

离轴反射式空间天文望远系统设计及其杂散光抑制研究

朱 杨^{1,2} 张 新¹ 伍雁雄¹ 曲贺盟¹ 张继真¹ 王灵杰¹

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为满足天文望远系统大 F 数、长焦距、小型化、高成像质量、高消杂光比等要求, 采用库克离轴三反消像散 (TMA) 光学结构形式, 设计了参数为焦距 $f' = 24$ m, F 数 16, 视场 $1.6^\circ \times 1^\circ$ 的离轴望远系统。设计了系统的外遮光罩及其挡光环, 并对系统内部的杂光陷阱结构进行优化。利用杂光分析软件对系统的点源透射率 (PST) 进行仿真计算, 结合正向追迹和反向追迹两种方法寻找关键面与关键路径, 反复迭代优化改进相应光机结构。设计及仿真结果表明, 系统各视场光学传递函数均接近衍射极限, 视场外规避角 40° 时, PST 小于 10^{-11} , 满足空间天文望远系统对成像质量和杂光抑制的要求。

关键词 光学设计; 离轴三反系统; 杂散光; 点源透射率; 散射模型

中图分类号 TG502.33 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0822002

Research on the Optical Design and Stray Light Suppression for Off-Axis Reflective Space Astronomical Telescope

Zhu Yang^{1,2} Zhang Xin¹ Wu Yanxiong¹ Qu Hemeng¹ Zhang Jizhen¹ Wang Lingjie¹

¹ Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract In order to aim at a telescope system with large F number, long focal length, miniaturized dimension, high image quality and high stray light suppression, a three mirror off-axis anastigmatic telescope is designed based on the Cook type, of which f' is 24 m, F number is 16, field of view is $1.6^\circ \times 1^\circ$. The outer baffle and the structures inside are designed. The stray light of telescope system is analyzed with stray light program to calculate the point sources transmittance (PST). The forward and backward ray tracing is combined to find the key surface and modify the optical and mechanical structure with optimization and iteration. The result shows that the modulation transfer functions (MTF) approaches the diffraction limit at all fields. When the evadable angle out of the field is 40° , the PST is less than 10^{-11} and the system can achieve the requirement of stray light suppression.

Key words optical design; off-axis three mirror system; stray light; point source transmittance; scatter model

OCIS codes 220.4830; 290.2648; 110.6770

1 引 言

与透射系统相比, 反射光学系统具有易于轻量化、对温度变化不敏感、无色差等诸多优势, 因此在大口径长焦距的空间多光谱成像与探测光学系统中往往采用反射式结构。与同轴三反消像散光学系统

相比, 离轴三反消像散光学系统可同时实现长焦距与大视场, 且无中心遮拦, 调制传递函数 (MTF) 高^[1], 在获得同等能量利用率的情况下, 使用离轴结构能够实现比同轴结构更小的主镜口径和系统结构尺寸。

收稿日期: 2014-01-23; 收到修改稿日期: 2014-04-05

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(61007009)

作者简介: 朱 杨(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事光学系统设计和杂散光分析方面的研究。

E-mail: zhuyang_1989@126.com

导师简介: 张 新(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事非常规复杂光学系统设计等方面的研究。

E-mail: optlab@ciomp.ac.cn

空间光学系统易受太阳、地球、月亮、黄道背景光等视场外杂光光源的影响,若不进行有效的抑制,其杂光可能经低级次散射到达探测器,严重降低在轨空间系统的成像质量和目标分辨能力。就对地观测的空间系统而言,方位角大于外部杂光规避角时,其点源透射率(PST)一般要求控制在 10^{-7} 以下;而天文望远系统由于被观测物体能量更低,对杂光抑制要求更高,方位角大于外部杂光规避角时,PST一般要求在 10^{-11} 以下。光学系统口径、焦距越大,探测器等灵敏度越高,系统所需的杂光抑制水平越高,消杂光难度显著增大。与同轴反射系统相比,离轴反射系统的主镜中心不存在遮拦,因而无法像同轴系统那样在主镜中心开孔处加入遮光罩,且离轴系统光路折叠紧密,留给消杂光结构设计空间更小,因而杂光抑制的难度更大。目前国内已有相关文章对离轴反射系统的初始结构求解、优化设计和杂散光分析进行了研究^[2-5],但对长焦距大面阵的离轴系统设计及其高抑制比的杂散光分析并不多见。

