

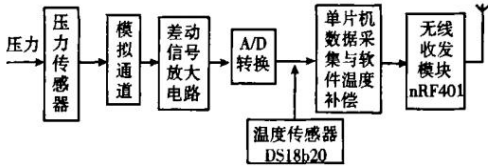
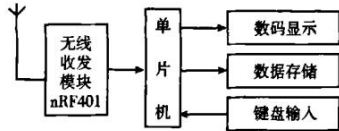
标题	压力传感器温度漂移补偿的 RBF 网络模型
作者	何平, 潘国峰, 孙以材, 赵红东, 张银慧
关键词	压力传感器; 温度漂移补偿; RBF 网络; 硬件补偿; 软件补偿
研究目的与背景	<p>压力传感器是由半导体材料制成的, 因此传感器的输出值不只决定于输入的压力, 还会受到环境温度变化的影响, 从而产生温度漂移现象。再加上其本身所存在的非线性问题, 器件在封装加工过程中受到的应力影响, 使测量精度难以满足精密压力测量的需要。因此需要采取适当的补偿措施对传感器的温度附加误差进行修正, 从而提高测量的准确性。</p>
研究内容	<p>文章研制的压阻式压力传感器电路中每一步都进行了温度的硬件补偿。比如测量电路采用恒流源电路来减小温度对传感器输出信号灵敏度的影响; 采用差动放大电路提高输入阻抗; 使用高性能的集成温度传感器 DSI8b20 提高系统的抗干扰性; 利用开关电容的设计使整个温度范围内有较小的转换误差等。但由于硬件补偿成本比较高且精度不高, 所以需要结合软件补偿提高温度漂移补偿的精度。文章建立了压力传感器温度漂移补偿的 RBF 网络模型, 并对实验中采集的数据进行非线性补偿仿真实验。</p>
硬件设计	<p>文章研制的压力传感器数据采集硬件部分由前端传感器数据采集发射部分及末端的数据接收部分组成。</p> <div style="text-align: center;">  <p>图 1 传感器数据采集发射端</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>图 2 传感器数据接收端</p> </div> <p>为了进行有效的温度补偿, 在整个传感器及电路系统中使用集成温度传感器读取环境温度参数, 提供给微处理器作为进行软件温度补偿的依据。电路中采用 DSI8b20 单线数字式测温集成电路, 数字化温度传感器 DSI8b20 支持“一线总线”接口, 它具有微型化、低功耗、高性能、抗干扰能力强、易于与微处理器接口等优点。该器件将半导体温敏器件、A / D 转换器、存储器等做在一个很小的集成电路芯片上, 传感器直接输出的就是温度信号数字值。现场温度直接以“一线总线”的数字方式传输, 大大提高了系统的抗干扰性, 适合于恶劣环境的现场温度测量。</p>
软件设计	<p>文章的软件设计采用了了 RBF 神经网络算法。径向基函数神经网络(radial basis function neural net.work)是一种具有单隐层的 3 层前馈网络, 与 BP 网络不同, RBF 网络最显著的特点是隐节点的基函数采用距离函数(如欧氏距离), 而激活函数采用径向基函数(如高斯函数)。径向基函数是一种局部分布的中心点径向对称衰减的非负非线性函数, 这种“局部特性”使得 RBF 网络成为一种局部响应神经网络。目前已经证明, 径向基网络也能够以任意精度逼近任意连续函数, 并且它的学习速度比 BP 网络快, 也不存在局部极小值问题。</p>

图 3 为 RBF 网络的拓扑结构。网络具有 n 个输入节点, h 个隐节点, m 个输出节点。其中 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathbf{R}^n$ 为网络输入样本, $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$ 为网络输出; c_i 为网络中第 i 个隐节点的数据中心值, $\Phi_i(\cdot)$ 为第 i 个隐节点的径向基函数, $\|\cdot\|$ 表示欧氏范数; $W^{h \times m}$ 为输出权矩阵, b_0, b_1, \dots, b_m 为输出单元偏移, 输出层节点中的 Σ 表示神经元采用线性激活函数。

