

文章编号: 0258-7025(2004)07-0793-04

小 F 数标准球波面透镜组的 $F'C$ 重合误差分析

高志山

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 标准球波面透镜组是光干涉计量测试凸、凹球面形质量的重要测量器具,它能产生 $P-V$ 值优于 $\lambda/20$ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) 的标准球面波,透镜组中末球面为标准球面。其使用特点要求透镜组的焦点 F' 与末面球心 C 重合;如果存在重合误差,则用于球面面形检验时会引入测量系统误差。推导分析了 $F'C$ 的允许重合误差与透镜组 F 数等参量的关系,运用 ZEMAX 光学设计软件模拟给出系列小 F 数标准球波面透镜组允许的 $F'C$ 重合误差,并设计实验测试方案,得到反映标准球波面透镜组 $F'C$ 重合误差的干涉图,它们的波像差均小于 5λ 。由理论分析与实验测试结果可知, F 数很小(如 $F/1.5, F/0.75$) 的标准球面透镜组, $F'C$ 重合误差小于 0.03 mm ,甚至达到微米量级。

关键词 光学技术与仪器;误差分析;光学设计;球波面;干涉仪

中图分类号 O 435.2 文献标识码 A

Analysis of Coincidence Tolerance between F' and C for the Transmission Spheres with Small F -Number

GAO Zhi-shan

(School of Electronic Engineering & Optoelectronic Techniques,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The lens assembly producing reference transmission spherical wavefront is important device for test of convex or concave spherical surfaces in an interferometer and it can offer a high-quality spherical wave and a reference spherical surface with peak-to-valley less than $\lambda/20$ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$). According to their utility, the curvature center (C) of its last spherical surface, as a reference, should coincide with its focus. The mathematical form is deduced for showing the relation between the deviation of F' and C and the F -number for a reference transmission sphere. The simulation of calculating the coincidence tolerance between F' and C is shown with ZEMAX software (Focus Software Inc.). The setup to test the coincidence tolerance is designed with the reference flat in Zygo GPI interferometer. The interferograms have been given to show the coincidence value for three self-developed transmission spheres. All the wavefront errors related to the coincidence tolerance between F' and C are less than five wavelength. The coincidence tolerance between F' and C is less than 0.03 mm for $F/1.5$ transmission sphere, and $5 \mu\text{m}$ for $F/0.75$ transmission sphere.

Key words optics technique and instrument; tolerance analysis; optical design; spherical wavefront; interferometer

1 引 言

标准球波面透镜组能产生 $P-V$ 值优于 $\lambda/20$ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$) 的标准球面波,透镜组中最后一面为标准球面,面形质量 $P-V$ 值优于 $\lambda/20$,同时透镜组

的焦点 F' 与该面的曲率中心 C 重合。

过去的光学加工行业,球面面形质量的检验常采用样板法^[1],且一个曲率半径对应凸凹一对样板。样板的面形与曲率半径按等级有着不同的质量要求,球面加工厂家都有大量的样板库,每对样板的加

收稿日期:2003-04-18;收到修改稿日期:2003-05-21

基金项目:国防技术基础资助 C 类项目(JB182001C002)资助课题。

作者简介:高志山(1966—),男,南京理工大学副教授,博士,主要从事光学设计与光学测试智能化仪器研究。E-mail: zhishgao@mail.njust.edu.cn

工具有一定的难度。

由于标准球波面透镜组能产生 $P-V$ 值优于 $\lambda/20$ 的标准球面波,球面波在各向同性均匀介质中传输时,波面仍为球面,而曲率半径都不一样,相当于不同曲率的球面样板,只要标准球面透镜组的 F 数(相对孔径的倒数)一定,它就能测试曲率半径变化范围很大的凸凹球面,克服了球面样板与半径一一对应的缺点。另外,由于标准球面透镜组测量球面面形的误差属非接触测量,不会损伤被检球面表面的光洁度,克服了球面样板接触测量的缺点。

由于系列小 F 数标准球波面透镜组的设计、加工、装校有一定的难度,早期的球面高精度检验,一般在泰曼-格林干涉仪中采用系列参考球面反射镜^[2]。随着光学设计、数字波面干涉仪^[3]、计算机辅助装配技术^[4,5]、软件技术的发展,高质量系列标准球波面透镜组的设计制作时机已经成熟。通过配备测长技术,在测量球面面形的同时,标准球波面透镜组也能测量球面的曲率半径。

