

文章编号 1004-924X(2011)04-0728-09

基于离焦星点图的 RC 式望远镜装调技术

孙敬伟^{1,2}, 陈 涛¹, 王建立¹, 张金凯^{1,2}

- (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的装调,基于离焦星点图的图像处理和分析,研究了 RC 式望远镜的装调技术。首先,根据横向几何像差分析离焦像点图像和系统装调误差之间的关系,重点讨论了横向误差中离心和倾斜导致的偏心彗差和内外轮廓圆的圆心位置偏离距离的关系,以及彗差消除后残余的像散导致外轮廓椭圆的偏心率随长轴增大而逐渐减小的特点。然后,分析了主次镜之间纵向误差导致的球差和最小圆半径大小的关系。最后,应用 Zemax 建模仿真验证了上述分析,总结了如何应用离焦星点图指导装调过程以及图像处理的方法。实验结果表明:无论是横向误差还是纵向误差,应用该方法得到的实验结果和理论分析值均符合得很好,其中通过倾斜调整彗差和偏心率调整像散误差均可控制在 5% 以内。

关键词:装调; RC 式望远镜; 离焦星点图; 彗差; 像散; 球差

中图分类号: TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111904.0728

RC telescope alignment based on out-of-focus stellar image

SUN Jing-wei^{1,2}, CHEN Tao¹, WANG Jian-li¹, ZHANG Jin-kai^{1,2}

- (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 large aperture telescopes, the RC telescope alignment techniques were investigated based on the image processing and analysis of out-of-focus stellar images. Firstly, the relationship between the disalignment comas due to decentered or tilted errors and the centers of contour circle was analyzed according to transversal aberration. The decrease of ellipse eccentricity with the increase of major axis length caused by residual astigmatism were investigated after removing the coma. Then, the dependence of spherical aberration caused by longitudinal errors on the least circle radius of defocused stellar image was analyzed. Finally, the analysis above was verified by the emulation of Zemax modeling and how to use the out-of-focus stellar image to guide the alignment process and how to process the image were discussed. Experimental results indicate that both the lateral and longitudinal errors are well consistent with the theoretically analyzed results. The precision

收稿日期: 2010-04-20; 修订日期: 2010-05-28.

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程重点支持项目

errors of coma and astigmatism adjusted respectively by tilt and eccentricity are both less than 5%.

Key words: alignment; RC telescope; defocused stellar image; coma; astigmatism; spherical aberration

1 引言

由于光学系统的装调精度对整个系统的成像质量具有关键作用,因此关于装调技术的研究有着极其重要的意义^[1-3]。对较大口径的卡塞格林式地基望远镜来说,其装调过程主要包含两个方面的内容,即主次镜光轴重合和主次镜的间隔调整到望远镜的轴上点像差最小。假设主镜固定不动且无像差,则只需考虑次镜的位置调整。其中光轴不重合的情况主要包含两种横向误差:次镜和主镜不同心,次镜和主镜倾斜,一般上述两种情况统称为次镜偏心;而纵向误差一般为主次镜顶点距离偏离像差最小的最优值。由于主次镜加工误差的存在,该最优间隔一般根据主次镜元件参数的测量结果再次优化得到,它和设计值略有偏差。

国外的大口径望远镜研究较早,针对望远镜的装调技术的研究较多。地基大口径望远镜系统一般采用RC式结构,其主镜和次镜均采用双曲面,该望远镜可通过二次常数的选择消除球差和彗差的干扰作用,是目前望远镜系统最常采用的形式。这类望远镜的装调过程需和检测方法紧密结合,故对应不同的检测手段,装调技术的实现有较大不同。比较普遍的检测方法为应用干涉仪自准检验,该方法对应的装调技术具有调整精度高,调整过程快,且可以结合计算机技术来实现等优点,其中比较突出的方法为计算机辅助装调^[4]它不仅可以实现较高精度的自动调整,而且能用于离轴系统的装调,有着较高的应用价值。此外,应用 Shack-Hartmann 波前传感器进行检验和装调也是较常用的方法^[5]。该装调技术摆脱了自准反射镜的限制,同样具有着较高的精度。除以上两种方法外,应用看星观察离焦星点图调整也是比较常用的方法,该方法一般需借助于 CCD 记录和分析图像。文献[6-7]中的方法通过曲率测量重

建波前,其原理为基于同样大小的焦前焦后离焦图像,分析两者的光照度关系进行波前重构进而分析系统像差。文献[8-9]的方法为通过离焦图像的几何形状分析其系统的误差。文献[10]则通过控制离焦量,分析出像差中的像散和离焦量之间的关系找出系统的偏心误差。本文的分析即基于离焦星点图来得到有关主次镜偏心倾斜和间隔误差,实现望远镜系统的装调的相关研究。

