

转镜式高速相机与阴影装置或干涉装置结合的光学问题

陆 增 培
(苏州光学仪器厂)

提 要

本文叙述了转镜式高速相机与阴影装置或干涉装置最佳结合的光学条件,并给出了在最佳结合时光学参数应满足的关系式。当相机与阴影装置结合时,公式表明所能获得的最大画幅尺寸、衍射鉴别率、灵敏度三个技术指标之乘积为一常数,光学系统的设计应使这三个指标得到最佳匹配。最后叙述了适合与阴影装置或干涉装置结合的转镜式高速相机应具有的光学结构。

为研究在透明介质中发生的高速流逝过程,如风洞、自由飞行弹道靶、激波管等实验装置中,除了用高速相机作直接摄影外,还必须在使用高速相机的同时附加其它光学装置,如阴影装置、干涉装置等。当相机与阴影装置或干涉装置结合使用时,显然应保持物像光学共轭和光瞳光学共轭^[1],也就是说被研究的目标应成象在相机的胶片上;阴影装置的出瞳(纹影摄影时其出瞳为狭缝或刀口,阴影摄影时其出瞳为圆孔)或干涉装置的出瞳(位于无限远)应成象在相机的入瞳上。通常的方法是在相机前加一附加透镜,但不是所有的相机都能与它们结合的。能否结合并获得最佳的结合则取决于相机的光学结构以及结合时的光学条件。本文将就此问题作一讨论,以便为一种能同时与阴影装置或干涉装置结合使用的转镜式高速相机提供光学方案设计依据。

一、相机与阴影装置的结合

相机与阴影装置结合时的整个光路如图1所示的等效光路。等效光学系统由阴影装置之后和相机转镜之前各种光学元件组成,包括相机前的附加透镜。物距为 L 的目标被阴影装置成象在距阴影装置出瞳的距离为 L_0 处 y ,通过等效光学系统成象在分幅相机的转镜 y' 上,最后被排镜成象在相机的胶片上。在扫描相机中,象 y 被等效光学系统直接成象在相机的胶片上。阴影装置的出瞳 a 被等效光学系统成象在分幅相机的排镜光阑上或扫描相机的转镜上(扫描相机的转镜起孔径光阑作用)。

要使相机和阴影装置发挥其最大功能,其间最佳结合显然应满足:(1)阴影装置试验段的目标在相机胶片上的成像尺寸应充满画幅尺寸;(2)阴影装置出瞳在分幅相机排镜上或扫描相机转镜上的成像尺寸应充满排镜光阑或应与扫描相机转镜尺寸相一致。这就要求整个光学系统具有一定的物像放大率 $\beta = (b/D)$ 和光瞳放大率 $\beta_p = (a'/a)$ 。其中 D 、 a 分别为

