

基于光学扩展量的 LED 均匀照明反射器的设计

余桂英¹ 金 骥¹ 倪晓武² 郑颖君¹

(¹ 中国计量学院计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018; ² 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094)

摘要 针对发光二极管(LED)光源的发光特点,根据非成像光学的光学扩展量理论建立了获得均匀照明反射器的一般方程,实现了在特定目标面上的均匀照明,进而依据该方程设计了用于体视显微镜的 LED 照明系统。利用 TracePro 软件对所设计的系统进行光线追迹仿真,结果表明在 $\Phi 90$ mm 的范围内照度均匀性达到 90.6%,不考虑反射率损失时能量利用率可达到 99.6%。该设计方案采用单一反射器实现均匀照明,为实现照明系统小型化和简单化提供了一种有效的途径。

关键词 光学设计;非成像光学;均匀照明;光学扩展量;反射器;发光二极管(LED)

中图分类号 O439;TM923.34 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2297

Design for LED Uniform Illumination Reflector Based on Étendue

Yu Guiying¹ Jin Ji¹ Ni Xiaowu² Zheng Yingjun¹

(¹ College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)
² School of Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract In view of light-emitting diode (LED) light source's characteristics, according to the étendue conservation theory in non-imaging optics, the improved reflection equations for obtaining uniform illumination are derived and the uniform illumination in specific target plane is achieved. Based on the equations, an illumination system of LED-base stereomicroscope is designed. Using software Tracepro, the ray-tracing simulations show that, in the scope of $\Phi 90$ mm, the uniformity of illumination reaches 90.6%, and the efficiency can reach 99.6% without considering the loss. This scheme uses only one single reflector to achieve uniform illumination and provides an effective way for realizing system's miniaturization and simplification.

Key words optical design; non-imaging optics; uniform illumination; étendue; reflector; light-emitting diode (LED)

1 引 言

随着半导体照明技术的发展,发光二极管(LED)正逐渐取代传统光源,成为新一代光源。由于在尺寸和节能方面的优势,越来越多的照明系统使用 LED 作为光源,但其中如何实现目标面的均匀照明与光能的充分利用是 LED 照明系统设计中急需解决的问题^[1~5]。

非成像光学从光源的发光特性和目标面所要求的光强分布出发,以能量利用率为设计指标,重点考虑能量传输的匹配问题,因而在解决光能收集和照明设计问题上比成像光学理论更有效^[6]。照明设计

可以分为面向点光源的设计和面向扩展光源的设计。点光源给定照度分布,是非成像光学中一类可以抽象出数学模型的光学问题^[7];而对于扩展光源,则具有相当的难度。一种针对扩展光源设计的方法是 SMS 法(Simultaneous multiple surface)^[8],可同时针对多个折射或反射面进行设计。2004 年, Benitez^[9]等又提出了 SMS3D 设计方法,该方法同时使用两个自由曲面对入射光进行偏折成为出射光,可有效控制扩展光源的光束,减少损失。光学扩展量守恒理论和边缘光线理论是非成像光学的基本理论^[10],光学扩展量不仅可以描述光学系统传输能

收稿日期: 2008-10-12; 收到修改稿日期: 2008-11-30

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y 104436)和浙江省科技计划项目(2008C21158)资助课题。

作者简介: 余桂英(1965—),女,副教授,硕士,主要从事照明和测量方面的研究。E-mail: yuguiying11@163.com

量的能力,还可以描述光束本身的走向,因此,该方法可以在照明设计中对能量的分配和重构进行评价和修正。

实现均匀照明的设计方法主要有两种:重叠法和裁剪法^[11]。重叠法即是光源发出的光细分为多个部分,然后在照明区域上相互重叠以消除光源总体光束的不均匀性,如复眼照明、光管照明和微透镜阵列的设计^[12]。Fournier 等^[13]通过有理 Bezier 曲线的控制点来控制光管外形,能在最小损耗的情况下提高空间均匀性。裁剪的方法即是在已知光源光强分布的情况下,通过裁剪反射镜或透镜的面形来控制波前的走向,获得均匀的能量或照度分布^[14,15]。如丁毅等^[16~18]基于折射方程和能量守恒建立一阶偏微分方程组,通过数值求解得到用于均匀照明的自由曲面透镜和自由曲面反射器,但是对于旋转对称的反射器设计而言,该方法较为繁琐。

本文针对旋转对称反射器,根据 LED 光源特性和目标面光强的分布要求,依据裁剪法的基本思想和非成像光学中的光学扩展量守恒理论,设计了一种较为简便的反射器,实现了系统的均匀照明和结构简洁化。

