

基于成像清晰度函数的非球面反射镜位置校正实验研究

周龙峰 张昂 张俊波 樊新龙 魏凌 陈善球 鲜浩

Experimental research of alignment error correction by aspheric mirror based on the function of imaging quality

Zhou Long-Feng Zhang Ang Zhang Jun-Bo Fan Xin-Long Wei Ling Chen Shan-Qiu Xian Hao

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 139501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.139501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.139501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I13>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种自适应光学系统响应矩阵的直接计算方法

[Direct computation of the interaction matrix of adaptive optical system](#)

物理学报.2014, 63(14): 149501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.149501>

自适应光学系统倾斜校正回路的最优闭环带宽

[Optimal closed-loop bandwidth of tip-tilt correction loop in adaptive optics system](#)

物理学报.2014, 63(6): 069502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.069502>

大气湍流三维波前探测模式层析算法分析

[Analysis of modal tomography for three-dimensional wavefront sensing of atmosphere turbulence](#)

物理学报.2013, 62(16): 169501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.169501>

快速响应的硅基纯相位液晶器件对动态大气湍流波前的校正能力研究

[Dynamic wavefront correction with a fast liquid-crystal on silicon device of pure phase](#)

物理学报.2012, 61(8): 089501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.089501>

相位差波前检测方法应用于平移误差检测的实验研究

[Experimental study on phase diversity wavefront sensing technology in piston error detection](#)

物理学报.2012, 61(6): 069501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.069501>

# 基于成像清晰度函数的非球面反射镜位置校正实验研究\*

周龙峰<sup>1)2)3)</sup> 张昂<sup>1)2)</sup> 张俊波<sup>1)2)</sup> 樊新龙<sup>1)2)</sup> 魏凌<sup>1)2)</sup>  
陈善球<sup>1)2)</sup> 鲜浩<sup>1)2)†</sup>

1)(中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

2)(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

3)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2016年3月31日收到; 2016年4月11日收到修改稿)

在具有双曲面、抛物面或椭圆面反射镜的成像光学系统中, 反射镜的位置误差通常具有对成像质量影响灵敏的特点. 因此, 在该类光学系统装调或工作过程中反射镜位置存在误差时需要对该反射镜进行精确调整. 目前, 反射镜位置校正的方法多基于对系统波前误差的测量, 从而判断其位置误差. 然而在系统工作过程中可能无法进行光学系统的波前测量, 或者需要复杂的光学系统才能实现波前误差的测量. 本文以焦平面图像清晰度作为评价函数, 采用随机并行梯度下降算法对反射镜位置进行调整, 使系统成像质量达到最佳. 针对迭代过程中反射镜位置发生变化时图像偏离探测器靶面而无法探测的问题, 本文采用了一种反射镜垂直光轴平移和旋转相结合的调整方法. 在保证图像位置不变化的条件下对系统像差进行校正. 室内实验验证了该方法具有可行性, 校正后的成像质量达到衍射极限.

**关键词:** 反射镜, 位置误差, 成像清晰度, 迭代

**PACS:** 95.75.Qr, 95.55.Cs, 42.30.-d

**DOI:** 10.7498/aps.65.139501

## 1 引言

在具有双曲面、抛物面或椭圆面反射镜的成像光学系统中, 反射镜的位置误差通常具有对成像质量影响灵敏的特点. 因此, 在该类光学系统装调或工作过程中反射镜位置存在误差时需要对该反射镜进行精确调整. 例如, 对于大型天文望远镜, 其光学系统中包含非球面反射次镜, 通常以主镜为基准调整次镜位置, 使整个光学系统处于最佳成像质量.

目前有多种针对镜面位置误差校正的方法<sup>[1-5]</sup>. 车驰骋等<sup>[1]</sup>和史广维等<sup>[6]</sup>利用矢量波像差理论, 建立了镜面位置失调量和波前误差 Zernike 像差系数的矩阵关系, 通过对像差系数的

测量计算镜面位置误差来实现系统误差的校正. 该方法需要获得系统误差的波前信息, 可以使用夏克哈特曼波前探测器、曲率传感器等直接测量波前信息, 也可利用图像信息进行波前复原. 但是, 在实际系统中可能无法进行波前探测或者实现起来很复杂, 并且系统失调量与波前误差 Zernike 像差系数的矩阵关系只有在误差较小的情况下近似满足, 因此限制了其校正范围. 为了增大校正范围, 使校正过程不受前面提到的矩阵关系的限制, Kim 等<sup>[7]</sup>利用优化函数衰减法 (merit function regression method) 对某一特定光学系统进行了校正. 该算法将实测的波前误差 Zernike 像差系数与其光学系统设计状态的 Zernike 像差系数进行对比, 通过一定的算法寻找两者最接近时的系统状态, 该

\* 中国科学院空间科学战略性先导科技专项 (批准号: XDA04060902) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xianhao@ioe.ac.cn

状态即为系统的失调状态. 除此之外, 基于 Zernike 像差系数的方法还包括 Luna<sup>[8]</sup> 提出的利用离焦星点图对位置误差进行校正, 即通过光斑形态特征计算像差系数, 并与失调量之间建立关系求解失调量, 国内孙敬伟等<sup>[9]</sup> 也对该方法进行了仿真分析和实验研究. 该方法需要对成像光斑的特征信息进行精确测量, 其特征测量过程较为复杂且受成像质量的影响较大. 与此同时, 该类方法主要适用于 RC(Ritchey-Chretien) 望远镜系统, 因此限制了其应用范围.

光学系统中反射镜位置产生误差时其波像差会变大, 直接导致系统成像质量的下降, 其表现形式是星像点模糊. 本文直接以光学系统成像光斑的清晰度函数作为评价指标, 利用随机并行梯度下降优化算法以迭代收敛的方式对非球面反射镜位置进行调整, 使成像质量达到最佳. 该方法直接利用系统的成像相机, 无需对光学系统的波前误差进行测量, 简化了系统结构, 具有工程实际意义<sup>[10]</sup>. 为了保证迭代校正过程中光斑不偏离探测器靶面, 本文采用了一种反射镜垂直光轴平移和旋转相结合的方法, 通过实验验证了该方法的可行性.

