

实时TV光电子全息散斑干涉仪 及其在折射率场中的应用

束继祖

王树元

(中国科学院力学研究所, 100080)

(北京大学无线电系)

提要 介绍了一种不需PC微机支持图象卡的实时TV光电子全息散斑干涉仪,成功地应用于折射率流场的显示定量测量,并给出了实验结果。

关键词 全息散斑干涉 电子散斑干涉 实时图象处理 流场显示

A Real-Time TV Photoelectronic Holographic Speckle Interferometer and Applied to the Measurement of Refractive Index Field

Shu Ji-zu

(Institute of Mechanics, Chinese Academic of Sciences)

Wang Shu yuan

(Department of Radio Engineering, University of Peking)

Abstract A real-time TV holographic speckle interferometer which without PC-computer to support the video digital board is introduced. The instrument was applied to visualize and for quantitative measurement of the refractive index field (laminar flow field around a candle flame) successfully. The experimental results are presented.

Key words Holographic speckle interferometry, Electronic speckle interferometry, Real-time imaging processing, Flow Visualization.

TV光电子全息散斑干涉术是近年来迅速发展起来的新型的非接触无损检测技术^[1],它与全息干涉具有同等的测量精度和灵敏度,自动化程度高,速度快,效率高。可以说,TV光电子全息散斑干涉术是自全息术发展以来,最有希望应用于工业生产中理想的无损检测手段和近代力学实验研究的测量技术。

在目前的技术条件下,TV光电子全息散斑干涉仪有两个发展途径。一是采用商品化的图象卡,在PC微机的支持下,配上相应的软件对两种不同力学状态下的两幅散斑干涉图样进行相关处理运算,从而产生反映力学参量的干涉图。利用一般数字图象卡,难以实现实时的效果。近年来发展出了一些高级性能的数字图象卡,在386以上的PC微机支持下,可以达到实

时的效果,这个方案简单,但价格高昂。

另一种技术途径,是采用电子线路,避免软件运行这一环节,对两种不同力学状态下的两幅散斑干涉图,直接进行数字化图象相关处理,直接在显示器上显示出速率为25幅/秒的与力学参量相关的干涉图,实现了实时的效果,特别适用于动态力学实验过程的研究和应用于流体力学中的流动显示。这种方案不需利用PC微机支持图象卡,结构简单,造价低,操作简便,适合于在工业生产上普及推广应用。

本文重点介绍利用第二种技术方案研制成功的一套TV光电子全息散斑干涉系统,我们曾用该系统对固体平板在不同载荷下的变形进行了测量。在本文中将其应用于位相物场的测量

1992年9月1日收稿

作为实验的例子,说明这类干涉仪完可以应用于传热学,燃烧学和流体力学领域中。

基本原理

TV光电子全息散斑干涉术的原理可用象面双曝光全息干涉来叙述,但物光束必须是散斑型光场,而作为参考光束,不论是散斑型或是非散斑型(平面波或球面波)均可采用。物光束(粗糙面上的散斑光场)是由物镜成象在光电子记录器件(如CCD面摄象机)的光敏靶面上的,参考光通过分光镜直接照射在该靶面上与物光束重叠,如同象面全息一样是定域在记录平面上的,这里所产生的干涉图仍是散斑型的光场,但它是经过与参考光束干涉后形成的另一种散斑干涉场,称之为散斑相关图样(Speckle pattern correlation),简称SPC。

从数学表达式上来分析,TV光电子全息散斑干涉术与一般的双曝光全息干涉术一样,在象面上,物体变形前物光的复振幅为: $U_1 = a_0(x, y)\exp[i\Phi_0(x, y)]$,物体变形后物光的复振幅变为: $U_2 = a_0(x, y)\exp[i\Phi_0(x, y) + \Delta\Phi(x, y)]$,参考光的复振幅为: $U_R = a_R(x, y)\exp[i\Phi_R(x, y)]$,这儿 a_0, a_R 和 Φ_0, Φ_R 分别为各自象平面上散斑随机变化的光波振幅和相位。