综合上述因素,本文选取含有一次像面的离轴库克结构,设计了参数为焦距为 24 m,像方 F 数为 16,视场为 $1.6^\circ \times 1^\circ$,像面尺寸为 $670 \text{ mm} \times 420 \text{ mm}$ 的离轴望远系统,其摄远比小于 0.2,成像质量接近衍射极限,结构紧凑。为有效消除系统杂散光,设计了光学系统的外遮光罩和内部挡板、挡光环结构,在

一次像面处设置视场光阑,出瞳处设置 Lyot 光阑,通过反复进行光机结构整体优化,使系统在大于外部杂光规避角时 PST 达到 10^{-12} 量级。

2 光学系统设计

2.1 光学系统参数

光学系统工作波段为 $400 \sim 800 \text{ nm}$,口径 $D = 1.5 \text{ m}$,焦距 $f' = 24 \text{ m}$, F 数为 16,视场为 $1.6^\circ \times 1^\circ$,系统总体长度要求小于 5 m。

2.2 初始结构的计算

离轴三反射镜光学系统的初始结构和同轴三反系统一样,只是在优化计算时,取同轴的离轴部分,因此首先由共轴三反射镜系统出发求解系统的初始结构参数^[6]。如图 1 所示, f' 为光学系统总焦距,三片反射镜的放大倍率和顶点曲率半径分别为 m_1 、 m_2 、 m_3 和 R_1 、 R_2 、 R_3 ,三片反射镜的非球面系数分别为 b_{s1} 、 b_{s2} 、 b_{s3} ,主镜与次镜间隔为 d_1 ,次镜与三镜间隔为 d_2 , R_A 为系统遮拦比。

根据反射式系统三阶像差理论,通过改变反射镜曲率半径、间距和非球面系数消去系统的三阶球差、彗差、像散、场曲,即使得 $S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = 0$ 。当主镜为视场光阑,物距为无穷远时,系统初始结构参数计算公式为^[7]

$$\left\{ \begin{aligned} b_{s3} &= - \left[2m_2m_3 \left(\frac{m_2}{m_2+1} - \frac{2p_2}{p_2+1} \right) + \frac{(m_2+1)^2}{m_2-p_2} (p_2-1)m_3 \left(\frac{m_2-1}{m_2+1} - \frac{p_2-1}{p_2+1} \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{(m_3+1)^2}{m_3-p_3} (p_3-1) \left(\frac{m_3-1}{m_2+1} \frac{1}{m_3} - \frac{p_3-1}{p_2+1} \frac{1}{p_3} \right) \right] / \left[\frac{(m_3+1)^2}{m_3-p_3} (p_3+1) \left(\frac{m_3+1}{m_2+1} \frac{1}{m_3} - \frac{p_3+1}{p_2+1} \frac{1}{p_3} \right) \right] \\ b_{s2} &= - \frac{2m_2^2m_3}{m_2+1} + \frac{(m_2+1)^2}{m_2-p_2} (p_2-1) \frac{m_2-1}{m_2+1} m_3 + \frac{m_3+1}{m_3-p_3} \frac{p_3+1}{m_2+1} \frac{1}{m_3} \left(b_{s3} + \frac{m_3-1}{m_2+1} \frac{p_3-1}{p_2+1} \right) \\ &\quad \frac{(m_2+1)^2}{m_2-p_2} (p_2+1)m_3 \\ b_{s1} &= - \left\{ (m_2m_3)^3 + \frac{(m_2+1)^4}{m_2-p_2} p_2m_3 \left[b_{s2} + \left(\frac{m_2-1}{m_2+1} \right)^2 \right] + \frac{(m_3+1)^4}{m_3-p_3} p_2p_3 \left[b_{s3} + \left(\frac{m_3-1}{m_3+1} \right)^2 \right] \right\} / (m_2m_3)^3 \\ R_1 &= \frac{2f'}{m_2m_3} \\ R_2 &= - \frac{2f'p_2}{m_3(m_2-p_2)} \\ R_3 &= \frac{2f'p_2p_3}{m_3-p_3} \\ d_1 &= \frac{f'(1+p_2)}{m_3(m_2-p_2)} \\ d_2 &= f' \left(\frac{m_2+1}{m_2-p_2} + p_3 \frac{m_3+1}{m_3-p_3} \right) \frac{p_2}{m_3} \end{aligned} \right. , \quad (1)$$

