

离轴三反系统计算机辅助装调

王彬^{1,2}, 伍凡¹, 叶玉堂²

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;

2. 电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘要: 为实现对离轴三反系统快速、有效的装调, 提出了一种离轴三反系统计算机辅助装调(CAA)方法。该方法在理论分析失调后离轴三反系统像差特性的基础上, 结合 CAA 技术及光学装调的实际情况, 选择出最少且最合理的调整量; 根据检测数据及 CAA 数学模型直接计算出调整量的大小及方向。采用该方法对一离轴三反系统进行实际装调, 将调整量从 11 个减少到 7 个, 利用波前传感器被动式检测方法对离轴三反系统 0 及 ± 1 视场像质进行检测, 通过一次计算调整快速使该系统全视场波像差从 $\text{RMS} \leq 0.32\lambda$ 减少至 $\text{RMS} \leq 0.067\lambda$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$), 结果表明该装调方法简单、有效。

关键词: 计算机辅助装调; 离轴三反系统; 失调特性; Zernike 多项式

中图分类号: V248.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1118006

Computer aided alignment for off-axis TMA system

Wang Bin^{1,2}, Wu Fan¹, Ye Yutang²

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: To realize the fast, efficient alignment of off-axis three-mirror anastigmatic (TMA) system, a computer aided alignment (CAA) method was proposed. First, the aberration characteristics in the misaligned off-axis TMA system was theoretically analyzed to determine the evaluation parameters in CAA. Second, the key alignment parameters to be adjusted were given by combining the misalignment characteristics with the actual situation of the optical assembly. Finally, the magnitudes and orientation of the alignment parameters were calculated with the measurement data and CAA model. In order to verify the method, an off-axis TMA system was aligned according to this CAA method. The wave-front error (WFE) of the center and extreme edge FOVs were measured by wave-front sensor. After only once calculation and alignment, the measured root mean square (RMS) WFEs were reduced from 0.32λ to 0.067λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$). The experiment results demonstrate that this CAA method is feasible.

Key words: computer aided alignment; off-axis TMA system; misalignment characteristics; Zernike polynomial coefficient

收稿日期: 2016-03-10; 修订日期: 2016-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(61178043)

作者简介: 王彬(1979-), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事光学检测及装调等方面的研究。Email: wangbin-79@163.com

导师简介: 伍凡(1957-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事先进光学制造及测试技术方面的研究。Email: wufan@ioe.ac.cn

叶玉堂(1946-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电测量与控制及光电对抗方面的研究。Email: tyte@uestc.edu.cn

0 引言

随着现代光学的发展,对光学系统的要求越来越高,系统结构也日益复杂。在某些应用领域需要很大线视场、像质接近衍射极限、大相对口径且无中心遮拦的光学系统,能满足这些要求的,非离轴三反系统莫属。离轴三反系统主要优点包括^[1]:

(1) 不存在任何色差,可用于宽波段成像,特别适用于长焦距相机和光谱成像相机;

(2) 通光口径大,不必通过光学玻璃,易于解决由材料引起的问题;

(3) 结构紧凑,可采用超薄镜坯(如 SiC)或轻量化技术;

(4) 无遮拦、光学传递函数 MTF 值高;

(5) 视场大,一般可达到 2°,甚至更大。

由于具有以上优点,离轴三反系统的应用越来越广泛。其应用领域主要涉及到对地观测、空间目标探测、天文观测、多光谱热成像、立体测绘等,最近十余年发展更为快速。离轴三反系统的光学装调为公认的难点^[2],采用传统方法很难实现高精度装调,原因主要在于:

(1) 离轴反射镜的焦点及光轴难以确定,反射镜间相对位置调整非常困难;

(2) 调整量多,同时调整多个调整量非常困难;

