

用实时小波分析消除噪声的动态测量误差补偿

刘 清, 孙 颖

(南京师范大学 数学与计算机科学学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 在传感器的输出端串接一个动态补偿环节来改善传感器性能, 消除动态测量误差. 补偿环节本质上是一个带通或高通滤波器. 在补偿动态测量误差的同时, 会引入严重的高频噪声干扰, 影响测量系统的精度. 为了解决该问题, 研究了一个采用实时小波滤波算法, 消除动态测量误差补偿中噪声干扰的方法. 该方法采用实验数据, 通过系统辨识的方法得到补偿环节系数, 消除动态测量误差. 同时, 用正交紧支撑小波和滑动数据窗口, 构造一种保留离线小波降噪优点的实时小波降噪算法, 消除噪声干扰. 最后, 通过对薄膜热电偶动态测量误差补偿的仿真实验, 验证了该方法的有效性.

[关键词] 实时小波, 动态误差, 补偿, 消除噪声

[中图分类号] TP212 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2006)03-0001-04

Dynamic Measurement Error Compensating of Real-time Wavelet De-noising Algorithm

LIU Qing SUN Ying

(School of Mathematics and Computer Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract A dynamic compensation unit is connected with output port of sensor in series to improve the sensor's characteristics and compensating dynamic measurement error of sensor. The unit is a band-pass filter or a high-pass filter, it can eliminate dynamic measurement errors but cause severe noise amplification. In order to solve this problem, a real-time wavelet de-noising algorithm is researched in compensating for dynamic measurement error. The coefficient of the unit is obtained via experimental data. At the same time, the real-time wavelet de-noising algorithm that has the advantages of off-line wavelet de-noising algorithm is formed through the orthogonal wavelet with compact support and moving window. The method is proved effective by the simulation experimental results of thin-film thermocouple dynamic error compensation.

Key words real-time wavelet, dynamic error, compensation, de-noising

在生产和科研中, 动态测量技术的应用与日俱增. 然而, 许多传感器的动态性能不能满足动态测量的要求, 用这样的传感器进行测量时, 将会导致动态误差. 因此, 如何减小动态误差, 获取准确可靠的被测信号, 是动态测量需要解决的重要问题之一.

动态测量误差形成的原因, 是因为传感器动态特性的频带不够宽, 不足以覆盖动态信号中包含的所有频率分量, 而使部分高频分量受到不同程度的衰减造成的. 在传感器之后增加动态补偿环节, 使传感器动态特性的频带得以适当延伸, 可达到减小动态误差的目的^[1-3]. 但是, 在测量系统中存在噪声干扰, 而噪声又是一个高频信号, 所以, 传感器频带的扩展将会引起严重的噪声干扰, 影响测量系统的精度.

为此, 本文研究了一种用实时小波分析消除噪声干扰的传感器动态测量误差方法. 该方法在采用实验数据得到动态补偿环节的同时, 通过实时小波滤波的方法减小测量系统的噪声, 提高测量系统的精度. 仿真实验验证了该方法的有效性.

1 动态补偿环节的设计

动态补偿的原理如图 1 所示. 补偿环节 $H(Z^{-1})$ 在理想情况下应采用高通滤波器. 但是, 高通滤波器

收稿日期: 2006-04-12

基金项目: 国家“十五”“211”一期学科建设项目基金资助.

作者简介: 刘 清 (1962-), 博士, 副教授, 主要从事智能控制与现场总线测控系统的研究与开发. E-mail: njnjk@163.com

引起更严重的噪声放大,因此,在这里采用了带通滤波器^[1]。另外,为了减少设计 $H(Z^{-1})$ 时对传感器动态特性的数学模型依赖,可采用通过实验数据,由系统辨识的方法得到 $H(Z^{-1})$,该方法是将 $H(Z^{-1})$ 的设计问题转化为一个最优化问题。补偿环节的输出 $u_c(n)$ 可用一个线性差分方程表示:

$$u_c(n) = \sum_{i=1}^P a_i u_c(n-i) + \sum_{j=0}^Q b_j u(n-j)$$

(1)

