

折反射式空间相机光学系统设计与杂散光抑制

吕 博*, 冯 睿, 寇 伟, 刘伟奇

(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:针对同轴两反射镜光学成像视场角受限、大视场角下成像对比度较低的问题,采用透镜组作为像差校正组,合理分配光学系统的光焦度及间距,来扩大两反射结构的成像视场角,提升相机全视场内的成像质量。以某一工程应用需要为例,设计并研制了焦距为 750 mm、视场角 $2\omega=3.45^\circ$ 、全视场平均传递函数在 108 lp/mm 处优于 0.2 的相机光学系统,且在未使用主镜筒外遮光罩的前提下,优化设计了次镜遮光罩以实现杂散光抑制。采用 TracePro 软件进行相机杂散光环境建模仿真,结果表明:在非成像视场角内的杂散光点源透过率(PST)的量值范围为 $10^{-3}\sim 10^{-6}$ 。系统满足传统地面目标探测成像要求,验证了紧凑型大视场折反射光学杂散光抑制结构的可行性,并为商用同轴折反射光学系统设计与优化提供了一定的参考。

关 键 词:光学设计;折反射;杂散光抑制;点源透过率(PST)

中图分类号:0436 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2019-0036

Optical system design and stray light suppression of catadioptric space camera

LÜ BO*, FENG Rui, KOU Wei, LIU Wei-qi

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

* Corresponding author, E-mail: jllvbo@163.com

Abstract: A lens group is used as an aberration correction group to solve the limited field of view angle and low imaging contrast at a large field of view in the coaxial two-mirror optical system. The lens group adopts reasonable optical power and pitch, it expands the field of view of two-reflection mirrors and improves imaging quality in the camera's full field of view. Taking an engineering application as an example, we design and develop an optical system with a 750 mm focal length, a field of view of $2\omega=3.45^\circ$, an average transfer function better than 0.2 at 108 lp/mm, and an optimized design for its secondary mirror hood that suppresses stray light without a main mirror barrel hood. Simulation stray light was optimized by using TracePro software. The results show that the stray light Point Source Transmittance (PST) in the non-imaging field of view ranges from 10^{-3} to 10^{-6} . The system meets the requirements for traditional ground target detection and ima-

收稿日期:2020-03-05; 修订日期:2020-03-19

基金项目:高分专项装备预研项目(No. GFZX0403260206)

Supported by Equipment Pre-research of GF Project (No. GFZX0403260206)

ging, the feasibility of a compact large-field refracting optical stray light suppression structure is verified, and a certain reference for the design and optimization of commercial coaxial refracting optical systems is provided.

Key words: optical design; catadioptric; stray light suppression; Point Source Transmittance (PST)

1 引言

随着空间应用载荷各项技术的飞速发展,以及环境治理监督、灾害评估、精准农业等涉及到民生领域的信息获取需求日益增多,空间成像载荷的应用也逐渐从军事侦察领域向民用及国家战略需求方向扩展。地物空间分辨率相机具备大视场、大靶面成像幅宽,采用可常规加工技术加工,具备快速组装能力,且制造成本低、精巧、重量低,是现今及未来军民两用及商用航天成像载荷的发展趋势。为保证大靶面、高分辨率的地面成像要求,相机的相对孔径及焦距要较大,并要具备一定的成像视场角。这决定相机光学系统无法采用透射元件进行像差校正,从而无法实现小型化设计。而采用全反射镜光路结构虽然不存在消色差等设计技术难度,但多反射镜的二次曲面离轴镜结构会存在一维方向视场无法扩大问题,采用高次及自由曲面反射结构虽然可以增大视场角但加工及装调难度将显著增加,违背了高性价比低成本的商业航天应用的设计原则。因此,针对大视场高分辨率轻小型空间对地相机的应用需求,本文将采用常规可加工的 R-C 两反射系统作为长焦距相机的主要光焦度调整机构,结合负光焦度校正透镜组扩大成像视场角,多自由度校正光学像差^[1-5]。对地观测成像相机工作时,大气散射、湖泊海洋等水面反射光较为强烈,除成像视场内光线外,进入到探测器靶面上的较强的非成像光将以杂散光的形式进入光学系统,直接影响目标成像的真实性,降低像面对比度及信噪比,比较强烈的非成像光甚至可通过透镜间的镜面反射在像面产生光晕,直接导致系统无法正常成像^[6-7]。为了满足轻小型化设计要求,本文以上述同轴折反射光学系统为基础,进行光线位置计算,完成了低遮拦比次镜遮光罩设计,根据镜筒及金属结构内壁涂敷材料的性质,在 TracePro 光学软件中建

