

离轴自由曲面三镜反射系统的装调技术

王 超^{1,2} 张 新¹ 王灵杰¹ 张建萍¹ 张继真¹

(¹ 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中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 针对离轴自由曲面三镜反射系统, 采用了基准传递技术和计算机辅助装调技术相结合的装调方法。基准传递过程中基于计算全息建立了一套完整、精确的空间基准来保证初装调质量; 在此基础上, 计算机辅助装调过程中采用自准干涉检验法获得多个视场干涉图, 像差用方形域上正交修正泽尼克多项式系数表征, 利用 Zemax 软件和方形域上正交修正泽尼克多项式得到系统的灵敏度矩阵, 求解失调量; 在多次迭代后得到系统平均波像差均方根值为 0.1641λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), 调制传递函数平均值为 0.4534。

关键词 光学设计; 离轴自由曲面; 装调基准; 计算全息; 计算机辅助装调; 修正泽尼克多项式

中图分类号 V248.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1208001

Adjustment of Three-Mirror Off-Axis Freeform System

Wang Chao^{1,2} Zhang Xin¹ Wang Lingjie¹ Zhang Jianping¹ Zhang Jizhen¹

(¹ *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*
² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract In accordance with a three-mirror off-axis freeform system, the alignment method of combining benchmark transmission and computer-aided alignment is put forward. Based on computer-generated hologram (CGH), an entire and precise space benchmark is founded to ensure the quality of prime alignment in the process of benchmark transmission. During computer-aided alignment, by collecting interferograms of several fields of optical system by means of autocollimating interferometry, aberrations could be obtained from parameters of modified orthogonal Zernike polynomials in square area. Furthermore, the sensitivity matrices related to the incorrect parameters derived from Zemax software and those of modified orthogonal Zernike polynomials in square area are used to determine the incorrect parameters. The results show that the average root-mean-square (RMS) value of the system is 0.1641λ ($\lambda = 632.8\text{ nm}$) and the average modulation transfer function (MTF) value of the system is 0.4534 after iterations.

Key words optical design; off-axis freeform; assemblage and adjustment benchmark; computer-generated hologram; computer-aided alignment; modified Zernike polynomial

OCIS codes 080.1005; 080.4228

1 引 言

三镜消像散系统(TMA)是当前大视场空间光学系统的常用光学方案之一,但随着对幅宽的追求,

要求光学系统的视场不断增加,与视场相关的轴外像差逐渐占据主导地位,尤其是轴外高级像差。目前空间相机采用的同轴三反或离轴三反光学系统中

收稿日期: 2013-05-08; **收到修改稿日期**: 2013-06-27

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61007009)

作者简介: 王 超(1986—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计和成像超分辨方面的研究。

E-mail: wangchao32050609@163.com

导师简介: 张 新(1968—),男,博士,研究员,主要从事非常规复杂光学系统设计方面的研究。

E-mail: zhangxin@126.com

光学元件通常采用 3 块二次非球面或高次非球面镜,无法平衡剧烈增加的高级像差。针对空间遥感光学系统追求大幅宽的应用需求,将自由曲面应用于三镜反射式离轴 TMA 光学系统中,可以平衡高级像差,并可使视场角达到 76° 。系统采用方形孔径光阑,虽然能提高系统的调制传递函数(MTF),但同时也使得系统像差变得异常复杂,且目前还不能实现其完备的定量描述^[1]。

对于偏光瞳、偏视场的方形孔径自由曲面反射式系统,所有反射镜没有统一光轴,若采用自由曲面面型的反射镜则会失去旋转对称性,且反射镜之间没有直接的装调基准可以建立,传统的基准传递技术中的干涉定心方法和离轴 TMA 系统零位补偿调整法都不适用于此类光学系统。此外系统采用方形孔径,使得常用的条纹泽尼克多项式失去正交性,从而导致对系统像差描述失真,而现有的计算机辅助

