

中高轨道空间详查相机光学设计

王蕴琦^{1,2} 刘伟奇^{1,2} 付瀚毅¹ 张大亮¹ 魏忠伦¹ 冯睿¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间一部, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 明确了几种三反和四反结构的性能优劣,进而获得一种性能优良的中高轨空间详查光学系统的设计方案。针对同一种光学设计技术指标,分析了空间详查相机的各项主要参数,利用Zemax光学设计软件设计了同轴三反射镜,一次中间像离轴三反射镜和无中间像离轴三反射镜3种三反光学系统以及同轴四反射镜,无中间像离轴四反射镜和一次中间像离轴四反射镜3种四反光学系统,均满足指标要求。对比了上述系统的优缺点,在综合考虑当前的光学加工、检测、装调的可行性以及高分辨力空间对地成像技术发展先进性的基础上,决定选用有一次中间像的离轴四反射镜光学系统作为最终方案,得到了有效焦距29 m, F 数9.7,视场角 $1^\circ \times 0.3^\circ$,外形尺寸3200 mm \times 6489 mm \times 8194 mm的空间详查相机光学系统。对该光学系统的性能进行了模拟和验证,结果表明该光学系统的分辨率、传递函数、像差、畸变等各项性能优异。

关键词 光学设计; 空间光学; 详查相机; 全反射系统; 四反系统

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0116001

Optical Design of Space Detailed Survey Camera in the Middle or High Orbit

Wang Yunqi^{1,2} Liu Weiqi^{1,2} Fu Hanyi¹ Zhang Daliang¹ Wei Zhonglun¹ Feng Rui¹

¹The First Department of Space Optical, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The advantages and disadvantages of several kinds of three-mirror system and four-mirror system are clear, a kind of high quality space detailed survey camera in the middle or high orbit is formed. According to the same technical target, we analyse the key parameters of space detailed survey camera, six kinds of optical systems: on-axis three-mirrors system, two imaging off-axis three-mirrors system, one imaging three-mirror system, on-axis four-mirrors system, two imaging off-axis four-mirrors system and one imaging four-mirror system has been designed by Zemax software, and all of them can satisfy the requirements of the indicators. The advantages and disadvantages of six systems are given, on consideration of the fabrication, testing, calibration and the technology development of high resolution camera, the one imaging off-axis four-mirrors system has been chosen, gets a effective focus length 29 m, F number 9.7, wide of field $1^\circ \times 0.3^\circ$, shape size 3200 mm \times 6489 mm \times 8194 mm space detailed survey camera optical system. The property of the optical system is simulated and validated, the results suggest that the resolution, transfer function, aberration and distortion of system are excellent.

Key words optical design; space optics; space high resolution camera; reflective optical system; four-mirrors optical system

OCIS codes 220.1010; 220.4830; 280.4788

收稿日期: 2015-07-22; 收到修改稿日期: 2015-09-06

基金项目: 国防基础科研计划(B1720132001)

作者简介: 王蕴琦(1990—),男,博士研究生,主要从事空间成像技术方面的研究。E-mail: doctorwho_wangyq@163.com

导师简介: 刘伟奇(1958—),男,硕士,研究员,博士生导师,主要从事空间成像与瞄准技术,高精度光学检测方面的研究。

E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn(通信联系人)

1 引言

空间光学和遥感技术一直倍受人们的关注,随着其不断的发展,空间相机、高光谱仪等光学载荷对其自身的成像分辨力提出了越来越高的要求。现代的空间光学载荷,运行于太阳同步轨道的地面分辨力优于1 m的就属于高分辨力空间相机,优于0.5 m时即属于空间详查相机。中高轨详查相机能够在距离地面500 km以上的中高轨道空间对地面目标以短重访周期(1 d到2 d)、高分辨率成像的方式进行信息获取,能够实时准确的完成目标搜寻、地图测绘、灾害预报、作物产量评估、大气与海洋污染测定等任务,其成果可广泛地应用于军事、地理、农业、气象、环境和灾害监测等诸多领域,具有十分重要的战略意义和实用价值。

