

# 提高轮廓仪对大曲率半径表面形貌测量精度的研究

梁旭 王军华 徐敏

(复旦大学光科学与工程系 上海超精密光学制造工程技术研究中心, 上海 200433)

**摘要** 结合超精密制造技术,讨论了轮廓仪测量大曲率半径表面形貌存在的精度缺陷。提出了利用 NIKON Autocollimator 6D 自准直仪辅助 Form Talysurf PGI 1250A 以提高轮廓仪测量精度的改进方法。当自准直仪的光轴与样品顶点的法线共轴时,旋转样品其顶点的法线方向不变,因此自准直仪的反射像位置也不会变,并且自准直仪有很高的精度,从而可将其用于寻找顶点。基于相关参数对提高轮廓仪测量精度进行了理论计算和 Zemax 模拟。搭建实验装置对不同曲率半径的样品进行测量,与改进前实验结果进行对比,证明了轮廓仪测量精度提高到原来的 2~4 倍,适用于测量大曲率半径表面形貌,验证了改进方法的合理性和有效性。

**关键词** 测量;非球面测量;轮廓仪;大曲率半径;自准直仪

**中图分类号** TG806 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.071202

## Research on Improving Accuracy of Large Radius of Curvature Measurement Using Surface Profiler

Liang Xu Wang Junhua Xu Min

(Shanghai Ultra-Precision Optical Manufacturing Engineering Center, Department of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract** The disadvantages of large radius of curvature measurement using surface profiler according to ultra-precision optical manufacturing are discussed. An improved method is proposed to achieve higher accuracy, in which the NIKON Autocollimator 6D is used to assist the measurement of the Form Talysurf PGI 1250 A surface profiler. When the optical axis of autocollimator and the normal direction of vertex of sample are coaxial, rotating the sample, the normal direction of vertex of it will not change, and then the position of reflected image received by autocollimator will not change too. Meanwhile, autocollimator can be used to find the vertex of sample because of its high accuracy. Theoretical calculation and Zemax simulation based on relevant parameters are given. Experimental equipment is set up for measuring samples with different radii of curvature, and comparison with previous experimental results is illustrated. Measurement accuracy of surface profiler is increased to 2~4 times, showing that this method is suitable for large radius of curvature measurement. Rationality and effectiveness of the method are validated.

**Key words** measurement; measurement of aspherical surface; surface profiler; large radius of curvature; autocollimator

**OCIS codes** 120.6650; 120.1680; 080.4295; 220.4840; 120.4640

## 1 引言

伴随着以单点金刚石车削为代表的现代超精密加工技术的发展<sup>[1~3]</sup>,为了满足高精度的要求,现代检测技术也是突飞猛进。在测量表面形貌方面,轮廓仪起到了很重要的作用,不仅达到了亚微米量级的测量精度,而且重复性好、效率高,在超精密检测领域起到了重要的作用<sup>[4,5]</sup>。

**收稿日期**: 2012-03-02; **收到修改稿日期**: 2012-04-09; **网络出版日期**: 2012-05-16

**基金项目**: 国家科技重大专项(2011ZX02402)和上海市引进技术的吸收与创新计划(2010CH-007)资助课题。

**作者简介**: 梁旭(1985—),男,硕士研究生,主要从事衍射光学元件加工与检测等方面的研究。

E-mail: 09210720007@fudan.deu.cn

**导师简介**: 徐敏(1959—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学设计、先进光学制造与光电测量等方面的研究。

E-mail: minx@fudan.edu.cn(通信联系人)

