

实现均匀照明的 LED 系统设计方法

李 林¹ 王光珍¹ 王丽莉¹ 孔德鹏¹ 姬江军¹ 张亚军²

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)

² 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029

摘要 针对医用无影灯的应用要求, 提出了一种利用非球面透镜实现对目标平面均匀照明的方法。基于能量守恒定律得到光源出射角与目标面之间的关系, 利用 Zemax 的宏语言编写优化操作数使透镜优化满足上述关系, 在非序列模式中对结果进行模拟和优化, 并分别对透镜的前表面三种情况进行模拟, 提出并模拟了 LED 球面阵列, 并分析了角度及距离的偏移对照明均匀度的影响。结果表明, 1 m 距离处实现了直径为 25 cm 的平面内的均匀照明, 均匀度(平均照度/最大照度)达到 96% 以上; 球面阵列的设计可以满足无影灯的光分布要求, 照明深度达到 1 m。

关键词 光学设计; 非球面; 均匀照明; 无影灯; Zemax 软件

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201232.0222002

Lens Design for Uniform Illumination with LED

Li Lin¹ Wang Guangzhen¹ Wang Lili¹ Kong Depeng¹ Ji Jiangjun¹ Zhang Yajun²

¹ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

² College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

Abstract A new method that the target plane is uniformly illuminated with aspheric lens is proposed. Based on the energy conservation law, it can be figured out the angle between the light source and the target surface, and the macro language of Zemax is used to make the lens meet the above mentioned relation, simulating and optimizing the result in the non-sequential mode and respectively simulating the three cases of the front surface. It is proposed and simulated a spherical LED array, and analysed the effect of the illumination uniformity of the angle and distance offsets. The result shows that the uniform illumination in a distance of 1 m and 0.25 m in diameter of the plane is achieved, with the uniformity of 96% or more. The spherical array meets the application requirements of shadowless lighting and the depth of illumination up to 1 m.

Key words optical design; aspheric lens; uniform illumination; shadowless lamp; Zemax software

OCIS codes 220.2945; 220.1250; 220.4298; 230.3620

1 引 言

LED 作为 21 世纪的节能型新光源, 在显示、景观照明等方面已得到广泛应用^[1,2]。且据最新电子元器件行业点评, LED 成本仍有巨大的下降空间, 包括光效提高、规模效应以及产业利润回归合理, 这些都预示着 LED 照明时代的来临。虽然目前国内

大部分的医院都还在使用传统的整体反射无影灯, 即卤素灯。但相对于卤素灯, LED 有超长使用寿命、绿色环保和低能耗的特点, 而且辐射小更利于手术后创面恢复。另外现在 LED 的芯片设计和封装技术已经能够充分满足无影灯在照度和显色指数上的要求, 同时它的光谱分布也决定了其非常适合作

收稿日期: 2011-06-23; 收到修改稿日期: 2011-08-21

基金项目: 国家 863 计划(2007AA032452)和国家自然科学基金(60437020)资助课题。

作者简介: 李 林(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: lilin_517@126.com

导师简介: 王丽莉(1957—), 女, 博士, 研究员, 主要从事聚合物光学材料制造与应用等方面的研究。

E-mail: wangll@opt.ac.cn(通信联系人)

为手术无影灯的光源^[3]。所以,LED 无影灯取代卤素灯作为医疗手术光源将是必然的发展趋势。而且在光学设计方面 LED 芯片的尺寸可以做到很小,一般低于 1 mm×1 mm,所以在设计中可以作为点光源处理,方便地进行光学设计,更好地满足光源对不同区域照明的需求。

在 LED 二次配光设计中,透镜设计主要分为两种方法^[4,5]:试错法与求解偏微分方程法。求解曲面方程需要根据斯涅耳(Snell)定律,结合立体坐标系思想以及能量守恒原理,根据光源的发光特性和所需的照明推导得出一组偏微分方程,通过求解偏微分方程得到面型数据^[6~10]。这种方法其方程组复杂,求解麻烦,建模时由于软件带来的误差,致使只能通过离散面的拼接来构建整个自由曲面。各离散面之间的间隙会造成部分光线的吸收,影响了照明均匀性和能量利用率;试错法又为经验法即选择初结构,在非成像光学分析软件中通过光线追迹判断照明面的照度及光强分布,通过软件的优化功能不断改变结构参数最终得到理想面型。这种方法初始结构的选取很重要,不需要复杂的计算,可以很随意的对参数进行限制,设计关键在于建立评价函数,确定优化指标进行优化^[11]。

