

研究和技术简报

高振幅夹心式压电换能器

林仲茂 李 萌

(中国科学院声学研究所)

1986年1月31日收到

摘要 用一维理论分析了由 n 个元件组成的压电换能器,用传输矩阵方法编程计算了换能器两端面的位移振幅比为最大时的最佳长度比,并作实验验证。实验和理论计算结果基本符合。

HIGH AMPLITUDE PIEZOELECTRIC SANDWICH TRANSDUCER

LIN ZHONG-MAO LI MENG

(Institute of Acoustics, Academia Sinica)

Received January 31, 1986.

Abstract A piezoelectric transducer consisted of n elements is described by one dimensional theory. By means of transfer matrix operations, a computer program has been made for calculating the resonant frequencies of transducer and distribution of displacement along its axis. It is shown that a maximum ratio of the amplitude at the radiating surface to that at the backing of transducer can be obtained under an optimum length ratio of transducer $L_s/(L_s^1+L_b)$. Theoretical results are compared with measured ones, the two agree fairly well.

一、引 言

在工业应用的许多方面,时常需要一种具有较大振动振幅的超声换能器。这种换能器的结构主要有两种。一种是在半波长换能器的端面连接一变幅杆。变幅杆将换能器端面的振动振幅加以放大而在变幅杆端面得到较大的振动振幅。这种结构的换能器系统的长度较长;另一种结构是由不同截面积的若干元件组成半波长换能器,这种换能器不需要另接变幅杆,而在换能器的较小截面端就能够得到大的振动振幅,因此换能器系统的长度短。本文采用后一种换能器结构。研究了换能器两端面振幅比为最大时的最佳长度比,并作了实验验证。

二、理论分析

图1表示由多个元件组成的夹心式压电换能器的理论分析模型。图中1是匹配块;2是

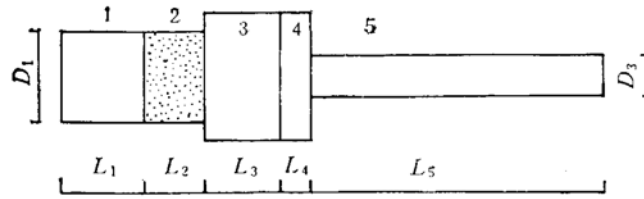


图1 理论分析模型

Theoretical model for the sandwich transducer

压电元件；3、4和5表示由不同横截面积的三个元件组成的辐射体。设各个元件都是均匀截面杆，考虑一维纵振动，并忽略机械损耗及用于加预应力的螺钉的影响。谐和振动时，均匀截面棒的波动方程为

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + k^2 U = 0$$

而第 i 个元件波动方程的解为

$$u_i(x_i) = A_i \sin k_i x_i + B_i \cos k_i x_i$$

其中 u 为位移振幅， k 为波数， A 和 B 为待定系数。根据连接界面的力及位移连续条件，换能器系统中的力和位移的关系可用下式表示

$$\begin{bmatrix} U_i \\ F_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{11}^i & t_{12}^i \\ t_{21}^i & t_{22}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{i-1} \\ F_{i-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

或写成

$$W_i = T_i W_{i-1}$$

其中

$$T_i = \begin{bmatrix} t_{11}^i & t_{12}^i \\ t_{21}^i & t_{22}^i \end{bmatrix}$$

$$t_{11}^i = t_{22}^i = \cos k_i l_i; \quad t_{12}^i = \sin k_i l_i / k_i E_i S_i$$

$$t_{21}^i = -k_i E_i S_i \sin k_i l_i$$

k, l, E 和 S 分别为波数、元件长度、材料的杨氏模量和元件的截面积。

由 n 个元件组成的换能器系统可写成如下形式

$$W_n = H W_0$$

其中

$$H = T_n \cdot T_{n-1} \cdots T_2 \cdot T_1 = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix}$$

