

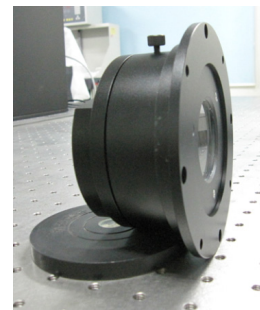


DOI: 10.12086/oe.2019.180399

棱镜转像机构在超高速转镜相机中的应用

畅里华, 李 剑, 汪 伟*, 王 旭, 张光升, 高 鹏,
肖正飞, 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: 叙述了棱镜转像机构的原理, 设计与高速转镜相机匹配的别汉棱镜转像机构, 并将其作为超高速转镜相机的固定组成部分, FJZ-250 型转镜分幅和 SJZ-15 型转镜扫描相机通用。高速转镜相机中增配转像机构后, 对目标成像 360°连续可调, 解决了多台相机同步使用时, 爆轰装置不同研究方向的测试问题, 对实验数据的获得及系统外场目标调试起了很大的作用, 极大方便了相机的使用。经像质检测及动态实验结果表明: 转镜式高速相机增配别汉棱镜转像机构后, 对相机光学系统成像质量不受影响, 甚至略有提高。

关键词: 高速摄影; 转镜相机; 转像机构; 爆炸

中图分类号: TB872

文献标志码: A

引用格式: 畅里华, 李剑, 汪伟, 等. 棱镜转像机构在超高速转镜相机中的应用[J]. 光电工程, 2019, 46(1): 180399

Application of image rotating mechanism of prism in ultra-high speed rotating mirror camera

Chang Lihua, Li Jian, Wang Wei*, Wang Xu, Zhang Guangsheng,
Gao Peng, Xiao Zhengfei, Shang Changshui

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

Abstract: In this paper the principle of image rotating mechanism based on prism is introduced and the image rotating mechanism using Pechan prism matching the high speed rotating mirror camera is designed. The designed mechanism can be used in FJZ-250 or SJZ-15 type rotating mirror camera as a fixed part. Equipped with the designed mechanism, the rotating mirror cameras can rotate the image of the object by any angle in the range of 0°~360° before recording it. As a result, the measurement problem of different research directions of detonation test is solved when multiple cameras are used synchronously, which plays an important role in acquisition of experimental data and debugging of outdoors targets, thus, it is a great convenience for the camera. The results of the image quality specification experiment indicate that the equipment of the designed image rotating mechanism based on Pechan prism induced no degradation to the image quality and even slightly improved it.

Keywords: high speed photography; rotating mirror camera; image rotating mechanism; explosion

Citation: Chang L H, Li J, Wang W, et al. Application of image rotating mechanism of prism in ultra-high speed rotating mirror camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(1): 180399

收稿日期: 2018-07-25; 收到修改稿日期: 2018-10-18

基金项目: 国防科工局技术基础项目(JSJL2016208A011); 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ130019)

