

倾斜波面干涉仪中光纤阵列型点源发生器的 光程误差标定方法

李小柳¹, 沈华^{1,2}, 李嘉^{1,2}, 朱雪妍¹, 姚德超¹, 路晴^{1,2}, 朱日宏^{1,2}

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;

²南京理工大学先进固体激光工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京 210094

摘要 分析了光纤阵列型点源发生器相对于透镜阵列型点源发生器的优势。针对光纤阵列型点源发生器各光纤出射光束之间存在初始光程差的问题,提出了基于马赫-曾德尔全光纤干涉仪和小数重合法的光程差检测方法。测量各光束间的光程差并将其引入到倾斜波面干涉系统的误差模型中,以消除其对被测件面形偏差解算的影响。结果表明,该检测系统的测量不确定度为 $0.07\lambda_3$ ($\lambda_3 = 632.8 \text{ nm}$)。分别使用基于光纤阵列的倾斜波面干涉系统和 ZYGO 干涉仪对抛物面镜片进行测量,二者获得的面形偏差结果一致。

关键词 测量; 点源发生器; 光纤阵列; 小数重合法; 光程差

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0512002

Optical Path Difference Calibration Method of Optical Fiber Array Point Source Generator in Tilted-Wave-Interferometer

Li Xiaoliu¹, Shen Hua^{1,2}, Li Jia^{1,2}, Zhu Xueyan¹,

Yao Dechao¹, Lu Qing^{1,2}, Zhu Rihong^{1,2}

¹ School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China;

² MIT Key Laboratory of Advanced Solid Laser, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing,
Jiangsu 210094, China

Abstract The advantages of the optical fiber array point source generator relative to the lens array point source generator are analyzed. An optical path difference detection method based on Mach-Zehnder all-fiber interferometer and excess fraction method is proposed, which can measure the optical path difference of all beams relative to the beam emitted from central fiber. Meanwhile, the measurement influence of optical path difference on surface deviation calculation can be eliminated with introducing it into the mathematical model of tilted-wave-interferometry system. The results show that the measurement uncertainty of this detection system is $0.07\lambda_3$ ($\lambda_3 = 632.8 \text{ nm}$). A parabolic mirror is measured with fiber array based tilted-wave-interferometry system and ZYGO interferometer, and the surface deviations obtained by the two interferometers are consistent.

Key words measurement; point source generator; fiber array; excess fraction method; optical path difference

OCIS codes 120.3180; 040.1880; 060.2380

1 引 言

光学自由曲面是一类复杂、非旋转对称的异形曲面,具有较大的面形自由度,它可以突破传统光学

系统的限制,在校正像差的同时简化了系统结构,满足了现代光学系统小型化、高性能的要求,是当前光学领域的前沿技术^[1-4]。

倾斜波面干涉(TWI)法^[5-6]具有测量效率高、检

收稿日期: 2017-08-04; 收到修改稿日期: 2017-12-09

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(30916014112-007)、国家自然科学基金(61775096)、南京理工大学本科生物科研训练“百千万”省级项目(201610288028X)

作者简介: 李小柳(1996—),女,本科生,主要从事光学精密测试技术方面的研究。E-mail: 15205159863@163.com

导师简介: 沈华(1981—),男,博士,副教授,主要从事光学精密测试技术方面的研究。E-mail: edward_bayun@163.com (通信联系人)

测精度高、系统动态测量范围大等优点,在自由曲面形检测技术中具有较好的应用前景。点源发生器是 TWI 系统中的关键器件,但目前国内外普遍使用的由透镜阵列制作的点源发生器存在一些不足,如单透镜球差会引入误差、无法动态生成点源阵列等。本文提出在 TWI 系统中使用光纤阵列型点源发生器,以弥补透镜阵列的不足。通过光纤耦合器、光开关、保偏光纤和光纤阵列的共同作用,动态生成点源阵列,从而提高系统的通用性。此外,光纤发出的光束可保证测试光束的质量。但该结构中任意两根光纤的出射光束经过的光纤长度不完全相同,使出射光束之间存在初始光程差,从而导致利用 TWI 系统检测曲面形时出现错误。本文针对光纤阵列型点源发生器出射光束间存在不一致而导致测试光束间存在相位差的问题,设计了初始光程差检测系统,将测得的光程差引入 TWI 系统的误差模型^[6]中,消除了因引入光纤阵列而产生的测量误差,提高了系统的测量精度。

