

文章编号 1004-924X(2010)10-2123-07

微型投影机自由曲面 LED 聚光器的设计

赵 星, 吴宏超, 宋丽培, 方志良

(南开大学 现代光学研究所 教育部光电信息技术与科学重点实验室, 天津 300071)

摘要: 为提高 LED 微型投影机中光学引擎的效率和结构紧凑性, 研究了自由曲面 LED 聚光器结构和工作原理, 设计了含有折射和反射自由曲面的 LED 聚光器。采用非成像理论和同时多表面设计方法, 计算并获得了聚光器折射和反射两个自由曲面在子午截面内的各点坐标, 利用聚光器的旋转对称性得到了其在三维空间内的面形数据。设计结果的光学建模仿真分析表明: 所得聚光器能够有效地收集大功率 LED 光源的能量, 并将光束发散角控制在 12° 内, 其光能收集率达到 71%。与采用反射式聚光器的设计方案相比, 光能收集率提高了 20%, 而体积则下降了 70%, 有效地提高了光学引擎的效率和紧凑性。本项设计对 LED 微型投影机的小型化具有指导和借鉴作用。

关键词: LED 聚光器; 自由曲面; 微型投影机

中图分类号: TH741.5; TN312.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101810.2123

Design of freeform LED concentrator for micro-projector

ZHAO Xing, WU Hong-chao, SONG Li-pei, FANG Zhi-liang

(*Institute of Modern Optics, Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

Abstract: The structure and working principle of a freeform LED concentrator were researched and a compact LED concentrator with refractive and reflective freeform surfaces for the micro-projector was designed to improve the concentration efficiency and to compress the volume. Based on non-imaging optics and the method of simultaneous multi-surfaces, the curves of freeform surfaces in the meridian planes were calculated, then the 3D structure of the concentrator was obtained by rotating the curves along Z axis. The simulation result confirms that the concentrator can collect the energy from high power LED sources effectively with a collection efficiency of 71% and can control the divergence angle within 12° . Compared with conventional reflective ones, this new concentrator increases the collection efficiency by 20% and compresses the volume by 70%. The design can provide a reference for the microminiaturization of LED micro-projectors.

Key words: LED concentrator; freeform surface; micro-projector

1 引言

LED 具有体积小、功耗低、寿命长以及价格

低廉等优点, 作为新型固体光源, 特别是微型投影机的新型光源近年来受到世人的广泛关注^[1-6]。然而相比传统的弧光灯投影光源, LED 的亮度低, 光束发散角大, 对微型投影机光学引擎的效率

收稿日期: 2010-03-09; 修订日期: 2010-04-05.

基金项目: 光电信息技术科学教育部重点实验室开放课题资助项目 (No. 2007KFKT029); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

和结构紧凑性具有更高要求。现有 LED 微型投影照明系统的公开报道中^[7-8],采用 LED 光源阵列的设计方案尽管提高了系统出射光通量,但造成光学系统体积大且结构复杂;而采用单颗 RGBLED 的设计中,大多设计使用了复合抛物面反光杯或锥形光管等器件来减小 LED 光源的光束发散角,在有限提高单颗 LED 光能收集率的同时,器件尺寸并未有效减小。最新的研究表明,自由曲面 LED 聚光器应用于微型投影 LED 照明系统中,能有效解决照明系统紧凑高效的问题,具有很大的发展前景,但聚光器的设计还有很多改进和提高的余地。如 Pan 等人的设计中^[9],器件在 25° 出射光束发散角内的效率为 95%,尺寸可达 18 mm×18 mm×10 mm,但器件出射光束发散角过大以及匀光系统中蝇眼透镜的使用,降低了系统整体的光能效率,且理论上其器件尺寸还有进一步减小的可能。而甄艳坤等人设计的聚光器则因所使用设计理论和方法的局限性导致器件效率较低^[10]。由此可见,使用合适的设计理论和方法,同时实现较小的光束发散角,较高的效率和紧凑的结构形式,将是自由曲面 LED 聚光器应用于微型投影系统中所要解决的关键问题。

本文在已有 LED 微型投影系统设计的工作基础上,使用非成像理论和同时多表面(SMS—Simultaneous Multi-surfaces)设计方法,进行了自由曲面 LED 聚光器的设计和光学仿真应用,在保证较小光束发散角的前提下,有效地提高了照明系统的效率,同时进一步减小了器件和系统的体积。

