

引用格式: YU Bai-hua, TIAN Zhi-hui, SU Dong-qi, *et al.* Multi-fields Optimization Iterative Design Method for Freeform Surface in Ultra-short-focus Projection System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(3):0322001

于百华,田志辉,苏东奇,等. 超短焦投影系统中自由曲面的多视场优化迭代设计方法[J].光子学报,2019,48(3):0322001

超短焦投影系统中自由曲面的多视场优化迭代设计方法

于百华^{1,2}, 田志辉^{1,3}, 苏东奇^{1,3}, 高松涛^{1,3}, 隋永新^{1,3}, 杨怀江^{1,3}

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 超精密光学工程研究中心, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 长春国科精密光学技术有限公司, 长春 130033)

摘 要:为解决超短焦投影系统中自由曲面反射镜的设计难题,提出一种适用于大视场成像光学系统的自由曲面设计方法,即多视场优化迭代法.该方法以一个反射平面作为设计起始面,基于多视场下物像的对应关系,并根据反射面的法线方向,通过加权优化迭代计算得到自由曲面反射面的形貌.采用基于该方法得到的自由曲面优化设计了一种折反式超短焦投影物镜,可将 0.65 inch 的数字微镜器件芯片在 230 mm 投影距离处放大为 100 inch 的投影画面.物镜的调制传递函数在 0.43 lp/mm 处优于 0.4,最大畸变优于 1%.该方法简单易行,可为大视场成像系统中自由曲面的设计提供有益参考.

关键词:几何光学;光学设计;设计方法;自由曲面;超短焦投影系统

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20194803.0322001

Multi-fields Optimization Iterative Design Method for Freeform Surface in Ultra-short-focus Projection System

YU Bai-hua^{1,2}, TIAN Zhi-hui^{1,3}, SU Dong-qi^{1,3}, GAO Song-tao^{1,3}, SUI Yong-xin^{1,3}, YANG Huai-jiang^{1,3}

(1 *Engineering Researcher Center of Extreme Precision Optics, 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*)

(3 *Changchun National Extreme Precision Optics CO., Ltd, Changchun 130033, China*)

Abstract: In order to solve the design problem of freeform mirror in ultra-short-focus projection system, a method of freeform surface design for large field of view imaging optical system is proposed, which is called multi-field optimization iteration method. In this method, a reflection plane is used as the design starting surface. Based on the corresponding relationship between objects and images in multi-field, and according to the normal direction vectors of the reflector, the freeform surface is obtained by weighted iterative optimization. Based on the freeform surface obtained by this method, a refractive-reflective combined ultra-short-focus projection objective is designed, which can magnify the 0.65 inch digital micromirror device chip to 100 inch projection screen at the projection distance of 230 mm. The modulation transfer function of the objective system is better than 0.4 at 0.43 lp/mm and the maximum distortion is less than 1%. This method is simple and feasible, which can provide useful reference for the design of freeform surface in large field of view imaging system.

基金项目:国家科技重大专项(No. 2009ZX02205)

第一作者:于百华(1991—),女,博士研究生,主要研究方向为自由曲面光学设计. Email: ybh886655@163.com

导师(通讯作者):杨怀江(1966—),男,研究员,博士,主要研究方向为紫外光刻技术、光学信息融合以及网络信息安全. Email: yanghj@sklao.ac.cn

收稿日期:2018-11-07;录用日期:2019-01-04

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

0322001-1

Key words: Geometric optics; Optical design; Design method; Freeform surfaces; Ultra-short-focus projection system

OCIS Codes: 220.2740; 080.2740; 080.1753; 080.4228

0 引言

近年来,投影系统已经被广泛应用于教育、商务、科研和娱乐等领域.相比于传统的投影物镜或短焦投影物镜^[1-3],超短焦投影物镜^[4-6]能在更短的投影距离实现大屏幕投影.然而,随着超短焦投影物镜焦距的缩短与视场角的增大,由此导致的离轴像差特别是畸变已很难通过传统的球面或非球面进行校正.自由曲面是解决这一问题的有效途径,这是由于自由曲面作为一种非旋转对称的面型,具有更高的设计自由度,能够更好地校正像差、缩小系统体积和提高系统性能^[7-8].因而,自由曲面逐渐被引入到折反式^[9-11]超短焦投影物镜的光学设计中,作为反射镜的面型,用来缩短投影距离和校正畸变.由于超短焦投影物镜视场角很大,且在现有专利库中很难找到包含自由曲面的折反式超短焦投影物镜的初始结构,因此,如何设计出适用于大视场成像系统中的自由曲面是一个亟待解决的关键问题.

