

文章编号: 0258-7025(2005)04-0514-05

基于时间差法主动调焦式激光测头的研究

樊玉铭, 张国雄, 高翔, 李智, 赵树忠

(天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 在研究动态主动调焦法测量原理的基础上, 提出一种新型的动态主动调焦式激光测头的检测方法。该检测方法的核心原理是将位移量的测量转换成了时间差的测量, 从而简化了激光测头的结构, 提高了激光测头的测量精度和稳定性。介绍了所设计的高精度激光测头测量系统, 并对激光测头进行了动态特性的实验。结果表明激光测头的测量分辨力为 $0.075 \mu\text{m}$, 测量线性度为 $0.45 \mu\text{m}$, 测量范围为 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。

关键词 测量; 激光测头; 动态主动调焦; 时间差调焦测量

中图分类号 TS 736+.2; TN 247 **文献标识码** A

A Study of Dynamic Confocal Laser Probe based on Time Difference Measurement

FAN Yu-ming, ZHANG Guo-xiong, GAO Xiang, LI Zhi, ZHAO Shu-zhong

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Based on a study optical dynamic active confocal probe, a new method of the measuring deviation focus is developed. The key point of this new method is that displacement of the turning fork is converted to time difference measurement, thus the optical and mechanical structures of the laser probe system can be simplified greatly, and its accuracy and stability are enhanced. A new high integration measurement system is designed, and systematic experiments resulted of the including linearity, measuring range and performance were carried out.

Key words measurement; laser probe; dynamic active confocal; time difference confocal measuring

1 引 言

测头是三坐标测量机的基本部件。它关系到测量装置的测量精度、工作效率和测量功能^[1]。按测量方式, 测头可以分为接触式和非接触式。目前非接触式激光测头具有效率高、响应快、无摩擦、可测量软质表面等优点, 已经成为测头发展的主流。常用的光学非接触式测头方式主要有离焦法、三角法、视像法、轴向位移转换法、光纤法和立体视觉法测头等^[2~7]。其中离焦法激光测头是目前测量精密曲线表面最优秀的测头之一, 它利用不同的激光原理检测被测表面相对聚焦于光学系统微小间距的变化, 目前已广泛应用于工程表面微观轮廓测量、半导体、微电子器件、信息存储、医学检测、化学分析以及生

命科学研究等领域中。离焦法测头可以分为离焦误差检测法和扫描共焦检测法^[8]。

离焦误差检测法原理是将被测物转换为物镜焦平面相对于被测面的偏移量, 由不同的检测元件将其转换为电量输出反映偏离量的大小。常见的方法有全息法、像散法、临界角法、傅科刀口法等。其垂直分辨力为纳米级, 但是它的测量范围小, 工作距离短, 水平分辨力受到衍射极限的限制。扫描共焦检测法原理是将光源、被照物点和探测器三点处于彼此对应的共轭位置。激光经物镜在样品表面聚焦成衍射极限的光点。其反射光被导入共焦小孔光阑内, 利用光电探测器获得表面轮廓信息。扫描共焦检测法具有良好的垂直、水平分辨力和深度响应特性, 光强对比度强, 但是它也存在测量范围较小、对

收稿日期: 2003-12-23; 收到修改稿日期: 2004-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(50075064)资助项目。

作者简介: 樊玉铭(1947—), 男, 天津人, 天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室副教授, 主要从事光学测量方面的研究。E-mail: fanyuming@tju.edu.cn

针孔尺寸和位置要求严格等不足^[9,10]。动态扫描调焦法原理是在光路中引入音叉振动机构带动透镜,使焦点位置发生变化。当焦点落到被测表面时,其反射光束正好汇聚在与其共焦的光阑上,光阑处的光电元件接收到最大光强。通过微型位移传感器测量振动透镜的位置,即可确定被测表面的位置。动态扫描调焦法测量范围较大,但是所使用的微型位移传感器要求体积小、精度高,一般价格昂贵。与传统的离焦法相比动态主动调焦法测量系统具有高的测量精度,大的测量范围和好的动态特性^[11]。本文所提出的基于时间测量法调焦式激光测头及其测量系统,从原理而言所采用的时间测量法要比位移测量更容易实现高的分辨力和测量精度,激光测头的结构更简单,测量功能更强,而且系统不需要价格昂贵的高精度微型位移传感器。