物体变形前象平面上给定点上的光强为:

$$I_1 = a_0^2 + a_R^2 + 2a_0a_R\{\exp[i(\Phi_0 - \Phi_R)] + \exp[-i(\Phi_0 - \Phi_R)]\} = I_0 + I_R + 2\sqrt{I_0I_R}\cos(\Phi_0 - \Phi_R) \quad (1)$$

物体变形后,象平面上给定点上的光强:

$$I_2 = I_0 + I_R + 2\sqrt{I_0I_R}\cos(\Phi_0 - \Phi_R + \Delta\Phi) \quad (2)$$

物体变形前,所得到的散斑干涉图样 I_1 ,经A/D转换器数字化后储存在数字图象储存器中,物体产生变形时所形成的散斑干涉图样,同样经A/D变换后数字化, I_2 与 I_1 输入数字图象相关处理器中进处理,我们采用相减技术,即

$$I = I_1 - I_2 = 2\sqrt{I_0I_R}[\cos\Psi - \cos(\Psi + \Delta\Phi)] \quad (3)$$

式中 $\Psi = \Phi_0 - \Phi_R$ 。

光电子器件(CCD)的输出信号 V_1 正比于输入图象的光强,其相减的电压信号 V_2 表示为:

$$V_2 = (V_1 - V_2) \propto (I_1 - I_2)$$

$$= 4\sqrt{I_0I_R} \sin(\Psi + \Delta\Phi/2)\sin\Delta\Phi/2 \quad (4)$$

电压信号 V_2 具有正负值,电视监视器将负值信号显示为黑色,监视器上的亮度正比于 $|V_2|$,因而监视器上给定点的亮度为:

$$B = 4K[I_0I_R\sin^2(\Psi + \Delta\Phi/2)\sin^2\Delta\Phi/2]^{1/2} \quad (5)$$

式中 K 是常数,亮度 B 是 $\Delta\Phi$ 的函数:

$$B_{\max} = 2K\sqrt{I_0I_R}; \quad \Delta\Phi = (2n+1)\pi, n=1,2,\dots \quad (6)$$

$$B_{\min} = 0 \quad \Delta\Phi = 2n\pi, n=1,2,\dots$$

上述的干涉条纹图与全息干涉条纹图具有完全相同的物理意义,即表示等位相(或等光程差)的线,TV光电子全息散斑干涉图,是由两幅不同力学状态下的散斑图样,经过电子数字图象处理产生的,而不是如全息干涉那样是再现波前干涉的结果,另外一点不同的是这两种干涉图条纹明暗与位相的关系恰好反转,此外,由于散斑图各点的光强和位相是随机分布的,这给最终所得到的干涉图增加了散斑噪声,干涉图不如全息干涉图清晰。

显然,TV光电子全息散斑干涉术,只不过是记录方式上采用现代化的光电子器件CCD摄象机和数字图象处理技术来获得反映力学参量的干涉图,其光学部份仍然建立在全息术的基础上,所以任何型式的全息光路(双光束干涉)均可采用这种技术^[7],从而实现多种力学量的测量。

实时TV光电子全息散斑干涉系统

我们研制成功的实时TV光电子全息散斑干涉系统共分三个部份,如图1所示,

1.光路系统

我们采用测试位相物场的透射式光路(图1上部所示),光源为输出功率15mW的He-Ne激光器,经分束器B后,物光束由扩束镜 L_e 扩束,经 L_c 形成平行光穿过测试区,在测试区后适当的地方(尽量减少阴影效果)放置了一块毛玻璃GG,它是产生散斑效应的关键元件,带有光栏 D_1 的成象物镜 L_1 ,将投影在毛玻璃上的被测物体,通过部份反射分束镜 B_s 成象在CCD摄象机的光敏靶面上,参考光束经与物光束进行光程匹配后,由扩束镜 L_e 扩束,形成球面参考光波

