

# 双脉冲数字散斑干涉系统的实验研究\*

彭翔 朱绍明 高志 姚健铨

(天津大学精密仪器工程系, 天津 300072)

**提要** 研究了一种基于脉冲 Nd·YAG 激光系统的数字散斑干涉技术, 设计并实现了物体与脉冲激光触发以及 CCD 图像获取的同步控制。这种双脉冲数字散斑干涉技术, 可记录亚毫秒时间间隔的物体状态变化并可作定量分析。

**关键词** 脉冲激光, 数字散斑干涉, 条纹自动分析

## 1 引言

脉冲数字散斑干涉技术是定量研究高速动态过程的有力工具<sup>[1~4]</sup>。通过在一定时间间隔内使两幅由双脉冲记录的干涉散斑场相关可以获得被测物体在两次曝光记录之间所发生的状态变化。要使脉冲数字散斑干涉技术能够记录并定量分析高于视频速率(25帧/s)的物体状态变化, 则要求: (1) 运动物体与脉冲激光触发以及 CCD 图像获取的同步控制; (2) 具有相应的条纹自动分析算法。

本文建立了一种基于脉冲 Nd·YAG 激光系统的数字散斑干涉技术, 设计并实现了运动物体与脉冲激光触发以及 CCD 图像采集的同步控制, 使其能够记录双曝光脉冲时间间隔小于 1 ms 的物体动态位移。作者最近提出了一种广义载波条纹的数字解调算法<sup>[5]</sup>, 本文将该算法运用于双脉冲数字散斑干涉系统并对物体瞬态位移进行了检测, 获得了定量分析的结果。

## 2 双曝光数字散斑干涉系统

双曝光数字干涉实验系统如图1所示。激光系统为声光调 Q、腔内倍频 Nd·YAG 脉冲激光。波长为  $0.53 \mu\text{m}$ , 脉宽为 250 ns。为了压缩线宽, 在激光腔内加了法布里-珀罗标准具, 相干长度为 5 cm。激光系统输出的光经小孔光阑  $AP_1$  进行空间滤波后, 在反射镜  $BS_1$  处分成两束分别作为物光和参考光, 二者能量比大约为 9:1。物光经反射镜  $M_1, M_2$  反射和凹透镜  $L_1$  扩束后照明被测物体(被测物为继电器控制的小薄片)。物体通过成像镜头  $L_2$  成像于 CCD 靶面上,  $L_2$  前的小孔光阑  $AP_2$  用来控制散斑尺寸。参考光经反射镜  $M_3$  反射, 凸透镜  $L_3$  和位于  $L_3$  焦点处的针孔空间滤波后, 由分束镜  $BS_2$  反射到 CCD 靶面上。仔细调节光路, 使针孔和小孔光阑  $AP_2$  成共轭点, 以保证物光和参考光有相同曲面的波前。选择适当的光学元件参数, 使物光和参考光在 CCD 靶面上光强近似相等, 以便获得对比度良好的相关条纹。图像接收和处理系统

\* 国家自然科学基金资助项目。

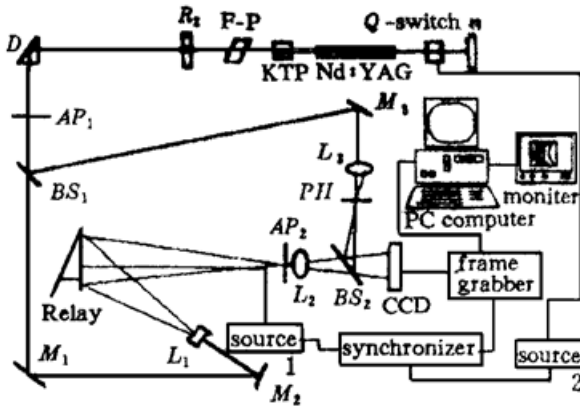


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

由 PIH-703 CCD 摄像机(单个像素尺寸为  $12.7 \times 8.3 \mu\text{m}$ ), CA 5300 图像卡和 Super 286 PC 微机构成。实验中, 成像透镜  $L_2$  焦距为  $75 \text{ mm}$ , 小孔光阑  $AP_2$  直径为  $0.8 \text{ mm}$ , 则 CCD 靶面上散斑平均直径为:

$$d_s = \lambda f / D = 0.53 \times 75 / 0.8 = 49.7 \mu\text{m}$$

它大约为  $4 \times 12.7 \mu\text{m}$ , 即 4 个像素大小。

图 1 中 Source 1 和 Source 2 分别为继电器驱动电源和 Q 开关电源。继电器驱动电源接收到同步单元的触发信号后, 经一定延时(该延时可根据

需要进行调节), 然后给继电器一个瞬时电流, 使继电器吸合, 从而使被测物产生动态位移; 声光 Q 开关电源可使激光系统工作于准连续状态, 脉冲重复频率为  $300 \text{ Hz}$ 。它也可以由外触发信号控制。在本实验中, 它接收到同步单元给出的信号后, 发出调 Q 光脉冲。

### 3 双脉冲散斑图采集的同步控制

#### 3.1 实现采集亚毫秒双曝光图的方法

由 CCD 的工作过程可知<sup>[5]</sup>: 隔列转移型面阵 CCD 的像敏元呈二维排列, 每列像敏元被遮光的读出寄存器及沟阻隔开, 像敏单元与读出寄存器间又有转移控制栅。在光积分期间, 光生电荷包存储在像敏单元的势阱里, 转移栅为低电位, 转移栅下的势垒将像敏单元的势阱与读出寄存器的势阱隔开。当光积分时间结束时, 转移栅上的电位由低变高, 其下形成的势阱将像敏单元的势阱与此刻读出寄存器单元(此刻该单元上的电压为高电平)的势阱沟通, 像敏单元的光生电荷便经过转移栅转移到读出寄存器中。转移过程为并行的, 即各列像敏单元的光生电荷同时转移到对应的读出寄存器中。因此, 转移过程很快(转移时间为微秒量级), 转移控制栅上的电位很快变为低电平。转移过程结束后, 像敏单元与读出寄存器又被隔开。转移到读出寄存器中的光生电荷在读出脉冲的作用下一行行地向水平读出寄存器中转移, 水平读出寄存器快速地将其经输出端输出, 在输出端得到与光学图像对应的一行行视频信号。

根据上述过程, 可以在如下理想情况下采集到时间间隔很短的两幅分离的图像: 第一光脉冲达到后, CCD 立即结束光积分状态, 将该场图像转移到读出寄存器中。然后紧接着接收第二次曝光。此时, 第一幅图在暂存区(读出寄存器)中, 第二幅图在光敏区(像敏单元)。这样, 两幅图便分别处于两场中, 只要将两场分开便可以得到两幅分离的图像。可见, 采集两幅图的最小时间间隔由 CCD 转移时间决定。

#### 3.2 采集运动物体双曝光散斑图的同步控制

同步控制的逻辑关系图和时序关系图分别如图 2, 图 3 所示。其工作过程为: 取出图像卡的场同步信号不断传送给同步单元, 当同步单元接收到物体发出的信号后, 取第一个场信号作为外触发信号传送给图像卡, 同时将该场信号延时  $N - \epsilon$  场作为激光触发信号。另一方面, 图像卡接收到外触发信号之后在内部延时(软件延时, 该延时为场周期  $T$  的整数倍, 即  $NT$ ), 仔细调节内外延时, 使双曝光出现在 CCD 转移信号两边, 从而达到采集目的。

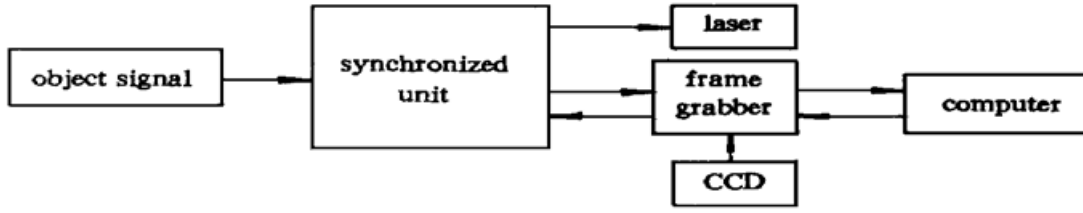


Fig. 2 Logic diagram for recording of two pulses

### 3.3 采集双曝光散斑图的软件控制

该软件首先进行图像卡初始化,并清零。然后等待外触发信号(外触发信号由外部硬件输入,它是从场消隐开始的。而该信号延时后也传送给了激光器。调外部延时,使激光在第  $N$  场正程和  $N + 1$  场正程时出现)的输入。计算机接收到外触发信号后延时  $N$  场(判断  $N - 1$  个场消隐信号通过)。在第  $N$  个场消隐信号到来时打开图像卡帧存体 1 进行采集。在  $N + 1$  个场消隐信号到来时,关闭帧存体 1,同时打开帧存体 2 进行采集。当  $N + 2$  个场消隐信号到来时,关闭帧存体 2。最后,将帧存体 1, 2 存储的图像分别存盘作后续处理。

