声阻法换能器特性的研究*

李明軒

(中国科学院物理研究所)

一、引　言

利用声波可以检测材料内的“伤”. 这种检测通常称为声学检测, 声学检测可以分为传播检测和振动检测两类,传播检测是利用声波的传播特性,振动检测则是利用被检测材料的振动特性. 声阻法是振动检测中的一种方法, 它把反映材料振动特性的力阻抗转换为换能器的负载阻抗,而材料的力阻抗是和材料中某些类型“伤”有一定关系的. 通过对换能器某些特性的测量来鉴别材料的力阻抗, 可以实现检测的目的. 点源激发被检测材料使作弯曲振动的声阻法,一般用来检查粘结质量,如薄蒙皮粘接和蜂窝粘接等质量. 根据对换能器测量参量的不同,应用时可分为振幅法、相位法和频率法.

本文讨论的声阻法,是 Ю. В. Ланге 首先提出并进一步发展的[1-10]. Ланге 最近对圆锥形辐射杆换能器应用部分的等效线路,进行了比较细致的理论分析[11],导出了计算公式和传递模数的极值公式, 研究了发射压电元件的背面负载质量和片数对辐射效率的影响;又对振幅法和相位法的检测灵敏度进行了分析[12].

由于可采用的换能器结构形式很多,比如我们曾采用过阶跃形辐射杆的结构,本文由全等效线路出发, 导出了对各种形状辐射杆适用的一般公式, 为研究如何提高换能器的灵敏度等特性提供了线索. 以等截面辐射杆为例, 对空载下接收电压的模数进行了理论与实验的比较, 并计算了电压矢量图; 对两种简单的粘接状态,也进行了理论和实验的比较.

二、基本方程

本声阻法采用双压电元件复合式换能器(如图1所示). 图中1为背复盖板或背复负载块, 2与4各为压电元件, 3为辐射盖板或辐射杆. 它可以是等截面的直杆, 或变截面的圆锥杆,或变截面阶跃杆等等; 5为检测盖板或触头,和被检测材料作点接触.

主要由压电元件2组成的换能部分,随着外加电压 $V_{激}$, 通过触头5,对被检测材料激发弯曲振动,称为激振器. 主要由压电元件4组成的换能部分,以触头5为阻抗转移器来测量被检测材料的检测阻抗, 输出电信号 $V_{收}$, 称作检测器. 这两个器件处在同一个结构内同时工作,又相互影响. 可以说,弯曲振动声阻法换能器是由两个夹心式换能器联合组

* 1972年8月4日收到.

成的.

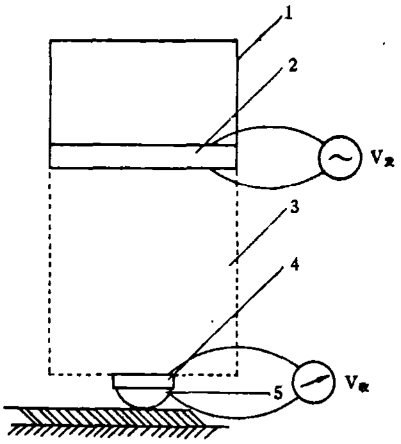


图1　换能器结构示意图

图1所示的声阻法换能器,它的通用全等效线路可用图2表示.

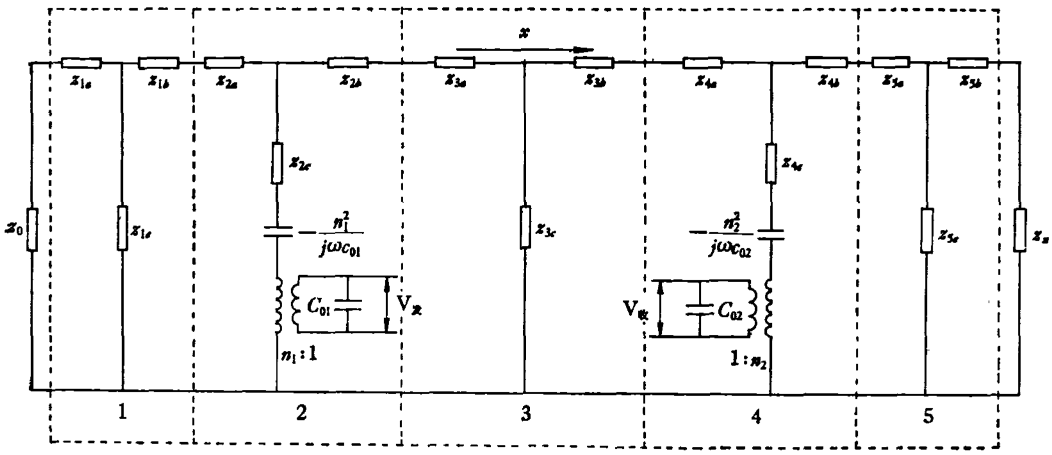


图2　换能器全等效线路图

图中:

$$z_{ia}=z_{ib}=\rho_i c_i s_i \operatorname{th}\left(\frac{k_i'' l_i}{2}\right), \quad z_{ic}=\frac{\rho_i c_i s_i}{\operatorname{sh}(k_i'' l_i)}. \quad \left(\begin{array}{l} i=1,2,4; \\ i \neq 3,5. \end{array}\right) \tag{1}$$

关于 z_{3a}, z_{3b}, z_{3c}, 当辐射杆3为等截面时,仍同式(1), 即

$$z_{3a}=z_{3b}=\rho_3 c_3 s_3 \operatorname{th}\left(\frac{k_3'' l_3}{2}\right), \quad z_{3c}=\frac{\rho_3 c_3 s_3}{\operatorname{sh}(k_3'' l_3)}.$$

但当辐射杆3为变截面时,设其截面面积为 $s_3=s(x)$, 则

$$z_{3a}=\rho_3 c_3 s_{3\cdot1} \operatorname{cth}(k_3' l_3)-j\frac{\rho_3 c_3 s_{3\cdot1}}{k_3'}\left(\frac{1}{2s_{3\cdot1}}\left.\frac{\partial s_3}{\partial x}\right|_{x=l_{3\cdot0}}\right)-\frac{\rho_3 c_3\sqrt{s_{3\cdot1}s_{3\cdot2}}}{\operatorname{sh}(k_3' l_3)}, \tag{2.1}$$

$$z_{3b}=\rho_3c_3s_{3\cdot2}\,\mathrm{cth}\,(k_3'l_3)+j\frac{\rho_3c_3s_{3\cdot2}}{k_3'}\left(\frac{1}{2s_{3\cdot2}}\frac{\partial s_3}{\partial x}\bigg|_{x=l_{3\cdot3}}\right)-\frac{\rho_3c_3\sqrt{s_{3\cdot1}s_{3\cdot2}}}{\mathrm{sh}\,(k_3'l_3)},\tag{2.2}$$

$$z_{3c}=\frac{\rho_3c_3\sqrt{s_{3\cdot1}s_{3\cdot2}}}{\mathrm{sh}\,(k_3'l_3)}.\tag{2.3}$$

式中

$$k_3'^2=k_3''^2-s_3^{-\frac{1}{2}}\left(\frac{d^2s_3^{1/2}}{dx^2}\right),\quad l_{3\cdot3}-l_{3\cdot0}=l_3.\tag{3}$$

若辐射杆为圆锥形，则

$$s_3=s_{3\cdot1}\left(1-\frac{x}{l_3}\right)^2.\tag{4}$$

若辐射杆为指数形，则

$$s_3=s_{3\cdot1}e^{-2\beta x},\quad \beta=\frac{1}{e}\ln\sqrt{\frac{s_{3\cdot1}}{s_{3\cdot2}}},\tag{5}$$

等等.

若辐射杆为阶跃形，则

$$z_{3a}=z_1+\frac{z_3(z_2+z_4)}{z_2+z_3+z_4+z_6},\tag{6.1}$$

$$z_{3b}=z_5+\frac{z_6(z_2+z_4)}{z_2+z_3+z_4+z_6},\tag{6.2}$$

$$z_{3c}=\frac{z_3z_6}{z_2+z_3+z_4+z_6}.\tag{6.3}$$

其中

$$z_1=z_2=\rho_3c_3s_{3\cdot1}\,\mathrm{th}\left(\frac{k_3''l_{3\cdot1}}{2}\right),\qquad z_3=\frac{\rho_3c_3s_{3\cdot1}}{\mathrm{sh}\,(k_3''l_{3\cdot1})}.$$

$$z_4=z_5=\rho_3c_3s_{3\cdot2}\,\mathrm{th}\left(\frac{k_3''l_{3\cdot2}}{2}\right),\qquad z_6=\frac{\rho_3c_3s_{3\cdot2}}{\mathrm{sh}\,(k_3''l_{3\cdot2})}.$$

式中 $l_{3\cdot1}l_{3\cdot2}$ 分别是截面面积各为 $s_{3\cdot1}$, $s_{3\cdot2}$ 的部分杆长.

