

新型的激光 Doppler 测振装置

孙渝生 靳永东

(上海激光技术研究所)

提要: 本文介绍一台激光 Doppler 测振装置, 提出了一种新型的带微机的计数处理方法, 该装置的优点是可同时测量振动物体的振幅和振频, 测量精度高, 装置简单可靠, 使用方便, 应用面广。

A novel laser Doppler vibrometer

Sun Yusheng, Jin Yundong

(Shanghai Institute of Laser Technology, Shanghai)

Abstract: This paper introduces a laser Doppler vibrometer and a new counting processing method using microcomputer. This device offers the advantages of simultaneous measurement of vibrating amplitude and frequency, high accuracy, simple structure and reliable performances. It is operated conveniently and has wide applications.

一、前言

目前, 计量部门等有关方面均采用 Michelson 干涉仪法进行激光测振, 该法虽然测量精度高, 但必需在已知振动频率情况下才能测出振幅^[1]。这种方法对光路调整精度要求高, 装置不宜搬动, 而且测量时需要在被测振动体上安放较大的配合目标(如角锥棱镜), 这样对质量小的振动体就无能为力。

本文介绍的激光测振装置基于 Doppler 测振原理, 由于采用了新型的计数处理方法, 因而可以同时测量振幅和振频, 该法简单可靠, 做成整机后易于调整, 整个装置可以做得较小, 只要采用粘在振动体上极微小的散射

微珠作为散射体, 就可得到较好的 Doppler 信号, 于是对于质量小、重量轻的振动体也同样易于测量。实验结果表明: 在振幅大于 $5 \mu\text{m}$ 时, 振幅测量的相对精度可高达 2%, 而频率测量精度可优于 0.5%。

二、光路原理

整个实验装置的光路原理图如图 1 所示。由 He-Ne 激光器输出 632.8 nm 的线偏振光经分束器分为两束, 其中光束 1 经偏振分束器、 $\frac{1}{4} \lambda$ 波片变为圆偏振光, 再由 L_1 和 L_2 组成的扩束器扩束后, 由长焦距透镜 L_3

收稿日期: 1986年12月25日。

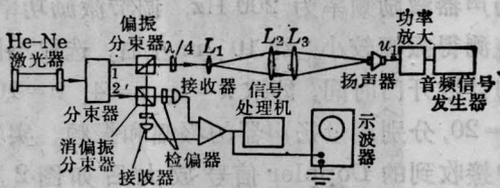


图1 多普勒测振光路原理图

会聚到被测振动体表面，由振动体散射的信号光仍由 L_3 和原扩束系统收集，经 $\frac{1}{4}\lambda$ 波片变为线偏振光，由于此时偏振方向相对于原入射光转过 90° ，因而由偏振分束器反射至消偏振分束器，它们与光束 2 经过消偏振分束器以及两个偏振方向相互垂直的检偏器后，在两个光电接收器上进行光外差，得到振动外差信号。这里，我们在振动体表面涂上散射微珠，从而得到较强的信号光。

在图 1 所示的系统中，当振动体作简谐振动时，其外差信号为：

$$i(t) \propto 4\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi A_v}{\lambda} \cos(2\pi f_v t)\right) \quad (1)$$

其中 A_v 为振幅， f_v 为振频， I_1 、 I_2 分别为信号光和本振光的强度。

图 2 为实验中拍摄到的信号波形。图中所见到的周期最长的“宽区”所对应的位置是振动时速度为零时的位置，即位移的二个极限位置之一。从式 (1) 可以推导出如下的关系：即图 2 中每一个波形都相当于 $\frac{1}{2}\lambda$ (即 $0.316 \mu\text{m}$) 的位移，而每两个相邻的“宽区”之间的总位移就是振动体振幅的两倍，而每

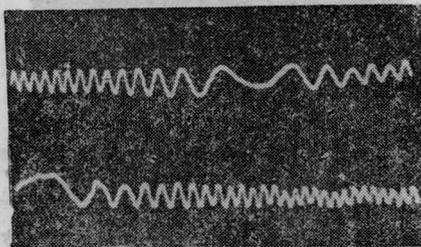


图2 外差信号波形

两个相邻“宽区”之间时间间隔的两倍就是振动体的振动周期。

三、信号处理

本装置采用了一种新型的计数处理方法，数据的采集、运算、显示、复位、再测等整个测量过程均由一台单板微型计算机自动控制。图 3 为信号处理装置框图，图 4 为该装置各主要部位的波形图。其工作过程和原理如下：由平衡外差探测器的两个光电管接收到的外差信号分别经过两个对称的放大器放大后，进入差分放大器的两个输入端。这样可抵消由激光源等方面引起的噪声，而大大提高了信噪比。差分电路输出电压 u_2 的波形如图 4 所示，与扬声器激励电压 u_1 相比较，可看到在振动极限位置， u_2 的周期最长，出现“宽区”；当振动体速度最高时，波形 u_2 的频率最高。从图中可见，只要知道相应的两“宽区”之间、或时间轴上每 $\frac{T}{2}$ 之间的波形数 N ，就能求得振幅 A_v ：

