

基于矢量波像差理论的两反系统装配失调解算方法

郭攀¹, 周军², 丁晓宇¹, 刘检华^{1*}, 盛忠²

¹北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081;

²北京遥感设备研究所, 北京 100854

摘要 以矢量波像差理论中的三级像差理论为基础,提出了一种两反系统装配失调解算方法。该方法仅采用轴上视场波前像差系数建立失调解算模型,然后基于球差系数解算间隔误差,并基于彗差和像散系数解算偏心和倾斜误差,大幅提高了解算精度和效率。以某一两反光学系统为例,利用光学设计软件 Zemax 进行模拟装调,系统轴上视场失调像差系数均减小到 10^{-7} 数量级,失调误差均校正到 10^{-5} 数量级,达到了良好的装调效果。最后,利用该失调解算模型指导两反光学系统的装调,失调解算精度及装调精度达到了使用要求。Zemax 模拟装调结果和实际装调效果均证明了所提方法的正确性。

关键词 光学设计; 两反系统; 矢量波像差; 计算机辅助装调

中图分类号 TH743

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0722002

Method to Solve Assembly Misalignment of Two-Reverse System Based on Vector Wave Aberration Theory

Guo Pan¹, Zhou Jun², Ding Xiaoyu¹, Liu Jianhua^{1*}, Sheng Zhong²

¹School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100854, China

Abstract This study proposes a method to solve the assembly misalignment of two-reverse systems based on the three-level aberration theory in vector wave aberration theory. The proposed method uses the wavefront aberration coefficient of the axial field of view to establish a model for the misalignment solution. Then, the interval error is solved based on the spherical aberration coefficient. The eccentricity and inclination error are solved based on the coma error and astigmatism coefficient, which considerably improves the accuracy and efficiency of the solution. Using a two-reverse optical system as an example, the alignment is simulated based on the Zemax optical design software, the disorder aberration coefficient of axial field of view is reduced to 10^{-7} orders of magnitude, the misadjustment error correction is reduced to 10^{-5} orders of magnitude, and good alignment effect is achieved. The model is used to guide the alignment of a two-reverse system, so that the calculating precision and the alignment accuracy meet the requirements. The Zemax simulation and practical results demonstrate that the proposed method functions correctly.

Key words optical design; two-reverse system; vector wave aberration; computer-aided alignment

OCIS codes 220.1140; 220.1250; 220.4610

1 引 言

近年来,随着光学制造技术和检测技术的发展,反射式光学系统得到了普遍应用,其中又以两反光学系统的应用最为广泛。两反光学系统具有波段宽、体积轻小和装调相对简单等显著优势^[1],被广泛应用于精确制导、航空、航天、天文探测等领域。尽

管两反光学系统的设计、制造、检测和装配方法已趋于成熟,但在工程应用中,这些方法大部分需要依赖于个人经验与手工操作,在面向批量、稳定性与一致性要求时,极不适用。装配阶段对光学元件位姿精度的失调以及失调的随机性是影响两反光学系统成像质量好坏、一致性和装配效率的主要因素。因此,面对装配一致性与高效率的要求,建立两反光学系

收稿日期: 2019-01-07; 修回日期: 2019-03-10; 录用日期: 2019-03-22

基金项目: “十三五”国防基础科研项目(JCKY2016204B201)、国家自然科学基金(51605030,51675050)

* E-mail: Jeffliu@bit.edu.cn

统光学元件失调量解算模型和方法具有重要意义。

目前,相关学者提出过许多光学系统失调量的解算方法,主要分为数值法和解析法两种。数值法通过人为构造一个数值模型来代替失调量与波像差之间复杂的函数关系,包括灵敏度矩阵模型、逆向优化法和微分波前采样法等。解析法则从像差理论的角度分析系统的失调问题,主要包括矢量波像差模型。在灵敏度矩阵模型研究方面,Hvisc等^[2]、杨晓飞^[3]、孙敬伟等^[4]完成了相关光学系统的装调,并取得了较好的装调效果,但通过进一步研究发现,当系统失调量过大时,灵敏度矩阵的解算求解并不准确。在逆向优化法研究方面,Kim等^[5]发现系统波像差 Zernike 系数与失调量之间并非线性关系,采用逆向优化法优化卡塞格林系统,使其波像差从 0.283λ 优化到了 0.194λ (λ 为波长)。在微分波前采样法研究方面, Lee 等^[6-8]使用一个视场的波像差 Zernike 系数便完成了对元件失调量的解算,该方法避免了失调量与波像差 Zernike 系数间的非线性问题,但过分依赖于微小失调量的精确测量。在矢量像差模型研究方面, Thompson 等^[9-11]基于 Hopkins 的轴对称光学系统波像差理论提出了矢量波像差理论,国内众多学者也对其进行了深入研究,如顾志远^[12]、孔小辉等^[13]、徐祺瑞^[14]、史浩东等^[15]基于矢量波像差理论分析了特定光学系统的失调像差特性。

传统的失调量解算方法受限于光学系统元件间的耦合效应与元件的失调范围,解算精度和效率会受到较大影响。本文提出了一种基于矢量波像差理论的两反系统装配失调量解算新方法,依据单一轴上的波像差建立装调失调量解算模型,基于球差解算间隔误差,基于像散和彗差解算偏心误差和倾斜误差,可大幅提高解算精度与解算效率。基于该解算模型,通过光学软件 Zemax 对失调两反系统进行了失调量解算仿真计算。最后,结合该解算方法和专门研制的超精密六自由度定位机械臂装置,对解算方法的实际解算精度、效率进行了实验验证。

