

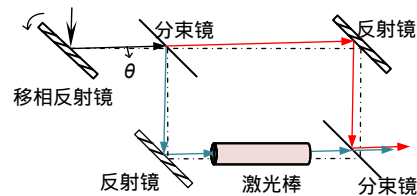


DOI: 10.12086/oe.2020.190254

用于检测激光棒的变倾角马赫-曾德尔干涉仪

孔璐, 陈磊*, 丁煜, 吴志飞, 郑东晖, 朱文华

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094



摘要: 为实现激光棒透射波前的测量, 改善一般泰曼型或斐索型干涉仪测量小口径激光棒透射波前时的边缘衍射效应, 研究了一种变倾角移相马赫-曾德尔干涉仪。通过调整移相反射镜的倾斜姿态, 改变入射到马赫-曾德尔干涉光路的光束倾角, 参考光束与测试光束的光程差随之变化, 从而在相干光之间引入相移, 实现了相移干涉测量。利用该干涉仪测量一根口径为 $\Phi 6\text{ mm}$ 、长度为 60 mm 激光棒(Nd:YAG)的透射波前, 测量结果的峰谷值(PV)为 0.391λ , 均方根值(RMS)为 0.056λ ; 使用 ZYGO 激光干涉仪测量同一根激光棒, 其透射波前的峰谷值(PV)为 0.370λ , 均方根值(RMS)为 0.064λ 。对比结果表明该干涉仪能够实现光学元件透射波前的高精度检测, 测试结果的一致性验证了该方案的可行性。该变倾角移相方法具有较高的移相精度和较大的移相范围, 且该变倾角干涉系统中光束仅一次透过待测激光棒, 可有效抑制多光束干涉现象, 改善小口径激光棒的边缘衍射效应。

关键词: 干涉测量; 马赫-曾德尔干涉仪; 变倾角移相; 激光棒

中图分类号: O436

文献标志码: A

引用格式: 孔璐, 陈磊, 丁煜, 等. 用于检测激光棒的变倾角马赫-曾德尔干涉仪[J]. 光电工程, 2020, 47(2): 190254

Variable-inclination Mach-Zehnder interferometer for testing laser rods

Kong Lu, Chen Lei*, Ding Yu, Wu Zhifei, Zheng Donghui, Zhu Wenhua

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

Abstract: In order to measure the transmission wavefront of laser rods and to improve the edge diffraction effect of small-aperture laser rods measured by Tayman or Fizeau interferometer, a variable-inclination Mach-Zehnder interferometer was proposed. The incident angle was changed by adjusting the tilting attitude of the phase shifting reflector, then the optical path difference was changed that the phase shift was introduced to the coherent light and the phase shifting interferometry was realized. The transmission wavefront of a laser rod (Nd:YAG) with the diameter of 6 mm and the length of 60 mm was measured by this interferometer, the peak-valley (PV) and root mean square (RMS) of the wavefront were 0.391λ and 0.056λ . The same laser rod was measured by ZYGO GPI XP interferometer, the peak-valley (PV) and root mean square (RMS) were 0.370λ and 0.064λ . The comparison results show that the interferometer can achieve high-precision detection of transmission wavefront of laser rods. The variable-inclination Mach-Zehnder interferometer has high phase-shifting precision and wide phase-shifting range, and the beam in the

收稿日期: 2019-05-17; 收到修改稿日期: 2019-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1731115)

作者简介: 孔璐(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail: kwyl8@163.com

通信作者: 陈磊(1964-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学计量测试与光电智能化仪器等方面的研究。

E-mail: chenlei@njust.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

system can pass through the laser rod only once, which can suppress the multi-beam interference and improve the edge diffraction effect of the small-aperture laser rods.

Keywords: interferometry; Mach-Zehnder interferometer; variable-inclination phase shifting; laser rods

Citation: Kong L, Chen L, Ding Y, et al. Variable-inclination Mach-Zehnder interferometer for testing laser rods[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(2): 190254

1 引言

激光棒是固体激光器的核心工作物质,其透射波前质量可以衡量激光棒的折射率非均匀性、两端面平行差以及剩余应力等指标,直接影响了激光器输出激光的模式和能量。美国检测与材料协会于 20 世纪 80 年代正式确立激光棒波前检测的标准方法,规定采用干涉测量的方法,将待测激光棒放置于干涉腔中,并通过干涉图标准判读方法进行相位解算。陈进榜等^[1]采用 LTY80 型棱镜干涉仪对小口径激光棒进行了测量,讨论了干涉图与激光棒端面平行差的关系并详细介绍了手工作图法获得波前畸变的分析过程。何勇等^[2]将移相干涉技术引入激光棒测量领域,采用改进的泰曼-格林型光路并结合四步移相算法实现了 $\Phi 5$ mm 口径的激光棒波前畸变检测。吴志飞等^[3]在斐索干涉仪中对比了单双通法测量激光棒的优劣,并采用棱镜反射单通方案测量了口径为 $\Phi 6$ mm 激光棒的透射波前,有效提高了检测精度。

