

# 基于 MSP430 单片机的高精度压力变送器

张建军<sup>1</sup>, 李 颀<sup>1</sup>, 丁明东<sup>2</sup>, 庞 兴<sup>2</sup>

(1. 陕西科技大学电气与信息工程学院, 陕西西安 710021; 2. 西安中星测控有限公司, 陕西西安 710077)

**摘要:**介绍了以超低功耗单片机 MSP430 为核心的高精度压力传感器的硬件电路设计, 针对压力传感器的温度漂移问题分析了用于温度补偿的 BP 网络算法, 通过单片机对 MPM280 压力传感器的温度和压力信号采集, 构造 4 层 BP 神经网络进行离线训练, 将训练好的网络模型利用 C 语言完成编程, 研究了单片机软件实现方式。结果表明: 利用 MSP430 单片机减少了系统功耗, 其丰富外设减小了传感器体积, 利用单片机对传感器的温度和压力 A/D 采样值离线训练减少了信号误差, 利用 BP 网络算法提高了传感器的精度, 传感器的精度为 0.1%。

**关键词:** MSP430 单片机; BP 网络; 压力变送器; 离线训练

**中图分类号:** TP36 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-1841(2010)01-0032-04

## A Design of High Smart Pressure Sensor Based on MSP430 MCU

ZHANG Jian-jun<sup>1</sup>, LI Qi<sup>1</sup>, DING Ming-dong<sup>2</sup>, PANG Xing<sup>2</sup>

(1. Electrical and Information Engineering College, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China;

2. Xi'an Chinastar M&C Limited, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The high smart pressure sensor's hardware-circuit design which based on ultra-low power MSP430 MCU was introduced. The BP network algorithm in temperature compensation caused by the pressure sensor's temperature drift was analyzed, and the collected values of MPM280's temperature and pressure signals with MCU were used in 4-layer BP network for offline training. The suited network module was expressed by C language program; the software-implemented method was analyzed. The result shows that the MSP430 MCU can reduce system power and its rich exterior equipments can reduce the size of pressure sensor, the direct training of BP network by use of digital A/D value of MCU conversion reduces the error, the pressure sensor's precision is improved by BP network, the precision is 0.1%.

**Key words:** MSP430 MCU; BP network; pressure sensor; offline training

### 0 引言

传感器输出不但受到所受压力的影响, 还受到其他外界非目标参量的影响, 形成了传感器交叉灵敏度的问题, 影响输出精度。为解决此问题主要是进行温度补偿, 温度补偿有线性插值法、最小二乘法、神经网络算法等, 其中神经网络中的 BP 网络法是很好的方法<sup>[1]</sup>, 通过建立 BP 网络, 利用其能够以任意精度逼近任何非线性函数的能力进行数据拟合。MSP430 是超低功耗、有丰富外设的单片机, 用 MSP430 采集传感器的压力输出和所处环境的温度值作为 BP 网络训练输入样本进行离线训练, 最大程度修改权值与阈值, 利用训练后的权值数组与阈值数组去对变送器进行控制输出, 将其结构利用 C 语言编程, 达到 BP 网络数据融合的目的。

### 1 系统硬件设计

#### 1.1 芯片选型

MSP430<sup>[2]</sup> 单片机为高整合、高精度的单芯片系统, 其利用精简指令集, 是 16 位高速处理单片机, 系统工作相对稳定, 处理能力强。它丰富的外围模块, 如 A/D 模块, D/A 模块, 在利用时减少了外设空间体积。利用 MSP430 系列单片机具有的超低功耗, 处理数据强大, 考虑到经过 BP 网络训练之后的数组

