

# 应用激光干涉仪的超声换能器 绝对校准法

对于校准超声换能器，通常有许多方法可用，但这些常用的方法并非是可靠的绝对校准。而且这些方法不能对工作环境中的换能器进行绝对校准，这是明显的严重缺点。很多换能器是在水槽中校准的，当用于金属样品时，它们的特性与水中不同，金属样品的几何形状和它的声阻抗明显地影响换能器的性能。因此需要有一种校准方法能用于测量在各种环境和各种几何形状和类型的材料中工作的换能器性能。

Harwell 无损检测中心，进行换能器校准已有多年，并创造了测量换能器的频响和声束剖面的技术。

这些技术已被广泛应用，但其目的仅用作换能器的质量检验，而并非给出设备的绝对校准。而现在欧洲许多公司和实验室都需要绝对校准。最近，手提式激光干涉仪已经在 Harwell 完全研制成功。这种仪器有足够的灵敏度可用作超声检测器。这种仪器不限于实验室而且还适合在工业环境中使用。

这篇文章将讨论激光干涉仪和用于绝对校准的方法。

## 换能器的绝对校准

在了解包括换能器的传输函数、声束强度、灵敏度、工作方式等的任何超声实验中，使用绝对校准法是不可缺少的。

在 Harwell，当进行一个应用声辐射的研究计划时，曾考虑过绝对法。在我们的实验中，我们企图测定声辐射的能量和频率成分。

现在，除非采用特殊的实验条件，否则

不能直接观察源的声辐射，因为下列原因要产生失真，例如，1)模式变换；2)色散；3)激励样品的简正振动模式；4)检测换能器和相连的电子设备的传输函数。

这种工作状态能以一系列传输函数的卷积的近似方式来表示：

$$O[f] = S[f] * T[f] * N[f] * L[f] \quad (1)$$

这里  $O[f]$  为所观察到的被检测的发射的频响；

$S[f]$  为声发射源级谱；

$N[f]$  为样品和联结支架的简正模式；

$L[f]$  为样品中损耗机理的传输函数。

因此，为确定  $S[f]$ ，必须知道式(1)中的各种传输函数。考虑过各种校准方法中仅有一种用易变探针校准技术认为是可行的，即用激光干涉仪直接观察超声位移幅度。在考虑干涉仪以及如何使用它之前，必须指出在宽频率范围内换能器的响应不一样，也就是当校准一个宽带换能器时，我们必须考虑电输出是否就是作用在检测器表面的超声束的位移、速度或加速度的模拟量。

## 换能器的简单模型

在本节中指出的简单换能器模型，仅仅是实用换能器模型的一种近似。描述该模型的目的，只是简单地表明对不同的频率范围和不同的力学条件以响应方式表示的换能器的输出将不同。

假设一个由一个振子、一个质量和一个恢复力组成的理想模型。

质量  $M$  的运动方程为:

$$M\ddot{x} + R(\dot{x} + a\omega\sin\omega t) + S(x - a\cos\omega t) = 0^*$$

其解为:

$$x = R_e \left\{ \frac{\alpha(S + \omega R)e^{i\omega t}}{i\omega R + (S - M\omega^2)} \right\}$$

前表面的相对位移为:

$$\begin{aligned} x - a\cos\omega t &= R_e \left\{ \frac{\alpha(S + i\omega R)e^{i\omega t} - ae^{i\omega t}(i\omega R + (S - M\omega^2))}{i\omega R + (S - M\omega^2)} \right\} \\ &= R_e \left\{ \frac{\alpha e^{i\omega t} M\omega^2}{i\omega R + (S - M\omega^2)} \right\} \\ &= \frac{\alpha[M\omega^2(S - M\omega^2)]\cos\omega t + aM\omega^3 R\sin\omega t}{\omega^2 R^2 + (S - M\omega^2)^2} \end{aligned}$$

相对位移的幅度为:

$$A = \frac{\alpha[(M\omega^2(S - M\omega^2))^2 + M^2 R^2 \omega^6]^{1/2}}{\omega^2 R^2 + (S - M\omega^2)^2} = \frac{aM\omega^2}{[\omega^2 R^2 + (S - M\omega^2)^2]^{1/2}}$$

