

# 星光半物理实验平台遮光罩设计新方法

刘文东 杨 博

(北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191)

**摘要** 详细论述了星光半物理实验平台用遮光罩抑制实验环境杂光的一种新的设计思想,用以最大程度地还原星光模拟器产生的模拟星光与周围暗背景的对比度,从而大大提高了实验检测精度。根据实验系统原理推导出一整套设计公式,并提出利用程序递推计算遮光罩内部挡光环位置和尺寸的新方法。在 TracePro 杂光分析软件中建立遮光罩实验模型,对遮光罩径向成  $1^\circ \sim 85^\circ$  之间的 18 个偏角的平行光源进行杂光抑制情况模拟,通过计算得到不同偏角遮光罩杂光抑制能力曲线。仿真结果表明,杂光偏角为  $25^\circ$  以上时,光通量抑制比下降到  $10^{-3}$  量级。加工出实物在半物理仿真平台上进行检验,实际拍摄结果显示,以该方法设计的遮光罩能够有效抑制环境中的杂散光,还原星光模拟器的对比度,使 CCD 相机能够准确观测到 6 等以上的星,保证了实验系统的可靠性。

**关键词** 光学设计;几何光学;遮光罩;杂散光分析;半物理实验平台;星光导航

**中图分类号** O435.1;V448.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.092203

## Lens-Hood Design of Starlight Semi-Physical Experimental Platform

Liu Wendong Yang Bo

(School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** In order to restore the contrast of celestial simulator-generated starlight with the surrounding dark background, improve the recognition rate of the star map and navigation solution accuracy, a new design of the lens hood for celestial navigation simulation system to decrease environmental stray light is discussed detailedly. Design formula is derived in accordance with its principles, and a new method to calculate the position and size of the vane inside the hood with computer program is proposed. Using the baffle model established in TracePro, 18 different deviation angles between  $1^\circ \sim 85^\circ$  of parallel light source are simulated. The stray light suppression curves for different deviation angles are obtained. Results show that above  $25^\circ$ , suppression ratio of the luminous flux decreases to the order of magnitude of  $10^{-3}$ . A physical test is carried out on semi-physical simulation platform. The actual results show that this design of the lens hood can decrease the environmental stray light and effectively restore the contrast of starlight simulator.

**Key words** optical design; geometrical optics; lens hood; stray-light analysis; semi-physical experimental platform; celestial navigation

**OCIS codes** 220.4830; 080.2740; 350.1260; 000.2170

## 1 引 言

随着星传感器精度的不断提高,星光定位导航技术已日趋成熟,其被动、隐蔽和导航误差不随时间积累等特点越来越引起国内外专家学者的重视。然而,由于造价、技术条件等因素的限制,频繁进行飞行试验对星光导航方法测试和研究是不现实的,因此国内外通常通过实验室半物理仿真实验平台<sup>[1]</sup>进行研究。其中,星光模拟器利用显示灰度等级的不同来区分恒星星等<sup>[2]</sup>。由于星光模拟器本身具有背景亮度,因而模拟的星光与在宇宙中完全黑暗背景下观测到的星光有所不同。模拟产生的星光对比度受到显示器背景亮度的限制。另一方面,相机探测到的星光与背景的对比度也受到实验环境杂散光的影响,因而必须在星光模拟器与

收稿日期: 2012-06-11; 收到修改稿日期: 2012-06-15; 网络出版日期: 2012-07-20

作者简介: 刘文东(1987—),男,硕士研究生,主要从事星光折射导航方面的研究。E-mail: liuwendong15@163.com

导师简介: 杨 博(1963—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事天文导航方面的研究。

E-mail: yangbo@buaa.edu.cn

相机之间加入遮光罩抑制环境中的非成像光线,最大程度地还原星光模拟器模拟的星光与背景的对比度,复现相机所能观测到的真实星等,保证星光模拟半物理仿真实验系统的可靠性。

对于宇宙中的星敏传感器或空间相机,日、月等强光源的光线在非成像区域会对 CCD 像面造成干扰。国内外用于此类航天器上的遮光罩已进行了大量的设计研究<sup>[3~5]</sup>。然而,对于地面半物理仿真实验台用遮光罩的设计研究仍属空白<sup>[6]</sup>。针对这一问题,本文提出一种新的设计方法,设计的遮光罩能有效减轻杂散光的影响。

