

# 基于激光扫描法的非接触式光学元件 曲率半径测量系统

覃瑛 许骏

中国科学院云南天文台云南省应用天文技术工程实验室, 云南 昆明 650011

**摘要** 介绍了基于激光扫描法的非接触式光学元件曲率半径检测系统,该系统大大提高了光学元件粗磨后曲率半径检测的自动化程度,实现了软硬件结合的一键式面形数据获取。该系统利用  $x/y$  轴二维平移台的运动实现网格扫描,同时基于激光扫描法测量面形弧高,并附加有  $z$  轴升降台扩展弧高量程。设计了上位机控制程序和人机交互界面,使系统在后期使用中更为灵活便捷。编写了曲面拟合算法,最终实现光学元件面形数据的自动采集、拟合以及相关光学参数的计算,可完成对多种光学元件面形的非接触式检测。实验结果表明,无论待测光学元件的表面落差是否超出激光头测量范围,系统均能完整采集所需面形数据,经过误差处理后,测量精度优于  $\pm 0.15\%$ ,满足粗磨检测要求。

**关键词** 测量; 面形检测; 激光扫描法; 光学元件; 自动化; 曲面拟合

**中图分类号** TP29      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.091203

## Non-Contact Optical Component Curvature Radius Detection System Based on Laser Scanning

Qin Ying Xu Jun

*Yunnan Astronomical Technology Engineering Laboratory, Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences,  
Kunming, Yunnan 650011, China*

**Abstract** In this paper, a non-contact optical component curvature radius detection system based on laser scanning method is introduced. With this method, the automation degree of the curvature radius detection after rough grinding of the optical elements is greatly improved, and the software-hardware combined one-click surface shape data are obtained as well. This system uses  $x/y$ -axis two-dimensional translation stage motion for grid scanning. Meanwhile, it measures surface shape camber based on laser scanning method and adds  $z$  axis lifting platform to increase the camber measurement range. Computer control program and the human-computer interaction interface are designed to make the system more flexible and convenient at later stage. The surface fitting algorithm is written, and the automatic acquisition and fitting of the optical surface shape data as well as the calculation of the relevant optical parameters are realized ultimately, then the detection of a variety of non-contact optical component surface shapes can be completed. Experiment results show that the system can get the required surface shape data whether the surface gap of optical components under test is beyond the measuring range of the laser head or not. After error processing, the measurement accuracy meets the testing requirements of rough grinding and is better than  $\pm 0.15\%$ .

**Key words** measurement; surface shape detection; laser scanning; optical components; automation; surface fitting

**OCIS codes** 120.4630; 120.5800; 120.6650

## 1 引言

常用的光学面形检测方法分为接触式检测和非接触式检测两大类。接触式检测中最常见的检测方法是

收稿日期: 2016-04-11; 收到修改稿日期: 2016-06-03; 网络出版日期: 2016-08-20

作者简介: 覃瑛(1990—),女,硕士研究生,主要从事天文仪器与方法方面的研究。E-mail: qinying@ynao.ac.cn

导师简介: 许骏(1968—),男,硕士,研究员,主要从事 CCD、硬件设计等方面的研究。E-mail: xj@ynao.ac.cn

三坐标测量法,在此方法的基础上发展起来的轮廓仪,其基本原理与三坐标测量机类似,可以认为是针对光学元件测量专门开发的一类三坐标测量设备。例如,英国 Form Talysurf PGI 1240 非球面表面轮廓仪<sup>[1]</sup>。

非接触式检测方法可以分为几何光线法和干涉法<sup>[2]</sup>。其中,几何光线法主要作为光学元件研磨后期及粗抛光阶段的面形检测方法,包括哈特曼波前传感器法、刀口阴影法、朗奇光栅法和激光扫描法等。干涉法检测则可以分为零位检测和非零位检测两类,是目前精密抛光后高精度面形检测的主要方法<sup>[3-4]</sup>。干涉仪虽然也可以用作镜面粗检,但是每种镜头只能检测一种对应半径的光学元件,因此需要厂家针对不同半径的零件生产相应的镜头才能满足需求,同时在生产线上进行批量检测时更换镜头并不方便,所以需要大量的主机,因而成本较高且可实施性较低。

