

· 光学设计 ·

分步法快速实现LED小视场角矩形均匀照明

刘典宏, 张晓晖

(海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

摘要:提出一种基于分步法控制纵向视场角的改进方法,可以快速实现LED横纵向小视场角矩形均匀照明。通过设计三个轮廓线可以快速构造三个光学曲面,基于光学曲面构造折射透镜和紧邻的反射器组成光学系统。系统仿真结果表明,当光源距透镜内曲面尺寸与光源尺寸的比值大于6时,光束横向视场角不超过 1° ,纵向视场角不超过 2.6° ,且照明均匀性大于0.75。该方法为具有小视场角矩形均匀照明要求的光学系统提供了一种有效途径。

关键词:几何光学设计;矩形均匀照明;小视场角;LED

中图分类号:O435.1

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2017)-01-0006-04

Step-by-step Method for Quickly Achieving Uniform Rectangular Illumination and Small Divergence Angle with LED

LIU Dian-hong, ZHANG Xiao-hui

(Ordnance Engineering Department, Naval Engineering University, Wuhan 430033, China)

Abstract: An improved method to control longitudinal divergence angle based on step-by-step method is proposed to obtain quickly LED small divergence angle rectangular uniform illumination at horizontal and longitudinal directions. Three optical curved surfaces can be constructed quickly through designing three contour lines. The optical system is made up of the reflective lens constructed based on optical curved surface and an adjacent reflector. Simulation results show that when the ratio of the distance between the optical source and the inner curved surface of lens and the optical source size is more than 6, the horizontal divergence angle of the optical beam is less than 1° , the longitudinal divergence angle is less than 2.6° , and the illumination uniformity is more than 0.75. It provides an effective way for optical system with small divergence angle rectangular uniform illumination requirements.

Key words: geometric optical design; rectangular uniform illumination; small divergence angle; light emitting diode (LED)

照明光学系统设计目的是尽可能将光源的所有光线折射(或反射)至预定目标面并在目标面上形成预期的光强分布。Schurben^[1]在1972年通过建立光源空间坐标系和能量守恒定律推导出照明光学系统设计的本质是求解二阶非线性蒙日-安培偏微分方程。由于方程过于复杂,经过四十年的探索,研究者们仍未能推导出方程的解析解^[2-3]。但是

照明光学系统的发展并未停滞,研究者们通过间接的方法尽可能获得无限逼近方程解析解的数值解,通过这种间接方式也可以设计出满足预期的照明光学系统,包括网格划分法^[4-6]、支撑曲面法^[7]、SMS法^[8]等。同时由于传统的反射式照明光学系统无法兼顾体积小和集光效率高,基于间接法设计折射式照明光学系统成为近些年研究的热点。

收稿日期:2016-12-28

作者简介:刘典宏(1990-),男,博士研究生,主要从事非成像光学系统设计方面的研究。

LED作为一种新型的节能光源,同时具有功耗小、耐冲击、寿命长和耐振动等特点,自1996年白光LED研发出后发展非常迅速,基于LED光源的二次光学系统设计成为近年来的研究热点。LED二次光学系统设计的照明目标面主要为圆形^[9-10]和矩形^[11-15]。当目标面为圆形时,由于LED光源光强分布近似于朗伯状辐射,具有旋转对称性,而圆形照明面也具有旋转对称性,求解的二阶非线性蒙日-安培偏微分方程可以转化为一阶偏微分方程,从而可以有效地求解方程,设计出光学系统。

当目标面为矩形时,不具有旋转对称性。研究者更多地是采用间接法设计LED二次光学系统。网格划分法实现矩形照明是一种被广泛采用的LED二次光学系统设计方法,基本思路是通过先验知识建立LED光源与目标面坐标之间的关系求解光学表面,在光源网格划分时,先后出现 (r, θ) 型^[4]、 (u, v) 型^[5]型和双极坐标型^[6]划分方式以求更好的逼近二阶非线性蒙日-安培偏微分方程的真实解,但是该方法设计复杂、计算量大,且只能设计一个光学曲面,无法实现小视场角矩形照明。支撑曲面法^[7]实现LED矩形照明是一种基于照明问题解的存在性证明而提出的方法,该方法能够更好地适应拓展光源,但同样只能设计一个光学曲面,无法实现小视场角矩形照明。SMS法^[8]是基于双曲面同时设计,能以高集光效率实现小视场角照明,设计十分复杂,对于非对称目标面难以有效达到目标。分步法^[14-15]实现LED矩形照明是基于矩形光束可以近似认为有固定横纵向视场角的光束,从而分步设计曲面分别完成横纵向视场角的控制,实现LED矩形照明。

