

星载遥感器的挡光环优化设计与分析

杜保林¹ 李 林¹ 黄一帆¹ 姜震宇¹ 赵苑苑²

(¹ 北京理工大学光电工程系, 北京 100081; ² 河南科技大学经济与管理学院, 河南 洛阳 471003)

摘要 空间光学系统的工作环境非常恶劣,特别是在卫星本地时间的白天。太空中的太阳光、地气光以及各种热辐射构成了严重的背景噪声,威胁着空间光学系统的成像质量,甚至导致空间光学系统因无法成像而失去探测能力。挡光环的出现大大改善了背景噪声带来的不良影响,可以直接阻挡视场外杂光,从而影响着系统的杂光抑制能力。然而,由于挡光环的尺寸较小,当光线入射到挡光环的边缘时就会产生严重的衍射效应,这种衍射效应对改善表面材料的散射特性起了反作用。因此,怎样设计结构合理的挡光环成为了遮光罩设计中的重要环节。本文将机械设计中的聚焦组合创新方法应用到空间光学系统的挡光环优化设计中,提出了新型结构的挡光环。通过与已有挡光环的结构形式做比较,经计算机仿真,验证了该新型结构挡光环的抑制杂散光的优越性,为我国星载遥感器的挡光环设计提供一种新的方法。

关键词 空间光学; 星载遥感器; 挡光环; 杂散光

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0233

Optimum Design and Analysis of Vane in Satellite Remote Sensor

Du Baolin¹ Li Lin¹ Huang Yifan¹ Jiang Zhenyu¹ Zhao Yuanyuan²

¹ Department of Opto-Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
² School of Economics and Management, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China

Abstract Space optical systems always work in very bad conditions. The sunlight, airlight and various radiation, coming from the space constitute serious background noise of image plane in space optical system. This noise can reduce imaging quality, and even leads to detectivity losing of satellite remote sensor because of unable imaging. Because it can improve the bad influence coming from background noise and prevent directly stray-light out of the field of view, the vane has the ability to raise the ability of suppressing stray light. However, diffraction effect will occur when rays arrive the edge of vanes due to the small size of vanes. So, how to design reasonable vane is very important in baffle designing. A new type of vane which is produced by using focus-assemble innovation method is proposed in this article. Having compared with existing vanes and simulated, this new type of vane is proved to be predominant in stray light suppressing.

Key words space optics; satellite remote sensor; vane; stray light

1 引 言

星载遥感器的成像质量受到杂散光的影响。杂散光,也称为杂光或杂散辐射,是指扩散于光学系统像面或探测器接收面上的非目标光线或非成像光线辐射能。这种非成像光能量包括来自于系统外部的

辐射源(如太阳)和内部辐射源(如光学元件、结构件等)以及散射表面的非成像光能量。它会降低像面的对比度和调制传递函数,使整个像面的层次减少,清晰度变坏,甚至形成杂光斑点,严重时使目标图像被杂散光噪声所淹没^[1,2]。

基金项目: 国家 863 计划(2006AA01Z339)资助课题。

作者简介: 杜保林(1979—),男,博士研究生,主要从事杂散光理论、特性及分析方法和抑制措施,遮光罩和挡光环设计等方面的研究。E-mail: dubaolin@bit.edu.cn

导师简介: 李 林(1957—),男,教授,主要从事传感器技术及实验仿真,光机电一体化技术研究,近代光学与光电检测技术及仪器方面的研究。E-mail: li_lin@263.net

在星载遥感器中,系统的外部辐射源可能由物空间直接射到像面,是影响光学系统或探测器成像质量的重要杂散辐射。这种杂散辐射源,可以通过遮光罩以及加在遮光罩内部的挡光环加以消除。在星载遥感器的发展中,以美国和俄罗斯为首的军事强国走在世界最前沿,星载遥感器的遮光罩设计也已日臻完善起来,出现了各种改进方法^[3~5]。而挡光环的设计则被人们忽视了,只有少数文献中提到了挡光环的改进设计方法^[6~9]。挡光环既可以直接阻挡系统的外部杂散辐射,也可以抑制视场内的成像光束经主镜和次镜的漫反射或散射以及视场外的光线经遮光罩筒壁漫反射产生的杂散辐射。然而,由于挡光环的尺寸较小,当光线入射到挡光环的边缘时就会产生严重的衍射效应,这种衍射效应对抑制杂散辐射起了反作用。因此,怎样设计结构合理的挡光环成为了遮光罩设计中的重要环节。

