

基于像散分解的望远镜主次镜对准方法

张晓明^{1,2,3} 陈洪斌^{1,2} 王继红^{1,2} 齐波^{1,2}

$\left[\begin{array}{l} ^1 \text{ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209} \\ ^2 \text{ 中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209} \\ ^3 \text{ 中国科学院大学, 北京 100049} \end{array} \right]$

摘要 主次镜的对准误差是影响望远镜成像质量的主要因素。为了提高望远镜主次镜的对准精度,提出了一种基于像散分解的对准误差计算方法。该方法利用出瞳波前误差的泽尼克多项式的像散项计算出两种对准误差单独作用时的像散项的大小。以口径为 1200 mm 的同轴反射式(RC)望远镜为对象,仿真分析了像散分解算法的特性。当主次镜光轴不共面时,像散分解算法的计算误差随着主次镜光轴间的距离增大而增大。进而给出了基于像散分解的对准误差求解方法,并进行了仿真对准。仿真结果显示,当主次镜光轴的空间距离小于 0.5 mm 和夹角误差小于 0.1°时,基于像散分解的对准算法可以迅速将对准误差降到 5 μm 和 0.5"以内。仿真分析验证了基于像散分解的对准算法的可行性。

关键词 成像系统;望远镜对准;像散分解;对准算法;对准误差

中图分类号 TH743 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0512007

An Alignment Method of the Telescope's Primary and Second Mirrors Based on Astigmatic Decomposition

Zhang Xiaoming Chen Hongbin Wang Jihong Qi Bo

$\left[\begin{array}{l} ^1 \text{ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China} \\ ^2 \text{ Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China} \\ ^3 \text{ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China} \end{array} \right]$

Abstract The alignment errors of primary and secondary mirrors can make the image blur. In order to improve the alignment precision of the telescope's primary and secondary mirrors, an algorithm used to calculate the alignment errors based on astigmatic decomposition is presented. The algorithm makes use of the astigmatism item of wavefront errors described by Zernike Polynomials to calculate the astigmatism produced by the different alignment errors independently. The character of the astigmatic decomposition algorithm is investigated based on a reflective coaxial (RC) telescope whose diameter is 1200 mm. It is obviously that the calculation errors increase along with the distance between the primary and secondary mirrors' optical axes, while the two optical axes are in the different planes. An alignment algorithm is designed based on the astigmatic decomposition algorithm. The simulation alignment is done. The simulation shows that the alignment algorithm can align the optical system rapidly with a residual less than 5 μm and 0.5", when the distance between two axes is less than 0.5 mm and the tilt of two axes is less than 0.1°. Simulation analysis demonstrates the feasibility of the alignment algorithm based on astigmatic decomposition.

Key words imaging systems; telescope alignment; astigmatic decomposition; alignment algorithm; alignment errors

OCIS codes 120.1680; 120.1880; 120.3940; 120.6085

收稿日期: 2013-12-13; 收到修改稿日期: 2014-01-16

基金项目: 中国科学院重点实验室预研基金(A09K002)

作者简介: 张晓明(1986—),男,博士研究生,主要从事望远镜光路实时对准方面的研究。

E-mail: zxm1986715@163.com

导师简介: 陈洪斌(1953—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学工程方面的研究。E-mail: chbin@ioe.ac.cn

(通信联系人)

1 引 言

在望远镜工作时,振动引起的主次镜晃动、重力畸变引起的主次镜相对位置的变化及温度变化引起的支撑结构变形等均会造成望远镜的成像质量下降。其中以侧向辐照引起的温度梯度变化和振动引起的主镜晃动影响最大。为了提高望远镜的成像质量,必须及时修正主次镜的对准误差。

