

紧凑型高亮度发光二极管准直镜设计

荆 雷^{1,2} 刘 华¹ 赵会富^{1,2} 卢振武¹ 续志军¹ 韩雪冰¹ 李也凡¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电技术研发中心, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要 为满足高亮度发光二极管(LED)的准直照明要求,克服传统 LED 准直镜径长比过大、结构厚重的缺点,设计了小径长比、结构紧凑以及高度准直的 LED 准直系统。准直镜设计基于 LED 为理想点光源,光线在准直镜内部经历了两次反射,根据几何光学的等光程原理和折、反射定律,通过数值求解等光程方程组获得准直镜各个面型的轮廓曲线,系统径长比为 0.1。利用 TracePro 软件对所设计的准直系统进行光线追迹模拟,结果表明,光源为理想点光源时,在 $\Phi 50$ mm 的出光口径处,光线经准直镜出射的光束发散角(光强半值角)为 5.4° ;光源采用实际高亮度白光 LED 时,光线经准直镜出射的光束发散角变为 6° ,在距准直镜 1 m 处接受屏上, $\Phi 60$ mm 光斑照度均匀性为 92%,光效为 52.11%,适用于高亮度 LED 准直照明领域。系统设计实现了结构紧凑,准直性能高的设计目标,系统公差满足装配要求,为大功率高亮度 LED 准直照明系统的小型化、简单化提供了一种有效的解决途径。

关键词 几何光学;高亮度发光二极管;照明;准直镜;发散角

中图分类号 O435 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1222001

Compact Collimator Design for High-Brightness Light-Emitting Diode

Jing Lei^{1,2} Liu Hua¹ Zhao Huifu^{1,2} Lu Zhenwu¹ Xu Zhijun¹ Han Xuebing¹ Li Yefan¹

(¹ *Opto-Electronic Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*
² *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract In order to meet the requirements of collimating illumination for high-brightness light-emitting diode (LED) and overcome the shortcomings of traditional LED collimator's large aspect ratio and heavy structure, a novel collimator with small aspect ratio, compact structure and high collimation is presented. The design of collimator is based on the assumption that the LED source is ideal point source. The rays are reflected twice in the collimator. According to the theory of the constant optical path length and the refraction law in geometric optics, the profiles of collimator's surface are obtained through numerical solution of the constant optical path length equations, and the aspect ratio is 0.1. Using the optical software TracePro, the collimator system is traced and simulated. The results show that the divergence angle (full angular width of the radiation pattern at the half intensity) is just 5.4° for a point source with the diameter of exit aperture is 50 mm; but it changes to 6° for an actual high brightness white LED, and the irradiance uniformity and the optical efficiency within a diameter of spot 60 mm are 92% and 52.11% at 1 m respectively, which is suitable for the illuminating area of light brightness LED. The design realizes the objectives of compact structure and high collimation, and the tolerances meet the requirements of alignment, which provides an effective way for realizing the illuminating system's miniaturization and simplification.

Key words geometric optics; high-brightness light-emitting diode; illumination; collimator; divergence angle

OCIS codes 220.2740; 080.4035; 080.4298; 080.4225

收稿日期: 2011-05-27; 收到修改稿日期: 2011-06-23

基金项目: 国家 973 计划(2010CB227101)和中科院三期创新项目资助课题。

作者简介: 荆 雷(1983—),男,博士研究生,主要从事太阳能聚光热发电、光伏发电和 LED 照明等方面的研究。

E-mail: 100jinglei100@163.com

导师简介: 卢振武(1955—),男,研究员,博士生导师,主要从事波动光学、太阳能应用、新型光学系统及其在空间的应用等方面的研究。E-mail: luzw@ciomp.an.cn

1 引言

发光二极管(LED)作为新一代照明光源,其体积小、寿命长、显色性好、节能高效和绿色环保的诸多优势^[1,2]日益凸显,尽管现在还存在一些问题亟待解决,例如大功率LED的散热问题^[3],但是随着LED性能的进一步提高和有关技术问题的相继解决,有理由相信:正如20世纪电子学领域里晶体管最终取代电子管,LED光源逐渐取代传统光源只是一个时间问题。