Moiseev等^[14-15]通过分步法分别设计了两种LED自由曲面透镜,能够实现横向 $10^\circ \sim 40^\circ$,纵向大于 120° 的均匀矩形照明,但是其设计曲面控制纵向视场角时又采用了复杂的网格划分法,而且使得纵向视场角无法小于 120° 。为了同时获得小纵向视场角的LED矩形均匀照明,在前人的研究基础上,改进纵向方向上的视场角控制方式,可以快速实现小视场角矩形均匀照明。

1 分步法控制横纵向视场角

1.1 控制横向视场角方法

光源产生近似朗伯状辐射,在半球形空间内光

线沿着各个方向传播。通过构造第一光学曲面,将所有的光线折射或反射至与 x 轴垂直,从而形成绕 x 轴方向的柱面波,此时 y 轴方向视场角为 180° , y 轴正半轴效果如图1所示。

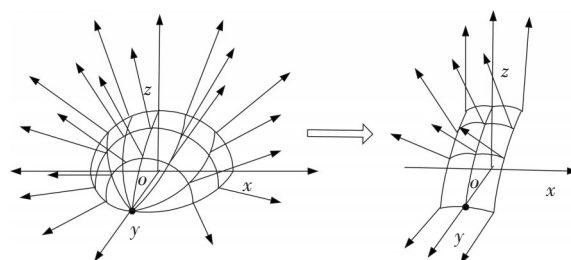


图1 控制横向视场角

1.2 改进的控制纵向视场角方法

由于光线形成绕 x 轴的柱面波,所以可以分步地设计第二光学曲面对 y 轴方向的视场角进行控制。Moiseev等^[14-15]在光线形成绕 x 轴的柱面波的基础上,对波阵面和目标面再次应用网格划分法进行第二光学曲面的设计。由于波阵面 y 轴方向视场角为 180° ,导致第二光学曲面无法获得小的纵向视场角。为了克服这个问题,通过设计第二光学曲面将 y 轴方向与 z 轴成 γ 角度内的光线准直,同时设计紧邻的第三反射光学曲面将其余的光线准直,通过准直后的光线可以实现较均匀的小视场角矩形照明, y 轴正半轴光学曲面控制效果如图2所示。其中实线部分曲面为第二光学曲面,虚线部分曲面为第三反射光学曲面。

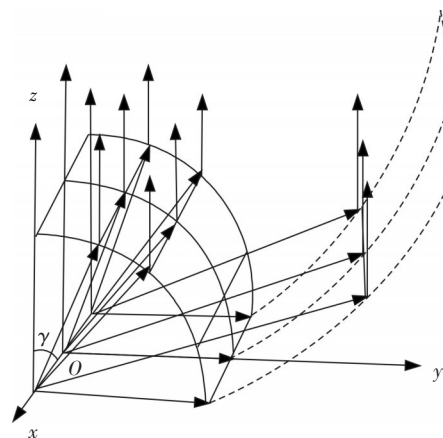


图2 控制纵向视场角

2 光学曲面设计

2.1 第一光学曲面设计

通过TIR轮廓线绕 x 轴旋转 180° 可构造第一光学曲面,如图3所示。其中TIR轮廓线只画出 x 正半轴部分。

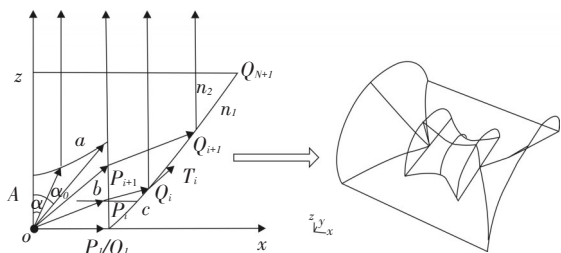


图3 构造第一光学曲面

该TIR轮廓线包含3个部分: a 、 b 和 c 。光源位于坐标原点 O 。点 A 是 a 的起始点。 α 是光源光线和 z 轴的夹角, α_0 是 a 和 b 的边界角。两种介质的折射率分别为 n_1 和 n_2 。当 $0 < \alpha < \alpha_0$,光源光线到达 a 。 a 是一个准直面,根据费马原理, a 部分的矢径方程满足下式

$$r(\alpha) = |OA| \frac{1 - n_1/n_2}{\cos(\alpha) - n_1/n_2} \quad 0 < \alpha < \alpha_0 \quad (1)$$

