

文章编号: 1000-8152(2007)04-0679-04

用多项式预测滤波消噪的传感器动态特性辨识

刘 清

(南京师范大学 计算机科学系, 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, 需要建立传感器动态特性的数学模型, 传感器动态特性可以通过系统辨识得到. 但是, 测量噪声的存在, 使得辨识得到的传感器动态特性与实际动态特性存在一定误差, 影响到测量系统的精度. 为了解决该问题, 本文讨论了多项式预测滤波和中值滤波相结合的方法对传感器输出信号进行滤波消噪. 然后, 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数学模型. 研究表明, 采用本文研究的方法可以克服测量噪声对传感器动态特性辨识的影响, 并将该方法用于薄膜热电偶的动态特性辨识.

关键词: 传感器; 动态特性; 系统辨识; 噪声; 多项式预测滤波; 薄膜热电偶

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Identification of sensor's dynamic characteristic based on denoising by polynomial FIR predictors

LIU Qing

(Department of Computer Science, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu 210042, China)

Abstract: In dynamic measurements, it is necessary to build a mathematical model for a sensor's dynamic characteristic to obtain accurate measurement data, and the sensor's dynamic characteristic can be determined by system identification. However, the noises in measurement may produce adverse influences to system identification, and cause error between the identified characteristic and the real one. To reduce these disadvantageous influences, sensor output signal polluted by additive noise are processed by hybrid filter with polynomial FIR predictors and median (PMH). After the signal is denoised by PMH, the mathematical model of sensor's dynamic characteristic is obtained by system identification. The study shows that the presented approach can reduce the influences of noise. This approach has been applied to the identification of the characteristic of a thin-film thermocouple.

Key words: sensor; dynamic characteristic; system identification; noise; polynomial FIR predictors; thin-film thermocouple

1 引言(Introduction)

在利用传感器对瞬变信号实施动态测量时, 为了得到精确的测量结果, 需要建立传感器动态特性的数学模型, 如: 利用薄膜热电偶进行瞬态温度的测量和对称重传感器进行动态补偿^[1,2]. 传感器动态特性的数学模型可以通过系统辨识得到. 但是在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特性与实际特性之间存在一定误差^[3], 影响到测量系统的精度. 因此, 人们一直在寻找和探索有效地减小噪声影响的辨识方法.

目前, 消除噪声对测量系统信号干扰的方法主要有: ① 采用平均滤波和中值滤波, 但这种方法只

适用于静态测量, 而在传感器的动态建模中, 传感器的输出信号是时变的, 若用采用平均和中值滤波的方法, 会使测量信号产生畸变, 影响传感器的动态特性^[4]. ② 采用Kalman滤波^[5]. Kalman滤波是一种最优随机滤波技术, 能够很好地消除噪声对测量系统信号的干扰, 但是, 采用Kalman滤波时, 要求已知测量系统的精确数学模型, 而在传感器的动态特性辨识中, 测量系统的数学模型是未知的. ③ 采用小波分析的方法消除测量系统信号的干扰^[3]. 但是, 小波分析无法消除脉冲噪声的干扰, 且小波基函数和小波分解的层次的选择, 对滤波的效果有较大的影响.

为此, 本文讨论了一种有限脉冲响应的多项式

预测滤波器(polynomial FIR predictors)和中值滤波器(MEDIAN)结合的混合滤波(PMH)方法,该方法可以有效地消除噪声对测量系统信号的干扰,且不会使测量信号产生畸变.然后,利用消噪后的信号,通过最小二乘法建立传感器动态特性的数学模型.最后,作者将该方法用于薄膜热电偶的动态特性辨识.

