

大振幅超声换能器设计

陈桂生 朱革非 张宏彬

(中国科学院东海研究站)

本文主要介绍超声振子和聚能器两个组成部分的设计,详细分析了纵向复合式振子的各设计参数的作用,并讨论了振子节面位置的不同设置对它的前后振速之比和机电耦合系数两参数的影响。重点介绍阶梯形聚能器的设计,特别计算了在截面突变位置以不同线型曲线平滑以后的振速和应力分布。本文不但给出了各参数的解析表达式,还给出了计算曲线。

一、大振幅超声换能器结构特点

大振幅超声换能器是超声加工应用中一个关键的重要部件。为了提高功效,要求在换能器的输出顶端具有比较高的振动振速或位移振幅。一般使用的超声换能器振子,其振动表面的振动速度的振幅都比较小,不能满足实际加工要求。因此,我们希望有表面振速幅度较大的换能器,从这个意义上说,这就是我们所说的大振幅换能器。提高换能器加工工具端振幅的办法,一是在换能器振子的前表面加接一级或二级超声聚能器,也叫做变幅杆,以将振子表面的振幅放大,直至达到加工要求。二是加大输入电功率,在压电陶瓷材料的线性工作范围内,提高超声换能器的工作电压,即加大输入电功率,也可以增大换能器的振幅。但是,加大输入电功率以后,换能器输出顶端的振速振幅获得提高的同时,换能器尾端振速幅度也得到几乎相同比例的提高,这样整个振动系统的前后振速比并没有得到根本的改善。此外,在大功率下长时间持续工作会使换能器发热、温度升高,而带来一系列的不良后果。三是提高整个系统的效率,其中包括发射机与换能器的阻抗匹配、换能器振子与超声聚能器之间的阻抗匹配以及换能器振子本身的效率。这里

讨论的是在换能器振子与超声聚能器之间理想匹配条件下,为了提高换能器振子的效率,应如何进一步选择和设计它的某些性能参数以及讨论和介绍聚能器部分的设计。鉴于聚能器有多种形状,在此仅讨论阶梯形聚能器的设计,以及在其截面突变位置分别以圆锥形、指数形、双曲函数形进行平滑以后组成的复合式聚能器的振动特性,并给出了它们的频率方程、振速分布、应力分布等参数。

通常,大振幅超声换能器由换能器振子、一级或二级超声聚能器以及加工工具这三部分组成,其结构图如图1所示。

冷却装置应固定安装在聚能器的节面位置上。振子与聚能器的连接,以及第一与第二级聚能器之间的连接,可用螺丝拧紧。各接合部位的表面要求磨光,而聚能器与加工工具之间则可用螺丝或用环氧树脂固紧,这可视加工工具的尺寸、形状而定。

上面讨论的超声换能器的总长度至少是一个波长,如在振子的前端加两级放大,则换能器的总长度为1.5个波长。若从换能器功率重量比角度来看,这种结构是不经济的。此外,在半波振子与半波聚能器的接合面上,以及第一与第二级聚能器之间的接合面上,即使它们的光洁度很高,总有能量传递损失,因而在这些部位会严重地形成一个“阻挡层”,而使声能量的传递受到阻挡。因此,超

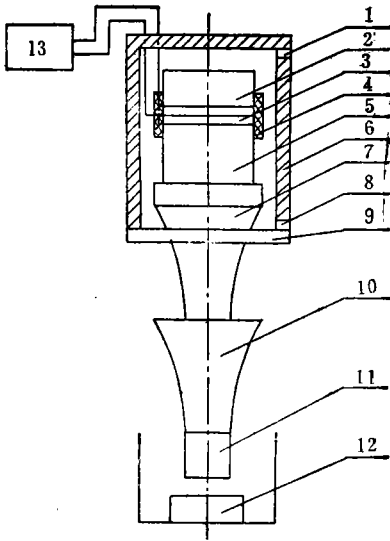


图1 超声加工装置

1. 进水口; 2. 振子后盖板; 3. 压电陶瓷; 4. 水密橡皮; 5. 振子前盖板; 6. 冷却罩子; 7. 第一级聚能器; 8. 出水口; 9. 聚能器节面; 10. 第二级聚能器; 11. 加工工具; 12. 被加工部件; 13. 发射机(包括匹配装置和频率跟踪系统)

声换能器的结构可以这样进行设计,即在 $\lambda/4$ 换能器振子的节面上接一个 $\lambda/4$ 的聚能器,这样组成的超声换能器的总长度大约半个波长,同样地可以通过中心螺杆把 $\lambda/4$ 聚能器与 $\lambda/4$ 振子牢牢拉紧。这种超声换能器的设计在本文中不予介绍。

二、半波纵向复合式振子

作为产生大振幅振动的推动级,换能器振子形式采用纵向复合式压电振子是很合适的。纵向复合式压电换能器的结构,其首、尾是两块金属质量盖板,中间是压电陶瓷元件——一般是纵向极化的带孔圆片或圆管,也可以是径向极化的圆管——用一根中心螺杆将这三部分牢牢紧固。从图1可见,超声波加工装置中的换能器振子,前后盖板都是圆柱体形状,并且前后盖板、陶瓷元件各部分的横截面都相同。这样,可使计算得到简化。