在国外,空间详查成像技术已经日趋成熟,2010年的Geo-Eye-1已经达到500 km飞行高度对地分辨力0.41 m,近十年来国外的研究机构正向分辨力优于0.25 m的全色和多光谱并用系统发展。在国内,2008年中科院长春光机所的韩昌元对比了R-C结构和三反结构的性能优劣。2015年,中科院长春光机所的王孝坤对比了几种三反结构的性能优劣并利用三反结构得到了飞行高度250~1000 km时对地像元分辨力优于1 m的无中间像离轴三反空间光学系统,属于国内领先水平^[1-2]。目前为止,国内在空间详查光学技术领域还没有较为详尽的针对三反系统和四反系统的对比研究,与国外存在着一定的差距。

详查光学系统的焦距一般在10 m以上, F 数大多在10~15之间,属于长焦距、大 F 数、小视场、高指向精度的空间成像光学系统。三反和四反光学系统凭借着工作波段宽、有效焦距长、成像质量高、杂散光抑制能力强、光学元件少、结构紧凑、布局灵活的特点,广泛应用于空间光学、遥感等领域^[3-5]。针对国内存在的不足,同时也为了得到结构更加稳定、体积更加轻便、布局更为合理的空间详查相机。本文对空间详查相机的技术指标进行了简要的分析,然后针对同一技术指标,在计算分析了光学系统参数的基础上,利用Zemax光学优化软件设计得到了3种三反和3种四反结构的详查光学系统,均满足指标要求。分析比较这3种三反和3种四反结构的光学系统的优劣,在综合考虑了当前光学系统的加工、检测、装调的可行性以及空间相机技术发展的先进性后决定选用光阑位置与主镜重合且离轴放置的二次成像四反光学系统作为最终方案,并对该系统像差、畸变等性能进行了模拟和验证。

2 系统技术指标

根据项目要求,需要设计的空间相机光学系统有关的技术指标如下:

- 1) 光谱范围:0.5~0.8 μm ;
- 2) 光学传递函数(MTF): ≥ 0.4 (奈奎斯特频率);
- 3) 相机静态传递函数:不低于0.2;
- 4) 成像轨道:500~1500 km;
- 5) 信噪比: ≥ 30 dB;
- 6) TDICCD像元尺寸:12 μm ,时间延迟积分(TDI)4096 \times 96级;
- 7) 分辨能力:符合详查光学系统要求,优于0.5 m(1000公里轨道高度)。

3 主要参数分析

对于空间相机而言,当选定探测器时,其像元尺寸 δ 即为固定值,此时相机的设计传递函数、地面像元分辨力GSD等重要性能指标很大程度上取决于光学系统的有效焦距(EFL)、相对孔径 D/f 、轨道高度 H 等主要参数^[6-7]。中高轨详查相机是工作轨道高度不低于500 km,地面像元分辨力优于0.5 m的空间载荷,下面针对第2部分提出的主要技术参数进行说明和讨论。

3.1 有效焦距

在空间对地成像系统中,轨道高度 H ,探测器像元尺寸 δ 与系统分辨率GSD之间存在如下关系:

$$V_{\text{GSD}} = \delta \frac{H}{f}, \quad (1)$$

其中 f 为系统的有效焦距。

所用的探测器像元尺寸12 μm ,对中高轨详查相机来说,工作高度多高于500 km,则对应的光学系统有

效焦距不得小于 12 m。

3.2 相对孔径

光学系统的 F 数与其相对孔径满足倒数相等的关系,即:

$$\frac{1}{F} = \frac{D}{f} \quad (2)$$

在综合考虑了衍射分辨能力、传递函数、曝光量等因素后,取 F 数约为 10,在确定了系统的有效焦距后,就可以计算得到系统的有效孔径。

3.3 静态传递函数

根据截止频率 v_n 的定义,有如下表达式:

$$v_n = \frac{1}{2\delta} \quad (3)$$

其中 δ 为探测器像元尺寸,当 $\delta=0.012$ mm 时, $v_n=41.67$ lp/mm。空间对地成像系统内部各独立分系统间传递函数值一般来说满足如下等式:

$$M_{ji} = M_{sj} M_{jh} M_{dx} M_{jg} \quad (4)$$

通常而言,空间相机的静态传递函数多不低于 0.2,即 $M_{ji} \geq 0.2$ 。根据对加工装配情况的调研^[6],一般取光电探测器几何尺寸决定的传递函数 $M_{jh}=0.60$,探测器电子学决定和几何尺寸的传递函数分别为 $M_{dx}=0.98$ 和 $M_{jg}=0.90$,不难得出截止频率处设计传递函数 $M_{sj} \geq 0.40$ 。