2 设计原理

2.1 光学扩展量理论

光学扩展量是非成像光学理论中一个重要的概念,描述光束所通过的面积和光束所占有的立体角的积分,用于权衡所要求的面积和立体角,确定系统的能量收集率,从而确定结构参数。光学扩展量定义为^[19]

$$U = n^2 \iint \cos \theta dA d\Omega, \quad (1)$$

式中 n 为折射率, θ 是微元面积 dA 的法线与微元立体角 $d\Omega$ 的中心轴的夹角。

对于理想的光学系统,在不考虑折射、反射、散射、吸收等损失的情况下,光束经光学系统后光学扩展量守恒。在非成像光学系统设计中,光学扩展量匹配是最重要的考虑因素。对于光源光学扩展量越小越好,而对于光学元件的光学扩展量应越大越好。但是扩展量的增加并不一定能产生相同程度的能量效率的提高,同时还会引起系统复杂度和成本的增加。因此需要合理的设计照明系统,控制光线走向,实现光学扩展量的匹配,从而获得较高的光能利用率和所需的照明均匀性。

2.2 反射器设计

如图 1 建立坐标系。在极坐标下,反射器外形

轮廓的微分方程为

$$\frac{dr(\theta)}{r(\theta)} = \tan \left[\frac{\theta - \alpha(\theta)}{2} \right] d\theta, \quad (2)$$

式中 θ 是 LED 光源发射到反射器任一点 P 的光线与 LED 发光面法线的夹角,光源中心位于原点。

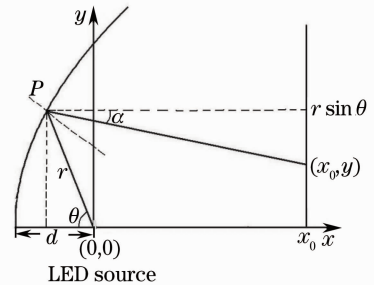


图 1 反射器设计示意图

Fig. 1 Sketch map of reflector design

根据图 1 可得

$$\alpha(\theta) = \arctan \frac{r \sin \theta - y}{r \cos \theta + x_0}, \quad (3)$$

式中 x_0 是目标面放置的位置, y 为光线经过 P 点反射后落在目标面上的位置。令(1)式中 $n=1$, 则对从 LED 任意角度 θ 内反射的光,可得到

$$U_s = \iint \cos \theta dA d\Omega = A_s \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\theta \cos \theta \sin \theta d\theta = \pi A_s \sin^2 \theta, \quad (4)$$

式中 U_s 为 θ 内光源的光学扩展量, A_s 为 LED 光源的发光面积。通过计算得到 θ 角对应的目标面上的照度

$$E_t = \frac{LU_t}{A_t}, \quad (5)$$

式中 L 为照明面亮度, A_t 为目标面上的照明面积, U_t 为目标面上的光学扩展量。另取边界点的照度为

$$E_0 = \frac{LU_0}{A_0}. \quad (6)$$

根据光学扩展量守恒和等照度条件:

$$\begin{aligned} U_s &= U_t, \\ E_t &= E_0, \end{aligned} \quad (7)$$

得到

$$\frac{U_s}{A_t} = \frac{U_{s0}}{A_0}, \quad (8)$$

其中 U_{s0} 为 θ_{\max} 所对应的光源扩展量。将 $A_t = \pi y^2$, $A_0 = \pi R^2$, $U_s = \pi A_s \sin^2 \theta$, $U_{s0} = \pi A_s \sin^2 \theta_{\max}$ 代入(8)式,得到

$$y(\theta) = \frac{\sin \theta}{\sin \theta_{\max}} R, \quad (9)$$

式中 R 为最大照明范围。将(9)式和(3)式代入(2) 式,得

$$\frac{dr}{d\theta} = r \tan \left\{ \frac{\theta - \arctan \left[\frac{r \sin \theta - R \sin \theta / \sin \theta_{\max}}{r \cos \theta + x_0} \right]}{2} \right\}. \quad (10)$$

(10)式就是在一确定的目标面上实现均匀照明的反射器的数学模型,可知,通过数值积分方法可求解得到 r 与 θ 的离散点坐标,再经过旋转,得到三维数据点,利用 3D 建模软件 Rhinoceros 进行曲面拟合并建立系统模型。

3 仿真结果与分析

3.1 仿真结果

根据反射器数学模型(10)式,通过选择不同的目标面位置 x_0 、LED 与反射器顶点的距离 d 和照明范围 R 等参数,可以设计出均匀照明的反射器。下面以体视显微镜的照明系统设计为例进行说明。

