

# 大口径光学系统时在轨调整补偿能力

刘剑峰 王慧军 孙德伟 李 博 周 峰

(北京空间机电研究所, 北京 100076)

**摘要** 随着航天遥感需求的不断提高,光学遥感器的口径越来越大,光学元件的支撑和重力变形对光学系统的影响难以消除,因此需要在轨调整光学元件位置变量,来补偿主镜面形误差引起的系统光学性能的下降。以一个大口徑同轴三反射式光学系统为例,在理论上分析了次镜的倾斜、偏心和轴向位置引起的初级像差的变化,得出次镜的在轨补偿能力。利用 Zernike 多项式模拟主镜面形误差,通过调整次镜的位置自由度,分别补偿主镜的球差、彗差和像散,给出了仿真结果,并进行了工程可实现性分析。结果表明,次镜的位置自由度调整能够补偿主镜的彗差,并能够补偿一定量的像散,但是只能补偿小量球差。

**关键词** 光学设计;在轨补偿;光学系统;初级像差;Zernike 多项式

**中图分类号** O438 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0322005

## On-Orbit Adjustment and Compensation for Large Aperture Optical System

Liu Jianfeng Wang Huijun Sun Dewei Li Bo Zhou Feng

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100076, China)

**Abstract** With the uprating requirements of space remote sensing, the aperture of the remote sensor is getting larger and larger. The influences of both the support of optical elements and gravity deformation on the optical system are difficult to conquer. Therefore, it is necessary to compensate the descending optical performance which is caused by the surface error of the primary mirror by means of adjusting the position parameters of the optical elements on-orbit. A large aperture coaxial three-mirror optical system is introduced. The variation of primary aberrations caused by tilting, off-centering and varying of axial position of the secondary mirror are theoretically analysed. The on-orbit compensation ability of the secondary mirror is deduced consequently. Zernike polynomials are used to simulate the surface error of the primary mirror. The spherical aberration, coma and the astigmatism of the primary mirror are compensated respectively by adjusting the positional freedoms of the secondary mirror, which are proved by both simulation results and feasibility analysis. The results show that the adjustment of the positional freedoms of the secondary mirror can compensate both the coma and some astigmatism of the primary mirror, but a little spherical aberration.

**Key words** optical design; on-orbit compensation; optical system; primary aberration; Zernike polynomial

**OCIS codes** 220.1000; 220.4839; 220.4880; 220.1140

## 1 引 言

随着遥感技术的发展,地面分辨率要求越来越高,光学系统口径也越来越大<sup>[1-2]</sup>,美国 KH12 相机的通光口径已经达到了 3 m<sup>[3]</sup>。随着光学遥感器口径的不断增大,其重量也随之增加,自重、热变形等问题对主镜的面形精度产生很大的影响<sup>[4]</sup>。虽然人

们提出了各种解决方法<sup>[5-7]</sup>,如重力卸载技术、改进支撑方式和轻量化技术等,但是由于地面难以精确模拟在轨飞行环境以及各种综合剩余误差的影响,难以保证大口径光学元件在轨飞行时的面形精度。

本文以一个大口徑同轴三反消像散系统为例,研究了次镜在轨位置调整补偿主镜的残余像差,得

**收稿日期**: 2013-10-14; **收到修改稿日期**: 2013-11-04

**作者简介**: 刘剑峰(1975—),男,高级工程师,博士,主要从事光学系统设计、检测和仿真分析等方面的研究。

E-mail: jfliu1@163.com

到次镜的在轨补偿能力,为利用光学元件在轨调整技术的实际应用提供坚实的理论和实验基础。

## 2 光学系统性能指标和设计

光学系统指标为:光学系统焦距:30 m;相对口径:1/10;谱段:0.4~0.78  $\mu\text{m}$ ;视场角: $1^\circ \times 0.2^\circ$ 。光学系统结构型式如图 1 所示,调制传递函数(MTF)如图 2 所示。

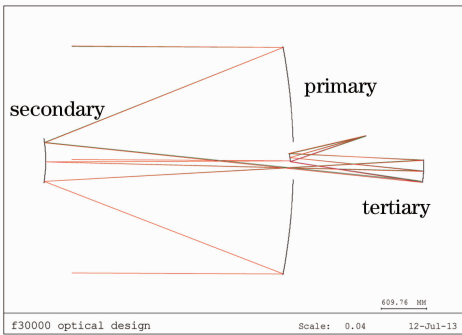


图 1 光学系统结构型式

Fig. 1 Layout of the optical system

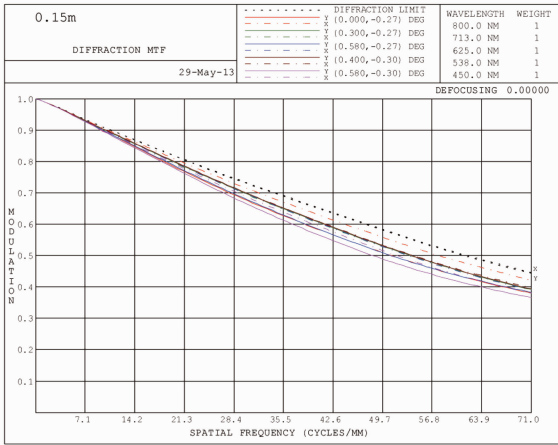


图 2 光学系统调制传递函数

Fig. 2 MTF of the optical system

## 3 次镜补偿能力理论分析

为了分析次镜的补偿能力,需要在理论上计算出次镜 6 个自由度位置偏差引起的初级像差变化量,根据这些像差变化量得出次镜能够补偿的初级像差种类和大小。次镜的 6 个自由度包括两个方向的偏心和倾斜、沿光轴平移和绕光轴旋转,其中绕光轴旋转不引起像差变化,因此只需分析次镜的 5 个自由度调整引起的初级像差变化。

