

一种改进的易于加工、装调的离轴三反光学系统设计

高铎瑞¹ 胡 辉¹ 汪 伟¹ 谢小平¹ 韩 彪¹ 苏玉龙¹ 付 强²

¹中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

²长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

摘要 为了降低离轴三反光学系统加工和装调难度,提出了一种无遮拦的两反射镜三反射光学系统。将传统的离轴三反射光学系统中的主镜和三镜改进为一块非球面反射镜,即用一块镜面实现两镜的设计,这既能够降低光学加工的复杂度,同时也减少了装调的难度。根据三反射系统像差设计理论,推导出同轴两反射镜三反射系统的初始结构参数计算公式,得出了适用于该系统的求解方程组。设计了焦距1000 mm, F 数为10,全视场 $2^\circ \times 0.4^\circ$,无中心遮拦的离轴两镜三反射系统,两反射镜面型均为二次曲面。从调制传递函数、点列图、衍射能量分布图可以看出,系统成像质量好,能量比较集中。整体系统体积小、结构简单,重量轻。

关键词 光学设计; 三反系统; 离轴; 二次非球面

中图分类号 TH703

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0616001

Optical Design for a Kind of Simply Processed and Installed Off-Axis Three-Reflection

Gao Duorui¹ Hu Hui¹ Wang Wei¹ Xie Xiaoping¹ Han Biao¹ Su Yulong¹ Fu Qiang²

¹State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shanxi 710119, China

²Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Space-Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract An unobscured reflective optical system with two-mirrors three-reflective is described to reduce off-axis difficulty processing. A piece of aspherical mirrors instead of the primary mirror and third mirror in the traditional off-axis three-reflective system, that is one mirror achieve two mirrors' responsibility, the complexity of the optical processing is reduced, as well as the difficulty of the alignment. Based on the aberration theory of three reflective system, formula of the coaxial structural is deduced, the equation for the system is obtained as well. The parameters of the unobscured off-axial two-mirrors system are that focal length of 1000 mm, F number is 10, field of view is $2^\circ \times 0.4^\circ$, and the surface type of the two mirrors are all quadric surface. From the figure of spot digram, modulation transfer function, point spread function and encircled energy, it is observed that image quality is good and energy is more concentrated. The optical system is designed with small volume, simple structure, and light weight.

Key words optical design; three-reflective system; off-axis; even aspheric surface

OCIS codes 220.4830; 120.4570; 110.6770; 110.4234

收稿日期: 2014-12-19; 收到修改稿日期: 2015-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(60677009)

作者简介: 高铎瑞(1989—),男,硕士,助理研究员,主要从事光学系统设计及激光大气传输特性等方面的研究。

E-mail: gaoduorui@126.com

1 引 言

在空间对地观测、遥感领域中,无论军事还是民用领域,对光学系统的要求都越来越高,具体表现为:要求长焦距、大口径、多光谱、结构紧凑等特点^[1]。光学系统经历了从折射式到反射式,从同轴光学系统到离轴光学系统的发展阶段。折射式及折反射由于折射材料性能的限制及宽光谱范围色差的影响,或通过复杂的结构来消除二级光谱^[2],使其应用受到一定的限制^[3]。而反射式光学系统不产生色差,孔径可以做得较大,且易于轻量化。在红外波段,由于透射红外的材料很少,反射式红外光学系统在红外技术中也有着重要应用^[4]。两反射系统结构简单,但可变量少,不能满足大视场、大相对孔径的要求。而三反系统具有3个半径、2个间隔和3个非球面系数共8个参数,增加了系统优化的自由度。除了能满足焦距、球差、彗差、像散及场曲等系统性能和像质要求外,还有足够的变量进行系统布局和结构的优化设计^[5-9]。但同轴三反系统在视场较大的情况下,会导致中心遮拦过大,影响进入系统的总能量,同时也降低了光学系统的分辨率。采用离轴形式的三反射系统不存在中心遮拦,且可优化变量多,提高光学系统视场大小的同时有效改善了系统成像质量^[10-11]。

