

光学学报

性能参数可调的宽视场轴向色散镜头

白昊东^{1,2}, 赵阳^{1,2}, 周建康^{1,2*}, 朱嘉诚^{1,2}, 沈为民^{1,2}

¹苏州大学光电科学与工程学院教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;

²苏州大学光电科学与工程学院江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 为提高光谱共焦位移传感器的检测效率和稳定性,设计一种性能参数可调的宽视场轴向色散镜头。基于快照式光谱共焦测量原理,提出一种轴向色散倍增的宽视场色散镜头设计方案。将色散镜头关于中间光阑前后对称放置,建立轴向色差和剩余像差评价函数,得到库克结构初始参数,实现对称的半组镜头。在前组不变的情况下,采用复杂化库克结构设计不同数值孔径的后组,替换后组可实现具有不同轴向色散距离、分辨率和视场的轴向色散镜头。为了测试轴向色散镜头的性能,搭配成像光谱仪分光模块、针孔阵列板和白光LED,组成快照式光谱共焦测量实验装置,验证了研制的可调两种性能参数的轴向色散镜头具有良好性能。所提轴向色散镜头设计方案可用于构建快照式光谱共焦测量系统并实现高精度和高效率的3D形貌测量。

关键词 光学设计; 光谱共焦; 快照式; 宽视场轴向色散

中图分类号 O433; O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230846

1 引言

光谱共焦技术是目前检测物体三维形貌信息最常用的光学方法之一^[1-2],它属于非接触式测量,具有无损检测、精度高、速度快、对周围环境不敏感的特点。目前点光谱共焦和线光谱共焦在检测时需要在空间进行一维或二维扫描,检测效率低^[3-5]。为了提高检测速度,研究人员对多点面阵或快照式光谱共焦测量技术进行了研究,轴向色散镜头是其中一个重要的组成部分,镜头的色散范围和像方数值孔径等参数决定了测量系统的轴向分辨率和最大测量倾角,视场和放大率决定了测量系统的横向检测面积。国外的Tiziani等^[6]在1996年利用微透镜阵列产生轴向面阵色散,单次横向检测面积为14 mm×14 mm,使光谱共焦实时三维测量成为可能,但是微透镜尺寸大、色散范围小及非线性限制了测量系统的高性能使用。2015年Hillenbrand等^[7]采用衍射元件和偶次非球面镜片设计了一种宽视场轴向色散镜头,横向检测面积为5.5 mm×7 mm,轴向量程为8.4 mm,采用衍射元件的系统能量会受衍射效率的影响,而且衍射元件和非球面元件加工复杂,成本高。2021年Li等^[8]采用非球面镜片作为宽视场轴向色散镜头,其在60 nm的工作波段内产生轴向色散90 μm,轴向量程较小,而且存在较大的离轴像差,导致有效视场较小。在国内,华侨大学的李焯^[9]于2017年将轴向色散镜头分成色散和聚焦

两部分,色散部分采用自研的色散管镜,聚焦部分采用商用的显微物镜,通过替换放大倍率不同的显微物镜可实现不同的量程和轴向分辨率。之后该学校的张一^[10]利用该色散管镜进行了多点单次拍照测试,轴向量程为300 μm,横向检测面积直径为1.5 mm,轴向色散和横向检测面积都比较小。2021年苏州大学的杨洁^[11]对光谱共焦系统中的轴向色散镜头设计方法进行改进,采用理想的近轴面和衍射面构建衍射模型,产生线性轴向色散,对轴向色散镜头进行反向设计,这样相当于镜头物方产生了线性的轴向色散,不需要多重结构来限制轴向色散镜头的线性度,实际设计的轴向色散镜头半视场为8 mm,轴向色散范围较小,仅0.37 mm。总之,目前关于宽视场光谱共焦色散镜头的研究还很少,视场和轴向色散距离都很小。

本文提出一种宽视场轴向色散镜头的设计方案,将镜头分成关于光阑对称的前组和后组两部分,只需设计整个镜头的一半即可,还可获得相当于镜头后组2倍的轴向色散。通过设计不同数值孔径的后组并共用前组镜头,可以实现性能参数可调的色散镜头。根据快照式光谱共焦原理和镜头设计方案,研制了两种性能参数的轴向色散镜头,并搭配白光LED、针孔阵列板和成像光谱仪分光模块,组成光谱共焦测量实验装置。所提装置可实现两种测量参数,一种可以实现140 mm²横向检测面积、超过4 mm轴向量程,但横向采样间隔仅100 μm;另一种视场探测面积降低为

收稿日期: 2023-04-19; 修回日期: 2023-05-16; 录用日期: 2023-05-29; 网络首发日期: 2023-06-28

通信作者: *health@suda.edu.cn

12.6 mm², 横向采样间隔提高到 30 μm。这两种配置的轴向测距分辨力均在微米量级。利用快照式光谱共焦测量装置开展性能测试实验, 证明了所提方案的可行性。

2 快照式光谱共焦测量原理和性能指标

2.1 测量原理

快照式光谱共焦测量系统的组成和工作原理如图 1 所示, 主要包括光源、轴向色散模块和光谱探测模块。在光源模块中, 白光在积分球里经过多次漫反射后在出光口形成均匀的出射光, 照射在针孔阵列 A 上。在轴向色散模块中, 针孔阵列 A 上分布许多小孔, 可以看作是多个点光源, 经过轴向色散镜头 L1 和 L2 后产生近线性宽视场轴向色散。当被测物表面处于轴向测量范围内时, 反射光会再次通过轴向色散镜头 L1 和 L2, 被分光棱镜反射后经过针孔阵列 B, 针孔阵列 B 上

的小孔与针孔阵列 A 上的小孔位置关于分光棱镜的分光斜面成对称关系。因为针孔阵列 A、针孔阵列 B 和轴向色散阵列带是光学共轭的关系, 聚焦在被测物表面的光会以最大光强通过针孔阵列 B, 在被测物处其他波长的光由于处于离焦状态光能量密度低, 反射后被针孔阵列 B 再次限制, 从而导致进入光谱探测模块的光能量弱。光通过针孔阵列 B 后进入光谱探测模块, 经镜头 L3 后准直成平行光, 经过分光元件后不同波长的光出射角度不同, 再经过镜头 L4 聚焦后被面阵探测器接收。由于从针孔阵列 B 出射的光都是近单色光, 探测器接收面上会生成多个与针孔数量相同的窄光谱亮点, 每个亮点都在固定的色散范围内, 如图 1 所示的圆角方框, 每一个圆角方框长度对应一个点光谱色散最大带宽, 随着被测物表面高度改变, 亮点在圆角方框内移动。亮点的像素位置包含了被测物表面高度信息, 通过分析亮点像素位置可以获取物体表面相对测量系统的轴向高度信息。

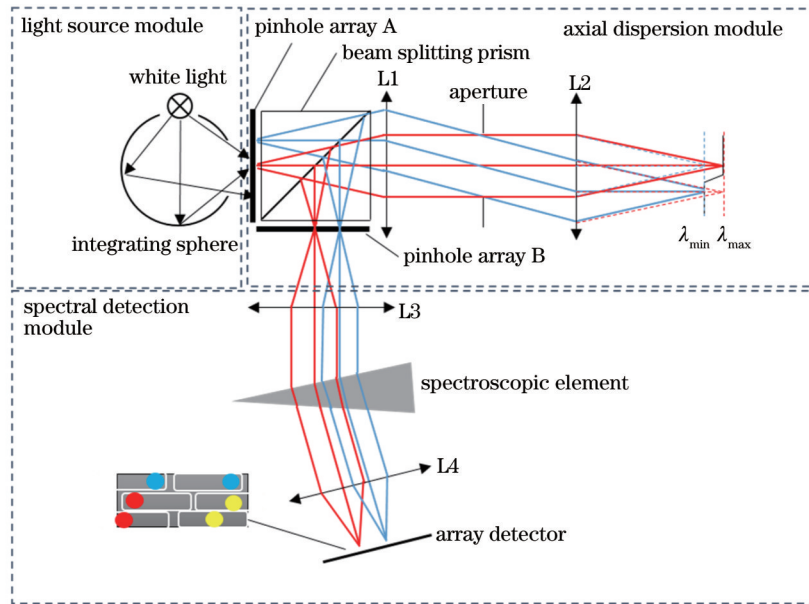


图 1 快照式光谱共焦测量系统原理图

Fig. 1 Schematic of snapshot type chromatic confocal measurement system

2.2 性能指标

对于快照式光谱共焦测量系统, 表征其特性的主要性能指标有轴向测量范围、轴向分辨率和横向分辨率等。测量系统的轴向测量范围由色散镜头的轴向色散范围决定, 如图 2 所示, 复色光经过色散镜头后, 不同波长的光聚焦在不同的轴向位置, 测量范围指在工作波长范围内最大波长 λ_{\max} 与最小波长 λ_{\min} 的位置差, 延长轴向色散可以增大测量范围, 但光能量会减弱, 系统信噪比降低。

