

文章编号: 1002-2082(2008)05-0708-05

# 转镜分幅相机中分幅系统放大倍率的校正

汪 伟, 尚长水, 谭显祥

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 理论上分析转镜分幅相机分幅系统放大倍率不一致产生的原因及因素。给出分幅系统放大倍率校正的方法,并以国内普遍使用的FJZ-250型高速转镜分幅相机为例,给出了每一画幅的放大倍率和校正系数。实测结果表明:分幅系统的放大倍率的不一致性与理论计算值差异较大,以校正的数据去分析处理爆轰实验底片,其空间测试精度有较大的提高。

**关键词:** 校正; 横向放大倍率; 转镜分幅相机; 高速摄影

中图分类号: TB872

文献标志码: A

## Correction of transversal magnification for framing system in high-speed rotating mirror framing camera

WANG Wei, SHANG Chang-shui TAN Xian-xiang

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The reasons of the magnification inconsistency for the framing system in the high-speed rotating mirror framing camera were analyzed theoretically. The correction method of transversal magnification for the framing system was introduced. Taking model FJZ-250 rotating mirror framing camera as an example, the magnification and correcting coefficient of each frame are presented. The measurement results indicate that the magnification inconsistency of the framing system is different significantly with the theoretically calculated value. The spatial test accuracy would be improved by processing the experimental negatives with the corrected coefficient.

**Key words:** magnification correction; transversal magnification; rotating mirror framing camera; high-speed photography

## 引言

转镜式高速分幅相机在爆炸力学和高压物理学等领域的研究中占有重要的地位,它记录二维空间信息随时间的变化过程,常用于观察不对称发展的高速运动物体或者各个细节之间相互作用的高速过程,图1为其光学成像原理图。

被摄目标1经第一物镜2成像在视场光阑处,后经第二物镜5和7成像在转镜8上,再经分幅透镜10成像在相机最终像面11;同时,阶梯光阑6经第二物镜及转镜成像在分幅光阑9处。当转镜旋转

时,阶梯光阑像沿分幅光阑移动,形成光快门。与转镜扫描相机相比,转镜分幅相机是在适当降低时间信息的基础上,提高了空间信息容量。在时间测试精度方面,转镜扫描相机在经过位置误差修正后,最大相对误差0.2%<sup>[1]</sup>,而转镜分幅相机要低一些,在进行修正后可以达到0.3%<sup>[2]</sup>,这样的时间测试精度已基本满足精密爆轰实验的要求<sup>[3]</sup>。在实验结果处理时,研究人员更容易忽视空间测量精度。明显地,空间测量精度不仅影响物体运动速度的计算精度,而且严重影响物体加速度的计算精度,在一

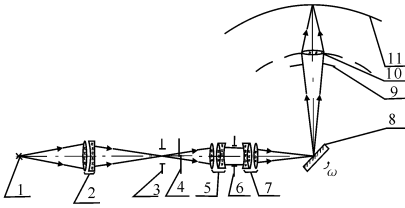


图1 转镜式高速分幅相机光学成像原理图

Fig. 1 Optical imaging principle of high-speed rotating mirror framing camera

些极端的情况下,得到的物体加速度值可能与实际情况相反。在转镜分幅相机的研制中,设计人员较少考虑分幅系统放大倍率的不一致性问题,一般也不会给出校正结果。还应该注意的,转镜分幅相机的放大倍率的不一致性还受加工误差和装配误差的影响,实际情况比理论严重得多。因此,分幅系统放大倍率的校正,符合精密物理实验的要求,也提高了转镜分幅相机的可靠性<sup>[4]</sup>。

本文将国内普遍使用的FJZ-250型高速转镜分幅相机为例,分析分幅系统放大倍率的不一致性问题,并给出了各分幅透镜校正的结果及应用方法。

## 1 放大倍率不一致产生的原因

在不考虑分幅相机光学系统几何像差等因素的情况下,转镜的厚度是分幅系统放大倍率产生不一致的最根本原因。由于转镜厚度的存在,用圆柱面代替超越曲面,各分幅透镜物距的变化量是相机工作角 $\theta$ 的函数等因素直接导致了各画幅放大倍率的不一致。如图2所示,在实际的相机设计中,用圆取代超越曲线,胶片安置面与理想成像位置之间

