

基于光纤像面全息的金属构件微位移测量

沈 涛

(哈尔滨理工大学 应用科学学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要:针对激光全息技术能处理常规方法难以解决的问题以及光纤具有环境适应性的特点,设计了一种基于光纤像面全息干涉计量对金属材料构件微小位移测量的方法.通过对不同芯径传像光纤束情况下的成像结果分析,得出了与材料力学相符合的结论.实验结果表明,提出的方案适用于对金属材料特性的高精度测量,可以解决阻碍激光全息技术推广应用和发展的环境要求.

关键词:信息光学; 光纤像面全息; 干涉计量; 微位移; 金属特性

中图分类号: O438.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2009)05-0083-04

Measuring Micro-displacement of Metal Components Based on the Image-surface Holography of Optical Fiber

SHEN Tao

(School of Applied Sciences, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Considering the environmental adaptability of optical fiber and unique advantage of laser holography, the laser image-surface holographic of optical fiber interferometric techniques for measuring micro-displacement of metal components is proposed. Imaging analysis of the different single fiber core diameter size of image-carrying optical fiber shows that the conclusion is consistent with theory of mechanics of materials. Moreover, experimental results indicate that the approach can be applied in high precision measurement of properties of metal. The results also demonstrate the potential of the fiber optical image-surface holographic in practical applications, and lay a foundation for further research.

Key words: information optics; image-surface holographic of optical fiber; interferometry; micro-displacement; properties of metal

0 引 言

自激光全息术发明以来,激光全息技术的应用领域和范围不断拓展,对相关技术和行业的影响越来越大,尤其是近年来随着激光全息技术与其它学科技术的综合运用,激光全息技术更展现了它的巨大应用前景.目前,阻碍其推广应用和发展的主要因素之一是其严格的防震性和避光性要求导致的对环

境要求十分苛刻.光纤引入全息干涉计量中,扩大了普通全息的应用范围,大大简化了光学全息装置,便于实现系统的仪器化,并且可以实现对处于封闭系统内部、远距离或危险环境中的物体进行全息记录和检测,因而光纤全息很受人们的重视.

光纤像面全息比一般光纤全息具有更大的实用价值,并且细单丝芯径传像束用于光纤像面全息,能获得较高衍射效率和分辨率^[1],以及光纤聚焦系统的发展使方便而迅速地建立全息和干涉术系统成为

可能^[2],包括激光所不能到达的地方.本文设计了一种通过利用光纤像面全息干涉计量对金属材料构件微小位移测量,进而实现对金属材料弹性模量等性质以及金属材料内存在的裂纹、气泡、截面尺寸不均匀等现象进行高精度测量的方法,并进行了相关的实验和讨论.

1 光纤像面全息干涉计量理论

1.1 光纤像面全息照相理论

光纤全息就是在全息照相和全息干涉计量系统中应用光纤来传导激光束以提供物体照明光波或参考光波,或用光纤传像束把物体光波,甚至把全息干涉条纹传输到全息记录介质上^[3].我们简单的定义物体或物体的像处在记录介质平面附近所产生的全息为像面全息图.

在光纤像面全息照相系统中,物光波是经传像光纤传像并成像在全息图记录平面上,因此物光波的形式为^[4]

$$O(x, y) = \sum_m \sum_i O_{mi}(x, y) \exp[-\beta_m L] \exp[j\Phi_0(x, y)]$$

其中: $O_{mi}(x, y)$ 为传像光纤第*i*根单丝中模式*m*的复振幅; L 为传像光纤传像的总长度; β_m 为传像光纤第*i*根单丝中模式*m*的传输系数; $\Phi_0(x, y)$ 为物光波的位相.

设参考光波为

$$R(x, y) = R_0(x, y) \exp[j\Phi_R(x, y)]$$

其中: $R_0(x, y)$ 为参考光的振幅; $\Phi_R(x, y)$ 为参考光的位相.

设再现照明光波为

$$C(x, y) = C_0(x, y) \exp[j\Phi_c(x, y)]$$

其中: $C_0(x, y)$ 为再现照明光波的振幅; $\Phi_c(x, y)$ 为再现照明光波的位相.

在线性记录和略去常数项的情况下,光纤全息的透过率为

$$T = |O + R|^2 = O_0^2 + R_0^2 + O_0 R_0 \exp[j(\Phi_0 - \Phi_R)] + O_0 R_0 \exp[-j(\Phi_0 - \Phi_R)] \quad (1)$$

其中 $O_0 = \sum_m \sum_i O_{mi}(x, y) \exp[-\beta_m L]$.

