

基于 DSP 技术的传感器非线性校正

周易, 崔葛瑾

(东华大学 信息科学与技术学院, 上海 200051)

摘要: 针对系统内含有 DSP (数字信号处理) 芯片的检测系统, 提出了运用 DSP 芯片对传感器进行非线性校正的方法。与传统校正方法进行比较可以表明, 此方法简化了设计, 提高了通用性和灵活性。并且通过最小二乘法在 DSP 芯片上实现非线性校正的实例说明其可行性。

关键词: DSP; 非线性校正; 最小二乘法

Non-linearity Rectification of Sensor Based on DSP

ZHOU Yi, CUI Ge-jin

(School of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: In this paper, a new method of non-linearity rectification of sensor based on DSP (digital signal processing) chip, is put forward in the measurement systems. With comparison to traditional non-linearity rectification methods, this new method not only simplifies design, but improves generality and flexibility. And the feasibility of this new method, by adopting least square method to full non-linearity rectification based on DSP chip is validated.

Key words: DSP; non-linearity rectification; least square method

1 引言

在检测装置的组成环节中, 往往存在非线性环节, 特别是传感器的输出量与被测物理量之间的关系, 绝大部分是非线性的。这势必难以保证系统的精度与准确度, 有时甚至不得不规定传感器的使用范围。因此, 对传感器输出信号进行非线性校正就显得尤为重要。对传感器信号的非线性校正方法比较多, 按照实现的条件可以分为用硬件电路实现和在智能芯片或微机中以软件方法实现。用硬件电路进行校正大都存在电路复杂、调试困难、精度低、通用性差等缺点, 不利于工程实际应用。以单片机为基础的智能芯片无法实现非线性校正的高速数据运算, 微机的高成本和庞大的体积又难以满足现场工控的灵活要求。所以目前在很多信号检测系统中都使用了数据计算处理能力极强、性价比较高的 DSP 芯片作为主处理器。文章提出了一种利用 DSP 技术进行传感器信号非线性校正的方法。该方法充分发挥 DSP 芯片对于数据运算处理的能力, 使非线性校正的实现具有精度高、通用性好等特点, 并给出了用最小二乘法多项式曲线拟合实现测振系统非线性校正数字信号处理的实例。

2 与硬件电路校正方法的比较

硬件校正方法主要有这几种: (1) 利用模数转换 A/D 电路来进行非线性校正; (2) 电桥电路做修改, 加入电源补充或恒定电流的电路, 使电桥电路的线性化得以保证; (3) 用多功能转换器来组成线性化电路。以上几种方法都只能应用于精度不高、被测对象相对固定的情况。若要提高精度, 必须提高 AD 转换器的位数或修正电路的精度, 这样辅助电路将变得较复杂, 成本也会提高, 而且通用性差的问题仍然难以克服。

在测振系统中, 由于被测对象的材质与工作环境可能是不固定的, 所以传感器输出的非线性关系也随着被测对象材质和工作环境的变化而变化。这样, 如果根据某一具体对象和环境设计特定的非线性校正电路, 其精度和通用性就会显得不够理想。因此, 我们设想在测试现场通过 DSP 技术对被测信号进行软件非线性校正。如图 1 所示。当被测对象的材质与工作环境发生变化时, 只要根据精度要求和测量范围改变少量的参数即可满足要求, 整个系统的灵活性和精度就会大大提高。

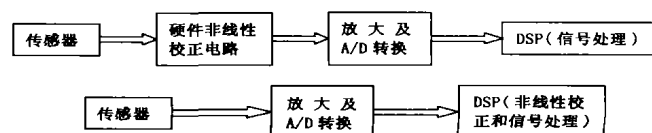


图 1 与硬件电路校正方法的比较

收稿日期: 2002-09-06。

作者简介: 周易 (1977-), 男, 浙江省杭州市人, 硕士研究生, 主要从事振动测试系统的数字信号处理的研究。

3 与传统软件方法的比较

以前用软件来实现非线性校正的智能芯片主要是运用单片工控微处理器, 通常采用查表或插值的方法, 但像多项式曲线拟合这样的校正方法, 因为计算的相对复杂和单片机本身计算能力的限制, 往往难以得到应用。而如果运用微机来解决计算能力的问题, 又由于系统的高成本和庞大的体积使得应用灵活性变差。

随着 DSP 技术的不断发展, DSP 芯片的计算功能越来越强, 应用手段也日趋普及。大多数 DSP 芯片都支持汇编语言和标准 C 语言编程, 并带有优化 C 编译器, 使 C 语言在 DSP 芯片中实现的效率大大提高。所以, 无论是查表、插值或是曲线拟合等非线性校正的运算方法都可以直接在 DSP 芯片中编程实现, 无需增加其他硬件资源, 具有成本低、精度高的特点, 如图 2 所示。