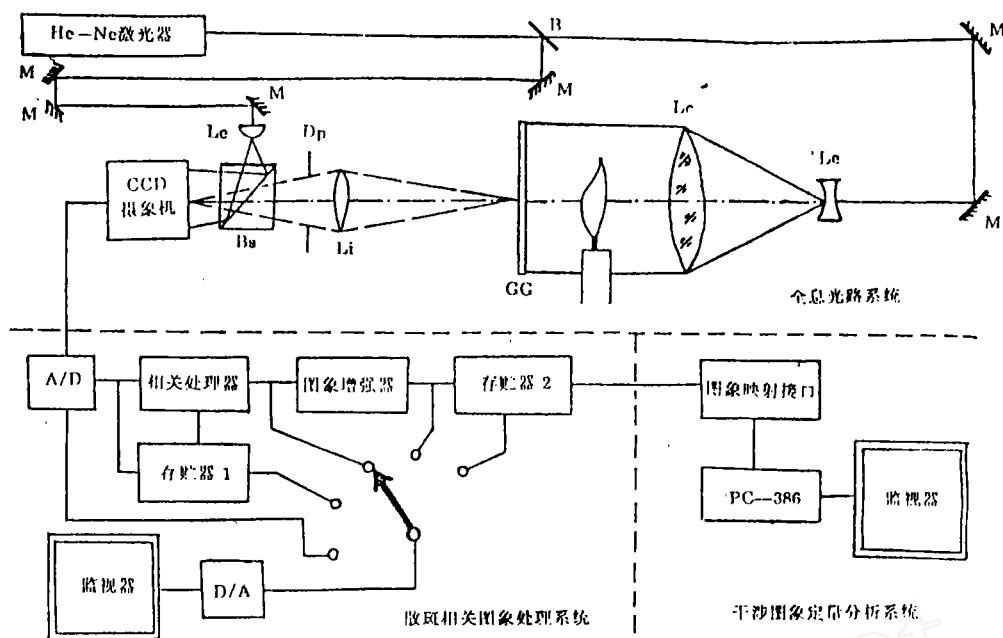


图1 实时TV光电子全息散斑干涉系统

经部份反射分束镜Bs, 投射到CCD光敏靶面上与物光重叠。

在这儿物光束与参考光束几乎是同轴型的, 这主要是由接收器件CCD的解象率所决定。众所周知, 化学银盐感光材料, 目前的解象率可达3000pl/mm以上, 物光束与参考光束的夹角可超达120°以上, 而光导热塑料记录材料的解象率目前为1000pl/mm左右, 因而只能把物光与参考光束的夹角限制在30°的范围之内, 一般512×512象素点的CCD, 每个象元的典型尺寸为10.5μm×13μm, 这就决定了它对图象的分辨率, 但由于CCD器件是建立在电荷积累和转移的原理上的, 如果图象中某个点的尺寸小于10.5μm×13μm, 但只要该点的光强是够能激励起电荷包的产生, 也能给出图象输出信号, 但该点图象将出现几何变形, 即对于小于10.5μm×13μm的点均规一化为10.5μm×13μm的点, 当然所反应点的亮度也被平均地降低。若CCD的可分辨的散斑点平均直径按10μm计算, 相应的空间频率为100mm⁻¹(即100pl/mm), 物光与参考光束的夹角 $\theta \leq 3.62^\circ$ 。所以典型的光路布置如图1所示。

2. 散斑相关图象处理系统

由CCD输出的模拟信号经A/D变换器转为数字信号, 分两路分别送入储存器N0.1和相关处理器。被测物体选用的是蜡烛火焰场, 在未点燃蜡烛之前采下一幅散斑相关图, 储存在储存器N0.1中, 然后点燃蜡烛, CCD摄像机就按每秒24幅图象采集速度将图象与已存入储存器N0.1中的图象, 同时输入相关处理器中进行实时相关处理, 获得反映力学参量(火焰温度)的干涉图, 经条纹增强器或直接输出到D/A变换器, 将数字图象转回到模拟图象, 显示在监视器上。如果在测试过程中, 发现对某幅图象感兴趣, 只要按一下相应的按钮, 可随时将它储存在储存器N0.2中, 并可在任何需要的时刻将它提取出来显在监视器上进行定性分析, 或送入计算系统进行定量化处理。

