

文章编号: 1005-5630(2015)06-0517-05

基于微透镜阵列生成特定矩形光斑的 TIR 组合透镜设计与仿真

刘雁杰^{1,2}, 惠 彬^{1,2}, 李景镇², 丁金妃²

(1. 深圳大学 电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060;

2. 深圳市微纳光子信息技术重点实验室, 广东 深圳 518060)

摘要: LED 功率的不断增大使其逐渐替代传统光源, 并广泛用于各种照明光源。在某些室内照明以及道路照明设计中, 通常需要借助 LED 透镜产生矩形光斑从而充分利用光能避免浪费。利用 Light Tools 软件设计了一种全内反射(total internal reflection, TIR)透镜与特定微型透镜阵列的组合透镜, 设置 TIR 准直透镜透射曲面和全反射曲面为二次曲面, 并对其进行准直优化。然后建立单个微型透镜, 设置单个矩形微透镜长宽比分别为 1:1、3:2 和 4:3, 并将其阵列化。通过改变微型透镜的尺寸以及球面曲率半径进行进一步优化, 最后生成与微型透镜长宽比对应的均匀矩形光斑, 从而满足不同矩形照明区域的照明需求。

关键词: 照明工程; LED; TIR 透镜; 微型透镜

中图分类号: TN 321.8 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.06.010

Design and simulation of TIR combination of lens for a specific rectangular spot based on micro-lens array

LIU Yanjie^{1,2}, HUI Bin^{1,2}, LI Jingzhen², DING Jinfei²

(1. College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. Shenzhen Key Laboratory of Micro-Nano Photonic Information Technology, Shenzhen 518060, China)

Abstract: LED is widely used in different lighting environment instead of traditional lighting source as its power becoming higher and higher. LED lens are always needed to make rectangular spot to avoid waste of flux in some illumination design of indoor and road conditions. In this design, total internal reflection (TIR) lens and micro-lens array are integrated by Light Tools. The transmission and the total reflection surface of TIR lens are all set up to quadric for optimization. And the ratio of length and width of a single micro-lens is set to 1:1, 3:2 and 4:3. The size of the micro-lens and spherical curvature are also variable for further optimization. Finally, a uniform rectangular spot appears on the detector, and the ratio of the length and width is the same as the ratio of micro-lens which can meet illumination design of different condition.

Keywords: illumination engineering; LED; TIR lens; micro-lens

收稿日期: 2015-02-27

基金项目: 国家专项基金项目(61027014); 深圳市科技计划项目(JCYJ20140418095735582)

作者简介: 刘雁杰(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: liuyanjielphelps@foxmail.com

通信作者: 惠 彬(1977—), 女, 副教授, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: huibin@szu.edu.cn

引 言

LED 具有体积小、发光效率高、寿命长等优点,并且随着单颗 LED 功率的提高,如今 LED 光源已经广泛应用于室内照明(筒灯、射灯、球泡灯等)、室外照明(路灯、标识灯等)、投影照明和车灯照明等方面^[1-3]。LED 二次光学设计直接影响着 LED 出射角度、光照度分布等,在 LED 照明设计起着至关重要的作用。

在道路照明应用方面,灯具设计者通常会根据不同照明场景和环境的需求对 LED 进行配光和二次设计。光照的区域和形状是设计者必须要考虑的,在路灯照明系统以及一些室内照明(地铁或者火车)中,照明区域通常为矩形,而未经配光的 LED 产生的光斑呈圆形。为了充分利用光能,避免照明区域外光能量的损失,可利用对 LED 二次光学设计直接产生矩形光斑^[4-6],最终使 LED 发出的光能够在路面上呈均匀分布并符合相关道路照明标准^[7]。

当前,较为常用的做法是根据 LED 发光特性采用自由曲面^[8-10]的方法进行设计:复旦大学刘正权等^[11]根据空间 Sell 定律的矢量表达式^[11]和光源扩展度守恒列出偏微分方程,并根据边界条件求出方程数值解从而得到反射曲面坐标,再通过软件的建模与拟合最终得到反射器模型,采用这种方法最终可以得到近似的矩形光斑,但矩形的轮廓并不清晰;清华大学深圳研究生院胡晓佳等^[12]采用分离变量与最小能量块迭代法通过对 LED 光源和路面的能量网络划分设计成类似“花生米”结构的自由曲面透镜,最终生成相对均匀的矩形光斑,但精确改变矩形两边长之比却相对困难;北京工业大学李澄、李农采用抛物线聚光碗、准直透镜和复眼结构并利用 Tracepro 软件进行模拟生成了方形光斑^[5],但并未对产生特定长宽比的矩形光斑进行进一步研究。