装调工具均是以条纹泽尼克多项式为像差解析数理工具和失调量迭代解算算法的基础。

本文针对以上两个问题,在初装调阶段引入计算全息(CGH)^[3],巧妙地建立了传递基准;在计算机辅助装调阶段对现有的条纹泽尼克多项式进行适用于方形孔径的正交化修正,并将其应用于离轴方形孔径自由曲面计算机辅助装调过程中,得到了该系统的灵敏度矩阵,解算了失调量,并能实现像差完备的定量描述。

2 装调光学系统指标与公差分析

2.1 光学系统指标

考虑到相机分辨率和地面覆盖宽度要求,具体光学系统参数如表 1 所示,系统焦距为 550 mm,视场角为 76° , F 数为 6.5。结构图如图 1 所示。

表 1 光学参数

Table 1 Optical parameters

Parameter	Main mirror	Secondary mirror	Tertiary mirror	Fourth mirror
Radius /mm	1033.2	1425.4	1565.7	1425.4
Distance /mm	-605.2	515.3	-515.3	-515.3
Type of surface	Sphere	Freeform	Freeform	Freeform

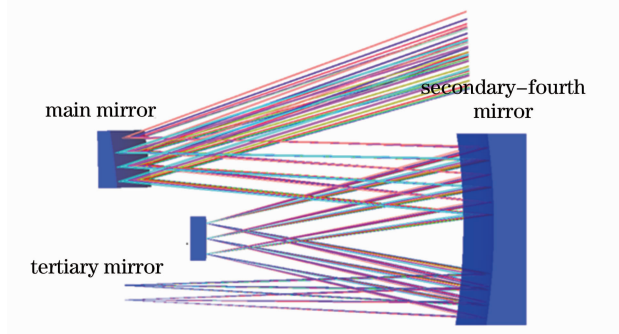


图 1 光学系统结构图

Fig. 1 Optical system frame

方形三镜为系统孔径光阑;主镜为球面镜,二四镜相对于最接近球面的偏离量为 0.6530 mm,三镜相对于最接近球面的偏离量为 0.0884 mm。

为保证自由曲面光学系统数据在设计、加工链路中的无损传递,选择泽尼克多项式作为其数理模型,其数学表达式为^[2]

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^N A_i Z_i, \quad (1)$$

式中 c 为球面部分曲率; k 为二次项常数; A_i 为泽尼克系数; Z_i 为泽尼克多项式。

2.2 公差分析

由以下的公差分析结果可以看出二四镜的装调公差相对更为严格,在频率为 38.5 lp/mm 时全视场调制传递函数平均值为 0.58(见图 2)。在基准传递过程中,长度、距离等尺寸精度均控制在 ± 0.1 mm 以内,角度精度控制在秒(")量级。由于光学系统采用了自由曲面反射镜,系统的装调公差要考虑 z 方向的倾斜公差,装调中设备误差都要进行严格控制并计入装调参数。具体公差分配参数如表 2 所示,公差分析结果如图 3 所示。

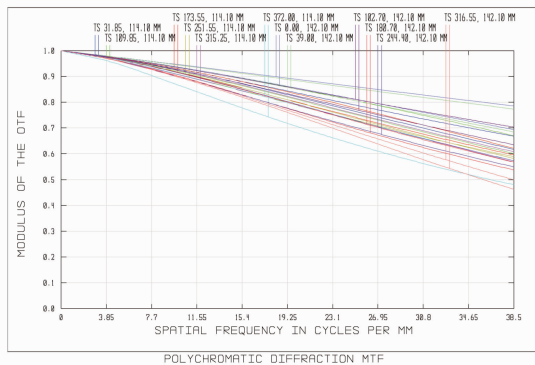


图 2 各视场的光学传递函数

Fig. 2 Modulation transfer functions of each field of view

表2 公差分配

Table 2 Distribution of tolerances

Type of tolerance	Numerical value of tolerance			Type of tolerance	Numerical value of tolerance
Tilt	x	y	z	Decenter	
Main mirror	20.6"	12.4"	—	Main mirror	0.04 mm
Second mirror	28.8"	16.5"	20.6	Second mirror	0.04 mm
Tertiary Mirror	28.8"	20.6"	16.5	Tertiary Mirror	0.04 mm
Fourth mirror	28.8"	20.6"	20.6	Fourth mirror	0.04 mm