由于各个部件的阻尼效应，上述各个 k'' 均为复数.

$$k''=jk+K=k\left(j+\frac{1}{2Q}\right).\tag{7}$$

关于 z_{5a}, z_{5b}, z_{5c}, 由于实际设计中，做得非常薄，即 $l_5\ll\lambda$, 于是

$$z_{5a}=z_{5b}\simeq jw\frac{m_5}{2},\quad z_{5c}\simeq\infty.$$

图 2 中，z_0 是背复负载块 1 的负载阻抗，z_x 是被检测材料的检测阻抗．一般情况下负载块 1 的负载是空气，所以 $z_0=0$, 至于 z_x 下面将略有讨论.

现在从图 2 的全等效电路来求 $V_{收}$ 的解．将等效线路图 2 中的某些元件合并，令

$$\left.\begin{aligned}
&z_1 = z_{2c} + j\frac{n_1^2}{\omega c_{01}},\quad z_2 = z_{2a} + z_{1a} + \frac{z_{1b}z_{1c}}{z_{1b}+z_{1c}} = z_{2a} + \rho_1 c_1 s_1 \operatorname{th}(k_1'' l_1),\\
&z_3 = z_{2b} + z_{3c},\quad z_4 = z_{3c},\quad z_5 = {}_{3b} + z_{4a},\\
&z_6 = z_{4c} + \left(j\frac{n_2^2}{\omega c_{02}} - j\frac{n_2^2}{\omega c_{02}}\right) = z_{4c},\quad z_7 = z_{4b} + z_{5a} + z_{5b} + z_x.
\end{aligned}\right\}\tag{8}$$

则从图 2 可得出合并后的等效线路图 3. 从图 3 得出方程组:

$$\left.\begin{aligned}
&n_1 V_{发} + z_1\dot{\xi}_1 = z_2\dot{\xi}_2, && \dot{\xi}_1 = \dot{\xi}_2 + \dot{\xi}_3,\\
&z_2\dot{\xi}_2 = z_3\dot{\xi}_3 + z_4\dot{\xi}_4, && \dot{\xi}_3 = \dot{\xi}_4 + \dot{\xi}_5,\\
&z_4\dot{\xi}_4 = z_5\dot{\xi}_5 + z_6\dot{\xi}_6, && \dot{\xi}_5 = \dot{\xi}_6 + \dot{\xi}_7,\\
&z_6\dot{\xi}_6 = z_7\dot{\xi}_7, && V_{收} = \frac{n_2}{j\omega c_{02}}\dot{\xi}_6.
\end{aligned}\right\}\tag{9}$$

式中 $\dot{\xi}_i(i = 1, \cdots, 7)$ 是图 3 中的一些支路电流.

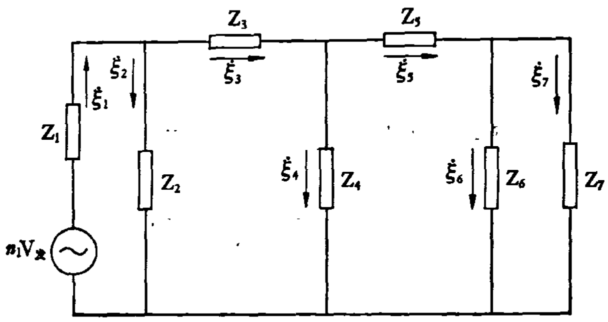


图 3 合并后的等效线路图

解方程组得

$$\dot{\xi}_6 = \frac{n_1 V_{发}}{a_3 z_2 - (a_1 + a_2 + a_3) z_1},\tag{10}$$

$$V_{收} = \frac{n_1 n_2 V_{发}}{j\omega c_{02}[a_3 z_2 - (a_1 + a_2 + a_3) z_1]}.\tag{11}$$

式中

$$a_1 = 1 + \frac{z_6}{z_7},\quad a_2 = \frac{a_1 z_5 + z_6}{a_4},\quad a_3 = \frac{(a_1 + a_2) z_3 + a_2 z_4}{z_2}.$$

公式(11)给出的换能器输出电压 $V_{收}$ 为复数,可写作

$$V_{收} = V_1 + jV_2 = |V| e^{j\varphi}.\tag{12}$$

式中

$$|V| = \sqrt{V_1^2 + V_2^2},\quad \varphi = \operatorname{tg}^{-1}\frac{V_2}{V_1}.$$

当忽略整个换能器的损耗时, 则 $V_2 = 0$, 而 $V_{收} = V_1$ 变为实数. 相角 φ 取 0° 或 180° 值.

