

文章编号 1004-924X(2025)16-2516-15

检焦镜面型精度对航空相机 自准直检焦位置的影响

张俊达, 丁亚林*, 孙 林*, 陈志超, 张明强, 宇文子明, 李汝琛
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 动态光学成像与测量全国重点实验室,
吉林 长春 130033)

摘要:针对航空相机自准直检焦过程中出现的检焦镜面型变化导致检焦失败问题,建立检焦镜面型与检焦曲线变化的理论模型,并进行仿真分析和实验验证。首先,通过建立传感器接收到的光强差与检焦曲线的关系,计算不同检焦镜面型精度对成像光强分布影响,并分析不同像差对检焦曲线造成的影响,然后,结合实际相机模型利用Zemax软件非序列模式进行仿真,最后,通过改变温度控制检焦镜面型,在不同面型下进行检焦实验,验证了理论与仿真结果。实验结果表明:检焦镜面型精度在面型RMS达到 $0.048\ 3\lambda$ 时,检焦曲线峰值位置超出半焦深;当面型RMS达到 $0.082\ 1\lambda$ 时,检焦曲线出现多峰。本文建立的理论模型及实验方法对光电自准直检焦镜的面型误差分配、设计与面型控制、提高航空相机成像质量有指导意义。

关键词:航空相机;自准直;检焦;曲线拟合;面型误差

中图分类号:V243.5 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20253316.2516 CSTR:32169.14.OPE.20253316.2516

Impact of collimating mirror surface accuracy on focusing position in aviation cameras

ZHANG Junda, DING Yalin*, SUN Lin*, CHEN Zhichao, ZHANG Mingqiang,
YUWEN Ziming, LI Ruchen

(State Key Laboratory of Dynamic Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: dingyl1964@sohu.com; sunlin@ciomp.ac.cn

Abstract: For the issue of focus failure caused by changes in the shape of the focusing mirror during the autocolimation focusing process of aerial cameras, a corresponding theoretical model was provided. By establishing the relationship between the difference in light intensity received by the sensor and the focusing curve, the impact of different focusing mirror shape accuracies on the distribution of imaging light intensity was calculated, and the effects of various aberrations on the focusing curve were analyzed. Combined with an actual camera model, simulations were conducted using Zemax software in non-sequential mode. By adjusting the temperature to control the shape of the focusing mirror, focusing experiments were carried

收稿日期:2025-02-20;修订日期:2025-05-10.

基金项目:国家科技重大专项(No. 30-H32A01-9005-13115)

out under different shapes, verifying the theoretical and simulation results. The results show that when the surface shape RMS of the focusing mirror reaches $0.048\ 3\lambda$, the peak position of the focusing curve exceeds the half focal depth; when the surface shape RMS reaches $0.082\ 1\lambda$, the focusing curve exhibits multiple peaks. This has guiding significance for the error allocation, design, and control of the optical autocollimation focusing mirror, as well as for improving the imaging quality of aerial cameras.

Key words: aerial camera; autocollimation; focus inspection; curve fitting; surface figure error

1 引 言

航空遥感是获取地面信息的重要手段之一,具有成像分辨率高、实时性强、成像直观、灵活快速等优势^[1-4]。在民用、军事与科学等领域,均发挥着不可替代的作用。航空相机成像质量是衡量其性能的重要指标,但在工作过程中它会受到温度、压强、照相距离影响^[5-6],使航空相机光学系统产生离焦,造成成像质量下降,影响图像信息判读,因此航空相机需要进行焦面位置的调整,提升成像质量,而精确的调焦则需要准确度高、实时性强的检焦作为前提,因此研究影响检焦精度的因素对提升调焦精确度,从而提升航空相机成像质量有重要意义。

在航空相机发展历程中,存在多种不同检焦方法如标定法^[6]、光电自准直检焦法^[7-8]、图像检焦法^[9-15]等。其中光电自准直检焦方法由于其具有较高的可靠性和准确度,是长焦航空相机检焦最常用的方法。光电自准直检焦装置主要由光源、物方光栅、像方光栅、待检光学系统、检焦镜、光电接收器件组成,每个部分的加工及装调误差都会对检焦精度造成影响,如文献^[16]刘学吉等从衍射和像差、光栅的周期及检焦光源的能量等三个方面对检焦精度的影响进行了分析,并建立了数学模型;文献^[17]刘伟毅等对航空相机外界温度对检焦系统的影响进行了分析和理论建模。

检焦镜常设置于航空相机光学系统前端,受外部环境及其支撑结构影响,其面型精度易发生下降,包括其本身加工精度不足都会导致检焦失败。但是针对检焦镜面型如何影响检焦精度目前缺乏完善理论模型。故本文分析计算检焦镜面型精度对成像光强分布、传感器接收光强差造成不同影响,对检焦镜面型精度影响检焦位置进

行理论分析和仿真,并分析不同像差对检焦曲线造成的影响,再设计实验验证。本研究对检焦镜的材料选择、支撑结构设计以及加工制造、检焦故障排除有重要意义。

2 检焦镜面型与检焦位置的理论模型

2.1 检焦镜面型表达式

检焦镜面型误差 $W(\xi, \eta)$ 可以用多种拟合方法进行拟合得到,由于 Fringe Zernike 按照模式复杂程度递增方式排列,分析波前像差时更容易追踪且更契合于干涉仪,所以本文选用 Fringe Zernike 多项式进行分析,其前三项为常数项、y 倾斜、x 倾斜,代表面的刚体位移,第四项为离焦。检焦镜放置在光学系统前端平行光路中并做小幅摆动,故不把前四项考虑进检焦镜面型误差内;而检焦镜是平面镜,高阶像差存在量较少,故本文主要考虑 Fringe Zernike 多项式 5-9 项对检焦曲线的影响,包括 Z5 0° 像散、Z6 45° 像散、Z7 初级 X 慧差、Z8 初级 Y 慧差、Z9 初级球差。

检焦镜面型用均方根值(Root Mean Square, RMS)进行量化,为使 Fringe Zernike 多项式系数能与 RMS 值建立关系,定义 G_j 为 RMS 系数:

$$G_j = |C_j| \cdot \sqrt{\langle Z_j^2 \rangle}, \quad (1)$$

其中: C_j 表示第 j 项 Zernike 系数, $\langle Z_j^2 \rangle$ 表示第 j 项 Zernike 多项式在整个光瞳区域的平均平方值,如果光瞳固定,则 $\langle Z_j^2 \rangle$ 为固定值。那么总 RMS 值为:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{j=5}^9 G_j^2} + R, \quad (2)$$

