

样频率 125MHz。这些为扩大测量频率范围提供了必备条件。实验时控制水温在 10℃ 左右。

量结果受环境影响小,重复性好。

四、结 论

由实验结果不难得出,时域近场自易法作为一种新颖的换能器灵敏度测量方法,不仅能测出传统方法所能测得的换能器灵敏度幅频特性,且具有如下特点。

1. 测量速度快,可迅速测出整个频带范围内的幅频、相频特性。
2. 测量频率范围宽,且具有较高精度。
3. 由于激励信号是时域脉冲,能反映换能器瞬态特性。
4. 整个测量过程易于操作。
5. 由于测量在小水域内进行,容易调整,测

参 考 文 献

- [1] Maclean W. R., *J. Acoust. Soc. Am.*, **12**, (1940), 140—146
- [2] Carstensen E. L., *J. Acoust. Soc. Am.*, **19**, (1947), 961—965
- [3] Diercks K. J., *J. Acoust. Soc. Am.*, **35**, (1963), 1903 (A)
- [4] Simmons B. D. and Urick R. J., *J. Acoust. Soc. Am.*, **21**, (1949), 633—435
- [5] Reid J. M., *J. Acoust. Soc. Am.*, **55-4** (1974), 862—868
- [6] Koppelman J., Brendel K. and Wolf, *J. Acustica*, **25**, (1971), 73—80
- [7] Seki, H. Granato A. and Truell R., *J. Acoust. Soc. Am.*, **28-2** (1956), 230—238
- [8] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬,声学基础(下册),上海科学技术出版社,1981,112—116
- [9] Masao Ide, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, **35-2** (1988)

高频超声换能器的阻抗匹配研究

罗淑云 赵学军 陈戈林 胡思正

(清华大学电子工程系 北京 100084)

1993 年 8 月 30 日收到

本文介绍了用于声学显微镜中超声换能器的阻抗匹配方法。由三个电感构成的 T 型结构被选作匹配网络,通过理论计算和实验调试得到了良好的匹配效果。文章的最后给出了实际的匹配结果。

Abstract

A design for impedance matching of ultrasonic transducer used in an acoustic microscope is described. A T-structure with three inductors is adopted. The near-optimal design is obtained through theoretical calculation and manual adjustment. Finally, the matching results are given.

一、引 言

我们研制的高频超声换能器用在声学显微镜中,作为声学显微镜的核心部件声透镜的声电转换元件。换能器材料用的是 Y-35° 切割铌

酸锂晶片,经过特殊研磨等加工工艺制成,频率从 15—50MHz。

由实验测得,高频超声换能器中心频率的阻抗实部小于 10Ω,虚部大到几百 Ω。声学显微镜的信号源阻抗为 50Ω,两者之间严重失配,因此有相当大的能量反射回电路,其危害有两

方面。一方面使得能够传送到换能器上的电功率损失严重，另一方面反射回电路的电功率使整个声显微镜不能稳定地工作。

为了使来源于声学显微镜信号源的功率最大地转换为声功率以用作探测材料的声能，同时也使电路稳定地工作，超声换能器的阻抗匹配便是一个非常重要的问题。

我们由实验测得换能器的阻抗值，理论设计了匹配网络参数，用电路实现了对换能器的阻抗匹配，在需要的工作带宽内实现了较好的匹配，使声学显微镜的工作效率得到提高。

二、超声换能器匹配网络的设计

超声换能器的等效电路由图 1 表示，其各个符号的意义为， Z_{in} ：换能器的输入阻抗； C_0 ：换能器集总等效电容； x_s ：换能器等效电抗； Z_p ：换能器声阻抗的前端负载； Z_B ：换能器声阻抗的后端负载。

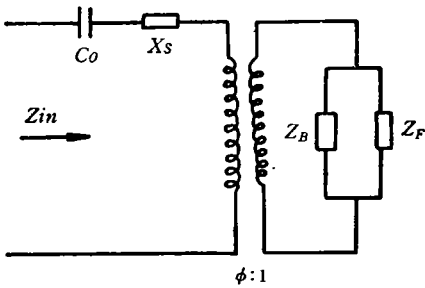


图 1 换能器等效电路图

用计算机模拟可以得到 $Z_{in}(f)$ 的数值解。我们设计匹配网络主要关心的是它的外特性，因此用实验测得换能器的 $Z_{in}(f)$ ，便可设计匹配网络的各参数。

我们用 HP 公司的 8505A 型网络分析仪测得所制作的换能器的输入阻抗 $Z_{in}(f)$ ，从实际测量得到：在换能器的中心频率，其输入阻抗的实部小于 10Ω ，虚部为容性阻抗，数值为几百 Ω 。我们设计的匹配网络要起到下面两方面的作用：

1. 使信号源内阻与负载阻抗互为共轭；
2. 使负载阻抗与信号源内阻互为共轭。

为了实际调试的方便，我们将匹配网络设计成单级，其基本形式有五种：变压器型、 T 型、 L 型、 π 形、网型。针对我们的换能器在声显微镜中的作用，要求换能器系统的高频电反射要尽量的小，带宽要尽可能大，整个透镜换能器结构要轻、小。综合考虑，我们选择了 T 型结构，采用了双电感的方法，见图 2，图中 L_3 为连线电感。图 2 中的网络具体为图 3。由图 3 可以得到两个匹配方程：

