

# 长曲率半径测量系统精度设计及分析

魏凤龙, 田 伟, 彭石军

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所超精密光学工程研究中心, 吉林 长春 130033

**摘要** 根据高精密光学系统的需求,结合目前的研究成果,基于干涉测量法研制了长曲率半径测量系统。分析了影响长曲率半径测量系统测量精度的多种误差因素,根据误差理论和系统组成建立了长曲率半径测量系统误差分配的数学模型和误差分配树。结合系统的整体使用需求,对系统测量精度的目标不确定度进行了分配和合成。结果表明,根据分配结果得到的标准不确定度为 $2.49\ \mu\text{m}$ ,小于系统要求的目标不确定度 $2.5\ \mu\text{m}$ 。以此分配结果作为各子系统结构设计的输入指标,总结并提出了提高曲率半径测量精度的措施,根据误差分配结果设计了符合使用需求的长曲率半径测量系统。

**关键词** 测量;长曲率半径;精度设计;误差分配;不确定度合成

**中图分类号** O439 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.061205

## Precision Design and Analysis of Large Curvature Radius Measurement System

Wei Fenglong, Tian Wei, Peng Shijun

*Super Precision Optical Engineering Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

**Abstract** According to the demand of high precision optical system and the present research achievements, a large curvature radius measurement system is developed based on the interferometric measurement. Error factors affecting the measurement precision of the developed system are analyzed, and a mathematical model of error distribution and an error distribution tree of the measurement system are established based on the error theory and the system composition. Combined the actual usage requirements, the target uncertainty of the measurement precision of the system is distributed and then combined. Results show that the standard uncertainty is  $2.49\ \mu\text{m}$ , and it less than  $2.5\ \mu\text{m}$  which is the target uncertainty required by the system. The distribution result is used as the input index for the design of subsystem structures. Measures that can improve the measurement precision of curvature radius are proposed and summarized. According to the error distribution result, a system for measuring large curvature radius which can satisfy the using requirements is designed.

**Key words** measurement; large curvature radius; precision design; error distribution; uncertainty combination

**OCIS codes** 120.3180; 120.3940; 120.4630; 120.4800

## 1 引言

光学元件的曲率半径是决定元件光学特性的重要参数,其准确度直接影响透镜光学系统的综合性能,对光学元件进行精确的测量不仅可以在透镜元件加工制造过程中判定元件的加工质量,也可为光学系统的装调提供可靠参考<sup>[1]</sup>。

光学元件曲率半径的测量方法主要分为接触式测量和非接触式测量两大类。接触式测量(如球径仪法和球面样板法)在测量时会造成光学元件表面的损伤或变形,测量范围及测量口径受限,测量精度较低。高

**收稿日期:** 2017-01-16; **收到修改稿日期:** 2017-02-18

**基金项目:** 国家科技重大专项-02 专项基金(2009ZX02205)

**作者简介:** 魏凤龙(1988—),男,硕士,研究实习员,主要从事精密光学仪器光机结构设计方面的研究。

E-mail: wfl9999@foxmail.com

精度曲率半径测量大多采用非接触式测量方法,如干涉仪测量法<sup>[2-4]</sup>。目前对于高精度曲率半径测量的研究已相对成熟,但对于高精复杂光学系统,不仅需要考虑到曲率半径的测量精度,还需要考虑到曲率半径的测量范围,以达到实现大曲率半径高精度测量、降低光学系统的设计难度和增加光学设计的自由度的目的。

本文基于国家科技重大专项任务——光刻投影物镜的研制需求,结合现阶段曲率半径测量的研究成果,分析了影响长曲率半径测量系统测量精度的误差因素,建立了长曲率半径测量系统的误差分配树;基于误差理论,对系统测量精度的目标不确定度进行分配和合成,总结并提出了提高曲率半径测量精度的措施,在精度设计分析的基础上设计了符合指标要求的长曲率半径测量系统。

## 2 长曲率半径测量系统

### 2.1 干涉测量法原理

干涉测量法通过观察参考面反射波前和光学元件被测面反射波前形成的干涉条纹图样,判断被测元件的猫眼位置和共焦位置<sup>[5-7]</sup>。如图1所示,猫眼位置为光学元件被测表面顶点与标准镜头焦点相重合的位置,共焦位置为被测表面焦点与标准镜头焦点相重合的位置,通过激光干涉测长(DMI)系统测量两位置的相对距离(即元件被测表面的曲率半径)。

