

文章编号:1002-2082(2015)05-0818-05

自由反射面设计中的椭流面光滑化研究

张航, 刘超, 马宇飞, 周海波, 苏泽宇, 陈钢

(浙江工业大学 应用物理系, 浙江 杭州 310023)

摘要: 基于配焦椭流面的光学自由曲面设计具有几何意义明确、设计灵活和优化思路清楚等优点, 但也存在表面不光滑的弊端。为了将每个椭流面片尽可能地光滑拼接, 从边缘一点为起始位置开始构建自由反射面, 先在 θ 方向构建光滑的椭流面, 然后通过调整能量分配的方法, 减小曲面在 φ 方向的不连续性。通过仿真验证, 此方法可在 2 min 内完成对 40 000 个椭球面片的计算处理, 构建的曲面保证能量在目标面上均匀分配的同时在连续光滑性上也有很大提高。

关键词: 几何光学; 矩形均匀照明; 配焦椭流面; 非成像光学; 自由反射面

中图分类号: TN202

文献标志码: A

doi:10.5768/JAO201536.0505005

Smoothing of ellipsoid flow patches in optical design for freeform reflector

Zhang Hang, Liu Chao, Ma Yufei, Zhou Haibo, Su Zeyu, Chen Gang

(Institute of Intelligent Optoelectronic Technology, Zhejiang University of Technology,
Hangzhou 310023, China)

Abstract: The optical design based on foci mapping ellipse flow-patch method has many advantages, such as clear geometric meaning, design flexibility and explicit method of optimization, but there is a drawback that the surface is not smooth. In order to sew up each ellipse flow-patch on the freeform reflector smoothly, the surface of reflector started from one point on the edge and a smooth ellipse flow-patch was built in the θ -direction, then the discontinuity in the φ -direction could be reduced by the energy adjusting method. The time consumption for the surface reconstruction from 40 000 ellipsoid pieces with this method is only about 2 min. The free-form surface cannot only ensure the energy distributed equally, but also improve the smoothness greatly.

Key words: geometrical optics; rectangular uniform illumination; foci mapping ellipse flow-line method; nonimaging optics; free-form reflector

引言

随着 LED 技术的日益成熟, LED 照明将逐渐取代传统光源成为新一代的绿色光源。与传统光源相比, LED 具有寿命长、光效高、无污染等优点^[1-2]。目前 LED 光源广泛应用于各种室内和室外照明, 包括背光源、道路照明、汽车照明等^[3-5]。由于 LED 光源通常属于朗伯型光源, 存在亮度过高和失能性眩光等问题, 因此对 LED 光源进行二

次光学设计成为一种必然, 这正是非成像光学的重要应用之一。

二次配光是指通过设计透镜或反射面的自由曲面来实现 LED 光源能量的二次分配, 自由曲面的构造方法可以分为微分方程法和几何法等, 微分方程法是根据光源发光特性和预定的照明要求, 由 Snell 定律和能量守恒定律构建光学自由曲面所满足的数学方程, 通过数值求解方程得到自

收稿日期: 2015-04-09; 修回日期: 2015-05-17

作者简介: 张航(1970—), 男, 浙江浦江人, 博士, 副教授, 主要从事非成像光学、LED 照明和量子点 LED 等方面的研究。
E-mail: physzhang@zjut.edu.cn

由曲面的面型数据,如偏微分方程法、剪裁法、SMS法等^[6-7],几何法是根据能量守恒将预定照明目标离散化,并基于一些常规几何曲面的光学特性,用一组几何曲面的包络面来确定自由曲面,如SP(supporting paraboloids)法。偏微分方程法和剪裁法均能实现非轴旋转对称照明区的照明区,但该方法设计过程极为复杂,SMS法对于非对称的照明设计过程较为繁琐,而且难以完成指定光强分布的配光任务。SP方法往往需要通过对数万个几何面片进行调整,存在过程复杂、计算量大、表面不光滑和不易加工等缺陷^[8-10],但该方法具有设计自由,可以实现任意图像的配光设计。

本文采用一种有别于传统的能量划分方式,采用光源的法向与角空间对称轴垂直的方式,使光学曲面在 θ 方向上通过简单拼接实现光滑,从而将二维表面的不光滑问题压缩为 φ 方向单维度的不光滑问题。在 φ 方向采用局域能量再分配方法进行曲线光滑化处理,并建立了基于切矢量变化率的光滑度评价方法,优化后的曲面光滑度提高了4倍。光学仿真结果表明优化所得的光学表面在矩形均匀配光中保持了良好的稳定性,本文方法在一定程度上丰富了自由光分布为目标的非成像光学设计思路。