在测量大曲率半径表面形貌时,比如大型光学观察系统和巨型激光装置使用的大口径长焦距球面或非球面透镜<sup>[6]</sup>,以及测量衍射元件的环带位置等对顶点的精确确定要求更加严格的情况下<sup>[7~9]</sup>,轮廓仪的使用遇到了瓶颈。以 Taylor Hobson 公司出品的 Form Talysurf PGI 1250A 轮廓仪为例,在实际操作中发现,测量大曲率半径样品表面形貌或者样品表面粗糙度比较大的时候,探针自动寻找顶点不是很准确,从而导致表面形貌的测量精度受到影响。轮廓仪的测量要达到很高的精度,必须要精确确定样品的顶点,但是对于大曲率半径表面来说,样品曲率半径越大,越难准确地找到顶点,测量出来的形貌误差也越大。尤其是测量衍射元件面型时,顶点位置确定不准确,得到的环带位置误差也较大。

在国内,现阶段超精密测量技术的研究水平同国外的差距较大,高性能仪器主要还是依靠进口。为了推动我国的超精密制造以及相关测量技术的进一步发展,满足提高大曲率半径表面形貌测量精度的要求,对相关课题的研究显得十分迫切。本文提出一种利用自准直仪辅助,提高轮廓仪对大曲率半径表面形貌测量精度的方法,并通过实验验证了其合理性和有效性。

## 2 方法研究

为了提高大曲率半径表面形貌的测量精度,基于 Form Talysurf PGI 1250A 进行了研究。实验中选用 NIKON Autocollimator 6D 光学自准直仪来辅助轮廓仪搭建测量装置,并对测量步骤和方法进行改进以提高 Form Talysurf PGI 1250A 的测量精度。

把轮廓仪的校准球置于 Form Talysurf PGI 1250A 自动测量平台的电动  $\theta$  轴(最小旋转角度  $0.01^\circ$ ,并且可以  $\pm 360^\circ$  旋转,如图 1 所示)上面,用轮廓仪的自动程序找到校准球的顶点。然后将探针上移,并向右移动一定距离(例如 100 mm,视样品尺寸而定)。

利用 NIKON Autocollimator 6D 搭建的辅助测量装置来确定校准球的顶点,如图 2 所示。这时候只能调节自准直仪、反射镜和参考物镜。在确定样品顶点的过程中让  $\theta$  轴旋转,同时观察目镜,直到从样品表面反射回来的十字光标不再移动,从而确定校准球的顶点位置。

保持自准直仪和平台的 X 轴与 Y 轴位置不变,用待测的大曲率半径样品代替  $\theta$  轴上的校准球。并且更换合适的参考物镜,改变样品在  $\theta$  轴上的位置,同时转动  $\theta$  轴,直到再次看到十字光标不再移动。这样就找到了样品的顶点,并且确保了待测样品、校准球和  $\theta$  轴前后两次共轴。将轮廓仪的探针向反向移动相同的距离,探针对应样品上的点即为顶点。

利用 Zemax 模拟 NIKON Autocollimator 6D 辅助轮廓仪寻找样品顶点的装置,如图 2 所示。参考物镜可以有多种替换,并且位置可以上下移动,在调节过程中使得参考物镜的焦点与样品表面的几何圆心重合,

