文章编号: 1000-3630(2001) 01-0039-03

高精度超声波油水界面计的精度分析和神经网络逼近

靳海水, 卢　杰, 梁军汀, 朱士明
(同济大学声学研究所, 上海 200092)

摘　要: 首先介绍了高精度油水界面计的原理, 通过分析找到了影响其精度的重要因素为长度测量的不准确, 用神经网络逼近测量结果, 取代直接解析计算, 得到了系统误差小于 1mm 的测量精度。
关键词: 超声波界面计; 精度; 神经网络
中图分类号: TB51^{+} 4　　文献标识码: A

The accuracy analysis of ultrasonic oil-water interface meter and its neural networks fitting

JIN Hai-shui, LU Jie, LIANG Jun-ting, ZHU Shi-ming
(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the paper the principle and measuring method of high-accuracy ultrasonic oil-water interface meter are introduced, followed by its accuracy analysis. In order to eliminate the influence of incorrectness of the length measurement to the accuracy of interface height, a forward neural network is used to simulate the height equation. The result shows that the accuracy is better than 1mm
Key words: ultrasonic; interface meter; accuracy; neural network

1　超声波油水界面计测试装置及原理

超声界面计的测试装置如图 1 所示, 它是由上锅(pot)、下锅和中间垂直的空心连通圆管而组成一个哑铃状的封闭容器。超声界面计由同济大学自行设计, 委托加工。容器选用不锈钢材料制造, 在中间垂直的空心连通圆管的壁上开有玻璃窗, 以便用钢尺直接测量其中液面的高度。容器内装满两种液体, 比重较小的液体 2 位于界面 A 的上方, 比重较大的液体 1 位于界面 A 的下方。超声界面计共装有 3 对压电晶体超声探头: 第 1 对探头测量声波穿过两种液体的声时 T, 探头 B 发射、探头 C 接收, 界面计垂直高度为 L; 第 2 对探头测量声波在液体 1 中传播的声时 T_1, 探头 F 发射、探头 G 接收, 其间距为 L_1; 第 3 对探头测量声波在液体 2 中传播的声时 T_2, 探头 D 发射、探头 E 接收, 其间距为 L_2。超声波在上锅、下锅和垂直圆管中传播时的声时、距离、和声速间的关系为: $V_1 = L_1/T_1$, $V_2 = L_2/T_2$, $T = X/V_1 + (L - X)/V_2$。经简单推导可得界面高度表达式为:

$$X = (LT_2 - L_2T)/\left(T_2 - \frac{L_2}{L_1}T_1\right) \qquad (1)$$

可见, 当 $L_1 = L_2$, $T_1 = T_2$ 时, 两种液体声速相同, 而无法测量。这种情况在上下为同一种液体或成分非常相近时会发生。

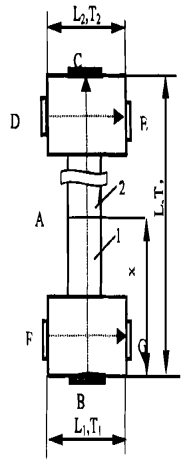

图 1　界面计测试原理图

2　测试结果和精度分析

为检验界面计的精度, 在自己设计的界面计上选用水和航空煤油为介质, 对其界面高度进行了 50 次测量, 限于篇幅这里略去测量结果的详细列表。因为声速对温度非常敏感, 为了使样本覆盖较大声时范围, 在两天之内的不同温度下进行了测量。其中 T、T_1、T_2 为从单片机上直接读到的声时。用 H 表示钢尺从垂直钢管外测得的界面高。测量的目的

收稿日期: 2000-09-29; 修回日期: 2000-11-30
作者简介: 靳海水(1965-), 男, 山西人, 工学硕士, 讲师, 研究方向: 神经网络和模式识别及其在自适应控制和超声工业中的应用。

