

模型参考和误差白化的传感器动态补偿算法

刘 清¹, 曹国华²

(1. 南京师范大学 数学与计算机科学学院, 江苏 南京 210097; 2. 南京师范大学 电气与自动化学院, 江苏 南京 210042)

摘要: 通过模型参考的系统辨识方法建立传感器的动态补偿器, 常用的系统辨识采用均方误差(mean square error, MSE)为评判标准. 但是, 由于测量噪声存在和补偿器的频率特性, 使得补偿器的输入/输出信号存在严重的噪声干扰, 采用MSE为评判标准的系统辨识方法, 无法得到最优的补偿器的参数. 为此, 本文研究了一种以误差白化(error whitening criterion, EWC)为评判标准, 设计传感器动态补偿器的系统辨识方法. 该方法无需事先已知系统的动态特性, 根据传感器以及参考模型对输入激励响应的实测数据, 以EWC为代价函数, 通过优化辨识得到补偿器的参数. 最后, 通过实验验证了该方法的有效性.

关键词: 传感器; 动态测量; 补偿; 参数优化; 误差白化

中图分类号: TP212.6 **文献标识码:** A

Reference-model and error-whitening in dynamic compensation for sensors

LIU Qing¹, CAO Guo-hua²

(1. School of Mathematics and Computer Science, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu 210049, China;

2. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu 210042, China)

Abstract: The dynamic compensator for a sensor can be modeled with a reference model identified by the MSE(mean square error) criterion. However, only the biased estimates of the parameters can be obtained due to the contamination of high level noises in the output/input signals and the limited frequency response range of the compensator. To tackle this problem, the error whitening criterion(EWC) is proposed by which a dynamic compensator can be designed without knowing the dynamic characteristics of sensor. Based on the step-input responses of the sensor and the reference model, the compensator parameters are estimated by the EWC. Finally, experimental results show that this approach is effective.

Key words: sensor; dynamic; measurement; compensation; parameter optimization; error whitening

1 引言(Introduction)

影响传感器动态响应的快速性能的原因是: 传感器的频带不够宽, 不足以覆盖动态信号中包含的所有频率分量, 使得部分高频分量受到不同程度的衰减. 所以, 在传感器输出端增加一个补偿器^[1~5], 对传感器的频带进行扩展可以达到减小动态误差的目的. 目前对动态补偿器的设计方法主要有: 反卷积分法、零极点方法、预测法. 上面这些方法均要求在设计补偿器前确定传感器动态特性的数学模型, 而在确定数学模型的过程中, 为避免建模所带来的复杂性, 会作一些简化和假设. 这样, 建模的结果与传感器动态特性之间就存在一些差异, 会引入新的动态测试误差. 所以, 在进行传感器动态测量补偿时,

必须按传感器的实际特性建立动态补偿器, 以避免不准确的模型影响动态补偿效果. 为此, 可以采用模型参考的辨识方法设计补偿器. 常用的系统辨识采用均方误差(mean squared-error, MSE)为准则. 但是, 在测量系统中存在高频噪声干扰, 而补偿器又是一个高通或带通滤波器, 这就使得补偿器的输入/输出信号存在严重的噪声干扰. 所以, 采用MSE为评判标准的系统辨识方法, 无法得到补偿器的无偏参数估计^[6]. 为了解决这个问题, 本文研究了一种以误差白化(error whitening criterion, EWC)^[6,7]为评判准则的补偿器的设计方法. 该方法采用EWC为代价函数, 根据传感器以及参考模型对输入激励响应的实测数据, 通过系统辨识的最优化过程得到补偿器的参数.

