文章编号 1004-924X(2012)11-2353-07

基于高斯光学齐次坐标变换的光机装调

胡春晖[1,2],颜昌翔[1*]

(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. 中国科学院大学,北京 100039)

摘要:高性能光学系统装调的调整量与光机结构设计相关,而装调所用参考坐标系往往与光学设计所用的坐标系不同。为了精确描述调整量对高斯像位置的影响,本文在基准坐标系下建立了引入装调误差量的高斯光学齐次坐标变换模型。针对具体的光机结构,建立了高斯像像旋和离焦对调整变量的函数,据此计算小的结构变化导致的离轴三反望远物镜高斯像面的移动,结果显示其与光学设计软件对最佳像面位置优化结果的相对差小于 4%。利用方差合成方法建立线性规划模型,对 17 个装调变量做了最宽松的误差分配方案。用 Monte Carlo 法验证了分配方案,结果表明,该方案在±300 μm 调焦能力下满足各视场±10 μm 的焦深要求。本文的方法忽略了复杂、微小像差的影响,适用于含多个已做内部精装的光学组件或平面反射镜的复杂成像光学系统的装调。

关 键 词:几何光学;最优化装调;高斯光学;坐标变换;误差分配

中图分类号:TH703;TH743 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20122011.2353

Optical-mechanical assembly based on Gaussian optical homogeneous coordinate transformation

HU Chun-hui[1,2], YAN Chang-xiang[1*]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: yancx@ciomp.ac.cn*

Abstract: The assembly variables of a high performance optical system are dependent on the design of optical and mechanical structure, however, the reference coordinates used in the system assembly are mostly different from those used in optical design. To describe paraxial image motions due to adjustments precisely, the Gaussian optical homogeneous coordinate transformation model with assembly error variables was established under a reference coordinate. According to specified optical-mechanical design, the Gaussian image rotation and defocus as functions of assembly variables were described. Then, the paraxial image motion induced by small deformation of a three-mirror off-axis telescope was calculated, which shows a relative difference less than 4% compared with that from the optical software optimized image location. By the variance combining method, a linear optimization model was

收稿日期:2012-03-26;**修订日期**:2012-05-15.
基金项目:国防预研基金资助项目(No. O5001SA050)

solved to get the loosest error budget for 17 variables and the Monte-Carlo simulation was used to verify the error budget. It indicates that all fields meet the focus depth of ±10 μm within the focusing ability of ±300 μm. This method ignores subtle influences caused by aberration, and is favorable for optical systems consisting of plane optical components and near aberration-free components.

Key words: geometrical optics; optimized assembly; Gaussian optics; coordinate transformation; error budget

1 引　言

随着成像光学系统性能指标的提高，对其尺寸、重量的要求更加严格，结构也日趋复杂。高精度要求和众多光学组件使得光学系统的装调面临巨大挑战[1]。计算机辅助装调（Computer-Guided Alignment，CGA）对装调变量不多但至关重要的光学组件的装调提供了有效指导[2-5]。CGA 通过对光学系统波前的检测值计算光学元件失调量，其基础是系统波前与失调量关系的模型。目前，建立此模型主要采用基于像差理论[6-8]和利用光学设计软件数值计算[9]的方法。

当光学系统包含多个独立成像光学组件或不引入像差的光学组件时，使用 CGA 进行精装会因装调变量过多而降低效率。由于实际装调调整量依赖于光机结构设计和辅助调整设备，在光学设计基准中描述光学元件的刚体运动并不充分。本文采用动态光学坐标变换研究方法[10-11]，在基准坐标系下描述引入装调误差量的高斯光学成像规律，结合光机结构将装调模型定位到调整动作。据此计算离轴三反光学组件在小量结构变形时的高斯像位移，结果表明近轴像能很好地近似最佳焦面的位置变化。在以 buttom-up 或者 top-down 模式对光学系统做误差分配方案的基础上[12-13]，根据装调工艺水平、焦深要求、调焦范围建立了最优化模型，求解得到了既宽松又满足性能要求的装配误差分配方案。

2 引入装调误差量的高斯光学齐次坐标变换模型

2.1 基准坐标系下表述的高斯光学模型

为了能够精确表达空间三维图形在不同基准下的位置，采用齐次坐标变换方法。这种方法在高精度像移补偿计算[14]、光电经纬仪测量误差分析方面都有重要应用[15-16]。

