

文章编号: 1005-5630(2015)06-0522-04

# 大口径高精度斐索干涉仪球面参考镜设计

曲 艺, 苏东奇

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 设计了一款口径为 30.48 cm 高精度斐索激光干涉仪参考镜, 其  $F$  数为 0.82, 参考面半径为 224.99 mm。所设计的参考镜其透射波前峰谷值为  $0.095\lambda$ , 均方根值为  $0.028\lambda$ , 透射波前斜率最大值为  $11\ \mu\text{rad}$ 。理论分析了参考镜的回程误差对面形检测精度的影响, 其最大值为 0.29 nm。利用 Zemax 光学设计软件对参考镜进行了仿真分析, 仿真与实验结果表明, 该标准镜头可满足精度 1 nm 的元件面形检测需求。

**关键词:** 光学设计; 斐索干涉仪; 标准镜头; 面形测量

**中图分类号:** O 43 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.06.011

## Design of a high-precision reference spherical lens for Fizeau interferometer

QU Yi, SU Dongqi

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** A high-precision reference spherical lens is designed. The  $F$  number of the lens is 0.82. The wavefront PV value is  $0.09\lambda$  and RMS value is  $0.028\lambda$ . The slope of wavefront is  $11\ \mu\text{rad}$ . We calculate the retrace error of the reference spherical lens. The maximum of retrace error is 0.29 nm. A part of surface is measured with the reference spherical lens. The results show that precision of 1 nm can be reached.

**Keywords:** optical design; Fizeau interferometer; reference spherical lens; metrology

## 引 言

斐索激光干涉仪主要用于光学元件的表面面形测量, 它具有非接触、无损伤、精确度高等突出优点, 目前已成为光学元件检测的首选方式<sup>[1-2]</sup>。标准参考镜头是斐索激光干涉仪的重要组成部分, 它将斐索激光干涉仪输出的平面波转化为一个高精度的球面波, 用于球面元件的表面面形测量<sup>[3]</sup>。斐索激光干涉仪测量元件表面面形的原理如图 1 所示, 标准镜头 1 将斐索激光干涉仪输出的平面波转变为球形波, 同时将输出的激光分离为参考光束和测量光束两部分。标准镜头最后一个面称为参考面 2, 一般是一个消球差的曲面。参考面将约 4% 的激光反射回干涉仪, 形成参考波前, 剩余的激光作为测量波前, 照射至待测元件 3。测量光线垂直穿过参考面后, 照射到待测元件表面, 经过元件表面反射后, 原路返回至参考面, 并再次垂直穿过参考面, 与参考波前共同被斐索激光干涉仪内部探测器接收。由于测量波前携带了待测元件表面的面形信息, 通过数据处理, 可以得到元件的表面面形。

收稿日期: 2015-04-20

基金项目: 国家科技重大专项资助课题(2009ZX02205)

作者简介: 曲 艺(1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光学仪器设计与检测。E-mail: quyi@ciomp.ac.cn

标准参考镜  $F$  数定义为标准参考镜工作焦距除以标准参考镜的入瞳口径,球面元件  $R$  数定义为球面半径除以实际的通光口径。利用斐索激光干涉仪测量元件表面面形时,只有标准参考镜  $F$  数小于待测量元件  $R$  数,才能将待测量元件的通光口径测全。由于小  $F$  数标准参考镜,弯曲光线的角度大,因此设计与加工难度也迅速增大。美国的 ZYGO 公司已有商业化的标准参考镜出售,其所出售产品的  $F$  数范围为 0.65~11,入射光束口径范围为 25 mm~15.24 cm。日本的 MGKK 系列标准参考镜的  $F$  数范围为 0.75~45,入射光束口径范围为 100 mm~150 mm。国内也有标准参考镜产品出售,其参数基本与上述国外公司产品参数相同, $F$  数范围为 0.75~11,口径范围为 25 mm~15.24 cm。随着产品对工艺技术要求的不不断提高,比如光刻物镜中非球面加工与检测,为了提高环带拼接对非球面检测精度<sup>[4]</sup>,需要设计具有更小系统误差的参考镜以满足需求。本文设计了一款大口径高精度  $F$  数 0.82 的标准参考镜,可以满足精度 1 nm 的面形检测要求。