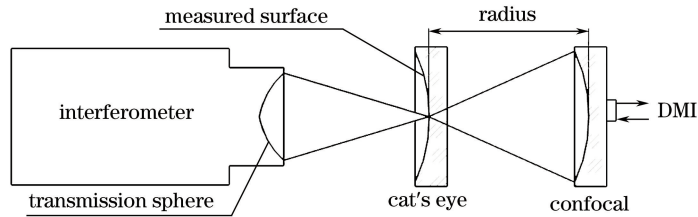


图1 干涉测量法原理示意图

Fig. 1 Diagram of interferometric measurement method

### 2.2 系统基本组成

图2为基于干涉测量法的长曲率半径测量系统示意图,该系统主要包括干涉仪检测系统、DMI系统、精密导轨运动系统、调整系统、电控系统及大理石平台安放系统,所有子系统安装在具有较高刚度和稳定性的大理石平台上。

测量时,被测件固定于四维调整系统上,且受滚珠丝杠驱动沿精密位移导轨左右移动。首先调整被测件的 $Z$ 向位置,使从标准镜(Transmission Sphere, TS)出射的光束聚焦在被测面表面,通过调整被测件光轴使其与干涉仪出射光轴相重合,直至出现猫眼干涉图样(即为猫眼位置);再沿 $Z$ 向移动被测件使TS出射光垂直入射到被测表面,干涉图样显示零条纹或几根直条纹(即为共焦位置);利用DMI系统测量被测件移动的距离,得到被测表面的曲率半径。根据任务需求,该曲率半径测量系统可实现对曲率半径为150~2000 mm的凹球面的高精度测量。

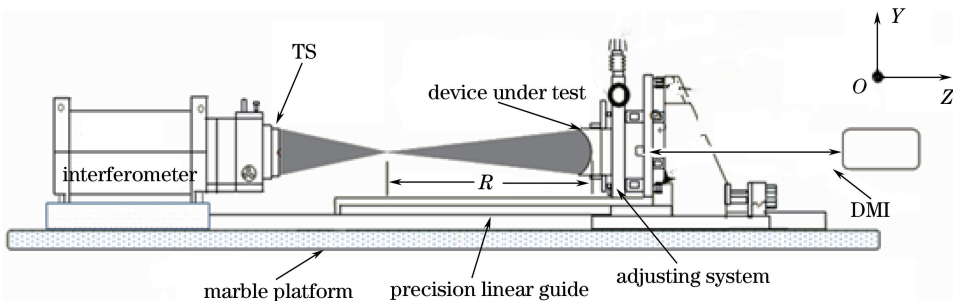


图2 长曲率半径测量系统示意图

Fig. 2 Diagram of large curvature radius measurement system

## 3 精度设计

基于上述方法和系统进行曲率半径测量时,理论上待测量的曲率半径值为猫眼位置与共焦位置的相对

距离,实际测量时会受到多种因素的影响,使得测量结果产生误差。因此,有必要在系统的设计阶段对影响测量结果的误差源进行分析,并将系统的整体精度指标作为各子系统结构设计的输入指标分配给各子系统及相关结构部件。

### 3.1 影响长曲率半径测量系统误差的因素

#### 3.1.1 定焦误差

定焦误差是由于对猫眼位置和共焦位置的判读不准确而造成的误差,定焦误差与干涉仪测量系统、标准镜头及被测光学元件的面形误差和测量过程中的姿态有关<sup>[8-9]</sup>。具体到长曲率半径测量系统,影响系统定焦误差的因素包括零条纹的判读误差、导轨运动系统的 Z 向分辨率、工件调整系统 X 向和 Y 向的调整分辨率及干涉测量系统中由元件材料及面形引起的偏差。

#### 3.1.2 阿贝误差

当被测长度量和标准长度量不共线时就会产生阿贝误差。在长曲率半径测量系统中,当 DMI 系统的光轴与干涉仪检测系统的光轴或被测元件的光轴不共线时,就会产生被测表面曲率半径测量的阿贝误差。激光测长系统光轴与被测元件光轴之间的偏移会产生阿贝偏离,当被测表面倾斜时产生阿贝偏角。具体地说,干涉仪测量系统与大理石平台安放系统的装配误差、Z 向导轨运动系统与干涉仪测量系统间的装配误差、测长干涉仪及角反射镜的装配误差均会引起测量结果的阿贝误差。

#### 3.1.3 余弦误差

在曲率半径测量过程中,测长系统光轴与被测元件运动轴之间的夹角会导致余弦误差,且此余弦误差会随曲率半径测量长度的增加而增大,因此余弦误差为干涉测长系统光轴与被测元件运动轴之间夹角和被测元件运动距离的函数<sup>[10]</sup>。

