

文章编号: 1006-2467(2008)02-0245-04

基于模型参考和卡尔曼滤波的动态测量方法

刘 清^a, 岳 东^b

(南京师范大学 a. 数学与计算机科学学院; b. 电气与自动化工程学院, 南京 210042)

摘 要: 在传感器动态补偿时, 传感器频带的扩展将会引起严重的高频噪声干扰, 为有效地抑制噪声, 研究了一个基于模型参考和卡尔曼滤波的动态补偿方法. 补偿器的参数通过参考模型和系统辨识的方法得到, 同时, 利用参考模型建立卡尔曼滤波器, 消除高频噪声对测量精度的影响. 通过仿真实验以及对硅加速度传感器的动态测量误差补偿, 验证了该方法的有效性.

关键词: 动态测量; 噪声; 模型参考; 卡尔曼滤波

中图分类号: TP 212 **文献标识码:** A

Dynamic Measurement Based on Model Reference and Kalman Filtering

LIU Qing¹, YUE Dong²

(a. School of Mathematics and Computer Science; b. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: A dynamic compensation unit is connected to output port of sensor in series for improving 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, and cause severely noise amplification. In order to control noise, a new method of dynamic measurement with model reference and Kalman filtering was researched. Parameters of the unit were obtained by reference model and system identification. At the same time, Kalman filter was constructed with reference mode to eliminate high frequency effected measurement precision. The method is proved to be effective by the simulation experiment and dynamic compensation of micro-silicon accelerometer.

Key words: dynamic measurement; noise; model reference; Kalman filtering

随着对测量系统性能要求进一步提高和一些特殊领域应用的需要, 人们对传感器动态响应的快速性提出了较高的要求, 于是产生了许多能有效缩短传感器动态调节时间和抑制超调的动态补偿方法, 如反卷积分方法、零极点方法、时域优化方法以及智能补偿方法等^[1-5]. 而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. 各种动态补偿方法的本质都是使传感器频带能够适当延伸, 以保证满足动态测量所需要的快速性. 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. 因此, 传感器频带的

收稿日期: 2006-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(60774060), 江苏省高校自然科学基金(06KJD520099)资助项目.

作者简介: 刘 清(1962-), 男, 安徽芜湖市人, 副教授, 工学博士, 主要从事智能控制与现场总线测控系统的研究与开发.

电话(Tel.) 025-85481170; E-mail: njnuliq@163.com.

扩展将会引起严重的噪声干扰,影响测量系统的精度,而现有的补偿器设计方法^[1-4]都未考虑该问题。

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^[5],但这种方法只适用于静态测量,而在传感器的动态测量中,传感器的输出信号是时变的,若用平均和中值滤波法,会使测量信号产生畸变,影响传感器动态测量值。②采用小波分析的方法消除测量系统信号的干扰^[6]。但是,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,无法满足动态测量信号的实时要求。卡尔曼(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,而在传感器动态补偿中,测量系统的数学模型是未知的。为此,本文研究了一种基于模型参考和 Kalman 滤波的动态补偿方法,以消除传感器动态补偿时,高频噪声对测量精度的影响。

1 模型参考的补偿器设计原理

在常规的动态补偿器设计中,需要已知传感器特性的数学模型^[2-4]。在确定数学模型时,为避免建模所带来的复杂性,要作一些简化和假设,这样设计的动态补偿器的效果必然受到限制,同样会引入动态测试误差。

一种基于模型参考的动态补偿器设计原理如图 1 所示。图中: $x(k)$ 为输入激励信号, $k=0,1,\dots,M-1,M$ 为输出信号的序列长度; $y(k)$ 、 $y_c(k)$ 和 $y_d(k)$ 为传感器、补偿器和参考模型的输出信号; θ 为补偿器的 $W(z)$ 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,本文采用带通滤波器^[1]。另外,为了减少设计 $W(z)$ 时对传感器动态特性的数学模型的依赖,可采用模型参考的系统辨识方法得到补偿器的 $W(z)$ ^[1],该方法将 $W(z)$ 的设计问题转化为一个最优化问题。补偿器的输出可用一个线性差分方程表示:

$$y_c(k) = \sum_{i=1}^p a_i y_c(k-i) + \sum_{j=0}^q b_j y(k-j) \quad (1)$$

式中: a_i 和 b_j 为补偿器的参数; p 和 q 为补偿器的阶次。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

$$J = \min \sum_{k=0}^{M-1} [y_c(k) - y_d(k)]^2 \quad (2)$$

通过最小二乘法离线辨识,得到参数 a_i 和 b_j 。

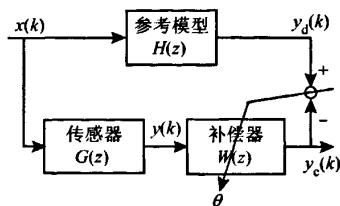


图 1 动态补偿原理示意图

Fig. 1 Dynamic compensation principle diagram

2 用 Kalman 滤波消除信号噪声

在增加了动态补偿器后,由于测量系统频带的扩展,使得高频噪声干扰被加重。为了保证一定的测量精度,必须消除测量系统输出信号的噪声干扰。由于 $y(k)$ 是时变的,为了保证测量结果的实时性,必须采用递推计算的实时数字滤波器消除噪声,而常用的平均滤波、傅里叶滤波和小波滤波都无法满足实时性要求。Kalman 滤波是一种最优实时滤波器,能够很好地消除噪声对测量系统信号的干扰,但是它要求已知测量系统的精确数学模型,才能获得理想的滤波效果,否则可能产生发散现象。而测量系统的数学模型在补偿时是未知的。为了解决该问题,采用参考模型作为 Kalman 滤波器的数学模型进行递推计算。

设在离散域上测量系统的状态方程为

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k-1) + \mathbf{B}(u(k) + \delta(k)) \quad (3)$$

$$y_s(k) = \mathbf{C}\mathbf{X}(k) + v(k) \quad (4)$$

式中, $\mathbf{X}(k) \in \mathbf{R}^n$ 为状态向量; $u(k) \in \mathbf{R}$ 为系统输入量; $\delta(k) \in \mathbf{R}$ 为过程噪声信号; $y_s(k) \in \mathbf{R}$ 为系统实际输出; $v(k) \in \mathbf{R}$ 为测量噪声信号; $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 为通过参考模型建立的系统状态方程参数。离散 Kalman 滤波器递推算法为:

(1) 由 $k-1$ 时刻对 k 时刻的协方差阵预测

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{A}\mathbf{P}(k-1)\mathbf{A}^T + \mathbf{B}\mathbf{E}_\delta\mathbf{B}^T$$

(2) k 时刻滤波增益

$$\mathbf{K}_k = \frac{\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{C}^T}{(\mathbf{C}\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{C}^T + \mathbf{E}_v)^{-1}}$$

(3) k 时刻协方差阵估计

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{C})\mathbf{P}_{k|k-1}$$

(4) 由 $k-1$ 时刻对 k 时刻的状态预测

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}(k-1)$$

(5) k 时刻状态估计

$$\hat{\mathbf{X}}(k) = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k(y_s(k) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1})\mathbf{X}(k)$$

(6) 滤波器输出

$$\hat{y}_s(k) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}(k)$$

其中: E_m 为测量系统噪声方差; E_p 为系统的过程噪声方差, 由于测量系统的噪声为白噪声, 故 $E_m = [1]$ 、 $E_p = [1]$; I 为单位阵。

将经过补偿后的传感器信号通过 Kalman 滤波, 消除因频带扩展造成的高频噪声干扰。

3 仿真实验

设某传感器动态特性的数学模型的传递函数为

$$G(z) = \frac{0.418\ 100(z + 1.000\ 00)(z - 8.868\ 69)}{(z - 0.997\ 63)(z - 0.915\ 67)} \quad (5)$$

由于在 $G(z)$ 中存在一个较接近单位圆的实数极点, 使得传感器的动态特性呈现为一阶特性, 从而在对瞬态信号测量时出现动态误差。为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的传递函数为

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi_0\omega_0s + \omega_0^2} \quad (6)$$

式中: 阻尼比 $\xi_0 = 0.8$; 固有频率 $\omega_0 = 5\pi$ 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, 会使测量中存在的高频噪声信号得到放大, 使补偿失去意义。

