

高精度非接触式锥光全息测量系统设计与应用

温亚楠¹ 王添² 于佳² 杨宇² 王金城² 王志红³ 田维坚^{1*}

¹青岛市光电工程技术研究院, 山东 青岛 266109

²中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100

³河北衡水市信息产业局, 河北 衡水 053000

摘要 针对常见的工业零部件尺寸, 基于锥光全息测量原理, 设计一套高精度非接触式锥光全息测量系统, 并用于测量钱币表面的高度信息。首先记录钱币的锥光全息图, 接着对全息图的干涉条纹进行中心线细化处理, 用以计算条纹宽度变化量, 进而得到被测钱币表面高度的变化。实验结果表明, 当物镜焦距为 50 mm 时, 该测量系统的精确探测范围达到 5 mm, 测量误差在 0.28% 之内, 验证了该系统设计方案的可行性和准确性。

关键词 全息; 晶体双折射; 锥光全息; 中心线细化

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.080902

Design and Application of a High-Precision Non-Contact Conoscopic Holographic Measure System

Wen Ya'nan¹ Wang Tian² Yu Jia² Yang Yu² Wang Jincheng²

Wang Zhihong³ Tian Weijian¹

¹Qingdao Academy for Opto-Electronics Engineering, Qingdao, Shandong 266109, China

²College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

³Hengshui Information Industry Bureau, Hengshui, Hebei 053000, China

Abstract Based on the principle of conoscopic holography, a high-precision non-contact measure system is designed for the measurement of typical industrial parts. Using this system, height information of coin surface is acquired. After recording of the conoscopic holograms of the coin, the interference fringes are processed by centerline refinement, through which we can calculate the variation in the fringe width, and thus obtain the height information of the coin surface. The results show that when the focal distance of objective is 50 mm the accurate measurement range of the system is 5 mm, with a maximum error of 0.28%, verifying the feasibility and accuracy of the conoscopic holographic measure system.

Key words holography; crystal birefringence; conoscopic holography; centerline refinement

OCIS codes 090.1995; 090.5694; 090.1760

1 引言

随着计算机辅助设计和数控机床加工技术的飞速发展, 当今工业级零部件的产品形状日趋复杂, 对尺寸公差的要求也愈加严格, 使得企业对于零件的测量精度和测量速度的要求也大大提高。不仅如此, 还需要实现无损测量、实时测量、测量范围大等其他要求, 因此, 物体的非接触式高精度形貌测量成为现代科学研究领域的一大热点。现在常用的非接触式光学测量方法有结构光法^[1-4], 锥光全息法^[5-6], 菲涅耳数字全息法^[7-9]等。其中, 结构光法测量范围较大但精度较低, 菲涅耳全息法测量速度快但测量范围较小, 而相比于一般全息法, 锥光全息法的探测精度高, 且对光源的依赖性低, 具备较强的抗干扰能力及很强的环境适应性。因此, 本文针对典型的工业级零部件尺寸的测量要求(测量精度达到零件尺寸的 10^{-3}), 设计了一套锥光全息测量系统, 并应用于钱币的表面高度测量。通过计算被测钱币锥光全息干涉图的干涉条纹宽度变化量, 得

收稿日期: 2014-02-18; 收到修改稿日期: 2014-04-02; 网络出版日期: 2014-07-16

作者简介: 温亚楠(1981—), 女, 博士, 主要从事光电探测方面的研究。E-mail: wenyn@qdaoe.cn

* 通信联系人。E-mail: tianwj@qdaoe.cn

到钱币表面的高度信息。经过实验验证和数据计算,该系统测量分辨力较高,并且测量误差较小,满足测量要求。

2 锥光全息系统的测量原理及设计

当一束激光聚焦到被测物表面一点时,该点将散射出多种方向的散射光,以锥光束的形态返回,每束光穿过起偏器和单轴晶体,分裂成偏振方向相互垂直的寻常光 o 与非寻常光 e ;两束光经过检偏器后发生干涉,形成的干涉条纹被电荷耦合元件(CCD)记录下来,这就是锥光全息产生的原理,实际上是一种偏振光干涉成像的过程。得到的干涉条纹间距和数量是由入射晶体光线的光锥角决定的,而被测物点离物镜的距离又决定了光锥角的大小,因此,通过测量干涉条纹的间距和数量即可得到被测物点到物镜的距离,即高度信息。测量原理如图1所示,其中1为双折射晶体,2为检偏器,3为接收屏。