2 工作原理与测头结构

为了克服传统离焦法测量范围较小的问题,本文引入了动态主动调焦的概念。通过对振动透镜变化的间接测量得到被测物体表面的位置,因此对振动透镜位移量的测量将直接影响到测头的测量精度。有多种微位移传感器可以实现对振动透镜位移量的测量,如电容传感器、电感传感器、应变片传感器和光栅传感器等。它们有各自的优势和不足,电容传感器容易受环境因素的影响;电感传感器的动态特性不够好;应变片传感器存在疲劳极限;光栅传感器体积大。传感器要达到亚微米级的测量精度、体积小的要求是比较困难的。在仔细分析了激光测头系统的基础上,提出了一种回避直接测量振动透镜位移量的方法,通过测量激光测头系统内两路光学信号的时间差来间接获得被测物体表面的位置。其测量原理如图 1 所示。

图 1 中,激光测头系统的两光路分别称为参考光路和测量光路。由分光镜 10,透镜 12,光阑 13 和光电接收器 14 组成参考臂对应振动透镜的平衡位置。即当振动透镜 7 位于平衡位置时,参考臂上的光电接收器 14 接收到激光器 1 的光强最大,并始终与被测点无关。由振动透镜 7,分光镜 3,光阑 2 和光电接收器 4 组成测量臂,光电接收器 4 在透镜 7 振动到某一位置时,使透镜 8 聚光点位于被测物体表面获得测量信号光强的最大值。因此,在测量过程中,如果被测面不在测头的原点,即振动透镜 7 的平衡位置时,则两个光电接收器所接收到光强最大

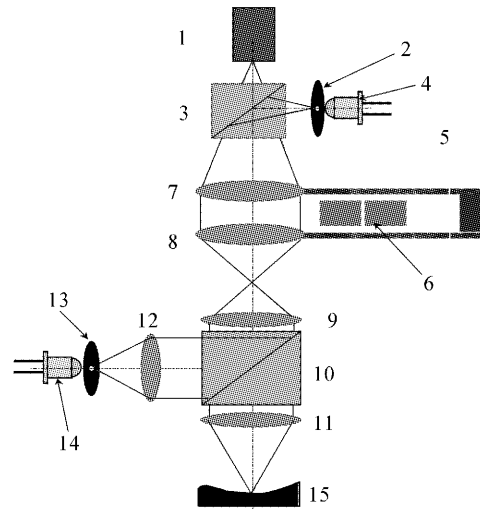


图 1 时间差法激光调焦式测头工作原理

1: 激光器; 2, 13: 光阑; 3, 10: 分光镜; 4, 14: 光电接收器;
5: 音叉; 6: 线圈; 7, 8, 9, 11, 12: 透镜; 15: 待测表面

Fig. 1 Working principle of the laser confocal probe based on time difference measurement

1: laser; 2 and 13: pinhole; 3 and 10: beam splitter; 4 and 14: photoelement; 5: vibrating fork; 6: coil; 7, 8, 9, 11, and 12: lens; 15: measured surface

值的时刻将存在着一个时间差 Δt 。通过测量这个时间差 Δt ,即将被测物体 15 相对于测头零点的位移量 Δ 转换为时间差 Δt 的测量。使用完全相同的两路光电信号处理方法测量时间量要比测量振动透镜位移量简单得多。它不仅提高了激光测头的测量精度,而且也省去了昂贵的位移传感器及其复杂的测量系统,简化了结构,降低了成本。由测量原理可知,激光测头对被测表面实际的轴向变化量是根据双音叉振动透镜位移运动的迭加效应换算出来的。因此,振动透镜 7 的位移量 Δ 和物镜 8 聚光点位移量 Δ' 位于被测物体表面之间的几何关系可以由图 1 获得。