马赫-曾德尔干涉仪中参考光与测试光分光路传输,可以独立调节并进行光程补偿,其属于单通干涉仪即测试光单次透过被测件,扩展了干涉仪的测量范围,避免了一般干涉仪中测试光束两次通过被测件引入的回程误差和四次边缘衍射,对大像差、小口径的被测对象,优势尤为突出。

马赫-曾德尔干涉仪中常用的波面恢复技术是基于单帧干涉图的处理方法。Bone 等^[4]首先提出了二维快速傅里叶变换方法,并用该方法对单幅载频干涉图进行处理以提取相位信息^[5]。然而,对于小口径的测试件而言,增加条纹数量则意味着更大的倾斜角度,导致相干光之间的夹角增大,引入较大回程误差^[6],在测量长度较长的小口径激光棒时,相干光之间的剪切量增大,导致较大的波前遮拦,加剧边缘衍射效应。

在移相干涉测量技术中,压电陶瓷晶体(PZT)是最为常见的移相器件^[7],在适当的电压作用下,压电陶瓷产生微米量级的微位移,驱动反射镜实现移相^[8]。在马赫-曾德尔干涉仪中,利用压电陶瓷晶体在斜 45° 方向上推动反射镜,改变相干光束间的光程差,以实

现移相。但是,压电装置较为昂贵,需要放大器和控制系统,增加了干涉仪结构复杂度,不适用于小口径干涉仪。

另一种常用的移相方式是波长调谐移相^[9]。以激光器作为移相器,通过改变其输出波长实现移相,简化了干涉仪的装置结构。电流调制波长移相方案中,激光器注入电流的变化会引起输出光功率与激光器相干长度的改变^[10-12],导致移相干涉图的背景光强和对比度不一致,在利用干涉图进行相位解算时会出现较大误差。Brid 等^[13]采用光栅作为选频器件,通过机电调谐的方法,实现了稳定的高精度波长调谐。但是,光栅调制的频率不高,移相速度慢,激光器的整体价格昂贵,难以用于现场检测的一体化结构干涉仪中。

偏振移相技术也是马赫-曾德尔干涉仪中常用的时域移相方法。Santa 等^[14]在测量双折射材料的幅值和方向时,通过旋转偏振片引入相移;Tania 等^[15]采用偏振移相术得到全内反射液体样本的折射率和相位分布。然而偏振移相术系统结构复杂,且很难控制偏振器件的透振方向,容易导致移相误差,影响测量结果。

Carlos 等^[16]基于等厚干涉光路提出了一种新型的移相方式,以激光点源作为移相器,在垂直于光轴方向上移动点光源,改变入射到等厚干涉腔中的光束倾角,从而实现点源移位移相干涉。但是,该方案仅适用于反射式、有一定腔长的等厚干涉光路^[17],无法应用于传统的等光程马赫-曾德尔干涉仪。

本文提出了一种变倾角移相马赫-曾德尔干涉仪方案。以反射镜为移相器,调制入射到马赫-曾德尔干涉模块中准直光束的倾角;以小口径激光棒作为待测件,增加等光程马赫-曾德尔干涉仪中参考光与测试光的光程差。当入射到干涉模块的光束倾角发生变化时,两路光的光程差随之变化。该方法避免了一般泰曼型或斐索型干涉仪在测量激光棒透射波前时产生的多次干涉现象,改善了光束两次透过激光棒的边缘衍射效应,突出了马赫-曾德尔干涉仪单次透过待测小口径激光棒的结构优势。采集到系列移相干涉图后,根据随机移相算法^[18]解算相位。

2 理论推导

2.1 变倾角移相原理

图 1(a)为变倾角移相原理光路图, 平行光束入射到马赫-曾德尔干涉腔中, 形成一对相干光。其中一路光经反射镜折转形成参考光, 另一路光经反射镜折转后入射到激光棒中, 形成测试光; 图 1(b)为光束经过待测激光棒的等效光路图, 当平行光束垂直入射到激光棒中, 即光束倾角 θ 为 0 时, 参考光与测试光的传播方向相同, 此时这两路光之间存在光程差为

$$\Delta_0 = L(n-1), \quad (1)$$

式中: L 和 n 分别表示激光棒的厚度和折射率, 可理解为透射式的等倾干涉。

改变移相反射镜的倾角, 使得经该反射镜折转后入射到干涉腔中的平行光束与光轴的夹角为 θ , 倾斜光束经过图 1(b)后, 此时参考光与测试光的光程差为

$$\Delta = nAC + CD - AB = L[\sqrt{n^2 - (\sin\theta)^2} - \cos\theta]。 \quad (2)$$

由式(2)可知, 参考光与测试光的光程差 Δ 随入射到干涉腔中平行光束的倾角 θ 而变, 每幅干涉图中相应的相位量 φ_θ 与倾角 θ 的关系可以表示为

$$\varphi_\theta \approx kL(n-1) + [kL(n-1)/2n]\theta^2, \quad (3)$$

其中每幅干涉图中对应的移相量为

$$\delta_\theta \approx [kL(n-1)/2n]\theta^2, \quad (4)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为入射光的波长。由式(4)可知, 改变入射到干涉腔中的光束倾角, 可以在干涉图中引入不同的移相量, 实现了移相干涉测量。