2 多项式预测滤波器(Polynomial FIR predictors)

当传感器的信号 $x(n)$ 能够用一个 L 阶多项式表示时,有限脉冲响应的预测滤波器可以预测出将要引入的测量信号值,具体预测过程如下.传感器输出信号用多项式表示为

$$x(n) = \sum_{l=0}^L a_l n^l + e(n). \quad (1)$$

在这里: a_l 为多项式系数, $e(n)$ 是噪声引起的误差.对 $x(n)$ 的预测过程定义在一个长度为 $k-1$ 的窗口上,其中

$$x_f(n) = E_f[x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-k)]. \quad (2)$$

E_f 是向前预测运算, $x_f(n)$ 是 $x(n)$ 的预测值,通过有限脉冲响应的多项式预测滤波器实现

$$x_f(n) = \sum_{i=1}^k h_i(i)x(n-i). \quad (3)$$

$h_l(i)$ 是对 l 阶多项式信号预测滤波器的系数.对滤波器系数的设计是一个具有约束的泛函极值问题^[6].在不考虑噪声情况下,希望通过滤波器的信号保持不变,即有 $x(n) = x_f(n)$,带入式(1)可得

$$\sum_{l=0}^L a_l n^l = \sum_{i=1}^k h_i(i) \sum_{l=0}^L a_l (n-i)^l. \quad (4)$$

为使信号保持不变,存在的约束条件为

$$g_0 = \sum_{i=1}^k h_i(i) - 1 = 0, \quad (5)$$

$$g_m = \sum_{i=1}^k i^m h_i(i) = 0, \quad m = 1, \dots, l. \quad (6)$$

如果每一个采样值的噪声成分是相互独立的,则滤波器噪声增益为

$$J = F(h_l(1), \dots, h_l(k)) = \sum_{i=1}^k [h_l(i)]^2. \quad (7)$$

将 J 作为性能泛函.对滤波器系数的设计是以公式(5)和(6)为约束条件,并使性能函数 J 取极小值为目标的最优化过程,在此使用拉格朗日乘子法实现.所构造出增广泛函为

$$J' = F(h_l(1), \dots, h_l(k)) + \lambda_0 g_0 + \sum_{m=1}^l \lambda_m g_m =$$

$$\sum_{i=1}^k [h_l(i)]^2 + \lambda_0 [\sum_{i=1}^k h_l(i) - 1] +$$

$$\sum_{m=1}^l [\lambda_m \sum_{i=1}^k i^m h_l(i)]. \quad (8)$$

对式(8)中 $h_l(i), \lambda_0, \lambda_m (m = 1, \dots, l)$ 求偏导数,并使等式为零:

$$\frac{\partial J'}{\partial h_l(i)} = 2h_l(i) + \lambda_0 + \sum_{m=1}^l \lambda_m i^m = 0,$$

$$\frac{\partial J'}{\partial \lambda_0} = \sum_{i=1}^k h_l(i) - 1 = 0,$$

$$\frac{\partial J'}{\partial \lambda_m} = \sum_{i=1}^k i^m h_l(i) = 0, \quad m = 1, \dots, l. \quad (9)$$

在此讨论 $l = 1, 2$ 情况,对公式(9)求解可得

在 $l = 1$ 时,

$$h_1 = \frac{4k - 6i + 2}{k^2 - k}; \quad (10)$$

在 $l = 2$ 时,

$$h_2 = \frac{9k^2 + (9 - 36i)k + 30i^2 - 18i + 6}{k^3 - 3k^2 + 2k}. \quad (11)$$

在 $l = 0$ 时,多项式预测滤波器退化为一个平均滤波器,滤波器系数 $h_0(i) = 1/k$.

3 混合滤波(PMH)方法(Hybrid filter(PHM))

传感器的输出信号可能存在水平、斜坡和曲线区间以及脉冲噪声.如果将信号考虑为某一种 l 阶多项式进行预测滤波处理,会引起较大的预测误差.例如:用1阶预测滤波器预测正弦信号,将会在曲线区间产生较大的超调.另外,考虑到脉冲噪声的影响,采用一般的中值滤波将会产生输出滞后,影响测量精度.为此,采用0阶、1阶、2阶预测信号和测量信号组合的中值滤波,平均滤波器在信号的水平区间起主要作用,1阶预测滤波器在信号斜坡区间起主要作用,2阶预测滤波器在信号曲线区间起主要作用,而中值滤波用于减小脉冲噪声.中值滤波器的输出为

$$y(n) = \text{Median}[x_f^0(n), x_f^1(n), x_f^2(n), x(n)]. \quad (12)$$

其中: $x(n)$ 为在 n 时刻传感器采样信号值, $x_f^l(n)$ 是0阶(平均滤波器)、1阶和2阶多项式预测滤波器输出信号($l = 0, 1, 2$).