作者简介: 畅里华(1974-), 女, 高级工程师, 主要从事高速摄影技术的研究。E-mail: clhwdd@126.com

通信作者: 汪伟(1974-), 男, 高级工程师, 主要从事高速摄影技术的研究。E-mail: wwclhdd@163.com

1 引言

转镜式高速分幅相机、扫描相机具有空间分辨率高、画幅尺寸大、记录时间长及摄影频率高等特点，一直是核武器、常规武器、高新技术武器及其它领域实验研究的重要手段之一，不仅广泛用于炸药爆轰参数、冲击波速度、核武器初级及常规武器战斗部的膨胀断裂、微物质喷射、飞片和破片的速度等测量，而且在弹道学、雷电及高压火花放电、物质的分解与合成、瞬态光谱分析、高速碰撞与安全防护等研究中应用广泛^[1]。随着精密物理实验的需要，除了研究目标某一平面上的波形对称性外，往往也需要拍摄不同方位的波形对称性，例如要求测量两个互相成 θ 角度的特殊方向的波形。为了满足这一要求，常采用联用两台转镜扫描相机，由于转镜扫描相机的狭缝方向均与扫描方向垂直，因此这两个方向无法同时与狭缝方向一致，为此，必须在其中一台扫描相机的光路上附加一转像机构使物体的像旋转，以达到记录任一方向波形的目的。而且即使在单台相机使用时，转像机构也能起到很大的作用，特别是单台分幅相机使用时，由于相机自身原因，像面水平和垂直方向的空间分辨可差一倍甚至几倍。实际使用相机时，被摄目标往往因为笨重或不便随意安放的原因，而只能以某固定位置面对相机，很容易出现被摄目标需要仔细研究的方向正好相应于相机低分辨方向，就会使被研究目标的细节受到损失^[2]。增配转像机构后，不仅可把被摄目标所需的研究方向转到相机的高分辨方向来，避免细节研究的损失，还可减少调试时间，提高实验工作效率。棱镜转像机构国内、外在望远镜、跟踪仪器中的瞄准及显微镜等光学系统中已普遍使用，但在超高速转镜相机拍摄中使用还比较少，1998年、2000年国内谭显祥、韩立石等开展了棱镜在转镜相机中应用实验研究，

最初采用的三反射镜转像曾得到广泛应用，其后，又发展了光楔转像机构、整台相机转动机构及棱镜转像机构^[3-8]。三反射镜转像虽然可实现一台相机同时拍摄同一被摄物体的不同方位，但是两像光程差不等，难以同时清晰成像，且调试时需两人配合。光楔转像机构容易使两个像的照度差别大，且易引入较大慧差，影响相机的分辨率。整台相机转像机构较复杂，且操作极不方便，容易影响设备性能。别汉棱镜转像机构避免了上述几种机构所存在的问题，成像清晰，结构紧凑，操作简单、方便，同时可作为转镜相机的固定组成部分，且对目标 360° 角连续可调，解决了两台及以上相机同步使用时，爆轰装置不同研究方向的测试问题，且对实验数据的获得及系统外场目标调试起到很大的作用^[9]。

2 别汉棱镜的成像方向及与转像规律

别汉棱镜转像机构的原理如图 1 所示，棱镜组由屋脊棱镜 1 和等腰棱镜 2 组成，两棱镜间有 $0.05\text{ mm} \sim 0.1\text{ mm}$ 空气隙。从 O 点发出的光束射入屋脊棱镜 1 的 AB 面，经过两次反射后，通过间隙的空气层进入等腰棱镜 2，又经三次反射后由 CD 面射出。设入射右手坐标系 $O\text{-}XYZ$ 中 OX 为棱镜组光轴，则此坐标系经棱镜组后的像 $O'\text{-}X'Y'Z'$ 成为左坐标系。保持 $O\text{-}XYZ$ 不动，若棱镜组绕 XX' 轴向某方向旋转，则像平面 $O'\text{-}X'Y'Z'$ 亦沿同一方向转动，实现转像要求。

当棱镜组围绕其光轴旋转 θ 角时，由棱镜转动定理^[10]描述的两种转动均发生在可叠加的空间内，故像平面上的合成转动角 ϕ 是两种转动的代数和，即：

$$\phi = (-1)^{k+1}\theta + \theta,$$

式中 k 为光线在别汉棱镜中的反射次数，此处 $k=5$ ，所以有： $\phi=2\theta$ 。

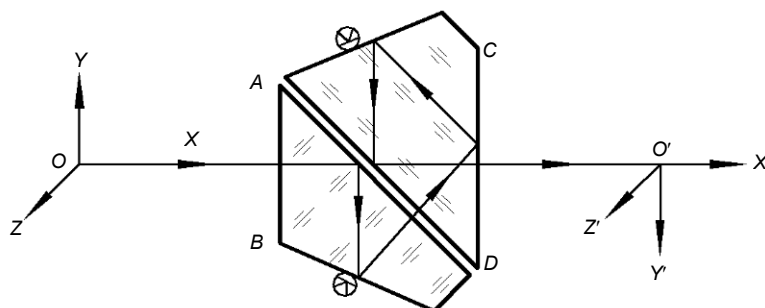


图 1 别汉棱镜转像机构原理

Fig. 1 Principle of the image rotating mechanism based on Pechan prism

即别汉棱镜转像机构中，像面旋转速度是棱镜旋转速度的二倍。

棱镜和共轴球面系统组合必须满足的条件：1) 在平行光路中使用，展开后等效的玻璃板的两个表面必须平行，否则会破坏整个系统的共轴性；2) 在会聚光路中使用还要使棱镜的入射、出射表面垂直于系统的光轴，否则整个系统的对称性会被破坏。道威棱镜只能在平行光路中使用，别汉棱镜在会聚光路或平行光路中都可使用。

