

# 应变式称重传感器的非线性校正\*

景婧

(东华大学信息科学与技术学院, 上海 201620)

**摘要:** 因受自身材质、工艺的限制以及外界环境影响,应变式称重传感器输入—输出特性存在非线性误差,影响系统测量精度,需要对其进行非线性校正。采用曲线拟合法建立传感器逆模型,并存储于单片机中用于非线性校正,结合外围硬件电路完成对被测数据的采集与实时处理。设计完成的测量系统具有一定的环境自适应性和智能化特点。实验结果表明,校正后系统的非线性和零点漂移得到明显改善,同时软、硬件相结合的设计方式具有较高的应用价值。

**关键词:** 应变式称重传感器; 非线性校正; 曲线拟合; 系统实现

**中图分类号:** TP212.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2013)01-0189-03

**doi:**10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.048

## Nonlinear compensation of strain-type weighing sensor

JING Jing

(School of Information Science & Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** The objective of this research was to investigate the possibility of compensating for the nonlinearity of the strain-type weighing sensor. Because of the internal and external factors, the relationship between the input weight and the output voltage of the sensor presented nonlinear characteristic. This paper applied the curve fitting method to establish the inverse model of the weighing sensor. It used the model held in the microcontroller to compensate for the nonlinearity of the sensor in real time. The research results show that this processing method can implement the nonlinear compensation of the sensor and eliminate zero drift effectively. Hardware/software co-design has been confirmed helpful and practical in system design.

**Key words:** strain-type weighing sensor; nonlinear compensation; curve fitting; system implementation

传感器技术广泛应用于各行各业,它的误差大小直接影响到测控系统的性能和测量准确度。现代测控系统对传感器的准确度、稳定性和工作条件都提出了更高的要求。应变式称重传感器是电子衡器的核心部件,在工业、农业等领域的生产、销售、质量控制、产品分级等诸多环节具有重要的作用。然而受自身材质、工艺等条件的限制以及温度等外界环境影响,其输入—输出特性存在非线性误差。为了保证传感器输入输出之间具有线性关系,除了对其本身在设计上和工艺上采取一定措施之外,还必须对它进行非线性补偿。

最早的补偿方法是采用硬件处理方法来实现的<sup>[1]</sup>,但这种方法缺乏灵活性,并且硬件电路的介入本身又会带来新的非线性因素,补偿工艺的复杂很大程度上限制了生产的效率。随着计算机技术的广泛应用,利用其强大的数据处理能力,一定程度上改善了传感器系统的静态特性。常用的补偿方法有查表法、支持向量机法<sup>[2,3]</sup>、归十算法<sup>[4]</sup>、神经网络法、遗传算法<sup>[5-7]</sup>等。然而,算法越复杂、编程难度越大,非线性校正模块依旧存在不可忽视的系统误差。本文利用单片机数据处理的优越性,运用软件方法——曲线拟合方法实现应变式称重传感器的非线性校正。将传感器与单片机结合起来,把校正模型存储于单片机中,结合外围电路实现对称重传感器的实时补偿,构成一个具有非线性校正功能的称重传感器测试系统,提高了传感器的测量精度和可靠性。

### 1 应变式称重传感器结构及误差分析

应变式称重传感器主要由双孔悬臂梁、应变片以及电桥电路组成。悬臂梁作为弹性敏感元件是应变式称重传感器的核心元件,它将被测重量转换为弹性体应变值,具有结构刚度、稳定性好等特点<sup>[1,8]</sup>。应变片基本原理是利用了金属的电阻应变效应,即金属导体在外力作用下发生机械形变时,其电阻值随着所受机械形变(伸长或缩短)的变化而发生变化,它作为转换元件将弹性体的应变同步转换为电阻值的变化。当弹性体受重量作用时,应变片阻值发生变化,经电桥作用后输出电压信号。