4 光学系统设计

4.1 三反射镜光学系统

三反系统具有组件少、消像散、无色差、结构紧凑等优点,其在空间相机光学系统中得到了广泛的应用,结合国内外三反相机成功的先例^[8-14],并根据前面计算分析的参数,利用 Zemax 光学设计软件设计得到了 3 种三反光学系统,具体方案如下。

4.1.1 同轴三反光学系统

同轴三反(TMC)系统设计参数如表 1 所示,侧视图如 1(a)所示。该系统的入瞳直径 $V_{EPD}=3200$ mm,有效焦距 $V_{EFF}=29000$ mm, F 数 9.1,视场角 $1^\circ \times 0.3^\circ$ 。各镜尺寸:主镜直径 3204 mm,次镜直径 872 mm,三镜长 480 mm、宽 600 mm。主、次镜为圆形孔径,主镜的中心被次镜遮挡,遮拦比约为 27%,三镜设计为矩形孔径,有利于系统的轻量化。系统外形尺寸约为:3204 mm×3204 mm×5975 mm,在截止频率(41 lp/mm)处全视场的调制传递函数均高于 0.41,如图 1(b)所示。系统是一个光轴不经过视场中心,孔径光阑在主镜上的同轴偏视场三反光学系统。

表 1 TMC 系统的最终结构参数

Table 1 Final structure parameters of TMC system

Surf	Primary mirror	Secondary mirror	Third mirror
Radius/mm	-6036.55	-2264.31	-2725.54
Thickness/mm	-2264.31	5974.59	-3905.92
Conic	-0.97	-2.01	-0.57

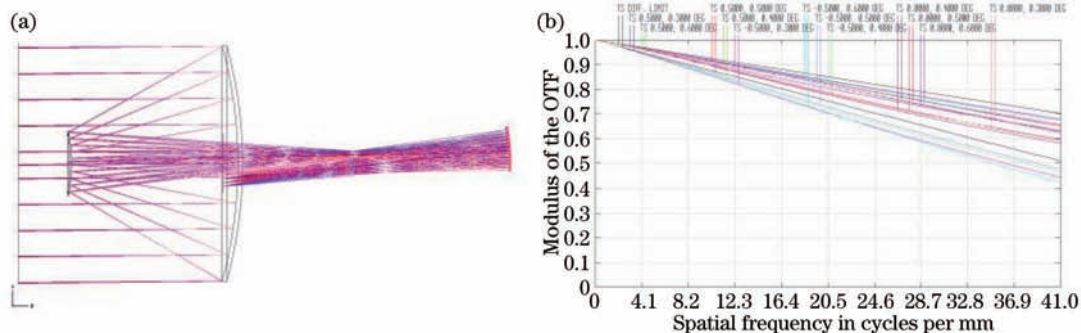


图 1 (a) 系统结构侧视图; (b) TMC 系统传递函数曲线图

Fig.1 (a) End view of system structure; (b) MTF curves of TMC optical system

4.1.2 无中间像离轴三反光学系统

系统中元件参数如表 2 所示,结构侧视图如图 2(a)所示。系统的入瞳直径 $V_{EPD}=3000$ mm,有效焦距 $V_{EFL}=29000$ mm, F 数 9.7,视场角大小 $1^\circ \times 0.3^\circ$,光阑在主镜上。系统中主镜为圆形口径,直径 3002 mm,次镜和三镜为矩形口径尺寸分别为 2000 mm \times 1500 mm 和 3400 mm \times 2500 mm。仅采用视场离轴方式, X 方向视场范围 $-0.5^\circ \sim 0.5^\circ$, Y 方向视场范围 $4^\circ \sim 4.3^\circ$ 。外形尺寸约为: 3400 mm \times 7257 mm \times 19900 mm,截止频率(41 lp/mm)处全视场传递函数均高于 0.6。图 2(b)为系统传递函数曲线。

表 2 Wetherell-TMA 光学系统的最终结构参数

Table 2 Final structure parameters of Wetherell-TMA optical system

Surf	Primary mirror	Secondary mirror	Third mirror
Radius /mm	-58600	-19200	-28700
Thickness /mm	-16000	17300	-19900
Conic	-1.56	0.06	0.19

