**文章编号**：1000-5773(2006)01-0079-04

# 两台联动转镜式高速相机像漂移分析*

刘宁文，桑永生，肖正飞，畅里华，尚长水

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900）

**摘要**：讨论了两台联动转镜式高速相机像漂移的各种原因，从理论和实验对相机像漂移的影响因素进行了分析，比如磁电式传感器、材料、制作工艺、装配精度及操作不当等。并针对这些影响因素，提出了解决像漂移的技术措施，通过实验证明了改进效果。

**关键词**：高速摄影；转镜式高速相机；磁电式传感器；漂移

**中图分类号**：O521.3 **文献标识码**：A

## 1 引 言

高速摄影是爆轰物理、冲击波物理、加速器物理和等离子体实验等研究领域中重要的光学测试手段之一。由于爆轰物理、冲击波物理等实验研究的时间范围为几毫秒到十几微秒，转镜式高速相机具有合适的时间分辨本领($1\times10^4$～$1\times10^7$幅/秒)和良好的图像空间分辨率，一直是爆轰物理、冲击波物理等实验研究的重要设备[1]。

在实际测试中，测量目标与高速相机同步的准确度很重要，一般要求目标在底片上成像漂移不大于±1 μs。相机控制系统控制目标像落在胶片的适宜位置上，这就要求目标发生时刻和转镜旋转位置保持同步。

用两台气动转镜式高速相机微机控制系统，控制两台 FJZ-250 型相机工作在转速 $12\times10^4$ r/min 以上，目标像漂移都在允许范围之内。用两台 FJZ-250 型转镜式高速相机同步拍摄火花隙放电目标时，一台选用 $12\times10^4$ r/min 的转速拍摄目标，另一台用 $8\times10^4$ r/min 的转速拍摄目标，发现用 $8\times10^4$ r/min 的转速拍摄目标的相机在工作时图像漂移过大，针对此问题拍摄了 3 组空气隙放电火花，并用 SJZ-15 型扫描相机记录。图 1 是转速为 $8\times10^4$ r/min 相机拍摄的 3 组火花图像。第 2 组火花像中波头相差最大，为 23 mm(在 $8\times10^4$ r/min 时相当于 5.8 μs)。

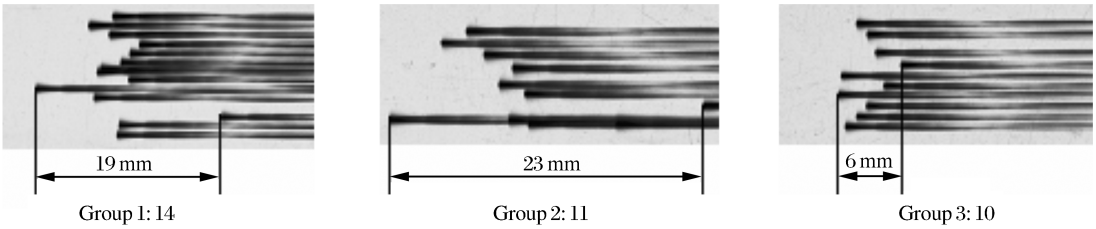



图 1 SJZ-15 型扫描相机在 $8\times10^4$ r/min 时拍摄的 3 组火花扫描像

Fig. 1 Sparkle images from SJZ-15 model streak camera in $8\times10^4$ r/min

* **收稿日期**：2004-11-26；**修回日期**：2005-04-11

**作者简介**：刘宁文(1967—)，女，学士，高级工程师，主要从事高速摄影技术研究.

E-mail：LiuNingWin@shou.com

## 2 目标像漂移分析

### 2.1 机械安装定位精度的影响

按照常规操作规程,目标像对好后,高速相机透平是不应拆装的,在发现转镜有污点需要清洗时,必须在透平拆洗安装后,重新找火花基数。因转镜透平在拆卸过程中,机械安装定位孔的大小有 1～2 mm 的空间间隙,根据表 1 数据可知,转镜透平不同的安装定位可引起目标像位置的整体移动。如安装误差为±1°,像在底片上引起的整体移动约为±8.33 mm,对于不同转速,整体移动时间为 0.55～5.53 μs。

**表 1 SJZ-15 型高速相机(扫描半径 238.73 mm)转速、扫速、时间等对应表**

**Table 1 Correspondence in rotating speed, streaking speed and time of model SJZ-15 rotating high speed camera(streaking radius 238.73 mm)**

