文章编号　2095-1531(2014)05-0823-07

基于 Supporting-Ellipsoid 方法的自由曲面构造

顾国超,刘洪波*,陈家奇,高　雁
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:为了在特定平面上获得任意形式的辐照分布,采用了 Supporting-Ellipsoid 设计方法来构造自由曲面反射镜。介绍了其设计思想和设计过程,并以具体的设计实例为例构建了自由曲面光学系统。仿真结果表明,在不计反射损失的情况下,系统效率达到了 97%,较传统太阳模拟器光学系统提升了 3 倍以上,不均匀度达到 5.26%,与理想状态有一定差距,这是因为设计中兼顾了计算时间和自由曲面光滑性所造成的。

关　键　词:Supporting-Ellipsoid 方法;自由曲面;均匀照明
中图分类号:TH703　　**文献标识码**:A　　doi:10.3788/CO.20140705.0823

Construction of freeform surface based on Supporting-Ellipsoid method

GU Guo-chao, LIU Hong-bo*, CHEN Jia-qi, GAO Yan
(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: hbliu120@sina.com*

Abstract: To get irradiation distribution of arbitrary form on a specific plane, the free-form surface reflector is constructed with the Supporting-Ellipsoid design method in this paper. Firstly, the design idea and design process are introduced, and then a specific optical system of free-form surface is constructed. Simulation results show that the system efficiency reaches 97% without regard to reflection loss, which is three times more than that of the optical system of traditional solar simulator. The irradiance non-uniformity reaches 5.26%, which has a certain gap with the ideal state, resulting from the consideration on both the calculate time and the smoothness of the free-form surface in the design.

Key words: Supporting-Ellipsoid method; freeform surface; uniform illumination

收稿日期:2014-04-11;**修订日期**:2014-06-13
基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(No. 20130303009GX)

1 引 言

在传统的照明光学系统中,要获得均匀稳定的辐照分布,需要采用特定的复杂光学系统来实现,如采用透镜阵列形式的太阳模拟器光学系统[1],或采用通道反射式积分器的高热流密度输出装置[2-3],不仅需要庞大的系统,而且效率不高。若要获得更加复杂的辐照分布,传统的光学系统便无能为力,因为传统的光学表面多为球面、二次曲面或多项式曲面。若要满足特定的照明,则需要光学面具有足够高的阶次,这势必会造成面型造型不便和数值不稳定。随着人们对照明要求的不断提高,新的照明形式,即采用自由曲面光学面来实现复杂照明的方法便应运而生。自由曲面没有统一的数学表达式,其具有足够多的设计自由度能够应付复杂的照明,同时又具有灵活的空间布局及局部可操作性的优点。

均匀圆形辐照面的自由曲面设计较为简单,因其具有旋转对称性,只要确定旋转自由曲面的母线即可,W. Tai、L. Peng 和顾国超[4~6]等人分别采用了相似的设计思想获得了不同形式的自由曲面光学面,均获得了非常不错的效果。但对于更加一般的辐照情况,如辐照面形状为不规则形状且辐照度为特定非均匀的辐照来说,以上的设计思想和设计方法就难以胜任了。J. S. Schruben 首次从数学和几何学上对此类问题进行了阐述,并获得了从这类问题抽取出来的数学模型, 为 Monge-Ampere 形式的非线性二阶偏微分方程[7]。H. Ries 等人于 2002 年提出了裁剪法,以折射定律为基础建立入射波前、出射波前的曲率以及自由曲面上对应点处曲面曲率之间的关系,并结合能量守恒定律和传输能量密度与光束波前高斯曲率的关系,构建了一组非线性偏微分方程,并通过数值求解获得了自由曲面的离散面型数据,首次解决了这类问题[8]。但其并没有公布具体的解决方法。