#### 3.1.4 直线度误差

待测光学元件在共焦位置和猫眼位置之间相对运动时,运动导轨的直线度误差会导致产生被测面曲率半径的测量不确定度。

#### 3.1.5 死区误差

死区误差是由测长系统光路与干涉仪检测系统光路的光程不相等且未对测量过程中折射率的变化进行补偿造成的,死区误差不会直接影响长曲率半径测量系统结构的设计。通过补偿折射率的变化量和实际测量确定死区长度,即可降低或者确定死区误差,测量时将死区误差作为系统误差予以消除即可。在精密温控实验环境中,由死区误差引起的测量不确定度与其他误差源相比非常小。

#### 3.1.6 环境噪声

环境噪声是指在测量环境的温度、湿度、空气洁净度及流动速度的影响下产生的测量结果的不确定度,通过多次测量来进行测量噪声的统计评估,即进行 A 类不确定度评估。测量噪声包括所有的随机噪声,具体包括干涉仪内部噪声和影响测长的环境噪声。

### 3.2 误差分配

在曲率半径测量的过程中,上述各项误差源均会引入测量结果的不确定度分量,各不确定度分量的综合作用结果不应大于系统的目标不确定度。根据误差理论,当测量结果受多个因素影响而形成若干个不确定度分量时,测量结果的标准不确定度分量用各标准不确定度分量合成<sup>[11]</sup>,以此作为系统误差分配的数学模型,即

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \cdots + u_m^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j} \rho_{ij} u_i u_j}, \quad (1)$$

式中  $u_c$  为合成不确定度,  $u_i, u_j$  分别为第  $i, j$  个不确定度分量,  $\rho_{ij}$  为第  $i, j$  个不确定度分量之间的相关系数,  $m$  为不确定度分量的个数。

结合长曲率半径测量系统构成和误差分析建立系统误差分配树,如图 3 所示,根据误差分配的数学模型对系统的目标不确定度进行分配。

环境噪声对测量结果的影响很大,但对系统的结构设计不会造成直接的影响,故仅需在设计选型的过程中评估元器件对温度和湿度的敏感性。根据大量测量结果,可确定长曲率半径测量系统使用环境中的环境噪声大小为  $u_6 = 2.3 \mu\text{m}(3\sigma)$ ,其中  $\sigma$  为统计分布标准差,  $3\sigma$  准则为误差理论中的一种误差判别准则。

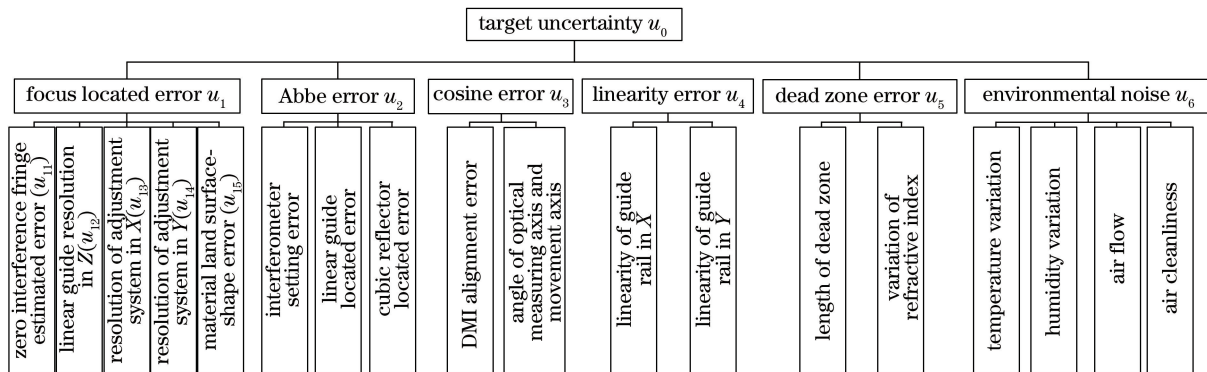


图3 长曲率半径测量系统误差分配树

Fig. 3 Error distribution tree of measurement system for large curvature radius

首先,将系统的目标不确定度分配给除环境噪声外的各误差源,即

$$\omega_1 u_1 = \omega_2 u_2 = \omega_3 u_3 = \omega_4 u_4 = \omega_5 u_5 = \frac{u_0 - u_6}{n}, \quad (2)$$