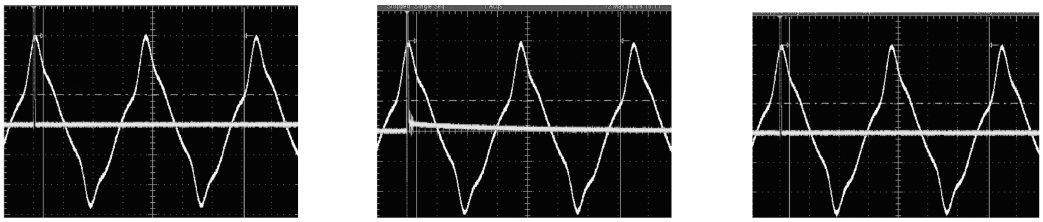
| Rotating speed/($10^4$ r/min) | Degree/(°) | Image movement/(mm) | Streaking speed/(km/s) | Time error/(μs) |
|---|---|---|---|---|
| 3 | 1 | 8.33 | 1.5 | 5.53 |
| 6 | 1 | 8.33 | 3.0 | 2.76 |
| 8 | 1 | 8.33 | 4.0 | 2.07 |
| 9 | 1 | 8.33 | 4.5 | 1.84 |
| 12 | 1 | 8.33 | 6.0 | 1.38 |
| 15 | 1 | 8.33 | 7.5 | 1.11 |
| 18 | 1 | 8.33 | 9.0 | 0.92 |
| 21 | 1 | 8.33 | 10.5 | 0.79 |
| 24 | 1 | 8.33 | 12.0 | 0.69 |
| 30 | 1 | 8.33 | 15.0 | 0.55 |

### 2.2 磁电式传感器信号的影响

在拍摄以上 3 组火花像的同时,用示波器对磁电式传感器信号进行了监测,测量结果发现,在同一转速下($8\times10^4$ r/min,标准周期 750 μs),测量不同次数的转镜周期、信号的上升沿、电压峰峰值等是不相同的,在某一个小范围内变化且无规律可寻,波形形状随转速变化且不稳定,但在转速上升过程中,信号的上升沿和电压峰峰值随着转速升高不断加大。对火花像的 35 个测量数据进行对比分析,发现在拍摄火花像时,实测转镜周期时间在 754～740 μs 的变化中,上升沿变化达 10 μs,峰峰值变化达 1 V,但无变化规律。而控制系统判断零时刻的依据是传感器信号的电压幅值。假设把传感器信号设定为线性变化的三角波,则上升时间与电压峰峰值成线性正比关系,控制系统设定的电压门槛值为 4 V,对应 0 V 时的时间 $t$ 为

$$t = 4t_{\mathrm{rise}}/V_{\mathrm{p\text{-}p}} \tag{1}$$

从第 2 组火花像拍摄时的磁电式传感器信号中,选了 6 次数据,根据公式(1)计算出的相对零点时间见表 2。从表 2 可知,6 次实验火花像中,火花像波头相差最大时间为 5.313 μs,图 2 是任选的三次传感器信号波形,从图中可知,传感器信号波形不规则。



(a) (b) (c)

图 2 任选传感器信号波形

Fig. 2 Discretional sensor wave signal

**表 2　磁电式传感器信号的转镜周期、上升沿、电压峰峰值等对比**

**Table 2　Signal compare of magnetoelectric sensor in period, rising-edge and $V_{p\text{-}p}$**

| No. | Rotating speed/($10^4$ r/min) | Period/($\mu$s) | Rising-edge/($\mu$s) | $V_{p\text{-}p}$/(V) | Relatively zero time/($\mu$s) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 8 | 744.4 | 188.5 | 12.24 | 61.601 |
| 2 | 8 | 749.0 | 187.6 | 12.16 | 61.710 |
| 3 | 8 | 728.3 | 187.7 | 12.40 | 62.567 |
| 4 | 8 | 748.3 | 193.3 | 12.08 | 64.007 |
| 5 | 8 | 719.1 | 184.3 | 12.56 | 58.694 |
| 6 | 8 | 738.3 | 189.0 | 12.48 | 60.576 |

磁电式传感器的理想波形为正弦波或三角波,但在研制出的传感器中,发现影响波形的因素很多。

(1) 铁芯和永磁材料的性能质量:永磁材料的表磁强度要求足够大、磁场分布均匀,铁芯要求磁通量尽量大、剩磁少,需要材料的性能稳定,在对传感器电阻的测量中,发现电阻随温度的变化而改变,经实验发现,材料的性能质量影响波形的电压幅值和稳定度。

(2) 制作安装工艺:对电磁传感器的制作、装配的精度要求较高,铁芯的退火工艺等也影响其波形的质量。所研制的磁电式传感器波形每个都有差异,实验分析得知:以上诸多因素影响和决定着传感器波形的形状和质量。

### 2.3　两台转镜式相机同步控制精度的影响

控制系统要同时控制两台同步转镜式高速相机同时拍摄同一目标,必须使反射镜成像在底片的位置处于底片前端。反映到转镜传感器信号上,即为两台同步转镜式高速相机的符合脉冲 $\Delta T_1$、$\Delta T_2$ 必须有重叠的部位,即为目标像所漂移的不确定时间,这是由两台同步控制原理设计系统所决定的。两台转镜式高速相机同步工作控制原理图见图 3,其中 $T_1$、$T_2$ 为两台高速相机的转镜周期时间,$\Delta T_1$、$\Delta T_2$ 为符合脉冲宽度,取为 1 $\mu$s。由图 3 可看出,两台相机同步工作时,可产生的最大漂移时间为 $\Delta T_1$ 或 $\Delta T_2$($\mu$s)[2]。

