

# 激光探针测量非线性系统的研究<sup>①</sup>

吴 兵 陈旭东 林靖波 千昌明 姜文华

(南京大学声学研究所 近代声学国家重点实验室 南京·210093)

## 1 引言

非线性声学是声学的一个重要研究方向。声波实际上是非线性的,只是在振幅较小的情况下可取线性的近似。随着声振动频率和强度的提高,非线性效应常不可避免,它表现为波形畸变、谐波发生、声饱和等。

非线性参量  $\beta$  是描述材料非线性性质的基本参量,它往往是用实验确定。通常用有限振幅法直接用声振动传感器检取波形畸变而产生的二次谐波。我们在所建立的新的解调系统的基础上,用激光探针对压电振子的非线性效应进行了测量。证明这是一种测量材料的非线性效应的新的非接触方法,从而为非线性声学参量成像提供了一条新的途径。

## 2 原理

激光外差式干涉仪和相干解调的基本结构如图 1 所示,其测量表面振动的原理可简述如下:激光经过声光调制器产生的零级光和一级光相差一个中频,取其中一个为信号光,另一个为参考光。将信号光投射到待测振动样品表面,经反射后与参考光相干。由于样品振动改变了信号光的光程,即对其进行了调相,故相干后的光信号中包含了被调相的中频成分,可由光电检测器检出。对该调相信号进行解调,即可得到样品表面振动情况。

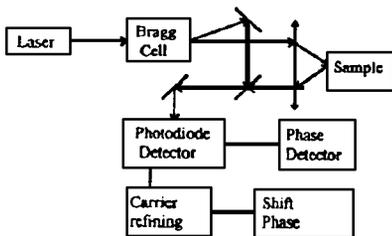


图 1 激光干涉仪和相干解调的基本结构

信号光  $v_s = \cos(\omega_0 t + \varphi(t))$ ,  $\varphi(t) = 4\pi u_0 \sin t / \lambda$

参考光  $v_r = \cos(\omega_0 + \omega)t$

光电检测器输出  $v_{det} = \cos(\omega t + \varphi(t))$  式中  $\omega_0$  为光频,  $u_0 \sin t$  为样品表面振动位移,  $\lambda$  为光波波长。

由于样品振动频率较高,光电检测器输出为一宽带调相信号,采用相干解调,即从调相信号中提取载波,并将其移相 90 后与原信号进行鉴相,便可以得到与样品表面振动位移成正比的信号。

载波  $v_1 = \sin \omega t$

$$v_{det} \times v_1 = [\cos \omega_0 t \cos \varphi(t) - \sin \omega_0 t \sin \varphi(t)] \times \sin \omega t$$
$$= (1/2) [\sin 2\omega_0 t \cos \varphi(t) - (1 - \cos 2\omega t) \sin \varphi(t)]$$

经低通滤波器滤除高频分量,鉴相器输出  $v_u \approx -\varphi(t)/2$ ,相干解调的关键是对载波信号的提纯。本文总结了如下几种方法:

(1) 锁相环方法(PLL)<sup>[1,2]</sup>

其原理如图 2 所示,鉴相器比较信号相位和压控振荡器相位,产生与相位差有关的误差电压,低通滤波器将此电压进行变换,以恰当的形式控制振荡器的频率和相位,使其与信号相位之差保持 90°:

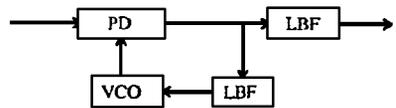


图 2 PLL 原理图

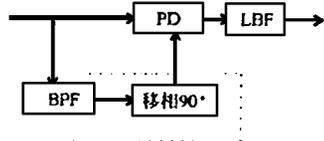


图 3 BPF 原理图

(2) 带通滤波器方法(BPF)

其原理如图 3 所示,本实验中使用一种声表面波(SAWF)滤波器既作为滤波器,又作为  $\pi/2$  移相器,工作极为方便。

表 1 声表面波滤波器主要参数

中心频率	带宽(3dB)	插损	带外抑制
77.78MHz	300kHz	21dB	34dB

法国产 SH-120 激光探针系统,用晶体滤波器滤出载频,用电缆延时实现移相 90°;其稳定度及灵敏度都很好,但还有些不足:(a)其解调系统线性不好,不能真实地反映样品表面振动情况,因而不能

① 本工作得到国家自然科学基金资助

直接用于非线性测量。(b)其低频响应不够令人满意,无法对较低频率的振动信号进行测量。

(3) 高灵敏度的声表面波延迟线(SAWDL)<sup>[3,4]</sup>

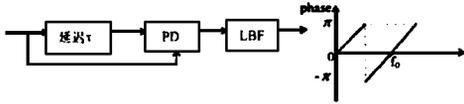


图4 SAWDL原理图

图5 相位-频率图

信号经延时后,相位发生变化,与原信号进行鉴相,得一相位信号。如图5所示:

$\tau = d\phi/d\omega = \Delta\phi/\Delta\omega$   $\Delta\phi = \tau \times \Delta\omega$   $\tau$  越大,  $\Delta\phi$  越大,灵敏度也就越高。

