

传感器信号非线性的软件补偿

阚保强¹, 张安堂¹, 王建业¹, 杜洁²

(1. 空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800; 2. 西北机电工程研究所, 陕西咸阳 712099)

摘要: 针对传感器信号中存在的非线性误差, 对采用软件校正的特点和实现方法进行了研究。文中详述了将最小二乘曲线拟合方法应用于传感器非线性校正的方法和优缺点, 并提出了将最小二乘曲线拟合与线性插值相结合的方法, 最后, 通过一个工程实例描述了在实际工程中利用曲线拟合实现传感器非线性补偿的过程。

关键词: 传感器; 最小二乘拟合; 非线性补偿

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2005)02-0025-03

在数据处理系统中, 希望系统的输入输出之间的关系为线性关系, 但在实际工程中, 有许多参数是非线性的。为了保证这些参数能有线性输出, 需要在仪表中引入一种特殊环节, 用来补偿其它环节的非线性, 通常称这种环节为“线性化器”。传感器的非线性补偿按“线性化器”的实现方法分硬件补偿和软件补偿两种方法, 硬件补偿方法包括敏感元件的线性化和非电量转换电路的线性化, 以及分段折线逼近; 软件补偿方法是把计算法和查表法相结合形成插值法。硬件补偿, 其或多或少使设备更复杂, 成本更高, 电路也复杂, 而且有些补偿是极为困难甚至是不可能实现的。智能仪表的不断发展, 使很多非线性补偿元件被单片微处理器所代替, 即使用软件补偿^[1]。

1 软件补偿方法

1.1 校正函数法

若校正函数具有明确的数学表达式(如 $1/x, x^m, \lg x$ 多项式等), 可用相应的函数电路进行连续拟合, 其优点在于误差函数是平滑连续的、宜于观测分析。当然, 分段拟合可以近似逼近任意校正函数, 尤其在校正函数的表达式难以确定或过于复杂时, 该方法更为简便, 但其误差函数有不平滑的转折点。若对信号进行微分或其它非线性处理时, 该转折点将带来麻烦。在智能仪表中, 由于微处理器具有很强的函数运算与数据处理能力, 因此用编程的方法可以很容易地产生所需的校正函数。

对于具有明确数学表达式类型的传感器, 被测参数 x 经过传感器后得到输出信号 y , y 再经放大与 A/D 转换得到与 x 相应的数字信号送往 CPU, y 与 x 不是线性关系, 若通过校正函数 $z = \varphi(y)$ 进行运算, 则 z 与 x 之间即为线性关系。

1.2 基于最小二乘准则的函数拟合法

对于不可以用函数关系来表示其非线性特性的传感器, 往往需要在传感器的数据采集和处理系统中采用函数拟合的方法来推算出传感器输入、输出的关系, 然后再通过对实测值进行选定函数的数值计算, 求得准确的测量结果。对所选拟合函数的要求是: 能将剩余的误差限制在要求的范围内, 且对于输入信号是单值性的。常用的拟合函数有: 多项式和解析函数 $1/x, e^x, \lg x$ 等。函数拟合是指从 n 对测定数据 (x_i, y_i) 中, 求得一个简单的、便于计算机处理的近似函数表达式 $f(x, y)$, 来代替实际的非线性关系。一般可以通过最小

收稿日期: 2004-06-11

基金项目: 军队科研基金资助项目

作者简介: 阚保强(1980-), 男, 山东济宁人, 硕士生, 主要从事微电子学与固体电子学研究。

二乘法来求得拟合函数^[2]。以二元曲面拟合为例,其原理是:对于 n 对实验数据 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_n, y_n, z_n)$, 一般可将传感器的输出作为一个多变量函数来处理, $z = f(x, y_1, y_2, \dots, y_n)$ 。 z 为传感器的输出; x 为传感器的输入; y_1, y_2, \dots, y_n 为环境参量, 如温度、湿度或振动等。只考虑一种参量影响时, 可采用二元函数 $z = f(x, y_1)$ 来进行补偿处理。令 $z = P, x = U, y_1 = T$, 则根据 Weierstrass 逼近定理存在多元多项式

$$p = f(U, T) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_{ij} U^i T^j \quad (1)$$