2 补偿器设计原理(Design principle of compensator)

一种基于模型参考的动态补偿器设计原理如图1所示。

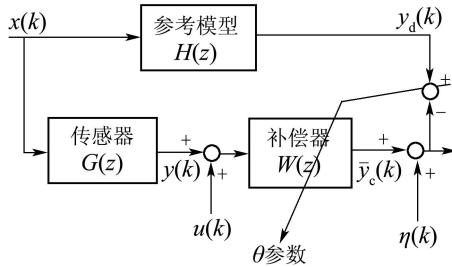


图1 动态补偿原理示意图

Fig. 1 Dynamic compensation principle diagram

图中: $x(k)$ 为输入激励信号, $y(k)$, $y_c(k)$ 和 $y_d(k)$ 为传感器、补偿器和参考模型的输出信号, $u(k)$ 为传感器输出端的测量噪声, θ 为补偿器 $W(z)$ 待辨识的参数. $W(z)$ 在理想情况应采用高通滤波器, 但是, 高通滤波器引起更严重的噪声放大, 因此, 在这里采用了带通滤波器^[5]. 为了减少设计 $W(z)$ 时对传感器动态特性的数学模型依赖, 可采用采用模型参考的系统辨识方法得到补偿器 $W(z)$ ^[5], 在不考虑传感器输出端的测量噪声 $u(k)$ 的情况下, 可将 $W(z)$ 的设计问题转化以均方误差为评判标准的系统辨识问题. 补偿器可用一个传递函数:

$$W(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \cdots + b_q^{-q}}{1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_p^{-p}}. \quad (1)$$

补偿器的输出可写为

$$y_c(k) = \frac{B(z)}{A(z)} y(k) + \eta(k) = -\sum_{i=1}^p a_i y_c(k-i) + \sum_{j=0}^q b_j y(k-j) + \eta(k). \quad (2)$$

式中: a_i 和 b_j 为补偿器的参数, p 和 q 为补偿器的阶次, η 为输出端测量噪声. 补偿器的设计是通过实验数据对 $W(z)$ 系统辨识的最优化过程, 即使

$$J = \min \sum_{k=1}^N E([y_c(k) - y_d(k)]^2). \quad (3)$$

式中: E 求是数学期望, N 是实验数据的长度. 通过最小二乘法离线辨识, 得到参数 a_i 和 b_j . 但是, 在传感器输出端的测量噪声 $u(k)$ 是不可避免的, 如由 A/D 采样产生的噪声等, 则补偿器实际输出为

$$\bar{y}_c(k) = \frac{B(z)}{A(z)} [y(k) + u(k)] = \frac{B(z)}{A(z)} y(k) + \frac{B(z)}{A(z)} u(k) = y_c(k) + v(k).$$

由于补偿器 $W(z)$ 的输入/输出信号中存在较大的噪

声扰动, 采用 MSE 准则的系统辨识方法, 无法得到补偿器参数 θ 的精确解^[6].

3 白化误差的辨识算法(System identification based on EWC)

设补偿器的实际参数向量为

$$\theta = (a_1, a_2, \cdots, a_p, b_0, b_1, \cdots, b_q)^T.$$

由系统辨识得到的补偿器参数向量为

$$\bar{\theta} = (\bar{a}_1, \bar{a}_2, \cdots, \bar{a}_p, \bar{b}_0, \bar{b}_1, \cdots, \bar{b}_q)^T.$$

$y(k)$ 和 $y_c(k)$ 为无噪声的补偿器输入和输出信号, $u(k)$ 和 $v(k)$ 为叠加在输入/输出上的噪声, 方差未知且与输入/输出信号不相关, 则补偿器的实际输入/输出信号为

$$\bar{y}(k) = y(k) + u(k), \quad \bar{y}_c(k) = y_c(k) + v(k).$$

对应于式(1), 在噪声下辨识输入信号向量为

$$\begin{aligned} \bar{D}(k) = & (-\bar{y}_c(k-1), \cdots, -\bar{y}_c(k-p), \\ & \bar{y}(k), \cdots, \bar{y}(k-q))^T = \\ & (-y_c(k-1) - v(k-1), \cdots, \\ & -y_c(k-p) - v(k-p), y(k) + u(k), \cdots, \\ & y(k-q) + u(k-q))^T. \end{aligned}$$

