

文章编号: 1003-501X(2015)03-0089-06

LED 复合椭球面聚光器的设计

黄 慧^{1,2,3}, 李湘宁^{1,2,3}, 汪宇青^{1,2,3}

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093;

3. 教育部光学仪器与系统工程研究中心, 上海 200093)

摘要: 为了使发光二极管(LED)光源在近距离内满足特定角度范围内出射的高效照明, 提出了一种基于光学扩展量的复合椭球面聚光器(CEC)的设计方法。首先, 根据LED光源的发光特性和非成像光学中的光学扩展量守恒理论, 建立了CEC的母线方程, 进而依据边缘光线理论和几何光学中的光线追迹原理, 设计了CEC结构的前后表面面型。最后利用光学设计软件ZEMAX对所设计的系统进行光线追迹仿真, 结果表明在CEC出口处可获得的角度大小为 51.6° , 在距离出口后4 mm处8 mm×8 mm大小的探测器上可利用的光能达到69%。模拟仿真与理论计算结果基本吻合, 证明了该设计方法的合理性。整个系统尺寸较小, 为实现聚光系统的小型化和简单化提供了一种有效的设计方案。

关键词: 光学设计; 光学扩展量; 发光二极管(LED); 复合椭球面聚光器; ZEMAX

中图分类号: O439

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2015.03.015

Design for LED Compound Elliptical Concentrator

HUANG Hui^{1,2,3}, LI Xiangning^{1,2,3}, WANG Yuqing^{1,2,3}

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineer,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Key Lab of Modern Optical System, Shanghai 200093, China;

3. Research Center of Optical Instruments and System Engineering, Ministry of Education, Shanghai 200093, China)

Abstract: A design method for Light-emitting Diode (LED) Compound Elliptical Concentrator (CEC) is proposed based on optical extent, in order to satisfy specific emergent angle and high efficient illumination in short distance. Firstly, the CEC generatrix equations are derived according to the optical properties of LED light source and the optical extent conservation theory in non-imaging optics. Then the front and rear surface types are analyzed in the light of the edge-ray principle and the ray tracing theory in geometrical optics. Finally, the designed system is ray tracing simulated in optical software ZEMAX. The results show that, the emergent angle is 51.6° and the light energy utilization efficiency reaches 69%, in the scope of 8 mm×8 mm detector that is 4mm away from the CEC exit aperture. The reasonableness of the method is proved by comparing the simulation results with the theoretical calculation. Using the small size-concentrator is an effective way to realize system's miniaturization and simplification.

Key words: optical design; optical extent; light-emitting diode (LED); compound elliptical concentrator; ZEMAX

0 引言

随着照明技术的发展, 发光二极管(LED)由于存在光效高、能耗低、寿命长、响应时间短和无污染等优点, 逐渐成为新一代光源, 被越来越多的照明系统所使用。但是, LED 芯片光强分布成近朗伯型, 发散

收稿日期: 2014-06-05; 收到修改稿日期: 2014-08-25

作者简介: 黄慧(1988-), 女(汉族), 河南南阳人。硕士, 主要研究工作是光学设计。E-mail: huihuang.xf@foxmail.com。

<http://www.gdgc.ac.cn>

角相对较大,要想高效利用其光通量,就要对系统的结构尺寸有较高的设计要求^[1-2]。为了增大系统的出射光通量,现有的一些照明系统中采用 LED 光源阵列的设计方案,但这样会造成光学系统体积大且结构复杂,在微型的系统中难以实现。如李晓艳等人的设计中,虽然可以很好的调节光束角度和收集光束的能力,但是整个系统的尺寸达到了 19 英寸(1 英寸=2.54 cm)^[3]。而甄艳坤等人设计的聚光器虽然可以使系统的光学体积达到 125 cm³,但是整体系统光能效率较低^[4]。所以,针对 LED 的发光特性,如何在有限的面积和角度范围内高效的利用其光通量,是设计的一个难点。

