

像差对复眼透镜光束整形性能的影响分析

贾文武 汪岳峰 黄峰 赵诚 侯军燕

(军械工程学院光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要 复眼透镜在均匀照明中应用广泛,但是在大像差系统中其均匀性和能量利用率等性能会大大下降。通过对复眼透镜光束整形系统的成像假设,将其分解为若干子成像系统的组合,并讨论了像差及其表现对整形性能的影响。认为在像差表现中边缘点扩散、像面畸变、子孔径成像位置偏离对复眼透镜整形性能影响较大,而内部点扩散在一定程度上能够提高其整形性能。通过具体实例,控制对复眼透镜性能影响较大的像差表现而放宽影响较小的像差表现,优化设计以两个普通球面镜而不是通常采用的傅里叶透镜作为积分透镜的大像差复眼透镜整形系统,验证了该成像分析方法及其结果的有效性。

关键词 几何光学;照明光学;像差;复眼透镜;均匀照明

中图分类号 O435.2

OCIS 080.0080 080.4298

文献标识码 A

Effects of Aberration on Performance of Fly's Eye Integrator

Jia Wenwu Wang Yuefeng Huang Feng Zhao Cheng Hou Junyan

(Department of Optics and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College,

Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

Abstract The fly's eye integrator is widely applied in homogeneous illuminance, but its performance decreases dramatically when the aberration of the system is large. In order to study the effects of aberration, the fly's eye integrator is supposed to be composed by some certain sub-imaging-systems. The point diagram of grim point, distortion and the departure of sub-image location caused by aberration can influence the performance of fly's eye integrator seriously, but the point diagram of inner points can improve the performance to some extent. At last, an example, which optimizes a fly's eye integrator made up of two ordinary lens rather than Fourier lens by limiting the derivative of aberration, is given and validates the effectiveness of the imaging analysis and its result.

Key words geometric optics; illuminance optics; aberration; fly's eye lens; homogeneous illuminance

1 引言

在平板印刷,半导体激光抽运固体激光器微显示器及透镜等需要均匀照明的场合中,复眼透镜以其较高的均匀性和能量利用率获得了广泛的应用^[1~4]。和方棒照明系统相比,复眼透镜照明系统具有更加紧凑的系统结构^[5]。但是如果要进一步获得更加紧凑的系统结构或者较小的照明光斑,需要复眼透镜整形系统的积分透镜在相同的孔径下具有更短的焦距;同时,对于具有较大发散角的非准直光源往往需要复眼透镜具有较大的数值孔径。在这两种情况下光学系统都有较大的像差,将极大影响复眼透镜的照明均匀性和能量利用率。B. V. Giel等^[6,7]在复眼透镜整形系统中采用对像差严格校正的傅里叶透镜作为积分透镜在一定程度上回避像差的影响,并获得了较好的效果。但是傅里叶透镜制作难度大,价格昂贵,不利于降低系统的成本。如果研究影响复眼透镜整形性能的因素,在设计过程中限制对整形性能影响较大的影响因素而放宽对性能影响较小的因素,则有可能通过普通的球面镜实现较好的整形性能,而不必采用昂贵的傅里叶透镜。本文通过成像分析,将照明光学问题转化为成像问题,讨论了像差及其表现对复眼透镜整形性能的影响。并在

收稿日期: 2010-06-04; 收到修改稿日期: 2010-07-17

作者简介: 贾文武(1984—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计和光束整形等方面的研究。

E-mail: jww4891@163.com

导师简介: 汪岳峰(1963—),男,博士,教授,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: wyfmail@sina.com

此基础上给出了大像差复眼透镜光束整形系统的设计实例,验证了该成像分析及其结论的有效性。

2 复眼透镜光束匀化原理及成像分析

图 1(a)为一维复眼透镜,如果将两个一维复眼透镜交叉排列则能够实现二维复眼透镜的功能。在整形过程中,如图 1(b)所示,复眼透镜光束整形系统由双排微透镜阵列和积分透镜组成。两组微透镜阵列前后平行放置且间距为子透镜的焦距,子透镜之间相互对准形成子透镜对。第一组微透镜阵列中的子透镜将入射光束分割为子光束并聚焦到第二组微透镜阵列上,第二组微透镜阵列中的子透镜和积分透镜共同将对应的子光束重合在积分透镜的焦面上。由于第一排微透镜阵列将光源的整个宽光束分为多个细光束,每个细光束范围内的微小不均匀性将在重合的过程中被平滑从而获得均匀照明^[8~10]。

