

文章编号 1004-924X(2026)02-0191-10

含偶次非球面的手机镜头降敏设计方法

王 洋¹, 王楚文¹, 顾志远^{2*}

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031)

摘要:在光学设计过程中,光学系统性能的优化与公差分析是分隔开的,理论性能良好的系统公差可能过于严苛,因此,光学系统的降敏设计至关重要。手机镜头通常采用偶次非球面来降低系统的像差和总长,高次项的引入导致由光学表面的失调量引起的像质退化比较严重。本文针对含有偶次非球面的手机镜头,提出了一种基于节点像差理论的降敏设计方法。首先,根据节点像差理论,分析了偶次非球面的圆锥曲面基底部分出现失调时,三阶彗差和像散的 Zernike 系数变化情况。随后,为了计算偶次非球面的高次项部分由失调引入的波像差变化量,通过光瞳坐标变换,获得了光学表面在失调状态下的光瞳图,并且根据光瞳的坐标变化对波像差变化量进行了计算;最后,建立了适用于含偶次非球面光学系统的实际性能模型,并且利用该模型设计了一个 4 片式手机镜头。公差分析结果表明:在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 偏心 and $5'$ 倾斜公差范围内,经过 30 min 的优化,手机镜头的 RMS 波像差均值相较于默认设计方法减少了 33%,验证了本文提出的设计方法的有效性。

关键词:节点像差理论;降敏设计;非球面;手机镜头

中图分类号:TB133 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20263402.0191

CSTR:32169.14.OPE.20263402.0191

Desensitization design method for mobile phone lens with even aspheric surfaces

WANG Yang¹, WANG Chuwen¹, GU Zhiyuan^{2*}

(1. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130031, China)

* Corresponding author, E-mail: zhiyuan.gu@hotmail.com

Abstract: In the optical design process, the optimization of optical system performance and tolerance analysis are often treated separately. A system with excellent theoretical performance may have excessively tight tolerance. Therefore, the desensitization of the optical system is crucial during the system design process. The even aspheric surfaces are commonly used in the mobile phone lens to reduce aberrations and total track length. However, the introduction of high-order terms can lead to significant image quality degradation caused by the misalignments. A desensitization design method based on nodal aberration theory was

收稿日期:2025-10-12;修订日期:2025-10-30.

基金项目:吉林省科技厅自然科学基金面上项目(No. 20230101217JC)

proposed in this paper to desensitize mobile phone lenses with even aspheric surfaces. First, based on nodal aberration theory, the variations in Zernike coefficients for third-order coma and astigmatism were analyzed for the conic surface base of the misaligned even aspheric surfaces. Then, in order to calculate the variation in wavefront error introduced by the higher-order terms, a transformation of the pupil coordinates was used to obtain the pupil map of the optical surface under misalignments. Based on the coordinate transformation in the pupil map, the variation in wavefront error was then calculated. Finally, an as-built performance model suitable for optical systems with even aspheric surfaces was established, which was then used to design a 4-element mobile phone lens. The tolerance analysis showed that after 30 minutes of optimization and under $5\text{ }\mu\text{m}$ decenter and $5'$ tilt tolerance, the mean RMS wavefront error of the mobile phone lens was reduced by 33% compared to the default design method, which verifies the effectiveness of the proposed design method in the paper.

Key words: nodal aberration theory; desensitization design; aspheric surface; mobile phone lens

1 引言

随着移动影像技术的快速发展^[1-4],手机镜头凭借其体积小、成本低的优势,在许多领域逐渐取代了传统摄像机。手机镜头的加工通常是大规模量产,如果镜头的公差要求过于严格,将显著提高制造成本。而在传统光学设计过程中,系统的性能优化与公差分析是隔离开的,导致理论成像质量良好的镜头可能因公差要求过严而不适于大规模生产。因此,如何在手机镜头的设计阶段既能保证成像质量又能降低公差的灵敏度,进而减少制造成本,是手机镜头设计面临的一个关键问题。

近年来,多位学者就光学系统的降敏设计展开了相关研究^[5-6]。Fuse^[7]及 Rogers^[8]提出了多重结构法,通过在不同的镜头结构中添加公差,以模拟光学系统的实际性能,进而降低镜头的公差灵敏度;2004年,Isschiki^[9]所提出的“ θ -segmentation”入射角优化法,通过优化光线在光学表面的入射角及折射角对镜头进行降敏;2006年,McGuire^[10]提出了全局优化法,直接通过全局优化获得大量备选镜头,从中挑选出相对不敏感的结构。上述的方法通常依赖于大量的优化计算,效率较低。

除此之外,利用节点像差理论^[11-13]进行降敏设计可在更短的优化时间内取得更好的优化结果。2020年,Gu Zhiyuan^[14]根据节点像差理论计算了光学表面发生偏心 and 倾斜时,镜头的三阶彗

差和三阶像散的变化量,利用建立的降敏模型对一个 Cooke 三片式镜头进行了降敏设计;2024年,Guan Zihan^[15]通过数学方法对光学系统失调后产生的新像差进行了分析,确定主要的引入像差,通过节点像差理论分析了引入像差的成因并给出了评价函数;2024年,Zhang Jipeng^[16]根据高阶节点像差理论,对光学表面失调后的六种像差 $W_{131}, W_{222}, W_{151}, W_{242}, W_{333}, W_{422}$ 进行了分析,并据此给出了评价函数,分别对三片式,广角镜头及离轴三反镜头进行了降敏设计;2025年,Peng Shengbo^[17]通过节点像差理论及光瞳变换方法,推导了 Zernike 自由曲面在偏心及倾斜情况下波像差的像差解析式,根据该式构建了光学系统的实际性能模型,分别对离轴两反和离轴三反镜头进行了降敏设计。以上降敏设计方法均是针对圆锥曲面或自由曲面,而手机镜头通常采用偶次非球面进行设计,目前的节点像差理论并未针对偶次非球面进行相关的研究。

