

doi: 10.3788/gzxb20124104.0421

基于均分配焦椭流线法的 LED 匀光管 菲涅尔反射器设计

张航, 贺叶美, 李栋, 梁雪, 严金华

(浙江工业大学 应用物理系, 杭州 310023)

摘要: 基于边光原理和椭流线理论提出了均分配焦椭流线的非成像光学设计方法, 通过对 LED 光源的能量均分、椭流线虚实焦点的配对和光学仿真优化三个规范步骤实现了应用于 LED 匀光管均匀配光的菲涅尔反射器的光学设计. 分析了光源、反射器和投射目标面三者之间的复杂关系, 为 LED 照明设计的优化提供了方便. 仿真结果表明, LED 匀光管管壁照度的均匀度超过 0.93, 有效降低了 LED 光源的眩光性.

关键词: 非成像光学设计; 椭流线法; LED 照明; 菲涅尔反射器

中图分类号: O439; O435

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)04-0421-4

0 引言

LED 作为新一代的绿色光源, 具有体积小、寿命长、电光效率高和环保节能等优点. 随着光效的不断提高, LED 在照明领域的应用越来越广, 但 LED 与传统光源比较存在着很大的差异, 传统照明系统的光学设计与结构不能充分发挥 LED 光源的优势, 因此需要针对 LED 小尺寸和朗伯光源的特点进行特殊的二次配光设计, 以提高 LED 照明系统的性能^[1-3]. 目前 LED 灯具的配光设计也越来越依赖于光学设计软件来实现, 而光学设计软件尚不能完全胜任 LED 灯具配光优化设计的要求, 因此更好、更快和更为高效的设计方法成为热点需求^[4-6].

LED 芯片的尺寸通常只有毫米级的, 可近似为点光源, 若要实现大面积目标面上的均匀照明, 就要精确地分配光强、控制光线投射角度. 目前这一领域内研究的热点是自由曲面透镜, 自由曲面可以带来设计上的灵活性, 但也存在镜体厚、散热弱和容易引入色散问题等的不足^[6-9]. 菲涅尔反射器作为反射型配光器件可以避免色散问题的产生和降低设计难度^[10-11].

LED 匀光管的设计主要考虑了两个因素: 一是为了让 LED 灯具与传统日光灯接口相匹配; 二是为了扩大光源面积, 降低 LED 照明的眩光性. 本文以边光原理和椭流线理论为基础, 提出均分配焦椭流线法的非成像光学设计方法, 应用到 LED 匀光管的

菲涅尔反射器上, 实现目标投射面的均匀照明或特定光分布的配光设计. 通过软件模拟验证了本文设计方法的有效性, 实现了设计步骤的规范化, 避免了色散问题的引入, 对 LED 照明和太阳能聚光设计都具有指导意义.

1 设计原理

1.1 边光原理

边光原理^[12-13]是非成像光学的重要理论组成部分之一. 边光原理可以简述为: 一束光线, 其边界上的光线不管经过多少连续光滑的单调(凸或凹)光学界面(反射或折射), 最终仍将对应落在目标面上光强分布的边界处. 同时, 光束边界内的所有光线也将对应全部落在目标面光强分布的边界内.

1.2 流线理论基础

流线理论^[12-13]是非成像光学设计中的又一重要理论, 可以为 LED 照明设计提供理论指导. 流线的本质是光学扩展量的矢量合成轨迹, 换一种说法就是没有光学扩展量穿越流线. 对于一个点光源而言, 流线就是光线本身. 由流线可以构成流面, 流面为光学设计带来三个方便: 1) 变换光源的空间位置; 2) 改变光源的性质(如发散、会聚等); 3) 改变配光特性.

非成像光学设计常引入二次流线, 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多采用抛物流线, 而在 LED 照明设计中更多采用的是椭流线^[7, 13]. 为了表述方便, 本文

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60807011)资助

第一作者: 张航(1970-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为非成像光学、光散射理论、量子点应用. Email: physzhang@zjut.edu.cn

收稿日期: 2011-09-13; 修回日期: 2011-11-01

引入了正源和负源概念,又称实焦和虚焦.光线从正源发出,汇聚到负源.由两个正源发出的光线构成的流形为双曲流线,一对正负源则构成椭流形.

