

doi:10.3788/gzxb20144308.0812001

## 基于有限元法的面形反演模型

刘永明<sup>1,2</sup>, 谢军<sup>1</sup>, 田伟<sup>1</sup>, 隋永新<sup>1</sup>, 刘震宇<sup>1</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘 要:**为利用有限元法和面形检测结果反演出光学元件的面形, 对面形检测结果进行分解, 并对旋转平均法面形检测原理进行分析, 讨论采用忽略光学元件自身面形的理想几何模型对其旋转非对称项面形误差进行有限元计算的理论可行性. 在此基础上提出了基于有限元法反演光学元件面形的反演模型. 以三点球支撑 6 inch 平面镜为例, 建立接触有限元模型计算旋转非对称项面形误差, 对比了数值法和 N 步旋转平均法所获得的镜面旋转非对称项面形误差, 结果显示, 二者的旋转非对称项面形均方根值分别为 2.944 nm 和 2.762 nm, 两种方法获得的面形相减结果分别为二者的 6.31% 和 6.73%. 最后对比了面形反演的面形结果与 N 步旋转平均法所获得的面形检测结果, 结果显示, 二者的面形均方根值分别为 3.535 nm 和 3.351 nm, 两种方法获得的面形相减结果分别为二者的 11.67% 和 11.06%. 证明提出的反演模型准确可靠.

**关键词:**绝对检测; 旋转平均法; 反演模型; 干涉检测; Zernike 多项式

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)08-0812001-6

## Inverse Modeling of Mirror Surface Figure Based on Finite Element Contact Analysis

LIU Yong-ming<sup>1,2</sup>, XIE Jun<sup>1</sup>, TIAN Wei<sup>1</sup>, SUI Yong-xin<sup>1</sup>, LIU Zhen-yu<sup>1</sup>

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

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In order to inversed compute the optical element surface profile using the finite element method and the surface shape interference test results, the composition of interference test results was decomposed, and the testing principles of the rotational averaging method were analysed. The feasibility of using simplified geometrical model to caculate the deformation of an optical element with arbitrary given surface shape was discussed. Surface profile inversion model was proposed based on finite element method. A finite element analysis model was then presented based on surface-surface contact modeling. A plane mirror supported by three rigid spheres as the simulation and experimental model, the rotationally asymmetrical surface deviation was quantitative analysis using the numerical method presented in this paper and the N-step rotational averaging method. The obtained results show that the root mean square of rotationally asymmetric surface is 2.933 nm obtained through numerical method and the root mean square of rotationally asymmetric surface is 2.75 nm obtained through N-step rotational averaging method. Subtracted result of the two rotationally saymmetric surface show that the root mean square of the subtraction are 6.31% of the numerical method result and 6.73% of the N-step rotational averaging method result. Finally, comparing the optical element surface profile computed by proposed inversion model with the surface profile tested by N-step rotational averaging method. Results show that

基金项目: 国家科技重大专项(No. 2009ZX02205)和国家自然科学基金(No. 51275504)资助

第一作者: 刘永明(1986-), 男, 博士, 主要研究方向为光机结构设计, 工程力学分析. Email: liuyongming1015@163.com

导师(通讯作者): 刘震宇(1972-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为微光机电系统、微流控系统的设计制造研究. Email: liuzy@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2013-12-02; 录用日期: 2014-03-20

<http://www.photon.ac.cn>

the root mean square of optical element surface profile are 3.535 nm and 3.351 nm respectively. Subtracted result of the two surface profile show that the root mean square of the subtraction are 11.67% of the inversion result and 11.06% of the result tested by N-step rotational averaging method. The proposed inversion model is accurate and reliable.

**Key words:** Absolute measurement; Rotational averaging method; Inversion model; Interference test; Zernike polynomial

**OCIS Codes:** 120.2650; 120.4880; 120.6650; 120.666

## 0 引言

目前 193 nm 光刻机投影物镜的光学元件面形均方根(Root Mean Square, RMS)准确度要求达到了 1~2nm,部分元件的要求更高. 为了达到元件面形加工的高准确度要求,首先需要解决的是确定光学元件面形的问题. 高表面质量的元件加工过程分为为粗磨、精磨、抛光三个阶段,抛光是最终达到所需面形的阶段,需要利用光学元件面形确定光学元件面形上的各点空间坐标准确位置,为进一步的加工工作提供指导意见. 因此高准确度光学元件面形对利用数控加工技术提高光学元件加工的质量和效率具有重要意义.