在光学元件生产线上使用的方法还有对样板检测法,此方法需要研磨出一个标准的对样板,并与被测元件重叠放置,通过移动被测元件观察牛顿环个数是否满足要求进行检测。该方法增加了误差传递的同时也会磨损元件表面。

目前,大部分民营企业由于资金有限,通常使用接触式球径仪对光学元件进行粗磨检测。由于设备的局限性,该方法在实际生产中只能检测出几个定点的弧高,然后根据公式计算出球面镜的曲率半径,对非球面不具有检测功能,而且因为是接触式测量,可能会损坏被测元件的表面,对光洁度造成了实际制约,不适合检测晶体等材质表面较软的镜片。而通常用来检测面形的非接触式球径仪市场价格又十分昂贵,在镜面粗磨阶段性价比比较低。因此,研制出一套相对低成本、扩展性强、灵活度高的自动化面形检测系统从而实现球径仪的功能,完成对光学镜面的粗磨检测是十分必要的。

本文提出了一种基于激光扫描法的非接触式光学元件曲率半径检测系统,感测头基于共焦显微镜原理<sup>[5]</sup>,工作时先通过控制平台运动来移动待测光学元件,再利用激光束对光学元件进行网格式逐点扫描(这一点与一般意义上通过移动激光头进行扫描不同),探测器接收由被测面反射的光线,根据光斑的不同位置拟合各点坐标数据得到表面面形。硬件上采用 KEYENCE LT-9031 高精度激光测量仪、丹纳赫二维移动平台和 ULTI-MAC-G 型控制器以及卓立汉光 KSAV 2030-ZF 高精密切控垂直升降台搭建实验系统,结合对软件的二次开发,实现光学元件面形数据的自动采集、拟合,绘制出直观的曲面三维图,并计算出相关光学参数。

## 2 系统总体结构设计

系统整体结构如图 1 所示,主要由激光扫描控制器、激光感测头、监视器、平移台控制器、二维平移台、升降台控制器、垂直升降台、调度控制器和 PC 上位机组成。按照功能划分,可以分为激光测量仪系统、平台运动控制系统、PC 上位机和调度控制器 4 部分。

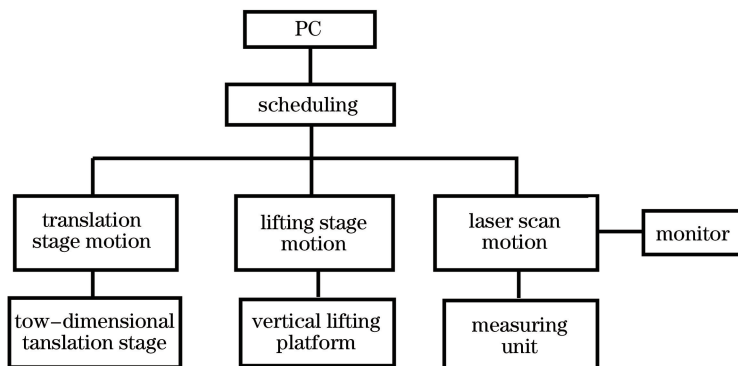


图 1 系统结构图

Fig. 1 System configuration diagram

### 2.1 激光测量仪系统及平台运动控制系统

传统的激光扫描法在采集被测点坐标时一般都采用间接测量,即先测出相关值,再根据公式推导计算出该点坐标,过程较为繁琐。引入激光扫描共焦显微镜(LSCM)原理,在直接获得被测点相对坐标的同时,还能得到对象面清晰的图像,辅助发现镜面问题。

检测系统的测量部件为基恩士公司生产的 LT-9031 高精度激光测量仪<sup>[6]</sup>。该测量仪发出的激光束波长为 655 nm, 功率为 170  $\mu\text{W}$ , 可以根据反射光强的大小设定不同的接收强度值, 且灵敏度较高, 因此在检测粗磨镜面时可以探测到强度很低的反射光。测量仪的分辨率为 0.3  $\mu\text{m}$ , 基准距离为 30 mm, 测量范围上下限为  $\pm 1$  mm, 采集数据时, 可自行判断被测点是否在量程范围内<sup>[7]</sup>, 若被测点超出测量上下限, 激光测量系统将通过串口进行相应反馈, 据此, 可以移动 Z 轴升降台使待测点回到量程内。

