

## 基于激光干涉法的曲率半径精密检测系统

代 雷<sup>1</sup>, 隋永新<sup>1</sup>, 吴 迪<sup>2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 1300332;  
2. 空军航空大学 航空航天情报系, 吉林 长春 130022)

**摘 要:** 为了满足光学元件曲率半径精密检测的需求, 设计了应用激光干涉方法的曲率半径精密检测系统, 实现了对口径 100~300 mm, 曲率半径 500~2 000 mm 光学元件曲率半径的高精度, 非接触式测量。并分析了影响曲率半径测量结果的各项不确定度, 进行不确定度合成。最终完成曲率半径精密检测系统的装调, 进行验证实验, 曲率半径测量结果相对不确定度约  $7 \times 10^{-6}$ , 满足了  $10 \times 10^{-6}$  的设计要求。

**关键词:** 曲率半径测量; 激光干涉; 不确定度; 干涉检验

**中图分类号:** TH161; TQ171.6<sup>+</sup> **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2221-05

## Precision of measuring system of radius of curvature using laser interference method

Dai Lei<sup>1</sup>, Sui Yongxin<sup>1</sup>, Wu Di<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Air and Space Intelligence Faculty, Air Force Aviation University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to meet the demand of precision measurement of radius of curvature, precision ROC measurement system was designed based on laser interferometry. High precision, non-contact ROC measurement of optic elements was achieved, whose diameter was 100-300 mm and ROC 500-200 mm. The factors of ROC measurement results was analyzed and combination of standard uncertainty was caculated. Installation and adjustment of the system and verification experiments was finished. The relative uncertainty of ROC experiment results is above  $7 \times 10^{-6}$ , it can meet the design demand of  $10 \times 10^{-6}$ .

**Key words:** radius of curvature; laser interference; uncertainty; interferometry

收稿日期: 2012-12-13; 修订日期: 2013-1-27

基金项目: 国家科技重大专项支持(2009ZX02205)

作者简介: 代雷(1986-), 男, 硕士, 主要从事光学元件加工与检测方面的研究。Email: [xiaomao\\_566@cimop.ac.cn](mailto:xiaomao_566@cimop.ac.cn)

## 0 引言

光学元件的曲率半径(ROC)是光学元件的一项重要参数,随着航空、航天、集成电路技术的不断发展,对其中光学系统如相机镜头,光刻机投影物镜等也提出了更高的要求,同样对光学元件曲率半径的精密检测也提出了更高的要求。现今最精密的光学系统-光刻投影物镜,其工作波长极短,并要求系统具有极高的成像质量、极高分辨率,光刻投影物镜的性能直接决定了光刻机的图形传递能力,也影响制造超大规模集成电路的质量与性能<sup>[1]</sup>。因此光刻投影物镜对光学元件的加工与检测都提出了十分严格的要求,其中对曲率半径的加工误差要求甚至达到  $10 \times 10^{-6}$ ,且光学元件的曲率半径范围为 500~2000 mm 不等。采用传统的球径仪,轮廓仪,以及三坐标等接触式的测量方法已经不能满足这样大范围、高精度曲率半径测量的要求<sup>[2]</sup>。当元件面形质量达到  $\lambda/20$  甚至更高时,更必须采用非接触式的测量方式,以防止损坏元件。

因此文中利用激光干涉原理,设计了满足光学加工与检测要求的非接触式曲率半径精密检测系统。该系统设计紧凑,结构简单,配合开发的曲率半径测量系统软件,被测元件口径范围为 100~300 mm 连续可调,可测量曲率半径范围为 500~2000 mm,曲率半径测量结果的相对不确定度可达  $7 \times 10^{-6}$ 。

## 1 系统工作原理及其构成

### 1.1 曲率半径检测系统的工作原理

该系统的基本工作原理为:通过相移激光干涉仪与标准具产生标准球面波,经被测光学元件表面反射,与参考波面产生干涉现象,得到干涉条纹进而计算得到元件面形误差,通过调节被测元件到等光程位置,即干涉零条纹的特殊位置。但由于实际的球面标准具存在一定的像差,实际的干涉条纹可能并不是理想的零条纹,在球面标准具的焦点处的干涉图像类似于“猫眼”宝石,又将此位置称为“猫眼位置”(Cat's Eye);另一个零光程位置由于光线沿原路返回,即焦点重合,又常称为“共焦位置”(Confocal)<sup>[3-4]</sup>。

