

减光式烟雾报警准直系统研究

赵会富, 张贺

长春理工大学光电工程学院光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 减光式烟雾报警系统中的准直系统收集大角度红外光线获得平行光, 保证光线长距离传输不发散, 逐点计算并优化减光式烟雾报警准直系统。针对理想点光源, 依据等光程原理及折射定律, 求解烟雾报警准直系统初始结构的离散数据点, 将离散数据点拟合成自由曲线。利用光学仿真软件建模并优化准直系统的初始结构, 得到较好的 LED 自由曲面准直系统。自由曲面准直系统的厚度为 20 mm, 口径为 28 mm, 准直角度为 $\pm 1.5^\circ$, 光能效率高 89.82%。

关键词 光学设计; 烟雾报警系统; 自由曲面; 准直透镜; 全内反射

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.122202

Research of Reducing Smoke Alarm Collimation System

Zhao Huifu, Zhang He

Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract The collimation system of reducing smoke alarm system collects wide angle near infrared rays to generate the parallel beam, which ensures that the rays travel long distances without divergence. Reducing smoke alarm collimation system is optimized by point by point calculation. The initial discrete data points of smoke alarm system for ideal point light source are calculated based on the principle of equal optical path and refraction law. The discrete data points are fitted into freeform curves. Using optical simulation software to build the model and optimize the initial structure of the collimation system, and better LED freeform collimation system is got. The thickness of freeform surface collimation system is 20 mm, the diameter is 28 mm, the collimation angle is $\pm 1.5^\circ$ and the energy efficiency is 89.82%.

Key words optical design; smoke alarm system; freeform surface; collimation lens; total internal reflection

OCIS codes 220.3620; 220.4830

1 引言

浓烟是火灾发生的前期阶段, 预先探测浓烟是预防火灾或火灾消防的一项关键技术, 在实际应用领域及学术领域分别具有重要的实用意义和研究意义。及时检测烟雾能够针对火灾预先报警, 避免或减少人员伤亡和社会财产损失^[1]。

近红外光 LED 具有成本低、节能环保、使用寿命长、抗干扰能力强、功率消耗低等优点, 因此被广泛地用于烟雾报警系统。LED 发光机理决定了其发散角度较大的发光特性, 实际应用中很难对其收集和利用。烟雾系统需要探测的距离远近不一, 探测距离越远要求近红外 LED 光源的准直度越高。LED 光源是大角度朗伯型发光体, 很难对其收集和利用。烟雾探测系统中的 LED 近红外光的准直性决定着烟雾探测系统的探测距离, 国内外现有的烟雾探测系统中准直透镜的准直角度大致在 $3^\circ \sim 5^\circ$ 范围内, 导致 50 m 以上的长距离探测结果不准。文献[2]中的 LED 的准直角度为 5° , 苏宙平等^[3]设计的准直系统的准直角度为 4° 。为了提

收稿日期: 2017-07-21; 收到修改稿日期: 2017-08-06

基金项目: 吉林省发改委产业创新专项资金(2017C037-1)

作者简介: 赵会富(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事非成像光学方面的研究。E-mail: huifuzhao@163.com

高 LED 光线的准直度,本文设计了全内反射(TIR)式的自由曲面透镜实现 LED 光源准直,准直角度在 2° 以内,可以在其他条件不变的情况下提升烟雾探测距离。

2 非成像光学理论基础及烟雾探测系统

2.1 非成像光学理论基础

边缘光线原理为:系统入瞳处入射的边缘光线经过光学系统后在出瞳处仍为边缘光线,即保证了系统的传递率理论上为 100% ^[4]。非成像光学的边缘光线原理说明,从光源到目标的边缘光线映射能够应用于非成像光学器件的设计^[5-8]。

