

空间离轴反射式 CCD 相机杂散光抑制

李可*, 王媛媛, 常君磊, 李庆林, 张楠, 张庭成, 姚林

北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 对空间离轴反射式 CCD 相机的杂散光情况进行分析, 通过对 CCD 的照度图进行分解, 对占 CCD 照度图能量较大的杂散光光路进行解析, 确定杂散光路径。根据仿真结果, 针对两个成像通道提出杂散光抑制措施并对抑制措施进行优化设计。经过再次仿真, 两个成像通道杂散光系数得到大幅降低。根据相机观测对象, 利用点源透过率(PST)作为检验杂散光抑制措施有效性的指标。当离轴角为 30° , 相机的 PST 达到 10^{-8} 数量级, 满足设计指标要求。

关键词 散射; 杂散光抑制; 双向反射分布函数; 杂散光系数; 点源透过率

中图分类号 O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.032902

Stray Light Suppression of Space Off-Axis Reflective CCD Camera

Li Ke*, Wang Yuanyuan, Chang Junlei, Li Qinglin, Zhang Nan, Zhang Tingcheng, Yao Lin

Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

Abstract The stray light from a space off-axis reflective CCD camera is analyzed. The irradiance images of CCD are obtained and decomposed. The path of stray light which occupies more energy of irradiance images is determined. According to the results of optical simulation, stray light suppression measures for two imaging channels are proposed and optimized. After re-simulation, the veiling glare indexes of the two imaging channels are greatly reduced. According to the observation object of the camera, the point source transmission (PST) is used to test the effectiveness of stray light suppression measures. When the off-axis angle is 30° , the PST of the camera reaches the order of 10^{-8} , which meets the design requirements.

Key words scattering; stray light suppression; bidirectional reflection distribution function; veiling glare index; point source transmittance

OCIS codes 290.2648; 290.1483; 280.4788

1 引言

杂散光是指在光学系统中除成像光线外到达探测器表面上的非成像光线辐射能, 以及以非正常光路到达探测器表面上的成像光线辐射能。杂散光会造成成像对比度低, 从而导致信噪比的降低以及光学系统的传递函数退化, 最终严重影响成像质量。为保证空间相机的光学性能满足设计要求, 必须对空间相机进行杂散光抑制设计, 以实现良好的成像质量。杂散光的来源一般分为两种: 1) 由太阳、月亮等自然环境入射到光学系统内部; 2) 空间相机内部的结构或者光学系统表面的散射或多次反射。一般

地, 空间相机主要采用遮光罩、挡光环等抑制措施。为抑制地气光, 空间天文望远镜采用太阳挡板设计^[1]。利用 Satellite Tool Kit 软件进行轨道仿真, 模拟太阳与月亮等外部杂散光对相机的影响^[2]。

三反离轴光学系统的特点是不存在色差和二级光谱, 适合宽谱段范围的成像, 设计灵活, 既可以利用折转反射镜折叠光路、缩短体积, 又可以使用非球面镜来获得长焦距、大视场、大孔径的组合^[3]。本文通过对空间离轴反射式 CCD 相机进行建模, 并通过蒙特卡罗法光线追迹, 确定杂散光路径, 对严重影响像质的杂散光进行抑制设计。对相机进行点源透过率(PST)计算以确定离轴的杂散光分布情况并验证

收稿日期: 2019-06-18; 修回日期: 2019-07-28; 录用日期: 2019-08-16

* E-mail: 565544473@qq.com

抑制措施的有效性。最后对相机的焦面拼接区域进行能量计算,验证 CCD 拼接的设计正确性,全面分析空间离轴反射式 CCD 相机的杂散光情况。

2 杂散光分析模型建立

根据两个面元的辐射通量转换公式,降低杂散光的途径有两个:1)减小散射表面的双向反射分布函数(BRDF)值;2)减小参与光线散射的表面积。在美国材料试验学会标准 ASTM Standard E1392—1996《规则反射面或漫射面的光散射测量角度定义》中,BRDF 的定义为:当光线均匀照射足够大的、均匀且各向同性的材料表面时材料表面的反射亮度值与入射照度值的比值。BRDF 是关于入射角、反射角和波长的函数,量纲为 sr^{-1} ,可表示为

$$X_{\text{BRDF}}(\varphi_i, \theta_i, \varphi_r, \theta_r) = \frac{I_r(\varphi_r, \theta_r)}{E_i(\varphi_i, \theta_i)}, \quad (1)$$