2 失调两反系统的矢量波像差表达

2.1 两反系统失调量的定义

在全反两镜系统的装调过程中,往往以主镜作为装调基准来调整次镜的位姿。次镜局部坐标系如图 1 所示,其 6 个自由度分别为沿 3 个轴的偏心误差 (D_x 、 D_y 、 D_z) 以及绕 3 个轴的倾斜 (T_x 、 T_y 、 T_z) 误差。由于次镜为轴对称结构,绕 Z 轴旋转不会引起系统的像差发生变化,故系统失调量有 D_x 、 D_y 、

D_z 、 T_x 、 T_y 5 个自由度。

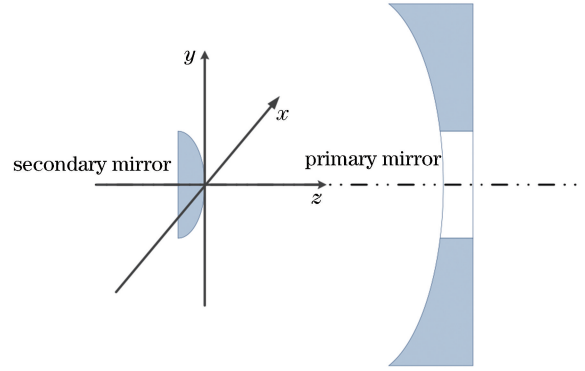


图 1 次镜的自由度

Fig. 1 Degree of freedom of secondary mirror

2.2 像差场中心偏移矢量

根据矢量像差理论,失调、偏心倾斜系统中只是像差的视场相关性发生了改变,而像差孔径的相关性保持不变。如图 2 所示,有效视场矢量 \mathbf{H}_{Aj} 的表达式为

$$\mathbf{H}_{Aj} = \mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j, \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}_j$ 为像差场中心偏移矢量; \mathbf{H} 为视场矢量; j 为光学面序号。确定光学元件失调量与像差场中心偏移矢量的关系,是建立光学系统失调量解算模型的关键。由于绝大多数两反系统的主次镜均为非球面,像差场中心偏移矢量 $\boldsymbol{\sigma}_j$ 分为球面基底部分 $\boldsymbol{\sigma}_{j, \text{sph}}$ 和非球面叠加部分 $\boldsymbol{\sigma}_{j, \text{Asph}}$ 。根据近轴理论,主镜为孔径光阑的两反系统失调量与像差场中心偏移矢量的关系为

$$\left\{ \begin{array}{l} \boldsymbol{\sigma}_{\text{PM}, \text{sph}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\sigma}_{\text{SM}, \text{sph}} = k_1 \begin{bmatrix} D_x - k_2 T_y \\ D_y + k_2 T_x \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\sigma}_{\text{PM}, \text{Asph}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\sigma}_{\text{SM}, \text{Asph}} = k_3 \begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix} \end{array} \right., \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = -\frac{1}{u_{\text{PM}}(r_{\text{SM}} + d_1 + D_z)} \\ k_2 = r_{\text{SM}} \\ k_3 = -\frac{1}{u_{\text{PM}}(d_1 + D_z)} \end{array} \right.$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}_{\text{PM}, \text{sph}}$ 为主镜像差场中心偏移矢量的球面基底分量; $\boldsymbol{\sigma}_{\text{SM}, \text{sph}}$ 为次镜像差场中心偏移矢量的球面基底分量; $\boldsymbol{\sigma}_{\text{PM}, \text{Asph}}$ 为主镜像差场中心偏移矢量的非球面基底分量; $\boldsymbol{\sigma}_{\text{SM}, \text{Asph}}$ 为次镜像差场中心偏移矢量

的非球面基底分量; k_1, k_2, k_3 为像差场中心偏移矢量系数, 由系统结构参数决定, 受间隔误差 D_z 的影响; u_{PM} 为边缘视场主光线在主镜物方的光线倾角; d_1 为主次镜空气间隔; r_{SM} 为次镜近轴曲率半径。

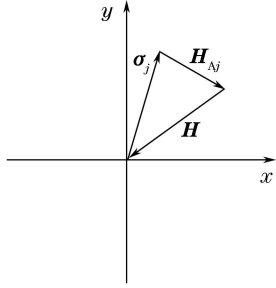


图 2 视场偏移矢量

Fig. 2 Offset vector of field of view

由于主镜为孔径光阑和装调基准, 故主镜并不会引入像差场中心偏移矢量。次镜的偏心和倾斜误差会引入像差场中心偏移矢量。间隔误差 D_z 通过影响系统结构参数间接影响像差场中心偏移矢量。像差场中心偏移矢量建立起了系统失调量与系统视场偏移矢量之间的关系。

2.3 失调两反系统轴上视场的三级矢量波像差表达

根据矢量像差理论, 系统的三级波像差表达式为

$$W_j(\mathbf{H}_j, \boldsymbol{\rho}) = W_{040}(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho})^2 + W_{131}(\mathbf{H}_j \cdot \boldsymbol{\rho})(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + \frac{1}{2}W_{222}(\mathbf{H}_j^2 \cdot \boldsymbol{\rho}^2) + W_{220M}(\mathbf{H}_j \cdot \mathbf{H}_j)(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + W_{311}(\mathbf{H}_j \cdot \mathbf{H}_j)(\mathbf{H}_j \cdot \boldsymbol{\rho}), \quad (3)$$

式中: \mathbf{H}_j 为视场矢量; $\boldsymbol{\rho}$ 为光瞳矢量; $W_{040}, W_{131}, W_{222}, W_{220M}$ 和 W_{311} 分别为光学系统球差系数、彗差系数、像散系数、场曲系数和畸变系数。若光学系统存在非球面, 像差系数 W_{klm} 分为球面基底部分 W_{klm}^{sph}