(3) 系统视场大,装调时需兼顾全视场像质。

目前,复杂光学系统装调一般采用 CAA 方法,它是指利用光学设计软件建立光学系统仿真模型,并根据检测数据,通过一定的数学模型处理,计算出光学系统中各光学元件调整量的大小及方向^[3]。由于 CAA 方法能够实现可视化、量化调整,所以装调周期短、装调精度高。CAA 方法主要包括评价函数优化法和灵敏度矩阵法等。其中,评价函数优化法通过构建评价函数,并将检测数据代入评价函数,通过光学设计软件进行优化,使评价函数最小,从而得出失调量的大小及方向^[4],该方法需保证调整量间不相关或相关性较小;灵敏度矩阵法为利用光学设计软件分析得到各调整量与系统波像差的灵敏度矩阵,根据灵敏度矩阵计算失调量的大小及方向,该方法需各调整量与系统波像差满足线性或近似线性关系^[5-6]。文中采用的 CAA 方法是灵敏度

矩阵法。

采用灵敏度矩阵法对离轴三反系统进行计算机辅助装调时,首先应分析失调后离轴三反系统像差特性,并选择 CAA 时系统像质的评价函数。

1 失调后离轴三反系统像差特性

如图 1 所示,离轴三反系统是在共轴三反(TMA)系统基础上,采取孔径离轴及视场离轴的方式优化而来^[7]。

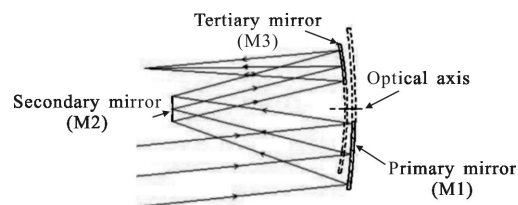


图 1 离轴三反系统示意图

Fig.1 Schematic layout of off-axis TMA system

在光学设计时,反射系统像质主要受初级像差限制,且失调不会产生新的像差类型^[5],所以光学元件失调主要引入初级像差。由于波像差检测设备(干涉仪、波前传感器等)不能检测畸变与场曲,仅考虑初级球差、彗差、像散。根据矢量波像差理论,失调共轴三反系统初级像差的矢量表达式如下^[8]:

$$W = \sum_{j=1}^3 W_{040j}^{3rd\ Spherical} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2 + \sum_{j=1}^3 W_{131j}^{3rd\ Coma} [(\vec{H} \cdot \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho}] \cdot (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho}) + \sum_{j=1}^3 W_{222j}^{3rd\ Astigmatism} [(\vec{H} \cdot \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho}]^2 \quad (1)$$

式中: \vec{H} 和 $\vec{\rho}$ 为视场向量和出瞳向量; j 为光学系统中光学元件的表面数; W_{040j} 、 W_{131j} 、 W_{222j} 为各光学表面的像差系数,分别对应初级球差、彗差、像散; $\vec{\sigma}_j$ 为系统在失调时光学系统各表面的像差中心与理想状态时的偏离量。

利用 Zernike 多项式 5~9 项(见表 1)可得到公式(1)的标量表达式如下:

$$W_j(\rho, \phi) = \sum_{j=5}^9 C_j^i Z_j(\rho, \phi) \quad (2)$$

式中: $W_j(\rho, \phi)$ 为 j 视场波像差; $Z_j(\rho, \phi)$ 为 Zernike 多项式; C_j^i 为多项式 j 视场拟合系数。

表 1 Zernike 多项式

Tab.1 Zernike polynomial coefficient

	Polar coordinates	Meaning
Z_5	$\rho^2 \cos 2\Phi$	Astigmatism 0° or 90°
Z_6	$\rho^2 \sin 2\Phi$	Astigmatism 45°
Z_7	$(3\rho^2-2)\rho \cos \Phi$	X coma and tilt
Z_8	$(3\rho^2-2)\rho \sin \Phi$	Y coma and tilt
Z_9	$6\rho^4-6\rho^2+1$	Spherical and focus

