

文章编号: 0258-7025(2004)03-0350-04

复合光源实时微振动干涉测量仪

李代林, 王向朝, 王学锋, 郭立萍, 刘英明

(中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学研究实验室, 上海 201800)

摘要 提出了一种新的实时微振动激光干涉测量仪。通过采用复合光源和反馈系统, 有效地消除了激光二极管-正弦相位调制(LD-SPM)干涉仪中由电流调制所带来的测量误差和外界干扰所带来的影响, 实现了物体微振动的纳米精度实时测量。

关键词 测绘仪器; 实时测量; 微振动; 干涉仪

中图分类号 TH 744.3 **文献标识码** A

Composite-Light-Source Interferometer for Real-Time Micro-Vibration Measurement

LI Dai-lin, WANG Xiang-zhao, WANG Xue-feng, GUO Li-ping, LIU Ying-ming
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A novel LD-SPM interferometer, which can be used to measure micro-vibrations with a high accuracy in real time, is proposed. In this paper, a composite light source is employed to decrease the measurement errors caused by the light-intensity changes. Experiments verify the usefulness of the interferometer.

Key words measurement instrument; real-time measurement; micro-vibration; interferometer

1 引言

随着高精度机械加工和机器人技术的发展, 对机械运动部件相关参数的高精度实时检测变得越来越重要。光学干涉测量技术作为一种非接触式测量技术, 具有高分辨率、高精度和高灵敏度等特点, 因而得到了广泛的应用^[1~4]。

相对于传统的外差干涉仪, 由于使用激光二极管(LD)的正弦相位调制(SPM)干涉仪具有体积小、结构紧凑、相位调制简单、精确等优点, 因此在近十几年来使用这种干涉仪的高精度测量技术得到了很大的发展。在 LD-SPM 干涉仪^[5~9]中, 通过对 LD 输入正弦电流信号来实现干涉信号的正弦相位调制。然而通过注入调制电流来改变光源波长的同时, 光源的输出光强同时也被调制, 从而带来了较大的测量误差。本文提出了一种新的 LD-SPM 微振

动实时干涉测量仪, 通过采用复合光源降低了伴随 LD 波长调制产生的光强变化的影响; 通过加入反馈电路, 有效地消除了外界干扰对测量精度的影响。

2 原理

为了消除直接电流调制改变光源的波长时对光强波动的影响, 采用了如图 1 所示的新的复合光源 ALS 作为干涉仪的光源。当半导体激光器 LD₂ 的出射光注入到 LD₁ 时, 由于光热效应使 LD₁ 的结温发生变化导致其输出波长发生相应改变。LD₂ 由直流 I_{02} 和正弦电流 $I_{m2}(t)$ 通过 LM 驱动, 发出的光经过准直透镜 L_2 , 偏振分束器 PBS, 透镜 L_1 后, 聚焦到 LD₁ 上。由 LD₁ 发出的光经过准直透镜 L_1 及 PBS 后, 由分束器 BS 分成两束平行光, 分别照射到参考镜 M 和被测物体 object 上, LD₁ 与 LD₂ 的出射

收稿日期: 2002-11-04; 收到修改稿日期: 2002-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(69978024)和上海市科技发展基金(011461060, 0114nm013)资助项目。

作者简介: 李代林(1973—), 男, 中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事光信息处理研究。E-mail: ldl

@mail.siom.ac.cn

万方数据

光偏振方向互相垂直, PBS 使 LD₁ 的光透过而不反射到 LD₂ 上, 同时使 LD₂ 的光入射到 LD₁ 上, 其中被 LD₁ 反射的部分光束不会通过 PBS 进入两干涉臂产生干涉。此干涉仪中, LD₁ 被用作干涉仪光源、相位调节器和相位补偿器。

