

基于矢量像差的自由曲面光学系统像差特性研究

史浩东¹ 姜会林¹ 张 新² 王灵杰² 伍雁雄²

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Zernike多项式为表征函数的自由曲面光学系统像差分析方法,推导了在未消像散和彗差的光学系统中引入自由曲面后系统像差解析表达式,利用光学设计软件对远离光阑位置的自由曲面所导致的像差节点分布特性进行了仿真实验验证。仿真结果与理论推导一致,证明该方法可以用来解析自由曲面光学系统像差。最后,应用该方法设计了含有自由曲面的大视场离轴三反光学系统。系统焦距850 mm, F 数6.5,系统在成像视场 $20^\circ \times 2^\circ$ 范围内的畸变小于0.25%,成像质量满足使用要求。

关键词 光学设计; 矢量像差; 自由曲面; Zernike多项式

中图分类号 O435.2 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1208003

Research on Freeform Optical System Aberration Characteristic Based on Vector Aberration

Shi Haodong¹ Jiang Huilin¹ Zhang Xin² Wang Lingjie² Wu Yanxiong²

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, Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

Abstract Based on the vector aberration theory, an analysis method of aberration field distribution induced by Zernike polynomial freeform surface is proposed. The analysis expression of aberration by inducing freeform surfaces into the optical system with residual astigmatism and coma is deduced. The aberration nodal distribution leaded by freeform surface which is away from the stop position is simulated by optical design software. The simulation result is agreed with the analysis result which proves the method can be utilized to analyze the freeform optical system aberration. Lastly, a three mirror optical system with large field of view including freeform surface is designed by utilizing this method. The effective focal length is 850 mm, F number is 6.5, the field of view is $20^\circ \times 2^\circ$. The result shows that the system distortion is lower than 0.25% through the field of view. The system can achieve the requirement of earth observation.

Key words optical design; vector aberration; freeform surface; Zernike polynomial

OCIS codes 220.1250; 080.1010; 080.4228; 240.6700

1 引言

随着人们对大视场、非旋转对称式光学系统的需求不断增加,传统球面或非球面已经很难完成对此类光学系统像差的校正。需要采用面型更加复杂的自由曲面对局部光线进行控制,从而达到平衡全视场像差

收稿日期: 2015-05-18; 收到修改稿日期: 2015-07-02

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,博士,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: hljiang@cust.edu.cn

的目的^[1-4]。例如,欧洲特大望远镜项目(E-ELT)中的中波红外成像光谱仪,其主镜采用自由曲面后,使得次镜和三镜由原先设计的非球面改为球面,在提高成像质量的同时,降低了加工成本^[5];荷兰航天局设计的臭氧层监视系统的主镜和次镜同样采用自由曲面,实现了2600km的超大幅宽^[6]。我国由于受加工水平的限制,自由曲面的应用还处在起步阶段^[7-11]。值得注意的是,虽然自由曲面能够为设计提供更多的自由度,但由于其非旋转对称的特性,使得传统的近轴像差理论不再适用。设计者只能依靠软件对此类系统进行盲目优化,不能通过面型的变化情况洞察和控制系统的像差分布,而且过于复杂的面型还会增加加工和检测的难度。因此,研究含有自由曲面光学系统的像差特性对于进一步完善光学像差理论以及推广自由曲面的应用具有重要意义。

光学自由曲面的表征形式多种多样,目前常用的有:非均匀有理B样条(NURBS)、高斯径向基函数(GRBF)、Forbes多项式、Zernike多项式等^[12]。其中,Zernike多项式对复杂面型的拟合精度较高,并且能够与像差项对应,常被用于检测面型误差和解析光学系统波前。而针对非旋转对称式光学系统像差特性的研究始于20世纪80年代,由Buchroeder提出,经Shack发展为矢量像差理论,后被Thompson等^[13]根据像差零点的分布特性扩展为节点像差理论(NAT);最近,Fuerschbach等^[14-15]结合矢量像差理论,研究了面型误差对像差场分布的影响,为分析自由曲面像差提供了方法。

本文将以矢量像差理论为基础,重点研究以Zernike多项式为表征函数的自由曲面光学系统像差,分析自由曲面面型对光学系统像散和彗差节点分布的影响,并据此,有针对性的选取Zernike系数,设计了一个含有自由曲面的偏视场三反射光学系统。

