

基于光谱共焦传感器的石英摆片厚度测量

刘雪原, 钟志

(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为提高石英摆片厚度测量的精度和效率, 提出一种利用光谱共焦传感器进行测量的非接触测量方法, 并对该方法测量的不确定性进行了分析和实验。实验结果表明: 该测量方法测量精度高, 重复性好, 可以实现石英摆片厚度的非接触精密测量。

关键词: 光电子学与激光技术; 光谱共焦; 石英摆片; 厚度测量

中图分类号: TN247 文献标识码: A 文章编号: 1674-2850(2015)06-0610-04

Measurement method for the thickness of quartz pendulous reed based on chromatic confocal sensor

LIU Xueyuan, ZHONG Zhi

(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and efficiency of the measurement of quartz pendulous reed thickness, this paper proposed a non-contact measurement method using chromatic confocal sensor and analyzed the method. Experimental results show that the proposed method has good stability and high measurement accuracy, which can achieve precise non-contact measurement of quartz pendulous reed thickness.

Key words: optoelectronics and laser technology; chromatic confocal; quartz pendulous reed; thickness measurement

0 引言

石英挠性加速度计作为惯性导航仪表或遥控遥测仪表, 在航天、航空技术领域占有非常重要的地位。由于其精度高、长期稳定性好、体积小, 不仅在导弹平台式和捷联式惯性基准、飞机导航平台和宇宙飞船飞行控制系统、潜艇等航空、航天、航海等国防技术领域起着重要的作用, 而且在石油钻井、开凿隧道、建筑测震、地震检测等民用领域中亦得到广泛应用^[1]。石英摆片作为石英挠性加速度计的核心器件, 在加速计中起敏感加速度的作用。

石英摆片在我国已建线生产多年, 然而相应的质量检测技术并不完善, 存在许多问题。目前, 国内对石英摆片的厚度参数检测一般利用接触法, 如千分尺、电感传感器等。这种测试方法容易造成零件的损坏, 效率低, 精度很难保证, 而且完全由人工测量、操作, 钢板尺寸测量的准确率低, 成品率不高, 操作人员劳动强度大且极易造成摆片的人为损坏。石英摆片的几何尺寸对相应控制器件、导航器件性能影响很大, 其中高精度的厚度参数能够提高相应控制器件、导航器件的装配精度, 厚度参数精度的提高有助于生产出高性能的玻璃元件^[2]。研究提出了利用光谱共焦传感器对石英摆片厚度进行高精度的非接

作者简介: 刘雪原 (1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 现代通信技术

通信联系人: 钟志, 副教授, 主要研究方向: 光电检测、光电仪器、光电信号信息处理、通信信号信息处理. E-mail: zhongzhi@hrbeu.edu.cn

触测量, 该方法能够消除接触式测量引起的误差和损伤, 提高检测的速度和精度。

1 测量原理与系统设计

1.1 光谱共焦传感器原理

光谱共焦传感器采用复色光为光源, 其测量精度能够达到微米量级, 可用于测量漫反射或镜反射物体。此外, 光谱共焦传感器还可以对透明物体进行单向厚度测量, 光源和接收光镜为同轴结构, 有效地避免了光路遮挡。光谱共焦传感器原理如图 1 所示, 它由光源、透镜组、光谱仪等组成。

光源发出的多色光(呈白光)通过探头中一系列的光镜组后, 产生光谱色散, 再经过一系列的光学反射后, 形成不同波长的单色光; 然后在光轴的一定范围内聚焦, 并且形成一个连续的焦点组, 由传感器接收到每个焦点的反射信号, 从而确定每个单色光波长对应位置。还可以在高灵敏感光片上成像, 通过单色仪读出单色波的波长, 然后将其换算成对应的距离值, 通过控制箱中光电组件识别并最终得到样品的轴向位置。采用高数值孔径的聚焦镜头可以使传感器达到较高的分辨率^[3-4]。正是基于这种独特的原理, 使得光谱共焦传感器在位移测量上拥有高精度, 不论是单层透明物体还是多层透明物体, 不仅能够测量该物体位移, 而且可以测量其厚度。如薄玻璃片、平行平板等。平行平板的前后表面都会反射特定波长的光, 在单色仪上获得出现 2 个峰值的光谱曲线, 通过这 2 个峰值可以推算出玻璃的厚度^[5]。