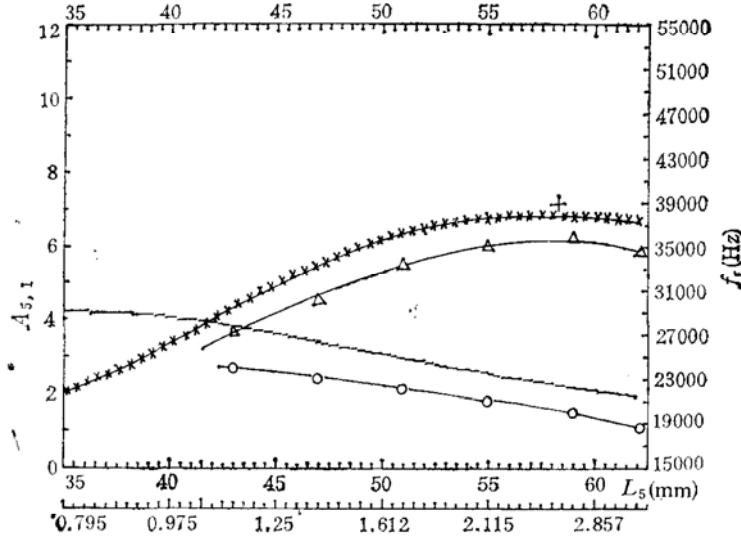
当换能器两端自由时， $F_n = F_0 = 0$ ，则有

$$\begin{bmatrix} U_n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

即 $U_0 \cdot h_{21} = 0$ ，式中 h_{21} 为一复合矩阵，满足这一条件是行列式 $|h_{21}| = 0$ ，由此可以求得由 n 个元件组成的换能器系统的谐振频率。由振动位移表达式对某一谐振频率计算，可以得到沿换能器轴向各点的位移分布，预计位移节点位置。

三、结果和讨论

用传输矩阵编制计算程序作数值计算。作为一个例子，我们选定元件 1 的长度 L_1 为



$$L_5/(L_3 + L_4)$$

图 2 换能器两端振幅比 $A_{5,1}$ 和谐振频率 f_r 与长度比 $L_5/(L_3 + L_4)$ 的关系曲线
Amplitude ratio of radiating to the backing $A_{5,1}$ and resonant frequencies f_r versus the ratio of $L_5/(L_3 + L_4)$

×××——位移振幅理论值 (theoretical displacement); △△△——位移振幅实验值 (experimental); ---——谐振频率理论值 (theoretical resonant frequency); ○○○——谐振频率实验值 (experimental)

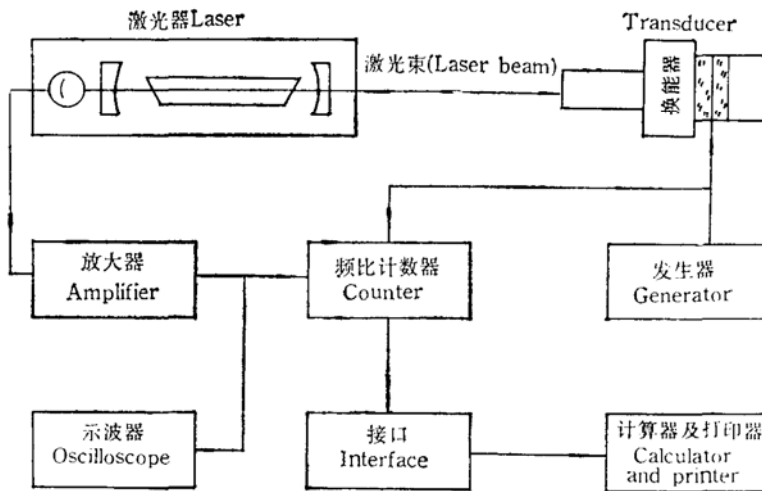


图 3 反馈调制激光测振原理框图

block diagram of feed-back interference laser device for measurement of displacement amplitude

