

文章编号: 0258-7025(2005)02-0252-05

图像模拟在白炽灯气体折射率全息 CT 测量中的应用

李俊昌, 熊秉衡

(昆明理工大学理学院激光应用研究所, 云南 昆明 650093)

摘要 简要介绍白炽灯点燃过程中灯内气体折射率三维分布测量的实时全息干涉图像, 根据密闭气体被灯丝加热时所涉及的物理问题建立简化的物理及数学模型, 并利用数字图像处理技术对全息干涉图像的形成过程进行模拟研究。研究表明, 当灯泡外空间的折射率变化不均匀时, 灯泡投影区域内的干涉图像将同时带有灯内外气体折射率变化的信息, 利用干涉图像中灯泡投影区域外干涉条纹的测量结果可以对实际测量结果进行修正。此外, 根据研究结果及全息 CT 技术, 给出了忽略灯泡外空间的折射率变化影响时白炽灯内气体折射率三维分布测量的实例。

关键词 全息; 全息 CT 技术; 实时全息; 数字图像处理

中图分类号 O 348.12 **文献标识码** A

Application of Image Simulation to the Holographic CT Measurement for Refractive Index of the Gas in an Incandescence Lamp

LI Jun-chang, XIONG Bing-heng

(Applied Laser Institute, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract Real-time holographic interference patterns of three-dimensional distribution of gas refractive index in an incandescence lamp during its lighting process are introduced here briefly. Based on the fundamental physical problems occurred in gas heating process by filament, a concise physical and mathematical model has been developed. The forming processes of holographic interference pattern are studied numerically by using digital image processing technique. The obtained results have shown that when the refractive index outside of filament has a non-uniform distribution, the information of this non-uniform distribution can be reflected by the interference pattern in the projection of lamp, and the measurements of the fringes of interference pattern can be used to modify the real measurement data. Moreover, based on the result of study and the holographic computed tomography (CT) technique, an example of the three-dimension distribution of gas refractive index inside an incandescence lamp is given without the influence of the change of refractive index outside of the lamp.

Key words holography; holographic CT technology; real-time holography; digital image processing

1 引 言

单次曝光法对透明物体折射率变化的实时全息测量过程中, 当被测量物体具有轴对称特性时, 只要在一个方向记录干涉图, 便能通过 CT 层析技术重

建物体内部的三维折射率分布^[1]。基于对全息理论及实验的研究, 采用了一系列的新方法^[2], 诸如: 测量和控制相位调制度的方法, 同时获得高反衬度条纹和高亮度检测光场的方法以及在参考光方向探测干涉图像的方法等, 获得了便于测量使用的高质量

收稿日期: 2003-09-28; 收到修改稿日期: 2003-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(60178004, 49764010)资助项目。

作者简介: 李俊昌(1945—), 男, 昆明理工大学理学院激光应用研究所所长, 研究员, 博导, 主要从事信息光学及数字图像处理方面的研究。E-mail: jcli@vip.163.com

干涉图,为实现光学检测提供了方便。随着计算机及 CCD 探测技术的进步,利用 CCD 探测干涉图像并录入计算机,利用数字图像处理直接实现测量的技术正在积极研究^[3],但无论采用什么手段记录干涉图像,干涉图的正确分析与相位识别仍然是完成测量的关键技术。本文以白炽灯加热过程中单次曝光法实时全息 CT 测量为例,选择合适的函数模拟灯泡内气体的折射率分布,利用计算机图像处理技术模拟研究实时全息干涉图像,并根据模拟研究结果,对实际测量的干涉图像进行处理,最后,利用 CT 层析理论给出灯泡内气体折射率三维分布测量的实例。

2 基本原理

在光学干涉测量技术中,被测量对象的物理信息通常包含于从测量对象反射或折射的物光相位变化之中。来自测量对象的物光与参考光进行干涉后,首先通过干涉图像的灰度测量获取物光波场的相位变化,然后求出引起相位变化的物理量,是完成干涉测试的基本步骤。然而,分析两束光干涉的强度图像可知,当干涉图像上观察点相位差为 $2n\pi \pm \delta(n=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ 时,观察点将具有同样的干涉