和非球面叠加部分 W_{klm}^{Asph} , 其中 k, l, m 为区分像差系数的下标。由于场曲和畸变主要产生离焦像差和倾斜像差, 并不影响系统的初级像差, 故本研究主要对球差、彗差和像散进行分析。

当系统存在偏心、倾斜误差时, (3) 式中的视场矢量 \mathbf{H}_j 应采用有效视场矢量 \mathbf{H}_{Aj} 。处于轴上视场时, 其视场矢量 $\mathbf{H} = \mathbf{0}$, 由 (1) 式得到有效视场矢量 $\mathbf{H}_{Aj} = -\boldsymbol{\sigma}_j$ 。将有效视场矢量 \mathbf{H}_{Aj} 代入 (3) 式, 那么存在偏心、倾斜误差时, 处于轴上视场的系统波像差可表示为

$$W_j(\boldsymbol{\sigma}_j, \boldsymbol{\rho}) = W_{040}(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho})^2 + W_{131}[(-\boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}](\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + \frac{1}{2}W_{222}[(-\boldsymbol{\sigma}_j)^2 \cdot \boldsymbol{\rho}^2] + W_{220M}[(-\boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (-\boldsymbol{\sigma}_j)](\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) + W_{311}[(-\boldsymbol{\sigma}_j) \cdot (-\boldsymbol{\sigma}_j)][(-\boldsymbol{\sigma}_j) \cdot \boldsymbol{\rho}]. \quad (4)$$

当且仅当 $\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{0}$ (系统不存在失调) 时, 系统轴上的视场波像差为 0。因此, 可以将轴上视场波前测试结果作为系统装调质量的判据, 而无需进行全视场解算。

2.3.1 失调两反系统轴上视场的三级球差矢量波像差表达

(4) 式中的第一项为三级球差, 与孔径大小的 4 次方成正比, 与系统的像差场中心偏移矢量无关, 其表达式为

$$W_{Asph} = W_{040}(\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho})^2 = W_{040}\rho^4 \Leftrightarrow W_{040} = 6C_9, \quad (5)$$

式中: ρ 为孔径大小; C_9 为 Zernike 多项式三级球差项系数。

利用 Seidel 公式可以直接得到以同轴两反系统结构参量表示的两反系统球差项系数表达式, 即

$$W_{040} = W_{040}^{PM_sph} + W_{040}^{PM_Asph} + W_{040}^{SM_sph} + W_{040}^{SM_Asph} = \frac{1}{8} \left[-\left(\frac{y_1}{f'}\right)^4 f' \frac{m_2^3}{4} \right] + \frac{1}{8} \left[-\left(\frac{y_1}{f'}\right)^4 f' \frac{m_2^3}{4} b_{s1} \right] + \frac{1}{8} \left[-\left(\frac{y_1}{f'}\right)^4 L \frac{(m_2 + 1)^3}{4} \left(\frac{m_2 - 1}{m_2 + 1}\right)^2 \right] + \frac{1}{8} \left[-\left(\frac{y_1}{f'}\right)^4 L \frac{(m_2 + 1)^3}{4} b_{s2} \right], \quad (6)$$

式中: $W_{040}^{PM_sph}$ 为主镜球面部分的贡献; $W_{040}^{PM_Asph}$ 为主镜非球面部分的贡献; $W_{040}^{SM_sph}$ 为次镜球面部分的贡献; $W_{040}^{SM_Asph}$ 为次镜非球面部分的贡献; y_1 为光瞳边缘光线在主镜表面的投射高度; L 为系统后截距; b_{s1}, b_{s2} 分别为主次镜的非球面系数; f' 为系统焦距; m_2 为次镜的放大率。 $\frac{1}{f'} = \frac{-f'_2 + f'_1 - d_1}{f'_1 f'_2}$, $m_2 =$

$\frac{f'}{f_1}$, d_1 为主镜厚度, 表示主次镜空气间隔。根据符号规则, 其值为负。

用 D_z 表征间隔误差, 它主要影响系统结构参数中的主镜厚度 d_1 。故将 (6) 式中的 d_1 用 $d_1 + D_z$ 代替, 联立 (5) 式, 即可得到光学检测中使用广泛的 Zernike 多项式三级球差项系数 C_9 与间隔误差 D_z

的关系式,即

$$\begin{cases} C_9 = k_4 + k_5[(k_9 + D_z)^4 + k_6(k_9 + D_z)^3 + \\ k_7(k_9 + D_z)^2 + k_8(k_9 + D_z)] \\ k_4 = -[(1 + b_{s1})y_1^4] \cdot (192f_1'^3)^{-1} \\ k_5 = [(1 + b_{s2})y_1^4 L] \cdot (192f_1'^4 f_2'^4)^{-1} \\ k_6 = [(3b_{s2} - 1)f_2'^2] \cdot (1 + b_{s2})^{-1} \\ k_7 = [(3b_{s2} - 1)f_2'^2] \cdot (1 + b_{s2})^{-1} \\ k_8 = f_2'^3 \\ k_9 = -f_2' + f_1' + d_1 \end{cases}, (7)$$

式中: $k_4 \sim k_9$ 分别为球差项公式系数,由系统的结构参数决定。(7)式给出了一种解算主次镜间隔的方法,即三级球差系数 C_9 与间隔误差 D_z 为4次函数关系,并非文献[16]中所述的线性关系。

