

复数阻抗法修正电缆引起的水听器灵敏度变化

郭西洋, 周利生, 陈毅

(杭州应用声学研究所, 浙江杭州 310012)

摘要: 压电式水听器的灵敏度会因为外接电缆的电容效应而降低, 在校准和使用中需要根据延长电缆的特性对灵敏度进行修正。从水听器与外接电缆的等效电路出发, 推导了复数阻抗法修正水听器灵敏度的方法。以 RHS-30 和 RHS-10 水听器为例, 由水听器的复数阻抗、延长电缆的开路和短路复数阻抗计算得到了电缆引入的灵敏度修正值, 并与实际测得的加电缆前后水听器灵敏度变化值做了比较, 结果证明利用复数阻抗法能准确地修正因延长电缆引起的水听器灵敏度变化, 与传统的纯电容修正相比, 该方法具有更好的适用性。

关键词: 水听器; 灵敏度修正; 延长电缆; 复数阻抗

中图分类号: TB552

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-01-0075-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.01.016

Correction of hydrophone sensitivity variation caused by cable extension based on complex impedance method

GUO Xi-yang, ZHOU Li-sheng, CHEN Yi

(Hangzhou Applied Acoustic Institute, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: The sensitivity of the piezoelectric hydrophone will decrease because of the capacitive effect caused by cable extension. Sensitivity correction is needed in accordance with the characteristics of the cable extension. This paper starts from the equivalent circuit of the external cable and hydrophone to derive the complex impedance method for the correction of hydrophone sensitivity. Taking the RHS-30 and RHS-10 hydrophone as example, the correction value is calculated from the complex impedance of the hydrophone, the open and short circuit complex impedances of the extended cable, and then, compared with the directly measured sensitivity of the hydrophone with and without cable. The results show that the calculated value is in agreement with the measured value very well. Compared with the traditional method of pure capacitance correction, the complex impedance method is more accurate and could be used in whole bandwidth.

Key words: hydrophone; sensitivity correction; extension cable; complex impedance

0 引言

水听器灵敏度校准过程中, 有时候需要加延长电缆, 延长电缆的引入势必会引入电压耦合损失, 降低水听器的灵敏度^[1]。国标中给出了两种电压耦合损失的测量方法——插入电压法和测量阻抗法^[2], 这两种方法在实际操作中都比较复杂; 插入电压法需要在水听器低电位端接入一个插入电阻, 引入一个已知的电压, 测量阻抗法中很难准确测量出电负载阻抗, 计算也过于繁琐。计量检定规程中也给出了电负载修正方法^[3], 实际应用中, 通常将电缆当

做纯电容, 近似计算电压耦合损失, 从而得到灵敏度修正值, 这种近似方法在低频段与实际值符合得很好, 但是在高频段, 尤其是在水听器的谐振点附近, 实际情况与理论修正值相差较大。特别是在水听器的电容较小, 而延长电缆较长(此时电缆电容很大)时, 实际情况与理论修正值相差更大。

Hayman 论述了一种复数阻抗修正理论, 可以在所有频率点准确修正延长电缆引入的灵敏度衰减^[4], 该方法将延长电缆视作水听器输出端的负载, 用等效电路分析方法计算出电缆引入的灵敏度变化。实际操作时, 需要分别测量延长电缆的开路和短路复数阻抗以及加电缆前水听器复数阻抗, 根据这些阻抗值计算出修正值。本文以复数修正理论为基础, 给出了延长电缆引入的灵敏度修正公式, 并以 RHS 系列水听器为例给出了两种水听器的测量结果和理论修正结果。

收稿日期: 2012-11-02; 修回日期: 2013-01-09

作者简介: 郭西洋(1988—), 男, 陕西商洛人, 硕士, 研究方向为水声计量测试。

通讯作者: 郭西洋, E-mail: gxiyang81@gmail.com

1 复数阻抗修正理论

如图 1 所示, 假如不加延长电缆的水听器灵敏度为 M_0 , 自带电缆末端测得的复数阻抗为 Z_H ; 加了延长电缆后, 在延长电缆末端测得的水听器的阻抗为 Z_H' , 灵敏度为 M_C ; 延长电缆的开路特性阻抗为 Z_{OC} , 短路特性阻抗为 Z_{SC} , 假设测量设备的输入阻抗足够高, 分析电路可以得到如下关系式:

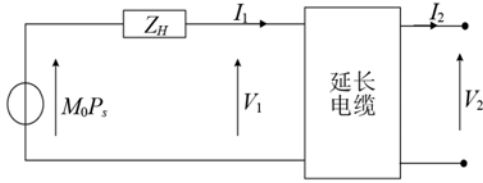


图 1 水听器与延长电缆连接等效电路图

Fig.1 Electrical equivalent circuit of a hydrophone with extended cable

$$M_C = \frac{V_2}{P_s} \quad (1)$$

$$Z_H' = \frac{V_2}{I_2} \Big|_{P_s=0} \quad (2)$$

$$Z_{OC} = \frac{V_1}{I_1} \Big|_{I_2=0} \quad (3)$$

$$Z_{SC} = \frac{V_1}{I_1} \Big|_{V_2=0} \quad (4)$$

式中: V_1 是不加延长电缆时水听器自带电缆输出端的电压值; V_2 是在延长电缆末端测得的电压值; P_s 是作用在水听器上的声压大小, 电缆的传输特性函数如下^[5]:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_2 \cos(\beta l) + jI_2 Z_0 \sin(\beta l) \\ I_1 &= jV_2 \frac{\sin(\beta l)}{Z_0} + I_2 \cos(\beta l) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: β 是电缆的传播常数; l 是电缆的长度; Z_0 是电缆的特性阻抗。由于水听器的输出端的负载阻抗很高, 电流可近似为 0, 则有:

$$V_1 = V_2 \cos(\beta l) \quad (6)$$

如图 1 所示, 由流过电缆的电流相等列出方程:

$$\frac{M_0 P_s}{Z_H + Z_{OC}} = \frac{V_1}{Z_{OC}} = \frac{V_2 \cos(\beta l)}{Z_{OC}} \quad (7)$$

代入式(1)可以得到

$$M_0 = \cos(\beta l) \left(\frac{Z_H + Z_{OC}}{Z_{OC}} \right) M_C \quad (8)$$

令 $V_2=0$ 、 $I_2=0$, 将式(5)代入(3)、(4)可得

$$Z_{OC} = -jZ_0 \cot(\beta l) \quad (9)$$

$$Z_{SC} = jZ_0 \tan(\beta l) \quad (10)$$

式(9)乘以式(10), 得到

$$Z_0^2 = Z_{OC} Z_{SC} \quad (11)$$

式(9)除以式(10), 得到

$$\frac{Z_{OC}}{Z_{SC}} = -\frac{\cos^2(\beta l)}{\sin^2(\beta l)} \quad (12)$$

代入 $\cos^2 x + \sin^2 x = 1$ 化简后得到

$$\cos^2(\beta l) = \frac{Z_{OC}}{Z_{OC} - Z_{SC}} \quad (13)$$

只考虑幅度, 将式(13)中的 $\cos(\beta l)$ 代入(8)得:

$$|M_0| = \sqrt{\frac{Z_{OC}}{Z_{OC} - Z_{SC}}} \left| \frac{Z_H + Z_{OC}}{Z_{OC}} \right| |M_C| \quad (14)$$

设声压作用为零, 即 $P_s=0$, 则图 1 可简化成图 2。

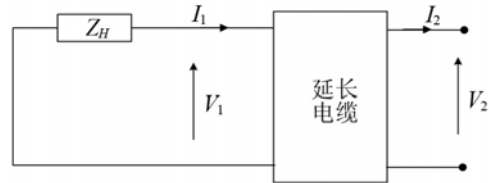


图 2 无声压作用时水听器等效电路图

Fig.2 Electrical equivalent circuit of a hydrophone without acoustic source

分析图 2 可知 $V_1/I_1 = -Z_H$, 结合方程(2)和(5)得

$$Z_H = -\frac{V_1}{I_1} = \frac{\cos(\beta l) Z_H' - jZ_0 \sin(\beta l)}{-j \sin(\beta l) \frac{Z_H'}{Z_0} + \cos(\beta l)} \quad (15)$$

