

doi:10.3788/gzxb20144308.0812002

# 基于离散阵列光源的空间光学系统对准

张晓明<sup>1,2,3</sup>, 陈洪斌<sup>1,2</sup>, 王继红<sup>1,2</sup>, 齐波<sup>1,2</sup>, 史建亮<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国科学院光束控制重点实验室, 成都 610209)

(3 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘 要:**为了解决基于波前或星点图对准大口径空间光学系统时计算量大、面形误差影响大等问题,提出了一种基于离散阵列光源对准空间光学系统的方法,给出了离散阵列光源的设计、检测和标定方法,并以此为基础设计了对准检测光路,以某在研 RC 望远镜为对象,用离散阵列光源产生参考光,设计了一个用于快速对准主镜的检测光路。在光学系统设计参数已知的情况下,根据像平面上的点列图,建立了主镜位置信息和点列图分布信息的函数关系。利用光学设计软件和数学计算工具建立仿真平台,并进行了主镜的仿真验证。仿真结果表明,使用离散阵列光源可以有效减少计算量,降低面形误差和杂散光的影响,提高对准效率,并且具有较高的计算准确度。

**关键词:**光学检测;光学对准;离散阵列光源;望远镜;参考光;对准检测;点列图

中图分类号:TH743

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)08-0812002-5

## Alignment of the Space Optics Using Discrete Light Source

ZHANG Xiao-ming<sup>1,2,3</sup>, CHEN Hong-bin<sup>1,2</sup>, WANG Ji-hong<sup>1,2</sup>, QI Bo<sup>1,2</sup>, SHI Jian-liang<sup>1,2</sup>

(1 *The Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

(2 *Key Laboratory of Beam Control, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

(3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** In order to solve the problems of aligning the space optics by wavefront errors or stellar image, the large amount of calculation and the great influence of surface shape errors, and so on, a discrete light source is proposed. And based it on, an alignment and measurement optical system is designed. The optical system is designed to measure and align a Ritchey Chretien telescope quickly by using the discrete light source as the reference ray. When the parameters of the optical system have been known, the relationship could be established exactly between the alignment errors and the spot diagram on the image plane. A simulation flat form is developed by using of the optical design software and the mathematics calculation tool. Then, the algorithm is proved in the simulation flat form. The simulation results show that using the discrete light source could reduce the amount of calculation, decrease the effects of the mirror errors and the stray light and have the precise calculation result.

**Key words:** Optics detection; Optical alignment; Discrete light source; Telescopes; Reference ray; Alignment and measurement; Spot diagram

**OCIS Codes:** 120.0120; 120.1680; 120.1880; 120.3940; 120.6085

## 0 引言

随着空间光学系统口径的增大,其穿轴、对准、链路检测等所需参考光源的直径也越来越大。常见的解

决方式有利用大口径的平行光管直接作为入射参考光;参考光源置于焦平面,在主镜(Primary Mirror, PM)出瞳处放置大口径标准平面反射镜构成自准直检测光路等。对于 2m 及更大口径的平行光管或者平面

基金项目:中国科学院重点实验室预研基金课题(No. A09K002)资助

第一作者:张晓明(1986—),男,博士研究生,主要研究方向为望远镜光路实时对准方法。Email: zxm1986715@163.com

导师(通讯作者):陈洪斌(1953—),男,研究员,主要研究方向为光束控制。Email: chbin@ioe.ac.cn

收稿日期:2013-12-10;录用日期:2014-02-28

<http://www.photon.ac.cn>

反射镜的加工难度很大,并且成本很高。

常见的对准方法有优质函数衰减算法<sup>[1-2]</sup>、计算机辅助对准(Computer Aided Alignment, CAA)算法<sup>[3-5]</sup>、随机并行梯度下降(Stochastic Parallel Gradient Descent, SPGD)算法<sup>[6-7]</sup>、遗传模拟退火算法<sup>[8]</sup>和基于星点图的对准算法<sup>[9-10]</sup>等。优质函数衰减算法和 CAA 算法都需要测量系统的波前信息,因此在光学系统口径很大时,出瞳波前的获得是一个难题。且前者采用优化理论进行计算,所以实时性不好。SPGD 算法用于空间光学系统的对准时依赖于合理的目标函数的支持,且耗时较长。星点图法的难点在于星点图像内外轮廓的精确提取。

