



一种实现大功率LED均匀照明的投射器设计

吴仍茂, 屠大维, 黄志华

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要:以特定区域的均匀照明为目标,设计一种以单粒LED为光源的均匀投射系统。根据LED的发光特性以及能量守恒定律选择采用折射-全反射(TIR)光学系统,通过建立TIR折射面及全反射面轮廓曲线上的点所满足的常微分方程,利用Runge-Kutta求解常微分方程得到轮廓曲线上点的坐标,再在UG中对坐标点进行曲线拟合得到轮廓曲线,进而得到TIR模型及适合数控加工的面形数据。将TIR模型导入Tracepro并对投射系统追迹光线。模拟结果表明:目标平面的光照均匀度达到92.6%,系统的效率达到91.8%。

关键词:应用光学;大功率LED;投射器;LED照明;照度

中图分类号:TN312.8

文献标志码:A

Design of uniform illumination projector with high power LED

WU Reng-mao, TU Da-wei, HUANG Zhi-hua

(College of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: A uniform projection system with a single LED as light source was designed for the purpose of the uniform illumination in a designated region. An optical system with refraction and total internal reflection (TIR) was proposed according to the luminous characteristic of LED and the law of energy conservation. The ordinary differential equations satisfying the spots on the contour curve of TIR refractive and reflective planes were established. The coordinates of points on profile curves were obtained by solving these ordinary differential equations using Runge-Kutta method. The profile curves were acquired by curve fitting of the coordinate spots with software UG, and then TIR model of the projector and data of the surface shape suitable for NC manufacture were obtained. The TIR model of the projector was introduced into Tracepro, and rays were traced. The results show that the illumination uniformity of the illuminated region is better than 92.6%, and the efficiency of the whole system is more than 91.8%.

Key words: applied optics; high-power LED; projector; LED illumination; illuminance

引言

LED是21世纪具有竞争力的新型固体光源,它具有效率高、光色纯、能耗低、寿命长、可靠耐用、无污染、控制灵活等优点^[1-2]。随着LED技术不断

完善,LED的光通量及光效将不断提高。目前,商业化的单粒5W白光LED的光通量已达到200 lm,而实验室高亮度白光LED的水平已达到115 lm/W^[3]。以单粒LED为光源的照明系统不断增多,如

收稿日期:2008-10-27; 修回日期:2008-11-05

基金项目:国家自然科学基金(60774102);上海市重点优势学科(Y0102)

作者简介:吴仍茂(1984-),男,江西抚州人,硕士,主要从事LED照明系统研究和设计。

E-mail: xiaofeng_soso@126.com。



LED 投影仪、LED 射灯以及 LED 光学传感器等^[4]。LED 芯片的出光为 Lambertian 分布, 这样的光场分布, 如果不经合适的光学系统处理而直接应用, 在大多数情况下都难以满足照明灯具和器件所需要达到的性能指标。因此, 对以 LED 为光源的照明系统进行二次光学设计是十分必要的。照明系统实现均匀照明则是通过二次光学设计使照明系统在一个给定的区域内形成一个照度均匀的光斑。照明系统一般分为反射型、折射型以及反射-折射混合型, 其中反射-折射混合型主要利用全内反射 (TIR) 技术^[5]。LED 出光范围大, 反射型或者折射型照明系统往往很难控制 LED 的全部出光, TIR 利用折射和全反射, 可以有效地收集 LED 大范围的出光, 并控制光束分布, 保证照明系统结构紧凑^[2]。本文提出了一种实现单粒 LED 均匀照明的投射器, 给出了该投射器的理论计算和光学设计模型, 对该均匀照明系统进行了光线追迹, 并对光线追迹结果进行了分析。