## 2 理论基础

在具有反射镜的光学系统中, 若以反射镜反射面中心顶点为坐标系原点, 沿光轴方向定义  $z$  方向, 垂直光轴沿  $x, y$  方向建立直角坐标系, 则反射镜的自由度包括沿  $x, y, z$  轴方向的平移  $d_x, d_y, d_z$  以及绕  $x, y, z$  轴的旋转  $t_x, t_y, t_z$  共六个, 部分变量如图 1.

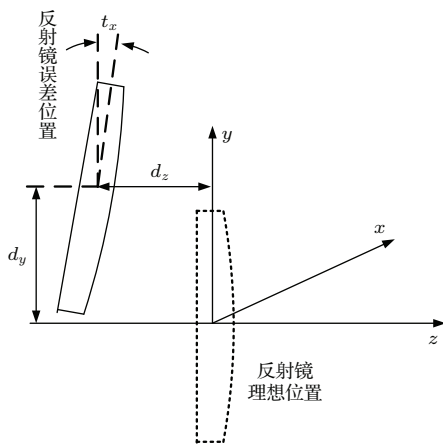


图1 反射镜位置误差示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the reflecting mirror's alignment error.

对于绕  $z$  轴旋转对称的非球面可以忽略  $t_z$  的影响, 因此, 在反射镜位置误差分析中只需考虑其他五个自由度.

### 2.1 反射镜位置误差对成像质量的影响

当反射镜位置偏离理论位置时, 沿  $x, y$  轴的平移  $d_x, d_y$  或旋转  $t_x, t_y$  时轴上视场主要产生彗差; 沿  $z$  轴方向平移  $d_z$  则产生离焦和球差, 离焦和球差在成像方面均表现为中心对称. 在此, 主要针对彗差进行分析说明. 通常用子午彗差 coma 表示其大小,  $H_0$  为轴上视场主光线的位置, 如图 2 所示.

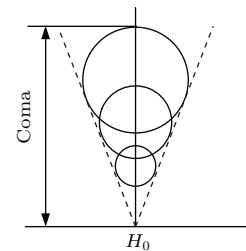


图2 彗差光斑示意图

Fig. 2. Schematic diagram of the spot including coma.

根据共轴光学系统的矢量波像差理论, 当反射镜处于理想位置时, 系统的波前彗差满足如下公式:

$$W_{coma} = \left( \sum_j W_{131j} \mathbf{H} \cdot \boldsymbol{\rho} \right) (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}), \quad (1)$$

其中  $j$  是光学系统中光学元件的表面数,  $W_{131j}$  和  $W_{222j}$  分别为第  $j$  面系统波像差的三阶彗差系数,  $\mathbf{H}$  为归一化视场向量,  $\boldsymbol{\rho}$  为归一化光瞳向量. 若系统处于理想状态时无彗差, 则彗差系数  $\sum_j W_{131j} = 0$ .

第  $j$  面的平移  $d$  或旋转  $t$  会使该面的像差对称中心产生  $\sigma_j$  的偏移, 从而使彗差公式更改为如下形式:

$$W'_{coma} = \left[ \left( \sum_j W_{131j} \mathbf{H} - \sum_j W_{131j} \boldsymbol{\sigma}_j \right) \cdot \boldsymbol{\rho} \right] \times (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}). \quad (2)$$

对于轴上视场, 归一化视场向量  $\mathbf{H} = 0$ , 则轴上视场产生常数项彗差  $-\left( \sum_j W_{131j} \boldsymbol{\sigma}_j \cdot \boldsymbol{\rho} \right) (\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho})$ . 其中像差对称中心产生的偏移量  $\boldsymbol{\sigma}_j$  与垂直光轴的平移  $d$  及旋转  $t$  相关, 两者均能使系统产生彗差. 因

此,当反射镜存在垂直光轴的误差时,通过平移  $d$  或旋转  $t$  均能使彗差得到校正.

### 2.2 反射镜位置误差对成像位置的影响

当反射镜沿  $z$  方向平移时,只会导致成像模糊而对成像位置没有影响,因此不考虑该情况下光斑的位置变化;当反射镜沿  $x, y$  方向平移和旋转时,轴上视场光斑不仅会产生彗差,而且光斑的位置会产生偏移.根据理论分析可知,光斑的偏移量  $\Delta\eta_d$  与平移  $d$  满足如下线性关系<sup>[11]</sup>:

$$\Delta\eta_d = (2L/R) \cdot d, \quad (3)$$

其中  $L$  为反射镜与像面的距离,  $R$  为反射镜的曲率半径.反射镜产生偏移  $d$  如图 3 所示.

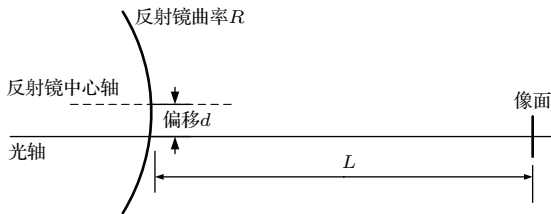


图 3 反射镜垂直光轴产生偏移  $d$

Fig. 3. De-center error  $d$  of reflecting mirror perpendicular to the optical axis.

同理,当反射镜存在旋转时光斑的偏移量  $\Delta\eta_t$  与旋转  $t$  满足如下线性关系<sup>[11]</sup>,其中  $t$  的单位为弧度(rad):

$$\Delta\eta_t = 2L \cdot t. \quad (4)$$

反射镜产生旋转  $t$  时如图 4 所示.

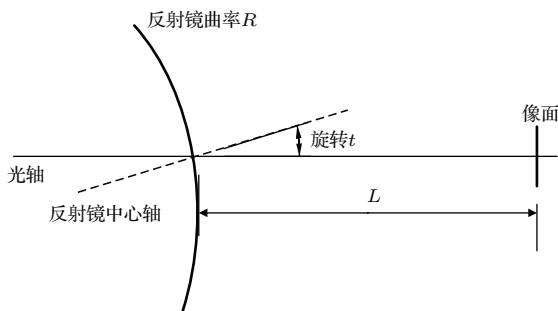


图 4 反射镜沿中心顶点产生旋转  $t$

Fig. 4. Tilt error  $t$  of reflecting mirror around the vertex center.