由于激光头动态范围有限, 因而增加了垂直升降台来扩大最大弧高的测量范围。平台运动控制系统由二维平移台和垂直升降台两部分构成, 通过二者组合运动可使待测光学元件在三维坐标上移动, 从而完成全镜面扫描。运动范围为 150 mm(X 轴)  $\times$  150 mm(Y 轴)  $\times$  30 mm(Z 轴), 这三个值决定了系统能测量的最大镜面直径和弧高, 可以满足部分应用的需求。各轴的运动系统均使用步进电机<sup>[8]</sup>, 在经过调整、测试后不存在丢步的情况下, 无需使用编码器。

## 2.2 调度控制器

系统码率较低, 激光测量仪系统、平台运动控制系统与上位机之间的通信均可通过 RS 232 串口进行, 并作了一体化集成。考虑到计算机一般都只有一个串口, 无法同时控制三台设备, 设计并制作调度控制器完成一对三的指令分配和调度。调度控制器程序流程图如图 2 所示。

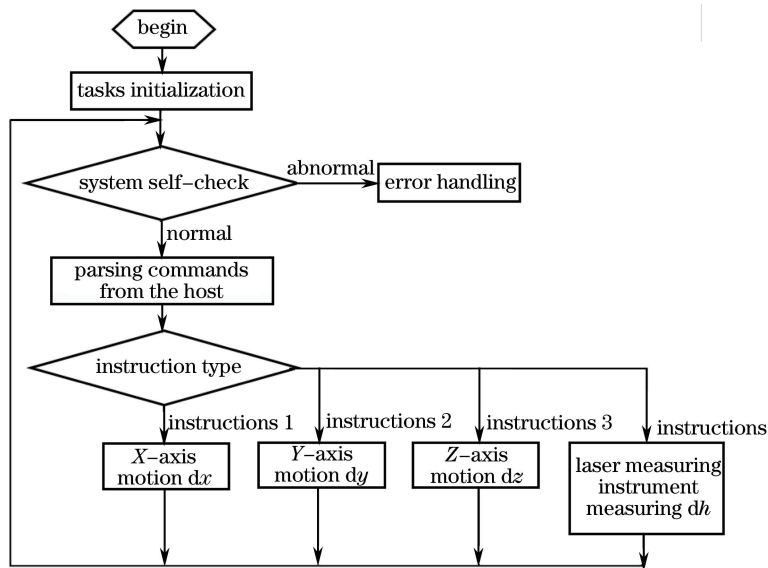


图 2 调度控制器程序流程图

Fig. 2 Flow chart of the scheduling controller program

调度控制器采用的核心控制芯片为 STM32F107 系列。该芯片内核为 ARM32 位 Cortex-M3 CPU, 最高工作频率可达 72 MHz, 片上集成 256 kB 的 Flash 存储器和 64 kB 的 SRAM 存储器, 具有休眠、停止、待机三种低功耗模式, 其内部自带 4 个串口(分别与 PC 上位机、激光测量仪、平移台控制器、升降台控制器进行通信), 2 个 USB 接口(可通过 USB 接口输出信号), 满足系统要求。

## 2.3 PC 上位机

上位机控制程序采用 Visual Studio 2015 软件编写, 基于 C#.NET 框架进行开发<sup>[9]</sup>。上位机系统分为通信、参数设置、实时采样、计算结果 4 个模块, 并遵循用户为本的设计原则开发了人机交互界面<sup>[10]</sup>, 如图 3 所示。上位机根据用户要求向各控制器发送控制指令, 将采集到的数据依照自定义的“.dat”格式作为原始数据存储到计算机中, 并通过数据处理模块完成处理和曲面拟合, 最终给出三维曲面面形图。

## 3 自动测量方案

实验系统采用的激光测量仪测量范围为距基准点  $\pm 1$  mm 以内, 对于表面弧高超过 2 mm 的光学元件, 需要通过控制升降台运动, 调整被测点至激光测量仪测量范围以内, 进行数据采集。自动测量的具体步骤如下:

1) 固定好激光感测头、二维平移台、垂直升降台, 调节被测镜面与感测头之间的基准距离(大约

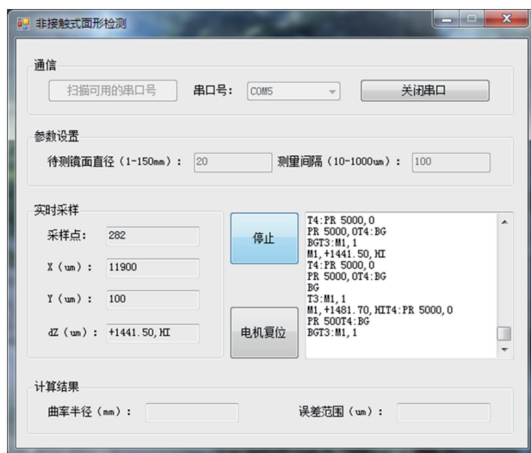


图3 非接触式曲率半径测量系统软件控制界面

Fig. 3 Software control interface of the non-contact curvature radius detection system

30 mm), 确定基准坐标;

2) 在检测系统的人机交互界面打开可用的串口号, 输入待测镜面的大概直径和测量点之间的间隔数值 (以此确定采集点个数);

3) 按下“开始”键对光学元件表面进行网格扫描。首先, 程序控制激光测量仪自动检测被测点与基准点之间的距离  $dh$ , 若反馈指令为 HI, 则控制平台在  $Z$  轴方向下降  $|dz|$  (该运动为闭环控制, 由于激光测量仪测量范围为 2 mm, 为了有效扩展其测量范围, 由激光测量仪确保  $dz$  的值为 1.8 mm 的整数倍), 若反馈指令为 LO, 则控制平台在  $Z$  轴方向上升  $|dz|$ , 当被测点落入有效测量范围内时, 测量仪对被测点进行多次测量并计算出平均值  $dh$ , 程序根据公式得到被测点相对基准点的  $Z$  轴坐标值, 然后将该点的三维坐标以 “.dat” 的格式记录到计算机中。重复上述步骤完成网格扫描。

4) 程序根据所采集到的数据进行三维曲面拟合。对于任意三次曲面都可以用幂基函数表示为<sup>[9]</sup>:

$$f(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + a_7x^3 + a_8x^2y + a_9xy^2 + a_{10}y^3, \quad (1)$$

令  $z = f(x, y)$ ,  $k = (x_i, y_i)$ ,  $k_i$  表示曲面的坐标  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ , 其对应基函数为  $[b^1(k), b^2(k), \dots, b^n(k)]$ , 满足线性关系<sup>[10]</sup>:

$$f(k) = \sum_{j=1}^n a_j b^j(k), \quad (2)$$

式中  $b^j(k) = x^s y^t$ ,  $0 \leq s + t \leq n$ ,  $s \geq 0, t \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$ 。  $a_1, a_2, \dots, a_n$  为待定的系数矢量。利用最小二乘法进行拟合, 使得测量的曲面数据和真实曲面数据之差的平方和最小, 即:

$$E(f) = \sum_{i=1}^N [f(k_i) - z_i]^2 = \sum_{i=1}^N \left[ \sum_{j=1}^n a_j b^j(k_i) - z_i \right]^2, \quad (3)$$

式中  $E(f)$  为误差的平方和, 要使得  $E(f)$  最小, 则有:

$$\frac{\partial E}{\partial a_j} = 0, j = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

由(2)~(4)式得:

$$\begin{cases} a_1 \sum_{i=1}^N b_i^1 b_i^1 + a_2 \sum_{i=1}^N b_i^1 b_i^2 + \dots + a_n \sum_{i=1}^N b_i^1 b_i^n = \sum_{i=1}^N b_i^1 z_i \\ a_1 \sum_{i=1}^N b_i^2 b_i^1 + a_2 \sum_{i=1}^N b_i^2 b_i^2 + \dots + a_n \sum_{i=1}^N b_i^2 b_i^n = \sum_{i=1}^N b_i^2 z_i \\ \vdots \\ a_1 \sum_{i=1}^N b_i^n b_i^1 + a_2 \sum_{i=1}^N b_i^n b_i^2 + \dots + a_n \sum_{i=1}^N b_i^n b_i^n = \sum_{i=1}^N b_i^n z_i \end{cases} \quad (5)$$

