

基于 DTC-LS 的加速度计动态模型参数辨识*

魏青轩¹, 王建林¹, 付雪松¹, 孙 桥², 胡红波²

(1. 北京化工大学信息科学与技术学院 北京 100029; 2. 中国计量科学研究院 北京 100013)

摘要:加速度计动态模型对描述和分析其动态特性具有重要作用。针对加速度计绝对法冲击激励校准中未知延迟时间对加速度计动态模型参数辨识精度的影响,提出了一种基于延迟时间修正(DTC)和最小二乘(LS)的加速度计动态模型参数辨识方法,该方法将延迟环节引入加速度计动态模型中,使用加速度计冲击激励与响应数据的傅里叶变换估计频率响应函数,采用LS方法和极小化相位误差准则函数迭代修正延迟时间,并利用延迟时间修正后的加速度计冲击激励与响应数据,辨识加速度计动态模型参数。仿真实验和加速度计绝对法冲击激励校准实验表明,该方法能够有效地消除延迟时间对加速度计动态模型参数辨识的影响,辨识获得的加速度计动态模型参数具有较高精度。

关键词: 加速度计; 动态模型; 参数辨识; 延迟时间; 最小二乘

中图分类号: TH824 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Dynamic model parameter identification of accelerometer using delay time correction and least square

Wei Qingxuan¹, Wang Jianlin¹, Fu Xuesong¹, Sun Qiao², Hu Hongbo²

(1. College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: The accelerometer's dynamic model plays an important role in describing and analyzing its dynamic characteristics. For the influence of unknown delay time on the accuracy of accelerometer's dynamic model parameters identification using the calibration upon shock excitation, a dynamic model parameter identification method of accelerometer using delay time correction (DTC) and least square (LS) is presented. In this method, the delay time is firstly introduced into the dynamic model of accelerometer, and the frequency response function is estimated by using Fourier transform of the accelerometer's shock excitation and response data. Then, the LS method and minimizing the error criterion function of phase are utilized to correct the delay time through continuous iteration. Finally, the dynamic model parameters of accelerometer are estimated, based on the delay time corrected data which consists of shock excitation and response of accelerometer. The experimental results of simulation and the calibration upon the shock excitation show that the presented method can reduce the influence of the delay time effectively on the accuracy of accelerometer's dynamic parameters identification, and the dynamic model parameters of accelerometer can be obtained with higher accuracy.

Keywords: accelerometer; dynamic model; parameter identification; delay time; least square (LS)

0 引 言

加速度计动态模型参数辨识对研究加速度计动态建模和提高加速度计动态测量精度具有重要作用。

加速度计绝对法冲击激励校准具有测量精度高、涵

盖频率范围宽以及易于产生较大加速度等优点^[1-2],已广泛应用于加速度计动态模型参数辨识。加速度计动态模型参数辨识方法主要有时域辨识方法^[3-4]和频域辨识方法^[5-7]两类,而加速度计动态模型参数时域辨识方法,存在辨识数据量大、对高频噪声敏感、所建模型阶次较高且阶次确定困难等缺点,使得应用上述方法辨识的加速度

计动态模型参数误差较大。加速度计动态模型参数频域辨识方法,克服了加速度计动态模型参数时域辨识方法的缺点,具有较高的模型参数辨识精度。近年来,基于最小二乘(least square, LS)的加速度计动态模型参数频域辨识方法得到了广泛应用。Link A 等人^[5]应用加权 LS 方法,利用加速度计绝对法正弦振动激励校准数据辨识出模型参数;胡红波等人^[6]采用 ISO 16063-13 激光绝对法冲击校准要求建立的冲击激励系统,应用频域 LS 方法辨识出加速度计动态模型参数,取得了一定的辨识效果。但是,现有的加速度计动态模型参数频域 LS 辨识方法同时利用加速度计复频率响应的实部与虚部,使得参数辨识结果受延迟时间影响较大,当延迟时间较大时,所得模型参数误差偏大,难以准确描述加速度计动态特性。Link A 等人^[7]指出了加速度计绝对法冲击激励校准中存在未知延迟时间,且该延迟时间由激光干涉仪内部不同的数据处理过程产生,或者由加速度计敏感元件感受的加速度和激光干涉仪测量基准面位移得到的加速度之间存在差别造成,并通过绝对法正弦振动激励校准间接地补偿了延迟时间。但是,并未研究直接估计加速度计冲击激励校准中延迟时间的方法,制约着加速度计动态模型参数辨识以及动态校准精度的进一步提高。

传感器动态测量系统中由测量通道不匹配产生的延迟时间,直接影响着基于数据驱动传感器建模和参数辨识精度,制约着测量系统动态性能和测量精度的提高^[8-9]。现有的延迟时间估计方法主要是基于相关分析^[10-12]、极大似然估计^[13-15]、最小均方误差^[16-17]和构建滤波器^[18-19]等方法实现延迟时间估计。Li H 等人^[11]提出了一种基于幅度差分相关函数的延迟时间修正(delay time correction, DTC)方法,对射频功率放大器输入信号与反馈信号的延迟时间进行了补偿;李帅永等人^[12]利用加速度计检测管道径向泄漏信号,采用基于互相关函数的时频分析方法,确定了测量信号的时间延迟。但这类基于相关函数的延迟时间估计方法对信号时域相似程度敏感,由于加速度计冲击激励与响应信号相似程度差异较大,使得这类方法估计出的延迟时间存在较大误差。江若玫等人^[15]提出一种基于极大似然估计的延迟时间估计方法,能够在观察时间趋近于无穷大时渐进有效,但需要已知信号的先验知识,使得该方法在现实中的应用受到局限;王文川等人^[17]提出了一种变步长最小均方自适应延迟时间估计算法,通过构建步长因子与误差之间的非线性函数关系,实现了延迟时间估计;Ahmed S 等人^[19]提出了一种基于线性滤波器的延迟时间辨识方法,通过迭代计算,能够同时辨识出延迟时间的整数部分和小数部分,但这两种方法均引入了新的设定参数,对延迟时间估计结果影响较大,使其难以估计并修正加速度计冲击激励与响应数据存在的延迟时间。

