

某型机载反射式光学成像系统失调空中校正方法

刘莹奇 陆红强 李炜 白钊 万菁昱 徐红伟 孟立庄 王磊磊 胡博 杨晓强

Misalignment correction method of an airborne reflective imaging system in the sky

LIU Yingqi, LU Hongqiang, LI Weipeng, BAI Zhao, WAN Jingyu, XU Hongwei, MENG Lizhuang, WANG Leilei, HU Bo, YANG Xiaoqiang

引用本文:

刘莹奇, 陆红强, 李炜, 等. 某型机载反射式光学成像系统失调空中校正方法[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 763–767. DOI: 10.5768/JAO202344.0401009

LIU Yingqi, LU Hongqiang, LI Weipeng, et al. Misalignment correction method of an airborne reflective imaging system in the sky[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(4): 763–767. DOI: 10.5768/JAO202344.0401009

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0401009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复眼式光学成像系统畸变测量与校正技术研究

Distortion measurement and correction method on compound-eye optical imaging system

应用光学. 2021, 42(4): 717–722 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403004>

机载相机非球面光学系统热光学特性分析

Analysis of thermal optical properties of airborne camera aspheric optical system

应用光学. 2020, 41(2): 270–275 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201006>

广角红外地球敏感器光学系统设计及畸变校正

Design of optical system of wide angle infrared earth sensor and study on distortion correction

应用光学. 2018, 39(2): 257–261 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0206001>

基于长焦距、大口径反射式光学系统成像的工艺技术研究

Alignment technology for reflective optical system imaging with long focus and wide aperture

应用光学. 2017, 38(4): 627–631 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0405001>

大视场反射式施密特光学系统设计与检测

Optical design and detection for reflective Schmidt system with large field of view

应用光学. 2020, 41(2): 265–269 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201005>

超大视场折反射全景光学成像系统设计

Design of catadioptric panoramic optical imaging system with ultra-large field of view

应用光学. 2021, 42(4): 608–613 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401006>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 04-0763-05

某型机载反射式光学成像系统失调空中校正方法

刘莹奇¹, 陆红强¹, 李炜芃², 白钊¹, 万菁昱¹, 徐红伟¹, 孟立庄¹,
王磊磊¹, 胡博¹, 杨晓强¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 中国人民解放军 93427 部队)

摘要: 反射式高分辨力光学系统是未来机载望远系统的发展方向。当光学系统工作在航空平台, 由于受温度变化、振动冲击等因素的影响, 光学系统将存在失调误差, 需要对其进行空中校正。建立了反射镜失调量与泽尼克 (Zernike) 系数之间的非线性函数数学模型, 采用 Bhattacharyya 系数方法去除相关性强的失调量, 减少空中装调的复杂程度, 增加可靠性。经过校正某同轴三反消像散系统, 计算结果表明, 系统的波像差均方根值 (RMS) 减小到 0.025λ , 与设计值相差小于 0.014λ , 满足空中装调需求。

关键词: 机载光学系统; 失调; 空中校正; Zernike 系数

中图分类号: TN21

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0401009

Misalignment correction method of an airborne reflective imaging system in the sky

LIU Yingqi¹, LU Hongqiang¹, LI Weipeng², BAI Zhao¹, WAN Jingyu¹, XU Hongwei¹,
MENG Lizhuang¹, WANG Leilei¹, HU Bo¹, YANG Xiaoqiang¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. Unit 93427 of PLA)

Abstract: The reflective high-resolution optical system is the future development direction of airborne telescope system. When the optical system works on the aviation platform, there will exist offset errors in the optical system, which needs to be corrected in the air due to the influence of temperature change, vibration and impact. The nonlinear function mathematical model between mirror misalignment and Zernike coefficients was established, and the Bhattacharyya coefficient method was used to eliminate the highly correlated misalignment, reduce the complexity of the air alignment and increase the reliability. After correcting a coaxial three-mirror anastigmatic system, the results show that the root-mean-square (RMS) value of wavefront aberration reduces to 0.025λ , which is 0.014λ different from the design value, and satisfies the demands of air alignment.