如图 2 所示,选取同轴三反系统离轴部分,坐标变换关系如公式(3):

$$\begin{cases} B = \frac{b}{a} < 1, \rho' = \frac{\sqrt{x'^2+y'^2}}{a}, \rho = \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{b} \\ \rho' \cos \phi' = B\rho \cos \phi + Px \\ \rho' \sin \phi' = B\rho \sin \phi + Py \\ \rho'^2 = B^2\rho^2 + 2Px\rho \cos \phi + 2Py\rho \sin \phi + P^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: B 为出瞳孔径压缩比; ρ, ρ' 为出瞳处归一化孔径; P_x, P_y 为出瞳离轴矢量 P 的两个归一化分量。

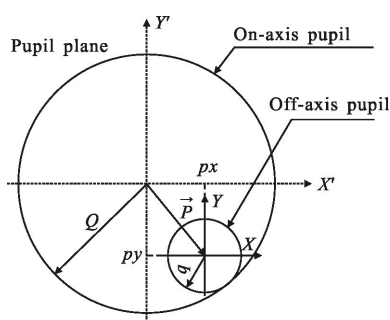


图 2 同轴三反及离轴三反系统出瞳相对关系示意图

Fig.2 Pupil of TMA and off-axis TMA system

不考虑视场因素,将公式(3)代入公式(2),可得到失调后离轴三反系统与其相应同轴三反系统 Zernike 多项式系数对应关系^[9]:

$$\begin{aligned} C_{5\text{off-axis}} &= 3B^2(P_x C_{7\text{con-axis}} - P_y C_{8\text{con-axis}}) + \\ & 12B^2(P_x^2 - P_y^2) C_{9\text{con-axis}} + B^2 C_{5\text{con-axis}} \\ C_{6\text{off-axis}} &= 3B^2(P_x C_{7\text{con-axis}} + P_y C_{8\text{con-axis}}) + \\ & 24B^2 P_x P_y C_{9\text{con-axis}} + B^2 C_{6\text{con-axis}} \\ C_{7\text{off-axis}} &= 8B^3 P_x C_{9\text{con-axis}} + B^3 C_{7\text{con-axis}} \\ C_{8\text{off-axis}} &= 8B^3 P_y C_{9\text{con-axis}} + B^3 C_{8\text{con-axis}} \\ C_{9\text{off-axis}} &= B^4 C_{9\text{con-axis}} \end{aligned} \quad (4)$$

根据以上分析,总结出失调离轴三反系统像差

特性:

- (1) 失调所引入的波像差主要是三阶像差;
- (2) 失调状态一定时,所引入的彗差及球差在整个视场为常数;
- (3) 失调状态一定时,所引入的像散包括常数项及线性项两个部分。

综上所述,轴上视场零像差不能作为系统调好的充要条件,需兼顾边缘视场。可采用中心及边缘视场的 Zernike 多项式 5~9 项(见表 1)作为 CAA 时系统像质的评价函数。

2 CAA 方法流程

实际光学系统装调过程分为两步:(1) 初调。利用光学、机械加工基准及装调工具、方法大致调整光学元件间相对位置;(2) 精调。检测光学系统成像质量,根据检测数据调整系统。精调是保证系统成像质量的关键步骤,也是光学装调难度最大的部分。

CAA 应用在光学装调精调阶段。对离轴三反系统进行精调时,根据 CAA 方法及光学系统装调实际情况选择最合适的装调方案,从而减少装调难度,提高装调精度。具体流程如下:仿真模型建立→失调特性分析→装调方案确定→辅助装调数学模型→调整量计算→光学装调。

3 离轴三反系统 CAA 装调

按照以上流程对一实际离轴三反系统进行 CAA 装调。

3.1 仿真模型建立

首先,利用 ZEMAX 建立离轴三反系统仿真模型,系统主要参数如表 2 所示。

表 2 离轴三反系统主要参数

Tab.2 Main parameters of off-axis TMA system

Name of parameter	Value of parameter
Field of view/(°)	$8^\circ \times 1^\circ$
Focal length/mm	650
Diameter of entrance pupil/mm	100
Wavelength aberrations/($\lambda=632.8\text{nm}$)	$\text{RMS} \leq 0.028\lambda$

