

# 大画幅等待式转镜分幅相机结构设计

李 剑 汪 伟 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** 采用共轴理论和控制离焦相结合的方法, 设计了大画幅等待式转镜分幅相机, 该相机的画幅尺寸达到了  $30\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ , 同时还具备了相对孔径大和分辨率高的特点, 对底片的相对孔径为空间方向  $1/15$  和扫描方向  $1/35$ , 动态目视分辨率达到了  $35\text{ lp/mm}$ , 总画幅数 80 幅, 摄影频率  $1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5\text{ frame/s}$ 。采用  $2 \times 10^5\text{ frame/s}$  的拍摄频率对某爆轰过程进行了试验记录, 得到了高分辨率的图像。结果表明: 相机的画幅尺寸大、空间分辨率高, 适用于冲击、爆轰和弹体姿态等试验过程和目标的拍摄。

**关键词** 光学设计; 高速摄影; 高速相机; 共轴设计; 爆轰试验

中图分类号 O439; TB872; TJ06

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.072202

## Structural Design of Large-Frame Continuous Rotating Mirror Framing Camera

Li Jian Wang Wei Shang Changshui

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

**Abstract** A large-frame continuous rotating mirror framing camera is developed by using the coaxial imaging theory and controlling defocusing range. It has the frame size of  $30\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ , dynamic visual resolution of  $35\text{ lp/mm}$ , relative aperture of  $1/15$  in spatial direction and  $1/35$  in scanning direction, frame number of 80, and framing rate from  $1 \times 10^4$  to  $5 \times 10^5\text{ frame/s}$ . The camera runs conveniently under a new control system. High-resolution images about a detonation experiment are obtained with this camera under the framing rate of  $2 \times 10^5\text{ frame/s}$ . It is proved that this camera can be used for imaging in such experiments as shock wave, detonation and gesture of bowb.

**Key words** optical design; high-speed photography; high-speed camera; coaxial imaging design; detonation experiment

**OCIS codes** 220.4830; 230.1150

## 1 引言

转镜式高速相机具有画幅尺寸大、画幅数目多、空间分辨率高、能实现等待功能和覆盖的摄影频率段宽 ( $10^4 \sim 10^7\text{ frame/s}$ ) 等特点, 使之能对绝大部份超快过程进行研究<sup>[1,2]</sup>。转镜式高速相机目前仍然是武器研究和爆轰物理研究领域不可缺少的重要实验设备。虽然相关的设计理论和实验技术仍在研究和发 展<sup>[3~8]</sup>, 但在提高空间分辨本领和增大画幅尺寸方面, 还未见新的进展。与此同时, 出于军事目的的实验研究对高空间分辨率的高速相机需求强烈, 在试验测试过程中, 往往要求有较大的成像视场。而提高转镜式高速相机的总的空间信息量, 需要实现大画幅、大相对孔径和高分辨率, 这些指标之间不仅相互矛盾, 而且相互制约。设计这类相机的主要困难是结构形式、高速大尺寸的转镜系统以及由此而产生的成像质量的下降。通常情况下, 通过提高像面的动态摄影分辨率来增加空间信息量是困难的, 而在保证相机成像质量的前提下增大画幅尺寸是一个比较可取的方法。本文设计了一种大画幅等待式转镜分幅相机, 在结构设计中采用了共轴理论和控制离焦相结合的方法, 有效地控制了画幅尺寸增大带来的大的像移和离焦, 从而保证了相机在拥有大画幅的情况下仍具有高的动态成像质量。

收稿日期: 2012-02-04; 收到修改稿日期: 2012-04-05; 网络出版日期: 2012-05-24

作者简介: 李 剑(1976—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高速摄影及光电测试技术等方面的研究。