1 LED 芯片光学特性分析

LED 芯片可视为 Lambertian 光源, 光线出射满足余弦分布, 如图 1 所示。

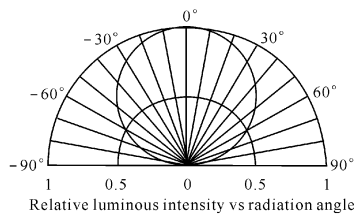


图 1 LED 芯片相对光强分布曲线

Fig. 1 Relative intensity distribution of LED chip

若 LED 芯片的朗伯光强分布为已知, 那么在给定方向上的光强为

$$I_{\theta} = I_0 \cos(\theta) \quad (1)$$

式中: I_0 为发光表面在法线方向的发光强度; I_{θ} 为和法线成任意角度 θ 方向的发光角度。由于 LED 芯片为朗伯光源, 所以其各个方向的亮度是一常量, 即

$$L_{\theta} = \frac{I_0}{dA \cos(\theta)} = \frac{I_0 \cos(\theta)}{dA \cos(\theta)} = \frac{I_0}{dA} = L \quad (2)$$

式中: dA 为发光面的元面积; L 为一常量, 表示芯片的亮度。这样在平面孔径角为 θ 的立体角范围内发出的光通量可表示为

$$\varphi(\theta) = \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} d\varphi \int_{\gamma=0}^{\gamma=\theta} I_0 \sin(\gamma) d\gamma = \pi L d A \sin^2(\theta) \quad (3)$$

图 1 表示了 LED 芯片的出光覆盖半个球面, 即 $\theta = \frac{\pi}{2}$, 芯片的总光通量为

$$\varphi\left(\frac{\pi}{2}\right) = \pi I_0 \quad (4)$$

2 照明系统设计方法

本文旨在设计一种投射器, 使该种投射器能满足给定的出射光角度要求, 并实现特定区域内目标平面的均匀照明。投射器结构原理如图 2 所示。图中 l 为投射器距目标平面的距离, 在该距离下应保证投射器可视为点光源, 因此, l 应至少大于投射器最大尺寸的 5 倍。为方便设计加工, 曲面 CD 取为平面, 曲面 BN 取为圆柱面。使入射到曲面 AB 的光源出射光经投射器作用后, 出射光与光轴最大夹角为 φ , 并在目标平面上形成半径为 r_0 的均匀照明; 使入射到圆柱面 BN 的光源出射光经投射器作用后, 出射光与光轴最大夹角为 φ , 并在目标平面上形成半径为 r_2 的均匀照明, 叠加两部分均匀照明后, 最终在目标平面上形成半径为 r_2 的均匀照明。因此, 该投射器的设计重点是寻求满足投射光照分布的折射面 AB 以及全反射面 EF。

该投射器的设计方法是, 根据目标平面照明区域的光照分布, 结合能量守恒定律求得曲面 AB 以及曲面 EF 轮廓曲线上的一系列点, 然后对系列点进行曲线拟合并旋转拟合曲线得到折曲面 AB 和曲面 EF。

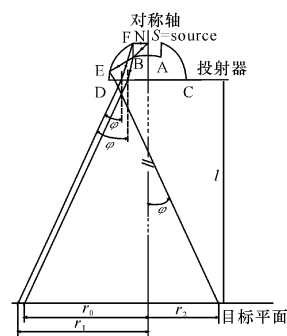


图 2 投射器原理图

Fig. 2 Principle of projector

2.1 折射面设计

由前面的分析可知, 入射到曲面 AB 的光源出射光, 经投射器作用后在目标平面上形成半径为 r_0 的均匀照明, 如图 3 所示。可根据给定的出射光线与光轴的最大夹角 φ 和距离 l 确定半径 r_0 , 即

$$r_0 = l \tan(\varphi) \quad (5)$$

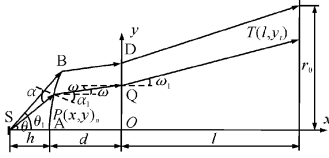


图3 折射面设计原理图

Fig. 3 Design principle of refracting surface of projector

根据能量守恒定律求得入射到曲面 AB 的光源出光在目标平面上形成的均匀照明的照度:

$$E_1 = \frac{LA \sin(\theta_1)}{r_0^2} \quad (6)$$

式中: L 为光源的亮度; A 为光源的面积; θ_1 为 B 点对应的光源中心出射光线的孔径角; θ_1 的取值应当保证 B 点的纵坐标至少大于光源最大尺寸的 5 倍。

