

文章编号:1002-2082(2009)04-0575-05

R-C 系统外遮光罩挡光环的程序化设计 及锥状内遮光罩的改进

高郭鹏^{1,2}, 熊望娥¹, 甘玉泉^{1,2}, 刘 阳^{1,2}

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 基于几何作图法推导出R-C系统外遮光罩内挡光环顶点的坐标公式, 利用C语言编程实现程序化设计挡光环。在中心遮光比确定的情况下, 推导出内遮光罩的顶点坐标公式, 并将通常使用的主镜一级锥状遮光罩改进为二级锥状遮光罩, 以高速摄影系统的R-C型折反式主物镜为例, 对其主镜和次镜内遮光罩进行设计, 并给出设计结果。当轴角为 70° , 遮光罩为二级和一级时, 到达像面的杂散光照度分别为 $1.0823 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 和 $1.6614 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$, 相差二个数量级, 证明改进的二级遮光罩优于一级遮光罩, 能有效抑制杂散光。最后, 设计了主、次镜间镜筒内壁上等高档光环, 进一步抑制了R-C系统的杂散光。

关键词: R-C系统; 杂散光; 遮光罩; 挡光环

中图分类号: O439

文献标志码: A

Program design of outer baffle vanes and improvement of conical inner baffle in R-C system

GAO Guo-peng^{1,2}, XIONG Wang-e¹, GAN Yu-quan^{1,2}, LIU Yang^{1,2}

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The vertex coordinate formulas for outer baffle vanes of R-C system are deduced based on geometrography, and the vanes are designed with C-language program. The vertex coordinate formulas of inner baffle are also deduced after assuring the central obscuration ratio, and then the common one-grade conical baffle is improved into the two-grade one. The correctness of baffle design is proved by an example and its simulated analysis, meanwhile an effective way of suppressing the stray light is provided. Finally, the same-height vanes in drawtube between primary and secondary mirrors are designed for further suppressing the stray light in R-C system.

Key words: R-C system; stray light; baffle; vane

引言

光学系统成像时, 在像面上除了按正常光路成像外, 尚有一些非成像光线落在像面上, 构成不参

与成像的有害光即杂散光^[1]。R-C光学系统一般是由主镜、次镜、主校正镜及次校正镜组成的折反射式系统, 由于该系统具有尺寸小、焦距长、无色差等

收稿日期: 2009-02-06; 修回日期: 2009-03-05

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2009CB72405)

作者简介: 高郭鹏(1983-), 男, 陕西渭南人, 硕士研究生, 主要从事空间光学系统的杂散光抑制的研究。

E-mail: gaoguopeng1983@163.com

优点,因此在空间光学遥感系统中得到广泛应用。然而,R-C 系统所带来的中心遮拦、结构严格等问题,使得其杂散光抑制难于处理。通常的做法是:设置外遮光罩阻挡视场外大角度光线直射主校正镜,设计主、次镜内遮光罩阻挡视场外小角度光线直射像面^[2-3]。

本文在作图法的基础上,首先推导出外遮光罩内挡光环顶点的坐标公式,利用C 语言编程实现程序化设计挡光环,并给出设计实例。然后推导出主镜、次镜内遮光罩的顶点坐标公式,将通常使用的主镜一级锥状遮光罩改进为二级遮光罩;最后给出的具体实例说明,主镜二级遮光罩比一级遮光罩能使像面的杂散光照度较大程度地减少,从而为R-C 光学系统提供一种有效抑制杂散光的方法。最后,设计了主、次镜间镜筒内壁上等高挡光环,进一步抑制了R-C 系统杂散光。

1 外遮光罩的设计

外遮光罩的设计原则是阻止光学系统视场外大角度杂散光直接射向主校正镜,使得到达主校正镜第一光学表面的杂散光至少经过一次散射衰减。另外,在外遮罩内壁设立挡光环和高吸收涂层能使到达主校正镜第一光学表面的杂散光经过一次以上散射衰减。

