

文章编号:1005-4642(2025)07-0054-09

复杂孔径衍射图样分析与透镜焦距测量

朱康安,李毅涵,李 浩,杨文革,高大强,冯娟娟

(兰州大学 物理科学与技术学院 物理国家级实验教学示范中心(兰州大学),甘肃 兰州 730000)

摘 要:通过理论分析、仿真模拟和实验测量,探究了利用复杂孔径衍射图样精确快速测量凸透镜焦距的方法. 实验观察到泡沫镍衍射图样中的条纹消失现象,分析实验数据发现其物距-像距变化规律与高斯公式近乎一致,但是有偏差. 基于傅里叶光学原理进行理论分析及推导,修正了焦距计算公式. 对多块透镜测量的结果表明,该方法对焦距较大透镜的测量相对偏差小于 0.50%,其中焦距为 10.00 cm 透镜的焦距测量相对偏差仅为 0.06%,优于位移法、自准法以及使用规则结构作为衍射屏的测量结果.

关键词:焦距;傅里叶光学;复杂孔径;衍射图样

中图分类号:O438.2

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2025.07.009

透镜焦距的准确测量对于光学系统的性能评估及研究至关重要^[1],透镜焦距的测量也是重要的大学物理实验教学内容^[2]. 传统的焦距测量方法有位移法、放大率法、高斯公式法、自准直法等^[3],新兴的方法有干涉法、衍射法、全息法^[4]等. 对于更加复杂或特殊的焦距测量需求,也可利用泰伯-莫尔干涉技术^[5]、双朗奇光栅测量技术^[6]、涡旋光干涉测量技术^[7]、相关系数匹配技术^[8]等方法. 对于大学物理实验教学来说,上述测量方法的适用范围有限且存在局限性:位移法的测量结果易受实验条件影响,导致其重复性不高;放大率法操作繁复;高斯公式法物像位置不易准确界定,测量精确度偏低;新兴方法往往对实验仪器和实验环境有较高的要求且操作较为繁琐.

目前,实验教学中主流的焦距测量方法大都基于几何光学原理,与傅里叶光学相关的实验较少^[2]. 本文利用复杂孔径的衍射图样,对于单一凸透镜构成的成像系统运用傅里叶光学原理及后续的理论修正,实现了对凸透镜焦距的准确、快速测量. 该方法操作简单,对设备精度和测量环境的依赖较小,并且在多个透镜的测量中表现出

了较高的准确度和稳定性,能够为常见凸透镜的焦距测量提供准确、可靠的方法. 另外,本研究也能帮助学生理解和掌握傅里叶光学的基本原理,激发学生对光学实验的兴趣.

1 测量原理

1.1 实验装置及复杂孔径面

实验光路如图 1 所示,所用装置以及元件:激光器,激光波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$;扩束镜,扩束后的光斑半径 $r = 3.00 \text{ cm}$;凸透镜,标称焦距 $f = 19.00 \text{ cm}$,材质为 BK-17,折射率 $n_0 = 1.515$,孔径 $D = 3.20 \text{ cm}$;光具座,港东 ER-CO-3,刻度尺的最小刻度值为 0.01 cm .

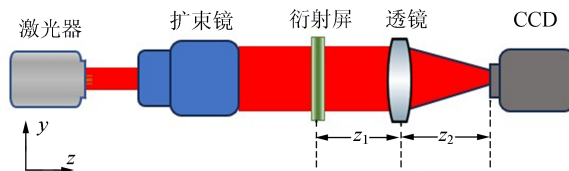


图 1 实验光路示意图

收稿日期:2024-12-16;**修改日期:**2025-05-12

基金项目:2024 兰州大学“中央高校基本科研业务费专项资金”科研能力提升项目(青稞计划)-优秀本科生创新项目(No. lzujbky-2024-ou06);兰州大学 2024 年实验技术创新项目(No. Lzushyjj2024-09);甘肃省高等学校创新创业教育改革项目(No. 71);兰州大学教育教学改革研究重点项目(No. 202318)

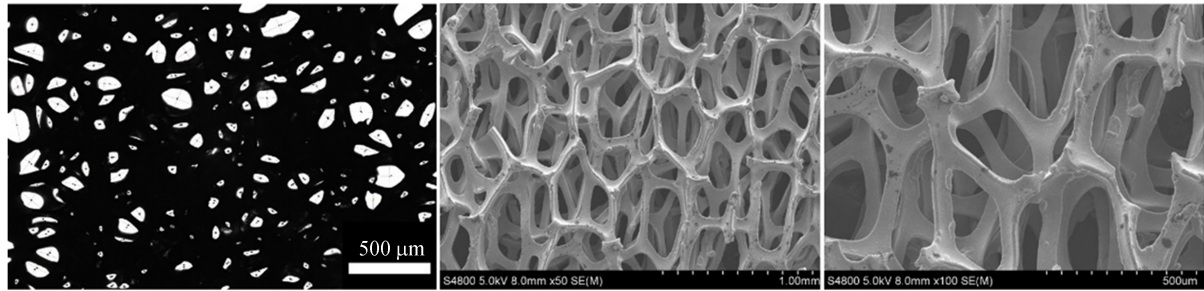
作者简介:朱康安(2003—),男,安徽芜湖人,兰州大学物理科学与技术学院 2022 级本科生. E-mail: zhuka21@lzu.edu.cn

通信作者:冯娟娟(1982—),女,河南郑县人,兰州大学物理科学与技术学院工程师,博士,主要从事微光纤传感应用研究及大学物理光学实验教学. E-mail: fengjj@lzu.edu.cn

测量时,激光被扩束为平行光,通过孔径面发生衍射并经过凸透镜的调制后于 CCD 接收面处成像. 设物平面至透镜中心的距离为 z_1 , 即孔径面至透镜中心的距离(以下简称物距);设像平面至透镜平面的距离为 z_2 , 即 CCD 接收面至透镜中心的距离(以下简称像距).