由于 LED 面源的尺寸通常比灯具尺寸小很多而作点源近似处理,因此将 LED 作为正源,而负源则落在目标面上特定的离散点.负源的数目由实际设计需要而定,LED 与每一个负源构成一对正负源(虚实焦),而每一对正负源可生成相应的椭流形簇.本文设计过程的实质就是利用边光原理和椭流线性质,为每个负源确定一条合适的椭流形及区间长度以保证通过特定的光学扩展量,并沿对称轴旋转形成相应的椭流面带,从而确定菲涅尔反射体的结构.

2 均分配焦椭流形法

利用均分配焦椭流形法设计出菲涅尔反射器,将单个大功率 LED 朗伯型光源发出的光均匀反射到 T12 光管的柱面上,实现匀光管的效果.由于本文使用的 LED 光源、菲涅尔反射器和匀光管都具有轴对称性,因此可将三维问题转化为二维问题来简化处理.

设计分为能量均分、虚实配焦和仿真优化三步:1)均分:将角空间 $\theta \in [0, \pi/2]$ 分割成 N 个大小不等的角区间 $[\theta_i, \theta_{i+1}]$,使 LED 光源的光学扩展量均匀配分到各个角区间中;2)配焦:均匀划分目标区间为 N 个子区间,令子区间中心 P_i 为虚焦,LED 为实焦,虚实焦配对,确定出菲涅尔反射器中相应环带的椭流形 $C_i C_{i+1}$,如图 1;3)仿真:运用软件建立 3D 模型,导入光学软件中模拟以检验设计效果.

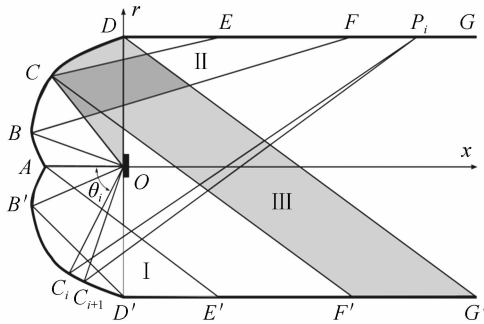


图 1 光路设计

Fig. 1 The scheme of optical design

2.1 光源光学扩展量的均匀配分

所谓均匀配分是指将 LED 光源的光学扩展量由内向外均匀分配到一系列大小不同的立体角中去.

菲涅尔反射器接收到的光源总辐射通量为

$$\Phi = 2\pi \int_0^{\theta_0} I(\theta) \sin \theta d\theta \quad (1)$$

式中, θ_i 为 LED 光线投射到菲涅尔反射镜面上的最

大立体角(通常取为 $\pi/2$), $I(\theta)$ 为 θ 角方向上的光强,即 LED 光源的配光曲线.设计中采用半光强角 $2\pi/3$ 的朗伯光源,配光曲线为 $I(\theta) = I_0 \cos(\theta)$.为了得到均匀的配光,首先将角空间 $\theta \in [0, \pi/2]$ 分为 N 份,并保证每一份上的光学扩展量相等.令 $\theta_0 = 0$,立体角 $d\theta_i = [\theta_{i-1}, \theta_i]$ 可由式(2)给出

$$d\theta_i = \arcsin \sqrt{\frac{1}{N} + \sin^2(\theta_{i-1})} - \theta_{i-1} \quad (i=1, 2, \dots) \quad (2)$$

根据光学扩展量守恒定律,均分后每一小份的光学扩展量经过反射器后,忽略反射面的吸收及传播过程中的损耗,按照设计的光路投射到目标面时必将得到相同的光学扩展量^[9].

2.2 配焦椭流形菲涅尔反射器

为了将光源发出的光均匀投射到指定柱面上,将柱面 DG 在轴向 x 方向上由 D 到 G 的顺序均分为 N 等份,每一等份的中心为 P_i ,如图 1.利用流形理论,将圆柱中心 O 处的光源作为实焦点,而将 P_i 作为虚焦点,由 OP_i 构成 N 对配焦.显然决定一条椭流形(椭圆)单靠两个焦点是不够的,还需要确定椭流形上的一个点 C_i .通过分析可知,这里 $C_N = D'$,结合 OP_N 和 $\angle C_N OC_{N-1} = d\theta_N$ 可确定椭流形段 $C_N C_{N-1}$,其椭流形方程为

$$\frac{K^2 - f^2}{2K - 2f \cos \varphi} (\cos(\varphi + \alpha), \sin(\varphi + \alpha)) \quad (3)$$

式中, $K = |OC_i| + |C_i P_i|$ 等于椭圆长轴的长度, $f = |OP_i|$ 为两个焦点间距离, α 是 OP_i 与 x 轴的交角, φ 是 OC_i 与 x 轴的交角.