Key words: airborne optical system; misalignment; aerial correction; Zernike coefficient

引言

反射式高分辨力光学系统是未来机载望远系统的发展方向^[1]。当光学系统工作在航空平台, 由于光机结构使用环境变化, 且在上升、下降、机动过程中经历振动等各种因素的影响, 并且由于失重造成的面型变化等原因, 都将造成光学系统失调误差^[2-3]。此外, 航空光电任务系统追求载荷小

型化、轻量化设计, 体积和质量的减小, 意味着飞行速度和距离的增加, 而光学结构小型化会急剧增加光机结构刚度、光学像差校正难度以及光学元件位置公差灵敏度, 尤其是长焦距反射式光学成像系统, 对光学元件的失调误差更为敏感^[4-5]。

星载反射式高分辨力光学系统在轨装调是目前研究的热点, 例如詹姆斯·韦伯空间望远镜

收稿日期: 2022-11-24; 修回日期: 2023-04-12

基金项目: 航空装备预先研究项目 (KTT-LH135BJ-19-03)

作者简介: 刘莹奇 (1984—), 男, 博士后, 研究员, 主要从事新型机载光电系统技术研究。E-mail: a1032510210@126.com

(JWST), 其主镜采用拼接形式, 发射时折叠, 入轨后因为需要展开, 必然会经历展开的不确定性, 这就意味着在光学系统开始工作之前必须对光学系统进行在轨复原, 而检测在轨光学系统的失调误差, 得到需要的校正量便成为亟需解决的问题^[6]。其主镜和次镜在轨展开伊始, 强大的波前探测和控制算法便开始工作, 对其主镜子镜和次镜进行在轨调整。

机载光电系统相对于星载光电系统, 由于快速响应及更强机动灵活性特性, 对其光电载荷各方面性能提出了更高的要求, 而且光电吊舱受到体积、质量、成本等诸多约束条件的限制而工作在非最佳状态下^[7], 空中装调如应用类似詹姆斯·韦伯等空间望远镜采用大规模波前传感器、波前校正器、多自由度调整平台等完整链路的主动光学^[8]与自适应光学技术^[9], 代价大且不现实。因此, 需结合飞机光电平台特点, 研究适合机载反射式光学成像系统失调空中校正新方法。

光学系统的元件位置与像差之间存在着一定的数学关系, 而 Zernike 系数与赛德尔像差之间有着直接的联系^[10], 因此可以用 Zernike 系数来表征光学系统的像差变化。为了适应机载反射式光学成像系统空中环境要求, 以求能用最低代价、最少的调整量、最快速度空中复原光学系统, 本文建立了反射镜失调量与 Zernike 系数之间的非线性函数数学模型, 通过非线性函数的泰勒一阶近似获得线性系数矩阵, 将非线性模型转换成线性模型。采用 Bhattacharyya 系数^[11]的方法来判断系数矩阵中列变量之间的相关程度, 去除相关性强的变量, 从而确定出减少变量后系统的待调整量。最后采用该算法对同轴三反消像散光学系统进行校正, 验证该方法可行性。

1 数学模型

光学系统失调时, 光学元件的位置与设计状态不一致, 元件的偏心和倾斜会引入波像差^[12]。本文从系统的失调量与 Zernike 系数之间的关系入手, 建立它们之间的函数关系, 利用计算机仿真模拟求解出失调量, 用于指导空中装调。

从数学上来说, 像差应该是光学元件位置结构参数的函数。光学系统的 Zernike 系数用 $F_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 来表示, 各元件位置结构参数用 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 来表示, 则二者之间的函数关系可表示为

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $f_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 代表 Zernike 系数与反射镜位置之间的函数关系。这是一个非常复杂的非线性方程, 无法求出具体的形式。在一定的误差范围内, 为了能进行代数求解, 对其进行泰勒一阶近似展开, 将 Zernike 系数与位置结构参数之间的函数关系近似用线性方程代替:

$$F_j = F_{0j} + \frac{\partial f_j}{\partial x_1} (x_1 - x_{01}) + \frac{\partial f_j}{\partial x_2} (x_2 - x_{02}) + \dots + \frac{\partial f_j}{\partial x_n} (x_n - x_{0n}) \quad (2)$$

