

一种均匀准直 LED 光源系统的设计

罗一丹^{1,2}

(1 中国科学院力学研究所 北京 100080; 2 中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 设计了一种新型的采用 LED 作光源的仪器光源系统,使之符合一些光学仪器采用平行光照明、光束截面光强均匀的要求。运用波前重组的光波均匀方法,将 LED 光源发光整形为光强均匀的光斑;通过控制出射光线的高度,设计并优化准直光路。软件模拟和实际测量的结果表明,该光源系统出射光束发散角小于 1.5 度,指定区域内光强均匀度大于 90%,光束准直度、均匀度都很高,并且结构简单紧凑,使仪器向小型化方向发展成为可能。

关键词: 发光二极管; 仪器光源系统; 准直光路; 光强均匀; 波前重组

Design of uniform collimated LED light system

Luo Yidan

(1 Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: A novel LED light system was designed to provide a uniform expanded collimated probe beam. The method of wavefront reorganization was used to convert the light beam of LED into a uniform spot. By controlling the height of parallel light rays, the collimating lens was designed and optimized. The simulation and experiment results show that the divergence angle of the collimated beam is less than 1.5°, and the intensity uniformity is better than 90%. Thus the LED light system can be used in optical instruments which require highly uniform parallel probe beam. Meanwhile, the light system is compact in structure and has the advantage of miniaturization of the instrument.

Key words: LED; light system; collimated beam; intensity uniformity; wavefront reorganization.

1 引言

随着近年来发光二极管(LED)光效的不断提高和大功率 LED 的开发,LED 的应用领域也在不断扩展,已开始被应用于仪器光源。它体积小、结构简单、价格低,在仪器的小型化和集成化方面具有很大优势。但是,LED 的发散角大,光强呈大致的余弦分布,通常被认为是近似的朗伯光源,这样的光场分布,如果不经过合适的光学系统处理而直接应用,在大多数情况下都难以满足仪器照明系统所需要达到的性能指标^[1]。

尤其是在很多光学系统中,如太阳仿真器的照明系统^[2]、可用于农作物培养的生物光源^[3]、缺陷检测仪器^[4]等,需要采用扩展的平行光照明待测面,不仅要求被照面

上有一定的光照强度,还对准直光束截面的光强均匀性要求很高,一般要求均匀度在 90% 以上。而对于平行光照明系统,无法采用被照面和聚光镜的出瞳重合或共轭照明的方法改善光束均匀度。而且,LED 的芯片表面有金属电极的接触面,对光发射有一定干扰,通过凸透镜直接准直或取其部分光准直,即采用扩束或空间滤波的均匀方法时,会产生中央暗斑,凸显其芯片表面的不均匀性。

因此,在采用 LED 作为这类仪器的光源时,需要提出可用于 LED 的均匀、准直方法,针对 LED 进行光学系统的设计。本文采用了一种波前重组的光波均匀方法,使 LED 光源发光转变为光强均匀的光斑,再通过光学设计软件优化准直光路,得到了光强分布均匀、准直度高、结构简单的平行光照明系统。

2 波前重组的光波均匀方法

根据波动理论,光波从波源向一定方向传播,在某一时刻,波所到达的空间内,具有同位相的各点所组成的面称为波阵面。离波源最远即最前面的波阵面称为波前。根据波前的不同,可以将波动分为不同的形式,如波前为平面的是平面波,波前为球面的是球面波。我们需要得到的均匀平行光在理想情况下是均匀平面波,波的幅度在整个空间是常数,且等相位面是平行平面。它可以通过理想点光源发出的球面波经理想凸透镜变换后得到。