传统的三反射式光学系统主镜、次镜、三镜为不同面型的二次或高次非球面,每个镜面均需要进行分别加工和检测,在装调时装调的自由度更多,难度也较大,需要采用共基准、干涉仪等高精度检测设备进行装调,复杂度较大。本文提出将位于同一侧的主、三镜采用同一面型,即一块镜面实现两镜的设计,这既能够降低光学加工的复杂度,同时也减少了装调的难度。推导了两反射镜三反射光学系统的初始光学参数计算公式,得出适用于该光学系统的初始参数求解方程组。设计了焦距1000 mm,视场 $2^\circ \times 0.4^\circ$ 无中心遮拦离轴两镜的三反射光学系统。

2 系统设计原理

离轴三反系统的初始结构参量是在同轴三反结构参量的基础上进行离轴、倾斜并优化后得到的^[12]。因此,设计时首先要得出同轴三反系统的初始结构参数。三反射系统由主镜、次镜和三镜组成,光线入射后,依次经主镜 M_1 、次镜 M_2 和三镜 M_3 ,最终到达像面。主镜 M_1 、次镜 M_2 和三镜 M_3 顶点的曲率半径分别为 R_1, R_2, R_3 ; M_1, M_2 和 M_3 的非球面系数分别为 $-e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$; $d_1, d_2, -l'_3$ 分别为主镜与次镜、次镜与三镜及三镜与像面的间距。两反射镜三反射光学系统的初始结构如图1所示,该系统特点是主镜和三镜完全相同并且重合,即要求 $R_1=R_3, -e_1^2=-e_3^2, d_1=-d_2$ 。

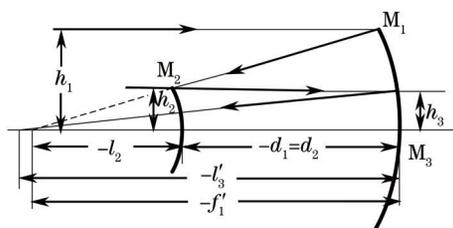


图1 共轴三反初始结构

Fig.1 Initial configuration of coaxial three mirrors

三反射系统的成像性质由结构参数 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$ 和 β_2 决定^[13]。 $\alpha_1 = l_2/l'_1 \approx h_2/h_1$ 为次镜对主镜的遮拦比; $\alpha_2 = l_3/l'_2 \approx h_3/h_2$ 为三镜对次镜的遮拦比; β_1 和 β_2 分别为次镜和三镜的放大率。

从仪器的总体结构考虑,希望镜筒愈短愈好,且主镜和三镜位置重合,为此限制 d_1 ,使 $d_1 = -d_2$ (主镜和三镜位置完全相同)。按总焦距 $f' = 1$ 归一化处理,可得

$$d_1 = \alpha_2(1 - \alpha_1)^2 + \alpha_1(1 - \alpha_2)^2, \tag{1}$$

$$d_2 = \frac{\alpha_1(1 - \alpha_2)}{\beta_2}, \tag{2}$$

式中 $d_1 = -d_2$,为了使给定的有关结构的条件和系统总长要求的关系更加明了,将 α_1, α_2 作为初始已知量,根据平场条件可得:

$$\beta_1 = \frac{1 - \alpha_1}{d_1 \beta_2}, \tag{3}$$

$$\beta_2 = \frac{1 - \alpha_2(1 - \alpha_1)^2/d_1}{\alpha_2 - 1} \quad (4)$$

利用高斯光学理论,可得到同轴三反射式系统结构参数的公式^[14]:

$$R_1 = \frac{2}{\beta_1\beta_2} f', \quad (5)$$

$$R_2 = \frac{2\alpha_1}{\beta_2(1 + \beta_1)} f', \quad (6)$$

$$R_3 = \frac{2\alpha_1\alpha_2}{1 + \beta_2} f', \quad (7)$$

$$d_1 = [\alpha_2(1 - \alpha_1)^2 + \alpha_1(1 - \alpha_2)^2] f', \quad (8)$$

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

$$l'_3 = \alpha_1\alpha_2 f', \quad (10)$$

式中 f' 为系统的总焦距。限制 $R_1 = R_3$, 使主镜和三镜的曲率半径相同,得到:

$$\alpha_2 = -\frac{2\alpha_1^2 - 4\alpha_1 + 1}{\alpha_1}, \quad (11)$$

给出一个 α_1 值,由(11)式可求得 α_2 ,将 α_1 和 α_2 代入上述系统结构参数(3)~(10)式,求出两反射镜三反射系统的其余全部结构参数。由系统的三级球差、彗差为零,可以求出两个反射镜的非球面系数 $-e_1^2, -e_2^2$ 。

