

长焦距激光光学系统焦距测试方法

段亚轩 陈永权 赵建科 李坤 田留德 张洁

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要 为了测试长焦距激光光学系统焦距,对基于自准直原理的焦距测试精度进行了理论分析,提出了一种采用光纤激光器、分光镜、平面镜、精密测角仪、电荷耦合器件(CCD)探测器和波前采集系统的焦距测试方法。通过自行设计的波前采集系统测试被测激光光学系统透射波前,使光纤点源置于其焦点位置。由 CCD 探测器扫描自准直点源像面,通过扫描定焦算法,使 CCD 探测器置于最佳像面位置。旋转平面镜使精密测角仪和 CCD 探测器同步采集,通过精密测角仪获取平面镜旋转的角度和质心法判读点源像移动的线量,获取被测激光光学系统的焦距。采用此方法对焦距为 7171 mm 的激光光学系统焦距进行测试,并对测试结果进行分析,扩展不确定度为 13.48 mm ($k=2$)。结果表明,该方法可满足长焦距激光光学系统的焦距测试要求。

关键词 测量;激光光学;焦距;波前传感器;不确定度

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0408005

Focal Length Testing Method of Long Focal Length Laser Optical System

Duan Yaxuan Chen Yongquan Zhao Jianke Li Kun Tian Liude Zhang Jie

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract In order to measure the focal length of long focal length laser optical system, a method based on the principle of autocollimation, using fiber laser, beam splitter, flat mirror, precision angular instrument, charge couple device (CCD) and wavefront sensor is proposed. The fiber pinhole is placed at the focal point of laser optical system by testing the transmission wavefront of laser optical system with the Shack-Hartmann wavefront. Then, the CCD is placed at the best image surface by the scanning focus algorithm. The synchronization acquisition of the angular instrument and CCD is made. The focal length of laser optical system is calculated with the angle got by precision angular instrument and the deviation of pinhole image calculated by the centroid algorithm. The long focal length laser optical system of which the focal length is 7171 mm has been tested by this method. The uncertainty of test result is 13.48 mm ($k=2$). The test results show that this method is practical to the focal length testing of long focal length laser optical system.

Key words measurement; laser optics; focal length; wavefront sensor; uncertainty

OCIS codes 120.4630;120.4800;140.5960; 110.4100;200.4880

1 引言

在神光Ⅲ装置中,强激光的准直、聚焦和激光远场焦斑测试需要大量口径和焦距不同的光学系统,激光光学系统的焦距直接影响着整个光路的对接,进而影响激光的传输质量和打靶性能^[1~3]。为了使激光达到良好传输质量就必须严格控制传输过程中所用激光光学系统的焦距,因此精确测量激光光学

系统的焦距就显得非常重要。目前传统焦距的测量主要采用放大倍率法与精密测角法^[4]。放大倍率法是在平行光管焦面处放置双狭缝目标板,狭缝目标板经被测系统成像在其焦面上,用显微系统接收图像并计算焦距,由于神光Ⅲ装置所用激光光学系统为 0 视场非成像激光光学系统,狭缝目标板不能清晰成像,采用此方法焦距测量误差较大。并且,受平

收稿日期: 2012-10-31; 收到修改稿日期: 2012-12-28

基金项目: 中国科学院创新基金(Y154451ZZ0)资助课题。

作者简介: 段亚轩(1983—),男,硕士,工程师,主要从事光学测试技术方面的研究。E-mail: 6216366@163.com

行光管焦距限制,焦距的测量范围不能满足神光Ⅲ装置中部分长焦距激光光学系统的需求。精密测角法一般采用经纬仪测角,需人工读数,并且长焦距光学系统一般需小角度(角分量级)测量,读数误差对测试结果影响很大,且这种方法只适合在可见光条件下对光学系统进行测量。

本文提出了一种基于自准直原理,采用光纤激光器、分光镜、平面镜、精密测角仪、电荷耦合器件(CCD)探测器和波前采集系统的长焦距激光光学系统焦距测试方法,弥补了常规焦距测试方法的不足,解决了长焦距激光光学系统焦距测试的问题,并很好地保证了测试精度。