1 设计原理

1.1 映射关系

对于矩形均匀配光,如图1所示,需要将目标面离散成规则的离散点,为更直观地实现自由曲面与目标面的对应关系,将光源放置于直角坐标系原点位置,发光面法向为 z 轴方向。为方便描述光通量划分形式,将出射光线在 xoz 平面内的投影与 z 轴的夹角记为 θ ,从 x 轴正方向到负方向 θ 的角度变化范围记为 $(\pi/2) \sim (-\pi/2)$ 。将出射光线在 yoz 平面内的投影与 z 轴的夹角记为 φ ,从 y 轴正方向到负方向 φ 的角度变化范围 $(\pi/2) \sim (-\pi/2)$ 。

将LED光源看作朗伯体点光源,其总光通量为 $\Phi = \pi I_0$, I_0 为LED点光源在 z 方向上的光强,在其他方向的光强可以表示为 $I(\theta, \varphi) = I_0 \cos \theta \cdot \cos \varphi$ 。将目标面离散化成 $2m \times 2n$ 个点,对于矩形均匀照明,我们只需考虑第一象限的分配情况即可。

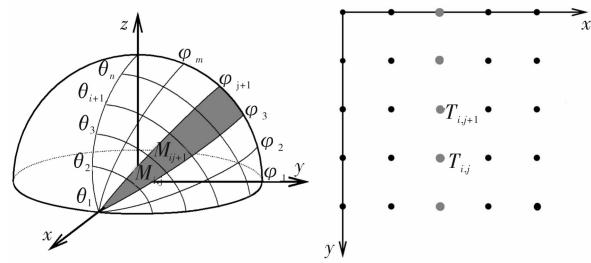


图1 光通量与目标面对应关系

Fig. 1 Mapping relation between flux and target surface

从光源发出的光经过灰色自由曲面各曲面片的反射均匀地投射到目标面上灰色列的各点上,通过能量均等划分,使得整个自由曲面的各个自由面片将相等的光通量映射到其对应的目标面位置,每个离散点对应的光通量相同。根据能量守恒推出:

$$\int_{\varphi_j}^{\varphi_{j+1}} \int_{\frac{\pi}{2}}^{-\frac{\pi}{2}} I_0 \cos^2 \theta \cos \varphi d\theta d\varphi = \pi I_0 / m \quad (1)$$

$$\int_{\varphi_j}^{\varphi_{j+1}} \int_{\theta_{j,i}}^{\theta_{j,i+1}} I_0 \cos^2 \theta \cos \varphi d\theta d\varphi = \pi I_0 / mn \quad (2)$$

将(1)式和(2)式整理后得到:

$$\varphi_{j+1} = \arcsin(j/m) \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

$$2\theta + \sin(2\theta) = \pi i / n \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

由(3)式和(4)式可以求得光源离散化的 θ 向和 φ 向对应的角度。

1.2 方向曲面拼接

如图1所示,曲面片 $M_{i,j}$ 和 $M_{i,j+1}$ 是与目标面上相邻离散点 $T_{i,j}$ 和 $T_{i,j+1}$ 对应的自由曲面上的有效椭流面片。2个面片所取的形状如图2所示,曲面上灰色部分的中间区域为对应于目标面上离散点的有效曲面面积,灰色部分的两端部分为同一椭球面片在其他空间位置的分布。

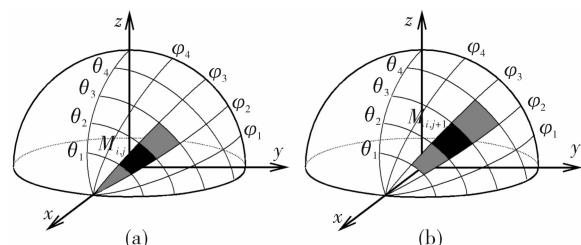


图2 曲面拼接

Fig. 2 Patch's blending

目标面上沿 θ 方向相邻两点对应的有效曲面拼接如图3所示, P_i 和 Q_i $(i=1, 2, \dots, k)$ 为2个曲面相邻边界上的点,为尽量减小相邻曲面拼接处的突变程度,需要对曲面采用局部优化处理。将

