

多向平行分光透镜的自由曲面组合设计方法

林浩博, 万运佳, 刘杰, 张健, 熊晖

湖北大学物理与电子科学学院, 武汉 湖北 430062

摘要 提出一种多向平行分光透镜的自由曲面组合设计方法, 可适用于广义朗伯分布的发光二极管(LED)光源, 实现任意多向的平行分光。设计了应用于雨量传感器的透镜, 在不增加光源的前提下, 增加出射的光线路径数量, 透镜体积小、光效利用率高, 增大了传感器的光学探测区域, 可为相关的光电器件的设计与优化提供便利。理论计算和建模仿真进一步证明了此方案的可行性和有效性。

关键词 光学设计; 分光透镜; 自由曲面; 准直光束; LED光源; 雨量传感器

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.112204

Freeform Surface Combination Design Method of Multidirectional Parallel Beam Splitting Lens

Lin Haobo, Wan Yunjia, Liu Jie, Zhang Jian, Xiong Hui

School of Physics and Electrical Technology, Hubei University, Wuhan, Hubei 430062, China

Abstract A combination design method of freeform surface of multidirectional parallel beam splitting lens is proposed, which can be applied to the light emitting diode (LED) light source of generalized Lambertian distribution to realize any multidirectional parallel beam splitting. A lens is designed for the rainfall sensor, which can increase the number of outgoing ray paths without adding the light source. The designed lens has such advantages as small volume and high luminous efficiency, which can help to increase the optical detection of the sensor area and provide convenience to the design and optimization of related photoelectricity devices. Theoretical calculation and modeling simulation further verify the feasibility and validity of this plan.

Key words optical design; beam splitting lens; freeform surface; collimated beam; LED light source; rainfall sensor

OCIS codes 220.3620; 220.4298; 230.3670

1 引言

感应式自动雨刮器大多数为光学式, 发光二极管(LED)是核心部件^[1-2]。光学透镜在感应式自动雨刮器中有重要应用。自动雨刮器在给驾驶员提供便利的同时, 大大降低了因频繁手动控制开关带来的行车安全隐患。然而, 目前自动雨刮器的感应系统还存在着一些不足, 亟待优化^[3]。例如, 传统的“发射-接收”的一对一模式使得传感器只能覆盖挡风玻璃的部分区域, 光学检测的面积较小, 结果不够准确, 可能存在偶然性和误差。为了解决这一问题, 很多厂商采用多端点发射的方案, 对光学透镜进行自由曲面设计^[4-6], 放置多组传感器用以增大覆盖面积。此方案虽然在一定程度上提高了探测精度, 但LED的光效利用率不高, 并使透镜内部结构复杂化, 设备的体积增大。

针对这些问题, 本文以雨量传感器配光为例, 运用多自由曲面组合的设计思路^[7-12], 设计多向分光透镜

收稿日期: 2017-05-10; **收到修改稿日期:** 2017-06-08

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划青年人才项目

作者简介: 林浩博(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学工程方面的研究。E-mail: linhaobo_hubu@163.com

导师简介: 熊晖(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事半导体光学、光电器件、光学工程方面的研究。

E-mail: xhui_hbu@163.com(通信联系人)

和中心准直透镜,将单个 LED 发射端的光线进行多向分光,增加光线探测路径,尽可能地覆盖更大的探测区域,在控制结构体积和制造成本的同时,提高光学性能,达到设计目的。对设计方案运用 3D 建模和光学仿真^[13-14]加以验证,确保方案的有效性。

2 基本原理

光源采用封装红外 LED,单个 LED 光源光强近似呈朗伯分布,光强分布可表示为 $I(\theta) = I_0 \cos^m \theta$,其中 I_0 为正入射方向的光强。当 $m = 1$ 时,其配光曲线如图 1 所示。

