

偏视场用三反射系统的一次杂光问题研究

樊学武 马 臻 陈荣利 李英才

(中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学研究室, 西安 710068)

摘 要 介绍了传统的二反射系统的杂光设计方法,研究了偏视场用三反射系统的杂光域与光阑位置的关系;指出了在线遮栏比较小(如 1/4)和半视场角比较大(如 0.77°)的情况下,设计时可不考虑用外遮光罩消一次杂光;给出了在不使用外遮光罩消一次杂光的情况下,决定主镜上内遮光筒和次镜上内遮光罩的长度的方法,此时系统线遮栏比为 1/2.6;由于飞行方向与垂直方向视角不同,主镜上遮光筒和次镜上遮光罩的形状可以设计成非轴对称形状,并可使系统线遮栏比降为 1/3.3;在此基础上提出了进一步减少系统遮栏比的方法,使线遮栏比降为 1/3.6.

关键词 三反射系统;杂光;偏视场;光阑

中图分类号 TB133 **文献标识码** A

0 引言

卫星传感器的性能通常受到探测器上杂光水平、非均匀性和相应的辐照度斜率的影响. 对于卡塞格林系统及其衍生形式主要有三种杂光^[1]: 1) 不经主镜,次镜由物空间直接射到或经过校正镜和场镜后射到像面的杂光. 这是这类两镜系统所特有的. 2) 主要是视场内的成像光束,不按成像光路,经镜面来回反射到像面的杂光. 3) 主要是进入系统的,视场外的光线经筒壁漫反射而射到像面的杂光. 其中第二种杂光要靠镀增透膜和提高镜面光洁度来消除,本文将不予讨论.

杂光会产生假讯号,造成光辐射度失真,并降低影像对比度,因此必须去除. 杂光产生的原因除了上述之外,还有机械结构表面之漫反射及绕射等原因. 限制这些噪声主要是消杂光光阑^[2],几何光学是设计消杂光光阑的主要手段. 本文讨论的是设计偏视场使用的三反射系统消一次杂光的光阑.

1 光学系统

在空间遥感传输型的相机中,我们经常使用 TDICCD,通过多级积分来获得足够的能量,这样可以降低光学系统的相对孔径. 图 1 是我所研究的相机的光学系统的光路图,系统相对孔径为 1/10,视场角为 0.77° ,是一种偏视场使用的光学系统^[3]. 由于成像器件长度的限制,通常采用视场拼接的方式,如图 2 所示,图中黑线代表 TDICCD. 系统共有四个反射镜,其中第三反射镜为平面镜,主镜和第四反射镜为椭球面镜、第二镜为双曲面镜. 从图 1 可以看出,这一类系统可以看作是卡塞格林系统的一种衍

生形式. 前两个反射面可近似地看作一个 R-C 系统,系统的光轴穿过主镜和次镜的中心,并经折转反射镜反射后偏转 90° .

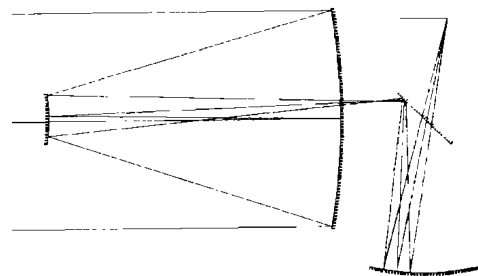


图 1 三反射系统的光路图
Fig. 1 Opticalschematic of three-mirror reflective system

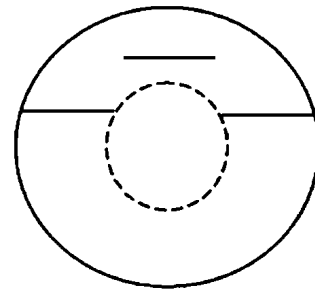
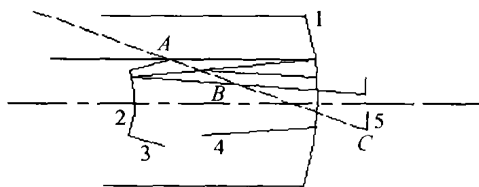


图 2 TDICCD 在象面的位置
Fig. 2 The positions of TDICCD in the image field

此相机使用的探测器是 TDICCD,视场是条形视场,如图 2 所示. 因此对于此相机来说,消杂光主要是针对所使用的条形视场区域. 我们所设计的系统线遮栏比为 1/4. 2.