式中, $u_c(k)$ 为 k 时刻补偿器输出; $u(k)$ 为 k 时刻传感器输出的采样值; P 和 Q 为滤波器的阶次。滤波器的参数 a_i 和 b_j 的设计是通过实验数据对 $H(Z^{-1})$ 系统辨识的最优化过程,即使

$$J = \sum_{k=0}^{M-1} [u_c(k) - u_d(k)]^2 \longrightarrow \min$$

(2)

其中, $u_c(k)$ 和 $u_d(k)$ 分别为在激励信号作用下补偿环节实际输出和希望输出的实验数据。

2 用实时小波分析消除信号噪声

在增加了动态补偿环节后,高频噪声干扰被加重。为了保证一定的测量精度,必须消除输出信号的噪声干扰。由于动态测量信号 $u(k)$ 是时变的,无法采用平均和中值滤波的方法减小噪声干扰^[4]。为了解决这个问题,本文讨论了一种实时小波分析的滤波算法。该方法可以有效地减小动态测量系统的噪声。

2.1 小波分析消除噪声

运用小波分析进行一维信号消噪处理是小波分析的重要应用之一。补偿后的传感器输出信号的模型可以表示为如下的形式: $u_c(i) = u_f(i) + e(i)$ 。其中, $u_c(i)$ 为含噪声的信号; $u_f(i)$ 为真实信号; $e(i)$ 为噪声。设 $u_c(i)$ 是一个平方可积信号, $u_c(i) \in V_0 \subset L^2(R)$ 。在多分辨率分析(MAR)中, V_0 空间可以用有限子空间来逼近,即有:

$$V_0 = V_1 \oslash W_1 = V_2 \oslash W_2 \oslash W_1 = \dots = V_N \oslash W_N \oslash \dots \oslash W_2 \oslash W_1 = \sum_{j=1}^N V_N \oslash W_j$$

式中, $\{V_j\}$ 为尺度空间($j \in \mathbf{Z}$, \mathbf{Z} 为自然数集合); $\{W_j\}$ 是尺度为 j 的小波空间,且有下式成立:

$$V_j = V_{j+1} \oslash W_{j+1} \quad j = 0, 1, \dots, N-1$$

其中, V_{j+1} 表示 V_j 的低频子空间, W_{j+1} 表示 V_j 的高频子空间。

在测量系统中,真实信号 $u_f(i)$ 通常表现为低频信号或是一些比较平稳的信号,而噪声信号 $e(i)$ 则通常表现为高频信号。所以消噪过程可按如下方法进行处理:首先,对信号 $u_c(i)$ 进行小波分解(如进行3层分解,分解过程如图2所示),则噪声部分通常包含在高频系数 cd_1 、 cd_2 、 cd_3 中;然后,通过门限阈值等形式对包含噪声高频系数进行收缩化处理;最后,对信号进行重构即可以达到消除噪声的目的。

由于小波分析的非因果性及不具备平移不变性,使小波分析难以实现递推计算,因而小波滤波算法也不能递推运算。目前的小波滤波算法都是基于对测量数据的离线批量处理,从而影响了小波降噪的在线实时应用。

2.2 实时小波滤波算法

为保证实时小波滤波算法的运算速度,小波变换应优先采用快速离散小波变换算法。

设用小波进行多分辨率小波分解所需要的最小数据数量为 2^0 ,其中 $j_0 \in \mathbf{N}$, $j_0 \geq 1$ 再记到 k 测量时刻已获得的实时测量数据序列为 $u_c(1), u_c(2), \dots, u_c(k)$ 。那么,实时小波降噪可以这样完成^[5]:

在 $k < 2^0$ 期间,由于所得到的采样数据数量太少,无法进行小波变换及降噪,因此,直接输出 k 时刻的实时采样值 $a(k)$ 。当 k 增长到 $k = 2^0$ 时,进行首次小波滤波处理,得到一个长度为 2^0 的滤波后数据序列,记为 $tb(1), tb(2), \dots, tb(2^0)$,这个数据序列是对整个序列记为 $u_c(1), u_c(2), \dots, u_c(2^0)$ 小波滤波。输出 $tb(2^0)$ 作为 $k = 2^0$ 的实时滤波值,其他点的滤波后取值 $u_c(1), u_c(2), \dots, u_c(2^0 - 1)$ 可简单地抛弃或作为 $u_c(1), u_c(2), \dots, u_c(2^0 - 1)$ 的平滑取值留作它用。当下一个采样值 $u_c(2^0 + 1)$ 到来时,再用最新得到

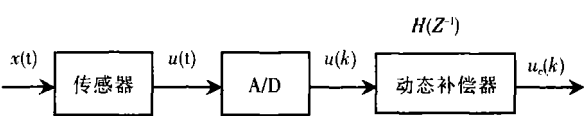


图1 动态补偿原理示意图

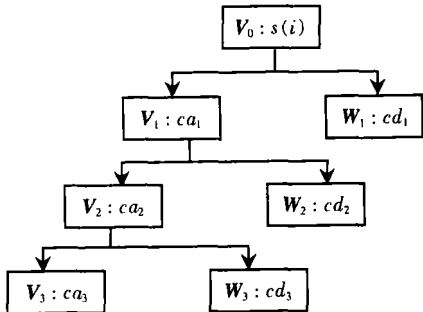


图2 小波分解示意图

2^{j_0} 个采样值, 即 $u_c(1), u_c(2), \dots, u_c(2^{j_0} + 1)$, 进行小波滤波计算, 然后将滤波所得的最后一个值, 即 $u_c(2^{j_0} + 1)$ 作为 $k = 2^{j_0} + 1$ 时刻的实时滤波输出. 这种计算伴随 k 的增长继续进行, 构成一个以宽度固定的滑动窗口内采样数据为输入的处理过程. 滑动窗口总是只包含 2^{j_0} 个最新采样数据, 直到 $k = 2 \times 2^{j_0} = 2^{j_0+1}$ 时刻为止. 当 $2^{j_0+1} \leq k < 2^{j_0+2}$ 时, 改变滑动窗口的宽度, 使之包含 2^{j_0+1} 个最新采样数据, 滤波处理后也只输出最后一个值. 依此类推, 即当 $2^j \leq k < 2^{j+1}$ 时 (其中 $j > j_0$), 取滑动窗口的宽度, 使之包含 2^j 个最新采样数据, 然后对该窗口内的数据进行小波滤波处理, 输出最后一个降噪值.

显然, 在实时系统中, 上述滑动窗口的宽度不能随采样数据量的不断增大而无限扩大, 否则滤波处理时间将超出实时系统数据更新率的要求, 当 $k \geq 2^j$ 时, j 与采样速率、被采样信号的截止频率、实时数据更新率以及处理器运算速度等有关, 滑动窗口的宽度可保持为包含最新 2^j 个采样数据而不再变化.

3 仿真研究

为了验证在传感器动态误差的补偿中, 通过实时小波滤波, 消除测量噪声干扰的有效性, 作者进行了仿真研究. 仿真模型为某一薄膜热电偶动态特性的数学模型, 模型的传递函数为^[6]:

$$G(z) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{0.4181 + 0.05491z^{-1} - 0.3632z^{-2}}{1 - 1.9133z^{-1} + 0.9135z^{-2}} = \frac{0.4181(z + 1.000)(z - 8.86869)}{(z - 0.99763)(z - 0.91567)} \quad (3)$$

由于在 $G(z)$ 中存在一个较接近单位圆的实极点, 使得传感器的动态特性呈现为一阶特性, 其动态响应需经过一个较长的过程才到达稳态, 从而在对瞬态信号测量时出现动态误差. 为了改善传感器动态测量的精度, 必须进行传感器动态特性的补偿.