2 自由曲面 LED 聚光器结构和工作原理

图 1 所示为文献^[11]中报道的 LED 微型投影系统光学引擎,其光学系统由 R,G,B 三个单色 LED 光源模块、X 立方棱镜、会聚系统、积分方棒、中继系统、全内反射(Total Internal Reflection, TIR)棱镜和投影物镜组成。其中三基色 LED 光由 X 立方棱镜合色后,经由会聚系统进入积分方棒进行匀光,中继系统则把积分方棒匀光后的出射端面成像至光调制器上进行调制,最终

由 TIR 棱镜和投影物镜投射至屏幕上。此光学引擎采用数字光处理微显示芯片(Digital Light Processing, DLP),利用基色光的时序控制来实现彩色图像的显示,其中会聚系统设计的入射角为 $\pm 6^\circ$,入射孔径约为 20 mm。LED 光源模块由 LED 和聚光器组成。此投影系统中采用了 Lumileds 公司的 Luxeon® III Emitter 系列作为光源,同时选择了 IMS 公司的 SO20XA 型 Luxeon 系列 LED 专用聚光器对 LED 发出的光束进行收集和会聚,聚光器属于纯反射型,高 18.4 mm,出射口径为 20 mm,它可使 2π 立体角内的 LED 出射光束初步会聚后,再经由会聚系统耦合进入积分方棒,聚光器出射发散角 12° 内的光束能量仅占总能量的 52%。文献^[11]的分析结果表明,较低的光能收集效率导致了微型投影系统的理论最大光输出效率仅为 16%,而 18.4 mm 的聚光器高度也不利于微型投影系统外形尺寸的减小。因此,高效率且结构紧凑的自由曲面 LED 聚光器的应用会较好地提高系统的光学性能。

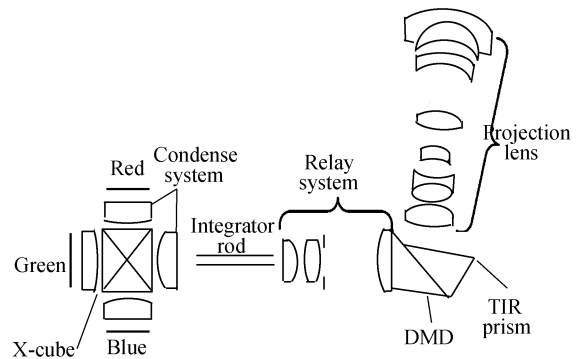


图 1 LED 微型投影光学系统

Fig. 1 Scheme of LED micro-projection system

根据光学引擎中会聚系统的光学性能参数,确定所设计的自由曲面 LED 聚光器的光束出射口径为 20 mm,发散角为 12°;在此发散角内的光能收集率 $> 52\%$,聚光器高度 < 18.4 mm。为进一步减小器件尺寸,需要对光路进行折叠,为此,本文提出了含有折射和反射自由曲面的 LED 聚光器结构,其工作原理如图 2 所示。

图中曲面 1 和曲面 2 是自由曲面,曲面 3 和曲面 4 则为球面和二次曲面。器件关于 z 轴旋转对称,S 为 LED 芯片,曲面 3 和曲面 4 将光源发

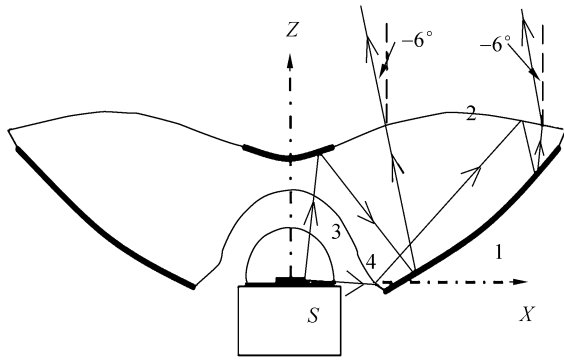


图 2 LED 聚光器结构

Fig. 2 Structure of LED concentrator

出的光线折射到曲面 2 上。曲面 2 的设计保证此时入射于此的光线满足全反射条件,并将光线反射到曲面 1 上,这时曲面 2 是一个全反射面。曲面 1 是一个镀有金属反射膜的表面,它再次把光线反射到曲面 2 上,而此时光线已经不满足全内反射条件,曲面 2 相当于一个折射面,光线将以设计的发散角折射透出。曲面 1~4 围绕 z 轴旋转即得完整的聚光器。

