

线性调频激光外差技术测量磁致伸缩系数

白 岩¹, 杨春梅¹, 杨柳松¹, 田 赫²

(1. 东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;
2. 东北林业大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 融合激光外差和线性调频技术, 基于磁致伸缩系数测量原理, 将磁致伸缩系数的测量转换成微小长度变化量的精确测量, 并提出一种线性调频多光束激光外差复合检测磁致伸缩系数的新方法, 即通过线性调频技术将待测微小长度变化量信息加载到多光束激光外差信号的频率差中, 经外差信号解调后可以同时得到多个微小长度变化量值, 对这些数值加权平均, 可以精确获得微小长度变化量数值, 最终进一步提高磁致伸缩系数测量精度。利用该方法, 仿真研究了不同电流条件下, 待测样品的磁致伸缩系数, 结果表明: 相对测量误差小于 0.09%, 与传统测量方法相比, 测量精度提高了一个数量级以上。

关键词: 磁致伸缩系数; 激光外差; 线性调频; 多光束干涉

中图分类号: TN247 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1217002

Magnetostrictive coefficient measurement method combined linear frequency modulation with laser heterodyne

Bai Yan¹, Yang Chunmei¹, Yang Liusong¹, Tian He²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China;
2. College of Science, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Combining laser heterodyne with linear frequency modulated technology, based on the measurement method of magnetostrictive coefficient, a novel method of linear frequency modulated multi-beam laser heterodyne measurement for magnetostrictive coefficient was proposed, which converted the measurement of magnetostrictive coefficient into the length variation. Based on linear frequency modulated technology, the information of length variation was loaded into the frequency difference of the multi-beam laser heterodyne signal, and many value of length variation could be acquired simultaneously after the multi-beam laser heterodyne signal was demodulated. Processing these values by weighted-average, length variation could be obtained accurately, and eventually the accuracy of magnetostrictive coefficient was improved. The magnetostrictive coefficient of the sample under different currents was simulated by Matlab. The results indicate that compared with traditional

收稿日期: 2018-07-10; 修订日期: 2018-08-12

基金项目: 中央高校基本科研业务费(DL12BB35); 哈尔滨市应用技术与开发项目(2016RQYXJ015)

作者简介: 白岩(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事红外激光技术应用方面的研究。Email: baiyan@nefu.edu.cn

technique, the relative measurement error of this method is less than 0.09% and the accuracy is improved more than one order of magnitude.

Key words: magnetostrictive coefficient; laser heterodyne; linear frequency modulation; multi-beam interference

0 引言

铁磁体在外界磁场的作用下,其内部磁畴会定向排列,致使介质内部晶格间距变化,其体积和长度发生变化,这种现象称为磁致伸缩效应^[1]。由于这一效应在 1842 年由焦耳首次发现,故又称焦耳效应。磁性材料在磁场的作用下会发生长度的变化(即线磁致伸缩),或在交变磁场作用下发生反复的伸缩,从而产生振动或声波,利用这种电磁能和机械能的相互转换原理,可做为能量与信息转换功能材料,在换能器技术、微小位移测量、振动和噪声抑制等高精度测量领域具有良好的应用前景。

在相同的外磁场条件下,不同的磁性材料发生的形变程度不同,可用磁致伸缩系数 α 进行描述,其数值大小等于沿着磁化方向的伸长量与总长度的比值,单位为 ppm($1 \text{ ppm}=10^{-6}$)。 $\alpha>0$ 表示沿着磁化方向上的尺寸伸长,称为正磁致伸缩。大多数磁

性材料的磁致伸缩系数都比较小($10^{-5}\sim 10^{-6}$ 量级),所以需要采用高精度的测量方法^[2-3]。目前测量磁致伸缩系数的方法主要有非平衡电桥测量法^[4]、差动变电容测法^[5]、光杠杆^[6]、应变电阻片测量法^[7]和光学干涉法^[8]等。但是这些方法都存在各自的缺点和不足,因此测量精度都不高。

激光检测技术具有精度高、响应速度快、重复性好、非接触测量等优点^[9-12],已成为现代重要的超精密检测及测量技术。因此,文中将线性调频技术和激光外差技术结合,提出了一种利用线性调频多光束激光外差高精度测量磁致伸缩系数的方法。

