

文章编号 1004-924X(2010)10-2156-08

## 主次镜系统的计算机辅助装调

孙敬伟<sup>1,2</sup>, 陈 涛<sup>1</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 杨 飞<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. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**为了实现大口径望远镜系统的装调,提高其光学成像质量,研究了望远镜装调像差和计算机辅助装调技术。首先针对 RC 式望远镜系统,分析了装调过程中由于次镜偏心 and 倾斜导致系统模型产生的扰动误差。针对实际调整过程中选择零彗差点和曲率中心作为旋转中心进行调整的特点,分析了这两个旋转点的选择对系统像差和指向精度的影响。然后结合计算机辅助装调原理,研究了关于恒定彗差、线性像散与模型相关的灵敏度矩阵的特殊形式,结合波像差理论与光学软件 Code V 模型仿真来实现装调技术。最后,针对 1 m 级望远镜系统进行了安装调整。实验结果表明:装调后系统的 RMS 达到了  $0.1445\lambda$ , 大大优于装调前的  $1.214\lambda$ , 证实了该方法具有较好的精度、抗干扰能力和实际应用价值。

**关键词:**计算机辅助装调;望远镜;主次镜;偏心误差;零彗差点

**中图分类号:**TH743 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101810.2156

## Computer-aided alignment for primary and secondary mirrors

SUN Jing-wei<sup>1,2</sup>, CHEN Tao<sup>1</sup>, WANG Jian-li<sup>1</sup>, YANG Fei<sup>1</sup>

(1 *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:** In order to realize the alignment of a large aperture telescopic system and to improve the image quality, the alignment aberration and computer-aided alignment technique are investigated. Firstly, the perturbation error of a RC telescope due to the displacement and tilt of a secondary mirror is analyzed in an alignment process. Based on the feature that the coma-free point and the center of curvature are chosen as the rotating centers during the adjusting process, the effect of choosing two different points on the optical aberration and pointing errors is emphatically analyzed. Then, according to wavefront aberration theory combining with optical software Code V, the special sensitivity matrixes of constant coma and linear astigmatism of telescope system are studied based on the computer aided alignment principle, and the alignment technique is realized by programming and emulating. Finally, combining the project applications, 1 m telescope system is adjusted and aligned. Experimental results indicate that the RMS of system after alignment reaches  $0.1445\lambda$ , which is greatly superior to  $1.214\lambda$  before alignment. The results prove that the method has good accuracy, anti-interference ability and

收稿日期:2010-01-14;修订日期:2010-02-03.

基金项目:中国科学院三期创新工程支持项目;中科院长春光学精密机械与物理研究所创新工程重点支持项目

practical application values.

**Key words:** computer-aided alignment;telescoping;primary and secondary mirrors;misalignment error;coma-free point

## 1 引言

光学系统的对心装调是一项富有挑战性的工作,装调过程的好坏对成像质量、对准精度都有很大的影响。对于较大口径的望远镜系统,其加工、安装和调整<sup>[1]</sup>是一个相当复杂的过程,近年来国内已针对相应的系统和调整精度进行了一些关于误差分配的相关研究<sup>[2-3]</sup>。光学像差中和装调关系最紧密的分别为彗差、像散和球差。其中球差项除与二次常数有关系外仅和主次镜之间的距离有直接关系,消除装调产生的球差项即可保证主次镜之间的轴向关系;而消除轴上彗差可实现光轴的初步重合;对于较大视场角的系统,随视场角的增大,像散会逐渐增大,这就要求进行离轴检测。计算机辅助装调用于完成复杂或者较难通过手工操作实现的光学系统的装调,对该技术的研究对于指导装调过程、光学系统精调以及空间系统的远程自动控制有着重要的意义。