3 自由曲面 LED 聚光器的设计

自由曲面 LED 聚光器的设计将基于非成像光学理论和同时多表面(SMS)设计方法进行。非成像光学理论主要应用于扩展光源照明系统的设计,特别是器件尺度与光源尺度可比的照明系统设计,光学扩展量是其重要的基本概念^[12],它与器件或光束的截面积及发散角有关,因此通过对系统光学扩展量的计算能够确定照明器件的基本参数,如发散角度、口径、光能利用率等。同时多表面设计方法是在 20 世纪 90 年代初提出的,现在已经逐渐应用在光电收集器、光通信、照明光学系统设计等领域中^[13]。SMS 设计方法的基本设计理论是边缘光线原理,该原理的内容是:无光能损耗的理想光学系统中以最大入射角入射的所有光线即边缘光线都必须从出射孔径的边缘出射^[14]。SMS 设计方法则是在此基础上结合光线在不同光学表面折射或反射等物理特性,同时进行多个光学表面的面形参数计算,适用于对光线进行多次折叠的光学器件的设计。已有的理论研究表明,采用此种方法设计的照明系统,理论上效率可达 95%^[13]。因此,该方法可针对扩展光源设

计出光能利用率高且结构非常紧凑的器件^[15]。本文正是利用该理论和方法实现了图 2 所示聚光器的设计。

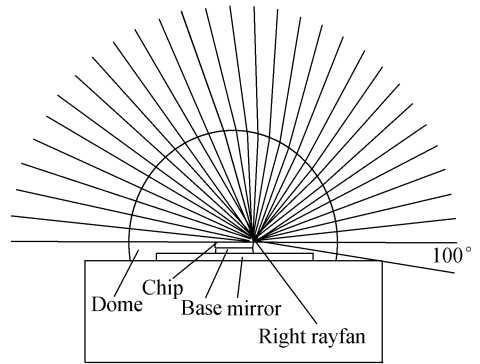


图 3 LED 光源剖面图

Fig. 3 Cross section of LED source

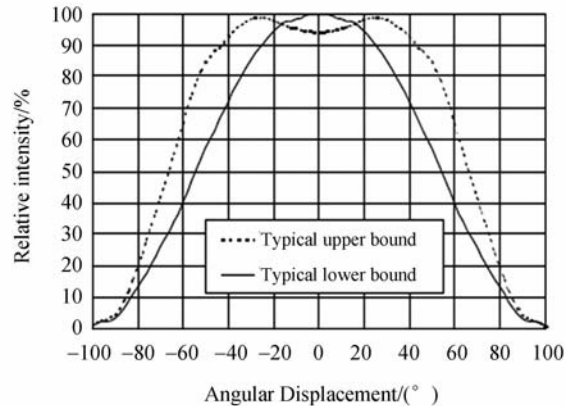


图 4 LED 光源发光强度分布曲线

Fig. 4 Relative intensity distribution of LED

图 3 所示为 Luxeon® III 光源的剖面图,图 4 所示为 LED 光源的强度分布。光源主要由置于硅基底上的 1 mm×1 mm 发光半导体芯片和其上覆盖的半球球状透明树脂构成。可以看到,由于 LED 存在侧面发射,整个光源的发光半角达到了 100°。通过分析计算可知,发光半角 90° 内的光能量占总发光能量的 99%,所以设计中对 LED 光源在 90~100° 之间发出的光线忽略不计,并将 LED 光源近似处理为一个圆柱体。发光面为圆柱体的圆形上表面,直径为 1 mm,发光半角为 90°。以其圆心为原点,在子午横截面内建立如图 2 所示的 X-Z 坐标系,设计过程如下。