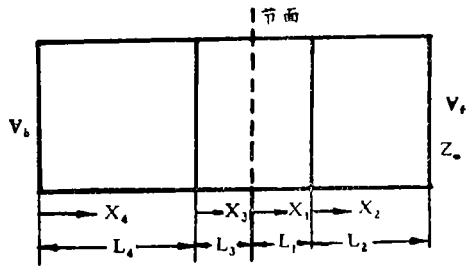


图2 半波纵向复合式振子

1. 性能参数

纵向复合式振子处于发射工作状态时,它的主要性能有好多种。各种不同的应用,对各个性能参数所提出的要求也不相同。但是,为了提高发射效率,多数是谐振发射,所以首先必须明确谐振频率,设计时应认真进行计算,以使各部分材料参数、尺寸能满足谐振条件。其次,谐振阻抗也是一个重要参数,并且阻分量和抗分量要分开给出,以便与发射机进行阻抗匹配。振子的有效机电耦合系数,它代表换能器的机电能量之间的相互转换性能,与振子效率密切相关,要求尽可能有较高的值。对于超声加工系统,振子的前后振速(或位移)幅度之比是一个很重要的设计参数,提高振子的前后振速之比,使能量沿着振子轴向往前传递,经过超声聚能器进一步放大,可以在加工工具端获得更大的振幅,从而达到提高加工功效目的。关于换能器的机械品质因数 Q_m 或半功率点带宽,在超声加工应用中所用的大振幅超声换能器的 Q_m 一般都很高。为了保持工作稳定,发射系统中装有频率跟踪装置,有了这个装置后,对超声换能器的 Q_m 要求就显得比较不重要。此外,对于整个振动系统的振速、应力分布参数,在最大应力点上特别要注意金属和陶瓷材料的强度。如果最大应力超过了金属的屈服点或陶瓷材料所允许的张应力,以及在应力跃变梯度比较大的位置上,须特别引起重视。

2. 频率方程、振速和应力分布

如果换能器振子的横截面线度小于工作

频率在材料中的工作波长的四分之一，则振子各部分的振速分布可用下列微分方程计算；并且可把振子作为一个共振棒来处理。

由图 2 不难求得振子节面右侧的频率方程、振速和应力分布：

$$\operatorname{ctg} k_1 l_1 = \frac{Z_2}{Z_1} \left(\operatorname{tg} k_2 l_2 - j \frac{Z_W}{Z_2} \right) / \left(1 + j \frac{Z_W}{Z_2} \operatorname{tg} k_2 l_2 \right) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} v_1(x_1) &= \frac{v_f}{\sin k_1 l_1} \left(\cos k_2 l_2 + j \frac{Z_W}{Z_2} \sin k_2 l_2 \right) \sin k_1 x_1 \\ v_2(x_2) &= [\cos k_2 (l_2 - x_2) + j \frac{Z_W}{Z_2} \sin k_2 (l_2 - x_2)] v_f \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_1(x_1) = -j \rho_1 C_1 v_f \frac{1}{\sin k_1 l_1} \left(\cos k_2 l_2 + j \frac{Z_W}{Z_2} \sin k_2 l_2 \right) \cos k_1 x_1 \\ T_2(x_2) = -j \rho_2 C_2 v_f [\sin k_2 (l_2 - x_2) - j \frac{Z_W}{Z_2} \cos k_2 (l_2 - x_2)] \end{cases} \quad (3)$$

当 $Z_W = 0$ 时，可简化为：

$$\operatorname{tg} k_1 l_1 \cdot \operatorname{tg} k_2 l_2 = Z_1 / Z_2 \quad (4)$$

$$\begin{cases} v_1(x_1) = v_f \frac{\cos k_2 l_2}{\sin k_1 l_1} \sin k_1 x_1 \\ v_2(x_2) = v_f \cos [k_2 (l_2 - x_2)] \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} T_1(x_1) = -j \rho_1 C_1 v_f \frac{\cos k_2 l_2}{\sin k_1 l_1} \cos k_1 x_1 \\ T_2(x_2) = -j \rho_2 C_2 v_f \sin k_2 (l_2 - x_2) \end{cases} \quad (6)$$

对于节面左侧部分，因为超声换能器的尾部盖板多半暴露在空气中，所以可同样地得到如下方程：

$$\operatorname{tg} k_3 l_3 \operatorname{tg} k_4 l_4 = Z_3 / Z_4 \quad (7)$$

$$\begin{cases} v_3(x_3) = -v_b \frac{\cos k_4 l_4}{\sin k_3 l_3} \sin k_3 (x_3 - l_3) \\ v_4(x_4) = v_b \cos k_4 x_4 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} T_3(x_3) = j \rho_3 C_3 v_b \frac{\cos k_4 l_4}{\sin k_3 l_3} \cos k_3 (x_3 - l_3) \\ T_4(x_4) = j \rho_4 C_4 v_b \sin k_4 x_4 \end{cases} \quad (9)$$

式中： v_b 为振子尾端振速，各个 Z 为相应各

部分材料的力阻抗。

实际应用中， Z_W 是未知量，比较难以精确测定或加以估算。在用作水声换能器时，辐射阻抗虽可通过振子表面形状进行理论计算，但多数还是与实际情况有差距，总是近似值。在工程设计上，通常是根据空气中的频率方程进行计算，并凭经验积累数据加以调整的，以使与实际情况相符。

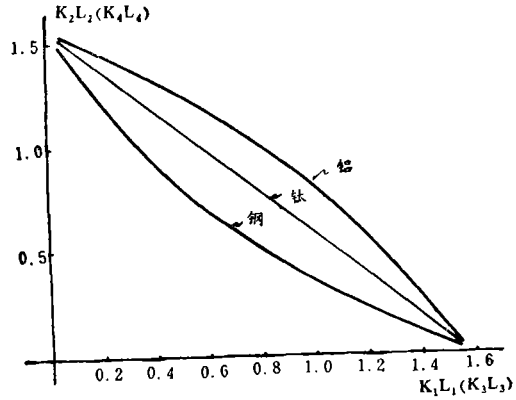


图 3 盖板长度参数 $k_2 l_2 (k_2 l_2)$ 与陶瓷材料长度参数 $k_1 l_1 (k_1 l_1)$ 关系曲线

如果后盖板材料采用软钢，则根据软钢和陶瓷材料的特性力阻抗数值，并利用式(6)可获得软钢的长度参数 $k_3 l_3$ 与压电陶瓷材料的长度参数 $k_4 l_4$ 的关系曲线。同理，如果前盖板分别采用铝和钛合金，可利用式(4)，获得前盖板的长度参数 $k_2 l_2$ 与陶瓷材料的长度参数 $k_1 l_1$ 之间的关系曲线(如图 3 所示)。根据图 3 所给定的曲线，当设计频率确定以后，就可计算得到盖板的长度与陶瓷材料的长度关系，只要陶瓷长度确定以后立即可得出盖板的长度。