传感器结构如图1所示。板状梁上开有两个孔,在孔的上下对称贴有四个相同的应变片。其中: $R_1$ 、 $R_3$ 贴于梁上表面,受拉伸力作用; $R_2$ 、 $R_4$ 贴于梁下表面,受压缩力作用。如图2所示, $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 和 $R_4$ 共同构成全桥电路,电位器 $W_0$ 和 $R_0$ 为电桥调节平衡。被测重量施加于悬臂梁自由端,通过测量传感器输出电压 $U$ 的大小即可反映 $W$ 的数值大小。

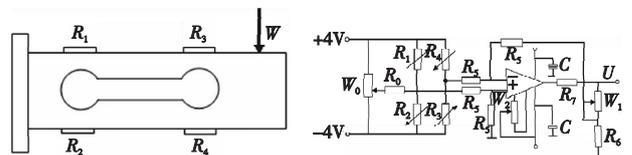


图1 应变式称重传感器结构      图2 应变式称重传感器测量电路

实际测量中,应变式称重传感器表现出非线性特性。分析其非线性误差存在的原因有多方面因素:a)传感器因自身材质、工艺等条件的限制,非线性特征无法完全消除;b)传感器设置的场所并非理想,在温度、湿度、重力加速度和空气浮力等效影响下,可引起传感器零点漂移和灵敏度的变化<sup>[9]</sup>,虽然采用半桥或全桥电路在一定程度上可以削弱共模干扰量,但实际制作工艺不可能是四个桥臂电阻初始值达到完全对称或一致,所以由同一干扰量引起的阻值改变量均不可能完全相当,继而不可能完全抵消;c)因为采用的非线性补偿方法存在缺陷,只能用最为合适的软件补偿算法去模拟实际情况,但不能找到完全与之匹配的,从而产生实际值与理论值的偏差。传感器表现出来的非线性特性给测量范围和准确性带来不便,因此,对传感器的非线性补偿显得尤为重要。

### 2 非线性补偿原理

根据上述分析,本文采用软件方法对应变式称重传感器的非线性特性进行补偿。传感器正模型可表示为

$$U = f(W) \tag{1}$$

其中,  $W$  为被测重量,  $U$  为传感器的电压输出。如图 3 所示,为补偿称重传感器的非线性,可在传感器测量部分后串联一个非线性校正环节  $Y = g(U)$ ,使补偿后的输出  $Y$  相对于  $W$  具有理想的线性特性,即  $Y = W$ ,从而有

$$Y = W = f^{-1}(U) \tag{2}$$

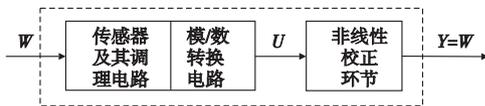


图3 应变式称重传感器非线性校正系统

由式(2)可知,若校正环节具有与传感器正模型成反函数的输出特性,即逆模型,则可以实现对传感器输出非线性的校正。式(2)可由  $n$  阶多项式表示为

$$W = \alpha_0 + \alpha_1 U + \alpha_2 U^2 + \alpha_3 U^3 + \dots + \alpha_n U^n + \varepsilon \tag{3}$$

其中,  $\varepsilon$  为高阶无穷小,  $\alpha_0 \sim \alpha_n$  为常数。

根据精度的要求,选择  $n = 3$ ,则式(3)可变为

$$W = \alpha_0 + \alpha_1 U + \alpha_2 U^2 + \alpha_3 U^3 \tag{4}$$

从式(4)可知,确定非线性校正环节的关键在于系数  $\alpha_0 \sim \alpha_3$  的求解<sup>[10]</sup>。由曲线拟合多项式式(4)计算得到的  $W_k(U)$  值与实验标定值  $\bar{W}_k$  之间必然存在误差  $\Delta_k$ ,其方差为

$$\Delta_k^2 = [\bar{W}_k - W(U)]^2 \tag{5}$$

其中,  $k = 1, 2, \dots, l$ ,  $l$  为标定点个数。其均方误差  $R$  可表示为

$$R = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m [\bar{W}_k - (\alpha_0 + \alpha_1 U + \alpha_2 U^2 + \alpha_3 U^3)]^2 = R(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) \tag{6}$$