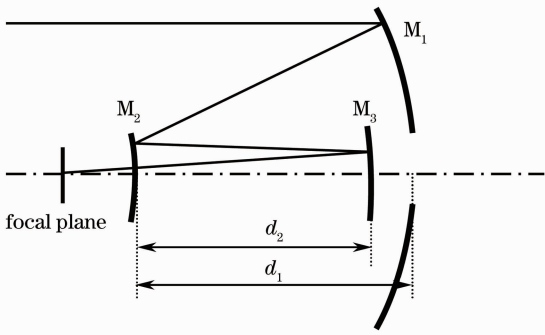


图 1 反射光学系统结构图

Fig. 1 Reflective optical system configuration

其中 p_2, p_3 为

$$p_2 = -\frac{m_2 R_A}{1 + m_2 - R_A},$$

$$p_3 = \frac{m_3}{1 - p_2 m_2 m_3 - m_2 m_3 + p_2 m_3}.$$

通过选择合适的 R_A, m_2, m_3 , 计算出系统的结构参数。

2.3 设计结果

将上述计算求得的初始参数输入到光学设计软件中, 并进行优化。为降低大口径反射镜的加工和检测成本, 次镜采用二次曲面, 主镜和三镜采用最高次项为 8 次项的非球面镜, 最终设计结果如图 2 所示。由于系统焦距和 F 数均很大, 主次镜间隔的减小将使轴外像差迅速增大, 同时系统后截距也将增大, 最终也将增加系统总尺寸。此外为满足消杂光需要, 次镜需给予一定的离轴量, 以便在次镜上端加入遮光罩抑制散射杂光。系统整体光路尤其是一次像面处要保证无穿插, 以避免在一次像面处设置视场光阑和在后续光路中设置挡板或挡光环时遮挡成像光路。而主次镜间距的减小, 将使系统光路更为紧密, 不利于挡光机械结构的设计。离轴系统的像差校正和杂光抑制在一定程度上是相互矛盾、相互制约的。为此经过反复优化, 选定主次镜间隔为

4.4 m。为抑制衍射杂光, 需保证系统有完整的实出瞳, 以便设置 Lyot 光阑。因此在次镜下方附近、出瞳后方, 加入一平面反射镜折叠光路, 将像面置于次镜之后, 有利于杂光的抑制, 并减小系统尺寸。

在目前的技术水平下, 尚无如此大的单片面阵 CCD, 需采用多片探测器进行拼接来实现大面阵的要求。系统的拼接探测器选用 E2V 公司的 CCD231-84, 像元个数为 4000×4000 , 像元尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$, 从而求得系统截止频率为 33 lp/mm。表 1 为系统的部分设计参数, 图 3 为系统的 MTF 曲线, 图 4 为系统的点列图, 从中可知, 无论是在视场中心 $(0^\circ, -0.3^\circ)$ 处还是在对角线视场边缘 $(0.8^\circ, 0.2^\circ)$ 和 $(0.8^\circ, -0.8^\circ)$ 处, 在截止频率下的各个视场 MTF 值均大于 0.6, 接近衍射极限。