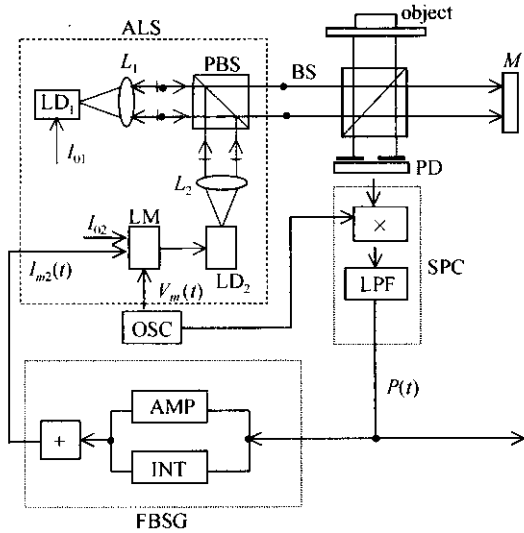


图 1 复合光源实时微振动干涉测量仪

Fig. 1 LD-SPM interferometer for real-time micro-vibration measurement

在电流 I_{02} 与 $I_m(t) = a \cos(\omega_c t)$ 的驱动下, LD₂ 的输出光强正弦变化, 照射到 LD₁ 上后, 导致其波长变化为

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \beta_1 \beta_2 a \cos(\omega_c t) \quad (1)$$

λ_0 为 LD₁ 的中心波长, β_1 为 LD₁ 波长的光热调制效率, β_2 为 LD₂ 的光强调制效率。光电二极管 PD 接收到的干涉信号为

$$S(t) = S_0(t) + S_1(t) \cos[z \cos(\omega_c t + \theta) + \alpha(t) + \delta] \quad (2)$$

其中 S_0 为信号的直流分量, S_1 为信号的交流分量的振幅, $z = 4\pi a \beta D_0 / \lambda_0^2$ 为正弦相位调制深度。 $\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_d(t)$, 其中 $\alpha_0 = (4\pi / \lambda_0) D_0$ 是初始相位, 由光程差 $2D_0$ 决定; $\alpha_d(t) = (4\pi / \lambda_0) d(t)$, 是由被测物体的振动引起的相位变化。 $d(t)$ 为压电陶瓷 (PZT) 驱动下物体的位移变化。用 Δl 表示由干涉仪的机械振动和空气扰动引起的光程变化, 则它带来的相位误差为 $\delta = (2\pi / \lambda_0) \Delta l$ 。将干涉信号 $S(t)$ 和调制信号 $V_m(t)$ 分别放大后通过由模拟乘法器和一个低通滤波器 LPF 组成的信号处理电路 SPC, 两个放大器的增益分别为 K_1 和 K_2 , 模拟乘法器的增益为 K_m 。低通滤波器 LPF 的增益为 K_L , 截止频率 $< \omega_c / 10$ 。信号变为 万方数据

$$P(t) = K_s \sin \alpha(t) = K_s \sin[\alpha_0 + \alpha_d(t) + \delta] \approx K_s [\alpha_d(t) + \delta] \quad (3)$$

其中信号处理系统的增益 $K_s = K_m K_L S_0 A J_1(z)$ 。由式(3)可知, 因为存在外界干扰, 同时仅在 $\alpha(t) = 2n\pi$ 附近探测信号 $P(t)$ 与振动 $d(t)$ 之间的比例关系才成立, 因此在很大程度上限制了该系统的精度。为了消除外界干扰, 在处理电路中引入增量积分电路作为反馈信号控制器。由放大器 AMP 和积分器 INT 组成的反馈电路 FBSG 得到的控制电压为

$$V_c(t) = K_p e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt - K_p K_f \alpha_d - \left(K_p K_f \alpha_0 + \frac{K_f}{T_I} \int \alpha_0 dt \right) - \left(K_p K_f \Delta l + \frac{K_f}{T_I} \int \Delta l dt \right) - \frac{K_f}{T_I} \int \alpha_d dt \quad (4)$$