2 自由曲面像差特性研究

2.1 矢量像差理论

传统旋转对称式光学系统波像差一般采用Hopkins标量形式表示^[13]:

$$W = \sum_j \sum_p \sum_n \sum_m (W_{klm})_j H^k \rho^l \cos^m \phi, \quad (1)$$

其中, $k = 2p + m$, $l = 2n + m$, W_{klm} 为波像差系数, H 为视场坐标, ρ 为光瞳坐标。

之后,Shack将上述标量形式改写为含有视场坐标矢量 \mathbf{H} 和光瞳坐标矢量 $\boldsymbol{\rho}$ 的表达式,形成矢量像差理论^[12]:

$$W = \sum_j \sum_p \sum_n \sum_m (W_{klm})_j (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H})^p (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho})^n (\mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho})^m. \quad (2)$$

利用该理论可以解析非旋转对称式光学系统的波像差,而自由曲面最大的特点就是非旋转对称。因此,考虑利用矢量像差理论对含有自由曲面光学系统的像差进行解析。

2.2 光阑位置对像差分布的影响

光学系统的像差分布与光阑位置密切相关^[14]。以一个单反射球面系统为例(如图1所示),在入瞳直径不变的情况下,当光阑位置分别位于球面或远离球面时,某视场光线经光阑入射到球面上的区域分别为A和B,两区域之间有一个光瞳偏移矢量 $\Delta \mathbf{h}$,该偏移矢量将影响光学系统波像差分布,如下式所示:

$$W(\boldsymbol{\rho}) = W(\boldsymbol{\rho}' + \Delta \mathbf{h}), \quad (3)$$

偏移矢量表示为

$$\Delta \mathbf{h} = \begin{pmatrix} \bar{y} \\ y \end{pmatrix} \mathbf{H} = \begin{pmatrix} ut \\ y \end{pmatrix} \mathbf{H}, \quad (4)$$

其中, \bar{y} 表示主光线的入射高度, y 表示边缘光线高度, u 表示主光线入射角, t 为光阑移动的距离。

针对自由曲面而言,当光阑与自由曲面位置重合时,在同一口径下,各视场光线入射到自由曲面表面的范围均相同,面型对各视场光线的作用也相同,即此时自由曲面所产生的像差贡献量与视场无关。而当光阑位置远离自由曲面时,由于 $\Delta \mathbf{h}$ 与视场矢量 \mathbf{H} 相关,因而自由曲面产生的像差分布将随视场发生改变。为了能够分析自由曲面在光学系统任意位置时对像差分布的影响,以下将根据此方法对远离光阑位置的自由曲面像差解析式进行推导。

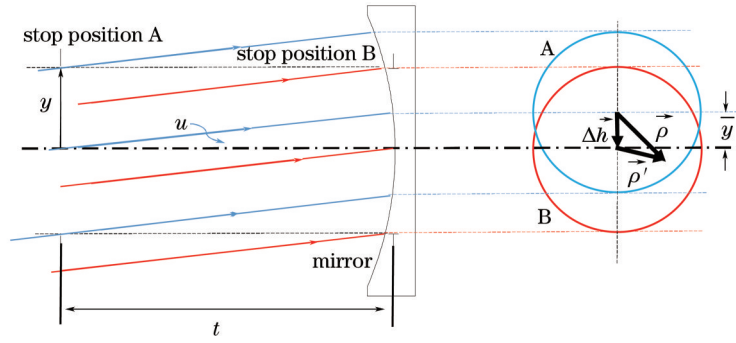


图1 光阑位置对入射口径的影响

Fig.1 Pupil effected by stop position

2.3 自由曲面像差的解析

Zernike 多项式被广泛应用在现有商业光学设计软件当中,其面型表达形式由非球面项和高阶震荡项组成:

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^{66} z_i Z_i(\rho, \theta), \quad (5)$$

其中, c 为球面曲率, k 为二次项系数, r 为径向口径, z_i 为 Zernike 多项式系数。由于 Zernike 多项式在单位圆域内正交且与像差项相对应,用其表征自由曲面时,可以对每项 Zernike 系数产生的像差贡献量进行分析。这里将主要分析去掉非球面项后对成像清晰度有影响的 Zernike 系数。