3. 振子的前后振速比

谐振条件下，振子的前后振速之比为：

$$\left| \frac{v_f}{v_b} \right| = \frac{\sin k_1 l_1 \sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_1 l_1}}{\sin k_3 l_3 \sqrt{1 + \left(\frac{Z_3}{Z_4} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_3 l_3}} \quad (10)$$

为了分析振子节面位置的影响，我们讨

论三种节面位置设置情况。通常，可把节面位置设在陶瓷元件堆的中间(节面在中)，或者设置在陶瓷与前盖板的交界面(节面在前)，再或设置在陶瓷与后盖板的交界面(节面在后)。

1) 节面在前时，

$$\left| \frac{v_f}{v_b} \right| = \frac{Z_1}{Z_2} \frac{1}{\sin k_1 l_1 \sqrt{1 + \left(\frac{Z_3}{Z_4} \right)^2 \text{ctg}^2 k_3 l_3}} \quad (11)$$

2) 节面在中时，

$$\left| \frac{v_f}{v_b} \right| = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \text{ctg}^2 k_1 l_1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{Z_4} \right)^2 \text{ctg}^2 k_1 l_1}} \quad (12)$$

3) 节面在后时，

$$\left| \frac{v_f}{v_b} \right| = \frac{Z_4}{Z_3} \sin k_1 l_1 \sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \text{ctg}^2 k_1 l_1} \quad (13)$$

同样，我们假设前盖板分别采用铝和钛合金，后盖板采用软钢，利用以上三式画出 $|v_f/v_b|$ 与 $k_1 l_1$ (或 $k_3 l_3$) 的关系曲线如图 4。结论是：

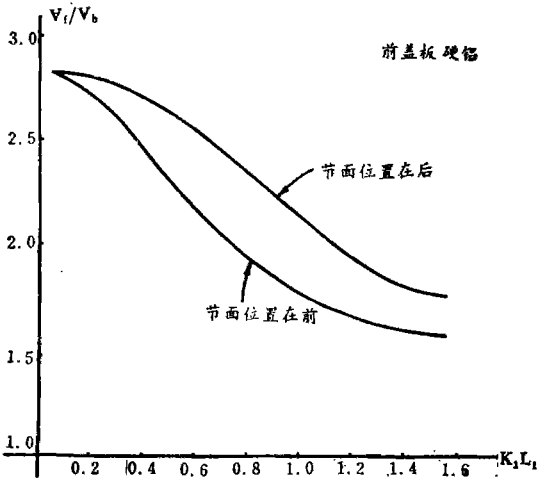


图 4 振子前后振速比 $|v_f/v_b|$ 与陶瓷材料长度参数 $k_1 l_1$ ($k_3 l_3$) 关系曲线

1) 三种节面位置设置情况，为了提高换能器振子的前后振速之比，要求前盖板材料

特性声阻抗愈小愈好，而后盖板材料的声特性阻抗愈大愈好，即要求 $Z_2 < Z_1 = Z_3 < Z_4$ ；

2) 当前、后盖板材料确定以后，节面位置设计在后可获得较高的 $|v_f/v_b|$ 。这种效果在前盖板采用钛合金、后盖板采用软钢时尤为明显(如图 5 所示)。并且以节面在前情况对提高 $|v_f/v_b|$ 最为不利。

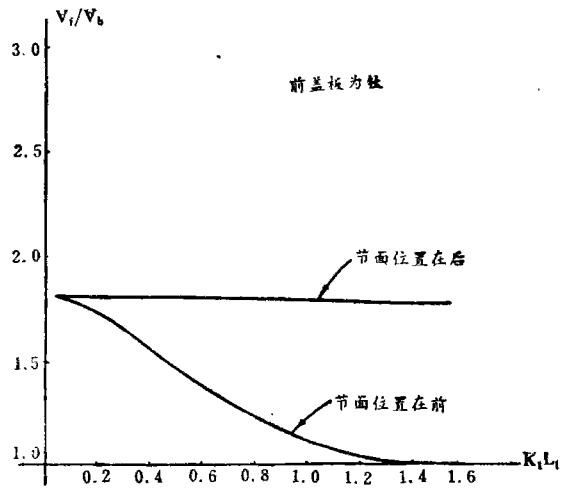


图 5 振子前后振速比 $|v_f/v_b|$ 与陶瓷材料长度参数 $k_1 l_1$ ($k_3 l_3$) 关系曲线

3) 从各个 $v_f/v_b \sim k_1 l_1$ (或 $k_3 l_3$) 曲线可见， v_f/v_b 随 $k_1 l_1$ 的增大单调下降，并且曲线的左侧变化趋势较为平坦，数值比较接近，这是因为当 $k_1 l_1$ 比较小时，节面在前或在后，实际距离都已相当接近。随着 $k_1 l_1$ 的增大，曲线下落的速率有差异，并且以节面在后情况的下降速率比较平坦。若取 $k_1 l_1 < 0.1$ ，前盖板用铝，振子前后振速之比 v_f/v_b 为 2.8，也就是利用前后盖板材料的不对称性，可获得接近 10 分贝的增益。

