

用实时全息术研究低速变化过程 的一种简易系统*

王正荣 熊秉衡 张永安 俞昕
(云南工业大学激光所, 昆明 650051)

摘 要 研制了一种用于研究物体低速变化过程的简易系统。它由带有液门原位化学处理的实时全息干涉装置和具有连拍功能的相机以及一台氩氟激光器组成, 是一种简易实用的“低速, 实时全息干涉摄影系统”。用它记录了火箭推进剂样品在室温, 常压下的燃烧过程; 100 瓦普通白炽灯逐级加压的点燃过程。对实时全息图的记录和处理采用了一种可获得高反衬度的新技术。拍摄的成功率高, 干涉条纹的反衬度好。它为研究物体的低速变化过程提供了一种有力的手段。

关键词 实时全息干涉系统, 具有连拍功能的相机。

1 引 言

用实时全息干涉计量术配合高速摄影机进行记录是研究高速变化过程的一个重要方法。当前人们关注的热点是如何进一步提高它的速度和分辨率以便进一步记录超高速的变化过程。这种装置需要高速相机(幅频每秒数千帧至数万帧乃至每秒一, 二十万帧)和较强功率的激光光源(如氩离子激光器, 红宝石激光器)。装置起来十分昂贵, 一般实验室难于推广使用。然而, 在许多情况下, 物体的变化过程并不很快。用幅频每秒数帧, 曝光时间数百分之一秒至千分之一秒也就足够用了。本文的实时全息干涉摄影系统就是为研究这种低速变化现象而研制的。它由一支约三十毫瓦的氩氟激光器和一套带有原位化学处理的液门在内的实时全息干涉装置以及具有连拍功能的 35 mm 相机所组成。用它记录了火箭推进剂样品在室温, 常压下的燃烧过程, 100 瓦普通白炽灯逐级加压的点燃过程。对实时全息图的记录和处理采用了一种可获得高反衬度的新技术。拍摄的成功率高, 干涉条纹的反衬度好。它为研究物体的低速变化过程提供了一种有力的手段。

2 装 置

2.1 光源和记录材料

采用北京大学物理系生产的 HN-120 型氩氟激光器, 输出功率约 30 mW, 相干长度约为 20 cm。记录材料采用天津感光胶片厂生产的 I 型全息干版。

* 云南省科委应用基础研究基金资助项目。

收稿日期: 1996 年 3 月 13 日

2.2 液门原位化学处理装置

液门原位化学处理装置所能拍摄的实时全息图的最大有效面积为 $80 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。容量为 800 cm^3 。全息干版装在一个金属夹持板上, 然后插入其内, 并固定在容器之中部。液门的右上方有一注入液体的漏斗, 水或化学试剂可从这里依次注入。右下方有一排放口。液体可通过一根橡皮管排放出来。底部用磁性座锁定在铸铁全息台上。

2.3 具有连拍功能的相机

曾先后用过两种型号的 35 mm 相机效果都很好。一种是 NIKON F801S 35 mm 相机, 幅频为 3.3 frame/s。一种是 Canon EOS-5QD 35 mm 相机。具有 5 frame/s 和 3 frame/s 两种幅频的连拍功能。曝光时间最短可到 $1 \times 10^{-3} \text{ s}$ 。

2.4 光路系统布局

图 1 是拍摄火箭推进剂样品燃烧过程的光路系统示意图。图中 M_1 , M_2 为反射镜, BS 为分束镜, SF 为空间滤波器, CL 为准直镜, SL 为扩束镜, G 为毛玻璃, LG 为液门原位化学处理装置。全息干版装在其内。C 为具有连拍功能的相机, Q 为火箭推进剂样品。全息图曝光时 Q 并不放入光路, 待拍摄并处理好实时全息图后再放入光路, 并点燃观察。同时用相机对准燃烧场通过实时全息图拍摄记录。当然, 这样的燃烧过程, 参考光、物光均可采用平行光^[1]。不过, 为了在小口径光学元件的条件下获得更大的视场, 对物光只扩束, 而不准直。并在扩束后的光路中加进了一块大毛玻璃。图 2 是拍摄 100 W 白炽灯逐级加压点燃过程的光路系统示意图。其基本光路布局与图 1 相似, 只是白炽灯放在毛玻璃与全息干版之间。并在全息图曝光之前已摆入光路。