1 光路设计及测量原理

1.1 光路设计

图 1 是线性调频多光束激光外差测量磁致伸缩系数的实验方案。实验方案包括了线性调频激光器、平面反射镜 1,薄玻璃板、平面反射镜 2、铁镍合金样

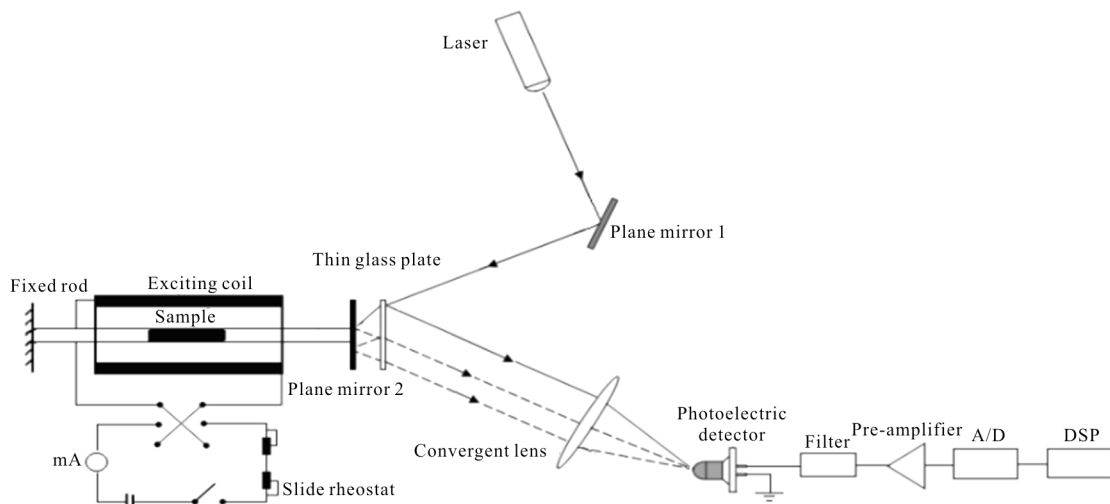


图 1 实验方案

Fig.1 Experimentation design

品、固定棒、激励线圈、直流稳压电源、会聚透镜、光电探测器和电信号处理部分。

首先将铁镍合金样品进行退磁,然后缓慢调节激励线圈中的电流值,使电流单调上升,要求加在激

磁线圈的电流不会发生磁饱和。同时,打开线性调频激光器,使线偏振光经平面反射镜 1 斜入射到薄玻璃板上,入射至玻璃板的光一部分被反射,一部分透射至平面反射镜 2 进行反射,再次经过薄玻璃板后

与之前在玻璃板处反射的光经会聚透镜后,在探测器表面进行干涉后进入光电探测器,由探测器进行光电信号转换,然后经由滤波器、前置放大器,A/D和 DSP 进行电信号的处理和显示。

为了确保铁镍合金样品在长度上的变化能够精准测量,需要将其一端用胶合剂与固定棒牢固连接,并且保证固定棒与固定部件之间牢固。样品另一端通过固定棒与平面反射镜 2 牢固连接,且保证样品长度变化时平面反射镜 2 一端可以自由移动。同时,将薄玻璃板置于平面反射镜 2 前 20 mm 处,利用二维调整架仔细调节使薄玻璃板和平面反射镜 2 平行、等高。之后,利用高精度数字电流表监测输出电流值,读取并记录电流显示值 I 和信号处理后得到的 ΔI 值。其中, ΔI 的大小恰好等于薄玻璃板和平面反射镜之间距离的变化量 Δd ,就可以通过记录薄玻璃板和平面反射镜 2 之间距离的变化量 Δd 来获得 ΔI 的数值。

1.2 测量原理

入射至薄玻璃板的透射光会在平面反射镜 2 与薄玻璃板之间发生多次的反射和透射,透射出玻璃板的光彼此平行(如图 2 所示),经会聚透镜后在探测器表面处(焦平面)发生干涉,所以在测量原理中应讨论多光束激光干涉。

