

物理译丛

水声学

第一集

中国物理学会编

科学出版社

物 理 译 丛

水 声 学

第 一 集

中 国 物 理 学 会 编

內 容 簡 介

本文集收集了水声学方面的論文共 21 篇，这些論文主要选自苏联的“苏联科学院报告”、“声学杂志”和美国的“美国声学杂志”等刊物。

文集所涉及的問題相当广泛，包括声脉冲在水中的传播、声在水中的散射和吸收、海水混响等的理論和各种有关参数的实际测量方法及仪器裝置的介紹，虽然各論文发表的年份相差頗多，但对于我国有关工作者仍有一定参考价值。

本书专供水声学領域的科学工作者閱讀。

物 理 译 丛

水 声 学

第 一 集

中国物理学会編

科学出版社出版 (北京朝阳門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

1960 年 6 月 第 一 版

1960 年 6 月 第 一 次 印 刷

(京) : 00001—11,000

书号 : 2240 字数 : 178,000

开本 : 850×1168 1/32

印张 : 6 1/2 插頁 : 6

定价 : 1.05 元

目 录

在超声频段利用脉冲管测量材料的声学参数.....	1
在声频和超声频段测量橡皮的力学参数的方法.....	15
关于不計內耗的活塞式压电辐射器的計算.....	21
水下声道中脉冲发射器的声場.....	35
声脉冲在水下声道中的传播.....	48
水和电解水溶液中的声吸收測量.....	58
在含空气泡的水中相速和吸收的測量.....	87
海上研究声吸收的混响桶法.....	98
由声散射所引起的海水混响理論.....	106
在声音的发射与接收具有方向性时的海水混响.....	112
在声吸收存在下的海水混响.....	117
海水混响的起伏特性.....	122
被观察到的海水混响的一些特征.....	126
水下回声测位.....	131
声波在无規非均匀媒質中的传播(I).....	140
声波在无規非均匀媒質中的传播(II).....	151
声波在无規非均匀媒質中的传播(III).....	160
細的有限杆对声的散射.....	171
連續媒質中的噪声理論.....	182
噪声場的相关函数.....	192
相关系数的測量.....	197

在超声频段利用脉冲管测量材料的声学参数*

阿盖耶娃 (H. C. Агеева)

本文阐述在超声频段利用水声设备“脉冲管”^[1,2] 测量平面的复反射系数的方法。用此方法对各种形状(圆板状杆状)的样品进行测量时,能测到样品的输入声阻抗、各种形态下材料的弹性系数、管中液体的声传播速度和纵波在杆中的传播速度等声学参数,也可测量板的隔声性能。测量可在各种温度下进行。

1. 反射系数和入射声阻抗

装置的主要部分是一根装满水的钢管,管子的一端装有辐射器,另一端放着所测的样品,其直径等于管子的内径。辐射器向管中发射超声频的单色平面波。管中水柱可看作声长线,而样品可看作声长线一端的负载。观测样品的反射波的位相和振幅,就可以测得样品的反射系数。

为了得到所需要的负载性质与用装置直接测量到的量之间的关系,我们先回忆一下在声长线场中的几个关系。

设单色平面波 $p = e^{ikx}$ 沿着管子传播。由样品表面反射回来的波可以写成 $p = \beta_{\text{反射}} e^{-ikx}$ 。式中 β ——反射系数; p ——波压, k ——在该频率下管子中水的声波的波数。在一般情况下, β 用复量表示:

$$\beta = |\beta| e^{-i\varphi} \quad (1)$$

其中 $|\beta|$ 和 φ 分别表示反射系数的模与位相,这些量可用本文所述的方法直接测量。

* 本文原载于 *Акустический журнал*, 1, вып. 2, 110 (1955).

