

采用双自由曲面整形的无掩模光刻照明系统

孟祥翔^{1,2}, 刘伟奇¹, 魏忠伦¹, 柳华¹, 康玉思¹, 冯睿¹, 张大亮¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了实现无掩模光刻系统所需求的矩形准直平顶激光光束照明, 提高照明系统的能量利用率, 提出了一种利用双自由曲面整形的照明系统设计方法。根据光程守恒原理和折射定律, 推导了积分形式的双自由曲面面形方程; 采用数值解法求解积分方程, 分别设计了含有双自由曲面的双透镜整形单元和单透镜整形单元的照明系统, 使用光学设计软件对两种照明系统进行模拟, 得到两种照明系统的照明均匀性在 93% 以上, 能量利用率大于 91%。结果表明, 两种照明系统均能实现无掩模光刻系统的高均匀性、高能量利用率照明。

关键词: 无掩模光刻; 照明系统; 激光光束整形; 矩形平顶光束; 自由曲面

中图分类号: TN305.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1505-06

Maskless lithography illumination system with double freeform surfaces for beam shaping

Meng Xiangxiang^{1,2}, Liu Weiqi¹, Wei Zhonglun¹, Liu Hua¹, Kang Yusi¹, Feng Rui¹, Zhang Daliang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to achieve the illumination of maskless lithography by rectangular collimated flat-top laser beam and improve the illumination efficiency, a design method of the illumination system using double freeform surfaces shaping unit was proposed. Based on the optical path constant condition and Snell's refraction law, the surfaces equations in integral form of the freeform surfaces were derived. The integral equations were solved by numerical calculation. The illumination systems using two-lens shaping unit and single-lens shaping unit which included double freeform surfaces were designed and simulated by optical design software. The simulated results show that the uniformity is over 93% and the illumination efficiency is over 91%. It is illustrated that the two kinds of shaping unit could meet the requirements of the illumination of maskless lithography.

Key words: maskless lithography; illumination system; laser beam shaping; rectangular flat-top beam; freeform surface

收稿日期: 2013-09-07; 修订日期: 2013-10-13

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划(2009AA032701)

作者简介: 孟祥翔(1988-), 男, 博士生, 主要从事无掩模光刻照明和激光光束整形等方面的研究。Email: mengxx326@126.com

导师简介: 刘伟奇(1958-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间目标成像方面的研究。Email: liuwq@ciomp.ac.cn

0 引言

在印刷电路板、平板显示器、微光学器件、投影光刻掩模板等设备制造过程中,无掩模光刻以其方便高效的优点得到了广泛的应用^[1-6]。目前基于光学的无掩模光刻方式有折射/衍射聚焦元件阵列无掩模光刻^[1-4]、数字灰度投影光刻^[5-6]等。其中折射/衍射聚焦元件阵列无掩模光刻中聚焦元件有微透镜^[1]、波带片^[2]、光子筛^[3-4],为提高聚焦元件的聚焦效率,折射/衍射聚焦元件阵列无掩模光刻方式均采用准直平顶光照明;此外数字灰度投影光刻采用准直平顶光照明时可以减小后继投影镜头的物方 NA,降低投影镜头的设计难度;无掩模光刻照明系统的被照面是形状为矩形的空间光调制器,为提高能量利用率,照明光斑应为矩形。

目前,无掩模光刻的研究主要致力于减小光刻特征尺寸和提高生产效率等方面,而无掩模光刻的照明系统仍停留在初始阶段。以激光作为光源的无掩模光刻照明系统^[2-3]中普遍采用开普勒扩束系统扩束并在中间聚焦点处加小孔光阑的方法获得准直平顶照明光束,而且要求出射光束平顶性越高,光阑孔径越小。参考文献[1]中将激光光束入射到散射体上,再经过准直镜准直,得到准直近似平顶光束。以上两种方法都可以看作以损失光能来获得准直均匀光束,能量利用率很低,光束平顶性不易控制。

采用几何光学方法设计出射光束轮廓为圆形的折射式高斯光束平顶器已发展成熟^[7-8]。为了不受出射光束轮廓对称性的限制,Vladimir Oliker^[9]提出了一种采用双自由曲面的双透镜光束整形器设计方法,可在入射面和出射面坐标关系确定的情况下将任意分布的准直入射光束整形为所需分布的准直出射光束。但他给出的自由曲面面形方程由一组 Monge-Ampère 类型的非线性偏微分方程组构成,数值计算和编程非常复杂。