式中  $u_i (i=1,2,\dots,5)$  为第  $i$  个一级误差源产生的不确定度,  $\omega_i$  为  $u_i$  对应的权重系数,  $n$  为待分配的误差源数。一级误差分配的权重系统根据实验确定<sup>[10]</sup>。

以一级误差分配的结果作为系统二级误差分配的初始值,进行二级误差分配,同理有

$$\omega_{i1} u_{i1} = \omega_{i2} u_{i2} = \dots = \omega_{im} u_{im} = \frac{u_i}{m}, \quad (3)$$

式中  $u_{im} (i=1,2,\dots,5)$  为第  $i$  个一级误差对应的第  $m$  个二级误差源,  $\omega_{im}$  为  $u_{im}$  对应的权重系数。二级误差分配过程中,权重系数结合具体结构零部件的选型及经验值确定。

根据长曲率半径测量系统的使用要求,最终系统的曲率半径测量结果的不确定度  $u_0 \leq 2.5 \mu\text{m} (3\sigma)$ , 以此作为系统的目标不确定度,针对曲率半径测量不确定度要求最严格的样品(凹面曲率半径  $R=900 \text{ mm}$ , 外径  $D=320 \text{ mm}$ )进行系统误差分配。表1为长曲率半径测量系统一级误差分配结果,表2为以定焦误差为例进行二级误差分配的结果。

表1 一级误差分配表

Table 1 First level error distribution

Target uncertainty	Error source	Label	Value / $\mu\text{m}$
$u_0 = 2.5 \mu\text{m} (3\sigma)$	Focus located error	$u_1$	0.49
	Abbe error	$u_2$	0.34
	Cosine error	$u_3$	0.30
	Linearity error	$u_4$	0.15
	Dead zone error	$u_5$	0.11
	Environmental noise	$u_6$	2.40

表2 定焦误差分配

Table 2 Focus located error distribution

Uncertainty of focus located error	Error source	Label	Value / $\mu\text{m}$
$u_1 = 0.49 \mu\text{m} (3\sigma)$	Zero interference fringe estimated error	$u_{11}$	0.01
	Linear guide resolution in Z direction	$u_{12}$	0.20
	Resolution of adjustment system in X direction	$u_{13}$	0.25
	Resolution of adjustment system in Y direction	$u_{14}$	0.25
	Material and surface-shape error	$u_{15}$	0.23

### 3.3 不确定度合成

对系统的目标不确定度进行分配后,需要对分配的不确定度进行合成,以验证分配结果的合理性。在对

长曲率半径测量系统进行误差分析的过程中,各误差源之间的耦合性很小,因此可忽略各误差造成的不确定度相关项。对于长曲率半径测量系统,有

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \cdots + u_m^2}, \quad (4)$$

式中  $u_c$  为系统的合成不确定度,  $u_k$  ( $k=1, 2, \dots, m$ ) 为第  $k$  个一级误差源的目标不确定度,  $m$  为一级误差源的个数。各级系统误差分配结果应满足误差分配的数学模型:

$$u_{ci} = \sqrt{u_{i1}^2 + u_{i2}^2 + \cdots + u_{im}^2} \leq u_i, \quad (5)$$

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \cdots + u_6^2} \leq u_0, \quad (6)$$

式中  $u_{ci}$  为第  $i$  个一级误差源的合成不确定度,  $u_{ik}$  为一级误差源  $i$  的第  $k$  个二级误差源的目标不确定度,  $u_i$  为第  $i$  个误差源的合成不确定度,  $u_0$  为系统的目标不确定度。将表 2 中分配结果代入(5)式可得  $u_{c1} = 0.47 \mu\text{m}$ ,  $u_1 = 0.49 \mu\text{m}$ , 将表 1 中分配结果代入(6)式可得  $u_c = 2.498 \mu\text{m}$ ,  $u_0 = 2.5 \mu\text{m}$ , 说明对长曲率半径测量系统误差分配的结果满足要求。

以上对长曲率半径测量系统误差的分配是结合具体的结构和实际测量条件进行的,运用上述公式对误差分配和合成结果进行反复迭代和验算,最终得到符合实际设计条件的分配结果。以此误差分配结果作为各相关子系统结构设计的输入,将由直线度误差分配得到的导轨安装的直线度误差作为导轨选型及装调的依据,由定焦误差分配得到导轨 Z 向移动的分辨率,并将其作为导轨及丝杠选型的依据,由定焦误差分配得到四维调整系统 X 向和 Y 向的分辨率,从而进行调整系统的结构设计工作。