式(15)中分子分母同时乘以 $-jZ_0/\sin(\beta l)$ 得到

$$Z_H = \frac{-jZ_0 \cot(\beta l) Z_H' - jZ_0^2}{-Z_H' - jZ_0 \cot(\beta l)} \quad (16)$$

将式(9)和式(11)代入可得到加电缆时水听器阻抗的表达式:

$$Z_H' = \frac{Z_{OC}(Z_H + Z_{SC})}{Z_{OC} + Z_H} \quad (17)$$

将式(17)代入式(14)可得到加电缆时灵敏度为

$$|M_C| = \frac{\sqrt{Z_{OC}(Z_{OC} - Z_{SC})}}{|Z_{OC} + Z_H|} |M_0| \quad (18)$$

用对数形式表示可得加电缆前后的灵敏度变化:

$$\Delta M = M_C - M_0 = 20 \lg \left[\frac{\sqrt{Z_{OC}(Z_{OC} - Z_{SC})}}{|Z_{OC} + Z_H|} \right] \quad (19)$$

上式中的 Z_{OC} 可由电缆开路时测得, Z_{SC} 可由电缆短路时测得, Z_H 是未加电缆时水听器的复数阻抗。由公式(17)知, 分别测量出延长电缆的开路阻抗和短路阻抗, 以及未加延长线时水听器的阻抗, 就可计算出加电缆后水听器的阻抗。同样, 根据公式(19)可计算加电缆前后水听器灵敏度的变化值。

纯电容灵敏度修正公式如式(20):

$$\Delta M' = M_C - M_0 = 20 \lg \left[\frac{C_H'}{C_H' - C_{OC}} \right] \quad (20)$$

式中: C_H' 表示加电缆之后水听器的电容量; C_{OC}

表示电缆的开路电容。

2 阻抗测量及修正结果

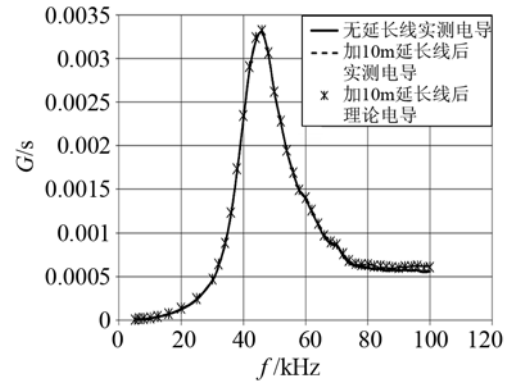
为了验证上述理论，选择了杭州应用声学研究所制造的 RHS 系列水听器作为研究对象，第一只水听器为 RHS-30，它的敏感元件是直径为 30 mm 的陶瓷球，自带 10m 电缆，静态电容为 13790pF，谐振点以下的灵敏度为-195 dB 左右；第二只水听器为 RHS-10，它的敏感元件为直径 10 mm 的陶瓷球，自带 10m 电缆，静态电容 8060 pF，远离谐振频率的低频段灵敏度约为-210dB。两根延长电缆，一根长 10 m，静态开路电容约为 1000 pF，另一根长 30 m，静态开路电容约为 3000 pF。

首先将水听器置于水中用 Agilent 4294A 阻抗分析仪测量了不加延长电缆和加延长电缆时两只水听器的阻抗曲线，RHS-30 水听器的谐振点在 50 kHz 左右，选取测量阻抗的频率范围为 5~100kHz，RHS-10 水听器的谐振点在 150 kHz 左右，选取测量阻抗时的频率范围为 5~300 kHz；再在相同的频率范围内分别测量了延长电缆的开路和短路复数阻抗，根据公式(17)计算出未加电缆时的阻抗与实际测量值作比较，为了便于观察，将阻抗用导纳形式表示。

