

# 动态白光数字散斑计量术\*

亓东平\*\* 程传福 滕树云 刘德丽

(山东师范大学物理系 济南 250014)

**提要** 提出了动态白光数字散斑计量术,并研制了相应的实验测量系统。在系统启动脉冲的触发下,动态白光数字散斑计量系统中物体动态加载、脉冲白光光源照明、数字散斑图像采集等过程依次完成。该系统可通过延时调节,对可重复动态过程的位移演化进行全过程测量。

**关键词** 白光数字散斑,动态变形,频率域数字相关

## 1 引 言

早期的动态激光散斑干涉计量术<sup>[1,2]</sup>以全息干版为介质记录动态散斑场,通过光学逐点或全场分析法来获得物体的位移信息。1995 年以来,彭翔等<sup>[3]</sup>和张东升、佟景伟等<sup>[4]</sup>利用 CCD 靶面对光生电荷包的短暂保留性能,来捕获物体动态变形的瞬态数字散斑图像,实现了动态激光数字散斑干涉计量术。利用这一技术进行动态计量时,须记录物体散射光与参考光相干涉而形成的散斑场,因而实验光路较为复杂,并且该计量术需要以脉冲激光器作为光源,实验设备昂贵,防震要求高,不便于现场测量。本文提出以脉冲白光光源代替脉冲激光光源并用数字相关方法进行信息提取的动态白光数字散斑计量术,研制了动态白光数字散斑计量系统。首先通过改装电子闪光灯获得短脉冲白光光源,并设计了计量系统工作原理以同步捕获物体动态变形过程中的瞬态数字散斑图像;其次,提出了频率域数字散斑相关方法,该方法无需通过条纹分析而直接从数字散斑图中提取物体动态位移信息。

## 2 动态白光数字散斑计量的实验系统及其工作原理

在动态数字散斑计量术中,为了分辨物体动态变形并同时保证 CCD 有足够的感光能量,实验要求脉冲光源闪光时间足够短且要有足够的发光强度。照相用电子闪光灯为脉冲氙灯,是目前除激光外发光功率最高的人造光源。因此,本文选用并改装银燕电子闪光灯作为动态白光数字散斑计量系统的脉冲白光光源。

### 2.1 电子闪光灯的改装

自动调光闪光灯是可根据外界环境光照及被摄物远近而控制闪光能量的闪光灯。下面,

\* 国家自然科学基金(69978012)资助项目。

\*\* 现通讯地址:山东工业大学数理系,济南 250061。

收稿日期:1999-01-21;收到修改稿日期:1999-05-11

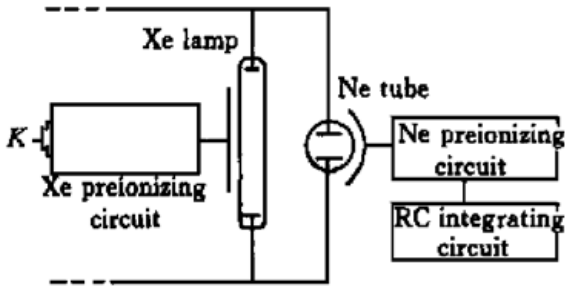


图 1 银燕-32TFZ 闪光灯简图

Fig. 1 Diagram of Yinyar 32TFZ

我们以银燕 BY-32TFZ 型闪光灯为例说明闪光灯调光原理,其结构简图如图 1 所示。闪光灯充电完毕后,按动闪光按钮 K 则氙灯预电离电路产生数千伏高压脉冲使氙灯电离,放电回路导通,氙灯开始闪光。RC 积分调光电路中的光敏三极管接收到被摄物反射回来的光线后电阻减小而使 RC 电路导通充电,积分电容两端的电压升高,当积分电压升高到  $V_0$  (约为 10 V) 时,氖管预电离电路导通,旁路氖管电离,其所在放电电路开始导通放电,从而使氙灯灯管的放电电压降低,氙灯停止闪光。

由上述调光过程得知,闪光灯闪光脉宽取决于 RC 积分调光电路积分升压至  $V_0$  所需要的时间。由于原积分电容积分时间长,因而闪光灯闪光脉宽较大。用存储示波器测得该闪光灯最短闪光时间为 900  $\mu\text{s}$ ,这难以对物体动态变形过程进行时间分辨。并且,闪光灯 RC 积分调光电路中的光敏三极管接收到的光能量容易受外界环境光照的影响,因而引起闪光脉宽不稳定。此外,原闪光灯是机械触发闪光的,若直接以它作为脉冲光源则在整个动态白光数字散斑计量系统中,物体动态加载、闪光灯闪光、数字散斑图像采集等过程难以保持同步。

