

激光双法-珀干涉纳米测量系统总体设计^{*}

陈本永 朱若谷^a 吴昭同

(浙江大学机械系精密测量教研室,杭州,310027)

(^a 中国计量学院计测系精仪教研室,杭州,310034)

摘要: 设计了一套集光、机、电为一体的新型纳米测量系统:以激光为光源、双法-珀干涉仪及轻拍式探针为纳米传感部件、以柔性铰链机构的微动工作台为纳米扫描测试系统,并采用计算机数字 PID 实时控制处理;提出了通过测量双法-珀干涉仪透射光强基波幅值差或基波等幅值过零时间间隔的方法进行纳米测量的理论基础;理论分析了检测探针振动的方法;给出了基于柔性铰链机构的微动工作台的有限元设计新方法;设计了以电容传感器为精密位置反馈的 PID 闭环控制系统,解决了压电陶瓷等元件对系统造成的非线性影响;对系统误差进行了分析。

关键词: 纳米测量 双法-珀干涉仪 轻拍式探针 柔性铰链微动工作台 PID 闭环控制

Design of a nano-measurement system based on dual Fabry-Perot interferometer

Chen Benyong, Zhu Ruogu^a, Wu Zhaotong

(Dept. of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

(^aDept. of Metrology & Measurement, China Institute of Metrology, Hangzhou, 310034)

Abstract: A new nano-measurement system with laser, dual Fabry-Perot interferometers (DFPI), tapping stylus, flexure hinge stage and digital PID real-time computer control system is systematically designed. The theoretical basis of the nano-measurement system, using the measurement of amplitude difference or equal amplitude time interval of DFPI transmission wave, is proposed. The method of detection of tapping stylus vibration is theoretically analyzed. The finite element analysis method of small distance stage based on flexure hinge structure is proposed. The digital PID closed loop control system with the feedback signal of capacitance position sensor is applied, the system nonlinear influence caused by piezoelectricity element was solved. Finally, system error is analyzed.

Key words: nano-measurement dual Fabry-Perot interferometer tapping stylus flexure hinge stage PID closed loop control

* 国家自然科学基金资助。

5 Lowdermilk W H, Murray J E. J A P, 1980; 51: 2436

6 张 彬, 吕百达. 中国激光, 1996; A23(12): 1061

7 Keochner W. Solid-State Laser Engineering, 4th edition, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1996: 77

8 吕百达. 强激光的传输与控制. 北京: 国防工业出版社, 1999: 218

9 张 彬, 吕百达. 光学学报, 1997; 18(12): 1765

作者简介: 张 彬, 女, 1969 年 9 月出生。副研究员、博士。现从事光束传输变换、高功率激光物理与技术方面的研究。

收稿日期: 1999-09-24

引言

纳米技术是 21 世纪重点发展的高新技术,纳米测量是纳米技术的关键技术之一。一套纳米测量系统一般由纳米传感技术、三维(或二维)扫描工作台及其测量控制系统(即扫描测试系统)、信息处理及图像分析技术等三部分组成。目前,国内外对纳米测量技术的研究大致分为两个方面:一方面应用先进的测试仪器解决应用物理和微细加工中的纳米测量问题,分析各种测试技术,提出改进的措施或新的测试方法^[1~6];另一方面从计量学的角度出发分析各种测试方法的特点,如:使用范围、精度等级、频率响应等^[3,4,7,8]。笔者侧重前一方面,设计了一套基于激光双法-珀干涉仪的新型纳米测量系统。

1 系统总体设计

激光双法-珀干涉(DFPI)纳米测量系统组成框图如图 1 所示。He-Ne 激光器为系统光源,两个法-珀干涉腔 FP₁, FP₂ 组成类似迈克尔逊干涉仪的两个臂,其中 FP₁ 是测量腔,FP₂ 为参考腔,通过比较参考腔与测量腔的相对变化,可以准绝对地测量微小位移。将一个对微弱力极敏感的微悬臂的一端与 FP₁ 腔的一侧固定连接,另一端固定有一微小探针。该系统的工作过程为:激光束经分光器分成两束分别至 FP₁, FP₂ 形成双法-珀干涉,调节 FP₁, FP₂ 干涉腔长,使其输出稳定的