式中: φ 和 θ 分别为球坐标下的天顶角和方位角, i 和 r 分别表示入射和出射; $E_i(\varphi_i, \theta_i)$ 为入射角为 (φ_i, θ_i) 的入射照度值; $I_r(\varphi_r, \theta_r)$ 为出射角为 (φ_r, θ_r) 的反射亮度值。入射双向反射分布函数综合反映了目标表面在空间的光辐射特性。任何物体都在接收外界对它的光辐射的同时向外辐射各种波长的光,BRDF 有效地把这种入射和反射的光能量融合到一个量中,对物体的入射、反射并存的性能进行综合评价^[4]。由(1)式可知,不同的消光涂层的 BRDF 可由实测反射比因数得到,本文中相机的机械结构表面涂吸收系数比较高的 Z306 黑漆。利用 BRDF 测试设备进行测量,并将测量结果运用到杂散光仿真中,可提高运算的准确性和一致性。

用于分析杂散光的光学系统如图 1 所示,光学系统为三反离轴光学系统,包括主镜、次镜、三镜、分光棱镜,并分为两个成像通道。相机的机械结构由外遮光罩、相机主体、焦面结构等组成。在光学建模时,对光学系统的 RMS Radius 与 ZEMAX 软件中

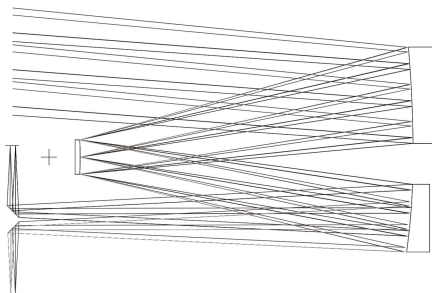


图 1 空间离轴反射式 CCD 相机光学设计

Fig. 1 Optical design of space off-axis reflective CCD camera

光学系统的 RMS Radius 进行比对,发现二者误差低于 1%。在仿真计算时,根据相机实际加工情况,相机主体结构采用相应材料的 BRDF 实测数据,以增加计算的准确性和真实性。根据实际加工情况,对相机的光学材料表面进行表面设置(表 1)。

表 1 杂散光仿真设计表面属性

Table 1 Surface properties of stray light simulation design

No.	Component	Reflectivity	Scattering coefficient	Transmissivity
1	Primary mirror	0.96	0.04	0
2	Secondary mirror	0.96	0.04	0
3	Third mirror	0.96	0.04	0
4	Reflecting prism	0.96	0.04	0
5	Main structure	BRDF measured data		

3 杂散光仿真分析

杂散光的来源分三类:第一类来自光学系统外部如太阳光或经过地球散射后进入到地球的杂散能量;第二类为红外系统的杂散辐射;第三类为经过光路中结构表面散射的非正常传播光线。由于相机用于对地观测,不存在太阳直射的情况,应重点关注第一类和第三类杂散光对相机的影响。三反离轴光学系统的杂散光主要来源于两方面:1)大角度入射到光机系统内的杂散光,经过光机结构表面到达 CCD (这部分为杂散光抑制的重点);2)相机的焦面位置附近产生的对成像质量影响较大的杂散光^[5]。