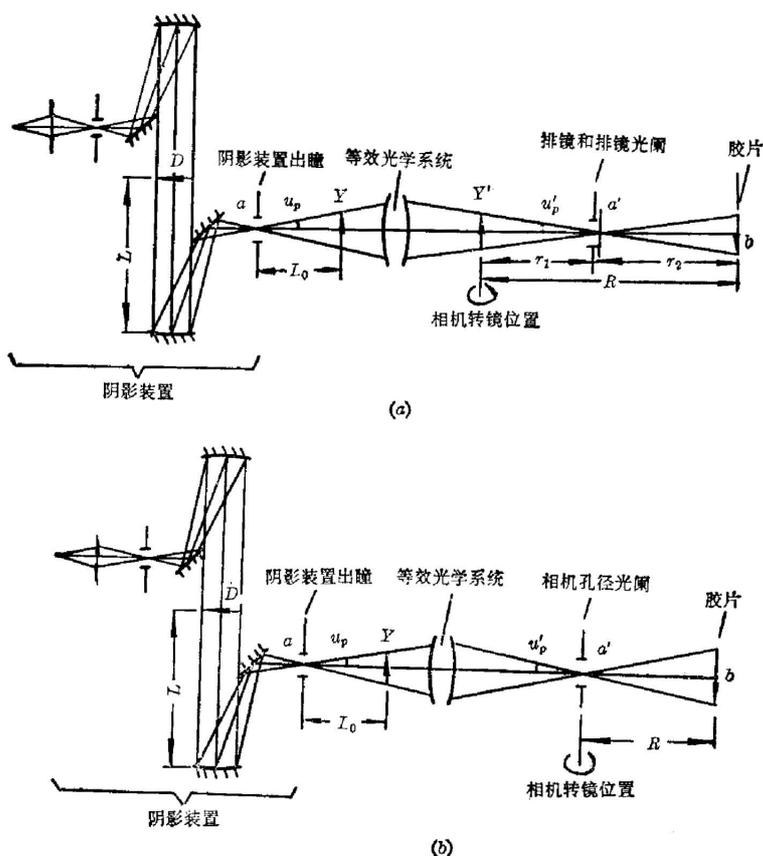


图 1 相机与阴影装置的结合

Fig. 1 Optical schematic diagram of the combination of the rotating mirror camera and the shadowgraphic devices

(a) framing camera; (b) slit scanning camera

阴影装置的目标尺寸和出瞳尺寸; b 、 a' 分别为分幅相机的画幅尺寸和排镜光阑尺寸(在扫描相机中, 它们应为胶片上狭缝像尺寸和转镜尺寸)。

分幅相机的情况如图 1(a) 所示, 以单排排镜为例, r_1 、 r_2 表示排镜的物距和像距, R 为排镜的共轭距, $R=r_1+r_2$, 也即相机暗箱的扫描半径。于是, 可把光瞳面成像的拉赫(Lagrange-Helmholtz)不变式表示为:

$$au_p = a'u_p \quad (1)$$

因为阴影装置的出瞳位于它的出射焦点上, 同时在通常情况下目标尺寸应等于阴影装置的通光口径, 因此 $2u_p$ 也就是阴影装置的相对孔径: $2u_p = (D/f')$, f' 为阴影装置的焦距。而 u'_p 是相机的象方视场角:

$$2u'_p = (b/r_2), \quad a(D/f') = a'(b/r_2) \quad (2)$$

如果这个系统要满足上述两个最佳结合条件, 于是可得

$$\beta\beta_z = (r_2/f') - (r_1/f')\beta_0 = (R/f') [\beta_0/(1+\beta_0)], \quad (3)$$

式中 β_0 为排镜倍率: $\beta_0 = (r_2/r_1)$ 。

上式表明,当相机与阴影装置结合使用时,整个光学系统的物象放大率与光瞳放大率之乘积仅是相机暗箱参数(扫描半径 R 和排镜倍率 β_0)和阴影装置焦距的函数,而与等效光学系统之参数无关。等效光学系统的设计只能改变二者之比值,而不能改变二者之积。当相机和阴影装置给定时,二者之积便为一常数,试图通过附加透镜使它们同时满足上述两个最佳结合条件是困难的。转镜式高速相机与阴影装置结合时往往不能在最佳状态下使用,其原因就在此。公式(3)表示了这种装置在最佳结合状态下,光学参数应满足的关系式。在选配或设计这种结合装置时,应使它们的光学参数尽量满足这个关系式。

现在来考虑这种结合装置的衍射鉴别率 N 和灵敏度 S 。衍射鉴别率是由相机对底片的孔径 A 决定的: $N=1470 A$, $A=(a'/r_2)$ 。灵敏度是由阴影装置决定的: $S=(f'/a)$ 。那么利用(2)式便可得出

$$bNS=1470 D。 \quad (4)$$

这个公式表明,当转镜式分幅相机与阴影装置结合时,所能获得的最大画幅尺寸、衍射鉴别率、灵敏度三个技术指标之乘积是一个与阴影装置通光口径有关的常数。由此可知,通过相机的光学设计手段试图同时改进这三个技术指标都是徒劳的,光学系统轮廓尺寸的合理设计仅仅能使这三个指标获得最佳的匹配。

