

文章编号: 0253-2239(2010)06-1688-05

反射变焦系统的计算机辅助装调

张庭成 王涌天 常 军 泰 哈

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 计算机辅助装调(CAA)是提升高精度、复杂离轴光学系统成像质量的一个行之有效的办法,特别是对空间光学系统的在轨调整显得尤其重要。介绍了一种针对离轴反射变焦系统进行计算机辅助装调的方法。由于变焦系统具有多重结构,所以需要计算系统在不同位置的灵敏度矩阵。因而,变焦系统的计算机辅助装调实际上是由一系列独立的对应着不同位置的辅助装调组成的。对各重结构进行装调的过程包括灵敏度矩阵的计算、实际系统和理想系统像差值的计算,以及失调量的计算等。针对反射变焦系统,建立了新的计算机辅助装调数学模型。为了更进一步地说明问题,进行了数值实验,并通过对比装调前后系统的成像质量,验证了该方法的可行性。

关键词 计算机辅助装调;失调量;灵敏度矩阵;泽尼克多项式;反射变焦系统

中图分类号 TH74 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103006.1688

Computer-Aided Alignment for Reflective Zoom Systems

Zhang Tingcheng Wang Yongtian Chang Jun Talha M. M

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Computer-aided alignment (CAA) is an effective method to improve the imaging quality of high-precision, complex, and off-axis optical systems. A computer-aided alignment method for off-axis reflective zoom systems is proposed. Due to the varying optical characteristics of a zoom system, sensitivity matrices are used in the alignment rather than a single matrix. Thus, the computer-aided alignment of a zoom system can actually be considered as a series of independent alignments of with different configurations. Each alignment in this series includes the calculation of sensitivity matrix and difference in aberrations between the actual system and the designed system, and the determination of misalignments. For this purpose, a new mathematical model is established. By numerical experiments and comparison of the image qualities between the pre-aligned and post-aligned systems, the feasibility of the CAA method is demonstrated.

Key words computer-aided alignment; misalignments; sensitivity matrix; Zernike polynomials; reflective zoom system

1 引 言

相对于透射式变焦系统,全反射式变焦系统具有无色差、成像波段宽、重量轻等特点,可以满足空间对地遥感、空间摄影等领域的要求,因而越来越受到人们的关注^[1]。为了提高光能的利用率,克服遮挡带来的影响,反射系统往往采用离轴结构。与共轴系统不同,离轴系统无法找到一个对称轴作为参考轴,各个镜子的位置无法独立校正。因此离轴系统需要调整的变数多,仅根据检测人员的经验,用随

机尝试的方法去调整是不切实际的,需要利用计算机来进行辅助装调。而且在变焦过程中,镜子的运动往往会使得其自身的位置发生偏离,从而降低系统的成像质量,同时如果系统运行在太空轨道上,根本无法通过人工的手段来对其进行调整,所以也必须借助于计算机来进行辅助装调^[2]。

计算机辅助装调综合运用了CAD光学仿真、优化计算等方法,能够自动计算出系统的失调量,所谓失调量就是光学系统各个镜子的实际位置和理论

收稿日期: 2009-07-03; 收到修改稿日期: 2009-09-03

基金项目: 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0606)资助课题。

作者简介: 张庭成(1982—),男,博士研究生,主要从事成像光学系统设计方面的研究。E-mail: tczhang@gmail.com

导师简介: 王涌天(1957—),男,博士生导师,主要从事光学设计、虚拟现实等方面的研究。E-mail: wyt@bit.edu.cn

位置之间的差别。可以将求得的失调量反馈给相应的模块,以驱动光学系统的传动机构,对镜子的位置做出适当的调整,提高系统的成像质量。以一个三反射变焦系统为例,通过自编的以动态数据交换机制为基础的软件^[3],进行了数值仿真,并给出了仿真结果。数值仿真的结果表明,文中提出的、针对反射变焦系统的计算机辅助装调方法的可行性。

2 反射变焦系统

在之前的研究工作中,已经设计了一些可用于空间对地观测的全反射式变焦距系统^[4],在文中用到的系统的结构示意图如图 1 所示。该系统的成像波段为 $3 \sim 4 \mu\text{m}$,采用了“机械补偿”方式^[4],主镜 M_1 固定不动,而将次镜 M_2 和三镜 M_3 分别作为变倍组和补偿组^[5]。由于 M_2 和 M_3 是运动的,这两个镜子都需要相应的传动机构来控制其位置的变化。通过计算机辅助装调的手段来确定,在一定焦距值下, M_2 和 M_3 的传动机构应该对这两个镜子的位置进行的微调量,以达到提高系统成像质量的目的。