在相机初次计算时,两个通道分别用 10 亿根光线进行光学仿真(模拟光线数量越多,结果越趋于稳定)。本次仿真中均用 10 亿根光线进行光学仿真,如图 2 所示。软件基于蒙特卡罗法^[6]的光线追迹思想,利用两个 CCD 得到两幅能量照度图,对照度图上的接收光线按照传播路径进行解析和归类,根据各路径的能量大小进行排序,选择能量比例较大的杂散光光路为主要抑制对象,通过光路逆向追迹确认杂散光光路的传播路径。光源的波段设定为 450~900 nm。半视场角为 30°。成像系统的杂散光系数的计算公式为^[7]

$$\eta = \frac{i_0}{i} \times 100\%, \quad (2)$$

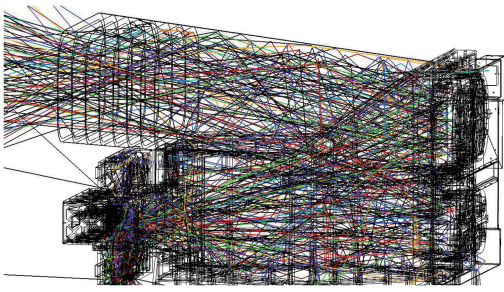


图2 空间相机杂散光仿真示意图

Fig. 2 Simulation diagram of stray light in space camera

式中: i 为成像系统像面的总光能量; i_0 为成像系统像面的杂散光光能量。经过仿真可得,相机通道一的杂散光系数为 26.72%,通道二的杂散光系数为 2.87%,相机中存在严重的杂散光,主要杂散光路径如下:

1) 光线经过主镜和分光棱镜反射后到达 CCD,此光路的能量占像面总能量的 20.72%(表 2),属于重点抑制对象。此路杂散光在 CCD 上集中分布在一

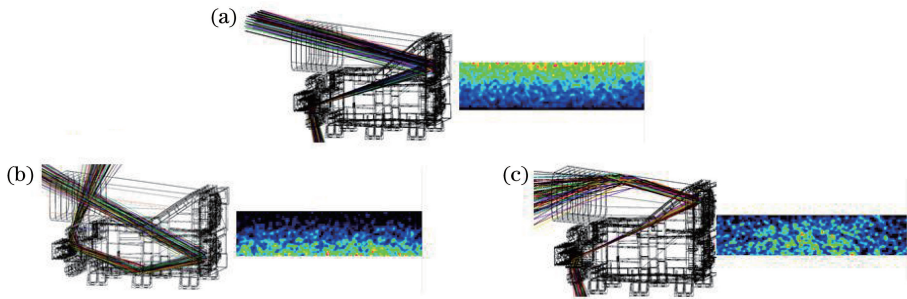


图3 杂散光路径和照度图。(a)杂散光光路 1;(b)杂散光光路 2;(c)杂散光光路 3

Fig. 3 Stray light paths and illumination diagrams. (a) Stray light path 1; (b) stray light path 2; (c) stray light path 3

4 杂散光抑制结构优化设计

几何光学中认为光是直线传播且光路是可逆的,因此对成像光线和杂散光线逆向追迹获得的路径可以作为光学系统优化的依据。杂散光抑制方法分为三种:1)改变杂散光的传播方向,如通过改变结构或增加挡光环、光阑等改变杂散光光路方向;2)改变微观表面,如采用螺纹、改变表面粗糙度等;3)改变表面涂层,如使结构表面经过发黑处理等。

理论上,在杂散光传播路径上的任意位置实施干预都可以实现抑制杂散光的目的,通常的做法是增加遮光罩的长度以抑制杂散光,但是这样会导致整个相机体积增大并且使相机质量增加,另外通过尽可能增大相机内壁的吸收率和漫反射率也可以减小杂散光的影响,但任何表面的散射率都不可能为 0,杂散光的传播路径依然存在,因此可以考虑在相机内部优化光学或结构设计。

侧,没有会聚成亮斑,如图 3(a)所示;

2) 光线以较大角度进入相机内部,经过三镜反射和相机底板的散射后,又经过分光棱镜的反射到达 CCD,此光路能量占像面总能量的 2.15%,此路杂散光在 CCD 上集中分布在一侧,没有会聚成亮斑,如图 3(b)所示;

3) 光线经遮光罩的内壁散射和主镜反射后,又经分光棱镜反射和焦面基座的散射后到达 CCD,此光路能量占像面能量的 4.40%,此路杂散光在 CCD 上分布较均匀,如图 3(c)所示。