4 辨识建模(Identification and modeling)

传感器动态特性的数学模型可以通过辨识的方法建立.设待辨识的传感器动态特性的数学模型为

$$y(k) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(k) + v(k). \quad (13)$$

式中:

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n},$$

$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}.$$

$u(k)$ 为传感器输入, $y(k)$ 为传感器输出, $v(k)$ 为输出端综合噪声.待辨识的参数为

$$\theta = (a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_m).$$

通过动态校准实验得到辨识参数所需要的数据 $y(k)$ 和 $u(k)$, 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:

$$y(k) = y_d(k) + e(k). \quad (14)$$

为克服噪声对辨识参数的影响, 先对 $y(k)$ 用PMH滤波消除噪声, 得到 $y_d(k)$ 的近似值 $y_c(k)$; 再使用 $y_c(k)$ 和 $u(k)$ 进行参数辨识. 而对系统参数的辨识本质上是一个最优化过程, 即使

$$E = \sum_{k=0}^{N-1} [y_c(k) - y_t(k)]^2 \rightarrow \min. \quad (15)$$

其中: $y_c(k)$ 为在某信号激励下, 传感器实际输出 $y(k)$ 通过多项式预测滤波消噪后的值; 而 $y_t(k)$ 为在相同信号激励下, 辨识参数所对应的动态特性数学模型的输出值. 使用该方法可使待辨识的传感器动态特性的数学模型, 在消除噪声干扰下, 以最小二乘意义下逼近实际的传感器动态特性.

5 仿真研究(Identification and modeling)

为了验证在系统辨识中, 通过PMH消除测量噪声, 以达到提高动态数学模型辨识精度的目的, 作者进行了仿真研究. 仿真模型的传递函数为^[3]

$$B(z^{-1}) = 8.5536z^{-1} - 13.0254z^{-2} + 9.1128z^{-3} - 3.3744z^{-4},$$

$$A(z^{-1}) = 1 - 1.4532z^{-1} + 0.9265z^{-2} - 0.8293z^{-3} + 0.4916z^{-4}.$$

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, 实现起来存在一定的困难, 用单位采样序列或单位阶跃序列作为输入信号, 同样可

以激励系统的动态特性, 获得系统的单位采样响应输出或单位阶跃响应输出, 而且实现起来比较方便. 为了充分激励模型的动态特性, 并考虑到实现的方便性, 本文采用如下信号作为系统的激励信号:

$$u(k) = \begin{cases} a, & 0 \leq k \leq k_1, \\ 0, & k_1 < k \leq k_2, \\ -a, & k_2 < k \leq k_3. \end{cases} \quad (16)$$

式中: $a = 1.5$ 为输入信号的幅值, $k_1 = 70$, $k_2 = 140$, $k_3 = 200$. 另外考虑到在实际工程中, 噪声一般是非平稳随机噪声, 其方差是变化的. 设模型在式(16)输入信号激励下的输出为 $y_d(k)$, 叠加在 $y_d(k)$ 上的噪声

$$v(k) = [\sigma_{\min} - \lambda(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})]\text{rand } n(0, 1).$$

