

# 适于逆光条件的消鬼像镜头光学设计与实验验证

石荣宝<sup>1,2</sup> 季轶群<sup>1,2</sup> 赵知诚<sup>1,2</sup> 周建康<sup>1,2</sup> 沈为民<sup>1,2</sup> 唐敏学<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 苏州大学物理与光电·能源学部 光电信息科学与工程学院, 江苏 苏州 215006)  
<sup>2</sup> 江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

**摘要** 鬼像是逆光照明下影响光学镜头成像清晰度、对比度的主要原因,为减少其影响,研究典型匹兹万镜头的消鬼像问题。运用近轴矩阵光学理论,详细分析讨论匹兹万镜头的鬼像特性,给出抑制方法。根据使用要求,优化设计和研制了消鬼像光学镜头,像质评价结果表明鬼像能量低且分布均匀,具有接近衍射极限的成像性能。逆光照明下的成像结果表明,研制的镜头具有优异的鬼像抑制性能,验证了设计和分析的正确性。给出的鬼像抑制方法可用于其他光学系统。

**关键词** 光学设计;匹兹万镜头;近轴矩阵光学;鬼像

**中图分类号** TH74 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0922002

## Optical Design and Experimental Verification of a Reduced Ghost Image Lens for Backlight Condition

Shi Rongbao<sup>1,2</sup> Ji Yiqun<sup>1,2</sup> Zhao Zhicheng<sup>1,2</sup> Zhou Jiankang<sup>1,2</sup>  
Shen Weimin<sup>1,2</sup> Tang Minxue<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Optoelectronic Information Science and Engineering Institute, College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Modern Optical Technology of Jiangsu Province, Suzhou, Jiangsu 215006, China

**Abstract** Ghost image is the main factor which degrades imaging definition and contrast of lenses under backlight illumination. In order to avoid its influence, a reduced ghost image lens with typical Petzval lens is studied. With matrix paraxial optical theory, characteristics of the ghost image are discussed and analyzed in detail, and then suppression method is suggested. According to application requirement, a ghost image reduced lens is optimized and developed. Evaluation of the designed lens's image quality shows that the ghost image intensity is low and uniform, but its imaging performance is close to diffraction limit. Imaging result under backlight illumination shows that the developed lens has excellent suppression performance of ghost image. The correctness of design and analysis are verified. The suggested suppression method is potential for reducing ghost image of other optical systems.

**Key words** optical design; Petzval lens; matrix paraxial optics; ghost image

**OCIS codes** 220.4830; 220.2740; 220.3620

## 1 引 言

逆光导致光学镜头产生强的鬼像和眩光,降低景物像的清晰度和对比度,影响目标探测识别<sup>[1]</sup>。近年来国内外积极开展鬼像领域的研究工作<sup>[2-3]</sup>,

2006年,Rogers等<sup>[4]</sup>利用倾斜非球面透镜设计研制了消鬼像的显微光学镜头,降低了85%的偶次反射光强,却带来了加工装调的难度。2009年,El-Maksoud等<sup>[5]</sup>采用近轴光线追迹理论模拟计算了

收稿日期: 2014-02-20; 收到修改稿日期: 2014-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(61078043)、江苏省高校优势学科建设工程(PAPD)

作者简介: 石荣宝(1984—),男,博士研究生,主要从事光学设计与杂散光等方面的研究。

E-mail: rongbaoshi0715@163.com

导师简介: 沈为民(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事光学设计和仪器光学等方面的研究。

E-mail: swm@suda.edu.cn(通信联系人)

两次反射鬼像;2011年,将此方法推广至多次反射鬼像分析中,为分析系统潜在鬼像提供了重要方法<sup>[6]</sup>;2012年,研究了相干与非相干成像系统的鬼像特性,但未给出鬼像抑制方法<sup>[7]</sup>。

本文从近轴矩阵光学理论出发,考虑两次反射光线,分析讨论匹兹万镜头鬼像特性和抑制方法,报道了适用于逆光光照条件的具有低鬼像、高成像性能等特点的匹兹万镜头研制结果。

## 2 鬼像产生机理与矩阵描述

鬼像是由光学元件表面的偶次菲涅尔反射引起<sup>[8]</sup>,如图1所示,其能量由反射次数、表面反射率和透射率决定。当镜头处于强照明光源(如太阳)的逆光照射下,易产生聚焦位置接近像面的鬼像或眩光,造成成像性能下降,其中两次反射路径是主要贡献路径。

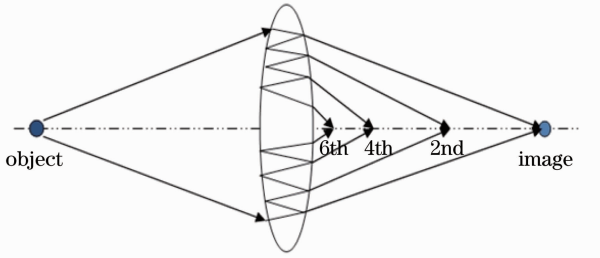


图1 偶次反射路径示意图

Fig.1 Sketch map of even-reflection path

矩阵光学<sup>[9]</sup>是描述光线传输过程的重要理论,可将光线折射、传输、反射等过程利用矩阵直观清晰地表示出来,建立了各物理过程与光学系统参数( $r, l, n, d$ )的关系:

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{n-n_i}{r_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{d_i}{n_i} & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{l_i}{n} & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_4 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{2n_i}{r_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $\mathbf{M}_1$  为光线在第  $i$  表面的折射矩阵,  $\mathbf{M}_2$  为光线在第  $i$  透镜中的过渡矩阵,  $\mathbf{M}_3$  为光线在第  $i$  空气间隔的过渡矩阵,  $\mathbf{M}_4$  为光线在第  $i$  表面的反射矩阵。  $n$  为空气折射率,  $n_i$  为透镜折射率,  $d_i$  为透镜间隔,  $l_i$  为空气间隔。

透射系统光线成像过程表示为折射矩阵、透镜过渡矩阵和空气过渡矩阵的乘积,而鬼像路径除此之外,还应包含反射矩阵。透射系统中某两次反射路径的传输矩阵为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{n_1-n}{r_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{d_1}{n_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{n-n_1}{r_2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{l_1}{n} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{n_2-n}{r_3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{d_2}{n_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{n-n_2}{r_4} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} [\dots] \times \begin{bmatrix} 1 & \frac{2n_{01}}{r_j} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} [\dots] \begin{bmatrix} 1 & -\frac{2n_{02}}{r_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} [\dots] \begin{bmatrix} 1 & \frac{n-n_N}{r_{2N-1}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{d_{N-1}}{n} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{n_N-n}{r_{2N}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中  $n_{01}$  和  $n_{02}$  分别为第一和第二反射面的透镜折射率。其中  $A, B, C, D$  是系统结构参数的函数,当各参数已知时,可求得相应表达式,表示此反射路径的高斯光学特性。光线传输至第  $r_j$  面发生第一次反射,反向传输后至第  $r_i$  面发生第二次反射,最终到达鬼像像面。

## 3 匹兹万镜头鬼像特性

匹兹万镜头的研究中,更多关注其像差特性、成像质量,对影响成像性能的鬼像研究甚少。结合实

际使用要求,采用矩阵光学理论,分析匹兹万镜头的鬼像特性。经典匹兹万镜头由两组分离的正光焦度双胶合透镜组成,因胶合面前、后透镜折射率差异相对较小,菲涅尔反射较弱,分析中将两组双胶合透镜简化为图2所示的两组单透镜元件。图2为间隔为  $l$  的两组正薄透镜组成匹兹万光学系统,其中  $r_1, r_2$  与  $r_3, r_4$  分别为两透镜表面曲率半径,  $n_1$  和  $n_2$  分别为透镜材料折射率。  $l'_f$  为后焦距,  $F'$  为像方焦点,  $S_1$  至  $S_4$  标记各光学表面。当透镜为薄透镜系统时,即  $d_1 = d_2 = 0$ , 且  $n = 1$ , 则成像光线传递矩阵为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{n_1-1}{r_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1-n_1}{r_2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -l & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{n_2-1}{r_3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1-n_2}{r_4} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

简化为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1-l(a-b) & a-b + \frac{[l(a-b)-1](n_2-1)(r_3-r_4)}{r_3 r_4} \\ -l & ld-lc+1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中  $a = \frac{n_1-1}{r_1}, b = \frac{n_1-1}{r_2}, c = \frac{n_2-1}{r_3}, d = \frac{n_2-1}{r_4}$ 。

光线经两次反射后,鬼像光线传递矩阵为

$$\mathbf{T}' = \begin{bmatrix} 1 & \frac{n_1-1}{r_1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} [\dots] \begin{bmatrix} 1 & \frac{2n_{01}}{r_j} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} [\dots] \begin{bmatrix} 1 & -\frac{2n_{02}}{r_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} [\dots] \begin{bmatrix} 1 & \frac{1-n_2}{r_4} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

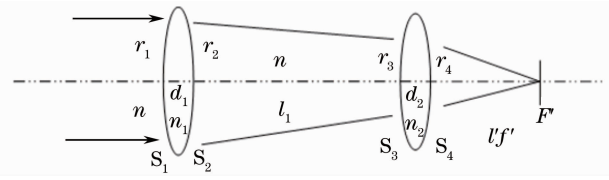


图2 匹兹万系统

Fig.2 Layout of Petzval system

图2所示的匹兹万系统中存在6条两次反射路径,结合(8)式可计算各路径传递矩阵。以  $S_4$  与  $S_1$  的两次反射路径为例,其传递矩阵为

$$\mathbf{T}_{4-1} = \begin{vmatrix} E & F \\ G & H \end{vmatrix}, \quad (9)$$

式中  $E, F, G, H$  均为结构参数的函数:

$$\begin{cases} E = (r_2 r_4 - l r_4 + l n_1 r_4) / r_2 r_4 + [l(4n_2 l^2 n_1^2 - 4n_2 l^2 n_1 + 4n_2 r_2 l n_1 + r_2 r_4 n_1 + r_2 r_4)] / r_1 r_2 r_4 - 4l^3 n_1 n_2 r_2 (n_1 - 1) / r_1^2 r_2 r_4 \\ F = (-4l^3 n_1^2 n_2^2 r_1 + 4r_2 l^3 n_1^2 n_2^2 + 4l^3 n_1^2 n_2 r_1 - 4r_2 l^3 n_1^2 n_2 + 4l^3 n_1 n_2^2 r_1 - 4r_2 l^3 n_1 n_2^2 - 4l^3 n_1 n_2 r_1 + 4r_2 l^3 n_1 n_2 - 4l^2 n_1^2 n_2 r_1 r_4 + 4r_2 l^2 n_1^2 n_2 r_4 - 4r_2 l^2 n_1 n_2^2 r_1 + 4l^2 n_1 n_2 r_1 r_4 + 4r_2 l^2 n_1 n_2 r_1 - 4r_2 l^2 n_1 n_2 r_4 + l n_1 n_2 r_1^2 r_4 - 7r_2 l n_1 n_2 r_1 r_4 + l n_1 r_1^2 r_4 + r_2 l n_1 r_1 r_4 - l n_2 r_1^2 r_4 + r_2 l n_2 r_1 r_4 - l r_1^2 r_4 + r_2 l r_1 r_4 - n_1 r_1^2 r_4^2 - r_2 n_1 r_1 r_4^2 + r_2 n_2 r_1^2 r_4 + r_1^2 r_4^2 + r_2 r_1^2 r_4 - r_2 r_1 r_4^2) / r_1^2 r_2 r_4^2 + (4l^3 n_1^2 n_2^2 r_1 r_4 - 4r_2 l^3 n_1^2 n_2^2 r_4 - 4l^3 n_1^2 n_2 r_1 r_4 + 4r_2 l^3 n_1^2 n_2 r_4 - 4l^3 n_1 n_2^2 r_1 r_4 + 4r_2 l^3 n_1 n_2^2 r_4 + 4l^3 n_1 n_2 r_1 r_4 - 4r_2 l^3 n_1 n_2 r_4 + 4r_2 l^2 n_1 n_2^2 r_1 r_4 - 4r_2 l^2 n_1 n_2 r_1 r_4 + l n_1 n_2 r_1^2 r_4 + r_2 l n_1 n_2 r_1 r_4 - l n_1 r_1^2 r_4 - r_2 l n_1 r_1 r_4 - l n_2 r_1^2 r_4 + r_2 l n_2 r_1 r_4 + l r_1^2 r_4^2 - r_2 l r_1 r_4^2 + r_2 n_2 r_1^2 r_4 - r_2 r_1^2 r_4^2) / r_1^2 r_2 r_3 r_4^2 \\ G = -l - (4l^3 n_1 n_2) / r_1 r_4 \\ H = 4l^2 n_1 n_2 (l r_4 - l r_3 + r_3 r_4 + l n_2 r_3 - l n_2 r_4) / r_1 r_3 r_4^2 - (l r_3 - l r_4 - r_3 r_4 + l n_2 r_3 + l n_2 r_4) / r_3 r_4 \end{cases} \quad (10)$$

由于成像系统与两次反射鬼像系统后焦距 ( $l'_f$ 、 $l'_g$ ) 的参考面均为最后一个光学表面,故后焦距之间的差值  $\Delta$ ,即为鬼像聚焦位置与近轴像面的距离。为避免鬼像聚焦于像面, $\Delta$ 需大于焦深。

当物距无限远时,成像系统和两次反射鬼像系统的后焦距的计算公式:

$$\begin{cases} l'_f = \frac{D_1 n}{B_1} \\ l'_g = \frac{F n}{H} \end{cases}. \quad (11)$$

可见光系统中,正透镜常采用冕牌玻璃,其折射

率范围为 1.5~1.7,而火石玻璃的折射率范围约为 1.6~1.8,分析中,选择透镜材料折射率分别为 1.6 和 1.7,即  $n_1 = 1.6, n_2 = 1.7$ 。根据(11)式,分别计算后焦距  $l'_f$  和  $l'_g$ ,于是鬼像聚焦位置与近轴像面的距离  $\Delta$  为

$$\Delta = |l'_f - l'_g|. \quad (12)$$

匹兹万镜头光焦度分配方程为

$$\begin{cases} h_1 \varphi_1 + h_2 \varphi_1 = 1 \\ h_2 = h_1 - l \varphi_1 \\ K = h_1 \varphi_1 / (h_2 \varphi_2) \end{cases}, \quad (13)$$

其中两组透镜均为正透镜,即光焦度  $\varphi_1 > 0$  和  $\varphi_2 > 0$ 。 $\varphi_1, \varphi_2$  为前后两组光焦度,  $h_1, h_2$  为第一近轴光线在前后两组的光线高度,  $l$  为前后组之间的间隔,  $K$  为光焦度的分配比。当两组光焦度平均分配时 ( $K = 1$ ), 系统像差系数比较小; 考虑光学系统结构长度尽量短, 归一化间隔  $l$  选择为  $0.7^{[10]}$ , 由此可计算得到光焦度  $\varphi_1, \varphi_2$ , 得到曲率半径的相互关系, 各矩阵元素  $A_1, B_1, C_1, D_1, E, F, G, H$  可简化为两个曲率半径的函数, 如用  $r_2$  和  $r_4$  表示。

假设系统中心波长  $0.8 \mu\text{m}$ , 相对孔径为 3, 焦距  $100 \text{ mm}$ , 于是焦深为  $28.8 \mu\text{m}$ 。取  $l = 30 \text{ mm}$  时,  $\Delta$  与焦深 ( $\delta$ ) 的差值  $\delta'$  为

$$\delta' = \Delta - \delta = |l'_f - l'_g| - 0.0288. \quad (14)$$

图 3 绘出  $\delta'$  与曲率半径  $r_2, r_4$  的关系曲线。其中横坐标分别为前组透镜曲率半径  $r_2$  和后组透镜曲率半径  $r_4$ , 纵坐标为  $\Delta$  (鬼像聚焦点与近轴像面的距离) 和  $\delta$  的差值  $\delta'$ 。当  $\delta'$  大于零时, 表明鬼像聚焦点的位置位于成像系统的焦深之外, 像面不会产生明亮鬼像; 当  $\delta'$  小于零时, 表明鬼像聚焦点的位置位于焦深之内, 像面形成明亮鬼像。从图 3 和计算得到的数值中可见, 大部分的曲率半径组合  $[r_2, r_4]$ , 使得差值  $\delta'$  大于零。但也存在曲率半径组合  $[r_2, r_4]$ , 如

