

激光多普勒效应测量微小振幅

周书铨

(上海科技大学)

Micrometer-order displacement measurement of vibrating objects with laser Doppler effect

Zhou Shuquan

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai)

Abstract: This paper presents the experimental results in measuring a micrometer order displacement of vibrating objects based on laser-Doppler effect.

引言

在机械、电机、建筑以及科研等许多方面常常需要测定振动的幅度。例如，我们可以从旋转物体抖动的检测中了解系统运行的有关信息，进行系统可靠性研究，以提高设计质量。此外，晶体及陶瓷振子、弹性波器件等有关参数的测量，也是目前急待解决的问题。总之，对微小振动的振幅、速度以及频率的检测，已经受到人们的重视。

由于光纤材料抗电磁场干扰，并能在有毒和腐蚀等化学环境中正常工作，特别是光纤可绕曲到“设备”内部，更使光纤传感器扩大了应用领域。

本实验以耳机金属膜片为样品，测量了膜的振幅与激励电压的关系，获得了较满意的结果。

测量原理

图1是本测试系统的框图。由He-Ne激光器发出波长为 $0.63\mu\text{m}$ 的激光，经显微透镜 L 注入到光纤耦合器的 A 端，在耦合区 C 被分离为两束光。其中一束沿主光纤传输到 A' 端，仔细调节膜片 S 与 A' 端的相对位置，并使光束垂直入射到紧靠该端的耳机膜片 S 上。当耳机加一激励电源时，金属膜片 S 将垂直于膜片平面的方向上作往复振动。此时，膜片上正入射的光功率有极小部分反射回到 A' 端，这束反射光中又有部分光功率沿着 $A'CB$ 传输。另一方面，沿以上主光纤 ACA' 传输到 A' 端的光中有约

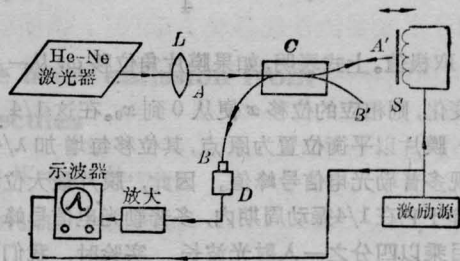


图1 测试系统框图

4%^[1]的光功率直接被端面 A' 反射。其中部分光也沿着 $A'CB$ 传输。于是，膜片 S 的部分反射光和端面 A' 直接反射光在 $A'CB$ 中叠加，产生了干涉波，传输到紧靠光纤耦合器 B 端的光电探测器 D ，被其敏感元所接收，并转换为电信号。

如果膜片 S 的振动频率为 ω ，振幅为 x_0 ，相对于平衡位置的位移为

$$x = x_0 \cos \omega t \quad (1)$$

光束经其反射，产生了多普勒频移，其大小为 $\Delta\nu = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{\delta x}{\delta t} \right)^{[2]}$ 。

今设在探测器 D 处，光纤端面 A' 直接反射光的电场强度为

$$E_1 = E_0 \cos \omega_0 t \quad (2)$$

其中 E_0 为电场强度的幅值。这个直接反射光与垂直入射到膜片 S 反射光的光程差为

$$\delta x = 2(x_0 \cos \omega t + d_0) - \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

其中 d_0 为光纤端面 A' 与膜片 S 平衡位置间的距离, $\frac{\lambda}{2}$ 为向膜片正入射时反射的半波损失。

于是, 在探测器 D 处, 膜片 S 反射光的电场强度可写成

$$E_2 = E_0 \cos\left(\omega_0 t + \frac{2\pi}{\lambda} \delta x\right)$$

适当调节端面 A' 与膜片 S 的相对位置, 使 $2d_0$ 为入射光半波长的奇数倍, 则上式可简化为

$$E_2 = E_0 \cos\left[\omega_0 t + \frac{2\pi}{\lambda} (2x_0 \cos \omega t)\right] \quad (4)$$

可以证明, 探测器 D 输出电流中的干涉项为

$$\Delta i \propto E_0^2 \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} (2x_0 \cos \omega t)\right] \quad (5)$$