本文针对加速度计绝对法冲击激励校准中未知延迟时间对加速度计动态模型参数辨识精度的影响,提出了一种基于 DTC-LS 的加速度计动态模型参数辨识方法,将延迟环节引入加速度计动态模型中,使用加速度计冲击激励与响应数据的傅里叶变换估计其频率响应函数(frequency response function, FRF),利用 LS 方法和极小化相位误差准则函数修正延迟时间,并利用延迟时间修正后数据,实现加速度计动态模型参数辨识。

1 含延迟时间的加速度计动态模型

1.1 加速度计动态模型

加速度计在其线性动态范围内,可等效为单自由度质量-弹簧-阻尼系统^[20],如图 1 所示。

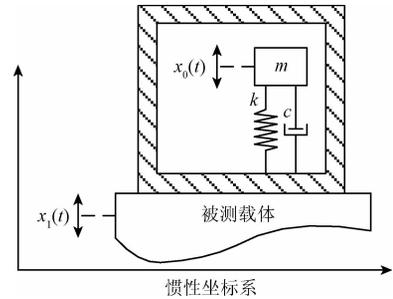


图 1 单自由度质量-弹簧-阻尼系统

Fig. 1 Single degree of freedom mass-spring-damper system

质量为 m 的质量块内置于加速度计壳体,被弹性系数为 k 的弹簧和阻尼系数为 c 的阻尼器支撑,加速度计壳体固定在被测载体上。在惯性坐标系下,设 $x_0(t)$ 为质量块相对于壳体的位移,当载体以绝对位移 $x_1(t)$ 运动时,加速度计感受到输入加速度为 $u_0(t) = x_1''(t)$,并产生输出 $y_0(t) \propto x_0(t)$,质量块 m 的运动方程为:

$$y_0''(t) + 2\delta\omega_n y_0'(t) + \omega_n^2 y_0(t) = K\omega_n^2 u_0(t) \quad (1)$$

式中: $\delta = c/(2\sqrt{km})$ 为等效阻尼比, $\omega_n = \sqrt{k/m}$ 为固有频率, K 为加速度计静态增益。

考虑在未加激励时,初始条件为 0,加速度计传递函数为:

$$G(s) = \frac{Y_0(s)}{U_0(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\delta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

式中: $U_0(s)$ 、 $Y_0(s)$ 分别为加速度计输入输出信号。

令 $s = j\omega$,则 $G(s)$ 可表示为如下线性形式:

$$G^{-1}(j\omega) = \boldsymbol{\varphi}^T(j\omega)\boldsymbol{\theta} \quad (3)$$

式中: $j = \sqrt{-1}$, $\boldsymbol{\theta} = (1/K, \delta/K\omega_n, 1/K\omega_n^2)^T$ 为参数矩阵, $\boldsymbol{\varphi}^T(j\omega) = (1, 2j\omega, -\omega^2)$ 。

根据频域 LS 方法,建立最小二乘规范方程:

$$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{e} \quad (4)$$

式中： $T = \begin{pmatrix} \text{Re}G^{-1}(j\omega_1) \\ \vdots \\ \text{Re}G^{-1}(j\omega_L) \\ \text{Im}G^{-1}(j\omega_1) \\ \vdots \\ \text{Im}G^{-1}(j\omega_L) \end{pmatrix}$ 为观测矩阵， $\Phi =$

$\begin{pmatrix} \text{Re}\varphi^T(j\omega_1) \\ \vdots \\ \text{Re}\varphi^T(j\omega_L) \\ \text{Im}\varphi^T(j\omega_1) \\ \vdots \\ \text{Im}\varphi^T(j\omega_L) \end{pmatrix}$ 为信息矩阵， e 为误差。

参数矩阵 θ 的估计为：

$$\hat{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T T \tag{5}$$

进而得到加速度计动态模型参数。但是，在加速度计绝对法冲击激励校准中，测量通道不匹配将导致测量的加速度计输入输出数据存在时间延迟。

为了分析现有频域 LS 方法的参数辨识效果，在式(2)中引入延迟环节，如式(6)所示。

$$E(\tau, \omega) = T|_{\tau \neq 0} - T|_{\tau = 0} = \begin{pmatrix} (\text{Re}G^{-1}(j\omega_1))(\cos(\tau\omega_1) - 1) - (\text{Im}G^{-1}(j\omega_1))\sin(\tau\omega_1) \\ \vdots \\ (\text{Re}G^{-1}(j\omega_L))(\cos(\tau\omega_L) - 1) - (\text{Im}G^{-1}(j\omega_L))\sin(\tau\omega_L) \\ (\text{Im}G^{-1}(j\omega_1))(\cos(\tau\omega_1) - 1) + (\text{Re}G^{-1}(j\omega_1))\sin(\tau\omega_1) \\ \vdots \\ (\text{Im}G^{-1}(j\omega_L))(\cos(\tau\omega_L) - 1) + (\text{Re}G^{-1}(j\omega_L))\sin(\tau\omega_L) \end{pmatrix} \tag{9}$$