3 转镜相机中别汉棱镜转像机构的设计

超高速转镜相机光学系统相对比较复杂，由多个部件组成，为使转镜相机光路中加入棱镜转像机构后

不影响相机整体结构及系统成像质量，在满足成像完整的条件下，别汉棱镜设计体积尽可能小，且调节方便。别汉转像棱镜设计应置于相机光学系统会聚光路中，有利于棱镜通光孔径做得较小，光能损失小，对转镜扫描相机，应置于相机主物镜与第二物镜之间，相机机匣入口与狭缝之间；而对于转镜分幅相机，置于主物镜与第二物镜之间，相机机匣入口与视场光阑之间，且都紧贴相机机匣入口处，便于一人完成相机与转像机构的操作。SJZ-15 型转镜式高速扫描、FJZ-250 型分幅相机加别汉棱镜光学成像原理图见图 2，图 3 所示。

转镜扫描相机在主物镜后，机匣入口处的光束直径为 $\Phi 36\text{ mm}$ ，转镜分幅相机在主物镜后，机匣入口处的光束直径为 $\Phi 38\text{ mm}$ 。为了使研制的转像机构能

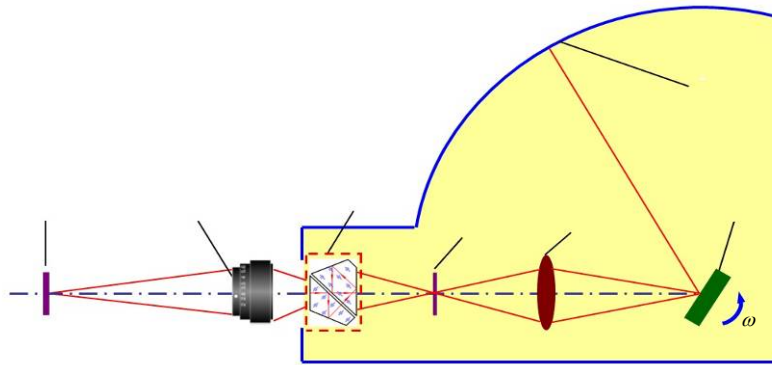


图 2 转镜式高速扫描相机加别汉棱镜光学成像原理图。① 被摄目标；② 主物镜；③ 狭缝；④ 第二物镜；⑤ 转镜；⑥ 像面；⑦ 别汉棱镜

Fig. 2 Optical schematic of the high speed rotating mirror streak camera equipped with the Pechan prism. ① Object; ② Main objective lens; ③ Slit; ④ Second objective lens; ⑤ Rotating mirror; ⑥ Image plane; ⑦ Pechan prism

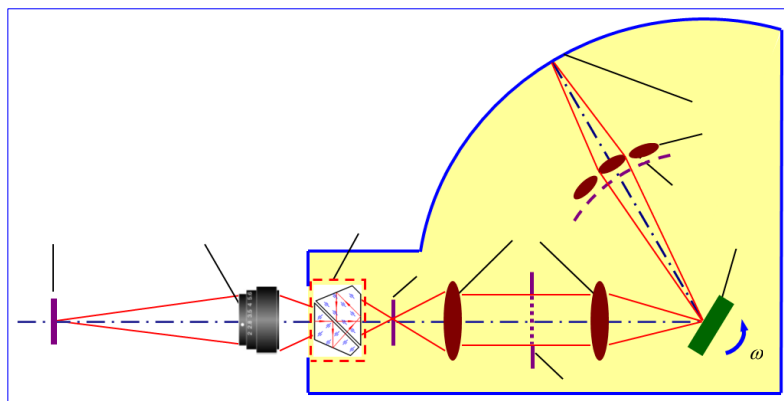


图 3 转镜式高速分幅相机加别汉棱镜光学系统原理图。① 被摄目标；② 主物镜；③ 视场光阑；④ 第二物镜；⑤ 孔径光阑；⑥ 转镜；⑦ 分幅光阑；⑧ 分幅透镜；⑨ 相机像面；⑩ 别汉棱镜

