

旋转支撑法去除元件面形测量的夹持误差

王 平 田 伟 王汝冬 王立朋 隋永新 杨怀江
(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 为实现对光学元件的高精度面形测量,建立了一种旋转支撑结构的高精度测量方法。对该方法的理论原理、数值仿真和误差分析等进行了研究。首先根据元件夹持工况仿真分析了支撑变形的特性。接着用泽尼克多项式拟合波面,建立了旋转支撑法的理论模型,并推导出光学元件去除支撑影响后的面形公式。用仿真分析的方式验证了理论模型,对计算的面形结果与理论面形进行了比较分析。最后,分析了影响旋转支撑法测量精度的误差项。仿真分析结果表明,通过两次旋转支撑结构的方式,可以有效地去除元件支撑造成的面形误差,计算值与真实值之间的误差为支撑误差的泽尼克多项式的高阶对称项,满足元件面形的高精度检测要求。

关键词 测量;元件夹持;测量误差;夹持误差;旋转支撑法

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0812004

Rotating Chuck Test for Removing Chuck Error of Optical Surface

Wang Ping Tian Wei Wang Rudong Wang Lipeng Sui Yongxin Yang Huaijiang
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract In order to realize high accuracy test for optical surface, a rotation chuck method is built and its principle, model analysis and error analysis are researched. Based on the optical component mounting case, the property of surface deformation is analyzed. The surface profile is fitted with Zernike polynomials. The principle model of rotation chuck method is studied, and the equation of surface real profile is derived from the model. Then, the principle model is analyzed with numerical simulation method. The results of surface profile and the real surface profile are compared. Finally, the error sources of rotation chuck method are researched. Analysis results indicate that the rotation chuck method can remove mounting error efficiently, the difference between the computed profile and the real profile is the high-order symmetrical Zernike polynomials, which can satisfy the high accuracy requirement of optical surface tests.

Key words measurement; optical component mounting; test error; chuck error; rotation chuck method

OCIS codes 120.6650; 220.4840; 200.4880; 350.4800; 000.2658

1 引言

干涉检测是测量高精度光学元件面形的主要手段,现在的商用干涉仪主机可以达到纳米量级的检测精度。但是随着检测精度的提高,除干涉仪自身精度需要提高以外,对周围环境和辅助支撑技术的要求也越来越高。在干涉检测中,需要将光学元件固定在调整架上,在重力和夹持力的作用下,光学元

件表面会发生变形,导致测量的光学元件面形里包含了这一固定过程造成的面形变化,极大地限制了干涉测量的精度。某些超高精度的光学元件,其使用方向需要严格限制,例如光刻镜头中的光学元件只能将光轴竖直放置,但是商用干涉仪通常将光轴水平放置,这种工作工况与检测工况的差别形成了元件面形检测的另一个主要误差。因此,需要提出

收稿日期: 2011-02-17; 收到修改稿日期: 2011-03-28
基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)资助课题。
作者简介: 王 平(1984—),男,硕士,研究实习员,主要从事光学仪器结构方面的研究。
E-mail: alex.wongp@gmail.com

一种能够分离出光学元件固定过程造成的面形误差的元件面形检测手段。

针对光学元件面形的超高精度检测,业界提出了多种方法,其中最主要的就是绝对检测手段。Evans 等^[1]对高精度测量方面的标定技术进行了详细论述。Schulz 等^[2~5]对平面的三平板法绝对检测方法进行了研究,并探讨了测量误差的补偿。Evans 等^[6~8]建立了旋转参考面或待测面的旋转绝对检测法,通过旋转平均获得光学表面的绝对面形,可以有效去除测量系统的非对称误差和部分旋转误差。Griesmann 等^[9]改进了三平板绝对检测法,将支撑变形误差引入到三平板检测中,将测量中由支撑结构造成的影响消除。国内对干涉仪测量精度也进行了大量的研究,苗二龙等^[10]对超高精度干涉仪进行了误差分析,并对误差进行了分类;刘东等^[11]对干涉测量的回程误差进行分析;耿文豹等^[12]对成像系统性能进行了研究;刘克等^[13]对系统误差的标定进行了研究。但是,以前的工作主要是集中在平面的绝对检测,期间存在元件的重复装夹问题,并且没有考虑装夹作用造成的误差。Griesmann 等^[9]的工作虽然考虑了支撑变形误差,但是却只针对平面的三平板法,并不适用于非平面镜。本文针对光刻镜头中光学元件的检测以及磁流变修形^[14]的需求,提出了一种旋转元件支撑结构的绝对检测方法,适用于平面与球面的面形检测。通过该方法可去除支撑造成的面形误差,提高检测精度。