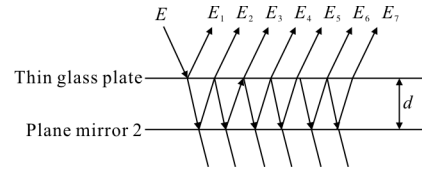


图 2 玻璃板透反射示意图

Fig.2 Glass plate through reflection map

在不考虑薄玻璃板自身厚度的情况下,经线性调频后的激光以入射角 θ_0 斜入射时,假设入射光场的数学表达式为:

$$E(t) = E_0 \exp\{i(\omega_0 t + kt^2)\} \quad (1)$$

式中: $k = \frac{\Delta F}{T}$ 为扫描速率,T 为扫描周期, ΔF 为调制带宽; E_0 为入射光振幅;t 为时间; ω_0 为入射光角频率。

若到达薄玻璃板前表面的光程为 L,则 $t - L/c$ 时刻到达薄玻璃板前表面的反射光场为:

$$E_1(t) = \alpha_1 E_0 \exp\left\{i\left[\omega_0\left(t - \frac{L}{c}\right) + k\left(t - \frac{L}{c}\right)^2\right]\right\} \quad (2)$$

式中: $\alpha_1 = r$, r 为薄玻璃板的反射率。

同理,透射过玻璃板的入射光会在玻璃板和平面反射镜 2 之间多次透射和反射,每一路透射光可表示为:

$$\begin{cases} E_2(t) = \alpha_2 E_0 \exp\left\{i\left[\omega_0\left(t - \frac{L+2nd\cos\theta}{c}\right) + k\left(t - \frac{L+2nd\cos\theta}{c}\right)^2 + \frac{2\omega_0 nd\cos\theta}{c}\right]\right\} \\ E_3(t) = \alpha_3 E_0 \exp\left\{i\left[\omega_0\left(t - \frac{L+4nd\cos\theta}{c}\right) + k\left(t - \frac{L+2nd\cos\theta}{c}\right)^2 + \frac{4\omega_0 nd\cos\theta}{c}\right]\right\} \\ \dots \\ E_m(t) = \alpha_m E_0 \exp\left\{i\left[\omega_0\left(t - \frac{L+2(m-1)nd\cos\theta}{c}\right) + k\left(t - \frac{L+2mnd\cos\theta}{c}\right)^2 + \frac{2\omega_0 mnd\cos\theta}{c}\right]\right\} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\alpha_2 = \beta^2 r$, \dots , $\alpha_m = \beta^2 r^{m-1}$, β 为薄玻璃板的透射率, r' 为平面反射镜 2 的反射率; d 为薄玻璃板和平面反射镜 2 之间的距离; θ 为入射光透射出薄玻璃板后的折射角; n 为薄玻璃板与平面反射镜 2 之间介质的折射率;下标 m 的取值为 1, 2, 3, \dots 。由于

忽略了薄玻璃板的厚度,因此不考虑薄玻璃板后表面的影响。

探测器接收到的总光场可以表示为:

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t) + \dots + E_m(t) + \dots \quad (4)$$

则探测器输出的光电流可以表示为:

$$I = \frac{\eta e}{h\nu} \frac{1}{Z} \iint_s \frac{1}{2} [E_1(t) + E_2(t) + \dots + E_m(t) + \dots] [E_1(t) + E_2(t) + \dots + E_m(t) + \dots]^* ds \quad (5)$$

式中: η 为量子效率; e 为电子电荷值; h 为普朗克常量; ν 为激光的绝对频率; Z 为探测器的本征阻抗; s 为探测器表面光敏面面积。

经光电探测器转换后的电信号通过带通滤波器后只保留有中频信号,称为中频电流,则线性调频激光外差信号的中频电流可表示为:

$$I_{if} = \frac{\eta e}{2h\nu} \frac{1}{Z} \iint_S \sum_{p=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{m-p} (E_j(t) + E_{j+p}(t) + E_j^*(t)E_{j+p}^*(t)) ds \quad (6)$$

将公式(2)、(3)代入公式(6), 最终结果为:

$$I_{if} = \frac{\eta e}{h\nu} \frac{1}{Z} E_0^2 \sum_{p=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{m-p} \alpha_{j+p} \alpha_j \times \cos\left(\frac{4pknd\cos\theta}{c} t - \frac{4pknd\cos\theta(L+nd\cos\theta)}{c^2}\right) \quad (7)$$