本文采用全内反射(total internal reflection, TIR)透镜结合矩形微型矩形球面透镜阵列的方法,在 Light Tools 软件中建立模型并进行模拟,采用长宽比分别为 1:1、3:2 和 4:3 的微型透镜作为阵列元,并改变其后表面曲率半径进行优化,最终得到长宽比分别为 1:1、3:2 和 4:3 的矩形光斑。

1 系统模型的建立

1.1 TIR 准直透镜模型的建立

TIR 透镜模型的建立一般有两种方法^[13-15]:第一种是采用逆向工程的方法,假设 LED 为点光源,利用空间 Snell 定律列出方程,然后分别计算出透射曲面和全反射曲面母线上的坐标点,并在建模软件中把这些坐标点通过样条曲线拟合成一条曲线,利用建模软件对其绕对称轴旋转建立相关模型;第二种方法是直接在光学软件中建立模型,根据光线追迹的结果对已经建好的模型进行优化和修改,直至满足设计需求。

第一种方法的优点是可以对曲面面型进行直接计算,缺点是无法直接在光学软件中对其进行优化,并且 LED 本身为扩展光源,将其看作点光源必定会给模拟仿真的结果带来一定误差。此外,在计算的过程中需要利用 MATLAB 软件或者其他工具进行计算,也使建模本身更加复杂。第二种方法在建模时相对简单和直观,我们可以在光学软件中直接建立模型并通过观察光线追迹结果对透镜相关参数进行修改而使结构更接近预期效果。在实际生产中,大多数采用第二种方法,并利用 Light Tools 软件结合 Solidworks 或者利用 Tracepro 软件进行建模和优化,但是这种方法使用的前提是要对 TIR 透镜以及 LED 配光曲线有较多的设计经验。

本文采用第二种方法,在 Light Tools 软件中直接建立模型,其中透射面和全反射面面型均采用二次曲面,设定初始值,利用布林运算对建立的三维模型进行编辑从而建立 TIR 透镜初始结构。在优化过程中,把透射面与全反射面的二次曲面系数设置为变量,并以准直为优化目的对建立的透镜模型进行优化。采用 1 mm×1 mm 朗伯发光体光源进行模拟,经过优化之后所得到 TIR 透镜如图 1(a)所示,图 1(b)为经过优化后在 2 000 mm 处接受到的光斑的照度图。

1.2 矩形微型透镜阵列的建立

微型透镜所采用的材料与 TIR 透镜一样,均为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),折射率为 1.49,并采用平凸透镜结构,即第一面为平面,第二面采用球面。在光学软件中建立图 2 所示的矩形微透镜。图 2(a)为单个微型透镜模型。建立好单个模型后,将其阵列化并使用布林运算使其与 TIR 透镜构成一个系统(图 2(b))。

整个系统相当于一个组合透镜系统,其中 TIR 主要起到准直的作用,而后面的微型透镜阵列起到对光斑整形的作用。当改变微型透镜球面的曲率半径以及微型透镜在 TIR 出射面的排布个数时,最终形成的矩形光斑会发生相应的变化。

另外,微型透镜的出射面面型对照明效果也起着重要作用。本文仅仅对球面这一特殊情况进行讨论,还可以在 Light Tools 软件中设置二次曲面的曲面系数来改变曲面面型,从而对系统进行进一步优化和分析,也可以在其它建模软件中根据实际需求自行设计自由曲面进行建模。

2 系统模拟与仿真结果

如 1.2 节所述,在对 TIR 透镜进行准直和均匀度优化之后,在 TIR 透镜后表面增加微型透镜阵列,设定矩形微透镜长宽比分别为 1:1、3:2、4:3。在建立 TIR 模型时,设定出射面直径为 24 mm,接收面在距 LED 后 2 m 处。在分别保持微型透镜长宽比不变的情况下,通过改变微型透镜的尺寸和曲率半径进行优化。