本文采取试错法进行设计,原理简单,不需要复杂的编程,只是借助 Zemax 自带的优化操作数及简单的编写宏语言进行优化。由于这种方法的初始结构比较重要,因此首先在序列模式中对初始结构进行设计,再利用序列模式中的均匀优化参数对照明面均匀性进行优化。

2 设计原理

本文中采用 Zemax 软件进行二次光学设计和优化。本文的优化操作数基于 Zemax 的 ZPL 宏语言自行编写,Zemax 根据评价函数自动构建评价函数进行优化:

$$F_M^2 = \frac{\sum W_i (V_i - T_i)^2 + \sum W_j (V_j - T_j)^2}{\sum W_i}, \quad (1)$$

式中 F_M 为评价函数, W_i 为操作数权重, V_i 为操作数当前值, T_i 为操作数目标值, $(V_i - T_i)$ 为拉格朗日乘子,一般对应于透镜的边界条件。

该设计的关键是在已知光源出光分布的前提下,利用能量守恒建立光源与照明区域的联系,确定优化指标进行优化,准确控制每条光线的走向,最终实现均匀照明。

设计原理如图 1 所示,由光源 O 出射的光线入射至透镜,经透镜折射后入射到目标平面上的 T 点。为了方便设计把前表面取为平面,因此现在的目标是需要找一个为非球面的后表面,使光线偏折后到达目标平面的指定位置。

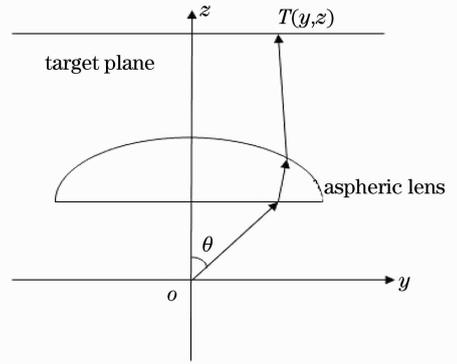


图 1 设计原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of design principle

忽略吸收和散射损耗,光线传播遵守能量守恒定理,即光源的输出光通量应等于入射目标面内的光通量:

$$\iint_{\Omega} I(\theta) d\Omega = \iint_y E(y) dS, \quad (2)$$

式中 $I(\theta)$ 为与光轴夹角为 θ 处的光强值, $E(y)$ 为目标面上 T 处的照度。已知光源的配光曲线为 $I(\theta)$,则光源发出的光通量为

$$\Phi = \int_0^{\theta} I(\theta) d\Omega = \int_0^{\theta} I(\theta) 2\pi \sin \theta d\theta, \quad (3)$$

对于像面面积 S 上,根据照度的定义

$$E = \frac{d\Phi}{dS}, \quad dS = 2\pi \sin \theta d\theta, \quad (4)$$

对任意半径内的光通量积分有

$$\Phi(y) = \int_0^y E(y) 2\pi y dy, \quad (5)$$

由(2)式可知,有光源发出的能量全部到达屏幕,即(4)式与(5)式相等,得

$$\Phi = \int_0^{\theta} I(\theta) 2\pi \sin \theta d\theta = \int_0^y E(y) 2\pi y dy, \quad (6)$$

假设目标平面照度均匀为 E_0 ,对任意 (θ, y) 进行积分可得

$$E_0 = \frac{2 \int_0^{\theta} I(\theta) \sin \theta d\theta}{y^2}, \quad (7)$$

将 $y = y_{\max}, \theta = \theta_{\max}$ 即边缘情况对(6)式积分得

$$E_0 = \frac{2 \int_0^{\theta_{\max}} I(\theta) \sin \theta d\theta}{y_{\max}^2}, \quad (8)$$

