

半导体激光器线性调频光纤位移测量仪的研究

田 芊 李达成 章恩耀
(清华大学精密仪器系, 北京 100084)

提要: 半导体激光器线性调频光纤位移测量仪是将半导体激光器线性调频技术与光纤传感技术相结合制成的一种新型外差干涉仪, 它结构简单, 实用性强, 位移测量范围为 1mm; 精度优于 $0.05\mu\text{m}$ 。

关键词: 半导体激光器, 光纤, 位移

Study on optical fiber displacement gauge using frequency-modulated diode laser

Tian Qian, Li Dacheng, Zhang Enyao

(Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing)

Abstract: An optical fiber displacement gauge is a novel heterodyne interferometer. It is made with a frequency-modulated diode laser and an optical fiber. This gauge has an advantage of simple and practical construction. The measurement range of displacement is 1mm with an accuracy of $0.05\mu\text{m}$.

Key words: diode laser, optical fiber, displacement

利用半导体激光器连续调频特性构成调频连续波(FMCW)外差干涉仪和光纤传感技术相结合, 研制了半导体激光器线性调频光纤位移测量仪。该仪器结构简单, 具有位移测量精度高(不低于 $0.05\mu\text{m}$), 动态范围大(优于 1mm), 非接触、非破坏性测量, 可抗外界电磁场干扰, 尤其是探头体积小(直径约 2mm), 因而可以解决某些用传统测量仪无法解决的难题。

一、仪器测量原理

线性调频连续波外差干涉技术通常采用锯齿波调制, 其优点是拍频频率大小不变。当在半导体激光器的偏置电流上叠加小幅度($<10\text{mA}$)、低频($<10\text{kHz}$)的锯齿波调制电流时, 激光的频率和光强幅度将随调制电流呈锯齿状波形线性变化^[1~3]。设激光的中心频率为 ω_0 , 光频调制幅度为 $\Delta\omega$, 调制周期为 T_s , 且有 $2\alpha = \Delta\omega/T_s$ 为光频调制率。调制后的光波经过干

涉仪两个不同光程的双臂,会产生相对时延为 τ 的参考光波 $E_r(t)$ 和延时光波 $E_d(t+\tau)$ 两个光波场:

$$E_r(t) = E_R \cdot \exp\{i[\omega_0 t + \alpha t^2 + \phi(t)]\},$$

$$E_d(t) = E_D \cdot \exp\{i[\omega_0(t+\tau) + \alpha(t+\tau)^2 + \phi(t+\tau)]\},$$

上述两式中 E_R 和 E_D 分别为参考光和延时光振幅,同样受到锯齿波调制,但可在信号处理电路中用除法器以解调信号来消除,所以这里均可视为常数。这两束光波相遇干涉可得到一个拍频信号:

$$I(t) = I_r + I_d + 2\sqrt{I_r \cdot I_d} \cdot \cos(\omega_b t + \omega_0 \tau + \alpha \tau^2) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{\tau_c}\right) \\ \left(-\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2} - \tau\right)$$

式中, $\omega_b = 2\alpha\tau$ 为拍频频率, τ_c 为激光的相干时间。由此可知,拍频信号随干涉仪的相位差(光程差) $\omega_0\tau$ 而变,但同时又是 T_s 的周期函数,对鉴相检测不便。然而由拍频信号的频谱可以看出,它是由一系列间隔为 ω_s ($\omega_s = \frac{2\pi}{T_s}$, 为调制频率)的谐波成分组成,且各级谐波的幅度受 sinc 函数调制的 δ 函数序列。其中位于 ω_b 值附近的某一级谐波幅值最大,这样可用窄带滤波器将此谐波滤出,从而得到标准的外差拍频信号 $I(t) = A \cdot \cos(\omega_s t + \omega_0 \tau)$, 其拍频率 ω_s 为常值,位相正是干涉仪的光相位差 $\omega_0\tau$, 利用位相检测能很容易求得相应的位移量大小。

二、仪器的构成与特点

半导体激光器线性调频光纤位移测量仪的构成如图 1 所示。由调频激光电源(2)使半导体激光器(1)发出一束频率调制的激光,经耦合进入光纤,再由光纤定向耦合器(3)分成信号探测光(II)和解调参考光(IV)。探测光从光纤探头(4)射出,出射光射到被测物(12)上,被反射回到探头内,此反射光与原探测光在探头端面产生的部分反射光形成干涉,沿原光路返回,到达光电探测器(5)产生幅度被调制的拍频信号。由另一探测器(6)接收上述解调参考信号,经过平衡放大与除法器(7)后拍频信号的幅度调制被消除,再经滤波器(8),相位比较器(9)和计数器(10)等,输出被测量的位移值。

在这种光纤位移测量仪中采用了斐索型干涉

仪,光纤在光路中只起传光作用,参考光与传感光在传输中是共光路的,真正的干涉区只在探头与被测物之间。这样,就克服了通常光纤传感器中一路作参考用的光纤必须相对稳定,以及光在光纤内传输过程中和外界因素影响所带来的干扰问题。因此,本仪器有很高的稳定性和可靠性,同时也给遥控测量和监控带来了可能性。为此进行了温度对长距离遥测影响的实验,将长 30 m 的探测光纤一臂弯曲放入可控温的容器内,使温度从 0°C 变到 60°C 。试验证明,完全可以消除环境温度变化和光纤弯曲、振动对测量精度与稳定性的影响,预计光纤做到上百米也是可

