文章编号:1002-2082(2012)06-1040-07

自由曲面空间光学系统设计研究

王灵杰,张　新,张建萍,史广维

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘　要:对自由曲面的发展及应用做简要梳理,介绍国外自由曲面空间光学系统的研究现状,讨论 3 种自由曲面数理模型的特点和像差平衡能力,阐述自由曲面光学系统相对轴对称系统和平面对称系统的像差特点以及自由曲面空间光学系统的像差控制与评价方法,给出采用泽尼克多项式表述的自由曲面多光谱相机的设计结果,成像视场 76°,为远心光路设计,全视场调制传递函数(MTF)优于 0.56,适用于空间多光谱成像。

关键词:自由曲面;空间光学系统;像差;泽尼克多项式

中图分类号:TN202　　**文献标志码**:A　　**doi**:10.5768/JAO201233.0601007

Free-form surface space optical system

WANG Ling-jie, ZHANG Xin, ZHANG Jian-ping, SHI Guang-wei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China)

Abstract: We made a brief summary of the development and application of free-form surface, introduced the research status of free-form surface in space optical system abroad, described the characteristics of three kinds of free surface mathematical models and the aberration balancing ability, focused on the aberration characteristics of free-form surface optical system compared with the axisymmetric system and plane-symmetric system. In addition, we presented the aberration controlling and evaluation method of the free-form space optical system. Finally, we gave the design results of the free-form surface multi-spectral camera adopting Zernike polynomial representations. The results show that the imaging field of view is 76°, it adopts telecentric optical path design ; the wide field of view MTF is superior to 0.56, and it is applicable for space multispectral imaging.

Key words: free-form; space optic system; aberration ;Zernike polynomial

引言

空间遥感光学系统是在离地 200 km(低轨卫星)以上的轨道对地面目标或空间目标进行光学信息获取,具有遥感成像距离远的特点。如何在几百公里遥感距离下获得较高分辨率的同时保证较宽的成像幅宽是推动空间遥感光学不断发展的源动力。

光学系统的入瞳直径是决定空间相机地面像元分辨率的主要因素之一,在一定 $F/\#$ 的前提下,入瞳直径越大,空间相机地面像元分辨率越高。但入瞳直径的增加,意味着所有与孔径相关的像差增加。受空间环境中力学、热学、压力等因素的制约,当入瞳直径增大到一定程度(通常 200 mm 以上),光学系统一般采用反射式或折反射式方案。为了简化光学系统形式,仅采用球面镜是无法平衡由于入瞳直径增加而剧增的像差,因此,二次非球面和高次非球面在上世纪 70 年代被逐渐应用到空间光学系统中。但随着对幅宽的追求,要求光学系统的视场不断增加,与视场相关的轴外

收稿日期:2012-05-25;　**修回日期**:2012-06-12

作者简介:王灵杰(1979－),男,江苏金坛人,助理研究员,主要从事现代光学技术研究及红外光电系统性能研究。
E-mail:wanglingjie@126.com

像差逐渐占据主导地位,尤其是轴外高级像差增加更加剧烈。高级像差的增加使得光学系统的波面由单纯的低频特性,逐步引入更多的非轴对称高频特性[2]。目前空间相机采用的同轴三反或离轴三反光学系统,光学元件通常采用3块二次非球面或高次非球面,无法平衡剧增的高级轴外像差。

随着数控光学加工技术的进步,并伴随CGH光学面形检测技术的进步,自由曲面光学元件正逐步得到应用。例如,共形光学系统、波前编码系统、头盔显示系统(HUD)和照明系统等。