从光源中心出射孔径角为 θ 的光线入射到曲线 AB 的 P 点, 经投射器作用后照射到目标平面的 T 点。根据能量守恒定律求得 T 点的纵坐标为

$$y_t = \frac{r_0 \sin(\theta)}{\sin(\theta_1)} \quad (7)$$

进而求得 ω 满足方程:

$$y_t = \frac{l n \sin(\omega)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\omega)}} \quad (8)$$

曲线 AB 在 P 点的导数可表示为

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{n \cos(\omega) - \cos(\theta)}{n \sin(\omega) - \sin(\theta)} \quad (9)$$

由于 $\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{d\theta} \times \frac{d\theta}{dx}$, 由 $y = (h + d + x) \tan(\theta)$ 对 θ 求导并结合(9)式, 求得 x 和 θ 满足的常微分方程为

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{h + d + x}{[-\frac{n \cos(\omega) - \cos(\theta)}{n \sin(\omega) - \sin(\theta)} - \tan\theta] \cos^2\theta} \quad (10)$$

式中: h 、 d 所表示的意义如图 3 所示, h 的取值应至少大于光源最大尺寸的 5 倍; ω 为方程(8)的根。该常微分方程的初始条件: $\theta = 0, x = -d$, 利用 Runge-Kutta 求解该常微分方程, 即可获得曲线 AB 上一系列点。

2.2 全反射面设计

为了实现在距离 l 变化的情况下, 在目标平面上均能形成均匀照明区域, 将曲面 EF 分成曲面 R_0E 和曲面 R_0F 两部分, 如图 4 所示。入射到曲面 R_0E 的光源出射光, 经投射器作用后在目标平面上

形成半径为 r_2 的均匀照明; 入射到曲面 R_0F 的光源出光, 经投射器作用后在目标平面上形成半径为 r_1 的均匀照明。经叠加后, 入射到曲面 EF 的光源出射光, 经投射器作用后在目标平面上形成半径为 r_1 的均匀照明。

根据上述分析可知, 曲面 R_0E 和曲面 R_0F 对应的均匀照明区域的照度应相等, 根据能量守恒定律求得入射到曲面 R_0E (或曲面 R_0F) 的光源出射光在目标平面上形成的均匀照明的照度:

$$E_2 = \frac{LA[\sin^2(\theta_2) - \sin^2(\theta_1)]}{r_1^2 + r_2^2} \quad (11)$$

式中: $r_1 = r_0 + H_0$; $r_2 = r_0 - H_0$; H_0 为 R_0 点的纵坐标; H_0 的取值应保证 F 点位于线段 BN 的上方; θ_2 为光源中心出光与光轴的最大夹角。

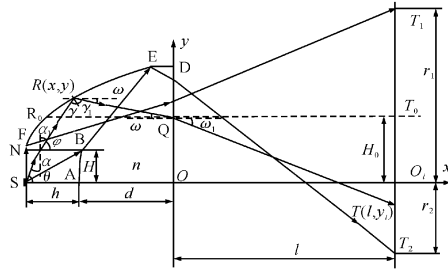


图4 全反射面设计原理图

Fig. 4 Design principle of totally reflecting surface of projector

从光源中心出射孔径角为 θ 的光线入射到曲线 EF 的 R 点, 经投射器作用后照射到目标平面的 T 点, 根据能量守恒定律可求得 T 点的纵坐标 y_t 。当 R 点位于曲线 R_0F 上, 此时 T 点位于线段 T_0T_1 上, T 点的纵坐标为

$$y_t = \sqrt{H_0^2 + \frac{LA[\sin^2(\theta_2) - \sin^2(\theta)]}{E_2}} \quad (12)$$

当 R 点位于曲线 R_0E 上, 此时, 若 T 点位于线段 O_1T_0 上, 则 T 点的纵坐标为

$$y_t = \sqrt{H_0^2 + \frac{LA[\sin^2(\theta_3) - \sin^2(\theta)]}{E_2}} \quad (13)$$

