

主三镜一体化离轴三反光学系统设计

孟庆宇, 王维, 纪振华, 董吉洪, 李威, 王海萍

(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: 离轴三反光学系统具有成像质量高、可实现大视场、无遮拦等优点,但其装调难度大,镜面支撑结构质量大。为解决这些问题,基于三级像差理论,研究一种主镜、三镜可集成一体化的大视场离轴三反光学系统,并以焦距为 1 200 mm, F 数为 12, 视场为 $10^\circ \times 1^\circ$ 的光学系统为例进行了验证设计。结果表明:调制传递函数接近衍射极限,视场内平均波像差 RMS 值为 $\lambda/55$, 最大波像差 RMS 值为 $\lambda/22$ 。设计结果显示,光学系统装调自由度由 12 个减少到 6 个,可使光机系统可得到简化,实现了主三镜一体化设计。

关键词: 光学设计; 离轴三反光学系统; 像差理论; 一体化设计

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0578-05

Design of off-axis three-mirror system based on integration of primary and tertiary mirrors

Meng Qingyu, Wang Wei, Ji Zhenhua, Dong Jihong, Li Wei, Wang Haiping

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Off-axis three-mirror system (OTMS) has the advantage of high image quality, large field of view and non-obscuration. But drawbacks also exist, such as the alignment difficulty, cost and large optomechanical weight. In order to solve these problems, the design of a novel OTMS was necessary. In this design, the primary mirror and tertiary mirror can be integrated on a single substrate based on third-order aberration theory. An example which has a focal length of 1 200 mm, F -number of 12 and field of view of $10^\circ \times 1^\circ$ was given. The mean WFE rms was $\lambda/55$, and the maximum WFE rms was $\lambda/22$. The result of this design shows that the number of alignment freedoms was reduced from 12 to 6, the weight of the mirror support assembly also can be lighter.

Key words: optical design; off-axis three-mirror system; aberration theory; integration design

收稿日期: 2014-06-05; 修订日期: 2014-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(60507003)

作者简介: 孟庆宇(1986-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事空间遥感光学系统设计方面的研究。Email: mengqy@ciomp.ac.cn

0 引言

空间相机是卫星的“眼睛”,在航天任务中的角色至关重要,是卫星的重要载荷之一,随着空间对地观测技术的不断发展,离轴三反射镜消像散光学系统正逐步取代传统的同轴光学系统遥感相机,在航空、航天领域得到了广泛的应用。美国 Quick Bird 卫星搭载的侦查相机,印度测绘相机 CARTOSAT-1,德国环境卫星 EnMAP 上的超光谱成像仪^[1],美国空间目标监视卫星 MSX 搭载的可见光探测器 SBV^[2-3]等均采用了离轴三反系统。

离轴三反光学系统^[4-8](Off-axis three-mirror system, OTMS)除了具有反射式光学系统的特点外,还具有可实现大视场、无中心遮拦的优点^[9-10],但其装调难度大、成本高^[11-12],光机结构件体积质量大。若从基本理论着手,通过光学设计的方法降低光学系统装调难度,实现离轴三反系统光机结构轻量化,将对空间光学遥感器的设计具有重要意义。

光学系统的装调难度在一定程度上取决于镜面的数量,离轴三反系统在装调过程中,需分别调整主镜、次镜与三镜的位置量与角度量,若以主镜做为基准,需分别调整次镜与三镜在 X, Y, Z (弧矢、子午、光轴)三个方向上的偏心与倾斜,共 12 个自由度,工作量大,相应工装卡具的设计难度与制造成本也很高。不难发现,在很多离轴三反系统中,主镜与三镜的轴向位置接近,通过光学设计,若能将主镜与三镜集成一体,使一面镜子既具有主镜的功能,又具有三镜的功能,这样三镜系统的装调就演变成了两镜系统的装调,将减少 6 个调整自由度,装调难度将得到降低。不仅如此,主三镜集成为一面镜体后,主镜、三镜的背部支撑结构将合二为一,这对光机系统轻量化也具有重要意义。

1 设计理论

离轴三反系统是在同轴三反系统的基础上加入孔径离轴、视场离轴演变而来的,设计离轴三反系统通常可从求解同轴三反系统的初始结构开始^[13]。图1为同轴三反结构的一般表示形式, M_1, M_2, M_3 分别为主镜、次镜和三镜, l_2, l_2', l_3, l_3' 分别为次镜物距、次镜像距、三镜物距、三镜像距。