将(5)式改写为矩阵形式得:

$$BB^T A = BZ, \quad (6)$$

$$\text{式中 } B = \begin{bmatrix} b^1(k_1)b^1(k_2)\cdots b^1(k_N) \\ b^2(k_1)b^2(k_2)\cdots b^2(k_N) \\ \vdots \\ b^n(k_1)b^n(k_2)\cdots b^n(k_N) \end{bmatrix}, A^T = (a_1, a_2, \cdots, a_n), Z^T = Z_1, Z_2, \cdots, Z_N.$$

由上式得到一个一般线性方程组,程序利用此方程组,结合所采集的数据集计算出被测元件的曲率半径以及误差范围。

## 4 误差分析及实验结果

根据系统总体框架图搭建的基于激光扫描法的非接触式曲率半径测量实验系统如图4所示,其中1为PC上位机;2为调度控制器;3为激光感测头;4为垂直升降台;5为二维平移台;6为激光测量仪控制手柄;7为激光测量仪控制器;8为监视器;9为垂直升降台控制器;10为二维平移台控制器。

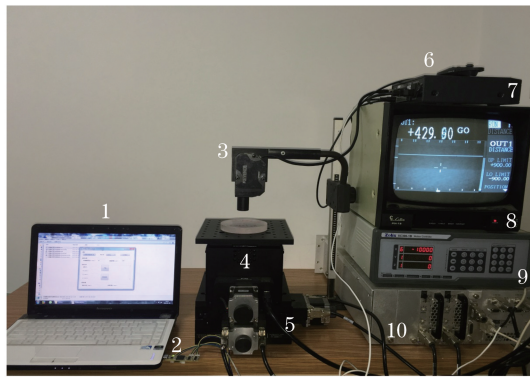


图4 实验系统

Fig. 4 Experimental system

### 4.1 误差分析及处理

系统的误差来源主要包括:激光测量仪系统的测量误差,垂直升降台定位误差,二维平移台定位误差,载物台机械运动起伏引起的误差和测量环境引起的误差<sup>[13-14]</sup>。

激光感测头测量精度为 $\pm 6 \mu\text{m}$ ,为了进一步提高激光测量仪系统精度,需要使该系统在短时间内对同一采样点进行多次测量(实际采样次数为4096次),再利用滑动平均算法得出该采样点的最终测量结果,测量精度优于 $\pm 0.6 \mu\text{m}$ 。假设动态测试数据总长为 $N$ ,取每 $m$ 个相邻数据做算术平均,则滑动平均法的一般表达式可表示为:

$$f_k = y_k = \frac{1}{2n+1} \sum_{k=-n}^n y_{k+1}, \quad (7)$$

式中 $k = n+1, n+2, \cdots, N-n, 2n+1 = m$ 。平均次数越大,测量值越稳定,精度越高,但响应越慢。

从自动测量方案可以看出, $Z$ 轴的运动是依据激光测量仪的测量结果和反馈指令,进行1.8 mm的整数倍的升降运动,因此垂直升降台的定位精度取决于激光测量仪的测量精度,优于 $\pm 0.6 \mu\text{m}$ 。

为了减小二维平移台定位误差,可使 $X$ 轴和 $Y$ 轴导轨按照设定的网格路线先正向运动,采集所有被测点的三维坐标集,完成后以终点为起点再沿原路线返回,同时测量所有被测点的三维坐标集,以这两组数据平均得到一组三维坐标集。重复上述过程可分别得到多组点集坐标,平均后即可减小二维平移台定位误差。经检测后可标定出该二维平移台的定位精度优于 $\pm 2 \mu\text{m}$ 。

由于平移台的制造工艺限制,其出厂时导轨、丝杠、滑块等各部件的尺寸都有一定的偏差,导致平台运动到某一坐标位置 $(x, y)$ 时都存在一个恒定的平面起伏高度,引起 $Z$ 轴坐标的测量误差,与 $(x, y)$ 之间的机械误差是固定的。因此,采用一个标准平晶做了零位平面校准,零位平面数据计量存储在计算机中并会在实际

测量中自动修正。

测量环境温度的剧烈变化会导致运动平台的机械结构热胀冷缩,所以实验室温度应保持在 $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ ,同时激光感测头的正常工作湿度为 $35\%\sim 85\%$ (相对湿度),而其余环境参数对实验结果造成的影响微乎其微,所以暂不做分析处理。