式中 θ_3 为 R_0 点对应的光源中心出射光线的孔径角。若 T 点位于线段 O_1T_2 上, 则 T 点的纵坐标为

$$y_t = -\sqrt{\frac{LA[\sin^2(\theta_3) - \sin^2(\theta)]}{E_2} - H_0^2} \quad (14)$$

根据 T 点的纵坐标求得角 ω 满足的方程为



$$y_t = \frac{l n \sin(\omega)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2(\omega)}} \quad (15)$$

曲线 EF 在 R 点的导数可表示为

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\cos(\varphi) - \cos(\omega)}{\sin(\omega) - \sin(\varphi)} \quad (16)$$

由于 $\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{d\theta} \times \frac{d\theta}{dx}$, 由 $y = H + (h + d + x - \frac{H}{\tan(\theta)}) \tan(\varphi)$ 对 θ 求导并结合(16)式, 求得 x 和 θ 满足常微分方程:

$$\frac{dx}{d\theta} = \frac{\frac{H \sqrt{n^2 - \cos^2(\theta)}}{\sin^2(\theta) \cos(\theta)} + [h + d + x - \frac{H}{\tan(\theta)}] \frac{n^2 \sin(\theta)}{\cos^2(\theta) \sqrt{n^2 - \cos^2(\theta)}}}{\frac{\cos(\theta) - n \cos(\omega)}{n \sin(\omega) - \sqrt{n^2 - \cos^2(\theta)}} - \frac{\sqrt{n^2 - \cos^2(\theta)}}{\cos(\theta)}} \quad (17)$$

式中: H 为 B 点的纵坐标; ω 为方程(15)的根。常微分方程满足的初始条件为: $\theta = \theta_3, x = x_0, x_0$ 为 R_0 点的横坐标。利用 Runge-Kutta 求解该常微分方程, 即可获得曲线 EF 上的一系列点。

3 实例模拟与分析

作为设计实例, 采用 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的 LED 芯片作为光源, 光通量为 100 lm 。要求光源出射光经投射器作用后与光轴的最大夹角为 30° 。投射器所用材料为有机玻璃 (pmma), 参数 h, d, l 分别取 $8 \text{ mm}, 15 \text{ mm}, 2000 \text{ mm}$ 。

根据上述分析, 将计算所得的各轮廓曲线的点导入 UG 进行曲线拟合, 然后将拟合生成的轮廓曲线绕光轴旋转得到投射器的三维模型。图 5 是该投射器的截面外形尺寸, 透射器出光口直径为 42 mm , 高度为 23 mm 。再将投射器的三维模型导入 Tracepro, 并对芯片出射光进行光线追迹。图 6 是目标平面照度分布图。

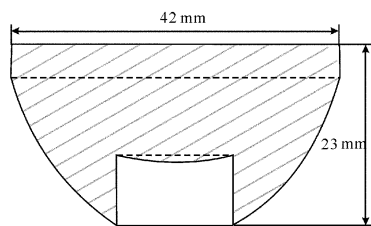


图 5 投射器截面

Fig. 5 Cross section of projector

在实际评定照明面的照度均匀度时, 常采用标准 ANSI/NAPM IT7. 228 中的 9 点测试法, 即将照明面分成 9 个大小均等的矩形, 照度计探测器置于每一个矩形的中心进行测量, 将 9 个点的照度的平均值作为整个照明面的平均值^[7], 然后用最大照度

减去平均照度 (或用平均照度减去最小照度值), 将该差值与平均照度的比值作为照明面的照度均匀度。对于用计算机模拟来说, 对照度图的分析相对简单, 常采用均匀照明区域中最小照度值与最大照度值的比值来表征均匀照明区域的照度均匀度^[8]。