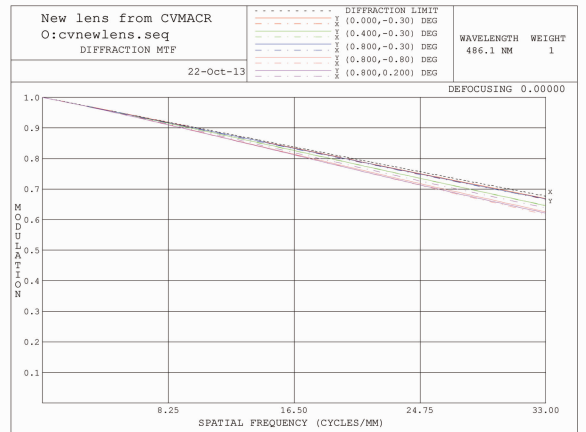


图 3 调制传递函数曲线

Fig. 3 Curves of MTF

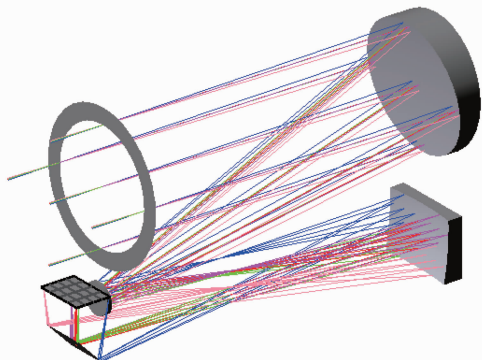


图 2 光学系统光路结构图

Fig. 2 Optical path layout of optical system

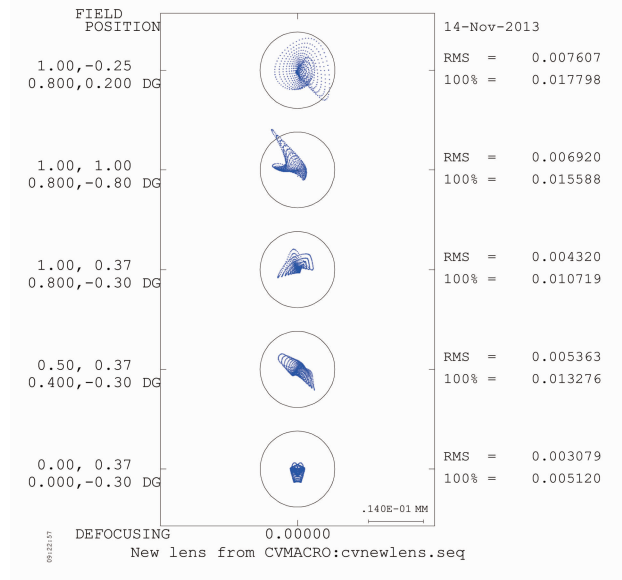


图 4 光学系统点列图

Fig. 4 Spot diagram of optical system

表 1 光学系统参数

Table 1 Parameters of optical system

| Surface | R / mm | d / mm | e^2 |
|-----------|-----------------|-----------------|--------|
| Primary | -10290 | -4400 | -0.936 |
| Secondary | -2629 | 4400 | -5 |
| Tertiary | -3586 | -6128 | -0.357 |

3 表面散射模型分析

在杂光分析中,元件表面的散射模型是能否准确计算杂光的关键因素。对于离轴反射系统,由于系统结构紧凑、光路密集,反射镜对外部杂光的散射是杂散光的主要来源。反射表面的散射特性一般用双向反射分布函数(BRDF)进行描述,其原理如图 5 所示, θ_s 和 θ_i 分别为散射角和入射角, φ_i 为垂直于物体表面的方位角。获得表面 BRDF 主要有两种途径:1)实测表面的 BRDF,2)利用散射模型进行仿真近似求解。由于实测设备复杂,成本较高,目前杂光分析大多利用散射模型进行分析计算。

系统机械结构件一般采用理想漫反射的朗伯模型,而镜面的模型则比较复杂,目前常用的镜面模型是高斯模型、哈维模型和 ABg 模型^[8]。目前国外诸如詹姆斯·韦伯太空望远镜(JWST)、先进技术大口径太空望远镜(ATLAST)、超新星/宇宙加速度探测器(SNAP)等大型空间天文望远光学系统的镜面散射建模均采用哈维模型。在对数坐标系下,哈维模型认为 BRDF 具有位移不变性,即 BRDF 曲线仅随入射角的改变而平移,而曲线特性保持不变。当镜面的粗糙度均方根(RMS)远小于工作波长时,则可利用哈维模型将粗糙镜面近似成光滑镜面,其表面 BRDF 散射特性可描述为^[9]

$$E_{\text{BRDF}}(\theta_s, \theta_i) = [b(100l)^S] \left[1 + \left(\frac{\sin \theta_s - \sin \theta_i}{l} \right)^2 \right]^{S/2}, \quad (2)$$

式中 b 为截距, S 为对数坐标系下的斜率, l 为肩膀函数。鉴于目前加工水平,反射镜面型精度可达到 2 nm, 由于远小于工作波长,故可用上式近似。对于波长为 633 nm, $S = -1.8526$, $l = 0.0050625$, $b = 0.45788$, TIS 为 0.20825%。对于波长为 1130 nm, $S = -1.9$, $l = 0.007$, $b = 0.2$, TIS 为 0.077903%。TIS 为所有角度下的总散射能量积分,即半球内散射能量与入射能量之比,可由下式求得:

$$E_{\text{TIS}} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} E_{\text{BRDF}}(\theta, \theta_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\varphi_i. \quad (3)$$