复杂孔径面为泡沫镍样品,具有多孔结构,厚

度为 0.3 mm. 图 2(a)为泡沫镍样品在光学显微镜下的暗场像,利用 Nanosize 软件在图像上标记并测量孔径的尺寸,平均孔径为 $59.95 \mu\text{m}$,最大孔径为 $249.54 \mu\text{m}$,最小孔径为 $8.62 \mu\text{m}$,与激光光源的波长相比,孔径的尺寸满足衍射条件. 扫描电子显微镜拍摄孔径面如图 2(b)和(c)所示,显示泡沫镍为三维多孔结构.



(a)光学显微镜的暗场像

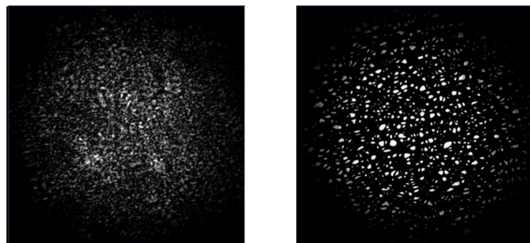
(b)扫描电镜图像 1

(c)扫描电镜图像 2

图 2 复杂孔径面的结构图

1.2 还原像现象

利用泡沫镍作为复杂孔径,观察其衍射图样, CCD 接收到的图像通常有明显的衍射干涉条纹,如图 3(a)所示. 当调节 CCD 至导轨上某一位置时,图像中的衍射干涉条纹向中心收缩后“消失”,图像转变为许多边界清晰、锐利的孔洞,如图 3(b)所示,称该图像为还原像,设此时 CCD 到透镜中心的距离为 z_0 .



(a)衍射条纹存在

(b)衍射条纹消失

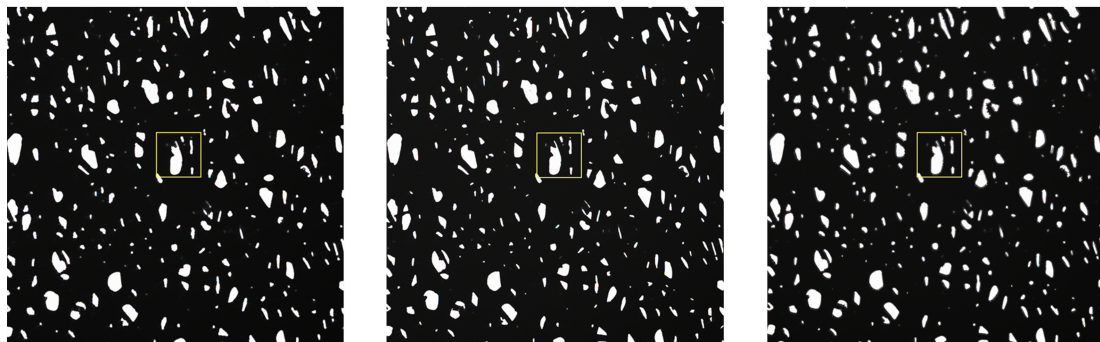
图 3 衍射图样

用标称焦距为 19.00 cm 的凸透镜,在以 z_0 为基点间隔 0.10 cm 处由 CCD 拍摄图像,如图 4 所示.

1)实验过程中,随着 CCD 位置接近 z_0 处,图像中部分衍射干涉条纹渐渐收缩为许多边界模糊的斑点,余下的条纹则环绕在这些斑点周围,图 4(a)为 CCD 于 z_0 处前 0.20 cm 拍摄的图像.

2)移动 CCD 至 z_0 处,图像中的条纹都收缩为边界清晰、明亮的斑点,如图 4(b)所示.

3)图 4(d)~(f)分别为 CCD 位于 z_0 处及其前后移动 0.20 cm 的同区域放大图. 从放大图中可以看出,CCD 位置在 z_0 处的图像没有衍射干涉条纹,CCD 位置偏离 z_0 位置 0.20 cm 的图像有明显条纹,即像距仅改变 0.20 cm,图像就已产生可被分辨的变化,这表明据此能够较精确地测定 z_0 的位置.



(a) z_0 前 0.20 cm 处

(b) z_0 处

(c) z_0 后 0.20 cm 处



(d)图(a)局部放大图

(e)图(b)局部放大图

(f)图(c)局部放大图

图 4 z_0 处及前后 0.20 cm 处 CCD 拍摄的图像

1.3 成还原像时的物距-像距关系

调节物距至设定值,调节 CCD 位置使图像成还原像,此时像距 $z_2 = z_0$. 测量像距时,每个物距对应的像距均进行 5 次独立测量. 分析实验数据

发现:每组数据中物距的倒数和像距的倒数呈反比例关系,然而图 5 中 2 组数据间的偏差表明直接按高斯成像公式计算得到的透镜焦距与实际焦距间存在差异.

