



振幅为百万分之一埃的极微振动测量技术

吕大炯 王国宗 周世织

引言

目前,由于激光技术的发展,使得各种精密测量技术也得到了很大的提高。本文介绍一种激光在测量极微振动方面的应用。

普通的激光测振仪是采用记录干涉条纹移过数目的方法。它只需要干涉条纹具有一定的反差度,而不需要干涉条纹的强度分布具有很理想的余弦平方的规律性。也就是说,它对激光器、干涉仪并不要求很高。由于它的记数单元是一个条纹,相应的物体振动振幅为半个波长,因此它能够测量的最小振动振幅仅为半波长数量级。如果同时再采用分频技术,也只能测到 $1/4$ 波长, $1/8$ 波长, $1/16$ 波长等精度。想要用这种方法把精度大幅度提高是不可能的。

最近,已经能够利用高精度的激光干涉仪和高灵敏度的电子学系统,来测量小到 10^{-6} 埃数量级的极微振动了^[1,2]。众所周知,这一振幅比原子核的线度还要小,也就是说,现在已经能够感知基本粒子尺度的宏观物体的运动了。

鉴于 10^{-6} 埃的极微振动相应于要测量一个条纹的 10^{-9} 的变化,因此就必须有频率稳定的激光器和高精度的干涉仪,以保证得到具有高稳定性和高质量的干涉条纹。同时,也必须采用外差交流相位检测技术、高灵敏度的电子学系统和严格地消除外界的各种干扰,才能测到如此精确的程度。

下面就来介绍这一测量技术。

测量技术

作为光源的激光器必须是单模稳频的。输出波长为 6328 埃的氦-氖激光器很适合于这种应用。采用把激光频率稳定在“兰姆下陷”,频率的稳定性可达 10^{-13} ,其波长的绝对变化范围为 $6.328 \cdot 10^{-6}$ 埃;若利用 Ne^{20} 吸收法,频率的稳定性可达 10^{-10} ,其波长的绝对变化范围为 $0.328 \cdot 10^{-6}$ 埃。将这类稳频的氦-氖激光器配合干涉仪使用,能够较好地满足对于 10^{-6} 埃振幅的测量。

和氦-氖激光器配合使用的是迈克耳孙式的直角干涉仪。为了避免反射能量重新进入激光器,以及为了得到两个输出,而把干涉仪做成稍微不对称的形式,如图1所示。另外,一个慢作用的伺服系统保持干涉仪的两个臂接近相等,以使激光振幅和相位噪声尽可能小。对于反射镜的平面度则要求小于 $1/20$ 波长。

这样一台激光干涉仪,当其一个直角臂上的镜子作极微振动(例如,用压电陶瓷激振),则它的输出条纹也产生相应的交流变化。若镜子振动的振幅为半波长的 10^{-9} ,对应的条纹振动的振幅为一个条纹的 10^{-9} 。这样小的条纹变化又怎样测量呢?

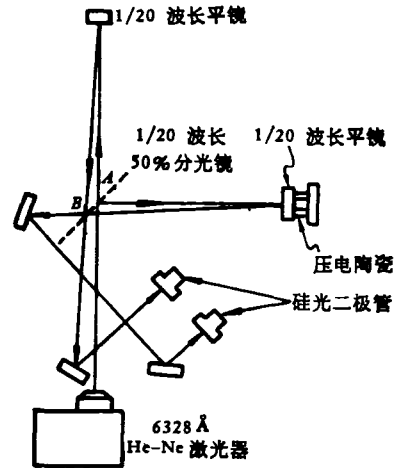


图1 干涉仪示意图

这就需要利用外差交流相位检测技术。外差,在这里实际上是零差,即参考光束和载波光束的频率相等。为了清楚地说明起见,让我们来看图1。激光束从氦-氖激光器发出,到达分光板上的A点。光束被分成两路:一路经上端的平镜反射后回到分光板上的B点,这一路即参考光束;另一路经右端粘在压电陶瓷上的平镜,被调制后也反射到分光板上的B点,这一路即载波光束。在B点,参考光束与载波光束又分别被分成两路:经分光板反射的一路参考光束与透过分光板的一路载波光束干涉后,形成一组干涉条纹;透过分光板的一路参考光束与经分光板反射的一路载波光束干涉后,形成另一组干涉条纹。这两组干涉条纹,即激光

干涉仪输出的两个零差信号，分别被组成平衡电桥两臂的硅光电管所接收，桥的输出则和阻抗匹配的低噪声前置放大器相联结，然后再经过窄带的选频放大器、相敏检波器、低通滤波器，最后在记录仪上被记录下来，如图2方框图所示。或者根据具体需要，选用宽带放大器，并且使用信息处理技术，将有用信息从背景噪声中取出。