综上, 移相反射镜实现了光束变倾角, 待测激光

棒增加了参考光与测试光的光程差, 两者作为关键元件, 使得马赫-曾德尔干涉系统中相干光之间的光程差发生变化, 从而实现了变倾角移相干涉测量。

2.2 随机移相算法

采集到系列移相干涉图后, 利用随机移相算法进行待测激光棒的相位恢复, 该算法主要是采用最小二乘法求解线性回归模型的迭代算法^[18]。变倾角时间移相干涉图的背景和调制度可认为是时间不变量, 此时测量得到的干涉条纹光强可表示为

$$I(x, y, t) = A(x, y) + B(x, y) \cos[\varphi(x, y) + \Delta(x, y, t)], \quad (5)$$

式中: $A(x, y)$, $B(x, y)$ 分别是干涉图的背景光强和调制度, $\varphi(x, y)$ 是待测相位, $\Delta(x, y, t) = \delta(t) + \alpha(t)x + \beta(t)y$, $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 分别为 x 和 y 方向的倾斜系数, $\delta(t)$ 为移相量。

最小二乘法求解线性回归模型的迭代算法主要包括以下计算步骤: 首先对干涉图背景、调制度和待测相位进行初始估计, 初始估计不要求有较高的精度; 接着对式(5)中的时间相关量即移相量和倾斜系数进行线性一阶近似, 得到干涉光强的迭代值与实际测量值之间的误差, 运用最小二乘法, 得到迭代更新后的移相量及倾斜系数; 然后根据计算结果, 进一步更新迭代后的干涉图光强, 并计算优值函数:

$$\chi(t) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N [I_m(r_i, t) - I_k(r_i, t)] / B(r_i)]^2。 \quad (6)$$

当优值函数满足 $\chi(t) < \varepsilon$ 时, 终止迭代。其中 ε 为迭代精度, 一般设定为一个小量; 最后根据收敛后的计算结果求解出精确的相位分布, 进而计算出待测激光棒的透射波前质量。具体的计算流程如图 2 所示。

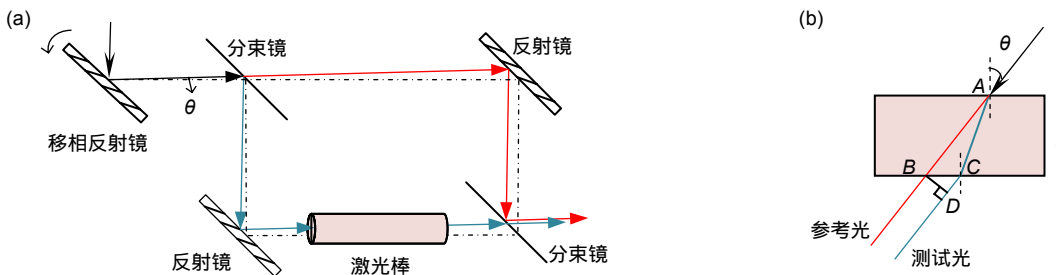


图 1 (a) 变倾角移相的原理光路图; (b) 透射式等倾干涉示意图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of variable-inclination phase shifting; (b) Diagram of transmissivity equal inclination interference

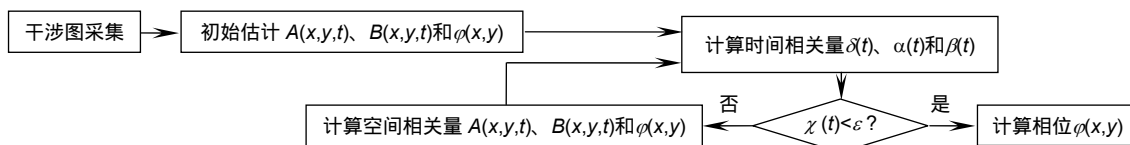


图 2 最小二乘求解线性回归模型迭代算法流程图

Fig. 2 Flow chart of least squares iterative algorithm for solving linear regression model

3 实验结果

图 3 为变倾角时间移相马赫-曾德尔干涉仪的系统光路图。其中,光源采用中心波长为 $\lambda=632.8\text{ nm}$ 的 He-Ne 激光器,激光束经光纤耦合后形成点光源,点光源发出的扩散光经物镜准直后形成口径为 $\Phi 25.4\text{ mm}$ 的平行光,平行光经移相反射镜折转后形成具有一定倾角的光束,而后入射到马赫-曾德尔干涉腔中。一路光经反射镜 1 折转形成参考光束,另一路光由反射镜 2 折转入射到测试光路,被测件为长度 60 mm 、口径 $\Phi 6\text{ mm}$ 掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)激光棒,其折射率 $n=1.82$ 。参考光与测试光经分束镜 2 合束后,进入成像模块。成像系统由透镜 1 和透镜 2 形成双远心光路,最终在 CCD 靶面获取干涉图。系统中所用的 CCD 型号为 Imaging Source DMK23G274,其分辨率为 $1600\text{ pixel}\times 1200\text{ pixel}$ 。