本文将机械设计中的聚焦组合创新方法应用到空间光学系统的挡光环优化设计中,提出了新型结构的挡光环。通过与已有挡光环的结构形式作比较,经计算机仿真,验证了该新型结构挡光环的抑制杂散光的优越性,为我国星载遥感器的挡光环设计提供一种新的方法。

2 挡光环设计旧方案

在以往挡光环的设计中,设计者主要寻找它在遮光罩内的合理的布置方式来抑制杂散光,而忽略了挡光环本身结构的杂散光抑制能力。研究发现,挡光环的结构形式对杂散光抑制效果也起关键作用。因此,在分析了旧结构形式的挡光环抑制杂散光的基础上,提出了结构更加合理、对杂散光抑制能力更强的新型挡光环结构形式。图 1~图 3 为三种典型的旧结构形式挡光环^[8~10]。



图 1 直面型挡光环
Fig. 1 Rectangulate vane



图 2 斜面型挡光环
Fig. 2 Trapezoidal vane



图 3 圆弧型挡光环
Fig. 3 Crown face vane

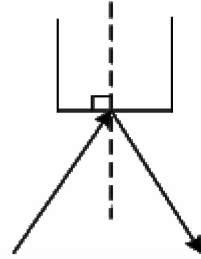


图 4 直面型挡光环边缘处的光线
Fig. 4 Rays at the edge of rectangulate vane

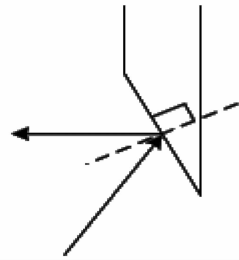


图 5 斜面型挡光环边缘处的光线
Fig. 5 Rays at the edge of trapezoidal vane

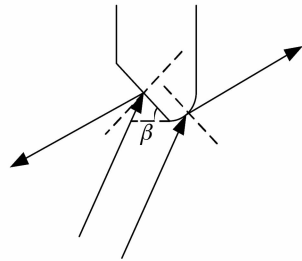


图 6 圆弧型挡光环边缘处的光线
Fig. 6 Rays at the edge of crown face vane

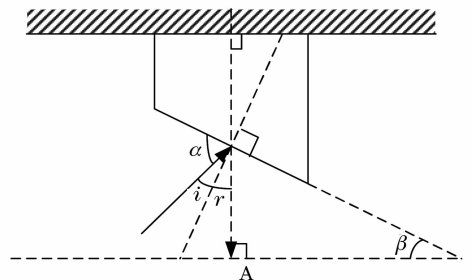


图 7 斜面型挡光环抑制杂光的角度示意图
Fig. 7 Sketch map of suppressing stray-light angle of trapezoidal vane

用作图法,以上三种旧方案挡光环抑制杂散光的示意图如图 4~图 6 所示,假设水平向右为镜筒

内部的方向。

由图 4 可知,任何角度和方向的入射光线入射到挡光环边缘时,光线都会向镜筒内部方向反射;由图 7 可知,位于垂直于筒壁的垂线 OA 右侧的反射光线指向镜筒的内部,也即反射角大于 r 的反射光线有可能会经镜筒进入光学系统,并最终到达像面影响成像质量。图 7 中 α 角范围内的角度是挡光环斜面无法抑制杂散光的角度。根据示意图可知

$$\alpha = 90^\circ - i, \quad i = r, \quad r = \beta, \quad \alpha = 90^\circ - \beta,$$

即这种斜面型挡光环损失的杂散光抑制的角度范围为 $90^\circ - \beta$, β 为挡光环斜面与镜筒壁之间的夹角。由图 6 可知,该圆弧型挡光环损失的杂散光抑制范围是圆弧区域以及斜面处的 $90^\circ - \beta$ 角度范围。

3 挡光环设计新方案

3.1 聚焦组合法

在机械设计中,聚焦组合是常用的创新设计方法。聚焦组合法的主旨是以待解决的特定问题为中心,广泛地寻求与解决问题有关的各种已知的技术手段,最终形成一种或多种解决这一问题的综合方案^[11]。聚焦组合法示意图如图 8 所示。