对望远镜系统来说,成像好坏是衡量系统质量的主要问题。在装调过程中,各块镜子位置的差异易使光学系统像质变坏。采用计算机辅助装调<sup>[4-5]</sup>的目的就是根据实测光学系统的性能,应用计算机技术来确定光学系统各失调量的大小和方向以便指导装调过程,使每次调整后的系统更接近于理论的光学系统,最终满足设计要求。在计算机辅助装调方面,最常用的是应用奇异值分解建立灵敏度表<sup>[6]</sup>的方法,本文亦采用了这种方法。除此以外,反向优化算法<sup>[7-8]</sup>和差动像差采样法等<sup>[9]</sup>也是较常用的方法。计算机辅助装调的本质是基于迭代的方法保证逼近目标函数,利用 Zernike 系数和偏心量的矩阵关系,分析失调引入的误差以此指导装调过程。

本文对大型望远镜的装调像差和计算机辅助装调技术进行研究,针对 RC 式望远镜系统,通过波像差理论分析了由于系统失调引入的彗差和像散的特点,进而设计了灵敏度矩阵的形式,利用奇异值分解和最小二乘法拟合确定系统的装调方案,并对系统进行模拟失调分析和实验验证。实

验结果证实该方法具有较好的精度、抗干扰能力和实际应用价值。

## 2 主次镜偏心误差及旋转点的影响

主次镜相对于机械轴的离心会导致光学像面的偏离并且产生对准误差,还会引入彗差和小量的像散。次镜可通过调整倾斜量使离心导致的彗差和像散减少到零,但是伴随图像位置的偏移和像面的倾斜却不可避免。为了光学系统的精确对心和像面处于正确位置,有必要测量和区分各种偏差和导致的波前误差。

这里使用 Code V 建立光学模型,选择  $F$  数为 7.7 的 RC 式望远镜系统,其最大视场角为  $17.67'$ ,基本的望远镜布局如图 1 所示, $z$  轴为光轴方向。当其光轴完全重合(无偏心误差时),修正彗差项为 0 时,可以清晰地观察到视场边缘的像散(如图 2)。

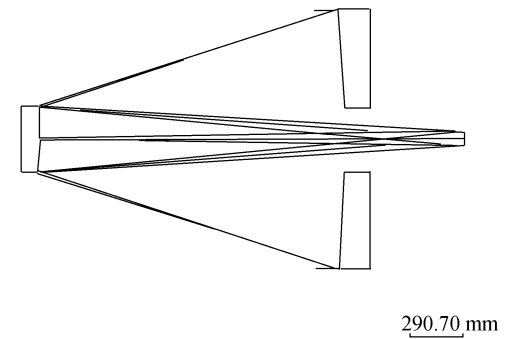


图 1 RC 式望远镜的布局框图

Fig. 1 Schematic layout of RC (Ritchey-Chretien) telescope

将主镜的位置作为参考基准(假设与机械轴重合),考虑次镜共有 6 个自由度,分别是  $x, y, z$  的平移和  $x, y, z$  的转动,如果将次镜光轴方向定义为  $z$ (同主光轴同向),那么由于次镜的轴对称结构,绕  $z$  方向的转动就不会产生像差,而沿  $z$  的移动主要产生离焦和球差。剩下的 4 个自由度(2 个偏心、2 个倾斜)会将彗差和像散引入光学系统,其符号由偏心和倾斜的方向决定,大小则取决