模并进行蒙特卡洛杂光源光线仿真追迹^[8-9],用常规点源透过率表征系统杂散光抑制能力。最后,通过实验验证了所设计的次镜遮光结构的杂散光抑制效果。

2 折反射式光学系统设计

2.1 光学参数及光路选型

针对某商用航天对地相机的设计要求,折反射式光学系统的主要光学参数如表 1 所示。

表 1 光学系统设计参数
Tab. 1 Design parameters of optical system

光学参数	数值
焦距/mm	750
视场角 $2\omega/(^\circ)$	3.45
像方 F 数	10
工作波段/nm	420~700
畸变	<1%
探测器像元	8 K×6 K@4.65 μm ×4.65 μm
相对照度	≥95%
体积/mm	≤ $\varnothing 95\times 200$

光学系统焦距较大,若采用传统透射式光学结构,相机光学系统总将长远远超出尺寸限制,采用折叠光路又将导致相机尺寸体积包络超差,包络指的是表 1 中的体积 $\varnothing 95\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 。由于使用单片大靶面探测器作为信号接收单元,若采用反远型物镜光学结构,需要在正光焦度后组添加一组负光焦度扩束透镜组进行光线矢高展开,引入的像差需使用更多的透镜进行像差校正,从而导致成像光路的重量和尺寸增大。采用全反射结构时,虽然无需考虑色差像,焦距也可通过一次成像或二次成像的离轴结构实现,但采用传统消像散型二次曲面面形反射镜结构时,光学系统像差在成像视场角的两个方向上无法同时得到较好

校正,同时,大靶面尺寸和低畸变要求使得采用全反射结构时需引入高次或自由曲面面形结构,这极大地增加了制造与检测难度,不利于高性价比商业相机的大批量研制。综合考虑,本文采用折反射结构的成像光路,其中,反射组件用于控制主光焦度及实现光路折叠小型化,折射元件对扩大视场造成的成像质量下降进行优化。

2.2 折反射光学系统的设计及优化

同轴两反光学结构可对长焦距光路进行折叠,相比于全透射结构,其使用的元件数量少,有利于长焦距相机的小型化。在众多同轴两反射镜中,R-C系统,即卡塞格林型两反射结构的球差、彗差系数均为零,像散较小,其对无穷远目标成像时弥散斑近似呈圆形,在大视场成像时相对于马克苏托夫(格利高里等晕形式)等其它两反镜系统具有较大优势,也是目前众多大型光学天文望远镜经常采用的形式^[10-12]。

根据 R-C 系统等晕条件($S_I=S_{II}=0$)及初级像差理论两反射镜面形系数技术公式,得到的主、次反射镜二次曲面系数表达式为:

$$e_1^2 = 1 + \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta^2}, \quad (1)$$

$$e_2^2 = \frac{\frac{2\beta}{1-\alpha}(1+\beta)(1-\beta)^2}{(1+\beta)^3}. \quad (2)$$

选择主镜作为孔径光阑面,目标物位于无穷远时,次镜顶点半径 R_2 与主镜顶点半径 R_1 有如下关系:

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{1+\beta} R_1, \quad (3)$$

其中: α 为次镜的遮拦比、 β 为次镜的放大倍数。根据光学系统的设计参数,并考虑同轴系统中心遮拦较大时将导致传递函数质量下降严重,根据经验,在光学系统进行初始设计时,选择次镜遮拦比 α 为 0.36,次镜放大倍率为-3,计算 R-C 初始结构主次镜面形的二次曲面系数。根据设计经验,主反射镜初始顶点半径设定为-250 mm,根据公式(3)得到次镜顶点半径初始值,主次镜间隔由次镜遮拦比及无穷远处的成像关系即可得到。利用上述参数,在光学软件中得到主次反射镜的初始光路结构,如图 1 所示。

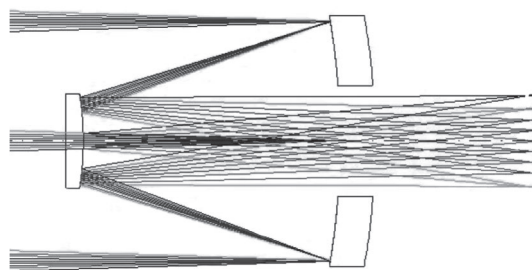


图 1 R-C 系统初始结构

Fig. 1 Initial structure of R-C reflected mirror

得到的两反系统的初级像差中除正切向彗差为正数外,球差、正切向像散、弧矢项像散、匹兹瓦弯曲等像差均为负数,且各像差数值均较小。根据高斯光学透镜成像的像差特点及初始主次反射镜的成像高度,在次镜后设置一组负光焦度透镜校正镜组,以平衡主次反射镜的固有像差。负光焦度校正镜组同时具有扩束功能,可使整机焦距进一步拉长、各主光线在焦平面的高度升高。在近轴条件下,简化校正镜组为一平凹透镜,且平面靠近探测器,此时校正镜组的物方主面位于凹面表面,主次镜的物方主面位于光阑,即主镜位置,由此得到主次镜和校正镜组这一复合结构的高斯公式,进而求出合成的光焦度表达式,如下:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - d\phi_1\phi_2, \quad (4)$$