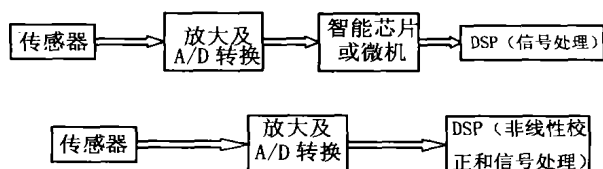


图 2 与传统的软件方法的比较

4 最小二乘法多项式曲线拟合的原理

最小二乘法多项式曲线拟合的基本思想就是选择一个多项式函数: $f(x) = \sum_{j=0}^n a_j x^j$ 去逼近一组测量数据 (x_i, y_i) ($i = 0, 1, \dots, n$)。在实际中应用最广的是采用最小二乘法对测量数据进行多项式拟合。由于被拟合的测量数据本身带有一定的测量误差, 所以, 所拟合的曲线一般不要求多项式 $f(x)$ 严格通过每一个测量点 (x_i, y_i) , 而是要求 $f(x)$ 尽可能地从每个测量点的附近通过, 进而可排除掉一些人为的误差, 真实反映出变量之间的客观整体变化规律, 获得很高的拟合精度。

最小二乘法多项式曲线拟合的过程用数学可描述为: 对于 X 与 Y 的一组测量数据 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)$, 欲求一个 n ($n < m$) 次多项式:

$$f(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n = \sum_{j=0}^n a_j x^j \quad (1)$$

来反映 X 与 Y 之间的函数关系, 并使得在给定的节点 $X_0, X_1, \dots, X_m$ 上, 使平方和误差

$$E = \sum_{i=0}^m (f(x_i) - y_i)^2 = \sum_{i=0}^m (\sum_{j=0}^n a_j x_i^j - y_i)^2 \quad (2)$$

达到最小值。 E 为测量点 X_i 处的拟合值 $f(x_i)$ 与 y_i 之间偏差的平方和。把满足上述关系的函数 $f(x)$

称为上述最小二乘问题的最小二乘解。曲线拟合就是要求这样一条函数的曲线, 使离散的测量节点数据与拟合曲线的偏差平方和为最小。因为 x_i 与 y_i 均是已知的数据, 余下的问题就是如何确定多项式 $f(x)$ 的 $n+1$ 个系数 $a_0, a_1, \dots, a_n$ 来满足对 (2) 式的要求。由 (2) 式可看出, 测量次数 m 总是要多于未知参数的个数, 因而不能利用一般的代数方程去求解这一组“矛盾”的方程, 根据数学分析的多元函数求极值定理可知, 若把 E 视为关于 a_k 的 $n+1$ 元函数, 对于不同的多项式 (不同的 a_k) 就有不同的 E 值, 即

$$E = E(a_0, a_1, \dots, a_n) \quad (3)$$

于是, 上面提出的函数拟合问题就转化为一个多元函数求极值问题, 为此, 求解

$$\frac{\partial E}{\partial a_k} = 0 \quad (k = 0, 1, \dots, n) \quad (4)$$

便立即得到 $n+1$ 个方程组成的线性方程组:

$$\sum_{j=0}^n a_j \sum_{i=0}^m x_i^{j+k} = \sum_{i=0}^m y_i x_i^k \quad (k = 0, 1, \dots, n) \quad (5)$$

解方程组 (5) 即得到 a_j ($j = 0, 1, \dots, n$)。

5 应用实例

笔者采用 TI 公司的浮点型 DSP 芯片 TMS320C3X, 运用 C 语言编制最小二乘法曲线拟合程序对以测振系统中位移霍尔传感器的输出信号进行了非线性校正处理。

首先, 在被测对象静止的状态下, 测得一组传感器输出电压值 U_i ($i = 0, 1, \dots, m$) 和传感器与被测对象之间的距离值 S_i ($i = 0, 1, \dots, m$) 的数据。 U_i 在有效测量范围内从小到大等间距取值, 并经过 A/D 转换以数字量的形式输入 DSP, 相应的传感器与被测对象之间的距离值 S_i 也以数字量的形式输入 DSP 中, 测量数据如表 1 所示。

表 1 测量数据

X_i	$U_i(\text{V})$	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
Y_i	$S_i(\text{mm})$	9.47	8.80	8.30	7.94	7.66	7.42	7.22	7.06	6.92

上述数据如果构造一个二次多项式 $S = a_0 + a_1 U + a_2 U^2$ 来拟合, 则参数 $m = 9, n = 2$ 。 (m 为拟合样本数据的长度, n 为目标多项式的阶数)