传统的显微镜照明系统以成像光学作为设计思路,如临界照明和柯拉照明。随着 LED 光源的发展,基于非成像光学的设计方案开始用于显微镜照明。体视显微镜的照明指标为:在观测屏上形成一个直径为 90 mm 的光斑,均匀性要求大于 85%。为此选择:反射器的初始点到原点的距离 d 为 5 mm,

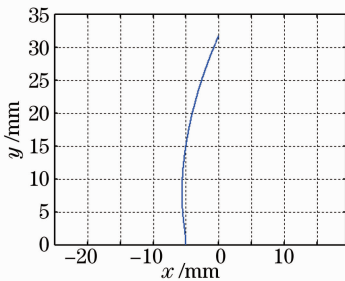


图 2 反射器数值求解结果

Fig. 2 Numerical results of reflector

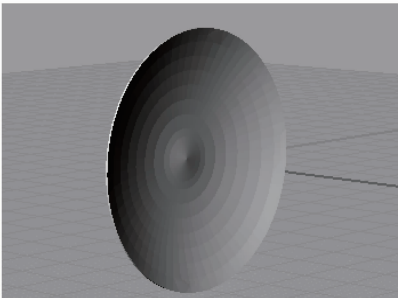


图 3 反射器 3D 模型图

Fig. 3 3D model of reflector

目标面位置 x_0 为 15 mm,照明范围半径 R 为 45 mm,光源 LED 大小为 1 mm×1 mm,LED 光源发散角 $\theta_{\max}=90^\circ$,光通量设置为 10 lm,放置于原点。反射器的反射率设为 1,反射器口径 63.6 mm。经过设计和计算得到数值求解结果以及 3D 模型,如图 2 和图 3 所示。

根据设计得到的系统进行光线追迹和照度分布计算,其结果如图 4、图 5 所示。图 5(b)照度分布曲线中蓝线和绿线分别代表测试屏上 X 和 Y 方向。由图 5 可见,预定照射目标面的照度均匀性达到了 90.6%,能量利用率达到 99.6%。根据等照度原则,理论上照度均匀性应该达 100%,其间的差异主要是由于设计时假设 LED 光源为点光源,因而根据点光源理论得到的结果与实际情况存在一定的偏差;通过有限的离散点拟合生成光滑曲面也存在一定的误差。能量利用率偏小的原因是作为扩展光源,从偏离中心的发光面发射的光线进过反射器后未能落在目标面上,因而造成能量的损失。

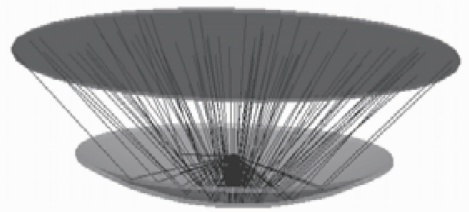


图 4 光线追迹图

Fig. 4 Ray-tracing figure

3.2 公差分析

根据显微照明均匀性要求大于 85% 的条件,着重对图 1 中目标面位置 x_0 、LED 光源位置的允许偏差进行公差分析。以图 1 给出的为初始结构,当 LED 光源位置不变,改变目标面位置 x_0 时可以得到不同 x_0 对均匀性和效率的变化曲线,如图 6 和 7 所示,其中 x_0 作为理想位点, Δx_0 作为观测屏位置偏差量。从图 6 中可以看出,随着 Δx_0 绝对值的增大,均匀性逐渐下降,在 $[-3, 3]$ 区间内均匀性都能保持在 85% 以上。图 7 反映了当 Δx_0 从 -3 变化到 3 时,能量利用率不断减小。离反射器越远,能量利用率就越低。