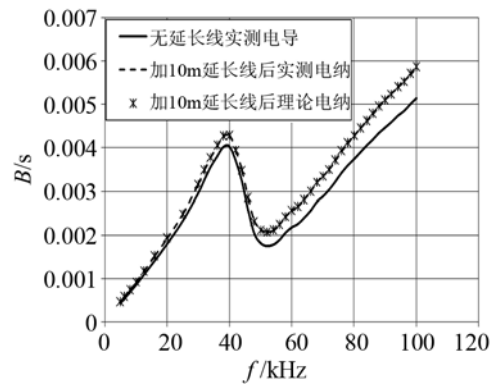
图 3 和图 4 中，实线表示的是实际测量得到的水听器没有加延长线时的导纳曲线，虚线是实际测量得到的加了延长电缆之后测得的导纳曲线，而星点描绘的是根据公式(17)计算得到的加延长电缆后的导纳。图 3 给出的是 RHS-30 水听器加 10 m 延长线前后的导纳曲线，图 4 给出的是 RHS-10 水听器分别加 10 m、30 m 延长电缆以及不加延长电缆时的导纳曲线。

可见，根据上述公式计算的水听器加电缆后的导纳值与实际测量值符合得非常好；加延长电缆之后水听器的开路导纳增大，随着频率的增加，导纳增加的愈加明显；需要指出的是图 3 中加延长电缆前后电导变化不是很明显，只有在 80 kHz 以上才能看出一点微小的差别，这主要是因为 RHS-30 水听器本身的电容就比较大，电缆的引入对电导的影响较小；从图 4 也可以看出延长电缆越长引起的开路导纳变化越大。

引起上述现象的原因可通过分析图 1 得到，电缆的接入就相当于在水听器的输出端并入了一个电阻和一个电容，虽然电缆自身的电阻很小，但是在高频段也会有很大影响，并入的电阻使水听器的开路电阻减小，表现在导纳图中也就是电导的增

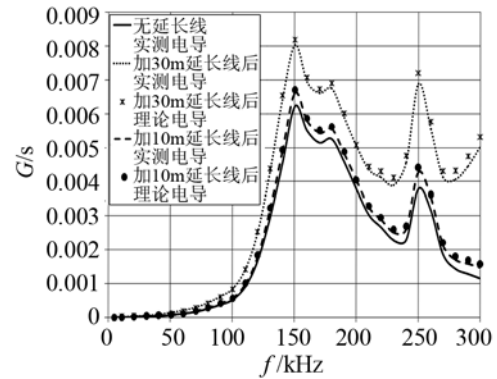


(a)

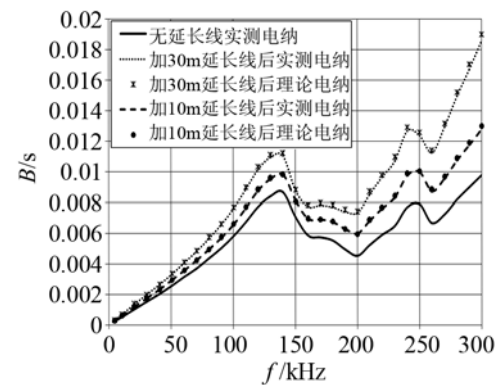


(b)

图 3 RHS-30 水听器加电缆前后导纳变化曲线
Fig.3 The variation of conductance and susceptance of RHS-30 hydrophone with and without extended cable



(a)



(b)

图 4 RHS-10 水听器加电缆前后导纳变化曲线
Fig.4 The variation of conductance and susceptance of RHS-10 hydrophone with and without extended cable

大, 并入的电容使水听器的容抗减小, 表现在导纳图中就是电纳增大。

3 灵敏度修正结果

以上分析表明, 根据第1节中复数修正理论对水听器加电缆后的阻抗修正与实际测量结果吻合得非常好, 接下来看看根据公式(19)进行灵敏度修正的结果。利用国防科技工业水声一级计量站的标准装置测量了加延长电缆前后水听器的灵敏度, 测量方法为自由场互易法, 测量不确定度为0.7 dB。图5给出了RHS-30水听器加10 m延长电缆前后灵敏度的修正曲线, 图6给出了RHS-10水听器分别加10 m、30 m延长电缆后灵敏度的修正曲线。图中实线表示由公式(19)计算得到的加延长电缆前后灵敏度的差值, 离散点表示实际测量得到的不加延长电缆和加延长电缆后灵敏度的差值, 虚线表示由