首先根据边缘光线原理确定扩展光源的边缘点和边缘光线。图 5 中 LED 芯片左右两端点 R' 和 R 即为光源的边缘点,由这两个边缘点发出的

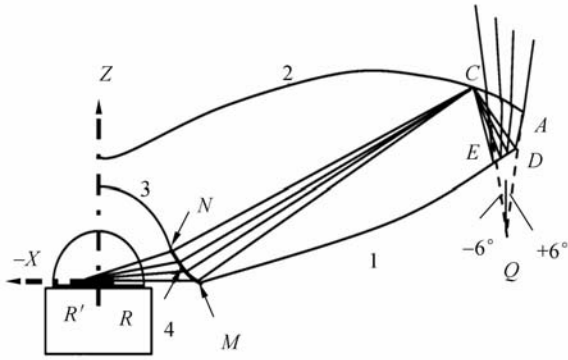


图 5 表面 4 和 ED 部分的设计

Fig. 5 Design of surface 4 and ED

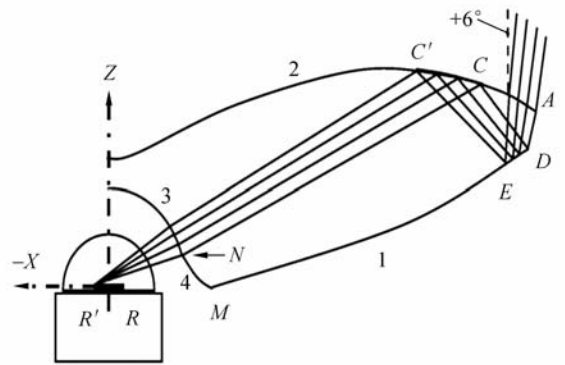
光线是光源上所有发光点射向曲面 3 和 4 光线中角度最大的,即为边缘光线,它们分别对应出射后与 z 轴成 $+6^\circ$ 和 -6° 的边缘光线。根据边缘光线原理,如果曲面能保证光源两边缘点发出的光束分别在出射口径以倾角 $+6^\circ$ 和 -6° 出射,则光源发出的所有光线在出射口径处的发散角都将在 $\pm 6^\circ$ 之内。图 5 中所示 R 和 R' 发出的部分边缘光线最终应形成发散角 12° 的光束,这部分具有较大发散角的光线可以近似看作是由 R' 边缘点出射的边缘光线,此时扩展光源 RR' 可退化为传统的点光源。为此应使 R' 边缘点发出的这部分边缘光线经由曲面 4 的折射会聚至 C 点,在 C 点全内反射后在曲面 1 上形成光束分布 ED ,再经过 ED 反射后由 AC 折射,因此 R' 和 C 关于曲面 4, C 和 Q 关于曲面 ED 分别形成两对共轭点。若已知 LED 芯片尺寸即 R 和 R' 点坐标,则通过计算光源的扩展量,并根据上述出射光束发散角的要求,可以计算出器件的口径,并选定图 5 中 A, C, D, M, Q 点的坐标初值。根据 R' 和 C 的共轭关系和费马原理,曲面 4 的方程如式(1)所示,称为笛卡尔椭圆方程^[16]:

$$n_1 \sqrt{(x-x_{R'})^2 + (z-z_{R'})^2} + n_2 \sqrt{(x-x_C)^2 + (z-z_C)^2} = C_0, \quad (1)$$

其中 n_1 和 n_2 是曲面 4 两侧介质的折射率; (x, z) , $(x_{R'}, z_{R'})$ 和 (x_C, z_C) 分别为曲面 4 上坐标点 R' 点和 C 点的坐标值; C_0 是常数,对应光线自 R' 至 C 点的光程。由已知的 R', C 和 M 点坐标,就可以得到曲面 4 上各点的坐标和法线斜率。假设 AC 是一满足低阶方程的曲面,如抛物面方程,那么根据选择的初始条件,结合费马原理和折射反

射定律,就能得到曲面 1 上 ED 部分各点的坐标及法线斜率,进而通过对 $+6^\circ$ 出射的边缘光线 $R'NCD$ 进行追迹,可确定出曲面 4 的另一边界点 N 的坐标。

图 6 中边缘点 R' 所发出的一部分边缘光线将经过曲面 3 折射至曲面 2 上,这部分边缘光线与曲面 2 相交于 CC' 。根据边缘光线原理, R' 点发出的边缘光线最终须形成 $+6^\circ$ 发散角的出射边缘光线,因此图 6 所示的光线在 CC' 发生全反射后,经过曲面 1 上 ED 部分的反射和 AC 曲面的折射将全部以 $+6^\circ$ 发散角出射。为简化设计,可以取曲面 3 为球心位于原点的球面,由已求得的 N 点坐标可完全确定曲面 3 上各点的坐标及法线斜率,并根据费马定理和折射反射定律确定出曲面 2 上 CC' 间各点坐标和法线斜率。