2.3.2 三级彗差和三级像散的矢量波像差表达式

(4)式中的第2、第3项分别代表三级彗差和三级像散。三级彗差与像差场中心偏移矢量呈线性关系,三级像散与像差场中心偏移矢量的平方成正比,分别为

$$W_{\text{Coma}_A} = [W_{131}(-\boldsymbol{\sigma}) \cdot \boldsymbol{\rho}](\boldsymbol{\rho} \cdot \boldsymbol{\rho}) = -W_{131}(\boldsymbol{\sigma}) \begin{bmatrix} \rho^3 \cos \varphi \\ \rho^3 \sin \varphi \end{bmatrix}, (8)$$

$$W_{\text{AST}_A} = \frac{1}{2}W_{222}[(-\boldsymbol{\sigma})^2 \cdot \boldsymbol{\rho}^2] = \frac{1}{2}W_{222}\boldsymbol{\sigma}^2 \begin{bmatrix} \rho^2 \cos(2\varphi) \\ \rho^2 \sin(2\varphi) \end{bmatrix}, (9)$$

式中: W_{Coma_A} 为三级彗差项; W_{AST_A} 为三级像散项; ρ 为视场矢量长度; φ 为视场矢量与视场 x 轴逆向的

夹角。

同球差项类似,两反系统的彗差项 W_{131} 和像散项 W_{222} 由系统结构参数决定,均受间隔误差 D_z 的影响。由于主次镜均为非球面镜,系统像差系数和像差场中心偏移矢量包含球面部分及非球面部分的贡献。因此进一步整理(8)式和(9)式可得

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \sigma_{\text{sph},x} & \sigma_{\text{Asph},x} \\ \sigma_{\text{sph},y} & \sigma_{\text{Asph},y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{131}^{\text{sph}} \\ W_{131}^{\text{Asph}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3C_7 \\ -3C_8 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \sigma_{\text{sph},x}^2 - \sigma_{\text{sph},y}^2 & \sigma_{\text{Asph},x}^2 - \sigma_{\text{Asph},y}^2 \\ 2\sigma_{\text{sph},x}\sigma_{\text{sph},y} & 2\sigma_{\text{sph},x}\sigma_{\text{Asph},y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{222}^{\text{sph}} \\ W_{222}^{\text{Asph}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2C_5 \\ 2C_6 \end{bmatrix} \end{cases}, (10)$$

式中: $\sigma_{\text{sph},x}$ 为次镜像差场中心偏移矢量球面基底部分在 x 轴方向的分量; $\sigma_{\text{sph},y}$ 为次镜像差场中心偏移矢量球面基底部分在 y 轴方向的分量; $\sigma_{\text{Asph},x}$ 为次镜像差场中心偏移矢量非球面基底部分在 x 轴方向的分量; $\sigma_{\text{Asph},y}$ 为次镜像差场中心偏移矢量非球面基底部分在 y 轴方向的分量; W_{131}^{sph} 为系统彗差像差系数球面基底部分的分量; W_{131}^{Asph} 为系统彗差像差系数非球面基底部分的分量; W_{222}^{sph} 为系统像散像差系数球面基底部分的分量; W_{222}^{Asph} 为系统像散像差系数非球面基底部分的分量; C_5 、 C_6 、 C_7 和 C_8 分别为光学系统轴上视场波像差的Zernike系数。由于主镜为孔径光阑,主镜并不会引入失调像差。故(10)式中系统像差项和像差场中心偏移矢量均为次镜的贡献。

将像差场中心偏移矢量表达式(2)式代入(10)式,化简整理可得

$$\begin{cases} C_7 = D_x \cdot W_1 - T_y \cdot W_2 \\ C_8 = D_y \cdot W_1 + T_x \cdot W_2 \\ C_5 = (D_x^2 - D_y^2) \cdot W_3 + (T_y^2 - T_x^2) \cdot W_4 - 2(D_x \cdot T_y + D_y \cdot T_x) \cdot W_5 \\ C_6 = 2D_x \cdot D_y \cdot W_3 - 2T_x \cdot T_y \cdot W_4 + 2(D_x \cdot T_x - D_y \cdot T_y) \cdot W_5 \end{cases}, (11)$$

其中,

$$\begin{cases} W_1 = \frac{k_1 W_{131}^{\text{sph}} + k_3 W_{131}^{\text{Asph}}}{-3} = \frac{y_1^3}{-6f_1'^3} \left[\frac{\xi_0}{r_{\text{SM}} + d_1} \left(-d_1 - \frac{L}{f_1'} f_{\text{EPT}} + \frac{2f_1'}{m_2 - 1} \right) + \frac{\xi^*}{d_1} \left(-d_1 - \frac{L}{f_1'} f_{\text{EPT}} \right) \right] \\ W_2 = \frac{k_1 k_2 W_{131}^{\text{sph}}}{-3} = \frac{r_{\text{SM}} y_1^3 \xi_0}{-6(r_{\text{SM}} + d_1) f_1'^3} \left(-d_1 - \frac{L}{f_1'} f_{\text{EPT}} + \frac{2f_1'}{m_2 - 1} \right) \\ W_3 = \frac{k_1^2 W_{222}^{\text{sph}} + k_3^2 W_{222}^{\text{Asph}}}{2} = \frac{y_1^2}{4f_1'^2} \left[\frac{\xi_0}{(r_{\text{SM}} + d_1)^2} \left(-d_1 - \frac{L}{f_1'} f_{\text{EPT}} + \frac{2f_1'}{m_2 - 1} \right)^2 + \frac{\xi^*}{d_1^2} \left(-d_1 - \frac{L}{f_1'} f_{\text{EPT}} \right)^2 \right], \\ W_4 = \frac{k_1^2 k_2^2 W_{222}^{\text{sph}}}{2} = \frac{r_{\text{SM}}^2 y_1^2 \xi_0}{4(r_{\text{SM}} + d_1)^2 f_1'^2} \left(-d_1 - \frac{L}{f_1'} f_{\text{EPT}} + \frac{2f_1'}{m_2 - 1} \right)^2 \\ W_5 = \frac{k_1^2 k_2 W_{222}^{\text{sph}}}{2} = \frac{r_{\text{SM}} y_1^2 \xi_0}{4(r_{\text{SM}} + d_1)^2 f_1'^2} \left(-d_1 - \frac{L}{f_1'} f_{\text{EPT}} + \frac{2f_1'}{m_2 - 1} \right)^2 \end{cases}, (12)$$

$$\text{式中: } \xi_0 = \frac{(m_2 + 1)^3 (m_2 - 1)^2}{4}; \xi^* = \frac{(m_2 + 1)^3}{4} b_{s2};$$

f_{EPT} 为入瞳相对主镜的距离。

(11)式指出了一种解算偏心误差和倾斜误差的方法,即可由光学系统轴上视场波像差 Zernike 系数 C_5 、 C_6 、 C_7 和 C_8 求解次镜的偏心和倾斜误差。(11)式在一定程度上解释了手工装调过程中 D_x 与 T_y 、 D_y 与 T_x 互相补偿的现象。