检验球面时,标准球波面透镜组发出的标准球面波经被检球面反射,测试波面按原路返回,与其末面标准球面反射回的参考波面汇合,形成反映被检球面面形的干涉条纹。如果 F' 与 C 不重合,则测试波面与参考波面在标准球波面透镜组中行走不同的路程,引起测量误差。对于大 F 数的标准球波面透镜组, $F'C$ 重合误差通过一般机械装校易于保证,但对于小 F 数的透镜组, $F'C$ 重合误差要求很严,甚至达到微米量级,需要做深入研究。

本文主要分析研究在允许范围内 $F'C$ 有多大量值的重合误差,同时设计一种能够测量 $F'C$ 重合误差的简单方法。

2 理论分析

理想情况下,标准球波面透镜组的末面曲率中心与焦点重合,考虑到测试凸球面的半径范围,其末面曲率半径应尽可能大;同时为了装校方便调整点集中,透镜组中采用负弯月透镜。如果标准球波面透镜组的焦点 F' 与其末面曲率中心 C 不重合,则由被检球面返回的测试波面与末面返回的参考波面在透镜中行走不同的路程,引起光程差,如图 1 所示。图中 Σ_i 为入射透镜组的平面波, Σ_r 是末面反射回的参考波面。由于 $F'C$ 不重合,过透镜组出射的参考波面不再是平面波,而是半径为 r 的球面波,其半径为

$$r = \frac{f^* f'}{2\Delta_{F'C}} \quad (1)$$

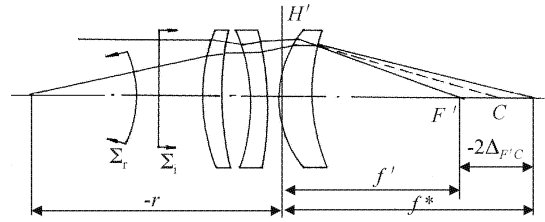


图 1 透镜组 F' 与 C 不重合引起的波面传输示意图

Fig. 1 Ray-path through lens assembly of non-coincidence between F' and C

式中, f' 表示透镜的焦距, $f^* = f' - 2\Delta_{F'C}$, $\Delta_{F'C}$ 即 $F'C$ 重合误差,如果 $\Delta_{F'C} = 0$,则 $r = \infty$,即由透镜组末面反射回的参考波面为平面波。

半径为 r 的参考球面偏离平面波的最大波面误差为

$$W_{P.V} = r - \sqrt{r^2 - \frac{D^2}{4}} \quad (2)$$

其中 D 为标准球波面透镜组的光瞳直径,将式(1)代入式(2)得到

$$\Delta_{F'C} = \frac{4f^* f'}{D^2} W_{P.V} \quad (3)$$

一般地 $\Delta_{F'C} \ll f'$, $f^* \approx f'$,此时式(3)为

$$\Delta_{F'C} = 4W_{P.V} * F_{\text{number}}^2 \quad (4)$$

式中, $F_{\text{number}} = f'/D$ 。由式(4)可以看出,在 $W_{P.V}$ 要求为定值时, $\Delta_{F'C}$ 与标准球波面透镜组的 F 数平方成正比。假设 $W_{P.V} = 5\lambda$,对 $F/1.5$ 透镜组 $\Delta_{F'C} = 0.028 \text{ mm}$,在装配过程中这一要求是很严的。

3 计算模拟

利用 ZEMAX 光学设计软件,建立标准球波面透镜组用于测试球面面形的干涉系统,如图 2 所示,图中 I 虚框内为标准球波面透镜组,II 表示被检球面,由其反射回测试波面;由标准透镜组 I 的末球面反射回参考波面,两种波面相遇产生干涉,工作波长

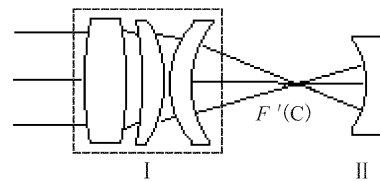


图 2 ZEMAX 模拟的球波面干涉仪示意图

I: 标准球波面透镜组; II: 被检球面

Fig. 2 Interferometer simulated by the ZEMAX

I: lens assembly producing reference transmission sphere;