4. 振子的有效机电耦合系数

振子的有效机电耦合系数 k_{eff} 是表示振子的机与电之间耦合程度的一个重要参数。它与所使用的压电陶瓷晶片的耦合系数 k_3 有关，此外还与晶堆的总长度、前后盖板材料的声特性阻抗率、尺寸以及节面位置等参变量有关。其定义为：

$$k_{eff}^2 = W_{me}^2 / W_m W_e \quad (14)$$

式中: W_e 为电能, W_m 为机械弹性能, W_{me} 为机电耦合能。我们可以根据纵向复合式振

子无损耗时总能量表示式及压电方程求出式(14)中各个能量的表达式。经过不很复杂的运算可以获得:

$$\frac{k_{eff}^2}{k_{33}^2} = \frac{4Z_1 (\cos k_4 l_4 - \frac{v_f}{v_b} \cos k_2 l_2)^2 \left[Z_1 \frac{\cos^2 k_2 l_2}{\sin^2 k_1 l_1} (2k_1 l_1 - \sin 2k_1 l_1) + Z_2 (2k_2 l_2 - \sin 2k_1 l_1) \right] + \left[Z_1 \frac{\cos^2 k_4 l_4}{\sin^2 k_3 l_3} (2k_3 l_3 + \sin 2k_3 l_3) + Z_4 (2k_4 l_4 - \sin 2k_4 l_4) \right]}{k_1 (l_1 + l_3) \left\{ \left(\frac{v_f}{v_b} \right)^2 \left[Z_1 \frac{\cos^2 k_2 l_2}{\sin^2 k_1 l_1} (2k_1 l_1 - \sin 2k_1 l_1) + Z_2 (2k_2 l_2 - \sin 2k_1 l_1) \right] + \frac{v_f}{v_b} \cos k_2 l_2 \right\}^2} \quad (15)$$

1) 节面在前情况,

$$\frac{k_{eff}^2}{k_{33}^2} = \frac{4}{\left[1 + \left(\frac{Z_3}{Z_4} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_3 l_3 \right] k_3 l_3 [A_1 + B_1]}$$

$$\text{式中: } A_1 = \frac{1}{\sin^2 k_3 l_3} \frac{1}{1 + \left(\frac{Z_3}{Z_4} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_3 l_3} \left[\frac{Z_1}{Z_2} \pi + (2k_3 l_3 + \sin 2k_3 l_3) \right]$$

$$B_1 = \frac{Z_4}{Z_3} \left(2 \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_3}{Z_4} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_3 l_3}} - 2 \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_3}{Z_4} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_3 l_3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_4}{Z_3} \right)^2 \operatorname{tg}^2 k_3 l_3}} \right) \quad (16)$$

2) 节面在中情况,

$$\frac{k_{eff}^2}{k_{33}^2} = \frac{8Z_1}{\left(1 + \left(\frac{Z_3}{Z_4} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_1 l_1 \right) k_1 l_1 (A_2 + B_2 + C_2)}$$

$$\text{式中: } A_2 = 2Z_1 \frac{1}{\sin^2 k_1 l_1} \frac{1}{1 + \left(\frac{Z_3}{Z_4} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_1 l_1} (2k_1 l_1 + \sin 2k_1 l_1)$$

$$B_2 = Z_2 \frac{1 + \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_1 l_1}{1 + \left(\frac{Z_3}{Z_4} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_1 l_1} \left(2 \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_1 l_1}} - 2 \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{Z_2} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_1 l_1}} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^2 \operatorname{tg}^2 k_1 l_1}} \right)$$

$$C_2 = Z_4 \left[2 \cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_3}{Z_4} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_1 l_1}} - 2 \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_3}{Z_4} \right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_1 l_1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_4}{Z_3} \right)^2 \operatorname{tg}^2 k_1 l_1}} \right] \quad (17)$$

3) 节面在后情况,

$$\frac{k_{eff}^2}{k_{33}^2} = \frac{4\sin^2 k_1 l_1}{k_1 l_1 (A_3 + B_3)}$$

式中:

$$A_3 = 2k_1 l_1 + \sin 2k_1 l_1 + \frac{Z_2}{Z_1} \sin^2 k_1 l_1 \left(1 + \frac{Z_1^2}{Z_2^2} \operatorname{ctg}^2 k_1 l_1 \right)$$

$$\left(2\cos^{-1} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_1 l_1}} - 2 \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^2 \operatorname{ctg}^2 k_1 l_1}} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 \operatorname{tg}^2 k_1 l_1}} \right)$$

$$B_3 = \frac{Z_1}{Z_4} \pi \quad (18)$$

各个有效机电耦合系数的表达式十分繁复, 我们还是分别以铝和钛合金作前盖板材料、以软钢作后盖板材料, 借助DJS-130机进行计算, 获得各种情况下的 $k_{eff}^2/k_{33}^2 \sim k_1 l_1$ (或 $k_3 l_3$) 曲线图(6-9), 并由此得出如下结论:

1) 当换能器振子的节面位置设置相同时, 振子有效机电耦合系数与前盖板材料的声阻抗有关, 为了提高振子的 k_{eff}^2/k_{33}^2 , 前盖板宜取声阻抗率大的钛合金更为有利, 这种优越性以节面在前时更为明显;

2) 当振子的前后盖板材料确定后, 则振子的 k_{eff}^2/k_{33}^2 与节面位置的设置有关, 节面在后比节面在前优越, 而以节面在中间情况最佳;