系统检测光路如图 3 所示:平行光入射,依次经

过主(M1)、次(M2)、三镜(M3)后会聚,在像面处利用波前传感器检测系统像质。

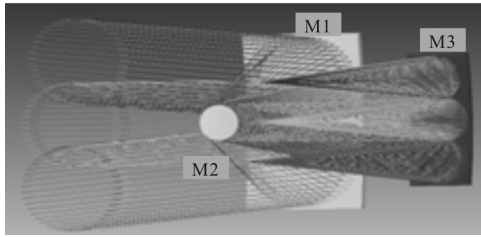


图 3 离轴三反系统仿真模型
Fig.3 Simulation model of off-axis TMA system

3.2 光学系统失调特性分析

仿真分析系统中各光学元件的调整量对系统像质的影响。首先,确定装调时的调整量。选择 M1 作

为基准,只调整 M2、M3,总计 11 个调整量(M2: D_{x2} 、 D_{y2} 、 D_{z2} 、 T_{x2} 、 T_{y2} ; M3: D_{x3} 、 D_{y3} 、 D_{z3} 、 T_{x3} 、 T_{y3} 、 T_{z3})。

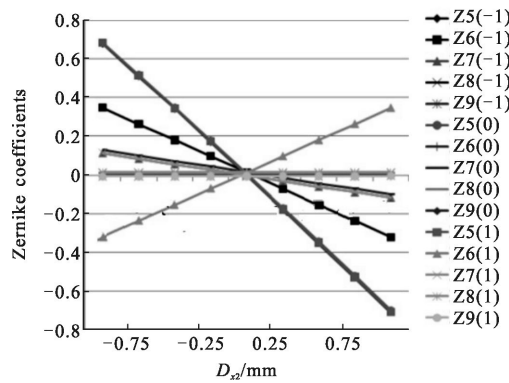
其次,根据前面像差特性分析结果,选择中心(0)及边缘(± 1)视场 Zernike 多项式 $Z_5 \sim Z_9$ 作为系统的评价函数,总计 15 个:

-1 视场 $Z_5(-1)$ 、 $Z_6(-1)$ 、 $Z_7(-1)$ 、 $Z_8(-1)$ 、 $Z_9(-1)$

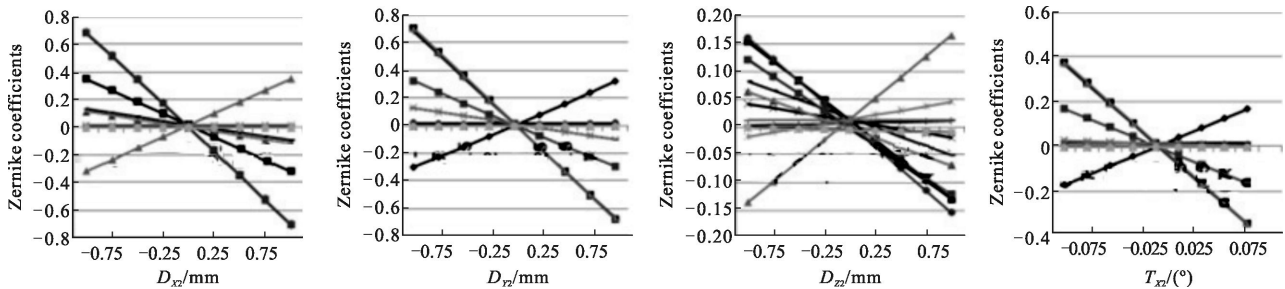
0 视场 $Z_5(0)$ 、 $Z_6(0)$ 、 $Z_7(0)$ 、 $Z_8(0)$ 、 $Z_9(0)$