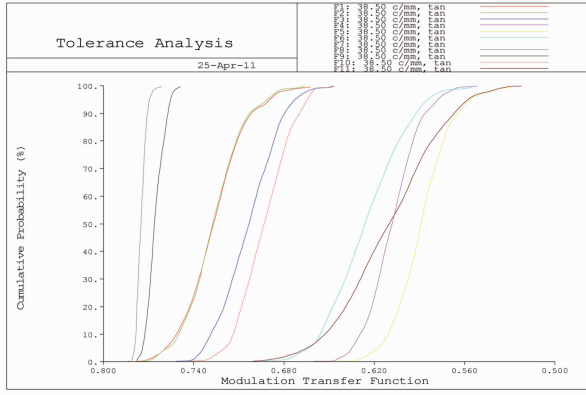


图3 公差分析结果

Fig. 3 Result of tolerance analysis

3 基准传递

3.1 基准建立

由于离轴自由曲面系统的三块反射镜没有统一光轴,且二四镜和三镜采用自由曲面面型,失去旋转对称性,主镜、像面、二四镜和三镜之间没有直接的装调基准可以建立。传统的基准传递技术中的干涉定心方法和离轴三反光学系统零位补偿调整法都不适用于离轴自由曲面反射系统。

为了解决离轴自由曲面基准传递问题,采用CGH进行装调,如图4所示。准直CGH可以方便、快捷地完成CGH基片在检测光路中位置的校准。基准CGH用来在自由曲面的上下左右4个边缘处投射十字线,不仅可以用来控制自由曲面的横

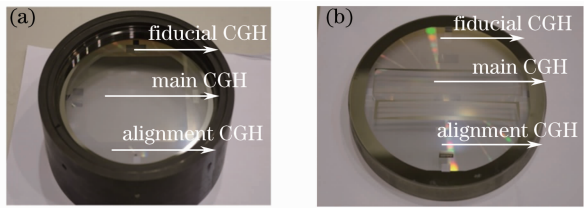


图4 (a)三镜计算全息补偿器;(b)二四镜计算全息补偿器

Fig. 4 (a) CGH of tertiary mirror; (b) CGH of secondary-fourth mirror

向移动,还可结合自由曲面镜坯侧面标记指导自由曲面的绕干涉仪光轴旋转调整。主CGH用于反射镜和CGH之间空间位置校正^[4]。根据图5所示的检测光路,将二四镜和三镜之间基准传递关系转化成二四镜CGH和三镜CGH基底面之间基准传递关系。

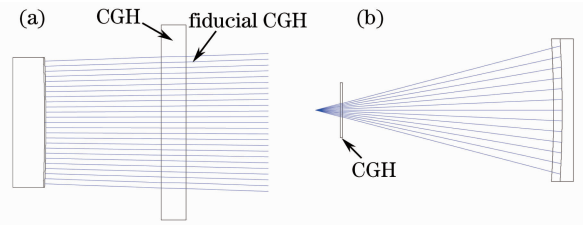


图5 (a)三镜检测光路图;(b)二四镜检测光路图

Fig. 5 (a) Layout of tertiary mirror's testing; (b) layout of secondary-fourth mirror testing

在2.2节公差分析中得到二四镜装调公差最为严格,本应以二四镜CGH为传递的基准,但是当二四镜装调完毕,装调三镜时,在三镜CGH和二四镜之间无摆放干涉仪的空间,所以选择三镜CGH基底面作为初装调的基准。

由大理石平尺、双零精度的大理石台面和三镜CGH建立装调基准:垂直于三镜CGH工作面的方向定义为 z 轴方向;垂直于大理石平尺内侧长端面方向向里的方向定义为 x 轴正方向;以垂直于大理石台面向上的方向定义为 y 轴正方向,如图6所示。