当 $\alpha_0 < \alpha < \pi/2$,光源光线到达 b 。 b 是垂直 x 轴的线段,对于 b 上的任意一点 P_i ,矢径方程满足

$$\overline{OP_i} = (r(\alpha_0)\sin\alpha_0, r(\alpha_0)\sin\alpha_0/\tan\alpha) \quad (2)$$

此后,光线由 b 折射至 c ,对于 c 上的任意一点 Q_i ,根据折射定律,方向矢量满足

$$\frac{\overline{P_i Q_i}}{|\overline{P_i Q_i}|} = (\sqrt{1 - (n_1 \cos\alpha/n_2)^2}, n_1 \cos\alpha/n_2) \quad (3)$$

当光线到达 c 发生全反射,点 Q_i 上的切矢量满足

$$\overline{T_i} = (\sqrt{1 - (n_1 \cos\alpha/n_2)^2}, n_1 \cos\alpha/n_2 + 1) \quad (4)$$

同时如果知道点 Q_i 的坐标,那么点 Q_{i+1} 的坐标满足

$$\begin{cases} \frac{\overline{P_{i+1} Q_{i+1}}}{|\overline{P_{i+1} Q_{i+1}}|} = \frac{\overline{OQ_{i+1}} - \overline{OP_{i+1}}}{|\overline{OQ_{i+1}} - \overline{OP_{i+1}}|} \\ \frac{\overline{T_i}}{|\overline{T_i}|} = \frac{\overline{OQ_{i+1}} - \overline{OQ_i}}{|\overline{OQ_{i+1}} - \overline{OQ_i}|} \end{cases} \quad (5)$$

如果知道初始点 A 的坐标,根据式(1)~式(5),

可以获得TIR轮廓线。

2.2 第二光学曲面设计

由于经第一光学曲面控制后波阵面是柱面,所以只需计算一条轮廓线,就可快速构造第二光学曲面,如图4所示。其中轮廓线只画出 y 正半轴部分。

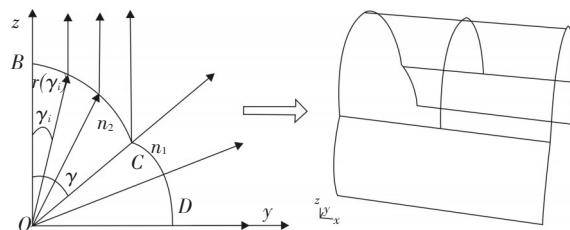


图4 构造第二光学曲面

其中 CD 段为圆弧轮廓线,光线经过轮廓线不改变方向, D 点坐标为 $((Q_{N+1})_z, 0)$, C 点坐标为 $((Q_{N+1})_z \sin\gamma, (Q_{N+1})_z \cos\gamma)$ 。

BC 段为折射轮廓线,光线经过轮廓线被准直,其矢径满足以下方程

$$r(\gamma_i) = |OC| \frac{\cos(\gamma) - n_2/n_1}{\cos(\gamma_i) - n_2/n_1} \quad 0 < \gamma_i < \gamma \quad (6)$$

得到轮廓线后将其在 $2(Q_{N+1})_z$ 长度内拉伸成形,即可得到光学曲面。

2.3 第三光学曲面设计

第三反射光学曲面将第二光学曲面柱面部分出射的光线准直,同样由于经第一光学曲面控制后波阵面是柱面,且光线经过第二光学曲面柱面部分未改变方向,同样只需计算一条轮廓线,就可快速构造第三光学曲面,如图5所示。其中轮廓线只画出 y 正半轴部分。

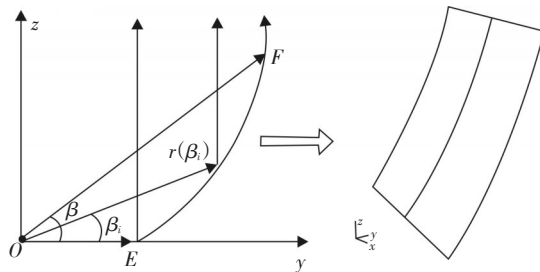


图5 构造第三光学曲面

EF段为反射轮廓线,光线经过轮廓线被准直, E点坐标为 $((Q_{N+1})_x, 0)$,其矢径满足以下方程

$$r(\beta_i)^2 + \frac{2\sin(\beta_i)|OE| - \cos(\beta_i)}{\sin(\beta_i)^2}r(\beta_i) = -|OE|, 0 < \beta_i < \beta \quad (7)$$

