

基于菲涅尔透镜的大功率 LED 均匀照明系统设计

聂佳林, 胡淼*, 阮泽辉, 崔恩楠, 汪延安, 蔡美伶
(杭州电子科技大学 通信工程学院, 杭州 310018)

摘要:为了弥补无线通信的缺陷,大功率白光 LED 通信技术的研发十分必要。基于光学扩展量守恒思想,提出了一种基于菲涅尔透镜和复合抛物面反射镜的大功率 LED 均匀光源。首先通过理论设计获得反射镜截面曲线,然后通过 Tracepro 软件进行建模以及光线追迹仿真,获取最优仿真参数进行加工,最终在距离光源 2.5m 处实现了发散角约为 2.63° 、光斑有效区域的光度均匀度优于 94.40% 和整体出光效率超过 80% 的均匀光源。

关键词:复合抛物面反射镜;菲涅尔透镜;LED 扩展光源;均匀度

中图分类号: O432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2018)01-0042-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.01.012

Design of high power LED uniform illumination system based on Fresnel lens

NIE Jialin, HU Miao*, RUAN Zehui, CUI Ennan, WANG Yan'an, CAI Meiling
(College of Communication Engineering,
Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to make up for the shortcomings of wireless communications, the development of high-power white LED communication technology is very necessary. Based on the idea of conservation of optical extension, a high power LED uniform light source based on Fresnel lens and compound paraboloid reflector is proposed. First of all, the mirror cross-section curve is obtained through theoretical design, and then the Tracepro software is used for modeling and ray tracing simulation. The optimal simulation parameters are obtained for processing to achieve an uniform light source system entity. Finally, an uniform light source with a divergence angle of about 2.63° at a distance of 2.5m from the light source, an uniform light uniformity of better than 94.40% in the effective area of the light spot, and an overall light extraction efficiency of more than 80% is achieved.

Key words: compound parabolic concentrator; Fresnel lens; extended LED source; uniformity

0 引言

白光 LED 具有体积小、寿命长和光效高的优点,在照明领域有很大的应用前景。此外,由于其易于调制,白光 LED 也成为一种优秀的信息载体。虽然无线通信技术已被广泛普及,但在一些场合并不适用该技术,考虑到电磁波对人体健康的影响,开发一种均匀

稳定的新载体是十分必要的^[1]。由于白光 LED 具有朗伯体空间发光特性^[2],无法满足市场需求,进而需要进行二次光学设计。利用光学设计来改善 LED 的发光特性,扩展其应用领域是未来的研究方向。依据非成像光学理论^[3]进行 LED 配光设计,通常在照明领域中,器件的设计也要依据能量守恒对应关系来建立模型^[4],使用边缘光线原理来简化设计的复杂性^[5]。王洪等人在提出的一种面向大功率 LED 集成光源的反射器设计方法中,研制出了一种均匀性较好的反射器光学模型,和传统点光源近似设计方法相比,获得了优于

收稿日期:2017-10-31。

基金项目:浙江省工艺技术研究工业项目(NO.2016C31068)资助。

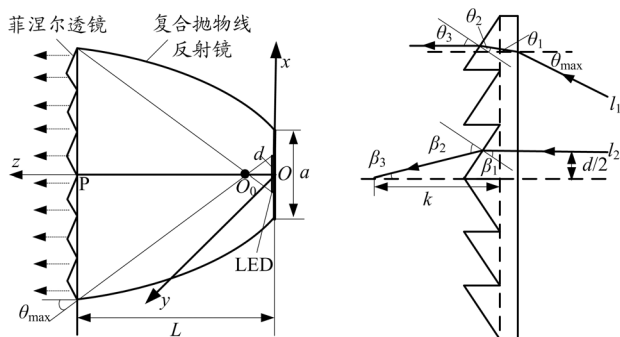
作者简介:聂佳林(1992-),男,硕士研究生,主要从事 LED 光源均匀辐射模拟器等方面的研究。