以参考模型对阶跃响应的输出作为补偿器的 $W(z)$ 辨识的希望输出数据, 用最小二乘法对 $W(z)$ 进行离线辨识, 使得式(2)成立。通过辨识过程得到补偿环节的脉冲响应传递函数为

$$W(z) = \frac{0.026\ 0 - 0.012\ 4z^{-1} - 0.008\ 0z^{-2}}{1 - 0.336\ 7z^{-1} - 0.320\ 8z^{-2} - 0.336\ 8z^{-3}} \quad (7)$$

传感器的输出值 $y(k)$ 经过补偿环节处理后输出 $y_c(k)$ 。补偿环节扩大了传感器频率响应的带宽, 使得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, 为此, 在仿真实验中, 给传感器的输出值 $y(k)$ 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

$$v(k) = [\sigma_{\min} - \lambda(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})]r \quad (8)$$

式中: λ 为在 $[0, 1]$ 间分布的随机数; r 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。仿真实验的结果如图 2 所示。由图可见, 在补偿后的 $y_c(k)$ 中, 噪声被严重放大, 影响了测量系统的精度。

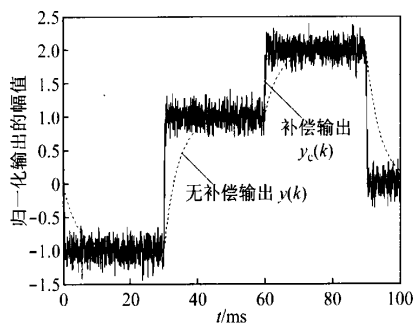


图2 无 Kalman 滤波的补偿仿真结果

Fig. 2 The simulation result of non-Kalman filtering

3.2 Kalman 滤波消除噪声

为了消除高频噪声对补偿后测量值的影响, 采用 Kalman 滤波消除噪声。通过参考模型式(6)建立起系统的状态空间模型, 用 Kalman 滤波器的数学模型进行递推滤波计算, 将滤波所得的值, 作为输出值。经过 Kalman 滤波处理后的输出如图 3 所示。

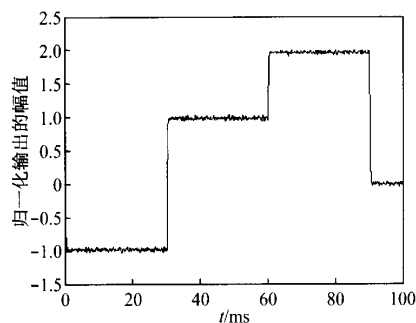


图3 Kalman 滤波的补偿仿真结果

Fig. 3 The simulation result of Kalman filtering

受到噪声干扰的输出信号 $y_c(k)$ 的序列长度 $M=2048$, $y_c(k)$ 经过 Kalman 滤波的输出数据为 $\bar{y}(k)$, 而没有受到噪声干扰的补偿环节的真实输出信号为 $y_f(k)$, 定义信号的标准差

$$S = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (\bar{y}(k) - y_f(k))^2} \quad (9)$$

通过分析可得, 没有经过 Kalman 滤波消除噪声的输出信号的标准差 $S_1 = 0.1157$, 而经过 Kalman 滤波消除噪声的标准差 $S_2 = 0.0537$ 。因此, 经过 Kalman 滤波后, 信号的噪声水平被明显减小。

4 应用

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。

4.1 微硅加速度传感器的动态补偿

微硅加速度传感器的具体结构参见文献[7]。传感器传感系统所对应的微分方程为

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + \kappa y = \beta m \quad (10)$$

式中: m 为敏感质量块的质量; κ 为刚度; c 为阻尼系数。当传感器受到加速度 β 作用时,质量块位移 y 为微分方程输出。将式(10)两边进行拉普拉斯变换,得到该传感器的传递函数为

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + 2\xi_0 \omega_0 s + \omega_0^2} \quad (11)$$

式中: $\omega_0 = \sqrt{\kappa/m}$ 为传感器系统的固有频率; $\xi_0 = \frac{c}{2\sqrt{m\kappa}}$ 为传感器系统的阻尼比。由式(11)的传

递函数可知,加速度传感器在 ω_0 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,动态补偿环节采用带通滤波器,其传递函数可构造为如下的形式:

$$W(s) = \frac{s^2 + 2\xi_0 \omega_0 s + \omega_0^2}{s^2 + 2\xi_1 \omega_1 s + \omega_1^2} \quad (12)$$