2 理论分析

参照文献[8]的分析过程和相关公式,并在此基础上考虑像散的影响作用。设 $W(x, y)$ 表示偏心望远镜出瞳处的近轴波前,当只考虑横向位置出现误差时:

$$W(x, y) = D(x^2 + y^2) + Cy(x^2 + y^2) + Ax^2, \quad (1)$$

其中 D 为系统离焦, C 为偏心彗差, A 为偏心和残余像散。

为了寻找离焦图像的边缘,参照文献[8]使用横向像差(T)来计算:

$$\begin{cases} TA_x = -R \frac{\partial W}{\partial x} \\ TA_y = -R \frac{\partial W}{\partial y} \end{cases}, \quad (2)$$

其中 R 为出射波前的曲率半径。将上述坐标转化为极坐标($x = \rho \cos \theta, y = \rho \sin \theta$),上式转化为

$$\begin{cases} TA_x = -2R\rho \cos \theta (C\rho \sin \theta + D + A) \\ TA_y = -R\rho (C\rho + 2C\rho \sin^2 \theta + 2D \sin \theta) \end{cases}. \quad (3)$$

2.1 离焦图像调整彗差(C 较大)

如果偏心 and 倾斜引起系统出现彗差,当偏心量较小时,相比彗差,像散对系统的影响较弱;而随着偏心量增大,像散呈二次方趋势变大,逐渐和彗差影响相同。图1中前4张图为利用光学软件 Zemax 得到的彗差恒定而离焦量逐渐增加的离焦星点图,后4张图为利用 Matlab 编程得到的外边界曲线,观察发现二者的轮廓线基本吻合。

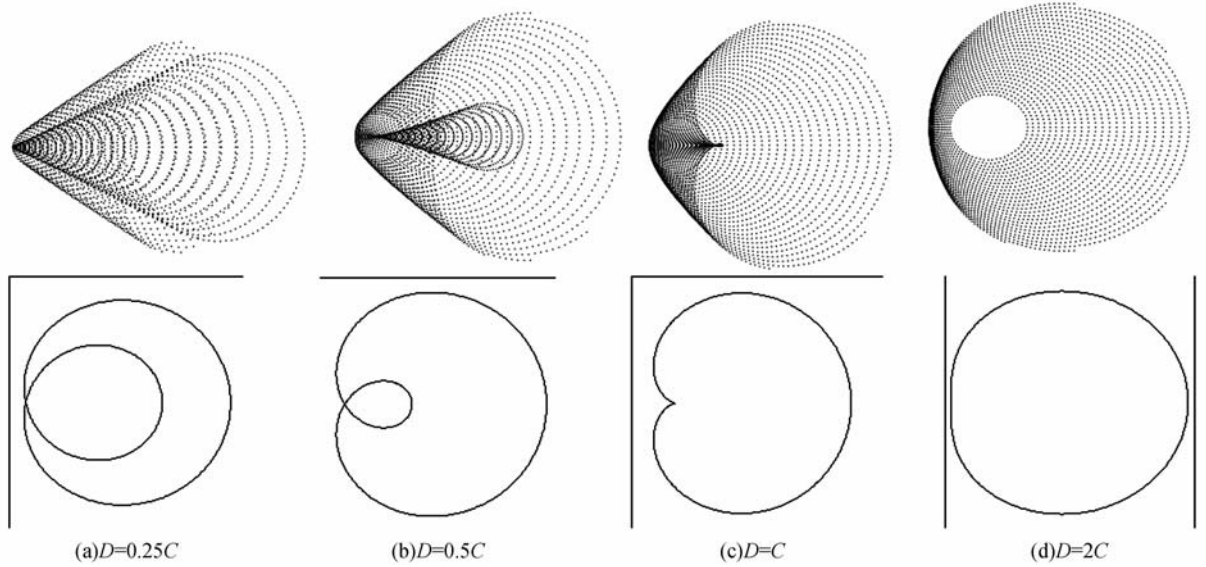


图 1 Zemax 模拟的离焦星点图和 Matlab 画出的边界图(C :不变, D :增大)

Fig. 1 Simulated out-of-focus stellar image by Zemax and edge graph drawn by Matlab (C :fixed, D :increased)