目前,LED的应用领域早已从过去只能用在电子装置的状态指示灯,发展到成为液晶屏的背光源,再扩展到普通照明及公共显示,例如汽车灯、交通信号灯、路灯和大型影视墙等^[4~6],其应用仍在持续延伸,尤其是在高亮度白光LED出现以后。毫无疑问,这个世界需要高亮度的LED,可喜的是从20世纪70年代至今,单颗LED的光通量每18~24个月就增加2倍。Cree最新公布的XLamp MT-G系列LED的光通量在1.1 A条件下可以高达560 lm,而在4 A条件下能够提供1525 lm^[7]。在高亮度LED照明应用中,考虑到其发光具有一定的发散性,为了高效地利用光能,光学配光元件必不可少,其中准直镜作为基本的配光元件,被广泛地应用于各个照明应用场合。现今,市场上经常使用的LED准直镜主要包括三种:反射式准直镜、透射式准直镜和复合式准直镜。然而它们的共同缺点就是径长比较大,出光面积相对较小,整个系统显得十分厚重。

本文针对LED准直镜的上述缺点,根据几何光学的基本原理:等光程原理和光线经过介质面的折、反射定律,通过求解一系列等光程方程组,得到准直镜各个面型的轮廓曲线,从而设计出一种结构更加紧凑,具有更小径长比,高度准直的适用于高亮度LED准直系统,而且在光学软件TracePro中对该准直系统进行了准直效果分析,并对实际高亮度白光LED的轴向、垂轴位置公差和倾斜公差进行了具体分析。

2 设计原理

该准直镜的设计主要基于几何光学里的等光程原理和光线折、反射定律。等光程原理是几何光学中一个十分基本的原理,描述的是入射波面与出射波面对应点之间的光程均为定值^[8],即若光线通过的连续变化的非均匀介质,则光线实际经过的路径为一条空间曲线。考虑光线由点A到点B,则光程

可以表示为

$$s = \int_{A \rightarrow B(L)} n dl, \quad (1)$$

式中 n 为介质的折射率, L 为光线在介质中走过的实际路程。在本文中,考虑到光线通过均匀介质,因此,实际光线是由许多段折线组成,其总光程变为多段折线与相应介质折射率乘积的和:

$$s = \sum_{i=1}^m n_i l_i, \quad (2)$$

式中 n_i 和 l_i 分别为介质的折射率和光路长度。

尽管等光程原理看似十分简单,然而其在非成像光学设计领域中的作用却是不可忽视,等光程原理的合理应用可以避免求解繁琐复杂的偏微分方程来获得面型轮廓^[9~12]。目前公认最为先进的针对扩展光源的多表面同时设计方法(SMS)^[13],其基本原理就包括等光程原理。因此,在一些具体的非成像光学设计实例中,等光程原理的利用,往往会使整个设计过程更加简单,容易实现。

3 准直镜设计

如图1所示,本文设计的新型LED准直镜外观上看类似于菲涅耳透镜,主要由透射面、反射面1和反射面2组成,有所不同的是光线在该准直镜内部经历了两次光线折叠,焦距要比透射式菲涅耳镜小得多,其焦点甚至可以设计到该准直镜内部。

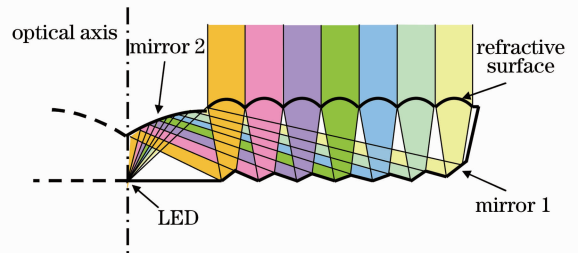


图1 LED准直镜结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LED collimator structure

值得注意的是,尽管本文讨论的是LED照明准直镜,但其设计方法却采用非成像光学的聚光理论,也就是说,如图1所示,平行光束经过准直镜的透射面折射后被反射面1反射到反射面2,最后经反射面2反射到LED。根据光路可逆性原理,实际的准直照明恰恰相反,LED发出的光线在准直镜内部先经过两次反射,最终由透射面出射,从而得到准直光线。

下面具体介绍该新型LED准直镜的设计方法。由于本文中设计的准直镜为旋转对称式结构,这里仅

考虑其 2D 结构,3D 实体最终绕其中心对称轴旋转而得。选取如图 2 直角坐标系,原点取在 LED 位置处(LED 视为点光源), y 轴为该准直镜的中心对称轴, R, T 分别为准直镜的半口径和平均厚度。

