

# 离轴三镜系统光学元件间补偿关系研究

张 伟 刘剑峰\* 龙夫年

(哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心 哈尔滨 150001)

**摘 要** 分析了离轴三镜系统中光学元件调整变量间的补偿关系和面形误差与调整变量间的补偿关系. 调整变量中偏心变量和倾斜变量的位置失调常常会产生同种像差, 存在一定的相关性. 从失调像差理论出发, 通过平衡偏心变量和倾斜变量产生的初级像差, 得到偏心变量和倾斜变量间的补偿关系. 利用 Zernike 多项式模拟面形误差, 建立面形误差与初级像差的关系, 使面形误差与调整变量联系起来. 通过计算机模拟, 给定光学元件一定的面形误差, 然后调整光学元件的偏心、倾斜和横向位移进行补偿, 发现当次镜带有  $1\lambda$  像散的面形误差时, 补偿后系统波前误差只下降了  $0.01\lambda$  RMS.

**关键词** 空间光学; 离轴三镜系统; 面形误差; 像差平衡

**中图分类号** TH74 **文献标识码** A

## 0 引言

空间相机光学成像系统, 根据任务不同, 光学系统结构形式也不同. 目前, 空间相机光学系统主要有折射式、折反式和全反射式<sup>[1~3]</sup>, 随着光学系统结构形式的复杂化, 其调整方式也发生了变化. 旋转对称透射系统装配时不需要内部调整, 只需平移或旋转焦平面就可以获得足够高的精度<sup>[4]</sup>. 折反射系统(通常为两镜系统加校正器)中, 除了调整焦平面外, 还需要一个元件(通常为次镜)的平移和倾斜来消除慧差和像散, 这种传统的方法需要调整的变量不多, 每一次调整也是靠工作人员的经验. 在旋转非对称系统(甚至有些共轴系统)中, 如果不对光学元件进行有计划地调整, 将无法达到性能要求. 离轴三镜无遮挡光学系统取决于对装调变量(倾斜、偏心和平移)的调整来达到设计的光学性能. 实际上, 每一个光学元件常常要调整 6 个自由度, 自由度间不可避免存在一定的相关性, 而且每个光学元件都存在一定的面形误差, 面形误差产生的像差与位置自由度失调产生的像差混合在一起, 难以把这些变量分离出来, 这些因素给系统装调造成一定的困难.

本文分析了离轴三镜系统中调整变量之间及调整变量与面形误差间的补偿关系, 进行了计算机模拟, 得到了变量间相互补偿的具体量值.

## 1 离轴三镜系统

本文分析的是一个离轴三镜系统, 其光学系统结构形式如图 1. 系统焦距为 1.5 m,  $F$  数为 5, 视场角为  $0.1^\circ \times 10^\circ$ . 系统没有一个公共的光轴, 每个光学元

件都有一定的偏心和倾斜量. 该系统在装调时一般以主镜为基准, 需要调整量为次镜的偏心和倾斜:  $d_{x2}$ 、 $d_{y2}$ 、 $t_{x2}$ 、 $t_{y2}$ ; 三镜的偏心和倾斜:  $d_{x3}$ 、 $d_{y3}$ 、 $t_{x3}$ 、 $t_{y3}$ ; 主次镜间距和次镜与三镜间距:  $d_1$ 、 $d_2$ .

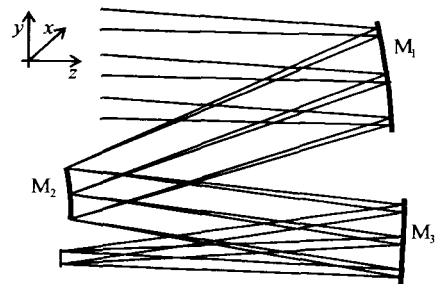


图 1 离轴三镜系统结构图

Fig. 1 Off-axis three-mirror system layout

光学元件位置失调主要引起初级像差的变化, 根据初级像差理论<sup>[5]</sup>, 可以写出系统初级像差的极坐标表达式

$$W = A_s \rho^4 + A_c h' \rho^3 \cos \theta + A_a h'^2 \rho^2 \cos^2 \theta + A_d h'^2 \rho^2 + A_t h'^2 \rho \cos \theta \quad (1)$$