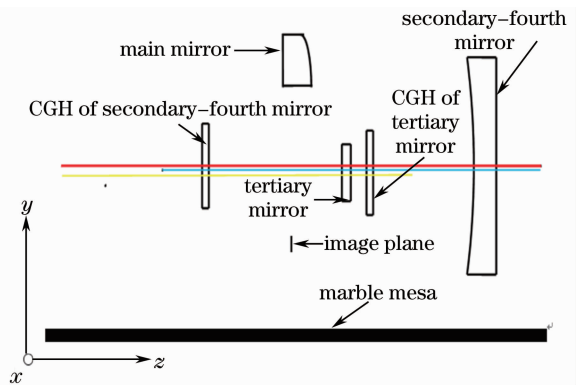


图6 装调基准示意图

Fig. 6 Sketch map of assemblage and adjustment benchmark

3.2 基准传递

在基准传递过程中使用的经纬仪角度定位精度为 $0.5''$, 高度计高度定位精度在 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 以内, 而测量臂的位移定位精度也在 $\pm 0.02 \text{ mm}$ 以内, 以上辅助装调工具精度都满足 2.2 节公差分析所要求的基准传递精度。

在基准传递过程中采用 CGH 对二四镜和三镜进行共基准装调, 并在此基准下完成主镜及像面装调, 装调自由度为 12。初装调尽量提高基准传递精度, 使像差和结构参数之间的关系更接近线性, 这样就能为接下来的计算机辅助装调过程提供良好的装调基础。

4 计算机辅助装调

计算机辅助装调是运用光学手段实测系统几个视场的波像差, 再由计算机反算得到光学元件的调整方向和具体量值, 通过各种定位工具和调整工具使各元件的相互位置可以接近于理论设计参数。由于此离轴反射系统采用方形孔径光阑, 圆域条纹泽尼克多项式在方形域上已不正交, 使用其表征像差

已失真, 所以要构造方形域上正交的修正泽尼克多项式来表征像差^[5]。

4.1 方形域正交修正泽尼克正交多项式

对于圆形孔光学系统利用条纹泽尼克多项式表征像差, 但对于方形孔径光学系统一般在圆形域截取出方形孔径区域, 再利用此区域上的正交修正泽尼克多项式表征像差, 采用如图 7 所示的数学模型。

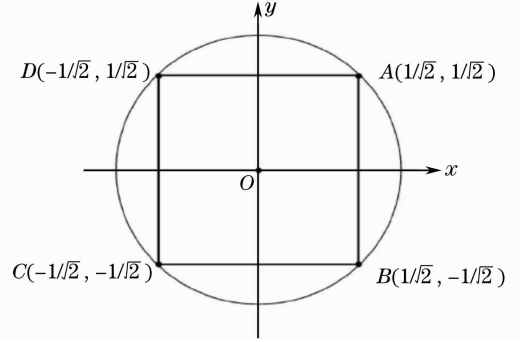


图 7 单位圆内接单位正方形

Fig. 7 Unit square inscribed inside a unit circle

在笛卡儿坐标系中, 像差方程 $W(x, y)$ 可以展开为光瞳内正交的多项式 $F_j(x, y)$, 展开式和修正泽尼克多项式正交性可表示为

$$W(x, y) = \sum_j a_j F_j(x, y), \quad \frac{1}{A} \int_{\text{pupil}} F_j(x, y) F_{j'}(x, y) dx dy = \delta_{jj'},$$

$$A = \int_{\text{pupil}} dx dy, \quad a_j = \frac{1}{A} \int_{\text{pupil}} W(x, y) F_j(x, y) dx dy, \quad (2)$$

式中 a_j 就是展开式的多项式 $F_j(x, y)$ 的像差系数, A 为单位圆内接光瞳区域的积分面积, $\delta_{jj'}$ 为克罗内克算符。格雷姆-施瓦兹正交化方法是正交变换中普遍使用的方法^[6], 所以方形域上的正交修正泽尼克多项式 $F_j(x, y)$ 可以用此方法得到。给定初始条纹泽尼克多项式 $\{Z_j\}_{j=1}^n$, $\{G_j\}_{j=1}^n$ 代表方形域正交、非归一化多项式, $\{F_j\}_{j=1}^n$ 代表方形域上正交、归一化修正泽尼克多项式:

$$G_1 = Z_1 = 1, \quad C_{j+1, k} = -\frac{1}{A} \int_{\text{pupil}} Z_{j+1} F_k dx dy,$$

$$G_{j+1} = Z_{j+1} + \sum_{k=1}^j C_{j+1, k} F_k, \quad F_{j+1} = \frac{G_{j+1}}{\|G_{j+1}\|} = \left[\frac{G_{j+1}}{\frac{1}{A} \int_{\text{pupil}} G_{j+1}^2 dx dy} \right]^{1/2}. \quad (3)$$

