

航天遥感器里奇-克雷蒂安系统遮光罩 的设计和分析

宋 宁 韩心志 李润顺

(哈尔滨工业大学航天电子与光电工程系, 哈尔滨 150001)

孙胜利

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要 提出一种航天遥感器里奇-克雷蒂安(R-C)系统遮光罩的设计方法,并给出其数值计算过程,以确定 R-C 系统遮光罩的尺寸和口径。同时,依据 R-C 系统的特点,提出其杂散辐射的计算方法,用以估计遮光完善 R-C 系统的杂光水平。通过计算得到的系统的点源透过率,可对系统的杂散辐射抑制能力进行评价。

关键词 遮光罩, 杂散辐射, 点源透过率。

1 引 言

航天遥感器的成像质量受到扩散于像面上的其它非成像光能量—杂散辐射的影响。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。它会降低系统的调制传递函数,使整个画面的层次减少,清晰度变坏,严重时甚至会形成杂光斑点^[1]。

在航天遥感器中经常使用里奇-克雷蒂安(简称 R-C)系统^[2],系统的外部辐射源可能由物空间直接射到像面,这是 R-C 系统所特有的。这种杂散辐射源,可以通过增加外遮光罩以及在主镜和次镜上加内遮光罩加以消除。对于其它的杂散辐射源,例如,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,可以通过改进膜层以及在遮光罩上增加挡光环加以消除。目前航天遥感器较常使用的 R-C 系统有大口径、小视场的特点,从而使其遮光罩的设计变得异常复杂。自 60 年代末起,不断有人对遮光罩的设计提出改进方法^[3-5]。

遮光罩可以避免杂散辐射直接到达像面,这样的系统可称之为遮光完善系统。但还有其它不可避免的杂散辐射路径,比如,系统的散射和衍射产生的杂散辐射。需要对这些杂散辐射水平进行分析和估计,以便改善系统结构,使像面的杂散辐射水平降低到可允许的水平。1977年, Greynold^[6]提出了一种适用于遮光完善系统的杂散辐射计算的简化公式, Bamberg^[7]

使用这些公式在 HP-41 C/CV 上编制了计算机程序, 对系统的杂散辐射水平进行估算。但这些计算模型过于简化, 并且考虑的杂散辐射路径较少。

本文提出任意结构的 R-C 系统的遮光罩的设计方法, 给出其数值解。对于其它的杂散辐射源, 本文对上述杂散辐射计算方法进行了改善, 并根据 R-C 系统的特点, 通过计算系统的点源透过率, 对所设计的遮光完善的 R-C 系统的杂散辐射抑制能力进行了计算和评价。

2 遮光罩的设计

R-C 系统遮光罩的设计要满足以下要求: 1) 满足中心遮拦比的要求; 2) 避免杂散辐射直接到达像面; 3) 小渐晕。要使杂散辐射不直接到达像面, 要在系统上加外遮光罩, 在主镜和次镜上加内遮光罩, 并满足以上三点要求, 从而确定外遮光罩和内遮光罩的尺寸和口径。

2.1 遮光罩的设计

遮光罩的设计是指, 根据系统的结构参数(包括系统的焦距、孔径光阑的位置和直径、主镜的焦距以及主镜到焦面的距离等), 确定主镜和次镜上的内遮光罩的尺寸和口径, 以及外遮光罩的长度。通常情况下, 外遮光罩的长度不能随意选择, 常根据系统的结构尺寸确定。主镜上的内遮光罩要求阻挡所有不是来自于次镜的成像光束和次镜上的内遮光罩的杂散辐射, 同时不能阻挡在视场内、由主镜到达次镜或从次镜到达像面的光线。由图 1, 可得到遮光罩的设计要求如下:

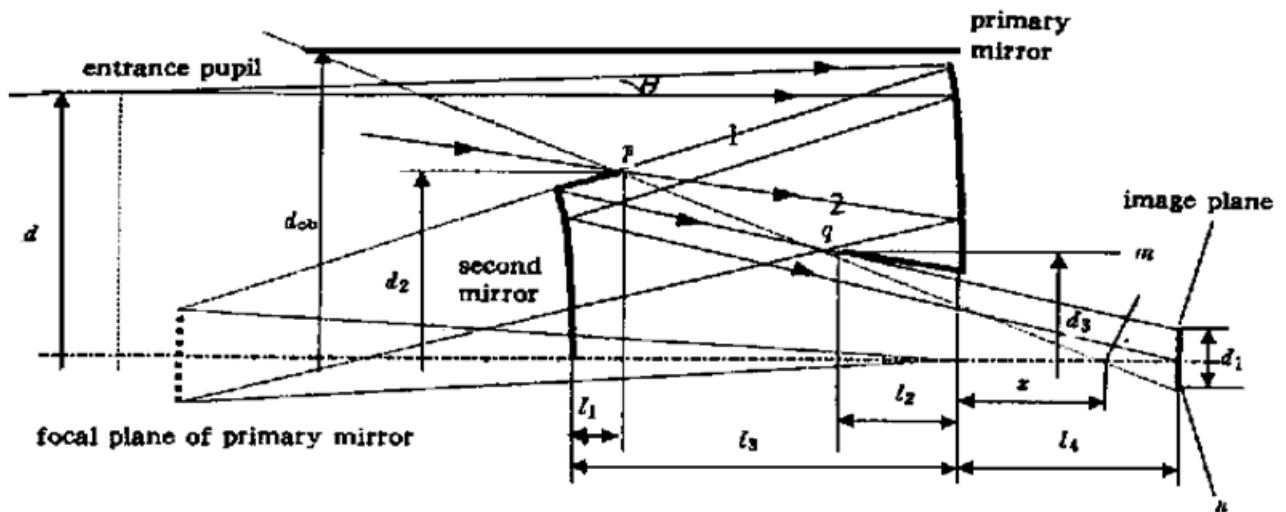


Fig. 1 Diagram illustrating the design of baffle

1) 视场外的光线被主镜上的内遮光罩所遮挡。

连接点 p 和 q 并延长, 其和像平面的交点距离像面越远, 则遮拦杂散辐射的效果越好; 如果靠近像面则杂散辐射遮拦不好, 进入像面更不允许。由于篇幅所限, 本文只给出在此条件下遮光罩的设计要求, 其它条件下的设计要求只给出最终结果。

推导过程如下: 连接 p 点和像面边缘 n 点, 与光轴交于 m 点, 设主镜到 m 点的距离为 x , 有

$$\frac{l_4 - x}{l_3 - l_1 + x} = \frac{d_1}{d_2} \quad (1)$$

其中: d_1 为像面的直径, d_2 为位于次镜上的内遮光罩的直径, l_1 为位于次镜上的内遮光罩的长度, l_3 为主镜和次镜之间的距离, l_4 为主镜和像面之间的距离。解得 x 为

$$x = \frac{d_2 l_4 - d_1(l_3 - l_1)}{d_1 + d_2} \quad (2)$$

假设主镜上的内遮光罩边缘位于直线 pn 上, 有

$$\frac{l_2 + x}{l_3 - l_1 + x} = \frac{d_3}{d_2} \quad (3)$$

其中, d_3 为位于主镜上的内遮光罩的直径, l_2 为位于主镜上的内遮光罩的长度。

将(2)式代入(3)式, 可得到主镜上的内遮光罩直径为

$$d_3 = \frac{d_2(l_2 + l_4) - d_1(l_3 - l_2 - l_1)}{l_3 + l_4 - l_1} \quad (4)$$

为了使视场外的光线被主镜上的内遮光罩所遮挡, 主镜上的内遮光罩直径应满足

$$d_3 \leq \frac{d_2(l_2 + l_4) - d_1(l_3 - l_2 - l_1)}{l_3 + l_4 - l_1} \quad (5)$$

2) 视场外的光线被次镜上的内遮光罩所遮挡。

过外遮光罩的端点, 连接 q 点, 使 p 点位于此点上, 从而决定位于次镜上的内遮光罩的直径, 它的直径越大, 则遮光效果越好, 可得到

$$d_2 \geq \frac{d_3(l_{ob} - l_3 + l_1) + d_{ob}(l_3 - l_2 - l_1)}{l_{ob} - l_2} \quad (6)$$