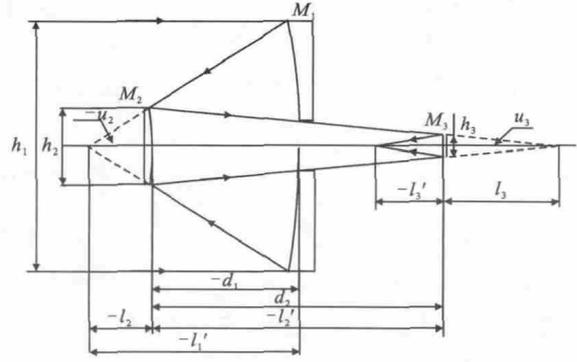


图1 共轴三反初始结构

Fig.1 Initial configuration of coaxial three mirrors

在系统中,一共有 4 个自由变量 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$, 分别是次镜对主镜遮拦比、三镜对次镜遮拦比、次镜放大率、三镜放大率:

$$\alpha_1 = \frac{l_2}{f_1'} \approx \frac{h_2}{h_1} \quad (1)$$

$$\alpha_2 = \frac{l_3}{l_2'} \approx \frac{h_3}{h_2} \quad (2)$$

$$\beta_1 = \frac{l_2'}{l_2} \approx \frac{u_2}{u_2'} \quad (3)$$

$$\beta_2 = \frac{l_3'}{l_3} \approx \frac{u_3}{u_3'} \quad (4)$$

式中: h_1, h_2, h_3 分别为主镜、次镜、三镜的口径直径; u_2, u_2' 为主镜物方与像方孔径角; u_3, u_3' 为次镜的物方与像方孔径角^[14]。

光学系统初始结构轮廓参数的归一化数值可由近轴光学理论得出, r_1, r_2, r_3, d_1, d_2 分别为主镜、次镜、三镜的曲率半径,主次镜间隔、次三镜间隔:

$$r_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2} \quad (5)$$

$$r_2 = \frac{2\alpha_1}{(1+\beta_1)\beta_2} \quad (6)$$

$$r_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{1+\beta_2} \quad (7)$$

$$d_1 = \frac{1-\alpha_1}{\beta_1 \beta_2} \quad (8)$$

$$d_2 = \frac{\alpha_1(1-\alpha_2)}{\beta_2} \quad (9)$$

由像差理论,光学系统的三级像差系数与 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 有关, $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 又决定光学系统的轮廓参数,所以也可认为三级像差系数与轮廓参数 r_1, r_2, r_3, d_1, d_2 有关。三级像差系数可以表示为:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(\beta_1, \beta_2) & B_1(\beta_1, \beta_2) & C_1(\alpha_1, \alpha_2, \beta_2) \\ A_2(0) & B_2(\alpha_1, \beta_1, \beta_2) & C_2(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) \\ A_3(0) & B_3(\alpha_1, \beta_1, \beta_2) & C_3(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} e_1^2 \\ e_2^2 \\ e_3^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_1(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) \\ D_2(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) \\ D_3(\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: S_1, S_2, S_3 分别为赛德尔球差、彗差、像散三级像差系数; $-e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$ 为主、次、三镜的二次非球面系数; $A_i, B_i, C_i, D_i (i=1, 2, 3)$ 是 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 的函数。

根据成像方式, 三反系统存在四种形式^[15], 分别为: 无中间像、次三镜间有中间像、主次镜间有中间像与两次中间像三反系统, 当 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 取不同数值时, 可求解出四种不同形式的光学系统初始参数。典型的无中间像系统为 COOK 式离轴三反系统, 其孔径光阑位于次镜, 光学系统具有一定的对称性, 可较好的校正垂轴像差, 在理论上, 无中间像离轴三反系统可以实现具有优良像质的宽视场, 具有很高的应用价值, 现以该种形式为例进行分析。

将主镜与三镜集成设计, 首先需要尽量使两面镜子的轴向位置相同, 但若两面镜子的曲率半径相差很大, 也很难将主镜与三镜加工在一块基板材料上。为此, 在实现设计目的过程中, 不仅需要主三镜轴向位置相同, 主三镜曲率半径也需相同。