## 2 星光半物理仿真实验平台

实验室星光半物理仿真实验平台如图 1 所示。实验系统功能划分为三个部分:轨道产生与星光模拟部分、星图采集处理与质心提取部分和星图匹配与导航解算部分。

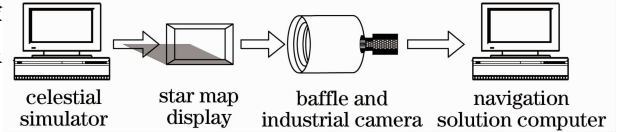


图 1 星光半物理仿真平台简图

Fig. 1 Starlight semi-physical simulation experimental platform

## 3 遮光罩设计

### 3.1 遮光罩设计原理

星光半物理仿真实验平台如果采用封闭式设计,要求星光模拟器、平行光管、CCD 相机镜头全部包含在封闭空间内,占用体积大,不利于移动、更换和调试设备。而采用开放式设计,则必须设计遮光罩,用以抑制室内灯光等杂光。

遮光罩的设计思想是: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。采用几何光学原理设计遮光罩<sup>[7]</sup>。

对于星光半物理仿真实验平台,星敏传感器视场应完全包含星图显示屏,故遮光罩的直径  $d$  已经确定,为星图显示屏的内接圆直径。设系统视场角为  $\alpha_{\text{FOV}}$ ,则遮光罩长度应为  $\frac{d}{2} \cot \frac{\alpha_{\text{FOV}}}{2}$ 。

考虑到要避免杂光光线在遮光罩内壁反射从而影响成像,同时尽可能多地增加杂光光线在遮光罩内部的反射次数来衰减杂光能量,在遮光罩内部设计多级挡光板,如图 2 所示。第一级挡光板的位置取决于希望抑制的杂光入射角。当希望抑制的杂散光源(例如太阳)入射角为  $\varphi_1$  时,根据图 2 可推得

$$d \tan \varphi_1 = l(1) \tan \varphi_1 + l_1 \cot \frac{\alpha_{\text{FOV}}}{2}, \quad (1)$$

$$x = l \cot \frac{\alpha_{\text{FOV}}}{2}, \quad (2)$$

由(1)式得到遮光罩内第一级挡光板的高度  $l_1$  为

$$l_1 = \frac{d \tan \varphi_1}{\tan \varphi_1 + \cot \frac{\alpha_{\text{FOV}}}{2}}, \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式得到第一级挡光板距离遮光罩最右端距离  $x_1$  为

$$x_1 = \overline{NP} = l_1 \cot \frac{\alpha_{\text{FOV}}}{2}.$$

当杂光入射角小于  $\varphi_1$  时,杂散光有可能通过第一级挡光板前的内壁反射影响像面,故需设计第二级挡光板。第二级挡光板的极限位置如图 2 所示,光线经过第二级挡光板边缘经遮光罩内壁反射刚好被第一级挡光板边缘遮挡,此时,入射角在  $\varphi_1$  到  $\varphi_2$  之间的杂光不会对像面构成影响。根据光的反射定律,推出如下关系:

$$a = x_1 - d \tan \varphi_2, \quad (4)$$

$$\frac{b}{l_2} = \frac{a}{l_1}, \quad (5)$$

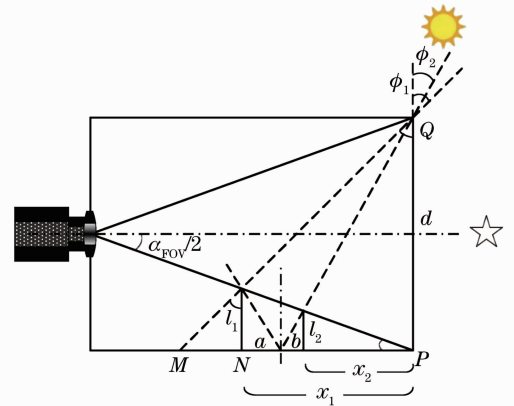


图 2 遮光罩内部尺寸设计图

Fig. 2 Internal-size design diagram of the lens hood

$$\tan \frac{\alpha_{\text{FOV}}}{2} = \frac{l_1 - l_2}{a + b}, \tag{6}$$

$$\tan \varphi_2 = b/l_2, \tag{7}$$

联立(3)~(7)式解算遮光罩内第二级挡光板的高度  $l_2$  为

$$l_2 = \frac{l_1 + d - \tan \frac{\alpha_{\text{FOV}}}{2} x_1}{l_1 + d - \tan \frac{\alpha_{\text{FOV}}}{2} x_1} l_1, \tag{8}$$

