

· 光学设计 ·

实现小发散角圆形照明的TIR透镜设计

刘典宏, 张晓晖

(海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

摘要: TIR结构可准直LED光, 因此被广泛应用于LED二次光学系统设计。通过调整TIR结构的全反射面, 可以实现不同小发散角的圆形照明。设计了半发散角为 5° 和 10° 的透镜并进行了仿真实验。仿真结果表明, 当采用点光源或者 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ LED光源时, 半发散角都分别能满足预期为 5° 和 10° 。此方法同样适用其他小发散角透镜的设计。

关键词: 非成像光学; 照明光学; 几何光学; 发散角

中图分类号: O435.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-03-0013-04

TIR Lens Design for Circular Illumination with Small Divergence Angle

LIU Dian-hong, ZHANG Xiao-hui

(Ordnance Engineering Department, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: LED light source can be collimated by total internal reflection (TIR) structure which is widely used in LED secondary optic system design. By adjusting the total reflection surface of TIR structure, the circular illumination with small divergence angle is realized. The lenses with 5° and 10° half divergence angle are designed and the simulation experiments are performed. Simulation results show that the expectation requirements can be met and half divergence angle is 5° and 10° respectively with a point source or a $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ LED source. This method can also be applied to design the lens with small divergence angle.

Key words: non-imaging optics; illumination optics; geometric optics; divergence angle

由于具有低功耗和寿命长的特点, LED被应用于不同的照明场合。LED辐射的空间分布近似于单向的朗伯辐射体, 因此不能直接用于照明, 需要进行相应的一次、二次光学系统设计, 其中二次光学系统设计的目的是重新分配LED的出射光线, 实现预期照明效果^[1-5], TIR结构实现LED光准直是一种常见的二次光学系统设计^[7-9]。

目前研究者设计不同的TIR结构实现LED光准直。文献[7]中常用的TIR结构可以将LED光源的光线全部转化成平行光, 但是该TIR结构对拓展光源的适应性不高。飞利浦公司设计了一种新的TIR结构^[8], 同样能够准直LED光线, 且透镜的尺寸有所减小, 但是部分照明区域光线无法到达。文献[9]中

提出一种新的TIR结构同样可以准直LED光线, 而且对拓展光源适应性较高。

而在一些特定的场合, 需要小发散角的圆形照明。根据TIR结构准直LED光线的原理, 通过对TIR结构进行改进, 主要是通过TIR结构全反射面的调整, 可实现小发散角的圆形照明。

1 TIR结构改进设计

文献[9]中的TIR结构能够实现LED光线准直, 如图1所示。在该TIR结构的基础上通过调整全反射面和相应的出射面, 可以将 x 轴上光线的半发散角由 90° 变为 γ_N , 如图2所示。

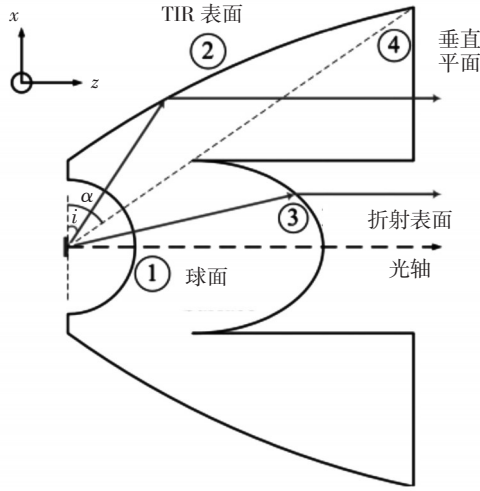


图1 准直TIR结构

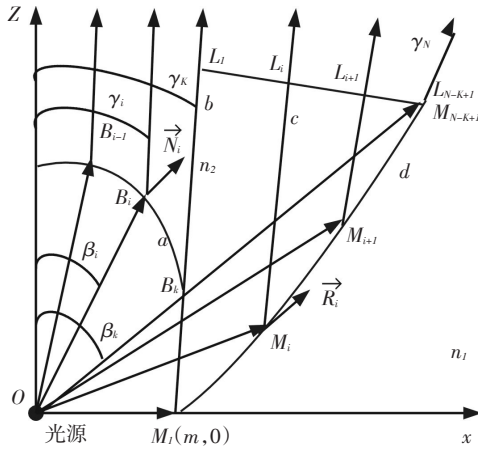


图2 调整的TIR结构

由于其对称性,这里只分析 x 轴正轴部分。该TIR结构分为 a 、 b 、 c 和 d 四部分。其中光源在原点, β 是入射光线和 z 轴的夹角, γ 是出射光线和 z 轴的夹角。TIR结构外部和内部两种介质的折射率为 n_1 和 n_2 ,设定该TIR结构能实现 β 与 γ 之间的映射,有下式