$r_2 = 405 \text{ mm}, r_4 = 175 \text{ mm}$  时  $\delta' = -0.002 \text{ mm}$ , 表明  $S_4 - S_1$  两次反射路径的鬼像聚焦位置在焦深内, 靠近像面。

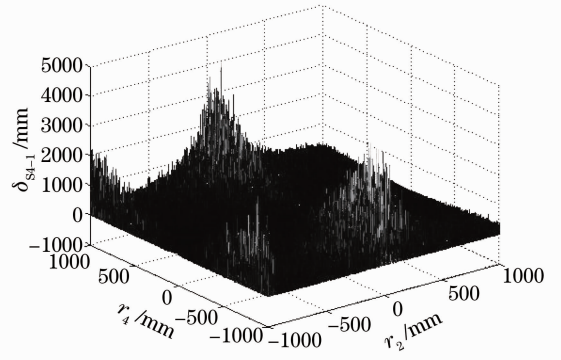


图 3  $\delta'_{S_1-1}$  随曲率半径  $r_2, r_4$  的变化

Fig. 3  $\delta'_{S_1-1}$  versus curvature radius  $r_2$  and  $r_4$

用同样的方法可得到其余两次反射光线的  $\delta'$  值与曲率半径的关系, 分别如图 4(a)~(e) 所示。分析可知, 系统中  $S_2 - S_1$  与  $S_4 - S_3$  的两次反射光线聚焦位置远离像面, 均不会在像面处形成像点,  $S_3 - S_1, S_3 - S_2$  和  $S_4 - S_2$  的两次反射路径中, 存在曲率半径组合  $[r_2, r_4]$ , 使得反射光线会在像面上形成聚焦像点或弥散斑。为抑制此鬼像, 应选取使  $\delta'$  大于零的曲率半径组合。

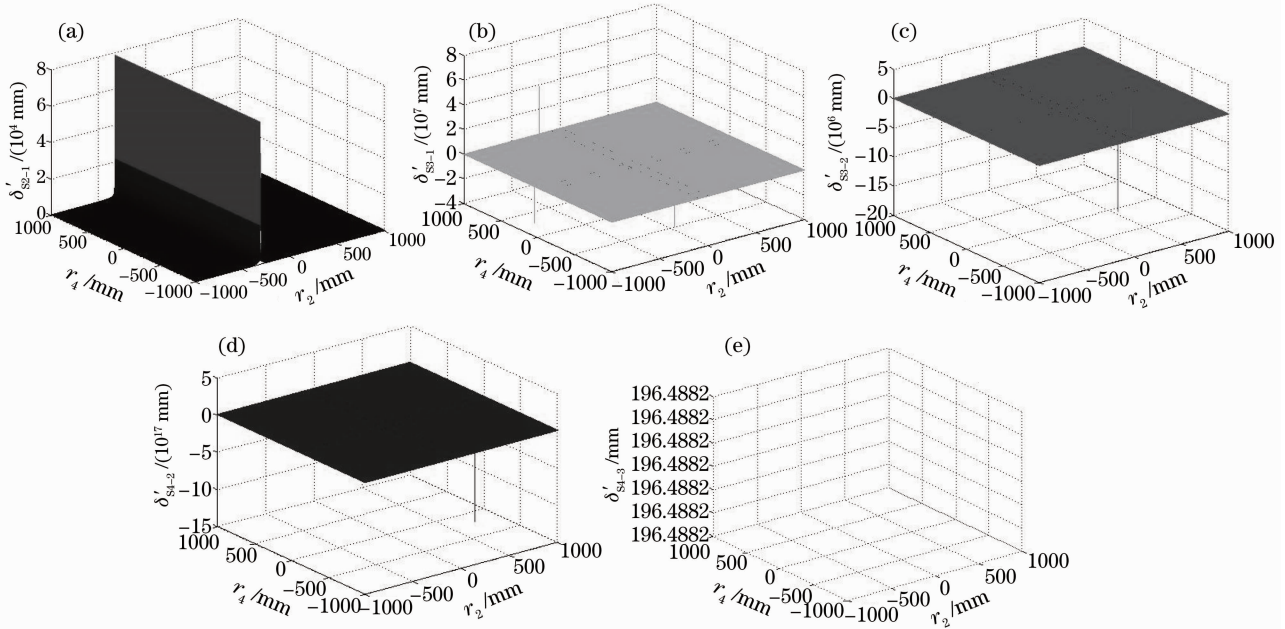


图 4 (a)  $\delta'_{S_2-1}$  随曲率半径  $r_2, r_4$  的变化; (b)  $\delta'_{S_3-1}$  随曲率半径  $r_2, r_4$  的变化; (c)  $\delta'_{S_3-2}$  随曲率半径  $r_2, r_4$  的变化; (d)  $\delta'_{S_4-2}$  随曲率半径  $r_2, r_4$  的变化; (e)  $\delta'_{S_4-3}$  随曲率半径  $r_2, r_4$  的变化

