

偏轴自由曲面光学系统像差特性研究

史浩东¹ 张 新² 王灵杰² 王 超² 姜会林¹

¹ 长春理工大学空间光电技术研究所, 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光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 基于矢量像差理论,提出了以 Fringe Zernike 多项式为表征函数的偏轴自由曲面光学系统像差分析方法,推导了偏轴自由曲面系统的三阶像散和彗差解析表达式,分析了自由曲面对偏轴系统像差节点分布的影响。根据像差分布特性,有针对性地选取和优化 Zernike 系数,设计了一个偏轴两反自由曲面长波红外光学系统,系统有效焦距为 500 mm,口径为 300 mm,采用 384 pixel×288 pixel 非制冷红外探测器接收,像素大小为 25 μm。优化后的系统三阶像散和彗差节点被重新移至视场中,平衡了系统偏轴引起的非对称像差,系统成像质量接近衍射极限,满足使用需求。

关键词 几何光学; 矢量像差; Zernike 多项式; 自由曲面; 偏轴

中图分类号 O435.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0708001

Aberration Properties of Off-Axis Freeform Surface Optical System

Shi Haodong¹ Zhang Xin² Wang Lingjie² Wang Chao² Jiang Huilin¹

¹ Institute of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

² Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Based on the vector aberration theory, a method to analyze aberration field distribution induced by the Fringe Zernike polynomial off-axis freeform surface is proposed. The analytical expressions of third-order astigmatism and coma of off-axis freeform surface system are deduced. The aberration nodal distribution of off-axis system caused by the freeform surface is analyzed. According to the aberration distribution properties, with proper Zernike terms selected and optimized, an off-axis two-mirror freeform surface long-wave infrared optical system is designed, and the system has an effective focal length of 500 mm and a pupil diameter of 300 mm. The system is compatible with the uncooled infrared detector that has a format of 384 pixel×288 pixel, and the pixel size is 25 μm. The third-order astigmatism and coma nodes of the optimized system are both moved into the field of view, the asymmetric aberration induced by off-axis is balanced, and the imaging quality of the system is close to the diffraction limit that meets application requirements.

Key words geometric optics; vector aberration; Zernike polynomial; freeform surface; off-axis

OCIS codes 080.1010; 080.4228; 240.6700

1 引 言

偏轴光学系统是指含有偏心或倾斜元件的光学系统^[1]。由于偏轴光学系统的结构具有非旋转对称性,传统的球面或非球面很难校正系统偏轴带来的非对称像差。而自由曲面可以控制局部光线,从而补偿非对称像差。最早利用自由曲面校正偏轴系统像差的产品是 1972 年宝丽来生产的 SX-70 相机,该相机在光阑和

收稿日期: 2016-01-20; 收到修改稿日期: 2016-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(91338116)

作者简介: 史浩东(1989—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计和自由曲面像差等方面的研究。

E-mail: shihaodong08@163.com

导师简介: 姜会林(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事光学系统设计、光电检测技术和激光通信技术等方面的研究。

E-mail: huilinjiang@edu.cust.cn

目镜处引入自由曲面,校正了系统偏轴产生的像差^[2],James-Webb 空间望远镜后端的偏轴红外光谱仪则利用一块自由曲面反射镜平衡系统像散^[3]。

由于近轴像差理论不再适用于偏轴自由曲面等非旋转对称式系统,设计者设计时缺乏必要的理论指导,很难通过像差分布洞察系统成像质量。因此,研究偏轴自由曲面光学系统的像差分布特性可以指导自由曲面系统的设计。2005 年,Thompson 等^[4]利用矢量像差理论,分析了失调光学系统像差节点的分布特性;2013 年,Fuerschbach 等^[5-6]研究了面型误差对像差场分布的影响;2014 年,朱钧等^[7]推导了同轴自由曲面光学系统的像差解析表达式,提供了分析自由曲面像差的方法。

本文以矢量像差理论为基础,研究了以 Fringe Zernike 多项式为表征函数的自由曲面偏轴光学系统像差,推导了系统三阶像散和彗差的解析表达式,根据自由曲面对偏轴系统像差节点分布的影响选取 Zernike 系数,设计了偏轴自由曲面两反光学系统。

2 理论推导

2.1 偏轴矢量像差

从 Hopkins 的波像差理论出发,Thompson 等^[4]结合矢量像差理论推导出的偏轴光学系统三阶波像差解析表达式为

$$W = \Delta W_{20} (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + \Delta W_{11} (\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho}) + \sum_j W_{040j} (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho})^2 + \sum_j W_{131j} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}] (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + \sum_j W_{222j} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}]^2 + \sum_j W_{220j} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)] (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + \sum_j W_{311j} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)] [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}], \quad (1)$$