由于采用方形域, 如图 7 所示, 则 $A=2$, 所以

$$C_{j+1, k} = -\frac{1}{2} \int_{-1/\sqrt{2}}^{1/\sqrt{2}} dy \int_{-1/\sqrt{2}}^{1/\sqrt{2}} Z_j F_k dx, \quad \frac{1}{2} \int_{-1/\sqrt{2}}^{1/\sqrt{2}} dy \int_{-1/\sqrt{2}}^{1/\sqrt{2}} F_j F_{j'} dx = \delta_{jj'}. \quad (4)$$

利用(3)、(4)式在方形域上构造的正交修正泽尼克多项式^[5], 方形域和圆形域条纹泽尼克正交多项式形式, 前 12 项如表 3 所示, 用此方形域上正交修正泽尼克多项式描述系统波像差。

4.2 数学模型和灵敏度矩阵

计算机辅助装调理论模型: 将用于表征像差的方形域修正泽尼克多项式系数进行泰勒展开, k 为多项式项数, x_0 为理想空间位置, x_{0i} 为设计空间位置,

表 3 方形域和圆域泽尼克正交多项式

Table 3 Orthogonal Zernike polynomials in square area and circle area

i	Modified Zernike polynomial	Fringe Zernike polynomial	Relation of conversion
1	1	1	z_1
2	$\sqrt{6}\rho\cos\varphi$	$\rho\cos\varphi$	$\sqrt{6}z_2$
3	$\sqrt{6}\rho\sin\varphi$	$\rho\sin\varphi$	$\sqrt{6}z_3$
4	$\sqrt{5/2}(3\rho^2-1)$	$-1+2\rho^2$	$3\sqrt{5/2}/2z_4 + \sqrt{5/2}/2z_1$
5	$3\sqrt{5/2}\rho^2\cos 2\varphi$	$\rho^2\cos 2\varphi$	$3\sqrt{5/2}z_5$
6	$3\rho^2\sin 2\varphi$	$\rho^2\sin 2\varphi$	$3z_6$
7	$\sqrt{21/31}(15\rho^2-7)\rho\cos\varphi$	$(-2+3\rho^2)\rho\cos\varphi$	$5\sqrt{21/31}z_7 + 3\sqrt{21/31}z_2$
8	$\sqrt{21/31}(15\rho^2-7)\rho\sin\varphi$	$(-2+3\rho^2)\rho\sin\varphi$	$5\sqrt{21/31}z_8 + 3\sqrt{21/31}z_3$
9	$1/(2\sqrt{67})(315\rho^4-240\rho^2+31)$	$1-6\rho^2+6\rho^4$	$105\sqrt{1/67}/4z_9 + 75\sqrt{1/67}/4z_4 + 41\sqrt{1/67}/2z_1$
10	$\sqrt{5/31}/2(31\rho^3\cos 3\varphi+3[13\rho^2-4]\cos\varphi)$	$\rho^3\cos 3\varphi$	$\sqrt{155}/2z_{10} + 13\sqrt{155}/62z_7 + 7\sqrt{155}/31z_2$
11	$\sqrt{5/31}/2(31\rho^3\sin 3\varphi-3[13\rho^2-4]\sin\varphi)$	$\rho^3\sin 3\varphi$	$\sqrt{155}/2z_{11} - 13\sqrt{155}/62z_8 + 7\sqrt{155}/31z_3$
12	$35/\sqrt{2}/4(3\rho^2-2)\rho^2\cos 2\varphi$	$\rho^2(-3+4\rho^2)\cos 2\varphi$	$105\sqrt{2}/16z_{12} + 135\sqrt{2}/16z_5$