近年来,已经发展了一些关于自由曲面的设计方法,例如偏微分方程(Partial Differential Equations, PDEs)方法^[12]、同时多表面(Simultaneous Multiple Surface, SMS)方法^[13-14]和构造迭代(Construction-Iteration, CI)方法^[15]等.PDEs方法对仅考虑单个视场点的成像系统有效.SMS方法虽然能够同时设计多个自由曲面,但是所考虑的视场的数量需要与自由曲面的数目相同,所以在视场点的数量方面仍存在一定的限制.CI方法基于平面通过逐点法^[16]构建初始面,然后采用迭代过程优化自由曲面从而提高系统成像质量,但在现有文献中,未见到将该方法应用于诸如超短焦投影系统的大视场光学成像系统的设计实例.

为了解决超短焦投影系统中自由曲面设计的难题,本文提出了一种适用于大视场成像系统中自由曲面的设计方法.该方法基于多视场下物像的对应关系,采用多视场法线加权综合优化迭代计算自由曲面的形状.设计了超短焦投影物镜中的自由曲面反射镜来验证该方法的有效性.与现有自由曲面设计方法相比,该方法可基于平面同时对所有光线进行计算,且适用于计算大视场成像系统中的自由曲面,有利于提高自由曲面的设计效率.

1 设计方法

在多视场成像系统中,不同视场的光线在光学表面上的足迹区域之间会存在重叠,相邻视场在光学表面上的重叠区域部分需要同时满足不同视场的物像关系,如图1.因此,在多视场成像系统中,设计的自由曲面是对所有视场的成像质量进行综合平衡之后的结果.基于此思想,提出了一种多视场法线加权综合优化迭代的设计方法,根据多个视场的入射光线的单位方向矢量和理想的出射光线方向矢量,通过对不同视场光线的法线方向矢量偏差进行加权优化迭代计算自由曲面的形状.

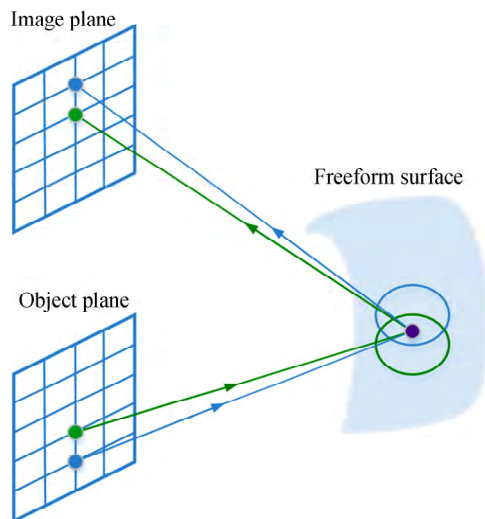


图1 视场重叠问题示意图

Fig.1 The illustration of the field overlapping problem

0322001-2

1.1 设计原理

如图 2,对单一视场内的光线来说,当入射光线及其上一点 P_s 和出射光线上一点 P_e 已知时,如果能够准确计算出入射光线和出射光线在待求光学表面上的交点 P_i ,则可以根据反射定律或折射定律,准确地计算出光线在待求光学表面上该点处的法线 N_i ,即

$$N_i = \frac{r_i' - r_i}{|r_i' - r_i|} \tag{1}$$

$$n'(r_i' \times N_i) = n(r_i \times N_i) \tag{2}$$

式中, $r_i = \overrightarrow{P_s P_i} / |\overrightarrow{P_s P_i}|$ 和 $r_i' = \overrightarrow{P_i P_e} / |\overrightarrow{P_i P_e}|$ 分别是入射光线和出射光线的单位方向矢量.如果入射光线和出射光线在光学表面上的交点不准确,即实际交点 P_{i0} 与待求面上满足物像关系的理想交点 $P_i(x, y, z)$ 之间存在一个偏差 $\Delta T(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$,则交点的坐标变为 $P_{i0}(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$,计算的法线方向矢量 N_{i0} 变为