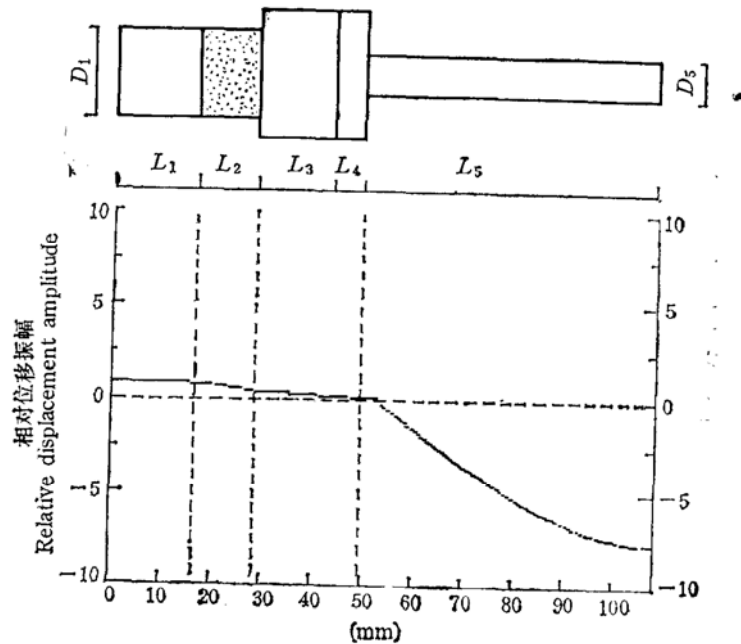


图4 沿换能器轴向的位移分布

Distribution of displacement along the axis of transducer

16.5mm, 材料为钢; 元件2的长度为12mm, 材料为锆钛酸铅压电陶瓷; 元件3的长度 L_3 为15mm, 材料为钛合金。元件4, 5的材料也是钛合金。换能器系统的总长度为107.5mm。辐射端与匹配块端的直径比为1:2.28。取不同的 $L_5/(L_3 + L_4)$ 比值, 计算了换能器辐射端(元件5)与匹配块(元件1)端面的位移振幅比值 $A_{5,1}$ 及相应的谐振频率 f_r 。计算结果由计算机直接打印出曲线, 如图2所示。由图2可以看出, $L_5/(L_3 + L_4)$ 有一最佳值, 在这一最佳比值, 换能器系统的两端面振幅比达最大值(图中用“+”号表示)。理论计算还表明, 元件3, 4与元件1, 2的直径比增大时, 振幅比 $A_{5,1}$ 也增加。图2中 $D_{1,2}$ 为32mm; $D_{3,4}$ 为45mm。

为验证理论计算结果, 取同一换能器, 用车刀逐次将元件4的长度车短, 车去部分直径由 D_4 变成 D_5 , 因而改变了 L_5/L_4 的比值, 并进行逐点测量换能器的谐振频率及两端面振幅比值。端面振幅测量采用反馈调制激光测振仪测量。仪器工作原理如框图3所示。激光束入射到换能器的振动端面后以相同的路线反射回激光管, 对振荡光进行调制。被调制光从激光管后面输出, 经光电转换器转换成电信号输出, 经放大后送入频比计数器, 通过接口由计算器给出振幅值并打印出结果。这种测量方法的优点是不需要严格的隔振装置。可以进行现场测量。

测量结果同样绘在图2中。由图可见, 实验曲线与理论计算结果基本符合。实验值偏低理论值, 这是由于在理论分析时(如上节所述)采取近似计算的原因。

图4表示在最佳条件下, 振动位移振幅沿换能器轴向的分布曲线。从图中可见, 在换能器的小端面可以得到较大的振幅。

参 考 文 献

- [1] Lin Zhongmao, Li Meng, "High Amplitude Piezoelectric Transducer", *Technical Papers WESTPAC II*, 85, Hong Kong, 439-441.