

·测试、试验与仿真·

实现台灯照明高均匀性的LED配光设计与仿真

罗秉东,王亚军,宋宁亮,王阿莉,吕海裕,廖 锐

(厦门大学电子科学系,福建省半导体照明工程技术研究中心,福建 厦门 361005)

摘要:针对台灯照明的高均匀性要求,设计一个自由曲面透镜对LED光源进行二次光学配光。根据非成像光学理论,在已知入射光强分布与所需配光效果的前提下,建立关于透镜自由曲面面型的偏微分方程,并采用相应的数值解法,得到自由曲面面型数据。通过在建模软件Rhino中建立光学透镜的模型,并在Tracepro中进行光学仿真,得出仿真结果,验证此设计方法的可行性。

关键词:自由曲面;LED;配光;Tracepro;台灯

中图分类号:O657.31

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2014)-01-0080-04

Light Distribution Design and Simulation of LED for High Uniformity Illumination of Desk Lamp

LUO Bing-dong, WANG Ya-jun, SONG Ning-liang, WANG A-li, LV Hai-yu, LIAO Kun

(Fujian Engineering Technology Research Center for Solid-State Lighting, Department of Electronic Science of Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: According to high uniformity requirements of desk lamp lighting, a free curved surface lens is designed to perform the secondary light distribution of light emitting diode (LED) light source. Based on the theory of non-imaging optics, at the condition of known incident light intensity distribution and required light distribution effect, partial differential equations related to the shape of free curved surface are established. And corresponding numerical value algorithm is adopted to obtain the data of the shape of free curved surface. The models of optical lens are built through simulation software Rhino. And optical simulation is performed in Tracepro. The simulation results are obtained to verify the feasibility of the design method.

Key words: free curved surface; light emitting diode (LED); light distribution; TracePro; desk lamp

LED作为新型光源越来越多地被用于日常照明,无频闪的LED作为台灯的光源比传统光源更具优势。然而,未经过配光的LED直接射出的光型通常为一个照度分布不均匀的圆形,这很难适应台灯的照明需求。因此,LED要借助适当的配光设计来调整空间中光线能量的分布,以控制光型和照度均匀性。自由曲面透镜是新近出现的非成像光学透镜,它因设计快捷、结构紧凑和精确的光型控制等优

势成为LED配光设计的一个趋势^[1]。设计自由曲面透镜可以通过许多方法来实现:SMS法(simultaneous multiple surface)、剪裁法(tailored freeform surface)等一系列方法^[2-3]。其中剪裁法是目前应用最为广泛且是最有前景的方法,它与其他方法相比更为直接,而且不需要特别优化就能得出较理想的效果。将用剪裁法设计一个内表面是球面、外表面是自由曲面的透镜,光源发出的光线经过透镜后,在与光源有一定距

收稿日期:2013-10-28

基金项目:福建省重大科技项目资助(2006H0092)

作者简介:罗秉东(1987-),男,福建上杭人,硕士研究生,主要从事新能源、半导体照明方面的研究;王亚军(1969-),男,浙江慈溪人,副教授,硕士研究生导师,主要从事新能源、半导体照明方面的研究。

离的目标面上形成一个照度均匀的圆形光斑,完成台灯的配光设计。

1 自由曲面透镜的设计原理

设LED光源处于正交坐标系的原点,目标面为平行于XY平面,与Z轴相交于 z_0 ,则目标面上T点的坐标可以表示为 (x, y, z_0) 。透镜位于光源与目标面之间,透镜靠近光源一侧定义为球面,使得光线通过该球面时方向不变,透镜外表面为自由曲面,光线经过外表面一次折射,投射到目标面完成配光。为了方便计算,自由曲面P上的坐标采用极坐标表示: $(\theta, \varphi, \rho(\theta, \varphi))$ 。设自由曲面上一点p上的法向量为 \vec{N} , \vec{I} 是经过p点的入射光线矢量, \vec{O} 为出射光线矢量^[4]。如图1所示。