目前此类问题的基本解决方法主要有 3 种:数学法、几何法和优化法,间或有这 3 种基本解决方法的组合方法。数学法即是基于光源的发光特性和预定照明要求,根据反射或者折射定律,结合能量守恒定律构建自由曲面所满足的数学方程,通过求解获得自由曲面的面形数据。如 Simultaneous multiple Surfaces(SMS)方法[9],Seroka 和 W. Rengmao 分别采用不同方法的直接解法[10-11]等。几何法的核心思想就是将辐照分布离散化,并利用一些二次曲面(如椭球面、抛物面以及笛卡尔卵圆面)的光学特性,用一组这类二次曲面的曲面片来实现离散照明,并用其包络面作为自由曲面的最终形式。如 Supporting Paraboloids (SP)方法。优化法的主要思想就是将曲面参数化,并选取合适的优化变量,通过不断的调整优化变量来趋近预定照明,直至满足要求。另外 A. Bäuerle 和 Zexin Feng 采用了以上基本方法的组合方法,也得到了不错的效果[12-13],其核心思想就是首先采用不同数学方法获得光源、自由曲面和目标面之间的映射关系,并构建自由曲面,然后采用优化方法获得更加理想的效果。本文的设计思想就是采用几何方法中的 Supporting-Ellipsoid 法,这种设计方法能够解决复杂的照明问题,过程简单易懂,效果直观,避免陷入复杂的数学计算当中。

2 Supporting-Ellipsoid 方法的设计思想基础

2.1 系统整体的坐标系

整体照明系统由光源、自由曲面和目标面所构成,如图 1 所示,其中光源 S 位于系统坐标系中

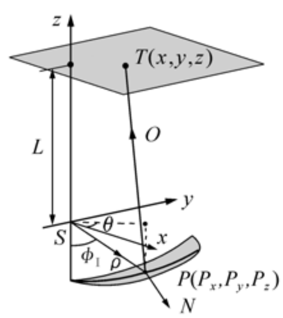


图 1 系统整体坐标系

Fig. 1 Coordinate of the system

心,从光源出射的一条光线入射至自由曲面上的一点 P,经反射后出射光线到达目标面上点 T,其中入射点 P 的直角坐标为 $P(P_x,P_y,P_z)$,球坐标为 $P(\rho,\theta,\varphi)$,入射光线、法线、出射光线的单位矢量分别为 I,N,O,系统光轴与 Z 轴重合,目标面为位于 Z 轴方向并与光源距离 L 处的平面,其中目标面与系统光轴正交。

2.2　Supporting-Ellipsoid 设计思想基础

Supporting-Ellipsoid 设计方法由 Kochengrin 和 Oliker 所提出[14],其核心思想就是将目标面上的预定辐照分布离散化,利用椭球反射镜的特性,并将每个离散点与单个椭球曲面片联系起来,通过调整椭球曲面片的参数,来调整各个离散点所能接收的能量,并以一个整体自由曲面包络各个曲面片,作为自由曲面的最终形式。为了能够更好地理解这个问题,考虑最简单的二维情形下的两个离散点和两个椭圆的情况,规则为第一个与入射光线相交的椭圆线反射此光线,反之亦可,即最后一个与入射光线相交的椭圆线反射此光线,以第一条与入射光线相交的椭圆线反射光线为例,如图 2 所示,椭圆 E_1 和椭圆 E_2 分别对应目标

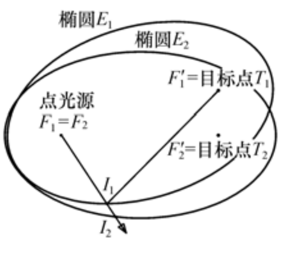


图 2　两个椭圆和两个离散点的情况

Fig. 2　Condition of two ellipsoids and their targets

点 T_1 和 T_2,其中两椭圆的第一焦点与点光源重合,椭圆 E_1 的第二焦点 F'_1 为目标点 T_1,椭圆 E_2 的第二焦点 F'_2 为目标点 T_2,入射光线分别与两椭圆相交于点 I_1 和 I_2,根据规则,则在交点 I_1 处反射此光线,到达目标点 T_1。图 3 则说明了如何调节分配两个目标点的能量,以椭圆 E_0 作为基本椭圆,在变化的过程中保持不变,椭圆 E_1 则保证两个焦点不变,即点光源和目标点的位置保证不变,当椭圆 E_1 的长半轴 $a_1 \gg a_0$ 时,光源发出的所有光线经反射后全部到达目标点 T_0,此时目标点 T_0 得到光源的全部能量,T_1 得到的能量为 0,当减小