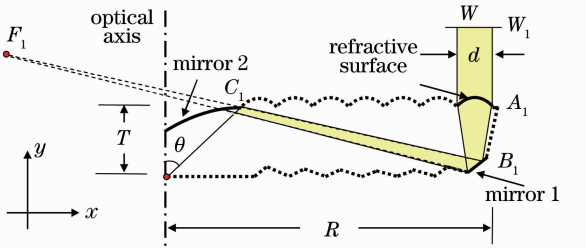


图 2 反射面 1 求解示意图

Fig. 2 Determination of the profile of reflective surface 1

以准直镜最边缘齿设计为例,关于透射面的单齿面型,采取相对容易加工的球面,曲率半径为 r ,齿宽度为 d ,亦即单齿的出光宽度。首先需要求出反射面 1。假设平行光束经透射面折射,再经反射面 1 反射后会聚于焦点 F_1 ,注意,焦点 F_1 并不位于准直镜的中心对称轴上,而是位于 B_1 和 C_1 点的延长线上,其中 C_1 点为准直镜中心处反射面 2 的边缘点,可由下式得出

$$C_{1x} = T \tan \theta, \quad C_{1y} = T, \quad (3)$$

式中 θ 为 LED 光源的光能利用半角。值得指出的是,对于大功率白光 LED,其空间光强类似朗伯分布, θ 角一般取在 60° 附近,本文中准直镜的设计只是对 LED 光源 $0^\circ \sim \theta$ 角范围内光线进行准直控制, $\theta \sim 90^\circ$ 范围内的光线未经准直镜准直。

根据等光程(2)式,可以得出关于反射面 1 上点 $B_n(B_{nx}, B_{ny})$ 的方程:

$$s = \sum_{i=1}^3 n_i l_i = n_1 \sqrt{(A_{nx} - W_{nx})^2 + (A_{ny} - W_{ny})^2} + n_2 \sqrt{(B_{nx} - A_{nx})^2 + (B_{ny} - A_{ny})^2} + n_2 \sqrt{(F_{1x} - B_{nx})^2 + (F_{1y} - B_{ny})^2}, \quad (4)$$

式中 n_1, n_2 分别是空气和准直镜材料的折射率, W_n, A_n 分别是平面波前 ω 和单齿球面上各点。而光程定值 s 可以由定点 W_1, A_1, B_1 和 F_1 求得

$$s = n_1 \sqrt{(A_{1x} - W_{1x})^2 + (A_{1y} - W_{1y})^2} + n_2 \sqrt{(B_{1x} - A_{1x})^2 + (B_{1y} - A_{1y})^2} + n_2 \sqrt{(F_{1x} - B_{1x})^2 + (F_{1y} - B_{1y})^2}. \quad (5)$$

此时若想得到反射面 1 上各点 B_n 的值,仍然缺少一个方程。如图 3 所示,平行于光轴的光线 r_n 经过透射面时经历一次折射,根据折射定律:

$$n_1 \sin i_n = n_2 \sin o_n, \quad (6)$$

式中 i_n, o_n 分别为第 n 根光线在折射球面处的入射角和出射角。联立(4),(6)式便可依次求得边缘齿上反射面各点 B_n 的值。准直镜其它齿的计算过程如同上述边缘齿的计算,直至计算到准直镜中心反射面 2 的边缘点 C_1 。

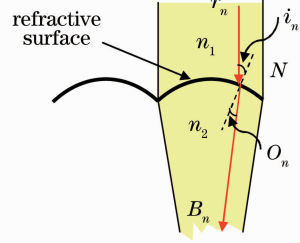


图 3 透射面光线折射

Fig. 3 Refraction on the refractive surface

此时,若想会聚于焦点 F_1 的光线最终会聚到 LED 中心位置处的焦点 F_2 ,由几何光学相关理论可知,反射面 2 应该是以 F_1, F_2 为焦点的双曲线^[14],不难求得准直镜中心处反射面 2 上各点值,至此该 LED 准直镜的设计过程基本完成,准直镜的表面轮廓曲线最终由上述方法求出的一系列离散点分段拟合而成。

