

高速摄影

光学

译文集

10—11

中国科学院西安光机所情报研究室编

1980年

I521/17 T1386/26

目 录

1. 采用旋转棱镜作为光学补偿器的若干问题 1
С. В. Кузнецов 戴洪恩 译
董恒本 校
2. С К С 型棱镜光学补偿式高速电影机中象散焦点的轨迹 14
Ю. П. ЩЕПЕТКИН 胡 庸 译
王辅伦 校
3. С К С 型高速电影摄影机中宽子午光束象差 28
Ю. П. ЩЕПЕТКИН 王辅伦 译
胡 庸 校
4. 棱镜光学补偿系统 36
Ю. П. ЩЕПЕТКИН 胡 庸 译
王辅伦 校
5. 旋转棱镜补偿器, 第一部份, 理论基础 54
R. A. BUCHROEDER 胡 庸 译
张焕星 校
6. 调制传递函数在光学校镜补偿器设计中的应用 91
G. I. Belinskaya 胡 庸 译
(Г. И. Белинская) 张焕星 校

7. 高速摄影机的光学补偿系统 100

戴洪恩 译

胡庸 校

8. 转镜原理在一种新的中等频率分幅摄影机中的应用 109

J. R. Greer

丰善 译

胡庸 校

9. 周转圆摄影机 121

陈良一、潘来俊 译

张焕星 校

10. 在高速电影摄影中记录时标的方法对定量信息精度的影响

..... 142

H. A. KOHOBAJIOB

王辅伦 译

戴洪恩、胡庸 校

采用旋转稜镜作为光学补偿器的若干问题

作者: С. В. КУЛАГИН

实践指出,为了实现拍摄频率高于250格/秒的特种电影摄影,不能采用断续移动胶片的摄影机。这是因为输片机构跳跃运动部分的惯性以及胶片的强度不足〔1〕。因此在拍摄频率为300格/秒和高于此频率的特种摄影机内采用在连续运动的胶片上进行拍摄的方法(苏联的CKC-1,德国的Zeit-Lupe,美国的Fastax等等)。

胶片连续运动时,为了得到足够清晰的影像,在画幅曝光时间内必须或者减少每一张的曝光时间,或者力求消除感光层和光学像之间的相对移动。

根据曝光时消除像在运动着的胶片上产生位移的方法,可将摄影机划分为二种型式。

第一种类型摄影机是对像进行瞬时曝光(狭缝摄影机和脉冲照明的摄影机)。

第二种类型摄影机是利用像位移的光学补偿。从所有各种不同的光学补偿方法中,在摄影机内采用最多的是下述二种:

- а) 利用旋转稜镜的补偿。
- б) 利用旋转内反射或外反射镜鼓的补偿。

以旋转稜镜作为光学补偿器的有关理论问题在国外的期刊上引起

足够的注意。在某些论文中〔2, 3〕研讨了与消除旋转稜镜补偿器产生的像差有关的问题。在 Woddell 的论文〔4〕中, 对于补偿稜镜基本参数的选择作了论证, 根据在稜镜允许的旋转角范围内, 像的速度变化不大于 2 % 这个原则来选择稜镜的厚度和玻璃的折射率。

在本文中, 根据在曝光时胶片速度 $v_{\text{胶}}$ 和像的速度 $v_{\text{像}}$ 不可能绝对相等而引起的允许的模糊量, 试图对补偿稜镜主要参数的选择作出理论上的分析。