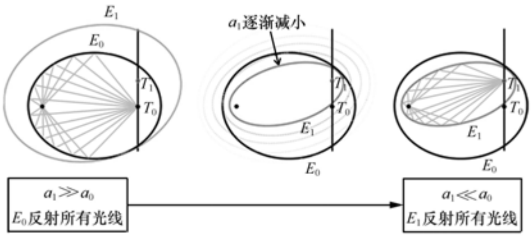
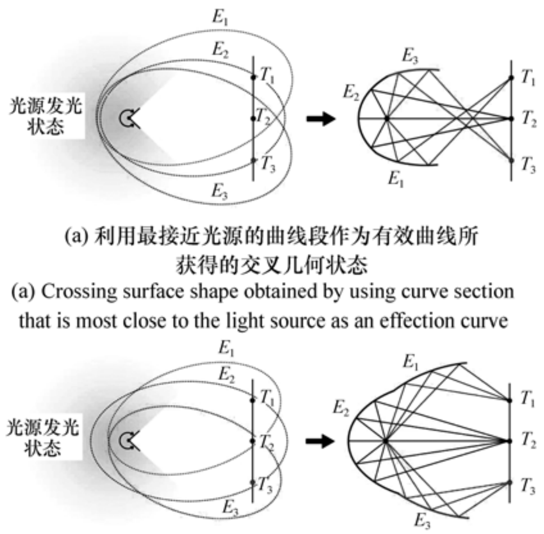


图 3　两个离散点的能量分配变化

Fig. 3　Change of the targets' energy based on the Ellipsoid scaling procession

a_1,直至 $a_1 \ll a_0$,此时所有的光线经反射后全部到达目标点 T_1,此时目标点 T_1 得到光源的全部能量,T_0 得到的能量为 0,在此过程中,只要给定合适的 a_0 和 a_1 值,就可以得到任何我们想要的能量分配比例。定义反射光线的椭圆线段为有效线段,称为支撑椭圆,从而得到一组不连续的曲线段,根据反射规则的不同,有交叉和非交叉两种情况,如图 4 所示。在多个离散目标点的情况下,基础椭圆大小和两焦点均保持不变,保证其他椭圆两焦点位置不变,并调整其长半轴 a 的大小,可以调整各个目标点接收能量的大小,直至满足预定要求,以上两维的情况可以扩展到三维,即为



(a) 利用最接近光源的曲线段作为有效曲线所获得的交叉几何状态

(a) Crossing surface shape obtained by using curve section that is most close to the light source as an effection curve

(b) 利用最远离光源的曲线段作为有效曲线所获得的非交叉几何状态

(b) Crossing surface shape obtained by using curve section that is most far away from that light source as an effection curve

图 4　不同规则下的几何状态

Fig. 4　Shape of the surface based on different rules

Supporting-Ellipsoid 方法的设计思想基础。

3 利用 Supporting-Ellipsoid 方法构造自由曲面反射镜

利用 Supporting-Ellipsoid 方法构造自由曲面反射镜的方法如图5所示，其过程如下：

(1)将目标照明离散化，并根据目标面的辐照分布赋予各离散点以权值；

(2)以 Oliker 的 Supporting-Ellipsoid 方法获得合乎要求的一组曲面片，通过离散点拟合获得光源出射角度与目标点之间的关系；

(3)利用拟合后的映射关系构建自由曲面反射镜。

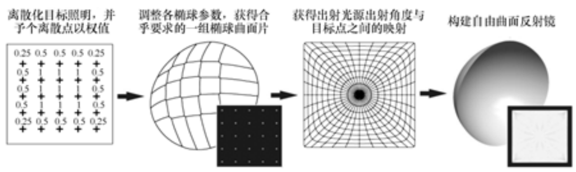


图5 自由曲面反射镜的构造过程

Fig. 5 Generation of a smooth reflector

本文采用短弧氙灯作为光源，以离光源最远的曲面作为有效曲面，构建非交叉形式的系统几何结构，光源与目标面之间的距离 L 选为 600 mm，以获得 400 mm×400 mm 正方形均匀辐照面为例，给出了自由曲面构建的细节和结果，其中短弧氙灯光源的配光曲线如图6所示。