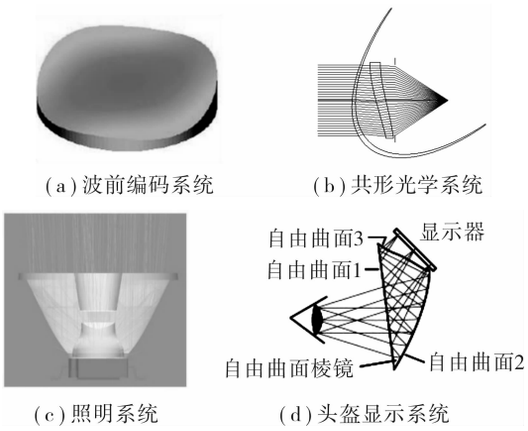


图1　几种自由曲面应用实例

Fig. 1　Examples of free-form system application

国外知名光学研究机构一直致力于自由曲面应用于空间光学的研究,例如HUBBLE望远镜在其修复光学系统中采用了一块自由曲面反射镜[1],成功治好了"近视眼",JWST在其红外光谱仪中也采用了一块自由曲面平衡轴外像差。Leica为欧空局研制的TMA空间相机,采用自由曲面进行像差平衡(全视场波像差由λ/7提高到λ/20(λ=1 064 nm)。

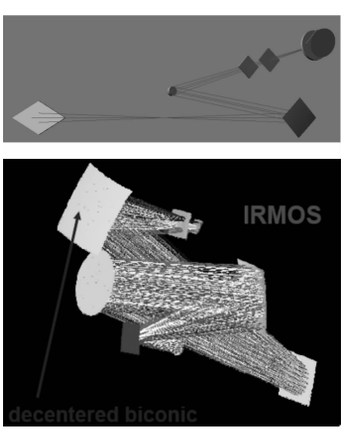


图2　自由曲面应用于HUBBLE望远镜中

Fig. 2　Free-form mirror applying in HUBBLE

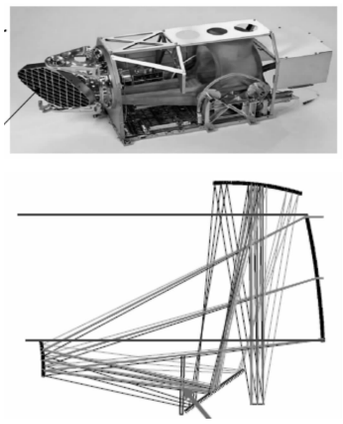


图3　Leica研制的自由曲面TMA相机

Fig. 3　Free-form TMA camera by Leica

1　自由曲面数理模型

作为光学元件的面形表达式必须具备4种特性,即连续阶特性、函数值唯一性、坐标轴无关性和局部控制性。连续阶特性是指表达式具有一阶以上连续导数,无突变点。函数值唯一性保证光线与曲面交点的唯一性。坐标轴无关性是指函数值不受坐标系的改变而变化,保证数据在光学设计、加工和装调过程中的无损传递。局部控制性是指表达式能够实现面形的局部控制,实现对非对称像差的平衡。自由曲面的数理模型有很多种,例如Zernike多项式、XY多项式、高斯方程等,详见式(1)～式(3)。以上3种多项式均具备这4种特性。

$$z=\frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2r^2}}+\sum_{i=1}^{N}A_iZ_i$$

式中Z_i分别表示成:

$$Z_i=Z_i(\rho,\varphi) \tag{1}$$

$$Z_i=x^m y^n \tag{2}$$

$$Z_i=\exp(-\beta r^2) \tag{3}$$

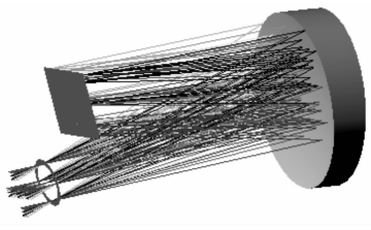


图4　自由曲面应用于头盔显示器中

Fig. 4　Free-form applying in HUD

这3种自由曲面表达式各有优点。Zernike多项式为圆域正交,各项系数之间不会互相干扰,且与几何像差一一对应,不会出现高次项与低次项互相抵消的情况;XY多项式与数控光学加工的表达形式一致,最适合确定式加工;径向基函数局部控制力最强,像差平衡能力最强,同时其属于矩阵形式,最适合变形镜或子孔径拼接的面形描述。将这3种表达式应用于头盔显示系统设计中。光学系统设计参数见表1所示。