1 视场 $Z_5(1)$ 、 $Z_6(1)$ 、 $Z_7(1)$ 、 $Z_8(1)$ 、 $Z_9(1)$

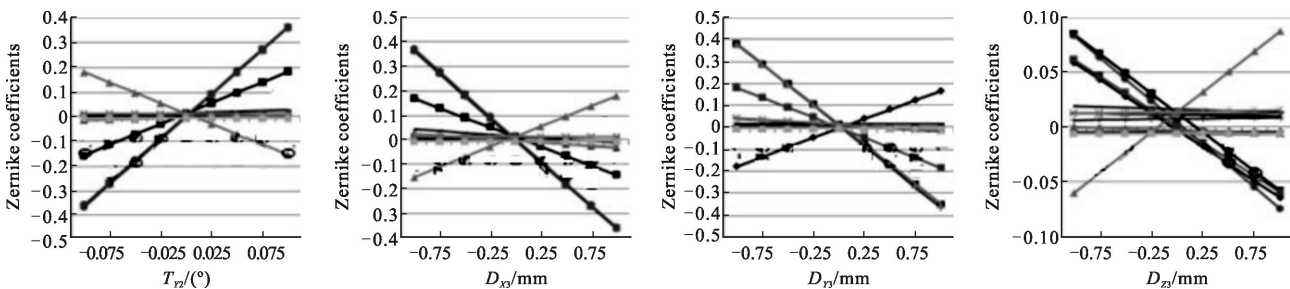
最后,仿真分析 11 个调整量与 15 个评价函数之间的关系,利用 ZEMAX 及自编程序完成。图 4(a)为 D_{x2} 与 15 个评价函数的关系曲线图,X 轴为 D_{x2} ,Y 轴为 15 个评价函数。图 4(b)为 11 个调整量(仿真范围: D_x, D_y, D_z $-1 \sim 1$ mm, T_x, T_y, T_z $-0.1^\circ \sim 0.1^\circ$)与 15 个



(a)



(b1)



(b2)

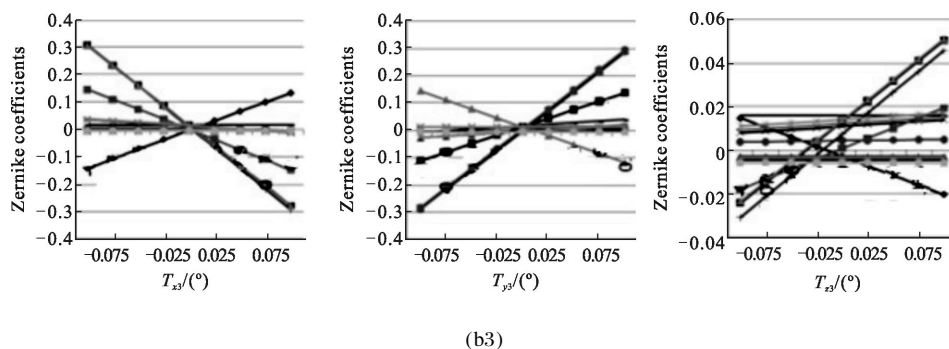


图 4 D_{x2} 与 15 个评价函数关系曲线图(a)和 11 个调整量与 15 个评价函数关系曲线图(b)

Fig.4 Relation between D_{x2} and 15 evaluating parameters (a) and relation between 11 alignment parameters and 15 evaluating parameters (b)