两式相比得

$$y = \sqrt{\frac{\int_0^{\theta} I(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_0^{\theta_{\max}} I(\theta) \sin \theta d\theta}} y_{\max}, \quad (9)$$

倘若光源为朗伯光源,即发光特性为

$$I = I_0 \cos \theta, \quad (10)$$

代入(9)式得

$$y = \frac{y_{\max}}{\sin \theta_{\max}} \sin \theta. \quad (11)$$

(9)式和(11)式根据能量守恒定律在已知光源配光曲线的条件下,推导得出的出射角 θ 与目标平面坐标 y 之间的关系。选取若干节点根据这两式建立优化操作数,通过优化实现目标值(T_i)和实际光线追迹得到的当前值(V_i)的一致。

3 设计过程及结果模拟

以朗伯光源为例,对无影灯进行设计,设计目标是针对最大出光角为 120° 的朗伯光源^[12],在 1 m 远的直径为 25 cm 的平面上实现均匀照明。根据国家有关手术无影灯的相关标准^[13],在照明光束未被遮挡的情况下,距设备光发射外表面下 1 m 处光斑中心的照度在 40~160 klx 范围内,对光斑直径 d10(即照度达到中心照度的 10% 的圆的直径)和光斑分布直径 d50(即照度达到中心照度的 50% 的圆的直径),规定光斑分布直径 d50 不小于光斑直径 d10

的 50%。

3.1 优化模拟

首先对于透镜前表面为平面的情况,在 Zemax 软件的序列模式中建立初始结构,将透镜的后表面选为 Even Asphere 面型,并将半径、conic 及 r^4, r^6, r^8, r^{10} 的系数设为变量,并根据上面得到的(11)式建立优化操作数。

下面程序为计算像面坐标的部分 MARC 命令:
 input "Enter the maximal angle of incidence : ", a
 input "Enter the normalized pupil coordinates:", py
 input "Enter the maximal radius of target plane : ", Rmax

```

pi=3.1415926
y= Rmax * sine(atan(py * tang(a * 180/pi)))/sine(a)
print "y=",y
OPTRETURN 0 = y
    
```

程序得到的 y 值通过 OPTRETURN 存储并返回,在评价函数编辑器中通过 ZPLM 将计算结果调用并定义为目标值;运用函数 RAGY(Hx, Hy, Px, Py)得到实际光线追迹的像面坐标,即当前值。最后用运算函数 DIFF(op # 1, op # 2)将两值相减,并将其目标值设为 0。在优化过程中,追迹光线越多得到的结果越精确,在这里只是为了找到一个初始结构,所以只选取了 10 条光线,用软件自动优化使得每条光线光线追迹结果和计算结果实现一致。

在优化过程中,发现自由曲面的二次曲线常量 conic 变化范围很大,因此添加操作数对它进行限制(如图 2 所示),以达到一个可行的透镜参数。

1	COVA	COVA	2			0.000000	0.000000	-0.957940	0.000000
2	OPGT	OPGT	1			-10.000000	1.000000	-1.000000	0.000000
3	OPLT	OPLT	1			10.000000	1.000000	1.000000	0.000000

图 2 优化操作数

Fig.2 Optimized operand

最终得到初步模型实现了对指定平面区域的照明(如图 3,4 所示)。由图 4 看出,目标平面上边缘的照度高于中心的照度,因此需要进一步的优化。由于在非序列模式中有专门用于照度均匀化控制的操作数 NSDD,因此将上述数据导入非序列模式中,并取 LED 芯片尺寸为 1 mm × 1 mm,光通量为 100 lm,进行进一步优化。

Zemax 软件提供了一个强大的非序列照明优

化操作数 NSDD,优化过程中将照度作为评价光斑均匀性的参量。将透镜的各参数设为变量,在进行优化之前还是要先清空探测器上的光线重新进行光线追迹。本文主要对 NSDD 的两项功能进行了控制(如图 5 所示),首先是对效率的控制,确保探测器上能够接收到足够多的光线确保下面的优化能够进行;其次就是对探测器面上实现均匀度控制。