轴向分辨率与接收到的反射光信号的半峰全宽和光谱仪的光谱分辨率有关, 通常认为半峰全宽越窄, 光谱分辨率越高, 测量系统的轴向分辨率越高。半峰全宽的表达式^[11]为

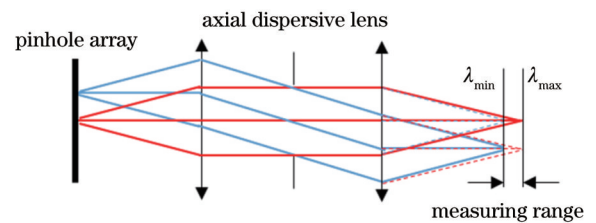


图 2 测量系统的轴向测量范围

Fig. 2 Axial measurement range of the measurement system

$$F_{\text{WHM}} = \frac{0.443\lambda}{1 - \sqrt{1 - NA^2}}, \quad (1)$$

式中: λ 为波长; NA 为色散镜头的像方数值孔径。可以看到光波长越小, 像方数值孔径越大, 则系统的半峰

全宽越窄,但是增大像方数值孔径,镜头的像差会增大,因此需要综合考虑。光谱仪的主要作用是获取不同波长光信号的光强,通过峰值提取找到最大光强对应的波长,然后将波长转换成位移信息。如果光谱分辨率较小于半峰全宽,还可采用亚像素峰值提取算法进一步增加测量系统的轴向分辨率。

横向分辨率在测量系统中分为单点测量分辨率和面阵采样分辨率。单点测量分辨率主要与波长 λ 和色散镜头的数值孔径 NA 有关,根据瑞利判据可知能分辨的最小距离为

$$d \approx 0.61 \frac{\lambda}{NA} \quad (2)$$

面阵采样分辨率 d_T 为测量系统单次检测相邻点间的距离,主要与针孔阵列板上相邻针孔之间的间距 R 和色散镜头的垂轴放大率 β 有关,存在的关系为

$$d_T = \beta R \quad (3)$$

3 宽视场轴向色散镜头设计

3.1 设计方案

宽视场轴向色散镜头的轴向色差决定了测量系统的轴向量程,视场和放大率决定了横向检测面积,像方数值孔径是影响轴向分辨率的重要因素之一。轴向色

散镜头的光路如图 3(a)所示,物方发出的复色光经过镜头 L1 和 L2 后在像方产生轴向色散,聚焦在被测物表面的反射光再次经过镜头 L1 和 L2 后被分光棱镜反射向下传播。如果将分光棱镜放置在镜头 L1 和 L2 之间,如图 3(b)所示,则反射光经分光棱镜反射后需要再增加一组镜头 L1,因此本文将分光棱镜放置在物方和镜头 L1 之间,可以减少一组镜头的使用,从而降低镜头成本和复杂度。若轴向色散镜头在轴外视场的主光线与光轴之间存在角度,该角度的正弦值小于镜头的像方数值孔径时,只有部分反射光可以被接收,当该角度的正弦值大于镜头的像方数值孔径时,反射光无法被轴向色散镜头接收。若待测物体表面相对镜头轴外视场主光线偏离 90° 倾斜时,进一步降低了反射光的能量,限制了对轴外视场的有效测量。只有轴向色散镜头各视场的主光线与光轴平行时,镜头的测量能力才能被最大程度发挥,因此要求轴向色散镜头满足像方远心条件。同样为了使轴向色散镜头和后续光谱探测模块的光瞳匹配,减少共焦小孔影响,如图 1 小孔阵列 B,提高透过小孔的光能利用率,要求轴向色散镜头满足物方远心条件,因此选择双远心结构进行设计,而且在双远心结构中,垂轴像差互相抵消,镜头的畸变也很小,有利于系统进行高精度的三维形貌检测。

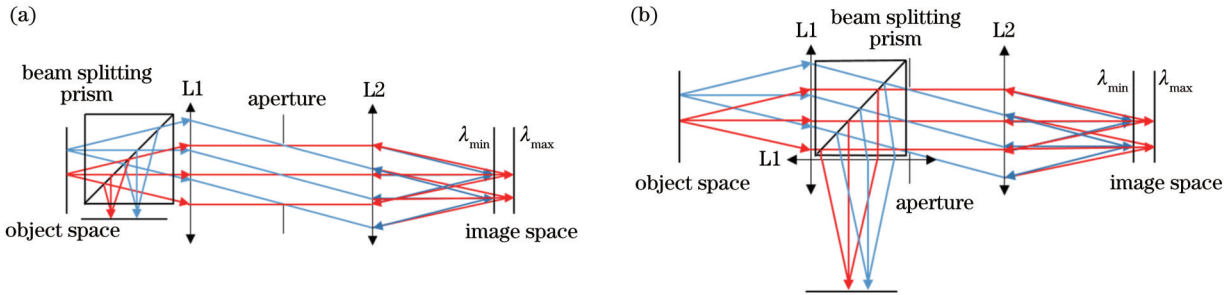


图 3 轴向色散镜头光路。(a)第一种分光棱镜安装位置;(b)第二种分光棱镜安装位置

Fig. 3 Axial dispersion lens optical path. (a) Installation position of the first type of splitting prism; (b) installation position of the second type of splitting prism

本文提出一种轴向色散镜头的设计方案,假设镜头的垂轴放大率为 -1 ,由于镜头是双远心结构,则轴向色散镜头关于光阑前后对称,将光阑前面的部分记为前组 L1,光阑后面的部分记为后组 L2。如图 4(a)所示,在设计时可以先设计后组 L2,在工作波长 $\lambda_{min} \sim \lambda_{max}$ 产生轴向色散 d ,再以光阑为对称轴对后组 L2 进行翻转,得到前组 L1。如图 4(b)所示,将前组 L1 的光阑和后组 L2 的光阑重叠拼接在一起,得到整个轴向色散镜头。但是在实际的应用中,所有波长的光是在物方同一位置发出的,因此将物方波长为 λ_{max} 的位置沿光轴方向移动距离 d 与波长为 λ_{min} 的位置重叠在一起,如图 4(c)所示。由于镜头的垂轴放大率为 -1 ,根据式(4)可知轴向放大率为 $1^{[12]}$,因此物方波长为 λ_{max} 的物移动了距离 d ,那么对应的像也会移动距离 d ,根据

式(5)轴向色散镜头可获得 $2d$ 的轴向色散。利用这种方法设计时只需要设计轴向色散镜头的一半,降低了设计难度,而且还可以获得相当于后组 L2 两倍的轴向色散。

$$\alpha = \beta^2 = (f_2/f_1)^2, \quad (4)$$

$$d_T = d_1\alpha + d_2, \quad (5)$$

式中: α 和 β 分别为镜头的轴向放大率和垂轴放大率; f_1 为前组 L1 的焦距; f_2 为后组 L2 的焦距; d_T 为色散镜头产生的轴向色散; d_1 为前组 L1 产生的轴向色散距离; d_2 为后组 L2 产生的轴向色散距离。

假设轴向色散镜头的物方面阵采样间隔为 a ,物高为 y ,那么实际像方的面阵采样间隔为 $a \times \beta$,像高为 $y \times \beta$ 。如果改变镜头的垂轴放大率 β ,测量系统的面阵采样间隔和横向检测面积也会改变。设计时可以保

留放大率为 -1 的轴向色散镜头前组 L1, 改变后组的焦距或数值孔径即可。

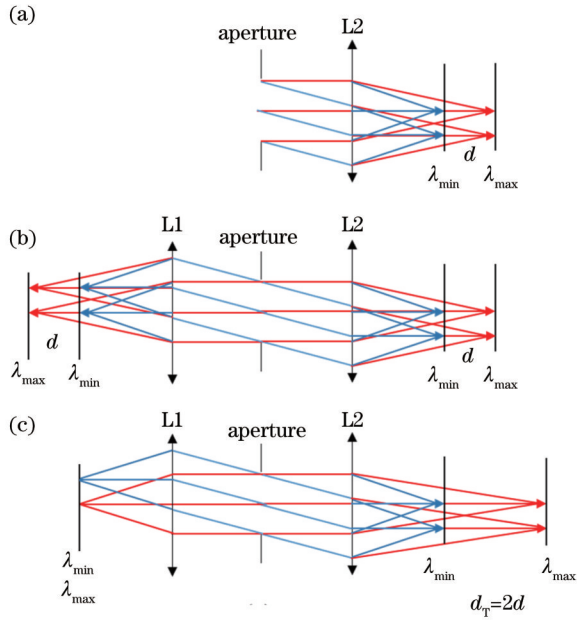


图 4 轴向色散镜头设计方案
Fig. 4 Design method for axial dispersion lens

3.2 设计结果与分析

根据所提轴向色散镜头设计方案,在设计时可以先设计后组,它是一种光阑前置的像方远心结构。综合以上分析结果并考虑后组镜头的特点,选择库克三片式(正-负-正)结构进行设计。库克三片式是一种能够校正 7 种初级像差最简单的结构,介于对称和非对称结构之间,即使将光阑前置也不会增加太多的像差。

