

反射光学系统杂散光的消除

钟 兴^{1,2}, 张 雷^{1,2}, 金 光¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 成像光学系统中的杂散光会引起像质模糊和对比度下降, 在对像质要求较高, 或被探测的光能量微弱的情况下, 必须对杂散光进行消除。R-C (Ritchey- Chretien)系统是卡塞格林系统的一种形式, 在地面光电探测和空间对地观测等方面都有广泛应用。以焦距为 2 m, 相对孔径为 1/4 的 R-C 系统为例, 介绍了利用计算机仿真技术进行消杂散光设计和评价的原理, 结合 CAD 建模进行了主镜内遮光罩、外遮光筒、次镜百叶窗式遮光罩的设计。使用光线模拟追迹软件 TRACEPRO 建立的测试系统进行仿真测试, 得到 R-C 系统的杂光系数为 6.4%, 证明了设计的可行性, 为应用和进一步的优化设计提供了依据。

关键词: R-C 系统; 杂散光; 遮光罩; 模拟测试

中图分类号: TN216 文献标识码: A 文章编号: 1007- 2276(2008) 02- 0316- 03

Stray light removing of reflective optical system

ZHONG Xing^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2}, JIN Guang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The stray light in optical imaging system could blur the image and decrease the contrast. It is necessary to eliminate the stray light when the system requires a high image quality and the detected light is weak. As a form of Cassagrain system, R-C (Ritchey-Chretien) system is widely used in the field of imaging system on the ground and space-based remote sensing. A R-C system with foci of 2 m and f-number F/4 was taken for an example, the principles of stray light eliminating and evaluation in reflective optical system was put forward. Lens hood in the main mirror, lens hood outside and window shade, lens hood in the secondly mirror were designed by CAD modeling. The design result was tested by light tracing in simulating software TRACEPRO, which showed the stray light ratio of the R-C system is 6.4%. This proved the feasibility of the stray light eliminating design. According to the analysis, the further optimization can be carried out.

Key words: R-C system; Stray light; Baffle; Simulation testing

0 引 言

杂散光指到达光学系统像面的非成像光线, 对光学系统的影响表现为像面对比度的下降, 从而引起传递函数的退化和信噪比的降低。杂散辐射的主要来源分为三类^[1]: (1) 外部辐射。对空间光学遥感器而言, 主要指太阳光、地物散射光和大气漫射光。外部辐射

经光学系统内部多次折反射到达探测器。(2) 内部辐射。电机、温控热源等产生的红外辐射。(3) 成像光线非正常传递。指由于路径中光学表面引起的杂散辐射。第二类和第三类杂散光主要针对特定的成像系统而言, 而第一类杂散光普遍存在于所有的成像光学系统中。因此文中主要讨论第一类杂散光。

以典型 R-C 系统为例, 研究反射式光学系统的杂散

收稿日期: 2007- 06- 10; 修订日期: 2007- 08- 15

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划)

作者简介: 钟兴(1982-), 男, 四川自贡人, 博士, 主要从事空间光学系统方面的研究工作。Email: ciomper@163.com

导师简介: 金光(1958-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光学遥感器总体工作。Email: jing@ciomp.ac.cn

光消除和评价方法。文中研究的是由两个双曲面组成的 R-C 系统,如图 1 所示,焦距 2 m,主镜口径为 0.5 m,次镜口径约为 0.15 m。传统的积分球检验的办法对于此类大口径的光学系统很难实现,计算量也很大。

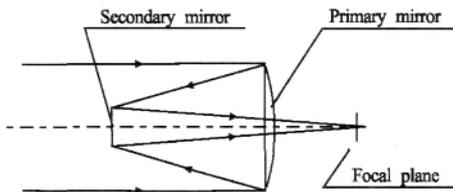


图 1 典型 R-C 光学系统

Fig.1 Representative R-C system

1 R-C 系统的消杂散光原理

在 R-C 系统中,为了消除杂散光的干扰,采取的措施是添加外镜筒、内镜筒和次镜遮光罩^[2]。图 2 中,光线 1 为主镜外直径决定的视场边缘光线,光线 2 是由遮拦比决定的内孔径光线。次镜遮光罩点 C 是由光线 2 和光线 1 经主镜反射后光线的交点,内镜筒点 A 是由光线 1 经主镜、次镜依次反射后的光线和光线 2 经主镜反射后的光线的交点,外镜筒的边缘点 D 是由 AC 连线延长线与外镜筒的交点。卡塞格林光学系统的外型尺寸主要由外镜筒决定。某些应用中对系统体积有严格要求,因此外镜筒的长度 L 不能太长。