Fig. 4 (a)  $\delta'_{S_2-1}$  versus curvature radius  $r_2$  and  $r_4$ ; (b)  $\delta'_{S_3-1}$  versus curvature radius  $r_2$  and  $r_4$ ; (c)  $\delta'_{S_3-2}$  versus curvature radius  $r_2$  and  $r_4$ ; (d)  $\delta'_{S_4-2}$  versus curvature radius  $r_2$  and  $r_4$ ; (e)  $\delta'_{S_4-3}$  versus curvature radius  $r_2$  and  $r_4$

在非近轴区域,考虑像散和场曲,子午和弧矢鬼像像面为抛物线型<sup>[6]</sup>,若其与成像像面相交,即产生聚焦鬼像,如图 5 所示。这样可计算相应交点的位置 $[\Delta_1, h_1]$ 和 $[\Delta_2, h_2]$ ,其中 $\Delta_1$ 和 $\Delta_2$ 为子午和弧矢鬼像在成像像面的交点分别与鬼像近轴像面的距

离,即近轴分析中鬼像聚焦点与像面距离 $\Delta$ ;  $h_1$ 和 $h_2$ 分别为交点距离光轴的高度。为避免像面产生聚焦鬼像,一方面要求 $\Delta$ 大于焦深,另一方面要求高度 $h_1$ 和 $h_2$ 均大于像高一半。

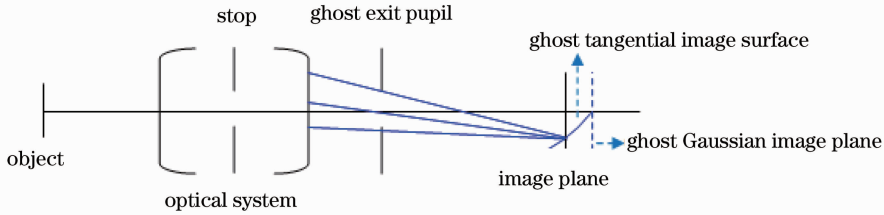


图 5 子午鬼像像面与成像像面交点

Fig. 5 Ghost tangential image surface intersects the image plane

匹兹万镜头中,常在靠近像面附近引入光焦度接近零的负透镜校正场曲。鬼像研究表明,其两次反射光线聚焦位置取决于透镜折射率,与透镜光焦度成反比<sup>[11]</sup>。由于其光焦度很小,导致聚焦位置远离像面,不会产生严重鬼像影响。

鬼像聚焦位置和鬼像聚焦点的高度,合理优化各元件曲率半径,得到的光学系统如图 6 所示,由两组双胶合镜和一组单负透镜组成,光焦度按正、正、负分配。两组正光焦度组单独校正轴向色差和倍率色差,共同校正球差、彗差和像散。负透镜校正匹兹万场曲,通过优化曲率校正畸变。孔径光阑置于第一个双胶合镜组前,一方面约束光束孔径,另一方面便于电控光阑安装。图 6 中像面前的平板为探测器保护窗口。

#### 4 消鬼像匹兹万镜头设计

结合应用要求,研究的光学镜头工作于 $0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ ,焦距为 $80 \text{ mm}$ ,相对孔径为 $3$ ,全视场角为 $6.5^\circ$ ,要求系统逆光照射下清晰成像。设计中约束

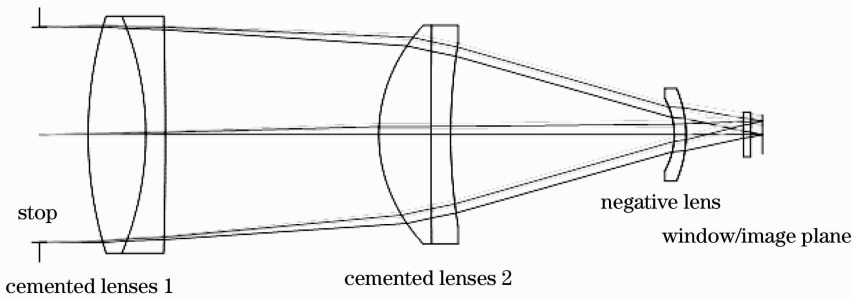


图 6 匹兹万镜头光学路图

Fig. 6 Layout of optics of Petzval lens

图 7 为建立的鬼像分析模型,不同逆光角度光线进入系统,到达光学元件表面,产生偶次反射光,被像面探测器接收。表 1 列出两次反射鬼像与像面

距离和鬼像焦距,表中 $S_1 \sim S_8$ 标记系统各光学表面,可见,系统中两次反射光线聚焦位置远离像面,像面上不会产生鬼像。图 8 为偶次反射引起的像面