令

$$\begin{aligned} D(k) = & (-y_c(k-1), \cdots, -y_c(k-p), \\ & y(k), \cdots, y(k-q))^T, \\ S(k) = & (-v(k-1), \cdots, -v(k-p), \\ & u(k), \cdots, u(k-q))^T, \end{aligned}$$

则 $D(k)$ 和 $S(k)$ 为无噪声的系统辨识输入信号和输入噪声向量, 由式(2)可得待辨识的补偿器输出

$$\begin{aligned} \bar{y}_c(k) = & \bar{D}^T(k) \bar{\theta} + \eta(k) = \\ & D^T(k) \bar{\theta} + S^T(k) \bar{\theta} + \eta(k), \end{aligned} \quad (4)$$

以及希望的输出: $y_d(k) = D^T(k) \theta$.

定义一个误差:

$$\begin{aligned} z(k) = & y_d(k) - \bar{y}_c(k) = \\ & D^T(k) (\theta - \bar{\theta}) - \eta(k) - S^T(k) \bar{\theta}. \end{aligned}$$

设向量 $\varepsilon = \theta - \bar{\theta}$, 在一个任意滞后 L 下, 误差信号的自相关误差函数可表示为

$$\begin{aligned} \rho(L) = & E[z(k)z(k-L)] = \\ & \varepsilon^T E[D(k)D^T(k-L)] \varepsilon + \bar{\theta}^T E[S(k)S^T(k-L)] \bar{\theta}. \end{aligned} \quad (5)$$

从上式中可以看出, 如果有 $L \geq p + q + 1$, 则有

$$E[S(k)S^T(k-L)] = 0.$$

若 $E[D(k)D^T(k-L)]$ 存在且满秩, 则有: 当 $\theta = \bar{\theta}$ 时, $\rho(L) = 0$. 因此, 对任意 $L \geq p + q + 1$, 当自相关误差函数 $\rho(L) = 0$ 时, 能够得到一个无偏的参数估计^[6,7]. 设 $\bar{z}(k) = z(k) - z(k-L)$, 则式(5)可表示为

$$J(\bar{\theta}) = E[z^2(k)] + \beta E[\bar{z}^2(k)]. \quad (6)$$

式中: β 是一个常量, 当 $\beta = 0$ 时, 式(6)退化为MSE准则的代价函数.

为了计算方便, 这里定义系统辨识输入信号的相关矩阵, 分别为无噪声、有噪声:

$$\begin{aligned} R &= E[D(k)D^T(k)], \\ \bar{R} &= E[\bar{D}(k)\bar{D}^T(k)], \\ \dot{R} &= E[\dot{D}(k)\dot{D}^T(k)], \\ \bar{\dot{R}} &= E[\bar{\dot{D}}(k)\bar{\dot{D}}^T(k)]. \end{aligned}$$

这里有

$$\begin{aligned} \dot{D}(k) &= D(k) - D(k-L), \\ \bar{\dot{D}}(k) &= \bar{D}(k) - \bar{D}(k-L). \end{aligned}$$

同时, 定义了系统辨识的无噪声、有噪声输入信号与希望输出信号相关向量:

$$\begin{aligned} P &= E[D(k)y_d(k)], \\ \bar{P} &= E[\bar{D}(k)y_d(k)], \end{aligned}$$

以及相关向量

$$\begin{aligned} Q &= E[\dot{D}(k)\dot{y}_d(k)], \\ \bar{Q} &= E[\bar{\dot{D}}(k)\dot{y}_d(k)]. \end{aligned}$$

这里有

$$\dot{y}_d(k) = y_d(k) - y_d(k-L).$$

在定义了上述相关矩阵和向量后, 式(6)可表示为

$$\begin{aligned} \bar{J}(\bar{\theta}) &= E[y_d^2(k) + \beta \dot{y}_d^2(k)] + \\ &\quad \bar{\theta}^T(R + \beta \dot{R})\bar{\theta} - 2(P + \beta Q)^T\bar{\theta}. \end{aligned} \quad (7)$$