文中介绍了一种采用双自由曲面整形的出射光束为矩形准直平顶激光光束的无掩模光刻照明系统设计方法,给出了积分形式的双自由曲面面形方程,实现了矩形准直平顶光束的输出,简化了面形方程推导过程,降低了数值计算难度,得到了能量利用率高、均匀性好的照明结果。

1 总体结构

折射/衍射聚焦元件阵列无掩模光刻^[1-3]中均采用空间光调制器调制照明光束,空间光调制器的每一个单元控制一条细光束,每一条细光束对应聚焦阵列上的一个聚焦单元,经过聚焦元件阵列聚焦后形成聚焦点阵,空间光调制器的开关配合扫描平台的移动可以形成任意光刻图形。数字灰度投影光刻^[5-6]则利用空间光调制器取代传统光刻中的掩模板作为图形发生器,经过缩倍投影物镜将空间光调制器产生的灰度图形投影在光刻胶上。

目前以上无掩模光刻系统中多数采用美国 TI 公司生产的数字微镜器件(DMD)作为空间光调制器。DMD 的微反射镜可以绕平衡位置正负旋转固定角度,当处在正向倾斜时,处于该像素“开”的状态,当处在负向倾斜时,处于该像素“关”的状态;为使 DMD 的微反射镜处于“开”的状态时,反射的光束沿竖直向下出射,照明光束应当倾斜一定角度入射。如图 1 为无掩模光刻照明系统总体结构示意图,由激光光源出射的光束经过扩束单元扩束准直入射到自由曲面整形单元,自由曲面整形单元将入射光束整形为矩形准直平顶光束,经平面反射镜反射后以一定角度入射到 DMD 上。

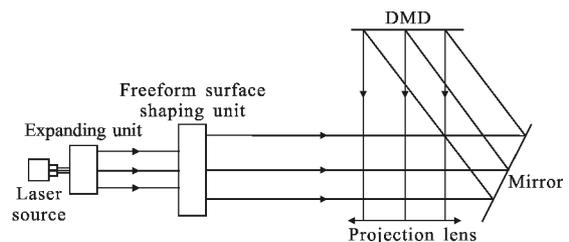


图 1 无掩模光刻照明系统总体结构示意图

Fig.1 Scheme of maskless lithography illumination system

2 整形单元设计原理

双自由曲面整形单元为无掩模光刻照明系统的核心部分,其目标是将准直入射的光束整形为矩形准直平顶出射光束,设计的主要原理及过程是利用矢量形式的折射定律进行光线追迹,代入等光程条件以实现光束准直出射;根据能量守恒原理推导出入射面坐标和出射面坐标的对应关系^[7]以实现入射光束转化为矩形平顶光束。

2.1 理论推导

图 2 为双自由曲面整形单元的设计原理图,从扩束单元出射的激光光束准直入射到自由曲面 S_1 上,自由曲面 S_1 的中心为坐标系 (x, y, z) 的原点 O_1 ,自由曲面 S_2 的中心为坐标系 (X, Y, Z) 的原点 O_2 , O_1 和 O_2 都在光轴上,距离为 d ; 准直入射光线单位矢量 $\vec{l}=(0, 0, 1)$, \vec{l} 与自由曲面 S_1 的交点为 A , A 在坐标系 (x, y, z) 中的坐标为 $(x, y, G(x, y))$, 对应的位置矢量 $\vec{f}=(x, y, G(x, y))$, $G(x, y)$ 为自由曲面 S_1 在 (x, y) 处的矢高, \vec{O} 为经过自由曲面 S_1 后的折射光线单位矢量, 折射光线与自由曲面 S_2 交点为 B , 点 B 在坐标系 (X, Y, Z) 中的坐标为 $(X, Y, F(X, Y))$, $F(X, Y)$ 为自由曲面 S_2 在 (X, Y) 处的矢高, 点 B 在坐标系 (x, y, z) 中对应的位置矢量 $\vec{t}=(X, Y, d+F(X, Y))$, 光线经过自由曲面 S_2 折射后准直出射。