2 测试原理及精度分析

2.1 测试原理

长焦距激光光学系统焦距的测试基于自准直原理,如图1所示。

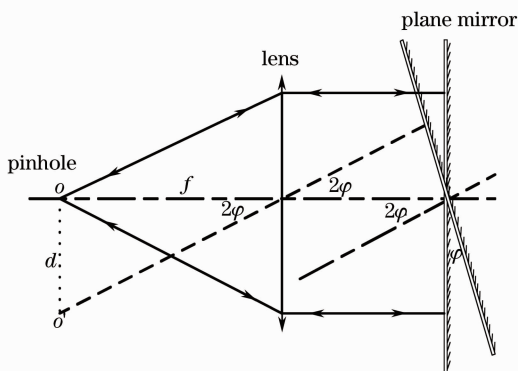


图1 基于自准直原理测量焦距示意图

Fig.1 Schematic of the focal length measurement based on autocollimation principle

点源 o 发出的球面波经被测光学系统后准直,再由平面反射镜反射回来,经过被测光学系统聚焦到点源 o 处。当平面反射镜旋转角度为 φ 时,准直光通过平面镜反射后,经过被测光学系统聚焦到 o' 处,点源像移动的线量为 d ,则被测光学系统的焦距为

$$f = d / \tan 2\varphi. \quad (1)$$

2.2 精度分析

根据 2.1 节描述的测量原理,对(1)式两边微分运算可得

$$\Delta f = \frac{\Delta d}{\tan 2\varphi} - \frac{2d\Delta\varphi}{\sin^2 2\varphi}, \quad (2)$$

故焦距相对测试精度为

$$\frac{\Delta f}{f} = \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta d}{f \tan 2\varphi}\right)^2 + \left(\frac{4\Delta\varphi}{\sin 4\varphi}\right)^2}. \quad (3)$$

由(3)式可以看出点源像移动线量判读精度 Δd 、读角精度 $\Delta\varphi$ 和平面镜旋转角度 φ 直接影响焦距测试精度。当平面镜旋转角度 φ 一定时, Δd 和 $\Delta\varphi$ 越小,焦距测试的相对精度越高。目前市场上销售的精密测角仪的最高精度可达到 $0.1''$ ($300''$ 内), CCD 探测器采集点源像,受其靶面大小的限制,平面镜旋转角度 φ 必须满足

$$\varphi < \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{L}{f}\right), \quad (4)$$

式中 L 为 CCD 探测器线视场; f 为被测长焦距激光光学系统的焦距。以 $f=7171 \text{ mm}$ 为例, CCD 探测器靶面大小为 $13.3 \text{ mm} \times 13.3 \text{ mm}$, 像元尺寸为 $13 \mu\text{m}$, 根据(4)式,平面镜旋转角度 φ 必须小于 $190''$ 。平面镜旋转角度和点源像移动线量判读精度对焦距测试精度的影响如图2所示。

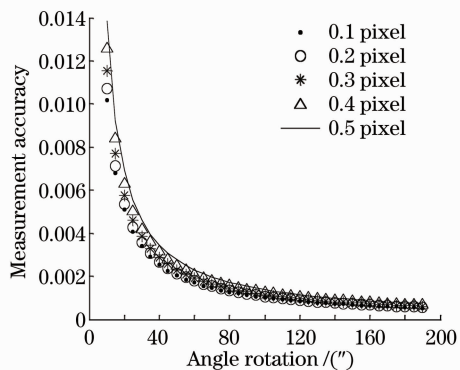


图2 焦距测试精度随平面镜旋转角度和判读线量精度的变化

Fig.2 Measurement accuracy of focal length versus angle rotation and displacement accuracy

从图2中可以看出,随着平面镜旋转角度 φ 的增加,焦距的测试精度越来越高,当平面镜旋转角度在 $140''$ 到 $190''$ 之间时,点源像移动线量的判读精度从 0.1 pixel 到 0.5 pixel ,对焦距测试精度几乎没有影响。选取平面镜旋转角度为 $150''$,点源像移动线量的判读精度为 0.2 pixel 时,焦距测试相对精度可达到 0.07% 。

对长焦距光学系统焦距测试要达到上述分析精度,除了读角精度、线量判读精度和平面镜旋转角度影响因素外,必须保证点源在被测长焦距激光光学系统的焦点位置,同时采集点源像的 CCD 探测器必须在点源像的最佳像面位置,且其靶面必须与光轴垂直。由于长焦距测试的空间距离比较长,很容易受空气扰动的影响,所以必须解决空气扰动和平面镜晃动带来的问题。