在对准检测中,虽然使用连续参考光可以获得很多信息,但是对准时并不需要那么多信息,并且对于面形畸变的信息需要滤除。离散阵列光源可以为大口径天文光学系统的对准检测提供高质量的参考光。与现有的望远镜装调理论<sup>[11-13]</sup>相比,基于离散阵列光源的对准方法主要以光线追迹结果来反映光学系统的特性。本文将详细分析离散阵列光源的特性及检测方法,并以离散阵列光源为参考光设计对准检测光路,然后,推导出基于该对准光路对准算法的数学模型,并进行仿真实验。

## 1 离散阵列光源及检测光路设计

离散阵列光源是把一系列的线光源按一定规律固定在机械支架上从而构成特定的阵列光源,整个阵列光源是作为一个整体来使用的。

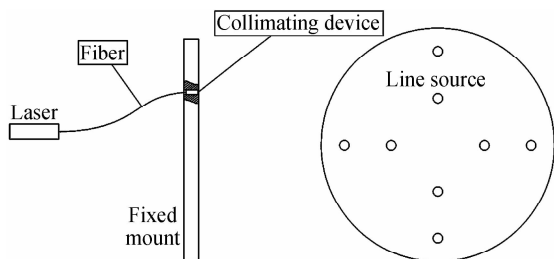


图1 离散阵列光源构造

Fig. 1 The configuration of the discrete light source

可以把离散阵列光源看成是对一个连续实心参考光的离散采样。这样做可以简化光路、减轻参考光源的重量、增大参考光的有效直径,同时可以根据需求把支架做成复杂形状,从而实现特定出射状态的参考光。一个等效于平面波的离散阵列光源的构造如图1。图1左边为阵列光源的实体构成,由光纤、光源、准直器和支架组成,用光纤把光源产生的光引入准直器,经准直器准直为发散角很小的线光源,准直器固定在支架上,实际制作时还需要为每个准直器增加足够的调整机构。图1右边为准直器在支架上的分布,根据设计要求来规划每个线光源的位置。

离散阵列光源的检测采用图2所示的方法。图2左边为用于检测标定的光路,离散阵列光源和屏1相距 $L$ ,屏1和屏2的距离 $d$ 根据需求设定。图2右边为屏的正面示意图,因为采用图像处理来计算各个光线的状态,因此需要有一个参考点,因此在中心刻画一个直角坐标的标记,光线在屏上成的光斑以直角坐标为基准来精确确定其位置。一般情况对光线的像质要求不高,只需标定光线的质心即可。通过屏1和屏2上光斑的相对位置来计算各个准直器偏离设计值的大小及其传播的方向。屏对材料的特性要求不高,只要能相机捕获光斑即可。这里应该采用定焦测量用的相机,合理选择焦距和视场大小以便精确计算各个光斑的相对位置。

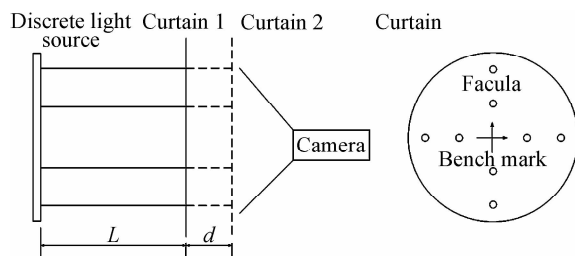


图2 离散阵列光源检测及标定示意图

Fig. 2 The measurement of the discrete light source

用离散阵列光源作为参考光来设计一个对准某在研 RC 望远镜的对准检测光路,离散阵列光源的分布及对准检测光路如图3。图3右边线光源的分布数据为:里面四个线光源距中心 300 mm,外面四个线光源距中心 500 mm,每个线光源的直径为 1.3~2 mm。一方面,由于中心遮拦的存在,线光源需要离中心有一定距离。另一方面,为了提高参考光随次镜(Secondary Mirror, SM)扰动变化率的不同,同一径向方向上的线光源需要相隔一定的距离。

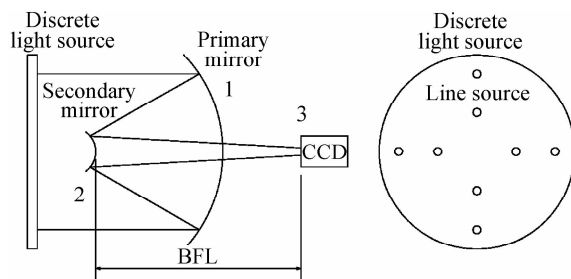


图3 离散阵列光源的分布及对准检测光路

Fig. 3 The schematic diagram of the alignment of RC telescope by using the discrete light source, and the distributing of the discrete light source

