

决定超声换能器最大效率的参量 N_{eff}^*

林 仲 茂

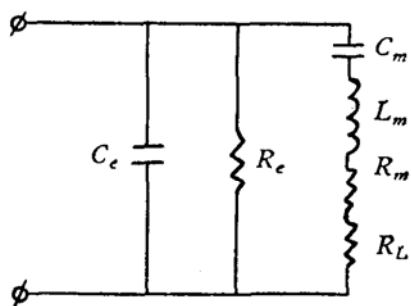
(中国科学院声学研究所)

换能器的电声效率在功率超声处理技术中是一个很重要的问题。研究它与哪些因素有关，在什么负载条件下能够达到换能器的最大效率，这对于如何设计和制造换能器；如何进行声匹配等等都具有实际意义。本文给出一个评价功率超声换能器的效率及其负载适应能力的重要参数 N_{eff} ，并提出测量方法。

一、换能器的效率与动态参量的关系

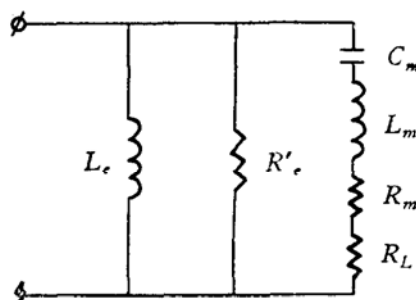
工作在共振频率附近的压电及磁致伸缩换能器的等效电路如图1所示。当换能器在其机械共振频率工作时，其效率最高。由图1(a)如果考虑声负载为纯阻，或者它对换能器的共振频率影响不大时，对压电换能器，可以得到如下关系式

$$\left. \begin{aligned} Q_e^m &= \omega_m C_e R_e \\ Q_m^m &= \frac{1}{\omega_m C_m R_m} \\ Q_L^m &= \frac{1}{\omega_m C_m (R_m + R_L)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



(a) 压电换能器

Piezoelectric transducer



(b) 磁致伸缩换能器

Magnetostrictive transducer

图1 换能器在共振频率附近的等效电路

Equivalent electrical circuit for electroacoustic transducer working in the neighborhood of its resonant frequency

其中 Q_e^m , Q_m^m , Q_L^m 分别表示换能器在机械共振频率(以上标 m 表示)时的电品质因数, 换能器固有的机械品质因数及有负载时的机械品质因数. $\omega_m = [(L_m \cdot C_m)^{1/2}]^{-1}$. 根据效率定义可

* 本文1980年12月29日收到。

得到下列关系式

$$\eta_{ma}^m = \frac{Q_m^m - Q_L^m}{Q_m^m} \quad (2a)$$

$$\eta_{cm}^m = \frac{k_1^2 \cdot Q_c^m \cdot Q_L^m}{1 + k_1^2 \cdot Q_c^m \cdot Q_L^m} \quad (2b)$$

$$\eta_{ca}^m = \eta_{ma}^m \cdot \eta_{cm}^m \quad (2c)$$

其中 $k_1^2 = K_{\text{eff}}^2 / (1 - K_{\text{eff}}^2)$, $K_{\text{eff}}^2 = C_m / (C_m + C_c)$ 为换能器的有效机电耦合系数. η_{ma}^m , η_{cm}^m 和 η_{ca}^m 分别为在机械共振频率时的机声、电机及电声效率.

对于磁致伸缩换能器的效率由图 1(b) 可得到下列关系式

$$\left. \begin{aligned} Q_c^m &= R'_c / \omega_m L_c \\ Q_m^m &= \omega_m L_m / R_m \\ Q_L^m &= \omega_m L_m / (R_m + R_L) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其效率与动态参量 Q_c^m , Q_m^m 和 K_{meff}^2 的关系和式(2)一样, 只要以 k_2^2 代替 k_1^2 , $k_2^2 = (1 - K_{\text{meff}}^2) / K_{\text{meff}}^2$, $K_{\text{meff}}^2 = L_m / (L_m + L_c)$, 为磁致伸缩换能器的有效机电耦合系数.

二、换能器的最佳负载及最大电声效率

引入一系数 P , $P = R_L / R_m$, 则由式(1), (2b) 及 (2c) 可得

$$\eta_{ca}^m = \frac{N_{\text{eff}}}{N_{\text{eff}} + P + 1} \cdot \frac{P}{P + 1} \quad (4)$$

其中动态系数 $N_{\text{eff}} = Q_c^m \cdot Q_m^m K_{\text{eff}}^2 / (1 - K_{\text{eff}}^2)$, 对磁致伸缩换能器, 可以得到类似于式(4)的结果, 只要以 N_{meff} 代替 N_{eff} . 其中 $N_{\text{meff}} = Q_c^m \cdot Q_m^m (1 - K_{\text{meff}}^2) / K_{\text{meff}}^2$. 由式(4)对 P 求极值时, 得最佳负载系数 P_{opt} 为

$$P_{\text{opt}} = (N_{\text{eff}} + 1)^{1/2} \quad (5)$$

在此负载条件下, 得到换能器的最大电声效率 η_{max}^m 为

$$\eta_{\text{max}}^m = [(N_{\text{eff}} + 1)^{1/2} - 1]^2 / N_{\text{eff}} \quad (6)$$

可见换能器的最大效率只和动态系数 N_{eff} 有关.

