水声测量用声脉冲瞬态抑制方法的研究

陈毅 袁文俊 赵涵

(杭州应用声学研究所 浙江富阳 311400) 2001 年 4 月 16 日收到

摘要 脉冲声技术是一种很常用的水声测量技术,但由于脉冲声存在着瞬态过程,严重影响了它在低频下的使用。本文中研究的水声测量用声脉冲瞬态抑制方法,通过瞬态抑制等效消除换能器的瞬态过程,从而为在有限尺寸水域内扩展水声测量低频限创造了条件。 关键词 水声测量,声脉冲,瞬态抑制

Investigation on the sound pulse transient suppression method used in the underwater acoustic measurement

CHEN Yi YUAN Wenjun ZHAO Han

(Hangzhou Applied Acoustic Institute, Fuyang, Zhejiang, 311400)

Abstract Sound pulse technique is often used in the underwater acoustic measurement, but it has transients, so it can not be used in low frequencies. The sound pulse transient suppression method investigated in this paper removes the transients through the transient suppression. Consequently, the low frequency limitation of the small size tank for measurement will be expanded.

Key words Underwater acoustic measurement, Sound pulse, Transient suppression

1 引言

随着低频声呐的发展,低频换能器的校准 和水声材料构件性能的低频测试成为现代水声 校准测试技术的主要研究内容。由于脉冲声技 术具有能有效隔离边界反射声的优点,长期以 来它一直作为最常用的技术,在水声测量中发 挥着重要的作用。但脉冲声技术也有其缺点, 即存在脉冲前期和后期瞬态。所以,在小空间 水域中,这种技术可使用的低频下限较高。为 此,我们开展了水声低频测量技术和方法的研 究,主要有声脉冲瞬态抑制方法和多路径建模 技术。这两者是有所不同的,前者研究的主要 是换能器的发射信号,而后者则主要是水听器 的接收信号处理技术。

水声测量用声脉冲瞬态抑制方法^[1,2]就是 对换能器施加一特定的电压信号而使它在媒质 中产生无瞬态过程的声压信号(相当于为矩形 窗所截取的完整的正弦波形)。这样,实际测 量时换能器发送的脉冲所包含的周期数可以减 少,从而为在有限尺寸水域内测量低频限的降 低创造了条件。在本文中,该特定电压信号被

 \cdot 10 \cdot

21 卷 4 期 (2002)

称为"瞬态抑制激励电压信号"。

2 研究内容

2.1 声脉冲瞬态抑制方法

按文献 [1]、 [2],我们首先进行声脉冲 瞬态抑制方法的理论研究。如图1所示,建立 了一般换能器实际工作时的等效电路模型,其 中 C_b 为阻挡电容,L、C、R分别为动态 电感、电容和电阻, L_w、 R_w 分别为辐射电 感、电阻, R。为内阻, V(t) 为输入电压。 图 中左端是电路端, 右端是机械振动系统等效端 和声学端。辐射负载对换能器的影响在等效电 路中表示为辐射阻抗。



为了在 Rw 上得到幅值为 1V 、半周期 数为 n 、角频率为 $\omega_0(=2\pi f_0)$ 的正弦电压信 号, 需要求得"瞬态抑制激励电压信号" V(t) 的表达式。假定该正弦电压信号的脉冲宽度 $\tau = n/(2f_0)$, n为正整数。通过电路的反向 推导,我们得到了 V(t) 的表达式 [1] 为:

$$\begin{array}{ll}
A\sin(\omega_0 t + \phi) + M_{ramp} t + V_{dc}, & 0 \leq t \leq \tau \\
\begin{cases}
V_{dc}^{''}, & n \end{pmatrix} \# & t > \tau \\
M_{ramp}^{'}(t - \tau) + V_{dc}^{'}, & n \end{pmatrix} \widehat{n} \widehat{m} & t > \tau
\end{array} \tag{1}$$

