

基于像差特性分析的光学系统横向失调校正方法

徐春梅, 刘秉琦, 黄富瑜, 张 维, 沈洪斌, 李 莉

(军械工程学院 电子与光学工程系, 河北 石家庄 050003)

摘 要: 在高分辨力光学系统中, 光学元件偏心引起的光学系统初级像差特性已经成为系统设计和装调必须要考虑的因素, 文中拟从分析透镜横向失调量对像差影响的基础上, 提出了一种考虑像差特性影响的光学零件装调校正方法。在考虑光学元件偏心对像差的影响的情况下, 推导了光瞳中心位置和像面中心位置随透镜偏心程度的变化, 建立了光学系统失调校正量和像差增量之间的数学关系, 提出了一种基于像差理论的透射式光学系统横向失调校正方法, 可以弥补现有高斯光学校正方法的不足。以三透镜准直系统为例, 利用 ZEMAX 软件仿真验证了文中方法的有效性, 实验表明该方法所选择的调整方案在所有调整方案中引起的像差增量最小, 降低了校正过程中对光学系统成像质量的影响。

关键词: 初级像差; 光学系统; 偏心; 横向失调; 校正

中图分类号: O435.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0618005

Correction method for lateral displacement optical system based on the analysis of aberration

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

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

Abstract: Based on the consideration of the influences of decenter element to aberration, the positions of pupil center and image center as functions of lens decenter was derived and the relationships of adjustment and aberration increment was established. Then, the calibration method on lateral displacement transmission-type system based on aberration theory was advanced, which cover the shortages of calibration method based on Gauss optics. An example was also set up to prove the effectivity of this method. The result showed that the adjust programme chose by this method caused the minimum aberration increment which reduced the influence to the imaging quality. This theory could be used to instruct the calibration on misalignment system.

Key words: primary aberration; optical system; decenter; lateral displacement; calibration

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-15

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

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,光学元件偏心和倾斜光学系统初级像差特性已经成为高分辨率力光学系统设计必须要考虑的两个因素,基于这两个因素的 optics 设计研究也逐渐成为热门。参考文献[1]运用矢量像差理论,分析了具有较大交叉倾斜角的平行平板光学系统和具有较大倾斜角的光楔光学系统的像差特性,该理论仅适用于指导具有较大倾斜元件的非共轴光学系统设计;参考文献[2]在共轴光学系统波像差的基础上,分别推导了光学元件偏心和倾斜对主要像差的影响,主要用于指导偏心和倾斜系统的设计。参考文献[3]利用旋转轴对称球面光学系统的全口径初级波像差理论推导了子孔径面对称光学系统的初级波像差分布,验证了面对称光学系统中的节点像差理论,该理论主要用于指导非对称光学系统初始结构的选择和优化设计过程。参考文献[4]借助计算机辅助装校技术,通过对一次装调后的系统进行像差分析计算,确定了补偿环节进行补偿调整的装校方法,该方法必须借助于专用的像差测量仪器才能进行调整。参考文献[5]介绍了一种通过像差分析和仿真预估指导光轴一致性装调的方法,但没有涉及到调整量的大小和方向。文中在分析透镜横向失调量对像差影响的基础上,提出了一种考虑像差特性影响的校正方法,该方法能够直接确定透镜及其调整量指导光学系统横向失调的校正,并且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

透镜横向位置失调会引起光学系统的像点位置的横向移动,利用基于高斯光学特性的调校方法^[7]可以较好地将像点恢复到理论位置,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,光学元件发生横向小

量位移时,光学系统的整体性能就会发生变化。在经过传统方法校正后,一般都会残留一定的透镜横向失调量,此时有必要根据初级像差理论来对光学系统做进一步失调校正。

对于共轴球面对称光学系统,初级波像差普遍式如下^[6]:

$$W(x,y;h')=-\frac{n'}{l'}\left[\frac{1}{4}A_1(y^2+x^2)^2+A_2h'(y^2+x^2)y+\frac{1}{2}A_3h'^2(3y^2+x^2)+\frac{1}{2}A_4h'^2(y^2+x^2)+A_5h'^3y\right] \quad (1)$$

