

基于 RBF 神经网络的电子天平温漂补偿研究

□辽宁省计量科学研究院 李寒雷 李东岳 李迪

【摘要】为了克服BP神经网络在电子天平温漂补偿中存在的容易陷入局部最小、收敛速度慢、对学习速率过度依赖等缺点，本文提出了一种新的基于RBF神经网络的温漂补偿方法。通过在Matlab中仿真的实验结果表明，基于RBF神经网络的温漂补偿在收敛性能和预测效果方面，均要优于BP神经网络。

【关键词】温漂；RBF神经网络；Matlab仿真

文献标识码：A

文章编号：1003-1870（2024）12-0045-03

引言

大多数高精度电子天平的主要测量元件是电磁力平衡传感器，由于该传感器高准确度、高灵敏度的特点，电子天平的计量准确性受温度影响比较大，就会产生温漂。近些年，学者们对于如何解决温漂的问题进行了大量的研究。白国均等通过V/F变换，将与温度相关的电压信号转换为数字量，再通过单片机计算出温漂补偿量，最后将称量值与补偿量相减，从而实现软件补偿^[1]。孙鹏龙等建立了电子天平非线性补偿的牛顿插值算法，实现了具有温度补偿功能的电子天平^[2]。随着人工智能与深度学习算法的发展，周玮等研究了利用神经网络的非线性逼近能力，搭建BP神经网络，解决电子天平的温度补偿问题^[3,4]。然而，BP神经网络所采用的BP算法具有一些固有的缺点，如容易陷入局部最小、收敛速度慢、对学习速率过度依赖等缺点。而RBF神经网络在实际应用中有着比BP神经网络优良的特性。因此，本文对基于RBF神经网络的电子天平温漂补偿进行了研究。

1 电子天平温漂分析

电子天平基本工作原理是内部动圈产生的电磁力与被测物重力相等，即：

$$mg = BLI$$

其中 m 为被测物质量； g 为重力加速度； B 为磁感应强度； L 为动圈有效长度； I 为流经线圈的电流。通常磁感应强度 B 是恒定的，线圈制作好后，其长度

也是定值。因此 m 与 I 成正比。

由于温度的变化以及材料特性的不稳定，磁通 B 和线圈长度 L 均可能发生变化，进而产生测量误差。根据相关研究^[5]可知，对于最大称量为200g，分度值为0.1mg的电子天平而言，当温度变化1℃时， B 和 L 所产生的测量误差分别是40mg和3.4mg，因此进行温漂补偿是非常有必要的。

2 RBF神经网络结构及学习算法

RBF（Radical Basis Function）神经网络属于前向神经网络类型，于1988年，Broomhead和Lowe根据生物神经元具有局部响应这一特点提出来的。1989年，Jackson证明了RBF神经网络对非线性连续函数的逼近能力。

RBF神经网络模型的结构是一种三层的前馈神经网络。第一层是输入层，仅仅起到传递信号的作用。第二层为隐含层，隐含层节点个数和激活函数中心根据减聚类算法自行确定，隐含层节点的激活函数本文选择高斯函数 $R(x)$ 。网络的第三层是输出层，它对输入模式做出响应^[6]。

$$R(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2}\right)$$

其中， x 为输入矢量， $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ ； $c_j = (c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jn})$ 是隐含层第 j 个节点高斯函数的中心， b_j 是隐含层第 j 个节点高斯函数的宽度，本文 b_j 选择缺省值， $b_j=1$ 。