目前主要采用干涉仪对光学元件的面形数据进行检测,检测手段采用绝对检测,如单次旋转法(single-rotation method)<sup>[1-3]</sup>、N步旋转平均法(N-step averaging method)<sup>[4-9]</sup>、多序列独立测量法(multi-independent series of measurement method)<sup>[10-11]</sup>等. 单次旋转法利用最小二乘法对测量数据拟合 Zernike 多项式,通过一次旋转测量就可计算出光学元件旋转非对称面形误差,其本质是假设波前误差的 Zernike 多项式可以很快的收敛. N步旋转平均法通过每次沿圆周方向旋转支撑 360°/N 角度圆心角,对光学元件进行测量,利用 N 次测量数据的平均去掉支撑造成的旋转非对称面形误差,但不能去掉  $kN\theta$  项,因此这种方法当  $kN\theta$  项影响很小的时候比较有效. 多序列独立测量法是一种改进的 N 步旋转平均法,要求至少进行两个独立的测量序列,利用数值处理的手段可以去掉更高阶的 Zernike 多项式,但仍无法去掉  $kMN\theta$  项. 此方法对旋转位置准确度要求较高,在测量时,保证旋转位置准确度、维持检测环境和检测系统的稳定是一个不小的挑战. 这三种方法都需要对支撑进行旋转,增加了检测过程的复杂程度,同时在旋转过程中不可避免的会引入旋转误差. 在干涉仪测量准确度方面,苗二龙等对超高准确度干涉仪进行了误差分析<sup>[12]</sup>;明名等对大口径光学元件检测进行了研究<sup>[13]</sup>;陈伟对光学元件干涉检测数据的定位处理方法进行了研究<sup>[14]</sup>;宣斌对应力双折射对偏振相移干涉检测的影响进行了研究<sup>[15]</sup>.

本文利用有限元分析和光学检测结果反演出光学元件的面形,基于对旋转平均法的检测原理分析了基于忽略光学元件自身面形的理想几何模型对旋转非对

称面形误差进行有限元计算的理论可行性,并提出了基于有限元法反演光学元件面形的反演模型,以三点球支撑 6 inch 平面镜为例,验证了反演模型的正确性.

## 1 理论分析

干涉仪测量的结果指被测面与参考面之间干涉腔的光程差  $W$ ,包括待测面面形  $T$ (包括真实面形  $T_0$  和各项误差)和参考面面形  $R$ ,即

$$W = R + T \quad (1)$$

对于普通准确度的面形检测,检测准确度主要取决于参考面的面形准确度  $R$ ,而对于高准确度、超高准确度的面形检测,其准确度则取决于环境扰动  $E$ 、干涉仪自身误差  $S$  和支撑误差  $T_s$ <sup>[16]</sup>,因此式(1)可写为

$$\begin{cases} T = T_0 + T_s + E + S \\ W = R + T_0 + T_s + E + S \end{cases} \quad (2)$$

标准面  $R$  通过绝对检测的方式进行标定,测量时考虑了标准面的面形误差. 环境扰动  $E$  通过精密环控系统的建设,可以有效地控制在一定的准确度范围内. 干涉仪自身误差  $S$  主要由干涉仪主机的测量重复性决定,现有商用产品可以达到万分之一的测量重复准确度,完全能满足高准确度检测需求. 因此,在高准确度检测中,决定干涉仪最终测量准确度的限制条件就是被测光学元件支撑系统引起的面形误差  $T_s$ . 这里假设参考面误差  $R$ 、环境扰动误差  $E$  和干涉仪自身误差  $S$  可以通过相关手段进行有效消除,那么测量的光程差  $W$  可以表示为