(11)式中的系数 W_i 由光学系统的结构参数决定,且受间隔误差 D_z 的影响,因此存在偏心和倾斜误差时应提前校正间隔误差。

2.4 光学面形误差对两反系统波像差的影响

实际上,光学元件都不可避免地存在加工残余面形误差以及由装配应力引起的面形变化。根据光学面的面形误差引入的光程差公式可知,以 Zernike 多项式表征的光学元件面形误差对轴上视场的波像差贡献量为^[17]

$$W_j = (1 - n_k^j) \sum_{i=1}^{37} C_i^j Z_i(\rho, \varphi), \quad (13)$$

式中: j 为光学面序号; W_j 为第 j 个光学面的波像差贡献量; n_k^j 为第 j 个光学面的相对折射率(对于反射面, $n_k^j = -1$); ρ 为原点到光学面上任一点(x, y)的矢量长度; φ 为光学面上任一点(x, y)与 x 轴的逆向夹角。

根据波像差理论可知,系统波像差是系统设计成像误差、失调成像误差和光学元件面形误差之和。故两反光学系统轴上视场波像差可表示为

表 1 光学系统的结构参数

Table 1 Structural parameters of optical system

mm

Surface	Radius	Thickness	Semi-diameter	Conic	4th term parameter	6th term parameter	8th term parameter
PM	-123.110	44	37	-1			
SM	-109.175	25.877	12.5	0	2.393×10^{-6}	3.915×10^{-11}	6.297×10^{-12}
Image	Infinity			0			

3.2 失调像差系数与失调量关系的验证

由(7)式可得,系统球差系数 C_9 是关于间隔误差 D_z 的 4 次函数。由于系统球差系数包含了系统设计残余球差和失调引起的球差,故系统球差系数 C_9 与系统间隔误差 D_z 可改写成

$$C_9 = P(1)D_z^4 + P(2)D_z^3 + P(3)D_z^2 + P(4)D_z + P(5) + C_9^{\text{Designed}}, \quad (15)$$

式中: $P(1) \sim P(5)$ 为拟合系数,为失调引起的球差; C_9^{Designed} 为系统的设计球差系数,为 0.25732638。

在 Zemax 仿真模型中,单独引入间隔误差 D_z

$$C^{i1} = C_{\text{normal}}^{i1} + C_{\text{alignment}}^{i1} + 2C_{\text{PM_figure}}^{i1}, \quad (14)$$

式中: i_1 取值为 5、6、7、8、9,分别代表像散、彗差和球差; C_{normal}^{i1} 为系统设计成像误差 Zernike 系数; $C_{\text{alignment}}^{i1}$ 为失调引起的失调像差 Zernike 系数; $C_{\text{PM_figure}}^{i1}$ 为主镜面形误差 Zernike 系数。

3 模拟装调及解算精度分析

为验证次镜失调量校正数学模型(7)式、(11)式的准确性,利用光学设计软件 Zemax 对一个两反系统进行模拟装调。

3.1 光路模型

该两反系统的主镜为旋转抛物面,次镜为偶次非球面,其光学系统结构形式如图 3 所示,系统参量如表 1 所示。系统焦距为 90 mm。仅采用轴上视场,波长 λ 为 0.6328 μm 。

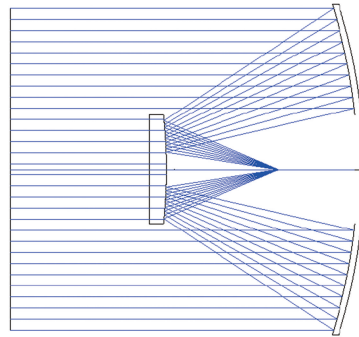


图 3 两反系统的光路

Fig. 3 Optical path of two-reverse system

时,系统失调球差系数 C_9 随间隔误差 D_z 的变化如图 4 所示。Zemax 仿真清晰地表明系统球差与间隔误差 D_z 并非线性关系,而近似为 4 次函数关系,证明了 2.3.1 节中结论的正确性。拟合得到(15)式中的系数分别为 -0.00086304、0.00147260、0.22607891、1.99008896、0。

在 Zemax 仿真模型中单独引入 D_x 、 D_y 、 T_x 、 T_y 中某个失调量时可以计算得到系统失调彗差系数与偏心误差、倾斜误差的关系,如图 5(a)~(b)所示,可见存在线性关系。系统失调像散系数与偏心

误差、倾斜误差的关系如图 5(c)(d)所示,可见存在二次函数关系。拟合得到(11)式中的系数分别为 -13.43491758 、 -4.04393709 、 1.35938184 、 -0.26132415 、 -0.22099697 。该仿真计算结果与(7)式和(11)式一致,证明了该模型的正确性。

3.3 模拟装配过程

根据上述提出的失调量解算模型理论,采用如图 6 所示装调流程进行模拟装配。图 6 中 $T_{\text{threshold}}$ 表示次镜装配所允许的最小误差值。