间隔为自由光谱范围的两个光脉冲信号;用一个小压电陶瓷元件驱使微悬臂在接近其固有频率处振动,调节 FP₁ 的腔长把这种受迫振动的探针调至距被测样品表面一定距离(通常 2~20nm),由于探针与样品表面之间的微弱作用力,会引起微悬臂振动的振幅、相位发生变化;样品随微动工作台移动进行扫描时,控制这种振幅或相位的恒定,则固定在微悬臂上的探针将对应于针尖与样品表面间作用力的等位面而在垂直于样品的表面方向起伏运动;利用光学检测法测出探针对应于样品扫描各点的位置变化,即可获得样品表面结构特征信息。

为了消除环境因素的影响,特别是环境振动和温度的变化,本系统设计了隔振系统和采用了双法-珀干涉仪,另外,通过振动位移传感器和温度传感器测得它们的变化量值传至控制系统,通过软件进行结果修正。

2 系统理论基础

2.1 相位调制 DFPI 理论分析

相位调制 FPI,若工作点选择在透射光强曲线峰值处,那么正弦波调制的光强基频分量别如下式表示:

峰值附近:
$$I_1 \cong I_0 F J_1(x) \sin(\omega_0 t + \varphi) \sin(\omega_m t + \varphi_m) \quad (1a)$$

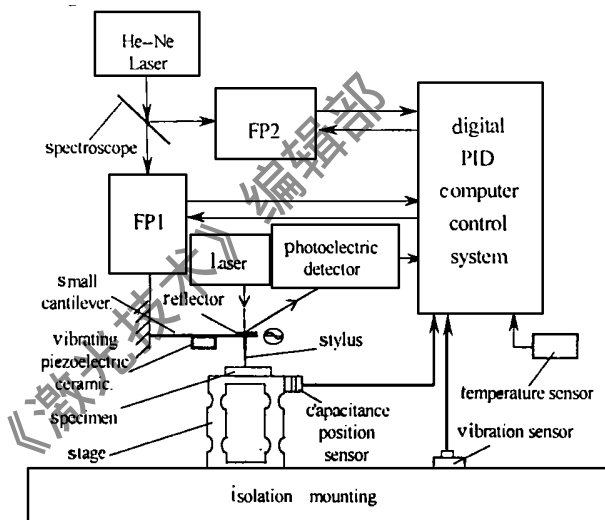


Fig. 1 Schematic diagram of a nano-measurement system based on dual F-P interferometer

偏离峰值： $I_1 \cong (4/F) I_0 J_1(x) \sin(\omega_0 t + \phi_0) \sin(\omega_m t + \phi_m)$ (1b)

式中, I_0 为输入光强; F 是精细常数 $J_1(x)$ 是一阶贝塞尔函数, 其宗量 $x = (4/\lambda) nV_0 K_c$, 其中 λ 为激光波长, n 为 F-P 谐振腔内介质折射率; K_c 为一阶压电材料转换系数; V_0 为调制电压幅值; ω_m 和 ϕ_m 分别为调制电压的角频率和相位; ϕ_0 为 F-P 的光相位; $\omega_0 t$ 为调制引起的等效相位变化。当 DFPI 的初相位 ϕ_1 和 ϕ_2 远小于 1rad 时, 对应的微位移计算如下:

设 $a_1 = I_0 F J_1(x_1) \cong I_0 F x_1/2$, $a_2 = I_0 F J_1(x_2) \cong I_0 F x_2/2$
则有 $a_1/a_2 \cong x_1/x_2 = d_1/d_2$ (2)