式中 $\boldsymbol{\rho}$ 为归一化光瞳矢量, \mathbf{H} 为归一化视场矢量, $\boldsymbol{\sigma}_j$ 为系统偏轴产生的视场偏心矢量。 ΔW_{20} 为离焦项的波像差系数, ΔW_{11} 为倾斜项的波像差系数, W_{040j} 为球差波像差系数, W_{131j} 为三阶彗差波像差系数, W_{222j} 为三阶像散波像差系数, W_{220j} 为三阶场曲波像差系数, W_{311j} 为三阶畸变波像差系数。(1)式的前 2 项为离焦项和倾斜项,对成像清晰度没有影响,不予考虑;第 3 项为球差项,与视场无关,不受偏轴影响;第 4~7 项分别代表系统三阶彗差、像散、场曲和畸变。受视场偏心矢量影响,三阶彗差单节点移出视场中心,三阶像散出现双节点现象。

2.2 自由曲面像差

众多的自由曲面表征形式中,Zernike 多项式的面型拟合能力相对较强,广泛应用于商业光学设计软件中,因此针对以 Fringe Zernike 多项式为表征函数的自由曲面进行分析,表达式为

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^{37} C_i Z_i(\rho, \theta), \quad (2)$$

式中 c 为球面曲率, k 为二次项系数, r 为径向口径, C_i 为 Fringe Zernike 多项式系数, $Z_i(\rho, \theta)$ 为 Zernike 多项式的表达式, ρ 和 θ 分别为面型的归一化半径坐标和方位角。该多项式由旋转对称的球面项和非旋转对称的 Zernike 项两部分组成。其中 Zernike 项对像差场的分布影响较大,对像散和彗差的校正起决定性作用^[7]。因此,将单独分析 Fringe Zernike 系数对光学系统像差的影响。

自由曲面对像差的影响不仅与面型有关,还取决于其与光学系统光阑的相对位置^[6,8]。自由曲面远离光阑位置时,轴外视场光线入射到自由曲面上的口径, $\boldsymbol{\rho}$ 会随光阑位置的变化发生偏移, $\boldsymbol{\rho}' = \boldsymbol{\rho} + \Delta\mathbf{h}$,偏移量 $\Delta\mathbf{h}$ 与视场 \mathbf{H} 线性相关。Fringe Zernike 多项式自由曲面在远离光阑位置时产生的波像差解析表达式为

$$\delta_{m/n} = \frac{n_2 - n_1}{\lambda} \sqrt{C_m^2 + C_n^2} \exp \left[\text{iarctan} \left(\frac{C_n}{C_m} \right) \right] Z(\boldsymbol{\rho} + \Delta\mathbf{h}) = \mathbf{V}_{m/n} \cdot Z(\boldsymbol{\rho} + \Delta\mathbf{h}), \quad (3)$$

式中 n_1 和 n_2 分别为自由曲面前后的介质折射率,反射系统 $n_1 = -n_2 = 1$ 。Fringe Zernike 多项式前 9 项系数所对应的自由曲面在远离光阑位置时产生的像散和彗差为

$$FZ W_{\text{ast}+\text{coma}} = \mathbf{V}_{5/6} \cdot \boldsymbol{\rho}^2 + 3\Delta\mathbf{h} \mathbf{V}_{7/8} \mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho}^2 + 3(\mathbf{V}_{7/8} \cdot \boldsymbol{\rho}) (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + 12\mathbf{V}_9 \Delta\mathbf{h}^2 \mathbf{H}^2 \cdot \boldsymbol{\rho}^2 + 24\Delta\mathbf{h} \mathbf{V}_9 (\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho}) (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}), \quad (4)$$

式中 \mathbf{V} 为自由曲面面型矢量,第 1 项为视场常量像散(与视场无关);第 2 项为视场线性像散;第 3 项为视场常

量彗差;第 4 项为视场二次方像散;第 5 项为视场线性彗差。随着系数的增加,像差的视场依赖性更加复杂。

2.3 偏轴自由曲面像差

偏轴自由曲面光学系统理论模型如图 1 所示,球面光学元件发生偏心或倾斜时,光学系统光轴(OAR,物像中心连线)与机械坐标轴(MCA)之间存在夹角 θ ,此时像差场中心将偏离原共轴系统的像面坐标原点。由 2.1 节可知,系统像差因视场偏心矢量 σ_j 而重新分布。而自由曲面对像差场的贡献量为口径偏移矢量 Δh 在像面的投影 $\delta_{m/n}$ 。最终偏轴自由曲面光学系统的像差场分布 H' 将由 σ_j 和 $\delta_{m/n}$ 共同决定。