2 元件夹持误差

在对光学元件进行干涉测量时,通常采用三爪卡盘将其固定在调整架上,如图 1 所示。在外力作用下,光学元件会发生变形,带来测量误差。对于低

精度的面形检测,夹持过程造成的面形测量误差影响很小,可以忽略不计;但是对于高精度测量,夹持过程造成的误差就变成了主要误差源,必须予以考虑。在工程实际中,元件的夹持误差很难通过物理手段予以消除,只能采取特殊的测量过程以及数据处理方式进行解决。如果采用数据处理的方式,那么显而易见,夹持造成的面形变化必须具有相当高的可重复性。在设计三爪卡盘时,夹持爪与底座之间必须尽量减少摩擦力的作用,同时,三爪必须能够保证待测件自动对心,即待测镜相对于三爪的位置具有一定的重复性,通过这种方式保证待测镜的每次夹持能够具有可靠的重复性。

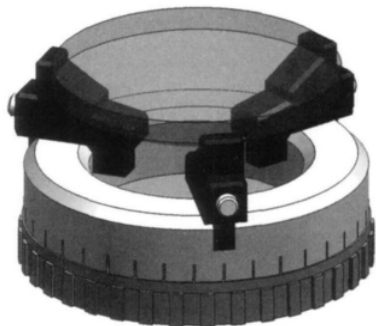


图 1 光学元件夹持示意图

Fig. 1 Schematic of optical component chuck

为了去除夹持带来的面形误差,必须先分析该误差的性质。首先,通过有限元(FEM)仿真分析三爪夹持造成的元件表面变形,然后对表面变形数据作泽尼克多项式拟合,观察泽尼克系数来分析支撑误差的性质。由于夹持造成的面形变化与光学元件的真实面形相互独立,因此,可以单独分析夹持造成的面形变化。以一块平面镜作为分析对象,其口径为 $\phi 150\text{ mm}$,厚度为 20 mm ,材料为熔石英。建立平面镜的有限元模型,如图2(a)所示,平面镜的

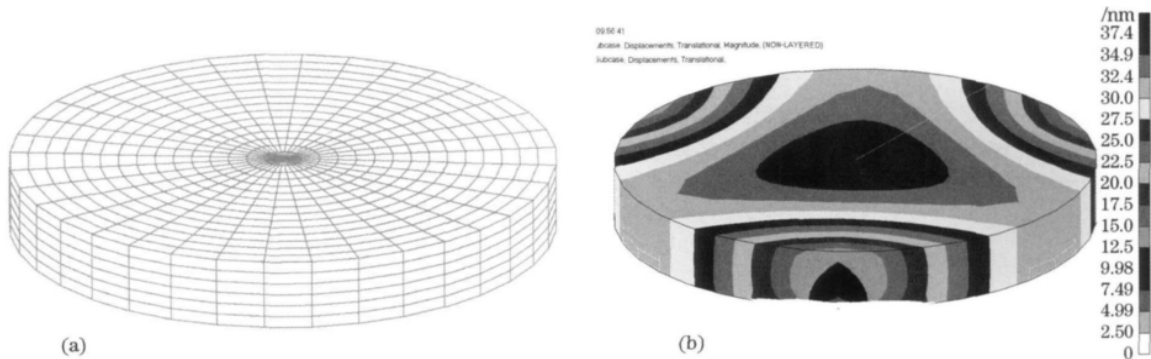


图 2 平面镜有限元分析结果。(a)有限元模型;(b)变形云图

Fig. 2 FEM result of flat mirror. (a) FEM model; (b) deformation graph

光轴竖直放置,设定边界条件为三点支撑,负载为重力和夹持力,仿真计算,获得其变形云图如图 2(b)所示。平面镜上表面的变形量为 37.4 nm。可见,由夹持作用造成的平面镜面形误差非常大。

由于有限元分析的表面变形中包含有一定的刚性位移,需要重新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,进行泽尼克多项式拟合,获得如图 3 所示的面形云图,其面形均方根(RMS)为 3.87 nm,峰-谷值为 20.3 nm。夹持的面形误差为 $0.03\lambda(\lambda=633\text{nm})$,对于高精度测量,这部分误差的影响非常严重,必须予以消除。

泽尼克多项式的各项系数如表 1 所示。从表 1 可以看出,三爪夹持方式造成的面形主要为第 4 项和第 11 项,其中第 4 项可以表示为离焦误差,可以

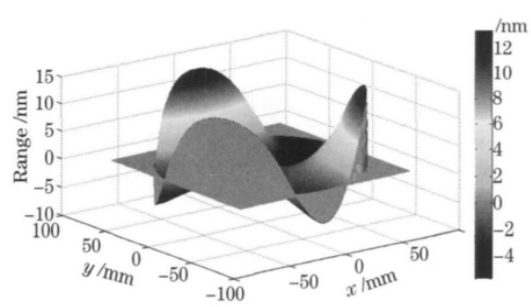


图 3 平面镜支撑状态下的面形

Fig. 3 Surface profile of mounted flat mirror

通过调整平面镜的位置予以补偿,第 11 项为非对称项,不能通过调节平面镜的位置予以补偿。因此,这部分非对称项误差就作为支撑造成的面形误差,传递到测量结果中。从另一方面看,消除支撑造成的面形误差也就是消除这部分非对称项误差。