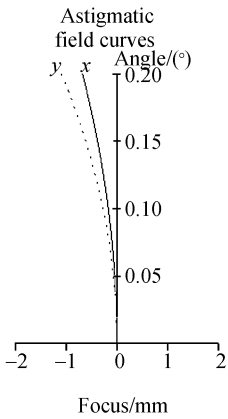


图 2 像散随视场变化曲线

Fig. 2 Astigmatic field curves

于偏心幅值的大小。彗差和像散的精确观测可保证离心调整和像的位置。对于等光程设计的望远镜系统,对心偏差导致的彗差在视场内是恒定的。

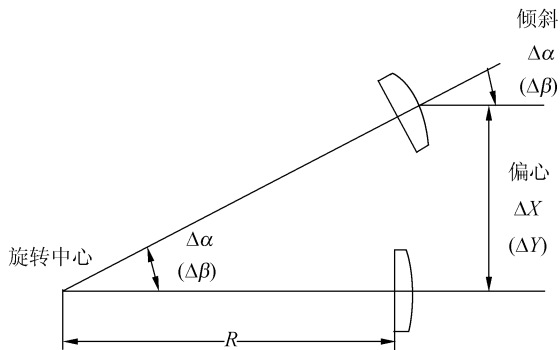


图 3 绕任意点旋转可分解为偏心 and 倾斜

Fig. 3 Rotation for random points dividing into de-center and tilt

次镜绕任意点的旋转都可以分解为沿 2 个方向的偏心和倾斜的复合作用,如图 3 所示。实际装调过程,按照望远镜的结构形式,一般有 2 种调整方式:1 种是围绕零彗差点旋转,另 1 种是围绕次镜的曲率中心旋转,二者选择的旋转半径不同,对成像影响也有不同。

绕零彗差点旋转:对主次镜组成的系统,在主光轴上有 1 个特殊点,围绕该点旋转不会引入彗差。其本质为由倾斜和偏心产生的彗差相互补偿,而二者恰好满足线性关系,二者的比值即为次镜到该点的旋转半径  $R$ 。对 RC 式系统来说,该半径为:

$$Z_{coma} = 2L \frac{m_2 - 1}{m_2 + 1} \frac{1}{m_2 - 1 - (m_2 + 1)b_{s2}}, \quad (1)$$

其中  $L$  为次镜到主焦点的距离,  $m_2$  为次镜的放大率,  $b_{s2}$  为次镜的二次常数,可见对于特定系统,该旋转半径为定值。次镜装调过程一般要确保消除彗差,而次镜绕零彗差点转动不会引入彗差,故该点对装调过程具有重要的指导作用。研究还发现,绕该点转动虽然不会引入彗差,但是会带来线性像散和指向的改变。

绕曲率中心转动:对于较慢  $F$  数(小视场角)的光学系统,一般采取绕曲率中心进行次镜的装调。虽然绕该点转动会引入恒定彗差和线性像散,但其优点为对于近轴光线不会带来指向的改变,所以对光学像面的形状不会带来影响,并且该点容易寻找,装调过程也容易实现。

表 1 总结了次镜绕零彗差点和曲率中心旋转对彗差、像散和指向的影响:

表 1 次镜自由度对系统像差的影响

Tab. 1 Effect of secondary DOF on systematic aberrations

次镜旋转点	零彗差点	次镜曲率中心
恒定彗差	无	有(主导影响)
线性像散	有	有(次要影响)
指向改变	有	无

### 3 计算机辅助装调原理及仿真

从数学模型中可以推出次镜对于偏心的灵敏度矩阵,望远镜系统的对心装调量可以灵敏度矩阵进行奇异值分解,应用阻尼最小二乘法计算得出。当只考虑次镜偏心、倾斜和轴向偏离时,像差的灵敏度矩阵一般用 Zernike 系数来描述。对于只有主次镜组成的望远镜系统,以主镜为基准,次镜的倾斜和偏心误差主要引起彗差和像散,一般对应 Zernike 系数中  $Z_5 \sim Z_8$  的系数  $C_5 \sim C_8$ ,其中  $C_5 \sim C_6$  代表像散,  $C_7 \sim C_8$  代表彗差。系数的正负号由倾斜和偏心的方向决定,其大小则取决于偏心扰动的幅值。从数学模型中可以推出次镜对于偏心的灵敏度矩阵,望远镜系统的对心装调量可以灵敏度矩阵进行奇异值分解,应用阻尼最小二乘法计算得出。

首先进行有关灵敏度矩阵的相关计算,假定  $F_j (j=1, 2, \dots, m)$  为相应像差 (Zernike 系数),  $x_i (i=1, 2, \dots, m)$  作为调整变量 (离心和倾斜量)。像差和调整量之间的关系可以表达成