表1　头盔显示系统设计参数

Table 1　HUD design parameters

设计参数	参数值
焦距	8 mm
视场	42°
入瞳直径	3 mm
元件数量	1

表2　国外文献中的设计结果

Table 2　Design results in foreign reference

表面类型	35 lp/mm 处平均 MTF 值	最大畸变
X-Y 表面	0.436	2.65%
Zernike 表面	0.42	3.74%
径向基函数表面	0.605	3.6%

表3　平移项放开后设计结果

Table 3　Results of free piston

表面类型	35 lp/mm 处平均 MTF 值	最大畸变
X-Y 表面	0.566	2.35%
Zernike 表面	0.645	1.89%
径向基函数表面	0.657	2.01%

3种自由曲面表达式均具有很强的像差平衡能力,放开平移项后Zernike表面与径向基函数表面的优化结果几乎相当,系统特征频率下的MTF稍低,但畸变优于径向基函数表面。由此可见,优化变量要针对系统残余像差的类型进行选取,并因此会影响自由曲面的像差平衡能力。考虑到自由曲面光学系统数据在设计、加工、检测、装调链路中的无损传递,目前仍然选择Zernike表面作为自由曲面的数理模型。

2　自由曲面光学系统像差理论

轴对称系统所有光学元件拥有唯一的对称轴,称为光轴。轴对称系统的像差可采用标量波像差理论进行描述,见公式(4),其中H为像高,ρ为入瞳直径。理想的轴对称系统的全视场像差以视场中心对称,仅有一个节点(零点),规律简单,如图5所示,图6(a)~6(c)依次为彗差、像散和场曲。

$$W=\sum_{j}\sum_{p}^{\infty}\sum_{n}^{\infty}\sum_{m}^{\infty}(W_{klm})_j(\vec{H}\cdot\vec{H})^p(\vec{\rho}\cdot\vec{\rho})^n(\vec{H}\cdot\vec{\rho})^m \tag{4}$$

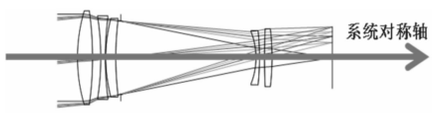


图5　轴对称系统

Fig. 5　Axisymmetric system

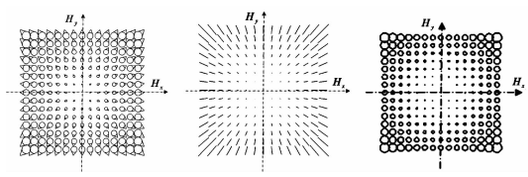


图6　轴对称系统像差特性

Fig. 6　Aberration characteristics of axisymmetric system

当轴对称系统出现一个小的失调量时,在原波像差公式中将引入失调量$\boldsymbol{\sigma}_j$,于是适用于轴对称系统的标量波像差变形为含有较小矢量偏量的矢量波像差公式,见公式(5)。随着该矢量偏量$\boldsymbol{\sigma}_j$的引入,轴对称系统像差对称性发生了改变,对称中心发生了偏移,采用CODE V软件进行像差模拟,结果如图7所示,像散出现双节点现象。当系统发生较大偏心或倾斜时,系统像差特性将变得更加复杂,例如平面对称系统[3-4]。

$$W=\sum_{j}\sum_{p}^{\infty}\sum_{n}^{\infty}\sum_{m}^{\infty}(W_{klm})_j[(\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{\sigma}_j)-(\boldsymbol{H}-\boldsymbol{\sigma}_j)]^p\cdot(\boldsymbol{\rho}\cdot\boldsymbol{\rho})^n[(\boldsymbol{H}-\boldsymbol{\sigma}_j)\cdot\boldsymbol{\rho}]^m \tag{5}$$