采用右手坐标系，当物点坐标 $\boldsymbol{X}_1$、像点坐标 $\boldsymbol{X}_1'$ 分别在物方、像方主点坐标系内度量时[10,14,15]，有：

$$\boldsymbol{X}_1' = \begin{bmatrix} \beta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n'\beta/n & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \boldsymbol{X}_1, \tag{1}$$

$$\beta = \frac{-f}{z-f} = \frac{f' \times n/n'}{f' \times n/n' + z}, \tag{2}$$

其中：β 是横向放大倍率，n，n' 分别是物方、像方折射率，z 是物点在物方主面坐标系中第 3 个坐标。

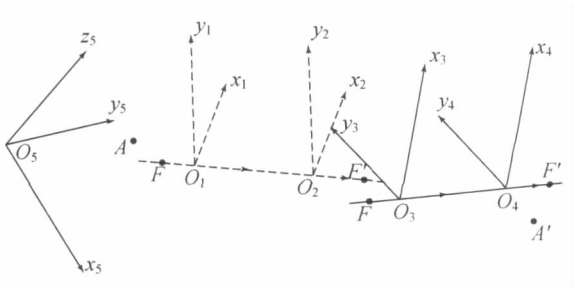


图 1　基准坐标系下引入装调误差量的高斯光学成像模型

Fig. 1　Gaussian imaging model with misalignments in global coordinates

图 1 是引入物方主面失调量的高斯光学成像模型。坐标系 5 是基准坐标系，光学组件、物、像都在其内度量。坐标系 1，2 分别是光学组件在理想位置处的物方、像方主面坐标系，坐标轴取向相同，z 轴为光轴且从物方主点 O_1 指向像方主点 O_2。失调之后，坐标系 1 运动到坐标 3，坐标系 2 运动到坐标系 4。像 A' 是物 A 经失调后的光学组件所成的高斯像。$\boldsymbol{X}_5$ 和 $\boldsymbol{X}_5'$ 分别是 A 和 A' 在坐标系 5 中的齐次坐标。记 $\boldsymbol{S}_{mn}$，$\boldsymbol{C}_{mn}$ 分别是齐次坐标从坐标系 m 变换到坐标系 n 的平移矩阵、旋

转矩阵，T_{mn} 是从 m 系到 n 系的坐标基过渡矩阵，s_{mn} 是 n 系坐标原点在 m 系中的坐标。为分离出由失调量决定的失调矩阵，按如下坐标变换思路：A 从坐标系 5 经坐标系 1 变换到坐标系 3，按式(1)成像得坐标系 4 中度量的像点 A'，A' 从坐标系 4 经坐标系 2 变换到坐标系 5。可得：

$$\boldsymbol{X}_5' = (\boldsymbol{C}_{24}\cdot\boldsymbol{S}_{24}\cdot\boldsymbol{C}_{52}\cdot\boldsymbol{S}_{52})^{-1}\cdot \boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{C}_{13}\cdot\boldsymbol{S}_{13}\cdot\boldsymbol{C}_{51}\cdot\boldsymbol{S}_{51}\cdot\boldsymbol{X}_5, \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{B}$ 是式(1)中的放大倍率矩阵；没有失调的充要条件是 $\boldsymbol{S}_{13}$、$\boldsymbol{C}_{13}$ 都为单位矩阵；$\boldsymbol{S}_{51}$，$\boldsymbol{C}_{51}$，$\boldsymbol{S}_{52}$，$\boldsymbol{C}_{52}$ 由基准坐标系的定义和光学组件的高斯光学参量确定。

由于只考虑光学组件刚体运动，$\boldsymbol{C}_{13}=\boldsymbol{C}_{24}$，$\boldsymbol{C}_{52}=\boldsymbol{C}_{51}$。$\boldsymbol{S}_{52}$ 由 $\boldsymbol{S}_{51}$，$\boldsymbol{C}_{51}$ 确定，$\boldsymbol{S}_{24}$ 由 $\boldsymbol{S}_{13}$，$\boldsymbol{C}_{13}$ 确定。图 1 中，记 $\boldsymbol{i}_m$，$\boldsymbol{j}_m$，$\boldsymbol{k}_m$ 分别是 m 系 x，y，z 轴单位矢量，由 $\boldsymbol{O}_5\boldsymbol{O}_2=\boldsymbol{O}_5\boldsymbol{O}_1+\boldsymbol{O}_1\boldsymbol{O}_2$；$\boldsymbol{O}_1\boldsymbol{O}_3+\boldsymbol{O}_3\boldsymbol{O}_4=\boldsymbol{O}_1\boldsymbol{O}_2+\boldsymbol{O}_2\boldsymbol{O}_4$。在相应坐标系下描述：

