

自动焦度计中哈特曼光阑最佳孔径的确定

刘颖, 王劲松*, 李华建, 屈阿雪

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 在采用哈特曼法测量的自动对焦式焦度计中, 哈特曼光阑具有选择光线和决定测量分辨率的作用, 其孔径大小和孔间距直接影响 CCD 接收器上成像光斑质量从而导致光斑位置测量误差。根据哈特曼光阑上圆孔的排布方式建立了目标函数模型, 利用孔径光阑衍射干涉光学理论结合 Matlab 仿真确定了变量模型, 以枚举法作为极值搜寻方法, 完成了优化光阑圆孔最佳孔径的程序编制, 求得一定测量面积内哈特曼光阑最佳孔径, 并搭建基于哈特曼法测量镜片的实验平台, 通过对比实验证明了此方法求得的最佳孔径值的可靠性。

关键词 成像系统; 焦度计; 哈特曼光阑; 菲涅耳衍射; 最佳孔径

中图分类号 TB96; TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1011002

Determination of Optimal Aperture of Hartmann Diaphragm in Automatic Focimeter

Liu Ying, Wang Jinsong*, Li Huajian, Qu Axue

*School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract In an automatic focimeter that uses the Hartmann method for measurement, the Hartmann diaphragm can select light and determine the measurement resolution. Its aperture and hole spacing directly affect the quality of the imaging spots on the CCD, resulting in a measurement error in the spot position. In this paper, we established an objective function model according to the arrangement of circular holes on the Hartmann diaphragm and a variable model through the diffraction and interference theory and Matlab simulation. Then, taking the enumeration method for extremum search, we designed an optimization program for the optimal aperture of circular holes. As a result, the optimal aperture of the Hartmann diaphragm in a certain measurement area was obtained. Furthermore, we developed an experimental platform for lens measurement based on the Hartmann method. Comparative experimental results prove that this method can get reliable optimal apertures.

Key words imaging systems; focimeter; Hartmann diaphragm; Fresnel diffraction; optimal aperture

OCIS codes 110.3000; 230.1950; 050.1970; 110.1220

1 引言

自动焦度计是测量眼镜镜片、角膜接触镜片及装配眼镜最重要的计量仪器, 其具有误差小、操作简单、测量精确度高的特点^[1]。它不同于直视式、投影式焦度计, 测量时不需要手动对焦, 只要被测镜片的中心通过对准位置, 即可测得球镜度、柱镜度、散光

轴向、棱镜度等相关光学参数^[2]。目前, 焦度计的测量原理已从第二代抗干扰能力差、测量精度不高的单点测量发展到第三代稳定性好、测量结果准确的三点、四点、多点测量^[3-4]。如日本尼德克公司基于哈特曼光阑多点区域测量的自动焦度计, 颠覆了原来传统的测量原理, 将单点测量变为光学区域测量^[5]。由于实现了多点测量, 光路上即使存在一些障碍物对

收稿日期: 2020-11-04; 修回日期: 2020-12-07; 录用日期: 2020-12-16

基金项目: 吉林省重点科技研发项目(20180201025GX)

* E-mail: soldier_1973@163.com

测量结果影响也不大。对于该类型自动焦度计的哈特曼光阑最优孔径确定,工程上是利用 Zemax 光学仿真,多次尝试不同孔径大小、孔间距和孔的数量,去寻找最优值,这是相当费时费事的工程。基于此提出 Matlab 光学仿真优化变量结合枚举法寻找目标函数最优值的数学方法,可以快速确定哈特曼光阑的最优孔径,避免了以往冗余重复的操作。

2 基于哈特曼法的焦度计测量原理

自动焦度计基于哈特曼光阑测量镜片的测量原理图如图 1 所示。LED 作为光源经过准直物镜后变为平行光,平行光经待测镜片,再通过一个矩形阵列带孔哈特曼光阑后,由于待测镜片屈光度的不同,

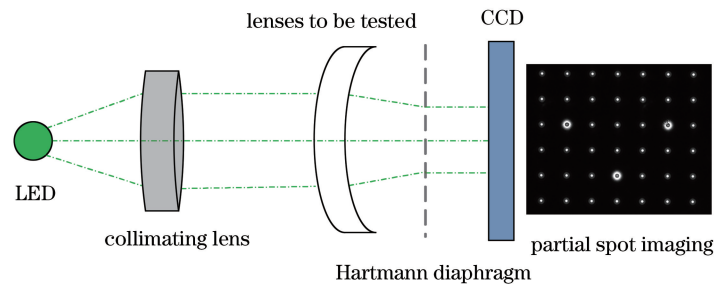


图 1 基于哈特曼法的焦度计测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of focal meter measurement based on Hartmann method