在直接探讨此题目之前, 提出几个在连续运动的胶片上进行摄影的基本概念。时间分辨本领, 或者称为更换画幅的周期 T , 按下述公式决定:

$$T = 0.001 \frac{H}{v_{\text{胶}}} \text{ 秒} \quad (1)$$

式中 H —— 画幅节距, 以毫米表示。

拍摄频率:

$$\omega = \frac{1}{T} = 1000 \frac{v_{\text{胶}}}{H} \text{ 幅/秒} \quad (2)$$

表内列出了连续影片摄影的一些操作指标值, 这些数值是在各种不同的 $v_{\text{胶}}$ 值和画幅距 H 下得出的。

表

片带宽度毫米	画幅距 H ·毫米	在1米胶片 内的画幅数	胶片速度 米/秒	拍摄频率 幅/秒	每米胶片的拍 摄频率, 毫秒
35	19.0	52.6	50	2630	20
			150	7900	6.7
			300	15800	3.3
16	7.62	131.2	50	6550	20
			150	19700	6.7
			300	39400	3.3
8	3.81	262.5	50	13100	20
			150	39400	6.7
			300	78800	3.3

具有旋转镜补偿器的摄影机实际上可以达到的最高输片速度是在150到200米/秒的范围内(胶片按置在旋转镜鼓的外表面上可以获得这样的速度〔1〕)。然而在现有的OKO-1和Felix相机内是采用输片齿轮来输片的,输片的最大速度不超过40米/秒,在这种速度下,当画幅距 $H=7.62$ 毫米时,允许进行拍摄的极限频率为5000幅/秒。

为了得到足够精确的画幅距,必须使旋转补偿器和输片机构之间

存在运动的联系。但是在胶片上的成像清晰度既取决于摄影光学系统的质量，也取决于曝光时光学像和胶片移动速度接近相等到什么程度。

旋转稜镜的光学补偿

旋转稜镜通常按置在摄影物镜和胶片之间。把呈平面平行玻璃板形的稜镜放在会聚光束内，导致附加的像差〔5〕，由于稜镜进入面相对于光束位置的变化，此像差在数量上也引起变化。这导致摄影机光学系统的有效成像角减少因而减少了画幅尺寸。除此之外，补偿稜镜本身限制了摄影物镜后节距的名义尺寸，同样导致成像角减小。因此旋转稜镜补偿方法适用成像角小于 15° 的窄片摄影机中。（在OKO-1摄影机中沿画幅宽度的成像角为 $11^\circ 53'$ 〔6〕）。

现在来讨论在稜镜偏离零点位置，转到某一角度 φ 时（见图1）此稜镜的动作。

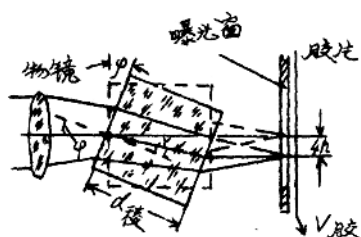


图1、补偿稜镜的工作原理图

为了决定主光线在通过入射面与光线方向成 φ 角的平面平行玻璃板之后平行于本身的位移，具有下述公式：

$$\Delta h = \frac{d_{\text{棱}}}{n} \left(n - \frac{\cos \varphi}{\cos r} \right) \sin \varphi; \quad (3)$$

式中 n —— 棱镜玻璃的折射率。

按时间对 Δh 进行微分，得到决定主光线位移速度（也即是光学像的移动速度）的公式

$$V_{\text{像}} = \frac{d \Delta h}{dt} = \frac{d_{\text{棱}}}{n} \left[\cos \varphi \left(n - \frac{\cos \varphi}{\cos r} \right) \frac{d \varphi}{dt} + \frac{\sin^2 \varphi}{\cos r} \frac{dr}{dt} - \frac{\sin \varphi \sin r \cos \varphi}{\cos^2 r} \frac{dr}{dt} \right].$$

$$\text{因为 } \sin \varphi = n \sin r, \text{ 则, } \cos \varphi \frac{d \varphi}{dt} = n \cos r \frac{dr}{dt},$$

$$\text{所以 } \frac{dr}{dt} = \frac{\cos \varphi}{n \cos r} \frac{d \varphi}{dt}.$$