$$(\boldsymbol{i}_5,\boldsymbol{j}_5,\boldsymbol{k}_5)\cdot\boldsymbol{s}_{52}=(\boldsymbol{i}_5,\boldsymbol{j}_5,\boldsymbol{k}_5)\cdot\boldsymbol{s}_{51}+\Delta\cdot\boldsymbol{k}_1, \tag{4}$$

$$(\boldsymbol{i}_5,\boldsymbol{j}_1,\boldsymbol{k}_1)\cdot\boldsymbol{s}_{13}+\boldsymbol{k}_3\cdot\Delta=\boldsymbol{k}_1\cdot\Delta+(\boldsymbol{i}_2,\boldsymbol{j}_2,\boldsymbol{k}_2)\cdot\boldsymbol{s}_{24}, \tag{5}$$

式(4)、(5)中 Δ 是物方、像方主点间距，解出：

$$\boldsymbol{s}_{52}=\boldsymbol{s}_{51}+\Delta\cdot(\boldsymbol{i}_5,\boldsymbol{j}_5,\boldsymbol{k}_5)^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{k}_1,$$

$$\boldsymbol{s}_{24}=\boldsymbol{s}_{13}+[(\boldsymbol{i}_1,\boldsymbol{j}_1,\boldsymbol{k}_1)^{\mathrm{T}}\cdot\boldsymbol{k}_3-(0,0,1)^{\mathrm{T}}]\cdot\Delta。$$

得到对应齐次坐标的平移矩阵 $\boldsymbol{S}_{51}$，$\boldsymbol{S}_{52}$ 以及 $\boldsymbol{S}_{13}$，$\boldsymbol{S}_{24}$ 关系为：

$$\boldsymbol{S}_{52}=\begin{bmatrix}1&0&0&-\Delta\times(\boldsymbol{i}_5,\boldsymbol{k}_1)\\0&1&0&-\Delta\times(\boldsymbol{j}_5,\boldsymbol{k}_1)\\0&0&1&-\Delta\times(\boldsymbol{k}_5,\boldsymbol{k}_1)\\0&0&0&1\end{bmatrix}\cdot\boldsymbol{S}_{51}, \tag{6}$$

$$\boldsymbol{S}_{24}=\begin{bmatrix}1&0&0&-\Delta\times(\boldsymbol{i}_1,\boldsymbol{k}_3)\\0&1&0&-\Delta\times(\boldsymbol{j}_1,\boldsymbol{k}_3)\\0&0&1&-\Delta\times[(\boldsymbol{k}_1,\boldsymbol{k}_3)-1]\\0&0&0&1\end{bmatrix}\cdot\boldsymbol{S}_{13}. \tag{7}$$

按光学系统中包含的光学组件成像顺序连续使用式(3)，就得到引入各个光学组件的物方主面坐标系失调量的近轴像点在基准坐标下的齐次坐标。

2.2　装调调整量等效为物方主面坐标系失调量

在装调过程中，光学组件物方主面坐标系的失调矩阵 $\boldsymbol{S}_{13}$，$\boldsymbol{C}_{13}$ 由光机结构设计确定的调整量决定，需要将装调调整等效为物方主面坐标系的失调。有限角转动不符合交换律，需要按序装调。

首先，按照结构设计确定 m 个按序调整量：$x_1,x_2,\cdots,x_m$；其次，根据按序调整量确定 $n(m/6\leqslant n\leqslant m)$ 个调整坐标系 $CO_1,CO_2,\cdots,CO_n$，并确定它们在基准坐标系下的过渡矩阵 $\boldsymbol{T}$ 和平移矢量 $\boldsymbol{s}$；最后，确定每个调整坐标系所绑定的光具组。

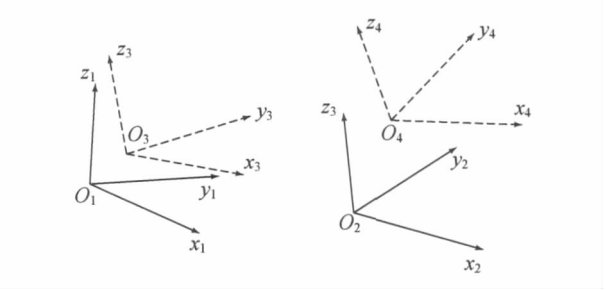


图 2　调整坐标系 O_1-$x_1y_1z_1$ 到物方主面坐标系 O_2-$x_2y_2z_2$ 的运动传递

Fig. 2　Motion transformations from assembly coordinates O_1-$x_1y_1z_1$ to first principle plane coordinates O_2-$x_2y_2z_2$