当 FP_1 作为测量共振腔时, 由(2)式有:

$$d_1 = d_2 a_1/a_2 \quad \text{或} \quad d_1 = d_1 a_1/a_1 \quad (3)$$

式中, d_1, a_1 和 d_2, a_2 分别为 FP_1, FP_2 的腔长和基波振幅, a_1 为两个 F-P 之间的振幅差。

设控制系统中带通滤波给出的信号为 $V_s \cos[(\omega_0 - \omega_m)t + \phi - \phi_m]$, 则当 $t = t_1, t_2$; ϕ_1, ϕ_2 时, 其相位差满足: $(\omega_0 - \omega_m)(t_1 - t_2) + \phi_1 - \phi_2 = 0$
对应等幅值时刻检测, 当选择适当的参数 (V_0, ω_m 和 ϕ_m) 以及限于纳米级测量时, 有近似线性关系:

$$\phi_1 - \phi_2 = \omega_m(t_1 - t_2) - \omega_0(t_1 - t_2)$$

而 $\omega_0(t_1 - t_2)$ 为二次微量, 可忽略不计, 有: $\phi_1 - \phi_2 \cong \omega_m(t_1 - t_2)$

又因为 $\omega_m = 4\pi d/T$, 有 $\phi_1 - \phi_2 = 4\pi d/T(t_1 - t_2)$, 记: $t = t_1 - t_2$, 所以有: $d = T(\phi_1 - \phi_2)/(4\pi t)$ (4)

式中, d 为 FP_1 和 FP_2 之间的腔长差; $T = 2\pi/\omega_m$ 为调制电压周期; t_1, t_2 分别是 FP_1 和 FP_2 基波的等幅值过零时刻。

(3)式, (4)式就是我们提出的通过测量 DFPI 输出光强基波幅值差或基波的等幅值过零时刻时间间隔的方法进行纳米测量的理论依据。

2.2 微悬臂振动理论分析

微悬臂一阶振动模型可简化如图 2 所示。其中: K 为等效弹簧常数; C 为等效阻尼系数; m 为等效质量; $F_1(t)$ 为施加给微悬臂的激振力, $F_1(t) = F_0 \sin \omega t$; $F_2(t)$ 为探针与样品表面之间的相互作用力, 其主要表现为 Van Der Waals 力, 当探针与样品表面间距一定时, 它们之间的相互作用力为一常数 F_d , 即 $F_2(t) = F_d$ 。因而, 微悬臂的振动是 $F_1(t)$ 与 $F_2(t)$ 共同作用引起的合振动。设 $F_1(t)$ 引起的探针振动位移是 $Z_1(t)$, $F_2(t)$ 引起的探针振动位移是 $Z_2(t)$, 于是有:

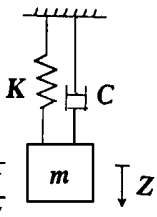


Fig. 2 Simplified model of small cantilever vibration

$$m\ddot{Z}_1 + C\dot{Z}_1 + KZ_1 = F_0 \sin \omega t$$

$$m\ddot{Z}_2 + C\dot{Z}_2 + KZ_2 = 0$$

解上述微分方程, 得探针的振动位移为:

$$Z(t) = Z_1(t) + Z_2(t) = A_1 \sin \omega t + A_2 \sin \omega t$$

式中, $A_1 = F_0/(K - m\omega^2)$, $A_2 = F_d/(m\omega_n^2 - \omega^2)$, $F = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} F_d dt$ 。

因激振频率 ω 在固有频率 ω_n 附近取值, 设: $\omega = \omega_n - \Delta\omega$, 将其代入上式, 并整理得:

$$Z(t) = A \sin(\omega t + \phi) \quad (5)$$

式中, $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \phi}$, $B = \text{tg}^{-1}(A_2 \sin \phi / (A_1 + A_2 \cos \phi))$ (6)

(5)式, (6)式表明此时探针振动的振幅 A 、相位 ϕ 与探针初始振动的振幅 F_1 、相位 ϕ_0 均不同。因此, 利用光杠杆、位置敏感检测器 (PSD) 可检测出振幅的变化, 利用相敏检波检测出