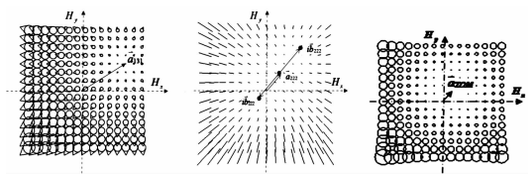


图7　失调轴对称系统像差特性

Fig. 7　Aberration characteristics of maladjustment axisymmetric system

平面对称系统是指系统以 YZ 平面对称面,见图 8 所示。主镜和次镜在 YZ 平面内发生偏心和倾斜,使波像差公式中引入矢量$\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{H}$和矢量$\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{\rho}$,相比于轴对称系统由于小的失调量$\boldsymbol{\sigma}_j$ 对像差的影响要大得多。平面对称系统像差种类相比标量波像差种类大大增加,一级像差由 3 种即平移、离焦和倾斜,增加到 5 种,三级像差由 5 种增加到 11 种,五级像差由 9 种增加到 35 种。美国亚利桑那大学的 Jose M. Sasain 教授对平面对称系统的一级、三级和五级波像差进行了推导和归纳,而七级以上的波像差规律更加复杂,目前还没有得到推导。

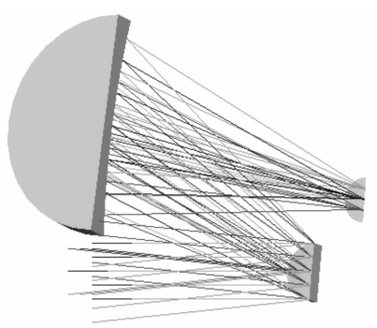


图 8　平面对称系统

Fig. 8　Plane-symmetric optical system

$$W(\boldsymbol{H},\boldsymbol{\rho},\boldsymbol{i})=\sum_{k,m,n,p,q}^{\infty}W_{2k+n+p,2m+n+q,n,p,q}(\boldsymbol{H}\cdot\boldsymbol{H})^{k}(\boldsymbol{\rho}\cdot\boldsymbol{\rho})^{n}(\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{H})^{p}(\boldsymbol{i}\cdot\boldsymbol{\rho})^{q} \tag{6}$$

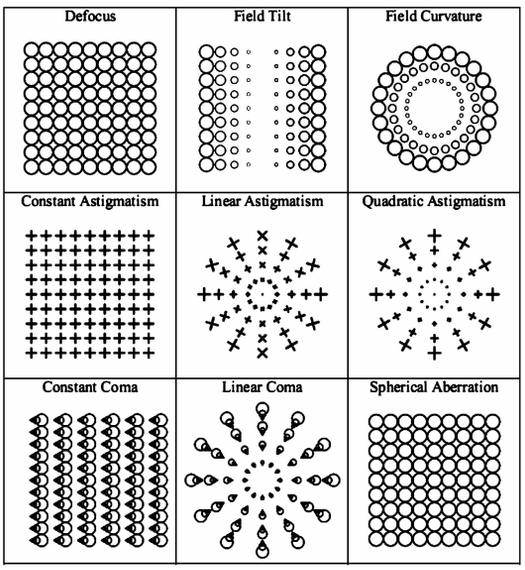


图 9　平面对称系统三级像差拟合图

Fig. 9　Third order aberration of plane-symmetric optical system

由于自由曲面本身失对称,使得自由曲面系统也完全非对称,相比于平面对称系统,其像差规律更加复杂,目前尚未对该类系统的像差函数完成推导和归纳。但从视场像差图形中可以定性得到自由曲面系统像差的 4 大特点:

a) 像差节点不止一个;

b) 像场不再以中心对称;

c) 像差无确定指向;

d) 像差种类更多。

虽然目前未能完成自由曲面光学系统的波像差的推导和归纳,但是这并不影响设计过程中对光学系统参数和像质的优化和控制。方法包括:

a) 通过对重点光线的精确控制实现光学系统一阶参量的掌控;

