

基于补偿法的均匀照明自由曲面 LED 反光杯设计

闫兴涛^{1,2}, 杨建峰¹, 张国琦³, 卜凡^{1,2}, 张磊^{1,2}

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西西安 710119; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 西安中科麦特电子技术设备有限公司, 陕西西安 710119)

摘要: 根据面向理想光源的设计原理, 提出了基于能量补偿和坐标迭代的自由曲面母线求解方法。在二维坐标系中建立系统模型, 由反光杯反射光对直射投射光进行补偿, 将反光杯右上边缘的光线反射到目标面左边缘, 且随着光线下移反射光线逼近目标中心。根据 Snell 定律, 以上边缘点为初始点, 逐一迭代得母线上各点坐标, 旋转或拉伸生成所求反光杯。在 Tracepro 软件中的模拟结果表明对圆形或正方形目标照度均匀性均优于 85%, 且系统能量利用率仅由 LED 出光角度和反光杯反射系数决定, 该结构可使 LED 光源用于大范围照明。

关键词: 非成像光学; 均匀照明; 自由曲面; LED 反光杯

中图分类号: O434.19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2012)03-0718-06

Design of freeform surface LED reflectors for uniform illumination based on compensation method

Yan Xingtiao^{1,2}, Yang Jianfeng¹, Zhang Guoqi³, Bu Fan^{1,2}, Zhang Lei^{1,2}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Xi'an ZKMT Electronic Technology Equipment CO., LTD, Xi'an 710119, China)

Abstract: According to the design principle of ideal light source, a method to obtain freeform surface generatrix based on energy compensation and coordinate iteration was proposed. Freeform surface LED reflectors for uniform illumination were designed. Firstly, the geometrical model of illumination system was established in two-dimensional coordinate system, in order to get uniform illumination. The directly incident energies were compensated by the reflected rays. Concretely, the rays were reflected into the upper verge of the reflector to the verge area of the target plane, and go down to the bottom of the reflector along with the rays, approaching the middle of the target plane. Based on Snell equation and geometrical relation, choosing the point on the top of freeform surface generator as the initial point, the coordinates of all points on the freeform surface generator were obtained by iteration method, which could be rotated or extended into the freeform surface. The simulations of the designed LED reflectors with Tracepro software show that the illumination uniformity of either the circle or the square target plane is higher than 85%, and the energy

收稿日期: 2011-07-22; 修订日期: 2011-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(60808028); 国家 863 计划(2009AA122203)

作者简介: 闫兴涛(1986-), 男, 博士生, 主要从事照明光学设计和 LED 照明应用方面的研究。Email: xingtiao.yan@163.com

导师简介: 杨建峰(1969-), 男, 博士生导师, 博士, 主要从事光学设计与光谱成像方面的研究。Email: yangjf@opt.ac.cn

efficiency which was affected only by the LED's emitting angle and the reflectivity of the reflector surface can be high. These peculiarity enable LED light source to be applied in wide range lighting system.

Key words: non-imaging optics; uniform illumination; freeform surface; LED reflectors

0 引言

随着半导体发光材料和工艺的不断发展,发光二极管(LED)正逐渐取代传统光源,成为新一代光源,广泛应用于投影灯、阅读灯、汽车前照灯等^[1],虽然具有高效环保、耐用安全等优点,但其出射光强呈大致的余弦分布,因此通常被认为是近似的朗伯辐射体。这样的空间光强分布,如果未经合适的光学系统处理而直接应用,多数情况下都难以满足照明的灯具和器件所要达到的性能指标,同时还会因为大量无效光的存在而大大降低系统的效率。针对LED的二次光学设计可有效调制LED光源的配光特性,使其光场分布满足大范围照明的需求,它属于非成像光学范畴^[2-4]。