負載的輸入声阻抗 $Z_{\text{輸入}}$ 与反射系数之間的关系为

$$Z_{\text{輸入}} = \rho_0 c_0 \frac{1 + \beta}{1 - \beta} = \rho_0 c_0 \frac{1 + |\beta| e^{-i\varphi}}{1 - |\beta| e^{-i\varphi}} \quad (2)$$

$\rho_0 c_0$ 是管中水的波阻抗, 应当指出, 这里規定指向样品的方向为正方向, 当阻抗用实数 $R_{\text{輸入}}$ 与虚数 $X_{\text{輸入}}$ 表示时, 我們有

$$Z_{\text{輸入}} = R_{\text{輸入}} + iX_{\text{輸入}}$$

和

$$\left. \begin{aligned} R_{\text{輸入}} &= \rho_0 c_0 \frac{1 - |\beta|^2}{1 + |\beta|^2 - 2|\beta| \cos \varphi} \\ X_{\text{輸入}} &= -\rho_0 c_0 \frac{2|\beta| \sin \varphi}{1 + |\beta|^2 - 2|\beta| \cos \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

公式(3)给出了可以直接测量反射系数的模 $|\beta|$ 和反射系数的位相 $|\varphi|$ 与所求的样品的輸入阻抗之間的关系。

根据对各种样式的样品所测得的反射系数的模与位相来计算阻抗, 正如以上所說的, 可以得到样品的一系列声学参数与弹性参数。

現在我們来研究这样的具体問題, 即在用上述方法測定阻抗的基础上求材料的声学参数。

2. 杆中纵波速度及其衰减的測定

为了測定杆状样品中的纵波速度及其衰减, 取杆的直径等于管子的內径。杆的輸入阻抗可根据所测得該样品的反射系数的模 $|\beta|$ 和位相 φ 确定。从另一方面說, 杆的阻抗也可用纵波速度表示如下:

$$Z_{\text{輸入}} = -i\rho c \operatorname{tg} \frac{\omega}{c} h \quad (4)$$

其中 ρ 是杆材料的密度; $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 是杆中的纵波速度; E 是杆的楊氏模量¹⁾; h 为杆的长度。

1) 实际上, 由于杆的直径有限, 所测得的纵波模量与楊氏模量略为不同。

这个公式使我们能够用材料的参数来表示 R 输入和 X 输入。例如,如果材料中没有损耗,那么, R 输入永远等于零。在测量这种杆的反射系数时,将永远有 $|\beta| = 1$; 这时位相 φ 将取决于杆的长度,或在杆的长度一定的情况下取决于声频率。当杆长等于纵波的半波长(“半波杆”)时,杆的阻抗等于零,相应的反射位相 $\varphi = \pi$ 。但是,材料总是有这种或那种损耗。因为我们仅研究正弦过程,所以要计及损耗,只需引入复弹性模量(包括杨氏模量和切变模量)就够了。例如,杨氏模量可写成

$$\bar{E} = E(1 - i\eta)$$

这里 η 是纵向形变的损耗系数。

在有损耗的情况下,测量值与材料参数间的关系更为复杂。

在损耗较小($\eta \ll 1$)的情况下,杆的阻抗可用 E 与 η 比较简单地表示出来。在这种情况下,实际上,纵波速度精确到二阶小量,可以认为等于

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{\bar{E}}{\rho}} = c \left(1 - i\frac{\eta}{2}\right). \quad (5)$$

杆阻抗公式为

$$Z_{\text{输入}} = R_{\text{输入}} + iX_{\text{输入}} = -i\rho c \left(1 - i\frac{\eta}{2}\right) \operatorname{tg} \left[\frac{\omega}{c} \left(1 + i\frac{\eta}{2}\right) h \right]. \quad (6)$$

R 输入和 X 输入值可以用直接测得的 $|\beta|$ 和 φ 值确定。其次,对 c 和 η 解方程(6),可以算出 c ,因而可求得材料的未知参数,但是,如果选用反射位相 $\varphi = \pi$ 时的频率,则可得到更精确的结果,此时杆的长度恰好等于半波长,因而下列关系式成立(准确到平方项):

$$\frac{\omega}{c} h = \pi; \quad X_{\text{输入}} = 0; \quad R_{\text{输入}} = \pi\rho c \frac{\eta}{2}. \quad (7)$$