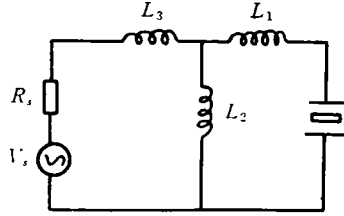


图 2 T 型匹配网络联接在信号源与换能器之间

$$R_0 = R_3 + \{R_2(R_1 + R_L)(R_1 + R_2 + R_L) + x_2^2(R_1 + R_L) + R_2(x_1 + x_L)^2\} / \{(R_1 + R_2 + R_L)^2 + (x_1 + x_2 + x_L)^2\} \quad (1)$$

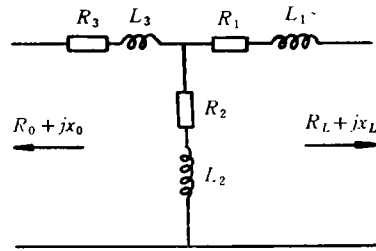


图 3 T 型网络的电参数

$$x_0 = x_3 + \{x_2(R_1 + R_L)^2 + R_2^2(x_1 + x_L) + x_2(x_1 + x_L)(x_1 + x_2 + x_L)\} / \{(R_1 + R_2 + R_L)^2 + (x_1 + x_2 + x_L)^2\} \quad (2)$$

式中， x_1, x_2, x_3 分别表示电感 L_1, L_2, L_3 的电

抗值。令连线电抗 x_3 为已知, 则这是一个二元三次方程组。其解过繁, 再作简化和变换。实际应用中, R_1, R_2, R_3 分别为铜线电阻, 其值小于 0.01Ω , 所以 $R_1, R_2, R_3 \ll x_1, x_2, x_3$ 。 (1) 式简化为:

$$R_0 = \frac{R_2 R_L^2 + x_2^2 R_L + R_2(x_1 + x_L)^2}{R_L^2 + (x_1 + x_2 + x_L)^2} \quad (3)$$

将其展开、化简, 得到

$$(R_0 - R_L)x_2^2 + 2R_0(x_1 + x_L)x_2 + R_0[R_L^2 + (x_1 + x_L)^2] = 0 \quad (4)$$

这是一个一元二次方程, 设 x_1 为已知, 则其值可解。 (2) 式化简为

$$x_0 = x_3 + \{x_2 R_L^2 + x_2(x_1 + x_L)(x_1 + x_2 + x_L)\} / \{R_L^2 + (x_1 + x_2 + x_L)^2\} \quad (5)$$

令 (5) 式右边为 Δ , 用迭代法求解方程组 (4)、(5), 直到满足 $\Delta \rightarrow 0$, 则可求得匹配网络的各元件参数值。为此我们编制了专用程序, 求得了数值解。

三、实际匹配结果

我们用上面设计方法对 5 个换能器系统进行了匹配设计, 根据计算结果自己绕制了电感, 组装成匹配网络, 将其联到换能器上, 然后进行实际调试修正。整个调试过程在 8505A 型网络分析仪上进行。调试方法为: 先设置网络分

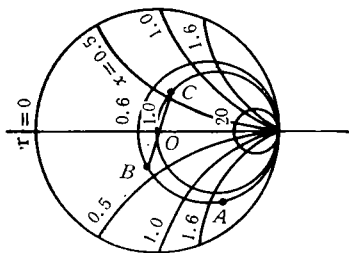


图 4 匹配原理分析阻抗圆图

析仪, 在网络分析仪的显示屏上显示换能器的阻抗圆图。调试过程用图 4 表示。图中, 圆圈为等 r 线, 匹配前, 换能器中心频率的阻抗值在

应用声学

圆图上的点 A , 接入串联电感 L_1 , A 点阻抗加上 $j\omega L_1$, 圆图上 A 点沿等 r 线移至点 B , 然后求 B 点在圆图上的中心对称点 C , C 即为 B 点的导纳点。再接入并联电感 L_2 , B 点阻抗值加了 $-\frac{j}{\omega L_2}$, 即 C 点沿等 r 线移至圆点 O 附近; 若接入 L_2 不能使 C 点接近 O 点, 则再调整连线, 改变连线电感 L_3 , 使 C 点接近 O 点。经上述调整后, 换能器达到匹配的目的。匹配前后网络分析仪的显示屏上显示的圆图如图 5 所示。由图 5 看到, 匹配实质为将换能器阻抗域由圆图的周边移至靠近圆点。

用上面方法, 我们对 5 个换能器进行了匹配, 结果如表 1。表中, V_u 为匹配前声反射输出电压, V_m 为匹配后声反射输出电压。由表 1 可见, 匹配效果是比较好的, 其声反射输出电压匹配后比匹配前增加了 2.4 倍以上。

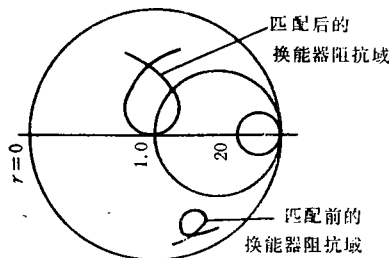


图 5 匹配前后换能器阻抗域在阻抗圆图上的位置

表 1 换能器匹配前后声反射电压输出结果比较

换能器序号	1	2	3	4	5
中心频率 (MHz)	15	20	20	30	50
V_u (mV)	6.5	4.0	9	19	28
V_m (mV)	28	15	30	56	68
V_m/V_u	4.3	3.75	3.3	3.0	2.4

四、结 论

我们采用双电感 T 型网络结构对 5 个超声换能器系统进行了设计、匹配, 得到了较为理想的结果; 证明了在 10—50MHz 频率范围内用上面的匹配方法是可行的, 这对提高声学显微镜的使用效率是有实际价值的。