实验过程中,调节 CCD 的前后位置,直到在其靶面获取到成像清晰的干涉图,通过调节反射镜 1 的

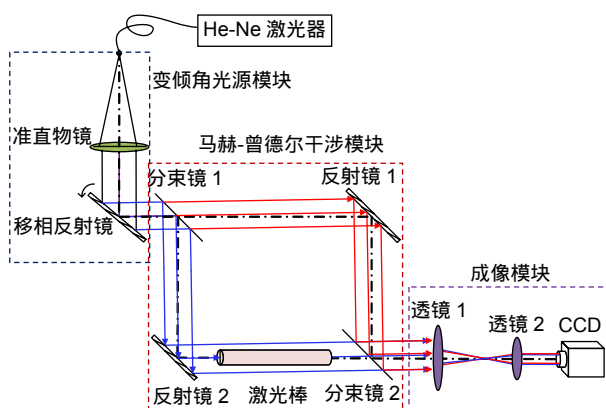


图 3 变倾角时间移相马赫-曾德尔干涉仪系统光路图
Fig. 3 Schematic optical diagram of variable-inclination phase shifting Mach-Zehnder interferometer

俯仰倾斜,可以改变视场中干涉图的条纹数量,之后便可改变移相反射镜的倾角以获取系列移相干涉图解算相位信息。由于手动调整移相反射镜倾角难以精确控制旋转方向及旋转步长,实验中采用电动线性旋转台来控制移相反射镜的倾角变化,该电动旋转台的重复精度达到 0.005° ,实验中旋转台的旋转步长为 0.02° ,移相反射镜每旋转一次即相应地采集一幅移相干涉图。图 4 为一个移相周期内得到的其中 9 幅移相干涉图。采用随机移相算法解算相位,图 5 为待测激光棒的透射波前结果,波面的峰谷值(PV)为 0.391λ ,均方根值(RMS)为 0.056λ 。

为了验证该干涉仪测量结果的准确性,在相同实验条件下,使用 ZYGO GPI XP 型干涉仪测量了同一根激光棒,测量结果如图 6 所示,激光棒透射波前的峰谷值(PV)为 0.370λ ,均方根值(RMS)为 0.064λ ,两台干涉仪的测量结果基本吻合,验证了变倾角时间移相马赫-曾德尔干涉仪的正确性。

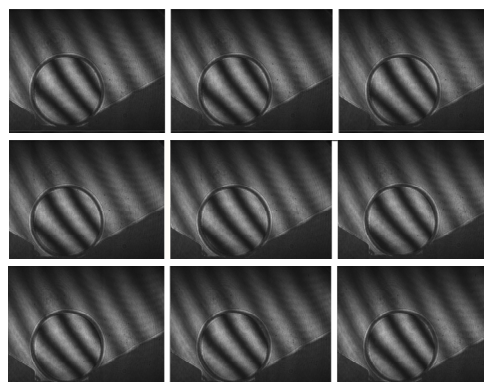


图 4 实验中获得 9 幅移相干涉图
Fig. 4 9 phase shifting interferograms

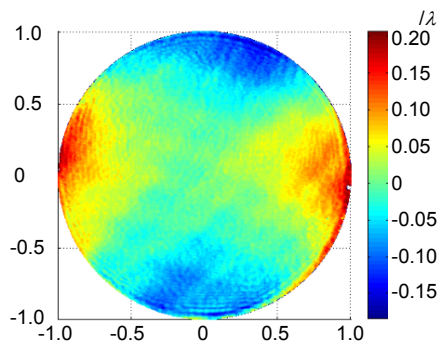


图 5 变倾角时间移相马赫-曾德尔干涉仪中得到的激光棒透射波前
Fig. 5 Transmission wavefront of laser rod measured by variable-inclination Mach-Zehnder interferometer

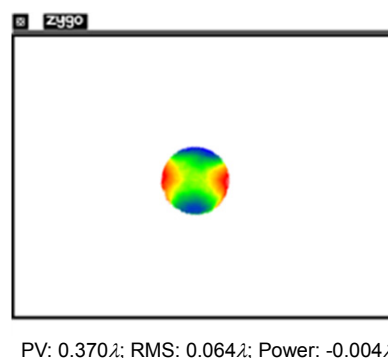


图 6 ZYGO GPI XP 干涉仪中得到的激光棒透射波前
Fig. 6 Transmission wavefront of the same laser rod measured by ZYGO GPI XP interferometer

4 讨论分析

4.1 系统移相量的分析

本文研究的变倾角移相马赫-曾德尔干涉仪中,改变移相反射镜的倾角,即改变入射到干涉腔中平行光束的倾角,从而实现系统移相量的变化。移相反射镜置于电动旋转台上,旋转台的重复精度为 0.005° ,由式(4)得系统的移相精度为 0.004 rad ,用常规精度的步进电机驱动旋转台即可实现较高精度的相位调制。