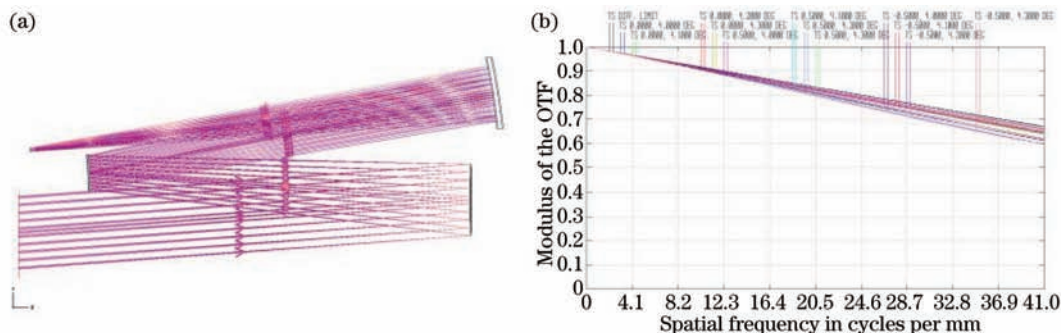


图 2 (a) 系统结构侧视图; (b) Wetherell-TMA 传递函数曲线图

Fig.2 (a) End view of system structure; (b) MTF curves of Wetherell-TMA optical system

4.1.3 一次中间像离轴三反光学系统

系统的结构参数如表 3 所示,结构侧视图如图 3(a)所示。本系统入瞳直径 $V_{EPD}=3000$ mm,有效焦距 $V_{EFL}=29000$ mm, F 数 9.7,视场大小 $1^\circ \times 0.3^\circ$ 。系统各镜尺寸分别为:主镜直径 3222 mm,次镜长 600 mm、宽 400 mm,三镜长 2600 mm、宽 2000 mm。主镜为圆形口径,位置与光阑位置相重合,次镜和三镜为矩形口径。系统仅采用光阑离轴,离轴量 3000 mm。系统外形尺寸约为: 3222 mm \times 6643 mm \times 10000 mm,截止频率(41 lp/mm)处全视场调制传递函数高于 0.7。图 3(b)即为系统的传递函数曲线。

表 3 Cook-TMA 光学系统的最终结构参数

Table 3 Final structure parameters of Cook-TMA optical system

Surf	Primary mirror	Secondary mirror	Third mirror
Radius/mm	-22300	-6376.14	-8959.47
Thickness/mm	-10000	9999	-9760.88
Conic	-0.82	-7.66	-0.15

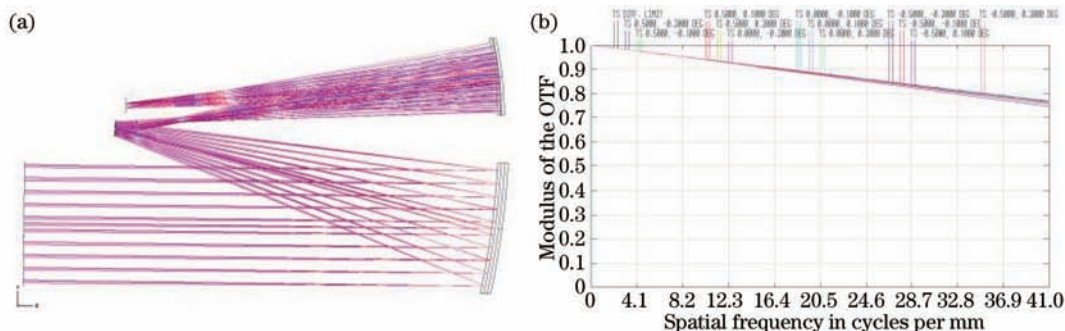


图 3 (a) 系统结构侧视图; (b) Cook-TMA 传递函数曲线图

Fig.3 (a) End view of system structure; (b) MTF curves of Cook-TMA optical system

4.2 四反光学系统

四反系统比三反系统增加了一片反射镜,这片反射镜视用途不同可以被称作场镜、调焦镜或校正镜等,使得四反系统不但继承了三反系统消像散、无色差、结构紧凑等优点,而且具有更强的像差适应能力和更为灵活合理的布局,虽然四反系统的装调难度更大,但依然可用于一些性能要求较高的空间相机光学系统。结合国内外四反光学系统成功的先例,根据前文分析计算的参数利用Zemax光学设计软件得到3种四反光学系统设计方案,具体方案如下。