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{01} \\ \vdots \\ F_{0m} \end{bmatrix} + \mathbf{A} \left( \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{01} \\ \vdots \\ x_{0m} \end{bmatrix} \right) \quad (2)$$

简化为

$$\mathbf{A} \Delta \mathbf{X} = \Delta \mathbf{F} \quad (3)$$

其中

$$\Delta \mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{01} \\ \vdots \\ F_{0m} \end{bmatrix} \quad \Delta \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{01} \\ \vdots \\ x_{0m} \end{bmatrix}, \text{ 而 } \Delta \mathbf{X}$$

$= \mathbf{X} - \mathbf{X}_0$  是偏心和倾斜量,  $\Delta \mathbf{F} = \mathbf{F} - \mathbf{F}_0$  为系统像差变化值, 选择其为 Zernike 系数  $C_5 \sim C_8$ ,  $\mathbf{A}$  为灵敏度矩阵。采用干涉仪或者 Shack-Hartmann 可以得到有关系统用 Zernike 表示的像差, 如果灵敏度矩阵已知, 则可应用最小二乘拟合推出系统的装调偏差量

$$\Delta \mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} \Delta \mathbf{F}, \quad (4)$$

系统可以根据该偏差量进行精确的对心装调。原理上来说, Zernike 像差仅仅需要在一个视场点测量即可得出偏心量, 然而对于实际的系统, 不可避免存在的噪声干扰会影响计算的精度, 一般采用的办法为针对多个视场点得出一系列的 Zernike 像差, 然后应用最小二乘法拟合计算。

理想轴对称光学系统的三阶波像差<sup>[10-11]</sup>为:

$$\begin{aligned} W = & \sum_j W_{040j} \rho^4 + \sum_j W_{131j} H \rho^3 \cos \phi + \\ & \sum_j W_{220j} H^2 \rho^2 + \sum_j W_{220j} H^2 \rho^2 \cos^2 \phi + \\ & \sum_j W_{311j} H^3 \rho \cos \phi, \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $H$  和  $\rho$  是归一化的视场和瞳坐标,  $\phi$  是瞳方位角;  $j$  是光学系统中光学元件的表面数。

只考虑彗差和像散, 当系统存在装调偏心误差时, 系统的彗差、像散的矢量波像差为:

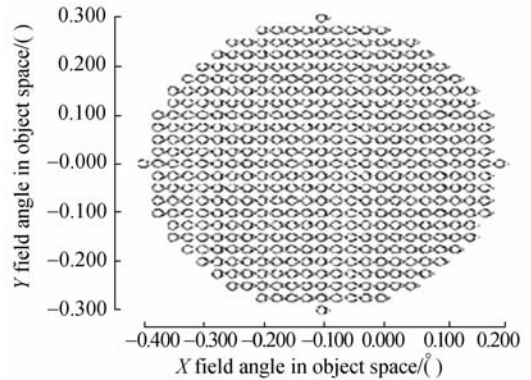
$$\begin{cases} W_{\text{coma}} = W_{131} [(\mathbf{H} - \mathbf{A}_{131}) \boldsymbol{\rho}] \rho^2 \\ W_{\text{ast}} = \frac{1}{2} W_{222} (\mathbf{H}^2 - 2\mathbf{H}\mathbf{A}_{222} + \mathbf{B}_{222}^2) \cdot \boldsymbol{\rho}^2 \end{cases}, \quad (6)$$

其中  $W_{131}$ ,  $W_{222}$  分别为三阶彗差和像散的系数, 而  $\mathbf{A}_{131}$ ,  $\mathbf{A}_{222}$ ,  $\mathbf{B}_{222}$  分别为由于偏心对像差的偏离向量。

观察发现, 系统彗差 ( $\mathbf{H}$  项) 随视场角变化情况较为简单, 仅仅为一阶, 而由于偏心和倾斜导致的装调彗差 ( $\mathbf{A}_{131}$  项) 在整个视场为恒定的, 不随视场角发生变化; 像散项的变化则比较复杂, 二次像散 ( $\mathbf{H}^2$  项) 与视场角成二阶变化, 线性像散 ( $\mathbf{H}\mathbf{A}_{222}$  项) 则为包含视场角和由于装调引入的偏离矢量的耦合, 恒定像散 ( $\mathbf{B}_{222}^2$  项) 仅受偏离矢量的平方的影响, 和视场角无关。

