

文章编号 1004-924X(2012)09-1883-07

# 大画幅等待式转镜分幅相机系统设计

李 剑\*, 汪 伟, 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:**采用共轴设计理论和控制离焦的方法,设计了画幅尺寸达30 mm×18 mm的大画幅等待式转镜分幅相机。该相机同时具备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,扫描方向1/35;静态目视分辨率为46 lp/mm,动态目视分辨率为35 lp/mm;总画幅数为80,摄影频率为 $1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$  frame/s。相机的高速转镜部件采用光纤传感器系统来产生和传输转速信号,避免了高速直流电机对转速信号的干扰,确保了测速准确度。研制的相机已应用于爆轰物理和冲击波物理实验中,并采用 $2 \times 10^5$  frame/s的拍摄频率对爆轰过程进行了试验记录,得到了高分辨率的图像。试验结果表明:设计的相机画幅尺寸大、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:**高速摄影;高速相机;共轴设计;爆轰试验

中图分类号:TB872 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20122009.1883

## Design of large frame and framing camera with continuous rotating mirror

LI Jian\*, WANG Wei, XIAO Zheng-fei, SHANG Chang-shui

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

\* Corresponding author, E-mail: lijiana@sohu.com

**Abstract:** A large frame and framing camera with a continuous rotating mirror is developed under the coaxial imaging theory and a controlling defocusing range. With the frame size of 30 mm×18 mm, it shows a large relative aperture and higher resolution. Moreover, its big stops are 1/15 for the spatial direction and 1/35 for the scanning direction. The static visual resolution and dynamic visual resolution of the camera are 46 lp/mm and 35 lp/mm, respectively, and it can offer the number of frames of 80 and framing rate from  $1 \times 10^4$  frame/s to  $5 \times 10^5$  frame/s. Furthermore, the high speed rotation mirror in the camera uses a fiber sensor system to produce and transfer the rotation signals, which eliminates the influence of the electromagnetic disturbance from a high speed rotating electromotor on the rotation signals and ensures the measurement accuracy. The camera has been applied to the detonation and shock wave physics experiments and the experimental processing has been recorded at a framing rate of  $2 \times 10^5$  frame/s. Obtained results demonstrate that the camera has larger frames and higher resolution and is suitable for the various experiments of shocking, detonation, projectile atti-

收稿日期:2012-04-17;修订日期:2012-06-13.

基金项目:国家空间碎片专题研究资助项目(No. 09203)

tude and target photography.

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

## 1 引言

由于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摄影频率段宽( $10^4 \sim 10^7$  frame/s)等特点,因此可用于绝大部份超快过程的研究<sup>[1-2]</sup>,转镜式高速相机也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。近年来,转镜式高速相机相关的设计理论和实验技术仍在研究和发展中<sup>[3-8]</sup>,但在提高相机的空间分辨本领方面还未见新的进展,而某些领域的试验测试却往往要求有较大的成像视场和较高的细节分辨能力,因此,研制大画幅、大相对孔径和高分辨率转镜式高速相机倍受期待。先进常规武器的研制需要具有更大空间信息量的等待式转镜高速分幅相机作为记录手段,因此本课题组研制了目前国内最大画幅尺寸的转镜式高速分幅相机。由转镜式高速相机的基本原理可知,通过提高最终像面的空间分辨率来增大相机的空间信息量是困难的,而采取在保持空间分辨率不降低的前提下增大画幅尺寸是一种行之有效的方法。本文在保证运转稳定可靠的前提下,通过选用大尺寸的高速转镜使整个系统的放大率匹配更加合理,同时采用共轴设计理论和控制离焦相结合的方法来最大限度地抑制转镜增大带来的像移。

## 2 设计要求

相机的具体设计要求为:

工作方式:等待;

摄影频率: $1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^5$  frame/s;

画幅尺寸:30 mm(空间方向) $\times$ 18 mm(扫描方向);

画幅总数:80 frame;

动态目视分辨率:30 lp/mm;

对底片的相对孔径:1/15(空间方向),1/35(扫描方向);

视场角: $4^\circ \times 2.4^\circ$ (主物镜焦距为 300 mm 时)。

## 3 光学原理及光学系统设计

### 3.1 光学原理

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,共有 4 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,即为第二次成像;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 4 次成像。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。

