

大像场离轴三反望远镜畸变特性分析与设计

陈 杨^{1,2} 王跃明¹

(¹ 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)
² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 低畸变大像场望远镜是实现宽波段高光谱成像系统图像数据高精度配准融合的关键。基于解析法和矢量波像差理论,分析离轴三反光学系统的畸变,提出了一种消畸变的离轴三反系统的设计方法——通过解析法计算参数,建立同轴三反初始结构,再将初始结构做离轴处理,根据矢量波像差理论作定性分析与调整。给出了离轴三反系统的光学设计实例,系统焦距为 1000 mm,穿轨方向视场角为 5.6°,沿轨方向视场角为 1°, F 数为 5,通过 Zemax 软件测得畸变仅为 0.0628%。该方法可用于设计航天大视场高分辨率成像光谱系统的望远镜部分,也可应用于各种要求低畸变的场合。

关键词 光学设计;成像光谱仪;望远系统;离轴三反系统;畸变

中图分类号 TH743 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0222003

Design and Distortion Characteristics Analysis of the Large-Image-Field Off-Axis Three-Mirror Telescope

Chen Yang^{1,2} Wang Yueming¹

(¹ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The low-distortion, large-image-field telescope is the key to the precise image fusion and registration of wide-band hyperspectral imaging system. Based on the analytical methods and vector aberration theory, the distortion of the off-axis three-mirror optical system is analyzed. A new method to design the low-distortion off-axis three-mirror optical system is proposed. A coaxial three-mirror optical system is designed by analytical methods and then the original system is made off-axis. Then the system is optimized according to analysis based on the vector aberration theory. An optical system is designed which is characterized by the system focal length of 1000 mm, cross track field of 5.6°, along track field of 1° and F number of 5. The maximum distortion measured by Zemax software is only 0.0628%. This method can be applied to design telescopes not only in the large-field and high-resolution imaging spectrometer system, but also in the occasions that demand low distortion.

Key words optical design; imaging spectrometer; telescope system; off-axis three-mirror system; distortion

OCIS codes 220.4830; 120.4570; 110.6770; 110.4234

1 引 言

高光谱成像仪是 20 世纪 80 年代初在多光谱遥感成像技术的基础上发展而来的新一代光学遥感仪器,能够以高光谱分辨率获取目标的连续光谱图像,同时得到空间和光谱信息。作为一种重要的观测手段,高光谱成像技术在陆地、大气和海洋观测中得到

越来越广泛的应用。

色散型高光谱成像仪的光学部分通常由望远系统和分光系统组成。地物目标经望远系统成像在分光系统的入射狭缝面上,分光系统对狭缝处的像进行色散,将不同谱段的光信号投射到探测器的对应行,再经沿轨方向推扫,获得图谱合一的图像信息。

收稿日期: 2012-08-20; 收到修改稿日期: 2012-09-20

作者简介: 陈 杨(1988—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: chen1988@yahoo.cn

导师简介: 王跃明(1977—),男,博士,研究员,主要从事光谱成像技术方面的研究。E-mail: wangym@mail.sitp.ac.cn

在望远系统中,离轴三反系统受材料限制小,无色差,通光效率高,无中心遮拦,可优化变量多,广泛应用于高分辨率光谱成像系统。

光学系统不可避免地存在像差。在高光谱成像仪中,望远系统畸变像差的影响主要有以下几个方面:

1) 狭缝作为视场(FOV)光阑,经望远系统成像在狭缝上的地物目标是弯曲的条带,其形状和弯曲程度由望远系统的畸变特性决定。

2) 分光系统的工作波长范围或视场有一定的限制。宽波段大视场成像光谱系统常采用视场分离,设计成多分光系统共用单望远系统的结构。由于望远系统的畸变特性,各分光系统的输入视场的形状和弯曲程度不同,增加了图像谱段融合的难度。