表 1 表面面形的泽尼克系数

Table 1 Zernike coefficients of surface profile

Term	Coefficient	Term	Coefficient	Term	Coefficient	Term	Coefficient
1	0	11	3.7663×10^{-6}	21	0	31	-2.27×10^{-8}
2	0	12	0	22	0	32	0
3	0	13	0	23	0	33	0
4	4.139×10^{-6}	14	0	24	0	34	0
5	0	15	0	25	-3.8×10^{-9}	35	0
6	0	16	-9.7×10^{-9}	26	0	36	2.3×10^{-9}
7	0	17	0	27	0	37	-3.68×10^{-8}
8	0	18	0	28	0		
9	-3.308×10^{-7}	19	0	29	0		
10	0	20	-2.372×10^{-7}	30	0		

3 旋转支撑法测量面形的原理

菲佐型干涉仪测量的目标是被测面与参考面之间的干涉腔的光程差,这部分光程差 W 包括待测面面形 T (包括真实面形 T_0 和各项误差)、参考面面形 R ,即

$$W=R+T. \tag{1}$$

对于普通精度的面形检测,检测精度主要取决于参考面的面形精度 R ,而对于高精度、超高精度的面形检测,其精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 。因此(1)式可以写成

$$W=R+T_0+T_s+E+S. \tag{2}$$

标准面 R 通过绝对检验的方式进行标定,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精度范围内。干涉仪自身误差 S 主要由干涉仪主机的测量重复性决定,现在的商用产品可以达到万分之

一的测量重复精度,完全能满足高精度检测需求。因此,在高精度检测中,决定干涉仪最终测量精度的限制条件就是元件夹持造成的待测面面形误差 T_s 。这里假设参考面误差和干涉仪自身误差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

$$W=T_0+T_s. \tag{3}$$

以待测面和参考面之间的光轴为 Z 轴,待测面与参考面的圆心为原点,建立两个坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1, O_2X_2Y_2Z_2$,如图 4 所示。图中的 3 个用虚线表示的支撑点为 120° 均匀排布,与 X_1 轴成 α 角。在坐标系 $O_1X_1Y_1Z_1$ 中,用泽尼克多项式拟合待测面的面形。假设待测面的初始面形为

$$T_0(\rho,\theta)=\sum_{j=0}^{36}T_{0j}Z_j(\rho,\theta). \tag{4}$$

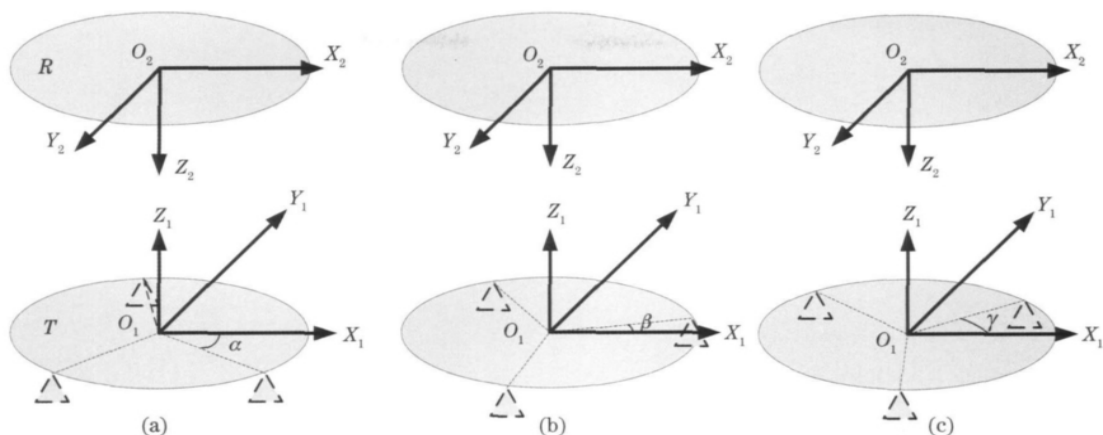


图 4 旋转支撑法测量过程。(a)初始状态;(b)第一次旋转;(c)再次旋转

Fig. 4 Test process of the rotation chuck method. (a) Origin condition; (b) the first rotating condition; (c) the second rotating condition

初始状态下,三点支撑所造成的面形变化误差 T_s 可表示为

$$T_s^0(\rho, \theta) = \sum_{j=0}^{36} T_{sj} Z_j(\rho, \theta + \alpha). \quad (5)$$

由此,干涉仪测量的光程差 W 为

$$W^0(\rho, \theta) = T_o + T_s^0 = \sum_{j=0}^{36} W_j^0 Z_j(\rho, \theta). \quad (6)$$

保持透镜的位置不变,将 3 个支撑点转动一个角度,由于支撑方式未变,其造成的待测面变形量也

不发生变化,只是随着支撑点转动了一个角度,此时,三点支撑方式造成的面形变化可以表示成

$$T_s^1(\rho, \theta) = \sum_{j=0}^{36} T_{sj} Z_j(\rho, \theta + \beta). \quad (7)$$

由于待测面、参考面都未发生移动,因此 R, T_o 都不变,此时,干涉仪测得的光程差可以表示为

$$W^1(\rho, \theta) = T_o + T_s^1 = \sum_{j=0}^{36} W_j^1 Z_j(\rho, \theta). \quad (8)$$