库克三片式的光路结构如图 5 所示,一共有 3 个元件。图 5 中 k_m 表示第 m 个元件的幂, h_m 和 \bar{h}_m 分别表示近轴边缘光线和旁轴主光线在第 m 个元件上的高度。假设 S_I, S_{II}, S_{III} 和 S_V 分别表示 4 种单色初级像差球差、彗差、像散和畸变的 Seidel 系数,镜头的场曲不影响成像质量,可利用轴向色散镜头的对称性来减小场曲,若镜头的剩余初级像差用 $(\sum S_I)_l, (\sum S_{II})_l, (\sum S_{III})_l$ 和 $(\sum S_V)_l$ 表示,依照文献[13-14]可知,轴向色散镜头后组第 m 个元件的 Seidel 系数 $(S_I)_m$ 和 $(S_{II})_m$ 满足下列方程组:

$$\sum_{m=1}^3 a_{lm} (S_I)_m + \sum_{m=1}^3 d_{lm} (S_{II})_m + b_l = 0, \quad l = 1, \dots, 4, \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} b_1 = -(\sum S_I)_l \\ b_2 = -(\sum S_{II})_l \\ b_3 = -\left[(\sum S_{III})_l - H^2 \sum_{m=1}^3 k_m \right] \\ b_4 = -\left[(\sum S_V)_l - (3 + p) H^2 \sum_{m=1}^3 \frac{\bar{h}_m}{h_m} k_m \right] \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} a_{1m} = 1 \\ a_{2m} = \bar{h}_m / h_m \\ a_{3m} = (\bar{h}_m / h_m)^2 \\ a_{4m} = (\bar{h}_m / h_m)^3 \\ d_{1m} = 0 \\ d_{2m} = 1 \\ d_{3m} = 2(\bar{h}_m / h_m) \\ d_{4m} = 3(\bar{h}_m / h_m)^2 \end{cases}, \quad (8)$$

式中: H 代表拉格朗日不变量,为视场和数值孔径的乘积。其中 k_m 的表达式为

$$k_m = (n_m - 1) \{ (c_1)_m - (c_2)_m \}, \quad (9)$$

式中: n_m 表示在中心波长第 m 个元件的折射率; $(c_1)_m$ 和 $(c_2)_m$ 分别表示第 m 个元件前表面和后表面的曲率。为了评价库克三片镜头的像差,定义一个评价或优化函数 Ψ , 其大小为系统所有剩余像差的平方和,表达式为

$$\Psi = \sum_{l=1}^4 \left[\sum_{m=1}^3 a_{lm} (S_I)_m + \sum_{m=1}^3 d_{lm} (S_{II})_m + b_l \right]^2. \quad (10)$$

假设 $(\sum C_L)_l$ 表示镜头的轴向色差,那么可以得到如下关系式:

$$\begin{cases} (\sum C_L)_l = \sum_{m=1}^3 (C_L)_m \\ (C_L)_m = h_m^2 \frac{\varphi_m}{v_m} \end{cases}, \quad (11)$$

式中: $(C_L)_m$ 表示第 m 个元件的轴向色差; φ_m 表示第 m 个元件的光焦度; v_m 表示第 m 个元件的阿贝数。库克三片式结构有 8 个自由度,即 3 个幂、3 个形状因子和 2 个厚度,而且对于本文设计的轴向色散镜头,不需要消除轴向色差,库克结构可以校正除轴向色差外的全部初级像差,另外在设计时要扩大轴向色差,尽量选择阿贝数 v_m 较小的玻璃。

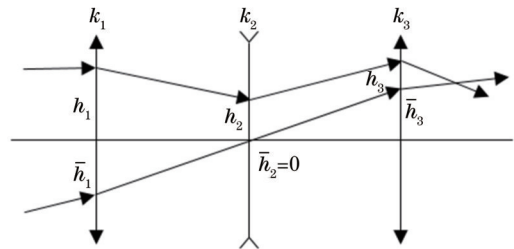


图 5 库克三片式光路结构
Fig. 5 Cooke three piece optical path structure

将轴向色散镜头的像高定为 9 mm, F 数为 4, 产生轴向色散 4 mm, 工作波长为 450~700 nm。先设计后组镜头, 控制式(10)中评价函数 Ψ 值最小并且使式(11)轴向色差 $(\sum C_L)_l$ 大于 2 mm, 得到一种库克三片式结构, 如图 6 所示, 镜片参数如表 1 所示, 镜头可产生 2.07 mm 的轴向色散, 但是波长和焦移的线性度较差,

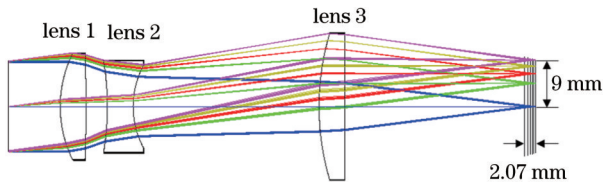


图 6 轴向色散镜头三片式结构

Fig. 6 Three piece structure of axial dispersion lens

成像质量也较差。

库克三片式无法同时满足色散线性和成像质量高要求,因此将库克三片式结构复杂化,增加了两片透镜,尽可能采用折射率高、阿贝数小的玻璃种类,高折射率有利于降低镜头的像差,阿贝数越小色散能力越强。在光学设计软件中将波长 450 nm、500 nm、550 nm、600 nm、650 nm 和 700 nm 设置 6 个多重结构,用相邻结构下的后焦距作差,并使得每两个差值相除等于 1,以此达到线性色散的目的,综合控制焦距、数值孔径和各个结构下的像差。最终的优化结果如图 7

所示,镜头的 F 数为 4,像高为 9 mm,产生轴向色散 2.1 mm。

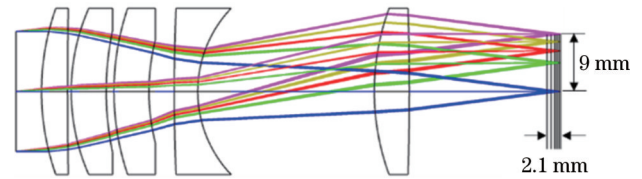


图 7 第一种轴向色散镜头后组

Fig. 7 First type of axial dispersion lens rear group

轴向色散镜头的光路中应加入一块分光棱镜,使得反射光进入光谱探测模块。将第一种后组镜头左右翻转,得到前组镜头,并且在物面后加入分光棱镜,将前组和后组的光阑重叠拼接在一起,形成整个轴向色散镜头。对像方远心和色散线性度进行约束,在各个结构下都添加像质评价函数,调整各个结构下的后焦距,最终的优化结果如图 8 所示,产生轴向色散为 4.06 mm。

表 1 三片式轴向色散镜头镜片参数

Table 1 Parameters of three pieces of axial dispersion lens

Lens	Front surface curvature radius/mm	Rear surface curvature radius/mm	Glass material
Lens 1	23.273	-273.143	H-LAF10LA
Lens 2	-53.155	16.864	H-F4
Lens 3	49.590	-10500	H-ZLAF92

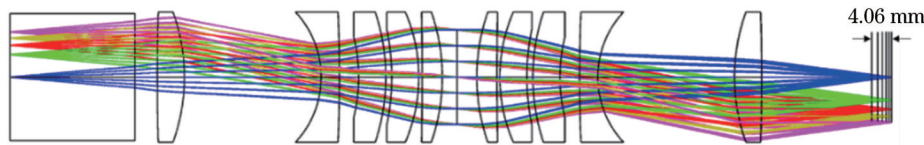


图 8 第一种轴向色散镜头

Fig. 8 First type of axial dispersion lens

调制传递函数(MTF)和点列图是评价光学系统成像质量经常采用的方法^[15]。第一种轴向色散镜头在中心波长 575 nm 处的 MTF 和在 450 nm、500 nm、

550 nm、600 nm、650 nm、700 nm 波长下的点列图如图 9 所示,可以看到 MTF 值基本与衍射极限重合,弥散斑的均方根(RMS)半径都在艾里斑半径以内,镜头的