## 4 提高测量精度的措施

为了提高长曲率半径测量系统的测量精度,除了在系统结构设计阶段进行合理的精度设计,还需要通过其他补偿或调整提高系统的测量精度,主要措施有以下几种。

1) 三路干涉测长系统。该系统采用三路干涉测长系统,连接三路测长干涉仪角反射镜的中心点可形成等边三角形,该等边三角形的中心与 DMI 系统的光轴在一条直线上,从而使测长干涉仪的阿贝误差最小。通过三路测长系统的度数计算监测工件台在测量过程中倾斜量的相对变化,以便进行实时修正并增强测量重复性。

2) 环境补偿。通过实时的温度、湿度和气压补偿<sup>[1,12]</sup>,降低环境噪声引入的测量不确定度分量。长曲率半径测量系统在精密温控洁净间内使用,保证了测量系统的稳定性。

3) 提高干涉条纹的判读精度<sup>[13]</sup>。测量过程中可在较短的时间间隔内进行多次测量并取平均值,从而可提高干涉条纹的判读精度和减小误差。

4) 消除轴向运动机构的误差。电机驱动丝杠运动机构使被测件在猫眼位置与共焦位置往复运动过程中存在回程误差,在运动系统两端设置零位开关,测量过程中进行多次回零,可在一定程度上提高测量精度。

5) 辅助装调。导轨运动系统及测长系统很难通过一次装配保证设计精度,系统集成过程中通过辅助工装进行高精度装调,可提高长导轨及干涉测长系统的装配精度。

## 5 结 论

结合现阶段研究成果,对自研长曲率半径测量系统的精度设计及分析方法进行了研究。分析了影响测量精度的误差因素,建立了长曲率半径测量系统误差分配树,根据误差理论对系统测量精度的目标不确定度进行分配和合成,总结并提出了提高曲率半径测量精度的措施,根据误差分配结果设计了符合使用需求的长曲率半径测量系统。

## 参 考 文 献

- [1] Peng Shijun, Miao Erlong, Shi Zhenguang, *et al.* Research on high-precision measurement of radius of curvature[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011201.  
彭石军, 苗二龙, 史振广, 等. 高精度曲率半径测量研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011201.

- [2] Xu Yongxiang, Chen Lei, Zhu Rihong, *et al.* Study on the measurement of radii of curvature of mini-spheres[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(9): 1159-1162.  
徐永祥, 陈磊, 朱日宏, 等. 微小球面曲率半径的测量研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(9): 1159-1162.
- [3] Malacara D. Optical shop testing[M]. 3<sup>rd</sup> ed. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [4] Selberg L A. Radius measurement by interferometry[J]. Optical Engineering, 1992, 31(9): 1961-1966.
- [5] Xu Deyan, Wang Qing, Gao Zhishan, *et al.* Active optical element testing and international standard[M]. Beijing: Science Press, 2009.  
徐德衍, 王青, 高志山, 等. 现行光学元件检测与国际标准[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [6] Wang Xiaokun, Zheng Ligong. A method for testing radius of curvature of optical spheric surface[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812010.  
王孝坤, 郑立功. 一种精确测量光学球面曲率半径的方法[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812010.
- [7] 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检测[J]. 光学精密工程, 2011, 19(6): 1207-1212.
- [8] Mao Jie. Study on techniques of high-accuracy radius interferometric measurement[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.  
毛洁. 高精度曲率半径干涉测量技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [9] Mao Jie, Hou Xi, Wu Fan. Position error analysis in radius interferometric measurements[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(7): 0712003.  
毛洁, 侯溪, 伍凡. 曲率半径干涉测量定焦误差分析[J]. 光子学报, 2015, 44(7): 0712003.
- [10] Peng Shijun, Miao Erlong. Sub-micron precision measurement of radius of curvature and uncertainties analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0512001.  
彭石军, 苗二龙. 亚微米高精度曲率半径测量及其不确定度分析[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0512001.
- [11] Ma Hong, Wang Jinbo. Instrument precision theory[M]. Beijing: Beihang University Press, 2009.  
马宏, 王金波. 仪器精度理论[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
- [12] Miao Erlong, Gu Yongqiang. Temperature influence on Fizeau interferometer repeatability[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1212008.  
苗二龙, 谷勇强. 温度对 Fizeau 干涉仪测量重复性的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1212008.
- [13] Wang Qing, Xu Xinhua. Precision analysis of measurement of radius of curvature by interferometer[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2009, 39(S2): 55-59.  
王青, 徐新华. 干涉仪测量球面曲率半径的精度分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2009, 39(S2): 55-59.