Fig. 3 Optical schematic of the high speed rotating mirror framing camera equipped with the Pechan prism. ① Object; ② Main objective lens; ③ Eyesight diaphragm; ④ Second objective lens; ⑤ Aperture diaphragm; ⑥ Rotating mirror; ⑦ Framing diaphragm; ⑧ Framing lens; ⑨ Camera image plane; ⑩ Pechan prism

够通用,设计别汉棱镜转像机构有效通光口径为 $\Phi 40$ mm,材料为 K9 玻璃,两棱镜间间隙 0.05 mm,为避免别汉棱镜制造误差产生色散和像偏转引起像模糊,棱镜表面的光学不平行度控制在 $2' \sim 3'$ 以内,与转镜相机配套的别汉棱镜转像机构结构设计如图 4 所示。其结构紧凑,操作简单、方便,可作为转镜分幅相机和扫描相机的一个固定组成部分,对目标 360° 角连续可调。

4 别汉棱镜转像机构对像质的影响

超高速转镜相机光学系统从像差校正结果来说,属于大像差光学系统。将别汉棱镜转像机构加在相机的主物镜和视场光阑之间并且靠近视场光阑方向,对

像质的影响较小,只是相机对光能量的利用率将有所下降。加入设计的棱镜转像机构,在物距 10 m 处用分辨率板检查像质,对高速转镜分幅相机,静态目视分辨率为 42 lp/mm,取下转像机构,重新调焦后相机本身分辨也能达到相同水平;对转镜扫描相机,静态目视分辨率为 103 lp/mm,取下转像机构,重新调焦,相机分辨水平相当,基本上无变化。同时在相机转速 12×10^4 r/min(多数爆轰试验所用转速)时,对相机的动态摄影分辨率进行了检测,图 5 和图 6 分别是超高速转镜分幅相机和扫描相机加入别汉棱镜转像机构和不加别汉棱镜转像机构的动态摄影分辨率图像,加入别汉棱镜转像机构的相机原有分辨率保持不变,对分幅相机甚至还略有提高。

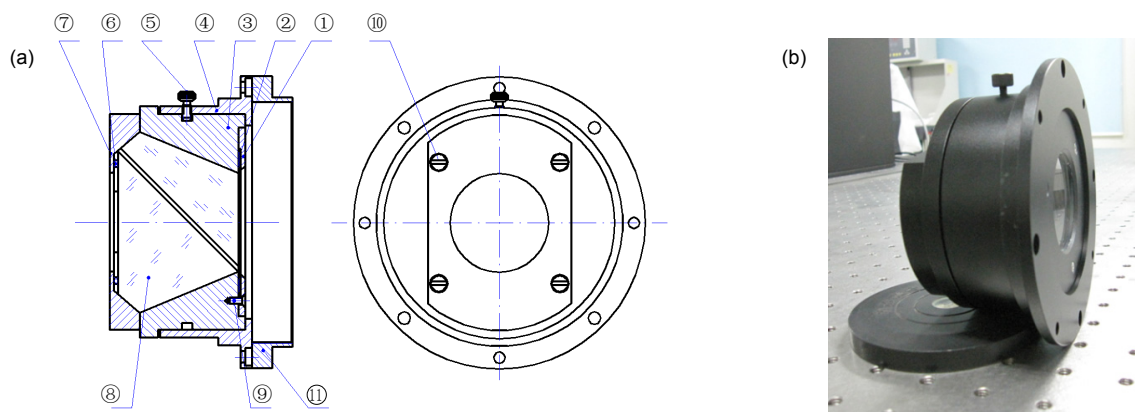


图 4 棱镜转像机构结构设计(a)和外形图(b)。① 棱镜外壳盖; ② 垫环; ③ 棱镜外壳; ④ 转像外壳; ⑤ 锁紧螺钉; ⑥ 垫片; ⑦ 棱镜座; ⑧ 别汉棱镜; ⑨ 螺钉; ⑩ 螺钉; ⑪ 连接座