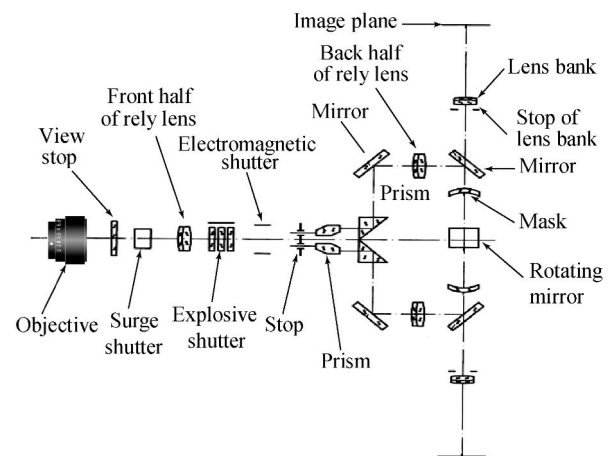


图 1 高速相机光学系统

Fig. 1 Optical system configuration of camera

### 3.2 光学系统设计

#### 3.2.1 转镜尺寸的确定

高强度铝合金是较先进的高速转镜材料,使用该材料制成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>。采用复制膜技术或镀膜技术制成铝合金转镜的光学镜面,镜面可达一个光圈,反射率>80%,膜层可承受 750 m/s 以上的边缘线速度。国内某转镜相机已成功应用了铝合金转镜,并且最大镜面尺寸达到了 33 mm×28 mm,其设计和工艺已经较为成熟。由于选择大尺寸的转镜有利于提高相机的画幅尺寸,所以本文采用 33 mm×28 mm 尺寸的高强度铝合金转镜,由转镜尺寸来确定整个系统的放大率分配,已确定转镜旋转中心到镜面的垂直距离为  $r=9.53$  mm。

3.2.2 相机主要参数的计算

由画幅尺寸和转镜尺寸可确定排镜的放大率

为 1.07,由主物镜焦距为 300 mm,视场角为  $4^\circ \times 2.4^\circ$  可计算出视场光阑的大小,进而由转镜尺寸确定中继透镜组的放大率为 1.34,则系统总的放大率为  $1.07 \times 1.34 = 1.43$ 。由画幅尺寸和总的放大率可得视场光阑的大小为  $12.5$  mm ×  $20.9$  mm。

画幅尺寸的扫描方向为 18 mm,取画幅间距为 1 mm,则画幅夹角为:  $\theta = 120/39 = 3.077^\circ$ ,可求出扫描半径为:

$$r = \frac{(18+1) \times 180}{\pi \theta} = 353.97 \text{ mm.}$$

相机的主要设计参数如表 1 所示。

表 1 相机主要参数

Tab.1 Detailed parameters of camera

转镜尺寸	视场光阑	放大率分配			扫描半径 /mm	图像间距 /mm	相对孔径	
		第二物镜	排镜	总放大率			空间方向	扫描方向
33 mm×28 mm	12.5 mm×20.9 mm	1.34	1.07	1.43	353.97	1	1/15	1/35

3.2.3 中继透镜

为了实现大画幅和大相对孔径的要求,相应地增大了系统各个部分的视场角。中继透镜由前组和后组两部分组成,作用是将视场光阑成像在转镜像面上。由于快门系统和复杂的分光系统被放置在前组和后组之间,使得前组和后组之间的距离很大,但考虑到结构的需要,又不能过多的增加中继透镜的口径,使得中继透镜的视场进一步