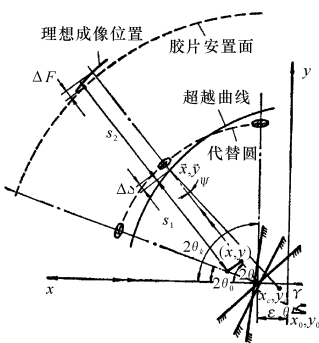


图2 转镜分幅相机中像面和分幅透镜架安置面

Fig. 2 Image plane and mounting surface on framing lens support in rotating mirror framing camera

均存在差异,这些因素都有可能使得分幅系统的放大倍率不一致<sup>[5]</sup>。

对转镜分幅相机的第*i*幅来说,相机内部放大倍率 $M_i$ (第一物镜除外)可以用下式表示<sup>[6]</sup>:

$$M_i = M \cdot \frac{s_2 - \Delta s_i (s_2/s_1)^2}{s_1 + \Delta s_i} \quad (1)$$

式中: $M_i$ 为第*i*幅的内部放大倍率; $M$ 为相机第二物镜组的放大倍率(为一不变常数); $s_2$ 为分幅透镜像距; $s_1$ 为分幅透镜物距; $\Delta s_i$ 为第*i*个分幅透镜沿着反射主光线的物距变化量。分幅透镜物距变化量 $\Delta s_i$ 用下式表示:

$$\Delta s_i = \left[ \bar{R} - \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2} \right] \times \cos \left( \arctan \frac{\bar{y} - y_c}{\bar{x} - x_c} - 2\theta_i \right) \quad (2)$$

式中: $\bar{R}$ 为分幅透镜架的代替圆半径; $\theta_i$ 为入射光轴与镜面法线的夹角,也是转镜的转角; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为分幅透镜架的超越曲面上的某一点的坐标,是与 $\theta_i$ 及转镜中心坐标 $(x_0, y_0)$ 的函数; $x_c$ 和 $y_c$ 为分幅透镜架的代替圆中心坐标,是与 $\theta_i$ 及其他参量相关的函数; $\arctan(\bar{y} - y_c)/(\bar{x} - x_c) - 2\theta_i$ 为分幅透镜光轴与入射光线经镜面反射后的光轴的夹角(又称作不共轴性 $\psi$ )。

FJZ-250型转镜分幅相机的具体参数为: $M = 1.556$ ,  $s_1 = 159.547$  mm,  $s_2 = 143.487$  mm,  $\bar{R} = 161.624$  mm,  $\theta_i = 10.72^\circ \sim 38.8^\circ$ (共40幅,相邻画幅间隔 $\theta_i - \theta_{i+1} = 0.72^\circ$ ),  $(x_0, y_0) = (-3.596$  mm,  $-3.51$  mm),  $(x_c, y_c) = (-0.911$  mm,  $-3.252$  mm)。由此可以得到 $\beta_i$ 随画幅序号的变化曲线,如图3所示。

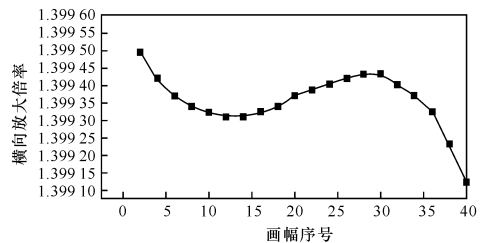


图3 FJZ-250型转镜分幅相机放大倍率理论分布曲线

Fig. 3 Transversal magnification of lens in theory

从图3的曲线可以看出,在理论上,FJZ-250型转镜分幅相机的内部放大倍率在1.39912~1.39950之间变化,差别非常小,几乎可忽略不计。但是,在相机的实际研制过程中,由于机械加工误差、光学加工误差以及装配等多方面的综合因素,导致相机分幅系统的放大倍率差异较大,其对实验结果的影响的贡献量已大于时间误差的贡献量,因