强度。由于许多物理量沿相反的方向变化时将引起物光相位沿相反的方向变化。例如,当光波通过气体介质时,气体密度的增加将使来自气体的物光波前比密度增加前滞后,反之则比密度减小前超前,当来自气体的物光与参考光进行干涉时,单纯从干涉图的强度测量很难判断气体的密度是增加还是减小。因此,如何正确地判读干涉图像提供的信息,准确判断物光相位变化的符号,是实现准确测量需要解决的重要问题。

理论及实验研究表明,根据实际测量的物理内容,建立相应的数字模型,利用计算机模拟或仿真技术建立干涉图像,将能为物光相位变化的符号判断提供重要依据。

3 白炽灯点燃过程的模拟研究

图 1 是对白炽灯逐步点燃过程中灯泡及灯泡周围气体折射率作实时全息检测时获得的一组干涉图像。分析白炽灯点燃过程可知,由于气体被密封在玻璃外壳内,白炽灯内气体被灯丝加热后,在灯丝上方的气体密度总体应低于通电前灯泡内气体的密度,灯丝下方的密度则高于通电前灯泡内气体的密度。

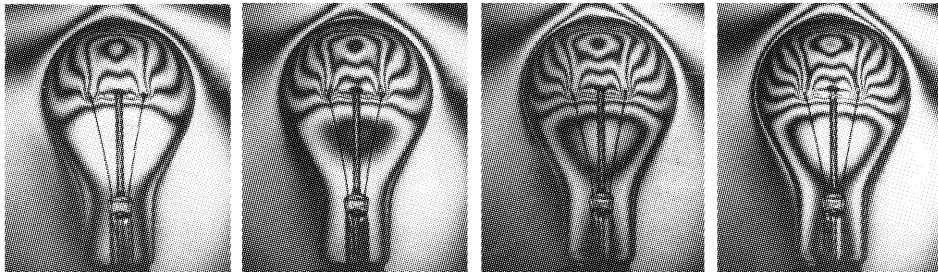


图 1 白炽灯逐步点燃过程的实时全息干涉图像

Fig. 1 Holographic interference pattern of the incandescent lamp in the emblazing process

根据气体密度减小后折射率减小的原理^[1],选择模拟研究方案:将灯泡近似为一个球体与柱体的组合(见图 2),在过球心的水平面上设置一个环形折射率极小值区;在该平面上方对称轴上分别设置折射率极小及极大值点,并让折射率在组合体内部平滑变化;为近似模拟组合体外气体折射率的分布,设组合体外存在一个以模拟球体的球心为对称中心,由内向外折射率逐步增加的折射率空间分布。

令 $\Delta N(x, y, z, t)$ 为图 2 所定义的直角坐标系中折射率随时间 t 变化的函数,按照上述方案将模拟研究函数选择如下:

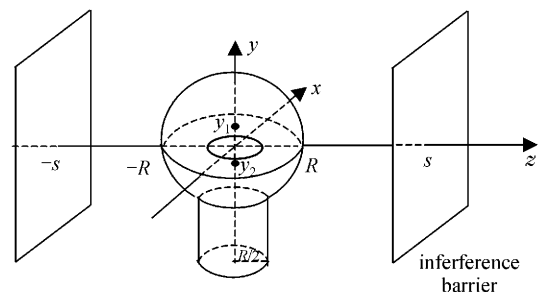


图 2 理论模拟研究对象及坐标定义

Fig. 2 Theoretical simulated study object and the definition of coordinates

1) 当 $y \geq -R\sqrt{3}/2$ 时

$$\Delta N(x, y, z, t) = \begin{cases} \Delta N_0(x, y, z, t), & (x^2 + y^2 + z^2 > R^2) \\ \sum_{i=1}^3 \Delta N_i(x, y, z, t), & (x^2 + y^2 + z^2 \leq R^2) \end{cases},$$