$$N_{i0} = \frac{r_{i0}' - r_{i0}}{|r_{i0}' - r_{i0}|} \tag{3}$$

$$n'(r_{i0}' \times N_{i0}) = n(r_{i0} \times N_{i0}) \tag{4}$$

当 $\Delta T(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 远小于已知点 P_s 和 P_e 与待求光学表面之间的距离 $|\overrightarrow{P_s P_i}|$ 和 $|\overrightarrow{P_i P_e}|$ 时,则可以将计算的出射光线 $|\overrightarrow{P_{i0} P_e}|$ 近似认为是理想的出射光线 $|\overrightarrow{P_i P_e}|$,即忽略了 $|\overrightarrow{P_{i0} P_i}|$ 距离.一般来说,光学表面的矢高相对于光线的起点或终点到其在光学表面上对应的交点之间的距离是一个小量.因此在法线的计算过程中,通常可忽略矢高,然后根据入射光线在初始平面上的交点 P_{i0} 计算出曲面的法线,并采用数据点和法线同时拟合的方法计算出自由曲面的形状.但忽略矢高会导致法线的计算存在一定的误差,为了缩小矢高和法线的偏差,将计算的自由曲面作为一个新的起始面,重新计算光线与曲面的交点以及交点处的法线方向矢量,从而同时缩小计算的入射光线和出射光线在待求自由曲面上的交点坐标与理想的交点坐标之间的偏差(即忽略的矢高偏差)和法线方向矢量的偏差,进而减小光线在像面的实际像点与理想像点之间的偏差,即减小畸变,如此多次迭代可设计得到理想的自由曲面.

对于多视场的实际成像系统来说,基于上述法线迭代优化的设计思想,同时考虑多个视场的光线.设共考虑 M 个视场,每个视场采样 N 条光线,则总的采样光线数为 $M \times N$,将每条光线在待求面上交点处的理想法线向量 N_i 与实际法线向量的偏差 N_{i0} 记为

$$D_i = (N_i - N_{i0}) \tag{5}$$

则每个视场的法线偏差可表示为

$$\sigma_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |D_1 + D_2 + \dots + D_i + \dots + D_N|^2 \quad k = 1, \dots, M \tag{6}$$

为了使计算的自由曲面能同时对不同视场实现较好的成像质量,对每个视场的光线在未知自由曲面上数据点处的法线矢量偏差进行加权,则所有视场的法线矢量偏差为

$$\sigma = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (\mu_1 \sigma_1 + \mu_2 \sigma_2 + \dots + \mu_k \sigma_k + \dots + \mu_M \sigma_M)^2 \tag{7}$$

将式(7)作为目标函数,进行优化计算自由曲面,然后再将计算的自由曲面作为新的起始面进行迭代,直到满足设置的精度要求或达到一定的迭代次数时,得到期望的自由曲面.

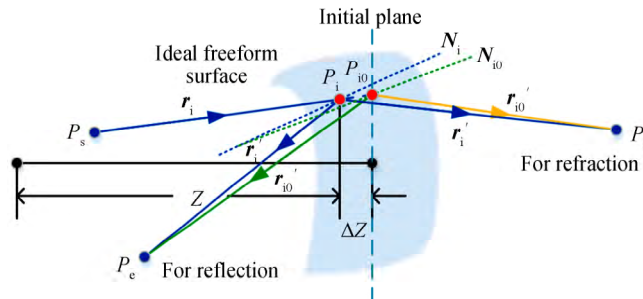


图 2 设计原理示意图

Fig.2 The illustration of the principle of the design method

1.2 设计步骤

如图3, 在开始计算自由曲面之前, 首先建立一个初始系统, 自由曲面的初始面应该近似位于理想的自由曲面所在的位置. 为了计算出能使所有视场都能实现较好成像质量的自由曲面, 需要基于初始系统采样多个视场的光线, 设总共采样的视场数为 M , 每个视场采用 N 条光线. 所有采样光线与待求面相邻的前一面的交点作为光线的起点, 采样光线与待求面相邻的后一面的理想像点作为光线的终点.