首先以 Zernike 多项式中 Z_4 、 Z_6 项面型为例,分析该面型的像差贡献量。面型的大小和方向表示为

$$\begin{cases} Z_4 = z_4[\rho^2 \cos(2\theta)] \\ Z_6 = z_6[\rho^2 \sin(2\theta)] \end{cases}, \quad (6)$$

$$|z_{4/6}| = \sqrt{z_4^2 + z_6^2}, \quad (7)$$

$$\xi_{4/6} = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{z_6}{z_4} \right). \quad (8)$$

根据矢量像差理论^[13],当自由曲面位于光阑位置时产生与视场无关的像散可表示为

$$W_{\text{stop}}(\rho) = \frac{1}{2} (B_{222}^2 \cdot \rho^2), \quad (9)$$

其中,

$$B_{222}^2 = 2|z_{4/6}| \exp(i2\xi_{4/6}), \quad (10)$$

当自由曲面远离光阑位置时,根据 2.2 节的方法,引入 Δh 光瞳偏移矢量,展开后得:

$$W_{\text{NotStop}}(\rho, \Delta h) = \frac{1}{2} [B_{222}^2 \cdot (\rho + \Delta h)^2] = \frac{1}{2} (B_{222}^2 \cdot \rho^2 + 2B_{222}^2 \cdot \Delta h \rho + B_{222}^2 \cdot \Delta h^2), \quad (11)$$

根据 Shack 提出的矢量乘法运算法则^[12]

$$A \cdot BC = AB^* \cdot C, \quad (12)$$

对(11)式进行整理得:

$$W_{\text{NotStop}}(\rho, H) = \frac{1}{2} \left[B_{222}^2 \cdot \rho^2 + 2B_{222}^2 \left(\frac{\bar{y}}{y} \right) H^* \cdot \rho + B_{222}^2 \cdot \left(\frac{\bar{y}}{y} \right)^2 H^2 \right], \quad (13)$$

在(13)式中,除常量像散外,还有倾斜项和平移项。但这两项对成像清晰度没有影响,将不予考虑。综上,无论 Zernike 多项式 Z_4 、 Z_6 项面型是否远离光阑位置,都将产生与视场无关的常量像散。

将该自由曲面产生的像散量与系统固有像散相加,得到含有自由曲面光学系统的像散解析表达式:

$$W_{\text{ASTI}} = \frac{1}{2} (W_{222} H^2 + B_{222}^2) \cdot \rho^2, \quad (14)$$

若原系统消像散 ($W_{222} = 0$),在引入 Z_4 、 Z_6 项自由曲面后,系统产生的像散大小和方向不随视场改变,仅

与口径的平方有关。

若原系统未消像散 ($W_{222} \neq 0$) , 则

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(W_{222}H^2 + B_{222}^2)\cdot\rho^2 &= 0, \\ H &= \pm i \frac{B_{222}}{\sqrt{W_{222}}}. \end{aligned} \quad (15)$$

由此可知, 当引入 Z_4 、 Z_6 项自由曲面后, 系统像散大小随视场的平方发生变化, 像散节点由原来的一个变为两个。

下面再以 Zernike 多项式 Z_8 、 Z_9 项面型为例。

$$\begin{cases} Z_8 = z_8[(3\rho^3 - 2\rho)\cos\theta] = z_8\left(3\rho^3\cos\theta - \frac{z_8}{z_2}Z_2\right) \\ Z_9 = z_9[(3\rho^3 - 2\rho)\sin\theta] = z_9\left(3\rho^3\sin\theta - \frac{z_9}{z_3}Z_3\right) \end{cases}. \quad (16)$$

由于 Z_2 与 Z_3 对应波像差的倾斜项, 对成像清晰度没有影响, 这里将其舍去, 得

$$\begin{cases} Z_8 = z_8(3\rho^3\cos\theta) \\ Z_9 = z_9(3\rho^3\sin\theta) \end{cases}, \quad (17)$$

$$|z_{8/9}| = \sqrt{z_8^2 + z_9^2}, \quad (18)$$

$$\xi_{8/9} = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{z_9}{z_8}\right). \quad (19)$$