E-mail: lijiana@126.com

## 2 光学系统安排

相机系统采用三角形截面的三棱反射镜等待扫描方式,基于 Miller 原理的经典设计理论,即用代替圆来替代 Pascal 曲线<sup>[9,10]</sup>。相机的光学系统如图 1 所示,在整个相机的光学系统中,有四个成像关系。第一次成像是主物镜把被摄目标成像在视场光阑上。此像经快开快门、爆炸快门和电磁快门,由中继透镜前组和后组,分两路进入真空球罩,成像在高速转镜的反射面上,这是第二次成像。转镜为三面反射体,两路图像经转镜不同的反射面,先后反射至上、下排透镜上,并依次在像面(胶片)上成像,这是第三次成像。在光学系统的孔径光阑处,置有两排阶梯光阑,它经中继透镜后组后,成像在排透镜光阑上,组成相机的光快门,从而实现相机的分幅摄影,这是第四个成像关系。分幅相机的这种成像原理,有利于在相机中安置电磁快门、快开快门以及爆炸快门。

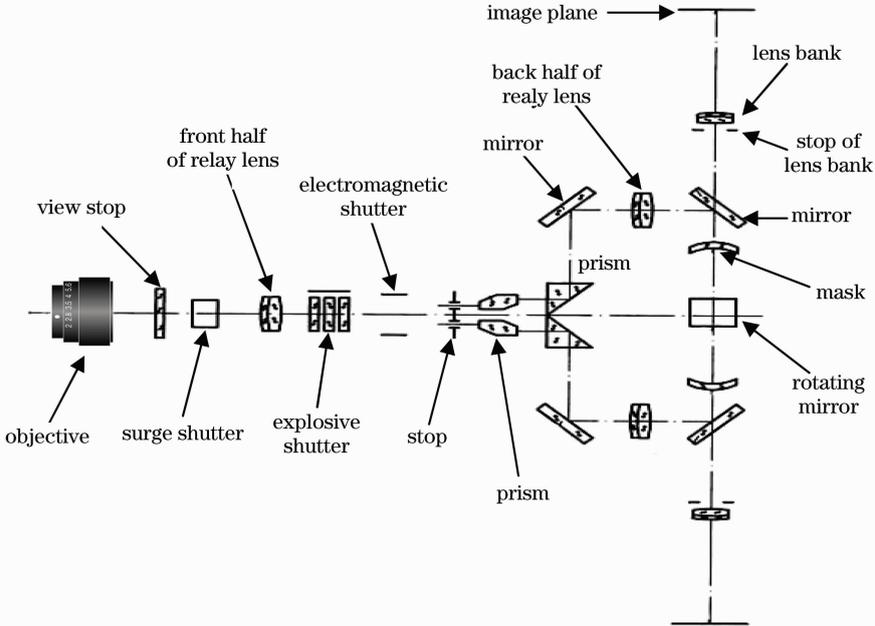


图 1 相机光学系统原理图

Fig. 1 Optical system configuration of camera

### 2.1 转镜尺寸的确定

高强度铝合金是较先进的高速转镜材料,用该材料制作的转镜具有工艺性好、极限破坏速度高、驱动功率低、变形系数不大、镜面质量好和成本低等特点<sup>[11,12]</sup>。铝合金转镜可用复制膜技术或镀膜技术制成光学镜面,镜面可达一个光圈,反射率大于 80%,膜层可承受 750 m/s 以上的边缘线速度。该材料的转镜曾在国内转镜相机上成功应用,并且最大镜面达到了 33 mm×28 mm 的较大尺寸,设计和工艺已经较为成熟,同时选择大尺寸的转镜对提高相机画幅尺寸是有利的,所以采用 33 mm×28 mm 尺寸的高强度铝合金转镜,以转镜尺寸为中心展开设计工作。可确定转镜旋转中心到镜面的垂直距离为  $r=9.53$  mm。

### 2.2 相机设计过程参数

以转镜尺寸为基准进行设计,由总体要求可确定中继透镜和排镜光学参数。相机设计过程中的一些重要结果如表 1 所示。

表 1 相机设计过程参数

Table 1 Detailed parameters of camera design

Size of rotating mirror /mm	Stop /mm	Magnification			Streak radius	Distance of frame	Relative aperture	
		Relay lens	Lens bank	Product			Direction of space	Direction of streak
33×28	12.5×20.9	1.34	1.07	1.43	353.97	1	1/15	1/35