4 仿真与结果分析

4.1 白光 LED 光源的仿真

目前,LED 的发光模型一般存在两种类型:蒙特卡罗光线追迹模型和数学模型^[15]。众所周知,LED 光源仿真建模的准确与否决定着整个照明系统最终仿真结果的可靠性^[16]。因此,首先需要对所选 LED 进行准确的光学建模。在这里,采用蒙特卡罗光线追迹软件来模拟白光 LED,LED 型号选取 OSRAM 的 LCW W5SM-JYKY-4R9T,在 1 A 时典型光通量为 154 lm,色温 3000 K。图 4 为光学软件 TracePro 里 LED 光学模型图(彩图见网络电子版),不同的颜色代表不同的波长,其波长范围为

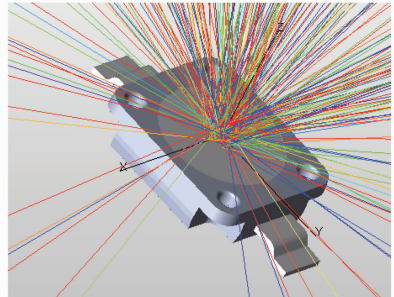


图 4 高亮度白光 LED 光线追迹图

Fig. 4 Raytracing of the high brightness white LED

380~780 nm。

图 5(a)为该白光 LED 制造商技术手册里给出的空间相对光强曲线,图 5(b)为追迹 2 百万条光线得到的光强曲线模拟结果图,不难发现,光学软件里 LED 的仿真模拟结果与实际的 LED 光强曲线有着非常好的吻合,其归一化互相关值(NCC)^[17]高达 99.4%,从而验证了该白光 LED 光源在光学软件里模拟的准确性。

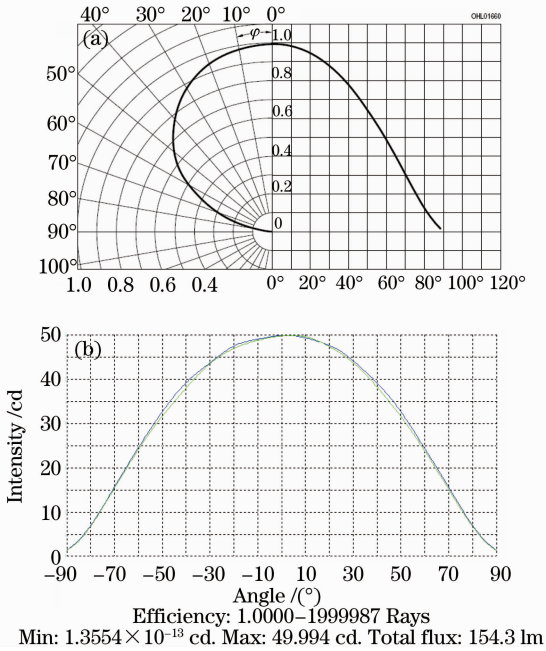


图 5 高亮度白光 LED 光强曲线图
Fig. 5 Intensity distribution of the high-brightness white LED

4.2 准直系统的仿真分析

根据等光程(4)式,折射定律(6)式和双曲线方程,通过给定 LED 的光能利用半角 θ ,准直镜的半口径 R 和平均厚度 T 等参数,可以设计出准直效果相当不错的准直透镜。下面以一具体实例验证上述设计方法的正确性。所取白光 LED 的光能利用半角 $\theta=50^\circ$,准直镜的半口径 25 mm,平均厚度 5 mm,透射面单齿球面曲率半径 2.5 mm,宽度 3 mm,准直镜材料选用便于注塑成型的树脂材料 PMMA,折射率 $n_2=1.49(\lambda=0.5461 \mu\text{m})$ 。如图 6(a)所示,经过上述设计方法得到该准直镜面型轮廓的数值结果,并将其 2D 数据导入光学软件里,绕其中心对称轴旋转得到其 3D 实体模型,并模拟 2D 光线[见图 6(b)],可以看出,点光源模拟结果与理论设计结果符合得很好,进而验证了该准直镜设计方法的正确性。

根据设计得到的准直系统进行 3D 光线追迹和

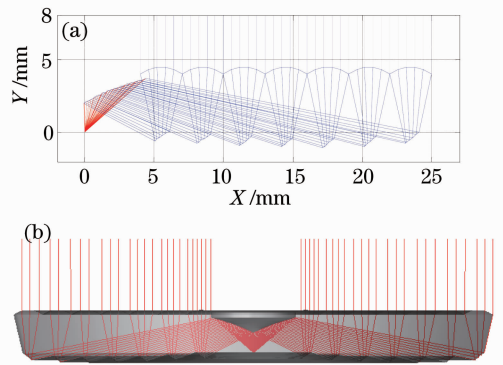


图 6 准直镜点光源 2D 光线追迹图。(a)设计过程中光线追迹;(b) TracePro 中光线追迹

Fig. 6 2D raytracing of collimator for a point source.