观察图 1 发现,边界图关于 TA_y 轴(纵向)对称。为避开焦散位置,需保证离焦量较大,如图 1 后两幅边界无相交的彗差图,要计算外围的直径可通过在对称轴线方向上将最大值减去最小值,而二者的均值即为中心位置。对于主次镜望远镜系统,主镜和次镜的轮廓同样遵循上述规律,故只需选择不同的 ρ 值投射到出瞳上, ρ 值分别对应主镜和次镜的外圆直径。分析过程参照文献[8]的公式可知该直径为

$$TA_{y\max} - TA_{y\min} = -4DR\rho, \quad (4)$$

中心位置为

$$\frac{TA_{y\max} + TA_{y\min}}{2} = -3CR\rho^2, \quad (5)$$

最后,对应内外不同的半径值 ρ_{in} 和 ρ_{ex} , 计算中心位置的偏差为

$$\Delta y = -3RC\rho_{\text{ex}}^2(1-\epsilon^2), \quad (6)$$

其中 $\epsilon = \frac{\rho_{\text{in}}}{\rho_{\text{ex}}}$ 为中心遮拦比。

观察发现,外圆轮廓直径仅仅由望远镜系统参数和离焦量 D 决定,而中心偏差值仅仅受系统参数以及偏心彗差影响,故可以按照该方法测量系统中偏心彗差量的大小。

文献[8]中给出偏心彗差受次镜偏心和倾斜影响的公式为:

$$\begin{aligned} Coma_{\beta} &= \left[\frac{1}{R_s^2} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{R_s} \right)^2 \right] (0.004776)\beta \\ Coma_{\delta} &= \frac{1}{2R_s} \left[\left(\frac{1}{d} - \frac{1}{R_s} \right)^2 + \frac{1-K_s}{R_s^2} \right] \delta \end{aligned}, \quad (7)$$

其中 R_s 为次镜近轴曲率半径, K_s 为其二次常数, d 为次镜到焦面的距离, β 为次镜倾斜角度, δ 为偏心距离。可见,内外圆的偏心距离仅仅受偏心量的影响,二者满足线性关系,而和离焦量无关,故可应用该性质指导主次镜同轴装调。

上面的分析主要是基于彗差进行有关调整,而实际过程中由于偏心和倾斜误差的影响,系统一定会产生相应的像散。由于它并不满足随偏心误差的线性变化关系,故像散会随着偏心误差的增大而影响调整过程,使上述分析不准确,影响调整精度,故下面针对像散进行了相关分析。

2.2 离焦图像调整像散(A 较大)

由上面的分析可知当偏心和倾斜量较小时彗差是系统主要的像差;而随着偏心以及倾斜的增大,像散会迅速增大和彗差同时影响系统。可见,彗差作为影响系统的主要像差必须首先消除,而彗差消失后也仅能保证主次镜光轴交点为零彗差点^[11-12],并不能保证主次镜系统同轴。零彗差点是 RC 系统中特殊存在的一点,其性质为次镜围绕该点旋转不会引入彗差,故可应用该性质调整剩余的像散。以下分析同样适用于系统彗差影响较小,像散是降低系统像质主要原因的情况。

当 C 较小至可以忽略不计时:公式(3)变为

$$\begin{cases} TA_x = -2R\rho\cos\theta(D+A) \\ TA_y = -2R\rho D\sin\theta \end{cases}, \quad (8)$$

此时系统中的变量只有两个:离焦量 D 和像散

A. 同样应用 Zemax 和 Matlab 分析离焦和像散的关系如图 2 所示,其中图(a)(b)(c)分别对应 Zemax 得到的离焦量逐渐减小时的离焦星点图,

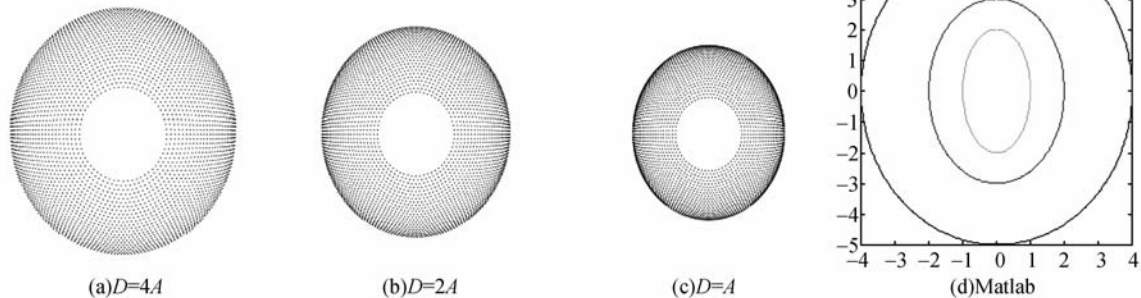


图2 Zemax 模拟的离焦星点图和 Matlab 画出的边界图(A 不变, D 减小)

