

文章编号 1004-924X(2010)08-1754-06

# 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统 进行计算机辅助装调

巩 盾<sup>1,2</sup>, 田铁印<sup>1</sup>, 王 红<sup>1</sup>

(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 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**针对离轴三反光学系统检测和装调的复杂性,提出了一套结合了干涉测量技术的计算机辅助装调方法。采用多视场 ZYGO 干涉仪自准干涉检验各种失调量产生的残余像差,得到表征系统失调量引起残余像差的一系列 Zernike 系数,利用 Zernike 系数与 Seidel 像差系数之间的相关性将之转化为几何像差作为校正对象。由光学设计软件求得与系统失调量相关的灵敏度矩阵,并确定对残余像差影响最敏感的失调量。当失调量被确定后,将调整后的结果再次代入光学设计软件进行验证。多次迭代后,得到系统的 RMS 值 $<0.04\lambda$ 的良好结果,证明了这种指导装调的方法是行之有效的。

**关键词:**离轴三反系统;计算机辅助装调;干涉检验;灵敏度矩阵

**中图分类号:**V248.3;TP391.7 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101808.1754

## Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients

GONG Dun<sup>1,2</sup>, TIAN Tie-yin<sup>1</sup>, WANG Hong<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

**Abstract:** A computer-aided alignment method in combining with the interferometry was proposed to optimize the detection and alignment of an off-axis three-mirror system. By using a multi-fields ZYGO interferometer, a series of Zernike coefficients were obtained to express the incorrect parameters of the system, which were then transformed into geometric aberrations as the corrected objects based on the dependence of Zernike-coefficients on Seidel aberrations. Furthermore, an optical design software was used to derive the sensitivity matrix related to the incorrect parameters and to determine the incorrect parameter mostly sensitive to the redual aberration. Consequently, the adjusted result was brought into the software to verify the selection of incorrect parameters. Experimental results show that the RMS value of the system is lower than  $0.04\lambda$  after iterations, which proves the effectiveness of the

收稿日期:2009-05-14;修订日期:2009-09-01.

基金项目:中国科学院三期创新工程资助项目

method in alignment guidance.

**Key words:** off-axis three mirror system; computer-aided alignment; interference test; sensitivity matrix

## 1 引 言

随着空间技术的巨大发展,对空间遥感器的成像质量和覆盖范围提出了更高的要求。为了实现对远距离物体的清晰成像,对观察用光学系统的要求也随之提高。随着能实现远距离观察和测量的大口径、大视场光学系统越来越多地应用在地面观察测量系统中<sup>[1]</sup>,传统的共轴系统已经不能满足这些日益严格的需求,而离轴系统由于其具有无中心遮拦、成像质量好、视场大、结构紧凑等优点得到广泛的应用<sup>[2]</sup>。不过由于离轴系统的复杂性,传统的装调方法不能达到所需的精度要求,新的装调手段和方法成为当今离轴系统发展的瓶颈。针对传统装调方法不可视,不定量,随机成分多,装调周期长等缺点而提出的计算机辅助装调是一种新的装调方法,它能定性、定量地给出失调量,从而指导装调过程。光学系统的计算机辅助装调技术,是利用计算机对实时检测结果与理论结果进行对比分析,通过必要的数学模型处理,预测系统中零件的失调方位和量值以指导实际装调<sup>[3]</sup>的一种方法。

早在 20 世纪 80 年代,美国的 Santa Barbara 研究中心就对多光谱望远镜的计算机辅助装调技术进行了研究与应用<sup>[4]</sup>。在一个与原型系统成比例缩小的实验室光学系统上进行实验,获得了非常好的结果。从 1970~1985 年,Ittek 公司研制出了许多成像质量优于 Cassegrain 和 Gregorian 设计的全反射、无中心遮拦、视场大、全波段应用的光学系统,但却无法将系统装调到接近设计的成像质量。于是,该公司采用了计算机辅助装调的方法,达到了手工装调无法达到的结果,从而为计算机辅助装调创立了一个良好的开端<sup>[5-6]</sup>。此后,法国、以色列等国家也对此项技术进行了深入的研究和探索,并取得了一些令人满意的结果。近几年,国内也开始了这方面的研究,并进行了计算机模拟实验<sup>[7]</sup>。

