

基于小波消噪的传感器动态补偿方法

刘 清

(南京师范大学 数学与计算机科学学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 在利用传感器进行动态测量时, 为了得到精确的测量结果, 需要对传感器进行动态补偿, 补偿环节可以通过系统辨识得到. 由于测量噪声的存在, 会使得辨识得到的补偿环节存在一定误差, 影响到测量系统的精度. 利用小波分析的方法可以对传感器输出信号进行滤波消噪. 利用消噪后的信号, 通过系统辨识方法建立传感器动态特性的补偿环节. 仿真研究表明, 采用该方法可以克服测量噪声对传感器动态补偿环节的影响.

[关键词] 传感器, 动态补偿, 辨识, 噪声, 小波分析

[中图分类号] TP212.6, [文献标识码] B, [文章编号] 1672-1292(2004)02-0033-04

0 引言

在利用传感器对瞬变信号实施动态测量时, 由于传感器动态特性存在着一定的响应滞后, 使得动态测量结果与真值之间存在较大的动态误差. 为了得到精确的动态测量结果, 必须对传感器的输出信号进行后处理, 增加动态补偿环节, 实现对动态测量误差的补偿. 例如利用薄膜热电偶测量枪炮膛内壁温度^[1]和用热敏电阻测量材料特性^[2].

目前, 设计传感器动态补偿环节的方法主要有: (1) 将传感器的动态特性用低阶微分方程来表示, 使补偿环节传递函数的零点与传感器传递函数的极点相同, 通过零极抵消的方法实现动态补偿^[3,4]. 但这种方法要求在测量前确定传感器的数学模型. 由于在确定数学模型时, 为避免建模所带来的复杂性, 会作一些简化和假设. 这样, 所设计的动态补偿器的效果必然受到限制, 同样会带来动态测试误差. (2) 按传感器的实际特性建立补偿环节^[5]. 根据传感器对输入信号响应的实测参数, 以及参考模型输出, 通过系统辨识的方法设计动态补偿环节. 但是, 实际测量系统不可避免地存在各种噪声, 使得辨识得到的传感器动态补偿环节也存在一定误差, 影响到测量系统的精度. 为了克服噪声对辨识得到的补偿环节的影响, 本文对采用小波分析对传感器输出信号进行滤波消噪处理, 然后利用消噪后的信号以及参考模型输出建立补偿环节的方法进行了研究. 研究表明, 该方法可以克服测量

噪声对设计传感器动态补偿环节的影响, 提高动态测量系统的精度.

1 动态补偿原理

传感器将被测信号 $u(t)$ 转换为 $y(t)$, 当被测信号 $u(t)$ 发生变化时, 由于传感器的动态特性存在一定程度的惯性和一些相位滞后, 使得传感器输出 $y(t)$ 无法表示真实的测量值 $u(t)$. 如果要对 $y(t)$ 进行测量, 通常必须等很长时间才能得到其稳态结果. 为改善系统的动态特性, 必须在传感器输出端串连一个动态补偿器, 即用补偿器输出的 $y_c(t)$ 代替 $y(t)$, 可使测量时间大幅度缩短, 如图 1 所示.

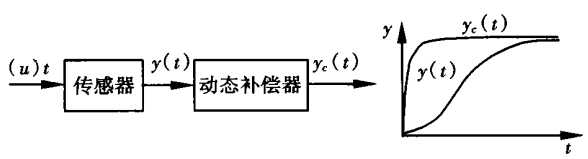


图 1 动态补偿原理示意图

为了减少设计动态补偿器时对传感器动态特性的数学模型的依赖, 可采用通过实验数据建立动态补偿器. 该方法是将动态补偿器的设计问题转化为一个最优化辨识问题. 具体描述如下. 线性传感器的动态补偿器可用一个线性差分方程表示:

$$A(Z^{-1})y_c(k) = B(Z^{-1})y(k) + \zeta(k) \tag{1}$$

$$\zeta(k) = A(Z^{-1})v(k) \tag{2}$$

式中, $A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}$, $B(z^{-1}) = b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m}$, $y_c(k)$ 为 k 时刻动态补偿器的