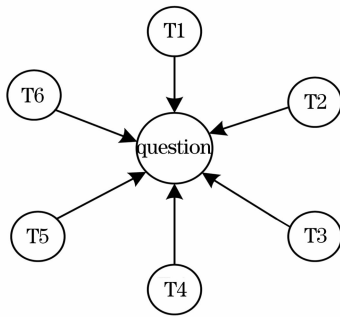


图 8 聚焦组合法

Fig. 8 Focus-assemble innovation method

3.2 设计新方案

从挡光环旧设计方案的杂散光抑制示意图(图 4~图 7)可以看出,面型是影响挡光环抑制杂散

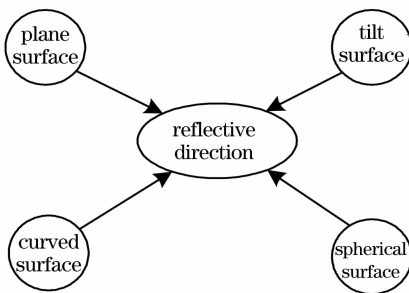


图 9 新方案的聚焦组合法

Fig. 9 Focus-assemble method of new proposal

光效果的重要因素,所以在新的设计中应找到一个面型使得入射到挡光环边缘的光线尽可能向镜筒外部反射。根据这一思想,明确待解决的核心问题是反射光线的方向,结合各种几何结构面型,应用机械设计中的聚焦组合创新方法(如图 9),提出球形曲面结构的挡光环(图 10)。

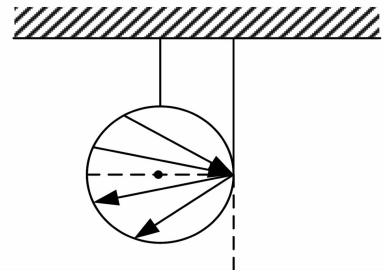


图 10 球形曲面光线反射示意图

Fig. 10 Sketch map of reflective rays on spherical face

由于经球心的入射光线都与球面的法线重合,所以只有经球面的入射光线,其反射方向才与入射方向不同。但是,球面的每一条法线都把球面平分,所以经球面的入射光线,其反射光线也一定交于球面,且与入射光线分别位于两个半球内。因此,只要保证挡光环内侧边缘与球体相切,形成的面型就满足反射光线指向镜筒外部的要求,最终形成符合要求的挡光环如图 11 所示。

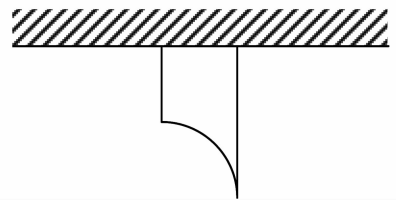


图 11 球面结构的挡光环示意图

Fig. 11 Sketch map of spherical face vane

4 挡光环的光线模拟及结果

将三种已有结构的挡光环和新结构的挡光环分别在 Tracepro 中建立对应的镜筒模型,来模拟实际的杂散光抑制效果。假设四个镜筒大小和通光口径都相同,挡光环按照梯度形式布置,光线追迹初始条件为:光线数 4681 条,初始能量 4681 W,镜筒和挡光环所有表面的吸收率为 80%,透射率为 0,表面反射率为 20%。

根据四种镜筒模型的实际光线追迹结果(图 12~图 15)可知,带有球形曲面挡光环的镜筒抑制杂散光的能力最好,斜面型的次之,圆弧型的较次之,直面型的杂散光抑制能力最差。图 15 中镜筒出口处杂

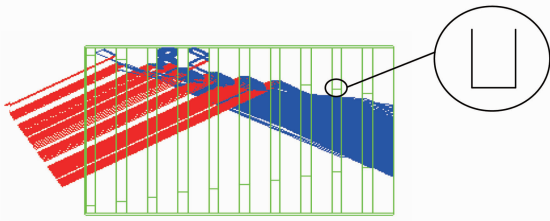


图 12 直面型挡光环的光线追迹结果镜筒出口处杂散光能量为 115.73 W

Fig. 12 Trace result of rectangulate vane (energy of stray-light at the exit of drawtube is 115.73 W)

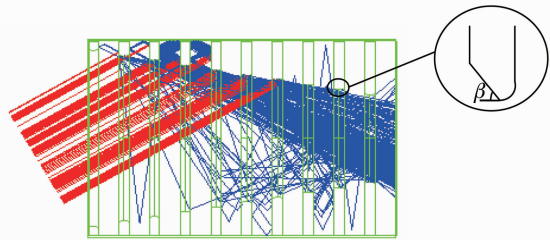


图 13 圆弧型挡光环的光线追迹结果镜筒出口处杂散光能量为 40.455 W

Fig. 13 Trace result of crown face vane (energy of stray-light at the exit of drawtube is 40.455 W)