主次镜对准误差的量化和计算是修正对准误差的核心内容。国内外在这方面均做了大量研究和分析。常见的对准算法有优质函数递减算法^[1-2]、随机并行梯度下降(SPGD)算法^[3]、遗传模拟退火算法^[4]、计算机辅助对准(CAA)算法^[5-7]等。优质函数递减算法的步骤为:1)建立光学系统的光学模型,测出待测光学系统的出瞳波前误差;2)在光学模型中建立优质函数,以测出的波前误差为目标值,以待测的对准误差为变量,按照一定的算法进行优化;3)优化函数的值与目标值很接近时得到的变量的值就是实际的对准误差。该算法具有很广的适用范围,但是存在计算时间不确定和计算精度受建模精度影响的缺点。韩杏子等使用 SPGD 对准初始峰谷值(PV)值为 6.7021λ 的光学系统,经 200 次迭代计算后 PV 降为 0.1967λ 。SPGD 算法和模拟退火算法均属于最优化算法,不需要知道光学系统的参数,可以直接以表征对准状态的评价值来修正对准误差,但是对对准状态评价函数要求过高,且容易陷入局部极值。CAA 算法则是建立对准误差和出瞳波前误差的映射关系,已有的研究多是建立线性关系,且未对耦合项进行解耦。

本文针对同轴反射式(RC)望远镜提出了一种新的求解对准误差的算法,用泽尼克多项式描述出瞳波前误差,并将像散项分解为两组对准误差单独作用时引起的像散项的大小,然后结合慧差项建立方程组求解主次镜的对准误差。由于存在计算误差,所以需要采用一定的对准误差修正算法来实现主次镜的高精度对准。

2 像散分解原理

2.1 量化对准误差

检测光路如图 1 所示,图中 primary mirror 为主镜,secondary mirror 为次镜,wavefront sensor 为探测镜,主次镜对准误差的定义如图 2 所示。其中: d_x 为次镜顶点偏离主镜的距离,称为离心误差,可以分解为沿 x 轴方向的 d_x 和沿 y 轴方向的 d_y ;tilt

为次镜光轴与主镜光轴的夹角,称为倾斜误差,可以分解为绕 x 轴的旋转 t_x 和绕 y 轴旋转的 t_y ; d_z 为次镜与主镜的间距偏离理论值的大小。无穷远目标在主镜光轴上,目标发出的光线经过主次镜后成像。在像平面附近进行出瞳波前误差的探测,常见的波前探测仪器有夏克-哈特曼波前探测器、剪切干涉仪、曲率传感器等,也可以直接利用图像进行波前复原^[8-13]。用 Zemax 和 Matlab 建立的仿真平台进行数值分析^[14-15]。通过研究出瞳波前误差随对准误差变化的规律,建立合理的映射关系。

假定主镜处于理想位置,次镜相对于主镜存在对准误差,主次镜均为理想曲面。

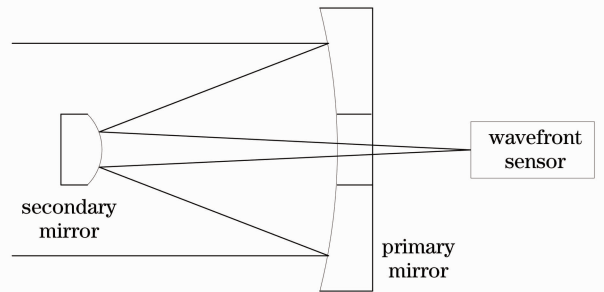


图 1 检测光路示意图

Fig. 1 Schematic of the optical system for detection

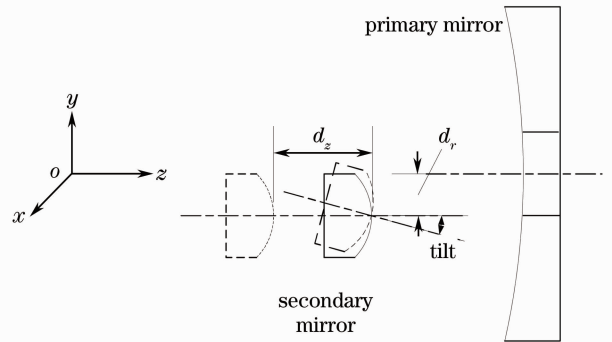


图 2 主次镜对准误差示意图

Fig. 2 Schematic of the definition of the alignment errors of primary and secondary mirrors

先以系统仅同时存在 d_x 和 d_y 时的情况进行讨论,仅同时存在 t_x 和 t_y 的情况与仅同时存在 d_x 和 d_y 的情况相似。 d_x 、 d_y 、 t_x 和 t_y 同时存在的情况将单独讨论。