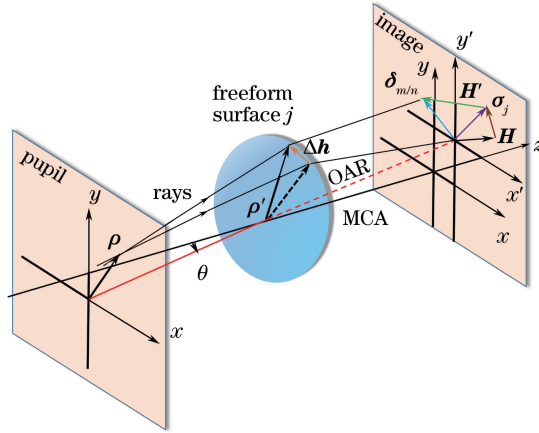


图 1 偏轴自由曲面像差分布理论模型

Fig. 1 Theoretical concept of off-axis freeform surface aberration field distribution

鉴于不同 Fringe Zernike 系数对像差场的贡献不同,分别对不同系数对应的像差进行解析。首先以 $C_{5/6}$ 项系数为例,将该自由曲面加入偏轴系统中,系统的三阶像散解析表达式可以写为

$$\begin{aligned} \text{asti } W_{5/6} &= \frac{1}{2} \sum W_{222j} [(H - \sigma_j)^2 \cdot \rho^2] + V_{5/6} \cdot \rho^2 = \\ &= \frac{1}{2} W_{222} \left[\left(H - \frac{\sum W_{222j} \sigma_j}{W_{222}} \right)^2 + \frac{\sum W_{222j} \sigma_j^2 + 2 V_{5/6}}{W_{222}} - \left(\frac{\sum W_{222j} \sigma_j}{W_{222}} \right)^2 \right] \cdot \rho^2 = \\ &= \frac{1}{2} W_{222} [(H - \text{tilt } a_{222})^2 + \text{tilt } b_{222}^2 + \text{ff } b_{222}^2] \cdot \rho^2 = \frac{1}{2} W_{222} [(H - a_{222})^2 + b_{222}^2] \cdot \rho^2, \end{aligned} \quad (5)$$

式中

$$\text{tilt } b_{222}^2 = \frac{\sum W_{222j} \sigma_j^2}{W_{222}} - \text{tilt } a_{222}^2, \quad (6)$$

$$\text{ff } b_{222}^2 = \frac{2 V_{5/6}}{W_{222}}. \quad (7)$$

由(5)式可知,系统三阶像散随视场的平方变化,因此有 2 个像散节点(像差零点),分别位于 $H = a_{222} \pm i b_{222}$, 如图 2 中红点所示。其中, a_{222} 决定了双节点的对称中心位置。该矢量与文献[5]中 Thompson 定义的偏轴矢量 $\text{tilt } a_{222}$ 相同,即 $a_{222} = \text{tilt } a_{222} = \frac{\sum W_{222j} \sigma_j}{W_{222}}$,说明自由曲面 $C_{5/6}$ 对系统偏轴产生的双节点对称中心位置没有影响。另外,图 2 中双节点的相对位置分别位于 b_{222} 的两个垂直分量 $\pm i b_{222}$ 上,该矢量由偏心矢量 σ_j 和面型矢量 $V_{5/6}$ 共同决定,具体关系如图 3 所示。

利用 CODE V 软件对偏轴自由曲面系统进行仿真,借助软件的视场图(FFD)功能对系统像差进行分析。FFD 是系统真实光线追迹的结果,与像差理论无关,因此可以用来验证上述理论推导。当一个球面系统发生沿弧矢方向的倾斜时,系统像散产生双节点现象,且均位于视场 y 轴上,如图 4(a)所示;共轴自由曲面($C_{5/6}$)产生的像散双节点分布如图 4(b)所示;自由曲面发生倾斜时,像散双节点现象没有改变,双节点对称中心与偏轴产生的双节点对称中心重合,但双节点相对位置发生改变,位于 b_{222} 的两个垂直分量上,如图 4(c)所示。仿真结果与理论推导吻合。