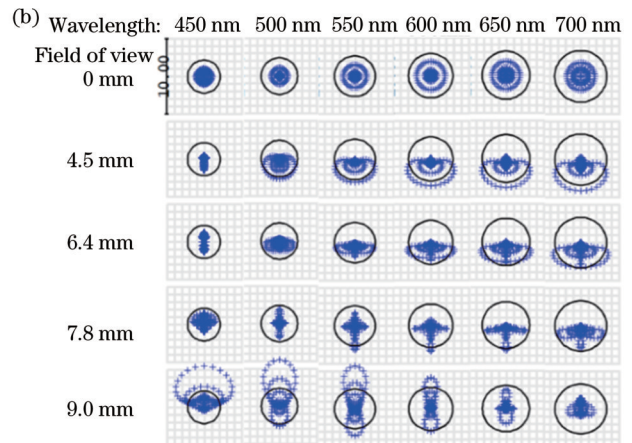
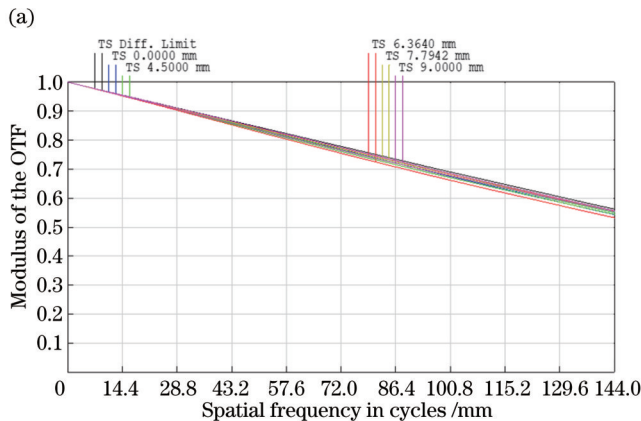


图 9 第一种轴向色散镜头。(a) MTF;(b)点列图

Fig. 9 First type of axial dispersion lens. (a) MTF; (b) point plot

成像质量较优。

垂轴色差即在轴外视场下不同波长光焦点的垂轴位置,会影响测量系统横向检测点的位置误差,应尽可能减小。在设计色散镜头时为平衡色散距离和垂轴色差,可控制各波长色散面的畸变或各视场下不同波长的聚焦点位置偏离均小于所需横向采样分辨距离。图 10 为在不同视场下不同波长光焦点对应的垂轴位置相对中心波长 575 nm 的偏离,从图 10 可以看到短波偏离最大,在归一化视场 1.0 处最大绝对偏离小于 7 μm,色散镜头的横向采样点位置误差小于 ±7 μm。在后续三维数据处理时,可通过畸变校正来进一步改善垂轴色差造成的采样点偏离。

根据提出的轴向色散镜头设计原理,如果改变镜头的放大率,测量系统的面阵采样间隔和横向检测面

积也会改变,设计时保留第一种轴向色散镜头前组,重新设计后组 L2 即可。如果轴向色散镜头的放大率为 -0.3,前组镜头 F 数为 4,后组镜头的 F 数为 1.2 即可,因此本文将库克结构再复杂化,重新设计了一个后组 L2 镜头,使其 F 数为 1.2,像高为 2.7 mm,最大波长和最小波长的后焦距差大于 1 mm,其余设置与第一种轴向色散镜头后组设计相同。第二种后组镜头优化后的光路如图 11 所示,产生的轴向色散为 1.02 mm。根据式(5),前组可以贡献 0.18 mm 的色散距离,从而整体色散距离超过 1.2 mm。

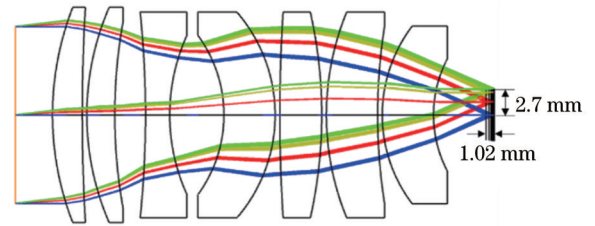


图 11 第二种轴向色散镜头后组

Fig. 11 Second type of axial dispersion lens rear group

将前组 L1 镜头和第二种后组镜头的光阑重叠拼接在一起,得到第二种轴向色散镜头。重新调整后组镜头的后焦距,最终的优化结果如图 12 所示,产生的轴向色散为 1.21 mm。第二种轴向色散镜头在中心波长 575 nm 处的 MTF 和在 450 nm、500 nm、550 nm、600 nm、650 nm、700 nm 波长下的点列图如图 13 所示,MTF 值基本接近衍射极限,弥散斑的 RMS 半径也基本都在艾里斑半径以内,镜头的成像质量也较优。

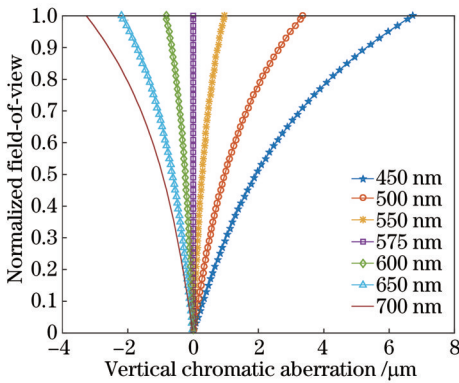


图 10 垂轴色差

Fig. 10 Vertical chromatic aberration

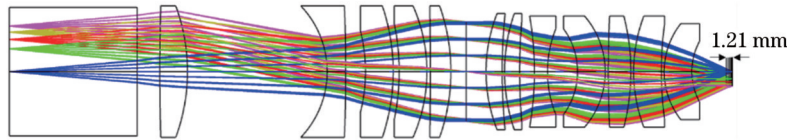


图 12 第二种轴向色散镜头

Fig. 12 Second type of axial dispersion lens

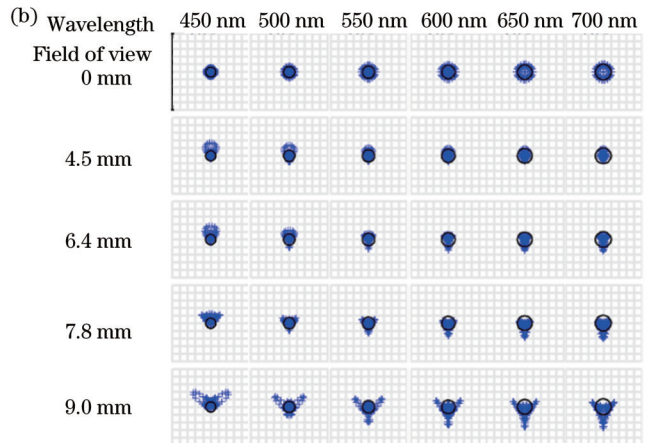
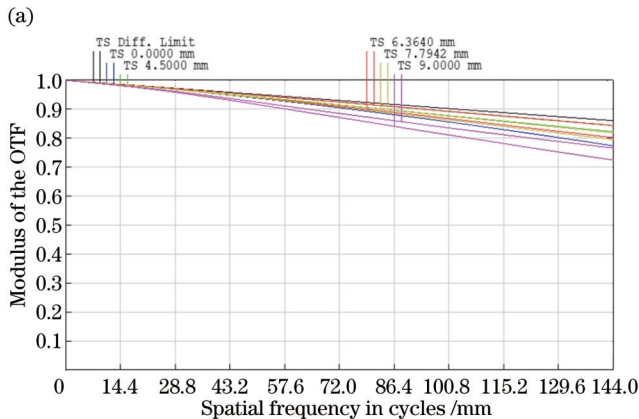


图 13 第二种轴向色散镜头。(a) MTF;(b)点列图

Fig. 13 Second type of axial dispersion lens. (a) MTF; (b) point plot

综上所述,本文设计了两种性能指标不同的宽视场色散镜头,两种色散镜头共用前组,通过替换后组即可实现参数的改变,具体的性能参数如表2所示,像高或垂轴放大率与F数成比例关系,色散范围的改变遵循式(5)。

表 2 色散镜头两种性能参数

Table 2 Two types of performance parameters of dispersion lenses

Performance index	First type of dispersion lens	Second type of dispersion lens
Wavelength /nm	450-700	450-700
Object height /mm	9	9
F number	4	1.2
Vertical axis magnification	-1	-0.3
Image height /mm	9	2.7
Axial chromatic aberration / mm	4.06	1.21

4 宽视场轴向色散镜头研制

对宽视场轴向色散镜头进行光机设计,光机结构剖面图和实物如图14所示,轴向色散镜头的前组和后组单独设计两个镜筒,后组镜头可以单独替换,镜片之间通过隔圈控制间隔,最后用压圈固定。设计合理的加工公差,然后展开机械加工和光学零件加工,最后使用中心偏差测量仪对镜头辅助装调,完成轴向色散镜头的研制。