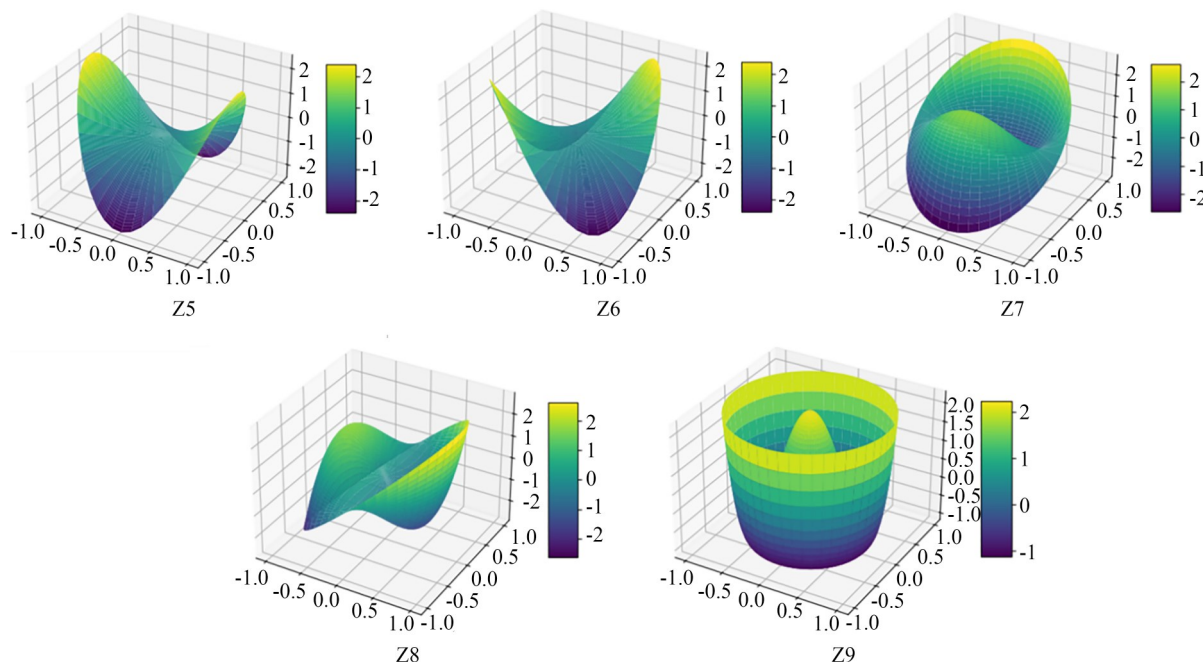


图1 Z5-Z9项 Zernike 多项式对应的像差形状

Fig. 1 Z5-Z9 Zernike polynomial aberration mode maps

其中, R 为高阶 Zernike 项引入的 RMS 值, 在平面镜中这个值趋近于零, 故可忽略不计。

2.2 检焦过程量化方式

光电自准直检焦原理组成如图 2 所示。

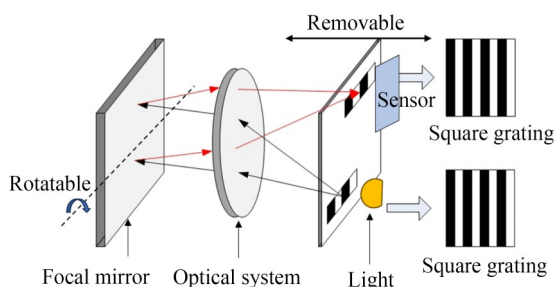


图2 光电自准直检焦原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of photoelectric autocollimation autofocus

检焦时物方光栅放置于光学系统焦面位置附近, 点亮光源, 光线经过物方光栅后穿过光学系统经过检焦镜反射后再一次经过光学系统将物方光栅成像在其共轭位置, 在此位置摆放像方光栅, 物方光栅的像被像方光栅遮挡后被光电接收, 在这个过程中检焦镜绕垂直光轴位置小幅度摆动, 把恒定的光辐射通量变成周期性重复的光辐射通量, 产生正弦型曲线, 如图 3 所示。

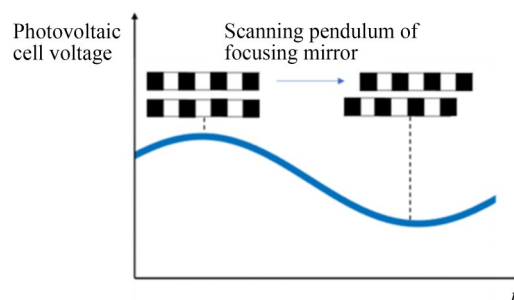


图3 检焦产生正弦形曲线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of focus detection generating a sine wave curve

电控位移平台按照遍历算法控制物方光栅在相机光学系统附近按照一定步长移动, 则可以获得一系列相似的正弦型电压曲线, 但由于其离焦程度不同, 不同位置物方光栅成像弥散程度不同, 导致正弦型电压曲线的峰峰值不同, 通过对不同位置正弦型信号的峰峰值检测可以得到一条峰峰值-光轴位置曲线, 通过爬山算法找到这条曲线的极大值位置即为光学系统焦面位置^[18]。

由图 3 可知, 正弦型曲线的峰峰值即为光电接收器件记录的最大光伏电压差, 其正比于光电接收器件接收到的最大光强差。光强差是由检焦镜摆动使物方光栅所成的像被像方光栅遮拦程度不同导致, 如图 4 所示, 图中灰色部分表示物

方光栅亮条纹成像,当此像正对像方光栅亮条纹时,接收光强最大;当此像正对物方光栅暗条纹时,接收光强最小。

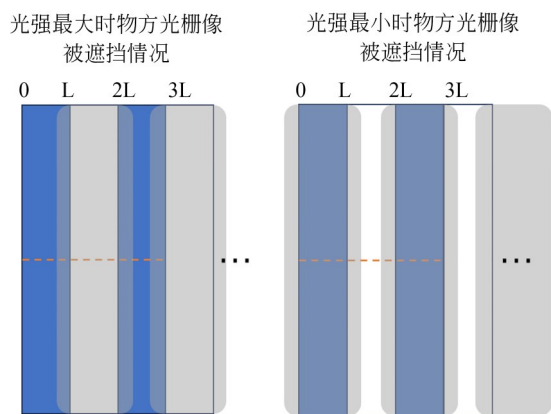


图 4 物方光栅亮条纹成像被像方光栅遮挡示意图

Fig. 4 Bright fringes of the object-side grating imaging are blocked by the image-side grating

光电自准直检焦使用的光栅为 Ronchi 光栅,即等栅距的黑白透射式光栅,光电接收器件接收到的最大光强差是物方光栅所成像光强分布在亮条纹区域与暗条纹区域的光强差 Δ ,计算方法如下:

$$\Delta = \iint_L I_i(x_r, y_r) dx_r dy_r -$$

$$\iint_0 I_i(x_r, y_r) dx_r dy_r - \iint_{2L} I_i(x_r, y_r) dx_r dy_r, \quad (3)$$

其中: $I_i(x_i, y_i)$ 为物方光栅成像光强分布, L 为光栅刻线宽度, Δ 为光强差, x_r, y_r 为光栅平面坐标。由于光栅的周期性,最大光强差正比于单条亮条纹成像在亮条纹区域与暗条纹区域的光强差如图 3,因此想表示检焦镜面型如何影响检焦过程,则需要表示检焦镜面型对物方光栅成像光强分布的影响,再通过式(3)计算光强差。

2.3 检焦镜面型对检焦位置的影响

按照傅里叶光学理论,光学成像系统属于线性系统,单点通过光学系统后的衍射复振幅分布可以视为系统的冲击响应,物所成像可以视为组成物的所有基点的衍射复振幅分布的组合^[19]。航空相机属于非相干成像系统,在傅里叶光学中属于强度变换的线性系统,物像光强关系满足下

述卷积积分:

$$I_i(x_i, y_i) = k \iint_{-\infty}^{\infty} I_g(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0) \tilde{h}_I(x_i - \tilde{x}_0, y_i - \tilde{y}_0) d\tilde{x}_0 d\tilde{y}_0, \quad (4)$$

其中: k 是实常数; I_g 是物的强度分布; I_i 是像的强度分布 $\tilde{x}_0, \tilde{y}_0$ 是物平面直角坐标; x_i, y_i 是像平面直角坐标。光强脉冲响应(或称点扩散函数)表示为 $\tilde{h}_I$, 它是点物产生的衍射斑的强度分布,则 $\tilde{h}_I$ 与系统相干脉冲响应 $\tilde{h}$ 满足关系:

$$\tilde{h}_I = |\tilde{h}|^2. \quad (5)$$

由于检焦镜面型变化会在检焦系统的物方光栅成像过程中引入像差,其效果就是将出瞳处的出射波前偏离理想球面,也就是对光瞳函数引入了误差项,如图 5 所示。

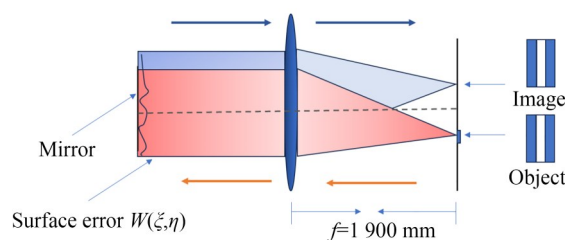


图 5 检焦镜面型影响下的光场传播

Fig. 5 Light field propagation under the influence of the focusing mirror surface figure

定义 $P(x, y)$ 为广义光瞳函数:

$$P(x, y) = P(x, y) \exp[jk2W(x, y)], \quad (6)$$

其中: $P(x, y)$ 为光瞳函数 $W(x, y)$ 表示检焦镜面型误差。由 2.1 节可知其可用 Zernike 多项式进行拟合,利用计算光学方法计算光强分布,波相差需要提取离散视场点的 Zernike 系数来得到检焦系统的波相差:

$$W(x, y) =$$

$$[G_5(x, y), G_6(x, y), \dots, G_9(x, y)] \times Z_i, \quad (7)$$

其中: G_{5-9} 为多项式系数矩阵, $Z_i = [Z_5, Z_6, \dots, Z_9]^T$ 。

由光电自准直检焦原理可知,检焦曲线表示的是检焦正弦信号峰峰值随检焦位置的变化,可以用物方光栅像的亮暗条纹光强差代表检焦正弦信号电压峰峰值,不同面型对应不同的点扩散函数,而不同的检焦位置的峰峰值需要在点扩散

