

长焦距光学系统杂光系数测量的新方法 及其理论分析

高万荣 薛鸣球 苗兴华 查冠华 沙维敏

潘来俊 张兴珍 梁蕴绵 秦 斌

(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 在分析现有杂光系数测量的基础上, 提出了一种新的长焦距光学系统杂光系数测量的方法, 并对这种方法进行了理论分析。

关键词 长焦距光学系统, 杂光系数, 杂光源

1 引 言

成像光学系统的像面通常不仅接收成像光线, 也接收到了非成像光线, 而这非成像光线则降低了像面的对比度。传统的评价光学系统抑制杂散光性能的方法之一是黑斑法。在黑斑法测量中, 目标物是一个置于具有均匀辐亮度扩展场上的完善圆形小黑斑。杂光系数(VGI)定义为像面中黑斑中心的辐照度与黑斑移去时同一点的辐照度之比。均匀扩展亮场的实现, 通常是采用积分球的方法。对于摄影系统来说, 当焦距短时, 积分球实现起来比较容易, 而当焦距长时, 则按照模拟光源应距被测镜头10倍焦距远以外的要求, 制作大口径积分球非常困难。本文在分析现有杂光系数测量装置的特点及其相应适用范围的基础上, 提出了一种长焦距摄影系统杂光系数测量的方法, 并提出了分析杂光源的一些观点。同时, 结合目前正在设计的一台杂光系数测试仪进行了讨论。

2 现有的杂光系数测量装置的分析

测量光学系统杂光系数的典型装置如图1所示^[1]。在积分球内的适当位置上装上几个灯, 以产生张 2π 球面度的扩展亮场。黑斑则是装在积分球内壁上的一个吸收腔, 它可以用具有积分球其它部分一样反射性质的材料更换。被测镜头从积分球上正对着黑斑的出口伸入, 镜头的前端至少应伸到积分球内表面的孔口边缘。黑斑像的辐照度用一个适当的光电探测器进行测量, 探测器的前端是一个小孔。

上述条件下探测器测得的信号与黑斑被具有积分球其它部分一样反射性质的材料代替后探测器所测得的信号之比, 便给出杂光系数。如果不能具有积分球其它部分一样反射性质

收稿日期: 1995年6月11日; 收到修改稿日期: 1996年1月2日

的材料代替黑斑，则第二次测量时，可将小孔和探测器移到黑斑像的临近像点。

测量装置的具体结构取决于被测镜头的性能参数，而被测镜头的性能参数则由使用条件而定。对摄影光学系统来说，物距常常很大，则来自整个半无限空间的辐射照到镜头上，扩展源为了模拟这种使用条件，也必需对镜头张 2π 球面度。显然，事实上不可能实现位于无限远的这种光源和黑体，通常以10倍焦距外的模拟黑体和均匀扩展亮场来代替。均匀扩展亮场则用积分球来实现。因此，图1所示的装置适用于焦距相对较短的镜头，这时，单个积分球实现起来比较容易。测量时黑斑可位于视场中的不同位置来进行测量。但当焦距长达几米时，按照10倍焦距的要求，则要求积分球的直径相当大。为此，本文作者提出了如下的分区扩展源法，对所研制的长焦距摄影光学系统进行测量。