同样地,得到轮廓线后将其在 $2(Q_{N+1})_x$ 长度内拉伸成形,即可得到光学曲面。

3 光学系统构造

根据光学曲面设计,可以构造折射透镜加一紧邻反射器组成光学系统。通过第一光学曲面和第二光学曲面合并,同时封闭前后平面,可以构造透镜,如图6a所示。将第三光学曲面沿x轴镜像成形并封闭前后两平面可获得环状曲面,将该曲面以厚度d向外延伸可构造反射器,如图6b所示。两透镜与反射器组合可获得该光学系统,如图6c所示。

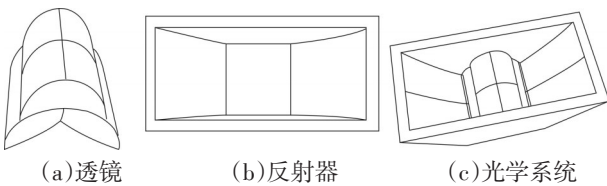


图6 构造光学系统

4 仿真分析

4.1 光学系统追迹效果分析

设定透镜初始点A的坐标为(0,6),边界角 α 为 34° ,边界角 γ 为 44° ,透镜材料选择PMMA,折射率为1.49,所以 $n_1=1, n_2=1.49$ 。根据参数可以构造透镜及反射器模型,将透镜和完整光学系统分别导入光学设计软件并进行光线追迹。由于当光源距透镜内曲面尺寸与光源尺寸的比值大于6时,LED光源可以近似认为点光源,将光源设定为点光源。两种情况下的追迹效果如图7所示。

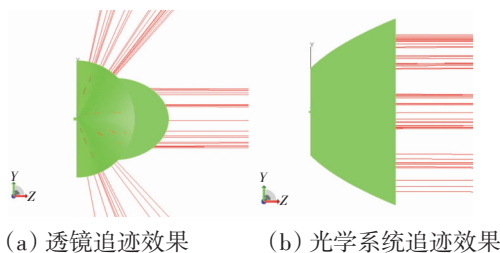


图7 追迹效果对比

由图可知,设计满足光学曲面的预期效果。同时设定光源光通量为100 lm,光线数为50万。经光线追迹后可得到光学系统的光强度分布,如图8所示。

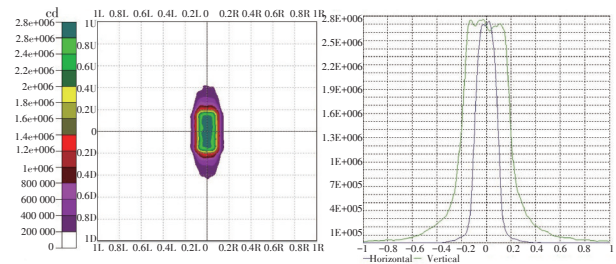


图8 光强度分布图

由仿真结果可知,当该系统采用点光源时可形成横向 0.2° 、纵向约 0.4° 的矩形照明,且照明均匀性(最小光强/最大光强)达到0.9。

4.2 光源距透镜内曲面尺寸与光源尺寸的比值改变时效果分析

当采用点光源时,光源距透镜内曲面尺寸 $|OA|$ 与光源尺寸的比值几乎为无穷大。而实际的LED都有一定的发光尺寸,相比点光源,光学系统的效果会有所改变。为了分析光学系统对带有一定发光尺寸的LED的真实效果,设定LED的边长为h,改变光源距透镜内曲面尺寸与光源尺寸的比值 $|OA|/h$,其他参数不变,构造光学系统并进行仿真,仿真结果如表1所示。

表1 不同 $|OA|/h$ 的系统的仿真效果

$ OA /h$	横向视场角/ $(^\circ)$	纵向视场角/ $(^\circ)$	均匀性
30	0.3	0.5	0.89
12	0.4	0.9	0.87
10	0.7	1.5	0.84
7.5	0.8	2	0.78
6	1	2.6	0.75
5	1.4	3.2	0.70
4.2	1.6	3.6	0.67
3.7	1.7	4	0.64
3.3	1.8	4.2	0.62
3	2	4.6	0.60

根据仿真结果可以知道,随着 $|OA|/h$ 的变小,整形后光束的横向视场角、纵向视场角逐渐增大,

(下转第49页)

ing of sound velocity in water: Brillouin scattering[J]. Remote sens. Environ, 1991, 36:165-178.