在仪器视场角 θ 、入瞳直径 D_0 、杂散光源(例如太阳)入射角 α 等已知的条件下,就可以得到外遮光罩的长度 L 与直径 D'_0 的大小^[4]。

外遮光罩内挡光环按照下面的原则设计^[5]。如图1,以光轴为 X 轴、遮光罩外端口为 Y 轴建立直角坐标系,设挡光环的高度相等并记为 H ,则 A, B, C, D, E, F 点的坐标分别为 $A(0, -D'_0/2), B(L, -D'_0/2), C(0, -H, -D'_0/2), D(L, -H-D'_0/2), E(0, D_0/2), F(L, D_0/2)$ 。图1中任意两点间 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 的直线方程可表达为

$$y=kx+b \tag{1}$$

式中: k 为该直线的斜率; b 为该直线的纵截距,其表达式为

$$k=(y_2-y_1)/(x_2-x_1) \tag{2}$$

$$b=y_1-kx_1 \tag{3}$$

任意两条直线的交点坐标 (x_0, y_0) 为

$$x_0=(b_2-b_1)/(k_1-k_2) \tag{4}$$

$$y_0=(k_1b_2-k_2b_1)/(k_1-k_2) \tag{5}$$

连直线 ED 交 AB 于点 $X_0(x_0, y_0)$,由(4)式和

(5)式得到第一个挡光环顶点的坐标值,连 FX_0 并延长交 CD 于点 $X'_0(x'_0, y'_0)$;连 EX'_0 交 AB 于新点 $X_0(x_0, y_0)$ 得到第二个挡光环顶点的坐标,连新直线 FX_0 并延长交 CD 于新点 $X'_0(x'_0, y'_0)$,以此类推直至 $x'_0 < 0$,得到一系列挡光环顶点的坐标 $X_0(x_0, y_0)$ 。由于此计算过程极为繁琐,本文将上述算法在计算机上利用C 语言编程,能方便地得到挡光环顶点坐标,这一方法已在实际设计中得到应用。

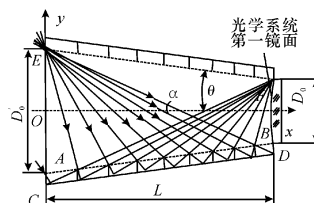


图1 外遮光罩内挡光环设计示意图

Fig.1 Design of vanes in outer baffle

下面给出一个R-C 系统外遮光罩及其挡光环的设计实例。当 $\theta=0.375^\circ, D_0=255\text{ mm}, \alpha=40^\circ$ 时,外遮光罩长度 $L=354\text{ mm}$,外端口径 $D'_0=259\text{ mm}$ 。该外遮光罩内挡光环顶点的坐标如表1所示。

表1 外遮光罩内挡光环顶点坐标

Table.1 Vertex coordinate of vanes in outer baffle

顶点	x_0	y_0
1	328.623 657	-127.643 379
2	303.218 933	-127.786 911
3	277.785 522	-127.930 595
4	252.323 471	-128.074 448
5	226.832 794	-128.218 460
6	201.313 431	-128.362 640
7	175.765 396	-128.506 973
8	150.188 644	-128.651 474
9	124.583 130	-128.796 143
10	98.948 822	-128.940 964
11	73.285 667	-129.085 953
12	47.593 666	-129.231 094
13	21.872 766	-129.376 419

2 内遮光罩的设计

2.1 内遮光罩设计原则

R-C 系统中,主、次镜内遮光罩尺寸和口径设计的基本原则是,要求内遮光罩能够对直接进入视场的杂散光进行遮挡,同时不对成像光线阻挡。具

体要求^[6]为: 1) 视场外的光线被主镜上的内遮光罩所遮挡; 2) 视场外的光线被次镜上的内遮光罩所遮挡; 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; 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; 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; 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。

2.2 内遮光罩设计过程

根据 R-C 系统内遮光罩设计的基本原则和具体要求, 作出主、次镜内遮光罩示意图如图 2 所示。其中, ep 、 hr 、 ij 及 mn 分别为主镜、次镜、远方物体经主镜所成的一次像及远方物体经主、次镜所成的像。光线 1 为主镜外直径决定的视场边缘光线, 光线 2 是由中心遮拦比决定的内孔径光线, 光线 3 为中心视场光线。有关尺寸及角度如图 2 所示, 其中 L_B 为系统的后截距。