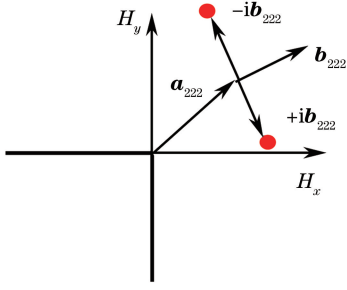


图 2 像散双节点相对位置关系

Fig. 2 Relative location of the binodal astigmatism

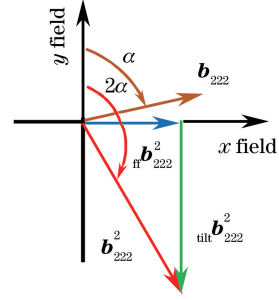


图 3 b_{222} 矢量的确定

Fig. 3 Calculation of vector b_{222}

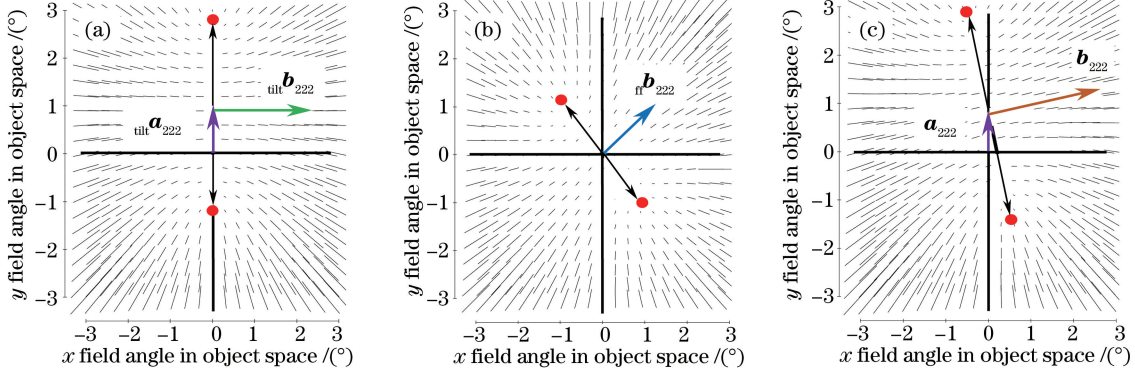


图 4 双节点像散分布。(a) 偏轴系统；(b) $C_{5/6}$ 项自由曲面系统；(c) 偏轴自由曲面系统

Fig. 4 Binodal astigmatism distribution. (a) Off-axis system; (b) freeform surface ($C_{5/6}$) system;

(c) off-axis freeform surface system

对 $C_{7/8}$ 项面型进行分析。由(4)式可知, $C_{7/8}$ 项面型在远离光阑位置时会同时产生视场线性像散和视场常量彗差。对系统三阶像散进行解析得

$$\begin{aligned} \text{asti } W_{7/8} &= \frac{1}{2} \sum W_{222j} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)^2 \cdot \boldsymbol{\rho}^2] + 3\Delta h \mathbf{V}_{7/8} \mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho}^2 = \\ &= \frac{1}{2} W_{222} \left[\left(\mathbf{H} - \frac{\sum W_{222j} \boldsymbol{\sigma}_j - 3\Delta h \mathbf{V}_{7/8}}{W_{222}} \right)^2 + \frac{\sum W_{222j} \boldsymbol{\sigma}_j^2}{W_{222}} - \left(\frac{\sum W_{222j} \boldsymbol{\sigma}_j - 3\Delta h \mathbf{V}_{7/8}}{W_{222}} \right)^2 \right] \cdot \boldsymbol{\rho}^2 = \\ &= \frac{1}{2} W_{222} [(\mathbf{H} - \mathbf{a}_{222})^2 + \mathbf{b}_{222}^2] \cdot \boldsymbol{\rho}^2, \end{aligned} \quad (8)$$

此类系统的三阶像散同样呈现双节点特性。值得注意的是, 由于 $C_{7/8}$ 面型产生的像散具有视场依赖性, 自由曲面的引入改变了双节点的对称中心位置, 具体为偏轴和面型两个矢量相叠加的结果, 并且双节点的相对位置仍由偏轴和面型共同决定, 如图 5 所示。

系统三阶彗差可表示为

$$\begin{aligned} \text{coma } W_{7/8} &= \sum W_{131j} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}] (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + 3(\mathbf{V}_{7/8} \cdot \boldsymbol{\rho}) (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) = \\ &= \left\{ W_{131} \left[\mathbf{H} - \left(\frac{\sum W_{131j} \boldsymbol{\sigma}_j - 3 \mathbf{V}_{7/8}}{W_{131}} \right) \right] \cdot \boldsymbol{\rho} \right\} (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) = [W_{131} (\mathbf{H} - \mathbf{a}_{131}) \cdot \boldsymbol{\rho}] (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}), \end{aligned} \quad (9)$$