干涉法测量曲率半径原理图如图 1 所示,其中包括相移激光干涉仪、标准具(Transmission sphere),位移激光干涉仪、分光镜(BS)与参考角镜(RRF),测量角镜(TRF),通过相移激光干涉仪得到猫眼位置与共焦位置,通过位移激光干涉仪精确测量猫眼位置与共焦位置之间的距离,则此距离为元件被测表面的曲率半径。

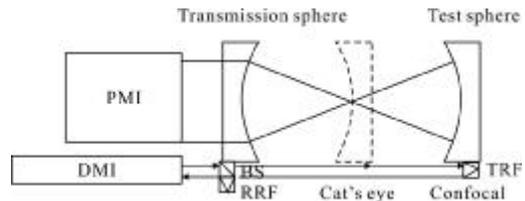


图 1 干涉法测量曲率半径原理图

Fig.1 Diagram of ROC measurement by interferometry

### 1.2 曲率半径检测系统的硬件构成

图 2 为 ROC 检测系统原理图。它主要由相移激光干涉仪、自中心载物台、精密调整架、位移激光干涉仪与计算机等组成。实际系统构成如图 3 所示,系

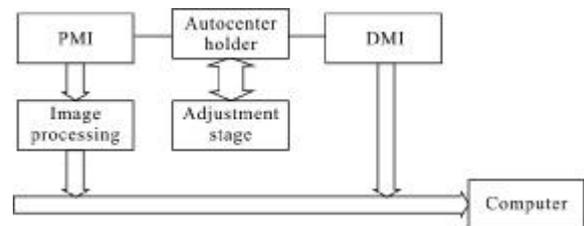


图 2 ROC 检测原理图

Fig.2 Block diagram of ROC system

统集成于稳定性极好的花岗岩光学平台上,相移激光干涉仪选用美国 ZYGO 公司的 6 in VeriFire XP/D 激光干涉仪。安装于花岗岩光学平板上,其目的是保证测量光学元件口径达 300 mm 时光轴的高度与光路的稳定性;位移激光干涉选用英国 Renishaw 公司的 XL-80 激光干涉仪,安装在相移激光干涉仪同一



图 3 ROC 检测系统实物图

Fig.3 Figure of ROC measurement system

侧,不仅提高了系统的紧凑性,而且降低了相移激光干涉仪光路与位移激光干涉仪光路受环境扰动的影响,以提高测量结果的重复性;采用紧凑性较好的单边导轨与辅助滚轮的直线位移机构;精密调整架与自中心载物台为实现对口径小于 300 mm 工件的自中心安装与位置的精密调节,针对曲率半径精密检测系统开发的曲率半径测量软件实现对光学元件曲率半径的精密检测。

## 2 系统测量结果的不确定度分析

### 2.1 被测面面形影响

在确定猫眼位置时,由于光束汇聚于一点,被测元件的面形质量直接影响猫眼位置的确定<sup>[5-6]</sup>,不确定度计算使用经验公式(1),其中  $pv$  为被测元件面形质量,若被测面形质量  $pv$  为  $\lambda/5$  ( $\lambda$  为 632.8 nm),此项不确定度  $u_1$  约为 12.6 nm;则:

$$u_1 \approx 0.1 pv \quad (1)$$

### 2.2 位移激光干涉仪的影响

利用位移激光干涉仪测量猫眼位置与共焦位置之间的距离进而得到被测元件的曲率半径,干涉仪发出光线经过分光棱镜,一部分经过干涉角锥棱镜反射作为参考光,另一部分经测量角锥棱镜反射作为测量光,两束反射光汇聚干涉,通过干涉原理计算得到光程差的变化,即可计算得到测量角锥棱镜移动的距离,进而算出被测元件的曲率半径。激光干涉测量的结果受激光波长稳定性、空气折射率等因素影响,在实际位移激光干涉仪测量结果又受角锥棱镜安装位置(即阿贝误差与余弦误差)及调整架材料热膨胀的影响,分光棱镜与测量角锥棱镜的初始距离(即死程, Deadpath)影响。