针对在哈特曼测量法原理中,哈特曼光阑选择光线并决定测量分辨率,在一定的测量面积中,由于光学衍射作用,随圆孔直径减小,衍射效应变大,光斑位置信息误差增大,如果减小衍射效应,孔间距就应变大,那么孔的数量就会减小,影响最终测量精度。故在哈特曼光阑上,孔径尺寸、孔间距和孔的数量是相互制约的,最佳孔径大小的确定即为哈特曼光阑优化设计问题。

3 确定哈特曼光阑最佳孔径的程序设计

3.1 基本思路

把哈特曼光阑最佳孔径问题抽象成为数学中的优化计算,主要思路为:建立一个目标函数其能准确描述哈特曼光阑孔径,并将描述哈特曼光阑的相关参数作为目标函数的变量,确定一个合适的算法改变变量,在变量的约束区间范围内找出一组值,使目标函数达到最优。从数学的角度来看,目标函数最优值就是一个极值求解问题,建立优化数学模型需要两个要素,即优化变量和目标函数^[9]。同时需找到适用于该模型的极值求解算法作为优化算法,通过编制优化程序将理论模型运用到实际应用中,实

光线会发生不同程度的偏折,在 CCD 成像面形成相应的位图,其所成像的大小、位置和形状都有可能发生变化。通过相关的数学运算与数字图像处理,可得到被测镜片的相关光学参数。无被测镜片时,光源穿过光阑投影在 $CCD(x_0, y_0)$ 处;有被测镜片时,投影移动到 (x, y) 处,若置入柱镜片,则其两个主顶焦度值不同,所成的像还会畸变为一个椭圆,通过计算待测镜片放置前后位图光斑的几何坐标位置移动量,就可计算出待测镜片球镜度,再通过计算椭圆长短轴变化的大小和方向就可得到柱镜度和散光轴向^[6-7]。如果获得 4 点的数据,就可确定待测镜片度数^[8]。如果光阑上有多个圆孔,可以得到镜片某区域内多点测量值就可提高测量结果的精确度。

现对哈特曼光阑的优化设计,使哈特曼光阑的性能达到最佳。

3.2 孔阵排列模型

哈特曼光阑是在已知矩形测量区域 S 内,由 5 个大圆孔和若干小圆孔构成,孔的排布如图 2 所示矩形分布,5 个大孔用于定位和计算,小孔是为了提高精度。放入远视镜时光线会聚,平行光穿过哈特曼光阑后所成的像均不能相交,放入近视镜即凹透镜时光线发散,需要尽可能多的圆孔能够清晰成像用于计算。大孔半径为小孔半径 r 的 2 倍,假设测量区域 S 内有 m 行 n 列圆孔,可得测量面积的高和宽为

$$\begin{cases} H = 2mr + (d - 2r)(m - 1) \\ W = 2nr + (d - 2r)(n - 1) \end{cases} \quad (1)$$

测量面积为

$$S = H \times W = 4mnr^2 + (d - 2r)[(2r + d)mn + (1 - n - m)d - 2r] \quad (2)$$

已知给定测量面积 S_0 。进而求得目标函数为

$$\Delta S = |S - S_0| = |4mnr^2 + (d - 2r)[(2r + d)mn + (1 - n - m)d - 2r] - S_0| \quad (3)$$

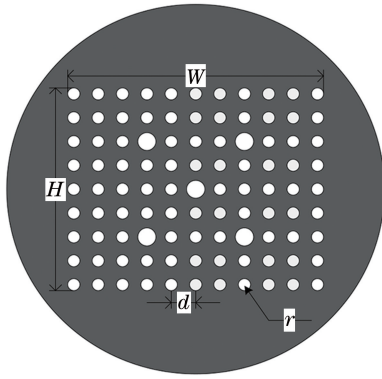


图 2 哈特曼光阑示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Hartmann diaphragm

3.3 优化变量的约束条件

3.3.1 圆孔半径 r

由于圆孔有一定的几何尺寸,并非为一点,所以光经过小孔后就形成了扩散的光束,落在接收屏上就形成了光斑而不是光点。圆孔光斑的边界锐利程度受光的衍射影响,每个孔传播到接收屏都是单一的圆孔衍射,决定了光斑的相对亮度。当圆孔直径过大时,光斑间发生相互重叠,就产生了像的失真。孔径越大,光斑越大,光斑间重叠越明显,像失真越严重;减小孔的半径,屏上将出现按直线传播计算出来的像,继续减小圆孔的半径,接收屏将出现明暗相间的圆形衍射光环。因此,光源经圆孔后成的像总存在着失真,而且失真度主要取决于圆孔的相对孔径的大小^[10-11]。故设计了圆孔衍射 Matlab 仿真程序,仿真出衍射效果图和归一化的光强波形,再根据光强波形的检测,得出圆孔孔径可用范围。