用再现照明光波照明光纤全息图时得到的原始在线物光波的强度分布为

$$I = C_0^2 R_0^2 \sum_m \sum_i \sum_j \sum_k O_{mi} O_{nj}^* \exp[j(\beta_{nj} - \beta_{mi})L] = C_0^2 R_0^2 \sum_m \sum_i |O_{mi}|^2 + C_0^2 R_0^2 \sum_{m \neq i} \sum_j \sum_k O_{mi} O_{nj}^* \exp[j(\beta_{nj} - \beta_{mi})L]$$

上式中第一项表示均匀的物光波,第二项表示传像光纤中不同模式之间的干涉,表现为模斑形式.可见,光纤全息图的再现像就是带有物光信息的模斑象.

1.2 二次曝光理论

光纤像面全息干涉计量常用的方法有实时法、二次曝光法和时间平均法.在本文的实验中,用实时法确定加载条件,用二次曝光法进行记录和分析.二次曝光全息干涉计量原理为:两次曝光时用同一参考波 $R(x, y)$,第一次曝光时物光波为 $O_1(x, y)$,第二次曝光时物光波为 $O_2(x, y)$.假设两者的振幅无变化,仅有相位改变 $\Phi(x, y)$,即

$$O_2(x, y) = O_1(x, y) \exp[j\Phi(x, y)]$$

两次曝光时底片平面上的光强度分布分别为

$$I_1(x, y) = |R + O_1(x, y)|^2 = |R|^2 + |O_1(x, y)|^2 + R^* O_1(x, y) + R O_1^*(x, y)$$

$$I_2(x, y) = |R + O_2(x, y)|^2 = |R|^2 + |O_2(x, y)|^2 + R^* O_2(x, y) + R O_2^*(x, y)$$

如果记录介质工作在线性区,则经过两次曝光后,底片平面上的振幅透射率分布为

$$t(x, y) = [2|R|^2 + |O_1(x, y)|^2 + |O_2(x, y)|^2] + R^* [O_1(x, y) + O_2(x, y)] + R [O_1^*(x, y) + O_2^*(x, y)]$$

当用参考光 R 再现时,照明光透过全息图,记录介质平面上的光场复振幅分布为

$$Rt(x, y) = [2|R|^2 + |O_1(x, y)|^2 + |O_2(x, y)|^2]R + |R|^2 [O_1(x, y) + O_2(x, y)] + R^2 [O_1^*(x, y) + O_2^*(x, y)] \quad (2)$$

第二项是两次曝光时两种物光波相干迭加的合成波,第三项则是上述合成波的共轭波.可见,再现时所出现的原始像和共轭像中均有干涉条纹出现,这一干涉条纹记录了两次曝光时物体形态的变化,经推算可知两状态中各点位置的改变量.

1.3 金属材料微位移测量理论

1.3.1 材料力学理论公式

若在一金属材料构件的自由端施加力 F ,金属构件将产生微小弯曲,如果只考虑金属构件的中心线(x 轴)上各点沿 y 方向的变形,变形后的轴线称为挠曲线,金属构件挠曲线示意图如图 1,其数学表示^[5]为

$$dy = \frac{F_y x^2}{6EJ} (3L - x) \quad (3)$$

式中: L 为金属构件长; E 为材料的杨氏模量; J 为金属构件截面的惯性矩; x 为待测点 P 的位置坐标.当

$x=L$ 时, $dy = y_{\max} = \frac{F_y L^2}{3EJ}$. $y_{\max}$ 是自由端受力的位移.

由上式可得 $F_y = \frac{3EJy_{\max}}{L^3}$, 带入式 (3) 后得

$$dy = \frac{y_{\max}}{2L^3} (3L - x) x^2 \quad (4)$$

式 (4) 就是金属材料构件中心线上任一点 P 处微小位移的材料力学理论计算公式。

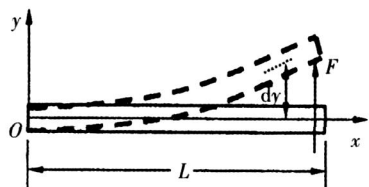


图 1 金属材料构件挠曲线的分布

1.3.2 光纤像面全息干涉术公式

由前述二次曝光理论, 挠度变形 dy 所引起的位相变化为 $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta\delta$, 由几何关系进一步可得

$$\Delta\delta = dy (\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$$

式中, θ_1 和 θ_2 为对应任何一级暗条纹的光路参数, 它可由具体光路的几何图形求出。

又由式 (1)、(2) 可知, 干涉暗条纹的条件是

$$1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda} dy (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) = 0$$

$$\text{即 } \frac{2\pi}{\lambda} dy (\cos\theta_1 + \cos\theta_2) = (2k+1)\pi, k=1, 2, 3, \dots$$