3) 振子的有效机电耦合系数与晶堆的长度参数关系 ($k_{eff}^2/k_{33}^2 \sim k_1 l_1$) 的各条曲线表明: 起始时, 随着 $k l_1$ (或 $k_3 l_3$) 的增大, k_{eff}^2/k_{33}^2 呈线性增大, 其斜率与前盖板材料声特性阻抗、节面位置的设计有关。前盖板的声阻抗愈高, 斜率愈大; 节面位置在后, 斜率也比较大。随着 $k_1 l_1$ 继续增大, k_{eff}^2/k_{33}^2 的变化就出现非线性, 并且变化缓慢、平稳。出现非线性 $k_1 l_1$ 的区域, 也与前盖板的声阻抗、节面位置有关。再继续增大 $k_1 l_1$ 直至 $k_1 l_1 = \pi/2$, k_{eff}^2/k_{33}^2 的变化将出现微弱下降的趋势。大约在 $k_1 l_1 = 1 \sim 1.2$ 时, k_{eff}^2/k_{33}^2 有一个极大值。

所以, 振子的晶堆部分尺寸应根据上述讨论的振子的前后振速比参数及有效机电耦合系数参量权衡确定。在晶堆尺寸确定后, 即可根据前后盖板材料声特性阻抗, 由频率方程计算出盖板的尺寸, 而节面位置还是以

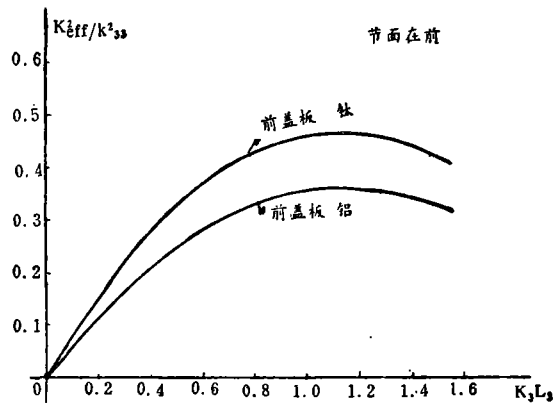


图6 节面在前 $k_{eff}^2/k_{33}^2 \sim k_1 l_1$ 曲线

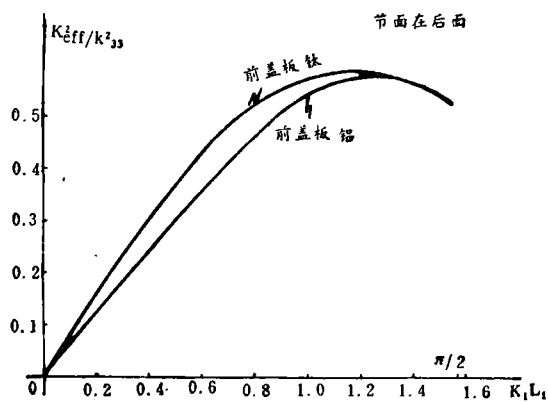


图7 节面在后 $k_{eff}^2/k_{33}^2 \sim k_1 l_1$ 曲线

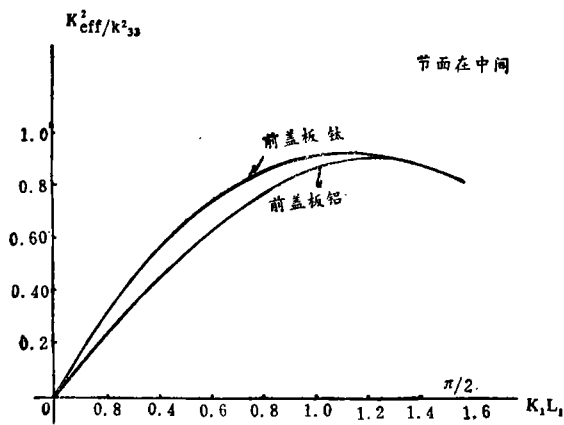


图8 节面在中 $k_{eff}^2/k_{33}^2 \sim k_1 l_1$ 曲线

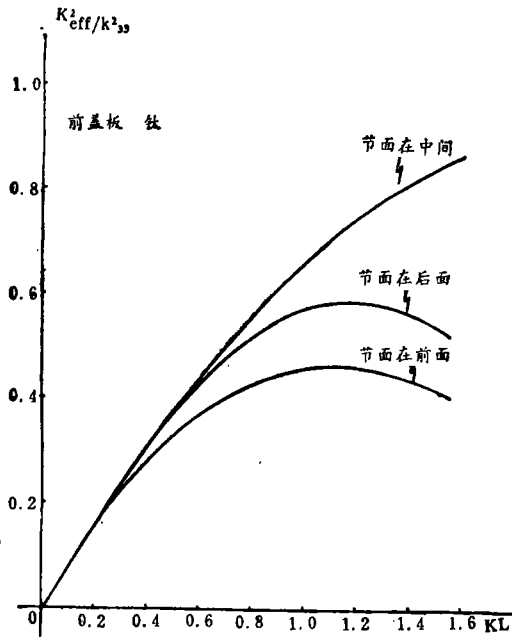


图9 前盖板为钛 $k_{eff}^2/k_{33}^2 \sim kl$ 曲线
设计在后面比较适宜。

三、半波聚能器设计

半波聚能器类型比较多，如有圆锥形、指数形、双曲函数形、阶梯形等。从振动速

振速分布：

$$\begin{cases} v_6(x_6) = \frac{1}{rx_6 - 1} v_f \sin kx_6 \\ v_7(x_7) = -\frac{R_5}{R_6} v_f \left[\left(\cos kl_6 + \frac{1}{kl_6} \frac{R_5 - R_6}{R_6} \sin kl_6 \right) \sin kx_7 + \sin kl_6 \cos kx_7 \right] \end{cases} \quad (23)$$