函数上加入离焦量引入的相位差计算光强差,不同离焦位置出瞳处的复振幅脉冲响应函数可以表示为:

$$\tilde{h} = F\{P(x, y)\} = F\{P(x, y) \exp[jk2W(x, y) + jkW_{\text{defocus}}]\}_{f_x = \frac{x}{\lambda d_i}, f_y = \frac{y}{\lambda d_i}}, \quad (8)$$

其中: W_{defocus} 表示离焦量引入的相位差, $W(x, y)$ 表示检焦镜面型引入的相位差。可以用 Fringe Zernike 多项式第四项表示, 系数满足:

$$C_4 = \frac{\pi d}{8\lambda F^2}, \quad (9)$$

其中: C_4 表示 Fringe Zernike 多项式第四项的系

$$I_i(x, y) = k I_g(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0) \cdot \left| F\left\{P(x, y) \exp\left[2jk \sum_{i=5}^9 G_i(x, y) Z_i + jk \frac{\pi d}{8\lambda F^2} Z_4\right]\right\}_{f_x = \frac{x}{\lambda d_i}, f_y = \frac{y}{\lambda d_i}} \right|^2 d\tilde{x}_0 d\tilde{y}_0. \quad (12)$$

由式(12)可知物方光栅成像光强分布受检焦镜面型 Zernike 系数 G_i 及离焦量 d 影响, 而 Zernike 系数 G_i 可由公式(2)转换成 RMS 值。但是由于式(12)涉及指数函数包含高次项的傅里叶变换, 不存在简单闭式解, 难以求得检焦曲线关于面型精度的表达式, 故本文利用数值积分方式继续求解。

利用 FFT 算法进行数值化的过程中, 需要进行采样, 采样频率应当满足奈奎斯特定理, 也就是抽样频率应至少为函数最高频率的两倍。

数, d 表示离焦量, λ 表示波长, F 为系统 F 数。

则在自准直检焦系统中成像光强的计算公式如式(10):

$$I_i(x, y) = k \iint_{-\infty}^{\infty} I_g(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0) \cdot |\tilde{h}|^2 d\tilde{x}_0 d\tilde{y}_0, \quad (10)$$

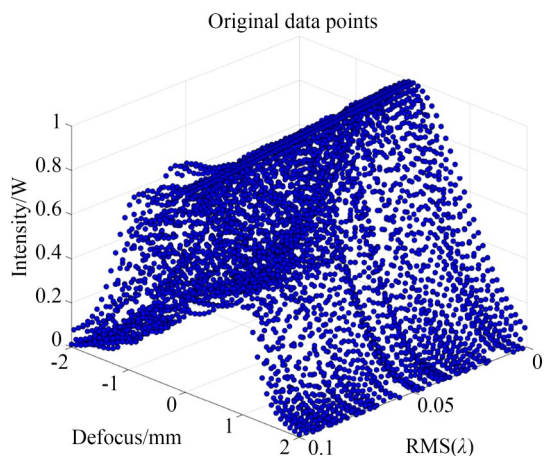
其中:

$$\tilde{h} = F\{P(x, y)\} = F\{P(x, y) \exp[2jk \sum_{i=5}^9 G_i(x, y) Z_i + jk \frac{d}{\lambda R^2} Z_4]\}_{f_x = \frac{x}{\lambda d_i}, f_y = \frac{y}{\lambda d_i}}, \quad (11)$$

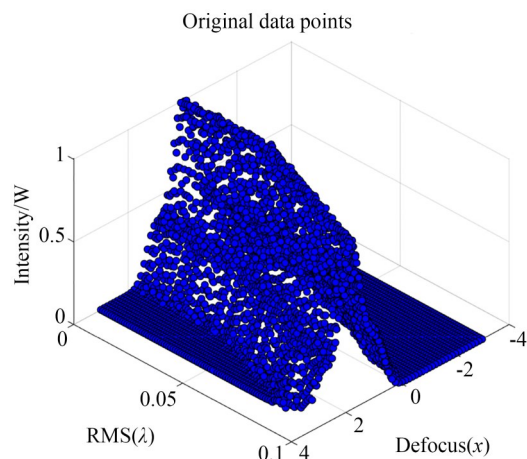
其中: d 表示离焦量, λ 表示波长, R 为光瞳半径。

将 $\tilde{h}$ 表达式代入式(10)得:

鉴于式(12)是关于包含高阶项的指数函数的傅里叶变换, 为了保证算法准确性, 选择5倍最高频率的采样频率, 本文所用光电池的频率为30 Hz, 故采样频率为150 Hz, 按照此抽样频率对式(12)进行数值化, 同时将 RMS 值在 $0 \sim 0.1 \lambda$ 之间; 离焦量 d 在 $-2 \sim 2$ mm 之间各进行1 000次抽样作为参数代入即可得到对应的光强值分布, 再由式(3)计算可以得到不同面型 RMS 值下光强差随离焦量变化的情况, 将这些数据输入, 如图6所示(横坐标为离焦量 d 和 RMS 值, 纵坐标为归一化



(a) 主要像差为球差时的数据点集
(a) Optical surface characterized by dominant spherical aberration



(b) 主要像差为像散的数据点集
(b) Optical surface characterized by dominant astigmatism aberration

图6 由理论计算得到的光强与离焦量和检焦镜面型 RMS 值分布图

Fig. 6 Plot depicting the relationship between the theoretically calculated light intensity and the defocus distance along with the RMS (Root Mean Square) value of the focusing mirror's surface

的光强),主要像差不同时数据分布不同,主要像差为像散时出现主峰随 RMS 值偏移现象,其他像差则没有此现象。这是因为存在像散的情况下,光电自准直检焦所检位置为像散的弧矢焦点,偏离高斯焦点,检焦曲线峰值位置发生变化。

由这些数据点进行拟合可以得到曲面的表达式,也就是光强差与检焦镜面型误差、离焦量的数值关系。

主要像差为球差时拟合曲面表达式为:

$$\begin{aligned} \text{surface}(RMS, d) = & (a_1 + b_1 \cdot RMS) \cdot \exp\left(-\frac{(d - x_1)^2}{(2\sigma_1^2)}\right) + \\ & (a_2 + b_2 \cdot RMS) \cdot \exp\left(-\frac{(d - x_2)^2}{(2\sigma_2^2)}\right) + c, \end{aligned} \quad (13)$$

式中参数(置信区间 95%): $a_1=0.971\ 5$, $b_1=-0.658\ 6$, $x_1=-0.011\ 53$, $\epsilon_1=0.786$, $a_2=-0.083\ 21$, $b_2=2.686$, $x_2=1.01$, $\epsilon_2=0.150\ 9$, $c=-0.001\ 857$ 。

拟合系数 $R^2=0.963\ 2$, 拟合效果可信度高,拟合曲面与源数据对比如图 7 所示。

由图 7 可知拟合曲面的趋势和位置与源数据基本吻合。由公式 (13) 可知,当检焦镜面型 RMS 确定,即可得到能量差随离焦位置的变化

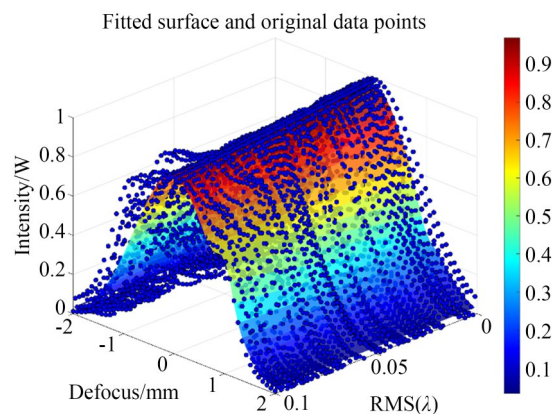


图 7 主要像差为球差的拟合曲面与原数据对比图
Fig. 7 Comparative graph of the fitted surface, characterized by dominant spherical aberration, against the original data

关系即检焦曲线,是明显的多峰表达式,典型位置的检焦曲线如图 8 所示。

实际检焦过程中,噪声一般低于最高峰值的 30% 当检焦曲线出现多峰峰值高于最高峰值 30% 时,由于自准直检焦使用爬山算法,故会将次峰位置错判成主峰位置,影响峰值位置检测。由式 (13) 可知多峰在 RMS 值升高时逐渐出现,当达到 $0.079\ 6\lambda$ 时,多峰峰值高于最高峰值 30%,此时检焦失败。