## 1 高精度标准参考镜设计要求

标准镜头属于小视场、单波长、大口径类光学镜头,主要考虑的像差为初级球差与高级球差。目前主流的非索激光干涉仪,通常是移相式干涉仪,通过波长移相或者机械移相,反演出元件表面的面形<sup>[5]</sup>。标准球面参考镜是干涉成像光路中的一个组成部分,将被测件成像至 CCD 上。因而,设计标准球面参考镜时只考虑照明光路,并且考虑对轴上和轴外视场的波像差都进行校正,所设计的参考镜视场角为  $0.01^\circ$ ,对应载频条纹约 165 根。对于测试要求 PV 值  $0.1\lambda$  的元件,当标准镜的透射波前小于  $1\lambda$ ,参考面面形优于  $0.1\lambda$ ,基本就可以满足使用要求<sup>[6]</sup>。但是对于精度要求更高的光学元件,如光刻镜头、高功率激光器系统中光学元件,其面形精度要求达到均方根值 1 nm,同时对镜片的中高频也有要求,对干涉仪系统及标准镜头成像质量提出更高的要求<sup>[7-10]</sup>。此时不仅要考虑镜头透射波前的大小,还要考虑透射波前斜率对回程误差的影响。文献<sup>[11]</sup>中给出了标准镜头的透射波前斜率与回程误差  $OPD$  一个经验公式

$$OPD \approx \alpha^2 \times R_2 \times \left( \frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) \quad (1)$$

式中: $\alpha$  为透射波前斜率; $R_1$  为参考面半径; $R_2$  为测试元件半径。通过式(1)可以看出,当测试元件半径接近参考面半径时,系统的回程误差小,而当测试半径与参考面半径差值增大时,系统的回程误差会迅速增加。当测试面半径为参考面半径的 5% 时,系统的回程误差较测试面半径与参考面半径相等时增大近 10 倍。因此,对于半径较小的光学元件进行面形测量,要尽量使用半径与之相匹配的标准镜头,以降低测试时的系统误差。

## 2 高精度标准参考镜设计与仿真

30.48 cm 斐索激光干涉仪参考镜头的  $F$  数为 0.82,设计使用了 5 片光学元件。设计参数见表 1,光学结构图、参考镜透射波前、参考镜透射波前斜率分别见图 2,图 3,图 4。

设计结果表明,标准镜的透射波前峰谷值为  $0.095\lambda$ ,均方根值为  $0.028\lambda$ ,透射波前斜率最大值为

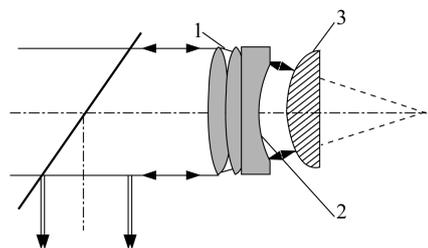


图 1 面形测量原理图

Fig. 1 Structure of a Fizeau interferometer for testing surface

表 1 高精度标准镜头设计参数

Tab. 1 Parameters of the high-precision reference lens

序号	材料	半径/mm	中心厚/mm
光阑			50.000
1	h-LaK3	-277.320	50.000
2		-672.370	79.950
3	h-LaK3	-1363.450	60.000
4		-456.300	70.000
5	h-LaK3	771.200	48.200
6		-3685.254	5.000
7	h-LaK3	313.095	49.000
8		604.700	5.000
9	Silica	176.260	50.000
10		224.990	224.990