扫描相机情况如图 1(b)所示,按同样方法可以得出

$$\beta\beta_p=(R/f')。 \quad (5)$$

同样,也可以得出与(4)式完全一样的关系式。因此转镜式高速相机无论是分幅型式还是扫描型式在与阴影装置结合时,其结论是一致的。

二、相机与干涉装置的结合

相机与干涉装置结合的等效光路如图 2 所示,等效光学系统由干涉装置之后和相机转镜之前的各种光学元件组成,包括相机前的附加透镜。距干涉装置出射窗口的距离为 L 的目标 y 被等效光学系统成像在相机的胶片上(在分幅相机中,还要通过排镜),干涉装置无限远的出瞳被等效光学系统成像在分幅相机的排镜光阑上或扫描相机的转镜上。如果 y 表示干涉装置的目标尺寸, b 为相机胶片上的像尺寸,那么由拉赫不变式可得

$$y \cdot 2u = b \cdot 2u = b \cdot A, \quad (6)$$

式中 A 为相机对底片的孔径: $A=2u$ 。

显然在这种结合装置中,等效光学系统的设计只能改变物像放大率,而不影响相机对底片的孔径 A ,因此相机本身的孔径决定了摄影的衍射鉴别率。然而在这里重要的是要求对目标摄影时,其视场边缘不发生渐晕,这就应满足下列关系

$$2uL + y \leq D, \quad (7)$$

式中 D 为干涉装置出射窗口的通光口径,把(6)式代入上式便可得到

$$A \cdot b \leq [(D-y)y/L]。 \quad (8)$$

这个关系式表明了相机与干涉装置结合时应满足的视场无渐晕条件,等效光学系统的设计同样应满足这个关系式。

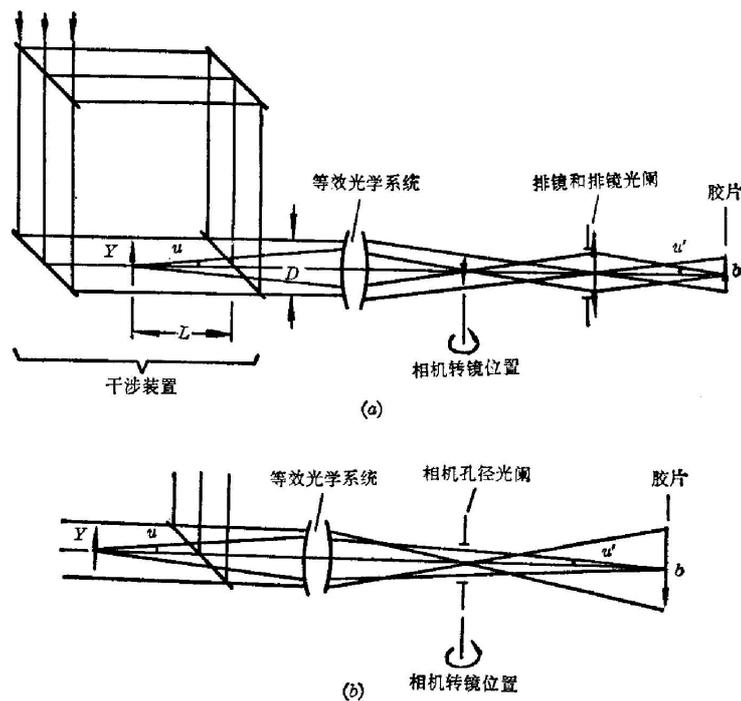


图2 相机与干涉装置的结合

Fig. 2 Optical schematic diagram of the combination of the rotating mirror camera and the interferometer

(a) framing camera; (b) slit scanning camera

三、相机的光学结构

能够与阴影装置或干涉装置结合使用的转镜式高速相机要求有特殊的光学结构，只有在允许结合的情况下才谈得上光学参数的相互匹配。

由转镜式分幅相机的光学原理知道，在相机的光学系统中安置了一个与相机入瞳和排镜光阑互为光学共轭的孔径光阑。阴影装置或干涉装置的出瞳都将在相机的孔径光阑和排镜光阑上成像，来自装置的光束能否被相机接收，将取决于相机孔径光阑、排镜光阑的结构形式和光学系统的放大率。对于具有单孔孔径光阑和单排排镜的相机是不成问题的，然而对于具有两个以上孔的孔径光阑和两排以上的排镜形式就未必如此。以某种相机与出瞳为圆孔的阴影装置结合为例，相机的孔径光阑和排镜光阑的结构以及阴影装置出瞳的成像情况如图3所示。