如图 2 所示，O_1-$x_1y_1z_1$ 为初始位置处装调调整坐标系，O_2-$x_2y_2z_2$ 是被 O_1-$x_1y_1z_1$ 绑定的光具组物方主面坐标系。将 O_1-$x_1y_1z_1$ 调整至 O_3-$x_3y_3z_3$ 的位置时，O_2-$x_2y_2z_2$ 因被绑定运动至 O_4-$x_4y_4z_4$。假设装调过程不改变调整坐标系和光具组之间的相对位置关系，由矢量代数：

$$\boldsymbol{T}_{24}=\boldsymbol{T}_{12}^{-1}\boldsymbol{T}_{13}\boldsymbol{T}_{12} \tag{8}$$

根据 $\boldsymbol{O}_1\boldsymbol{O}_3+\boldsymbol{O}_3\boldsymbol{O}_4-\boldsymbol{O}_1\boldsymbol{O}_2=\boldsymbol{O}_2\boldsymbol{O}_4$。在相应坐标基下描述：

$$(\boldsymbol{i}_2,\boldsymbol{j}_2,\boldsymbol{k}_2)\boldsymbol{T}_{21}\boldsymbol{s}_{13}+(\boldsymbol{i}_2,\boldsymbol{j}_2,\boldsymbol{k}_2)\boldsymbol{T}_{23}\boldsymbol{s}_{34}-(\boldsymbol{i}_2,\boldsymbol{j}_2,\boldsymbol{k}_2)\boldsymbol{T}_{21}\boldsymbol{s}_{12}=(\boldsymbol{i}_2,\boldsymbol{j}_2,\boldsymbol{k}_2)\boldsymbol{s}_{24}.$$

所以：

$$\boldsymbol{s}_{24}=\boldsymbol{T}_{12}^{-1}[\boldsymbol{s}_{13}+(\boldsymbol{T}_{13}-\boldsymbol{I})\boldsymbol{s}_{12}]. \tag{9}$$

其中：$\boldsymbol{I}$ 是三阶单位矩阵。

3　装调对象以及像质评价量的选择

3.1　装调对象以及高斯光学方法的适用性

图 3 所示是某光学系统示意图。景物在无穷远，依次通过指向反射镜、离轴三反望远物镜、平面调焦镜、平面折叠镜成像于狭缝。

能用近轴像建立正确装调模型的前提是在小失调误差范围，近轴像可以近似实际像的运动情况。对于图 3 所示系统，调焦镜、折叠镜作为平面

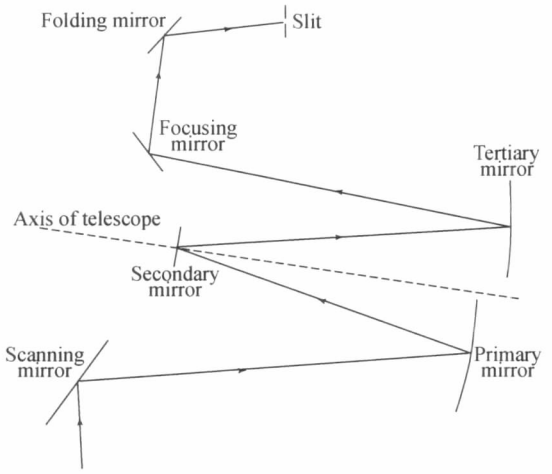


图 3　光学系统结构示意图

Fig. 3　Sketch for layout of optical system

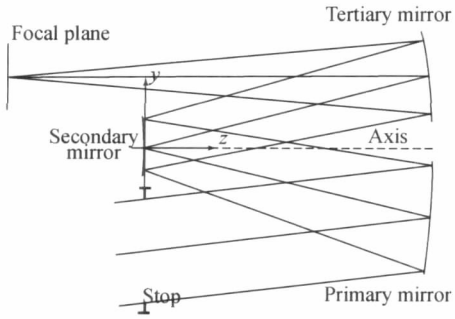


图 4　图 3 中三镜消像散光学系统设计图

Fig. 4　Layout of TMA in figure 3

反射镜不引入像差，上述近似是合理的。着重考虑离轴三反镜相对位置变化引入的像差，如图 4 所示，以次镜为基准，假设主镜和三镜沿着 y，z 轴平移 $17\times10^{-6}\times\delta T\times L$，$L$ 为离轴量或间隔量。用光学设计软件优化得不同 δT 所致位移下离焦量 δz_1，并按本文方法计算近轴像离焦量 δz_2，列于表 1。

