

考虑像差影响的透射式光学系统失调校正方法

徐春梅, 刘秉琦, 黄富瑜, 沈洪斌, 张 维

(军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要: 随着高分辨力光学系统应用领域的不断拓展, 光学元件的高精度装配要求和高精度的设计要求一样, 已成为光学系统分辨力的决定性因素。现有的高斯光学校正方法仅考虑物像位置关系的调整, 已不能满足光学系统的调整要求, 光学仪器的调整理论需要同步发展。考虑像差对光学系统失调的影响, 提出了一种基于像差理论的(透射式)光学系统失调校正方法: 分析了单透镜轴向位移引起的像差变化规律, 给出了像差影响系数的定义; 在此基础上, 通过反演计算像面位置误差和放大率误差所需的透镜调整量, 数学推导出了基于像差约束条件的光学系统失调校正公式。以三透镜准直系统为例进行了仿真实验验证, 证明了将像差约束引导到校正方法中, 能够同时满足高斯光学特性的要求和像差增量最小的要求。

关键词: 像差约束; 透镜轴向失调; 失调校正

中图分类号: O435.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)10-3020-05

New correction method for transmission-type misalignment optical system based on aberration theory

Xu Chunmei, Liu Bingqi, Huang Fuyu, Shen Hongbin, Zhang Chu

(Department of Electronic and Optics Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Along with more broad application fields of the high-resolution optical system, the high-precision assembling requirement of optical components, as same as the high-precision design requirement, has become the decisive element of the optical system resolution. Because the current Gauss optical correction method only considers the alignment of object-image location, and cannot actually meets the requirement of optical system adjustment, the alignment theory of optical instruments needs to be developed synchronously. The influence of aberration on misalignment of optical system was considered fully, a correction method for transmission-type misalignment optical system was proposed based on aberration theory. The variation regularity of single lens aberration caused by axial displacement was analyzed, and the aberration effect coefficients were defined. On this basis, through calculating the size of lens adjustment induced by the image position error and the magnifying rate error, the misalignment correction formula based on the constraints of the aberration was deduced mathematically. Taking the three lens collimation system for an example, the simulation was carried out to validate this method. It comes to the following conclusion: by introducing the aberration constraint theory into the correction method, the final correction result meets both the requirement of Gauss optical characteristic and the

收稿日期: 2015-02-13; 修订日期: 2015-03-17

基金项目: 武器装备军内科研计划

作者简介: 徐春梅(1975-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事光电装备设计理论与应用方面的研究。Email: xcm1975@sina.cn

minimum aberration increase.

Key words: aberration constraint; lens axial displacement; misalignment correction

0 引言

随着高分辨力光学系统应用领域的不断拓展,人们对系统设计的像差要求也越来越高,而光学元件装调误差是影响像差的重要因素之一。目前,在反射式光学系统的装调中,已经充分考虑了像差对失调量的影响,基于像差理论的计算机辅助装调技术也已相对成熟^[1-3]。然而,受光学元件较多、控制复杂、失调量定位分析难度大等的限制,像差问题在透射式光学系统失调校正中还没有因其足够重视,相关研究工作也刚刚起步,参考文献[4-7]利用光学设计软件针对特定的光学系统进行仿真分析,确定调整对象,存在的问题是分析结果具有特殊性,仅适用于指定光学系统。当前,关于利用像差理论来指导透射式光学系统失调校正的方法还未见公开报道。文中在分析透镜轴向位移对像差影响的基础上,提出了一种基于像差约束条件的透射式共轴光学系统失调校正方法,仿真实验表明,该方法可同时满足高斯光学特性和像差特性的双重要求。

1 理论分析

透镜轴向位置失调会引起整个光学系统的像面移动和放大率变化,利用基于高斯光学特性的调校方法^[8]可以较好地恢复像面位置和放大率,但这种调校理论并没有考虑调整过程中像差的变化,有可能造成系统成像质量的下降。为此,文中引入像差约束条件,使调整结果能够兼顾高斯光学特性和像差特性两种实用需求。