相位的变化,传至控制系统。若保持探针的振幅、相位不变,可通过控制系统调节 FP_1 的腔长伸长或缩短,使探针朝向(或背离)样品方向移动(设移动量为 d),这个纳米级的微位移量 d 可由(3)式和(4)式得出。

3 系统微动工作台设计

基于柔性铰链机构的微动工作台如图 1 所示。设计这种工作台的关键在于柔性铰链的设计。

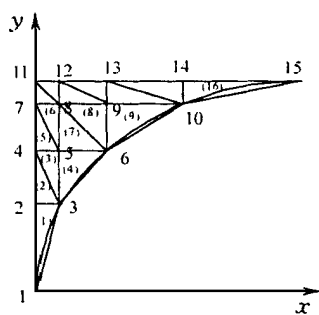


Fig. 3 The drawing of finite analysis cell of 1/4 flexure hinge iteration times: 4; cell number: 16

柔性铰链的设计要求是:绕一个轴的变形是柔性的,而绕另二轴的变形是刚性的^[9]。笔者用角度细分逐次迭代的有限元方法,先分别对柔性铰链部分和直杆处进行受力的应力、位移分析(图 3 所示为 1/4 柔性铰链的单元划分),找出这些部分的最佳单元划分;然后组合求解整个柔性铰

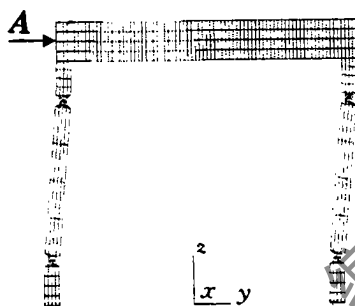


Fig. 4 Schematic diagram of deformed stage forced at point A

链机构的微动工作台的应力、位移分布,从而解决了工作台的设计问题。

逐次迭代的迭代次数-单元数-A 点的位移 (x 方向) 关系如表 1 所示。由表 1 可以看出,当迭代次数、划分的单元数到一定值(如 4, 16)时,再继续迭代、细分单元数, A 点的位移趋于定值。受力变形后的工作台(一维)如图 4 所示(为增强效果,力加大处理)。

Table 1 Force (1N) at point A

iteration times	cell number	displacement of point A (nm)
1	1	2.62
2	4	2.69
3	9	2.75
4	16	2.78
5	25	2.79
6	36	2.79

4 系统控制系统设计

为了使系统能进行纳米范围(0.1nm ~ 100nm)的测量和具有 0.1nm 分辨率的测试精度,解决 FPI 及压电陶瓷等元件对系统造成的非线性影响,并综合考虑环境振动、温度变化等因素的影响,我们依据控制系统理论,设计了一套以精密电容传感器测量微动工作台位移、探针振动相敏检波、数字 PID 闭环控制系统,如图 5 所示。

压电陶瓷元件具有典型的滞环非线性特性,它的非线性描述函数为:

$$\begin{aligned} \text{幅值} \quad |N_1| &= K_c \left\{ \left[\frac{H_1}{2} + \arcsin(1 - H_1) \right]^2 + \left[\frac{H_1}{2} + \arcsin(1 - H_1) + (1 - H_1)(2H_1 - H_1^2)^{1/2} \right]^{1/2} \right\} \\ &\cong K_c \left(1 + \sqrt{2H/V_0} \right) \quad \text{当 } 0 < H_1 \ll 1 \text{ 时} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{相位} \quad N_1 = \arctg \left\{ \frac{H_1(H_1 - 2)}{\left[\frac{H_1}{2} + \arcsin(1 - H_1) + (1 - H_1)(2H_1 - H_1^2)^{1/2} \right]} \right\}$$

式中, $H_1 = H/V_0$, H 为输入滞后(单位为 V); V_0 为正弦调制波幅值。由(7)式知,在工作范围内仅考虑滞环时, N_1 是与频率无关的,它仅与 V_0 有关。

FPI 的非线性描述函数可由(1)式导出:

幅值 $|N_2| = 2 K_1 \sqrt{\omega^2 + 4} / [(\omega^2 - 4) V_0 K_c \sqrt{2(1 - \cos \theta)}]$ (8)