b) 对全视场进行差权平衡,控制像面的振荡和异变;

c) 编写自由曲面偏离量拟合及约束程序,实现自由曲面制造性控制。

通过以上方法,并结合 CODE V 中用户优化评价函数功能,完成了一套针对空间遥感应用的自由曲面光学系统的设计和像质评价。

3　自由曲面空间光学系统设计

针对空间遥感光学系统追求大幅宽的应用需求,我们将自由曲面应用于四反射式光学系统中,实现了 76°视场的全反射式光学系统设计。具体光学系统参数见表 4,光学系统图见图 10 所示。光学系统采用四反射式光学系统形式,主镜和三镜为凸面反射镜,二镜和四镜为凹面反射镜。其中主镜为球面反射镜,二、三、四镜为自由曲面反射镜。表 5 为光学系统数据。二、三、四镜均采用 CODE V 软件中的 Zernike 多项式描述的自由曲面面形。其中三镜面形拟合如图 11 所示,其相对于最接近球面的偏离量 PV 值为 210λ,RMS 值为 47λ,评价波长为 632.8 nm。其中二四镜面形拟合如图 12 所示,其相对于最接近球面的偏离量 PV 值约 1 148λ,RMS 值 292λ。采用确定式数控加工技术进行自由曲面加工,并采用 CGH 干涉补偿检测技术进行面形检测,其

中三镜 CGH 的尺寸约为 Φ100 mm,其条纹密度低于 50 lp/mm,二四镜 CGH 尺寸约为Φ135 mm,其条纹密度低于 200 lp/mm。

表 4　光学系统设计参数

Table 4　Design parameters of optical system

设计参数	参数值
焦距	600 mm
视场	76°
入瞳直径	85 mm
成像谱段	波段 1:0.45 mm～0.52 mm
	波段 2:0.52 mm～0.60 mm
	波段 3:0.63 mm～0.69 mm
	波段 4:0.77 mm～0.89 mm

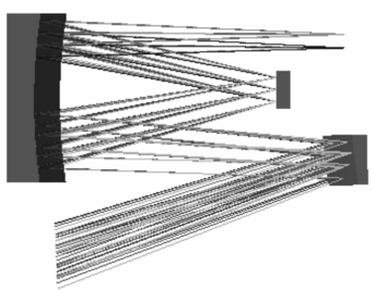


图 10　光学系统图

Fig. 10　Optical system graph

表 5　光学系统数据

Table 5　Data of optical system

反射镜	曲率半径/mm	反射镜面形	间隔/mm
主镜	1 033.2	凸球面	−605.2
次镜	1 425.4	自由曲面	515.3
三镜	1 565.7	自由曲面	−515.3
四镜	1 425.4	自由曲面	662.13

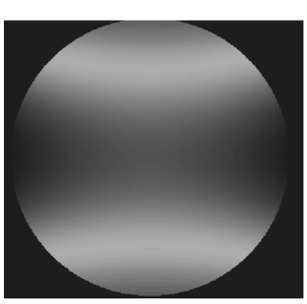


图 11　三镜面形图

Fig. 11　Surface shape of third mirror

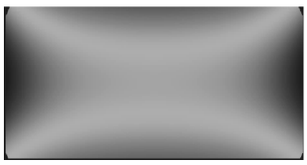


图 12　二四镜面形图

Fig. 12　Surface shape of second-four mirror

对于大视场空间多光谱遥感相机如何控制不同视场下的光谱漂移是技术难题之一。系统采用远心光路设计,不同视场主光线与干涉滤光片法线夹角小于 3°,全视场成像光谱漂移小于1 nm。满足高精度多光谱遥感相机的应用指标要求。