$$\begin{cases} (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k) \rightarrow (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k) \\ (\beta_k, \beta_{k+1}, \dots, \beta_N) \rightarrow (\gamma_N, \gamma_{N-1}, \dots, \gamma_k), \gamma_N \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, β_k 与 γ_k 是曲线 a 与曲线 b 之间的边界夹角,当 $\beta_k < \beta < \pi/2$,光源的光线首先达到曲线 d 。在曲线 d 上光线都将发生全反射。其中曲线 d 上任意点 M_i 对应的两夹角为 β_{N+1-i} 与 γ_{k+i-1} ,对应的切矢量为

\vec{R}_i 。其中切矢量可以表示为

$$\vec{R}_i = (\sin(\beta_{N+1-i}) + \sin(\gamma_{k+i-1}), \cos(\beta_{N+1-i}) + \cos(\gamma_{k+i-1})) \quad (2)$$

假设已知 M_i 的坐标,则可以由式(3)得到 M_{i+1} 的坐标为

$$\begin{cases} \frac{\overline{OM}_{i+1}}{|\overline{OM}_{i+1}|} = (\sin(\beta_{N+1-i-1}), \cos(\beta_{N+1-i-1})) \\ \frac{\vec{R}_i}{|\vec{R}_i|} = \frac{\overline{OM}_{i+1} - \overline{OM}_i}{|\overline{OM}_{i+1} - \overline{OM}_i|} \end{cases} \quad (3)$$

假设位于曲线 d 上的点 M_i 坐标为 $(m, 0)$,则可以获得曲线 d 上所有点 M_i 的坐标。光线经曲线 d 全反射后到达曲线 c ,曲线 c 能够保证光线都垂直的通过。曲线 d 上任意点 L_i 对应的夹角为 γ_{i+k-1} 。假设已知 L_{i+1} 的坐标,则可以由式(4)得到 L_i 的坐标为

$$\begin{cases} \frac{\vec{M}_i L_i}{|\vec{M}_i L_i|} = (\sin(\gamma_{i+k-1}), \cos(\gamma_{i+k-1})) \\ \frac{\vec{M}_i L_i}{|\vec{M}_i L_i|} \cdot \frac{\vec{L}_{i+1} L_i}{|\vec{L}_{i+1} L_i|} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由于 L_{N-k+1} 的坐标就是 M_{N-k+1} 的坐标,所以可以获得曲线 c 上所有点 L_i 的坐标。曲线 b 是一条直线,其斜率为 $\tan(\gamma_k)$ 。其中曲线 a 和曲线 b 的交点 B_k 的坐标可以由式(5)算出

$$\begin{cases} \frac{\vec{OB}_k}{|\vec{OB}_k|} = (\sin(\beta_k), \cos(\beta_k)) \\ \frac{\vec{B}_k L_1}{|\vec{B}_k L_1|} = (\sin(\gamma_k), \cos(\gamma_k)) \end{cases} \quad (5)$$

当 $0 < \beta < \beta_k$,光源光线直接达到曲线 a 。对于曲线 a 上的任一点 B_i ,对应的两夹角为 β_i 与 γ_i ,假设 B_i 的坐标已知,根据SNELL定律^[10],则 B_{i-1} 的坐标可以由式(6)算出

$$\begin{cases} \vec{In}_i = (\sin(\beta_i), \cos(\beta_i)) \\ \vec{Out}_i = (\sin(\gamma_i), \cos(\gamma_i)) \\ [1 + (\frac{n_2}{n_1})^2 - 2\frac{n_2}{n_1}(\vec{Out}_i \cdot \vec{In}_i)]^{1/2} \cdot \vec{N}_i = \vec{Out}_i - \frac{n_2}{n_1} \vec{In}_i \\ (\vec{B}_{i-1} - \vec{B}_i) \cdot \vec{N}_i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, \vec{R}_i 为点 B_i 的法矢量。因为点 B_i 的坐标已知,则曲线 a 上所有点 B_i 的坐标都可以算出。至此,通过计算可以得到TIR结构上所有的点坐标,该TIR结构可实现 x 轴上光线的半发散角由 90° 变为 γ_N 。