DSP 芯片根据式 (5) 应用最小二乘法对这两组数据进行运算, 可以得出 $a_0 = 11.41848, a_1 = -7.78302, a_2 = 3.40455$, 即:

$$S = 11.41848 - 7.78302 U + 3.40455 U^2 \quad (6)$$

获得拟合多项式后, 在测振系统运行时, 即可根据式 (6) 对传感器的输出信号 U 实时计算出相应的距离值 S , 然后由距离值的变化曲线求出被测对象的振动

表 2 实际测量值与拟合计算值的比较

U_i (V)	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7
测量值 S_i (mm)	9.47	9.09	8.80	8.56	8.30	8.19	7.94	7.79	7.66
计算值 $\bar{S}_i$ (mm)	9.39	9.11	8.85	8.61	8.38	8.17	7.97	7.80	7.64
偏差 $-\bar{S}_i - S_i$	-0.08	0.02	0.05	0.05	0.08	-0.02	0.03	0.01	-0.02
U_i (V)	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1.0	1.05	1.1	
测量值 S_i (mm)	7.53	7.42	7.23	7.22	7.04	7.06	6.96	6.92	
计算值 $\bar{S}_i$ (mm)	7.50	7.37	7.26	7.17	7.10	7.04	7.00	6.98	
偏差 $-\bar{S}_i - S_i$	-0.03	-0.05	0.03	-0.05	0.06	-0.02	0.04	0.06	

幅值和频率。

表 2 列出了实际测量值与拟合计算值之间的比较关系。

表中两者的最大相对误差为 $0.08/8.30 \approx 0.00964 < 1\%$ ，具有较高的拟合精度。由于采用 C 语言编程，计算公式的描述直观、简洁。同时，被拟合数据的长度 m 和拟合多项式的次数 n 都可根据测量现场的条件实时进行调整。例如可以根据具体被测对象的振幅变化范围适当增大或减小数据长度 m ，以达到更好的拟合效果。而多项式次数 n 的调整又可满足不同的精度要求。所以运用 DSP 技术，在现场条件或测试要求改变时，不必重新大规模改编程序，只需相应地修改参数 m 或 n ($n < m$) 即可。而要完成同样运算任务，并到达相应的测试精度，目前的单片工控微处理器在运行速度是难以实现的，程序编制的工作量较大，通用性也较差。如果运用微机，虽然在运算速度、精度等方面都能与 DSP 相当，但成本较高，

也不适应工业现场的工作条件。所以对于实时性要求较高的传感器信号的非线性校正，运用 DSP 技术实现是比较理想的选择。

当然，除了最小二乘多项式曲线拟合外，反函数、插值和查表等方法都可以在 DSP 芯片中用 C 语言或汇编语言实现。实际应用时，可根据具体对象选择不同的程序，有很好的灵活性。

6 结束语

文章提出的在 DSP 芯片中实现非线性校正的观点和方法，经过研究和实验验证在精度、通用性、灵活性方面都非常适合实际工程应用，可以应用于各种传感器系统。

参考文献：

- [1] 刘君华. 测试技术与测试系统设计 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999.
- [2] 王艳. 传感器非线性校正方法研究 [J]. 测试技术学报, 1998, 112(3): 27-31.
- [3] 付尚朴. 线性方程组极小最小二乘解行处理法 C 语言程序 [J]. 教学与科技, 1990, 4(3): 20-26.
- [4] 张雄伟, 曹铁勇. DSP 芯片的原理与开发应用 (第 2 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [5] 王念旭. DSP 基础与应用系统设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.

(上接第 358 页)

在监测系统中会遇到数据采集误差加大或出现异常值、在干扰的侵害下 RAM 中的数据发生串改、程序运行失常等，因此在该系统软件设计中采取了多种形式的抗干扰措施。如采用均值法、中值法避免了采集的数据偏大或偏小的情况；采取比较取舍法剔除个别异常值的影响。为了防止数据因干扰而失真或不能传输显示，在设计中采用循环方式进行数据传送，保证传送数据的正确性。软件中也采用“设自检程序”方法，一旦出现了问题能立即进行改正。

6 结论

纸张在线实时检测系统实现了对印钞纸张纵向尺寸的实时在线检测。该系统从开始试运行以来，系统运行稳定，能准确、可靠地测量出纸张的长度，并能实时显示出来，便于操作工人及时发现问题，及时处

理。保证了纸张纵向长度尺寸的稳定性，大大提高了产品的合格率。

纸张长度在线实时系统的成功研制，填补了国内空白，降低了生产成本，提高了产品质量，增加了企业的经济效益。

参考文献：

- [1] 雷卫武. 89C52 单片机在电子计重秤中的应用 [J]. 电子与自动化, 2000, (5): 28-29.
- [2] 皇顿平. 微机控制系统的抗干扰技术应用 [J]. 电脑与信息, 2000, (5): 39-42.
- [3] WU W F. Application of PLC in pumping station control system [J]. Electronics & Automation, 2000, (5).
- [4] 高晓康. 计算机辅助测试技术及其应用 [J]. 计算机测量与控制, 2001, (5): 4-5.
- [5] 李凤保. 造纸生产过程控制集散系统 [J]. 计算机测量与控制, 2001, (5): 31-32.