

文章编号 1004-924X(2012)05-0927-07

磁驱动飞片的超高速激光阴影扫描摄影技术

汪 伟*, 王桂吉, 罗振雄, 莫建军, 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: 针对磁驱动飞片的物理过程, 设计了显微装置和激光阴影照明装置。结合超高速转镜式扫描相机, 利用串联式光电开关避免相机像面重复曝光, 有效地解决了飞片被碰撞过程中严重影响测试结果的自发强光现象, 获得了磁驱动加载下飞片运动过程清晰的一维扫描试验图像。图像分析数据表明, 在充电电压为 60~64 kV 时, 可将尺寸为 8 mm×6 mm×0.7/0.9 mm 的 Ly12 铝飞片发射至 9~14 km/s 的超高速, 且飞片运动速度与充电电压和飞片厚度有关。该项工作为磁驱动飞片运动过程的研究提供了一种重要的测试手段, 其测试方法也适用于其它产生强烈杂光的高速碰撞的测试研究。

关键词: 高速显微摄影; 阴影扫描摄影; 激光照明; 磁驱动; 高速飞片

中图分类号: TB872 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122005.0927

Ultra-high speed laser shadow streak photography for flyer plates driven by magnetic fields

WANG Wei*, WANG Gui-ji, LUO Zhen-xiong, MO Jian-jun, SHANG Chang-shui

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

* Corresponding author, E-mail: wangyye@tom.com

Abstract: According to the physical process of flyer plates driven by magnetic fields, an ultra-high speed photographic system including an ultra-high speed rotating mirror streak camera, a micrographic lens suitable for the optical system of the camera and a continuous laser source was developed. An electric-optic switch in series was used to avoid the repetitious exposure on imaging plate of the camera, by which the intense light produced in the course of collision was bated and 1D clear-cut streak images of flyer plates driven by an electric gun were obtained firstly at home. Experimental results show that Ly12 flyer plates with the size of 8 mm×6 mm×0.7/0.9 mm can be accelerated in 9-14 km/s within 1.8 μs when the charge voltages of flyer plate reach in 60-64 kV. The results demonstrate that the charged voltages and the thicknesses of flyer plates have great effect on the movement velocities of the flyer plates. The present work will be helpful for researching flyer velocity and can provide important data for the development of electric guns.

Key words: ultra-high speed microphotography; shadow streak photography; laser illumination; magnetic field driving; high speed flyer plate

收稿日期: 2011-11-15; 修订日期: 2011-12-29.

基金项目: 国防科技工业局空间碎片专题资助项目 (No. 08201)

1 引言

磁驱动高速飞片试验技术是近些年发展起来的一种新型试验技术,已应用于材料的冲击压缩特性研究。其工作的基本原理为当电脉冲功率装置短路放电产生的强电流流经由两个相近的平行导电平面构成的回路时,电流产生的磁场与电流本身相互作用产生洛伦茨力(即磁压力),在这两个平面电极板之间起排斥作用,即对电极板材料施加压力脉冲。放电电流的时间波形通常接近于正弦形状,由于磁压力与电流密度的平方成正比,在一定时段中磁压力随时间近似线性平滑地上升。也就是说放电刚开始,从两个导电表面各向其材板的厚度方向作用有平滑上升的压力波,在这样的加载作用下材料经历了等熵程度很高的压缩过程。一旦此压力波到达电极板的另一外表面时(自由面或窗口界面),反射稀疏波,致使该自由表面朝外加速运动,其速度历程提供了加载中材料状态的信息。当磁力作用过程较长时,该板材就成为飞片整体飞出^[1-6]。

电炮装置驱动飞片能够达到的运动速度是电炮装置的关键技术指标之一,因此,飞片速度测量是需要解决的首要问题。目前,国内外应用任意反射表面干涉测速系统(VISAR)和 Fabry-Perot 激光干涉仪已经可以较好地解决电炮加载下小尺寸飞片实时速度测量问题^[7-10]。用超高速摄影方

