

$\Phi 200$ mm 口径长焦距球面干涉测试及装备

赵智亮^{1,2}, 刘敏^{1*}, 陈立华², 赵子嘉¹, 陈辉¹

(1. 成都太科光电技术有限责任公司, 四川 成都 610041;

2. 成都精密光学工程研究中心, 四川 成都 610041)

摘要:为实现对大尺寸光学材料及系统元件的高精度对准测试,设计了一种新型 $\Phi 200$ mm 口径长焦距准直干涉测试装置。该装置以球面标准镜作为参考镜,结合斐索型透射式干涉机制和长焦距准直测试原理对凹球面大曲率半径光学元件进行面形精度检测,最大测试口径为 $\Phi 226.67$ mm,且球面标准镜和球面标准反射镜同轴共球心,大幅度减小了测试空腔距离。结果表明,该系统空腔测试精度 PV 值为 $0.097\lambda@632.8$ nm, RMS 值为 $0.013\lambda@632.8$ nm,系统重复稳定性优于 $\lambda/500@632.8$ nm,可实现曲率半径为 7 500 ~ 8 500 mm 测试,且大曲率半径测试误差小于 1/1 000。

关键词:长焦距准直测试系统;球面干涉仪;大曲率半径

中图分类号:TH744.3 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20191204.0866

$\Phi 200$ mm long focal length spherical interference test and equipment

ZHAO Zhi-liang^{1,2}, LIU Min^{1*}, CHEN Li-hua², ZHAO Zi-jia¹, CHEN Hui¹

(1. Chengdu Tyggo Photo-Electricity Co. Ltd., Chengdu 610041, China;

2. Chengdu Fine Optics Engineering Research Center, Chengdu 610041, China)

* Corresponding author, E-mail:1923733665@qq.com

Abstract: In order to achieve high-precision alignment tests for large-size optical materials and system components, a new $\Phi 200$ mm long focal length collimation interference test device was designed. The device uses a spherical standard mirror as a reference mirror, combined with a phenotype transmissive interference mechanism and a long focal length collimation test principle to detect the surface accuracy of a concave spherical large curvature radius optical component. The maximum test aperture is $\Phi 226.67$ mm. The spherical standard mirror and spherical standard reflection mirror are coaxial with the center of the sphere, which greatly reduces the distance of the test cavity. The results show that the PV test accuracy of the system is $\lambda/500@632.8$ nm, and the radius of curvature test range is 7 500 ~ 8 500 mm with the test error of large curvature radius less than 1/1000.

Key words: long focus collimation system; spherical interferometer; large radius of curvature

1 引言

随着大尺寸光学元件测试需求的增加,对光学测试技术的研究也随之不断扩展,从最初的泰曼-格林干涉测试技术^[1]发展到现在比较成熟且广泛使用的斐索干涉测试技术^[2-5],扩大了检测技术及装置对光学元件的不同测试范围。自美国 Perkin Elmer 公司研制出第一台斐索型激光球面干涉仪以来,球面干涉测试装置^[6-8]的制备与应用研究就受到国内外学者的广泛关注,但仅限于小尺寸光学元件的检测,且测试精度较低。现代球面干涉仪^[9]正朝向大口径、高精度和复杂面形的趋势发展,将成为国内外科科研人员关注的重点探讨领域。

研究发现,球面干涉仪类型包括立式透射式、立式反射式、卧式透射式和卧式反射式 4 种,当大尺寸球面元件在实际使用中处于倒置状态时,由于球面元件对支撑精度的要求非常高,故在加工和装调过程中^[10-11],需要保证检测条件与环境一致,即准直物镜和标准球面镜以及标准球面反射镜同时保持倒置状态,这无法保证高精度对准测试。现有技术中,根据测试装置的尺寸检测要求,对球面元件最大测试曲率半径为 0 ~ 5 000 mm。传统长焦距测试^[12]采用凹球面标准检测镜和凹球面标准反射镜,其空腔测试距离较长,占用空间比例大。为满足对大曲率球面光学元件的高精度对准测试,本文设计、研制了一款新型大口径长焦距立式斐索型球面干涉测试装置,选用凸球面标准镜和凹球面标准反射镜形成干涉空腔,大大减小空间测试距离,在光学检测领域具有广泛的应用前景。