相角 $N_2 = \arctg[\omega / 2tg(\theta/2)]$ (9)

式中, $tg \theta = \sin \theta / (-1 + \cos \theta)$ 。

由(8)式,(9)式得出符合 FPI 实际工作情况的奇点 $\omega = \{0, 2\}$,它相当于 $\theta = \{0, 2\pi\}$,这时幅值 $|N_2|$ 最大,即光强峰值。

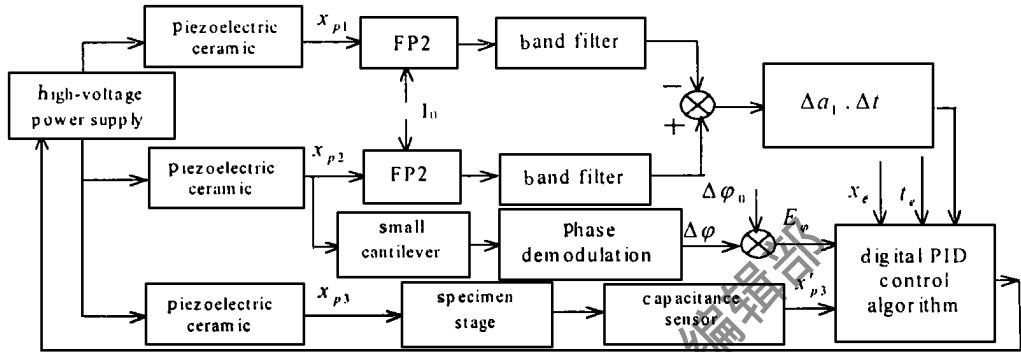


Fig. 5 Block diagram of digital PID closed loop control of the nano-measurement system

系统其它线性环节的综合传递函数为：

$$G(s) = K_3(s + s_5) \exp(-s_0) / Y_1(s + s_3)(k - \frac{2}{1} m + j_1 c) J$$

简化后的控制系统框图如图 6 所示,其中等价非线性环节幅值 $|N| = |N_1| |N_2|$,相角 $\angle N = \angle N_1 + \angle N_2$,系统的特征方程为: $1 + NG(s) = 0$

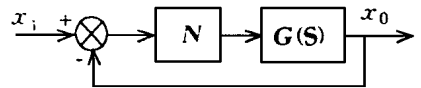


Fig. 6 Simplified block diagram of the control system

实验验证 DFPI 输出光强基波时间间隔测量和幅值测量的灵敏度阈值分别为 4.11×10^{-4} (μs), $n = 0.016 \text{ nm} / \mu s$ 和 3.70×10^{-4} ($\text{V} / 0.1 \text{ V}$), $n = 0.055 \text{ nm} / 0.1 \text{ V}$,其中 λ 为 He-Ne 激光波长 ($\lambda = 0.6328 \mu m$) 以及 $d_1 = d_2 = 0.25 \text{ m}$ 。通过实验证明,可以调节调制波的频率和幅值,并且加上直流偏置电压调节 FPI 的初相位,以获得最佳工作状态。

5 系统误差分析

针对我们提出的测量 DFPI 输出光强基波幅值差或基波的等幅值过零时刻时间间隔的纳米测量方法,分析其对应的基波幅值差测量法误差和时间间隔测量法误差。

5.1 时间间隔测量法误差分析

对(4)式求偏导(原 t 以 T 替代),有:

$$\frac{\partial t}{\partial T} = [t / T + (t / T + t(-T / T^2))] / 2$$

此式说明时间间隔测量法误差主要为光波长误差 λ 、时间间隔测量误差 (t) 和扫描正弦波周期误差 T 。

代入典型数值计算: $T = 10^{-3} \text{ s}$, $\lambda = 0.6328 \mu m$, $\lambda / \lambda = 10^{-6}$, $t = T$, $(t) = 5 \times 10^{-7} \text{ s}$, $T / T = 10^{-3}$,有: $(\partial t) \approx 1 / 2000$,可见产生的误差是很小的。