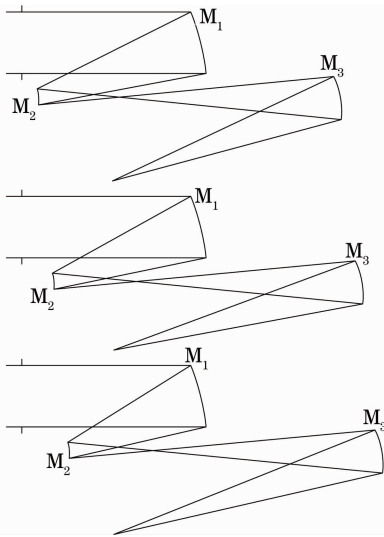


图 1 三反变焦系统的结构示意图

Fig. 1 3-mirror reflective zoom system

3 反射变焦系统的辅助装调

3.1 数学模型

失调量就是光学系统各个镜子的实际位置和理论位置之间的差别,这包括镜子在 X, Y, Z 三个方向上的偏移,和相对于这三个轴的偏转,失调量会引入新的像差,从而降低系统的成像质量。而计算机辅助装调的目的就是找出这些失调量和它们引入的像差之间的关系,所以反射变焦系统的计算机辅助

装调的数学模型可以通过下面的矩阵方程式表达出来,

$$\mathbf{A}_i \Delta \mathbf{X}_i = \Delta \mathbf{F}_i, \quad (1)$$

式中 $\Delta \mathbf{F}_i$ 是系统在第 i 个位置时,各个像差的实际值和理论值的差值,是一个 $m \times 1$ 维向量。 $\Delta \mathbf{X}_i$ 是系统在第 i 个位置时,由系统的失调量构成的 $n \times 1$ 维向量。 \mathbf{A}_i 是系统在第 i 个位置时的灵敏度矩阵($m \times n$)。

$$\Delta \mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \Delta F_{i1} \\ \vdots \\ \Delta F_{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{i1} \\ \vdots \\ F_{im} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{i10} \\ \vdots \\ F_{im0} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\Delta \mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} \Delta X_{i1} \\ \vdots \\ \Delta X_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{i1} \\ \vdots \\ X_{in} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{i10} \\ \vdots \\ X_{in0} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{i1}}{\partial x_{i1}} & \dots & \frac{\partial F_{i1}}{\partial x_{in}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_{im}}{\partial x_{i1}} & \dots & \frac{\partial F_{im}}{\partial x_{in}} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中像差的提取是通过如下方法实现的:首先将系统的波像差表示成为边缘泽尼克多项式的线性组合,从而求得泽尼克多项式各项的系数,然后再从这些系数中提取各种像差^[6](球差、彗差、像散等)。这是因为泽尼克多项式可以很方便地和各种像差建立起联系,在复杂系统像差评价^[7]、波前传感器设计等方面都有广泛的应用^[8]。与轴对称系统不同,非轴对称系统中,彗差的零点一般不再位于零视场的中心,而是存在着一个偏移量 \mathbf{a}_{131} ,如图 2 所示。并且像散在像面上存在着两个为零的场点 $\mathbf{a}_{222} \pm i\mathbf{b}_{222}$,这两个零点一般也不与零视场的中心重合^[9],如图 3 所示。

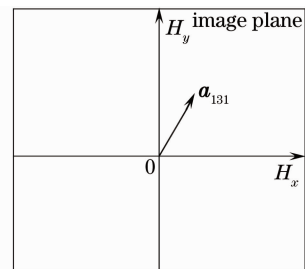


图 2 彗差在像平面上的中心

Fig. 2 Center of coma on the image plane

离轴系统的各种像差与边缘泽尼克多项式的前九项之间并不存在着一一对应的关系^[10],而是分散在不同的泽尼克系数中,所以必须表示成不同泽尼克系数的线性组合^[11]。以球差为例,在 37 项边缘泽尼克多项式中,包含有球差 ρ^4 的项有第 9, 16, 25,