Fig.2 Simulated out-of-focus stellar image by Zemax and edge graph drawn by Matlab(A: fixed, D: decreased)

该椭圆的长轴长度为 $A+D$, 短轴长度为 D 。当 A 不变而不断增大 D 时, 椭圆的偏心率逐渐减小:

$$\tau = \frac{\sqrt{(A+D)^2 - D^2}}{A+D} = \frac{\sqrt{A^2 + 2AD}}{A+D} = \frac{\sqrt{1+2D/A}}{1+D/A}, \quad (9)$$

根据偏心率的变化规律可以得出有关像散的大小。依照此原理, 只需分析外圆的长短轴的比值即可求得像散, 这大大简化了有关像散的分析过程。和彗差的分析过程类似: 首先应用 Zemax 得出有关偏心率和像散的相应规律, 画出相应曲线, 再通过实际调整离焦量得出关于椭圆长轴长度和偏心率的相应关系, 确定系统中的偏心误差。

调整过程为防止引入彗差, 一般选择围绕零彗差点进行旋转。参考文献[13]中关于零彗差点距离次镜顶点的公式:

$$L_{\omega 0} = \frac{(m+1)R_s}{[(m+1) - (K_s - 1)(m-1)]}, \quad (10)$$

零彗差确定以后, 只需知道要旋转的角度以及方向就可以消除像散。需注意的是该方法只能消除由于主次镜偏心导致的装调像散; 而由主次镜底支撑以及随温度变化导致机械结构变形等原因产生的像散值虽然可以按照求偏心率的方法得到, 但是却不能简单通过调整次镜位置消除, 故在调整前需首先确定像散产生的原因。

取轴上点分析, 围绕零彗差点 x 向旋转 α_x , y 向旋转 α_y 产生的两个方向的像散分别为:

图(d)为应用 Matlab 计算得出的曲线, 并且离焦量和前面的三张图分别对应。可以发现两者吻合度良好。

$$\begin{cases} (W_{ast})_{\cos 2\phi} = B_2(\alpha_x^2 - \alpha_y^2) \\ (W_{ast})_{\sin 2\phi} = 2B_2\alpha_x\alpha_y \end{cases}, \quad (11)$$

其中 B_2 为由系统决定的常数, 其求法可参照文献[12]。当像散大小和方向确定后, 即可确定旋转角度 α 。

2.3 离焦图像调整球差

前面提到的彗差和像散都是关于次镜相对于主镜的横向位置误差导致的, 而实际调整过程中, 由于主次镜间隔误差导致的系统会出现离焦和球差。下面具体分析如何针对球差进行离焦补偿以及确定主次镜间隔误差的原理及方法。

当只考虑离焦和球差时, 方程(1)变为 $W((x, y) = S(x^2 + y^2)^2 + D(x^2 + y^2)$, (12) 此时横向像差变为

$$\begin{cases} TA_x = -2R\rho\cos\theta(2S\rho^2 + D) \\ TA_y = -2R\rho\sin\theta(2S\rho^2 + D) \end{cases}, \quad (13)$$

通过公式 13 可得横向像差满足关系:

$$TA_x^2 + TA_y^2 = [2R\rho(2S\rho^2 + D)]^2, \quad (14)$$

离焦图像为半径为 $2R\rho(2S\rho^2 + D)$ 的圆,

$$D = -\frac{3(1-\epsilon^4)}{2(1-\epsilon^2)}S. \quad (15)$$

图 3 所示为光学系统存在球差干扰时近轴焦点和最小圆的大致位置关系。

将公式(15)代入到公式(14)可得到最小圆的半径和球差满足关系:

$$R_{\text{least}} = R\rho(4\rho^2 - \frac{3(1-\epsilon^4)}{1-\epsilon^2})S, \quad (16)$$

可见, 该最小圆的半径仅仅由系统主次镜纵向误

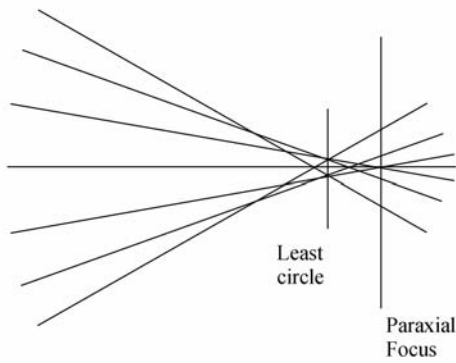


图 3 球差和离焦

Fig. 3 Spherical aberration and defocus

差导致的球差决定,且有正比关系,故可以通过测定半径值判断系统的球差值。参照文献[13]可得公式:

$$S = \frac{(m+1)[2m(m-1)(F-\eta)+1]}{256\lambda F^3 F_p (F-\eta)} \Delta Z, \quad (17)$$