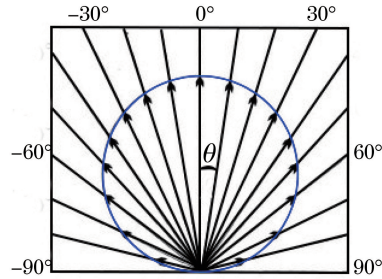


图 1 光源的配光曲线示意图

Fig. 1 Diagram of light source distribution curve

光源发光的空间范围为经度 $-180^\circ \sim 180^\circ$,纬度 $0^\circ \sim 90^\circ$,为了让光源发射的光线呈多向平行出光,达到准直分光的效果,需要对光源进行空间划分。具体思路是:首先找到使光源产生单个准直光序列的自由曲面形式,并以此为分割基准,通过绕平面轴旋转的方式,生成对应 $0^\circ \sim 60^\circ$ 经度区间和 $0^\circ \sim 90^\circ$ 纬度区间的 3D 自由曲面,最后以光源为中心,以 60° 经度为区间对自由曲面进行圆周阵列组合,以覆盖整个光源的空间范围。其单个透镜的数学模型如图 2 所示。

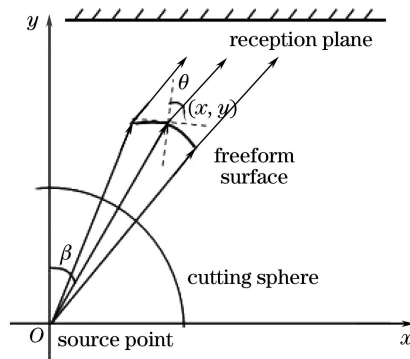


图 2 光线经过透镜的参数示意图

Fig. 2 Parameter diagram of light passing through the lens

光源 O 以与垂直法线成 β 角度发射出光线,经过球形切削(球心为 O)的下底面进入透镜,在此界面上不发生偏折,再经过自由曲面时发生折射,折射角为 θ ,折射后的光线相互平行且与垂直法线呈 α 角度,根据斯涅耳定理和几何关系有:

$$\beta - \theta - \alpha + \arcsin\left(\frac{\sin \theta}{n_1}\right) = 0, \quad (1)$$

式中 n_1 为透镜折射率。曲线上的点 (x, y) 存在正切关系:

$$\frac{x_n}{y_n} = \tan \beta. \quad (2)$$

采用迭代法,将前一点的斜率依次代入相邻下一点计算中:

$$\frac{dy}{dx} = \tan \theta_n = \frac{y_n - y_{n-1}}{x_n - x_{n-1}}. \quad (3)$$

联立(1)~(3)式,编写计算程序,以 $(0, y_0)$ 为起始点开始计算,直到 $\beta=45^\circ$ (即 $x_n=y_n$)时停止,依次求出曲线上各点坐标。根据透镜应用的实际需要,设定合理的透镜尺寸,计算中采用的各参数如表1所示,其中 n_0 为空气折射率, y_0 为计算起始点, d 为透镜焦距, R 为透镜半径, n_1 为透镜折射率, α 为出射光线与垂直法线夹角。

表1 计算参数表

Table 1 Parameters in calculation

Parameter	Value
n_0	1
n_1	1.5
y_0/mm	50
d/mm	20
R/mm	50
α	$\pi/4$

计算得到的透镜自由曲面的曲线如图3所示。

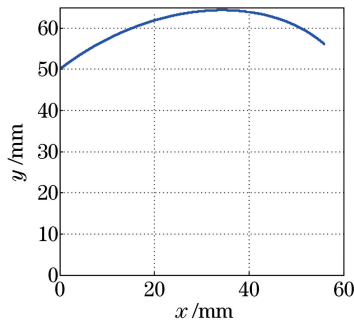


图3 透镜横截面曲线

Fig. 3 Cross section curve of the lens

3 光学设计与仿真

3.1 多向平行分光透镜

3.1.1 透镜模型

将透镜曲线数据导出进行3D建模,建立透镜的精确3D模型,过程如下:将曲线和下方圆弧闭合为封闭空间,以斜向 $\alpha=45^\circ$ 为中心轴旋转,可得椭球型透镜,正视图如图4所示,其特点在于对底面进行了球形切削,因而在体积和厚度上都具有一定的优势,并且在实际生产中可以节省原材料。此时如果将光源放置于坐标原点,透镜可满足斜 45° 平行出光的要求。

