

可调频率压电换能器原理*

汪承灏 赵哲英

(中国科学院声学研究所)

最近,我们曾研究电负载对压电振动系统振动特性的影响^[1,2]。随着电负载的连续变化,通过压电效应,压电振动系统的谐振频率也连续地改变。由此引伸,可以实现可调频率压电换能器。本文将对其原理进行研讨。

我们将对压电夹心换能器进行这种调节频率的理论分析,并对一种纵向加电场,纵向振动的夹心换能器进行实验比较。理论与实验结果一致表明,用有效耦合系数 K_{eff} 来衡量,该换能器可以在一个半倍频程的范围内有效地工作。

这里提出的可调频率压电换能器,由于是改变电负载,通过压电耦合来实现换能器的频率调节的,因此它还具有方便、连续和瞬时可调的特点。

一、引 言

在文献[1],[2]中,我们讨论了电负载对压电振动系统振动特性的影响。我们看到,随着电负载的连续改变,压电振动系统的谐振频率将连续地大范围变化,甚至原则上说,如果考虑泛音振动,谐振频率将可以由零变化到无穷大。那么由此我们自然可以引伸想到,用改变电端负载的办法,通过压电耦合,是否可以实现压电换能器的频率调节。这正是本文所要研究的可调频率压电换能器原理。

在本工作中,我们将典型地分析夹心式结构可调频率压电换能器,来阐明“压电调节频率”原理。夹心换能器的一部分是用来作为电激励声的“工作部分”,另一部分是电端接上抗性负载,通过改变电负载,来改变整个换能器的谐振频率的“调节频率部分”。我们将分析两种夹心换能器:一种是侧向加电场、作纵向振动;另一种是纵向加电场、作纵向振动。

我们对一种纵向加电场、作纵向振动的夹心式压电换能器,进行了压电调节频率实验研究,与理论分析比较。

在分析和实验中,不仅讨论换能器谐振工作频率随电负载的变化。而且为了要衡量这种换能器的性能,还将讨论换能器的关键参数——有效耦合系数 K_{eff} 随着频率调节的变化情况,以便给出可调频率压电换能器能有效地工作的频率范围。

二、可调频率夹心式压电换能器分析

1. 侧向加电场、纵向振动夹心压电换能器

* 本文1981年9月18日收到。

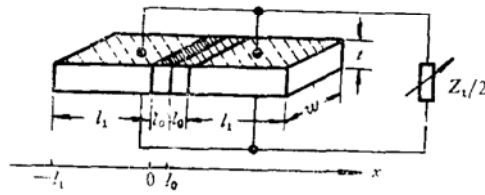


图1 可调频率式侧向加电场纵振动夹心换能器
Frequency-tunable sandwich transducer of length
vibration bar with electric field perpendicular
to direction of vibration

如图1所示,换能器是中心对称的,中间的 $2l_0$ 部分是用于电驱动的工作部分,两边的 l_1 部分为调节频率部分。这两部分,均是侧向极化并涂以电极;在工作部分,侧向电极连接驱动电源;而在调节部分,侧向电极接上用来调节频率的电负载,每边为 Z_1 ,总阻抗为 $Z_1/2$ 。此换能器作一维纵振动。为简单起见,换能器用相同压电材料作成,耦合系数为 K_{31} ,工作部分和调节部分的阻挡电容分别为 C_0^* 和 C_1^* , z 为电策动源内阻。这里我们将采用文献[1]的分析方法来讨论。

由于中心对称,故只讨论换能器的一半就可以了。以左一半为例,将工作部分与调节部分交界处取为 $x=0$, $(0, l_0)$ 是工作部分, $(-l_1, 0)$ 是调节部分。由文献[1]的(2.4)和(2.7)式,在 $(0, l_0)$ 的工作部分

$$\xi_0 = A \sin kx + B \cos kx \quad (1)$$

$$\begin{aligned} S_{11}^E T_0 / k &= A \left[\cos kx - \frac{\sin kl_0}{kl_0(1 - 1/K_{31}^2)(1 + 1/j\omega C_0^* z)} \right] \\ &- B \left[\sin kx - \frac{1 - \cos kl_0}{kl_0(1 - 1/K_{31}^2)(1 + 1/j\omega C_0^* z)} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