式中: (x,y) 为理想系统的坐标; h' 为像点到光轴距离; A_1,A_2,A_3,A_4,A_5 分别表示球差、彗差、像散、场曲和畸变。

为便于表述,令: $a_s=-\frac{n'}{l'}\frac{1}{4}A_1, a_c=-\frac{n'}{l'}A_2, a_a=-\frac{n'}{l'}\frac{1}{2}A_3, a_d=-\frac{n'}{l'}\frac{1}{2}A_4, a_i=-\frac{n'}{l'}A_5$ 。

当整个系统中的某一透镜*i*偏心 $\vec{\Delta}$ 后,其光瞳中心和高斯像面中心将分别会发生偏移,光瞳和像面的中心移动量分别为 $m\Delta$ 和 $M\Delta$ 。光瞳中心和像面中心的偏移将会引起光瞳矢量 \vec{r} 和有效视场矢量 \vec{h} 的变化,设变化后新的光瞳矢量和有效视场矢量分别为 \vec{r}_p 和 \vec{h}_p ,则:

$$\begin{aligned} \vec{r}_p &= \vec{r} + m\vec{\Delta} \\ \vec{h}_p &= \vec{h} + M\vec{\Delta} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: m 为光瞳的放大率; M 为像的垂轴放大率。

忽略 $\Delta^2, \Delta^3, \Delta^4$ 等高次项,透镜*i*偏心所引入的波像差增量可近似表示^[1]为:

$$\begin{aligned} \delta W_{dec}(x,y;h') &= -(Ma_c + 4ma_s)\Delta(y^2+x^2)x - 2(Ma_a + ma_c) \\ &\quad \Delta x^2 h' - (2Ma_d + ma_c)\Delta(y^2+x^2)h' - \\ &\quad [3Ma_i + 2m(a_a + a_d)]\Delta x h'^2 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: (x,y) 为偏心后系统的光瞳坐标。

在多透镜组成的透射式光学系统中,经后续光学系统放大后,不同透镜的同一偏心量在出瞳面和像平面上引起的偏移量 $m\Delta$ 和 $M\Delta$ 是不同的,因此上式中的 M 和 m 应为该偏心透镜后方各透镜对光瞳和物面依次成像时的横向放大率,它们随偏心透镜*i*的变化而变化。

像点在出瞳面上的偏移量 dx'_p 和像面上的偏移量 dx'_i 分别为:

$$\begin{aligned} dx_r' &= \frac{\Delta u_{r_i}}{u_{rN}'} \cdot \Delta_i = m \cdot \Delta_i \\ dx_{h_i}' &= \frac{\Delta u_{h_i}}{u_{hN}'} \cdot \Delta_i = M \cdot \Delta_i \end{aligned} \quad (4)$$

将公式(4)带入公式(3),得到透镜 i 的偏心量为 $d\eta_i$ 时的波像差增量为:

$$\begin{aligned} \delta W_{\text{dec}}(x, y; h') &= - \left(\frac{\Delta u_{h_i}}{u_{hN}'} \cdot \Delta_i a_c + 4 \frac{\Delta u_{r_i}}{u_{rN}'} \cdot \Delta_i a_s \right) (y^2 + x^2)x - \\ & 2 \left(\frac{\Delta u_{h_i}}{u_{hN}'} \cdot \Delta_i a_a + 4 \frac{\Delta u_{r_i}}{u_{rN}'} \cdot \Delta_i a_c \right) x^2 h' - \\ & \left(2 \frac{\Delta u_{h_i}}{u_{hN}'} \cdot \Delta_i a_d + \frac{\Delta u_{r_i}}{u_{rN}'} \cdot \Delta_i a_c \right) (y^2 + x^2) h' - \\ & \left[3 \frac{\Delta u_{h_i}}{u_{hN}'} \cdot \Delta_i a_i + 2 \frac{\Delta u_{r_i}}{u_{rN}'} \cdot \Delta_i (a_a + a_d) \right] x h'^2 \end{aligned} \quad (5)$$

针对上述透镜失调引起的像面上像点发生横向位置误差 dx' , 需要选择合适的透镜进行横向调整消除像点位置误差, 依据光学零件微动理论^[7], 调整透镜应选择对像点横向移动量影响系数较大的透镜作为调整对象, 透镜的调整量 $d\eta_i$ 为:

$$dx' = - \frac{\Delta u_{h_i}}{u_{hN}'} \cdot d\eta_i = M \cdot \Delta_i \quad (6)$$