其中, l_{ob} 为外遮光罩的长度, d_{ob} 为外遮光罩的直径。

3) 在入瞳边缘入射的边缘视场光线不被主镜上的内遮光罩遮挡。

以最大视场角, 在入瞳边缘入射的光线经主镜和次镜的反射(光线 1), 入射到像面上, 此光线不能被主镜上的内遮光罩遮挡, 可得到

$$d_3 \geq 2\left\{\frac{(f_p - l_3)[d_4/2 + (l_5 - f_p) \tan \theta]}{f_p} + (f_p - f) \tan \theta\right\} \frac{l_2 + l_4}{l_3 + l_4} + 2 \tan \theta \quad (7)$$

其中, d 为入瞳的直径, f 为系统的焦距, f_p 为主镜的焦距, l_5 为入瞳和主镜之间的距离。

4) 在入瞳边缘入射的边缘视场光线不被次镜上的内遮光罩遮挡。

以最大视场角, 在入瞳边缘入射的光线经主镜的反射(光线 1), 此光线不能被次镜上的内遮光罩遮挡, 可得到

$$d_2 \geq \frac{d(f_p - l_3 + l_1) + 2 \tan \theta [f_p l_5 - (l_1 - l_3)(f_p - l_5)]}{f_p} \quad (8)$$

其中, θ 为视场角。

5) 在一定的中心遮挡下, 边缘视场光线不被主镜上的内遮光罩遮挡。

在一定的中心遮挡下, 以最大视场角, 从次镜上的内遮光罩边缘入射的光线(光线 2), 经主镜的反射入射到主镜的焦面上, 此光线不能被主镜上的内遮光罩遮挡, 可得到

$$d_3 \leq \frac{d_4(f_p - l_2) - 2 \tan \theta (f_p l_5 - l_2 l_5 + l_2 f_p)}{f_p} \quad (9)$$

其中, d_4 为系统的中心遮拦直径。

6) 在一定的中心遮挡下, 边缘视场光线不被次镜上的内遮光罩遮挡。

在一定的中心遮挡下, 以最大视场角入射的光线, 必须确保不被次镜上的内遮光罩遮挡, 可得到

$$d_2 \leq d_4 - 2 \tan \theta (l_5 - l_3 + l_1). \quad (10)$$

2.2 挡光环的设计

被外遮光罩所遮挡的杂散辐射,经罩壁的漫反射后,可能到达像面,影响成像质量。为了消除这部分杂散辐射,可在罩壁涂消光漆,此外在罩壁增加挡光环也是必要的。挡光环的间隔和长度应满足以下关系^[8]

$$v_1 = \frac{l_{ob} v_2}{v_2 + d}, \quad (11)$$

其中, v_1 为挡光环的间隔, v_2 为挡光环的长度。

2.3 数值计算方法

根据遮光罩的设计要求,可以采用逐次逼近的方法得到遮光罩的直径和长度的近似解。在逼近过程中,首先采用文献[9]的方法,设定中心遮拦比,得到遮光罩的长度和直径的初始值。设中心遮拦比为 k , 那么

$$l_1 = l_3 + (k - 1)d, \quad (12)$$

$$d_2 = kd, \quad (13)$$

$$l_2 = \frac{l_3 l_4 - f_p l_4 + l_3 k f_p + l_4 k f_p}{f_p - l_3 + l_4 k + l_3 k}, \quad (14)$$

$$d_3 = kd(l_4 + f_p) \frac{f_p - l_3}{f_p(f_p - l_3 + kl_3 + l_4k)}. \quad (15)$$

在得到遮光罩的初始值后,首先根据(7)式得到 d_3 , 然后根据(10)式计算 d_2 , 根据(8)式计算 l_1 , 根据(5)式和(6)式计算 l_2 , 取其中的最大值。主镜的中心遮拦直径可根据(9)式得到。在逼近过程中,通过选择合适的初始值,可以得到较满意的结果。