式中: F_{0j} 为光学系统设计结果中残留的 Zernike 系数值; F_j 为测量得到的当前 Zernike 系数值; $(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})$ 为原始系统各镜面的设计位置结构参数; $\left(\frac{\partial f_j}{\partial x_1}, \frac{\partial f_j}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f_j}{\partial x_n}\right)$ 为 Zernike 系数对各个位置参数的一阶偏导数。

函数值相对各个结构参数的微商 $\left(\frac{\partial f_j}{\partial x_1}, \frac{\partial f_j}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f_j}{\partial x_n}\right)$ 用差商 $\left(\frac{\delta f_j}{\delta x_1}, \frac{\delta f_j}{\delta x_2}, \dots, \frac{\delta f_j}{\delta x_n}\right)$ 来近似代替, 可以得到像差与失调量之间的近似线性方程:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{01} \\ F_{02} \\ \vdots \\ F_{0m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1} \Delta x_1 + \frac{\delta f_1}{\delta x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\delta f_1}{\delta x_n} \Delta x_n \\ \frac{\delta f_2}{\delta x_1} \Delta x_1 + \frac{\delta f_2}{\delta x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\delta f_2}{\delta x_n} \Delta x_n \\ \vdots \\ \frac{\delta f_m}{\delta x_1} \Delta x_1 + \frac{\delta f_m}{\delta x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\delta f_m}{\delta x_n} \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(3)表示为矩阵形式:

$$\Delta F = \Delta F_0 + \Delta F \quad (4)$$

式中:

$$\Delta F = \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta F_2 \\ \vdots \\ \Delta F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_{01} \\ F_{02} \\ \vdots \\ F_{0m} \end{bmatrix}$$

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{01} \\ x_{02} \\ \vdots \\ x_{0n} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta x_1} & \frac{\delta f_1}{\delta x_2} & \dots & \frac{\delta f_1}{\delta x_n} \\ \frac{\delta f_2}{\delta x_1} & \frac{\delta f_2}{\delta x_2} & \dots & \frac{\delta f_2}{\delta x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta f_m}{\delta x_1} & \frac{\delta f_m}{\delta x_2} & \dots & \frac{\delta f_m}{\delta x_n} \end{bmatrix}$$

A 称为灵敏度矩阵,可根据光学设计数据得出。由于式(4)为超定方程组,不存在满足所有方程式的准确解,只能求出它的最小二乘解。如果矩阵 $A^T A$ 非奇异,得到其表达式为

$$DX = (A^T A)^{-1} A^T D F \quad (5)$$

2 灵敏度矩阵的构造

由于 Zernike 系数与失调量之间的关系是非线性的,并且由于失调量比较多,因此可能出现失调量之间相关,使得矩阵 $A^T A$ 出现病态,无法正确求解出校正量用于指导空中装调。

在大口径望远镜系统中,主镜的体积和质量相对庞大,利用后续光路小反射镜等体积小与质量轻优点,将次镜或者三镜设计成多自由度可调整的机构具有实际意义^[13]。在对同轴三反消像散系统进行空中装调时,假定主镜、次镜固定不动,三镜具有沿 x 轴和 y 轴的偏心 D_x 、 D_y 和倾斜 T_x 、 T_y 以及沿 z 轴的平移 D_z 五个自由度的运动。这样,因为三镜沿光轴的移动可以通过离焦来补偿,因此我们不考虑这个失调量,可以得到影响 Zernike 系数变化的 4 个失调量: D_x 、 D_y 、 T_x 和 T_y 。

因为反射式高分辨力光学系统往往还需要较大的视场,故不能牺牲边缘视场以保证中心视场的成像质量。因此我们选择 3 个视场的 Zernike 系数。根据失调系统像差理论,光学元件的倾斜和偏心使得系统产生附加的像差,例如慧差、像散、场曲和畸变的变化,球差的变化很小,其中慧差和像散是主要像差^[14]。通过 Zernike 系数与 Seidel 系数之间关系,在选择 Zernike 多项式变化量的时候我们选择表征慧差、像散等变化比较明显的系数项,而不选择表征球差等失调量几乎不被影响的系数项^[15]。最后,我们选取了 3 个视场的 4 项 Zernike 系数(x -coma、 y -coma、 x -astig、 y -astig)作为校正对象。