对准之前将离散阵列光源的各个线光源调为平行度误差小于 $1'$ ,出射方向与支架垂直。该 RC 望远镜的主镜为 1 200 mm,其质量必然会很大,所以在对准过程中尽量不调整主镜,并认为主次镜光轴的对准误差均来自次镜。该对准方法需要对检测光路进行必要的

初始装调.首先,调整离散光源使其线光源与主镜光轴平行,且离散光源的对称中心尽量位于主镜光轴上,8个光斑在屏上的分布与线光源在支架上的分布成比例相似.接着,在离焦点较远的位置放置一个屏,调整次镜使屏上的光斑尽量与线光源的分布接近.然后,根据数学模型计算次镜的偏离误差并修正.最后,去掉屏,在焦点位置附近放置一个 CCD.要保证 CCD 靶面与主镜光轴垂直,且光斑在 CCD 上可以区分,占 CCD 靶面的 2/3 左右.初始装调结束后便可以使用数学模型计算次镜的对准误差,然后用高准确度的六自由度调整机构来控制次镜的刚体移动来实现对准误差的修正.这里的对准只考虑镜子的刚体位移,RC 望远镜系统的参数如表 1.

表 1 RC 望远镜的设计参数  
Table 1 The parameters of RC telescope

	Radius	Thickness	Semi-diameter	Conic
PM	-3600	-1380	600	-1.027992
SM	-1036.33014	2216.973218	145	-2.378094

## 2 基于光线追迹的对准算法

把离散光源的每个线光源看成是一束光线,用数学模型描述它的传播及光线本身和光学元件的扰动对屏上光斑位置的影响.参考 David C Redding 和 William G Breckenridget 等人关于动态和控制分析光学模型的研究<sup>[14+16]</sup>.以图 3 左图为模型建立数学模型,以主镜顶点为原点,主镜光轴朝向参考光源的方向为  $y$  轴正方向建立笛卡尔右手坐标系.以图 3 右图所标记的数字为顺序来追迹各个线光源.由于视轴扰动模型是基于微小扰动时的一阶线性模型推导出来的,所以基于模型计算时尝试移动的扰动量不宜过大.

光线经第  $i$  个单元反射后的出射光线的扰动用  $x_i$  来表示,其具体定义为

$$x_i = \begin{bmatrix} dr_i \\ d\gamma_i \\ dL_i \end{bmatrix}_{7 \times 1}, dr_i = \begin{bmatrix} dr_{ix} \\ dr_{iy} \\ dr_{iz} \end{bmatrix}, d\gamma_i = \begin{bmatrix} d\gamma_{ix} \\ d\gamma_{iy} \\ d\gamma_{iz} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} i_i = r_{i-1} \\ \alpha_i = \gamma_{i-1} \\ L_i = \sum_{j=1}^i L_j \end{cases}$$

式中,  $r_i$ 、 $\gamma_i$  分别为第  $i$  个单元的出射光线的方向向量、横向偏移量,  $L_i$  为入射到第  $i$  个单元时光线的光程.上一个单元的出射光线为下一个单元的入射光线,  $i_i$ 、 $\alpha_i$  分别为第  $i$  个单元的入射光线的方向向量、横向偏移量.

线光源经主镜、次镜反射后入射到 CCD 上,把 CCD 看成是一个反射镜. CCD 靶面与主镜光轴垂直,法向量与入射光线相反 ( $N_3 = -i_3$ ).在离散阵列光源、主镜及 CCD 均处于理论位置时,次镜本身的扰动对整

个系统的出射光线的影响可以用式(1)表示.

$$x_3 = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_3}{\partial x_0^T} & \frac{\partial x_3}{\partial u_1^T} & \frac{\partial x_3}{\partial u_2^T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial x_3}{\partial x_0^T} & \frac{\partial x_3}{\partial u_1^T} & \frac{\partial x_3}{\partial u_2^T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u_2 \end{bmatrix} = \frac{\partial x_3}{\partial u_2^T} \cdot u_2$$