如图 1(c)所示,当入射光不是平行光时,不同入射角的光线通过第一组微透镜阵列被聚焦于第二组微透镜阵列的相应子透镜的不同高度处。此时第二组微透镜通过第一组子透镜的中心光线偏折为平行光轴射出,从而保证其他入射角的光线仍然能够在积分透镜的焦面上重合,使非准直光束仍然能够在焦面上重合。但是如果光线的入射角过大,使光线聚焦点超出对应子透镜的孔径范围进入相邻的子透镜孔径,其光束将偏离重合区域而形成旁瓣,降低了光源的能量利用率。对于具有一定发散角的光源来讲,子透镜的数值孔径需要足够大才能接收到来自光源的所有光线。

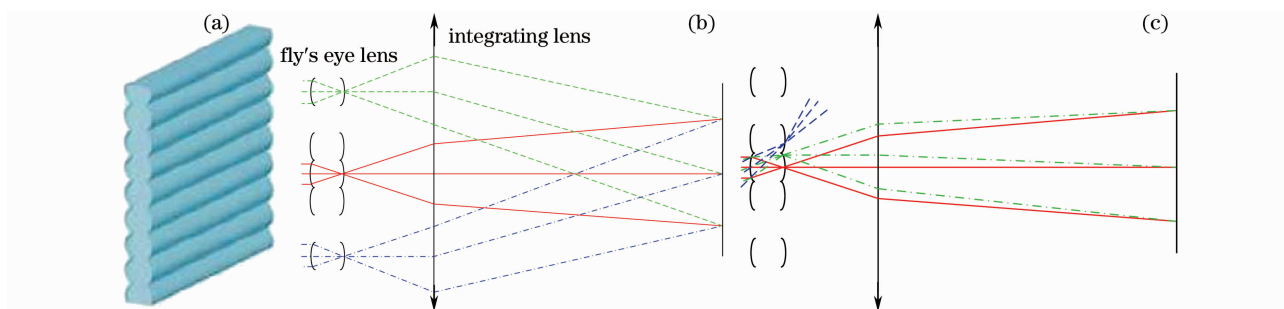


图 1 复眼透镜光束整形系统示意图

Fig. 1 Sketch of fly's eye beam shaping system

随着复眼透镜子透镜的数值孔径增大,像差对其整形效果的影响变得明显起来。为了分析像差对其整形结果的影响,需要将复眼透镜整形系统进行成像分析。如图 2 所示,由于复眼透镜的子透镜孔径将光源分割为多个子光束,因此认为通过子透镜孔径上任一点的光线为该点发出的光线,那么可以将子透镜的孔径作为成像系统的虚拟物,虚拟物的光分布和光源在该孔径上的分布一致。而该子透镜对和积分透镜作为成像透镜组将该虚拟物成像在积分透镜的焦面上。复眼透镜中的每个子透镜对均和积分透镜构成一个子成像系统,并将子口径成像在积分透镜的焦面上。由于所有的子成像系统共用一个积分透镜,所以这些像能够在其焦面上重合而获得均匀的光分布。通过该成像假设就可以分析像差对复眼透镜光束整形性能的影响。

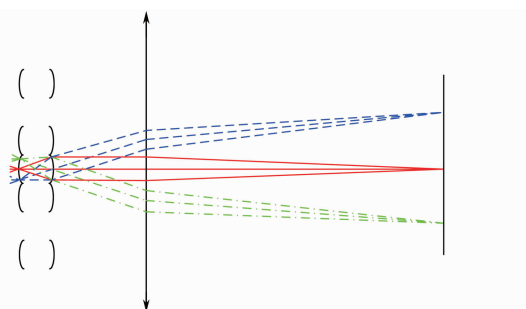


图 2 复眼透镜整形系统的成像分析

Fig. 2 Imaging analysis of fly's eye lens beam shaping system

3 像差对复眼透镜光束整形性能的影响

假设入射光源为单色光(如面阵半导体激光),暂不考虑色差的影响。一般来说单色像差对单个成像系统的影响可以粗略分为两类:1)对单个物点的影响即点扩散(包括大小和形状);2)对像面上点和点之间的位置关系的影响即畸变。

在初级像差中球差、彗差、像散都表现为对像点的弥散斑的大小和形状的影响;场曲使像点位置偏离像

平面,虽然也是对点和点之间的位置关系,但是在像面上其表现为点的扩散;而像面上点和点之间的位置关系通常是由畸变引起的。同时根据我们对复眼透镜的成像假设,复眼透镜光束整形系统由若干子成像系统组成,因此像差也会影响到子孔径之间的成像位置关系。首先讨论单个子成像系统中点扩散和像面畸变对复眼透镜整形性能的影响。