上式中 $e(t) = -[K_f(\alpha_0 + \alpha_d(t)) - \delta]$, T_I 为积分时间。当 $\alpha_d(t)$ 为周期函数时, (4) 式的最后一项为 0; 当第一项、第二项和第三项所示的电压输入到 LM, 其反馈电流分别为 $I_c(t)$, I_b 和 I_f , 这些反馈电流导致 LD₂ 的光强发生相应的变化, 引起 LD₁ 的波长发生变化。LD₁ 波长的改变量分别为 $\lambda_c(t) = \beta_1 \beta_2 I_c(t)$, $\lambda_b(t) = \beta_1 \beta_2 I_b$ 和 $\lambda_f(t) = \beta_1 \beta_2 I_f$, 其中 I_b 和 I_f 都是直流电流。则干涉信号相位变为

$$\alpha(t) = \frac{4\pi[D_0 + d(t)]}{\lambda_0 + \lambda_b + \lambda_c(t) + \lambda_f} \approx (\alpha_0 - \alpha_b) + [\alpha_d(t) - \alpha_c(t)] + (\delta - \delta_f) \quad (5)$$

式中 $\alpha_c(t) = \frac{4\pi D_0}{\lambda_0^2} \lambda_c(t)$, $\alpha_b(t) \approx \frac{4\pi D_0}{\lambda_0^2} \lambda_b$ 和 δ_f 是由反馈电路产生的补偿相位, 其中 $\alpha_b(t)$ 是由积分器产生的补偿相位, 它能将相位 α_0 完全补偿掉, 于是(5)式中第一项变为 0; 则(3)式变为

$$P(t) = K_s \sin \alpha(t) = K_s \sin[\alpha_d(t) - \alpha_c(t) + \delta - \delta_f] \quad (6)$$

定义 $K_c = 4\pi D_0 / \lambda_0^2$, 反馈环增益 $G_0 = K_c \beta_1 \beta_2 K_{LM} K_f K_s$ 。为讨论简单, 先不考虑由物体振动所带来的相位影响, 则当反馈环工作时, 得到

$$\delta_f = -K_c \beta_1 \beta_2 K_{LM} K_f P(t) \quad (7)$$

通过适当地选取 G_0 , 综合(6), (7)式可得

$$\delta_f = \frac{G_0}{G_0 - 1} \delta \quad (8)$$

由(8)式可见, 当 $G_0 \gg 1$ 时, 可以消除由外界干扰带来的相位扰动。

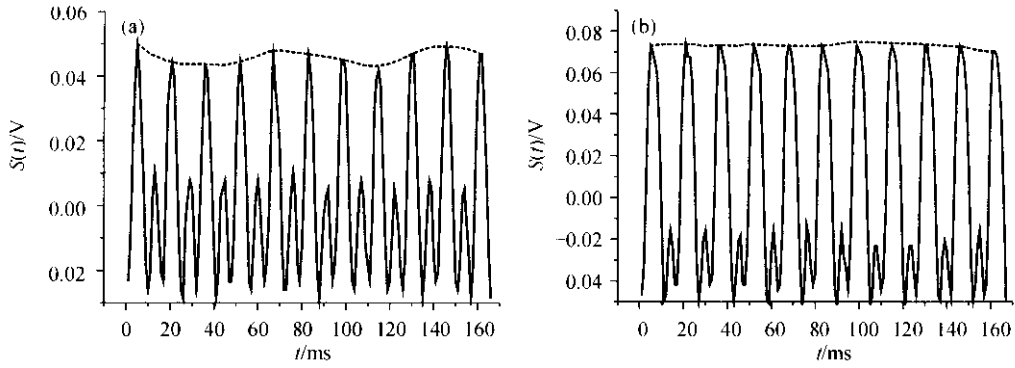


图 2 采用电流直接调制光源时(a)和复合光源时(b)得到的干涉信号

Fig. 2 Detected interference signals when current-modulation light source (a) and composite light source are used (b)