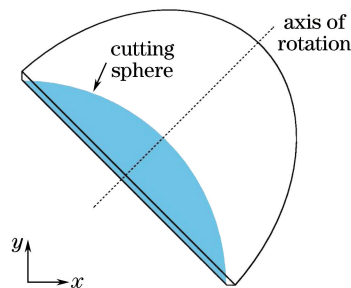


图4 单个透镜3D模型、旋转轴以及底面球形切削

Fig. 4 3D model of single lens, axis of rotation and spherical cutting in the bottom

进一步地,为了满足光线多角度多方向环绕形出射,透镜需要进行相应的组合。以六向为例,图5(a)显示了六边形组合的全过程,原透镜以 60° 的中心角进行拉伸切削,得到扇形部分,再以顶角为中心,旋转拼接,最终得到多拱形透镜,其3D模型如图5(b)所示。由于各个透镜的曲线参数相同,都由单个透镜进行镜像旋转生成,所以最终的透镜组可拼接为一个规整的多拱形,效果良好。

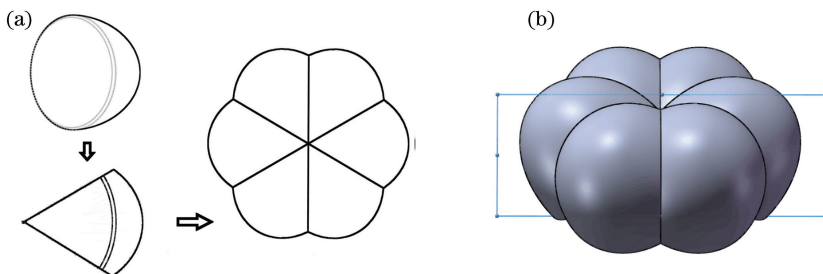


图5 (a)透镜的切削、拼接过程;(b)透镜的3D模型

Fig. 5 (a) Cutting and combination process of the lens; (b) 3D model of the lens

3.1.2 光学仿真

采用光学设计软件 Light Tools 对配光效果进行光学仿真,基于已建立好的透镜模型,设置透镜材料折射率为 1.5,光源特性为朗伯光源,总光通量为 1 lm,放置在原点,透镜正对面设置平面接收器,指定光线追迹数量为 10^5 条。运行光学仿真,得到的光路如图 6(a)所示,接收器散点图和光斑的放大图(红框)如图 6(b)所示。

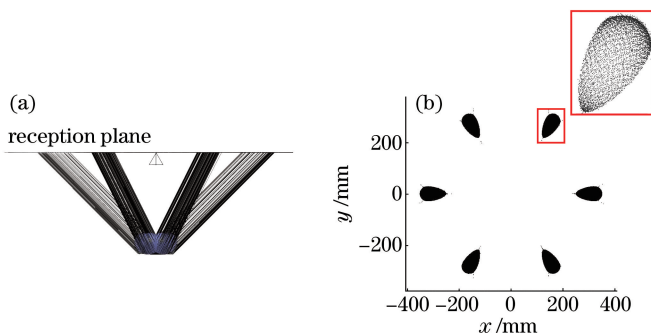


图6 (a)光线传播示意图;(b)接收平面上的光斑散点图

Fig. 6 (a) Schematic of light trace; (b) light spots on the reception plane

由图 6 中光路可见,朗伯光源发光经过透镜之后,变为 6 束斜射光束,效果良好。由散点图可见,接收平面得到 6 个光斑,单个光斑呈扇形,与切削形状相关。扇形光斑的尖端和尾部的散点较为密集,中心区域较稀疏,6 个光斑呈六边形分布,与透镜的拼接结构保持一致。光斑周围部分较为纯净,杂光较少。基于图 6 得到的光路,得到照度分布图如图 7 所示。