显然，当阴影装置出瞳的成像尺寸不够大时，首先是孔径光阑，然后是排镜光阑都将明显地切割光束，严重时将被完全切割掉。遗憾的是如前所述，光瞳放大率受(3)式所限制。然而，阴影装置的出瞳为狭缝时，由于其高度尺寸要比出瞳为圆孔时的直径大得多，因此具有这类光学结构的相机较容易实现纹影摄影，而不易实现阴影摄影。

至于干涉装置由于其出瞳在无限远处，在相机孔径光阑和排镜光阑处的像始终是一个很小的光斑，来自干涉装置的光束是不可能被这种相机接收的。如果用扩大这个光斑的办

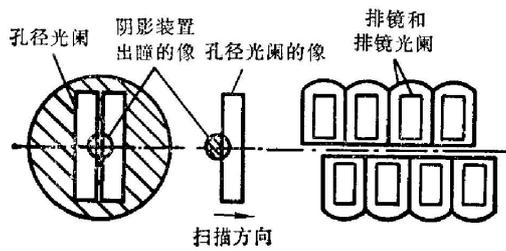


图3 某种相机的孔径光阑和排镜光阑

Fig. 3 Aperture stop with double openings and framing lenses bank in double rows in the given camera

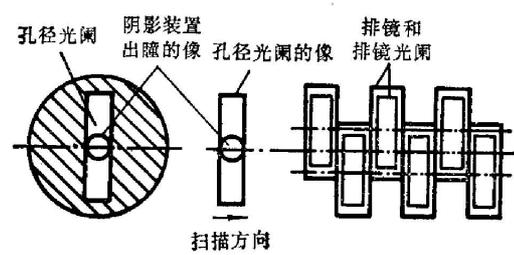


图4 单孔孔径光阑和特殊双排排列

Fig. 4 Aperture stop with a single opening and special framing lenses bank in double rows

法以期待能为这两个光阑接收,则此时将发生切割干涉场的现象,胶片上将得不到完整的干涉照片。因此这类相机更不适合于作干涉摄影。

为解决“结合”这个问题,相机的孔径光阑宜采用单孔结构。在等待型相机中,在孔径光阑处安置的分光系统相应地应采用半透半反形式。至于排镜不妨采用如图4所示的一种特殊双排排列形式,相邻排镜和排镜光阑在空间方向是互相重叠的,重叠区域至少应等于排镜光阑的宽度,排镜光阑与排镜光轴保持同心(不排除偏心的可能)。这种排列形式在拍摄频率和画幅分布上虽然相当于普通的双排排列形式,但它却不会因光瞳放大率而出现问题,尤其适合与干涉装置结合。

最后还必须指出,当阴影装置或干涉装置采用大功率激光器(如红宝石激光器)作光源时,为避免光学元件和相机转镜的损毁,光学系统的设计应使激光束的会聚点偏离这些元件,但是必须注意到在作干涉摄影时应避免切割干涉场。

参 考 文 献

- [1] А. С. Дубовик; «高速流逝过程摄影记录», (中译本)(科学出版社,1976), 293.

Optical problems in the combination of a high-speed rotating mirror camera with shadowgraphic devices or a interferometer

LU ZENGPEI

(*Suzhou Optical Instruments Factory*)

(Received 3 March 1983; revised 23 May 1983)

Abstract

In this paper, the optical conditions for the optimum combination of a rotating mirror camera with shadowgraphic devices or a interferometer are described, and equations showing the relation among the optical data in the optimum condition of the combination are given. When the camera is used together with the shadowgraphic devices, another equation in the paper shows that the product of the three main parameters (maximum frame size, diffraction resolution, resolution and sensitivity) is always a constant, and that the optical system should be designed to make the three parameters optimally match, finally, the optical structure suitable for the camera that is used to be combined with the shadowgraphic devices or the interferometer is also discussed here.