4.2.1 同轴四反光学系统

系统的结构参数如表4所示,结构侧视图如图4(a)所示。系统的入瞳直径 $V_{EPD}=3000\text{ mm}$,有效焦距 $V_{EFL}=29000\text{ mm}$, F 数9.7,视场角 $1^\circ\times 0.3^\circ$,光阑位于主镜。系统的各镜尺寸:主镜直径3002 mm,次镜直径914 mm,三镜直径940 mm,四镜直径292 mm。系统中次镜为圆形孔径,其余各镜均为环形孔径,主镜遮拦直径914 mm,三镜遮拦直径250 mm,四镜遮拦直径100 mm。系统中间像面位置与四镜位置重合。系统外形总尺寸约为:3002 mm \times 3002 mm \times 4224 mm,截止频率(41 lp/mm)处全视场调制传递函数均大于0.5。图4(b)即为本系统的传递函数曲线。

表4 同轴四反光学系统的最终结构参数

Table 4 Final structure parameters of on-axis four-mirrors optical system

Surf	Radius /mm	Thickness /mm	Conic
Primary mirror	-9352.85	-3366.27	-0.84
Secondary mirror	-6575.49	4059.72	-10.36
Third mirror	-2200.54	-1885.66	-0.21
Fourth mirror	-2454.95	2023.82	4.31

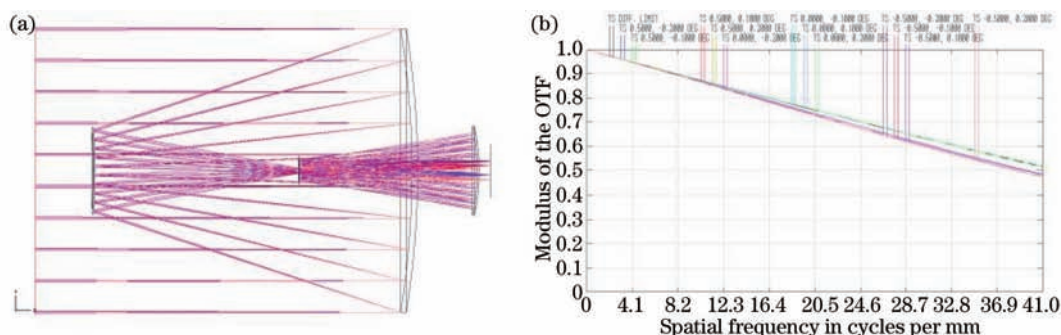


图4 (a) 系统结构侧视图; (b) 系统传递函数曲线图

Fig.4 (a) End view of system structure; (b) MTF curves of the optical system

4.2.2 无中间像离轴四反光学系统

设计的无中间像四反光学系统结构参数如表5所示,结构侧视图如图5(a)所示。入瞳直径 $V_{EPD}=3000\text{ mm}$,有效焦距 $V_{EFL}=29000\text{ mm}$, F 数9.7,视场大小 $1^\circ\times 0.3^\circ$ 。系统的各镜尺寸:主镜长3600 mm、宽3000 mm,次镜直径980 mm,三镜长2200 mm、宽2200 mm,四镜长1492 mm、宽1100 mm。主镜、三镜和四镜均为矩形口径,减轻了系统的重量,次镜的口径相对较小,且上面安放了孔径光阑,设计为圆形口径。系统没有中心遮拦,外形总尺寸大约为:3600 mm \times 8882 mm \times 10332 mm,采用视场离轴为主,兼顾光阑离轴的离轴方式,系统在41 lp/mm(截止频率)处全视场平均调制传递函数均优于0.5。图5(b)即为该系统的传递函数曲线。

表5 一次成像离轴四反光学系统的最终结构参数

Table 5 Final structure parameters of one imaging off-axis four-mirrors optical system

Surf	Radius/mm	Thickness/mm	Conic
Primary Mirror	-44500	-7050	-10.58
Secondary Mirror	-27300	8000	-4.96
Third Mirror	-27000	-8226	0.25
Fourth Mirror	-56000	5096	49.88