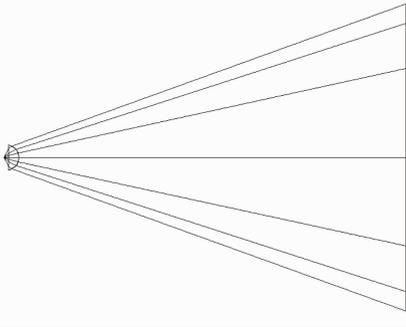


图 3 光线追迹图
Fig. 3 Diagram of ray trace

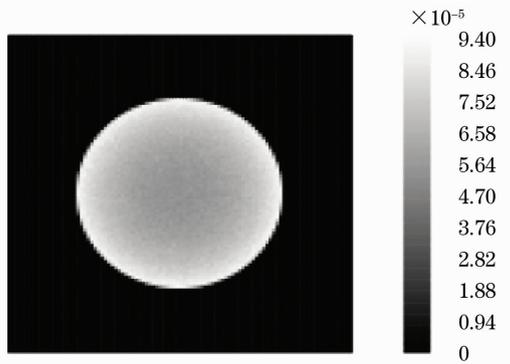


图 4 序列模式中照度图(单位: lx)
Fig. 4 Diagram of Illuminance in sequential mode

Oper #		Pix#	Data			Target	Weight	Value
1	NSDD	0	0			0.000000	0.000000	0.000000
2	NSTR	0	0			0.000000	0.000000	0.000000
3	NSDD	0	0			90.000000	1.000000	94.291100
4	NSDD	-4	0			0.000000	2.000000	0.010315

图 5 均匀度优化操作数
Fig. 5 Optimized operand of uniformity

由图 6(b),(c)可看出,在距离 1 m 直径约为 25 cm 的平面上实现了均匀照明。透镜材料选用 PMMA,口径为 19.2 mm,厚度为 10 mm。采用光斑

直径 d_{l0} 内的能量与进入透镜前表面的能量比值定义透镜效率,则透镜效率为 98.1%。最大光照度为 1065 lx,平均照度为 1032 lx,均匀度为 96.9%。

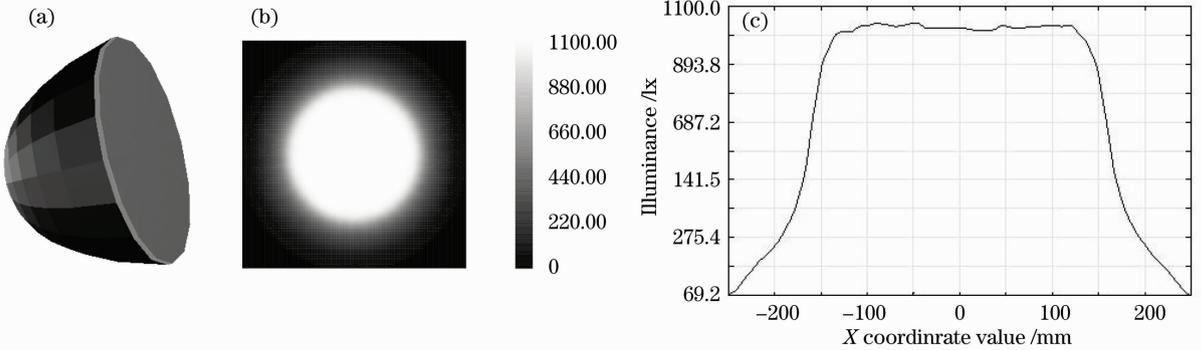


图 6 (a)非球面透镜模型;(b),(c)模拟结果照度图
Fig. 6 (a) Model of aspheric lens; (b), (c) simulated results of illuminance

3.2 适用性验证

以上是前表面为平面的设计,为验证方法上的可行性,下面对于球面和非球面的情况进行优化模拟。

如图 7 所示在前表面为球面的情况下目标平面上照度分布图,透镜效率 97.3%,25 cm 的均匀区域内,最大值照度为 1005 lx,平均照度为 991 lx,均匀度为 98.6%。