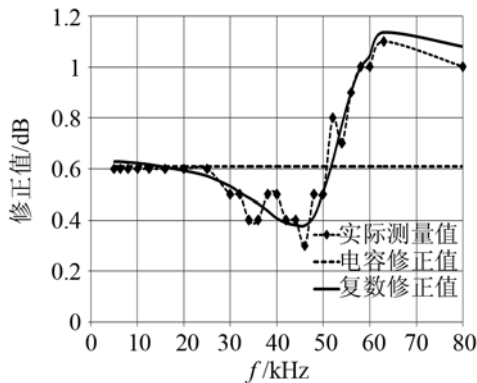


图5 RHS-30 加延长电缆前后灵敏度修正值

Fig.5 The sensitivity correction of RHS-30 hydrophone with and without extended cable

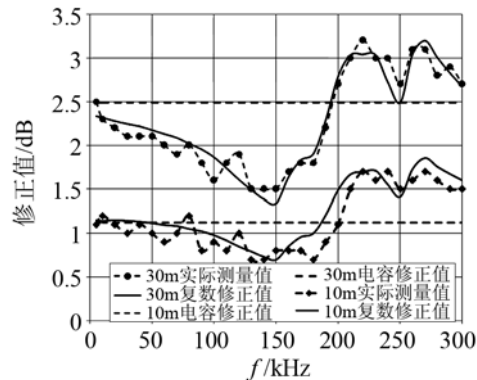


图6 RHS-10 加延长电缆后灵敏度变化值

Fig.6 The sensitivity correction of RHS-10 hydrophone with and without extended cable

纯电容修正公式计算得到的修正值。

从图5中实际测量值可以看出, 在25 kHz以下灵敏度降低约0.6 dB, 从25~50 kHz加电缆前后灵敏度的差值逐渐减小, 在50 kHz附近达到最小, 从

50 kHz开始差值又逐渐增大, 从阻抗分析可知50 kHz恰巧是RHS-30水听器的第一个谐振点, 在谐振点附近电缆引入的灵敏度变化较小, 这与公式(19)计算得到的复数修正值吻合得很好, 而根据电容修正法得到的修正值在整个频段都是0.6 dB, 在低频段(25 kHz)以下基本吻合, 但是25 kHz以上误差就比较大。从图6也可以看出类似规律, 上面一组曲线是加了30 m电缆时的修正结果, 电容修正值为2.5 dB, 下面一组是加10 m电缆的修正结果, 电容修正值为1.2 dB。由于RHS-10水听器本身的电容量比较小, 引入加长电缆后, 灵敏度的变化非常明显。对比图6中两条上下两组曲线发现, 电缆越长由纯电容修正带来的误差越大, 而复数修正法并不受此影响。综合这些数据可得, 利用水听器的复数阻抗和延长电缆的复数阻抗可以很精确地修正因电缆引入的灵敏度损失, 可以有效解决在谐振点附近纯电容修正不准确的问题。

4 结论

文章从理论上推导了复数阻抗法修正延长电缆引起的水听器灵敏度变化的方法, 通过实际测量水听器加电缆前后的灵敏度变化, 与理论计算值比较发现计算值与测量值符合得很好。该方法与传统的纯电容修正法相比, 修正结果更加接近实际测量值, 且能弥补电容修正在高频不准确的缺陷。

参考文献

- [1] International Electro technical Commission. IEC 60565: Underwater acoustics-hydrophones-calibration in the frequency range 0.01Hz to 1 MHz [S]. 2006.
- [2] 中国国家标准化管理委员会. GB/T3223-94, 声学 水声换能器自由场校准方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994. Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T3223-94, Acoustics free field calibration method of underwater transducer[S]. Beijing: China Standard Press, 1994.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. JJG 1017-2007. 1kHz~1MHz 标准水听器检定规程[S]. 北京: 中国质检出版社, 2007. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China(AQSIQ). JJG 1017-2007. Verification regulation of standard hydrophones in the frequency range 1 kHz~1 MHz[S]. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2007.
- [4] Hayman G, Gelat P N, Moore G R. A method for correcting the complex electrical impedance and open-circuit sensitivity of a hydrophone for the effect of added extension cable[J]. Measurement Science and Technology, 2007 (18): N47-N52.
- [5] Ali M Niknejad. 电磁理论: 高速模拟与数字通信电路设计[M]. 张为, 译. 北京: 电子工业出版社, 2011. Ali M Niknejad. Electromagnetics for high-speed analog and digital communication circuits[M]. ZHANG Wei, translate. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.