本文进一步分析了该变倾角移相系统的移相量变化规律和移相分辨率。设定激光器波长 $\lambda=632.8 \text{ nm}$ 、被测 Nd:YAG 激光棒的折射率 $n=1.82$ 、长度 $L=60 \text{ mm}$,由式(4)计算得反射镜倾角与系统移相周期之间的关系,如图 7 所示。可见系统移相量随移相反射镜倾角的变化是非线性的,当倾角较小时,系统移相量的变化率较小,相邻干涉图之间的相位差较小,随着倾角变大,系统移相量的变化率逐渐增大,相邻干涉图之间的相位差也变大。当移相反射镜偏转约 0.2° 时系统移相量达到 $6.3(2\pi) \text{ rad}$,实现一个周期的移相。由于驱动移相反射镜旋转的电动线性旋转台步长约为 0.02° ,此时一个移相周期内可以获得 10 幅移相干涉图,由于干涉图数量较多,且当移相反射镜的倾角为 0.02° 时,移相量仅为 0.1 rad ,系统的移相分辨率达不到 $\pi/2 \text{ rad}$,无法采用四步移相算法解算相位,所以最终采用了随机移相算法进行待测相位解算。

表 1 列出了随机移相算法计算所得移相量的精度,可以看出,采用最小二乘迭代随机移相算法可以精确地计算移相量,计算结果与理想结果基本吻合。

4.2 可测量激光棒的长度范围

由式(4)可知,系统移相量与光束倾角 θ 和待测激

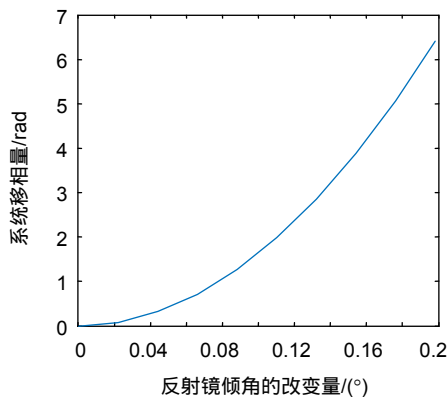


图 7 系统移相量与反射镜倾角的关系图

Fig. 7 Relationship between system phase shift and inclination of reflector

光棒长度 L 有关,当系统移相量为 $2\pi \text{ rad}$ 时,一个移相周期内光束的倾角 θ 与激光棒长度 L 关系为

$$\theta = \sqrt{4\pi n / kL(n-1)}, \quad (7)$$

式中: $k=2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为入射光波长, n 为待测激光棒的折射率。由式(7)可知,激光棒长度越长,一个移相周期内光束偏转角度越小。

由于变倾角移相方案中入射到干涉腔中的光束倾角会发生变化且待测件有一定的长度,所以参考光束与测试光束之间会存在一定的剪切量 s ,如图 1(b)中的 BC 所示,其可以表示为

$$s \approx L\theta(1 - (1/n)), \quad (8)$$

式中: θ 为光束倾角, L 和 n 分别为激光棒的长度和折射率。式(8)表明相干光束的剪切量与光束偏转角度和激光棒的长度有关。将式(7)得到的一个移相周期内光束的最大倾角代入式(8),可以得到系统移相量为 $2\pi \text{ rad}$ 时相干光束的最大剪切量与激光棒长度的关系:

$$s_m \approx \sqrt{4L\pi(n-1)/kn}。 \quad (9)$$

根据式(9)可知,激光棒长度越长,相干光束之间的剪切量也越大。而当相干光束之间存在剪切量时,入射波前的波像差对测试结果及系统误差造成影响:

$$\Delta W = W(x+S, y) - W(x, y) = (\partial W / \partial x) \cdot S, \quad (10)$$

式中: W 为入射波前的分布, S 为口径归一化后的光束剪切量, $S \in [0, 1]$, $S=s/D$, D 为激光棒的口径。由式(10)可知,当相干光束不存在剪切时,理想状态下入射波前的波像差对测量结果没有影响,而当相干光束之间存在一定的剪切量时,入射波前的波像差无法实现同一点的点对点相减,所以待测相位中会携带入射波前的信息,造成系统误差。

将式(9)代入式(10),可以得到测量不同长度的激光棒时,相干光束的最大剪切量对系统误差的影响:

表 1 随机移相算法计算移相量与理想移相量对比

Table 1 Comparison of the phase shift quantity calculated by random phase shift algorithm and the ideal quantity

干涉图 序号	理想的 系统移相量/rad	随机移相算法 计算的移相量/rad
1	0	0
2	0.079	0.075
3	0.317	0.308
4	0.712	0.710
5	1.266	1.264
6	1.978	1.978
7	2.849	2.853
8	3.878	3.881
9	5.065	5.063
10	6.376	6.382

$$\Delta W_m = \frac{\partial W}{\partial x} \sqrt{\frac{4L\pi(n-1)}{kn}} \cdot \frac{1}{D} \quad (11)$$

由式(11)可知,激光棒长度越长,系统误差越大。为了将系统误差控制在 10 nm 以内,该系统能测量的激光棒长度范围为

$$L \leq \left[\frac{\Delta W_m \cdot D}{(\partial W / \partial x)_{PV}} \right]^2 \cdot \frac{kn}{4\pi(n-1)} \quad (12)$$