为了便于理论分析,将次镜等效为一个折射面,分析偏心和倾斜引起的初级像差变化。如图 3 所示,次镜等效为一个曲率半径为  $R$  的折射面,折射面两边折射率分别为  $n$  和  $n'$ ,连接顶点  $V_0$  和曲率中心  $C$  的直线为光轴。物点为  $P$ ,它的高斯像点为  $P'$ ,物点和像点到光轴的距离分别为  $h$  和  $h'$ , $O$  为出瞳中心,出瞳面到像面的距离为  $L$ , $(x, y)$  为出瞳面上任意一点  $Q$  相对于原点  $O$  的坐标。

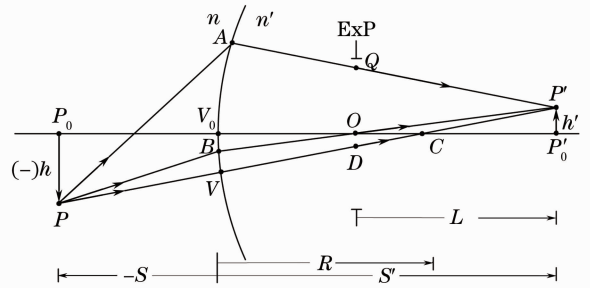


图 3 共轴光学系统

Fig. 3 Coaxial optical system

共轴系统初级波像差公式为<sup>[8]</sup>

$$W(x, y; h') = a_s(x^2 + y^2)^2 + a_c h' x(x^2 + y^2) + a_a h'^2 x^2 + a_d h'^2(x^2 + y^2) + a_t h'^3 x, \quad (1)$$

式中  $a_s$  为球差系数,  $a_c$  为彗差系数,  $a_a$  为像散系数,  $a_d$  为场曲系数,  $a_t$  为畸变系数。

### 3.1 偏心引起像差变化

考虑由于偏心所引入的像差。假定系统中某一光学面相对于光轴有一纵向( $x$  方向)位移,偏移量为  $\Delta_x$ ,如图 4 所示。

实线表示为理想系统光学面,虚线表示偏心系统光学面,  $C$  是光学面曲率中心,  $V$  是曲面顶点,  $A$  是入瞳中心,  $A'$  点为入瞳中心  $A$  对偏心面的像,即出瞳中心。在理想的光学系统中,设物点  $P$  和像点  $P'$  到光轴  $VC$  的距离分别为  $h$  和  $h'$ ,  $B$  和  $B'$  是分别为新光轴与入瞳和出瞳的交点,它们是一对共轭点。如果所考虑的理想系统的初级像差是像高  $h'$  形式表述的,则它们也可以通过简单的替换写成像高为  $h'_p$  的形式。这样得到的出瞳处的初级像差是以  $B'$  点为中心,然而未准直系统的出瞳中心位于  $A'$  点,它是如果中心  $A$  的共轭点,这样需要一系列的坐标变换,使得初级像差中心位于  $A'$  点,参考球球心位于  $P''$  点。

根据共轴系统的波前误差公式,可以得到偏心面的初级波像差变化:

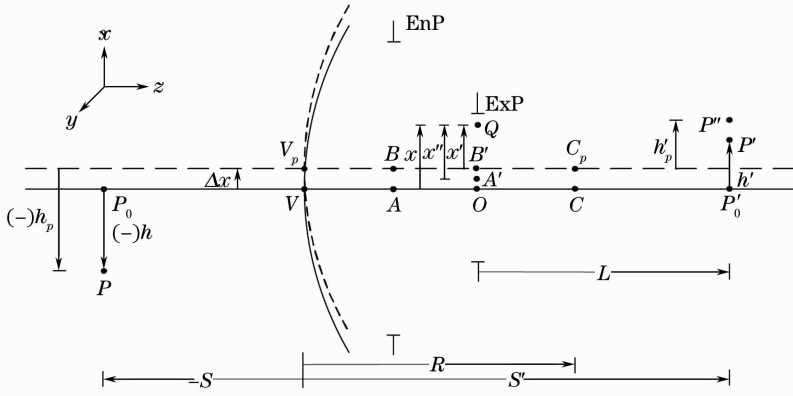


图4 偏心光学系统

Fig. 4 Decentered optical system

$$\delta W_{\text{decx}}(x, y; h') = W_{\text{dec}}(x, y; h'_p) - W(x, y; h') = -(Ma_c + 4ma_s)\Delta_x x(x^2 + y^2) - 2(Ma_a + ma_c)\Delta_x h' x^2 - (2Ma_d + ma_c)\Delta_x h'(x^2 + y^2) - [3Ma_t + 2m(a_a + a_d)]\Delta_x h'^2 x. \quad (2)$$

同样方法,可以得到光学面沿  $y$  轴偏心(偏心量为  $\Delta_y$ )的初级像差变化量:

$$\delta W_{\text{decy}}(x, y; h') = W_{\text{decy}}(x, y; h'_p) - W(x, y; h') = -(Ma_c + 4ma_s)\Delta_y y(x^2 + y^2) - 2(Ma_a + ma_c)\Delta_y h' y^2 - (2Ma_d + ma_c)\Delta_y h'(x^2 + y^2) - [3Ma_t + 2m(a_a + a_d)]\Delta_y h'^2 y. \quad (3)$$

从(2)、(3)式知,光学系统中某一面的小量偏心对系统的球差影响很小。第一项系数是轴向彗差,第二项是像散,第三项是场曲,第四项是畸变。

### 3.2 倾斜引起像差变化

同理也可以推导出次镜倾斜引起的初级像差变化,如图5所示。

$$\delta W_{\text{tilty}}(x, y; h') = -(MSa_c + 4msa_s)\beta x(x^2 + y^2) - 2(MSa_a + msa_c)\beta h' x^2 - (2MSa_d + msa_c)\beta h'(x^2 + y^2) - [3MSa_t + 2ms(a_a + a_d)]\beta h' x. \quad (4)$$