式中： E 表示误差矩阵。

参数矩阵 θ 的估计为：

$$\hat{\theta}|_{\tau \neq 0}(\tau, \omega) = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T (T|_{\tau = 0} + E(\tau, \omega)) = \hat{\theta}|_{\tau = 0}(\omega) + \hat{\theta}_e(\tau, \omega) \tag{10}$$

式中： $\hat{\theta}_e(\tau, \omega) = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T E(\tau, \omega)$ 为参数矩阵 θ 估计误差， $\hat{\theta}|_{\tau = 0}(\omega)$ 为 $\tau = 0$ 时的参数矩阵 θ 估计。

延迟时间 $\tau \neq 0$ 时，利用现有的频域 LS 方法辨识模型参数，将产生大小为 $\hat{\theta}_e(\tau, \omega)$ 的估计误差。在加速度计绝对法冲击激励校准中，测量噪声与延迟时间同时存在，现有的加速度计动态模型无法准确描述加速度计动态特性。

1.2 含延迟时间的加速度计动态模型

为了准确表征加速度计绝对法冲击激励校准中存在的延迟时间，克服现有频域 LS 方法产生的估计误差，不失一般性，设 $M(s)$ 、 $N(s)$ 分别表示校准过程中由输入端和输出端引入的加性随机噪声， $U_\lambda(s)$ 、 $Y_\lambda(s)$ 分别表示时间延迟后的加速度计输入输出信号， $U(s)$ 、 $Y(s)$ 分别

$$G_\tau(j\omega) = G(j\omega) \exp(-\tau j\omega) \tag{6}$$

式中： $\exp(-\tau j\omega)$ 表示延迟环节， τ 表示由于测量通道不匹配产生的延迟时间。

利用欧拉公式， $G_\tau^{-1}(j\omega)$ 的实部和虚部可表示为：

$$\begin{cases} \text{Re}G_\tau^{-1}(j\omega) = (\text{Re}G^{-1}(j\omega)) \cos(\tau\omega) - (\text{Im}G^{-1}(j\omega)) \sin(\tau\omega) \\ \text{Im}G_\tau^{-1}(j\omega) = (\text{Re}G^{-1}(j\omega)) \sin(\tau\omega) + (\text{Im}G^{-1}(j\omega)) \cos(\tau\omega) \end{cases} \tag{7}$$

记观测矩阵为 $T|_{\tau \neq 0}$ ，则：

$$T|_{\tau \neq 0} = \begin{pmatrix} (\text{Re}G_\tau^{-1}(j\omega_1)) \cos(\tau\omega_1) - (\text{Im}G_\tau^{-1}(j\omega_1)) \sin(\tau\omega_1) \\ \vdots \\ (\text{Re}G_\tau^{-1}(j\omega_L)) \cos(\tau\omega_L) - (\text{Im}G_\tau^{-1}(j\omega_L)) \sin(\tau\omega_L) \\ (\text{Im}G_\tau^{-1}(j\omega_1)) \cos(\tau\omega_1) + (\text{Re}G_\tau^{-1}(j\omega_1)) \sin(\tau\omega_1) \\ \vdots \\ (\text{Im}G_\tau^{-1}(j\omega_L)) \cos(\tau\omega_L) + (\text{Re}G_\tau^{-1}(j\omega_L)) \sin(\tau\omega_L) \end{pmatrix} \tag{8}$$

记式(4)中观测矩阵为 $T|_{\tau = 0} = T$ ，则由式(8)可知：

$T|_{\tau = 0} \neq T|_{\tau \neq 0}$ ，且两者误差如式(9)所示。

表示测量的加速度计输入输出信号，则含延迟时间的加速度计输入输出测量通道框图可表示为图2所示。

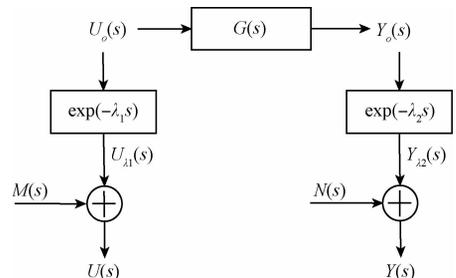


图2 含延迟时间的加速度计输入输出测量通道框图

Fig.2 The block diagram of the accelerometer's input and output measurement channels with delay time

含延迟时间的加速度计动态模型可表示为：

$$H(s) = G(s) \exp(-\tau s) \frac{1 + \frac{N(s)}{Y_{\lambda_2}(s)}}{1 + \frac{M(s)}{U_{\lambda_1}(s)}} \tag{11}$$

式中: $\tau = \lambda_2 - \lambda_1$ 表示测量通道不匹配产生的延迟时间。

根据式(11),含延迟时间的加速度计 FRF 为:

$$H(j\omega) = G_\tau(j\omega)\beta(j\omega) \quad (12)$$

其中:

$$G_\tau(j\omega) = G(j\omega)\exp(-\tau j\omega) \quad (13)$$

$$\beta(j\omega) = \frac{1 + \frac{N(j\omega)}{Y_{\lambda_2}(j\omega)}}{1 + \frac{M(j\omega)}{U_{\lambda_1}(j\omega)}} \quad (14)$$

相对于激励与响应信号,测量过程随机噪声幅值较小, $\beta(j\omega) \approx 1$ 。若能使 $\tau = \lambda_2 - \lambda_1$ 不断减小,直至 $\tau \rightarrow 0$,则可以忽略延迟时间对加速度计 FRF 估计的影响,提高加速度计 FRF 估计的精度,从而使加速度计动态模型参数频域辨识精度得到提高。