有两个, 一个是检验偶然误差, 另一个是检验系统误差。检验偶然误差的方法是进行重复性实验, 即将液面固定在一定的高度上, 对声时进行多次测量, 用公式(1)计算高度, 并观察计算值间的差异。试验表明该系统的偶然误差小于 1mm, 能够满足要求。例如对标准高度为 719mm 界面进行 10 次测量其均值为 719. 15mm, 方差为 0. 1566mm。

检验系统误差的方法是将液面置于不同的高度, 然后用公式(1)的计算值和实际值 H 比较。经 50 个高度值的测量, 其误差的均值为 3. 86mm, 均方差为 5. 79mm。显然不能满足 1mm 的要求。以下对系统误差的来源和大小进行分析。

由式(1)可知, 高度 X 的精度由 3 个时间参数 T、T_1、T_2 和三个距离参数 L、L_1、L_2 决定, 且各参数相互独立。假如不考虑温度变化引起的热胀冷缩的影响, 距离参数 L、L_1、L_2 一旦确定, 在测量中将不再变化, 因此由此带来的误差属于确定性误差, 也属于系统误差。L、L_1、L_2 的测量误差对界面高度误差的传递系数为[1]:

$$\frac{X}{L}=\left(\frac{T_2}{T_2-\frac{L_2}{L_1}T_1}\right) \tag{2}$$

$$\frac{X}{L_1}=\left(\frac{-1}{T_2-\frac{L_2}{L_1}T_1}\right)^2(LT_2-L_2T)\frac{L_2T_1}{L_1^2} \tag{3}$$

$$\frac{X}{L_2}=\left(\frac{1}{T_2-\frac{L_2}{L_1}T_1}\right)^2\left[-T\left(T_2-\frac{L_2}{L_1}T_1\right)+\frac{T_1}{L_1}(LT_2-L_2T)\right] \tag{4}$$

用 L、L_1、L_2 分别表示 3 个距离测量的最大误差。L 用钢尺单次测量, 其最小刻度为 1mm, 故这里假定 $L=0.5$mm, 距离 L_1 和 L_2 用游标卡尺单次测量, 卡尺的最小刻度为 0. 02mm, 故假定 $L_1=L_2=0.01$mm。

声时 T、T_1、T_2 的测量采用 随机多次平均多次测量 技术, 在文献[2]中有详细介绍。当声时测量出现系统误差时, 即声时测量值的平均值和真值有偏差时, 会对 X 的测量值带来系统误差。当声时测量值由于多次测量而出现偶然误差时, 对 X 值带来偶然误差。两类误差的传递系数都可以用以下公式计算:

$$\frac{X}{T}=\left(\frac{-L_2}{T_2-\frac{L_2}{L_1}T_1}\right) \tag{5}$$

$$\frac{X}{T_1}=\left(\frac{1}{T_2-\frac{L_2}{L_1}T_1}\right)^2\frac{L_2}{L_1}(LT_2-L_2T) \tag{6}$$

$$\frac{X}{T_2}=\left(\frac{1}{T_2-\frac{L_2}{L_1}T_1}\right)^2\left[L\left(T_2-\frac{L_2}{L_1}T_1\right)-(LT_2-L_2T)\right] \tag{7}$$

表 **1** 误差传递系数和误差影响值

($L=902.45$mm, $L_1=100.6$mm, $L_2=101.6$mm, $T=641$ s, $T_1=67.504$ s, $T_2=80.018$ s)

误差传递系数	$\frac{X}{L}$	$\frac{X}{L_1}$	$\frac{X}{L_2}$	$\frac{X}{T}$	$\frac{X}{T_1}$	$\frac{X}{T_2}$
	6. 75	- 36. 80	- 17. 68	- 8. 57	54. 84	22. 45
误差影响值/mm	$\frac{X}{L}L$	$\frac{X}{L_1}L_1$	$\frac{X}{L_2}L_2$	$\frac{X}{T}T$	$\frac{X}{T_1}T_1$	$\frac{X}{T_2}T_2$
	3. 88	- 0. 37	- 0. 18	- 0. 0083	0. 0509	0. 0236