上式 Δi 就是多普勒光电信号, 经电子系统放大处理后, 可由示波器直接显示。

由式(5)可知, 当

$$\frac{2\pi}{\lambda} 2(x_0 \cos \omega t) = n\pi,$$

即在位移

$$x_0 \cos \omega t = n \frac{\lambda}{4} \quad (6)$$

时, Δi 取极值。上式表明, 如果膜片角位移 ωt 从 $-\frac{\pi}{2}$ 向 0 变化, 则相应的位移 x 便从 0 到 x_0 。在这 $1/4$ 周期内, 膜片以平衡位置为原点, 其位移每增加 $\lambda/4$, 便出现多普勒光电信号峰值。因此, 膜片最大位移 x_0 便等于它在 $1/4$ 振动周期内, 多普勒光电信号峰值的数目乘以四分之一入射光波长。实验时, 我们可以把放大后的多普勒光电信号与激励电源同时输入到双迹示波器上, 通过计数一个振动周期内所包含的多普勒光电信号峰值的数目来计算膜片的振幅 x_0 。

测量结果与讨论

本实验测量了 50~1000 Hz 耳机金属膜片振动的振幅与激励电压的关系。图 2 及图 3 下半部的图形表示膜片在振动频率分别为 100 Hz 和 1000 Hz, 激励电压为 0.964 V 和 2.69 V 的作用下, 从 SR-12 型双迹示波器上拍摄的多普勒光电信号。该图顶端则是激励源的波形。图 4 为膜片在 50 Hz 激励电源的作用下, 振幅 x_0 与激励电压 U 的曲线。由图可见, $x_0 \sim U$ 呈线性关系, 与文献[3]相符。

但是, 与文献[3]不同, 本系统由于利用了光纤输出端 A' (图 1) 的反射光作为参考光束, 这就自动省去了迈克尔逊干涉仪中的固定镜, 使系统调节方便。其次, 由于本系统只利用光纤耦合器的一个输出端, 因此, 对耦合器分束比没有要求。

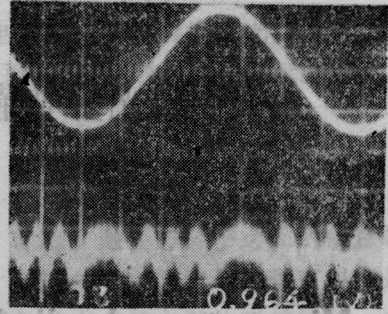


图 2 上半部为激励源 $\nu=100$ Hz 的波形, 下半部为 $U=0.964$ V 的多普勒信号

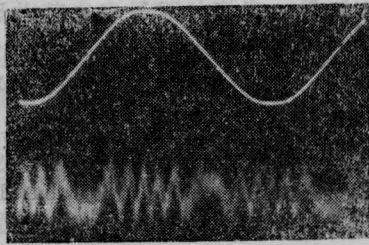


图 3 上半部为激励源 $\nu=1000$ Hz 的波形, 下半部为 $U=2.69$ V 的多普勒信号

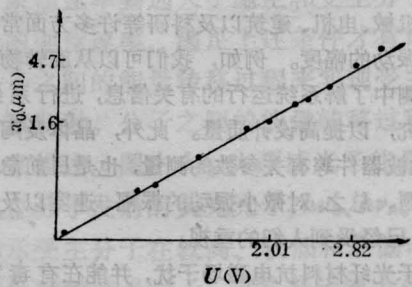


图 4 位移 x_0 与激励电压的关系 ($\nu=50$ Hz)

本系统的测量误差为 $1/4$ 入射光波长。待测样品的振动频率从 50 Hz 到 1000 Hz, 多普勒光电信号清晰。

顺便指出, 由于两束相干光皆沿同一路径往复传输, 如果对信号处理采用实时比较^[4], 必将减小由于温度变化, 外界振动等干扰的影响, 可望提高系统的信噪比。

本实验用的光纤耦合器是陆善达等与笔者共同研制的, 殷振威同学参加了实验工作, 谨此致谢。

参 考 文 献

- 1 广濑, 他. 昭和 59 年信学会全国大会, p. 1054
- 2 Drain L B 著, 王仕康等译. 激光多普勒技术, 清华大学出版社, 1985: 57
- 3 Imai M *et al.* *Opt. Lett.*, 1980: 5(10): 418~420
- 4 周书铨 *et al.* *光学学报*, 1987: 7(5): 423~429