圆孔衍射原理图如图 3 所示,设孔径屏的直角坐标系为 (x_0, y_0) , 并且接收屏与孔径屏平行,两个屏的间距为 $z=20$ mm,接收屏的坐标系为 (x, y) ,用平行光入射中间开有圆孔的孔屏,发生菲涅耳衍射。在菲涅耳近似下,接收平面上的光场复振幅可以表示为^[12]

$$\tilde{E}(x, y) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \iint_{\Sigma} \tilde{E}(x_0, y_0) \times \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]\right\} dx_0 dy_0. \quad (4)$$

将(4)式展开并改写成傅里叶变换的形式,

$$\tilde{E}(x, y) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right] \times f\left\{\tilde{E}(x_0, y_0) \exp\left[\frac{ik}{2z}(x_0^2 + y_0^2)\right]\right\}. \quad (5)$$

孔径 r 的大小表示为

$$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}. \quad (6)$$

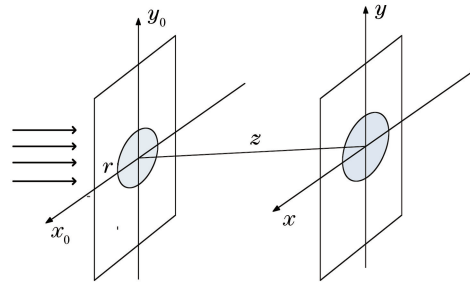


图 3 圆孔菲涅耳衍射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of circular aperture Fresnel diffraction

用 Matlab 模拟圆孔菲涅耳衍射,分别构造了表示孔径屏和接收屏的二维矩阵,取波长为 546 nm 的激光器^[13],在孔径屏和接收屏相距 $z=20$ mm 下,改变孔径的大小,可得出不同孔径下的衍射图样和光强归一化后的波形图如图 4 所示。 r 分别为 0.1, 0.2, 0.3 mm 可以得出光强归一化后的波形图,如图 5 所示,当孔半径较小时,中央亮条纹宽度较大,主极大位于 $x=0$ 处,只有一个波峰,衍射的相对光强较弱,亮纹间距较大。随着孔径的逐渐增加,亮条纹间距缩小,当孔径增加到一定程度时,主极大波峰开始分裂,随着孔径的进一步增加,主极大光强趋于稳定,亮纹间距进一步缩小,中间区域光强出现振荡,没有明显的波峰,而阴影区光强振荡大为减弱。故可以通过探测光强分布图的峰值轮廓,检测波形图的波峰,当且仅当只有一个主波峰可以满足要求时,模拟得出 $r < 0.3$ mm。

哈特曼光阑采用玻璃材质,国内激光打孔技术从 0.2 μm 到 1.5 mm 不等孔径,光源波长为 546 nm,那么孔的直径必须远大于波长,从一定测量面积综合考虑,圆孔半径 $r > 0.01$ mm^[14-15]。

对于圆孔半径 r 的变量区间为 $0.01 \text{ mm} < r < 0.3 \text{ mm}$ 。

3.3.2 孔间距 d

光束垂直射入双孔屏并在穿过这两个小孔后随机发生衍射,发出的衍射波是两组同频率同相位的球面波,在光射空间叠加后发生干涉,并在像屏上呈现出清晰的、明暗相间的条纹,如图 6 所示。

根据光学干涉原理,场点 P 的光强为

$$E(P) = \left(\frac{1}{r_1} \cos kr_1 + \frac{1}{r_2} \cos kr_2\right)^2 + \left(\frac{1}{r_1} \sin kr_1 + \frac{1}{r_2} \sin kr_2\right)^2. \quad (7)$$