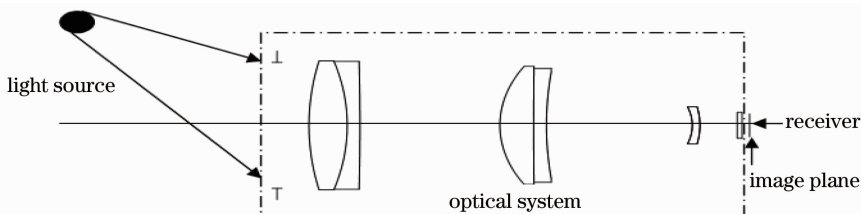


图 7 鬼像分析模型

Fig. 7 Analysis model of ghost image

照度分布曲线,纵坐标为像面探测器接收到的照度值,横坐标为像面位置坐标,实线和虚线分别为像面子午和弧矢方向的照度曲线。从图 8 中可见,随着

入射角度增大,像面鬼像照度值减小,照度分布曲线无明显极值。当入射角度大于 15°时,鬼像照度值衰减到 10<sup>-7</sup>量级,对成像性能已无影响。

表 1 两次反射聚焦位置与像面距离

Table 1 Distance between focal position of twice reflection and image plane

Reflection path	$d / \text{mm}$	$f'_R / \text{mm}$	Reflection path	$d / \text{mm}$	$f'_R / \text{mm}$
S <sub>2</sub> -S <sub>1</sub>	-74.27	5.93	S <sub>6</sub> -S <sub>1</sub>	-32.78	15.10
S <sub>3</sub> -S <sub>2</sub>	-32.73	11.62	S <sub>7</sub> -S <sub>6</sub>	-11.43	32.67
S <sub>3</sub> -S <sub>1</sub>	-30.93	8.60	S <sub>7</sub> -S <sub>5</sub>	-28.02	37.85
S <sub>4</sub> -S <sub>3</sub>	-13.59	58.66	S <sub>7</sub> -S <sub>4</sub>	-18.28	56.77
S <sub>4</sub> -S <sub>2</sub>	-17.93	24.62	S <sub>7</sub> -S <sub>3</sub>	-56.44	5.44
S <sub>4</sub> -S <sub>1</sub>	41.35	-8.02	S <sub>7</sub> -S <sub>2</sub>	-44.39	6.71
S <sub>5</sub> -S <sub>4</sub>	26.33	-12.56	S <sub>7</sub> -S <sub>1</sub>	51.01	-5.44
S <sub>5</sub> -S <sub>3</sub>	46.88	-11.70	S <sub>8</sub> -S <sub>7</sub>	32.06	-8.64
S <sub>5</sub> -S <sub>2</sub>	183.49	-2.79	S <sub>8</sub> -S <sub>6</sub>	13.21	-41.80
S <sub>5</sub> -S <sub>1</sub>	-54.92	8.84	S <sub>8</sub> -S <sub>5</sub>	-53.04	7.24
S <sub>6</sub> -S <sub>5</sub>	-0.26	199.21	S <sub>8</sub> -S <sub>4</sub>	-33.96	11.28
S <sub>6</sub> -S <sub>4</sub>	-122.78	4.26	S <sub>8</sub> -S <sub>3</sub>	-29.78	14.91
S <sub>6</sub> -S <sub>3</sub>	-79.19	6.60	S <sub>8</sub> -S <sub>2</sub>	-19.21	22.93
S <sub>6</sub> -S <sub>2</sub>	61.34	-10.89	S <sub>8</sub> -S <sub>1</sub>	34.51	113.42

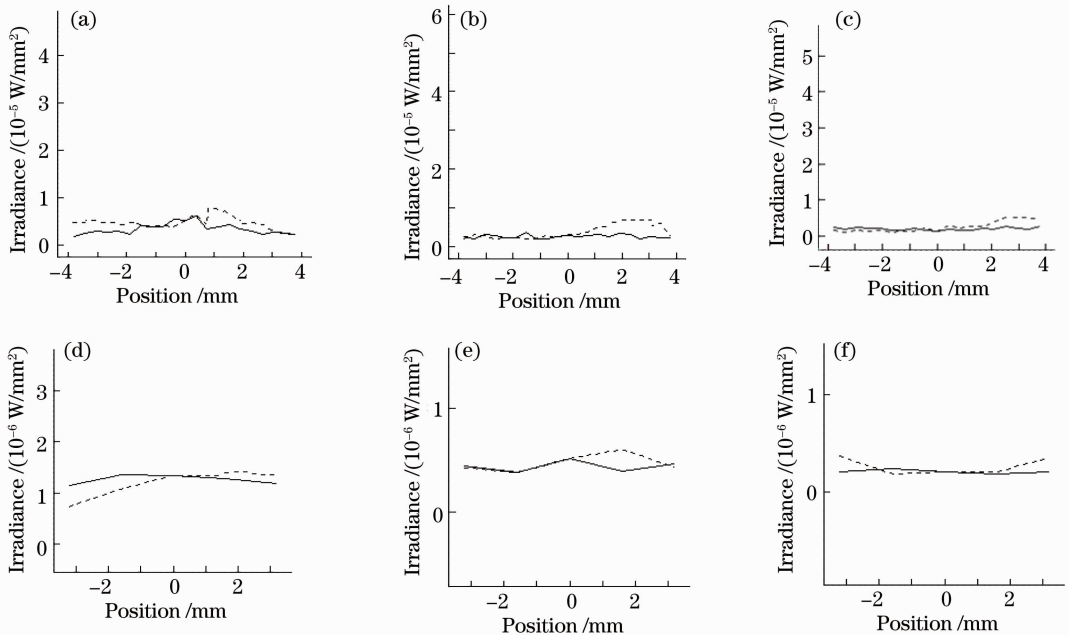


图 8 像面鬼像照度分布曲线。(a)入射角度 3.5°; (b)入射角度 5°; (c)入射角度 7.5°; (d)入射角度 10°; (e)入射角度 15°; (f)入射角度 20°

Fig. 8 Distribution curves of ghost illuminance on image plane. (a) Incident angle of 3.5°; (b) incident angle of 5°; (c) incident angle of 7.5°; (d) incident angle of 10°; (e) incident angle of 15°; (f) incident angle of 20°

图 9 给出光学系统衍射极限和三个视场处的调制传递函数(MTF)曲线,横坐标与纵坐标分别表示像面处空间频率和 MTF 值。从图 9 中可见,系统的成像质量接近衍射极限,在 90 lp/mm 空间频率处,MTF 值大于 0.69。图 10 为系统三个视场相对