2 光纤阵列型点源发生器各光束间的光程差检测方案

2.1 TWI 系统及光纤阵列型点源发生器

目前国内外常见的基于点源阵列的 TWI 系统如图 1 所示,该系统主要由泰曼-格林干涉系统和梯度补偿模块(GCM)组成^[5-6]。图 1 中 BS₁、BS₂ 为偏振分光棱镜, SF₁、SF₂ 为标准平面反射镜, L₁ 为准直物镜, B 为干涉仪孔径光阑。系统进行检测时,测试波面经过点源发射器(LA)后产生多束入射光,入射光经过准直透镜组(C)、球面补偿透镜组(S)后产生具有不同倾角的多重入射球面波,利用多重倾斜球面波可对被测曲面的各个局部区域进行梯度补偿。由被测件反射回来的多重倾斜波面携带有被测件的局部面形偏差,并与干涉系统参考波面发生干涉,干涉光束经过成像透镜(L₂)后在电荷耦合器(CCD)上形成干涉图阵列。通过一系列的波面相位解算、拟合和重构算法,可将被测件的面形恢复出来。

点源发生器是 TWI 系统中的关键器件,目前国内外使用的点源发生器结构如图 2 所示,主要由透镜阵列、掩模板和针孔阵列组成,以产生对待测件进行表面梯度补偿的球面点源阵列。使用透镜阵列制作点源发生器存在的问题有:1)单透镜会产生球差,使透镜出射的光不是理想球面波,进而在测量中引入误差;2)系统中通过动态掩模板的定向移动来控制单透镜出射光束的通断,但动态掩模板的形状在制作完成后无法更改,测量过程中也无法更换动态

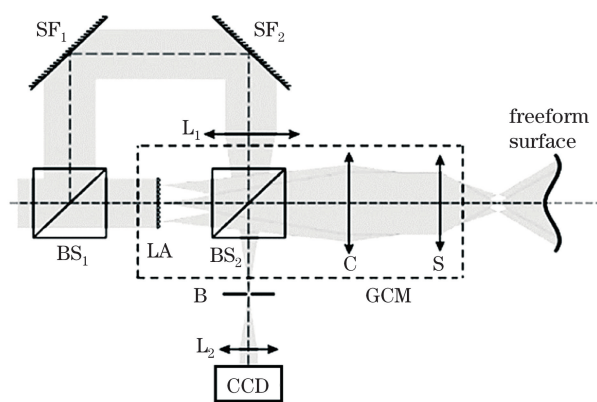


图 1 基于点源阵列的 TWI 系统
Fig. 1 TWI system based on point source array

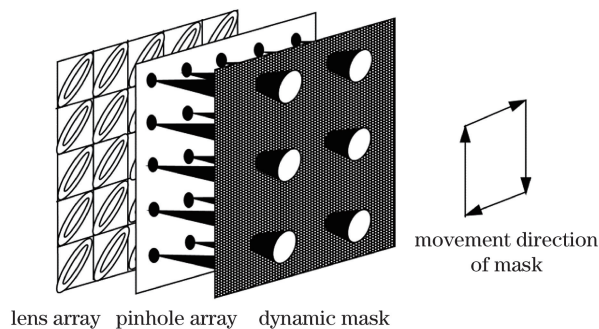


图 2 点源发生器组成结构示意图

掩模板,导致产生的点源阵列形状固定,无法根据被测件的梯度变化动态生成点光源,从而限制了测量系统的通用性。

为了弥补透镜阵列型点源发生器的不足,本课题组提出在 TWI 系统中使用光纤阵列制作点源发生器,其结构如图 3 所示。激光器的出射光经光纤传输到 $1 \times N$ ($N \geq 2$) 的光纤耦合器后,被分为能量相等的 N 束光,将这 N 束光分别传输到 N 个 $1 \times M$ ($M \geq 2$) 的光纤耦合器上,可得到 $N \times M$ 束光路。然后将这 $N \times M$ 束光路分别用保偏光纤与光纤阵列相连接,即可得到 $N \times M$ 束测试光。光纤的出射光束可以看作点光源的发射光束,保证了测试光束的质量。