2 透镜构造

在犀牛软件中进行透镜生成,根据设计的TIR曲线,将其绕z轴360°放样,可以得到TIR曲面。封闭该曲面成实体后,在实体底端剔除一定半径的半球后即可构造所需透镜,如图3所示。

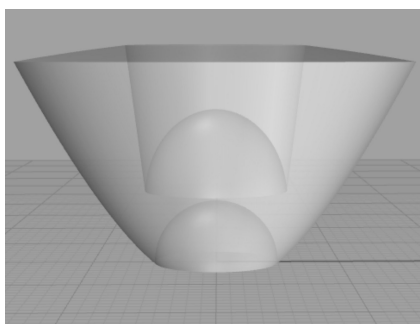


图3 TIR透镜模型

需要说明的是,当剔除的半球的半径足够大时,LED光源可近似为点光源,底部半球可近似认为不影响光源光线的传播方向。

3 设计实例与仿真分析

设定 γ_N 为 10° , m 设置为5,单位为mm,剔除的半球半径为5mm。透镜材料为亚克力板,折射率 n_2 设置为1.4935。

根据式(1), β 与 γ 之间有许多不同的映射形式,采用如下的映射形式

$$\begin{cases} \frac{\int_0^{\beta_i} \cos \beta d\beta}{\int_0^{\pi/2} \cos \beta d\beta} = \frac{i-1}{N-1}, 0 \leq \beta_i \leq \pi/2 \\ \gamma_i / \gamma_N = \frac{i-1}{N-1} \end{cases}, 1 \leq i \leq N \quad (7)$$

根据设定的参数可以生成透镜,将该透镜导入tracepro软件并进行光学仿真,可得到LED点光源的仿真坎德拉图,如图4所示。其中LED光源的光线经透镜后半发散角变为 10° ,跟预期相符。

由于实际的LED光源具有一定的尺寸,当该透镜采用 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 尺寸的LED光源时,同样条件下仿真得到的坎德拉图如图5所示。从图5可知,半发散角为 10° ,但是相比图4,光强分布不均匀。