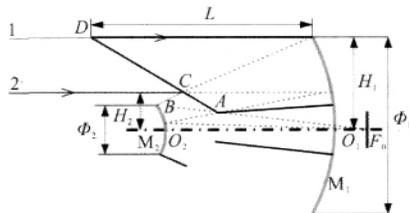


图 2 遮光罩与杂光路径

Fig.2 Baffles and pathway of stray light

次镜遮光罩的外径影响到系统的遮拦比:

$$R = \frac{H_2}{H_1} \times 100\%$$

由图 2 中关系可知,遮拦比 $R > 1/2 = 0.3$,当遮拦比在 0.3-0.6 之间时,传递函数和外镜筒长度值分别如表 1 所示。从表 1 可以看出:R-C 系统的调制传递函数

表 1 遮拦比与传递函数及外镜筒长度的关系

Tab.1 Relation of blocking ratio vs MTF and length

Parameters	Values						
R	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6
MTF	0.769	0.752	0.729	0.708	0.676	0.639	0.594
L/mm	55.52	43.15	27.05	17.52	11.59	7.62	4.91

随遮拦比增加而减小,因此遮拦比不能太大。而遮拦比减小时,外镜筒长度急剧加长,接近 0.3 时外镜筒需要 55.52,因此遮拦比又不能太小。从结构设计的角度,较合适的外镜筒长度应接近主次镜距离,故选取遮拦比为 45%。

外镜筒可以阻止外界杂散光直接入射到像面,但外镜筒本身具有一定反射率,射到外镜筒上的光线有可能反射到反射镜面,多次反射后到达像面形成干扰。因此,对外镜筒内壁吸光涂层有一定要求外,还要设计内挡光环。如图 3 所示,虚线为不加挡光环时外镜筒的位置,采用等高挡光环设计。选择挡光环的高度 h。外界杂散光由次镜遮光罩边缘点 B 入射,挡光环设置的目的是隔断 B 点射到镜筒壁上的绝大部分杂散光到达主镜的路径。在加上高度 h 的外镜筒壁(实线表示)上选择靠近 F 的一点与 E 点和 B 点连接,作为外镜筒接收杂散光的最小角度路径。在此路径与虚线的交点处设置两个挡光环,与外镜筒壁交点为 H 和 G。推广下去,由最小角度路径与虚线的交点进行 B、E 点的连接,便可确定其余挡光环位置,直到接近外镜筒边缘,设置最外一级挡光环。文中在 17.52 mm 一共设计了五级挡光环。

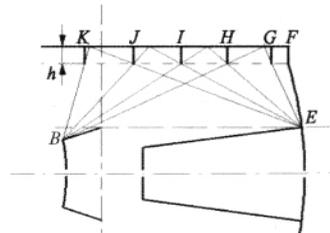


图 3 外镜筒挡光环位置

Fig.3 Position of blocking rings

通过在 CAD 中精确建模来分析杂散光的路径,可以容易的得到各级挡光环的间隔距离,从而避免了繁琐的数学计算和公式推导。

为了在不增加外镜筒长度的情况下减小系统遮拦比,设计了百页窗式的次镜遮光罩,其原理如图 4 所示。百页窗边缘点 C、C₀、C₁ 和 C₂ 由最大像高决定。杂散光通往焦平面像边缘内的路径被平行的 L₁、L₂、L₃ 的配合阻

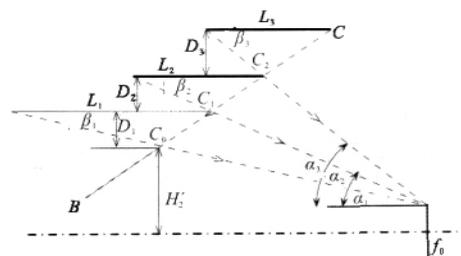


图 4 次镜百页窗光阑机构杂光路径

Fig.4 Stray light pathway of secondary mirror shutters

断,杂散光只能射到焦平面外。 C_0 、 C_1 和 C_2 之间的工作视场光线不受影响,仍然可以通过,因此此方法几乎不产生遮拦^[3]。按此思路进行设计的次镜遮光罩,在不增加外镜筒长度的情况下,将 R-C 系统的遮拦比由 45% 减小到了 36%,最后的设计结果如图 5 所示。