其中 F 为系统焦比, F_p 为主镜焦比, $\eta = b/D_p$ 为后焦距和主镜直径的比,均为系统常数; λ 为波长,所以球差与纵向误差同样满足正比关系。综合式(16)和式(17)可知:最小圆的半径仅由系统常数和主次镜间隔的纵向误差决定,且和该误差满足线性关系。该方法需首先消除系统除球差和离焦外的像差。

3 仿真分析和装调过程

3.1 基于 Zemax 的系统建模和仿真

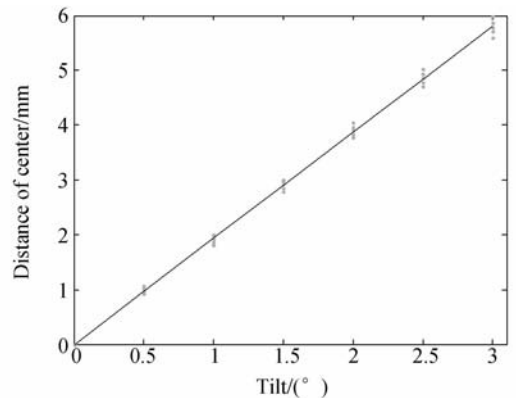
针对 RC 式望远镜进行 Zemax 仿真,分析系统像差、彗差、像散和球差与系统常数之间的关系,证明上述的分析。首先进行望远镜系统的建模,其光学系统参数为 $F\# = 7.7$,最大可用视场角为 $17.67'$,其光学参数参照表 1:

表 1 RC 式望远镜的光学参数

Tab. 1 Optical parameters of RC telescope

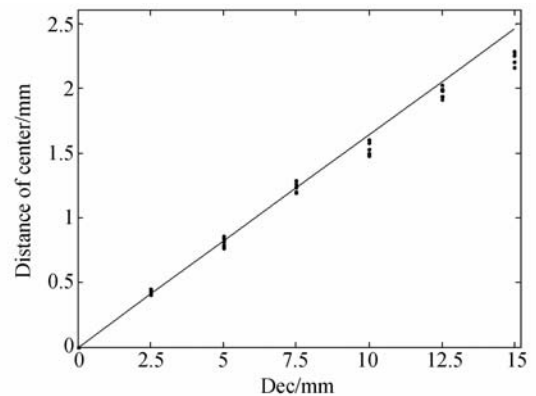
表面	类型	二次常数	曲率半径 /mm	间隔 /mm	半口径 /mm
PM	Conic	-1.040 231	-4 591.81	-1 716.2	606.4
SM	Conic	-3.083 152	-1 532.68	2 380.7	153.9

图 4 所示为望远镜系统次镜发生倾斜和偏心时内外圆圆心的距离仿真图。仿真结果(实心点)的计算过程为:首先通过 Zemax 仿真得到离焦图像,并通过 Matlab 编程寻找离焦图像的内外圆圆心,然后计算两圆心的距离;实线为通过公式算出的理论值。观察发现,由于次镜偏心 and 倾斜会同时引入像散,故圆心偏离量随着离焦量的变化而偏离理论值;且倾斜关系相比偏心和理论值更加接近,并且线性度良好。随着偏心量增大,仿真得到的偏心量逐渐远离理论值,表明像散对系统的影响逐渐增大。



(a) 次镜倾斜

(a) Secondary mirror tilt



(b) 次镜偏心

(b) Secondary mirror decentration

图 4 1.2 m 望远镜系统离焦星点图次镜倾斜和偏心对应内外圆圆心距离的仿真与理论对比

Fig. 4 Contrasts of theoretical and simulated distances between inner and outer centers of tilted or decentered secondary mirrors for defocused star of 1.2 m telescope

图5所示为次镜绕零彗差点转动且只引入像散时,随着旋转角度的不同长轴长度和偏心率之间的相互关系。观察可知,旋转角度越大,像散的幅值越大,其偏心率的变化速度越慢,这和前面的理论分析相一致。该性质可用于分析系统的不同轴误差,进而指导调整。需注意的是此时最好将离焦量控制到较小,以保证偏心率较大且远离渐晕位置。图6所示为次镜间隔误差和系统最小圆半径的对应关系的仿真结果和理论值的对比,仿真结果基本满足线性关系,和理论值相差不大。同样验证了上面的理论分析。