光学扩展不变量描述的是具有一定孔径面积及发散角度的光辐射经光学系统后的传播规律^[7-11]。图 1 所示的近轴聚焦透镜系统中像方焦点位置范围为 $2f\theta$,其中 f 为透镜的焦距, θ 为扩展半角。入瞳处光源扩展角 2θ 、系统入射口径 $2a$ 、入射口径所在介质折射率 n 三者之积为 $4n\theta a$,若省略前面的系数 4,所得物理量 $n\theta a$ 即称为光学扩展不变量。设系统为理想光学系统,没有能量损失,系统中的光学扩展不变量应为一定值,在三维情况下,系统的光学扩展不变量 E 是上述表达式的平方,即:

$$E = n^2 a^2 \theta^2 = n'^2 a'^2 \theta'^2, \quad (1)$$

式中 n' 、 a' 、 θ' 分别代表出射的折射率、出射口径和扩展半角。

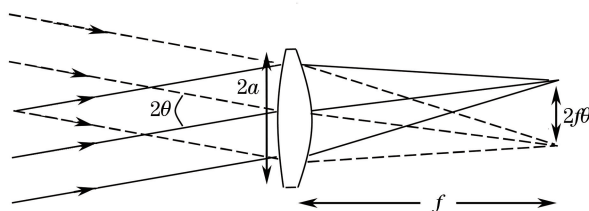


图 1 近轴聚焦透镜示意图

Fig. 1 Schematic of paraxial focusing lens

2.2 减光式光电烟雾探测系统

减光式光电烟雾探测系统由光电烟雾探测器、近红外光源及光源准直透镜构成,如图 2 所示。在常规条件下,近红外光源向外辐射光线,探测器接收到一定量的光线;但在有烟雾情况下,近红外光源发出的光线被烟雾中的小颗粒散射和吸收,导致光电探测器接收的光能量减少,低于设定的阈值则开始报警。

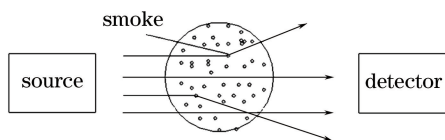


图 2 烟雾报警系统原理图

Fig. 2 Principle diagram of the smoke alarm system

3 基于自由曲面的烟雾报警 LED 准直系统的设计

3.1 基于自由曲面的 LED 准直系统初始结构的设计

LED 光源为发散角度较大的发光体,近似呈朗伯分布,难以收集和利用。为收集大发散角的 LED 光源发出的光线以获得准直光束,需采用折射面与全反射面组合的 TIR 结构准直系统^[4,12-15],其结构如图 3 所示。芯片发光半口径为 0.4 mm ,发光半角度为 50° ;设定出射角度为 1.5° ,根据光学扩展量守恒公式[(1)式]计算得到准直透镜出光半口径 $a' = 13.33\text{ mm}$,近似取 14 mm ,准直透镜的全口径为 28 mm 。然后利用边缘光线原理和折射定律计算自由曲面离散数据点。图 4 中的 ω 角为折射部分与全反射部分的分界线, $\pm\omega^\circ$ 范围内的光线都是二次折射光线,折射次数较少,当 ω 角增大时,光源在这部分的光通量增大,光通损耗少,光线经两个曲面发生两次折射,自由度小,准直性不好控制。当 ω 角减小时,则光源在该区域的光通量减少,

效率减低,但光线两次折射和一次全反射后出射,控制准直性较好。因此需要根据预设配光,合理分配这两部分角度,本设计中选 $\omega = 30^\circ$, 角度 $\Phi = 60^\circ$ 。