采用ZYGO干涉仪对轴向色散镜头进行像质检测,具体实验装置如图15(a)所示。激光聚焦点置于轴向色散镜头物方焦点处,光束经过镜头后聚焦在标准球面反射镜的球心位置,然后再经球面反射镜原路返回,反射光返回ZYGO干涉仪后与参考光束相遇产生干涉条纹。两种轴向色散镜头中心和边缘视场波前检测结果如表3所示,第一种轴向色散镜头波前RMS值在 0.053λ 到 0.075λ 之间,第二种轴向色散镜头波前RMS值在 0.061λ 到 0.078λ 之间。波面最大值与最小

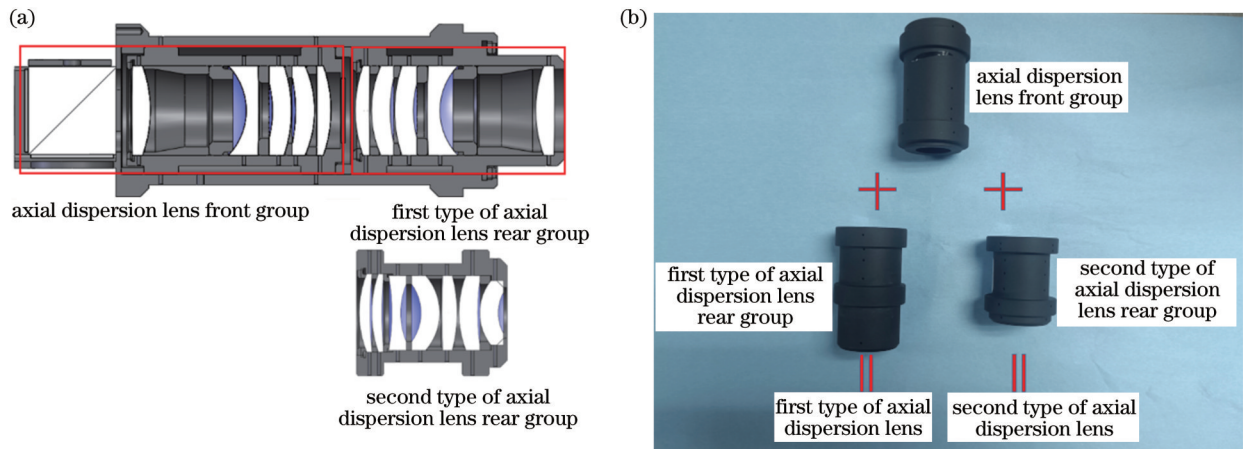


图 14 轴向色散镜头。(a)光机结构剖面图;(b)镜头实物

Fig. 14 Axial dispersion lens. (a) Optical and mechanical structure profile; (b) physical object of lenses

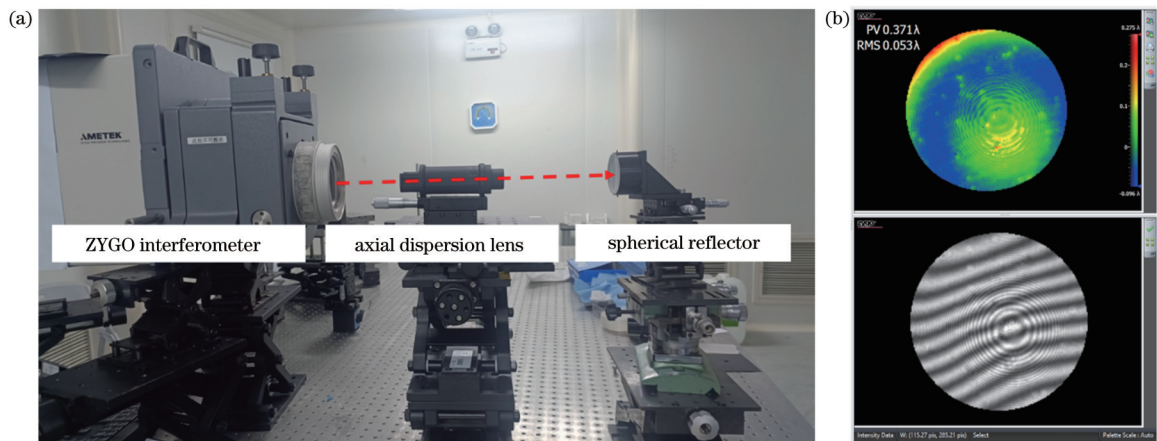


图 15 干涉检测。(a)实验装置;(b)第一种轴向色散镜头中心视场干涉检测结果

Fig. 15 Interference detection. (a) Experimental setup; (b) results of interference detection in the center field-of-view of the first type of axial dispersion lens

值的差值(PV)通常为RMS值的5~8倍。其中第一种轴向色散镜头中心视场检测结果如图15(b)所示,可以看到有两组干涉条纹,其中一个是由标准球面反射镜反射产生的干涉条纹,包含镜头的波前信息,另一个是由镜头中分光棱镜的前表面反射产生的干涉条纹,

会增加镜头波前检测结果的误差。由于在轴向色散镜头的设计中物面位于分光棱镜前表面上,无法去除这个干涉条纹对检测结果的影响,实际轴向色散镜头的波前应优于该检测值。

表3 轴向色散镜头波前检测结果

Table 3 Axial dispersion lens wavefront detection result

Wavefront	First type of axial dispersion lens		Second type of axial dispersion lens	
	Centre field-of-view	Edge field-of-view	Centre field-of-view	Edge field-of-view
RMS	0.053λ	0.075λ	0.061λ	0.078λ
PV	0.371λ	0.440λ	0.415λ	0.463λ

5 实验及结果分析

为验证宽视场轴向色散镜头的性能,搭建了快照式光谱共焦测量装置。选择光谱比较平坦的白光LED作为光源,并利用积分球实现均匀照明。采用一种棱镜型成像光谱仪分光模块进行光谱探测,F数为4,物高为9 mm,与轴向色散镜头前组相匹配,放大率为-1,色散带宽为431 μm,平均光谱分辨率为2 nm。相机的型号为Sony IMX304 CMOS,分辨率为4096×3000,单个像素大小为3.45 μm×3.45 μm。针孔阵列板的面积为14 mm×10 mm,针孔直径为20 μm,相邻针孔中心间距为100 μm。图16为孔阵列板出射的450~700 nm波长光经成像光谱仪分光模块色散后的部分图像,方框为一个小孔对应的色散带宽,长度为123 pixel。

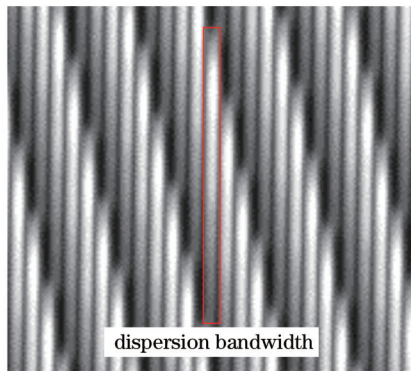


图16 针孔出射的白光经成像光谱仪分光模块的色散图

Fig. 16 Dispersion diagram of white light emitted from small hole through optical module in imaging spectrometer

快照式光谱共焦测量装置可获取到一张与针孔阵列板上小孔数量相同的点图,这些点的像素位置包含波长信息,同时也包含被测物位移信息,需要利用像素位置与位移的函数关系进行转换。像素位置、波长和位移三者的关系如图17所示,一般步骤是先对成像光谱仪分光模块进行像素位置和波长标定,再根据波长信息得到位移信息,但对于光谱共焦测量装置来说,波长只是一个中间量,对结果没有影响,因此本文直接对

像素位置和位移进行标定,可减少实验工作量和减小标定误差。

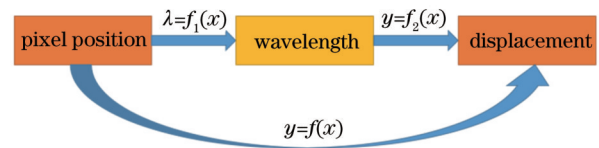


图17 像素位置、波长和位移三者关系

Fig. 17 Relationship between pixel position, wavelength, and displacement

像素位置和位移的标定实验如图18所示。采用双面反射镜作为待测物,反射镜双面平行度小于5",利用位移平台移动待测物位置。利用快照式光谱共焦测量装置对反射镜的一面进行检测并记录下像素位置数据,利用基恩士的点激光位移传感器(LK-G30)对反射镜的另一面进行检测并记录下位移,基恩士点激光传感器的位移测量精度为0.05 μm。另外在反射镜的另一面增加一个激光器,利用自准直原理确保反射镜在移动过程中反射面与轴向色散镜头的光轴垂直。第一种性能参数下轴向色散镜头在450~700 nm的工作波段内位移差为4.013 mm,一共检测45个点,对得到的像素位置-位移数据进行多次拟合,标定曲线公式为

$$y = 0.01388x^2 + 35.07x + 4000, \quad (12)$$

该曲线与检测点的相关系数为 $R^2=0.999$ 。第二种性能参数下轴向色散镜头在450~700 nm的工作波段内位移差为1.193 mm,标定曲线公式为

$$y = 0.01049x^2 + 10.78x + 1147, \quad (13)$$

曲线与检测点的相关系数 $R^2=1$ 。理论上单波长下小孔在第一种性能参数镜头像面上的光斑直径为20.0 μm,在第二种性能参数时为6.0 μm,但由于镜头像差和衍射效应的存在,直径会有所变化。为了检测针孔阵列板上小孔在像面上实际光斑直径的大小,利用20倍测量显微镜进行检测。检测光路如图19所示,在光源和轴向色散镜头之间加入一个窄带滤光片,窄带滤光片的中心波长为460 nm和650 nm,带宽为10 nm。将显微物镜的物面与小孔对应波长的像面重合,在探测器上可以得到清晰的针孔阵列像,如图19右