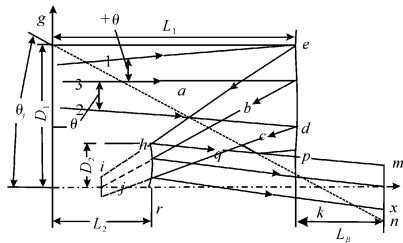


图 2 内遮光罩设计示意图

Fig. 2 Design of inner baffle

当外遮光罩、主镜及次镜结构确定之后, 仍然使用设计外遮光罩时的坐标系, 点 e, g, i, j, h, m 的坐标分别为 $e(L_1, D_1)$, $g(0, D_1)$, $i(L_1 - f_1, f_1 \tan \theta)$, $j(L_1 - f_1, -f_1 \tan \theta)$, $h(L_2, D_2)$, $m(L_1 + L_B, f \tan \theta)$, 其中 θ 为系统半视场角, f_1 为主镜的焦距, f 为 R-C 系统的焦距。光线 1 经主镜反射后的光线 ei , 光线 1 经主镜、次镜依次反射后的光线 hm 的方程分别为

$$\frac{y - D_1}{x - L_1} = \frac{D_1 - f_1 \tan \theta}{f_1} \quad (6)$$

$$\frac{y - D_2}{x - L_2} = \frac{f \tan \theta - D_2}{L_1 + L_B - L_2} \quad (7)$$

2.2.1 次镜内遮光罩顶点 a 坐标

当 R-C 系统中心遮光比 k 确定后, 可由光线 ei 首先求得点 a 的坐标为

$$\begin{cases} x_a = L_1 + \frac{(k-1)f_1 D_1}{D_1 - f_1 \tan \theta} \\ y_a = k D_1 \end{cases} \quad (8)$$

由此得到次镜内遮光罩即 ha 段。

2.2.2 主镜内遮光罩顶点 b 及拐点 c 坐标

为求得主镜内遮光罩的顶点及拐点坐标, 以下工作是必需的。

光线 2 的方程为

$$y = y_a - \tan \theta (x - x_a) \quad (9)$$

光线 2 与主镜的交点为 $d(L_1, y_a - \tan \theta (L_1 - x_a))$ 。光线 dj 的斜率为

$$k_{dj} = \frac{y_a + (f_1 - L_1 + x_a) \tan \theta}{f_1} \quad (10)$$

过外遮光罩顶点和次镜内遮光罩顶点的光线 ga 的方程为

$$y = -x \tan \theta_j + D_1 \quad (11)$$

其中

$$\tan \theta_j = \frac{y_a - D_1}{x_a} \quad (12)$$

主镜内遮光罩顶点为光线 dj 与光线 ga 的交点 b , 其坐标为

$$x_b = \frac{D_1 + f_1 \tan \theta + (L_1 - f_1) k_{dj}}{k_{dj} + \tan \theta_j} \quad (13)$$

$$y_b = \frac{k_{dj} D_1 - [k_{dj} (L_1 - f_1) + f_1 \tan \theta] \tan \theta_j}{k_{dj} + \tan \theta_j} \quad (14)$$

主镜内遮光罩的拐点为光线 ga 和光线 hm 的交点 c , 其坐标为

$$x_c = \frac{D_1 (L_1 + L_B - L_2) - D_2 (L_1 + L_B) + L_2 f \tan \theta}{f \tan \theta - D_2 + (L_1 + L_B - L_2) \tan \theta_j} \quad (15)$$

$$y_c = \frac{D_1 (f \tan \theta - D_2) + [D_2 (L_1 + L_B) + L_2 f \tan \theta] \tan \theta_j}{f \tan \theta - D_2 + (L_1 + L_B - L_2) \tan \theta_j} \quad (16)$$

当外遮光罩结构确定后, 光线 1 经主、次镜反射后的光线 hm , 光线 2 经主镜反射后的光线 dj 与边缘光线 ga 的交点 b, c 及光线 hm 和光线 dj 的交点 q 一般并不重合。为此, 本文将主镜内遮光罩设计成如图 2 所示的折线 bcp 段即二级锥状遮光罩, 不同于通常使用的 pq 段即一级锥状遮光罩^[7]。

二级锥状遮光罩相比一级锥状遮光罩, 都可以使得成像光线顺利通过并最终进入像面。但当视场外杂散光离轴角变大时, 二级遮光罩将优于一级, 前者使更多的杂散光在 bcp 段和主镜间、 bc 段和次镜内遮光罩间、 bc 段和次镜间来回反射, 使部分杂散光得到极大地衰减; 同时, 二级遮光罩使从主镜内遮光罩端口进入视场的杂散光在到达像面前, 至少经过 2 次衍射, 从而起到抑制端口衍射杂散光的作用。