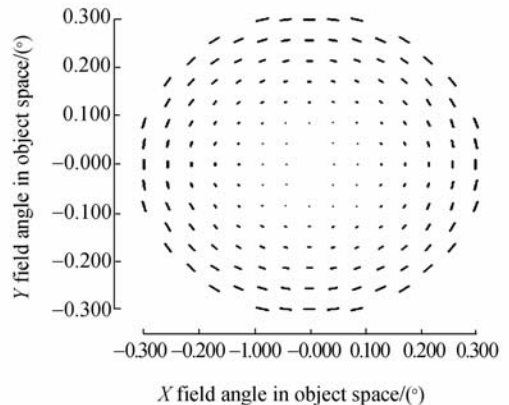
图 4 所示为通过 Code V 得出的次镜和主镜同心以及相互之间存在偏心时的全口径像差图, 通过观察可以发现图 (a) 中彗差方向与幅值恒定, 图 (b) 中节点位于圆心且随视场变化是二次像散, 而且图 (c) 中明显可以发现双节点的位置, 这和上面通过波像差得出的像散关系完全一致。

参照式 (3) 可知, 考虑  $\Delta \mathbf{F}$  为相应系数的变化值, 故随视场变化而和偏心量无关的相应项 (系



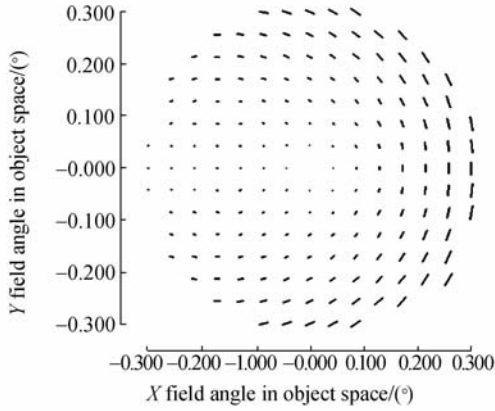
(a) 偏心彗差图

(a) Perturbed coma



(b) 无偏心像散图

(b) Unperturbed astigmatism



(c) 偏心的像散图  
(c) Perturbed astigmatism

图 4 全视场演示不存在偏心和存在偏心时系统彗差和像散的变化

Fig. 4 Full-field demonstrations of differences of coma and astigmatism of unperturbed and perturbed secondary mirrors

统彗差和二次像散)可去除,而像散项中随偏离矢量平方变化的项对系统影响较小可忽略,故可以推导出灵敏度矩阵的大致形式为:

$$\begin{pmatrix} C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x & y & 0 & 0 \\ y & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & M_2 & M_5 & 0 \\ M_1 & 0 & 0 & M_4 \\ 0 & M_5 & M_7 & 0 \\ M_5 & 0 & 0 & M_8 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{Dec} \\ Y_{Dec} \\ X_{Tilt} \\ Y_{Tilt} \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中  $X_{Dec}$  和  $Y_{Dec}$  分别代表 X 和 Y 向的偏心,  $X_{Tilt}$  和  $Y_{Tilt}$  则代表 X 和 Y 方向的倾斜, 偏心量对应的

系数为  $M_1 \sim M_8$ 。求取过程为: 利用光学软件 Code V 设定圆形的几个视场位置, 首先得出无装调偏心扰动时的 Zernike 系数, 接着对应相同视场角得出每次设定调整次镜的相应单位偏心量, 得出相应的像散和彗差的 Zernike 系数, 减去上述无扰动系数, 得到的即为由于偏心和倾斜导致的像差系数, 最后利用最小二乘法拟合, 求解  $M_1 \sim M_8$ , 分别对应像散和彗差, 所有装调系数的求取结果如表 2 所示。