三级球差系数 $S_I=0$,得

$$e_1^2 = 1 + \frac{1}{\beta_1^3\beta_2^3} [\alpha_1\alpha_2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2 - \alpha_1\beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 + e_2^2\alpha_1\beta_2^3(1 + \beta_1)^3 - e_1^2\alpha_1\alpha_2(1 + \beta_2)^3]. \quad (12)$$

三级彗差系数 $S_{III}=0$,得

$$e_2^2(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1)^3 - e_1^2[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)^3 = (\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 - [\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2 - 2\beta_1\beta_2. \quad (13)$$

将 α_1 和求出的 $\alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 代入(12)式和(13)式即可求出两个反射镜面的非球面系数 $-e_1^2$ 和 $-e_2^2$ 。至此,系统的结构参数 $R_1 (R_3), R_2, d_1 (-d_2), -e_1^2 (-e_3^2), -e_2^2$ 全部确定。

3 系统设计

根据使用要求,设计焦距 $f = 1000 \text{ mm}$, F 数为 10, 视场(矩形视场) $2w = 2^\circ \times 0.4^\circ$, 工作波段 $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 的两反射镜三反射系统,选用像元尺寸 $a = 10 \mu\text{m}$ (奈奎斯特频率 $f_N = 1/2a = 50 \text{ lp/mm}$) 的 CCD 探测器。考虑系统结构的合理性,取 $\alpha_1 = 0.49$,根据上述初始结构参数的计算方法,则 $\alpha_2 = 0.9792, \beta_1 = -50, \beta_2 = -0.04$,得到系统的初始结构参数如表 1 所示,主、次镜均为双曲面。将参数输入光学设计软件 Zemax 中,得到同轴光学系统结构图和调制传递函数(MTF)分别如图 2 和图 3 所示,系统光阑在主镜上,无中间成像。

表 1 同轴初始结构参数

Table 1 Coaxial original structural parameters

	Radius /mm	Thickness /mm	Conic
Primary mirror	-999.6	-254.898	-1.518
Secondary mirror	-499.8	254.898	-2.246
Tertiary mirror	-999.6	-479.800	-1.518

求解出的初始结构,轴外边缘视场成像质量不好,需进行初步优化。为保证系统结构的合理性,优化过程中保持各面间隔不变,以各面曲率半径和非球面系数为变量进行优化,得到成像质量有所提高的同轴系统。取离轴量 230,使系统无中心遮拦。将主镜和次镜的倾斜量设为变量,优化得到如图 4 所示的离轴两反射镜三反射系统,其结构参数如表 2 所示。

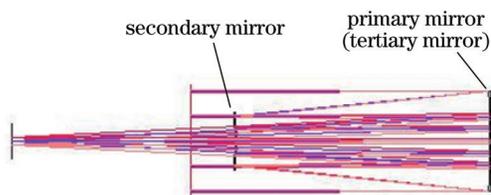


图2 两反射镜三反射系统初始结构

Fig.2 Initial structure of the two-mirror three-reflective system

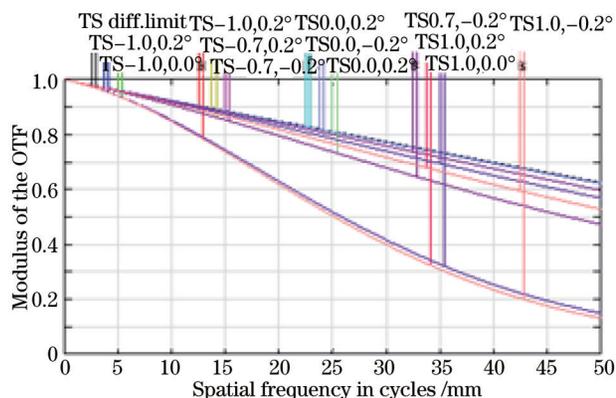


图3 系统初始 MTF 曲线

Fig.3 Initial MTF curves of optical system

表2 离轴优化后的结构参数

Table 2 Structural parameters of the off-axis optimization

	Radius /mm	Thickness /mm	Conic
Primary mirror	-1000.00	-255.08	-1.528
Secondary mirror	-500.215	255.08	-2.253
Tertiary mirror	-1000.00	-479.26	-1.528

