

## 基于全局性优化的极简光学系统设计

李江勇<sup>1</sup>, 吴晓琴<sup>1,2</sup>, 刘飞<sup>1,2,3</sup>, 魏雅喆<sup>1</sup>, 邵晓鹏<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;<sup>2</sup>西安市计算成像重点实验室, 陕西 西安 710071;<sup>3</sup>西安电子科技大学前沿交叉研究院, 陕西 西安 710071

**摘要** 针对传统光电成像设备存在体积大、质量重和成本高的问题, 基于计算成像全局性优化的思想将光电成像全链路上的光学系统设计和图像复原两个独立设计的“节点”进行一体化考虑。首先深入分析不同几何光学像差的图像复原难度, 然后通过光学-图像全局性自动优化迭代的方式来设计易于图像复原算法处理的光学传递函数, 最后对全局优化单透镜和三透镜的光学系统输出模糊图与其复原质量进行分析评价。结果表明, 相比于光学输出模糊图, 复原图像的对比度、清晰度和边缘保持系数均有一定提升, 说明利用全局性优化的思想恢复光学模糊图像的思路是可行的, 可将光学像差的校正压力分配给图像复原过程, 降低光学系统的设计压力, 从而简化光学系统结构。

**关键词** 光学设计; 光学系统设计; 全局性优化; 像差校正; 图像复原

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2422004

## Design of Minimalist Optical System Based on Global Optimization

Li Jiangyong<sup>1</sup>, Wu Xiaoqin<sup>1,2</sup>, Liu Fei<sup>1,2,3</sup>, Wei Yazhe<sup>1</sup>, Shao Xiaopeng<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup> School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;<sup>2</sup> Xi'an Key Laboratory of Computational Imaging, Xi'an, Shaanxi 710071, China;<sup>3</sup> Academy of Advanced Interdisciplinary Research, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

**Abstract** In order to solve the problems of large size, heavy quality, and high cost of traditional photoelectric imaging equipment, two independent design "nodes" of optical system design and image restoration on the whole link of photoelectric imaging are integrated based on the idea of global optimization of computational imaging. First, the difficulty of image restoration with different geometric optical aberrations is analyzed. Then, an optical transfer function that is easy to be processed by the image restoration algorithm is designed through the iterative method of optical-image global automatic optimization. Finally, the output blurred image of single lens and three lenses optical system with global optimization and their restoration quality are analyzed and evaluated. The results show that compared with the optical output blurred image, the contrast, sharpness, and edge retention coefficient of the restored image have been improved to a certain extent. The correction pressure is allocated to the image restoration process to reduce the design pressure of the optical system, thereby simplifying the structure of the optical system.

**Key words** optical design; optical system design; global optimization; aberration correction; image restoration

**OCIS codes** 220.4830; 220.1010; 100.2000

收稿日期: 2021-05-18; 修回日期: 2021-06-13; 录用日期: 2021-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(62075175, 62005203)、中央高校基本科研业务费(XJS190502, XJS200505, RW200145)

通信作者: \*xpshao@xidian.edu.cn

## 1 引言

目前,现代光电成像系统对视场、分辨率和工作距离的要求越来越高,而传统宏观成像系统只能通过增大相对孔径和焦距、增加透镜数量以及引入非球面等复杂面型的方式来满足上述要求,但这些方式往往会导致光电成像系统的结构复杂和体积增大。以信息传递为核心的计算成像技术虽然可以凭借图像复原算法来优化光学系统的像差,从而达到降低系统复杂度和减小系统体积的目的,但优化过程中光学系统设计与数字图像处理是两个相互独立的过程,这会造成现代光电成像系统无法实现光学系统设计与数字图像处理的全局性最优方案。

为了实现光学系统设计与数字图像处理的无缝耦合,Dowski 等<sup>[1-3]</sup>提出了一种波前编码技术,该技术成功引入了光学预先编码与图像复原一体化优化的思想。利用波前编码技术对几何像差所造成的图像缺陷进行复原,发现复原图像的质量还有待进一步提高。Robinson 等<sup>[4-5]</sup>提出了光学-图像全局性优化的方法,采用该方法对传统设计单透镜与联合设计单透镜的计算复原技术进行对比研究,Heide 等<sup>[6]</sup>对简单透镜的计算复原技术进行了研究,结果均证明联合设计复原后的图像质量优于复原前。但上述实验仅对单透镜进行研究并未将其引入复杂系统中,所以不能全面反映该方法的有效性。中国科学院相里斌等<sup>[7-9]</sup>提出了像差选择性校正的方法,处理过程中将残余像差的校正问题转化为图像复原的问题,但忽略了光学系统设计与图像复原之间的像差校正互补性,导致图像的复原效果受限。

为了解决上述问题,本文基于计算光学信息传递的思想提出一种系统全局一体化的设计方法。根据光学-图像的像差选择性校正原则,综合考虑光学系统与图像复原算法校正各几何像差的能力,使图像处理算法承担部分光学像差的校正压力。以图像处理算法的复杂度来换取光学系统结构的简化设计,在相同成像质量的前提下,使光学系统达到复杂度降低、体积减小和能量利用率提高的目的。基于全局优化设计的像差互补性校正理论并借助光学设计软件 ZEMAX 的动态数据交换(DDE)功能,利用端对端的图像性能评价指标来实现全局优化设计单透镜、三透镜光学系统,证明基于全局性优化思想的全局优化设计方法是