表 2 灵敏度矩阵中的装调系数及其代表的关系  
Tab. 2 Coefficients and its relation in sensitivity matrix

关系	系数	数值	系数	数值
离心→像散	$M_1$	-0.361 5	$M_2$	-0.361 5
倾斜→像散	$M_3$	15.639 2	$M_4$	-15.639 3
离心→彗差	$M_5$	-2.427 7	$M_6$	-2.421 2
倾斜→彗差	$M_7$	-22.557 0	$M_8$	22.563 6

该系数对应偏心量为 1 mm, 倾斜量为  $1^\circ$  时引入的对应像差量。观察发现像散和彗差的系数满足轴对称性质, 即  $M_1 M_2, M_3 M_4, M_5 M_6, M_7 M_8$  分别相等(正负不同代表定义的方向相反)。进一步分析表明: 无论是离心还是倾斜, 装调误差对彗差的线性影响都大于对像散的线性影响。

基于计算出的各视场点的 Zernike 系数, 应用最小二乘法计算出偏心量, 将其与给定值的对比如表 3 所示。这里共对比了 3 组数据, 二者基本吻合, 证明该方法不受数据大小的影响。

表 3 实际偏心量和计算偏心量的对比  
Tab. 3 Comparison between actual and calculated misalignments

Terms	1		2		3	
	实际偏心量	计算出的偏心量	实际偏心量	计算出的偏心量	实际偏心量	计算出的偏心量
$X_{Dec}$	3	2.996 0	0.3	0.304 0	3	2.996 0
$Y_{Dec}$	-4	-4.007 6	-4	-4.009 1	-4	-4.007 6
$X_{Tilt}$	0.5	0.499 94	0.05	0.049 7	0.5	0.499 94
$Y_{Tilt}$	1.5	1.499 6	-1.5	-1.499 4	0.05	1.499 6

调整时首先通过围绕曲率中心的转动消去系统恒定彗差, 剩余的像散则通过围绕零彗差点消

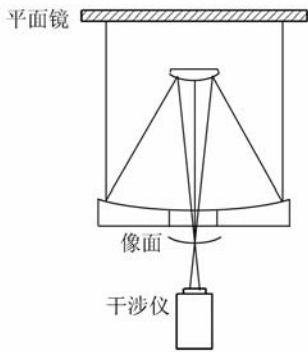
去。表 4 所示为理论偏心量和实际计算的的偏心量的对比, 二者基本吻合。

**表 4 实际偏心量和计算偏心量的对比**  
 Tab.4 Comparison between actual and calculated misalignments

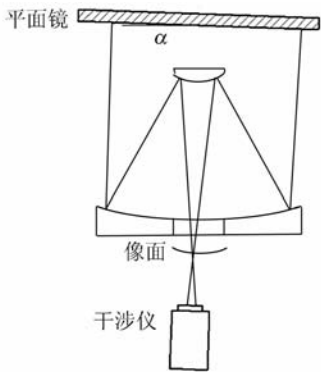
旋转方式	偏心和倾斜量	旋转角度	计算角度
	/mm	/( $^{\circ}$ )	/( $^{\circ}$ )
曲率中心 X	9.657 1	0.1	0.101 7
曲率中心 Y	11.968 3	0.5	0.499 3
零彗差点 X	1.1	1	0.997 1
零彗差点 Y	0.1	-0.4	-0.3996

### 4 实验与结果分析

参考上面的理论分析和仿真研究,讨论了实际工作中如何实现上述计算机辅助装调的过程,其基本原理为利用干涉仪和平面镜进行主次镜系统的自准直检验。图 5 所示为对于卡式或 RC 式