2.2 像散分解算法

用 Fringe 排列方式的泽尼克多项式来表示出瞳波前误差,其中像散项和慧差项的泽尼克多项式的表达式如表 1 所示。将 0° 像散项和 45° 像散项的泽尼克多项式的系数分别记为 A_{ST0} 和 A_{ST45} 。

将 A_{ST0} 和 A_{ST45} 进行合成得到 A_{ST} ,并求得 A_{ST}

的方向,如图 3(a)所示。对应的 d_x 和 d_y 的关系如图 3(b)所示。

表 1 像散项和慧差项的泽尼克多项式表达式

Table 1 Zernike polynomial of the astigmatism and the coma

Name	Polynomial
Astigmatism at 0°	$-x^2 + y^2$
Astigmatism at 45°	$2xy$
Coma at 0°	$-2y + 3y^3 + 3x^2y$
Coma at 90°	$-2x + 3x^3 + 3xy^2$

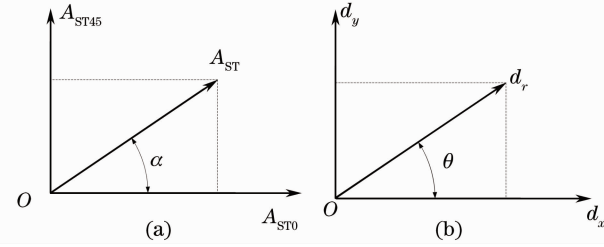


图 3 像散项的合成及对应的 d_x 和 d_y 的关系

Fig. 3 Synthesis of the astigmatism and corresponding relation of d_x and d_y

根据三阶像差和泽尼克多项式的关系^[16],可以得到:

$$m_{AST} = \sqrt{(A_{ST0})^2 + (A_{ST45})^2}$$

$$\theta = \frac{\alpha}{2} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{A_{ST45}}{A_{ST0}}\right), \quad (1)$$

式中 m_{AST} 表示 A_{ST} 的大小。

当主次镜光轴平行,且次镜顶点与主镜光轴的距离为 d_r 时,产生的像散为

$$A_{ST} = K_a^{dr} \cdot d_r^2, \quad (2)$$

式中 K_a^{dr} 为 d_r^2 和 A_{ST} 之间的比例系数。由于该光学系统为圆对称系统,因此在对准误差较小时有 $K_a = |K_a^{dx}| = |K_a^{dy}|$ 。 K_a^{dx} 和 K_a^{dy} 分别为 d_x^2 和 d_y^2 与 A_{ST} 之间的比例系数。

表 2 RC 望远镜光学模型参数

Table 2 Parameters of the reflective coaxial (RC) telescope

Name	Glass	Radius /mm	Thickness /mm	Semi-diameter /mm	Conic
PM	Mirror	-3600	-1380	600	-1.027992
SM	Mirror	-1036.33014	2216.973	142	-2.378094

3.1 离心和倾斜误差单独作用时的情况

人为给定对准误差,然后用像散分解算法对出瞳波前误差的像散项进行分解,计算结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出,在系统在当 t_x 和 t_y 同时为零或者 d_x 和 d_y 同时为零时,该分解算法具有很高的计算精度。

假定 t_x 和 t_y 为零,则有:

$$\begin{cases} \tan \theta = \frac{d_y}{d_x} \\ d_x^2 + d_y^2 = d_r^2 \\ K_a \cdot d_x^2 = m_{AST}^x \\ K_a \cdot d_y^2 = m_{AST}^y \\ K_a \cdot d_r^2 = m_{AST} \end{cases}, \quad (3)$$

结合(1)式和(3)式可得:

$$\begin{cases} m_{AST}^x = \frac{m_{AST} + \text{sign}(K_a^{dr}) \cdot \text{sign}(A_{ST45}) \cdot A_{ST0}}{2} \\ m_{AST}^y = m_{AST} - m_{AST}^x \end{cases}, \quad (4)$$

这里将 d_x 和 t_y 分为一组,并定义为 x 方向组,它们产生的像散项定义为 A_{ST}^x, m_{AST}^x 表示 A_{ST}^x 的大小;将 d_y 和 t_x 分为一组,定义为 y 方向组,它们产生的像散项为 A_{ST}^y, m_{AST}^y 表示 A_{ST}^y 的大小。虽然(4)式是在 t_x 和 t_y 为零时求得的,但是当 t_x 和 t_y 不为零时仍然可以使用。后面将会详细说明 d_x, d_y, t_x 和 t_y 同时存在时的情况。