$$W = T_0 + T_s \quad (3)$$

N 步旋转平均法的检测原理为<sup>[4]</sup>,分别对支撑绕光轴旋转  $\alpha_j = j \times 360^\circ / N$  ( $j = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ) 角度时的光学元件进行检测,为了叙述的方便,令  $\alpha_0 = 0^\circ$ ,  $N$  为支撑绕光轴旋转的次数,用  $W_j$  表示第  $j$  旋转支撑的检测结果,利用 Zernike 多项式可表达为

$$\begin{cases} W_j(\rho, \theta) = T_0(\rho, \theta) + T_{sj}(\rho, \theta) \\ T_{sj}(\rho, \theta) = T_{s0}(\rho, \theta + \alpha_j) = \sum_{l,k} R_l^k(\rho) [c_{0,lk} \cos(k\theta + k\alpha_j)] + \sum_{l,k} \bar{R}_l^k(\rho) [\bar{c}_{0,lk} \sin(k\theta + k\alpha_j)] = \sum_{l,k} R_l^k(\rho) \cdot \\ [c_{j,lk} \cos(k\theta)] + \sum_{l,k} \bar{R}_l^k(\rho) [\bar{c}_{j,lk} \sin(k\theta)] \\ c_{j,lk} = c_{0,lk} \cos(k\alpha_j) + \bar{c}_{0,lk} \sin(k\alpha_j) \\ \bar{c}_{j,lk} = \bar{c}_{0,lk} \cos(k\alpha_j) - c_{0,lk} \sin(k\alpha_j) \\ j = 0, 1, 2, \dots, N-1 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $c_{0,lk}$ 、 $\tilde{c}_{0,lk}$ 、 $c_{j,lk}$ 、 $\tilde{c}_{j,lk}$  为对应项的 Zernike 系数;  $T_{sj}(\rho, \theta)$  是支撑旋转  $\alpha_j$  角度后检测结果中由支撑引起的面形误差,为了叙述方便,  $T_{sj}(\rho, \theta)$  可写成

$$\begin{cases} T_{sj}(\rho, \theta) = T_{\text{sym}}(\rho) + T_{\text{asyj}}(\rho, \theta) \\ T_{\text{asyj}}(\rho, \theta) = T_{k\theta}(\rho, \theta) + T_{mN\theta}(\rho, \theta), k \neq mN \end{cases} \quad (5)$$

则

$$W_j(\rho, \theta) = T_o(\rho, \theta) + T_{\text{sym}}(\rho) + T_{k\theta}(\rho, \theta) + T_{mN\theta}(\rho, \theta), k \neq mN \quad (6)$$

对检测结果求平均得

$$\begin{aligned} W_{\text{ave}}(\rho, \theta) &= \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} W_j(\rho, \theta) = T_o(\rho, \theta) + \\ &\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} T_{sj}(\rho, \theta) = T_o(\rho, \theta) + T_{\text{sym}}(\rho) + \\ &T_{mN\theta}(\rho, \theta) \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $T_{\text{sym}}(\rho)$  是由支撑引起的旋转对称项面形误差;  $T_{\text{asyj}}(\rho, \theta)$  是由支撑引起的旋转非对称项面形误差; 求平均时由于

$$\sum_{j=0}^{N-1} c_{j,lk} = \sum_{j=0}^{N-1} \tilde{c}_{j,lk} = 0 \quad (8)$$

$T_{k\theta}(\rho, \theta)$  自动消除;  $T_{mN\theta}(\rho, \theta)$  由式(9)决定

$$\begin{aligned} T_{mN\theta}(\rho, \theta) &= \sum_{l,m} R_l^{mN}(\rho) [c_{0,lmN} \cos(mN\theta)] + \\ &\sum_{l,m} R_l^{mN}(\rho) [\tilde{c}_{0,lmN} \sin(mN\theta)] \end{aligned} \quad (9)$$

对比式(6)、(7)可得

$$W_{\text{ave}}(\rho, \theta) = W_j(\rho, \theta) - T_{k\theta}(\rho, \theta) \quad (10)$$

可以看出  $N$  步旋转平均法检测光学元件面形的结果可以由一次检测结果  $W_j(\rho, \theta)$  去掉  $T_{k\theta}(\rho, \theta)$  项即可。