鉴于上述背景,本文根据节点像差理论,针对采用偶次非球面设计的手机镜头,将由失调量引起的波像差变化量作为系统误差灵敏度的评价函数,推导了偶次非球面波像差与失调量之间的关系,进而提出了针对手机镜头的降敏设计方法。

2 光学系统实际性能模型

光学系统的实际性能同时受其理论性能与

公差灵敏度的影响,如式(1)所示^[14]:

$$A = \frac{\int_{\text{field}} \sqrt{|N(H)|^2 + |M(H)|^2} dH}{\int_{\text{field}} dH}, \quad (1)$$

其中: A 代表镜头的实际性能, $N(H)$ 为镜头设计的残余像差,可在光学设计软件中获取; $M(H)$ 为由光学元件的失调量引起的像差变化量,光学系统实际性能的评估主要是 $M(H)$ 的计算。

在各类手机镜头或微型镜头的设计过程中,偶次非球面能够大幅缩短镜头的总长并且降低像差,因此被广泛应用,其数学表达式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_4r^4 + \dots + a_{16}r^{16}, \quad (2)$$

其中: r 代表径向坐标, c 为表面曲率, k 为圆锥系数, $a_4 \dots a_{16}$ 为非球面系数。

由式(2)可知,偶次非球面由圆锥曲面基底及高次项构成,因此,偶次非球面因失调量所引起的像差变化量 $M(H)$ 可由式(3)计算:

$$M(H) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (M(H)_{i,\text{conic}}^2 + M(H)_{i,\text{asph}}^2)}, \quad (3)$$

其中: $M(H)_{i,\text{conic}}$ 为圆锥曲面基底失调时的像差变化量,可根据节点像差理论进行计算^[15]。 $M(H)_{i,\text{asph}}$ 为高次项失调时的像差变化量,后文将进行详细分析。

3 圆锥曲面基底失调时像差的变化量

3.1 圆锥曲面基底彗差的变化量

当手机镜头的光学元件存在微小倾斜与偏心时,彗差与像散为影响系统性能的主要像差,因此,圆锥曲面基底的像差变化量 $M(H)_{i,\text{conic}}$ 可通过式(4)计算:

$$M(H)_{i,\text{conic}} = \sqrt{M(H)_{i,\text{coma}}^2 + M(H)_{i,\text{ast}}^2}, \quad (4)$$

其中: $M(H)_{i,\text{coma}}$ 和 $M(H)_{i,\text{ast}}$ 分别为表面偏心 and 倾斜时圆锥曲面基底三阶彗差和像散的变化量。基于节点像差理论,当圆锥曲面发生偏心或倾斜时,彗差对应的三阶波像差可表示为:

$$W_{\text{coma}} = W_{131i}[(H - \sigma_i) \cdot \rho](\rho \cdot \rho), \quad (5)$$

其中: W_{131i} 是第*i*个表面的三阶彗差系数, σ_i 是单个表面的像差场中心偏移矢量。将式(5)转化为

Zernike类型的像差^[18],即:

$$W_{\text{coma}} = \frac{1}{3} (W_{131i} H - A_{131i}) \cdot \begin{bmatrix} Z_7(\rho) + 2Z_2(\rho) \\ Z_8(\rho) + 2Z_3(\rho) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中: $A_{131i} = \sum_i W_{131i} \sigma_i$, $Z_7(\rho)$, $Z_8(\rho)$ 分别为 x , y 轴彗差; $Z_2(\rho)$, $Z_3(\rho)$ 为 x 和 y 轴倾斜项,二者不影响成像质量,可忽略。去掉设计中的残差,圆锥曲面基底因失调而产生的像差变化量:

$$M(H)_{i,\text{coma}} = \sqrt{M(H)_{i,\text{coma},x}^2 + M(H)_{i,\text{coma},y}^2}, \quad (7)$$

其中: $M(H)_{i,\text{coma},x} = -1/3 \cdot A_{131x}$, $M(H)_{i,\text{coma},y} = -1/3 \cdot A_{131y}$, A_{131x} , A_{131y} 为 A_{131i} 的 x 轴和 y 轴分量。

3.2 圆锥曲面基底像散的变化量

与彗差的计算方法类似,当圆锥曲面发生偏心或倾斜时,像散对应的三阶波像差可表示为:

$$W(H, \rho) = W_{222i}[(H - \sigma_i) \cdot \rho]^2/2, \quad (8)$$

其中, W_{222i} 是第*i*个表面的三阶像散系数,将式(8)转化为Zernike类型的像差:

$$W_{\text{ast}} = \frac{1}{2} [W_{222} H^2 - 2HA_{222} + B_{222}^2] \cdot \begin{bmatrix} Z_5(\rho) \\ Z_6(\rho) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中: $Z_5(\rho)$ 和 $Z_6(\rho)$ 为 $0^\circ/90^\circ$ 像散项和 $\pm 45^\circ$ 像散项, $A_{222} = \sum_i W_{222i} \sigma_i$, $B_{222}^2 = \sum_i W_{222i} \sigma_i^2$ 。忽略系统的设计残差,圆锥曲面基底由失调而产生的像散变化量:

$$M(H)_{i,\text{ast}} = \sqrt{M(H)_{i,\text{ast},x}^2 + M(H)_{i,\text{ast},y}^2}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} M(H)_{i,\text{ast},x} = (H_x A_{222x} + H_y A_{222y}) - B_{222x}^2 \\ M(H)_{i,\text{ast},y} = 2(H_y A_{222x} - H_x A_{222y}) + B_{222y}^2 \end{cases}, \quad (11)$$