2 $\Phi 200$ mm 口径长焦距测试方案

2.1 测试光路

$\Phi 200$ mm 口径长焦距球面干涉测试装置由激光系统、扩束聚焦系统、干涉成像系统、对准测试系统和长焦距准直测试系统 5 部分组成,光路设计见图 1 所示。激光光源出射的光束经扩束聚焦系统以发散光输出,通过对准测试系统对检测

光路调节对准,确定测试元件的摆放位置。干涉测试过程中,在球面标准镜 21 后表面反射形成标准参考光,原光束直接透射标准球面镜头,于球面标准反射镜 22 的前表面反射形成测试光。上述标准参考光和测试光沿原光路返回,形成干涉测试光,最终成像于 CCD 靶面。该装置长焦距准直输出有效口径为 $\Phi 200$ mm,包括球面准直物镜 18、球面标准镜 21 和球面标准反射镜 22,元件外径为 220 mm,通光口径为 210 mm。激光光源采用 632.8 nm 波长的氦氖激光器,输出功率为 1.5 mW。其中干涉成像系统和对准测试系统的成像部分分别采用 CCD 和 CMOS 成像元件进行成像,分辨率为 1 024 pixel \times 1 024 pixel。球面标准镜 F 数为 37.5,经计算实际测试元件的最大口径为 $\Phi 226.67$ mm。

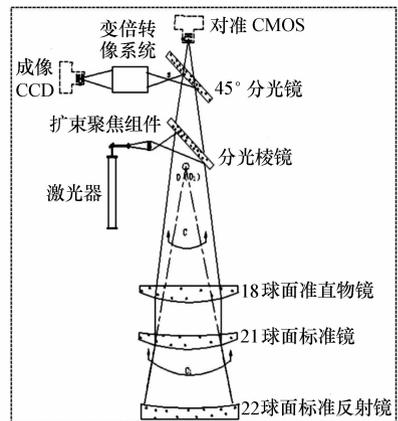


图1 长焦距球面干涉装置光路示意图

Fig. 1 Optical path schematic of the long focal length spherical interference device

2.2 $\Phi 200$ mm 口径凹球面反射镜设计

本文研制的 $\Phi 200$ mm 口径长焦距球面干涉测试系统中,所用的 $\Phi 200$ mm 口径凹球面反射镜如图 2 所示,其通光口径为 $\Phi 210$ mm,有效口径为 $\Phi 200$ mm,设计半径 8 000 mm。

$\Phi 200$ mm 口径球面标准反射镜的光学像差设计如图 3 所示,从图 3 左图可看出中心视场的输出波前 PV 值为 0.085λ ,RMS 值为 0.0253λ ,在 632.8 nm 工作波长下重复性优于 $\lambda/20$ 。对应球面标准反射镜的弥散圆斑图像结果如图 3 右图所示,在全视场时,中心视场 RMS 为 $33.283\ \mu\text{m}$,具有接近衍射受限成像的特性,达到分辨要求。



图 2 $\Phi 200$ mm 口径球面标准反射镜光学设计图像
Fig.2 Optical design of $\Phi 200$ mm spherical standard reflection mirror

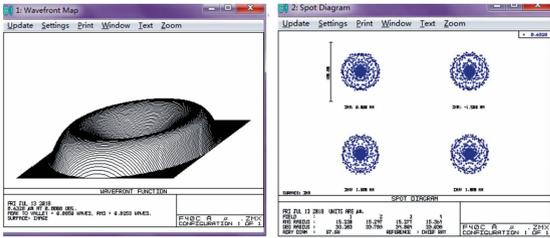


图 3 632.8 nm 波长下球面标准反射镜的波像差和 spot 图像
Fig.3 Wave aberration and spot results of the spherical standard reflection mirror at 632.8 nm

图 3 632.8 nm 波长下球面标准反射镜的波像差和 spot 图像
Fig.3 Wave aberration and spot results of the spherical standard reflection mirror at 632.8 nm