利用光学设计软件 Zemax,对三镜的 4 个自由度分别施加微扰后得到 Zernike 系数的变化量,并得到每个视场的 Zernike 系数变化量。由前面的分析可知,校正对象对该失调量的差商为 $\delta f_j / \delta x_n$ 。对每个失调量都取差商,得到灵敏度矩阵 A 。

由以上的分析可知,灵敏度矩阵中存在相关现象,灵敏度矩阵 A 直接关系着能否求解出失调量,因此,必须去除相关变量,得到正确的失调量解。本文采用 Bhattacharyya 系数的方法来判断灵敏度矩阵中列变量之间的相关程度,去除相关性强的

变量,从而确定出系统的待调整量。这种方法是用所确定的调整变量的变化补偿其他相关变量的失调,其收敛速度快,而且需要调整的自由变量少,可以减小空中装调的复杂程度,缩短装调周期,增加可靠性。

$$\rho(y) = \rho[\hat{p}_u(y), \hat{q}_u(y^*)] = \frac{\sum_{u=0}^m \sqrt{\hat{q}_u(y^*)} \hat{p}_u(y)}{\sum_{u=0}^m \sqrt{\hat{q}_u^2(y^*)} \cdot \sum_{u=0}^m \sqrt{\hat{p}_u^2(y^*)}} \quad (6)$$

$\rho(y)$ 称为 Bhattacharyya 系数,其几何意义为 2 个 m 维向量 $(\sqrt{\hat{q}_1}, \dots, \sqrt{\hat{q}_m})$ 和 $(\sqrt{\hat{p}_1}, \dots, \sqrt{\hat{p}_m})$ 夹角的余弦。

3 数值模拟

3.1 光学系统

反射式系统具有不产生色散、口径可以做得很大、并且易于轻量化、抑制杂散辐射等优点,因此,长焦距的光学系统大多采用反射式系统。而为了获得较大视场,常采用三反形式^[16],但三反消像散系统的装调一直是比较困难的事情。尤其当系统空中成像时,会增加更多不确定因素,这就为系统的装调带来更大的难度。

本文模拟了一个同轴三反消像散光学系统,焦距 1.5 m, $F\#$ 为 6,视场 $1.5^\circ \times 0.5^\circ$,光学结构如图 1 所示。

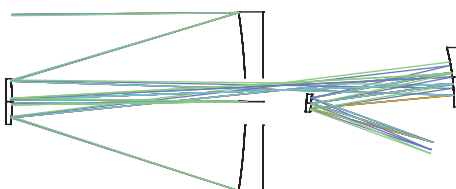


图 1 同轴三反光学系统

Fig. 1 Schematic of co-axial three-mirror optical system

经过光学优化设计,达到衍射极限后的系统 3 个视场的波前 RMS 值如表 1 所示(单位: $\lambda = 632.8 \text{ nm}$)。

表 1 光学系统设计各视场波前 RMS 值
Table 1 Wavefront RMS values of each field of view after optical optimization design

	波前RMS
视场1	0.008 62
视场2	0.009 86
视场3	0.011 75

3.2 数值计算及结果

利用上述方法,首先对每个失调量分别施加微

扰,得到 3 个视场的 Zernike 系数,对每个失调量求差商得到灵敏矩阵 A ,如表 2 所示。然后采用 Bhattacharyya 系数的方法来判断灵敏矩阵 A 中列向量之间的相关程度,得到列向量之间相关性最小的灵敏度矩阵,用于求解失调量。

表 2 灵敏度矩阵 A
Table 2 Sensitivity matrix A

	ΔD_x	ΔD_y	ΔT_x	ΔT_y
ΔF_1	0.029	-0.001	0.001	-0.473
ΔF_2	0.001	0.027	0.514	-0.001
ΔF_3	0.002	0.046	0.345	-0.003
ΔF_4	0.052	-0.002	0.003	-0.321
ΔF_5	0.032	-0.005	0.013	-0.282
ΔF_6	0.004	0.031	0.248	-0.014
ΔF_7	0.007	0.037	0.432	-0.009
ΔF_8	0.043	-0.008	0.003	-0.417
ΔF_9	0.057	-0.001	0.028	-0.837
ΔF_{10}	0.001	0.060	0.893	-0.029
ΔF_{11}	0.012	0.047	0.765	-0.023
ΔF_{12}	0.048	-0.016	0.021	-0.648

