

超高速转镜分幅摄影时间信息参量测量的研究*

李景镇¹ 谭显祥² 龚向东¹ 李善祥¹ 艾月霞¹

(1 深圳大学工程技术学院光子工程研究所,深圳 518060)

(2 中国工程物理研究院流体物理研究所,绵阳 621900)

摘要 对超高速转镜分幅摄影时间信息参量的精确测量进行了研究,得出了摄影频率的空间分布表达式和任一空间画幅位置的分幅时间、任两幅画幅的时间间隔的精确计算方法.该方法已成功用于爆轰物理的实验及测试,测量相对标准差小于±0.2%.

关键词 转镜超高速分幅摄影;摄影频率;时间间隔

中图分类号 TB872 **文献标识码** A

0 引言

超高速转镜分幅摄影机是一种微秒、亚微秒级时空信息测量设备,广泛用于爆轰物理、激波物理、再入段物理、高电压放电、超高速风动、弹导与穿甲、爆炸及碎裂、高速变形、推进剂化学、细观及微观等超快过程的实(试)验研究.它用超高速光学扫描快门,依次把瞬变现象发生、发展和消失过程的二维时序图象纪录在胶片上,以便进行精确测量,得出瞬变现象时空信息的变化规律.现代实验科学对时间信息参量的测量提出了极为严格的要求,在20 μs量级,测量相对标准差应小于±0.2%.

超高速转镜分幅摄影时间信息参量主要有摄影频率(ν),曝光时间(τ),分幅时间(t_f),任两幅的时间间隔 Δt ,和总纪录时间(t)^[1].本文仅对摄影频率的空间分布、分幅时间的空间分布、任两幅时间间隔的计算方法作深入研究;同时,对转镜转速的周期测量误差也进行了较为详细分析.文中数据取自S-150型超高速等待式分幅摄影机.

1 转镜转速的周期测量误差

转镜转速的周期测量误差(标准差)包括测量原理、器件和线路误差,转镜转速的动态过程误差^[2,3].

1.1 转镜转速的原理、器件和线路误差

超高速转镜摄影机的转镜转速测量,都是采用符合测速原理测量转镜转速的周期 T ,文献[2]已有详细的分析.本文仅给出周期测量误差 $\sigma_T = [\sum_{i=1}^3 u_i^2(T)]^{1/2} = \pm 156 \text{ ns}$.计算值和实验值基本一致.S-150型摄影机转镜转速的测量相对误差在

±0.1%以下.

1.2 转镜升速过程的动态误差

从S-150型摄影机转镜转速的测试实验中可知,点火周期(测速周期)的10圈内,相邻两圈转镜周期有几微秒到十几个微秒的差异,这说明转镜的周期一直处于变化之中,很难做到在稳速段进行周期测量(整个工作时间仅为20~30s,是一种短时制工作模式).在变速过程中进行测量,所测周期值是所测那一圈内的平均值(假设是匀变速过程),而且每次摄影过程转镜上升速度所能达到的转数 N 不同、加速度 ε 不同,在工作角 $\alpha = \varphi_k - \varphi_0$ 内会产生周期的测量误差 ΔT_α .这个误差的大小和位相是随机的,经推导可得

$$\Delta T_\alpha = \frac{\alpha T^3 \varepsilon}{360^\circ} = \frac{\alpha}{360^\circ} \frac{T^2}{t} \quad (1)$$

式中 t 为过渡时间.分析可知,如果转镜的速度更高,转镜的升速时间更短,这项误差是应该考虑的.

2 扫描速度和标称摄影频率、平均摄影频率

从转镜扫描理论可知^[4],最终成象面和出瞳光阑面都是巴斯加柱面;但是,直到目前为止,国内外超高速转镜分幅摄影机的设计基本上都是用圆柱面来代替巴斯加柱面的.这种设计理论称为代替圆理论,又称为超高速转镜摄影机的经典设计理论.因此需研究出瞳光阑代替圆上的光束扫描速度,以确定摄影频率和分幅时间在代替圆上的分布特性.经推导,扫描速度 V 可表示为^[5]

$$V = 2R\omega(1 - F) \quad (2)$$

$$F = \frac{A \sin 2\varphi + B \cos 2\varphi + r \cos \varphi}{[R^2 - (B \sin 2\varphi + 2A \sin^2 \varphi + 2r \sin \varphi + C)^2]^{1/2}}$$