(a) raytracing in design; (b) raytracing in TracePro 准直效果分析,图 7(a), (b)分别为把白光 LED 视为点光源和如上节所述实际高亮度白光 LED 光源进行 50 万条光线追迹得到的结果。如图 7(a)所示,由于设计时把 LED 为作为理想的点光源,因此点光源模拟得到的准直效果相当不错,光线经准直镜出射的发散角只有 5.4° ,当然这与理论设计上的绝对准直存在一定差距,其原因主要有两个:1)该准直镜的设计只考虑 LED 光源光能利用半角 θ 范围内光线的准直, $\theta \sim 90^\circ$ 范围内的光线尽管同样经过准直镜,但并未得到准直,这部分光线最终散乱地出射,其光强分布直接影响经准直镜出射所有光线的光强分布;2)该准直镜的 CAD 软件建模误差在一定程度上影响了模拟的准确性。

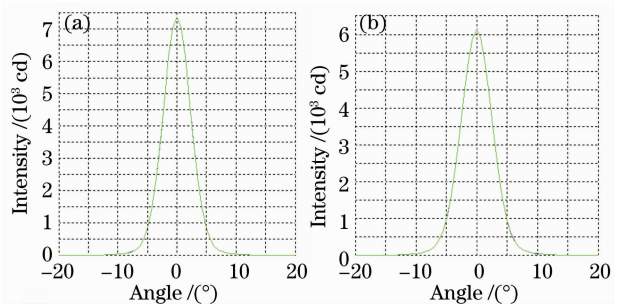


图 7 LED 经准直后光强曲线图

Fig. 7 Intensity distribution of LED with collimator

如图 7(b)所示,按照实际白光 LED 光源进行光线追迹模拟,最终系统的准直效果稍有下降,LED 光线经准直镜出射的发散角增大到 6° 左右,究其原因同样有两点:1)实际的 LED 往往并不是设计时所认为的理想点光源,而是具有一定发光面积的扩展光源;2)设计时采用单一波长设计,实际的白光 LED 却是光谱范围相当宽的多光谱光源。然而正

是因为如此,实际白光 LED 光源在 1 m 处接受面上照度均匀性得到了明显改善,如图 8(b)所示,Φ60 mm 光斑内均匀性提高到 92%,光效为 52.11% (考虑菲涅耳损失,不计材料吸收)。图 8(a)为点光源模拟 1 m 处接受面上的照度结果图,中心处暗斑的产生主要是由准直镜中心反射面 2 遮挡阴影造成的,很显然,对于点光源而言,准直镜的准直效果越好,中心暗斑越显著。