3) 在上述成像光谱系统中,需对各分光系统进行定标与校正,数据处理的计算量庞大,在图像处理的过程中会损失信息。畸变越大,信息损失越严重。

通过光学设计消除系统的畸变像差,能够避免这些影响。国内多采用图像处理,关于消畸变光学设计的研究较少。在三反系统设计及像差分析这一领域,常军等^[1,2]采用解析法分析了三反偏心和倾斜光学系统设计;樊学武等^[3]采用几何光学像差理论分析了偏心和倾斜元件对光学系统像差的影响;张虎等^[4,5]采用矢量像差理论分析了偏心和倾斜系统的初级像差,包括系统的球差、彗差、场曲、像散特性,没有过多关注畸变;李旭阳等^[6]使用透镜组件消除畸变,也仅限于同轴系统。目前尚未有关于离轴系统消畸变光学设计的研究工作。本文研究了离轴三反系统的畸变特性,提出了一种消畸变离轴三

反系统的设计方法,给出了系统设计实例。

2 同轴三反系统畸变分析

同轴三反系统如图 1 所示。光线入射后,依次经主镜 M1、次镜 M2 和三镜 M3,最终到达像面。主镜到次镜的距离为 d_1 ,次镜到三镜的距离为 d_2 ;反射镜的非球面系数分别为 e_1, e_2, e_3 ,口径分别为 D_1, D_2, D_3 ;系统焦距为 f 。次镜对主镜的遮拦比为 α_1 ,三镜对次镜的遮拦比为 α_2 ,次镜的放大率为 β_1 ,三镜的放大率为 β_2 ; l_2, l_3, l'_2, l'_3 分别为次镜和三镜的物距、像距。参数间关系如下:

$$\alpha_1 = \frac{D_2}{D_1}, \quad \alpha_2 = \frac{D_3}{D_2}, \quad \beta_1 = \frac{l'_2}{l_2}, \quad \beta_2 = \frac{l'_3}{l_3},$$

$$d_1 = \frac{f}{\beta_1 \beta_2} (1 - \alpha_1), \quad d_2 = \frac{f}{\beta_2} \alpha_1 (1 - \alpha_2). \quad (1)$$

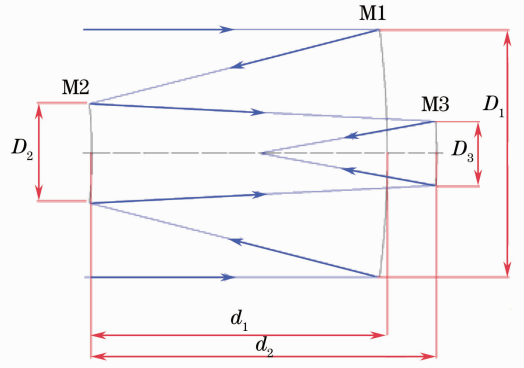


图 1 同轴三反系统结构

Fig. 1 Coaxial three-mirror system structure

系统存在 5 种单色像差:球差、彗差、像散、场曲及畸变,其三级像差系数分别为 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 。光瞳位于主镜上时,推导出畸变系数 S_5 表达式为

$$S_5 = \sum_j S_{5-j} = S_{5-1} + S_{5-2} + S_{5-3} = \frac{(\alpha_1 - 1)^3 \beta_2^3 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\beta_1^3 \beta_2^3 \alpha_1^2} - \frac{3(\alpha_1 - 1)^2 \beta_2^2 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)}{2\beta_1^2 \beta_2^2 \alpha_1^2} +$$

$$\frac{2(\alpha_1 - 1)\beta_2(1 + \beta_1)}{\beta_1 \beta_2 \alpha_1^2} - \frac{(\alpha_1 - 1)^3 e_2^2 (1 + \beta_1)^3 \beta_2^3}{4\beta_1^3 \beta_2^3 \alpha_1^2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^3 (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\alpha_1^2 \alpha_2^2 \beta_1^3 \beta_2^3} -$$

$$\frac{3[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2 (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)}{2\alpha_1^2 \alpha_2^2 \beta_1^3 \beta_2^3} - \frac{2[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)}{\alpha_1^2 \alpha_2^2 \beta_1 \beta_2} +$$

$$\frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^3 e_3^2 (1 + \beta_2)^3}{4\alpha_1^2 \alpha_2^2 \beta_1^3 \beta_2^3}. \quad (2)$$