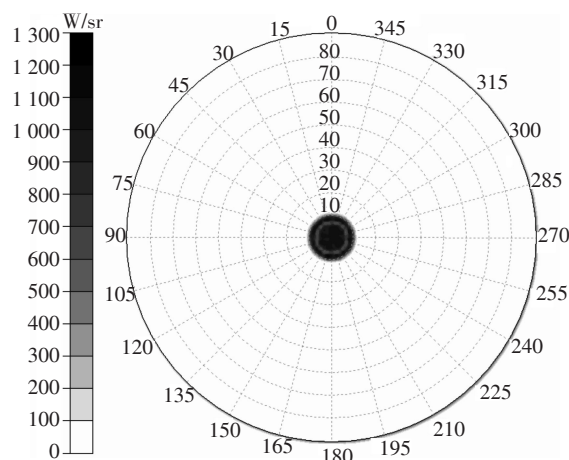


图4 10° 的点光源坎德拉图

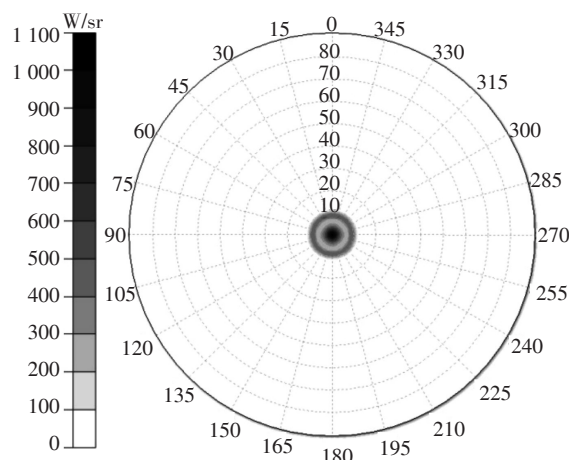


图5 10° 的 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ LED光源坎德拉图

为了对比,设定 γ_N 为 5° ,其他条件不变。根据设定的参数可以生成透镜,进行光学仿真后,可得到LED点光源的仿真坎德拉图,如图6所示。

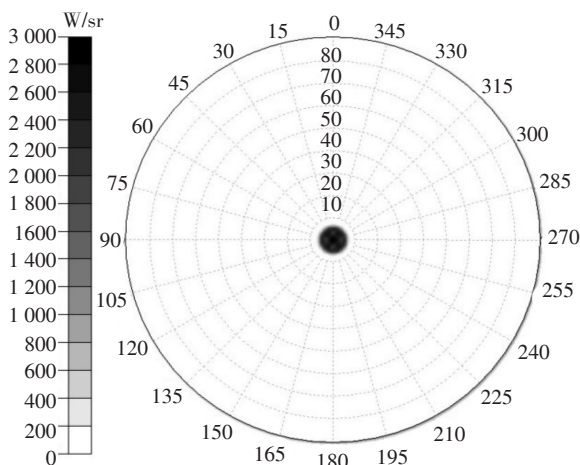


图6 5° 的点光源坎德拉图

其中LED光源的光线经透镜后半发散角变为 5° ,跟预期相符。同时采用 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 尺寸的LED光源时,仿真得到的坎德拉图如图7所示。

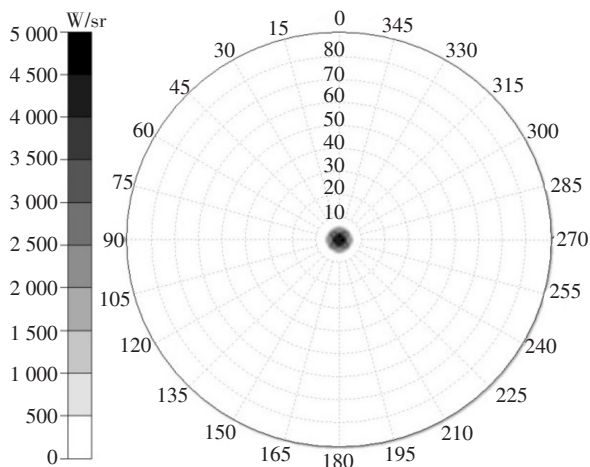


图7 5° 的 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ LED光源坎德拉图

从图7可知,半发散角为 5° ,相比图6,光强分布不均匀。

4 结论

通过改变TIR结构的全反射面,可实现小发散角的圆形照明。设计了半发散角为 5° 和 10° 的透镜并进行了仿真验证,当采用点光源或者 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ LED光源时,半发散角能满足预期为 5° 和 10° ,当采用 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ LED光源时,光强分布会变得不均匀,后期可通过改变映射方式提高光强分布均匀性。此方法同样适用其他小发散角透镜的设计。

参考文献

- [1] Moiseev M A, Doskolovich L L, Kazanskiy N L. Design of high-efficient freeform LED lens for illumination of elongated rectangular regions[J]. Optics Express, 2011, 19 (3): 225-233.
- [2] Ma D, Feng Z, Liang R. Freeform illumination lens design using composite ray mapping[J]. Applied Optics, 2015, 54 (3): 498-503.
- [3] Liu Z, Yu F. Non-uniform grid target tessellation method for the design of lens group with rectangular uniform illumination[J]. Applied Optics, 2015, 54(7): 1618-1624.
- [4] Michaelis D, Schreiber P, Bräuer A. Cartesian oval representation of freeform optics in illumination systems[J]. Optics letters, 2011, 36(6): 918-920.
- [5] Hongtao L, Shichao C, Yanjun H, et al. A fast feedback method to design easy-molding freeform optical system with uniform illuminance and high light control efficiency [J]. Optics express, 2013, 21(1): 1258-1269.
- [6] Domhardt A, Weingaertner S. TIR Optics for non-Rotationally symmetric illumination design[J]. SPIE, 2008, 7103 (04): 1-8.
- [7] Doskolovich L L, Moiseev M A. Calculations for refracting optical elements for forming directional patterns in the form of a rectangle[J]. J. Opt. Technol. 2009, 76 (7): 430-434.
- [8] Chen J, Lin C. Freeform surface design for a light-emitting diode-based collimating lens[J]. Optical Engineering. 2010, 49(9): 93001.
- [9] Liu D, Zhang X, Chen C. Free-form lens for rectangular illumination with the target plane rotating at a certain angle [J]. JOSA A, 2015, 32(11): 1958-1963.

声明

近期发现有假冒《光电技术应用》期刊的投稿代理机构非法进行投稿代理,对此,《光电技术应用》编辑部正式声明,本刊自成立以来没有设立任何投稿代理机构且尚未开通在线投稿,一直使用的、唯一的投稿邮箱为 aoe-cetc@vip.163.com,编辑部电话:022-59067938。请作者按此邮箱投稿,如有疑问请直接通过电话或邮件与编辑部联系咨询。

特此声明。

《光电技术应用》编辑部