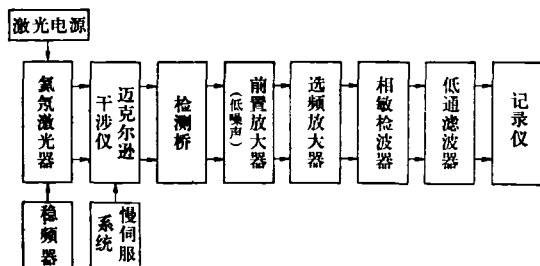


图2 测量装置的方框图

这种激光干涉仪方法，从物理概念上来说，实质上可以看作是全息术的一个特例。在这里只是参考光束和从“被摄物体”反射回来的光束都十分接近于平面波。而“被摄物体”则只是一块平面镜的一部分。外差交流相位检测的电子学方法，在这里代替了普通全息术中的介质记录的方法。

这样一台激光干涉仪的工作，需要有很好的防震设备和安静的环境，以消除声音和地动的干扰。现在，对于防震问题还没有很严格的理论计算，而往往偏重于实践经验。例如，有人试验过用以下三种方法来消除地震动噪声：(1)由弹簧和用橡皮隔开的钢板所组成的多级低通串联滤波器，具有3赫芝的共振频率；(2)用内胎支撑重900公斤的钢桌面，其共振频率是2赫芝；(3)悬挂在橡皮管上的一种减震系统，具有1赫芝的共振频率。最好的效果是在第二种防震设备上达到的，而企图在其他两种防震设备上达到同样好的效果都未获得成功。

干涉仪的灵敏度的标定，是采用把干涉仪的一面镜子粘在一块压电陶瓷上，而在压电陶瓷上加电压。首先测量镜子位移1/2波长的距离所需加的电压。而后，进行小位移的线性核对，即通过降低输入在压电陶瓷上的交流电压而读出干涉仪的输出。

关于检测系统的极限灵敏度，可由以下考虑得到。

硅光电管的信号和噪声的功率比可由下式表述^[4]：

$$\left(\frac{S}{N}\right)_P = \frac{\eta}{4B} \frac{P_i^2}{Ph\nu} \left[1 + \frac{2kT(\omega R_S C_P)^2}{q R_{S1}}\right]$$

其中 η 是硅光电管的量子效率， B 是检测系统带宽， P_i 是调制部分的功率， P 是总入射功率， I 是由于 P 而产生的总电流， R_S 、 C_P 是硅光电管等效电路中的串联电阻和分流电容。 $h\nu$ ——光子能量， q ——电子

电荷， k ——波耳兹曼常数， T ——绝对温度。

当激光功率较高时，光子所引起的散粒噪声和发生-复合噪声远大于热噪声。所以，在括号中因子就趋近于1，公式就变为：

$$\left(\frac{S}{N}\right)_P = \frac{\eta}{4B} \frac{P_i^2}{Ph\nu}$$

通过简单计算就可得到系统噪声功率的等效位移 $\Delta\lambda$ 的表达式：

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{2\pi} \left(\frac{Bh\nu}{\eta P}\right)^{1/2}$$

从这一表达式中可知，当波长、光电管的量子效率和检测系统的带宽为一定时，系统噪声功率的等效位移同激光器输出功率有关。

当 $\lambda = 6.328 \cdot 10^{-7}$ 米， $\eta = 0.35$ ， $B = 1$ 赫芝时，

$$\text{若 } P = 80 \mu\text{W, 则 } \Delta\lambda = 1.06 \cdot 10^{-11} \text{ 米} = 1.06 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}$$

$$\text{若 } P = 75 \text{mW, 则 } \Delta\lambda = 3.5 \cdot 10^{-16} \text{ 米} = 3.5 \cdot 10^{-6} \text{ \AA}$$

为此，我们看到，测量 10^{-6} 埃数量级的极微振动，需要有近百毫瓦的激光功率。

从上可知，为了能够测量极微振动，需要提高单模稳频激光器的输出功率。最简单的一种方法是通过放一个标准具在多模激光器的腔中，用这种方法曾经得到了55mW的单模氦-氖激光器的输出^[1]。另外，可以使用一种内腔单反射表面技术。所谓单反射表面技术，就是在外腔式的氦-氖激光器的腔中，插入一块只有一个表面起作用的石英块，该面的反射系数为4%，这样就构成了如图3所示的a、b、c三个谐振腔，调整此石英块在腔中的位置、腔的端面镜和放电管的支架，也即调整了光与三个腔之间的相互作用，从而达到选出单模的目的。已经报导了用这种方法得到了75mW的单模输出^[15]