3. 图象定量分析系统

若要对于干涉图进行定量分析, 就必需将储存在储存器N0.2中的干涉图, 通过图象映射接口输入PC微机, 利用相应的运算软件, 进行量化计算处理。首先是求取干涉条纹的中心线(即干涉条纹细化处理), 再进行量化计算。图2给出

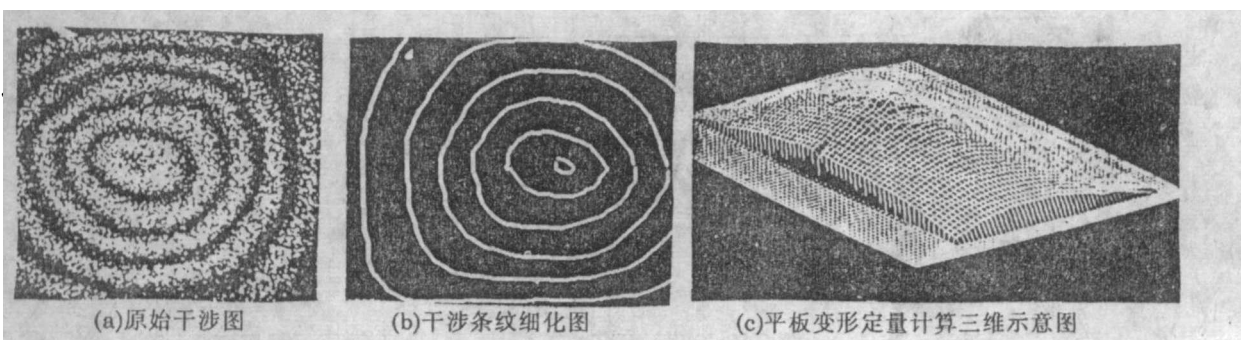


图2 中心加载平板离面变形定量测试过程

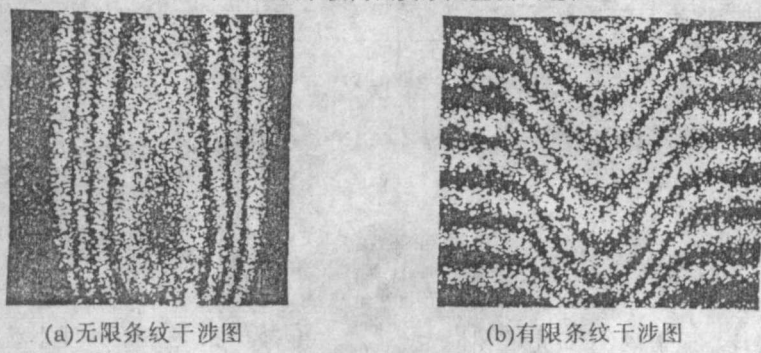


图3 蜡烛火焰(层流)二种干涉图

了一中心加载平板的定量化测量过程,图2(a)为原始干涉图,(b)为干涉条纹中心求解细化图,(c)为三维变形量的示意图。

目前研制成功的这套实时TV光电子全息散斑干涉系统,可以组合成两套不同级别的系统.由全息散斑干涉仪光路系统加上散斑相关图形的电子处理系统,即包括图1左下半的单元(用点划线包围的那些部份,组合成为一套可作元损检测应用于工业生产中定性分析的实时TV光电子全息散斑干涉仪.而图1所表示的整个系统是一套功能齐全满足科学实验研究的定量测量分析系统。

折射率场的实验与结果

TV光电子全息散斑干涉术,很少被应用于流体力学的实验研究中.测量流体介质场(折射率场)的密度和温度分布.我们发现该项技术特别适用于传热、燃烧和超声速风洞中流场的显示和计量.在本文中我们选用了可代表这类流场测量应用的典型代表,热气流(蜡烛火焰)的测量作为一个例证。

实验装置图仍为图1.实验过程简述如下.在未点燃蜡烛前,采一张作为比较的静止气流的散斑相关图,数字化后存放在电子储存器中.然后点燃蜡烛,产生火焰和热气流,CCD相机将燃烧火焰的散斑相关图,连续地按25幅/秒的速率输入图象相关处理器,与静态散斑相关图进行处理,并以同样的速率输出反映力学参量(温度)有关的干涉图,如图3所示.图3(a)为一张无限条纹火焰干涉图.同样可以得到有限条纹干涉图(如图3(b)),只需将参考光或物光束中的一个光学元件转动一个很小的角度,产生载波干涉条纹。