2 主镜内遮光筒和次镜内遮光罩的设计

相机的光学系统为三反射消像散光学系统,使用的视场为三个条形视场. 消除不经主镜和次镜射入系统的杂光是设计相机光学系统一开始就要考虑的问题,因为它影响系统的中心遮栏比和轴外光束的遮栏,从而影响成像质量指标,也涉及到总体结构安排. 图 3 是遮光罩设计的几何草图.



1.Primary mirror;2.Secondary mirror;3.Secondary baffle;4.Primary baffle;5.Focal plane

图3 共轴的两镜望远镜的构型

Fig.3 The axial two-mirror telescope configuration

光阑的设计应该避免非成像光束直接入射到光学系统像面,光阑的几何尺寸是由系统参量得来的,在许多情况下,消杂光光阑的长度是不能任意选取的,而必须由几何关系决定,杂光设计的主要目的就是计算主镜和次镜上的遮光筒以及外遮光罩的长度和半径^[4]。同时,遮光罩的长度受到机械设计的限制^[5];光阑长度越长,一阶振动频率越低。

对于卡塞格林及其衍生系统来说,每一反射镜都必须有光阑以阻止杂光入射到光学系统的焦平面上。对于一次杂光,通常可以采用主镜上的外遮光罩、次镜上的内遮光罩和主镜上的内遮光筒中的两者去消除。对于其中每一遮光罩,都有高度和长度两个变量。如果使系统的遮拦比保持在 $1/4$ 左右,在保证遮拦比的情况下^[6],用外遮光罩和次镜上的遮光罩来消一次杂光,则势必会使外遮光罩的长度过长(可长到三十多米),结构上很难实现。因此,我们在设计中必须牺牲一定的遮拦。这时在实际的设计中我们将采用主镜和次镜上的内遮光罩来达到消一次杂光的目的,但是这样会使整个系统的遮拦比过大,为了减小系统的遮拦比,就必须结合系统的实际使用情况来优化主镜和次镜上遮光罩的设计。

一方面,主、次镜上的遮光罩必须遮挡所有的一次杂光,另一方面又必须使系统的遮拦比最小,如图3。主、次镜上的遮光罩必须遮挡所有的一次杂光要求主镜上遮光罩的边沿点B和次镜遮光罩的边沿点A以及最大视场所对应的像点C三点共线,系统的遮拦最小要求通过次镜遮光罩边沿的光线经主镜反射后刚好能通过主镜遮光罩的边沿。由这两个条件就可以求出主镜上内遮光筒边沿点B、次镜上内遮光罩边沿点A的坐标。但是这样系统的遮拦比依然很大,经过计算,可大到 $1/2.6$,从而使整个系统的性能较难达到要求。

3 系统杂光域的研究

分析系统的杂光范围是遮光罩设计的前题,因此搞清系统的一次杂光范围对卡塞格林系统及其衍生形式的遮光罩设计是非常重要的。由于一次像面和最终像面是共轭的,因此只要是入射到系统一次像面上的杂光都有可能入射到最终像面上。为了研

究上的方便,这里消杂光将在一次像面上相应的区域去考虑。

杂光域的确立必须和实际的设计联系起来,在杂光抑制方面,光阑要放在首位考虑,这是因为它们直接影响到关键表面和被照射表面的面积。在光学系统中,孔径光阑前除中心遮拦外的所有非成像物体都不能被像面看到,而在孔径光阑到像面之间的诸多表面则可见,即孔径光阑限制关键表面的数目。下面我们将研究光阑位置和杂光域的关系。为此我们先采用在一次像面上放一光阑,如图4所示,此光阑和实际的一次像面上像的大小一致,方框内的区域为通光区域,其它部分为黑屏,同样它应和系统的实际视场一致。遍历一次像面的各点对主镜反射面位置的光阑在次镜所在的面投影,即为系统的杂光域,图5的长条区域即为我们所研究的系统的杂光域。如果更改主镜位置处中心孔光阑的位置,将光阑位置靠近次镜,则系统的杂光域将会减小。因此,合理的放置光阑将是此系统有效的杂光抑制方法。从图5还可以看出,通过放置光阑的方法使得系统在竖直方向的杂光域较小,如图6。