其中: A_{222x} , A_{222y} , B_{222x}^2 , B_{222y}^2 分别为 A_{222} , B_{222}^2 的 x 和 y 轴分量。

4 高次项像差变化的计算

4.1 高次项波像差的计算方法

偶次非球面与Zernike自由曲面均是在圆锥曲面基底上叠加额外项,因此,本文中偶次非球面的高次项所产生的像差计算参考含Zernike自由曲面的像差计算方法。

当系统没有中间像面时,Zernike自由曲面分

量所产生的像差计算公式如下^[19]:

$$W = \frac{(n_2 - n_1)}{\lambda} C \cdot Z, \quad (12)$$

其中: W 为 Zernike 分量所产生的波像差; $C = [c_1, c_2, c_3 \dots]$ 为 Zernike 系数矩阵, $c_1, c_2, \dots$ 为各项 Zernike 系数; $Z = [z_1, z_2, z_3 \dots]^T$ 为 Zernike 项矩阵, $z_1, z_2, z_3 \dots$ 为 Zernike 项。不同于 Zernike 自由曲面使用的归一化径向长度 ρ , 偶次非球面所采用的径向长度 r 并未进行归一化, 两者之间转化关系如下:

$$\rho = \frac{r}{d}, \quad (13)$$

其中: d 为表面的半宽度, 参考式(12), 并将 Zernike 系数替换为偶次非球面系数。偶次非球面高次项引入的像差 W 以如下的方式进行近似计算:

$$W = \frac{(n_2 - n_1)}{\lambda} (a_4 r^4 + a_6 r^6 + a_8 r^8 + \dots) = \frac{(n_2 - n_1)}{\lambda} A \cdot E, \quad (14)$$

其中: $A = [a_4 d^4, a_6 d^6, a_8 d^8 \dots]$ 为归一化非球面系数矩阵, $a_4, a_6, a_8 \dots$ 为高次项的非球面系数, $E = [\rho^4, \rho^6, \rho^8 \dots]^T$ 为归一化径向长度矩阵。

偶次非球面高次项所引入的像差的变化特性, 主要取决于不同视场, 偏心, 倾斜等状况下光瞳坐标的变化。假设未失调情况下的光瞳的径向长度矩阵为 $\vec{E}_1$, 失调情况下的矩阵为 $\vec{E}_2$, 则偶次非球面高次项因失调而引入的像差变化量:

$$M(H)_{i, \text{asph}} = \frac{(n_2 - n_1)}{\lambda} A \cdot (E_1 - E_2). \quad (15)$$

若要求解 $M(H)_{i, \text{asph}}$, 就要先求解不同状况下的光瞳坐标矩阵 E_1 及 E_2 。

4.2 任意视场下光瞳的坐标变换

为保证分析的一般性, 首先考察光学系统中任意视场对应的光瞳形状。手机镜头的渐晕较大, 轴上视场的光瞳呈圆形分布, 随着视场的扩大, 光瞳逐渐变为类椭圆形, 且该椭圆的长、短轴尺寸及其与 XY 坐标系之间的夹角均随视场的变化而发生改变。任一光瞳足迹图如图 1 中椭圆所示, 设其长短轴长分别为 l_1, l_2 , 光瞳内有一矢量, 其在光瞳内局部坐标系的坐标为 ρ , 在表面全局坐标系的坐标为 ρ' 。从光学表面顶点到光瞳中心的矢量为 Δh , Δh 与 x 所成夹角为 α , 表面的半宽度为 d 。 $l_1, l_2, \Delta h, \alpha, d$ 均可通过

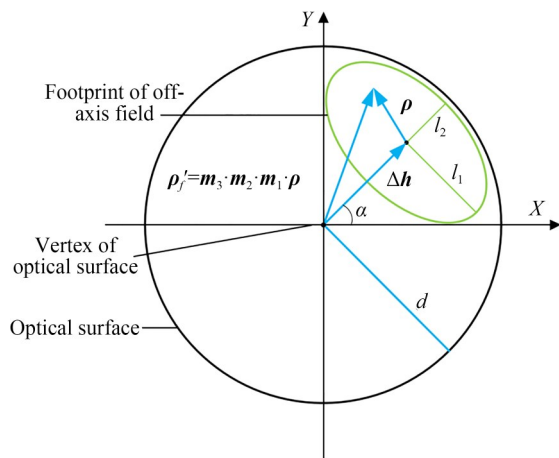


图 1 任意光瞳足迹图

Fig. 1 Footprint of arbitrary field

光线追迹获得。

理想的圆形光瞳经过三种坐标变换即可获得实际的光瞳。

4.2.1 非定向缩放光瞳

设光瞳内一矢量的局部坐标为 $\rho = (\rho_x, \rho_y, 1)^T$, 缩放比例为 f_1 , 则变换后的矢量可表示为:

$$\rho_{f1}' = \begin{bmatrix} f_1 & 0 & 0 \\ 0 & f_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \rho = m_1 \cdot \rho, \quad (16)$$