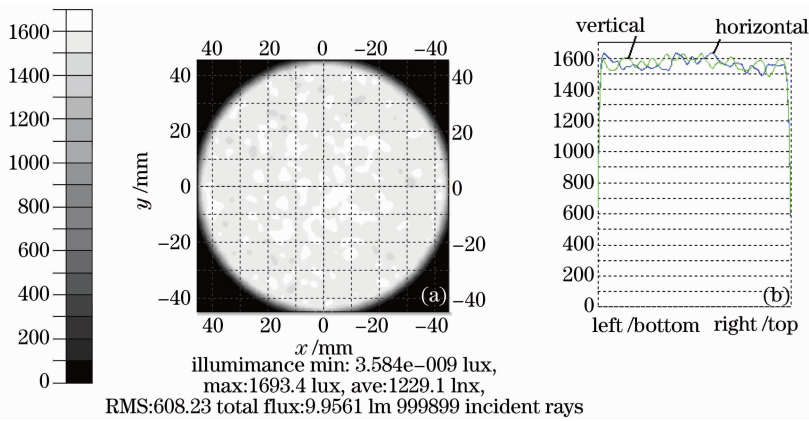


图 5 照度分布图

Fig. 5 Illuminance distribution diagram

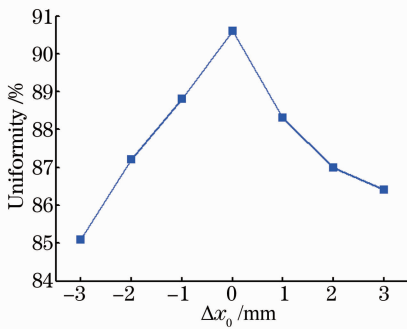


图 6 观测屏位置变化对于均匀性的影响

Fig. 6 Influence of Δx_0 on uniformity

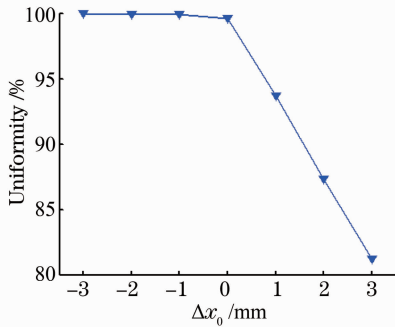


图 7 观测屏位置变化对于效率的影响

Fig. 7 Influence of Δx_0 on efficiency

当目标面位置 x_0 不变,LED 光源偏离原点沿 x 轴移动时,以 Δx 作为 LED 轴向位置偏差量,得到的结果如图 8 和 9 所示。从图 8 中可以看出,随着 Δx 绝对值的增加,均匀性随之下降,在 $[-0.15, 0.27]$ 范围内,总体的均匀性都保持在 85% 以上。图 9 表明,当 $\Delta x < 0$,即 LED 位置偏向反射杯时,能量利用率略微增大;当 $\Delta x > 0$,即 LED 位置偏离反射杯时,能量利用率不断减小。

以 Δy 作为 LED 垂轴位置偏差量,LED 光源沿 y 轴移动时,得到的结果如图 10 和图 11 所示。由

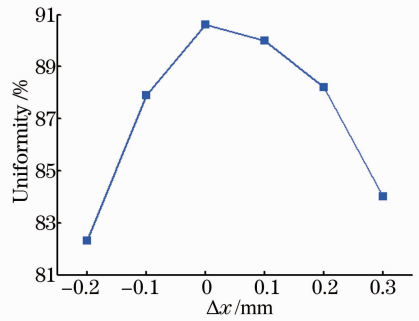


图 8 LED 轴向位置 Δx 变化对于均匀性的影响

Fig. 8 Influence of Δx on uniformity

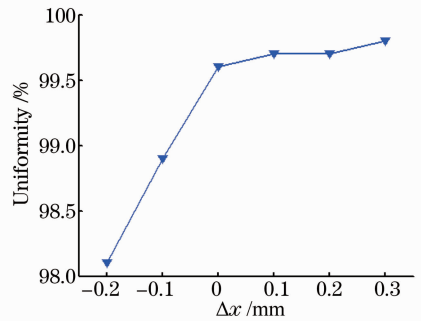


图 9 LED 轴向位置 Δx 变化对于效率的影响

Fig. 9 Influence of Δx on efficiency

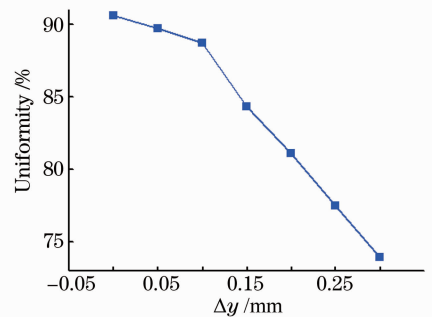


图 10 LED 垂轴位置 y 的变化对于均匀性的影响

Fig. 10 Influence of Δy on uniformity

图 10 中可以看出,随着 Δy 的增加,均匀性不断下降,在 $[0, 0.13]$ 范围内,总体的均匀性保持在 85% 以上。而图 11 表明随着 Δy 的增大,能量利用率略微下降,基本不影响整体的能量利用率。由于系统关于 x 轴旋转对称,因此 z 方向上的变化情况与 y 方向相同。