在此情况下,如果满足 $\eta \ll 1$ 的条件,则得到

$$c = 2fh, \quad (8)$$

$$\eta = \frac{2}{\pi} \frac{\rho_0 c_0}{\rho c} \cdot \frac{1 - |\beta|}{1 + |\beta|}. \quad (9)$$

式(8)和(9)表明了杆材料的参数 c 和 η 与直接测量值 $|\beta|$ 和

f 之間的关系。

在杆具有較大損耗的情況下，則以下式代替方程(6)：

$$Z_{\text{輸入}} = R_{\text{輸入}} + iX_{\text{輸入}} = -i\rho c \sqrt{1 - i\eta} \operatorname{tg} \frac{\omega h}{c \sqrt{1 - i\eta}} \quad (10)$$

原則上，問題仍與 $\eta \ll 1$ 時一樣，但是按 R 輸入和 X 輸入數據計算 c 和 η 時，可用文獻[3]中專門的列綫圖來進行。

3. 測定剪切變形時橡皮材料的切變模量和損耗係數

為了利用借助於上述裝置測量到的數據 $|\beta|$ 和 φ 值確定剪切變形時橡皮材料的切變模量和損耗係數，我們取硬的“半波杆”作為管子的負載。首先要計算在杆中的縱波速度及其衰減，即復聲速為

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = c \sqrt{1 - i\eta}$$

把被測的環形橡皮材料的樣品貼在杆的側面，測量杆的反射係數並計算它的輸入阻抗。根據算出的阻抗，確定剪切時環形樣品剪切振動的輸入阻抗，然後再確定與其相關的切變模量和損耗係數。這裡把樣品的輸入阻抗定義為在樣品與杆貼接界面處的剪切應力對沿著柱杆母綫速度的切向分量的比值。

為了求出測量值與所求的參數間的关系，我們先研究整個側表面用橡皮貼上的硬杆的振動。當杆中激發起縱振動時，在橡皮材料中產生剪切振動。橡皮樣品（以下簡稱為樣品）的反作用力正比於此樣品中剪切振動的輸入阻抗。

在推導貼有橡皮材料的杆微元的運動方程時，我們將作以下假設。為了可以認為質點速度沿著杆斷面的變化很小，設杆的直徑比起杆中縱波的半波長來是很小的。因為在橡皮材料中的剪切波長遠小於杆中的縱波長，所以可以認為杆表面的位移振幅值沿著杆在樣品中的剪切波長內變化很小。在這種情況下，樣品對杆的反作用力可用樣品的阻抗來表示。

當杆縱振動時，圓柱形的剪切波將在樣品中傳播。但在樣品

厚度 l_p (图 1) 比杆半径小好多倍的条件下, 可以认为剪切波是平面波, 这个波是在样品中由样品的粘贴表面向样品的外表面传播的, 在这种情况下样品的每一点上的振幅值与垂直于轴线相应的断面上杆的振幅值成比例。

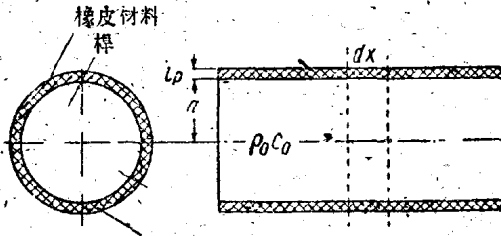


图 1

在上述假设下, 杆微元 dx 的振动方程将有以下形式:

$$\pi a^2 \rho \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} dx = \pi a^2 \bar{E} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} dx - \frac{\partial \xi}{\partial t} 2\pi a dx Z_p \quad (11)$$

其中 ξ 是杆断面的位移, ρ 是杆材料的密度, $\bar{E} = E(1 - i\eta)$ 是杆材料的杨氏模量, a 是杆半径, Z_p 是剪切振动时材料的输入阻抗。