(a)轴上检验  
(a)On axis test



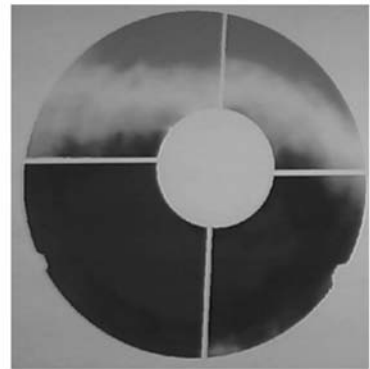
(b)离轴检验  
(b)Off axis test

图 5 自准检验

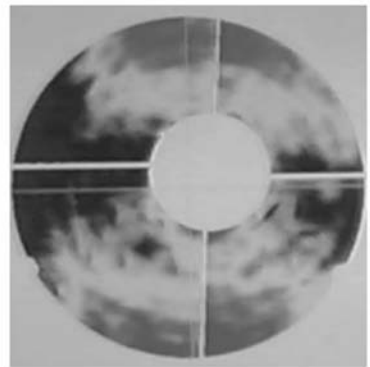
Fig.5 Autocollimating tests

望远镜系统的轴上和离轴的自准检验,此方法需借助于较大口径的平面反射镜和干涉仪来实现,还需能将该平面反射镜旋转某一个小角度并将其精确固定在该位置上的机械装置。进行轴上自准检验时,需将干涉仪调整对焦到系统像面上;而离轴自准检验时,则将反射镜倾斜某一角度  $\alpha$ ,对应系统的视场角,还需移动干涉仪到像面的离轴位置。

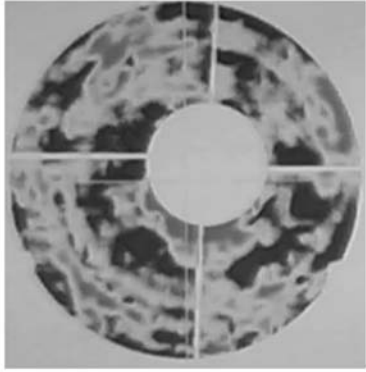
通过这种自准干涉检验可以进行次镜的倾斜和离心的计算机辅助调整。采用上述方法,针对一个 1 m 级的 RC 式大口径共轴望远镜系统进行装调,由 4D 干涉仪采集不同视场的干涉图计算相应的 Zernike 系数。由于测量受实验环境及位置测量精确度影响,故经多次测量取平均,根据测量结果求出装调误差量,再按照论文所述的调整方法进行精确调整。由于存在系统误差和调整机械结构误差,要实现精确装调需重复几次调整过程,才能获得比较好的装调结果。干涉图中两圆不同心的原因在于选用的自准反射镜口径小于主镜口径,并且二者放置时未保证同心。取  $0^{\circ}$  视场



(a)装调前  
(a)Before alignment



(b)初次装调后  
(b)After first alignment



(c)最后装调

(c) After last alignment

图 6 卡式焦点上的系统干涉图

Fig. 6 Interferograms on Cassegrain focus

调整前和调整后的干涉图如图 6 所示:调整前系统的 RMS 为  $1.214\lambda$ ;调整后系统 RMS 为  $0.6738\lambda$ ,观察该图发现其主要残余的像差为像散;再次调整最后保证系统的 RMS 为  $0.1445\lambda$ ,

#### 参考文献:

- [1] 徐刚,杨世模,龚雨兵.大型光学望远镜副镜位姿精调机构的优化设计[J].光学精密工程,2008,16(7):1181-1189.  
XU G, YANG SH M, GONG Y B. Optimal design of pose and position fine tuning apparatus for secondary mirror in large optical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (7): 1181-1189. (in Chinese)
- [2] 赵勇志,张景旭,吴小霞,等.1 m 望远镜俯仰轴系精度检测误差的修正[J].光学精密工程,2009,17(10):2401-2405.  
ZHAO Y ZH, ZHANG J X, WU X X, et al.. Modification of altitude axis errors for 1 m aperture telescopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2401-2405. (in Chinese)
- [3] 明名,王建立,张景旭,等.大口径望远镜光学系统的误差分配与分析[J].光学精密工程,2009,17(1):104-108.  
MING M, WANG J L, ZHANG J X, et al.. Error budget and analysis for optical system in large telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 104-108. (in Chinese)
- [4] 林妮妮.光学系统计算机辅助装调(CAA)机理的研究[J].光电工程,1999,(26):49-52.  
LIN W M. Study on computer aided assembling