1. 如果系统是无阻尼的, 则

$A = a / \left( \frac{S}{M\omega^2} - 1 \right)^*$ , 意味着在  $S = M\omega^2$  时谐振。

然而, 如果  $M\omega^2 \ll S$ , 则  $|A| = \frac{aM\omega^2}{S}$ ,

即加速度灵敏度。如果  $M\omega^2 \gg S$ , 则  $|A| = a$ , 即位移灵敏度。

2. 如果系统存在阻尼, 则  $|A| = \frac{aM\omega}{R}$ ,

即是速度灵敏度。

### 换能器灵敏度

为了表明任何校准仪器能检测到的位移范围, 指出各种换能器的典型超声位移极限是值得的, 这些值列于表 1。表 1 中也表明研制成的激光干涉仪的位移极限。

表 1 换能器灵敏度

类型	极限灵敏度 cm
静电式	$10^{-10}$
宽带压电式	$10^{-11}$
共振压电式	$10^{-12}$
激光干涉仪	$10^{-9} - 10^{-10}$

### 干涉仪原理

用于校准换能器的干涉仪, 是以 19 世纪 Michelson 发明的干涉仪为基础, 仅在最近

才作重大的改进而做成具有表 1 所示灵敏度的激光干涉仪。Michelson 干涉仪受到下列因素的限制。

- 1). 缺乏高强度的相干光源(激光);
- 2). 存在实验室振动。

因素(2)通常限制位移的最佳灵敏度约为  $\lambda/2$ , 其中  $\lambda$  是光源的波长, 除非外部的振动或者被消除或者被补偿。在图 1 概要地表示的干涉仪中, 应用反馈回路连接一个光电器件, 以改变干涉仪的参考束特性来补偿通常小于 10KHz 的所有外界振动。

确定超声探针位移的方法, 由经典干涉原理来给示。

设换能器的偏差为  $\zeta$

$$\zeta = d\sin\omega t$$

从换能器反射出的光波的幅度:

$$A = A_0 \exp \left\{ i \left( \varphi + 2d \frac{2\pi}{\lambda} \sin\omega t \right) \right\}$$

这里  $\varphi$  是任意相位常数。

被反射的参考束的幅度为:

$$A_r = A_{r0} \exp \{ i\varphi_r t \}$$

这里  $\varphi_r$  是任意相位常数。

\* 原文误作  $R(\dot{x} - a\cos\omega t)$  ——译注。

\* 原文误作  $A = a \left[ \frac{S}{M\omega^2} - 1 \right]$  ——译注。

在光检测器上参考光波和信号光波的总幅度为：

$$A_T = A + A_r$$

$$\begin{aligned} \text{总的光强是} \quad I_T &= A_T A_T^* \\ &= |A|^2 + |A_r|^2 + 2AA_r \cos \left[ \varphi - \varphi_r + 2d \frac{2\pi}{\lambda} \sin \omega t \right] \end{aligned} \quad (2)$$

如果  $\varphi - \varphi_r = \pi/2$ ，则检测电流是

$$\begin{aligned} i_d &= 2\eta\sqrt{I_r} \cos \left( \frac{\pi}{2} + \frac{4\pi d}{\lambda} \sin \omega t \right) \\ &= 2\eta\sqrt{I_r} \sin \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \sin \omega t \right) \end{aligned}$$

这里  $\eta$  是检测器的量子效率。如果  $\frac{d}{\lambda} \ll 1$ ，则

$$\sin \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \sin \omega t \right) \approx \frac{4\pi d}{\lambda} \sin \omega t, \text{ 则}$$

$$i_d = 8\pi\eta \frac{d}{\lambda} \sqrt{I_r} \sin \omega t \quad (3)$$

### Harwell 干涉仪

光路图在图 1 中表示。从频率稳定的激光器射出一平面偏振光通过一个  $\frac{\lambda}{4}$  波晶片转换成圆偏振光然而进入光—电盒。约有 95% 的光不受影响地通过该盒，另外约 5% 的光产生频移和受到“盒”的作用改变频移光的偏振

方向，所以它的圆偏振方向与非频移的圆偏振光的方向相反。另一个  $\frac{\lambda}{4}$  波晶片变此二个圆偏振光为二个偏振方向互相垂直的线偏振光束，用一个偏振光分裂器容易分离开。非频移光射至目标而频移光选作干涉仪的参考束。参考束经棱镜反射器沿平行路径返回，而由目标来的散射光或镜反射光沿平行路径返回至于干涉仪。两束光的偏振方向仍垂直，并在通过另一个置于  $45^\circ$  方向的偏振光分裂器，以选取参考束和信号束的  $45^\circ$  分量后才产生干涉。两个检测器用以监控由于干涉而产生的强度起伏。将光检测器上的输出放大，而它们的差别仅仅是方程 (2) 中的干涉项。改进后的仪器由于激光器引起的任何强度起伏已被抵消，所得的信号远比用单个光电倍增器得到的信号好。超声检测所需的高灵敏度是通过反馈系统达到的，该系统能自动补偿干涉仪由于遭受建筑物的运动、空气湍流等引起的小于 5KHz 的低频振动。在这种工作方式中光—电盒产生的频移不固定而是取决于改变参考束的有效路径的长度的反馈而变化。所以干涉仪总是处于最灵敏的工作状态，也就是参考束和信号束之间的相位差等于  $\frac{\pi}{2}$ 。