由(9)式可知, 系统只有一个三阶彗差节点, 位于 $\mathbf{H} = \frac{\sum W_{131j} \boldsymbol{\sigma}_j - 3 \mathbf{V}_{7/8}}{W_{131}}$ 。图 6(a)~(c) 分别为偏轴系统、共轴自由曲面系统和偏轴自由曲面系统三阶彗差分布。偏轴系统的彗差单节点特性没有因 $C_{7/8}$ 项自由曲面的引入而改变, 但其节点位置将远离视场中心。

对 C_9 项进行分析。由(4)式可知, C_9 项自由曲面产生视场平方像散和视场线性彗差, 将其引入共轴系统中时, 系统像散和彗差节点仍在视场中心。但将其引入偏轴系统后, 系统像散和彗差节点特性发生改变。偏

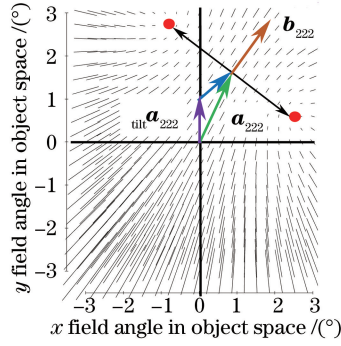

 图 5 偏轴自由曲面($C_{7/8}$ 项)双节点像散分布

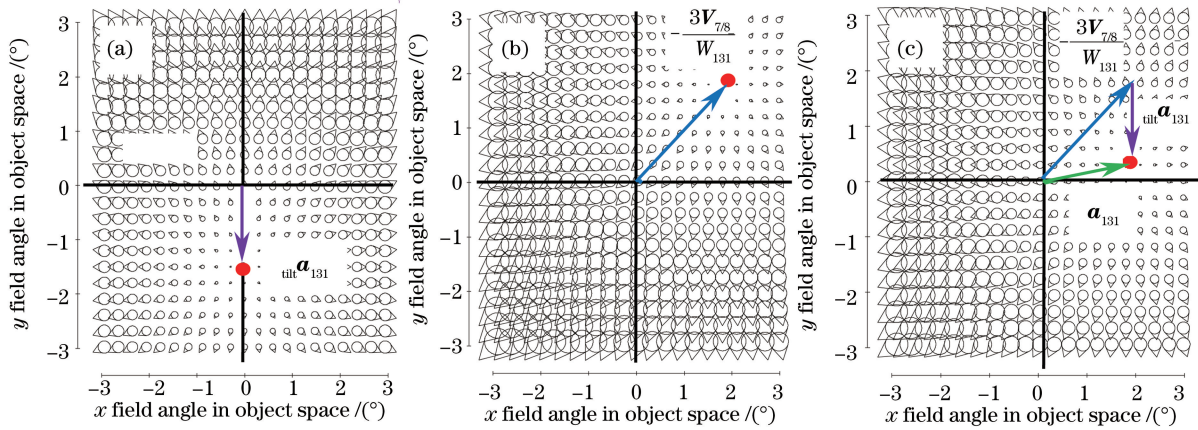
 Fig. 5 Binodal astigmatism distribution of off-axis freeform surface ($C_{7/8}$)

 图 6 单节点彗差分布。(a) 偏轴系统；(b) $C_{7/8}$ 项自由曲面系统；(c) 偏轴自由曲面系统

 Fig. 6 Node coma distribution. (a) Off-axis system; (b) freeform surface ($C_{7/8}$) system; (c) off-axis freeform surface system

轴自由曲面 C_9 项的三阶像散解析表达式为

$$\begin{aligned} \text{asti } W_9 &= \frac{1}{2} \sum W_{222j} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)^2 \cdot \boldsymbol{\rho}^2] + 12V_9 \Delta h^2 \mathbf{H}^2 \cdot \boldsymbol{\rho}^2 = \\ &= \frac{1}{2} k W_{222} \left\{ \left(\mathbf{H} - \frac{1}{k} \text{tilt } \mathbf{a}_{222} \right)^2 + \frac{1}{k} \left[\text{tilt } \mathbf{b}_{222}^2 + \left(\frac{k-1}{k} \right) \text{tilt } \mathbf{a}_{222}^2 \right] \right\} \cdot \boldsymbol{\rho}^2 = \frac{1}{2} k W_{222} \left[\left(\mathbf{H} - \frac{1}{k} \text{tilt } \mathbf{a}_{222} \right)^2 + \mathbf{b}_{222}^2 \right] \cdot \boldsymbol{\rho}^2, \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $k = \frac{W_{222} + 24\Delta h^2 V_9}{W_{222}}$, 与偏轴无关。矢量 $\frac{1}{k} \text{tilt } \mathbf{a}_{222}$ 决定双节点对称中心位置, 方向只由偏轴决定, 与面型无关, 但大小与面型有关, 而双节点的相对位置与面型和偏轴都相关。 C_9 项偏轴自由曲面系统的双节点像散分布情况如图 7 所示。由于系统仅在弧矢方向发生偏轴, 因此双节点对称中心在视场 y 轴上, 且双节点关于视场 y 轴对称。