3 杂散辐射计算和分析

遮光罩可以避免杂散辐射直接到达像面,但系统还存在其它杂散辐射源,需要对其进行分析和计算,使杂散辐射水平满足设计要求。对光学系统的杂散辐射分析,就是计算系统外的杂散辐射源的杂散辐射有多少能够到达像面。点源透过率 T^{PS} 是较常使用的杂散辐射水平评价指标。它定义为系统视场外的点源到达像面的辐照度和在入瞳上的辐照度之比:

$$T^{PS} = \frac{E_2}{E_1}, \quad (16)$$

其中: E_1 为系统入瞳的辐照度, E_2 系统像面的辐照度。

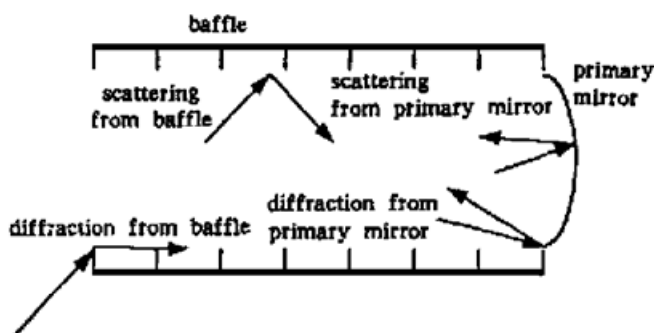


Fig. 2 Stray light paths

对于遮光完善的光学系统,本文主要考虑以下几个杂散辐射路径,如图2所示。

- 1) 主镜表面的散射;
- 2) 经遮光罩和主镜表面的散射;
- 3) 主镜的衍射;
- 4) 遮光罩的衍射和主镜表面的散射;
- 5) 遮光罩的散射和主镜的衍射。

在计算过程中作以下假设:

1) 两个面元间辐射能量传递通过双向反射分布函数 (F^{BRD}) 和投影立体角 (Ω) 来计算, 并且两面元之间无其它表面的遮挡,

$$d\Phi = d\phi F^{\text{BRD}} d\Omega \cos \beta, \quad (17)$$

其中, $d\Phi$ 为接受面元的微分能量, $d\phi$ 为散射面元的微分能量, F^{BRD} 为散射面元的双向反射分布函数, $d\Omega$ 为接受面元对散射面元的投影立体角, β 为两面元之间的连线和散射面元法线之间的夹角。

2) 挡光环是等间距放置的, 杂散辐射至少经两次散射才能到达第一个光学元件, 其双向反射分布函数定义为

$$F_v^{\text{BRD}} = F_s^{\text{BRD}} + F_e^{\text{BRD}} + F_d^{\text{BRD}}, \quad (18)$$

其中, F_s^{BRD} 为经挡光环壁侧两次散射的双向反射分布函数, F_e^{BRD} 为经挡光环的边缘散射的双向反射分布函数, F_d^{BRD} 为经挡光环的边缘衍射的双向反射分布函数。

3) 光学元件为极光洁的抛光表面, 其双向反射分布函数定义为

$$F^{\text{BRD}}(\theta_1, \theta_2) = b[100(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)]^m, \quad (19)$$

其中, θ_1 、 θ_2 为入射方向和散射方向与散射面元间的夹角, b 、 m 为由表面性质决定的常数。

4 计算实例和讨论

本工作为三轴稳定地球同步气象卫星 CCD 成像仪的光学系统设计了遮光罩, 其光学系统的参数如表 1 所示。当外遮光罩的长度取不同的值时, 得到内遮光罩的结构参数如表 2 所示。当外遮光罩在一定的范围内选择不同的值时, 都可以得到较满意的结果。

Table 1. The parameter of optical system

d	100 mm
f	694 mm
f_p	503 mm
l_4	68 mm
l_5	320 mm
2θ	$\pm 0.209^\circ$

Table 2. Design result of baffle

l_{ob}	320 mm	300 mm	280 mm
d_3	40 mm	40 mm	39 mm
d_2	59 mm	61 mm	62 mm
l_2	194 mm	194 mm	186 mm
l_1	30 mm	36 mm	46 mm