可行的,为实现高性能 SWaP(Size, Weight, and Power)成像提供了新思路。

## 2 光学成像系统的全局性优化设计

传统的成像过程往往是先进行光学系统的设计再进行图像的分块优化,通过光学设计软件来优化各个透镜的曲率半径、镜片厚度以及透镜材料等多个设计变量,从而达到校正光学系统像差的目的。基于全局性优化的设计方法将光学系统设计与数字图像处理两个过程结合,并且以图像复原算法的复杂度来换取光学系统结构的简化设计,从而达到降低系统复杂度、设计难度以及成本的目的,使极简光学系统可以获得与复杂光学系统相媲美的成像质量。合理设计极简光学系统中的两种变量可以使极简光学系统完美校正像差,两种设计变量与光学像差的关系可表示为

$$E(\Omega_o, \Omega_D) =$$

$$\operatorname{argmin}(S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V, S_{IC}, S_{IIC}), \quad (1)$$

式中: $\Omega_o$  表示光学系统的设计变量; $\Omega_D$  表示图像复原算法的设计变量; $S_I$ 、 $S_{II}$ 、 $S_{III}$ 、 $S_{IV}$ 、 $S_V$ 、 $S_{IC}$  和  $S_{IIC}$  分别表示球差、彗差、像散、场曲、畸变、位置色差和倍率色差。

传统的设计方法依靠光学系统设计来校正像差,从而在探测器像面上获取清晰的成像效果,但会导致光学结构复杂。然而,图像复原作为传统设计中非必要的补充部分,当光学系统存在明显畸变或因运动模糊等外因发生图像退化时,图像复原才成为其必要部分。

全局性优化设计与传统设计的对比如图 1 所示。传统成像方法中光学设计与图像复原相互独立,仅仅依靠光学系统设计来校正像差以获取探测器像面上清晰的成像效果,而图像处理一般作为其非必要的补充部分,只有当成像存在明显畸变或由外因影响而导致图像质量退化时才成为其必要部分。将光学设计与图像复原进行一体化考虑的全局性优化设计方法是使用简单透镜进行成像,不用获取探测器像面上清晰的成像效果,只需获得后续图像复原算法用到的图像信息即可。借助图像复原算法校正光学像差的能力,通过图像复原算法进行处理可以使简单透镜获得与复杂镜头相媲美的成像效果。

### 2.1 理论基础分析

根据像差的几何理论,极简光学系统的  $S_I$ 、 $S_{II}$ 、 $S_{III}$ 、 $S_{IV}$  和  $S_V$  的赛德尔公式<sup>[10]</sup>可表示为

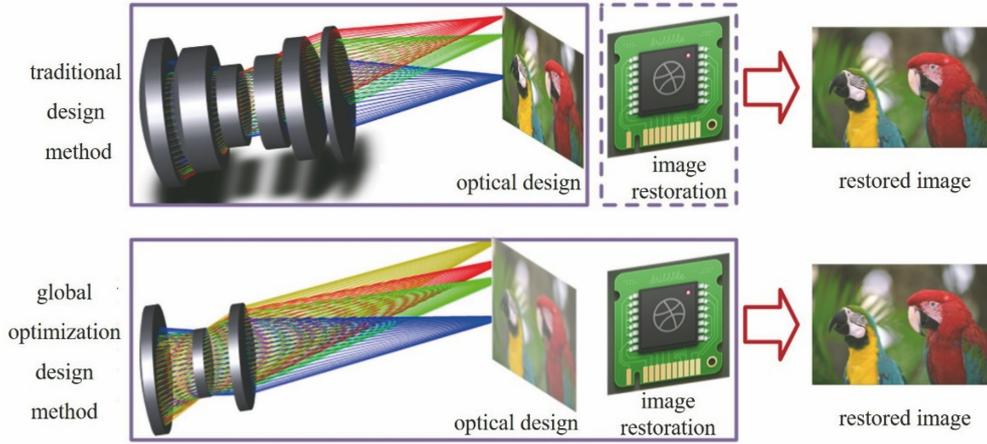


图 1 全局性优化设计与传统设计的对比

Fig. 1 Comparison between global optimization design and traditional design

$$\begin{cases}
 S_{\text{I}} = \frac{1}{2} \sum_i h_i^4 \frac{b_i}{r_i^3} (n_i - n_{i-1}) + h_i^4 K_i^2 \left( \frac{1}{n_i s_i'} - \frac{1}{n_{i-1} s_i} \right) \\
 S_{\text{II}} = \frac{1}{2} \sum_i h_i^4 k_i \frac{b_i}{r_i^3} (n_i - n_{i-1}) + h_i^2 K_i (1 + h_i^2 k_i K_i) \left( \frac{1}{n_i s_i'} - \frac{1}{n_{i-1} s_i} \right) \\
 S_{\text{III}} = \frac{1}{2} \sum_i h_i^4 k_i^2 \frac{b_i}{r_i^3} (n_i - n_{i-1}) + (1 + h_i^2 k_i K_i)^2 \left( \frac{1}{n_i s_i'} - \frac{1}{n_{i-1} s_i} \right) \\
 S_{\text{IV}} = \frac{1}{2} \sum_i h_i^4 k_i^2 \frac{b_i}{r_i^3} (n_i - n_{i-1}) + h_i^2 k_i K_i (2 + h_i^2 k_i K_i) \left( \frac{1}{n_i s_i'} - \frac{1}{n_{i-1} s_i} \right) - K_i \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_{i-1}^2} \right) \\
 S_{\text{V}} = \frac{1}{2} \sum_i h_i^4 k_i^3 \frac{b_i}{r_i^3} (n_i - n_{i-1}) + k_i (1 + h_i^2 k_i K_i) (2 + h_i^2 k_i K_i) \left( \frac{1}{n_i s_i'} - \frac{1}{n_{i-1} s_i} \right) - \frac{1 + h_i^2 k_i K_i}{h_i^2} \left( \frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_{i-1}^2} \right)
 \end{cases}, \quad (2)$$