轮廓参数 r_1, r_2, r_3, d_1, d_2 由结构系数 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 决定, 以 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 四个参数入手作为一组数学输入, 由三级像差理论寻找一组数学输出, 满足 4 个条件, 即:

- (1) 主次镜间隔与次三镜间隔相等 $d_1 = -d_2$
- (2) 主镜与三镜曲率半径相等 $r_1 = r_3$
- (3) 主镜与三镜二次非球面系数相等 $e_1^2 = e_3^2$
- (4) 某些像差系数为零 $S_x = S_y$

从而得出一组光学系统轮廓参数 r_1, r_2, r_3, d_1, d_2 , 达到初始设计目标。

基于数学理论, 4 个输入量最多可得出 4 个确定的输出量, 经分析 $d_1 = d_3, r_1 = r_3, e_1^2 = e_3^2$ 必须得到满足, 像差系数中仅可取两项为 0, 即 $S_1 = S_2 = 0$, 或 $S_2 = S_3 = 0$, 或 $S_1 = S_3 = 0$ 。球差为轴上像差, 只与口径有关, 校正相对容易, 取像差系数 $S_2 = S_3 = 0$ 较为合适, 像差系数的矩阵则表示为:

$$\begin{bmatrix} S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_2 & C_2 \\ B_3 & C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2^2 \\ e_3^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $d_1 = -d_2, r_1 = r_3$ 是保证设计目标的基本条件, 轮

廓参数由结构参数所决定, 通过公式(5)~(9)的变换可发现, 在 $d_1 = -d_2, r_1 = r_3$ 两条件得到满足的情况下, β_1, β_2 由 α_1, α_2 所决定, 即:

$$\beta_1 = \frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1(\alpha_2 - 1)} \quad (12)$$

$$\beta_2 = \frac{\alpha_2 - 1}{1 - \alpha_1 \alpha_2} \quad (13)$$

由此, $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, 4$ 个输入参数归结为两个输入参数 α_1, α_2 。基于三级像差理论, 仅由两个参数 α_1, α_2 即可得出一组轮廓参数 r_1, r_2, r_3, d_1, d_2 满足主三镜一体化设计目标, 得出同轴三反系统的初始结构。

实际设计中, 由已求得的同轴三反系统初始结构向离轴三反系统过度, 当 $d_1 = d_3, r_1 = r_3, e_1^2 = e_3^2$ 时, 三镜系统近似成为两镜系统, 虽可调整离轴量作为优化变量, 但仍不易得到较大的、像质优良的视场, 应适当增加主三镜的非球面高次项系数, 两面镜子的曲率半径相同, 但各自有效成像区域内非球面高次项系数不同, 在尽量不增大加工难度的原则下进行设计即可完成具体设计任务。

2 设计实例

为验证正确性, 现设计一个焦距 $f' = 1\ 200\ \text{mm}$; 相对孔径 $D/f' = 1/12$; 视场角(矩形视场): $10^\circ \times 1^\circ$; 测试波长为 $0.632\ 8\ \mu\text{m}$ 的离轴三反光学系统。光学系统设计结果如表 1 所示。

表 1 光学系统设计结构参数

Tab.1 Configuration parameter

	Radius /mm	Distance /mm	Conic	Aspheric surface high-order term	Off-axis value/mm
Primary mirror	-1 200.87	-278.04	-4.43	10 h	70
Second mirror	-603.67	278.04	4.43	-	10
Third mirror	-1 200.87	-682.43	-4.43	10 th	-39

设计中, 主镜、三镜为双曲面, 曲率半径与非球面二次项系数相同, 但各含有不同的非球面高次项系数; 次镜为扁圆面, 不含高次项系数。系统平均波像差 RMS 值为 $\lambda/44$, 最大波像差为 $\lambda/22$, 如表 2 所

示,MTF 值在各空间频率处皆接近衍射极限,光学系统点列图几何半径小于艾丽斑半径,光学系统具有很好的能量集中度,如图 2 所示。系统成像质量好,具有较大的、像质优良的视场,满足空间光学遥感器光学系统的要求。

表 2 光学系统波像差(参考波长 $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$)