在上式中: $R, \dot{R}, P, Q$ 均为无噪声干扰的输入信号相关矩阵和向量, 在实际系统辨识中是无法得到的, 为此可将有噪声扰动的输入信号相关矩阵和向量 $\bar{R}, \bar{\dot{R}}, \bar{P}, \bar{Q}$ 代入式(7), 得到一个新的代价函数:

$$\begin{aligned} \bar{J}(\bar{\theta}) &= E[y_d^2(k) + \beta \dot{y}_d^2(k)] + \\ &\quad \bar{\theta}^T(\bar{R} + \beta \bar{\dot{R}})\bar{\theta} - 2(\bar{P} + \beta \bar{Q})^T\bar{\theta}. \end{aligned} \quad (8)$$

这样, 对补偿器的参数 θ 的辨识问题就成为在噪声输入数据 $\bar{D}(k)$ 下, 使得 $J(\bar{\theta})$ 最小. 为使式(8)最小. 可以

通过对求偏导数, 并使等式为零:

$$\frac{\partial \bar{J}(\bar{\theta})}{\partial \bar{\theta}} = 2(\bar{R} + \beta \bar{\dot{R}})\bar{\theta} - 2(\bar{P} + \beta \bar{Q}) = 0. \quad (9)$$

对式(9)求解, 可以得到一个最优的补偿器的参数

$$\theta^* = (\bar{R} + \beta \bar{\dot{R}})^{-1}(\bar{P} + \beta \bar{Q}). \quad (10)$$

4 仿真研究(Simulation research)

设某传感器动态特性的数学模型的传递函数为

$$G(z) = \frac{0.4181(z + 1.000)(z - 8.86869)}{(z - 0.99793)(z - 0.91567)}. \quad (11)$$

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, 必须通过设计动态环节, 已达到减小动态误差以及扩大其适用范围的目的.

4.1 补偿器的设计(Design of compensator)

增加补偿器是为了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2阶低通滤波器

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi_0\omega_0s + \omega_0^2}. \quad (12)$$

式中: 阻尼比 $\xi_0 = 0.8$, 固有频率 $\omega_0 = 2\pi(\text{rad/s})$, ω_0 远大于传感器的固有频率, 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.

设补偿器为一个带通滤波器:

$$W(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}}.$$

采用如图1所示的方法, 以参考模型对阶跃响应的输出作为补偿器 $W(z)$ 辨识的希望输出数据, 通过对 $W(z)$ 进行离线辨识, 得到补偿器的参数 $\theta = (a_1, a_2, b_0, b_1, b_2)$.

4.2 补偿器的参数辨识(Parameter identification of compensator)

在噪声 $u(k)$ 的影响下, 采用最小二乘法进行系统辨识, 无法得到一个最优的补偿器参数 $\bar{\theta}$. 且会因为参数 $\bar{\theta}$ 的偏差, 给动态测量系统引入更大的测量误差. 为此, 可以采用本文讨论的误差白化的系统辨识方法, 以消除噪声 $u(k)$ 对补偿器参数辨识的影响, 得到一个最优的参数. 为了验证误差白化的系统辨识的有效性, 作者进行了仿真实验. 在实验中, 给传感器的输出值 $y(k)$ 上叠加了一个噪声. 另外, 在实际工程中, 噪声一般是非平稳随机和方差是变化的, 因

此, 叠加传感器输出端的噪声为

$$u(k) = [\sigma_{\min} + \lambda(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})]r. \quad (13)$$