本文针对某空间遥感器有效载荷的离轴三反射系统高精度高标准的装调要求,结合干涉测量与

优化技术,将计算机技术应用于光学系统装调中,提出了一种行之有效的计算机辅助装调方法。根据已知光学设计数据,在此方法的指导下,可以快速、明确地找到系统的失调量,对失调量校正后取得了良好的装调结果,缩短了装调周期。

## 2 光学系统的干涉检验

本文讨论的光学系统是焦距为 3 m 的离轴三反射系统,使用 TDI CCD 为系统成像传感器,要求全视场 60 lp/mm 空间频率下 MTF>0.5,系统结构见图 1。

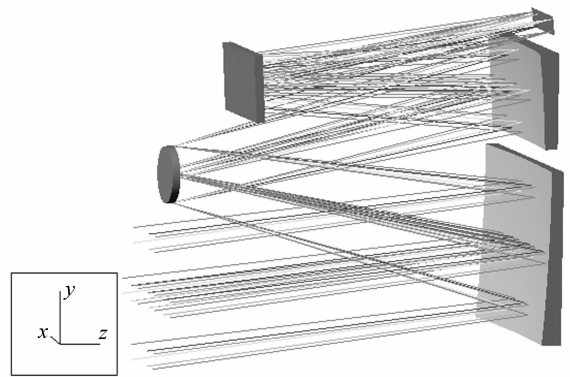


图 1 系统结构图

Fig. 1 Configuration of system

图 1 中像面前的平面镜起调焦和缩短系统长度的作用。用 ZYGO 干涉仪对系统进行自准直干涉检验,检验方法见图 2。由 ZYGO 干涉仪发

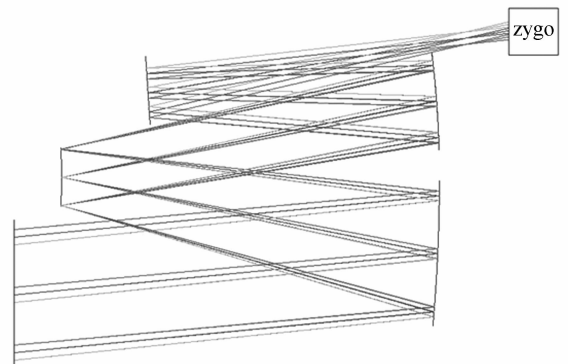


图 2 光学系统的自准干涉检验

Fig. 2 Auto-collimating interference test of system

准球面波经过光学系统后变为平面波,平面波在系统前的平面镜发生反射,再次经过光学系统回到干涉仪与标准光发生干涉,得到干涉图。

### 3 校正对象的选取

由光学设计阶段的相关计算可知,失调量所带来的主要影响表现为初级像差,高级像差的变化与初级像差相比比较小,因此装调时把初级像差作为校正对象。畸变在干涉图中反应不出来,所以只控制初级球差、彗差和像散。根据初级像差与失调量的关系,选取的校正对象有:球差, $x$ 轴方向的彗差, $y$ 轴方向的彗差, $45^\circ$ 方向的像散, $0^\circ$ 或 $90^\circ$ 方向的像散。

在光学设计的公差计算阶段,发现主镜是对装调误差最敏感的镜面,所以在实际装调中以主镜作为基准,固定不动。次镜和三镜沿 $z$ 轴方向上的误差在小范围的变化主要产生的是离焦,可以通过移动焦平面来补偿,因此这两个变量可以不考虑。这样,需要装调的自由度共 8 个:次镜沿 $x$ 轴和 $y$ 轴的平移 $D_{x,sec}, D_{y,sec}$ ;沿 $x$ 轴和 $y$ 轴的旋转 $R_{x,sec}, R_{y,sec}$ ;三镜沿 $x$ 轴和 $y$ 轴的平移 $D_{x,tri}, D_{y,tri}$ ;沿 $x$ 轴和 $y$ 轴的旋转 $R_{x,tri}, R_{y,tri}$ 。