2 基于 DTC-LS 的加速度计动态模型参数辨识

2.1 含延迟时间的加速度计动态模型参数辨识

令 $c(\omega) = \omega_n^2 - \omega^2, d(\omega) = 2\delta\omega_n\omega$ 代入式(12),得式(15)。

$$J(\tau) = \begin{cases} \tau\omega - \arctan \frac{c(\omega)\tan \angle G_\tau(j\omega) + d(\omega)}{c(\omega) - d(\omega)\tan \angle G_\tau(j\omega)}, & \omega \leq \omega_n \\ \tau\omega - \arctan \frac{c(\omega)(\pi + \tan \angle G_\tau(j\omega)) - d(\omega)}{c(\omega) - d(\omega)(\pi + \tan \angle G_\tau(j\omega))}, & \omega > \omega_n \end{cases} \quad (18)$$

采用单纯形算法^[21]极小化该误差准则函数,可以得到延迟时间 τ 的估计:

$$\hat{\tau} = \arg \min_{\tau} J(\tau) \quad (19)$$

通过辨识出的延迟时间调整加速度计输入输出数据,然后将该数据作为新的加速度计输入输出数据,重复上述辨识过程,不断修正延迟时间,直至 $|\hat{\tau}| < \varepsilon$ ($\varepsilon > 0$ 表示极小量)时得到的加速度计动态模型参数即为最优的加速度计动态模型参数。

2.2 含延迟时间的加速度计动态模型参数辨识算法

设测量的加速度计输入输出数据分别为 $u(n)$ 和 $y(n), n = 1, 2, \dots, N, t_s$ 为采样周期。基于 DTC-LS 的加速度计动态模型参数辨识算法流程如图 3 所示。

基于 DTC-LS 的加速度计动态模型参数辨识算法的具体步骤如下:

1) 设 $u_k(n), y_k(n)$ 为第 k 次迭代的加速度计输入输出数据,其中 $u_1(n), y_1(n)$ 分别为 $u(n), y(n)$;

2) 利用傅里叶变换估计加速度计 FRF $\hat{G}_{\tau,k}(j\omega_l), l = 0, 1, \dots, (N/2 - 1)$ 为离散谱线序号,根据式(17)由 LS 方法辨识出加速度计动态模型参数 $\hat{K}_k, \hat{\delta}_k, \hat{\omega}_{n,k}$;

$$|H(j\omega)|^2 \approx |G_\tau(j\omega)|^2 = \frac{(K\omega_n^2)^2}{c(\omega)^2 + d(\omega)^2} \quad (15)$$

$$\angle H(j\omega) \approx \angle G_\tau(j\omega) =$$

$$\begin{cases} \arctan \frac{-d(\omega) + \tan(\tau\omega)c(\omega)}{c(\omega) + \tan(\tau\omega)d(\omega)}, & \omega \leq \omega_n \\ \arctan \left[-\pi + \frac{-d(\omega) + \tan(\tau\omega)c(\omega)}{c(\omega) + \tan(\tau\omega)d(\omega)} \right], & \omega > \omega_n \end{cases} \quad (16)$$

由式(15)变换后可得如下线性关系:

$$\frac{1}{|G_\tau(j\omega)|^2} = \frac{c(\omega)^2 + d(\omega)^2}{(K\omega_n^2)^2} = \frac{1}{K^2} + \frac{2(2\delta^2 - 1)}{K^2\omega_n^2}\omega^2 + \frac{1}{(K\omega_n^2)^2}\omega^4 = f^T(\omega)\boldsymbol{\mu} \quad (17)$$

式中: $f^T(\omega) = (1, \omega^2, \omega^4) \in \mathbb{R}^{1 \times 3}$, 参数向量 $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \mu_3)^T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$, 且 $K = \sqrt{1/\mu_1}, \omega_n = \sqrt[4]{\mu_1/\mu_3}, \delta = \sqrt{(\mu_2/\sqrt{\mu_1\mu_3} + 2)/4}$ 。

根据式(17)采用 LS 方法得到参数向量的估计,通过参数向量各元素与加速度计动态模型参数之间关系得到加速度计动态模型参数估计。

根据式(16),定义相位误差准则函数如式(18)所示。

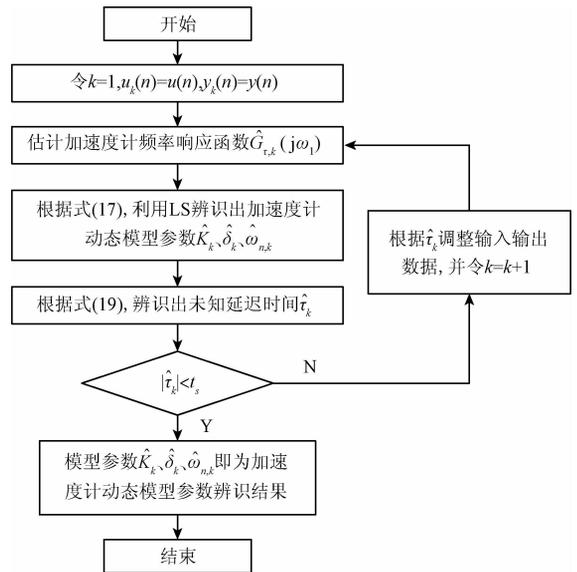


图 3 基于 DTC-LS 的加速度计动态模型参数辨识算法流程

Fig. 3 The flow chart of dynamic model parameter identification of accelerometer using DTC-LS