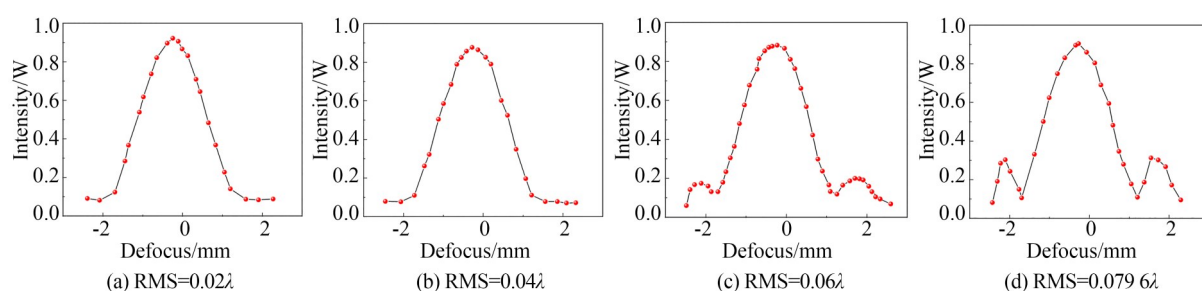


图 8 主要像差为球差时不同 RMS 对应的检焦曲线

Fig. 8 Focus curves under different RMS values when the primary aberration is spherical aberration

主要像差为像散时拟合曲面表达式为:

$$\begin{aligned} \text{surface}(RMS, d) = & a_1 \cdot \exp\left(-\frac{(d - (b_1 \cdot RMS + b_2))^2}{(2\sigma_1^2)}\right) + \\ & \frac{(d - (c_1 \cdot RMS + c_2))^2}{(2\sigma_2^2)}, \end{aligned} \quad (14)$$

式中参数(置信区间为 95%): $a_1=0.191\ 7$, $b_1=39.360\ 5$, $\epsilon_1=0.309\ 6$, $c_1=17.608\ 7$, $a_2=0.756\ 3$, $b_2=-1.869\ 7$, $\epsilon_2=0.684\ 5$, $c_2=-0.304\ 4$ 。

拟合系数 $R^2=0.945\ 2$ 拟合效果可信度较高,拟合曲面与源数据对比如图 9 所示。

实际光学系统的探测器在离开高斯像面一

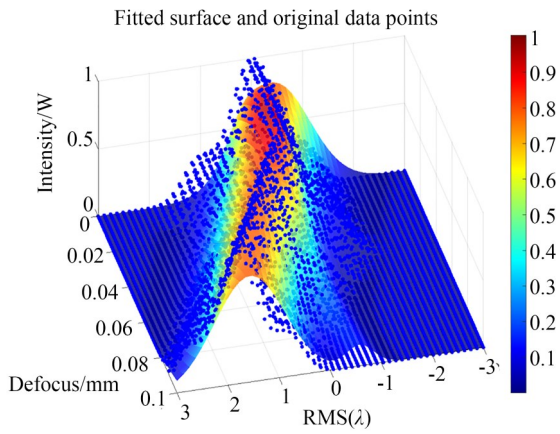


图9 主要像差为像散的拟合曲面与源数据对比图
Fig. 9 Comparative graph of the fitted surface, characterized by dominant astigmatism, against the original data

定距离时也可以清晰成像,这个距离被称为光学系统的半焦深,其大小为 $2\lambda F^2$,其中 λ 代表光学系统中心波长,本文数值为 $0.63\text{ }\mu\text{m}$, F 表示光学系统 $F^\#$ 本文光学系统 $F^\#$ 为 5.6。所以光电自准直检焦的检焦精度应优于光学系统的半焦深,对本文所用光学系统该数值为 $0.039\text{ }5\text{ mm}$ 。当检焦位置与理想焦面位置差值大于半焦深时,则认为检焦精度不足。

主要像差为像散时,检焦位置会随着 RMS 值增加发生移造成航空相机成像质量下降,检焦位置变化如图 10。在主要像差为像散的情况下,当检焦镜表面面型 RMS 值为 0.04λ 时,光电自准直检焦位置超过半焦深。

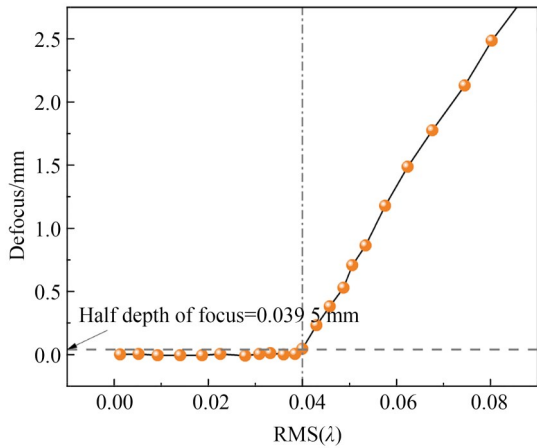


图10 像散焦点偏移随RMS变化曲线
Fig. 10 Curve of astigmatism focus offset versus rms variation

由于多种像差组合情况过多,为了方便实验验证,对检焦镜加热变形过程进行热仿真,并根据式(1)提取解算表面 Zernike RMS 系数,如表 1 所示。

表 1 Zernike RMS 参数随温度变化

Tab. 1 Variation of Zernike RMS parameters with temperature

Temperature/°C	24	26	29
Z_5^2	$0.021\text{ }9\lambda$	$0.049\text{ }8\lambda$	$0.081\text{ }7\lambda$
Z_6^2	$0.000\text{ }8\lambda$	0.001λ	0.002λ
Z_7^2	$0.000\text{ }4\lambda$	$0.001\text{ }2\lambda$	$0.001\text{ }5\lambda$
Z_8^2	$0.000\text{ }4\lambda$	$0.001\text{ }5\lambda$	$0.002\text{ }6\lambda$
Z_9^2	$0.009\text{ }4\lambda$	$0.021\text{ }3\lambda$	$0.035\text{ }0\lambda$
Total RMS	0.033λ	0.075λ	0.123λ

航空相机处于外环境中,必然与外界环境进行热交换,换热方式主要包括、传导、辐射以及对流。航空相机工作时,处于大气平流层,当飞行速度稳定时,外界环境相对较稳定,其典型条件为:飞行高度 18 km ,飞行速度为 0.7 Ma ,外界大气环境温度为 $-56\text{ }^\circ\text{C}$,压强为 $7\text{ }491\text{ Pa}$,大气密度为 0.121 kg/m^3 。

航空相机初始温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,飞行速度为 0.7 Ma ,在 30 min 到达预定高度 18 km ,基于相机内部热源以及环境条件,在 30 min 时刻的检焦镜组件温度变化情况如图 11 所示。

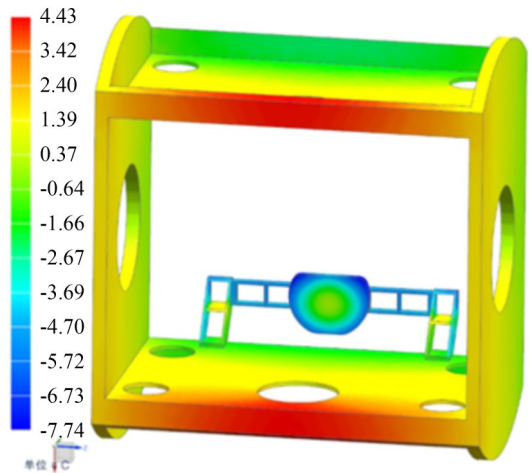


图11 检焦镜组件及检焦镜温度分布
Fig. 11 Temperature distribution of focal scope components and focal scope

利用形函数插值法把热模型的温度场插值到结构模型中,使用有限元分析方法预测检焦镜在不均匀温度场扰动后的表面位移。仿真zernike系数变换情况如图12所示。

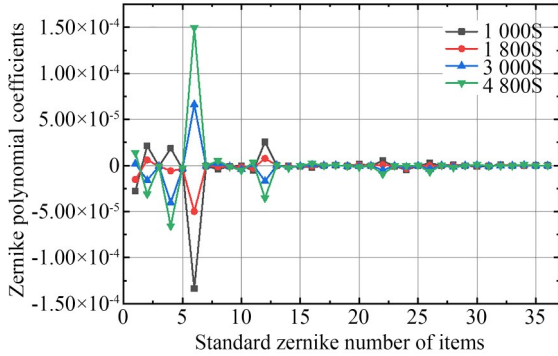


图12 检焦镜表面的多项式拟合系数曲线

Fig. 12 Polynomial fitting coefficient curve of the surface of the focal lens

4个时刻检焦镜表面的多项式系数数值变化趋势大体一致,但在第2,4,6项的系数值明显变大,在标准Zernike多项式中第2项多项式代表光学元件存在倾斜,说明变形后的检焦镜导致成像光线的传播发生变化。在标准Zernike多项式中第6项多项式代表着有一阶像散的存在,说明变形后的检焦镜出现明显的低阶像差。而标准Zernike多项式中第4项多项式代表光学元件的离焦,对于平面反射镜,此项一定程度上表示球差。

