

# 等待型高速相机光学系统的研究

陆增培  
(苏州光学仪器厂)

## 提 要

本文介绍了等待型转镜高速相机的一种新的光学方案。由于应用特殊的分光系统的排镜结构,相机不仅能直接进行分幅或扫描摄影,而且还可以通过简单的附加透镜实现与阴影(纹影)装置或干涉装置的结合使用,从而扩大了相机的功能。

## 一、引 言

同步型转镜高速相机与阴影(纹影)或干涉等专用装置的结合使用,已取得了一系列成果<sup>[1,2]</sup>。但是,对于研究拍摄起点时间很不稳定的事件来说,等待型转镜高速相机是一种最为方便可靠的测试手段,它不需要被摄事件的起点与相机的记录起点精确地同步,可省略许多复杂的电子设备。因此研制一种与阴影(纹影)或干涉等专用装置结合使用(以下简称“结合”)的等待型转镜高速相机无疑是高速摄影界关注的问题。然而,对等待型转镜高速相机,特别是对分幅型式来说,因其光路十分复杂,给“结合”工作带来一定的困难。为此,必须对相机的光学方案进行巧妙的设计。例如:GSFK等待型转镜高速相机采用双通道光学系统的设计方案<sup>[3]</sup>。

本文将介绍一种基于单层转镜等待原理的单通道光学系统。由于该设计方案中采用了特殊的分光系统和排镜结构,所以这样的光学系统除了具有直接分幅或扫描摄影的功能以外,只需增设简单的附加透镜便可实现与阴影(纹影)或干涉等专用装置的结合使用。

## 二、相机的分光系统

众所周知,采用单通道光学系统和转镜具有两个光学入口的等待型转镜高速相机,转镜型式无论是单层或双层,为实现等待原理,必须把进入相机入瞳的光束分成等能量的二束,以不同的途径射向转镜,都会涉及到分光问题。为此,在相机中都要安置一个分光系统,通常它被安置在光学系统的孔径光阑(或其光学共轭像)处,以避免分光不均匀引起的渐晕现象。如ZFD-20型、ZFD-50型等高速相机<sup>[4,5]</sup>,它们的分光系统如图1所示,分光光阑为二排矩形孔,分光元件是一对棱镜。

根据文献[6],在满足光瞳光学共轭和物像光学共轭条件下,相机与阴影(纹影)装置结合使用时,光瞳放大率受物像放大率限制;相机与干涉装置结合使用时,干涉装置的出瞳在无限远处。因此,不难得出:阴影装置或干涉装置的出瞳在相机孔径光阑处所成的像将是一

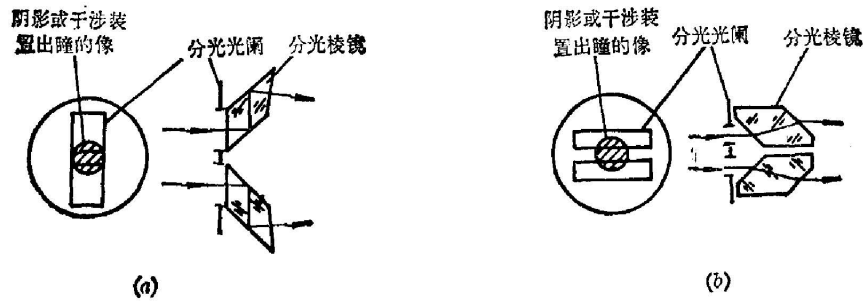


图 1 ZFD 相机的分光系统

Fig. 1 Beam splitter arrangements in ZFD cameras

(a) in ZFD-20 camera; (b) in ZFD-50 camera

个很小的圆形光斑; 纹影装置因其出瞳为狭缝像或刀口, 所以在相机孔径光阑处将成窄条状的像。如果在相机中采用图 1 所示的分光系统, 那么阴影装置或干涉装置的出瞳也将在分光系统处成一个很小的圆形光斑(见图 1 中剖面线所示部分)。显然, 在干涉摄影时会切割干涉场而得不到完整的干涉图样, 严重时将会把干涉场全部切去; 对于阴影摄影, 能否实现则取决于光学系统的光瞳放大率大小。当然也可用光瞳位置偏离的方法来扩大这个光斑, 但是这将更严重地切割干涉场, 而在阴影摄影时要把由此而产生的渐晕现象限制在允许范围内也将是困难的。

