

转镜式高速分幅相机中的离焦计算

陆增培
(苏州光学仪器厂)

提 要

本文从排镜代替圆产生的离焦和不共轴性出发,推导了在底片代替圆上离焦计算的精确公式,克服了传统计算方法所引入的误差,为评价转镜分幅相机的像质提供了更可靠的依据。

关键词: 高速相机, 转镜, 排镜。

在转镜分幅相机中,由于转镜厚度的存在,理想的像面位置和排镜位置都应位在相应的帕斯卡尔(Pascal)蜗线上。出于工艺性能的考虑,通常都把像面和排镜安置在圆柱面弧线上。这种用圆代替超越曲线的方法将使像点产生离焦,直接影响相机的成像质量^[1]。

排镜代替圆不仅使排镜位置偏离理想位置,而且使排镜光轴与转镜镜面反射的入射系统光轴不一致,都将对底片代替圆上的像点离焦产生影响。在底片代替圆上像点离焦的传统计算方法^[2]忽略了这种影响,因此给出的结果精度低,不是什么时候都可以采用的。特别是在具有大画幅、大工作区域的相机中,这种影响是不能忽视的。

本文推导出更为精确的离焦计算公式,并以数字例子与传统计算结果作了比较。

图1为转镜转到相对于入射系统光轴为某一角度 ϕ 的位置。此时在转镜附近形成被摄目标的中间像,其中心点的像为 I ,边缘点的像为 A 。经转镜镜面反射后,相应的像点分别为 \bar{I} 和 \bar{A} ,同时入射系统光轴以 2ϕ 角进入排镜 \bar{K} 。排镜 \bar{K} 位于半径为 R_e ,中心在 E 点的排镜代替圆上,排镜光轴 $\bar{K}E$ 与反射后的系统光轴 $\bar{K}P$ 成 ψ_e 角,该角表征了排镜成像的

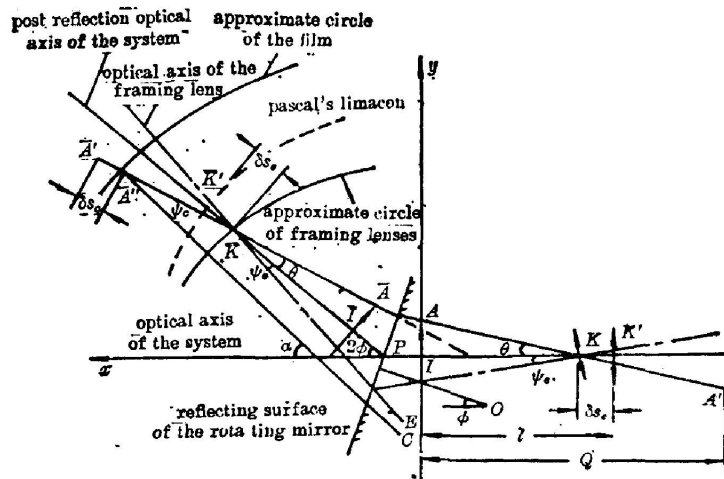


Fig. 1 Defocus and non-coaxiality in a framing camera with rotating mirror

不共轴性。排镜的理想位置 \bar{K}' 位于帕斯卡尔蜗线上并通过系统光轴 $\bar{K}P$, 因此 \bar{K}' 至 \bar{K} 的距离为排镜的离焦量 δs_e 。转角 ϕ 时的 ψ_e 和 δs_e 可由文献 [2] 给出的公式计算。转镜旋转轴垂直于图平面且通过 O 点, O 点至镜面的距离 R 为转镜厚度之半。取中间像中心 I 为直角坐标系的原点, x 和 y 轴的方向如图所示, 于是图上各点均可用相应的坐标表示出来。