法对飞片的运动过程进行研究,可以得到更为直观的试验结果。1998年,中国工程物理研究院流体物理研究所的张希林、彭德志等人利用阴影扫描摄影技术测量了电爆炸箔驱动飞片连续速度^[10],但该测试装置很难应用在碰撞过程中自发光很强以及小尺寸飞片的试验测量中。2008年,中国工程物理研究院流体物理研究所的畅里华等人^[12]利用靶板自发光和激光阴影分幅摄影技术获得了电炮加载下多层铝板形成碎片云的变化图像,试验靶板分为2层和3层,靶板之间的间隔为15~30 mm,板厚为1~5 mm,板大小为200 mm×200 mm,但在自发光拍摄情况下,很难清楚观察靶板本身的运动情况。本项工作针对磁驱动下小尺寸飞片(边长小于10 mm,厚度小于1 mm)的自发光很强等特点,设计与超高速转镜式扫描相机光学系统匹配的显微物镜,采用激光阴影照明技术,同时利用串联式光电开关避免相机像面重复曝光,利用转向机构使被摄小尺寸飞片的运动方向与相机狭缝方向一致,获得了电炮加载下飞片运动过程清晰的一维扫描试验图像。

2 测试方法及装置

2.1 试验总体布局

试验总体布局示意图如图1所示。本次光学高速摄影测试试验采用10 W连续激光器作为阴

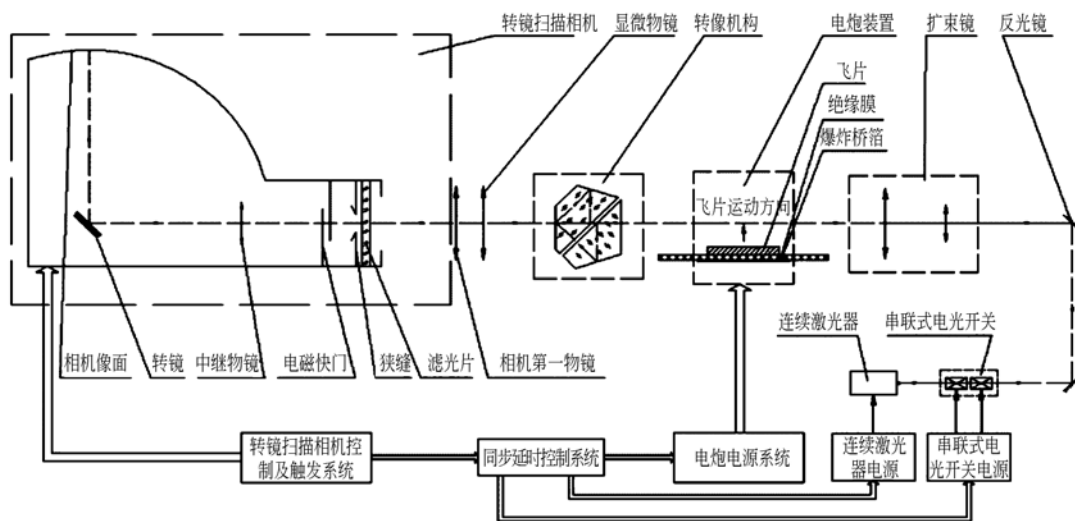


图1 试验总体布局示意图

Fig. 1 Experimental set-up for flyer driven by electric gun

影照明光源,显微物镜与转镜扫描相机光学系统匹配后将小尺寸飞片放大在相机像面上。试验中由于小尺寸飞片的运动速度方向与相机狭缝方向垂直,因此在测试光路中加入由两件 Pechan 棱镜组成的转向机构,这样就能够保证飞片的运动速度方向与狭缝一致,达到测试要求。历次的电炮加载试验表明,绝缘薄膜与飞片碰撞过程中会产生强光,为不影响或大幅减小强光对测试结果的干扰,在测试光路中加入了与激光波长一致的窄带滤光片。在相机正常曝光的前提下,窄带滤光片的半宽越小越好,这样不但可使大部分照明光线进入最终像面,而且最大程度地抑制了碰撞过程中的自发强光,对于提高测试结果的清晰度和对比度有着重要的作用。