根据透镜的物像距计算公式,物距 z ,像距 z' ,像方焦距 f' 之间的关系有

$$\frac{1}{z'} - \frac{1}{z} = \frac{1}{f'}, \quad (1)$$

在透镜 7,透镜 8,音叉 5,电磁振荡线圈 6 组成的音叉双透镜振动系统中,透镜 7 移动 Δ_2 ,则透镜 8 移动 Δ_3 。当透镜 7 移动 Δ_2 时,其物距 z_2 的变化为 $z_2 = -f'_2 + \Delta_2$,相应的像距 z'_2 为

$$z'_2 = \frac{f'_2(\Delta_2 - f'_2)}{f'_2 + \Delta_2 - f'_2} = \frac{f'_2(\Delta_2 - f'_2)}{\Delta_2}, \quad (2)$$

其中 f'_2 为透镜 7 的焦距。由此可得到透镜 8 的物点就是透镜 7 的像点。因此相对透镜 8 的物距 $z_3 = z'_2$

-(b + Δ₂ - Δ₃)。同样以透镜的物像距计算公式,得到透镜 8 的像距 z'₃ 为

$$z'_3 = \frac{f'_3 \cdot z_3}{f'_3 + z_3} = \frac{f'_3 \left[\frac{f'_2 (\Delta_2 - f'_2)}{\Delta_2} - (b + \Delta_2 - \Delta_3) \right]}{f'_3 + \frac{f'_2 (\Delta_2 - f'_2)}{\Delta_2} - (b + \Delta_2 - \Delta_3)}, \quad (3)$$

其中 b 为双透镜间距。在双透镜振动系统中,由于透镜 8 的运动,系统最终像点位置变化量与透镜 8 的像距变化量已不相同,应该减去透镜 8 的移动量 Δ₃,所以得到聚光点的位移量 Δ' 为

$$\Delta' = \frac{f'_3 \left[\frac{f'_2 (\Delta_2 - f'_2)}{\Delta_2} - (b + \Delta_2 - \Delta_3) \right]}{f'_3 + \frac{f'_2 (\Delta_2 - f'_2)}{\Delta_2} - (b + \Delta_2 - \Delta_3)} - \Delta_3 - f'_3,$$

经简化为

$$\Delta' = \frac{\Delta_2^2 - (f'_3 + f'_2 - b)\Delta_2 + f'^2_{\frac{3}{2}} - \Delta_2 \Delta_3}{2\Delta_2^2 - (f'_3 + f'_2 - b)\Delta_2 + f'^2_{\frac{3}{2}} - \Delta_2 \Delta_3} - \Delta_3. \quad (4)$$

当音叉振动时,理论上可以认为音叉的运动始终有 Δ₂ = -Δ₃,即 Δ₂ 与 -Δ₃ 的变化规律完全相同。因此可以设 Δ₂ = -Δ₃ = Δ,代入式(4)得

$$\Delta' = \frac{f'^2_{\frac{3}{2}} \Delta}{2\Delta^2 - (f'_3 + f'_2 - b)\Delta + f'^2_{\frac{3}{2}}} + \Delta. \quad (5)$$

依据式(5),可以得到音叉振动透镜位移量 Δ 与物镜聚光点位移量 Δ' (即测量点) 的关系。

为了推导测头音叉振动透镜位移量 Δ 与其所需要的时间 Δt 关系,可以由振动透镜的振动方程获得。因为音叉振动透镜位移方程的振幅为 a = A sin ω₀ (t + t₀)。其中, A 为最大振幅, ω₀ 为音叉振动角频率, t₀ 为初始时刻。在测头振动透镜的平衡位置,可认为 t₀ = 0,因此 a = A sin ω₀ t。假设在测量某一点时,音叉振动透镜的位移量为 Δ,因此有