根据光学零件微动理论^[9],光学系统中透镜的轴向位移 $d\xi$ 小量移动时就会引起光学系统的性能变化,因此只考虑初级像差的影响即可。设光学系统的初级像差与结构参数之间的关系为:

$$F=f(a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (1)$$

式中: a_i 表示组成光学系统的各折射面曲率半径 r_i 、折射率 n_i 和轴向位置 x_i 及物距。

在光学系统中仅考虑透镜轴向位置失调时,各折射面球面曲率、折射率、物体位置均不变,可视为

常数,光学系统初级像差的变化 ΔF 由透镜位置 x_i 的变化决定。

$$\Delta F = \begin{bmatrix} \Delta \delta L_k' \\ \Delta K_{sk}' \\ \Delta x_{isk}' \\ \Delta x_{pk}' \\ \Delta \delta y_{zk}' \\ \Delta(\Delta I_{FCK}') \\ \Delta(\Delta y_{FCK}') \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i \partial \delta L_k' / \partial x_i \cdot \Delta x_i \\ \sum_i \partial K_{sk}' / \partial x_i \cdot \Delta x_i \\ \sum_i \partial x_{isk}' / \partial x_i \cdot \Delta x_i \\ \sum_i \partial x_{pk}' / \partial x_i \cdot \Delta x_i \\ \sum_i \partial \delta y_{zk}' / \partial x_i \cdot \Delta x_i \\ \sum_i \partial \Delta I_{FCK}' / \partial x_i \cdot \Delta x_i \\ \sum_i \partial \Delta y_{FCK}' / \partial x_i \cdot \Delta x_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_i}$ 为透镜 i 的球差影响系数。同理, $\frac{\partial K_{sk}'}{\partial x_i}$ 、 $\frac{\partial x_{isk}'}{\partial x_i}$ 、 $\frac{\partial x_{pk}'}{\partial x_i}$ 、 $\frac{\partial \delta y_{zk}'}{\partial x_i}$ 、 $\frac{\partial \Delta I_{FCK}'}{\partial x_i}$ 、 $\frac{\partial \Delta y_{FCK}'}{\partial x_i}$ 分别为每个透镜的彗差影响系数、像散影响系数、场曲影响系数和畸变影响系数、轴向色差影响系数、垂轴色差影响系数。

光学系统的放大率误差和像面位置误差的校正通常需要两组透镜轴向移动共同完成,由此产生的像差增量等于各透镜单独失调作用所产生的像差增量的代数和,以球差为例:

$$\Delta \delta L_k' + \Delta \delta L_k' = \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_i} \Delta x_i + \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_j} \Delta x_j \quad (3)$$

根据透镜轴向位置误差的高斯光学特性调校理论^[8],对于存在像面位置误差 dx' 或放大率误差 $\frac{d\beta}{\beta}$ 的光学系统进行校正时,两透镜移动量 $d\xi_1$ 和 $d\xi_2$ 需满足消视差条件和消放大率误差条件:

$$\begin{aligned} c_1 d\xi_1 + c_2 d\xi_2 &= -dx' \\ k_1 d\xi_1 + k_2 d\xi_2 &= -\frac{d\beta}{\beta} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: c_i 为透镜 i 的像面移动量影响系数,表示单位透镜移动量引起的像面轴向位置移动量; k_j 为透镜 j 的放大率影响系数,表示单位透镜移动量引起的放大率误差的变化量。 c_i 和 k_j 的值由公式(5)、(6)确定:

$$c_i = \frac{1}{u_N} (u_i'^2 - u_i^2) \quad (5)$$

$$k_j = \left(\frac{u_j}{u_j'} \right) \phi_j - (u_j'^2 - u_j^2) \sum_{v=j+1}^N \left(\frac{\phi_v}{u_v u_v'} \right) \quad (6)$$