3 $\Phi 200$ mm 口径球面面形保障技术

为了实现 $\Phi 200$ mm 口径长焦距球面干涉仪的高精度检测,球面标准镜的加工面形精度是整体干涉测试的参考标准。考虑到球面标准镜面形检测难度较大,拟采用两步检测法:(1)利用 4D 动态干涉仪对 $\Phi 200$ mm 口径球面标准反射镜进行面形检测,如图 4 所示,得到球面标准反射镜的面形检测结果;(2)以球面标准反射镜面形检测结果为基准,利用 $\Phi 200$ mm 口径长焦距球面干涉



图 4 4D 动态干涉检测光路图

Fig.4 Optical path of 4D dynamic interference detection

测试装置进行干涉测试,通过相移计算方式,即可得到 $\Phi 200$ mm 口径球面标准镜的面形精度以及其它重要参数。本文通过标定球面标准镜面形精度参数,节省光路调节时间,大大缩短测试距离,并解决长距离光路对准测试等问题,为后续 $\Phi 200$ mm 口径大曲率待测元件提供测试基础。

3.1 球面标准反射镜面形保障

根据光学设计结果,分别采用经典低速抛光加工技术和离子束抛光技术对 $\Phi 200$ mm 口径凹球面标准反射镜加工处理。经过经典低速抛光加工处理,测试得到球面标准反射镜的面形检测结果:PV 值为 $0.103\lambda @ 632.8$ nm, RMS 值为 $0.018\lambda @ 632.8$ nm,如图 5 所示。

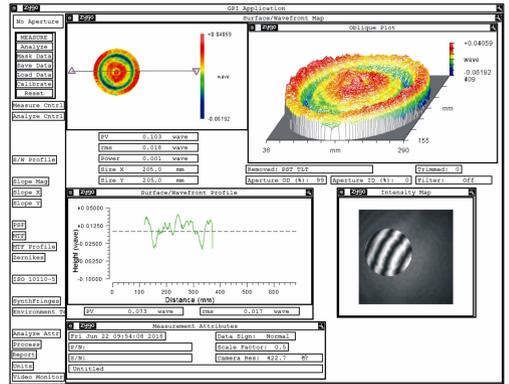


图 5 经典低速抛光加工下球面标准反射镜检测结果
Fig.5 Detection results of spherical standard reflection mirror in the classic low-speed polishing process

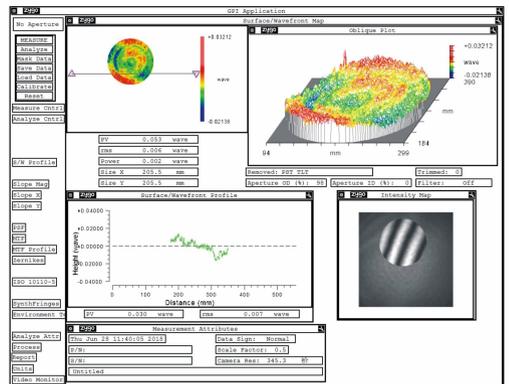


图 6 离子束抛光下球面标准反射镜检测结果
Fig.6 Detection results of spherical standard reflection mirror under ion beam polishing

经离子束抛光加工处理后,得到球面标准反

射镜的面形检测结果:PV 值为 0.053λ @ 632.8 nm, RMS 值为 0.006λ @ 632.8 nm,如图 6 所示。相比单轴经典加工技术,离子束抛光工艺具有高效率、高精度以及耗时短等优良特性。

3.2 球面标准镜面形保障

以离子束抛光下的球面标准反射镜面形检测结果为基准,利用 Φ200 mm 口径长焦距球面干涉测试装置进行干涉测试,最终通过相移计算得到 Φ200 mm 口径标准球面镜的面形参数,见图 7。经过经典低速抛光加工处理,测试得到球面标准镜的面形检测结果:PV 值为 0.161λ @ 632.8 nm, RMS 值为 0.026λ @ 632.8 nm。