(4)式便是像散分解公式,该分解算法的本质是将对准误差产生的像散进行坐标变换,并计算各个方向的分量。

3 像散分解算法的数值验证

以某在研 RC 望远镜的系统参数在 Zemax 中建立光学模型,光学参数如表 2 所示。PM 为主镜,SM 为次镜。主次镜均为反射镜,Radius 为反射镜顶点处的曲率半径的大小,主镜的 Thickness 为主镜顶点到次镜顶点的距离,次镜的 Thickness 为次镜顶点到像平面的距离,Semi-Diameter 为反射镜的径向尺寸,Conic 为镜面面形的非球面参数。

3.2 离心和倾斜误差共同作用时的情况

采用表 2 所示的光学模型来分析所有对准误差共同作用时像散分解算法的特性,结果如表 4 所示。

表 5 给出了计算误差和主次镜光轴间距离的对应数据,这里规定主次镜光轴共面时距离为 0。可以看出当主次镜光轴不在一个平面内时,像散分解算法的计算误差与两光轴间的距离成正比。这是由

表 3 离心误差和倾斜误差单独作用时的计算结果

Table 3 Calculation results when the decent errors or the tilt errors work independently

Alignment errors		Independent / 10^{-3}		Together / 10^{-3}		Results / 10^{-3}	
		A_{ST0}	A_{ST45}	A_{ST0}	A_{ST45}	m_{AST}^x	m_{AST}^y
d_x	0.3 mm	1.8066	0	-1.4106	4.8175	1.8066	-
t_y	0.4 mm	-3.2116	0			-	3.2116
d_y	0.02°	1.9708	0	0	-3.9416	1.9708	-
t_x	-0.02°	-1.9708	0			-	1.9708

表 4 所有对准误差同时存在时像散分解算法的特性

Table 4 Characters of the astigmatic decomposition algorithm under the condition that all alignment errors exist

Alignment errors				Independent / 10^{-3}		Together / 10^{-3}		Results / 10^{-3}	
				A_{ST0}	A_{ST45}	A_{ST0}	A_{ST45}	m_{AST}^x	m_{AST}^y
1	x group	d_x	0.3 mm	3.1368	0			3.2157	-
		t_y	0.02°			-2.5055	8.5784		
	y group	d_y	0.4 mm	-5.6422	0			-	5.7211
		t_x	-0.02°						
2	x group	d_x	0.3 mm	3.1368	0			8.9982	-
		t_y	0.02°			6.2974	9.8595		
	y group	d_y	0.4 mm	3.1606	0			-	2.7008
		t_x	0.02°						
3	x group	d_x	0.1 mm	0.2007	0			0.1314	-
		t_y	0°			2.1715	-1.1004		
	y group	d_y	0 mm	1.9708	0			-	2.3030
		t_x	0.02°						
4	x group	d_x	0.01 mm	0.0020	0			0.0015	-
		t_y	0°			1.9728	-0.1100		
	y group	d_y	0 mm	1.9708	0			-	1.9744
		t_x	0.02°						

表 5 主次镜光轴的距离和计算误差

Table 5 Distances of the axes between the primary and secondary mirrors and the calculation errors

	Alignment errors				Calculate errors		Distance of the axes /mm
	d_x /mm	d_y /mm	t_x / (°)	t_y / (°)	m_{AST}^x /%	m_{AST}^y /%	
1	0.3	0.4	-0.02	0.02	2.51	1.4	0.0707
2	0.3	0.4	0.02	0.02	187	13.9	0.495
3	0.1	0	0.02	0	34.5	16.9	0.1
4	0.01	0	0.02	0	23.7	1.8	0.01