1.2 测量系统设计

测量时将石英摆片固定于测量台上, 使光谱共焦传感器的镜头垂直于石英摆片且位于其上方, 调整传感器的镜头使石英摆片位于其量程范围内, 如图 2 所示。利用光谱共焦传感器的特性, 其发出的不同波长光分别聚焦在摆片的上表面 A 点和下表面 B 点, 并被反射回至信号处理系统。通过对信号分析, 根据 2 种波长的不同, 可以确定其相应的 (AO , BO) 位移值, 二者作差即可求出被测点的厚度。

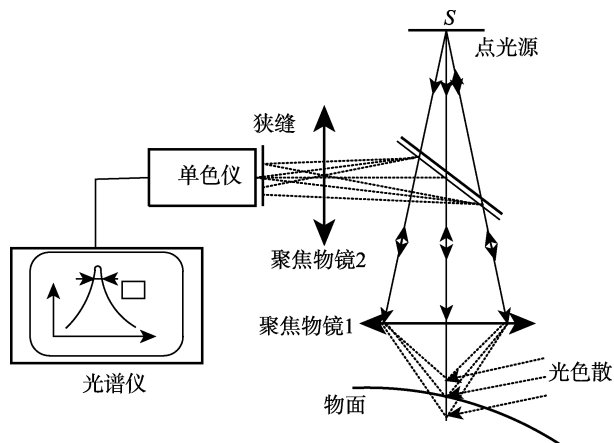


图 1 光谱共焦传感器原理

Fig. 1 Principle diagram of chromatic confocal sensor

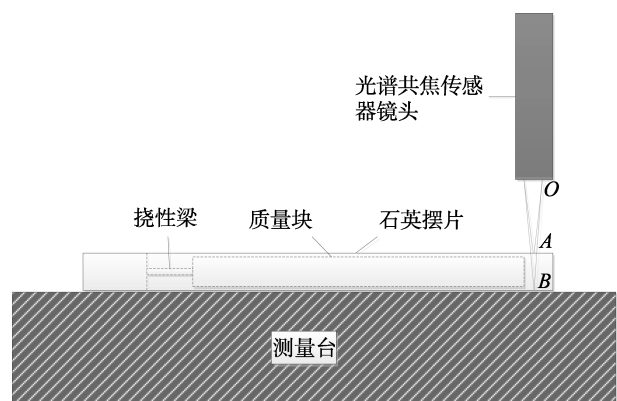


图 2 测量系统原理图

Fig. 2 Principle diagram of measurement setup

2 系统测量不确定性分析

2.1 光谱共焦传感器测量不确定性

研究使用的光谱共焦传感器测量量程为 $4\ 000\ \mu\text{m}$, 分辨率为 $50\ \text{nm}$, 精度为 $300\ \text{nm}$ 。根据其精度,

可以得出区间半宽度值为 300 nm，可认为区间内误差服从均匀分布，取包含因子 k 为 $\sqrt{3}$ ，置信概率 $P=100\%$ ，采用 B 类方法进行评定，则标准不确定度为

$$u(a) = 300/\sqrt{3} = 173 \text{ nm} = 0.17 \text{ }\mu\text{m} .$$

2.2 摆片放置不确定性

测量误差引入的测量不确定度还与放置的不平行度有关，其最大不可修正倾角为 1.3° ，因此，其测量误差最大为 $\left(\frac{1}{\cos 1.3} - 1\right)h_0$ ， h_0 为摆片厚度的测量参考值，假定 $h_0 = 800 \text{ }\mu\text{m}$ ，通常情况下厚度不会超过该值。根据测量误差可以得出区间半宽度值为 $\left(\frac{1}{\cos 1.3} - 1\right)h_0$ ，认为区间内误差服从均匀分布，取包含因子 k 为 $\sqrt{3}$ ，置信概率 $P=100\%$ ，采用 B 类方法进行评定，则标准不确定度为

$$u(b) = 1.5 \times 10^{-4} h_0 = 0.12 \text{ }\mu\text{m} .$$

2.3 摆片样品不确定性

石英摆片的加工工艺和石英玻璃不同批次对该不确定性影响较大，主要体现在摆片表面粗糙度和折射率上。对于同一批次的玻璃，其折射率变化程度不大，具有较好的可比较性，假定折射率测量的不确定度为