度的振幅放大系数而言，以阶梯形聚能器的功效最高。并且从结构形状来说，阶梯形聚能器各参数的计算也最简单。

可以证明，当阶梯形聚能器大小截面长度分别为： $l_5 = \lambda_5/4$ ， $l_6 = \lambda_6/4$ 时，其最大的振幅放大系数为：

$$\frac{v_e}{v_f} = \frac{\rho_5 C_5 S_5}{\rho_6 C_6 S_6} \quad (19)$$

这时，节面位置就在截面积发生突变的位置上。而且可以很容易地求得它的振速和应力分布函数如下：

$$\begin{cases} v_5(x_5) = v_f \cos k_5 x_5 \\ v_6(x_6) = -\frac{Z_5}{Z_6} v_f \sin k_6 x_6 \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} T_5(x_5) = j\rho_5 C_6 v_f \sin k_5 x_5 \\ T_6(x_6) = j\rho_6 C_6 v_f \left(\frac{Z_5}{Z_6} \right) \cos k_6 x_6 \end{cases} \quad (21)$$

在实际应用中，由于机械加工或材料参数数值估计不精确，节面位置可能发生偏离，比如偏在小截面的输出侧或者偏在大截面这一侧。

理论证明，阶梯形聚能器小截面部分长度加工精度必须很高，一般要求准确到毫米量级，否则可能发生严重失谐或功效大大下降；而大截面部分的长度精度要求可相对低些。

图10是阶梯形聚能器振速、应力分布图，在阶梯台架位置处可产生很大的应力跃变梯度，因此在实际应用中应尽量加以避免，否则容易在此位置发生断裂。一般补救办法是在这位置上以某种线型加以平滑。

1) 以圆锥体平滑的阶梯形聚能器

频率方程：
$$\operatorname{tg} kl_7 = \operatorname{ctg} kl_6 + \frac{1}{kl_6} \left(\frac{R_5}{R_6} - 1 \right) \quad (22)$$

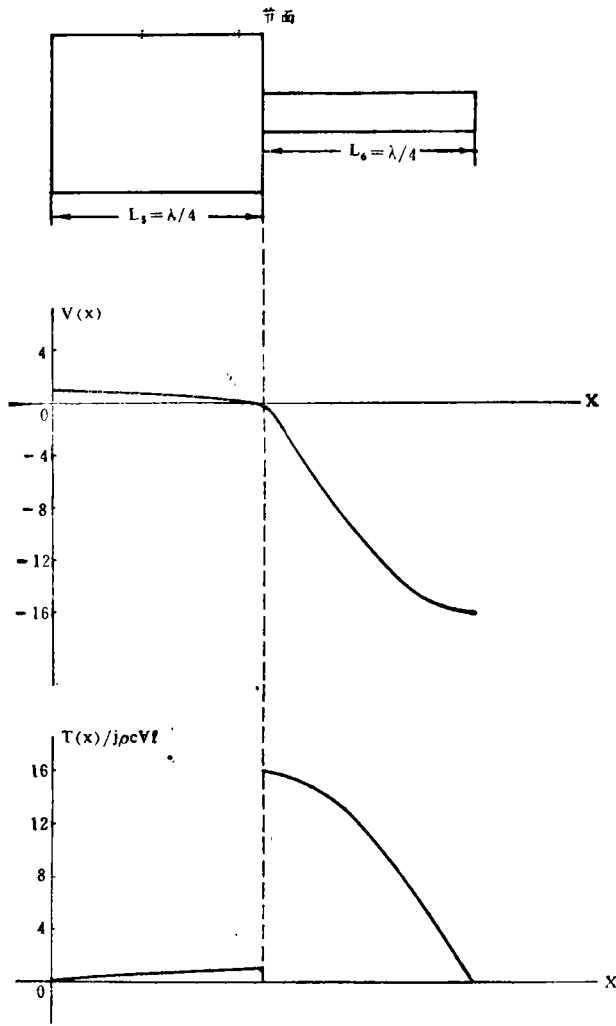


图 10 阶梯形聚能器振速、应力分布图

$$\text{应力分布: } \begin{cases} T_6(x_6) = -j\rho C \frac{v_f}{r} \left[\frac{1}{x_6 - 1/r} \cos kx_6 - \frac{1}{k(x_6 - 1/r)^2} \sin kx_6 \right] \\ T_7(x_7) = j\rho C v_f \frac{R_5}{R_6} \left[\left(\cos kl_6 + \frac{1}{kl_6} \frac{R_5 - R_6}{R_6} \sin kl_6 \right) \cos kx_7 - \sin kl_6 \sin kx_7 \right] \end{cases} \quad (24)$$

式中: $r = \frac{R_5 - R_6}{R_5 l_6}$, R_5 为大截面半径, R_6 为小截面半径。

2) 以指数函数形平滑的阶梯形聚能器

$$\text{频率方程: } \operatorname{tg} kl_7 = \frac{\ln \frac{R_5}{R_6} + kl_6 \sqrt{1 - \left(\frac{1}{k' l_6} \ln \frac{R_5}{R_6} \right)^2} \operatorname{ctg} \left(kl_6 \sqrt{1 - \left(\frac{1}{k' l_6} \ln \frac{R_5}{R_6} \right)^2} \right)}{kl_6} \quad (25)$$

$$\text{振速分布: } \begin{cases} v_6(x_6) = e^{\alpha x_6} \left(\frac{-k}{k'} \right) v_f \sin k' x_6 \\ v_7(x_7) = \frac{1}{k'} \frac{R_5}{R_6} v_f [\alpha \sin k' l_6 + k' \cos k' l_6] \sin kx_7 + k \sin k' l_6 \cos kx_7 \end{cases} \quad (26)$$