式中： $i$  表示曲面个数； $h$  表示物方高度； $b$  表示常数； $r$  为曲率半径； $n$  为折射率； $s_i$  表示第  $i$  个曲面顶点到物平面的距离； $s_i'$  表示第  $i$  个曲面顶点到像平面的距离； $k_i$  满足  $H_i = k_i h_i$ ，其中  $h_i$  表示所有面高度  $H_i$  的加和， $H_i$  满足

$$\frac{H_{i+1}}{H_i} = \frac{t_{i+1}}{t_i}, \quad (3)$$

$t$  表示极点入射光瞳的距离， $t'$  表示极点出射光瞳的距离； $K_i$  表示

$$K_i = n_{i-1} \left( \frac{1}{r_i} - \frac{1}{s_i} \right) = n_i \left( \frac{1}{r_i} - \frac{1}{s_i'} \right). \quad (4)$$

$k_{i+1}$  满足

$$k_{i+1} = k_1 + \sum_{j=1}^i \frac{d_j}{n_j h_j h_{j+1}}, \quad (5)$$

式中： $d_i$  表示第  $i$  面和第  $i+1$  面极点之间的距离。

各初级像差对光学系统的影响如表 1 所示，其中  $n$  表示径向顺序， $m$  表示方位角频率。因为像散通常使用子午场曲与弧矢场曲的差值来表示，而且离焦也会影响成像结果，所以表 1 仅用畸变、像散、

慧差、球差和离焦来代表光学系统的单色像差，其中畸变、像散和慧差各有两种表示方式，描述的像差分布本质上并无差别，只是在方位上旋转了一定角度，在实际处理中将两种方式等同对待。当各个单色像差单独存在时，波像差使用 Zernike 多项式加权的形式来表示，可以得到各单色像差单独存在的点扩展函数 (PSF) 和光学调制传递函数 (MTF)。

圆形孔径中各单色像差的波面光程差在笛卡儿坐标系下的表达式为

$$W(x, y) = \sum_{z=0}^{z_{\max}} W_z Z_z(x, y), \quad (6)$$

式中： $(x, y)$  表示光学系统出瞳面坐标； $W(x, y)$  表示各单色像差的出瞳波像差函数； $W_z$  表示均方根波前误差系数，指某一单色像差所引起的波像差大小； $Z_z(x, y)$  为 Zernike 多项式，指某一单色像差的分布形式，其中  $z$  表示 Zernike 项数。

利用不同几何像差的波面光程差来表示其在像面上的点扩展函数，即

表 1 初级像差的 Zernike 多项式、PSF 分布与 MTF 分布

Table 1 Zernike polynomial, PSF distribution and MTF distribution of primary aberratio

Type	(n,m)	Polynomial distribution	PSF distribution	3D MTF distribution	2D MTF distribution
Distortion	(1,1)				
Astigmatism	(2,2)				
Coma	(3,1)				
Spherical	(4,0)				
Defocus	(2,0)				

$$F_{\text{PSF}}(x,y) = \frac{1}{\lambda^2 D^2 A_p} \times \left| \mathcal{F} \left\{ p(x,y) \exp \left[ -i \frac{2\pi}{\lambda} W(x,y) \right] \right\} \right|_{x=f_x \lambda D, y=f_y \lambda D}^2 \quad (7)$$

式中： $\lambda$  表示中心波长； $D$  表示出瞳到像面的距离； $A_p$  表示出瞳面积； $\mathcal{F}$  表示傅里叶变换； $p(x,y)$  表示出瞳函数； $f_x$  和  $f_y$  分别表示横向空间坐标的频域变换与纵向空间坐标的频域变换。

对于成像系统，MTF 可以表征调制度与图像每毫米线对数之间的关系，其能最全面地判断光学系统的性能，MTF 与 PSF 的关系<sup>[11]</sup>如下

$$F_{\text{MTF}}(f_x, f_y) = \left| \frac{\mathcal{F}(F_{\text{PSF}})}{\mathcal{F}(F_{\text{PSF}})|_{f_x=0, f_y=0}} \right| \quad (8)$$

各单色像差的 Zernike 多项式、PSF 分布和 MTF 分布如表 1 所示。从数学角度来考虑，若 Zernike 多项式中高阶项的复杂度不同，则各几何像差过零点的数量以及系统的信息容量也不同，最终导致图像复原算法校正几何像差的效果不同。各单色像差的不同分布情况表明，不同像差下系统对目标物具有不同的调制传递能力，故通过对各单色像差的 MTF 曲线可知图像复原算法校正各几何像差的难易程度。由于畸变、球差和离焦三种单色像差的 MTF 曲线均对称分布，故可选取任意一个截面