三、空载特性

根据上述基本方程(11),先分析最简单的情况,即当 $z_x = 0$,换能器空载的情况. 这里选取一个实例,对公式(11)进行数字计算,然后与实验比较. 在计算和实验中,换能器选取半径为 5 毫米、长为 20 毫米的钢柱为背复负载块,半径为 5 毫米、长为 100 毫米的有机玻璃杆为辐射杆,半径为 5 毫米、厚度分别为 2 毫米与 1 毫米的 PZT-5 圆片作为辐射与接收压电元件,曲率半径为 10 毫米、底半径为 5 毫米的钢球片为触头.

由于在整个换能器结构中,估计有机玻璃损耗是主要的,而这个杆的损耗又只在系统谐振附近才有较大的影响. 所以,当远离系统谐振时,计算中将忽略全部损耗; 当在系统谐振附近时,则只考虑辐射杆的损耗. 这样得到公式(11)中各个 z 分别为:

在整个频段,

$$\left.\begin{aligned} &z_1 = j\omega\frac{m_2}{2} + \frac{1}{j\omega c_{02}} - \frac{n_1^2}{j\omega c_{01}}, \quad z_2 = j\omega\frac{m_2}{2} + j\rho_1 c_1 s\,\mathrm{tg}\,(k_1 l_1), \\ &z_6 = j\omega\frac{m_4}{2} + \frac{1}{j\omega c_4}, \quad z_7 = j\omega\left(\frac{m_4}{2} + m_5\right). \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

远离谐振时,

$$\left.\begin{aligned} &z_3 = j\omega\frac{m_2}{2} + j\rho_3 c_3 s\,\mathrm{tg}\left(\frac{k_3 l_3}{2}\right), \quad z_4 = \frac{\rho_3 c_3 s}{j\sin(k_3 l_3)}, \\ &z_5 = j\omega\frac{m_4}{2} + j\rho_3 c_3 s\,\mathrm{tg}\left(\frac{k_3 l_3}{2}\right). \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

在谐振附近,

$$\left.\begin{aligned} &z_3 = j\omega\frac{m_2}{2} + j\rho_3 c_3 s\,\mathrm{tg}\left(\frac{k_3 l_3}{2}\right) + \frac{\rho_3 c_3 s k_3 l_3}{4Q\cos^2\left(\frac{k_3 l_3}{2}\right)}, \\ &z_4 = \frac{\rho_3 c_3 s}{j\sin(k_3 l_3)} + \frac{\rho_3 c_3 s k_3 l_3 \cos(k_3 l_3)}{2Q\sin^2(k_3 l_3)}, \\ &z_5 = j\omega\frac{m_4}{2} + j\rho_3 c_3 s\,\mathrm{tg}\left(\frac{k_3 l_3}{2}\right) + \frac{\rho_3 c_3 s k_3 l_3}{4Q\cos^2\left(\frac{k_3 l_3}{2}\right)}. \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

取有机玻璃的 $Q = 20$, $V_{发} = 34$ 伏,代入公式(11),得到接收电压的实数部分随频率变化,如图 4 所示. 其虚数部分的频率特性如图 5 所示. 电压的矢量图如图 6 所示,电压模数的频率特性如图 7 所示. 实验测出了不同频率的电压模数,结果表示在图 7 中. 实验结果与理论计算(其 Q 值是估计的)比较接近. 为了对照,在图 8 中给出完全忽略损耗时的理论曲线. 从图中可以看出相位在 0° 与 180° 之间的跃变.

资料 [13] 曾给出两个与耦合元件串联相接的耦合电路(如图 9 所示). z_{E11}和 z_{E22} 的谐振频率分别为 ω_{01}, ω_{02}, z_{E12} 为无损耗的电感或电容耦合元件. 当 $\omega_{01} = \omega_{02}$ 时可得到在谐振附近 i_2/e_1 随频率变化的轨迹,如图 10(a) 所示, $|i_2/e_1|$ 随频率变化的曲线如图 10(b) 所示. 本文中的图 3, 通过网络变换也可以变作如图 9 的形式,其中相应的 $\omega_{01} \neq \omega_{02}$, 且