Fig. 4 Structure design and profile of the image rotating mechanism of prism. ① Prism shell cover; ② Loop spacer; ③ Prism shell; ④ Image rotating shell; ⑤ Lock-screw; ⑥ Spacer; ⑦ Prism pedestal; ⑧ Pechan prism; ⑨ Screw; ⑩ Screw; ⑪ Connection pedestal

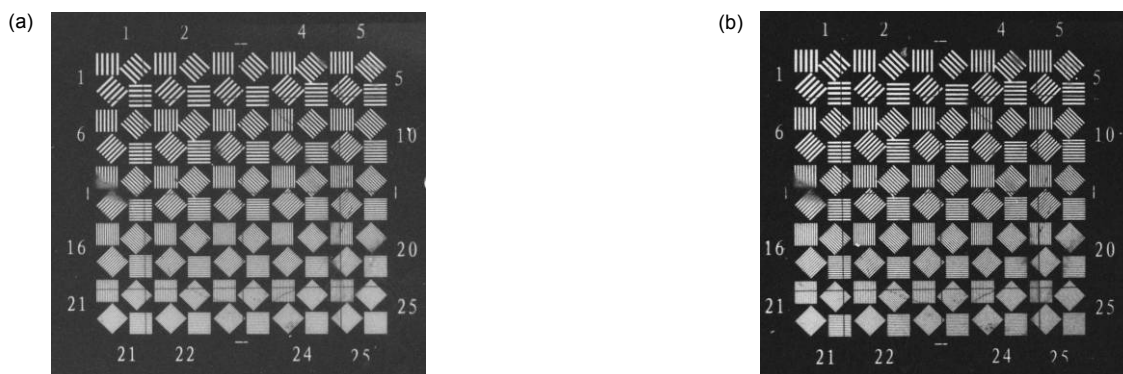


图 5 超高速转镜分幅相机的动态摄影分辨率像。(a) 未加转像机构; (b) 加转像机构
Fig. 5 Dynamic resolution image of framing camera. (a) Without Pechan prism; (b) With Pechan prism

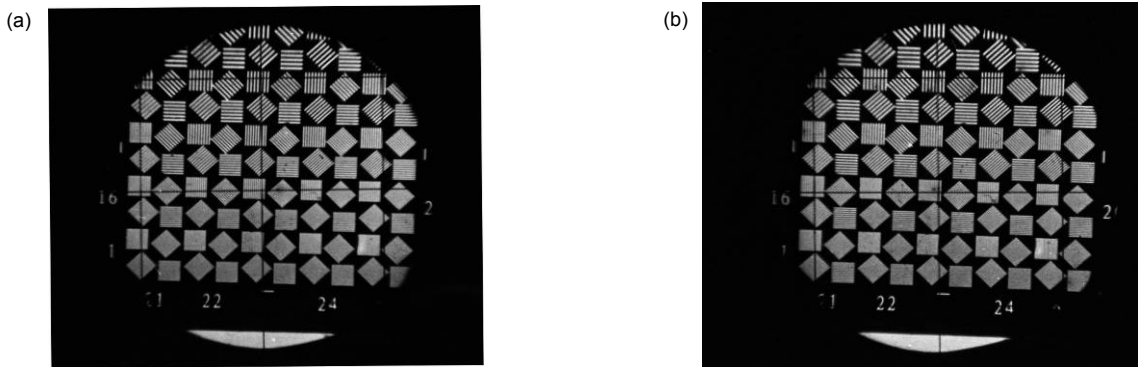


图 6 超高速转镜扫描相机的动态摄影分辨率像。(a) 未加转像机构; (b) 加转像机构
Fig. 6 Dynamic resolution image of streak camera. (a) Without Pechan prism; (b) With Pechan prism