实现了较高的调整精度。

## 5 结 论

用计算机辅助装调高精度、高成像质量的光学系统可以大大缩短周期,且能保证系统的像质。本文较全面地介绍了卡式和 RC 式系统计算机辅助装调的基本原理和方法,通过波像差理论分析了由于系统失调引入的彗差和像散的特点,进而设计了灵敏度矩阵的形式,利用奇异值分解和最小二乘法拟合确定了系统的装调方案,并对系统进行了模拟失调分析和实验验证。结果显示该方法是有效的,确定的装调方案是合理的。实验结果证明:应用该方法进行主次镜装调,调整精度可保证 RMS 达到  $1/7\lambda$ 。该方法可用于主次镜系统的精确装调过程,对今后进一步研究计算机辅助装调工作具有很好的指导性。

- mechanism of optical system [J]. *Opto-Electronic Engineering*. 1999, (26): 49-52. (in Chinese)
- [5] 杨晓飞,张晓辉,韩昌元. Zemax 软件在离轴三反射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, HANG CH 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)
- [6] HVISC A M, BURGE J H. Alignment analysis of four-mirror spherical aberration correctors [J]. *SPIE*, 2008, 7018: 1-12.
- [7] JEONG H J, LAWRENCE G N. Simultaneous determination of misalignment and mirror surface figure error of a three mirror off-axis telescope by end-to-end measurements and reverse optimization: numerical analysis and simulation [J]. *SPIE*, 1988, 966: 341-353.
- [8] KIM S, YANG H S, LEE Y W, et al.. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical system [J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5059-5068.
- [9] LEE H, DALTON G B, TOSH I. Computer-guided alignment II: optical system alignment using differential wavefront sampling [J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15424-15437.
- [10] BUCHROEDER R A. *Tilted component optical*

systems [D]. University of Arizona, Tucson, Arizona, 1976.

telescope system on its aberration field [J]. SPIE., 1980, 251, 146-153.

[11] SHACK R V. Influence of alignment errors of a

#### 作者简介:



孙敬伟(1983-)男,吉林松原人,博士研究生,主要研究方向为大口径望远镜系统的装调。E-mail: blizzardmaple@163.com



杨飞(1982-)男,湖北天门人,助理研究员,主要从事地基大口径光电望远镜镜面支撑和光机结构技术的研究。E-mail: yangflying@hotmail.com



王建立(1971-)男,山东曲阜人,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像光电望远镜总体技术的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn

#### 导师简介:



陈涛(1965-)男,内蒙古赤峰人,研究员,博士生导师,主要从事光电精密跟踪测量技术的研究。Email: chent@ciomp.ac.cn

#### ● 下期预告

## 灵敏度系数可调的布拉格光栅应变传感器的设计

何俊<sup>1</sup>,周智<sup>2</sup>,董惠娟<sup>1</sup>,张广玉<sup>1</sup>,欧进萍<sup>2,3</sup>

- (1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090;
3. 大连理工大学 土木与水利工程学院,辽宁 大连 116024)

针对裸光纤布拉格光栅应变监测量程或精度有限的问题,提出了一种灵敏度系数可调的光纤布拉格光栅应变传感器的设计方法,理论和实验研究了该方法在光纤布拉格光栅增大应变监测量程或提高精度方面的性能,并以此研制了两种封装结构的灵敏度系数可调应变传感器。首先,理论分析了传感器的灵敏度系数;然后,实验标定了传感器的灵敏度系数;最后,对传感器理论和实验灵敏度系数的误差进行了分析,指出了改进的方向。结果表明:两种封装结构大量程传感器的量程分别增加了 243% 和 126%,高精度传感器精度提高至  $0.51 \mu\epsilon$  和  $0.52 \mu\epsilon$ ,传感器标定实验的相关系数达到 0.999 以上。