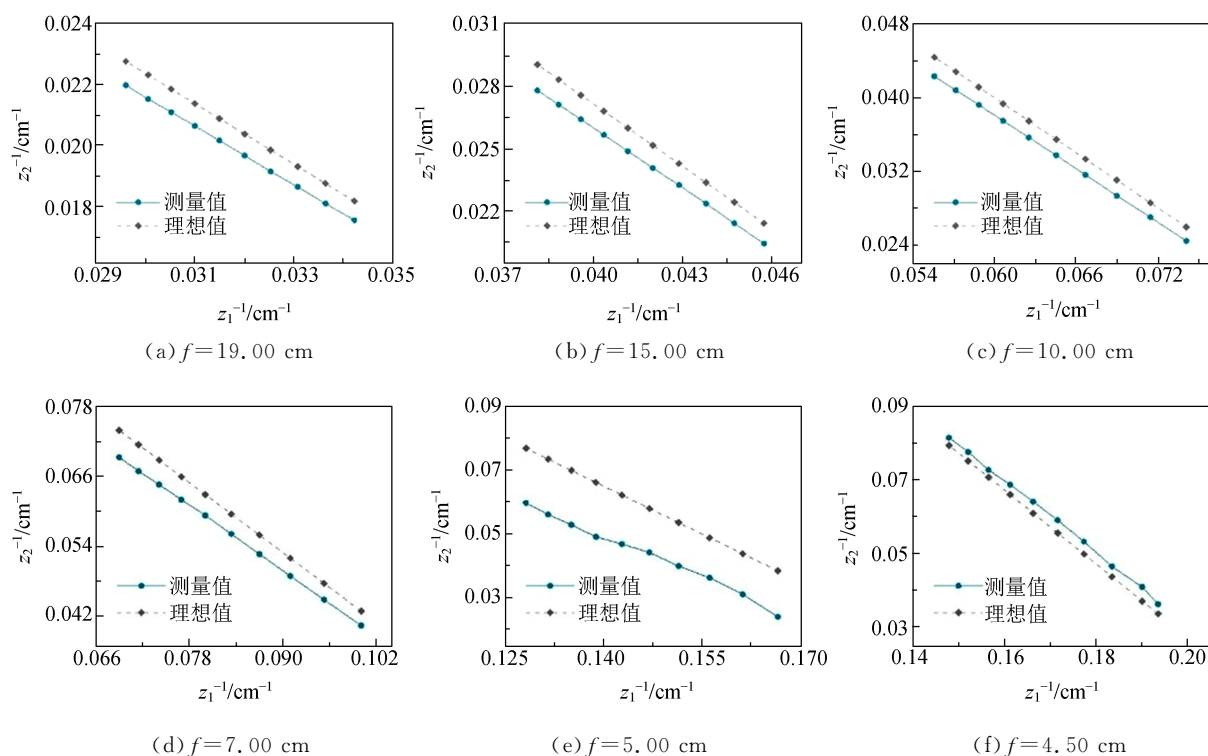


图 5 不同标称焦距下的理论值(利用高斯公式计算)与测量值对比

1.4 基于透镜成像性质的理论分析

如图 6 所示,考虑单一薄凸透镜组成的成像系统,在透镜中心处建立直角坐标系,并令 z 轴与透镜光轴重合. 设平行光通过物平面(ξ, η)后的光场分布为 $U_0(\xi, \eta)$,物距为 z_1 ,通过透镜后的光场分布为 $U_L(x, y)$,在像平面(u, v)处的光场分布为 $U_i(x, y)$,像距为 z_2 ,透镜的焦距为 f .

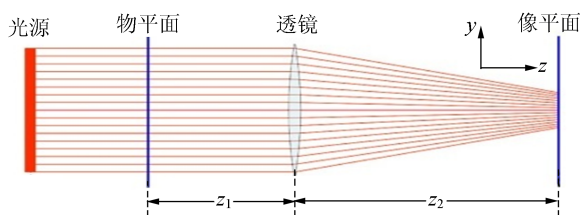


图 6 单凸透镜系统成像简化示意图

由标量衍射理论写出物平面上的点源 (ξ, η) 发出的光波到达透镜表面的场分布 $U_1(x, y)^{[9]}$, 将其按傍轴近似为

$$U_1(x, y) = \frac{1}{\lambda z_1} \exp \left[jk \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2z_1} \right], \quad (1)$$

式中, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波矢, λ 为波长, j 为单位虚数. 设光瞳函数为 $P(x, y)$, 则经过透镜调制后的光场分布为

$$U_2(x, y) = U_1(x, y) P(x, y) \exp \left(-jk \frac{x^2 + y^2}{2f} \right). \quad (2)$$

当 z_1 和 z_2 满足以下关系^[10]:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}, \quad (3)$$

即满足高斯公式时, 此时的输出光分布为

$$\begin{aligned} U_i(u, v) = & \exp \left(jk \frac{u^2 + v^2}{2z_2} \right) \iint_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{M} U_o \left(\frac{\xi'}{M}, \frac{\eta'}{M} \right) \cdot \\ & \exp \left(jk \frac{\xi'^2 + \eta'^2}{2z_1} \right) \delta(u - \xi', v - \eta') d\xi' d\eta' = \\ & -\frac{1}{M} U_o \left(\frac{u}{M}, \frac{v}{M} \right) \exp \left[jk \frac{u^2 + v^2}{2z_2} \left(1 + \frac{1}{M} \right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

此时的像平面光强分布为

$$I(u, v) = \frac{1}{M^2} U_o \left(\frac{u}{M}, \frac{v}{M} \right) \cdot U_o \left(\frac{u}{M}, \frac{v}{M} \right)^*. \quad (5)$$

此时的衍射图样可视为孔径图样的准确复现, 且图样尺寸变为原来的 M 倍 (M 为横向放大率), 光强变为 M^{-2} 倍. 考虑到透镜孔径造成的衍射效应对结果的影响, 式(4)应为

$$U_i(u, v) = -\frac{1}{M} U_o \left(\frac{u}{M}, \frac{v}{M} \right) * \tilde{h}(u - \xi', v - \eta'), \quad (6)$$

式中, $\tilde{h}(u - \xi', v - \eta')$ 是透镜孔径的夫琅禾费衍射图样. 此时的衍射图样不再是孔径图样的准确复现, 而是其发生变形后的像. 孔径越小, 变形越严重^[10], 从而造成测量误差. 故为保证测量结果的准确性, 待测凸透镜的孔径不应过小.