3 测试方案

3.1 测试系统设计

长焦距激光光学系统焦距测试装置如图 3 所

示,主要由光纤激光器、分光镜、平面反射镜、精密测角仪、波前采集系统、CCD 探测器、电控平移台、五维调节机构、转台和采集与控制计算机组成。

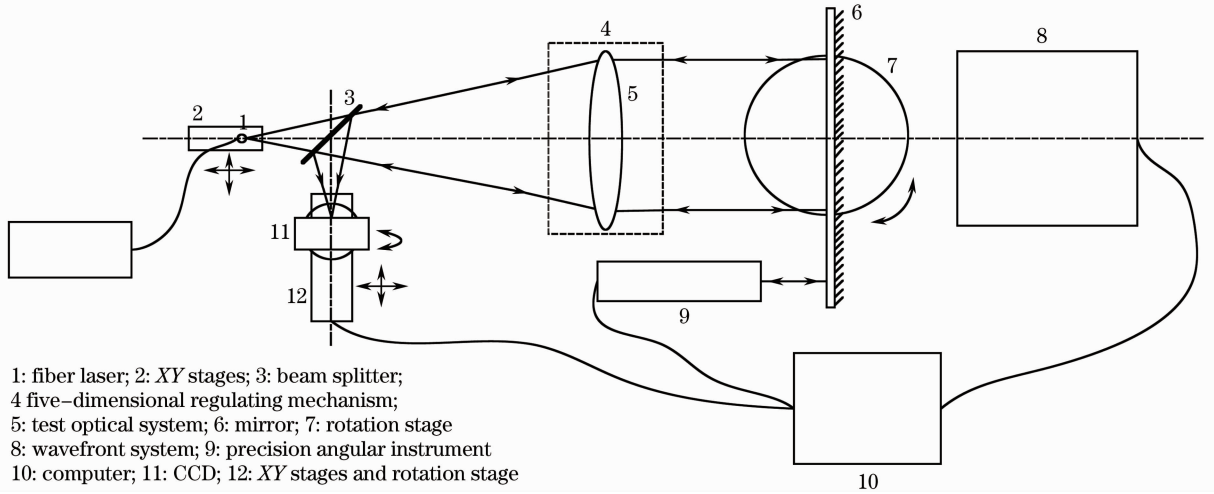


图 3 测试装置示意图

Fig. 3 Schematic of test system

点源采用光纤激光器,其中心波长为 1053 nm,输出光纤为单模光纤,芯径为 $6.2 \mu\text{m}$,芯径远远满足被测长焦距激光光学系统的 1 倍衍射极限。用传统放大倍率法对长焦距激光光学系统焦距测试时,平行光管的焦距必须为被测光学系统焦距的 3~5 倍,研制加工长焦距平行光管需要投入上千万经费,且对环境要求高、系统维护费用高、利用光纤点源代替长焦距平行光管,大大节省了研制成本。

点源的姿态和位置可通过测量由点源发出的激光通过长焦距激光光学系统后的透射波前来确定。将点源固定在五维调节机构上,调节点源的姿态和位置使长焦距激光光学系统透射波前的 Zernike 像差系数中的离焦和彗差项系数最小,从而可以保证点源置于被测长焦距激光光学系统的焦点位置。

夏克-哈特曼(S-H)波前传感器具有宽波段、动态范围大、不受环境(空气扰动或振动)影响和结构紧凑等优点^[5],尤其对激光波前测试更具有优越性^[6]。因此,设计了由缩束系统和夏克-哈特曼波前传感器组成的波前采集系统。

缩束系统光路设计采用双远心设计,使微透镜阵列及 CCD 探测器的光轴方向位置误差均不影响光斑的质心分布,成像质量接近衍射极限,根据夏克-哈特曼波前传感器探测靶面的大小和被测长焦距激光光学系统的通光口径,缩束系统设计的缩束比为 8:1。自研制夏克-哈特曼波前传感器具体参数为:微透镜阵列为 50×50 ;微透镜焦距为 7.1 mm;

有效测量口径为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$;CCD 探测器靶面大小为 $14.6 \text{ mm} \times 14.6 \text{ mm}$;CCD 探测器量化位数为 12 位。

点源发出的激光通过长焦距激光光学系统后,由波前采集系统的微透镜阵列分割,计算子孔径范围内波前的平均斜率,根据 Shouthwell 模型可求得被测长焦距激光光学系统的透射波前,并通过 Zernike 多项式拟合得到透射波前的各阶像差系数^[7]。由于直接利用波前采集系统测试长焦距激光光学系统的透射波前,其结果含有本身缩束系统的透射波前,所以必须先对波前采集系统本底波前进行标定,然后在使用时将其扣除,进行相对测试。具体标定的过程如图 4 所示。