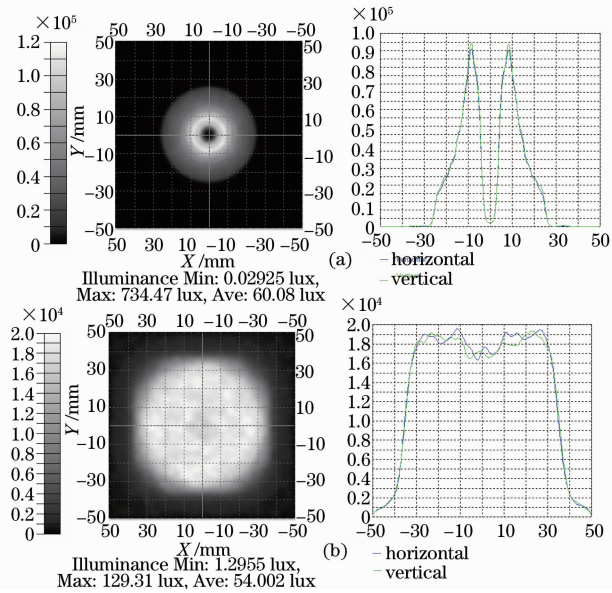


图 8 1 m 接受屏光斑照度图

Fig. 8 Illuminance map on the receiver's surface at 1 m

4.3 公差分析

考虑到实际准直照明应用时该准直系统中白光 LED 与准直镜相对位置误差和 LED 关于光轴的倾斜误差会直接影响最终的准直效果,接下来分别对二者进行具体公差分析。以图 2 坐标系原点为 LED 初始位置,沿垂轴方向 x 、轴向 y 改变 LED 相对准直镜的位置偏移量 Δx 、 Δy ,依次可以得到不同 x 、 y 位置对准直性能影响的变化曲线,如图 9,10 所示。从图 9 可以看出,随着 LED 相对于初始位置的垂轴偏移量 Δx 的增加,准直光束的发散角逐渐增大,而中心光强呈减小的趋势,在 $[-0.5 \text{ mm}, 0.5 \text{ mm}]$ 范围内,准直发散角保持在 6.3° 左右,中心光强降为初始位置的 90%。

从图 10 中可以看出,随着 LED 相对于初始位置的轴向偏移量 Δy 的增加,准直光束的发散角和中心光强的变化趋势如同垂轴偏移量 Δx 影响,有所不同的是沿轴向 y 轴的负方向移动 LED 时,准直光线的发散角和中心光强值急剧变化,LED 沿轴负向偏移 0.05 mm 时,准直光束的发散角便降低到初

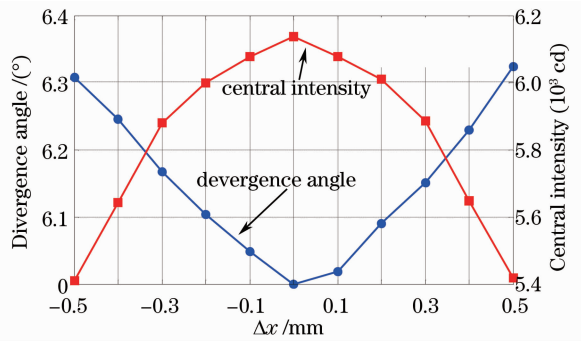


图 9 LED 垂轴位置偏移量影响

Fig. 9 Influence of LED's location offset Δx

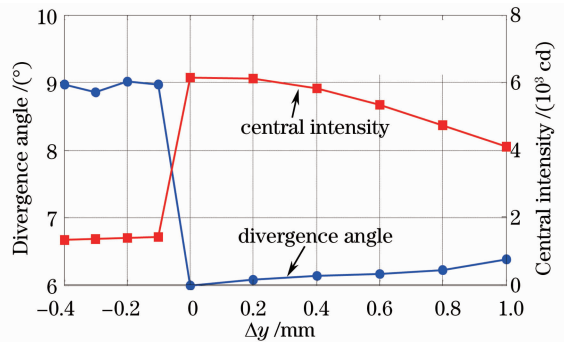


图 10 LED 轴向位置偏移量影响

Fig. 10 Influence of LED's location offset Δy

始位置的 90% 以下,这主要是因为沿 y 轴负向移动 LED,将有更多其它空间角度的光线未经准直镜准直,便从准直镜直接出射。

当 LED 位于初始位置,绕 y 倾斜一定的角度 Δt ,得到不同倾斜角度对准经镜准直效果的影响如图 11 所示。从中可以看出,在倾斜 5° 的公差范围内,最终准直光束的发散角变化不大,而中心处光强却降低到初始位置时中心光强的 90% 以下。

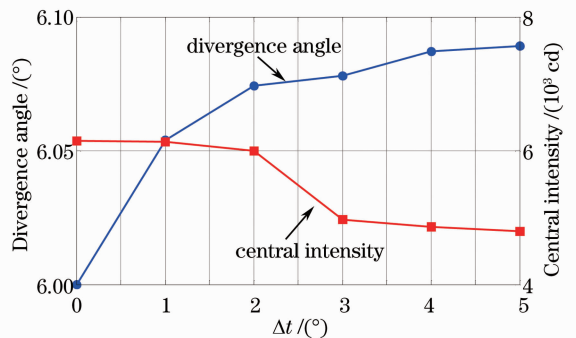


图 11 LED 倾斜角度影响

Fig. 11 Influence of Δt LED tilt angle about y axis

通过上面对白光 LED 光源相对准直镜位置偏差和 LED 关于光轴倾斜的公差分析,可见 LED 沿光轴负向位置的偏差对光线准直性的影响较其他方向位置偏差和倾斜更为敏感,因而在安装 LED 时,