假设样品中传播的是平面剪切波, 这时可以把样品当做其长度等于样品厚度 l_p 的线段来研究。在此情况下, 样品的剪切振动阻抗 Z_p , 可用样品材料的参数表示:

$$Z_p = -i\rho_p c_p \operatorname{tg} \left(\frac{\omega}{c_p} l_p \right) = \gamma_p + iX_p \quad (12)$$

这里的 ρ_p 是样品材料的密度, $c_p = \sqrt{\frac{\mu_p(1 - i\eta)}{\rho_p}}$ 是剪切波在样品中的传播速度, μ_p 和 η_p 分别是剪切变形时样品材料的切变模量和损耗系数。

在杆正弦振动时, 方程(11)变成如下形式:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \bar{k}_1^2 \xi = 0,$$

其中

$$\bar{k}_1^2 = \frac{\omega^2 \rho(1 + i\alpha)}{\bar{E}} \quad (13)$$

这里的 $\alpha = \frac{2Z_p}{\omega \rho a}$

这样一来,由方程得知,当带橡皮样品的杆作正弦振动时,杆的有效参数与样品的阻抗有关,这些有效参数(密度、纵波速度和波数)显然与不带样品的杆的相应参数不同。根据式(13),带有样品的杆的有效参数可用不带样品的杆的参数和它的输入阻抗表示如下:

$$\rho_1 = \rho(1 + i\alpha), \quad (14)$$

$$\bar{c}_1 = \bar{c} \frac{1}{\sqrt{1 + i\alpha}} \quad (15)$$

我們研究过了全长贴着橡皮材料的杆子,找到了这种杆子的

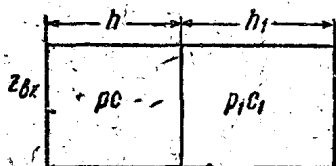


图 2

有效参数。如上所述,在测量时采用贴有环形橡皮材料样品的杆子。当计算杆的输入阻抗时,为方便起见,把整个杆当做由两个杆组成的(如图2),其中一杆是:杆长为 h , 由密度为 ρ 和纵波速度为 $\bar{c} = \alpha\sqrt{1 - i\eta}$ 的材料做成(杆子不带贴附的部分),另一个是:杆长为 h_1 , 由参数为 ρ_1 和 $\bar{c}_1 = \bar{c} \frac{1}{\sqrt{1 + i\alpha}}$ 的材料做成(杆子有贴附的部分)。由声长线理论可知,这样组成的杆的输入阻抗公式为

$$Z_{\text{输入}} = \frac{-i\rho\bar{c} \operatorname{tg} \frac{\omega}{\bar{c}} h - i\rho_1\bar{c}_1 \operatorname{tg} \frac{\omega}{\bar{c}_1} h_1}{1 - \frac{\rho_1\bar{c}_1 \operatorname{tg} \frac{\omega}{\bar{c}_1} h_1}{\rho\bar{c} \operatorname{ctg} \frac{\omega}{\bar{c}} h}} \quad (16)$$

式(16)很容易变为下式:

$$\begin{aligned} Z_{\text{输入}} &= R_{\text{输入}} + iX_{\text{输入}} = \\ &= -i\rho\bar{c} \operatorname{tg} \left[\frac{\omega}{\bar{c}} h + \operatorname{arctg} \left(\sqrt{1 + i\alpha} \operatorname{tg} \frac{\omega}{\bar{c}} \sqrt{1 + i\alpha} h_1 \right) \right] \quad (17) \end{aligned}$$

这个公式把杆的输入阻抗与参数 α 联系起来，因而也就与样品的输入阻抗 Z_p 联系起来。为了确定 α ，把式(17)变为下式：

$$\begin{aligned} & \frac{\omega}{c} h_1 \sqrt{1 + i\alpha} \operatorname{tg} \left[\frac{\omega}{c} h_1 \sqrt{1 + i\alpha} \right] = \\ & = \frac{\omega}{c} h_1 \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{iZ_{\text{输入}}}{\rho c} \right) - \frac{\omega}{c} h \right]. \end{aligned}$$