当大角度入射且考虑加工粗糙度对散射的影响时,

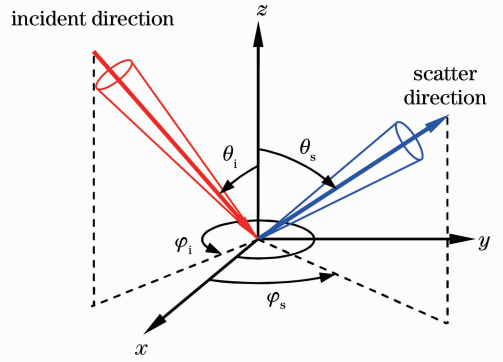


图 5 BRDF 散射原理图

Fig. 5 Principle diagram of BRDF scatter

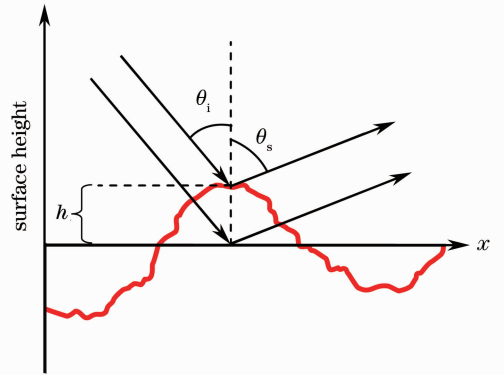


图 6 Harvey-Shack 散射模型示意图

Fig. 6 Sketch of Harvey-Shack scatter model

上述模型不再适用,需采用改进型的 Harvey-Shack 散射模型^[10-11],如图 6 所示, h 为表面微尺度下轮廓的高度,模型由下面的表面散射传递函数表示:

$$H_s(\hat{x}, \hat{y}; \gamma_i, \gamma_s) = \exp\{-[2\pi\hat{\sigma}_s(\gamma_i + \gamma_s)]^2 [1 - C_s(\hat{x}, \hat{y})/\sigma_s^2]\}, \quad (4)$$

式中 $\gamma_i = \cos \theta_i$, $\gamma_s = \sqrt{1 - (\alpha_s^2 + \beta_s^2)} = \cos \theta_s$, $\hat{\sigma}_s = \sigma_s/\lambda$ 为表面粗糙度均方根的波长形式

$$\begin{cases} \alpha = \sin \theta \cos \phi \\ \beta = \sin \theta \sin \phi \\ \gamma = \cos \theta \end{cases}, \quad (5)$$

则角扩散函数为

$$\begin{aligned} \mathcal{R}(\alpha, \beta) &= K \sum_j \sum_k \mathcal{R}(\alpha_j, \beta_k) = \\ &= K \sum_j \sum_k F [H_s(\hat{x}, \hat{y}; \gamma_i, \gamma_s) \exp(i2\pi\beta_0 \hat{y})] \Big|_{\alpha=\alpha_j, \beta=\beta_k}. \end{aligned} \quad (6)$$

对于给定入射角 θ_i 或散射分布强度 $I(\alpha, \beta)$ 后,可求得散射表面 BRDF:

$$E_{\text{BRDF}/\theta_i, \varphi_i} = \frac{Q}{\gamma P} I(\alpha, \beta) = Q \mathcal{R}(\alpha, \beta), \quad (7)$$

式中 Q 为表面的偏振反射率。

4 系统消光结构设计

与同轴系统不同,离轴系统在弧矢方向上结构不对称,因此杂光的传播路径和挡光结构也不对称。由于各主镜和三镜、次镜和一次折转平面镜的间距均较小,内部挡光结构的装调较难,一般只设计外遮光罩来抑制杂光,然而受本系统的结构尺寸所限,外遮光罩本身不能太长,且其挡光环不能太深,因此须在后续光路中继续添加机械结构来抑制杂光。若系统对杂光抑制水平要求较高,则一般采用含有一次像面的库克式离轴系统结构。

对于库克式离轴系统的杂光抑制,一般要求视场外杂光不能直接经外遮光罩一次散射到达除主镜外的其他反射镜上,从而确保视场光阑是杂散光进入后续光路的唯一通光孔径。尽可能地抑制机械结构的散射杂光,使镜面散射杂光成为系统总体杂光的主要来源。