的 MTF 曲线来表示该像差的调制传递能力。由于像散和慧差的 MTF 曲线均不对称分布,故需选取这两个单色像差的最优与最差调制传递函数来描述其固有特征。根据  $+x$  轴的逆时针规定,像散选取  $0^\circ$  方向和  $45^\circ$  方向,它们分别代表水平方向与  $45^\circ$  方向的调制传递函数;慧差选取  $0^\circ$  方向和  $90^\circ$  方向,它们分别代表水平方向与垂直方向的调制传递函数<sup>[12]</sup>。这些方向上任一截面的 MTF 曲线均可表示成像系统对不同空间频率信息的调制传递能力;若某一空间频率处的 MTF 值越高、曲线下降越缓慢,则系统的信息容量越大,系统的成像性能越好;若高频信息的损失越小,则图像复原算法复原的图像效果越好。

任一光学系统中,各单色像差的数值是不同的,为了便于比较,对各单色像差进行归一化处理。实验中,光学系统的波长为 570 nm,光瞳直径为 7.5 mm,初级像差的均方根波前误差系数为 0.1。根据(2)~(4)式可以计算出各单色像差的调制传递函数,光学系统中只含某一初级像差的调制传递函数曲线如图 2 所示。从图 2 可以看到,归一化条件下,畸变的 MTF 曲线下降最缓慢;在截止频率处,  $0^\circ$  像散的 MTF 曲线优于  $45^\circ$  像散,  $90^\circ$  慧差的 MTF 曲线优于  $0^\circ$  慧差。图 2 中各几何像差的 MTF 曲线下降程度、截止频率和过零点数量均略有不同,而这些差异与后续图像复原算法复原成像效果的关系密切。由图像复原理论可得<sup>[13]</sup>,MTF 曲线急速下降、截止频率低以及零点数量过多都会使图像复原的难度加大,故不同的单色像差会对成像质量造成不同的影响,使后续图像复原算法的补偿难度也各不相同。

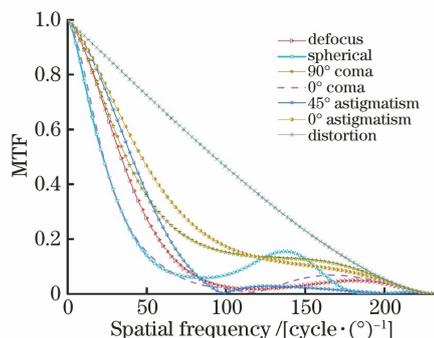


图 2 有像差的调制传递函数曲线

Fig. 2 Modulation transfer function curves with aberrations

## 2.2 全局性优化设计方法

采用全局性优化设计方法来构建极简光学系统。首先利用 ZEMAX 来建立光学系统的初始结构,然后借助 MATLAB 强大的图像处理功能来编写相应的图像复原算法,接着采用该算法对获取的光学模糊图像和 PSF 进行处理,同时采用端对端的评价指标对极简光学系统复原前后的图像进行像质评价。最后在 ZEMAX 软件中建立用户自定义优化操作数(UDOP)以实时反馈迭代优化的 UDOP 数值。当 UDOP 取极小值时,优化迭代过程结束,这标志着全局性优化设计极简光学系统的完成。其中,动态数据的传入传出接口模块是通过 ZEMAX 的动态数据交换功能在 Microsoft Visual Studio 中建立的。

全局性优化设计方法的具体实现过程如图 3 所示,其主要分为三大部分。1) 在 ZEMAX 中建立极简光学系统的初始结构,借助 ZEMAX 强大的优化功能对极简光学系统进行选择性的像差校正;2) 通过动态数据交换功能在 ZEMAX 中来获取极简光学系统的光学模糊图像与 PSF,借助

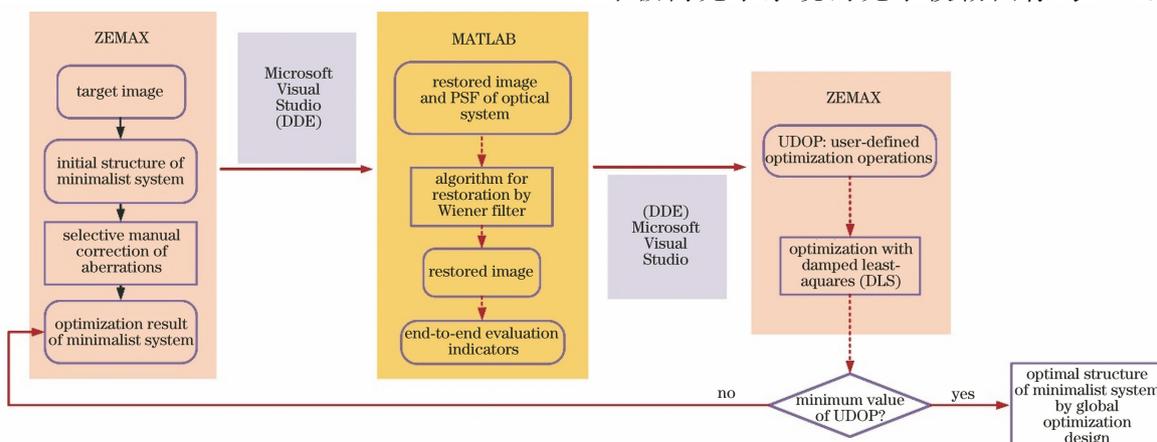


图 3 光学全局性优化的具体实现步骤

Fig. 3 Concrete realization steps of optical global optimization

MATLAB 强大的图像处理功能对所获取的光学模糊图像与 PSF 进行处理,其中维纳滤波处理算法是用来复原图像,同时采用无参考图像质量评价指标与全参考图像质量评价指标对极简光学系统复原前后的图像进行像质评价,将图像质量评价指标值通过 Microsoft Visual Studio 与 ZEMAX 中的动态数据交换接口返还给 ZEMAX 中的 UDOP;3) 使用 ZEMAX 实时接收图像复原后的端对端评价指标,评价指标在 UDOP 操作栏上实时显示,通过迭代优化 UDOP 目标值来获得极简光学系统的最优结果,从而达到极简光学系统各参数联合设计的目的,其中自动优化迭代过程停止的判断标准是 UDOP 取极小值。