应力分布: $T_6(x_6) = \frac{j\rho C}{k'} \nu_f e^{\alpha x_6} (\alpha \operatorname{sinc}' l_6 + k' \operatorname{cosec}' l_6)$

$$T_7(x_7) = j\rho C \frac{1}{k'} \frac{R_5}{R_6} \nu_f [(\alpha \operatorname{sinc}' l_6 + k' \operatorname{cosec}' l_6) \operatorname{cosec} x_7 - k \operatorname{sinc}' l_6 \operatorname{sinc} x_7] \quad (27)$$

式中: $\alpha = \frac{1}{l_6} \ln \frac{R_5}{R_6}$, $k' = \sqrt{k^2 - \alpha^2}$

R_5 、 R_6 分别为大小截面的半径。

3) 以双曲函数形平滑的阶梯形聚能器

$$\operatorname{tg} \left(kl_6 \sqrt{1 - \left(\frac{ch^{-1} \frac{R_5}{R_6}}{kl_6} \right)^2} \operatorname{tg} kl_7 \right) = \sqrt{1 - \left(\frac{ch^{-1} \frac{R_5}{R_6}}{kl_6} \right)^2} \quad (28)$$

振速分布:

$$\left\{ \begin{aligned} v_6(x_6) &= - \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{ch^{-1} \frac{R_5}{R_6}}{kl_6} \right)^2}} \frac{R_5}{R_6} \nu_f \frac{1}{ch(l_6 - x_6)} \operatorname{sin} \left(kl_6 \sqrt{1 - \left(\frac{ch^{-1} \frac{R_5}{R_6}}{kl_6} \right)^2} \frac{x_6}{l_6} \right) \\ v_7(x_7) &= - \frac{R_5}{R_6} \nu_f \left[\operatorname{cos} \left(kl_6 \sqrt{1 - \left(\frac{ch^{-1} \frac{R_5}{R_6}}{kl_6} \right)^2} \right) \operatorname{sinc} x_7 + \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{ch^{-1} \frac{R_5}{R_6}}{kl_6} \right)^2}} \right. \\ &\quad \left. \operatorname{sin} \left(kl_6 \sqrt{1 - \left(\frac{ch^{-1} \frac{R_5}{R_6}}{kl_6} \right)^2} \operatorname{cosec} x_7 \right) \right] \end{aligned} \right. \quad (29)$$

应力分布:

$$\left\{ \begin{aligned} T_6(x_6) &= j\rho C \frac{1}{k'} \frac{R_5}{R_6} \nu_f \left[\frac{\beta \operatorname{sh} \beta (l_6 - x_6)}{ch^2 \beta (l_6 - x_6)} \operatorname{sinc}' x_6 + \frac{k'}{ch \beta (l_6 - x_6)} \operatorname{cosec}' x_6 \right] \\ T_7(x_7) &= j\rho C \nu_f \frac{R_5}{R_6} \left[\operatorname{cos} \left(kl_6 \sqrt{1 - \left(\frac{ch^{-1} \frac{R_5}{R_6}}{kl_6} \right)^2} \operatorname{cosec} x_7 - \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{ch^{-1} \frac{R_5}{R_6}}{kl_6} \right)^2}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \operatorname{sin} \left(kl_6 \sqrt{1 - \left(\frac{ch^{-1} \frac{R_5}{R_6}}{kl_6} \right)^2} \operatorname{sinc} x_7 \right) \right] \end{aligned} \right. \quad (30)$$

式中 $\beta = \frac{1}{l_6} ch^{-1} \frac{R_5}{R_6}$; $k' = k \sqrt{1 - \left(\frac{1}{kl_6} ch \frac{R_5}{R_6} \right)^2}$

图11、12、13分别为上述三种曲线平滑的阶梯形聚能器的振速和应力分布图。假定聚能器材料为软钢, 频率为20千赫, $R_4/R_5 = 4$, $l_5 = \lambda_5/4$, 即节面位置在 l_5 与 l_6 的交界面上, 则 $kl_6 = \frac{\pi}{4}$ 。结论是以双曲函数形平

滑最好, 可获得较高的振幅放大系数, 并且应力变化曲线比较平滑、连续。而以圆锥形平滑为差, 应力变化仍比较陡。以指数形平滑的应力变化曲线其最大应力点上将出现一个尖角, 为了避免应力过分集中, 在这位置上应加工成适当的圆角。