II: tested spherical surface

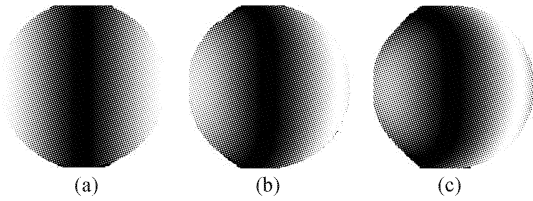


图 3 $F/0.75$ 透镜组不同 $\Delta_{F'C}$ 对应的光学质量干涉图
Fig. 3 Optical quality interferograms varying with different $\Delta_{F'C}$ value

(a) $\Delta_{F'C} = 0.0$ mm; (b) $\Delta_{F'C} = 0.005$ mm; (c) $\Delta_{F'C} = 0.01$ mm

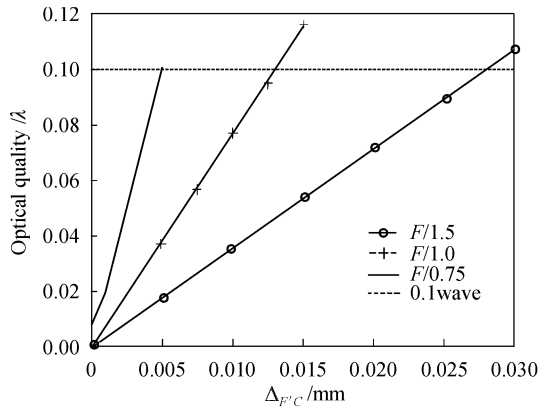


图 4 球波面干涉仪的光学质量随不同透镜组 $\Delta_{F'C}$ 变化的关系曲线

Fig. 4 Optical quality of interferometer for $F/1.5$, $F/1.0$, $F/0.75$ varying with $\Delta_{F'C}$

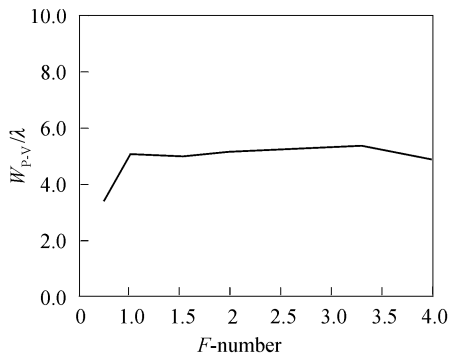


图 5 不同 F 数透镜组允许的 W_{P-V}

Fig. 5 Acceptable W_{P-V} for different F -number

为 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 。通过模拟计算标准球波面透镜组的 $\Delta_{F'C}$ 与该球面干涉系统光学质量之间的变化关系,以及据系统光学质量的要求,可以确定出系列小 F 数情况下的 $\Delta_{F'C}$ 。以 $F/0.75$ 为例,图 3 给出了三种 $\Delta_{F'C}$ 量值情况下的光学质量干涉图。图 4 给出了三种 F 数标准球波面透镜组的 $\Delta_{F'C}$ 与光学质量之间的关系曲线。由图看出,如果控制球面干涉系统的光学质量在 $\frac{\lambda}{10(P-V)}$ 以下,则大相对孔径标准球波面透

镜组的 $F'C$ 公差在 0.03 mm 以下,且 $F/0.75$ 的 $F'C$ 公差要控制在微米量级。这样严格的公差,利用普通的机械结构已无法保证。确定了系列小 F 数透镜组的 $\Delta_{F'C}$ 之后,利用式(4),可以得到不同 F 数情况下的 W_{P-V} 值,图 5 给出了标准球波面透镜组的不同 F 数与 W_{P-V} 值之间的关系曲线。

W_{P-V} 值反映:在 F' 和 C 位置之间有偏差时,由透镜组末面反射,并经透镜组出射的波面偏离平面波的最大偏差,它很容易由干涉方法直接测量。由图 5 看出, $F/0.75$ 透镜组的 W_{P-V} 值略小且精度高一些,小于 4λ 。一般情况下,标准球波面透镜组的 W_{P-V} 控制在 5λ 。

4 实验

图 6 显示了使用干涉方法测量 W_{P-V} 的光路原理。图中由干涉仪 I 发出平面波,透过标准平板 II,入射被检标准球波面透镜组 III,入射波面经 III 的末球面反射,返回的测试波面与透射平板 II 后表面反射的标准平面波相干涉,干涉图由干涉仪 I 中的图像采集系统接收。如果 III 的 F',C 重合,则入射波面经其末球面反射,按原路返回,出射波面仍为平面波;反之出射波面为半径很大的球面波。