系统有 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, e_1, e_2, e_3$ 7 个结构变量。根据结构要求,先确定 β_1, β_2 的值。设 $C = |d_1/d_2|$,令 S_1, S_2, S_3, S_4 等于 0,消除球差、彗差、像散、场曲 4 种像差^[7]后, S_5 与 C 存在对应关系。

3 离轴三反系统畸变分析

离轴三反系统的初级像差中,畸变的矢量波像差系数表达式为

$$W_{311} = \sum_j W_{311-j} [(H - \sigma_j)(H - \sigma_j)] [(H - \sigma_j)p_j], \quad (3)$$

式中 \mathbf{H} 为归一化视场矢量, \mathbf{p} 为归一化光瞳矢量, $\boldsymbol{\sigma}$ 为像差场偏心矢量, $\boldsymbol{\sigma}_j$ 为离轴光学系统中光学表面 j 的像差场 W 相对于高斯像面中心的相对偏心量, 为归一化矢量, 矢量起点是高斯像面中心, 即类光轴与像平面的交点, 矢量终点为像差场对称轴与高斯像面的交点^[8,9]。 W_{311-j} 为系统中光学表面 j 的波像差系数。

系统光瞳在主镜时, 主镜面上不产生畸变, 系统的总畸变是次镜和三镜的畸变场之和。(3)式可变为

$$W_{311} = W_{311-2} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_2)(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_2)] [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_2)\mathbf{p}_2] + W_{311-3} [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_3)(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_3)] [(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_3)\mathbf{p}_3]. \quad (4)$$

在同轴三反初始结构的基础上, 使光瞳偏心或视场倾斜, 得到离轴三反系统。离轴系统的 W_{311-j} 与原初始结构的 S_{5-j} 大小成正比。假设 C 在小范围变动时像差偏离矢量近似保持不变, 调整 C 值可以改变 S_{5-j} , 进而改变 W_{311-j} , 使 W_{311} 发生变化。

需要注意的是, 这里仅分析了离轴系统的初级畸变像差, 在设计大视场离轴光学系统时, 还应考虑高级像差。

4 系统设计

设计了焦距 $f = 1000 \text{ mm}$, 入瞳直径 $D = 200 \text{ mm}$, 相对孔径 $D/f = 1/5$, 穿轨视场角 5.6° , 沿轨视场角 1° , 工作谱段范围为 $1 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的消畸变离轴三反系统, 采用探测器像元尺寸为 $30 \mu\text{m}$ 。

首先建立同轴三反初始结构, 取 $\beta_1 = 2.5, \beta_2 = 0.4$ 。令 S_1, S_2, S_3, S_4 等于 0, 计算 S_5 和 C 的对应关系, 其中在 $S_5 = 0$ 附近的对应数据如表 1 所示。

表 1 C 与 S_5 的关系

Table 1 Relation between C and S_5

C	S_{5-2}	S_{5-3}	$S_5 = S_{5-2} + S_{5-3}$
1.4	-0.87377	0.86431	-0.00946
1.35	-0.85129	0.84469	-0.0066
1.3	-0.82853	0.82475	-0.00378
1.25	-0.8055	0.80448	-0.00102
1.2	-0.78216	0.78385	0.00169
1.15	-0.7585	0.76285	0.00435
1.1	-0.73453	0.74147	0.00694
1.05	-0.71021	0.71968	0.00947
1	-0.68553	0.69745	0.01192
0.95	-0.66047	0.67478	0.01431
0.9	-0.63501	0.65161	0.0166
0.85	-0.60912	0.62794	0.01882
0.8	-0.58278	0.60371	0.02093

取 $C = 1.2$, 建立同轴三反初始结构, 如图 2 所示。该结构三级像差系数 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 均接近于 0。

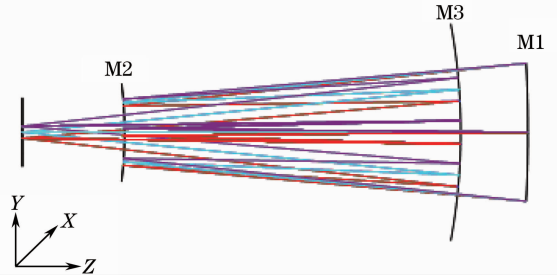


图 2 同轴三反初始结构

Fig. 2 Original structure of coaxial three-mirror

使同轴系统的光瞳离轴并倾斜视场, 得到离轴三反系统。利用文献[4]中的方法可以测量离轴系统像差偏离矢量以及视场范围内各点对应的 \mathbf{H} 和 \mathbf{p} 。代入(4)式, 可计算全视场的畸变波像差系数分布。调整 C 值, 改变系数分布, 使畸变减小。