在光学设计软件 Zemax 中模拟装配实验,引入如表 2 所示的失调量。模拟装调过程中,间隔误差 D_z 、次镜偏心误差 D_x 和 D_y 、次镜倾斜误差 T_x 和

T_y 、系统轴上视场像差 Zernike 系数及系统轴上视场波前误差峰谷值(PV)和均方根值(RMS)随模拟装调迭代次数的变化如图 7 和表 2 所示。

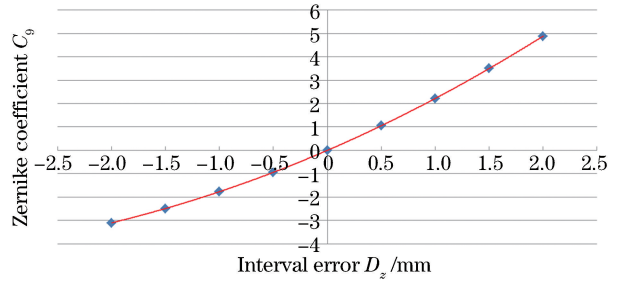


图 4 Zernike 系数 C_9 与 D_z 的关系
Fig. 4 Zernike coefficient C_9 versus D_z

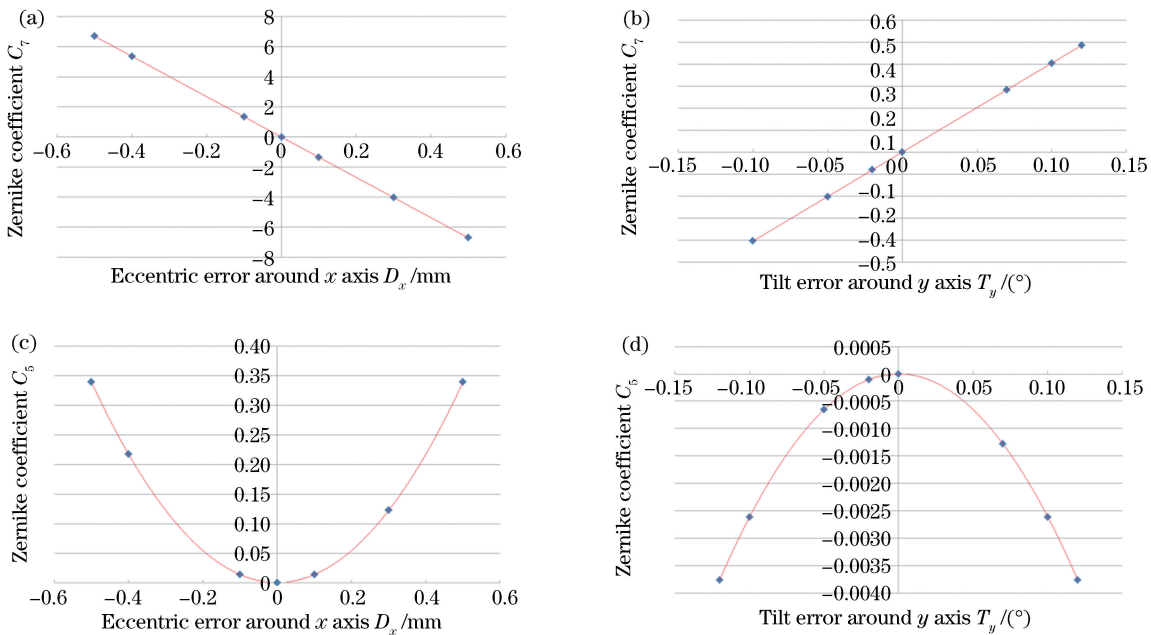


图 5 次镜失调量与系统像差 Zernike 系数的关系。(a) C_7 随 D_x 的变化;(b) C_7 随 T_y 的变化;
(c) C_5 随 D_x 的变化;(d) C_5 随 T_y 的变化

Fig. 5 Relation between secondary mirror misalignment and Zernike coefficient of system aberration. (a) C_7 versus D_x ;
(b) C_7 versus T_y ; (c) C_5 versus D_x ; (d) C_5 versus T_y