式中 A 、 B 、 C 由摄影机的结构参数确定, R 为出瞳光阑代替圆半径, r 为转镜垂轴截面内切圆的半径(通常称为半厚), φ 为入射光轴与转镜镜面法线的夹角,即分幅透镜(也称排透镜)光轴与转镜镜面法线

*国家自然科学基金(60127501)和广东省自然科学基金(000840)资助项目

Tel:0755-26536217 Email:lijz@szu.edu.cn

收稿日期:2003-12-31

的夹角. 可知速度 V 是 φ 角的函数. 极坐标情况下的出瞳光阑巴斯加蜗线上的光束扫描速度方程便于理解和进行误差分析, 特列出

$$V' = 2l\omega(1 + \frac{r}{l} \cos \varphi) \tag{3}$$

式中 l 为转镜旋转中心到虚轴上象点的距离, r 为转镜半厚. 计算表明, 通常情况下式(2)、(3)的计算结果相差甚微, 只是在大工作角情况下才有较大的差别. 如果转镜为无限薄的理想情况, 可得标称扫描速度 V_0

$$V_0 = 2R\omega \tag{4}$$

摄影机的标称摄影频率, 是指设计频率. 它与转镜的转速成的线性关系. S-150 型摄影机标称摄影频率 ν_0 为

$$\nu_0 = 3.36 \times 10^8 / T \tag{5}$$

或者等于

$$\nu_0 = \frac{V_0}{\Delta L} = \frac{2R\omega}{\Delta L} \tag{6}$$

式(5)中 T 以 μs 计, ν_0 则为 pps; 式(6)中, ΔL 为两相邻出瞳光阑之间的中心距, ω 为转镜转速.

摄影机的平均摄影频率 ν_a 是指在工作角范围内摄影频率的平均值, 较标称摄影频率更具有代表性, ν_a 可表示为

$$\nu_a = \frac{1}{\varphi_k - \varphi_0} \int_{\varphi_0}^{\varphi_k} V d\varphi / \Delta L = \frac{1}{(\varphi_k - \varphi_0) \Delta L} \int_{\varphi_0}^{\varphi_k} V d\varphi \tag{7}$$

亦可表示为

$$\nu_a = \frac{2R\omega}{\varphi_k - \varphi_0} \int_{\varphi_0}^{\varphi_k} (1 - F) d\varphi / \Delta L = \frac{2R\omega}{(\varphi_k - \varphi_0) \Delta L} \int_{\varphi_0}^{\varphi_k} (1 - F) d\varphi$$

对于 S-150 型摄影机, $\int_{\varphi_0}^{\varphi_k} (1 - F) d\varphi / (\varphi_k - \varphi_0) = 0.9800$, 即 $\nu_a = 0.9800\nu_0$.

3 摄影频率表征方法

首先对画幅编号. 为了对空间有确定位置的画

表 1 每幅所对应的表征修正系数 k_i

序号	1	2	3	4	5	6	15	16	17	18	19	20
k_i	-0.0104	-0.0103	-0.0102	-0.0101	-0.0100	-0.0100	-0.0114	-0.0117	-0.0120	-0.0124	-0.0128	-0.0132
序号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
k_i	-0.0137	-0.0141	-0.0146	-0.0152	-0.0157	-0.0163	-0.0169	-0.0175	-0.0181	-0.0187	-0.0194	-0.0200
序号	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
k_i	-0.0207	-0.0214	-0.0221	-0.0228	-0.0235	-0.0242	-0.0249	-0.0256	-0.0263	-0.0270	-0.0277	-0.0284
序号	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
k_i	-0.0290	-0.0297	-0.0304	-0.0310	-0.0316	-0.0322	-0.0328	-0.0334	-0.0340	-0.0345	-0.0350	-0.0355

3.2 以平均摄影频率 ν_a 计算摄影频率 ν_i

平均摄影频率和空间各画幅所对应摄影频率 ν_i 的关系可表示为

幅进行识别, 以利修正, 特对每个画幅进行编号. S-150 型摄影机共有画幅 114 幅, 上下两排各有 57 幅. 每一排的第 1 幅和另一排的第 57 幅重合(曝光时刻重合), 所以有效画幅数 112 幅. 画幅编号的简单做法, 就是摄影机使用人员在 S-150 型摄影机物镜前方, 面对摄影机, 上排图象从左至右依次编号为第 1, 第 2, ..., 第 57 幅; 下排图象从右至左依次编号为第 1, 第 2, ..., 第 57 幅. 画幅间隔号 1 指第一幅图象和第二幅图象之间的时间间隔, 画幅间隔号 30 是第 30 幅图象和第 31 幅图象之间的时间间隔, 依此类推, 画幅间隔号 56 是第 56 幅图象和第 57 幅图象之间的时间间隔(也是另一排的第一幅图象)之间的时间间隔.