由于计算全视场的畸变波像差系数分布非常复杂, 只取视场中心一点代入(4)式中计算, 作定性分析。测量得到 $\boldsymbol{\sigma}_2 \approx -0.685\mathbf{j}, \boldsymbol{\sigma}_3 \approx 0.539\mathbf{j}$, \mathbf{j} 是高斯像面中 Y 轴方向的单位向量。代入后发现, 为减小中心视场的 W_{311} , 需要 $|W_{311-2}|$ 减小, $|W_{311-3}|$ 增大。分析表 1, 应减小 C 值。

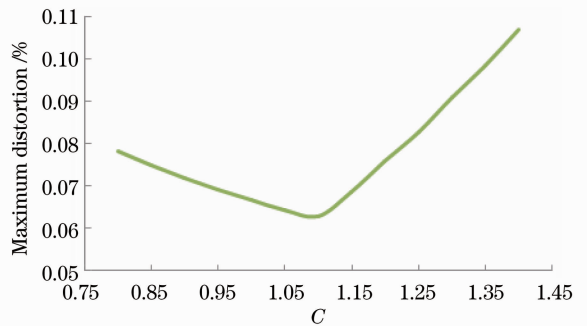


图 3 离轴三反系统的最大畸变与 C 的关系

Fig. 3 Relation between the maximum distortion of off-axis three-mirror system and C

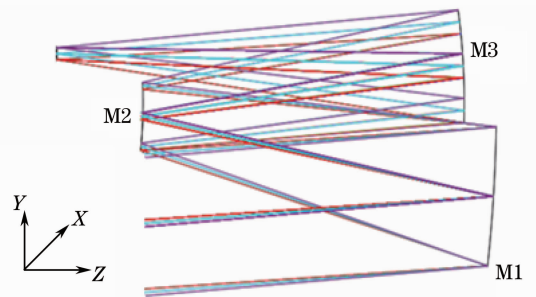


图 4 离轴三反系统结构

Fig. 4 System structure of off-axis three-mirror

通过软件测得离轴三反系统的最大畸变与 C 关系如图 3 所示, C 由 1.2 变为 1.1 时, 系统有最小畸变。

最终设计的光路如图 4 所示, 结构参数如表 2 所示。

对系统进行仿真, 成像质量结果如图 5 所示。图 5(a) 为离轴系统的调制传递函数 (MTF) 曲线,

MTF 在截止频率处大于 0.5。图 5(b) 为全视场的畸变, 以中心视场为基准, 系统最大畸变为 0.0628%。图 5(c) 为沿轨方向 $-0.5^\circ, 0^\circ, 0.5^\circ$ 三个视场在沿轨方向的畸变, 曲线上各点与曲线平均值的距离差小于 $1 \mu\text{m}$, 仅占像元尺寸的 3.5% 左右。

表 2 光学系统结构参数

Table 2 Structure parameter of optical system

Surface	R / mm	d / mm	$-e^2$	Tilt	Decenter
Primary	-1999.9932	-558.678078	-1.682131	0	0
Secondary	-630.455063	507.889388	-0.221422	0	0
Tertiary	-920.679789	-644.480038	0.176205	0	0