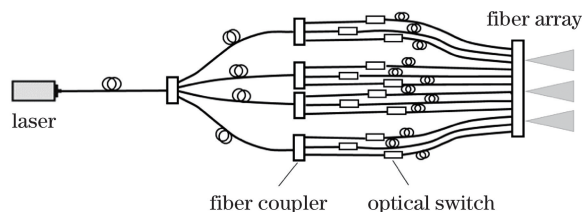


图 3 光纤阵列型点源发生器组成结构示意图
Fig. 3 Schematic of point source generator structure based on fiber array

在 TWI 系统检测面形时,各点源分别检测被测件的不同区域面形^[5],光纤阵列出射的每束测试光经被测件反射回干涉系统后与参考光进行干涉。当每束测试光与参考光的能量匹配时,产生干涉条纹的对比度、强度即可达到解算要求。每束测试光之间因器件损耗导致的能量差异不会对测量结果产生影响^[6]。同时在运用 TWI 系统检测自由曲面面形的过程中,针对不同的待测面形,点源发生器需要产生不同分布的点源阵列。在上述的光纤阵列型点源发生器中,将光开关连接在光纤耦合器和光纤阵列之间,通过光纤耦合器、光开关和光纤阵列的共同作用,可以实时控制任意点源的通断,动态生成点源阵列,从而提高了系统的通用性。

光纤阵列型点源发生器可以解决 TWI 系统的测量通用性问题,但其任意两根光纤的出射光束经过的光纤长度不完全相同,导致出射光束之间存在初始光程差。如图 4 所示,由于存在初始光程差,系统通过解算、重构后,得到存在台阶的面形偏差结果,导致面形检测出现错误。

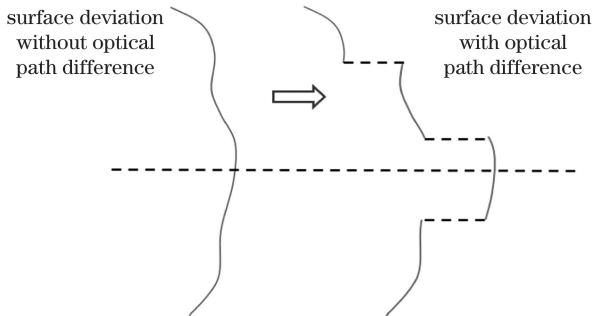


图 4 光纤出射光束间存在的光程差对测量结果的影响
Fig. 4 Influence of optical path difference between output light beams on detection result

因此需对点源发生器的初始光程差进行检测,以消除其对系统检测结果的影响。针对光纤阵列型点源发生器的测试光束间存在相位差的问题,设计了初始光程差检测系统。

2.2 各光束光程差检测方案

基于马赫-曾德尔全光纤干涉仪^[7-8]和移相法^[9]的原理设计了初始光程差检测系统。如图 5 所示,激光器的出射光经光纤耦合器后分为两束等光强的光。一束光输入参考光纤,输出至反射镜,压电陶瓷微位移器(PZT)作用在参考光纤上,通过改变光纤长度来改变相位^[10]。另一束光输入测试光纤(光纤阵列中某根光纤),输出至反射镜。两束反射光经光纤传输至耦合器后发生干涉,干涉光信号经

光电探测器转换为电压信号,利用示波器检测电压-时间($u-t$)变化曲线。

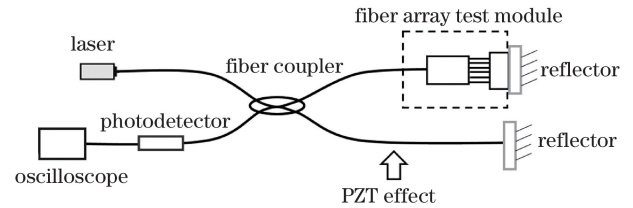


图 5 相位差检测系统原理图

Fig. 5 Schematic of phase difference detection system

光电探测器输出的电压信号可表示为

$$u = A + B \cos(\Delta\varphi + \varphi_r), \quad (1)$$

式中 A 、 B 为常量, φ_r 为 PZT 移相后产生的相位差, $\Delta\varphi$ 为所求的相位差。

实验中使用的 PZT 线性度优于 0.03%。将 PZT 三次移相稳定后的输出电压分别记为 u_i ($i = 1, 2, 3$)。整理得到 $\Delta\varphi$ 的表达式为^[10]