$$\begin{split} V_{dc} &= \frac{(R+R_s)V_0}{L_w\omega_0} + \frac{C_b R_s V_0}{CL_w\omega_0} + \frac{V_0}{CR_w\omega_0} \\ M_{ramp} &= \frac{V_0}{CL_w\omega_0} \\ \phi &= \tan^{-1}(a/b) \\ A &= (a^2 + b^2)^{1/2} \\ a &= -\frac{RV_0}{L_w\omega_0} - \frac{R_s V_0}{L_w\omega_0} - \frac{C_b R_s V_0}{CL_w\omega_0} - \frac{V_0}{CR_w\omega_0} + \frac{LV_0\omega_0}{R_w} + \frac{C_b LR_s V_0\omega_0}{L_w} + \frac{C_b RR_s V_0\omega_0}{R_w} \\ &+ c_b R_s V_0\omega_0 \\ b &= V_0 + \frac{LV_0}{L_w} + \frac{RV_0}{R_w} + \frac{R_s V_0}{R_w} + \frac{C_b RR_s V_0}{L_w} + \frac{C_b R_s V_0}{CR_w} - \frac{V_0}{CL_w\omega_0^2} - \frac{C_b LR_s V_0\omega_0^2}{R_w} \\ M'_{ramp} &= \frac{2V_0}{CL_w\omega_0} \\ V'_{dc} &= \frac{1}{C} \left(\frac{V_0 \tau}{L_w\omega_0} + \frac{2V_0}{R_w\omega_0} \right) + \frac{2V_0}{L_w\omega_0} \left[R + \left(1 + \frac{C_b}{C} \right) R_s \right] \end{split}$$

由式(1)可知, V(t)的表示式非常复杂。 当 $0 \le t \le \tau$ 时, V(t)由斜坡电压 $M_{ramp}t$, 基座电压 V_{dc} 与正弦信号 $A\sin(\omega_0 t + \phi)$ 三部 分之和组成,且该正弦信号与所希得到的正弦 波形还有一相位差 ϕ 。当 $t > \tau$ 时,如果n为 应用声学

偶数,则 V(t) 为一基座电压 V''_{dc} ;如果 n 为 奇数,则 V(t) 由斜坡电压与基座电压 V'_{dc} 之 和组成。在推导过程中,我们假设在t=0时 满足以下四个条件,即(1) $i_1 = 0$; (2)i = 0; (3) 电容 C 上的电荷 q = 0; 和 (4) 电容 C_b 上

· 11 ·

的电荷 $q_b = 0$ 。可见,前三个条件容易满足, 对于第四个条件,由于电压源总含有内阻,所 以不可能完全满足。从而, V(t)的表达式是 近似的。因此,在实际测量中,为了提高 V(t)的精度应该选择输出阻抗 R_s 尽量低的功放。 同理,在 $t = \tau$ 时也同样需要满足上述四个条 件。

2.2 计算机模拟

对如图 1 所示的等效电路,取 $R_s = 1\Omega$ 、 $C_b = 0.07\mu$ F、 $C = 0.03\mu$ F、 $R = 20\Omega$ 、 L = 5mH、 $L_w = 8$ mH和 $R_w = 150\Omega$,则 该电路模型的谐振频率在 12kHz 左右。对它作 用幅值为 1V 的 5 周 (n = 10)12kHz 正弦脉冲 电压信号,在 R_w 上将得到如图 2 所示的电压 信号的波形。可见,该波形在第 4 个周期几乎 完全达到了稳态,亦即该换能器的品质因数 Q为 3。



图 2 $R_s = 1\Omega$ 时在 5 周 12kHz 幅值为 1V 的正弦 脉冲信号激励下等效电路的 R_w 上输出的电压信号

假设我们希望在 R_w 上得到的输出电压信 号是一个幅值为 1V 的 5 周 12kHz 正弦信号, 即取 $V_0 = 1V$ 、 $f_0 = 12$ kHz 和 n = 10,则 $\tau = 0.4167$ ms。由式(1),我们得到了 V(t) 的 波形,如图 3 所示。(为了使波形的表达更加 清晰,我们让时间轴的零点稍稍偏离了一点。) 可见,在 $0 \le t \le 0.4167$ ms 时,V(t)由一个 基座电压、斜坡电压与正弦信号三部分之和组 成;当 t > 0.4167ms 时,由于 n 为偶数,所以 V(t) 为一基座电压。

将该信号作用于等效电路,在 R_w 上将得 到如图 4 所示的电压信号。该信号波形近似于 为矩形窗所截取的幅值为 1V 的 5 周 12kHz 正 弦信号。显然,瞬态抑制已基本上消除了图 2 中所示的明显的瞬态过程。所以,对如图 1 所 示的一般换能器实际工作时的等效电路模型, 在 $R_s = 1\Omega$ 、 $f_0 = 12$ kHz 时瞬态抑制取得了很 好的效果。同样,在以上各相应条件下,我们 对低于谐振频率的各频率点(如 8、 9、 10、 11 kHz)分别进行了声脉冲瞬态抑制方法的计 算机模拟,均取得了很好的瞬态抑制效果。