根据以上推导, 像距 $z_2 = z_0$ 时测量得到的物距和像距满足高斯公式. 而先前的实验结果表明, 根据式(3)计算得到的焦距值与实际的焦距值之间存在偏差. 一部分偏差来源于上述推导及分析均为理想情况, 其结果不能完全准确地描述实

际情况, 从而产生偏差; 另一部分偏差来源于实验装置造成的系统误差. 对测量结果造成主要影响且可方便修正的是实际透镜厚度和像差造成的测量偏差^[3, 11-12]. 因此, 本文主要考虑透镜的厚度及透镜的初级球差对测量结果的影响^[11, 13], 并据此对式(3)进行修正.

1.5 对焦距计算公式的修正

由于透镜有厚度, 这使得透镜的物方主点和像方主点并不重合于透镜中心, 而先前讨论中的物距、像距皆以透镜中心为参照点. 为此, 需计算透镜此时的物方主点位置 z_{L1} 和像方主点位置 z_{L2} . 设透镜厚度为 d , 孔径为 D , 曲率半径分别为 R_1 和 R_2 , 满足 $R_1 = -R_2 = R$, 由此可写出物方主点位置 z_{L1} 和像方主点位置 z_{L2} 为^[2]

$$z_{L1} = \frac{R_1 d}{2Rn_0 - (n_0 - 1)d}, \quad z_{L2} = \frac{R_2 d}{2Rn_0 - (n_0 - 1)d}, \quad (7)$$

则其间距为

$$z_c = \frac{(2R - d)(n_0 - 1)d}{2Rn_0 - (n_0 - 1)d}, \quad (8)$$

修正后物距值变为 $z_1 + \frac{z_c}{2}$, 像距值变为 $z_2 + \frac{z_c}{2}$, 与式(3)的偏差为

$$\Delta f_1 = \frac{z_c}{4} \cdot \frac{2z_1^2 + z_c z_1 + 2z_2^2 + z_c z_2}{(z_1 + z_2 + z_c)(z_1 + z_2)}. \quad (9)$$

考虑到透镜球差的影响, 通过透镜边缘的光线会比通过中心的光线更早会聚在光轴上, 因此在焦平面上成像不再是点光源经过透镜后的完善像, 而是具有一定大小的弥散光斑, 如图7所示.

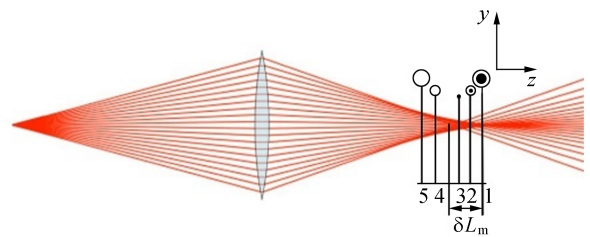


图7 透镜球差示意图

实验中取衍射图样与孔径图样最为相近(相似度最高)的位置作为还原像位置, 此时图像宽度最小, 像距位于图7中的点4到点3之间. 而式(3)只适于满足图像宽度最小处与高斯像点1重合的情况, 故需对式(3)进行修正才能更好地符合实验的具体情况.

对于 n 个面组成的光学系统的球差分布为^[3]

$$\delta L' = -\frac{1}{n_n' u_n' \sin U_n'} \sum_{i=1}^n S_i, \quad (10)$$

其中, n_n' 为折射率, u_n' 和 U_n' 为孔径角, S_i 为第 i 个面上的球差分布系数.

结合透镜参数, 令 $h = D/2$, 此透镜的最大轴向球差为^[3,11]

$$\delta L_m = -\frac{z_2^2}{8} D^2 \left\{ \frac{n_0 + 2}{n_0 f R^2} - \left[\frac{2n_0 + 1}{(n_0 - 1) f^2} + \frac{4(n_0 + 1)}{n_0 f z_1} \right] \frac{1}{R} + \frac{3n_0 + 1}{(n_0 - 1) f^2 z_1} + \frac{3n_0 + 2}{n_0 f z_1^2} + \frac{n_0^2}{(n_0 - 1)^2 f^3} \right\}. \quad (11)$$

按图像宽度最小时位于 $\frac{3}{4} \delta L_m$ 计算, 此时待测量透镜的像距应为 $z_2 - \frac{3}{4} \delta L_m$, 故此时相对式(3)计算结果的偏差为

$$\Delta f_2 = \frac{\frac{3}{4} \delta L_m z_1^2}{\left(z_1 - z_2 - \frac{3}{4} \delta L_m \right) (z_1 - z_2)}. \quad (12)$$

考虑到透镜厚度和透镜初级球差的影响, 式(3)应该修正为

$$f = \left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \right)^{-1} - \Delta f_1 - \Delta f_2. \quad (13)$$

1.6 修正后理论预测结果

根据上述理论推导, 计算给定孔径面在还原像处的像面光场分布^[14], 并与先前实验拍摄的图像进行对照, 以初步验证理论推导结果. 设定透镜焦距 $f = 19.00$ cm, 物距 $z_1 = 30.00$ cm, 代入式(13)可计算得到 $z_0 = z_2 = 53.46$ cm, 这与相同条件下实验测得像距值 53.44 cm 相近. 以孔径的暗场像作为衍射屏, 计算得到 z_0 处及前后移动 0.20 cm 的衍射图样如图 8 所示.