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{u_1 - u_3}{2u_2 - u_1 - u_3}. \quad (2)$$

在干涉光路中,相位差与光程差的关系式为

$$\delta = [\Delta\varphi / (2\pi) + m] \lambda, \quad (3)$$

式中 m 为 2π 的整数倍, λ 为波长, δ 为对应的光程差。为了进一步求得 m , 基于小数重合法原理, 使用多个不同波长的出射光束进行实验, 通过建立方程得到光程差的整数部分^[11-13]。

2.3 小数重合法

光在光纤中传输存在的光程差为

$$\delta = nL, \quad (4)$$

式中 n 为光纤折射率, L 为干涉仪的两臂差。

根据小数重合法原理, 引入波长 λ_i ($i = 1, 2, 3$), 对应的光纤折射率为 n_i ($i = 1, 2, 3$)。结合 (3)、(4) 式得到三种波长下的光程差为

$$\delta = \left(\frac{\Delta\varphi_i}{2\pi} + m_i \right) \lambda_i \quad (i = 1, 2, 3). \quad (5)$$

假设检测系统测试光纤与参考光纤长度差的初测值为 $L \pm \Delta L$, 其中 ΔL 为精度误差, 结合 (5) 式可得到 m_1 和 m_2 的取值范围为

$$m_i \in \left(\frac{(L - \Delta L)n_i}{\lambda_i} - \frac{\Delta\varphi_i}{2\pi}, \frac{(L + \Delta L)n_i}{\lambda_i} - \frac{\Delta\varphi_i}{2\pi} \right) \quad (i = 1, 2). \quad (6)$$

为了便于计算, 引入关于折射率的系数 A_{ij} ^[14]:

$$A_{ij} = \frac{n_i - 1}{n_i - n_j} \quad (i, j = 1, 2, 3, i \neq j). \quad (7)$$

结合 (5) 式和 (7) 式, 经过整理得到系统所求值 (λ_3 对应的值) m_3 的表达式为

$$m_3 = \frac{\left(\frac{\Delta\varphi_1}{2\pi} + m_1\right)(1 - A_{12})\lambda_1 + \left(\frac{\Delta\varphi_2}{2\pi} + m_2\right)(A_{12} + A_{23} - 1)\lambda_2}{A_{23}\lambda_3} - \frac{\Delta\varphi_3}{2\pi} \quad (8)$$

将(6)式可能的取值组合都代入(8)式,满足 m_3 的残余误差最小^[15],即可求得 m_1 、 m_2 和 m_3 的值。通过上述过程,将 $\Delta\varphi$ 和 m 代入(3)式中,即可求得完整的光程差值。

2.4 测量系统的不确定度分析

在使用小数重合法进行光程差测量时,测量系统的误差取决于小数部分的测量精度^[16]。小数部分的数值由(2)式得到,(2)式为三步移相法求解相位的表达式,相位求解精度为 $0.01\lambda_3$ ($\lambda_3 = 632.8 \text{ nm}$)^[17];此外,实验过程中电压测量误差为 3.2%,最终计算得出系统的测量不确定度为 $0.07\lambda_3$ 。

3 光程差检测结果及抛物面镜片的测试

3.1 光纤阵列型点源发生器的光程差检测

图 6 为实验装置图,实验使用的光纤为石英光纤(PM630),实验过程中环境温度范围为 $(20 \pm 0.1)^\circ\text{C}$,从而保证光纤性能变化对实验结果产生的影响最小^[16,18]。光纤阵列型点源发生器选用 5×5 光纤阵列,使用两级 1×5 光纤耦合器,最终产生测量被测件不同区域的 25 个点源。假设激光器发射光束的功率为 P ,发射光束经 1×5 光纤耦合器(附加损耗为 0.4 dB)后分为 5 束等能量的光,每束光的能量为 $0.182P$ 。5 束光分别输入到 5 个 1×5 光纤耦合器