把 $\frac{dr}{dt}$ 和 $\sin \varphi$ 的值代入上式，进行整理后，得

$$V_{\text{像}} = \frac{d_{\text{棱}}}{n \cos r} (n \cos \varphi \cos r - \cos^2 \varphi - \operatorname{tg}^2 r \cos^2 \varphi) \frac{d \varphi}{dt}.$$

考虑到 $\frac{d\varphi}{dt} = W_{\text{稜}}$ —— 稜镜旋转的角速度，最后得：

$$V_{\text{像}} = \frac{d_{\text{稜}}}{n \cos r} (n \cos \varphi \cos r - \cos 2\varphi - \operatorname{tg}^2 r \cos^2 \varphi) W_{\text{稜}} \quad (4)$$

为了在曝光时补偿光学像和胶片之间的相对位移，必须使 $V_{\text{像}} = V_{\text{胶}}$ 。因为通常 $W_{\text{稜}} = \text{常量}$ ，而 $V_{\text{像}} = \text{变量}$ ，因此像和胶片的线速度完全相等是不可能的。因而采用旋转稜镜作为光学补偿器时，在曝光时不可能使光学像和感光材料的位移完全相等。

对于具体的摄影条件， n 、 $d_{\text{稜}}$ 和 $W_{\text{稜}}$ 为常数。如前所述，输片机构必须和补偿稜镜间具有运动的联系，因此可以认为 $W_{\text{稜}} = k_1 V_{\text{胶}}$ 。则

$$V_{\text{像}} = \frac{k_2}{\cos r} (n \cos \varphi \cos r - \cos 2\varphi - \operatorname{tg}^2 r \cos^2 \varphi) V_{\text{胶}} \quad (5)$$

$$\text{式中 } k_2 = k_1 \frac{d_{\text{稜}}}{n}.$$

以 $V_{\text{像} \cdot 0}$ 表示 $\varphi = 0$ 时像的瞬时速度。

$$V_{\text{像} \cdot 0} = k_2 (n-1) V_{\text{胶}} = k_3 V_{\text{胶}}. \quad (6)$$

用下式决定稜镜旋转时像速的相对变化：

$$\frac{V_{\text{像}}}{V_{\text{像} \cdot 0}} = \frac{1}{n-1} \frac{(n \cos \varphi \cos r - \cos 2\varphi - \operatorname{tg}^2 r \cos^2 \varphi)}{\cos r}. \quad (7)$$

图 2 表示在稜鏡旋轉角 φ 值从 0° 到 28° 范围内关系式

$\frac{v_{\text{像}}}{v_{\text{像} \cdot 0}}$ 的变化。由图可见，光学像的线速度随着补偿稜鏡旋轉角的

增加而不断地增长。为了减少像速度 $v_{\text{像}}$ 与胶片速度 $v_{\text{胶}}$ 之间的差值，

在稜鏡补偿角为 $\varphi_{\text{补}}$ 时（ $\varphi_{\text{补}}$ 在这里和以后都表示整个补偿时间内稜

鏡轉角的一半） $v_{\text{胶}}$ 值应当在这样的范围内选择： $v_{\text{像} \cdot 0} < v_{\text{胶}}$

$< v_{\text{像} \cdot \text{补}}$ ，这里 $v_{\text{像} \cdot \text{补}}$ —— 当 $\varphi = \varphi_{\text{补}}$ 时像的速度。