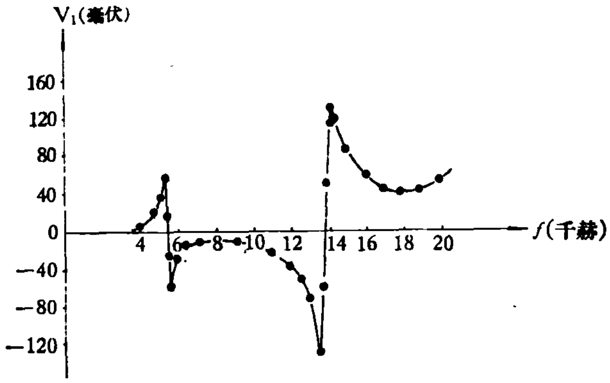


图 4 电压实部频率特性曲线

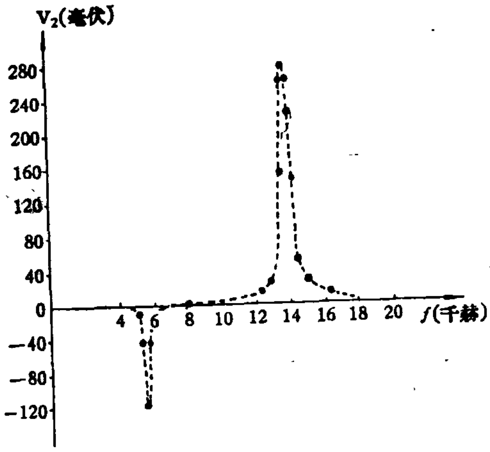


图 5 电压虚部频率特性曲线

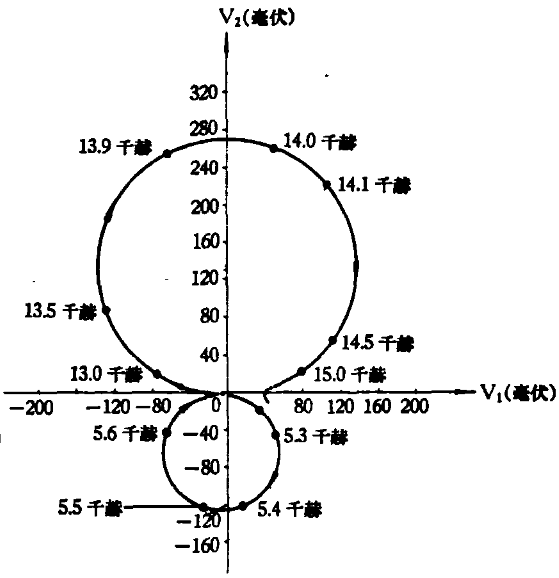


图 6 电压矢量图

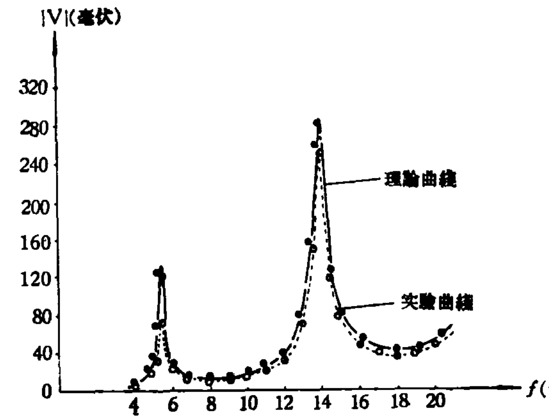


图 7 电压模数与实验频率特性曲线

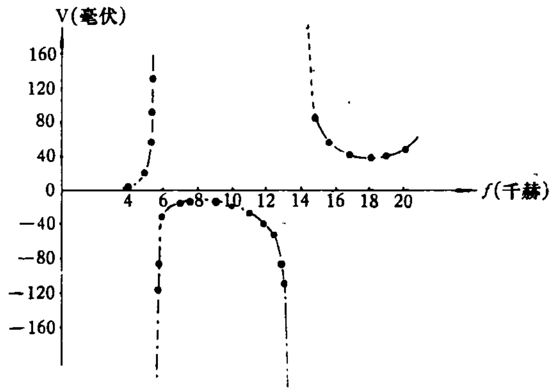


图 8　忽略损耗电压频率特性曲线

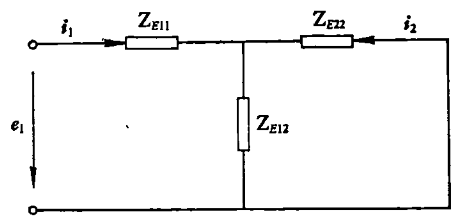
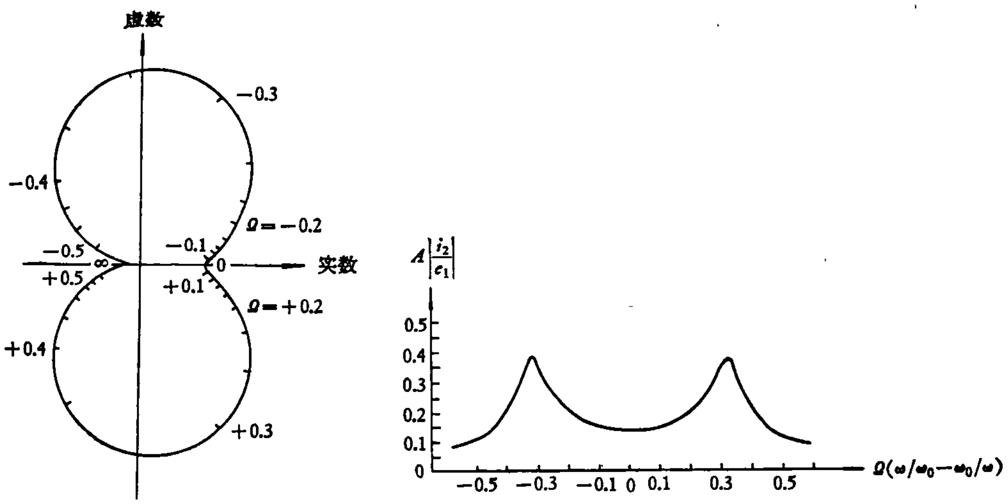


图 9　具有串联相接耦合元件的二个耦合电路图



(a) i_2/e_1 随频率变化的轨迹；　(b) $|i_2/e_1|$ 随频率变化特性曲线.

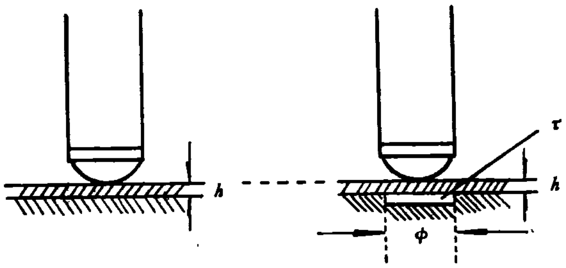
图 10　i_2/e_1 与 $|i_2/e_1|$ 的频率特性

z_{E12} 中有损耗．这样似乎可以定性地理解图 6 和图 7 中曲线的形状．

四、负 载 特 性