式中： u_i, u_i' 分别对应近轴光线经第 i 个透镜时入射光线和出射光线与光轴的夹角； u_N' 为近轴光线经最后一个透镜 N 时出射光线与光轴的夹角； $\phi_j = \frac{1}{f_j}$ ，为透镜 i 的光焦度。

求解公式(4)，可以得到透镜移动量 $d\xi_1$ 和 $d\xi_2$ 与透镜像面移动量系数 c_i 和放大率差影响系数 k_j 之间的关系：

$$d\xi_1 = \frac{-k_2 dx' + c_2 \frac{d\beta}{\beta}}{c_1 k_2 - c_2 k_1}$$

$$d\xi_2 = \frac{k_1 dx' - c_1 \frac{d\beta}{\beta}}{c_1 k_2 - c_2 k_1} \quad (7)$$

将公式(7)代入公式(3)，可得到调整透镜引起的球差增量 $\Delta\delta L_k'$ 为：

$$\Delta\delta L_k' = \Delta\delta L_{k1} + \Delta\delta L_{k2} = \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_1} d\xi_1 + \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_2} d\xi_2 =$$

$$\frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_1} \cdot \frac{-k_2 dx' + c_2 \frac{d\beta}{\beta}}{c_1 k_2 - c_2 k_1} + \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_2} \cdot \frac{k_1 dx' - c_1 \frac{d\beta}{\beta}}{c_1 k_2 - c_2 k_1} =$$

$$\frac{dx'}{c_1 k_2 - c_2 k_1} \left(-k_2 \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_1} + k_1 \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_2} \right) + \frac{\frac{d\beta}{\beta}}{c_1 k_2 - c_2 k_1} \cdot$$

$$\left(c_2 \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_1} - c_1 \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_2} \right) = \frac{dx'}{c_1 k_2 - c_2 k_1} \left[\frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_2} \right] \cdot$$

$$\begin{bmatrix} -k_2 \\ k_1 \end{bmatrix} + \frac{\frac{d\beta}{\beta}}{c_1 k_2 - c_2 k_1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_1} & \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_2 \\ -c_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

将该式推广到几何像差的其他参量，可得到引起其他像差增量的公式为：

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta L_k' \\ \Delta K_{sk}' \\ \Delta x_{tsk}' \\ \Delta x_{pk}' \\ \Delta\delta y_{zk}' \\ \Delta(\Delta I_{FCK}') \\ \Delta(\Delta y_{FCK}') \end{bmatrix} = \frac{dx'}{c_1 k_2 - c_2 k_1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_i} & \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_j} \\ \frac{\partial K_{sk}'}{\partial x_i} & \frac{\partial K_{sk}'}{\partial x_j} \\ \frac{\partial x_{tsk}'}{\partial x_i} & \frac{\partial x_{tsk}'}{\partial x_j} \\ \frac{\partial x_{pk}'}{\partial x_i} & \frac{\partial x_{pk}'}{\partial x_j} \\ \frac{\partial \delta y_{zk}'}{\partial x_i} & \frac{\partial \delta y_{zk}'}{\partial x_j} \\ \frac{\partial \Delta I_{FCK}'}{\partial x_i} & \frac{\partial \Delta I_{FCK}'}{\partial x_j} \\ \frac{\partial \Delta y_{FCK}'}{\partial x_i} & \frac{\partial \Delta y_{FCK}'}{\partial x_j} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_2 \\ k_1 \end{bmatrix} +$$