3) 利用获得的 $\hat{K}_k, \hat{\delta}_k, \hat{\omega}_{n,k}$, 根据式(19)极小化相频响应误差准则函数, 辨识出延迟时间 $\hat{\tau}_k$;

4) 判断 $\hat{\tau}_k$ 是否满足停止条件 $|\hat{\tau}_k| < t_s$ 。若不满足, 根据上步辨识得到的延迟时间 $\hat{\tau}_k$, 修正加速度计输入输出数据, 将该数据作为新的加速度计输入输出数据, 并令 $k = k + 1$, (重复步骤2)~4), 直至满足停止条件时, 停止迭代, 此时得到的加速度计动态模型参数即为加速度计动态模型参数最优辨识结果。

3 实验与分析

3.1 仿真实验

利用 MATLAB 软件仿真加速度计冲击激励与响应

数据, 数据长度均为 5×10^4 个点, 采样频率为 10 MHz。冲击激励利用 4 阶巴特沃斯滤波器产生, 截止频率为 10 kHz。设定仿真加速度计动态模型参数 K, δ 和 ω_n 分别为 $0.449\ 0\ \text{pC}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 、 $0.006\ 3$ 和 $2.771\ 9 \times 10^5\ \text{rad/s}$ 。

应用本文方法辨识加速度计动态模型参数, 并与频域 LS 方法进行比较, 采用式(20)所表示的偏差作为衡量辨识结果精度指标, 延迟时间 τ 为 $1.5 \times 10^{-6}\ \text{s}$ 时的参数辨识结果如表 1 所示。由表 1 可以看出, 由于设定的延迟时间较小, 两种方法均较为精确地辨识出模型参数, 但频域 LS 方法无法估计出延迟时间。

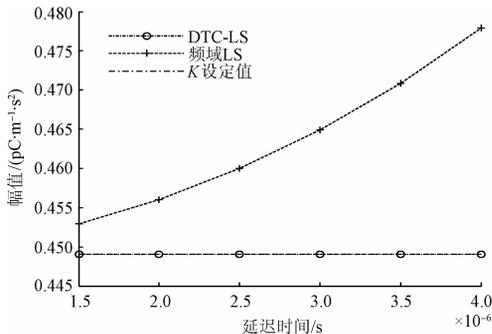
$$\text{偏差} = (|\text{辨识值} - \text{设定值}| / \text{设定值}) \times 100\% \quad (20)$$

表 1 参数辨识结果(无噪声)
Table 1 Results of parameter identification (without noise)

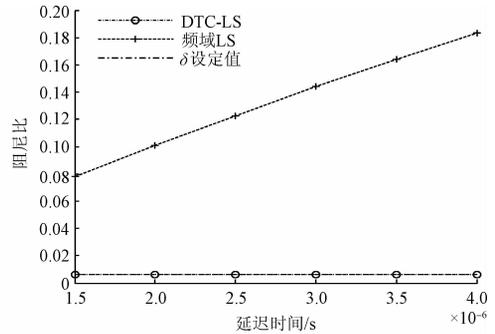
参数	设定值	DTC-LS/偏差	频域LS/偏差
$K/(\text{pC} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2)$	0.449 0	0.449 0/7.5 × 10 ⁻³	0.452 9/8.7 × 10 ⁻¹
δ	0.006 3	0.006 3/2.3 × 10 ⁻³	0.077 8/1.1 × 10 ³
$\omega_n/(\times 10^5\ \text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	2.771 9	2.771 9/3.4 × 10 ⁻⁶	2.744 5/9.9 × 10 ⁻¹
$\tau/(\times 10^{-6}\ \text{s})$	1.500 0	1.503 0/2.0 × 10 ⁻¹	-

为了得到参数辨识结果随延迟时间变化的关系, 将延迟时间增大, 应用本文方法辨识加速度计动态模型参数, 并与频域 LS 方法比较, 结果如图 4 所示。由图 4(a)~(c)可以明显看出, 随着延迟时间增加, 应用频域 LS

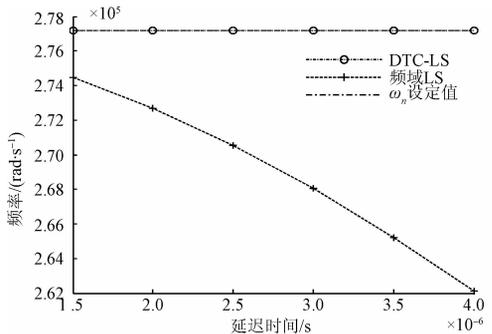
方法得到的辨识结果偏差也随着增大, 而应用本文方法能够得到良好的辨识结果。图 4(d)显示了应用本文方法得到的延迟时间估计, 在延迟时间增大到 40 倍采样周期时, 仍能得到准确的辨识结果。



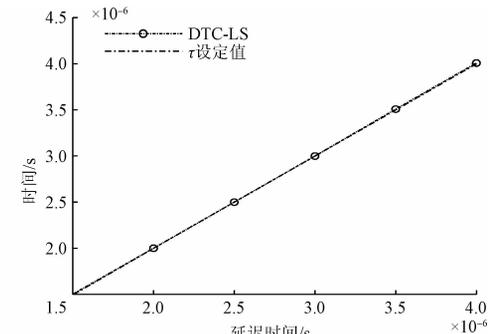
(a) 不同延迟时间下K的辨识结果
(a) Results of parameter K under different delay time



(b) 不同延迟时间下delta的辨识结果
(b) Results of parameter delta under different delay time



(c) 不同延迟时间下omega_n的辨识结果
(c) Results of parameter omega_n under different delay time