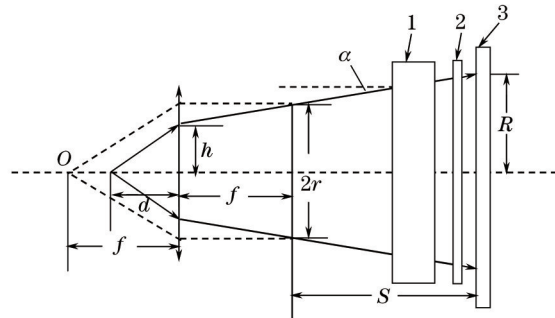


图1 锥光全息测量原理图

Fig.1 Principle of conoscopic holography

图1中的 O 点为被测物点, d 为被测距离, h 为物镜的通光孔径的半径, r 为光阑半径, f 为物镜焦距。根据应用光学成像公式和几何关系推导,可以得到被测距离 d 与光锥角 α 之间的关系式为

$$\sin \alpha = \frac{r^2(f-d)^2}{r^2(f-d)^2 + f^4} \quad (1)$$

锥光全息测量中干涉光束的相位差是通过晶体中 o 光和 e 光的速度差引起的,晶体内 o 光的折射率 n_o 保持不变, e 光折射率 n_e 随入射角的变化而变化。引起 o 光和 e 光的光程差 Δ 可以近似表达为^[9]

$$\Delta = \frac{(n_o^2 - n_e^2)l\alpha}{2n_o n_e^2}, \quad (2)$$

式中 l 是晶体的通光厚度, n_o 和 n_e 分别是 o 光和 e 光的主折射率。将(1)式代入(2)式,再结合相位与光程差的关系式 $\varphi = 2\pi\Delta/\lambda$,即得到相位差 φ 与被测距离 d 之间的关系式为

$$\varphi = \frac{\pi l(n_o^2 - n_e^2)r^2(f-d)^2}{\lambda n_o n_e^2 [r^2(f-d)^2 + f^4]} \quad (3)$$

(3)式给出的是绝对相位差与被测高度之间的关系。设沿晶体光轴方向传播的光线投影在接收面上的点为干涉图的绝对相位零点,晶体发生偏转使得晶体光轴随之转动,相应地,绝对相位零点 φ_0 也会随着被测距离 d 的变化而变化,因此,很难直接测量到被测点的绝对相位。但是,从图1可以看出,当被测距离 $d \approx f$ 时,光锥角 α 非常小,根据(3)式可知此时的相位差 φ 也非常小,因此 o 光和 e 光的光程差也很小,导致此时干涉条纹的宽度超过了光线在接收面上的投影范围,无法观察到整个干涉条纹。随着被测距离 d 的减小,光锥角逐渐增大,当增大到可以观察到一个完整条纹时,此时 o 光和 e 光的光程差达到了一个周期。也就是说,干涉条纹宽度的变化敏感地反映了被测距离 d 的变化,因此,可以通过测量干涉条纹的宽度来计算得到被测距离 d ^[10]。

如图1所示,当测量距离为 d 时得到的接收屏的光线接收半径为

$$R = r + s(r/f - rd/f^2) \quad (4)$$

视场内的干涉条纹数为 $n = \varphi/2\pi$,结合(3)式即可得到单条干涉条纹的宽度为

$$w = \frac{4 \left[r + s \left(\frac{r}{f} - \frac{rd}{f^2} \right) \right] \lambda n_o n_e^2 \left[r^2 (f-d)^2 + f^4 \right]}{l (n_o^2 - n_e^2) r^2 (f-d)^2} \quad (5)$$

根据(5)式,只要测量全息图中干涉条纹的宽度 w ,即可计算出被测距离 d 。

根据以上原理设计锥光全息测量系统的光路,用以测量钱币表面的高度信息。其结构如图2所示,其中1为1/2波片,2,3为扩束准直系统,4为偏振分光棱镜,5为光阑,6为1/4波片,7为物镜,8为被测物,9为双折射晶体,10为偏振片。