图1描述了具有单隐含层的RBF神经网络结构。

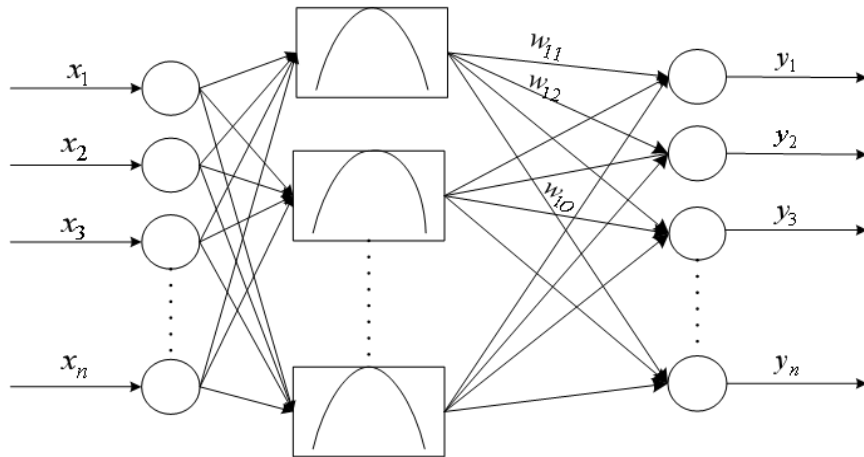


图1 径向基神经网络结构图

在RBF神经网络中，输入层的作用仅仅是传输输入信号，与BP神经网络相比，输入层和隐含层可以看作是连接权值为1的连接。隐含层是对激活函数的参数进行调整，采用的是非线性优化策略，因而学习速度较慢。输出层是线性权值进行调整，采用的是线性优化策略，因而学习速度较快^[6]。

RBF神经网络训练学习包括两个过程：一是利用改进的减聚类算法对学习样本进行聚类分析，得到合理的RBF神经网络隐含层径向基函数的中心参数，并终止聚类确定径向基函数数目，即网络隐含层节点的数目。二是利用梯度下降法对隐含层到输出层之间的权值进行调节。减聚类与梯度下降训练学习算法既能合理地对训练样本进行聚类，又可以提高神经网络的映射能力^[6]。

3 实验结果及分析

根据上述分析，本文建立了以温度为输入，以温漂误差为输出的三层RBF神经网络，该网络的隐含层节点个数根据减聚类算法确定。RBF网络的训练数据采用文献^[1]中的采集数据，该数据是将原有硬件温度补偿去掉，再进行高低温实验采集到的，分别采样了15℃，20℃，25℃，30℃，35℃，每一个温度下均采样了7个质量值。本文同时构建了相同结构的BP神经网络，数据归一化处理后分别训练RBF神经网络和BP神经网络。设置目标精度为0.0004，两者收敛性能如图2和图3所示，从中可以看出，BP神经网络经过86个周期才达到所要求的目标精度。

而RBF神经网络29个周期后就达到了所需的目标精度，可见RBF神经网络算法收敛性能较好。

利用训练好的网络进行预测，预测效果图如图4和图5所示。显然，RBF神经网络的预测效果要好于BP神经网络，它几乎实现了完全逼近。为了进一步说明所提出的方法的有效性，计算性能评价指标均方根误差，定义如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (Y_k - D_k)^2}{N}}$$

其中， N 为样本数； Y_k 是RBF神经网络预测值； D_k 是期望输出值。根据实验结果可计算BP神经网络和RBF神经网络预测值的均方根误差分别是0.0275和0.0068。