根据文献[2], 对声时进行多次平均测量时, 均方差为 1ns 即声时测量的均方差 σ_T、σ_{T_1}、σ_{T_2}取 1ns。当 $L=902.45$mm, $L_1=100.6$mm, $L_2=101.6$mm; $T=641$ s, $T_1=67.504$ s, $T_2=80.018$ s 时, 传递系数和误差影响值参见表 1。由表 1 可见, 由高度 L 的测量误差引起的系统误差最大可达 3. 88mm。而$\frac{X}{L_1}$和$\frac{X}{L_2}$的值都为两位数, 说明 X 的精度对L_1、L_2 的误差最为敏感, 因此要提高测量精度, 就必须消除公式(1)中的 L、L_1、L_2 测量值的误差。即必须使 L、L_1、L_2 的取值非常准确。T、T_1、T_2 的误差传递系数分别为- 8. 57、54. 84 和22. 45, 说明 X 的精度对声时 T、T_1、T_2 非常敏感, 如当 T_1 的测量有 1 s 的误差时, 会带来高度上 50. 87mm 的误差。因此声时测量也必须准确。

由表 1 可知 T、T_1、T_2 引起偶然误差最大为 0. 0509mm, 能够满足 1mm 的偶然误差的要求。然而, 声时测量时, 本身还存在系统误差。根据以前所做的研究[2]可知, 声时 T、T_1、T_2 本身的测量中, 电路会产生时间延迟, 其大小和导线线路的长短及单片机有关, 压电换能器中也会产生时间延迟, 这些时间延迟可以通过仪器进行测试, 但其误差比偶然误差高出两个量级, 其带来的 X 的系统误差也在 mm 级。因此必须从测量结果中扣除这些时间延迟才能使得声时测量准确, 但在实际操作中正确估计这些时间延迟十分困难。

在实验的开始阶段, 我们用常规的最小二乘法对距离和声时进行校正, 具体做法是: 在一定的约束范围内寻找最佳的 T、T_1、T_2 及 L、L_1、

L_2, 使得不同测量高度时的误差平方的平均值(MSE)最小, 可表示为公式(8):

$$\min_{T,\ T_1,\ T_2,\ L,\ L_1,\ L_2} \frac{1}{N} (H - X_0)^2 \qquad (8)$$

式中 N 为测量次数, 即样本数, 这里为 50。X_0 为经过校正后按公式(1)的计算值。

经寻优后的一组可接受的结果为 $T = 0.5$ s; $T_1 = -0.05$ s; $T_2 = 0.25$ s; $L = 0$, $L_1 = 0$; $L_2 = 0$, 修正后误差的均值为 0.18mm, 均方差为 2.97mm, 显然不能满足 1mm 的误差要求, 原因分析如下。

将公式(1)改写为:

$$X = \frac{L - T(L_2/T_2)}{1 - (L_2/T_2)(L_1/T_1)} = \frac{L - TV_2}{1 - V_2/V_1} \qquad (9)$$

由式(9)可知, 在小范围内调整 L、L_1、L_2 和 T、T_1、T_2 时, 在最佳值的附近会出现时间和距离校正值的偶合, 即出现许多的(T, L), (T_1, L_1), (T_2, L_2)组合, 这些组合使得公式(9)中的 V、V_1 和 V_2 稳定在一定的值上, 从而无法获取 L、L_1、L_2 和 T、T_1、T_2 的最佳估计值。

3 界面高度的神经网络逼近

为了解决上述难题, 我们决定直接用神经网络拟合来替代公式(1), 表示如下:

$$X1 = NN(T, T_1, T_2) \qquad (10)$$

通过对一定数量的样本(H, T, T_1, T_2)进行训练, 得到一个恰当的网络, 代替公式(1)。训练使用的行为函数为

$$MSE1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (H_i - X1_i)^2 \qquad (11)$$

公式(10)中并没有出现 L、L_1 和 L_2, 因为如前所述在实际的测量过程对不同的测量样本中它们是不变的。这样就可以消除由 L、L_1 和 L 的测量误差带来的系统误差。