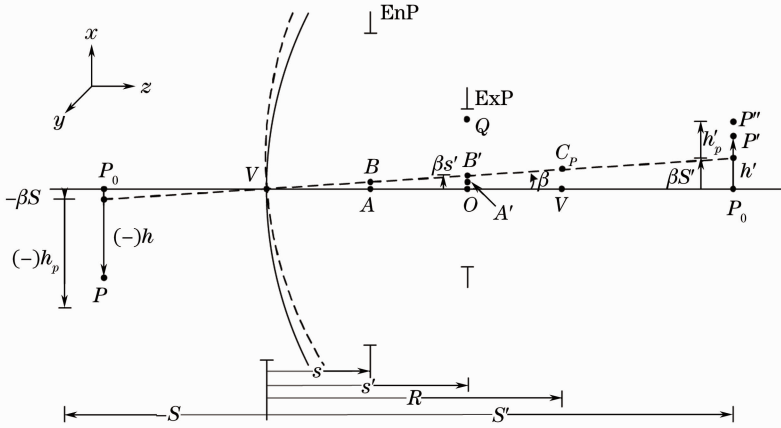


图5 倾斜光学系统

Fig. 5 Tilted optical system

同样,可以得到光学面绕  $x$  轴旋转一个角度  $\alpha$  所引起的初级像差变化:

$$\delta W_{\text{tiltx}}(x, y; h') = -(MSa_c + 4msa_s)\alpha y(x^2 + y^2) - 2(MSa_a + msa_c)\alpha h' y^2 - (2MSa_d + msa_c)\alpha h'(x^2 + y^2) - [3MSa_t + 2ms(a_a + a_d)]\alpha h' y. \quad (5)$$

光学元件小量的倾斜只引起了彗差、像散、场曲和畸变的变化,并未引起球差的变化。

### 3.3 轴向移动引起像差变化

次镜轴向位置变化会引起主次镜间距变化,像面位置会发生变化,产生离焦像差,离焦像差表达式为

$$W(\rho) \approx -n_i \Delta R / 8F^2 \rho^2 = B_d \rho^2, \quad (6)$$

式中  $\Delta R$  为离焦量,  $F$  为系统的  $F$  数。利用焦平面平衡系统轴向像差是光学系统经常用到的调整方式, 它可以利用焦面产生的离焦误差补偿系统球差、像散和场曲。

从以上分析可以得出: 次镜偏心和倾斜可以补偿系统的彗差、象散、场曲和畸变, 不能够补偿系统的球差; 次镜的轴向移动可以补偿一定量的球差、像散和场曲。

### 4 次镜补偿能力仿真分析

光学系统的结构型式如图 1 所示, 主镜是系统的关键部件, 口径为  $\Phi 3$  m, 重量约 500 kg(材料为碳化硅)。次镜补偿能力仿真分析过程: 利用 Zernike 多项式模拟主镜面形误差; 得到光学系统传函变化; 调整次镜位置变量; 光学系统传递函数提高。

#### 4.1 次镜补偿主镜的球差

利用 Zernike 多项式模拟主镜剩余球差, 如

图 6、8、10 所示 ( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ), PV 为峰谷值, RMS 为均方根, 然后将球差加到主镜上, 得到光学系统的传递函数变化, 调整次镜轴向位置变量, 得到最终光学系统传递函数, 调整前后光学系统传递函数如图 7、9、11 所示。

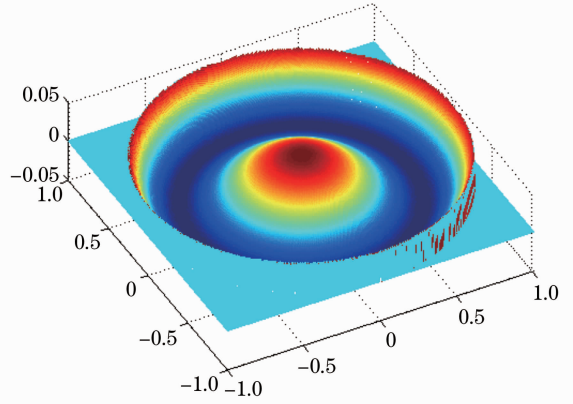


图 6 球差 (PV:  $0.06\lambda$ , RMS:  $0.0158\lambda$ )

Fig. 6 Spherical aberration (PV:  $0.06\lambda$ , RMS:  $0.0158\lambda$ )

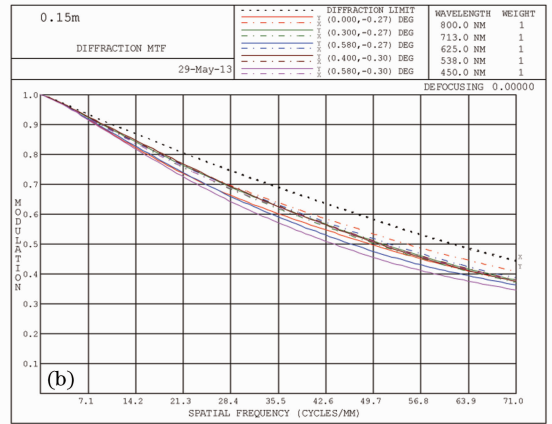
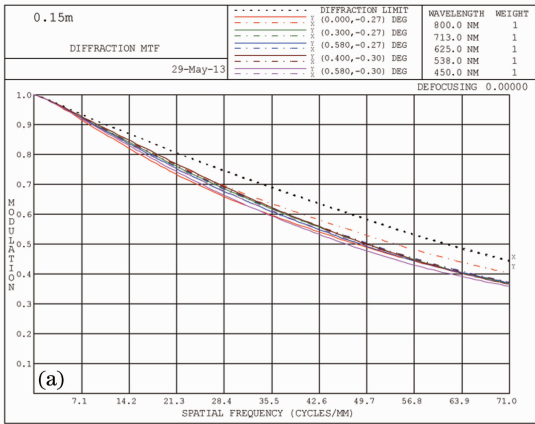