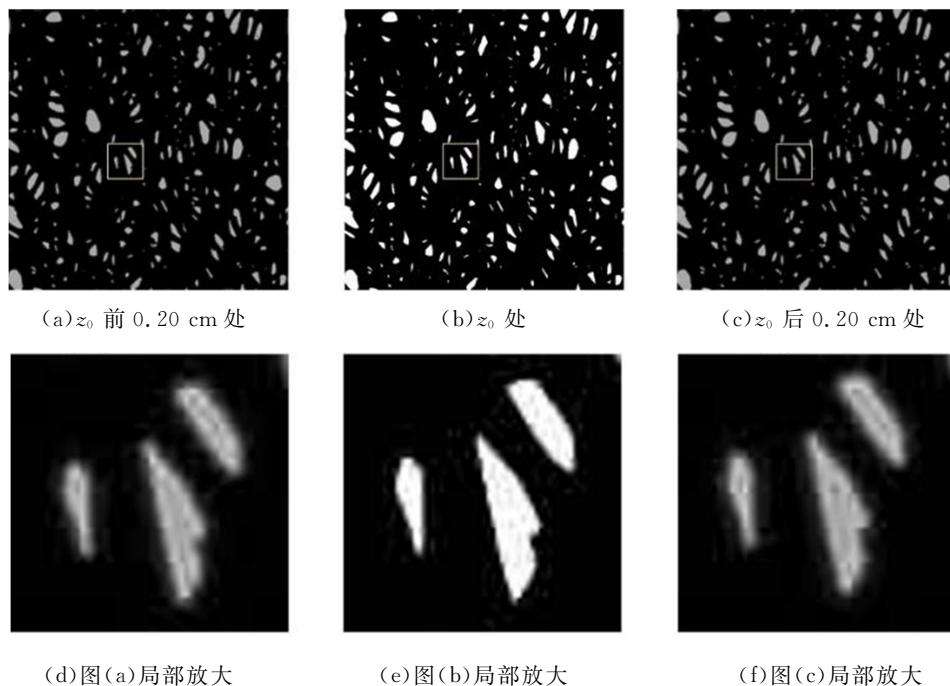


图8 仿真模拟的衍射图样

对比图 8 和图 4, 在 z_0 处, 条纹消失并且呈现边界清晰的孔洞; 前后移动 0.20 cm 时, 条纹重新出现, 孔洞的边界也变得模糊. 理论预测的图样变化规律与实验拍摄的图像变化规律基本吻合.

2 测量结果及分析

2.1 测量要求

搭建图 1 所示光路, 利用复杂孔径面按相同

的测量方法对 6 块透镜进行测量. 考虑到上述推导以傍轴近似为前提, 为提高结果的精度, 实验光路应满足以下条件^[2]:

- 1) 光路准直性良好;
- 2) 扩束后的平行光束能够完整入射衍射屏(物屏);
- 3) 光轴与衍射屏、透镜、CCD 保持较高的同轴度, 并确保衍射屏平面、透镜平面与 CCD 接收

面互相平行;

4) CCD 接收到的光强适中.

2.2 复杂孔径的测量结果

对标称焦距 $f=19.00, 15.00, 10.00, 7.00,$

$5.00, 4.50$ cm 的 6 块透镜进行测量. 将测量得到的数据分别代入修正前的式 (3) 和修正后的式 (13), 得到 2 组测量值, 如图 9 所示, 修正后的测量结果较未修正更加接近标称焦距值.