于主次镜光轴间的空间距离不为零时,光学系统失去了对称性, x 方向组和 y 方向组的比例系数发生了改变。

3.3 耦合分析

通过分析可知 d_x 和 t_y 同时存在时不会产生 A_{ST45} ,但是它们之间会存在耦合现象。即:

$$A_{ST0(d_x, t_y)} \neq A_{ST0(d_x, 0)} + A_{ST0(0, t_y)}, \quad (5)$$

式中 $d_x \cdot t_y \neq 0$ 。 d_y 和 t_x 也存在相同的情况。

这里将对 d_x 和 t_y 之间的耦合现象做出具体分析。 d_y 和 t_x 的耦合现象与 d_x 和 t_y 的分析结果相似。根据大量数据分析构建 d_x 和 t_y 共同作用产生像散 A_{ST}^x 的数学模型,如下式所示:

$$K_a^{dx} \cdot d_x^2 + 2\alpha_x \cdot d_x \cdot t_y + K_a^{ty} \cdot t_y^2 = A_{ST}^x, \quad (6)$$

式中 α_x 为 d_x 和 t_y 之间的耦合系数。

(6)式对 d_x 求偏导,则有:

$$K_a^{dx} \cdot d_x + \alpha_x \cdot t_y = \frac{1}{2} \frac{\partial A_{ST}^x}{\partial d_x}, \quad (7)$$

(7)式可以用于对准误差的微分求解。

α_x 有多种求解方法,但是这里只介绍一种基于光学模型的求解方法。求解 α_x 时, d_y 和 t_x 同时为零。

测得 t_y 为零时 $A_{ST}^x|_{t_y=0}$ 随 d_x 的变化关系。然后,测得多个 t_y 不为零时 $A_{ST}^x|_{t_y}$ 随 d_x 的变化关系。最后,求出它们的差值。

$$\Delta A_{ST}^x|_{t_y} = A_{ST}^x|_{t_y} - A_{ST}^x|_{t_y=0} = 2\alpha_x \cdot d_x \cdot t_y + K_a^{ty} \cdot t_y^2, \quad (8)$$

当 t_y 分别为 0° 、 0.01° 、 0.02° 和 0.03° ， A_{ST}^x 随 d_x 的变化关系如图 4 所示，不同 t_y 时 ΔA_{ST}^x 随 d_x 的变化关系如图 5 所示。

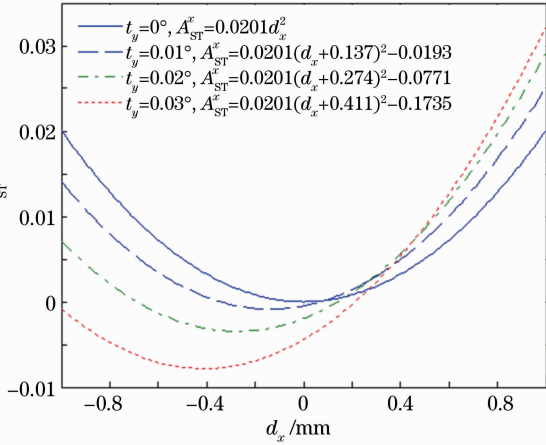


图 4 不同 t_y 时 A_{ST}^x 随 d_x 变化的关系

Fig. 4 A_{ST}^x versus d_x in various t_y

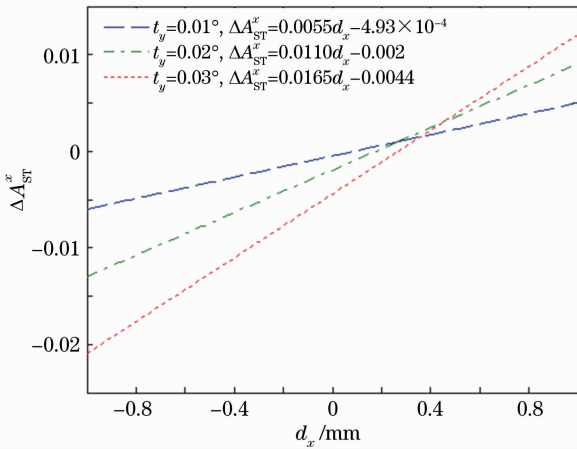


图 5 不同 t_y 时 ΔA_{ST}^x 随 d_x 变化的关系

Fig. 5 ΔA_{ST}^x versus d_x in various t_y

从图 4 可以看出，在 d_y 和 t_x 为零时， A_{ST}^x 随 d_x 变化的函数曲线只是随着 t_y 的改变而发生了平移， A_{ST}^x 与 d_x^2 之间的比例系数 K_a^{dx} 并未发生改变。 A_{ST}^x 随 d_x 变化的函数曲线为二次曲线，当 t_y 不为零时，不能在 d_x 为零处取得极小值，但是存在使该函数取得极小值的 d_x 。这说明 d_x 可以补偿 t_y 带来的像散。从图 5 的数据可得到 K_a^{dx} 为 0.0201。