当采样光线及其起点终点确定以后, 采用图3方法计算自由曲面, 如图4. 首先, 将入射光线与自由曲面初始平面的交点 P_{i0} 作为未知表面的初始数据点, 光线与初始面交点处的法线为初始实际法线 N_{ir0} , 如图4(a); 然后根据入射光线方向矢量和理想出射光线的方向矢量按照反射定律或折射定律计算光线在曲面数据点处期望的法线方向向量 N_{ie1} , 如图4(b); 接着根据各视场自由曲面的数据点 P_{i0} 和法线方向向量 N_{ie1} , 采用文献[17]的方法拟合得到自由曲面 Freeform1, 根据拟合的自由曲面计算光线与自由曲面的交点 P_{i1} 及交点处的实际法线矢量 N_{ir1} , 如图4(c); 计算各视场实际法线矢量与理想法线矢量的偏差, 再按照各视场法线矢

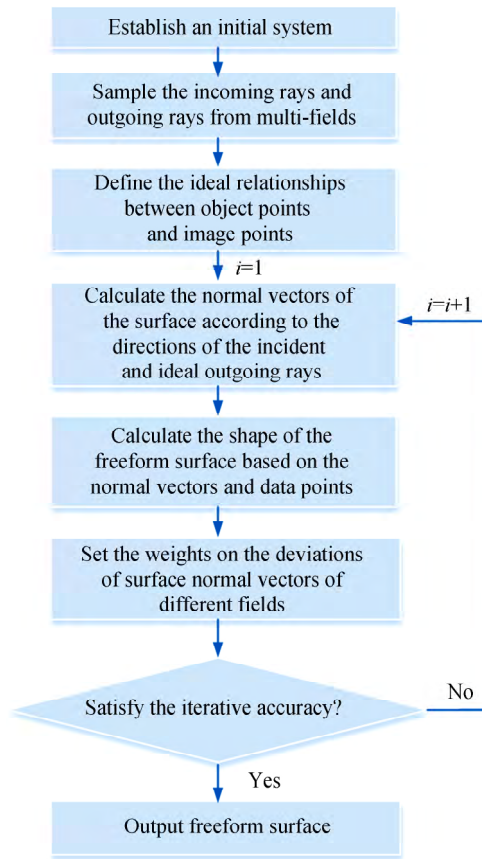
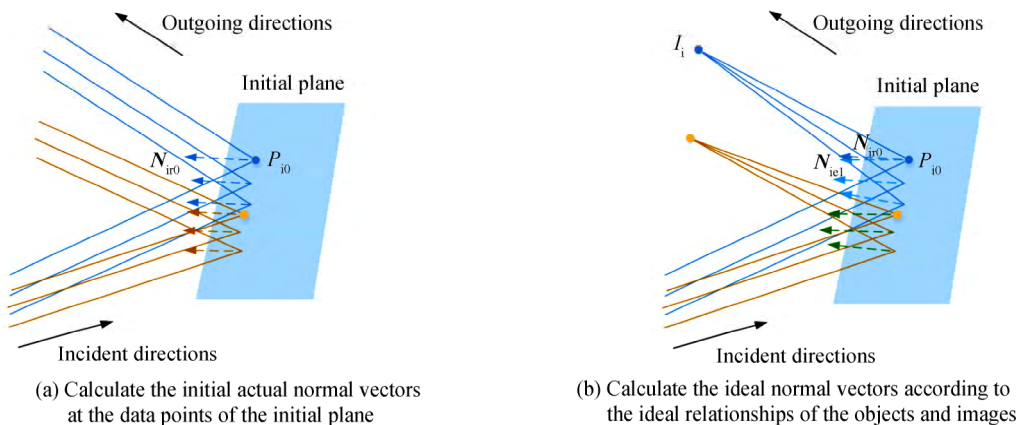