2.1 长宽比为 1:1

设置微型透镜轮廓为矩形,设置微型透镜长与宽相等(X 表示长边, Y 表示短边),分别设置 $X=Y=1$ mm、 $X=Y=2$ mm 和 $X=Y=3$ mm,即分别对应 TIR 透镜后表面排布的微型透镜个数为 $N=450$ 、 $N=110$ 和 $N=50$ 。分别在保持 N 不变的情况下,改变微型透镜后表面的曲率半径,并进行光线追迹,分别得到如图 3 所示的(a)(b)(c)光斑照度图(由于篇幅限制,仅从多个模拟结果中选取 8 幅充分展示照度变化的照度图)。

从图中可以看出,当保持微透镜两边 $X=Y=1$ mm 时,改变后表面曲率半径时,当曲率半径 R 从 40 mm 逐渐减小至 1 mm,最终目标面上的光斑形状会从圆形逐渐变成正方形,且光斑会逐渐变得更加均匀。保持矩形长宽比不变,改变微型透镜的尺寸使得 $X=Y=2$ mm 和 $X=Y=3$ mm,同样也得到了照度分布较为均匀的正方形光斑。

2.2 长宽比为 3:2

2.1 节中所模拟的正方形是矩形的特殊情况,当两边长度不相同,改变微型透镜的比例,设置长宽比为 3:2,分别设置 $X=1.5$ mm、 $X=3$ mm、 $X=4.5$ mm,对应的 $Y=1$ mm、2 mm 和 3 mm,即 $N=300$ 、75 和 33。分别在保持 N 不变的情况下,改变微型透镜后表面的曲率半径,并进行光线追迹,分别得到图 4 所示的(a)(b)(c)光斑照度图。

如图 4(a)所示,当 $X=1.5$ mm、 $Y=1$ mm 时, $R>6$ mm 时,接受面上的光斑为圆形且变化不大;当 R 从 6 mm 逐渐减小时,接受面上的光斑从圆形逐渐变成椭圆形,再由椭圆形渐渐变成矩形,且矩形的四个直角和轮廓也愈来愈清晰,光斑也逐渐变得均匀,且矩形光斑两边之比为 3:2。当保持 X 与 Y 比例不变改变其值时,也得到了均匀的矩形光斑(图 4(b)和图 4(c)),且矩形光斑长宽比为 3:2。

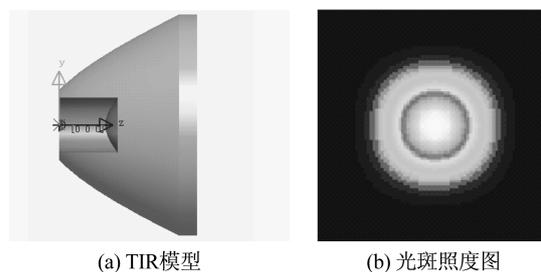


图 1 TIR 模型以及其后 2 000 mm 处光斑后照度图
Fig. 1 TIR model and illumination map after 2 000 mm

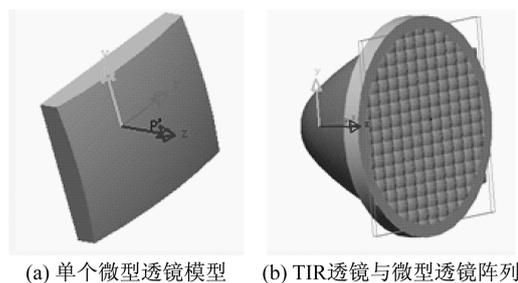


图 2 在 Light Tools 软件中建立的微型透镜以及组合透镜系统
Fig. 2 Single lens and combination lens system