### 4 Zernike 系数与几何像差的关系

Zernike 多项式是在连续的单位圆上正交的,具有旋转对称性的一组正交多项式。Zernike 多项式系数与常用的 Seidel 像差系数可以建立起联系, CODE V 和 ZEMAX 等软件中常用的是它的子集 Fringe Zernike 多项式。前 9 项系数形式见表 1<sup>[8]</sup>。

表 1 36 项 Zernike 系数的前 9 项

Tab. 1 The first 9 of 36 Zernike coefficients

项数	Zernike 系数
$Z_1$	1
$Z_2$	$\rho \cos \theta$
$Z_3$	$\rho \sin \theta$
$Z_4$	$2\rho^2 - 1$
$Z_5$	$\rho^2 \cos 2\theta$
$Z_6$	$\rho^2 \sin 2\theta$
$Z_7$	$(3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta$
$Z_8$	$(3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta$
$Z_9$	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$

干涉检验后 ZYGO 干涉仪可以自动产生 36 项 Fringe Zernike 系数,其中  $Z_5$  对应  $0^\circ$  或  $90^\circ$  方向的像散; $Z_6$  对应  $45^\circ$  方向的像散; $Z_7$  对应  $x$  轴方向的彗差; $Z_8$  对应  $y$  轴方向的彗差; $Z_9$  对应球差<sup>[9]</sup>。

### 5 数学模型与灵敏度矩阵

校正对象与调整变量之间是非线性关系,利用多元泰勒公式可以把非线性方程组用下列线性方程组代替,即<sup>[4]</sup>:

$$\mathbf{A} \Delta X = \Delta F$$

$$\Delta X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad \Delta F = \begin{pmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta F_2 \\ \vdots \\ \Delta F_m \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$\mathbf{A}$  为灵敏度矩阵:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial F_m}{\partial x_n} \end{pmatrix}$$

$\Delta X$  为调整变量, $\Delta F$  为校正对象的实测值与光学系统设计值之差,灵敏度矩阵  $\mathbf{A}$  可由光学设计数据得到。利用最小二乘法对方程求解,其表达式为:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \Delta X = \mathbf{A}^T \Delta F, \quad (2)$$

如果矩阵  $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$  非奇异,则方程组的解为:

$$\Delta X = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \Delta F. \quad (3)$$

### 6 装调过程

选取 3 个视场进行评价,由于评价方式相同,并且中心区域是光学系统首要考虑的视场,所以文中只以中心视场为例。

系统经过初装调后,在中心视场得到  $\text{RMS} = 0.084\lambda$ ;  $\text{PV} = 0.536\lambda$  的结果,  $60 \text{ lp/mm}$  空间频率下 MTF 值为 0.47, 尚未达到系统要求。干涉图和 Zernike 系数如图 3、表 2 所示。由表中得出,  $Z_7$  项系数较大,接近  $-0.1$ , 说明对应的  $x$  轴方向的彗差为目前的主要校正对象。

光学设计软件 CODE V 可以在已有设计基础上分析生成的虚拟干涉图和 Fringe Zernike 系

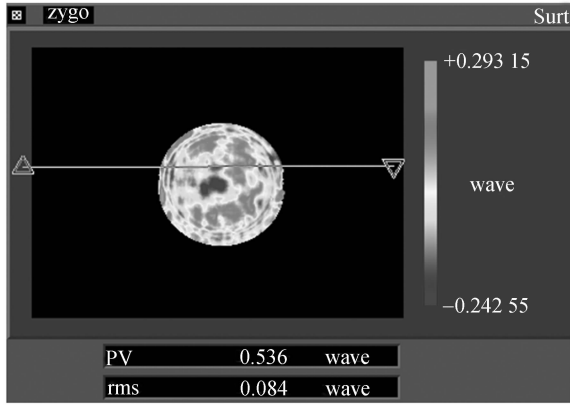


图 3 初装调的系统干涉图

Fig. 3 Interferogram of beginning alignment

灵敏度矩阵  $A^{[10]}$ 。为了与实际装调情况相符合,将公差 的 2 倍作为调整量单位,建立的灵敏度矩阵如表 3 所示。由灵敏度矩阵可知,次镜沿  $x$  轴的平移  $D_{x,sec}$  是  $Z_7$  的主要影响量,与  $x$  轴方向的偏心带来  $x$  轴方向的彗差的传统理论完全吻合。