增大,故设计采用了如图 2 所示的两组双胶合的对称结构。在计算及校正像差时需要加入球罩部分。

3.2.4 排透镜

单个双胶合透镜会带来严重的像面弯曲,使轴外像质下降,为此,增加了厚透镜校正场曲。排透镜的设计结果如图 3 所示,在计算时也要加入球罩部分。



图 2 中继透镜结构

Fig.2 Optical scheme of rely lens

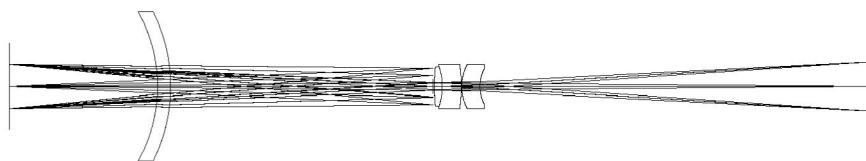


图 3 排透镜结构

Fig.3 Optical scheme of lens bank

### 3.2.5 总体设计结果

光学系统的总体结果和成像质量分别如图 4、图 5 所示。由于转镜式相机属小孔径大像差系统,并考虑像移的存在,所以重点关心的是 30 lp/mm

以下的成像质量,由设计结果看,像差校正还是获得了较为满意的结果。相机装校完成后,静态目视分辨率达到了 46 lp/mm。

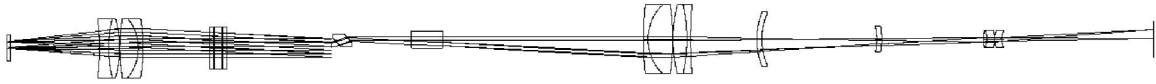


图 4 转镜相机整体光路图

Fig. 4 Whole optical scheme of rotating camera

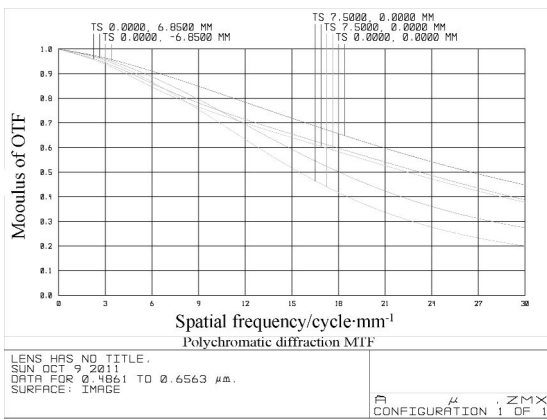


图 5 转镜相机的调制传递函数曲线

Fig. 5 MTF curves of rotating camera

### 3.3 四心的选择和代替圆的设计

四心指中间像中心 $(O, O)$ 、转镜中心 $(x_0, y_0)$ 、排镜中心 $(x_c, y_c)$ 、底片中心 $(x_r, y_r)$ ,在计算过程

中,中间像中心作为原点坐标 $(0, 0)$ ,球罩的中心和排镜中心重合。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。在确定排镜中心和底片中心时,分别采用共轴理论和控制离焦的方法<sup>[13-16]</sup>,采用共轴设计理论来完成相机四心和代替圆的设计,主要基于以下两点考虑:一是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,提高成像质量更为重要,特别是在如此大画幅的情况下;二是相机的相对孔径为 1/15 和 1/35,把设计重心放在控制相机的离焦上效果不明显,并且增加了排透镜的放大倍率,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。选心结果如表 2 所示。本相机工作角  $\theta$  为  $6 \sim 66^\circ$ 。

表 2 选心结果

Tab. 2 Parameters of fungible curve

$(O, O)$	$(x_0, y_0)$	$(x_c, y_c)$	$(x_r, y_r)$	排镜代替圆 半径 $r_1$ /mm	底片代替圆 半径 $r_2$ /mm
$(0, 0)$	$(-6.76, -8.70)$	$(-1.86, -1.50)$	$(0.66, -7.72)$	160.23	358.84

由上述设计结果,用公式(1)、(2)可求出相机的原理性像移  $dl'$  和原理性离焦  $da'$ 。

$$dl' = 2\beta | (x_0 + c \cos \theta) d\theta |, \quad (1)$$

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

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弧度的二分之一,单位为 rad。工作角  $\theta$  对应的像移曲线和离焦曲线如图 6 所示,原理性像移及离焦对像质的影

响如图 7 所示。由计算结果可以看出,只有头尾两幅图像的理论分辨率略低于 30 lp/mm,而绝大部分画幅的理论分辨率都在 35 lp/mm 以上,原理性像移和离焦对像质没有造成坏影响。

由设计结果也可得出相机的拍摄频率不均匀性  $E$ ,由公式(3)计算:

$$E = \frac{v(\theta) - v_p}{v_p} \times 100\%. \quad (3)$$

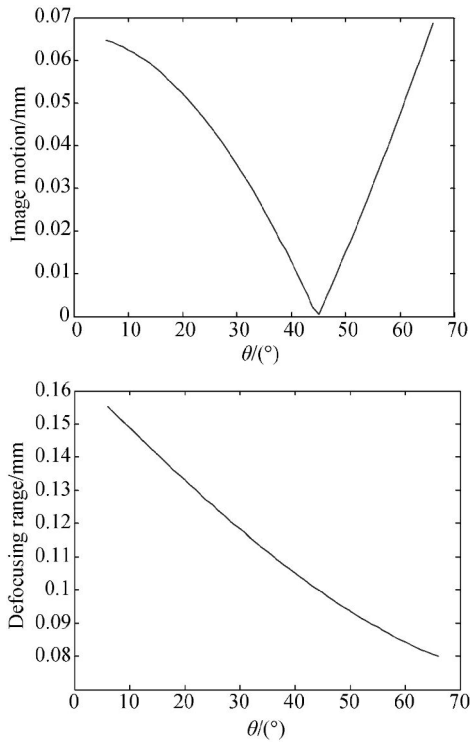


图 6 像移曲线和离焦曲线

Fig. 6 Residual image drag and defocusing range

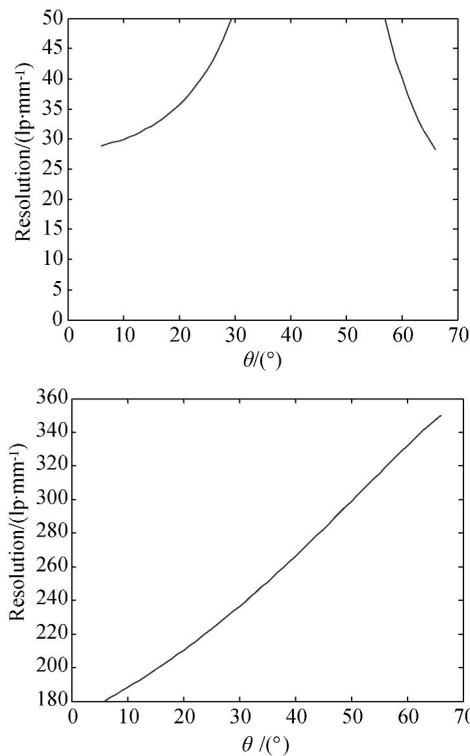


图 7 原理性像移及离焦对像质的影响

Fig. 7 Influence of residual image drag and defocusing range on resolution, respectively

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, 拍摄频率的不均匀性随角度变化的曲线如图 8 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, 在保证了 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控制。

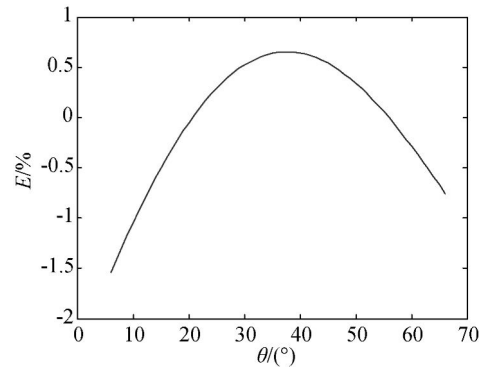


图 8 拍摄频率非线性变化曲线

Fig. 8 Nonlinear curve of framing rate

### 3.4 动态试验验证

设计的相机系统经过精密装调后, 全部满足了设计指标要求, 达到了静态目视分辨率 46 lp/mm, 动态目视分辨率 35 lp/mm 的国内先进水平, 将转镜信号光纤传感器应用于相机系统, 并对转镜光信号进行动态判读和智能调整, 解决了高速直流电机对转镜信号干扰的技术难题, 保证了传感器可靠工作, 提高了转镜转速的测量准确度。

对某爆裂过程进行了试验记录, 采用  $2 \times 10^5$

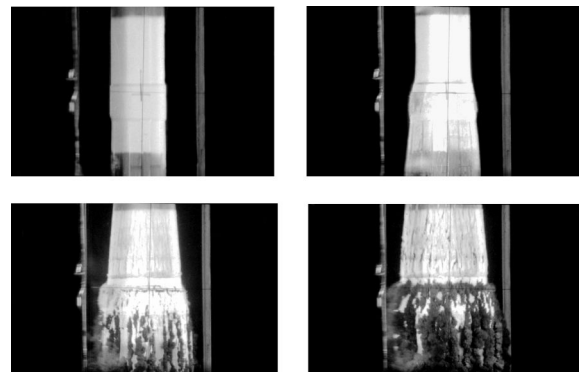


图 9 爆裂过程试验记录

Fig. 9 Results of detonation experiment

frame/s 的拍摄频率,得到了清晰的图像,如图 9 所示。试验结果表明: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。

