

文章编号 1004-924X(2015)12-3303-06

转镜式高速摄影机角跟踪精度的检测

赵怀学^{1*}, 赵建科¹, 田留德^{1,2}, 薛 勋¹, 潘 亮¹, 段 炯¹

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了提高转镜式高速摄影机测量弹丸运动轨迹的精度, 本文通过合理假设和理论推导, 依据弹丸外弹道飞行运动模型得到了弹丸飞行过程的数学模型。结合室内检测条件, 设计了用于转镜式高速摄影机角跟踪精度的检测装置并分析了测试原理。用该设备实测了转镜式高速摄影机的角跟踪精度, 并对检测装置的测量不确定度来源进行了分析。结果显示: 被测转镜式高速摄影机的角跟踪精度为 $(0.34 \pm 0.06)^\circ$, 检测装置的相对不确定度为 $3.0''$; 不确定度来源主要为角度测量不确定度和焦距测量不确定度。实验结果表明, 设计的检测装置具有较高的准确度和可靠性。

关键词: 角跟踪精度检测; 转镜式高速摄影; 测量不确定度; 弹丸飞行

中图分类号: TB872; TB922 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152312.3303

Detection of angular tracing precision of rotating mirror house in streak camera

ZHAO Huai-xue^{1*}, ZHAO Jian-ke¹, TIAN Liu-de^{1,2}, XUE Xun¹, PAN Liang¹, DUAN Jiong¹

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: zhaohuaixue@opt.ac.cn

Abstract: On the basis of the theoretic deduction and corresponding reasonable assumption, a mathematic model was built according to the flight model of exterior trajectory to improve the angular tracing precision of rotating mirror house in a streak camera. A test device was designed and developed for the angular tracing precision of rotating mirror house in the streak camera. The measuring principle of the test device was introduced, the angular tracing precision was measured by the developed device and the uncertainty factors of the tested device were analyzed. The tested results show that the angular tracing precision of the high speed rotating mirror in the streak camera is $(0.34 \pm 0.06)^\circ$, the relative uncertainty of the tested device is $3.0''$ and the main error sources come from interpretation and servo control. It concludes that the tested device designed has higher precision and reliability.

Key words: angular tracing precision detection; high speed rotating mirror photography; measurement uncertainty; projectile flight

收稿日期: 2015-08-11; 修订日期: 2015-10-21.

基金项目: 神光 III 大科学工程资助项目 (No. 091212B0A)

1 引言

高速摄影技术广泛应用于爆炸、穿甲、弹道及飞行姿态等国防科技研究领域。高速摄影装置能够真实地记录炮弹碰靶前后的高速现象,再通过事后深入分析得到重要的试验参数^[1-2],对靶场光测设备的性能改进,高速运动目标及高速流逝场的研究和发展具有重要的意义。

在兵器靶场测试领域,传统方法是在外弹道方向配备数台高速、高分辨弹道相机进行定点拍摄,记录弹丸飞行过程的数幅高清图像,再经过后期图像拼接等复杂技术获取弹丸完整的运动图像。但由于该方法受弹道相机视场、定点拍摄和复杂图像处理技术等限制,目前已逐渐被转镜式高速摄影机所替代^[3-7]。转镜式高速摄影机是集光、机、电、算为一体的复杂测试设备,在高速运动目标、高速流逝场的研究中占有重要地位。它因具有使用方便、实时性强、数据存储量大等优点而广泛应用于高速现象的研究中,现已成为弹道试验研究中不可或缺的测试技术^[8-12]。在外弹道飞行姿态测试领域,通常沿弹丸飞行方向部署高速摄像机,当弹丸进入转镜式高速摄影机的跟踪范围,高速摄影机即可记录下弹丸的影像以及弹丸飞行过程的运动图像^[13-15]。

