

超高速转镜扫描相机扫描速度的校准及应用方法*

汪 伟 畅里华 李 剑 尚长水 肖正飞

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 621900)

摘 要 研制了一套超高速转镜扫描相机扫描速度的校准装置, 采用严格控制狭缝宽度和边缘质量的双狭缝、超快响应(0.7 ns)的光电倍增管以及相应措施, 改善光电倍增管阴极不同部位灵敏度的一致性, 使得校准装置的相对测量扩展不确定度达到了 0.1%; 给出了扫描速度校准的应用方法, 并且分析了气压对相机符合转速的影响。

关键词 高速摄影; 转镜式扫描相机; 校准; 扫描速度

中图分类号 TP872 **文献标识码** A

0 引言

转镜式高速扫描相机以极高的时间分辨本领(2~3 ns)^[1], 在爆轰物理和冲击波物理实验研究领域有着广泛的应用。目前, 国内在用的扫描相机的记录像面均为代替圆柱面, 近期也有无离焦和等速像面新设计理论^[2], 但未见有最新应用。记录像面采用代替圆柱面最大的缺点是产生了扫速不均匀性。根据转镜相机的设计理论^[3], 代替圆柱面上像点的扫速与光轴的入射角 φ 和转镜厚度 $2a$ 有直接关系。针对国内常用的 SJZ-15 型转镜扫描相机, $a=4$ mm, φ 从 9° 到 39.5° , 扫描方向从 39.5° 到 9° , 像面上的扫速是逐次增大的。像面上的扫速, 始端、末端与中端相比, 分别相差 -0.17% 和 0.19% , 始端和末端相差 -0.36% 。这种扫速不均匀性对于普通的物理实验, 是可以满足测试要求的。因此, 国内外绝大多数实验研究均使用相机的名义扫描速度(设计值), 即像面中点附近的扫描速度^[4]。随着精密爆轰物理实验(测量相对标准差小于 0.2% ^[5], 甚至更高)的提出, 研究人员对扫描相机提出了更高的要求, 准确获知像面上不同扫描位置的扫描速度是最好的方法, 这对最大限度减小实验误差具有重要意义。

我所曾研制过类似的装置, 虽然在原理上并无本质的区别, 但是其相对测量不确定度较大(0.3%)^[6], 且检测结果与相机像面扫速趋势(理论计算)自相矛盾, 不具有说服力。本文采取了多种必要的措施, 使得校准装置的相对测量不确定度达到 0.1% , 校准结果也符合相机扫描理论。

1 校准原理及装置

1.1 校准原理

要实际测量像面上每一点的扫描速度是非常困难的, 实际上也是不必要的。通常的方法是在像面上选定具有代表性的三小段(像面的始端 1、中端 2 和末端 3), 测量这三小段的平均速度代替像面的始端、中端和末端的扫描速度。

在相机像面上装有双狭缝金属片, 金属片上有三组狭缝(一组包含两条狭缝), 一组狭缝对应一只光电倍增管。实现氙灯与相机的同步, 当相机达到预设转速时, 控制台触发氙灯电源使氙灯发光, 三个光电倍增管先后接收到六个光信号, 将其转换为六个电信号后, 由数字示波器接收, 可以测量扫过每一组狭缝的时间, 从而计算出扫描速度。像面上扫描速度为

$$v_i = d_i / t_i \quad (1)$$

式中 d_i 为标准双狭缝金属片的狭缝间距, t_i 为狭缝像扫过狭缝间距的时间, i 为像面位置的编号, 文中规定 1 为始端(远离入射光轴), 2 为中端, 3 为末端。扫速不均匀性 Δv_i (相对像面中端位置 2) 为

$$\Delta v_i = (v_i - v_2 / v_2) \times 100\% \quad (2)$$

1.2 实验装置

实验装置见图 1。

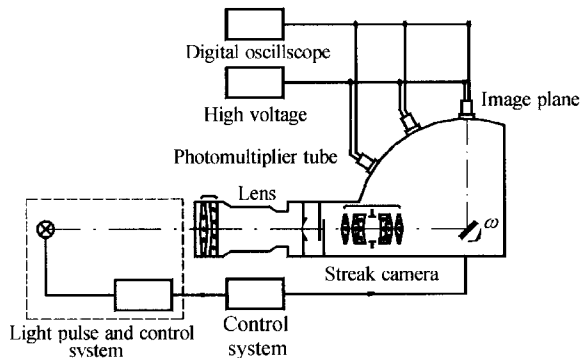


图 1 扫描速度校准装置
Fig. 1 Schematic diagram of calibration device for writing rate

* 国防科技工业技术基础科研(2002JC2)资助项目

Tel: 0816-2492104 Email: wangyue@tom.com

收稿日期: 2005-04-25

1.2.1 脉冲氙灯

氙灯的光脉冲宽度应该大于该转速时的像面记录时间、而小于转速周期时间,氙灯光脉冲的产生应与相机同步.