$$A_v = \frac{N}{2} \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

u_2 经整形电路变为 u_3 所示的方波序列。然后 u_3 分为两路，一路送入鉴频器，其输出波形 u_4 是周期为 $\frac{T}{2}$ 的正弦波。整形后变为 u_5 所示的方波。 u_5 经计算机控制的开门电路，产生 u_6 所示周期为 $\frac{T}{2}$ 的开门信号，如图所示。 u_6 在 t_1 至 t_2 期间打开计数门 I_1 和 I_2 (见图 3)，其中 I_1 让 u_3 通过，在计数器 I 中

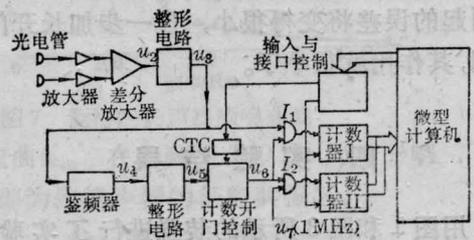


图3 信号处理装置框图

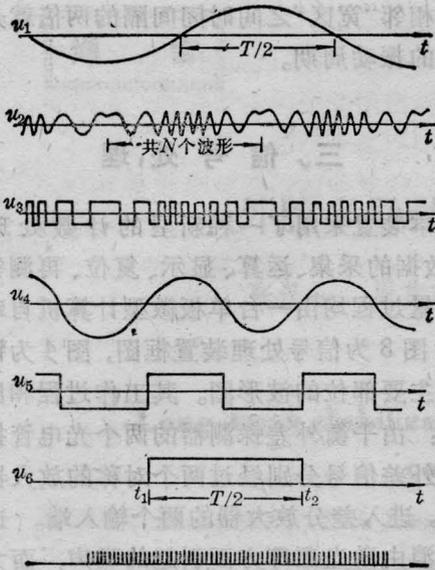


图4 信号处理部分波形图

计下这一时间(即 $\frac{T}{2}$) 内的波形数, 而 I_2 则让标准频率(如在该装置中为 1 MHz)信号通过, 在计数器 II 中计下 $\frac{T}{2}$ 的时间长度, 然后由计算机控制, 将两个计数器的计数值送入计算机进行计算, 并自动显示出振幅和振频。这一全过程结束后, 计算机重新初始化, 并使所有电路自动复位, 再进行下一个测量过程。

值得提出的是: 测量前通过计算机的计数器定时器电路 OTC, 可预置计数的开门时间为 $\frac{nT}{2}$, 即使其为 $\frac{T}{2}$ 的任意整数倍, 如 T 、 $\frac{3T}{2}$ 、 $2T$ ……等。当然, 在计算振幅或振频时, 这一因素将由计算机自动作为初始条件置入计算公式。很明显, 开门时间长, 测量精度就高。但实验证明: 高到一定的倍数, 由开门引起的误差将变得很小, 进一步加长开门时间, 其作用就很小了。

四、实验结果

用图 1 和图 3 所示的装置进行了实验, 使图 1 中标准音频信号发生器的输出频率, 即

扬声器激励频率为 200 Hz, 调节激励功率, 使测得振幅较小, 约 $10 \mu\text{m}$ 左右, 选取不同的计数开门时间, 即取 $n=1$ 、 $n=4$ 、 $n=10$ 、 $n=20$, 分别测量扬声器的振幅和振频。实验中接收到的 Doppler 信号放大后如图 2 所示。而图 5 则显示了扬声器激励电压波形 u_1 和整形后的鉴频器输出 u_5 之间的对应关系。测量结果示于表 1。从表 1 中可见, 振频测量精度优于 0.5%, 振幅测量重复性优于 1~2%, 同时可见, 增加计数开门时间有利于提高测量精度。可以预见, 该法在测量较大振幅时, 测量精度必然能进一步提高。此外, 我们还测量了振幅随激励电压变化时的响应曲线和振幅随振频变化时的响应曲线。图 6 是振频为 100.4 Hz 时的扬声器振幅对所加激励电压的响应。结果表明: 在激励电压较低时, 扬声器的幅压响应在这一段范围内基本上是线性的。

图 7 是扬声器加有固定电压 70mV 时的表 1 激励频率 200 Hz 时, 不同 n 情况下的测量结果

$n=1$		$n=4$		$n=10$		$n=20$	
A_v	f_v	A_v	f_v	A_v	f_v	A_v	f_v
9.80	200.39	9.96	200.23	10.08	200.03	10.11	200.00
9.88	199.64	9.90	200.07	10.05	200.03	10.13	199.95
9.92	201.21	10.00	200.11	10.02	199.95	10.11	200.03
9.88	199.59	10.00	199.95	10.08	199.95	10.14	200.07
9.96	199.48	9.98	200.03	10.07	200.07	10.11	200.00
9.848	200.06	9.968	200.08	10.06	200.01	10.12	200.01
0.0816	0.6580	0.0371	0.0926	0.025	0.053	0.014	0.044

