

弯张换能器的等效电路支路阻抗分析方法

莫喜平

姜广军

(中国科学院声学研究所 北京 100080) (解放军军需大学 长春 130062)

1999年12月22日收到

摘要 本文提出了适用于弯张换能器的等效电路支路阻抗分析方法, 归纳总结了一些描述IV型弯张换能器振动辐射的特性参量, 通过支路阻抗分析方法计算这些特性参量可以进行换能器局部结构的优化设计.

关键词 弯张换能器, 等效电路支路阻抗分析方法, 特性参量

An equivalent circuit branch impedance analysis method for flextensional transducers

Mo Xiping

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Jiang Guangjun

(The Quartermaster University of PLA, Cangchun 130062)

Abstract An equivalent circuit branch impedance analysis method is proposed which can be applied to analyze flextensional transducers and a series of characteristic parameters representing the vibration and radiation of Class IV flextensional transducers is summarized. The part structure of flextensional transducer can optimize by calculation the characteristic parameters with the branch impedance analysis method.

Key words Flextensional transducers, Equivalent circuit branch impedance analysis method, Characteristic parameters

1 引言

弯张换能器是实现低频大功率声辐射的水声换能器类型之一, 具有低频、宽带、大功率的特点, 一般结构比较复杂, 理论设计及性能分析方法还不很完善。其中等效电路方法^[1,2]计算参数少, 且误差较大; 有限元方法^[3-7]目

前较常用, 但在反复优化参数时计算量大, 在改变某些或某个局部参数时, 也要进行全局运算, 许多工作量是重复的。本文借鉴等效电路方法的基本思想和所具有的直观物理意义, 将弯张换能器结构拆分成激励振子和振动壳体最简单的两部分。由这两部分组成综合等效电路, 这样简化时各部分的阻抗, 尤其是振动壳体的

阻抗描述变得很复杂，但可采用有限元方法对这两部分阻抗进行纯数值化描述，相对独立地计算、分析各部分的动态规律，并结合综合等效电路来确定谐振频率及谐振频率下的振动辐射特性，分析辐射特性与结构之间的关系，有利于进行局部结构优化设计，同时节省时间、提高工作效率。

2 IV型弯张换能器振动辐射特性的分析方法

2.1 弯张换能器综合等效电路及支路阻抗分析方法

弯张换能器可以等效成如图1所示的综合等效电路形式。其中F是激励力，它可以来自压电效应、磁致伸缩效应以及其它任何形式的电-机转换系统。阻抗部分的 Z_0 为电路系统静态阻抗折算到机械端的分量； Z_{rod} 是振子的等效阻抗，它包括阻分量及抗分量。一般来说，弯张换能器工作在低于棒的纵振动谐振基频的频段内，因此 Z_{rod} 的抗分量表现为机械弹性抗。 Z_{shell} 是壳体的动态阻抗，其中包括壳体自身阻抗及辐射阻抗两部分。对于IV型弯张换能器为了分析方便，在演化成等效电路时，采用如图2所示的模型，将振子中有源元件（如压电陶瓷堆、磁致伸缩棒等）作为 Z_{rod} 部分，而将机械传动部分（俗称铰链）与壳体一并作为 Z_{shell} 部分。这样既保证了两部分在机械等效图中以串联形式连结，同时在改变壳体参数时，将不会影响 Z_{rod} 的值，从而可以相对独立地讨论两部分各自的特性，更直观地采用支路阻抗分析方法，分析换能器的频率特性，便于描述换能器的辐射特性与各组成部分结构之间的关系，进行换能器结构的优化设计。

2.2 各阻抗分量特性的分析与讨论

Z_0 是静态分量，在电路端看，它对于压电材料，呈现介电损耗电阻与钳定电容的并联形式；对于磁致伸缩材料，呈现为损耗电阻（欧姆损耗、磁滞损耗、涡流损耗等）及静态电感

