

传输电缆对换能器阻抗特性的影响

郭 榕

(无锡市海鹰集团水声中心 无锡 210043)

1998年1月14日收到

摘要 本文通过传输线方法讨论了电缆对换能器的影响。随频率增加, 电缆对换能器的影响将显著增大。主要表现为: 最大电导增大, 串联谐振频率下降。这些都是由于电缆传输系数随频率变化引起的, 并且与换能器的阻抗特性有关。

关键词 电缆, 换能器阻抗, 传输系数

Effect of transmission cable on the transducer impedance characteristics

Guo Rong

(Center of Under Water Acoustics, Hai Ying Group, Wuxi 210043)

Abstract The effect of a cable on the transducer impedance is discussed by the transmission line method. Numerical example is given. Enlarged admittance circle and decreased resonance frequency are the major phenomena.

Key words Electrical cable, Transducer impedance, Transmission coefficient.

1 引言

换能器的阻抗特性是换能器的一个重要性能指标。为保证电功率较好地传输到换能器, 必须使换能器与功率源的阻抗匹配, 保证功率最大传输。而功率源与换能器通过电缆相接, 特别是水声换能器与功率源之间往往有较长的电缆相连。这要求电缆与负载及功率源阻抗匹配, 以保证功率信号的最大传输。如果负载阻抗不随频率变化, 容易做到三者之间的阻抗匹配。而换能器大多为容性, 阻抗特性随频率变化。因此, 在一个频段内无法达到阻抗匹配的

要求。

在工程上选用电缆时, 常根据换能器的静态电容与电缆电容的比值来确定电缆与换能器失配对换能器性能的影响。比值越高, 即认为影响越小。这是非常粗略的, 因为它完全忽略了电缆分布电感的影响。当换能器频率较低时, 这样考虑的影响不太大; 随着频率升高, 电缆对换能器的谐振频率, 电导, 电纳等阻抗特性影响逐步增大。其大小如何, 未见有具体的讨论计算。本文利用传输线理论对此进行分析: 其一, 加电缆后对换能器导纳的变化, 其二, 谐振点附近, 电缆传输系数的变化, 利用典型

值进行了数字计算。

2 传输电缆的理论

设单位长度电缆的电导为 G ，电感为 L ，电容为 C ，电阻为 R ，电缆长为 x ，则有电报方程^[1]

$$\begin{aligned} LCV_{tt} - V_{xx} + (LG + RC)V_t + RGV &= 0 \\ LCI_{tt} - I_{xx} + (LH + RC)I_t + RGI &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中 V 为电缆某点的电压， I 为电缆某点的电流。本方程的通解为

$$\begin{aligned} V &= Ae^{j(\omega t + kx)} + Be^{j(\omega t - kx)} \\ I &= -ASe^{j(\omega t + kx)} + BSe^{j(\omega t - kx)} \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} K &= \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \\ S &= \sqrt{\frac{G + j\omega C}{R + j\omega L}} \end{aligned}$$

$Be^{j(\omega t - kx)}$ 为向 x 正方向传输的电信号，而 $Ae^{j(\omega t + kx)}$ 表示沿 x 反向传输的电信号。设电缆末端负载为 Z ，如图 1 所示，输入端电压为 V_i ，则可得解为

$$\begin{aligned} A &= \frac{V_t e^{-kx}(SZ - 1)}{2 \sinh(kx) + 2SZ \cosh(kx)} \\ B &= \frac{V_i e^{kx}(SZ + 1)}{2 \sinh(kx) + 2SZ \cosh(kx)} \end{aligned} \quad (3)$$

由上式看，只要 $SZ - 1 = 0$ 即 $Z = \frac{1}{S} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$ 时，系数 A 为 0。表示只有正向传输的电信号，没有反射波。因此，常用 $Z_s = \frac{1}{S} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$ 表示特性阻抗。当 $SZ - 1 = 0$ ，即负载阻抗等于电缆特性阻抗时，电缆和负载的阻