在 $(-l_1, 0)$ 的调节部分

$$\xi_1 = C \sin kx + D \cos kx \quad (3)$$

$$\begin{aligned} S_{11}^E T_1 / k &= C \left[\cos kx - \frac{\sin kl_1}{kl_1(1 - 1/K_{31}^2)(1 + 1/j\omega C_1^* Z_1)} \right] \\ &- D \left[\sin kx - \frac{1 - \cos kl_1}{kl_1(1 - 1/K_{31}^2)(1 + 1/j\omega C_1^* Z_1)} \right], \end{aligned} \quad (4)$$

边界条件及连续条件为:

$$\begin{cases} x = l_0, & \xi_0 = 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x = 0, & \xi_0 = \xi_1, \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} & T_0 = T_1, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x = -l_1, & T_1 = 0. \end{cases} \quad (8)$$

共振频率

换能器的共振频率可以令 $z=0$ 得到,此时(2)式化为:

$$S_{11}^E T_0 / k = A \cos kx - B \sin kx, \quad (2a)$$

由(1)、(2a)、(3)、(4)式和(5)、(6)、(7)、(8)式,可得到共振频率方程为:

$$\frac{\operatorname{ctg} kl_0 - 2 \operatorname{tg} \frac{kl_1}{2}}{\operatorname{ctg} kl_0 \cdot \operatorname{ctg} kl_1 - 1} = kl_1 \left(1 - \frac{1}{K_{31}^2} \right) \left(1 + \frac{1}{j\omega C_1^i Z_1} \right). \quad (9)$$

反共振频率

这时令 $z \rightarrow \infty$, 此时(2)化为:

$$\begin{aligned} \frac{S_{11}^E T_0}{k} = & A \left[\cos kx - \frac{\sin kl_0}{kl_0(1 - 1/K_{31}^2)} \right] \\ & - B \left[\sin kx - \frac{1 - \cos kl_0}{kl_0(1 - 1/K_{31}^2)} \right], \end{aligned} \quad (2b)$$

由(1)、(2b)、(3)、(4)式和(5)、(6)、(7)、(8)式,可得到反共振频率方程为:

$$\frac{\operatorname{ctg} kl_0 - 2 \operatorname{tg} \frac{kl_1}{2} - \frac{1}{kl_0(1 - 1/K_{31}^2)}}{\operatorname{ctg} kl_0 \cdot \operatorname{ctg} kl_1 - \frac{\operatorname{ctg} kl_1}{kl_0(1 - 1/K_{31}^2)} - 1} = kl_1 \left(1 - \frac{1}{K_{31}^2} \right) \left(1 + \frac{1}{j\omega C_1^i Z_1} \right). \quad (10)$$

有效耦合系数

对于上述可调频率换能器,我们首先讨论了它的可调频率特性。进一步还需要考虑,在什么频率范围内,换能器能够较好地工作。这里将用换能器的关键参数——有效耦合系数 K_{eff} 来衡量它。根据有效耦合系数 K_{eff} 与共振频率 f_r 和反共振频率 f_a 的关系式

$$K_{\text{eff}}^2 = \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2}, \quad (11)$$