用上面一节中提到的 Bhattacharyya 系数方法来计算灵敏矩阵 A 中各列的相关性,离轴和倾斜之间存在补偿关系^[17],为了尽可能简化空中装调的复杂程度,我们用其中一组变量来补偿另外一组变量引起的像质下降。这样,我们得到:

$$A(\Delta D_x, \Delta D_y) = 2, A(\Delta T_x, \Delta T_y) = 34$$

因此,我们把 $A(\Delta D_x, \Delta D_y)$ 作为灵敏度矩阵来进行计算,而且实际上平移运动比旋转运动更好控制,精度更高。

现随机给定次镜 4 个自由度一定的失调,失调量分别为: $D_x=0.045$ mm、 $D_y=0.06$ mm、 $T_x=0.01^\circ$ 和 $T_y=0.02^\circ$,得到系统包含失调量在内的有效的 Zernike 系数,从而求得 ΔF ,将 ΔF 和上面得到的灵敏度矩阵 A 代入到式(5),求解得到校正量。然后把校正量代入到 Zemax 中优化系统。当系统具有失调时 3 个视场的波前 RMS 值以及分别经过 1 次和 3 次迭代后的波前 RMS 值如表 3(单位: $\lambda=632.8$ nm)所示。

将表 3 中的数据与表 1 中的数据进行对比可知,在 3 次迭代后,系统的波前 RMS 值已减小到 0.025λ ,满足系统装调的需要。

当系统具有较大的失调量时,需要迭代的次数也随之增多。图 2 给出了失调量分别为 $D_x=0.09$ mm、

$D_y=0.12$ mm、 $T_x=0.02^\circ$ 和 $T_y=0.04^\circ$ 时,多次迭代的系统 3 个视场的波前 RMS 值变化趋势。由图 2 可知,虽然失调量较大时,系统的波前 RMS 值也比较大,若要满足系统装调要求,需要的迭代次数也较多,但是迭代持续收敛,最终能满足系统要求。

表 3 迭代后的 3 个视场的波前 RMS
Table 3 Wavefront RMS values of three fields of view after iteration λ

迭代数量	视场1-波前RMS	视场2-波前RMS	视场3-波前RMS
失调状态	0.178 6	0.182 1	0.194 3
第1次迭代后	0.087 5	0.089 8	0.094 3
第3次迭代后	0.024 7	0.024 9	0.025 1

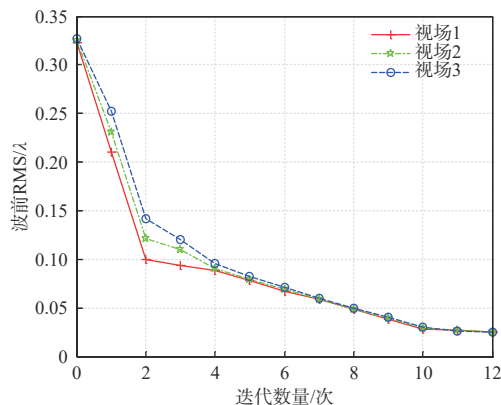


图 2 多次迭代的系统 3 个视场的波前 RMS 值变化趋势
Fig. 2 Variation trend of wavefront RMS values of three fields of view with iterations

实际应用中,将三镜设置在两轴压电陶瓷驱动位移平台,通过两轴平移运动补偿复杂的失调误差。同时,光学系统各视场 Zernike 系数,可采用无波前传感器相位波前探测技术^[18]得出,如相位差异(PD)^[19]、随机并行梯度下降算法(SPGD)^[20]等。

4 结论

本文研究了机载平台高分辨力反射式光学系统空中失调校正方法。数据模拟结果表明,利用 Zernike 多项式与失调量之间的关系对失调系统进行校正,在仅 3 次迭代后,光学系统的波前 RMS 值已经减小到 0.025λ ,满足系统装调的需要。并且,当系统具有较大的失调量时,需要迭代的次数也随之增多,但是迭代一直收敛,最终可以得到期望的结果。当系统的失调量较小时,迭代次数也较少,只需几次迭代便可以快速达到系统的要求,与星载光学载荷研究的在轨失调校正方法相比,降