摄影频率, 是指不同 φ 角下, 即不同画幅所对应的摄影频率, 或称瞬时摄影频率. 由于记录工作角范围内, 光束沿出瞳光阑代替圆上扫描的速度是变化的, 因而记录象面上各画幅所对应的摄影频率是不同的, 是 φ 角的函数. 在计算象面代替圆上各画幅对应的摄影频率 ν_i 时, 可以直接用式(2)的速度 V 除以相邻中心距 ΔL 得到; 为了分析内在的联系和表征摄影频率偏离程度, 通常用修正标称摄影频率和平均摄影频率的方法.

3.1 以标称摄影频率 ν_0 来表征摄影频率 ν_i

标称摄影频率和空间各画幅所对应的摄影频率之间的关系, 可表示为

$$\nu_i = \nu_0(1 + k_i) \tag{8}$$

式中 k_i 为标称修正系数, 等于

$$k_i = \frac{\nu_i - \nu_0}{\nu_0} = \frac{c_i - c_0}{c_0}$$

式中 c_i, c_0 为相应的摄影频率因子, 数值上, $c_i = (1 - F)$, $c_0 = 1$. 表 1 为 k_i 的数值, 计算参数取自 S-150 型摄影机. 若转镜转速 $T = 300 \mu s$, 求第 39 幅的瞬时摄影频率 ν_{39} , 查表 1, 可得 $k_{39} = -0.0249$, 计算可得

$$\nu_{39} = \nu_0(1 + k_{39}) = 1.0921 \times 10^6 \text{ pps}$$

$$\nu_i = \nu_a(1 + K_i) \tag{9}$$

式中 K_i 为平均修正系数, 等于

$$K_i = \frac{\nu_i - \nu_a}{\nu_a} = \frac{c_i - c_a}{c_a}$$

式中 c_a 为平均摄影频率因子, 数值上 $c_a = \int_{\varphi_0}^{\varphi_k} (1 - F)$

$d\varphi/(\varphi_k - \varphi_0)$. 表 2 为 K_i 值的数. 计算表明: 两种

表 2 每幅所对应的平均修正系数 K_i

序号	1	2	3	4	5	6	15	16	17	18	19	20
K_i	0.0097	0.0099	0.0100	0.0101	0.0101	0.0102	0.0088	0.0085	0.0081	0.0077	0.0073	0.0069
序号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
K_i	0.0064	0.0059	0.0054	0.0049	0.0043	0.0037	0.0032	0.0025	0.0019	0.0013	0.0006	-0.0001
序号	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
K_i	-0.0008	-0.0015	-0.0022	-0.0029	-0.0036	-0.0043	-0.0050	-0.0057	-0.0065	-0.0072	-0.0079	-0.0086
序号	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
K_i	-0.0093	-0.0100	-0.0106	-0.0113	-0.0119	-0.0125	-0.0131	-0.0137	-0.0143	-0.0148	-0.0153	-0.0158

4 分幅时间和任意两画幅之间的时间间隔的计算方法

标称分幅时间 Δt_0 可从式(6)得到

$$\Delta t_0 = \frac{1}{\nu_0} = \frac{\Delta L}{2R\omega} \quad (10)$$

任意相邻二画幅之间的时间间隔, 即分幅时间, 可从式(2)得到

$$\Delta t_p = \frac{\Delta L}{2R\omega(1 - F)} \quad (11)$$

方法得到的结果一致, k_i 和 K_i 反映每个画幅的瞬时摄影频率相对于标称摄影频率、平均摄影频率偏离的程度.

定义修正系数 p 为

$$p = \frac{\Delta t_p - \Delta t_0}{\Delta t_0} \quad (12)$$

则 Δt_p 可表示为

$$\Delta t_p = \Delta t_0(1 + p) \quad (13)$$

p 值可从式(2)、(10)、(11)、(12)编程逐幅求出. 表 3 列出了修正系数 p 及其累加值 t , 而且上、下排中同一间隔号具有相同的修正系数.

