

电容式传感器测量动态容器中液位的方法研究

陆贵荣^{1,2}, 朱睿¹, 陈树越^{1,2}

(1. 常州大学 信息科学与工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州市过程感知与互联技术重点实验室, 江苏 常州 213164)

摘要: 文章提出了一种测量动态容器中液体液位的实用传感方法; 该法采用了一种新的传感器结构, 它主要由装在圆柱形框架内壁的 3 个电极构成; 在不同液位下, 采集容器不同倾角时电极之间电容值并送入径向基网络进行训练, 构建网络模型应用于实际液位测量; 研究结果证明所设计的传感器及其数据融合方法可以在容器不同倾角状态下均能对同一液位正确评价, 体现出良好的应用前景。

关键词: 液位测量; 电容式传感器; 径向基网络; 动态容器; 方法研究

Method Research for Measuring Liquid Level in Dynamic Container with a Capacitive Sensor

Lu Guirong^{1,2}, Zhu Rui¹, Chen Shuyue^{1,2}

(1. School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;

2. Key Laboratory for Process Perception and Interconnected Technology, Changzhou 213164, China)

Abstract: In this paper, a practical sensing approach for monitoring the liquid-level in a container is presented. In order to realize the method, a new structure sensor has been developed. The sensor consists of three electrodes installed on the inner wall of the cylindrical body. The capacitances between electrodes are determined in container under different incline condition and sent into RBF network for training. A network model has been got and applied to estimate a known liquid-level. The result of this research proves that the designed sensor and data fusion method can be used to measure the liquid-level in the container unrelated to inclination. The method shows good application prospect.

Keywords: liquid level measurement; capacitive sensor; RBF network; dynamic container; method research

0 引言

液位测量传感器多种多样, 如浮子式传感器、电容式传感器、差压式传感器和超声波传感器等^[1]。一般来说, 传统的液位传感器往往用于测量静态垂放状态下容器中液体液位, 但当测量过程中容器处于动态或静态垂放或倾斜时, 容器中液体的情况将会改变^[2]。因此, 使用传统传感测量液位变得困难, 在实际应用中, 流行的测量方法是省略容器倾斜引起的误差或者是使用额外的补偿装置^[3]。

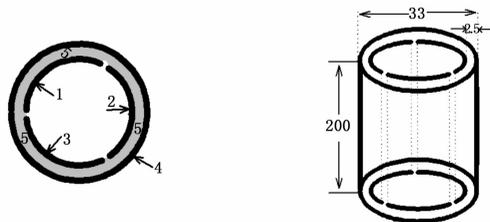
径向基神经网络作为一种具有良好的曲线拟合能力的数据处理工具, 被应用于地下水位预测中^[4-5]。也有文献中将降雨、径流和人工开采量作为输入变量, 对研究区域内的承压水位埋深进行预测, 将 1984~2001 年的数据用于径向基网络模型训练, 2002~2005 年的数据用于模型的验证, 最后对 2006~2023 年共 18 年的地下水位埋深进行预测, 结果表明, 径向基神经网络模型对 20 年左右的数据序列有较好的预测效果, 且根据降雨、径流和开采量, 能较准确的预测地下水位埋深^[6]。

基于上述研究背景, 一种新的传感器结构及其数据处理方法被提出, 该方法通过测量每两个电极之间的电容变化, 应用

径向基神经网络分析实验数据, 获得动态容器中的液位值。

1 结构和原理

为了实现液位测量目标, 新传感器结构被提出如图 1 所示, 一个塑料管被用作传感器框架, 3 个大小相同的长方形铜片作为 3 个电极自上而下粘贴到塑料管内壁上, 另外一铜片被用作传感器屏蔽层贴在塑料管外面。



(a) 传感器俯视图 (b) 传感器侧视图 (单位: mm)