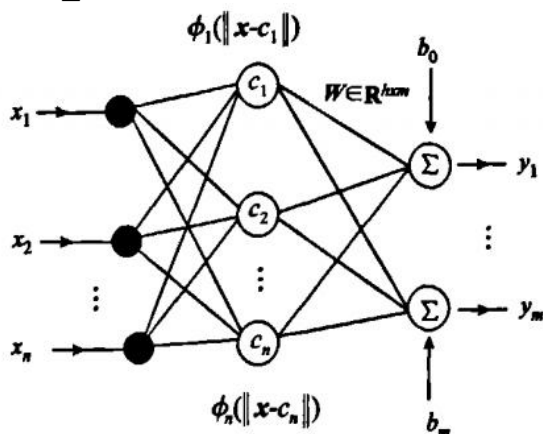


图 3 RBF 网络的拓扑结构

常用的径向基函数是高斯函数:

$$u_i = \varphi_i(\|x - c_i\|) = \exp \left[-\frac{(x - c_i)^T (x - c_i)}{2\sigma_i^2} \right]$$

式中: u_i 为第 i 个隐节点的输出, σ_i 为标准偏差, 也称为扩展常数。RBF 网络的输出是隐层节点输出的线性组合, 即:

$$y_j = \sum_{i=1}^h \omega_{ij} u_i - b_j$$

RBF 网络算法可分为 2 个阶段, 它们所起的作用完全不同。在第一阶段, 采用无监督训练方法确定基函数的参数(当基函数取高斯函数时, 这些参数为数据中心 c_i 和扩展常数 σ_i), 属于非线性变换; 而在第二阶段, 基函数固定, 网络输出是隐层基函数的线性组合, 所以调节该输出层权值属于线性映射。因此, 虽然网络输出对可调参数而言是线性的, 但从总体上看, 网络由输入到输出的映射是非线性的。

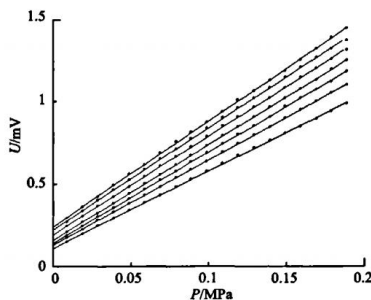
RBF 网络的梯度训练方法与 BP 算法训练多层感知器的原理类似, 也是通过最小化目标函数实现对各隐节点数据中心、扩展常数和输出权值的调整。本文采用带遗忘因子的梯度下降法用于 RBF 网络的参数调整, 即在考虑当前时刻即 k 时刻的网络状态的变化时, 将前一个时刻即 $(k-1)$ 时刻的网络参数变化也包括进去。

实验设计

文章先进行了单独的硬件补偿实验, 得出补偿结果不达指标, 再结合软件补偿进行第二次实验, 进一步提高补偿精度。

纯硬件补偿实验:

实验器材: 标准压力计、压力传感器、温度传感器、压力传感器测试电路。其中压力传感器测试电路测量出压力所转换的电压信号和对应的温度值。实验时将数据采集发射电路与信号接收装置相距 50 m 左右, 把压力传感器和温度传感器放在恒温槽中, 温度变化范围从 -10°C 到 50°C , 共 7 个温度点, 然后测量出不同温度下不同压力标定值的电压测量值。图 4 为不同温度下通过硬件电路所测量的未经软件补偿的共 140 组样本数据的分布图。