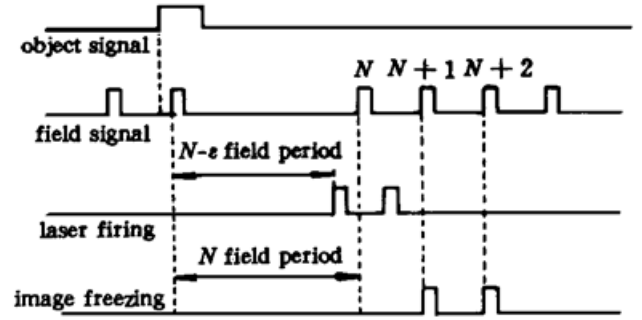


Fig. 3 Time sequence for recording of two pulses

## 4 双脉冲散斑相关条纹自动分析

在物体运动时触发激光进行双曝光。CCD 接收两幅干涉散斑图,并分别存储于图像卡不同的帧存体中。然后经过软件相减便得到相关条纹图。在实行二次曝光之前,将  $M_3$  偏转一个角度  $\theta$ ,使物体状态变化前后产生的干涉合成散斑场引入一个空间载波。其周期为  $P_M = \lambda \sin\theta^{61}$ 。选择适当的  $\theta$  角,使参考光和散斑物光在相邻像素间有一个相移  $\alpha$ (参见文献[4, 6])。若取  $\alpha = 90^\circ$ ,则  $P_M = (360/90) \Delta x = 4\Delta x$ ,  $\Delta x$  为 CCD 相邻像元间距。

物体处于状态 1 时,参考光和物光形成的干涉散斑场强度为

$$SP_1(x, y) = I_{SP_1}(x, y) + I_r(x, y) + 2 \sqrt{I_{SP_1}(x, y)I_r(x, y)} \cos [\varphi(x, y) - \varphi_{P_1}(x, y)] \quad (1)$$

其中,  $\varphi(x, y)$  是参考光波面的相位,  $\varphi_{P_1}$  是与散斑场  $SP_1$  有关的随机相位,它是均匀分布的随机变量。当物体处于状态 2 时,设物体相对于状态 1 位相变化了  $\Delta\varphi(x, y)$ ,则相应的干涉散斑场强度为

$$SP_2(x, y) = I_{SP_2}(x, y) + I_r(x, y) + 2 \sqrt{I_{SP_2}(x, y)I_r(x, y)} \cos\{\varphi(x, y) - [\varphi_{P_2} + \Delta\varphi(x, y)]\} \quad (2)$$

假定双曝光所获得的两幅干涉散斑场相关,则有  $I_{SP_1}(x, y) \approx I_{SP_2}(x, y)$ ,  $\varphi_{P_1}(x, y) \approx \varphi_{P_2}(x, y)$ 。由于物光和参考光统计独立,则散斑相关条纹可由(1)式和(2)式相减并且取模平方再平均得到<sup>71</sup>,即

$$I_0(x, y) = \langle |SP_2(x, y) - SP_1(x, y)|^2 \rangle = T_0(x, y) [1 - \cos\Delta\varphi(x, y)] \quad (3)$$

其中  $T_0(x, y) = 8 \langle I_{SP}(x, y) \rangle I_r(x, y)$  为背景光强。

根据光学广义载波解调的思想<sup>[6]</sup>, 反射镜  $M_3$  的偏转使参考光和散斑物光在 CCD 探测器平面的相邻像素间有一个相移  $\alpha$ 。于是将散斑图  $SP_2$  分别左移和右移一个像素得到  $SP_2(x \pm \Delta x, y)$ , 然后与  $SP_1(x, y)$  相减后求模平方, 然后再求集平均则可获得相移  $\pm \alpha$  的相关条纹图。即

$$I_{\pm\alpha}(x, y) = \langle |SP_2(x \pm \Delta x, y) - SP_1(x, y)|^2 \rangle = I_0(x, y) \{1 - \cos[\Delta\varphi(x, y) \pm \alpha]\} \quad (4)$$