式(6)减式(7)可得

$$\begin{aligned} T_{k\theta}(\rho, \theta) &= T_{sj}(\rho, \theta) - T_{\text{sym}}(\rho) - T_{mN\theta}(\rho, \theta), \\ &k \neq mN \end{aligned} \quad (11)$$

可以看出支撑引起的  $T_{k\theta}(\rho, \theta)$  项与光学元件待测真实面形无关. 因此, 可建立理想光学元件及其支撑系统的有限元模型, 而不考虑光学元件自身面形的影响, 求解支撑引起  $T_{k\theta}(\rho, \theta)$  项面形误差。

通过有限元法求解  $T_{k\theta}(\rho, \theta)$  项替代  $N$  步旋转平均法检测光学元件时的旋转过程可反演出光学元件面形, 反演模型为

$$W_{\text{ave\_fem}}(\rho, \theta) = W(\rho, \theta) - T_{k\theta\_fem}(\rho, \theta) \quad (12)$$

式中  $T_{k\theta\_fem}(\rho, \theta)$  是利用有限元法求得的  $T_{k\theta}(\rho, \theta)$  项面形误差,  $W_{\text{ave\_fem}}(\rho, \theta)$  是由反演模型反演出的光学元件面形。

同时由式(7)可知, 反演模型式(12)只能分离出支撑面形中的非旋转对称项, 其旋转对称项  $T_{\text{sym}}(\rho)$  及高阶项  $T_{mN\theta}(\rho, \theta)$  仍旧在元件测量面形的结果中, 这部分残留的旋转对称项及高阶项为反演模型式(12)的理论误差. 在支撑结构带来的旋转对称项所占比例较大时, 该反演模型所起到的作用将随之减小. 因此, 在设计检测工装支撑结构时, 需要选择造成面形变化量中的对称项小的支撑结构。

## 2 仿真分析与实验结果

以一块口径为 152.4 mm, 厚度为 26.8 mm 的平面镜为例, 验证利用基于有限元法的面形反演模型的正确性和可行性。

### 2.1 仿真分析

首先对图 1 所示模型建立接触有限元模型进行仿真. 平面镜的光轴竖直放置, 支撑采用三点球支撑, 负载为重力, 模型中平面镜采用熔石英, 与平面镜接触的支撑球为黄铜, 材料属性见表 1。

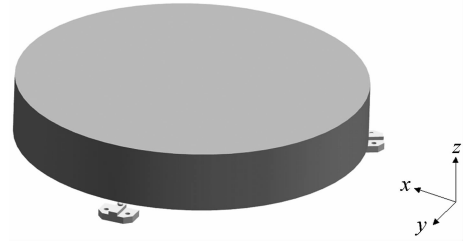


图 1 6 inch 平面镜及 3 点球支撑

Fig. 1 6 inch flat mirror and three point ball support

表 1 平面镜及支撑球材料属性

Table 1 Material property of flat mirror and support ball

Material	Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Young modulus $E / \text{Mpa}$	Poisson ratio $\nu$
Fused silica	2 200	7 459	0.167
Brass	8 430	20 000	0.277

图 1 所示模型为球-平面接触, 且模型三分之一对称, 依据材料属性, 从接触面上划分 1 600 个 4 节点四边形单元, 主接触面上划分 128 个 3 节点三角形单元, 以防止发生主接触面过多的贯入从接触面(图 2c); 平面镜有限元模型采用 167 974 个 8 节点六面体低阶单元。

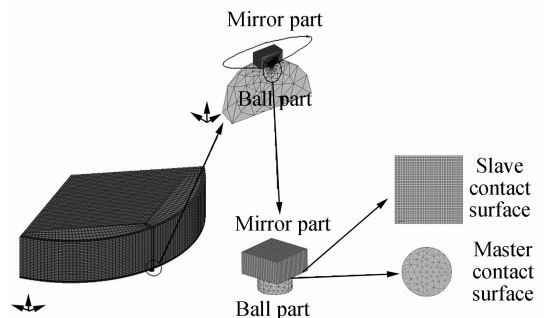


图 2 有限元分析网格模型

Fig. 2 Mesh model for finite element analysis

为验证接触分析的准确性, 把有限元分析结果与利用赫兹接触理论计算的近似模型做对比. 近似模型选择支撑球与弹性半空间接触, 支撑球受到平面镜三分之一的重力. 对比结果如表 2, 其中  $r_c$  为接触半径,  $S_{\text{avg}}$  为平均接触压力,  $S_{\text{csph}}$  为最大接触压力. 由表 2 可以看出有限元法计算的接触状态与近似模型赫兹接触的计算结果吻合, 有限元计算结果合理。