现在来研究半径为 R_e , 中心为 c 的底片代替圆上的成像情况。令转镜处像高之半为 h 的边缘点 \bar{A} 经排镜 \bar{K} 的理想像点为 \bar{A}' , 那么主光线 $\bar{A}\bar{K}\bar{A}'$ 与底片代替圆的交点 \bar{A}'' 即为实际像点, \bar{A}' 至 \bar{A}'' 的距离定义为底片代替圆的离焦量, 用 δs_e 表示。由图 1 可知, 主光线 $\bar{A}\bar{K}\bar{A}'$ 与系统光轴 $\bar{K}P$ 的夹角 θ 可由下式求得:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{h}{l - \delta s_e}, \quad (1)$$

式中 l 为排镜的理想物距, $l = \bar{K}'\bar{I}$ 。显然, 排镜所负担的实际视场角应为 $\theta + \psi_e$ 。不共轴性 ψ_e 将造成排镜负担的视场增大, 从而使像质恶化。但是, 如果在进行排镜光学设计时预先

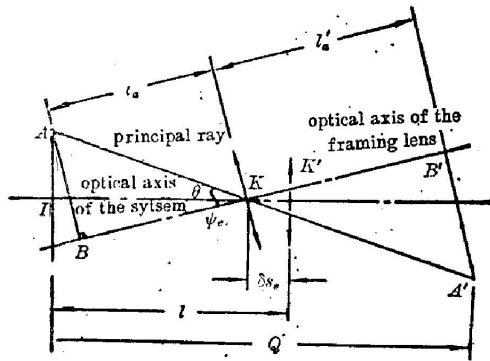


Fig. 2

考虑了这个因素, 那么由此而引起的像质恶化还是有可能限制在允许范围内的。然而, 像点离焦 δs_e 造成的像质恶化, 必须在相机总体设计时就加以控制, 并进行精确计算。

由镜面成像原理可知, 排镜不论位于代替圆上何处, 排镜中心的镜面像总是通过入射系统光轴的。于是在系统光轴 (x 轴) 上可作出与 \bar{K} 、 \bar{K}' 相应的镜面像 K 、 K' 。显然, $KK' = \delta s_e$, $K'I = l$, 排镜 K 的光轴与系统光轴的夹角为 ψ_e , \bar{A}' 的镜面像 A' 必在主光线 $\bar{A}\bar{K}\bar{A}'$

上, 主光线与系统光轴的夹角为 θ 。为清楚起见, 把图中 y 轴右边部分表示在图 2 上, 像点 A' 的位置可根据高斯光学原理和图中的几何关系来求得。

由边缘点 A 向排镜 K 的光轴作垂线, 垂足为 B 。于是边缘点 A 相对于排镜 K 的物距 l_a 为:

$$l_a = BK = (l - \delta s_e) \cos \psi_e - h \sin \psi_e. \quad (2)$$

相应的像距 l'_a 可由高斯公式求得:

$$l'_a = \frac{l_a f'}{l_a - f'} = \frac{[(l - \delta s_e) \cos \psi_e - h \sin \psi_e] f'}{(l - \delta s_e) \cos \psi_e - h \sin \psi_e - f'}, \quad (3)$$

式中 f' 为排镜的焦距。 B 点的共轭像为 B' , 过 B' 作排镜 K 光轴的垂线, 与主光线 $\bar{A}\bar{K}\bar{A}'$ 交于 A' 点, 即为边缘点 A 的理想像点。 A' 至物面 AI 的距离 Q 可由图中几何关系求得:

$$Q = \frac{l'_a \cos \theta}{\cos(\theta + \psi_e)} + (l - \delta s_e) = \frac{(l - \delta s_e)^2 \cos \psi_e - h(l - \delta s_e) \sin \psi_e}{(l - \delta s_e) \cos \psi_e - h \sin \psi_e - f'}. \quad (4)$$

参看图 1, 便可求出 A' 在 xy 坐标系中的坐标 (x' , y')

$$\left. \begin{aligned} x' &= -Q = -\frac{(l - \delta s_e)^2 \cos \psi_e - h(l - \delta s_e) \sin \psi_e}{(l - \delta s_e) \cos \psi_e - h \sin \psi_e - f'}, \\ y' &= -(Q - l + \delta s_e) \operatorname{tg} \theta = -\frac{h f'}{(l - \delta s_e) \cos \psi_e - h \sin \psi_e - f'}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