其中, ϕ 为系统光焦度, ϕ_1 、 ϕ_2 分别为反射结构光焦度及校正镜组光焦度, d 为主次镜物方主面到校正镜组物方主面的距离。

负光焦度校正镜组产生的像差除场曲项为负数外,其余均为正像差,因此,当主次镜固有像差得到补偿后,大视场的倍率像差可以得到较好控制,故弥散斑更加接近圆形,由于校正镜组的正球差和主次镜的负球差也得到补偿,使得弥散斑尺寸进一步缩小。考虑到空间环境辐照特性复杂,为避免胶合层黑化失效,在校正镜组选型时应使用非胶合透镜对其进行色差校正,采用 3 片透镜进行色差校正。第一片透镜对次镜出射光线进行压缩会聚处理,减少主镜中心的开孔尺寸,同时,也为穿过主镜中心孔的校正镜筒的机械结构设计提供空间。压缩后的光束在穿过主镜后应进行扩束,以抬高各视场主光线矢高,从而实现大靶面成像,因此第二片透镜应具有负光焦度。在保证

镜间结构具有一定设计余量的情况下,第三片透镜应具备光线会聚能力,故需使用正透镜。通过上述分析,本文选用柯克物镜组(透镜光焦度依次为+、-、+)作为校正镜的初始型,同时,在柯克物镜后再增加一片透镜,以提高设计自由度。在校正镜组及光学系统的优化过程中,控制边缘视场主光线的入射角度和位置,适当放开主次镜二次系数的变化范围,合理设置透镜组半径、厚度等自由变量,力求在满足奈奎斯特频率下的弥散斑能量集中统一。经深度优化后的折反射系统的成像光路如图2所示。

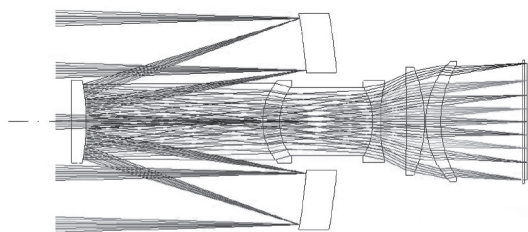


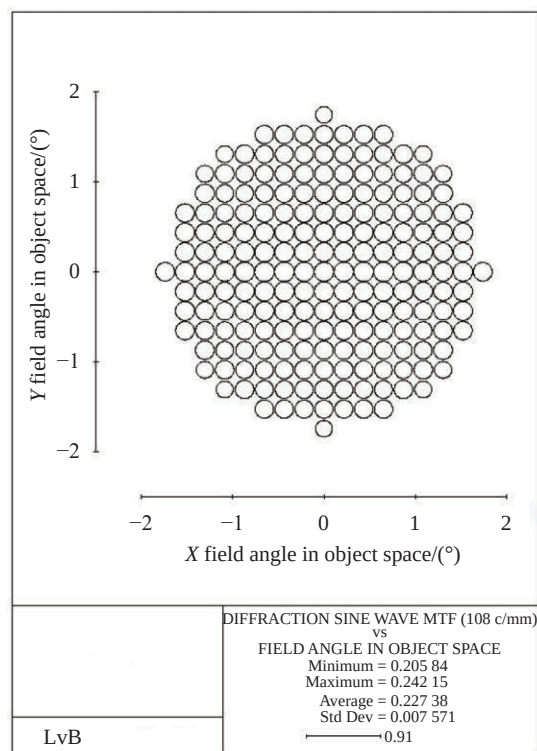
图2 折反射系统的成像光路图
Fig. 2 Optical path of catadioptric system

2.3 像质评价

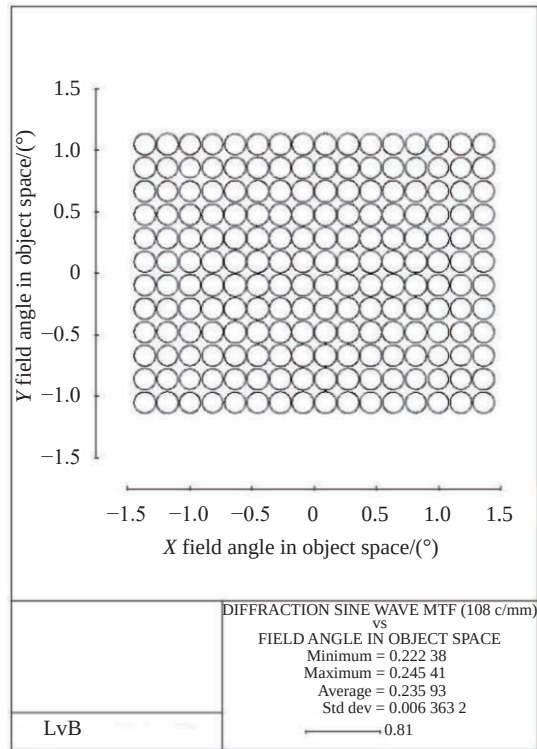
经过深度优化后的折反射光学系统的长度小于186 mm,全视场角大于 3.45° ,成像靶面直径大于46.4 mm,在小型化基础上实现了同轴大视场成像,极大地提升了单幅成像幅宽。衍射传递函数值(MTF)的采样结果如图3所示。可见,在108 lp/mm频率下,圆形成像视场的衍射MTF平均值优于0.22,标准差小于0.008;实际探测器成像区域内的衍射MTF平均值优于0.23,标准差小于0.0065,传递函数值接近衍射极限,且标准差较小,说明在成像视场内,各视场的传递函数值都非常接近,整个成像靶面对比度高度一致。