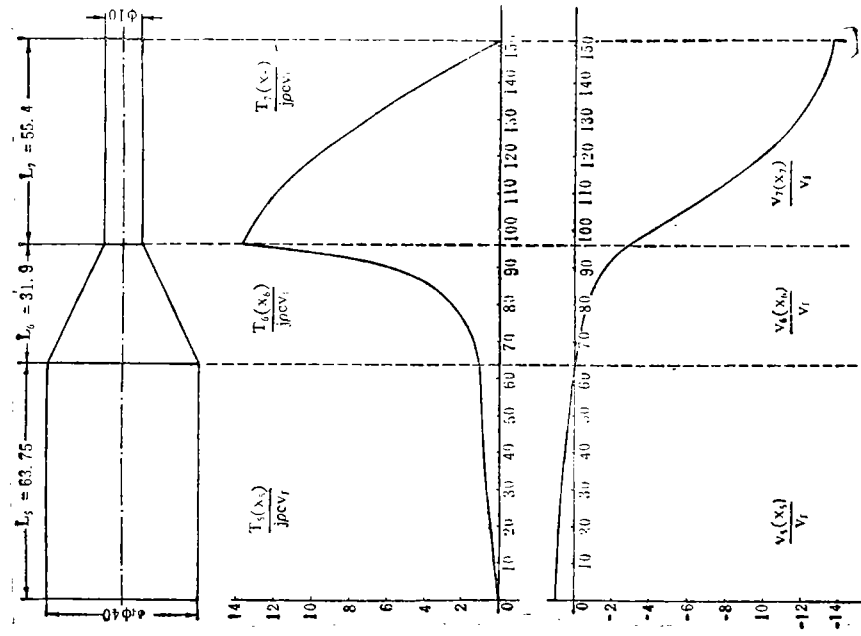


图 11 用圆锥体平滑的阶梯形聚能器振速和应力分布图

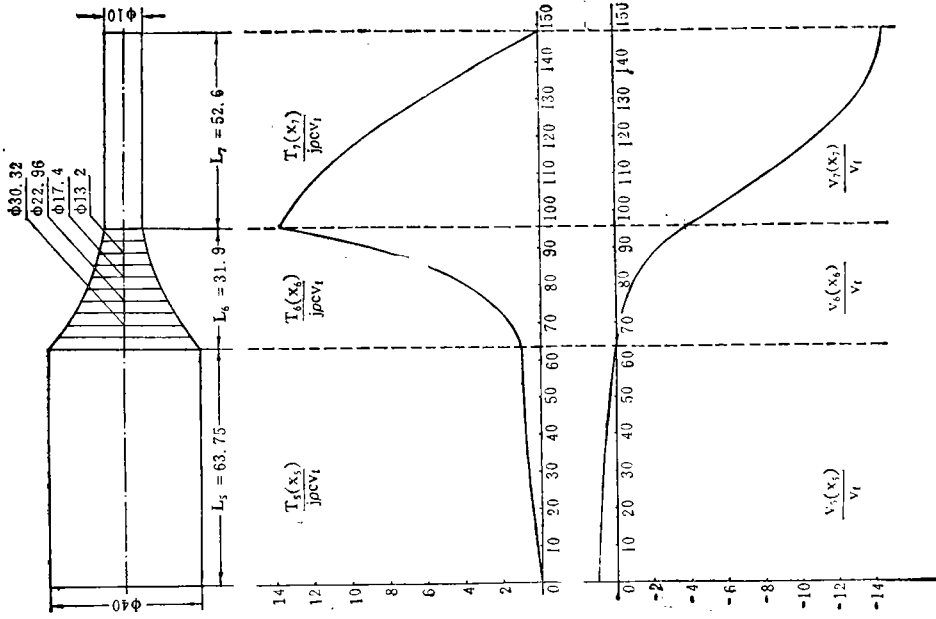


图 12 用指数形平滑的阶梯形聚能器振速和应力分布图

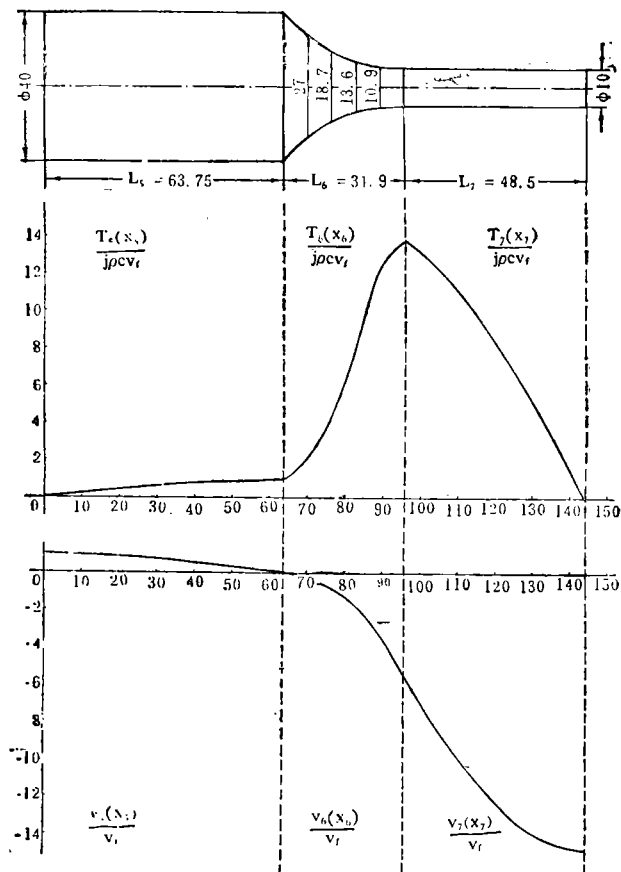


图 13 用双曲函数形平滑的阶梯形聚能器振速和应力分布图

(上接第 20 页)

可提高 2—6 分贝，而且第一气泡脉冲与激波的幅度比下降约一半。

最后，对在电火花声源的整个研制和测试过程中曾给以指导和帮助的张叔英、任来法、郑昌武、朱圣钦、华祖根、孙林和酆斌等同志表示衷心的感谢。还有海洋局三所陈金根同志也参加了电火花声源研制工作。

参 考 文 献

[1] Weston, D. E., "Underwater Explosions as Acoustic Sources" *Pro. Phys. Soc.* 26(1960) pp.233-249

[2] Caulfield, D. D., "Improvements in the Continuous Seismic profiler" *Geophysics* 30 (1965) pp133-138.

[3] 海洋石油勘探指挥部地质调查处, 中国科学院电工研究所“电火花震源”, 《海洋石油》, 第 1 期(1977)第 1—25 页。

[4] 浙江大学电机工程系, 《电工学》人民教育出版社, 1960 年第 41—43 页。

[5] 凌鸿烈等, “水下火花放电声辐射特性的实验研究” 《海洋技术》, 第四期(1982)。

[6] Caulfield, D. D., "Predicting Sonic Pulse Shape of Underwater Spark Discharge" *Deep-Sea. Res.* 9(1962) pp339-348.

[7] Pote Leonard, "Tables for Computing the Equilibrium Configuration of A Flexible Cable in A Uniform Stream" AD-607448.