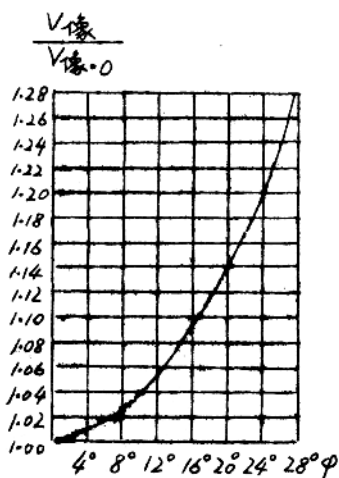


图 2. 像的相对速度 $\frac{v_{\text{像}}}{v_{\text{像} \cdot 0}}$ 的变化曲线

稜鏡轉角 φ 從 0 到 $\varphi_{全}$ 值 (此時 $v_{像} = v_{胶}$)，此 $\varphi_{全}$ 值由膠片上所成之像的允許模糊量來決定，這個模糊量是由於不完全補償所造成的。此不完全補償的出現是由於 $0 < \varphi < \varphi_{全}$ 時膠片的位移速度 $v_{胶}$ 超過光學像的速度 $v_{像}$ ，而在 $\varphi_{全} < \varphi < \varphi_{补}$ 時，反之，變得小於 $v_{像}$ 。

稜鏡在 $\varphi_{全}$ 角範圍內旋轉時，由於 $v_{胶}$ 和 $v_{像}$ 不相等而形成的殘余位移等於差值，

$$(s_{胶 \cdot 全} - s_{像 \cdot 全}) = \Delta s_{残},$$

式中 $s_{胶 \cdot 全}$ —— 補償稜鏡轉到 $\varphi_{全}$ 角時間內 (也即是在 $\varphi_{全}/\omega_{稜}$ 時間內) 膠片的行程， $s_{像 \cdot 全}$ —— 在同樣時間內像的行程。

為了獲得高質量的像，必須使殘余位移值不超過允許的模糊量 Δs ，

也就是 $\Delta s_{残} \leq \Delta s$ 。因為 $s_{胶 \cdot 全} = v_{胶} \frac{\varphi_{全}}{\omega_{稜}}$ ，而 $s_{像 \cdot 全}$

$$= \int_0^{\varphi_{全}} v_{像} d\varphi, \text{ 那末將公式(4)的 } v_{像} \text{ 代入並整理後獲得,}$$

$$\frac{d_{稜}}{n} \left[\frac{\varphi_{全}}{\cos r_{全}} (n \cos \varphi_{全} \cos r_{全} - \cos 2\varphi_{全} - \tan^2 r_{全}) - \left(n - \frac{\cos \varphi_{全}}{\cos r_{全}} \right) \sin \varphi_{全} \right] \leq \Delta s. \quad (8)$$

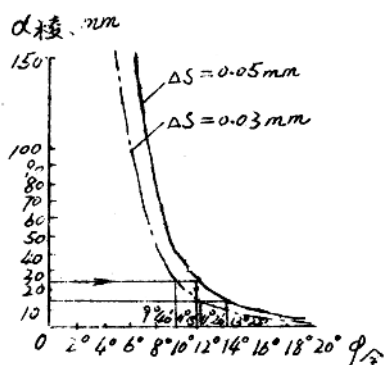


图3、 $d_{\text{稜}} = f(\varphi_{\text{全}})$ 的关系曲线

图3所示为补偿稜镜厚度 $d_{\text{稜}}$ 和它的转角 $\varphi_{\text{全}}$ 之间的关系曲线，在 $\varphi_{\text{全}}$ 角时像速 $v_{\text{像}}$ 等于胶片速度 $v_{\text{胶}}$ 。建立此图形的条件为：稜镜是由 $n = 1.52$ 的 K-8 玻璃制成，允许的模糊量 $\Delta S = 0.03$ 毫米和 0.05 毫米。（大多数文献中引用 $\Delta S = 0.03$ 毫米。这里值 $\Delta S = 0.05$ 毫米是用作为极限值。）

根据曲线，对于 $d_{\text{稜}} \leq 25$ 毫米的 $\varphi_{\text{全}}$ 值不超过 15° 。

当 $\varphi_{\text{全}} < 15^\circ$ 时，可将公式 (8) 简化，这时：

$$\sin \varphi_{\text{全}} \approx \operatorname{tg} \varphi_{\text{全}} \approx \varphi_{\text{全}}, \quad \cos \varphi_{\text{全}} \approx \cos \gamma_{\text{全}} \approx 1;$$

$$\text{而 } \operatorname{tg} \gamma_{\text{全}} \approx \gamma_{\text{全}}$$

整理后得

$$\frac{d_{\text{稜}}}{n^3} \varphi_{\text{全}}^3 (n^2 - 1) \leq \Delta s,$$

因此
$$\varphi_{\text{全}} \leq n \sqrt[3]{\frac{\Delta s}{d_{\text{稜}}(n^2 - 1)}}. \quad (9)$$