采用全视场差权平衡,对 76°成像视场内实现多点监控。采用波像差对全视场像差进行平衡,利用 CODE V 的全视场波前多项式拟合功能,对视场内的彗差和像散进行拟合,通过对像差节点控制,实现对系统成像质量的优化。图 13 为全视场波像差图,未对 2 个边缘设置优化控制点,波像差明显增大,而设有控制点的视场内波像差变化不大,无突变点。图 14 为彗差项即 Z7 和 Z8 项的拟合,各视场彗差方向不一致,但在差权控制下全视场范围内彗差值差别不大,节点为条形视场的中心。图 15 为像散项即 Z5 和 Z6 项的拟合,像散节点增加到 6 个,方向规律复杂,全视场范围内彗差值差别不大,边缘未设控制点区域,像散明显增加。

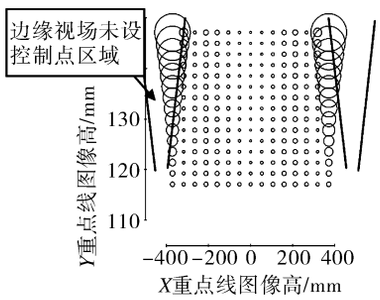


图 13　波像差 RMS

Fig. 13　RMS of wave aberration

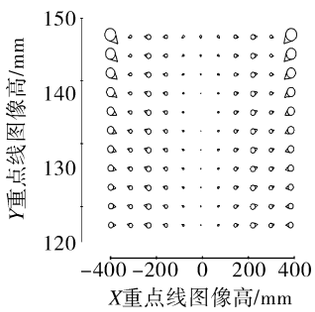


图 14　Z7、Z8 项拟合图

Fig. 14　Fitting figure of Z7、Z8 terms

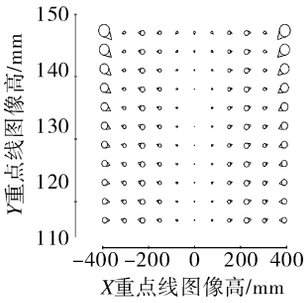
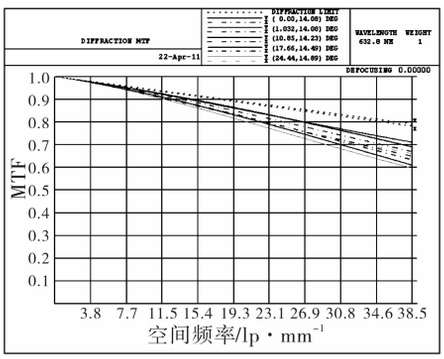
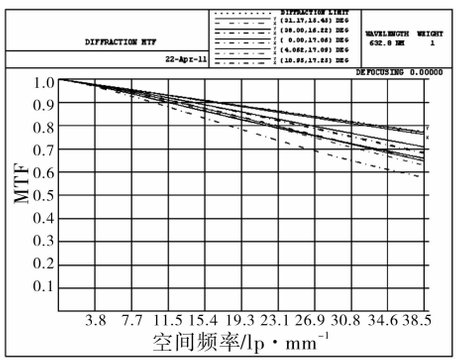


图 15　Z5、Z6 项拟合图

Fig. 15　Fitting figure of Z5、Z6 terms

采用光学系统传递函数(MTF)对系统像质进行定量评价。图 17 和图 18 分别为光学系统在 632.8 nm 波长下的 MTF 曲线以及特征频率处离焦 MTF 曲线。在 632.8 nm 波长下全视场 MTF 高于 0.567,全视场平均 MTF 为 0.653。近红外谱段 770 nm～890 nm 处系统全视场范围内 MTF 高于 0.510。虽然反射式系统没有色差,但是由于波长的增加会导致系统 MTF 在近红外波段有所下降。同时多光谱 CCD 在近红外波段的 MTF 也较另外 3 个波段低。因此,通常多光谱相机要求在全波段范围内相机静态 MTF 均高于 0.2。我们的设计结果可以满足多光谱相机的应用要求。