令

$$\frac{\omega}{c} h_1 \sqrt{1 + i\alpha} = L_1 \sqrt{1 + i\eta_1},$$

式中 L_1 和 η_1 是实数，我們得到

$$\begin{aligned} & -iL_1 \sqrt{1 + i\eta_1} \operatorname{tg} (L_1 \sqrt{1 + i\eta_1}) = \\ & = -i \frac{\omega}{c} h_1 \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{iZ_{\text{输入}}}{\rho c} \right) - \frac{\omega}{c} h \right] = \gamma - iX. \end{aligned} \quad (18)$$

知道 γ 和 X 后，借助于列线图用图解法可以得到参数 L_1 和 η_1 。列线图(图3)是按照式(18)繪制成的。注意到式(13)时，可以求出样品阻抗的实数和虚数部分：

$$\begin{aligned} \gamma_p &= \frac{\omega \rho a}{2} \left(\frac{L_1}{\frac{\omega}{c} h_1} \right)^2 (\eta_1 - \eta) \\ X_p &= - \frac{\omega \rho a}{2} \left[\left(\frac{L_1}{\frac{\omega}{c} h_1} \right)^2 - 1 \right] \end{aligned} \quad (19)$$

知道 γ_p 和 X_p 后，应用式(12)，可以求出与它們有关的弹性参数 μ_p 和 η_p 。确定 μ_p 和 η_p 可按本文第三节讲的利用列线图(参看[3])进行。

利用半波杆(样品貼在半波杆側面上)可以測得最准确的 μ_p 和 η_p 值，此时式(19)变成下式：

$$\begin{aligned} \gamma_p &= \frac{\omega \rho a}{2} \left[\frac{L_1(h_1 + h)}{\pi h_1} \right]^2 (\eta_1 - \eta) \\ X_p &= - \frac{\omega \rho a}{2} \left[\left(\frac{L_1(h_1 + h)}{\pi h_1} \right)^2 - 1 \right] \end{aligned} \quad (20)$$

測出半波杆(其上貼有环形样品和沒有貼样品的)的反射系数

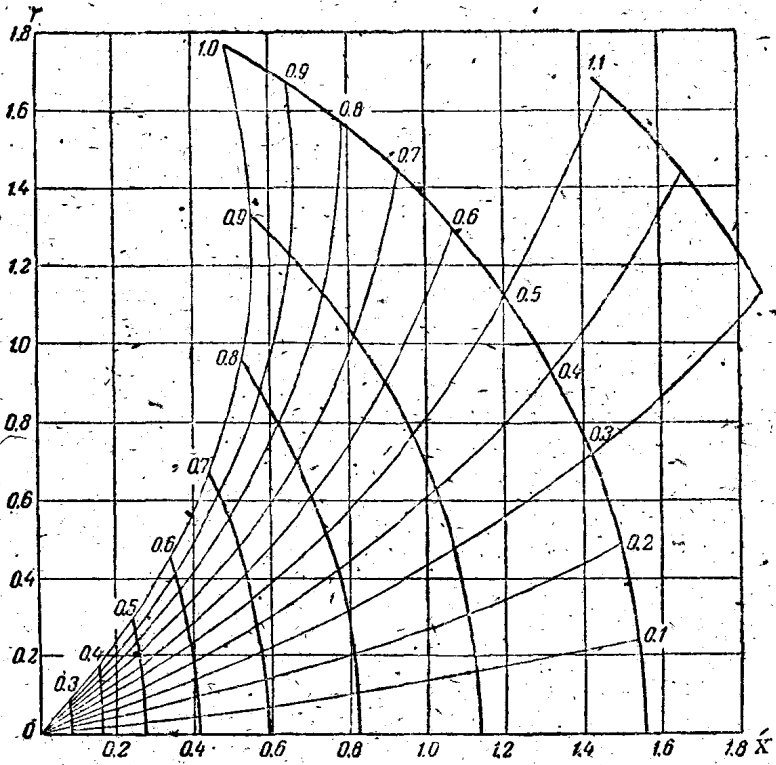


图 3

后,按式(3)可以计算贴样品杆的 Z 输入,按式(8)和(9)可以计算自由杆的 c 和 η。根据找出的 Z 输入, c 和 η,按式(20)计算环形样品的 γ_p 和 X_p,根据它们便可求出橡皮材料的 μ_p 和 η_p 值。