将对干涉仪两次的测量结果求差,得到

$$W^1(\rho, \theta) - W^0(\rho, \theta) = \sum_{j=0}^{36} (W_j^1 - W_j^0) Z_j(\rho, \theta) = \sum_{j=0}^{36} T_{sj} [Z_j(\rho, \theta + \beta) - Z_j(\rho, \theta + \alpha)]. \quad (9)$$

由泽尼克多项式的性质 $Z_j(\rho, \theta) = r(\rho) g(\theta)$, 通过整理可得

$$g_j(\theta + \beta) - g_j(\theta + \alpha) = \begin{cases} A_k \cos(k\theta) - B_k \sin(k\theta), & [g_k(\theta) = \cos(k\theta)] \\ B_k \cos(k\theta) - A_k \sin(k\theta), & [g_k(\theta) = \sin(k\theta)] \end{cases} \quad (10)$$

其中 $A_k = \cos(k\alpha) - \cos(k\beta)$, $B_k = \sin(k\alpha) - \sin(k\beta)$ 。

于是,得到方程

$$T_{sj} [g_j(\theta + \beta) - g_j(\theta + \alpha)] = dW_j g_j(\theta), \quad j = 0, 1, 2, \dots, 36 \quad (11)$$

整理(8)式和(11)式,得到方程组

$$\begin{cases} T_{sj} [A_k \cos(k\theta) - B_k \sin(k\theta)] = dW_j^1 \cos(k\theta), & [g_k(\theta) = \cos(k\theta)] \\ T_{s(j+1)} [B_k \cos(k\theta) - A_k \sin(k\theta)] = dW_{j+1}^1 \sin(k\theta), & [g_k(\theta) = \sin(k\theta)] \end{cases} \quad (j = 0, 1, 2, \dots, 36; \quad k = 1, 2, \dots, 5) \quad (12)$$

方程组(12)式中含有 3 个未知数,因此需要增加已知条件进行求解。继续将支撑结构旋转一个角度 γ , 同样可以获得一组类似(12)式所示的方程组

$$\begin{cases} T_{sj} [C_k \cos(k\theta) - D_k \sin(k\theta)] = dW_j^2 \cos(k\theta), & [g_k(\theta) = \cos(k\theta)] \\ T_{s(j+1)} [D_k \cos(k\theta) - C_k \sin(k\theta)] = dW_{j+1}^2 \sin(k\theta), & [g_k(\theta) = \sin(k\theta)] \end{cases} \quad (13)$$

式中 $C_k = \cos(k\alpha) - \cos(k\gamma)$, $D_k = \sin(k\alpha) - \sin(k\gamma)$ 。

通过求解由(12)式和(13)式组成的方程组,可以求得支撑造成的面形误差的泽尼克多项式系数为

$$T_{sj} = \frac{D_k dW_j^1 - B_k dW_j^2}{A_k D_k - B_k C_k}. \quad (14)$$

根据(5)式得到待测面的泽尼克系数为

$$T_{oj} = W_j^1 - T_{sj} = \frac{[D_k(A_k + 1) - B_k(C_k + 1)]W_j^0 - D_kW_j^1 + B_kW_j^2}{A_kD_k - B_kC_k} \tag{15}$$

待测面的真实面形为

$$T_o(\rho,\theta) = \sum_{j=0}^{36} T_{oj}Z_j(\rho,\theta) = \sum_{j=0}^{36} \left[\frac{D_k(A_k + 1) - B_k(C_k + 1)}{A_kD_k - B_kC_k}W_j^0 + \frac{-D_k}{A_kD_k - B_kC_k}W_j^1 + \frac{B_k}{A_kD_k - B_kC_k}W_j^2 \right]Z_j(\rho,\theta) \tag{16}$$

4 旋转支撑法的仿真分析

通过上述理论分析,采用两次旋转支撑结构的方法可以去除支撑带来的非旋转对称误差。这一部分主要通过仿真分析的办法来验证上述理论是否可行。以第 2 节中的平面镜作为分析对象,假设其真实面形如图 5(a)所示,该面形由有限元分析软件产生,包括了多项对称项和非对称项,其面形峰-谷值为 5.5 nm。支撑结构采用第 2 节中描述的三点支撑形式,理论分析可以得到该支撑形式造成的理论面形如图 5(b)所示,其面形峰-谷值为 20.3 nm。

在仿真分析过程中,将元件的初始面形和支撑面形以不同角度叠加,就可以用于模拟干涉仪测量的平面镜面形。图 6 为支撑结构在初始位置及旋转 20°和 50°时的测量面形。可以看出,当支撑结构与元件的相对位置发生变化时,干涉仪的测量结果也随之改变,并且测量的幅值和分布都有改变,从另一方面也证实必须将支撑面形从中剔除。旋转角度应该避免出现 $360^\circ/k, (k=1,2,3,4,5)$,因为在相应的转角下,对应阶数的泽尼克项将无法去除。