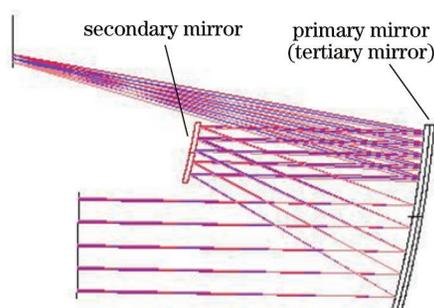


图4 两反射镜三反射系统最终结构

Fig.4 Final structural of the two-mirror three-reflective system

图5为该系统优化后 MTF 曲线, MTF 反映了光学系统对入射光束空间频率成分的传递能力, 可以看出在奈奎斯特频率下, 全视场、全波段范围内, 系统的 MTF 大于 0.4, 具有较好的成像质量。图6是系统最终点列图, 反映了几何光线入射到像面上的光线分布情况, 点列图的艾里斑半径为 $7.057 \mu\text{m}$, 各视场均方根 (RMS) 半径最大值为 $6.877 \mu\text{m}$, 均小于艾里斑半径。图7为衍射能量分布图, 反映了光斑能量集中程度, 曲线表明该系统在探测器像元尺寸 $10 \mu\text{m}$ 内, 能量集中度大于 84%。从图6和图7可以看出, 能量比较集中。