$$\frac{\partial x_3}{\partial u_2^T} = \frac{\partial x_3}{\partial x_2^T} \frac{\partial x_2}{\partial u_2^T} = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_3}{\partial r_3^T} & \frac{\partial r_3}{\partial \alpha_3^T} & 0 \\ \frac{\partial \gamma_3}{\partial r_3^T} & \frac{\partial \gamma_3}{\partial \alpha_3^T} & 0 \\ \frac{\partial L_3}{\partial r_3^T} & \frac{\partial L_3}{\partial \alpha_3^T} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial r_2}{\partial \theta_2^T} & \frac{\partial r_2}{\partial \delta_2^T} \\ \frac{\partial \gamma_2}{\partial \theta_2^T} & \frac{\partial \gamma_2}{\partial \delta_2^T} \\ \frac{\partial L_2}{\partial \theta_2^T} & \frac{\partial L_2}{\partial \delta_2^T} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$u_2 = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \delta_2 \end{bmatrix}_{6 \times 1}, \theta_2 = \begin{bmatrix} \theta_{2x} \\ \theta_{2z} \end{bmatrix}, \delta_2 = \begin{bmatrix} \delta_{2x} \\ \delta_{2z} \end{bmatrix}$$

式中,  $x_3$  表示第 3 个单元出射光线的改变,  $u_2$  表示第 2 个单元自身的刚体位移,  $\theta_2$  和  $\delta_2$  分别表示第 2 个单元自身的刚体平移和刚体旋转,  $\theta_{2x}$ 、 $\theta_{2y}$  和  $\theta_{2z}$  分别表示单元 2 在全局坐标系下绕  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴旋转的弧度值.为了方便起见,总是将单元 2 的刚体扰动分解为绕其顶点的旋转和整体的平动.

此外,该数学模型采用偏心率 and 焦距来描述光学系统,与 ZEMAX 的描述方式有所不同.模型中用到的偏心率 and 焦距与 ZEMAX 中 conic 和  $R_v$  的关系为

$$\begin{cases} e = \sqrt{-k}, k \leq 0 \\ f = \frac{R_v}{1 + \sqrt{-k}} \end{cases}$$

式中,  $k$  为 conic 常数,  $R_v$  为曲面顶点处的曲率半径.

在实际对准时很难知道出射光线的理论值,因此采用人为施加定量失调量来求解次镜的位置.根据先验知识可知,像平面上光斑对次镜倾斜误差很敏感,加上望远镜焦距很长的因素,很小的倾斜失调量就会使光斑从视场中消失.因此,采用给予次镜定量平移误差  $\delta_x$ ,然后根据改变前后两幅图像上光斑的位置来计算出射光线的方向改变量,进而求解次镜的位置.由于只有单元 2 产生了  $\delta_{2x}$  的刚体位移,因此可以进一步化简式(1)为

$$d\gamma_3 = \begin{bmatrix} d\gamma_{3x} \\ d\gamma_{3y} \\ d\gamma_{3z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \gamma_3}{\partial r_3^T} & \frac{\partial \gamma_3}{\partial \alpha_3^T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial r_2}{\partial \delta_2^T} \\ \frac{\partial \gamma_2}{\partial \delta_2^T} \end{bmatrix} \delta_2 = C \cdot \delta_2 \quad (2)$$

式中,  $d\gamma_{3x}$  和  $d\gamma_{3y}$  可以根据光斑在像平面上的改变量及次镜距像平面的距离来求得,  $\delta_2$  人为给定的已知量.系数矩阵  $C$  是和光线在单元 2 上的入射位置有关的函数,除入射点向量  $p_{2n}$  外,其它均为已知量.为了便于分辨像平面上光斑的变化,将次镜到像平面的距离设为

2 210 mm.

结合以上分析,用相对测量法按照图 4 所示的算法来对准主次镜.首先,人为给定次镜一个已知的对准误差,然后,根据 CCD 上光斑的变化来计算每束光线的灵敏度系数矩阵  $C_n$ ,下标  $n$  表示光线的序号, $C_n$  是和次镜姿态有关的函数.接着,根据  $C_n$  和对准误差  $e_2$  的函数关系求出次镜的对准误差  $e_2$ .最后,根据计算结果调整次镜修正对准误差.