为解决上述问题, 可以采用一种新的分光系统。分光光阑具有单排孔(孔的形状应与排镜光阑一致)的形式, 分光元件是镀以半透半反膜的组合棱镜, 如图 2 所示。由图可知, 即使阴影装置或干涉装置的出瞳在分光系统处所成的像(图中剖面线部分)尺寸无限地小, 来自阴影装置或干涉装置的光束也将无切割地通过这个分光系统。

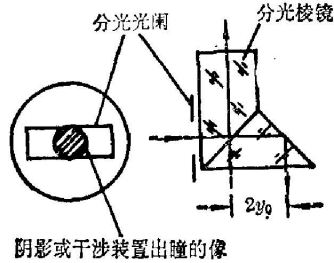


图 2 新的分光系统

Fig. 2 A new beam splitter arrangement

本文将介绍的相机光学方案中就是采用了这种分光系统。参看图 4 可知, 为保证转镜旋转中心的  $y_0$  坐标( $y_0$ ——旋转中心至光轴的距离), 通过分光棱镜  $P$  分光后, 两条光轴之间的距离应为  $2y_0$ , 因此分光棱镜主截面几何尺寸是由转镜旋转中心的  $y_0$  坐标来确定。这种分光系统能给相机光路提供合理布局, 使相机在两个工作区域内获得的像面坐标方位保持连续。由分光不均匀而造成的渐晕现象在这里也将被消除。同时也使相机光学系统保持同轴(多排排镜情况除外), 有效地利用了透镜的口径, 对于光路计算和提高像质是有益的。

同时使相机光学系统保持同轴(多排排镜情况除外), 有效地利用了透镜的口径, 对于光路计算和提高像质是有益的。

### 三、相机的排镜和排镜光阑

在转镜分幅相机中, 分光光阑通过透镜成像在起分幅作用的排镜上, 当转镜旋转时, 分光光阑的像在排镜光阑上扫描从而起到光学快门作用。由于排镜光阑与分光光阑为光学共轭, 可把光学快门作用视为各个排镜光阑的像依次地通过分光光阑。如前所述, 在结合使用时, 阴影装置或干涉装置的出瞳在相机分光光阑处成像为一个很小的圆形光斑。显然只有

当排镜光阑在分光光阑处的共轭像包含这个圆形光斑时,才能将来自阴影装置或干涉装置的光束被排镜接收,并在底片上形成阴影或干涉图像。排镜和排镜光阑的结构型式无疑应满足这个条件。因此除单排结构型式外,采用文献[6]给出的一种特殊双排排列作为排镜的结构型式是合适的。这种结构型式如图3所示,每一排镜和排镜光阑都通过光轴扫描弧线(在图5、图6中将了解到它的光学原理)。

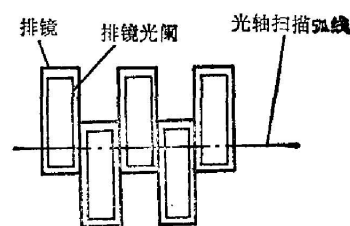


图3 特殊双排排镜

Fig. 3 Special framing lenses bank in double rows

#### 四、相机的光学系统

通过以上讨论,相机可采用如图4所示的一种光学方案。它是基于单层三面体转镜的等待原理,分光棱镜 $P$ 给转镜提供了两个直入口,具有两个 $120^\circ$ 的扇形工作区域。光路的布局保证了在两个工作区域内得到像面坐标方位一致的画幅,为判读提供了方便。相机的分幅摄影和扫描摄影两种功能可以通过更换暗箱(分幅暗箱和扫描暗箱)或光学部件的方法来实现,因此主物镜,分光棱镜和转镜部件的设计应考虑共用性。