物体表面上各级暗条纹处位移大小的公式为

$$dy = \frac{(2k+1)\lambda}{2(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)} \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

式 (5) 就是微位移的光纤像面全息干涉理论计算公式。

2 光纤像面全息干涉计量对金属构件微小位移测量的设计方案

像面全息一般有 3 种方法: 第 1 种方法是, 先照一张普通离轴全息图, 洗相处理后, 用黑纸遮住两边, 纸之间留一小缝隙。然后用一激光打在小缝上, 在成实像处放记录介质, 加一束参考光干涉即可得到像面全息图。第 2 种是把记录介质放在非常靠近物的地方。这种方法的弊端是因为物离记录介质太近, 物体的各个部分反射到记录介质的光强受到一定的限制, 导致记录信息不全面。第 3 种方法为透镜耦合法。用成像透镜把物成像到记录介质上, 与参考光干涉成像面全息图。本文中光纤像面全息就采用透镜耦合成像的第 3 种方法。

根据上述原理设计出一种金属材料构件微位移

高精度测量的方案, 实验如图 2 所示, 其中金属材料构件部分的数据放大如图 3 所示。图 2 中, 1 为 He-Ne 激光器, 2、3、4、5 为全反镜, 6 为衰减镜, 7 为分束镜, 8、9、10 为光阑, 11、12 为扩束镜, 13、14 为成像透镜, 15 为金属材料构件, 16 为光纤, 17 为记录介质, 18 为施力装置, 19 为测力计, 20 为固定装置。为了证明获得较高衍射效率和分辨率的途径, 实验中使用中国南京 841 所研制的包层折射率 $n_1 = 1.525$, 纤芯折射率 $n_2 = 1.626$, 长为 1.25 m, 横截面积为 $5 \times 5 \text{ mm}^2$, 单丝芯径分别为 $14 \mu\text{m}$ 和 $28 \mu\text{m}$ 的两根传像光纤束进行光纤像面全息并加以对比。

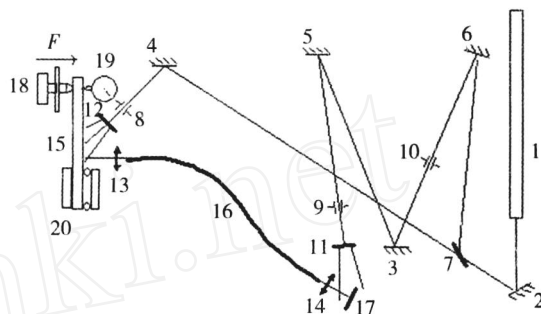


图 2 实验设计方案图

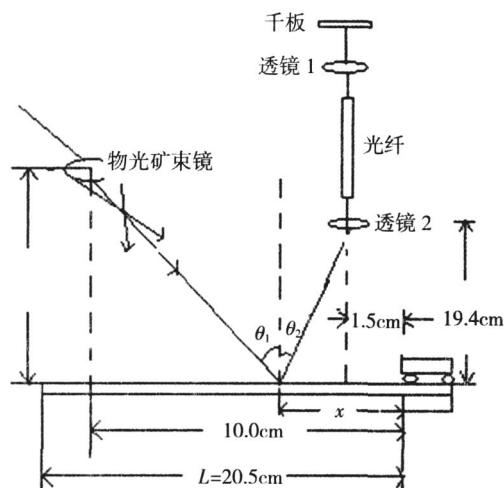
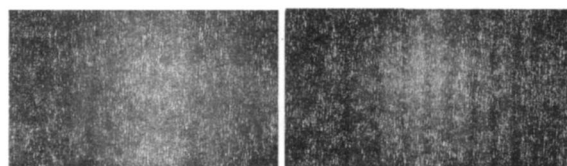