表 1　两种方法计算的离焦量比较

Tab. 1　Comparison of defocusing values calculated by two means

δT/℃	δz_1/μm	δz_2/μm	δT/℃	δz_1/μm	δz_2/μm
−10	−137	−137	−4	56	55
−8	−110	−110	8	112	110
−4	−53	−55	10	139	137
0	0	0			

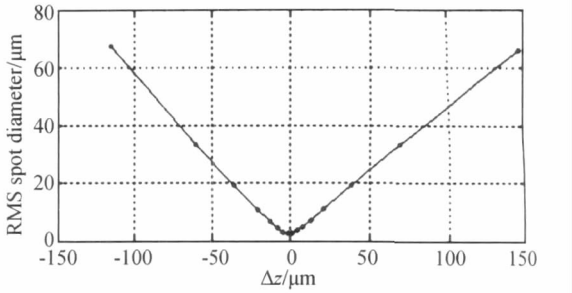


图 5　离焦量差别与最小点列斑 RMS 直径关系

Fig. 5　Relationship between defocusing value difference and corresponding smallest RMS spot diameter

表 1 说明小结构变形下，近轴像移动与考虑像差的实际像移动相对误差小于 4%。图 5 是在大 δT 导致位移下，两种方法所得离焦量的差（$\Delta z=\delta z_1-\delta z_2$）与最佳焦面处点列斑 RMS 直径的关系。当近轴像与实际像运动差别较大时，即使在最佳焦面处，像质也会显著下降。这表明近轴像的运动具有重要参考价值。

3.2　装调模型以及像质评价量

记 s_{ip}，t_{ip} 分别表示第 i 个坐标系沿 p 轴的平移、绕 p 轴的旋转，将图 3 中已做内部精装的离轴三反镜用等效光具组代替，根据光机结构设计确定调整坐标系，建立图 6 所示装调模型。坐标系

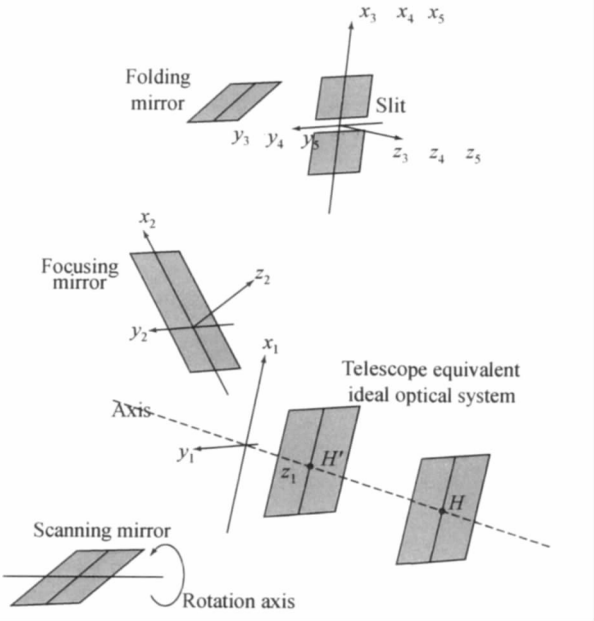


图 6　根据光机结构确立的调整坐标系

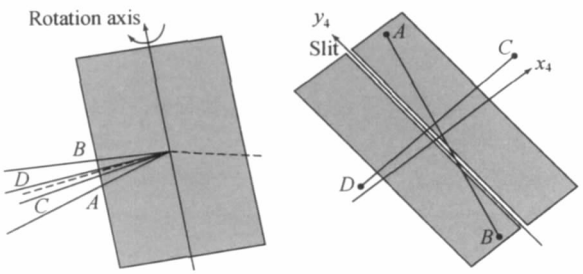
Fig. 6　Assembling coordinates according to optical-mechanical structure