Tab.2 Wavefront error(reference wave $\lambda=0.6328\ \mu\text{m}$)

FOV	WFE(PV)	WFE(RMS)
(0°, -5°)	0.195 7 λ	0.045 0 λ
(0°, -5.5°)	0.169 8 λ	0.040 4 λ
(0°, -6°)	0.134 7 λ	0.032 5 λ
(-2.5°, -5°)	0.181 4 λ	0.033 1 λ
(-2.5°, -5.5°)	0.159 8 λ	0.027 3 λ
(-2.5°, -6°)	0.131 7 λ	0.020 6 λ
(-5°, -5°)	0.244 0 λ	0.023 7 λ
(-5°, -5.5°)	0.215 9 λ	0.024 2 λ
(-5°, -6°)	0.215 3 λ	0.031 1 λ

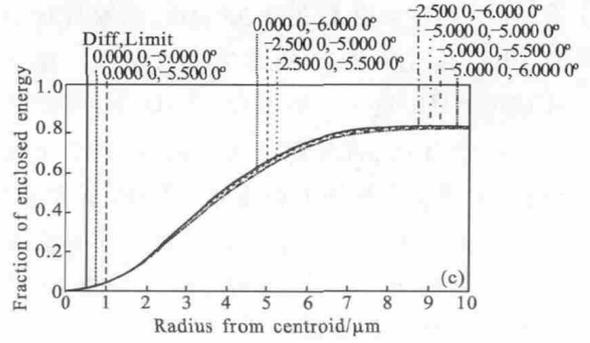
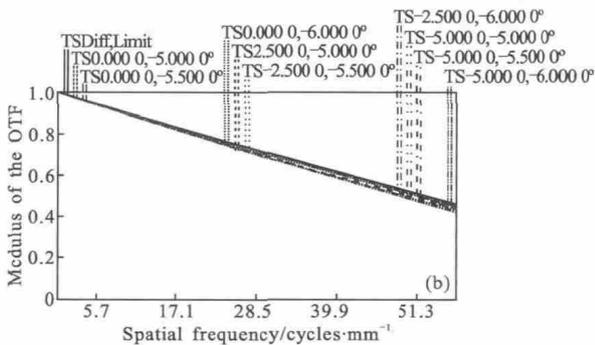
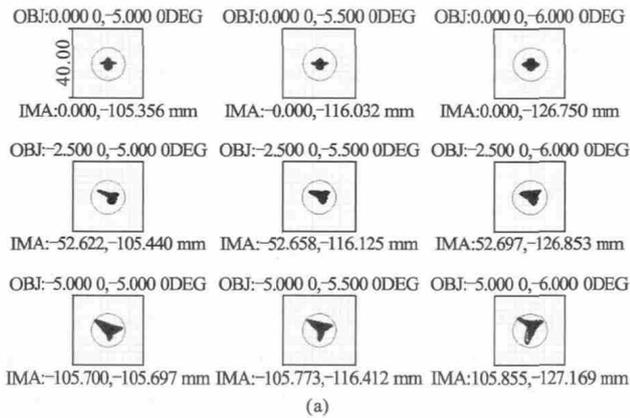


图 2 光学系统评价

Fig.2 Performance of optical system

实际制造中,主镜与三镜可在一块基板材料上铣磨出同一球面,然后根据非球面设计结果,在球面的不同区域铣磨不同的高次非球面面型,形成主三共镜,实现光学系统的主镜与三镜一体化设计,如图3所示,黑色线条为主镜面形,红色线条为三镜面形,二者具有相同的曲率半径。光学系统后截距中加有平面反射镜,兼具折转光路与调焦功能。主三共镜检测时,可采用 CGH 技术,对镜面的不同成像区域进行光学检测。