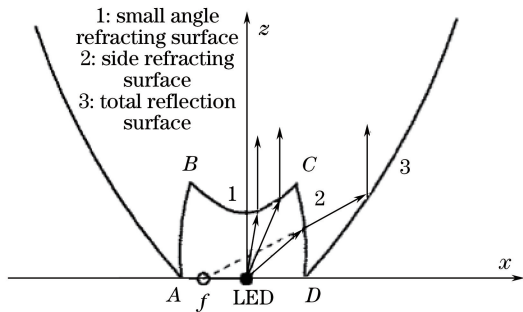


图 3 TIR 透镜轮廓示意图

Fig. 3 Outline diagram of the TIR lens

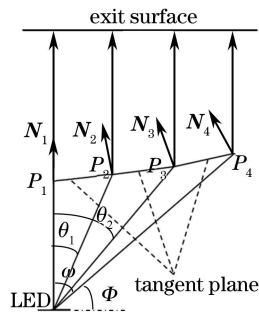


图 4 LED 小发散角光线的准直折射自由曲面

Fig. 4 Collimation refractive freeform surface of LED divergent rays with small angle

求解使 LED 光源小发散角光线准直的自由曲面时,需要提前确定在 LED 正上方的面型的起始点 P_1 , 设 P_1 坐标为 $(0, y_1, 0)$, 经 P_1 点的法线竖直向上, 过 P_1 点作切向矢量, P_1 点的切向矢量与 LED 光源的第二个角度光线交于 $P_2(x_2, y_2, 0)$ 点, 其中 $y_2 = y_1$, 第二个角度光线与竖直的光轴夹角为 θ_1 , 光线经 P_2 反射后的光线准直射出。已知入射光矢 $\mathbf{I}_2(\cos \theta_1, \sin \theta_1, 0)$ 和出射光矢 $\mathbf{O}_2(0, 1, 0)$, 根据折射定律可求出 P_2 的法向光矢 \mathbf{N}_2 。将 LED 光源发出的光矢分成 i 份, 与竖直向上的光轴夹角为 θ_i 的第 $i+1$ 条光矢的位置通过前面的 P_i 点的切向矢量与入射光矢相交而得到, 以此类推可以计算出一系列的离散数据点^[16-17]。

求解使 LED 光源大发散角光线准直的全反射自由曲面时, 如图 5 所示, 也要先选定自由曲面的初始点位置 Q_1 。选 Q_1 点与 LED 中心处于同一平面位置, 设定 Q_1 点坐标为 $(x_1, 0, 0)$ 、法向矢量 $\mathbf{N}_1(-1, 1, 0)$ 。过 Q_1 点做垂直于 \mathbf{N}_1 法线矢量的切平面, 切平面与光源发出的下一条光线交于 $Q_2(x_2, y_2, 0)$ 点。光线经 Q_2 点的反射自由曲面反射后与竖直光轴准直射出, 出射矢量亦为 $\mathbf{O}_2(0, 1, 0)$ 。以此递推, 利用折反射定律, 可得组成自由曲面全反射面的一系列离散数据点。利用数据处理软件拟合离散数据点可得两条自由曲线, 将两条曲线首尾相连后绕中心对称轴旋转可得到 3D 模型。

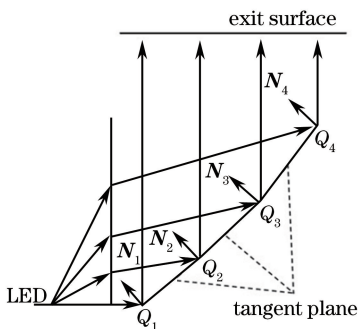


图 5 LED 大发散角光线的准直全反射自由曲面

Fig. 5 Collimation total reflective freeform surface of LED divergent rays with big angle

通过上述建模方法可以得到 LED TIR 准直系统的初始结构, 见图 6。

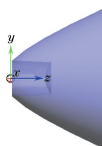


图 6 自由曲面 TIR 准直透镜的初始结构

Fig. 6 Initial structure of the freeform surface TIR collimation lens

3.2 TIR 准直系统的优化

针对于点光源设计的初始结构可以实现出射平行光,具体光路见图 7。

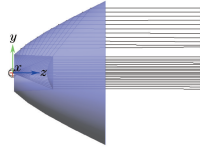


图 7 点光源光线追迹图

Fig. 7 Point source ray trace diagram

实际光源选用 OSRAM 公司的 SFH4235 光源,用实际光源替换点光源,光线追迹结果如图 8 所示。显然初始结构模型对实际光源没有实现准直,将全反射面和折射面的二次曲面的曲面系数和曲率半径设置为变量,添加优化函数进行优化。