表 2 空间相机杂散光路径汇总表

Table 2 Summary of stray light path in space camera

No.	Path	Stray light coefficient /%	
		Channel 1	Channel 2
1	Path 1	20.72	—
2	Path 2	—	2.15
3	Path 3	4.40	—

本相机的杂散光抑制设计的原则为:1)不对成像光线造成遮拦;2)尽量优化增加的杂散光抑制结构,控制结构的质量。根据以上的分析结果,应采取如下的杂散光抑制措施:1)设计光阑片。针对杂散光光路 1,在主镜和三镜之间设计一个挡光板,如图 4(a)所示;2)设计内遮光罩。内遮光罩用于抑制大角度入射到分光棱镜的杂散光,如图 4(b)所示;3)设计焦面光阑片。焦面光阑片用于抑制以大角度入射到 CCD 的杂散光,焦面光阑片中的通光孔径尺寸以成像光路为准,不对成像光路造成遮拦,如图 4(c)所示。

由于空间相机对质量的要求较为严格,应对杂散光抑制结构进行优化设计。单纯依靠光阑片或内遮光罩都无法在不对成像光路造成遮拦的情况下完全抑制杂散光,所以光阑片和内遮光罩应同时配合使用。以两个成像通道的杂散光系数为目标、抑制结构的尺寸为优化变量,对光阑片和内遮光罩的长

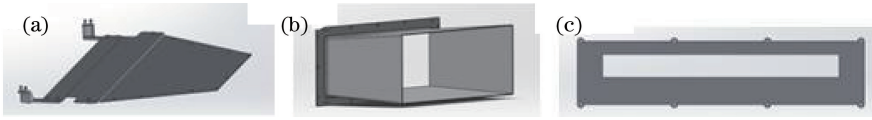


图4 杂散光抑制结构。(a)光阑片;(b)内遮光罩;(c)焦面光阑片

Fig. 4 Suppression structure for stray light. (a) Diaphragm; (b) inner shade; (c) diaphragm on focal plane

度进行优化设计。光阑片位于主镜与三镜之间,形状与相机的主体结构一致,如图5所示。根据相机的成像光路,光阑片的极限长度为440 mm。对光阑片和内遮光罩的不同长度进行杂散光系数仿真对比,计算结果表明:当光阑片的长度为430 mm和内遮光罩的长度为205 mm时,两个通道的杂散光系数最小并且抑制结构的质量较轻。通过表3可知,此时通道一和通道二的杂散光系数分别为1.20%和0.73%,CCD所接收到的光线能量分布均匀,无能量集中的杂散光亮斑,较好地抑制了相机严重的杂散光。

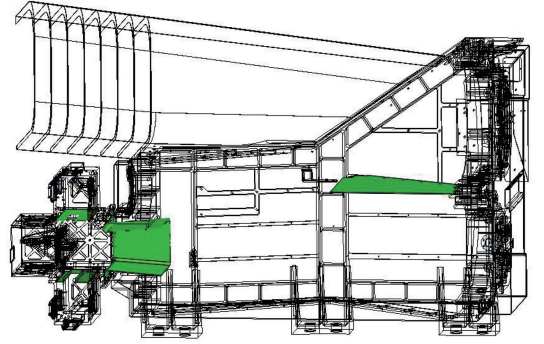


图5 杂散光抑制结构图

Fig. 5 Structural diagram for stray light suppression

表3 不同光阑片长度下的杂散光系数仿真结果

Table 3 Simulation results of stray light coefficient for different lengths of diaphragm

No.	Length of inner shade /mm	Stray light coefficient for different lengths of diaphragm /%							
		410 mm		420 mm		430 mm		440 mm	
		Channel 1	Channel 2	Channel 1	Channel 2	Channel 1	Channel 2	Channel 1	Channel 2
1	190	23.60	2.08	23.67	2.08	20.04	1.83	1.20	1.26
2	195	22.34	1.37	22.34	1.37	13.78	1.15	1.20	1.15
3	200	16.08	1.29	6.71	1.29	1.36	1.13	1.20	1.13
4	205	5.40	0.87	1.86	0.87	1.20	0.73	1.20	0.73