当该自由曲面位于光阑位置时, 产生与视场无关的彗差

$$W_{\text{Stop}}(\rho) = (A_{131}\cdot\rho)(\rho\cdot\rho), \quad (20)$$

其中,

$$A_{131} = 3|z_{8/9}|\exp(i\xi_{8/9}). \quad (21)$$

当该自由曲面远离光阑位置时, 其产生的像差为:

$$\begin{aligned} W_{\text{NotStop}}(\rho, \Delta h) &= [A_{131}\cdot(\rho + \Delta h)][(\rho + \Delta h)\cdot(\rho + \Delta h)] \\ &= (A_{131}\cdot\rho)(\rho\cdot\rho) + A_{131}\Delta h\cdot\rho^2 + 2(A_{131}\cdot\Delta h)(\rho\cdot\rho) \\ &\quad + 2(\Delta h\cdot\Delta h)(A_{131}\cdot\rho) + A_{131}^*\Delta h^2\cdot\rho + (A_{131}\Delta h)(\Delta h\cdot\Delta h) \end{aligned} \quad (22)$$

由(22)式可知, 当 Zernike 多项式 Z_8 、 Z_9 项自由曲面远离光阑位置时, 产生对成像清晰度有影响的像差项有: 与视场无关的常量彗差(第一项)、视场线性像散(第二项)、视场线性场曲(第三项)。

同样, 将该面型的像散贡献量引入系统固有像差中, 新的像散为

$$W_{\text{ASTI}} = \frac{1}{2}W_{222}H^2\cdot\rho^2 + A_{131}\Delta h\cdot\rho^2 = \frac{1}{2}W_{222}H^2 + \left(\frac{\bar{y}}{y}\right)A_{131}H\cdot\rho^2, \quad (23)$$

当原系统消像散时 ($W_{222} = 0$), Z_8 、 Z_9 项对应的面型将产生视场线性像散, 像散节点位于视场零点; 当原系统未消像散时 ($W_{222} \neq 0$),

$$\frac{1}{2}W_{222}H^2 + \left(\frac{\bar{y}}{y}\right)A_{131}H = 0. \quad (24)$$

根据(24)式可以求出引入该类自由曲面后系统的像散节点分布情况。其双节点分别位于视场零点和零点外一点。

$$H = 0, H = -2\left(\frac{\bar{y}}{y}\right)\frac{A_{131}}{W_{222}}, \quad (25)$$

再对系统彗差进行分析:

$$W_{\text{COMA}} = (W_{131}H\cdot\rho + A_{131}\cdot\rho)(\rho\cdot\rho), \quad (26)$$

当原系统消彗差 ($W_{131} = 0$) 时,加入该面型后,系统的彗差大小和方向与视场无关。

当原系统未消彗差 ($W_{131} \neq 0$) 时,可求出彗差零点位于

$$H = -\frac{A_{131}}{W_{131}} \quad (27)$$

即加入该自由曲面后,系统的彗差节点将移出视场零点,彗差大小将随视场线性变化。

以此类推,可以得到其余 Zernike 多项式系数所对应的自由曲面面型在远离光阑位置时产生的像差场分布特性。表 1 列出了不同 Zernike 系数对应面型所产生的三阶和五阶像差随视场变化情况。

表 1 以 Zernike 多项式表征的自由曲面像差随视场变化情况

Table 1 Variation of freeform surface aberration with field described by Zernike polynomial

Zernike	Astigmatism	Coma	Curvature	Elliptical coma	Oblique spherical	5 th order coma
Z_4Z_6	Constant	-	-	-	-	-
Z_8Z_9	Linear	Constant	Linear	-	-	-
Z_7Z_{10}	Linear	-	-	Constant	-	-
$Z_{12}Z_{14}$	Quadratic	Linear	Quadratic	Linear	Constant	-
$Z_{18}Z_{19}$	Cubic	Quadratic	Cubic	Quadratic	Linear	Constant

由表 1 可知,随着 Zernike 多项式系数增高,其对应的自由曲面面型的高阶量随之增多,并且与视场的关系更加复杂。因此,高阶像差的校正需要用到较多的 Zernike 系数。

3 仿真实验

本节将借助 CodeV 软件中的视场图对自由曲面单反射镜系统的像差场分布进行分析,以验证上述理论推导的正确性。视场图是软件通过真实光线追迹得到系统波前后,再利用 Zernike 多项式对波前进行拟合的结果。可以利用视场图独立查看系统不同种类像差的大小、方向随视场的变化情况。