由(9)式和(10)式求出 f_r 和 f_a , 就可以由上式求出有效耦合系数。

在图2中,给出了这种换能器的调节频率原理图。曲线1是对应共振频率的(9)式等号左

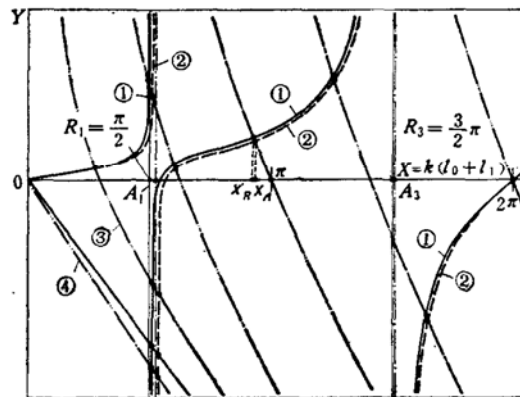


图2 侧向加电场纵振动夹心换能器调节频率与电负载的关系

Relations of tuning frequencies of sandwich transducer to electric load ($l_1/l_0 = 1$). Electric field is perpendicular to direction of vibration

边的函数;而曲线2对应反共振频率的(10)式等号左边的函数。图上以Y表示。它们都是以 $k(l_0 + l_1)$ (横坐标X)为变量,相应于随频率的变化。曲线3和4分别代表(9)式和(10)式的

右边部分的函数,也以 Y 表示,前者相应于 $Z_1 = j\omega L$, 后者相应于 $Z_1 = 1/j\omega C$. 它表示,以 Z_1 为参数,以 $k(l_0 + l_1)$ 为变量,相应于随频率的变化. OA 线对应 $Z_1 = \infty$. 曲线 1 与 3、4 或 2 与 3、4 的交点所对应的横坐标 X_R 或 X_A 表示(9)式或(10)式的解,即分别对应共振频率 f_r 和反共振频率 f_a .

参照文献[1]中对于侧向加电场、纵振动压电换能器的压电调频特性的讨论,我们可以看到当阻抗 Z_1 由 $+\infty$ 变到 $-\infty$ 时,共振频率和反共振频率包括基频和泛音,将分段连续地变化,充满零到无穷大的整个频率域. 因此我们可以看到,这种压电夹心换能器,是一种工作频率可以调节变化的换能器,而且随着 Z_1 的连续变化,换能器的工作频率也连续地变化. 这就是压电可调频率换能器的原理.

由公式(9)和(10)及图 2 可见,无论什么情况,对于所提出的可调频率换能器,包括泛音在内,其可调谐范围是从零到无穷大. 只要选择适当的 Z_1 ,即可以在任意频率上调谐. 关于调频后,对 K_{eff} 的影响我们将在下一节纵向加电场、纵向振动换能器中讨论.

2. 纵向加电场、纵向振动夹心压电换能器

这种换能器如图 3 所示. 换能器中心对称,中间 $2l_0$ 为“工作部分”,两边 l_1 为“调节频率部分”. 每边接阻抗 Z_1 ,总阻抗为 $Z_1/2$. 换能器用相同材料,其耦合系数为 K_{33} ,工作部分和调节部分的阻挡电容分别为 C_0' 和 C_1' . 此处用等效网络(如图 4)来求解.

从等效电路^[3]可获得共振频率方程

$$\frac{\operatorname{ctg} kl_0 - 2 \operatorname{tg} \frac{kl_1}{2} - \frac{K_{33}^2}{kl_0}}{\operatorname{ctg} kl_0 \cdot \operatorname{ctg} kl_1 - \frac{K_{33}^2}{kl_0} \operatorname{ctg} kl_1 - 1} = \frac{kl_1}{K_{33}^2} (1 + j\omega C_1' Z_1) \quad (12)$$