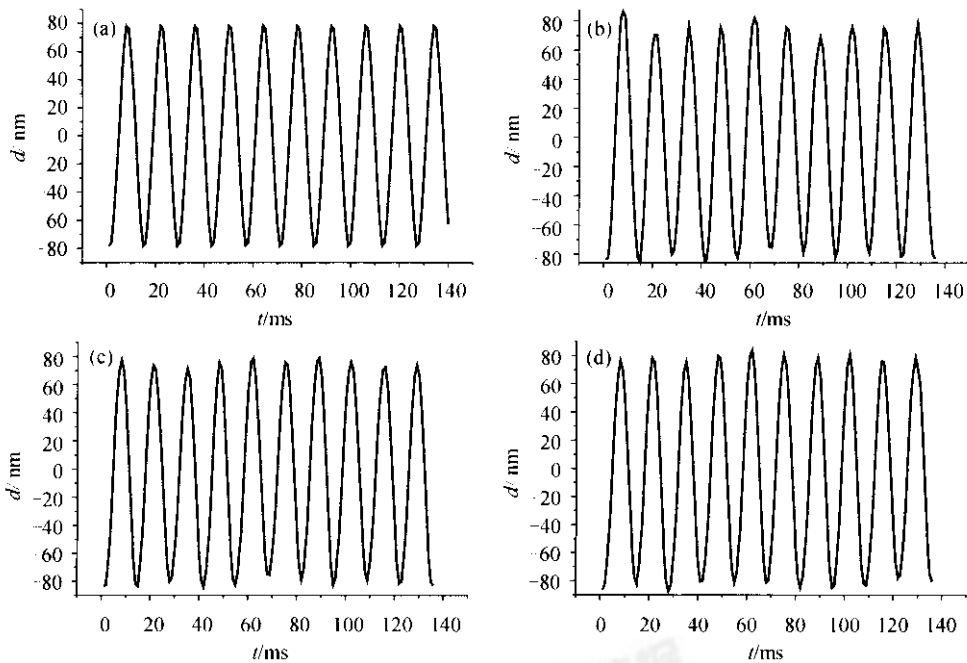


图 3 (a) 物体的微振动曲线;(b) 电流直接调制光源时测得的振动曲线;

(c) 采用复合光源时实验测得的物体微振动曲线;(d) 相隔几分钟后的测量结果

Fig. 3 (a) Micro-vibration curve of PZT. The measured micro-vibration curve when (b) current-modulated light source and (c) the composite light source are used. (d) The measured curve after an interval of a few minutes

3 实验结果

LD₁, LD₂ 的中心波长为 785 nm, 输出功率分别为 10 mW 和 40 mW。实验中 LD₂ 波长的光强调制效率 β_2 为 0.27 mW/mA, LD₁ 的光热调制效率 β_1 无法由实验直接得出, 我们用文献[3]的方法测出总的调制效率, 然后求出 β_1 为 6.3×10^{-4} nm/mW。实验中采用的调制信号的频率为 10 kHz, LM 的转换系数 K_{LM} 为 0.01 mA/mV。放大器的增益 K_1 与 K_2 分别为 62.2 和 86.7, 模拟乘法器的系数 K_m 为 5×10^{-5} mV, 放大器的增益 K_L 为 10。由振动 $d(t)$

到相位 $\alpha_d(t)$ 的转换系数 K_d 为 1.54×10^{-2} rad/nm。两光臂间的光程差 $2D_0$ 为 16 cm。首先用电流调制法对物体的微振动进行实时测量; 然后再采用复合光源进行测量。图 2(a) 是用电流直接调制时所得到的干涉信号, (b) 是采用复合光源后得到的干涉信号。可以看出由于直接电流调制时对光源的光强影响, 图 2(a) 中干涉信号强度受到调节, 而采用复合光源后消除了这种影响。图 3 是一个 PZT 振动的测量结果, (a) 是用本研究室的微位移与微振动纳米精度干涉测量仪测得的结果, 因为该干涉测量仪的测量精度为 1 nm, 所以把它的测量结