C_9 项自由曲面对偏轴系统彗差分布的影响可表示为

$$\begin{aligned} \text{coma } W_9 &= \sum W_{131j} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}] (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + 24\Delta h V_9 (\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho}) (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) = \\ &= W_{131} \left\{ \left[\left(1 + \frac{24\Delta h V_9}{W_{131}} \mathbf{H} \right) - \text{tilt } \mathbf{a}_{131} \right] \cdot \boldsymbol{\rho} \right\} (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}), \end{aligned} \quad (11)$$

由(11)式可知, 由于彗差的视场线性特性没有改变, 因此单节点现象依然存在, 位于 $\mathbf{H} = \mathbf{a}_{131}/m \text{tilt}$, 其中 $m = 1 + 24\Delta h V_9/W_{131}$ 为仅与面型有关的常数。 $m > 0$ 时, 节点位置与偏轴方向相同; $m < 0$ 时, 节点位置与偏轴方向相反。图 8 为偏轴 C_9 项自由曲面的彗差节点分布情况, 若系统仅沿弧矢方向倾斜, 则彗差节点仍在视场 y 轴上。

同理可得其余 Fringe Zernike 多项式系数对应的自由曲面对偏轴系统像差场分布的影响。随着自由曲

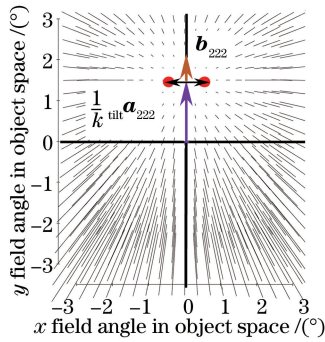


图 7 偏轴自由曲面(C_9)双节点像散分布
Fig. 7 Binodal astigmatism distribution of off-axis freeform surface (C_9)

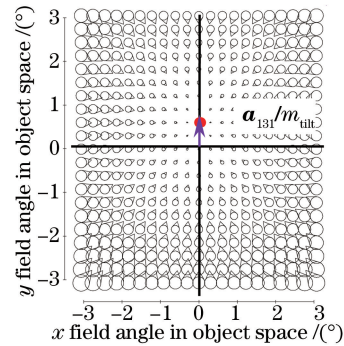


图 8 偏轴自由曲面(C_9)彗差节点分布
Fig. 8 Coma node distribution induced by off-axis freeform surface (C_9)

面项数的增加,像差节点的分布更加多样,对高阶像差的校正能力更强。

3 设计实例

3.1 设计指标

根据 2.3 节分析的偏轴自由曲面系统像差分布特性,设计了长焦距偏轴两反自由曲面红外光学系统。该系统采用 $384 \text{ pixel} \times 288 \text{ pixel}$ 非制冷红外焦平面探测器(DLC384-25 μm ,大立科技公司,中国),像素尺寸为 $25 \mu\text{m}$ 。光学系统技术指标如表 1 所示。

表 1 光学系统技术指标

Table 1 Specifications of optical system

Spectrum range	Focal length	Pupil diameter	Field of view
8~12 μm	500 mm	300 mm	$1.2^\circ \times 1^\circ$

3.2 设计方法

为使光学系统结构紧凑,需将光路折叠,并保持探测器与入瞳垂直放置。从同轴两反二次曲面系统出发校正球差,以获得较为合理的光焦度分配^[9-11];再逐步倾斜主镜,将次镜引出成像光路,避免中心遮拦;而后次镜倾斜相应角度,保证最终像面水平(与入瞳垂直放置);最后通过加入特定的优化操作数,控制光阑、主镜和次镜三者的相对位置关系,保证结构合理性^[12-16]。至此,初始光路搭建完成。由于系统偏轴使三阶像散和彗差节点移出视场,视场内残余像差量较大。为平衡这种非对称像差,将主镜改为 Fringe Zernike 多项式自由曲面,并根据 2.3 节的理论分析,为保证像差分布的对称性,选取 C_5 项作为优化变量,控制系统像散节点位置;引入 C_8 项,同时对三阶彗差和像散分布进行调整;加入 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{15} 、 C_{21} 项,对系统大相对孔径产生的高阶像散和彗差进行补偿;引入 C_4 、 C_9 、 C_{16} 项对系统离焦和高阶球差进行补偿,同时微调像散和彗差节点。但由于系统偏轴量较大,一片自由曲面很难完成对该偏轴像差的校正,像散和彗差节点仍不在视场中,因此需要进一步增加优化自由度,将次镜也改为自由曲面。次镜 Fringe Zernike 系数的选取方法与主镜相同。仅主镜为自由曲面和主次镜均为自由曲面的系统波前误差均方根(RMS)值的对比如图 9 所示。仅主镜为自由曲面时,边缘视场的非对称像差未校正完全,次镜也引入自由曲面后,系统全视场波前误差进一步降低,RMS 达到 $\lambda/20$,此时边缘视场和中心视场成像质量相当。