### 3 四心的选择和代替圆的设计

四心指中间像中心 $(0,0)$ 、转镜中心 $(x_0, y_0)$ 、排镜中心 $(x_c, y_c)$ 和底片中心 $(x_r, y_r)$ 。Miller型超高速分幅系统的光学快门功能和分幅功能是靠转镜扫描完成的,由于转镜厚度的存在,使得转镜转轴不在转镜镜面上,在转镜扫描时形成了两条 Pascal 蜗线,一条记录像面,一条是排镜及其出瞳光阑所在的曲面,并由此导致了离焦和像移的产生。长期以来,人们对这两条曲线进行了深入的研究,并发展了用圆来代替 Pascal 曲线的理论,即所谓代替圆的设计理论,这是转镜式相机设计中最为重要的部分。在计算过程中,中间像中心作为原点坐标 $(0,0)$ ,球罩的中心和像的中心重合。

#### 3.1 Pascal 蜗线方程

如图 2 所示,在直角坐标系中,指向中继透镜的光轴为  $x$  轴的正方向, $y$  轴的正方向指向工作扇形,转镜的旋转中心是  $O$  点 $(x_0, y_0)$ ,转镜镜面到旋转中心的距离为  $r$ 。如果仅研究轴上点,当转镜旋转时,像点的坐标方程可写成

$$\begin{cases} x = (Q + x_0) \cos 2\varphi + y_0 \sin 2\varphi + (x_0 + 2r \cos \varphi) \\ y = (Q + x_0) \sin 2\varphi + y_0 \cos 2\varphi + (y_0 + 2r \sin \varphi) \end{cases}, \quad (1)$$

(1)式即为 Pascal 蜗线方程,式中  $\varphi$  是转镜的转角, $Q$  是坐标原点到最终像面转镜镜象的距离。

#### 3.2 设计方法的选择

采用共轴设计理论<sup>[13~16]</sup>来完成相机四心和代替圆的设计,主要基于以下两点考虑:1)对于等待式分幅相机来说,多用于实验总体效应的定性研究,所以对扫描速度的要求没有那么苛刻,而对提高成像质量的考虑更为重要,特别是在画幅如此大的情况下;2)相机的相对孔径为空间方向  $1/15$  和扫描方向  $1/35$ ,把设计重心放在控制相机的离焦上效果不明显,而对共轴性的控制会更有意义,特别是在增加了排透镜放大倍率的情况下,必须重视共轴性对成像质量的影响。所以在对排透镜代替圆的设计时,采用共轴设计理论,而对于胶片面的代替圆,采用控制离焦量的方法进行单独设计。

#### 3.3 设计结果

确定转镜旋转中心坐标 $(x_0, y_0)$ 的依据是:在转镜工作角内有最大的信息量。由公式

$$x_0 = \frac{-r(\sin \theta_k - \sin \theta_0)}{\theta_k - \theta_0}, \quad (2)$$

确定旋转中心横坐标  $x_0$ ,按工作角内镜面尺寸最小原则来确定  $y_0$ ,对于此相机,

$$y_0 = 2r \sin \theta_0 + \frac{a}{2} \cos \theta_k, \quad (3)$$

式中  $\theta_0$  和  $\theta_k$  为转镜工作角, $a$  为转镜镜面的边长(垂直于转轴方向)。本相机中  $\theta_0 = 6^\circ, \theta_k = 66^\circ, r = 9.53, a = 33$ 。由此计算出转镜旋转中心坐标为 $(-6.76, -8.70)$ 。