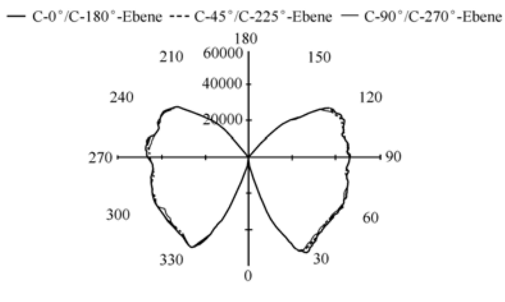


图6 短弧氙灯配光曲线

Fig. 6 Flux distribution of the short arc xenon lamp

3.1 目标面的离散化和映射关系的获取

由于自由曲面的构造需要对有限的离散点进行插值，则目标面上离散的目标点数越多，获得的目标辐照面越接近于理想状态，同时所需的椭球面片亦越多，这就意味着需要调整更多的椭球参数，其计算时间会呈现类似指数关系的增长。由于本文所需为均匀辐照面，采用更多的离散点能够提升目标面的均匀性，但离散点增加到一定程度后，均匀性的提升已不明显，同时会大大延长计算时间。因此，在平衡目标面均匀性和计算时间的基础上，将目标面离散成为 15×15 的离散点，并依据目标辐照分布给各个离散点赋予权值，调整各个椭球的参数，最终获得满足目标离散点能量的一组椭球曲面片，在每个曲面片上选取一特征点作为目标点的对应点，从而可以获得一组光源出射方向与目标点之间的映射。为了便于观察理解，选用 5×5 的离散点，并建立映射关系，如图7所示。

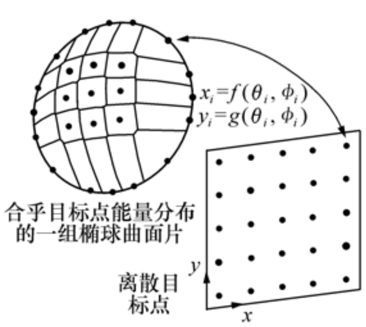


图7 曲面片上点与目标点之间的映射关系

Fig. 7 Mapping retrieval between surface point and objective point

3.2 曲面拟合及其连续性和光滑性的保证

如果完全按照文章3.1节中的映射关系构建自由曲面反射镜，并选取足够多的离散点，则能够得到理想情况下的辐照面，不论辐照面有多么复杂和特殊。但另一方面，据此构建的自由曲面难以满足积分条件[8]，则其势必会存在不连续的情况或者构造偏差，与 L. Wang 和 Y. Ding 构造自由曲面所遇到的问题一样[15-17]，难以满足其光滑性。积分条件以自由曲面法矢形式给出，如式(1)所示。

$$N(\nabla\times N)=0, \quad (1)$$

式中：N 为自由曲面的法矢。

自由曲面的连续性和光滑性是自由曲面加工的基本要求，若自由曲面存在不连续的情况或者构造偏差，会给加工带来极大的困难，甚至使得加

工难以实现。因此，需要对文章 3.1 节中所获取的映射关系进行微调，即对映射关系中目标点位置做细微的调整，在尽可能接近以上获得的映射关系的前提下，使得自由曲面满足积分条件，尽管这种操作会在一定程度上牺牲目标辐照面的精度，以本文的设计来说，则是在一定程度上牺牲了辐照面的均匀性，来保证自由曲面的连续性和光滑性。本文采用了 MATLAB 中 Gridfit[18] 程序来对离散点进行处理，使其满足积分条件。程序主要特点就是在保证映射关系的基础上，采用一个弹性曲面片来对离散点进行拟合和插值，经程序处理后所获得的目标点坐标映射函数关系如图 8 和图 9 所示，根据所得的映射关系，可以得到在相同 θ 和 ϕ 参数下 x 与 y 的对应关系，如图 10 所示。

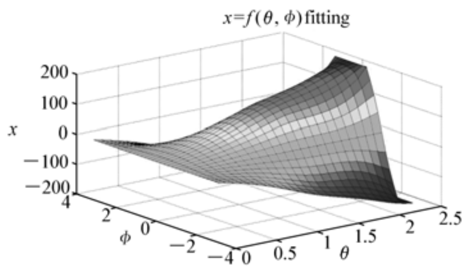


图 8　目标点坐标 x 的拟合函数

Fig. 8　x-fitting function

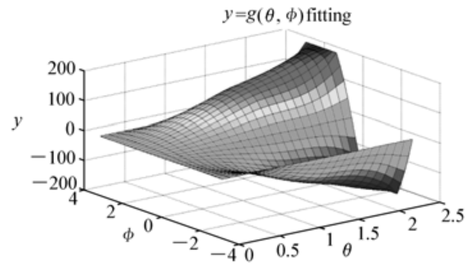


图 9　目标点坐标 y 的拟合函数

Fig. 9　y-fitting function

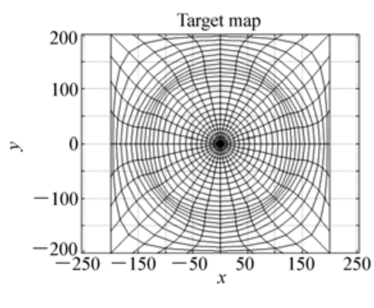


图 10　目标坐标之间的映射关系

Fig. 10　Map generation of objective coordinates

3.3　构建自由曲面反射镜

基于 Gridfit 程序处理后所获得的映射关系，即可构建出光滑的自由曲面。构建自由曲面的方法有很多种，本文所采用的方法就是首先构建自由曲面反射镜的骨架，即曲面上相互交叉的经线和纬线，以此为基础获得自由曲面整体的面片，曲面骨架线的构建流程如图 11 所示。