图3 设计方法流程

Fig.3 The flow chart of the design method



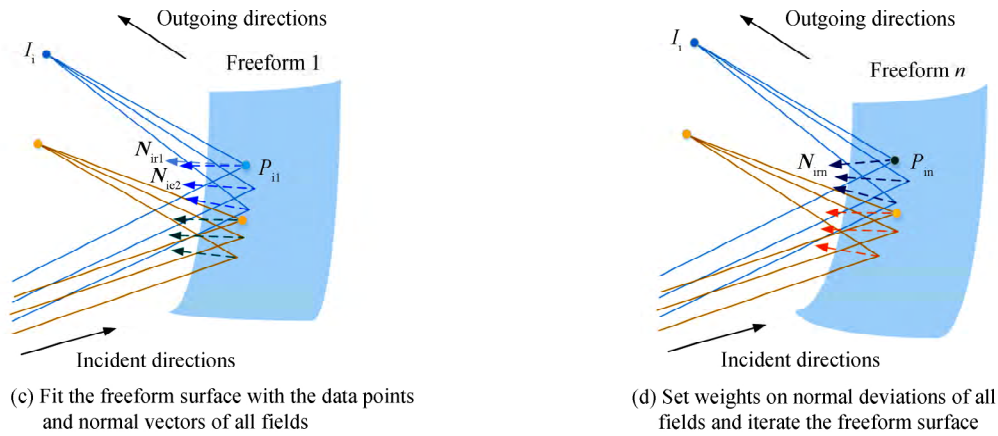


图 4 迭代设计过程示意图

Fig.4 The illustration of the process of iterations

量偏差均方根值的大小,对不同视场的法线偏差设置权重,权重值的大小与法线矢量偏差均方根值的大小成正比.设置初始权重时可将中心视场设置成比其他视场大,在迭代过程中,依据各视场法线偏差情况,更改各视场权重以使各视场法线偏差均逐步收敛,直至满足系统的精度要求,即可得到所需的自由曲面,如图4(d).

2 设计实例

基于第 1 节自由曲面设计方法,设计了一个由折射透镜组和自由曲面反射镜组成的超短焦投影物镜系统.在设计中,将数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)设置为物面,屏幕作为像面,其中 DMD 的尺寸为 0.65 inch,单个像元尺寸为 $7.5 \mu\text{m} \times 7.5 \mu\text{m}$,投影系统的设计参数见表 1.

表 1 超短焦投影系统的参数

Table 1 Specifications of the ultra-short-focus projection system

| Parameter | Specification |
|---------------------|--------------------------------|
| DMD size | 0.65 inch |
| Screen size | 100 inch |
| Projection distance | 230 mm |
| Field of view | 165° |
| F number | 2 |
| Configuration | Refractive-reflective combined |
| Distortion | $<1\%$ |
| MTF | $>0.3@0.43 \text{ lp/mm}$ |

投影镜头的折射部分根据设计指标选择视场角和 F 数比较相近的折射透镜组^[18],然后将焦距缩放到与设计指标一致,将优化后的折射系统作为超短焦投影系统的折射部分的起点,如图 5.将自由曲面反射镜的初始面设为平面,并将其位置设定在期望的自由曲面反射镜的目标位置.

在计算自由曲面之前,通过系统的折射部分校正超短焦投影系统主要的离轴像差和色差.考虑到投影系统关于 YOZ 平面对称,在设计过程中只考虑 X 视场的一半.为了适应矩形屏幕,以矩形网格的方式采样了 51×51 个视场,每个视场采样均匀分布于整个光瞳的 9×9 条光线计算自由曲面.

将采样光线和系统折射部分的最后一个光学表面的交点作为采样光线的起点,将理想的像点作为采样光线的终点.然后确定入射光线和理想出射光线的单位方向矢量,基于曲面法线的迭代优化算法计算自由曲

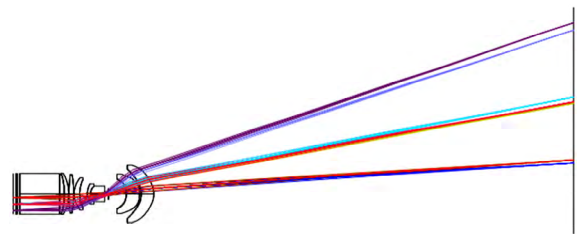


图 5 优化后的投影系统折射部分系统结构

Fig.5 The layout of the refractive part of the projection system after optimization

面.自由曲面采用 XY 多项式表示,即

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=2}^{154} c_i x^m y^n \quad (8)$$

式中, c 是曲面的曲率, k 是圆锥常数, c_i 是 XY 多项式的系数. 经过多次优化迭代之后, 法线方向矢量偏差的均方根值为 $1.055 0 \times 10^{-2}$ 时, 得到了自由曲面如图 6(a) 所示, 自由曲面去除倾斜后的矢高图如图 6(b) 和 6(c) 所示. 计算得到的包含自由曲面反射镜的投影系统的结果如图 7 所示, 从图 7 中可以看出, 所计算的初始系统可近似到达像点. 计算的包含自由曲面的初始系统的畸变如图 8 所示, 最大畸变为 3.36%, 图 8 表明所提方法设计得到的自由曲面对系统的畸变进行了有效地校正.