5.2 基波幅值差测量法误差分析

整流电压 V 与位相 θ 的关系为: $V = K_2 V_0 \sin \theta$ (10)

式中, $K_2 = 2 / F \cdot I_0 \cdot (4) / \cdot K_c \cdot K_V$, K_V 为电气部分总放大倍数。

此时的误差源包括:精细常数变化 F 、光强变化 I_0 、光波长变化 λ 、一阶压电系数变化 K_c 和电气放大倍数 K_V , 设它们的综合误差为 K_2 。对(10)式求偏导数,并整理得:

$$\frac{\partial V}{\partial \theta} = 0 + \dots \tag{11}$$

式中, $\frac{\partial V}{\partial \theta} = - \text{tg} (V_0 \cdot K_2 + K_2 \cdot V_0) / (K_2 V_0)$ \tag{12}

$$\frac{\partial V}{\partial \theta} = V / (K_2 \cdot V_0 \cdot \cos \theta) \tag{13}$$

所以位移变化 d 为: $d = \theta / (2) \cdot / 2 = V / (2 \cdot K_2 \cdot V_0 \cos \theta) \cdot / 2$ \tag{14}

(11)式~(14)式表明:只有当 θ 在零值附近,才有很好的线性并且误差最小。

把两 F-P 腔信号相减处理,有: $V = V_2 - V_1 = K_2 V_0 (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)$

令 $\theta_1 = \theta_0$, $\theta_2 = \theta_0 + \Delta\theta$, 代入上式,整理得:

$$V = K_2 V_0 [\cos \theta_0 \sin \Delta\theta - 2 \sin \theta_0 \sin^2(\Delta\theta / 2)]$$

当 $\Delta\theta \ll 1$ 时, $\sin^2(\Delta\theta / 2) \approx 0$, $\sin \Delta\theta \approx \Delta\theta$, 上式化简为: $V = V_0 / (K_2 \cos \theta_0)$

则相减后实现了差分运算,减小了误差,这是双 F-P 补偿的特点。对上式求偏导,有:

$$\frac{\partial V}{\partial \theta} = (V) / V + (-K_2 / K_2) + (-V_0 / V_0) + \text{tg} \theta_0 \cdot \theta_0$$

此时表明:在技术上使 $\theta_0 \approx 0$, 则上式中第 4 项误差可以充分补偿,从而最终误差主要由正弦扫描电压幅值误差 V_0 、综合误差 K_2 和电压差误差 (V) 决定,这三项可分别控制在 10^{-3} 以下,所以,最终相对误差可以不超过 2×10^{-3} 。

6 结 束 语

设计了一套以激光为光源、以双法-珀干涉仪及轻拍式探针为纳米传感部件、以柔性铰链机构的微动工作台为纳米扫描测试系统、采用计算机实时控制处理的新型纳米测量系统,并对该系统的关键技术进行了详尽的论述。

参 考 文 献

- 1 Takaya Y, Shimizu H, Takahashi S *et al.* Measurement, 1999; 25(1): 9 ~ 18
- 2 Atherton P D. Measurement and Control, 1998; 31(2): 37 ~ 42
- 3 Yoshida S. Metrologia, 1992; 28(6): 433 ~ 442
- 4 Nakayama K, Tanaka M, Shiota F *et al.* Metrologia, 1992; 28(6): 483 ~ 502
- 5 Li T Ch. 计量学报, 1998; 19(1): 9 ~ 14
- 6 朱若谷. 光学学报, 1994; 14(5): 508 ~ 512
- 7 Kunzmann H. Metrologia, 1992; 28(6): 455 ~ 462
- 8 Chetwynd D G. Measurement and Control, 1998; 31(2): 43 ~ 47
- 9 Parros J M, Weisbord L. Machine Design, 1965; 25: 151 ~ 156

作者简介:陈本永,男,1965年12月出生。博士研究生。目前主要从事纳米测量技术方面的研究。

收稿日期:1999-10-09 收到修改稿日期:1999-12-13