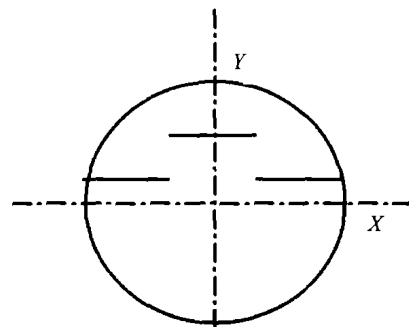


图4 第一次象面处的视场光阑

Fig.4 THE field aperture of the first image

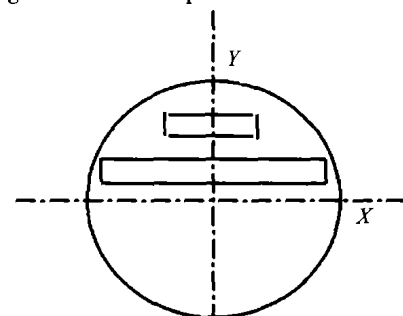


图5 一次象面前的视场光阑

Fig.5 The field aperture before the first image

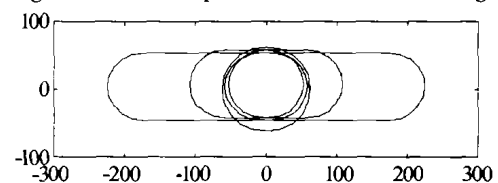


图6 杂光的区域

Fig.6 The region of straylight

4 主镜上遮光筒与次镜上遮光罩的非对称形状可以减小遮拦比

为了最大限度地减小遮拦比,挖掘光学系统的潜力就必须考虑系统的实际使用情况.经上面分析发现,主镜上遮光筒和次镜上的遮光罩的形状由于飞行方向与垂直方向视角不同,可以设计成非轴对称形状.从图5也可以看出在 Y 方向上的杂光区域很小,因此在设计系统的遮光罩时应考虑此点,将遮光罩设计成非对称的形式,也就是在与条形视场垂直的方向,遮光筒的长度可以减短些.经分析计算,这样可以减小系统的线遮拦比到1/3.3.

5 采用“百页窗”进一步减小系统遮拦比

从以上分析可知,采用上述方法后,整个系统的遮拦比仍然很大,不能满足设计的要求,因此,必须进一步减小系统的遮拦比.为此,我们提出了“百页窗”式的遮光罩设计,如图7、图8所示.

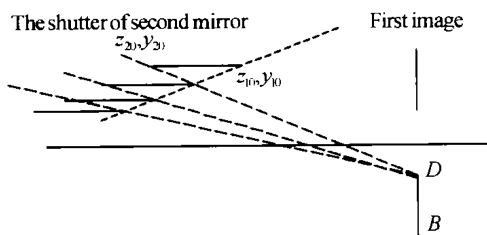


图7 次镜上百页窗遮光罩的原理图

Fig. 7 The layout for the illustration of the shutter of second mirror

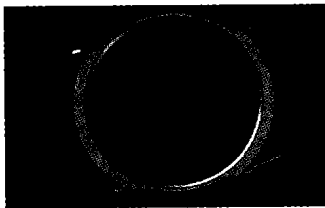


图8 次镜上遮光罩的实物图

Fig. 8 The solid image of second mirror baffle

由于所使用的视场为三个条形视场,如图2, $(0.23^\circ \sim 0.7^\circ, 0.32^\circ)$ (Y 方向偏 0.32° , X 方向的条形视场在 $0.23^\circ \sim 0.7^\circ$ 之间,以下同), $(-0.23^\circ \sim -0.7^\circ, 0.32^\circ)$, $(-0.23^\circ \sim 0.23^\circ, 0.55^\circ)$. 因此若将它当圆形视场来考虑,系统实际使用的视场区域在 $0.39^\circ \sim 0.77^\circ$ 之间 ($\sqrt{0.23^2 + 0.32^2} = 0.39$),如图2,即为虚线圆外和实线圆内的区域.图7中下面的像面 DB , D 点对百叶(水平线)的倾角最小,因此在计算“百页”的长度和距离时以 D 点作为参考进行计算,若从百页窗叶片间入射的杂光不能射到 D 点,自然对 DB 之间的象面杂光都入射不到.百叶的安排应不遮挡入射到主镜的视场内光线和主镜反射的光线,这里以主镜反射的边光(图7虚线所

示)为边沿来安排百叶的一边的位置.假定百叶的长度为 d , (z_{10}, y_{10}) 为百叶所允许最边沿的坐标,则可以求出 C 点的坐标 $z_{20} = z_{10}, y_{20} = y_{10} - d$,由 DC 直线的方程和主镜反射的边光的直线(图中虚线所示)方程即可确定下一个百叶的边缘,同理可以确定下一个百叶的参数.综合光学和结构方面的考虑,最终选择了四个百叶片,图8所示.