抗匹配，没有反射波。

当 $Z \neq Z_s$ 时，为分析问题方便，由 (2)、(3) 式，可推得接入电缆后换能器的阻抗值 Z_p ，电缆的电压传输系数 T_v ，电流传输系数 T_i 分别为：

$$\begin{aligned} Z_p &= \frac{V_i}{I_i} = \frac{SZ \tanh(kx)}{S(SZ \tanh(kx) + 1)} \\ T_v &= \frac{V_o}{V_i} = \frac{ZS}{\sinh(kx) + SZ \cosh(kx)} \\ T_i &= \frac{I_o}{I_i} = \frac{1}{SZ \sinh(kx) + \cosh(kx)} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 V_o 、 I_o 为电缆终端的电压、电流， V_i 、 I_i 为电缆起点的电压、电流。

当频率较低时 (20kHz 以下)，由于常用电缆的 L 、 C 、 R 的数量级分别为 $10^{-7}H/m$ 、 $10^{-10}F/m$ 、 $10^{-1}\Omega/m$ ，故对常用的电缆长度 (百分之一波长内)^[2]，有 $kx \ll 1$ ，即 $\sinh(kx) \approx 0$ ， $\cosh(kx) \approx 1$ ， $\tanh(kx) \approx 0$ ，由 (4) 式得 $Z_p = Z$ ， $T_v = 1$ ， $T_i = 1$ ，表示接入电缆后，换能器的阻抗不变，电缆传输无电压、电流变化。即 Z 在相当大范围内，换能器阻抗不受影响，电缆的电压、电流传输系数皆为 1。

3 传输电缆对发射换能器阻抗特性的影响

在高频时 (频率高于 100kHz 时)，由于电缆的 $R \ll j\omega L$ ， $G \ll j\omega C$ ，由 (2) 式则， $k \approx j\omega\sqrt{LC}$ ， $S \approx \sqrt{\frac{C}{L}}$ ， $Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}}$ 。令 $k_p = \omega\sqrt{LC}$ ，则 $k = jk_p$ 。取典型值并接入电缆后，现分析 Z 的变化及电缆电压、电流传输系数的变化。

设 Z 为容性， $Z = r_1 - jx_1$ ，其中 r_1 为阻、 x_1 为抗。由 (4) 式及以上假设可推得电缆传输电压、电流系数的模分别为：

$$\begin{aligned} T_v &= \frac{1}{\sqrt{(\cos(k_p x) - x_1 \sin(k_p x) / S(r_1^2 + x_1^2))^2 + (r_1 \sin(k_p x) / S(r_1^2 + x_1^2))^2}} \\ T_i &= \frac{1}{\sqrt{(\cos(k_p x) + Sx_1 \sin(k_p x))^2 + (Sr_1 \sin(k_p x))^2}} \end{aligned} \quad (5)$$

若 r_1 , x_1 值都与 Z_s 即 $1/S$ 处于同一数量级, 则由上式可看出: r_1 、 x_1 的大多数值都使 $|T_v|$ 值大于 1, 而 $|T_i|$ 值小于 1。即换能器为容性, 且阻抗值与电缆特性阻抗值处于同一量级。接电缆后, 电缆的电压传输系数模

值大 1, 而电流传输系数模值小于 1。由 (4) 式, $Z_p = \frac{V_i}{I_i} = \frac{T_v}{T_i} \cdot \frac{V_o}{I_o} = \frac{T_v}{T_i} \cdot Z$, 故 Z_p 的模值小于 Z 的模值, 换能器的阻抗值减小。