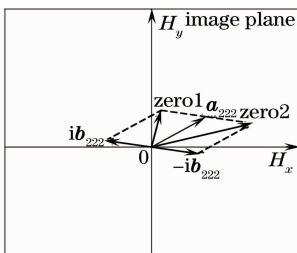


图 3 像散在像平面上的两个中心

Fig. 3 Zeros of astigmatism on the image plane

36 和 37 项,所以在提取球差时,得到的结果为

$$6z_9 - 30z_{16} + 90z_{25} - 210z_{36} + 420z_{37}. \quad (5)$$

其他各个像差提取的方法与球差相同,现给出结果如下:

$$X \text{ 方向彗差 } (\rho^3 \cos \theta): 3z_7 - 12z_{14} + 30z_{23} - 60z_{34}, \quad (6)$$

$$Y \text{ 方向彗差 } (\rho^3 \sin \theta): 3z_8 - 12z_{15} + 30z_{24} - 60z_{35}, \quad (7)$$

$$0^\circ \text{ 或 } 90^\circ \text{ 像散 } (\rho^2 \cos 2\theta): z_5 - 3z_{12} + 6z_{21} - 10z_{32}, \quad (8)$$

$$\pm 45^\circ \text{ 像散 } (\rho^2 \sin 2\theta): z_6 - 3z_{13} + 6z_{22} - 10z_{33}. \quad (9)$$

由(1)式可知,计算机辅助装调是用线性近似来表示失调量和其引入的像差变化之间的关系的关系的。根

据这个线性假设,用差分来代替微分^[12], (4)式可以改写成如下的形式:

$$A_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{i1}}{\partial x_{i1}} & \dots & \frac{\partial F_{i1}}{\partial x_{in}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F_{im}}{\partial x_{i1}} & \dots & \frac{\partial F_{im}}{\partial x_{in}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta F_{i1}}{\delta x_{i1}} & \dots & \frac{\delta F_{i1}}{\delta x_{in}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\delta F_{im}}{\delta x_{i1}} & \dots & \frac{\delta F_{im}}{\delta x_{in}} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

一个常用的求解方程(1)中的失调量 ΔX_i 方法就是广义逆转换法^[13]。如果用 A_i^+ 来表示矩阵 A_i 的广义逆转换矩阵,那么(1)式中的失调量 ΔX_i 就可以通过下面的表达式求得:

$$\Delta X_i = A_i^+ \Delta F_i. \quad (11)$$

3.2 装调过程

反射变焦系统的传动机构会驱动次镜和三镜到达指定位置,可以确定此时系统的结构形式,计算出系统在这个位置时的灵敏度矩阵 A_i 和理论像差向量 F_{i0} ;通过干涉仪测量出系统各个视场的实际波像差,同时利用泽尼克多项式来对其进行拟合,以从中提取系统的实际像差向量 F_i ,这样失调量 $\Delta X_i = A_i^+ \Delta F_i = A_i^+ (F_i - F_{i0})$ 。上述两个步骤需要不断重复,直到系统的成像质量达到要求为止。图 4 给出了反射变焦系统计算机辅助装调的流程图。

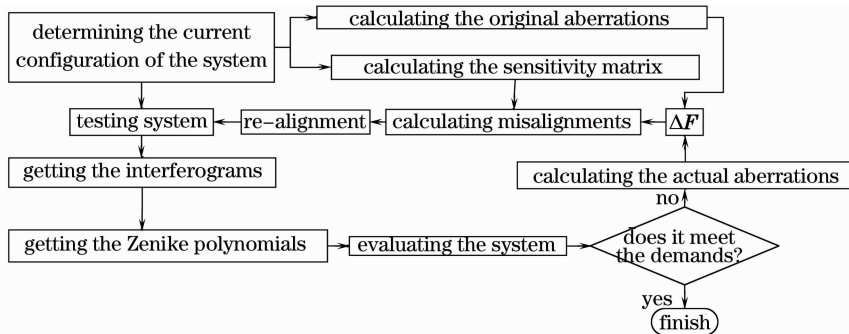


图 4 反射变焦系统计算机辅助装调的流程图

Fig. 4 Procedures of computer-aided alignment for reflective zoom system

3.3 数值仿真

数值仿真实验提供了一种便捷的,用于检验上述计算机辅助装调方法有效性的手段。在进行数值实验时,为了模拟真实的干涉测量和对干涉图的处理过程,需要人为地引入失调量,并通过光学设计软件 CODE V 来计算系统各个视场的波像差,同时进行泽尼克多项式拟合,这是通过动态数据交换机制完成的。在装调的过程中通常将系统的主镜 M_1 作为基准,因此主镜固定不动,在进行数值仿真的过程中并不考虑这个镜子的影响。在系统焦距值确定后,选择通过微调次镜和三镜的方法来消除装调误

差,所以选择的失调量如下:

$\Delta_{x2}, \Delta_{y2}, \Delta_{z2}, \Delta_{x3}, \Delta_{y3}, \Delta_{z3}$: 次、三镜在 X, Y, Z 三个方向上的偏移;