根据共轴设计理论,应当保证排透镜光轴与经镜面反射的轴向主光线之间的夹角  $\varphi$  为最小值,应用公式

$$\begin{cases} \frac{\partial \int_{\theta_0}^{\theta_k} \sin^2 \varphi d\theta}{\partial x_c} = 0 \\ \frac{\partial \int_{\theta_0}^{\theta_k} \sin^2 \varphi d\theta}{\partial y_c} = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

可得排镜的中心坐标为 $(-1.86, -1.50)$ ,代替圆半径为  $r_1 = 160.23$  mm。该设计结果很好地控制了  $\varphi$  角,除了前两幅  $\varphi$  值分别为  $0.24^\circ$  和  $0.18^\circ$  之外,其余  $\varphi$  值全部控制在  $0.1^\circ$  以内,这样就从根本上消除了由  $\varphi$  角

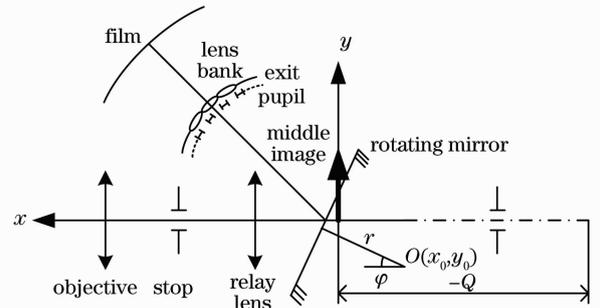


图 2 Miller 型高速分幅系统原理示意图  
Fig. 2 Sketch diagram of Miller type high-speed framing system

过大带来的排透镜视场增加而引起的原理性附加像差,从而保证了整机的成像质量。

用解析法来单独求解胶片面的代替圆中心和半径,以控制像面的离焦量。假设排透镜架代替圆和 Pascal 曲线之间有 3 个交点,分别为  $p_1(x_1, y_1)$ ,  $p_2(x_2, y_2)$ ,  $p_3(x_3, y_3)$ , 应用

$$x_r = \frac{[(x_2^2 - x_1^2) + (y_2^2 - y_1^2)](y_3 - y_2) - [(x_3^2 - x_2^2) + (y_3^2 - y_2^2)](y_2 - y_1)}{2[(x_2 - x_1)(y_3 - y_2) - (x_3 - x_2)(y_2 - y_1)]}, \quad (5)$$

$$y_r = \frac{[(x_2^2 - x_1^2) + (y_2^2 - y_1^2)](x_3 - x_2) - [(x_3^2 - x_2^2) + (y_3^2 - y_2^2)](x_2 - x_1)}{2[(x_3 - x_2)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(y_3 - y_2)]}, \quad (6)$$

$$(x_1 - x_r)^2 + (y_1 - y_r)^2 = r_2^2, \quad (7)$$

经过几次优选,便可找出最佳的  $x_r, y_r, r_2$ 。最终求出的胶片面中心坐标为  $(0.66, -7.72)$ , 代替圆半径为  $r_2 = 358.84 \text{ mm}$ 。

由上述设计结果,可求出相机的原理性像移  $dl'$  和原理性离焦  $da'$ :

$$dl' = 2\beta |(x_0 + c \cos \theta) d\theta|, \quad (8)$$

$$da' = \beta^2 |(y_0 + c \sin \theta - h) d\theta|, \quad (9)$$

式中  $\beta$  为排镜放大倍率,  $h$  为转镜面上中间像的半高,  $d\theta$  为分幅光阑扫描方向对应的弧度的  $1/2$ , 单位为 rad。不同的工作角  $\theta$  对应的像移曲线和离焦曲线如图 3 所示, 原理性像移及离焦对像质的影响如图 4 所示。由计算结果可以看出, 只有首尾两幅图像的理论分辨率略低于  $30 \text{ lp/mm}$ , 而绝大部分画幅的理论分辨率都在  $35 \text{ lp/mm}$  以上, 原理性像移和离焦对像质没有造成坏的影响。