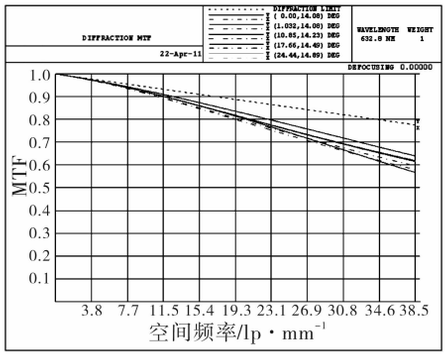


图 16　波长 632.8 nm、38.5 lp/mm 时 MTF 曲线

Fig. 16　MTF curve at 38.5 lp/mm, 632.8 nm

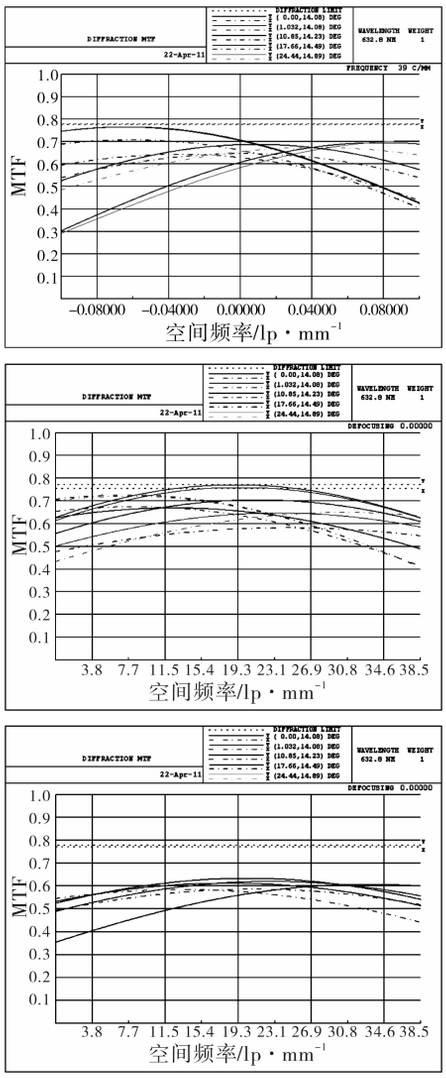


图 17　38.5 lp/mm 时系统离焦 MTF 曲线

Fig. 17　Defocusing MTF curve at 38.5 lp/mm

4　结束语

提出一种采用自由曲面反射镜的大视场空间

多光谱相机的光学系统的设计方法、像差理论和优化设计结果。分析比较了 3 种自由曲面函数式的像差平衡能力,结合目前的光学加工和检测技术,优选采用 Zernike 多项式表述的自由曲面面形。通过全视场差权平衡、重点光线精确控制和 Zernike 像差分析等设计手段完成系统优化。采用 MTF 和波像差对系统进行像质评价,结果证明在全视场和全波段范围内能够满足空间相机对光学系统像质的指标要求。

参考文献:

[1] BOTTEMA M. Reflective correctors for the Hubble space telescope axial instruments [J]. Applied Optics,1993,32(10):1768-1774.

[2] MAHAJAN V N. Zernike polynomials and aberration balancing[J]. SPIE,2003,5173:1-17.

[3] 史广维,张新,张鹰,等. 基于矢量波像差理论的两反光学系统装调研究[J]. 应用光学,2011,32(3):540-544.
SHI Guang-wei,ZHANG Xin,ZHANG Ying,et al. Alignment of two-mirror optical system based on vector wavefront aberration[J]. Journal of Applied Optics,2011,32(3):540-544. (in Chinese with an English abstract)

[4] 史广维,张新,张建萍,等. 几种失调反射光学系统的波像差特性[J]. 红外与激光工程,2011,41(1):160-166.
SHI Guang-wei,ZHANG Xin,ZHANG Jian-ping,et al. Wavefront aberration characteristics of several misaligned reflective optical systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011,41(1):160-166. (in Chinese with an English abstract)

[5] 张以谟. 应用光学:下册[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
ZHANG Yi-mo. Applied optics[M]. Beijing: Mechnical Industry Press, 1982. (in Chinese)