式中,  $(\rho, \theta)$  为出瞳面任意点极坐标,  $h'$  为像高,  $A_s$ ,  $A_c$ ,  $A_a$ ,  $A_d$  和  $A_t$  为球差、慧差、像散、场曲和畸变系数, 这些系数与光学系统结构参数有关. 下面以初级像差理论为基础, 分别对焦平面补偿沿轴误差、次镜和三镜的倾斜变量补偿偏心误差、次镜和三镜的偏心、倾斜变量及位移补偿面形误差进行研究.

## 2 利用焦平面补偿系统沿轴像差

利用焦平面平衡系统沿轴像差是光学系统经常用到的调整方式. 空间相机光学系统都带有调焦机构, 除了补偿光学元件的位置失调而引起系统焦距变化外, 还可以利用焦面产生的离焦像差补偿系统球差、像散和场曲. 在离轴三镜系统中, 镜子间的间

\* Tel: 0451-86414833-2468 Email: jfliu2003@hit.edu.cn

收稿日期: 2005-01-13

距误差会导致系统焦距发生变化,可以利用调节焦面的方式来补偿. 焦平面离焦产生的像差为

$$W(\rho) \approx -\Delta R/8F^2 \rho^2 = B_d \rho^2 \quad (2)$$

式中,  $\Delta R$  为离焦量,  $F$  为系统的  $F$  数.

离焦像差补偿球差的公式为

$$W(\rho) = A_s \rho^4 + B_d \rho^2 \quad (3)$$

离焦像差补偿像散和场曲的公式为

$$W(\rho, \theta) = A_a \rho^2 \cos^2 \theta + A_d \rho^2 + B_d \rho^2 \quad (4)$$

这种补偿方式与传统共轴系统的焦面补偿一样,这里不再详细分析.

### 3 偏心误差和倾斜误差相互补偿

离轴三镜系统装调时,每个光学元件都要存在一定数量的倾斜和偏心误差,只调整焦平面难以满足精度要求. 光学元件的倾斜和偏心误差会产生新的像差,而且常常会产生同一种像差,要想将这两者分离开来是非常困难的,这也是系统装调的一个难点<sup>[6]</sup>. 如果能利用它们之间的这种相关性,找出偏心 and 倾斜间的具体补偿关系,会使得装调这样的系统更加容易.

光学元件的倾斜和偏心使得系统产生附加像差,这种失调系统像差理论虽然还不完善,但已经取得了很大的进展<sup>[7~10]</sup>,我们可以从失调系统像差理论出发,研究倾斜和偏心元件间的关系.

根据失调系统像差理论<sup>[11]</sup>,光学元件小量偏心 and 倾斜会引起慧差、像散、场曲和畸变的变化,球差变化很小,其中慧差和像散是主要像差<sup>[12]</sup>,因此只研究这两种像差的相互补偿. 偏心 and 倾斜产生附加的慧差、像散为

$$W_{dec} = A_{cdy} d_y \rho^3 \cos \theta + A_{ady} d_y h' \rho^2 \cos^2 \theta + A_{cdx} d_x \rho^3 \sin \theta + A_{adx} d_x h' \rho^2 \sin^2 \theta \quad (5)$$

$$W_{til} = A_{ctx} t_x \rho^3 \cos \theta + A_{atx} t_x h' \rho^2 \cos^2 \theta + A_{cty} t_y \rho^3 \sin \theta + A_{aty} t_y h' \rho^2 \sin^2 \theta \quad (6)$$