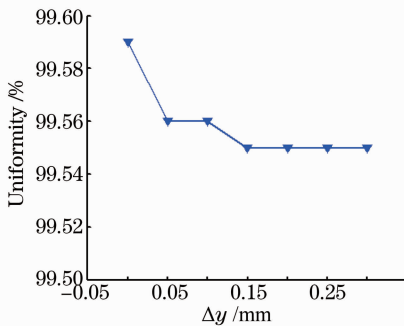


图 11 LED 垂轴位置 y 的变化对于效率的影响

Fig. 11 Influence of Δy on efficiency

通过上面对观测屏位置、LED 光源位置的公差分析,可见 LED 沿轴向和垂轴位置的变化对均匀性的影响较观测屏放置位置更为敏感,因而在安装 LED 时,其允许的公差范围应较小,位置精度要求更高。

4 结 论

通过对 LED 光源的发光特性和给定目标面照明要求的分析,根据非成像光学中的光学扩展量守恒理论,得到了实现均匀照明反射器的一般方程,运用数值积分法、3D 建模软件 Rhinoceros 和 TracePro 软件等对显微镜照明模型进行了光线追迹模拟,结果表明只采用单一反射器可实现均匀照明,且在确定的目标面上照度均匀性达到 90.6%,能量利用率达到 99.6%。该设计方法可用于要求高均匀照明的系统,如用于以 LED 为光源的显微镜照明系统、室内照明、投影系统等照明系统。通过选择合理的参数,可以进一步提高系统性能,达到最佳的照明效果。

参 考 文 献

- 1 M. Hamm, W. Huhn. Design claims and technical solution steps generating the world first full LED headlamp[J]. SAE, 2008, (01): 0337
- 2 T. Inaba, S. Watanabe, Y. Yamada. LED headlamp development for mass production[J]. SAE, 2008, (01): 0339

- 3 F. Fournier, J. Rolland. Optimization of freeform lightpipes for light-emitting-diode projectors[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(7): 957~966
- 4 X. Yu, Y. L. Ho, L. Tan *et al.*. LED-based projection systems [J]. *Journal of Display Technology*, 2007, **3**(3): 295~303
- 5 Zhao Xing, Fang Zhiliang, Cui Jicheng *et al.*. Study on the optical engine of the mini-projector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 913~918
赵 星,方志良,崔继承 等. 微型投影机光学引擎的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 913~918
- 6 B. Pablo. 2006 IOOC illumination design problem[C]. *SPIE*, 2006, **6342**(2): 63421V
- 7 Luo Yi, Zhang Xianpeng, Wang Lin *et al.*. Non-imaging optics and its application in solid lighting[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 963~971
罗 毅,张贤鹏,王 霖 等. 半导体照明中的非成像光学及其应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 963~971
- 8 O. Dross, R. Mohedano, P. Benitez *et al.*. Review of SMS Design Method and Real World Applications[C]. *SPIE*, 2004, **5529**: 35~47
- 9 P. Benitez, J. C. Minano, J. Blen *et al.*. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(7): 1489~1502
- 10 R. Winston, J. C. Miñano, P. Benitez. With contributions by N. Shatz and J. C. Bortz. *Nonimaging Optics* [M]. Amsterdam: Elsevier, 2005
- 11 H. Ries. Tailored freeform optical surfaces[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(3): 590~595
- 12 A. V. Arecchi, T. Messadi, R. J. Koschel. *Field Guide to Illumination* [M]. SPIE Press, 2007
- 13 F. Fournier, W. J. Cassarly, J. P. Rolland. Method to improve Spatial uniformity with lightpipes[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(11): 1165~1167
- 14 P. T. Ong, J. M. Gordon, A. Rabl *et al.*. Tailored edge-ray designs for uniform illumination of distant targets [J]. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(6): 1726~1737
- 15 Wu Rengmao, Tu Dawei, Huang Zhihua *et al.*. Illuminative uniformity design of a LED illumination system [J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(1): 74~76
吴仍茂,屠大维,黄志华 等. LED 照明系统的光照均匀性设计 [J]. *光学技术*, 2009, **35**(1): 74~76
- 16 Y. Ding, X. Liu, Z. Zheng, *et al.*. Freeform LED lens for uniform illumination [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 12958~12966
- 17 Ding Yi, Gu Peifu, Lu Wei *et al.*. Using numerical solutions of differential equations to form free reflector [J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2007, **41**(9): 1516~1518
丁 毅,顾培夫,陆 巍 等. 利用微分方程数值解构造自由曲面反光器[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2007, **41**(9): 1516~1518
- 18 Ding Yi, Gu Peifu. Freeform reflector for uniform illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 540~544
丁 毅,顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 540~544
- 19 W. Cassarly. Nonimaging optics: concentration and illumination [M]. *New York: OSA Handbook of Optics*, 2001, Vol 3. Chap 2. McGraw-Hill