设反射镜球面半径为 100 mm,将光阑置于距球面顶点 100 mm 处时,系统消像散和彗差;当距离 60 mm 处时,系统存在残余像散和彗差。分别将 Zernike 多项式 Z_4 和 Z_8 项加入球面反射镜中,分析该自由曲面系统的像散和彗差分布情况,如图 2~5 所示。图中红点表示像差节点位置。

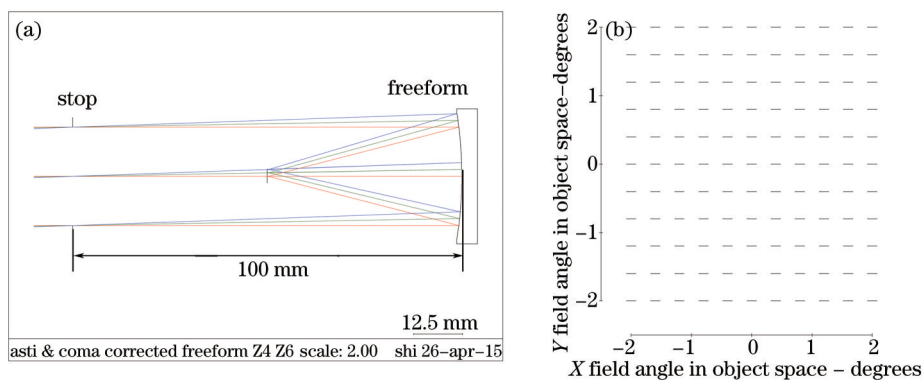


图 2 (a)消像散和彗差系统和(b) Z_4 项自由曲面产生的视场常量像散

Fig.2 (a) Astigmatism and coma corrected system and (b) field constant astigmatism induced by Z_4

通过以上仿真结果可以看出,系统像散和彗差的分布符合 2.3 节的推导结果,证明该方法可以用来解析以 Zernike 多项式表征的自由曲面光学系统像差。

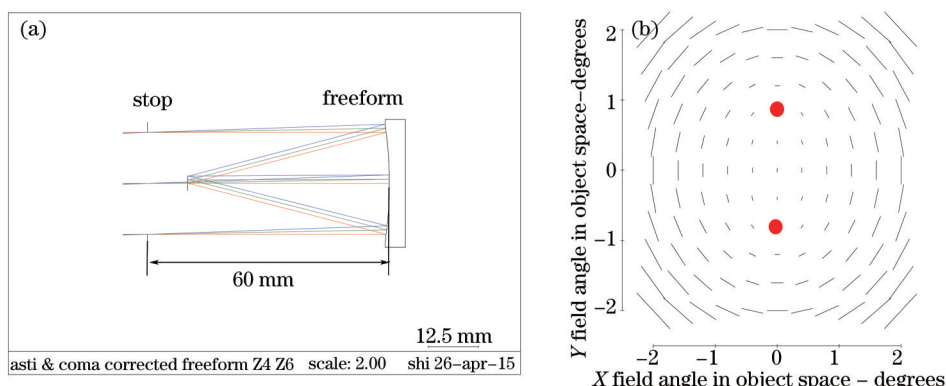


图 3 (a) 未消像散和彗差系统和(b) Z_4 项自由曲面产生的视场线性像散及双节点现象

Fig.3 (a) Astigmatism and coma uncorrected system and (b) field linear astigmatism and binodal induced by Z_4

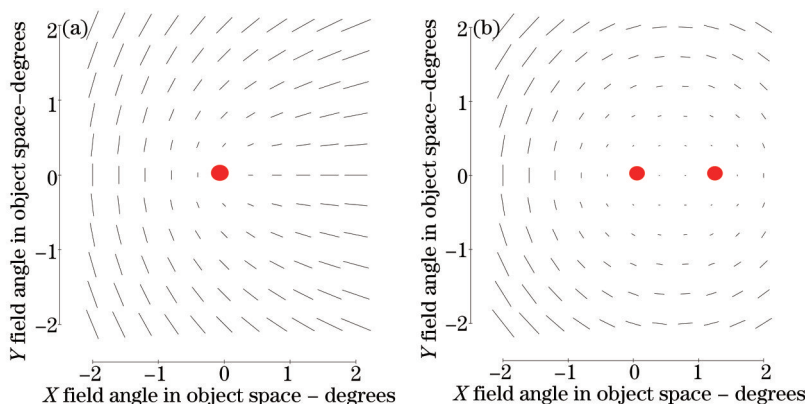


图 4 (a) 消像散系统加入 Z_8 项后视场线性像散和(b)未消像散系统加入 Z_8 项后双节点像散

Fig.4 Field linear astigmatism induced by Z_8 with anastigmatism system and (b) binodalastigmatism induced by Z_8 with residual astigmatism

