTP 测量球面镜的下限,只给出了口径与  $R$  的一个比值。不同口径的元件测量范围不同,但是对于光学加工车间的大  $R$  光学元件,LTP 的测量范围已经足够。

## 参考文献:

[1] 杨甬英,陈坚.一种新型的大曲率半径实时检测系统[J].光电工程,2001,28(3):29-33.  
YANG Y Y, CHEN J. A novel real-time testing system used for large curvature radius[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, 28(3): 29-33. (in Chinese)

[2] 钱石南.大口径平面和非球面光学表面的纳米和纳弧度精度的测量——长行程外形仪的原理应用和发展[J].激光与光电子学进展,2008,45(5):16-25.  
QIAN SH N. Nanometer and nanoradian accuracy measurement of large scale plane and asphere——principle, applications and development of Long Trace Profiler[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(5): 16-25. (in Chinese)

[3] XIAO T Q, XIA SH J. A new long trace profiler for aspheric optical surface metrology[J]. *SPIE*, 2002, 4927: 208-213.

[4] IRICK S C, MCKINNEY W R. Advancements in one-dimensional profiling with a long trace profiler[J]. *International Symposium on Optical Fabrica-*

*tion, Testing and Surface Evaluation*, 1992, 1720: 162-168.

[5] TAKACS P Z, FURENLID K, et al.. Advances in precision mirror figure metrology[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(1, pt. 11B): 1409.

[6] QIAN S N, LI H Z, et al.. Penta-Prism Long Trace Profiler (PPLTP) for measurement of grazing incidence space optics[J]. *Multilayer and Grazing Incidence X-Ray/Euv Optics Iii*, 1996, 2805: 108-114.

[7] 崔天刚,王永刚,马冬梅,等. Wolter I型反射镜面形在线检测装置设计[J].光学精密工程,2010,18(8):1801-1806.  
CUI T G, WANG T G, MA D M, et al.. Design of online measuring device for surface profile of Wolter Type I mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1801-1806. (in Chinese)

[8] 杨君,张涛,宋靖雁,等.星点质心亚像元定位的高精度误差补偿法[J].光学精密工程,2010,18(4): 1002-1010.  
YANG J, ZHANG T, SONG J Y, et al.. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location[J]. *Opt. Precision*

Eng., 2010, 18(4):1002-1010. (in Chinese)

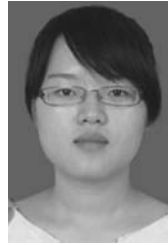
- [9] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 第 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2009.  
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing* [M]. 5th ed.. Beijing: Mechanics Industry press, 2009. (in Chinese)

- [10] 林旭东, 陈涛, 明名, 等. 球面拼接的相对曲率半径测量[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1):75-82.  
LIN X D, CHEN T, MING M, *et al.*. Measurement of relative curvature radius for spherical segmented mirrors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):75-82. (in Chinese)

#### 作者简介:



杨李茗(1967—), 男, 浙江杭州人, 研究员, 博士生导师, 成都精密光学工程研究中心主任, 2000 年于浙江大学获得博士学位, 主要从事光学制造技术及光学精密检测技术的研究。E-mail: lmyang@vip.sina.com



叶海仙(1985—), 女, 浙江金华人, 硕士研究生, 2004 年于南京理工大学获得学士学位, 主要从中光学精密检测技术的研究。E-mail: yhaixian@163.com

#### ● 下期预告

## 碘等离子体受激辐射产生的可行性研究

鲁建业, 申英杰, 崔 铮

(哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150080)

为了实际应用中对小型化、无污染及高功率碘激光的需求, 提出了碘原子受激辐射放大的等离子体产生途径的设想。首先, 通过对泵浦光功率密度与离化电子数密度、自由电子温度等的理论计算, 确定了本实验条件下的最优实验参数范围。然后, 在理论计算的参数范围内, 用 Nd:YAG 激光器的二倍频 532 nm 激光泵浦固体碘产生等离子体, 并采集其荧光发射谱。最后, 通过对碘等离子体光谱扫描结果的拟合得到发射谱的中心波长位于 1 313 nm, 谱宽 1.182 nm。研究结果显示, 通过激发等离子体的途径实现碘原子受激辐射产生的构想是可行的。