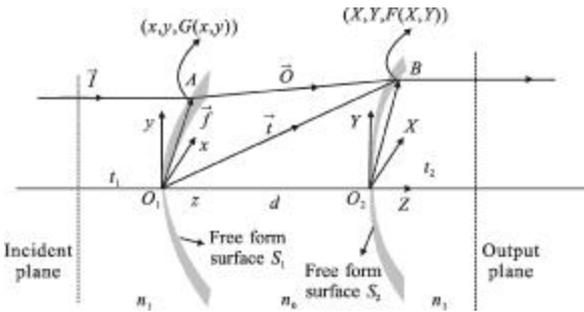


图 2 双自由曲面整形单元设计原理图

Fig.2 Scheme of double freeform surfaces shaping unit

折射光线单位矢量 \vec{O} 可表示为:

$$\vec{O} = \frac{(X-x, Y-y, d+F(X, Y)-G(x, y))}{\sqrt{(X-x)^2+(Y-y)^2+(d+F(X, Y)-G(x, y))^2}} \quad (1)$$

根据微分几何理论, 点 A 处的单位法矢 \vec{N} 可表示为位置矢量 \vec{f} 在 x 和 y 方向切矢的叉乘

$$\vec{N} = \frac{\vec{f}_x \times \vec{f}_y}{|\vec{f}_x \times \vec{f}_y|} = \frac{(-G_x, -G_y, 1)}{\sqrt{1+G_x^2+G_y^2}} \quad (2)$$

$$G(x, y) = \int_0^x \frac{x'-X}{\left(d + \frac{(1-a)d + \sqrt{d^2(a-1)^2 + (a^2-1)(X-x')^2}}{a^2-1} \right) - a \left[(X-x')^2 + \left(d + \frac{(1-a)d + \sqrt{d^2(a-1)^2 + (a^2-1)(X-x')^2}}{a^2-1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} dx' + \int_0^y \frac{y'-Y}{\left(d + \frac{(1-a)d + \sqrt{d^2(a-1)^2 + (a^2-1)[(X-x)^2 + (Y-y')^2]}{a^2-1} \right) - a \left[(X-x)^2 + (Y-y')^2 + \left(d + \frac{(1-a)d + \sqrt{d^2(a-1)^2 + (a^2-1)[(X-x)^2 + (Y-y')^2]}{a^2-1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} dy' \quad (9)$$

式中: \vec{f}_x 和 \vec{f}_y 分别为位置矢量 \vec{f} 在 x 和 y 方向上的切矢, G_x 和 G_y 分别为 $G(x, y)$ 对 x 和 y 的偏导。

矢量形式的折射定律公式^[10]变形可得:

$$[n_0^2 + n_1^2 + 2n_0n_1(\vec{O} \cdot \vec{l})]^{\frac{1}{2}} \vec{N} = n_0\vec{O} - n_1\vec{l} \quad (3)$$

式中: n_1, n_0 分别为折射面两端出入射和出射介质的折射率; 将公式(2), (3)以及 $\vec{l}=(0, 0, 1)$ 带入上式, 整理可得到 $G(x, y)$ 对 x 和 y 的偏导 G_x 和 G_y 的表达式为:

$$G_x' = \frac{-(X-x)}{(d+F(X, Y)-G(x, y)) - a|\vec{t}-\vec{f}|} \quad (4)$$

$$G_y' = \frac{-(Y-y)}{(d+F(X, Y)-G(x, y)) - a|\vec{t}-\vec{f}|} \quad (5)$$

其中:

$$|\vec{t}-\vec{f}| = \sqrt{(X-x)^2+(Y-y)^2+(d+F(X, Y)-G(x, y))^2}, a = n_1/n_0.$$

为确保光束准直输出, 引入等光程条件^[7], 即轴上光线经过双自由曲面整形单元的光程等于任意轴外光线经过双自由曲面整形单元的的光程。轴上光线光程长度为:

$$OPL_{axial} = n_1t_1 + n_0d + n_1t_2 \quad (6)$$

任意轴外光线光程长度为:

$$OPL_{non-axial} = n_1(t_1 + G(x, y)) + n_0|\vec{t}-\vec{f}| + n_1(t_2 - F(X, Y)) \quad (7)$$