表 2 近似模型与有限元模型接触结果  
Table 2 Approximate model and finite element model of contact result

Method	$r_c/mm$	Savg/Mpa	Scsph/Mpa
Hertz contact	0.041 4	651.32	976.46
Finite element method	0.04	633.37	907.86

由于有限元分析的表面变形中包含一定的刚性位移,需要拟合一个表面来计算平面镜的面形,因此,必须对光学表面的变形量进行处理,获得表面的面形数据.提取有限元的仿真结果进行 Zernike 多项式拟合,利用 Zernike 多项式与 Seidel 像差的关系,分离去掉离轴、倾斜、离焦三种形式的刚体位移,获得如图 3 所示的面形云图,其面形均方根 RMS 为 4.369 nm,面形峰-谷值 PV 为 18.8 nm.

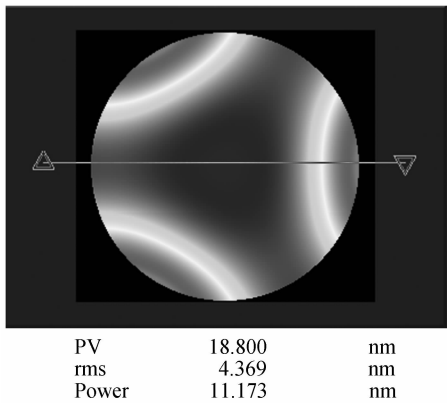


图 3 有限元分析结果 Zernike 拟合面形

Fig. 3 Zernike fitting surface profile of finite element analysis results

由有限元数值解拟合所得的 Zernike 系数  $Z_{FEM}$  (这里不离轴、倾斜、离焦三种形式的刚体位移)如表 3. 从

表 3 面形 Zernike 系数  $Z_{FEM}$

Table 3 Zernike coefficient  $Z_{FEM}$  of surface profile

Item	$Z_{FEM}$	Item	$Z_{FEM}$
1	-	19	-
2	-	20	-7.249e-004
3	-	21	-
4	-	22	-
5	-	23	-
6	-	24	-
7	-	25	-1.725e-005
8	-	26	-
9	-8.027e-004	27	-
10	-	28	-
11	1.312e-002	29	-
12	-	30	-
13	-	31	-1.662e-004
14	-	32	-
15	-	33	-
16	-8.128e-005	34	-
17	-	35	-
18	-	36	-

表 3 可以看出,三点支撑方式造成的面形误差包括旋转对称项第 9 项、第 16 项、第 25 项和旋转非对称项第 11 项、第 20 项、第 31 项.其中主要为旋转非对称项第 11 项,可以表示为初级三叶草误差,为非对称项,比旋转对称项系数高两个数量级,旋转对称项 RMS 值与旋转非对称项 RMS 值的比值为 0.076,因此旋转对称项所占比例较小,满足所提出反演模型的适用条件.

### 2.2 实验结果

接着对研究对象利用  $N$  步旋转平均法进行高精度检测.面形检测实验中使用的是 Zygo GPI XP/D<sup>TM</sup> 立式干涉仪,干涉仪的工作波长为 632.8 nm, CCD 分辨率为 1K(1K,检测时分别对支撑结构在初始位置及旋转 30°、60°、90°、120°、150°、180°、210°、240°、270°、300°、330° 时进行测量,支撑结构在初始位置时测量结果面形如图 4 所示,光学检测面形均方根 RMS、面形峰-谷值 PV 如表 4.