用 Matlab 仿真(7)式,当 $z=20$ mm,波长为 546 nm, $d=0.5$ mm 时,干涉仿真图如图 7 所示。

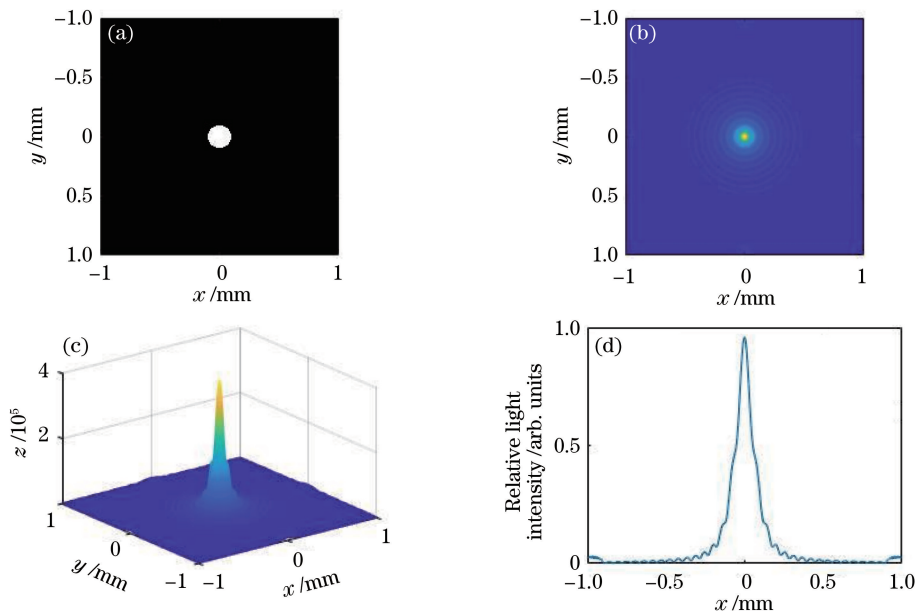


图 4 $r=0.1$ mm 的模拟仿真图。(a) 衍射屏;(b) 衍射后的图样;(c) 衍射图样的三维显示;(d) 衍射图样归一化光强分布
Fig. 4 Simulation diagram of $r=0.1$ mm. (a) Diffraction screen; (b) patterns after diffraction; (c) three-dimensional display of diffraction patterns; (d) normalized intensity distribution of diffraction patterns

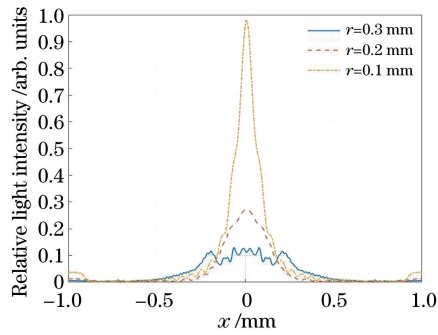


图 5 不同圆孔半径下的衍射图样归一化光强波形图
Fig. 5 Normalized light intensity waveforms of diffraction pattern under different circular hole radii