表 3 每一分幅时间的修正系数 P 和其累加值 t

序号	1	2	3	4	5	6	15	16	17	18	19	20
P	0.0368	0.0362	0.0357	0.0351	0.0346	0.0339	0.0277	0.027	0.0263	0.0255	0.0248	0.024
t	0.0368	0.073	0.1087	0.1438	0.1784	0.2123	0.4875	0.5145	0.5408	0.5663	0.5911	0.6151
序号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
P	0.0233	0.0226	0.0219	0.0211	0.0204	0.0198	0.0191	0.0184	0.0178	0.0172	0.0165	0.016
t	0.6384	0.661	0.6829	0.704	0.7244	0.7442	0.7633	0.7817	0.7995	0.8167	0.8332	0.8492
序号	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
P	0.0154	0.0149	0.0143	0.0139	0.0134	0.013	0.0125	0.0122	0.0118	0.0115	0.0112	0.0109
t	0.8646	0.8795	0.8938	0.9077	0.9211	0.9341	0.9466	0.9588	0.9706	0.9821	0.9933	1.0042
序号	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
P	0.0107	0.0105	0.0104	0.0103	0.0102	0.0101	0.0101	0.0101	0.0102	0.0103	0.0104	0.0105
t	1.0149	1.0254	1.0358	1.0461	1.0563	1.0664	1.0765	1.0866	1.0968	1.1071	1.1175	1.128

S-150 型摄影机的有效画幅数 112 幅. 根据工程需要, 处理数据时, 需要计算任意两画幅间的时间间隔. 为了避免按式(13)作累加计算, 在工程中是按按下法进行处理的. 设待测的起始号为 s , 终止号为 e , 则 $(e - s)$ 为分幅时间的个数. 分别以 t_0 、 t_p 表示 s 至 e 间的标称时间间隔值和修正后的实际时间间隔值, 即

$$\begin{aligned} t_0 &= (e - s) \Delta t_0 \\ t_p &= (e - s) \Delta t_0 + \Delta t_0 \sum_{j=s}^{e-1} p_j \end{aligned} \quad (14)$$

若图象从上排第 40 幅开始, 经下排后终止于上排第 20 幅图象, 求该两幅图象间的实际时间间隔值 t_p . 已知 $\Delta t_0 = 1.05 \mu\text{s}$. 因图象跨越二排, 拟采用分

段计算法:

1) 幅面间隔总个数

$$(e - s) = (57 - 40) + (57 - 1) + (20 - 1) = 92$$

2) 总修正量 $\sum p$ 的计算

$$\sum_{j=40}^{e-1} p_j = \sum_{j=40}^{56} p_j + \sum_{j=1}^{56} p_j + \sum_{j=1}^{18} p_j = (1.128 - 0.9466) + 1.128 + 0.5911 = 1.90$$

3) 实际时间间隔 t_p 的计算

$$t_0 = 92 \times 1.05 = 96.6 \mu\text{s} \quad t_p = 92 \times 1.05 + 1.90 \times 1.05 = 98.6 \mu\text{s}$$

可知 $\delta = (t_p - t_0)/t_0 = 2\%$. 可见对 S-150 型超高速摄影机在应用过程中对其标称值进行修正是完全必要的.

5 精度估算

经过修正后,影响实际分幅时间 Δt_p 测量精度的主要因素是转镜转动周期的测量精度 σ_T 和式(12)中 $l, r, \Delta L$ 的加工精度. r 是靠研磨得到, $l, \Delta L$ 是用坐标镗床加工,都能得到很高的加工精度. 一般来说, $\sigma_r = \pm 0.002$, $\sigma_l = \pm 0.005$, $\sigma_{\Delta L} = \pm 0.01$. 用式(4)来估算 Δt_p 的测量精度,可得

$$\Delta t_p = \frac{\Delta L}{2l\omega(1 + \frac{r}{l}\cos\varphi)} = \frac{\Delta LT}{4\pi(1 + r\cos\varphi)} \quad (15)$$

根据误差理论可得标准差合成公式

$$\sigma_{\Delta t_p} = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta t_p}{\partial T}\right)^2 \sigma_T^2 + \left(\frac{\partial \Delta t_p}{\partial \Delta L}\right)^2 \sigma_{\Delta L}^2 + \left(\frac{\partial \Delta t_p}{\partial l}\right)^2 \sigma_l^2 + \left(\frac{\partial \Delta t_p}{\partial r}\right)^2 \sigma_r^2} \quad (16)$$