RMS 值为 0.012λ @ 632.8 nm,如图 8 所示。

4 测试结果与数据分析

在 Φ200 mm 口径长焦距球面干涉测试装置进行测试时,以第 3 节所述的球面标准镜和球面标准反射镜形成测试空腔,结果如图 9 所示。系统精度为:PV 值达到 0.097λ @ 632.8 nm,系统 RMS 值达到 0.013λ @ 632.8 nm。

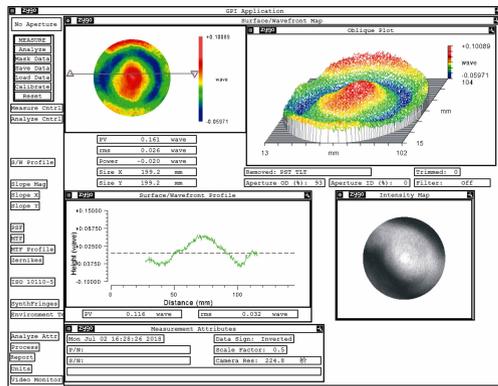


图 7 经典低速抛光加工下球面标准镜检测结果

Fig. 7 Detection results of spherical standard mirror in the classic low-speed polishing process

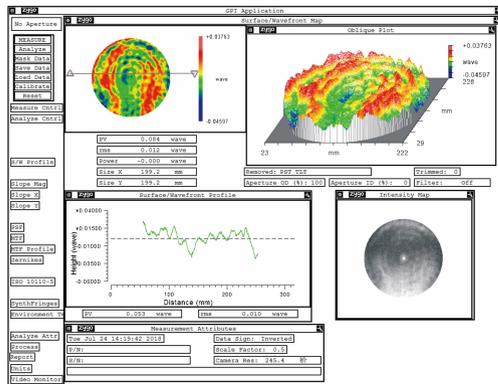


图 8 离子束抛光下球面标准镜检测结果

Fig. 8 Detection results of spherical standard mirror under ion beam polishing

经离子束抛光加工处理后,得到球面标准镜的面形检测结果:PV 值为 0.084λ @ 632.8 nm,

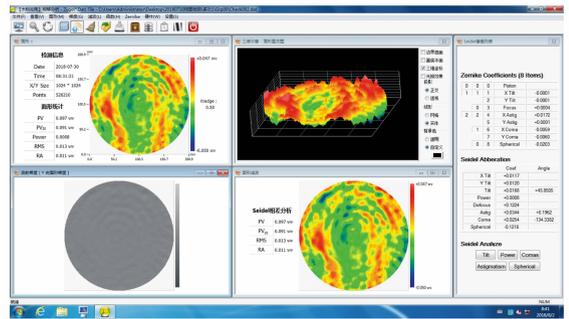


图 9 系统空腔测试结果

Fig. 9 System cavity test results

表 1 系统空腔稳定性测试数据结果

Tab. 1 System cavity stability test results

序号	PV	PEAK	VALLY	RMS
1	0.131 6	0.055 9	-0.075 7	0.017 6
2	0.098 4	0.041 8	-0.056 6	0.012 4
3	0.106 5	0.046 9	-0.059 6	0.012 5
4	0.099 3	0.052 2	-0.047 1	0.01 3
5	0.104	0.052 8	-0.051 2	0.013 8
6	0.097 3	0.051	-0.046 2	0.012 8
7	0.097 2	0.045 4	-0.051 8	0.013 1
8	0.097 6	0.051 5	-0.046 2	0.011 6
9	0.105 2	0.048 5	-0.056 8	0.013 7
10	0.105 2	0.052 5	-0.052 7	0.013 5
11	0.096 1	0.046 5	-0.049 5	0.013
12	0.094 3	0.042 6	-0.051 7	0.013 8
13	0.105 5	0.046 9	-0.068 6	0.013 2
14	0.176 6	0.061 5	-0.099 2	0.019 6
15	0.174 1	0.038 1	-0.042 1	0.014 1
16	0.088 7	0.083 3	-0.098 6	0.011 5
最大值	0.176 6	0.083 3	-0.042 1	0.019 6
最小值	0.088 7	0.038 1	-0.099 2	0.011 5
平均值	0.111 1	0.015 4	-0.059 6	0.013 7
RMS	0.015 6	0.007 5	0.010 2	0.001 8