式中: λ 为在 $[0,1]$ 之间分布的随机数; r 为均值为0、方差为1的白噪声; $\sigma_{\max} = 0.003$ 和 $\sigma_{\min} = 0.001$ 分别为标准差的下限和上限. 另外, 为了充分激励传感器的动态特性, 并考虑到实现的方便性, 作者采用了

$$\begin{cases} x(k) = -1, & 0 \leq k \leq k_1, \\ x(k) = 1, & k_1 < k \leq k_2 \end{cases}$$

作为传感器的和参考模型的输入激励信号. 分别采用最小二乘法和误差白的辨识算法进行50次仿真实验, 补偿器的参数为50次实验的平均值, 采用误差白化的辨识算法得到的参数

$$\theta_1 = (-1.8420, 0.8480, 1.2881, -0.0114, -1.2706).$$

所对应的补偿器的脉冲传递函数

$$W_1(z) = \frac{1.2881 - 0.0114z^{-1} - 1.2706z^{-2}}{1 - 1.8420z^{-1} + 0.8480z^{-2}} = \frac{1.2881(z - 0.9976)(z + 0.9888)}{(z - 0.9365)(z - 0.9055)}. \quad (14)$$

而采用最小二乘法得到的参数

$$\theta_2 = (-1.9975, 0.9977, 0.0234, -0.0005, -0.0227)$$

所对应的补偿器的脉冲传递函数

$$W_2(z) = \frac{0.0234 - 0.0005z^{-1} - 0.0227z^{-2}}{1 - 1.9975z^{-1} + 0.9977z^{-2}} = \frac{0.0234(z - 0.9957)(z + 0.9743)}{(z - 0.9987 - 0.0141i)(z - 0.9987 + 0.0141i)}. \quad (15)$$

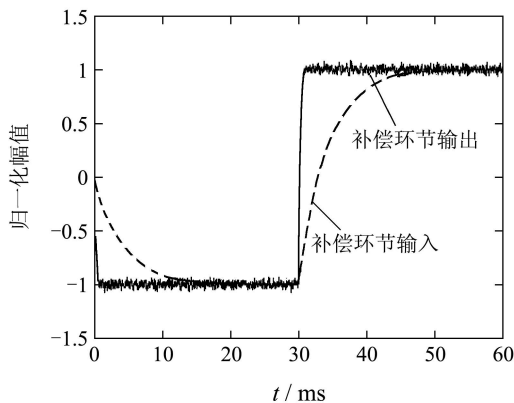


图2 经过 $W_1(z)$ 补偿的仿真结果

Fig. 2 simulation result of $W_1(z)$ compensation

传感器的输出分别经过以 $W_1(z)$ 和 $W_2(z)$ 补偿器处理后, 得到仿真试验的结果如图2和3所示. 由于 $W_1(z)$ 的一个零点与影响传感器动态特性的极点接近, 所以, 传感器的输出信号经过补偿器后, 减小了动态误差. 而由于传感器输出噪声的干扰, 使得采

用最小二乘法得到补偿器 $W_2(z)$ 中, 不存在这样的零点, 并使得补偿器的输出产生了震荡, 无法消除动态误差.

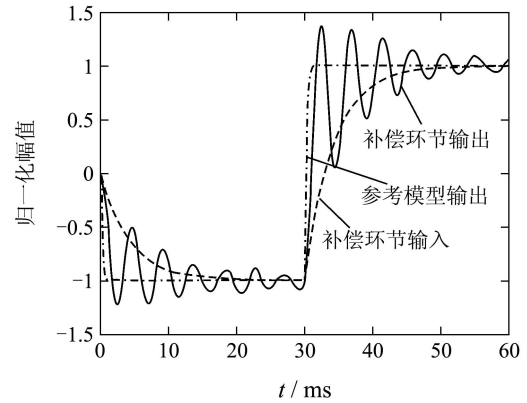


图3 经过 $W_2(z)$ 补偿的仿真结果

Fig. 3 simulation result of $W_3(z)$ compensation

5 应用(Environent)

微硅加速度传感器是一种在军事、工业等许多领域广泛使用的传感器. 由于该类传感器敏感元件结构的固有特点, 使得该类传感器的固有频率较低, 阻尼比也不满足要求, 其动态特性很难满足各种动态测试要求^[8]. 因此, 必须对加速度传感器的动态特性进行补偿, 扩展其频带范围, 以满足动态测量需要.