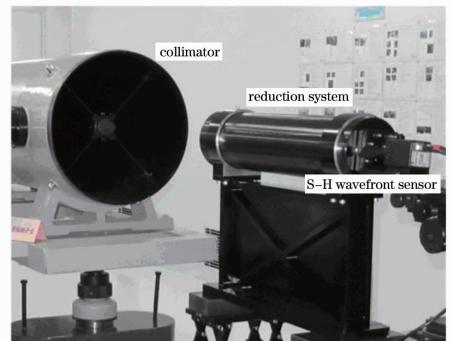


图 4 波前采集系统标定

Fig. 4 Calibration of wavefront system

利用 5 m 反射式平行光管(F 数为 10)对波前采集系统的本底波前进行标定,平行光管全口径波

前峰谷(PV)值小于 $\lambda/10$, ($\lambda=1053$ nm), 在缩束系统物镜口径内, 波长在 1053 nm 条件下, 平行光管引入的波前误差可忽略。将测试得到的缩束系统波前作为本底, 进行 10 次相对测试, 波前采集系统的静态波前 PV 平均值为 0.089λ ($\lambda=1053$ nm), 均方根(RMS)值为 0.011, 测试结果如图 5 所示。

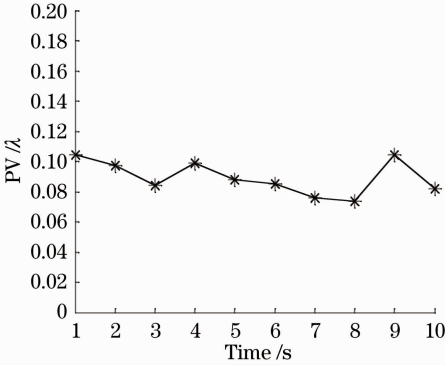


图 5 系统静态波前测试结果

Fig. 5 Test result of system static wavefront

目前转台读角度精度无法满足长焦距激光光学系统焦距高精度测试的要求, 所以选择德国 MOLLER 公司研制的高精度精密测角仪, 其 300'' 内测量不确定度为 0.1'', 完全满足长焦距激光光学系统焦距测试精度的要求。

CCD 探测器的选择主要考虑靶面大小和量化位数。靶面大小必须满足平面反射镜在旋转的最佳角度内, 点源像不跑出其视场。由于需要通过定焦算法确定 CCD 探测器的最佳位置和通过质心判读算法得到点源像的移动线量, 故 CCD 探测器的量化位数越高越好。CCD 探测器参数为像元尺寸为 $13 \mu\text{m}$, 靶面大小为 $13.3 \text{ mm} \times 13.3 \text{ mm}$, 量化位数为 16 位。长焦距激光光学系统焦距测试所需要的空间距离很长, 光纤点源像很容易受空气扰动和平面镜本身晃动的影响, 利用采集与控制系统使 CCD 探测器采集点源像和精密测角仪采集角度同步, 并多次采集取平均, 从而可消除空气扰动和平面镜本身晃动对焦距测试的影响。

3.2 关键算法

3.2.1 扫描定焦算法

判断图像聚焦与否的算法主要有: 能量谱法、灰度方差法和灰度梯度法等^[8~10]。考虑到算法要满足快速和实时测量, 且不受噪声影响, 先粗扫描确定最佳像面位置范围, 然后缩小步长, 采用光学传递函数(MTF)扫描定焦算法寻找最佳像面。

CCD 探测器置于电控平移台上, 初始位置为 S_0 , 以步长 l 开始扫描, 采集每步的点源图像 I_i ($i = 1, 2,$

\dots, k, \dots), 由于采用光纤激光器, 其输出功率稳定性 RMS 优于 $\pm 1\%$ (8 h), 故计算点源图像灰度最大值 M_i 作为粗扫描寻找最佳像面位置的评价值。当扫描到第 k 步时, M_k 达到最大值, 此时 CCD 探测器的位置为 $S_k = S_0 + kl$ 。然后以 S_k 位置为中心, 缩小扫描范围为 h , CCD 探测器以步长为 t ($t < l$) 扫描像面, 计算每步点源像子午和弧矢方向的 MTF, 得到以扫描距离为横坐标, MTF 值为纵坐标的曲线。子午和弧矢方向同时出现峰值的位置, 即为最佳像面位置^[11]。