根据镜面坐标方程不难求得镜面像点 \bar{A}' 的坐标 (\bar{x}' , \bar{y}'):

$$\left. \begin{aligned} \bar{x}' &= Q \cos 2\phi + (Q-l+\delta s_e) \operatorname{tg} \theta \sin 2\phi + 2\epsilon \cos^2 \phi, \\ \bar{y}' &= (Q+\epsilon) \sin 2\phi - (Q-l+\delta s_e) \operatorname{tg} \theta \cos 2\phi, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 ϵ 为入射系统光轴与转镜镜面交点 P 至坐标系原点 I 的长度, 与转镜旋转中心 O 的坐标 (x_0, y_0) 有下面关系:

$$\epsilon = x_0 + y_0 \operatorname{tg} \phi + R \sec \phi. \quad (7)$$

同理, 已知中间像边缘点 A 的坐标为 $(0, h)$, 便可求得镜面像 \bar{A} 的坐标 (\bar{x}, \bar{y}) :

$$\bar{x} = 2\epsilon \cos^2 \phi - h \sin 2\phi, \quad \bar{y} = \epsilon \sin 2\phi + h \cos 2\phi. \quad (8)$$

令主光线 $\bar{A}\bar{K}\bar{A}'$ 的延长线与 x 坐标轴的交点为 T , 其坐标为 $(\xi, 0)$, 则:

$$\xi = \bar{x} - \frac{\bar{y}}{\operatorname{tg}(2\phi - \theta)} = 2\epsilon \cos^2 \phi - h \sin 2\phi - \frac{\epsilon \sin 2\phi + h \cos 2\phi}{\operatorname{tg}(2\phi - \theta)}. \quad (9)$$

利用投影定理还可写出:

$$\psi_e = ARC \sin \frac{(x_0 - \xi) \sin(2\phi - \theta) - y_0 \cos(2\phi - \theta)}{R_0}, \quad (10)$$

式中 x_0, y_0 为底片代替圆中心 c 的坐标。由图 1 可知:

$$\alpha = 2\phi - \theta + \psi_e. \quad (11)$$

实际像点 \bar{A}'' 的坐标 (\bar{x}'', \bar{y}'') 为:

$$\bar{x}'' = x_0 + R_0 \cos \alpha, \quad \bar{y}'' = y_0 + R_0 \sin \alpha. \quad (12)$$

至此, 利用关系式(6)和(12), 便可计算出底片代替圆上像点的离焦量 δs_e :

$$\delta s_e = \frac{\bar{x}' - \bar{x}''}{\cos(2\phi - \theta)} \quad \text{或} \quad \delta s_e = \frac{\bar{y}' - \bar{y}''}{\sin(2\phi - \theta)}. \quad (13)$$

若要计算中间像中心像点的离焦, 只需把 $h=0$ 代入(1)至(13)式即可。分析可知, 只要令 $\delta s_e=0, \psi_e=0, h=0, f'=0$, 并用排镜代替圆参数 R_e, x_e, y_e 代替底片代替圆参数 R_0, x_0, y_0 , 利用(1)至(13)式同样可计算出排镜的离焦量 δs_e 和不共轴性 ψ_e 。此外, 从公式的推导过程可知, 底片代替圆上像点的离焦 δs_e 直接与排镜代替圆所产生的离焦 δs_e 和不共轴性 ψ_e 有关。若不考虑这种影响, 即 $\delta s_e=0, \psi_e=0$, 便可将(1)至(13)式改写为文献[2]所给出的一套公式。