5 是基准坐标系，建立在无失调的狭缝平面上；坐标系 1 建立在次镜顶点上，绑定离轴三反整体做 6 自由度运动（s_{1x}，s_{1y}，s_{1z}，t_{1x}，t_{1y}，t_{1z}）；坐标系 2 建立在调焦镜上，由于调焦镜可在 2 mm 行程内做一维精密调焦，只考虑其绕 x_2，y_2 的角度安装误差（t_{2x}，t_{2y}）；折叠镜由作六维微调的机械组件固定于狭缝，坐标系 3 建立在狭缝平面上，绑定折叠镜做 6 自由度运动（s_{3x}，s_{3y}，s_{3z}，t_{3x}，t_{3y}，t_{3z}）；折叠镜和狭缝作为整体可在安装界面 y_5z_5 内调整，坐标系 4 建立在失调的狭缝平面上，绑定折叠镜和狭缝平面整体做 3 自由度运动（s_{4y}，s_{4z}，t_{4x}）；对无限远物成像，指向镜装调误差不予考虑。若折叠镜与狭缝无失调，坐标系 3，4，5 重合。

望远物镜、调焦镜、折叠镜、狭缝的安装误差会导致以狭缝为参考基准的像旋和离焦。图 7(a)所示为 4 个用于计算离焦和像旋的参考视场 A，B，C，D，图 7(b)所示为经失调的光学系统成像于坐标系 4，由坐标系 4 中像点坐标 $A(x_A, y_A, z_A)$、$B(x_B, y_B, z_B)$、$C(x_C, y_C, z_C)$、$D(x_D, y_D, z_D)$，定义高斯像像旋与离焦作为评价量：

$$\begin{cases} y_1 = \arcsin\dfrac{z_A - z_B}{|AB|} \\ y_2 = \arcsin\dfrac{z_C - z_D}{|CD|} \\ y_3 = \arcsin\dfrac{x_A - x_B}{y_A - y_B} \\ y_4 = (x_A + x_B)/2 \\ y_5 = (y_A + y_B)/2 \\ y_6 = (z_A + z_B)/2 \end{cases}. \tag{10}$$

其中：y_1，y_2 分别是 AB，CD 与狭缝平面的夹角；y_3 为 AB 在狭缝平面的投影与狭缝的夹角，（y_4，y_5，y_6）为 AB 中点的坐标。6 个评价量都为 0 时，像在狭缝平面上既无像旋，也无离焦。



(a)参考视场A, B, C, D　(b)参考视场的失调像

(a)Reference fields A, B, C, D　(b)Images of reference fields

图 7　参考视场以及在狭缝坐标系所成的像

Fig. 7　Reference fields and images in slit coordinates

4　装配误差分配优化方案

由于已将影响光学组件位置的因素细分转化为调整的 17 个变量，可将它们当作相互独立的正态分布随机变量。y_1，y_2，y_6 是 17 个正态分布随机变量函数，依据林德贝格-列维中心极限定理，它们近似服从正态分布，采用极限误差的 3σ 准则。根据如下条件建立误差分配方案：装调工艺水平为偏心 ± 20 μm、倾斜 $\pm 0.5'$，它们具有同等实现难度，据此确定偏心量、倾斜量标准差 σ_{shift_i}、σ_{tilt_j} 的下限；焦深为 ± 10 μm，狭缝长 2 cm，确定像旋 y_1 上限为 $3.4'$；像旋 y_2 上限设为 $10'$，此时在缝宽范围内，沿着 x_4 轴方向的离焦在焦深之内；调焦镜预留有对焦面 ± 300 μm 的调整能力，以校正装调导致的离焦，由此确定 y_6 取值为 [−300 μm，300 μm]。为了得到约束要求下最宽松的误差分配方案，采用 17 个装调变量的归一化方差和作为目标函数，如式(11)所示。

$$\max \sum_{i=1}^{8} \frac{\sigma_{\text{shift}_i}^2}{(20)^2} + \sum_{j=1}^{7} \frac{\sigma_{\text{tilt}_j}^2}{(0.5)^2}. \tag{11}$$

该式服从条件：

$$\begin{cases} 0' < \sigma(y_1) \leqslant 1.1' \\ 0' < \sigma(y_2) \leqslant 3.3' \\ 0\ \mu\text{m} < \sigma(y_6) \leqslant 100\ \mu\text{m} \\ 6.7\ \mu\text{m} \leqslant \sigma_{\text{shift}_i} \leqslant 333\ \mu\text{m}, i = 1\cdots 8 \\ 0.167' \leqslant \sigma_{\text{tilt}_j} \leqslant 3.3', j = 1\cdots 7 \end{cases}.$$