式中: p 和 j 均为不小于 0 的整数。

通过公式(7)可以看到, 中频电流中的频率项和相位项中都含有薄玻璃板和平面反射镜 2 之间距离 d 的信息。由于使用傅里叶变换便于进行频率测量, 所以可针对频率项进行分析, 将角频率变换为频率, 表示为:

$$f_p = \frac{2pknd\cos\theta}{\pi c} = K_p d \quad (8)$$

公式(8)建立了线性调频激光外差信号的频率与薄玻璃板和平面反射镜之间距离 d 的函数关系, 其中的比例系数为:

$$K_p = \frac{2pknd\cos\theta}{\pi c} \quad (9)$$

由上式可知比例系数与折射率 n 、折射角 θ 、扫描速率 k 有关。

根据公式(8), 通过测量光电探测器输出的中频电流的频率, 就可计算出玻璃板与平面反射镜之间的距离 d , 当磁致伸缩效应导致样品的长度发生变化时, 就会带动平面反射镜发生微小位移, 从而改变距离 d , 根据计算得到 Δd , 从而获得 Δl 的大小, 就可以根据公式 $\alpha = \Delta l/l$ 计算得到待测样品磁致伸缩系数。

2 仿真研究及结果分析

利用 Matlab 软件模拟测量了长 200 mm 的铁镍合金样品的磁致伸缩系数, 验证多光束激光外差测量方法的可行性。激磁线圈的参数为 200 匝/cm; 通常情况下平面反射镜 2 和薄玻璃板之间介质的折射率取 $n=1$; 设线性调频激光器波长为 1.55 μm , 扫描周期 $T=1$ ms, 调制带宽 $\Delta F=5$ GHz。

根据设定值, 得到的仿真结果如图 3 所示。图中实线是在激光斜入射(即 $\theta>0$)的情况下得到的中频信号的频率值; 图中虚线是在激光正入射(即 $\theta=0$)的

情况下得到的中频信号频率值。

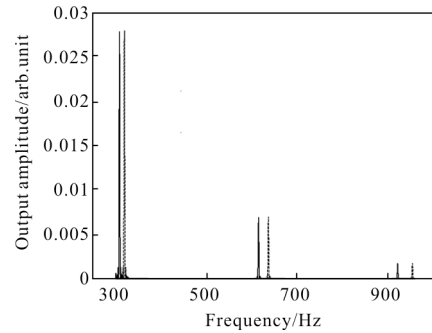


图 3 傅里叶变换频谱图

Fig.3 Fourier transform spectrum diagram

图中给出了在激光正入射时的仿真结果, 这是由于在公式(8)中, 虽然建立了中频频率 f_p 和距离 d 的关系, 但仍有一未知量 θ 。由于当激光正入射时角度已知($\theta=0$), 设激光正入射时中频频率为 f_{p1} (入射角 $\theta_1=0$), 斜入射时的频率为 f_{p2} (入射角 $\theta_2=\theta$), 则根据公式(8)可知, 其比值 δ 为:

$$\delta = \frac{f_{p2}}{f_{p1}} = \frac{\cos\theta_2}{\cos\theta_1} = \cos\theta \quad (10)$$

当已知中频频率 f_{p1} 和 f_{p2} , 就可通过公式(10)算出激光经薄玻璃板后折射角 θ 的大小, 由于薄玻璃板的厚度可以忽略, 因此, 入射角 θ_0 近似等于折射角的大小:

$$\theta_0 \doteq \theta = \arccos\delta \quad (11)$$

通过公式(9)求 K_p 的值, 最终获得薄玻璃板和平面反射镜 2 之间距离变化量 Δd 的值, 由于 $\Delta d = \Delta l$, 从而根据 $\alpha = \Delta l/l$ 可以计算出任意入射角 θ_0 情况下铁镍合金样品的磁致伸缩系数。

在理论推导过程中, 忽略了薄玻璃板的厚度, 即不考虑其后表面的反射光对线性调频外差信号的影响, 但实际上薄玻璃板的厚度是存在的, 一般小于 1 mm, 为克服这种影响, 根据公式(8)可以看出, 薄玻璃板后表面的反射光产生的线性调频多光束外差信号的频率分布在频谱的零频附近, 在实验光路中加入了滤波器就可以滤除低频外差信号的干扰。依据上述测量原理和仿真, 给出了在不同激磁电流下, 待测铁镍合金样品的磁致伸缩系数模拟值和实际值的对比, 如表 1 所示。