假设标定数据为 $P_1, P_2, \dots, P_N; T_1, T_2, \dots, T_N; U_1, U_2, \dots, U_N; N$ 为标定点个数。用最小二乘法原则来确定待定系数 a_{ij} 。从式(1)确定的各个 $f_k = f(U_k, T_k)$ 值, 与各个点的标定值 P 之均方差应最小。预先选定式(1)中 n, m , 则有

$$\sum_{k=1}^N [f_k(U_k, T_k) - P_k]^2 = \sum_{k=1}^N \left[\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m a_{ij} U_k^i T_k^j - P_k \right]^2 = F(a_{00}, a_{01}, \dots, a_{nm})$$

对 $F(a_{00}, a_{01}, \dots, a_{nm})$ 分别求 $a_{00}, a_{01}, \dots, a_{nm}$ 的偏导, 并令为零, 即

$$\frac{\partial F}{\partial a_{00}} = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial a_{01}} = 0 \quad \dots \quad \frac{\partial F}{\partial a_{nm}} = 0$$

经整理后可得到 $a_{00}, a_{01}, \dots, a_{nm}$ 矩阵方程。通过矩阵方程可求得 $a_{00}, a_{01}, \dots, a_{nm}$ 的值。在矩阵求解中, 为使矩阵值误差最小, 利用高斯消去法中的总体选主元法, 求解出 $a_{00}, a_{01}, \dots, a_{nm}$ 的值, 回代式(1)中。至此, 可得出传感器的非线性补偿所用的曲面拟合函数式^[3~4]。下一步就是估计 $F(a_{00}, a_{01}, \dots, a_{nm})$ 是否在允许范围内, 如不是调整 n, m 重新计算, 如是则根据拟合曲线得出连续的 $P-U$ 关系表格, 写入微处理器的 ROM 中, 这些工作都是由计算机离线完成。然后, 就可以利用拟合的函数产生校正值生成的查找表对传感器信号进行非线性校正了。

查表法的实施步骤为: 当 U 和 T 的采集分辨率为 N 位时, 将 U 从 0 到 $2^N - 1$ 和 T 从 0 到 $2^N - 1$ 的各个值, 分别代入由函数逼近法得到的 $P = f(U, T)$ 函数式, 即可得到所需的一组表格数据, 根据该表格可方便的查出所需数据 P 。

1.3 函数分段拟合和线性插值的综合算法

当用最小二乘曲线拟合法拟合函数时, 如果逼近次数太高, 导致计算速度过慢时, 就应当采用分段曲线拟合。其原理是: 对传感器分段选择多个试验点进行精确测试, 并根据测试数据绘制出传感器的各段拟合曲线, 然后利用拟合函数产生校正值生成分段查找表。如直接查表取值, 显然将会影响测量精度。如果采用线性插值的分段处理方法, 必能有效提高系统精度。所以综合应用函数分段拟合算法和线性插值将会有效提高系统的测量精度^[5]。利用线性插值法实现补偿的过程是首先确定测量值在哪一个区间, 然后调出区间端点对应值, 利用公式

$$P = \frac{P_2 - P_1}{M_2 - M_1} (M - M_1) + P_1 \quad (M_1 \leq M \leq M_2)$$

实现校正, 其中 M 为测量输出值, $(M_1, P_1), (M_2, P_2)$ 为区间端点的值。

2 应用实例

现欲拟合 K 型热电偶 $0 \sim 1\,000^\circ\text{C}$ 范围内的特性曲线。由于热电偶测量范围较宽, 采用一段拟合将带来较大误差, 因此须采用分段拟合的方法拟合特性曲线。从整个热电偶测量范围的计算精度考虑分为 5 段, 并且特性曲线多项式阶次定为 3 阶。在 Matlab6.1 下, 对标定数据^[6] 求出拟合函数的系数, 如表 1。

表 1 拟合函数系数表

分段范围/ $^\circ\text{C}$	系数			
	a_0	a_1	a_2	a_3
0 - 100	0.005 1	24.354 877 61	-0.417 645 81	0.040 254 02
100 - 300	0.958 0	23.254 215 01	0.302 546 81	-0.014 502 5
300 - 500	-9.350 4	26.906 158 63	-0.157 799 33	0.002 403 46
500 - 800	12.005 4	23.693 846 95	-0.090 036 59	0.001 549 52
800 - 1 000	38.001 2	22.210 951 90	-0.005 907 65	0.000 759 07