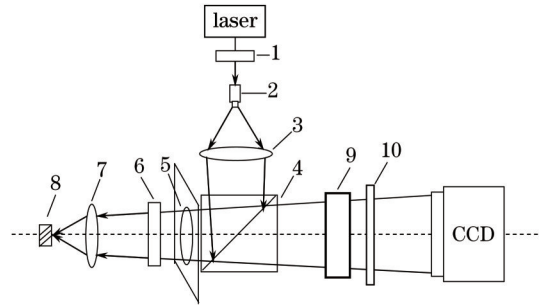


图2 锥光全息系统光路示意图

Fig.2 Optical structure of the conoscopic holographic measure system

如图2所示,激光器发出的一束激光经过1/2波片,扩束准直后进入偏振分光棱镜,被棱镜反射后经过1/4波片和聚焦物镜后会聚到被测物表面的一点。物体表面反射回来的锥光透过棱镜后进入双折射晶体,在晶体中分裂成o光和e光,最终通过偏振片后形成干涉条纹被CCD记录下来。

测量系统的元件选取和参数确定如下:照明光源采用中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的MSL-FN-532 nm-400 mW-12060026半导体激光器,聚焦物镜采用双胶合消色差透镜,焦距 $f=50$ mm,采用的单轴晶体材料为冰洲石, $n_o=1.6584$, $n_e=1.4864$,尺寸参数为10 mm×10 mm×25 mm(10 mm×10 mm为两个抛光面的尺寸,25 mm为通光厚度),两个波片的作用是调节光经过棱镜时的透反比。被测钱币固定在一个三维精密位移平台上(最小位移为0.01 mm),通过微调钱币相对物镜的距离,得到干涉条纹宽度与被测距离之间的关系。

3 测量结果与分析

3.1 干涉条纹的记录及中心细化处理

采用如图2所示的系统记录不同距离处被测钱币的锥光全息图如图3所示。钱币沿物镜轴向移动,移动步长 $\Delta d=0.1$ mm。

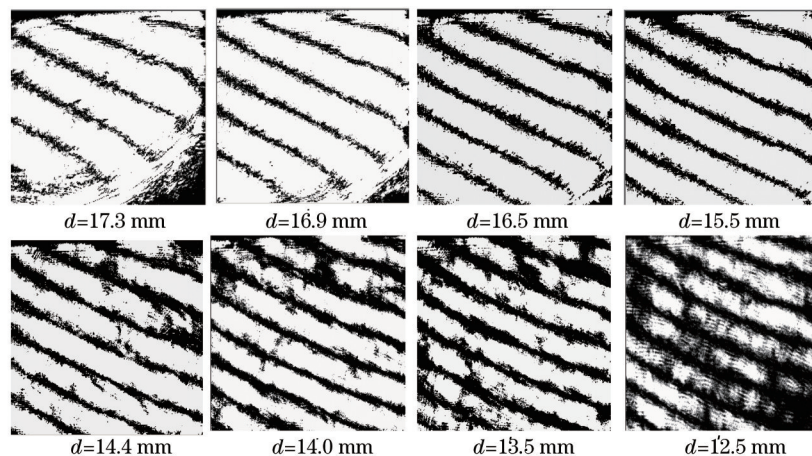


图3 被测钱币锥光全息图

Fig.3 Conoscopic holography of the coin

从图3可以看出,被测点的距离变化量 Δd 通过干涉条纹宽度和条数的变化表现出来。当 d 值从17.3 mm

减小到 15.5 mm, 即被测点逐渐靠近物镜的过程中, 随着 d 值的减小, 视场内条纹宽度的变化比较剧烈, 此时能敏感地反映被测距离的变化; 而当 d 值从 14.4 mm 减小到 12.5 mm 时, 条纹的宽度变化就比较缓慢且不明显, 而且成像质量逐渐变差, 使得条纹处理的准确度受到影响。因此, 锥光全息测量系统能准确反映距离变化的范围是有限的, 这个范围取决于所采用物镜的焦距大小, 可以通过更换不同焦距的透镜实现不同范围的探测。本文中采用的物镜焦距为 50 mm, 由实验得到对应的 Δd 的可精确测量范围是 5 mm。