图 8(a),(b)为前表面为非球面情况下的目标平面上的照度分布图,可以看出仍然可以达到很好的均匀度。透镜效率达到 97.8%,目标平面内最大照度为 1047 lx,平均照度为 1012 lx,均匀性为 96.65%。

对于上述两种情况,均匀度同样可以满足要求。

3.3 阵列化模拟

上述的设计已经满足了对照明面积和照度均匀性要求,但作为无影灯,需要阵列化实现它的无影效果及照度需求。在此阵列采用球面分布,如图 9 所示,使得每个单元的主光线对应球心,由于 LED 尺寸很小,在位置上的微小移动对目标平面的影响可以忽略,因此各光源对目标平面的照度影响相互叠加。通过照度叠加而不是光斑的拼接使得每个灯都独立地形成均匀光斑,手术时遮住部分光组,光斑大小均匀性仍然不改变。

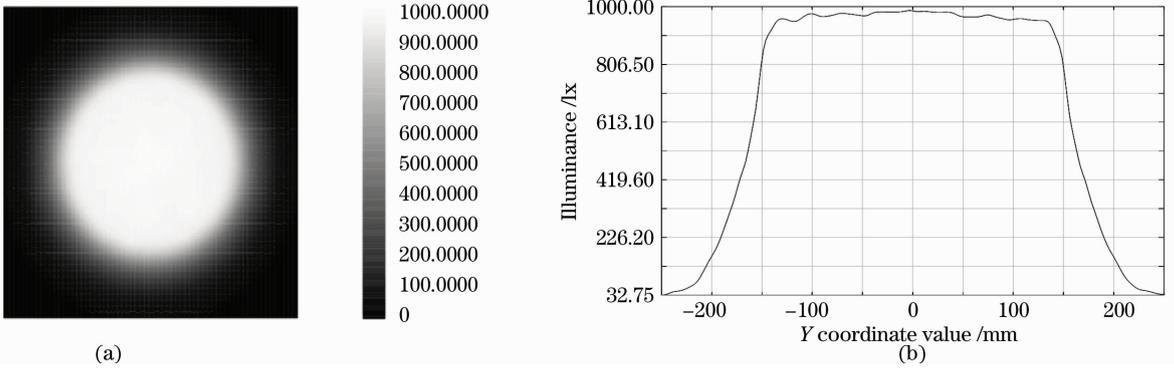


图 7 前表面为球面的透镜模拟结果

Fig. 7 Simulated results of lens with spherical front surface

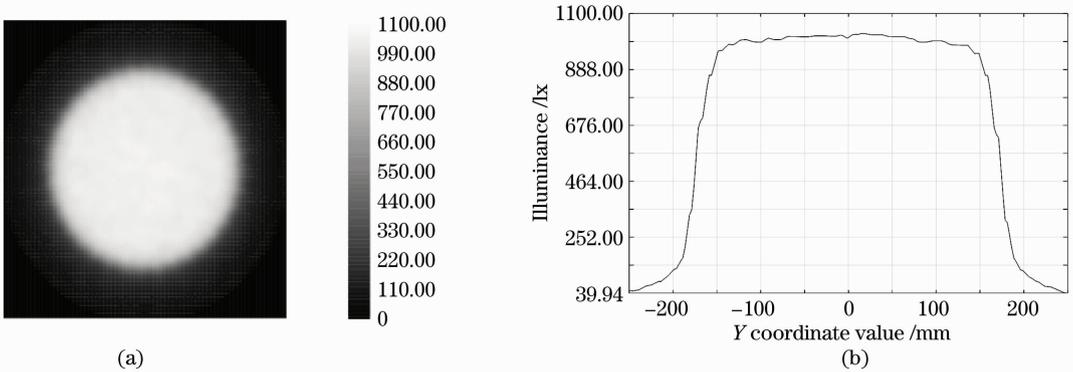


图 8 前表面为非球面的自由透镜模拟结果

Fig. 8 Simulated results of lens with aspheric front surface

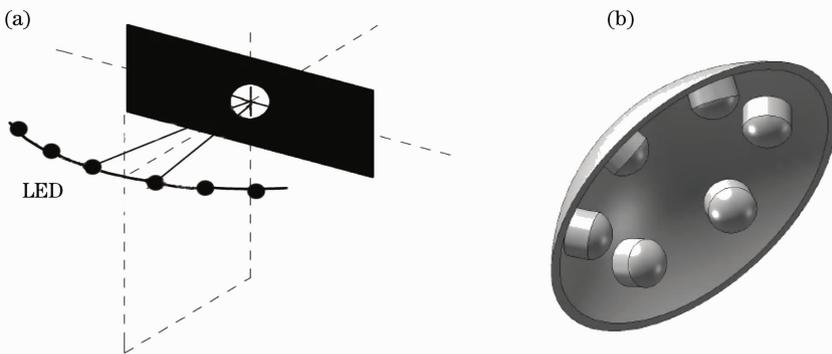


图 9 (a) 二维辐射照度分布图和 (b) 环形阵列立体图

Fig. 9 (a) Two-dimensional distribution of illuminance and (b) stereogram of a ring array

图 10 是对图 9(a) 中 6 个 LED 线性阵列分布的照度模拟, 球面半径为 1 m, LED 角间距为 5° 。由图看出的阵列化后位置及角度的偏移对于中心区域的均匀性影响不大, 边缘照度下降较单个灯时平缓。透镜效率为 97.69%, 最大照度为 5667 lx, 平均照度为 5370 lx, 均匀性为 94.75%。均匀度明显优于传统的整体反射手术无影灯^[3], 且照度分布满足无影

灯指标^[13], 即 $d_{50} \geq 0.5d_{10}$ 。

对于无影灯要求有一定的照明深度, 因此最后对均匀度随距离的变化进行了分析。由图 11 对图 9(a) 阵列的模拟结果可以看出, 在 1 m 之后的范围可以保持良好的均匀度伴随照度降低, 1 m 之前照度增强均匀度降低, 因此在满足无影灯的光分布和照度的要求下, 适用范围即照明深度可达到 1 m。