将(8)式代入(2)式得

$$x_2 = l_2 \cot \frac{\alpha_{\text{FOV}}}{2}, \tag{9}$$

$x_2$  为第二级挡光板至遮光罩最右端得距离。依此类推,可得以下各级挡光板的高度和位置信息

$$l_{i+1} = \frac{l_i + d - \tan \frac{\alpha_{\text{FOV}}}{2} x_i}{l_i + d - \tan \frac{\alpha_{\text{FOV}}}{2} x_i} l_i, \tag{10}$$

$$x_i = l_i \cot \frac{\alpha_{\text{FOV}}}{2}. \tag{11}$$

编程递推,当挡光板与最右端距离  $x_{i+1}$  为负数时停止计算。此时,第  $i$  级挡光板即为最后一级挡光板。

### 3.2 遮光罩内壁及挡光板表面设计要求

虽然入射角在  $\varphi_1 \sim \varphi_2$  之间的杂散光并不能直接作用于成像面,但遮光罩内壁或是挡光板的反射仍有可能使其影响成像。以一级、二级挡光板之间的光路为例分析遮光罩内壁及挡光板的表面处理要求。

考虑到杂散光经过几次反射散射能量得到有效衰减,在分析挡光板表面光路时,假定经过四次反射散射的光线能量已经可以忽略不计。

由图 3、4 可以看到,只有光线④到③之间的杂散光经历一级挡光板右侧 VN 段-内壁 NS 段-二级挡光板左侧 XT 段,反射回像面方向,可能对成像造成影响,其余的角度光线均不会反射回像面方向。根据上述分析,一级挡光板右侧 VN 段、二级挡光板左侧 XT 段需要增加吸光涂层,其余部分可抛光处理增加反光度。