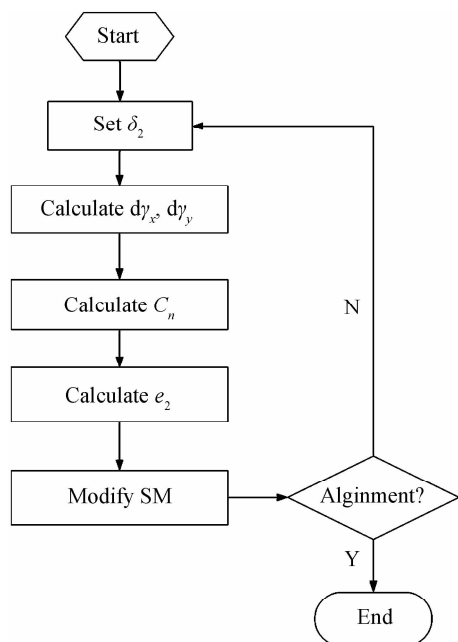


图 4 基于离散阵列光源的对准算法流程

Fig. 4 The chart of the alignment algorithm based on the discrete light source

### 3 仿真结果

按照图 3 左图在 ZEMAX 中建立仿真模型,用 MATLAB 软件编写对准算法,利用 DDE 实现两个软件的通信.将各单元的参数带入式(2)可以算得系数矩阵  $C$ .其中,  $R_2$  和  $R_3$  分别为次镜和 CCD 的反射光线的系数矩阵,  $L_3$  为次镜反射点到 CCD 的轴向距离,  $N_{e_1}$  为次镜反射点处的单位法向量,  $Pr_2$  为次镜反射点处沿原反射方向的投影系数矩阵.

$$C = [L_3 \cdot R_3 \quad R_3] \begin{bmatrix} \frac{\partial r_2}{\partial \delta_2^T} \\ Pr_2 \cdot \frac{i_2 N_{e_1}}{i_2 \cdot N_{e_1}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{\partial r_2}{\partial \delta_2^T} = -2 \text{sign}(i_2 \cdot N_{e_1}) \cdot$$

$$[(N_{e_1} \cdot i_2)I + N_{e_1} i_2] \left[ \frac{1}{|N_2|} I - \frac{N_{e_2}}{|N_2|^2} (\rho_2^T \cdot M_2^T + N_{02}^T) \right] \cdot \left( I - \frac{i_2 N_{e_1}}{i_2 \cdot N_{e_1}} \right) \quad (4)$$

$$N_2 = N_{02} + M_2 \cdot \rho_2 \quad (5)$$

$$N_{e_1} = \frac{N_2}{|N_2|} \quad (6)$$

$$R_2 = I - 2N_{e_1} N_{e_1} \quad (7)$$

$$Pr_2 = r_2 r_2 = (R_2 \cdot i_2)(R_2 \cdot i_2) \quad (8)$$

按照图 4 的算法进行仿真实验,其结果如表 2 所示.  $edx, edy, dtx, ety$  分别为次镜顶点沿  $x$  轴的平动偏离误差、顶点沿  $x$  轴的平动偏离误差、次镜以顶点为旋转中心绕  $x$  轴的倾斜误差、次镜以顶点为旋转中心绕  $y$  轴的倾斜误差.

表 2 RC 望远镜主次镜仿真对准结果

	$edx$	$edy$	$etx$	$ety$
Initial	1 mm	1 mm	0.5°	0.5°
Results	-36.4 μm	-36.8 μm	-49.15"	-49.18"

给主次镜均施加 RMS 为  $0.02\lambda$  的随机面形误差, (300 mm, 0 mm) 处的线光源在 CCD 上的光斑位置如图 5.

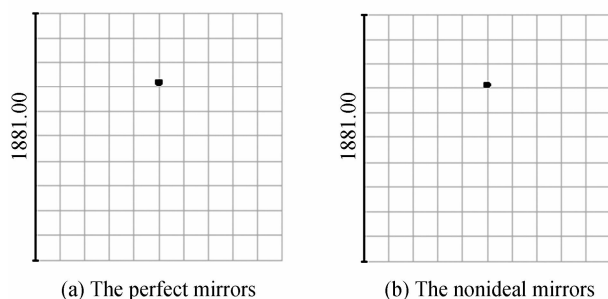


图 5 面形误差对光斑位置的影响

Fig. 5 The different of the facular position on the image plane, when Primary and Secondary mirrors exist figure errors

经计算,有面形误差时的光斑质心与理想状态时的偏差为  $(-2.883 25 \mu\text{m}, 1.075 15 \mu\text{m})$ . 常见 CCD 像元的尺寸为  $6 \sim 12 \mu\text{m}$ , 小于半个像元,在探测时可以忽略.次镜到像平面的距离为 2 210mm,该偏差引起的倾角误差为  $-1.304 64 \mu\text{rad}$  和  $0.486 49 \mu\text{rad}$ ,仿真表面该量级的倾角误差引起的出瞳波像差的改变小于  $0.01\lambda$ . 可见,具有一定直径尺寸的线光源对主次镜的面形误差并不敏感.

