

基于配焦椭流法法和梯度优化的自由反射面设计

张 航 李梅花 马宇飞 梁 雪 严金华

浙江工业大学应用物理系, 浙江 杭州 310023

摘要 结合配焦椭流法法和梯度算子,提出了一种针对LED扩展光源的自由反射曲面优化设计方法,其中配焦椭流法法负责生成自由反射曲面,梯度算子实现迭代优化。以线度为5 mm的LED扩展光源的轴对称均匀投光为例,完成了单个光滑连续自由反射面的设计和优化。光学仿真结果表明,优化前初级照度均匀度约为0.77,而优化后达到0.98,效果良好,并具有向非轴对称自由反射曲面设计拓展的可能性。

关键词 光学设计;非成像光学;自由反射面;配焦椭流法法;梯度优化;扩展光源

中图分类号 O435; O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.052201

Design for Free-Form Reflector Surface Based on Foci Mapping Ellipse Flow-Line Methods and Gradient Optimization

Zhang Hang Li Meihua Ma Yufei Liang Xue Yan Jinhua

Department of Applied Physics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract An optimized design method of free-form reflector surface for extended LED source, which is based on the foci mapping ellipse flow-line methods for generating free-form surfaces and the gradient operator for optimization, is presented. And a continued free-form surface reflecting the lights from a 5 mm size LED extended source to a target plane in rotational symmetrical uniform pattern is designed and optimized. Optical simulation results show that the original irradiance uniformity is about 0.77 and the optimized irradiance uniformity reaches 0.98. This method can be applied to the optical design of non-rotational symmetric reflector.

Key words optical design; nonimaging optics; free-form reflector; foci mapping ellipse flow-line method; gradient optimization; extended light source

OCIS codes 220.2740; 080.4298; 080.4035; 080.4225

1 引 言

大功率白光LED作为第四代光源正在替代传统光源进入日常应用中,具有广阔的应用前景^[1]。由于LED光源独特的空间光强分布特性,传统照明灯具无法适应LED光源的配光需求,也无法完全发挥其优势,因此需要针对LED的发光特点进行光学设计以实现LED光源能量的合理配分和高效利用,即二次光学设计。非成像光学理论为LED光源的二次光学设计提供了有力的理论依据。

对于LED光源的二次光学设计主要分为折射型和反射型。折射型一般是采用透镜对LED发出的光线进行配光,其结构比较紧凑,是目前大功率LED常用配光方法,但折射型光学器件也存在容易引入色散的缺点。反射型采用二次曲面或自由曲面对光线进行投射,可避免色散的引入并简化设计。目前对LED反射器的设计已经取得了一定的进展:余桂英等^[2]设计的LED均匀照明反射器照度均匀性达到了90.6%;Ding等^[3-4]设计的自由曲面反射器在投射区域内也实现了90%左右的照度均匀性;Fournier等^[5]的自由曲面快速生成法目标面均匀度达到93%,而其研究的LED投影机空间均匀度已经达到95%左右^[6];Zhang等^[7]设计的LED菲涅耳反射器总体均匀度大于93.7%。然而想要进一步提高目标照度分布的均匀度,尤其对扩展光源,存在很大的困难。为了突

收稿日期: 2013-10-10;收到修改稿日期: 2013-11-29;网络出版日期: 2014-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(61274124)

作者简介: 张 航(1970—),男,博士,副教授,主要从事非成像光学、智能照明等方面的研究。

E-mail: physzhang@zjut.edu.cn

破这一均匀性瓶颈,本文提出一种基于配焦椭流线法和梯度算子的自由反射面优化设计方法。

本文设计方法主要包含两个算法:1)曲面生成算法,先建立点光源与目标光场(会点)分布,再利用配焦椭流线法建立源点与会点的一一对应关系,然后遍历所有会点构建出初始自由反射曲面;2)梯度优化算法,对初始自由反射面进行光学仿真获得目标光照度分布,计算该照度分布的梯度场并作用到会点场上形成有向位移,再重新生成反射曲面实现迭代优化。最后以线度为5 mm的LED扩展光源的轴对称均匀照明为例设计一个自由反射面,光学仿真得到初始照度均匀度为0.77,通过11代优化后均匀度达到0.98,证明了该优化设计方法的有效性,而且所设计的反射表面光滑连续,方便机械加工。研究内容为大功率LED光源照明的非成像光学设计提供了一定的参考。