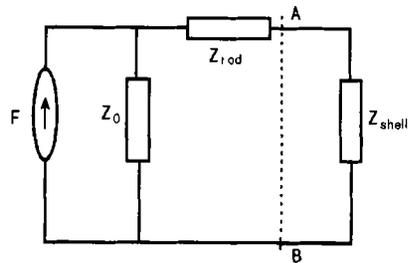


图1 弯张换能器机电等效图

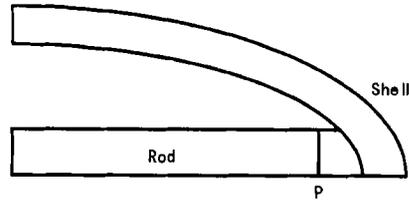


图2 IV型弯张换能器的结构模型示意图

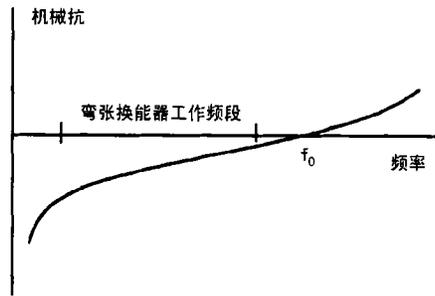


图3 振子等效机械抗分量随频率的变化规律

的串联形式。在换能器应用中，这部分阻抗通常通过电路原理进行合理匹配，并且该阻抗折算到机械端并联支路中时，一般具有较大的阻抗值（与 $Z_{rod} + Z_{shell}$ 支路相比），换能器的机电特性主要取决于动态支路。因此在等效电路支路阻抗分析方法中，将直接利用串联支路的谐振条件进行频率特性分析。

Z_{rod} 是振子的等效机械阻抗，在图2模型中一般可以简化成一维模式，并进一步表示成RLC串联形式：

$$Z_{rod} = R_m + j\left[\omega M_{\ominus} - \frac{1}{\omega C_{\ominus}}\right] \quad (1)$$

其中， R_m 为机械摩擦阻， M_{\ominus} 为等效质量， C_{\ominus} 为等效顺性。在频率低于棒的纵振动谐振

基频 f_0 时, Z_{rod} 的抗分量是负值, 表现为机械弹性抗, 如图 3 所示。

Z_{shell} 是壳体动态阻抗与辐射阻抗的组合形式, 利用振动模态叠加原理, 可以把它表示成一族并联支路。图 2 中, 在简谐力 $F(t) = F_0 e^{j\omega t}$ 作用下, P 点的位移可以表示成

$$\xi_P = \sum_{i=1}^{\infty} \xi_i \quad (2)$$

其中, ξ_i 是对应壳体第 i 阶模态在 P 点的位移贡献, 则 P 点的振动速度

$$\nu_P = \sum_{i=1}^{\infty} \nu_i \quad (3)$$

将两边同时除以 P 点处的作用力 F_P , 得导纳公式

$$Y_P = \sum_{i=1}^{\infty} Y_i \quad (4)$$

上面的导纳公式说明 Z_{shell} 可以分解成一族对应于壳各阶模态的等效支路的并联形式, 在以往的等效电路分析振动特性时, 一般取前 2-3 阶模态进行计算。本文工作是根据等效电路的分析原理及直观的物理模型, 利用有限元计算工具, 采用数值化描述来分析换能器, 得出的一系列工程上有意义的结论。

2.3 等效电路支路阻抗分析方法用于讨论弯张换能器的频率特性

在等效电路支路阻抗分析方法中, 采用各等效阻抗分量的数值化描述, 即针对于各阻抗分量是频率的任意函数 (不需要对函数形式作任何假设):

$$\begin{cases} Z_0 = Z_0(\omega) \\ Z_{rod} = Z_{rod}(\omega) \\ Z_{shell} = Z_{shell}(\omega) \end{cases} \quad (5)$$

其中, Z_{shell} 的形式最为复杂, 它受壳体结构、铰链耦合、水中辐射特性等多重因素的影响, 在有些研究工作中对它作了一系列假设, 而获得类似于经验公式的近似解析表达。这些表达方式只能对某些参量的模拟获得较好的结果, 而

不能完全真实地描述换能器辐射状态的全貌。我们所采用的数值化描述是根据有限元方法计算出足够多频率点上的 $Z_0(\omega)$ 、 $Z_{rod}(\omega)$ 、 $Z_{shell}(\omega)$ 值, 从而得出系列曲线, 根据曲线的变化趋势和相互之间的关系, 来确定换能器的谐振频率, 再结合壳体的动态行为, 求出一系列振动辐射参数。

图 4 是换能器各阻抗分量虚部的变化曲线示意图, 图中分别给出了 PZT 和 Terfenol-D 振动棒 (假设 Z_0 已经得到合理的电路补偿) 的机械抗随频率的变化曲线, 同时画出了振动壳体的机械抗分量随频率的变化曲线, 它可以代表水中辐射或空气中的情况 (因为二者具有相似的变化规律)。 $Z_{shell}(\omega)$ 的虚部与频率轴有三个交点 (在图 4 所示的频率范围内), 第一交点对应弯曲模第一阶谐振频率 f_{S1} , 第二个交点对应第一阶反谐振频率 f_a , 第三个交点对应弯曲模第二阶谐振频率 f_{S2} 。