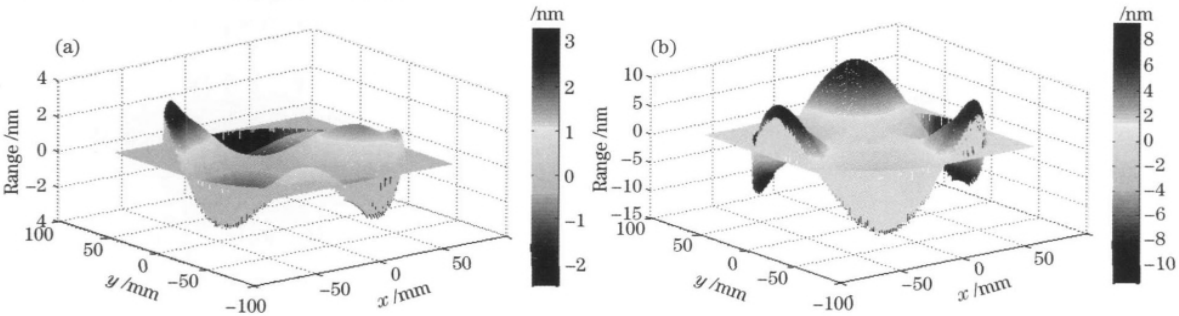


图 5 元件面形。(a)真实面形；(b)支撑面形
Fig. 5 Surface profile of the part. (a) Real profile; (b) mounted profile

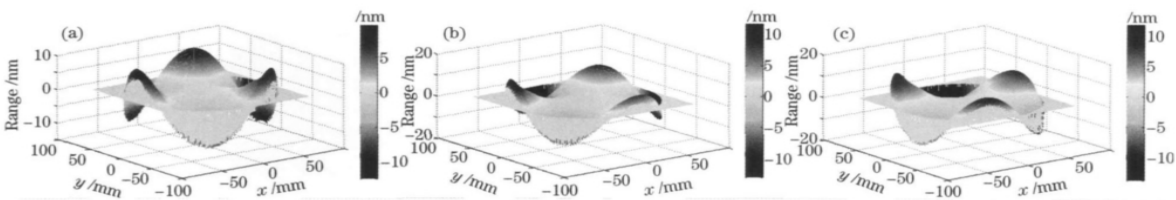


图 6 旋转支撑法测量过程的面形。(a)初始测量 (21.6 nm)；(b)第一次旋转测量(24.5 nm)；
(c)第二次旋转测量(24.3 nm)

Fig. 6 Testing the surface profile by rotation chuck method. (a) Initial test (21.6 nm)；(b) the first rotation test (24.5 nm)；(c) the second rotation test (24.3 nm)

应用前述的理论模型,将平面镜的真实面形和支撑面形从测量结果中分离出的结果如图 7,8 所示。图 7(a)、图 8(b)为旋转支撑法获得的面形,将

其与真实面形图 8(a)比较,可见其面形非常接近,旋转法获得的测量值要大一些,这是因为旋转法的结果中包含了支撑变形中的对称项。将真实面形与

测量面形结果求差,可以获得如图 8(c)所示的残差云图,该残差云图为高阶泽尼克对称项,其面形约为真实面形的 5%。图 7(b)为分离出的支撑面形,其结果小于理论的支撑面形,这是因为其中分离了一

部分泽尼克对称误差项。通过上述分析,可以认为,旋转支撑法可以有效剥离支撑作用造成的面形变化量,提高光学元件面形的测量精度。

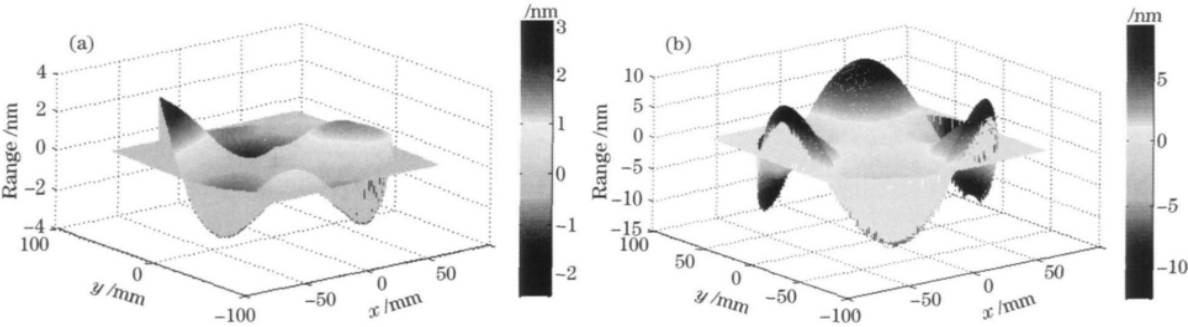


图 7 旋转支撑法测量结果。(a)元件真实面形(5.8 nm);(b)支撑变形(19.4 nm)
Fig. 7 Results by rotation chuck method. (a) Real profile (5.8 nm); (b) mounted profile (19.4 nm)