由 $OPL_{axial} = OPL_{non-axial}$ 可得:

$$F(X, Y) - G(x, y) = \frac{(1-a)d \pm \sqrt{d^2(a-1)^2 + (a^2-1)[(X-x)^2 + (Y-y)^2]}}{a^2-1} \quad (8)$$

当 $n_1 > n_0$ 时, 公式(8)取正号, 若取 $n_0=1$, 图 2 所示为双透镜自由曲面整形单元; 当 $n_1 < n_0$ 时, 公式(8)取负号, 且要求 $d^2(a-1)^2 + (a^2-1)[(X-x)^2 + (Y-y)^2] \geq 0$, 若取 $n_1=1$, 图 2 所示为单透镜自由曲面整形单元。将公式(8)代入公式(4)、(5), 并利用全微分方程可得 $G(x, y)$ 的方程为:

由公式(8)可得 $F(X, Y)$ 的方程为:

$$F(X, Y) = \frac{(1-a)d \pm \sqrt{d^2(a-1)^2 + (a^2-1)[(X-x)^2 + (Y-y)^2]}}{a^2-1} + G(x, y) \quad (10)$$

公式(9)、(10)使用积分方程的形式建立了光束准直入射且准直出射的双自由曲面模型,数值计算方便。若要实现光强分布的转变,还需根据入射光束光强分布和所需出射光束光强分布求出入射面坐标 (x, y) 和出射面坐标 (X, Y) 之间的关系。

2.2 坐标关系

入射光束和出射光束需遵循能量守恒原理,即入射面一方形面元内包含的能量等于其在出射面对应方形面元内包含的能量:

$$\int_0^x \int_0^y I_{\text{incident}}(x', y') dx dy = \int_0^X \int_0^Y I_{\text{output}}(X', Y') dX dY \quad (11)$$

选取入射光束光强分布 $I_{\text{incident}}(x, y)$ 为基模高斯分布,出射光束光强分布 $I_{\text{output}}(X, Y)$ 为在目标范围内为定值,采用分离变量法^[7],可求出入射面坐标 (x, y) 和出射面坐标 (X, Y) 之间的关系为:

$$X = \frac{X_{\text{max}} \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2} x}{\omega_0}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2} x_{\text{max}}}{\omega_0}\right)} \quad (12)$$

$$Y = \frac{Y_{\text{max}} \operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2} y}{\omega_0}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{\sqrt{2} y_{\text{max}}}{\omega_0}\right)} \quad (13)$$

式中: ω_0 为激光光束束腰; x_{max} 和 y_{max} 分别为入射面上光斑的最大横坐标和最大纵坐标值; X_{max} 和 Y_{max} 分别为出射面上光斑的最大横坐标和最大纵坐标值。通过坐标关系式(12)、(13),由入射面坐标 x 和 y 求出对应的出射面坐标 X 和 Y ,然后一起代入公式(9)、(10),利用数值积分即可求出双自由曲面矢高的数值解。

3 仿真与分析

以法国 oxixus 公司的 LBX-405 单模激光器作为光源,其束腰半径约为 0.43 mm,光束远场发散全角为 0.6 mrad,波长为 405 nm,功率 100 mW。对于理想高斯光束,选取光束横截面积内的光能占总光能比值由下式决定:

$$\frac{P_a}{P} = 1 - \exp\left(-2 \frac{a^2}{\omega_0^2}\right) \quad (14)$$

式中: P_a 为所选光束截面半径为 a 时包含的光能量; P 为光束截面半径趋于无穷大时,理想高斯光束的总能量。文中选择方形光束横截面,大小为 1.72 mm×1.72 mm,根据公式(14)可得在该区域内的光能约占总能量的 99.97%。选取美国 TI 公司生产的分辨率为 1024×768 的 DMD 作为被照空间光调制器, DMD 的单个微反射镜尺寸为 13.68 μm×13.68 μm,微反射镜之间的间隙为 1 μm,被照面积定为 12 mm×16 mm,为减轻整形单元的光线折射负担,在整形单元之前加入扩束单元对光源出射光束进行扩束,放大倍率为 6.977 倍,透镜材料全为 BK7。若 DMD 微反射镜的偏转角度为 ±12°,要使由 DMD 微反射镜处于“开”的状态时,反射的光束沿竖直向下出射,图 1 中平面反射镜应与水平方向成 57°角。采用数值解法求解面形方程,在 x - y 面上将入射光束横截面对应的矩形区域进行离散,离散点为 (x_n, y_n) ,这些点对应的矢高值便是要求的自由曲面 S_1 的面形数据;利用公式(12)、(13)求出出射面上与 (x_n, y_n) 对应的坐标 (X_n, Y_n) ,并将 (x_n, y_n) 和 (X_n, Y_n) 代入公式(9),计算出自由曲面 S_1 的矢高值 $G(x_n, y_n)$ 。