1: 电极 1; 2: 电极 2; 3: 电极 3; 4: 屏蔽层; 5: 塑料管

图 1 传感器结构示意图

论文提出的液位测量原理如图 2 所示。在这个过程中, 先测量电容值 C_1 、 C_2 和 C_3 , 然后通过径向基神经网络来拟合液位值, 图中, L 、 D 、 A 和 L_0 分别为液位信息、容器的倾向、容器的倾角及估测液位; C_1 、 C_2 和 C_3 分别代表电极 1、2 间、电极 1、3 间及电极 2、3 之间的电容值。

采用的径向基神经网络是具有三层结构的前向网络, 分别为输入层、隐含层和输出层, 其结构如图 3 所示。图中 C_1 、 C_2 和 C_3 分别为输入向量, ϕ_1 、 $\phi_2 \cdots \phi_N$ 是隐含层的第 n ($n=1, 2 \cdots N$) 个神经元的输出, w_{1o} 、 w_{2o} 、 w_{No} 是隐含层 N 维向量的

收稿日期: 2015-10-10; 修回日期: 2015-12-07。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51176016); 江苏省产学研联合创新资金(BY2014037-11)。

作者简介: 陆贵荣(1968-), 男, 甘肃定西, 博士, 副教授, 主要从事传感器技术、电子、仪表等领域的教学科研方向的研究。

陈树越(1963-), 男, 河北定州人, 博士, 教授, 主要从事图像处理方向的研究。

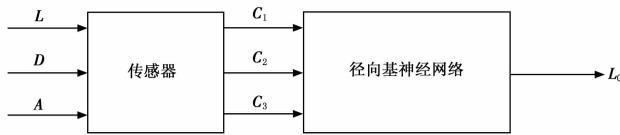


图 2 传感器的测量原理

每个分量对应的权值, L_0 是输出层的输出值。

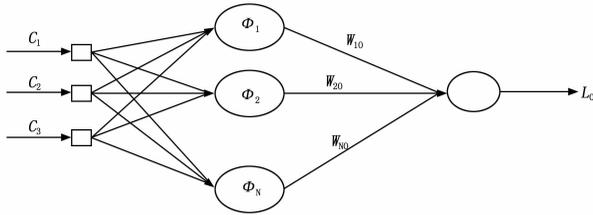


图 3 径向基神经网络结构

由于拟合值是容器中的单一液位参数, 故图 3 中输出层的神经元个数为 1。隐含层神经元个数与非线性映射能力有关, 一般来说, 隐含层节点越多, 网络的非线性映射能力越强。当达到恰当的节点个数时, 增加的神经元节点就对提高网络精度没有太大的帮助了, 反而在计算时增加了运算量, 因此, 隐含层神经元个数需要通过经验和实验确定。输入层神经元节点数与映射模型有关, 论文采用影响液位的 3 个因素作为自变量, 分别为 C_1 、 C_2 和 C_3 , 形成的函数关系如表达式 (1) 所示。