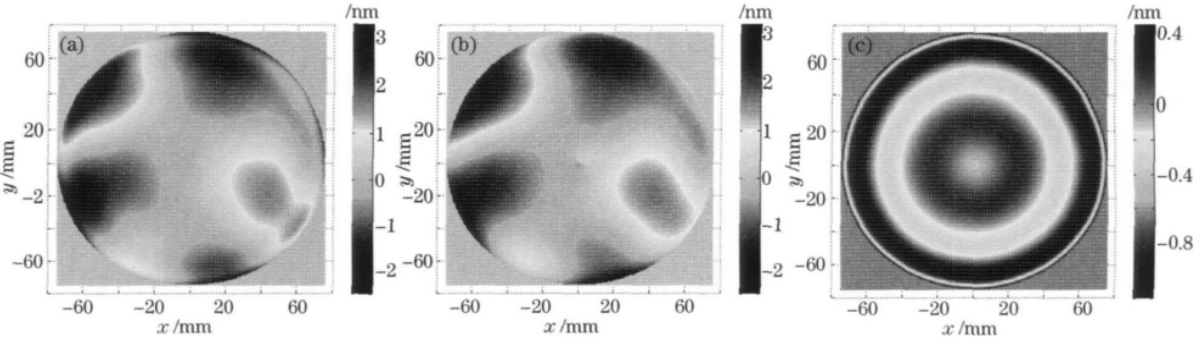


图 8 旋转支撑法测量误差。(a)元件真实面形(5.5 nm);(b)旋转法测量面形(5.8 nm);(c)旋转法测量面形残差(1.3 nm)

Fig. 8 Errors of rotation chuck method. (a) Real profile of optical component (5.5 nm); (b) test profile by the rotation chuck method (5.8 nm); (c) residual error of test profile by the rotation chuck method (1.3 nm)

5 误差分析

5.1 理论误差

旋转法去除支撑对光学元件面形的影响的误差源主要包括理论误差和测量误差。理论误差是该方法所固有的误差。通过旋转的办法只能分离出支撑面形中的非旋转对称项,其旋转对称项仍旧在元件测量面形的结果中,这部分残留的旋转对称项为旋转法的理论误差。在一种支撑结构带来的旋转对称项所占比例较大时,该方法所起到的作用将随之减小。因此,在设计支撑结构时,需要选择造成面形变化量中的对称项小的设计。

图 9 表示支撑变形的各项组成,其中图 9(a)为支撑变形,主要由第 4 项离焦和第 11 项组成,面形峰-谷值为 43 nm;图 9(b)为支撑变形中的非旋转对称项,其面形峰-谷值为 42 nm,这部分面形可以通过旋

转支撑结构予以去除;图 9(c)为支撑变形中的旋转对称项,其面形峰-谷值为 20 nm,占总量的 50%左右。旋转对称项中的离焦可以在测量时消除,消除离焦项以后的面形如图 9(d)所示,其峰-谷值为 5nm。具体的比例可以从表 2 中看出,去除离焦后的面形峰-谷值约占整个支撑面形峰-谷值的 11%。可以看出,旋转支撑法对于支撑变形中非旋转对称项比例大的支撑方式更加有效。不同的支撑方式造成的面形变化不同,随支撑点的增加,其变形量中的对称项也随之增加,这也就降低了旋转支撑法的有效性。干涉仪的测量工况通常分为卧式和立式两种,在卧式测量时,三爪夹持方式造成的面形更多的成分为非对称项,因此,旋转支撑法更加适用于卧式测量中的三爪支撑方式。

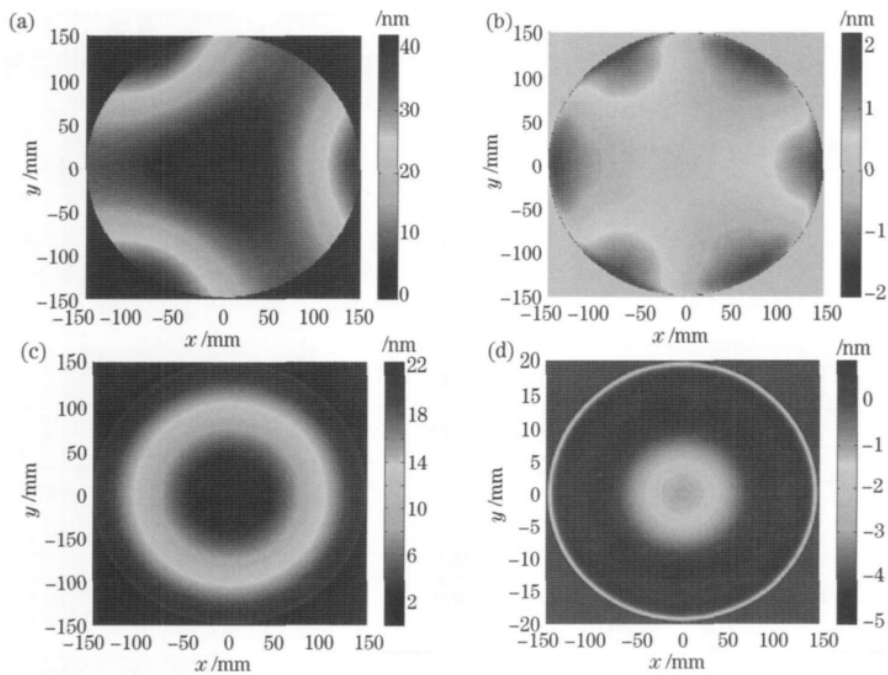


图 9 支撑变形的组成。(a)支撑变形(43 nm)；(b)非旋转对称项(42 nm)；(c)旋转对称项(20 nm)；(d)去除离焦后的旋转对称项(5 nm)