MTF 扫描定焦算法的具体实现过程为: 选取包含点源像的二维窗口大小, L 为扫描方向, W 为积分方向, 则点扩展函数为

$$f_{\text{PSF}}(x, y) = I(x, y), \quad (5)$$

式中 x, y 对应于 CCD 靶面的像素坐标, $I(x, y)$ 为窗口点源像的灰度分布; 分别在点源像的水平方向和竖直方向积分求和, 可得到子午和弧矢方向上的线扩展函数:

$$f_{\text{LSF}}(x) = \sum_{y=1}^w f_{\text{PSF}}(x, y), \quad (6)$$

$$f_{\text{LSF}}(y) = \sum_{x=1}^w f_{\text{PSF}}(x, y), \quad (7)$$

对上述线扩展函数进行自适应背景校正^[12]后分别进行快速傅里叶变换取模归一化, 得到整个系统的传递函数:

$$f_{\text{MTF}} = \frac{|\mathcal{F}_1(f_{\text{LSF}} - v_{\text{th}})|}{\max[|\mathcal{F}_1(f_{\text{LSF}} - v_{\text{th}})|]}, \quad (8)$$

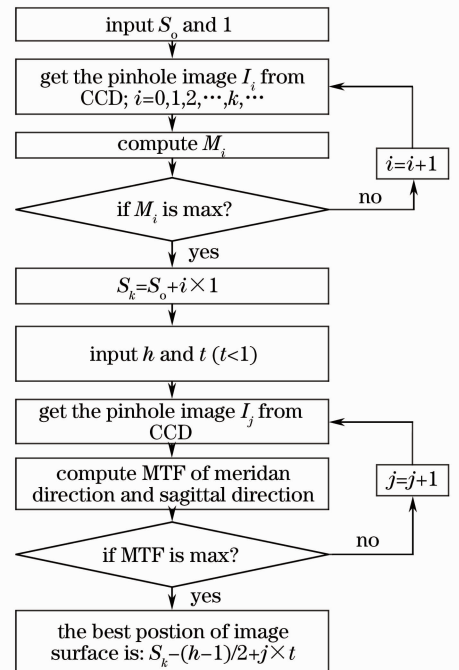


图 6 扫描定焦算法流程图

Fig. 6 Flow chart of scanning focusing algorithm

式中, \mathcal{F}_t 表示进行快速傅里叶变换, $\max(\cdot)$ 表示求最大值算子, v_{th} 为自适应背景修正值。扫描定焦算法的具体流程如图 6 所示。

3.2.2 质心算法

质心算法主要有: 加权质心算法、拟合法和亚像元相关法等^[13~16]。拟合法易受像差和噪声的影响, 且计算量较大。亚像元相关法定位精度很高, 但计算量非常大; 考虑到实时测量, 故采用加权质心算法。由于在点源像灰度最大值为中心的一个区域内, 点源像的强度分布可以近似的满足高斯分布^[17], 即

$$I(x, y) = \frac{I_0}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{\sigma^2}\right], \quad (9)$$

式中 I_0 为时间 T 间隔内投射到 CCD 探测器光敏面上的光信号总能量; (x_c, y_c) 是点源像能量位置, 即质心; σ 是高斯弥散半径。由于能量分布主要集中在 3σ 以内, 故以目标点源像灰度最大点为中心, 选取窗口为 $m \times m$ ($m=2 \times 3\sigma+1$), 通常 m 取 5。目标点源像的质心位置为