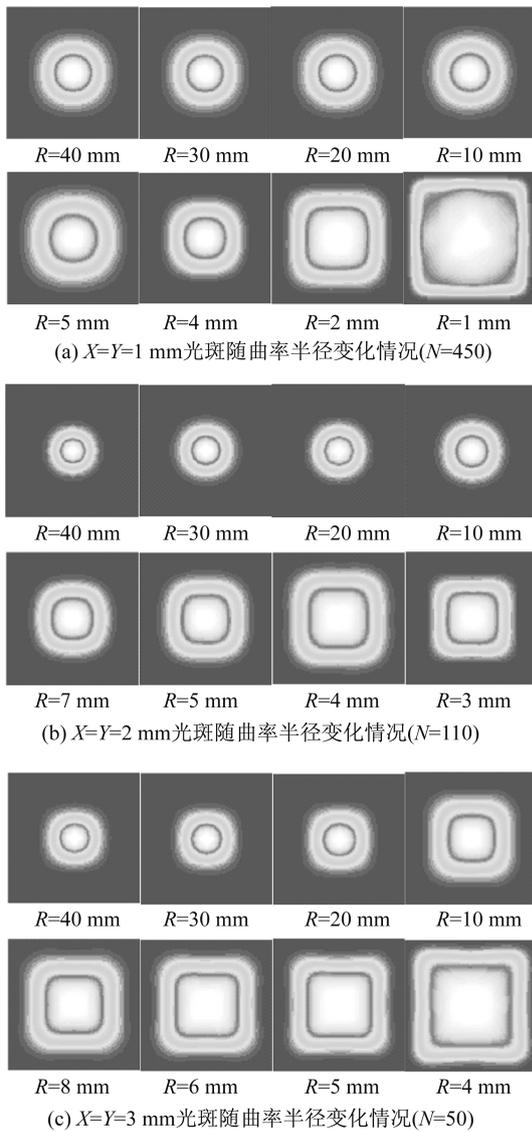


图 3 微型透镜长宽相等时生成的光斑照度图

Fig. 3 Spots when length:width is 1:1

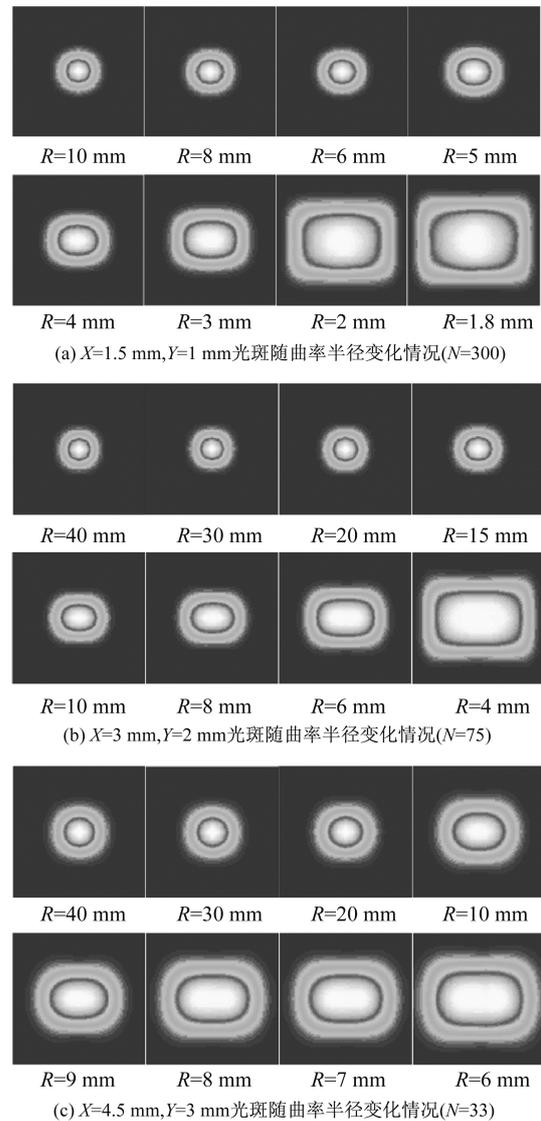


图 4 微型透镜长宽比为 3:2 时生成的光斑照度图

Fig. 4 Spots when length:width is 3:2

2.3 长宽比为 4:3

设置 $X=1$ mm、 $X=2$ mm、 $X=4$ mm, 对应的 $Y=0.75$ mm、 1.5 mm 和 3 mm, 即 $N=600$ 、 150 和 75 。分别在保持 N 不变的情况下, 改变微型透镜后表面的曲率半径, 并进行光线追迹, 分别得到图 5 所示的 (a)(b)(c) 光斑照度图(已略去 R 变化时变化不大的照度图), 最终三种情况下都得到了长宽比为 4:3 的矩形光斑, 所得到的结论和 2.1 以及 2.2 节完全一致。

从以上的模拟与仿真结果可得知, 在微型透镜取合适的尺寸, 并在保持微透镜尺寸不变的情况下, 可以通过调节微型透镜出射面面型最终得到与微型透镜长宽比相吻合的矩形光斑, 也就是说微型透镜的个数 N 以及微型透镜的面型是影响最终矩形光斑形状以及大小的两个重要因素。

3 结论与展望

本文提出了一种基于矩形微型透镜阵列的新型 TIR 透镜结构并建立了相关模型, 并分别设置微型透镜长宽比为 1:1、3:2、4:3, 然后在保持长宽比不变的情况下通过改变微型透镜的个数 N 和微型透镜后表