2 设计原理

2.1 边光原理和流线理论

边光原理是非成像光学中的一个基础原理,其内容可以表述为:来自光源边缘的光线经过若干有序正则光学曲面后依然落在投射光斑的边缘,而来自光源内部的光线也将落在光斑内部^[8-9]。这里的边缘包含两层含义:1)二维曲面边缘,2)光束立体角边缘。对于需要考察光斑内部分布的照明配光器件而言,利用边光原理可以生成一个基础方案,也为设计带来方便。

流线理论是又一非成像光学重要理论。流线的本质是光学动量的矢量合成轨迹,其性质可表述为在辐射场中放置一条反射性的流线,并不会改变辐射场的分布情况^[8]。由于流线的引入,为非成像光学设计带来了如下方便:1)改变光源的尺寸和位置;2)改变光源特性(如发散或会聚);3)改变光源配光特性(如光线发散角等)^[7]。流线设计方法可以针对光源形状和辐射场分布设计出特定的二次流线反射器形状,从而实现光源的配光^[8-10]。

2.2 配焦椭流线法

非成像光学设计中通常引入二次流线,典型的二次流线有:椭流线、双曲流线和抛物流线。在传统聚光灯具的光学设计中多采用抛物流线,而在LED照明设计中更多采用的是椭流线。采用椭流线的理由是:根据椭圆性质,椭流线可以将其焦点上光源发出的光线会聚到另外一个焦点,对光线投射具有良好的控制性^[7]。在设计过程中,需要将LED在半球空间中进行等通量均分,每一等份辐射通量都对应一个由椭流线生成的椭球面并经过椭球面的反射会聚到目标面的对应焦点上。一源一会分别落在椭圆(球)的两个焦点上,根据配光要求生成目标会点分布,再通过合适的反射曲面实现焦点匹配,将LED发出的光线投射到相应的点上形成目标光分布,故此方法称为配焦椭流线法。

2.3 优化方法

利用配焦椭流线法实现点源发出的光经过特定曲面面元投射到目标面相对应的一点上,将这些面元拼接就形成了一个有效的反射曲面。然而对于扩展光源,经过特定曲面面元投射到目标面上不再是一个点,而是展宽成一个区域分布。这个区域分布既与光源面的位置形状等因素有关,又与反射曲面面元的位置、方向和形状等因素相关,十分复杂。由于扩展光源引入投射展宽的存在,使得原来适用于点源的配焦椭流线法生成曲面产生了较大的偏差。为了解决这个问题,引入了一种负反馈优化算法。以均匀投光为例,优化算法主要思路为:1)由配焦椭流线法生成初始反射曲面,并进行光学仿真获得目标初始光分布;2)求出初始光分布的梯度分布,作用到目标会点分布上,实现会点场向光强低的地方不等距移动,形成新的会点分布;3)由点源配焦椭流线法生成新一代反射曲面,进行光学仿真获得目标一次优化光分布,最后判断是否符合设计要求,若否重复类似2)和3)的步骤,直至终止。

3 自由反射面的生成与优化

3.1 自由反射面的生成

先将LED看成是点源,构建点源配光反射曲面通常分为两步:1)将光源的空间或角空间能量均分,2)根据目标照度要求构建反射曲面。未进行任何初级配光的LED光源可看作是一个朗伯发光体,其光强分布为 $I(\theta) = I_0 \cos \theta$, I_0 为法线方向的光强, θ 为发射方向与法线的夹角,因此在半球空间中光源的总辐射通量为^[7]

$$\Phi = 2\pi \int_0^{\pi/2} I(\theta) \sin \theta d\theta. \quad (1)$$

将该半球面分为 N 个等通量的圆环面, 则通过每一圆环面的辐射通量都为 $\Delta\Phi = \Phi/N$ 。据此可以计算出能量均分后的每一个环面对应的角度区间, 该角度区间决定了每段椭流线的长度。图 1 所示为光源按通量均分的示意图, 以 LED 中心为坐标原点建立坐标系, 则设计可以简化在 $x-y$ 平面内进行。