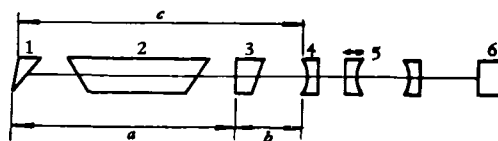


图3 内腔单反射表面技术

1. 棱镜 2. 放电管 3. 4%镜 4. 输出镜
5. 扫描干涉仪 6. 探测器

关于低噪声前置放大器的灵敏度及输入阻抗，可由下述考虑得到。

根据文献[6]，对于对称及匹配的电桥，其最大输出功率为：

$$(\Delta P_s)_{\max} = \frac{1}{8} P_i \varepsilon^2$$

其中 P_i 是被测元件上所消耗的功率，而 $\varepsilon = \frac{\Delta R}{R}$ 。R

及 ΔR 分别是硅光电管在所给定的激光功率照射下的直流阻抗以及由于条纹的微小变化所引起的直流阻抗的变化量。

同时,根据文献[6],从桥路元件的数值,可求出对称电桥的输出阻抗:

$$R = \frac{(R_2 + R_3)(R_1 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{R_1 + R_3}{2}$$

从上述两式就可得知,根据硅光电管的参数能够求出低噪声前置放大器的输入阻抗以及功率或电压灵敏度。

应 用

那么这种极微振动的测量技术有哪些应用价值呢?从目前来看,这种测量技术有以下几种可能的应用。

1. 探测引力波

1969年,韦伯^[1]宣布他测到了来自银河系中心发出的引力波信号,引起了全世界科学家的注意。但最近国际上基本倾向于否定韦伯测得的是引力波信号^[2]。现在理论预言,必须在现有的引力波探测精度的基础上,还要再提高8个数量级。有人认为这两种可能方案,本文介绍的用激光干涉仪测量极微振动就是其中之一^[3]。

2. 地震预报

人们发现,激光干涉仪为这个问题提供了可能性。依靠和上述类似的技术可以制造出超高灵敏度的仪器,以测得地震先兆的信息。例如,用这种仪器来监视地壳断裂层的两侧,以期能够预报地震的发生。

3. 计量上的应用

例如有可能用于波长比对等方面。

综上所述,我们可以看到,迄今为止人们已经掌握了振动振幅小到原子核线度的宏观物体运动的测量技术,并且正在试图把它应用在例如探测引力波、预报地震等几个比较重要的科学研究领域。可以相信,这种技术在未来可以找到更为广泛的用途。

参 考 文 献

[1] Moss, G. E. Miller, L. R. and Forward, R. L.,

Photon-noise-limited Laser Transducer for Gravitational antenna, Appl. Opt., **10**-11(1971), 2495.

[2] Logan, J. L., *Gravitational waves—a progress report, Phys. Today*, **26**-3 (1973), 44.

[3] 中国计量科学院激光组,《6328 埃氦-氖激光器的频率稳定》,《物理》**2**-1 (1973), 35.

[4] Domenico, M. Di. Svelto, O., *Solid-State Photo-detection; A Comparison between Photodiodes and Photoconductors, Proc. IEEE*, **52**(1964), 136.

[5] Currie, G. D., *High Power Single Mode He-Ne Laser, Appl. Opt.*, **8** (1969), 1068.

[6] 卡兰捷耶夫, K. B., 《电桥理论与计算》第三章,上海科学技术出版社, (1964), 50—56, 66—75.

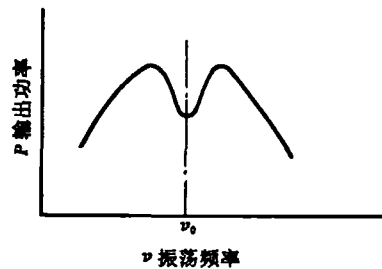
[7] Weber, J., *Evidence for Discovery of Gravitational Radiation, Phys. Rev. Lett.*, **22** (1969), 1320.

[8] *Weaving Good bye to Weber's waves, Nature*, **243**-5402 (1973), 61.



兰姆下陷

在单模激光器中,当激光跃迁的增益曲线由于多普勒效应或压力效应等原因而产生非均匀加宽时,激光器的输出功率在原子跃迁的中心频率 ν_0 处有一极小值,如图所示。我们可以看到:在曲线中央,有一对对应于原子跃迁中心频率 ν_0 的凹形下陷。这就是“兰姆下陷”。



由于这是一个对称的凹形下陷,因此可以利用光电元件及电子学仪器从单模激光器的输出中获得误差信号,从而稳定激光器的振荡频率。并且,由于兰姆下陷的极小值仅与原子跃迁中心频率有关;在工艺上可以使兰姆下陷中心两侧的斜率较陡,因此,用这种方法可以获得频率稳定性较好($\frac{\Delta\nu}{\nu} \sim 10^{-9}$ 数量级)的激光器。