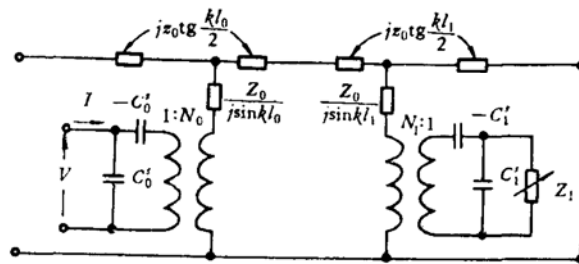


图 4 可调频率式纵向加电场纵振动夹心换能器等效电路

$$\nu_b^D = \left(\frac{1}{\rho S_{33}^D} \right)^{1/2}; \quad Z_0 = W t \rho \nu_b^D; \quad C_0' = \frac{W t \epsilon_{33}^T (1 - K_{33}^2)}{l_0}$$

$$C_1' = \frac{l_0}{l_1} C_0'; \quad N_0 = \frac{W t}{l_0} \frac{g_{33}}{S_{33}^E} = \frac{W t}{l_0} \cdot \left(\frac{\epsilon_{33}^T}{S_{33}^E} \right)^{1/2} K_{33}; \quad N = \frac{l_0}{l_1} N_0$$

Complete equivalent circuit for frequency-tunable sandwich transducer of length vibration bar with electric field parallel to direction of vibration

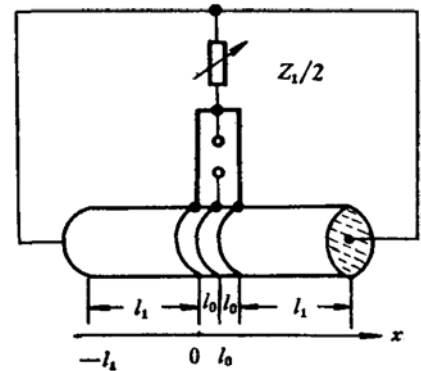


图 3 可调频率式纵向加电场纵振动夹心换能器
Frequency-tunable sandwich transducer of length vibration bar with electric field parallel to direction of vibration

和反共振频率方程

$$\frac{\operatorname{ctg} kl_0 - 2 \operatorname{tg} \frac{kl_1}{2}}{\operatorname{ctg} kl_0 \cdot \operatorname{ctg} kl_1 - 1} = \frac{kl_1}{K_{33}^2} (1 + j\omega C_1 Z_1) \quad (13)$$

有效耦合系数 K_{eff} 可以由 (12) 和 (13) 式的解求出。

图 5 表示这种换能器的可调频率与电负载关系,它与图 2 大同小异。同样,曲线 1 和 2 分别表示共振频率公式 (12) 左边的函数和表示反共振频率公式 (13) 左边的函数,而曲线 3 和 4 分别为 $Z_1 = j\omega L$ 和 $Z_1 = 1/j\omega C$ 时,公式 (12) 和 (13) 右边的函数。 OA 线对应 $Z_1 = 0$ 。其分析可以参照上述和文献 [1] 中有关讨论进行,这里从略。

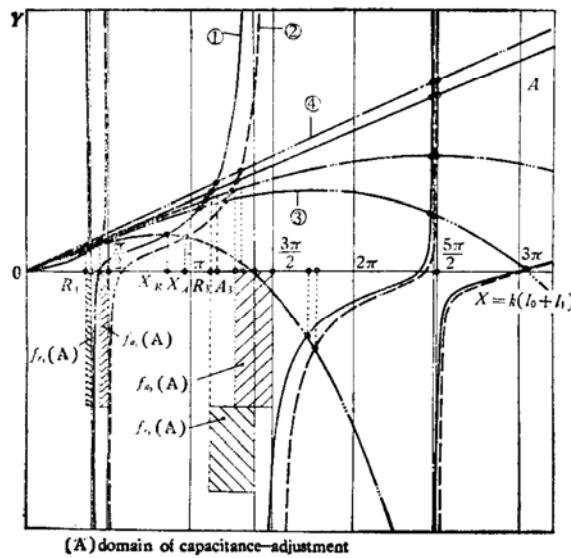


图 5 纵向加电场纵振动夹心换能器调节频率与电负载的关系
Relations of tuning frequencies of sandwich transducer
to electric load ($l_1/l_0 = 2$). Electric field is parallel
to direction of vibration