表 1 液位训练样本数据实测表

| 序号 | C_1 /pF | C_2 /pF | C_3 /pF | L /mm | 序号 | C_1 /pF | C_2 /pF | C_3 /pF | L /mm |
|----|-----------|-----------|-----------|---------|----|-----------|-----------|-----------|---------|
| 1 | 5.059 | 5.059 | 5.059 | 0 | 23 | 5.798 | 5.909 | 6.007 | 50 |
| 2 | 5.489 | 5.489 | 5.489 | 25 | 24 | 5.933 | 5.891 | 5.933 | 50 |
| 3 | 5.508 | 5.492 | 5.467 | 25 | 25 | 5.953 | 5.859 | 5.949 | 50 |
| 4 | 5.539 | 5.493 | 5.442 | 25 | 26 | 5.984 | 5.820 | 5.973 | 50 |
| 5 | 5.566 | 5.498 | 5.412 | 25 | 27 | 6.014 | 5.777 | 5.995 | 50 |
| 6 | 5.599 | 5.501 | 5.379 | 25 | 28 | 5.904 | 5.940 | 5.905 | 50 |
| 7 | 5.502 | 5.502 | 5.463 | 25 | 29 | 5.885 | 5.974 | 5.888 | 50 |
| 8 | 5.521 | 5.516 | 5.433 | 25 | 30 | 5.853 | 6.023 | 5.874 | 50 |
| 9 | 5.549 | 5.539 | 5.397 | 25 | 31 | 5.830 | 6.062 | 5.857 | 50 |
| 10 | 5.577 | 5.560 | 5.357 | 25 | 32 | 6.349 | 6.349 | 6.349 | 75 |
| 11 | 5.475 | 5.509 | 5.476 | 25 | 33 | 6.371 | 6.352 | 6.324 | 75 |
| 12 | 5.457 | 5.540 | 5.460 | 25 | 34 | 6.407 | 6.354 | 6.295 | 75 |
| 13 | 5.428 | 5.585 | 5.447 | 25 | 35 | 6.438 | 6.360 | 6.260 | 75 |
| 14 | 5.407 | 5.622 | 5.431 | 25 | 36 | 6.476 | 6.363 | 6.222 | 75 |
| 15 | 5.919 | 5.919 | 5.919 | 50 | 37 | 6.364 | 6.364 | 6.319 | 75 |
| 16 | 5.939 | 5.921 | 5.895 | 50 | 38 | 6.386 | 6.281 | 6.284 | 75 |
| 17 | 5.973 | 5.924 | 5.869 | 50 | 39 | 6.419 | 6.407 | 6.242 | 75 |
| 18 | 6.001 | 5.929 | 5.836 | 50 | 40 | 6.451 | 6.431 | 6.197 | 75 |
| 19 | 6.037 | 5.932 | 5.801 | 50 | 41 | 6.332 | 6.372 | 6.334 | 75 |
| 20 | 5.901 | 5.916 | 5.937 | 50 | 42 | 6.312 | 6.408 | 6.316 | 75 |
| 21 | 5.869 | 5.914 | 5.972 | 50 | 43 | 6.279 | 6.460 | 6.301 | 75 |
| 22 | 5.828 | 5.912 | 6.014 | 50 | 44 | 6.254 | 6.503 | 6.282 | 75 |

$$L_0 = F(C_1, C_2, C_3) \quad (1)$$

利用径向基网络对液位进行测定的详细步骤如图 4 所示。

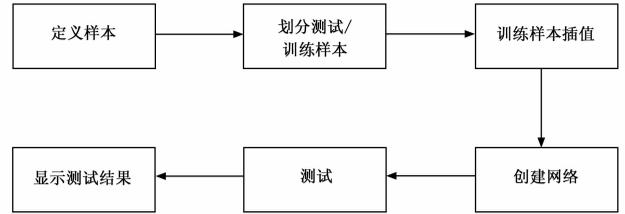


图 4 测定液位步骤

图 4 中定义样本是实验的首要步骤, 主要标定传感器采集的在不同倾向倾角上的 C_1 、 C_2 和 C_3 值以及相对应的容器内液体液位值。将数据划分为两类即训练数据和测试数据, 训练数据用来创建并确定径向基网络模型, 训练神经网络往往需要大量的样本, 在样本数据有限的情况下, 可以采用二维插值法扩充样本数据, 由此得到的神经网络模型更加可靠, 能更好的模拟输入与输出之间的函数关系。测试数据则是用来验证训练好的径向基网络能否在任意给定 C_1 、 C_2 和 C_3 值时, 输出正确的液位评价。若测试结果误差较大, 则修改神经网络参数, 直到输出值与实际值的误差在允许的要求范围内。

最后创建并训练完成的径向基网络便可以应用于实际测量。未知液位对应的 C_1 、 C_2 和 C_3 可由测量电路获取, 然后输入 C_1 、 C_2 和 C_3 至径向基网络, 从而评价出该未知液位。

2 实验

为了获取传感器在不同条件下的输出，实验使用柴油作为液体样本，在环境温度为 25 ℃ 的条件下得到实验数据如表 1 所示，所有数据均由 HP 公司生产的 4284A LCR 表测得。实验具体步骤为：选择 3 个液体样本校准液位 L (25、50 和 75 毫米)。每个校准液位下，沿如图 5 所示的 4 个不同方向 $X+$ 、 $X-$ 、 $Y+$ 和 $Y-$ 测量样本数据，在每个方向上，传感器倾角选择 0、10、20、30 和 40 度。