4. 测定橡皮材料体积压缩模量

如所周知,材料的体积压缩模量可用拉梅系数表示如下:

$$K = \lambda + \frac{2}{3} \mu.$$

因为橡皮材料的 $\mu \ll \lambda$, 所以体积压缩模量几乎与平面波时的模量一致。此模量等于 $\lambda + 2\mu$ 。利用这个装置测得的值就是 $\lambda + 2\mu$ 。为此,取圆板(其直径等于管内径)状的橡皮材料作为测

量的对象。把样品放在管中；在样品的后面建立绝对刚性壁的条件。把样品放在管中距水面 $1/4$ 波长深处就能实现这个条件。测量从样品的反射位相，由它计算输入阻抗和与它有关的橡皮材料的体积压缩模量。按照一端固定的杆阻抗公式，计算这种样品的输入阻抗

$$Z_{\text{输入}} = i\rho c \operatorname{ctg} \frac{\omega}{c} h, \quad (21)$$

其中 ρ 是样品材料的密度， h 是圆板的厚度

$$c = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}}$$

如果圆板厚度比它里面的纵波波长小得多，则式(21)变为

$$Z_{\text{输入}} = i \frac{\rho c^2}{\omega h}. \quad (22)$$

由(22)可见，被测的橡皮材料圆板(在管中浸入深度为 $1/4$ 波长)的输入阻抗有纯弹性的特性。

这样一来，测出由靠着硬壁的薄圆板(圆板的厚度较纵波长小)的反射位相，依照式(3)和(22)，就可以用下式决定橡皮材料的体积压缩系数 $K = \lambda = \rho c^2$ ：

$$\lambda = \rho c^2 = -h\omega\rho c_0 \operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2},$$

式中 φ 是从被测样品反射的位相。

5. 板的隔声本领的测定

在水声学中常常需要确定法向入射时板的隔声本领。可以根据管中的测量来确定板的隔声本领。为此把被测圆板(其面积等于管子的横截面)放在管中某一深度。把专门的样品(样品的阻抗等于水的波阻抗)放在水的表面上。这样的样品什么也不反射，因而板处在行波场中。在这些条件下用前面的方法测出板的反射系数 β ，就很容易找到通过的能量，因而求得板的隔声本领：

$$\alpha = 1 - |\beta|^2$$

6. 反射系数的测量过程及装置的描述

测量装置“脉冲管”是一个装满水的垂直厚壁管(图4)。在管子的下端装有振荡器,在管子的上端装上被测的样品。在管子全长上围有夹套,套内有冷却或加热溶液在循环。溶液的温度按管