在实际照明中,诸如投影灯、阅读灯、场馆照明、室内照明灯都要求均匀照明,而实现均匀照明的设计方法主要有两种:重叠法和裁剪法^[5]。重叠法是将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,但在实际应用加工中这些结构较复杂。裁剪法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,近几年应用较广。2001年起,H.Ries和J.Muschaweck等先后发表了数篇介绍裁剪法文章^[6-7];国内浙江大学的丁毅等通过Snell定律及能量关系建立一阶偏微分方程组,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^[8-9]。但是基于该原理的设计方法,在光源发光角度较大、照明范围较广时,其求解较为复杂且难以得到连续的自由曲面。清华大学的罗毅、钱可元等人先后发表了数篇用于LED路灯照明的透镜设计方法及其专利,且已取得很好市场^[10-11]。然而,对照明系统而言,除照明目标的照度均匀性及亮度大小等基本要求外,其系统的能量利用率及生产成本等因素也是设计时必须考虑的。相比透射式的自由曲面透镜元件,反光杯元件无需考虑材料内部的吸收和散射等耗损,且具有结构简单、加工容易、成本低廉等优点^[12]。因

此,设计中选用反光杯结构实现均匀照明更加简便高效。文中从以上分析出发,根据LED光源特性和目标面照度要求,按照裁剪法基本原理和Snell定律,通过能量补偿法,迭代求解控制自由曲面形状的母线上的坐标,设计适用于不同照明场合的反射器,实现了目标面的均匀照明和系统结构的简洁化。

1 设计原理

当光源的尺寸远小于它到反射或折射界面的最小距离时,可以将光源理想化,忽略它的尺寸,这称为“点光源近似”。根据光学系统形态的不同,它又可分为二维系统设计和轴对称三维系统设计两种,分别使用线光源和点光源。两种系统设计方法的不同点在于:对于设计得到的平面曲线,前者将其沿着平面的垂直方向全等延伸生成一个三维模型,而后者将其绕对称轴旋转一周生成一个轴对称的模型^[13]。在实际设计中,对于目标面为旋转对称的照明场合,选用面向点光源的设计方法较为简便合理。对于目标面为正方形、矩形等特殊形状的照明场合,选用线光源的理想化近似更为简便。由上述可知,无论面向何种照明场合的设计,只需先求解一条平面曲线,然后根据具体照明场合,将其旋转或拉伸即可。下面介绍一种基于能量补偿的求解此自由曲线的方法。

如图1所示,在二维坐标系XZ中,设LED光源位于原点处,目标面位于距离原点 Z_0 处,则由LED发出的光线被反光杯分成两部分,一部分是直接出射的,另一部分是经过反光杯反射的。对于直接出射的光线,其照射范围 R 为: $R=H\tan\phi$ 。因此在灯高一定的情况下,可通过控制 ϕ 角来控制照明范围。然而,由于LED的空间光强满足近似的朗伯分布,因此,该部分光线在目标面上形成照度随 ϕ 角逐渐降低的分布。为使目标面照明范围内得到均匀的照度,需通过反射部分的光来对直接照射部分的光进行补偿。如果使投射到反光杯右侧上边缘的光线反射到照明目标的左侧边缘,使照射到杯口边缘以下的光线随着 ϕ 角的增大,其反射光线竖直偏向角度依次减小,即反射光线沿目标面径向朝中心移动,LED最

大发光角即水平出射的光线最终被反射到目标面中心附近。通过以上对光线方向的控制,实现反射部分光对直射部分光能量的补偿,可得到比较均匀且能量利用率很高的照明效果^[14]。由图 1 可以看出,对于反光杯上边缘反射的光线,其投射到目标面时距离目标边缘存在一定的偏离,对 ΔX 范围内的直射光不能很好地补偿,但考虑到设计的反光杯与实际的照明范围之间数量级的差异,该偏离可忽略。

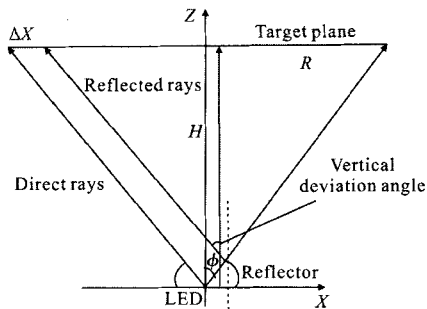


图 1 LED 与反光杯及目标面相对位置及光线分布截面图
Fig.1 Sectional sketch map of the relative position of LED, reflector and target plane