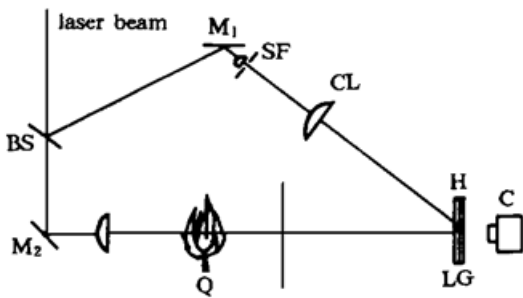


Fig. 1 Schematic diagram of the optical setup for recording the combustion process of a solid rocket propellant sample

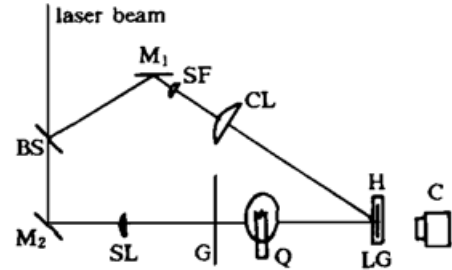


Fig. 2 Schematic diagram of the optical setup for recording the lighting process of an incandescent lamp

3 获得高反衬度干涉条纹的实时全息图的条件

设物光和参考光分别表示为

$$O(x) = O_0(x) \exp [j \varphi_0(x)], \quad R(x) = R_0 \exp [j \varphi_R(x)] \quad (1)$$

若曝光时间为 t , 记录干版上的曝光量可表示为

$$\begin{aligned} E(X) &= [O_0^2 + R_0^2 + 2O_0 R_0 \cos(\varphi_0(x) - \varphi_R(x))] t \\ &= (O_0^2 + R_0^2) \{1 + [2O_0 R_0 / (O_0^2 + R_0^2)] \cos(\varphi_0 - \varphi_R)\} t \\ &= I_0 t \{1 + [2B^2 / (1 + B)] \cos(\varphi_0 - \varphi_R)\} \\ &= E_0 [1 + V \cos(\varphi_0 - \varphi_R)] \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $I_0 = O_0^2 + R_0^2$ 为平均光强, $E_0 = I_0 t$ 为平均曝光量, $B = R_0^2 / O_0^2$ 为光束比, V 为条纹可见度。

$$V = 2B^2 / (1 + B) \quad (3)$$

位相型, 薄全息图的复振幅透射率可表示为^[2]

$$T_a(x) = b_t \exp [j \varphi(x)] \quad (4)$$

在透射率的相位 $\varphi(x)$ 与曝光量 $E(x)$ 成正比的情况下

$$\begin{aligned} T_a(x) &= b_t \exp(j \gamma E_0) \exp [j(\gamma E_0 V) \cos(\varphi_0 - \varphi_R)] \\ &= K \exp [j \alpha \cos \theta] \end{aligned} \quad (5)$$

$$K = b_t \exp(j \gamma E_0), \quad \alpha = \gamma E_0 V, \quad \theta = \varphi_0 - \varphi_R \quad (6)$$

式中 γ 是曝光量常数。应用贝塞尔函数展开式并只考虑零级和一级衍射, 则有

$$\begin{aligned} T_a(x) &= K \{J_0(\alpha) + 2jJ_1(\alpha) \cos \theta\} \\ &= K \{J_0(\alpha) + J_1(\alpha) \exp [j(\theta + \pi/2)] + J_1(\alpha) \exp [-j(\theta - \pi/2)]\} \end{aligned} \quad (7)$$