由式(6)可见,均方误差  $R$  是系数  $\alpha_0 \sim \alpha_3$  的函数,根据多元函数求极值条件,将函数  $R(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$  分别对  $\alpha_0 \sim \alpha_3$  求偏导,并令各偏导数等于零,即

$$\frac{\partial R}{\partial \alpha_0} = 0, \frac{\partial R}{\partial \alpha_1} = 0, \frac{\partial R}{\partial \alpha_2} = 0, \frac{\partial R}{\partial \alpha_3} = 0 \tag{7}$$

整理可得方程组

$$\left. \begin{aligned} \alpha_0 l + \alpha_1 A + \alpha_2 B + \alpha_3 C &= V \\ \alpha_0 A + \alpha_1 B + \alpha_2 C + \alpha_3 D &= X \\ \alpha_0 B + \alpha_1 C + \alpha_2 D + \alpha_3 E &= Y \\ \alpha_0 C + \alpha_1 D + \alpha_2 E + \alpha_3 F &= Z \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

方程组中:  $A = \sum_{k=1}^l U_k$  为传感器输出值  $U_k$  之和,  $V = \sum_{k=1}^l \bar{W}_k$  为实

验标定重量值  $\bar{W}_k$  之和,  $B = \sum_{k=1}^l U_k^2, C = \sum_{k=1}^l U_k^3, D = \sum_{k=1}^l U_k^4, E = \sum_{k=1}^l U_k^5, F = \sum_{k=1}^l U_k^6, X = \sum_{k=1}^l U_k \bar{W}_k, Y = \sum_{k=1}^l U_k^2 \bar{W}_k, Z = \sum_{k=1}^l U_k^3 \bar{W}_k$ 。

当实验标定重量值  $\bar{W}_k$  和对应输出电压值  $U_k$  确定后,通过求解线性方程组式(8),可求得待定常数  $\alpha_0 \sim \alpha_3$ ,代入式(4)即可得非线性校正环节拟合表达式。

### 3 实验标定及数据分析

通过应变式称重传感器标定实验获取重量值  $\bar{W}_k$  和对应输出电压值  $U_k$ 。标定实验电路如图 2 所示,对放大器调零和电桥电路调平衡,待各项显示稳定后开始操作。在传感器托盘上依次放上标定重量值的砝码,同时记下传感器的输出电压,得到表 1。

表 1 标定实验数据

	1	2	3	4	5
$\bar{W}_k/g$	0	20	40	60	80
$U_k/mv$	7.239	44.976	83.434	116.743	145.816
	6	7	8	9	10
$\bar{W}_k/g$	100	120	140	160	180
$U_k/mv$	180.643	207.271	235.748	264.102	293.370
	11	12	13	14	15
$\bar{W}_k/g$	200	220	240	260	280
$U_k/mv$	323.481	349.523	377.087	401.371	428.032
	16	17	18	19	20
$\bar{W}_k/g$	300	320	340	360	380
$U_k/mv$	452.541	479.824	509.579	533.303	561.974

根据表 1 中各数据,计算式(10)中相关数值如下:  $l = 20, A = 5.9960 \times 10^3, B = 2.3391 \times 10^6, C = 1.0148 \times 10^9, D = 54.6758 \times 10^{11}, E = 2.2398 \times 10^{14}, F = 1.1026 \times 10^{17}, V = 3800, X = 15183 \times 10^6, Y = 6.6660 \times 10^8, Z = 3.0934 \times 10^{11}$ 。

将上述各值代入式(8)中,求出常数  $\alpha_0 \sim \alpha_3$  值为:  $\alpha_0 = -3.6483, \alpha_1 = 0.4882, \alpha_2 = 5.9622 \times 10^{-4}, \alpha_3 = -4.4215 \times 10^{-7}$ 。从而求得传感器非线性校正环节的表达式为

$$W = -3.6483 + 0.4882U + 5.9622 \times 10^{-4}U^2 - 4.4215 \times 10^{-7}U^3 \tag{9}$$