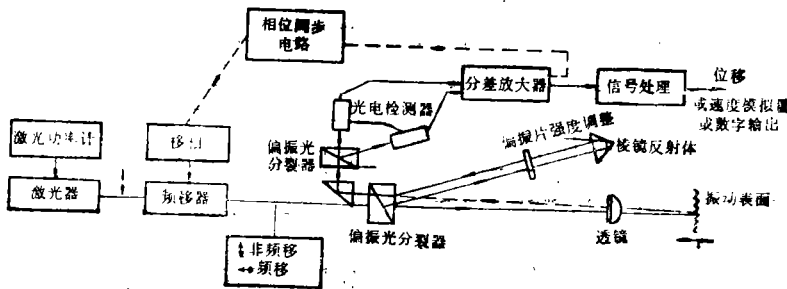


图 1 激光干涉仪的光路图

干涉仪本身设计成由予先经准直的光学器件组成的紧凑单元。因此仪器的装配十分容易，只要求保证激光束通过频移单元和干涉仪，检验激光束落于接收孔径及目标置

于或接近透镜的焦点上。

### 测定超声探针的绝对灵敏度的方法：

一系列纵波换能器已经用连续波电驱动激励 PZT 材料以及用干涉仪检查发生在探

针前表面的位移来检查和校准。在探针面上的激光聚焦光点的大小约为  $200\mu\text{m}$ ，所以能检查非常局部的表面范围，这就使得具有很好的空间分辨率并允许详细地检查探针通过表面情况的变化。图 2 表示 2.5MHz 共振换能器上两个离散点的位移响应。图 3 表示换能器的幅度和相位的响应。

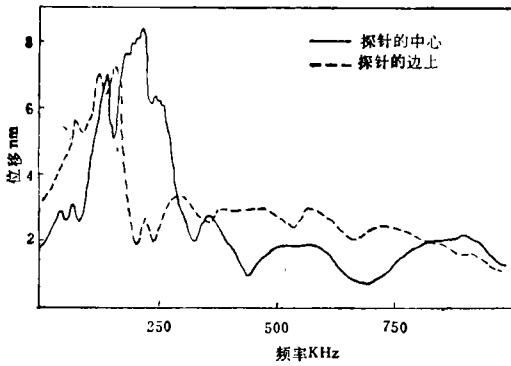


图 2 换能器上二点的超声波位移

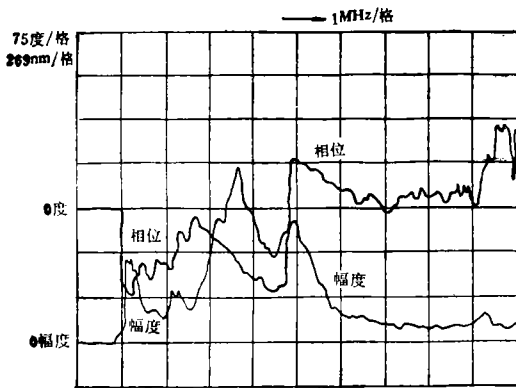


图3 一个标称 5MHz 压缩波换能器的幅度和相位的绝对校准

为了获得换能器整个表面范围的平均绝对校准，需要对每一点的位移频谱进行积分。这将是冗长的过程，较好的方法是扩大激光束以便复盖整个欲检查的表面。因此，这种方法需要功率比通常使用的 5mW 的 He-Ne 激光器大得多的激光器或要求好的光反射性以观察足够大的散射光强度。而这两个课题都是在研究中。这种方法能够检查和校准