应用实时全息法检测物体的状态变化时, 若参考光, 物光仍由(1)式表达, 而物光只发生位相上的变化。变化的物光可表示为^[3]

$$O'(x) = O_0(x) \exp \{j[\varphi_0(x) + \Delta \varphi_0(x)]\} \quad (8)$$

当以原参考光和变化了的物光 $O'(x)$ 照明全息图时, 只考虑沿物光方向传播的两项衍射光, 即

$$U_R = KJ_1(\alpha) R_0 \exp \{j[\varphi_0(x) + (\pi/2)]\} \quad (9)$$

$$U_0 = KJ_0(\alpha) O_0 \exp \{j[\varphi_0(x) + \Delta \varphi_0(x)]\} \quad (10)$$

它们迭加后的光强分布为

$$\Phi = [KJ_0(\alpha)]^2 \{(AR_0)^2 + O_0^2 + 2AR_0O_0 \cos [\Delta \varphi_0(x) - (\pi/2)]\} \quad (11)$$

式中

$$A = J_1(\alpha) / J_0(\alpha) \quad (12)$$

条纹反衬度为

$$V = (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}) / (\Phi_{\max} + \Phi_{\min}) = 2AR_0O_0 / [O_0^2 + (AR_0)^2] = 2AB^2 / [1 + (AB^2)^2] \quad (13)$$

对(13)式求导可得其极值条件

$$AB^2 = 1 \quad (14)$$

即

$$B = 1/A^2 = [J_0(\alpha) / J_1(\alpha)]^2 \quad (15)$$

时, 反衬度有最大值 $V = V_{\max} = 1$ 。

为了拍摄具有最佳反衬度的实时全息图。应根据所选取的光束比和表 1 估算出满足(15)式的最佳位相调制度 α_{opt} 。先试拍第一张实时全息图 H_1 。设曝光时间为 t_1 , 处理后测出其所达到的位相调制度。设为 α_1 。根据文献[1]的公式

$$t_{\text{opt}} = (\alpha_{\text{opt}} / \alpha_1) t_1 \quad (16)$$

计算出 α_{opt} 所对应的最佳拍摄时间 t_{opt} 。在拍摄第二张实时全息图时, 除曝光时间改变以外, 保持所有其他实验条件不变。即可获得最佳反衬度的实时全息图。

Table 1. Relationship of $J_1^2(\alpha)$, $[J_0(\alpha)/J_1(\alpha)]^2$ and phase modulation α

α	$J_1^2(\alpha)$	$J_0^2(\alpha)/J_1^2(\alpha)$	α	$J_1^2(\alpha)$	$J_0^2(\alpha)/J_1^2(\alpha)$
0.1	.0025	398.0	1.3	.2725	1.411
0.2	.0099	99.00	1.4	.2933	1.096
0.3	.0220	43.48	1.5	.3113	.8416
0.4	.0384	24.01	1.6	.3248	.6385
0.5	.0587	15.00	1.7	.3339	.4745
0.6	.0822	10.12	1.8	.3381	.3419
0.7	.1082	7.174	1.9	.3378	.2350
0.8	.1360	5.266	2.0	.3326	.1506
0.9	.1648	3.958	2.1	.3230	.0859
1.0	.1937	3.023	2.2	.3091	.03943
1.1	.2218	2.335	2.3	.2915	.01057
1.2	.2483	1.814	2.4	.2706	.00002