如果将光学系统成像光斑的清晰度函数作为反射镜位置校正的判断依据,利用优化算法对反射镜施加多维扰动变量时,根据上述光斑偏移量的公

式分析可知,在  $x, y$  方向施加的扰动可能会使光斑脱离成像探测器靶面,进而无法正确地获取光斑清晰度函数,导致迭代收敛出现错误.因此,为了使光斑位置不发生变化而使系统像差得到校正,考虑将  $x, y$  方向的平移  $d$  和旋转  $t$  按一定比例进行结合,使光斑位置始终保持不变.根据 (3), (4) 式所给出的线性关系,当  $d$  和  $t$  使光斑所产生的位移量大小相等,方向相反即  $\Delta\eta_d = -\Delta\eta_t$  时,可保证光斑位置不发生变化.此时根据 (3),(4) 式可得如下关系:

$$d = -R \cdot t. \quad (5)$$

由 (5) 式可得:当反射镜绕其曲率中心旋转时,可以保证光斑位置不发生变化.

综合分析可得:在实际的光学系统中,为了对由于反射镜位置误差所产生的离焦、球差、彗差等系统像差进行校正,需要对反射镜位置进行调整.若随意采用垂直光轴的平移  $d$  或旋转  $t$  对彗差进行校正,则可能导致光斑位置发生变化甚至脱离探测器靶面而无法探测.因此,根据 (5) 式时两者按一定的比例结合,从而实现光斑位置不发生变化下的像差校正.

### 2.3 成像光斑清晰度评价函数

目前,基于点目标成像的优化性能指标包括远场峰值、环围能量、光斑半径等<sup>[12]</sup>,其中平均半径由于具有适用范围大、动态特性好的特点而得到广泛的应用.当光斑质量逐渐提高时,光斑半径逐渐减小,并最终达到最小值.本文以光斑半径  $R$  作为清晰度评价函数,其定义如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sqrt{(x_i - x')^2 + (y_j - y')^2} I_{i,j}}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p I_{i,j}}, \quad (6)$$

其中  $I_{i,j}$  为探测器靶面第  $(i, j)$  个像素点灰度值,  $p, q$  分别为靶面  $x, y$  方向的像素数.假设靶面为正方形,即  $p = q$ ,行、列方向像素个数均为  $p$ .定义正方形靶面边长为  $p$ ,以靶面中心沿边长方向建立直角坐标系,则可定义第  $(i, j)$  个像素点的坐标值  $(x_i, y_j)$ ,从而可以计算出该定义下 (6) 式中光斑半径大小.  $x', y'$  为光斑质心坐标,满足 (7) 式:

$$x' = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q x_i I_{i,j}}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q I_{i,j}}, \quad y' = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q y_i I_{i,j}}{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q I_{i,j}}. \quad (7)$$

### 2.4 基于优化算法的校正过程

校正过程所采用的迭代算法为随机并行梯度下降算法 (SPGD) [13], 其校正流程如图 5 所示. 根据该算法的理论, 假设第  $k$  次迭代时反射镜五个自由度位置状态为  $U^k = \{u_{d_x}^k, u_{d_y}^k, u_{d_z}^k, u_{t_x}^k, u_{t_y}^k\}$ , 此时将反射镜五个自由度的变量  $\delta u_{d_x}, \delta u_{d_y}, \delta u_{d_z}, \delta u_{t_x}, \delta u_{t_y}$  作为优化算法的扰动变量进行迭代, 其中  $\delta u_{d_x}$  和  $\delta u_{t_y}, \delta u_{d_y}$  和  $\delta u_{t_x}$  均满足 (5) 式. 以 (6) 式中光斑的半径作为校正效果的评价指标, 则第  $k$  次迭代过程包括三个步骤: 1) 对控制参量分别施加正扰动  $\{+\delta u_{d_x}, +\delta u_{d_y}, \dots, +\delta u_{t_y}\}$ , 计算轴上视场光斑的半径  $R$ , 记为  $J_+$ ; 2) 对控制参量施加负扰动  $\{-\delta u_{d_x}, -\delta u_{d_y}, \dots, -\delta u_{t_y}\}$ , 计算轴上视场光斑的

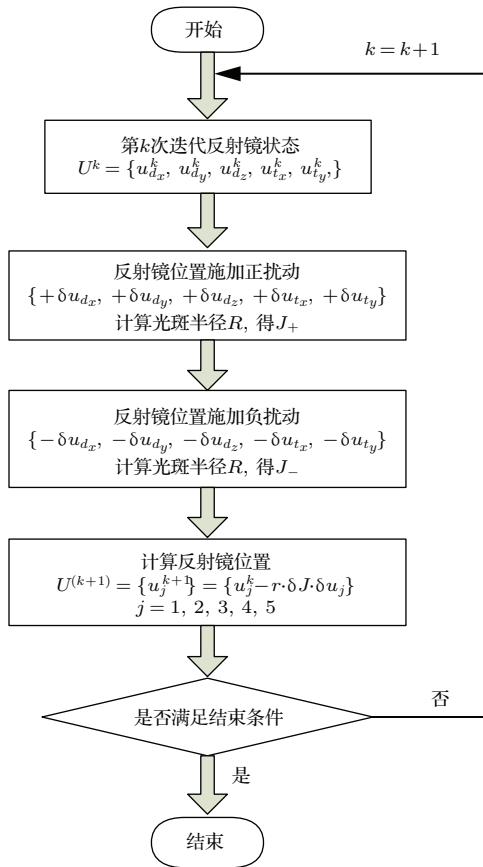


图 5 基于 SPGD 算法的反射镜位置校正流程  
Fig. 5. Flow path of the alignment error correction based on the SPGD algorithm for reflecting mirror.