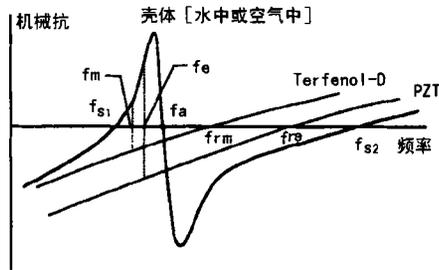


图 4 换能器各阻抗分量虚部的变化曲线示意图

Z_{rod} 在所讨论的频率范围内与频率轴有一个交点, 对应于棒纵振动基模, Terfenol-D 棒的谐振频率 f_{rm} 要比 PZT 压电堆谐振频率 f_{re} 低许多, 因为它具有相对低的杨氏模量, 但它们都高于壳体的弯曲基频 f_{S1} (考虑水辐射阻抗或不考虑), 一般情况也高于壳体的第一阶反谐振频率 f_a 。

Z_0 在上面讨论的情况中被忽略可以根据以下分析证明其合理性:

如图 1 所示, 换能器输入端总阻抗

$$Z = \frac{Z_0(Z_{rod} + Z_{shell})}{Z_0 + Z_{rod} + Z_{shell}} \quad (6)$$

因 Z_0 已经得到合理的电路补偿为纯阻性： $Z_0 \neq 0$ 。

所以 $\text{Im}[Z]=0$ 的条件是：

$$\text{Im}[Z_{rod} + Z_{shell}] = 0 \quad (7)$$

其中 $\text{Im}[\]$ 表示取虚部。换能器谐振频率对应于串联支路 ($Z_{rod} + Z_{shell}$) 的谐振频率，因此换能器的谐振频率可以由串联支路谐振条件求得，即 (7) 式。上式表明，在等效电路支路阻抗分析方法中，研究谐振频率附近的动态特性，可以忽略 Z_0 的影响，直接利用串联支路谐振条件讨论换能器的频率特性。

对于 Terfenol-D 材料作激励振子，由 (7) 式求出换能器谐振频率 f_m ，对于 PZT 材料作激励振子，由 (7) 式求出换能器谐振频率 f_e ，图 4 中已经标注出这两个谐振频率的位置，这两个谐振频率都低于壳体的第一阶反谐振频率 f_a ，在壳体 Q_m 较高时，尤其是对应空气中情况， f_m 、 f_e 、 f_a 三个频率点比较接近。用图 4 描述的等效机械抗之间的关系，结合谐振条件 (7) 式，可以求得换能器的谐振频率。

在换能器谐振频率下，由数值化描述可以求出 $Z_0(\omega)$ 、 $Z_{rod}(\omega)$ 、 $Z_{shell}(\omega)$ 的值及壳体的机械振动特性（有限元网格节点的位移分布），还可以方便求出换能器的一系列振动辐射特性。

图 5 定性描述四个不同的壳体，它们分别与 PZT 及 Terfenol-D 振子组合成换能器的谐振频率及带宽特性。图中假定已经通过电路手段作了合适的补偿而直接讨论串联支路 (Z_{rod} 与 Z_{shell}) 的阻抗特性。为了讨论方便，图中给出的是振子机械抗的绝对值，由于在所讨论的频率范围内，振子机械抗本身是负值，因此将其取绝对值，并记为： $-X_{rm}$ 和 $-X_{re}$ ， $-X_{rm}$ 及 $-X_{re}$ 曲线与壳体机械抗曲线的交点即对应于由 (7) 式确定的谐振频率，并且交点处两线的夹角大小代表换能器总机械抗随频率（在谐振点附近）变化快慢，因此可以定性地表征相对带宽特性，夹角越小，则频带越宽，对应机械 Q 值越小。对于低杨氏模量（如 Terfenol-D）

材料的振子，其机械抗绝对值曲线与壳体机械抗曲线交点位置比较低，这类弯张换能器的带宽特性主要决定于壳体机械抗曲线在交点附近的坦缓程度，相对陡的情况则对应机械 Q 值较高的机械特性；对于 PZT 等杨氏模量较高的材料，其机械抗绝对值曲线相对位置比较高，与壳体机械抗曲线相对关系分几种情况，在图 5 中定性描述出四种情况：