该系统选用位移激光干涉仪的激光波长稳定性约为  $0.05 \times 10^{-6}$ ,则测量长度由于激光波长稳定性影响测量结果的不确定度  $u_2$  计算如公式(2)

$$u_2 = \bar{r} \cdot 0.05 \quad (2)$$

式中: $\bar{r}$ 为被测元件曲率半径的名义值。

由于位移激光干涉仪的测量结果与工作环境的空气折射率相关。通常采用埃德伦公式进行补偿,即通过测量空气的温度,气压及相对湿度计算得到空气中工作波长的折射率。该系统使用 XC-80 环境传感器进行空气参数的测量,但由于 XC-80 环境

传感器的测量能力有限,仍会存在一定的无法补偿的部分<sup>[7]</sup>。无法补偿部分不确定度计算方法如下,埃德伦折射率计算如公式(3):

$$n = 1 + 271.8 \cdot 10^{-6} \frac{P}{101325} \cdot \frac{293.15}{T} \left[ 1 + 0.54 \left( \frac{55}{1 \cdot 10^6} \right) \right] - 1 \cdot 10^{-8} H \quad (3)$$

式中: $n$ 为工作波长在实验环境中的折射率; $P$ 为气压; $T$ 为温度; $H$ 为相对湿度。则折射率  $n$  的不确定度  $u(n)$  计算如公式(4):

$$u^2(n) = \left( \left( \frac{\partial n}{\partial P} \right) u(P) \right)^2 + \left( \left( \frac{\partial n}{\partial T} \right) u(T) \right)^2 + \left( \left( \frac{\partial n}{\partial H} \right) u(H) \right)^2 \quad (4)$$

若传感器的温度测量精度为  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ,相对湿度测量精度  $\pm 6\%$ ,空气压强测量精度为  $\pm 100\text{ Pa}$ ,代入公式(4)计算得到不确定度  $u(n)$  为  $0.34 \times 10^{-6}$ ,则由于空气折射率变化影响曲率半径的测量结果的不确定度  $u_3$  计算公式如公式(5):

$$u_3 = \bar{r} \cdot 0.34 \quad (5)$$

材料热膨胀是由于材料具有热膨胀特性,随着温度的变化,其尺寸也会发生一定的变化。被测元件与测量角锥棱镜共同安装于精密调整架的一侧,但在光轴方向仍存在一定的距离,即材料死程,材料死程包括被测元件材料热膨胀引起的误差与调整架材料热膨胀引起的误差,由于被测元件材料热膨胀系数远小于调整架的材料铝合金的热膨胀系数,因此只考虑铝合金的热膨胀影响<sup>[8]</sup>。若调整架的材料死程为 60 mm,材料为铝合金,其热膨胀系数约为  $22 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ,温度变化为  $0.2^\circ\text{C}$ ,则此项不确定度  $u_4$  为 44 nm,计算公式为:

$$u_4 = \alpha L u(\Delta T) = 44.0 \text{ nm} \quad (6)$$

死程 (Deadpath) 是指在位移激光干涉仪处于初始位置或零位置时,分光棱镜到测量角锥棱镜的长度,这段长度空气折射率的变化引起的光程变化是无法补偿的,因此常将这段距离称为死程,如图 4 所示。不可补偿的大气压强变化为  $\pm 200\text{ Pa}$ ,温度变化为  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ,相对湿度  $\pm 10\%$ ,则代入公式(4)得空气折射率  $u(n)$  为  $0.67 \times 10^{-6}$ ,若 Deadpath 长度为 500 mm,则代入公式(7)计算,得不确定度  $u_5$  为 335 nm。

$$u_5 = 500 \cdot 0.67 = 335 \text{ nm} \quad (7)$$

阿贝误差是位移激光干涉仪光轴与相移激光干涉仪光轴存在偏差产生的位移测量误差,与偏离量

L 和夹角角度  $\varphi$  有关。阿贝误差的计算公式如(8), 若 L 为 200 mm,  $\varphi$  为 15  $\mu\text{rad}$ , 代入公式(9)计算, 得到不确定度  $u_6$  为 1 010 nm。

$$e=L \cdot \tan \varphi \quad (8)$$

$$u_6^2=\tan^2 \varphi u^2(L)+L^2 \cdot \sec^4 \varphi \cdot u^2(\varphi) \quad (9)$$