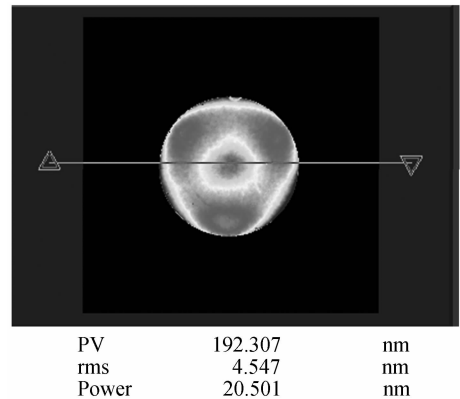


图 4 支撑结构在初始位置表面面形实验数据 (nm)

Fig. 4 Surface profile experiment data mounting in the initial position (nm)

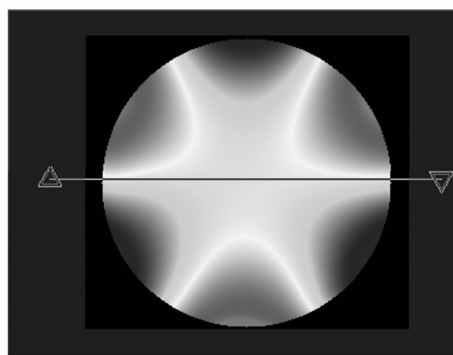
表 4 面形 RMS 值和面形 PV 值检测结果

Table 4 Testing result about the RMS and the PV value of surface profile

Rotation angle	RMS	PV
0	4.547	192.307
30°	4.459	186.156
60°	4.46	189.91
90°	4.789	259.551
120°	4.630	360.475
150°	4.465	180.208
180°	4.662	195.329
210°	4.768	239.183
240°	4.607	232.157
270°	4.446	191.361
300°	4.638	223.718
330°	4.089	228.131

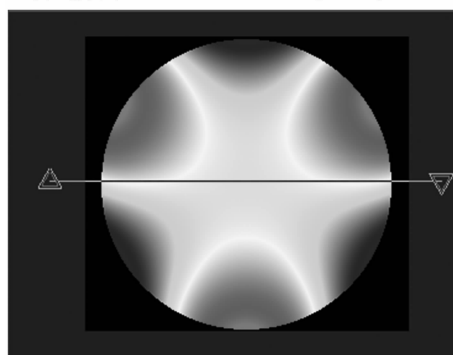
### 2.3 仿真结果与检测结果对比分析

基于有限元法计算出的  $T_{kl}(\rho, \theta)$  面形误差与式 (11) 计算的  $T_{kl}(\rho, \theta)$  面形误差如图 5, 对应 Zernike 系数  $Z_{FEM}$ 、 $Z_{N-step}$  如图 6.



PV 15.555 nm  
rms 2.762 nm  
Power -0.000 nm

(a)  $T_{k0}(\rho, \theta)$  surface deviation computer by FEM



PV 15.449 nm  
rms 2.944 nm  
Power -0.004 nm

(b) Testing  $T_{k0}(\rho, \theta)$  surface deviation through N-step averaging method