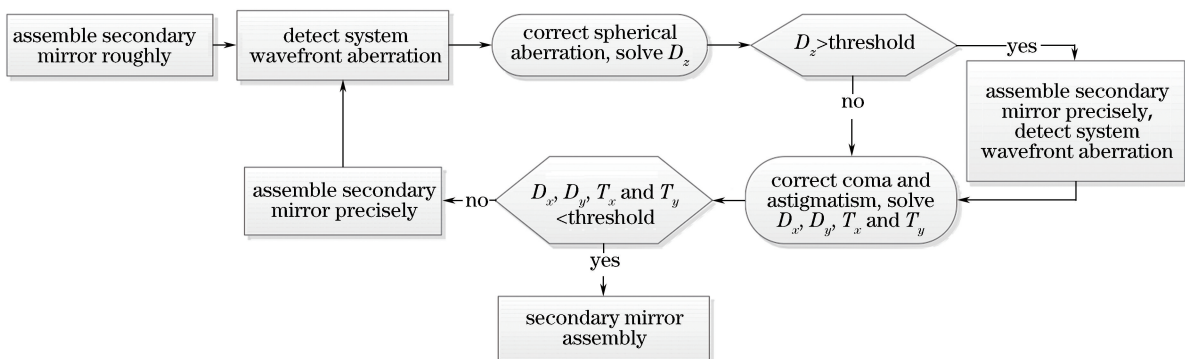


图 6 模拟装调流程图

Fig. 6 Simulated alignment flow chart

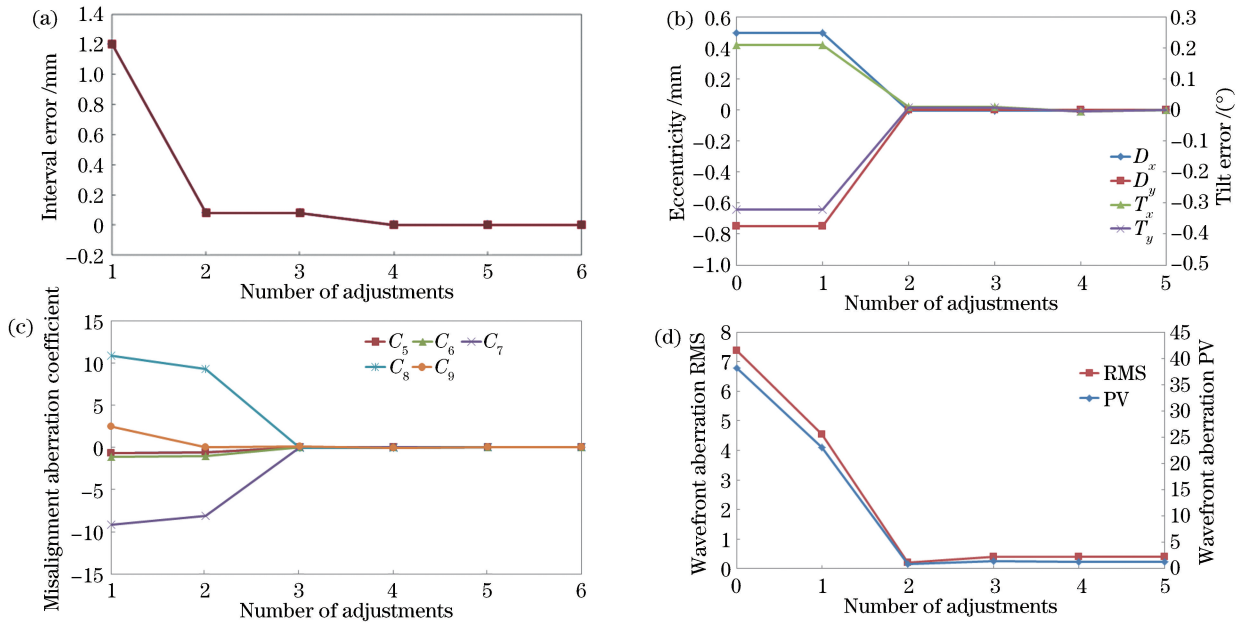


图 7 模拟装调系统失调量和像差变化状态。(a)主次镜间隔误差;(b)次镜偏心和倾斜误差;(c)系统轴上视场像差 Zernike 系数;(d)系统轴上视场像差 PV、RMS

Fig. 7 Simulated alignment system disorders aberration. (a) Interval error between primary mirror and secondary mirror; (b) secondary mirror eccentricity and tilt error; (c) Zernike coefficient of on-axis field aberration; (d) PV and RMS of on-axis field aberration

表 2 装调过程系统状态变化

Table 2 State change during system alignment

Item	Initial state	Spherical aberration correction	Coma and astigmatism correction	Spherical aberration correction	Coma and astigmatism correction	Coma and astigmatism correction
D_z /mm	1.2	0.08087842	0.08087842	1.50374×10^{-5}	1.50374×10^{-5}	-1.43778×10^{-6}
D_x /mm	0.5	0.5	-0.00200622	-0.00200622	-0.00098510	1.69084×10^{-6}
D_y /mm	-0.75	-0.75	0.00265171	0.00265171	0.00097903	-7.73288×10^{-6}
T_x / (°)	0.21	0.21	0.01077287	0.01077287	-0.00325258	2.56832×10^{-5}
T_y / (°)	-0.32	-0.32	0.00739672	0.00739672	-0.00327274	5.61329×10^{-6}
C_5	-0.66313579	-0.58405183	0.00001824	0.00001801	0.00000000	0.00000000
C_6	-1.06318042	-0.99662740	0.00004603	0.00004541	0.00000011	0.00000000
C_7	-9.17465699	-8.06838398	0.05723730	0.05686537	0.00000003	-0.00000002
C_8	10.92039219	9.30615168	-0.07969032	-0.07919037	-0.00000002	-0.00000008
C_9	2.51101043	2.51101043	0.16240162	-0.00997993	-0.00000006	-0.00000006
PV	38.22162042	23.0993551	0.78194180	1.37066420	1.22703541	1.22699556
RMS	7.38342091	4.53141891	0.20912868	0.40435121	0.40304867	0.4030989

由图 7 和表 2 可知:失调量随着迭代的增加而逐渐缩小,系统轴上的视场波前误差 PV 和 RMS 值明显减小,系统球差系数、彗差系数和像散系数项均减小到 10^{-7} 数量级,次镜失调误差均校正到 10^{-5} 数

量级以下。

由于矢量像差模型不受限于光学系统元件间的耦合效应与元件的失调范围,故所提失调量解算方法有很大的误差容限。在实际装调中,主次镜的面

形误差会引入像散,如不能准确分离出系统失调引入的像散,就会对该模型的准确度产生影响。

4 装调实例

为验证所提失调量解算方法的实际效果及提高装配效率,将该解算方法与六自由度精密定位装置结合,对实际的两反系统进行装调。实际装调系统包括两反光学反射镜、ZYGO 激光干涉仪和超精密六自由度定位机械臂装置,如图 8 所示。ZYGO 激光干涉仪检测系统波前误差,超精密六自由度定位机械臂装置精确控制并返回次镜的位姿数据。在实际装调实验中,经过 4 次迭代,系统波前误差 PV 值从初始的 3.037λ ($\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$) 收敛到 1.042λ ,如图 9 所示。