由公式(8)和(9)所得结果之差, 不超过10%。对于一定的稜镜, 决定了角值 $\varphi_{\text{全}}$, 可以求得与像速 $v_{\text{像}}$ 相等的胶片速度 $v_{\text{胶}}$, 像速 $v_{\text{像}}$ 由公式(4)在 $\varphi = \varphi_{\text{全}}$ 时求得。

利用下述公式可以决定补偿角 $\varphi_{\text{补}}$: $2 s_{\text{像} \cdot \text{全}} = s_{\text{像} \cdot \text{补}}$ 。因为

$$s_{\text{像} \cdot \text{全}} = \int_0^{\varphi_{\text{全}}} v_{\text{像}} d\varphi, \text{ 而 } s_{\text{像} \cdot \text{补}} = \int_0^{\varphi_{\text{补}}} v_{\text{像}} d\varphi,$$

经积分和整理后, 得

$$\left(n - \frac{\cos \varphi_{\text{补}}}{\cos r_{\text{补}}}\right) \sin \varphi_{\text{补}} = 2 \left(n - \frac{\cos \varphi_{\text{全}}}{\cos r_{\text{全}}}\right) \sin \varphi_{\text{全}}. \quad (10)$$

如同公式(9), 对上式进行简化, 得到近似公式

$$\varphi_{\text{补}} \approx 2 \varphi_{\text{全}}. \quad (10')$$

为了简化胶片速度 $v_{\text{胶}}$ 的计算, 公式(4)内的 $w_{\text{稜}}$ 值可以用

$$\frac{2\pi}{z} w_0 \text{ 代替, 这里 } w_0 \text{ —— 在一定的 } w_{\text{稜}} \text{ 值下的摄影频率; } z \text{ ——}$$

补偿稜镜的面数。因此

$$v_{\text{胶}} = \frac{d_{\text{稜}}}{n \cos r_{\text{全}}} (n \cos \varphi_{\text{全}} \cos r_{\text{全}} - \cos 2\varphi_{\text{全}} - \text{tg}^2 r_{\text{全}} \cos^2 \varphi_{\text{全}}) \cdot \frac{2\pi}{z} \omega_0. \quad (11)$$

当 $\omega_0 = 1000$ 幅/秒, $d_{\text{稜}} = 25$ 毫米, $z = 4$ 和 $\varphi = 1^\circ 15'$ 时,

胶片速度 $v_{\text{胶}} \approx 14.5$ 米/秒。

显然, 按照公式 (11) 所求得胶片速度值 $v_{\text{胶}}$ 是在预先选好的许可模糊量 Δs 下最大允许的值。

在这个 $v_{\text{胶}}$ 值下, 稜镜的补偿角以及补偿时间 $t_{\text{补}}$, 同样也是最大值。随着胶片速度的减少, 补偿角和补偿时间都相应地减少。最小的 $v_{\text{胶}}$ 值等于 $v_{\text{像} \cdot 0}$ 。这时角度 $\varphi_{\text{补}}$ 等于 $\varphi_{\text{全}}$, 此 $\varphi_{\text{全}}$ 由上面导出的公式 (8) 或 (9) 求出。