$$\frac{\frac{d\beta}{\beta}}{c_1 k_2 - c_2 k_1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_i} & \frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_j} \\ \frac{\partial K_{sk}'}{\partial x_i} & \frac{\partial K_{sk}'}{\partial x_j} \\ \frac{\partial x_{tsk}'}{\partial x_i} & \frac{\partial x_{tsk}'}{\partial x_j} \\ \frac{\partial x_{pk}'}{\partial x_i} & \frac{\partial x_{pk}'}{\partial x_j} \\ \frac{\partial \delta y_{zk}'}{\partial x_i} & \frac{\partial \delta y_{zk}'}{\partial x_j} \\ \frac{\partial \Delta I_{FCK}'}{\partial x_i} & \frac{\partial \Delta I_{FCK}'}{\partial x_j} \\ \frac{\partial \Delta y_{FCK}'}{\partial x_i} & \frac{\partial \Delta y_{FCK}'}{\partial x_j} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_2 \\ c_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中： $\Delta\delta L_k', \Delta K_{sk}', \Delta x_{tsk}', \Delta x_{pk}', \Delta\delta y_{zk}', \Delta(\Delta I_{FCK}'), \Delta(\Delta y_{FCK}')$ 分别为透镜调整引起的球差增量、彗差增量、像散增量、场曲增量、畸变增量、轴向色差增量和垂轴色差增量。

从公式(9)可以看出：(1) 双透镜调整时，系统的像差增量受到像差影响系数、像面移动量系数 c_i 和放大率影响系数 k_j 的共同影响；(2) 对只存在一种误差的光学系统 dx' (或 $\frac{d\beta}{\beta}$) 进行校正时，可令公式(4)中另一误差量为零，即 $\frac{d\beta}{\beta} = 0$ (或 $dx' = 0$)，此时公式(8)也适用于单一误差的校正；(3) 通过合理选择 c_1, c_2 及 k_1, k_2 ，可以使两组透镜之间的像差相互补偿，从而使系统整个像差增量最小。

2 仿真实验与分析

文中选择某型号光学标定器作为实验验证对象，将上述理论公式计算结果与 Zemax 仿真结果进行验证比较。光学标定器校正指标为从中央纵线到视场最边缘(左边或右边)第 37 条分划纵线间隔对应的角值 $(0-80) \pm (0-00.25)$ ，超过该范围均应校正。在考虑像差约束时可将球差 $\delta L'$ 、彗差 K_s' 、畸变 $\delta y_z'$ 作为主要考虑因素。标定器光学系统一般由 3 组透镜构成，如图 1 所示。设需要校正的标定器放大率误差为 $d\beta/\beta$ ，同时要求像面位置不变。

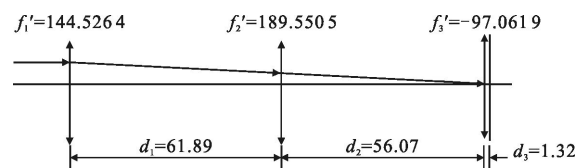


图 1 某标定器光学系统图

Fig.1 Optical system of calibration device

实验中,取各透镜轴向误差量 $d\xi_i=1$,近轴光线满足 $h_1=100, u_1=0$,先利用公式(10)计算光线对每一块透镜的入射高度 h_i' 、物方孔径角 u_i 、像方孔径角 u_i' :

$$\begin{pmatrix} h_i' \\ u_i' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{d_i}{f_i'} & -d_i \\ \frac{1}{f_i'} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_i \\ u_i \end{pmatrix} \quad (10)$$

然后根据公式(5)、(6)分别计算每组透镜 c_i 和 k_j ,利用 Zemax 软件计算出每一组透镜轴向微位移 $d\xi$ 引起的光学系统像差影响系数 $\frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_i}$ 、 $\frac{\partial K_{sk}'}{\partial x_i}$ 、 $\frac{\partial \delta y_{zk}'}{\partial x_i}$,如表 1 所示。

表 1 各透镜的像差影响系数值

Tab.1 Aberration influence coefficient of lens

No.	$\frac{\partial \delta L_k'}{\partial x_i}$	$\frac{\partial K_{sk}'}{\partial x_i}$	$\frac{\partial \delta y_{zk}'}{\partial x_i}$
1	-0.000 02	-0.001 2	0.000 3
2	0.000 6	0.000 5	-0.000 2
3	-0.000 5	0.000 7	-0.000 08

光学系统由三组透镜构成,因此存在三种调整方法,根据公式(9)计算由三种方法引起的像差增量 $d\beta/\beta$ 如表 2 所示。

表 2 各调整方法引起的像差增量计算值

Tab.2 Calculated value of aberration increments raised by different adjustment methods