$$\Delta = A \sin \omega_0 \Delta t, \quad (6)$$

其中 Δt 为测量音叉振动透镜的位移量 Δ 所用的时间。在式(6)中,振动透镜位移量 Δ 即为双音叉振动透镜的位移量 Δ。将双音叉振动透镜的位移量 Δ 代入式(5)中,即可得到测头音叉振动透镜位移量 Δ 所用的时间 Δt 与物镜聚光点位移量 Δ', 即被测量点的位移量 Δ' 之间的精确关系。因此,由图 1 可知,参考光路获得的光电信号始终与被测量点无关,而测量光路所得到的光电信号始终与被测量点共焦。因此通过测量参考光路与测量光路的时间差 Δt 就可获被测点的位移量 Δ', 如图 2 所示。a 点为振动透镜

的平衡位置, b 和 b' 为振动的极限位置,当音叉在 b 和 b' 之间振动的过程中,参考光信号会稳定地在透镜运动到平衡位置时达到最大值,而测量光信号的最大值则出现在透镜运动与被测量点共焦时的位置。

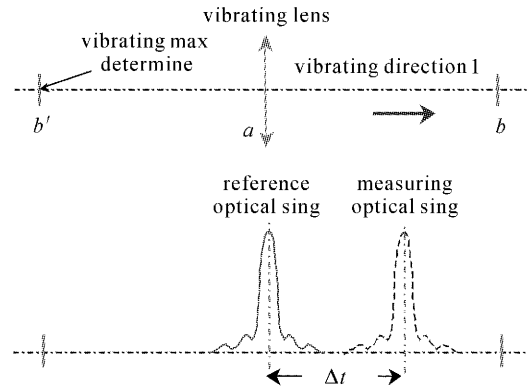


图 2 参考光路信号与测量光路信号的关系

Fig. 2 Relationship between the reference optical signal and the measuring optical signal

时间差测量法激光测头的结构包括机械系统、光学系统、音叉振动系统、光电接收电路系统和硬件电路系统。其中音叉振动系统采用了正反馈激励振动系统。硬件电路系统由光电接收前置放大部分,模拟信号处理部分和微机接口三部分组成。微机接口采用了现场可编程门阵列,减小了体积,增强了可靠性。整个软件采用了模块化结构的 Visual C++ 6.0 编写完成。

3 误差分析

由测量原理可知,激光测头在测量微小几何量时,是通过测量光路和参考光路输出的时间差得到的。因此从空间域到时间域测量的转换中,应该找出影响测量精度的振动参数。

由式(6)可以得到测头测量被测量点的位移量 Δ' 所用时间为 Δt = [arcsin(Δ/A)]/ω₀。可以看出,用时间来反映被测位移量大小存在着非线性。因此应该在系统标定时给予补偿处理,同时还可以看出激光测头振动系统的振幅变化或固有频率变化将会对测量带来误差。主要表现为:

1) 振动系统音叉的固有频率发生 dω₀ 变化时,产生的时间误差为

$$d\Delta t = -\frac{1}{\omega_0^2} \arcsin\left(\frac{\Delta}{A}\right) d\omega_0. \quad (7)$$

2) 振动系统的音叉振幅发生 dA 变化时,产生的时间误差为

$$d\Delta t = -\frac{\Delta/A}{\omega_0 A \sqrt{1-(\Delta/A)^2}} dA. \quad (8)$$

从式(7),(8)看出振动频率越高,由于频率和振幅不稳定性造成的测量时间 Δt 的误差越小;从式(8)还可以看出当振动透镜位移量接近振幅时,由于振幅波动带来的时间 Δt 的误差会增加很快,因此振动透镜振幅的稳定性和测量范围的选择很重要。