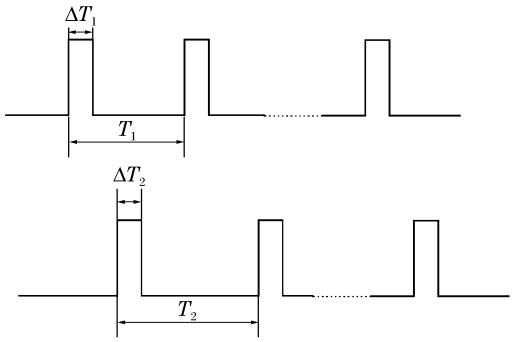



图 3　两台转镜式高速相机同步工作控制原理图

Fig. 3　Principle of two rotating mirror cameras synchronization operation

### 2.4　时间漂移的合成影响

综合以上三方面对成像位置的影响可知,转镜透平在拆卸过程中的机械安装定位所引起的整体移动,严格遵守操作规程是可避免的;而由传感器信号的不规则性和控制系统设计原理带来的时间漂移是不可避免的。根据以上两部分所得的最大漂移时间为 5.313 $\mu$s(转速为 $8\times10^4$ r/min)和 1 $\mu$s(系统漂移),合成成像系统的时间漂移公式为

$$t=\sqrt{t_1^2+t_2^2} \tag{2}$$

将相关数据带入公式(2),计算出的合成成像系统的时间漂移为 5.406 $\mu$s,与测量的第 2 组火花像中的波头最大相差 23 mm(在 $8\times10^4$ r/min 时相当于 5.8 $\mu$s)基本吻合。

## 3　实验结果

在对磁电式传感器进行挑选后,在使用中避免了相机机械定位的影响。用两台转镜式相机同步工作,拍摄了火花隙放电目标,以下是其中两组火花扫描像,图 4 为 $18\times10^4$ r/min 的转速拍摄的火花像(线速度为 9 km/s,相当于 0.5 $\mu$s),图 5 为 $9\times10^4$ r/min 的转速拍摄的火花像(线速度为 4.5km/s,相当于 0.99 $\mu$s)。拍摄结果表明,目标在底片上成像漂移小于±1.5 $\mu$s,满足实验使用要求。

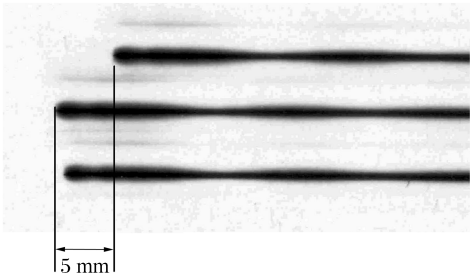



图 4 $18\times10^4$ r/min 拍摄的火花像

Fig. 4 Sparkle images in $18\times10^4$ r/min

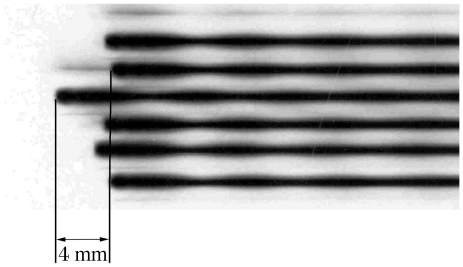



图 5 $9\times10^4$ r/min 拍摄的火花像

Fig. 5 Sparkle image in $9\times10^4$ r/min

## 4 结 论

经过对拍摄火花隙放电目标的实验，对各个影响目标像漂移的环节进行了分析，得出以下结论：

(1) 对相机机械定位精度的控制是减小相机像整体移动的重要环节，必须按照高速相机的操作规程进行工作，以避免目标像的整体移动。

(2) 两台相机同步控制在原理上会带来一定的时间漂移，通过优化设计，所产生的误差在允许范围内。

(3) 磁电式传感器的波形不规则和不稳定，是造成目标像漂移大的主要原因，下一步正在探索改进研制新的磁电式传感器。

对谭显祥研究员和李泽仁研究员的技术支持，孙学林高级工程师、金山等同志的大力协作，在此一并表示感谢！

## References:

[1] Tan X X. Test Technique for Optical High Speed Potography [M]. Beijing: Science Press, 1992. (in Chinese)
谭显祥. 光学高速摄影测试技术 [M]. 北京：科学出版社，1992.

[2] Liu N W, Wu Y F. Control System for Several Rotating Mirror Cameras Synchronization Operation [J]. SPIE, 1997, 2869: 695.

# Image Excursion Analysis of Two Rotating Mirror High-Speed Cameras Used Simultaneously

LIU Ning-Wen, SANG Yong-Sheng, XIAO Zheng-Fei,
CHANG Li-Hua, SHANG Chang-Shui

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

**Abstract**: Reasons of imaging excursion of two rotating mirror high speed cameras used simultaneously are discussed, and the influence to images are analysed according to the theories and experiments, such as the signal drift of the magnetoelectric sensor and improperly operating etc. Finally some measurement are taken to reduce the image excursion.

**Key words**: high-speed photography; rotating mirror high-speed camera; magnetoelectric sensor; jitter