Fig. 9 Composition of mounted deformation. (a) Mounted deformation (43 nm); (b) nonrotationally symmetrical profile (42 nm); (c) rotationally symmetrical profile (20 nm); (d) rotationally symmetrical profile without defocus (5 nm)

表 2 支撑面形的组成列表

Table 2 Composition of mounted profile

Item	Mounting profile	Nonrotationally symmetrical profile	Rotationally symmetrical profile	Rotationally symmetrical profile without defocus
P-V /nm	43	42	20	5
Percentage /%	100	97.7	46.5	11.6

5.2 测量误差

在测量过程中引入的误差包括转角误差、位置误差、夹持重复性误差、干涉仪测量误差和环境扰动等。环境扰动 E 作为随机量影响干涉测量精度,可通过多次测量平均的方式予以减小和消除,并且可以提供高质量的环境,保证温度、气流和振动等对测量的影响达到最小。干涉仪自身误差 S 包括系统误差和非系统误差,干涉仪的系统误差可通过标定的方式予以补偿,而其非系统误差则主要包括 CCD 噪声、移相误差和成像系统误差等,这部分误差影响干涉仪测量的重复性,主要通过干涉仪主机的性能予以保证。

转角误差是旋转角度不准确造成的误差,该误差由机械系统的精度和透镜位置保持精度所决定。根据 Parks^[8] 的研究,两块透镜相互旋转一个角度以后,其泽尼克系数可以写成

$$a_i^k = -\frac{1}{2} \left[\Delta a_i^k + \frac{\sin(k\phi)}{1 - \cos(k\phi)} \Delta a_i^{-k} \right]. \quad (17)$$

对角度进行偏微分,获得角度误差灵敏度的关系式为

$$da_i^k = -\frac{1}{2} \Delta a_i^{-k} \frac{k [\cos(k\phi) + 1]}{1 - \cos(k\phi)} d\phi. \quad (18)$$

计算不同的旋转角度与泽尼克多项式的阶数之间的关系,如图 10 所示。从图中可以看出,各个阶次的泽尼克多项式项对旋转角度有着不同的敏感程度,在选择旋转角度时,应该将面形的泽尼克系数作为权重,综合考虑各阶数项的灵敏度。通常可以取 20°~50°这一范围,因为这一范围内没有将角度的误差进行放大的成分,较为安全。

旋转 40°时,各个阶数的泽尼克系数的误差灵敏度如表 3 所示。从表中可以看出,对于高阶泽尼克项系数,其灵敏度非常小,而 1 阶项系数较大,但是泽尼克多项式的 1 阶项是可以在面形测量时予以消除的部分,因此,误差灵敏度满足精度要求。

位置误差是独立于光学元件夹持的误差,可以通过调整透镜的偏心和倾斜角度来补偿,因而,其引起的误差量是可以忽略的。

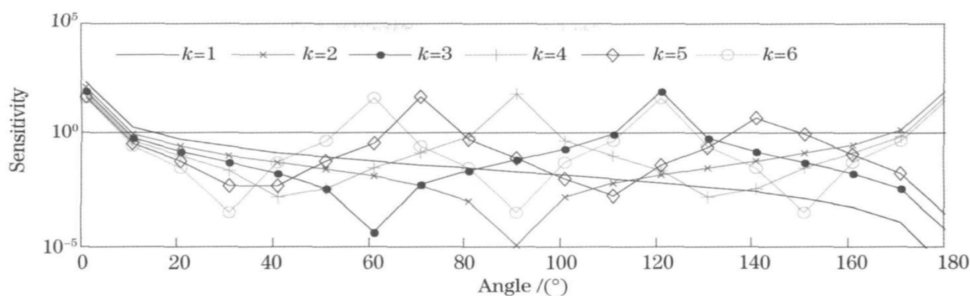


图 10 转动角度的误差灵敏度曲线

Fig. 10 Curves of error sensitivity of rotating angle

表 3 泽尼克多项式系数误差灵敏度

Table 3 Error sensitivity of Zernike polynomial coefficients

Order	Error sensitivity
1	0.1249
2	0.0462
3	0.0154
4	0.0014
5	0.0043
6	0.0442

夹持重复性误差是由于再次夹持不能保证夹持的位置和作用力完全相同所造成的误差。这部分误

差是不可避免的,通过仿真的方式进行预估。图 11 (a)为三点支撑的理想位置下平面镜的面形,图 11 (b)为三点支撑偏移 5 mm 下平面镜的面形,可以看出平面镜的面形发生了一定程度的变化,将两次的面形求差,得到图 11(c)所示的面形云图,可以看出两次的差值相对于初始面形变化小于一个数量级,并且成一定的倾斜分布,这种倾斜误差是可以去除的。因此,平面镜的面形误差对位置的重复精度要求不高。