将表 1 中输出电压值  $U_k$  代入式(9)中,可得经非线性校正环节后的系统输出值,如表 2 所示。

表 2 不含反馈调节器非线性校正后数据及误差

	1	2	3	4	5
$\bar{W}_k/g$	0	20	40	60	80
$W_k/g$	-0.083	19.473	40.974	60.763	78.839
$\Delta_k/g$	0.083	0.527	-0.974	-0.763	1.161
	6	7	8	9	10
$\bar{W}_k/g$	100	120	140	160	180
$W_k/g$	101.384	119.210	138.778	158.717	179.690
$\Delta_k/g$	-1.384	0.790	1.222	1.283	0.310
	11	12	13	14	15
$\bar{W}_k/g$	200	220	240	260	280
$W_k/g$	201.685	220.933	241.502	259.746	279.861
$\Delta_k/g$	-1.685	-0.933	-1.502	0.254	0.139
	16	17	18	19	20
$\bar{W}_k/g$	300	320	340	360	380
$W_k/g$	298.390	319.007	341.423	359.198	380.509
$\Delta_k/g$	1.610	0.993	-1.423	0.802	-0.509

由表 2 知道,传感器经过逆模型校正后,零点偏差由 7.239 减小为 0.083 4,最大偏差为 1.684 5,满量程时相对误差为  $\delta =$

$\frac{1.6845}{380} \times 100\% = 0.443\%$ , 满足 1% 的测试要求。如果测量中有更高的精度要求, 只需提高拟合多项式阶次  $n$  值即可。校正前后输出特性曲线比较如图 4 所示。经逆模型补偿后, 保证了系统输出的线性化, 同时零点漂移情况也有明显改善。

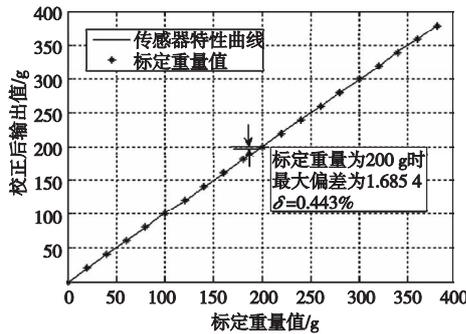


图4 传感器非线性校正后输出值 $W_2$ 与标定重量值 $W_1$ 比较

#### 4 系统实现

具有非线性校正功能的应变式称重传感器的关键技术在于非线性校正环节的处理方法, 根据曲线拟合法建立非线性校正拟合多项式(即式(9)), 利用编程语言将校正过程写入单片机中。单片机与传感器数据采集部分相连, 收集前向环节的输出数据, 并利用储存的处理方法对数据进行修正, 最终输出理想的被测重量, 改善了系统随工作环境变化的不稳定性。

##### 4.1 硬件实现

应变式称重传感器测试系统的硬件电路如图 5 所示。除数据采集部分外, 还包括显示电路、复位电路、报警电路、看门狗电路等<sup>[11]</sup>。其中, 复位电路保证在启动运行时 CPU 和系统中的其他部件都处于某一确定状态, 并从该状态开始工作; 看门狗电路可以防止程序跑飞, 增加系统的抗干扰能力; 报警电路可以保证系统在条件允许范围内完成测量工作, 避免因超出测试系统所要求的范围给数据测量带来误差。

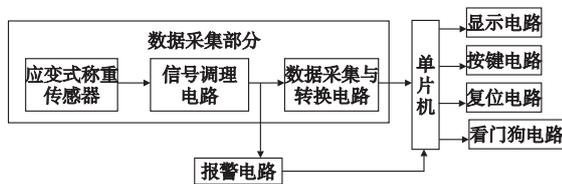


图5 具有非线性校正功能的应变式称重传感器系统

##### 4.2 软件部分

软件部分旨在完成传感器系统设计功能, 采用模块化编程提高了程序通用性。同时考虑系统抗干扰性能<sup>[12]</sup>, 除在硬件上采用看门狗监控器、复位电路外, 还在软件上采用消抖等方法。整个系统通过主程序完成初始化、键盘扫描以及调用各子功能模块, 实现对测试系统的控制管理。主程序流程如图 6 所示。