设 Z 为感性, $Z = r_2 + jx_2$, r_2 为阻, x_2 为抗, 同法可得:

$$T_v = \frac{1}{\sqrt{(\cos(k_p x) - x_2 \sin(k_p x)/S(r_2^2 + x_2^2))^2 + (r_2 \sin(k_p x)/S(r_2^2 + x_2^2))^2}}$$

$$T_i = \frac{1}{\sqrt{(\cos(k_p x) + Sx_2 \sin(k_p x))^2 + (Sr_2 \sin(k_p x))^2}} \quad (6)$$



图 1 等效电路图

若 r_2 , x_2 值与电缆特性阻抗处于同一数量级, 与 (5) 式比较, 则同样可看出: r_2 、 x_2 的大多数值都使 $|T_v|$ 值小于 1, 而 $|T_i|$ 值大于 1。即换能器为感性, 且阻抗值与电缆特性阻抗处于同一量级, 接电缆后, 电缆的电压传输系数模值大于 1, 而电流传输系数小于 1。故 Z_p 的模值大于 Z 的模值, 换能器的阻抗值增加。

对此可进行具体计算。本文选取 $L = 3.3 \times 10^{-7}(\text{H/M})$; $C = 3.3 \times 10^{-11}(\text{F/M})$; $R = 0.05(\Omega/\text{M})$; $Z_i = 100(\Omega)$ 的 20m 电缆与换能器相连。电缆未配接时换能器导纳圆如图 2, 频率范围为 400-500kHz。图中箭头所示为谐振频率。由 (4) 式计算出接电缆后的导纳圆如图 3。

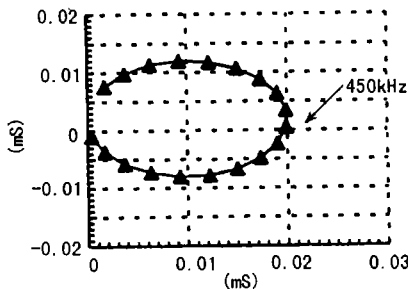


图 2 未接电缆时的导纳圆

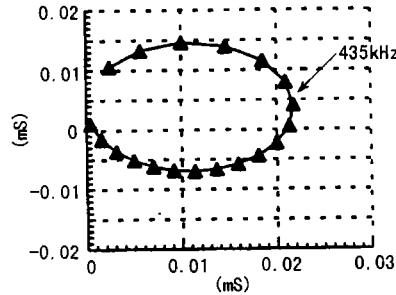


图 3 接 20m 电缆后的导纳圆

由图 2、图 3 可看出, 接电缆后换能器的最大电导由 0.02mS 增加到 0.022mS, 增加了百分之十。串联谐振频率由 450kHz 下降为 435kHz, 下降了 15kHz。电缆电压传输特性呈现波浪形, 如图 4 所示, 谐振频率低端传输系数大于 1, 最大值为 1.24, 而高端则小于 1, 最小值为 0.86。电缆电流传输特性曲线如图 5。谐振频率低端小于 1, 而高端大于 1, 最小为 0.75, 而最大为 1.75, 与前述分析结果一致。

对一发射换能器, 用 4192 阻抗分析仪进行测量, 接 5m 电缆时, 最大电导为 15.3mS, 谐振频率为 97kHz。接特性阻抗 75Ω, 20m 米电缆后, 最大电导为 19.2mS, 增加了百分之二十六, 谐振频率为 95kHz, 降低了百分之二。和计算结果: 最大电导 19mS, 谐振频率 95kHz, 非常一致。

因此, 由于传输电缆分布参数影响, 换能器接电缆后, 由于电缆传输电压系数、电流系数都随频率变化, 使换能器的阻抗特性发生变化, 产生最大电导增加, 谐振频率降低的现象。