(d) 不同延迟时间下tau的辨识结果
(d) Results of parameter tau under different delay time

图 4 无噪声时不同延迟时间下参数辨识结果

Fig. 4 Results of parameter identification under noise free and different delay time

表 2 所示为不同信噪比 (signal-noise ratio, SNR) 下, $\tau = 1.5 \times 10^{-6}$ s 时, 应用本文方法得到的参数辨识结果及其不确定度。不确定度采样蒙特卡罗方法计算,

实验次数为 500 次。当 SNR 为 20 dB 时, 仍可获得精度较高的加速度计动态模型参数和延迟时间辨识结果。

表 2 不同 SNR 下参数辨识结果 (包含不确定度)

Table 2 Results of parameters identification under different SNR (includes the uncertainty)

SNR/dB	$K/(\mu\text{C} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2)/\text{不确定度}$	$\delta/\text{不确定度}$	$\omega_n (\times 10^5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1})/\text{不确定度}$	$\tau (\times 10^{-6} \text{ s})/\text{不确定度}$
50	0.449 2/3.038 $\times 10^{-4}$	0.006 3/1.101 $\times 10^{-5}$	2.771 9/2.973	1.478 4/2.875 $\times 10^{-9}$
40	0.448 9/0.001	0.006 2/4.173 $\times 10^{-5}$	2.772 0/8.983	1.583 8/1.340 $\times 10^{-8}$
30	0.438 9/0.004	0.004 9/1.806 $\times 10^{-5}$	2.772 0/45.76	1.866 3/4.082 $\times 10^{-8}$
20	0.324 2/0.005	0.005 8/2.685 $\times 10^{-4}$	2.766 1/126.2	1.594 2/5.543 $\times 10^{-8}$

3.2 加速度计绝对法冲击激励校准实验

将本文方法应用于加速度计绝对法冲击激励校准, 加速度计绝对法冲击激励校准装置如图 5 所示, 由加速度计安装基座、缓冲垫盘、钢珠发射装置等组成。钢珠由发射装置发射, 与固定被校加速度计的安装基座发生碰撞, 加速度计的电荷输出经放大器转换为电压信号, 激光干涉仪测量加速度计安装基座产生的位移信号, 利用 PXI 采集板卡对两路信号同步采样, 并由计算机解算后得到加速度计冲击激励信号。



图 5 冲击激励校准装置

Fig. 5 The device of shock excitation

图 6 所示为测量的加速度计输入输出信号局部波形, 可以明显观察到由于延迟时间的影响, 使得输出超前输入。应用本文方法获得加速度计动态模型参数。辨识出的延迟时间为 $\hat{\tau} = -1.03 \times 10^{-5}$ s。图 7 所示为 DTC 前后由测量数据与辨识模型得到的加速度计 FRF。由图 7(a) 可以看出, 延迟时间使得相频响应随频率的增大而增大, 在谐振频率处增大至约 180° 。依据获得的延迟时间调整测量数据, 相频响应成为典型的二阶系统响应, 且与辨识出的加速度计动态模型 FRF 较为一致, 如图 7(b) 所示。

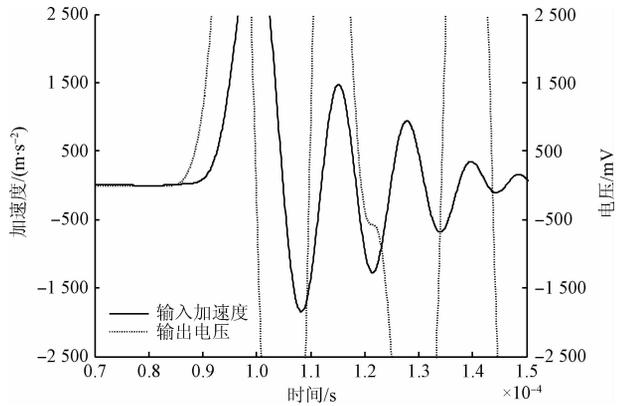
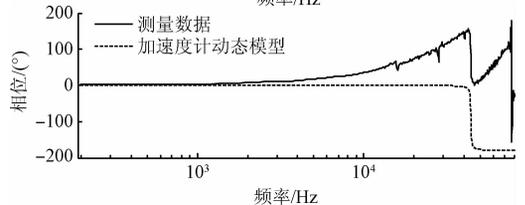
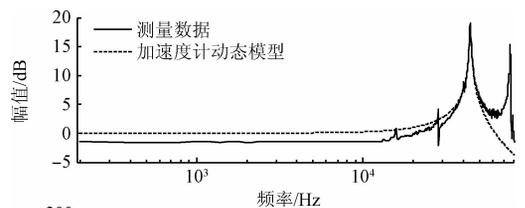


图 6 加速度计输入输出信号局部波形

Fig. 6 Waveform of accelerometer's input and output signal



(a) DTC 前加速度计 FRF
(a) FRF of accelerometer before DTC

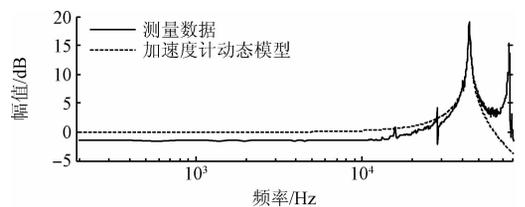


图 7(b) bottom: Phase plot of FRF after DTC. The x-axis is frequency/Hz on a log scale from 10^3 to 10^4. The y-axis is phase/(degrees) from -200 to 200. It shows measurement data (solid line) and the accelerometer dynamic model (dotted line).