这说明检焦镜实际工作的过程中主要像差是 Z_5 像散和 Z_9 初级球差,且二者的平方比例基本保持为3:7。为了可以实验验证理论数值分析结果,故选择对这种像差混合情况进行类似上述单个像差的数值拟合分析。

抽样过程与前期一致。RMS值按照3:7的比例分配给 Z_5 像散和 Z_9 初级球差,代入到式(3),得到能量差随离焦量和RMS值变化的数据点如图13。

拟合得到的像散混合球差曲面表达式为:

$$f(x, rms) = a_1 \exp \left(- \frac{\left((d - (b_1 * rms + b_2))^2 \right)}{2\tau_1^2} \right) + a_2 \exp \left(- \frac{\left((d - (c_1 * rms + c_2))^2 \right)}{2\tau_2^2} \right) + d, \quad (15)$$

式中系数(置信边界为95%): $a_1=0.8038$, $b_1=22.08$, $c_1=-0.8543$, $\epsilon_1=0.3523$, $b_2=-0.4928$, $a_2=0.37$, $c_2=0.08606$, $\epsilon_2=0.2468$, $d=0.0144$ 。

拟合曲面与原数据对比如图14所示。

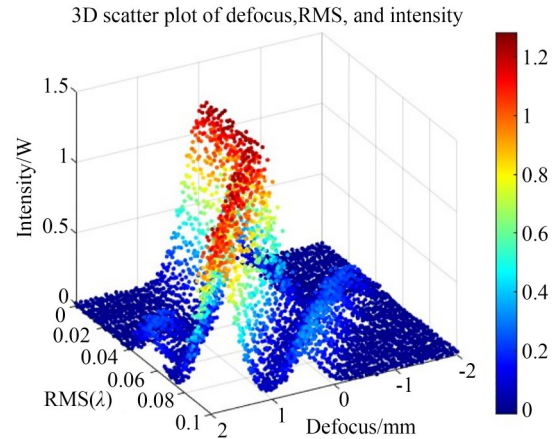


图13 像散与球差混合时的检焦数据点集

Fig. 13 Focus check data points when astigmatism and spherical aberration are combined

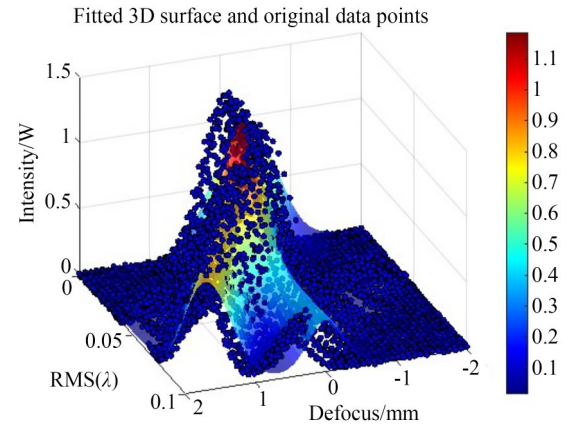


图14 像散与球差混合时的检焦数据点与拟合曲面

Fig. 14 Focus check data points and fitted surface when astigmatism and spherical aberration are combined

由公式(15)和图12可知,在像散和其他像差的共同作用下,检焦曲线会出现两种变化:(1)检焦曲线峰值位置偏移。(2)检焦曲线出现多峰。在多重像差的共同作用下,检焦曲线峰值位置偏移情况与单独像散情况不同,检焦曲线最大值位置如图15。

在球差和像散同时存在的情况下,检焦镜面型RMS值为0.0474λ时,光电自准直检焦位置

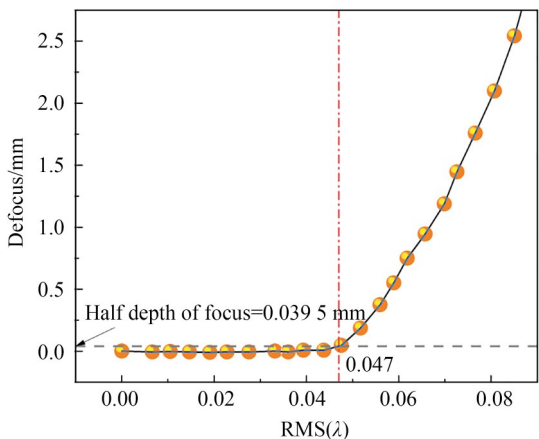


图 15 像散与球差混合的检焦曲线最大值位置随 RMS 变化
Fig. 15 Variation of the maximum value of the focus check curve with RMS when astigmatism and spherical aberration are combined

超过半焦深,检焦失败。而由式(15)计算可知,在混合像差情况下,当面型 RMS 达到 0.082 2λ 时,检焦曲线多峰峰值高于最高峰值 30%。

其他不同比例混合像差的理论计算阈值如表 2 所示,由于检焦镜面型误差多为受温度变化导致^[17],基于上文的热仿真数据可知在受温度影响情况下像散与球差 3:7 的比例最为普遍,本研究选定该比例作为典型分析对象。

表 2 不同比例像差混合得到的检焦曲线变化阈值
Tab. 2 Threshold of variation in the focus detection curve obtained by mixing different proportions of aberration

Ratio of spherical aberration to astigmatism	RMS value when exceeding half the depth of focus(λ)	Secondary peak exceeds 30% of the main peak's RMS value(λ)
9:1	0.058 3	0.079 0
8:2	0.056 2	0.079 5
7:3	0.057 4	0.080 3
6:4	0.054 2	0.081 4
5:5	0.049 3	0.081 6
4:6	0.048 7	0.082 1
3:7	0.047 4	0.082 2
2:8	0.044 6	0.085 6
1:9	0.042 2	0.087 7

3 仿真实验

使用光学设计软件 Zemax 对光电自准直检焦进行光学仿真,使用光线追迹方法计算光强分布,以验证理论计算不同检焦镜面型误差对检焦精度的影响,Zemax 软件非序列模式主要利用光线追迹原理对光线进行计算以得到光强分布,可以对本文建立的物理光学模型计算进行验证。

首先需要建立航空相机光学系统模型,本文所研究的航空相机使用的是由主镜、次镜、主校正镜及次校正镜组成的折反射式系统。为了节省载机空间,本文光学系统加入反射镜转折光路如图 14(a)。本文航空相机光学系统能量集中度为 5.32 μm,如图 14(b)即平行光成像 80% 的能量分布在半径 5.32 μm 范围内,本系统衍射极限为 5.26 μm。可知本系统能量集中度已接近理论

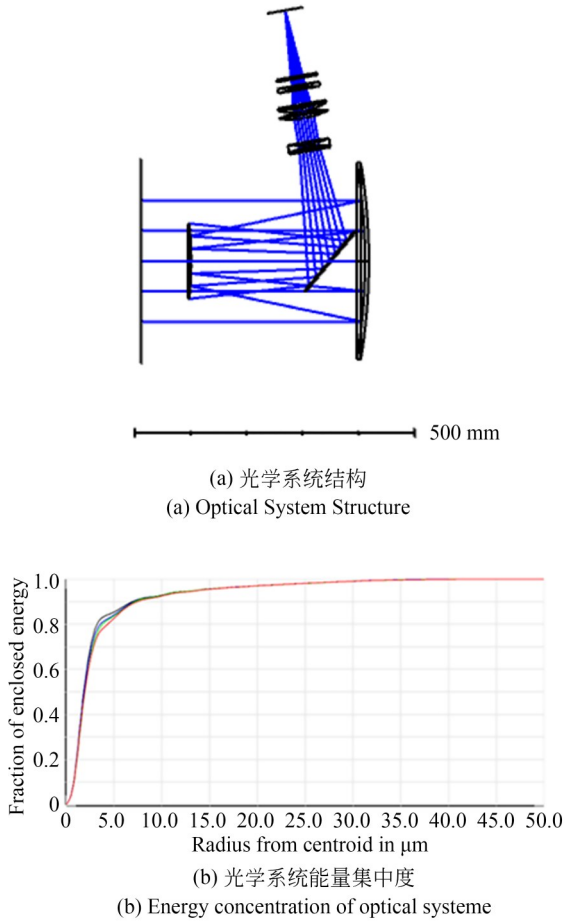


图 16 相机光学系统及其能量集中度
Fig. 16 Camera optical system and its energy concentration

上限,符合分析检焦镜面型影响检焦曲线的使用要求。

Zemax 的非序列模式更适用于能量系统的仿真,故本文使用非序列模式建立光电自准直检焦模型,如图 16 使用双角光源模拟检焦 LED 光源,光源能量归一化为 1。由于 Zemax 没有 Ronchi 光栅预设模组,故使用自定义孔径模拟光栅,将成像光学系统翻转后在焦面位置放置物方光栅,在成像光学系统入瞳前放置检焦镜,并在检焦镜后加入 Fringe Zernike 相位面用以模拟检焦镜面型带来的相位差,在物方光栅共轭位置放置像方光栅。