图 7 带有一定球差的光学系统传递函数曲线 (PV:  $0.06\lambda$ , RMS:  $0.0158\lambda$ )。 (a) 调整前; (b) 调整后

Fig. 7 MTF of optical system with spherical aberration (PV:  $0.06\lambda$ , RMS:  $0.0158\lambda$ ). (a) Before adjustment; (b) after adjustment

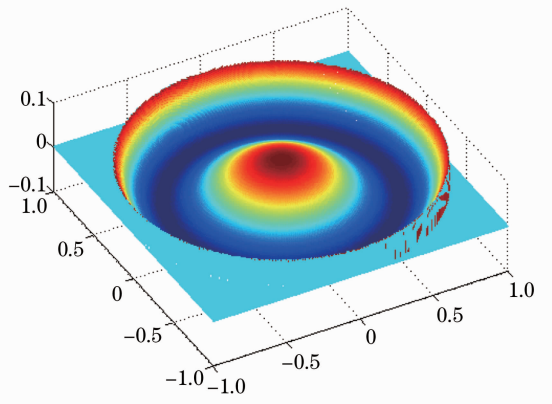


图 8 球差 (PV:  $0.09\lambda$ , RMS:  $0.0237\lambda$ )

Fig. 8 Spherical aberration (PV:  $0.09\lambda$ , RMS:  $0.0237\lambda$ )

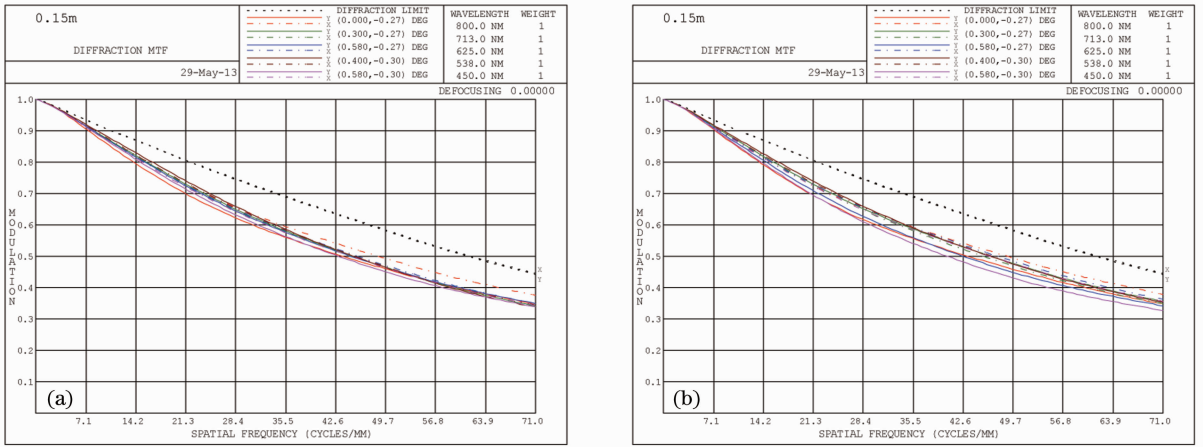


图 9 带有一定球差的光学系统传递函数曲线(PV:  $0.09\lambda$ , RMS:  $0.0237\lambda$ )。(a)调整前;(b)调整后  
Fig. 9 MTF of optical system with spherical aberration (PV:  $0.09\lambda$ , RMS:  $0.0237\lambda$ ). (a) Before adjustment; (b) after adjustment

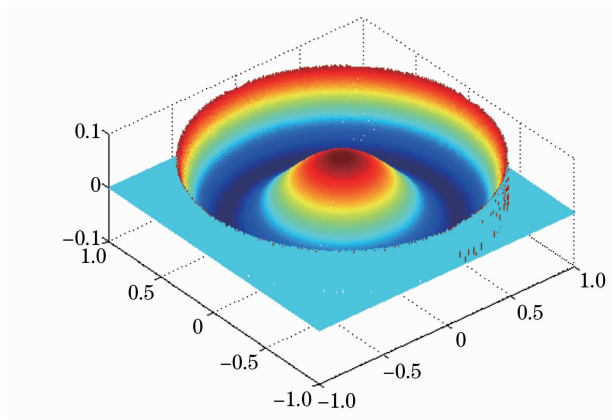


图 10 球差(PV: $0.12\lambda$ ,RMS: $0.0316\lambda$ )  
Fig. 10 Spherical aberration (PV: $0.12\lambda$ ,RMS: $0.0316\lambda$ )