在 3.2 节基准传递过程中使表征像差的修正泽尼克多项式系数和结构参数之间接近线性^[5], 可以简化为

装调过程中需要建立多个视场下如(5)式的线性方程, 用 m 来表征视场, 则(5)式转化为(6)形式^[7], 采用广义逆^[6]方法求解失调量 ΔX :

$$Z_k(x) - Z_k(x_0) = \sum_{i=1}^N \frac{\partial Z_k(x_0)}{\partial x_0} (x_i - x_{0i}), \quad (5)$$

$$\Delta F = A\Delta X, \quad \Delta X = \text{pinv}(A)\Delta F, \quad (6)$$

$$\Delta F = \begin{bmatrix} Z_{1m}(x) \\ \vdots \\ Z_{km}(x) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{1m}(x_0) \\ \vdots \\ Z_{km}(x_0) \end{bmatrix} A = \begin{bmatrix} \frac{\partial Z_{1m}(x_0)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial Z_{1m}(x_0)}{\partial x_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Z_{km}(x_0)}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial Z_{km}(x_0)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \Delta X = \begin{bmatrix} x_1 - x_{01} \\ \vdots \\ x_n - x_{0n} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 A 为系统灵敏度矩阵, ΔX 为系统失调量矩阵, ΔF 为系统各视场表征系统像差的修正泽尼克多项式系数随失调量的变化值^[8]。

波前, 代入自编的辅助装调软件中分析波前与表征系统波像差的修正泽尼克多项式系数的关系, 由此建立起系统灵敏度矩阵 A ^[9]。建立的灵敏度矩阵如表 4 所示, 以 0 视场为例。

为了与实际装调情况相符合, 将公差作为调整量单位, 将其代入光学设计软件 Zemax 中得到系统

表 4 中心视场灵敏度矩阵

Table 4 Sensitivity matrix of central field

Main mirror	Aberration	$T_{\alpha,\text{main}}$	$T_{\beta,\text{main}}$	$T_{\gamma,\text{main}}$	$D_{x,\text{main}}$	$D_{y,\text{main}}$	$D_{z,\text{main}}$
z_5	Astigmatism x	-0.048121	0	0	0	0	0
z_6	Astigmatism y	0	-0.123343	0	0	0	0
z_7	Coma x	0	-0.017161	0	0	0	-0.000109
z_8	Coma y	-0.072536	0	0	0	0	0
z_9	Primary spherical	-0.118729	0.003348	0	0.001134	0.002431	0.001245
Tertiary mirror	Aberration	$T_{\alpha,\text{tert}}$	$T_{\beta,\text{tert}}$	$T_{\gamma,\text{tert}}$	$D_{x,\text{tert}}$	$D_{y,\text{tert}}$	$D_{z,\text{tert}}$
z_5	Astigmatism x	0.362452	0.000101	-0.000100	0	-0.055335	0.363813
z_6	Astigmatism y	0	-0.127319	0.200100	0.001734	0	0
z_7	Coma x	0	-0.027122	0.001200	-0.014625	-0.000109	0
z_8	Coma y	-0.267635	0	0	0	-0.013803	-0.267323
z_9	Primary spherical	-0.3840123	0.001838	0.001421	0.003301	-0.000411	-0.346537

4.3 实际装调及装调结果

在 2.2 节公差分析中得到二四镜装调公差最为严格, 所以在计算机辅助装调过程中选取主镜和三

4.3.1 实际装调

镜作为调整对象,并用球面反射镜取代像面。由于三镜和主镜自身空间位置对系统成像形式存在互补关系,所以不能仅通过中心视场的像差形式对整个系统进行判断,需要测量多个视场。使用自准直干涉法测量系统±1 视场、±0.7 视场、±0.4 视场和 0 视场等多个视场的干涉图,据此进行计算机辅助装

调,装调过程中还在像面调整架上设置定位传感器,使各视场的每一次测量都能够高精度地重复。初装调时得到了 7 个视场波面误差等高图,图 8 为±0.7 视场和 0 视场初装调完成时波面误差等高图。利用广义逆算法结合系统灵敏度矩阵计算失调量,系统失调量如表 5 所示。