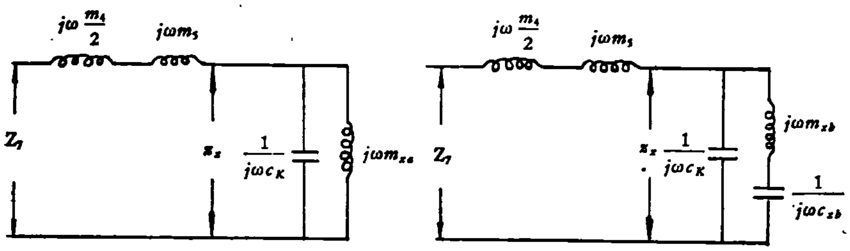
现在讨论换能器承受负载（即当 $z_x \neq 0$）的情况．这里只选取最简单的特例，即选取两个不同粘接状态的振动阻抗作为换能器的负载如图 11 所示．

图中(a)表示厚度 $h=1$ 毫米的钢板与钢块粘接好的状态，在忽略粘接层影响时，实际上是触头直接和钢块接触．图 (b) 表示与图 (a) 相同的粘结层，但在粘接界面有直径 $\phi=10$ 毫米、厚度 $\tau=1$ 微米的空气夹层，这是一种简单的脱粘状态．在任一种状态，检测阻抗 z_x 是由粘接后的钢块或钢板的振动阻抗与接触柔顺性阻抗两部分组成[9]．阻抗的等效线路如图 12 所示．



(a) 粘合好　(b) 脱粘

图 11　粘接状态示意图



(a) 粘合好　(b) 脱粘

图 12　检测阻抗等效线路图

图中 m_{xa} 为钢块加钢板的质量，实验中为 1.00 千克. C_k 为接触柔顺性，且[10]

$$C_k = \frac{2}{3}\left\{\left[\frac{3}{4}\left(\frac{1-\sigma_1^2}{E_g} + \frac{1-\sigma_2^2}{E_2}\right)\right]^2 \frac{R_1+R_2}{R_1R_2}\right\}^{1/3} F_0^{-1/3}. \tag{16}$$