11.02  $\mu\text{rad}$ 。表 2 给出不同半径待测元件条件下,该标准镜头的回程误差。

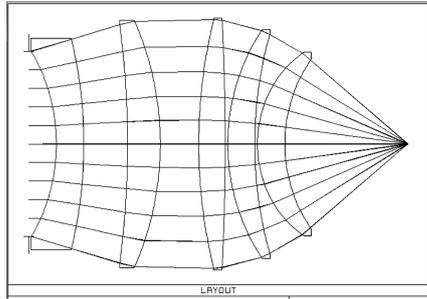


图 2  $F$  数为 0.82 的透射参考镜光学结构图

Fig. 2 Structure of the reference lens

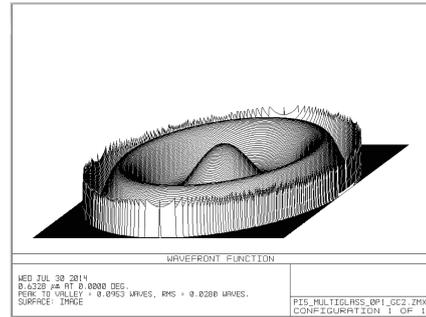


图 3 标准镜头的透射波前

Fig. 3 Wavefront of the reference lens

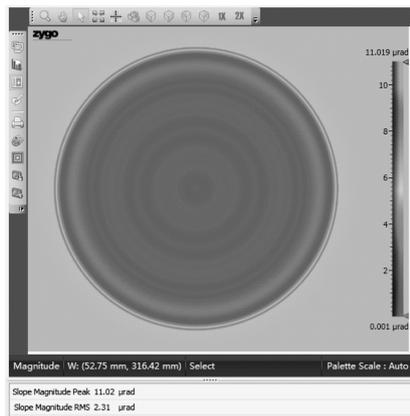


图 4 标准镜头透射波前斜率

Fig. 4 Slope of the wavefront

当待测面半径  $R_2$  为 22.5 mm 时,系统回程误差为 0.29 nm,当待测面半径为 202.5 mm 时,回程误差为 0.05 nm。说明当测试元件半径与标准镜头参考面半径比值为 0.1~0.9 时,理论上可实现 1 nm 的面形检测精度。

利用 Zemax 光学软件设计了一个斐索激光干涉仪的模型,对设计的标准镜头进行了仿真,给定两个不同的 Zernike 测试面,其参数如表 3 所示。通过大量的光学追迹,得到了干涉仪的理论干涉图像,如图 5 所示。

Zemax 非序列中,Zernike 面为标准多项式。Z5 和 Z9 分别代表  $45^\circ$  方向象散和 Y 方向三叶,与图 5 中各仿真图像相对应,说明所设计的标准镜头及仿真过程是正确的。

### 3 实验结果

利用干涉仪配备大口径平面参考镜,对所研制的球面参考镜透射波前进行了测试,图 6 为标准镜实际波前图,其峰谷值大小为  $0.418 \lambda$ ,均方根值为  $0.075 \lambda$ 。

利用所研制的球面参考镜,对一光学元件加工结果进行了测试,该元件为凸球面,参数与上述仿真所用参数相同,通光口径为 200 mm,半径为 180 mm。图 7 给出该光学元件最终的面形测试结果。为了验

表 2 不同半径待测元件标准镜头回程误差

Tab. 2 Retrace error of the reference lens

序号	半径值/ mm	与参考面 半径比值	回程误差/ nm
1	22.5	0.1	0.29
2	67.5	0.3	0.12
3	112.5	0.5	0.08
4	157.5	0.7	0.06
5	202.5	0.9	0.05

表 3 不同测试面参数

Tab. 3 Parameters of the test surface

序号	半径/mm	口径/mm	Zernike 项	数值/nm
1	180	200	Z5	100
2	180	200	Z9	100

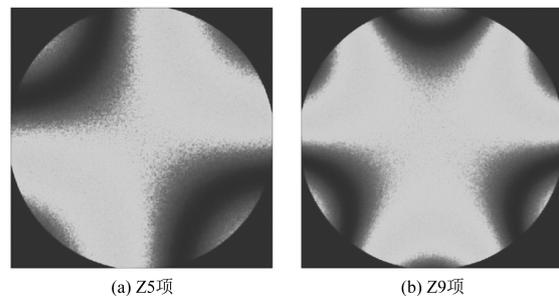


图 5 不同 Zernike 系数仿真干涉图像

Fig. 5 Simulation of the fringe pattern with different Zernike coefficients

证测量结果的复现性,我们将元件以干涉仪出射光方向为中心轴,每旋转 $60^\circ$ 测量一组数据,表4给出不同旋转角度的测试结果。元件的测试结果为面形均方根值为 $0.5\text{ nm}$ ,实验结果表明所研制的标准镜可以满足均方根值为 $1\text{ nm}$ 的检测精度。