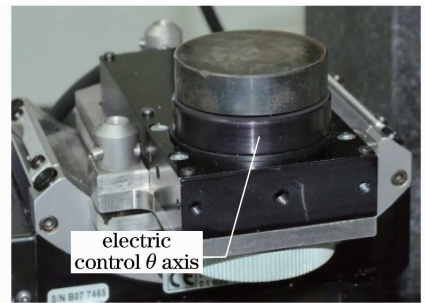


图 1 电动  $\theta$  轴

Fig. 1 Electric control  $\theta$  axis

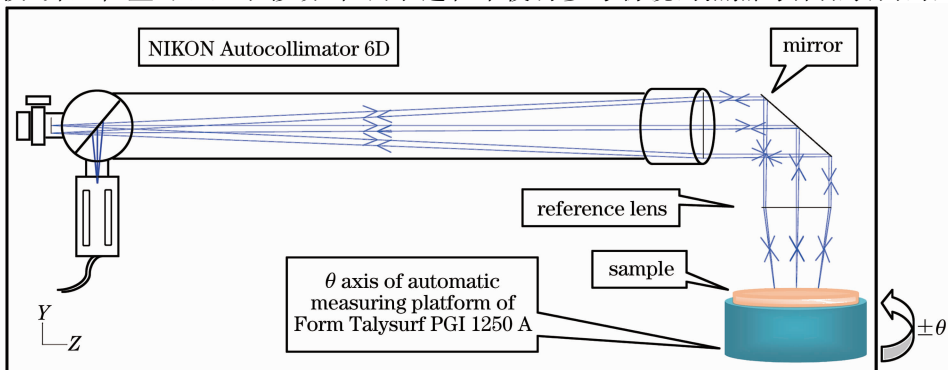


图 2 基于自准直仪的定中系统

Fig. 2 Center station based on NIKON Autocollimator 6D

并且两者的光轴共轴,保证光线原路返回,达到自准直状态。目的在于使得待测样品、校准球、 $\theta$ 轴和自准直系统共轴,从而确保准确找到样品顶点。

自准直仪主要包括光学自准直仪和光电自准直仪两大类<sup>[10]</sup>。分辨率方面,光电自准直仪达到了很高的精度,国外相关产品甚至可以达到 $0.005''$ 的分辨率,测量误差为 $0.10''\sim 0.01''$ <sup>[10,11]</sup>。当然国内的产品发展得也很快,已有产品的分辨率可达到 $0.01''$ ,测量误差为 $0.3''$ ,接近国际先进水平<sup>[10]</sup>,相关研究成果更是与国际水平相当<sup>[12]</sup>。结合上述测量步骤和改进方法,可以利用自准直仪来辅助轮廓仪寻找样品顶点。

### 3 理论验证

以上研究方法可以解决轮廓仪测量大曲率半径表面形貌精度不够的问题,对提高轮廓仪的测量精度有较大的改进,并且可以避免由于样品表面粗糙度比较大而引起的探针自动寻找顶点时可能出现的误差。进一步对以上方法的合理性进行理论验证。对 Form Talysurf PGI 1250A 自动寻找顶点的分辨率和利用 NIKON Autocollimator 6D 搭建辅助测量装置寻找顶点的分辨率进行理论对比。

实验选用的 NIKON Autocollimator 6D 测量范围纵横两轴均为 $30'$ ,分辨率在测量 $5'$ 以内时为 $0.5''$ , $30'$ 以内为 $1''$ 。大曲率半径样品测量时精度要求很高,应该选用 $0.5''$ 的精度。使用的轮廓仪 Form Talysurf PGI 1250A 的 Z 轴垂直分辨率为 $0.8\text{ nm}$ 。

如图 3 所示,利用 NIKON Autocollimator 6D 光学自准直仪辅助轮廓仪寻找样品顶点时,假设样品横向偏离理想位置的距离为 $L$ ,相应的样品顶点的垂直位移为 $h$ 。

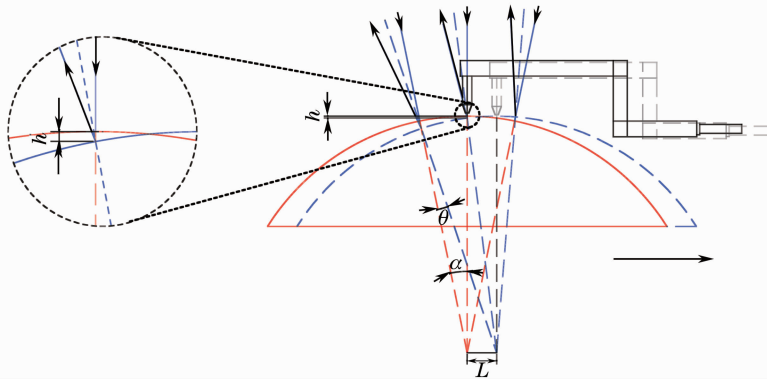


图 3 装置的可行性理论计算

Fig. 3 Theoretical calculation of feasibility of the equipment

利用三角函数关系式计算 $h$ :

$$h = R \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \alpha}} \right). \quad (1)$$