由于照明所用光源为连续激光,激光器不受外触发控制,因此正式动态试验前保持连续激光器的常开状态。在正确设置同步控制系统各子系统的工作时序后,以转镜扫描相机控制及触发系统的输出信号作为基准信号触发同步控制系统,同步控制系统按照各设置的延迟时间依次触发串联式电光开关和电炮电源系统,从而完成一次完整的动态电炮加载试验。

2.2 超高速转镜式扫描相机

超高速转镜式扫描相机是一种光学机械超高速摄影设备,在相机光学系统中,用狭缝切割相机第一物镜所成的像,此像再经后续光学系统和高速转镜,在相机像面上获得被摄物一维空间随时间变化的图像。本试验中使用 SJZ-15 型超高速转镜式扫描相机,在使用钢转镜时,转镜转速为 15×10^4 r/min,扫描速度为 $7.5 \text{ mm}/\mu\text{s}$,动态摄影分辨率只有 15 mm^{-1} ,已达实际应用极限,如果钢转镜转速再提高,反而会降低相机的时间分辨率,加大测量误差。如需要更高转速的转镜,则必须使用高速旋转时变形很小的铍制或类铍制转镜。

2.3 显微物镜

飞片尺寸约为 8 mm (长) $\times 6 \text{ mm}$ (宽),厚度分为 0.7 mm 和 0.9 mm 两种,按照磁驱动装置的设计,飞片的运动距离约为 10 mm 。常规的转镜式扫描相机最近的摄影距离为 3 m ,按此计算(相机第一物镜焦距为 300 mm ,相机内部放大倍率为 2 倍),相机光学系统总的放大倍率为 0.2 倍,即飞片在相机最终像面的大小为 1.6 mm

(长) $\times 0.14 \text{ mm}$ (厚),运动距离为 2 mm 。显然,要精确分析这么小的物像是不现实的。为了清晰分辨被摄物体的细节,减小测量误差,将飞片放大是非常必要的。因此,显微光学系统和高速相机的光学系统必须很好的匹配,整个光学系统的像差应该很好的平衡。在设计显微系统时,为适应实验布局空间的需要,还要求显微物镜有较大的物方截距,以利于镜头的防护。

本次试验中采用自主研发的焦距为 300 mm 的显微物镜,物方截距为 350 mm ,与第一物镜焦距为 300 mm 的转镜扫描相机相配合,总放大倍率为 2 倍,相机空间方向可拍摄视场为 12 mm ,结果满足飞片运动距离为 10 mm 的要求。

2.4 转向机构

转向机构的作用是使飞片的运动方向与扫描相机的狭缝方向一致,以研究飞片中心部位的运动过程。本转向机构采用两件 Pechan 棱镜,其转向原理如图 2 所示。由 Pechan 棱镜组成的转向机构置于汇聚光路中,两块棱镜间的空气间隙为 $0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$,入射和出射光轴重合。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 $O'\text{-}X'Y'Z'$ 成为左手坐标系。保持 $O\text{-}XYZ$ 不动,棱镜组绕 XX' 轴向某方向转动,则像平面 $O'\text{-}X'Y'Z'$ 也沿同一方向转动,从而实现了转向的要求^[13]。

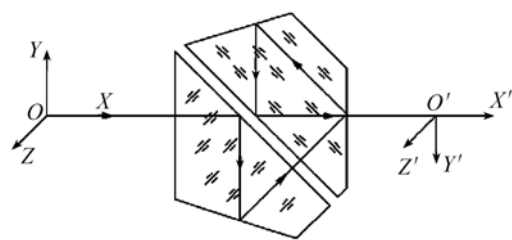


图2 Pechan 棱镜转向机构示意图

Fig. 2 Principle of Pechan prisms

2.5 串联式电光开关

由于照明光源采用的是连续激光,在动态试验前后时间段内激光器均处于出光状态,因此在转镜相机工作过程中,当转镜转速达到预定转速并且转镜处于某一位置时,需要一个快门开启光路;当相机完成拍摄任务时,需要一个快门砸断光路,以避免像面的重复曝光。传统的方法是用快开快门开启光路,用爆炸快门砸断光路。但由于电炮在工作前存储非常高的电能,在快开快门提