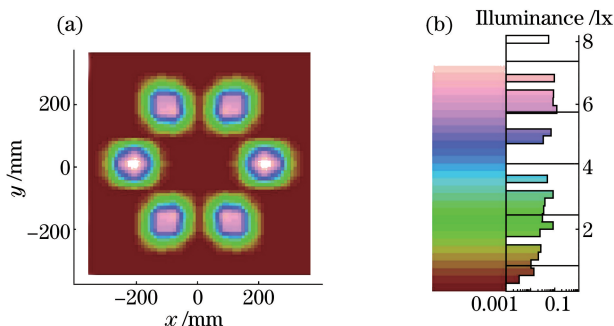


图7 接收平面上的照度示意图

Fig. 7 Schematic of light illuminance distribution on the reception plane

照度分析表明,与散点图类似,照明区域呈六向环绕分布,各分区中心照度达到 8 lx,照度标准偏差为 0.553 lx,为中心照度的 7%,说明光斑的均匀性较好。为精确分析出射光线的平行度,将光线的方位数据用方向余弦表示,逐条对光线进行数据分析,绘制方向余弦的分布情况如图 8 所示,其中 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别为光线与 x 轴、 y 轴和 z 轴的夹角。

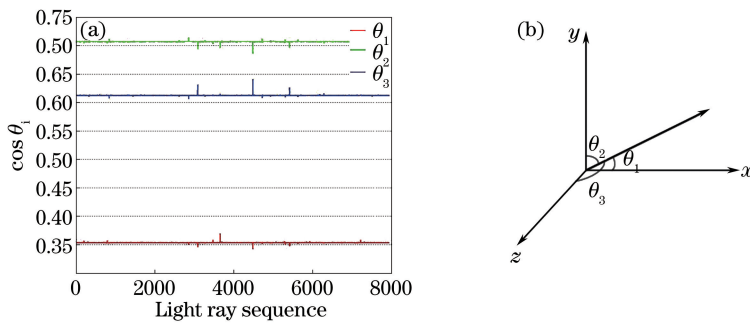


图 8 (a) 光线路径方向分布图; (b) 光线路径方向余弦示意图

Fig. 8 (a) Distribution diagram of light trace direction; (b) diagram of direction cosine of light trace

图 8(a) 中三条折线分别代表光线路径的方向余弦值的波动变化, 可见折线走势平缓。计算三个方向余弦的标准偏差分别为 0.000292、0.000364 和 0.000448, 证明各条光线路径的方向趋于一致, 即平行度良好, 达到了预期准直效果。

3.2 带中心准直的多向平行分光透镜模型

3.2.1 透镜模型

为了改善透镜的抗干扰性能, 增加透镜的环境光参量检测等功能, 可在多拱形透镜中心部分加入准直光路部分, 用于收集环境光信号, 其基本原理和方法与前述斜向出光类似。将表 1 中的变量 α 赋值为 0, 即可得到中心准直部分的透镜曲线, 如图 9 所示。

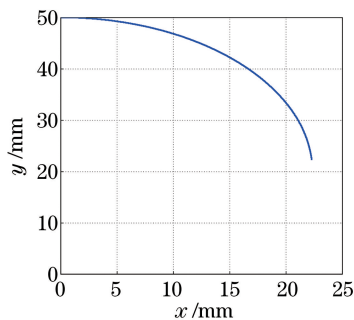


图 9 中心准直部分的透镜横截面曲线

Fig. 9 Cross section curve of central collimation lens part

将上述透镜曲线旋转 360° 得到完整模型, 并进行六边形切削, 同时也在多拱形透镜中心进行六边形切削, 如图 10(a) 所示。将中心准直部分和前述多拱形透镜组合起来, 得到最终形状, 其 3D 模型如图 10(b) 所示。