畸变曲线,横坐标和纵坐标分别表示相对畸变值和像高,图 10 中可见边缘视场的相对畸变值小于 0.03%。

像质评价和鬼像分析结果表明,设计的光学系统具有优异的鬼像抑制能力和良好的成像性能。

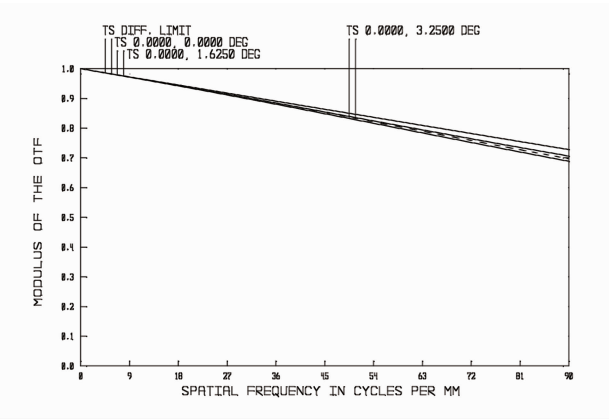


图9 匹兹万系统的 MTF 曲线  
Fig.9 MTF curve of Petzval system

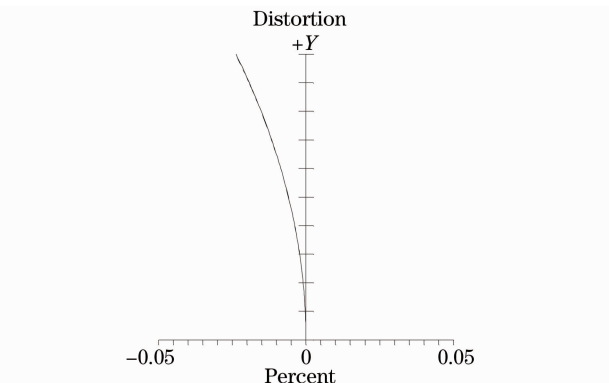


图10 相对畸变曲线  
Fig.10 Relative distortion curve

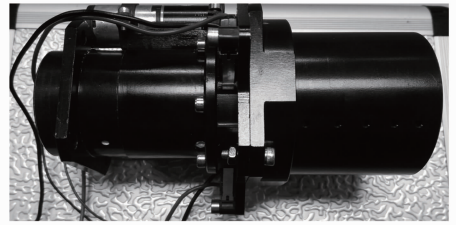


图11 匹兹万镜头  
Fig.11 Petzval lens

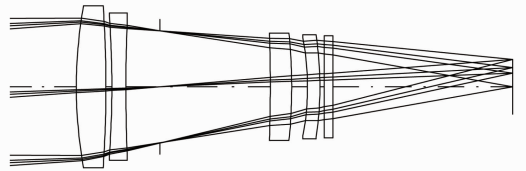


图12 实验室镜头光路图  
Fig.12 Layout of experimental lens

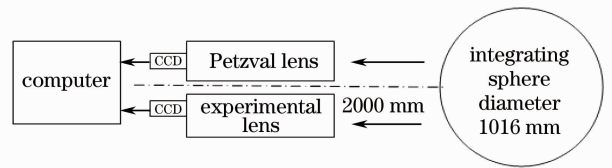


图13 逆光成像实验示意图  
Fig.13 Schematic of imaging experiment under backlight illumination

## 5 实验验证

图11为研制的匹兹万镜头，其焦距、视场、MTF等性能参数均通过测试。镜头的遮光罩长度为55 mm，口径为30.21 mm，能够抑制的一次杂光角度为 $24.8^\circ$ ，其引入不会影响逆光成像实验结果。成像中选用未经过低鬼像优化设计的实验室镜头进行对比，其结构亦为匹兹万型式，图12为其光路图，工作波段为 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ ，焦距为90 mm，相对孔径为4，全视场角为 $6.5^\circ$ 。

图13为逆光成像实验示意图，研制镜头与实验室镜头同时对距离2000 mm的均匀亮目标成像，探测器采集后，由计算机记录存储。模拟逆光光源的亮目标直径为60 mm，由直径1016 mm的积分球产生。

图14为实验装置图，分别记录入射角度为 $1.63^\circ$ 、 $3.25^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $7^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $20^\circ$ 时摄得的图像，见图15，左侧图像为实验室镜头摄得，右侧图像为研制镜头摄得。对比可见，实验室镜头在逆光小角度照射

下，存在明显眩光，且有鬼像，当逆光角度大于 $15^\circ$ 时，眩光与鬼像逐渐减少。研制的匹兹万镜头在入射角度 $1.63^\circ\sim 20^\circ$ 的逆光照射时，像面均无眩光和鬼像，表明其逆光抑制性能优异，验证了鬼像抑制方法、光学系统设计与模拟仿真结果的正确性。