此必须加以校正,以减小实验误差。

## 2 测试方法

图4为测试装置图。根据分幅相机的成像原理,相机的视场光阑与像面共轭,视场光阑上有刻线对,通过计量院计量中心可以精确测出这些刻线的距离。光源照明置于准直镜焦面上的漫射体上,准直光线使得分幅相机的视场光阑(如图5所示,

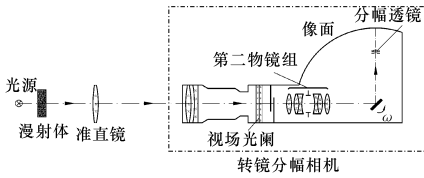


图4 转镜分幅相机放大倍率测试装置图

Fig. 4 Schematic diagram of test setup for transversal magnification of rotating mirror framing camera

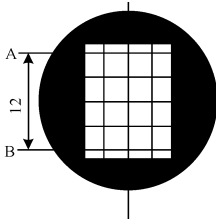


图5 视场光阑

Fig. 5 Diaphragm of FOV

带有一对刻线AB)被均匀照明。转镜匀速旋转,相机像面上安装的胶片得以重复曝光,视场光阑成像在胶片上。为保证测量的准确度,胶片曝光要适当,黑密度值应在1.8左右<sup>[7]</sup>。

假设视场光阑上刻线对AB的距离为d,像面上视场光阑像刻线对的距离为d',则每一画幅的内部放大倍率M<sub>i</sub>用下式表示:

$$M_i = d' / d \tag{3}$$

平均放大倍率M̄用下式表示:

$$\bar{M} = \sum_{i=1}^m M_i / m \quad (m \text{ 为分幅序号}) \tag{4}$$

为便于爆轰实验数据的处理,应求出相机各画幅的实际放大倍率对平均放大倍率的修正系数δ<sub>i</sub>,用下式表示:

$$\delta_i = M_i / \bar{M} = d' / (d \cdot \bar{M}) \tag{5}$$

相机各画幅的放大倍率相对误差Δ用下式表示成:

$$\Delta = (M_i - \bar{M}) / \bar{M} \times 100\% \tag{6}$$

## 3 校正结果

视场光阑刻线对经计量测试其空间长度最大误差在±2 μm以内;视场光阑像刻线的清晰程度受洗相、像差等因素的影响,空间长度测试最大误差在±0.01 mm以内。测试结果见表1。表1中视场光阑上刻线对长度d=11.999 mm(实测值);分幅透镜平均放大倍率M̄=1.405。

表1 分幅系统放大倍率及修正系数

Table 1 Transversal magnification and correction coefficient of framing system

分幅号 m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 d' /mm	17.062	17.069	17.008	16.962	16.921	17.089	16.896	17.087	16.921	17.014
M <sub>i</sub>	1.422	1.423	1.417	1.414	1.410	1.424	1.408	1.424	1.410	1.418
δ <sub>i</sub>	1.012	1.013	1.009	1.006	1.004	1.014	1.002	1.014	1.004	1.009
Δ	1.2%	1.3%	0.9%	0.6%	0.4%	1.4%	0.2%	1.4%	0.4%	0.9%
分幅号 m	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
测量值 d'	16.864	16.948	16.933	16.968	16.952	16.872	16.908	16.857	16.778	16.855
M <sub>i</sub>	1.405	1.412	1.411	1.414	1.413	1.406	1.409	1.405	1.398	1.405
δ <sub>i</sub>	1.000	1.005	1.004	1.006	1.006	1.001	1.003	1.000	0.995	1.000
Δ	0	0.5%	0.4%	0.6%	0.6%	0.1%	0.3%	0	-0.5%	0
分幅号 m	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
测量值 d' /mm	16.848	16.820	16.836	16.772	16.817	16.831	16.796	16.765	16.785	16.738
M <sub>i</sub> /mm	1.404	1.402	1.403	1.398	1.402	1.403	1.400	1.397	1.399	1.395
δ <sub>i</sub>	0.999	0.998	0.999	0.995	0.998	0.999	0.996	0.994	0.996	0.993
Δ	-0.1%	-0.2%	-0.1%	-0.5%	-0.2%	-0.1%	-0.4%	-0.6%	-0.4%	-0.7%
分幅号 m	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
测量值 d' /mm	16.655	16.782	16.727	16.693	16.713	16.628	16.811	16.728	16.792	16.782
M <sub>i</sub>	1.388	1.397	1.394	1.391	1.393	1.386	1.401	1.394	1.399	1.397
δ <sub>i</sub>	0.988	0.994	0.992	0.990	0.991	0.986	0.997	0.992	0.996	0.994
Δ	-1.2%	-0.6%	-0.9%	-1.0%	-0.9%	-1.4%	-0.3%	-0.8%	-0.4%	-0.6%