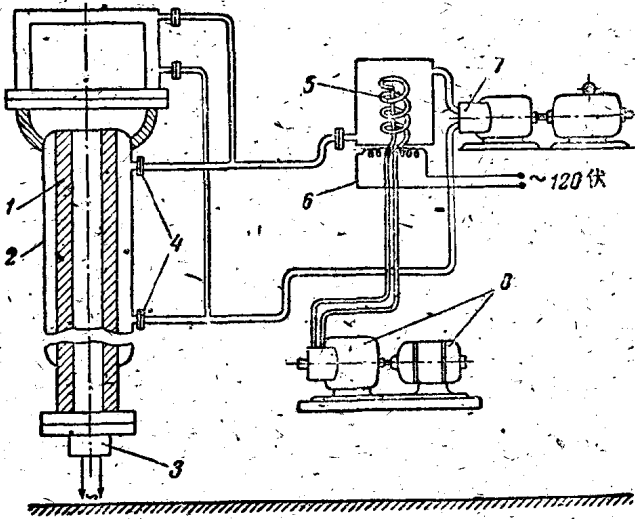


图4 测量装置。1.管子, 2.夹套, 3.振荡器, 4.冷却或加热溶液的出入口, 5.蛇形管冷却器, 6.加热装置, 7.泵, 8.冷却机构

中所要求的温度来调节。在管子的外面包上绝热材料,以免在测量过程中管内温度起变化。在管子上面有一杯形顶盖,顶盖是两层的,其中有冷却或

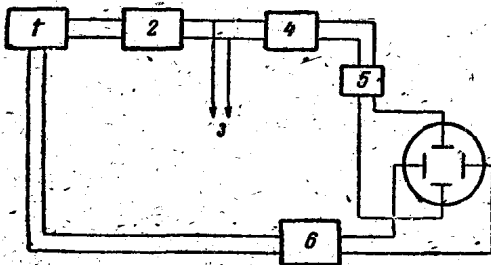


图5

加热溶液(与夹套内的一样)循环,这循环液是使管中和被测样品的周围的温度保持为所要求的温度。电子仪器系统的方块图如图5。由振荡器1

端送出超声頻振蕩的矩形脉冲信号給振動器 3, 同时經過移相器 4 送到示波器的垂直偏轉板的放大电路 5 的輸入端, 振動器的电压送到示波器的水平偏轉板的放大电路輸入端。振動器把脉冲送入管中, 在水中沿管子傳播, 由样品(放在管子的上端)或者由水的自由表面(取掉样品时)反射回来重新回到振動器上, 振動器在发射脉冲的間歇时接收反射脉冲, 用振動器所得到的信号經适当放大以后送到示波器的垂直偏轉板, 在示波器的熒光屏上可以得到各种橢圓图形(利薩如图), 它們与由輻射器和由样品或者水的自由表面依次反射的脉冲相适应。利薩如图的高正比于相应的反射声压; 橢圓的方向和形状表示反射相位。为了測量幅值, 示波器的熒光屏上附有比例格子。在測定的时候, 只观察相应于第一次反射的那个橢圓。

由于水的自由表面反射系数等于 -1 , 使我們能够將反射系数当作由样品和由水的自由表面反射波的幅值比来測量。此时应考虑由自由表面所增加的相角值 $\varphi = \pi$ 。

用以下的方法来測量反射系数的模量和位相。把样品浸入水中, 借助于移相器把示波器熒光屏上的橢圓变成直綫, 按移相器的分度記下度数 φ_1 , 并讀出反射信号的幅值 a 。当去掉样品时变成橢圓, 利用移相器把橢圓还原成直綫, 并重新記下讀数 φ_2 和信号幅值 a_2 。

根据信号的幅值比 $\left| \frac{a_1}{a_2} \right| = |\beta|$ (比值 $|\beta|$ 是反射系数的模) 和

根据位相差加半波长的位相 $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 + \pi$ (位相是在有样品与沒有样品时量出的), 按公式(3)計算样品的輸入阻抗。

应当指出, 当測量各种材料的体积压缩模量时, 圓板状样品应准确地放在水中 $1/4$ 波长深处。由 $1/4$ 波长水柱的反射位相等于 π 。結果, 由此圓板反射的位相就为有样品和无样品时測量到的位相差, 而不增加半波长的位相。

当測定橡皮材料的切变模量时, 必須取具有这样損耗的材料做杆, 即在这种損耗下在半波杆中振動建立時間远小于脉冲的持

續時間。在我們的實驗中，杆是用多甲基丙烯酸樹脂做的。測量按以下次序進行取兩個完全一樣的杆，其中一個貼上待測材料的样品。預先在管中進行測量來校驗此兩杆的諧振頻率是否相同（諧振頻率就是與杆的反射位相 π 相應的頻率）。兩杆應當有同樣的諧振頻率。第二個杆是做校核頻率用。杆的諧振頻率可用以下的方法來確定。旋轉振蕩器的調諧旋鈕至這樣一個頻率，在此頻率下使杆浸在水中和不浸在水中在熒光屏上出現的利薩如圖形不變；相應的反射位相是 π 。在“校核杆”的諧振頻率下測定第一個杆的反射系數的模 $|\beta|$ ，根據它確定不帶样品杆的 Z 輸入 = R 輸入，然後確定杆的 ϵ 和 η 。也在此同一頻率下，測定帶样品杆的 $|\beta|$ 和 ϕ 。計算帶样品杆的 Z 輸入 = R 輸入 + iX 輸入。然後按第 3 節的公式計算橡皮材料的參數。