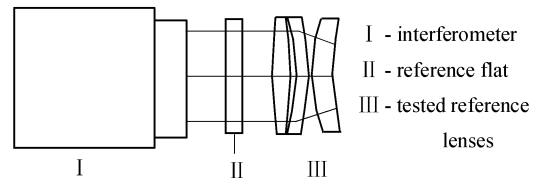


图 6 测试透镜组的干涉光路原理图

Fig. 6 Arrangement for testing lens assembly

图 7 给出了 $F/0.75, F/1.5, F/3.3$ 三种自行研制的标准球波面透镜组的被检干涉图。由干涉图可以看出,这三种透镜组的 W_{P-V} 值均小于 4λ ,与计算模拟结果一致,并使用式(4)可以得到 F',C 重合误差值。表明最后一块透镜已装调好。

5 结论

经理论分析、计算模拟与实验可知,大相对孔径的标准球波面透镜组的 $F'C$ 重合公差是影响透镜组光学质量的重要因素之一,经研究得出以下结论:1) 大相对孔径的标准球波面透镜组的 $F'C$ 重合公差均小于 0.03 mm,普通的装调方法难以保证,应采用计算机辅助装调方法;2) 在透镜组装调过程中,容

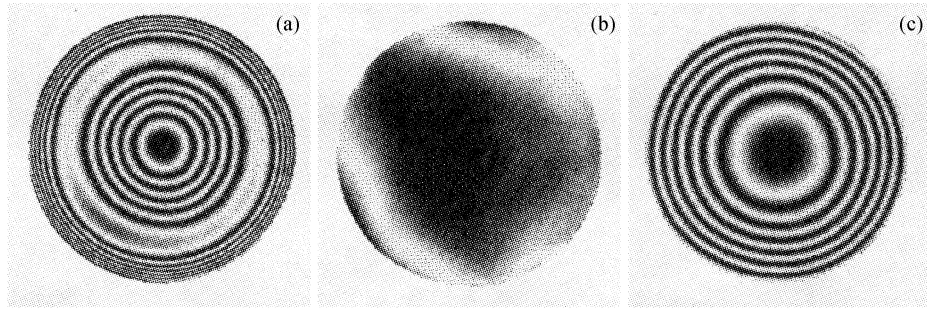


图 7 三种标准球波面透镜组的 $F'C$ 重合干涉图

Fig. 7 Interferograms and W_{P-V} tested for three developed transmission spheres

(a) $W_{P-V} = 3.05\lambda$ for $F/0.75$, $\Delta_{F'C} = 0.004$ mm; (b) $W_{P-V} = 0.507\lambda$ for $F/1.5$, $\Delta_{F'C} = 0.003$ mm;

(c) $W_{P-V} = 3.39\lambda$ for $F/3.3$, $\Delta_{F'C} = 0.093$ mm

易测量的是 W_{P-V} 值,所以干涉测试方法可以作为控制 $F'C$ 重合公差间接方法;3) 由计算机模拟与实验测量可知,反映 $F'C$ 公差的 W_{P-V} 值一般在 5λ 以下。

参 考 文 献

- 1 Pan Junhua, Chen Jinbang, Yang Yonggang. Handbook of Measurement Technology-10; Optics [M]. Beijing: Chinese Measurement Press, 1997. 456~457
潘君骅,陈进榜,杨永刚. 计量测试技术手册,第10卷,光学[M]. 北京:中国计量出版社,1997. 456~457
- 2 Su Datu, Zhao Liping, Sha Dingguo *et al.*. Optical Measurement

Technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 143~144

苏大图,赵立平,沙定国等. 光学测试技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996. 143~144

- 3 Jinbang Chen, Dezhen Song, Rihong Zhu *et al.*. Large-aperture high-accuracy phase-shifting digital flat interferometer [J]. *Opt. Eng.*, 1996, **35**(7):1936~1942
- 4 Zhang Bin, Han Changyuan. Study on optimization of computer-aided alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1):54~58
张斌,韩昌元. 离轴非球面三反射镜光学系统装调中计算机优化方法的研究[J]. 光学学报, 2001, **21**(1):54~58
- 5 Michael R. Descour, Mark R. Willer, Dana S. Clarke *et al.*. Misalignment modes in high-performance optical systems [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(7):1737~1747