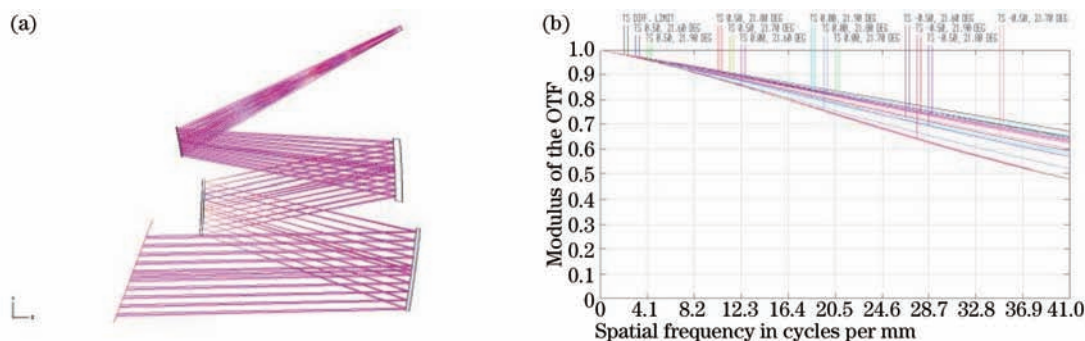


图5 (a) 系统结构侧视图; (b) 系统传递函数曲线图

Fig.5 (a) End view of system structure; (b) MTF curves of the optical system

4.2.3 一次中间像离轴四反光学系统

系统的结构参数如表6所示,结构侧视图如图6(a)所示。系统的入瞳直径 $V_{EPD}=3000$ mm,有效焦距 $V_{EFL}=29000$ mm, F 数 9.7, 视场 $1^\circ \times 0.3^\circ$, 光阑位于次镜。系统的各镜尺寸: 主镜直径 1600 mm(圆形口径), 次镜长 1400 mm、宽 1000 mm(矩形口径), 三镜长 800 mm、宽 240 mm(矩形口径), 四镜长 2366 mm、宽 1300 mm(矩形口径)。系统外形总尺寸: 3200 mm \times 6489 mm \times 8294 mm, 系统截止频率(41 lp/mm)处全视场传递函数均高于 0.61, 图6(b)即为该系统的传递函数曲线。

表6 二次成像离轴四反光学系统的最终结构参数

Table 6 Final structure parameters of two imaging off-axis four-mirrors optical system

Surf	Radius/mm	Thickness/mm	Conic
Primary mirror	-17000	-6104	-0.91
Secondary mirror	-7361	6262	3.35
Third mirror	-19200	-8194	-27.65
Fourth mirror	7873	8284	-0.22

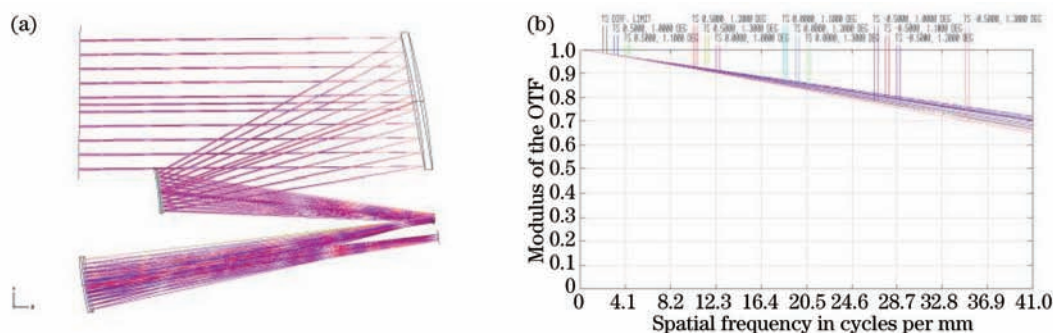


图6 (a) 系统结构侧视图; (b) 系统传递函数曲线图

Fig.6 (a) End view of system structure; (b) MTF curves of the optical system

4.3 方案选定

上述的3种三反设计方案和3种四反设计方案均可以满足预定指标要求,但对于空间详查系统而言,不同结构的性能还是有很大差别。将主要性能差异做出比较分析(如表7所示)。

根据表7和前面的方案介绍可以看出,同轴的三反和四反系统存有中心遮拦,在对各反射镜进行环形孔径的仿真后发现传递函数下降较严重,偏视场同轴三反元件间遮挡较少,但偏视场设计难给详查相机高指向精度的实现带来困难,且大相对孔径导致加工难度增加;有一次中间像的离轴三反系统结构不对称,装调困难;无中间像离轴三反系统为实现高分辨率指标,次镜和三镜的镜间隔较大,体积较笨重,不符合轻量化、小型化的要求;无中间像离轴四反系统的主镜口径较大,主镜和四镜的面型均为非球面且次数较高,离轴情况复杂,给加工、检测和装调都带来了较高的难度。