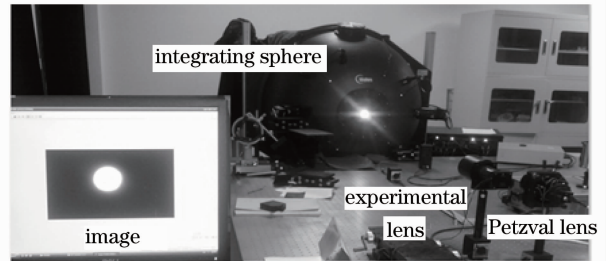


图14 实验装置  
Fig.14 Experimental equipment

## 6 结论

针对逆光照明下光学镜头的鬼像问题，结合近轴矩阵光学理论，分析讨论了匹兹万镜头中的鬼像特性，给出抑制方法。此鬼像分析方法适用于其他

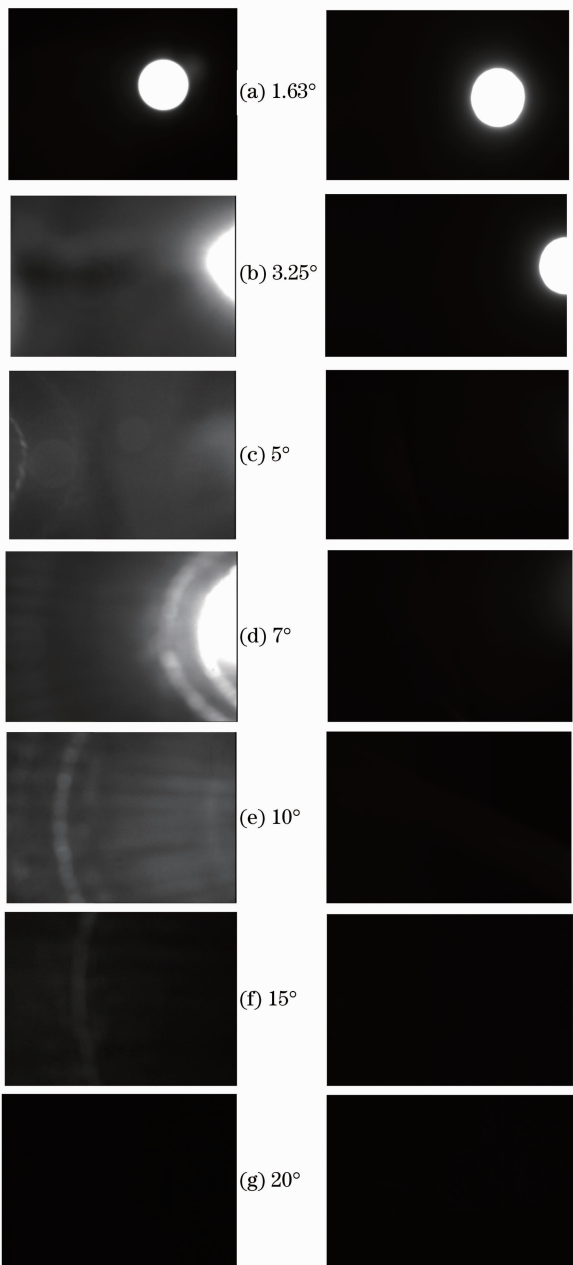


图 15 逆光照射实验室镜头和匹兹万镜头摄得的图像  
Fig. 15 Images captured by experimental lens and Petzval lens in different incident angles under backlight illumination

类型的光学系统。

基于鬼像抑制方法优化设计了焦距为 80 mm,

相对孔径为 3, 全视场角为  $6.5^\circ$  的匹兹万结构光学系统。它具有良好的逆光抑制性能和接近衍射极限的成像质量, 适于逆光光照条件。实验室开展了逆光光照下的成像实验, 测试研制镜头逆光抑制性能, 实验结果验证了设计和分析的正确性。目前, 研制的光学镜头工作状态良好。

### 参 考 文 献

- 1 A E Murray. Reflected light and ghosts in optical systems [J]. *J Opt Soc Am*, 1949, 39(1): 30-31.
- 2 Cao Huabao, Lu Xingqiang, Fan Dianyuan. Ghost analysis for complex optical systems based on Zemax [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(5): 1236-1239.  
曹华宝, 卢兴强, 范滇元. 用 Zemax 完成复杂光学系统的鬼像分析[J]. *中国激光*, 2010, 37(5): 1236-1239.
- 3 Mei Chao, Zhou Sizhong, Zhang Hengjin, *et al.*. Method of first-order ghost-image analysis in imaging system based on Code V and Tracepro [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0411003.  
梅超, 周泗忠, 张恒金, 等. 基于 Code V 和 Tracepro 的成像光学系统一阶鬼像分析方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0411003.
- 4 J D Rogers, T S Tkaczyk, M R Descour. Removal of ghost images by using tilted element optical systems with polynomial surfaces for aberration compensation [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(4): 504-506.
- 5 R H Abd El-Maksoud, J M Sasian. Paraxial ghost image analysis [C]. *SPIE*, 2009, 7428: 742807.
- 6 R H Abd El-Maksoud, J M Sasian. Modeling and analyzing ghost images for incoherent optical systems [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(15): 2305-2315.
- 7 R H Abd El-Maksoud, M Hilenbrand, S Sinzinger, *et al.*. Optical performance of coherent and incoherent imaging systems in the presence of ghost images [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(30): 7134-7143.
- 8 E C Fest. *Stray Light Analysis and Control* [M]. Bellingham: SPIE Press, 2013. 123-124.
- 9 Zhang Yimo. *Applied Optics (3rd Edition)* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 64-71.  
张以谟. *应用光学(第三版)*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 64-71.
- 10 Wang Zhijiang. *Practical Handbook of Optical Technique* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. 343-344.  
王之江. *实用光学技术手册*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. 343-344.
- 11 E D Evans. *An Analysis and Reduction of Flare Light in Optical Systems* [D]. Columbus: The Ohio State University, 1988. 145-148.

栏目编辑: 韩峰