需要很多浮点型运算, 而且其片内外设非常丰富的能力选择 MSP430 系列的 MSP430F247TPM 单片机。

#### 1.2 硬件电路设计

硬件电路设计的系统总体框图如图 1 所示, 气压或液压作用在前端压力传感器上, 压力传感器将压力和温度的电压信号输入到放大器, 通过放大器信号放大输入到单片机的 A/D 转换通道, 单片机将压力和温度的电压信号转换成数字量进行处理后通过 LED 显示出来, 并通过 RS-485 通讯接口将数据传送给上位机, 电源模块给单片机和外部设备分别提供 3.3 V 和 5 V 电压, 整个电路实施方式如下所述:

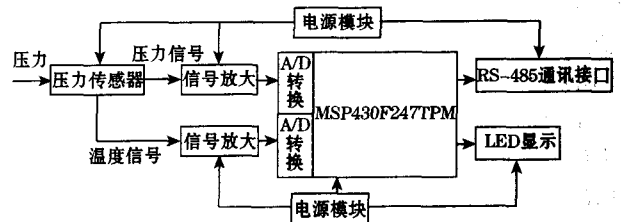


图 1 系统整体框图

(1) 压力传感器选择 MPM280 压力传感器, MPM280 的检测电路形式为惠斯登电桥, 采用 1.5 mA 直流形式供电, 如图 2 所示, 设  $V_p$  为被测压力转换成的电压信号<sup>[3]</sup>,  $V_p = V_2 - V_3$ ;  $V_T$  为被测压力转换成的温度信号,  $V_T = V_1 - V_4$ ,  $R_1 \sim R_4$  为惠斯登

电桥上 4 个扩散硅电阻,其阻值为  $R$ ,当对电桥施加压力时, $R_1$ 、 $R_4$  阻值增加  $\Delta R$ , $R_2$ 、 $R_3$  阻值减少  $\Delta R$ ,受温度影响,每个电阻值另外有  $\Delta R_T$  的变化量。设此电路恒流源为  $I$ ,则压力传感器输出电压信号为  $V_p = \Delta R \cdot I$ 。由于受温度影响电桥阻值有  $\Delta R_T$  的变化量, $V_T$  也表现出线性关系的变化,通过测试  $R_5$  两端的电压可以检测温度信号,此种方式能够减小设计的压力变送器的体积。

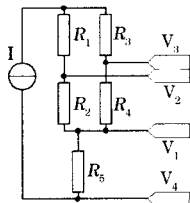


图 2 惠斯登电桥测压与测温原理图

(2) 电源模块设计。MSP430 需要 3.3 V 电压供电,其他外设需 5 V 电压供电,要对输入电源电压进行变压处理,这里用专用芯片 LM317,TPS76950,TPS76933。电压通过 LM317 转变为 +10 V 电压输出,分别给 TPS76933 和 TPS76950 芯片供电,TPS76933 和 TPS76950 将 10 V 电压转变为 3.3 V 和 5 V 电压输出给单片机和单片机外设。

(3) 信号放大电路。此处放大器芯片选择 INA121,INA121 是低功耗,高精度差压放大器,它能够在单电源和双电源 2 种模式下工作。将压力传感器的测量压力转化后的电压信号输入到 INA121 的 3 脚和 2 脚,放大器的放大倍数可根据外接电阻调节,放大后的电压信号通过 INA121 的 6 脚输入到单片机的 A/D 转换通道,实现放大功能。

(4) A/D 转换部分。利用 MSP430F247 单片机自带的 ADC12 模块直接实现 A/D 转换,MSP430F247TPM 自身带 2 路转换接口,通过 ADC12 模块控制寄存器实现温度和压力 2 路模拟信号 A/D 转换。ADC12 内置参考电源,ADC12 的模拟多路器可以分时地将温度和压力信号转换,并且具有采样和保持功能,ADC12 硬件通过设置会自动的将转换结果存放到相应的寄存器中。