计算出 C_{N-1} 后,由 C_{N-1} 结合 OP_{N-1} 及 $\angle C_{N-1} OC_{N-2} = d\theta_{N-1}$ 又可确定椭流形段 $C_{N-1} C_{N-2}$,由此递推可确定出整个椭流形 AD , AD 通过绕 x 轴旋转 2π 最后得到菲涅尔反射器 DAD' .每一个菲涅尔反射环面 $C_i C_{i+1}$ 都是独立的,其功能是将等光学扩展量的光线投射到指定位置 P_i 上,从而实现均匀投射.

然而按照上述方法设计的菲涅尔反射器由于光源本身的遮挡,在柱面 DG 上会留下一个暗环,不符合设计要求.为此本文调整菲涅尔反射环与虚焦点 P_i 的顺序对应关系,建立如图 1 所示的 I、II 和 III 区的特殊对应关系,如此可有效避开光源的遮挡.

需要指出的是,设计过程中采用 LED 点光源近似,其结果是在柱面上产生间隔均匀的等亮度线环,而非均匀照明.对于这个问题可以通过考察以下三个实际因素来解决:1)圆柱面上涂覆均匀散射体,会将亮线晕开;2)LED 光源实际并不是点光源,而是具有 $1 \sim 5$ mm 的线度,由边光原理可知,其投射光分布会有一定的展宽;3)为了机械加工方便,可用直

线段代替曲线段 C_iC_{i+1} ,将起汇聚作用的椭流面换成平面,进一步起到发散作用.

3 优化设计与结果分析

3.1 光学设计

按照均分配焦椭流线法来设计 LED 的反光器的反光曲面,先将目标柱面 DG 分为 N 份,相对应的反光曲面按均分规则分为 N 份,取 $N=80$. 为了提高 LED 朗伯面光源的利用率,椭流线从与 LED 发光面所在平面相重合的 D 点出发(见图 1),通过迭代计算可得菲涅尔反射面,其斜率分布如图 2 虚线所示. 图 2 中的纵坐标为斜率 $k=dx/dr$,横坐标为环带序数而不是半径 r . 因为是能量均分,所以每一环带的宽度不等. 与 I 区对应的 AB 段斜率 k 为负,可以有效减小菲涅尔反射器的高度尺寸. 斜率在 I、II、III 分区的分界处出现跳跃是分区投光策略所致.

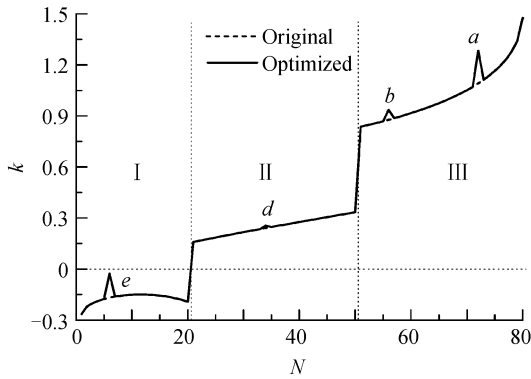


图 2 菲涅尔反射器的斜率分布
Fig. 2 The slope of Fresnel reflector

将斜率分布通过 3D 建模软件转换为 3D 模型文档导入光学设计软件中进行仿真模拟,计算得到的光强分布如图 3 虚线所示,存在 a 、 b 两个峰和 c 一个谷,显然光强分布的均匀性不理想,考虑到封装需要定义 4~76 mm 区域为有效区域,则有效区域内均匀度低于 0.65,需要进行进一步优化.