No.	$\Delta \delta L_k'/\text{mm}$	$\Delta K_{sk}'/\text{mm}$	$\Delta \delta y_{zk}'/\text{mm}$
1 and 3	-0.048 34	0.060 09	-0.005 86
1 and 2	-0.082 60	-0.240 92	0.070 19
2 and 3	-0.046 82	0.073 44	-0.009 24

取 $d\beta/\beta=-0.000 5$,该值超出应当校正的范围,设此时 $dx'=0$ 。在 Zemax 软件中通过绩效函数编辑器设置改变透镜的轴向位置,将光学系统焦距设置为失调焦距。根据公式(7)分别计算表 2 中三种调整方案中的透镜调整量 $d\xi_1$ 和 $d\xi_2$,将 $d\xi_1$ 和 $d\xi_2$ 分别代入 Zemax 中进行仿真,得到调整后的系统像差增量仿真结果如表 3 所示,与表 2 中的计算结果相比较,二者的比例关系是一致的,这说明文中提出的基于

像差约束的透镜轴向失调理论是正确的。

表 3 各调整方法引起的像差增量 Zemax 仿真值

Tab.3 Zemax simulation value of aberration increments raised by different adjustment methods

No.	$\Delta \delta L_k'/\text{mm}$	$\Delta K_{sk}'/\text{mm}$	$\Delta \delta y_{zk}'/\text{mm}$
1 and 3	-0.000 052	-0.000 042	0.000 005
1 and 2	0.000 073	0.000 175	-0.000 078
2 and 3	0.000 051	-0.000 055	0.000 009

通过比较,按照像差约束原则,选择透镜 1 和透镜 3 的组合作为光学系统消除放大率误差的调整方法,这种调整方法在满足放大率调整要求和像平面位移为 0 的前提下引入的像差增量最小。

常用调整方案为透镜 1 和透镜 2 的组合,引入的误差增量是透镜 1 和透镜 3 组合引入球差增量的 1.7 倍,彗差增量的 4 倍,畸变增量的 12 倍,显然采用透镜 1 和透镜 3 的组合进行放大率误差校正能够有效地抑制像差增量,调整后系统具有与调整前系统相似的像差值。

光学系统单片透镜相对移动会综合影响光学系统最终的成像质量,利用 MTF 作为评价函数,比较三种调整方法对 MTF 的影响。图 2 为调整透镜 1

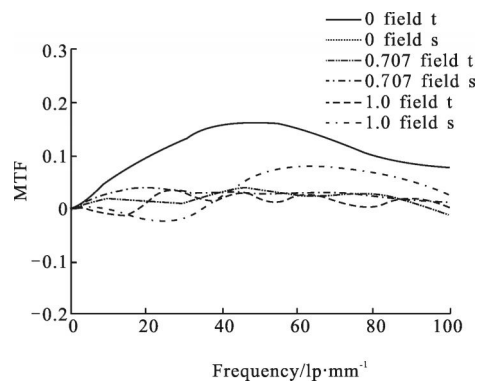


图 2 透镜 1 和 3 的组合校正 MTF 及其与设计 MTF 的相对误差

Fig.2 Relative error between original MTF and adjusted MTF by lens 1 and lens 3 adjustment combination

和透镜 3 的组合校正失调后系统的 MTF 及其与设计 MTF 的相对误差;图 3 为调整透镜 1 和透镜 2 的组合校正失调后系统的 MTF 及其与设计 MTF 的相对误差;图 4 为调整透镜 2 和透镜 3 的组合校正失

调后系统的 MTF 及其与设计 MTF 的相对误差。三种调整方法比较可见,透镜 1 和透镜 3 的组合引起的 MTF 在近轴、0.707 视场、1.0 视场变化量最小,与设计 MTF 最为接近,对系统成像质量影响最小。