输出, $y(k)$ 为 k 时刻传感器的输出和动态补偿器的输入, $v(k)$ 为输出端综合噪声, m 为传感器动态模型的阶次, n 为补偿后传感器系统动态模型的阶次. 待辨识的参数为

$$\theta = (a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m).$$

参数辨识的原理如图 2 所示. 其中, $y_c(k)$ 为 $y(k)$ 为输入信号作用下传感器补偿器的实际输出, $y_p(k)$ 为传感器的理想输出. 通过动态校准实验得到辨识参数所需要的数据 $y(k)$, 但是传感器的实际输出 $y(k)$ 存在一定的噪声干扰, 影响到辨识参数的精度. $y(k)$ 与传感器输出真实值之间 $y_d(k)$ 之间满足如下关系:

$$y(k) = y_d(k) + e(k) \tag{3}$$

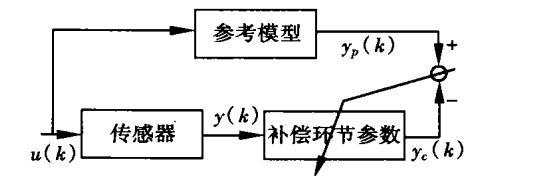


图 2 补偿环节参数辨识原理

为克服噪声对辨识参数的影响, 对 $y(k)$ 进行小波消噪处理, 得到 $y_d(k)$ 的近似值 $y_i(k)$, 使用 $y_i(k)$ 和作为补偿器的输入进行参数辨识. 而对参数 θ 的系统辨识本质上是一个最优化过程, 即使

$$J_{\min} = \sum_{k=0}^{N-1} [y_c(k) - y_p(k)] \tag{4}$$

2 小波分析用于信号消噪处理

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. 一个含噪声的一维信号的模型可以表示成如下的形式:

$$s(i) = f(i) + e(i)$$

式中, $f(i)$ 为真实信号, $e(i)$ 为噪声, $s(i)$ 为含噪声的信号.

设 $s(i)$ 是一个平方可积信号, $s(i) \in V_0 \subset L^2(\mathbf{R})$. 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:

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

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:

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

式中, 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 $f(i)$ 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 $s(i)$ 进行小波分解(如进行 3 层分解, 分解过程如图 3 所示). 则噪声部分通常包含在高频系数 cd_1, cd_2, cd_3 中, 因而, 可以以门限阈值等形式对小波系数进行处理, 然后对信号进行重构即可以达到消除噪声的目的. 对信号 $s(i)$ 消噪的目的就是要抑制信号中的噪声部分, 从而在 $s(i)$ 中恢复出真实信号 $f(i)$.

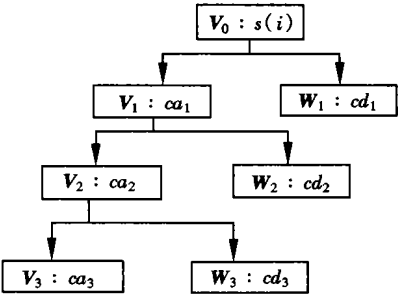


图 3 小波分解示意图

一维信号的消噪过程可分为 3 个步骤进行:

- (1) 小波分解. 选择一个小波并确定一个分解的层次 N , 然后对信号 $s(i)$ 进行 N 层分解.
- (2) 小波分解高频系数的阈值量化. 对第 1 到第 N 层的每一层高频系数, 选择一个阈值进行软阈值量化处理.
- (3) 小波重构. 根据小波分解的第 N 层的低频系数和经过量化处理后的第 1 层到第 N 层的高频系数, 进行信号的小波重构.

3 仿真研究

为了验证在传感器动态误差的补偿中, 通过小波分析滤波, 消除测量噪声对设计动态补偿器的影响, 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:

$$G(z) = B(z^{-1})/A(z^{-1}) = \frac{0.4181 + 0.05491z^{-1} - 0.3632z^{-2}}{1 - 1.9133z^{-1} + 0.9135z^{-2}} = \frac{0.4181(z + 1.000)(z - 8.86869)}{(z - 0.99763)(z - 0.91567)} \tag{5}$$

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 传感器输出信号

在系统辨识的理论研究中, 白噪声是用于辨识的理想输入信号. 但是, 在传感器动态特性的补偿

建模中, 无法产生按白噪声规律变化的输入信号. 为了充分激励传感器的动态特性, 并考虑到实现的方便性, 采用

$$u(k)=\begin{cases} u_1 & 0\leq k\leq k_1 \\ u_2 & k_1<k\leq k_2 \\ 0 & k_2<k\leq k_3 \end{cases} \quad (6)$$