- [3] Mobley C D. Light and water: radiative transfer in natural waters[J]. Academic Press, 1994.
- [4] 阎旭光. 基于蒙特卡罗模拟的海水光信道特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [5] Raymond C Smith, Karen S Baker. Optical properties of the clearest natural waters [J]. Applied Optics, 1981, 20 (2):177-184
- [6] Werner C, Streicher J, Herrmann H, et al. Multiple-scattering lidar experiments[J]. Optical Engineering, 1992, 31: 1731-1745.

- [7] 王文朋. 水下激光通信系统中信道特性分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [8] Arindam Banerjee, Anil A Ogale, Kunal Mitra. Experimental simulate on of lightning optical emissions in clouds [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39: 575-583.
- [9] Yuri I Kopilevich, Victor I Feygels, Alexey Surkov. Mathematical modeling of input signals for oceanographic lidar systems[J]. SPIE, 2003, 5155:30-39.
- [10] Eugeny P Savchenko, Valery V Tuchin. Computer simulation of light propagation in a multi-layer biological by Monte-Carlo method[J]. SPIE, 2000:317-326.

(上接第9页)

而且纵向视场角增长幅度比横向视场角大,同时系统的均匀性降低。当比值大于6时,横向视场角不超过 1° ,纵向视场角不超过 2.6° ,且均匀性大于0.75。

5 结论

分步法通过分步设计光学曲面分别完成横纵向视场角的控制,可以实现LED矩形均匀照明,同时实现较小横向视场角光束,但是纵向视场角仍然大于 120° 。文中设计新的光学曲面控制纵向视场角,可同时实现横纵向小视场角矩形均匀照明。通过设计第一光学曲面将球面波整形为柱面波,通过设计第二光学曲面将部分柱面波准直,通过设计第三光学曲面将其余柱面波准直,根据设计的光学曲面构造折射透镜和紧邻的反射器组成光学系统。光线追迹结果表明,当光源距透镜内曲面尺寸与光源尺寸的比值增大,整形后光束的横纵向视场角增大,同时系统的均匀性降低。当比值大于6时,横向视场角不超过 1° ,纵向视场角不超过 2.6° ,且均匀性大于0.75。该方法可以有效应用于舰船基于颜色/频率的光学对中系统。

参考文献

- [1] Schruben J S. Formulation of a reflector-design problem for a lighting fixture[J]. J Opt Soc Am, 1972, 62(12):1498-1501.
- [2] Olikier V, Newman E, Prussner L. Formula for computing illumination intensity in a mirror optical system[J]. J Opt-

Soc Am A, 1993, 10(9):1895-1901.

- [3] Olikier V, Newman E. The energy conservation equation in the reflector mapping problem[J]. Applied mathematics letters, 1993, 6(1):91-95.
- [4] Wang K, Liu S, Chen F, et al. Freeform LED lens for rectangularly prescribed illumination[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2009, 11(8):105501.
- [5] Liu D, Zhang X, Chen C. Free-form lens for rectangular illumination with the target plane rotating at a certain angle[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(11):1958-63.
- [6] Ma D, Feng Z, Liang R. Tailoring freeform illumination optics in a double-pole coordinate system[J]. Appl Optics, 2015, 54(9), 2395-2399.
- [7] Michaelis D, Schreiber P, Bräuer A. Cartesian oval representation of freeform optics in illumination systems[J]. Optics letters, 2011, 36(6):918-920.
- [8] Miñano J C, Benítez P, González J C. RX:an imaging concentrator[J]. Applied Optics, 1995, 34(13):2226-2235.
- [9] 陈琛, 张晓晖, 刘典宏. LED均匀准直光学系统设计[J]. 海军工程大学学报, 2015, 27(04):103-107.
- [10] 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):71-76.
- [11] Luo Y, Feng Z, Han Y, et al. Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source[J]. Opt. Express, 2010, 18(9):9055-9063.
- [12] Ma D, Feng Z, Liang R. Freeform illumination lens design using composite ray mapping[J]. Appl Optics, 2015, 54(3): 498-503.
- [13] Liu Z, Yu F. Non-uniform grid target tessellation method for the design of lens group with rectangular uniform illumination [J]. Appl Optics, 2015, 54(7):1618-1624.