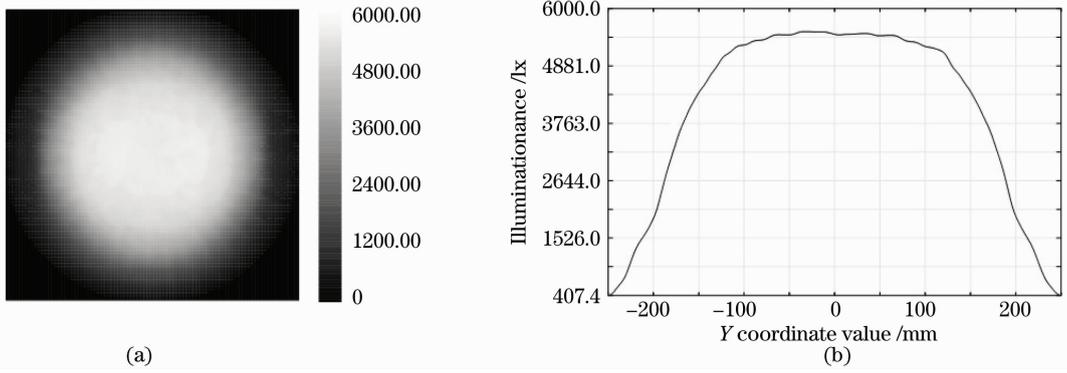


图 10 阵列模拟照度图
Fig. 10 Simulated illuminance of this array

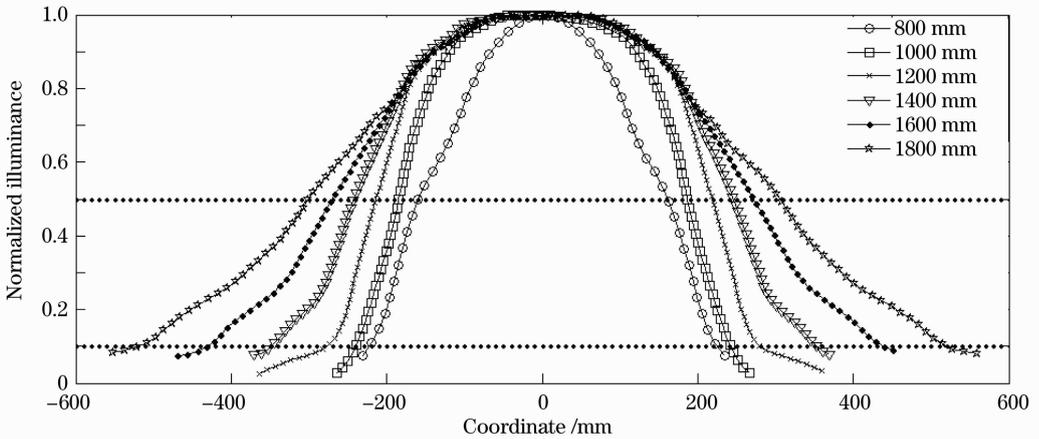


图 11 均匀度随距离的变化
Fig. 11 Uniformity versus distance

4 结 论

针对新型医用无影灯设计,提出了一种以 LED 为光源实现均匀照明的透镜设计方法。针对朗伯光源对前表面为平面的透镜进行设计,得到较好的均匀度。并对球面及非球面进行了验证,证明了这种方法的适用性。最后为了达到无影灯的光照效果及照度要求,提出 LED 球面阵列实现在目标平面上的照度叠加,并对少量阵列进行了模拟,考察了角度及距离对均匀度的影响,证实满足均匀性要求。这种方法不需要编写复杂的程序求解方程,依靠软件优化得到,曲面连续光滑,完全避免了拼接面对的能量利用率及均匀性的影响。

参 考 文 献

1 Wu Rengmao, Tu Dawei, Huang Zhihua *et al.*. Illuminative uniformity design of a LED illumination system [J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(1): 74~76
吴仍茂,屠大维,黄志华等. LED 照明系统的光照均匀性设计[J]. *光学技术*, 2009, **35**(1): 74~76
2 Zhuo Jinzhai, Wang Min, Zhuang Zhenfeng. Design of efficient

matched mirrors and arrays for small angle LED[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(11): 112202
卓金寨,王敏,庄振锋. 小角度高校配光镜组及阵列设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(11): 112202
3 Zhu Gendi, Liu Minjuan. Research on the illuminance characteristics of LED surgical luminaire [J]. *Chinese J. Medical Instrumentation*, 2009, **33**(3): 183~187
朱根娣,刘敏娟. 新型 LED 手术无影灯的光照度特性的研究[J]. *中国医疗器械杂志*, 2009, **33**(3): 183~187
4 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 LED 均匀照明反射器的设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2297~2301
5 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