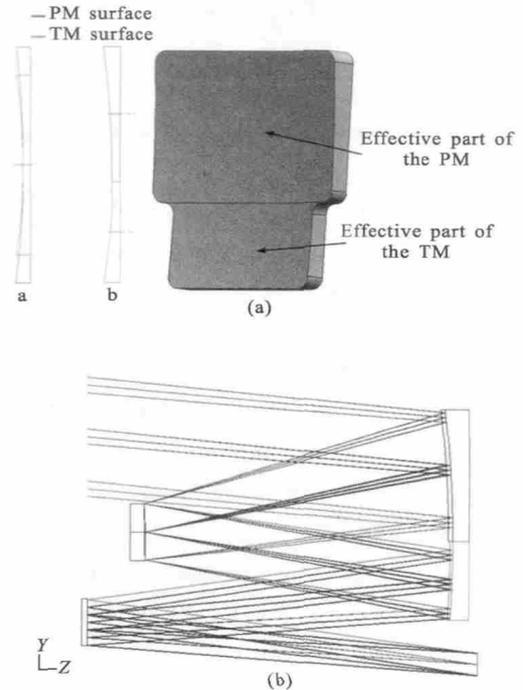


图 3 光学系统结构

Fig.3 Optics system configuration

3 结论

文中基于三级像差理论,研究了主三镜一体化

光学系统设计,针对焦距为 1 200 mm,成像视场角为 $10^\circ \times 1^\circ$,相对孔径为 1:12 的光学系统完成了验证设计。在该设计中,使主三镜实现了一体化,将镜面数量由 3 面减到 2 面,将装调自由度数量由 12 个减少到 6 个,光学系统全视场平均波像差 RMS 值为 $\lambda/55$,设计不仅减少了光学系统装调自由度,而且实现了优良像质的大视场。此外,通过下一步分析,主镜与三镜可共用一套光机支撑结构,会使光机结构得到简化,有待继续研究。主三镜一体化离轴三反光学系统对空间遥感器光学系统的设计具有重要意义。

参考文献:

- [1] Sang B. The EnMAP hyperspectral imaging spectrometer: instrument concept, calibration and technologies [C]//SPIE, 2008, 7086: 350–365.
- [2] Meng Qingyu, Zhang Wei, Long Funian. Analysis on detection ability of space-based space target visible camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2079–2084. (in Chinese)
孟庆宇, 张伟, 龙夫年. 天基空间目标可见光相机探测能力分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(8): 2079–2084.
- [3] Mill J D, O'Neil R R, Price S. Midcourse space experiment: introduction to the spacecraft, instruments, and scientific objectives [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1994, 31(5): 900–907.
- [4] Liu Xiaomei, Yang Xiang. Design of telecentric off-axis three-mirror system of imaging spectrometer with wide field-of-view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0622004. (in Chinese)
刘晓梅, 向阳. 宽视场成像光谱仪前置远心离轴三反光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0622004.
- [5] Roland Geyl. Design and fabrication of a three mirror flat field anastigmat for high resolution earth observation [C]//SPIE, 1994, 2210: 739.
- [6] Takayuki Nakano, Yasuhisa Tamagawa. Configuration of an off-axis three-mirror system focused on compactness and brightness[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(5): 776–783.
- [7] Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin. Design on three-reflective-mirror system used in space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(2): 216–219. (in Chinese)
常军, 翁志成, 姜会林. 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.
- [8] Xue Donglin, Zheng Ligong, Zhang Feng. Off-axis three-mirror system based on freeform mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2813–2820. (in Chinese)
薛栋林, 郑立功, 张峰. 基于光学自由曲面的离轴三反光学系统[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2813–2820.
- [9] Barry Johnson R. Wide field of view three -mirror telescopes having a common optical axis [J]. *Optical Engineering*, 1988, 27, 1046.
- [10] Mei, Lidong, Geng Qixian, Li Zhuo. Optimization design for main supporting structure of the off-axis TMA Space Remote Sensor [C]//IEEE Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2010.
- [11] Liu Jianfeng, Long Funian, Zhang Wei. Study on computer-aided alignment method of off-axis three-mirror system [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(5): 571–576. (in Chinese)
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[J]. *光学技术*, 2004, 30(5): 571–576.
- [12] David Lee, Andrew Born, Philip Parr-Burman, et al. Design of a compact wide field telescope for space situational awareness [C]//SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [13] Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 130–141. (in Chinese)
潘君骅. 光学非球面设计加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 130–141.
- [14] Mahajan V N. Optical imaging and aberrations: Part 1. ray geometrical optics[C]//SPIE, 1998,36: 367–462.
- [15] Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Off-axis three-mirror reflective optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 706–709. (in Chinese)
宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军. 离轴三反射镜光学系统研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(4): 706–709.