从图 5 可以看出，不同 t_y 时， ΔA_{ST}^x 随 d_x 变化的关系为线性关系，并且斜率满足线性比例关系。对照 (7) 式便可以求得 α_x 为 0.2751。

同理，可以得到在 d_x 和 t_y 为零时， d_y 和 t_x 的耦合系数 α_y 为 0.2751。

4 基于像散分解的主次镜对准

这里以表 2 所示的光学模型为例进行主次镜的仿真对准。像散项和对准误差的关系采用二次曲线模型 $A_{ST} = K_a \cdot \delta^2$ ，慧差项和对准误差的关系采用线性模型 $C_{OMA} = K_c \cdot \delta$ 。 K_a^{dx} 、 K_a^{dy} 、 K_a^{tx} 和 K_a^{ty} 分别为 d_x 、 d_y 、 t_x 和 t_y 单独作用时与产生的像散项的比例系数。 K_c^{dx} 、 K_c^{dy} 、 K_c^{tx} 和 K_c^{ty} 分别为 d_x 、 d_y 、 t_x 和 t_y 单独作用时与产生的慧差项的比例系数。 x 方向组只产生 0° 慧差项 C_{OMA0} ， y 方向组只产生 90° 慧差项 C_{OMA90} 。通过分析可以得到各对准误差单独作用时分别与像散项和慧差项的比例系数，如表 6 所示。

表 6 各对准误差的比例系数

Table 6 Coefficients of the alignment errors

Coefficients	Value	Coefficients	Value
K_a^{dx}	0.0201	K_c^{dx}	-5.1994
K_a^{dy}	-0.0201	K_c^{dy}	-5.1994
K_a^{tx}	4.9273	K_c^{tx}	-35.8964
K_a^{ty}	-4.9273	K_c^{ty}	35.8964
α_y	0.2751	α_y	0.2751

用下面的方程组求解主次镜的对准误差：

$$\begin{cases} |K_a^{dx} \cdot d_x^2 + 2 \cdot \alpha_x \cdot d_x \cdot t_y + K_a^{ty} \cdot t_y^2| = m_{AST}^x \\ |K_a^{dy} \cdot d_y^2 + 2 \cdot \alpha_y \cdot d_y \cdot t_x + K_a^{tx} \cdot t_x^2| = m_{AST}^y \\ K_c^{dx} \cdot d_x + K_c^{ty} \cdot t_y = C_{OMA0} \\ K_c^{dy} \cdot d_y + K_c^{tx} \cdot t_x = C_{OMA90} \end{cases}, \quad (9)$$

由于暂时还无法确定 A_{ST}^x 和 A_{ST}^y 的符号，所以这里采用尝试法。即根据 $\pm m_{AST}$ 求得的对准误差取其一半进行尝试，然后进行比较，最后选择能够有效消除像散项和慧差项的那一组解。

这里假定光学系统完成粗装调后， d_x 和 d_y 处于 ± 0.5 mm 的范围内， t_x 和 t_y 处于 $\pm 0.1^\circ$ 的范围内。采用 (9) 式评价对准结果。

$M_F =$

$$\sqrt{\beta_1 \cdot A_{ST0}^2 + \beta_2 \cdot A_{ST45}^2 + \beta_3 \cdot C_{OMA0}^2 + \beta_4 \cdot C_{OMA90}^2}, \quad (10)$$

式中 β_1 、 β_2 、 β_3 和 β_4 为权重系数， M_F 为主次镜光轴的对准状态， M_F 越小说明对准误差越小。因为这里不涉及轴向调整，即主次镜顶点间的距离，因此不考虑球差项。