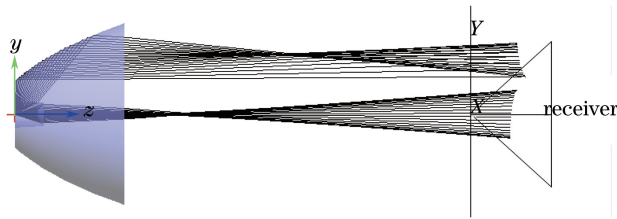


图 8 实际光源的光线追迹图

Fig. 8 Ray trace diagram of actual source

上述添加的优化评价函数主要有角度控制优化评价函数和强度分布优化评价函数。利用两种评价函数共同完成上述优化,将光线准直。图 9、图 10 分别为优化后的准直系统光线追迹图和目标面照度图。

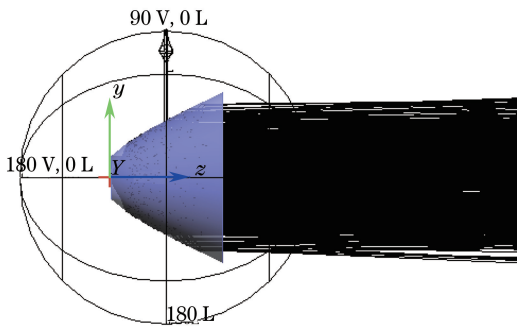


图 9 优化后的准直系统光线追迹图

Fig. 9 Ray trace diagram of optimized collimation system

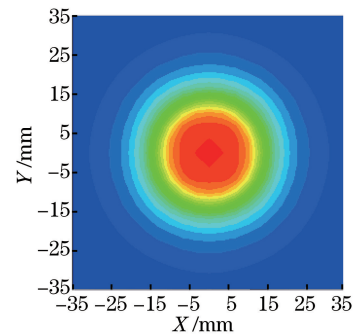


图 10 照度分布图

Fig. 10 Illuminance distribution diagram

探测器设定为 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$,放置于系统后 1000 mm 处,探测器接收的能量集中在半径为 26 mm 的圆内,根据下式可计算出准直角度为 $\pm 1.5^\circ$:

$$\theta = \arctan\left(\frac{r}{L}\right), \quad (2)$$

式中 θ 为准直角度, r 为探测器表面的光斑半径, L 为探测器距离烟雾报警系统的距离。

从接收入射能量可以算出光能利用率,光能效率公式为

$$\eta = \frac{\Phi_o}{\Phi_i} \times 100\%, \quad (3)$$

式中 Φ_o 为目标面收集的总功率, Φ_i 为光源发出的总功率, η 为光能效率,由(3)式可计算出光能效率为 89.82% 。光能效率及光能分布见图 11。

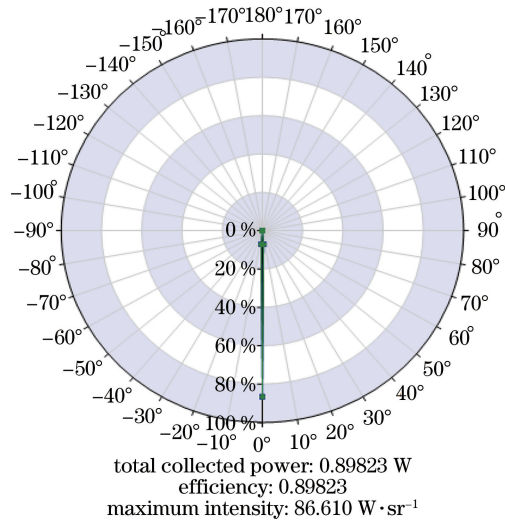


图 11 强度分布图

Fig. 11 Intensity distribution

4 结 论

以非成像光学为理论基础,设计了基于自由曲面面型的 TIR 式 LED 烟雾报警准直系统,并得到了 $\pm 1.5^\circ$ 的准直效果,光能利用率为 89.82%。TIR 式准直系统使光线发生两次折转,折叠了光路,很大程度上减小了光学系统的体积,有助于实现减光式烟雾报警系统小型化。TIR 式 LED 准直系统的设计优化方法对提高烟雾报警准直系统的能量效率具有实用价值。

参 考 文 献

- [1] Yao Xiaocheng. Intelligent smoke detection alarm system based on infrared detection[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
姚小城. 基于红外检测的智能烟雾探测报警系统[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [2] Teng T C, Tseng L W. Slim planar apparatus for converting LED light into collimated polarized light uniformly emitted from its top surface[J]. Optics Express, 2014, 22(S6): A1477-A1490.
- [3] Su Zhouping, Que Lizhi, Zhu Zhuowei, *et al.* Optical system design of the compact collimator for LED source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 022203.
苏宙平, 阙立志, 朱焯炜, 等. 用于 LED 光源准直的紧凑型光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(2): 022203.
- [4] Winston R, Miñano J C, Benítez P. Nonimaging optics[M]. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004.
- [5] Wei Xiudong, Lu Zhenwu, Lin Zi, *et al.* Design and optimization of heliostat field layout for solar tower power plant [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2652-2656.
魏秀东, 卢振武, 林梓, 等. 塔式太阳能热发电站镜场的优化设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2652-2656.
- [6] Kudaev S, Schreiber P. Automated optimization of non-imaging optics for luminaires[C]. SPIE, 2005, 5962: 59620B.
- [7] Ding Yi, Zheng Zhenrong, Gu Peifu. Freeform lens design for LED illumination[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(6): 1486-1490.
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.
- [8] Ding Y, Liu X, Zheng Z R, *et al.* Freeform LED lens for uniform illumination[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 12958.
- [9] Zheng Z R, Hao X, Liu X. Freeform surface lens for LED uniform illumination[J]. Applied Optics, 2009, 48(35): 6627.
- [10] Ding Yi, Gu Peifu. Freeform reflector for uniform illumination[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(3): 540-544.
丁毅, 顾培夫. 实现均匀照明的自由曲面反射器[J]. 光学学报, 2007, 27(3): 540-544.

- [11] Benítez P, Miñano J C, Blen J, *et al.* Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(7): 1489-1502.
- [12] Lin W, Benítez P, Miñano J C, *et al.* SMS-based optimization strategy for ultra-compact SWIR telephoto lens design [J]. *Optics Express*, 2012, 20(9): 9726.
- [13] Miñano J C, Benítez P, Wang L, *et al.* Overview of the SMS design method applied to imaging optics [C]. SPIE, 7429: 74290C.
- [14] Welford W T, Winston R. High collection non-imaging optics[M]. New York: Academic Press, 1989.
- [15] Zhao Huifu, Liu Hua, Sun Qiang, *et al.* Design of RIXR LED collimate system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1472-1479.
赵会富, 刘华, 孙强, 等. 基于折射/全反射/反射/折射结构的 LED 准直系统的设计[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(7): 1472-1479.
- [16] Liu Yanjie, Hui Bin, Li Jingzhen, *et al.* Design and simulation of free-form TIR collimating lens used in DLP projector system[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(7): 582-587.
刘雁杰, 惠彬, 李景镇, 等. 用于 DLP 投影系统的自由曲面 TIR 准直透镜设计[J]. *红外技术*, 2015, 37(7): 582-587.
- [17] Yang T, Zhu J, Wu X F, *et al.* Direct design of freeform surfaces and freeform imaging systems with a point-by-point three-dimensional construction-iteration method[J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10233.