在全视场进行 21×21 采样,系统的出射波前RMS如图4所示,以干涉仪工作波长计算,出射波前RMS小于 0.034λ ,标准差约为 0.008λ ,一致性较好,全视场下像差得到了较好的校正。

图5(彩图见期刊电子版)为像面处全视场的垂轴色差曲线。可见,二级光谱最大值小于 $0.12 \mu\text{m}$,最大倍率色差小于 $0.65 \mu\text{m}$,均远小于像元尺寸,说明引入的透镜组在工作波段内对垂轴像差进行了充分校正。



(a) 圆形全视场 MTF
(a) MTF of circular full field of view



(b) 矩形探测器视场
(b) MTF of rectangular detector field of view

图3 两种视场衍射传递函数

Fig. 3 Diffraction MTFs of two kinds of field of views

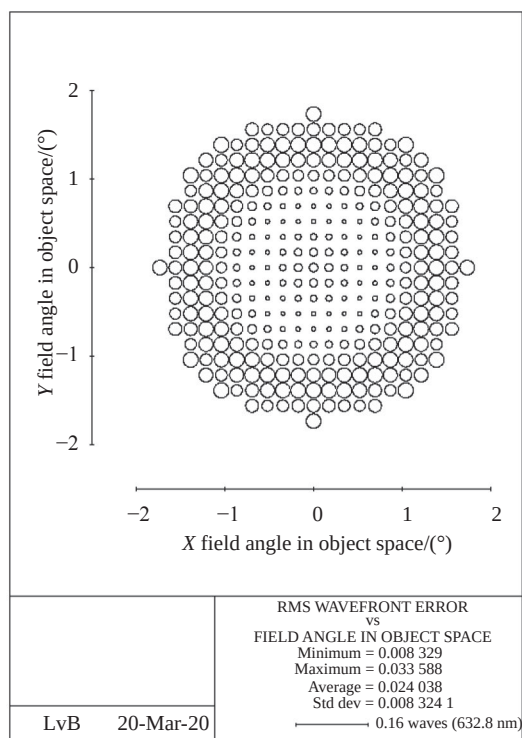


图 4 全视场(21×21)采样下的系统出射波前 RMS

Fig. 4 System wavefront RMS of 21×21 typical field of view

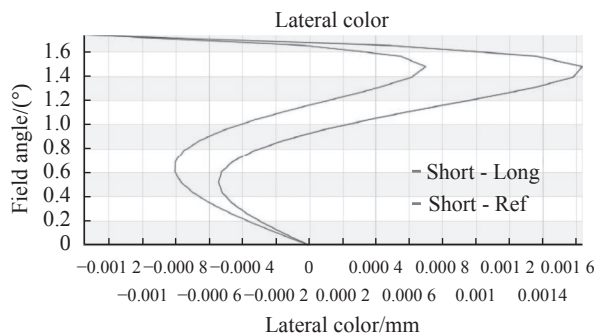


图 5 垂轴色差曲线

Fig. 5 Chromatic aberration in vertical axis of system

为减小成像光谱漂移,提升探测器边缘的成像照度,各视场主光线与探测器法线夹角要小于 6° ,仿真成像图如图 6(彩图见期刊电子版)所示。由图 6 可知,仿真图像没有出现边缘视场发暗的情况,全幅图像内照度响应比较统一。

综上所述,本文设计的折反射式相机的光学系统在 3.45° 全视场内的衍射传递函数在奈奎斯特频率下接近衍射极限、出射波前优于 0.034λ 、垂轴色差小于六分之一像元尺寸。由此可知,在外包络尺寸控制下,光学系统得到了较好的像差校正和优化设计。国内常规加工检测能力可保证

二次曲面的主次反射镜及全球面透镜组符合高性能、大幅宽、高性价比商业对地光谱相机的指标要求,部分性能参数也为后期系统装调留下了余量。

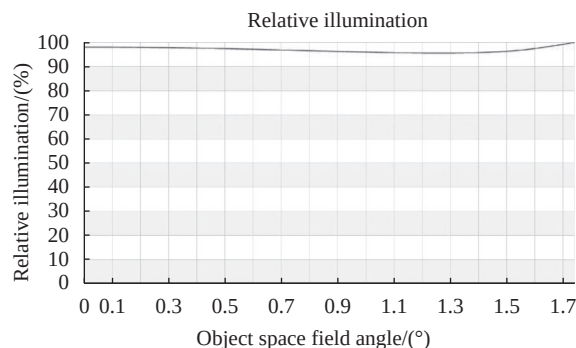
(a) 焦平面的照度曲线
(a) Illumination curve of focal plane(b) 仿真景物图
(b) Picture of simulation scenery(c) 仿真成像效果
(c) Simulated imaging effect