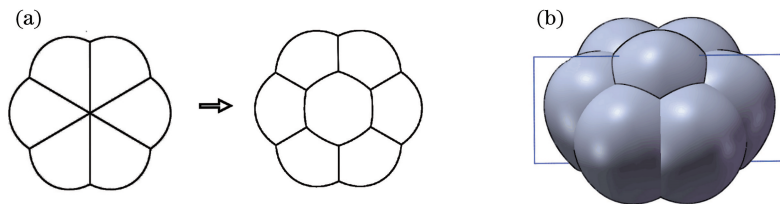


图 10 (a) 透镜的掏孔、拼接过程; (b) 透镜的 3D 模型

Fig. 10 (a) Hole-digging and combination process of the lens; (b) 3D model of the lens

3.2.2 光学仿真

利用光学设计软件 Light Tools 对透镜模型进行仿真, 仿真条件同上。光学仿真后, 得到如图 11 所示的光路图和接收平面上的散点图。与前述的多向分光透镜光路相比, 斜射部分无明显区别, 中心增加了准直光束垂直入射接收平面, 达到了设计预期。接收平面上的散点图与光路图相呼应, 由于中心六边形切削的缘故, 中心光斑(绿框)为六边形, 周围 6 个光斑(红框)呈近似梯形, 围绕中心呈六边形分布。

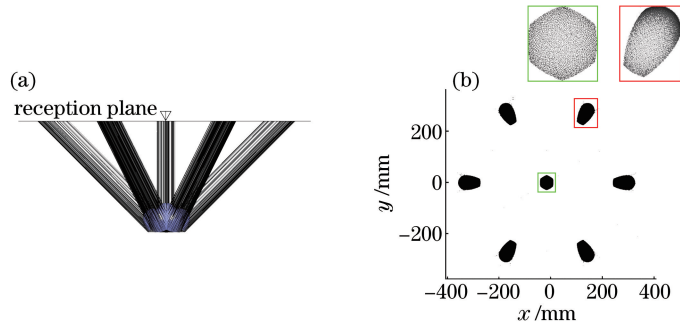


图 11 (a) 光线传播示意图; (b) 接收平面上的光斑散点图

Fig. 11 (a) Schematic of light trace; (b) light spots on the reception plane

基于图 11 得到的光路, 得到照度分布图如图 12 所示。照度分析表明, 由于增加了中心准直部分, 各分区中心照度比之前略有降低, 达到 6 lx 左右, 照度的标准偏差为 0.486 lx, 均匀性较好, 为中心照度的 8%。可根据实际需要调整 LED 功率来获得相应的照度值。

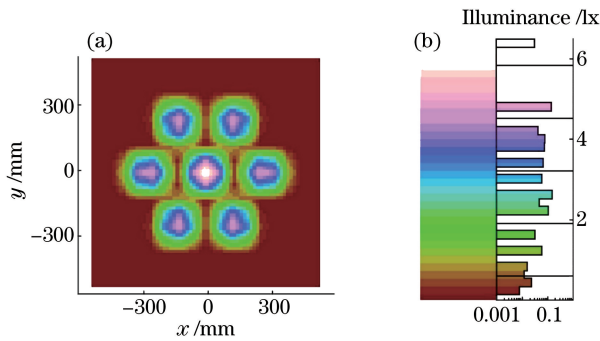


图 12 接收平面上的照度分布示意图

Fig. 12 Schematic of illuminance distribution on the reception plane

类似地, 将中心准直部分的光线方位用方向余弦表示, 进行偏差分析, 由于六向出光部分只发生了光斑形状改变和照度下降, 此处不再赘述。绘制出中心准直部分的方向余弦折线图, 如图 13 所示。

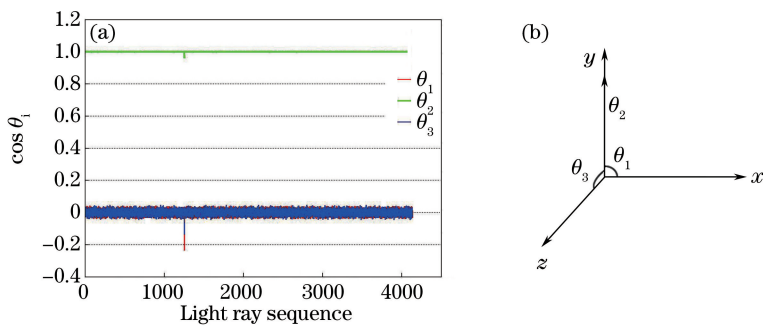


图 13 (a) 光线路径方向分布图; (b) 光线路径方向余弦示意图

Fig. 13 (a) Distribution diagram of light trace direction; (b) diagram of direction cosine of light trace