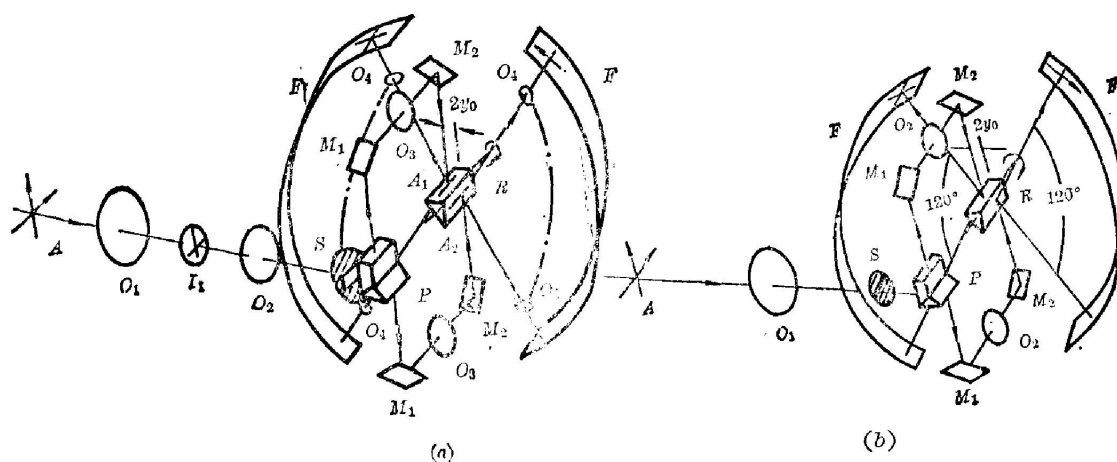


图4 相机的光学系统

Fig. 4 Optical scheme of the camera

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

图4(a)为分幅型式。光学系统为三次成像。来自目标 $A$ 的光束通过主物镜 $O_1$ 在作为内定标的网格分划板上成像 $I_1$ ,再通过透镜 $O_2$ 和分光棱镜 $P$ 被分成等能量的两束光,经反射镜 $M_1$ 、透镜 $O_3$ 、反射镜 $M_2$ ,在三面体转镜 $R$ 附近成两个像 $A_1$ 和 $A_2$ ,由排镜 $O_4$ (双排的应为图3所示的型式)把 $A_1$ 和 $A_2$ 成像在两个沿焦弧面分布的底片 $F$ 上。透镜 $O_3$ 的主要作用是把分光光阑 $S$ 成像在排镜 $O_4$ 上,转镜旋转时使底片逐幅曝光。

图4(b)为扫描型式。光学系统为二次成像。主物镜 $O_1$ 把目标 $A$ 成像在水平放置的狭缝 $S$ 上,被狭缝剪切的像通过分光棱镜 $P$ 、反射镜 $M_1$ 、转像透镜 $O_2$ 、反射镜 $M_2$ 和三面体转

镜  $R$ , 成两个沿焦弧面分布的底片  $F$  上。转镜旋转时, 在底片上将获得狭缝像的连续扫描。因为相机采用半透半反的分光形式, 并且由于沿狭缝方向上光束口径较小, 因此允许把分光棱镜安置在狭缝后适当的位置上而不会产生分光不均匀和渐晕, 所留空间可用于放置各种快门。