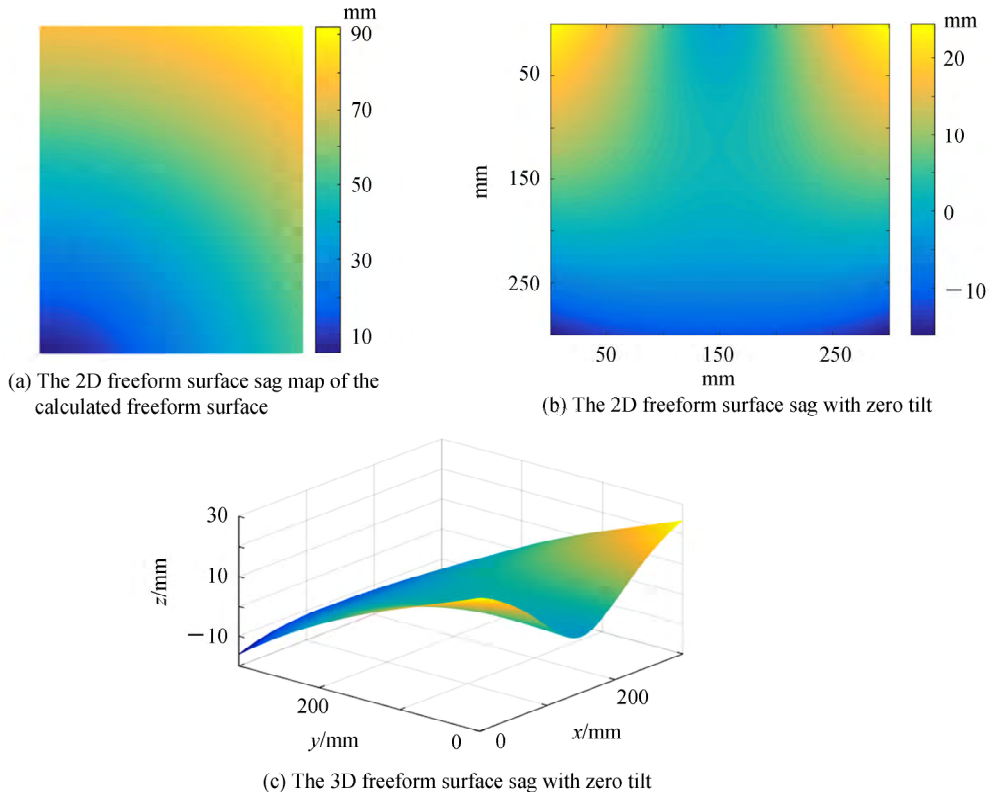


图 6 计算得到的自由曲面矢高

Fig.6 The surface sag map of the calculated freeform surface

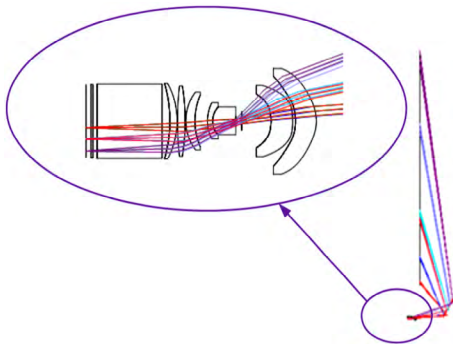


图 7 包含自由曲面的超短焦投影系统初始结构

Fig.7 The layout of the initial ultra-short-focus projection system with the calculated freeform surface

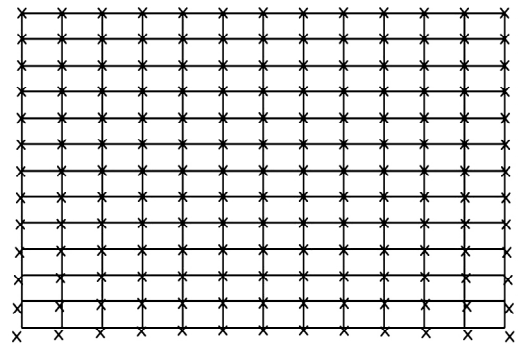


图 8 初始投影系统的畸变网格

Fig.8 The distortion diagram of the initial projection system

为进一步提高成像质量, 将包含计算得到的自由曲面的系统作为光学设计软件进一步优化的起点, 优化得到最终系统的投影距离为 230 mm, 屏幕尺寸为 100 inch, 焦距为 1.60 mm, 系统光学总长为 349.9 mm, 其光路结构如图 9 所示. 最终系统的畸变网格如图 10 所示, 最大畸变为 0.72%. RMS 光斑点列图如图 11(a) 所

示,光学传递函数(Modulation Transfer Function,MTF)如图 11(b)所示,可以看出系统 MTF 在 0.43 lp/mm 处高于 0.4.最终设计得到的系统性能指标均满足设计要求,表明所提设计方法对于大视场成像系统中自由曲面的设计是适用并有效的.