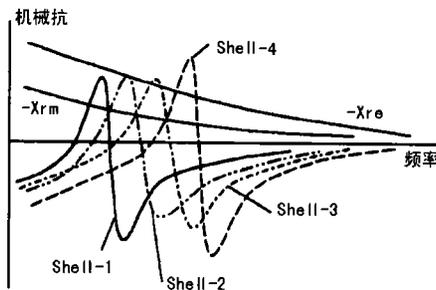


图 5 不同壳体与振子组合成换能器的谐振频率及带宽特性

(1) 相切或相离情况：对应于 Shell-1 和 Shell-2，谐振条件 (7) 式应改为 $|\text{Im}[Z_{rod} + Z_{shell}]|$ 取得极小值，因此换能器谐振频率即为壳体机械抗曲线的峰值点（或相切的切点），这种情况下带宽最窄，尤其是高于谐振频率的上边带很快下沉成为谷点，一些文献的实验结果已证实这一结论 [5]。

(2) 高位相交情况：对应于 Shell-3，这种情况下，因为交点处已经接近于峰值点，到达平缓变化区，工作频带可以越过峰值位置，一直延展到下降区第二个交点以后，这种情况具有最大的带宽。

(3) 大梯度上升区相交情况，对应于 Shell-4，振子机械抗绝对值曲线与壳体机械抗曲线交角比较大，工作频带仅对应于交点附近的一个小区域，频带也比较窄。

总之，从带宽特性来讲，一般稀土材料要比 PZT 材料易于获得更宽的工作频带，而当 PZT 材料与合适的壳体相配合时，也可能得到较大的带宽，但从图中又可以看出，弯张换能

器在不加入其它耦合机制时, 单个换能器不论是用 Terfenol-D 还是用 PZT 材料, 都无太大的带宽潜力可以挖掘, 只能在一定限度内, 通过对结构进行合理设计(尤其是壳体结构)来展宽频带。

2.4 IV 型弯张换能器振动辐射参量的描述和计算方法

关于 IV 型弯张换能器频率特性参量, 前面已经作了详细讨论, 下面将重点讨论其它振动辐射特性参量, 包括振幅放大率、相对体积位移、壳体等效质量抗、水中辐射阻等。

(1) 振幅放大率

弯张换能器都有振幅放大作用, 即杠杆臂效应, 可用振幅放大率来描述这一效应。对于 IV 型弯张换能器振幅放大率定义为短轴顶点的位移幅与长轴顶点的位移幅之比, 这一参量直接描述壳体弯曲振动时的杠杆臂效应。振幅放大率一般要比长短轴比 (a/b) 大, 动态值一般大于静态值, 并且随频率的变化而变化, 在壳体反谐振频率点 (f_a) 时振幅放大率最大, 因为参考点取在长轴顶点附近, 在壳体处于反谐振状态时长轴顶点的位移幅值趋近于零。振幅放大率与椭圆壳体长短轴比 (a/b) 的关系最为密切。

(2) 相对体积位移

换能器的体积位移定义为: 换能器振动辐射面上法向位移对辐射面的面积分:

$$L_V = \int_{S_0} U_n \cdot ds \quad (8)$$

式中, S_0 为换能器的有效辐射面。相同频率下, 具有较大体积位移的换能器可以产生更大的声功率。为了方便比较换能器对有源材料提供的振动位移的发挥能力, 需选择一个参考体积位移, 各种结构的换能器的体积位移与之相比较所确定的体积位移比值(称作相对体积位移)可以客观地表征换能器的这方面特性。弯张换能器由于它具有杠杆臂效应, 可以产生振幅放大作用, 因此能够产生更大的体积位移, 即它可以更有效地发挥有源材料所提供的振动

位移。对于 IV 型弯张换能器比较合适的参考体积位移可以如下选取:

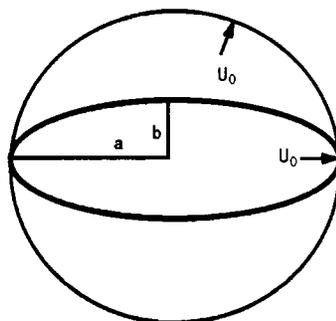


图 6 参考体积位移选取示意图

设同样的振子激励一无限薄等高度的圆柱面, 柱面的直径等于壳体椭圆截面的长轴 $2a$, 设振子自由状态极限位移为 U_0 , 则圆柱面以径向位移 U_0 作均匀脉动的体积位移取作参考体积位移, 记为 L_{V0} :

$$L_{V0} = 2\pi a \cdot h \cdot U_0 \quad (9)$$

其中, a 为椭圆管的长半轴(图 6 所示), h 为椭圆管的高度。

$$L_r = L_V / L_{V0} \quad (10)$$

定义为相对体积位移。在振子极限激励条件下, L_r 的值称作极限相对体积位移, 记作 L_{rm} 。因此对于相同振子而言 L_{V0} 为常数, 则极限相对体积位移 L_{rm} 的值可以描述 IV 型弯张换能器的声辐射能力。相对体积位移与振幅放大率有直接关系, 但它比振幅放大率能够更恰当地反映弯张换能器的声辐射能力。较大的 L_{rm} 对应的结构可以更有效地发挥有源材料的效能。而对于有源材料, 不同的材料与尺寸可以提供不同的 L_{V0} , 具有较大的 L_{V0} 的振子能够更有效地激发壳体辐射声能。单从声功率角度来讲, 应选择大 L_{rm} 的壳体和较大 L_{V0} 的振子。