5 PST 分析

PST 是杂散光分析中十分重要的参数,它的定义为^[8-9]:光学系统视场外视场角为 θ 的点源目标经光学系统后在像面产生的辐照度 $E_i(\theta, \lambda)$ 与其在光学系统入瞳处辐照度 $E_o(\theta, \lambda)$ 的比值,其数学表达式为

$$X_{\text{PST}}(\theta, \lambda) = \frac{E_i(\theta, \lambda)}{E_o(\theta, \lambda)}. \quad (3)$$

PST 是光学系统对视场外点源目标的杂散光抑制能力的客观评价标准,与杂散光光源无关。通过(3)式可以看出,PST 值越小,系统对杂散光的抑制能力越强,目标对比度越高。根据对地观测目标在相机入瞳处的辐亮度、太阳在相机入瞳处的辐照度与杂散光在 CCD 上可以接收的范围^[10],可反求出当光源与光轴呈 30° 时 PST 值应达到 10^{-8} 数量级的 PST 指标。对光机结构表面属性进行设置,对相机 $5^\circ \sim 80^\circ$ 范围每间隔 2° 进行光线扫描,得到的 PST 曲线图如图6所示。

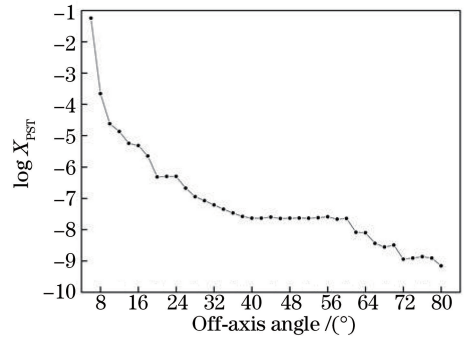


图6 PST 曲线图

Fig. 6 PST curve

通过 PST 分析验证采用抑制措施后相机的杂散光水平,并定量评价抑制措施的有效性。根据表4仿真结果,随着光源与光轴的夹角变大,PST 数值均匀下降。当光源与光轴呈 30° 时,PST 值为 8.50×10^{-8} ,满足指标要求。PST 仿真结果表明,相机对轴外视场的光线有良好的抑制能力,杂散光结构设计对杂散光抑制切实有效,可以满足使用要求。

表4 PST计算结果统计

Table 4 Statistics of calculation results of PST

No.	Off-axis angle / (°)	$E_0 / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$E_i / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$\log X_{\text{PST}}$	No.	Off-axis angle / (°)	$E_0 / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$E_i / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	$\log X_{\text{PST}}$
1	5	1.04×10^5	5.90×10^3	-1.25	20	44	5.26×10^4	1.32×10^{-3}	-7.60
2	8	1.03×10^5	2.25×10^1	-3.66	21	46	5.26×10^4	1.20×10^{-3}	-7.64
3	10	1.01×10^5	2.40×10^0	-4.62	22	48	4.99×10^4	1.16×10^{-3}	-7.63
4	12	9.83×10^4	1.32×10^0	-4.87	23	50	4.71×10^4	1.11×10^{-3}	-7.63
5	14	9.58×10^4	5.40×10^{-1}	-5.25	24	52	4.44×10^4	1.03×10^{-3}	-7.63
6	16	9.33×10^4	4.50×10^{-1}	-5.32	25	54	4.16×10^4	1.00×10^{-3}	-7.62
7	18	9.08×10^4	2.05×10^{-1}	-5.65	26	56	3.89×10^4	1.00×10^{-3}	-7.59
8	20	8.82×10^4	4.30×10^{-2}	-6.31	27	58	3.63×10^4	7.87×10^{-4}	-7.66
9	22	8.56×10^4	4.30×10^{-2}	-6.30	28	60	3.36×10^4	7.61×10^{-4}	-7.64
10	24	8.29×10^4	4.16×10^{-2}	-6.30	29	62	3.10×10^4	2.56×10^{-4}	-8.08
11	26	8.02×10^4	1.70×10^{-2}	-6.67	30	64	2.84×10^4	2.26×10^{-4}	-8.10
12	28	7.75×10^4	8.82×10^{-3}	-6.94	31	66	2.58×10^4	9.39×10^{-5}	-8.44
13	30	7.48×10^4	6.36×10^{-3}	-7.07	32	68	2.33×10^4	6.52×10^{-5}	-8.55
14	32	7.21×10^4	4.46×10^{-3}	-7.21	33	70	2.09×10^4	6.74×10^{-5}	-8.49
15	34	6.93×10^4	3.13×10^{-3}	-7.35	34	72	1.85×10^4	2.11×10^{-5}	-8.94
16	36	6.66×10^4	2.26×10^{-3}	-7.47	35	74	1.61×10^4	1.99×10^{-5}	-8.91
17	38	6.37×10^4	1.69×10^{-3}	-7.58	36	76	1.38×10^4	1.89×10^{-5}	-8.86
18	40	6.09×10^4	1.41×10^{-3}	-7.64	37	78	1.15×10^4	1.43×10^{-5}	-8.91
19	42	5.82×10^4	1.36×10^{-3}	-7.63	38	80	9.25×10^3	6.44×10^{-6}	-9.16