三条折线分别代表光线路径的三个方向余弦值的波动变化, 其中 y 方向的方向余弦值稳定在 1 左右, x 和 z 方向的方向余弦值在 0 附近波动, 符合 y 方向准直出光的情景。计算三个方向余弦的标准偏差分别为 0.0195、0.000634 和 0.0193, 证明中心光束准直程度较好, 达到了预期效果。

4 结 论

本文给出了一种多向平行分光透镜的自由曲面组合设计方法, 并以用于雨量传感器的“六向+准直”透镜为例, 阐述了有有关的设计思路, 取得了较好的效果。方法适用于任意多向的情况, 因而可广泛应用于各

种光学场景,具有较大的设计自由度,在增加了光学探测路径的同时,保持了紧凑的透镜体积,为相关的光学应用提供了便利。

参 考 文 献

- [1] Liu Zuming, Li Xiaotao. LED lighting design and applications[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 1-33.
刘祖明, 黎小桃. LED照明设计与应用[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 1-33.
- [2] Chen Yu. LED Manufacturing technology and applications [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2013: 2-28.
陈宇. LED制造技术与应用[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2013: 2-28.
- [3] Guo Jianying. Summary of rainfall sensor products[J]. Auto Electric Parts, 2007(11): 1-3.
郭剑鹰. 雨量传感器产品综述[J]. 汽车电器, 2007(11): 1-3.
- [4] Li Lin. Modern optical design method[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998: 162-165.
李林. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009: 226-235.
- [5] Gu Changxin. Computation physics[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2010: 152-158.
顾昌鑫. 计算物理学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2010: 152-158.
- [6] Ding Y, Liu X, Zheng Z R, *et al.* Freeform LED lens for uniform illumination[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 12958-12966.
- [7] Jing Lei, Liu Hua, Zhao Huifu, *et al.* Compact collimator design for high-brightness light-emitting diode[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1222001.
荆雷, 刘华, 赵会富, 等. 紧凑型高亮度发光二极管准直透镜设计[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1222001.
- [8] Luo Xiaoxia, Liu Hua, Lu Zhenwu, *et al.* Automated optimization of free-form surface lens for LED collimation[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(9): 1351-1355.
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.
- [9] Olikier V. Geometric and variational methods in optical design of reflecting surfaces with prescribed irradiance properties [C]. SPIE, 2005, 5924: 594207.
- [10] Hao Jian, Liu Hua, Sun Qiang, *et al.* Optimization of freeform surface lens for collimating illumination of LED[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 032302.
郝剑, 刘华, 孙强, 等. LED自由曲面准直透镜的优化设计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 032302.
- [11] Wan Yunjie, Lin Haobo, Liu Jie, *et al.* Design of LED lens with ultra-high light efficiency and small light-gathering angle for realizing uniform light distribution[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 122202.
万运佳, 林浩博, 刘杰, 等. 超高光效小聚光角度的均匀配光LED透镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 122202.
- [12] Cheng Zhiming, Zeng Ping, Zhang Zhihai, *et al.* Reaearch on multi-direction collimation beam on the plane parallel with LED lighting plane[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1008001.
程治明, 曾平, 张志海, 等. 与LED发光面平行平面上多向准直光束的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1008001.
- [13] Benitez P, Minano J C, Blen J, *et al.* Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions[J]. Optical Engineering, 2004, 43(7): 1489-1502.
- [14] Wang C L, Li X N, He L Q. Constructing user defined surface in ZEMAX[J]. Optical Instruments, 2001, 23(3): 23-26.