根据(3) 和(4) 式就可以解出与物体变化相应的位相分布  $\Delta\varphi(x, y)$ , 即

$$\Delta\varphi(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{I_{\alpha}(x, y) - I_0(x, y)}{I_{\alpha}(x, y) + I_0(x, y) - 2I_{-\alpha}(x, y)} \tan \frac{\alpha}{2} \right] \quad (5)$$

在实验中, 调节  $M_3$  的偏转角使  $\varphi = 90^\circ$ 。通过调节小孔光阑  $AP_2$  的直径可以控制散斑平均尺寸大小, 从而使其大于或等于干涉合成散斑图的空间载波周期  $P_M$ 。当小孔光阑  $AP_2$  的直径取为  $0.8 \text{ mm}$  时, 散斑平均尺寸为  $49.7 \mu\text{m}$ 。它大约为4个像素的大小(见第二节)。于是移动一个像素相等于干涉合成散斑图错动了  $P_M/4$ , 即  $90^\circ$  相移。同时可见, 移动一个像素后的散斑图与移动前的散斑图仍然相关。根据(5) 式就可获得与物体运动在两次曝光时间间隔内空间状态变化所对应的位相分布。

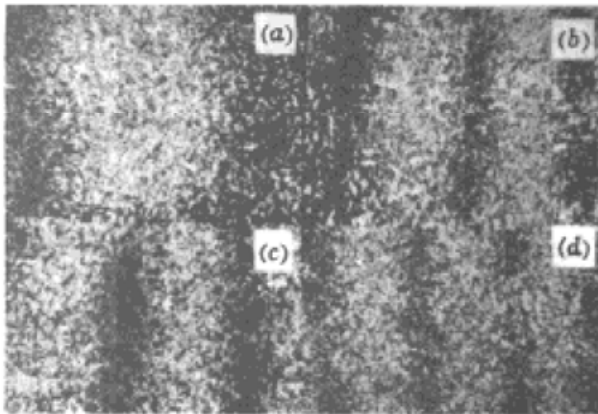


Fig. 4 Correlation fringe patterns from time intervals of  $650 \mu\text{s}$  to  $800 \mu\text{s}$   
(a)  $650 \mu\text{s}$ ; (b)  $700 \mu\text{s}$ ; (c)  $750 \mu\text{s}$ ; (d)  $800 \mu\text{s}$

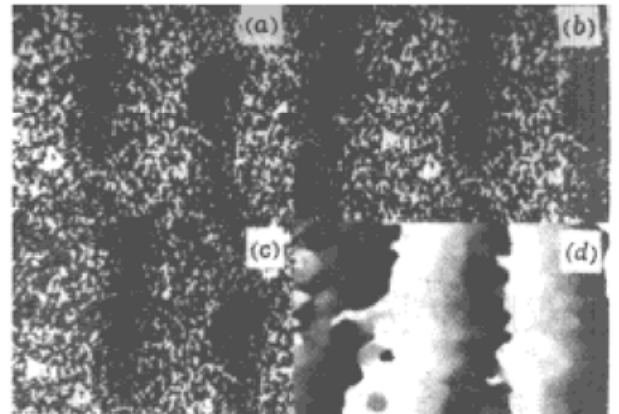


Fig. 5 Results of a quantitative analysis for a time interval of  $700 \mu\text{s}$   
(a) original fringe pattern; (b)  $90^\circ$  phase-shifted fringe pattern; (c)  $-90^\circ$  phase-shifted fringe pattern; (d) wrapped phase map

## 5 实验结果

实验条件如第二节所述, 唯一不同之处是: 此时反射镜  $M_3$  已被偏转了  $\theta$  角, 从而在 CCD 靶面上引入了空间载波相移。被测物体为继电器控制的小薄片。在实验中, 我们研究了继电器加上电流后在时间间隔为  $650 \mu\text{s}$  到  $800 \mu\text{s}$  的物体运动变化情况。由于在采集散斑图时仅取了一场的信息, 所以垂直分辨率下降了一半, 为了增加信息量, 我们在两幅散斑图相减前进行了插值。模平方及求平均运算得到相关条纹图。图 4(a) ~ (d) 分别显示了脉冲间隔为  $650 \mu\text{s}$  至  $800 \mu\text{s}$  的相关条纹图。取时间间隔为  $700 \mu\text{s}$  的双曝光相关条纹作定量分析。结果如图 5(a) ~ (d) 所示。图 5 中(a), (b), (c) 分别是相移为  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $-90^\circ$  的散斑相关条纹图。图 5(d) 是根据(5) 式计算出来的折叠位相分布 (wrapped phase map)。对图 5(d) 进行位相复原运算 (phase unwrapping), 得到灰度编码的连续相位分布图, 如图 6 所示。在图 6 中,  $z$  方向坐标描述了用灰