下面结合截面示意图 2,说明基于迭代法的自由曲面母线离散点的具体算法。

在照明范围半径 R 和灯高 H 确定后,反光杯的最上边缘入射光线与 X 轴夹角 α_0 即确定: $\alpha_0 = \pi/2 - \arctan R/H$ 。则在给定反光杯高度 h 后,即可确定反光杯口径 r 。根据对称性,选取反光杯右侧上边缘顶点为初始点,此时该点曲率需满足将入射光线反射到目标左侧边缘,设反射角为 β ,其与竖直方向的偏向角为 θ_0 ,且 $\theta_0 = \phi = \arctan R/H$ 。根据裁剪法思想和边缘光线原理^[15],沿高度方向将反光杯母线分 N 份,则有:

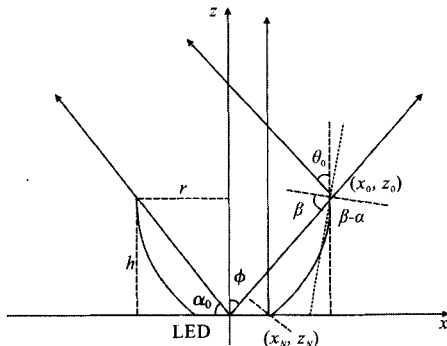


图 2 LED 出射光线与反光杯反射光线间的角度关系
Fig.2 Angle relationship between the emitting rays from LED and the reflected rays by reflector

$\Delta z_n = h/N (n=0,1,2 \dots, N$ 表示各点坐标的序列数),随着反光杯母线上各点 Z 坐标的减小,改变母线上各点的曲率,使反射光线竖直偏向角 θ_0 随 α 的减小等差减小,即 $\theta_{n+1} = \theta_n - \Delta\theta$ 。合理选取 $\Delta\theta$,使反射光线与直接光线在目标面叠加,即可实现均匀照明的光能补偿。根据反射定律,图 2 中所示的几何量满足以下关系:

$$\alpha_n = \arctan \frac{z_n}{x_n} \quad (1)$$

$$\beta_n = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + (\alpha_n - \theta_n) \right) \quad (2)$$

$$\frac{\Delta z_n}{\Delta x_n} = \tan \left(\frac{\pi}{2} - \beta_n + \alpha_n \right) \quad (3)$$

$$z_{n+1} = z_n - \Delta z_n \quad (4)$$

$$x_{n+1} = x_n - \Delta x_n \quad (5)$$

对应的初始条件为:

$$z_0 = h; x_0 = h / \tan \alpha_0 = h / \tan \left(\frac{\pi}{2} - \phi \right);$$

$$\theta_0 = \phi = \arctan \frac{R}{H}; \beta_0 = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} (\alpha_0 - \theta_0)。$$

由公式(1)~(5)及初始条件即可通过编程,用迭代法逐个求出反光杯截面自上而下的一条自由曲线上 N 个点的坐标 (x_n, y_n) ,由所求点即可拟合成对应的自由曲线,根据照明目标的特点,将其旋转或拉伸,即可得到对应的自由曲面反光杯。

2 设计实例与模拟

根据以上方法,分别设计用于实现圆形和正方形均匀照明的反光杯。

(1)设计灯高 10 m、直径 20 m 圆形范围均匀照明的 LED 反光杯,要求杯高为 15 mm。

根据设计要求可知,所设计反光杯的 α_0 为 45° ,最大竖直方向的偏向角 θ_0 为 45° ,根据以上方法,计算初始条件如下: $z_0 = 15 \text{ mm}; x_0 = 15 / \tan 45^\circ = 15 \text{ mm}; \theta_0 = \phi = 45^\circ; \beta = 45^\circ$ 。设迭代次数为 1000,则迭代的步长为: $\Delta z_n = \frac{h}{N} = 0.015 \text{ mm}; \Delta x_n = \frac{\Delta z_n}{\tan \left(\frac{\pi}{2} - \beta_n + \alpha_n \right)} = \frac{0.015}{\tan \left(\frac{\pi}{2} - \beta_n + \alpha_n \right)} \text{ mm}$,经多次优化选取 $\theta_0 = \frac{\phi}{N} = 0.06^\circ$ 。