此外,由于维纳滤波器是以输出图像与原始图像之间最小均方误差的原则对图像进行复原,可实现复原后图像的对比度与信噪比之间的均衡,能够

获得良好的复原图像,故图像复原算法采用维纳滤波。基于维纳滤波的图像复原算法相对简单,执行该算法的耗时较少,时间复杂度较低;同时该算法占用的内存空间相对较小,其空间复杂度也较低。总体而言,基于维纳滤波的图像复原算法以其较小的复杂度和较好的降噪优势在全局一体化设计中发挥了重要的作用。

### 3 极简光学系统的成像性能分析

为了评价极简光学系统的图像复原质量,采用全局性优化的设计方法对单透镜、三透镜进行优化设计,采用传统设计方式对具有六透镜的双高斯系统进行优化设计。为了方便单透镜、三透镜与六透镜的成像质量对比,通过对已有的光学结构进行优化可以得到具有一致性的各光学系统性能参数,如表 2 所示,各光学系统的布局如图 4 所示。

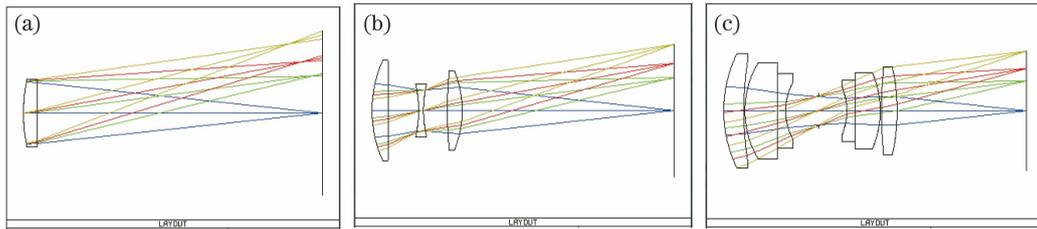


图 4 光学系统在不同透镜下的布局。(a)单透镜;(b)三透镜;(c)六透镜

Fig. 4 Layout of optical system under different lenses. (a) Single lens; (b) three lenses; (c) six lenses

表 2 光学系统的性能参数

Table 2 Performance parameters of optical system

Optical parameter	Value
Wavelength ( $\lambda$ ) /nm	500
Focal length ( $f'$ ) /mm	100
$F$ number	5
Field of view (FOV) /( $^\circ$ )	28

#### 3.1 光学系统的成像质量分析

全局性优化设计单透镜和三透镜的各初级像差与传统设计六透镜的各初级像差如图 5 所示。

从图 5 可以看到,全局性优化设计单透镜的各初级像差数值由大到小分别为像散、场曲、彗差、球差和畸变,其中单透镜的视场参数比一般单透镜较大,子午像点与弧矢像点的不重合会导致像散较明显;全局性优化设计三透镜的各初级像差数值由大到小分别为场曲、像散、球差、彗差和畸变,其中子午像点距离高斯像面比弧矢像点更远,故此处像散值为负;三透镜的各几何像差数值均小于单透镜,表明全局性优化设计三透镜的像差校正完善程度优于全局性优化设计单透镜。

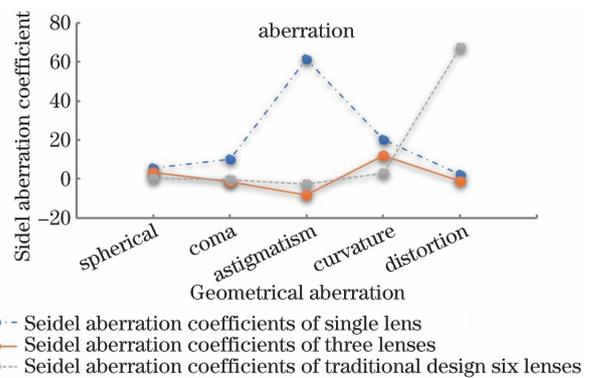


图 5 不同设计方法设计不同透镜后的赛德尔系数

Fig. 5 Seidel coefficients of different lenses designed by different design methods

从图 5 还可以看到,传统设计六透镜的单色像差中除了几何像差畸变以外,其余像差数值均较小,表明传统设计六透镜的像差校正完善程度优于全局性优化设计单透镜、三透镜。总体而言,全局性优化设计三透镜在一定程度上可以媲美传统设计六透镜。值得注意的一点是,传统设计六透镜的畸变值远大于全局性优化设计简单透镜,究其原因则是传

统设计六透镜的双高斯系统经过优化后中心位置处的光阑不完全对称,这会导致系统畸变较大,而全局性优化设计单透镜与三透镜系统的光阑位置与透镜组重合,故畸变较小。

### 3.2 极简光学系统的图像复原

为了验证基于全局性优化极简光学系统的设计方法复原图像的可行性,采用基于全局性优化的设计方法对简单光学系统所输出的模糊图像与图像复原算法复原的最终图像进行对比,并分别从主观与客观方面对成像效果进行评价分析。