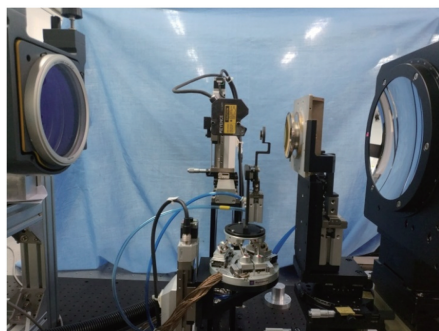


图 8 实际装调现场

Fig. 8 Actual alignment site

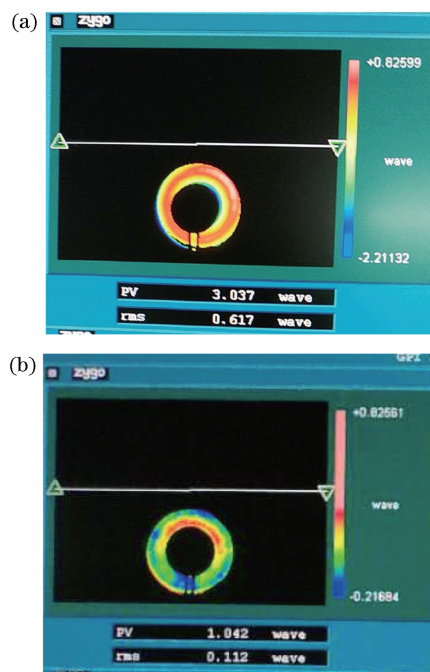


图 9 系统像差。(a)初始像差;(b)系统装调结束后像差

Fig. 9 System aberrations. (a) Original aberration;
(b) aberration after system alignment

被装配光学系统工作中波红外波段,根据光学设计公差分配,主次镜面形加工误差 PV 为 0.5λ 时系统成像质量可以接近衍射极限。根据现有的光学镜面加工工艺并结合装调过程中干涉仪对光学面形的实时监测,可以保证装调后单个主次镜面形接近 0.5λ 。将主次镜面形的实测值以 Zernike 多项式形式代入光学设计文件,可以得到主次镜系统的波前误差为 1λ ,该 1λ 的系统波前误差是由主次镜系统设计的残余误差和加工误差综合叠加导致的。可见,采用所提解算方法装调后的系统波前误差与理论值相差不到 5%,在实际使用中是完全可以接受的,可认为失调量解算收敛速度及解算精度均达到了使用要求。

5 结 论

基于三级矢量波像差理论,提出了一种两反系统装调失调量解算方法。采用轴上视场球差系数解算间隔误差,采用轴上视场彗差和像散系数解算偏心 and 倾斜误差,并建立了相应的解算数学模型。利用该失调量解算数学模型进行模拟装配,理论上验证了模型的准确性,提取了解算和装配精度:系统像差 Zernike 系数球差、彗差和像散项均校正到 10^{-7} 数量级。最后利用该失调量解算模型指导实际光学系统的装调过程,经过 4 次迭代过程,使光学系统的波像差小于 1.042λ ,与理论值的误差小于 5%,证明了该模型的正确性与快速收敛性。

参 考 文 献

- [1] Guo Y X, Li Y C, Liang T M, *et al.* Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2680-2683.
郭永祥, 李英才, 梁天梅, 等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2680-2683.
- [2] Hvisc A M, Burge J H. Alignment analysis of four-mirror spherical aberration correctors [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7018: 701819.
- [3] Yang X F. Study on the computer-aided alignment of three-mirror optical system [D]. Changchun: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2004.
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: 中国科学院研究生院, 2004.
- [4] Sun J W, Lü T Y, Yao L S, *et al.* Design and assembly of transmitter-telescope [J]. *Optics and*

- Precision Engineering, 2014, 22(2): 369-375.
- 孙敬伟, 吕天宇, 姚丽双, 等. 发射望远镜的设计与装调[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 369-375.
- [5] Kim S, Yang H S, Lee Y W, *et al.* Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems [J]. Optics Express, 2007, 15(8): 5059-5068.
- [6] Lee H, Dalton G B, Tosh I A, *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, *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] Thompson K P. Aberration fields in tilted and decentered optical systems [D]. Arizona: The University of Arizona, 1980.
- [10] Thompson K P, Rolland J P. A page from "the drawer": how Roland Shack opened the door to the aberration theory of freeform optics[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9186: 91860A.
- [11] Thompson K. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2005, 22(7): 1389-1401.
- [12] Gu Z Y. Misalignment corrections in reflective telescopes[D]. Changchun: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2016.
- 顾志远. 反射式望远镜失调校正技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院, 2016.
- [13] Kong X H, Fan X W. Alignment of two-mirror aspherical optical system based on vector aberration theory[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(8): 082202.
- 孔小辉, 樊学武. 基于矢量波像差理论的两镜系统装调技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(8): 082202.
- [14] Xu Q R. Research on key technology of large optical system alignment [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics Chinese Academy of Sciences, 2017.
- 徐祺瑞. 大口径光学系统装校关键技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2017.
- [15] Shi H D, Zhang X, Li Y C, *et al.* Analysis of aberration properties of pupil off-axis freeform surface optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1208001.
- 史浩东, 张新, 李英超, 等. 光瞳离轴自由曲面光学系统像差特性分析[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1208001.
- [16] Sun J W. Study on the alignment technique of large ground-based electro-optical imaging telescope [D]. Changchun: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2011.
- 孙敬伟. 地基大口径光电成像望远镜装调技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院, 2011.
- [17] Pang Z H, Fan X W, Chen Q F, *et al.* Influence of surface-profile error of larger mirror on aberrations characteristics of optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422002.
- 庞志海, 樊学武, 陈钦芳, 等. 大口径反射镜面形误差对光学系统像差特性的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422002.