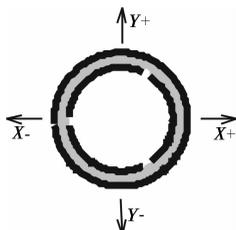


图 5 传感器实验倾斜方向（俯视图）

(1) 根据表 1 定义训练样本的输入向量及输出向量。输入向量为 3×44 的矩阵，输出为 1×44 的行向量。

(2) 训练样本插值。为了充分利用训练样本，对 44 份训练样本进行二维插值，将样本数增加到 100 份。先将训练输入向量与对应的目标输出值合并为一个 4×44 矩阵，经过插值，得到 4×100 矩阵，最后将其拆分为 3×100 的输入向量矩阵和 1×100 的输出向量。

(3) 使用 newrb 函数创建径向基神经网络。径向基函数语法格式如下：

$$\text{net} = \text{newrb}(\text{P}, \text{T}, \text{goal}, \text{spread}, \text{MN}, \text{DF})$$

P 、 T 分别为输入矩阵和输出矩阵， goal 为均方误差， spread 表示径向基函数扩散速度， MN 为隐含层节点个数， DF 是一个控制显示级别的参数，默认值为 25。除了 P 、 T 外，其他参数都是可以灵活选择的，在这里设置 $\text{goal} = 0$ ， $\text{spread} = 10$ ， $\text{MN} = 50$ 。调用这个函数，系统将会依次增加神经元个数，使训练误差减小，直到误差小于 goal 。误差下降曲线图如图 6 所示。

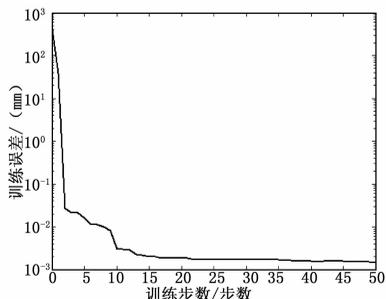


图 6 误差下降曲线图

(4) 测试。使用创建好的径向基网络模型对测试样本进行检测。为了验证径向基网络模型可行性，用其他实验数据进行检测，在液位设定值为 40 和 60 mm 条件下，传感器倾向图 7 中 $D2$ 方向，在不同倾斜角度下测量 C_1 、 C_2 和 C_3 值并使用径向基网络评价液位值，测试数据如表 2 所示。

价值和真实值之间的对比，计算最大相对误差值为 1.5%，可以看出径向基网络的预测效果良好。当液体容器中

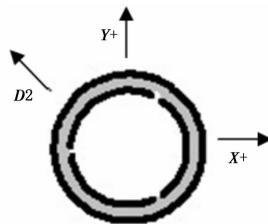


图 7 测试选择的倾斜方向（俯视图）

表 2 液位测试样本数据实测表

| 序号 | 倾斜/角度 | C_1/pF | C_2/pF | C_3/pF | L/mm |
|----|-------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 1 | 10 | 5.766 | 5.749 | 5.724 | 40 |
| 2 | 20 | 5.799 | 5.512 | 5.698 | 40 |
| 3 | 30 | 5.827 | 5.757 | 5.666 | 40 |
| 4 | 40 | 5.862 | 5.759 | 5.632 | 40 |
| 5 | 10 | 5.729 | 5.744 | 5.764 | 40 |
| 6 | 20 | 5.698 | 5.742 | 5.799 | 40 |
| 7 | 30 | 5.659 | 5.740 | 5.839 | 40 |
| 8 | 40 | 5.629 | 5.737 | 5.891 | 40 |
| 9 | 10 | 6.112 | 6.094 | 6.067 | 60 |
| 10 | 20 | 6.146 | 6.096 | 6.039 | 60 |
| 11 | 30 | 6.176 | 6.101 | 6.006 | 60 |
| 12 | 40 | 6.213 | 6.104 | 5.969 | 60 |
| 13 | 10 | 6.073 | 6.088 | 6.109 | 60 |
| 14 | 20 | 6.039 | 6.086 | 6.146 | 60 |
| 15 | 30 | 5.998 | 6.084 | 6.188 | 60 |
| 16 | 40 | 5.966 | 6.081 | 6.243 | 60 |