将测量结果的 50 个样本分为两组, 每 3 个样本值中取出 2 个做训练样本, 即 34 个样本用于训练网络, 其余 16 个样本用于验证。网络选用普通 3 层前向网络, 第一层 3 个节点为 3 个声时输入, 第 2 层为隐层, 有 10 个节点, 用正切 S 型传递函数, 第 3 层为输出层, 有 1 个节点, 用线性传递函数, 输出界面高度值, 即网络为 $NN(3, 10, 1)$。训练前先将三个声时值做标准化处理[4], 即分别使三个声时的测量值样本的均值为 0, 均方差为 1, 用 MATLAB 中的工具箱提供的函数进行训练后得到的网络参数如下[3]:

$W1 = [$ 15.0712 −23.5484 15.6183
12.692 34.6828 53.1821
−21.0618 −74.9654 −35.8187
103.7072 24.0726 −63.382
211.7021 −37.8273 −47.0125
−0.1233 −0.0011 −0.05
−57.5674 84.77 14.4843
−3.9115 −5.072 −4.7995
72.6239 127.2976 126.6896
33.1876 95.2983 16.036$]$

$B1 = [$ −38.9604 −21.6607 65.1257
−65.6573 −0.8231 −0.0108
39.6708 −6.6254 110.4271
49.1962$]$

$W2 = 1000^* [$ −0.0032 0.1314 −0.0011
−0.0046 0.0005 1.6666 0.0006
−0.0092 −0.1289 0.0006$]$

$B2 = [$443.732$]$

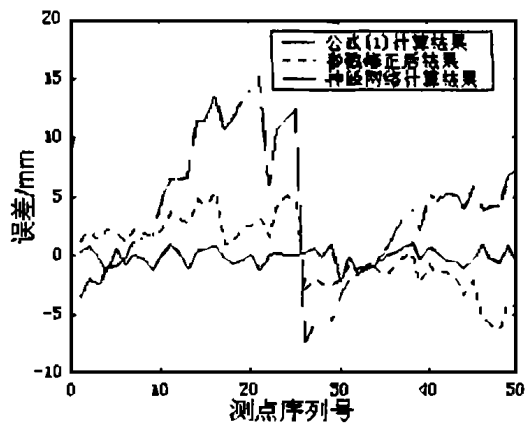

图 2 不同方法的误差比较

上述网络训练时误差的均方差为 0.673mm。用 16 次的观测值对该网络进行验证, 其误差的均方差为 0.8648mm。可见用网络模拟有足够高的精度和泛化能力。

将该网络逼近整个样本时, 误差的均值为 −0.16mm, 均方差为 0.74mm, 符合 1mm 的要求。且比用公式(1)精度有大幅度的提高。

为使结果清晰可见, 将直接用公式(1)的计算结果, 参数修正后用公式(1)的计算结果以及用神经网络拟合的结果画在一起, 见图 2。可见神经网络的拟合结果明显优于其它两者。

(下转第 44 页)