图 6 焦平面的照度曲线及仿真成像效果图

Fig. 6 Illumination curve of focal plane and simulation imaging effect

3 相机杂散光抑制

3.1 杂散光来源

本文设计的折反射式相机对地成像时,景物信息成像于整个相机靶面,太阳光、月光等虽然

不直接进入光学系统,但经过地表及空间气体反射、散射的天体光线依然较强,最终以近似朗勃散射形式进入相机光学系统。此外,地表散射光在成像视场外以非成像光线束的形式照射光学系统结构内壁时会产生漫反射,入射到光学元件表面时也会产生反射、散射等杂散光形式,经过特定光学元件表面的偶次反射光还会在成像面形成鬼像。严重的散射光被探测器接收后会对系统分辨率和对比度造成劣化影响,较强的光学表面二次反射鬼像光斑会以光晕的形式遮蔽目标成像信息。

3.2 组件表面的杂散光传输特性

外部非成像光进入相机照射组件表面后产生的杂散光均遵循能量传播规律及辐射传播规律,在不考虑光线传播过程中的介质吸收、拦光、反射等损失,则由光能量守恒定律可知从系统出射的光通量 φ_1 应等于进入系统的光通量 φ_2 。但杂散光在相机组件表面间传输时需要考虑的因素较多,目前从辐射传热计算中发展来的基本能量传输方程是进行表面杂散光传递及分析的理论基础^[13-14]。杂散光传递通用模型如图7所示,设有两表面具备散射条件,面元 dA 的辐射亮度为 L_A ,面元 dA' 所能接收到的来自面元 dA 发出的辐射通量为:

$$d\phi_{A'} = L_A \cos \alpha dA d\Omega_A, \quad (5)$$

其中,面元 dA' 对面元 dA 的立体张角 $d\Omega_A$ 可分解为含有两面元距离平方、面元连线与法线夹角 θ 的余弦及面元 dA' 的表达式,因此,式(5)可以写成如下形式:

$$d\phi_{A'} = \frac{L_A \cos \alpha dA \cos \theta dA'}{r^2} = BRDF \cdot d\phi_A \cdot GCF, \quad (6)$$

式中, BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)是描述面元 dA 表面漫反射特性的双向反射比分布函数,它是表面反射辐亮度和入射照度的比值,其表征了反射、散射方向的辐亮度和入射角下辐照度的关系,其可表达不同材料表面的散射属性; $d\phi_A$ 为面元 dA 的辐射通量; GCF 是几何构成因子,即面元 dA 对 dA' 的投影立体角,其只与发射面元和接收面元的相对位置有关。

从辐射能量传递示意图及面元 dA' 接收的辐射通量表达式(6)可知,接收表面的辐射通量与杂光源散射面的 BRDF、几何构成因子 GCF 及杂光源辐射通量有关,抑制或弱化相关因素将使杂散光传递后光通量值下降。通过降低传递路径中杂散光源产生面的辐射通量,对结构表面进行处理,喷涂特征 BRDF 涂层以人为干预光线散射方向,或采取降低 GCF 值、阻隔非成像光线传播路径等方法,降低接收面元处的光通量,进而达到杂散光抑制的目的。现有结构组件表面经过多种处理后及涂覆涂层的 BRDF 值多以波长-入射角度-模型 ABg 系数的形式给出。虽然选择适当的非成像光线接触表面可间接干预较强杂散光的传播方向,但在光学系统内直接阻隔拦截非成像光路确是最有效的方法,通常通过设计遮光筒、遮光罩等结构实现杂散光的直接抑制。

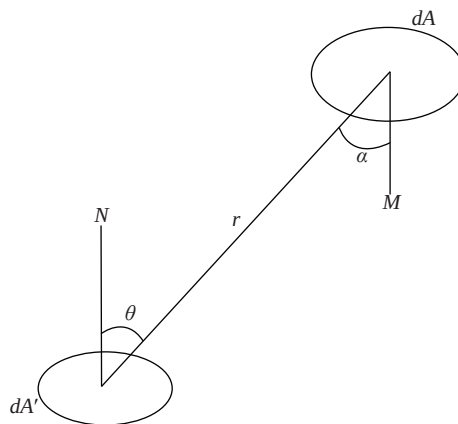


图7 辐射能量传递示意图

Fig. 7 Schematic diagram of radiation energy transfer

3.3 遮光结构设计

折反射相机遮光结构秉承了传统透射式相机光学遮光罩的设计原则,不允许角外的入射光直接入射到光学系统,一次杂光不能直接照射透镜组。此外,在理想无尺寸限制的情况下,同轴折反射成像系统的外镜筒遮光罩可向物方延伸,进而在不增加次镜遮光罩及透镜组遮光罩的情况下实现小遮拦比的杂散光抑制。但根据实际工程应用情况,本系统对相机外包络尺寸长度有所限制,在进行杂散光抑制遮光结构设计时,需尽量减小次镜遮光罩结构在光线入瞳面的投影面积,降低遮