的液位固定不变时，评价的液位值接近液位的真实值，两者几乎重合，液体容器的倾斜角度和倾斜方向对该传感器几乎没有影响。

3 结果与讨论

图 8 显示传感器在不同液位及倾向倾角条件下的响应结果非常令人满意。在每一个液位下，测试结果几乎是与倾向倾角无关的直线。分析实验存在的一些误差，估计其主要来自两个方面，一是传感器由手工制作，所以 3 个电极的对称是有限的，并且每两电极板之间的距离也不完全相同。另一个是实验方法，如实验过程中液位、倾斜角度和倾斜方向使用的准确性。除此之外实验过程中还存在随机误差和计算误差，这些均可通过提高测量系统的准确性和精确工艺加工进一步抑制。

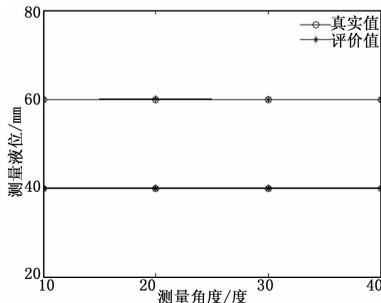


图 8 液位设定值与评价比较图

在这项研究中, 最重要的一点是如何获得最佳径向基网络。因此, 需要更丰富的训练样本来改善网络。在研究中, 传感器是在恒温条件下进行测试, 而在实际应用中温度是一个重要影响因素, 因此, 进行温度补偿是必要的, 这也是团队将来的工作。

4 结论

论文提出了一种容器处在不同倾斜方向和倾斜角度下测量液位的新方法。为了实现这个目标, 研制了一种实用、结构简单的传感器。该传感器由紧密粘贴在塑料管内壁的 3 个长方形铜片作为敏感元件, 根据液位和各铜片间电容之间的函数关系以及具有良好曲线拟合能力的径向基网络, 实现了动态容器中未知液位的评价。样品液位测试证明了所提出方法的可行性, 它预示着该方法完全可以用于某些特殊生产过程的液位测量。

(上接第 13 页)

RFM 打开:

```
RFM2gOpen( "RFM2G_0", &Handle ); //打开设备, 返回句柄
```

RFM 读写函数:

```
RFM2gWrite( rh, offset, buf, sizeof(buf) ); //向反射内存写数据
```

```
RFM2gRead( rh, offset, buf, sizeof(buf) ); //从反射内存读数据
```

这里要注意的是, 虽然 RFM 的传输速率可达 25.9 Mbps, 但是每次读写函数的内存操作大小不应大于 256 Bit, 在实际应用中, 当内存操作大于 256 Bit 时, 会带来意想不到的时间延迟, 严重影响系统的实时性能。因此在多通道通讯过程中, 若通讯数据较多时, 应分批传送。

3.3 故障注入模块

故障注入模块应在所有基本模块开发完成后实现。故障注入作为一个独立模块周期运行, 其周期约为 1/4 个小帧周期, 其优先级高于余度管理任务的优先级, 故障注入模块周期读取上位机传送的故障注入信息, 并及时将该信息传送至驱动 API 和余度功能模拟 API, 驱动 API 和余度功能模拟 API 根据故障注入信息修改对应的执行结果, 模拟多余度飞控系统的各种故障情况, 测试多余度系统的容错处理逻辑和容错能力。