基于上述原因,对原闪光灯进行了如图 2 虚线框内所示的改装。(1) 用闪光触发脉冲产生电路代替原来的机械闪光按钮。该电路由集成芯片 74LS123 中的单稳态触发器和一个开关三极管构成,它可在脉冲触发下使氙灯预电离电路导通,从而使闪光灯开始闪光。(2) 原闪光灯的 RC 积分调光电路用闪光截止脉冲产生电路来代替。该电路首先产生一脉冲来触发一个光电耦合器,在光电耦合器输出端输出的幅值为 10 V 的脉冲电压使氖管预电离电路导通,从而使闪光灯停止闪光。经上述改装后,闪光灯闪光脉宽稳定,它由延时器 2 所设置的延时和闪光截止脉冲产生电路的内禀延时决定,但后者很小,可忽略不计。经测定,改装后的闪光灯的闪光脉宽在 50  $\mu\text{s}$ ~ 2 ms 之间连续可调。虽然对物体动态变形过程进行时间分辨要求闪光脉宽越小越好,但由于受 CCD 对感光能量的要求和电路内禀延时的限制,闪光脉宽不能做得很小。一般说来,只要闪光脉宽与物体动态变形的演化过程相比比较小,则 CCD 在闪光持续时间内所记录的散斑光场可看作是一瞬态散斑场。将所摄得的瞬态数字散斑图与物体变形前拍摄的静态散斑图相比较,可获得物体在该时刻的动态位移信息。

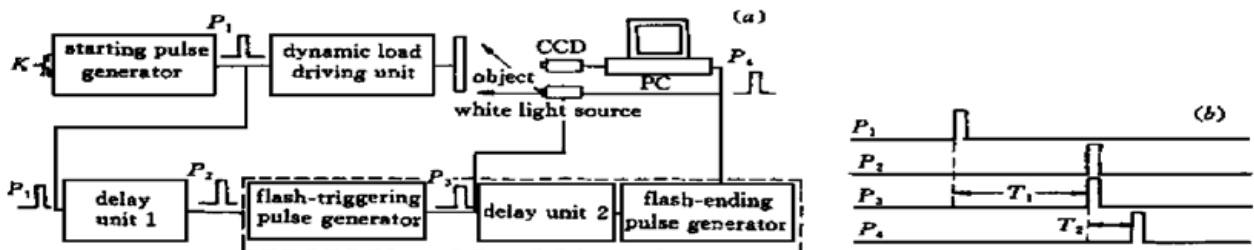


图 2 动态白光数字散斑计量工作原理

Fig. 2 Demonstration diagram of dynamic white light digital speckle photography

### 2.2 系统的设计及其工作原理

为了能够在给试件施加动态载荷后的某一时刻实现对物体照明以及使 CCD 同步获取该时刻的瞬态数字散斑图,设计了动态白光数字散斑计量系统,其原理框图如图 2 (a) 所示,图

2(b) 给出了该系统电路的脉冲工作时序。框图中的系统启动脉冲产生电路是由两个 RS 反相器组成的无弹跳开关以及一单稳态触发器组成。按动触发按钮  $K$ , 该脉冲产生电路发出系统启动脉冲  $P_1$ 。 $P_1$  分成两路: 一路触发试件动态加载驱动电路, 使试件开始产生动态位移; 另一路接至延时器 1, 该延时器为门积分器 Boxcar 的延时器, 其延时范围在 30 ns~ 100 ms 之间连续可调。经延时器 1 产生的脉冲  $P_2$  作为闪光触发脉冲产生电路的触发脉冲, 触发该电路产生闪光触发脉冲  $P_3$ 。脉冲  $P_3$  又分成两路: 一路控制闪光灯开始闪光, 闪光灯开始闪光的时刻如时序图中  $T_1$  所示, 它是由延时器 1 所设置延时决定的; 另一路接至延时器 2, 经延时器 2 延时产生的脉冲触发闪光截止脉冲产生电路产生脉冲  $P_4$ , 它控制闪光灯停止闪光。闪光截止脉冲  $P_4$  同时作为图像卡的外部触发信号, 控制图像卡在闪光结束后立即读取 CCD 探测器记录到的物体像面散斑图像。上述延时器及脉冲发生器输出的各脉冲均为三极管-三极管逻辑电平(TTL)脉冲, 宽度为 30  $\mu$ s。