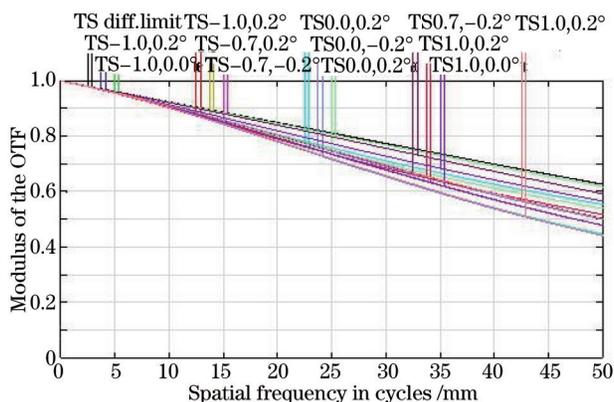


图5 系统最终 MTF 曲线

Fig.5 Final MTF curve of optical system

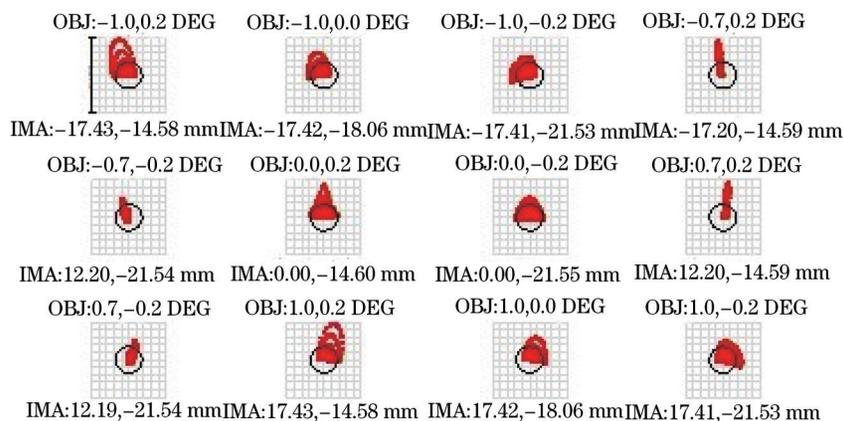


图 6 系统最终点列图

Fig.6 Final spot diagram of optical system

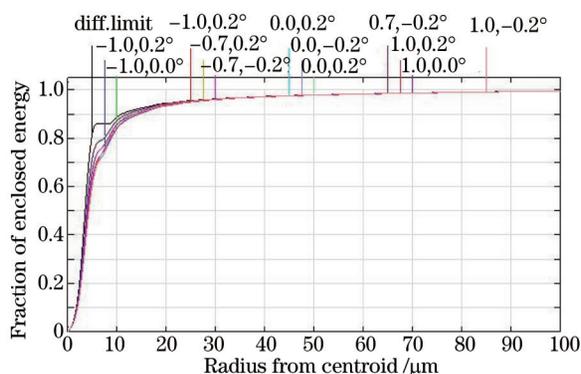


图 7 系统最终衍射能量分布图

Fig.7 Final fraction of enclosed energy of optical system

4 结 论

提出一种新型无遮拦两反射镜三反射光学系统,推导出同轴两镜三反射系统的初始结构参数计算公式。设计了焦距 1000 mm, F 数为 10, 全视场 $2^\circ \times 0.4^\circ$ 的无中心遮拦离轴两镜三反射系统,两反射镜均为二次曲面镜。在奈奎斯特频率下,系统的 MTF 大于 0.4, 能量集中, 成像质量好。并且体积小、结构简单, 重量轻。

由于该系统主、三镜共用一块非球面反射镜, 相对于普通三反系统减少了三个自由度, 故较难做到大视场, 这是该系统的局限性。

参 考 文 献

- Zhang Liang, An Yuan, Jin Guang. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 278-280.
张 亮, 安 源, 金 光. 大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 278-280.
- Jiang Huilin. On the secondary spectrum[J]. Acta Optica Sinica, 1982, 2(3): 225-232.
姜会林. 关于二级光谱问题的探讨[J]. 光学学报, 1982, 2(3): 225-232.
- Zhao Wencai. Design of improved off-axial TMA optical systems[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2837-2843.
赵文才. 改进的离轴三反光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2837-2843.
- Guo Yongxiang, Li Yingcai, Lü Baobin, *et al.*. Design of new-style unobscured three-mirror optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(4): 1144-1147.
郭永祥, 李英才, 吕保斌, 等. 一种新型无遮拦三反射光学系统研究[J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1144-1147.
- Wu Yu, Xue Mingqiu. Study of long length all-reflective optical system[J]. Acta Optica Sinica, 1991, 11(7): 646-650.
吴 煜, 薛鸣球. 长焦距反射式光学系统研究[J]. 光学学报, 1991, 11(7): 646-650.
- Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin, *et al.*. Design of long focal length space optical system with three reflective mirrors[J].

- Optics and Precision Engineering, 2001, 9(4): 315-318.
 常 军, 翁志成, 姜会林. 长焦距空间三反光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 315-318.
- 7 Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Off-axis three-mirror reflective optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(4): 706-709.
 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.
- 8 Zheng Guoxian, Xu Shiwen. Design of diaphragm-off-axis three-mirror anastigmat system used on ocean imager[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(4): 1030-1033.
 郑国宪, 许士文. 用于海洋成像仪的离轴三反主光学系统设计[J]. 宇航学报, 2007, 28(4): 1030-1033.
- 9 Bu Jiangping, Tian Weijian, Yang Xiaojun, *et al.*. A novel design of off-axis three-mirror reflective optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(4): 608-610.
 卜江萍, 田维坚, 杨小君, 等. 一种新型离轴三反式光学系统的设计[J]. 光子学报, 2006, 35(4): 608-610.
- 10 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei, *et al.*. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2680-2683.
 郭永祥, 李英才, 梁天梅, 等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2680-2683.
- 11 Liu Lin, Xue Mingqiu, Shen Weimin. Approach to increase the image performance of the uncoaxial three-mirror reflective system [J]. Optical Technique, 2002, 28(2): 181-184.
 刘 琳, 薛鸣球, 沈为民. 提高离轴三反射镜系统成像质量的途径[J]. 光学技术, 2002, 28(2): 181-184.
- 12 Ishigki Junichi, Okamura Toshihiro, Tanikawa Kunihiro. Designing and testing of off-axis three-mirror optical system for multi-spectral sensor[C]. SPIE, Infrared Technol Appl XXIII, 1997, 3061: 356-369.
- 13 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.
- 14 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. 131-140.
 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检测[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. 131-140.

栏目编辑: 韩 峰