

# 微振动振幅的精密测量\*

汤俊雄 万 炼 吴义芳 施 清 郑乐民  
(北京大学无线电电子学系)

## 提 要

本文给出一种微振动振幅的精密测量方法。此方法采用光拍相位检测、伺服锁定干涉仪光程差和窄带检测技术,大大提高了信噪比。微振动振幅检测灵敏度达  $2.2 \times 10^{-2} \text{ \AA} / \sqrt{\text{Hz}}$  (2 kHz 信号)。  
关键词: 光拍相位检测, 窄带检测, 伺服锁定。

## 一、引 言

近年来,人们通过检测光程差变化实现对一些灵敏度为  $\text{\AA}$  量级的物理量测量,例如,表面粗糙度<sup>[1]</sup>、微小位移<sup>[2]</sup>、波片延迟<sup>[3]</sup>等。另一类不同的方法是光程差以交变方式变化(其中包含待测物理量信息),这种方案最大优点是能用窄带检测技术、压缩检测电路带宽、提高信噪比。文献[4]曾报道检测光程差的微振动方案,为克服环境噪声影响,光路用晶体相连接,驱动频率用较高频率(160 kHz),振动振幅检测灵敏度达  $3 \times 10^{-4} \text{ \AA} / \sqrt{\text{Hz}}$ 。作者前曾用光拍振幅检测法测量小振动位移,检测灵敏度达  $5 \times 10^{-2} \text{ \AA} / \sqrt{\text{Hz}}$ <sup>[5]</sup>,本文采用的方案为光拍相位检测,其相对振幅检测可减少激光功率噪声影响。还采用了电子伺服回路锁定干涉仪光程差,抑制环境噪声,相对晶体光路方案有简易、成本低廉的优点。此外本方案还采用了窄带检测技术。在噪声较难克服的 kHz 频段,振幅检测灵敏度达  $2.2 \times 10^{-2} \text{ \AA} / \sqrt{\text{Hz}}$ 。由于一些物理量的检测可以转化成光程差(移位)的小振动形式(例如传感器冲击响应<sup>[4]</sup>、光热位移<sup>[6]</sup>、光吸收过程空气折射率变化<sup>[7]</sup>等),因此本课题有广泛应用前景。

## 二、实验原理

实验原理如图1所示,光源采用纵向塞曼稳频激光器(L.Z.S.L.),迈克尔逊干涉仪的镜子  $M_1$  与压电陶瓷(P.Z.T.)相连,在驱动信号  $f_m$  作用下作简谐振动,此即检测对象,本文采用光拍相位检测方案。光路1为检测光路,提取光拍相位信号,经相位解调、窄带检测获得微振动振幅值。光路2为锁光程光路,提取干涉信号,伺服控制镜  $M_2$ , 锁定干涉仪程长,下面详细分析之。