根据式(12)可以定量地得到可测量激光棒长度的最大值。仿真过程中,设定激光棒口径 $D=6$ mm,由于待测激光棒的口径很小,有效区域内入射波前的波像差 PV 值可以达到 $\lambda/10$,所以给定入射波前为 $W=0.1(x^2+y^2)^2$,系统误差最大值 $\Delta W_m=10$ nm,激光器波长 $\lambda=632.8$ nm,激光棒折射率 $n=1.82$,最终计算得到该系统可测量的激光棒最长约为 90 mm。

另外,当待测激光棒的长度较短时,根据式(9),此时相干光束的剪切量较小,保证了系统误差在可忽略范围内;但根据式(7),此时移相反射镜的偏转角度较大,所以一个移相周期内获得的干涉图数量较多,增加了随机移相算法进行相位解算的运算时间,降低了该干涉系统的测量效率,所以激光棒也不能过短,最短可为 10 mm。此时一个移相周期内反射镜偏转角为 0.48° ,根据电动线性旋转台的步长为 0.02° 计算,可获得约 25 幅干涉图。

所以,该变倾角马赫-曾德尔干涉系统可测量的激光棒长度范围为 10 mm~90 mm。

4.3 马赫-曾德尔干涉仪测量激光棒的优势

测量光学元件的透射波前时,一般的泰曼型或斐索型干涉仪都要两次透过待测件,而待测激光棒的口径较小,采用两次透射的干涉仪进行测量时会对干涉图样及测量结果带来较大影响。

图 8 为 ZYGO 干涉仪测量激光棒透射波前的光路图,可见当两端面平整度较高的激光棒正放于干涉腔

中时,由于激光棒两端面的反射率与平晶的反射率相匹配,经端面 1、端面 2 和反射平晶折返回去的光束都会与参考光束进行干涉,导致待测区域产生多组干涉条纹。所以使用这种反射式干涉仪测量时,只能将激光棒倾斜放置,从而导致波前遮拦,测量区域变小,影响测量精度。而马赫-曾德尔干涉仪属于透射式干涉仪(如图 3 所示),经两端面反射的光束不会进入成像系统进行干涉,避免了寄生条纹的出现。

此外,激光棒的口径一般都较小,本文选用的待测激光棒口径仅为 $\Phi 6$ mm,当使用标准仪器 ZYGO $\Phi 100$ mm 干涉仪对其进行透射波前测量时,其面积仅占干涉仪总视场的 $1/277$,放大后成像分辨率会明显降低,导致干涉信息不足。并且该干涉仪中光束两次透过待测件,测试波前被激光棒前后端面累计 4 次衍射,边缘衍射效应尤为明显,导致边缘信息也有所缺失。由于衍射效应随传播距离的增加而增大,所以在图 8 的 ZYGO 干涉仪测量光路中,获得的干涉图边缘衍射效应会随反射平晶距激光棒的远近而变化,图 9(a)、9(b)分别为 ZYGO 干涉仪中反射平晶距激光棒 10 cm 和 30 cm 的干涉图,可见反射平晶距激光棒越远,干涉图边缘越模糊,此现象可表明在两次透过待测激光棒的反射式干涉仪中,干涉图边缘受到衍射效应的影响较为明显。而在马赫-曾德尔干涉仪中,成像分辨率

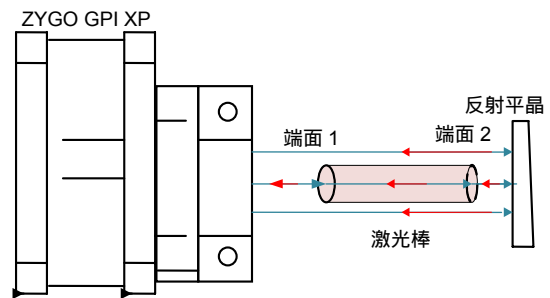


图 8 ZYGO 干涉仪测量激光棒透射波前光路图
Fig. 8 Optical diagram for testing laser rods in ZYGO interferometer

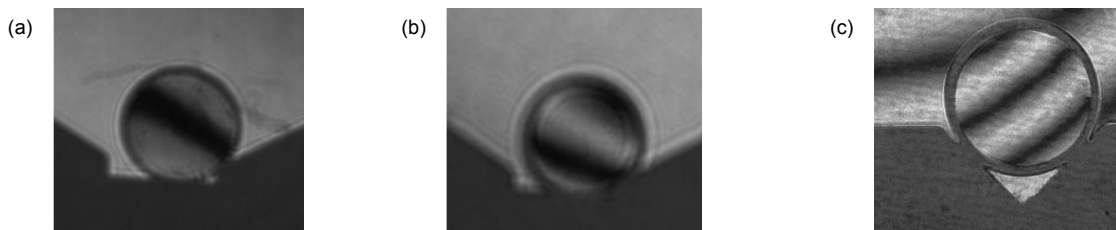


图 9 (a) ZYGO 干涉仪中反射平晶距激光棒 10 cm 的干涉图; (b) ZYGO 干涉仪中反射平晶距激光棒 30 cm 的干涉图; (c) 马赫-曾德尔干涉仪中得到的干涉图