*通信作者:胡淼(E-mail:miao_hu@hdu.edu.cn)。

80%的均匀度^[6],但均匀性相对较低,无法满足现在的市场需求。罗元等人设计了一种基于非成像光学的均匀光强反射器,通过能量守恒对应关系,采用差分方法求解反射器面形,最终得到了发散角为 30° ,均匀性为96%的光源^[7],但其发散角过大,使得光线过于扩散,光效较低。吴乃茂等人设计的一种大功率 LED 均匀照明的投射器,通过建立折射-全反射(TIR)光学反射面以及求解轮廓线上的微分方程,得到了92.6%的均匀度与91.8%的出光效率^[8]。荆雷等人研究设计的一种准直镜,其发散角为 5.4° ,出光效率为52.0%,得到光强均匀性为92.0%的LED均匀光源。赵会富等人设计的折射/全反射/反射/折射式结构的大功率LED准直系统,得到的光束发散角为 3.178° 并且其出光效率达到了80.0%以上^[9]。以上均匀光源设计都无法同时获得较好的均匀度和发散角。本文基于边缘光线原理和光学扩展量守恒思想,将大功率白光LED直接安装于复合抛物面反射器底面,并利用菲涅尔透镜实现均匀光源输出。

1 原理分析

本文应用复合抛物线反射面和菲涅尔透镜对LED扩展光源的出射光进行分析。LED扩展光源发出的光经过反射器的反/折射^[10],实现第一次配光,再通过菲涅尔透镜实现第二次配光,最终获得平行光输出,具体示意图如图1(a)所示。



(a) 实验装置原理图

(b) 菲涅尔透镜原理图

图1 实验装置整体原理图

图1(a)是以圆形LED圆心O为圆点的三维直角坐标系,LED光源位于xOy坐标平面O点,z轴垂直于发光平面。圆形LED光源发光面直径为d,复合抛物线反射镜底部截面直径为a,整体长度为L。因为LED为贴片型,厚度较小(只有1~2mm,本文不考虑其厚度),近似与反射镜底面在同一水平面上。在复合抛物线反射镜张口处为圆形菲涅尔透镜。在图1(a)中, O_0

为反射镜的焦点,同时也是菲涅尔透镜的反向虚焦点,反射镜焦距为k。经过反射镜光学变化后,LED出射光的最大出射角为 $\theta_{\max}$,因此在xOz面上的截面曲线可以表示为:

$$x^2 = \left(\sqrt{\frac{d^2}{4\tan^2\theta_{\max}} + \frac{a^2}{2}} + \frac{d}{4\tan\theta_{\max}} \right) z - \frac{a^2}{4} \quad (1)$$

复合抛物线折射镜的张口直径 a' 及焦距k为:

$$\begin{cases} a' = 2L\tan\theta_{\max} - d \\ k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d^2}{4\tan^2\theta_{\max}} + \frac{a^2}{2}} + \frac{d}{4\tan\theta_{\max}} \end{cases} \quad (2)$$

菲涅尔透镜一面是平坦的,另一面是锯齿状的。各个锯齿之间的角度都不相同,但最终所有投射过的光线都会汇集在一个中心点上,即为透镜的焦点。每个锯齿都类似一个单独的透镜,根据光线入射方向的不同可以把光线调整成平行光或聚光,同时可以用来过滤掉部分球形像差。菲涅尔透镜具有主焦点,在其对称位置存在着一系列虚焦点。光线从透镜的一侧入射,在另一侧聚焦成一点或平行光射出。焦点是在入射光线的另一侧,是有限共轭。其原理图如图1(b)所示。

在图1(b)中分别研究由图1(a)中装置产生的两种光线 l_1 和 l_2 。 l_1 代表经由复合抛物线反射镜产生的最大出射角光线,图中 θ_1 表示由反射镜内部光线入射到菲涅尔透镜中的折射角, θ_2 表示由菲涅尔透镜入射到空气中的入射角, θ_3 表示由菲涅尔透镜入射到空气中的折射角,根据折射定律有:

$$\begin{cases} \sin\theta_{\max} = n\sin\theta_1 \\ \sin\theta_3 = n\sin\theta_2 \end{cases} \quad (3)$$

l_2 代表由LED平面水平发射出的光线且为LED最边缘的光线,则其高度为 $d/2$,焦距为k, β_1 表示光线由菲涅尔透镜入射到空气中的入射角, β_2 表示光线由菲涅尔透镜入射到空气中的折射角, β_3 表示由出射光线与水平方向的夹角,由此可以获得:

$$\begin{cases} \tan\beta_3 = d/2k \\ \sin\beta_2 = n\sin\beta_1 \\ \beta_1 = \beta_2 + \beta_3 \end{cases} \quad (4)$$