侧检测结果所示,其中圆圈为针孔,黑色为不透光部分,根据放大比例可计算出实际针孔直径。其余针孔直径检测结果如表 4 所示,小孔在第一种性能参数镜头像面的最大光斑直径为 $20.53 \mu\text{m}$,在第二种性能参

数时为 $7.22 \mu\text{m}$,第一种性能参数镜头的光斑直径接近理论值,第二种性能参数镜头的光斑直径稍大些,光斑直径测试结果也能反映出研制的轴向色散镜头像质较优。

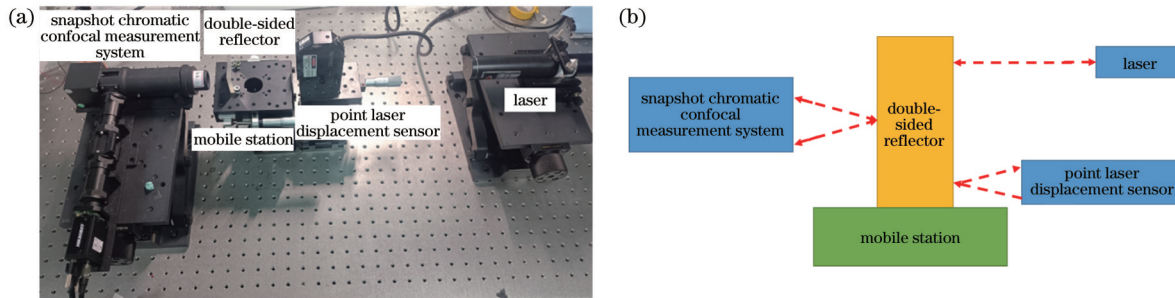


图 18 快照式光谱共焦标定实验。(a)实物;(b)原理

Fig. 18 Snapshot type chromatic confocal calibration experiment. (a) Material object; (b) principle

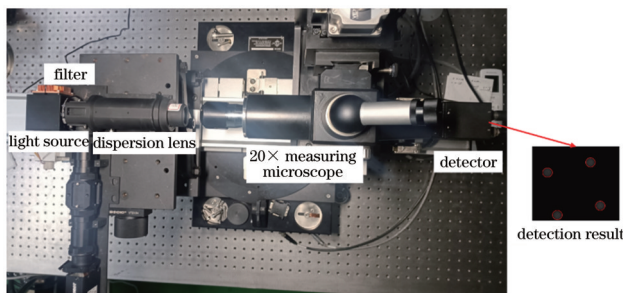


图 19 光斑直径检测实验

Fig. 19 Spot diameter detection experiment

为了验证测量装置的测量可重复性,对高度测量值开展了标准差和平均绝对误差测试。将反射镜作为被测物,在中心和边缘视场采用波长为 450 nm 、 575 nm 和 700 nm 的光分别对被测物进行 100 次检测,

对所测得的数据进行峰值提取,根据标定曲线公式求解出位移并作为测量值。测量装置处理后的数据如图 20 所示,测量标准差和平均绝对误差如表 5 所示。可以看到,第一种性能参数的最大测量标准差为 $2.965 \mu\text{m}$,最大平均绝对误差为 $2.466 \mu\text{m}$,第二种性能参数的最大测量标准差为 $0.856 \mu\text{m}$,最大平均绝对误差为 $0.790 \mu\text{m}$ 。测量的误差一方面来源于光源的不稳定性,本文采用的白光 LED 功率较高,工作时会产生大量的热,光谱会随着温度的升高而产生波动,另一方面来源于探测器内部的噪声,例如暗电流、背景辐射噪声和读出噪声。另外实验结果也表明,轴向色散镜头的数值孔径越大,测量装置的标准差和平均绝对误差会越小,数值孔径越大镜头接收的有效光能量越多,系统的信噪比越高,重复性越好。

表 4 光斑直径检测结果

Table 4 Spot diameter detection result

Center wavelength / nm	Spot diameter / μm	
	First type of axial dispersion lens	Second type of axial dispersion lens
460	20.53	7.14
650	20.20	7.22

对于本文采用的成像光谱仪分光模块,实际单个针孔的色散带宽在探测器上有 123 个像素,两种轴向色散镜头的轴向测量范围分别为 4.013 mm 和 1.193 mm ,假设位移差和像素位置之间是线性关系,则 1 个探测器像素分别对应 $33.0 \mu\text{m}$ 和 $9.7 \mu\text{m}$ 的轴向距离增加量,如果峰值检测算法的精度是 1 个像素,那么该值就是测量系统的轴向分辨率。图 21 为探测器上一个亮点的强度分布曲线,曲线呈高斯分布^[16],大约有 12 个像素点,可以采用高斯拟合算法提取峰值像素位置。高斯拟合算法属于亚像素峰值提取算法,理论上可以达到高于 0.1 个像素的精度,两种参数下色散镜头的轴向分辨率可以提高到 $3.3 \mu\text{m}$ 和 $0.97 \mu\text{m}$ 。因此在轴向分辨率测试中,对于第一种

性能参数,选取高度差 (H) 为 $2 \mu\text{m}$ 、 $4 \mu\text{m}$ 和 $6 \mu\text{m}$ 的标准量块进行测试,对于第二种性能参数,选取高度差为 $1 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$ 和 $3 \mu\text{m}$ 的标准量块进行测试,标准量块的精度优于 $0.1 \mu\text{m}$,对每个标准量块分别检测 20 次,对采集到的数据进行峰值提取并计算出高度差。检测结果如图 22 所示,对于第一种性能参数,当高度差为 $2 \mu\text{m}$ 时,20 次检测结果的平均值为 $0.56 \mu\text{m}$,检测结果基本被噪声覆盖,无法进行分辨,当高度差为 $4 \mu\text{m}$ 和 $6 \mu\text{m}$ 时,可以看到明显的高度差,因此第一种性能参数的轴向分辨率为 $2\sim 4 \mu\text{m}$ 。对于第二种性能参数,当高度差为 $1 \mu\text{m}$ 时,20 次检测结果的平均值为 $1.02 \mu\text{m}$,可以进行分辨,因此第二种性能参数的分辨率优于 $1 \mu\text{m}$ 。

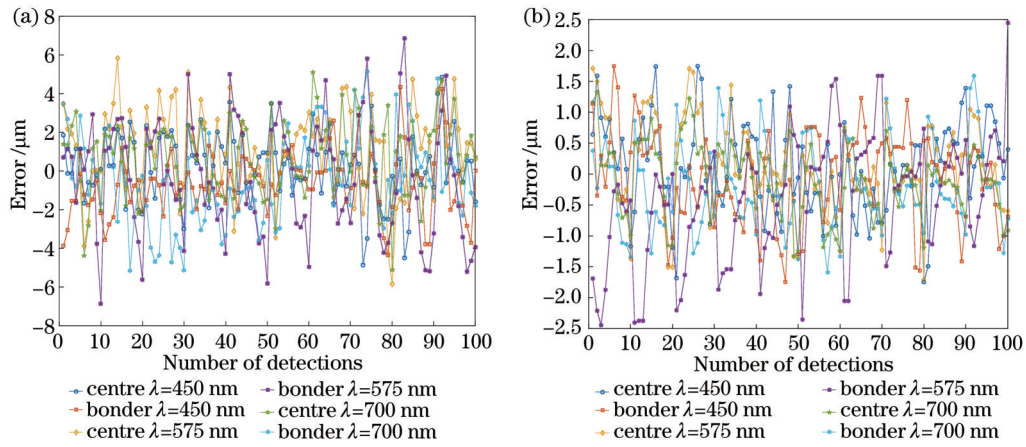


图 20 测量装置误差。(a)第一种性能参数;(b)第二种性能参数

Fig. 20 System measurement error. (a) First type of performance parameter; (b) second type of performance parameter