中(为了简洁,图 6 装置图中第 2 级 5 个 1×5 光纤耦合器只接入 1 个),得到 25 束等能量的光,每束光的能量为 $0.0333P$ 。实验使用的激光器功率可调,最大功率为 50 mW,每束光的能量可以调节到合适的范围内,从而使光电探测器接收到足够强的光信号。

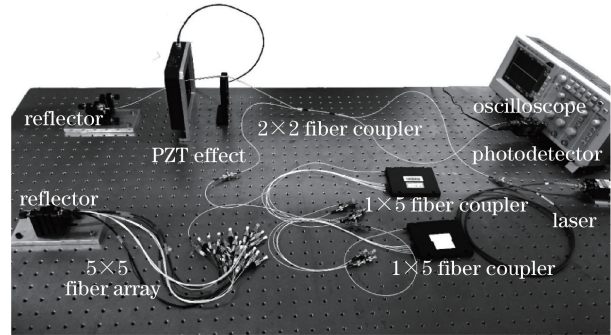


图 6 实验装置图

Fig. 6 Diagram of experimental setup

以测量光纤阵列中位置坐标为 $(-1, 1)$ 的光纤为例,可观察到在 PZT 移相过程中 $u-t$ 曲线呈正弦趋势变化。将 PZT 3 次移相稳定后的输出电压分别记为 u_1 、 u_2 和 u_3 。实验选取不同波长($\lambda_1 = 450 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 532 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 632.8 \text{ nm}$)的光输入时,对应的示波器输出电压、计算得到的 $\Delta\varphi$ 及 m 的取值范围如表 1 所示。

表 1 光纤阵列中位置坐标为 $(-1, 1)$ 的光纤测量数据

Table 1 Fiber measurement data at $(-1, 1)$ in fiber array

Wavelength /nm	Refractive index	u_1 /mV	u_2 /mV	u_3 /mV	$\Delta\varphi / \pi$	Range of m
$\lambda_1 = 450.0$	$n_1 = 1.476$	31.6	33.7	20.3	0.200	$m_1 \in [3870.3, 4001.5]$
$\lambda_2 = 532.0$	$n_2 = 1.471$	207.4	275.0	152.0	0.090	$m_2 \in [3262.7, 3373.3]$
$\lambda_3 = 632.8$	$n_3 = 1.467$	1700.0	2120.0	1360.0	0.085	m_3

根据(8)式,计算得到当 $m_1 = 3905$, $m_2 = 3266$ 时, m_3 的残余误差^[15]取得最小值, $m_3 = 2717$ 。重

复以上操作,测量光纤阵列中各光纤相对于中心基准光纤的光程差,如表 2 所示。

表 2 光纤阵列型点源发生器各光束相对于基准光束的光程差

Table 2 Optical path difference of each beam in point source generator with fiber array relative to reference beam

Y /mm	δ				
	X = -1.0 mm	X = -0.5 mm	X = 0 mm	X = 0.5 mm	X = 1.0 mm
1.0	$2515.68\lambda_3$	$-2889.66\lambda_3$	$-1920.33\lambda_3$	$1255.27\lambda_3$	$660.93\lambda_3$
0.5	$-2281.08\lambda_3$	$1171.92\lambda_3$	$-898.39\lambda_3$	$2623.69\lambda_3$	$2089.07\lambda_3$
0	$1781.75\lambda_3$	$2967.72\lambda_3$	0	$-2495.67\lambda_3$	$1469.12\lambda_3$
-0.5	$-2125.04\lambda_3$	$1498.45\lambda_3$	$-2786.42\lambda_3$	$-2391.14\lambda_3$	$468.26\lambda_3$
-1.0	$984.68\lambda_3$	$2319.05\lambda_3$	$-2610.70\lambda_3$	$2416.76\lambda_3$	$-1136.46\lambda_3$

由表 2 数据可以得到:在光纤阵列型 TWI 系统中,各光纤相对于中心点源的光程差的平均值为 $1906.59\lambda_3$,最大光程差为 $2967.72\lambda_3$,最小光程差为 $468.26\lambda_3$,光程差值集中分布在 $1500\lambda_3 \sim 2500\lambda_3$ 范围内。将上述测得的光程差作为固有误差引入到 TWI 系统的误差模型中,以消除光纤间的光程差对系统测量结果的影响。