5 动态实验结果

实验装置如图 7 所示。装置主要由两块 JO-9015 条形炸药、空气隙及 PMMA 光挡板等组成。实验要求用两台转镜相机(一台转镜分幅, 一台转镜扫描相机)同时研究炸药裂纹和间隙对爆轰传播的影响, 扫描相机和分幅相机拍摄观察面为相邻的两个面, 相互垂直。因炸药的特殊性, 装置放置位置、方向不能随意摆放, 实验要求转镜扫描相机狭缝必须为垂直方向, 而高速转镜扫描相机设计狭缝为水平方向, 相差 90°。为满足实验要求, 必须在扫描相机中加棱镜转像实现装置摆放方向与相机狭缝方向一致, 拍摄布局如图 8 所示。

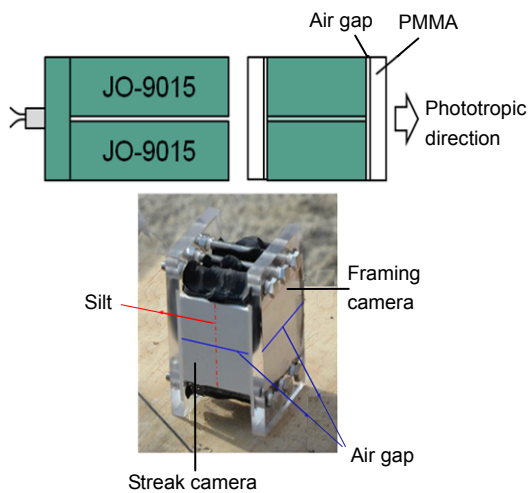


图 7 实验装置图
Fig. 7 Schematic of the experiment device

转镜扫描相机加转像机构成功拍摄到炸药爆轰波及间隙内射流超前过程具有超高时间分辨的一维时间图像, 清晰观察到裂纹射流明显超前爆轰波, 时间约 1.31 μs, 结果见图 9。转镜分幅相机拍摄到炸药传播过程具有高空间分辨的二维图像, 清晰观察到不同时刻间隙射流对爆轰波的影响, 结果见图 10。实验结果表明: 间隙内的射流超前爆轰波主要是在早期阶段形成的, 之后射流超前爆轰波的距离基本保持不变。裂纹明显影响爆轰波传播, 具体表现为纵向裂纹主要影响爆轰波阵面和驱动飞层的波形, 横向裂纹主要影响爆轰传播时间, 横向裂纹对飞层波形的影响小于爆轰对碰影响^[8]。

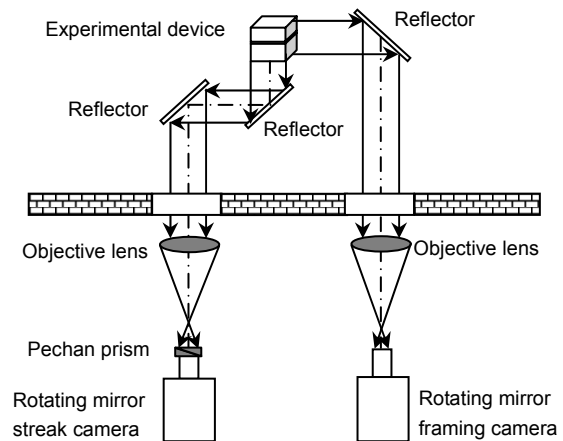


图 8 拍摄布局图
Fig. 8 Layout of the photography experiment

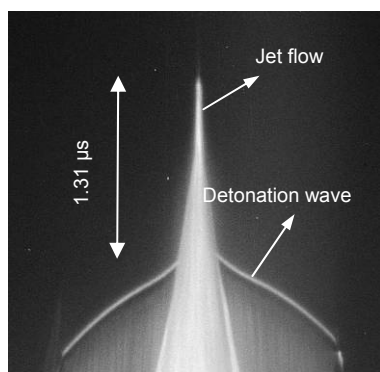


图 9 扫描相机加转像机构拍摄间隙内射流超前现象的实验结果

Fig. 9 Ahead phenomenon of jet between gap recorded by streak camera with the image rotating mechanism