角跟踪精度是指目标飞行过程中实时测量的目标空间指向与真值之差,是衡量转镜式高速摄影机最重要的技术指标之一。提高角跟踪精度是测量弹丸运动规律的关键。因此,研究角跟踪精度的室内测试方法,并对它进行定量测试和评价,可以为转镜式高速摄影机的设计和改进提供数据依据,对靶场光测设备的性能改进,高速运动目标及高速流逝场的研究和发展具有重要意义。

本文依据弹丸外弹道飞行运动模型,通过合理假设和严格理论推导得到了弹丸飞行过程的数学模型。然后结合室内检测条件,设计了用于转镜式高速摄影机角跟踪精度的检测装置并论述了其测试原理,分析了检测装置的测量不确定度来源,给出了该检测装置的测量不确定度评定方法及测量不确定度。最后用该设备实测了转镜式高速摄影机的角跟踪精度,实验表明该检测装置具有较高的精度和可靠性。

2 弹丸外弹道飞行运动模型

如图 1 所示,火炮将弹丸射出,弹丸飞过测速天幕靶(以下简称天幕靶),触发测速系统,天幕靶将测得弹丸速度传给主控系统。主控系统根据弹丸速度、弹丸性能、环境参数等解算出跟踪曲线,并将解算信息送给跟踪控制系统,跟踪控制系统驱动转镜完成对弹丸的跟踪。

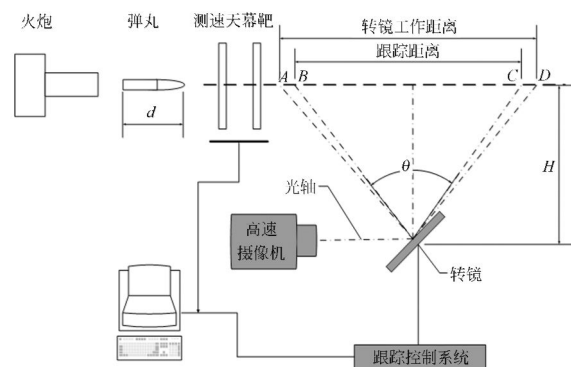


图 1 转镜式高速摄影机的工作原理

Fig. 1 Working principle of rotating mirror house of streak camera

弹丸发射后立刻获得初始速度,在随后的飞行过程中,由于受到空气阻力的作用表现为变减速过程。(弹丸运动轨迹较短,在垂直方向的下降幅度不明显,可忽略重力在跟踪过程对弹丸的作用)空气阻力 F 与空气密度、弹丸的横截面积、形状及速度等因素有关,通常阻力 F 表示为^[16-18]:

$$F = -\frac{\rho \times v}{2} \times S \times C_{x_0} \left(\frac{v}{v_{ys}} \right), \quad (1)$$

$$a = -\frac{\rho \times v}{2 \times m} \times S \times C_{x_0} \left(\frac{v}{v_{ys}} \right), \quad (2)$$

式中: a 为弹丸加速度, ρ 为空气密度, v 为弹丸速度, S 为弹丸的最大横截面积, $C_{x_0} \left(\frac{v}{v_{ys}} \right)$ 为阻力系数, $\frac{v}{v_{ys}}$ 为马赫数, m 为弹丸质量。

由西切亚阻力定律可知^[19]:

$$C_{x_0} \left(\frac{v}{v_{ys}} \right) = \begin{cases} 0.259 & (150 \leq v < 250) \\ 0.225 & (50 < v < 150) \end{cases} \quad (3)$$

整理式(2)得:

$$\frac{dv}{dt} = \lambda \times v, \quad (4)$$

其中: $\lambda = -\frac{\rho}{2 \times m} \times S \times C_{x_0} \left(\frac{v}{v_{ys}} \right)$ 。

