

用双折射激光频率分裂原理实现的静态与动态测量方法

邓之兵 李 岩 韩艳梅 张书练

(清华大学精密仪器系,精密测试技术与仪器国家重点实验室,北京,100084)

摘要: 讨论了用双折射激光频率分裂技术原理实现的静态与动态测量方法;介绍了实验系统和实验结果。该方法具有诸多优越性,例如灵敏度高、频响范围宽、有较强的抗干扰能力和较好的线性等,尤其适用于动态测量。

关键词: 双折射 激光 频率分裂 测量

Static and dynamic measuring method based on birefringence laser frequency splitting principle

Den Zhibing, Li Yan, Han Yanmei, Zhang Shulian

(The State Key Lab. for Precision Measurement Technology and Instruments,
Dept. of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract: Based on birefringence laser frequency splitting principle. This paper introduced the experimental system for static and dynamic measurements. The static measurements include the angle detection with 0.3° angle precision and the displacement detection with 10nm resolution. The dynamic detection can be utilize for detecting of the vibration frequency and amplitude with 15nm resolution at the range of 0.1 Hz ~ 8kHz. The method has many advantages: higher sensitivity, wide frequency response range and good linearity.

Key words: birefringence laser frequency splitting measurement

引 言

双折射激光频率分裂技术从 1985 年诞生以来^[1],经过清华大学精密仪器系以张书练教授为首的研究小组的艰苦努力,取得了许多很有价值的研究成果。我们仅对其应用于测量领域的情况作一些介绍。

参 考 文 献

- 1 Tanigawa H, Kawai S, Nakajima S. Opt Commun, 1987; 61(5): 299 ~ 301
- 2 陈伟民, 王晓林, 黄尚廉. 仪器仪表学报, 1996; 17(2): 149 ~ 153
- 3 丘悦, 黄宏一, 范滇元 *et al.* 光学学报, 1994; 14(11): 1198 ~ 1203
- 4 L ü B D, Zhang B. J Modern Opt, 1995; 42(8): 1593 ~ 1601
- 5 Sun GL, Zhang X X, Du L *et al.* Transforming Gaussian beam into line beam by a spherical lens, The Proceedings of SPIE, 1996; 2890: 148 ~ 153

作者简介: 孙桂林, 男, 1962 年出生。硕士, 副教授。主要研究方向为光学测量与光学设计、激光与全息应用等。

1 双折射激光频率分裂原理

如图 1 所示,激光谐振腔由 M_1 与 M_2 两个高反镜组成,设它们之间的光程为 L ,则输出激光波长应满足驻波条件:即 $\lambda = 2L/q$ (1) 式中, q 为自然数。相邻纵模的间隔为:

$$\Delta\lambda = \frac{c}{2L}(q+1) - \frac{c}{2L}q = \frac{c}{2L} \quad (2)$$

激光谐振腔内插入一个双折射元件,例如石英晶体 Q (参看图 1),由于石英晶体的双折射效应,原本单一频率的激光纵模将分裂成为振动方向互相垂直、频率不同的两个模,即 o 光模(寻常光)与 e 光模(非寻常光)。 o 光和 e 光的光程差为 $\Delta L = L_e - L_o$ 。这样,它们之间频率差的绝对值为:

$$\Delta\nu = \frac{c}{\Delta L} \quad (3)$$

从(3)式中可以看出,对于同一支激光器,在激光频率和腔长 L 都几乎不变的情况下,频差随光程差的变化而正比例变化。在图 1 所示的实验装置中,当改变石英晶体的位置(即改变 θ)时,频差的改变(即两个纵模的间距的变化)可以在示波器上明显观察到。

2 静态测量方法

静态测量方法包括两种:角度测量与位移测量。下面分别介绍。

1. 角度测量 o 光与 e 光折射率分别为 n_o 与 $n_e(\theta)$,其中 θ 为石英晶体的光轴与激光束之间的夹角。设石英晶体厚度为 h ,则 o 、 e 光的光程差约为(e 光在晶体内的偏折很小,可忽略):

$$\Delta L = [n_e(\theta) - n_o]h/\cos\theta \quad (4)$$

则 o 、 e 光的频率之差为:

$$\Delta\nu = \frac{c}{\Delta L} = \frac{c}{[n_e(\theta) - n_o]h/\cos\theta} \quad (5)$$

可见频差与转角之间并非线性关系,那么如何进行角度测量呢?图 2 是利用图 1 所示的实验装置测得的相对频

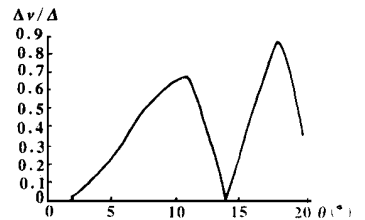


Fig. 2 The curve of $\Delta\nu/\Delta\lambda$ vs. θ .