图 3 $R_s = 1\Omega, n = 10, f_0 = 12$ kHz 时的 V(t) 波形

图 4 在 V(t) 作用下 R_w 上输出的电压波形

2.3 等效电路各参数的非线性最小二乘拟合

对实际工作的换能器,为了对它作用"瞬态抑制激励电压信号",就必须求得换能器等效电路的各参数 C_b 、 C、 R、 L、 L_w 和 R_w 的实际值。通常获得换能器等效电路各参数的方法是分别测量换能器在空气和水中的阻抗(或导纳),再通过计算求得等效电路各参数的值。在这儿,我们采用非线性最小二乘问题的一个自适应算法 ^[3]来拟合测得的阻抗曲线,通过获得一组浸于水中的换能器在不同频

 \cdot 12 \cdot

率下的阻抗数据,来求得精确的换能器等效电路的各参数值。

根据实际情况, 令 $b_1 = L$ 、 $b_2 = C$ 、 $b_3 = R$ 、 $b_4 = L_w$ 、 $b_5 = C_b$ 和 $b_6 = R_w$, 则 $\mathbf{b} = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6)^T$ 。接下去, 取频率 f作为变量x。对如图 1 所示的一般换能器实际工作时的等效电路模型的阻抗进行非线性最小二乘拟合,则拟合的函数对象为 $f(x_i; \mathbf{b})$, 其数学表达式为

$$f(x_i; \mathbf{b}) = \frac{1}{j2\pi x_i b_5 + \frac{1}{j2\pi x_i b_1 + \frac{1}{j2\pi x_i b_2} + b_3 + \frac{j2\pi x_i b_4 b_6}{j2\pi x_i b_4 + b_6}} - y_i$$
(2)

式中含有 6 个未知变量 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 b_5 和 b_6 。假设实验数据 $y_i(i = 1, 2, \dots, m, m > 6)$ 是在谐振频率附近测得的置于水中的换能器的阻抗值 (包含模和相角)。因此, 残差为

$$r_i(\mathbf{b}) = \frac{1}{j2\pi x_i b_5 + \frac{1}{j2\pi x_i b_1 + \frac{1}{j2\pi x_i b_2} + b_3 + \frac{j2\pi x_i b_4 + b_6}{j2\pi x_i b_4 + b_6}} - y_i$$
(3)

最小二乘拟合的目标是要找到一个 b*, 使残差的平方和为最小,即

$$\mathbf{Q}(\mathbf{b}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m} r_i^2(\mathbf{b}) = \frac{1}{2} \mathbf{R}(\mathbf{b})^T \mathbf{R}(\mathbf{b})$$
$$= \min$$
(4)

由于 **R**(b) 为非线性函数, 所以最小二乘 拟合是非线性的。在这儿, 拟合初始值由阻抗 分析仪测得的换能器的阻抗数据利用极限近似 原理算得; 拟合的准确值采用实际测得的阻抗 值。采用的拟合算法是自适应非线性最小二乘 算法。该算法结合了 LM 算法和拟 Newton 算 法的优点,利用逐次生成 $A^{(k)} + \mu_k D_k^2$ 来逼近, 最终使解 b 的残差 Q(b) 的平方和为最小。通 过拟合,得到了 $\mathbf{b} = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6)^T$ 的一 组值。因此,也就得到换能器的等效电路各参 数 C_b 、 L、 C、 R、 L_w 和 R_w 的一组准确 值, 显然, 这组值比通过极限原理近似计算得 到的值更接近于换能器的实际情况。图5给出 的是球型换能器经拟合后得到的阻抗曲线与阻 抗分析仪测得的阻抗曲线的比较。如图可知, 两者的吻合程度还是相当一致的。由这组参数 值,我们就可以通过计算得到实验所需的"瞬 杰抑制激励电压信号"。

如果水听器接收到的声压波形没有所 希望的那么完美,还可以对该波形进行再



次拟合,但为此须求解等效电路的一个四阶微 分方程的解析解。J.C.Piquette利用一种叫做 SMPTM的符号数学计算程序,解得了该表达 式。但由于它过于复杂,并未在参考文献中给 出。我们认为该方法虽然直接但过于麻烦,可

应用声学

 \cdot 13 \cdot

以考虑在频域上求解。以等效电路的传递函数 的表达式作为拟合的函数对象;准确值 y 是 换能器的传递函数,它通过换能器在不同频率 上发射"瞬态抑制激励电压信号",由水听器 接收声信号,再对接收到的信号进行归一化求 得的;拟合初始值采用阻抗拟合得到的各参数 值。通过波形拟合,可在一定程度上修正阻抗 拟合的偏差,得到更接近于实际换能器的电路 参数值。