半径  $R$ , 记为  $J_-$ . 其中  $\{+\delta u_{d_x}, +\delta u_{d_y}, \dots, +\delta u_{t_y}\}$  和  $\{-\delta u_{d_x}, -\delta u_{d_y}, \dots, -\delta u_{t_y}\}$  中变量  $\delta u$  的正负满足伯努利分布; 3) 若定义  $\delta J = J_+ - J_-$ , 则第  $k$  次迭代后反射镜位置变量  $U^{k+1}$  与上一次  $U^k$  满足 (8) 式. 其中  $u_j^k$  表示第  $k$  次迭代前第  $j$  ( $j = 1, 2, 3, 4, 5$ ) 个自由度参量的值,  $r$  为固定增益系数. 由于优化过程中半径  $R$  逐渐减小, 因此  $r$  为正,  $\delta u_j$  为第  $j$  个自由度的扰动量. 完成上述三个步骤即认为实现第  $k$  次迭代. 通过多次迭代, 光斑半径  $R$  将收敛到极值.

$$U^{(k+1)} = \{u_j^{k+1}\} = \{u_j^k - r \cdot \delta J \cdot \delta u_j\} \quad (j = 1, 2, 3, 4, 5). \quad (8)$$

### 3 实验研究

为了对理论分析进行验证, 我们搭建了室内实验系统. 该实验系统光路及控制流程如图 6 所示.

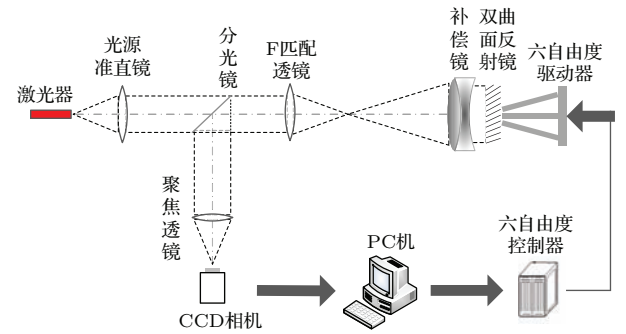


图 6 实验光路及其控制流程图  
Fig. 6. Flow path of the experiment's light and control process.

实验系统中的非球面反射镜参数如表 1 所列, 该镜面为双曲面.

表 1 反射镜结构参数  
Table 1. The parameters of the reflecting mirror.

镜面	Semi-diameter/mm	$R$ /mm	conic
反射镜	142.9	-938	-1.688

实验系统主要由目标光源、分光镜、 $F$  数匹配透镜、补偿镜、双曲面反射镜及其六维位置控制机构、成像系统及计算机组成. 目标光源由 He-Ne 激光器光束通过针孔出射形成点光源, 经焦距为 200 mm 的准直透镜后形成口径 14.4 mm 的平行光. 平行光经过分光镜、焦距  $f = 185.5$  mm 的  $F$  数匹配透镜后聚焦并发散. 当发散光经过补偿透镜后

第一次达到双曲面反射镜反射面, 光线经过反射镜反射后返回补偿镜后表面. 由于补偿镜后表面镀有反射率为 33.3% 的增反膜, 因此一部分光线通过补偿镜后表面透射发散而无法获取, 另一部分经过后表面反射后第二次到达反射镜表面. 最终, 经过反射镜两次反射的光线经补偿镜透射后聚焦沿原路返回  $F$  数匹配透镜后再次变为平行光. 该平行光经过分光镜反射后沿垂直原光路方向出射并最终经焦距  $f = 400 \text{ mm}$  的透镜在 CCD 靶面成像. 当双曲面反射镜位置存在误差时, CCD 靶面成像光斑会变模糊, 此时需要对双曲面反射镜所在的六自由度调整机构进行调整.

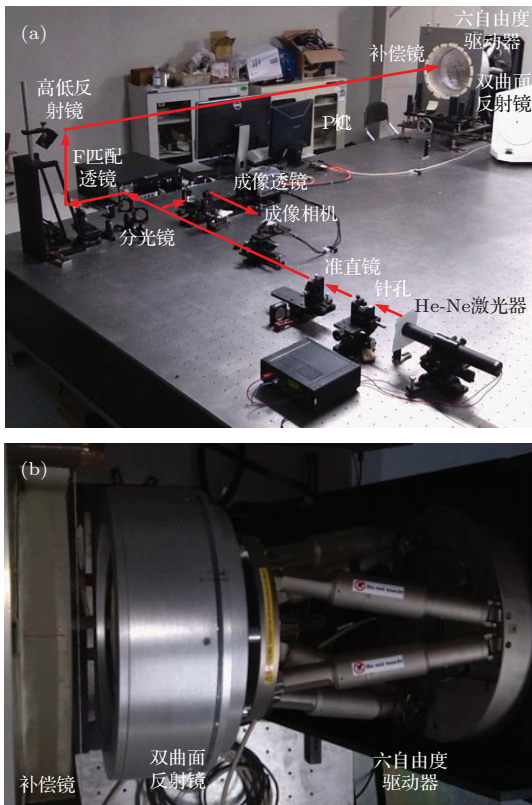


图 7 (网刊彩色) 实验设备 (a) 实验光路; (b) 补偿镜、反射镜及六自由度驱动器  
 Fig. 7. (color online) The experiment equipments including: (a) The experiment light path; (b) compensating mirror, reflecting mirror and the actuator in 6 degrees.

通过计算机可以对 CCD 相机数据进行采集, 通过 PI 公司的 hexapod850 六自由度控制器对双曲面反射镜位置进行调整. 实验光路及部分设备如图 7 所示, hexapod850 六自由度调整机构主要参数如表 2 所列. 成像 CCD 采用 Baumer 相机, 其像素尺寸为  $3.75 \mu\text{m}$ , 读取位数为 8 位, 靶面尺寸为  $1296 \times 966$ . 由于成像镜头  $F$  数为 27.78, 一级暗环

直径为  $42.75 \mu\text{m}$ , 约 11.4 像素.

若实验中仅仅采用  $d_x, d_y, d_z$  对系统像差进行校正, 则在校正过程中, 光斑位置不可避免地产生位移. 实验中任意给定误差量时初始状态成像如图 8(a) 所示, 其中包含图 8(a) 中光斑部分的局部放大, 像素数为  $200 \text{ pixels} \times 200 \text{ pixels}$ , 光斑峰值强度为 36 ADU. 校正过程中光斑质量逐渐提升, 但光斑逐渐偏离到探测器靶面边缘, 如图 8(b) 所示, 图中也对光斑位置进行了局部放大. 此时光斑峰值强度提升到 73 ADU, 但光斑仍明显存在像差, 如继续迭代校正, 则光斑会偏离探测器靶面而无法探测, 使校正中出现错误.