假设转镜式高速摄影机的有效跟踪角度为 θ , 弹丸进入有效跟踪角度的初始速度为 v_0 。 t 时刻弹丸速度 v 可表示为:

$$v = v_0 + e^{(-\lambda t)} - 1. \quad (5)$$

3 系统结构及其原理

如图 2 所示, 在跟踪系统的跟踪角度范围内, 放置 5 个平行光管(下称目标), 模拟无穷远目标。 如果试验条件允许, 平行光管数量应尽可能多。 根据弹丸尺寸 d 、平行光管焦距 f 、弹丸长度 H , 计算得到平行光管的焦面星点尺寸为:

$$d' = \frac{f}{H} \times d. \quad (6)$$

调整目标 3, 使得转镜为 0° 时(即转镜与高速摄影机光轴的夹角为 45° 时), 目标 3 位于视场中心。 利用全站仪以转镜 0° 为起点标定目标 1 与目标 2、目标 4、目标 5 的夹角, 得到目标之间的夹角分别为 $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{14}$ 和 θ_{15} 。 假设目标 1、目标 2、目标 4 和目标 5 到目标 3 的距离分别为 s_{12}, s_{13}, s_{14} 和 s_{15} 。

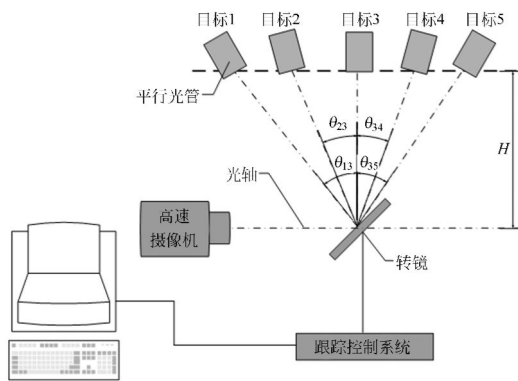


图 2 角跟踪精度检测装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test device for angular tracing precision

弹丸在实际飞行过程中(忽略重力影响)为直线运动轨迹, 在水平方向做变减速直线运动。 假设转镜式高速摄影机的有效跟踪角度为 θ_{15} , 弹丸进入有效跟踪角度的初始速度为 v_0 , 目标与转镜中心的距离为 $L(L \rightarrow \infty)$, 则有:

$$\begin{cases} s_{12} = L \cdot \tan \theta_{12} = \int_{0}^{t_2} (v_0 + e^{(-\lambda t)} - t) \times dt \\ s_{13} = L \cdot \tan \theta_{13} = \int_{0}^{t_3} (v_0 + e^{(-\lambda t)} - t) \times dt \\ s_{14} = L \cdot \tan \theta_{14} = \int_{0}^{t_4} (v_0 + e^{(-\lambda t)} - t) \times dt \\ s_{15} = L \cdot \tan \theta_{15} = \int_{0}^{t_5} (v_0 + e^{(-\lambda t)} - t) \times dt \end{cases} \quad (7)$$

整理式(7)可得:

$$\begin{cases} \tan \theta_{13} = \frac{(v_0 - 1) \times t_{13} + \frac{1}{\lambda} \times (1 - e^{-\lambda t_{13}})}{(v_0 - 1) \times t_{12} + \frac{1}{\lambda} \times (1 - e^{-\lambda t_{12}})} \\ \tan \theta_{14} = \frac{(v_0 - 1) \times t_{14} + \frac{1}{\lambda} \times (1 - e^{-\lambda t_{14}})}{(v_0 - 1) \times t_{12} + \frac{1}{\lambda} \times (1 - e^{-\lambda t_{12}})} \\ \tan \theta_{15} = \frac{(v_0 - 1) \times t_{15} + \frac{1}{\lambda} \times (1 - e^{-\lambda t_{15}})}{(v_0 - 1) \times t_{12} + \frac{1}{\lambda} \times (1 - e^{-\lambda t_{12}})} \end{cases} \quad (8)$$