图 3 实验设计方案中金属材料构件局部放大图

实验中, 分别用两根光纤来拍摄不加力载的自然情况下金属材料构件的像面全息。然后在构件末端, 加力载 F (折算为 $60 \mu\text{m}$), 静台后曝光 4 s, 撤销力载静台后再次曝光 4 s 拍成像效果如图 4 所示。



(a) 芯径 $28 \mu\text{m}$ 光纤传像束 (b) 芯径 $14 \mu\text{m}$ 光纤传像束

图 4 实验效果图

3 实验结果与分析

由图 4 可见,芯径 $14\ \mu\text{m}$ 光纤传像束比芯径 $28\ \mu\text{m}$ 光纤传像束拍摄成像分辨率高、效果清晰,证明了使用单丝芯径较小的传像束所拍摄的像面全息图具有较高的衍射效率和分辨率^[1].同时,利用图 4 还可对金属材料构件内存在的裂纹、气泡、截面尺寸不均匀等缺陷导致的位移分布异常进行检测.

依据式 (4)、(5) 以及图 3、4 计算所得结果绘制的曲线如图 5 图中 dy 、 dy' 分别为材料力学理论和光纤像面全息干涉理论计算得出的微位移值.从曲线可见,光学实验结果符合材料力学理论要求,光纤像面全息干涉方法能对金属材料构件的微小位移进行高精度的测量;由于单丝芯径较小的 ($14\ \mu\text{m}$) 传像束所拍摄的像面全息图具有较高的衍射效率和分辨率,故利用单丝芯径较小的传像束 ($14\ \mu\text{m}$) 得到的结果与材料力学理论计算所得的结果应更加接近^[1],从图 5 的结果证实了这一点.同时,利用图 5 结果和公式 (3) 也能够方便、准确测量出金属材料的弹性模量,为金属某些特性的研究提供了直观而有效的手段.有力证明了光纤像面全息干涉计量在金属材料构件测量中的实际应用价值.

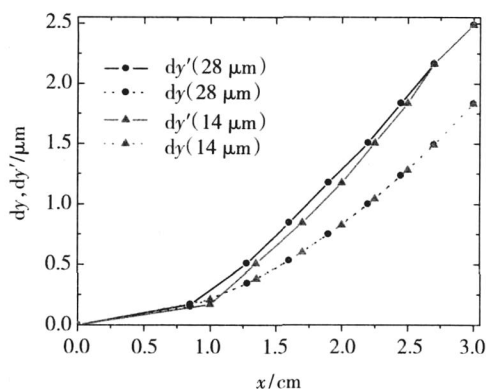


图 5 金属材料构件在不同位置的微位移曲线

4 结 语

采用光纤像面全息干涉计量实现了对金属材料构件微位移的高精度测量,根据不同芯径传像光纤束得到了与材料力学理论计算相符合的结果,并可进一步对金属材料弹性模量等性质以及金属材料内存在的裂纹、气泡、截面尺寸不均匀等现象进行高精度的测量.本文设计的方案解决了目前阻碍激光全息技术推广应用和发展的环境要求,并实现了较高衍射效率和分辨率.将本文的成果加以改进, (如用 Y 型光纤^[6-7]将光路加以改善,并采用可由计算机自动控制的器件替代传统的光学元件来实现全息图的自动化记录) 对促进全息的产业化发展具有指导意义.

参考文献:

- [1] 于 助,宋 伟,贺光裕,等. 传像光纤束单丝芯径大小对光纤像面全息图的影响 [J]. 光学学报, 1997, 17 (10): 1341 - 1346.
- [2] 友 清. 光纤技术在全息和干涉系统中的应用 [J]. 国外激光, 1994, 9: 31 - 32.
- [3] DUDDERAR T D, GLBERT J A, BOEHNFEEN A J. Achieving Stability in Remote Holography Using Flexible Multimode Image Bundles[J]. Appl Opt, 1983, 22 (7): 1000 - 1005.
- [4] 金英浩,于 助,班 . 光纤象面全息照相的研究 [J]. 光电子激光, 1991, 2 (2): 110 - 115.
- [5] 赵九江,张少实,王春香. 材料力学 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1995: 138.
- [6] 张 薇. 用 Y 型多模光纤束拍摄激光散斑全息图 [J]. 华东船舶工业学报, 2000, 14 (5): 92 - 94.
- [7] 周效东,汤伟中,周 文. 全光纤全息技术的研究与实现 [J]. 激光技术, 1995, 19 (2): 115 - 118.

(编辑:温泽宇)