随机变量函数的解析形式过于复杂，但由于装调变量变化范围足够小，可用差商近似得到评价量 y_1，y_2，y_6 的 Jacobian 矩阵以简化模型[17]，并把约束改写成方差形式，由此式(11)的优化问题可简化为线性规划，使用单纯形法得到表 2 所示的误差分配方案。

表 2　装调变量最优化的误差分配

Tab. 2　Optimized error budgets for assembling variables

Variables	s_{1x}/μm	s_{1y}/μm	s_{1z}/μm	t_{1x}/(′)	t_{1y}/(′)	t_{1z}/(′)
3σ	1 000	1 000	157.6	10	10	10
Variables	t_{2x}/(′)	t_{2y}/(′)	s_{3x}/μm	s_{3y}/μm	s_{3z}/μm	t_{3x}/(′)
3σ	0.5	0.5	20	1 000	20	0.5
Variables	t_{3y}/(′)	t_{3z}/(′)	s_{4y}/μm	s_{4z}/μm	t_{4x}/(′)	
3σ	0.5	0.5	1 000	1 000	10	

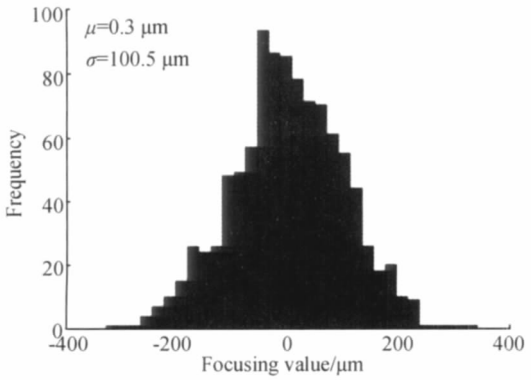


图 8　Monte Carlo 方法得到的最佳调焦量统计直方图

Fig. 8　Statistic histogram of best focusing value with Monte Carlo simulation

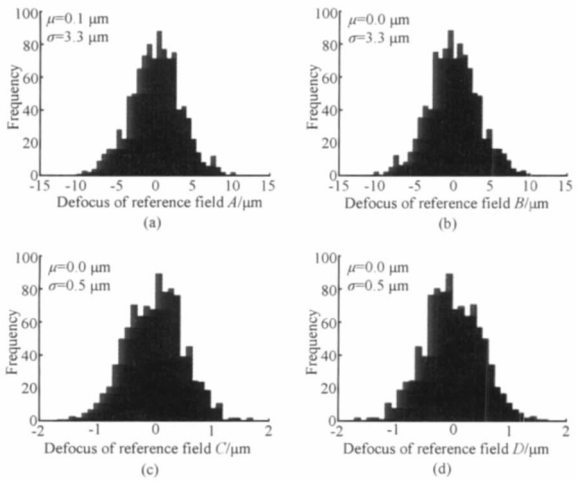


图 9　Monte Carlo 方法得到的参考视场离焦量统计直方图

Fig. 9　Statistic histogram of defocus value for reference fields with Monte Carlo simulation

为了直观检验不做线性近似时表 2 误差分配方案的可靠性，用 Monte Carlo 法来验证。据表 2 产生光学系统的 1 000 个随机失调状态，计算各状态下最佳调焦量以及调焦后像点 A，B，C，D 的离焦量。

图 8 是使 4 个参考视场具有最小离焦的最佳调焦量统计直方图，图 9 是调焦后各参考视场离焦量统计直方图。统计方差和期望表明，最佳调焦量在调焦能力内，参考视场像的离焦在焦深范围内，验证了最优化装调模型的正确性。

5　结　论

本文针对光机装调中组件多、调整定位复杂的问题，采用高斯光学齐次坐标变换方法建立了高斯像像旋、离焦与调整量的函数关系模型。通过具体分析某离轴三反望远物镜进行模型验证，计算表明在反射镜做小刚体运动时，高斯像能很好地近似最佳像的运动，具有重要参考价值。根据±300 μm 的调焦能力、±10 μm 的焦深要求、装调工艺水平等约束条件，建立了优化模型，求解得到了 17 个调整量最宽松的误差分配方案，其中只有 7 个变量需要按照最高精度装配。方案通过 Monte Carlo 方法验证，比 bottom-up 或 top-down[12-13]的误差分配方案更易找到最优解。这种方法忽略像差复杂、微小的影响，适合含多个已做内部精装的光学组件或者平面反射镜的复杂成像光学系统的装调。

参考文献：

[1] PARKS, R E. Alignment of optical systems [C]. *International Optical Design Conference*, 2006, paper: MB4.