$\Delta_{\alpha 2}, \Delta_{\beta 2}, \Delta_{\alpha 3}, \Delta_{\beta 3}$: 次、三镜绕着 X, Y 轴的偏转。其中偏移和偏转的单位分别为毫米和度。以下选取系统的两个状态来实施数值仿真。作为基准,在引入失调量之前,给出系统在两个焦距值下的调制传递函数(MTF)($\lambda=4000 \text{ nm}$)。从图 5 可以看出系统在两个焦距值下,各个视场在 20 lp/mm 处的 MTF 值都达到或者接近了衍射极限。

然后,向系统中加入在表 1 中列出的失调量。

在加入失调量以后,系统的成像质量大幅度下降,如图 6 所示。应用自编译的软件,得出如表 2 所示的结果。将得到的结果代入到系统中,得到装调后的

系统的 MTF 值如图 7 所示。对比图 6 和图 7,可以看出装调后系统的 MTF 值提高了 20%。

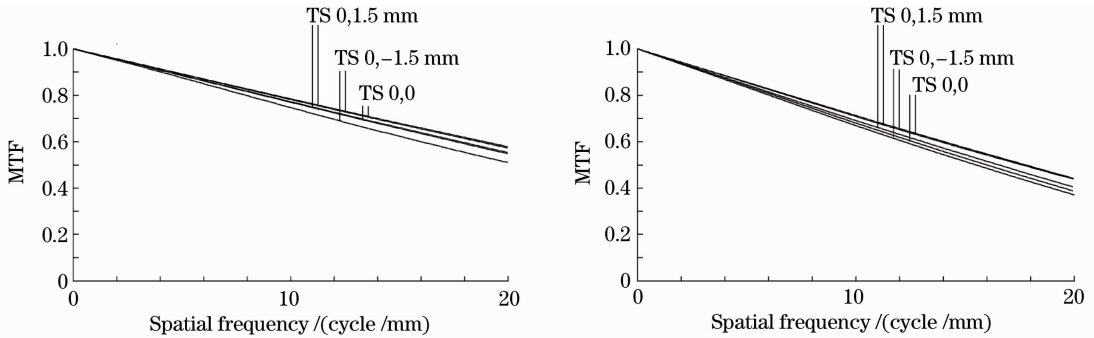


图 5 变焦系统的 MTF 值

Fig. 5 MTF of zoom system

表 1 人为加入的失调量
Table 1 Simulated misalignments

Misalignments	Δ_{x2}	Δ_{y2}	Δ_{z2}	Δ_{a2}	$\Delta_{\beta2}$
	Δ_{x3}	Δ_{y3}	Δ_{z3}	Δ_{a3}	$\Delta_{\beta3}$
Configuration1	0.1	-0.2	0.130	-0.15	0.05
	0.1	-0.1	0.012	-0.13	-0.01
Configuration2	0.01	-0.013	0.100	-0.12	0.050
	0.09	-0.12	0.013	-0.15	0.171

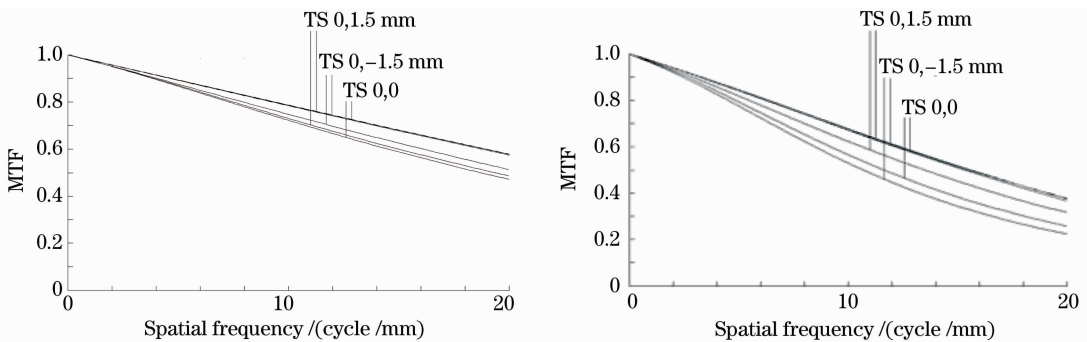


图 6 引入失调量后的 MTF 值

Fig. 6 MTF of mis-alignment system

表 2 自编译的软件求得的失调量
Table 2 Solved results by home-made software

Misalignments	Δ_{x2}	Δ_{y2}	Δ_{z2}	Δ_{a2}	$\Delta_{\beta2}$
	Δ_{x3}	Δ_{y3}	Δ_{z3}	Δ_{a3}	$\Delta_{\beta3}$
Configuration1	-0.029	0.175	-0.146	0.137	-0.077
	-0.104	0.050	-0.039	0.116	0.011
Configuration2	-0.076	0.122	-0.055	0.117	-0.020
	-0.122	0.086	0.064	0.140	0.176