但是,由普通的发光二极管在近距离得到的光波,波的幅度并不均匀,波前既不是平面也不是球面,其幅度在中心轴线附近最强,离开轴线越远光场越弱,类似图 1 左图所示。波前重组的光波均匀方法的原理就是将光波分离为多个波前,并按一定的要求进行排列,使强度分布曲线中高低部分对应叠加,合成后的强度分布在一定范围内^[5]。合成波的中部光强比较均匀,可近似看作均匀发光点,再由准直透镜将其波前变换为近似平面波,如图 1 所示。

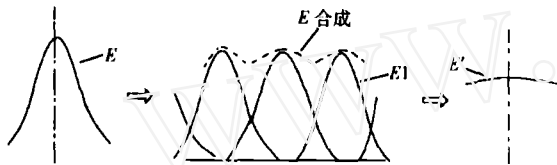


图 1 波前重组的光波均匀方法原理

这种波前重组的均匀方法的特点是有一个能使光源分解,并按一定规律排列的光学部件,这种部件目前主要有透镜式、多反射镜式和多棱体式 3 种。前两种方法均需要光学组合元件来完成,需要多个透镜或反射镜组合成阵列形式,结构较为复杂;而采用多棱体式的方法结构简单,造价低,均匀性也很好。下面以多面棱体(匀光棒)方法为例,说明这种光波均匀方法。

2.1 系统组成及匀光棒原理

如图 2 所示,系统主要由 LED 光源,透镜组,匀光棒,光阑和准直透镜组成。光源被透镜组会聚成一个具有一定大小的光斑。由于 LED 光源的发散角很大,透镜应具有较小的焦距和较大的相对孔径,以收集更多的光能,缩短结构尺寸。光斑中心光强很高,但光强分布不均,在此处加匀光棒,光线进入光棒经过多次反射,最后在后端面重合,得到一个较为均匀的输出,通过光阑后,由准直透镜将光束平行出射。

匀光棒可以是多边形玻璃柱体,也可以是内壁为反射面的中空体。入射到光棒内壁的光线会经过一次或多次反射,从入射面上实际光点发出的光线经过反射后,在

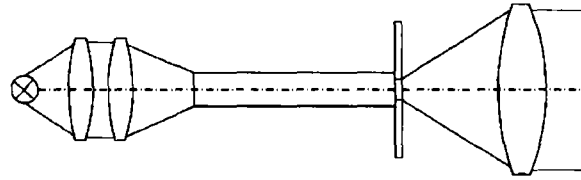


图 2 光棒均匀的平行照明系统

几何上可以看作是从一个虚光点发出的光线^[6]。例如,在图 3 中,从入射面上点 A 发出的光线经反射后的 BC 段,等同于从 A₁ 发出的光线 A₁C,并且 A 与 A₁ 相对于反射面对称。这样入射面上每个光点经同一次反射所对应的虚光点组成了与入射光斑类似的虚光源。随着反射次数的增多,虚光源的个数也增多,并对称分布,即光棒起到了将入射光波的波前分割的作用。经过不同的路线,多列波传播最后均在后端面重合,光波又叠加起来。光棒输出面上的每个点都将得到来自光源的不同角度照射,入射面的光能量被重新分布,输出面的光强分布较为均匀。

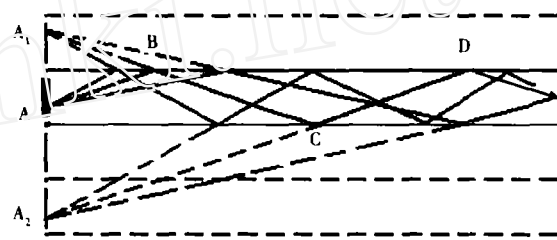


图 3 光棒匀光原理

光棒出射光的均匀性与光线在光棒中的反射次数有很大的关系,而光棒的截面尺寸、长度和入射角共同制约了反射次数的多少。根据文献[6]的公式:

$$\Lambda = \frac{l \tan \phi_{\max}}{\sqrt{h^2 + w^2}} \quad (1)$$

光棒均匀度随着无量纲量 Λ 的变化呈振荡特性,其中 l 为光棒长度, ϕ_{\max} 为入射最大孔径角, h 、 w 为边长。所以当入射角、光棒截面尺寸确定后,光棒输出光的光场不均匀度随着光棒长度增加振荡衰减,在一定长度范围内,存在局部最佳的光棒长度^[7-8]。设计时需平衡匀光棒的截面尺寸、长度与能量利用率、均匀性等方面的关系。