$$x_c = \frac{\sum_{i,j} x_{ij} (I_{ij} - T)}{\sum_{i,j} I_{ij}},$$

$$y_c = \frac{\sum_{i,j} y_{ij} (I_{ij} - T)}{\sum_{i,j} I_{ij}}, \quad (10)$$

式中 x_{ij} 和 y_{ij} 分别为像元 (i, j) 的 x 和 y 方向位置坐标; I_{ij} 为像元 (i, j) 的灰度值; T 为背景阈值。

3.3 测试过程

将被测激光光学系统置于五维调节平台上, 由

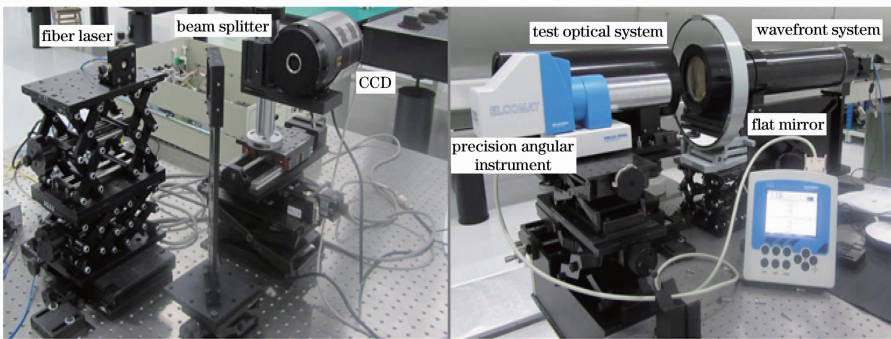


图 7 焦距测试实物装置

Fig. 7 Device of the focal length measurement

调整光纤点源的位置和被测激光光学系统的姿态, 由波前采集系统测试被测激光光学系统透射波前, 被测激光光学系统透射波前离焦为 -0.01λ , 水

已标定的波前采集系统测得被测激光光学系统透射波前, 利用五维调节机构调节光纤点源的姿态和位置, 使透射波前 Zernike 像差系数中的彗差项和离焦项系数最小, 从而保证光纤点源置于被测激光光学系统的焦点位置。然后将平面反射镜置于转台上, 平面反射镜以点源像在 CCD 探测器靶面中心为零位, 分别左右和上下转动相同角度, 调整 CCD 探测器的姿态, 使点源像左右和上下移动相同的距离, 保证 CCD 探测器靶面与光轴垂直。CCD 探测器置于电控平移台上, 扫描由平面反射镜反射, 经被测激光光学系统和分光镜后的自准直点源像面, 利用扫描定焦算法使 CCD 探测器置于自准直点源像的最佳像面位置。利用质心算法判读初始点源像像素位置为 (x_1, y_1) , 平面反射镜旋转一角度, 利用控制采集系统使精密测角仪和 CCD 探测器同步采集, 由精密测角仪获取旋转角度为 φ , 同时利用质心算法判读点源像像素位置为 (x_2, y_2) , CCD 探测器的像元尺寸为 L , 则被测激光光学系统的焦距为

$$f = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \times L}{\tan 2\varphi}. \quad (11)$$

4 测试结果与不确定度分析

4.1 测试结果

被测激光长焦光学系统参数为: 焦距 $f = 7171$ mm; 通光口径 $D = 155$ mm; 波长 $\lambda = 1053$ nm。由于被测激光光学系统焦距长达七米多, 所以测试装置分别放置在两个光学平台上, 激光长焦距光学系统焦距现场测试如图 7 所示。

平方向彗差为 -0.07λ , 垂直方向彗差为 0.02λ , 认为此时光纤点源已置于被测激光光学系统的焦点位置。由 CCD 先按步长 0.5 mm 扫描像面, 计算点源

像最大灰度值,初步确定最佳像面位置的范围。然后 CCD 按步长 0.1 mm 扫描像面,计算点源像子午和弧矢方向的 MTF,如图 8 所示。

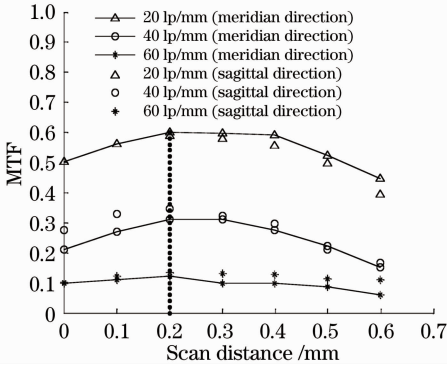


图 8 不同扫描距离下的子午和弧矢方向 MTF

Fig. 8 MTF of meridian direction and sagittal direction with different scan distances

图 8 为点源像子午和弧矢方向分别在 20, 40, 60 lp/mm 的 MTF 值与 CCD 扫描距离的关系曲线。子午和弧矢方向 MTF 同时出现峰值的位置为距 CCD 扫描起始位置 0.2 mm 处,此位置即为最佳像面位置。

平面镜以点源像在 CCD 靶面边缘为零位,旋转角度约 150"。由计算机控制,使精密测角仪和 CCD 同步采集点源像。对被测激光光学系统焦距测试 10 次,测试结果如表 1 所示,测试结果平均值为 7173.04 mm。