评价函数的关系曲线图,每个调整量对应图 4(b)中的一个子图。从图 4(b)中可看出,调整量与评价函数满足线性关系。

利用最小二乘法拟合图 4 曲线的斜率,即可得到该系统灵敏度矩阵,如表 3 所示。灵敏度矩阵反映的是调整量变化 1 mm 或 0.1° 时评价函数的变化量。

表 3 灵敏度矩阵

Tab.3 Sensitivity matrix

	D_{x2}	D_{y2}	D_{z2}	T_{x2}	T_{y2}	D_{x3}	D_{y3}	D_{z3}	T_{x3}	T_{y3}	T_{z3}
Z5(-1)	-0.694	0.310	-0.126	0.170	0.362	-0.359	0.172	-0.061	0.133	0.289	-0.018
Z6(-1)	-0.334	-0.687	-0.142	-0.362	0.169	-0.155	-0.364	-0.071	-0.293	0.124	0.037
Z7(-1)	-0.116	-0.001	-0.067	0	0.011	-0.028	0.001	-0.003	0	0.023	0
Z8(-1)	0	-0.115	-0.030	-0.011	0	0	-0.029	-0.001	-0.024	0	0.003
Z9(-1)	0	0	-0.005	0	0	0	0	0	0	0	0
Z5(0)	-0.691	0	-0.158	0.001	0.359	-0.360	-0.005	-0.078	-0.004	0.290	0
Z6(0)	0	-0.673	0.004	-0.359	0.001	0.005	-0.374	0.001	-0.301	-0.004	0.038
Z7(0)	-0.115	0	-0.066	0	0.011	-0.028	0	-0.003	0	0.023	0
Z8(0)	0	-0.114	0.09*	-0.011	0	0	-0.029	0	-0.024	0	0.003
Z9(0)	0	0	-0.005	0	0	0	0	0	0	0	0
Z5(1)	-0.694	-0.309	-0.122	-0.167	0.362	-0.359	-0.182	-0.060	-0.147	0.289	0.019
Z6(1)	0.334	-0.688	0.151	-0.362	-0.167	0.164	-0.364	0.073	-0.293	-0.132	0.037
Z7(1)	-0.115	0	-0.066	0	0.011	-0.028	0	-0.003	0	0.023	0
Z8(1)	0	-0.114	0.031	-0.011	0	-0.001	-0.03	0.001	-0.024	0	0.003
Z9(1)	0	0	-0.005	0	0	0	0	0	0	0	0

对灵敏度矩阵进行分析总结,可得以下 6 个系统主要失调特性:

- (1) 调整量与评价函数满足线性关系;
- (2) 像散为系统最主要的像差,其次是慧差,各调整量对系统球差影响很小;

- (3) 对系统像质影响从大到小排列依次是: D_{x2} 、 D_{y2} 、 D_{x3} 、 D_{y3} 、 T_{x2} 、 T_{y2} 、 T_{x3} 、 T_{y3} 、 D_{z2} 、 D_{z3} 、 T_{z3} ;
- (4) D_{x3} 与 T_{y3} 相关, D_{y3} 与 T_{x3} 相关;
- (5) D_{z3} 对系统像质影响很小,且与 D_{x3} 部分相关;
- (6) T_{z3} 对系统像质影响很小,且与 D_{y3} 相关。

相关是指不同的调整量对系统像质有相同的影响,所以相关的调整量之间可相互补偿。

3.3 装调方案确定

应结合光学装调的实际情况确定装调方案,主要包括以下几个方面:

(1) 精调时需要光学元件进行精细、准确的调整。相比倾斜调整,平移调整更容易、准确,且平移调整机械结构较简单、稳定性高;

(2) 在初调后,各光学元件的调整量偏差。在对文中三反系统进行初调时,利用光学、机械加工精度,可将主、次、三镜之间的倾斜偏差保证在 0.03° 以内,间隔偏差保证在 0.3 mm 以内,而平移偏差只能保证在 2 mm 以内;

(3) 在初调后,各光学元件的调整量偏差对系统像质影响。如表 4 所示,初调后系统像差主要是由平移偏差所引入的,倾斜及间隔偏差所引入的系统像差较小。

表 4 初调后偏心、倾斜及间隔所产生的像差

Tab.4 Aberrations induced by decenters, tilts and D_{Z3} after preliminary alignment

	Dec 2 mm	Tilt 0.03°	D_{Z3} 0.3 mm
RMS($\lambda=632.8\text{ nm}$)	0.59λ	0.027λ	0.008λ