3) 音叉透镜垂直于测量方向偏差对测量的影响。

从图 1 可以得出音叉透镜振动时发光点与测量点的关系,测量点并非理想的在测量轴上运动,它会由于透镜的非直线运动而产生垂直于测量方向的偏移。根据理论分析和近似原理可以找出音叉的非理想直线的正弦振动与测量点产生垂直于测量方向偏移大小的几何关系。根据设计图,音叉两透镜焦距 $f'_2 = 30 \text{ mm}$, $f'_3 = 20 \text{ mm}$,间距 $b = 10 \text{ mm}$ 时,音叉臂长 $L = 40 \text{ mm}$ 。音叉振幅变化 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 时,实际计算出物镜聚光点偏离测量方向的大小,如图 3 所示。当透镜振动时,物镜聚光点的偏移量与音叉运动量的量级相当。它所造成的误差属于系统误差,可以通过系统标定减小。通过分析可知物镜聚光点偏离方向在音叉平面内,因此在使用中,激光测头的扫描测量方向应当尽量与音叉平面的方向平行。

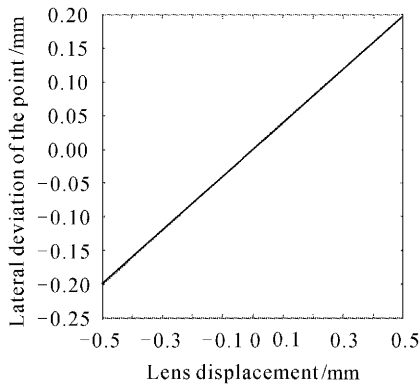


图 3 物镜聚光点偏离测量方向

Fig. 3 Lateral deviation of the image point

4 实验及分析

对关键部件音叉的实验主要为激光测头音叉振动稳定性测量;对激光测头测量系统整体的实验主要包括测量分辨力、示值稳定性、测量范围、测量非线性、测量强反射表面时的倾角范围。

4.1 音叉振动稳定性实验

通过对测量振动频率稳定性实验,得到音叉振动频率的平均值为 319.121 Hz ,频率变动最大量为 0.02 Hz 。根据标准方差公式得到振动频率的标准

方差为 0.006 Hz 。因此音叉固有振动频率 $\omega_0 = 2\pi \times 319.121 = 2005.1 \text{ rad/s}$ 。最大误差 $d\omega_{0\max} = 0.02 \times 2\pi \approx 0.126 \text{ rad/s}$ 。由式(8)得到因振动频率变化所产生的最大误差为 $dt_{\max} = \frac{0.126}{2005^2} \times \frac{\pi}{2} \approx 5 \times 10^{-8} \text{ s}$ 。用 dt_{\max} 除以音叉振动半周期得到测头测量范围的相对误差,其值为 3×10^{-5} 。显然其所占的比例很小。

4.2 分辨力实验

用量块固定于微动台上,以微动台单位步进运动为基准,读取测头对量块的输出作为分辨力。微动台每运动一小格 ($0.2 \mu\text{m}$),采集一次激光测头的输出。数据表明,激光测头对 $0.2 \mu\text{m}$ 的变化敏感性很好,整个数据的递增一致性好。测量数据的高散性分析,得到被测量每变化 $0.2 \mu\text{m}$,测量数据变化量的平均值为 93,测量数据变化量的标准方差为 35,约为 $0.075 \mu\text{m}$ 。

4.3 稳定性实验

实验得到两组数据。一组反映短期的稳定性,采样速率为 5 次/s,采样持续时间约 3 min。另外一组反映较长时间的稳定性,采样速率为 1 次/s,采样持续时间约 25 min。得到短时间稳定性的平均斜率为 0.014,平均值为 13244,标准方差为 21。约为 $21 \times 0.2 \mu\text{m} / 93 = 0.045 \mu\text{m}$ 。长时间稳定性数据的平均斜率为 -0.012 ,平均值为 13250,数据标准方差为 24.5,约为 $24.5 \times 0.2 \mu\text{m} / 93 = 0.052 \mu\text{m}$ 。与短时间相比较,激光测头系统的长时间稳定性变化不大。

4.4 测量范围及测量值的非线性

利用斜面微动平台使被测量块进行大范围内连续移动,得到激光测头确定输出的两个极限位置为 0.2960 mm 和 0.0980 mm 。因此激光测头的测量范围为 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 。激光测头的音叉正弦性振动造