	<div></div> <p>图4 不同温度下传感器的输出电压 U 与压力 P 关系图</p> <p>从图中可以看出:虽然同一温度下传感器的输出电压随着压力的增大而呈线性增加,但随着温度的升高,同一压力下的输出电压在降低,因此压力传感器存在着明显的温度漂移。由此看来,在现有电路中采用硬件温度补偿措施不能完全消除温度漂移现象。</p> <p>软硬件结合补偿实验:</p> <p>为了更好地进行网络参数的调整,加快收敛速度,需要对原始测量数据,即压力传感器的输出电压 U 和压力 P 进行归一化处理。设 U, 为压力传感器输出电压, T 为被测温度, P 为被测压力,则建立一个 RBF 网络结构,其输入层选取 2 个节点,分别对应压力传感器信号 U 和由 DS18B20 得到的温度检测信号 T,输出层选取 1 个节点,对应被测压力 P,隐层节点选为 16 个。采用压力标定值为 0、0.01、0.03、0.05、0.07、0.09、0.11、0.13、0.15、0.17、0.19 对应的共 77 组数据作为学习样本,另 63 组样本为测试样本。初始数据中心、扩展常数和输出权值均由随机函数 rand()产生。实验采用均方根(RMS)误差函数,训练的目的是为了找出使误差函数最小时的参数,即基函数的数据中心c_i和扩展常数σ_i,输出层权值 w_i,并最终对比在该参数下的温度补偿精度是否达标。</p>																																																																																								
实验结果	<p>当均方根(RMS)误差目标为 0.000 1 时, RBF 算法经过约 30s, 2000 多次学习训练结束。通过试算,目标误差为 0.0001、扩展常数的学习率为 0.006 时结果最好。对 63 组测试数据利用 RBF 算法计算出被测压力的补偿值,计算结果如表 1 所示,测试精度为 0. 011%。可以看出,补偿值与期望值基本达到了一致,取得了良好的补偿效果。</p> <p>表 1 测试数据的补偿结果</p> <p>Table 1 The compensation results of the test data</p> <table><tr><th>压强标定值 (P/MPa)</th><th>-10($T/^{\circ}\text{C}$)</th><th>0($T/^{\circ}\text{C}$)</th><th>10($T/^{\circ}\text{C}$)</th><th>20($T/^{\circ}\text{C}$)</th><th>30($T/^{\circ}\text{C}$)</th><th>40($T/^{\circ}\text{C}$)</th><th>50($T/^{\circ}\text{C}$)</th></tr><tr><th></th><th>P/MPa 融合值</th><th>P/MPa 融合值</th><th>P/MPa 融合值</th><th>P/MPa 融合值</th><th>P/MPa 融合值</th><th>P/MPa 融合值</th><th>P/MPa 融合值</th></tr><tr><td>0.02</td><td>0.019 65</td><td>0.019 45</td><td>0.019 47</td><td>0.019 22</td><td>0.020 06</td><td>0.020 07</td><td>0.019 95</td></tr><tr><td>0.04</td><td>0.040 40</td><td>0.040 80</td><td>0.039 85</td><td>0.039 73</td><td>0.040 78</td><td>0.041 21</td><td>0.038 20</td></tr><tr><td>0.06</td><td>0.059 61</td><td>0.061 18</td><td>0.060 67</td><td>0.060 42</td><td>0.060 94</td><td>0.061 88</td><td>0.059 87</td></tr><tr><td>0.08</td><td>0.080 30</td><td>0.080 20</td><td>0.079 56</td><td>0.079 85</td><td>0.080 32</td><td>0.081 43</td><td>0.080 19</td></tr><tr><td>0.10</td><td>0.098 48</td><td>1.000 41</td><td>0.099 83</td><td>0.098 01</td><td>0.099 87</td><td>1.000 11</td><td>1.000 96</td></tr><tr><td>0.12</td><td>0.120 49</td><td>0.120 44</td><td>0.119 59</td><td>0.118 74</td><td>0.119 42</td><td>0.120 41</td><td>0.119 53</td></tr><tr><td>0.14</td><td>0.140 39</td><td>0.141 02</td><td>0.140 26</td><td>0.139 01</td><td>0.139 26</td><td>0.141 05</td><td>0.139 31</td></tr><tr><td>0.16</td><td>0.160 38</td><td>0.160 91</td><td>0.160 48</td><td>0.159 49</td><td>0.160 09</td><td>0.161 33</td><td>0.159 00</td></tr><tr><td>0.18</td><td>0.180 34</td><td>0.180 51</td><td>0.181 08</td><td>0.180 55</td><td>0.179 80</td><td>0.181 02</td><td>0.179 74</td></tr></table>	压强标定值 (P/MPa)	-10($T/^{\circ}\text{C}$)	0($T/^{\circ}\text{C}$)	10($T/^{\circ}\text{C}$)	20($T/^{\circ}\text{C}$)	30($T/^{\circ}\text{C}$)	40($T/^{\circ}\text{C}$)	50($T/^{\circ}\text{C}$)		P/MPa 融合值	P/MPa 融合值	P/MPa 融合值	P/MPa 融合值	