图 2、3 及图 4 是由式(4)和(6)计算的结果. 由图 2 可以看出, 对不同的 N_{eff} 值都存在一最佳负载系数 P_{opt} , 在这一点上, 得到最大效率. N_{eff} 值小其最大效率所对应的 P 值也小. N_{eff}

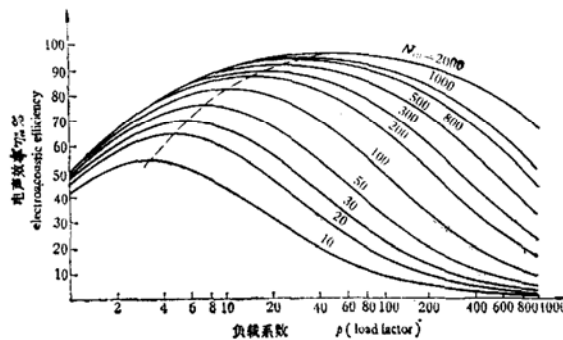


图 2 电声效率和负载系数的关系

Electroacoustic efficiency as a function of the load factor

值大时电声效率随系数 P 变化缓慢. 图 3 是换能器机电效率和 P 的关系. 而图 4 是换能器最大效率与动态系数 N_{eff} 的关系曲线. 最大效率随 N_{eff} 值的增加而增高, 与负载系数 P 无关.

从上面分析可见, 换能器的动态系数 N_{eff} 越大, 其效率越高, 而且效率受负载的影响越小, 即换能器可以在较宽的负载范围内工作而电声效率变化不大. N_{eff} 大意味着换能器的电及机械的损耗小, 或者有效机电耦合系数大, 这些取决于换能器所用的材料、结构及制造工艺.

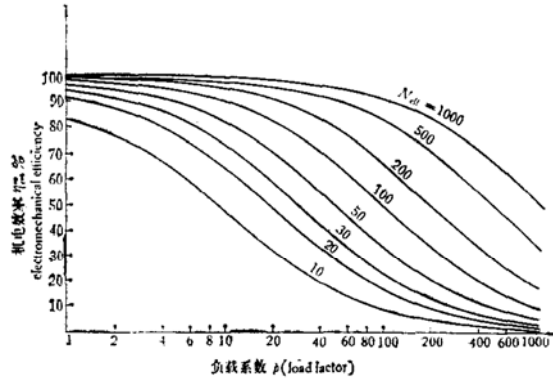


图 3 机电效率和负载系数的关系

Electromechanical efficiency as a function of the load factor

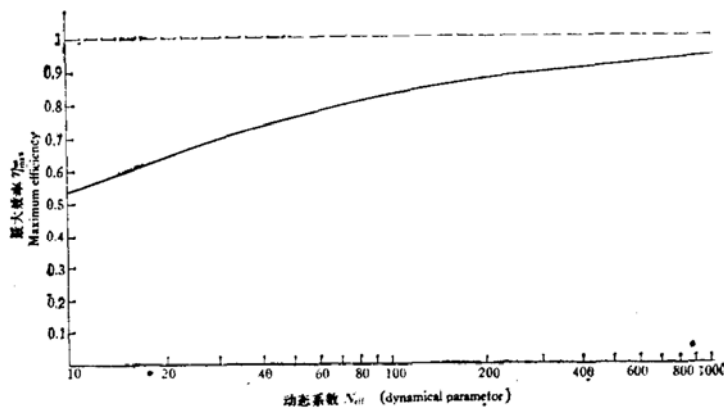


图 4 最大效率 η_{max}^m 和动态系数 N_{eff} 的关系

Maximum efficiency η_{max}^m as a function of the dynamical parameter N_{eff}

三、换能器动态系数 N_{eff} 的测量

根据前面的分析, 如果测量出等效电路中的各参数值, 就可以得到动态系数 N_{eff} , 最佳负载系数 P_{opt} 以及换能器的最大效率等. 等效电路参数可以用两种方法测量, 一种是熟知的导纳或阻抗圆图法; 另一种是“M”曲线法^[1].

实际上只要在空载情况下测量, 就可以得到动态系数 N_{eff} . 对压电换能器言, $N_{eff} = G_m / G_c$, G_m 为空载时导纳圆的直径, 而 G_c 是静态电导. 磁致伸缩换能器的动态系数 $N_{meff} = R_c / R_m$, 也可以由空载条件下直接测得.

表 1 给出三种不同结构及工艺的压电换能器所测得的结果. 可见不同换能器, 其性能差别很大. 一般说, 压电换能器的 N_{eff} 值在 100 以上, 最大效率为 80% 以上; 而磁致伸缩换能器

的 N_{eff} 值只有 5—25, 最大效率为 40—70%

表 1

换能器编号	N_{eff}	P_{opt}	η_{max}^m
1	259	16	0.88
2	1500	39	0.95
3	6300	79	0.97

参 考 文 献

- [1] 林仲茂, 几种夹心式换能器的研制和测量, 1977 年无锡功率超声学术会议.
 [2] Wright, E. B. "A spaced lamination transducer for industrial use", *IRE international convention record part 6*, 1960, 232—242.

A PARAMETER N_{eff} FOR DETERMINATION OF MAXIMUM EFFICIENCY OF ULTRASONIC TRANSDUCER

LIN Zhong-mao

(*Institute of Acoustics, Academia Sinica*)

In this paper the relationship between the maximum efficiency of transducer and their dynamical parameters (electrical and mechanical Q , effective electromechanical coupling coefficient) is described. The loading condition which gives maximum efficiency is analysed. It is pointed out that the dynamical parameter N_{eff} , which is a function of the transducer material, art of preparation and the mechanical structure of the transducer unit, are the important parameters that control the of transducers. The larger the parameter N_{eff} is, the higher is the efficiency of the transducer and the smaller is the influence of the load. Proposed methods of measuring parameter N_{eff} are also given.