与式(1)相比,慧差和像散的视场变量的阶次小于 1,慧差与视场变量无关,不随视场变化而变化,称之为轴上慧差,而像散的视场变量阶次为 1,这是与旋转对称光学系统像差理论不同之处. 倾斜 and 偏心变量间的补偿关系为

$$W = (A_{cdy} d_y + A_{ctx} t_x) \rho^3 \cos \theta + (A_{ady} d_y + A_{atx} t_x) \cdot h' \rho^2 \cos \theta + (A_{cdx} d_x + A_{cty} t_y) \rho^3 \sin \theta + (A_{adx} d_x + A_{aty} t_y) h' \rho^2 \sin \theta \quad (7)$$

由式(7)可以看出,沿  $y$  轴偏心  $d_y$  和  $x$  绕轴方向倾斜  $t_x$  间存在补偿关系;沿  $x$  轴偏心  $d_x$  和绕  $y$  轴方向倾斜  $t_y$  存在补偿关系.

为进一步分析这种补偿关系,对离轴三镜系统中次镜和三镜的倾斜和偏心变量失调产生的像差进

行分析,然后研究两者间的补偿关系. 利用光学设计软件和波像差与初级像差的关系,可以得到次镜和三镜偏心和倾斜引起的球差(sp)、 $x$  轴慧差(cox)、 $y$  轴慧差(coy)、 $0^\circ$ 或  $90^\circ$ 方向像散(as $0^\circ/90^\circ$ )和  $45^\circ$ 方向像散(as $45^\circ$ ),图 2、3 给出了一个视场点像差变化曲线,其它视场像差变化趋势与之相同.

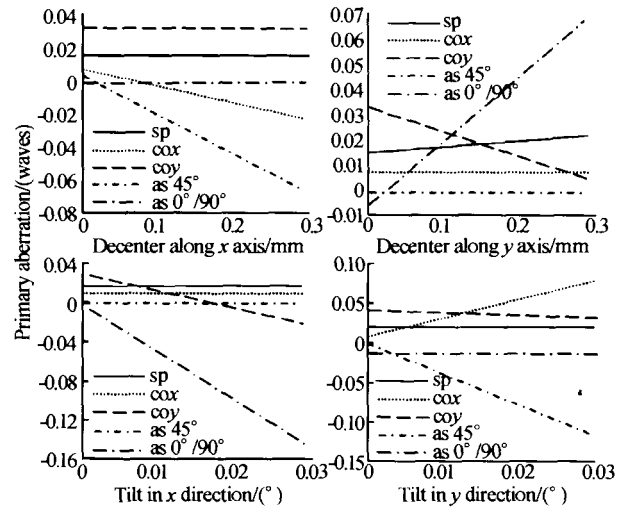


图 2 次镜位置失调引起的初级像差变化量  
Fig. 2 Variation of primary aberrations for the misalignment of secondary mirror

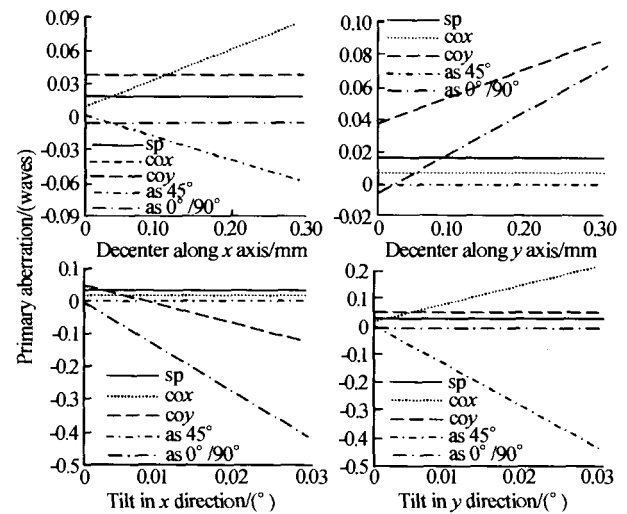


图 3 三镜位置失调引起的初级像差变化量  
Fig. 3 Variation of primary aberrations for the misalignment of tertiary mirror

可以看到,当次镜和三镜存在小量的偏心和倾斜误差时,初级球差保持不变,只引起慧差和像散变化. 沿  $x$  轴偏心和绕  $y$  轴倾斜引起  $x$  轴慧差、 $45^\circ$  方向像散变化;沿  $y$  轴偏心和绕  $x$  轴旋转引起  $0^\circ$ 或  $90^\circ$ 方向像散变化. 像差对倾斜变量变化灵敏,对偏心变量变化不灵敏.