非成像聚光器可以实现在某个立体角范围内从一定的发光体积收集光能,主要应用于 Cerenkov 辐射和其他辐射的收集、生物学模拟以及探测系统中辐射的会聚等领域^[5]。国内外现有的非成像聚光器的设计中,大多采用了折反射聚光器,荧光聚光器,全息聚光器,线聚集和点聚集聚光器等等,采用的面型常有复合抛物面(CPC)和圆柱腔、抛物槽、菲涅尔面、自由曲面及其他特殊面型等^[6-10]。CPC 主要实现的是光束的近似准直及高效利用,但往往接收面积很大,若是在小尺寸的接收面上则难以达到较好的效果。椭球面聚光器也是典型的非成像聚光系统,它利用的是椭球面两焦点的成像关系,从其中一个焦点发出的光线经过聚光器反射成像在另一焦点上^[11]。复合椭球面聚光器(CEC)是由两条倾斜的椭圆曲线复合而成,对于大尺寸的 LED 光源来说,可以将特定角度出射的光线聚集到小尺寸的接收器上,可应用于近距离光的会聚。现有的椭球面聚光器大多采用旋转椭球面、非共轴椭球面阵列或者椭球面反射镜等进行聚光设计来达到不同的设计效果^[12-13],但对复合椭球面聚光器的使用较少,对 CEC 的求解方法分析也较少。如钟伟志的设计方法中采用的则是根据整体光学系统的外形尺寸和已知焦距来求解椭圆的偏心率^[14]。由此可见,CEC 的设计方法仍有很大的改进空间,CEC 的使用仍然有较大的发展前景。

光学扩展量守恒理论是非成像光学的基本理论,不仅可以描述光学系统传输能量的能力,还可以描述光束本身的走向,因此,该方法可以在照明设计中对能量的分配和重构进行评价和修正。本文针对 LED 光源的发光特性和目标面光强及角度的分布要求,依据非成像光学设计思想,利用光学扩展量守恒理论和边缘光线原理,设计了一种体积较小的实心复合椭球面聚光器,可以在近距离的小尺寸接收器上接收到特定角度的出射光,并可获得较高的光能利用率。

1 设计原理

1.1 光学扩展量

光学扩展量(Étendue)是非成像光学理论中十分重要的概念,描述了系统中某一横截面和某一角度范围的光束,度量了当光束通过光学系统时光束源面积和立体角扩散这两者的变化。光学扩展量定义为^[15]

$$U = n^2 \iint \cos \theta dA d\Omega \quad (1)$$

式中: n 是介质的折射率, θ 是某一横截面上微元面积 dA 与微元立体角 $d\Omega$ 的中心轴的夹角。

在理想的对称或非对称光学系统中,若忽略光折射、反射、散射、吸收等损失的存在,光束通过光学系统时,光学扩展量是保持不变的^[16]。LED 光源的光输出在半球形空间里几乎呈朗伯分布,出射光束角相对较大,对于一个对光能要求较高的系统来说,一般采用面积大的 LED,这时光源的光学扩展量就比较大。要在设计中做到既缩小光束的截面尺寸又减小光束的角度是与光学扩展量守恒相矛盾的。因此,在设计中考虑光学扩展量的匹配因素,合理设计照明系统,控制光线的走向,从而获得较高的光能利用率和所需的出光角度^[17]。

1.2 CEC 反射面面型的设计

CEC 是由两条倾斜的椭圆曲线复合而成,具体是在子午面内,将椭圆的轴线以第一焦点为支点旋转一个角度,轴线偏转后的椭圆线的一部分再绕原轴线旋转一周后形成。如图 1 所示,椭圆曲线 1 的焦点为 F_1 、 F_2 ,椭圆曲线 2 的焦点为 F'_1 、 F'_2 , F'_1 点在椭圆曲线 1 上, F_1 在椭圆曲线 2 上,椭圆曲线 1 的轴线以第一焦点 F_1 为支点旋转后与 y 轴负半轴的夹角为 α , φ_1 、 φ_2 分别为直线 F_1F_2 与 $F_1F'_2$ 、直线 F_1F_2 与 $F_1F'_1$ 的夹角, P 、 Q 分别为椭圆曲线 1 和 2 上的点。则从点 F_1 出发入射的光线经过 CEC 反射后必经过点 F_2 出射,同理从