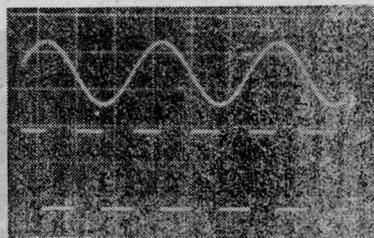


图 5 扬声器激励电压波形和鉴频器输出波形 (下转第 299 页)



图8 差值像
(离焦量 $\Delta=0.14\text{mm}$)



图9 恢复像

端的恢复像。实验结果足以说明,用非相干光学信息处理手段模拟数字 DPCM 算法实现图像信息压缩是完全可行的。

3.3 实验结果分析

如果用 $n_1(x, y)$ 表示图 1 中第一通道量化和传输的时间平均噪音,用 $n_2(x, y)$ 表示第二通道量化和传输的时间平均噪音,则在接收端的恢复像 $f_r(x, y)$ 可以写成如下形式

$$\begin{aligned} f_r(x, y) &= h(x, y) * [f_s(x, y) + n_1(x, y)] \\ &+ f(x, y) - h(x, y) * f_s(x, y) + n_2(x, y) \\ &= f(x, y) + h(x, y) * n_1(x, y) \\ &+ n_2(x, y) \end{aligned} \quad (9)$$

可见,重建图像有两种噪音成分:差值噪音 $n_2(x, y)$ 与数字 DPCM 的差值噪音相等; $h(x, y) * n_1(x, y)$ 则是本系统特有的,为掩模抽样的噪音与插值函数的卷积。对于可看成平稳随机过程的噪音序列,其均值趋于零^[7],

用插值函数作低通卷积所得到的均值,也使得空间掩模噪音趋于零(正负均可发生),尤其在图像的陡沿附近很少出现误差,这对于图像轮廓的观察是十分有利的。

图 9 所示恢复像的误差除噪音项 $n_1(x, y)$ 与 $n_2(x, y)$ 的影响外,主要是实验所用 PROM 器件产生的。我国研制的第一台 PROM 分辨率仅 7 线对/mm,这样大大降低了恢复像的分辨率;器件的光学质量使得读出像发生面形误差及局部干涉;晶体表面对读出光多次反射所产生的干涉条纹成为差值图像和恢复像的强烈背景,严重损害了恢复像的质量。器件作基线减法时,进行多次曝光,由于外加电压的变化,也会使器件内的电场分布发生某些变化,使读出像对比度衰减。衰减量和曝光光强成指数关系^[8]。也就是说,器件的残余效应降低了恢复像质量。

参 考 文 献

- 1 Abbott R P. IEEE Trans. Commun. Com-19, 3 December 1971: 907~912
- 2 Hunt BR. SPIE, 1977; 119: 85~90
- 3 Hunt B R. Appl. Opt., 1978; 17(8): 2944~2951
- 4 Mclaughley D. G. SPIE, 1978; 149: 51~61
- 5 Tamura P N et al. SPIE/OSA, 1976; 74: 57
- 6 Goodman J W. Introduction to Fourier Optics, San Francisco; McGraw-Hill, 1968: 6
- 7 Oppenheim A V, Schaffer RW. Englewood Cliffs: New Jersey; Prentice-Hill, 1975: 8
- 8 Lipson S G et al. Appl. Opt., 1974; 13(9): 2052

(上接第 278 页)

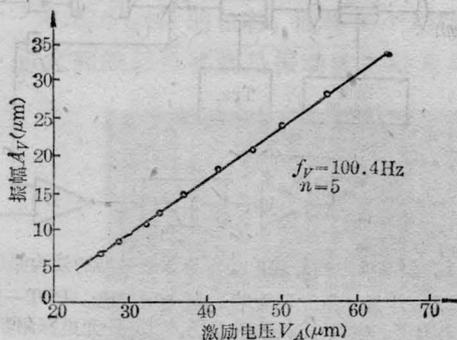


图6 扬声器振幅对所加电压的响应

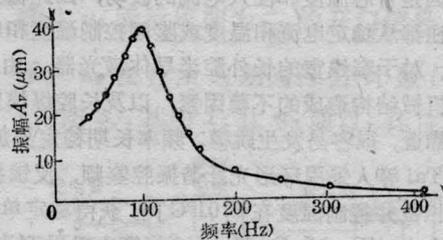


图7 测得的扬声器频响曲线

幅频响应曲线。在振频为 100 Hz 处有一响应峰值,即为此扬声器的低频共振区。

参 考 文 献

- [1] 卓永模,龚兆元. 应用激光, 1984; 4(1): 7