1.2.2 狭缝片

狭缝片厚度 0.2 mm,缝宽 0.3 mm;三组狭缝,一组两条狭缝,每组狭缝间距设计值 30 mm. 在 10 倍放大镜下观察,狭缝两边缘没有明显的锯齿状.

1.2.3 光电倍增管

光电倍增管的上升时间 0.7 ns,可见光响应,端窗外形尺寸 $\Phi 51$ mm,大于狭缝间距.

1.2.4 数字示波器

采样率 1 GSa/s,带宽 500 MHz,记录长度应大于该转速像面的记录时间.

2 实验

实验对象是 SJZ-15 型转镜扫描相机,不同转速下的实验数据及检测结果见表 1. 实验中使用同一狭缝片,实测的狭缝间隔距离分别为始端(1 位置)30.001 mm,中端(2 位置)29.980 mm,末端(3 位置)29.998 mm,对应的 φ 角分别是 35.65°、24.25°、13.45°. 在表 1 及表 2 中,时间间隔的单位为 μs ,扫描速度的单位为 mm/ μs .

表 1 实验结果

转速 10^4 r/min	气压 MPa	像面 位置	检测项目	测量次数								平均 值
				1	2	3	4	5	6	7	8	
6	0.1	1	时间间隔	9.950	9.964	9.947	9.957	9.965	9.959	9.967	9.970	9.960
			扫描速度	3.015	3.011	3.016	3.013	3.011	3.012	3.010	3.009	3.012
		2	时间间隔	9.931	9.937	9.924	9.932	9.943	9.939	9.941	9.945	9.937
			扫描速度	3.021	3.019	3.023	3.020	3.017	3.018	3.018	3.016	3.019
		3	时间间隔	9.906	9.914	9.901	9.909	9.925	9.922	9.912	9.924	9.914
			扫描速度	3.026	3.024	3.028	3.026	3.021	3.022	3.025	3.021	3.024
9	0.15	1	时间间隔	6.664	6.668	6.664	6.660	6.660	6.666	6.666	6.662	6.664
			扫描速度	4.502	4.499	4.502	4.505	4.505	4.501	4.501	4.503	4.502
		2	时间间隔	6.648	6.653	6.645	6.642	6.642	6.647	6.647	6.642	6.646
			扫描速度	4.512	4.509	4.514	4.516	4.516	4.513	4.513	4.516	4.514
		3	时间间隔	6.635	6.639	6.634	6.629	6.630	6.634	6.636	6.630	6.633
			扫描速度	4.518	4.516	4.519	4.523	4.522	4.519	4.518	4.522	4.519
18	0.31	1	时间间隔	3.338	3.340	3.340	3.341	3.343	3.339	3.342	3.340	3.340
			扫描速度	8.988	8.982	8.982	8.980	8.974	8.985	8.977	8.982	8.981
		2	时间间隔	3.330	3.331	3.329	3.330	3.329	3.329	3.331	3.330	3.330
			扫描速度	9.008	9.006	9.011	9.008	9.011	9.011	9.006	9.008	9.009
		3	时间间隔	3.321	3.322	3.322	3.321	3.324	3.322	3.323	3.322	3.322
			扫描速度	9.027	9.025	9.025	9.027	9.019	9.025	9.022	9.025	9.024

代替圆柱面理论推导公式表明,像面 1 位置偏离光轴最大(即 φ 角最大),扫速最小,2 位置扫速稍大,3 位置扫速最大. 从表 1 可以看出,本文的测量结果,不但统计的各像面位置扫速趋势遵守理论计算,而且单次实验得到的扫速数值也遵守这一规律. 这也从另一侧面证明了该校准装置具有很高的测量不确定度.

3 扫速不均匀性

对于 SJZ-15 相机,根据扫描扫速理论计算公式^[4]及式(2)的理论计算,被校准的相机像面各部位的扫速及不均匀性与校准结果的比较见表 2.