表 2 hexapod850 六自由度调整参数  
 Table 2. The parameters of hexapod 850.

自由度	$d_x/d_y$	$d_z$	$t_x/t_y$	$t_z$
运动范围	$\pm 50 \text{ mm}$	$\pm 25 \text{ mm}$	$\pm 15^\circ$	$\pm 30^\circ$
最小步长	$1 \mu\text{m}$	$0.5 \mu\text{m}$	$5 \mu\text{rad}$	
最大速度		$0.5 \text{ mm/s}$		$6 \text{ mrad/s}$

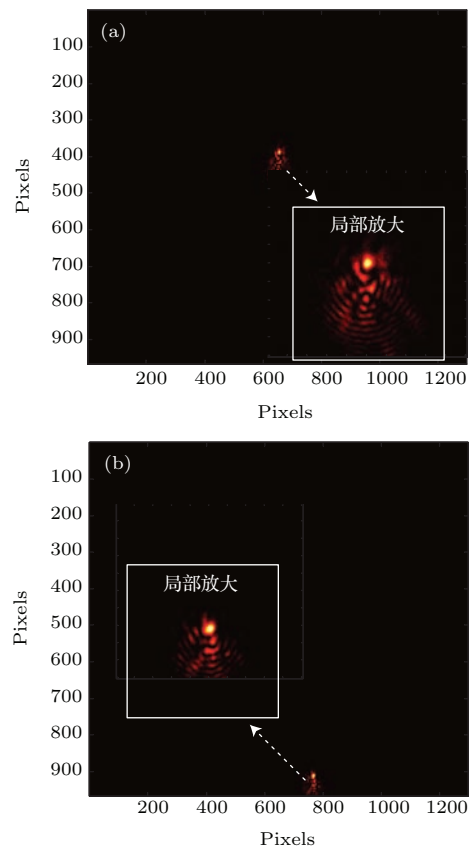


图 8 (网刊彩色) 采用  $d_x, d_y, d_z$  进行校正时校正前和校正中的成像光斑图 (a) 校正前; (b) 校正中  
 Fig. 8. (color online) The spot diagrams before and during the alignment error correction based on  $d_x, d_y, d_z$ : (a) Before correction; (b) during correction.

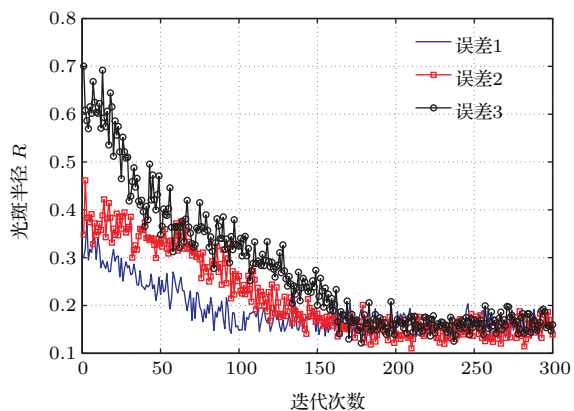


图9 (网刊彩色) 双曲面反射镜处于三种状态时光斑半径  $R$  随迭代收敛曲线 (半径分别由 0.32, 0.35, 0.70 收敛到约 0.14)

Fig. 9. (color online) The convergence curves of the spot diagrams' radius  $R$  by iteration in 3 different hyperbolic reflecting mirror positions (the radius converged from 0.32, 0.35, 0.70 to almost 0.14 respectively).

因此, 为了保证迭代校正过程中光斑位置不变, 需要根据 (5) 式及表 1 的参数计算出扰动变量  $\delta u_{d_x}, \delta u_{d_y}, \delta u_{t_x}, \delta u_{t_y}$  应满足 (9) 式的线性关系. 其中  $\delta u_{d_x}, \delta u_{d_y}$  单位为毫米 (mm),  $\delta u_{t_x}, \delta u_{t_y}$  单位转换为度 ( $^\circ$ ).

$$\delta u_{d_x} = 16.37\delta u_{t_y}, \quad \delta u_{d_y} = -16.37\delta u_{t_x}. \quad (9)$$

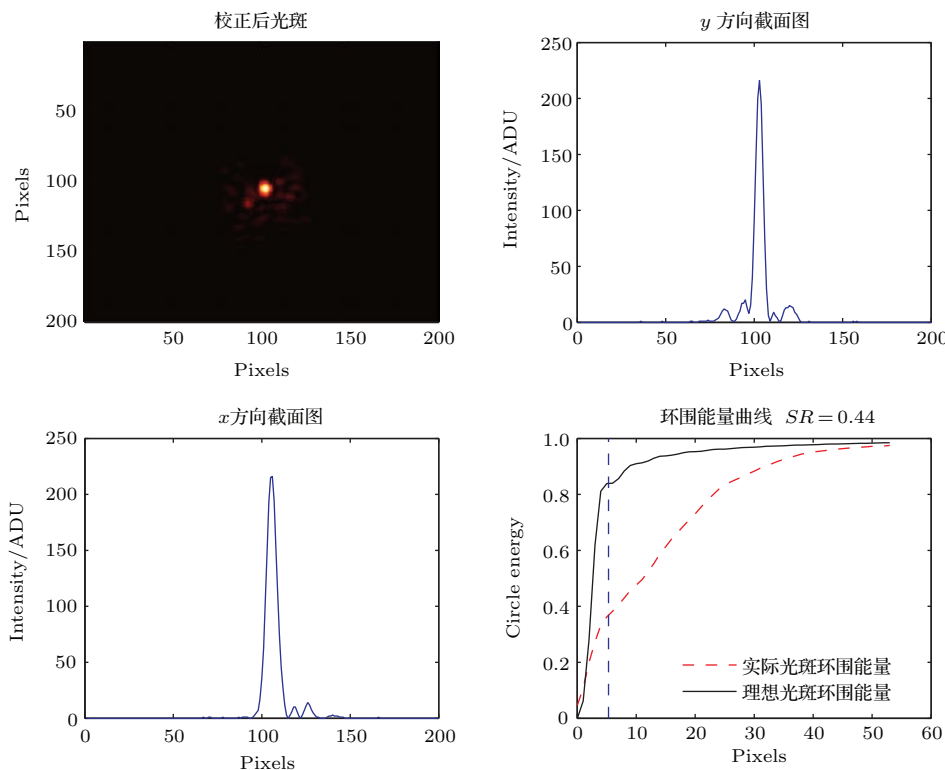


图 11 (网刊彩色) 误差 1 时校正后光斑、能量截面曲线及环围能量斯特列尔比计算  $SR = 0.44$

Fig. 11. (color online) The spot diagram after correction, section curves of energy and encircle energy strehl ratio  $SR = 0.44$ .