2.4 实验研究

利用上面的方法,我们得到了 *\phi*88mm 球型换能器的等效电路各参数的值,在表 1 中给出了球型换能器的各参数值。

表 1 球型换能器的等效电路各参数的值

	$C_b(\mathbf{F})$	$L(\mathrm{H})$	$R(\Omega)$	$C(\mathrm{F})$	$L_w(\mathrm{H})$	$R_w(\Omega)$
初始值	$1.49e^{-8}$	$8.79e^{-4}$	52.04	$4.15e^{-8}$	$6.7e^{-4}$	487.2
阻抗拟合后的值	$4.3e^{-8}$	0.0025	52.0	$1.23e^{-8}$	$9.33e^{-4}$	487.2

实验系统框图如图 6 所示。换能器和水听 器分别悬挂在 8×5×5m³水池的中间,在中 轴线上,入水深度为 1.7m,相距 0.86m。计算 机通过 IEEE488 总线控制任意波形发生器和 数字采集仪工作。在计算机的控制下,任意波 形发生器产生"瞬态抑制激励电压信号",经功 放放大后激励换能器工作。换能器发射的声波 在水中传播,由水听器进行接收。水听器接收 到的开路电压信号经测量放大器放大和滤波器 滤波后输入数字采集仪,在计算机控制下进行 数字采集。同样,取样到的电流、电压信号也 输入到数字采集仪进行数字采集。采集到的数 据通过 IEEE488 总线传输给计算机,由计算机 对采集到的数据进行所需的各种处理。处理的 结果由打印机输出。

球型换能器的谐振频率约为 25kHz 。实验时, 计算机控制任意波形发生器分别输出脉冲 宽度为 8 周频率为 25kHz 的正弦脉冲信号和 "瞬态抑制激励电压信号",经功放放大后由 球型换能器发射出去。由数字采集仪采集到的 水听器开路输出电压信号如图 7 所示。

比较以上波形,我们知道,在 25kHz 频率 点上经瞬态抑制后得到的声压波形虽有一定的 扭曲,但瞬态过程已得到了明显的改进。球型



图 6 水声测量用声脉冲瞬态抑制方法的实验系统图

· 14 ·





换能器的 Q 值已由 5 降到了 1 。这证实了声 脉冲瞬态抑制方法是有良好的实际效果的。

2.5 校准结果

最后,为进一步验证声脉冲瞬态抑制方法 的有效性,利用该方法在水池中实际校准了该 球型换能器和某纵向振动换能器的发送电压 响应,校准结果在图 8 中给出。结果表明, 在同频率上使用声脉冲瞬态抑制信号与使用正 弦脉冲信号校得的结果非常一致,相差一般在 0.4dB 以下。在正弦脉冲信号不能工作时,对 不同的换能器瞬态抑制信号在低频上还作了不 同程度的拓展。如球型换能器由 2500Hz 延伸 到 1250Hz,而纵向振动换能器则由 3kHz 扩展 到了 2kHz 。

3 结论

本文中研究的水声测量用声脉冲瞬态抑制 方法是进行换能器低频校准的有效方法之一, 应用声学



图 8 用正弦脉冲信号和瞬态抑制信号测得的发送
 电压响应 [级] 的曲线 (基准值: 1μPa·m/V)
 (a) 球型换能器 (b) 纵向振动换能器

也是降低大面积水声材料构件声特性测量频率 的有效手段之一。实验取得了很好的效果,但 由于以下几方面的原因,实验结果与理论预期 仍有一定差距: (1)因 R_s 不等于零, 声脉冲 瞬态抑制方法的理论本身是近似的;(2)"等 效电路"不可能真正等效于换能器这样一个复 杂的系统;(3)由于功放的非线性,作用于换 能器上的 V(t) 并不是所需的"瞬态抑制激励电 压信号"; (4) V(t) 在 $t > \tau$ 时的激励电压应 该持续到无穷长,但实际测量往往取一定的时 间长度;(5)水听器的频响不一定是平坦的, 在 V(t) 的 滤波器也存在着一定的瞬态。 三个组成部分中, 斜坡电压占有很大的比重, 正弦电压信号的比例则相对较小。由于功放动 态范围的限制,对发射信号的幅度有一定的要 求。加上功放的输出阻抗与换能器也不匹配。 所以,由水听器接收到的声压信号的信噪比较 低,可能会影响实际测量的精度。因此,在实 (下转第 48 页)