5.1 微硅加速度传感器的动态补偿(Dynamic Compensation of Micro-Silicon accelerometer)

微硅加速度传感器的具体结构参考见文献^[8]. 传感器传感系统所对应的微分方程为

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = \varphi m. \quad (16)$$

式中: m 为敏感质量块的质量, k 为刚度, c 为阻尼系数. 当传感器受到加速度 φ 用时, 质量块位移 y 是微分方程输出. 将式(16)两边进行拉普拉斯变换, 得到该传感器的传递函数为

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + 2\xi_0\omega_0 s + \omega_0^2}. \quad (17)$$

式中: $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 传感器系统的谐振频率, $\xi_0 = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$ 传感器系统的阻尼比. 由式(17)的传递函数可知, 加速度传感器在附近出现了谐振, 此时测量误差较大. 而微硅加速度器的谐振频率较低^[8], 这就极大地限制了加速度器的使用范围. 为了满足各种动态测试要求, 就必须对加速度传感器的动态特性进行补偿, 扩展其频带范围. 在实际使用中, 动态补偿器采用带通滤波器, 其传递函数可构造为如下的形

式:

$$H(s) = \frac{s^2 + 2\xi_0\omega_0s + \omega_0^2}{s^2 + 2\xi_1\omega_1s + \omega_1^2}. \quad (18)$$

式中 ω_1 和 ξ_1 分别为补偿后系统的谐振频率和阻尼比. 经过双线性变换, $W(s)$ 的脉冲传递函数为

$$W(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}}. \quad (19)$$

这样, 补偿器要确定的参数为

$$\bar{\theta} = (a_1, a_2, b_0, b_1, b_2).$$

为了减少补偿器设计时对传感器动态特性的数学模型依赖, 采用 ω_1 和 ξ_1 为参考模型参数, 通过系统辨识的方法得到补偿器 $W(z)$.

5.2 实验及结果(Experimentation and result)

选用一种微硅加速度传感器, 其固有谐振频率 $\omega_0 = 339 \times 2\pi(\text{rad/s})$, 阻尼比 $\xi_0 = 0.314$. 参考模型的参数 $\omega_1 = 1073 \times 2\pi(\text{rad/s})$, $\xi_1 = 0.684$. 将微硅加速度传感器安装在激振台上, 做动态标定实验, 用计算机数据采集系统采集阶跃输入及其响应的数据, 经预处理, 得到样本值 $\bar{y}(k)$, 并通过对参考模型的计算得到传感器 $y_d(k)$. 按照图1所示的原理, 用误差白化的辨识算法对补偿器的参数进行离线辨识, 得到补偿器的参数 $\bar{\theta} = (-1.9076, 0.9119, 96.3636, -191.4034, 95.0832)$.

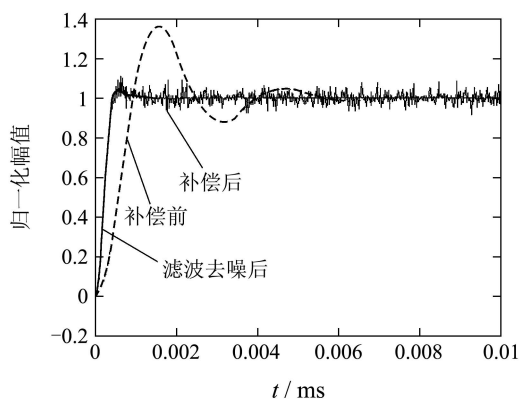


图4 补偿前后微硅加速度传感器阶跃响应曲线
Fig. 4 Micro-silicon accelerometer step response curve contrast

在实际测量时, 用补偿器对微硅加速度传感器的输出 $\bar{y}(k)$ 进行数字补偿, 产生实际测量值 $\bar{y}_c(k)$. 微硅加速度传感器补偿前后的阶跃响应曲线如图4所示, 由图中曲线可见, 补偿后传感器的动态性能得到了明显改善, 但是, 由于补偿器扩展了测量系统的频带, 使得传感器输出信号中的高频噪声, 在经过补偿器后被加重, 影响到测量精度, 为此, 可以采用多项式滤波的方法^[9]消除高频噪声干扰.