若使用解析的方法分别标定上述主要误差对最终结果的影响是复杂且不宜实现的,所以无法给出系统的理论误差,只能通过多次测量不同曲率半径的光学元件,根据多组系统测量结果和工厂对样板数据进行比对,得出系统的误差范围。

#### 4.2 实验结果

实验时,系统置于相对水平的实验台上,并让激光感测头与载物台尽可能垂直。在实验阶段,一方面为了检测系统性能,另一方面为了保证计量镜片安全,避免划伤等不必要的损坏,因此决定采用对样板代替正式光学元件,对实验数据进行比对。

实验保持在温度 $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ 、湿度 $35\%\sim 85\%$ (相对湿度)的条件下进行。对不同曲率半径的10块光学元件进行多次实验测试,并选取所有实验结果中,误差最小和最大的两组测量值所属光学元件的实验数据进行展示。

1) 实验所得所有数据中相对误差最小为 $0.03\%$ ,曲面拟合三维图如图5所示。该光学元件是曲率半径标称值为 $(19.208\pm 0.009)$  mm的粗磨凸透镜,表1中数据为10组实验测试结果和与参考值对比所得误差。

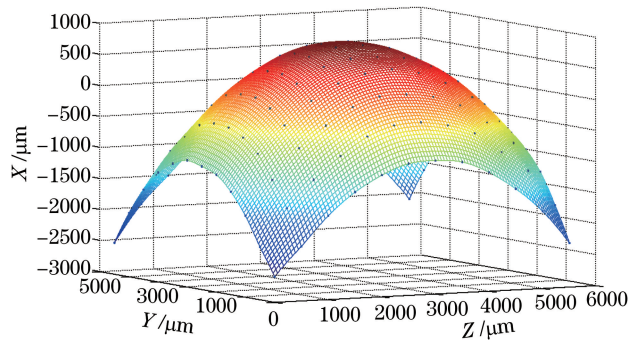


图5 三维曲面拟合图

Fig. 5 Three-dimensional surface fitting map

表1 实验1测量结果

Table 1 Measurement results of experiment 1

Number	Measurement result /mm	Absolute error /mm	Relative error /%
1	19.198	0.010	0.05
2	19.229	0.021	0.11
3	19.223	0.015	0.08
4	19.196	0.012	0.06
5	19.220	0.012	0.06
6	19.214	0.006	0.03
7	19.185	0.023	0.12
8	19.223	0.015	0.08
9	19.221	0.013	0.07
10	19.191	0.017	0.09

2) 实验所得所有数据中相对误差最大为 $0.15\%$ ,完整球面效果图如图6所示。该光学元件是曲率半径标称值为 $(145.38\pm 0.08)$  mm的粗磨凸透镜,表2中数据为10组实验测试结果和与参考值对比所得误差。

通过大量测试实验可以看出,所研究的面形检测系统方案切实可行。经过对所有实验数据的误差进行分析计算,对于曲率半径在 $\pm 1200$  mm以内的光学元件,系统的测量精度优于 $\pm 0.15\%$ ,能够满足粗磨检测的精度要求。

表 2 实验 2 测量结果  
Table 2 Measurement results of experiment 2

Number	Measurement result /mm	Absolute error /mm	Relative error /%
1	145.278	0.102	0.07
2	145.569	0.189	0.13
3	145.264	0.116	0.08
4	145.540	0.160	0.11
5	145.206	0.174	0.12
6	145.482	0.102	0.07
7	145.235	0.145	0.10
8	145.511	0.131	0.09
9	145.165	0.215	0.15
10	145.467	0.087	0.06