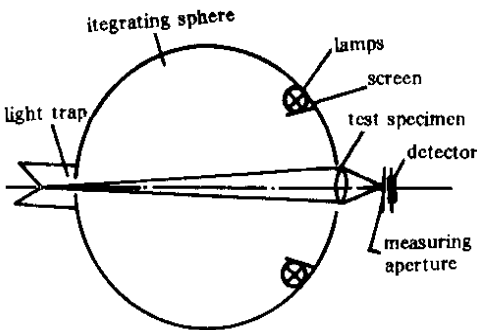


Fig 1 Veiling glare measurement in the case of an unlimited object field

3 扩展场分区实现法及其理论计算

3.1 分区的概念

事实上，视场中和视场外的不同点是通过不同的散射路径到达像面的，如图2所示。

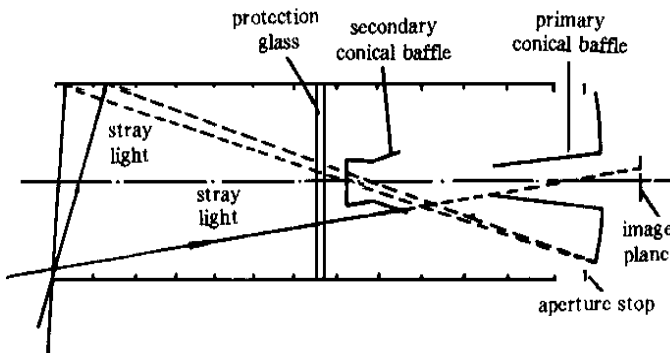


Fig 2 Stray light paths

由图可见，不同的视场点是通过不同的散射路径而到达像面的^[2]。为了分析光学系统不同视场点对系统杂散光水平的贡献量，以及光学系统对不同杂散光源的抑制能力，可以把杂散光源分为不同的区在各个区采用不同的光屏来模拟杂散光源，这样做，不仅可以通过实验研究不同杂散光源对光学系统杂散光水平的贡献量，也同时避免了制作大直径的积分球。

分区法是分成三个区域：A区：与光学系统视场相应的区域；B区：光线能直接进入光学系统第一折射面的目标区域；C区：在该区的任一点上的光源发出的光线能直接入射到光学系统的遮光罩上。在具体实现时，A区可以采用一光亮度均匀的平面屏来实现，C区可用筒形光屏来实现。B区可采用中间开孔的平面屏来实现。开孔的大小以不遮挡来自A区的光线为准。为了制作及运输的方便，在本设计中，B区的大小采用与A区一样的尺寸。

3.2 A区、B区和C区亮度均匀性的要求及其实现

A、B、C各区屏应具有朗伯辐射特性，即从被测镜头的入射光瞳观察时，对所有视场角其亮度不变。按照ISO标准的要求，在相应于像框对角线一半的视场中心区域内，其亮度均匀性应高于 $\pm 5\%$ ，而在整个视场范围内，其亮度均匀性应高于 $\pm 8\%$ 。如上所述，A区是有效画幅所对应的目标区域，B区则是光线能直接进入光学系统第一个折射面的目标区域，C

区是光线能直接入射到遮光罩上的目标区域。所以,对A区的亮度均匀性要求很高,而对B区和C区的要求则可适当降低。光源的选择取决于光学镜头工作波段的要求。根据使用部门的要求,在目前设计的杂光测试仪中,选用卤钨灯作为照明光源。卤钨灯除满足光谱要求外,其亮度可在一定范围内调节。但卤钨灯灯丝密集,可看作点光源。为满足亮度均匀性要求,必须确定灯与屏之间的距离以及灯的分布方式。根据点光源的照度公式和照度的叠加原理,可编制专用程序,通过改变灯的数量、灯距和灯的布局方式,计算出A区屏上的照度的相对值。表1给出A区屏第一象限相对照度的分布值。在有效视场中心区域(大小相应于像框对角线的一半)内,照度均匀性为在 $\pm 1\%$ 以下,在相应于有效视场对角线范围内,照度均匀性为 $\pm 5\%$ 以下。当然实际的灯泡并不是点光源,且加上灯泡性能的分散等,实际的照度分布可能有所下降,为此,A区屏面采用双层有机玻璃,中间夹一层散射膜的方法,以增加屏面照度的均匀性。同理,可以确定B区和C区的灯的分布情况以及灯与屏之间的距离。

Table 1. The relative irradiance distribution of the first quadrant of area A

X	l= 1000															DS = 21															distribution= 1- 16(11.25)- 1																		
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	
Y= 1500	0.95	0.95	0.91	0.91	0.91	0.93	0.92	0.91	0.90	0.96	0.88	0.87	0.81	0.79	0.75	0.71	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95	0.91	0.92	0.90	0.87	0.81	0.80	0.75	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.01	1.00	0.99	0.97	0.95	0.92	0.88	0.84	0.79
Y= 1400	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.05	1.04	1.04	1.03	1.01	0.99	0.96	0.92	0.87	0.82	1.05	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95	0.90	0.84	1.05	1.05	1.05	1.05	1.06	1.06	1.07	1.07	1.08	1.08	1.07	1.06	1.04	1.01	0.97	0.92	0.87
Y= 1300	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.06	1.07	1.08	1.08	1.08	1.07	1.05	1.03	0.99	0.94	0.88	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05	1.06	1.07	1.08	1.08	1.07	1.05	1.03	0.99	0.94	0.88	1.02	1.03	1.03	1.03	1.01	1.05	1.06	1.07	1.08	1.08	1.08	1.06	1.01	1.00	0.95	0.90	
Y= 1200	1.01	1.01	1.02	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08	1.08	1.06	1.04	1.04	0.96	0.91	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.07	1.06	1.05	1.02	0.97	0.92	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.06	1.05	1.02	0.98	0.93	
Y= 1100	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.06	1.05	1.04	0.98	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.91	
Y= 1000	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95	
Y= 900	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95		
Y= 800	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95		
Y= 700	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95		
Y= 600	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95		
Y= 500	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95		
Y= 400	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95		
Y= 300	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95		
Y= 200	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95		
Y= 100	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95		
Y= 0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.03	1.04	1.05	1.05	1.04	1.02	0.99	0.95		