### 1. 光路设计

本方案要求光路同时提供光拍相位信号和干涉信号,设计的光路如图1所示。在光路

收稿日期: 1988年9月9日; 收到修改稿日期: 1989年6月22日

\* 本项目为国家自然科学基金资助的项目。

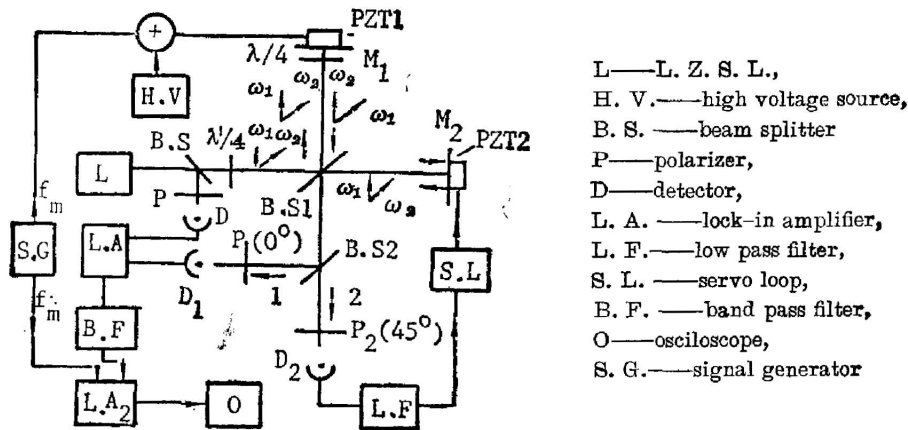


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental arrangement

1 中, 从纵向塞曼激光器出射的左、右旋圆偏振光经  $\lambda/4$  片后变成水平和垂直线偏振光, 自分束器  $BS_1$  反射之双光束经  $\lambda/4$  片和  $M_1$  反射后, 两线偏振光方向互换, 而自  $BS_1$  透射之双光束返回后偏振方向不变, 从干涉仪出射之四束光经分束器  $BS_2$  反射后作为检测光束, 偏振器  $P_1$  取水平方向 ( $0^\circ$ ), 滤掉两束光, 剩下的两束光是经  $M_1$  臂的  $\omega_1$  光和经  $M_2$  臂的  $\omega_2$  光, 这样采用功率分束器和偏振器也获得了与偏振分束器同样的分束效果, 选用高消比的偏振器使设计指标达到要求 (讨论 1)。显然偏振器  $P_1$  取  $90^\circ$  可得到同样效果。

这样参与光探测器  $D_1$  混频光束为

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= A_0 \cos \left[ \omega_1 t - \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta L_1 + \delta \Delta L_1) + \phi_{10} \right], \\ E_2 &= A_2 \cos \left[ \omega_2 t - \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta L_2 + \delta \Delta L_2) + \phi_{20} \right], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

输出之光拍信号为

$$\left. \begin{aligned} V_I &= V_0 \cos \left[ \omega_0 t + \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta L + \delta \Delta L) + \phi_0 \right], \\ \Delta L &= \Delta L_2 - \Delta L_1 = 2x_0 \sin \omega_m t, \\ \phi_0 &= (\phi_{10} - \phi_{20}) + \phi', \\ \omega_0 &= \omega_1 - \omega_2, \quad \delta \Delta L = \delta L_2 - \delta L_1, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中  $\omega_0 = \omega_1 - \omega_2$  为拍频,  $\Delta L$  为光程差,  $\delta \Delta L$  为气流、振动等环境因素引起的光程差无规抖动。 ( $\phi_{10} - \phi_{20}$ ) 为两光束初相差,  $\phi'$  为干涉仪两臂静态光程差对应的相位差,  $V_0$  为与输入光强有关的直流电平。

而在光路 2 中, 由于偏振器  $P_2$  置于  $45^\circ$ , 自干涉仪出射的四束光波都在  $D_2$  中参与混频, 既能得到拍频项又能得到干涉项, 用  $D_2$  后面低通滤波器滤掉拍频项。因此, 只计同频干涉项

$$V_{II} = V_0' \left\{ 1 + \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta L + \delta \Delta L) + \phi_0 \right] \right\}, \quad (3)$$

这样光路设计既得到了光拍相位信号, 又得到了干涉条纹信号, 人们可用前者检测待测量, 而用后者锁定干涉仪光程差。

## 2. 窄带检测

光路 1 中  $D_1$  的拍信号输入到锁相放大器 1, 经相位解调后得到

$$V = K_1 V_0 \left( \frac{2\pi}{\lambda} 2x_0 \sin \omega_m t + \Delta\phi \right), \quad (4)$$

式中  $K_1$  为锁相放大器 1 之增益,  $\Delta\phi$  为干涉仪光程漂移、抖动(环境所致)带来的相位噪声。锁相放大器的参考频率为光拍频 ( $f_0 = 200 \text{ kHz}$ ), 该仪器的低通滤波器带宽取决于驱动信号  $f_m$  的变化速率, 为使有用信号不失真, 滤波器带宽不可能取很小, 为此设置锁相放大器 2, 其参考频率为驱动信号频率  $f_m$ , 仪器滤波器带宽取为  $1 \text{ Hz}$ , 为使工作不过载, 在其前面加了一级带通滤波器(中心频率  $f_m$ 、带宽  $10 \text{ Hz}$ )。于是, 最后输出的直流电平为