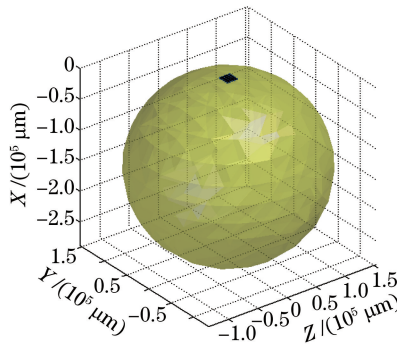


图 6 完整球面效果图

Fig. 6 Complete spherical rendering

## 5 结 论

在理论研究的基础上,采用成熟的设备搭建,通过二次开发,研制了一套自动测量仪器系统,实现了一键式面形数据测量。虽然只叙述了对球面镜的测量,从系统的设计思想和原理来看,该系统对双曲面、抛物面等非球面光学元件也具有检测功能,甚至在一定程度上可以检测高次非球面面形。测试结果表明,基于激光扫描法的非接触式曲率半径测量系统具有分辨率高、可靠性强、稳定性好等特点,且不受待测元件材质和光洁度要求的制约,经过硬件升级和算法改进后,精度还具有提升空间,符合设计要求,可以满足云南省中小民营企业的需求,为其提供相对低成本的粗磨检测设备,具有良好的应用前景。目前该系统已申请了发明专利(申请号 201610272377.1)。

**致谢** 感谢常亮老师对本论文写作的指导与帮助。

## 参 考 文 献

- Jia Shikui, Li Chenggui, Yang Hui, *et al.* Test method of optic element with aspheric surface[J]. Shanghai Measurement and Testing, 2009, 36(5): 2-6.  
贾世奎, 李成贵, 杨 辉, 等. 非球面光学元件面形检测方法[J]. 上海计量测试, 2009, 36(5): 2-6.
- Wang Xiaokun. Measurement of aspherical surfaces by laser tracker[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(4): 379-383.  
王孝坤. 激光跟踪仪检验非球面面形的方法[J]. 光子学报, 2012, 41(4): 379-383.
- Shi Tu, Yang Yongying, Zhang Lei, *et al.* Surface testing methods of aspheric optical elements[J]. Chinese Optics, 2014, 7(1): 26-46.  
师 途, 杨甬英, 张 磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 26-46.
- Shi Tu, Liu Dong, Zhang Lei, *et al.* Reverse optimization reconstruction method for aspheric testing in a nonnull

- interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0612007.
- 师途, 刘东, 张磊, 等. 非球面非零位检测的逆向优化面形重构[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0612007.
- 5 Yin Ke. Researches on parallel confocal imaging system with micro-lens array [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 1-20.
- 尹可. 基于微透镜阵列的多光束共焦成像系统若干问题的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 1-20.
- 6 Li Xuebao, Xu Jun, Deng Linhua, *et al.* Non-contact laser flatness measurement system [J]. *Modern Electronics Technique*, 2010, 33(3): 134-136.
- 李雪宝, 许骏, 邓林华, 等. 非接触式激光平面检测系统[J]. *现代电子技术*, 2010, 33(3): 134-136.
- 7 Keyence. Surface scanning laser confocal displacement meter LT-9001 series user manual[Z]. 2008.
- 8 Galilmc. DMC-21x2/ 21x3 user manual[Z]. 2008.
- 9 Sharp J. Visual C# 2010 step by step[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 117-134.
- 10 Zhang Ting. The application of human-computer interaction interface design in the product availability [J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(20): 63-66.
- 张婷. 人机交互界面设计在产品可用性中的应用研究[J]. *包装工程*, 2014, 35(20): 63-66.
- 11 Li Ertao, Zhang Guoxuan, Zeng Hong. Algorithm of surface fitting research based on least-squares methods[J]. *Journal of Hangzhou Dianzi University*, 2009, 29(2): 48-51.
- 李二涛, 张国焯, 曾虹. 基于最小二乘的曲面拟合算法研究[J]. *杭州电子科技大学学报*, 2009, 29(2): 48-51.
- 12 Peng Fangyu, Zhou Ji, Zhou Yanhong, *et al.* Research on least squares based algorithm for free form surfaces design[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 1999, 3: 41-46.
- 彭芳瑜, 周济, 周艳红, 等. 基于最小二乘法的曲面生成算法研究[J]. *工程图学学报*, 1999, 3: 41-46.
- 13 Song Qiang, Yang Baoxi, Yuan Qiao, *et al.* Study on large convex aspherical lens testing[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0408003.
- 宋强, 杨宝喜, 袁乔, 等. 大口径凸非球面面形检测方法研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0408003.
- 14 Quan Haiyang, Hou Xi, Wu Fan. Research status and progress of measurement uncertainty in interferometric testing of surface figure[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(6): 060004.
- 全海洋, 侯溪, 伍凡. 测量不确定度在干涉面形检测领域的研究现状及进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(6): 060004.