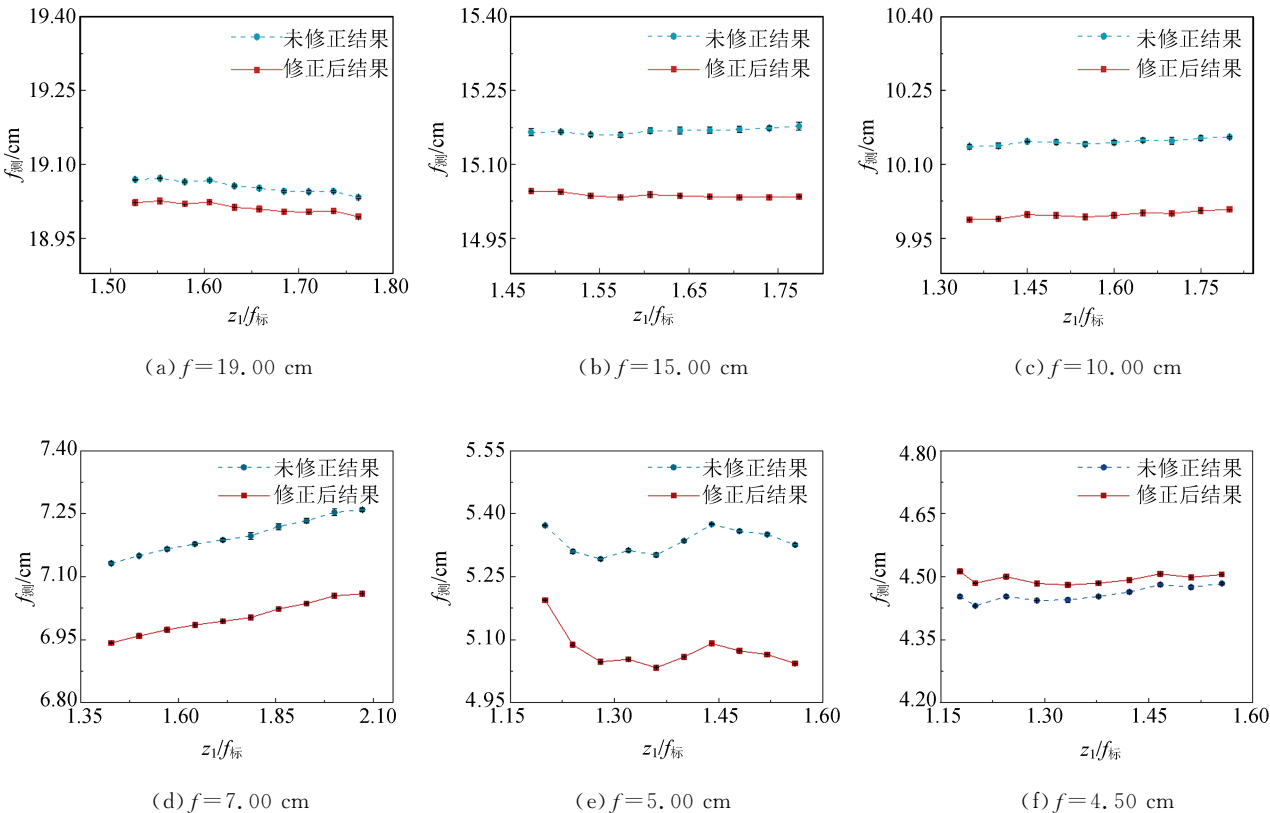


图 9 修正前后透镜焦距测量值对比

设修正后焦距测量值的平均值与焦距标称值的相对偏差为 $\overline{\delta_c}$, 方差为 S_c^2 , 测量结果的不确定度为 U , 其结果如表 1 所示.

表 1 测量结果的相对偏差与方差 (复杂孔径面)

f/cm	$\overline{\delta_c}$	$S_c^2/(10^{-4} \text{ cm}^2)$	U/cm
19.00	0.07%	0.99	0.01
15.00	0.25%	0.20	0.01
10.00	0.06%	0.39	0.01
7.00	0.46%	14	0.03
5.00	1.5%	19	0.03
4.50	0.22%	1.2	0.01

1) 标称焦距 $f \geq 10.00$ cm 的 3 块透镜的相对偏差均小于 0.26%, 方差均小于 $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, 同一透镜在不同物距下的测量结果基本一致, 验证了这一测量方法的有效性和稳定性.

2) 标称焦距 $f=7.00, 5.00$ cm 的 2 块透镜,

其相对偏差均增大, 但不超过 1.5%. 当 $f=5.00$ cm 时, 其相对偏差最大, 方差也增加至 $19 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$.

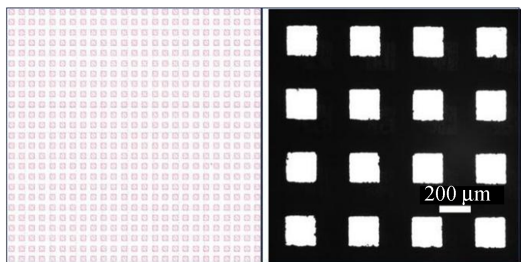
3) 当 $f=4.50$ cm 时, 其相对偏差降低至 0.22%, 方差也降至 $1.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, 与 $f \geq 10.00$ cm 的 3 块透镜的结果相近.

同一透镜的测量结果随物距的增大而改变, 且不同透镜的变化规律也发生了改变. 当透镜焦距 $f=7.00, 5.00$ cm 时, 测量的准确性和稳定性均有所下降. 这是由于透镜焦距变小时, 物距、像距在数值上相应减小, 导致傍轴条件逐渐被破坏. 同时, 仪器精度带来的误差对结果的影响上升, 从而导致了测量误差的增大^[15]. 而当透镜焦距 $f=4.50$ cm 时, 测量的准确性与稳定性较前 2 块透镜出现回升, 与 $f \geq 10.00$ cm 的 3 块透镜的测量结果相当. 这可能与物距焦距比的改变及透镜焦距比增大等因素有关^[11, 14].

2.3 平行实验测量结果

2.3.1 与规则孔径面对比

参照泡沫镍尺寸制作了光栅常量为 $200\ \mu\text{m}$ 、孔径为 $200\ \mu\text{m}$ 的正方形周期光栅,设计图和光栅局部暗场像如图 10 所示.



(a) 设计图 (b) 光栅局部暗场像

图 10 正方形周期光栅

使用正方形周期光栅测量得到的结果与使用复杂孔径得到的结果如图 11 所示. 使用不同孔径测量数据的相对偏差及方差如表 2 所示. 设用正方形周期光栅得到的焦距测量值平均值与焦距标称值的相对偏差为 $\bar{\delta}_r$, 方差为 S_r^2 , 测量结果的不

确定度为 U . 对比表 1 和表 2, 结合图 11, 规则孔径测量值的相对偏差在 $0.02\% \sim 4.4\%$ 内, 显著大于泡沫镍的结果. 对比不同透镜的测量结果: 当 $f = 5.00\ \text{cm}$ 时, 复杂孔径相对偏差值达到 1.5% , 是复杂孔径对不同透镜的测量结果中的最高值. 当 $f = 4.50\ \text{cm}$ 时, 规则孔径最高为 4.4% . 复杂孔径方差始终小于 $20 \times 10^{-4}\ \text{cm}^2$, 规则孔径方差均比较高, 在 $f = 7.00\ \text{cm}$ 时方差为 $57 \times 10^{-4}\ \text{cm}^2$, 这表明规则孔径测量值的波动性较大. 2 种孔径的测量不确定度 $U \leq 0.05\ \text{cm}$, 但复杂孔径在 $f = 7.00\ \text{cm}$ 时仍保持 $U = 0.03\ \text{cm}$, 规则孔径测量相同透镜时 U 骤升至 $0.05\ \text{cm}$. 从图 11 中可以看出, 2 种孔径对同一透镜的测量值均随物距的增大而改变, 规则孔径测量值的波动普遍更为显著.