从表1可以看出,该分幅相机的内部最大放大倍率相对误差为 $\pm 1.4\%$ ,这是一个不小的数值,使用时必须加以校正。

图6为实测的各幅放大倍率曲线图。总体上看,实测的各幅放大倍率与理论计算值,存在比较大的差异,而且其分布规律也与理论曲线不同,相机前半部分画幅的放大倍率相对误差绝大多数为正,而后半部分绝大多数为负。很明显,这种现象是由于以上所述的机械加工误差、光学加工误差以及装配误差等多方面的综合因素造成的。因此,可以这样认为,上述3个因素是造成放大倍率不一致性的主要原因。

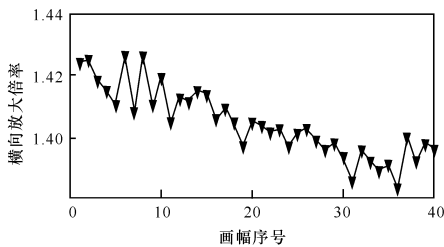


图6 实测放大倍率曲线分布

Fig. 6 Curve of measured magnification distribution

在利用表1中的数据处理爆轰实验结果时,首先确定相机对被摄物体的放大倍率。放大倍率应以修正系数为1的画幅为基准,如以表1中相机的第11幅为例,假如静止物体的大小为 $a$ ,通过测量第

11幅上的静止物体像的大小为 $a'$ ,则分幅相机的放大倍率为 $a'/a$ 。在处理动态实验结果时,如果测得第36幅上的运动物体像的大小为 $a'_{36}$ ,则第36幅上像的大小应修正为 $a'_{36}/0.986$ ,还原到物方,物体的大小应为 $a \cdot a'_{36}/(a' \cdot 0.986)$ 。其他画幅的修正方法以此类推,按 $a \cdot a'_i/(a' \cdot \delta_i)$ (其中 $a'_i$ 为某一画幅的动态像的大小, $\delta_i$ 为某一画幅的修正系数)可求得。

#### 4 修正系数 $\delta_i$ 的不确定度分析

根据表1的 $\delta_i$ 数据,最大值与最小值的相对差值为2.8%,因此对 $\delta_i$ 的准确度要求较高。评定修正系数的不确定度的数学模型见(5)式,不确定度的来源包括3个方面:一是视场光阑刻线对长度 $d$ 的测量不确定度 $u(d)$ ;二是视场光阑像刻线对长度 $d'$ 的测量不确定度 $u(d')$ ;三是相机内部平均放大倍率 $\bar{M}$ 的不确定度 $u(\bar{M})$ 。 $\delta_i$ 的合成标准不确定度 $u(\delta_i)$ 用(7)式表示<sup>[8]</sup>成:

$$u(\delta_i) = \sqrt{[c(d)u(d)]^2 + [c(d')u(d')]^2 + [c(\bar{M})u(\bar{M})]^2}$$

式中: $c(d)$ 、 $c(d')$ 和 $c(\bar{M})$ 为 $d$ 、 $d'$ 和 $\bar{M}$ 对 $\delta_i$ 的灵敏系数(偏导数)。

$\delta_i$ 的扩展不确定度 $U_{95}(\delta_i) = ku[\delta_i]$ ,其中 $k$ 为包含因子,其值根据有效自由度 $\gamma_{\text{eff}}(\delta_i)$ 取值。评定的结果见表2所示。