低了复杂度,增加了可靠性。此外,实时性是机载光电系统最基本的要求,有限次收敛迭代能够提高系统闭环检测装调的实时性,因此该方法具有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] WILSON R. Reflecting telescope optics I [M]. England: Springer, 1996: 113-128.
- [2] SAGEM. EUROFLIR 410 mm gyrostabilized optronic payload[M]. France: Sagemcom, 2009: 156-185.
- [3] RAYTHEON. AN/AAS-52 multi-spectral targeting system[M]. US: Raytheon, 2005: 27-35.
- [4] OTEO E, ARASA J. New strategy for misalignment calculation in optical systems using artificial neural networks[J]. Optical Engineering, 2013, 52(7): 71-87.
- [5] OHIA E S, SASIAN J, YOUNG R N, et al. Integration of differential wavefront sampling with merit function regression for efficient alignment of three-mirror anastigmat optical system[J]. SPIE, 2010, 48(3): 1748-1754.
- [6] BERNARD D S. The James Webb space telescope[J]. SPIE, 2003, 17(5): 170-178.
- [7] 纪明, 许培忠, 徐飞飞. 武装直升机光电系统发展与对策[J]. 应用光学, 2010, 31(1): 1-7.
JI Ming, XU Peizhong, XU Feifei. Development of optoelectronic systems for armed helicopters[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(1): 1-7.
- [8] LIANG M, KRABBENDAM V, CLAVER C F, et al. Active optics in large synoptic survey telescope[J]. SPIE, 2012, 95(2): 1310-1318.
- [9] 姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 1-15.
JIANG Wenhan. Overview of adaptive optics development[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(3): 1-15.
- [10] KIM E D, CHOI Y W, KANG M S, et al. Reverse-optimization alignment algorithm using zernike sensitivity[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2005, 9(2): 68-73.
- [11] BIDYUT K P, RAIMO L, VILLE O, et al. A new similarity measure using Bhattacharyya coefficient for collaborative filtering in sparse data[J]. Knowledge-Based Systems, 2015, 82(3): 163-177.
- [12] MANUEL A M. Alignment aberrations of the new solar telescope[J]. SPIE, 2009, 42(3): 7433-7458.
- [13] UPTON R, SASIAN J, YOUNGWORTH R N, et al. Active reconstruction and alignment strategies for the advanced technology solar telescope[J]. SPIE, 2010, 48(7): 1918-1932.
- [14] REGIS T. Analysis for alignment of optical systems[D]. Tucson: University of Arizona, 2003.
- [15] KEVIN T. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry[J]. Optical Society of America, 2005, 22(7): 1389-1401.
- [16] 李旭阳, 李英才, 马臻, 等. 折轴三反射光学系统的计算机辅助装调技术研究[J]. 应用光学, 2009, 30(6): 901-906.
LI Xuyang, LI Yingcai, MA Zhen, et al. Computer-aided alignment method of coaxial three-mirror-anastigmat system[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 901-906.
- [17] ROGERS J R. Techniques and tools for obtaining symmetrical performance from tilted component systems[J]. Optical Engineering, 2001, 39(4): 1776-1787.
- [18] 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综合校正[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0626003.
HAN Xingzi, HU Xinqi, YU Xin. Precisely integrated wavefront sensorless calibration of high-resolution space remote optical system with large position errors[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0626003.
- [19] HUANG S, XI F, LIU C, et al. Phase retrieval on annular and annular sector pupils by using the eigenfunction method to solve the transport of intensity equation[J]. Optical Society of America, 2012, 29(4): 513-524.
- [20] 徐项项, 吴阳, 苏杭, 等. 基于FPGA的自适应光学系统SPGD算法实现[J]. 应用光学, 2021, 42(5): 810-816.
XU Xiangxiang, WU Yang, SU Hang, et al. FPGA-based SPGD algorithm implementation of adaptive optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(5): 810-816.