源空间采用角度分割, 而在目标面上采用面积均分, 以保证相等面积上接收到相等能量。容易推得等面积分割的半径簇为: $r(i) = \sqrt{iR^2/N}$, 式中 R 为圆形目标面的半径, N 为分隔份数, i 为分割的圆环面的序号。源点坐标不变, 对应的会点坐标为

$$F(i) = \left[-h, \frac{r(i-1) + r(i)}{2} \right], \quad (2)$$

其中 h 为坐标原点到目标面的距离。确定反射器中心起始点距离光源中心的高度后即可根据椭圆性质顺次确定椭流线表达式为 $\frac{K^2 - f^2}{2K - 2f \cos \varphi} (\cos \varphi, \sin \varphi)$, 其中 $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, K 为第 i 个椭圆常数, $f=[F, S]$ 为第 i 个椭圆的两个焦点 F, S 的间距。通过上述计算得到 $x-y$ 平面内对应目标面上不同焦点的 N 段椭流线段及坐标数据, 构成反射面的母线。该母线绕轴转 360° 即可得整个反射曲面的坐标数据, 通过 NURBS 曲面建模得到一个光滑的自由曲面反射面。

将所得的 NURBS 反射曲面导入 Tracepro 进行光学仿真, 并设定 COB 封装 LED 光源功率为 10 W、 3×3 阵列排布、边长为 5 mm 和一次配光为朗伯型。由于反射配光不会引入色散, 因此取单色波长 560 nm 代替可见光谱, 光源距离反射器中心起始点的高度为 50 mm, 光源距离目标面的高度为 1 m, 追迹光线为 100 万条。图 2 为光学仿真所得的初始照度分布, 其均匀度只有 0.77, 需要进一步优化。

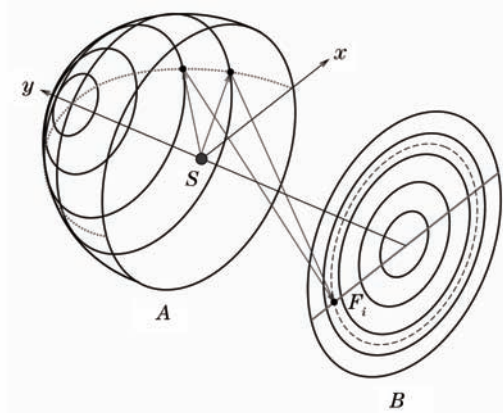


图 1 光源及目标面的通量均分

Fig.1 Source and target equi-flux slice

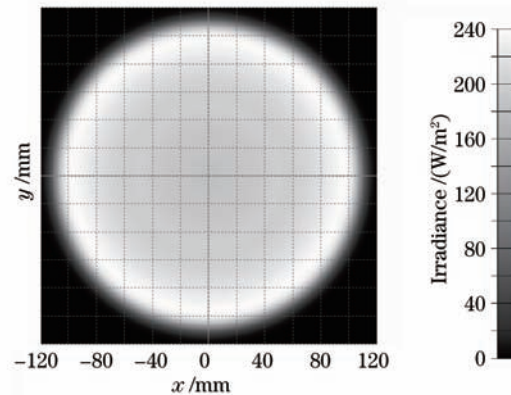


图 2 初始照度分布

Fig.2 Original irradiance distribution

3.2 自由反射面的优化

为了实现反射曲面的优化, 定义优化目标函数为

$$\sigma = \sum_{i=1}^N |\Psi_i - \Psi_i^*|, \quad (3)$$

式中 σ 为一维范数, Ψ_i 为投射到第 i 个环面的光能, Ψ_i^* 为投射到第 i 个环面的目标光能或预定光分布。由于以均匀分布为目标, 因此 Ψ_i^* 可表示为平均光能: $\Psi_i^* = \sum_{i=1}^N \Psi_i / N$ 。显然当 $\sigma = 0$ 时, 反射光分布实现了理想的均匀分布, 所以这里用照明设计中常用的均匀度替代 σ 作为目标函数。

根据前面的优化思路, 由初始照度分布计算可得梯度场分布, 按会点位置提取梯度值并作用到会点坐标上产生会点位移, 形成新的会点分布。作用机理如图 3 所示, $P_i P_{i+1}$ 为一段椭流线段 (即反射曲面), 其目标面上对应的初始焦点为 F_i , 如果初始焦点 F_i 在梯度场作用下移动到 F_i^- (或 F_i^+), 则椭流线段由 $P_i P_{i+1}$ 变