4.1 外遮光罩设计

遮光罩的基本任务是在不遮挡视场内光线的前提下,尽可能地阻拦视场外的杂光进入光学系统。

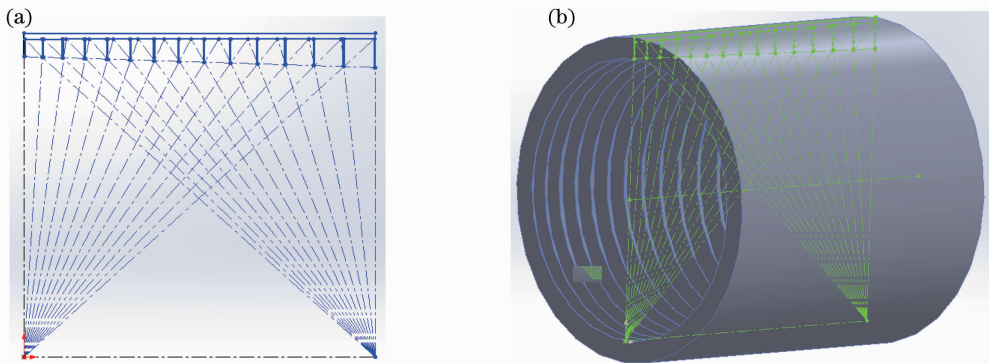


图 7 外遮光罩挡光环结构示意图。(a) 部面图; (b) 立体图

Fig. 7 Sketch of vanes structure outer baffle. (a) Cutaway view; (b) stereogram

4.2 内部消光结构设计

为有效地抑制散射杂光,在系统一次像面处设置视场光阑,在视场光阑上侧与主镜三镜之间设置挡光板,在视场光阑下侧与次镜和一次折转平面镜之间设置挡光板,这样杂光只能经视场光阑进入三镜后的成像光路中,大大减小了杂光的通光口径。对于衍射杂光的抑制,需在光学系统出瞳附近设置 Lyot 光阑,以保证衍射杂光经入瞳和出瞳两次衍射,从而有效降低系统衍射杂光。

5 系统的建模与仿真

根据光学设计结果,进行系统反射镜空间排布

几何光学是设计遮光罩的主要手段,遮光罩设计的基本原则有^[12-13]:首先,避免视场外非成像光线直接照射到光学系统像面。其次,使到达像面的杂光至少经过两次以上朗伯散射,从而有效衰减最终到达像面的杂光能量。再次,以视场外杂光源与系统光轴的最小夹角为外部杂光规避角,对于同轴系统,以光学系统第一表面为两次散射控制面,使大于杂光规避角的入射光线不能直接到达光学系统第一表面;对于离轴系统,所有反射镜表面都为两次散射控制面。最后,尽量采用低反射、高吸收的黑色涂层等,使系统内部的散射杂光衰减至最小。

由于实际使用环境对尺寸的限制,系统外遮光罩长度需小于 2 m,这增加了系统消杂光的难度。系统的外部杂光规避角 γ 为 40° ,入瞳直径为 1.5 m,主次镜间距为 4.4 m,半视场角 ω 为 0.8° , D_1 、 D_2 分别为外遮光罩后端和前端的直径, $D_1=1.5$ m, L 为外遮光罩的长度。由公式 $D_2 = D_1 + 2L \tan \omega$, $D_1 + L \tan \omega = L \tan 40^\circ$ 计算得: $D_2 = 1550$ mm, $L = 1818$ mm,经过计算共设计 12 级挡光环。利用 SolidWorks 软件进行三维建模,其结果如图 7 所示。

的优化,在次镜下方加入一平面反射镜折叠光路,缩小系统整体结构尺寸。采用结合几何光线追迹的 Monte-Carlo 概率模拟方法,将杂光传输过程分解为散射、透射、反射、吸收等一系列子过程,并根据实际光机材料属性进行赋值,求解系统杂散光。对于超大口径的光学系统,为保证计算所需总抽样数要求,往往需要大量的模拟杂光输入光线,采用并行计算可有效降低仿真时间。

由于光学系统工作波段为 400~800 nm,反射镜采用第 3 节中波长为 633 nm 下, $S=-1.8526$, $l=0.0050625$, $b=0.45788$,TIS 为 0.20825% 的哈维模型;其余消光机械结构件则采用吸收率为 90%

的朗伯模型。

5.1 系统仿真杂光关键路径

在杂光仿真分析中,往往难以进行一次光机结构设计就达到杂光的抑制要求,因此需要根据仿真结果,结合正反双向追迹记录杂光路径轨迹,寻找关键表面及杂光传递路径,通过降低涂层反射率,优化杂光陷阱以增加散射次数,从而降低像面处的杂光能量。反向追迹是指将探测器设为杂光光源,逆着成像光路进行光线追迹。被正向追迹和反向追迹同时照射的表面为系统关键表面,在所有到达像面的杂光路径中所占能量比重最大的一系列路径为关键路径。为便于显示杂光光线,将部分挡光结构隐藏,图 8 为离轴系统杂光分析图,图 9 为杂光关键路径的仿真结果。