3.1 点扩散对复眼透镜整形性能的影响

对于成像系统,点扩散影响成像的清晰度和能量集中度。但是对于照明系统,它只关心目标区域内的光能量分布和总能量大小,因此在一定情况下能够容忍较大的弥散斑半径。对于子孔径中的内部点其成像后仍然位于像的内部,只要其弥散光斑不扩散至孔径像的外部,其光能量仍然局限在像面内。因此内部点的弥散斑不造成系统能量利用率下降。而对于光能量分布,点扩散使像面上一点的光分布受周围点的共同影响,因此对光源中高频成分进行了平滑(对应成像就是成像模糊),在一定程度上提高了整形结果的均匀性。

但是对于子孔径边缘点情况有所不同。边缘点成像后位于像的边缘,因此子孔径边界线上的点扩散必然导致子孔径像的边缘锐度下降,使部分能量逸出照明区域外,降低了系统的能量利用率。因此,像差引起的点扩散中,内部点和外部点对复眼透镜整形效果的影响是不同的。在设计中可以适当增加内部点的弥散斑大小,而减小边缘点的弥散斑大小。

3.2 畸变对复眼透镜照明的影响

光学系统的像差不仅会造成点扩散也会造成像面畸变。像面畸变对复眼透镜光束整形的影响也分为两种情况。首先考虑单个子成像系统所成的像。如图3所示,桶形畸变的存在使预定照明区域的4个角未能获得照射,而枕形畸变的存在使照明光斑在4个角上超出预定的照明区域,从而造成能量利用率的下降。

而畸变对复眼透镜的照明影响更严重的是造成均匀性的下降。在物面上的发光点本来是等间距分布的,但是畸变发生后,在像面上这些等间距的点发生变化,部分点之间的间距缩小了,从而造成光能量在此范围内集中。对于单个子像来看,由于光源本身是非均匀的,因此影响并不明显。但是,由于所有的子成像系统均共享了积分透镜,因此这种畸变造成的间距分布变化具有极大的相关性。这就会使子像面叠加后,在间距缩小的区域内叠加的光能量增大,而间距增大的区域叠加的光能量减小,使本来叠加后应该为均匀的光分布变得不均匀。

需要指出的是,在通常的光学系统中,畸变是比较小的其影响可以忽略。但是在进行复眼透镜优化过程中,若不对子成像系统的畸变进行控制,就可能会使系统的畸变增大,从而使均匀性下降。图4显示了未对畸变进行限制的结果。其中图4(a)为中心子成像系统的网格畸变,图4(b)为整形后的光分布图,可看出在畸变较大的位置处光强度增大,从而造成整形光斑光强度分布的不均匀。

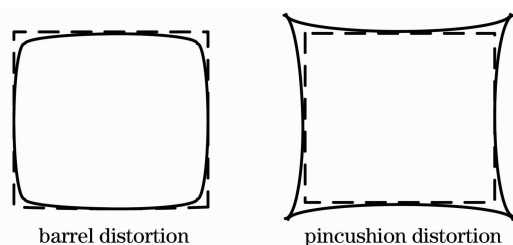


图3 畸变与照明区域的关系

Fig. 3 Relationship between distortion and illuminance area

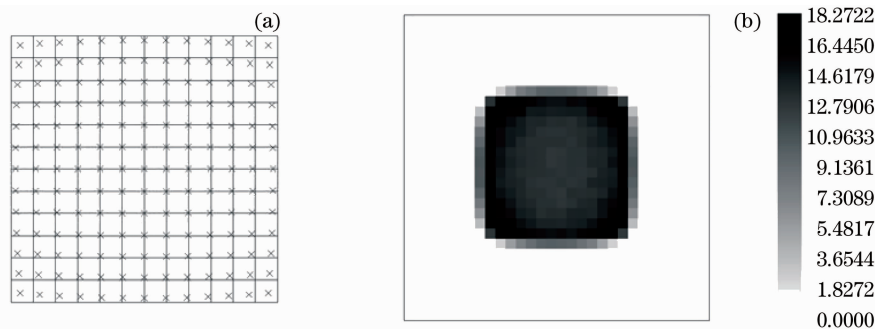


图4 畸变与光分布的关系。(a)中心子成像系统的网格畸变,(b)整形结果光强度分布

Fig. 4 Relationship between distortion and illuminance distribution. (a) grid distortion of the center sub-imaging-system, (b) illuminance distribution