表 2 初装调的 Zernike 系数

Tab. 2 Zernike coefficients of beginning alignment

项数	Zernike 系数
$Z_5$	-0.027
$Z_6$	-0.018
$Z_7$	-0.097
$Z_8$	0.014
$Z_9$	-0.022

数,由此建立起调整量与 Fringe Zernike 系数的

表 3 灵敏度矩阵

Tab. 3 Sensitivity matrix

	调整项数							
	$D_{x,sec}$	$D_{y,sec}$	$R_{x,sec}$	$R_{y,sec}$	$D_{x,tri}$	$D_{y,tri}$	$R_{x,tri}$	$R_{y,tri}$
$Z_5$	-0.003 8	0.003 8	0.004 7	-0.004 7	0.000 5	-0.000 5	-0.007 5	0.007 5
$Z_6$	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
$Z_7$	-0.082 3	0.000 0	0.000 0	-0.036 2	-0.010 2	0.000 0	0.000 0	-0.049 4
$Z_8$	0.000 0	-0.082 3	0.036 2	0.000 0	0.000 0	-0.010 2	0.049 4	0.000 0
$Z_9$	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0

由于次镜为光瞳,在  $x$  轴方向调整次镜的平移对系统的共轴性影响较大,而且会增大像散,因此选择了其他调整量校正系统的像差。如灵敏度矩阵所示,针对  $Z_7$  的  $D_{x,sec}$  可以由  $R_{y,sec}$  和  $R_{y,tri}$  来补偿,但三镜沿  $y$  轴的旋转  $R_{y,tri}$  会产生与  $D_{x,sec}$  符号相异的  $Z_5$ ,当用  $R_{y,tri}$  来补偿时就会增大系统的像散。因此采用调整次镜沿  $y$  轴方向的旋转  $R_{y,sec}$  来校正  $D_{x,sec}$ 。

首先在 CODE V 中进行模拟,虚拟的调整量产生的  $Z_7$  与实际情况比较接近,所以  $D_{x,sec}$  保持不变,将  $R_{y,sec}$  向建立灵敏度矩阵时调整方向的反方向调整 4 倍的公差量,此时所得的 Fringe Zernike 系数如表 4 所示。模拟的结果非常理想,很好地校正了失调产生的像散和彗差。

表 4 模拟装调的 Zernike 系数

Tab. 4 Zernike coefficients of simulate alignment

项数	Zernike 系数
$Z_5$	-0.009 3
$Z_6$	0.000 0
$Z_7$	-0.009 8
$Z_8$	0.000 0
$Z_9$	0.000 0

模拟之后进入实际装调阶段,将次镜沿  $y$  轴方向的旋转调整  $-0.2^\circ$ ,再重复之前的干涉检验过程,得到的干涉图如图 4。测得 RMS 为  $0.036\lambda$ ,PV 值达到  $0.243\lambda$ ,满足  $60 \text{ lp/mm}$  空间频率下  $\text{MTF} > 0.5$  的系统要求,所有像差都得到了很好校正。