3.1 补偿环节的设计

增加补偿环节是为了改善传感器的响应速度, 其本质是扩大传感器频率响应的带宽. 为使补偿器的输出快速达到传感器稳态值, 参考模型选用较大固有频率的二阶低通滤波器

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi_0\omega_0s + \omega_0^2} \quad (4)$$

这里, 阻尼比 $\xi_0 = 0.8$ 固有频率 $\omega_0 = 5\pi \text{ rad/s}$. ω_0 远大于薄膜热电偶的固有频率, 但也不能够选取得太大, 盲目地拓宽传感器的通频带, 会使测量中存在高频噪声信号得到放大, 使补偿失去意义.

以参考模型的阶跃响应的输出作为补偿环节 $H(s)$ 辨识的希望输出数据, 用微粒群 (PSO) 算法对补偿环节 $H(s)$ 进行离线辨识^[6], 使得式 (2) 成立. 通过辨识过程得到补偿环节的脉冲响应 $H(z)$ 为:

$$H(z) = \frac{5.4628 - 4.1838z^{-1} - 1.2632z^{-2}}{1 - 1.7835z^{-1} - 0.7994z^{-2}} \quad (5)$$

传感器的输出值 $u(i)$ 经过补偿环节处理后输出 $u_c(i)$. 补偿环节扩大了薄膜热电偶频率响应的带宽, 使得薄膜热电偶的动态测量误差被减小. 但是, 在 A/D 采样环节不可避免地存在测量噪声, 这些微弱的噪声在经过补偿环节后被严重放大. 作者在传感器的输出值 $u(i)$ 上叠加了一个噪声水平 $\xi = 0.01$ 的高斯白噪声, 该信号经过补偿环节后的输出如图 3 所示 (为了便于对信号分析, 输出信号采用归一化的幅值, 即: 在输入信号幅值为 1 时, 使得输出信号的幅值也为 1).

从仿真结果可知, 在补偿后的输出 $u_c(i)$ 中, 噪声被严重放大, 影响测量系统的精度.

3.2 实时小波消除噪声

为了消除动态测量误差补偿中噪声干扰, 可采用实时小波滤波算法. 考虑到实时处理的速度, 小波基选择具有正交和紧支撑性质的 Daubechies 小波, 小波分解的尺度为 5. 初始实时小波滤波的窗口宽度 $k = 2^5 = 32$. 当滤波序列 $u_c(i)$ 取到第 $i = 2^6 = 64$ 时, 实时小波滤波的窗口宽度扩展为 $k = 64$. 以此增加到 $k = 2^7 = 256$ 时, 窗口的宽度固定. 采用非负绞系软阈值收缩化方法处理高频小波分解的系数, 然后进行小

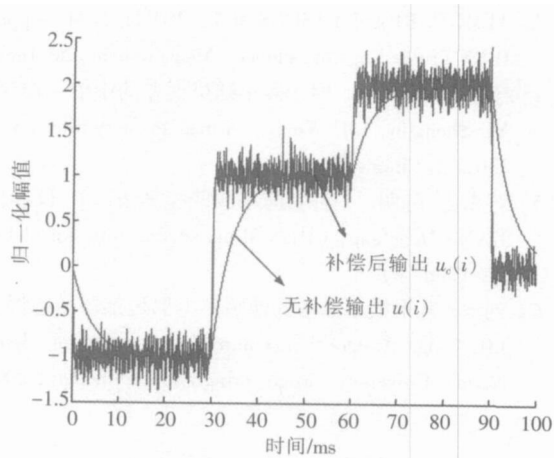


图 3 噪声干扰下的动态补偿输出

波逆处理, 将滤波所得的最后一个值, 作为滤波输出值. 经过实时小波滤波处理后的输出如图 4 所示.