表2 修正系数的不确定度评定

Table 2 Evaluation for uncertainty of correction coefficient

$u(d)/\mu\text{m}$	$u(d')/\mu\text{m}$	$u\bar{M}$	合成标准不确定度 $u(\delta_i)/\mu\text{m}$	有效自由度 $\gamma_{\text{eff}}(\delta_i)$	扩展不确定度 $U_{95}(\delta_i)/\mu\text{m}$	相对扩展不确定度 $U_{\text{rel}}(\delta_i)$
0.56	6	0.0014	0.001	118	0.002	0.2%

经评定,修正系数的相对扩展不确定度为0.2%,这证明校正结果具有非常高的精度,完全可以用于爆轰实验的数据修正。

## 5 结论

1) 对于FJZ-250型同步式转镜分幅相机,分幅系统放大倍率的相对误差最大可达 $\pm 1.4\%$ 。而对于等待型分幅相机,因为工作角和转镜的厚度均比同步式分幅相机大得多,其放大倍率相对误差可能会更大,如果研究人员在处理实验底片不考虑这个因素,得到实验结果的准确度将会降低,在极端的情况下甚至会得到与理论相反的结果。

为0.2%,具有非常高的准确度。

3) 研究人员修正实验结果时,应该用直接测量的结果除以修正系数,而不是乘以修正系数,应当特别注意。

4) 不同类型(同步型和等待型)的分幅相机,分幅系统放大倍率的修正系数有较大差别。对于同类型的分幅相机,分幅系统的放大倍率修正系数的分布也不一样,因此不能参照使用。

参考文献:

[1] 谭显祥. 高速扫描相机时间测量不确定度分析[J]. 光子学报, 2002, 31(11): 1387-1390.

TAN Xian-xiang. The uncertainty analysis of the

- measurement results of high speed rotating mirror streak camera [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31 (11):1387-1390. (in Chinese)
- [2] 谭显祥. FJZ-250 型高速分幅相机时间测量不确定度分析[J]. 光学与光电技术. 2004,2(2):21-23.  
TAN Xian-xiang. Investigation of time measurement uncertainty for model FJZ-250 high speed rotating mirror framing camera[J]. Optics & Photoelectronic Technology, 2004,2(2):21-23. (in Chinese)
- [3] 李景镇,谭显祥,龚向东,等. 超高速转镜分幅相机时间信息参量测量的研究[J]. 光子学报,2004,33(7):854-857.  
LI Jing-zhen, TAN Xian-xiang, GONG Xiang-dong, et al. Studying on time information parameters of ultra-high speed framing photography with rotating mirror [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33 (7): 854-857. (in Chinese)
- [4] 李福,阮萍,马小龙,等. 光机系统分析方法[J]. 应用光学,2006,27(6):497-501.  
LI Fu, RUAN Ping, MA Xiao-long, et al. Opto-mechanical system analysis method [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(6):497-501. (in Chinese)
- [5] 李景镇,黄景灏,田洁,等. 转镜扫描相机记录像面的设计理论[J]. 光子学报,2001,30(8):1033-1035.  
LI Jing-zhen, HUANG Jing-hao, TIAN Jie, et al. Advanced designing Theory of recording surface of rotating mirror streak cameras [J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(8):1033-1035. (in Chinese)
- [6] 许家隆. 转镜式高速摄影[M]. 北京:科学出版社,1985.  
XU Jia-long. Rotating mirror high speed photography [M]. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese)
- [7] 谭显祥. 高速摄影技术[M]. 北京:原子能出版社,1990.  
TAN Xian-xiang. High speed photography technology [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990. (in Chinese)
- [8] 李慎安,施昌彦,刘风,等. 测量不确定度评定与表示[M]. 北京:中国计量出版社,1999.  
LI Shen-an, SHI Chang-yan, LIU Feng, et al. Evaluation and expression of uncertainty in measurement [M]. Beijing: Metrology Press of China, 1999. (in Chinese)