设 $x = \frac{\sin^2 \theta}{\cos^2 \alpha}$ , 令 $\theta$ 为 NIKON Autocollimator 6D 自准直仪测量的最小分辨率,即 $\theta = 0.5''$ 。当表面曲率半径 $R$ 很大时, $\alpha$ 接近 $0$ ,即 $\cos^2 \alpha \approx 1$ ,则 $x \approx 0$ 。为了方便求解,对根号里的式子利用泰勒级数展开进行简化:

$$\sqrt{1-x} = 1 - \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} - \frac{x^3}{16} - \frac{5x^4}{128} - \frac{7x^5}{256} \dots, \quad (2)$$

$$h = R \left( \frac{x}{2} + \frac{x^2}{8} + \frac{x^3}{16} + \frac{5x^4}{128} + \frac{7x^5}{256} \dots \right) \approx R \frac{x}{2} = \frac{R \sin^2 \theta}{2 \cos^2 \alpha}. \quad (3)$$

为了使得利用自准直仪辅助寻找样品顶点的分辨率高于单纯用轮廓仪自动找顶点的分辨率,令 $h$ 小于轮廓仪的 Z 轴分辨率 $0.8\text{ nm}$ ,即 $h = \frac{R \sin^2 \theta}{2 \cos^2 \alpha} \leq 0.8\text{ nm}$ 。代入自准直仪和轮廓仪的相关参数,得到

$$R \leq \frac{\cos^2 \alpha}{\sin^2 \theta} \times 1.6 \times 10^{-6} (\text{mm}) = 272289.090 \times \cos^2 \alpha (\text{mm}). \quad (4)$$

在测量表面曲率半径很大的样品时,由于样品口径相对于表面曲率半径很小, $\alpha$ 接近 $0$ 。所以(4)式可以

近似为

$$R \leq 272289.090 \text{ mm.} \quad (5)$$

以上证明在样品表面曲率半径  $R \leq 272289.090 \text{ mm}$  的时候,利用 NIKON Autocollimator 6D 自准直仪搭建的辅助轮廓仪寻找样品顶点的测量装置,其分辨率要比单纯使用 Form Talysurf PGI 1250A 自动寻找样品顶点的分辨率高。一般情况下,待测样品的  $R$  都在  $272289.090 \text{ mm}$  之内,所以改进的方法可以提高大曲率半径表面形貌的测量精度。

进一步,根据误差理论的定义,可以得到搭建的辅助测量装置的测量误差:

$$\Delta\theta = \frac{f}{2R}\Delta\theta_1 + \frac{\theta_1}{2R}\Delta f + \frac{\Delta\theta_2}{2}, \quad (6)$$

式中  $\theta_1$  为自准直仪读出数据,  $f$  为参考物镜焦距,  $\Delta\theta_1$  为自准直仪系统误差,  $\Delta f$  为参考物镜焦距误差,  $\Delta\theta_2$  为轮廓仪  $\theta$  轴的回转误差。可以看出测量误差会根据测量目标和参考物镜的选择各异。NIKON Autocollimator 6D 的系统误差很小,参考物镜焦距误差可以控制在很小的范围,  $\theta$  轴的回转误差非常小,待测样品的曲率半径比(6)式中各项的分子大很多。所以综合起来,搭建的辅助测量装置的测量误差  $\Delta\theta$  是一个十分微小的量。以上理论分析证实了研究中搭建的辅助测量装置的可行性。

## 4 实验结果

实验中利用 Moore UPL250 超精密数控金刚石加工机床制作出了 3 个待测实验样品供检测所用,样品材质为铝 6061,具体参数如表 1 所示。

表 1 实验待测样品参数  
Table 1 Parameters of samples to be measured

Parameter	Sample 1	Sample 2	Sample 3
Diameter /mm	20	20	20
Radius of curvature /mm	80	400	2000
Material	6061 aluminum	6061 aluminum	6061 aluminum
Type of spherical surface	Convex	Convex	Convex