由上述系统工作原理得知, 在系统启动脉冲的触发下, 动态白光数字散斑计量系统中物体动态加载、脉冲白光光源照明、数字散斑图像采集等过程可依次完成。

### 3 图像采集及信息提取

#### 3.1 图像采集

本文用 MPE1000 黑白图像卡采集 CCD 记录到的散斑图像。图像卡在外触发模式下可由外部触发信号控制采集图像, 并通过总线控制技术将散斑图像直接传送至计算机扩展内存。我们用 C 语言编写了图像采集程序。该程序首先将扩展内存初始化为图像卡的帧存体, 并使图像卡处于清零等待状态。当图像卡受到外部触发信号触发后即实时采集图像至扩展内存中指定的帧存体, 在将所采集图像存为裸图像格式(RAW)图像文件后关闭帧存体, 释放扩展内存。

#### 3.2 信息提取

采用频率域数字相关方法从物体变形前的静态散斑图和物体动态变形过程中的瞬态散斑图中提取物体的位移信息。这一方法的原理和步骤如下。

在物体变形前拍摄的静态数字散斑图  $A_0(x, y)$  中, 以位置  $(x, y)$  为中心选定一小块散斑区域, 记为  $w(x, y)$ , 数字散斑图其余部分记为  $w_-(x, y)$ , 则有

$$A_0(x, y) = w(x, y) + w_-(x, y)$$

在物体变形后的瞬态数字散斑图中, 与变形前所选定小散斑区域  $w(x, y)$  相应的区域的位移可视为常数, 记作  $(u_0, v_0)$ ; 与静态数字散斑图中  $w_-(x, y)$  相对应的散斑区域发生的位移记为  $(u', v')$ , 它是  $x, y$  的函数; 则物体变形后瞬态数字散斑图可以写成

$$A_{in}(x, y) = w(x + u_0, y + v_0) + w_-(x + u', y + v')$$

对静态数字散斑图中的小散斑区域  $w(x, y)$  进行傅里叶变换, 并取复共轭得

$$W^*(u, v) = \text{FT}^*[w(x, y)] = |W(u, v)| \exp[-j\varphi(u, v)]$$

对变形后的瞬态散斑图  $A_{in}(x, y)$  进行傅里叶变换, 得

$$A_{f0}(u, v) = \text{FT}[w(x + u_0, y + v_0) + w_-(x + u', y + v')] = \\ W(u, v) \exp[j2\pi(uu_0 + vv_0)] + \text{FT}[w_-(x + u', y + v')]$$

以  $W^*(u, v)$  对  $A_{f0}(u, v)$  进行滤波, 即用  $W^*(u, v)$  乘  $A_{f0}(u, v)$ , 得频率域数字散斑场

$$A_{ff}(u, v) = W^*(u, v) W(u, v) \exp[j2\pi(uu_0 + vv_0)] + W^*(u, v) \text{FT}[w_-(x + u', y + v')]$$

对  $A_f(u, v)$  做傅里叶变换, 得到输出散斑场

$A_{out}(x, y) = FT\{W^*(u, v)W(u, v)\exp[j2\pi(uu_0 + vv_0)]\} + FT\{W^*(u, v)FT[w_-(x + u', y + v')]\}$   
 根据卷积定理, 用 \* 表示卷积运算, 上式右端第二项可写成  $w(x, y) * w_-(-x - u', -y - v')$ , 它是一卷积模糊项。由自相关定理和卷积定理, 上式右端的第一项可写为

$$F\{W^*(u, v)W(u, v)\exp[j2\pi(uu_0 + vv_0)]\} = [w(x, y) * w(-x, -y)] * \delta(x - u_0, y - v_0) = C_{ww}(x - u_0, y - v_0)$$

式中  $C_{ww}(x, y)$  是  $w(x, y)$  的自相关运算, 该项代表输出散斑场中一个相关亮点。由此可见, 在输出散斑场  $A_{out}(x, y)$  中与静态数字散斑图中选定散斑区域  $w(x, y)$  相匹配处是一亮点, 其余部分是卷积模糊的。根据静态散斑图中  $w(x, y)$  的中心像素坐标和相关输出散斑场中相关亮点的像素坐标可确定  $w(x, y)$  的位移  $(u_0, v_0)$ 。依次在静态散斑图中不同位置处选定散斑区域  $w(x, y)$ , 分别对瞬态散斑图进行上述频率域相关滤波, 可获得整幅散斑图的位移分布。