P/MPa 融合值	P/MPa 融合值	P/MPa 融合值	0.02	0.019 65	0.019 45	0.019 47	0.019 22	0.020 06	0.020 07	0.019 95	0.04	0.040 40	0.040 80	0.039 85	0.039 73	0.040 78	0.041 21	0.038 20	0.06	0.059 61	0.061 18	0.060 67	0.060 42	0.060 94	0.061 88	0.059 87	0.08	0.080 30	0.080 20	0.079 56	0.079 85	0.080 32	0.081 43	0.080 19	0.10	0.098 48	1.000 41	0.099 83	0.098 01	0.099 87	1.000 11	1.000 96	0.12	0.120 49	0.120 44	0.119 59	0.118 74	0.119 42	0.120 41	0.119 53	0.14	0.140 39	0.141 02	0.140 26	0.139 01	0.139 26	0.141 05	0.139 31	0.16	0.160 38	0.160 91	0.160 48	0.159 49	0.160 09	0.161 33	0.159 00	0.18	0.180 34	0.180 51	0.181 08	0.180 55	0.179 80	0.181 02	0.179 74
压强标定值 (P/MPa)	-10($T/^{\circ}\text{C}$)	0($T/^{\circ}\text{C}$)	10($T/^{\circ}\text{C}$)	20($T/^{\circ}\text{C}$)	30($T/^{\circ}\text{C}$)	40($T/^{\circ}\text{C}$)	50($T/^{\circ}\text{C}$)																																																																																		
	P/MPa 融合值	P/MPa 融合值	P/MPa 融合值	P/MPa 融合值	P/MPa 融合值	P/MPa 融合值	P/MPa 融合值																																																																																		
0.02	0.019 65	0.019 45	0.019 47	0.019 22	0.020 06	0.020 07	0.019 95																																																																																		
0.04	0.040 40	0.040 80	0.039 85	0.039 73	0.040 78	0.041 21	0.038 20																																																																																		
0.06	0.059 61	0.061 18	0.060 67	0.060 42	0.060 94	0.061 88	0.059 87																																																																																		
0.08	0.080 30	0.080 20	0.079 56	0.079 85	0.080 32	0.081 43	0.080 19																																																																																		
0.10	0.098 48	1.000 41	0.099 83	0.098 01	0.099 87	1.000 11	1.000 96																																																																																		
0.12	0.120 49	0.120 44	0.119 59	0.118 74	0.119 42	0.120 41	0.119 53																																																																																		
0.14	0.140 39	0.141 02	0.140 26	0.139 01	0.139 26	0.141 05	0.139 31																																																																																		
0.16	0.160 38	0.160 91	0.160 48	0.159 49	0.160 09	0.161 33	0.159 00																																																																																		
0.18	0.180 34	0.180 51	0.181 08	0.180 55	0.179 80	0.181 02	0.179 74																																																																																		
文章结论	<p>实验表明, RBF 网络具有很强的非线性映射能力,其收敛速度快,补偿精度高。因此,采用 RBF 网络算法能够很好地对传感器的温度附加误差进行修正,补偿后所得到的数据精度高,抗干扰能力强,取得了比硬件补偿精度高、成本低的补偿效果,其误差可以保持在 0.2%以内,此精度已能满足实际的需要,可以达到实用的目的。</p>																																																																																								
我的收获	<p>人一天保持坐姿时间通常在 5 个小时以上,要监测人体在保持坐姿期间的</p>																																																																																								

	坐姿倾向显然需要压力传感器长时间工作。压力传感器长期的工作极易造成传感器的漂移失准，使监测结果出现偏差。因此针对压力传感器设计补偿网络是十分重要的。
--	--