面曲率半径 R , 在远场分别产生了与微型透镜对应比例——即长宽比分别为 1:1、3:2、4:3 的矩形光斑, 照度分布较为均匀且矩形轮廓清晰。此种透镜可用于特定场合的照明, 比如室内照明和路灯照明等方面, 并且尽可能地利用光能, 避免了照明光斑与照明区域的不吻合造成的光能损失。此外, 本文所采用的建模方法步骤简单, 避免了繁琐的公式推导, 同时也避免了“逆向工程”方法带来的复杂的优化过程。

与此同时, 由于所选初始结构以及优化方式的限制, 导致矩形光斑边缘照度与中心区域照度呈阶梯状分布, 可以通过对 TIR 透镜全反射以及透射曲面的选型以及继续优化对结构进行进一步改善, 使最终结果满足设计需求, 或者在灯具中改变 LED 的排布也能达到增加均匀度的效果。另外, 本文在设定微型透镜时微型透镜后表面为球面, 我们还可以采用其他不同的面型, 比如二次曲面或者自由曲面, 通过改变二次曲面系数再进行深入的研究。

参考文献:

- [1] 刘祖明, 黎小桃. LED 照明设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [2] 刘旖. 微投影仪的照明光路设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [3] DING Y, LIU X, ZHENG Z R, et al. Freeform LED lens for uniform illumination[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 12958-12966.
- [4] 李竞. 实现 LED 矩形均匀照明的透镜设计[J]. 应用光学, 2011, 32(2): 211-214.
- [5] 张芸, 刘铁根, 张学敏, 等. LED 路灯光强模拟分布及实验验证[J]. 光学仪器, 2008, 30(1): 45-49.
- [6] 傅澄宇, 杨波, 李正达, 等. 一种 LED 光源矩形斑照明的优化算法及其仿真[J]. 光学仪器, 2013, 35(5): 36-40.
- [7] 中国建筑科学研究院. CJJ 45—2006. 城市道路照明设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [8] 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.
- [9] WANG L, QIAN K Y, LUO Y. Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance[J]. Applied Optics, 2007, 46(18): 3716-3723.
- [10] CHEN J J, LIN C T. Freeform surface design for a light emitting diode-based collimating lens[J]. Optical Engineering, 2010, 49(9): 093001.
- [11] 刘正权, 孙耀杰, 林燕丹. 基于 LED 的自由曲面反射器设计软件研究[J]. 照明工程学报, 2012, 23(4): 56-60.
- [12] 胡晓佳, 钱可元. LED 道路照明中实现任意照度分布的自由曲面光学设计[J]. 半导体光电, 2012, 34(6): 1077-1081.
- [13] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003.
- [14] GRABOVIČKIĆ D, BENÍTEZ P, MIÑANO J. TIR RXI collimator[J]. Optics Express, 2012, 20(S1): A51-A61.
- [15] 罗晓霞, 刘华, 卢振武, 等. 实现 LED 准直照明的优化设计[J]. 光子学报, 2011, 40(9): 1351-1355.

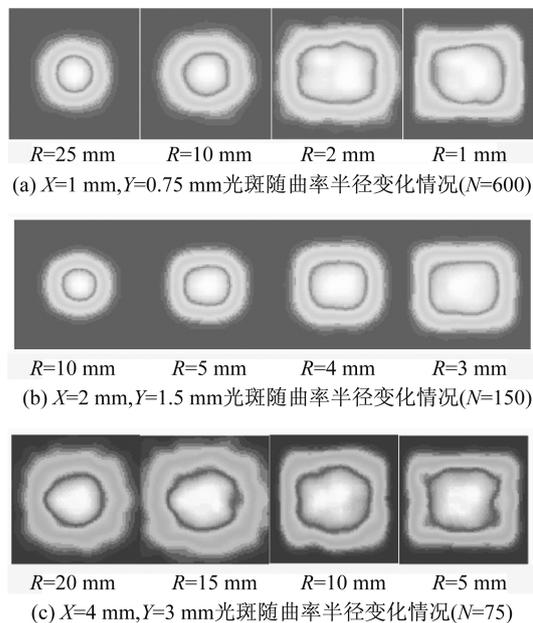


图5 微型透镜长宽比为 4:3 时生成的光斑照度图

Fig. 5 Spots when length:width is 4:3

(编辑:程爱婕)