点 F_1' 入射的光线经过 CEC 反射后必经过点 F_2' 出射。

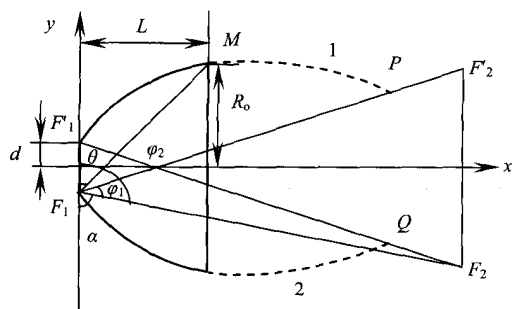


图 1 CEC 的形成

Fig.1 Formation of CEC

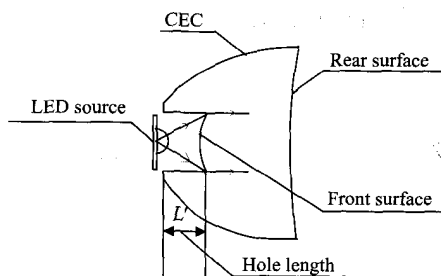


图 2 CEC 结构示意图

Fig.2 Structure of CEC

CEC 的反射面型由三个参数决定, 旋转角度及两焦点位置, 其母线方程为

$$\frac{K^2 - f^2}{2K - 2f \cos \varphi} (\cos(\varphi + \alpha), \sin(\varphi + \alpha)) + F_1(x, y) (\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2, K > f) \quad (2)$$

式中: K 为椭圆曲线的长轴距离, f 为 F_1 、 F_2 两焦点之间的距离, $F_1(x, y)$ 为 F_1 点在 xy 坐标系下的坐标, 其中, $K = |F_1P| + |PF_2|$, $f = |F_1F_2|$ 。令式(1)中的 $n=1$, 对 LED 从任意的角度 θ 内出射的光, 其光学扩展量为

$$U_s = n^2 \iint \cos \theta dA d\Omega = A_s \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\theta \cos \theta d\theta = \pi A_s \sin^2 \theta \quad (3)$$

式中 A_s 为 LED 光源的发光面积。

根据设计要求 CEC 边缘出射的光束半角度为 ω , 则从 CEC 反射面出射的光学扩展量为

$$U_o = \pi A_o \sin^2 \omega \quad (4)$$

式中 A_o 为聚光器出射的有效面积, 即图中的目标面的面积。

根据光学扩展量守恒, 可知:

$$U_s = U_o \quad (5)$$

对于光源经过 CEC 反射面的角度大小 θ , 聚光器出口端半径为 R_o , 有:

$$\tan \theta = \frac{L}{R_o + d} \quad (6)$$

若已知选用光源的尺寸大小 $2a$, 则 CEC 面型的前端口径确定, 假设为 $2d$, 要求目标面的大小为 $2h$, 出射光束的半角度为 ω , 设 CEC 反射面的长度 L 已知, 根据式(5)和式(6)可求得 R_o 的大小。由椭圆的定义可知

$$K = |F_1F_1'| + |F_1'F_2| = |F_1M| + |MF_2| \quad (7)$$

再由图 1 中的几何关系可求出光源距目标面的距离为 S 。则可用已知条件表示 K 、 f 、 α 以及 φ 的范围, 即可得出 CEC 反射面的面型方程, 以及聚光器的长度和出口口径的大小。

1.3 CEC 前表面的设计

由光学扩展量守恒求出的 CEC 不是其完整的长度, 而是将 CEC 的一部分截去了。若选用 CEC 的总长度, CEC 长度过长会导致材料浪费, 若将 CEC 出射孔径端的一部分截去, CEC 的长度明显减小而能量利用率几乎没有什么下降, 因此这是一个经济实用的方法。CEC 聚光器采用实心结构, 则由 LED 光源发出的光线中只有经过反射面的光线才满足角度要求, 而中间部分光线则不能经过 CEC 反射, 只经过聚光器出口处折射而出, 出射角度过大。为了更加充分利用 LED 的光能, 在 CEC 入口端挖去一段深度, 根据几何光学成像来设置前表面的面型, 将反射面不能利用的光线近似准直射, 以达到角度要求。如图 2 所示, CEC 的光孔深度为 L' , LED 光源在 CEC 的入口端处, 已知光源大小为 $2a$, 可根据单个折射球面成像来设计 CEC 前表面的曲率半径。将光源置于前表面的焦点附近可得准直光。已知近轴区域的物像关系式^[18]