用 C 语言编写了频率域数字散斑相关处理程序, 该程序可按上述原理步骤对静态散斑图和瞬态散斑图进行相关运算, 并可直接输出所选定不同散斑区域  $w(x, y)$  中心的像素坐标和相应的相关亮点的像素坐标。

图 3(a), (b) 分别给出了实验中实际拍摄的静态白光数字散斑图和瞬态白光数字散斑图。(b) 与 (a) 相比发生一微小转动。从图 3(a) 中 (170, 170) 处选取  $20 \times 20$  像素大小的散斑区域, 由其制得滤波器并对图 3(b) 的散斑图进行相关滤波, 得到的输出散斑场如图 (c) 所示。此外, 还用频率域数字散斑相关处理程序对试件平移、拉伸等静态实验的位移进行了提取, 所得到的结果与其他信息提取方法的结果一致。

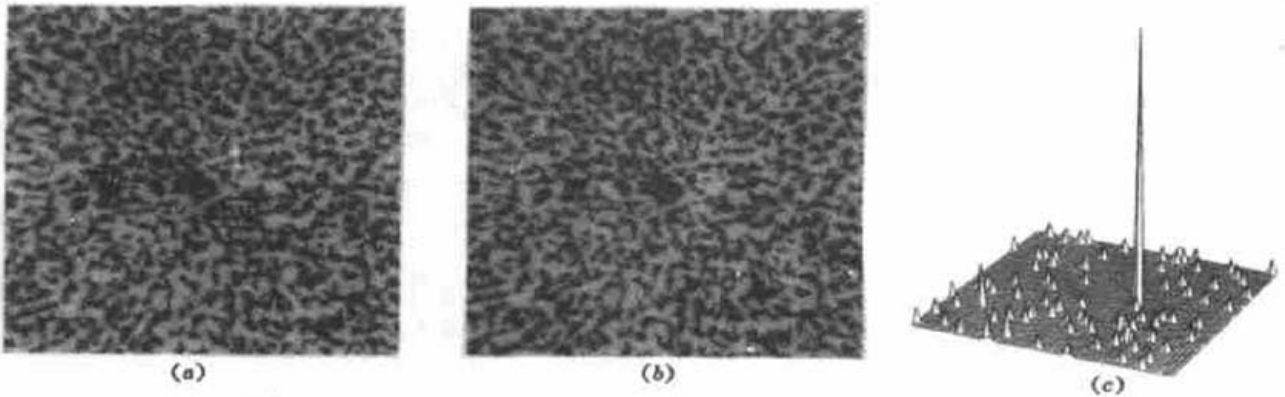


图 3 数字像面白光散斑图及频率域相关滤波输出场

Fig. 3 Digital image white-light specklegrams and output field after correlation filtering in frequency domain

## 4 实验验证

实验中将 CCD 摄像机置于试件正前方, 并使闪光灯以尽可能垂直的方向照明试件。仔细调节 CCD 相机镜头位置, 使 CCD 靶面与试件的像面严格重合, 以获得对比度较好的白光像面散斑。试件为一固定在微机风扇上经斑化处理的平板, 该平板垂直于风扇转轴, 并能随风扇一起转动。

用前述动态白光数字散斑计量系统对微机风扇起动动态过程进行了测试。风扇起动前, 断开系统中的动态加载驱动电路, 拍摄一幅静态数字散斑图。然后接通动态加载驱动电路, 并设定延时器 1 的延时时间  $T_1$ , 按动系统启动按钮, 拍摄风扇起动后  $T_1$  时刻的瞬态数字散斑图。

使风扇复位后, 重新拍摄静态散斑图并改变延时器 1 延时, 拍摄风扇起动后  $T_1'$  的瞬态散斑图。重复上述过程可摄得多幅静态散斑图和风扇起动后不同时刻的瞬态散斑图。拍摄散斑图时, 闪光灯闪光脉宽通过延时器 2 设定为  $50 \mu\text{s}$ 。

利用频率域数字散斑相关处理程序, 从静态数字散斑图和瞬态数字散斑图中提取出风扇起动后不同时刻各点的位移。将这些数据输入绘图软件绘得位移分布如图 4 所示。图 4 (a), (b), (c) 分别为风扇起动后延时  $100 \mu\text{s}$ ,  $200 \mu\text{s}$ ,  $300 \mu\text{s}$  的位移分布图。图中线段的起始点分别为所选定散斑子区的中心位置和相应相关输出亮点的位置, 线段的长度代表相应时刻各点处位移的大小, 图中坐标均以像素为单位, 像素间距大小为  $6.3 \mu\text{m}$ 。可以看出, 图中的位移呈典型的圆盘转动位移分布, 而且随风扇起动后时间的延迟, 位移逐渐增大。这与实际动态位移过程是相符的。我们对这一动态过程进行了大量的实验, 测试结果表明, 本文所建立的实验系统具有很好的可重复性。