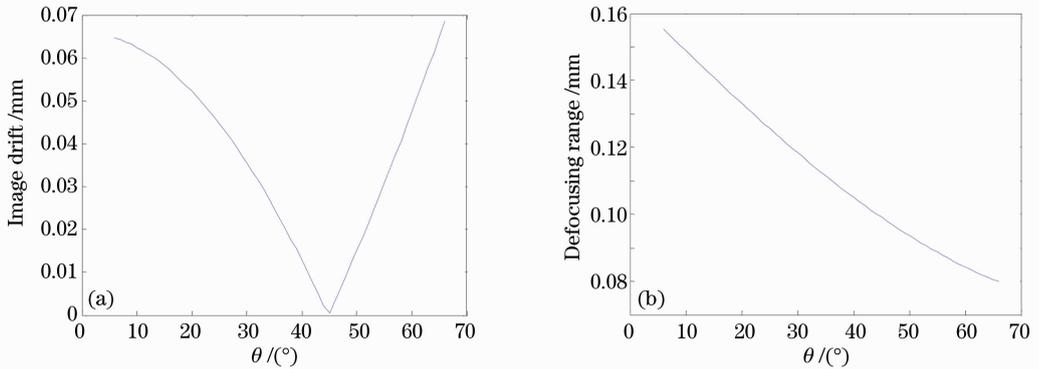


图 3 (a)原理性像移和(b)离焦

Fig. 3 (a) Residual image drift and (b) defocusing range

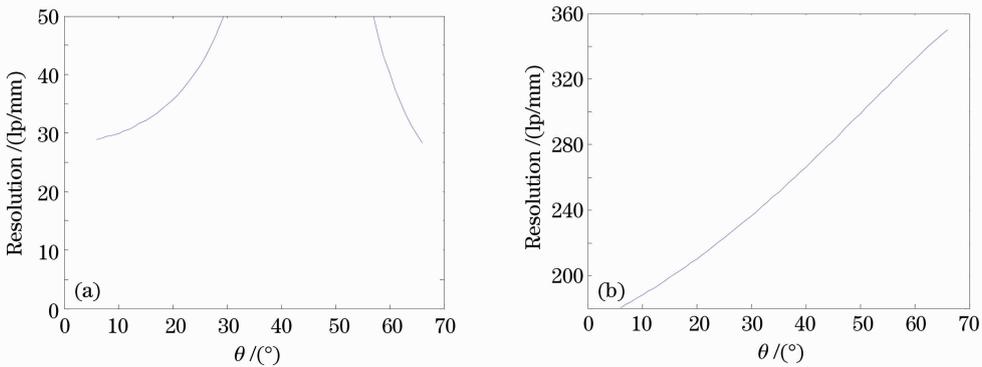


图 4 (a)原理性像移和(b)离焦对像质的影响

Fig. 4 Influences of (a) residual image drift and (b) defocusing range on resolution

由设计结果也可得出相机的拍摄频率不均匀性  $E$ :

$$E = \frac{V(\theta) - V_p}{V_p} \times 100\%, \quad (10)$$

式中  $V(\theta)$  为对应角度为  $\theta$  位置的扫描速度,  $V_p$  为平均扫描速度。拍摄频率不均匀性随角度变化的曲线如图

5 所示。第一幅图像的拍摄频率不均匀性为 1.54%，其余均在 1.5% 以下，且拍摄频率不均匀性小于 0.5% 的画幅总数占总画幅数的 82.5%。在有特殊需求的情况下，可对摄影频率进行技术修正。从设计结果看，在保证 30 mm×18 mm 画幅尺寸的前提下，仍然获得了高的空间成像质量，并且拍摄频率的不均匀性也得到了有效的控制。

## 4 实 验

设计的相机系统经过精密装调后，全部指标均达到了设计要求，静态目视分辨率达到了 46 lp/mm，动态目视分辨率达到了 35 lp/mm 的国内先进水平，总画幅数 80 幅，摄影频率  $1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$  frame/s，其中实验最高稳定摄影频率达到了  $8 \times 10^5$  frame/s。对某爆轰过程进行了试验记录，采用  $2 \times 10^5$  frame/s 的拍摄频率，得到了清晰的图像，如图 6 所示。实验结果表明：相机的画幅尺寸大，空间分辨率高，适用于冲击、爆轰和弹体姿态等试验过程和目标的拍摄。此外，该相机还应用于多项重要实验中，均得到了很好的实验结果。