3.3 设计结果

系统光路如图 10 所示,主镜和次镜分别沿弧矢方向倾斜 25° 和 65° ,像面水平放置。图 11 为主次镜去掉球面项和离焦项的矢高图,将主镜和次镜改为自由曲面,成像质量相对于两片二次曲面有较大提高,且由于面型采用轴对称设计,保证了最终像质关于视场 y 轴对称。系统三阶像散和彗差的节点均被移至视场中心(图 12),平衡了偏轴带来的残余像差。图 13 为系统调制传递函数(MTF)曲线,从图中可以看出在奈奎斯特频率 20 lp/mm 处系统各视场 MTF 优于 0.4,系统成像质量良好,满足使用需求。

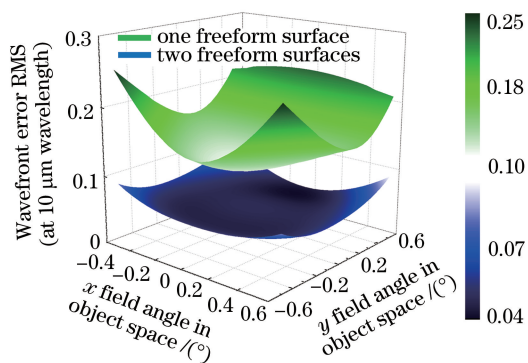


图 9 采用一片和两片自由曲面的系统波前误差 RMS 对比

Fig. 9 Comparison of system wavefront error RMS with one or two freeform surfaces

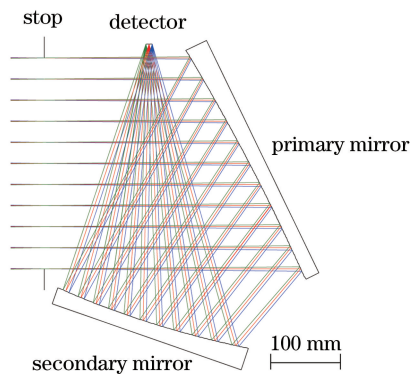


图 10 光学系统光路图

Fig. 10 Layout of optical system

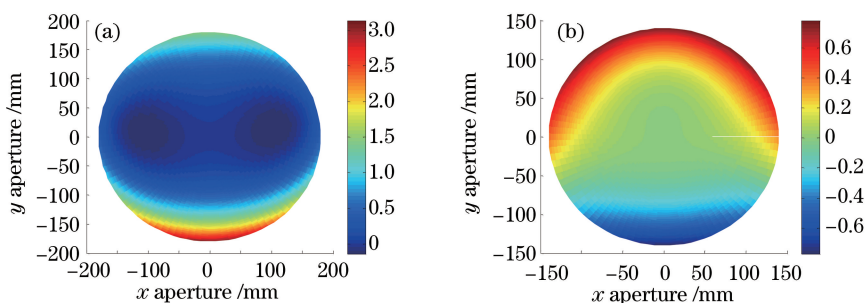


图 11 去掉球面项和离焦项的自由曲面矢高图。(a) 主镜；(b) 次镜

Fig. 11 Sag of freeform mirror with sphere and defocus removed. (a) Primary mirror; (b) secondary mirror

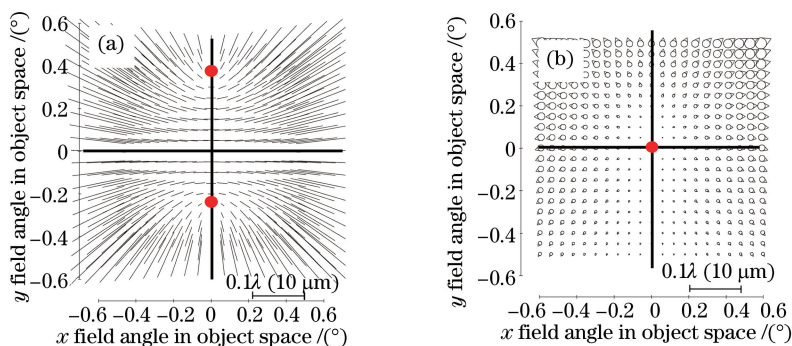


图 12 (a) 三阶像散分布；(b) 三阶彗差分布

Fig. 12 (a) Third-order astigmatism distribution; (b) third-order coma distribution