 $\cdot 15 \cdot$

关注。超声强化溶液结晶过程的研究不仅有 利于溶液结晶理论的发展、而且对提高结晶速 率、缩短结晶时间、控制晶体粒径的分布,提高 产品质量和结晶设备的生产能力具有重要的实 际意义,已在一些领域显示出它的优越性。但 由于超声处理溶液结晶过程影响的因素较多, 如超声的频率、超声的功率、超声的作用时间 等、再加上超声处理的效果与被处理的对象密 切相关,若操作参数选择不当,不但不利于溶 质的结晶过程和产品的质量、而且还会有相反 的作用。超声技术是一门较新的多学科交叉的 边缘学科技术、很多理论尚需进一步完善。其 应用于强化溶液结晶过程、促进溶液结晶成核 和结晶生长的机理,到目前为止还没有定论, 尚需进一步的探讨。在很多溶液体系如一些食 品溶液体系中的应用还处在经验的状态。超声 参数和超声对被处理对象的特性所产生的影响 之间的确切关系还没有建立,尚需加强这方面 的基础研究。随着研究的进一步深入、超声场 强化溶液结晶技术必将有广阔的前景。

参考文献

- Mullin J. Crystallization. London: Butterworths-Heinemann, 1993. 68-78.
- Lorimer J P, Mason T J. Chem. Soc. Ser., 1987, 16(2): 239-274.
- 3 Mason T J. Practical Sonochemistry-A Using Guide To Applications in Chemistry and Chemical Engineering. England: Ellis Horwood Limited. 1991. 29.
- 4 Macleay R Q, Holoroyd L V. J.Appl.Phys., 1961, 32(3): 449-453.
- 5 丘泰球. 声学技术, 1993, 12(1): 15.
- 6 刘晓庚. 商业科技开发, 1997, (3): 32-33.

(上接第 15 页)

际使用中还需设法提高接收信号的信噪比。

参考文献

 Piquette J C. J.Acoust.Soc.Am., 1992, 92(3): 1203– 1213.

- 7 赵茜, 高大维. 应用声学, 1997, 16(3): 26-30.
- 8 Spirov N, Goravon D, Lesichkov V. Khranit Prom., 1973, 22(5): 30.
- 9 王伟宁, 吕秉玲. 无机盐工业, 1990, (3): 27.
- 10 Action E, Morris G J. World Patent WO92/20420.
- 11 Roberts T, James M J. Leatherhead Food Research Association(UK) Research Report, 1992: 544.
- 12 Wiltshire M. SonochemistrySymp, R.S.C. Annu. Congr, Manchester, UK, 1992.
- 13 Jullan D, McClemenis. Trends in Food Science & Technology, 1995, 29(6): 293-299.
- 14 赵继华. 轻金属, 2000, (4): 29-32
- 15 Midler. US Patent 3510266, 1970.
- 16 方瑞斌, 赵逸云. 云南化工, 1998, (2): 21-23, 27.
- 17 丘泰球,张喜梅. 甘蔗糖业, 1996, (2): 38-42.
- 18 赵茜, 高大维. 食品工业科技, 1997, (5): 71--72, 65.
- 19 Kapustin A P. The Effects of Ultrasound on The Kinetics of Crystallization. New York: Consultants Bureau, 1975. 36.
- 20 张喜梅, 丘泰球. 化学通报, 1997, (1): 44-47.
- 21 丘泰球,张喜梅. 华南理工大学学报 (自然科学版), 1996, 24(6): 107-111.
- 22 Mason T J, Lorimer J P. Sonochemistry: Theory, Applications and Uses of Ultrasound in Chemistry. England: Ellis Horword Limited. 1982.
- 23 Fellix M P, Ellis A T. Appl. Phys. Lett., 1971, 19 (2): 48.
- 24 [荷] 霍尼编,杨倬,吴广礼译、制糖工艺学原理,第二卷 上册.北京:中国财政经济出版社, 1962.115-221.
- 25 赵之平,陈澄华,王能勤. 化肥工业, 1997, 24(6): 18-20.
- 26 Charpentier B A, Sevenants M R. Supercritical Fluid Extraction and Chromatography-Techniques and Application ACS Symposium Series366, Colorado U.S. 1988. 50–53.
- 27 陈钧. 全国超临界流体技术学术及应用研讨会论文集. 石 家庄, 1996. 50-52.

- 2 Piquette J C. J.Acoust.Soc.Am., 1992, 92(3): 1214– 1221.
- 3 赵涵. 声学与电子工程, 1998, (2).
- 4 陈毅, 袁文俊, 赵涵. 声学与电子工程, 2000, (1).

 \cdot 48 \cdot

21 卷 4 期 (2002)

 \sim