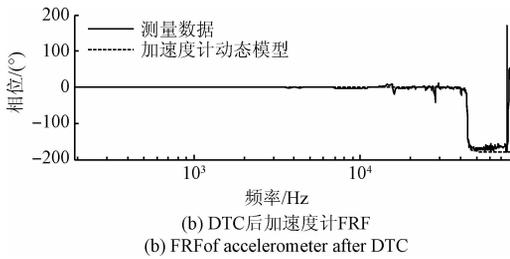


图7 DTC前后加速度计FRF

Fig.7 FRF of accelerometer before and after DTC

将本文方法与频域LS方法比较,两种方法所得加速度计动态模型参数结果如表3所示。

表3 加速度计动态模型参数辨识结果

Table 3 Results of dynamic model parameters identification of accelerometer

辨识方法	$K/(\mu\text{C} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2)$	δ	$\omega_n/(\times 10^5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1})$
DTC-LS	1.003 0	0.006 1	2.771 8
频域LS	0.736 3	0.008 2	2.700 0

由于加速度计绝对法正弦振动校准能够得到可靠且不确定度较小的校准结果^[6],为进一步验证辨识出的加速度计动态模型参数的有效性,采用图8所示的中国计量科学研究院振动国家基准装置^[22],其测量不确定度如表4所示,采用国际标准^[23]推荐的计算方法,对被校加速度计进行绝对法正弦振动激励校准。图9所示为离散频率点处校准数据和两种方法获得的加速度计动态模型计算结果。从图9可以看出,由于频域LS方法同时利用加速度计复频率响应的实部与虚部,使得参数辨识结果受延迟时间影响较大。而本文方法能够消除延迟时间对参数辨识的影响,在所选离散频率点处,加速度计动态模型频率响应与绝对法正弦振动激励校准数据较为一致,且均包含在绝对法正弦振动激励校准数据不确定度范围内,具有较高的模型参数辨识精度。

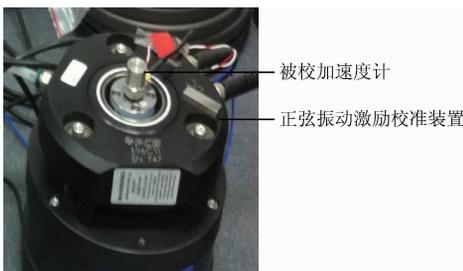


图8 正弦振动激励校准装置

Fig.8 The device of calibration upon sinusoidal excitation

表4 正弦振动激励校准装置不确定度

Table 4 Standard uncertainty of the calibration device

频率范围/kHz	幅值不确定度/ ($\mu\text{C} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$)	相位不确定度/(°)
≤ 5	0.002	0.25
(5,10]	0.005	0.5
(10,15]	0.007 5	0.5
(15,20]	0.015	0.5

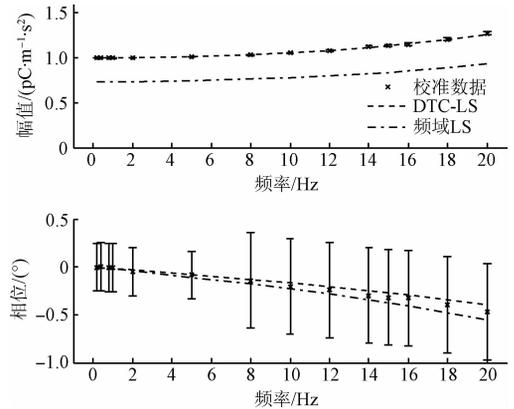


图9 绝对法正弦振动激励校准数据和辨识模型的频率响应

Fig.9 FRF of accelerometer using vibration calibration and the identified model

4 结论

本文提出了一种基于DTC-LS的加速度计动态模型参数辨识方法,将延迟环节引入加速度计动态模型中,有效地描述了加速度计绝对法冲击激励校准中存在的延迟时间;使用加速度计冲击激励与响应数据估计出频率响应函数,利用最小二乘方法和极小化相位误差准则函数迭代修正延迟时间,消除了未知延迟时间对加速度计动态模型参数辨识的影响,在频域实现了加速度计动态模型参数辨识,具有较高的模型参数辨识精度。

参考文献

- [1] 孙桥,王建林,胡红波,等. 低g值冲击加速度的激光绝对法校准[J]. 计量学报, 2015, 36(2):145-148.
SUN Q, WANG J L, HU H B, et al. Primary low g shock acceleration calibration using laser interferometry [J]. Acta Metrologica Sinica, 2015, 36(2):145-148.
- [2] 孙桥,王建林,胡红波,等. 低g值碰撞式冲击加速度计量标准装置研究与建立[J]. 振动与冲击, 2015, 34(10):179-183.