由图 5 中几何关系可解得

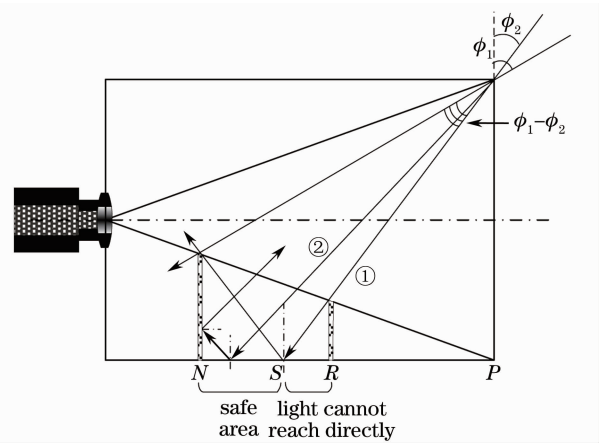


图 3 遮光罩内壁光路分析

Fig. 3 Light path of the inner wall

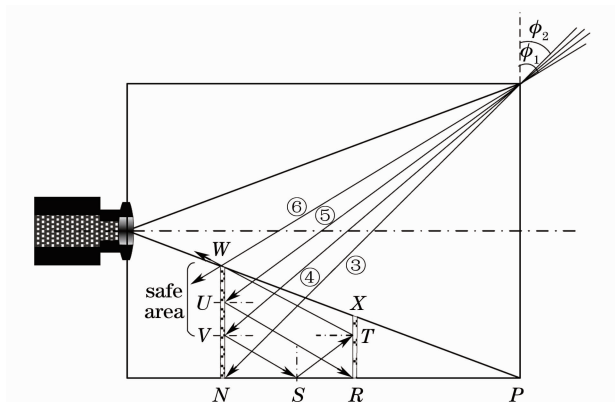


图 4 挡光板表面光路分析

Fig. 4 Light path of the baffle surface

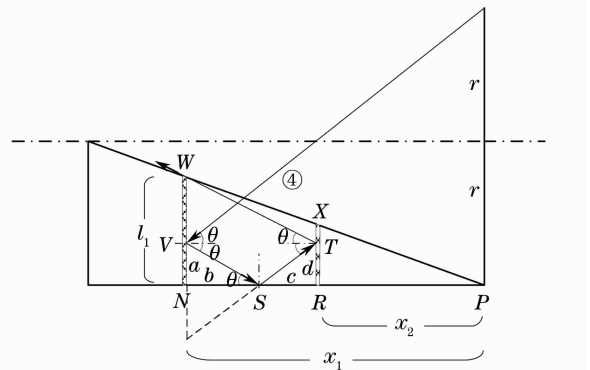


图 5 挡光板表面处理区域

Fig. 5 Light barrier surface treatment area

$$\theta = \arctan \frac{2r + l_1}{3x_1 - 2x_2}, a = \frac{(4r - 2l_1)x_1 - 4rx_2}{3x_1 - 2x_2},$$

$$d = \frac{(2l_1 - 2r)x_1 - (l_1 - 2r)x_2}{3x_1 - 2x_2}.$$

依此类推,可以将每级挡光板需要重点处理的表面区域递推出来。

### 3.3 遮光罩参数确定

本文实验台的具体参数为:相机镜头尺寸  $\Phi 40$  mm,焦距  $f=12.833$  mm,  $\alpha_{\text{FOV}}=46.398^\circ$ 。星图显示屏长400 mm、宽300 mm,根据上节推导结果,可确定遮光罩长度为364 mm,直径为300 mm。遮光罩抑制杂光的入射角与一级挡光板上的通光孔直径密切相关,通光孔直径越小抑制杂散光的能力越强。在保证相机视场不受影响的情况下,通光孔直径与抑制杂光入射角的关系如图6所示。

图6中,三角形点处通光孔径开始影响视场,可以看到能被抑制的杂散光最大入射角为  $60^\circ$ ,为了尽可能增大杂光抑制角,同时避免遮光罩的实际加工误差影响视场,本文选取  $55^\circ$  作为杂散光入射角抑制角。 $55^\circ \sim 90^\circ$  的光线被认为是平行光被镜头接收。其设计参数为:

挡光板与遮光罩最右端距离[266.742 160.5704 96.9089 52.3641 17.1741](单位 mm),每块挡光板的孔径为[73.5495 170.9562 211.6116 230.4832 239.1399](单位 mm)。

## 4 光学仿真分析

在模型的处理上,设置挡光板右壁及遮光罩内壁参数如下:光学反射面的双向反射分布函数(BRDF)<sup>[8]</sup>参量取为  $A=6.385 \times 10^{-6}$ ,  $B=0.0001$ ,  $g=2.172$ 。吸收率0.1,镜面反射率0.9。其余部位表面特性按黑漆处理。

对于空间光学系统,星敏感器在工作时视场外的太阳、地球等强光源发出的光都是遮光罩需要抑制的杂光。由于星体体积都远大于星敏感器感光面,因而这些杂光干扰都可以看作是星敏感器光轴成一定角度的平行光源。本文采用具有一定偏角  $\theta$  的平行光源与垂直于星敏感器入射的平行光源落在焦平面上的光通量的比值来衡量遮光罩对杂光光源的抑制程度。设计干扰测试方法为:在遮光罩开口方向上方放置大小与遮光罩口径相同的栅格光源,光线为7351条,设置光源的光线方向使栅格光源光线刚好完全投射到遮光罩中,光线与遮光罩径向的夹角  $\theta$  用于区别不同方向的入射光线,栅格光源的安放位置可以通过图7关系来确定。

本次实验对  $1^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ$  和  $85^\circ$  共18个偏角进行干扰再现。根据干扰光线角度要求,栅格光源与遮光罩最后端距离如下(单位 mm):17895,3861.2,2099,1506,1205,1020,894,801,729,670,621,578,541,507,475,446,418,391。以  $45^\circ$  干扰光线为例,光线追迹并隐藏遮光罩实体的结果如图8所示。其中遮光罩最左端表面中心圆盘区域为感光面,最终得到的不同偏角杂光抑制程度曲线如图9所示。