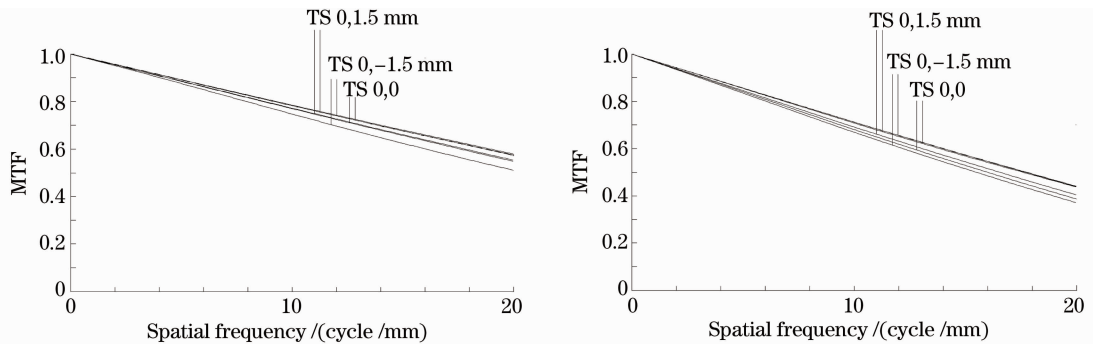


图 7 系统经装调后的 MTF 值

Fig. 7 MTF of post-alignment system

4 结 论

对于一些复杂的、高性能的离轴光学系统而言,进行计算机辅助装调是必要的,介绍了一种可以对离轴反射变焦系统进行计算机辅助装调的新方法,该方法涉及了对干涉测量数据的处理和广义逆转换法。数值仿真的结果验证了该方法的有效性,系统的成像质量在一次装调后就达到了设计要求。

参 考 文 献

- 1 R. B. Johnson, J. B. Hadaway, T. A. Bursleson *et al.*. All-reflective four-element zoom telescope: design and analysis[C]. *SPIE*, 1990, **1354**: 669~675
- 2 HUANG Y. F, LI L. Computer-aided alignment for the segmented mirrors of three-mirror optical system[C]. *SPIE*, 2007, **6624**: 66241V
- 3 HUANG Y F, LI L. Novel method based on dde technology for computer-aided alignment [C]. *SPIE*, 2007, **6834**: 68341G
- 4 Jun C, Wang Y. T, Zhang T. C *ey et al.*. All reflective zoom systems for infrared optics[C]. *SPIE*, 2006, **6342**: 63421Q
- 5 Miks A, Novak J, Novak P. Method of zoom lens design[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(32): 6088~6098
- 6 Smith W. J. Modern Optical Engineering (Second edition)[M].

McGraw-Hill, 1990

- 7 Zhang Wei, Deng Jian, Long Funian *et al.*. Image quality evaluation for segmented mirror synthetic aperture optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 687~691
- 张伟,邓键,龙夫年等. 子孔径合成光学成像系统像质评价研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 687~691
- 8 Li Min, Li Xinyang, Jiang Wenhan. Experimental comparison between linear phase retrieval sensor and hartman wavefront sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 619~625
- 李敏,李新阳,姜文汉. 线性相位反演传感器与哈特曼传感器的实验研究对比[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 619~625
- 9 Thompson K. Aberration fields in tilted and decentered optical systems[D]. Arizona: Optical Sciences Center, University of Arizona, 1980
- 10 Sweatt W. C. Reduction of Zernike wavefront errors using a micromirror array[J]. *Opt. Engng.*, 2005, **44**(9): 98001
- 11 Daniel M. Optical shop testing-appendix 2[M]. New York: A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2007
- 12 Zhang Wenjing, Liu Wenguang, Liu Zejin. Numerical simulation for computer-aided precise alignment of unstable resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 516~521
- 张文静,刘文广,刘泽金. 一种非稳腔计算机辅助装调方法的数值模拟[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 516~521
- 13 Huang Y. F, Li L, Cao Y. H. Computer-aided alignment for space telescope optical system[C]. *SPIE*, 2006, **6149**: 61490P