其中: λ 为在 $[0, 1]$ 之间分布的随机数; $\text{rand } n$ 为均值为0, 方差为1的白噪声. $\sigma_{\min} = 0.1$ 和 $\sigma_{\max} = 0.4$ 分别为 $v(k)$ 标准差的下限和上限. 采用PMH对叠加了噪声的模型输出信号 $y(k)$ 进行消除噪声处理, 并将消噪后的信号作为 $y_c(k)$, 进行50次参数辨识, 每次辨识使得式(15)成立, 最后取其平均值. 辨识得到的结果如表1,2所示. 其中: $\theta_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ 表示待辨识系统的传递函数分子、分母多项式的系数; $\bar{\theta}_i$ 是 θ_i 的50次辨识结果的平均值; e_r^i 是 $\bar{\theta}_i$ 的相对误差. e_c 综合相对误差, 它反映了整个辨识结果的精度, 可按下面公式计算:

$$e_c = \sum_{i=1}^8 |e_r^i \theta_i| / \sum_{i=1}^8 |\theta_i|.$$

表1和表2分别是未采用PMH滤波去噪和采用PMH滤波去噪的结果, 显然表2中的辨识结果比表1中的总体上要好, 表2的综合相对误差比表1的要小14.23个百分点, 且优于文献[3]采用小波去噪的结果.

表1 有非平稳噪声扰动时辨识结果

Table 1 Result of identification with non-stationary noise

θ_i	-1.4532	0.9265	-0.8293	0.4916	8.5536	-13.0254	9.1128	-3.3744
$\bar{\theta}_i$	-1.5683	0.7114	-0.6390	0.6030	8.5544	-15.7958	7.5661	-4.7032
e_r^i	0.0792	-0.2322	-0.2295	0.2266	0.0120	0.2127	-0.1697	0.3938
$e_c=0.1689$								

表2 PMH滤波后的辨识结果

Table 2 Result of identification with PMH denoising

θ_i	-1.4532	0.9265	-0.8293	0.4916	8.5536	-13.0254	9.1128	-3.3744
$\bar{\theta}_i$	-1.4688	0.9661	-0.8114	0.5654	8.5588	-13.7324	9.1464	-3.2854
e_r^i	0.0107	0.0212	-0.0216	0.0281	0.0125	0.0543	0.0037	-0.0264
$e_c=0.0266$								

6 应用(Application)

薄膜热电偶是一种用于瞬态温度测量的传感器, 特别是在内燃机壁面、枪炮膛内壁、锻模表

面等瞬态温度测试中近年来获得了广泛的应用. 对薄膜热电偶的动态特性进行研究是使其能应用于动态测试的关键. 但是, 在薄膜热电偶的动态标

定中, 测量信号存在较大的噪声干扰, 影响到传感器动态建模的精度^[7]. 为此, 作者采用了PMH滤波, 以消除测量信号的噪声对薄膜热电偶动态特性影响. 应用试验过程如下:

① 进行动态校准实验. 采用激光脉冲加热薄膜热电偶表面, 利用红外测温仪获得热电偶表面温升, 再由双通道瞬态仪记录下红外仪输出和传感器输出信号. ② 利用动态校准得到的实验数据, 通过系统辨识的方法建立薄膜热电偶传感器的动态数学模型. 由动态校准实验得到的红外仪输出信号(传感器激励信号)和热电偶输出信号如图1所示. 其中: 曲线 U_1 为传感器激励信号, 曲线 U_2 为热电偶输出信号.

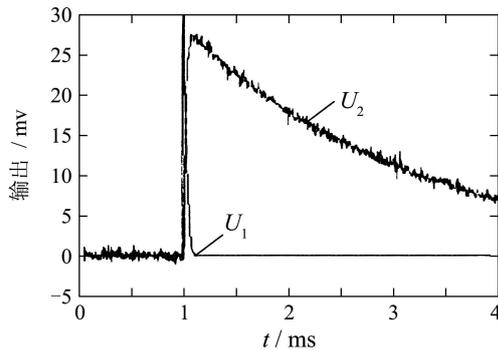


图1 动态校准实验曲线(U_1 (0.1 mv)-输入 U_2 (mv)-输出)
Fig. 1 Experiment curve of dynamic calibration
(U_1 (0.1 mv)-input U_2 (mv)-output)

由于热电偶输出信号存在严重的噪声干扰, 如果在传感器动态特性的建模中, 直接使用实验产生的数据, 那么, 通过系统辨识得到的动态数学模型与实际动态模型之间将存在较大地偏差. 而采用本文讨论的PMH消噪后的信号进行动态建模, 可以提高动态数学模型的精度. 经过20次动态校准实验和辨识建模后取其平均值, 结果如图2所示.