2.2 准直光路的优化设计

光阑中心位于准直透镜的焦点处,准直光束的发散角 θ 可由下式确定:

$$\tan \theta = \frac{D}{2f} \quad (2)$$

式中: D 为光阑直径, f 为准直透镜焦距。但是,由于准直透镜的像差影响中心光线的平行度和光束的准直角,从而也会影响截面光强的均匀性,所以还需要通过光学

设计优化准直光路。为了得到符合要求的光强分布,可以通过控制准直透镜后出射光线的高度来控制准直度、保证均匀度^[9]。

为了使光路结构紧凑,这里只采用一个单片透镜,第二面采用非球面,可以有效减小球差,提高准直度。利用 Zemax 光学设计软件辅助光路设计,在系统后建立理想透镜使准直光会聚,通过“REAY”函数控制实际光线在截面上的高度,并选择合适的权重,以保证光线的实际高度与理想高度尽可能一致,最后通过软件自动优化。设计完成后的光路图如图 4 所示。

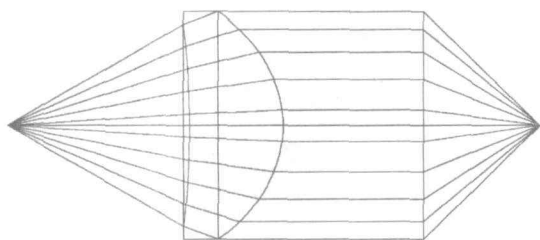


图 4 准直透镜的 Zemax 优化设计结果

3 实例模拟和测试

本文中,光强不均匀度根据下式计算:

$$\Delta I = \frac{|I - \bar{I}|}{\bar{I}} \quad (3)$$

式中: I 为考察面上各点的光强, \bar{I} 为考察面的平均光强。由于光束均匀度与透镜组会聚角、光棒尺寸、准直光路等多种因素有关,为了在设计阶段就可以方便有效地描述和优化设计,首先通过光学设计软件 LightTools 对光场模拟。

光路设计采用 1 W 大功率发光二极管作光源,用两个焦距 18 mm、直径 24 mm 的凸透镜作为透镜组,会聚点距透镜出射面 10 mm。根据计算和模拟,在兼顾尺寸、能量利用率和均匀性的情况下,采用 3 mm×3 mm×34 mm 的匀光棒,此时对应 Δ 为 4.7。这里选择大 Δ 值是因为 LED 发光在短距离内会聚,中心光强很高, Δ 增大可以减小中心光强的影响,且光强不均匀度随着 Δ 增大振荡幅度逐渐减小。为了进一步提高光棒的匀光效果,设置光棒出射面类型为散射。根据 LightTools 数据显示,光棒出射面的光强最小值、最大值和平均值分别为 869625、989261、929414 lux,不均匀度小于 6.5%。

按照 Zemax 软件的设计结果,采用焦距 38.5 mm 的凸透镜作为准直透镜,光阑直径 2 mm,光束发散角小于 1.5°,准直度较高。经过准直透镜后,接收面上的光强分布如图 5 所示。这是模拟计算三百万条光线的结果,可以看出,光束截面的大部分区域光强比较均匀。进一步

考查中间部分的光强均匀度,黑框表示中部 15 mm×20 mm 区域,根据数据显示,光强最小值、最大值和平均值分别为 309、366、339(lux),不均匀度小于 8.9%。