受到噪声干扰的补偿环节输出信号 $u_c(i)$ 的序列长度为 $N = 2048$, $u_c(i)$ 经过实时小波滤波的输出数据 $lk(i)$, 而没有受到噪声干扰的补偿环节的真实输出信号为 $u_f(i)$, 定义信号的标准差

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (lk(i) - u_f(i))^2} \quad (6)$$

通过分析可得到, 没有经过实时小波消除噪声的输出信号的标准差 $S_1 = 0.1157$, 而经过实时小波消除噪声的标准差 $S_2 = 0.0537$. 所以, 经过实时小波滤波后, 信号的噪声水平被明显减小.

4 结语

通过在传感器的输出端串接一个补偿环节, 拓宽传感器或测试系统的频带, 以减小动态测量误差, 是动态测试的一个重要研究内容. 但是在动态误差被消除的同时, 测试系统的高频噪声也被严重放大, 影响到系统的精度. 虽然小波分析是一种非常有效的消除噪声的滤波技术, 但是只适用于离线数据处理, 而测试系统的输出信号是一个实时信号, 所以无法直接使用小波滤波技术. 为此, 本文研究了用实时小波滤波算法, 消除动态测量误差补偿中噪声干扰的方法. 通过正交紧支撑小波和滑动数据窗口, 构造一种保留离线小波降噪优点的实时小波降噪算法. 仿真实验的结果显示该方法可以得到较理想的动态测量结果.

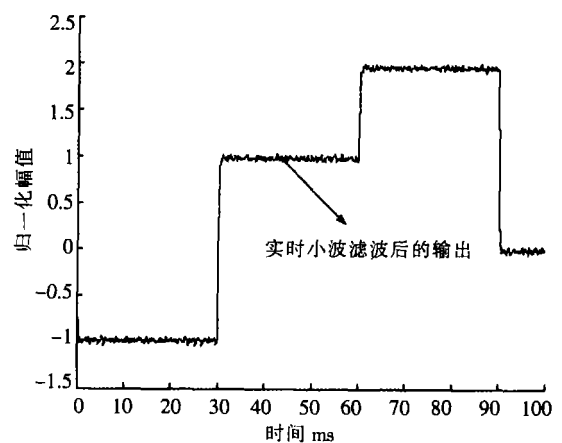


图 4 经过实时小波滤波后的补偿输出

[参考文献] (References)

- [1] 刘清, 沈祖诒, 王柏林, 等. 热敏电阻测量误差的非线性逆滤波器补偿研究 [J]. 上海交通大学学报, 2004, 38 (9): 1601-1604.
LIU Qing SHEN Zuyi WANG Bailin et al. Researching measurement error of thermistor compensated by nonlinear inverse filtering [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(9): 1601-1604. (in Chinese)
- [2] DAN ELMASSICOTTE, BRUNO MBA MEGNER. Neural-network-based method of correction in a nonlinear dynamic measuring system [J]. IEEE Trans Instrum Meas, 1999, 49(4): 1641-1645.
- [3] AIMODARRESI YASIN S M T, WHITE N M. Application of artificial neural networks to intelligent weighing systems [C] // IEEE Proceedings of Science, Measurement and Technology, New York, 1999, 46(1): 265-269.
- [4] 于盛林, 刘文波. 用于减小随机误差的中值-模糊滤波器 [J]. 计量学报, 1995, 16(4): 297-230.
YU Shenglin LIU Wenbo. A median-fuzzy filter for reducing random error [J]. Acta Metrologica Sinica, 1995, 16(4): 297-230. (in Chinese)
- [5] 蒋东方, 陈明. 一种实时小波降噪算法 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(6): 781-783.
JIANG Dongfang CHEN Ming. A real-time wavelet denoising algorithm [J]. Yiqi Yubiao Xuebao, 2004, 25(6): 781-783. (in Chinese)
- [6] 刘清. 基于模型参考的薄膜热电偶传感器动态误差补偿算法 [J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2006, 5(1): 5-8.
LIU Qing. A algorithm of thin-film thermocouple dynamic error compensation based on model reference [J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology, 2006, 6(1): 5-8. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]