3.2 抛物面镜片面形测量

使用基于光纤阵列的 TWI 干涉系统和 ZYGO 干涉仪对抛物面镜片进行测量。抛物面镜片的圆锥系数 $k = -1$,顶点曲率半径 $R = -30$,口径为 40 mm。图 7 为基于无像差点法原理并使用 ZYGO 干涉仪测量抛物面镜片的光路示意图^[19]。ZYGO 干涉仪出射的球面波会聚在抛物面镜的焦点 A,球面测试光经抛物面镜反射后变为平行光。在 A 点所在位置处放置中心带孔的标准平面反射镜,可使测试光束原路返回干涉仪,以获得干涉图,进而解算出面形偏差。图 8 为 TWI 系统测量抛物面镜片与 ZYGO 干涉仪测量抛物面镜片的面形偏差结果对比。图 8(a)为 TWI 系统测量抛物面镜片的面形偏差结果,从图中可以看出峰谷(PV)值为 0.469λ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。图 8(b)为 ZYGO 干涉仪测量抛物面镜片的面形偏差结果,PV 值为 0.352λ 。相较于 ZYGO 干涉仪测量结果,基于光纤阵列的 TWI 干涉系统测量结果的 PV 值偏大,这是因为使用 ZYGO 干涉仪测量抛物面时,采用了无像差点法,ZYGO 干涉仪发出的测试光束因中间部分被遮挡而无法返回干涉仪中[图 8(b)],造成了面形偏差结果中间部分的数据缺失。从图 8(a)、(b)中可以看出,中间区域偏离设计值较大,图 8(b)中的缺失部分数据对 PV 值有较大影响,但是从两个分图中的可比较区域来看,两个装置测得的面形偏差的变化趋势一致。

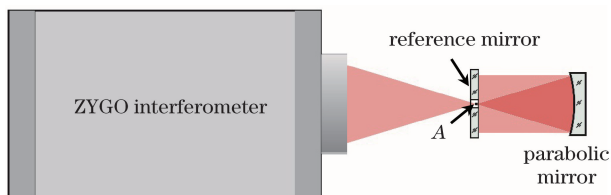


图 7 使用 ZYGO 干涉仪测量抛物面镜片的光路示意图
Fig. 7 Light path schematic for measurement of parabolic mirror using ZYGO interferometer

4 结 论

分析了 TWI 系统中光纤阵列型点源发生器相

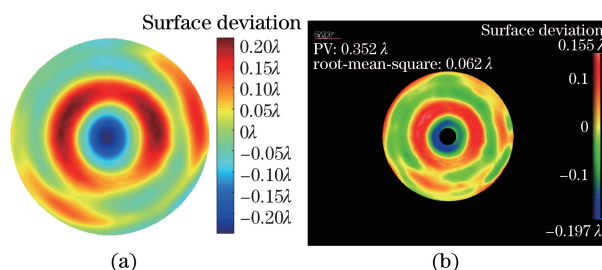


图 8 (a) TWI 系统测量抛物面镜片的面形偏差结果;
(b) ZYGO 干涉仪测量抛物面镜片的面形偏差结果

Fig. 8 (a) Surface deviation result of measurement of parabolic mirror using TWI system;
(b) surface deviation result of measurement of parabolic mirror using ZYGO interferometer

较于透镜阵列型点源发生器的优势,并结合光纤阵列型点源发生器的结构特点,分析了其各出射光束间存在的光程差对测量结果的影响。基于移相法、马赫-曾德尔全光纤干涉系统和小数重合法的原理,搭建了初始光程差检测系统,完整测出了光程差的小数部分和整数部分,分析得出系统测量不确定度为 $0.07\lambda_3$ 。将光程差测量结果作为固有误差引入到 TWI 系统的数学模型中,以消除点源间的光程差对系统面形检测结果的影响。此外,使用了基于光纤阵列型点源发生器的倾斜波面干涉仪对抛物面镜片进行测量,同时给出了使用 ZYGO 干涉仪测量的面形偏差结果,通过比较发现两个装置测得的面形偏差结果的变化趋势一致。所提光程差检测系统可为 TWI 系统面形检测的误差分析过程提供参考。