根据系统的特点, 给出实验中各自由度扰动参量及增益系数  $r$  分别如表 3 所列, 参量正负两两满足 (9) 式.

实验中, 首先通过人为调节的方式, 使轴上视场光斑位于 CCD 相机靶面中心并且光斑清晰度处于最佳状态. 在此状态基础上, 随机给出双曲面反射镜五自由度的误差量, 为了使光斑仍位于 CCD 相机靶面中心,  $x, y$  方向的误差量两两满足 (9) 式, 给出其中三组双曲面反射镜误差位置如表 4 所列.

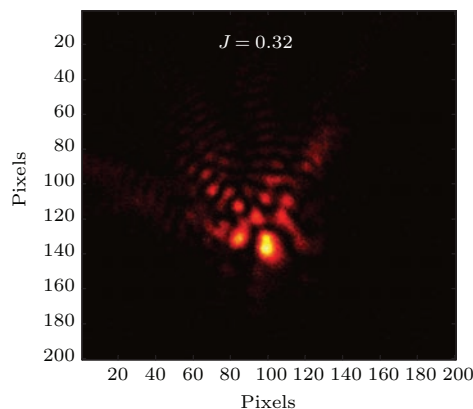


图 10 (网刊彩色) 误差 1 时校正前光斑

Fig. 10. (color online) The spot diagram for the alignment error 1.

表3 各自由度扰动变量及增益系数  $r$   
Table 3. The parameters of disturbance in different degrees and gaining coefficient  $r$ .

扰动变量	$\delta u_{d_x}$	$\delta u_{d_y}$	$\delta u_{d_z}$	$\delta u_{t_x}$	$\delta u_{t_y}$
大小	0.164 mm	0.005 mm	0.01°		
增益系数 $r = 1$					

表4 三组双曲面反射镜各自由度误差位置  
Table 4. Three different alignment errors of the hyperbolic reflecting mirror.

各自由度	误差1	误差2	误差3
$u_{d_x}$	-0.492 mm	0.164 mm	0 mm
$u_{d_y}$	0.164 mm	-0.164 mm	0 mm
$u_{d_z}$	0.02 mm	-0.03 mm	0.04 mm
$u_{t_x}$	-0.01°	0.01°	0°
$u_{t_y}$	-0.03°	0.01°	0°

校正中根据(7)式计算出靶面光斑质心, 并以此质心为中心选取  $200 \text{ pixels} \times 200 \text{ pixels}$  作为计算光斑半径  $R$  ((6)式)的靶面区域. 经过300次迭代, 三种状态下  $R$  均得到收敛, 收敛曲线如图9所示. 误差1, 2, 3时光斑半径分别由0.32, 0.35, 0.70收敛到约0.14并持续稳定.

误差1时校正前光斑如图10所示, 光斑半径

$J = 0.32$ , 峰值强度为26 ADU, 主要影响为彗差和离焦.

误差1时校正后光斑及其截面光强曲线如图11所示, 光斑半径减小到0.32, 峰值强度提高到216 ADU. 将所得光斑计算环围能量随光斑半径变化曲线(右下图红色)并与理想情况的环围能量随光斑半径变化曲线(右下图黑色)进行对比, 取一级暗环内的能量进行比较, 可得环围能量斯特列尔比约为0.44, 光斑质量得到明显提升.

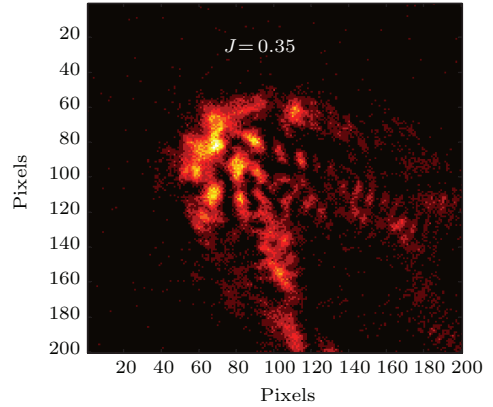


图12 (网刊彩色) 误差2时校正前光斑  
Fig. 12. (color online) The spot diagram for the alignment error 2