表 5 快照式光谱共焦测量装置测量的标准差和平均绝对误差

Table 5 Standard deviation and average absolute error measured by snapshot chromatic confocal measurement system

Parameter	Centre field-of-view			Edge field-of-view			
	450 nm	575 nm	700 nm	450 nm	575 nm	700 nm	
First performance parameter	Standard deviation / μm	1.778	2.234	1.999	1.625	2.965	2.339
	Average absolute error / μm	1.377	1.756	1.637	1.210	2.466	1.865
Second performance parameter	Standard deviation / μm	0.747	0.747	0.599	0.739	0.856	0.714
	Average absolute error / μm	0.590	0.611	0.476	0.790	0.763	0.567

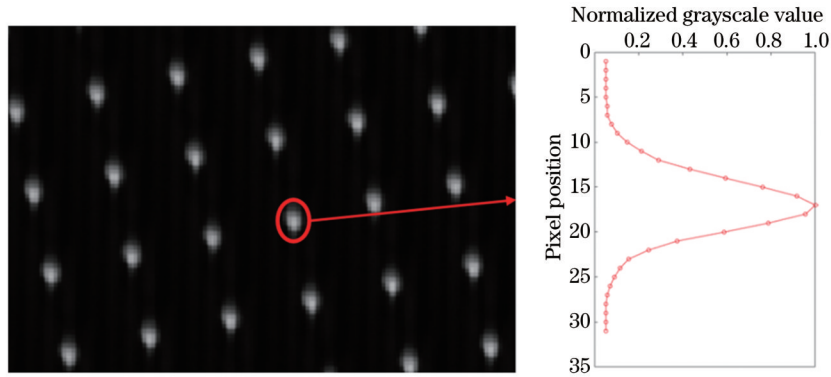


图 21 亮点强度分布

Fig. 21 Bright spot intensity distribution

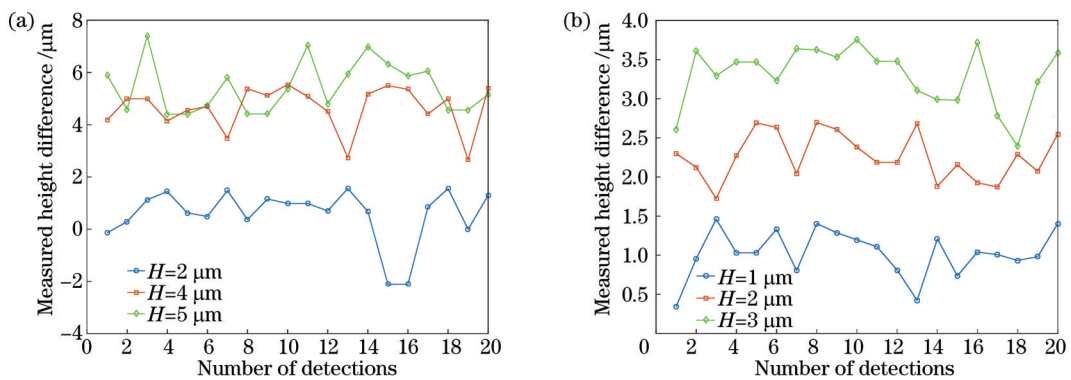


图 22 轴向分辨率测试结果。(a)第一种性能参数;(b)第二种性能参数

Fig. 22 Axial resolution test results. (a) First type of performance parameter; (b) second type of performance parameter

为了验证轴向色散镜头及其组成测量装置的三维检测能力,更换两种轴向色散镜头后组后分别对一元人民币进行检测,检测区域和结果如图 23 所示,其中大方框为第一种性能参数检测区域,两个小方框为第二种性能参数检测区域,图中 X 轴和 Y 轴表示空间平面二维坐标,坐标值代表检测的点数,Z 轴表示被测物的表面高度信息。从图 23 最直观地看出第一种性能参数的检测面积大于第二种性能参数,第一种性能参数的检测面积为 $14\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,第二种性能参数的检测面积为 $4.2\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,检测点阵数量相同,都为 140×100 ,所以第二种性能参数的检测结果更密集,可

以看到更细节的地方。一元人民币 1 字中间的横线用第二种性能参数检测,结果表明凹槽的宽度大概在 $150\text{ }\mu\text{m}$ 左右,而第一种性能参数的面阵采样间隔为 $100\text{ }\mu\text{m}$,无法对横线成像。在对检测数据进行算法处理时,第一种性能参数丢失点数要多于第二种性能参数,尤其在被测物高低过渡的地方,因为理论上第一种性能参数可检测的最大角度为 7.2° ,第二种性能参数可检测的最大角度为 22.6° ,只要检测点的倾斜角度大于最大检测角度,都会丢失。对于丢失的点,用它所在位置的上下左右四个点的高度取平均进行插值填充,尽可能还原被测物的真实形貌。

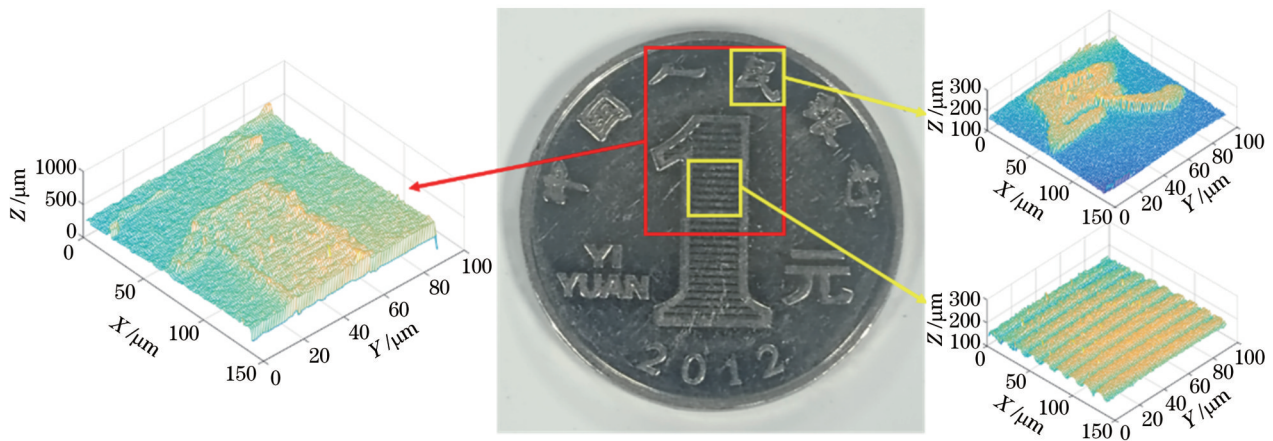


图 23 实物检测图

Fig. 23 Material object and testing picture

综上所述,快照式光谱共焦测量装置采用设计的轴向色散镜头后可实现两种性能参数,具体性能参数如表 6 所示,只需要替换镜头后组就可实现转换,在检测时不需要扫描,极大地提高了对三维形貌的检测速度。在实

际应用中,可根据具体的被测物选择合适的轴向色散镜头后组,第一种性能参数适用于检测面积大、表面结构比较平滑、高度差大的被测物,第二种性能参数适用于检测面积小、表面结构比较复杂、高度差小的被测物。

表 6 快照式光谱共焦测量装置的两种性能参数

Table 6 Two performance parameters of snapshot chromatic confocal measurement system

Parameter	First performance parameter	Second performance parameter
Axial measurement range /mm	4.013	1.193
Horizontal detection area /($\text{mm} \times \text{mm}$)	14×10	4.2×3
Axial resolution / μm	< 4	< 1
Area array sampling resolution / μm	100	30
Spot diameter / μm	20.53	7.22
Maximum measurement standard deviation / μm	2.965	0.856
Maximum average absolute error / μm	2.466	0.79

6 结 论

设计并研制了一种性能参数可调的宽视场轴向色散镜头,搭配其他模块组成快照式光谱共焦测量装置,并进行了性能测试实验,实验中直接对像素位置和位移进行标定,减少了工作量和减小了标定误差。利用激光自准直原理确保标定时轴向色散镜头光轴与被测物表面垂直,采用高斯拟合峰值提取算法提高了测量

装置的轴向分辨率。保持光源、光谱探测模块和轴向色散镜头前组不变,替换镜头后组可实现两种不同的性能参数:一种横向检测面积为 140 mm^2 ,采样间隔为 $100\text{ }\mu\text{m}$,轴向测距量程为 4.013 mm ,轴向分辨率优于 $4\text{ }\mu\text{m}$;另一种横向检测面积为 12.6 mm^2 ,采样间隔为 $30\text{ }\mu\text{m}$,轴向测距量程为 1.193 mm ,轴向分辨率优于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。测量装置的横向检测面积、轴向测距量程、面阵采样间隔、轴向分辨率等性能参数都与轴向色散镜