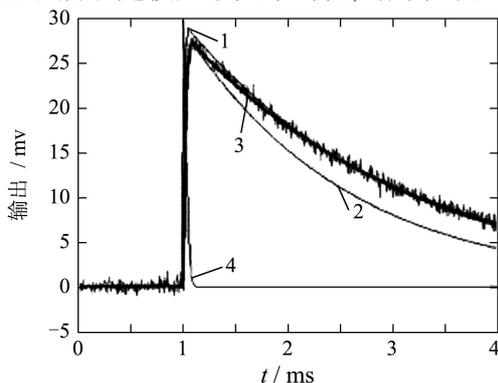


图2 辨识结果仿真曲线

Fig. 2 Emulation curve of identification model

其中: 曲线1为小波分析消噪后辨识模型的输出, 曲线2为未消除噪声辨识模型的输出, 曲

线3为PMH消噪后辨识模型的动态输出, 曲线4为通过红外仪得到的传感器激励信号. 从图中可以看出, 通过PMH消噪的辨识结果输出与传感器的输出非常接近. 所以, 通过PMH消噪可以提高系统辨识的精度.

7 结语(Conclusion)

在传感器动态特性的建模中, 为了克服测量噪声对建模精度的影响, 本文讨论了一种有限脉冲响应的多项式预测滤波器(polynomial FIR predictors)和中值滤波器(MEDIAN)结合的混合滤波(PMH)方法. 用该方法可以有效地消除噪声对测量系统信号的干扰, 且不会使测量信号产生畸变, 然后, 用消噪后的信号, 通过系统辨识的方法建立传感器动态特性的数学模型, 并通过薄膜热电偶动态特性的建模实验, 验证了该方法的有效性. 另外, 该方法也可以用于其它存在噪声干扰的动态数学模型的建模.

参考文献(References):

- [1] SCHRECK E, FONTANA R E, SINGH G P. Thin film thermocouple sensors for measurement of contact temperatures during slider asperity interaction on magnetic recording disks[J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 1992, 28(5): 2548 - 2550.
- [2] YASIN S M T A, WHITE NM. Application of artificial neural networks to intelligent weighing systems[C]//*Proc of IEEE Science, Measurement and Technology*. New York: IEEE Press, 1999, 146(1): 265 - 269.
- [3] 余世明, 冯浩, 王守觉. 基于小波和最小绝对误差的去噪抗扰动辨识方法[J]. *电子学报*, 2003, 31(2): 192 - 195.
(YU Shiming, FENG Hao, WANG Shoujue. Denoising and disturbance rejecting method based on wavelet decomposition and least absolute errors[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(2): 192 - 195.)
- [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, 4(16): 297 - 230.
(YU Shenglin, LIU Wenbo. A median-fuzzy filter for reducing random error[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1995, 4(16): 297 - 230.)
- [5] PARK Tong-Jin, CHOI Hyeun-Seok, HAN Chang-Soo, et al. Real-time precision displacement measurement interferometer using the robust discrete time Kalman filter[J]. *Optics Laser Technology*, 2005, 37(3): 229 - 234.
- [6] HIETANEN P, NEUV Y. FIR-median hybrid filters with predictive FIR substructure[J]. *IEEE Trans on Acoust, Speech, Signal Processing*, 1988, 36(6): 892 - 899.
- [7] 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*, 1999, 20(7): 182 - 186.
(LEI Min, WANG Zhizhong, MA Qindi, et al. Investigation of the dynamic characteristic of the thin-film thermocouple and dynamic compensation[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 20(7): 182 - 186.)

作者简介:

刘清 (1962—), 男, 南京师范大学计算机科学系副教授, 工学博士, 现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: njnulq@163.com.