(5) RS-485 通讯电路及显示电路。RS-485 通讯电路模块选择专用芯片 MAX485,LED 显示选择驱动芯片 SHJ74AHC373。

## 2 系统软件设计

系统软件实现核心是 BP 网络训练得到的权值与阈值的连接关系,权值与阈值是以数组运算及对每层神经元输出进行  $\tansig^{[4]}$  激励函数为主体,而神经网络的权值与阈值是通过训练样本在 MATLAB 神经网络工具箱中的训练得到的。这里训练样本的采集是把压力信号和温度信号的输出电压值放大处理后输入到单片机,经过单片机 A/D 转换之后得到数字量,直接应用数字量进行离线训练,得到神经网络的权值与阈值,直接利用 A/D 值训练的优点是减少了电压 A/D 转换的电压损失,提高了输出精度。利用检测本来检测训练后的神经网络,当满足要求后将训练得到的权值与阈值的连接关系用 C 语

言表达移植到单片机中处理信号,完成控制算法的要求。

### 2.1 BP 网络算法

BP 网络<sup>[4]</sup>是目前应用最广泛的神经网络模型,它分为输入层、隐含层和输出层 3 层,层与层之间多采用全互连方式,同一层单元之间不存在相互连接。BP 网络是由信息的正向传播和误差的反向传播组成,正向传播的输入模式从输入层经隐层逐层处理并传向输出层,如果输出层没有得到期望的结果,则将误差信号沿原来的通路返回并修改各层的权值转为反相传播,直到误差最小,最终达到期望的目标值。

### 2.2 试验样本的采集及数据处理

试验样本的采集需要的器材<sup>[5]</sup>有:MPM280 压力传感器、压力传感器信号控制电路板、标准压力计、压力传感器高低温测试温箱、测试电脑、MSP430 下载线。将压力传感器连接好置于压力传感器测试温箱内,将压力传感器反映温度和压力信号的 4 根导线连接到压力传感器信号控制电路板上,电路板上通讯接口与主机相连,MSP430 下载线一端与单片机 JTAG 相连,另一端与主机相连。

在神经网络的试验样本及检测样本的采集中,单片机完成的工作是上电初始化、温度和压力的 A/D 转换,将转换之后的数据通过 RS-485 通讯发送到主机上显示出来,记录温度和压力的 A/D 采样值,其中 A/D 采样值选择的参考电压为单片机内部设定电压 1.5 V,所测得的数据如表 1 所示。

通过表 1 可以看出:原压力传感器的零点 A/D 采样值由 -40 °C 的 223 漂移到 80 °C 的 185,满点由 -40 °C 的 3 961 漂移到 80 °C 的 3 016,并且在加相同的压力下,不同温度点的 A/D 采样值也是不同的,可以看出有很大的温度漂移,所以要进行温度补偿。

$$\bar{U}_m = \frac{U_m - U_{\min}}{U_{\max} - U_{\min}} \quad (1)$$

$$\bar{P}_m = \frac{0.9(P_m - P_{\min})}{P_{\max} - P_{\min}} + 0.05 \quad (2)$$

式中: $\bar{U}_m$ ,  $U_m$  为第  $m$  个样本  $U$  的标定值和归一化值; $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$  为给定温度下传感器输出的最大值和最小值; $P_m$ ,  $P_m$  为第  $m$  个样本  $P$  的标定值和归一化值; $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$  为被测压力的最大值、最小值。

温度  $T$  也是采用和  $U$  一样的归一化方法。

为了检验训练后 BP 网络的控制性能,需要对 BP 网络进行样本检测,这时需要对经过神经网络工具箱仿真之后的数据进行反归一化处理,反归一化的目的是将神经网络输出的 0.05 ~ 0.95 之间的数映射到期望的区间值。反归一化公式为

$$P_m' = (\bar{P}_m - 0.05) \cdot (P_{\max} - P_{\min}) / 0.9 + P_{\min} \quad (3)$$

式中: $P_m'$  为神经网络仿真输出值; $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$  为归一化时的训练样本中压力标定值中最大与最小值; $P_m'$  为最终数据融合值。

### 2.3 BP 网络的建立及训练

打开 MATLAB 进入命令窗口界面,输入 nntool 进入神经网络工具箱主界面<sup>[7-8]</sup>,建立一个 4 层的 BP 网络,第一层为输入层,为 2 个神经元,表温度和压力 A/D 采样值归一化后的数值