空气中的探针，但是在被作用物上面放置一探针将影响它的工作特性，因此任何校准方法都必须考虑到这一点。

表示在一种工作状态下实施精确校准方法的示意图由图(4)说明。

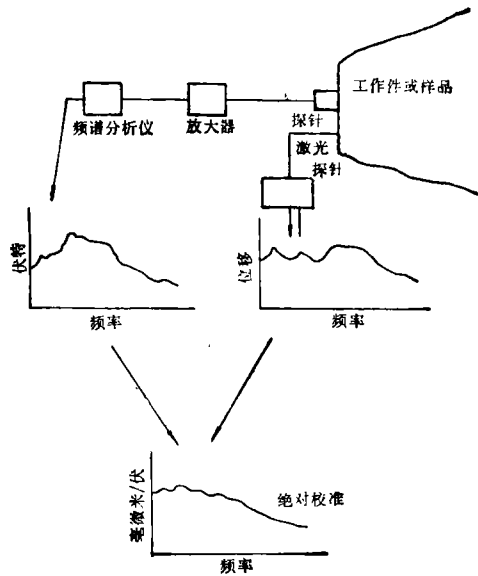


图 4 工作环境中探针的绝对校准

在此图中假设干涉仪正在检测平面波。绝对校准是简单地用换能器的电输出除激光干涉仪的输出来得到，从而得到所感兴趣的任何频率范围内以  $\text{nm/volt}$  表示的校准。

结论：

- (1) 能够进行换能器灵敏度和功率的绝对测量。
- (2) 通过控制由干涉仪获得的位移信号和探针的输出(或输入)电信号之间的相位可以确定换能器响应的形状。探针用作发射器取输出信号，用作接收器取输入信号。如果信号是同相位，则探针直接起位移传感器的作用。如果信号是  $\frac{\pi}{2}$  相位差，则探针起速度灵敏度器件的作用。如果相位差是  $\pi$ ，探针起加速度计的作用。

(3) 沿着激光束对准的直线方向的位移是受监视的。这表示原则上只有压缩波器件

# 声级计上传声器的正确使用\*

沈保罗 编译  
(同济大学声学研究所)

## 前 言

在国内,声级计上的电容传声器应该选用什么型号,是个引起争议的问题。有的主张用自由场传声器,有的却认为在某些测量场合下用声压传声器或无规入射传声器更好。在国外,这个问题同样存在。对于声级计,大西洋两岸有两种不同的标准。美洲大多数国家,声级计是按照美国国家标准 ANSI S 1.4<sup>[1]</sup>制造的,规定用无规入射传声器;而在欧洲、亚洲,声级计是按照国际电工委员会 IEC651 文件<sup>[2]</sup>或早先的 179 文件制造的,唯一不同的是规定用自由场传声器,其参考方向由厂商确定,一般取 $0^\circ$ 入射。两种声级计测得的结果在高频端甚至差达 6~7 分贝。本文将从传声器的基本概念出发,来阐述产生这种差异的原因,并给出两种声级计的各自适用范围。符合 IEC 标准的声级计用在已知声波方向的自由场测量,会给出更精确的结果,而符合 ANSI 标准的声级计,则用于扩散声场中测量较为满意。随着积分声级计的出现,问题变得更为尖锐。希望有关声级计的两种标准并用,以使得用不同声级计测

能校准。实际上如果换能器是转动的并且换能器的散射表面是充分大,使得有足够的光返回到干涉仪,则横向运动的分量也将能检测到。这就意味着实际上剪切波换能器能被监视。

(4) 该仪器是手提式的并能在有干扰的工业环境中使用。

(5) 该仪器能与低功率激光器或对眼睛

得的结果相一致。

## 在平面行波中的传声器

图 1 为传声器放在声压为  $p$  的平面行波场中在其周围的声压分布。图 1a 为  $0^\circ$  入射,即声波垂直入射到传声器膜片。由于传声器对声波的绕射和散射,膜片处的声压级增量  $\Delta L_p$  (相应声压增量为  $\Delta p$ ) 在某些频率高达 10 分贝。 $\Delta L_p$  依赖于声波波长与传声器(看作圆柱体)直径之比值,对于确定的传声器直径,  $\Delta L_p$  仅与频率有关。

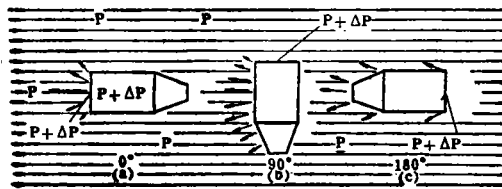


图 1 传声器置于自由声场中其膜片处的声压  $p + \Delta p$   
(a) 声波方向垂直于膜片( $0^\circ$ 入射);  
(b) 声波掠入射膜片( $90^\circ$ 入射);  
(c) 声波来自背后( $180^\circ$ 入射)

图 2 为  $1/2$  吋传声器的实验结果。从其

\*本文主要选自 B & K «Technical Review» 1983 No.4 PP3-23。

安全的激光器一起使用,所以它不违反工业安全法。

(6) 建议将这样的仪器作为原始标准,其它定量标准设备以它作为对照标准。

(周根祥 译自 «Conference on The Evaluation and Calibration of Ultrasonic Transducers» pp.106-111, 蒋廷华校)