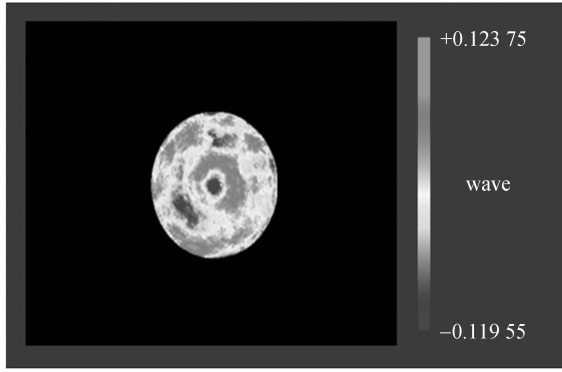


图 4 计算机辅助装调后的系统干涉图

Fig. 4 Interferogram after computer-aided alignment

## 参考文献:

- [1] 崔继承. 大口径折反射式变焦距物镜的设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2087-2091.  
CUI J C. Design of large aperture refractive-reflective zoom lens[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2087-2091. (in Chinese)
- [2] 常军, 翁志成, 姜会林. 长焦距空间三反光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 315-318.  
CHANG J, WENG Z C, JIANG H L. Design of long focal length space optical system with three reflective mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4): 315-318. (in Chinese)
- [3] 史亚莉, 高云国, 邓伟杰. 反射光路的计算机辅助装调模型[J]. 激光与红外, 2009, 39(4): 427-430.  
SHI Y L, GAO Y G, DENG W J. Model for computer-aided alignment of reflective optical system[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(4): 427-430. (in Chinese)
- [4] FIGOSKI J W, SHRODET E, MOORE G F. Computer-aided alignment of a wide-field three-mirror, unobscured, high-resolution sensor [J]. *SPIE*, 1989, 1049: 166-177.
- [5] IRA M, EGDAL L. Manufacture of a three-mirror wide-field optical system[J]. *Optical Engineering*, 1985, 24(2): 285-292.
- [6] 杨晓飞, 张晓辉, 韩昌元. ZEMAX 软件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.  
YANG X F, ZHANG X H, HAN C Y. Application of Zemax software in alignment of three-mirror off-axis aspherical optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(3): 270-274. (in Chinese)
- [7] 张斌, 张晓辉, 韩昌元. 光学系统计算机辅助装调中的一种优化算法[J]. 光学精密工程, 2001, 8(3): 273-277.  
ZHANG B, ZHANG X H, HAN C Y. Algorithm for misalignment determination in computer-aided alignment of optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 8(3): 273-277. (in Chinese)
- [8] 罗森, 朱永田. 计算机辅助装调方法在离轴卡塞格林系统中的应用[J]. 光学技术, 2008, 34(4): 514-517.  
LUO M, ZHU Y T. Application of computer-aided alignment to off-axis cassegrain system[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(4): 514-517. (in Chinese)
- [9] CODE V. *Optical Design Software User's Guide, version 9.5*[M]. Pasadena: Optical Research Associates. 2001.
- [10] MALACARA D. *Optical Shop Testing*[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1978.

## 7 结 论

基于计算机辅助装调操作性好、针对性强等诸多优点, 本文在原有装调理论的基础上, 结合 ZYGO 干涉仪可以自动生成 Zernike 系数的优点, 提出了利用 Zernike 系数对离轴三反系统进行装调的方法。该方法经 CODE V 软件多次叠代, 将各种像差进行平衡再指导装调, 避免了其他方法在模拟过程中诸多不确定量产生的模拟误差; 并且针对性更强, 有利于像差的校正。实验得到了  $RMS < 0.04\lambda$  的良好装调结果, 缩短了装调周期。该方法可以广泛应用于其他光学系统, 有较强的推广性。

## 作者简介:



巩 盾(1982—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事光学设计、光学系统的计算机辅助装调、温度对光学系统的影响等方面的研究。E-mail: gong-dun@sina.com



田铁印(1967—),男,吉林长春人,研究员,主要从事航天相机及各类光学仪器的研究与设计。E-mail: tiantieyin@ciomp.ac.cn



王 红(1968—),女,吉林长春人,研究员,主要从事航天相机及大型光电经纬仪光学系统的研究与设计。E-mail: wanghong@ciomp.ac.cn

## ● 下期预告

## 激光告警内场仿真试验系统研究与设计

王建军<sup>1</sup>,张沛露<sup>2</sup>,李 岩<sup>1</sup>,崔 爽<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 吉林建筑工程学院,吉林 长春 130033)

以某型号内场仿真试验系统研制为背景,对激光告警内场仿真试验的实现方法及关键技术进行探讨。通过对外场试验环境进行等效模拟,在内场构造了一个对激光告警装备进行检测的仿真试验系统。首先对仿真系统的发展以及仿真试验系统的设备组成进行了介绍,然后以内场激光编码识别能力测试为例,对以激光漫反射信号方式进行激光告警试验的方法进行探讨,并对完成激光告警内场仿真试验所需的激光能量等效计算、漫反射屏的位置标定以及漫反射屏最低入射能量分析等关键技术进行详细阐述。通过使用单脉冲能量 10 mJ 的激光信号源以漫反射方式进行激光编码识别能力测试,结果表明探测概率达到 100%,证明了试验方法的可行性。