## 4 结 论

本文通过光学设计来增大画幅尺寸,并运用

经典设计理论控制画幅尺寸增大带来的大像移和离焦,有效地提高了高速转镜分幅相机的空间分辨本领,保证了摄影系统在实现 30 mm×18 mm 大画幅前提下,仍能实现静态目视分辨率为 46 lp/mm、动态目视分辨率为 35 lp/mm 的高成像质量。高速转镜光纤传感器系统的应用,解决了高速直流电机对转镜信号干扰的技术难题,确保了转镜转速测量的准确度。该相机系统已成功应用于爆轰物理和冲击波物理实验研究中。

## 参考文献:

- [1] EUGENE A L, MANGE K. *Rotating Mirror Streak and Framing Cameras*[M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1997.
- [2] 李景镇. 超高速摄影的评价研究[J]. 光子学报, 1999, 28 (Z1):82-88.  
LI J ZH. Assessing study of ultra high speed photography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, 28 (Z1): 82-88. (in Chinese)
- [3] 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.  
LI J ZH, GONG X D, LI SH X, *et al.*. Study on classical designing theory of miller type ultra high speed photographic system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(6):739-742. (in Chinese)
- [4] 李剑, 畅里华, 谭显祥. FJZ-1000 型超高速转镜分幅相机及应用[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6):574-576.  
LI J, CHANG L H, TAN X X. Model 1000 ultra-high speed rotating mirror framing camera and applications[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005, 25 (6):574-576. (in Chinese)
- [5] 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.  
TAN X X. The uncertainty analysis of the measurement results of high speed rotating mirror streak camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31 (11): 1387-1390. (in Chinese)
- [6] 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.  
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):76-79. (in Chinese)
- [7] 赵剑衡, 谭显祥, 孙承纬, 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.  
ZHAO J H, TAN X X, SUN CH W, *et al.*. Investigations of failure waves in K9 glass using shadowgraph [J]. *Explosion and Shockwaves*, 2001, 21(2):150-156. (in Chinese)
- [8] 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.  
CHANG L H, TAN X X, WANG W, *et al.*. Schlieren techniques in experiments of shock wave and detonation physics[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(12):58-61. (in Chinese)
- [9] MILLER C D. Half-million stationary images per second with refocused resolving beam[J]. *SMPE*, 1949, 43:479.
- [10] 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.  
LI D X. *Collection of Translated Papers on High Speed Photography (Principle of Rotating Mirror Scanning)*[M]. Beijing: Science Press, 1965: 126-156. (in Chinese)
- [11] 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.  
LI J ZH, SUN F SH. Dynamic property of rotating mirrors of high intensity aluminium alloy for ultra high speed photography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29 (5): 636-639. (in Chinese)
- [12] 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.

- HUANG H B, LI J ZH, SUN F SH, *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. (in Chinese)
- [13] LI J ZH. Possibility of simultaneously attaining the curve without out of focus and with constant writing speed[J]. *SPIE*, 1982, 348: 471-474.
- [14] LI J ZH, HUANG J H, TIAN J, *et al.*. Advanced designing theory of recording surface of rotating mirror streak cameras[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(8): 1033-1035.
- [15] 许家隆. 转镜式高速摄影[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 139-142.
- XU J L. *High Speed Rotating Mirror Camera* [M]. Beijing: Science Press, 1985: 139-142. (in Chinese)
- [16] 朗见林. 转镜分幅相机代替圆参数的综合设计[C]. 第四届全国高速摄影和光子学学术会议论文汇编: 天津, 1985.
- LANG J L. Comprehensive design of substitution circular for rotating mirror framing camera[C]. *Proc. of the 4th NCHSPP*: Tianjin, 1985. (in Chinese)

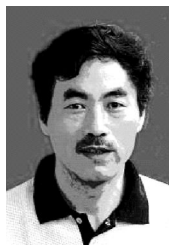
## 作者简介:



李 剑(1976—),男,河南新乡人,硕士,工程师,1999年于长春光学精密机械学院获得学士学位,2005年于四川大学获得硕士学位,主要从事高速摄影及光电测试技术方面的研究。E-mail: lijiana@sohu.com



汪 伟(1974—),男,四川德阳人,高级工程师,1998年于西安工业学院获得学士学位,主要从事超高速摄影技术、光学超高速摄影设备研制以及爆轰测试方面的研究。E-mail: wangyyue@tom.com



尚长水(1958—),男,河北南贡人,技师,2004年毕业于中国工程物理研究院工学院,主要从事高速摄影技术的研究。E-mail: shangchangshui@sohu.com