差与转角的关系曲线^[1],这里定义相对频差为频差与相邻纵模的间隔的比值。可见在 14 度与 18 度之间二者的线性很好,即可利用这段曲线进行角度测量。

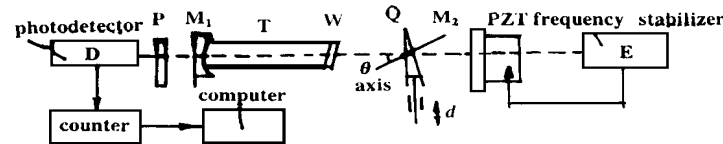


Fig. 3 The experimental setup of displacement measurement
 M_1, M_2 —laser cavity mirror T—discharge tube Q—quartz crystal wedge W—window plate P—polarizer PZT—piezoelectric transducer θ —angle between the laser beam and crystalline axis d —displacement of quartz crystal wedge

当石英晶体转动角度过大时,增透膜的表面反射增大,即增大了腔内损耗,另外光线的偏折使得角度失谐增大也增加了腔内损耗,导致激光输出功率降低甚至没有激光输出,这同样限制了角度转动范围不能太大。故这种测量方式仅可用于小角度测量(几度),目前已经达到的测角重复性约为 0.3。

上述使用的石英晶体是零度切割的,即石英晶体的光轴与表面法线是重合的,其转动轴垂直于纸面,也垂直于光束方向。如果采用非零度切割的石英晶体,即光轴与表面法线有一个夹角(例如图 3 中的光楔),其转动轴与光束方向重合,就可以进行较大范围的角度测量(几十

度),目前已经达到的测角重复性约为 1。

这种新型的角度测量方式能够达到相当高的灵敏度,具有很大的潜力,可以应用于角度测量基准、角度姿态控制以及角度信息反馈等方面。

2. 位移测量 如图 3 所示,将一块石英楔 Q(楔角为 θ)置于激光谐振腔内,当石英楔在腔内移动时,由于石英楔在光路中光学厚度 l (此处不用 h 表示是因为石英晶体平片换成了石英晶体楔)的变化导致频率分裂量 $\Delta\nu$ 改变,通过探测频差的变化量可以得出位移量 d 。

稳频器 E 利用激光尾光进行稳频。偏振片 P 置于激光器输出端,其通光轴与从镜 M_1 出射的两个互相垂直的线偏振光成 45° 夹角。激光频差通过光电探测器 D 接收,在频率计数器 C 上显示,后接计算机对频率信号进行处理,将其转化为相应的位移量。

当石英晶体楔在光路中横向移动 d 时,它在光路中的光学厚度改变量 l 为:

$$l = ndt\theta \quad (6)$$

式中, n 为折射率,则 o, e 光程差改变量 ΔL 为: $\Delta L = [n_e(\theta) - n_o]dt\theta$ (7)

将(7)式代入(3)式,可得: $\Delta\nu = \{ [n_e(\theta) - n_o]/L \} dt\theta = kd$ (8)

式中, k 为测量灵敏度,当楔在激光腔内横向移动时, k 不变,频差改变量 $\Delta\nu$ 与楔的位移量 d 成线性关系,故通过探测频差的变化可以得到位移量。目前其分辨力约为 10nm。这种位移测量方式具有良好的线性,灵敏度较高,有潜在的应用前景。

上述两种几何测量方法都是准静态的测量,由于频差本身并不稳定,大概每分钟波动几千赫兹,从而影响了测量分辨力。这种波动是一种慢变化(通常小于 0.1Hz),那么是否能够通过测量快变化的物理量来避开它呢?于是我们产生了振动测量的设想。可是当石英晶体在腔内振动时,是否会带来新的不稳定因素甚至导致激光频差消失呢?带着这样一些好的期望与坏的疑问,我们开始研制基于双折射激光频率分裂原理的振动测量系统。