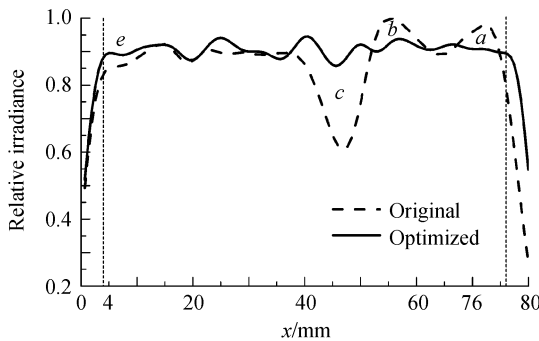


图 3 匀光管侧面相对照度
Fig. 3 The relative literal irradiance of LED tube

3.2 优化分析

优化方向是将 a 、 b 两个峰的能量转移到 c 谷中. 由于柱面 DG 等分为 80 份, DG 长度为 80 mm,每份长度 1 mm,由均分配焦方法可知菲涅尔反射器中环带序数跟柱面距离存在一一对应关系,所以只要调整图 3 中 a 和 b 两个峰位相对应环带的斜率就可实现优化目标. 进一步对图 3 中 e 附近作类似处理后可得优化后的斜率分布如图 2 中实线所示,并得光强分布如图 3 中实线所示,可见优化后有效区域内的均匀度大于 0.93,能够很好地满足国家照明要求.

优化后柱形管壁上的 LED 光照度分布如图 4 所示,已十分均匀,大大降低了 LED 光源的眩光性.

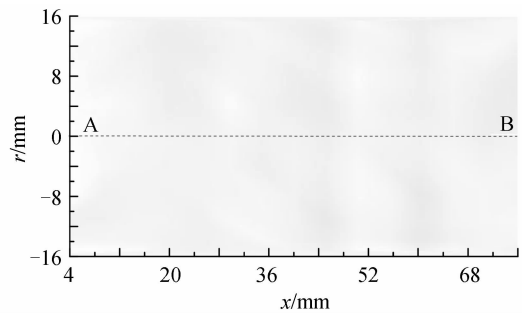


图 4 LED 匀光管侧面照度
Fig. 4 The literal irradiance map of LED tube

3.3 结果分析

事实上 a 、 b 两处多余的能量并不能恰好填充到 c 谷中,在填充 c 谷的同时导致 d 处光强增大,形成了一个新峰,为了抑制这个峰,在图 2 中 II 区 d 处又进行了一次较小的斜率调整. 显然这种调整是比较复杂的,菲涅尔反射器中每个环面在投射面上形成的光强分布由以下十余个因素共同决定:1)LED 位置;2)LED 发光面法向方向;3)LED 发光面形状;4)LED 配光特性;5)反射面位置;6)反射面法向方向;7)反射面形状;8)投射面位置;9)投射面法向方向;10)投射面形状等.

为了说明这种复杂性,从菲涅尔反射器中取出了分属三个区的 $N=(13, 32, 62)$ 三个环面产生的光强分布,分别对应于图 5 中 (c, b, a) 三个峰. 显然三个峰的形态各异,按峰高排序有 $c>a>b$,按峰宽排序有 $b>a>c$. 由反射器中一个环面的光反射影响的不仅是投射面上相应的位置,而有了较大的展宽. 这个展宽是由 LED 发光面具有一定尺寸和反射锥面替代椭流面以及三个法向方向之间关系等复杂因素造成的.

在这里,我们可以分析出一个简单关系:峰高峰宽取决于反射光相对于投射面的斜率. 对照图 1 可

知,图 5 中 c 峰在 I 区,其反射光斜率略大于相对于在 III 区 a 峰反射光斜率,又显著大于在 II 区 b 峰反射光斜率.这种对应关系为本文菲涅尔反射器的优化设计带来了方便.