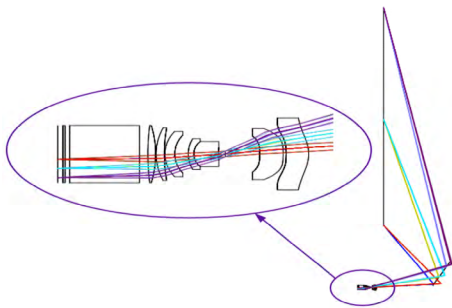


图 9 最终投影系统的结构

Fig.9 The layout of the final projection system

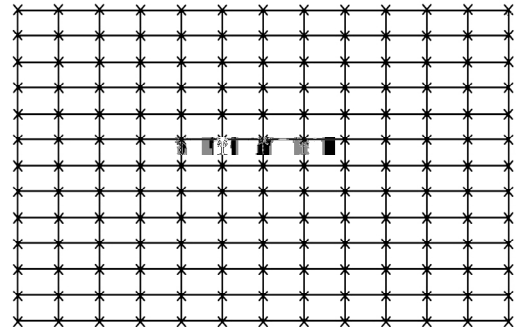


图 10 最终投影系统的畸变网格

Fig.10 The distortion of the final projection system

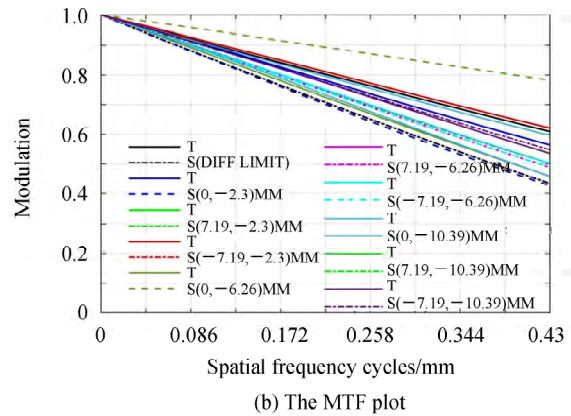
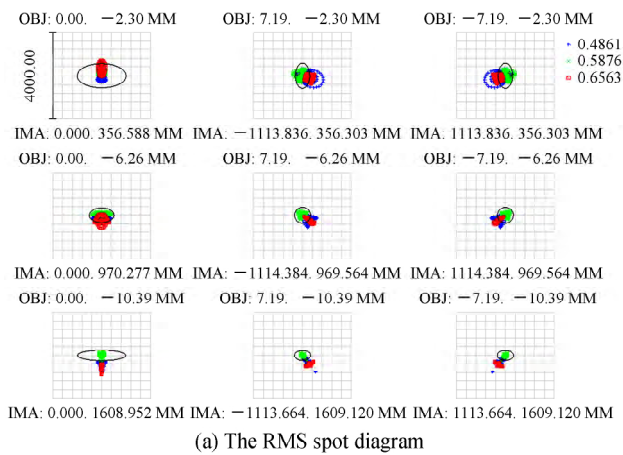


图 11 最终系统的成像质量

Fig.11 The image quality of the final system

3 结论

本文提出了一种成像系统中自由曲面的多视场加权优化迭代的设计方法,该方法以一个反射平面作为设计起始面,基于多视场下物像的对应关系,并根据反射面的法线方向,对不同视场逐步加权优化迭代计算自由曲面的形状.通过对超短焦投影物镜中自由曲面反射镜的设计发现,该方法可通过对不同视场实际法线矢量与理想法线矢量之间的偏差加权的方式来平衡多个视场的成像质量,且可同时对不同视场的大量光线进行计算,应用该方法设计的自由曲面反射镜得到了光学设计软件优化的初始点,最终优化设计的物镜在 230 mm 的投影距离处实现了 100 inch 的投影画面,系统的光学传递函数 MTF 在 0.43 lp/mm 处高于 0.4,最大畸变小于 1%.