6 结 论

详细分析了空间离轴反射式 CCD 相机的杂散光特性。根据光学仿真结果,对相机的杂散光光路进行详细的解析,通过光线逆追的方法确定杂散光路径,并采取有效的消杂散光措施。在采取抑制措施后,相机通道一和通道二的杂散光系数分别为 1.20% 和 0.73%,体现了杂散光抑制措施的有效性。采用计算点源透过率的方法详细分析了相机对轴外视场杂散光的抑制能力,当光源与相机光轴呈 30° 时,相机的 PST 值下降到 10^{-8} 数量级,满足设计指标要求。仿真结果表明,采取抑制措施未对成像光线造成遮拦,空间离轴反射式 CCD 相机可满足使用要求。

参 考 文 献

- [1] Lu L, Wang W, Meng Q Y, et al. Distribution of earth-atmosphere radiation on key component of space based telescope-sunlight baffle[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 091104.
陆琳, 王维, 孟庆宇, 等. 地气光在空间天文望远镜关键部位: 太阳挡板的分布[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 091104.
- [2] Chen H L, Chen L, Hu X Q, et al. Effect of

external stray light on low-light imager loaded in Fengyun-3 day/night orbit meteorological satellite [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(5): 050101.

陈海龙, 陈林, 胡秀清, 等. 外部杂散光对风云三号晨昏轨道气象卫星中微光成像仪的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(5): 050101.

- [3] Zhang K K, Ruan N J, Fu D Y. 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.
- [4] Song W, Miao X H, Shi J, et al. The study of additivity of scattering spectrum based on BRDF theory [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(4): 1027-1032.
宋薇, 苗馨卉, 石晶, 等. 基于 BRDF 理论的散射光谱加和性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(4): 1027-1032.
- [5] Yan C 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.
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.
- [6] Deng C. Analysis on stray light elimination for space solar telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 715-720.
邓超. 空间太阳望远镜消杂散光分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(4): 715-720.
- [7] Zhong X, Zhang L, Jin G. Stray light removing of reflective optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 316-318.
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.
- [8] Xu L, Zhao J K, Xue X, et al. PST research and measurement of lunar-based optical telescope stray light[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1289-1295.
徐亮, 赵建科, 薛勋, 等. 月基望远镜杂散光 PST 研究与测试[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(4): 1289-1295.
- [9] Liao Z B, Fu R M, Zong X Y. Design of specular baffle of star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 66-69.
廖志波, 伏瑞敏, 宗肖颖. 星敏传感器反射式遮光罩设计[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(1): 66-69.
- [10] Li X P, Sha S C, Hu T L. Suppression of stray light for long focal length off-axis three-mirror optical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(11): 2603-2608.
李晓平, 沙晟春, 胡亭亮. 长焦距离轴三反光学系统杂散光的抑制[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11): 2603-2608.