余弦误差是位移激光干涉仪光轴与被测元件运动轴存在一定夹角产生的误差。夹角可以通过位移激光干涉仪接收的干涉信号强度计算, 该系统装调完毕在 2 000 mm 行程, 信号强度变化小于 10%, 位移激光干涉仪光束口径约为 5 mm, 则位移激光干涉仪光轴与被测元件运动轴夹角约为 0.25 mrad, 则不确定度计算如公式(10), 不确定度  $u_7$  约为 31.25 nm。

$$e=r \cos(\beta-1)$$

$$u_7=r u^2(\beta)=r \cdot (0.25 \cdot 10^{-3})^2 \quad (10)$$

### 2.3 等光程位置的影响

精确测量曲率半径需要精确定位到等光程位置, 即猫眼位置与共焦位置, 对调整架的调节分辨率

与导轨的直线度提出了较高要求。实际测量的等光程位置与理想的等光程位置存在一定的偏差。测量过程中可以利用相移干涉仪测量的相位信息中的离焦量, 来判别实际位置与理想等光程位置的偏差。经过多次实验, 仅从干涉条纹判断猫眼位置与共焦位置, 实际位置与理想位置的偏差可以容易控制到小于  $\lambda/2$ , 设猫眼位置与共焦位置各自偏离的不确定度相互独立, 此项不确定度<sup>[9]</sup>计算公式为:

$$u_8=\sqrt{300^2+300^2}=424.3 \text{ nm} \quad (11)$$

### 2.4 不确定度的合成

由上述分析, 假设上述各项不确定度各不相关, 计算 ROC 为 500 mm 各项不确定度的分布, 并计算合成标准不确定度<sup>[10]</sup>, 计算结果见表 1。

则对于 ROC 为 500 mm 时, 合成标准不确定度约为 1.16  $\mu\text{m}$ , 相对不确定度约为  $2.4 \times 10^{-6}$ 。

各项不确定度因素中, 由阿贝误差与等光程位置引入的不确定度对 ROC 测量的结果影响较大, 其

表 1 不确定度的合成(单位: nm)

Tab.1 Summary of uncertainty terms (Unit: nm)

Uncertainty	Figure	Waviness stability	Index of refraction	Thermal expansion	Deadpath	Abbe error	Cosine error	Null	RSS	Relative error
ROC=500 mm	12.6	25.0	170.0	44.0	335.0	1010	31.25	424.3	1159.8	$2.4 \times 10^{-6}$

中阿贝误差主要为系统设计装调误差, 等光程位置主要测量位置的判读误差, 同时在测量范围较大时, 受环境扰动的影响亦会增加。因此若要提高测量精度, 一方面需要优化系统结构设计, 可采用多路补偿降低阿贝误差的影响, 即保证测量轴与运动轴尽量重合, 降低阿贝偏移 L; 另一方面应用更有效条纹判别与系统调节方法, 进一步降低由等光程位置带来的不确定度。另外, 当测量 ROC 较大时, 工作环境扰动对测量结果的影响明显增大, 因此严格控制系统工作环境, 可以进一步降低检测较大 ROC 的测量不确定度。

## 3 实验结果

利用该曲率半径测量系统分别测量了 ROC 名义值为 500 mm 与 1 200 mm 光学元件 (简称样件一与样件二), 测量的结果如表 2 所示。其中样件一的曲率半径测量结果均值约为 499.399 6 mm, 相对不

确定度约为  $6.7 \times 10^{-6}$ ; 样件二的曲率半径测量结果均值约为 1 196.401 mm, 相对不确定度约为  $6.9 \times 10^{-6}$ , 满足  $10 \times 10^{-6}$  的设计要求。实验结果相对不确定度  $6.7 \times 10^{-6}$  大于理论的  $2.4 \times 10^{-6}$ , 经反复试验认为, 主要为环境扰动对曲率半径测量的影响, 提高环控精度可进一步降低测量结果的相对不确定度。

表 2 曲率半径测量结果(单位: nm)

Tab.2 Results of ROC measurement (Unit: nm)