当调整透镜移动 $d\eta_i$ 时, 同样会引起像差增量的变化, 将公式(6)带入公式(3), 可得透镜 i 的横向移动 $d\eta_i$ 引入的波像差增量为:

$$\begin{aligned} \delta W_{\text{dec}}(x, y; h') &= \left(\frac{\Delta u_{h_i}}{u_{hN}'} d\eta_i \cdot a_c + 4 \frac{\Delta u_{r_i}}{u_{rN}'} \cdot \frac{u_{h_i}'}{\Delta u_{h_i}} a_s \right) dx' (y^2 + x^2)x + \\ & 2 \left(\frac{\Delta u_{h_i}}{u_{hN}'} d\eta_i \cdot a_a + \frac{\Delta u_{r_i}}{u_{rN}'} \cdot \frac{u_{h_i}'}{\Delta u_{h_i}} a_c \right) dx' x^2 h' + \\ & \left(2 \frac{\Delta u_{h_i}}{u_{hN}'} d\eta_i \cdot a_d + \frac{\Delta u_{r_i}}{u_{rN}'} \cdot \frac{u_{h_i}'}{\Delta u_{h_i}} a_c \right) dx' (y^2 + x^2) h' + \\ & \left[3 \frac{\Delta u_{h_i}}{u_{hN}'} d\eta_i \cdot a_i + 2 \frac{\Delta u_{r_i}}{u_{rN}'} \cdot \frac{u_{h_i}'}{\Delta u_{h_i}} (a_a + a_d) \right] dx' x h'^2 \end{aligned} \quad (7)$$

分析公式(5)可知, 失调透镜引起的波像差增量包括两部分, 一是像面偏移量 $M\Delta$ 引起的增量, 二是光瞳面偏移量 $m\Delta$ 引起的增量。分析公式(6)可知, 透镜微动理论指导的透镜调整是用来校正像面上的横向位置误差 dx' , 即无论移动哪个透镜去校正光学系统, 消除的像面偏移量都是相同的。比较公式(5)和公式(6)可见, 不同的透镜横向移动 $d\eta_i$ 引入的光瞳面偏移量 $m\Delta$ 波像差增量是不同的。

多透镜光学系统中, 高斯像面上像点横向位置误差 dx' 是由不同透镜的偏心共同引起的, 偏心量之间的关系为:

$$\sum_i \frac{\Delta u_{h_i}}{u_{hN}'} \cdot d\eta_i = -dx' \quad (8)$$

根据初级像差理论, 可将不同透镜引起的波像差增量进行叠加, 该失调光学系统的总像差为各自引起的像差增量之和:

$$\begin{aligned} \delta W_{\text{dec}}(x, y; h') &= - \left[4 \frac{\sum_i \Delta u_{r_i} d\eta_i}{u_{rN}'} \cdot a_s \right] (y^2 + x^2)x - \\ & 2 \left[\frac{\sum_i \Delta u_{r_i} d\eta_i}{u_{rN}'} \cdot a_c \right] x^2 h' - \left[\frac{\sum_i \Delta u_{r_i} d\eta_i}{u_{rN}'} \cdot a_c \right] \\ & (y^2 + x^2) h' - \left[2 \frac{\sum_i \Delta u_{r_i} d\eta_i}{u_{rN}'} \cdot (a_a + a_d) \right] x h'^2 \end{aligned} \quad (9)$$

公式(9)表明, 无论确定哪个透镜作为调整透镜都能够消除掉像面偏移量 $M\Delta$ 引起的波像差增量, 而光瞳面偏移量 $m\Delta$ 引起的波像差增量不能够被消除掉。因此得出结论: 在失调光学系统的成像质量没有明显下降的情况下, 选择引起像差增量最小的调整对象是合适的。

2 仿真实验验证与分析

仿真实验用于验证采用光学零件微动理论确定的校正方案和文中所提出的像差约束条件下的校正方案哪一个在校正后对光学系统的成像质量影响小。

文是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。光学标定器是一种对成像质量要求较高的典型光学仪器, 在标定中, 要求被标定仪器与标定器的分划全视场严格对正。设定光学系统中透镜的横向位移 $d\eta_i = 0.1$ 。根据光学零件微动理论计算各透镜的 t_i 值, 根据文中提出的理论波像差增量 $\delta W_{\text{dec}}(x, y; h')$ 值, 见表 1。