前于电炮工作时,其开启动作在快开快门周围会产生很强的电磁干扰,容易引起电炮电源系统的误触发。基于此,提出采用串联式电光开关来解决此问题。串联式电光开关以连续激光为光源,采用两个外腔调制型电光开关,将该连续激光调制成单脉冲光源,其中两个外腔调制型电光开关采用串联式工作,两者之间的检偏方向相互垂直,由第一级电光开关实现激光脉冲的极速开启,第二级电光开关实现激光脉冲的快速关闭,通过同步控制系统对两个电光开关的动作时间进行控制,从而实现光脉冲宽度的大范围可调,试验研究已经获得了时间为 40~400 μs,波长为 532 nm 的激光脉冲^[14]。本次试验相机的记录时间长度为 34 μs,在同步控制系统设置两路电光开关的动作时间在 34~400 μs(转镜转速为 15×10⁴ r/min 旋转周期时间为 500 μs),就完全能够满足本次试验的需要。

2.6 拍摄时序

为确保拍摄到飞片的运动过程,正确的时序甚为关键。首先要实现相机与电光开关的同步,通过调整相机转镜部件上的传感器角度,让电光开关适当提前开启(如提前 10 μs),开启与关闭的信号间隔设置为 100 μs。相机与飞片的同步可在试验前用高压火花代替,通过人眼观察相机像面上是否有火花扫描像。各子系统时序设置如图 3 所示。

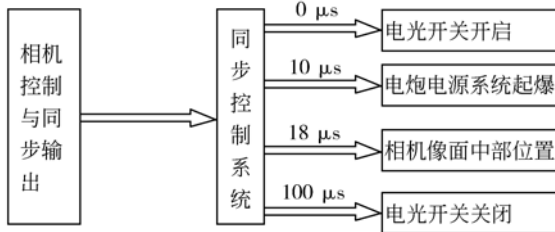


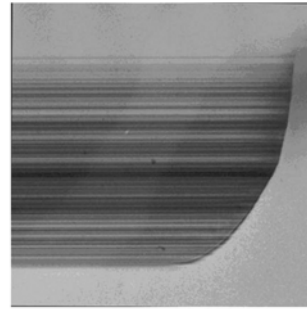
图 3 时序设置

Fig. 3 Scheduling of experiment

3 试验及数据分析

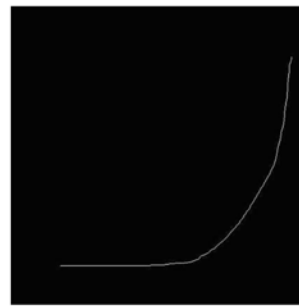
在系统调试过程中,由于激光的准直性非常好,导致其形成的被摄物阴影像的清晰程度不易辨别,此时需要用普通光源照明进行调像,在相机像面上获得清晰的像。试验条件如下:转镜扫描相机扫描速度为 7.5 mm/μs,狭缝宽度为 0.05

mm,时间分辨率优于 7 ns,成像系统总放大倍率为 2 倍,物方视场为 12 mm。获得的典型试验结果如图 4 (a)所示,从图 4 原始图像可以看到,图像曝光适当,边界非常清晰。图 4 (b)是采用灰度处理技术后提取的图像边缘。