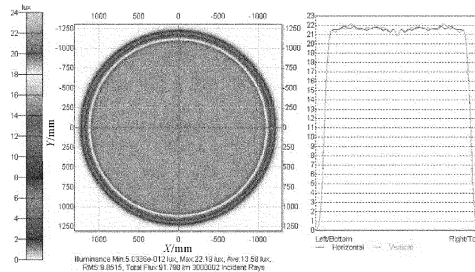


图 6 目标平面照度分布图

Fig. 6 Illuminance distribution on target plane

通过计算可知, 在均匀照明面 90% 的区域内, 照度均匀度达到 92.6%, 整个系统的效率达到 91.8%。改变投射器与目标平面之间的距离 l , 得到不同距离下均匀照明区域内的照度均匀度, 如表 1 所示。

表 1 不同距离下均匀照明区域的照度均匀度

Table 1 Uniformity of target plane at different distance

距离 l/mm	E_{\min}/lx	E_{\max}/lx	照度均匀度/%
1 000	81.00	87.75	92.3
2 000	20.52	22.16	92.6
3 000	9.21	9.86	93.4
5 000	3.34	3.54	94.2
8 000	1.34	1.40	95.1

根据该照明系统设计方法的特点, 随着距离 l 的增大, 采用点光源近似替代该照明系统将更加准确, 目标平面均匀照明区域内的照度均匀度将不断提高, 这与表 1 所示的均匀照明区域的照度均匀度



在不同距离下的变化规律相吻合。

4 结 论

提出一种实现单粒大功率LED均匀照明的投射器设计方法。根据LED的发光特性及能量守恒定律建立常微分方程,通过求解该常微分方程得到折射面和全反射面轮廓曲线上一系列点的坐标,在UG中对系列点进行曲线拟合,并旋转拟合曲线得到投射器模型,再将该模型导入Tracepro,从而得到系统的模型。对LED芯片出射光进行光线追迹,并对系统的效率以及特定区域内目标平面的照度均匀度进行了分析研究。同时,根据UG自动生成的数控代码,可驱动数控设备进行投射器的加工。

参考文献:

- [1] 屠大维, 吴仍茂, 杨恒亮, 等. LED封装光学结构对光强分布的影响[J]. 光学·精密工程, 2008, 16(5): 832-838.
TU Da-wei, WU Reng-mao, YANG Heng-liang, et al. Effect of optical structure on output light intensity distribution in LED package[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(5): 832-838. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 贺卫利, 郭伟玲, 高伟, 等. 大功率发光二极管可靠性和寿命评价实验方法[J]. 应用光学, 2008, 29(4): 533-536.
HE Wei-li, GUO Wei-ling, GAO Wei, et al. Test

method of life-time and reliability evaluation for high-power LED [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(4): 533-536. (in Chinese with an English abstract)

- [3] Philips Lumileds reports 115 lm/W power LED at 350 mA [EB/OL]. [2007-01-23]. <http://www.ledsmagazine.com/news/4/1/23>.
- [4] SCHWARTE R, HEINOL H, XU Z, et al. A new active 3D-vision system based on rf-modulation interferometry of incoherent light [J]. SPIE, 1995, 2588:126-134.
- [5] EICHHORN K. LEDs in automotive lighting [J]. SPIE, 2006, 6134:1-6.
- [6] BORTZ J, SHATZ N, PITOU D. Optimal design of nonimaging projection lens for use with an LED source and a rectangular target [J]. SPIE, 2000, 4092:130-138.
- [7] 孙英杰, 卜文斌. LED照明的照度均匀性研究[J]. 哈尔滨师范大学学报:自然科学版, 2008, 24(3):49-52.
SUN Ying-jie, BU Wen-bin. The study of illumination uniformity for LED [J]. Natural Sciences Journal of Harbin Normal University, 2008, 24(3): 49-52. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 鲍友南, 潘奕凯, 姚柏宏, 等. TV用液晶显示器之背光模组技术[J]. 机械工业杂志, 2003, 245:158-169.
BAO You-nan, PAN Yi-kai, YAO Bai-hong, et al. Back light module technology of LCD for TV [J]. Journal of the Mechatronic Industry, 2003, 245:158-169. (in Chinese with an English abstract)