同时进行 10 组 16 次系统重复测试,统计计算知 RMS 的重复性为 $0.0018\lambda@632.8\text{ nm}$, 优于 $\lambda/500@632.8\text{ nm}$, 系统空腔重复性测试结果如表 1 所示。

采用该长焦距球面干涉测试系统,测试口径 $\Phi 130\text{ mm}$, 半径 $R8\ 227.417\ 7\text{ mm}$ 的待测凹球面镜,测得面形精度 $PV = 0.125\lambda@632.8\text{ nm}$, $RMS = 0.016\lambda@632.8\text{ nm}$, 测试结果如图 10 所示。

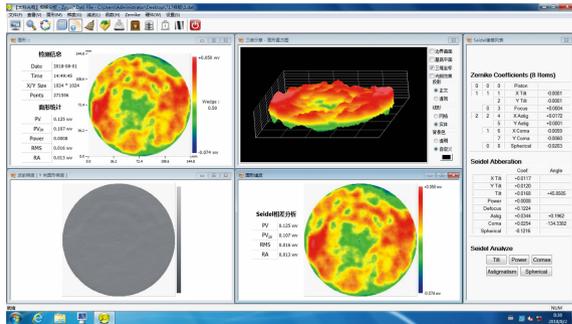


图 10 待测凹球面镜测试结果

Fig. 10 Results of the concave spherical mirror measured by spherical interferometer test system

所示。上述 4D 动态干涉仪测试结果与本装置测试结果较吻合,且误差很小,但 4D 动态检测技术占用空间范围大,测试距离长,且光路对准调节耗时较长。

本文研制的 $\Phi 200\text{ mm}$ 口径长焦距球面干涉测试装置,属成都太科光电技术有限公司自研产品,见图 12。该装置测试输出有效通光口径 $\Phi 200\text{ mm}$, 测试凹球面待测镜的曲率半径范围为 $7500 \sim 8500\text{ mm}$ 。



图 12 $\Phi 200\text{ mm}$ 口径长焦距球面干涉测试装置

Fig. 12 $\Phi 200\text{ mm}$ long focal length spherical interference test device

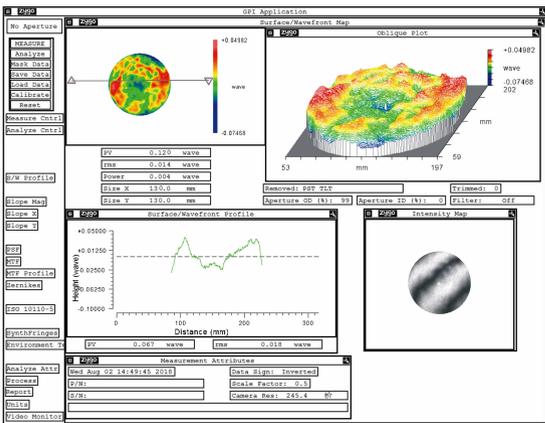


图 11 待测凹球面镜 4D 干涉仪测试结果

Fig. 11 Results of the concave spherical mirror measured by 4D dynamic interferometer

对比 4D 动态干涉测试结果,口径 $\Phi 130\text{ mm}$ 的待测凹球面镜面形精度 $PV = 0.120\lambda@632.8\text{ nm}$, $RMS = 0.014\lambda@632.8\text{ nm}$, 测试结果如图 11

5 结 论

本文研制一种新型 $\Phi 200\text{ mm}$ 口径长焦距准直干涉测试系统装置,实现口径 $\Phi 200\text{ mm}$ 凹球面大曲率半径光学元件面形精度检测,元件曲率半径测试范围为 $7500 \sim 8500\text{ mm}$ 。结果表明,该系统空腔测试精度 PV 值优于 $\lambda/10@632.8\text{ nm}$, RMS 值优于 $\lambda/50@632.8\text{ nm}$, 系统重复性优于 $\lambda/500@632.8\text{ nm}$ 。利用该系统对口径 $\Phi 130\text{ mm}$, 半径 $R8\ 227.417\ 7\text{ mm}$ 的待测凹球面镜测试得到面形精度 PV 值 $0.125\lambda@632.8\text{ nm}$, RMS 值 $0.016\lambda@632.8\text{ nm}$ 。