拦比的增加幅度。

图8为本文设计的折反射系统遮光结构的剖面示意图,根据成像视场角和外尺寸要求,主次镜间遮光罩向物方延伸的外缘端面标记为 A ,校正镜组镜筒外缘端面上下点标记为 O 、 O' ,在不考虑次镜遮光结构时,从 A 点发出入射到 O 及 O' 之间的光线束会进入并充满校正镜组的通光口径,直接对探测器成像对比度造成影响。作 AO 连线,其与子午向最大视场光线相交于点 A' ,从点 A' 平行于光轴向物方做延长线到 B , $A'B$ 为次镜遮光罩的“一级环片”。连接 O 、 B 两点, OB 与子午向最大视场光线相交于点 B' ,从点 B' 平行于光轴向物方延长到 C , $B'C$ 为次镜遮光罩的“二级环片”,根据上述作图法,依次可得到次镜遮光罩的“三级环片” $C'D$ 。从图8可看出,“一级环片” $A'B$ 的长度将决定“二级环片”起点 B' 的相对位置, $A'B$ 越长,则点 B' 越靠近光轴,“二级环片” $B'C$ 也越靠近光轴, $C'D$ 同理。这样将导致靠近光轴的“环片”过密;相反, $A'B$ 越短,则点 B' 离光轴越远,“二级环片” $B'C$ 也离光轴越远, $C'D$ 同理。这样将导致整体“环片”数量过多、遮光面积较大。考虑环片结构加工性和后期次镜装调方便,使点 B 、 C 、 D 位于次镜外缘端面连线并垂直于光轴。按上述过程作图,以次镜外缘端面连线与光轴交点 M 作为坐标原点(0,0),计算得到第一遮光环 A' 点坐标(50.6, 27.9)、第二遮光环 B' 点坐标(35.5, 22.8)、第三遮光环 C' 点坐标(27.3, 18.75)。

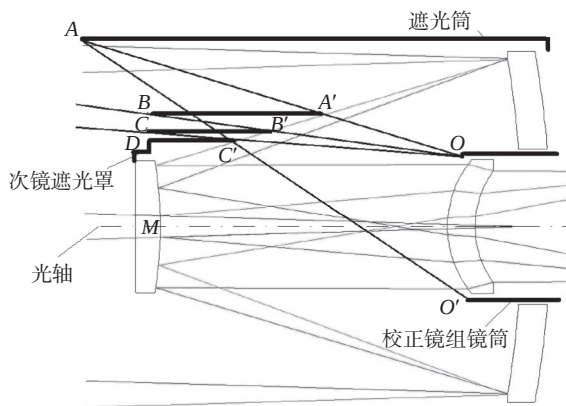


图8 遮光结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of baffle

根据光路可逆原理及关键杂散光产生源进行逆向分析,以 O 、 O' 为极限入射点,发散角大于

OA' 与光轴夹角的光线束将被遮光筒内壁拦截散射;光线 OA' 、 OB' 连线间内腔的光线束将被 $A'B$ 内壁所拦截散射,光线 OB' 、 OC' 连线间内腔的光线束将被 $B'C$ 内壁所拦截散射,发散角小于 OC' 与光轴夹角的入射光线将被 $C'D$ 内壁及次镜背部支撑所拦截散射;发散角大于 $O'A$ 与光轴夹角的光线束将被次镜遮光罩及遮光筒内壁拦截散射,发散角小于 $O'A$ 与光轴夹角的光线束将被次镜遮光罩及次镜背部支撑所拦截散射; O 与 O' 连线上其余位置光线束的发散角均属于上述拦截散射情况,次镜遮光罩结构对一次非成像光均进行了拦截和散射。

如图9所示,次镜遮光罩采用线切割加工工艺,遮光环 $A'B$ 、 $B'C$ 、 $C'D$ 的厚度应在保证系统环境适应性前提下尽量轻量化,环与环之间通过薄壁加强筋连接,以减少遮光面积。

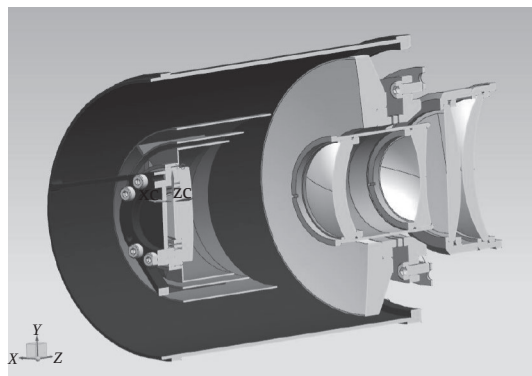


图9 系统内次镜遮光罩

Fig. 9 Secondary mirror hood in the system

4 光机系统建模仿真分析

4.1 分析方法

无论是地球反射光线还是天体反射光线,它们的传播距离与相机焦距的比值均较大,进入光学系统的非成像光线束都可看成是 π 空间分布的平行光束,以全口径、全视场形式入射到折反射系统。进入光学系统的平行光束中的任意条光线,经过光学系统内部表面和材质的散射、反射、透射、吸收,以一定的分布函数形式进行再次传播,这种特征分布函数服从概率统计模型,科研人员常用蒙特卡洛概率法对杂散光能量进行分析计算。根据相机成像功能及应用范围的不同,大多