参考文献

[1] CHEN Chen, LI Wei-shan, ZHANG Yu, *et al.* Optical design of short digital projection lens[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1855-1859.
 陈琛, 李维善, 张禹, 等. 短焦数字投影镜头的光学设计[J]. *光子学报*, 2011, **40**(12): 1855-1859.
 [2] LI Wei-shan, CHEN Chen, ZHANG Yu, *et al.* Design of short focal digital projection lens based on ZEMAX[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(5): 714-717.
 李维善, 陈琛, 张禹, 等. 基于 ZEMAX 软件的短焦数字投影镜头的设计[J]. *应用光学*, 2010, **31**(5): 714-717.
 [3] KUMLER J J, BAUER M L. Fish-eyelens designs and their relative performance[C]. *International Symposium on Optical Science and Technology*, International Society for Optics and Photonics, 2000:360-369.
 [4] BIAN Yin-xu, WANG Heng, GUO Tian-yi, *et al.* Design of ultra-short throw ratio projection lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(12): 1222002.

- 卞殷旭, 王恒, 郭添翼, 等. 超短投影距的投影物镜设计[J]. 光学学报, 2015, **35**(12): 1222002.
- [5] GAO Yang, CHENG De-wen, XU Chen, *et al.* Design of an ultra-short throw catadioptric projection lens with a freeform mirror[C]. SPIE, 2016, **10154**: 101540S.
- [6] YANG Bo, LU Kan, ZHANG Wei, *et al.* Design of a free-form lens system for short distance projection[C]. SPIE, 2011, **8128**: 81280E.
- [7] LI Xu-yang, NI Dong-wei, YANG Ming-yang, *et al.* Design of large field of view space camera optical system based on freeform surfaces[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(9): 0922003.
李旭阳, 倪栋伟, 杨明洋, 等. 基于自由曲面的大视场空间相机光学系统设计[J]. 光子学报, 2018, **47**(9): 0922003.
- [8] YANG Tong, CHENG De-wen, WANG Yong-tian. Freeform imaging spectrometer design using a point-by-point design method[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(16): 4718-4727.
- [9] SHIKAMA S, SUZUKI H, TERAMOTO K. Optical system of ultra-thin rear projector equipped with refractive-reflective projection optics[C]. The Society for Information Display Symposium Digest, 2002, **46**(2): 1250-1253.
- [10] MATSUMOTO S, AMANO R, OKUDA M, *et al.* Ultra-short throw distance front projector with mirror-lens hybrid projection optical system[C]. Consumer Electronics, 2008, 1-2.
- [11] LI Run-zhi, YANG Bo, ZHANG Jing-jing, *et al.* Design of ultra-short focal length catadioptric projection lens[J]. *Optical Technique*, 2018, **44**(3): 305-309.
李润芝, 杨波, 张婧京, 等. 采用折反式成像的超短焦距投影物镜设计[J]. 光学技术, 2018, **44**(3): 305-309.
- [12] CHENG De-wen, WANG Yong-tian, HUA Hong. Freeform optical system design with differential equations[C]. SPIE, 2010, **7849**: 78490Q.
- [13] MUÑOZA F, BENÍTEZ P, MIÑANO J C. High-order aspherics: The SMS nonimaging design method applied to imaging optics[C]. SPIE, 2008, **7100**: 71000K.
- [14] MIÑANO J C, BENÍTEZ P, LIN W, *et al.* An application of the SMS method for imaging designs[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(26): 24036-24044.
- [15] YANG Tong, ZHU Jun, WU Xiao-fei, *et al.* Direct design of freeform surfaces and freeform imaging systems with a point-by-point three-dimensional construction-iteration method[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(8): 10233-10246.
- [16] YANG Tong, ZHU Jun, HOU Wei, *et al.* Design method of freeform off-axis reflective imaging systems with a direct construction process[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(8): 9193-9205.
- [17] ZHU Jun, WU Xiao-fei, YANG Tong, *et al.* Generating optical freeform surfaces considering both coordinates and normal of discrete data points[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2014, **31**(11): 2401-2408.
- [18] YANG Jian-ming, LIU Wei-qi, MENG Xiang-xiang, *et al.* Design of coaxial short focal length catadioptric projection system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, **30**(5): 864-871.
杨建明, 刘伟奇, 孟祥翔, 等. 同轴超短焦距折反式投影系统设计[J]. 液晶与显示, 2015, **30**(5): 864-871.

Foundation item: The National Science and Technology Major Project of China (No. 2009ZX02205)