参考文献:

[1] 韩振华. 基于泰曼-格林干涉的球面面形在线检测仪研制[D]. 福州:福建师范大学,2012.
HAN ZH H. Develop of spherical surface online detector based on Twyman-Green interference[D]. Fuzhou:Fujian Nor-

- mal University,2012. (in Chinese)
- [2] 毛石磊. 菲索干涉仪移相器关键技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2015.
MAO SH L. Research on key technology of phase shifter of Fizeau interferometer[D]. Changchun:Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,2015. (in Chinese)
- [3] 田伟,王平,王汝冬,等. Φ150mm 菲索干涉仪球面标准具结构分析与设计[J]. 光学技术,2011,37(3):275-278.
TIAN W,WANG P,WANG R D,*et al.*. Analysis and design for the structure of reference spheres mirror in Φ150 mm Fizeau interferometer[J]. *Optical Technique*,2011,37(3):275-278. (in Chinese)
- [4] 张健. 超高精度菲索干涉仪不确定度分析[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2011.
ZHANG J. Uncertainty analysis for super-accuracy Fizeau interferometer[D]. Changchun:Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,2011. (in Chinese)
- [5] 苏志德,史振广,彭吉,等. 菲索干涉仪中精确移相的实现[J]. 中国光学,2013,6(2):244-250.
SU ZH D,SHI ZH G,PENG J,*et al.*. Implementation of accurate phase shift in Fizeau interferometer[J]. *Chinese Optics*, 2013,6(2):244-250. (in Chinese)
- [6] 黄深旺,陈磊,陈进榜,等. 斐索型球面干涉仪移相误差的探讨[J]. 光子学报,1996,25(10):883-888.
HUANG SH W,CHEN L,CHEN J B,*et al.*. Research on phase-shifting errors in a spherical-wave Fizeau interferometer [J]. *Acta Photonica Sinica*,1996,25(10):883-888. (in Chinese)
- [7] 吴航行. 激光球面干涉仪系统误差的测量[J]. 光学仪器,2004,26(3):14-17.
WU H X. Measurement of the systematic error of the laser sphericity interferometer[J]. *Optical Instruments*,2004,26 (3):14-17. (in Chinese)
- [8] 贺军峰,崔庚彦. 高精度大口径球面干涉仪光学系统的设计探讨[J]. 技术与市场,2014,21(4):46-47,49.
HE J F,CUI G Y. Design of high precision large diameter spherical interferometer optical system[J]. *Technology and Market*,2014,21(4):46-47,49. (in Chinese)
- [9] 赵智亮,夏伯才,陈立华,等. 相移干涉测量中相移误差的自修正[J]. 光学精密工程,2013,21(5):1116-1121.
ZHAO ZH L,XIA B C,CHEN L H,*et al.*. Self-correction of phase step error in phase shifting interferometric measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,21(5):1116-1121. (in Chinese)
- [10] KIM I W,LEE C M. A study on the machining characteristics of specimens with spherical shape using laser-assisted machining[J]. *Applied Thermal Engineering*,2016,100:636-645.
- [11] YANG N Y,LEE J. Measurement and prediction of thermal errors of a CNC machining center using two spherical balls [J]. *Journal of Materials Processing Technology*,1998,75(1-3):180-189.
- [12] 杨志文. 菲索型球面干涉仪测试精度分析[J]. 长春光学精密机械学院学报,1988(2):74-80.
YANG ZH W. Measuring accuracy of the Fizeau spherical mirror interferometer[J]. *Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*,1988(2):74-80. (in Chinese)

作者简介:



赵智亮(1974—),男,河北遵化人,博士,副研究员,2007年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,现为成都太科光电技术有限责任公司总经理,主要从事光学检测与高功率激光等方面的研究。E-mail: zzl_siom@163.com



刘敏(1991—),女,四川广安人,2017年于西南科技大学获得材料科学与工程学院硕士学位,主要从事干涉仪项目设计研究和项目管理工作。E-mail: 1923733665@qq.com