(3) 壳体等效质量抗

影响弯张换能器的机械品质因素 Q_M 的

主要质量抗来源之一是振动壳体(包括铰链部分,图2所示模型),因此壳体的等效质量抗可以借以描述换能器机械品质因素的相对大小。壳体等效质量抗按下式计算:

$$X_m = \omega M_{\ominus} \quad (11)$$

其中, $\omega = 2\pi f$ 为角频率, M_{\ominus} 是壳体相对于 P 点(图2中)的等效质量, M_{\ominus} 是用能量等效原理求得的, 设壳体振动的总动能为 E_k , P 点处的振速为 ν_p , 则等效质量:

$$M_{\ominus} = \frac{2E_k}{\nu_p^2} \quad (12)$$

壳体振动总动能根据有限元法求出的有限元网格节点上的位移分布, 利用积分运算求得

(4) 水中辐射阻

辐射阻是描述换能器机声转换能力的参量, 它表征换能器在水中振动时, 由于辐射声能而带来的机械损耗。对于表面振速非均匀分布的振动面, 辐射阻的值要依赖于参考点的选取^[8], 此处参考点仍选在图2中 P 点位置。

计算时利用有限元法, 只计及辐射阻尼(忽略其它一切阻尼作用), 由 P 点求出机械阻抗的实部获得。

以上所列举的包括频率特性参量等是用来表征 IV 型弯张换能器振动辐射特性的参量。它们不同于换能器最终的电声参数, 是对机械振动和辐射特性的具体描述。只有在换能器设计中兼顾以上诸特性参量, 对结构进行优化, 才能获得性能优良的电声参数。因此在设计换能器中, 应着重讨论以上几个重要振动辐射特性参量, 研究它们随结构及材料参数的变化关系, 经过综合分析, 获得最佳综合参数的优化结构, 完成换能器的初步设计。然后再考虑电声转换、结构振动、水中辐射的各项影响因素, 通过有限元分析, 计算出换能器的电声辐射参数。进一步根据这些参数, 考虑指标的再优化, 对换能器结构作更细微的调整, 最后得出最终

的优化设计方案。

3 结论

本文提出了适用于弯张换能器的等效电路支路阻抗分析方法和一系列描述弯张换能器振动辐射特性的特征参量, 选择这些振动辐射特征参量来进行弯张换能器设计, 有利于抓住主要矛盾、便于解决关键性问题, 并且不必要每次都进行全局计算得到电声参数, 节省了相当可观的计算量。

本文所提出的振动辐射特性分析方法, 虽然是从 IV 型弯张换能器得出的, 但也可以推广用于其它类型弯张换能器, 如 I 型、II 型、III 型、VII 型等, 以讨论其振动辐射特性与结构之间的关系。

参 考 文 献

- 1 Moffett M B, Lindberg J F, McLaughlin E A, et al. Proceeding of the third international workshop on Transducers for sonics and ultrasonics, ed M.D. McCollum, B.F.Hamonic and O.B. Wilson, ORLANDO, FLORIDA (1992), 170-180.
- 2 Debus J C, Decarpigny J N, Hamonic B. Proceeding of the third international workshop on Transducers for sonics and ultrasonics, ed M.D.McCollum, B.F.Hamonic and O.B.Wilson, ORLANDO, FLORIDA (1992), 181-197.
- 3 Yao Qingshan, Bjorno L. 3rd European conference on underwater acoustics. Heraklion, 1996, 1037-1042.
- 4 Zhang J D, Humphrey V F. 3rd European conference on underwater acoustics. Heraklion, 1996, 1013-1018.
- 5 Ring M D. Proceeding of the third international workshop on Transducers for sonics and ultrasonics. ed M.D.McCollum, B.F. Hamonic and O.B.Wilson, ORLANDO, FLORIDA, 1992, 198-208.
- 6 Quido Pucci. *Undersea Defence Technology*, 1995, 536-541.
- 7 Yamamoto M, Ishimura H, Hama Y, et al. *Undersea Defence Technology*, 1996, 109-112.
- 8 何祚镛, 赵玉芳编. 声学理论基础. 北京: 国防工业出版社, 1981. 194-278.