Fig. 9 (a) Interferogram of reflection flat 10 cm away from the laser rod in ZYGO interferometer; (b) Interferogram of reflection flat 30 cm away from the laser rod in ZYGO interferometer; (c) Interferogram in M-Z interferometer

较高,且光束仅一次透过待测激光棒,边缘衍射效应有所降低。图9(c)为马赫-曾德尔干涉仪中获得的干涉图,可见其成像清晰,且边缘无肉眼可见的衍射环。

所以,采用变倾角马赫-曾德尔干涉仪测量激光棒的透射波前时,由于其透射式的结构特点以及较高的成像分辨率,不会出现寄生条纹的干扰,成像清晰,且测量过程中光束单次透过激光棒,可以有效改善一般干涉仪中光束两次透过被测件引入的回程误差和边缘衍射效应,在测量口径较小或像差较大的光学元件透射波前时具有明显的结构优势。

5 结论

本文研究了一种变倾角时间移相马赫-曾德尔干涉仪。该系统只需在传统等光程马赫-曾德尔干涉仪中采用一块倾角可调的反射镜作为移相器,即可实现周期移相,采用常规精度的步进电机即可实现较高精度的相位调制,成本低廉且系统结构紧凑。使用该变倾角移相系统可以测量小口径激光棒的透射波前,该变倾角移相系统中测试光束仅一次通过被测件,所以在测量有一定长度的口径较小或像差较大的光学元件透射波前时具有明显优势,可有效抑制多端面干涉产生的寄生条纹现象,改善小口径光学元件的边缘衍射效应。但是,由于该系统中光束倾角处于变化之中,其可测量的激光棒长度存在一个最佳范围(10 mm~90 mm),若待测激光棒的长度更长(>90 mm),则光束倾角的变化较大,从而导致较大的干涉光剪切误差及激光棒边缘相位测量误差。未来可将等光程马赫-曾德尔干涉仪改进为不等臂长的马赫-曾德尔干涉仪^[19],给系统提供一个初始光程差,从而进一步减小移相反射镜的偏转角度及入射光束的倾角,可有效减小干涉光剪切量,提高测量范围及检测精度。