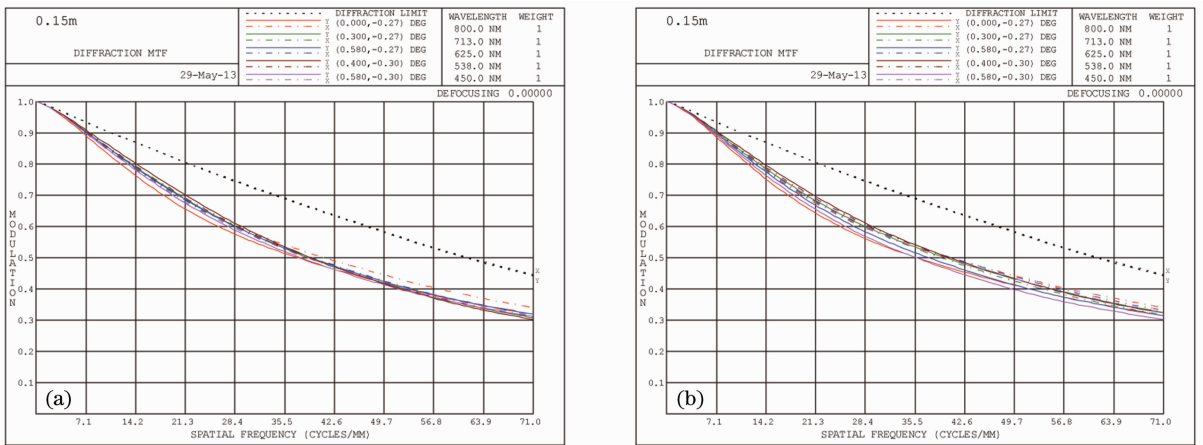


图 11 带有一定球差的光学系统传递函数曲线(PV:  $0.12\lambda$ , RMS:  $0.0316\lambda$ )。(a)调整前;(b)调整后  
Fig. 11 MTF of optical system with spherical aberration (PV:  $0.12\lambda$ , RMS:  $0.0316\lambda$ ). (a) Before adjustment; (b) after adjustment

从以上分析可以看出,次镜位置自由度调整对球差的补偿能力有限,因此主镜在加工和地面重力卸载时,残留的球差量不要大于  $0.02\lambda$ (RMS)。

#### 4.2 次镜补偿主镜的像散

利用与球差相同的仿真分析方法,调整次镜的倾斜和偏心变量,可以得到次镜补偿主镜像散的能

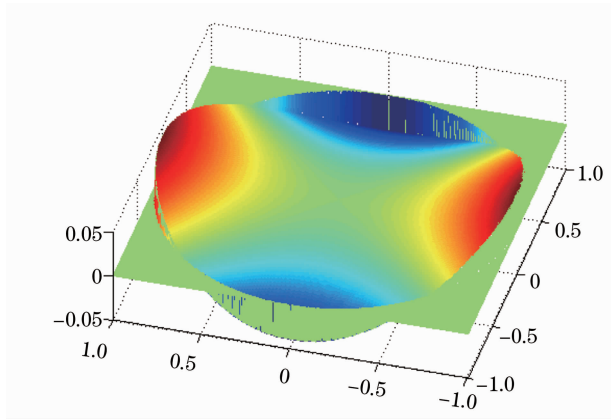


图 12 像散(PV:0.08λ,RMS:0.0144λ)

Fig. 12 Astigmatism (PV: 0.08λ, RMS: 0.0144λ)

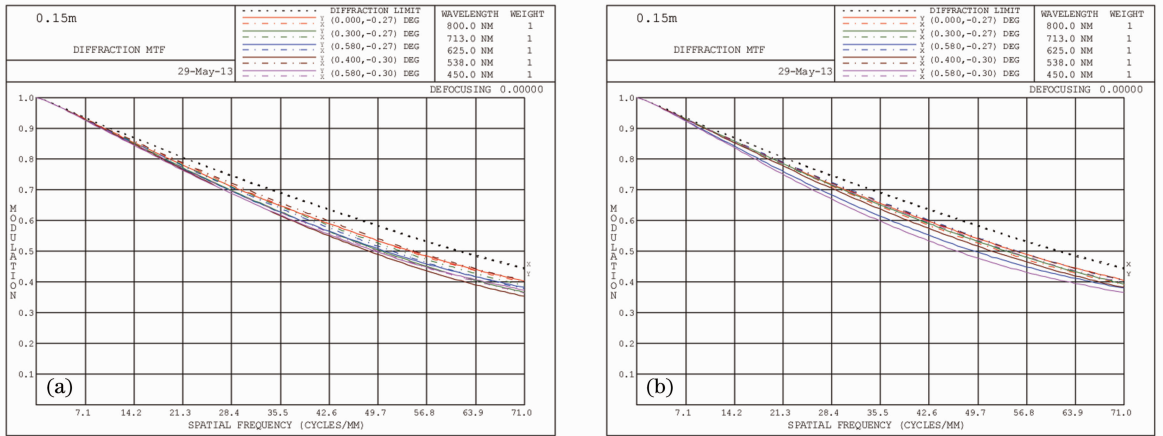


图 13 带有一定像散的光学系统传递函数曲线(PV: 0.08λ, RMS: 0.0144λ)。(a)调整前;(b)调整后

Fig. 13 MTF of optical system with astigmatism (PV: 0.08λ, RMS: 0.0144λ). (a) Before adjustment; (b) after adjustment

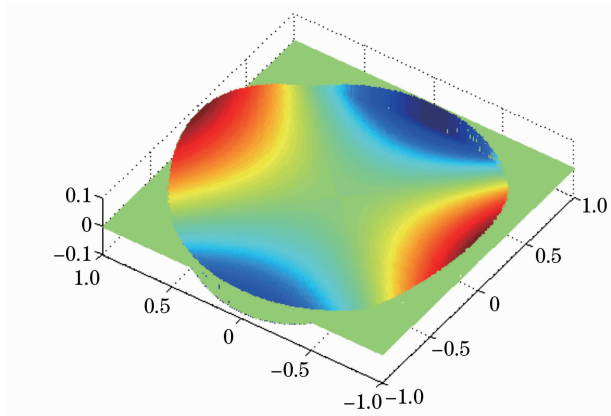


图 14 像散(PV: 0.12λ, RMS: 0.0187λ)

Fig. 14 Astigmatism (PV: 0.12λ, RMS: 0.0187λ)