3.3 A区、B区和C区的大小和相互位置的计算

在图3中,设 a_1a_2 为A区屏的大小, ef 为光学系统第一折射面的口径, d_g 为光学系统外遮光罩端点的口径(在纵向截面内), a_1e 和 a_2f 为沿视场角边缘的线段。在过 d_g 线段垂直于光轴的平面内,取 $c_1c_2 = a_1a_2$,连接 a_1c_1 和 a_2c_2 ,然后,延长 fd 连线交 a_1c_1 于 b_1 ,过 b_1 作垂直于光轴的直线,交 a_1e 于 b_1 点,则 b_1b_2 即为B1屏开口的大小。再连接 fb_1 ,并延长交 a_1c_1 于 b_2 ,过 b_2 作垂直于光轴的直线,交 a_1e 于 b_2 点,则 b_2b_3 即为B2屏开口的大小。类似地,可以确定其它各B区屏的大小,以便A区屏、C区屏和B区屏组合起来可构成一个对镜头张 2π 球面度的扩展场。C区屏可采用回形屏,其确定方法如图3所示, b_1c_1 为C区屏的高度, d_g 为回形屏内孔上口边长。回形屏的下口为B1区。各区的大小、相互位置计算如下:

设光学系统的焦距为 f ,按照10倍焦距的要求,A区距镜头的距离为 $d_A = 10f$ 。A区的大小(边长)为:

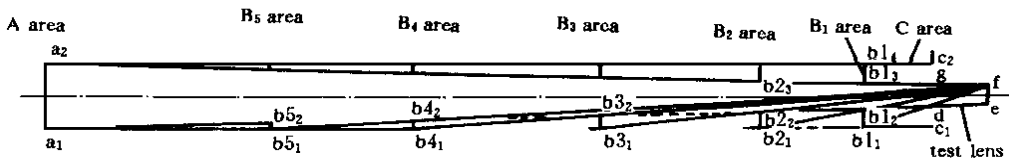


Fig 3 Schematic diagram of the divided source area method for the realization of the extended source

$$l_a = \frac{y}{\beta} \tag{1}$$

式中, β 为垂轴放大率, y 为象高。

确定B区和C区屏大小和位置的原则是, 它们不应遮挡来自A区屏的光线, 并且构成 2π 球面度扩展场的其余部分。并且为了便于制作, 可将B区屏和C区屏的外形尺寸作成一样的。

如图3所示, 在 Δb_1c_1d 中,

$$db_1c_1 = \Phi, \quad dg = D_0, \quad dc_1 = (l_a - D_0)/2, \tag{2}$$

$$b_1c_1 = dc_1/\text{tg } \Phi = [(l_a - D_0)/2] \text{ctg } \Phi$$

此即为C区屏的高度。式中, Φ 为外遮光罩下 endpoint d 与保护玻璃上 f 点的连线与光轴的夹角; D_0 为外遮光罩的口径。

B1区的开口为

$$b_1b_2b_3 = dg + 2 \text{tg } \alpha \times b_1c_1 = D_0 + \text{tg } \alpha \text{ctg } \Phi(l_a - D_0) \tag{3}$$

在 $\Delta b_2b_1b_2$ 中,

$$\text{tg } b_1b_2b_1b_2 = \frac{D + (L + b_1c_1)\text{tg } \alpha}{L + b_1c_1} = \frac{D}{L + [(l_a - D_0)/2] \text{ctg } \Phi} + \text{tg } \alpha \tag{4}$$

式中, $D = ef$ 为保护玻璃的口径; L 为 de 沿光轴的投影长度。所以, B2屏距B1屏的距离为

$$b_2b_1b_1 = \frac{b_1b_2b_1}{\text{tg } b_1b_2b_1b_2} = \frac{(l_a/2) - (D_0/2) - [\text{tg } \alpha \text{ctg } \Phi/2](l_a - D_0)}{D \{L + [(l_a - D_0)/2] \text{ctg } \Phi\}^{-1} + \text{tg } \alpha} \tag{5}$$