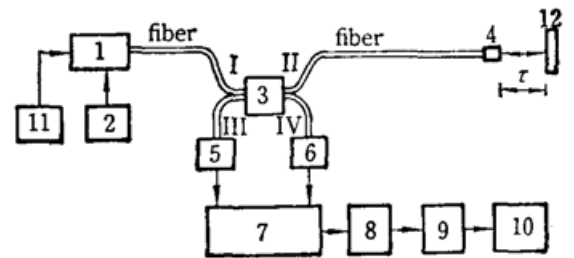


Fig. 1 Scheme of the optical fiber displacement gauge

- 1-laser diode; 2-frequency-modulation laser power supply; 3-fibre coupler; 4-fibre probe; 5, 6-photodetector; 7-amplifier and divider; 8-filter; 9-phase meter; 10-numerator; 11-thermostatic controller; 12-object

行的, 只要保证做到通过光纤传输的探测光光强足够大。另外, 由于由折射率梯度透镜构成的光纤探头射出的光束为准平行光, 光强强度高, 所以也可用于位移物体表面是粗糙表面或非平面进行测量。曾选择了金属(铁、铝、铜)、塑料、胶木、白纸等具有各种粗糙度的材料作为测量物体, 试验表明这些材料均可用作测量对象, 其中最粗糙的表面为 $R_z=40.4 \mu\text{m}$, $R_a=8.8 \mu\text{m}$, 即相当于 ∇_3 以上表面光洁度。在光纤传感器中往往要消除光反馈带来的干扰, 一般采用光隔离器。本仪器没有使用光隔离器同样满足了测量精度和稳定性的要求。因此, 本仪器光学系统结构简单、体积小, 而且还可做成全光纤集成化结构, 使得整个仪器构造更加紧凑、稳定, 由于没有过多的调整机构, 仪器本身的抗振动等干扰性能增强。本仪器光源采用了单纵模半导体激光器, 亦可采用准单纵模半导体激光器, 伴生模对仪器测量精度没有影响^[4], 另外光波长与单模光纤的工作波长可以不必完全匹配。

三、测量精度与范围

本测量仪的测量精度主要受限于激光器本身存在的振幅噪声和位相噪声。由于在半导体激光器中位相噪声远大于振幅噪声, 而对于干涉仪的干涉信号位相噪声也是主要影响因素, 这是因为干涉仪是通过检测光位相差而得到位移量, 因此激光器的位相噪声直接影响到测量位移的精度。激光的位相噪声影响半导体激光器的线宽, 而线宽的大小又决定了测量范围。分析表明, 当半导体激光器的线宽为 500 MHz 时, 光程差可达 10 mm, 位移精度将有 $0.012 \mu\text{m}$ 。除此之外, 半导体激光器的温漂效应对测量精度的影响也很大, 所以必须对半导体激光器加以恒温控制。光频随温度而漂移, 由于温漂造成的位相变化 $d\phi=d\omega_0 \cdot \tau$, 一般温度引起频率漂移约为 $25 \text{ GHz}/^\circ\text{C}$ ^[5]。则有平均相对精度 ϕ_R 为: $\phi_R=d\phi/\phi=d\gamma_0/\gamma_0 \approx 6.67 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, 这里光波长取 $0.8 \mu\text{m}$ 。若温控精度达到 0.1°C , 对于光程差为 10 mm, 则绝对精度为 $0.033 \mu\text{m}$ 。

我们利用美国 HP 公司双频激光干涉仪 5528A 和德国 Millitron 1202D 电感测微仪分别进行了对比实验。实验结果说明, 仪器的分辨率为 $0.0195 \mu\text{m}$, 零点漂移为 $0.04 \mu\text{m}/\text{小时}$ 。在整个测量动态范围(1 mm)光纤位移测量仪的测量精度均优于 $0.05 \mu\text{m}$ 。

运用此半导体激光器线性调频光纤位移测量仪, 曾应航天部某单位的要求对其某产品进行位移参数的测量。仪器解决了其被测物面积小(直径为 0.8 mm 的小球), 只能非接触测量, 以及测量时不能引入磁性材料等测量条件的困难, 得到了满意的测量结果。此外, 如果改变一下仪器探头的结构, 还可以对许多能够直接或间接转化为位移量的其它物理量(如温度、压力、振动等)进行测量。

参加本仪器研制工作的还有徐左、郑刚、张鸿飞、陈力、李岩、赵洋等同志。

参 考 文 献

- 1 S. Kobayashi, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-18**(4), 582(1982)
- 2 J. E. Schroder, *Electr. Lett.*, **22**(9), 469(1986)
- 3 R. I. Laming, *Electr. Lett.*, **22**(3), 167(1986)
- 4 徐左, 田芊 *et al.*, 计量学报, **10**(1), 18 (1989)
- 5 I. P. Giles, *IEEE Proc.*, **132**(5), 787(1985)