- SUN Q, WANG J L, HU H B, et al. Development of a low-g shock standard device based on rigid body collision for shock acceleration calibration [J]. *Journal of Vibration & Shock*, 2015, 34(10): 179-183.
- [3] YU T, HAO B Y, WANG J L, et al. An Accelerometer modeling approach based on mixed-kernel support vector machine [C]. 12th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2016: 2760-2764.
- [4] 杨子凯, 王建林, 于涛, 等. 基于预测误差法的加速度传感器动态模型参数辨识[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(6): 1244-1249.
- YANG Z K, WANG J L, YU T, et al. Dynamic model parameter identification of the acceleration sensor based on the prediction error method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(6): 1244-1249.
- [5] LINK A, TAÜBNER A, WABINSKI W, et al. Modeling accelerometers for transient signals using calibration measurements upon sinusoidal excitation [J]. *Measurement*, 2007, 40(9): 928-935.
- [6] 胡红波, 孙桥. 基于绝对法冲击校准的加速度计参数辨识研究[J]. *测试技术学报*, 2013, 27(1): 19-24.
- HU H B, SUN Q. Parameter identification of accelerometer based on primary shock calibration method [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2013, 27(1): 19-24.
- [7] LINK A, TAÜBNER A, WABINSKI W, et al. Calibration of accelerometers: Determination of amplitude and phase response upon shock excitation [J]. *Measurement Science & Technology*, 2006, 17(7): 1888-1894.
- [8] 赵冬青, 任勇峰. 高速数字采集系统通道间信号传输延迟时间分析[J]. *测试技术学报*, 2011, 25(2): 178-182.
- ZHAO D Q, REN Y F. Evaluation signal transmission delay in multi-channel high-speed data acquisition system [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2011, 25(2): 178-182.
- [9] 徐博, 陈春, 史宏洋, 等. 基于FGU的船体变形测量技术中时间延迟补偿方法研究[J]. *船舶力学*, 2015, 19(10): 1235-1244.
- XU B, CHEN CH, SHI H Y, et al. A time delay compensation method based on the hull deformation measurement technology by FGU [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2015, 19(10): 1235-1244.
- [10] HERO A O, SCHWARTZ S C. A new generalized cross correlator [J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing*, 1985, 33(1): 38-45.
- [11] LI H, KWON D H, CHEN D, et al. A fast digital pre-distortion algorithm for radio-frequency power amplifier linearization with loop delay compensation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2009, 3(3): 374-383.
- [12] 李帅永, 王鹏飞, 严冬, 等. 气体管道泄漏模态声发射时频定位方法[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(9): 2068-2075.
- LI SH Y, WANG P F, YAN D, et al. Leak location in gas pipelines with time-frequency analysis of modal acoustic emission using smooth pseudo Wigner-Ville distribution [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(9): 2068-2075.
- [13] STULLER J A, HUBING N. New perspectives for maximum likelihood time-delay estimation [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, 45(3): 513-525.
- [14] MESSER H, SHOR G, SCHULTHEISS P M. Passive time delay estimation in non-gaussian noise [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, 47(9): 2531-2534.
- [15] 江若玫, 余颜. 快速最大似然估计用于脉冲星时间延迟测量[J]. *西安电子科技大学学报*, 2016, 43(5): 147-152.
- JIANG R M, SHE Y. Method of time delay measurement based on fast maximum likelihood for pulsar pulse profile [J]. *Journal of Xidian University*, 2016, 43(5): 147-152.
- [16] YOUNG D, AHMED N, CARTER G. On using the LMS algorithm for time delay estimation [J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing*, 1982, 30(5): 798-801.
- [17] 王文川, 韩焱. 基于变步长LMS自适应时延估计算法[J]. *信息与电子工程*, 2009, 7(1): 32-36.
- WANG W CH, HAN Y. Time-delay estimation based on variable step size LMS algorithm [J]. *Information and Electronic Engineering*, 2009, 7(1): 32-36.
- [18] 陶伟, 刘发林, 王昊禹, 等. 一种非迭代的基于插值滤波器的小数延时估计算法[C]. 全国微波毫米波会议, 2015: 683-686.
- TAO W, LIU F L, WANG H Y, et al. A non-iterative fractional delay estimation algorithm based on interpolation filter [C]. National Conference on Microwave and Millimeter Wave, 2015: 683-686.
- [19] AHMED S, HUANG B, SHAH S L. Parameter and delay estimation of continuous-time models using a linear filter [J]. *Journal of Process Control*, 2006, 16(4):

323-331.

- [20] 胡红波,于梅. 基于高冲击激励的加速度计参数辨识的研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(4):487-491.
HU H B, YU M. Study for parameters identification of an accelerometer based on high shock intensities [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(4): 487-491.
- [21] ZETTEL V, HITZMANN B. Optimization of the production parameters for bread rolls with the Nelder-Mead simplex method [J]. Food & Bioproducts Processing, 2017, 103(2017): 10-17.
- [22] 胡红波,孙桥,白杰. 基于相关分析法的绝对法振动校准技术的研究与试验[J]. 测试技术学报, 2013, 27(5): 384-389.
HU H B, SUN Q, BAI J. Investigation of primary vibration calibration using correlation analysis method [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2013, 27(5): 384-389.
- [23] ISO 16063-13: 2001. International Standard 16063-13 Methods for the calibration of vibration and shock transducers Part 13: Primary Shock calibration using

laser interferometry [S]. France: Bureau International Des Poids et Measures, 2001.

作者简介



魏青轩, 2010 年于太原理工大学获得硕士学位, 现为北京化工大学博士研究生, 主要研究方向为加速度计动态建模。

E-mail: wqx007630@163.com

Wei Qingxuan received his M. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 2010. Now he is a Ph. D. candidate in Beijing University of Chemical Technology. His main research interests is dynamic modeling of the accelerometer.



王建林(通讯作者), 1997 年于天津大学获得博士学位, 现为北京化工大学教授, 主要研究方向为复杂工业过程智能检测与传感器技术、智能测控系统等。

E-mail: wangjl@mail.buct.edu.cn

Wang Jianlin (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Tianjin University in 1997. Now he is a professor in Beijing University of Chemical Technology. His main research interests include intelligent measurement technology of complex industrial process, sensor technology, and intelligent measurement & control systems.