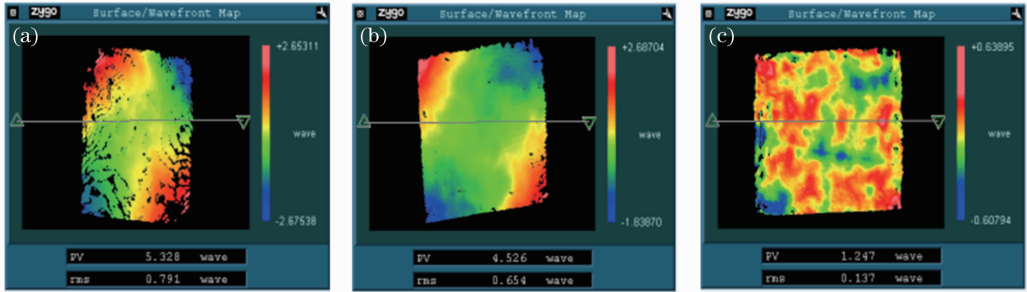


图 8 初装调时+0.7 视场(a),-0.7 视场(b)和 0 视场(c)波面误差等高图

Fig. 8 Contour maps of wavefront error of +0.7 (a), -0.7 (b) and 0 (c) fields of view of initial alignment

表 5 系统失调量

Table 5 Initial misalignment data

Misalignment of main mirror	Numerical value of misalignment	Misalignment of tertiary mirror	Numerical value of misalignment
$T_{\alpha,main}$	20"	$T_{\alpha,tert}$	9"
$T_{\beta,main}$	28.0"	$T_{\beta,tert}$	-26"
$T_{\gamma,main}$	32.0"	$T_{\gamma,tert}$	-14"
$D_{x,main}$	-1.50 mm	$D_{x,tert}$	0.14 mm
$D_{y,main}$	0.40 mm	$D_{y,tert}$	-0.47 mm
$D_{z,main}$	-0.88 mm	$D_{z,tert}$	-0.11 mm

三镜失调量主要是由三镜 CGH 和二四镜 CGH 基底面之间的传递误差造成的;在此传递误差基础上,叠加主镜与三镜 CGH 基底面之间传递误差导致主镜失调量。

果的波面误差等高图。

在波长为 632.8 nm 时期望装调结果和实际装

再进行计算机辅助装调:利用多个视场的干涉图和表 4 灵敏度矩阵计算系统空间位置调整量和调整方向,如果调整后测得波像差均方根(RMS)值不满足条件,则按照图 9 所示的流程进行多次反复迭代,最终各元件的相互位置将接近于理论设计值。

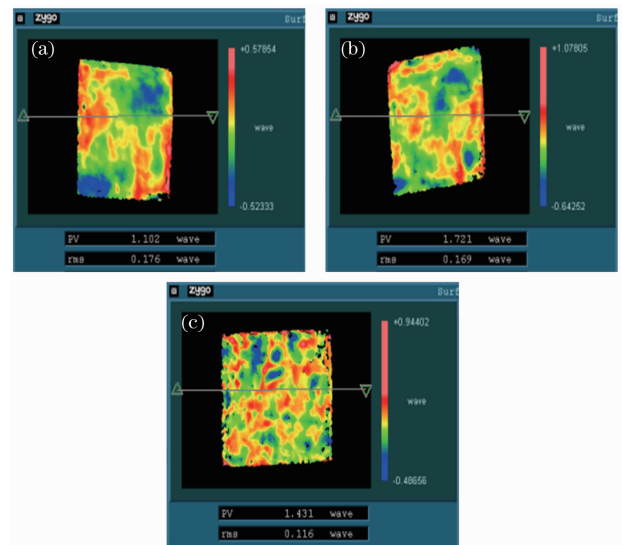


图 10 +0.7 视场(a),-0.7 视场(b)和 0 视场(c)波面误差等高图

Fig. 10 Contour maps of wavefront error of +0.7 (a), -0.7 (b) and 0 (c) fields of view