综合考虑该离轴三反系统失调特性及光学装调实际情况,可采取如下装调方案:在初调时,利用光学、机械加工精度及光学装调工具、方法大致调整主、次、三镜相对位置,尽量保证倾斜精度;在精调时,调整 D_{X2} 、 D_{Y2} 、 D_{Z2} 、 D_{X3} 、 D_{Y3} 、 T_{X2} 、 T_{Y2} 。

该方法不但降低了光学装调难度,而且可以简化系统机械结构,提高光机结构稳定性。

3.4 辅助装调数学模型建立

由于调整量与评价函数满足线性关系,可考虑建立线性模型:

$$A\Delta X = \Delta F \quad (5)$$

式中: A 为前面求取的灵敏度矩阵; ΔX 为系统中的失调量; $\Delta F = F - F_0$ 为系统像差检测值与设计值之差。

3.5 辅助装调数学模型求解

由于调整量之间相关或部分相关,当直接采用最小二乘法或广义逆法求解时计算结果不准确。阻尼最小二乘法在最小二乘法的基础上增加阻尼因子

$P_{\text{阻}}$,避免因调整量之间的相关导致计算结果前期发散,经多次迭代计算逼近真实值^[10],公式(6)为阻尼最小二乘法求解公式:

$$\Delta X = (A^T A + P_{\text{阻}} I)^{-1} A^T \Delta F \quad (6)$$

式中: I 为单位矩阵; $P_{\text{阻}}$ 为阻尼因子, $P_{\text{阻}}$ 及迭代计算次数需通过前期仿真计算确定。

表 5 为利用阻尼最小二乘法仿真计算结果(平移单位为 mm ,倾斜及旋转单位为 $^\circ$)。共进行了两组仿真计算验证。可以看出,计算结果与目标值有偏差,这是因为调整量之间因为相关而相互补偿所引起。

表 5 仿真计算结果

Tab.5 Results of simulation calculation

	Targets 1	Solution 1	Targets 2	Solution 2
D_{X2}	0.2	0.204	1	0.928
D_{Y2}	-0.2	-0.209	-1	-1.135
D_{Z2}	0.2	0.208	-0.3	-0.354
T_{X2}	0.03	0.025	0.02	0.018
T_{Y2}	-0.03	-0.332	-0.02	-0.019
T_{Z2}	0.2	0.41	1	0.84
D_{X3}	-0.2	0.087	-1	-1.163
D_{Y3}	0.2	0.204	-0.3	0.092
D_{Z3}	0.03		0.02	
T_{X3}	-0.03		-0.02	
T_{Y3}	0.2		1	

表 6 为在仿真模型中按照表 5 计算结果进行调整后的系统像质。可以看出,在两组仿真验证中,调整后系统全视场波像差均接近设计值。仿真验证表明,文中提出的调整方案可行。

表 6 调整后的波像差

Tab.6 Wave-front aberrations after being adjusted

	Test 1	Test 2
RMS ($\lambda=632.8\text{ nm}$)	0.030λ	0.031λ

4 实验验证

采用文中提出的装调方案对该离轴三反系统进行实际装调,主要过程如下。

(1) 初调:大致调整 M1、M2、M3 的相对位置;

(2) 利用波前传感器 HASO3-32(Imagine Optic) 检测系统 $0, \pm 4^\circ$ 视场像质(如图 5 所示), 将检测结果代入调整量求解数学模型中计算失调量的大小及方向;