6 Yi Ding, Xu Liu, Zhenrong Zheng *et al.*. Freeform LED lens for uniform illumination [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(17): 12958~12966
7 Li Jing. Lens design for uniform illumination of rectangle area with LED[J]. *J. Appl. Opt.*, 2011, **32**(2): 211~214
李竞. 实现 LED 矩形均匀照明的透镜设计[J]. *应用光学*, 2011, **32**(2): 211~214
8 Yi Luo, Zexin Feng, Yanjun Han *et al.*. Design of compact and

- smooth free-form optical system with uniform illuminance fo LED source[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(9): 9055~9063
- 9 Li Cheng, Li Nong. A LED lens design method for uniform illumination[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2010, **21**(3): 46~49
李 澄, 李 农. 一种用于均匀照明的 LED 透镜设计方法[J]. 照明工程学, 2010, **21**(3): 46~49
- 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 Liang Chengyuan. The Secondary Optic Design of LED [D]. Zhejiang University, 2008, 14~20
梁程远. LED 的二次配光设计[D]. 浙江大学, 2008, 14~20
- 12 Huang Qilu, Wu Fengtie. Investigation of uniform illumination of near-field targets using a conic light-emitting diode array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3039~3043
黄启禄, 吴逢铁. 基于近场均匀照明的 LED 二次曲线阵列的研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 3039~3043
- 13 Particular Requirements for the Safety of Surgical Luminaries and Luminaries for Diagnosis. YY 0627-2008 [S]. Beijing: China Standard Press, 2008

栏目编辑: 谢 婧