4 实 验

4.1 拍摄火箭推进剂样品燃烧过程

由于物光光路上有尺寸为 $200\text{ mm} \times 255\text{ mm}$ 的毛玻璃。它距全息干版为 300 mm 。为了有较高的衍射效率,应该使参物光比大些。本文选取的光束比为 $B = 6.07$ 。这是平均值。为得到最佳的条纹反衬度,应该使全息图的位相调制度达到 $\alpha = 0.76$ 。以任意的曝光时间 2.9 s 拍摄第一张实时全息图 H_1 ,测得其所达到的位相调制度为 $\alpha_1 = 1.17$ 。于是,由(16)式可计算出最佳感光时间为 1.9 s 。利用此数据曝光,其他实验条件保持不变。经原位显影,定影,漂白后所获第二张实时全息图有极好的条纹反衬度。图 3 是用火柴点燃火箭推进剂样品,直至样品烧尽的燃烧过程的系列图片记录。样品的尺寸为 $1\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 。照片的拍摄速度是 5 frame/s ,每幅曝光时间为 $1/250\text{ s}$,整个过程持续时间为 7 s 。全过程记录的照片共 36 张。这里只抽出 12 张示意。相邻照片的时间间隔约为 0.58 s 。从照片上可以看到图象清晰,条纹反衬度好,燃烧过程的许多细节都一一清楚地记录下来。如推进剂表面的演变,燃烧场气流的分布和变化状态等等。



Fig. 3 A series holographic interferograms of the combustion process of a solid rocket propellant sample

4.2 拍摄 100 瓦普通白炽灯逐级加压的点燃过程

这一实验中,被摄物体为白炽灯和毛玻璃背景。毛玻璃尺寸与实验 1 相同。本文选取的光束比为 $B = 8.94$ 。这也是平均值。同样,根据文献[1],为得到最佳的条纹反衬度,应该使全息图的位相调制度达到 $\alpha = 0.64$ 。根据所用干版特性和实验条件。曝光时间应取 1.6 s 。经

原位化学处理后所获实时全息图同样得到了极好的条纹反衬度。图 4 是 100 瓦白炽灯逐级加压点燃过程的系列全息干涉图。从照片上可以看到在逐级加压过程中白炽灯内反映温度场的干涉条纹的变化。



Fig. 4 A series holographic interferograms of the lighting process of an incandescent lamp by increasing the voltage of the lamp step by step

结 论 实验表明, 上述这种实时全息干涉摄影系统适用于研究低速变化过程。它所需要的各种组件较易获得, 在多数实验室中都可推广使用。加之采用可获得高反衬度实时全息图的技术, 拍摄的成功率高, 干涉条纹的反衬度好。它对研究物体的低速变化过程提供了一个很好的辅助手段。在本实验中所拍摄的都是无限宽条纹状态下的干涉图。为作进一步的定量计算, 还需拍摄成有限宽条纹状态下的实时全息图。有关这方面的工作, 将另文讨论。

本工作得到了龙翔同志的热情帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 熊秉衡, 王正荣, 张永安等, 可获得高反衬度干涉条纹的实时全息记录方法. 光子学报, 1996, 25(8): 707~ 712
- [2] H. M. 史密斯, 全息记录材料. 北京, 科学出版社, 1984: 12
- [3] 于美文编著, 光学全息及信息处理. 北京, 国防出版社, 1984: 176

A Simple System for Studing Low-Speed Phenomena with Real-Time Holographic Interferometry

Wang Zhengrong Xiong Bingheng Zhang Yongan Yu Xin
(Laser Institute, Yunnan Polytechnic University, Kunming 650051)

(Received 13 March 1996)

Abstract A simple system for studing low-speed phenomena by using holographic interferometry has been developed in our lab. It can be used to analyze the real-time interference fringes with the combination of a real-time holographic interferometry and a camera with continue shooting function and a He-Ne laser. A series holographic interferograms of combustion process of an solid rocket propellant sample and a series holographic interferograms of lighting an incandescent lamp by increasing the voltage of the lamp step by step were recorded successively by using this system. The higher rate of the success for the holographic recording and the higher contrast for the interference fringes have been obtained by this system. It can be used as a powerful approach for studing low-speed phnomena function.

Key words real-time holographic interferometry, camera with continue shooting function.