#### 3.2.1 全局性优化设计单透镜成像质量的主观评价

全局性优化设计单透镜和三透镜的光学输出模糊图像与图像复原算法复原的图像在视觉上并

无明显差异,对比效果如图 6 和图 7 所示。相比于全局性优化设计单透镜复原图像的效果,全局性优化设计三透镜复原图像的清晰度有较大提升,效果如图 7 所示。图 8(a)和图 8(b)从整体上说明三透镜复原图像的效果比单透镜好,图 8(b)左边鹰嘴和鹰翼上的白色羽毛与图 8(a)相比明显清晰恢复,图 8(b)右边整个鹰翼和右上角头上的白色羽毛与图 8(a)相比可以清晰分辨;图 8(c)的局部细节中三透镜复原的鹰眼图像和鹰嘴图像的清晰度相比于单透镜更高,尤其是鹰嘴的嘴尖轮廓,说明复原图像中的细节信息更多;图 8(d)三透镜复原图像中鹰翼轮廓分明,鹰翼上的羽毛清晰可见,进一步表明全局性优化设计三透镜的复原效果比单透镜好。



图 6 全局性优化设计单透镜的光学模糊图与复原效果对比。(a)光学模糊图像;(b)复原图像

Fig. 6 Comparison of optical blurred image and restoration effect of single lens with global optimization design.

(a) Optical blurred image; (b) restored image

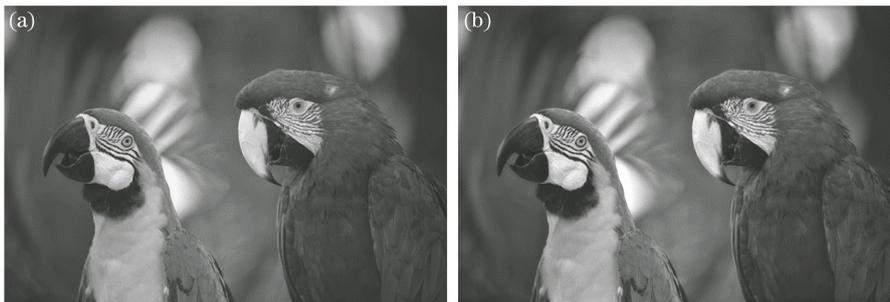


图 7 全局性优化设计三透镜的光学模糊图像与复原效果对比。(a)光学模糊图像;(b)复原图像

Fig. 7 Comparison of optical blurred image and restoration effect of three lenses with global optimization design.

(a) Optical blurred image; (b) restored image

#### 3.2.2 全局性优化设计单透镜成像质量的客观评价

基于全局性优化的极简光学系统在设计过程中为了达到最优化设计的目的,需要寻找能够分析和预测整体成像系统性能的图像质量评价指标。考虑到图像复原算法的性能依赖于对比度与信噪比,因此采用数字图像处理的评价指标推导出全局性优化设计的成像性能评价指标。图像对比度<sup>[14]</sup>和图像

清晰度<sup>[15-16]</sup>作为无参考评价标准,两个指标均与人的主观感受相对应,对比度可以直观反映图像的清晰程度,计算公式为

$$C = \sum_{\delta} \delta(i, j)^2 P_{\delta}(i, j), \quad (9)$$

式中: $(i, j)$ 表示图像中像素点位置; $\delta(i, j)$ 表示四相邻或八相邻像素间的灰度差值, $\delta(i, j) = |i - j|$ ;  $P_{\delta}(i, j)$ 表示相邻像素灰度差值为 $\delta$ 的像素分布概率。

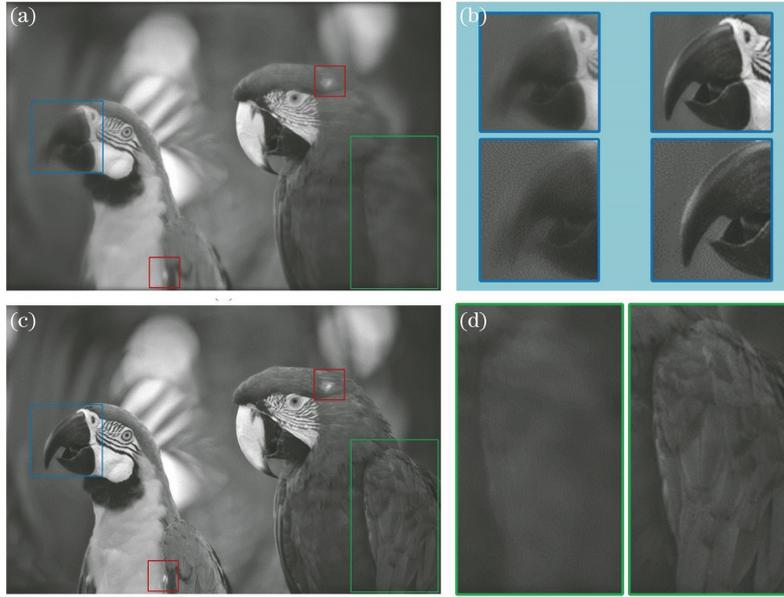


图 8 全局性优化设计不同透镜的复原效果对比及其局部放大图。(a)单透镜的复原图像；  
(b)三透镜的复原图像；(c)复原鹰嘴的效果对比；(d)复原鹰翼的效果对比

Fig. 8 Comparison of restoration effects of different lenses with global optimization design and its partial magnification. (a) Recovered image of single lens; (b) recovered image of three lenses; (c) comparison of effect of reconstructing olecranon; (d) comparison of effect of reconstructing eagle wing