如果我们还需要关心换能器在调频后的效率,就要研究换能器的有效耦合系数 K_{eff} 随着调节频率的变化。图 6 我们给出当 $K_{33} = 0.7$ 时,在不同的 l_1/l_0 , K_{eff} 随着 $k(l_0 + l_1)$ 的变化。由图可见, l_1/l_0 较小时,最大的 K_{eff} 较高^[4],但随着调节频率的变化, K_{eff} 下降较快,变

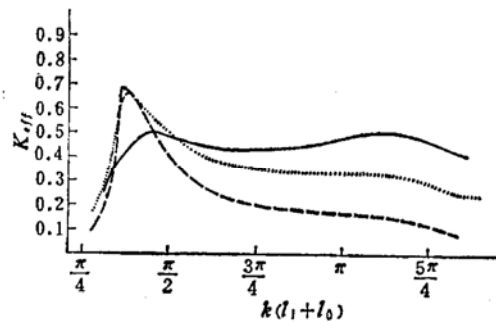


图 6 K_{eff} 随调节频率的变化 ($K_{33} = 0.7$)
— $l_1/l_0 = 5.0$ $l_1/l_0 = 1.0$ --- $l_1/l_0 = 0.5$
Variation of K_{eff} with tuning frequency ($K_{33} = 0.7$)

化较大,所以调节频率的可工作频率范围较窄. 而当 l_1/l_0 较大时,可工作的频率范围较宽,但最大的 K_{eff} 较小,但对较大的材料耦合系数, K_{eff} 仍足够的大^[4]. 由图我们可以得出结论: 这种可调频率换能器,将使换能器的工作频率范围有很大的延展;也就是说,在很大的调节频率范围内,换能器仍有较高的效率. 如图 6 所示,对于较大的材料耦合系数和较大的 l_1/l_0 , 其工作频率范围可以达到两个倍频程. 所以这种调节频率结构是相当有效的.

三、可调频率纵向加电场 纵振动夹心换能器实验

我们构成一种可调频率纵向加电场纵振动夹心换能器(见图 3),其材料为 PZT 类材料: $\rho = 7.5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, $v_p^D = 3825 \text{m/s}$, $K_{33} = 0.655$, $l_0 = 2.11 \text{cm}$, $l_1 = 4.22 \text{cm}$.

实验装置见图 7. 其原理是,扫频仪输出可调节的扫频信号,通过传输线测量,得出换能器阻抗特性曲线,同时利用扫频仪手动调节旋钮,可使标志点固定在阻抗特性曲线上任一点,用频率计精确读出它的频率. 因此,对某一给定电负载阻抗 Z_L ,可以读出阻抗最低的频率 f_r 和阻抗最高的频率 f_p ,用它们分别近似代替 f_r 和 f_a . 同时,通过它们便可计算出 K_{eff} 来.

对上述可调频率换能器,我们分别给出电容调频和电感调频的基频和三次泛音频率的调节曲线. 实验结果和理论曲线的比较见图 8 和图 9.