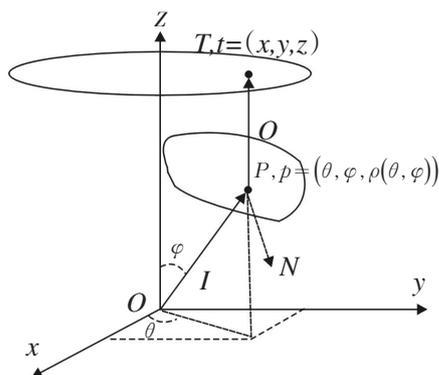


图1 自由曲面折射原理图

令 $\vec{N}, \vec{I}, \vec{O}$ 为单位矢量,则

$$\vec{N} = (N_x i, N_y j, N_z k) \tag{1}$$

$$\vec{I} = (I_x i, I_y j, I_z k) \tag{2}$$

$$\vec{O} = (\vec{i} - \vec{p}) / |\vec{i} - \vec{p}| \tag{3}$$

将上述矢量代入snell定律

$$[1 + n^2 - 2n(\vec{O} \cdot \vec{I})]^{1/2} \cdot \vec{N} = \vec{O} \cdot \vec{I} - n \cdot \vec{I} \cdot \vec{N}$$

可以求得目标面上t点的坐标公式

$$x = N_x [n_o(z - p_z) - n_l I_z |\vec{i} - \vec{p}|] / n_o N_z + p_x + (n_l/n_o) I_x |\vec{i} - \vec{p}| \tag{4}$$

$$y = N_y [n_o(z - p_z) - n_l I_z |\vec{i} - \vec{p}|] / n_o N_z + (n_l/n_o) I_y |\vec{i} - \vec{p}| \tag{5}$$

$$z = z_0 \tag{6}$$

其中, n_o 为入射材料折射率, n_l 为出射材料折射率。P点的法向量为 $\rho(\theta, \varphi)$ 在 θ 和 φ 两个方向上切矢的叉乘,即

$$\vec{N} = (\vec{\rho}'_\theta \times \vec{\rho}'_\varphi) / |\vec{\rho}'_\theta \times \vec{\rho}'_\varphi| \tag{7}$$

2 数值法解微分方程

大部分LED光源的发光特性为一朗伯体,其配光曲线可描述为

$$I(\varphi) = I_0 \cos^m \varphi \tag{8}$$

当LED为理想朗伯体时, $m=1$,则该光源总出射光通量为

$$\Phi = \int (\varphi) d\Omega = 2\pi I_0 \sin^2 \varphi \tag{9}$$

设一2 mm×2 mm的LED发光半角 $\varphi = \pi/6$,将光源置于原点并建立直角坐标系,发光方向指向目标面。台灯高50 cm,设透镜距离光源2 cm,在距发光点50 cm桌面上形成一个半径为28 cm的圆形光斑。由于光源特性及所需配光光型都关于圆心对称,因此将整个照明系统作为一关于z轴旋转对称系统处理,通过计算 $\theta=0$ 时曲面一条边的数据,并旋转得到整个自由曲面的面型,系统由三维简化为二维情况下求解。

此时,目标面上t点的坐标公式简化为

$$x = \frac{(\rho \sin \varphi - \rho'_\varphi \cos \varphi)(z_0 - (\rho + n|\vec{i} - \vec{p}|) \cos \varphi)}{\rho'_\varphi \sin \varphi + \rho \cos \varphi} +$$

$$(\rho + n|\vec{i} - \vec{p}|) \sin \varphi \tag{10}$$

$$y = 0, z = z_0$$

$$|\vec{i} - \vec{p}| =$$

$$\frac{(\rho_\varphi'^2 + \rho^2)(z_0 - \rho \cos \varphi)}{(\rho_\varphi'^2(1 - n^2) + \rho^2)^{1/2} (\rho'_\varphi \sin \varphi + \rho \cos \varphi) +} \tag{11}$$

$$n\rho'_\varphi(\rho \sin \varphi - \rho'_\varphi \cos \varphi)$$

由于实现均匀照明需要目标面上照度均匀,设目标面上平均照度为E,则目标面上的总光通量为

$$\Phi = E \cdot S \tag{12}$$

式中,S为目标面上照明区域的面积,已知光源发出光通量与照明面上光通量相等,有

$$2\pi I_0 \sin^2 \varphi = E \cdot \pi r^2 \tag{13}$$

联立方程式(7)、式(10)、式(11)、式(13),可得目标面上照度公式

$$E = \frac{I}{\rho} \cdot \frac{z_0 - \rho \cos \varphi}{|\vec{l} - \vec{p}|} \quad (14)$$

$$\frac{1}{C_1 C_2 |\vec{l} - \vec{p}|^2 + (C_1 + C_2) |\vec{l} - \vec{p}| + 1}$$

其中,当 $\varphi=0$, $\theta=0$,即考虑二维折射情况时,有

$$C_1 C_2 = \left(\frac{4\rho - \rho''_{\varphi\varphi}}{2\rho^2} \right)^2, C_1 + C_2 = \frac{4\rho - \rho''_{\varphi\varphi}}{\rho^2} \quad (15)$$