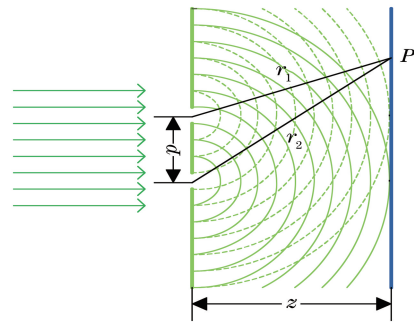


图 6 双孔干涉原理图
Fig. 6 Two-hole interference principle diagram

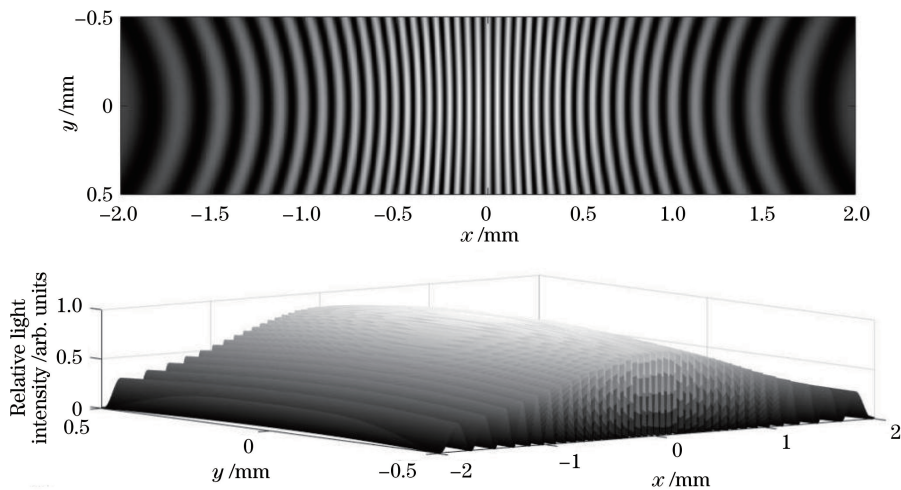


图 7 双孔干涉仿真图
Fig. 7 Two-hole interference simulation diagram

已知 λ 、 z 一定的条件下,增加双孔间距 d ,条纹间距 e 减小,具体数学关系为

$$e = \frac{\lambda \cdot z}{d} \quad (8)$$

若波长一定,屏间距一定,双孔间距越小,则干涉条纹间距越宽。 $z = 20 \text{ mm}$ 时波长为 546 nm 的曲线关系如图 8 所示。

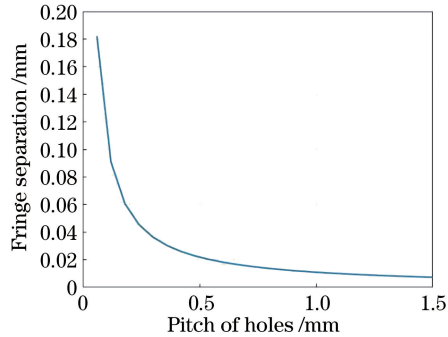


图 8 条纹间距与双孔间距关系图

Fig. 8 Relationship between stripe spacing and two-hole spacing

点光源经过哈特曼光阑的圆孔后,由于衍射的影响,所成的像不是一个点而是一个明暗相间的圆形光斑(爱里斑)。当两个相邻圆孔物点之间距离太短时,其像斑重叠在一起,就无法分辨出两个物点的像。根据瑞利判据可知:如果一个点光源的衍射图样的中央最亮处刚好与另一个点光源的衍射图像第一个最暗处相重合,则认为这两个点光源恰好能为这一光学仪器所分辨^[16]。瑞利判据公式为

$$\theta_R = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (9)$$

式中: λ 为入射光波长; D 为入瞳直径。

故此时,圆孔间距的最小值为

$$d_{\min} = z \cdot \theta_R \quad (10)$$

已知入瞳直径 $D = 26 \text{ mm}$,则相邻圆孔的最小间距 $d_{\min} = 512.4 \text{ nm}$,此时条纹间距 $e = 21.31 \text{ mm}$ 过大,故限定条纹间距 $e < 0.1 \text{ mm}$,得 $d > 0.11 \text{ mm}$ 。

3.3.3 孔数量 N

由自动焦度计定量计算式的研究可知,最少四个小孔的位置信息^[9]和一个中心定位孔共五个孔确定待测镜片的光学信息,所以 $N \geq 5$ 。

3.4 优化方法的选取

根据上文建立的目标函数和优化变量的数学模型,可将求解哈特曼光阑最佳孔径归结为非线性约束多维极值求解问题。目标函数是非解析函数,有可能存在不止一个极值点,这些极值不一定

是全局最小值^[17]。因此本文采取枚举法,利用计算机指令周期快、精确度高的特点,将问题所有可能出现的情况一一列举出来,逐个判断有哪些是符合问题所要求的条件,保留合适的,舍弃不合适的,从而得到问题的全部解答,问题求解的目标就是确定优化变量的值。Zemax 上可以使用 ZPL 语言实现枚举法优化,但由于枚举法是通过牺牲时间来换取结果的全面性,为了程序运行的效率,考虑使用专门的数学软件 Matlab 进行优化程序的编写,求出最佳孔径值、孔的数量和孔间距,再通过动态数据交换 (DDE) 服务器与 Zemax 通信,这样可以在确定的光路下改变哈特曼光阑参数来获得整个光路在 Zemax 上的仿真效果。将变量元素 r 、 d 、 m 和 n 在限定区间内的取值进行排列组合,计算每一种组合对应函数 ΔS 的值,从中选择出 ΔS 最小值对应的组合为最佳组合作为全局优化结果输出。当变量区域划分的精度越小、数量越大时,就越能找到全局中最佳变量组合。在前面建立的变量模型、目标函数模型的基础上,利用枚举法即可求出优化光阑孔径的最佳值,其流程如图 9 所示。

综合上节文中的分析,得出目标函数如(3)式所示,变量模型为

$$\begin{cases} 0.01 < r < 0.3 \\ d > 0.11 \\ N \geq 5 \end{cases} \quad (11)$$

变量元素 r 和 d 的区间划分精度为 0.01 mm ,以满足哈特曼光阑圆孔精度要求。当 $z = 20 \text{ mm}$,输入波长为 546 nm ,测量面积 $S_0 = 47 \text{ mm}^2$ 时,利用本文方法求得的哈特曼光阑最佳孔径值 $r = 0.2 \text{ mm}$, $d = 0.8 \text{ mm}$, $N = 81$ 。

4 实验结果分析

为了验证本文方法所得出的哈特曼光阑最佳孔径值是否可行,搭建了光学实验平台如图 10 所示,光强一定,固定好哈特曼光阑到 CCD 的距离 z ,相机采用大小为 $1/8''$ 、分辨率为 $2064 \text{ pixel} \times 1544 \text{ pixel}$ 的 CCD,更换不同参数值的哈特曼光阑,采集了三组哈特曼光阑成像图如图 11 所示。