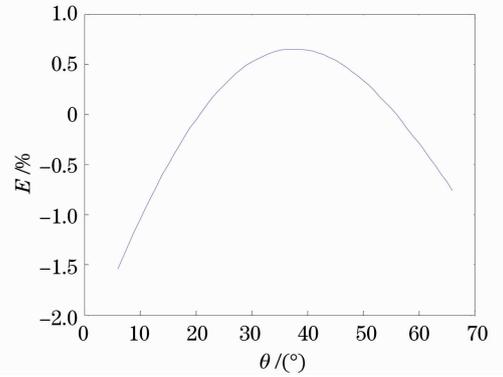


图 5 不同成像位置的拍摄频率不均匀性  
Fig. 5 Nonuniformity curve of framing rate at different imaging position

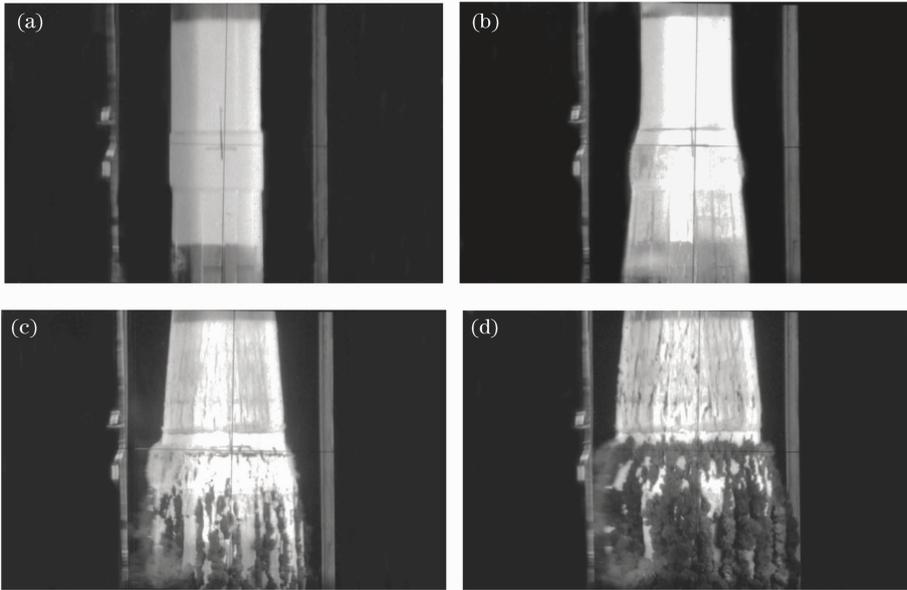


图 6 爆轰实验拍摄结果  
Fig. 6 Imaging results of a detonation experiment

## 5 结 论

采用共轴设计理论、离焦最小原则和拍摄频率不均匀性最小原则相结合的设计方法，有效地控制了增加画幅尺寸带来的大的像移和离焦，保证了摄影系统在实现 30 mm×18 mm 大画幅的前提下，仍能实现静态目视分辨率 46 lp/mm、动态目视分辨率 35 lp/mm 的高成像质量。设计的相机系统已成功应用于爆轰物理和冲击波物理实验研究。

## 参 考 文 献

- 1 A. L. Eugene, K. Mange. Rotating Mirror Streak and Framing Cameras [M]. Bellingham; SPIE Press, 1997. IX~XX
- 2 Li Jingzhen. Assessing study of ultra high speed photography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(Z1): 82~88
- 李景镇. 超高速摄影的评价研究 [J]. *光子学报*, 1999, **28**(Z1): 82~88