表 1 焦距测试结果

Table 1 Test result of focal length (unit: mm)

Times	$\varphi /(^{\circ})$	d / mm	f / mm	Average /mm
1	150.11	10.430	7165.88	7173.04
2	149.73	10.409	7169.60	
3	150.65	10.479	7173.74	
4	150.48	10.465	7172.25	
5	150.82	10.495	7176.59	
6	149.61	10.405	7172.60	
7	150.83	10.501	7180.22	
8	150.37	10.464	7176.81	
9	150.22	10.441	7168.18	
10	150.41	10.463	7174.53	

4.2 不确定度分析

根据(2)式,认为 d, φ 独立不相关,则焦距的合成标准不确定度可表示为

$$u(f) = \sqrt{\frac{u^2(d)}{\tan^2 2\varphi} + \frac{4d^2 u^2(\varphi)}{\sin^4 2\varphi}}. \quad (12)$$

由(12)式可以看出,焦距的不确定度由点源像移动线量的不确定度 $u(d)$ 和平面镜旋转角度的不

确定度 $u(\varphi)$ 组成。由测试过程可知,决定点源像移动线量不确定度的分量有 4 个:

1) 光纤点源位置引入的不确定度 $u(d_1)$: 由于波前采集系统静态波前 PV 值为 0.076λ ($\lambda = 1053 \text{ nm}$),由其标定光纤点源置于被测激光光学系统的焦点位置,对点源像移动线量引入的不确定度可以忽略不计,即 $u(d_1) \approx 0$ 。

2) CCD 置于最佳像面位置引入的不确定度 $u(d_2)$: 定焦算法的精度为 0.02 mm,对于长焦距激光光学系统,由其确定 CCD 置于最佳像面位置,对点源像移动线量引入的不确定度可以忽略不计,即 $u(d_2) \approx 0$ 。

3) 点源像移动线量的质心法判读引入的不确定度 $u(d_3)$: 加权质心算法定位精度优于 0.2 pixel,对点源移动线量引入的不确定度为 $u(d_3) = 0.0026 \text{ mm}$ 。

4) CCD 靶面与光轴的垂直度引入的不确定度 $u(d_4)$: 由测试人员操作和质心算法保证 CCD 靶面与光轴的垂直度偏差小于 2° ,对点源像移动线量引入的不确定度为 $u(d_4) = 0.0064 \text{ mm}$ 。

以上的各不确定度分量独立不相关,则有

$$u(d) = \sqrt{u^2(d_1) + u^2(d_2) + u^2(d_3) + u^2(d_4)}. \quad (13)$$

决定平面镜旋转角度的不确定度分量有 2 个:

1) 空气扰动和平面镜晃动引入的不确定度 $u(\varphi_1)$: 由于整个测试中角度值的获取和点源像的采集是同步的,且多次采集取平均故其引入的不确定度可以忽略不计,即 $u(\varphi_1) \approx 0$ 。

2) 精密测角仪引入的不确定度 $u(\varphi_2)$: 由精密测角仪本身的测角精度确定,即 $u(\varphi_2) = 0.1''$ 。

以上的各不确定度分量独立不相关,则有

$$u(\varphi) = \sqrt{u^2(\varphi_1) + u^2(\varphi_2)}. \quad (14)$$

由于受 CCD 靶面大小限制,平面镜旋转角度 $\varphi = 150''$,点源像移动的距离 $d = 10.43 \text{ mm}$ 。将(13)式和(14)式代入(12)式可得 $u(f) = 6.74 \text{ mm}$ 。取置信因子 $k = 2$,则焦距扩展不确定度为

$$U(f) = k \cdot u(f) = 13.48 \text{ mm}. \quad (15)$$

5 结 论

提出了一种基于自准直原理的长焦距激光光学系统焦距的测试方法,利用自行设计的波前采集系统保证了光纤点源置于被测激光光学系统的焦点位置,通过扫描定焦算法和加权质心算法保证了 CCD 探测器置于最佳像面位置和点源像移动线量的高精

度判读。此方法弥补了常规焦距测试方法的不足, 实现了长焦距激光光学系统焦距的高精度测试。为了验证该方法的有效性, 对焦距为 7171 mm 的激光光学系统的焦距进行测试, 并对测试结果进行分析, 扩展不确定度为 13.48 mm ($k=2$)。测试结果表明这种方法适用于对长焦距激光光学系统的焦距测试。