其允许的公差范围较小,位置精度要求更高。

5 结 论

本文针对高亮度白光 LED 的发光特性和光线准直基本原理分析,根据几何光学中的等光程相关理论,设计出结构十分紧凑,准直性能较高的菲涅耳式 LED 准直镜。运用光学软件对实际高亮度白光 LED 及其准直系统进行了光线追迹模拟,结果表明该设计方法可以获得发散角 6° 左右的准直镜,且准直光束的照度均匀性高于 90%。公差分析结果表明 LED 相对准直镜的沿光轴负向位置偏差对最终的准直效果影响最大。该准直镜的设计方法和其相关公差分析为将来大功率的高亮度 LED 照明普及提供相应理论依据。

参 考 文 献

- 1 F. M. Steranka, J. Bhat, D. Collins *et al.*. High power LEDs technology status and market applications[J]. *Physical Status Solid (A) Applied Research*, 2002, **194**(2): 380~388
- 2 David G. Pelka, Kavita Patel. An overview of LED applications for general illumination[C]. *SPIE*, 2003, **3781**: 15~26
- 3 Wen Shangsheng, Zhao Baofeng, Wang Baozheng *et al.*. Chinese patent analysis on LED thermal dissipation technology [J]. *Natural Science Journal of Hainan University*, 2010, **28**(3): 229~232
文尚胜, 赵宝锋, 王保争等. 中国 LED 散热技术专利分析[J]. 海南大学学报自然科学版, 2010, **28**(3): 229~232
- 4 Jin Peng, Yu Chunyu, Zhou Qifeng *et al.*. Superior application of LED to street lighting[J]. *Opt. & Precision Eng.*, 2011, **19**(1): 51~55
金 鹏, 喻春雨, 周奇峰等. LED 在道路照明中的光效优势[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(1): 51~55
- 5 Darsten Eichhom. LED in automotive lighting[C]. *SPIE*, 2006, **6134**: 613405
- 6 Yang Dongsheng. The status and trends of large-size LED backlight[J]. *Information Technology and Standardization*,

- 2010, **10**: 17~21
杨东升. 大尺寸 LED 背光源现状与展望 [J]. 信息技术与标准化, 2010, **10**: 17~21
- 7 XLamp MT-g Easy White LEDs [OL]. [2011-11-16]. http://www.cree.com/products/xlamp_mtg.asp.
- 8 Michael Bass, Eric W. Van Stryland, David R. Williams *et al.*. *Handbook of Optics 2nd ed* [M]. Columbus; McGraw-Hill, Inc, 1995
- 9 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
- 10 Wang Wei. Study on the Design Method of Uniform Illumination Based on Transmitted Free form Surface Theory[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. 28~54
汪 巍. 基于透射型自由曲面理论的均匀照明设计方法研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2006. 28~54
- 11 Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu *et al.*. Design for LED uniform illumination reflector based on etendue[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2297~2301
余桂英, 金 骥, 倪晓武等. 基于光学扩展量的 LED 均匀照明反射器的设计[J]. 光学学报, 2009, **29**(8): 2297~2301
- 12 Zheng Zhenrong, Hao Xiang, Liu Xu. Freeform surface lens for LED uniform illumination [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(35): 6627~6634
- 13 Winston Roland, C. Miñano Juan, Benitez Pablo. *Nonimaging Optics*[M]. Elsevier Academic Press, 2004. 181~219
- 14 Stavroudis, Orestes Nicholas. *The Mathematics of Geometrical and Physical Optics* [M]. John Wiley, 2006. 183~184
- 15 Ding Deqiang, Ke Xizheng. Research on generalized mathematic radiation model for white LED[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2536~2540
丁德强, 柯熙政. 一种通用白光 LED 数学发光模型研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2536~2540
- 16 Tu Dawei, Wu Rengmao, Yang Hengliang *et al.*. Effect of optical structure on output light intensity distribution in LED package[J]. *Opt. & Precision Eng.*, 2008, **16**(5): 832~838
屠大维, 吴仍茂, 杨恒亮等. LED 封装光学结构对光强分布的影响[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(5): 832~838
- 17 C. C. Sun, T. X. Lee, S. H. Ma *et al.*. Precise optical modeling for LED lighting verified by cross correlation in midfield region[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(14): 2193~2195

栏目编辑: 韩 峰