- 3 Li Jingzhen, Gong Xiangdong, Li Shanxiang *et al.*. Study on classical designing theory of Miller type ultra high speed photographic system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 739~742  
李景镇, 龚向东, 李善祥 等. Miller 型超高速摄影系统经典设计理论的研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(6): 739~742
- 4 Li Jian, Chang Lihua, Tan Xianxiang *et al.*. Model 1000 ultra-high speed rotating mirror framing camera and applications [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, **25**(6): 574~576  
李 剑, 畅里华, 谭显祥 等. FJZ-1000 型超高速转镜分幅相机及其应用 [J]. 爆炸与冲击, 2005, **25**(6): 574~576
- 5 Tan Xianxiang. The uncertainty analysis of the measurement results of high speed rotating mirror streak camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(11): 1387~1390  
谭显祥. 高速扫描相机时间测量不确定度分析[J]. 光子学报, 2002, **31**(11): 1387~1390
- 6 Wang Wei, Tan Xianxiang. Test device and its uncertainty for writing rate of ultra-high speed rotating mirror streak camera [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, **6**(5): 76~79  
汪 伟, 谭显祥. 转镜式高速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): 76~79
- 7 Zhao Jianheng, Tan Xianxiang, Sun Chengwei *et al.*. Investigations of failure waves in K9 glass using shadowgraph [J]. *Explosion and Shock Wave*, 2001, **21**(2): 150~156  
赵剑衡, 谭显祥, 孙承伟 等. 用高速阴影技术研究 K9 玻璃中的失效波[J]. 爆炸与冲击, 2001, **21**(2): 150~156
- 8 Chang Lihua, Tan Xianxiang, Wang Wei *et al.*. Schlieren techniques in experiments of shock wave and detonation physics [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(12): 58~61  
畅里华, 谭显祥, 汪 伟 等. 纹影技术用于爆轰与冲击波物理实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2006, **43**(12): 58~61
- 9 C. D. Miller. Half-million stationary images per second with refocused revolving beams J. *SMPE*, 1949, **53**(5): 479~488
- 10 Li Dexiong. Collection of Translated Papers on High Speed Photography (Principle of Rotating Mirror Scanning) [M]. Beijing: Science Press, 1965. 1126~156  
李德熊. 高速摄影译文集 I (转镜扫描原理) [M]. 北京: 科学出版社, 1965. 126~156
- 11 Li Jingzhen, Sun Fengshan. Dynamic property of rotating mirrors of high intensity aluminium alloy for ultra high speed photography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(5): 636~639  
李景镇, 孙凤山. 超高速摄影用高强度铝合金转镜动态特性的研究[J]. 光子学报, 2000, **29**(5): 636~639
- 12 Huang Hongbin, Li Jingzhen, Sun Fengshan *et al.*. Numeric analysis of structural strength of aluminous alloy rotating mirror for ultra-high speed photography [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(8): 1277~1281  
黄虹宾, 李景镇, 孙凤山 等. 超高速摄影中三面体铝合金转镜的空间结构强度数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(8): 1277~1281
- 13 Li Jingzhen. Possibility of simultaneously attaining the curve without out of focus and with constant writing speed [C]. *SPIE*, 1982, **348**: 471~474
- 14 Li Jingzhen, Huang Jinhao, Tian Jie *et al.*. Advanced designing theory of recording surface of rotating mirror streak cameras [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(8): 1033~1035  
李景镇, 黄景灏, 田 洁 等. 转镜扫描相机记录像面的新设计理论[J]. 光子学报, 2001, **30**(8): 1033~1035
- 15 Xu Jialong ed.. High Speed Rotating Mirror Camera [M]. Beijing: Science Press, 1985. 126~142  
许家隆(主编). 转镜式高速摄影 [M]. 北京: 科学出版社, 1985. 139~142
- 16 Lang Jianlin. Comprehensive design of substitution circular for rotating mirror framing camera [C]. Proc. of the 4th NCHSPP, 1985