## 五、阴影(纹影)和干涉摄影用的附加透镜

阴影(纹影)装置和干涉装置二者的出瞳位置和目标位置是不一样的, 因此需要配置各自的附加透镜。

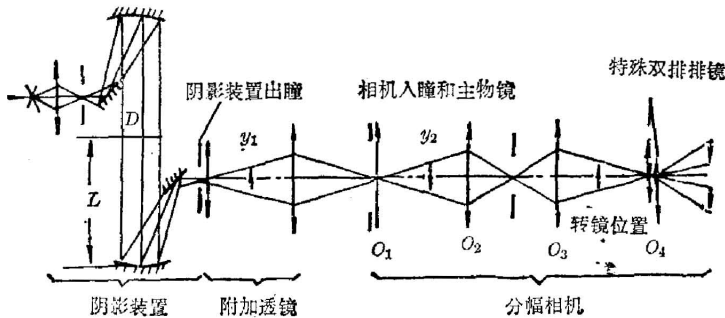


图5 分幅相机与阴影(纹影)装置结合的理想光路

Fig. 5 The perfect optical path of the combination of the framing and shadow-schlieren devices

阴影装置出瞳被附加透镜成像在相机的入瞳上。物距  $L$  的目标  $D$  在附加透镜内成一中间像  $y_1$ , 然后被调焦在无限远处的主物镜  $O_1$  在其焦平面上成像  $y_2$ 。于是可求得该像面上的横向放大率  $\beta$  为

$$\beta = y_2/D = -\beta_0 \cdot \frac{f'_1}{S_0 + f'_1} \cdot \frac{f'_3}{f'_2}, \quad (1)$$

式中  $f'_1$ 、 $f'_2$  和  $f'_3$  分别为附加透镜前组、后组和主物镜的焦距;  $\beta_0$  为阴影装置的横向放大率;  $S_0$  为阴影装置的成像面至出瞳的距离。  $\beta_0$  和  $S_0$  可由下式求得:

$$\beta_0 = \frac{f'_0}{f'_0 - L}, \quad (2)$$

$$S_0 = -\beta_0 L - f'_0 = -\beta_0 f'_0, \quad (3)$$

式中  $f'_0$  为阴影装置的焦距。利用(1)式可得到:

$$y_2 = \frac{D}{f'_0} \cdot \frac{f'_3}{f'_2} \cdot \frac{1}{\frac{f'_1}{f'_0} - \frac{1}{\beta_0 f'_0}}. \quad (4)$$

由于目标尺寸  $D$  通常与阴影装置通光口径是一致的, 因此  $D/f'_0$  表示了阴影装置的相对孔径。(4)式表明: 如果  $1/\beta_0 f'_0$  为一小量, 那么对于相对孔径相同的阴影装置, 不论其焦距为何值, 在相机主物镜焦面上的成像尺寸  $y_2$  是不变的。在实际使用中,  $1/\beta_0 f'_0$  为小量的条件是很容易满足的, 因此相对孔径相同而焦距不同的各种双反射镜式阴影装置只需配置一个附加透镜。设计光学系统时, 如果注意到使相机分幅型式的一次像面尺寸与扫描型式位于一次像面的狭缝高度一致, 那么只需利用同一个附加透镜就可实现分幅或扫描摄影。从光学设计观点看, 这种型式的附加透镜除了场曲以外, 其它各种像是很容易被校正的。

### 1. 阴影(纹影)摄影附加透镜

为了满足光瞳光学共轭条件并获得一定尺寸的画幅, 附加透镜还是必需的。图5表示相机分幅型式与双反射镜式阴影(纹影)装置结合的理想光路。阴影装置出瞳被附加透镜成像在相机的入瞳上。物距  $L$  的目标  $D$  在附加透镜内成一

## 2. 干涉摄影附加透镜

用于干涉摄影的附加透镜可采用多种结构型式。考虑到工作条件的限制,附加透镜的设计必须保证一定的工作距离

(干涉装置试验段目标至附加透镜的距离)。图6表示相机分幅型式与马赫-策德(Mach-Zehnder)干涉装置结合的理想光路。位于附加透镜中间像面  $y_1$  上的场镜使干涉装置的无限远出瞳成像在相机入瞳上,工作距离为  $L$  的目标  $D$  通过附加透镜和对无限远调焦的主物镜在相机一次像面上成像  $y_2$ 。在该像面上的横向放大率  $\beta$  为