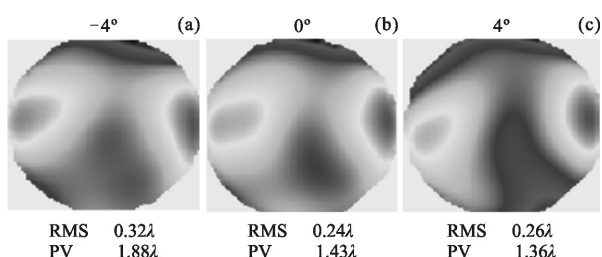


图 5 初调后系统波像差

Fig.5 Wave-front error after the preliminary alignment

(3) 精调: 如图 6 所示, 根据计算结果对系统进行调整。

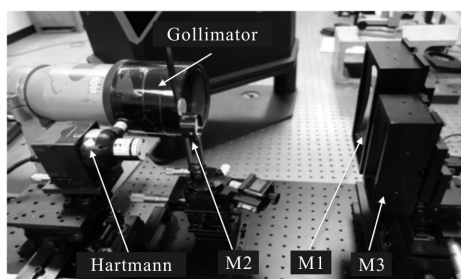


图 6 离轴三反系统精调

Fig.6 Fine alignment of off-axis TMA system

精调时, 通过一次计算调整快速将系统全视场波像差从 $RMS \leq 0.32\lambda$ 减少至 $RMS \leq 0.067\lambda$, 图 7 为精调后的系统全视场像质。

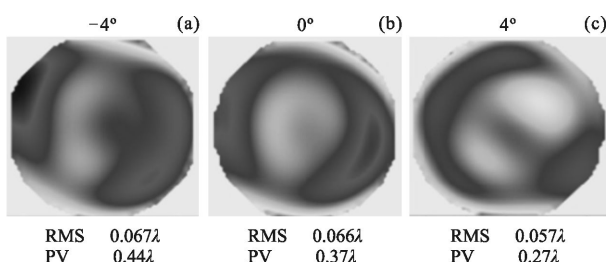


图 7 精调后系统波像差

Fig.7 Wave-front aberration after fine adjustment

5 结论

由于离轴三反系统具有非对称性、视场大、调整量多等特点, 对其实现高精度的光学装调十分困难。文中在理论分析失调后离轴三反系统像差特性的基础上, 结合 CAA 技术及光学装调的实际情况, 提出

了一种简单、有效的计算机辅助装调方法。采用该方法对一离轴三反系统进行实际装调, 并利用波前传感器检测系统中心及边缘视场像质, 通过一次计算调整使该系统全视场波像差 RMS 从 0.32λ 减少至 0.067λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$), 实验结果表明该方法快速、有效。此外, 文中提出的方法也适用于其他复杂光学系统的装调工作, 即结合系统失调像差特性、CAA 及光学装调实际情况选择出最少、最合理的调整量, 简化系统机械结构、降低光学装调难度, 从而提高光学装调精度、装调效率及光机结构稳定性。

参考文献:

- [1] Zhang Keke, Ruan Ningjuan, Fu Danying. Analysis and consideration of development of overseas space off-axis TMA system camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(3): 63-70. (in Chinese)
- [2] Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Off-axis three-mirror reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 706-709. (in Chinese)
- [3] Rimmer M P. A computer aided optical alignment method [C]//SPIE, 1990, 1271: 363-368.
- [4] Kim Seonghui, Yang Ho-Soon, Lee Yun-Woo, et al. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems [J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5059-5068.
- [5] Wang Chao, Zhang Xin, Wang Lingjie, et al. Adjustment of abnormality aperture off-axis freeform system based on square aperture [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1518-1525. (in Chinese)
- [6] Zhang Chao, Wei Xuemin, Zhao Xiting, et al. Computer-aided alignment technology of multi-spectral camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0812005. (in Chinese)
- [7] Pan Junhua. The Design, Manufacture And Test of The Aspherical Optical Surface [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 130-140. (in Chinese)
- [8] Gu Zhiyuan, Yan Changxiang, Wang Yang. Alignment of a three-mirror anastigmatic telescope using nodal aberration theory[J]. *Opt Express*, 2015, 23: 25182-25201.
- [9] Pang Zhihai. Study on computer aided alignment technology for off-axis Optical system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 63-68. (in Chinese)
- [10] Timothy Sauer. Numerical Analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 2014. (in Chinese)