为 P_iP^- (或 P_iP^+)。换言之,可以根据目标面上会点分布的改变来调整反射曲面的形状,而会点分布的改变是由目标函数驱动的,由此保证迭代结果的收敛性。

有了新的会点分布又可以利用配焦椭流线法生成一个新的自由反射面,再导入 Tracepro 光学仿真获得新的照度分布,计算新的目标函数并判断终止条件,如此循环往复,直至符合终止条件为止。当整个优化过程结束时便得到了最终的自由反射面,其对应的照度分布如图 4 所示,均匀度已达到 0.98,效果较好。

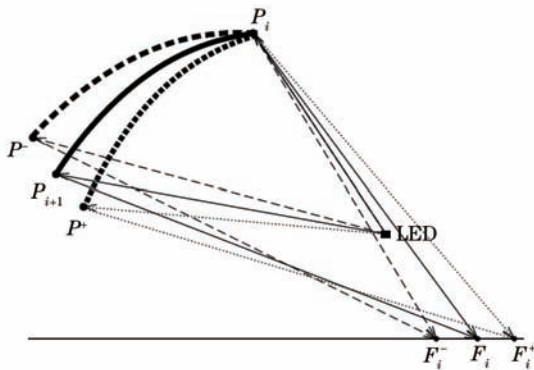


图3 目标面上会点的移动

Fig.3 Movement of the focus on target plane

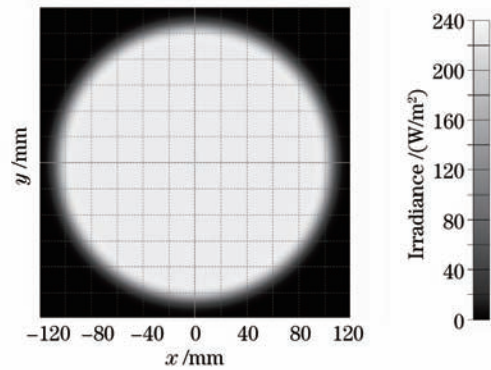


图4 优化照度分布

Fig.4 Optimized irradiance distribution

4 结果与分析

均匀度选用目标面均匀照明区域内的照度最小值与最大值之比。图 5 为优化过程中每一代的照度均匀度,可知初始照度分布的均匀度约为 0.77,经过第一代优化后均匀度已提升到 0.90,第二代优化后达到 0.93,随着优化代数增加均匀度的提升逐渐趋缓,并最终达到 0.98。整个优化过程中照度均匀度呈现对数增长特征,实现了快速收敛,只需 10 代即可完成优化,10 代以后均匀度变化很小,目标函数趋于收敛。

图 6 为目标面 $x=0$ 线上的照度分布,给出了初始(origin)、第 1 代(g1)、第 6 代(g6)以及末代(g11)的照度曲线。由 origin 曲线可以看出,光斑尺寸范围为 $-120\sim+120$ mm。光斑照度的峰值出现在两侧约为 300 W/m^2 ,谷值则在中间约为 230 W/m^2 ,其梯度场指向中间区域。第 1 代优化过程中大部分的会点向中间移动,重建反射曲面后的照度分布可以从 g1 线看出,光能量有效地往中间区域移动,并有效地将均匀度提高了 0.13。这表明配焦椭流线法成功建立起会点位移与能量移动之间的直接对应关系,获得了明显的优化效果。