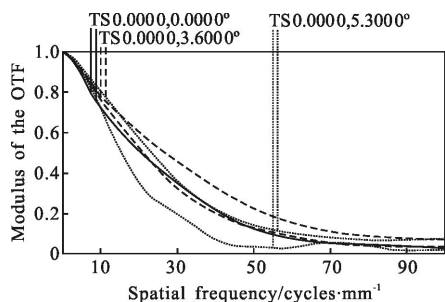
表 1 各透镜的 t_i 、 $\delta W_{\text{dec}}(x, y; h')$ 中系数值的计算结果

No	Coefficient		
	t_i	Correction value	$\frac{\Delta u_{h_i}}{u_{hN}'} \cdot \frac{u_{h_i}'}{\Delta u_{h_i}}$
1	0.70 62	0.141 6	0.833 0
2	0.306 5	0.326 2	-0.628 3
3	-0.012 73	-7.85 5	-47.474 5

根据计算结果可知, 依据光学零件微动理论制

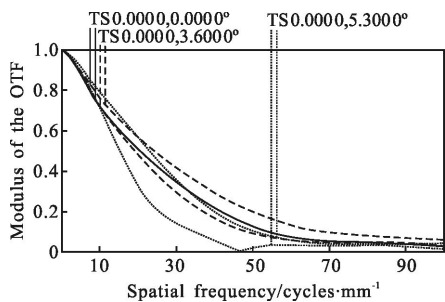
定调整方案,透镜 1 的 t_i 值最大,应作为校正像点横向位置误差的对象,但是根据像差约束分析,调整透镜 2 既能使消除像点横向位置误差,带来的波像差增量 $\delta W_{dec}(x,y;h')$ 值最小,应作为校正对象。透镜 3 的横向校正移动量过大,很明显作为调整对象是不合适的。

下面分别针对透镜 1 和透镜 2 两种校正方案进行 zemax 软件仿真,其校正后对系统的成像质量影响分别为用 MTF 和点列图来表征,如图 1 和图 2 所示。



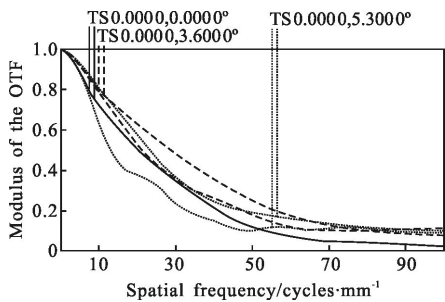
(a) 初始 MTF

(a) Original MTF



(b) 调整透镜 1 的影响效果

(b) Corrected effect by combining lens 1



(c) 调整透镜 2 的影响效果

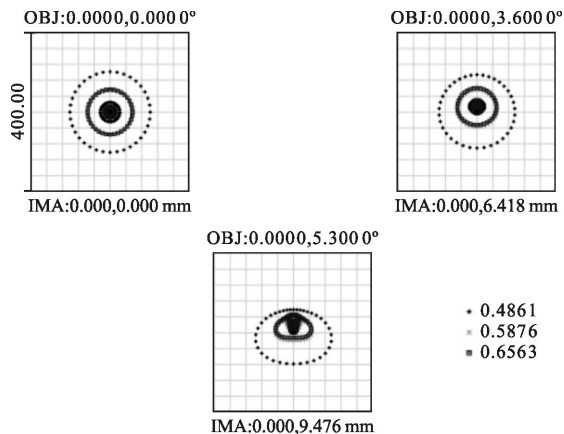
(c) Corrected effect by combining lens 2

图 1 调整元件的移动对 MTF 的影响

Fig.1 Corrected effect by combining lens 1 and lens 2

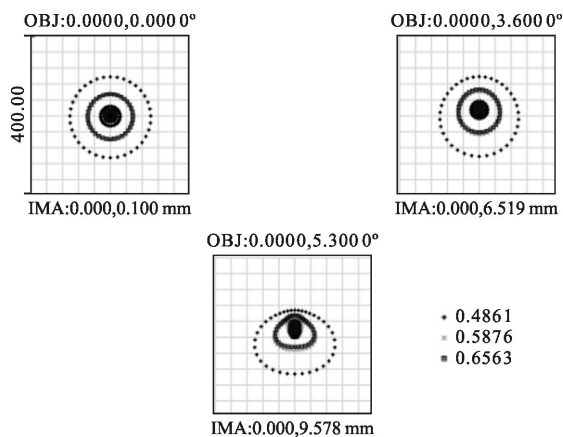
对图 1 和图 2 结果分析如下:

(1) 从 MTF 来看,无论调整透镜 1 还是调整透镜 2 都会相对非失调状态有所偏离,图 1 显示,对于



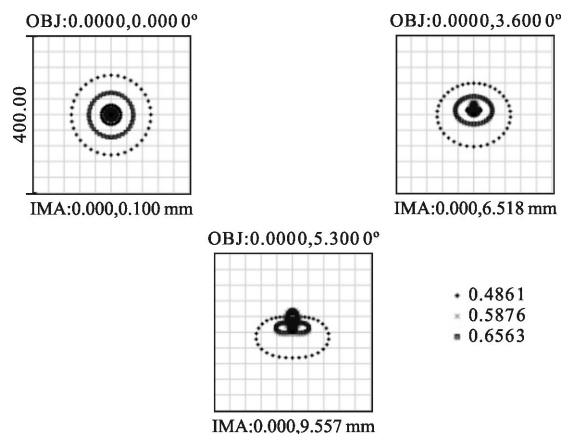
(a) 初始点列图

(a) Original spot diagram



(b) 调整透镜 1 的影响效果

(b) Corrected effect by combining lens 1



(c) 调整透镜 2 的影响效果

(c) Corrected effect by combining lens 2

图 2 透镜 1 和透镜 2 相结合的结果

Fig.2 Corrected effect by combining lens 1 and lens 2

轴上点而言,二者相差较小,但是对于轴外点,对于不同的空间频率而言,调整透镜 2 得到的空间频率值都高于调整透镜 1 和透镜 3 得到的空间频率值,结果更接近非失调光学系统;调整透镜 1 对于边缘点而言其截止频率明显下降。

(2) 从点列图来看,图 2 显示,调整透镜 1 在 0ω 、 0.707ω 、 1.0ω 个视场中的 RMS 半径为 $40.876\ \mu\text{m}$ 、 $40.822\ \mu\text{m}$ 、 $38.491\ \mu\text{m}$,调整透镜 2 在 0ω 、 0.707ω 、 1.0ω 个视场中的 RMS 半径为 $40.925\ \mu\text{m}$ 、 $35.030\ \mu\text{m}$ 、 $33.293\ \mu\text{m}$,可见调整透镜 2 在全视场范围内引起的变化最小,与分析结果相吻合。

(3) 总体来看,调整透镜 2 得到的结果更接近非失调光学系统,像差增量最小,校正相同的横向误差,对系统的成像质量的影响最小。

3 结 论

针对成像质量要求较高的光学系统,兼顾高斯光学特性和像差特性两个需求,文中提出了一种基于像差特性分析的光学系统横向失调校正方法。仿真实验表明文中方法延续了光学零件微动理论中可直接确定调整对象及调整量的优势,同时通过像差理论的分析,使调整后的像差增量在所有调整方案中最小,降低了调整过程中对光学系统的成像质量的影响。

参考文献:

- [1] Yang Xinjun, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang, et al. Aberration properties of the decentered and tilted optical systems [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(11): 1659–1662. (in Chinese)
- [2] Fan Xuewu, Chen Rongli, Ma Zhen, et al. A study on the primary aberration theory of decentered and tilted optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(4): 494–496. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] Guo Xiarui, Liao Zhibo, Wang Chunyu, et al. Aberration and alignment quality investigation of space transmission optical system with centering error of optical axes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 436–441. (in Chinese)
- [5] Sun Jinxia, Pan Guoqing, Liu Ying. Third-order aberrations of a plane symmetric optical system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(9): 094203. (in Chinese)
- [6] Zhang Dongge, Fu Yutian. Surrogate model used for computer aided alignment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 680–685. (in Chinese)
- [7] Yuan Xucang. *Optical Design* [M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese)
- [8] Cheng Shoucheng. *Calibration Theory of Optical Instruments* [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1992. (in Chinese)