曲面上 $P_i (i=k/4)$ 到光源和目标面对应点的距离之和 L 作为曲面调节的参数, 将 P_i 点和 Q_i 点 ($i=k/4$) 的距离的 $1/k$ 作为曲面调节参数 L 的调节梯度, 通过这种调节, 可以快速使得 P_i 中 L 距离大于对应 $Q_i (i=1, 2, \dots, k)$ 的控制点数量等于 P_i 中 L 距离小于对应 Q_i 的控制点数量, 然后取 2 个曲面片的外侧包络面, 可以在保证能量近乎完全等分的同时实现曲面在 θ 方向的平滑过渡。

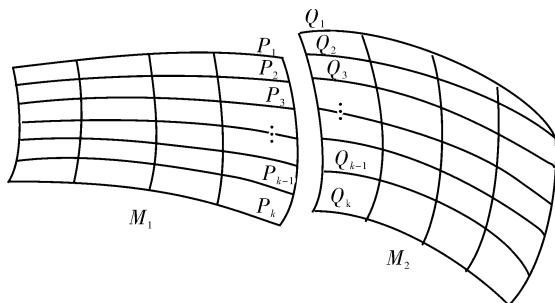


图 3 曲面优化调节

Fig. 3 Surface optimization process

1.3 方向曲面光滑化

如图 4 所示, 为了使曲面在 φ 向更光滑, 将曲面 1 映射到目标面 T_1 点的能量减少, 从曲面 2 上分配一部分能量来弥补曲面 1 映射到 T_1 点处减少的能量, 通过这样的能量调节, 曲面 2 靠近面 1 的曲面边缘会越来越接近面 1 的边缘, 曲面 2 靠近面 3 的曲面边缘会越来越接近面 3 的边缘, 通过将所有曲面片进行能量的重新分配, 可以基本实现曲面在 φ 向的光滑连续。

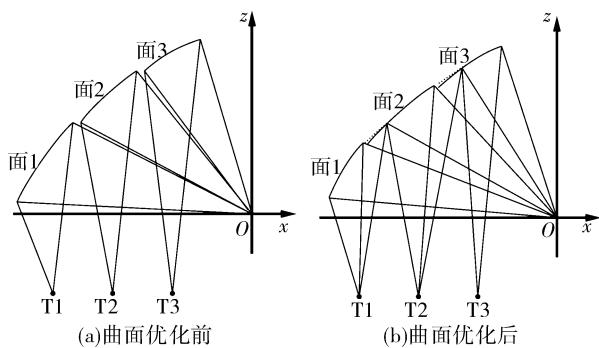


图 4 曲面优化调整

Fig. 4 Surface before and after optimal adjustment

1.4 曲面局部光滑评价

为更为直观地了解所构建曲面的光滑度, 这里定义一种曲面局部光滑度评价函数, $P_i (i=1, 2, 3)$ 是曲面上任意方向上相邻的 3 个曲面型值点, k_1, k_2, k_3 是曲面上点 P_1, P_2, P_3 的单位切向矢量, k_a 是 k_1, k_3 的和矢量, 如图 5 所示。

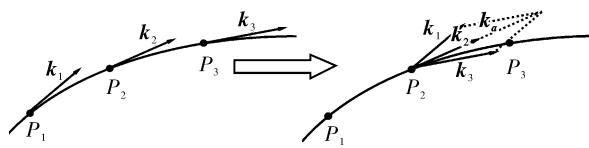


图 5 曲面局部光滑度评价方法

Fig. 5 Evaluation of local surface smoothness

将 k_2 和 k_a 的夹角作为曲面局部光滑度的评价参数, 对于夹角比较小的情况下, 为更清晰地评价曲面光滑度, 也可以将 k_2 和 k_a 正切值的比值作为曲面局部光滑度的评价参数, 用 η 表示, η 的值越接近 1 则曲面的光滑度越好。 α 为矢量 k_2 与 k_2 在 xoy 平面内投影的夹角, β 为矢量 k_a 与 k_a 在 xoy 平面内投影的夹角, 则曲面各点处 η 可以由(5)式求得:

$$\eta = \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} \quad (5)$$

2 曲面生成和仿真分析

初步生成的反射面如图 6(a) 所示, 从效果看, 自由反射面在 θ 方向光滑, 但在 φ 方向并不光滑, 需要通过其他方式进行优化。将曲面导入 Tracepro 中进行模拟仿真, 得到的仿真图见图 6(b)。