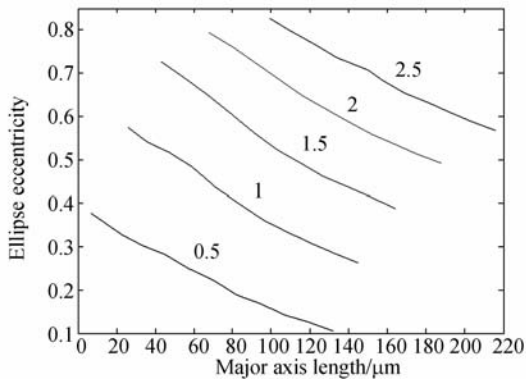


图5 长轴和偏心率的关系
(次镜绕零彗差点旋转不同角度)

Fig. 5 Relationship of longer axis and ellipse eccentricity (secondary mirror rotating different angles around neutral point)

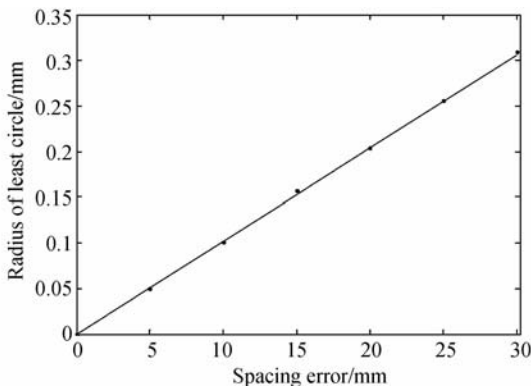


图6 间隔误差和最小圆半径的关系

Fig. 6 Relationship of spacing error and least circle radius

3.2 装调过程和离焦图像的分析方法

装调过程如下:首先将星点图像离焦,离焦量控制为较大,测量几次偏心距离取平均值,通过偏心距离分析得到系统的彗差值,然后利用公式(8)

求得系统的偏心量。接着调整该偏心误差,由于离心和倾斜的相互补偿作用,当系统彗差消除以后,系统可能处于零彗差情况,即主次镜交点为零彗差点,此时系统无彗差,但主次镜并不同轴。按照系统中主要像差为像散进行分析,将离焦量控制为较小值,记录不同离焦量下长轴长度和偏心率的关系,同时记录长轴的角度方向,通过上面的仿真分析求得像散值所代表的绕零彗差点的旋转角度,其旋转方向和长轴的角度方向有关。消除横向偏心误差以后,进行轴向间距误差的测量和分析。方法为调整焦面位置寻找最小圆的半径值,再通过最小半径值和球差关系,得到有关轴向误差的具体值。

求取偏心距离参照文献[8]中的方法来判断。首先基于能量或者几何形状寻找离焦图像的中心位置,接着围绕该中心将整个区域分为多个近似扇形,对于每个部分,按照从内向外的方向,寻找包含全部能量2%和99%的半径值的点,通过该点近似代表内外轮廓。一旦轮廓判断完毕,用最小二乘法的圆形逼近寻找内外圆对应的中心位置,两点之间的距离即为所求偏心距离如图7所示。判断偏心率的方法和上述方法类似,首先确定外轮廓,同样基于图像的中心位置通过划分扇形寻找每个扇形中包含全部能量99%的点,接着按照椭圆拟合的最小二乘得到长轴和短轴的长度比,最后变换得到偏心率。最小圆半径的取得过程类似。其过程如图8所示。

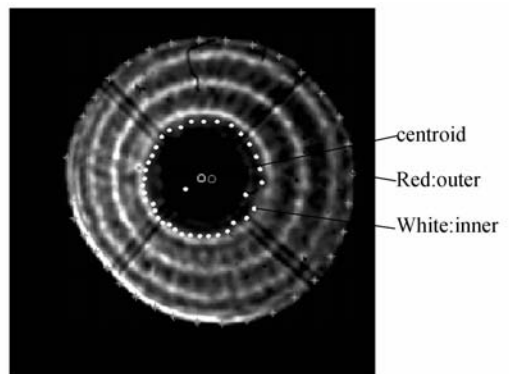


图7 离焦图像寻找边缘和中心位置

Fig. 7 Detection of out-of-focus image edge and inner and outer centers' locations