图 11　计算流程图

Fig. 11　Method for the generation of reflector curves

3.4　系统仿真与结果分析

根据所构建的自由曲面，光源采用短弧氙灯的配光曲线，忽略光源大小，并构建目标面，搭建整体系统，结果如图 12 所示，在 Lighttools 中构建整体系统，并采用蒙特卡洛法追迹 200 万条光线，最终所获得的辐照情况如图 13 所示。

仿真结果表明，在忽略反射损失时，系统整体的效率可以达到 97.54%，辐照不均匀度为 5.26%，准直角为 ±2°，与采用透镜阵列作为匀光系统的太阳模拟器照明系统相比，在参数均满足

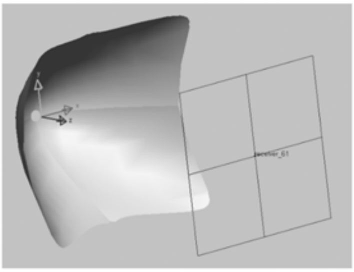


图12 系统整体构建

Fig. 12 Construction of the whole system

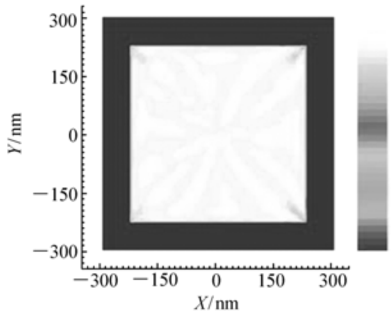


图13 目标辐照

Fig. 13 Target illuminance

一致的情况下,系统效率提升了3倍以上。系统的辐照不均匀度与太阳模拟器照明系统相比稍有不足,原因分析如下:(1)本文的设计兼顾计算时间和均匀性两个方面,没有选取更大数量的离散点;(2)为了保证自由曲面的连续性,映射关系做了微小的调整。

从辐照结果效果图来看,辐照分布结果基本上处于较为均匀的状态,且辐照面遵循着正方形各对称轴的对称性,这与光源发光特性的轴旋转对称性和能量分配特性相吻合。同时由结果图可以看出,在辐照面角落部分的均匀性与面上其余部分相比较差,这是为了保证辐照面形状,严格限制了自由曲面边缘与辐照面边缘的映射关系,这就意味着辐照面角落点成为了一个奇异点,这是角落处均匀性较差的根本性原因。

4 结 论

本文采用了Supporting-Ellipsoid设计方法构建了一个自由曲面反射镜,阐述了这种设计方法的坐标构成和设计思想,并以一个具体实例详细说明了自由曲面构建的整个过程,并采用所构建的自由曲面搭建了一个照明系统。仿真结果表明,在不考虑反射损失的前提下,系统效率达到了97%以上,辐照不均匀度达到了5.26%,各参数与传统太阳模拟器照明系统保持一致的情况下,系统效率提升了3倍以上。由于系统在计算时间和均匀性之间取了一个平衡,没有采用更加庞大的离散点;同时为了满足自由曲面的连续性和光滑性,对映射关系进行了微小的调整,这是本系统均匀性不如传统太阳模拟器照明系统的主要原因。本系统采用的是点光源,在采用扩展光源的情况下,辐照面会呈现怎样的变化,目前尚没有做具体的分析。如何构建扩展光源下的自由曲面是下一步工作的主要方向。

参考文献:

[1] 陈家奇,陈兰峰,王丽,等. 高准直太阳模拟器的设计与仿真[J]. 光机电信息,2011,28(11):68-74.
CHEN J Q,CHEN L F,WANG L,*et al.*. Design and simulation of high-collimating solar simulator[J]. *OME Information*,2011,28(11):68-74. (in Chinese)

[2] 刘洪波,高雁,王丽,等. 高倍聚光太阳模拟器的设计[J]. 中国光学,2011,4(6):594-599.
LIU H B,GAO Y,WANG L,*et al.*. Design of high-flux solar simulator[J]. *China Optics*,2011,4(6):594-599. (in Chinese)