图 5  $T_{k0}(\rho, \theta)$  面形误差

Fig. 5  $T_{k0}(\rho, \theta)$  surface deviation

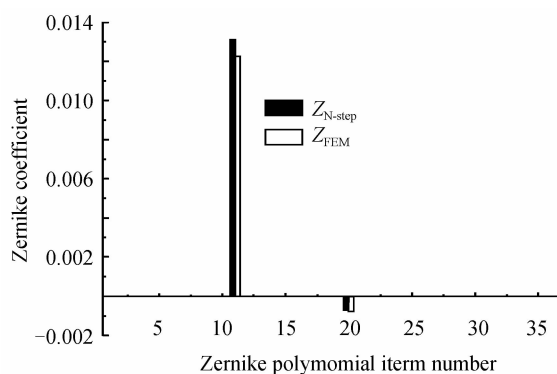


图 6  $T_{k0}(\rho, \theta)$  面形误差 Zernike 系数

Fig. 6  $T_{k0}(\rho, \theta)$  surface deviation zernike coefficient

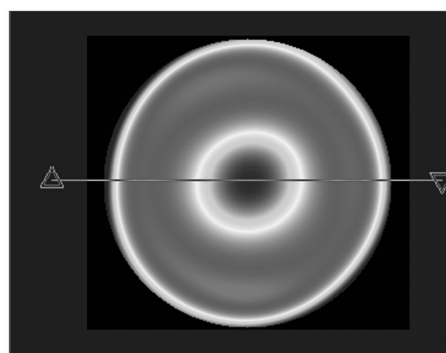
由图 5、图 6 可以看出有限元法计算光学元件旋转非对称项面形误差的分布, RMS、PV 及各项 Zernike 系数与 N 步旋转平均法检测旋转非对称项面形误差检测结果吻合较好. 为进一步确定有限元法计算光学元件旋转非对称项面形误差的计算准确度, 将有限元法计算出的光学元件旋转非对称项面形误差与 N 步旋转平均法检测的旋转非对称项面形误差进行面形相减, 相减后面形 RMS 为 0.185 nm, PV 为 1.134 nm.

面形相减结果显示, 相减后残差面形 RMS 是 N

步旋转平均法检测的旋转非对称项面形误差 RMS 的 6.31%, 是有限元法计算出的光学元件旋转非对称项面形误差 RMS 的 6.73%, 相减后残差面形 PV 值是 N 步旋转平均法检测的旋转非对称项面形误差 PV 值的 7.8%, 是有限元法计算出的光学元件旋转非对称项面形误差 PV 值的 7.23%.

### 3 基于有限元法的面形反演模型可行性验证

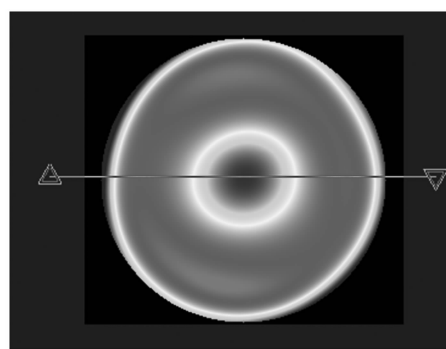
为了验证基于有限元的面形反演模型的可行性和正确性, 用 36 项 zernike 多项式对检测数据进行拟合, 对比利用反演模型式 (12) 所得的面形反演结果与 N 步旋转平均法的面形检测结果, 如图 7 和图 8.



PV 17.332 nm  
rms 3.535 nm  
Power 21.503 nm

图 7 基于有限元法反演面形

Fig. 7 Inversion surface profile compute by finite element method



PV 17.535 nm  
rms 3.35 nm  
Power 20.256 nm

图 8 N 步旋转法检测面形

Fig. 8 Testing surface profile through N-step averaging method

由图 7 和图 8 可以看出基于反演模型的面形反演面形 RMS、PV 及面形误差的分布与 N 步旋转平均法面形检测结果吻合较好. 面形相减结果显示, 相减后残差面形 RMS 是 N 步旋转平均法检测面形 RMS 值的 11.06%, 是反演面形 RMS 值的 11.67%, 相减后残差面形 PV 值是 N 步旋转平均法检测面形 PV 值的 13.9%, 是反演面形 PV 值 13.77%.

对比结果显示,基于有限元法的面形反演结果达到  $N$  步旋转平均法检测的面形准确度,反演模型准确可靠。

## 4 结论

本文通过对检测结果进行分解,并对旋转平均法的检测原理进行分析,讨论了采用忽略光学元件自身面形的理想几何模型进行有限元计算其旋转非对称面形误差的理论可行性,在此基础上提出了基于有限元法反演光学元件面形的反演模型.以三点球支撑6 inch 平面镜为例,对比了数值法和  $N$  步旋转平均法所获得的旋转非对称面形误差.结果显示,二者的旋转非对称项面形 RMS 值分别为 2.762 nm 和 2.944 nm,二者相减后面形 RMS 为 0.185 nm,是  $N$  步旋转平均法检测的旋转非对称项面形误差均方根的 6.31%,是有限元法计算出的光学元件旋转非对称项面形误差 RMS 的 6.73%.对基于反演模型的可行性和正确性进行验证,验证结果显示面形反演面形 RMS 值、面形 PV 值及面形误差的分布与  $N$  步旋转平均法面形检测结果吻合较好.面形相减结果显示,相减后残差面形 RMS 值是  $N$  步旋转平均法检测面形 RMS 值的 11.06%,是反演面形 RMS 值的 11.67%。