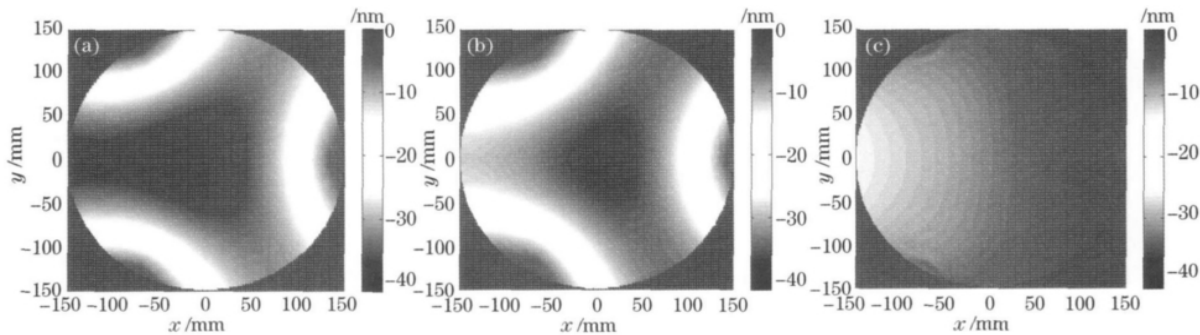


图 11 多次夹持造成的面形变化。(a)初始夹持装态;(b)再次夹持状态(偏心 5 mm);(c)面形变化

Fig. 11 Profile variation caused by repeated chuck. (a) Initial condition; (b) the second condition (eccentric 5 mm); (c) difference between (a) and (b)

6 结 论

针对高精度元件面形检测的需求,提出了一种能够分离出元件支撑造成的面形误差的面形测量方法。研究了元件支撑造成的面形变化的特点,针对这些特点,建立了一种基于旋转元件支撑结构的面形测量方法,并进行了仿真分析,对旋转支撑法的误差源进行了研究。仿真结果表明,通过旋转法,可以显著提高测量精度,剥离支撑变形后的面形误差为元件真实面形相应值的 5%。

参 考 文 献

1 Chris J. Evans, Robert J. Hocken, W. Tyler Estler. Self-calibration: reversal, redundancy, error separation, and absolute testing[J]. *Ann. CIRP*, 1996, **45**(2): 617~634

2 Günter Schulz, Jürgen Grzanna. Absolute flatness testing by the rotation method with optimal measuring-error compensation[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(19): 3767~3780

3 Robert E. Parks, Lianzhen Shao, Chris J. Evans. Pixel-based absolute topography test for three flats[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(25): 5951~5956

4 Ulf Griesmann. Three-flat test solutions based on simple mirror symmetry[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(23): 5856~5865

5 Chiayu Ai, James C. Wyant. Absolute testing of flats by using even and odd functions [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32** (25): 4698~4705

- 6 Chris J. Evans, Robert N. Kenster. Test optics error removal [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(7): 1015~1021
- 7 Klaus R. Freischlad. Absolute interferometric testing based on reconstruction of rotational shear [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(10): 1637~1648
- 8 R. E. Parks. Removal of test optics errors [C]. *SPIE*, 1978, **153**: 56~63
- 9 Ulf Griesmann, Quandou Wang, Johannes Soons. Three-flat tests including mounting-induced deformations [J]. *Opt. Engng.*, 2007, **46**(9): 093601
- 10 Miao Erlong, Zhang Jian, Gu Yongqiang *et al.*. Measurement error analysis of high precision Fizeau interferometer for lithography projection objective[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2029~2034
- 苗二龙, 张 健, 谷永强 等. 用于光刻投影物镜检测的高精度菲佐干涉仪误差分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2029~2034
- 11 Liu Dong, Yang Yongying, Tian Chao *et al.*. Analysis and correction of retrace error for nonnull aspheric testing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 688~696
- 刘 东, 杨甬英, 田 超 等. 非球面非零位检测中的回程误差分析与校正[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 688~696
- 12 Geng Wenbao, Zhai Linpei, Ding Yalin. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(2): 314~320
- 耿文豹, 翟林培, 丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(2): 314~320
- 13 Liu Ke, Li Yanqiu. A new calibration method of systematic errors in phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2923~2927
- 刘 克, 李艳秋. 一种新的相移点衍射干涉仪系统误差标定方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2923~2927
- 14 Shi Feng, Dai Yifan, Peng Xiaoqiang *et al.*. Magnetorheological finishing for high-precision optical surface [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(8): 1859~1864
- 石 峰, 戴一帆, 彭小强 等. 高精度光学表面磁流变修形[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(8): 1859~1864