成像质量的好坏影响后续光斑图像处理结果,进而直接影响光斑中心坐标测量的精度和稳定性^[18]。以中心大孔圆心为坐标中心,利用图像处理对这三组哈特曼光阑光斑图求取光斑中心坐标信息输出显示,并与实际圆孔坐标信息对比,相差

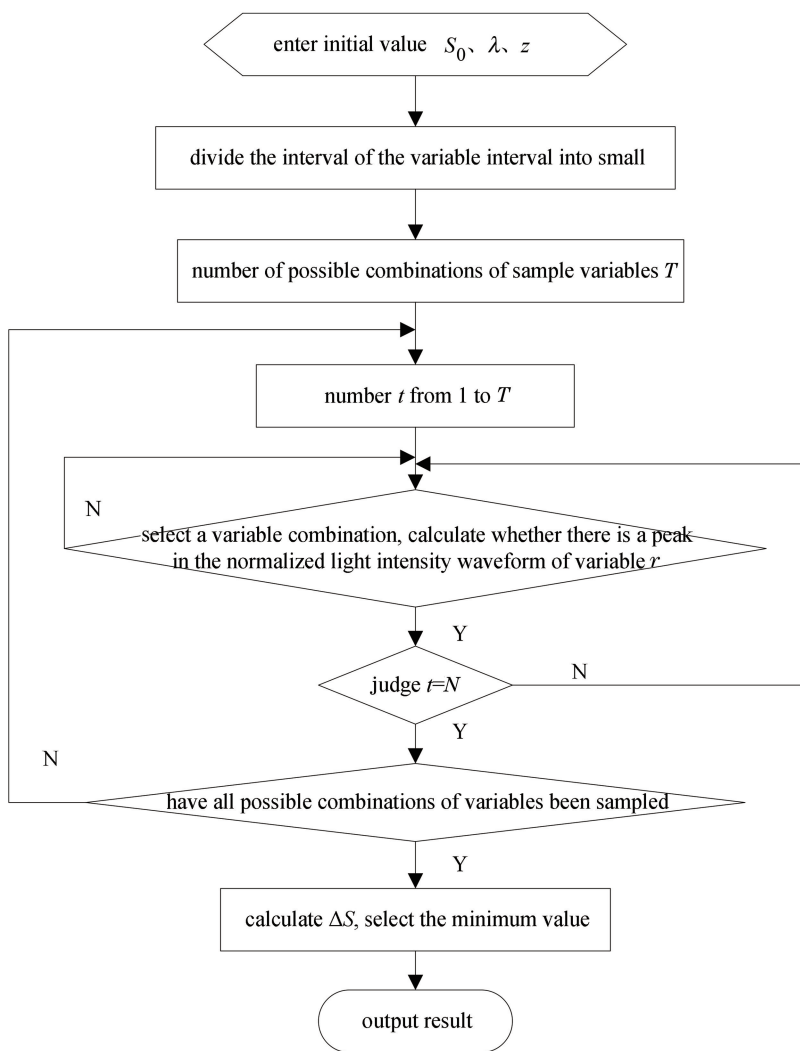


图 9 程序设计流程图

Fig. 9 Programming flowchart

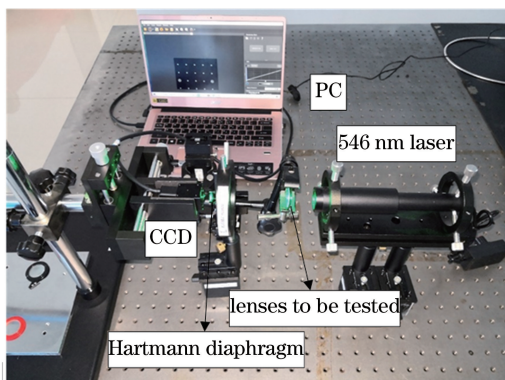


图 10 实验装置图

Fig. 10 Experimental setup

0.02 mm 之内则认为图像采取光斑坐标信息正确, 每组测量 10 次光斑坐标位置, 记录它们每次的正确量如表 1 所示, 求平均值得出光斑坐标位置的正确率, 即为光斑可用率, 通过比较每个哈特曼光阑的光斑可用率来评判哈特曼光阑的性能, 如表 2 所示。

表 1 哈特曼光阑成像光斑图坐标采集正确量

Table 1 Hartmann diaphragm imaging spot pattern coordinate acquisition correct amount