根据式(4)中的3个式子可以求出各环带倾角、齿高等具体参数。

本文根据式(1)~式(4)并利用Matlab软件计算,得到菲涅尔透镜的尺寸参数和抛物面反射镜的截面曲线参数,然后利用Solidworks2008软件进行绘制三维剖面结构图,最后对其进行加工制作以及电镀制作。

2 仿真设计

本实验装置的出光面直径为 150mm 的圆型平面,根据以上的理论分析和数值计算得到器件的各个参量。在仿真设计中采用朗伯体光源;为了得到圆形光斑,使用抛物面圆形反射面,这也易于后期的加工。我们根据仿真数据设计了该辐射模拟器,整体系统自左向右依次为:散热器、LED 导热底板、LED 光源、复合抛物面反射器和菲涅尔透镜。光源、抛物面反射器与菲涅尔透镜同心。

实验装置结构中,LED 发光面是半径为 11mm 的圆面;复合抛物面透镜的口径为 150mm,长度是 100mm;菲涅尔透镜是直径为 150mm 的圆面,其纹距是 0.3mm,厚度为 2mm,物距为 95mm。菲涅尔透镜与抛物面透镜张口相接。图 2 所示为采用 Tracepro 软件以 100 万条光线模拟的距离菲涅尔透镜 1m、1.5m、2m

和 2.5m 处光屏的光度分布图。图 2(a) 中的有效光斑直径约为 16cm,可以清晰地发现光斑的边缘相对中心会比较暗淡,均匀度不好;图 2(b) 中的光斑直径约为 20cm,边缘与中心仍然有一些差异,均匀度稍差一些;图 2(c) 中的光斑直径为 32cm,光度分布比较均匀;图 2(d) 中的光斑直径为 44cm,光度分布比较均匀。

根据仿真结果和发散角计算公式:

$$\text{发散角} = \arctan\left(\frac{\text{光斑直径} - \text{辐射器发光面直径}}{2 \times \text{发光面到光屏之间的距离}}\right) \quad (5)$$

在相距 1m、1.5m、2m 和 2.5m 时,计算出光学系统的出射光束发散角分别约为 0.29°、0.95°、2.43°和 3.32°。根据图 2 中的有效光斑尺寸及光屏到发光面的距离可以得出辐射模拟器的出射光束发散角会随着距离的增大而略有增加,当超出 4m 后发散角会超出 5°。

我们还设计了出光面直径为 150mm 的球面透镜用于与菲涅尔透镜进行比较,球面透镜的材质为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),折射系数为 $n=1.4935$ 。通过优化参数获得凸面透镜的曲率半径分别为 75mm 和

125mm,透镜厚度为 50mm(最优值)。我们分别在距离菲涅尔透镜 1m、1.5m、2m 和 2.5m 处进行光度测量,测量结果与基于菲涅尔透镜的均匀光源仿真相较而言,球面透镜在同样距离下所产生的光斑尺寸更大。根据式(5)可知,其获得的发散角分别为 5.99°、5.52°、6.41°和 6.28°,相对菲涅尔透镜获得的发散角会更大一些,而且光强分布明显不够均匀。

3 实测结果

在实验中,根据 Tracepro 软件仿真所得到的结果,按照设计的光学参数,本文利用数控机床将该光学系统加工成型,反射器内壁涂覆有高反射率铝膜层。菲涅尔透镜由亚克力 PMMA 材质制成。光源的发光面采用直径为 22mm 的圆形大功率白光 LED 光源,光源内部包含若干个小 LED 芯片,总功率为 96W。