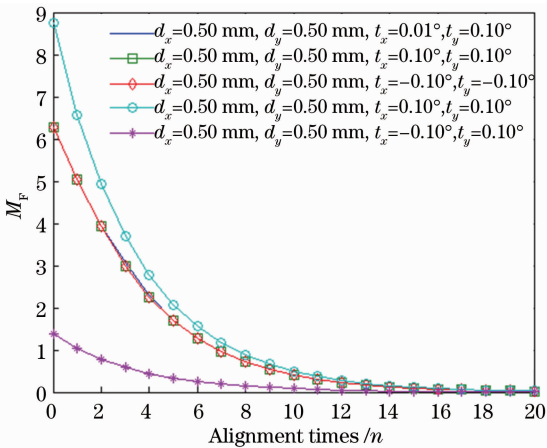
根据前面的分析可知，当主次镜的光轴之间的距离越大计算误差越大，因此以极限位置进行仿真，以检测算法的有效性。给定不同的初始对准误差，然后用基于像散分解的对准算法进行对准，其对准结果如表 7 所示，不同初始条件下 M_F 随对准次数

表 7 基于像散分解的对准的仿真结果

Table 7 Simulation alignment results based onastigmatic decomposition

		d_x	d_y	t_x	t_y	Distance of the axes / μm
1	Initial	0.5 mm	0.5 mm	0.1°	-0.1°	707.1
	Results	$2.527 \mu\text{m}$	$3.150 \mu\text{m}$	$0.211''$	$0.166''$	
2	Initial	-0.5 mm	-0.5 mm	0.1°	0.1°	707.1
	Results	$-1.178 \mu\text{m}$	$-1.984 \mu\text{m}$	$0.122''$	$0.165''$	
3	Initial	0.5 mm	0.5 mm	-0.1°	-0.1°	707.1
	Results	$1.178 \mu\text{m}$	$1.984 \mu\text{m}$	$-0.122''$	$-0.165''$	
4	Initial	-0.5 mm	0.5 mm	0.1°	0.1°	0
	Results	$-1.610 \mu\text{m}$	$1.610 \mu\text{m}$	$0.114''$	$0.114''$	
5	Initial	0.5 mm	0.5 mm	-0.1°	0.1	0
	Results	$4.323 \mu\text{m}$	$4.323 \mu\text{m}$	$-0.258''$	$0.258''$	

变化的情况如图 67 所示。光学模型在理想状态下对准误差为零。

图 6 不同初始条件下 M_F 随对准次数变化的情况Fig. 6 M_F versus alignment times in various initial conditions

从表 6 可以看出,该算法在主次镜光轴之间的距离较大时仍然能够有效对准,当主次镜光轴间距离较小时的情况和预想情况相同,因此可以认为当 d_x 和 d_y 处于 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 的范围内, t_x 和 t_y 处于 $\pm 0.1^\circ$ 的范围内基于像散分解的对准算法可以有效地对准主次镜。图 6 表明该对准算法具有良好的收敛性。理论上该对准算法一次就可以实现很高精度的对准,但是考虑到计算与主次镜光轴间的空间距离的关系,这里进行对准误差修正时是以计算值的一半进行修正的。因此需要几次对准才能使对准误差降下来。尽管如此,该算法仍然只需 20 次便可以达到最优值。而 SPGD 算法则需要 200 次才能达到最优值,并且还存在着较大不确定性。可见与 SPGD 算法相比,该算法具有很高的对准效率。

5 结 论

以 Fringe 泽尼克多项式表示的波前误差作为检测信息来对准 RC 望远镜的主次镜。通过对泽尼克多项式像散项的分解,分离出了 x 方向组和 y 方向组单独作用时产生的像散的大小。结合慧差项建立方程组,求解出 RC 次镜顶点相对于主镜光轴的离心误差和次镜光轴相对于主镜光轴的倾角误差。

像散分解算法是基于三阶像差和泽尼克多项式像散项系数的关系推导出来的。仿真结果表明,当主次镜光轴不共面时,像散分解算法的计算误差随着主次镜光轴间的空间距离的增大而增大。当两光轴间的空间距离小于 0.5 mm 时,像散分解算法的计算结果可以认为是有效的。用基于像散分解的对准算法仿真对一个口径为 1200 mm 的 RC 望远镜进行了仿真对准。当 d_x 和 d_y 小于 $\pm 0.5 \text{ mm}$, t_x 和 t_y 小于 $\pm 0.1^\circ$ 时,只需重复 20 次对准便可以将对准误差降到 $5 \mu\text{m}$ 和 $0.5''$ 以内。仿真结果证明基于像散分解的对准算法可以有效地对准望远镜的主次镜。