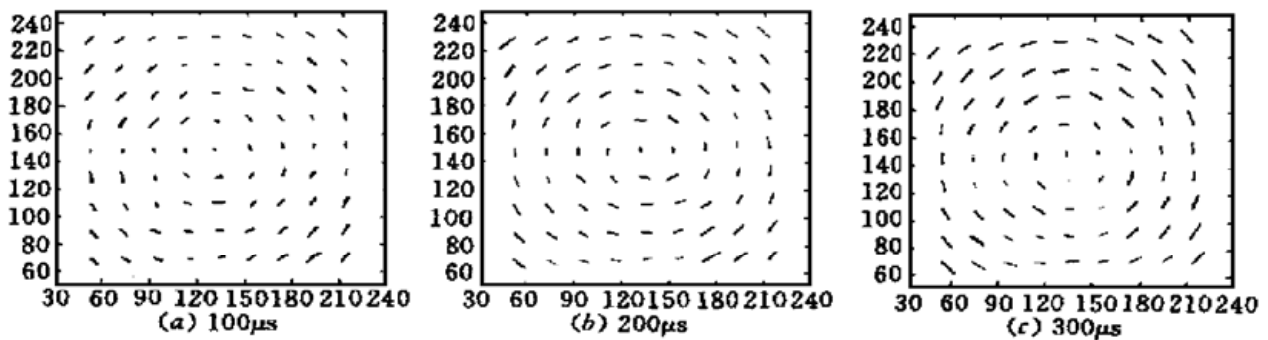


图 4 微机风扇起动动态位移场

Fig. 4 Dynamic displacement fields of a starting PC fan

对于不同动态载荷作用下试件的变形过程, 只要用本文所建立的动态白光数字散斑计量系统的系统启动脉冲触发相应的动态加载驱动装置, 或以这些动态加载驱动装置输出的同步脉冲作为本系统的系统启动脉冲, 则本系统可对这些动态变形过程进行测量。

## 5 结 论

动态白光数字散斑计量系统以改制的普通照相用电子闪光灯为脉冲白光光源, 以现代视频技术和数字图像处理技术为信息记录和提取手段, 因而具有不需避光, 不需防震, 光路简单, 不需要处理底片, 分析处理快速、精确、方便, 适用于现场测量等优点; 通过延时调节, 可对可重复动态过程的位移演化进行全过程测量。

## 参 考 文 献

- 1 Tong Jingwei, Wang Shibin, Li Hongqi. Determination of dynamic response of steel shell using photo-mechanics and finite element methods. *Acta Mechanica Sinica* (力学学报), 1992, **24**(3): 361~ 367 (in Chinese)
- 2 I. W. Tong, Y. An. A study of stress propagation under impact loading using double exposure speckle photography and finite element analysis. *Optics and Lasers in Engineer*, 1990, **12**(1): 35~ 42
- 3 Peng Xiang, Zhu Shaoming, Gao Zhi et al.. Double-pulse digital speckle pattern interferometry. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(9): 847~ 851 (in Chinese)
- 4 Zhang Dongsheng, Tong Jingwei. The measurement of surface deformation under transient loading. Proceedings of the 8th National Conference on Experimental Mechanics, 1995. 502~ 506 (in Chinese)

## Dynamic Digital White-light Speckle Metrology Technique

Qi Dongping Cheng Chuanfu Teng Shuyun Liu Deli

(*Physics Department, Shandong Normal University, Jinan 250014*)

**Abstract** A speckle metrology technique called dynamic white-light digital speckle photography is proposed, and an automatic measurement system of dynamic displacement or strain field is developed. The system procedure is designed so that the flashing illumination, the CCD camera, the grabbing card and the analog-to-digital converter can all work simultaneously. Two specklegrams of the specimen, one before and one after the deformation are captured. The time delay between two exposures is controlled by setting a certain numeral value in the Boxcar and the dynamic displacement in the deformation process of the specimen is recorded in serial specklegrams. The system is tested successfully.

**Key words** digital white-light speckle, dynamic deformation, digital correlation in frequency domain