在边界上,有 $\varphi=\pi/6$, $x=28$,则 $I_0=1568E$, $\varphi=\sin^{-1}(x/56)$,将式(15)代入式(14)中,则目标面上坐标 x 的公式变成一个关于 ρ 的常微分方程,并通过有限差分法可以迭代解得 ρ 的值,从而求出自由曲面数据。

有限差分法是求解边值问题的主要方法^[5-6],通过差商逼近导数,将微分方程离散为差分方程进行求解。首先将目标面上的坐标 x 离散化。在经过 $\theta=0$ 这条边折射至目标上,在相对应的一条半径上均匀地选取2001个点,即将目标面上一个半径平均分为2000份,有 $x_n=0.014n$; $n=1,2,\dots,2000$,为迭代计算的步长。因此,光源发光半角也被切割为2000份,光源发出相邻两条入射光线之间的夹角为 $\Delta\varphi_n$,如图2所示。

微分方程离散为差分方程,中心差分格式为

$$\rho'_{\varphi n} = (\rho_{n+1} - \rho_{n-1}) / (\Delta\varphi_{n+1} + \Delta\varphi_n) \quad (16)$$

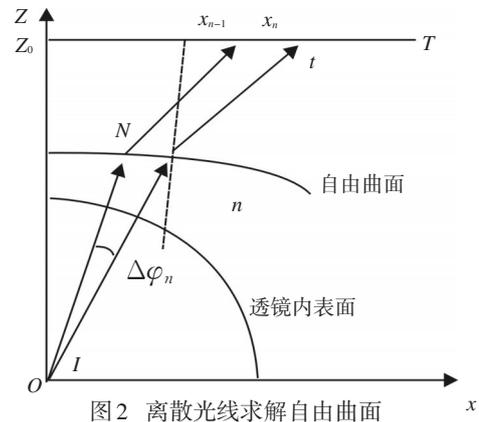


图2 离散光线求解自由曲面

$$\rho''_{\varphi n} = (\rho_{n+1} - \rho_n) / \Delta\varphi_{n+1} + (\rho_{n-1} - \rho_n) / \Delta\varphi_n^2; n=1,2,\dots,n \quad (17)$$

根据差分格式,已知 $\rho_0=2$, $\Delta\varphi_n=\sin^{-1}(x_n/56)$,代入式(14)、式(16)、式(17)求得 ρ_1 ,经过计算机编程迭代计算出 ρ_n 的值,并将球坐标转化为直角坐标值得到自由曲面的面型数据。

3 建立模型与光学仿真

Rhinoceros是一套以NURBS为理论基础的3D建模软件,可以建立、编辑、分析及转译NURBS,快捷高效地设计产品造型,并为后续工程化创造良好条件^[7-8]。将计算机计算得来的一系列离散点数据输入犀牛软件,得到一条平滑的曲线,通过旋转命令将曲线旋转360°即成为自由曲面面型,同时透镜的凹面设计为一个以坐标原点为圆心的球面,如图3所示。



图3 (a)数据点系列构成曲线;(b)旋转命令得到自由曲面面型;(c)填充实体模型

光源位于这个球面的球心处发出的光线经过内球面时方向不会发生变化,只经过自由曲面折射后投射至目标面。将整个透镜构建成实体模型,并保存为sat格式导入Tracepro中进行仿真。

TracePro光学仿真软件可以精确地定义各种实际光源的形状和发光特性,利用其照明模块可实现

蒙特卡洛法光线追迹,以便确定某个指定表面上的光照度、强度或亮度。定义透镜的材质为SCHOTT,折射率为1.5,并调用自建的2mm×2mm大小的光源模型进行仿真,设置LED光通量为80流明。图4为LED光源和导入的自由曲面透镜的光线追迹图。

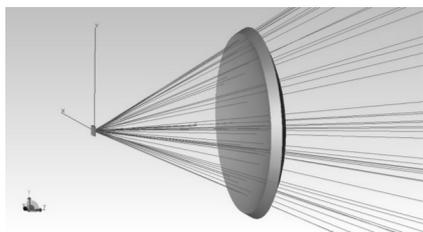
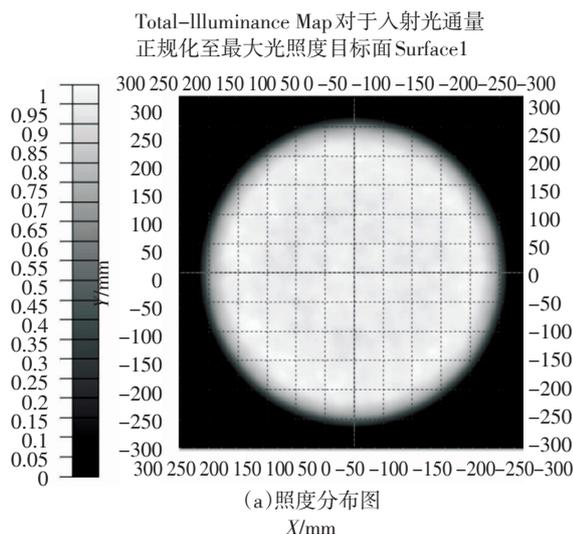