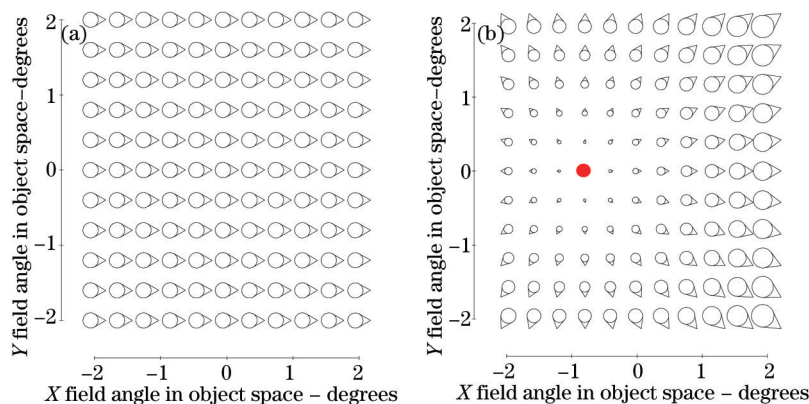


图 5 (a) 消彗差系统加入 Z_8 项后常量彗差和(b)未消像散系统加入 Z_8 项后彗差节点偏移

Fig.5 (a) Field constant coma induced by Z_8 with anastigmatism system and

(b) astigmatism nodal displacement induced by Z_8 with residual astigmatism

4 设计实例

为了将该理论与实际设计相结合,本节将利用该理论设计一个Cook式三反光学系统。要求该系统在644.5 km轨道高度处实现分辨率10 m、幅宽225 km的空间对地观测。为充分体现自由曲面面型对像差场分布的影响,令该系统各元件不含有偏心和倾斜,仅利用偏视场的方法消除中心遮拦。系统光学指标如表2所示。

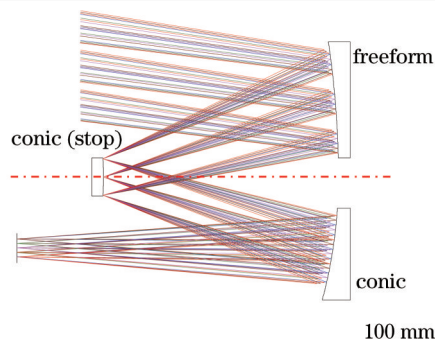


图 6 光学系统结构图

Fig.6 Layout of optical system

表 2 主要光学指标

Table 2 Major optical specifications

Specification	Parameters
Focal length	850 mm
F number	6.5
Field of view	$20^\circ \times 2^\circ$
Distortion	$< 0.5\%$
Pixel size	$13 \mu\text{m}$

光学系统初始结构为三片二次曲面,此时系统像散和彗差的节点在视场零点,并围绕视场中心旋转对称。为消除中心遮拦和一次杂光的影响,设计时需要适当选取视场偏离量。但是,这将导致实际使用的视场不在视场零点,像差量较大,达不到设计要求。为平衡实际视场中的像差,在远离光阑位置的主镜上引入自由曲面,通过有针对性的选取 Zernike 系数,实现对像差节点位置的控制,使彗差和像散的节点移至实际使用视场当中,以提高实际使用视场内的成像质量。