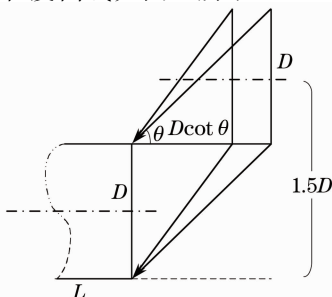


图7 栅格光源放置位置

Fig.7 Position of the grid light source

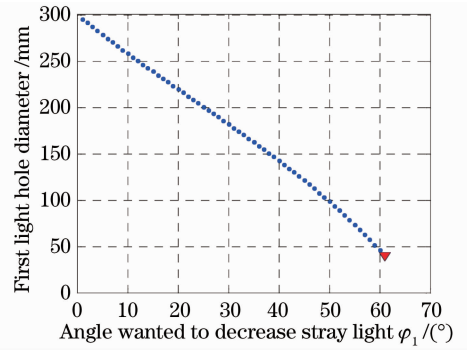


图6 通光孔直径与杂光抑制角关系

Fig.6 Relation between light hole diameter and stray-light suppression angle

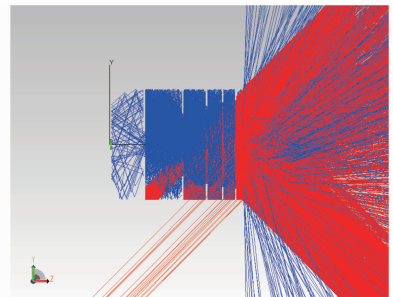


图8 干扰光线追迹图

Fig.8 Tracing of the stray light

可以明显地看到,当杂光偏角达到  $25^\circ$  以上时,到达感光面的杂光光强下降两个数量级,说明在杂光抑制方面遮光罩起到明显的作用,同时又不影响星敏感器视场,满足了星光半物理实验平台的技术要求。

## 5 物理实验验证

星光模拟半物理仿真实验平台实物如图 10 所示。图中轨道发生计算机①产生模拟星光数据,经由星图显示器②、遮光罩③被工业相机④接收,最后由导航解算计算机⑤实时解算出位置信息。其中,由星光模拟器生成的恒星包含大小、灰度信息,生成的包含 1~8 等星的星图经由遮光罩被 CCD 相机拍摄。其结果在 Matlab 软件中经图像处理得到灰度分布三维(3D)图,如图 11 所示。

图 11 中显示,星光模拟器产生的恒星之间的大小、灰度差异被 CCD 敏感器探测到,被遮光罩抑制的室内环境杂散光与星光之间具有较大的对比度,对恒星质心提取基本不会造成影响。