测量时使用光度计对光屏上的光斑进行逐点采样记录,光度计量程为 1lux~150klux。为了测得 LED 本身的光度值,并且预测其光度值较大,可能会超出光度计测量范围,所以我们选取了一块较低透过率的滤镜,对一束光度值相对较弱的光进行测试,获得其光度值为 I_0 。在相同条件下,将滤镜紧紧贴在光度计探头上,测得该光束光度值为 I_1 ,则获得该滤镜的透过系数约为 $\rho = I_1/I_0 = 0.017$ 。然后,将该滤镜分别放置在 LED 发光面上和菲涅尔透镜上测得其光度值分别为 $4.25 \times 10^4 \text{lux}$ 和 748lux ,再将两结果分别与透过系数相除获得其真实光度值。通过该方法实测 LED 的光度值约为 $2.5 \times 10^6 \text{lux}$,光辐射模拟器在发光口处测得光度值约为 $4.4 \times 10^4 \text{lux}$,根据发光口光度值和其本身面积的积分与 LED 光度值和其本身面积积分之比,即可获得光辐射模拟器的发光效率约为 80%。

为了测量相对光学系统发光面不同距离的光斑上各个点的光强,本文设计了光屏,该光屏由 35 个同心圆组成,相邻两个同心圆相距 1cm,总直径为 70cm。在该光屏上,取最大同心圆的相垂直的两条直径与各个同心圆相交的点为采样点,光屏及其采样记录点示意图如图 3(a)所示。

由于仿真中是不考虑光源热损失的,实体均匀光源系统的功率要低于仿真功率。图 3(b)~图 3(d)是发光功率为 96W 的 LED 实验获得的光度值图(在实际测量中,相距光屏 1m 和 1.5m 处的光斑上光度值变化不是很大,在这里舍去了距离 1.5m 处的光度值分析)。这 3 个图分别是距离光学系统出光面 1m、2m 和 2.5m 处的光度曲线。每个图中有圆点和方点两种曲线,分别