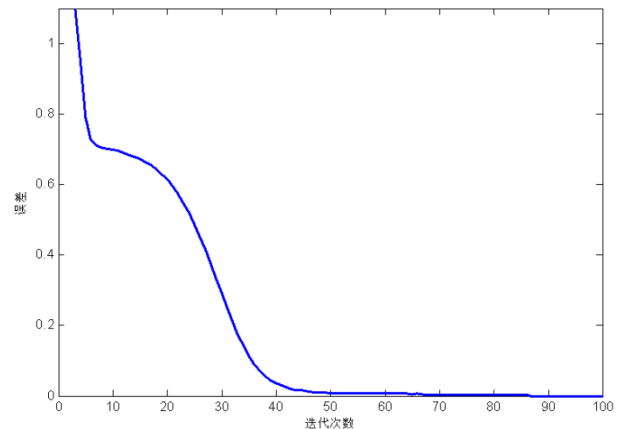


图2 BP神经网络收敛性能

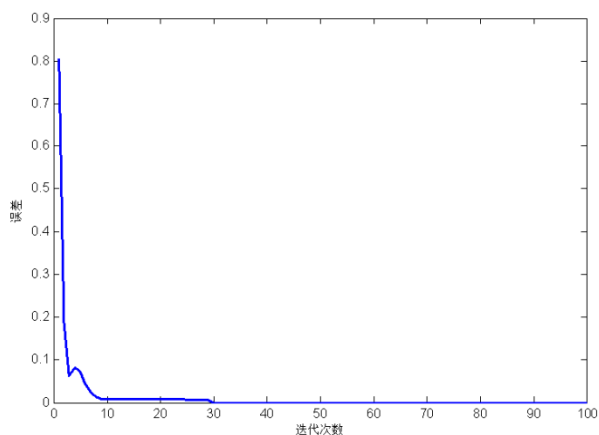


图3 RBF神经网络收敛性能

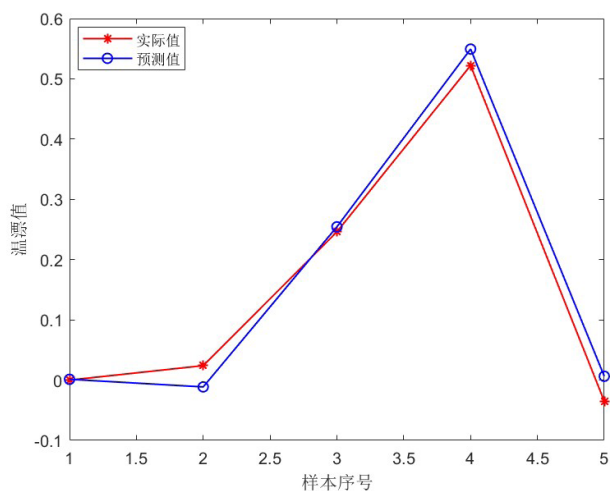


图4 BPNN预测效果

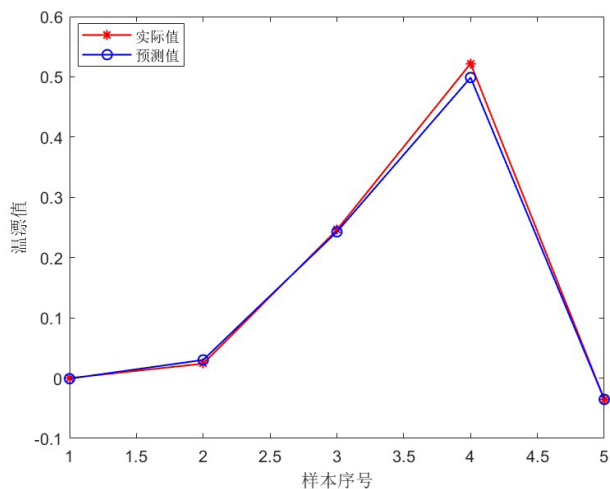


图5 RBFNN预测效果

4 结语

针对电子天平温漂问题,本文提出了一种新型的补偿方式,即通过RBF神经网络的非线性函数逼近能力,根据温度预测相应温漂误差。首先分析了电子天平进行温漂补偿的必要性;其次介绍了RBF神经网络的结构和学习算法;最后建立了以温度为输入,以温漂误差为输出的RBF神经网络。通过MATLAB中编程仿真研究,实验结构表明,在电子天平温漂误差补偿研究中,RBF神经网络的收敛性能和预测效果均好于BP神经网络。

参考文献

- [1] 白国君. 高精度电子天平的温度补偿与自动校准[D]. 东北大学,2009.
- [2] 孙鹏龙等. 环境温度对高精度电子天平称量准确度的影响[J]. 计量与测试技术.2016.43[10]:34-35.
- [3] 陈年,季华. 基于BP神经网络的天平计量性能研究[J]. 衡器,2019(08).
- [4] 周玮等. 一种新的高精度电子天平温度补偿研究方法[J]. 东北大学学报, 2006.27[4]:371-374.
- [5] 邓志军. 电子天平温度漂移的产生及其补偿的方法[J]. 中国仪器仪表,1997(02).
- [6] 李寒雷. 两种区间神经网络的研究与应用[D]. 东北大学,2015.

作者简介

李寒雷(1990—),男,辽宁兴城人,硕士研究生,助理工程师,就职于辽宁省计量科学研究院。主要研究方向为质量计量、衡器计量。