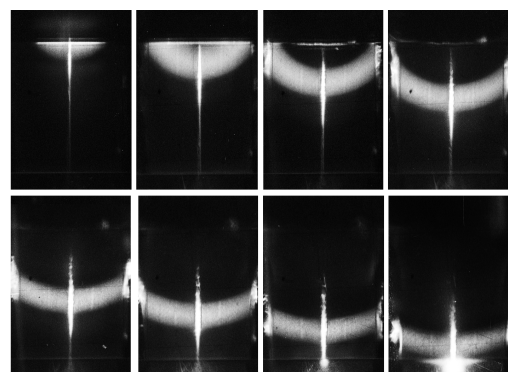


图 10 转镜分幅相机拍摄结果

Fig. 10 Picture recorded by framing camera

6 结论

转镜式高速相机中增配研制的别汉棱镜转像机构后,经像质检测及动态爆轰实验考核证明:

- 1) 棱镜对相机的像质无负面影响,甚至略有改善;
- 2) 对目标 360°角连续可调,与单台转镜高速相机配合使用时,减少外场被摄目标的调试时间,提高工作效率;
- 3) 解决了两台及以上相机同步使用时,爆轰装置不同研究方向的测试问题,极大方便了实验数据的获得及系统外场目标调试;
- 4) 高速转镜在分幅、扫描相机都通用,操作简易,使用方便,可作为相机的固定组成部分配备;
- 5) 转像机构与转镜分幅相机配合,当被摄目标只要求某一方向具有高的空间分辨率时,采用适当分幅光阑配合,可使分幅相机的时间分辨本领成倍地提高。

参考文献

[1] Tan X X, Han L S. *Technique for High Speed Photography*[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990.
谭显祥, 韩立石. 高速摄影技术[M]. 北京: 原子能出版社, 1990.

[2] Tan X X. *Test Technique for Optical High Speed Photograph*[M]. Beijing: Science Press, 1990.
谭显祥. 光学高速摄影测试技术[M]. 北京: 科学出版社, 1990.

[3] Paek E G, Choe J Y, Oh T K, et al. Nonmechanical image rotation with an acousto-optic dove prism[J]. *Optical Letters*, 1997, **22**(15): 1195–1197.

[4] Sullivan D L. Alignment of rotational prisms[J]. *Applied Optics*, 1972, **11**(9): 2028–2032.

[5] Han W Q, Liao S, Tan S L. Method for eliminating astronomical telescope's image rotation in real time[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(7): 88–91.
韩维强, 廖胜, 谭述亮. 一种实时消除望远镜图像旋转的方法[J]. 光电工程, 2006, **33**(7): 88–91.

[6] Luo H, Mao Y D, Yu Y, et al. A method of GEO targets recognition in wide-field opto-electronic telescope observation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(4): 418–426.
罗浩, 毛银盾, 于涌, 等. 利用超大视场光电望远镜观测 GEO 中的目标识别方法[J]. 光电工程, 2017, **44**(4): 418–426.

[7] Han L S. Application of the prism turning mechanism in explosion measurement[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1988, **8**(1): 67–72.
韩立石. 棱镜转向机构在爆轰测试中的应用[J]. 爆炸与冲击, 1988, **8**(1): 67–72.

[8] Tan X X, Li J, Chang L H, et al. Image rotating mechanism in ultra-high speed camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(S1): 47–50.
谭显祥, 李剑, 畅里华, 等. 超高速相机中的转像机构[J]. 光子学报, 2000, **29**(S1): 47–50.

[9] Ding L H. Bezhn prism for precise image transfer system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1983(1): 20–27.
丁林辉. 用于精密转像系统的别汉棱镜[J]. 光学精密工程, 1983(1): 20–27.