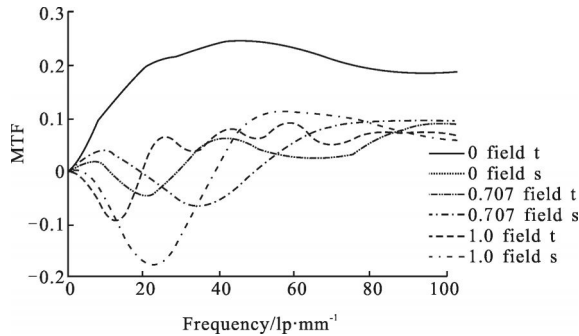


图 3 透镜 1 和 2 的组合校正 MTF 及其与设计 MTF 的相对误差

Fig.3 Relative error between the original MTF and the adjusted MTF by lens 1 and lens 2 adjustment combination

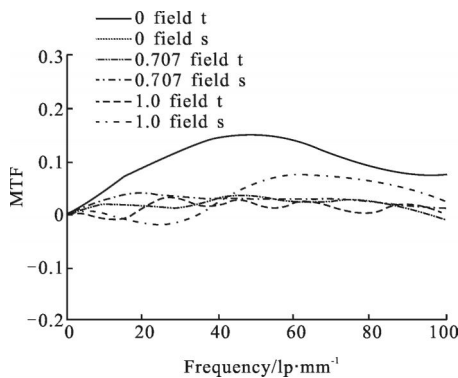


图 4 透镜 2 和 3 的组合校正 MTF 及其与设计 MTF 的相对误差

Fig.4 Relative error between the original MTF and the adjusted MTF by lens 2 and lens 3 adjustment combination

3 结论

透镜位置的失调会引起光学系统性能参数的下降,现有的光学检校理论能够将光学系统的像面位置和放大率校正到设计值,然而校正后的光学系统往往会成像质量下降,需要改进。文中通过研究校正过程中透镜移动量对像差的影响,将像差约束引导到校正方法中,使最后的校正结果既能满足高斯光学特性的要求,又能满足像差变化量最小的要求。文中的优化方法能够为实际光学校正提供必要的参考和理论依据。

参考文献:

- [1] Zhang Dongge, Fu Yutian. Surrogate model used for computer aided alignment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 680-685. (in Chinese)
张东阁,傅雨田. 计算机辅助装调的代理模型方法 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 680-685.
- [2] Sun Jingwei. Alignment technique for the large-aperture telescope based on astigmatism [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 427-435. (in Chinese)
孙敬伟. 利用像散分析实现的大口径望远镜装调技术[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 427-435.
- [3] Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Computer -aided alignment of off axis three-mirror using Zernike coefficients [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1754-1759. (in Chinese)
巩盾, 田铁印, 王红. 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1754-1759.
- [4] Yang Xiaofei, Zhang Xiaohui, Han Changyuan. Alignment of a three-mirror off-axis aspherical optical system by using gradual aberration optimization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 4(1): 115-120. (in Chinese)
杨晓飞, 张晓辉, 韩昌元. 用像差逐项优化法装调离轴三反射镜光学系统[J]. 光学学报, 2004, 4(1): 115-120.
- [5] Zhao Yang, Gong Yan. Computer aided alignment of small scale projected objective [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 394-400. (in Chinese)
赵阳, 巩岩. 投影物镜小比率模型的计算机辅助装调[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 394-400.
- [6] Zhao Feifei, Tang Jianyu, Huang Wei, et al. Computer-aided alignment for the lithographic lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0622001. (in Chinese)
赵菲菲, 唐剑宇, 黄玮, 等. 投影光刻物镜的计算机辅助装调[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0622001.
- [7] Liao Zhibo, Wang Chunyu, Li Mengjuan, et al. Research on computer-aided alignment based on refract optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2453-2456. (in Chinese)
廖志波, 王春雨, 栗孟娟, 等. 透射式光学系统计算机辅助装校技术初步研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2453-2456.
- [8] Cheng Shoucheng. Calibration Theory of Optical Instruments [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1992. (in Chinese)
程守澄. 光学仪器检校[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.