综上, 泡沫镍测量值相对偏差及方差普遍更小, 测量值随物距的增大而改变的幅度也更小. 这表明使用复杂孔径的测量结果优于简单孔径面的测量结果, 且更加准确、稳定, 其受物距变化影响也更小.

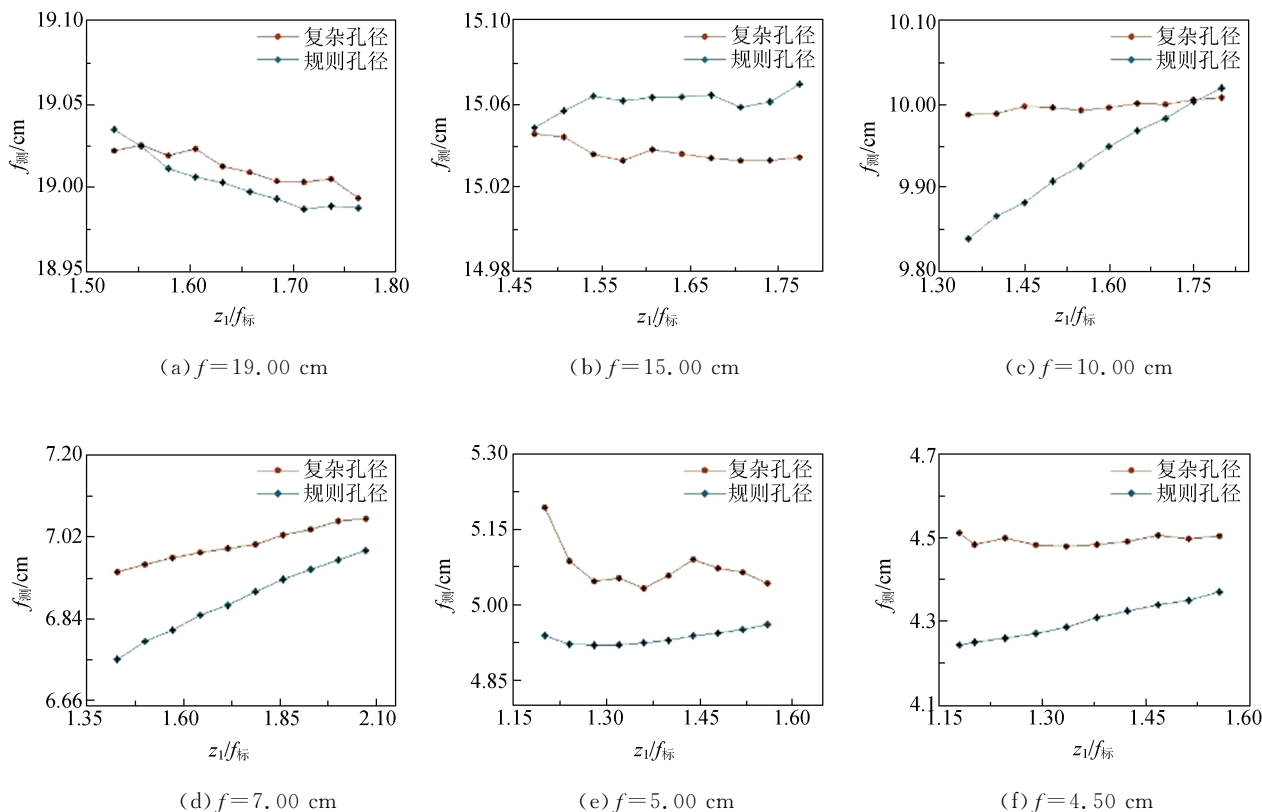


图 11 规则与复杂孔径下透镜焦距测量值对比

表 2 测量结果的相对偏差与方差(规则孔径面)

f/cm	$\overline{\delta}_r$	$S_r^2/(10^{-4}\text{ cm}^2)$	U/cm
19.00	0.02%	2.4	0.01
15.00	0.41%	0.28	0.01
10.00	0.66%	33	0.04
7.00	1.7%	57	0.05
5.00	1.3%	1.8	0.01
4.50	4.4%	18	0.03

使用 2 种孔径的测量结果均受测量系统中的环境噪声和相干噪声影响,其结果存在偏差的原因可能是正方形周期光栅排列规则、厚度较小,其衍射过程中光场的相干性较强,在像面为复振幅相干叠加成像,图样受噪声的影响较强.而复杂孔径面的立体多孔结构导致衍射过程中光场的相干性较弱,在像面为光强非相干叠加成像,噪声对图样造成的影响较弱,修正效果更好,从而导致复杂孔径面的测量结果优于规则孔径面.

2.3.2 与常见测量方式对比

在同一光具座上分别使用自准法与位移法测量 3 块透镜的焦距,每组数据重复测量 5 次,结果取均值,测量结果如表 3 所示.结果表明:与文献中的其他方法的测量结果相比^[5-6,16],本方法的测量值均优于其他方法,且相对偏差、方差和不确定度普遍低于其他方法.因此,本方法测透镜焦距值更准确且稳定.对于 $f=19.00\text{ cm}$ 的透镜,本方法测量结果的精度比其他方法高出 1 个量级.