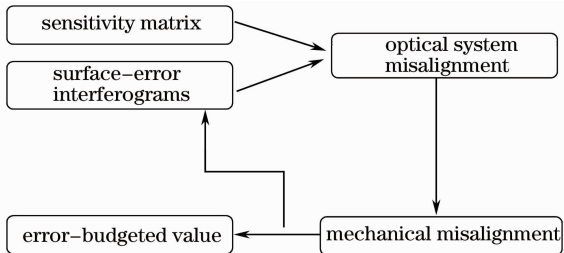


图 9 计算机辅助装调流程

Fig. 9 Process of computer-aided alignment

4.3.2 装调结果

图 10 给出了±0.7 视场和 0 视场最终装调结

调结果的具体数据如表 6 所示。系统实际全视场平均 MTF 值 0.4534, 期望全视场 MTF 平均值为 0.5739; 而系统实际全视场平均波像差 RMS 值

0.1641 λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)与期望值全视场平均波像差 RMS 值 0.14857 λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)接近, 基本达到指标要求。

表 6 期望装调校正值和实际装调值

Table 6 Predicted and real alignment correction values

Unitary field of view	-1	-0.7	-0.4	0	0.4	0.7	1
Expectation RMS / λ	0.1934	0.1549	0.1277	0.088	0.1277	0.1549	0.1934
Real RMS / λ	0.211	0.169	0.133	0.116	0.138	0.175	0.207
Expectation average MTF	0.498	0.572	0.6195	0.6385	0.6195	0.572	0.498
Real average MTF	0.3492	0.4122	0.5064	0.5297	0.4989	0.4493	0.3578

5 结 论

主要围绕自由曲面光学系统的装调技术进行研究, 采用基准传递技术和计算机辅助装调技术相结合的装调方法, 利用 CGH 建立初装调传递基准; 在计算机辅助装调阶段, 在方形域上泽尼克多项式失去正交性, 建立方形域上正交修正泽尼克多项式来表征系统波像差、建立灵敏度矩阵和求解失调量。装调后得到系统的 MTF 平均值为 0.4534, 波像差 RMS 值为 0.1641 λ 。这一方法对于其他离轴自由曲面光学系统装调也具有参考价值。

参 考 文 献

- 1 Wang Lingjie, Zhang Xin, Zhang Jianping, *et al.*. Free-form surface 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.
- 2 Xin Zhang, Ligong Zheng, Xin He, *et al.*. Design and fabrication of imaging optical system with freeform surface [C]. *SPIE*, 2012, 8486: 848607.
- 3 Li Fazhi, Zheng Ligong, Yan Feng, *et al.*. Optical testing method and its experiment on freeform surface with computer-generated hologram [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1052-1056.

黎发志, 郑立功, 闫锋, 等. 自由曲面的 CGH 光学检测方法
与实验 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 1052-1056.

- 4 Li Mengyang, Li Dahai, Wang Qionghua, *et al.*. Waveform reconstruction with orthonormal polynomials in a square area [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1108011.
李萌阳, 李大海, 王琼华, 等. 用方形区域内的标准正交多项式重构波前 [J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1108011.
- 5 Weisstein E. W. Gram-Schmidt Orthonormalization [OL]. <http://mathworld.wolfram.com/Gram-SchmidtOrthonormalization.html>, 2006.
- 6 Li Qingyang, Wang Nengchao, Yi Dayi. *Numerical Analysis* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. 73-76
李庆扬, 王能超, 易大义. *数值分析* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. 73-76.
- 7 Yang Xiaofei, Zhang Xiaohui, Han Changyuan. Application of Zemax software in alignment of three-mirror off-axis aspherical optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(3): 270-274.
杨晓飞, 张晓辉, 韩昌元. Zemax 在离轴三反射镜系统计算机辅助装调中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2004, 12(3): 270-274.
- 8 Liu Jianfeng, Long Funian, Zhang Wei. Study on computer-aided alignment method of off-axis three-mirror system [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(5): 571-576.
刘剑峰, 龙夫年, 张伟. 离轴三镜系统计算机辅助装调方法研究 [J]. *光学技术*, 2004, 30(5): 571-576.
- 9 Zhang Bin, Han Changyuan. Study on optimization of computer-aided alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(1): 54-58.
张斌, 韩昌元. 离轴非球面三反射镜光学系统装调中的计算机优化方法的研究 [J]. *光学学报*, 2001, 21(1): 54-58.

栏目编辑: 张腾