式中 E_g 为被检测材料的动态杨氏模量，E_2 为触头的静态杨氏模量，σ_1、σ_2 为被检测材料和触头的泊松比，R_1、R_2 为被检材料和触头的曲率半径，中心在物体内时取正，中心在物体外时取负，F_0 为检测中换能器作用于被检测材料的垂直静压力. 这里取 $\sigma_1=\sigma_2=0.28$，$E_g = 22.06 \times 10^{10}$ 牛顿/米^2，$E_2 = 21.00 \times 10^{10}$ 牛顿/米^2，$R_2 = \infty$，$R_1 = 10$ 毫米，$F_0=3$ 牛顿即 305.9 克重（一般在 300 到 1000 克重之间）. 由公式 (16) 得到 $C_k = 7.21 \times 10^{-8}$ 米/牛顿.

图中 m_{xb} 为脱粘"伤"区域钢板的等效质量，c_{xb} 为脱粘"伤"区域钢板的等效柔顺性，且[9]

$$m_{xb} = \frac{7\rho\pi h R^2}{54}, \tag{17.1}$$

$$c_{xb} = \frac{48\tau(1-\sigma^2)R^2}{\pi[64\tau E h^3 + 3\rho_0 c_0^2 R^4(1-\sigma^2)]}. \tag{17.2}$$

式中 ρ、ρ_0 分别为钢板和"伤"内空气的密度，R 为"伤"半径，h 为钢板厚度，τ 为"伤"空气层厚度，E 为钢板杨氏模量，σ 为钢板泊松比，c_0 为"伤"内空气声速. 这里取 $\rho = 7.8\times10^3$ 千克/米^3，$\rho_0 = 1.293$ 千克/米^3，$c_0 = 3.30 \times 10^2$ 米/秒，$\tau = 1 \times 10^{-6}$ 米，$E = 21.00 \times 10^{10}$ 牛顿/米^2，$h = 1 \times 10^{-3}$ 米，$R = 5 \times 10^{-3}$ 米，$\sigma = 0.28$. 由公式 (17) 得到 $m_{xb} = 8.25 \times 10^{-4}$ 千克，$c_{xb} = 2.618 \times 10^{-8}$ 米/牛顿.