图 6 曲面 2 上 CC' 部分的设计Fig. 6 Design of CC' on surface 2

接着从 R 点追迹一束光线,令其经由曲面 3 和曲面 4 折射至曲面 2 上的 CC' ,发生全反射后到达曲面 1 上的 EE' ,如图 7 所示,光线被反射回曲面 2 折射后以 -6° 出射。根据折射反射定律、费马原理以及已经计算所得的曲面 3、曲面 4 和曲面 2 中 CC' 部分的坐标,可以确定曲面 1 上 EE' 间各点坐标和法线斜率。

利用已得的曲面 1 上 EE' 部分的坐标和 R' 点其余部分边缘光线,利用上述解曲面 CC' 的方法,可以计算求出曲面 2 上与 CC' 相邻的部分曲面坐标,进而利用 R 点其余部分边缘光线,使用求解 EE' 的方法计算得到曲面 1 上与 EE' 相邻的部分曲面坐标。重复这一计算步骤,利用 R' 和 R 点发出的边缘光线交替进行曲面 1 和曲面 2 上坐标点的计算和求解,最终可得到自由曲面 1 和自

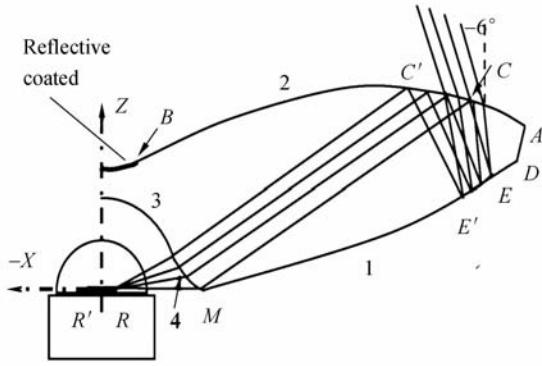


图 7 曲面 1 中 EE' 部分的设计
Fig. 7 Design of EE' on surface 1

由曲面 2 上所有点的坐标。设计中需要注意曲面 2 靠近 z 轴的这部分区域,对于经过曲面 3 折射后的部分光线已不再满足全内反射条件,因此,需要在此区域镀反射膜使其依然对光线起反射作用,图 7 中 B 点即为曲面 2 上发生全内反射的临界点。至此,将所得的 X-Z 二维截面图围绕 z 轴旋转即可得到完整的自由曲面 LED 聚光器。

4 设计结果及仿真

本文选择器件材料为聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA),折射率为 1.49,LED 发光芯片是发散角为 180°,大小为 1 mm×1 mm 的朗伯发光体,根据器件口径和光束发散角的设计要求,利用上述设计方法,可以得到自由曲面 LED 聚光器的设计结果如图 8 所示。聚光器高度为 4.2 mm,口径为 21.5 mm。其中曲面 3 的球面半径为 2.85 mm,图 3 至图 7 中所标注各点的坐标如表 1 所示。

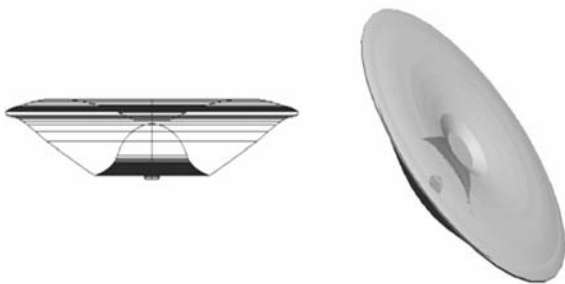


图 8 聚光器设计结果及建模
Fig. 8 Model and simulation of design result

表 1 图 3~图 7 中标注点的坐标

Tab. 1 Coordinates of points labeled in Fig. 3 -Fig. 7

Points	Coordinates (x,z)	Points	Coordinates (x,z)
R	(0.5,0)	R'	(-0.5,0)
A	(10.754,3.5)	C	(9.754,3.8)
D	(10.794,3.329)	E	(10.504,3.237)
M	(4.3,0)	N	(2.607,1.094)
Q	(10.691,1.857)	B	(1.371,3.051)