将以上参数输入用 C++ 编写的程序中,得到自由曲线的各点坐标,将其导入 Rhinoceros 犀牛建模软件中拟合出自由曲线,再旋转得反光杯模型如图 3 所

- illuminations [C]//SPIE, 2001, 4442: 43-50.
- [7] Ries H, Muschaweck J. Tailored freeform optical surfaces [J]. *J Opt Soc Am A*, 2002, 19(3): 590-595.
- [8] Ding Yi, Zheng Zhenrong, Gu Peifu. Freeform LED lens for uniform illumination [J]. *Opt Express*, 2008, 16: 12958-12966.
- [9] Ding Yi, Gu Peifu. Freeform reflector for uniform illumination [J]. *Acta Optics Sinica*, 2007, 27(3): 540-544. (in Chinese)
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.
- [10] Han Yanjun, Zhang Xianpeng, Feng Zexin et al. Variable-separation three dimensional freeform nonimaging optical system design based on target-to-source mapping and micro belt surface construction[J]. *Sciencepaper Online*, 2010, 5(1): 35-40. (in Chinese)
韩彦军, 张贤鹏, 冯泽心, 等. 基于由照射目标向光源映射和微带表面构型的分离变量三维自由曲面非成像光学系统设计[J]. 中国科技论文在线, 2010, 5(1): 35-40.
- [11] Wang L, Qian K Y, Luo Y. Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(18): 3716-3723
- [12] Wang Hong, Zhang Xiaofan, Wang Haihong, et al. Reflector design method of integrated high-power LED light source [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1282-1286. (in Chinese)
王洪, 张小凡, 王海宏, 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.
- [13] Yang Yi, Qian Keyuan, Luo Yi. A novel LED uniform illuminance system based on nonimaging optics [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(1): 110-115. (in Chinese)
杨毅, 钱可元, 罗毅. 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): 110-115.
- [14] Jiang Jinbo, Sandy To, Lee W B, et al. Optical design of a freeform TIR lens for LED streetlight [J]. *Optics*, 2009, 17(3): 1-5.
- [15] Wang Wei. Study on the design method of uniform illumination based on transmitted free-form surface theory [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006: 6-26. (in Chinese)
汪巍. 基于透射型自由曲面理论的均匀照明设计方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 6-26.
- [16] 建筑照明设计标准. GB 50034-2004 [S]. 北京: 中华人民共和国建设部, 2004.

下期预览

基于受激布里渊散射的可调谐多波长激光器的研究

姚斌, 童峥嵘, 杨秀峰, 曹晔

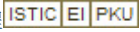
(天津理工大学 智能计算及软件新技术重点实验室及薄膜电子与通信器件实验室, 天津 300384)

摘要: 可调谐多波长布里渊掺铒光纤激光器将光纤中的SBS非线性放大同掺铒光纤的线性放大相结合得到室温稳定的多波长输出, 具有波长间隔一致、线宽窄、功率谱相对平坦等优点。设计了一种使用FBG构成反射腔的线形可调谐多波长布里渊掺铒光纤激光器。利用光纤布拉格光栅(FBG)进行选频滤波, 有效抑制腔内自激模的影响, 增加激光器输出波长数。布里渊泵浦信号进入布里渊增益介质之前经过掺铒光纤放大器的两次放大, 降低了布里渊增益的阈值。该多波长激光器实现了1530~1560 nm之间30 nm可调谐范围的输出。在布里渊泵浦信号功率2 mW、980 nm泵源抽运功率60 mW情况下, 1540~1554 nm范围内, 获得了波长间隔0.088 nm的16个波长的输出。

基于补偿法的均匀照明自由曲面LED反光杯设计

作者: [闫兴涛](#), [杨建峰](#), [张国琦](#), [卜凡](#), [张磊](#), [Yan Xingtao](#), [Yang Jianfeng](#), [Zhang Guoqi](#), [Bu Fan](#), [Zhang Lei](#)

作者单位: [闫兴涛, 卜凡, 张磊, Yan Xingtao, Bu Fan, Zhang Lei \(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西西安 710119; 中国科学院研究生院, 北京100049\)](#), [杨建峰, Yang Jianfeng \(中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西西安, 710119\)](#), [张国琦, Zhang Guoqi \(西安中科麦特电子技术设备有限公司, 陕西西安, 710119\)](#)

刊名: [红外与激光工程](#) 

英文刊名: [Infrared and Laser Engineering](#)

年, 卷(期): 2012, 41 (3)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_hwyjggc201203031.aspx