表7 各系统性能对比

Table 7 Contrast of all kinds of systems

Optical system	Obscuration	Ray axis	Field	Dimension	MTF
TMC	Exist	Coaxial	Bias field	(W)3204mm、(H)3204 mm、(L)5975 mm	≥0.41
Wetherell-TMA	Non-existent	Off-axis	Rectangular field	(W)3400mm、(H)7257 mm、(L)19900 mm	≥0.61
Cook-TMA	Non-existent	Off-axis	Rectangular field	(W)3222mm、(H)6643mm、(L)10000mm	≥0.7
On-axis four-mirrors system	Exist	Coaxial	Circular field	(W)3002 mm、(H)3002 mm、(L)4224 mm	≥0.5
One imaging four-mirrors	Non-existent	Off-axis	Rectangular field	(W)3600 mm、(H)8882 mm、(L)10332 mm	≥0.5
Two imaging four-mirrors	Non-existent	Off-axis	Rectangular field	(W)3200 mm、(H)6489 mm、(L)8294 mm	≥0.61

随着空间光学技术的发展,空间详查相机需满足结构轻巧、指向精度高、覆盖范围宽、分辨率高等要求,经对比发现,二次成像离轴四反光学系统在这些要求中具有明显的优势。本方案将孔径光阑放在主镜之上,容易实现光学系统的大集光面积,提高相机的灵敏度,减少曝光时间。且使得四反系统出瞳位置在系统焦面前方,当用于其它波段系统时,可将视场光阑置于出瞳位置,以有效地抑制系统的杂散光;当用于中长波红外系统时,可将杜瓦窗口放置在出瞳位置,以有效的抑制系统的背景热辐射,实现效率100%的冷屏效果,在空间遥感光学系统中存在着巨大优势。为了顺应空间相机的发展趋势,在综合考虑空间成像技术发展的传承性和先进性以及相机整体的加工、检验与装调能力的基础上,决定将一次中间像离轴四反光学系统确定为最终方案。

4.4 性能分析

利用光学设计的 Zemax 软件对最终方案的系统进行了模拟和验证。结果如下:1) 得到了该系统的光学调制传递函数曲线(图7)。可以看出该系统的全视场,全波段在截止频率(41.76 lp/mm)处的调制传递函数均在0.61以上;2) 得到了各视场点列图(图8),可以看出各视场的弥散圆均方根半径均在3.5 μm以内,小于艾利斑半径;3) 系统的网格畸变图(图9),可以看出系统最大网格畸变低于0.2%。证明了该系统传递函数、像差、畸变各项性能优良。

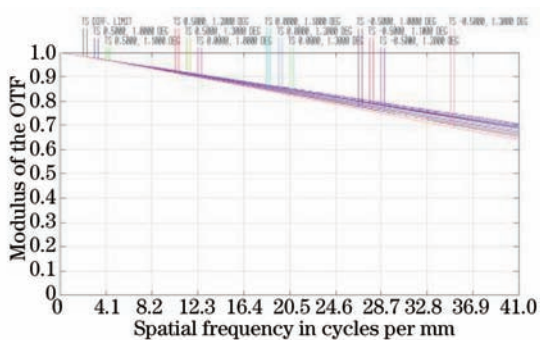


图7 MTF曲线(全视场、全波段、41 lp/mm)

Fig.7 MTF curves (full field, full wave-band, 41 lp/mm)



图8 点列图

Fig.8 Spot diagram



图9 网格畸变图

Fig.9 Grid Distortion

利用 Zemax 软件对系统进行了公差分析,根据技术指标要求以及现有的加工、装调能力,给出了最终方案的公差分配如表8所示。

表 8 公差分配表

Table 8 Tolerances of optical system

Displacement		Primary mirror	Second mirror	Third mirror	Fourth mirror
Line displacement	Decenter X /mm	0.1	0.06	0.04	0.08
	Decenter Y /mm	0.1	0.06	0.04	0.08
	Decenter Z /mm	0.1	0.02	0.04	0.08
Angular displacement	Tilted X /arc sec	10	10	20	40
	Tilted Y /arc sec	10	10	20	40
	Tilted Z /arc sec	10	30	20	50
Optical parameter	ΔR /mm	-4	-3	-2	-1
	ΔK	± 0.002	± 0.001	± 0.003	± 0.004