力。主镜剩余像散,如图 12、14、16 所示,调整前后光学系统传递函数如图 13、15、17 所示。

从以上分析可以看出,次镜位置自由度调整能够补偿一定量的像散,当主镜带有 0.03λ(RMS)像散时,通过调整次镜,可以使得光学系统传递函数接

近设计值。

### 4.3 次镜补偿主镜的彗差

同理,调整次镜倾斜和偏心变量,可以得到次镜补偿主镜彗差的能力。主镜剩余彗差,如图 18、20、22 所示,调整前后光学系统传递函数如图 19、21、23

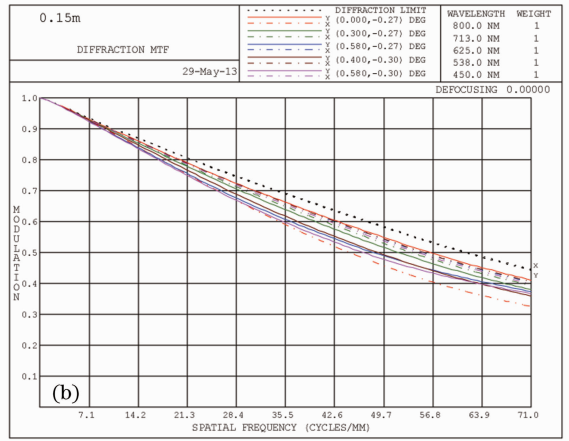
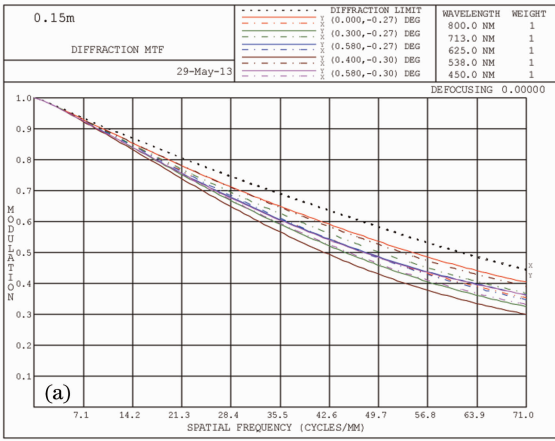


图 15 带有一定像散的光学系统传递函数曲线(PV: 0.12λ, RMS: 0.018λ)。(a)调整前;(b)调整后  
Fig. 15 MTF of optical system with astigmatism (PV: 0.12λ, RMS: 0.018λ). (a) Before adjustment; (b) after adjustment

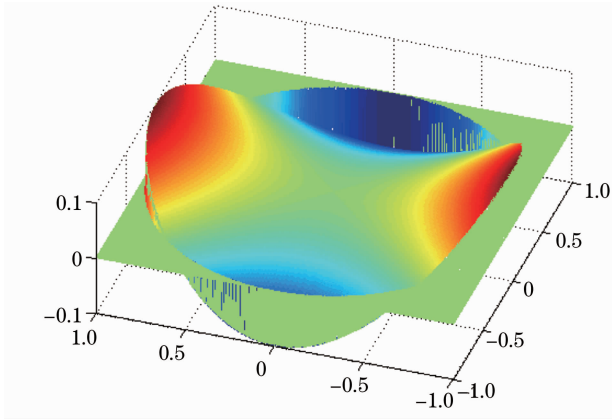


图 16 像散(PV: 0.2λ, RMS: 0.036λ)  
Fig. 16 Astigmatism (PV: 0.2λ, RMS: 0.036λ)

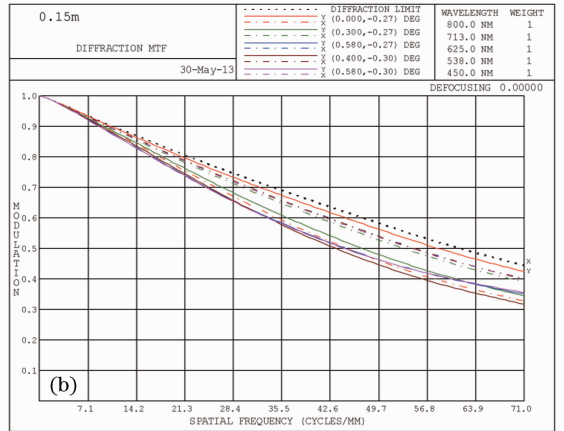
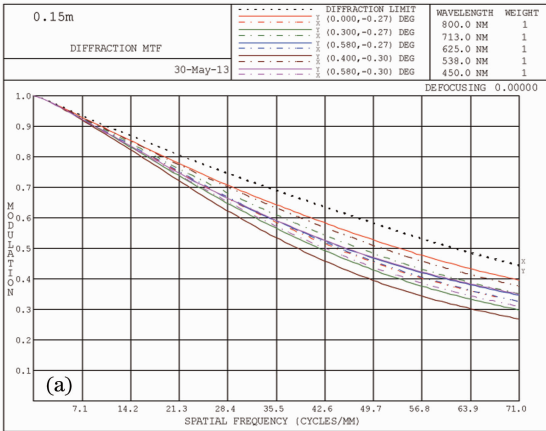


图 17 带有一定像散的光学系统传递函数曲线(PV: 0.2λ, RMS: 0.036λ)。(a)调整前;(b)调整后  
Fig. 17 MTF of optical system with astigmatism (PV: 0.2λ, RMS: 0.036λ). (a) Before adjustment; (b) after adjustment

所示。

从以上分析可以看出,次镜的位置调整能够补

偿彗差,当主镜带有 0.075λ(RMS)彗差时,通过调整次镜,可以使得光学系统传递函数接近原始设计

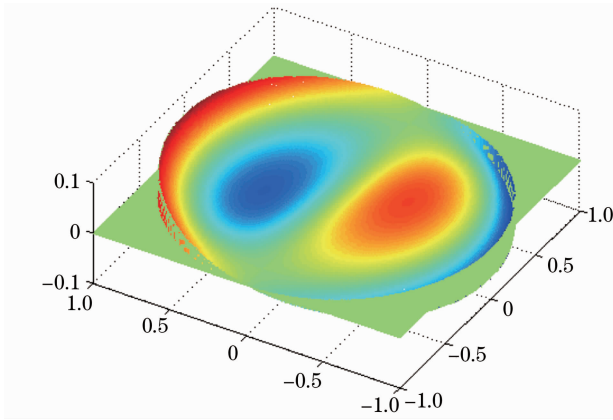


图 18 彗差(PV: 0.13λ, RMS: 0.0192λ)