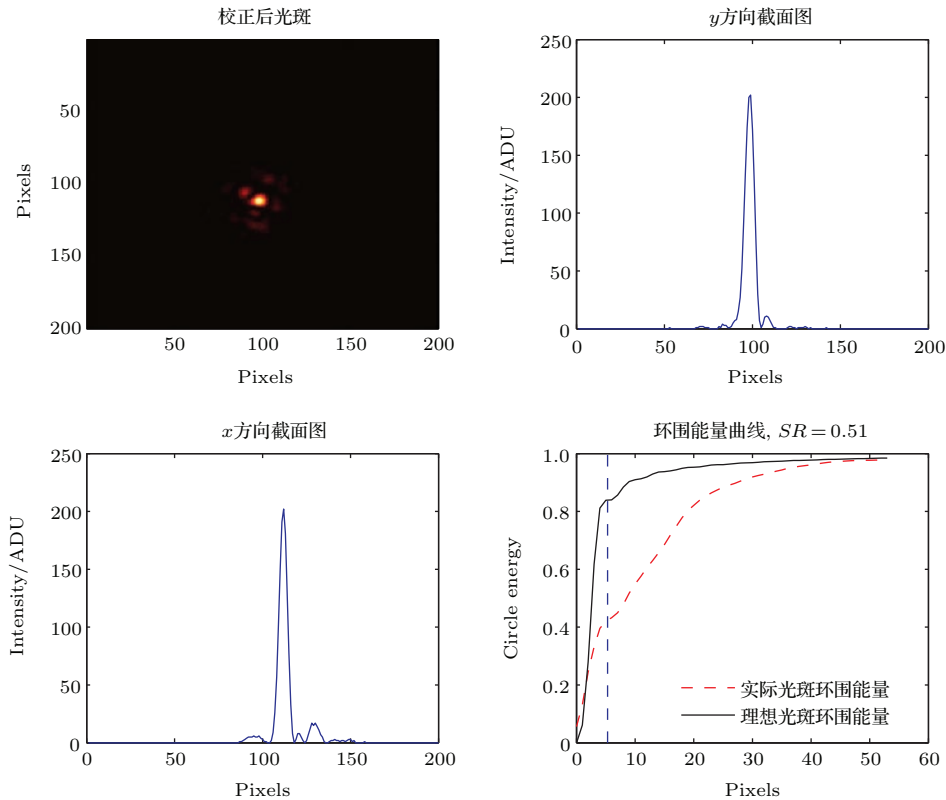


图13 (网刊彩色) 误差2时校正后光斑、能量截面曲线及环围能量斯特列尔比计算  $SR = 0.51$   
Fig. 13. (color online) The spot diagram after correction, section curves of energy and encircle energy strehly ratio  $SR = 0.51$ .



同理可得误差2时校正前光斑如图12所示, 光斑半径为0.35, 其峰值强度为8 ADU, 主要影响同样为彗差和离焦, 与误差1相比较而言离焦的影响增大. 同时, 彗差的方向误差1相反.

误差2时校正后光斑及其截面光强曲线如图13所示, 校正后光斑峰值强度提高到202 ADU, 环围能量斯特列尔比为0.51.

最后对系统只存在 $z$ 方向的误差时的校正进行分析, 此时系统像差为离焦, 初始光斑半径为0.7, 其峰值强度为5 ADU, 如图14所示.

误差3时校正后光斑及其截面光强曲线如图15所示, 校正后光斑峰值强度提高到220 ADU, 环围能量斯特列尔比为0.51.

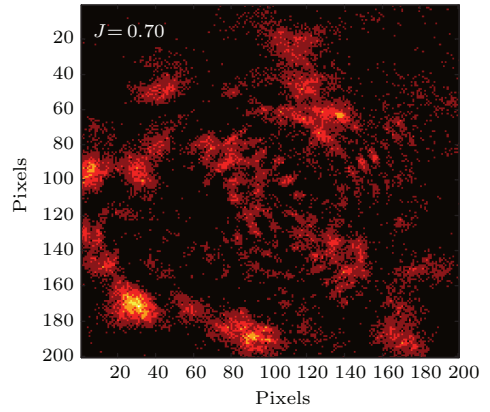


图14 (网刊彩色) 误差3时校正前光斑  
Fig. 14. (color online) The spot diagram for the alignment error 2.

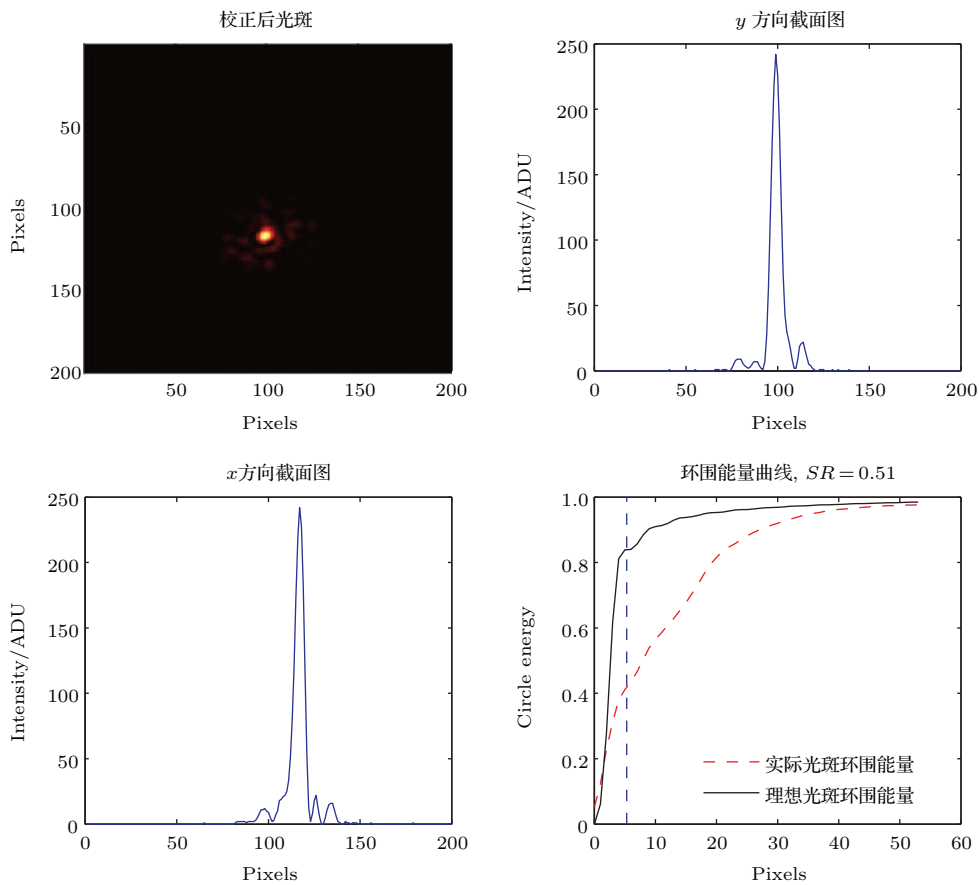


图15 (网刊彩色) 误差3时校正后光斑、能量截面曲线及环围能量斯特列尔比计算  $SR = 0.51$   
Fig. 15. (color online) The spot diagram after correction, section curves of energy and encircled energy strehl ratio  $SR = 0.51$ .