参 考 文 献

- [1] Cheng H B, Feng Y P, Wang Y T. Research on free-form optics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(12): 17-22.
程灏波, 冯云鹏, 王涌天. 自由曲面光学研究[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(12): 17-22.
- [2] Shi H D, Zhang X, Li Y C, et al. Analysis of the aberration properties of pupil off-axis freeform optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1208001.
史浩东, 张新, 李英超, 等. 光瞳离轴自由曲面光学系统像差特性研究[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1208001.
- [3] Yu Q H. Design and testing of channel splitter based on optical free-form surface[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0722005.
于清华. 一种基于光学自由曲面的通道分光元件的设计与检验[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0722005.
- [4] Garbusi E, Pruss C, Liesener J, et al. New technique for flexible and rapid measurement of

- precision aspheres[C]. SPIE, 2007, 6616: 661629.
- [5] Shen H, Zhu R, Chen L, *et al.* Assessment of optical freeform surface error in tilted-wave-interferometer by combining computer-generated wave method and retrace errors elimination algorithm[J]. Optical Engineering, 2015, 54(7): 074105.
- [6] Shen H, Li J, Zhu R H, *et al.* Design of non-null interferometer based on point source array for testing freeform surface[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1222003.
沈华, 李嘉, 朱日宏, 等. 基于点源阵列的自由曲面非零位干涉检测系统设计方法[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1222003.
- [7] Ji Y, Chung Y, Sprinzak D, *et al.* An electronic Mach-Zehnder interferometer[J]. Nature, 2003, 422(6930): 415-418.
- [8] Li J, Zhang X Q, Jia Y D. Design of spectrum measurement system based on Mach-Zehnder optical fiber interference[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(4): 679-684.
李杰, 张晓青, 贾豫东. 马赫-曾德光纤干涉光谱测量系统的设计[J]. 应用光学, 2017, 38(4): 679-684.
- [9] Hao J J. Research of phase-shifting interferometry with wavelength[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
郝晶晶. 波长移相干涉测量技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [10] Zheng G Z. The optical fiber interferometer with PZT phase-shift controller[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2002, 19(4): 34-37.
郑光昭. 带 PZT 相移控制器的光纤干涉系统[J]. 广东工业大学学报, 2002, 19(4): 34-37.
- [11] Zhou X Y. Research on 0.6328 μm He-Ne laser and the excess fraction reduction method for method of large-scale absolute distance measurement[J]. China Measurement & Testing Technology, 2003, 29(6): 16-17.
周秀云. 0.6328 μm He-Ne 激光器小数重合法大尺寸绝对距离测量方法的研究[J]. 中国测试, 2003, 29(6): 16-17.
- [12] Liang J. Research on multi-wavelength interferometer with 633 nm band He-Ne laser for absolute distance measurement[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
梁晶. 用于绝对距离测量的 He-Ne 激光多波长干涉仪的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [13] Liu S J, Chang Y, Xiao Z G, *et al.* Accurate calculation of spacing of F-P etalon under the multi-wavelength weighted regression[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 529-532.
刘松江, 常缨, 肖志刚, 等. 多波长加权回归准确计算 F-P 标准具的间隔[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 529-532.
- [14] Hua Q, Zhou W H, Ji R Y. Absolute distance measurement with multi-wavelength interferometric method of compensating for the refractive index of air[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(4): 38-44.
华卿, 周维虎, 纪荣祎. 补偿大气折射率的多波长干涉绝对距离测量[J]. 光电工程, 2013, 40(4): 38-44.
- [15] Hu C. Automatic measurement of high-level gauge based on fractional legality[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2012.
胡超. 基于小数重合法自动测量高等级量块技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [16] Shi L. Research of fiber interleaver based on the Mach-Zehnder interferometer[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003.
史磊. 基于马赫-曾德尔干涉仪型光纤奇偶交错滤波器的研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- [17] Wei H M. Phase shift method to improve the measurement accuracy of interferometer[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
魏豪明. 移相法提高干涉仪测量精度研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- [18] Du X Y, Su R T, Wang X L, *et al.* Research on fiber laser performance working at different temperatures[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(s1): s102004.
杜雪原, 粟荣涛, 王小林, 等. 工作温度对光纤激光器输出特性的影响研究[J]. 中国激光, 2015, 42(s1): s102004.
- [19] Stahl H P. Aspheric surface testing techniques[C]. SPIE, 1990, 1332: 66-76.