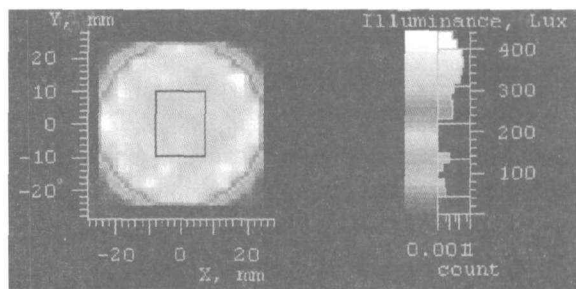


图 5 接收面上的光强分布

根据以上的光路优化和模拟结果构建光学系统,采用 CCD 作为接收器件,光束截面如图 6 所示。这里光强大小用灰度表示,图像被分为 256 个灰度级,通过软件可读出每个像素点的灰度值,灰度越高表示该点光强越大。出射光束直径 45 mm,可以看出,中部光强较高,比较均匀。中部黑框内表示的面积约为 15 mm×20 mm,根据数据显示,灰度平均值为 187.51,最大值和最小值分别为 198 和 169,不均匀度小于 9.9%。测量结果与模拟结果基本一致,在指定区域内均匀度达到了 90%以上。

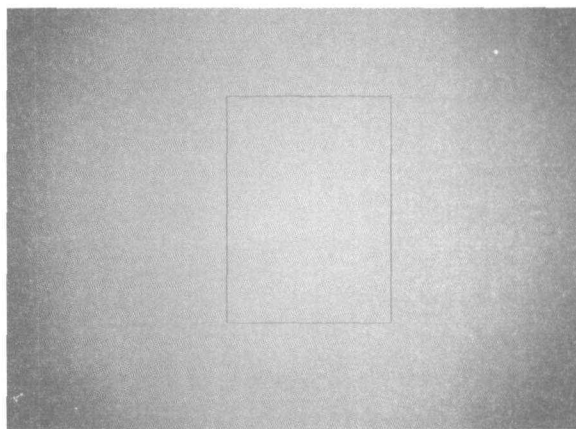


图 6 CCD 测量的实际结果

4 结 论

本文提出了一种以 LED 作光源的光强分布均匀的平行照明系统的设计方法,主要分析了匀光棒作为波前重组光波均匀器件的原理,并采用控制出射光线高度的方法,控制准直度并保证均匀度。通过光学设计软件辅助光路设计,得到优化结果,再构建光学系统,准直光束发散角小于 1.5 度,在 15 mm×20 mm 区域内光强均匀度在 90%以上。这种照明系统以 LED 作光源,在仪器

的小型化方面具有很大优势,光路总长在 140 mm 之内,结构简单紧凑,可以应用于对准直度和均匀度要求都很高的光学系统。

参考文献

- [1] 杨毅. 一种新型的基于非成像光学的 LED 均匀照明系统[J]. 光学技术, 2007, 33(1).
- [2] 王素平. 一种应用于太阳仿真器的照明系统设计[J]. 光电工程, 2006, 33(9).
- [3] 刘江. 改进实用型 LED 生物光源系列[J]. 应用激光, 2003, 23(3).
- [4] 曲兴华. 强反射复杂表面随机缺陷检测照明系统分析[J]. 光学学报, 2003, 23(5).
- [5] 陆汉民. 均匀照明系统的设计与应用[J]. 光学仪器, 1990, 12(4).
- [6] BENJAMIN A, JACOBSON. Beam shape transforming devices in high-efficiency projection systems[C]. Proc of SPIE, 1997, 3139.
- [7] 金新华. 多边形棒状透镜出端辐射均匀性的研究[J]. 光子学报, 2006, 35(12).
- [8] 王蔚生. 液晶投影机光棒照明系统的分析与设计[J]. 光学仪器, 2004, 26(4).
- [9] 王林梓. 透射式照明系统的光学设计新方法[J]. 光学技术, 2005, 31(6).

www.cnki.net