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \quad (8)$$

式中: n 、 n' 分别为两种材料的折射率, l 、 l' 分别为物像距, r 为单个折射面的半径, 已知折射面的最大孔径为光孔的半高 H , 则可根据几何关系计算出物距 l 的大小:

$$l = R_{\text{front}} - \sqrt{R_{\text{front}}^2 - H^2} - L' \quad (9)$$

式中: R_{front} 为所求前表面曲率半径, L' 为 CEC 的光孔深度。再联立式(8)可得

$$R_{\text{front}} = (L' - R_{\text{front}} + \sqrt{R_{\text{front}}^2 - H^2})(n - 1) \quad (10)$$

式中 n 为 CEC 材料的折射率。通过求解上式可得出 CEC 的前表面曲率半径。

1.4 CEC 后表面的设计

光线从出口端到空气中时会发生偏折, 造成出射角度偏大, 因此, 可在 CEC 后面增加一个透镜, 将大角度的光线会聚在接收器上, 这样目标面上能接收到更多满足设计要求的小角度光线。设透镜的曲率半径为 R_{back} , 轴外光线经过单个球面折射的光路计算公式^[18]:

$$n' \tan u' = n \tan u + \frac{(n' - n)H}{R} \quad (11)$$

式中: u 、 u' 分别为最大入射半角度和最大出射半角度, H 为入射光线的高度, R 为折射面的半径。从 CEC 中到空气中时, 根据边缘光线原理, 可将入射高度近似等于 CEC 反射面的出口口径大小, 入射角度和出射半角度的最大值均为所要求的角度值 ω , 则利用上式可求得后表面的曲率半径为

$$R_{\text{back}} = R_0 / \tan \omega \quad (12)$$

即求出后表面的曲率半径 R_{back} , 则 CEC 聚光器的后表面外形便可确定下来。

2 设计结果与分析

为了将给定的 LED 光源尽可能多的光通量导入到一个数值孔径为 0.43、口径为 8 mm×8 mm 的方棒中, 应用 CEC 结构的设计原理, 设计一款固定出射角度的聚光器。给定 LED 阵列光源的发光面大小为 4 mm×4 mm, 要求 CEC 的整体尺寸不能过大。根据方棒的数值孔径可知, 光源经过 CEC 出口的最大出射半角度应为 25.47°。在仿真过程中考虑到扩展光源边缘点与目标面边缘点的共轭关系, 以及 CEC 的整体尺寸不宜过大的约束条件, 所设计的聚光器的光孔直径为 5.8 mm, CEC 面型的入口端直径为 6.6 mm, 长度为 14 mm, 出口口径为 16 mm。CEC 结构材料选用 PMMA 材料, 其折射率为 1.49。

首先根据 CEC 面型设计原理, 用 Matlab 编程求出 CEC 反射面的母线方程, 然后将 CEC 反射面的母线数据导入到 Solidworks 机械软件中, 并结合求出的前后表面数据, 画出 CEC 结构的 3D 模型, 其 3D 模型图如图 3 所示。将 3D 模型导入到光学设计软件 ZEMAX 中进行仿真, 光线追迹图如图 4 所示。