对于图中 DB 内的像点,依然有从下面的百叶间通过的一次杂光入射,这里可以在主镜上的消杂光筒上作同样的处理:一方面使从百叶间空隙入射的光经主镜反射后能从主镜上的遮光筒上通过;另一方面,阻止一次杂光入射到图上面的像面,也就是将主镜上的内遮光筒也设计成“百页窗”的形式.通过这种在主镜的内遮光筒和次镜的内遮光罩上设计成“百页窗”的形式,我们可以将遮拦比减小到1/3.6,次镜上百叶的工程图见图8,左右两边各有四个百叶,左右对称,但上下不对称(这是由于系统的左右和上下两个方向的视场不同而造成的).

6 结论

卫星的性能通常要受到探测器上的杂光水平、非均匀光照明和相应的辐射角的限制.而限制这一噪声主要是消杂光光阑,几何光学是设计消杂光光阑的主要手段.在杂光抑制方面,光阑要放在首要地位去考虑,对于偏视场使用的三反射系统的杂光设计更是如此.除此之外,还可使用挡光环结构和消杂光涂料.在消杂光光阑设计的同时必须使它对系统的性能影响较小,不增加系统加工和装调的难度.对共轴的两镜或三镜反射系统,也就是使实际遮拦比接近设计的遮拦比,当然,也需考虑工程的难易程度.

参考文献

- 1 史光辉. 消除卡塞格林系统杂光的措施. 光学精密工程, 1997, 5(5): 10 ~ 16
- 2 Shi G H. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(5): 10 ~ 16
- 3 Arnoux J J. Star sensor baffle optimization: some helpful practical design rules. *Proc of SPIE*, 1988, 2864: 333 ~ 338
- 4 Korsch D. A Three-mirror space telescope. *Optical Engineering*, 1975, 14(6): 533 ~ 535
- 5 Freniere E R. First order design of optical baffles. *Proc of SPIE*, 1970, 257: 19 ~ 28
- 6 Stavroudlia O N, Foo L D. System of reflective telescope baffles. *Optical Engineering*, 1994, 33(3): 675 ~ 680
- 6 Song N, Yin Z M, Hu F Y. Baffle design for an axial two-mirror telescope. *Opt Eng*, 2002, 41(9): 2353 ~ 2356
- 7 Brunello P, Peron F, et al. Baffling system for the wide angle

- camera (WAC) of ROSETTA mission. *Proc of SPIE*, 2000, **4093**:79 ~ 88
- 8 樊学武, 马臻, 陈荣利, 等. 红外双波段卡塞格林光学系统设计. *光子学报*, 2003, **32**(4):463 ~ 465
Fan X W, Ma Z, Chen R L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4):463 ~ 465
- 9 樊学武, 马红卫, 陈荣利, 等. 具有二次像面的三反射光学系统的研究. *光子学报*, 2003, **32**(8):1001 ~ 1003
Fan X W, Ma H W, Chen R L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8):1001 ~ 1003

Study on Stray-light of the Three-mirror Optical System Used in Field Bias

Fan Xuewu, Ma Zhen, Cheng Rongli, Li Yingcai

Space Optics Laboratory, Xi'an Institute of Precision Optics and Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

Received date: 2003-07-21

Abstract The traditional baffle design method of two mirror reflective system is introduced. The relationship between the region of straylight and the positions of the stop aperture is presented for three-mirror optical system used in field bias. It may not depend on the outside baffle to block once straylight when the ratio of block is too small, for example $1/4$, and the field angle is large, such as 0.77° . Under the condition of not using outside baffle, how to reckon the baffle lengths of the primary mirror and secondary mirror is given to make the linear ratio of block as small as $1/2.6$. As the field angles are different between direction of flight and its perpendicularity, the baffle is made non-symmetrical, so the ratio of block may below $1/3.3$. The methods on how to reduce the block of the optical system continuously is offered. Finally, the ratio of block drops to $1/3.6$.

Keywords Three mirror optical system; Stray light; Field bias; Diaphragm



Fan Xuewu was born in 1972. He received the B. S. degree from Huaibei Coal Teacher's College in 1995. Now he is studying for his Ph. D. in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His major interests include optical design, optical testing and optical alignment.