通过对比验证,可得:基于有限元法的面形反演结果达到  $N$  步旋转平均法检测的面形准确度,反演模型准确可靠;该反演模型简化了光学元件高准确度面形测量的检测过程;该方法克服了  $N$  步旋转平均法无法求得  $kN\theta$  项和旋转平均法为提高检测准确度需要增加旋转测量步数  $N$  的缺陷,为提高检测准确度及检测效率提供了可靠的理论基础。

### 参考文献

- [1] SHARIHARAN P. Interferometric testing of optical surfaces: absolute measurements of flatness[J]. *Optical Engineering*, 1997, **36**(9): 2478-2481.
- [2] GRECO V, TRONCONI R, VECCHIO C D, *et al.* Absolute measurement of planarity with Fritz's method: uncertainty evaluation[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(10): 2018-2027.
- [3] RHEE H G. Self-calibration of high frequency errors of test optics by arbitrary  $N$ -step rotation[J]. *International Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 2000, **1**(2): 115-123.
- [4] EVANS C J, KESTNER R N. Test optics error removal[J]. *Applied optics*, 1996, **35**(7): 1015-1021.
- [5] SONG Wei-hong, WU Fan, HOU Xi, *et al.* Simulation analysis on absolute testing of spherical surface with shift-rotation method [J]. *High Power Laser Particle Beams*, 2011, **23**(12): 3229-3234.
- [6] 宋伟红, 伍凡, 侯溪, 等. 基于平移旋转的球面绝对检测技术仿真分析[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(12): 3229-3234.
- [7] ICHIKAWA H, YAMAMOTO T. Apparatus and method for wavefront absolute calibration and method of synthesizing wavefronts;US, 5982490[P]. 1999-10-09.
- [8] OTAKI K, YAMAMOTO T, Y FUKUDA, *et al.* Accuracy evaluation of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography aspheric mirror[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2002, **20**(1): 295-300.
- [9] SONG Wei-hong, WU Fan, HOU Xi. Method to test rotationally asymmetric surface deviation with high accuracy [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(22): 5567-5572.
- [10] SONG Wei-hong, WU Fan, HOU Xi, *et al.* Absolute calibration of a spherical reference surface for a Fizeau interferometer with the shift-rotation method of iterative algorithm[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(3): 033601-033601.
- [11] SEITZ G, OTTO W. Method for the interferometric measurement of non-rotationally symmetric wavefront errors: US,7277186[P]. 2007-10-02.
- [12] OTTO W. Method for the interferometric measurement of non-rotationally symmetric wavefront errors; US, 6839143 [P]. 2005-01-04.
- [13] MIAO Er-long, Zhang Jian, Gu Yong-qiang, *et al.* Measurement error analysis of high precision fizeau interferometer for lithography projection objective [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, **37**(8): 2029-2034.
- [14] 苗二龙, 张健, 谷勇强, 等. 用于光刻投影物镜检测的高准确度菲佐干涉仪误差分析[J]. *中国激光*, 2012, **37**(8): 2029-2034.
- [15] MING Ming, WANG Jian-li, MA pei-li. A new method for testing the whole lens group of large optic system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 419-423.
- [16] 明名, 王建立, 马佩立. 一种检测大口径光学系统中透射镜组的新方法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(3): 419-423.
- [17] CHEN Wei. Interferogram processing method of optical surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1191-1195.
- [18] 陈伟. 光学元件干涉检测数据的定位处理方法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(8): 1191-1195.
- [19] XUAN Bin. Influence of birefringence on polarization phase shifting interferometry [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(11): 1319-1323.
- [20] 宣斌. 应力双折射对偏振相移干涉检测的影响[J]. *光子学报*, 2013, **42**(11): 1319-1323.
- [21] WANG Ping, TIAN Wei, WANG Ru-dong, *et al.* Rotating chuck test for removing chuck error of optical surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 126-134.
- [22] 王平, 田伟, 王汝冬, 等. 旋转支撑法去除元件面形测量的夹持误差[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 126-134.