将设计结果导入 LightTools 光学建模仿真软件,结果如图 8 所示。通过大量光线的追迹计算,可得出射光束子午和弧矢截面内的光强分布如图 9 所示。

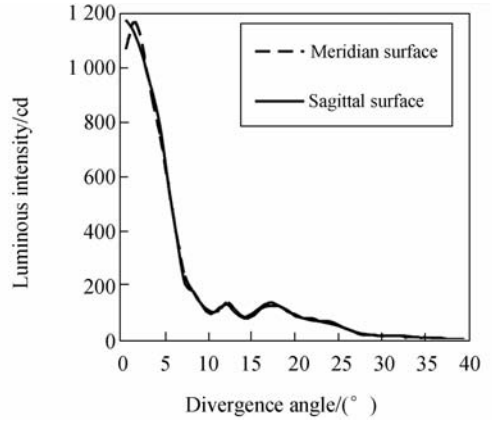


图 9 聚光器输出光强角度分布图
Fig. 9 Output intensity vs angle

与图 4 中 LED 光源的光强分布曲线比较可知,经过聚光器后,光束发散角得到了明显的减小。仿真分析的数据表明,出射光束发散角为 12°和 20°时,对应的聚光器光能收集效率分别为 71%和 81%。聚光器的设计和分析结果满足高度 < 18.4 mm,且在 12°发散角内的光能收集率 > 52%的设计要求。与文献 [11] 中所使用的 SO20XA 型专用反射式聚光器的比较参见表 2,从比较数据可知,设计所得自由曲面 LED 聚光器的体积减小了 70%,而在 12°发散角内的光能收集效率则提高了约 20%,可见自由曲面 LED 聚光器的性能明显优于 SO20XA 反射式聚光器。

表 2 两种 LED 聚光器性能比较

Tab. 2 Character comparison of two LED concentrators

	Output diameter /mm	Height /mm	Volume/mm ³	Efficiency within 12° divergence angle
SO20XA Series	20	18.4	5 781	52%
Freeform LED concentrator	21.5	4.2	1 525	71%

对设计结果进一步分析可以发现,聚光器 71% 的光能收集率与 95% 的理论预期值有较大误差,分析认为误差主要有 3 方面的原因:首先,部分光线在曲面 2 上 z 轴附近的区域反射后并未射至曲面 1 表面,而是通过曲面 3 折射进入 LED 所在的空间,造成了能量的损耗。其次,光源由矩形面光源近似为圆形面光源,造成部分边缘光线无法按照预期设计的发散角出射,降低了聚光器的光能收集效率。再者,由于实际的 LED 发光芯片并非理想光源,而是具有一定的体积,其发出的光线并不完全分布于子午平面内,在三维轴对称系统中的偏离如图 2 所示,子午平面的光线没有按照设计方向传播,而是在系统中螺旋式前进,由此导致光线的出射发散角大于设计值,造成仿真结果和理论结果之间产生误差。

由于聚光器所使用的材料为 PMMA,其加工可采用计算机数控单点金刚石车削技术和光学塑料成型技术。通过对上述设计仿真结果的进一步分析可知,若将坐标精度控制在 0.01 mm,则聚光器在 12° 发散角内的光能收集率可达 68%,较原反射式聚光器相比,收集率仍有较大的提高,而

现有加工设备和工艺完全能够满足上述精度要求。因此,上述设计结果具有一定的实用性。

5 结 论

本文利用非成像光学理论和同时多表面设计方法,计算得到了自由曲面上各点的坐标,实现了含有折射和反射自由曲面的高效紧凑型 LED 聚光器设计。设计结果的光学建模仿真分析表明:所得聚光器的出射口径为 21.5 mm,高度为 4.2 mm,在 12° 出射光束发散角内的光能收集效率达到 71%,满足设计要求。与采用反射式聚光器的原设计方案相比,其光能收集率提高了 20%,而体积则下降了 70%,有效地提高了光学引擎的效率和紧凑性。此外,设计结果的精度误差符合现有加工设备和工艺水平的要求,具有一定的实用性。本文进行的自由曲面 LED 聚光器的设计,将对 LED 微型投影机的小型化具有一定的指导和借鉴作用,同时,还可为其他 LED 照明系统设计提供参考。

参考文献:

- [1] 李学彬,高亦桥,纪玉峰,等. LED 光源光学粒子计数器的研制[J]. 光学精密工程,2008,16(3):406-409.
LI X B, GAO Y Q, JI Y F, *et al.*. Development of optical particle counter of LED lamp-house [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 406-409. (in Chinese)
- [2] LU W, GU P F, SHEN M. A novel LED illumination system used in hand-held projector[J]. *SPIE*, 2005, 5638: 103-107.
- [3] 朱孝立,陈军宁. 光电编码器 LED 光源准直特性研究[J]. 光学精密工程,2009,17(4):750-756.