表 1 的仿真实验数据, 利用公式 $\alpha = \Delta l/l$ 可以计算出不同电流情况下磁致伸缩系数的仿真值, 经计

表 1 磁致伸缩系数测量值

Tab.1 Measured values of magnetostrictive coefficient

Number	I/mA	Actual value of $\Delta l / \mu\text{m}$	Actual value of $\alpha (\times 10^{-6})$	Simulation value of $\Delta l / \mu\text{m}$	Simulation value of $\alpha (\times 10^{-6})$	Relative error
1	10.00	0.25	1.25	0.249 787	1.248 933	0.085 %
2	20.00	0.50	2.50	0.499 576	2.497 882	0.084 %
3	30.00	0.75	3.75	0.750 329	3.751 647	0.044 %
4	40.00	1.00	5.00	1.000 116	5.000 582	0.012 %
5	50.00	1.25	6.25	1.249 905	6.249 523	0.008 %
6	60.00	1.50	7.50	1.499 692	7.498 461	0.021 %
7	70.00	1.75	8.75	1.750 445	8.752 227	0.025 %
8	80.00	2.00	10.00	2.000 234	10.001 168	0.012 %

算可得最大相对误差小于 0.09%，相对于传统测量磁致伸缩系数的方法，精度提高了一个数量级以上。

3 结 论

文中基于线性调频技术将待测信息成功地调制为外差信号的中频频率值。通过对中频信号进行傅里叶变换，得到了包含金属长度变化量的信息频率值，进而根据频率值得到长度变化量，通过多次测量加权平均可以得到精确的样品长度随电流的变化量。以铁镍合金为例进行实验，磁致伸缩系数模拟结果的相对误差小于 0.09%，相比传统测量方法，精度提高了一个数量级以上。

与其他测量方法相比，线性调频多光束激光外差测量磁致伸缩系数的方法具有精度高、测量范围广、检测时间短，空间分辨率高和重复性好等优点，所以在超精密测量、检测、加工设备等工程设计领域中具有广泛应用。

参考文献：

[1] Ludwig A, Quandt E. Giant magnetostrictive thin films for application in microelectromechanical systems [J]. *J Appl Phys*, 2000, 87(9): 4691-4695.

[2] Yao Baidong, Shi Jingjing, Hou Zaihong, et al. Design and application of fast steering mirror based on GMM [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 96-101. (in Chinese)

[3] Zheng Quan, Han Zhigang, Chen Lei. Study of displacement sensing technology of near -infrared microscopic interferometry in spectral domain [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1017002. (in Chinese)

[4] Hou Junyong. Design of intelligent measuring system on magnetic flexible coefficient [J]. *Journal of Electrical & Electronic Engineering Education*, 2001, 23(2): 45-47.

[5] Wan Hong, Qiu Yi, Xie Haitao, et al. A method for testing the magnetostriction coefficient of thin films accurately [J]. *Journal of Functional Materials*, 2002, 33(3): 264-266.

[6] Jiang Hongchuan, Zhang Wenxu, Peng Bin, et al. Research on thin film magnetostrictive coefficient measurement system [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2006, 28(3): 344-346.

[7] Li Bozang. With the strain resistance measurement error of magnetostriction coefficient [J]. *Physics Examination and Testing*, 1985(3): 17-20.

[8] Cao Huixian. Measurement of magnetostriction coefficient [J]. *Physics Experimentation*, 2002, 23(2): 37-38.

[9] Chen Fei, Chai Jinhua, Liu Xin. Laser jamming scheme and experiment research of quasi parallel light interference [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0706001. (in Chinese)

[10] Li Yao, Yang Yongying, Wang Chen, et al. Point diffraction in interference detection technology [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 391-413. (in Chinese)

[11] Xia Haojie, Hu Mengwen, Zhang Xin. High precision processing of quadrature signals for homodyne interferometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(9): 2309-2316.

[12] Ni Chang, Zhang Ming, Zhu Yu. Fiber interferometer based on phase generated carrier method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(4): 820-826. (in Chinese)