利用 Form Talysurf PGI 1250A 轮廓仪以及改进的测量装置和方法分别对三个样品进行测试。每个样品测试 6 次,其中 3 次测量为单纯利用轮廓仪自动找顶点,另外 3 次为利用 NIKON Autocollimator 6D 自准直仪搭建的辅助测量装置寻找顶点。测量后用 ZYGO 公司的 NewView 白光干涉仪观察,如图 4 所示。由于铝 6061 材质比较软,经过轮廓仪的探针测量后表面会留有划痕,便于白光干涉仪观察实验效果。

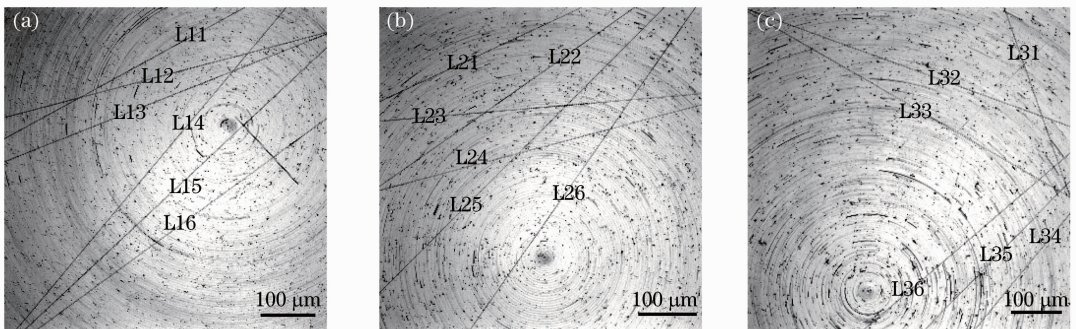


图 4 样品经轮廓仪测量后的结果。(a)  $R=80 \text{ mm}$  时的划痕;(b)  $R=400 \text{ mm}$  时的划痕;(c)  $R=2000 \text{ mm}$  时的划痕

Fig. 4 Results of samples measured by surface profiler. Scratches on sample which caused by gauge with  
(a)  $R=80 \text{ mm}$ , (b)  $R=400 \text{ mm}$  and (c)  $R=2000 \text{ mm}$

图 4(a)~(c)分别为曲率半径  $R$  为 80,400,2000 mm 的样品经过轮廓仪的多次测量后在白光干涉仪下的观测结果。其中 L11~L13, L21~L23 和 L31~L33 为单纯利用轮廓仪自动寻找顶点的测量划痕; L14~L16, L24~L26 和 L34~L36 为利用自准直仪搭建的辅助测量装置寻找顶点的测量划痕。从 3 个样品的划痕分布上可以看出,前者的划痕普遍要比后者的划痕距离样品的顶点远。并且可以看出在  $R$  偏小

时,两种测量结果差别不大,比如样品 1 和样品 2,前者划痕到样品顶点的距离约是后者的 2 倍;但是随着  $R$  增大,后者的测量结果明显要优于前者,比如样品 3,前者的距离几乎是后者距离的 4 倍。所以当  $R$  不是很大、测量精度要求不是很苛刻的时候,前者的测量还是很准确的,并且效率高,没有必要利用后者来提高精度;但在  $R$  比较大、测量精度要求很高的时候,后者体现出了明显的优势。