清晰度是指场景中的目标轮廓更分明,本文采用能量梯度函数来表示图像的清晰度,计算公式为

$$D(f) = \sum_y \sum_x [ |f(x+1, y) - f(x, y)|^2 + |f(x, y+1) - f(x, y)|^2 ], \quad (10)$$

式中: $f(x+1, y)$ 表示在 $(x, y)$ 坐标位置下方相邻像素的灰度值; $f(x, y+1)$ 表示点 $(x, y)$ 右方相邻像素的灰度值。

全参考图像质量评价指标包含边缘保持系数(EPI)<sup>[17-18]</sup>与峰值信噪比。EPI是反映图像的边缘保持能力,值越接近于1,表明全局性优化设计复原图像中的细节信息越丰富,计算公式为

$$x_{\text{EPI}} = \frac{\sum_{i=1}^{M \times N} |G'_{R1,i} - G'_{R2,i}|}{\sum_{i=1}^{M \times N} |G_{R1,i} - G_{R2,i}|}, \quad (11)$$

式中: $G_{R1}$ 表示全局性优化设计前复原图像中当前像素左右两边相邻像素的灰度值; $G_{R2}$ 表示全局性优化设计前复原图像中当前像素上下两边相邻像素的灰度值; $G'_{R1}$ 表示全局性优化设计后复原图像中当前像素左右两边相邻像素的灰度值; $G'_{R2}$ 表示全局性优化设计后复原图像中当前像素上下两边相邻像素的灰度值; $M$ 和 $N$ 分别表示图像的高度和宽度。

峰值信噪比通常由均方误差(MSE)来表示,通

过均方误差可以直接衡量全局性优化设计简单光学系统输出模糊图像的复原效果,计算公式为

$$x_{\text{MSE}} = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [f(x, y) - \hat{f}(x, y)]^2}{M \times N}, \quad (12)$$

式中: $\hat{f}(x, y)$ 表示复原后图像在 $(x, y)$ 坐标位置处使MSE最小的图像灰度值。

峰值信噪比可表示为

$$x_{\text{PSNR}} = 10 \lg \frac{L^2}{x_{\text{MSE}}}, \quad (13)$$

式中: $L = 2^o - 1$ ,其中 $o$ 为每像素的比特数,一般取8。

全局性优化设计单透镜的光学输出模糊图像与图像复原算法复原图像的质量评价指标对比如表3所示。从表3可以看到,相比于光学模糊图像,复原图像的对比度提升19%,清晰度提升11%,边缘保持系数提升11%,峰值信噪比提升0.3%,评价指标的提升说明图像复原算法可以明显改善光学模糊图像的成像效果,证明全局性优化设计复原图像的可行性与有效性。

全局性优化设计三透镜的光学输出模糊图像与图像复原算法复原图像的质量评价指标对比如表4所示。从表4可以看到,相比于光学模糊图像,复原图像的对比度提升6%,清晰度提升4%,边缘保持

系数提升 4%，评价指标的提升同时证明全局性优化设计复原图像的可行性与有效性；复原图像质量评价指标的提升程度比单透镜低，原因在于三透镜系统的成像完善程度比单透镜高，图像复原算法的成像效果提升空间有限；相比于光学模糊图像的峰

值信噪比，复原图像降低 0.1%，原因在于光学系统中存在的畸变会造成光学模糊图像与原始目标图像不一致，模糊图像与目标图像在空间位置上存在偏差，而且由于图像复原算法不能完全校正畸变，故造成图像质量的评价结果不准确。

表 3 全局性优化设计单透镜图像复原前后的指标对比

Table 3 Comparison of index before and after restoration of single lens image with global optimization design

Image	None reference index		Full reference index	
	Contrast	Visibility	Peak signal-to-noise ratio	Edge retention factor
Blurred image of optical output	2.1144	0.0065	72.8523	0.3888
Restored image with joint design	2.5198	0.0072	73.0447	0.4298

表 4 全局性优化设计三透镜图像复原前后的指标对比

Table 4 Comparison of index before and after restoration of three lenses image with global optimization design

Image	None reference index		Full reference index	
	Contrast	Visibility	Peak signal-to-noise ratio	Edge retention factor
Blurred image of optical output	9.0273	0.0141	73.2525	0.8531
Restored image with joint design	9.5735	0.0147	73.1467	0.8887

从 ZEMAX 分类数据报告中可以获取极简光学系统的体积和质量，参数如表 5 所示。由第 2.2 节分析可知，全局性优化三透镜的复原效果比单透镜清晰很多，体积比单透镜降低 10%。由第 2.1 节分析可知，全局性设计三透镜的复原效果可媲美传统设计六透镜，也就是说在系统体积相差较小的情况下，采用全局性优化设计系统质量可降低 86%，这在一定程度上证明了极简光学系统的设计可以达到减小系统体积与质量的目的。

表 5 极简光学系统的体积及质量

Table 5 Volume and mass of minimalist optical system

Lens	Volume /cm <sup>3</sup>	Quality /g
Single lens	206.167	3.67
Three lenses	185.787	23.14
Six lenses	171.014	165.71

从 ZEMAX 光学设计软件中可以获取极简光学系统在不同半视场处的透过率，结果如表 6 所示。由第 2.2 节分析可知，全局性优化三透镜的效果比单透镜好，不同半视场处的透镜率均比单透镜高，表明三透镜的能量损耗较单透镜而言较小。由第 2.1 节分析可知，全局性优化三透镜的成像效果可媲美