2.3 内遮光罩设计实例

以某高速摄影系统的 R-C 型折反式主物镜为

例,给出其主镜和次镜内遮光罩的设计结果。当视场 $\theta=0.375^\circ$,主反射镜焦距 $f_1=655.15\text{ mm}$,R-C 系统焦距 $f=1\ 300\text{ mm}$,后截距 $L_B=90.61\text{ mm}$,中心遮光比 $k=0.46$,主、次镜参数分别为 $L_1=824.5\text{ mm}$, $D_1=127.5\text{ mm}$, $L_2=418.5\text{ mm}$, $D_2=51.14\text{ mm}$ 时,利用以上的设计方法可以得到主、次镜内遮光罩的顶点坐标如表 2 所示。表 2 中还列出了 p 点即一级锥状遮光罩的顶点坐标。

表 2 内遮光罩顶点坐标

Table. 2 Vertex coordinate of inner baffle

顶点	x	y
a	458.406 9	58.650 0
b	607.732 5	36.218 6
c	628.251 1	33.136 7
d	600.325 8	35.534 2

本文在 Tracepro 中建立了该 R-C 系统的模型,追迹了杂散光在不同离轴角度入射时到达像面的杂散光照度。如图 3 所示,绘出了主镜内遮光罩分别为二级和一级时,入射到像面上的杂散光照度随杂散光离轴角变化的曲线。由于离轴角较大时,到达像面的能量将会比较小,不便于绘图,因此图 3 中的纵坐标实际是光照度的对数值。从图 3 中可知,当杂散光离轴角比较小时,二级和一级遮光罩对杂散光的抑制效果大致相同;当离轴角达到 30° 以上时,二级遮光罩相比一级的抑制效果更为明显。图 4 是离轴角为 70° 时像面上杂散光的照度图。从图 4 中可以看出遮光罩为二级和一级时,到达像面的杂散光照度分别为 $1.082\ 3\times 10^{-12}\text{ W/m}^2$ 和 $1.661\ 4\times 10^{-10}\text{ W/m}^2$,相差 2 个数量级。以上模拟结果验证了本文提出的主镜二级遮光罩优于一级遮光罩的方法。

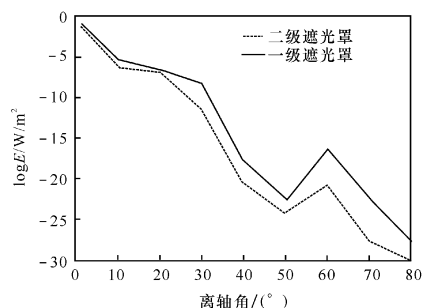


图 3 像面上的杂散光照度随杂光离轴角变化的曲线

Fig. 3 Variation of stray light illumination on image plane with its off-axis angle

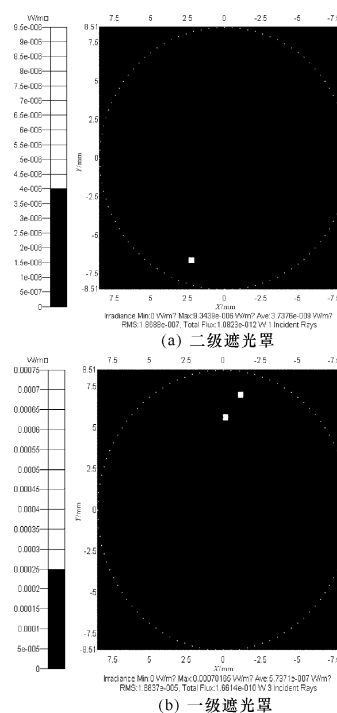


图 4 离轴角 70° 时像面上的光照度

Fig. 4 Illumination on image plane as off-axis angle is 70°

3 主镜、次镜间镜筒内壁上挡光环的设计

杂散光的抑制与分析中有 2 个重要的表面:一是关键表面,指从探测器看到的任何表面,包括从反射镜和镜头中看到的这些表面的像;二是光源直接照射面,指从光源直接或通过反射或镜面和镜头散射后间接接收光能的表面^[8],此二类表面的相关组合构成杂散光传输的路径。实际使用中,常利用在遮光罩或镜筒内壁增加挡光环,减小或移除关键表面或光源直接照射表面,特别是一些同时充当此二类表面的部件。