这里我们以扇形工作区 $5^\circ \leq \phi \leq 65^\circ$ 的三角形截面转镜构成的分幅系统为例。中间象面尺寸为 14 mm (即 $h=7 \text{ mm}$), 排镜焦距为 $f'=90 \text{ mm}$, 物距 $l=180 \text{ mm}$ 。根据使工作区两端的像移的绝对值相等和转镜尺寸尽可能小的原则来确定转镜参数: $R=9.81 \text{ mm}, x_0=-6.96 \text{ mm}, y_0=-9.49 \text{ mm}$ 。当不考虑排镜离焦和不共轴性影响的条件下, 根据离焦尽可能小的原则确定的排镜代替圆和底片代替圆参数为: $x_e=x_0=0.48 \text{ mm}, y_e=y_0=-7.60 \text{ mm}, R_e=184.88 \text{ mm}$ 和 $R_0=364.86 \text{ mm}$ 。于是可得到下述结果。

在扇形工作区内排镜的离焦 $\delta s_e(\phi)$ 和不共轴性 $\psi_e(\phi)$ 列表如下:

$\phi(^{\circ})$	5	9.4	15	25	35	35.9	45	55	61.5	65
$\psi_e(^{\circ})$	2.25	2.15	2.02	1.77	1.43	1.39	0.95	0.32	-0.15	-0.43
$\delta s_e(\text{mm})$	0.20	0	-0.15	-0.19	-0.02	0	0.18	0.20	0	-0.20

在扇形工作区内底片代替圆上像点的离焦 $\delta s_e(\phi)$ 图形表示在图 3 上, 图 3(a) 为中心像

点的离焦, 图 3(b) 为边缘像点的离焦。当不计入排镜的离焦和不共轴性时, $\delta s_o(\phi)$ 的计算结果在图 3 中用虚线表示。

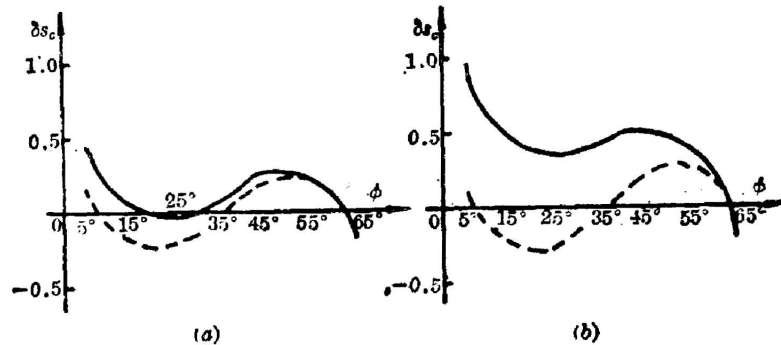


Fig. 3 The dofocus of image points within the working sector

(a) Points in the centre; (b) Points at the edge

结果表明: $\delta s_o(\phi)$ 的计算在扇形工作区的边缘, 对中心像点有 0.27 mm 的误差, 对边缘像点有 0.88 mm 的误差。注意到对应于排镜离焦 $\delta s_o = 0$ 的转镜转角位置, 如 $\phi = 9.4^\circ$, 即使是中心像点, 仍有 0.25 mm 的误差。这种情况对于在要求有高的或像质量的相机中是不允许的, 因此 $\delta s_o(\phi)$ 必须按本文给出的公式计算。由此可知, 对于在不考虑排镜离焦和不共轴性影响的条件下所求得代替圆参数还必须进行修正, 以期使转镜分幅相机具有更高的成像质量。

参 考 文 献

- [1] А. С. Дубовик; «高速流逝过程摄影纪录», (科学出版社, 1976), 160。
 [2] 李景镇; «全国高速摄影会议论文集», (科学出版社 1978) 26~36。

Defocus calculation in a high-speed framing camera with rotating mirror

LU ZENGPAI

(*Suzhou Optical Instruments Factory*)

(Received 30 June 1986; revised 12 September 1986)

Abstract

On the basis of defocus and non-coaxality induced by framing lenses in an approximate circle, the precision formulae for calculating the defocus of image points in the film in another approximate circle have been deduced in this paper. Errors caused by the traditional calculating method have been eliminated and more reliable data can be obtained for the evaluation of the image quality in a rotating mirror framing camera.

Key Words: high speed camera; rotating mirror; framing Lens.