条件: ① 调频信号的最大频偏  $\Delta F_{max} < 1/\tau$ , 这可消除相位信号的多值性。

②  $\Omega\tau \ll 1$ ,  $\Omega$  为调制信号频率,这可保证进入鉴相器的两路信号频率相等。

$$v_{det} = \cos(\omega_c t + \Delta\omega \cos \Omega t)$$

$$v_i = \cos[\omega_c(t - \tau) + \Delta\omega(\tau + 1) \cos \Omega(t - \tau)]$$

$$\cos[\omega_c(t - \tau) + \Delta\omega \cos \Omega t]$$

$$v_u = \omega_c \tau - \Delta\omega \tau \cos \Omega t$$

此解调方法的优点是不需移相 90 和提取载频。

(4) 正交方法

由于鉴相器的鉴相特性不可能是完全线性的,正交方法可以解决这一问题。其原理如图7所示: 输出2路正交信号  $I, Q$ , 可见  $Q(t) = \text{tg}^{-1}(I/Q)$ 。这2路信号可接入计算机或有关仪器处理。其中载频的提取可用 BPF、PLL 等多种方法。

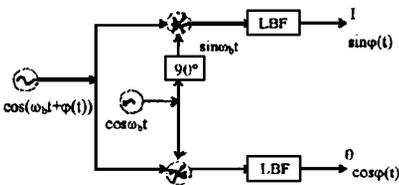


图6 正交方法原理图

(5) 注入锁相 ILSO 方法<sup>[5,6]</sup>

本文采用一种新的基于声表面波注入锁相振荡器(ILSO)解调系统。声表面波振荡器有如下优点:

(1) 振荡基频频率高。(2) 振荡频率稳定度高。(3) 相位噪声低。ILSO 为一种相干同步和跟踪网络。由于外加信号的注入使振荡器同步在注入信号频率上,并与之有固定的相位差,其原理如图8所示。

将  $E_i$  看作静止,其矢量电压合成如图9所示:  $E_i \ll E_f$ ,  $\phi = \sin\phi = h/E_f = -E_i \sin\theta/E_f$ , 设 SAWDL 群延迟时间为  $\tau$ , 振荡器本振频率为  $\omega_0$ , 瞬时频率为  $\omega$

则  $\tau = d\phi/d\omega$

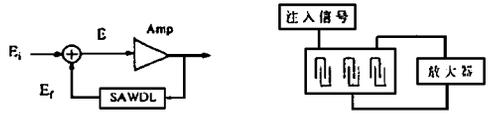


图7 ILSO原理图

图8 ILSO结构图

$$\phi = \tau(\omega - \omega_0) = \tau((\omega - \omega_0) - (\omega_0 - \omega_0))$$

$$= \tau(d\theta/dt - \Delta\omega_0) = -E_i \sin\theta/E_f$$

$$d\theta/dt = \Delta\omega - E_i \sin\theta/(\tau E_f)$$

锁定时  $d\theta/dt = 0$ ,  $\Delta\omega_0 = E_i \sin\theta/E_f \tau$ , 当  $\sin\theta = 1$ ,  $\Delta\omega_{max} = E_i/E_f \tau$ ,  $\Delta F = (P_i/P_0)^{1/2}/\pi\tau$ , 式中  $\Delta F$  为锁定带宽,  $P_i$  和  $P_0$  分别为注入和输出功率。由上式可知锁定带宽与  $(P_i/P_0)^{1/2}$  成正比。我们为激光探针调相信号解调而设计的ILSO证实了这一理论结果。实验中测出  $\Delta F - E_i$  曲线如图10所示( $P_0$  基本不变)。

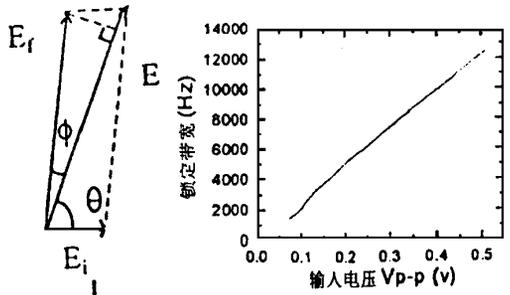


图9 ILSO 矢量电压合成图

图10  $\Delta F - E_i$  曲线图

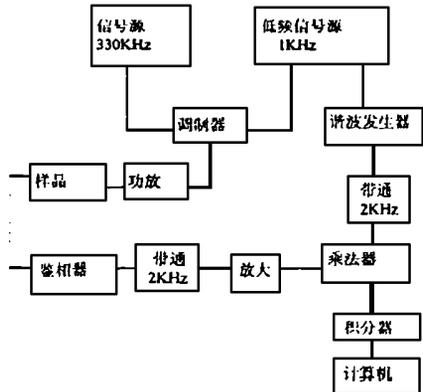


图11 激光探针测量非线性系统

ILSO 具有以下优点: (1) 锁定带宽很窄, 带外噪声信号受到很大衰减, 故有很大的选择性; (2) 能跟

踪注入信号缓慢变化; (3) 输出幅度保持恒定, 且能随输入信号功率而自动改变带宽, 起自适应滤波作用。故保证了解调系统的宽带、大动态范围和线性。

### 3 实验系统及其测量

线性和非线性表面振动测量的实验系统如图 11 所示。系统中未采用固定移相器, 而是通过微调载波 (即 Brag Cell 70MHz 信号) 频率来改变鉴相器两个输入信号之间的相差, 来达到移相 90 的目的。