选取挡光环的间隔 v_1 为 45 mm, 可根据公式(11) 得到挡光环的长度。表面性质决定的常数 b 、 m 分别取值为 0.141 和 $-2.172^{[6]}$ 。本文计算了光学系统的点源透过率, 如图 3 所示。由图 3 可以看出, 随着外遮光罩长度的增加, 在一定的角度内, 遮光效果变好。

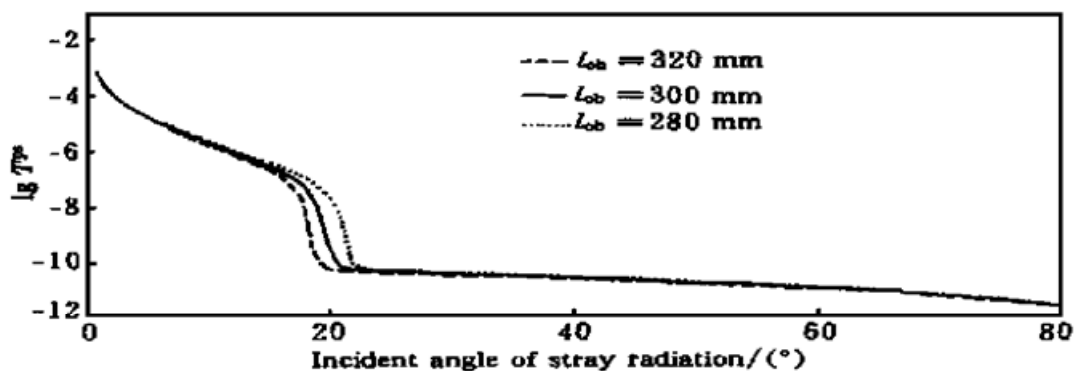


Fig. 3 The point source transmittance of the optical system

结 论 本文给出航天遥感器的 R-C 遮光罩的设计方法, 并应用于三轴稳定地球同步气象卫星 CCD 成像仪的设计中, 得到了较满意的结果, 同时对其杂散辐射水平进行了估算。这种设计方法可在航天遥感器的设计中得到推广和应用, 具有实用价值。

参 考 文 献

- [1] Robert P B. Problem and techniques in stray radiation suppression. *Proc. SPIE*, 1977, **107** : 58~ 65
- [2] Lansing J C. Thematic mapper design description and performance prediction. *Proc. SPIE*, 1979, **183** : 224~ 234
- [3] Young A T. Design of Cassegrain light shields. *Appl. Opt.*, 1967, **6**(6) : 1063~ 1067
- [4] Prescott R. Cassegrain baffle design. *Appl. Opt.*, 1968, **7**(3) : 479~ 481
- [5] Davis P K. Baffle design for telescope with tilttable secondary mirrors. *Proc. SPIE*, 1987, **766** : 163~ 168
- [6] Greynolds A W. Formulas for estimating stray-radiation levels in well-baffled optical systems. *Proc. SPIE*, 1977, **257** : 39~ 49
- [7] Bamberg J A. Stray light analysis with the HP-41C/CV calculator. *Proc. SPIE*, 1983, **384** : 109~ 116
- [8] Freniere E R, Skelton D L. Use of specular black coatings in well-baffled optical systems. *Proc. SPIE*, 1986, **675** : 126~ 132
- [9] 袁旭沧. 光学设计. 北京: 北京理工大学出版社, 1988. 337~ 342

Design and Analysis of the Baffle of the Ritchey-Chretien (R-C) System Used in Space Remote Sensor

Song Ning Han Xinzhi Li Runshun

(*Department of Spaceflight Electronic and Optoelectronic Engineer,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

Sun Shengli

(*Shanghai Institute of Technical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083*)

(Received 4 January 1998; revised 26 March 1999)

Abstract A method of design for the baffle of the Ritchey-Chretien (R-C) system used in space remote sensor is presented. A numerical method is provided to determine the lengths and diameters of the baffles. A stray radiation calculation method based on the feature of the R-C system is given for estimating stray light performance in the well-baffled R-C system. The calculation result of the point source transmittance (PST) is used to evaluate how the stray radiation is suppressed in this system.

Key words baffle, stray radiation, the point source transmittance.