作为传感器的激励信号 ($u_1=1, u_2=2, k_1=30\,000, k_2=60\,000, k_3=10\,000$, 采样时间为 $T=1\text{ ms}$). 而将在(6)式信号激励下的传感器的输出信号 $y(k)$, 作为补偿环节的输入信号. 考虑到工程中的实际情况, 在 $y(k)$ 叠加了非平稳随机噪声 $e(k)=10\cdot[\sigma_{\min}-\lambda\cdot(\sigma_{\max}-\sigma_{\min})]\cdot\text{randn}(0,1)$. 其中, λ 为在 $[0,1]$ 之间分布的随机数; randn 均值为 0, 方差为 1 的白噪声, 取 $\sigma_{\min}=0.1$ 和 $\sigma_{\max}=0.4$. 叠加了噪声的 $y(k)$ 信号如图 4 中曲线 1 所示, 从图中可以看出传感器达到稳态值需要较长的过渡过程, 所以在瞬态测量中存在较大的误差.

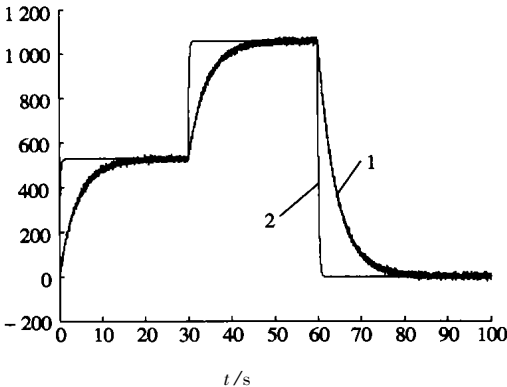


图 4 无补偿环节传感器输出和理想输出

3.2 参考模型选择

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. 考虑到(5)式的传感器的动态特性呈现为一阶特性, 为使补偿器的输出快速达到传感器稳态值, 参考模型选用较大截至频率的一阶低通滤波器:

$$G'=\frac{\omega_e}{S+\omega_e} \quad (7)$$

式中, 截止频率 $\omega_e=2\pi\text{ r/s}$. 在(6)式信号激励下, 参考模型(7)式的输出信号 $y_p(k)$ 如图 5 中曲线 2 所示, 该信号能够快速达到稳态值.

3.3 补偿环节辨识

补偿环节在理想情况应采用高通滤波器, 但是, 高通滤波器引起严重的噪声放大, 因此, 在这里采用了带通滤波器^[2].

3.3.1 输入信号含噪声的补偿环节辨识

用 $y(k)$ 作为补偿环节的输入信号, $y_p(k)$ 作

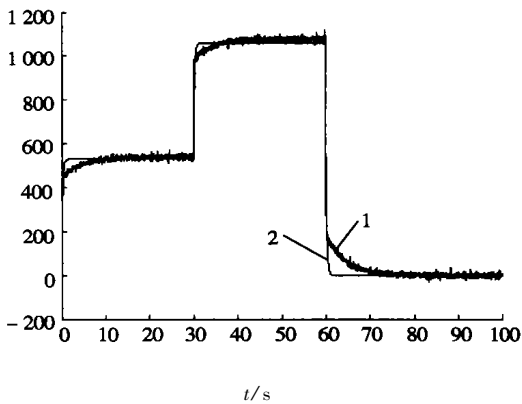


图 5 含噪声辨识的补偿环节输出和理想输出

为补偿环节的期望输出, $y_c(k)$ 为在 $y(k)$ 信号激励下的补偿器实际输出. 经过最小二乘法离线辨识, 使得公式(4)成立. 通过辨识过程得到补偿器的脉冲响应 $H(z)$ 为:

$$H(z)=\frac{0.0260-0.0124z^{-1}-0.0080z^{-2}}{1-0.3367z^{-1}-0.3208z^{-2}-0.3368z^{-3}} \quad (8)$$

由于噪声对辨识的精度存在较大的影响, 使得传感器信号经过该补偿环节补偿后, 仍存在一定的响应滞后, 并产生一些过冲, 影响到动态测量的精度. 如图 6 中的曲线 1, 该曲线是 $y(k)$ 信号经过公式(8)补偿后, 并经过多项式预测滤波器^[6]滤波后的输出.