为了能准确计算条纹宽度的变化量, 接下来还需要对全息图进行中心线细化处理。首先对图像进行预处理, 主要是滤波和二值化, 这是因为系统中的散斑噪声^[11-12]、CCD 本身的噪声^[13-14]都对信息提取造成极大影响, 必须加以消除或减小。然后对预处理后的条纹进行中心线细化^[15], 其原理基于求平均值法。计算公式为

$$\bar{x} = \frac{\sum I_x \cdot x}{\sum I_x}, \quad (6)$$

式中 x 为条纹上某个像素点的坐标, I_x 为像素点 x 处的光强值, \bar{x} 为中心线上的一点。将条纹上所有的 \bar{x} 点求出并连接起来, 即得到所需的中心。

如图 4 所示, 选取 $d=16.1$ mm 处的全息图做中心线细化处理, 经过处理后的图像, 更有利于计算条纹宽度。随机选取一条中心线上的一点, 对相邻的中心线作垂线, 分别读取该点与垂足的坐标 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$, 通过距离公式

$$z = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (7)$$

即可算出垂线的长度 z 。由于中心线并不是直线, 因此需要在中心线上取多个点计算 z 值, 最后求平均值, 得到的垂线长度才比较准确。将垂线的平均长度值视为两条中心线之间的距离, 也就是条纹的宽度。

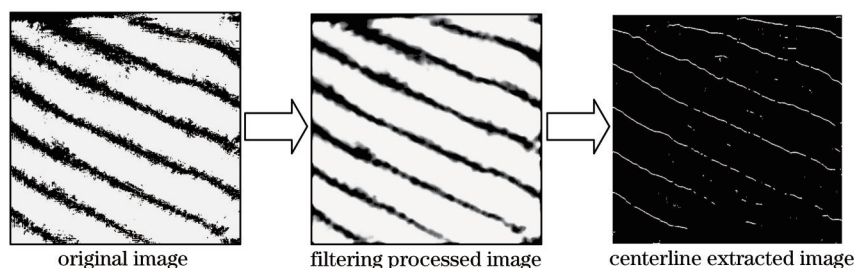


图 4 全息图预处理及中心线细化示意图

Fig.4 Schematic of pre-processing and centerline extraction

3.2 被测物的高度信息恢复

根据 3.1 节中的计算, 最后得到的 z 值就是条纹的宽度 w 值。于是根据(5)式将 w 值代入即可算出 d 值, 也就是被测物点的高度信息。表 1 所示为条纹宽度 w 与被测高度的真实值 d_0 和计算值 d 的对应数值关系, 对应的拟合关系曲线图如图 5 所示。

表 1 条纹宽度 w 与被测高度真实值 d_0 、计算值 d 的对应数值及相对误差 δ

Table 1 Corresponding values of stripe width w , real height d_0 , calculated height d and relative error δ

w /mm	7.287	6.643	6.281	5.843	5.562	5.335	5.176	5.025	5.004	4.986
d /mm	17.292	16.891	16.489	16.087	15.685	15.282	14.878	14.474	14.068	13.661
d_0 /mm	17.30	16.90	16.50	16.10	15.70	15.30	14.90	14.50	14.10	13.70
δ /%	0.046	0.053	0.067	0.081	0.096	0.118	0.148	0.179	0.227	0.285

由表 1 可知, 条纹的宽度变化量 Δw 最大值为 1.644 mm, 最小值为 0.018 mm, 而 CCD 的像元大小为 9 μm , 小于 Δw 的最小值, 由图 5 也可看出, 计算值 d 的散点几乎都落在 $w-d_0$ 的拟合曲线上, 因此, 可认为测得的条纹变化是准确的, 由 w 的值算出的 d 值也是准确的。被测高度 d 的最大相对测量误差为 0.285, 基本满足测量要求(测量精度达到 10^{-3})。

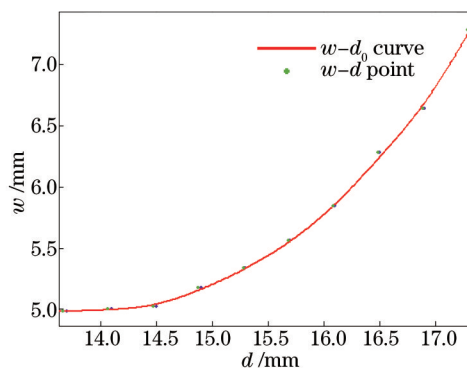


图5 条纹宽度 w 与被测高度真实值 d_0 、计算值 d 的对应关系

Fig.5 Corresponding relationship of stripe width w , real height d_0 and calculated height d