B2屏开口大小为

$$b_2b_2b_3 = dg + 2 \text{tg } \alpha(b_2b_1b_1 + b_1c_1)$$

$$= D_0 + 2 \text{tg } \alpha \left\{ \frac{l_a/2 - D_0/2 - (1/2) \text{tg } \alpha \text{ctg } \Phi(l_a - D_0)}{D \{L + [(l_a - D_0)/2] \text{ctg } \Phi\}^{-1} + \text{tg } \alpha} + \frac{1}{2} (l_a - D_0) \text{ctg } \Phi \right\}$$

类似地, 可以计算出其它各B区屏的大小, 以便A、B、C三个区合起来构成对镜头张 2π 球面度的扩展源。

在实际制作时, 各B区屏和C区屏有一定厚度, 如图4所示, b_5b_5 将挡掉一部分光线, 为此回形框($b_5b_5b_5b_5$ 回形屏的的纵向截面)可用透明的有机玻璃制造。另外, 为了避免各屏的亮度之间互相影响, 在实现时, 各区屏背对着镜头的一面及侧面均封闭起来, 外面再涂成黑色。为了防止热变形, 各屏内均安装有通风装置。

3.4 黑斑的设计

按照 ISO 的要求, 黑斑可以是圆形的, 其直径的大小应能使其所形成的像等于像框对角线长度的 (0.1 ± 0.02) 倍。黑斑也可以是方形的, 其边长应能使其所形成的像为像框对角线的 (0.1 ± 0.02) 倍。而黑斑的亮度则应小于周围亮场亮度的 10^{-3} 。如上所述, 在本文作者提

出的分区扩展源法中, 黑斑是悬挂在均匀亮度的平面屏A 前面, 其尺寸受到严格限制, 为此, 设计了一种黑斑^[3], 如图5所示。实验表明, 该黑斑结构完全满足 ISO 标准要求。

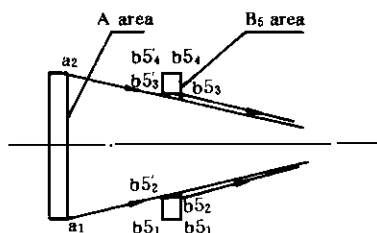


Fig 4 Schematic diagram of the connection between area and B5 area

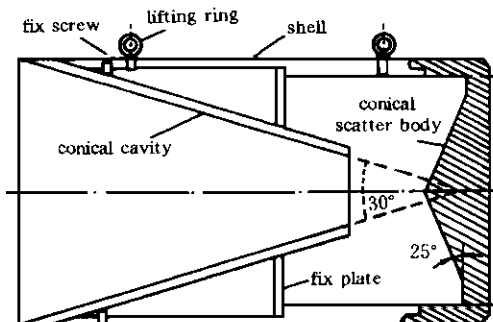


Fig 5 Structure of the black patch

结 论 采用分区的观点, 在测量杂光系数的同时, 能指出杂光源各部分对杂光系数的影响。提出了分区实现扩展源法, 给出了详细计算各部分尺寸的公式。这种装置不仅易于实现, 而且通过各区屏的亮暗可以由实验找出不同部分杂散光源对杂光系数的贡献, 因而具有分析各部分杂散光源对杂散光水平影响的优点。

参 考 文 献

- [1] Draft international standard ISO/DIS 9358, Optics and optical instruments-Veiling glare of image forming systems-definitions and methods of measurement, 1991
- [2] Francis Reininger, Stray light performance optimization through system design. *Proc SPIE*, 1994, 2260·17~ 28
- [3] Gao Wanrong, Zhang Xingzhen, Pan Laijun *et al* , The design of the black patch. *Chinese J. Laser*, 1996, B5(3)·260~ 267

A New Method for Measuring the Veiling Glare Index of Long Focal Length Optical Systems and Theoretic Analysis

ao Wanrong Xue Mingqiu Miao Xinghua Zha Guanhua Sha Weimin
Pan Laijun Zhang Xingzhen Liang Yunmian Qi Bin

(Space Optics Department, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068)

(Received 11 June 1995; revised 2 January 1996)

Abstract A new method is proposed for measuring the veiling glare index of long focal length optical systems based on the analysis of the properties and their application fields of present measurement devices and the theoretical analysis on the stray light sources is also given.

Key words long focal length optical system, veiling glare index, stray light sources