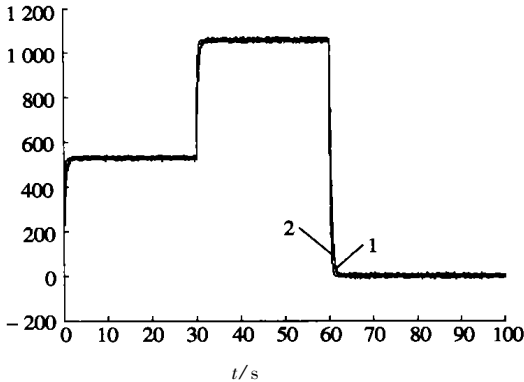


图 6 消除噪声的补偿环节输出和理想输出

3.3.2 输入信号消除噪声的补偿环节辨识

为了克服噪声对补偿环节辨识的影响, 采用小波变换对 $y(k)$ 进行消除噪声处理(采用 sym2 , bior2.6 和 db8 小波函数进行 3 次小波消噪), 并将消噪后的信号 $y_t(k)$ 作为补偿环节的输入信号, 进行 50 次 θ 参数辨识, 每次辨识使得(4)式成立, 最后取其平均值. 通过辨识过程得到补偿器的脉冲响应 $H(z)$ 为:

$$H(z)=\frac{0.0097+0.0019z^{-1}-0.0069z^{-2}}{1-0.3445z^{-1}-0.3304z^{-2}-0.32048z^{-3}} \quad (9)$$

传感器的输出信号经过公式(9)补偿后的输出,如图 6 中的曲线 1 所示(经过多项式预测滤波器^[6]滤波后的输出)。从图中可以看出,通过小波变换消除了噪声对辨识的精度,使得传感器信号经过该补偿环节补偿后,与希望输出信号基本接近,减小了动态测量误差。

4 结语

在传感器动态测量误差补偿中,为了克服测量噪声对补偿环节建模精度的影响,本文讨论了利用小波分析消除测量噪声,然后,用消噪后的信号,通过系统辨识建立补偿环节的方法。通过仿真研究验证了该方法可以有效地提高系统辨识的精度。

另外,在增加了动态补偿环节后,传感器的带宽增大,可以有效地克服传感器输出滞后的测量误差。但是,噪声也被严重放大,影响传感器的测量精度。所以,经过补偿后的传感器带宽应适中,不能追求理想状态。同时,采用能够减小传感器动态测量

噪声的多项式预测滤波器^[6],对补偿环节的输出信号滤波,以消除噪声被严重放大所带来的不利影响。

[参考文献]

[1] 雷敏,王志中,马勤弟,等. 薄膜热电偶的动态特性及动态补偿研究[J]. 计量学报,1997,20(3):182-186.
[2] Almeida L A L I d, Deep G S, Lima A M N. Nonlinear Inverse Filter for Measurement of Thermal Hysteretic[A]. Proceedings of the 19th IEEE IMTC[C]. 2002.1419-1423.
[3] 徐科军,朱志能,苏建徽,等. 传感器动态非线性的一种补偿方法[J]. 仪器仪表学报,2002,23(3):278-282.
[4] 徐科军,张颖,张崇巍. 腕力传感器动态补偿研究[J]. 计量学报,1997,18(4):116-121.
[5] 边润强,陈增强,袁著祉. 基于系统补偿和遗传算法的动态测量方法[J]. 控制理论与应用,2000,17(4):548-552.
[6] Hietanen P, Neuvo Y. FIR median hybrid filters with predictive FIR substructures[J]. IEEE Trans Acoust Speech Signal Processing, 1988,36(5):892-899.

Dynamic Compensation Method for Sensor Based on Denoising by Wavelet Decomposition

LIU Qing

(School of Mathematics and Computer Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: It is necessary to compensate for the dynamic measurement's error when using the sensor for dynamic measurement in order to get accurate results. The mathematic model of compensation block can be established by system identification. However, the presence of measurement noises could cause certain error in system identification, thus decreasing the accuracy of the measurement. To solve this problem, the output signal of the sensor with additive noises were decomposed, denoised and reconstructed by wavelet analysis. The simulation study showed that the approach could minimized the influences of noises.

Key words: sensor, dynamic compensation, system identification, noise, wavelet

[责任编辑: 严海琳]