采用系统追迹到探测器所能接收到的杂散光条数与入射光线条数的比值,或采用探测器接受到的杂散光能量最大值(或总计量)与入射光线入瞳处最大照度值(或总光通量)的比值来衡量光机系统杂散光抑制能力,上述比值越小说明探测器接收到的杂散光量值越少,光机系统的杂散光抑制能力越好。本系统采用点源透过率(PST)来分析杂散光的影响,PST是一个无量纲量^[15],因此,在计算探测器接收光与入射光通量的比值时,PST可忽略复杂太空环境杂光源真实值对分析结果产生的影响,其是可直接定量反映系统杂散光抑制能力的表征参数。

4.2 建模及分析

在 TracePro 中对折反射相机光机结构建模,如图 10 所示。为计算杂散光抑制能力,在软件中对系统中的反射镜、透镜光学组件,机械支撑连接组件等表面参数进行设置,利用 ABg 模型描述表面双向散射分布函数的材料属性,设置用于追迹计算的随机光线能量阈值,匹配不同角度下充满外镜筒端口进光端面的杂光源尺寸,简化相机外部壳体、框架、螺钉等不影响杂光分析的部分,以提升光线追迹效率。此外,在软件参数设置中,薄壁遮光罩表面光圈的衍射应加入探测器杂散光能量追迹统计中。为保证探测器在极限响应下有杂散光能量被记录,适当增大杂散光源的光出射度量值,以相机光轴与杂散光源法线夹角作为杂散光入射视场角,令杂散光源法线与系统 YOZ 共面。

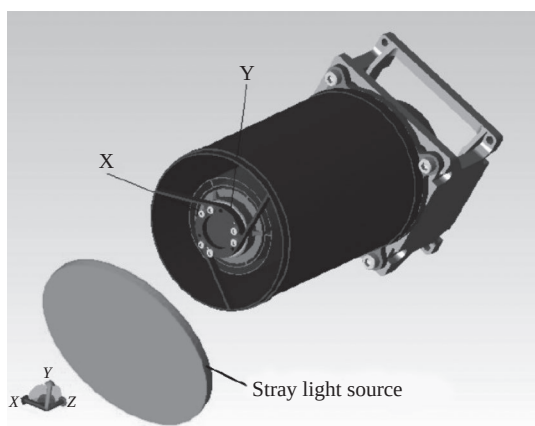


图 10 光机系统杂散光模型

Fig. 10 Stray light model of optomechanical system

在 TracePro 中,设置初始杂散光源出射光线数量为 3 万条,并进行追迹,实际探测器所在位置处设置入射能量接收器,各视场角下的 PST 数值收敛且无明显大倍率突变后,在分析模式下进行不少于 100 万条光线追迹,得到不同视场角下接收器的杂散光照度值。考虑到次镜环形遮光罩结构存在两组共 6 条均分连接筋,次镜背板也带有 3 条切向连接筋结构,在杂散光分析时,从俯仰(杂光源法线位于 YOZ 面)和水平(杂光源法线位于 XOZ 面)两个方向,每隔 1°完成一次全视场光线仿真追迹,直至垂直光轴,记录每个测试视场角探测器的最大照度值,以进行非成像视场角下的 PST 计算。俯仰及水平方向典型视场的 PST 结果如图 11 所示。