其中, $f_1 = l_1/d$ 。需要说明的是, 光瞳矢量是一个二维矢量, 本文将其扩展至三维空间进行表示, 可将二维矢量的加法运算转换为矩阵乘法形式。

4.2.2 定向缩放光瞳

引入缩放方向的单位矢量 (f_x, f_y) 和缩放倍数 k , 其中, $f_x = \cos \alpha, f_y = \sin \alpha, k = l_2/l_1$, 可构建相应的坐标变换关系:

$$\rho_{f2}' = m_2 \cdot \rho, \quad (17)$$

其中, m_2 的计算方法如下:

$$m_2 = \begin{bmatrix} 1 + (k-1)f_x^2 & (k-1)f_x f_y & 0 \\ (k-1)f_x f_y & 1 + (k-1)f_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

令 $f_2 = 1 + (k-1)f_x^2, f_3 = (k-1)f_x f_y, f_4 = 1 + (k-1)f_y^2$, 则式(18)可简化为:

$$m_2 = \begin{bmatrix} f_2 & f_3 & 0 \\ f_3 & f_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

4.2.3 光瞳平移

由于各视场的主光线仅在光阑面上重合,非光阑面处的光瞳分布存在位置差异。因此,根据主光线的实际追迹数据确定一平移矢量 $\Delta h = (f_5, f_6)$ 。确定 Δh 后,主光线引起的光瞳偏移可表示为:

$$\rho_{\beta 3}' = m_3 \cdot \rho, \quad (20)$$

其中, m_3 的值为:

$$m_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & f_5 \\ 0 & 1 & f_6 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

最后,将光瞳内矢量由光瞳局部坐标 ρ 转换为表面全局坐标 ρ_f' ,坐标为:

$$\rho_f' = m_3 \cdot m_2 \cdot m_1 \cdot \rho. \quad (22)$$

4.3 偏心情况下光瞳的坐标变换

当光学系统中存在装调或加工误差引起的偏心时,需引入一个偏移矢量以描述由此引起的光瞳平移^[20],如图2所示。

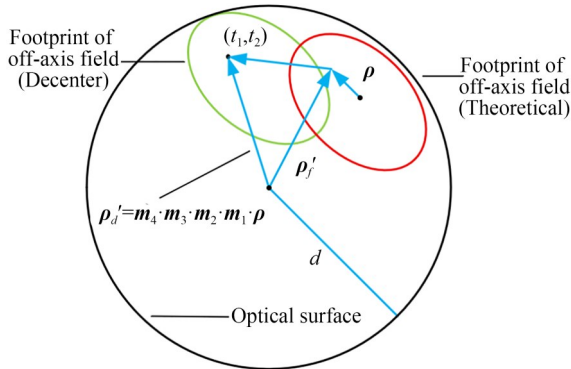


图2 偏心任意光瞳足迹图

Fig. 2 Footprint of arbitrary field under decenter condition

设理想光瞳内一矢量坐标 ρ ,发生偏心后在表面内全局坐标为 ρ_d' :

$$\rho_d' = m_4 \cdot m_3 \cdot m_2 \cdot m_1 \cdot \rho, \quad (23)$$

其中: m_1, m_2, m_3 在上一节已经予以阐述, m_4 的计算方法如下:

$$m_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_1 \\ 0 & 1 & t_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (24)$$

其中: (t_1, t_2) 为偏心相关矢量, $t_1 = XDE/d, t_2 = YDE/d, XDE, YDE$ 分别代表 x 方向和 y 方向的偏心。

4.4 倾斜情况下光瞳的坐标变换

当光学表面倾斜时,轴外光瞳的坐标变换与轴上光瞳相同,因此,将轴上光瞳作为研究对象。光学表面绕 x 轴的倾斜为 ADE ,绕 y 轴的倾斜为 BDE ,倾斜后该表面在 xoy 面上的投影为一斜椭圆,如图3所示。椭圆的长短轴长分别为 l_3 和 l_4 ,光束在 xoy 面的投影为圆形,半径为 l_4 。设未失调表面内有一矢量,其在表面上的全局坐标为 s ,因倾斜而变化为全局坐标 s' :

$$s' = \begin{bmatrix} \cos(BDE) & \sin(ADE)\sin(BDE) & 0 \\ 0 & \cos(ADE) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot s. \quad (25)$$

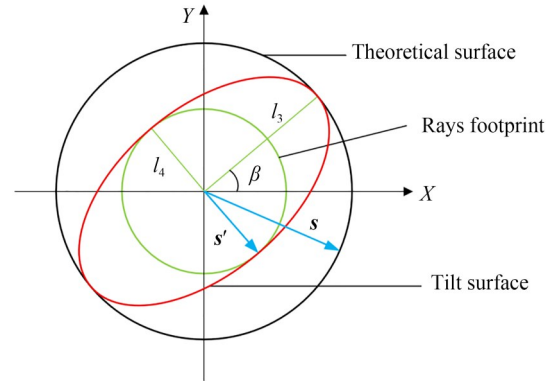


图3 倾斜状态表面及光束在 xoy 面的投影

Fig. 3 Projection of the tilt surface and rays on the xoy surface

椭圆的一般式为:

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 = 1. \quad (26)$$

经过推导可以得到:

$$\begin{cases} A = 1 \\ B = -2\sin(ADE)\sin(BDE)/\cos(ADE) \\ C = (\sin^2(ADE)\sin^2(BDE) + \frac{\cos^2(BDE)}{\cos^2(ADE)}) \end{cases}. \quad (27)$$

结合式(25)~式(27),可求得 l_3, l_4 和倾斜角 β :

$$\begin{cases} \beta = 1/2 \arccot[(A - C)/B] \\ l_3 = \sqrt{2/(A + C + B/2\cos\beta\sin\beta)} \\ l_4 = \sqrt{2/(A + C - B/2\cos\beta\sin\beta)} \end{cases}. \quad (28)$$

光束在倾斜表面上的投影可通过逆向缩放图3确定,投影的光瞳如图4所示。设光瞳内有

一矢量,原全局坐标为 ρ ,因倾斜而导致矢量的全局坐标为 ρ'_t 。

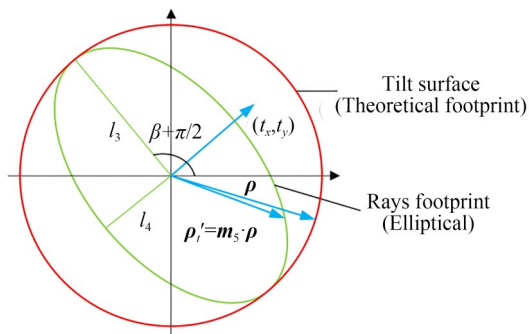


图 4 倾斜状态表面及光束在表面上的投影

Fig. 4 Projection of the tilt surface and rays on the tilt surface

根据几何分析可知,图 3 中所述的倾斜表面投影形状与图 4 中所述的光瞳投影形状一致,但是两者互相垂直,故图 4 中光瞳投影长轴 l_3 与横轴所成夹角为 $\beta + \pi/2$ 。光瞳在表面上的投影缩放比 $k_t = l_4/l_3$,缩放矢量 $(t_x, t_y) = (\cos \beta, \sin \beta)$,则由倾斜导致的全局坐标为:

$$\rho'_t = m_5 \cdot \rho, \quad (29)$$

其中, m_5 的值为:

$$m_5 = \begin{bmatrix} 1 + (k_t - 1)t_x^2 & (k_t - 1)t_x t_y & 0 \\ (k_t - 1)t_x t_y & 1 + (k_t - 1)t_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (30)$$

令 $t_3 = 1 + (k - 1)t_x^2$, $t_4 = (k - 1)t_x t_y$, $t_5 = 1 + (k - 1)t_y^2$,则式(30)可简化为:

$$m_5 = \begin{bmatrix} t_3 & t_4 & 0 \\ t_4 & t_5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (31)$$

4.5 失调情况下光瞳坐标及波像差变化量求解

将上述偏心,倾斜等情况综合在一起,原本的光瞳矢量在光瞳内局部系的坐标为:

$$\rho = (\rho_x, \rho_y, 1)^T. \quad (32)$$

将光瞳矢量转化为表面上的全局坐标 ρ_1 ,光瞳坐标为:

$$\rho_1 = m_3 \cdot m_2 \cdot m_1 \cdot \rho. \quad (33)$$

经过偏心 and 倾斜影响,失调后的光瞳全局坐标为 ρ_2 :

$$\rho_2 = m_5 \cdot m_4 \cdot m_3 \cdot m_2 \cdot m_1 \cdot \rho. \quad (34)$$

根据式(33)和式(34),可求得两光瞳坐标的

归一化径向长度矩阵:

$$\begin{cases} E_1 = [\rho_1^4, \rho_1^6, \rho_1^8, \rho_1^{10} \dots] \\ E_2 = [\rho_2^4, \rho_2^6, \rho_2^8, \rho_2^{10} \dots] \end{cases} \quad (35)$$

将求得的 E_1, E_2 代入到式(15)中,即可求得高次项因失调而产生的波像差变化量 $M(H)_{i, \text{asph}}$ 。随后,根据式(3)求得 $M(H)$,代入式(1)实际性能模型中,进行降敏设计。

5 实验与结果

5.1 实际性能模型计算准确性验证

因本文第 4 节所提出的高次非球面的像差计算方法参考了自由曲面分量像差的计算方法,为了验证本方法的正确性,进行如下仿真实验。

利用 CodeV 软件构建了如图 5 所示的光学元件,该元件左侧为平面,右侧为平面基底叠加高次项的偶次非球面,元件后设置一个理想透镜。系统中全部波像差均由偶次非球面的高次项引入。

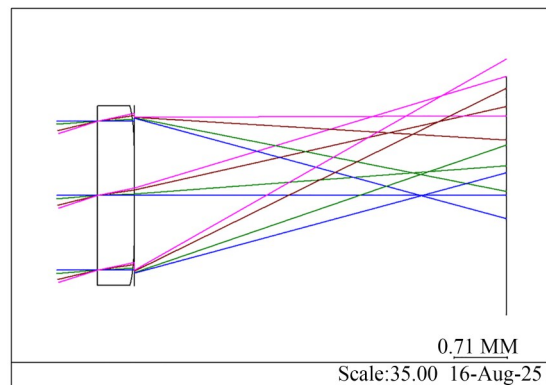


图 5 用于验证实际性能模型的光学元件

Fig. 5 Optical element for verifying the as-built performance model

本文进行 5 次仿真实验,基于第四节的计算方法,求解上述光学元件在无偏心和倾斜状态下全视场 RMS 波像差平均值。每次实验设置的 4~10 阶非球面系数的数值相同,分别为 $10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}$ 。计算的全视场 RMS 波像差平均值与 CodeV 软件的输出值具体结果如图 6 所示(彩图见期刊电子版,红色为模型