[3] 顾国超,王丽,刘洪波,等. 瞬态热量标定系统的太阳模拟器光学系统设计[J]. 中国光学,2012,5(6):630-638.
GU G CH,WANG L,LIU H B,*et al.*. Optical design of solar simulator used for transient calorimeter calibration system[J]. *China Optics*,2012,5(6):630-638. (in Chinese)

[4] TAI W,SCHWARTE R. Design of an aspherical lens to generate a homogenous irradiance for three-dimensional sensors with a light-emitting diode source[J]. *Appl. Opt.*,2000,39(31):5801-5805.

[5] LIU P,WU R M,ZHENG ZH R,*et al.*. Optimized design of LED freeform lens for uniform circular illumination[J]. *Zhe-*

jiang Univ-Sci C(Computers&Electronics),2012,13(12):929-936.

[6] 陈家奇,顾国超. 利用映射法构造自由曲面反射镜[J]. 长春理工大学学报,2013,36(6):1-5.
CHEN J Q,GU G CH. Using Mapping-method to FormFreeform surface Reflector[J]. *J. Changchun University of Science and Technology*,2013,36(6):1-5. (in Chinese)

[7] SCHRUBEN J S. Formulation of a reflcetor-design problem for a lighting fixture[J]. *Optical Society of America*,1972,62(12):1498-1501.

[8] RIES H. Tailored freeform optical surface[J]. *Opt. Soc. Am. A*,2002,19(3):590-595.

[9] BEN TEZ P,MI ANO J C,BLEN J,*et al*.. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions[J]. *Opt. Eng.*,2004,43(7),1489 1502.

[10] SEROKA S,SERTL S. Modeling of refractive freeform surfaces by a nonlinear PDE for the generation of a given target light distribution[C]. International Light Simulation Symposium,Nuremberg,Germany,7-8 March,2012.

[11] WU R,XU L,LIU P,*et al*.. Freeform illumination design:a nonlinear boundary problem for the elliptic Monge-Amp ere equation[J]. *Optics Letters*,2013,38:229-231.

[12] B UERLE A,BRUNETON A,WESTER R,*et al*.. Algorithm for irradiance tailoring using multiple freeform optical surfaces[J]. *Opt. Express*,2012,20:14477-14485.

[13] FENG Z,HUANG L,JIN G,*et al*.. Designing double freeform optical surfaces for controlling both irradiance and wavefront[J]. *Optics Express*,2013,21(23):28693-28701.

[14] KOCHENGIN S A,OLIKER V I. Determination of reflector surfaces from near-field scattering data II. Numerical solution [J]. *Numerische Mathematik*,1998,79(4):553-568.

[15] WANG L,QIAN K Y,LUO Y. Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance[J]. *Appl. Opt.*,2007,46:3716-3723.

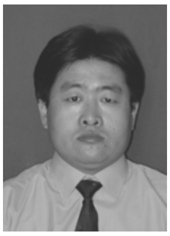
[16] DING Y,LIU X,ZHENG Z R,*et al*.. Freeform LED lens for uniform illumination[J]. *Opt. Express*,2008,16:12958-12966.

[17] 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.
DING Y,ZHENG ZH R,GU P F. Freeform lens design for LED illmination[J]. *Acta Photonica Sinica*,2009,38(6):1486-1490. (in Chinese)

[18] D'ERRICO J. Surface fitting using gridfit[EB/OL]. [2010-06-20]. http://www.mathworks.cn/matlabcentral/fileexchange/8998-surface-fitting-using-gridfit.

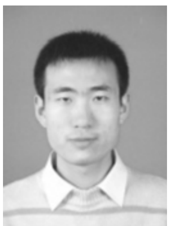
作者简介:

顾国超(1983—),男,吉林长春人,硕士,研究实习员,2007 年于华中科技大学获得学士学位,2010 年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail:ggc-2003@163.com



陈家奇(1971—),男,吉林长春人,副研究员,1994 年于电子科技大学获得学士学位,主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail:jiaqi_chen@163.com

刘洪波(1956—),男,吉林长春人,硕士,研究员,1982 年、1989 年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail:hbliu120@sina.com



高　雁(1982—),男,吉林长春人,硕士,助理研究员,2006 年于东北大学获得学士学位,2008 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事太阳模拟技术方面的研究。E-mail:ynogg@163.com