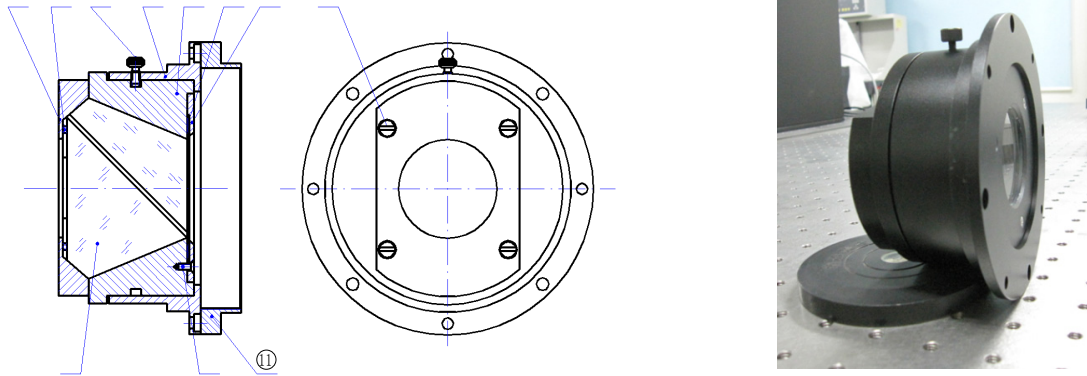
[10] Lian T S. Advances in the theory of conjugation for reflecting prisms in China[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1992, **1**(1): 1–12.
连铜淑. 我国在反射棱镜共轭理论方面的重要进展(英文)[J]. 北京理工大学学报, 1992, **1**(1): 1–12.

[11] Li J H, Wen S G, Tan D W, et al. Reaction threshold of explosive JO-9159 under low-amplitude shock[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, **31**(2): 148–152.
李金河, 文尚刚, 谭多望, 等. 低冲击作用下 JO-9159 炸药的反应阈值[J]. 爆炸与冲击, 2011, **31**(2): 148–152.

Application of image rotating mechanism of prism in ultra-high speed rotating mirror camera

Chang Lihua, Li Jian, Wang Wei*, Wang Xu, Zhang Guangsheng,
Gao Peng, Xiao Zhengfei, Shang Changshui

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



Structure design and profile of the image rotating mechanism of prism

Overview: The rotating mirror high-speed framing camera and streak camera have the characteristics of high spatial resolution, large picture size, long recording time, high photographic frequency and so on. They have always been an important means of experimental research in nuclear weapons, conventional weapons, high-tech weapons and other fields. They are widely used in the measurement of explosive detonation parameters, shock wave velocity, expansion fracture of nuclear weapons and conventional weapons warheads, micro material ejection, and the speed of flyer and fragmentation. Moreover, they are also widely used in ballistics, lightning and high-pressure spark discharge, material decomposition and synthesis, transient spectral analysis, high-speed collision and safety protection. With the development of precision physics experiment, in addition to studying the waveform symmetry on a plane of the target, it is often necessary to capture the waveform symmetry of different directions, for example, it is required to measure the waveform of two special directions with an angle of θ . The image rotating mechanism using Pechan prism matching the high speed rotating mirror camera was designed. It is compact, simple and convenient to operate, and it can be used in FJZ-250 or SJZ-15 type rotating mirror camera as a fixed part. Equipped with the designed mechanism, the rotating mirror cameras can rotate the image of the object by any angle in the range of $0^\circ \sim 360^\circ$ before recording it. As a result, the measurement problem of different research directions of detonation test is solved when multiple cameras are used synchronously, which plays an important role in acquisition of experimental data and debugging of outdoors targets, thus, it is a great convenience for the camera. Static visual resolution and dynamic photographic resolution were measured for the rotating mirror framing and streak cameras. The results of the image quality indicate that the equipment of the designed image rotating mechanism based on Pechan prism induced no degradation but even slight improved the image quality. The effects of explosive crack and gap on detonation propagation were studied by means of the rotating mirror framing and streak camera. One-dimensional ultra-high time resolution image of explosive detonation wave and the advance of the jet in the gap were captured by rotating mirror streak camera with image rotating mechanism of prism. The crack jet was clearly observed ahead of the explosion wave with about $1.31 \mu\text{s}$. Two-dimensional high spatial resolution image of the explosive propagation process was captured by the rotating framing camera, and the effect of gap jet on blast wave was clearly observed at different times. The expected results were obtained.

Citation: Chang L H, Li J, Wang W, *et al.* Application of image rotating mechanism of prism in ultra-high speed rotating mirror camera[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(1): 180399

Supported by National Science, Technology and Industry for National Defense Foundation of China (JSJL2016208A011) and National Significant Scientific Instruments Development Project of China (2011YQ130019)

* E-mail: wwclhdd@163.com