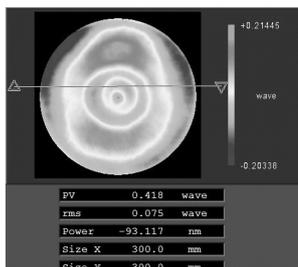


图6 标准镜透射波前测量结果

Fig. 6 Result of the reference lens wavefront

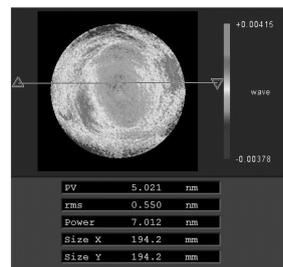


图7 元件表面面形测量结果

Fig. 7 Results of the lens surface

## 4 结论

标准镜头是斐索激光干涉仪的重要组成部分,利用 Zemax 设计了一款高精度大口径的激光干涉仪标准镜头,其透射波前峰谷值为 $0.09\lambda$ ,均方根值为 $0.028\lambda$ 。利用透射波前斜率分析了设计参考镜的回程误差,分析结果表明当测量元件半径约为参考面半径 $90\%$ 时,回程误差为 $0.05\text{ nm}$ ,当测量半径为参考面半径 $10\%$ 时,回程误差为 $0.29\text{ nm}$ 。并利用 Zemax 对其进行了仿真计算,给待测面分别赋予不同的 Zernike 系数,通过大量的光学追迹得到仿真的干涉图。通过分析表明获得的仿真干涉图与所设计的 Zernike 系数是完全一致的。仿真与实验结果说明所设计的标准镜,可满足面形精度均方根值为 $1\text{ nm}$ 的元件面形检测需求。

表4 不同旋转角度元件面形测量结果

Tab. 4 Results of the lens surface

序号	角度/ $(^\circ)$	峰谷值/nm	均方根值/nm
1	0	5.021	0.55
2	60	5.282	0.503
3	120	6.267	0.522
4	180	5.436	0.499
5	240	5.031	0.51
6	300	4.838	0.521
平均值		5.3125	0.517 5
标准偏差		0.513	0.018 4

## 参考文献:

- [1] LESLIE L D. Fourier-transform phase-shifting interferometry[J]. Applied Optics, 2003, 42(13): 2354-2365.
- [2] 苏海,刘缠牢,穆绵.一种检测光学元件面形的新方法[J].光学仪器,2014,36,(4):295-299,310.
- [3] SELBERG L A. Interferometer accuracy and precision[C]//LORENZEN M, CAMPBELL D R J, JOHNSON C. Proceeding of the SPIE 1400, Optical fabrication and testing. Singapore: SPIE, 1990, 1400: 24.
- [4] 陈宝钢,明名,吕天宇.大口径球面反射镜曲率半径的精确测量[J].中国光学,2014,7(1):163-168.
- [5] KAJAVA T T, LAURANTO H M, FRIBERG A T. Interference pattern of the Fizeau interferometer [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1994, 11(7): 2045-2054.
- [6] WANG B X, WU F, JIANG S L, et al. Optomechanical structural design and analysis of 300 mm aperture reference spherical lens [J]. SPIE, 2012, 8417: 84171U.
- [7] HUANG C S. Propagation errors in precision Fizeau interferometry [J]. Applied Optics, 1993, 32(34): 7016-7021.
- [8] JÓYWICKI R. Influence of aberrations of Fizeau interferometer elements on measurement errors [J]. Applied Optics, 1991, 30(22): 3126-3132.
- [9] GAO Z S, CHEN J B. Tolerance analysis and test of focus' coincidence with last surface's curvature center for reference lenses[J]. SPIE, 2002, 4927: 186.
- [10] GAO Z S, CHEN L, ZHOU S Z, et al. Computer-aided alignment for a reference transmission sphere of an interferometer[J]. Optical Engineering, 2004, 43(1): 69-74.
- [11] SYKORA D M. A model for cavity induced errors with wavefront slope in high accuracy spherical Fizeau metrology [J]. Fio/LS/META/OF&T, OSA Publishing, 2008.