Measurement	ROC500/mm	ROC1 200/mm
1	-499.401 242	-1 196.410 210
2	-499.403 961	-1 196.405 102
3	-499.398 003	-1 196.387 928
4	-499.395 100	-1 196.400 758
Average	-499.399 6	1 196.401
STD	0.003 336	0.008 255
ppm	6.7	6.9

## 4 结 论

利用激光干涉原理,设计了高精度曲率半径检测系统,其具有量程大、精度高、非接触式测量的特点。详细分析了影响该检测系统测量结果的各项不确定度,并进行标准不确定度的合成,并讨论了进一步降低测量结果不确定度的方法。完成了高精度曲率半径检测系统的装调,并开发配套软件。完成了验证实验,实验测量曲率半径结果不确定度约为  $6.7 \times 10^{-6}$ ,可以满足  $10 \times 10^{-6}$  的曲率半径检测要求。

## 参考文献

- [1] Gong Yan, Zhang Wei. Present status and progress in 193nm exposure system in lithography [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2008, 1(1): 25-36. (in Chinese)  
巩岩, 张巍. 193 nm 光刻曝光系统的现状及发展 [J]. 中国光学与应用光学, 2008, 1(1): 25-36.
- [2] Chen Li. Study on radius of curvature measurement by single frequency laser interferometry [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)  
陈丽. 球面曲率半径的单频激光干涉测量研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
- [3] Malacara D. Optical Shop Testing [M]. New York: Wiley Interscience, 2007: 23-45.
- [4] Roland V Shack, George W Hopkins. The shack interferometer [J]. Optical Engineering, 1979, 18(2): 226-228.
- [5] Selberg L A. Radius measurement by interferometry [J]. Optical Engineering, 1992, 31(9): 1961-1966.
- [6] Zhao Weiqian, Sun Ruoduan, Qiu Lirong. Laser differential confocal radius measurement [J]. Optics Express, 2010, 18(3): 2345-2360. (in Chinese)
- [7] Tony L Schmitz, Angela D Davies, Chris J Evans. Uncertainties in interferometric measurements of radius of curvature[C]//SPIE, 4451, 2001: 432-447.
- [8] Reninshaw. XL-80 and XC-80 Error Budget & Uncertainty Calculations[R]. New Mills: R&D Center, 2003.
- [9] Sha Dingguo. Error Analysis and Evaluation of Measurement Uncertainty[M]. Beijing: China Meteorology Press, 2003: 126-133. (in Chinese)  
沙定国. 误差分析与测量不确定度评定[M]. 北京: 中国计量出版社, 2003: 126-133.
- [10] International Organization for Standardization. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement[S]. 1995.

## 国际前沿光学成像技术与应用学术研讨会

征文通知 10月20-22日 苏州

中国宇航学会光电技术专业委员会联合其他相关单位将于10月20-22日在苏州市举办“国际前沿光学成像技术与应用学术研讨会”。诚挚欢迎国内外相关领域科研院所的科研人员以及大专院校的教师、研究生等踊跃投稿。

投稿请登录: [www.manuscript-cnoenet.com](http://www.manuscript-cnoenet.com), 中英文兼收。截稿日期: 2013年9月30日

### 主办单位:

美国光学学会(OSA) 欧洲光学学会(EOS)  
中国宇航学会

### 承办单位:

中国宇航学会光电技术专业委员会

### 征文方向:

光学系统中的新技术  
偏振成像技术 滤波技术 其他  
新型探测器技术  
高灵敏度的探测器技术  
高动态范围的探测器技术  
新谱段探测器技术 其他  
新型成像体制

### 支持媒体:

《红外与激光工程》(EI收录)  
《强激光与粒子束》(EI收录)  
《光学精密工程》(EI收录)  
中国宇航光电资讯网  
计算成像技术(计算光学成像, 3D光学成像, 鬼成像, 全息成像, 结构光照明, 数值超分辨率技术)  
显微成像技术(先进的显微技术, 高分辨率荧光成像, 物理超分辨率技术)  
光谱成像技术 合成孔径成像技术  
THZ成像技术  
前沿成像技术在国防、国土安全、遥感、测绘等领域应用

会议联系: 邓伟, 022-58168510 Email: [conf@cnoenet.com](mailto:conf@cnoenet.com)