从表 2 可以看出,相机实际的扫速不均匀性比理论计算要大,这是一个值得引起重视的问题.

表 2 理论扫速与实验结果的比较

转速 10^4 r/min	像面 位置	理论 扫速	理论计 算值	校准 扫速	实验值
6	1	2.997	-0.17%	3.012	-0.23%
	2	3.002	-	3.019	-
	3	3.005	0.1%	3.024	-0.17%
9	1	4.496	-0.17%	4.502	-0.27%
	2	4.503	-	4.514	-
	3	4.508	-0.1%	4.519	0.11%
18	1	8.991	-0.17%	8.981	-0.31%
	2	9.006	-	9.009	-
	3	9.015	0.1%	9.024	0.17%

4 测量不确定度分析

关于本次实验的测量不确定度分析,是一个较

为复杂的问题,将另文详细叙述,在这里只作简要分析.总的来说分为两大类:扫描速度测量重复性引起的不确定度和检测装置的不确定度.而校准装置的不确定度又拆分为双狭缝间距测量不确定度和时间间隔测量不确定度.根据分析,在众多影响因素中,时间间隔测量引起的不确定度是最主要的贡献量.通过对信号波形的重复性测量, 6×10^4 R/min 时,极限误差为 ± 6 ns; 9×10^4 R/min 时,极限误差为 ± 5 ns; 18×10^4 R/min 时,极限误差为 ± 2 ns. 根据以上数据,加上其它因素的影响,最终可以得到本校准装置的相对扩展不确定度为 0.1%.

5 确保 0.1% 测量相对扩展不确定度的关键方法

1) 采用严格控制狭缝宽度和边缘质量的双狭缝,提高了本校准装置波形信号的信噪比,减小了本校准装置的扩展不确定度.

2) 采用超快响应的光电倍增管以及采取措施减小扫描相机狭缝本身的长度,使其在相机像面上几乎成为一个光点,使波形信号触发位置变得易于判读(图 2),减小了判读带来的测量不确定度.

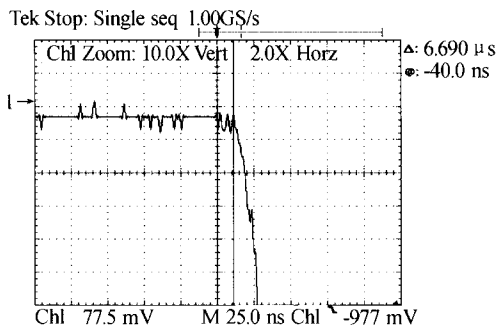


图 2 经过放大后的波形前沿

Fig. 2 Rising front of signal after amplification

3) 采取措施使光电倍增管光阴极不同部位的均匀性得以改善,保持波形的一致性(图 3),可以有效减小时间间隔测量的误差.

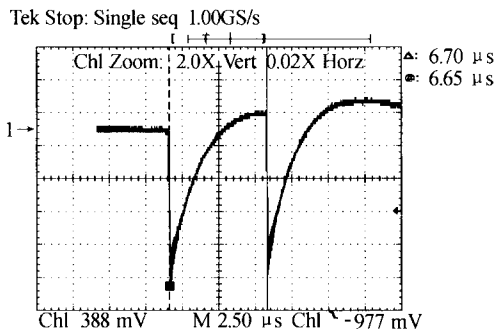


图 3 一个光电倍增管输出的典型波形

Fig. 3 Typical signal

4) 使用高采样率(1 GSa/s)和具有高时基准确度(20 ppm)的数字示波器,并采用适当的数值插入

法,使得数字示波器最大允许误差为 ± 1 ns.

6 气压对相机符合转速的影响

所谓符合转速,是指相机正在拍摄的转速.拍摄图像的转速周期称为符合周期,其值由相机控制台主控单元直接给出.

实验中,观察到,气压对相机的符合周期有影响,而相机在低转速时对气压的大小较为敏感.表 3 为相机 6×10^4 R/min 和 9×10^4 R/min 在不同气压下符合时的扫速.

表 3 不同气压下符合时的扫速

转速 10^4 R/min	气压 MPa	像面位置及扫速 mm/ μ s		
		1	2	3
6	0.08	2.994	3.005	3.009
	0.1	3.012	3.019	3.024
9	0.13	4.488	4.500	4.506
	0.15	4.502	4.514	4.519

从表 3 可以看出,对于这两个转速(较低速),在较小气压变化(减小)时,转镜符合周期均变大,相机符合的扫描速度变小.而对于 12×10^4 R/min 或更高转速,较小气压变化(如相机在气压为 0.2 MPa 和 0.18 MPa 下运转)对符合转速的影响很小,这是相机操作者应该引起重视的问题.