度编码表示的位相分布,  $x, y$  方向坐标分别描述空间坐标  $(x, y)$  离散化之后的像素表示  $(m, n)$ ,  $m, n = 0, 1, \dots, 64$ 。值得注意的是, 为了三维绘图方便起见, 我们已把尺寸为  $256 \times 256$  的图像压缩成  $64 \times 64$  的图像。由图 6 可见, 灰度编码的位相分布最大值为 100, 最小值为 20。因此, 由于物体运动状态变化引入最大位相差的灰度编码为 80。由图 5 可见, 折叠位相图中有三个跃变, 因此可知图 6 表示的最大位相差为  $6\pi$ 。由于这个位相差值在  $20 \sim 100$  范围内用灰度编码, 由此每一个灰度级表示  $6\pi/80 = 0.24 \text{ rad}$ 。

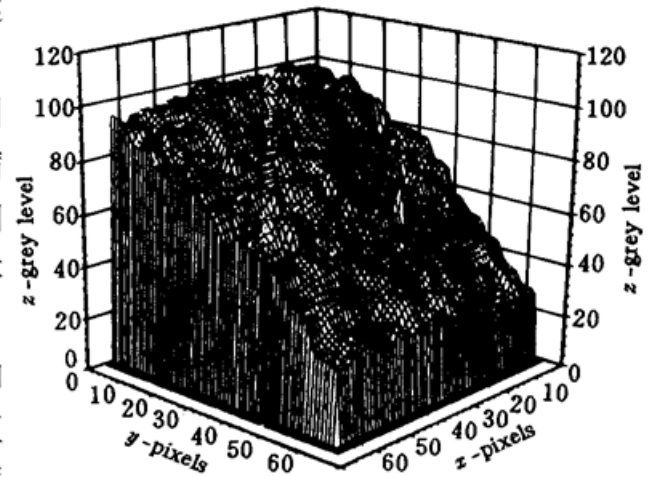


Fig. 6 3-D plot of an unwrapped phase map

致谢 作者感谢与 Hans Tiziani 教授和 G. Pedrini 博士的有益讨论。

### 参 考 文 献

- 1 F. F. Santoyo, M. C. Shellabear, J. R. Tyrer. Whole field in-plane vibration analysis using pulsed phase-stepped ESPI. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(7) ·717~ 721
- 2 R. Spooren. Double-pulse subtraction TV holography. *Opt. Eng.*, 1992, **31**(5) ·1000~ 1007
- 3 D. Colucci, P. Wizinowich. Millisecond phase acquisition at video rate. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(28) ·5919 ~ 5925
- 4 G. Pedrini, Y. L. Zou, H. J. Tiziani. Double pulse-electronic speckle interferometry. *J. Mod. Opt.*, 1993, **40**(1) ·89~ 96
- 5 D. L. Giblom. Special scanning modes in CCD cameras. *SPIE*, 1989, **1194** ·52~ 61
- 6 彭翔, 高志, 朱绍明等. 光学广义载波条纹图的计算机辅助分析. *中国激光*, 1995, **A22**(7) ·541~ 545
- 7 R. Jones, E. Wykes. *Holographic and speckle interferometry*. 1989 Cambridge University Press, 2nd, ed. ch. 3

## Double-pulse Digital Speckle Pattern Interferometry

Peng Xiang Zhu Shaoming Gao Zhi Yao Jianqua

(Department of Precision Instrumentation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract** A digital speckle pattern interferometry (DSPI) based on a double-pulsed Nd ·YAG laser system has been approached. The synchronized control of transient displacement of a test object and pulse trigger of the laser as well as the image capture with a frame grabber has been realized. It is shown that the dynamic displacement within 1ms may be recorded and analysed quantitatively with the double-pulse DSPI technique.

**Key words** pulsed laser, digital speckle pattern interferometry, automatic fringe analysis