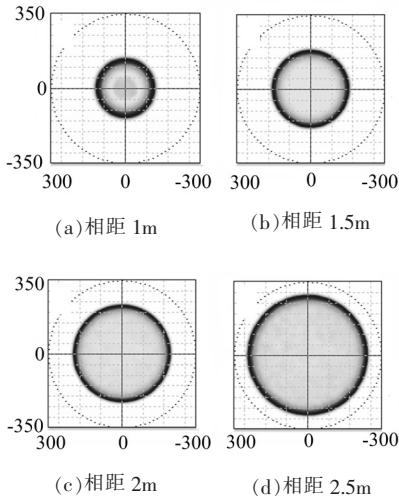


图2 关于菲涅尔透镜不同距离处的模拟光强分布图

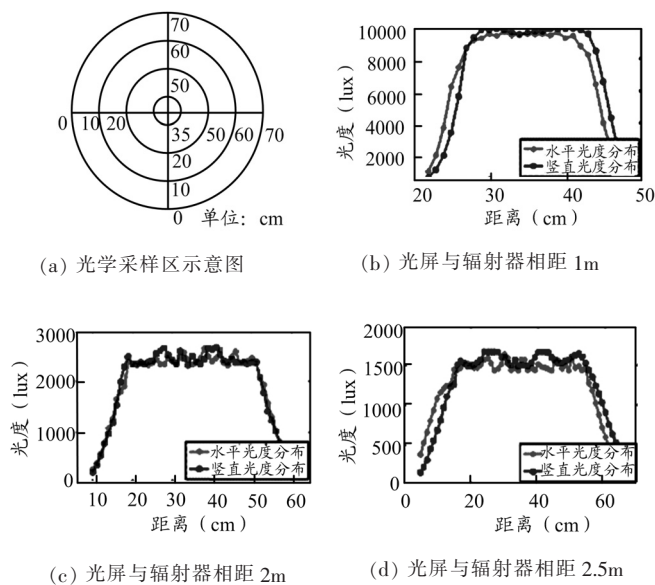


图3 光学采样图与不同距离光屏上的光度图

表示水平方向上的光度分布情况和竖直方向上的光度分布情况。

图 3(b) 的光度值在直径为 17cm 的圆形光斑区域范围内, 水平方向上的最大值为 9654lux, 平均光度值为 9290.71lux, 均方差为 379.63lux; 竖直方向上的最大值为 9872lux, 平均光度值为 9651.88lux, 均方差为 291.81lux。图 3(c) 的光度值在直径为 33cm 的圆形光斑区域范围内, 水平方向上的最大值为 2643lux, 平均光度值为 2412.45lux, 均方差为 87.63lux; 竖直方向上的最大值为 2659lux, 平均光度值为 2441.42lux, 均方差为 107.51lux。图 3(d) 的光度值在直径为 39cm 的圆形光斑区域范围内, 水平方向上的最大值为 1634lux, 平均光度值为 1493.99lux, 均方差为 54.12lux; 竖直方向上的最大值为 1669lux, 平均光度值为 1572.69lux, 均方差为 63.31lux。从图 3(b)~图 3(d) 可以看出, 距离光屏越远, 光度值越小, 均方差越来越小, 即均匀度越来越好。

观察图 3(d) 发现, 在有效光斑范围内, 光度值基本保持在一个较小波动范围内, 要比前两幅图效果好一些, 光度值的分布均匀性较好。光度均匀度计算公式定义为:

$$\sigma = 1 - (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min}) \quad (6)$$

其中, $L_{\max}$ 为最大光度值, $L_{\min}$ 为最小光度值。图 3(b) 中, 在直径为 17cm 的有效圆形光斑内, 水平方向上的光度均匀度达到 92.00%, 竖直方向上的光度均匀度达到 93.47%; 图 3(c) 中, 在直径为 33cm 的有效圆形光

斑内, 水平方向上的光度均匀度达到 93.28%, 竖直方向上的光度均匀度达到 93.17%; 图 3(d) 中, 在直径为 39cm 的有效圆形光斑内, 水平方向上的光度均匀度达到 93.38%, 竖直方向上的光度均匀度达到 94.23%。因此, 在相对较大的有效光斑区域内, 获得的均匀度会稍微优异一些。

本文结合图 3(b)~图 3(d) 的实验数据分析, 并对图 3(d) 测量结果进行二维细分插值, 获得距离光源 2.5m 处的二维光度分布图直径为 38cm 的圆面, 其发散角约为 2.63°, 整体出光效率约为 80%, 均匀度约为 94.40%。实验结果符合理论设计要求和模拟仿真结果。

4 结束语

本文采用复合抛物面反射器和高透菲涅尔透镜对大功率的 LED 扩展光源进行非成像光学变化实验和普通球面透镜的对比试验, 在距离光源 2.5m 处并经过二维细分差值优化后, 获得了二维光度均匀度优于 94.40%、光斑为直径 38cm 的均匀圆面, 发散角约为 2.63°。这种基于菲涅尔透镜的高均匀性白光 LED 照明系统在光通信领域、投影系统和光度/辐射度计量等方面有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] LOURO P, COSTA J, VIEIRA M A, et al. Optical Communication applications based on white LEDs [J]. Journal of Luminescence, 2016(191): 122-125.
- [2] YU X J, HO Y L, TAN L, et al. LED-based projection systems [J]. Journal of Display Technology, 2007, 3(3): 295-303.
- [3] 梁文跃, 李远兴, 龙拥兵, 等. 板上芯片型 LED 光源均匀照明自由曲面透镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 211-218.
- [4] 李鹏, 郑毅, 范江兵, 等. 基于大功率 LED 扩展光源的均匀光斑光辐射模拟器设计[J]. 光子学报, 2014, 44(2): 0222001-1-0222001-5.
- [5] 王洪, 张小凡, 杜乃锋, 等. 面向大功率 LED 集成光源的反射器设计方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1282-1286.
- [6] 罗元, 邓燕. 基于非成像光学的均匀光强反射器设计 [J]. 半导体光电, 2015, 36(2): 285-288.
- [7] 吴仍茂, 屠大维, 黄志华, 等. 一种基于同步多曲面方法的 LED 定向照明设计[J]. 光学技术, 2009, 35(4): 561-565.
- [8] 荆雷, 王尧, 赵会富, 等. 实现均匀照度光伏聚光镜设计[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 72-77.
- [9] 刘永强, 申作春, 芦宇, 等. 均匀会聚菲涅尔透镜设计及性能研究[J]. 光电子技术, 2012, 32(4): 263-266.
- [10] 赵会富, 刘华, 孙强, 等. 基于折射/全反射/反射/折射结构的 LED 准直系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1472-1479.