计算得到,蓝色为 CodeV 计算得到),为了直观表示,数据进行了取对数处理。利用本文提出的方法计算的最大 RMS 波像差为 11.73λ , CodeV 计算的波像差为 13.92λ ,二者差距为 15.71% 。

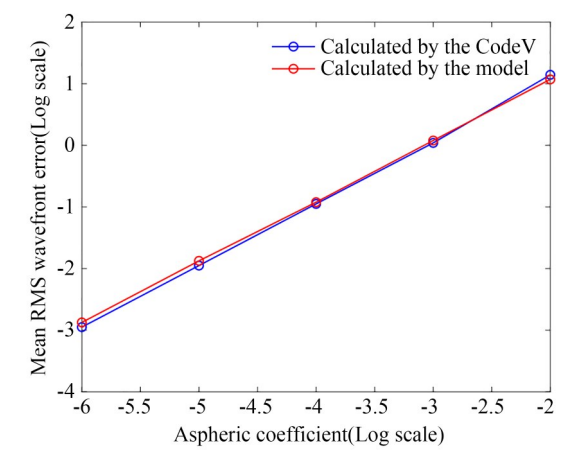


图 6 平均 RMS 波像差(取对数后,视场)
Fig. 6 Mean RMS wavefront error (Log Scale, field)

在此基础上,对每个光学表面依次施加 0.01 mm 的偏心量与 0.5° 的倾斜量,利用本文计算方法与 CodeV 计算的 RMS 波像差结果如图 7 所示(彩图见期刊电子版,红色为模型计算得到,蓝色为 CodeV 输出得到)。两种计算方法的 RMS 波像差分别为 11.75λ 和 9.25λ ,差距约为 18% 。

结果表明,在理论状态与光学元件引入失调

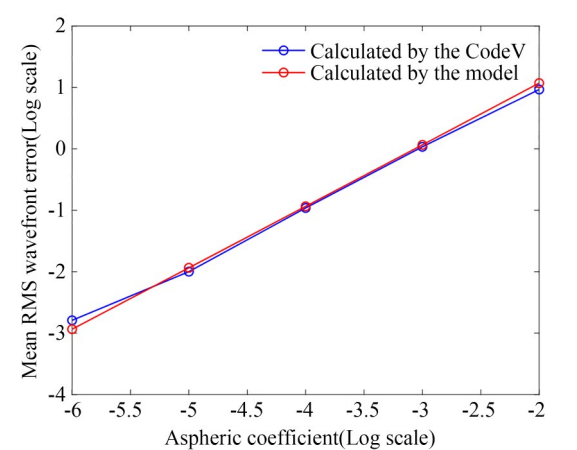


图 7 平均 RMS 波像差(取对数后,视场+偏心倾斜)
Fig. 7 Mean RMS wavefront error (Log Scale, field+de-center+tilt)

量两种状态下,利用本文方法计算得到的 RMS 波像差与 CodeV 软件计算的结果之间的最大误差分别为 15.71% 和 18% 。相关研究表明,自由曲面分量所产生像差的计算误差约为 20% ^[19],因此,本文提出的计算方法可应用于偶次非球面的像差计算。

5.2 实际性能模型降敏设计

为进一步验证本文提出方法的实用性,对一含有偶次非球面的手机镜头进行降敏设计,手机镜头的具体设计指标如表 1 所示。

表 1 镜头设计要求	
Tab. 1 Lens Design Specifications	
Parameter	Specification
Effective focal length	3.8 mm
Entrance pupil diameter	1.36 mm
F number	2.8
Field of view	30°
Wavelength	486~656 nm
Total length	$<4.9\text{ mm}$
Back focal distance	$\geq 1.4\text{ mm}$
Distortion	$<2\%$
Chief ray angle	$\leq 25^\circ$
Relative Illumination	$>50\%$

视场设置如图 8 所示,采用四个同心圆环将视场均匀划分为四个区域,每个环上均匀分布四

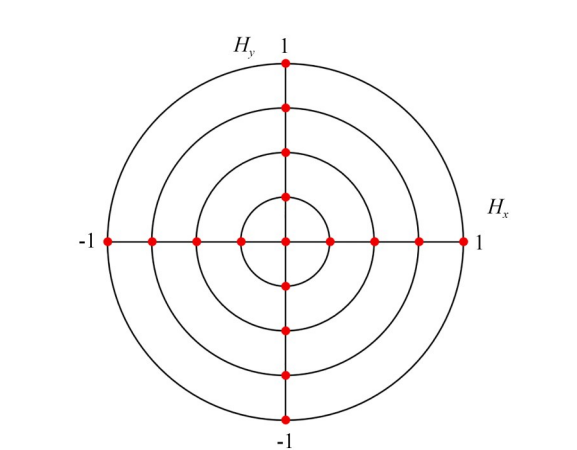


图 8 视场采样点的选择
Fig. 8 Selection of field sampling points

个采样点,并包含中心视场点,最终共设置 17 个视场采样点。

采用 CodeV 内置的 RMS 波像差评价函数对镜头进行设计,优化变量设置为各光学面的曲率半径、厚度、圆锥系数以及 4 阶至 10 阶非球面系数。经优化后,得到系统的初始结构如图 9(a)所示。