## 4 结 论

本文以存在双曲面反射镜的光学系统轴上视场成像光斑的清晰度函数作为迭代收敛的目标函数, 通过随机并行梯度下降算法 (SPGD) 对反射镜

位置施加扰动, 从而实现了系统低阶静态像差的校正. 扰动变量包括:  $\delta u_{d_x}$ ,  $\delta u_{d_y}$ ,  $\delta u_{d_z}$ ,  $\delta u_{t_x}$ ,  $\delta u_{t_y}$ . 由于平移  $\delta u_{d_x}$ ,  $\delta u_{d_y}$  和旋转  $\delta u_{t_x}$ ,  $\delta u_{t_y}$  均会对光斑位置产生影响, 根据理论基础, 采用了  $\delta u_{d_x}$  和  $\delta u_{t_y}$ ,  $\delta u_{d_y}$  和  $\delta u_{t_x}$  相结合的校正方式并给出了相应公式. 最后, 根据理论分析针对特定光学系统进行了室

内实验验证, 分别给出三种不同误差情况的校正分析, 光斑半径逐渐减小并收敛. 校正后光斑质量得到显著的提升, 斯特列尔比分别达到0.44, 0.51, 0.51, 证明了该方法具有可行性, 为进一步工程运用提供了依据.

感谢中国科学院光电技术研究所的张学军、王彩霞、王晓云在实验系统搭建中的帮助与指导.

### 参考文献

- [1] Che C C, Li Y C, Fan X W, Ma Z, Hu Y M 2008 *Acta Photon. Sin.* **37** 1630 (in Chinese) [车驰骋, 李英才, 樊学武, 马臻, 胡永明 2008 光子学报 **37** 1630]
- [2] McLeod B A 1996 *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **108** 217
- [3] Noethe L, Guisard S 2000 *SPIE* **4003** 382
- [4] Yang H S, Lee Y W, Kim E D, Choi Y W 2004 *SPIE* **5528** 334
- [5] Raich A, Hill J M, Biddick C J, Miller D L, Leibold T 2008 *SPIE* **7012** 70121L
- [6] Shi G W, Zhang X, Zhang Y, Wu Y X, Zhang J Z 2011 *J. Appl. Opt.* **32** 3 (in Chinese) [史广维, 张新, 张鹰, 伍雁雄, 张继真 2011 应用光学 32 3]
- [7] Kim S H, Yang H S, Lee Y W, Kim S W 2007 *Opt. Exp.* **15** 5059
- [8] Luna E 1999 *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **111** 104
- [9] Sun J W, Chen T, Wang J L, Yang F 2011 *Opt. Precision Eng.* **19** 728 (in Chinese) [孙敬伟, 陈涛, 王建立, 杨飞 2011 光学精密工程 **19** 728]
- [10] Zhou L F, Zhang A, Zhang J B, Xian H 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 6 (in Chinese) [周龙峰, 张昂, 张俊波, 鲜浩 2015 光学学报 **35** 6]
- [11] Wilson R N 1996 *Reflecting Telescope Optics I* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag) pp265–288
- [12] Muller R A, Buffington A 1974 *Opt. Soc. Am.* **64** 1200
- [13] Vorontsov M A, Carhart G W 1997 *Opt. Lett.* **22** 907

# Experimental research of alignment error correction by aspheric mirror based on the function of imaging quality\*

Zhou Long-Feng<sup>1)2)3)</sup> Zhang Ang<sup>1)2)</sup> Zhang Jun-Bo<sup>1)2)</sup> Fan Xin-Long<sup>1)2)</sup>  
Wei Ling<sup>1)2)</sup> Chen Shan-Qiu<sup>1)2)</sup> Xian Hao<sup>1)2)†</sup>

1) (*Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

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

3) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 31 March 2016; revised manuscript received 11 April 2016 )

## Abstract

Image definition will be influenced by alignment errors of mirrors in an optical system consisting of hyperbolic, parabolic or ellipse mirrors. The major factors of alignment errors are gravity, wind loads and heat exchange for some optical systems like ground-based telescopes, while vibration and temperature gradient for systems like space telescopes. Larger telescopes are more sensitive to these error sources, which becomes the concerns of researchers. So the alignment errors of mirrors must be corrected in time to keep systems working in best condition. In order to solve the problem, many methods are proposed based on the detection of wave-front errors using wave-front sensors like Hartmann-Shack. However, wave-front sensors may not be used or cause optical systems to be more complicated. For example, multi-fields must be tested when telescope is working. On the one hand, if a wave-front sensor is used, it must be moved around imaging plane, on the other hand, if more wave-front sensors are used, system must be more complicated. So a new method is discussed for alignment error correction by evaluating the quality of spot diagrams based on the using of stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm. The method considers the performance metric like spot diagram radius as a function of control parameters and then uses the SPGD optimization algorithm to improve the performance metric. The control parameters include positions of mirrors. The iteration process must be used in the right way to control position parameters. If it is not considered, a problem may come up that positions of spot diagrams may be influenced by the iteration. Furthermore, spot diagrams will probably disappear from detectors. Then the radii of spot diagrams are not correct. So a better way is put forward by the combination of de-center and tilt of mirrors. The way ensures that the position error produced by de-center and tilt are compensated for. A formula is provided in this paper to give the relationship between them. Based on the analysis, an optical system is designed to verify the conclusion. The SPGD algorithm is achieved by computer programming and the position of the mirror is controlled by a hexapod. Firstly, the problem is verified that the spot diagram will disappear from the detector with a normal iteration process. Then the new way is implemented. In the iteration process, the spot diagram is always in the center of the detectors. In order to prove the feasibility of the method, three different alignment errors are tested and all of them each give an Airy disk finally. The experiment can provide reference for engineering practice.

**Keywords:** reflecting mirror, alignment error, imaging quality, iteration

**PACS:** 95.75.Qr, 95.55.Cs, 42.30.-d

**DOI:** 10.7498/aps.65.139501

\* Project supported by the "Strategic Priority Research Program" of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA04060902).

† Corresponding author. E-mail: [xianhao@ioe.ac.cn](mailto:xianhao@ioe.ac.cn)