3.3 子孔径成像位置偏离对复眼透镜照明的影响

单个子成像系统中像差表现对复眼透镜光束整形系统的影响。但是复眼透镜的光束整形主要是靠对光源光束进行切割并在像面上叠加,从而获得均匀的照明光斑。即使每个子成像系统所成的像具有较小的边缘点扩散光斑,较小的畸变,但是如果在对像进行叠加的过程中,各个子像之间出现叠加位置误差即子孔径成像位置偏离理想位置,将会使照明区域的边缘锐度下降,降低复眼透镜光束整形系统的能量利用率。

如图5所示,即使每个子像都是均匀分布的,但是在叠加过程中,两个像面叠加的位置不重合,将会使有效照明面积下降,边缘出现梯度。多个像面叠加时,则表现为边缘锐度的下降。

由于复眼透镜中的子透镜一般来讲是一致的,因此不同子孔径的成像位置偏离理想成像位置主要是由积分透镜的像差引起的。

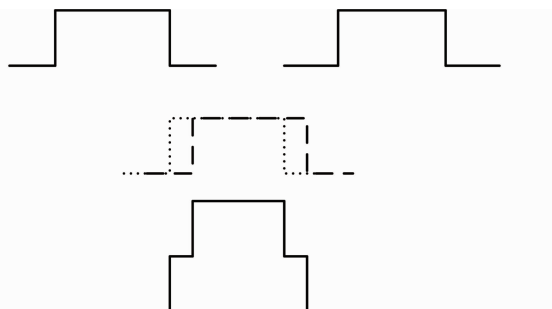


图5 叠加位置误差造成边缘梯度
Fig. 5 Gradient in edge caused by location error

4 复眼透镜成像分析的应用

在大像差的复眼透镜光束整形系统中,像差影响了单个子系统的成像和像的叠加,从而导致整形光斑的不均匀分布和能量利用率的降低。但是分析表明并不是像差的所有影响都会引起复眼透镜整形系统的性能下降。因此可以通过控制引起系统性能下降的像差表现而放宽对系统性能影响较小的像差表现,则有可能不采用傅里叶透镜而获得较好的性能,从而降低整形系统的难度和成本。

根据上述基本思路,优化设计了一复眼透镜光束整形系统。输入光源为一个6组的半导体激光器堆栈,间距为1.8 mm,快轴方向发散角预准直至 2° ,慢轴方向发散角为 8° ;复眼透镜口径为 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$,间距为0.5 mm,子透镜的接收角为 $\pm 5^\circ$;设计目标为获得一个 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的均匀照明光斑。因此积分透镜的口径为22 mm,近轴计算积分透镜的焦距约为17 mm,可见此时积分透镜的像差必然会很大。

采用两球面透镜而不是通常的傅里叶透镜作为积分透镜进行优化。图6(a),7(a)分别为通过近轴计算得

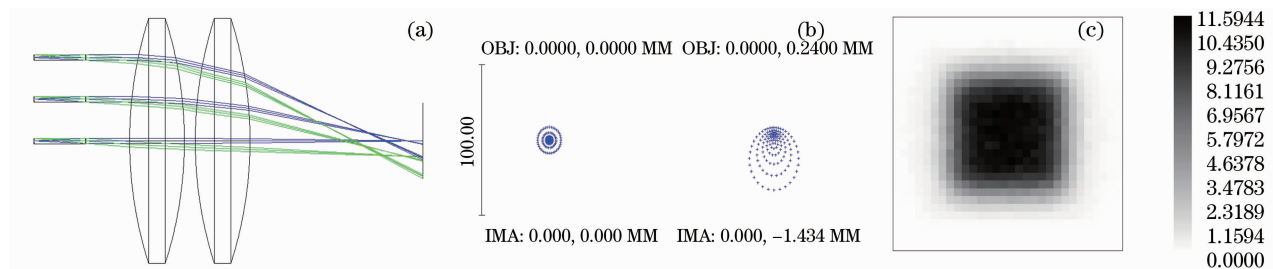


图6 初始系统。(a)初始系统结构,(b)中心点和边缘点点列图,(c)整形结果

Fig. 6 Original fly's eye lens integrator. (a) original form, (b) point diagram of center point and grim point, (c) shaping result