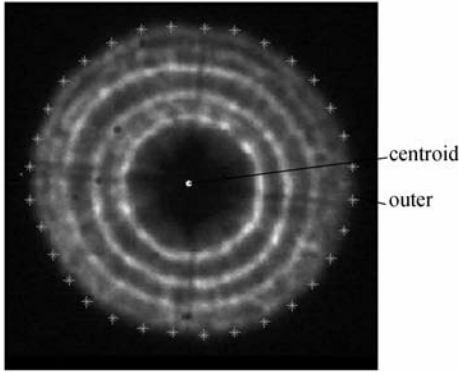


图 8 离焦图像寻找边缘

Fig. 8 Edge detection of out-of-focus image

4 实验过程及结果分析

为了验证上述理论和仿真分析,针对 1 m 级 RC 式望远镜进行了实验,其系统如图 9 所示,采用大平行光管模拟星像避免利用天体星像时大气的干扰作用。由于次镜配合了多自由度平台,如图 10 所示,可以实现理想的偏心和倾斜控制,故应用其控制作用每次调整次镜的以 0.25° 的倾斜量进行关于系统装调的实验和分析。通过上面的分析可知由于离焦量对像散的影响造成理论值和实际值存在误差,故选择几个焦面位置进行计算取平均值的方法得到最后的实验结果。实验结果见表 2 前两列,其中第一列为次镜的倾斜角度,第二列为离焦星点图内外圆圆心距离。将其和理论值对比如图 11 所示,其中实线为理论计算值,观察发现二者拟合的情况良好,且实验所得的数据和理想值相比误差小于 5%,证明实际应用中可采用该方法进行有关次镜的偏心和倾斜计算,进而指导次镜的位置装调。该方法主要消除系统的

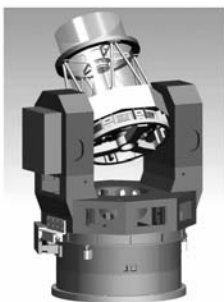


图 9 望远镜系统

Fig. 9 Telescope system



图 10 六自由度平台

Fig. 10 Stewart platform

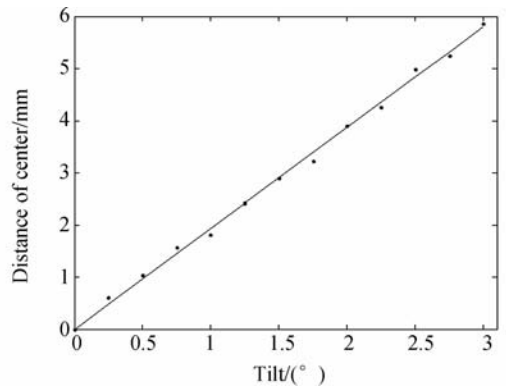


图 11 次镜倾斜对应两圆心距离实验与理论对比

Fig. 11 Contrasts of experimental and theoretical results of two center distances with tilted secondary mirror

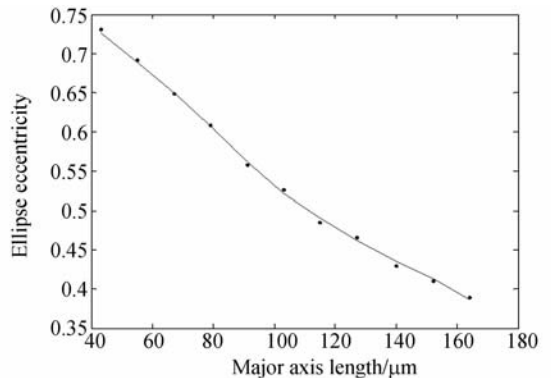


图 12 长轴长度和偏心率实验与仿真对比

Fig. 12 Contrasts of experimental and simulated results of eccentricity with major axis length

彗差,每次调整后需继续观察离焦星点图内外圆的圆心距离,直到该距离小于计算得到的误差允许的范围为止。此时可基本认为系统处于零彗差状态。

当系统不受彗差的干扰影响以后,一般要进

行关于像散的测量和调整工作。实际系统中温度变化、支撑失效、装调误差等因素都可能导致像散产生,下面的实验过程主要针对装调过程中偏心产生的像散。将次镜绕零彗差点旋转 1.5° (通过次镜的偏心和倾斜得到),通过控制离焦量得到不同大小的离焦星点图。其椭圆的长轴长度如表2第三列所示,第四列为其对应的偏心率的值。实验结果和仿真所得曲线对比如图12所示,可见其误差同样控制在5%以内。虽然原则上可以从任何尺寸的离焦位置测量长轴长度以及偏心率,但是实际上当偏心率较大时离渐晕位置较远测量更加准确。基于最小圆测量球差的方法同样精度较高,可用于指导主次镜间隔误差的调整。