参 考 文 献

- 1 S Kim, H S Yang, Y W Lee, *et al.*. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems [J]. *Opt Express*, 2007, 15(8): 5059–5068.
- 2 E S Oh, S Kim, Y Kim, *et al.*. Integration of differential wavefront sampling with merit function regression for efficient alignment of three-mirror anastigmat optical system [C]. *SPIE*, 2010, 7793: 77930F.
- 3 Han Xingzi, Hu Xinqi, Yu Xin. Precisely integrated wavefront sensorless calibration of high-resolution space optical system with large position errors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0626003.
韩杏子, 胡新奇, 俞 信. 高分辨率空间光学系统位置误差的无波前传感器综合校正[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0626003.
- 4 Fang Hengchu. Genetic Simulated Annealing Algorithm in Computer-Aided Alignment of Optical System [D]. Beijing:

- Beijing Jiaotong University, 2008.
- 方恒楚. 遗传模拟退火算法在光学系统计算机辅助装调中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- 5 Zhishan Gao, Lei Chen, Songzuan Zhou, *et al.*. Computer-aided alignment for a reference transmission sphere of an interferometer [J]. *Opt Eng*, 2004, 43(1): 69–74.
 - 6 H Lee, G B Dalton, I A J Tosh, *et al.*. Computer-guided alignment I: phase and amplitude modulation of alignment influenced optical wavefront [J]. *Opt Express*, 2007, 15(6): 3127–3139.
 - 7 H Lee, G B Dalton, I A J Tosh, *et al.*. Computer-guided alignment II: optical system alignment using differential wavefront sampling [J]. *Opt Express*, 2007, 15(23): 15424–15437.
 - 8 Mao Heng, Wang Xiao, Zhao Dazun. Experimental validation and phase retrieval algorithm of complicated pupil wavefront [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 575–581.
毛 珩, 王 潇, 赵达尊. 复杂光瞳波前相位恢复算法与实验验证[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 575–581.
 - 9 Li Fei. Phase Diversity Wavefront Sensing and Its Application in Image Restoration [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. 21–86.
李 斐. 相位差波前探测技术及其在图像恢复中的应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011. 21–86.
 - 10 Cheng Qiang, Yan Feng, Xue Donglin, *et al.*. Wavefront errors testing of off-axis three-mirror anastigmatic system using phase diversity technology [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1008001.
程 强, 闫 锋, 薛栋林, 等. 利用相位差异技术检测离轴三反光学系统的波前误差[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1008001.
 - 11 Li Mengyang, Li Dahai, Wang Qionghua, *et al.*. Wavefront reconstruction with orthonormal polynomials in a square area [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1108011.
李萌阳, 李大海, 王琼华, 等. 用方形区域内的标准正交多项式重构波前[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1108011.
 - 12 Zeng Renchang, Liu Xiaohua, Hu Xinqi, *et al.*. Frequency-domain Iterative algorithm for extended scene Shack-Hartmann wavefront sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0701006.
曾仁昌, 刘晓华, 胡新奇, 等. 扩展目标夏克-哈特曼波前传感器的频域迭代算法研究[J]. *光学学报*, 2012, 2012, 32(7): 0701006.
 - 13 Li Jing, Gong Yan. Insert algorithm of wavefront reconstructions for Hartmann-Shack wavefront sensor [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 120101.
李 晶, 巩 岩. 哈特曼-夏克波前传感器的插值重构算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(12): 120101.
 - 14 Zhang Wenjing, Liu Wenguang, Liu Zejin. Dynamic data exchange between Zemax and Matlab [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(4): 553–556.
张文静, 刘文广, 刘泽金. Zemax 与 Matlab 动态数据交换及其应用研究 [J]. *应用光学*, 2008, 29(4): 553–556.
 - 15 Liu Zhixiang, Ma Dongmei, Tian Yuan, *et al.*. Computer-aided alignment method based on DDE interface technique [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(4): 486–490.
刘志祥, 马冬梅, 田 园, 等. 基于 DDE 接口技术的计算机辅助装调方法[J]. *应用光学*, 2009, 30(3): 486–490.
 - 16 J C Wayant, K Creath. *Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology* [M]. New York: Academic Press, 1992. 35–38.

栏目编辑：张浩佳