2) 当 $y < -R\sqrt{3}/2$ 时

$$\Delta N(x, y, z, t) = \begin{cases} \Delta N_0(x, y, z, t), & (x^2 + z^2 > R^2/4) \\ \sum_{i=1}^3 \Delta N_i(x, y, z, t), & (x^2 + z^2 \leq R^2/4) \end{cases},$$

其中

$$\Delta N_0(x, y, z, t) = a_0(t) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{w_0^2}\right),$$

$$\Delta N_1(x, y, z, t) =$$

$$a_1(t) \exp\left[-\frac{x^2 + (y - y_1)^2 + z^2}{w_1^2}\right],$$

$$\Delta N_2(x, y, z, t) =$$

$$a_2(t) \exp\left[-\frac{x^2 + (y - y_2)^2 + z^2}{w_2^2}\right],$$

$$\Delta N_3(x, y, z, t) =$$

$$a_3(t) \exp\left(-\frac{y^2}{w_y^2}\right) \left(\frac{x^2 + z^2}{w_3^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2 + z^2}{w_3^2}\right),$$

以上诸式中, $y_1, y_2, w_0, w_1, w_2, w_3$ 为常数, 并且 $a_0(t), a_1(t), a_2(t), a_3(t)$ 设计为随参数 t 逐渐增加的函数, 以便模拟灯泡通电时灯内外气体折射率随时间 t 变化的情况。忽略从被测量物体到干涉图样观测屏的非涅耳衍射效应^[4], 令 $k = 2\pi/\lambda, \lambda$ 为光波长。光波从 $z = -s$ 平面到 $z = s$ 平面因折射率变化引起的相位变化即为

$$\Delta\varphi(x, y, t) = k \int_{-s}^s \Delta N(x, y, z, t) dt. \quad (1)$$

将所设 $\Delta N(x, y, z, t)$ 代入(1)式并引入误差函数后很容易求解。

设模拟干涉图强度分布为 $\text{Im}(x, y, t) = 127.5 + 127.5 \cos[\Delta\varphi(x, y, t) + \pi]$, 并令 $s = 50 \text{ mm}, R = 35 \text{ mm}, w_0 = 60 \text{ mm}, w_1 = w_2 = 30 \text{ mm}, w_3 = 9 \text{ mm}, y_1 = 20 \text{ mm}, y_2 = -25 \text{ mm}, \lambda = 632.8 \text{ nm}, a_0(t) = -0.0004[1 - \exp(-t^2)], a_1(t) = -0.0002[1 - \exp(-t^2)], a_2(t) = 0.0001[1 - \exp(-t^2)], a_3(t) = -0.0084[1 - \exp(-t^2)]$, 图 3 给出 0 ~ 255 灰度等级的从参考光方向观测的部分干涉图像。

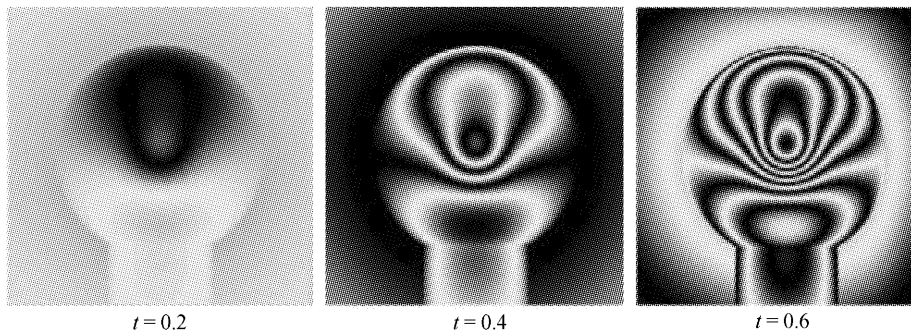


图 3 灯泡点燃过程的实时全息干涉图的模拟图像

Fig. 3 Simulation of the holographic interference pattern in the process of emblazing the incandescent lamp