表 3 不同方法的测量结果、相对偏差与方差

测量方法	f/cm	$\overline{\delta}$	$S^2/(10^{-4}\text{ cm}^2)$	U/cm
自准法	19.10	0.55%	2.9	0.01
	15.06	0.43%	0.99	0.02
	7.00	0.05%	0.09	0.04
位移法	18.94	0.29%	0.12	0.03
	15.04	0.23%	0.46	0.02
	6.88	1.7%	2.4	0.01
本文方法	19.01	0.06%	0.10	0.01
	15.04	0.25%	0.02	0.01
	7.00	0.04%	1.4	0.03

3 结 论

本文探索了利用复杂孔径衍射图样准确、快速测量单个凸透镜焦距的方法.通过还原像测量物距和像距,发现其倒数变化趋势与高斯公式一致.为从理论上解释实验现象,利用傅里叶光学

推导了光场在单凸透镜系统中的强度分布及还原像位置;分析了透镜像差和厚度对测量结果的影响,并修正了计算公式;编写程序模拟衍射图样变化,结果与实验基本一致.为验证该方法的准确度,测量了 6 块不同标称焦距的凸透镜,结果显示该方法在不同焦距下具有良好的准确性和稳定性.因此,基于复杂孔径衍射图样的透镜焦距测量方法具有准确、稳定、可靠、操作简单且快速的优点,对实验设备和环境要求低.

参考文献:

[1] 蔡红梅,鄢定尧,朱衡,等. 大口径长焦透镜透射波前的精确测量方案设计[J]. 中国激光,2015,42(10):1016002.

[2] 刘东奇,朱江,李强,等. 综合研究性实验题 A:基于傅里叶变换的频谱测量与应用[J]. 物理实验,2019,39(11):31-35.

[3] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 4 版. 北京:机械工业出版社,2016:14-19,93-103.

[4] 岳巾英,刘华,许文斌,等. 计算全息法测量长焦透镜面形和焦距[J]. 中国光学与应用光学,2009,2(6):502-507.

[5] 赵琦,蒋泽伟,孟庆安,等. 基于泰伯-莫尔干涉技术的焦距测量系统校准技术研究[J]. 激光与光电子学进展,2014,51(3):031204.

[6] 蒋正东,朱荣刚,陈磊,等. 基于双朗奇光栅的焦距测量技术研究[J]. 应用光学,2018,39(5):687-690.

[7] DOU J T, HE X L, HU Y Y, et al. Focal length measurement based on vortex beam interference[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024,178:108197.

[8] HE X L, DOU J T, HU Y Y, et al. Focal length measurement based on the correlation coefficient matching strategy [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024,181:108446.

[9] 李俊昌,彭祖杰,桂进斌,等. 傍轴光学系统的相干光成像计算[J]. 激光与光电子学进展,2021,58(20):2011001.

[10] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 3 版. 北京:机械工业出版社,2016:120-134,207-209.

[11] 盛树武,李林海,辛志慧,等. 凸透镜焦距测量不确定度分析及系统偏差校正[J]. 光学学报,2021,41(14):1412001.

[12] 程强,胡海翔,李龙响,等. 离轴光学系统的畸变分析及焦距测量[J]. 光学精密工程,2022,30(22):2839-2846.

- [13] HE F, BAI J. Analysis and correction of spherical aberrations in long focal length measurements [J]. Optics Communications, 2021, 482: 126564.
- [14] 李俊昌. 衍射计算及数字全息(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 53-71.
- [15] 宋庆和, 李俊昌, 刘志强, 等. 相干光照明的透镜成像系统离焦像场计算[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1207001.
- [16] 赵磊, 白剑, 方卫栋. 小口径长焦透镜的焦距检测技术[J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0412002.

Analysis of complex aperture diffraction pattern and lens focal length measurement

ZHU Kangan, LI Yihan, LI Hao, YANG Wenge, GAO Daqiang, FENG Juanjuan
(National Demonstration Center for Experimental Physics Education (Lanzhou University),
School of Physical Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A method for accurately and rapidly measuring the focal length of convex lenses using complex aperture diffraction patterns was developed through theoretical analysis, simulation and experiment. Observations of the diffraction patterns from foam nickel indicated a disappearance of fringes, and the object distance-image distance variation closely followed Gaussian formulas with some deviations definitely. After correcting deviations through theoretical derivation based on Fourier optics principles, the method demonstrated a relative measurement error less than 0.50% for lenses with larger focal lengths, and only a relative deviation 0.06% for a focal length of 10.00 cm. All these measurement showed significantly outperforming the results obtained by displacement method and autocollimation method, even better than the results using regular aperture as diffraction screens.

Key words: focal length; Fourier optics; complex aperture; diffraction patterns

[编辑:任德香]

(上接 42 页)

Teaching experiment design and research of manipulations on electromagnetic wave with metasurfaces

YU Junyi, ZHAO Liang, ZHOU Lei, YU Xi, HE Qiong
(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Metasurfaces have become one of the hottest research topics in the field of nanophotonics due to their great capability to manipulate different properties of electromagnetic wave at subwavelength scales. To introduce cutting-edge scientific research achievements related to metasurfaces into the modern physics experiment courses, a complete teaching experimental process focusing on homogeneous anisotropic reflective metasurfaces and gradient reflective metasurfaces was proposed. While demonstrating the metasurfaces' capability to modulate reflection phase and control electromagnetic wavefronts, these experiments enabled students to understand the fundamental working mechanism of metasurfaces for electromagnetic wave manipulation based on Huygens principle by employing the knowledge of electrodynamics, and to foster their basic scientific research skills such as numerical simulation, microwave far-field experiment operation, and data processing and analysis.

Key words: metasurfaces; generalized Snell's law; anomalous reflection; reflection phase; wavefront control

[编辑:任德香]