6 结语(Conclusion)

在传感器动态补偿中, 采用参考模型和系统辨识的方法得到动态补偿器参数, 可以避免不准确的模型影响动态补偿效果. 但是由于传感器的输出信号存在噪声扰动, 如果采用代价函数为均方误差最小的辨识算法, 则得到的传感器动态补偿器参数存在一定的偏差, 影响到动态补偿精度. 为此, 本文研究了一种误差白化的系统辨识算法, 该算法以白化误差为代价函数, 通过参考模型和系统辨识得到一个最优的补偿器参数. 该动态补偿技术算法和结构简单, 可以在单片机和数字信号处理器(DSP)中实现, 具有很强的实用性.

参考文献(References):

- [1] STUBBERUD S C, KRAMER K A, GEREMIA J A. Online sensor modeling using a neural Kalman filter[J]. *IEEE Transactions on Instrument Measurments*, 2007, 56(4): 1451 – 1458.
- [2] XU K J, LI C, ZHU Z N. Dynamic modeling and compensation of robot six-axis wrist force/torque sensor[J]. *IEEE Transactions on Instrument Measurment*, 2007, 56(5): 2094 – 2100.
- [3] SCHOEN M P. Dynamic compensation of intelligent sensors[J]. *IEEE Transactions on Instrument Measurment*, 2007, 56(5): 1992 – 2001.
- [4] JAFARIPANAH M, AI-HASHIMI B M, WHITE N M. Application of analog adaptive filters for dynamic sensor compensation[J]. *IEEE Transactions on Instrument Measurment*, 2005, 54(1): 245 – 251.
- [5] 刘清, 沈祖诒, 王柏林. 基于CAMC的非线性逆滤波改善传感器特性的研究[J]. *控制理论与应用*, 2005, 22(5): 758 – 761. (LIU Qing, SHEN Zuyi, WANG Bailin. Researching of improving sensor's dynamic characteristics by nonlinear inverse filtering of CMAC[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(5): 758 – 761.)
- [6] RAO Y N, ERDOGMUS D, PRINCIPE J C. Error whitening criterion for adaptive filtering: theory and algorithms[J]. *IEEE Transactions on Signal Proces*, 2005, 53(3): 1057 – 1069.
- [7] RAO Y N, ERDOGMUS D, RAO G Y, et al. Fast error whitening algorithms for system identification and control with noisy data[J]. *Neurocomputing*, 2005, 69(1): 158 – 181.
- [8] 才海男, 周兆英, 李勇, 等. 加速度传感器的动态特性软件补偿方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 1998, 19(3): 263 – 267. (CAI Hainan, ZHOU Zhaoying, LI Yong, et al. A study on software compensation method of accelerometers dynamic characteristics[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1998, 19(3): 263 – 267.)
- [9] 刘清. 用多项式预测滤波消噪的传感器动态特性辨识[J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(4): 679 – 682. (LIU Qing. Identification of sensor's dynamic characteristic based on denoising by polynomial FIR predictors[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(4): 679 – 682.)

作者简介:

刘清 (1962—), 男, 副教授, 工学博士, 目前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;

曹国华 (19—), 男, 1989年在东南大学自动控制系统精密仪器专业获工学硕士学位, 1998年被评为江苏省优秀青年骨干教师, 近年来一直从事现代测试技术、智能仪器、计算机应用技术的研究.