表2 实验结果

Tab. 2 Experimental results

Tilt / $^\circ$	Distance /mm	Major length / μm	Eccentricity
0.25	0.591 1	43	0.731 2
0.5	1.041 9	55	0.691 8
0.75	1.573 9	67	0.648 6
1	1.810 3	79	0.608 3
1.25	2.416 3	91	0.558 4
1.5	2.889 1	103	0.526 7
1.75	3.236 4	115	0.485 4
2	3.894 0	127	0.465 7
2.25	4.263 5	140	0.429 7
2.5	5.002 4	152	0.410 0
2.75	5.253 7	164	0.388 9
3	5.874 3		

参考文献:

- [1] 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 Z, 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)
- [2] 陈浩,宣丽,胡立发,等. 1 200 mm 望远镜开环液晶自适应光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1):29-36.
CHEN H, XUAN L, HU L F, *et al.*. Design of open-loop liquid crystal adaptive optical system for

5 结 论

本文研究了利用离焦星点图指导大口径望远镜系统的装调技术,实验结果表明:无论是横向误差还是纵向误差,应用该方法得到的实验结果和理论分析值拟合度良好,其中通过倾斜调整彗差和偏心率调整像散误差均可控制在5%以内。该方法完全满足大口径望远镜装调的精度高、抗干扰能力强等要求。其中关于调整彗差的方法适用于绝大多数卡塞格林式或者RC式望远镜,而测像散的过程可用于装调较大视场角情况下的望远镜系统,或者由于支撑、温度、刚体变形等原因引起的系统像散的消除。基于此种方法实现望远镜的装调需要配备必要的技术支撑条件。如要在室内进行望远镜的安装调试时,可采用大平行光管模拟星像;而在野外现场则可利用天体星像进行装调。应用天体观星时由于大气扰动对星像质量存在影响,将使得工作比较复杂,但该情况更接近望远镜的真实工作状况,其实际应用性更好。本论文的分析方法具有较高的应用价值,可广泛用于望远镜的指导装调。

- 1200mm telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):29-36. (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] LIU J F, LONG F N, ZHANG W. Study on computer-aided alignment method [J]. *SPIE*, 2005, 5638:674-681.
- [5] 马品仲. Shack-Hartmann 法在 4.3 m 望远镜中的应用设计[J]. 光学技术, 1994, 3(4):28-38.
MA P J. Shack-Hartmann wavefront sensor for

- 4.3 m telescope[J]. *Optical Technique*, 1994, 3(4):28-38. (in Chinese)
- [6] RODDIER C, RODDIER F. Wave-front reconstruction from defocused images and the testing of ground-based optical telescopes[J]. *Optical Society of America*, 1993, 10(11):2277-2287.
- [7] ANASTACIS M, DONALD W, SCOT S, et al.. Curvature wavefront sensing performance evaluation for active correction of the large synoptic survey telescope[J]. *Optics Express*, 2010, 18:1528-1552.
- [8] LUNA E, CORDERO A, VALDEZ J, et al.. Telescope alignment by out-of-focus stellar image analysis[J]. *The Astronomical Society of the Pacific*, 1999, 111:104-110.
- [9] Alignment of the Pan-Starrs PS1 prototype telescope optics[J]. *SPIE*, 2008, 7012:1-15.
- [10] SCHMID T, THOMPSON K, ROLLAND J. Alignment of two mirror astronomical telescopes(the astigmatism component)[J]. *SPIE*, 2008, 7017:1-12.
- [11] WILSON R N. *Reflecting Telescope optics I: Basic Design Theory and its Historical Development*[M]. Germany: Springer, 1996.
- [12] WILSON R N. *Reflecting Telescope optics II: Manufacture Testing Alignment Modern Techniques*[M]. Germany: Springer, 1996.
- [13] WETHERELL W B, RIMMER M P. General analysis of aplanatic cassegrain, gregorian, and schwarzschild telescopes [J]. *Applied Optics*, 1972, 11(12):2817-2832.

作者简介:



孙敬伟(1983—), 男, 吉林乾安人, 博士研究生, 2005 年于同济大学获得学士学位, 2008 年于汕头大学获得硕士学位, 主要从事大口径望远镜系统装调和检测方面的研究。E-mail: blizzard-maple@163.com



陈涛(1965—), 男, 内蒙古赤峰人, 工学博士, 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。E-mail: chent@ciomp.ac.cn



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望远镜总体技术的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn



张金凯(1986—), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事拼接镜相位检测方面的研究。E-mail: youjianer@sohu.com