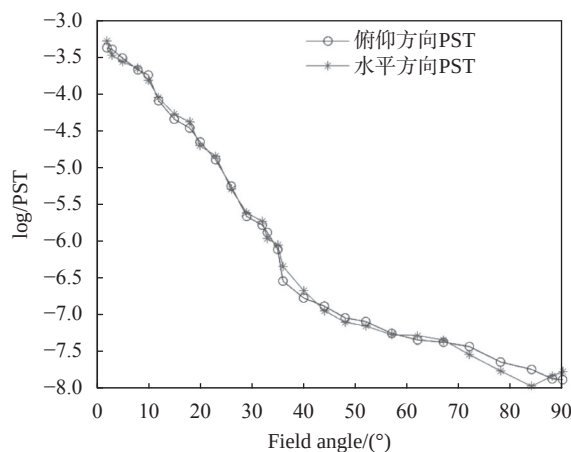


图 11 俯仰方向和水平方向的 PST 曲线

Fig. 11 PST curves of system in pitch and horizontal directions

仿真结果表明,俯仰和水平两个方向的非成像视场角下的 PST 曲线非常接近,无一次杂散光照射焦面,小投影面积的次镜遮光罩和次镜背板连接筋结构未对结果造成影响。靠近镜头最大半视场角处杂散光的 PST 约为 10^{-3} 量级, 24° 视场角下杂散光的 PST 为 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 量级,仿真视场角增大后系统的二次杂散光抑制能力逐渐增强,量值跳动点也在随机范围内,视场外杂散光 PST 值趋于平稳,在 33° 时 PST 小于 10^{-6} ,说明在有限尺寸下,仅通过次镜遮光罩设置即可对本折反射系统对地相机提供较强的杂散光抑制能力,可以保证整机在复杂照度环境下正常工作。对设计的光机系统进行加工装调后的样机如图 12 所示。



图 12 折反射光学系统样机

Fig. 12 Prototype of the catadioptric optical system

5 结 论

本文通过采用改进的 R-C 主次反射镜结构

参考文献:

- [1] 孙俊, 张世杰, 李葆华. 利用地球紫外和恒星可见光的卫星自主导航[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1192-1198.
SUN J, ZHANG SH J, LI B H. Autonomous navigation based on star light and ultraviolet earth sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1192-1198. (in Chinese)
- [2] 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.
YAN CH X, XU J, PENG Y. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(2): 289-293. (in Chinese)
- [3] 廖志波, 伏瑞敏, 宗肖颖. 星敏感器反射式遮光罩设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 66-69.
LIAO ZH B, FU R M, ZONG X Y. Design of specular baffle of star sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 66-69. (in Chinese)
- [4] 王威, 陈凡胜. 静止轨道对地观测成像系统外遮光罩设计[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0916001.
WANG W, CHEN F SH. Design of baffle of imaging system for earth observation on geostationary earth orbit[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(9): 0916001. (in Chinese)
- [5] 钟兴, 张雷, 金光. 反射光学系统杂散光的消除[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 316-318.
ZHONG X, ZHANG L, JIN G. Stray light removing of reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 316-318. (in Chinese)
- [6] 史光辉. 消除卡塞格林系统杂光的措施[J]. 光学精密工程, 1997, 5(5): 10-16.
SHI G H. Methods preventing stray light emerged in cassegrain systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(5): 10-16. (in Chinese)
- [7] 黄强. 空间光学系统的杂散光分析[J]. 红外, 2006, 27(1): 26-33.
HUANG Q. Analysis of stray light in space optical system[J]. *Infrared*, 2006, 27(1): 26-33. (in Chinese)
- [8] 吴峰, 沈为民. 折反式大视场星敏感器光学系统设计[J]. 光学技术, 2004, 30(2): 142-145.
WU F, SHEN W M. Design of a catadioptric system for star sensors with wide field of view[J]. *Optical Technique*, 2004, 30(2): 142-145. (in Chinese)
- [9] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 24-32.
PAN J H. *The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces*[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 24-32. (in Chinese)
- [10] SCHLICK C. A survey of shading and reflectance models[J]. *Computer Graphics Forum*, 1994, 13(2): 121-131.
- [11] 赵阳. 新型反射式星敏感器光学系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
ZHAO Y. New type reflective optical system design for a star sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

及球面校正透镜组的组合方式, 设计并实现了具有长焦距、大视场角、高分辨率的紧凑型折反射式光学系统, 全视场角为 3.45° , 全视场下, 传递函数在 108 lp/mm 处优于 0.2, 可适用于对角线大于 2 英寸、8 K $\times$ 6 K 的高分辨率成像。非球面主次镜光学元件补偿加工检测工艺成熟, 可常规加工的透射元件及结构组件均保证整机作为商用对地相机具有较高的性价比。受整机尺寸和重量所限, 设计了三环式的次镜遮光罩结构, 在 TracePro 软件下对整机进行建模分析。结果表明, 该次镜遮光罩具有较好的杂散光抑制能力, 可在保证整机尺寸满足要求的前提下实现杂散光抑制。

(in Chinese)

- [12] YOUNG A T. Design of cassegrain light shields[J]. *Applied Optics*, 1967, 6(6): 1063-1067.
- [13] HARVEY J E, THOMPSON A K. Scattering effects from residual optical fabrication errors[J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2576: 155-174.
- [14] VAN BEZOOIJEN R W H. SIRTf autonomous star tracker[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4850: 108-121.
- [15] 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.
- MEI CH, ZHOU S ZH, YAN P P, *et al.*. Design of an outer baffle based on scattering model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0122005. (in Chinese)

作者简介:



吕 博(1986—), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 2015 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 现为中科院长春光机所助理研究员, 主要从事各类型光学系统设计方面的研究。E-mail: jllvbo@163.com

《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国出版政府奖期刊提名奖
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊
- * 中国最具国际影响力学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路 3888 号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmgc@sina.com

网址:http://www.eope.net

定价:100.00 元/册