为得到偏心变量和倾斜变量间具体补偿关系,给定次镜和三镜一定的偏心量,然后调整倾斜变量,得到两者间相互补偿的具体数值,如图 4.

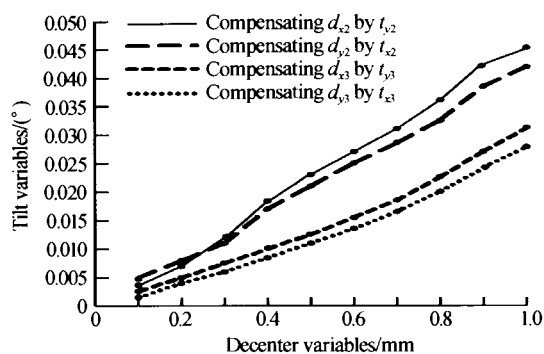


图4 倾斜变量补偿偏心变量

Fig. 4 Compensating decenter variables by tilt variables

可以看出,若次镜和三镜存在较大的偏心量时(不能超过线性区),只需很小的倾斜量就能将它予以补偿。

图5给出了补偿后三个视场波像差下降(相对于理想系统)的均方根值。

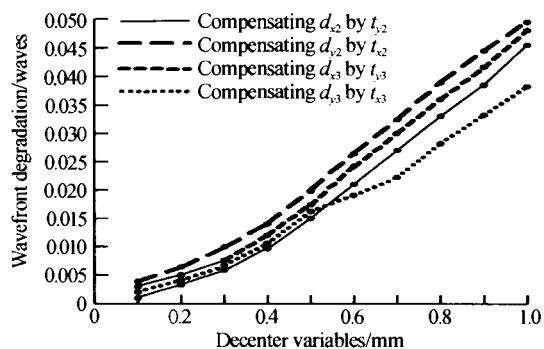


图5 补偿后波前误差的下降量

Fig. 5 Wavefront degradation after compensation

以上分析了偏心和倾斜变量的补偿关系,在装调中可以利用这种关系,简化装调过程<sup>[13]</sup>,如当偏心和倾斜都存在误差时,可以只调整倾斜变量,来补偿偏心误差或者调整偏心变量补偿倾斜误差。

#### 4 面形误差与位置自由度相互补偿

任何光学元件的加工技术不可避免地会引入一定的面形误差,这种残余误差会使光学系统成像质量下降。对于大口径非球面镜,在加工完之后,机械支撑,应力变形以及环境变化都会使镜子的表面发生变形,这会使得光学系统的成像质量下降。在进行光学系统调整时,面形误差与光学元件位置自由度误差交织在一起,它们的关系非常复杂很难将它们分离出来。

在频域中,面形误差分成三个频段<sup>[14]</sup>:高频误差,中频误差,低频误差。中频误差和低频误差使得光学系统的高级像差发生变化,低频误差的存在会引入附加的初级像差。同样位置自由度的失调主要引入初级像差,因此初级面形误差与自由度误差间存在一定的补偿关系,研究它们之间的关系可以消

除或部分消除初级面形误差对光学系统的影响。中频面形误差和高频面形误差与光学元件位置自由度间不存在补偿关系,这里不作研究。

为了能够把面形误差与初级像差联系起来,利用 Zernike 多项式来表达光学元件的面形误差,通过 Zernike 多项式系数与初级面形误差的关系,如表 1,将面形误差与初级像差联系起来,分析带有不同类型面形误差的光学表面与位置自由度间的补偿关系。