根据 2.3 节所分析的自由曲面像差场分布特性,利用 Zernike 多项式中的 Z_4 和 Z_{10} 项对像散节点分布进行控制,使系统产生双节点像散;而后引入 Z_{19} 项,系统像散变为三节点,系统彗差大小与视场平方成比例,出现双节点彗差;再利用 Z_9 项对像散和彗差节点位置进一步调整,使得像散和彗差的节点均位于实际使用视场当中。图 7 为像散和彗差的节点位置沿视场 X 、 Y 方向随 Zernike 系数的变化情况,其中虚线范围内为实际使用视场。从图中可以看出,随着 Zernike 系数的变化, X 方向像散节点始终在视场范围内,并且对称分布;而 Y 方向的像散节点逐步向实际使用视场的中心靠近,平衡了该视场内整体像差水平;最后再利用 Z_5 、 Z_{13} 、 Z_{25} 项对初阶和高阶球差进行校正,这些项对像差节点位置没有影响。最终系统像散和彗差分布如图 8、9 所示,像差节点均位于实际使用视场中,并且关于视场 Y 方向对称,系统各视场调制传递函数(MTF)在 38.5 lp/mm 处大于 0.6,全视场畸变小于 0.25%(如图 10、11 所示)。系统地面成像幅宽 227.28 km,中心视场分辨率 9.857 m,边缘视场分辨率 9.773 m,满足使用要求。

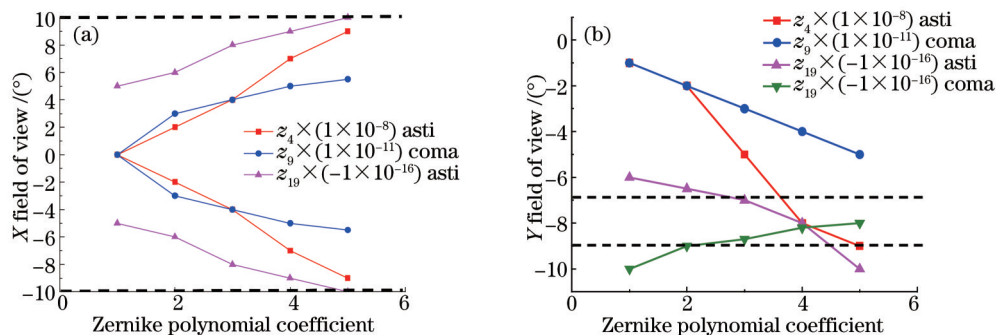


图 7 Zernike 系数对像散和彗差节点位置的影响。(a) X 方向; Y 方向

Fig.7 Astigmatism and coma nodal position effected by Zernike coefficient. (a) X direction; (b) Y direction