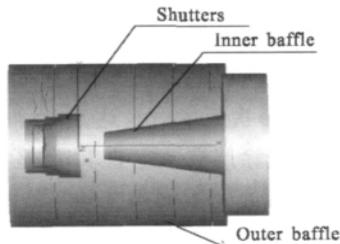


图 5 具备消杂光措施的 R-C 系统设计结果

Fig.5 R-C system with stray light removing measures

2 消杂散光效果评价

在实验室中一般采用积分球测量的方法对杂散光进行测量。近年来,人们也越来越多地采用了计算机仿真的方法对光学系统的杂散光进行计算^[4-5],特别是对于大口径的光学系统。目前使用较多的有光学设计软件 CODE V 的杂散光分析模块 LightTools、杂散光分析软件 ASAP。此外,由 Lambda Research 公司编写,在车灯及背光源设计行业广泛应用的 TracePro 软件,也可以用于光学系统杂散光的分析。

对杂散光进行计算,主要采用基于随机模拟的 Mento-Carlo 统计法和基于光传播规律的光线追迹法。仿真软件一般以 PST 点源透射比作为杂散光评价的输出结果。PST 曲线的绘制需要大量不同入射角度光线透射能量的统计数据,而且 PST 结果中包含有用工作光线和杂散光线两部分。因此结果只能作为消杂散光设计的改进评价,无法和别的光学系统消杂散光效果进行横向对比;而采用逆光路法,使有效光线与杂散光线分离,可以得到以百分比表示的杂散光系数。

以中心视场点为例,说明如何在 TRACEPRO 中以逆光路法对光学系统进行模拟测试。设 Z 轴为主光轴,模拟测试系统中需要建立两个相同的待测试系统,如图 6 所示,系统 1 与系统 2 关于 YOZ 平面镜面

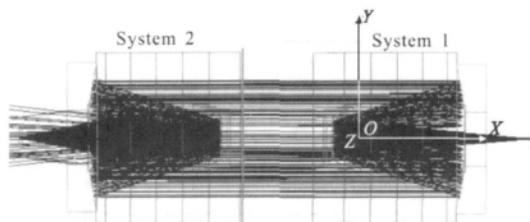


图 6 模拟测试系统

Fig.6 Simulation testing system

对称,光轴平行。系统 1 的作用是杂散光滤除器,系统 2 的作用是的光线发生器。将系统 2 的焦平面中心视场点设置为光源,发散角为 10° (保证光线锥角大于正常成像光线即可),其发出的光线经过系统 2 进行逆向传输。在系统出口处的光线可以认为是所有能到达系统 2 焦平面的光线的逆光线。这些光线的光能量就是系统 2 焦面的总光能量,这部分光线还包含不按设计光路射入到系统 2 焦面的杂散光,继续传入系统 1,系统 1 将其中的杂散光部分滤除,因此,在系统 1 焦面上接收的光能量为系统 2 按设计成像光路传输的有效光能量。

由于没有测试数据,在模拟光线追迹过程中,反射镜反射率设为 98%,结构件反射率设为 2%,追迹光线数目设为 10^7 条。杂光系数计算公式如下:

$$\eta = \frac{\text{杂光光能量}}{\text{总光能量}} = \frac{\text{总光能量} - \text{有效光能量}}{\text{总光能量}} \times 100\%$$

由追迹结果得到 R-C 系统杂光系数 $\eta = 6.4\%$ 。使用这种模拟方法,经过取不同视场点进行测试,还可以得到杂散光系数关于视场曲线图的分析,具有形象直观的优点,避免了通常杂散光测试方法的大量计算。

3 结论

计算机辅助设计及仿真模拟是杂散光分析及消杂光设计的有利手段,可以解决在光学系统口径比较大的情况下,杂光测试费用过于高昂、实验过于繁琐的问题。辅助设计经过模拟测试,得到的结果具有重要的参考意义,可为光学系统的实际研制起到指导作用。

参考文献:

- [1] SHI Guang-hui. Methods preventing stray light emergenced in cassagrain systems[J]. Optics and Precision Engineering 1997, 5(5):10-16.(in Chinese)
- [2] ANDREW T Y. Design of cassegrain light shields [J]. Applied Optics, 1967, 6 (6): 1063- 1067.
- [3] FAN Xue-wu, MA Zhen, CHEN Rong-li, et al. Study on stray light of the three-mirror optical system used in field bias[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33(8):960-963.(in Chinese)
- [4] CEN Zhao-feng, LI Xiao-tong, Zhu Qi-hua. Stray light analysis for optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(3):300-304.(in Chinese)
- [5] HU Fu-sheng, JIN Guang, ZHANG Nan. Algorithm of list structure of ghost images analyzing in complicated optical systems[J]. Infrared and Laser Engineering 2007, 36(3):323-325.(in Chinese)