输入;第一隐含层为5个神经元,第二隐含层为4个神经元;输出层为1个神经元,表示处理后压力输出,各层的激励函数均为 tansig 函数。将归一化之后训练样本输入值和目标值导入到神经网络工具箱,其中训练样本选择  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  共10个温度点的温度和压力采样值,检测样本选择  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度和压力 A/D 采样值,在 MATLAB 神经网络工具箱训练选项卡上设置训练

参数,点击 TRAIN 按钮进行训练,如果训练次数达到最大仍没有使误差最小,继续训练,当达到训练误差不再减小时停止训练,此时的误差为  $3.225 \times 10^{-9}$ ,训练次数达到2 899次,为了验证神经网络对传感器温度补偿的有效性以及准确程度,把采集到的数据输入神经网络进行检测,把输出值进行反归一化处理后得到融合值,其中训练样本和检测样本的神经网络融合值如表2所示。

表1 温度和压力 A/D 采样值

实际温度 / $^{\circ}\text{C}$	温度 A/D 采样	标定压力下 A/D 采样/MPa										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
-40	2 400	223	595	969	1 343	1 718	2 088	2 461	2 836	3 211	3 587	3 961
-30	2 366	236	595	957	1 321	1 684	2 048	2 411	2 775	3 139	3 504	3 868
-20	2 328	238	587	943	1 298	1 653	2 007	2 361	2 717	3 072	3 429	3 787
-10	2 287	238	581	926	1 273	1 620	1 965	2 314	2 660	3 008	3 356	3 704
0	2 242	235	570	907	1 246	1 583	1 925	2 262	2 600	2 940	3 280	3 619
10	2 191	231	557	888	1 218	1 548	1 878	2 206	2 537	2 867	3 199	3 530
20	2 146	226	546	869	1 192	1 515	1 838	2 160	2 482	2 806	3 130	3 454
30	2 099	220	533	848	1 163	1 479	1 795	2 110	2 425	2 741	3 058	3 374
40	2 053	212	515	828	1 138	1 447	1 757	2 065	2 374	2 684	2 993	3 304
60	1 952	198	490	785	1 080	1 376	1 671	1 966	2 261	2 556	2 852	3 148
80	1 861	185	466	748	1 032	1 315	1 599	1 882	2 165	2 447	2 732	3 016

由表2可以看到,当环境温度在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ~  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  变化范围内 BP 网络数据融合值误差为 0.08%,可知利用 BP 网络进行温度补偿数据融合精度很高,在 MATLAB 神经网络工具箱中查看 BP 网络的权值与阈值,得到其连接关系,通过编程实现其压力传感器的数据控制算法。查看神经网络工具箱的权值与阈值

如图3所示,其中  $iw\{1,1\}$ ,  $lw\{2,1\}$ ,  $lw\{3,1\}$  分别为输入层与第一隐含层,第一隐含层与第二隐含层,第二隐含层与输出层之间的权值,  $b\{1\}$ ,  $b\{2\}$ ,  $b\{3\}$  分别为各层的阈值,它们之间用相应行与列的数组表示。将训练得到的各数组及温度和压力 A/D 采样值中最大最小值利用 C 语言编程完成算法控制。