Fig. 18 Coma (PV: 0.13λ, RMS: 0.0192λ)

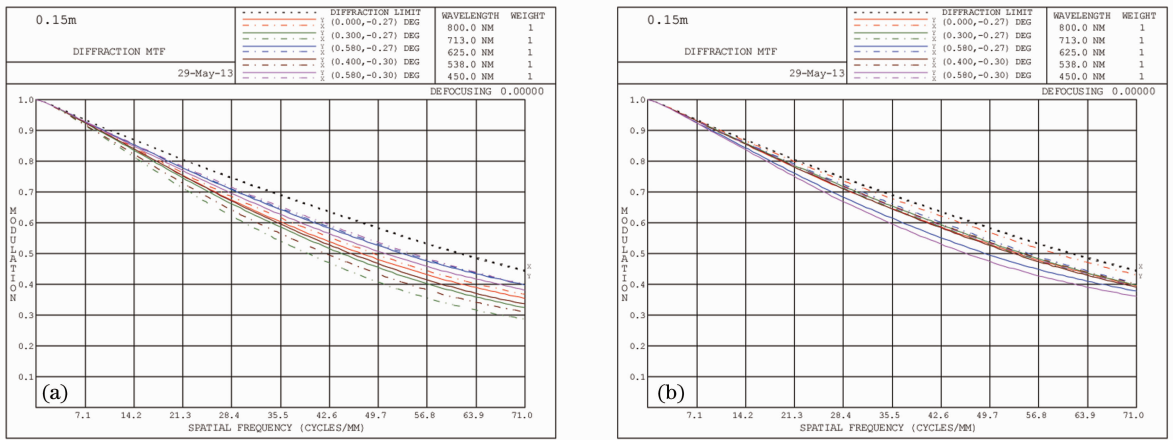


图 19 带有一定彗差的光学系统传递函数曲线(PV: 0.13λ, RMS: 0.0192λ)。(a)调整前;(b)调整后

Fig. 19 MTF of optical system with coma (PV: 0.13λ, RMS: 0.0192λ). (a) Before adjustment; (b) after adjustment

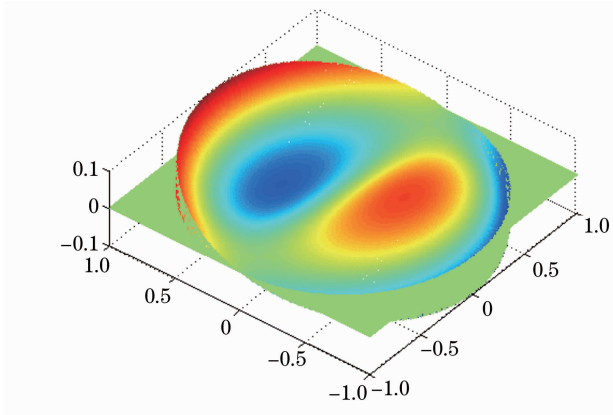


图 20 彗差(PV: 0.2λ, RMS: 0.031λ)

Fig. 20 Coma (PV: 0.2λ, RMS: 0.031λ)

值。

#### 4.4 工程可实现性分析

次镜安装在一个 5 自由度的调整机构上,通过控制调整机构的偏心、倾斜和轴向变量,实现 5 自由度调整。次镜补偿主镜误差所需要的最小调整量为:3 个方向平移变量为 1 μm、2 个方向倾斜变量为

10",目前国内研制的高精度调整机构可以实现:平移变量为 0.5 μm、倾斜变量为 2",因此次镜补偿主镜面型误差在工程上也是可行的。

## 5 结 论

从像差理论出发,分析了次镜偏心、倾斜和轴向



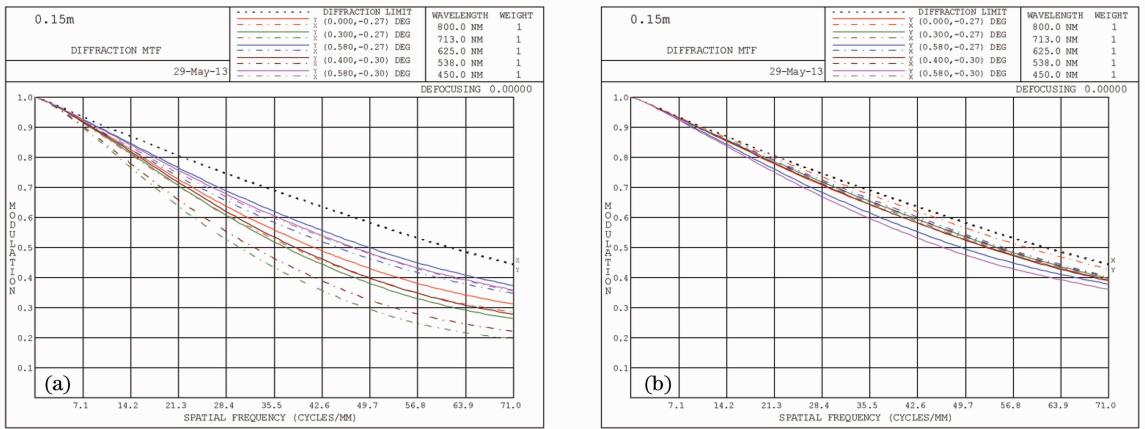


图 21 带有一定慧差的光学系统传递函数曲线(PV:  $0.2\lambda$ , RMS:  $0.031\lambda$ )。(a)调整前;(b)调整后  
Fig. 21 MTF of optical system with coma (PV:  $0.2\lambda$ , RMS:  $0.031\lambda$ ). (a) Before adjustment; (b) after adjustment