整理式(8)可得:

$$\begin{cases} k_1 e^{\frac{1}{\lambda} t_{13}} + k_2 t_{13} - \frac{1}{k_1} - \frac{\tan \theta_{13}}{\tan \theta_{12}} (k_2 t_{12} - k_1 (1 - e^{\frac{1}{\lambda} t_{12}})) = 0 \\ k_1 e^{\frac{1}{\lambda} t_{14}} + k_2 t_{14} - \frac{1}{k_1} - \frac{\tan \theta_{14}}{\tan \theta_{12}} (k_2 t_{12} - k_1 (1 - e^{\frac{1}{\lambda} t_{12}})) = 0 \\ k_1 e^{\frac{1}{\lambda} t_{15}} + k_2 t_{15} - \frac{1}{k_1} - \frac{\tan \theta_{15}}{\tan \theta_{12}} (k_2 t_{12} - k_1 (1 - e^{\frac{1}{\lambda} t_{12}})) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中: $k_1 = -1/\lambda, k_2 = v_0 - 1$ 。

以 B 码时系统终端的输出时间 t_{12} 和 t_1 时刻转镜式高速摄影机输出的脱靶量为基准, 结合式(9)计算转镜式高速摄影机观测到目标 2、目标 3、目标 4 和目标 5 的理论时间 t_{12}, t_{13}, t_{14} 和 t_{15} 。

提取转镜式高速摄影机记录的视频图像, 对 t_1, t_2, t_3, t_4 和 t_5 时刻的图像进行判读, 得到跟踪分系统脱靶量的输出 $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta x_4$ 和 Δx_5 。 由此计算得到转镜式高速摄影机的角跟踪精度为:

$$H_i = \arctan \left\{ \left((\Delta x_i - \Delta x_2) - (\Delta x_1 - \Delta x_2) \right) \cdot \frac{d}{f} \right\}, \quad \epsilon = \max_i |H_i - H_2| \quad (10)$$

其中: $i=2, \Lambda, 5, H_i$ 为角跟踪误差, f 为转镜式高速摄影机的镜头焦距, d 为像元尺寸。

试验条件允许的情况下, 目标应尽可能多。 本文由于试验条件有限, 测量目标数量设定为 5, 角跟踪精度取测量误差的最大值。

4 实验结果及分析

4.1 目标平行光管角度标定

在转镜位置放置高精度全站仪,测角精度为 $0.5''$ 。在目标 3 处清零,分别标定目标 1、目标 2、目标 4 和目标 5 的夹角,测量数据如表 1 所示。

表 1 目标角度值

Tab. 1 Angle values of targets

Target	Azimuth angle	Pitch angle
Target 1	$314^{\circ}8'18.6''$	$89^{\circ}59'2.5''$
Target 2	$338^{\circ}20'38''$	$90^{\circ}7'36''$
Target 3	$0^{\circ}0'0''$	$89^{\circ}46'43.5''$
Target 4	$21^{\circ}53'33''$	$90^{\circ}31'25.9''$
Target 5	$45^{\circ}17'39.6''$	$90^{\circ}39'21.8''$

4.2 目标脱靶量

将全站仪移去换为跟踪分系统,模拟目标飞行速度 v ,设置跟踪系统相应的参数,对 5 个目标进行判读,记录 B 码时间和目标脱靶量,结果如表 2 所示。

表 2 目标脱靶量

Tab. 2 Target-missing quantities

Target	Target-missing quantity					
	1	2	3	4	5	6
Target 1	515	585	498	396	468	603
Target 2	491	600	524	424	492	630
Target 3	507	634	553	446	523	523
Target 4	504	616	530	435	509	650
Target 5	503	578	503	412	472	610

4.3 角跟踪精度

转镜式高速摄影机的镜头焦距为 100 mm,像元尺寸为 $23 \mu\text{m}$ 。结合式(3)计算可得角跟踪精度,结果如表 3 所示。

表 3 角跟踪精度

Tab. 3 Angular tracing precisions

Serial number	Angular tracing precision/($^{\circ}$)
1	0.32
2	0.29
3	0.34
4	0.37
5	0.38
6	0.36
Average	0.34