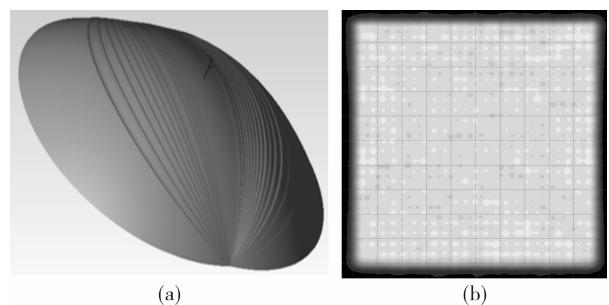


图 6 初步生成的自由反射面和光学仿真结果

Fig. 6 Freeform reflective surfaces generated preliminary and optical simulation results

从仿真结果来看, 通过这种构建方式可以实现矩形均匀配光的要求, 但曲面只能在 θ 向方向实现光滑连续, 在 φ 向方向存在局部不光滑的问题, 加工难度较大, 因此, 我们需要对 φ 方向进行局部优化调节。

φ 向光滑化处理后得到的自由曲面如图 7(a) 所示, 原先在 φ 方向存在的曲面不光滑程度得到了改善, 在保证照明效果的同时基本实现了可加工的目的。经过曲面优化调整后的仿真效果如图 7(b)。通过对 1×10^6 条光线追迹仿真结果, 曲面在经过优化后会有少量的光通量发散, 但对整体

光通量分布的影响很小,光效仍能达到90%,优化前目标面光通量分配均匀度为0.96,优化后均匀度为0.90,这是由于选择的优化方式以及目标面离散化点的数量不够多产生的问题。

通过对曲面优化前后沿 θ 和 φ 方向于 $(0 \sim \pi/6)$ 、 $(\pi/6 \sim \pi/3)$ 和 $(\pi/3 \sim \pi/2)$ 区间内随机取曲线进行局部光滑度测定。通过曲面局部光滑度计算,曲面优化前后在 θ 向保持良好的光滑程度,经过曲面优化在 φ 方向也得到了改善,通过对局部光滑自由度的计算,优化后的局部光滑度是优化前的4倍。结果如图8所示。

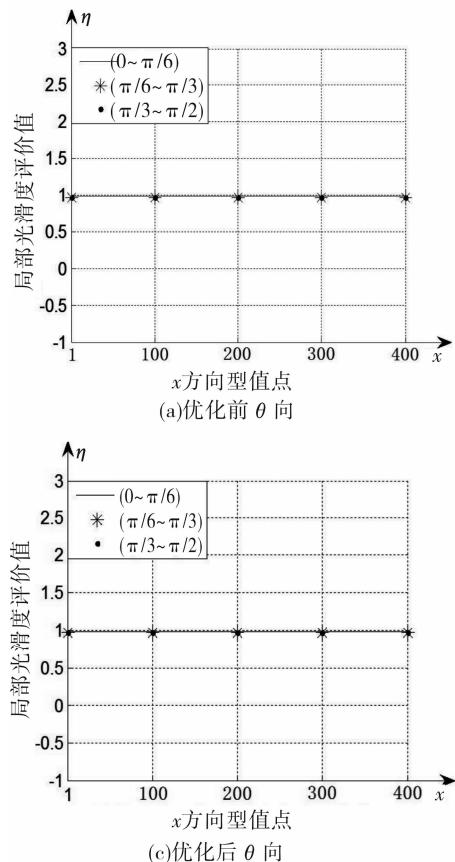


图8 优化前后光滑度

Fig. 8 Smoothness of freeform surface

3 总结

基于光源角空间和目标面空间的网格化,并通过椭流面片建立合适的映射关系,利用拼接方法构建出自由光学曲面。这种方法简单方便,但也存在曲面拼接不连续光滑的问题。本文通过改变能量的分配方式,保证曲面在角度划分的 θ 方向上光滑,将二维不光滑问题压缩到了 φ 方向单维度的光滑性问题上,再进行曲面局部光滑化处理,