不难看出, 模拟研究能为处理实际干涉图提供很大方便。干涉图上下两方形成两组干涉条纹, 上方一组干涉条纹对应于球体上方折射率减小的分布, 下方则对应于折射率增加的分布。若忽略物体外空气折射率变化对干涉图像的影响, 两组条纹的分界区域对应于物体内部折射率基本保持不变的区域。

4 实际图像的处理

令 $\Delta L(x, y)$ 为干涉图像上变形物光与参考光

的程差, 在参考光方向干涉图像的强度分布可表示为^[1,2]

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos\left\{\frac{2\pi}{\lambda} \left[\Delta L(x, y) + \frac{\lambda}{2}\right]\right\}, \quad (2)$$

式中 $A(x, y)$ 与 $B(x, y)$ 为与照明光源分布及全息干板感光特性相关的变量。于是求得

$$\Delta L(x, y) =$$

$$\frac{\lambda}{2\pi} \left\{ \arctan \sqrt{\frac{B^2(x, y)}{[I(x, y) - A(x, y)]^2} - 1} + 2\pi\tau \right\} - \frac{\lambda}{2}, \quad (3)$$

式中 $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 为干涉条纹级次。

当照明光强度较均匀时, 通常可将 (3) 式中 $A(x, y)$ 与 $B(x, y)$ 视为常量。按照这个近似, 设干涉图像强度极大及极小值分别为 I_{\max}, I_{\min} , 根据 (2) 式容易求得

$$A(x, y) = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}, B(x, y) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{2} \quad (4)$$

选择图 1 中第二幅干涉图为研究对象, 求得

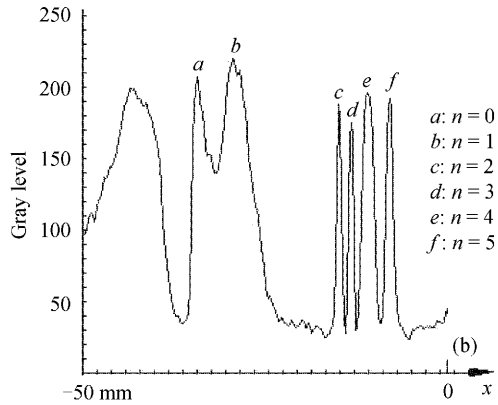
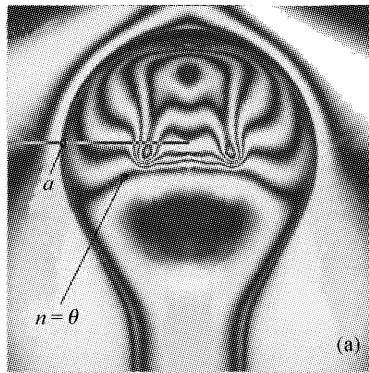


图 4 层析剖面位置(a)及对应干涉图像的强度曲线(b)

Fig. 4 Position of the layer analysis section (a) and the intensity curve corresponding to the interference pattern (b)

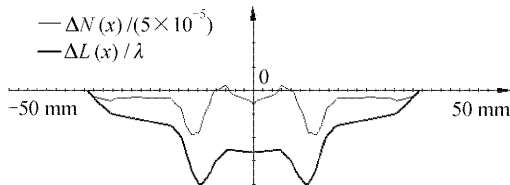


图 5 观察剖面的折射率变化及光程差曲线比较

Fig. 5 Comparison of the refractive index variation of the layer analysis section and the curve of optical path-difference

利用 (3), (4) 两式求得光程差 $\Delta L(x, y)$ 的曲线示于图 5 (图中粗实线)。设折射率场沿半径方向满足线性近似, 根据文献 [1] 可求得观察剖面的折射率变化分布。为便于与相应的程差曲线比较, 折射率变化分布也示于图 5 (图中细实线)。