根据表 1 可得每一段的非线性函数方程如下(其中 U 代表电压, T 代表温度):

$0 \sim 100(^{\circ}\text{C}) : T = 0.040\ 254\ 02U^3 - 0.417\ 645\ 81U^2 + 24.354\ 877\ 61U + 0.005\ 1$
 $100 \sim 300(^{\circ}\text{C}) : T = -0.014\ 502\ 5U^3 + 0.302\ 546\ 81U^2 + 23.254\ 215\ 01U + 0.958\ 0$
 $300 \sim 500(^{\circ}\text{C}) : T = 0.002\ 403\ 46U^3 - 0.157\ 799\ 33U^2 + 26.906\ 158\ 63U - 9.350\ 4$
 $500 \sim 800(^{\circ}\text{C}) : T = 0.001\ 549\ 52U^3 - 0.090\ 036\ 59U^2 + 23.693\ 846\ 95U + 12.005\ 4$
 $800 \sim 1\ 000(^{\circ}\text{C}) : T = 0.000\ 759\ 07U^3 - 0.005\ 907\ 65U^2 + 22.210\ 951\ 90U + 38.001\ 2$

将拟合所得值与标定试验值做一比较,其误差小于 0.1°C ,见表2。

表2 拟合值与标定试验值对比表

试验标定值/ $^{\circ}\text{C}$	函数拟合值/ $^{\circ}\text{C}$	拟合误差($ \Delta $)
90	90.041	0.041
190	190.061	0.061
450	449.087	0.013
780	780.075	0.075
905	905.079	0.079

在实际单片机系统中,补偿方法是上述方法得到的补偿系数,通过转换设置在EEPROM中,利用汇编语言编制非线性误差补偿程序,单片机进行数据采集及处理过程之后补偿非线性误差。但由于单片机自身的运算速度较低,为了提高系统测试速度,一般将拟合函数生成数据表格,然后,采用查表的方法实现补偿,为了提高精度,综合采用线性插值的方法实现,从而即能提高速度又可保证精度。

3 小结

文中讨论了采用软件处理手段,实现传感器非线性的校正,提高检测的准确性和精度的方法,并通过工程实例描述了软件补偿过程。但不足之处是需事先对传感器进行高精度检测,容易引进检测误差,计算工作量比较大,当数据点多时运算系数程序会产生震荡,即不能够计算出达到精度的函数系数。

参考文献:

- [1] 强锡富. 传感器[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 贾智伟,刘红飞,李应红. 传感器信号的非线性补偿[J]. 传感技术,2002, 21(5):30-33.
- [3] 刘钦圣. 最小二乘问题计算方法[M]. 北京:北京工业大学出版社,1989.
- [4] 秦刚,王大明,张学智,等. 非线性补偿在智能传感器中的工程实现[J]. 西安工业学院学报,2001, 21(2):119-122.
- [5] 孙慧卿,郭志友. 传感器的误差补偿技术[J]. 传感技术学报,2004, 15(1):90-93.
- [6] 杜维,张宏建,乐驾华. 过程检测技术及仪表[M]. 北京:化学工业出版社,1999.
- [7] 李若仲,齐跃虎,李兆展. 光电检测中弱信号的检测[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2002,4(3):33-35.

(编辑:田新华)

Study of Sensors Non-linear Compensation Based on Software

KAN Bao - qiang¹, ZHANG An - tang¹, WANG Jian - ye¹, DU Jie²

(1. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China; 2. Northwest Institute of Electrical Mechanical Engineering Xiayang, Shaanxi 712099, China)

Abstract: Methods of compensation for non-linear error in signals of sensors based on software are introduced. Through least square fitting, the error is greatly reduced, and the precision of the system is further improved. Finally, through an engineering example, the process of implementing the compensation for the non-linear error in sensor is described by using curve-fitting in engineering practice.

Key words: sensor; least square fitting; non-linear compensation