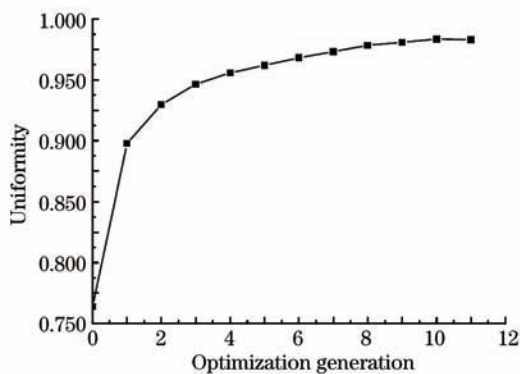


图5 优化过程中的均匀度

Fig.5 Uniformity in optimizing process

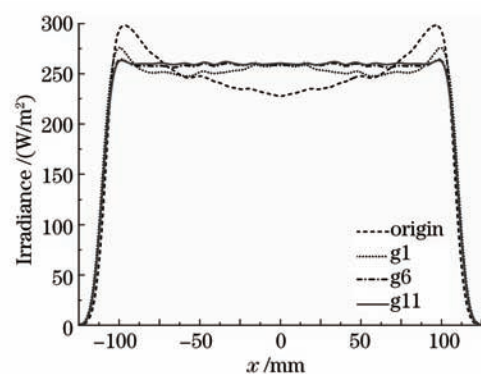


图6 优化过程中照度剖面曲线

Fig.6 Irradiance profile curve in optimizing process

结合图 5 和图 6,还可以看出 6-11 代优化过程中,照度剖面曲线的变化趋于稳定,均匀度达到 0.98 后很难进一步提高,究其原因主要在于本文采用连续光滑拟合的 NURBS 自由曲面与实际椭球面元阵列构成的非连续曲面之间存在一定的误差。为消除这个误差需要解决一个强约束下的 NURBS 曲面构建的计算几何数学问题,目前存在较大的困难。采用连续的 NURBS 曲面的原因为非连续的鳞甲曲面在机械加工上存在

较多困难,但是本文的设计精度已经可以满足绝大多数照明应用要求。

以轴对称目标光分布和自由反射面为例来阐述配焦椭流法在自由反射面设计和优化中的作用与机理,有两个核心:配焦与梯度算子。配焦算法提供了自由曲面的构造方法,梯度算子则提供了负反馈优化方法,而这两者本身都不局限于轴对称结构,完全可以拓展到任意目标光分布的非轴对称自由反射面优化设计中,但在NURBS曲面构造上会引入更大的困难。

5 结 论

利用配焦椭流法和梯度算子实现了针对LED扩展光源的自由反射曲面的配光设计与优化方法。并以轴对称均匀照明为例设计一个自由反射面,其初始照度均匀度为0.77,通过11代优化后均匀度达到0.98,充分说明了该优化设计方法的有效性。并且反射表面为光滑连续,具有方便机械加工的优点。该方法主要适用于定距照明,当光源与目标面距离远大于配光器件尺寸时,同样适用于非定距照明设计。该方法还具有向非轴对称结构设计的拓展性,但在拓展中也存在一个位置和法向量场严格约束下的自由NURBS曲面的构建难题有待解决。研究内容为大功率LED光源照明的非成像光学设计提供了一定的参考。

参 考 文 献

- 1 Zhou Zhimin, Ji Aihua. Design and Application of High Power LED Illumination Technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. 1-10.
周志敏, 纪爱华. 大功率LED照明技术设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011. 1-10.
- 2 Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu, *et al.*. Design for LED uniform illumination reflector based on etendue [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2297-2301.
余桂英, 金 骥, 倪晓武, 等. 基于光学扩展量的LED均匀照明反射器[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2297-2301.
- 3 Ding Yi, Liu Xu, Zheng Zhenrong, *et al.*. Freeform LED lens for uniform illumination [J]. Optical Society of America, 2007, 16(17): 12958-12966.
- 4 Ding Yi, Gu Peifu. Free form 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.
- 5 Fournier F R, Cassarly W J, Rolland J P. Fast freeform reflector generation using source-target maps [J]. Opt Express, 2010, 18(5): 5295-5304.
- 6 F Fournier, J Rolland. Optimization of freeform light pipes for light-emitting diode projectors [J]. Appl Opt, 2008, 47(6): 86-96.
- 7 Zhang Hang, He Yemei, Li Dong, *et al.*. Design for Fresnel reflector of uniform light LED tubes based on ellipse flow-line methods with equipartition and foci map [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(4): 421-424.
张 航, 贺叶美, 李 栋, 等. 基于均分配焦椭流法的LED匀光管菲涅耳反射器设计[J]. 光子学报, 2012, 41(4): 421-424.
- 8 Julio C. Introduction to Nonimaging Optics [M]. New York: CRC Press, 2008. 55-116, 474-475.
- 9 Harald R, Ari R. Edge-ray principle of nonimaging optics [J]. Opt Soc Am A, 1994, 11(10): 2627-2632.
- 10 Roland Winston, Juan C. Miñano, Pablo Benítez. Nonimaging Optics [M]. London: Elsevier Academic Press, 2005. 99-157.