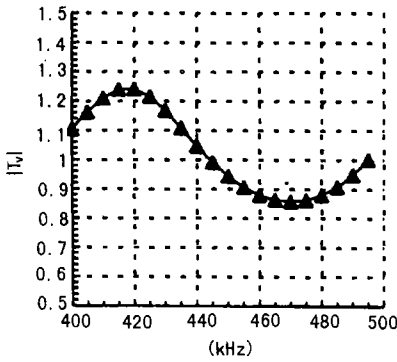


图 4 电缆的电压传输系数

4 结论

换能器阻抗不能满足电缆阻抗匹配的要求。在低频时, 电缆失配造成的影响并不大, 随着频率的升高, 其影响不容忽视。对于压电换能器, 若谐振点阻、抗可与电缆特性阻抗相比拟时, 由于在谐振点附近的抗性变化造成的电压、电流传输系数变化, 大多产生最大电导增加, 谐振频率降低的现象。具体的数值由电缆种类, 长度, 换能器的阻抗特性决定, 可通过计算求出。

因此, 在实际换能器阻抗测量工作中, 必须考虑电缆对换能器导纳的影响和失真。必要时, 还要根据测量值反推换能器的导纳。在设计换能器时, 特别是高频换能器时, 必须对电缆接入后, 换能器阻抗的变化引起重视。

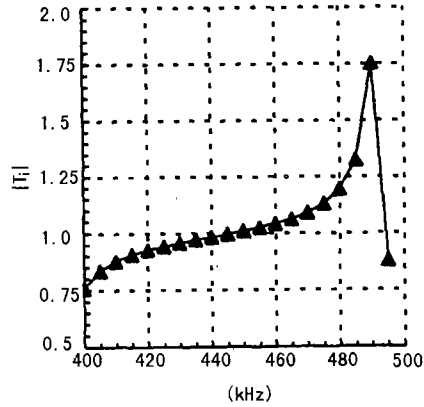


图 5 电缆的电流传输系数

参 考 文 献

- 1 梁昆森编. 数学物理方法. 北京: 人民教育出版社, 1976, 154.
- 2 袁易全. 超声换能器. 南京: 南京大学出版社, 1992, 283.

日本新建两大厅堂项目

1 东京国家剧院

占地 44000m², 于 1997 年 9 月开幕。内有 1800 座的歌剧院, 14500m³, 满场混响时间 1.5s; 1038 座的小剧场, 7200m³, 满场混响时间 1.1s; 1636 座的音乐厅, 15300m³, 满场混响时间 1.95s。各厅尚有 EDT, BR, t, IACC, C80 和噪声等多项测量指标。该项工程于 1985 年开始建筑设计国际竞赛, 日本 TAK 设计事务所获奖。声学顾问由美国 Beranek 和 TAK 联合进行。设计中利用了多种手段, 前后化了 7 年时间, 并写出多篇声学论文发表。

2 东京国际论坛

一座当今最化钱的城市多用演艺中心, 耗资达十六亿美元之巨。1985 年开始筹建, 有 50 个国家的 395 个设计者参加竞赛, 1989 年 3 月由各方面专家 8 人评选出 Rafae Vinoly 的设计为最佳方案。1992 年 10

月开始施工, 1996 年土建完成, 1998 年 1 月正式开幕。声学设计由美国 Jaffe 声学事务所和日本雅马哈声学研究所承担。内有 4 个大厅: A 厅为 5000 座的为多功能大会堂, 容积达 55000m³。供各类轻音乐和会议之用, 满场混响时间 1.8s。B 厅为展览和招待会之用, 面积 1400m², 可容 1200 人, 满场混响时间 1.7s。C 厅为 1500 座 (20499m²) 以自然声演出的古典音乐兼歌剧厅, 空间可以改变, 满场中频混响时间 1.9s。D 厅为戏剧、录音、电视演播等通用大厅, 容积 4576m³, 平顶可动。中频混响时间为 0.9-1.4s。B 厅和 D 厅均有可调音质的扩声系统。鉴于基地之下有多条繁忙的地下铁道通过, 故在隔振和隔声方面均做了仔细考虑。本项目中还包括一个巨型玻璃中庭式大厅, 体积达 250000m³, 其声学处理也是一个难题。

(同济大学 王季卿)