同时,由图 12 所示二维(2D)结果可以看到,遮光罩将环境杂散光抑制在一个很小的范围内,使 CCD 相机能探测到的最低星等为 6 等。

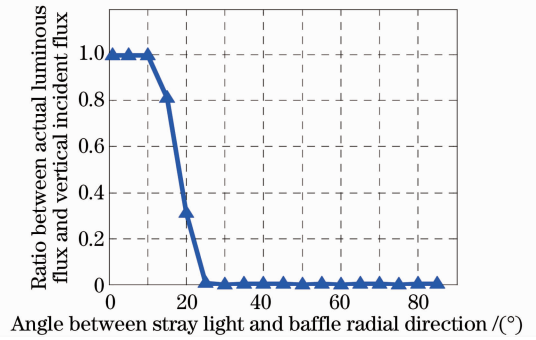


图 9 不同偏角杂光抑制程度曲线

Fig. 9 Stray light suppression curve for different deviation angles

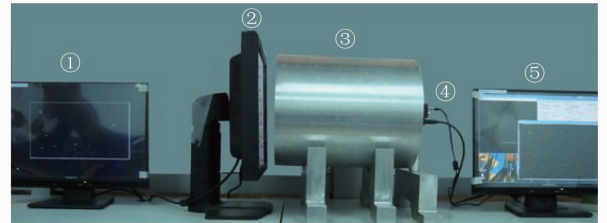


图 10 星光半物理仿真实验台

Fig. 10 Starlight semi-physical experimental platform

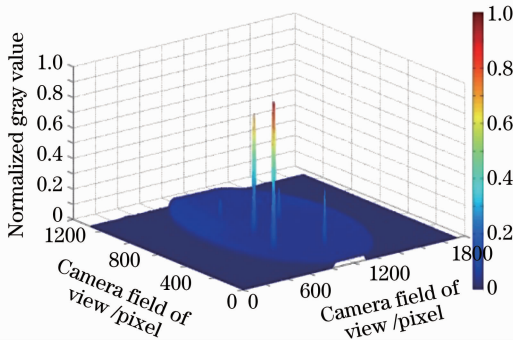


图 11 不同星等的恒星拍摄结果(三维)

Fig. 11 Imaging results of different magnitude star (3D)

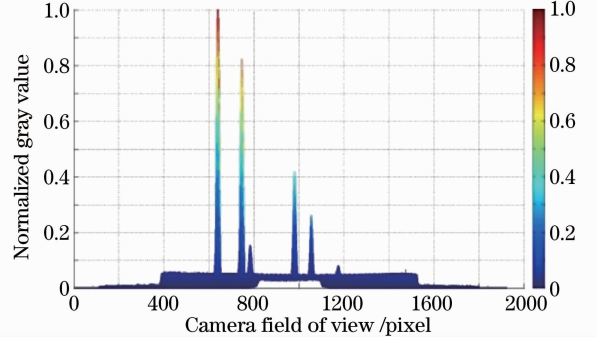


图 12 不同星等恒星成像平面图

Fig. 12 Imaging results of different magnitude star (2D)

## 6 结 论

根据仿真实验平台环境要求,结合星敏感器遮光罩设计原理,提出了适用于地面半物理仿真实验系统的相机遮光罩设计方案,具有一定的实际应用价值。实验结果证明:所设计的遮光罩对于与遮光罩径向偏角达到  $25^\circ$  以上的杂光光线,光通量抑制比可达到  $10^{-3}$  量级。实际安装后,CCD 相机准确观测到的最低星等能够达到 6 等。

## 参 考 文 献

- 1 Quan Wei, Fang Jiancheng. Hardware in-the-loop simulation of celestial navigation system[J]. *J. System Simulation*, 2006, **18**(2): 353~358  
全 伟, 房建成. 天文导航系统半物理仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, **18**(2): 353~358
- 2 Tian Yulong, Wang Guangjun, Fang Jiancheng *et al.*. A half-physics simulation method for simulative star light[J]. *China Aerospace*, 2004, (4): 25~26  
田玉龙, 王广君, 房建成 等. 星光模拟的半物理仿真技术[J]. 中国航天, 2004, (4): 25~26

- 3 Liao Zhibo, Fu Ruimin, Zong Xiaoying. 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. 星敏感器反射式遮光罩设计[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(1): 66~69
- 4 Li Yun, Xiang Libin, Li Libo. Design and simulation of the baffle of a new type space camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(7): 41~44  
李 芸, 相里斌, 李立波. 一种新型空间相机遮光罩的设计与仿真[J]. *光电工程*, 2010, **37**(7): 41~44
- 5 Huang Zhiqiang, Xing Tingwen. Principle and realization of baffle and vane's programmable design[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(4): 119~123  
黄志强, 邢廷文. 遮光罩和挡光环程序化设计的原理及实现[J]. *光电工程*, 2006, **33**(4): 119~123
- 6 Fang Jiancheng, Ning Xiaolin, Tian Yulong. Autonomous Celestial Navigation Principles and Methods[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006. 253~254  
房建成, 宁晓琳, 田玉龙. 航天器自主天文导航原理与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. 253~254
- 7 Zou Gangyi, Fan Xuewu. Off-axis three-reflection telescope hood design and stray light analysis[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
- 8 Yan Peipei, Fan Xuewu. Optical design and stray light analysis of R-C system[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(4): 214~218  
闫佩佩, 樊学武. R-C 光学系统设计及杂散光分析[J]. *红外技术*, 2011, **33**(4): 214~218