4.4 测量不确定度分析

4.4.1 不确定度来源

由数学模型可知,角跟踪精度检测装置的测量不确定度主要由角度测量不确定度和焦距测量不确定度组成。

4.4.2 不确定度分析及计算

角度测量误差主要由仪器精度和人眼瞄准误差引起。根据全站仪的检定证书,全站仪的测角精度为 $\pm 0.35''$,人眼瞄准误差为 $\pm 1''$ (按 B 类标准不确定度评定),即:

$$U(\theta) = \sqrt{0.35^2 + 1^2} = 1.1''$$

根据组合测量仪检定证书,组合测量仪焦距的测量精度为 $\pm 0.02 \text{ mm}$,所以有:

$$U(f) \approx -\frac{\Delta x \cdot d}{f^2} \cdot \Delta f \approx 1''$$

由贝塞尔法可得测量重复性引入的不确定度为:

$$u(\epsilon) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (\epsilon_i - \bar{\epsilon})^2} = 0.03^{\circ}$$

综上可得角跟踪精度的合成标准不确定度为:

$$U_c = \sqrt{U(\theta)^2 + U(f)^2 + u(\epsilon)^2} = 0.03^{\circ}$$

取 $k=2$,其置信区间约为 0.95,则角跟踪精度的扩展不确定度为:

$$U = k \cdot U_c = 0.06^{\circ}$$

同理,对检测设备进行不确定度分析可得:

$$U' = k \cdot \sqrt{U(\theta)^2 + U(f)^2} = 3.0''$$

5 结 论

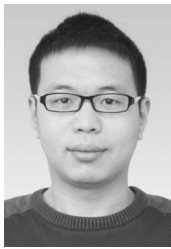
本文依据外弹道弹丸的飞行模型,在分析了转镜式高速摄影机工作原理的基础上,通过合理假设得到弹丸飞行过程的数学模型,研制了用于转镜式高速摄影机角跟踪精度的检测装置。利用该装置实测了转镜式高速摄影机的角跟踪精度,并对检测装置的测量不确定度来源进行了分析和计算。结果显示检测装置的测量不确定度为 $3.0''$ (扩展不确定度, $k=2$),被测设备的角跟踪精度为 $(0.34 \pm 0.06)^{\circ}$,误差来源主要为转镜式高速摄影机的角判读误差和伺服控制误差。实验结果表明,该检测装置具有较高的准确度和可靠性。

参考文献:

- [1] 蔡荣立,陈瑞,卢岩涛. 基于转镜运动补偿的弹丸同步摄影技术研究[J]. 光学仪器, 2012,34(6):21-25.
CAI R L, CHEN R, LU Y T. Research on the technology of projectile synchronized photography based on motion compensation for rotating mirror [J]. *Optical Instruments*, 2012,34(6):21-25. (in Chinese)
- [2] RK KELKARN T. Technique for the continuous measurement of projectile velocities in impact experiments[J]. *American Institute of Physics*, 1995(30): 3010-3050.
- [3] 宋玉贵,张嫚. 基于 ARM 的弹道跟踪转镜控制器设计[J]. 光学仪器,2011,33(1):50-53.
SONG Y G, ZHANG M. Design of the trajectory tracking rotating mirror controller based on ARM [J]. *Optical Instruments*, 2011,33(1):50-53. (in Chinese)
- [4] VISWANATHAN R,BOULIAS B. Optimal decision fusion in multiple sensor system[C]. *IEEE Trans. on AES*, 1987,23(5):644-653.
- [5] 宋玉贵,张帅. 镜反射式弹丸追踪摄影技术研究[J]. 光电技术应用,2010,25(4):5-8.
SONG Y G, ZHANG SH. Study of projectile photograph tracked by mirror in trajectory[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2010,25(4):5-8. (in Chinese)
- [6] 苏增立,高晰,王建军. 高速摄像系统及其在靶场中的应用[J]. 飞行器测控学报,2003,22(3):48-52.
SU Z L, GAO X, WANG J J. An introduction to high speed photo-electronic camera and its application in range measurement [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2003,22(3):48-52. (in Chinese)
- [7] DEGRIECK J, VERLEYSSEN P, WAELE W D. Optical measurement of target displacement and velocity in bird strike simulation experiments [J]. *Measurement Science and Technology*, 2003(14):1-3.
- [8] LANDRE L K. Time resolution of streak camera equipped with rotating mirror sweeping-image camera cameras[C]. *Proc of the 3rd Intern Congress on High-Speed Photography. Confon*, 1957:319-334.
- [9] 赵学颜,李迎春. 靶场光学测量[M]. 北京:装备指挥技术学院,2001:234-237.
ZHAO X Y, LI Y CH. *Optical Measurement of Shooting Range*[M]. Beijing: Academy of Equipment Command&Technology, 2001: 234-237. (in Chinese)
- [10] 崔彦平,林玉池. 运动目标姿态与速度测量的理论及实验研究[D]. 天津:天津大学,2006:5-13.
CUI Y P, LIN Y CH. *Theoretical and Experimental Research on Measuring Attitude and Velocity of Moving Target*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006:5-13. (in Chinese)
- [11] 倪晋平,张文娇,蔡荣立. 弹道同步跟踪反射镜运动分析与计算[J]. 西安:西安工业大学学报,2010,30(3):210-214.
NI J P, ZHANG W J, CAI R L. Motion analysis and computation of reflector synchronistically following measured exterior ballistics measurement [J]. *Xi'an: Journal of Xi'an University of Technology*, 2010,30(3):210-214. (in Chinese)
- [12] 吴云峰,吴玉堂,宁文. 转镜式高速相机控制系统[J]. 仪器仪表学报,2004,25(10):134-140.
WU Y F, WU Y T, NING W. Control system of high-speed rotating-mirror camera [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004,25(10):134-140. (in Chinese)
- [13] NEBEKER S J. Techniques and applications of rotating mirror cameras[C]. *Proc of the 13th Intern Congress on High Speed Photography and Photonics, Tokyo*, 1978:57-60.
- [14] 汪伟,谭显祥. 转镜式高速扫描相机扫描速度检测装置及不确定度评定[J]. 光学与光电技术,2008,6(5):76-80.
WANG W, TAN X X. Test device and its uncertainty for writing rate of ultra-high speed rotating mirror streak camera [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008,6(5):76-80. (in Chinese)
- [15] STASICKI B,MEIER G E A. A computer controlled ultra high-speed video camera system[J]. *SPIE*, 1994,2513:195-198.

- [16] 周启煌. 坦克火力控制系统[M]. 北京:国防工业出版社,1997.
ZHOU Q H. *Tank Fire Control System* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1997. (in Chinese)
- [17] 张嫒. 弹道跟踪转镜伺服控制与驱动技术研究[D]. 西安:西安工业大学, 2011:11-13.
ZHANG M. *Study on Servo Control and Drive Technology of Trajectory Tracking Rotating Mirror*[D]. Xi'an:Xi'an Technological University, 2011:11-13. (in Chinese)
- [18] 郭晶晶. 小口径弹丸姿态测试技术的研究[D]. 太原:中北大学, 2014:11-16.
GUO J J. *Research of Measurement Technology for Small Projectile Attitude*[D]. Taiyuan:North University of China, 2014:11-16. (in Chinese)
- [19] 于纪言. 运动弹丸追踪摄影方法及关键技术研究[D]. 南京:南京理工大学, 2007:42-45.
YU J Y. *The Method of Moving Projectile Tracking Photography and Study on the Key Technology* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007:42-45. (in Chinese)

作者简介:



赵怀学(1987—),男,河南焦作人,硕士,工程师,2012年于天津大学获得硕士学位,主要从事光学、靶场测量方面的研究。E-mail: zhaohuaxue@opt.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)