R-C 系统中,主、次镜间的镜筒阻止外界杂散光直接入射到像面,但镜筒表面本身具有一定反射率,镜筒内壁的部分表面实际上充当关键表面或光源直接照射表面或同时充当此二类表面。因此,当有杂散光辐射到镜筒内壁某些表面上时,可能反射到反射镜面,多次反射后到达像面形成干扰。因此,对除镜筒内壁吸光涂层有一定要求外,还要设计内

挡光环。为此,本文为主、次镜间镜筒内壁设计了一定数量的挡光环。

如图5所示,虚线为不加挡光环时主、次镜间镜筒的位置,本文设计镜筒内壁挡光环为等高,并记作 H 。外界杂散光由次镜边缘点1入射,挡光环设置的目的是隔断点1入射到镜筒内壁上的大部分杂散光到达主镜的路径。在加上高度为 H 的镜筒壁(实线表示)上选择靠近主镜的一点与点1和2连接作为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点4和3设置2个挡光环。依此类推,由最小角度路径与虚线的交点进行了点1和2间的连接,便可确定其他挡光环的位置,直到接近外镜筒边缘。本文为某R-C系统主、次镜间镜筒内壁设计了5级挡光环。

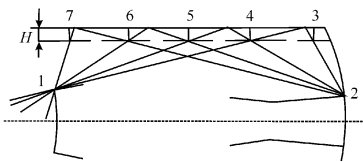


图5 主、次镜间镜筒内壁挡光环的设计

Fig. 5 Design of vanes in drawtube between primary and secondary mirrors

4 结论

本文给出R-C系统外遮光罩内挡光环的程序化设计方法,推导出R-C系统内遮光罩的顶点坐标公式,并将通常使用的主反射镜一级锥状遮光罩改进为二级锥状遮光罩,进一步提出了一种有效抑制杂散光的方法。最后,给出的设计实例验证了本文提出的改进方法的正确性。最后,设计了主、次镜间镜筒内壁上的等高挡光环,进一步消除了R-C系统杂散光辐射。

参考文献:

- [1] 马冬梅,张晓辉,韩昌元.大口径、长焦距光学系统杂散光系数、渐晕系数、像面照度均匀性等参数的测试[J].应用光学,1998,19(5):44-47.
MA Dong-mei, ZHANG Xiao-hui, HAN Chang-yuan. Test of stray light coefficient vignetting coefficient and image surface illumination uniformity

of optical system with large aperture and long focal length[J]. Journal of Applied Optics, 1998, 19(5): 44-47. (in Chinese with an English abstract)

- [2] 王灵杰,张新,杨皓明,等.超紧凑型红外折反式光学系统设计[J].应用光学,2007,28(3):288-291.
WANG Ling-jie, ZHANG Xin, YANG Hao-ming, et al. Design of a compact infrared catadioptric system[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(3): 288-291. (in Chinese with an English abstract)
- [3] 袁旭沧.光学设计[M].北京:北京理工大学出版社,1988.
YUAN Xu-cang. Optical design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. (in Chinese)
- [4] 光学仪器设计手册编辑组.光学仪器设计手册:下册[M].北京:国防工业出版社,1971.
Editorial group of optical instrument design manual. Optical instrument design manual : II[M]. Beijing: Defense Industry Press, 1971. (in Chinese)
- [5] 李晖,李英才.星载光学系统遮光罩消杂光结构优化设计方法[J].光子学报,1996,25(10):914-918.
LI hui, LI Ying-cai. An optimum design method for the light hade of spaceborne optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 1996, 25(10): 914-918. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 宋宁,韩心志,李润顺.航天遥感里奇-克雷蒂安系统遮光罩的设计和分析[J].光学学报,1999,20(6):821-826.
SONG Ning, HAN Xin-zhi, LI Run-shun. Design and analysis of the baffle of the ritchey-chretien (R-C) system used in space remote sensor[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 20(6): 821-826. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 钟兴,张雷,金光.反射光学系统杂散光的消除[J].红外与激光工程,2008,37(2):316-318.
ZHONG Xing, ZHANG Lei, JIN Guang. Stray light removing of reflective optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 316-318. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 黄强.空间光学系统的杂散光分析[J].红外,2006,27(1):26-27.
HUANG Qiang. Analysis of stray light in space optical system[J]. Infrared, 2006, 27(1): 26-27. (in Chinese with an English abstract)