由调节频率的实验结果与理论曲线相比较来看,规律一致,特别是基频符合得很好,三次泛音的实验结果偏低. 这是因为,实验用的换能器,在三次

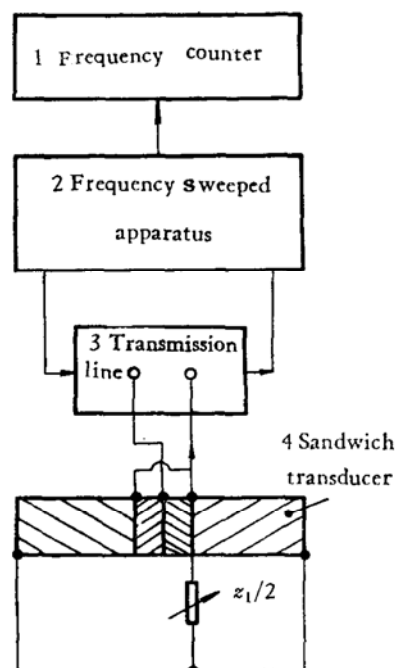


图 7 可调频率换能器实验装置
Experimental equipment of frequency-tunable transducer

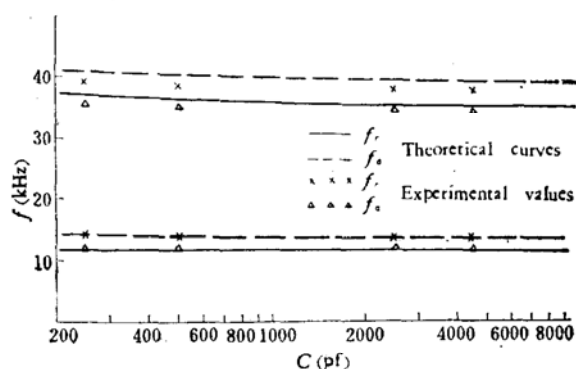


图 8 纵向加电场夹心换能器电容调节频率的结果
($l_0 = 2.11 \times 10^{-2} \text{m}$, $l_1 = 4.22 \times 10^{-2} \text{m}$, $K_{33} = 0.655$)
Results of frequency-tuning by capacitance for sandwich transducer with electric field parallel to direction of vibration ($l_0 = 2.11 \times 10^{-2} \text{m}$, $l_1 = 4.22 \times 10^{-2} \text{m}$, $K_{33} = 0.655$)

泛音的频率范围内,其波长与换能器的直径之比已不满足远大于 1 的条件了,相应的横向尺寸

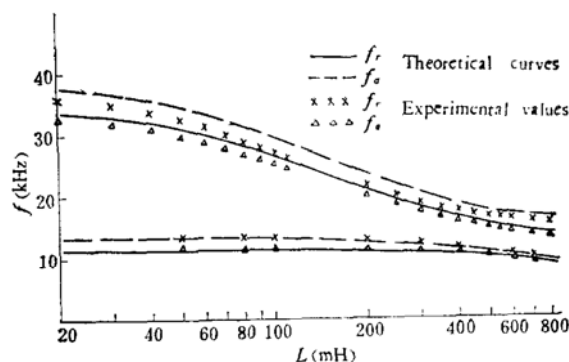


图9 纵向加电场夹心换能器电感调节频率的结果
 $(l_0 = 2.11 \times 10^{-2} \text{m}, l_1 = 4.22 \times 10^{-2} \text{m}, K_{33} = 0.655)$
 Results of frequency-tuning by inductance for sandwich
 transducer with electric field parallel to direction of vibration
 $(l_0 = 2.11 \times 10^{-2} \text{m}, l_1 = 4.22 \times 10^{-2} \text{m}, K_{33} = 0.655)$

较大,致使频率下降。

我们用测得的 f_r 和 f_a , 作出 K_{eff} 随调节频率的变化曲线, 并与理论曲线比较, 见图 10。

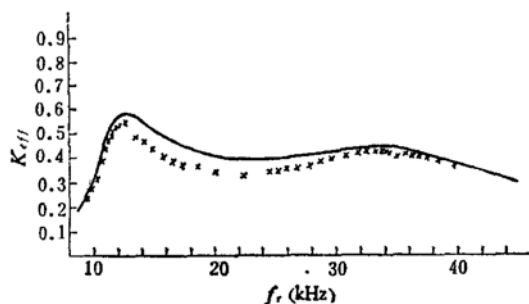


图 10 可调频率式纵向加电场夹心换能器有效耦合系数
 K_{eff} 的理论曲线和实验结果 $(l_0 = 2.11 \times 10^{-2} \text{m}$
 $l_1 = 4.22 \times 10^{-2} \text{m}, K_{33} = 0.655)$