表2 BP 网络数据融合值

实际温度 / $^{\circ}\text{C}$	标定压力下 BP 网络数据融合值/MPa										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
-40	0.000 1	0.099 8	0.199 6	0.299 8	0.399 8	0.499 5	0.599 4	0.699 5	0.799 8	0.899 2	0.999 9
-30	0.000 4	0.099 2	0.199 5	0.299 6	0.399 6	0.499 6	0.599 6	0.699 4	0.799 6	0.899 7	0.999 8
-20	0.000 3	0.099 3	0.199 8	0.299 6	0.399 7	0.499 5	0.599 7	0.699 6	0.799 4	0.899 3	0.99 9
-10	0	0.099 2	0.199 6	0.299 8	0.399 8	0.499 6	0.599 8	0.699 7	0.799 6	0.899 9	0.999 8
0	0.0004	0.0996	0.199 3	0.299 7	0.39 96	0.499 5	0.599 8	0.699 7	0.799 4	0.899 9	0.999 5
10	0.000 5	0.099 5	0.199 7	0.299 6	0.399 5	0.500 8	0.600 2	0.699 6	0.799 3	0.899 2	0.999 4
20	0.000 3	0.099 5	0.199 7	0.299 7	0.399 4	0.499 7	0.600 1	0.699 3	0.799 8	0.899 7	1.000 1
30	0.000 5	0.099 3	0.199 6	0.299 3	0.4	0.499 3	0.599 6	0.699 9	0.799 9	0.9	0.999 6
40	0.000 4	0.099 6	0.199 5	0.299 8	0.400 1	0.499 7	0.599 8	0.7	0.799 6	0.900 1	0.999 5
60	0.000 1	1.000 2	0.199 7	0.299 6	0.4005	0.499 6	0.599 3	0.699 8	0.799 4	0.899 6	0.999 4
80	0.000 6	1.000 3	0.199 7	0.300 1	0.399 8	0.499 8	0.599 7	0.699 6	0.799 3	0.899 5	0.999 8

## 2.4 系统软件实现方式

通过 BP 网络训练之后,得到满足控制要求训练的权值以及阈值,将其连接关系用程序编程,移植到单片机中,完成信号处理需要。在整个系统中单片机完成的工作主要有:上电初始化,包括看门狗关闭、晶振初始化、LED 与通讯模块的初始化

等;进行温度和压力的 A/D 转换,包括采样频率的设置、参考电压的选择、对 ADC12 模块设定、对数据进行平均值滤波等;对温度和压力的 A/D 采样值进行归一化,归一化的温度和压力最大值和最小值和 BP 网络训练是选择的最大最小值相同;把温度和压力信号组成二维数组输入到神经网络训练的权值连接中

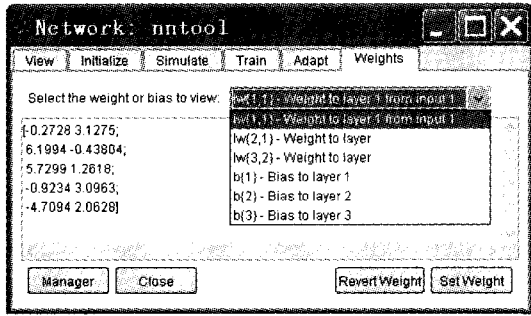


图 3 MATLAB 神经网络工具箱权值与阈值图

实现信号处理,对输出值进行反归一化;将反归一化处理的信号经过 LED 显示以及通过 RS - 485 通讯接口发送出去。其程序设计流程图如图 4 所示。

### 3 结束语

神经网络是一个大规模非线性系统,具有自适应和自学习的能力,通过其自身的数据融合消除了压力传感器的交叉灵敏度,进行了温度补偿,提高了压力传感器的精度。实验证明:经过神经网络离线训练得到数据拟合模型,处理实时信号能够进行很好的零点补偿特性以及良好的抑制时漂特性,利用超低功耗单片机 MSP430 的丰富外设减小了压力传感器的体积,利用 MSP430 单片机采集到的压力和温度的 A/D 值进行离线训练,提高了压力传感器的精度。该设计已做出样品,满足 0.1% 的精度要求。

### 参考文献:

[1] 严家明,毛瑞娟,谢永宜.两种数据融合算法对扩散硅压力传感器的温度补偿.计算机测量与控制,2008,16(9):1363-1365

[2] 沈建华,杨艳琴.MSP430 系列单片机 16 位超低功耗单片机原理

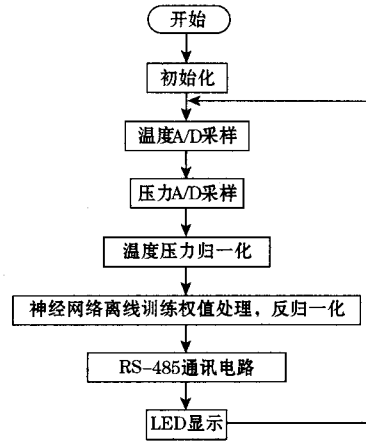


图 4 系统设计流程图

与实践.北京:北京航空航天大学出版社,2008:1-100.