3 动态测量方法

如图 4 所示,实验用的线振动测量系统主要由四个部分构成:1. 激振部分:包括信号发生器,功放,压电陶瓷(图中的 E),微动平台,以及一个示波器;2. 振动传感部分:包括半内腔 He-Ne 激光器,石英晶体楔 Q,压电陶瓷(图中的 PZT),直流高压源;3. 信号探测与处理部分:包括偏振片 P,雪崩光电二极管 APD(及其专用稳压源),高频放大器,信号处理电路,频率计,一个示波器;4. 数据处理部分:由计算机构成,含一个数据采集板,以及数据处理软件。

激振部分中,信号发生器产生一个正弦电信号,通过功率放大器后输入给固定在微动平台上的压电陶瓷 E,转换成机械振动,推动石英晶体楔振动。微动平台不仅支撑压电陶瓷,还用来调节振动测量系统的静态工作点。示波器用来读出信号发生器给出的正弦电信号的幅值与频率。

振动传感部分中,石英晶体楔使 He-Ne 激光器产生光学频差,当它振动时,频差被振动信

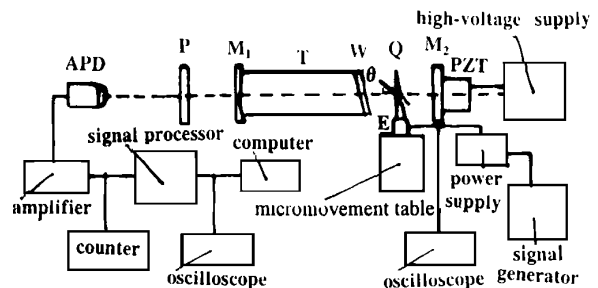


Fig. 4 The scheme of linear vibration measurement

APD—avalanche photodiode M_1, M_2 —laser cavity mirror T—discharge tube Q—quartz crystal wedge W—window plate P—polarizer E, PZT—piezoelectric transducer

号调制,成为一个调频光学频差信号。压电陶瓷 PZT 及直流高压源用来调节谐振腔长,保证激光器工作在增益线中心区域。

信号探测与处理部分中,激光束通过偏振片 P 后形成调频光拍信号,被雪崩二极管 APD 接收转换成调频电信号,通过高频放大器放大后再输入信号处理电路,即解调出来振动电压信号。频率计用来监测振动测量系统的静态工作点,示波器用来监测输入信号质量及信号处理电路的工作情况。

数据处理部分中,数据采集板对振动电压信号进行采样,再通过振动测量软件进行数据处理,可显示时域波形,可通过 FFT 变换进行频谱分析。

当石英晶体楔在腔内振动时,(8)式中的位移量 d 变成了振动量 x ,可得:

$$\Delta f = \{ [n_e(\theta) - n_o] / L \} \omega x \quad (9)$$

式中, L 为激光谐振腔长, ω 为激光频率, $n_e(\theta)$ 为晶轴与激光束夹角为 θ 时的 e 光折射率(当光束方向与晶体表面法线方向重合时,此即晶体切割角), n_o 为 o 光折射率, α 为石英晶体楔的楔角。

$$\text{根据晶体光学理论可知, } n_e(\theta) \text{ 为: } n_e(\theta) = n_o n_e / \sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta} \quad (10)$$

式中, n_e 为 e 光主折射率,其余符号含义同(9)式。

从(9)式可以看出,振动量 x 与频差改变量 Δf 成正比,只是振动量是一个具有一定频宽的时变信号,换句话说,即频差 Δf 被振动信号调制成一个调频信号。这个调频信号通过解调,得到振动信号,再通过计算机处理(如 FFT),即可对这个振动信号进行频谱分析,得到相应的振幅与频率等信息。

值得注意的是,振幅比例因子 k 和下列因素有关:激光频率 ω ,谐振腔长 L ,o 光折射率 n_o ,e 光主折射率 n_e ,晶轴与光束夹角 θ 以及楔角 α 。对于同一支激光器和同样种类的石英晶体, L , n_o 以及 n_e 基本不变(L 的小变化对 k 影响很小,若变化过大会带来激光模式以及激光功率的影响,故一般不改变它),我们可以通过改变 ω 和 θ 来改变 k 的大小。

我们研制的基于双折射激光频率分裂原理的振动测量系统,是一种采用全新机理——通过振动调制光学拍频变换、在低中频同样具有很高灵敏度、宽频带并且可以进行角振动量测量的振动测量系统。该系统通过计算机采样进行数据处理,可以实时监测显示振动波形,其频率分辨力可以根据需要进行选择,目前其振幅位移分辨力约为 15nm,带宽约为 0.1Hz~8kHz。基于上述特点,它很有希望在随机振动测量领域、角振动测量领域或者在低频、中频高灵敏度振动测量领域发挥作用。