4 平台应用与分析

设计 3*1 余度管理系统, 其工作过程如下: 飞行仿真机每 5 ms 发送一次飞行仿真数据, 飞控计算机仿真机每 20 ms 采集一次飞行仿真机的传感器数据 (只读取最新数据)。读到数据后, 对输入的数据在 N 个通道之间进行交叉传输, 并对交叉传输结果进行数据监控表决, 将“最合适”的数据送到控制律计算模块供控制律计算使用。控制律计算模块将结果输出, 并对输出数据再次进行交叉传输, 对第二次交叉传输结果同样进行监控、表决, 然后将表决所得到的舵控指令通过以太网输出给目标飞机。飞行仿真计算机按照一定的表决算法对三组输入进行选择, 并将结果输出到舵机实现飞机主飞控系统的增稳与控制任务。在该平台下开发 3*1 余度管理软件, 首先, 分模块完成通道间同步、交叉传输、数据监控、数据表决模块的开发和测试, 然后根据余度管理流程将模块任务融入 20 ms 小帧任务中, 进行余度流程测试。图 4 是三余度测试平台实物图。

5 结论

在该测试平台下, 可以运行实时程序, 统计实时任务执行

参考文献:

- [1] 郭伟, 陈琛, 陆振宇. 一种改进型动态矩阵控制在水箱液位系统中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (5): 1563 - 1567.
- [2] 徐绍勇, 龚磊. 倾斜对汽车罐车液位测量的影响与修正 [J]. 中国化工贸易, 2012, (4): 155 - 156.
- [3] Jianguo Yang, Guang Wu. Smart sensor system [M]. Electronic University Press, 2000.
- [4] 陈明等. MATLAB 神经网络原理与实例精解 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [5] 任林. 基于 RBF-ARX 模型的预测控制在液位系统中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (1): 81 - 84.
- [6] 董艳慧, 周维博, 卜卿等. RBF 网络在西安渭滨地下水水位埋深预测中的应用 [J]. 节水灌溉, 2012, (12): 66 - 69.

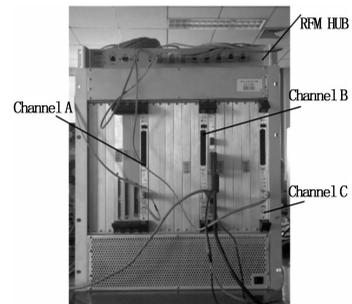


图 4 三余度测试平台实物

时间, 测试多余度策略管理逻辑, 并及时纠正软件书写 BUG 和逻辑 BUG。在各种系统航电总线存在差异的情况下, 利用 RFM 代替航电总线, 虽然其读写通道数据的时间和实际航电总线的通讯时间之间仍存在差异, 但是这点差异相对小帧周期而言, 是微乎其微的。因此, RFM 能较为逼真地模拟多通道间通讯过程。软件测试完成后, 还可以根据航电总线的设计加入相应的驱动模块并修改对应函数, 就能快速完成飞控系统多余度软件的开发工作。

参考文献:

- [1] 王仲涛, 刘增明, 刘晶晶. 弹载飞控软件开发调试与实时仿真平台研究 [J]. 航空兵器, 2010 (6): 38
- [2] 陈宗基, 孙晓哲, 秦旭东. 民机飞控计算机系统虚拟样机验证平台研究 [J]. 系统仿真学报, 2008 (8): 112
- [3] 顾颖彦, 反射内存网实时通信技术的研究 [J]. 计算机工程, 2002 (7): 143
- [4] 宋龙, 张文山, 靳凌, 任章. 空空导弹飞控软件研制中的虚拟样机应用 [J]. 计算机仿真, 2005 (5): 19 - 24.
- [5] Naidu A. Case study. Airbus A340 flight control system [D]. University of Virginia, 2002: 1 - 12.
- [6] Yeh Y C. Triple-Triple Redundant 777 Primary Flight Computer [A]. Aerospace Applications Conference [C]. Aspen, Co. 1996 (1): 293 - 307.
- [7] Briere D, Traverse P. Airbus A320/A330/A340 Electrical Flight Control-A family of fault-tolerant systems [A]. The Twenty-Third International Symposium. Aerospatiale [C]. 316, route de Bayonne, 31060 Toulouse, France. June, 1993: 616 - 623.