气体折射率的变化与气体的密度及温度分布有确定的数学关系 [1], 通过逐层折射率二维分布的测量, 不难获得灯内气体密度及温度的三维分布。

5 讨论与结论

模拟研究干涉图与相应的程差曲线容易发现, 物体外的空间折射率分布会对干涉图像结构发生影

响, 当 $a_0(t) \neq 0$ 时, 干涉图像上零相位区事实上不是两组干涉条纹的分界区, 图 6 给出 $t = 0.6$ 时 $a_0(t) \neq 0$ 及 $a_0(t) = 0$ 的两幅干涉图像。在每一幅图像右侧是变化物光与原始物光到达干涉屏时沿图像纵轴的程差曲线。显然, $a_0(t) \neq 0$ 时干涉图像的零程差区已经移到下面一组干涉条纹内。在上述实际测量研究中, 选择两组干涉条纹的交界区为零程差参考点等价于将实际程差分布统一地减去一个常数值。这在事实上是将灯泡通电前后外部空间的折射率视为均匀变化。当灯泡外空间的折射率变化不均匀时, 不但在干涉图像上灯泡投影区域外出现相应的干涉条纹, 而且灯泡投影区域内的干涉图像将同时带有灯内外气体折射率变化的信息。考查所研究的实际干涉图像可以看出, 在灯泡外存在干涉条纹, 因此, 所给出的测量实例是未考虑周围空间折射率非均匀分布影响的一种近似。利用干涉图像中灯泡投影区域外干涉条纹的测量结果可以对实际测量结果进行修正。

综上所述, 根据实际测量的物理问题建立数学模型, 利用计算机图像模拟技术能为测量结果的正确处理提供很多方便。

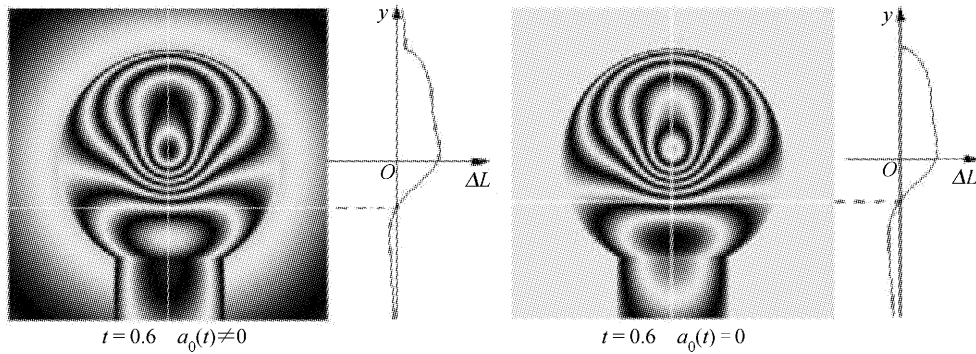


图 6 测量环境对干涉图零相位区的影响(图像尺寸 100 mm×100 mm)

Fig. 6 Influence of measuring condition on the nil phase of interference pattern
(the image dimension is 100 mm×100 mm)

参 考 文 献

- 1 He Anzhi, Yan Dabeng. Laser Transient Interferometry [M]. Beijing: Mechanic Industry Press, 1993. 329
贺安之, 阎大鹏 著. 激光瞬态干涉度量学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. 329
- 2 Bingheng Xiong, Zhengrong Wang, Junchang Li *et al.*. Some novel methods in real-time holographic interferometry [C]. SPIE, 2000, 4659: 91~95
- 3 Liu Cheng, Li Yinzhu, Li Lianyu *et al.*. A new way to eliminate the zero-order image in digital holography [J]. Chinese J. Lasers, 2001, A28(11): 1024~1026
刘 诚, 李银柱, 李良钰 等. 数字全息测量技术中消除零级衍射像的方法[J]. 中国激光, 2001, A28(11): 1024~1026
- 4 Li Junchang, Xiong Bingheng, Zhong Liyun *et al.*. Inverse calculation of diffraction and its application to the real-time holographic interferometry [C]. SPIE, 2000, 4659: 284~290