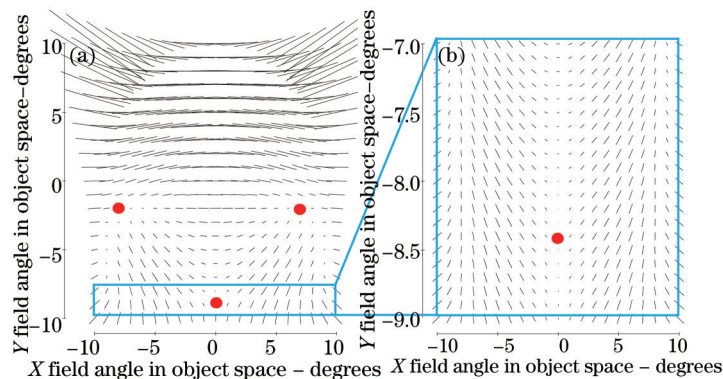


图 8 系统像散分布

Fig.8 Distribution of astigmatism

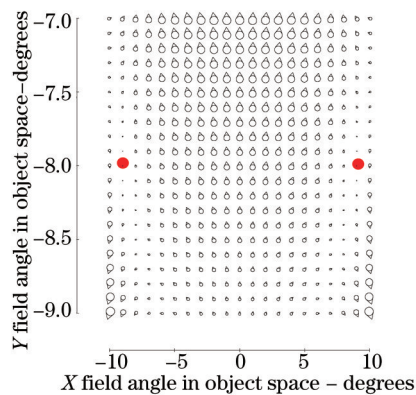


图 9 系统彗差分布

Fig.9 Distribution of coma

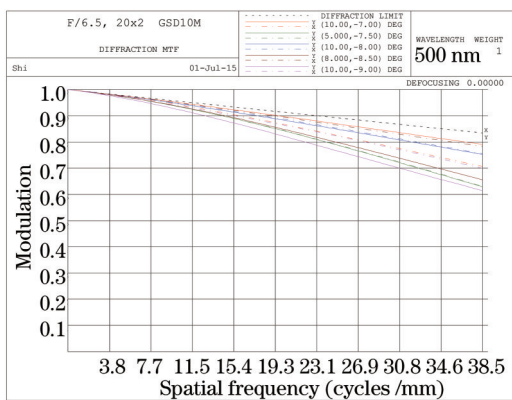


图 10 系统 MTF 曲线

Fig.10 System MTF curves

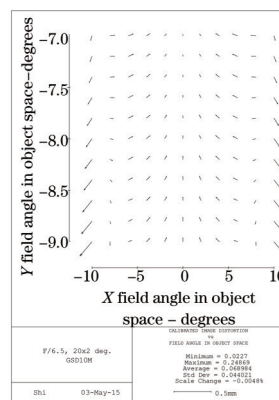


图 11 系统畸变

Fig.11 System distortion

5 结 论

基于矢量像差理论,对以 Zernike 多项式为表征函数的自由曲面光学系统像差进行解析。根据自由曲面对系统像差节点分布的影响,有针对性的选取 Zernike 系数,设计了含有自由曲面的大视场三反射光学系统,实现了对偏视场像差的校正。设计结果表明,该系统在 $20^\circ \times 2^\circ$ 视场范围内畸变小于 0.25%,满足使用要求。目前的研究还仅限于不含偏心和倾斜的自由曲面,为了解析离轴自由曲面光学系统的像差特性,未来还需将自由曲面的像差贡献量与系统离轴像差相结合,从而指导离轴自由曲面光学系统的设计和装调。

参 考 文 献

- 1 Lin Jing, Cui Qingfeng, Zhu Hao. Research of broad width off-axis three mirror optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0722002.
林 晶, 崔庆丰, 朱 浩. 宽幅离轴三反光学系统研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0722002.
- 2 Wang Lingjie, Zhang Xin, Zhang Jianping, *et al.*. Free-form surfaces space optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(6): 1040-1046.
王灵杰, 张 新, 张建萍, 等. 自由曲面空间光学系统设计研究[J]. 应用光学, 2012, 33(6): 1040-1046.
- 3 Gong Dun, Wang Hong. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with free-form surface[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0722001.
巩 盾, 王 红. 含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0722001.
- 4 Wang Xiaokun. Optical design of high resolution space camera[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122001.
王孝坤. 一种高分辨力空间相机的光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122001.
- 5 T Agócs, Gabby Kroes, Lars Venema. Freeform mirror based optical systems for FAME[C]. SPIE, 2014, 9151: 9512L.
- 6 M D Nijkerk. Freeform design and fabrication: where the proof of the pudding is in verification[C]. ICSO 2010.
- 7 Li Hua, Zhang Xin, Wang Chao, *et al.*. Optical design of an avionic helmet-mounted displays using freeform surface[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0322001.
李 华, 张 新, 王 超, 等. 自由曲面机载头盔显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0322001.
- 8 Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, *et al.*. Optical design and stray light analysis for ultraviolet board width off-axis four mirrors optical design[J]. Chinese J Lasers, 2014, 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, 2014, 42(2): 0216001.
- 9 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.
- 10 Chen Yang, Wang Yueming. Design and distortion characteristics analysis of the large-image-field off-axis three-mirror telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0222003.
陈 杨, 王跃明. 大像场离轴三反望远镜畸变特性分析与设计[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0222003.
- 11 Xue Qingsheng. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316003.
薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316003.
- 12 Robert W Gray, Christina Dunn, Kevin P Thompson. An analytic expression for the field dependence of Zernike polynomial rotationally symmetric optical systems[J]. Opt Express, 2012, 20(15): 16436-16449.
- 13 Kevin P Thompson. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry[J]. J Opt Soc Am A, 2005, 22(7): 1389-1401.
- 14 Kyle Fuerschbach, Jannick P Rolland, Kevin P Thompson. Extending nodal aberration theory to include mount-induced aberrations with application to freeform surfaces[J]. Opt Express, 2012, 20(18): 20139-20155.
- 15 Kyle Fuerschbach, Jannick P Rolland, Kevin P Thompson. Theory of aberration fields for general optical systems with freeform surfaces [J]. Opt. Express, 2014, 22(22): 26585-26606.

栏目编辑: 韩 峰