参 考 文 献

- 1 Lü Baida. Propagation and Control of High-Power Lasers[M]. Beijing: Defence Industry Press, 1999. 78~109
吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 78~109
- 2 Zhang Rongzhu. Studies on High-Accuracy Wavefront Test Techniques of Optical Components in ICF[D]. Chengdu: Sichuan University, 2003. 4~7
张蓉竹. ICF 系统光学元件高精度波前检测技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2003. 4~7
- 3 He Ling, Chen Bo, Liu Hua *et al.*. Experimental investigation in far-field test technique for high power laser output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(3): 245~248
何凌, 陈波, 刘华等. 激光远场焦斑测试技术的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(3): 245~248
- 4 Su Datu, Shen Hailong, Chen Jinbang *et al.*. Optical Test and Image Quality Identification [M]. Beijing: Beijing Industry College Press, 1987. 45~50, 173~176
苏大图, 沈海龙, 陈进榜等. 光学测量与像质鉴定[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1987. 45~50, 173~176
- 5 D. R. Neal, J. Copland, D. A. Neal. Shack-Hartmann wavefront sensor precision and accuracy [C]. *SPIE*, 2002, **4779**: 148~160
- 6 Julia Sheldakova, Alexis Kudryashov, Valentina Zavalova *et al.*. Shack-Hartmann wavefront sensor versus Fizeau interferometer for laser beam measurements[C]. *SPIE*, 2009, **7194**: 71940B
- 7 Zhou Renzhong, Yan Jixiang. Adaptive Optics Theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. 78~109
周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996. 78~109
- 8 Jiang Zhiguo, Han Dongbing, Yuan Tianyun *et al.*. Study on auto focusing algorithm for automatic microscope[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, **9**(4): 396~401
姜志国, 韩冬兵, 袁天云等. 基于全自动控制显微镜的自动聚焦算法研究[J]. *中国图像图形学报*, 2004, **9**(4): 396~401
- 9 Zhu Xianchang, Cao Xuedong, Wu Shibin *et al.*. Focal length measurement of microlens by rotation method based on grating multislit diffraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0523001
朱咸昌, 曹学东, 吴时彬等. 基于光栅多缝衍射的转角法测量微透镜焦距[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0523001
- 10 Liang Minhua, Wu Zhiyong, Chen Tao. Auto-focusing adjustment of theodolites by largest the gradient method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(12): 3017~3020
梁敏华, 吴志勇, 陈涛. 采用最大灰度梯度法实现经纬仪自动调焦控制[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(12): 3017~3020
- 11 Zhuang Songlin, Qian Zhenbang. Optical Transfer Function[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1981. 235~237
庄松林, 钱振帮. 光学传递函数[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981. 235~237
- 12 Duan Yaxuan, Chen Yongquan, Zhao Jianke *et al.*. A new adaptive background correction method based on pinhole image analysis in optical system modulation transfer function measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812008
段亚轩, 陈永权, 赵建科等. 一种基于针孔像分析的光学系统调制传递函数测量的自适应背景校正方法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0812008
- 13 Shen Baoliang, Sun Jianfeng, Zhou Yu *et al.*. Influence of time-varying atmospheric turbulence to facular orientation deviation in dynamic process [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0805004
沈宝良, 孙建峰, 周煜等. 时变湍流对动态移动光斑定位精度的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0805004
- 14 Liu Guodong, Liu Bingguo, Chen Fengdong *et al.*. Study on the method of the accuracy evaluation of sub-pixel location operators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3446~3451
刘国栋, 刘炳国, 陈凤东等. 亚像素定位算法精度评价方法的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3446~3451
- 15 Pan Bo, Yang Genqing, Liu Yong. Study on optimization threshold of centroid algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(9): 1788~1792
潘波, 杨根庆, 刘勇. 星点质心定位算法最优门限研究[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(9): 1788~1792
- 16 Li Chunyan, Xie Hua, Li Huaifeng *et al.*. Centroiding algorithm for high-accuracy star tracker [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(2): 42~44
李春艳, 谢华, 李怀锋等. 高精度星敏感器星点光斑质心算法[J]. *光电工程*, 2006, **33**(2): 42~44
- 17 Wang Xiaodong. Study on Wild-Field-of-View and High-Accuracy Star Sensor Technologies [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. 40~58
王晓东. 大视场高精度星敏感器技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003. 40~58

栏目编辑: 何卓铭