7 校准结果的应用方法

在实际的爆轰试验中,操作者使用的气压一般都偏高.从以上论述知道,在气压偏高时,相机在 6×10^4 R/min 和 9×10^4 R/min 的扫速与名义扫速相差较大,而在较高转速时(大于 12×10^4 R/min)与名义扫速符合较好.因此,需对相机较低转速时的扫速进行校准就可以了,较高转速时按照理论公式计算的扫速数值已经有非常高的准确度.较低转速时的校准,将校准结果与理论值相比较得到一个系数,如相机在 6×10^4 R/min、气压为 0.1 MPa 时,相机像面上的实际扫描速度就可以用如下修正公式

$$v = 2 \times 1.0055 L \omega (1 + \frac{a}{L} \cos \varphi) \quad (3)$$

相机在 9×10^4 R/min、气压为 0.15 MPa 时,相机像面上的实际扫描速度就可以用如下修正公式

$$v = 2 \times 1.002 L \omega (1 + \frac{a}{L} \cos \varphi) \quad (4)$$

修正后的计算结果与校准结果非常接近.

需要说明的是,式(3)和(4)不是通用的,因为不同的透平有不同的气动特性.

如果在底片上进行精确的时间间隔测量,可以根据上述校准方法得到扫描速度,再结合我所谭显

研究员提出了“中值定理”^[7]计算方法,测量结果具有非常高的准确度。

8 结论

1)本扫描速度检测装置的相对扩展不确定度为0.1%,完全可以用于转镜式高速扫描相机扫描速度的检测;

2)SJZ-15型扫描相机实际使用时是单次工作,由于现有控制系统未采取稳速措施,故像面上转速不均匀,因而单次扫速的不确定度将大于0.1%;

3)SJZ-15型扫描相机的符合转速在 6×10^4 R/min和 9×10^4 R/min时对气压的变化较为敏感,使用时应尽量以最低气压获得所需转速。这样,名义扫速才会有比较高的准确度。

致谢:在实验工作过程中,始终得到了谭显祥研究员的指导和帮助,作者在此深表谢意。

参考文献

- 1 叶式灿. 转镜式高速扫描相机时间分辨率的测定. 高压物理学报,1997,11(3):203~208
Ye S C. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1997,11(3):203~208
- 2 Li J Z, Huang J H, Tian J, et al. Advanced designing theory of recording surface of rotating mirror streak cameras. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(8): 1033 ~ 1035
- 3 Lgel A 著,姚文学译. 转镜相机设计计算. 光机技术, 1973,(1):43~52
Lgel A. Design for High Speed Rotating Mirror Camera. *Optical and Mechanism Technique*,1973,(1):43~52
- 4 谭显祥. 光学高速摄影测试技术. 北京:科学出版社, 1990. 37
Tan X X. Test technique for optical high speed photography. Beijing:Science Press,1990. 37
- 5 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. 光子学报,2004,33(7):854
Li J Z, Tan X X, Gong X D, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(7):854
- 6 叶式灿,董金轩. 转镜式高速相机扫描速度及其不均匀性测量. 爆炸与冲击,1997,17(2):188~192
Ye S C, Dong J X. *Explosion and Shock Waves*, 1997, 17(2):188~192
- 7 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

Calibration and its Application for Writing Rate of Ultra-high Speed Rotating Mirror Camera

Wang Wei, Chang Lihua, Li Jian, Shang Changshui, Xiao Zhengfei

Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Sichuan Mianyang 621900

Received date:2005-04-25

Abstract A calibration device for writing rate of ultra-high speed rotating mirror camera was developed. Its relative uncertainty can reach 0.1% by narrow slit, Ultra-high response multiplier tube and its accordant sensitivity. The influence of gas pressure on writing rate was analyzed and it is very important for explosive test. The application method is given according to calibration result.

Keywords High speed photography; High speed rotating mirror streak camera; Calibration; Writing rate



Wang Wei was born in 1974. He received B. S. degree in 1998 from Xi'an Institute of Technology. Now He works at Institute of Fluid Physics, CAEP. His research interest is high speed photograph.