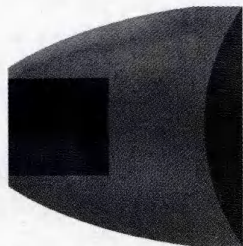


图3 CEC 的 3D 模型图
Fig.3 3D model of CEC

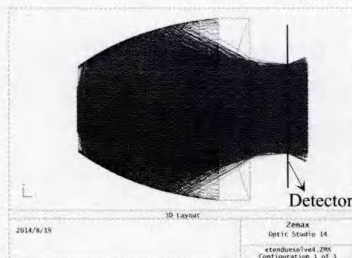


图4 光线追迹图
Fig.4 Ray-tracing figure

由于设计时没有考虑像差的影响, 所以在模拟时根据探测器上的光线追迹结果, 适当的微调 CEC 前后表面的面型, 然后重新追迹观察效果, 找到一个最佳面型。在探测器上接收到的角度分布如图 5 所示, 则从图中可以看出, 在半光强处的出射半角度为 25.8°, 并且角度分布很均匀。在探测器上接收到的能量分布

如图6所示,由图中可以看出,在8 mm×8 mm范围内的能量利用率为69%。

对设计结果进一步分析,光源的最大光学扩展量为 16π ,而接收面上接收到的光学扩展量为 10.4π ,其有效面积和角度以最大光强的50%来计算的。在理想光学系统中光学扩展量是守恒的,而实际仿真中这种光学扩展量变小的情况说明有一部分的光能损失,分析误差主要有两个方面的原因。首先,设计CEC反射面面型时,尽管考虑到边缘点的对应关系,但实际上采用的是大面积的阵列光源,扩展光源边缘点和角度发散具有不确定性,从光源出发的某些光线经过反射面反射之后出射的准确性与理论存在一定的偏差,因此部分光线无法按照预期设计的发散角出射,造成了能量的损耗;其次,对于透射部分,近距离大面积的聚光会产生较大的像差,虽然在设计中已进行尽可能的优化,但是还是会产生一定的误差。针对光源本身的发光特性,对光源的配光曲线从微元来分析,在相同的光学扩展量中,不同立体角分布区间内的能量不同,若尽量将小的光学扩展量内能量高的部分全部利用,则可以获得较好的精准性,从而进一步提高光能利用率。

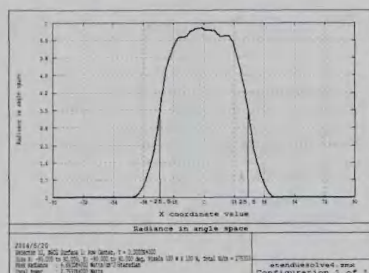


图5 目标照明面角度分布图

Fig.5 Angle distribution diagram



图6 目标照明面的能量分布图

Fig.6 Illumination distribution diagram

3 结 论

通过对LED光源的发光特性和给定目标面的照明要求的分析,根据非成像光学中的光学扩展量守恒理论,得到了一种实现近距离小范围聚光的LED复合椭圆面聚光器。运用了Matlab编程、3D建模软件Solidworks和光学设计软件ZEMAX对CEC结构进行了光线追踪模拟仿真。结果表明,所得CEC聚光器的出射口径16 mm,长度为14 mm,CEC出口处可获得的角度大小为 51.6° ,在距聚光器出口4 mm处的8 mm×8 mm探测器上接收光线,可利用的光能达到69%,满足设计要求。该设计方法可用于要求准确控制出射光角度的聚光系统。若其他聚光器单颗LED光源的光能量利用率可达100%,假设一颗LED的光功率为1 W,此时系统所利用的光功率为1 W。该设计中采用了4颗阵列LED光源,则实际上利用的光功率为2.76 W,还是比其他高出很多。且整个系统的结构尺寸较小,接收面积也很小,有利于后续光学系统的结构要求。通过选择合理的参数,可以进一步提高聚光器的性能。在实际应用中应考虑吸收散射等损失以及加工工艺中带来的误差。

参考文献:

- [1] 付倩, 苏成悦, 薛涛, 等. 基于虚拟目标面的LED均匀光强透镜设计方法[J]. 光电工程, 2013, 40(11): 46-50.
FU Qian, SU Chengyue, XUE Tao, *et al.* LED Uniform Luminous Intensity Lens Based on Virtual Target Surface[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(11): 46-50.
- [2] 赵星, 吴宏超, 宋丽培, 等. 微型投影机自由曲面LED聚光器的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2123-2129.
ZHAO Xing, WU Hongchao, SONG Lipai, *et al.* Design of freeform LED concentrator for micro-projector[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(10): 2123-2129.
- [3] 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 Xiaoyan, ZHONG Boliang, WANG Le, *et al.* Design of LED illumination system in LCOS micro-projector[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(5): 751-753.