Number	(r, d, m, n)		
	$(0.2, 0.8, 9, 9)$	$(0.1, 0.75, 9, 11)$	$(0.04, 0.9, 7, 11)$
1	81	98	75
2	81	98	73
3	80	99	71
4	81	96	72
5	79	98	74
6	81	98	70
7	80	99	71
8	79	97	68
9	79	97	70
10	81	95	73

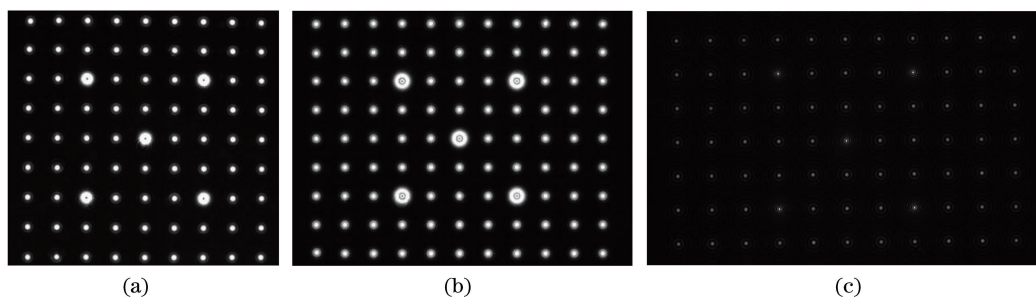


图 11 三组参数哈特曼光阑成像图。(a) $(r, d, m, n) = (0.2, 0.8, 9, 9)$; (b) $(r, d, m, n) = (0.1, 0.75, 9, 11)$;
(c) $(r, d, m, n) = (0.04, 0.9, 7, 11)$

Fig. 11 Three sets of parameters Hartmann diaphragm imaging diagram. (a) $(r, d, m, n) = (0.2, 0.8, 9, 9)$;
(b) $(r, d, m, n) = (0.1, 0.75, 9, 11)$; (c) $(r, d, m, n) = (0.04, 0.9, 7, 11)$

表 2 哈特曼光阑光斑可用率

Table 2 Hartmann diaphragm spot availability

(r, d, m, n)	Number of spots N	Average number of identifiable light spots	Spot availability / %
$(0.2, 0.8, 9, 9)$	81	80	98.77
$(0.1, 0.75, 9, 11)$	99	97	97.98
$(0.04, 0.9, 7, 11)$	77	71	92.21

由表 2 可以看出,当 $r=0.2 \text{ mm}$, $d=0.8 \text{ mm}$, $N=81$ 时,光斑可用率最高,并成像质量优于其余两种,镜片测量精度更高,实物图如图 12 所示。因此利用本文方法计算自动焦度计中哈特曼光阑最佳孔径值是可行的。

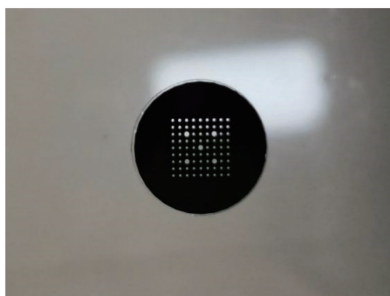


图 12 当 $r=0.2 \text{ mm}$, $d=0.8 \text{ mm}$ 时,哈特曼光阑实物图

Fig. 12 Actual picture of Hartmann diaphragm when $r=0.2 \text{ mm}$ and $d=0.8 \text{ mm}$

5 结 论

针对哈特曼多点区域测量法中的哈特曼光阑在 Zemax 中优化并不能直接给出最佳孔径值,而是在设计的基础上调整孔径值、孔间距和孔的数量,多次尝试比较不同参数的成像效果来判断最优组合等问题。本文通过理论分析提出了哈特曼光阑最佳孔径的优化设计方法。基于光学区域测量法,建立哈特曼光阑上圆孔分布的模型,确定变量和目标函数的

数学模型,从优化成像效果的角度去约束变量区间来求解目标函数最优值,选取枚举法作为极值搜寻的方法,基于 Matlab 编写优化程序并得出在一定的测量面积内的哈特曼光阑的最佳孔径,再通过 Zemax 搭建整个光路看成像效果来达到检验的目的。此方法相较于单一使用 Zemax 优化要方便快捷一些,因为通过 Matlab 实现枚举法代替了手动修改寻找最优值的过程,明显提高了设计效率。通过理论模拟和实验验证证明了此方法求得的光阑最佳孔径尺寸的可靠性。此方法还可以应用到逆向哈特曼面形测量法中光阑设计和用于设计改善波前质量的多孔板中,具有一定的通用性。