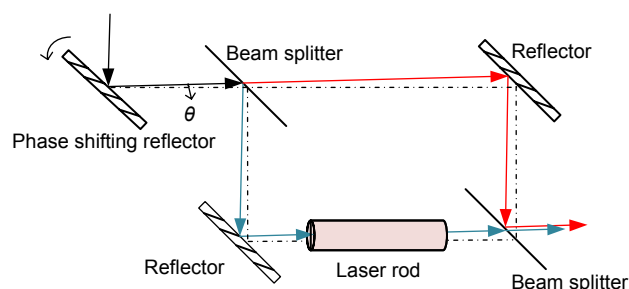
参考文献

- [1] Chen J B, Zhang P H. Several problems in the interferometric of laser rods[J]. *Laser and Infrared*, 1986(10): 14-19.
陈进榜, 张培河. 激光棒干涉测试中的若干问题[J]. *激光与红外*, 1986(10): 14-19.
- [2] He Y, Chen J B, Zhu R H, et al. Laser rods wavefront distortion testing instrument[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(10): 938-942.
何勇, 陈进榜, 朱日宏, 等. 激光棒波前畸变测试仪[J]. *中国激光*, 2003, 30(10): 938-942.
- [3] Wu Z F, Chen L, Kong L, et al. Single transmission method for wavefront measurement[C]//*The 17th National Optical Testing Academic Exchange Conference Summary*, 2018: 1.
吴志飞, 陈磊, 孔璐, 等. 一种用于波前测量的单次透射方法[C]//第十七届全国光学测试学术交流会摘要集, 2018: 1.
- [4] Bone D J, Bachor H A, Sandeman R J. Fringe-pattern analysis using a 2-D Fourier transform[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(10): 1653-1660.
- [5] Meng S, Chen L, Zhu W H, et al. Instantaneous wavefront measurement of large aperture optical elements[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(1): 170536.
孟诗, 陈磊, 朱文华, 等. 大口径光学元件瞬态波前检测[J]. *光电工程*, 2018, 45(1): 170536.
- [6] Zhang M, Tang F, Wang X Z, et al. Phase retrieval errors analysis of interferogram using two dimensional fast Fourier transform method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(3): 0308002.
张敏, 唐锋, 王向朝, 等. 二维快速傅里叶变换干涉图相位提取误差分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0308002.
- [7] Wang S W, Yu Y J, Fu Y. PZT displacement measurement and calibration of digital interferometer phase shifter[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2017, 44(10): 33-35, 37.
王圣文, 于瀛洁, 付焯. 数字干涉仪移相器 PZT 位移测量与标定[J]. *计量与测试技术*, 2017, 44(10): 33-35, 37.
- [8] Gao Z S, Wang R Y, Cheng X Q. Optical measurement and control of micro displacement for a piezoelectric device[J]. *Electronics Optics & Control*, 2016, 23(8): 1-5.
高志山, 王若言, 成晓强. 压电陶瓷装置微位移的光学测量与控制技术[J]. *电光与控制*, 2016, 23(8): 1-5.
- [9] Min J W, Yao B L, Gao P, et al. Parallel phase-shifting interferometry based on Michelson-like architecture[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(34): 6612-6616.
- [10] Deck L L, Soobitsky J A. Phase-shifting via wavelength tuning in very large aperture interferometers[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3782: 432-442.
- [11] Ding Y, Chen L, Wang Z H, et al. Wavelength phase shifting interferometry based on current modulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(5): 0506003.
丁煜, 陈磊, 王志华, 等. 电调谐波长移相干涉术[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(5): 0506003.
- [12] Chi M J, Jensen O B, Petersen P M. Tuning range and output power optimization of an external-cavity GaN diode laser at 455 nm[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(9): 2263-2269.
- [13] Bird D M, Armitage J R, Kashyap R, et al. Narrow line semiconductor laser using fibre grating[J]. *Electronics Letters*, 1991, 27(13): 1115-1116.
- [14] Sircar S, Bhattacharya K. Measurement of birefringence using polarization phase-shifting Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(11): 113112.
- [15] Das T, Bhattacharya K. Polarizing phase shifting interferometry of total internal reflection light for measurement of refractive index and its spatial variation in liquid samples[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(7): 077102.
- [16] Robledo-Sanchez C, Juarez-Salazar R, Meneses-Fabian C, et al. Phase-shifting interferometry based on the lateral displacement of the light source[J]. *Optics Express*, 2013, 21(14): 17228-17233.
- [17] Liu Z Y, Chen L, Zhu W H, et al. Oblique incidence dynamic phase-shifting interferometer based on inclination angle deflection[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(8): 180516.
刘致远, 陈磊, 朱文华, 等. 变倾角移相斜入射动态干涉仪[J]. *光电工程*, 2019, 46(8): 180516.
- [18] Deck L L. Model-based phase shifting interferometry[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(21): 4628-4636.
- [19] Song G C. *The Theory and Application of Physical Optics*[M]. 3rd ed. Beijing: Peking University Press, 2019.
宋贲才. *物理光学理论与应用*[M]. 3版. 北京: 北京大学出版社, 2019.

Variable-inclination Mach-Zehnder interferometer for testing laser rods

Kong Lu, Chen Lei*, Ding Yu, Wu Zhifei, Zheng Donghui, Zhu Wenhua

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



Schematic diagram of variable-inclination phase shifting

Overview: In order to measure the transmission wavefront of laser rods and to improve the edge diffraction effect of small-aperture laser rods measured by a general Teyman or Fizeau interferometer, a variable-inclination phase shifting Mach-Zehnder interferometer was proposed. In the proposed interferometer, the phase shifting reflector was placed on the electric linear rotating table. By adjusting the tilting attitude of the phase shifting reflector, the incident angle into the Mach-Zehnder interference cavity was changed. A laser rod with a certain length was placed in the test optical beam as the test object, and it could be used as a retarder in the equal optical path Mach-Zehnder interferometer to increase the optical path difference between the reference beam and the test beam, so the proposed interference system met the requirement of phase shifting. The optical path difference between the reference beam and the test beam changed each time the incident angle into the Mach-Zehnder interference cavity was transformed by the phase shifting reflector placed on the electric linear rotating table, thereby the phase shifting quantity was introduced to the coherent light. The phase shifting interferometry was realized under the interaction of phase shifting reflector and laser rod. The transmission wavefront of a laser rod (Nd:YAG) with the diameter of 6 mm and the length of 60 mm was measured by this interferometer, the peak-valley value (PV) and root mean square value (RMS) of the wavefront are 0.391λ and 0.056λ . The same laser rod is measured by ZYGO GPI XP interferometer, the peak-valley (PV) and root mean square (RMS) of the wavefront are 0.370λ and 0.064λ . The surface shape and numerical values of the two measurements are consistent, the comparison results show that the proposed interferometer can achieve high precision measurement of transmission wavefront of the laser rods. The proposed variable-inclination phase shifting Mach-Zehnder interferometer can realize periodic phase shifting only by using a reflector with adjustable inclination angle in the traditional Mach-Zehnder interferometer. It has high phase shifting precision and wide phase shifting range. The high precision phase modulation can be achieved by using conventional precision stepping motor. The proposed interferometer system is cheap and compact. The transmission wavefront of a small aperture laser rod can be measured by the variable-inclination phase-shifting system. The beam in the system can pass through the laser rod only once, therefore, the interferometer has obvious advantages in measuring the transmission wavefront of a small-aperture optical element with a certain length. It can effectively suppress the multi-beam interference and improve the edge diffraction effect of small-aperture optical elements.

Citation: Kong L, Chen L, Ding Y, *et al.* Variable-inclination Mach-Zehnder interferometer for testing laser rods[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(2): 190254

Supported by National Natural Science Foundation of China (U1731115)

* E-mail: chenlei@njjust.edu.cn