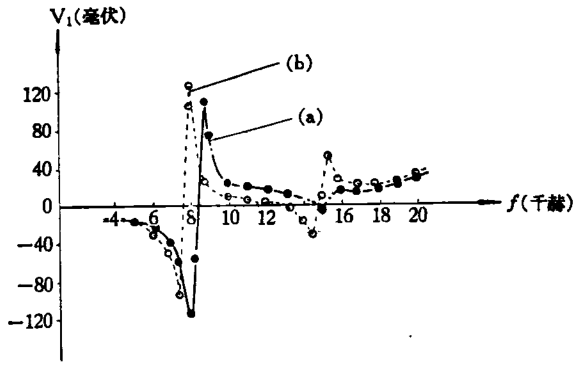


图 13　电压实部频率特性曲线

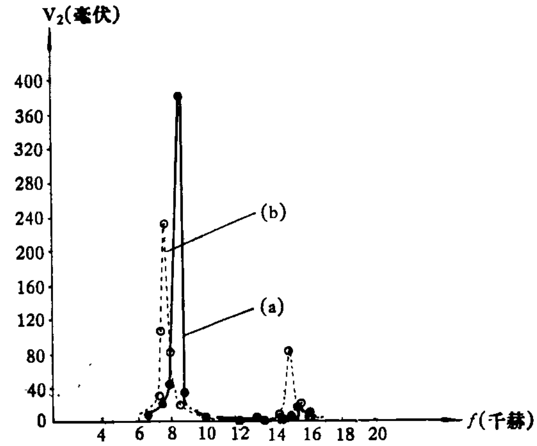


图 14　电压虚部频率特性曲线

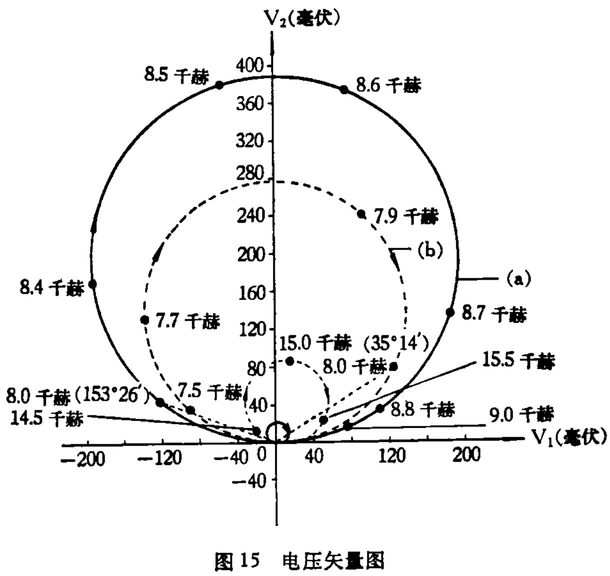


图 15　电压矢量图

取上述 z_x 值，忽略其他损耗，而在谐振附近考虑了辐射杆的损耗，并取 $Q=20$，$V_{发}=$ 34 伏．代入公式(11)，得到电压的实数分量随频率变化曲线（如图 13 所示）、虚数分量随频率变化曲线（如图 14 所示）、电压矢量图（如图 15 所示）、电压模数随频率变化曲线以及与实验的比较（如图 16 所示）．由图 15 看出，如果取 8 千赫工作，粘合好时电压相位为 153°26′，脱粘时电压相位为 35°14′．它们的相角差为 118°12′．在这个特例中，相位法检测可以得到较高灵敏度．同时可以看出，只有在系统谐振附近才能得到相位检测的高灵敏度．由图 16 看出，若取 8.5 千赫工作，粘合好时电压模数为 389 毫伏，脱粘时电压模数为 60 毫伏，可以得到较高的振幅法检测灵敏度．理论曲线与实验曲线有一定的偏差，看来从理论方面和从实验方面都尚待更细致地探讨．

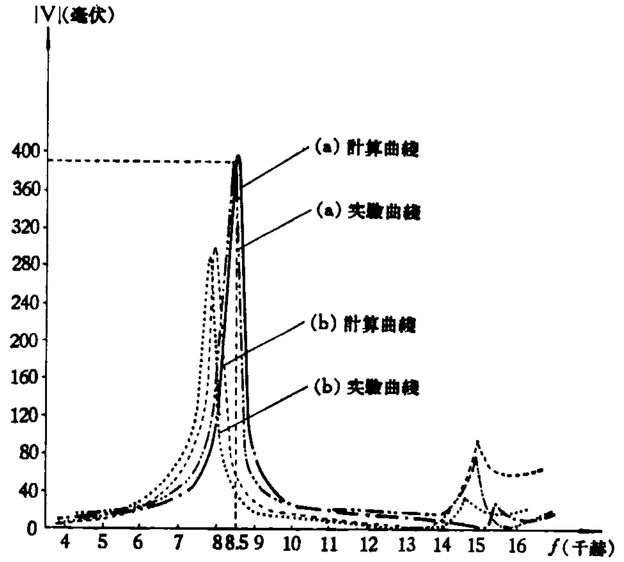


图 16　计算曲线与实验曲线比较

本工作得到应崇福同志的指导以及汪承浩、刘献铎、李丽岩等同志的帮助，一并致谢．

参　考　资　料

[1] Ю. В. Ланге, *Заводская лаборатория*, 7 (1959), 833.
[2] Ю. В. Ланге, *Заводская лаборатория*, 7 (1960)., 842.
[3] Ю. В. Ланге, *Дерек оскопия*, 1 (1965) 44.
[4] Ю. В. Ланге, Новые машины и приборы для испытания металлов сборник статей металлургидат, (1963), 94.
[5] Ю. В. Ланге, *Деректоскопия*, 3 (1969), 1.
[6] Ю. В. Ланге, *Деректоскопия*, 5 (1971), 96.
[7] Ю. В. Ланге, *Деректоскопия*, 3 (1971), 62.
[8] Ю. В. Ланге и С. М. Шварцман, *Деректоскопия*, 4 (1970), 53.
[9] Ю. В. Ланге и З. И. Манаева, *Деректоскопия*, 1 (1971), 42.
[10] Ю. В. Ланге и И. И. Теумин, *Деректоскопия*, 2 (1971), 49.
[11] Ю. В. Ланге, *Деректоскопир*, 1 (1972), 10.
[12] Ю. В. Ланге, *Деректоскопия*, 1 (1972), 57.
[13] F. A. 费歇尔，电声学基础第一章 7, 13.