- [4] 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 Yankun, LI Yan, BAI Yan. Application of TIR lens optimization design in LED micro-projector [J]. **Journal of Applied Optics**, 2009, **30**(3): 366-371.
- [5] Winston Roland, Minano Juan C, Benitez Pablo. **Nonimaging Optics** [M]. Elsevier Academic Press, 2005: 7-23.
- [6] Irfan Ullah, Seoyong Shin. Highly concentrated optical fiber-based daylighting systems for multi-floor office buildings [J]. **Energy and Buildings**(S0378-7788), 2014, **72**: 246-261.
- [7] Daly J C. Solar concentrator flux distributions using backward ray tracing [J]. **Applied Optics**(S0003-6935), 1979, **18**(15): 2696-2699.
- [8] Kok-Keong Chong, Sing-Liong Lau, Tiong-Keat Yew, *et al.* Design and development in optics of concentrator photovoltaic system [J]. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**(S1364-0321), 2013, **19**: 598-612.
- [9] 林海浩, 张雪梅, 钟英杰. 太阳能光伏聚光器技术进展 [J]. 太阳能, 2008(8): 34-39.
LIN Haihao, ZHANG Xuemei, ZHONG Yingjie. Technology Development of Solar Photovoltaic Concentrator [J]. **Solar Energy**, 2008(8): 34-39.
- [10] 田玮, 王一平, 韩立君, 等. 聚光光伏系统的技术进展 [J]. 太阳能学报, 2005, **26**(4): 597-604.
TIAN Wei, WANG Yiping, HAN Lijun, *et al.* Technology development of photovoltaic concentrator system [J]. **Acta Energiae Solaris Sinica**, 2005, **26**(4): 597-604.
- [11] 吕涛, 张景旭, 付东辉, 等. 可提高太阳模拟器均匀性的变形椭球面聚光镜 [J]. 光学学报, 2013, **33**(12): 1223001.1-1223001.5.
LÜ Tao, ZHANG Jingxu, FU Donghui, *et al.* A Deformed Elliptical Concentrator Beneficial to the Uniformity of the Solar Simulator [J]. **Acta Optica Sinica**, 2013, **33**(12): 1223001.1-1223001.5.
- [12] 任兰旭, 魏秀东, 牛文达, 等. 非共轴椭球面聚光阵列式高焦比太阳模拟器 [J]. 光学学报, 2012, **32**(10): 1022002-1-1022002-6.
REN Lanxu, WEI Xiudong, NIU Wenda, *et al.* High Flux Solar Simulator Based on an Array of Non-Coaxial Ellipsoidal Reflector [J]. **Acta Optica Sinica**, 2012, **32**(10): 1022002-1-1022002-6.
- [13] 魏辉, 李礼夫. 基于光源利用率的投影式汽车前照灯近光配光设计 [J]. 照明工程学报, 2012, **23**(2): 102-107.
WEI Hui, LI Lifu. Design of Projector Headlamp Low Beam Distribution Based on the Light Utilization Rate [J]. **Zhaoming Gongcheng Xuebao**, 2012, **23**(2): 102-107.
- [14] 钟伟志. 一种复合椭球面双高效聚光镜的光学设计方法及其聚光镜: 中国, 1450378 [P]. 2003-10-22.
- [15] Chaves Julio C. **Introduction to non-imaging optics** [M]. CRC Press, 2008: 25-116.
- [16] [美]迈克·伍德, 施端. 解析光学扩展量 [J]. 演艺科技, 2012, **4**(2): 6-8.
[USA] Mike Wood SHI Duan. Etendue [J]. **Entertainment Technology**, 2012, **4**(2): 6-8.
- [17] 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.
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.
- [18] 李湘宁, 贾宏志, 张荣福, 等. 工程光学: 二版 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 9-50.

本期组稿: 陈伟明

责任编辑: 杨洪名

英文编辑: 庞 洪