为了验证光学系统实际性能模型的降敏效果,利用 CodeV 的 Macro-Plus 编程语言,将式(3)的像差变化量 $M(H)$ 编程为 CodeV 宏,将其

加入像质评价函数中优化镜头的实际性能。优化过程中,将光学系统的曲率半径、厚度、圆锥系数以及 4 阶至 10 阶非球面系数作为变量,镜头的实际公差指标为:表面偏心 $5\ \mu\text{m}$,倾斜 $5'$ 。经过 30 min 全局优化后,设计结果如图 9(b)所示。

为了对比实际性能模型的效果,利用 CodeV 的“SAB”降敏设计方法,优化设置与前述设计方法一致,经过 30 min 优化后的结果如图 9(c)所示。

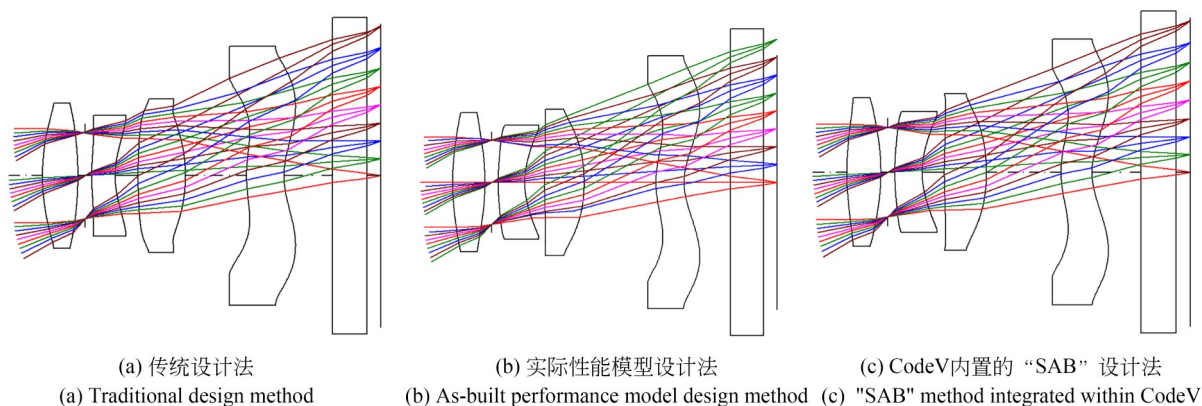


图 9 采用不同方法设计的镜头示意图

Fig. 9 Schematic of lens designs with different methods

5.3 公差分析

对三种设计法获得的结果分别进行公差分析,公差设置如下:表面偏心 $5\ \mu\text{m}$,表面倾斜 $5'$,曲率半径公差为 $5\ \mu\text{m}$,厚度公差为 $5\ \mu\text{m}$,表面随机误差 0.05 波长,像面位置设置为补偿器。执行 5 000 次波前微分公差评估,相应的统计分析结果如图 10 所示。

由公差分析结果可知,传统设计法获得

的镜头理论 RMS 波像差为 0.045λ ,比实际性能模型设计法获得的镜头低 0.1λ 。实际 RMS 波像差(95.44% 的概率)为 0.25λ ,较实际性能模型设计镜头增加 0.084λ ,较“SAB”设计法获得的镜头 RMS 波像差增加 0.073λ 。本文设计镜头实际性能相对传统设计法提升幅度达 33%,进一步验证了本研究方法的有效性。

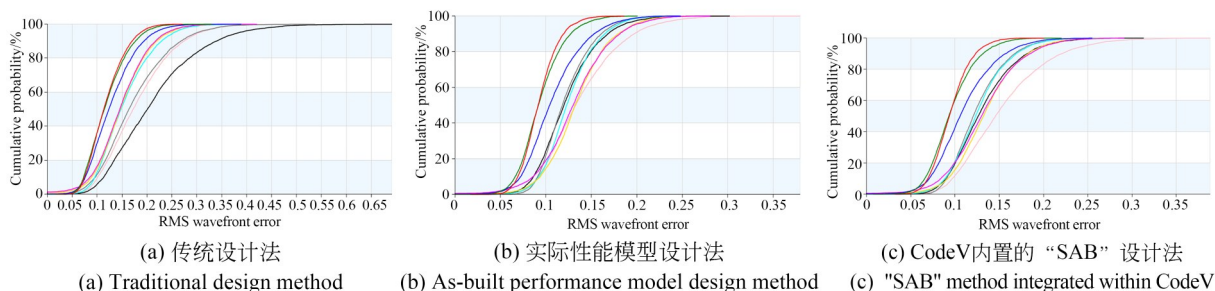


图 10 公差分析结果

Fig. 10 Tolerance analysis results

6 结 论

本文提出了一种基于节点像差理论的光学系统降敏设计方法。通过光瞳坐标变换推导了偶次非球面在失调状况下实际波像差的解析式,该模型可通过光学设计软件的编程语言转化为评价函数进行设计。本文将该模型用于含偶次非球面的手机镜头进行优化设计,并通过5 000次波前微分公差评估分析了优化后手机镜头的实际性能。结果表明:经过30 min的优化,手机