(a)原始扫描图像

(a)Original streak image



(b)边缘处理

(b)Edge extraction result

图 4 试验原始图像及边缘处理

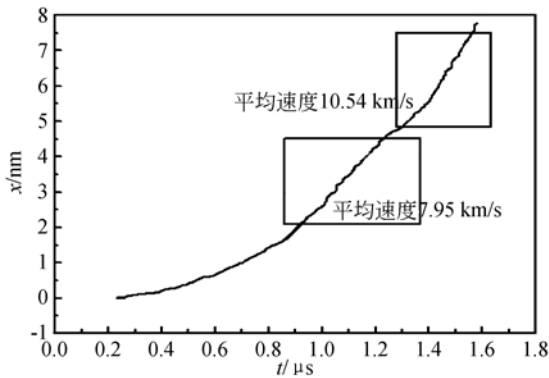
Fig. 4 Original image and its edge extraction result

在磁驱动装置及飞片参数不同的条件下,进行了 4 发试验,均获得了与图 4(a)类似的清晰图像,经灰度技术处理,得到的试验处理结果如图 5 及表 1 所示。

表 1 飞片速度实验条件与结果

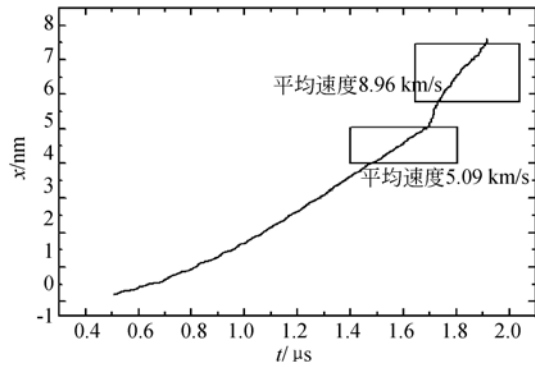
Tab. 1 Different conditions of flyer experiment and their results

实验序号	飞片形状-厚度 /mm×mm×mm	充电电压 /kV	平均速度 /(km·s ⁻¹)
20100818-2	平面 8×6×0.7	60	10.54
20100818-3	平面 8×6×0.7	64	13.87
20100820-1	平面 8×6×0.7	60	10.87
20100820-3	平面 8×6×0.9	60	8.96