采用双频差频法进行非线性测量

激光探针已广泛用于检测表面振动, 但以往对激光探针光声信号的解调方法, 由于系统的线性不够好, 常附加相当大的非线性畸变, 因而不能反应样品本身的非线性畸变。由于上述系统的良好线性, 我们试着用这套系统来检测样品的非线性振动。

由于声非线性很弱, 通常二次谐波分量远小于基波分量, 而信号源输出信号中一般含有较大的谐波分量, 故在测量二次谐波时, 往往需要对送入样品的信号进行滤波。本文则采取双频差频法避开了滤波: 将送入样品的信号 (频率为  $f$ ) 先与一低频信号 (频率为  $F$ ) 进行调制, 实验中用一乘法器作调制器, 即  $\cos \omega \times \cos \Omega t = [\cos(\omega + \Omega)t + \cos(\omega - \Omega)t] / 2$ , 其中  $\omega = 2\pi f$ ,  $\Omega = 2\pi F$ , 可见所得信号中包含  $f \pm F$  频率分量, 由于样品的非线性信号, 即  $A = A_0 + A_1 u + A_2 u^2 + \dots$  把  $u = [\cos(\omega + \Omega)t + \cos(\omega - \Omega)t]$  代入上式, 得

$$\begin{aligned} A &= A_0 + A_1 [\cos(\omega + \Omega)t + \cos(\omega - \Omega)t] \\ &\quad + A_2 [\cos^2(\omega + \Omega)t + 2\cos(\omega + \Omega)t \\ &\quad \quad \cos(\omega - \Omega)t + \cos^2(\omega - \Omega)t] \\ &= A_0 + A_1 [\cos(\omega + \Omega)t + \cos(\omega - \Omega)t] \\ &\quad + A_2 [1 + (1/2)(\cos 2(\omega + \Omega)t) \end{aligned}$$

$$+ \cos 2(\omega - \Omega)t + \cos 2(\omega + \cos 2\Omega)]$$

可见输出中包含  $2f, 2F, 2(f \pm F)$  等频率分量。另外由 2 路信号源的二次谐波 ( $2f, 2F$ ) 经调制器产生了另三种频率组合  $f \pm 2F, 2(f \pm F), 2f \pm F$  等频率分量, 这些谐波分量相对于基波只有 30 ~ 40dB, 再经过样品的非线性效应产生的  $2f, 2F$  分量相对于由基频产生的  $2f, 2F$  只有 60 ~ 80dB, 可以忽略不计。

用相关处理方法提取非线性分量电压, 实验中利用二极管检波, 产生低频信号的二次谐波 ( $2F$ ), 再经中心频率为  $2F$  的多路反馈无限增益带通滤波器滤波放大, 得到  $2F$  信号, 此路信号作为参考信号。将鉴相器信号的  $2F$  信号用同样的带通滤波器滤波放大, 再与参考信号相乘, 经积分器得一交流信号, 此信号就能反映出样品的非线性。

这部分成功地代替了锁定放大器的作用。

采用鉴相器输出的  $2f$  信号的双频和频法, 也能真实地反映样品的非线性。

### 4 结 论

实验结果表明, 以 ILSO 为基础的相干解调系统, 有许多优越之处, 它使激光探针不仅用于线性测量, 还可用于非线性测量。进一步完善该系统, 通过移动样品, 我们可以使该系统应用于非线性成像。

参考文献

- 1 Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1993; 12: 2051 ~ 2058
- 2 但森. 相干通信技术, 国防工业出版社, 1997; 11
- 3 吴伯修等. 调频技术理论及新发展. 人民邮电出版社, 1988; 5
- 4 Int. J. Electronics, 1985; 58(6): 963 ~ 967
- 5 林靖波. 声表面波注入锁相振荡器和信号提纯
- 6 Proceedings of the IEE 1965; 53(11): 1723 ~ 1727

## 1/f 杂音探索

许生龙

(昆明物理研究所 昆明·650223)

文献[1]指出: ‘所谓 1/f 杂音, 是功率谱与振动数  $f$  的倒数  $f^{-1}$  成比例时摆动的总称。同时也叫模糊 (flicker) 杂音或粉红色杂音。这一杂音, 虽然在各种现象中都能普遍观测到, 但从 60 年前就想解决这个声学技术

问题, 到现在也不知它的原因究竟在哪里。

除电路以外, 能观测到 1/f 杂音的有, 水晶片的振动、高速公路上的汽车流动、气温的季节变化、音乐、脉搏、神经纤维的膜电压等等<sup>[3]</sup>。之所以能在这