表 1 Zernike 多项式与初级像差的关系

Zernike 多项式	初级像差
1	Piston
$\rho \cos \theta$	沿 $x$ 轴倾斜
$\rho \sin \theta$	沿 $y$ 轴倾斜
$\rho^2 \cos 2\theta$	$0^\circ$ 方向像散和离焦
$2\rho^2 - 1$	离焦
$\rho^2 \sin 2\theta$	$45^\circ$ 方向像散和离焦
$(3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta$	$x$ 轴慧差和沿 $x$ 轴倾斜
$(3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta$	$y$ 轴慧差和沿 $y$ 轴倾斜
$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	球差和离焦

研究这种补偿关系最有效的方法是在所设计的理想系统中,给定每一个光学元件确定量的面形误差,然后利用镜子的偏心、倾斜和轴向位移来重新优化光学系统,得到具体补偿的量值。为了方便,我们只对离轴三镜系统中的次镜面形误差进行补偿分析,分别给定次镜一定量的球差、 $x$  轴慧差、 $y$  轴慧差、 $0^\circ$  和  $90^\circ$  方向像散和  $45^\circ$  方向像散,然后调整次镜和三镜,补偿结果如图 6。图 6 中横坐标是不同类型面形误差的峰谷值(P-V),纵坐标是补偿后系统三个视场波前误差下降(相对于理想系统)的均方根值。

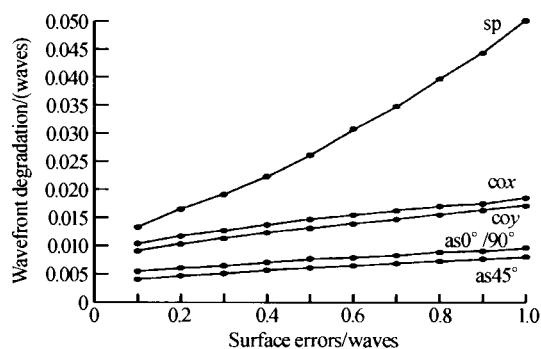


图6 补偿后波前误差的下降量

Fig. 6 Wavefront degradation after compensation

从图 6 可以看到,带有球差、慧差和像散的光学表面通过调整光学元件的位置变量可以有效的进行补偿,其中球差的补偿量最少,像散的补偿量最大。一个光学表面带有数量非常大的像散像差时,经过位置自由度补偿后光学系统成像质量仍然可以得到保证,如所当次镜带有  $1\lambda$  (P-V 值) 像散面形误差,补偿后波前误差只下降  $0.01\lambda$  RMS。

当然这种分析是孤立的,不实际的,但是这种分析方法可以使设计者、加工者和装调者意识到存在这样的加工或装调极限. 一个大口径、非球面反射元件由于加工技术、重力变形或环境变化等因素导致面形误差超出公差范围也是比较常见的情况,这样一个超出公差范围的光学元件一定就不能使用吗? 不一定. 如果利用上面的方法进行补偿分析,也许会节省大量的时间、经费.

## 5 结论

在离轴三镜系统中光学元件位置变量多,变量间关系复杂,难以将它们分离出来,装调时可以利用它们间的这种补偿关系,进行计算机辅助装调,将相关的变量(如倾斜或偏心)去掉(不调整),可以使失调量快速收敛、迭代次数少. 光学元件的面形误差可以通过调整位置变量来补偿,这样装调时可以消除或部分消除面形误差对系统成像质量的影响.

本文从实际光学系统出发,对其进行了理论分析和数值仿真模拟计算,证明了该分析结果指导装调的有效性. 在实际装调中,会存在一些不确定因素(如环境噪声),使获得实际系统与理论模型存在一定的偏差,这时我们要对理想模型进行修正,提高算法的稳定性,逐一解决实际问题中存在的问题.