表 6 极简光学系统在不同半视场下的透过率

Table 6 Transmittance of minimalist optical system at different half-fields

Lens	0°	7°	10°	14°
Single lens	0.91567	0.91564	0.91558	0.91543
Three lenses	0.95804	0.95782	0.95748	0.95646
Six lenses	0.93994	0.94006	0.94011	0.93995

传统设计六透镜。根据表 6 可知，全局性优化三透镜的透过率与传统设计六透镜相比相差较小，但三透镜的透过率均稍微高一点，能量损耗相对较少。综合来说，全局一体化设计方法可在一定程度上达到降低系统能耗的目的。

## 4 结 论

基于计算成像的全局性优化设计方法并借助全局一体优化的思想来校正光学像差，利用 Zernike 像差多项式来研究各光学像差的传递特性，通过对特性曲线变化趋势的分析来建立像差选择性校正的原则，结合计算成像理论建立光学-图像联合自动迭代优化模型，实现对光学成像系统的全局最优设计，使用极简光学系统来实现传统设计复杂光学系统的成像性能。本文利用维纳滤波算法证明了利用全局性优化设计来恢复光学模糊图像是可行的，维纳滤波算法对全局性优化设计单透镜以及三透镜的光学模糊图像的恢复具有一定效果。

所提方法可拓展至红外光学系统的无热化设计中以获取高分辨率的图像，也可延伸到变焦光学系统设计中以简化补偿组设计，达到延拓景深的目的。后续全局性优化设计方法将在光学系统设计、图像处理与评价和图像复原算法等方面进行优化改进，从而推动高性能 SWaP 计算成像技术的进一步发展。

## 参 考 文 献

- [1] Dowski E R, Jr, Cathey W T. Single-lens single-image incoherent passive-ranging systems [J].

- Applied Optics, 1994, 33(29): 6762-6773.
- [2] Kubala K, Dowski E, Cathey W. Reducing complexity in computational imaging systems [J]. Optics Express, 2003, 11(18): 2102-2108.
- [3] Dowski E R, Jr, Kubala K S. Reducing size, weight, and cost in a LWIR imaging system with wavefront coding[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5407: 66-73.
- [4] Robinson D M, Stork D G. Joint design of lens systems and digital image processing[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6342: 63421G.
- [5] Stork D G, Robinson M D. Theoretical foundations for joint digital-optical analysis of electro-optical imaging systems[J]. Applied Optics, 2008, 47(10): B64-B75.
- [6] Heide F, Rouf M, Hullin M B, et al. High-quality computational imaging through simple lenses [J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(5): 149.
- [7] Tan Z, Xiangli B, Lü Q B, et al. Optics/digital processing co-design method based on aberration optional-correcting[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(5): 0511001.  
谭政, 相里斌, 吕群波, 等. 基于像差选择性校正的光学-数字联合设计[J]. 光子学报, 2018, 47(5): 0511001.
- [8] Tan Z, Fang Y, Zhang J G, et al. A design method of reflective digital imaging system: CN104483752B [P]. 2017-02-22.  
谭政, 方煜, 张金刚, 等. 一种反射式数字成像系统的设计方法: CN104483752B[P]. 2017-02-22.
- [9] Zhang J G, Xiangli B, Tan Z, et al. A design method of transmissive digital imaging system: CN105278100B[P]. 2017-08-29.  
张金刚, 相里斌, 谭政, 等. 一种透射式数字成像系统的设计方法: CN105278100B[P]. 2017-08-29.
- [10] Smith W J. Modern optical engineering[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2007.
- [11] Goodman J W. Introduction to Fourier optics [M]. Englewood: Roberts and Company Publishers, 2005.
- [12] Li X D, Xi W S, Hu T L, et al. Research on MTF measurement for thermal imaging systems [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(4): 323-326.  
李旭东, 惠渭生, 胡铁力, 等. 红外热成像系统调制传递函数(MTF)测试研究[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 323-326.
- [13] Trussell H J, Vrhel M J. Fundamentals of digital imaging [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [14] Zhu H. Fundamentals of digital image processing [M]. Beijing: Science Press, 2005.  
朱虹. 数字图像处理基础[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [15] Cohen E, Yitzhaky Y. No-reference assessment of blur and noise impacts on image quality[J]. Signal, Image and Video Processing, 2010, 4(3): 289-302.
- [16] Shen Q. Research and improvement of digital image clarity evaluation function[J]. Microcomputer & Its Applications, 2011, 30(1): 32-33, 37.  
申勤. 数字图像清晰度评价函数的研究与改进[J]. 微型机与应用, 2011, 30(1): 32-33, 37.
- [17] Huang X F, Lin Y S, Chen H J. SAR image denoising using multiple wavelet domains Besov balls projections [J]. Journal of Computer Applications, 2007, 27(7): 1634-1636, 1650.  
黄夏飞, 林岳松, 陈华杰. 基于多小波域 Besov 球映射的 SAR 图像去噪算法[J]. 计算机应用, 2007, 27(7): 1634-1636, 1650.
- [18] Zhang W, Sun R H, Zhang X C. Noise removal of SAR image based on improved wavelet soft-thresholding method [J]. Remote Sensing Information, 2004, 19(4): 4-6.  
张微, 孙蓉桦, 章孝灿. 基于改进的小波软阈值法的 SAR 图像去噪[J]. 遥感信息, 2004, 19(4): 4-6.