$$u(c) = 1.0 \times 10^{-3} h_0 = 0.8 \text{ }\mu\text{m} .$$

假定石英摆片粗糙度为

$$u(d) = 0.8 \text{ }\mu\text{m} .$$

现有的加工工艺可保证实际摆片的粗糙度远低于该值。

因此，总的测量不确定度为

$$u(L) = \sqrt{u^2(a) + u^2(b) + u^2(c) + u^2(d)} = 1.15 \text{ }\mu\text{m} .$$

3 实验结果

实验中采用光谱共焦传感器对石英摆片的 3 个台阶位置进行多次测量，测量结果如表 1 所示，将结果绘图，如图 3 所示。

表 1 石英摆片厚度测量结果
Tab. 1 Measurement results of quartz pendulous reed thickness

测量次序	测量位置 1/ μm	测量位置 2/ μm	测量位置 3/ μm
1	780.352	778.077	779.866
2	780.136	778.056	779.817
3	780.291	778.092	779.928
4	780.259	778.115	780.065
5	780.162	778.059	779.748
6	780.338	777.921	779.705
7	780.339	778.122	779.735

续表

测量次序	测量位置 1/ μm	测量位置 2/ μm	测量位置 3/ μm
8	780.346	778.083	779.773
9	780.175	778.187	779.741
10	780.245	777.970	779.951
11	780.269	777.996	779.966
12	780.146	777.907	779.703
13	780.255	777.923	779.711
14	780.417	777.969	779.826
15	780.228	777.936	779.828

通过对石英摆片厚度重复测量结果计算可得到, 测量位置 1 处厚度的均值为 $780.264 \mu\text{m}$, 标准差为 $0.085 \mu\text{m}$; 测量位置 2 处厚度的均值为 $778.028 \mu\text{m}$, 标准差为 $0.087 \mu\text{m}$; 测量位置 3 处厚度的均值为 $779.824 \mu\text{m}$, 标准差为 $0.111 \mu\text{m}$.

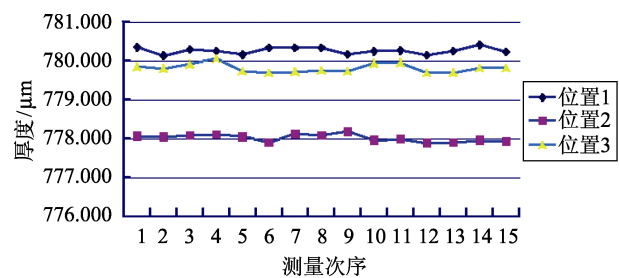


图3 石英摆片厚度测量结果图

Fig. 3 Graph of measurement results of quartz pendulous reed thickness

4 结论

研究提出的采用光谱共焦传感器对石英摆片厚度测量的方法, 弥补了传统测量方法的不足, 可以实现对石英摆片厚度进行高精度高速测量。该方法已于实验中取得满意结果。

[参考文献] (References)

- [1] 裴荣, 周百令. 高精度石英振梁加速度计挠性支承设计研究[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14 (5): 70-73.
PEI R, ZHOU B L. Design for high-precision quartz vibrating-beam accelerometer flexure hinge[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2006, 14(5): 70-73. (in Chinese)
- [2] 佟庆彬, 张晓冬, 丁振良, 等. 基于激光视觉的石英摆片厚度精密测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31 (6): 1358-1363.
TONG Q B, ZHANG X D, DING Z L, et al. Accurate measurement method for thickness of quartz pendulous reed based on laser vision[J]. Chinese Journal Scientific Instrument, 2010, 31(6): 1358-1363. (in Chinese)
- [3] 朱万彬, 曹世豪. 光谱共焦位移传感器测量透明材料厚度的应用[J]. 光机电信息, 2011, 28 (9): 50-53.
ZHU W B, CAO S H. Application of confocal chromatic displacement sensors to measuring thickness of transparent material[J]. OME Information, 2011, 28(9): 50-53. (in Chinese)
- [4] HILLENBRAND M, LORENZ L, KLEINDIENST R, et al. Spectrally multiplexed chromatic confocal multipoint sensing[J]. Opt. Lett., 2013, 38(22): 4694-4697.
- [5] 杨蒙生, 邢丕峰, 高党忠, 等. 基于双共焦传感器的薄膜厚度测量技术[J]. 原子能科学技术, 2010, 44 (增): 576-578.
YANG M S, XING P F, GAO D Z, et al. Measurement of thickness of foils based on conjugated confocal micro-displacement sensors[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(Suppl.): 576-578. (in Chinese)