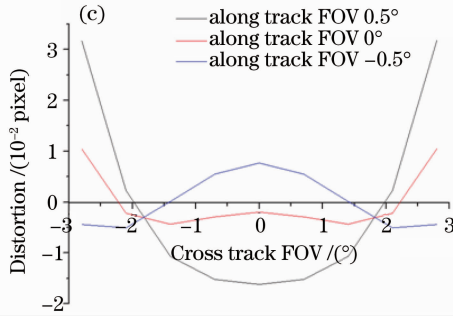
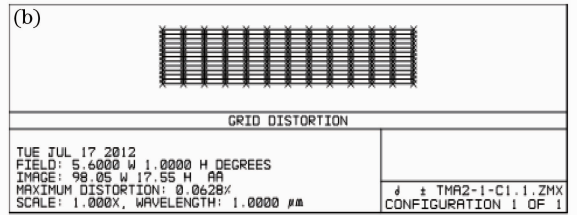
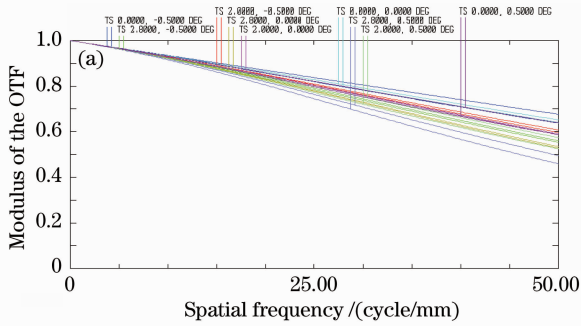


图 5 系统成像质量分析。(a) MTF 曲线; (b) 全视场畸变; (c) 沿轨方向畸变

Fig. 5 Imaging quality analysis. (a) MTF curves; (b) full-field distortion; (c) distortion along track

在成像光谱系统中, 沿轨方向的畸变影响很大, 决定了成像在狭缝上的地物目标的形状和弯曲程度。通常成像光谱系统的探测器空间维有数百至数千个像元, 本系统在沿轨方向的畸变几乎为零, 可将地物目标当作直线处理。

对该系统进行公差分析, 各项误差较为宽松, 加工、检测和装配的难度较低。分析表明, 系统加工和装调误差主要影响系统成像质量, 不会影响到系统的低畸变特性。

题, 首先通过解析法计算并建立同轴三反初始结构, 然后使初始结构的光瞳偏心并倾斜视场, 根据矢量波像差理论进行定性分析与调整, 可以得到低畸变的离轴三反系统。根据该方法设计出一离轴三反系统, 像面长度接近 100 mm, 最大畸变约 0.06%, 其余像差基本得到完全校正, 成像质量良好, 加工、检测和装配的难度较低。该系统可以广泛应用于航天大视场高分辨率成像光谱系统, 也可应用于如立体成像、立体测绘等各种要求低畸变的场合。

5 结 论

参 考 文 献

本文研究了低畸变离轴三反系统的光学设计问

1 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin *et al.*. Design on three-reflective-mirror system used in space[J]. *Acta Optica Sinica*,

- 2003, **23**(2): 216~219
 常 军, 翁志成, 姜会林 等. 用于空间的三反射镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2003, **23**(2): 216~219
- 2 Pan Junhua, Li Xinnan. Design of a tilted two-mirror optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(8): 867~871
 潘君华, 李新南. 偏轴两镜系统的设计光学系统[J]. 光学学报, 1994, **14**(8): 867~871
- 3 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
 樊学武, 陈荣利, 马 臻 等. 偏心 and 倾斜光学系统初级像差论的研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(4): 494~496
- 4 Zhang Hu. Vector Aberration Theory with Application to Off Axis Head Mounted Display Design[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010
 张 虎. 矢量像差理论及其在离轴头盔显示系统设计中的应用[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010
- 5 Yang Xinjun, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang *et al.*. Aberration properties of the decentered and tilted optical systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1658~1662
 杨新军, 王肇圻, 母国光 等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性[J]. 光子学报, 2005, **34**(11): 1658~1662
- 6 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen *et al.*. Optical system design of space camera with long focal length and correction of image distortion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 1359~1363
 李旭阳, 李英才, 马 臻 等. 消畸变、长焦距相机光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 1359~1363
- 7 Pan Junhua. Design, Manufacture and Test of Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. 32~35
 潘君华. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. 32~35
- 8 K. P. Thompson. Description of the third-order optical aberrations of near circular pupil optical systems without symmetry[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(7): 1389~1401
- 9 T. S. Turne. Vector aberration theory on spreadsheet analysis of tilted and decentered systems[C]. *SPIE*, 1992, **1752**: 184~195

栏目编辑：韩 峰