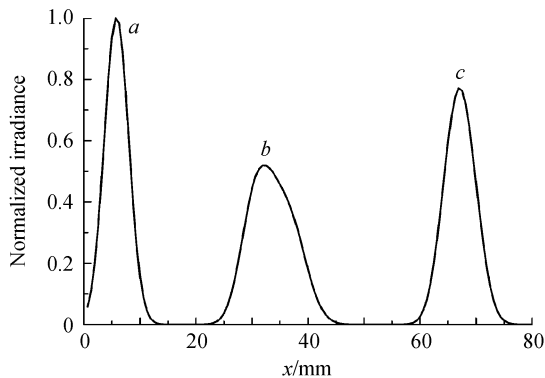


图 5 3 个独立环面的投光效果

Fig. 5 The reflect-distribution of 3 individual zone

4 结论

本文提出了一种新的 LED 反射器配光设计方法——均分配焦流线法,通过能量均分、虚实配焦和仿真优化三个步骤实现规范化配光设计,并能达到良好的投光效果.根据此方法本文设计了一款基于菲涅尔反射器的 LED 匀光管.本文设计方法具有光线可控、光源能量均匀分配和有效避免色散现象引入等优点,可应用到室内照明、路灯、投影仪以及特种照明等照明设计上,提高设计效率和设计质量.

参考文献

- [1] LUO Yi, ZHANG Xian-peng, WANG Lin, *et al.* Non-imaging optics and its application in solid lighting[J]. *Chinese Journal of Laser*, 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.
- [2] ZHAO Hua-long, LIANG Zhi-yi, SHI Xing-chun, *et al.* The design of LED using in optical projector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 244-246.

- 赵华龙,梁志毅,石兴春,等. 利用 LED 的投影系统光源设计[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2):244-246.
- [3] MIÑANO J C, BENÍTEZ P, CHAVES J, *et al.* High-efficiency LED backlight optics designed with the flow-line method[C]. *SPIE*, 2005, **5942**: 594202.
- [4] WU Reng-mao, TU Da-wei, HUANG Zhi-hua, *et al.* A light distribution proposal for designing LED dipped headlight[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2904-2908.
吴仍茂,屠大维,黄志华,等. 一种 LED 汽车前照近光灯配光设计方案[J]. *光子学报*, 2009, **38**(11):2904-2908.
- [5] YANG Yi, QIAN Ke-yuan, LUO Yi. A novel LED uniform illuminance system based on nonimaging optics[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(1): 110-115.
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.
- [6] DING Yi, ZHENG Zhen-rong, GU Pei-fu. Freeform lens design for LED illumination[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1486-1490.
丁毅,郑臻荣,顾培夫. 实现 LED 照明的自由曲面透镜设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(6):1486-1490.
- [7] FOURNIER F R, CASSARLY W J, ROLLAND J P. Fast freeform reflector generation using source-target maps[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(5): 5295-5304.
- [8] HAO Xiang, ZHENG Zhen-rong, LIU Xu, *et al.* Freeform surface lens design for uniform illumination[J]. *Journal of Optics and Applied Optics*, 2008, **10**(7): 5005-5010.
- [9] LUO Yi, FENG Ze-xin, HAN Yan-jun, *et al.* Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source[J]. *Optical Society of America*, 2010, **18**(9): 9055-9063.
- [10] RYU K, RHEE J G, PARK K M, *et al.* Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system[J]. *Solar Energy*, 2006, **80**(3): 1580-1587.
- [11] ZHU Hua, HE Ye-mei, LI Dong, *et al.* Design of lighting distribution of interior LED spotlights based on Fresnel lens[J]. *Optical Instruments*, 2011, **33**(2): 38-42.
祝华,贺叶美,李栋,等. 基于菲涅尔透镜的室内 LED 射灯配光设计[J]. *光学仪器*, 2011, **33**(2): 38-42.
- [12] WINSTON R, MINANO J C, BENÍTEZ P. Nonimaging optics[M]. London: Elsevier Academic Press, 2005: 99.
- [13] JULIO C. Introduction to nonimaging optics [M]. New York: CRC Press, 2008: 474-475.

Design for Fresnel Reflectors of Uniform Light LED Tubes Based on Ellipse Flow-line Methods with Equipartition and Foci Map

ZHANG Hang, HE Ye-mei, LI Dong, LIANG Xue, YAN Jin-hua

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

Abstract: A nonimaging optical design method is proposed based on edge ray principle and ellipse flow-line theory. And a Fresnel reflector for uniform lighting LED tubes is designed through three steps: energy equipartition of LED source, target-source foci map and optimization of optical simulation. The complex relationship among the LED source, reflector and target surface is analyzed, which is helpful to optimization of the design of LED illumination. Results show that the uniform of irradiance on LED tube surface is more than 0.93, and the glare is decreased obviously.

Key words: Nonimaging optics; Ellipse flow-line method; LED illumination; Fresnel reflector