对于 S-150 型超高速摄影机,当 $T = 300 \mu\text{s}$ 时, $\varphi = 5^\circ$ 时,可得

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \Delta t_p}{\partial T}\right)^2 &= 8.207 \times 10^{-6} & \left(\frac{\partial \Delta t_p}{\partial \Delta L}\right)^2 &= 1.29 \times 10^{-2} \\ \left(\frac{\partial \Delta t_p}{\partial l}\right)^2 &= 1.687 \times 10^{-5} & \left(\frac{\partial \Delta t_p}{\partial r}\right)^2 &= 1.674 \times 10^{-5} \\ \Delta t_p &= 0.8613 \mu\text{s} & \sigma_T &= \pm 0.156 \mu\text{s} \end{aligned}$$

代入式(16)可得

$$\sigma_{\Delta t_p} = \pm 1.22 \times 10^{-3} \quad \sigma_{\Delta t_p} / \Delta t_p = 1.417 \times 10^{-3} = 0.142\%$$

可知相对标准差 $\sigma_{\Delta t_p} / \Delta t_p = \pm 0.142\% < \pm 0.2\%$. S-150 型超高速摄影机所测数据的修正处理方法满足现代爆轰物理实验的测试要求.

6 结论

1) 对转镜转速的周期测量误差、升速过程中动态周期测量误差进行较为深入的研究,推导了计算方程.

2) 对转镜式分幅摄影机的标称摄影频率、平均摄影频率给出了明确的定义和表征方程.

3) 实际摄影频率是转镜转角 φ 的函数,即为图象空间坐标的函数. 为了便于分析,可以用标称摄影频率和标称修正系数来表示,亦可用平均摄影频率和平均修正系数来表示.

4) 任一图象空间位置的分幅时间,任二幅图象的时间间隔均可精确计算出来.

5) 经过修正后的主要时间信息参数的测量相对标准差小于 $\pm 0.2\%$.

6) 文中所取设计参数均来自 S-150 型超高速等待式分幅摄影机,并已编制了相应的数据处理软件.

参考文献

- 1 龚祖同(顾问),李景镇(主编). 光学手册. 西安:陕西科技出版社,1986
Gong Z T (Adviser), Li J Z (Chief Editor). Optics Handbook, Xi'an: Shaanxi Sciences & Technology Press, 1986
- 2 谭显祥. 高速扫描相机时间测量不确定度分析. 光子学报, 2002, 31(11): 1387 ~ 1390
Tan X X. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(11): 1387 ~ 1390
- 3 赵积来. ZFK-500 型高速摄影机拍摄速度的稳定性和同步精度分析. 第一届全国高速摄影论文选集. 北京:科学出版社,1978. 37 ~ 44
Zhao J L. Analysis of Stability and Synchronous Accuracy of Photographic Speed for Model ZFK-500 High Speed Cameras. Proc. of the 1st National Congress on High Speed Photography and Photonics (NCHSPP). Beijing: Science Press, 1978. 37 ~ 44
- 4 Li J, Huang J, Tian J. Advanced recording surface of rotating mirror camera. SPIE, 2000, 4183: 461 ~ 465
- 5 Egel E A, Kristiansen M. Rotating Mirror Streak and Framing Camera. Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1997. 16

Studying on Time Information Parameters of Ultra-high Speed Framing Photography with Rotating Mirror

Li Jingzhen¹, Tan Xianxiang², Gong Xiangdong¹, Li Shangxiang¹, Ai Yuexia¹

¹ *Inst of Opt Eng coll of Eng & Tech, Shenzhen University, Shenzhen 518060*

² *Inst of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900*

Received date: 2003 12-31

Abstract The precise measurement of the time information parameters of ultra high-speed photography were studied, and both the spacial distribution formulae of photographic frequency and the computing method of time intervals between arbitrary two frames obtained, which have been successfully applied to experimental measurement of detonating and exploding physics.

Keywords Ultra high-speed framing photography with rotating mirror; Photographic frequency; Time interval between arbitrary two frames



Li Jingzhen professor, Member of Council of the Chinese Optical Society and Vice President of Committee for Optical Testing of China, graduated from Tsinghua University in 1964, and from post graduate school, Academia Sinica in 1968, and transferred from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, to Shenzhen University in December, 1993. He has been studying high speed photography and photonic technology for about thirty six years. Now, his main research interests are ultra high speed photography, especially extreme high speed photography of $10^6 \sim 10^{12}$ pps, binary optics, and photonic crystal.