用 Zemax 的多组态工具模拟检焦镜小幅度摆动,可以计算探测器收集到不同检焦镜扫描位置的光强,将光强曲线画出可得到检焦正弦信号及其峰峰值,改变离焦量后重复上述操作即可得

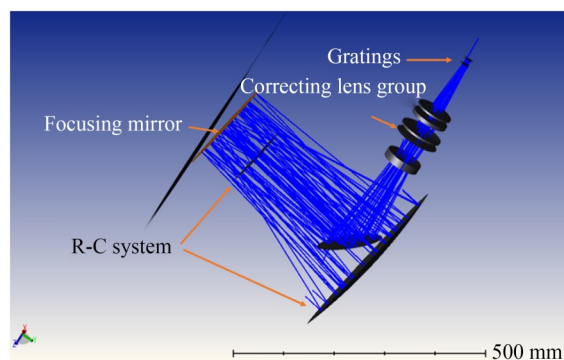


图 17 Zemax 建立的非序列检焦模型

Fig. 17 Non-sequential focusing model established in Zemax

到不同位置的检焦正弦信号峰峰值,从而得到检焦曲线。混合像差情况下,检焦镜面型误差可通过在镜头编辑器中添加 Fringe Zernike 面进行模拟。通过光线追迹得到检焦曲线如图 18。

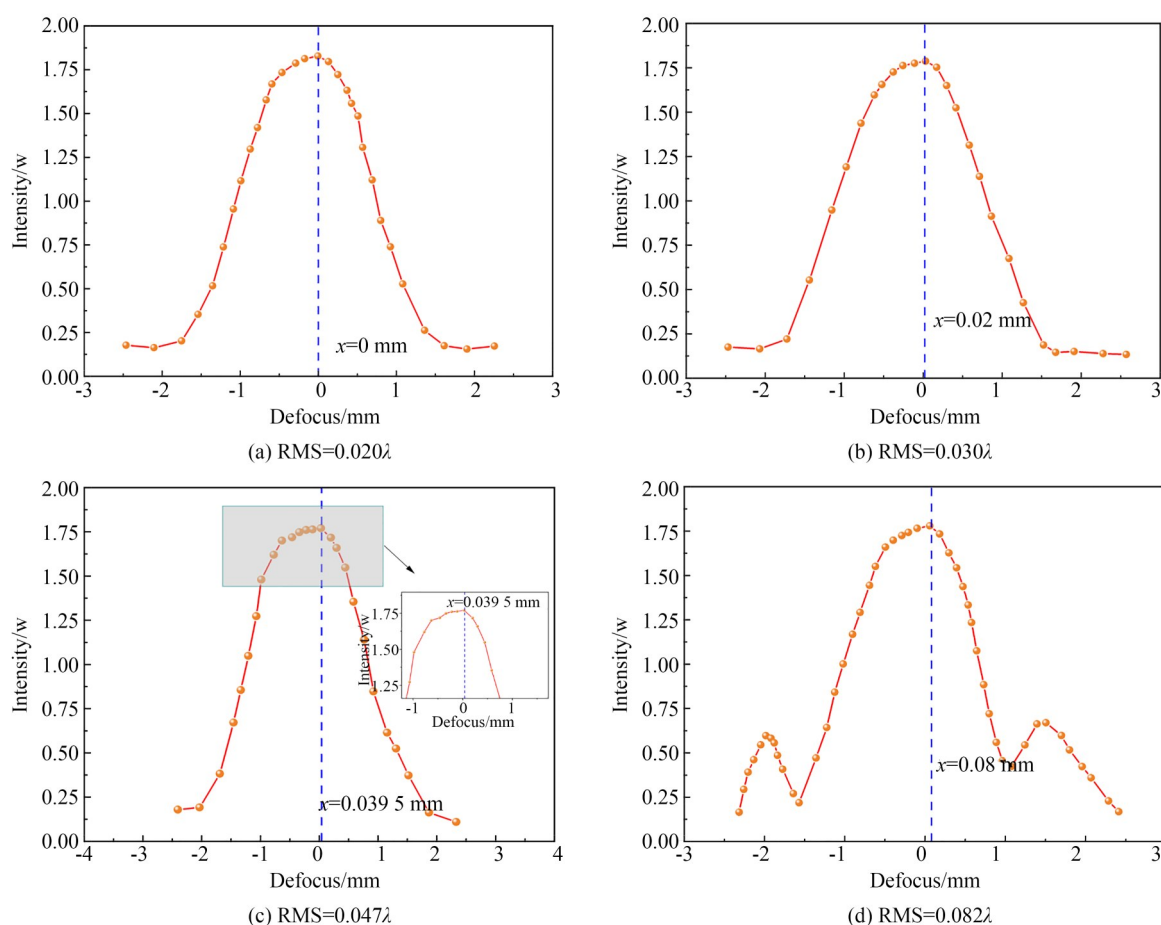


图 18 仿真不同面型误差下检焦曲线

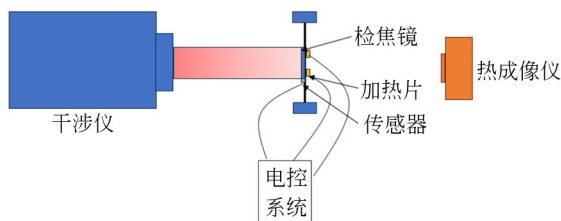
Fig. 18 Focus curves obtained from simulation under different surface error profiles

通过光线追迹得到的检焦曲线与理论计算得到的基本一致,当检焦镜面型 RMS 值为 $0.047\ 2\lambda$ 时,光电自准直检焦位置超过半焦深,检焦失败。当面型 RMS 达到 $0.082\ 3\lambda$ 时,检焦曲线多峰峰值高于最高峰值 30%。

4 实验验证

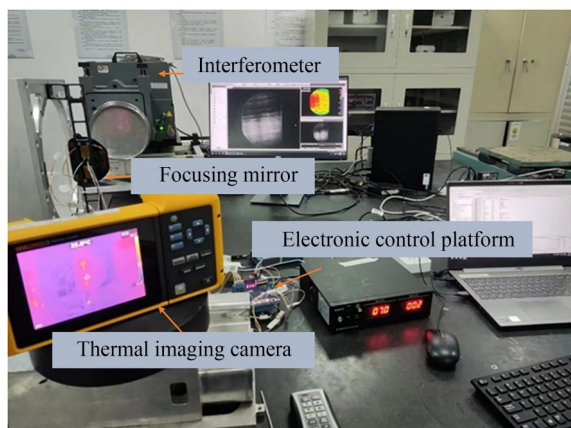
在光电自准直检焦过程中无法对检焦镜面型进行实时检测,所以需要通过控制温度来控制检焦镜表面面型,以确定检焦镜在特定温度下表面面型 RMS,为后面的检焦镜面型影响检焦精度的实验提供依据。检焦镜面型随温度变化实验示意图与实拍图如图 19 所示。

启动加热片后每隔 5 min,通过干涉仪和热成像仪对检焦镜面型、温度进行测量,保证加热条件相同,重复四次实验,拟合得到检焦镜面型



(a) 加热面型变化实验示意图

(a) Schematic diagram of heating-induced surface deformation experiment



(b) 加热实验实拍图

(b) Photographs from heating experiment

图 19 加热面型变化实验示意图及实拍图

Fig. 19 Schematic diagram and photographs of heating-induced surface deformation experiment