补偿时间等于稜镜转过 $2\varphi_{\text{补}}$ 角所需的时间, 也就是,

$$t_k = \frac{2\varphi_k}{360^\circ} \cdot \frac{z}{\omega_0}. \quad (12)$$

在补偿时间内胶片的移动值由下式决定:

$$h = \frac{\pi d_{\text{稜}}}{n \cos r_{\text{全}}} (n \cos \varphi_{\text{全}} \cos r_{\text{全}} - \cos 2\varphi_{\text{全}} - \text{tg}^2 r_{\text{全}} \cos^2 \varphi_{\text{全}}) \frac{\varphi_{\text{补}}}{90^\circ}. \quad (13)$$

最后把苏制 OKO-1 摄影机所具有的补偿角值和由公式 (8) 所得到的值作一下比较。在 OKO-1 摄影机内, 稜镜为四面体, 其厚度 $d_{\text{棱}} = 14.1$ 毫米, 角 $\varphi_{\text{补}} = 22^\circ [6]$ 。(角 $\varphi_{\text{补}}$ 是对主光线而言。) 在图 3 对于 $d_{\text{棱}} = 14.1$ 毫米, $n = 1.52$ 和 $\Delta s = 0.03$ 毫米, 可以找到 $\varphi_{\text{全}} = 11^\circ 20'$ 。因而补偿角 $\varphi_{\text{补}} \approx 22^\circ 40'$, 这实际上与 OKO-1 摄影机所具有的 $\varphi_{\text{补}}$ 角差别不大。

结 论

1. 在用旋转稜镜作为光学补偿器的摄影机内, 绝对补偿(胶片 和光学像速度完全相等)是不可能的。其它条件相同时, 补偿角越小, 像的残余位移值也越小。

2. 补偿角的数值主要决定于补偿稜镜的厚度和允许的模糊量。减少像的残余位移, 应当通过正确地确定胶片移动速度的途径来解决。

3. 计时时, 补偿角的数值要定得比计算值略为小一些, 这可减少像差和残余像位移。

参 考 资 料

1. Сахаров А. А., Вblesокоскоростная ки освемка,
Госкиноиздат, 1950.
2. Kuder J., J. Soc Mot. Pict. and Telev.
Engrs, 1946, 45, № 5, 400.
3. Schwesinger G., J. Opt. Soc America, 1952, 42;
№ 12, 923.
4. Waddell J. J. Soc Mot. pict and Telev. Engrs,
1949, 53, № 5, 496.
5. Тимонинский А. И., Теория оптичеcкe
приборов, Изд. АН СССР, 1948.
6. Материалы завода - изготовителя (гершеки оп
тичеcкой cхемы камеры ОКС-1).

藏洪恩译自 Журнал Наукой и Прикладной

Фотографии и Кинематографии

Том 4, Выпуск второй. 1959.

董恒本 校对。

OKO型稜镜光学补偿式高速电影

摄影机中象散焦点的轨迹

— Ю. П. Шенетков (苏)

提高国产※ OKO型稜镜光学补偿式高速电影摄影机成象质量的任务甚为迫切。国外经验迫使人们认为解决这个任务的有效途径是探讨和实际应用象差的计标理论及其校正方法。在这方面发表过一些有代表性的文章,例如〔1〕;设计参数较好的国外有代表性的产品有Prestax型WF-30和WF-8A以及Hycom等稜镜高速电影摄影机。但是在国内实践方面,至今甚至对这种型式摄影机的光学系统进行象差校正和寻找象差校正方法的必要性尚存有争议。

某些国内著作〔2-5〕已经对OKO型摄影机的光学系统进行过分析工作。但是问题研究表明必须比较全面地评价成象质量,这就不可能不探讨象差和合成的成象频率对比特性(ЧКХ)的计标方法。首先需要分析视场中心(画幅中心)的成象条件。按作者意见,先要着重研究的是在无限细孔径光束的极端条件下象点的轨迹问题,用计标轴上点无限细象散光束来代表全视场的情况,可使问题简化。作者曾用这种方法计标过〈Philo〉〔6〕稜镜光学补偿摄影机的光学系统,并显出了这种计标方法的优越性。这是“理想的”条件,它不

※ 指苏联——译者。