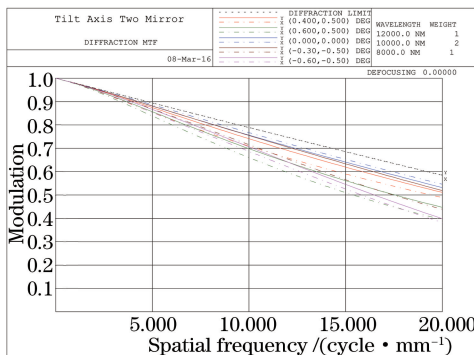


图 13 系统 MTF 曲线

Fig. 13 System MTF curves

4 结 论

偏轴系统的三阶像散双节点和三阶彗差单节点现象均未因低阶 Fringe Zernike 多项式自由曲面的引入而改变,但节点位置随面型变化发生变化。利用自由曲面对偏轴系统像差分布的影响,有针对性地控制系统像差节点位置,从而实现偏轴系统非对称像差的校正。对于高阶像差的校正,还需进一步分析高阶自由曲面对偏轴系统像差分布的影响。

参 考 文 献

- 1 Pan Junhua, Li Xinnan. Design of a tilted two-mirror optical system[J]. Acta Optica Sinica, 1994, 14(8): 867-871.
潘君骅, 李新南. 偏轴两镜系统的设计[J]. 光学学报, 1994, 14(8): 867-871.
- 2 Plummer W T. Unusual optics of the Polaroid SX-70 Land camera[J]. Applied Optics, 1982, 21(2): 196-202.
- 3 Winsor R S, MacKenty J W, Stiavelli M, *et al.*. Optical design for an infrared multi-object spectrometer (IRMOS) [C]. SPIE, 2000, 4092: 102-108.
- 4 Thompson K. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2005, 22(7): 1389-1401.
- 5 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.
- 6 Fuerschbach K, Rolland J P, Thompson K P. Theory of aberration fields for general optical systems with freeform surfaces[J]. Optics Express, 2014, 22(22): 26585-26606.
- 7 Yang T, Zhu J, Jin G F. Nodal aberration properties of coaxial imaging systems using Zernike polynomial surfaces[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2015, 32(5): 822-836.
- 8 Shi Haodong, Jiang Huilin, Zhang Xin, *et al.*. Research on freeform optical system aberration characteristic based on vector aberration[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1208003.
史浩东, 姜会林, 张 新, 等. 基于矢量像差的自由曲面光学系统像差特性研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1208003.
- 9 Shi Guangwei, Zhang Xin, Zhang Jianping. Unobscured catadioptric infrared optical systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8): 1995-2000.
史广维, 张 新, 张建萍. 无遮拦折反射红外光学系统[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(8): 1995-2000.
- 10 Gautam S, Gupta A, Singh G S. Optical design of off-axis Cassegrain telescope using freeform surface at the secondary mirror[J]. Optical Engineering, 2015, 54(2): 025113.
- 11 Bauer A, Rolland J P. Design of a freeform electronic viewfinder coupled to aberration fields of freeform optics[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 28141-28153.
- 12 Zhou Xiangdong, Bai Jian. Small distortion panoramic annular lens design with Q-type aspheres[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0722003.
周向东, 白 剑. Q-Type 非球面小畸变全景环带光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0722003.
- 13 Zhao Chunzhu, Cui Qingfeng, Zhao Yuanming, *et al.*. Design of fuselage conformal optical system based on freeform correctors[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1022010.
赵春竹, 崔庆丰, 赵渊明, 等. 基于自由曲面校正器的机身共形光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1022010.
- 14 Hao Peiming, Li Kexin, Yuan Liyin. Third-order aberration correction of two-mirror optical systems with zero-optical power corrector[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0222004.
郝沛明, 李可新, 袁立银. 带有无光焦度校正板两镜系统的三级像差校正[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0222004.
- 15 Liu Jun, Huang Wei, Xu Weicai, *et al.*. Optical design of the off-axis three-mirror reflective telecentric system with wide field of view[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 122203.
刘 军, 黄 玮, 许伟才, 等. 大视场像方远心离轴三反射镜光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 122203.
- 16 Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, *et al.*. Optical design and stray light analysis for ultraviolet board width off-axis four mirrors optical system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0216001.
朱 杨, 张 新, 伍雁雄, 等. 紫外宽幅离轴四反光学系统设计及其杂散光分析[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0216001.