$$A = K_1 K_2 K_3 \frac{4\pi}{\lambda} V_0 x_0, \quad (5)$$

式中  $K_2$  为所加滤波器的传递函数,  $K_3$  为锁相放大器 2 的增益。减小输入信号, 当锁相放大器 2 输出直流电平和噪声电平相等时, 即相当于信噪比等于 1, 这时的微振动振幅检测极限  $x_{0m}$  为

$$x_{0m} = A_{\min} \lambda / 4\pi V_0 K_1 K_2 K_3. \quad (6)$$

## 3. 伺服锁定干涉仪

如上所述, 光路 2 低通滤波器输出得到了干涉信号  $V_{II}$ , 其中  $\Delta L$  为驱动信号引起的光程差有规变化,  $\delta\Delta L$  为环境所引起的光程无规抖动, 为抑制  $\delta\Delta L$  影响, 作者设计了负反馈伺服回路, 即把  $V_{II}$  所反映的强度——光程差曲线作为光程差鉴别曲线, 以负反馈伺服回路将干涉仪光程差锁定在该曲线之中点。值得注意的是伺服回路的目的是抑制环境的超低频噪声影响, 而不能把驱动频率  $f_m$  反馈回  $M_2$  镜, 那样将使微振动振幅定标复杂化, 为此设计的伺服回路应是一个窄带低频放大器, 对环境超低频噪声有负反馈作用, 而对驱动频率 ( $f_m = 2 \text{ kHz}$ ) 无伺服功能, 环路增益在直流时为 10, 而在  $1 \text{ kHz}$  处为  $10^{-6}$ , 因此对  $2 \text{ kHz}$  信号造成的相对误差  $< 10^{-6}$ , 可以忽略不计。锁定干涉仪程长抑制了环境噪声引起的光程差无规抖动, 其作用既保证锁相放大器输入信号与参考信号保持  $\pi/2$  相位差条件(否则环境噪声会使该相位差大幅度抖动), 又提高了测量数据的准确性(讨论 1), 此外, 还可减少光功率噪声的影响(讨论 1)。

## 三、实验结果

为提高检测光路中拍信号反衬度, 在光路调节中应注意以下两点:

(1) 拍信号实际是光探测器光敏面微分电流信号之积分, 若微分电流同相位, 则拍信号反衬度高, 为了使相干叠加的两高斯光束波阵面尽量吻合, 在安排干涉仪光路时应使两臂光程尽量相等;

(2) 光波入射到分束器时, 由于平行入射面分量( $P$ 分量)和垂直入射面分量( $S$ 分量)的反射率(透射率)不同, 会使线偏振光偏振面旋转, 这也将使信号反衬度下降, 为避免此效应, 应调节  $\lambda/4$  片光轴, 使所产生的两束偏振光相对分束器入射面分别为  $S$ 、 $P$  分量, 这样不会由分束板原因造成入射光偏振方向改变, 这一措施也减少了测量数据不准确度(讨论 1)。

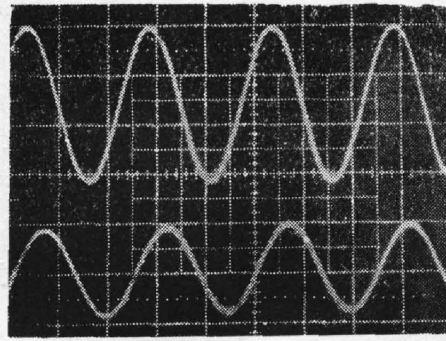


Fig. 2 Output from phase demodulation of lock-in amplifier 1 and filter  
upper: driving signal; lower: corresponding output from filter

取镜片  $M_1$  驱动信号  $f_m = 2 \text{ kHz}$ , 经锁相放大器 1 相位解调和带通滤波器输出之波形如图 2 所示。以实验数据代入 (6) 式:

$A_{\min} = 0.13 \text{ mV}$ ,  $K_1 = 50$ ,  $K_2 = 1.18$ ,  $K_3 = 0.28$ ,  $V_0 = 180 \text{ mV}$ ,  $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ ,  
得到微振动检测灵敏度为

$$x_{0m} = 2.2 \times 10^{-2} \text{ \AA} / \sqrt{\text{Hz}}$$

## 四、讨 论

### 1. 误差分析

(1) 漏出频率成分的影响 由于塞曼激光器磁场方向与激光管轴不严格平行, 以及腔镜膜片有残余双折射等原因, 激光器输出光束并非严格圆偏振光, 加之  $\lambda/4$  片厚度误差、分束器上入射光偏振面旋转, 以及偏振器消光不严格等原因, 使输入到  $D_1$  的光束除了 (1) 式所示两项, 还有漏出频率成分, 即有  $M_1$  臂出射光除  $\omega_1$  成分 (振幅为  $A$ ) 外, 还有  $\omega_2$  成分 (振幅  $\beta$ ), 自  $M_2$  臂出射光除  $\omega_2$  (振幅  $A$ ) 外, 还有  $\omega_1$  成分 (振幅  $\beta$ ), 这样混频后的拍频有四项: ①  $A^2 \cos(\omega_0 t + \phi_1)$ ; ②  $\beta^2 \cos(\omega_0 t + \phi_2)$ ; ③  $A\beta \cos(\omega_0 t + \phi_3)$ ; ④  $A\beta \cos(\omega_0 t + \phi_4)$ 。为了从实验上测定漏出频率成分的影响, 挡住干涉仪  $M_1$  臂光路, 观测到的拍频信号应是  $A\beta \cos(\omega_0 t + \phi_4)$ ; 而两臂皆不挡住时, 拍频信号主要成分是  $A^2 \cos(\omega_0 t + \phi_1)$ ; 两拍信号振幅比为:  $(A\beta/A^2) = (\beta/A) = 5 \times 10^{-3}$ 。由于实验光路调整时, 考虑了分束器引起的入射光偏振面旋转, 且选用了高消光比的偏振器, 这些措施减少了漏出频率所占比重。实验表明, 其主要原因是塞曼激光器出射光有轻微椭圆偏效应所致。

上述混频后的拍频的第 ③④ 项来自同一臂光束的拍频项, 其光程差不随时间变, 因此与锁相放大器交流输出有关的仅是第 ①② 项。由于第 ② 项存在对测量带来的相对误差为  $(\beta^2/A^2) = 2.5 \times 10^{-5}$ 。

(2) 光功率抖动和光程抖动的影响 为分析误差, 写出锁相放大器输出与 (4) 式稍有不同

$$V = K I_0 \sin \left( \Delta\phi + \frac{4\sigma}{\lambda} x_0 \sin \omega_m t \right), \quad (7)$$

若光功率有抖动, 上式中  $I_0$  改为  $(I_0 + \Delta I)$ , 则有

$$V = K(I_0 + \Delta I) \cos \Delta\phi \frac{4\pi x_0}{\lambda} \sin \omega_m t + K(I_0 + \Delta I) \sin \Delta\phi, \quad (8)$$

由(8)式第一项知功率抖动  $\Delta I$  改变了信号比例系数, 给振幅定标带来  $(\Delta I/I_0)$  的相对误差, 由于激光功率稳定度优于  $10^{-2}$ , 光功率抖动引起相对误差小于 1%。而且(8)式第二项表明功率抖动还带动  $K \Delta I \sin \Delta\phi$  的噪声, 可见锁定光程后,  $\Delta\phi$  下降还可减少功率噪声的影响。(8)式第一项还说明, 干涉仪光程抖动、漂移带来的相位噪声  $\Delta\phi$  也会影响  $V$  与  $x_0$  比例系数, 从而影响定标, 干涉仪光程差被锁定后, 光程抖动由伺服前的几百  $\text{\AA}$  量级降至几十  $\text{\AA}$ ,  $\Delta\phi$  约为 0.01 弧度以下, 这也大大减少了测量误差,