随温度变化关系。

由数据可以看出检焦镜表面 RMS 值与检焦镜测量点平均温度基本呈线性关系,将四组加热实验数据进行线性拟合,可以得到表面 RMS 值与检焦镜测量点平均温度的线性方程:

$$y = 0.019\ 03x - 0.416\ 18. \quad (16)$$

线性拟合如图 20 所示。

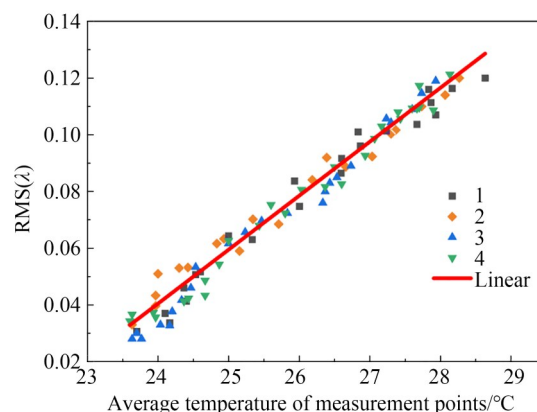


图 20 四次检焦镜加热变形实验数据线性拟合

Fig. 20 Linear fit of data from four heating deformation experiments of the focusing mirror

使用 R^2 , 即 R-Squared, 来衡量线性回归的拟合度 R^2 越接近于 1, 表示拟合程度越好, 即线性回归模型越好。本实验拟合所求 R^2 值为 0.956 63, 可认为检焦镜面型 RMS 值与测量点温度平均值基本满足线性关系。

通过上述实验得到温度与检焦镜面型关系后, 可以通过控制温度来控制检焦镜面型并进行在不同面型下的检焦实验验证检焦镜面型对检焦曲线的影响。

在室温下对相机进行多次检焦取平均值确定相机焦面, 与加热实验的初始温度和热载荷情况保持一致, 每隔 5 min 进行一次检焦实验, 进行重复实验三次, 三次实验的数据取平均值得到散点图如图 21 所示。

由图 21 可知:

(1) 检焦镜面型达到 $0.048\ 3\lambda$ 时, 相对检焦位置达到长焦相机的半焦深 $0.039\ 5\ \text{mm}$, 与理论计算 $0.047\ 4\lambda$ 及仿真结果 $0.047\ 2\lambda$ 接近。

(2) 相对检焦位置超过半焦深后, 随检焦镜面型 RMS 接近线性关系变化; 当检焦镜面型

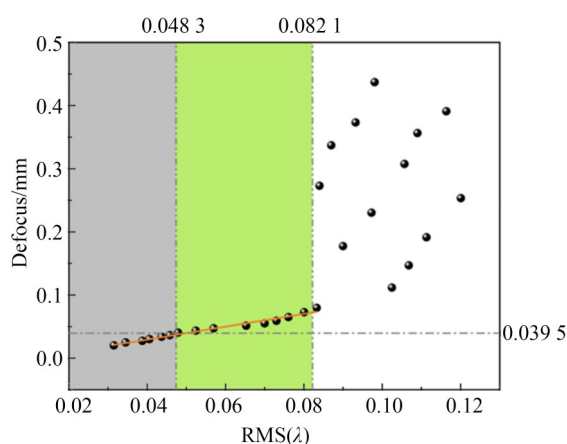


图 21 检焦实验散点图

Fig. 21 Scatter plot of focusing experiment

RMS 达到 0.0821λ 后,检焦相对位置与检焦镜面型 RMS 失去线性关系,且随机性较大。与本文理论计算 0.0822λ 及仿真结果 0.0823λ 出现双峰情况接近。

在不同检焦镜面型下进行检焦后,在对应检焦位置对靶标进行拍照得到的结果如图 22 所示。

从图 22 中可看出,检焦镜加热前初始面型 0.0315λ 时的拍照获得的靶标图像可以分辨 5 号靶标 16 组,分辨率达到 60.24 lp/mm ;当检焦镜面型 0.0479λ 时拍照获得的靶标图像可以分辨 5 号靶标 15 组,分辨率达到 56.9 lp/mm ,分辨率略有下降;检焦镜面型达到 0.0833λ 时,获得的靶标图像几乎无法分辨。

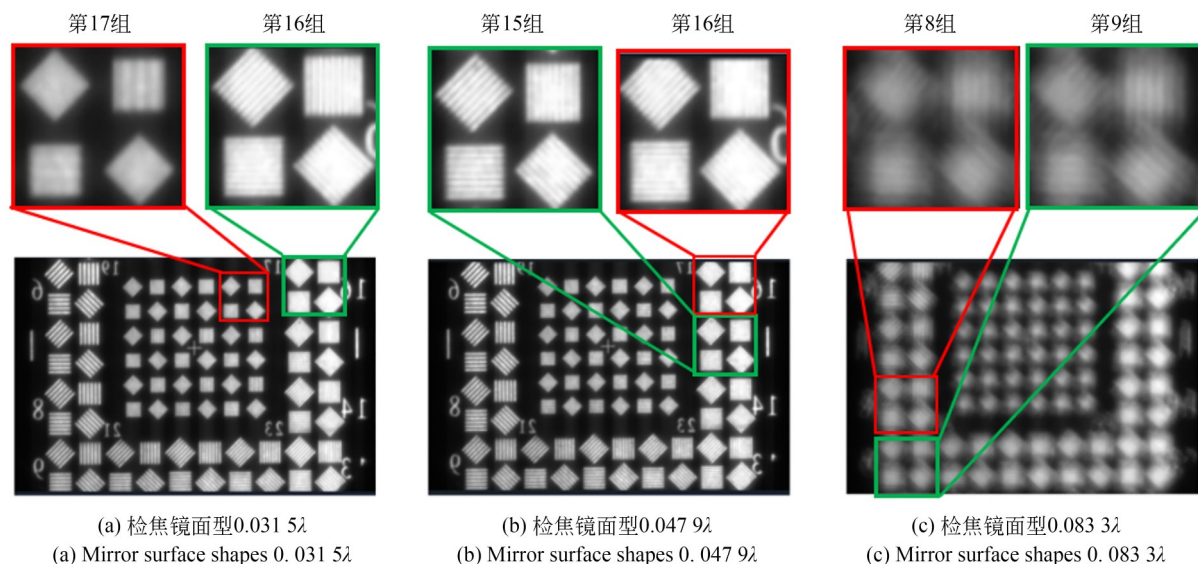


图 22 不同检焦镜面型下检焦位置拍照结果

Fig. 22 Photographic results of focusing positions under different mirror surface shapes

实验室成像试验表明,检焦镜面型与检焦位置有关,当检焦镜面型 RMS 值达到 0.0479λ 时达到光学系统的半焦深,成像质量略有下降,当检焦镜面型 RMS 值达到 0.0833λ 时,获得的图像无法分辨,检焦失效。成像试验结果与理论计算及仿真结果非常接近,证明理论计算及仿真结果是正确的。

检焦曲线出现问题将会使光学系统受到离焦影响,系统的成像质量将受到影响。MTF 是评价光学系统成像质量的重要指标,如图 23 所示,为光学系统离焦量-MTF 曲线图。

由图 23 可知,光学系统离焦量在 $\pm 40 \mu\text{m}$ 内

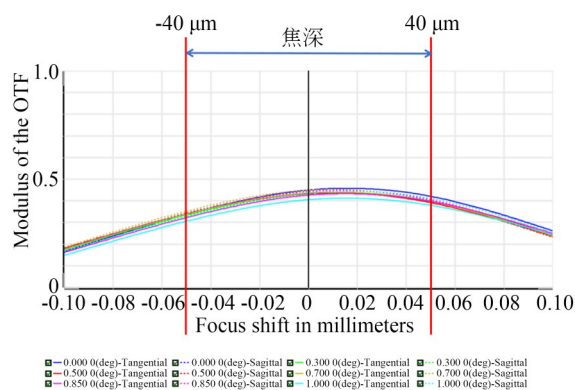


图 23 光学系统离焦-MTF 曲线

Fig. 23 Optical system defocusing MTF curve

时, $MTF > 0.3$, 可以满足光学系统的成像需求; 当离焦量超出半焦深时, 最终实际成像 MTF 较低, 难以满足成像要求。

像点弥散是一种由于系统像差而造成像质

模糊的几何评价方法, 它不考虑光线衍射效应, 仅追迹物点发出光线达到像面的弥散情况, 故像点弥散反映的是像面上光线的弥散程度。不同离焦量对应的点列图如图 24 所示。