應當注意，為了計算輸入阻抗，必須知道管中水的波阻抗 $\rho_0 c_0$ 。在一般情況下波阻抗 $\rho_0 c_0$ 與自由介質中水的波阻抗不同，這是由於聲在管中傳播速度減小的緣故。傳播速度的減小是由管的柔順性所引起的^[4]。因此，需要直接確定聲在管中的實際傳播速度。管中的聲速用以下的方法測定。當稍微改變頻率時，觀察水的自由表面反射位相的變化。

反射位相的變化與頻率變化值的關係用下面的公式表示：

$$\Delta\phi = \frac{4\pi l}{c_0} \Delta f,$$

式中 l 是管中水柱長， c_0 是管中聲速， Δf 是以赫茲表示的頻率變化。

由此式可得

$$c_0 = \frac{4\pi l}{\Delta\phi} \Delta f.$$

為了提高水中聲速測定的精確度， $\Delta f = \Delta f_n$ 的值應這樣選取，使位相變化 $\Delta\phi$ 等於 π 的整數倍，即 $\Delta\phi = n\pi$ ；其中 n 是整數。

此時，

$$c_0 = \frac{4l}{n} \Delta f.$$

7. 管中样品的悬置和縫隙的影响

測量样品阻抗的精确度要求是相当高的，因此必須考虑到产生系統誤差的可能性。誤差的原因之一是不可避免地会存在着充滿水的环形縫隙。它是在把样品放在管中的时候圍繞样品而形成的。縫隙的分路作用与縫隙的高度有关，即与样品(杆)的浸入深度有关。在我們的实验中，是在 10 到 20 千赫频段，管直径为 22 毫米，把杆放在 7—10 毫米深。这样的縫隙高度和在所用频段情况下，縫隙的影响不大，可以忽略。因为杆直径取小于管径 0.1 毫米，为使杆保持必需的高度，要用金属絲的环把它箍住，当把杆浸入管中时，金属絲的环擱在管子的末端上面，于是杆就被悬掛在环上。

应当指出，利用上述装置，測量的准确度还受到由气泡和气膜引起的誤差的限制。它們是由于样品表面和管壁沒有充分被水潤湿的緣故。因此把样品放在水中时要格外小心。如果用一切方法避免所有可能的誤差，反射位相的測量結果偏差不大于 $2-3^\circ$ ，反射系数的模的偏差不超过 2—3%。

8. 測量結果

下面我們列举一些測量結果。用脉冲管測量了在胶木杆和多甲基丙烯酸树脂杆中的損耗系数和声速。为了用上述的杆进一步測量橡皮的复切变模量，实验是在 9.5—18.5 千赫频段上进行的。实验时与管内径相应，杆的直径取为 2.18 厘米。曾准备了各种半波长的杆(相应于各种頻率的)。表中列举了在 25°C 时的实验結果：纵波速度 c ，楊氏模量 E 和損耗系数 η 。假如在上述頻带宽度内杆中的声速不依赖于頻率，我們便得到結論說，速度对平均值的最大偏差不超过 $\pm 2\%$ ，而損耗系数的偏差不超过 $\pm 4\%$ 。

我們也測量了橡皮的复切变模量。

图 6 所列举的例子是一种合成橡胶的 μ_p 、 η_p 与温度关系(温度范围 $5^\circ\text{C}-25^\circ\text{C}$) 的測量結果。图中的 μ_p 和 η_p 用相对单位表