软件设计采用 C51 进行编写。首先在 C51 环境下运行成功, 再送入仿真器内进行仿真调试, 在达到预期的功能后, 用编程器将程序写入单片机内部进行独立运行。整个系统实现了应变式称重传感器测量数据的准确性和实时性。

#### 5 结束语

针对应变式称重传感器受外界环境影响以及自身条件限制导致的输入—输出呈非线性现象, 在系统中串联非线性校正

环节, 利用单片机数据处理能力建立传感器逆模型  $W = f^{-1}(U)$  进行非线性校正, 实现算法与硬件相结合。实验结果表明, 校正后测量结果满量程相对误差为 0.443%, 满足 1% 的测量要求。设计完成的应变式称重传感器测试系统具有较强的环境自适应性和抗干扰性。在非极限条件下, 通过实时数据标定确定非线性校正环节的拟合多项式, 从而契合传感器工作环境, 保证系统静态特性的稳定。同时, 该方法具有很好的通用性, 根据被测重量大小以及精度的要求, 合理选择多项式阶次, 确保传感器测量精度满足实际需要。实践证明, 这种软硬件相结合的设计方法在传感器测量领域具有较高的应用价值。

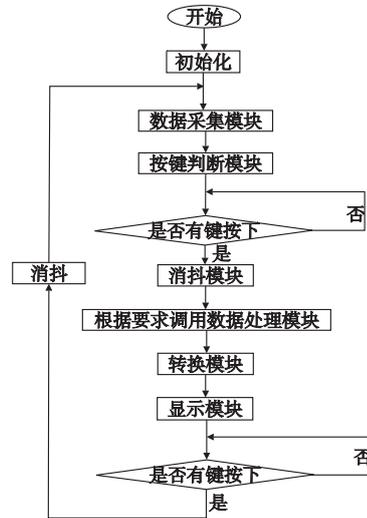


图6 主程序流程

#### 参考文献:

- [1] 王琦. 电阻应变式称重传感器的设计[J]. 木材加工机械, 2005 (3): 20-23.
- [2] 杨滨, 杨晓伟, 黄岚, 等. 自适应迭代最小二乘支持向量机回归算法[J]. 电子学报, 2010, 38(7): 1621-1625.
- [3] WANG Xiao-dong, YE Mei-ying. Hysteresis and nonlinearity compensation of relative humidity sensor using support vector machines[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2008, 129(1): 274-284.
- [4] 孙以材, 边翠华, 高骞, 等. 传感器非线性输入输出信号反演处理中的归十算法[J]. 电子学报, 2009, 37(11): 2470-2475.
- [5] 张耀峰, 孙以材, 邢晓辉. 基于人工神经网络的压力传感器的温度补偿[J]. 电子学报, 2008, 36(2): 358-361.
- [6] SUNG K H. Compensation of nonlinear thermal bias drift of resonant rate sensor using fuzzy logic[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1999, 78(2-3): 143-148.
- [7] PATRA J C, ANG E L, DAS A, et al. Auto-compensation of nonlinear influence of environmental parameters on the sensor characteristics using neural networks[J]. ISA Trans, 2005, 44(2): 165-176.
- [8] 何芝仙, 常小强, 李震. 双孔平行梁式传感器设计的理论分析与实验研究[J]. 试验技术与试验机, 2006(1): 14-17.
- [9] 李为琴. 浅析应变式称重传感器技术的发展趋势[J]. 山西师范大学学报: 自然科学版, 2007(S1): 42-43.
- [10] 刘君华. 智能传感器系统[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999: 199-201.
- [11] POUSSIER S, RABAH H, WEBER S. Adaptable thermal compensation system for strain gage sensors based on programmable chip [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 119(2): 412-417.
- [12] 卢文科. 电子检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 197-203.