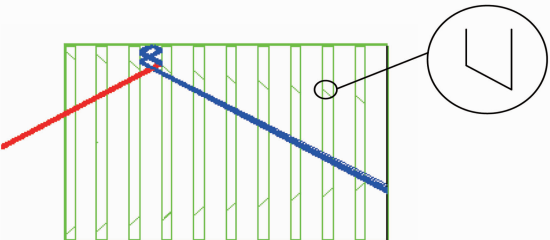


图 14 斜面型挡光环的光线追迹结果镜筒出口处杂散光能量为 0.01056 W

Fig. 14 Trace result of trapezoidal vane (energy of stray-light at the exit of drawtube is 0.01056 W)

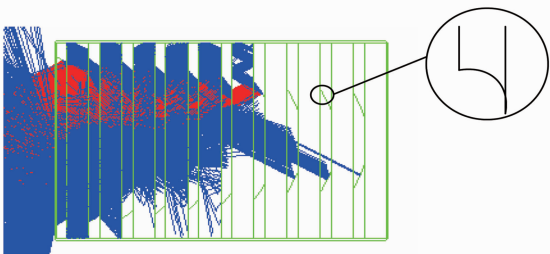


图 15 球形曲面挡光环的光线追迹结果镜筒出口处杂散光能量为 0

Fig. 15 Trace result of spherical face vane (energy of stray-light at the exit of drawtube is 0)

散光能量为 0,这是因为为了减少光线追迹的时间,在光线追迹初始条件中光线的数量设置的比较少,如果把光线数量设置的更多一些,出口处的杂散光能量

则会大于 0,但是在四种模型的初始条件设置一样的情况下对分析杂散光抑制能力的强弱是没有影响的,不会影响他们杂散光抑制能力高低趋势的。

5 结 论

新结构形式挡光环抑制杂散光的能力优于三种旧结构形式的挡光环。从理论上分析,主要是入射到新型挡光球形曲面上的入射光线,其反射光线的方向总体上都指向镜筒的外部,远离了光学系统或者探测器的成像面。本文重点分析挡光环的面型对杂散光的抑制效果,即光线的反射方向,并且上一级挡光环的出射光线变成了下一级挡光环的入射光线,所以在理论和仿真分析中没有考虑光线的散射,而假设反射面都是镜面反射。这样假设增大了误差,但是并不影响横向对比四种挡光环抑制杂散光的能力。

参 考 文 献

- 1 Song Ning, Han Xinzhi, Li Runshun. Design and analysis of the baffle of the Ritchey-Chretien (R-C) system used in space remote sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 821~826
宋 宁,韩心志,李润顺等. 航天遥感器里奇-克雷蒂安系统遮光罩的设计和仿真[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6): 821~826
- 2 Li Ting, Yang Jianfeng, Ruan Ping. Baffle design and simulation of R-C system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 332~335
李 婷,杨建峰,阮 萍等. R-C 系统的遮光罩设计与仿真[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2): 332~335
- 3 E. Perinati, T. Mineo, G. Cusumano *et al.*. Designing an X-ray baffle for stray-light reduction at the focal plane of the wide field imager on board EDGE[C]. *Proc. SPIE*, 2008, **7011**: 701139
- 4 Hiroyuki Kawano, Haruhiko Shimoji, Shoji Yoshikawa *et al.*. Suppression of sun interference in the star sensor baffling stray light by total internal reflection[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5962**: 59621R
- 5 G. Cusumano, M. A. Artale, T. Mineo *et al.*. Simbol-X: X-ray baffle for stray-light reduction [C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6688**: 66880C
- 6 Karsten Seiferlin, Sumita Chakraborty, Kurt Gunderson *et al.*. Design and manufacture of a lightweight reflective baffle for the BepiColombo laser altimeter[J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**: 043003
- 7 Andrew Buffington, Bernard V. Jackson, P. P. Hick. Space performance of the multistage labyrinthine SMEI baffle [C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5901**: 590118
- 8 Lu Wei, Li Zhan, Zhang Jianrong. Design of lens hood for star sensor and result simulation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **28**(3): 12~20
卢 卫,李 展,张建荣等. 星敏感器中遮光罩设计及结果模拟[J]. *光电工程*, 2001, **28**(3): 12~20
- 9 Huang Zhiqiang, Xing Tingwen. Principle and realization of baffle and vane's programmable design [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(4): 119~123
黄智强,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
- 10 Wang Sai, Zhang Jingxu, Guo Jin. Suppressing methods of stray radiation in infrared system[J]. *OME Information*, 2002, (12): 21~24
王 赛,张景旭,郭 劲. 红外系统中杂散辐射的抑制方法[J]. *光机电信息*, 2002, (12): 21~24
- 11 Huang Chunying. *Machinery Innovation Design* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000
黄纯颖. *机械创新设计*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000