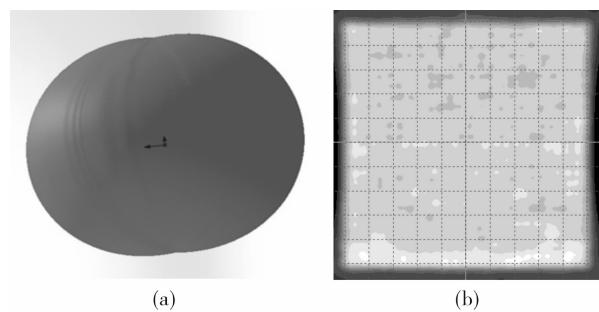


图7 优化后的自由曲面和优化后的光学仿真结果

Fig. 7 Freeform surface optimized and optical simulation results after optimization

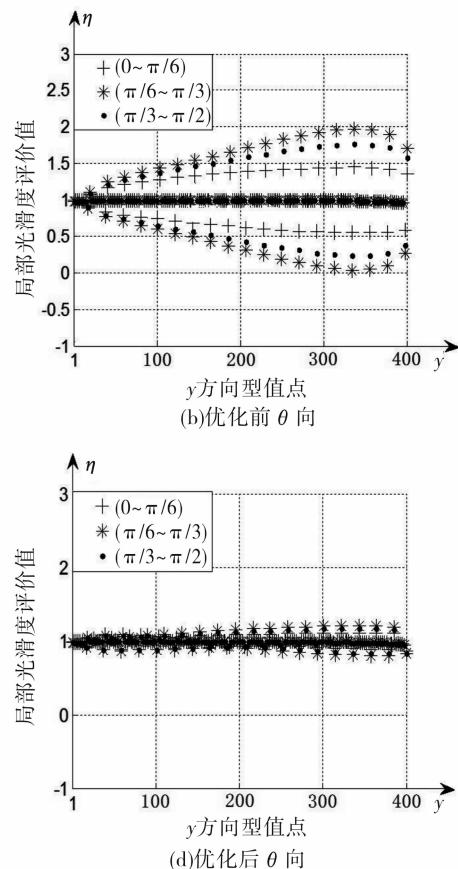


图7 优化后的自由曲面和优化后的光学仿真结果

不仅较快速实现了光滑曲面的构建,而且这种配光方法的几何意义明确,设计思路清晰,甚至可以实现任意图像的配光设计。通过计算可知,优化后的局部光滑度是优化前的4倍。经过优化后的曲面虽然改善了很多,但要达到完全光滑还有一定距离,这些正是我们接下来要开展的工作。本文方法对于解决几何SP方法配光通常伴随的曲面拼接处不光滑等非成像光学配光设计问题具有

较好的应用价值。

参考文献:

- [1] Chen J J, Lin C T. Freeform surface design for a light-emitting diode-based collimating lens[J]. Optics Express, 2010, 49 (9):093001-1.
- [2] Yan X T, Yang J F, Xue B. Design of a novel LED collimating element based on freeform surface[J]. Optoelectronics Letters, 2013, 9(1):1-2.
- [3] Murat H Y, Cuypers D, Smet H D, et al. Two liquid crystal on silicon panel projector with efficient light-emitting diode illumination engine[J]. Optical Engineering, 2007, 46(12): 124002.
- [4] Pan J W, Lin S H. Achromatic design in the illumination system for a mini projector with LED light source [J]. Optics Express, 2011, 19 (17): 15750-15759.
- [5] Ding Shushu, Yu Guiying, Hao Wenwen. A freeform surface lens for indoor uniform illumination [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49 (04):042201-1-6.
- 丁纾姝,余桂英,郝雯雯. 用于室内照明的自由曲面均匀配光透镜设计[J]. 激光与光电子进展,2012, 49(04):042201-1-6.
- [6] Ries H R, Winston R. Tailored edge-ray reflectors for illumination[J]. The Journal of the Optical Society of America A, 1990,11(4):1260-1-4.
- [7] Ong P T, Gordon J M, Rabl A. Tailoring lighting reflectors to prescribed illumination distributions: compact partial-involute designs [J]. Applied Optics, 1995, 34:7877-7887.
- [8] Bortz J C, Shatz N E, Pitou D. Optimal design of a nonimaging projection lens for use with an LED source and a rectangular target [J]. SPIE, 2000, 4092:130-138.
- [9] Wu R M, Zheng Z R, Li H F. Optimization design of irradiance array for LED uniform rectangular illumination [J]. Applied Optics, 2012, 51 (13): 2257-2263.
- [10] Luo Y, Feng Z X, Han Y J. Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illumination for LED source[J]. Optics Express, 2010, 18 (9):9055-9063.

丁纾姝,余桂英,郝雯雯. 用于室内照明的自由曲面