[3] 刘君华.智能传感器系统.西安:西安电子科技大学出版社,2004:1-50.

[4] 丛爽.面向 MATLAB 工具箱的神经网络理论与应用.合肥:中国科技大学出版社,2003:55-85.

[5] 何平,潘国峰,孙以材,等.压力传感器温度漂移补偿的 RBF 网络模型.仪器仪表学报,2008,29(3):572-576.

[6] 张耀锋,孙以材.基于 BP 神经网络温度补偿的压力传感器无线数据采集系统.传感器世界,2008(1):36-39.

[7] 王福昌,张宝雷,张同庆.神经网络工具 nntool 及其应用.计算机与现代化,2003(9):84-85.

[8] 高峰,董海鹰,胡彦奎.基于 BP 神经网络的传感器交叉敏感性抑制.传感器技术,2005,24(2):22-26.

作者简介:张建军,(1983—),硕士研究生,主要研究方向为工业自动化及智能控制。E-mail: jianjunarmy@163.com

(上接第 8 页)量硅膜片<sup>[4]</sup>。

图 8 所示的过载保护的实例中,当压力过载,压力  $p \geq 3p_m$  ( $p_m$  为 1 倍量程)时,外界测量膜片和腔室内壁重合,同时过载保护膜片向外侧方向移动,使腔室测量端内的硅油全部赶入另一侧过载保护移动膜片处,无法向压力测量硅膜片的测试端进一步传递更高的压力值,达到了高压力过载保护的目的。

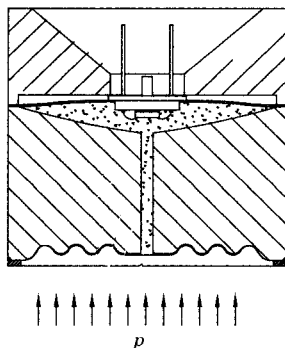


图 8 表压和绝压传感器的过载示意图

通过对表压和绝压传感器外部结构的设计,最终实现在测量压力的同时,有效地区分了正常工作压力和超高压,过

载保护移动膜片采用高弹性金属薄膜片。该表压和绝压传感器的外部过载保护设计已申请专利,专利号为 ZL200620044350.9。

### 3 结束语

硅芯片压力传感器的测量精度和稳定性提高的同时,用户越来越关注硅芯片压力传感器的长期使用可靠性,要求硅压力传感器的抗高压过载能力不断提高。针对这种要求,文中提出了针对硅芯片压力传感器的 2 种抗过载设计方法。该设计保证了硅压力传感器现场的应用安全,达到抗高压过载的目的,并提高了硅压力传感器的使用寿命和系统的安全可靠性。

### 参考文献:

[1] 唐露新,路德汉,徐今强.传感与检测技术.北京:科学出版社,2006:50-92.

[2] 张大伦,李宗培.材料力学.上海:同济大学出版社,1987:9-12.

[3] 王徐坚,孙国林,陆孝孟,等.单向压力过载保护差压传感器:中国专利,ZL2006 2 0044350.9,2006-09-05.

[4] 王徐坚,张曙,李俊毅,等.带高压过载保护的传感器:中国专利,200710043469.3,2007-07-05.

作者简介:王徐坚(1977—),工程师,主要从事工业自动化领域新型硅差压、压力传感器,以及电容式传感器的研究。

E-mail: xujian\_wang@welltech.com.cn