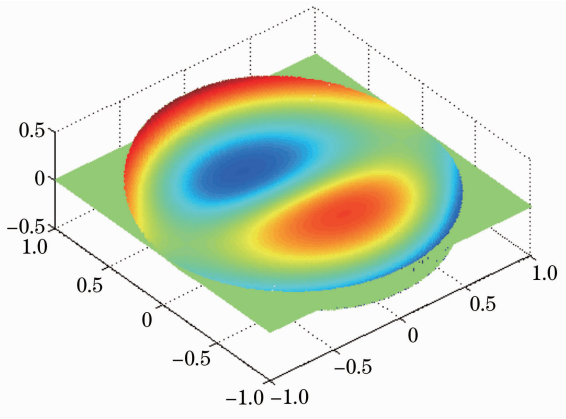


图 22 彗差(PV:  $0.48\lambda$ , RMS:  $0.075\lambda$ )  
Fig. 22 Coma (PV:  $0.48\lambda$ , RMS:  $0.075\lambda$ )

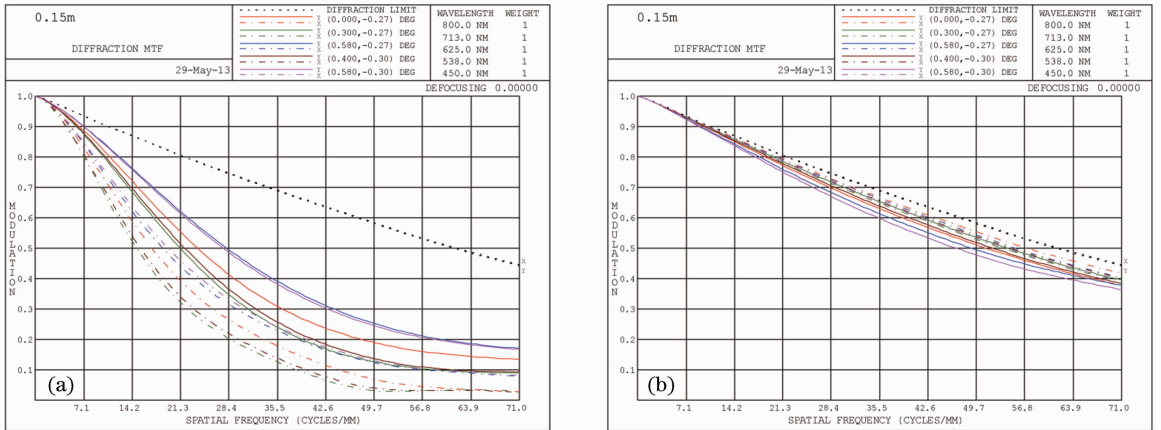


图 23 带有一定慧差的光学系统传递函数曲线(PV:  $0.48\lambda$ , RMS:  $0.057\lambda$ )。(a)调整前;(b)调整后  
Fig. 23 MTF of optical system with coma (PV:  $0.48\lambda$ , RMS:  $0.057\lambda$ ). (a) Before adjustment; (b) after adjustment

偏移产生的初级像差变化,得出次镜的补偿能力。利用 Zernike 多项式模拟了主镜带有一定量初级像差的面形误差,通过调整次镜,补偿主镜面形误差对光学系统性能的影响,得出如下结论:

- 1) 次镜位置调整能够补偿小量的主镜的球差;
- 2) 当主镜带有一定量的彗差时,通过调整次镜,能够有效补偿彗差对光学系统带来的影响;
- 3) 当主镜带有一定量的像散时,通过调整次

镜,能够补偿像散对光学系统带来的影响。

虽然本研究以一个同轴三反光学系统为例,得出次镜的补偿能力,此研究成果同样适用于离轴反射式光学系统,具有一定的普遍意义。

### 参 考 文 献

1 Hu Jun, Wang Dong, Sun Tianyu. Application and development of recent space opticalimaging remote sensors [J]. Chinese J Optics and Applied Optics, 2010, 3(6): 519-532.

胡 君, 王 栋, 孙天宇. 现代航天光学成像传感器的应用与发展[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(6): 519-532.

2 Zhong Xianyun, Fan Bin, Zeng Zhige, *et al.*. Design simulation and optimization for the flexible displacement support structure based on  $\Phi 1.8$  m lightweight reflector [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322002.

钟显云, 范 斌, 曾志革, 等.  $\Phi 1.8$  m 轻质镜能动磨盘技术抛光的柔性限位支撑设计仿真与优化[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322002.

3 Liang Wei. America reconnaissance camera present state [J]. International Space, 2000, 10: 1-3.

梁 巍. 美国照相侦察卫星系统现状[J]. 国际太空, 2000, 10: 1-3.

4 Pang Zhihai, Fan Xuewu, Chen Qinfang, *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影响[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422002.

5 Chen Xiaoli, Wang Bin, Yang Bingxin. Study of positioning and mounting scheme of large aperture ultra-light space reflector [J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2010, 31(3): 15-20. 陈晓丽, 王 彬, 杨秉新. 大口径超轻型反射镜定位和支撑方案研究[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(3): 15-20.

6 Fan Yanchao, Chai Fangmao, Li Zhilai, *et al.*. Lightweight design of primary mirror with large aperture for optical remote sensor [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(8): 123-134.

樊延超, 柴方茂, 李志来, 等. 大口径光学遥感器主反射镜轻量化方案设计[J]. 光电工程, 2012, 39(8): 123-134.

7 Chen Yang, Wang Yueming. Design and distortion characteristics analysis of the large-image-field off-axis three-mirror telescope [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0222003. 陈 杨, 王跃明. 大像场离轴三反望远镜畸变特性分析与设计[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0222003.

8 Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.

栏目编辑: 韩 峰