参 考 文 献

- [1] Zhang Y. Analysis and adjustment of the display error of the vertex power of the automatic focal meter [J]. Technology Innovation and Application, 2014 (14): 297.
张颖. 自动焦度计顶焦度示值误差分析及调校 [J]. 科技创新与应用, 2014(14): 297.
- [2] NIDEK. Technological innovation of focal meter [J]. China Glasses Science-Technology Magazine, 2006 (3): 114-115.
日本尼德克公司. 焦度计的技术革新 [J]. 中国眼镜科技杂志, 2006(3): 114-115.
- [3] Yang B S, Liao H Y. Automatic measuring method of eyeglass lens power [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2006, 29(10): 65-68.
杨并上, 廖海洋. 眼镜度数全自动测量方法 [J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(10): 65-68.
- [4] Hong B Y, Liu W L, Ma Z Y, et al. Research on measuring principle of four-beam automatic focalmeter [J]. Measurement Technique, 2009(11): 29-31.

- 洪宝玉, 刘文丽, 马振亚, 等. 四光束自动焦度计测量原理研究[J]. 计量技术, 2009(11): 29-31.
- [5] Xie Y Y, Li X N. Technology development of focal meter[J]. China Science and Technology Information, 2014(21): 29.
- 谢银月, 李湘宁. 焦度计的技术发展[J]. 中国科技信息, 2014(21): 29.
- [6] Cui L F. Design of automatic focal meter optical image system based on CCD 16-point mathematical model[J]. Electronic Component & Device Applications, 2011, 13(9): 38-40.
- 崔亮飞. 基于 CCD16 点数学模型的全自动焦度计光学图像系统的设计[J]. 电子元器件应用, 2011, 13(9): 38-40.
- [7] He X Q. Automatic measurement focimeter based on image processing [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009: 40-42.
- 何小群. 基于图像处理技术的自动焦度测量方法[D]. 重庆: 重庆大学, 2009: 40-42.
- [8] Xie Y Y, Li X N. Quantitative formula for automatic focimeter[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2013, 35(2): 161-164.
- 谢银月, 李湘宁. 自动焦度计定量计算式的研究[J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(2): 161-164.
- [9] Jin N, Yang K Y, Cao L, et al. Optimization design for the shapes of cold shield in infrared systems[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(1): 0111005.
- 金宁, 杨开宇, 曹凌, 等. 红外系统冷屏形状的优化设计[J]. 光学学报, 2016, 36(1): 0111005.
- [10] Chai X D, Wei S. Numerical computation and numerical reconstruction of optical fields distributing for Fresnel diffraction [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2003, 20(4): 435-438.
- 柴晓冬, 韦穗. 菲涅耳衍射光场分布的数值计算与数字重构[J]. 量子电子学报, 2003, 20(4): 435-438.
- [11] Zhang Y J. Analyzing the axial intensity of plane waves diffracted nonparaxially by a small circular aperture[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(12): 1917-1920.
- 张耀举. 平面波经小圆孔非傍轴衍射的轴上光强解析分析[J]. 光子学报, 2006, 35(12): 1917-1920.
- [12] Wang A L, Liu F P. Field distribution and simulation of several optical diffraction holes with different shapes [J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2019, 27(7): 107-110.
- 王安玲, 刘福平. 几种不同形状光学衍射孔的场分布及其仿真模拟[J]. 北京印刷学院学报, 2019, 27(7): 107-110.
- [13] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Verification regulation of focimeters JJG 580—2005 [S]. Beijing: Metrology Publishing House, 2006.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 焦度计检定规程 JJG 580—2005[S]. 北京: 中国计量出版社, 2006.
- [14] Pang J W, Wang C, Cai Y K. Research progress of laser processing technology for glass materials[J/OL]. Laser Technology: 1-19 [2020-10-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20200930.1350.002.html>.
- 庞继伟, 王超, 蔡玉奎. 玻璃材料激光加工技术的研究进展 [J/OL]. 激光技术: 1-19 [2020-10-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20200930.1350.002.html>.
- [15] Hu X D, Li Y L, Bai S Z, et al. Research progress of laser application in material removal processing [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500008.
- 胡晓冬, 李元龙, 白少状, 等. 激光在材料去除加工中应用的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500008.
- [16] Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics[M]. Beijing: China Machinery Industry Press, 2006: 193-195.
- 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 193-195.
- [17] Yang K Y, Jin N, Cao L, et al. Optimization design of stop aperture shape for uncooled infrared detector [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0811002.
- 杨开宇, 金宁, 曹凌, 等. 非制冷红外探测器光阑开孔的优化设计 [J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0811002.
- [18] Peimbert D P S, Schiaffino G T, Silva J A G, et al. Simple Hartmann test data interpretation for ophthalmic lenses [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(4): 043102.