(a) 充电电压为 60 kV,平面铝飞片尺寸为 8 mm×6 mm×0.7 mm

(a) In charge voltage of 60 kV and Ly12 flyer plate size of 8 mm×6 mm×0.7 mm

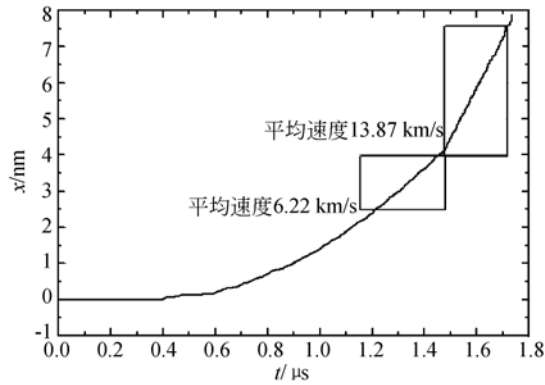


(d) 充电电压为 60 kV,平面铝飞片尺寸为 8 mm×6 mm×0.9 mm

(d) In charge voltage of 60 kV and Ly12 flyer plate size of 8 mm×6 mm×0.9 mm

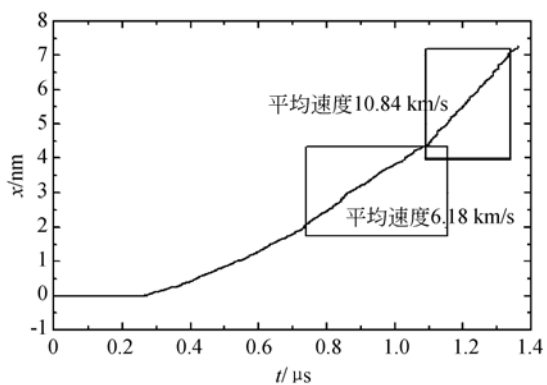
图 5 不同实验条件下飞片运动距离随时间变化的曲线

Fig. 5 Flyer movement distances versus time in different conditions



(b) 充电电压为 64 kV,平面铝飞片尺寸为 8 mm×6 mm×0.7 mm

(b) In charge voltage of 64 kV and Ly12 flyer plate size of 8 mm×6 mm×0.7 mm



(c) 充电电压为 60 kV,平面铝飞片尺寸为 8 mm×6 mm×0.7 mm

(c) In charge voltage of 60 kV and Ly12 flyer plate size of 8 mm×6 mm×0.7 mm

4 结 论

本文采用 532 nm、10 W 的连续激光阴影照明、显微高速扫描摄影技术对磁驱动加载下的小尺寸飞片速度进行了测量,底片曝光适当,试验获得了清晰的图像。利用超高速激光显微阴影扫描摄影技术获得的不同条件下 4 次试验结果表明,在 60~64 kV 充电电压下,当飞片尺寸为 8 mm×6 mm×0.7 mm 时,其平均速度达 10.54~13.87 km/s;当飞片尺寸为 8 mm×6 mm×0.9 mm 时,其平均速度为 8.96 km/s。可见,充电电压和飞片的厚度对飞片的运动速度有重要的影响。

从图 4 的原始图像可以看出,记录到的飞片运动过程在扫描方向上偏短,在动态试验时,转镜的转速应该更高一些(如使用 30×10^4 r/min 的铍或类铍转镜,此时相机像面上的扫描速度可达 15 mm/ μ s),这样更利于飞片运动过程细节的研究,使得测试结果更加准确。实验结果的原始图像上出现明暗相间的扫描条纹,这是激光散斑造成的。由于对激光散斑进行均匀化处理会极大减弱激光的利用能量,无法满足激光功率的要求,因此本轮试验中未处理激光光斑。在今后类似的激光照明阴影拍摄试验中,应使用更大功率的连续激光或高能量脉冲激光(ns 量级),并对激光光斑进行均匀化处理。

参考文献:

- [1] 王桂吉, 孙承伟, 蒋吉昊, 等. 磁驱动金属飞片速度理论近似解析[J]. 高压物理学报, 2008, 22(2): 137-141.
WANG G J, SUN CH W, JIANG J H, *et al.*. Approximately theoretical resolution of the velocity of the metallic flyer plates driven by magnetic field[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2008, 22(2): 137-141. (in Chinese)
- [2] 谭迎新, 张景林, 王桂吉. 电爆炸导体驱动飞片起爆技术研究[J]. 兵工学报, 2003(2): 253-256.
TAN Y X, ZHANG J L, WANG G J. A study on the explosion initiation by electrically exploded conductor driving a small flyer[J]. *Acta Armamentar*, 2003(2): 253-256. (in Chinese)
- [3] KNUDSON M D, HANSON D L. Principal hughoniot, reverberating wave, and mechanical reshock measurements of liquid deuterium to 400 GPa using plate impact techniques [J]. *Phys. Rev. B*, 2004, 69: 144209-144217.
- [4] ROTHMAN S D, PARKER K, ROBINSON C. Measurement of a release adiabat from ~ 8 mbar in lead using magnetically driven flyer impact [J]. *Phys. Plasmas*, 2004, 11(12): 5620-5625.
- [5] LEE R S, OSHER J E, CHAU H H, *et al.*. 1 MJ electric gun facility at LLNL[C]. *Proceeding of the 6th symposium on electromagnetic launch technology*, 1992.
- [6] KNUDSON M D, HANSON D L. Use of a reverberation technique to infer the density compression of shocked liquid deuterium to 75 GPa [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90(3): 035505-035511.
- [7] SCHMIDT S C, SEITZ W L, WACHERLE J. An empirical model to compute the velocity history of flyers driven by electrically exploding foils [R]. 1977: AD2A277726-AD2A277735.
- [8] 袁世伟. 电爆炸箔起爆系统小型化研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2001.
YUAN SH W. *Miniaturization of electric exploding foil system*[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2001. (in Chinese)
- [9] 耿春余. 电爆炸箔加速塑料飞片速度分析[J]. 含能材料, 1995, 3(2): 37-42.
GENG CH Y. Velocity analysis of a plastic flyer accelerated by electrically exploded metal foil [J]. *Energetic Materials*, 1995, 3(2): 37-42. (in Chinese)
- [10] 耿春余. 一种简易测量小飞片速度的方法[J]. 科技学报, 1984(1): 34-37.
GENG CH Y. A simple method of measuring the velocity of the flyer with small size[J]. *Journal of Science and Technology*, 1984(1): 34-37. (in Chinese)
- [11] 张希林, 彭德志, 王治平. 测量电爆炸箔驱动飞片连续速度的阴影扫描光学法[C]. 爆轰研究论文集. 绵阳: 中国工程物理研究院流体物理研究所, 1998, 3: 350-355.
ZHANG X L, PENG D ZH, WANG ZH P. A method of shadow scanning optics for measuring velocity of the flyer driven by metallic foil electrical explosion[C]. *Sym. of Detonation Study. Mianyang: Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineer Physics*, 1998, 3: 350-355. (in Chinese)
- [12] 畅里华, 汪伟, 尚长水, 等. 电炮加载下靶板的高速摄影技术研究[J]. 应用光学, 29(1): 27-30. (in Chinese)
CHANG L H, WANG W, SHANG CH SH, *et al.*. High-speed photography for electrical explosive loaded multi-layer target [J]. *Journal of Applied Optics*, 29(1): 27-30. (in Chinese)
- [13] 谭显祥. 高速光学摄影测试技术[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
Tan X X. *Test Technique for Optical High Speed Photography*[M]. Beijing: Science Press, 1992. (in Chinese)
- [14] 彭其先, 蒙建华, 刘俊, 等. 串联式电光开关实现光脉冲宽度大范围可调[J]. 光子学报, 38(11): 2767-2770.
PENG Q X, MENG J H, LIU J, *et al.*. Electro-optic switch in series for widely adjustable laser pulse width[J]. *Acta Photonica Sinica*, 38(11): 2767-2770. (in Chinese)

作者简介:



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



莫建军(1981—),男,湖南绥宁人,助理研究员,2003年于四川大学获得学士学位,2006年于中国工程物理研究院获得硕士学位,主要从事状态方程及材料动力学方面的研究。E-mail: mojj132@126.com



王桂吉(1977—),男,江西吉安人,博士,副研究员,2007年于中国工程物理研究院获得博士学位,主要从事电磁加载技术及材料动力学行为研究。E-mail: wangguiji@126.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



罗振雄(1978—),男,湖北天门人,助理研究员,2000年于电子科技大学获得学士学位,2004年于中国工程物理研究院获得硕士学位,主要从事光电子技术 and 图像处理等领域的研究。E-mail: luozhenxiong@gmail.com

● 下期预告

基于小发散角的投影式集成成像 三维显示再现深度的拓展技术

张 雷,杨 勇,赵 星,方志良,袁小聪

(南开大学 现代光学研究所 光学信息技术科学教育部重点实验室,天津 300071)

集成成像作为一种新型的裸眼三维显示技术具有连续视场角和无需辅助器件的优点,受到三维再现像的再现深度的限制,集成成像裸眼三维显示技术尚无法实现大规模应用。本文提出了一种基于小发散角的投影式集成成像三维再现深度的拓展方法。该方法利用投影式集成成像显示系统和一个辅助透镜来控制元素图像阵列中各像素点的发散角度,利用小发散角度实现了再现深度的拓展。相比于传统的多中心平面拓展技术,该方法具有系统结果简单,扩展效率高,对显示器件要求较低的优点。光学实验结果显示,当元素图像阵列中各像素点的发散角为 1.79° 时,集成成像三维再现深度是原来的6.4倍,相比于传统的多中心平面扩展技术实现的4倍再现深度有着60%的提升。为提高集成成像三维再现像的品质提供了一种行之有效的解决方法。