ZEMAX 中的 grid sag 面形是在一个基准面上加入矩形分布的矢高值,然后在离散点之间通过三次样条插值或线性插值计算出的面形。文中数值计算出的面形数据正是自由曲面在各点的矢高值,因此可以用 grid sag 面形对自由曲面进行模拟。grid sag 面形格式要求对输入的面进行单独离散,使用相同方法对出射面进行离散,计算出自由曲面 S_2 的面形数据 $F(X_n, Y_n)$,即可将双自由曲面的面形数据导入 ZEMAX 中进行仿真。

采用以上方法在假设入射光束为准直光束条件下分别设计了含有双自由曲面的双透镜整形单元和单透镜整形单元的无掩模光刻照明系统,在 ZEMAX 非序列中使用蒙特卡罗法加入光源实际发散角进行光线追迹,两种照明系统各单元参数如表 1 所示,模拟结果如图 3 所示。由追迹结果可知光源较小的发散角对照明结果基本没有影响。表 1 中的目标区域照明均匀性 U 用下式定义:

$$U = \left[1 - \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{mean}}}{I_{\text{mean}}}\right] \times 100\% \quad (15)$$

式中: I_{max} 为目标区域内的最大照度值; I_{mean} 为目标区域内的平均照度值。照明效率定义为被照目标区域

所接收到的能量值与光源发出的总能量之比。

表 1 两种照明系统各单元参数

Tab.1 Unit parameters of the two illumination systems

Parameters	Double freeform lens illumination system	Single freeform lens illumination system
Magnification of expanding unit	6.977	6.977
Distance between two freeform surfaces	20 mm	25 mm
Output beam size of shaping unit	12.4 mm×15 mm	12.4 mm×15 mm
Size of the target area	12 mm×16 mm	12 mm×16 mm
Uniformity of the target	93.13%	93.52%
Illumination efficiency	93.18%	91.08%

图 3(a)和图 3(b)分别为双透镜和单透镜整形单元照明系统的光线追迹图,图 3(c)和图 3(d)分别为双透镜和单透镜整形单元照明系统追迹五千万条光线后 DMD 被照面的光斑图,图 3(e)和图 3(f)分别为双透镜和单透镜整形单元照明系统被照面过 DMD 中心两正交方向上的光能分布图。