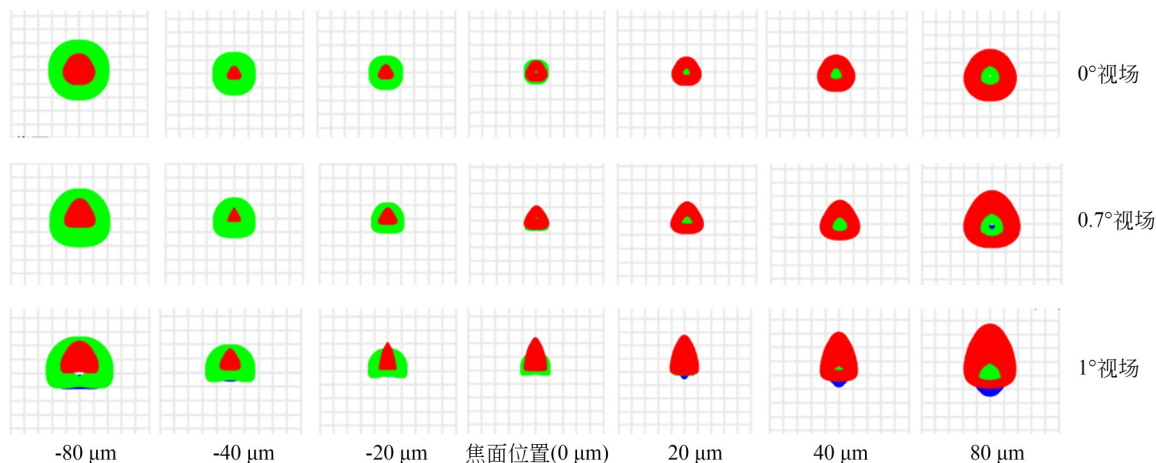


图 24 离焦对像点弥散的影响

Fig. 24 Effect of defocus on image point dispersion

离焦量超过半焦深 $40\ \mu\text{m}$ 时, 焦平面处像点弥散直径超出像元尺寸, 对成像质量有较大影响。因此需要采用一定热控设计和柔性支撑手段对检焦镜组件进行优化设计, 保证其面型稳定性。

5 结 论

本文首先建立了检焦镜面型 RMS-光强分布-离焦量的映射模型, 采用数值积分的方法, 得到不同像差条件下检焦镜面型精度与检焦曲线的数学模型, 系统揭示了检焦镜面型精度对航空相机自准直检焦位置的影响机制。然后设计了检焦镜面型-温度变化实验, 通过该实验进行实际检焦实验, 验证了上述理论与仿真的准确性。研究结果表明: (1) 当检焦镜面型精度劣化至 $RMS = 0.048\ 3\lambda$ 时, 检焦曲线峰值偏移量已超过

系统半焦深; (2) 当 RMS 值达到 $0.082\ 1\lambda$ 时, 产生的像差引发检焦曲线多峰现象, 严重破坏检焦系统的单值确定性。本研究对于指导光电自准直检焦镜的误差分配、支撑结构的优化设计、加工制作、环境适应性改良具有重要意义, 有助于提高航空相机的成像质量。

作者贡献声明:

张俊达: 方法论的提出, 测量实验的设计及数据整理和分析以及论文撰写;

丁亚林: 论文构思的提出, 论文审核与编辑写作并获取资助;

孙林: 论文审核与编辑写作;

陈志超: 测量实验数据分析;

张明强: 指导验证, 论文校稿;

宇文子明: 论文审核与编辑写作;

李汝琛: 测量实验数据分析。

参考文献:

- [1] 许永森, 田海英, 惠守文, 等. 国外传输型航空相机的发展现状与展望[J]. 光机电信息, 2010, 27(12): 38-43.

- XU Y S, TIAN H Y, HUI S W, *et al.* Trend and development actuality of the real-time transmission airborne reconnaissance camera[J]. *OME Information*, 2010, 27(12): 38-43. (in Chinese)
- [2] 李波, 孙崇尚, 田大鹏, 等. 国外航空侦察相机的

- 发展情况[J]. 现代科学仪器, 2013(2): 24-27.
- LI B, SUN C S, TIAN D P, *et al.* Developments of foreign airborne reconnaissance camera [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2013(2): 24-27. (in Chinese)
- [3] 李永昆, 林招荣, 张绪国. 国外远距斜视航空相机发展概况[J]. 航天返回与遥感, 2017, 38(6): 11-18.
- LI Y K, LIN Z R, ZHANG X G. Development survey of foreign aerial cameras for distant oblique reconnaissance [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(6): 11-18. (in Chinese)
- [4] HÖHLE J. Dem generation by means of new digital aerial cameras[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013, XXXVIII-3/W22: 185-190.
- [5] SONG J H, HWANG S U, PARK I Y, *et al.* Automatic focusing system for optical tweezers [C]. *Optomechatronic Actuators and Manipulation. Sapporo, Japan*. SPIE, 2005.
- [6] 曹智睿, 董吉洪. 航天 CCD 相机焦面位置地面标定方法研究[J]. 应用光学, 2014, 35(5): 830-834.
- CAO Z R, DONG J H. Terrestrial calibration method of focal plane position of space CCD camera[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(5): 830-834. (in Chinese)
- [7] 许兆林, 赵育良, 张玉叶. 基于光学自准直的航空相机自动调焦系统[J]. 光学仪器, 2011, 33(2): 52-56.
- XU Z L, ZHAO Y L, ZHANG Y Y. Autofocusing system based on optical autocollimating for aerial camera[J]. *Optical Instruments*, 2011, 33(2): 52-56. (in Chinese)
- [8] 陈志超. 基于 R-C 系统的长焦距航空相机实时相位检焦技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
- CHEN Z C. *Research on Real-Time Phase Focusing Technology of Long Focal Length Aerial Camera Based on R-C System*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [9] 郑丽娜, 李延伟, 远国勤, 等. Visibility 的航空遥感相机自动焦面检测方法[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4): 236-241.
- ZHENG L N, LI Y W, YUAN G Q, *et al.* Automatic focus plane detection of aerial remote camera based on Visibility[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 236-241. (in Chinese)
- [10] 李启辉. 一种基于图像处理的自准直检焦技术研究[D]. 长春: 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), 2020.
- LI Q H. *Research On A Self-Collimation Focal Inspection Technology Based on Image Processing* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [11] KHAN U, KHAN M K, LATIF M A, *et al.* A systematic literature review of machine learning and deep learning approaches for spectral image classification in agricultural applications using aerial photography [J]. *Computers, Materials & Continua*, 2024, 78(3): 2967-3000.
- [12] CHEN Z C, ZHANG T. Investigation of an auto-focusing method for visible aerial cameras based on image processing techniques [J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2016, (1): 1819472.
- [13] ZHAO H, FENG H J, XU Z H, *et al.* An aerial focusing method based on focusing window selection and variable threshold focusing evaluation function in frequency domain [C]. *AOPC 2020: Optical Sensing and Imaging Technology. November 30-December 2, 2020. Beijing, China*. SPIE, 2020.
- [14] 王德江, 李文明, 许永森, 等. TDI-CCD 全景航空相机快速自动检调焦方法[J]. 光电子激光, 2012, 23(8): 1452-1457.
- WANG D J, LI W M, XU Y S, *et al.* A fast auto-focusing technique for the TDI-CCD panoramic aerial camera [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2012, 23(8): 1452-1457. (in Chinese)
- [15] HUA Z J, ZHANG X, TU D W. Autofocus methods based on laser illumination[J]. *Optics Express*, 2023, 31(18): 29465.
- [16] 刘学吉, 丁亚林, 李锋, 等. 航空遥感相机 Ronchi 光栅自准直检焦模型分析与验证[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1236-1244.
- LIU X J, DING Y L, LI F, *et al.* Theoretical analysis and verification of Ronchi grating auto-collimated focusing for aerial remote camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(6): 1236-1244. (in Chinese)
- [17] 刘伟毅, 徐钰蕾, 石磊, 等. 航空低温温度对自准

直检焦系统的影响[J]. 光学 精密工程, 2020, 28 (6): 1226-1235.

LIU W Y, XU Y L, SHI L, *et al.* Influence of aviation low temperature on auto-collimating focusing system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28 (6): 1226-1235. (in Chinese)

- [18] 牛海军. 长焦距相机调焦关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2016.

NIU H J. *Research on Key Techniques of Focusing for Long Focal Camera* [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)

- [19] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2016.

YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2016. (in Chinese)

作者简介:



张俊达(1998—),男,山东潍坊人,硕士研究生,2020年于合肥工业大学获得学士学位,现就读于中国科学院大学长春光学精密机械与物理研究所,主要从事航空相机自准直检焦方面的研究。E-mail: zhangjunda21@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



孙 林(1993—),男,吉林长春人,助理研究员,主要从事航空光电载荷光学设计及杂散光分析等方面的研究。E-mail: sunlin@ciomp.ac.cn

通讯作者:



丁亚林(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事航空遥感仪器光机结构总体技术及载机动态条件下稳定成像技术等方面的研究。E-mail: dingyl1964@sohu.com