## 5 结 论

通过理论分析证明了利用 NIKON Autocollimator 6D 光学自准直仪辅助轮廓仪搭建的测量装置寻找待测样品顶点的方法的可行性。实验测量结果证明其精度比单纯利用 Form Talysurf PGI 1250A 轮廓仪寻找样品顶点提高到原来的 2~4 倍,适用于测量大曲率半径表面形貌。证明了搭建的实验装置满足理论设计要求,并且切实可行。可以推断利用分辨率为  $0.01''$  或者更高的 CCD 光电自准直仪可以进一步提高轮廓仪的测量精度。但是利用自准直仪寻找样品顶点的方法也有一定的局限性,要求被测样品的顶点处局部面形具有旋转对称性,以便反射像原路返回自准直仪。本文的研究对提高轮廓仪的测量精度有较大帮助,尤其是在样品曲率半径比较大的时候。

## 参 考 文 献

- 1 M. A. Davies, C. J. Evans, S. R. Patterson *et al.*. Application of precision diamond machining to the manufacture of micro-photonics components[C]. *SPIE*, 2003, **5183**: 94~108
- 2 Gong Yan, Zhao Lei. Single point diamond machines and their applications to optical engineering[J]. *Chinese Optics*, 2011, **4**(6): 537~545  
巩 岩, 赵 磊. 单点金刚石机床及其在光学工程领域的应用[J]. *中国光学*, 2011, **4**(6): 537~545
- 3 Kang Zhan, Nie Fengming, Liu Jingsong *et al.*. Research on single point diamond precision numerical control turning technique and its development[J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(2): 163~167  
康 战, 聂凤明, 刘劲松 等. 单点金刚石精密数控车削加工技术及发展前景分析[J]. *光学技术*, 2010, **36**(2): 163~167
- 4 Geng Anbing, Wang Bin. Inversion method for aspheric surface equation derivation based on data measured from Talysurf[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(4): 042204  
耿安兵, 王 彬. 基于轮廓仪测量数据的非球面方程反演技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(4): 042204
- 5 Li Shun, Gong Yan. Error analysis and correction during measurement of tube-shaped super-smooth mirrors using long trace profiler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1112001  
李 顺, 巩 岩. 长程轮廓仪用于筒状超光滑表面测量的误差分析及校正[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1112001
- 6 Yang Liming, Ye Haixian. High-precision metrology for optical components with large-apertures and large radii of curvature[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(6): 1207~1212  
杨李茗, 叶海仙. 大口径大曲率半径光学元件的高精度测量[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(6): 1207~1212
- 7 Li Xiangning. Lens design for Fresnel collimator with large aperture and linear fields[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(12): 53~58  
李湘宁. 大口径线视场菲涅尔准直透镜设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(12): 53~58
- 8 Yin Kewei, Huang Zhiqiang, Lin Wumei *et al.*. Analysis of effect of lateral fabrication errors on binary optical elements[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(9): 46~49  
殷可为, 黄智强, 林妩媚 等. 二元光学元件横向加工误差对衍射效率的影响[J]. *光电工程*, 2011, **38**(9): 46~49
- 9 Zheng Xuezhe, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Effect of alignment error on binary optics element efficiency[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 1997, **8**(4): 241~245  
郑学哲, 严瑛白, 金国藩 等. 对准误差对二元光学器件衍射效率的影响[J]. *光电子·激光*, 1997, **8**(4): 241~245
- 10 Chen Ying, Zhang Xuedian, Lu Xinglian *et al.*. Current situation and development trend of autocollimator[J]. *OME Information*, 2011, **28**(1): 6~9  
陈 颖, 张学典, 逯兴莲 等. 自准直仪的现状与发展趋势[J]. *光机电信息*, 2011, **28**(1): 6~9
- 11 A. N. Korolev, A. I. Gartsuev, G. S. Polishchuk *et al.*. A digital autocollimator[J]. *J. Opt. Technol.*, 2009, **76**(10): 624~628
- 12 Zhang Junjie, Li Zhengyang, Ye Shenghua. Using optical zoom to improve the resolution of photoelectric collimator[J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2011, **24**(1): 50~52  
张俊杰, 李政阳, 叶声华. 采用光学放大提高光电自准直仪的分辨力[J]. *传感技术学报*, 2011, **24**(1): 50~52