系统在设计时的调制传递函数不低于 0.65,在包含了下列误差后,传递函数下降至 0.55,下降幅度约为 10%,满足设计要求。

5 结 论

遵照前文的参数分析和指标要求,结合三反系统和四反系统组件少、消像散、无色差、结构紧凑等优点,提出了符合指标要求的 3 种三反和 3 种四反空间详查光学设计方案。详细对比分析了每种方案的优缺点,使得人们在应对不同空间任务时可以更直接的选择相应的光学结构。并在综合考虑了空间相机整体的加工、检测、装调可行性以及空间光学技术发展的传承性和先进性的基础上,选定了有一次中间像的离轴四反射镜光学系统作为最终方案,并对该光学系统的性能进行了模拟和验证,模拟和验证表明系统的调制传递函数在截止频率处全视场、全波段均保持在 0.61 以上,逼近衍射极限;各视场弥散斑均方根半径均小于 $3.5 \mu\text{m}$;系统的最大网格畸变小于 0.2%。不仅达到了指标要求,而且像差、畸变等各项性能优异。

参 考 文 献

- Zhang Keke, Ruan Ningjuan, Fu Duanying, *et al.*. Analysis and consideration of development of overseas space off-axis TMA system camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(3): 63-70.
张科科,阮宁娟,傅丹鹰. 国外空间用三反离轴相机发展分析与思考[J]. *航天返回与遥感*, 2008, 29(3): 63-70.
- Han Changyuan. Recent earth imaging commercial satellites with high resolution[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(3): 201-208.
韩昌元. 近代高分辨地球成像商业卫星[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, 3(3): 201-208.
- Wei Xiaoxiao, Xu Feng, Yu Jianjun. Design of space coaxial field-bias three-mirror optical system with high resolution[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(4): 0416002.
韦晓孝,许峰,余建军. 高分辨率空间同轴偏视场三反光学系统设计[J]. *中国激光*, 2012, 39(4): 0416002.
- Li Ronggang, Zhang Xingde, Sun Changfeng, *et al.*. Development and analysis of off-axis reflection optical system[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(2): 128-131.
李荣刚,张兴德,孙昌峰,等. 离轴反射式光学系统的研究进展与技术探讨[J]. *激光与红外*, 2013, 43(2): 128-131.
- Han Changyuan. *Optics and Optical Engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2005: 230-241.
韩昌元. *光学与光学工程*[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 230-241.
- Xue Mingqiu, Shen Weiming. *Optical Design of Light Weight and Compact High Resolution TDICCD Camera*[M]. Beijing: Science Press, 2005.
薛鸣球,沈为民. 轻小型高分辨率 TDICCD 相机的光学设计[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- Han Changyuan. Study on optical system of high resolution space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2164-2172.
韩昌元. 高分辨率空间相机的光学系统研究[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(11): 2164-2172.
- J A Connelly, B J Bosa, P S Davil, *et al.*. Optical metrology and alignment of the James Webb space telescope integrated science instrument module[C]. *SPIE*, 2008, 7068: 70680F.
- T L Zobrist, J H Burge, H M Martn. Laser tracker surface measurements of the 8.4 m GMT primary mirror segment[C]. *SPIE*, 2009, 7426: 742613.

- 10 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin, *et al.*. Design of long focal length space optical system with three reflective mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(4): 315-318.
常 军, 翁志成, 姜会林, 等. 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.
- 11 Zhang Xiaofei, Chen Lizi, Du Shaojun. Optical system design of off-axis three-mirror camera with resolution of 1 m [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 062204.
张晓飞, 陈力子, 杜少军. 1 m 分辨率离轴三反相机光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 062204.
- 12 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.
- 13 Liang Shitong, Yang Jianfeng, Xue Bin, *et al.*. Aberration analysis and design of four-mirror reflective optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3301-3305.
梁士通, 杨建峰, 薛 彬, 等. 四反射镜光学系统像差分析与设计[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3301-3305.
- 14 Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, *et al.*. Research on the optical design and stray light suppression for off-axis reflective space astronomical telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822002.
朱 杨, 张 新, 伍雁雄, 等. 离轴反射式空间天文望远镜系统设计及其杂散光抑制研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822002.

栏目编辑: 韩 峰