镜头的实际RMS波像差降低了33%。手机镜头的降敏设计实验验证了本文所提出的实际性能模型设计法的有效性,可以应用于含偶次非球面的镜头的降敏设计中。

作者贡献声明:

王洋:测量方法的提出,论文构思和撰写;

王楚文:测量实验的设计及数据整理和分析;

顾志远:论文审核与编辑写作。

参考文献:

- [1] SWITZ N A, D'AMBROSIO M V, FLETCHER D A. Low-cost mobile phone microscopy with a reversed mobile phone camera lens[J]. *PLoS One*, 2014, 9(5): e95330.
- [2] BLAHNIK V, SCHINDELBECK O. Smartphone imaging technology and its applications[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2021, 10(3): 145-232.
- [3] MORAKIS M M, MCKAY G N, DURR N J. A high-resolution reverse lens design for cell phone capillaroscopy blood analysis[C]. *Optical Diagnostics and Sensing XXII: Toward Point-of-Care Diagnostics*. January 22-February 28, 2022. San Francisco, USA. SPIE, 2022: 6.
- [4] SUN W S, LIU Y H, TIEN C L. Optical design of a miniaturized $10 \times$ periscope zoom lens for smartphones[J]. *Micromachines*, 2023, 14(6): 1272.
- [5] 孟庆宇,汪洪源,王维,等. 基于光程变化量的反射式光学系统敏感度理论分析与降敏设计方法[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(1): 72-83.
MENG Q Y, WANG H Y, WANG W, et al. Sensitivity theoretical analysis and desensitization design method for reflective optical system based on optical path variation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(1): 72-83. (in Chinese)
- [6] 孟庆宇,秦子长,任成明,等. 光学系统降敏设计方法综述[J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(5): 863-877.
MENG Q Y, QIN Z C, REN C M, et al. Review of optical systems' desensitization design methods[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 863-877. (in Chinese)
- [7] Sumitomo Electric Industries, Ltd. *Method for designing a refractive or reflective optical system and method for designing a diffraction optical element: US6567226*[P]. 2003-05-20.
- [8] ROGERS J R, HOWARD J M, KOSHEL R J. Using global synthesis to find tolerance-insensitive design forms[C]. *International Optical Design Conference*. Vancouver, Canada, Optica Publishing Group, 2006.
- [9] ISSHIKI M, GARDNER L, GREGORY G G. Automated control of manufacturing sensitivity during optimization[J]. *Optical Design and Engineering*, 2004, 5249: 343.
- [10] MCGUIRE J P. Designing easily manufactured lenses using a global method[C]. *International Optical Design*. Vancouver. OSA, 2006: TuA6.
- [11] BUCHROEDER R A. *Tilted Component Optical Systems*[M]. The University of Arizona, 1976.
- [12] ROLAND V S, KEVIN T. Influence of alignment errors of a telescope system on its aberration field[C]. *24th Annual Technical Symposium*. San Diego, SPIE, 1980.
- [13] THOMPSON K P, SCHMID T, CAKMAKCI O, et al. Real-ray-based method for locating individual surface aberration field centers in imaging optical systems without rotational symmetry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, 26(6): 1503-1517.
- [14] GU Z Y, WANG Y, YAN C X. Optical system optimization method for as-built performance based on nodal aberration theory[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 7928-7942.
- [15] 官子涵,王敏,李晓彤. 基于主成分分析和节点像差理论的公差降敏方法[J]. *红外与激光工程*,

- 2024, 53(2): 20230590.
- GUAN Z H, WANG M, LI X T. Tolerance desensitization method based on principal component analysis and nodal aberration theory [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(2): 20230590. (in Chinese)
- [16] ZHANG J P, SHI G W, HUANG Y Q, *et al.* Optimization of optical system for reducing tolerance sensitivity based on the high-order nodal aberration theory [J]. *Optics Express*, 2024, 32(8): 14334-14355.
- [17] 王洋, 彭圣博, 顾志远. 含自由曲面的反射式望远镜降敏设计 [J]. *光学精密工程*, 2025, 33(12): 1864-1875.
- WANG Y, PENG S B, GU Z Y. Desensitization design methods for reflective telescopes with freeform surfaces [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(12): 1864-1875. (in Chinese)
- [18] WANG K, GU Z Y, YAN C X. An analytic expression for the field dependence of three-order Zernike aberrations in decentered and/or tilted optical systems [J]. *Optics Communications*, 2024, 565: 130696.
- [19] YANG T, CHENG D W, WANG Y T. Aberration analysis for freeform surface terms overlay on general decentered and tilted optical surfaces [J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7751-7770.
- [20] FUERSCHBACH K, ROLLAND J P, THOMPSON K P. Extending nodal aberration theory to include mount-induced aberrations with application to freeform surfaces [J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20139-20155.

作者简介:



王 洋(1986—),女,博士,副教授,硕士生导师,2014年于中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)获得博士学位,主要从事光学系统设计与像差理论方面的研究。
Email:wangyang@cust.edu.cn

通讯作者:



顾志远(1986—),男,吉林长春人,博士,副研究员,硕士生导师,2009年于大连理工大学获得学士学位,2016年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事空间光学系统设计、装调与检测等方面的研究。E-mail: zhiyuan.gu@hotmail.com