系统的主要杂光路径一般为低级次散射杂光,其所占比例如表 2 所示。4 条关键路径均在外遮光罩内壁的挡光环间发生前两次朗伯散射,只是由于散射后杂光出射角度不同,导致形成第三次散射的表面有所不同。对于第一条关键路径,在主镜形成第三次散射(镜面散射)后,经次镜、三镜、折转镜的纯反射到达像面。对于第二条关键路径,经主镜纯反射,在次镜形成第三次散射(镜面散射)后,再经三镜、折转镜的纯反射到达像面。对于第三条关键路径,在主镜和次镜之间的遮光罩下方区域形成第三次散射(朗伯散射)后,经次镜、三镜、折转镜的纯反射到达像面。对于第四条关键路径,经主镜纯反射,在次镜周围结构件处形成第三次散射(朗伯散射)后,再经次镜、三镜、折转镜的纯反射到达像面。

由于主遮光罩只能遮挡一次散射杂光,必有二次散射杂光到达主镜和次镜附近结构件上。系统杂光主要分为两部分:1)由反射镜表面形成的第三次

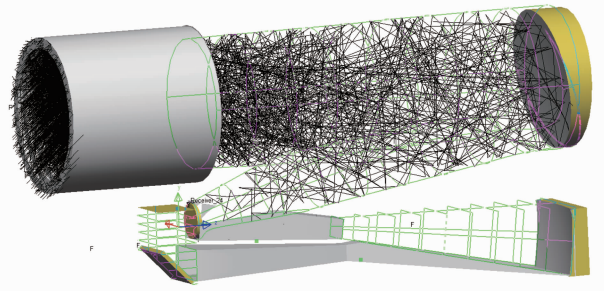


图 8 离轴系统杂光仿真分析图

Fig. 8 Diagram of off-axis system stray light simulation

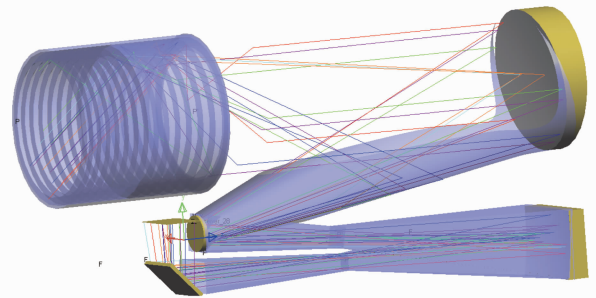


图 9 离轴系统杂光关键路径示意图

Fig. 9 Sketch of off-axis system key stray ray path

散射(镜面散射),如路径 1 和路径 2;2)由结构件表面形成的第三次散射(朗伯散射),如路径 3 和路径 4。当外遮光罩形式确定后,第一部分杂光成为系统杂光抑制水平的极限,在经过外遮光罩两次散射后,杂光不再经过结构件散射,只与反射镜作用,因此仅与反射镜表面加工粗糙度均方根 RMS 有关,无法通过光机结构进行改善。第二部分杂光则可通过改善黑漆涂料、加入蜂窝微结构等杂光陷阱进行抑制。如表 2 所示,系统杂光主要来自反射镜尤其是主镜的散射,而结构件散射所占比例很小,说明系统杂光抑制较好。

表 2 系统主要杂光路径及其比例

Table 2 Main stray ray paths and the proportions of system

| | First scatter surface | Secondary scatter surface | Tertiary scatter surface | Proportion /% |
|------------------|-----------------------|---------------------------|--|---------------|
| Stray ray path 1 | Outer baffle | Outer baffle | Main mirror | 86.4 |
| Stray ray path 2 | Outer baffle | Outer baffle | Second mirror | 4.2 |
| Stray ray path 3 | Outer baffle | Outer baffle | Baffle between main mirror and second mirror | 3.7 |
| Stray ray path 4 | Outer baffle | Outer baffle | Structures around second mirror | 5.7 |