图4 Tracepro中模型光线追迹图

为了增加模拟可信度,仿真过程使用了200万条光线进行追迹,光线追迹模拟的结果如图5。结果显示,配光效果基本上达到了预期,极大部分的光线都落在了半径为280 mm的圆内,系统透光效率达到92.43%,台灯中间光斑均匀性在0.95左右。



最小值:1.023e-018,最大值:1,平均值:0.528 78 总光通量:73.944
lm,光通量/发射光通量:0.924 3,2 000 000 Incident 条光线

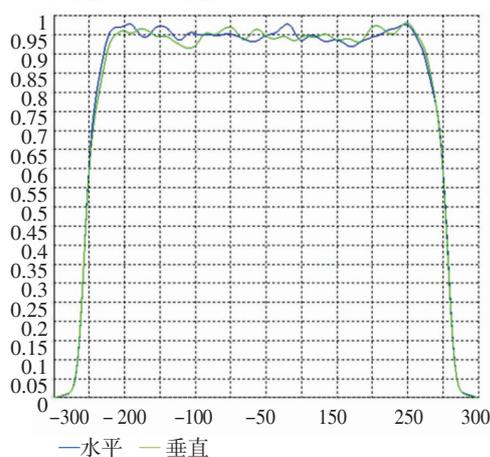


图5 仿真结果及归一化照度图

需要指出的是,在照度图中出现了边缘照度的下降。分析存在的原因有三个:一是在数值求解过程中,由 ρ_{n-1} 迭代计算出 ρ_n 导致误差的不断积累;二

是由于建模软件建模时的误差^[9];三是因为LED并不是一个理想的点光源,而是拓展光源^[10]。然而,出于对边缘照度缓慢下降可以避免因照度对比太强烈造成眩光的考虑,可以认为该自由曲面透镜的设计是符合预期效果的。

4 结 论

在已知光照度分布和光源特性的前提下,根据非成像光学原理构造出适合LED光源的自由曲面透镜,并利用犀牛软件建立模型,导入TracePro软件进行光线追迹,仿真的结果较好地满足台灯的配光要求,且优于当前市面上大部分台灯。通常LED的发光角度大于 $\pi/6$,因此其余少量的大角度光线可用全反射透镜投射到目标面。在发光半角 $\varphi = \pi/6$ 范围内的光线,根据仿真结果,透射率达到92.43%,在目标面上形成半径大约为280 mm的均匀光斑,照度均匀性达到0.95,使得台灯获得了较高的光能利用效率、照度均匀性和更优化的设计空间,满足台灯的使用、审美和节能要求,同时为未来LED应用于照明市场的自由曲面光学设计提供一些参考。

参考文献

- [1] HU Run, LUO Xiao-bing, ZHENG Huai, et al. Design of a novel freeform lens for LED uniform illumination and conformal phosphor coating[J]. Optical Society of America, 2012, 6,20(13):13727-13737.
- [2] Ries H, Muschaweck J. Tailored freeform optical surfaces [J]. J.Opt.Soc. Am. A, 2002, 19(3):590-595.
- [3] Ries H, Winston R. Tailored edge-ray reflectors for illumination [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1994, 11(4):1260-1264.
- [4] 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.
- [5] 颜庆津.数值分析[M].北京:北京航空航天大学出版社, 2012.
- [6] 李庆扬,王能超,易大义.数值分析[M].武汉:华中工学院出版社,1987.
- [7] 曹智雄,刘清吉,张柏钦.Rhinoceros电脑辅助工业设计与制造[M].北京:中国水利水电出版社,2001.
- [8] 谢质彬.计算机辅助产品造型设计, Rhinoceros 建模+Cinema 4D渲染[M].北京:清华大学出版社,2011.
- [9] 许耀云,井西利,丁金刚,等.基于均匀照明的LED反射器的设计[J].光学技术,2012,38(3):345-349.
- [10] 卓友望,葛子平.实现LED台灯均匀照明的自由曲面透镜仿真设计[J].照明工程学报,2012,22(6):4-7.