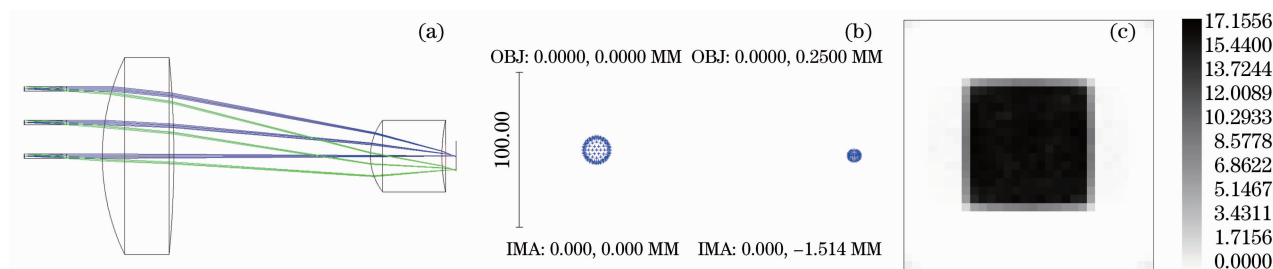


图7 优化系统。(a)优化后系统结构,(b)中心点和边缘点点列图,(c)整形结果

Fig. 7 Optimized fly's eye lens integrator. (a) optimized form, (b) point diagram of center point and grim point, (c) shaping result

得到的初始系统结构图和优化后的系统结构图。从两图对比可以看出优化后各个子孔径的像重合度大大提高,基本上成像在同一位置。图 6(b),7(b)分别为优化前和优化后中心子成像系统的点列图。优化后内部点的弥散斑半径大于边缘点半径,但是并不影响整形性能。图 6(c),7(c)分别为优化前和优化后蒙特卡罗模拟的照明光斑强度分布。优化后照明光斑更加均匀,边缘锐度更好。

5 结 论

通过对复眼透镜光束整形系统的成像假设,分析了像差对复眼透镜性能的影响。对单个子成像系统,将像差对子孔径像的影响分为对单个物点的点扩散和对像面上点与点之间的位置畸变两种像差表现。分析表明,边缘点扩散会造成光能量逸出照明区域使能量利用率下降,而内部点的扩散不会造成能量利用率下降,且能够平滑光源中的高频成分在一定程度增加系统的均匀性。畸变一方面造成能量利用率的下降,另一方面由于各子系统之间具有相关性使照明光斑光能量分布不均匀。其次子孔径成像位置偏离理想位置将造成叠加后整形光斑边缘锐度下降,降低能量利用率。采用两普通球面镜而不是通常采用的傅里叶透镜作为积分透镜优化设计了复眼透镜的整形系统,在降低系统的难度和成本的同时提高了系统的均匀性和能量利用率,验证该成像分析方法及其结论的有效性。

参 考 文 献

- 1 F. M. Dickey, S. C. Holswade. Laser Beam Shaping Theory and Techniques[M]. New York: Marcel Dekker, 2000, 271~311
- 2 Wang Wei, Zhou Changhe. New technology for fabrication of polymer microlens arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2869~2872
王 伟, 周常河. 一种新型聚合物微透镜阵列的制造技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2869~2872
- 3 Liu Desen, Hu Jianming, Liu Wei. Studies on the optical properties of planar intersect microlens arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 743~748
刘德森, 胡建明, 刘 炜. 平面交叉型微透镜阵列的制作及成像特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 743~748
- 4 Dou Rensheng, Lin Hai, Hu Jicheng. Programmable lens and lenslet array by operating a liquid crystal device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 959~964
窦任生, 林 海, 胡继承. 控制液晶器件产生的程控透镜和微透镜阵列[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 959~964
- 5 B. Köhler, A. Noeske, T. Kindervater *et al.*. 11 kW direct diode laser system with homogenized 55×20 mm² Top-Hat intensity distribution[C]. *SPIE*, 2007, **6456**: 645600
- 6 B. V. Giel, Y. Meuret, H. Thienpont. Using a fly's eye integrator in efficient illumination engines with multiple light-emitting diode light sources[J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(4): 043001
- 7 P. Schreiber, S. Kudaev, P. Dannberg *et al.*. Homogeneous LED-illumination using microlens arrays[C]. *SPIE*, 2005, **5942**: 59420K
- 8 F. C. Wippermann, U. D. Zeitner, P. Dannberg *et al.*. Fly's eye condenser based on chirped microlens arrays[C]. *SPIE*, 2007, **6663**: 666309
- 9 M. Zimmermann, N. Lindlein, R. Voelkel *et al.*. Microlens laser beam homogenizer-from theory to application[C]. *SPIE*, 2007, **6663**: 666302
- 10 P. Schreiber, P. Dannberg, B. Hofer. Chirped microlens arrays for diode laser circularization and beam expansion[C]. *SPIE*, 2005, **5876**: 58760K