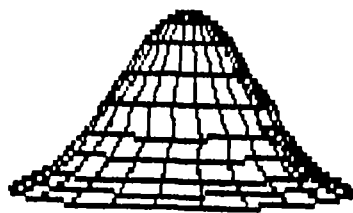


图4 蜡烛火焰计算截面温度分布三维图
我们实验的是一轴对称的火焰场,可以通

过Abel变换将温度场反演计算出来^[1,4],图4为蜡烛火焰某一计算截面上的温度分布准三维图;图5为计算截面温度分布曲线图。

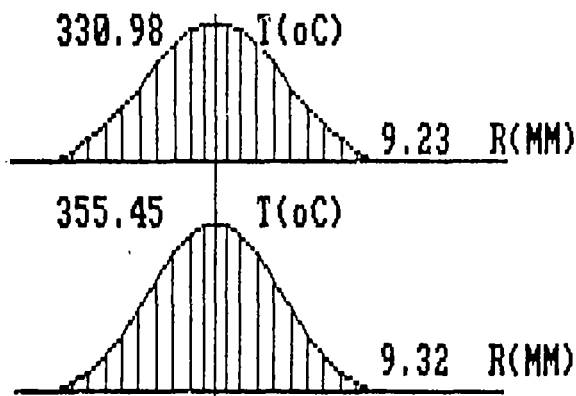


图5 蜡烛火焰计算截面温度分布曲线图

结 论

本系统的技术将点在于被测物散斑相关图样的采集和处理,采用了先进的电子图象技术。图象处理器是完全由硬件数字电路制作,对图象的采集和相关处理做到完全实时,可以连续观察干涉图样的瞬间变化。

存储器N0.2即是实时图象相关处理的帧存储器,也作为pc微机内的RAM存储器,通过映

(上接第151页)



图6 相位共轭镜消位相畸变的例子。

左图是位相畸变的物体,右图是经共轭光恢复的物体。

为了进一步分析比较,我们在 $I_1 = I_2 = 5\text{mW}$ 的条件下,进行了双相位共轭实验。首先将 I_1 的光程加大,使之与信号光的光程差达2m,超过激光的相干长度(约为0.5m)。测得在两束光不相干的条件下,由双相位共轭机理产生的

射接口,每次映入pc微机64K×8bit,一幅干涉图象分四次进入微机进行定量运算。

本系统具有以下特点:

a.不用微机支持可独立自成系统工作,进行无损检测或流场显示;

b.散斑相关图样实时采集,实时进行相关处理,以25帧/秒的速率给出反映力学参量的干涉图,适用于研究动态变化过程或流场显示过程;

c.具有可将某帧干涉图实时储存和随时提取的功能;

d.干涉图映入pc微机的速度高。

最后感谢刘方、李平曾和解京昌同志在研究过程中所作出的贡献,以及段晓辉和张新平在定量计算中所作的工作。

参考文献

- [1]J.N.Butters and J.A.Leendertz, J.of Measurement and Control,4,344(1971).
- [2]何世平等,实验力学5,387(1990).
- [3]W.Merzkirch.Flow Visualizafion,Academic press.(1974).
- [4]T.F.Zien et al.AD A009754(1974).

I_2 的共轭光 I_3 的反射率仅有2%。然后,再使 I_1 、 I_2 等光程相对于晶体对称入射,进行通常的双相位共轭实验,测得共轭光的反射率仍然只有约6%。

因此,本文单光束泵浦的相位共轭方法,虽然在形式上与双相位共轭类似,但其共轭光的反射率却比双相位共轭高得多。

参考文献

- [1]M.Cronin-Golomb et. al., IEEE J.Quant. Elect,QE-20,12(1984)
- [2]J.Feinberg.Opt.Lett,7,486(1982)
- [3]S.Weiss et. al.Opt. Lett.12.114(1987).
- [4]M.Crunin-Golomb et. al. Opt Lett.15.897(1990)