[2] 张斌，张晓辉，韩昌元. 光学系统计算机辅助装调中的一种优化算法[J]. 光学 精密工程，2000，8(3)：273-277.
ZHANG B, ZHANG X H, HAN CH Y. Algorithm for misalignment determination in computer-aided alignment of optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 273-277. (in Chinese)

[3] 杨晓飞. 三反射镜光学系统的计算机辅助装调技术研究[D]. 长春：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，2004：92-96.
YANG X F. *Study on the computer-aided alignment of three-mirror optical system* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2004: 92-96. (in Chinese)

[4] 张庭成，王涌天，常军，等. 反射变焦系统的计算机辅助装调[J]. 光学学报，2010，30(6)：1688-1692.
ZHANG T CH, W Y T, CHANG J, *et al*.. Computer-aided alignment for reflective zoom systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30 (6): 1688-1692. (in Chinese)

[5] 张文静，刘文广，刘泽金. 一种非稳腔计算机辅助装调方法的数值模拟[J]. 光学学报，2008，28(3)：516-521.

ZHANG W J, LIU W G, LIU Z J. Numerical simulation for computer-aided precise alignment of unstable resonator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 516-521. (in Chinese)

[6] LEE H, DALTON G B, TOSH I A J, *et al*.. Computer-guided alignment I: phase and amplitude modulation of alignment-influenced optical wavefront [J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 3127-3139.

[7] LEE H, DALTON G B, TOSH I A J, *et al*.. Computer-guided alignment II: optical system alignment using differential wavefront sampling[J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15424-15437.

[8] LEE H, DALTON G B, TOSH I A J, *et al*.. Computer-guided alignment III: description of inter-element alignment effect in circular-pupil optical systems [J]. *Optics Express*, 2008, 16(15): 10992-11006.

[9] KIM S H, YANG H S, KIM S W, *et al*.. Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems [J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5059-5068.

[10] **白素平，王春艳，庞春颖. 基于坐标变换的动态光学成象性质研究[J]. 光子学报**，2001，30(7)：846-850.
BAI S P, WANG CH Y, PANG CH Y. Imaging features of optics system in motion based on coordinate transformation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(7): 846-850. (in Chinese)

[11] **王俊，卢锷，王家骐. 光学系统动态像点移动的坐标变换法[J]. 光学 精密工程**，1999，7(6)：48-55.
WANG J, LU E, WANG J Q. Coordinates transformation method on image motion of dynamic optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(6): 48-55. (in Chinese)

[12] HUBBARD R. *ATST System Error Budgets* [EB/OL]. http://atst.nso.edu/files/docs/spec-009.pdf, 30 April 2009.

[13] **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)

[14] **颜昌翔，王家骐. 航相机像移补偿计算的坐标变换方法[J]. 光学 精密工程**，2000，8(3)：203-207.
YAN CH X, WANG J Q. Method of coordinate transformation for IM&IMC calculation in aerospace camera system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3): 203-207. (in Chinese)

[15] **李慧，沈湘衡. 光电经纬仪轴系误差仿真计算的新方法[J]. 红外与激光工程**，2008，37(2)：334-337.
LI H, SHEN X H. New shafting error simulating method of photoelectric theodolite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 334-337. (in Chinese)

[16] **王芳，贾涛，张春林. 应用坐标变换动态修正光电经纬仪脱靶量[J]. 光学 精密工程**，2009，17(12)：2939-2945.
WANG F, JIA T, ZHANG CH L. Dynamic correction of target deviations for photoelectric theodolites by coordinate transform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12): 2939-2945. (in Chinese)

[17] UPTON R, CHOU M, RIMMELE T. Force-optimized alignment for optical control of the advanced technology solar telescope [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(31): G105-G113.

作者简介：



胡春晖(1986－)，**男，河南光山人，博士研究生，2008 年于西北工业大学获得学士学位，主要从事光学装调方面的研究**。E-mail: famous226@163.com

导师简介：



颜昌翔(1973－)，**男，湖北洪湖人，研究员，2001 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位，主要从事空间光学遥感技术方面的研究**。E-mail: yancx@ciomp.ac.cn