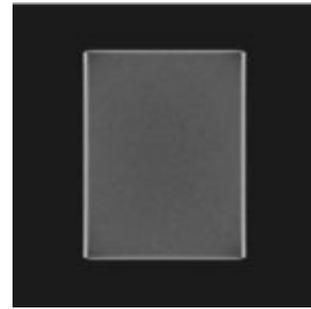
(a) 双透镜整形单元

(a) Two-lens shaping unit



(b) 单透镜整形单元

(b) Single-lens shaping unit



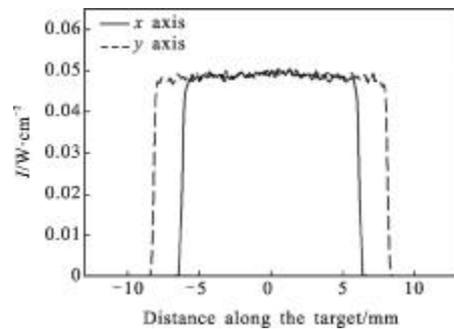
(c) 双透镜整形单元光线追迹结果

(c) Ray tracing result of two-lens shaping unit



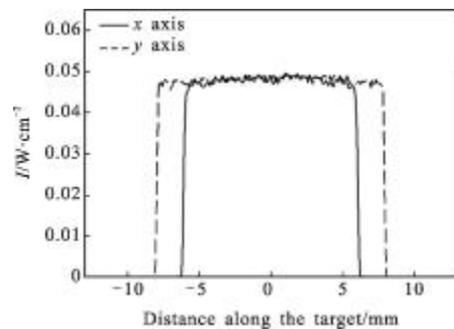
(d) 单透镜整形单元光线追迹结果

(d) Ray tracing result of single-lens shaping unit



(e) 双透镜整形单元目标面光强分布

(e) Intensity distribution on object plane of two-lens shaping unit



(f) 单透镜整形单元目标面光强分布

(f) Intensity distribution on object plane of single-lens shaping unit

图 3 两种整形单元模拟结果

Fig.3 Simulated results of two shaping unit

由以上图表可知,含有双自由曲面的双透镜整形单元和单透镜整形单元均能实现无掩模光刻中高均匀性、高能量利用率的准直矩形光斑照明。在入射光束尺寸和出射光束尺寸一定的情况下,单透镜自由曲面整形单元受限于 $d^2(a-1)^2+(a^2-1)[(X-x)^2+(Y-y)^2] \geq 0$,需增加透镜厚度 d 来满足此条件。 d 的值越大,自由曲面对光线的偏折程度越小,透镜越容易加工。此外,两种系统目标面上的矩形光斑图在四个直角处有不同程度的缺失,这主要由数值计算精度和 ZEMAX 中的 grid sag 面形对离散点的拟合精度所致。

4 结 论

针对无掩模光刻中对矩形准直平顶光束照明的需求,提出了一种基于积分方程的双自由曲面整形单元的设计方法。根据光程守恒原理和折射定律推导了积分形式的双自由曲面面形方程,分别设计了含有双自由曲面的双透镜整形单元和单透镜整形单元的照明系统,经过光学设计软件仿真得到的两种照明系统的矩形光斑照度均匀性大于 93%,能量利用率大于 91%,该照明系统不仅对于提高无掩模光刻的曝光速率有重要意义,还可以用在全息等以激光作为光源的需要矩形平顶光束照明的其他领域。

参考文献:

- [1] Chan Kin Foong, Feng Zhiqiang, Yang Ren, et al. High-resolution maskless lithography [J]. J Microlith Microfab Microsyst, 2003, 2(4): 331-339.
- [2] Rajesh Menon, Amil Patel, Henry I Smith, et al. Maskless optical lithography using MEMs-based spatial-light modulators[C]//SPIE, 2005, 5721: 53-63.
- [3] Rajesh Menon, Dario Gil, George Barbastathis, et al. Photon-sieve lithography[J]. J Opt Soc Am A, 2005, 22(2): 342-345.
- [4] Hou Changlun, Xu Jianfeng, Bai Jian, et al. Binary photon sieve[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 484-505. (in Chinese)
侯昌伦, 徐建锋, 白建, 等. 二元光子筛 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 484-505.
- [5] Lee Dong-Hee. Optical system with 4 μ m resolution for maskless lithography using digital micromirror device [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2010, 14(3): 266-276.
- [6] Jungyu Hur, Manseung Seo. Optical proximity corrections for digital micromirror device-based maskless lithography [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2012, 16(3): 221-227.
- [7] Shealy D L, Chao Shaohua. Geometric optics-based design of laser beam shapers[J]. Opt Eng, 2003, 42(11): 3123-3138.
- [8] Fan Zengming, Li Zhuo, Qian Lixun. Aspherical lens laser beam shaping system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 353-357. (in Chinese)
范增明, 李卓, 钱丽勋. 非球面透镜组激光光束整形系统 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 353-357.
- [9] Vladimir Oliker. On design of free-form refractive beam shapers, sensitivity to figure error, and convexity of lenses[J]. J Opt Soc Am A, 2008, 25(12): 3067-3076.
- [10] Sun Xiuhui, Du Jinglei, Yin Shaoyun, et al. Free-form lens design method based on the modulation of the aspheric inner surface for uniform illumination [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 163-166. (in Chinese)
孙秀辉, 杜惊雷, 尹韶云, 等. 非球面内表面调制的自由曲面配光透镜设计方法 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 163-166.