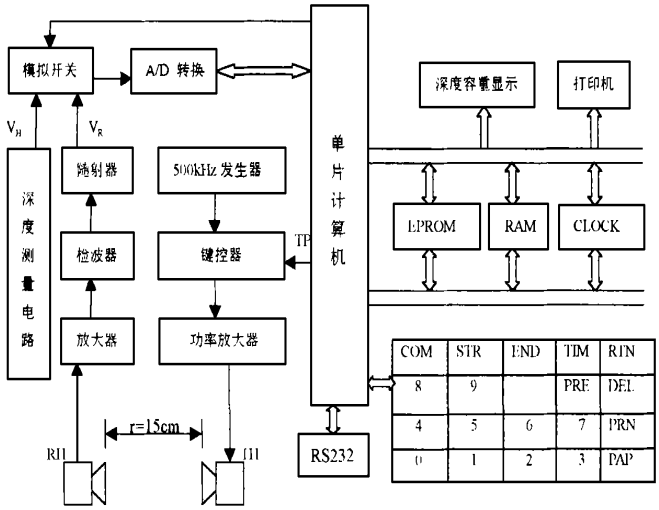

图 2

的数据。打印机开头打印的几行是测量数据时的年月日和时分, 这是单片机系统中的日历/时钟芯片 CLOCK 提拱的, CLOCK 具有断电保护功能。

图 2 中的 EPROM 是单片机的程序存储器, 4 6键盘用于设置公式的常数, 控制工作状态(如是否与 PC 机通讯, 要不要打印等) , 调整日历/时钟芯片等功能。

4 实验结果与分析

超声波浮泥重度测量仪研制成功以后, 我们对已知的 4 种浮泥重度样本(含清水)进行了测量。调整标定系数 K = 1.40 时, 测量仪显示值与已知重度值很接近。实验结果见表 1 所示。需要说明的是, 重度测量仪能显示的重度值为 4 位数字, 这反映了重度测量仪的分辨率可达 0.01kN m^{-3}。但标定系数只能精确到 3 位有效数字, 所以重度测量精度只能达到 0.1kN m^{-3}。

表 **1** 实验结果

样本类型	已知重度/(kN m^{-3})	标定系数	重度计显示/(kN m^{-3})
自来水	10.00	1.40	10.00
浮泥样本 1	11.17	1.40	11.05
浮泥样本 2	13.13	1.40	13.19
浮泥样本 3	14.87	1.40	16.07

从表 1 数据可以看出, 对于重度为 10.0 kN m^{-3}~ 14.0 kN m^{-3}的浮泥样本, 超声波重度测量仪实际测量值与已知值十分接近, 而重度为 14.87kN m^{-3}的浮泥样本的测量值偏离已知值较大(相对误差 8%)。这是因为浮泥重度增加到一定值时, 接收声波幅度太小, 导致检波电压的非线性。如要提高浮泥重度的测量精度, 可以再增加发射换能器的发射功率。对航道水底浮泥测量来说, 主要关心的是 10.00kN m^{-3}~ 14.00 kN m^{-3}范围内的浮泥重度, 所以本仪器是实用的。

参考文献:

[1] 张叔英等. 声学悬浮泥砂观测系统的研制和应用[J], 海洋学报, 1998, 20(5): 114-119.

[2] 凌鸿烈等. 长江口和杭州湾浮泥声参数测量[J]. 声学技术, 1997, 16(4): 194-197.

[3] Zhang S. Y. et al. Geoacoustic model and acoustic reflection properties of fluid mud layer in Chang jiang Estuary and Hangzhou Bay[J]. Chinese Journal of Acoustics, 1999, 18(1): 1-9.

(上接第 41 页)

4 结 论

由于声时的测量具有很高的精度(Precision), 即声时测量的偶然误差很小, 因此系统的偶然误差很小。这是高精度超声波油水界面计赖以生存的基础。使用神经网络对测量结果进行拟合, 消除了距离测量误差对界面高度带来的影响, 大大减小系统误差, 提高了测量精度。实测表明该方法是可行的。

另外, 当介质不均匀, 或两种液体的界面出现由于相互溶解或杂质沉积时, 使用公式(1)都会带来很大的误差。而神经网络拟合却提供了很好的手段。这将是下阶段研究的内容。

参考文献:

[1] 腾敏康. 试验误差与数据处理[M]. 南京: 南京大学出版社, 1989, 24-25: 167-197.

[2] 朱士明, 刘镇清等. 提高声时测量精度的过零检测数字平均法[J]. 声学技术, 1990, 9(3): 36-40.

[3] 张志涌, 刘瑞桢, 杨祖樱. 掌握和精通 MATLAB[M], 北京航空航天大学出版社, 1997, 304-305.

[4] D. L. Yu, J. B. Gomm, D. Williams. Neural model input selection for a MIMO chemical process[J]. Engineering applications of Artificial intelligence, 2000, 13: 15-23.