由于只需要追踪 8 个特定的光斑,所以图像处理量很小.虽然推导过程复杂,但是实际的计算量比波前复原算法及星点分割处理算法要小很多.

### 4 结论

本文提出了离散阵列光源的实现方案,并给出了离散阵列光源的检测标定方法.然后,以离散阵列光源为基础,建立了一个 RC 望远镜的对准检测光路.采用 David C. Redding 和 William G. Breckenridget 的用于动态和控制分析的光学模型来描述线光源的传播过程.通过对数学模型的简化推导出了以主动对次镜施加平移扰动来求解次镜对准误差的公式.同时给出了

conic 常数、曲面顶点曲率半径和曲面偏心率、曲面焦距的关系. 该对准方法适用于大口径天文望远镜的对准, 对准准确度受限于光斑位置对于扰动的灵敏度.

仿真结果表明该对准方法具有较高的对准准确度, 但是对于 0.01 mm 以下的平移扰动和  $0.01^\circ$  以下的倾斜扰动不敏感. 线光源对于主次镜的面形误差不敏感. 求解过程计算量比基于波前或图像分割的算法小.

本文初步对基于离散阵列光源的对准方法进行了研究, 今后还需要研究阵列光源不同分布方式的影响、线光源像质的影响、空气扰动的影响及较大对准误差情况下的数学模型等.

#### 参考文献

- [1] SEONGHUI K, HO-SOON Y, YUN-WOO L, *et al.* Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(8): 5059-5068.
- [2] EUN-SONG O, SEONGHUI K, YUNJONG K, *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] GAO Zhi-shan, CHEN Lei, ZHOU Song-zuan, *et al.* Computer aided alignment for a reference transmission sphere of an interferometer [J]. *Optical Engineering*, 2004, **43**(1): 69-74.
- [4] HANSHIN L, GAVIN B D, IAN A J T, *et al.* Computer-guided alignment I: Phase and amplitude modulation of alignment influenced optical wavefront[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(6): 3127-3139.
- [5] HANSHIN L, GAVIN B D, IAN A J T, *et al.* Computer-guided alignment II: Optical system alignment using differential wavefront sampling[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(23): 15424-15437.
- [6] HAN Xing-zi, YU Xin, DONG Bing. Use the stochastic parallel gradient descent control algorithm to calibrate the Second Mirror in Three-Mirror System [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 107-112.  
韩杏子, 俞信, 董冰. 随机并行梯度下降算法用于次镜校准的仿真研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(4): 107-112.
- [7] HAN Xing-zi, HU Xin-qi, YU Xin. Precisely integrated wavefront sensorless calibration of high-resolution space optical system with large position errors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 271-276.  
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): 271-276.
- [8] FANG Heng-chu. 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.
- [9] 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**(755): 104-110.
- [10] SUN Jing-wei, CHEN Tao, WANG Jian-li, *et al.* RC telescope alignment based on out-of-focus stellar image [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(4): 728-736.  
孙敬伟, 陈涛, 王建立, 等. 基于离焦星点图的 RC 式望远镜装调技术[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(4): 728-736.
- [11] CHE Chi-cheng, LI Ying-cai, FAN Xue-wu, *et al.* Research on computer aided alignment based on vector aberration theory[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(8): 1630-1634.  
车驰骋, 李英才, 樊学武, 等. 基于矢量波像差理论的计算机辅助装调技术研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(8): 1630-1634.
- [12] WANG Fu-guo, WANG Zhi, MING Ming, *et al.* Optomechanical structure design, alignment and test of prime focus optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 21-25.  
王富国, 王志, 明名, 等. 主焦点式光学系统的光机结构与装调检测[J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 21-25.
- [13] DUAN Xue-ting, ZHOU Ren-kui, CHEN Jian-jun, *et al.* Alignment analysis of large aperture rc system based on wavefront aberration test[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 36-41.  
段学霆, 周仁魁, 陈建军, 等. 基于波像差检测的大口径 RC 光学系统装调分析[J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 36-41.
- [14] DAVID C R, WILLIAM G B. Optical modeling for dynamics and control analysis [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1991, **14**(5): 1021-1032.
- [15] JET PROPULSION LABORATORY. Modeling and Analysis for Controlled Optical Systems User's Manual [M]. Jet Propulsion Laboratory, 1997.
- [16] SHI Jian-liang. Integrated modeling and simulation technology for opto-electrical tracking system [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.  
史建亮. 光电跟踪系统集成建模与仿真技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.