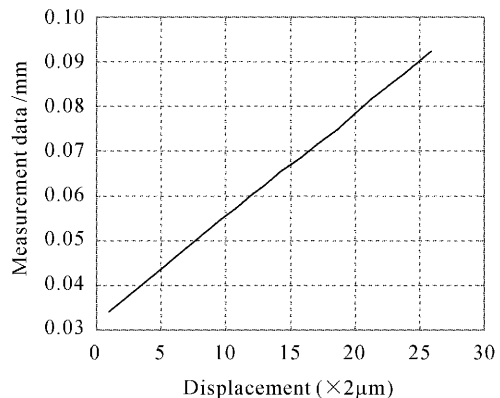


图 4 经过正弦补偿的测量数据

Fig. 4 Nonlinearity test

成的系统偏差,可以通过标定和软件补偿处理,很大程度消除了偏差。图 4 为经过正弦补偿的测量数据。利用最小二乘法求出激光测头补偿过的线性度误差约为 $0.45 \mu\text{m}$ 。

4.5 测量强反射表面的倾斜角度

通过倾斜被测表面进行强反射表面的倾斜角度实验,得到激光测头的倾角范围为 $\pm 10^\circ$ 。

5 结 论

基于时间测量法的调焦式激光测头及其测量系统结构简单,不需要价格昂贵的微型位移传感器,可以实现高的分辨力和测量精度。实验表明激光测头测量的分辨力为 $0.075 \mu\text{m}$,其测量范围为 $\pm 0.1 \text{ mm}$,线性度误差为 $0.45 \mu\text{m}$ 。系统的稳定性为 $0.052 \mu\text{m}$,测量速率为 320 点/s,最大可倾斜角度为 $\pm 10^\circ$ 。

参 考 文 献

- Zhang Guoxiong. Coordinate Measuring Machines [M]. Tianjin: The Publishing House of Tianjin University, 2000. 82
张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津:天津大学出版社, 2000. 82
- Kazuo Yamazaki, Kee Sein Lee, Hideki Aoyama *et al.*. Noncontact probe for continuous measurement of surface inclination and position using dynamic irradiation of the light beam [J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 1993, **42**(1):585~588
- Zhang G. X., Xu Y. C., Xie Z. X. *et al.*. A system for measuring high-reflective sculptured surfaces using optical noncontact probe [J]. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 2001, **50**(1):483~486
- Du Ying, Li Zhen, Zhang Guoxiong. Optical non-contact measurement technology for 3-D surface [J]. *Optics And Precision Engineering*, 1999, **7**(3):1~6
杜颖,李真,张国雄. 三维曲面的非接触测量技术[J]. 光学精密工程, 1999, **7**(3):1~6
- Gao Xiang, Zhang Guoxiong, Li Zhen. A study on the one-unit flexible hinge probe of CMMS [J]. *Journal of Tianjin University*, 2000, **33**(4):420~423
高翔,张国雄,李真. 一体化三坐标测头的研究[J]. 天津大学学报, 2000, **33**(4):420~423
- 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型貌检测中的应用[J]. 光学学报, 2002, **22**(4):452~455
- Zhang Shunde, Fang Qiang. Linearly coded profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(11):1533~1537
张瞬德,方强. 线性结构光编码的三维轮廓术[J]. 光学学报, 1997, **17**(11):1533~1537
- T. Wilson. Confocal Microscopy [M]. UK London: Academic Press, 1990
- H. J. Jordan, M. Wegner, H. Tiziani. High accurate characterization of engineering surfaces using confocal microscopy [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, **9**(7):1142~1151
- Hans J. Tiziani, Hans-Martin Uhde. Three-dimensional analysis by a microlens-array confocal Arrangement [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(4):567~572
- Gao Xiang. A study on the optical non-contact probe for surface measurement [D]. *Ph. D. Dissertation*, Tianjin: Tianjin University, 2002
高翔. 光电非接触形貌测头的研究[D]. 博士学位论文,天津:天津大学, 2002