### 参考文献

- 1 陈立武,杨建峰,洪新华,等. 宽谱段折射式长焦光学镜头. 光子学报,2004,**33**(9):1123~1126  
Chen L W, Yang J F, Hong X H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,**33**(9):1123~1126
- 2 常军,翁志成,姜会林,等. 用于空间的三反射镜光学系统设计. 光学学报,2003,**23**(2):216~219  
Chang J, Weng Z C, Jiang H L, et al. *Acta Optica Sinica*, 2003,**23**(2):216~219
- 3 樊学武,马卫红,陈荣利,等. 具有二次像面的三反射光学系统的研究. 光子学报,2003,**32**(8):1001~1003  
Fan X W, Ma W H, Chen R L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003,**32**(8):1001~1003
- 4 Matthew P. A computer aided optical alignment method. *Proc SPIE*, 1990,**1271**:363~368
- 5 以谟. 应用光学. 北京:机械工业出版社,1988. 364~366  
Zhang Y M. *Applied Optics*. Beijing: Machine industry publishing company, 1988. 364~366
- 6 Figoski J W, Shrode T E, Moore G F. Computer-aided alignment of a wide-field, three-mirror, unobscured, high-resolution sensor. *SPIE*, 1989, **1049**:166~171
- 7 Rogers R. Aberrations of optical systems with large tilts and decentration. *SPIE*, 1994,108~110
- 8 Agurok Ilya. Aberration of perturbed and unobscured optical system. *SPIE*, 1999,**3779**:166~175
- 9 Gelles R. Off-center aberrations in nonaligned system. *J Opt Soc Am*,1978,**68**:1250~1254
- 10 樊学武,陈荣利,马臻,等. 偏心和倾斜光学系统初级像差理论的研究. 光子学报,2004,**33**(4):494~496  
Fan X W, Chen R L, Ma Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,**33**(4):494~496
- 11 Virendra N. *Optical Imaging and aberrations*. Bellingham, Washington,1998. 437~444
- 12 Matthew P. A computer aided optical alignment method. *SPIE*, 1990,**1271**:363~365
- 13 刘剑峰,龙夫年,张伟. 离轴三镜系统计算机辅助装调方法研究. 光学技术,2004,**30**(5):571~573  
Liu J F, Long F N, Zhang W. *Optical Technique*, 2004,**30**(5):571~573
- 14 William B. Effects of mirror surface ripple on image quality. *SPIE*, 1982,**332**:335~351

## Study on Compensation Relationships Among the Elements in Off-axis Three-mirror System

Zhang Wei, Liu Jianfeng, Long Funian

*Research Centre for Space Optical Engineering, Harerbin Institute of Technology, Harerbin 150001*

Received date: 2005-01-13

**Abstract** The compensation relationships among the adjustable variables and those between surface errors and the adjustable variables in off-axis three-mirror system are analyzed. The decenter variable in the adjustable variables often brings the same kind of aberration as the position offset of the tilt variable does, so they are of considerable relativity. Based on the theory of offset aberration, the relationship between decenter variables and tilt variables is obtained by compensating the primary aberration caused by both the decenter variables and the tilt variables. The adjustable variables and surface errors are correlated by modeling the relationship between surface errors which is represented by Zernike polynomials and the primary aberration. The precondition of computer simulation for compensation is to adjust the decenter, tilt and transverse displacement of the optical elements when given a certain value of surface error. The result shows that the wave front performance degradation of compensated system is only  $0.01\lambda$  RMS, when compensating the secondary mirror with surface errors of  $1\lambda$  P-V astigmatism.

**Keywords** Space optics; Off-axis three-mirror system; Surface errors; Aberrations compensation



**Zhang Wei** was born in china, in 1962. He received B. S. and Ph. D degree in Optical Engineering, from Haerbin Institute of Technology in 1983 and 2001. He is now a professor, working in optic sensing, missile guidance, system simulation area.