4 结 论

针对常见的工业零部件尺寸 10~100 mm,设计了一套高精度非接触式锥光全息测量系统,并应用于测量钱币表面的高度信息。当物镜焦距为 50 mm 时,该测量系统的精确测量范围为 5 mm,相对测量误差在 0.28%之内。这些数据表明该系统的各项指标满足工业上的测量要求,具有很好的开发前景。

参 考 文 献

- Li Guiying, Chen Dianren, Du Zhenlin, *et al.*. Displacement quantity test and measurement system with the laser light tri-angle method[C]. SPIE Automated Optical of Inspection for Industry: Theory, Technology and Applications, 1998. 3558: 165.
- Yuan Libo. Design of structured light by using three PM fibers for Moire interferometric profilometry[C]. SPIE, 2007, 6595: 49.
- Joaquim Salvi. Pattern codification strategies in structured light systems[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(4): 827-849.
- Zhou Xinglin, Ye Shenghua. Study on Large Section Geometric Shape Vision Measurement System[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. 42-47.
周兴林, 叶声华. 大尺寸截面几何形状视觉测量系统的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006. 42-47.
- G Y Sirat, D Psaltis. Conoscopic holography[J]. Opt Lett, 1985, 10(1): 4-6.
- Ren Shuyan, Pu Zhaobang. 3D Measurement Technology Based on Conoscopic Holography[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. 75-80.
任淑艳, 浦昭邦. 基于锥光全息原理的三维测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. 75-80.
- Ulf Schnars, Thomas M Kreis, Werner P O Jüptner. Digital recording and numerical reconstruction of holograms reduction of the spatial frequency spectrum[J]. Opt Eng, 1996, 35(4): 977-982.
- Zhao Jie, Wang Dayong. Study on Phase Contrast Imaging for Micro Objects by Digital Holographic Microscopy[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011. 62-66.
赵 洁, 王大勇. 微结构相衬成像的数字全息方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011. 62-66.
- Cai Lüzhong, Wang Yongqian. Graphic determination of reflection ray in uniaxial crystals and analysis of the interference of convergent polarized light[J]. College Physics, 2001, 20(1): 2-3.
蔡履中, 王永铃. 单轴晶体中光折射的图解计算及会聚偏振光干涉的定量分析[J]. 大学物理, 2001, 20(1): 2-3.
- Gao Xiang, Zhang Guoxiong, Li Zhen. Application of conoscopic interference in geometric profilometry[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(4): 452-455.
高 翔, 张国雄, 李 真. 偏光干涉在物体几何形貌检测中的应用[J]. 光学学报, 2002, 22(4): 452-455.
- Zhang Shengtao, Gao Wenhong, Zhao Pengfei, *et al.*. Laser speckle reduction due to angular diversity introduced by 2D laser diode array[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102005.
张圣涛, 高文宏, 赵鹏飞, 等. 激光阵列光源角度多样性抑制散斑方法[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102005.
- Wen Donghai, Jiang Yuesong, Zhang Xuguo, *et al.*. Speckle characteristics of laser radar polarization imaging and despecking algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0311003.
闻东海, 江月松, 张绪国. 激光偏振成像散斑统计特性和抑制方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0311003.

- 13 Wang Yanping, Wang Qianqian, Ma Chong. Factors affecting the accurate measurement of laser beam width with CCD camera[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0208002.
王艳萍, 王茜茜, 马 冲. 影响基于 CCD 相机激光光束宽度精确测量的因素[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0208002.
- 14 Cheng Shubo, Zhang Huige, Liu Hao, *et al.*. Performance measurement of mechanical shutter and dark current for scientific-grade optical CCD[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0204001.
程书博, 张惠鸽, 刘 浩. 科学级光学 CCD 暗电流及机械快门时间响应特性测试[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0204001.
- 15 Liu Zhen, Li Sheng, Feng Chang. Laser stripe center extraction based on cross-correlation algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0508004.
刘 振, 李 声, 冯 常. 基于互相关算法的激光条纹中心线提取[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0508004.