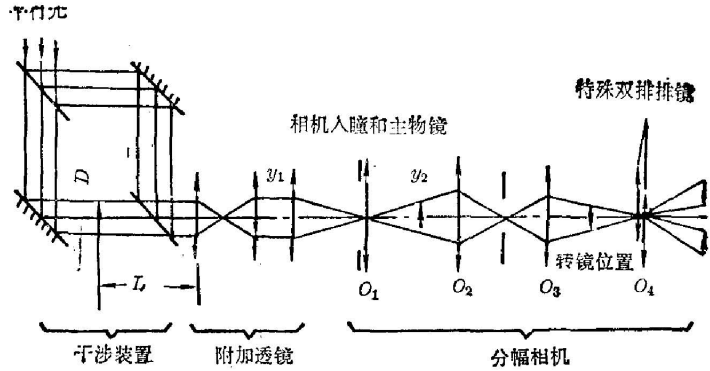


图6 分幅相机与干涉装置结合的理想光路

Fig. 6 The perfect optical path of the combination of the framing camera and the interferometer

$$\beta = y_2/D = -\frac{f'_1}{L+f'_1} \cdot \frac{f'_3}{f'_2}, \quad (5)$$

式中  $f'_1$ 、 $f'_2$  和  $f'_3$  分别为附加透镜前组、后组和主物镜的焦距。把(5)式改写为

$$L = -f'_1 \left( 1 + \frac{f'_3}{f'_2 \beta} \right). \quad (6)$$

由(6)式可知,只要适当选取附加透镜前后组的焦距,便可获得一定  $\beta$  值所需的工作距。该型式的附加透镜也适用扫描摄影,但是不论分幅摄影或扫描摄影,在选取  $\beta$  值时,不允许画幅框或狭缝高度切割有效的干涉场。

## 六、结 束 语

激光光源不仅有好的单色性和相干性而适用于阴影或干涉摄影,而且具有强的辐射亮度可使底片获得足够的曝光量,这对于光路十分复杂的“结合”的装置用来进行超高速摄影显得更为重要。但是强的激光光源也会带来损坏光学元件的可能,在上述“结合”装置中,由于附加透镜与主物镜之间对成像光束而言为平行光路,所以改变它们之间的间距不会影响成像的位置和大小,这就为激光束会聚点偏离光学元件提供了方便。在平行光路中还可以方便地插入“道威”(Dove)棱镜来达到旋转像面的目的。由于相机本身具有分幅功能,因此无需采用序列脉冲激光器作光源便可进行等待分幅摄影。

## 参 考 文 献

- [1] A. C. Дубовик;《高速流逝过程摄影记录》, (中译本) (科学出版社, 1976), 288。
- [2] 夏生杰等;《第二届全国高速摄影与光子学会讨论论文集》, (科学出版社, 北京, 1982), 204。
- [3] G. I. Belinskaja et al.; 《Proceeding of the 13th International Congress on High speed Photography and Photonics》, 242, Tokyo, 1978。
- [4] 李育林;《全国高速摄影会议论文集》, (科学出版社, 北京, 1978), 18。
- [5] 私人通讯。
- [6] 陆增培;《光学学报》, 1984, 4, No. 2 (Feb), 182。

## Study on the optical system of the waiting type high speed camera

LU ZENGPEI

*(Suzhou Optical Instruments Factory)*

(Received 18 June 1984; revised 18 September 1984)

### Abstract

A new optical system of the waiting type high speed camera with rotating mirror is presented in this paper. A new beam splitter system and a special framing lenses bank are employed in the camera. The camera can be used to combine with shadow and interferometric devices by means of simple optical attachments as well as to do frame and streak photography directly.