- ZHU X L, CHEN J N. Research on features of collimated LED beam in optical encoder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 750-756.
- [4] 杨毅,钱可元,罗毅. 一种新型的基于非成像光学的 LED 均匀照明系统[J]. 光学技术,2007,33(1):110-115.
YANG Y, QIAN K Y, LUO Y. A novel LED uniform illuminance system based on nonimaging optics [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(1): 110-115. (in Chinese)
- [5] 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研究[J]. 光学精密工程,2008,16(5):832-838.
TU D W, WU R M, YANG H L, *et al.*. Effect of

- optical package structure of LED to intensity distribution[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(5):832-838. (in Chinese)
- [6] FOURNIER F, ROLLAND J. Design methodology for high brightness projectors[J]. *Journal of Display Technology*, 2008, 4(1):86-91.
- [7] YU X J, HU Y L, TAN L, *et al.*. LED-Based projection systems[J]. *Journal of Display Technology*, 2007,3(3):295-303.
- [8] 李晓艳,钟伯亮,王乐,等. LCOS 微型投影系统的 LED 照明设计[J]. *光学技术*, 2007,33(5):751-753. LI X Y, ZHONG B L, WANG L, *et al.*. Design of LED illumination system in LCOS micro-projector [J]. *Optical Technique*, 2007,33(5):751-753. (in Chinese)
- [9] PAN J W, TU SH H, WANG CH M, *et al.*. High efficiency pocket-size projector with a compact projection lens and a light emitting diode-based light source system [J]. *Appl. Opt.*, 2008, 47 (19): 3406-3414.
- [10] 甄艳坤,李岩,白燕. TIR 透镜优化设计在 LED 微投影显示系统中的应用[J]. *应用光学*, 2009, 30 (3):366-371.
- ZHEN Y K, LI Y, BAI Y. Application of TIR lens optimization design in LED micro-projector [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30 (3): 366-371. (in Chinese)
- [11] ZHAO X, FANG ZH L, CUI J CH, *et al.*. Illumination system using LED sources for pocket-size projectors[J]. *Appl. Opt.*, 2007, 46 (4): 522-526.
- [12] WINSTON R, MINANO J C, BENITEZ P, *et al.*. *Non-imaging Optics* [M]. Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 2005.
- [13] DROSS O, MOHEDANO R N, BENÍTEZ, *et al.*. Review of SMS design methods and real world applications[J]. *SPIE*, 2004,5529:35-47.
- [14] RIES H, RABL A. Edge-ray principle of non-imaging optics[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, 11 (10):2627-2632.
- [15] BENÍTEZ P, MINANO J C. Ultrahigh-numerical-aperture imaging concentrator[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997,14(8):1988-1997.
- [16] ALAMO N, CRIADO C. A method to construct refracting profiles[J]. *Inverse Problems*, 2004, 20: 229-238.

作者简介:



赵 星(1980—),男,北京人,博士,讲师,2002年、2007年于南开大学分别获学士和博士学位,主要从事光学系统设计及微光学等方面的研究。E-mail: zhaoxingtjnk@nankai.edu.cn



吴宏超(1982—),男,河北承德人,硕士研究生,2005年于河北大学获学士学位,主要从事照明系统的设计和研究。E-mail: skyfeather@yahoo.cn



宋丽培(1977—),女,河北衡水人,硕士,工程师,1999年于天津大学获学士学位,2004年于南开大学获硕士学位,主要从事光学系统设计、图像处理等方面的研究。E-mail: gm_imo@nankai.edu.cn



方志良(1945—),男,吉林人,教授,博士生导师,1967年于长春光机学院获学士学位,主要从事应用光学、光学信息处理、图像处理等方面的研究。E-mail: zlfang@nankai.edu.cn