果作为标准值;(b)是电流直接调制时的测量结果,(c),(d)是用本文提出的测量系统相隔几分钟后测得的振动。与(a)相比,(b),(c)两次测量结果的振幅均方根(rms)误差分别为 4.2 nm 和 2.8 nm,(c),(d)两曲线的均方根差为 1.8 nm。可见采用复合光源后,测量系统的均方根误差降为原来的 67%,提高了系统的测量精度;同时由于采用反馈电路消除外界干扰,保证了干涉测量仪的高重复精度。由于相位 $\alpha(t)$ 的取值范围在 $\pm\pi/2$ 之间,所以 $d(t)$ 的最大测量范围为 $\lambda/4$ 。

需要指出的是,虽然复合光源中 LD_1 光强也会随注入的调制光变化而发生改变,但是其光强调制系数比电流直接调制系数小大约 1 个数量级^[10],因此可以认为本实验系统基本消除了通常电流调制所引起的测量误差。

4 结 论

对于在干涉测量领域应用广泛的 LD-SPM 干涉仪,我们通过采用新的复合光源和反馈电路,不仅消除了直接调制时光源的光强波动所引起的测量误差,而且有效地消除了外界干扰的影响,实验证明采用这种方法可以实现实时高精度的微小振动测量,可用于对微机电系统部件的微小振动的测量。

参 考 文 献

- 1 T. Suzuki, O. Sasaki, K. Higuchi *et al.*. Real time displacement measurement in sinusoidal phase modulating interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(24):5270~5274
- 2 Song Song, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng *et al.*. Real-time micro-vibration measurement using synchronous phase detection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8):753~756
宋 松,王向朝,王学锋 等. 采用同步相位检测的微小振动实时测量[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(8):753~756
- 3 Xuefeng Wang, Xiangzhao Wang, Feng Qian *et al.*. Photothermal modulation of laser diode wavelength: application to sinusoidal phase-modulating interferometer for displacement measurements [J]. *Optics & Laser Technology*, 1999, **31**(8):559~564
- 4 Xiangzhao Wang, O. Sasaki, T. Suzuki *et al.*. Measurement of small vibration amplitudes of a rough surface by an interferometer with a self-pumped phase-conjugate mirror [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(25):4593~4597
- 5 Wang Xuefeng, Wang Xiangzhao, Qian Feng *et al.*. Photothermal wavelength modulation of a laser diode for decreasing interferometric error [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1999, **26**(5):1~3
王学锋,王向朝,钱 锋 等. 光热调制半导体激光波长降低干涉测量误差[J]. *光电工程*, 1999, **26**(5):1~3
- 6 Lu Hongbin, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng *et al.*. Study on photo-thermal intensity-modulation characteristics of laser-diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(11):969~972
卢洪斌,王向朝,王学锋 等. 半导体激光器光强光热调制特性的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(11):969~972
- 7 Xiangzhao Wang, O. Sasaki, T. Suzuki *et al.*. Measurement of small vibration amplitudes of a rough surface by an interferometer with a self-pumped phase-conjugate mirror [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(25):4593~4597
- 8 Lih-Wuu Chang, Pie-Yau Chien, Ching-Ting Lee. Measurement of absolute displacements by a double-modulation technique based on a Michelson interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(13):2843~2847
- 9 Song Song, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng *et al.*. Real-time micro-vibration measurement with a laser diode interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5):578~580
宋 松,王向朝,王学锋 等. 半导体激光微小振动实时干涉测量仪[J]. *光学学报*, 2001, **21**(5):578~580
- 10 C. M. Klimcak, J. C. Camparo. Photothermal wavelength modulation of a diode laser [J]. *Am. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(2):211~214