5.2 杂散光抑制水平评价

PST 是目前杂散光仿真计算中普遍采用的一种评价方法,其定义为^[13]:光学系统视场外离轴角 θ 的光源经光学系统后,在像面处产生的辐照度 $E_d(\theta)$ 与垂直于该点源的入瞳处辐照度 $E_i(\theta)$ 之比,即

$$S_{PST} = \frac{E_d(\theta)}{E_i(\theta)}. \quad (8)$$

根据杂光软件的仿真结果,将子午、弧矢方向各离轴角度的 PST 绘制成曲线,如图 10 所示,在杂光规避角 40° 以外,系统 PST 小于 10^{-11} ,满足使用要求。

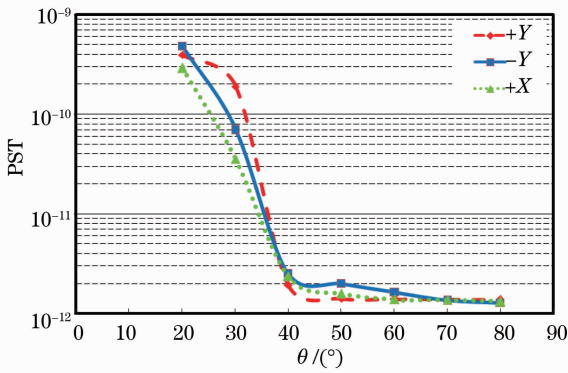


图 10 离轴系统点源透射率曲线

Fig. 10 PST curves of off-axis system

6 结 论

设计了长焦距大面阵库克式离轴反射系统,各视场 MTF 均接近衍射极限,系统成像质量良好,摄远比达到 0.2,结构紧凑。通过优化设计外遮光罩、视场光阑、Lyot 光阑等方法,对系统杂散光进行了有效的抑制。结合 Harvey-Shack 镜面散射模型,定量地对该光机系统进行了杂光分析,计算系统视场外各角度的 PST。设计与仿真结果表明,该离轴系统杂光抑制能力较强,满足空间领域对暗弱目标探测的杂光要求。

参 考 文 献

- 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 Liu Xiaomei, Xiang yang. Research and design of telecentric off-axis three-mirror system with real entrance pupil [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1122002.
刘晓梅, 向 阳. 具有实入瞳的远心离轴三反系统研究与设计[J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1122002.

- 3 Zhou Gangyi, Fan Xuewu. Baffle design and stray light analysis of the off-axis three-mirror telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 605–609.
邹刚毅, 樊学武. 离轴三反射望远镜遮光罩设计与杂光分析[J]. *光子学报*, 2009, 38(3): 605–609.
- 4 Yan Changxiang, Xu Jie, Peng Yan. Stray lightsuppression of three-mirror off-axis space optical telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(2):289–293.
颜昌翔, 许 杰, 彭 岩. 离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 289–293.
- 5 Lin Jing, Cui Qingfeng, Zhu Hao. Research of board width off-axis three mirror optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0722002.
林 晶, 崔庆丰, 朱 浩. 宽幅离轴三反光学系统研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0722002.
- 6 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.
- 7 D Korsch. Closed form solution for three-mirror telescopes corrected for spherical aberration, coma, astigmatism, and field curvature [J]. *Appl Opt*, 1972, 11(12): 2986–2987.
- 8 Mei Chao, Zhou Sizhong, Yan Peipei, *et al.*. Design of an outer baffle based on scattering model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0122005.
梅 超, 周泗忠, 闫佩佩, 等. 基于散射模型设计外遮光罩[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0122005.
- 9 M J Sholl, F S Grochocki, J C Fleming, *et al.*. Stray light design and analysis of the SNAP telescope [C]. *SPIE*, 2007, 6675: 66750C.
- 10 Andrey Krywonos, James E Harvey, Narak Choi. Linear systems formulation of scattering theory for rough surfaces with arbitrary incident and scattering angles [J]. *J Opt Soc Am A*, 2011, 28(6): 1121–1138.
- 11 Andrey Krywonos, James E Harvey. Recent developments in the analysis of surface scatter phenomena [C]. *SPIE*, 2006, 6291: 62910S.
- 12 John L Stauder. *Stray Light Comparison of Off-Axis and On-Axis Telescopes* [D]. Logan: Utah State University, 2000.
- 13 Yan Peipei, Fan Xuewu, Zou Gangyi, *et al.*. Stray light removing design and simulation of the three-mirror optical system used in field bias [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1997–2002.
闫佩佩, 樊学武, 邹刚毅, 等. 偏视场用三反系统消杂光设计及仿真[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1997–2002.

栏目编辑: 韩 峰