4 二者之比较

1. 关于稳频 利用双折射激光频率分裂技术进行角度测量以及位移测量的这两种测量方式均为准静态测量,对输出频差的静态稳定性要求较高,因此,都对双频激光器采取了稳频措施:前者是采用小抖动稳频方案,后者是采用等光强稳频方案。那么,在振动测量中是否也需要对激光器采取稳频措施呢?以下分别就三种稳频方式进行讨论:热稳频、小抖动稳频、等光强稳频。

无论是上述两种几何测量方式还是振动测量方式,由于激光器必须采用半内腔结构,以便腔内石英晶体元件可以与外界联接,故难于采用热稳频方案。

小抖动稳频方式需要利用一个连续的小抖动信号对激光腔长进行调制,其频率一般为几千赫兹,这对于振动测量是一个干扰,因此不便采用。

等光强稳频方式在振动测量中是可行的,不过它的装置比较复杂,难于调节,而且稳频效果也不理想。

事实上,我们使用的激光器大概 1h 左右达到热平衡,在不稳频的情况下,热平衡后输出频差的静态稳定性大约为 $10\text{kHz}/\text{min}$,也就是说,输出频差大约几秒钟波动 1kHz 。这个频率波动量对应于输出信号电压波动 1mV ,刚好不大于我们使用的数据采集卡的输入电压分辨率。而且这种波动是不规则的,其频率一般低于 0.1Hz ,通过 FFT 进行频谱分析之后,这种波动量大都分散在频谱中低于 0.1Hz 的范围内了,因此,不会影响对频率较高的振动信号的测量。可见,即使不稳频,频差的静态稳定性也是可以接受的。还应指出的是,通过以前的研究我们发现,无论是采用小抖动稳频方式还是采用等光强稳频方式,对频差的静态稳定性的贡献都不大,稳频后静态稳定性最好也只有 $5\text{kHz}/\text{min}$,只是能够保证频差始终存在,即保证纵模基本上工作在增益线的中间。

我们曾经担心:当石英晶体在激光腔内振动时,是否会使频差的动态稳定性变差,甚至导致激光频差消失呢?经过实验,我们发现所担心的情况并没有出现,当石英晶体楔振幅达到几个微米时(压电陶瓷所能给出的最大振幅),激光输出仍然相当稳定,测量系统也工作正常。

综上所述,为简便起见,我们决定在振动测量中暂不采取稳频措施,。不过,由于温漂等因素的影响,有时激光器的两个纵模(e 光模与 o 光模)之一会移出增益线,导致频差消失,从而无法进行测量。所以,我们把构成激光腔的全反镜贴在一个压电陶瓷上,用一个直流高压电源来调节压电陶瓷的伸长量,从而改变激光器的腔长,保证两个纵模工作在增益线的中心附近。多次实验证明,热平衡后,一般两个小时内不用改变激光器的腔长。

2. 关于稳定性 前面已经指出,在静态测量中,对双折射激光器输出频差的静态稳定性要求较高,因此都需要采取稳频措施,稳频之后,其静态稳定性一般在 $5\text{kHz}/\text{min}$,目前难于再提高了,这就限制了静态测量的性能。而动态测量却不受此限制,因为输出频差的波动频率一般在 0.1Hz 以下,所以测量频率大于 0.1Hz 的动态信号就不会受到影响。另外,由于动态测量是一种调频解调的方式,因此抗干扰能力强,稳定性好。所以,双折射激光频率分裂技术用于动态测量很有潜力,可以考虑向纳米动态测量领域迈进。

5 结 论

双折射激光频率分裂技术用于测量有许多优越性,例如:可以达到很高的灵敏度,频率响应范围宽,响应速度很快等等。尤其是用于动态测量很有潜力,除去静态测量所具有的优点之外,其抗干扰能力强,线性度好,稳定性好,因此,只要在资金与人力方面加大投入,那么在不久的将来,这项技术就能够走向实用。笔者深信,双折射激光频率分裂技术将在测试领域占有一席之地。

参 考 文 献

- 1 Zhang Sh L, Guo H, Li K L *et al.* Optics and Lasers in Engineering, 1995; B3(6):

作者简介:邓之兵,男,1972年2月出生。硕士研究生。现从事激光光电子技术的研究。