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, $W(s)$ 的脉冲响应传递函数为

$$W(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (13)$$

这样,补偿器要确定的参数为

$$\theta = (a_1, a_2, b_0, b_1, b_2)$$

为了减少补偿器设计时对传感器动态特性的数学模型的依赖,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的 $W(z)$ 。

4.2 实验及结果

选用一种微硅加速度传感器,其 $\omega_0 = 339 \times 2 \pi$ rad/s, $\xi_0 = 0.314$ 。参考模型的参数 $\omega_1 = 1\,073 \times 2 \pi$ 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

$y(k)$,并通过对参考模型的计算得到 $y_d(k)$ 。按照图1所示的原理,用最小二乘法对补偿器的参数进行离线辨识,使得式(2)成立,得到补偿器的参数

$$\theta = (a_1, a_2, b_0, b_1, b_2) = (-1.907\,6,$$

$$0.911\,9, 96.363\,6, -191.403\,4, 95.083\,2)$$

在实际测量时,用补偿器对微硅加速度传感器的输出 $y(k)$ 进行数字滤波,产生实际测量值 $y_c(k)$ 。同时,用参考模型建立 Kalman 滤波器的数学模型进行递推滤波计算,消除高频噪声干扰。微硅加速度传感器补偿前后的阶跃响应曲线如图4所示。由图可见,补偿后传感器的动态性能得到明显改善,同时采用 Kalman 滤波可以有效地消除高频噪声干扰。

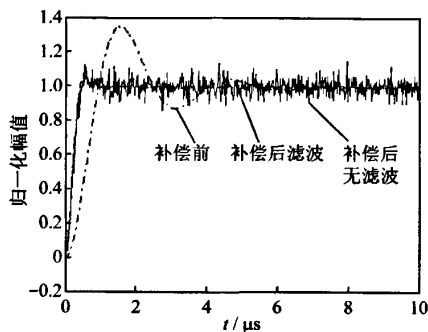


图4 补偿前后微硅加速度传感器阶跃响应曲线

Fig. 4 Micro-silicon accelerometer step response curve

5 结语

本文对噪声干扰环境下的传感器动态测量误差补偿进行了研究,提出了一个基于模型参考和卡尔曼滤波的动态测量方法。该方法通过实验,由参考模型和系统辨识得到动态补偿环节,克服了建模带来的复杂性和建模简化所引起的误差。同时,利用参考模型建立卡尔曼滤波器,消除高频噪声对测量精度的影响。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:

- [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 Zu-yi, WANG Bai-lin, et al. Researching measurement error of thermistor compensated by nonlinear inverse filtering [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(9): 1601-1604.

(下转第252页)

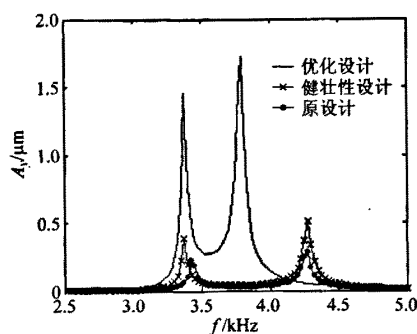


图2 健壮性设计频响结果

Fig. 2 The results of frequency response after robust design

45.16 dB 提高到 74.20 dB。虽然优化设计的灵敏度比健壮性设计高,但其工作带宽和稳健性降低,设计参数的微小扰动对微陀螺动态性能的影响很大,特别是设计参数 L_3 和 L_6 的影响显著,这也说明微陀螺的动态性能与弹性梁有着密切的关系。

4 结 语

本文以微机械陀螺为研究对象,提出了基于 Taguchi 三次设计的微机械陀螺健壮性设计方法。通过健壮性设计,在无需对现有加工条件进行改进的条件下,通过对微陀螺尺寸参数的健壮性优化,弱化了微陀螺加工对其性能的影响,提高了批量微陀

螺的性能稳定性,并寻找了设计参数在加工误差内扰动时,性能变异最小的设计参数组合,以实例解析验证了该方法在微机械陀螺性能设计中的应用价值。

参考文献:

- [1] 王安麟,朱学军,张惠侨. Pareto 多目标遗传算法及其在机械健壮性设计中的应用[J]. 机械设计与研究, 2000, 12(1): 10-12.
WANG An-lin, ZHU Xue-jun, ZHANG Hui-qiao. A genetic algorithm for Pareto multiobjective and application of machine robust design [J]. *Machine Design and Research*, 2000, 12(1): 10-12.
- [2] 刘广军,王安麟,姜涛,等. 基于子结构模型的音叉振动式微机械陀螺的检测电容解析方法[J]. 机械工程学报, 2006, 42(9): 97-102.
LIU Guang-jun, WANG An-lin, JIANG Tao, et al. Detection capacitance analysis method based on substructure model [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(9): 97-102.
- [3] 张正福,王安麟,刘广军,等. 基于子结构法的微机械陀螺性能解析[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(5): 797-801.
Jiang J B, WANG An-lin, LIU Guang-jun, et al. Analysis for micromachined gyroscope performance based on substructuring method [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2007, 41(5): 797-801.

(上接第 248 页)

- [2] Mgsicotte D, Legendre S, Barwicz A. Neural network based method of calibration and measure and reconstruction for a high-pressure measuring system [J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 1998, 47(2): 362-370.
- [3] Almodarresi 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: IEEE, 1999: 265-269.
- [4] 徐军科,张颖,张崇巍. 腕力传感器动态补偿研究[J]. 计量学报, 1997, 18(2): 116-121.
XU Jun-ke, ZHANG Ying, ZHANG Chong-wei. Investigation of dynamic compensation for wrist force sensor [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1997, 18(2): 116-121.
- [5] 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): 297-300.

YU Sheng-lin, LIU Wen-bo. A median-fuzzy filter for reducing random error [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1995, 16(4): 297-300.

- [6] 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 Shi-ming, FENG Hao, WANG Shou-jue. Denoising and disturbance rejecting method based on wavelet decomposition and least absolute errors [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(2): 192-195.
- [7] 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 Hai-nan, ZHOU Zhao-ying, 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.

作者: [刘清](#), [岳东](#), [LIU Qing](#), [YUE Dong](#)
作者单位: [刘清, LIU Qing \(南京师范大学数学与计算机科学学院, 南京, 210042\)](#), [岳东, YUE Dong \(南京师范大学电气与自动化工程学院, 南京, 210042\)](#)
刊名: [上海交通大学学报](#) [ISTIC](#) [EI](#) [PKU](#)
英文刊名: [JOURNAL OF SHANGHAI JIAOTONG UNIVERSITY](#)
年, 卷(期): 2008, 42 (2)
被引用次数: 2次

参考文献 (7条)

1. [Almodarresi Yasin S M T; White N M](#) [Application of artificial neural networks to intelligent weighing sys-tems](#) 1999
2. [Mgsicotte D; Legendre S; Barwicz A](#) [Neural network based method of calibration and measure and reconstruction for a high-pressure measuring system](#)[外文期刊] 1998 (02)
3. [刘清; 沈祖谕; 王柏林](#) [热敏电阻测量误差的非线性逆滤波器补偿研究](#)[期刊论文]-[上海交通大学学报](#) 2004 (09)
4. [才海男; 周兆英; 李勇](#) [加速度传感器的动态特性软件补偿方法研究](#)[期刊论文]-[仪器仪表学报](#) 1998 (03)
5. [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](#)[期刊论文]-[电子学报](#) 2003 (02)
6. [于盛林; 刘文波](#) [用于减小随机误差的中值-模糊滤波器](#) 1995 (04)
7. [徐军科; 张颖; 张崇巍](#) [腕力传感器动态补偿研究](#) 1997 (02)

引证文献 (2条)

1. [刘常波](#), [张洪星](#), [田炳丽](#), [丁风雷](#) [尔曼滤波在潜艇垂直面运动控制器设计中的应用](#)[期刊论文]-[舰船科学技术](#) 2009 (4)
2. [孙丽萍](#), [刘德胜](#), [张佳薇](#) [基于卡尔曼滤波的木材含水率在线估计](#)[期刊论文]-[自动化技术与应用](#) 2009 (10)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_shjtdxxb200802020.aspx