$$\cos \Delta\phi = [1 - (\Delta\phi^2/2)],$$

伺服后光程抖动造成的相对误差为

$$(\Delta\phi^2/2) \approx 1 \times 10^{-4}.$$

(3) 光束偏离正向入射的影响 由于激光束的反馈会使塞曼激光器工作不正常, 为避免此现象, 在调节干涉仪光路时, 使对镜面入射光束偏离正向入射  $\theta$  角, 这样光程差将附加一项因子  $\cos \theta$ , 微振动振幅检测极限公式中分母也将增加一个  $\cos \theta$  因子, 由于  $\theta$  角度很小(约 0.50), 引起的误差约为  $10^{-5}$  量级。

综上所述, 引起测量数据相对误差主要原因是光功率抖动, 约为 1%。

## 2. 关于灵敏度

检测灵敏度取决于对噪声的抑制, 而噪声主要来自光源, 环境及电子线路。用伺服回路锁定干涉仪是抑制环境噪声的有力措施, 用拍频 ( $f_0 = 200 \text{ kHz}$ ) 检测法可使有用低频 ( $2 \text{ kHz}$ ) 信息避开光探测器低频噪声的干扰, 而光源的低频噪声较为难办, 采用窄带检测是滤掉噪声之有效手段。

我们用图 3 所示实验安排测试了激光源的噪声谱, 图 4 是测试结果, 从照片可见, 光源的噪声随低频而明显增加, 特别在  $\text{kHz}$  频段及其以下, 噪声远远大于高频段, 这大大增加了低频检测的难度而频率  $> 50 \text{ kHz}$  以后, 噪声已下降到接近本底噪声(电子线路噪声), 可见若驱动频率  $> 50 \text{ kHz}$ , 检测灵敏度将有明显提高, 当然频率  $f_m$  的高低取决于实际应用的需要。

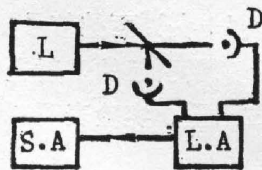


Fig. 3 Experimental arrangement for noise analysis

L—L. Z. S. L., D—detector,  
S. A.—spectrum analyzer, L. A.—lock-in amplifier

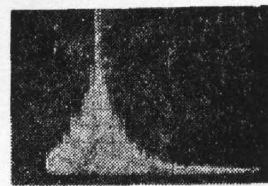


Fig. 4 Photograph of noise spectrum

ordinate: relative noise level ( $6 \mu\text{V}/\text{div}$ )  
abscissa: frequency (0~80 kHz)

## 参 考 文 献

- [1] G. Emmargren; *Appl. Opt.*, 1981, 20, No. 4 (Feb), 610~618.
- [2] 徐炳德; 《光学学报》, 1985, 5, No. 7 (Jul), 609~618.
- [3] 林跃等; 《光学学报》, 1987, 7, No. 10 (Oct), 929~934.
- [4] D. Royer *et al.*; *Appl. Phys., Lett.*, 1986, 49, No. 17 (Oct), 1056~1058.

- [ 5 ] 汤俊雄等;《中国激光》,1989, **16**, No. 3 (Mar), 156~158.  
[ 6 ] M. A. Olmstead *et al.*; *Appl. Phys.*, 1983, **32A**, No. 3 (Nov), 141~154.  
[ 7 ] Y. Ohtsuka, K. Itoh; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 2 (Jan), 219~224.

## Precise measurement of micro-vibration amplitude

TANG JUNXIONG, WAN LIAN, WU YIFANG, SHI QING, AND ZHENG LEMIN  
(*Department of Radio-Electronics, Beijing University*)

(Received 9 September 1988; revised 22 June 1989)

### Abstract

A precise measuring method of micro-vibration amplitude is reported. Optical heterodyne phase detecting technique, servo locking for the optical path difference of interferometer and narrow band detecting technique are used. The signal to noise ratio is improved greatly. The sensitivity of amplitude measuring can reach  $2.2 \times 10^{-2}$  Å/√Hz (2 kHz signal).

**Key words:** optical heterodyne phase detection; narrow band detection; servo locking.