头有关,根据提出的轴向色散镜头设计方案,保持前组 L1 镜头不变,还可以设计其他焦距的后组 L2 镜头,从而改变光谱共焦测量装置的性能参数,使测量装置适用于更多的应用场景。另外如果对 N 个放大率为 -1 的轴向色散镜头进行拼接,可以得到 N 倍单个轴向色散镜头的轴向测量范围,但同时也会增加镜头的长度。本文将两个针孔阵列板与分光棱镜固定在一起,之后可以尝试利用微位移移动器件对分光棱镜进行移动,进而带动针孔阵列进行移动扫描,提高测量装置的横向面阵采样分辨率,这种扫描方式属于内扫描,相比外部机械扫描装置,稳定性更好,速度更快。

参 考 文 献

- [1] 白蛟,李婧雯,王晓浩,等.高精度光谱共焦位移测量技术研究进展[J].激光与光电子学进展,2023,60(3):0312014.
Bai J, Li J W, Wang X H, et al. Research progress of high precision chromatic confocal displacement measurement technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(3): 0312014.
- [2] 王梓,石俊凯,陈晓梅,等.光谱共焦测量技术综述[J].半导体光电,2022,43(4):752-759.
Wang Z, Shi J K, Chen X M, et al. Overview of spectral confocal measurement technology[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(4): 752-759.
- [3] 邵谭彬,郭文平,席英皓,等.大量程光谱共焦位移传感器设计及性能评估[J].中国激光,2022,49(18):1804002.
Shao T B, Guo W P, Xi Y H, et al. Design and performance evaluation of chromatic confocal displacement sensor with high measuring range[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(18): 1804002.
- [4] 王佳怡,刘涛,唐晓锋,等.光纤式色散共焦三维测量系统及算法比较研究[J].光子学报,2021,50(11):1112001.
Wang J Y, Liu T, Tang X F, et al. Fiber-coupled chromatic confocal 3D measurement system and comparative study of spectral data processing algorithms[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11): 1112001.
- [5] 刘若虚.具有轴向色散的线光谱共焦 3D 测量光学技术研究[D].苏州:苏州大学,2021.
Liu R X. Research on optical technology of line spectrum confocal 3D measurement with axial dispersion[D]. Suzhou: Soochow University, 2021.
- [6] Tiziani H J, Achi R, Krämer R N. Chromatic confocal microscopy with microlenses[J]. Journal of Modern Optics, 1996, 43(1): 155-163.
- [7] Hillenbrand M, Weiss R, Endrödy C, et al. Chromatic confocal matrix sensor with actuated pinhole arrays[J]. Applied Optics, 2015, 54(15): 4927-4936.
- [8] Li S B, Song B F, Peterson T, et al. MicroLED chromatic confocal microscope[J]. Optics Letters, 2021, 46(11): 2722-2725.
- [9] 李煌.彩色共聚焦测量系统光学设计与实验研究[D].泉州:华侨大学,2017.
Li H. Optical design and experimental study of chromatic confocal microscopy[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2017.
- [10] 张一.基于数字微镜器件(DMD)的并行彩色共聚焦系统设计及实验研究[D].泉州:华侨大学,2017.
Zhang Y. Study on parallel chromatic confocal topography measurement system based on digital micromirror device[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2017.
- [11] 杨洁.线扫描光谱共焦光学系统研究与设计[D].苏州:苏州大学,2021.
Yang J. Research and design of line scanning spectral confocal optical system[D]. Suzhou: Soochow University, 2021.
- [12] 李林,黄一帆.应用光学[M].5版.北京:北京理工大学出版社,2017.
Li L, Huang Y F. Applied optics[M]. 5th ed. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2017.
- [13] Banerjee S, Hazra L N. Thin lens design of Cooke triplet lenses: application of a global optimization technique[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3430: 175-183.
- [14] Hazra L, Banerjee S. Genetic algorithm in the structural design of Cooke triplet lenses[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3737: 172-179.
- [15] 郁道银,谈恒英.工程光学[M].4版.北京:机械工业出版社,2016.
Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [16] 黄伟华,贺春景,赵维谦,等.激光共焦 LIBS 显微成像系统的研制[J].光学学报,2020,40(24):2430002.
Huang W H, He C J, Zhao W Q, et al. Development of confocal LIBS microscope[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(24): 2430002.

Wide Field-of-View Axial Dispersion Lens with Adjustable Performance Parameters

Bai Haodong^{1,2}, Zhao Yang^{1,2}, Zhou Jiankang^{1,2*}, Zhu Jiacheng^{1,2}, Shen Weimin^{1,2}

¹Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China;

²Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, Jiangsu, China

Abstract

Objective Chromatic confocal technology is one of the most commonly used optical methods for three-dimensional surface morphology detection. It is a non-contact, non-destructive measurement, which is very precise, fast, and insensitive to the surrounding environment. Presently, the point and line chromatic confocal technologies require one- or

two-dimensional space scanning during detection, resulting in low detection efficiency. Multi-point array or snapshot chromatic confocal measurement technologies have been investigated for improving detection speeds. The axial dispersion lens is one of the important components of the measurement system. The dispersion range of the lens and the image space numerical aperture determines the axial resolution and the maximum measurement angle of the measurement system, and the field-of-view and magnification determines the lateral detection area. A survey showed that the majority of contemporary wide-field chromatic confocal dispersion lenses adopt expensive diffractive elements and aspheric surfaces and produce a narrow field-of-view and dispersion ranges. The objective of this study is to design a wide-field long-axis dispersion lens to enlarge the measurement area and improve the accuracy of a snapshot chromatic confocal measurement system.

Methods The surface white light passes through the dispersive lens and generates the surface axial dispersion. Light, with different wavelengths, is focused at different axial positions, and the same wavelength and different fields-of-view are focused on the same vertical plane. The dispersion lens is required to meet the telecentric conditions in the image and object space to receive the maximum amount of light, reflected from the measured object. The double telecentric dispersion lens with -1 magnification is divided into two parts, front and back group, which are symmetrical at the middle point. The back group is designed first, and the front is its mirror image. The axial dispersion distance is twice that of the back or front group. As suggested by the structural characteristics of the dispersion lens, the Cook three-piece is selected as the initial structure. The axial chromatic and residual aberration evaluation functions are established to obtain the initial parameters of this structure and design the symmetrical half-group lens. After flipping and combining the two assemblies, the whole dispersion lens is obtained. Then, the Cook structure is adjusted by trying back group with different numerical apertures and combining them with their matching front group to obtain a wide field-of-view axial dispersion lens with adjustable performance parameters.

Results and Discussions In this paper, a wide field-of-view axial dispersion lens (Fig. 14) was designed. Its performance parameters can be adjusted by replacing the back group, and the effect of parameter adjustment is elucidated. The dispersion lens designed in this paper is characterized by two sets of performance parameters. The first set comprises a 9-mm image height, 4.06-mm axial color difference, 4 F number, and -1 magnification. The second set includes a 2.7-mm image height, 1.2-mm axial color difference, 1.2 F number, and -0.3 magnification (Table 2), and the image quality reaches the diffraction limit. Reasonable manufacturing and installation tolerances were considered, and the mechanical and optical parts were produced. Finally, the lens was adjusted using a center deviation eccentricity measurement instrument for auxiliary group. A ZYGO interferometer was used to test the image quality of the axial dispersion lens. The results show that the wavefront RMS value of the axial dispersion lens with the first set of parameters is $0.053\lambda-0.075\lambda$, while the wavefront RMS value for the second set of parameters is $0.061\lambda-0.078\lambda$ (Table 3). The first set of performance parameters is deemed suitable for measuring objects with large detection areas, smooth surface structures, and large height differences, whereas the second set is for objects with small detection areas, complex surface structures, and small height differences.

Conclusions In this paper, a design method is proposed for a wide field-of-view dispersion lens, which not only reduces the design difficulty but also doubles the axial dispersion of the back group of the lens. By replacing the back group, the lens performance parameters can be adjusted, so that the measurement system can be adopted for more applications. The objective of a chromatic confocal lens is to expand the dispersion range, increase the image space numerical aperture, and maintain the near-linear dispersion performance. However, the three parameters are related to the energy utilization of the measurement system and the volume and complexity of the lens. Increasing the image space numerical aperture will enhance the signal-to-noise ratio measurement and will also increase the aberration of the lens while affecting the linearity and dispersion range. A wide field-of-view dispersive lens was developed using the proposed design method, which can utilize two sets of performance parameters. To verify the performance of the designed dispersion lens, an experimental measurement device was constructed, which comprised of a light source, a pinhole array plate, and an imaging spectrometer beam splitting module. The experimental tests demonstrate the feasibility of the proposed design method.

Key words optical design; chromatic confocal; snapshot; wide field-of-view axial dispersion