Theoretical curve and experimental results of the
 effective coupling coefficient K_{eff} of frequency-tunable
 sandwich transducer with electric field parallel to the
 direction of vibration $(l_0 = 2.11 \times 10^{-2} \text{m}, l_1 = 4.22$
 $\times 10^{-2} \text{m}, K_{33} = 0.655)$

实验与理论符合较好。由结果可以看出, 对于上述可调频率换能器, K_{eff} 保持在最高值的 3 分贝以内的区域, 占据约一个半倍频程的范围。由此可以看出这种换能器的效能。

四、小结和讨论

根据以往我们研究的压电振动系统的压电调节频率原理, 在这里提出了可调频率压电换能器。对于可调频率压电夹心式换能器作了理论分析, 对于换能器的调节频率特性, 以及调频后换能器的效能(用有效耦合系数 K_{eff} 来衡量)进行了估计。最后, 我们给出了一种具体夹心式压电可调频率换能器, 它能在一个半倍频程内有效地工作。

我们知道, 目前一般夹心换能器, 为了能取得较好的效率, Q 值都比较高, 一般在几百甚至

上千的范围内,因而它的工作带宽仅是工作频率的百分之几甚至千分之一,在水中带宽也不过十分之一。这往往带来了困难:常常由于换能器的材料性能、尺寸和工艺上的细微差异,其工作频率就与设计的不一致;相同结构换能器之间工作频率也不一致,不能由同一电源驱动工作;还有,当需要改变声的工作频率时,往往由于换能器的工作带宽限制,很难实现,唯一的办法是更换一个新的换能器。

相比之下,这里提出的夹心式压电换能器可以进行压电调频,使得当我们改变电负载时,它们的工作频率也就随之改变,其能有效地工作的频率范围可延拓相当宽。而且,由于是电调节频率,比之于用改变机械结构来改变换能器工作频率,这种调节将是方便的,可以连续地调节,可以瞬时调节。根据这些特点,我们可望它作为声谱分析用换能器,需捷变跳频的换能器以及换能器工作频率的调整,特别是换能器阵里阵元的调整等方面获得应用。

在本文中,我们的讨论仅限于作纵振动的压电夹心换能器,实际上,其他压电换能器如厚度、圆柱、弯曲、弯张等各种换能器,原则上都可以利用此原理进行频率调节。更广泛些,其他电声换能器原则上也可以运用。而每种换能器的频率调节结构方式也可以是多种多样的。这些都还有待于进一步的工作。

本文工作中,与马玉龙同志进行多次有益的讨论。在工作进行中,得到了应崇福教授的关心和指导。

参 考 文 献

- [1] 汪承灏,赵哲英,马玉龙,“电负载对压电振动系统特性的影响”,声学学报,6(1981),92—102.
- [2] 汪承灏,赵哲英,“在电负载下压电板的厚度振动”,声学学报,6(1981),263—267.
- [3] Berlincourt, D. A. et al., “Physical Acoustics” (Ed. M. P. Mason) 1, Part A (Academic Press. N. Y. 1964), 234—239.
- [4] 汪承灏,“夹心式压电换能器的参数对有效耦合系数的影响”,声学学报,6(1981),194—197.

PRINCIPLE OF PIEZOELECTRIC FREQUENCY-TUNABLE TRANSDUCER

WANG Chen-hao ZHAO Zhe-ying

(Institute of Acoustics, Academia Sinica)

Recently, in our papers^[1,2] the effect of electric load on the characteristics of piezoelectric vibration system has been obtained. The resonant frequency of such a system changes continually with the changing of the electric load. In accordance with this effect, we made piezoelectric frequency-tunable transducers. In this paper, the principle of this frequency-tunable piezoelectric transducer is described.

We theoretically analyse the piezoelectric frequency-tuning of the sandwich transducers and experimentally investigate a sandwich transducer of length-vibration bar with field parallel to length. The theoretical and experimental results show that such frequency-tuning is available at one and half octaves.

For piezoelectric frequency-tunable transducer, the frequency tuning is convenient, continual and instantaneous.