

磁流变减振系统参数辨识*

余心宏**, 马伟增

(西北工业大学 542 信箱, 西安 710072)

摘要: 在对磁流变体的力学性能、减振系统设计和实验建模方法深入研究的基础上,提出了采用非线性顺序滤波来辨识磁流变体减振装置粘塑性模型参数的实验建模方法。研究表明,基于粘塑性假设,可以用该辨识算法获得库仑摩擦力和粘性摩擦系数。

关键词: 磁流变体;减振系统;参数辨识

中图分类号:O373 文献标识码:A

1 引言

磁流变体的基本特点是具有磁流变效应,即在磁场作用下磁流变体可以在瞬时由自由流动的粘性液体转变为具有可控屈服强度的准固体,因此基于磁流变体的机械减振装置在适当的外磁场激励下可以提供连续可变的阻尼减振力,适用于广阔的主动半主动减振领域。对于一定的磁流变体减振系统,其数学模型形式已知而其中的参数未知,模型建立问题就转化为参数辨识问题。本文采用的参数辨识方法是一种在含有噪音情况下非线性动力系统参数和状态的估计方法:顺序滤波法^[1]。下面以实例来介绍这种方法在磁流变体减振装置的粘塑性模型参数辨识中的应用。

2 磁流变体振动系统数学模型构造

如图 1 所示为含有磁流变体减振装置振动系统原理图,呈正弦变化的位移输入是由偏心轮产生的。磁流变减振装置看作粘塑性元件(这符合磁流变体的宾汉塑性体假设)^[2,3],其塑性部分类似库仑摩擦力,具有方向性,用 F 表示其绝对值,粘性部分类似粘性摩擦力,用 C_V 表示粘性摩擦系数。假设质量块质量为 m ,环形弹簧刚度为 k ,正弦位移输入的幅值为 A ,角频率为 ω ,相角为 φ ;如果质量块位移用 x 表示,时间为 t 表示,则该含有磁流变减振装置的振动系统方程可表示为:

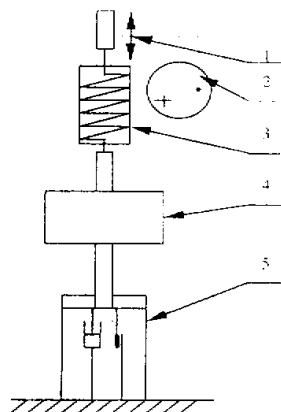


图 1 含有磁流变体减振装置振动系统原理图

1. 呈正弦变化的位移输入; 2. 偏心轮;

3. 环形弹簧; 4. 质量块; 5. 磁流变体减振装置

Fig.1 Schematic diagram of MRF damping system

1. Displacement input varying on sin-wave,

2. Eccentric sheave, 3. Ring spring,

4. Mass block, 5. MRF damper.

* 国家自然科学基金资助项目(5982003)。

** 通讯联系人, Email: xhyu@nwpu.edu.cn

收稿日期:2001-08-14;修回日期:2001-08-25。

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + F \operatorname{sgn} \frac{dx}{dt} + C_V \frac{dx}{dt} + kx = kA \sin(\omega t - \varphi) \quad (1)$$

3 基于粘塑性模型的参数辨识方法

为了研究问题的方便,对式(1)进行无量纲化处理,为此,假设一参考位移 e ,则(1)式可写为:

$$\frac{d^2\bar{x}}{d\tau^2} + \bar{F} \operatorname{sgn} \frac{d\bar{x}}{d\tau} + \bar{C}_V \frac{d\bar{x}}{d\tau} + \bar{k}\bar{x} = \bar{k}\bar{A} \sin(\tau - \varphi) \quad (2)$$

其中, $\bar{k} = \frac{k}{m\omega^2}$, $\bar{A} = \frac{A}{e}$, $\bar{x} = \frac{x}{e}$, $\tau = \omega t$, $\bar{F} = \frac{F}{me\omega^2}$, $\bar{C}_V = \frac{C}{m\omega}$ 。

根据式(2),参数辨识问题在这里可描述为:已知输入 $\bar{A} \sin(\tau - \varphi)$ 和位移响应信号 \bar{x} ,求库仑摩擦参数 \bar{F} 和粘性摩擦参数 \bar{C}_V 的值。

令 $x_1 = \bar{x}$, $x_2 = \frac{d\bar{x}}{d\tau}$, $x_3 = \bar{F}$, $x_4 = \bar{C}_V$, 并且认为 x_3 和 x_4 是时不变参数,代入(1)得:

$$\frac{d\mathbf{x}}{d\tau} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \tau) \quad (3)$$

$$\text{其中, } \mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T, \mathbf{f}(\mathbf{x}, \tau) = \begin{bmatrix} x_2 \\ -\bar{k}x_1 - \bar{F} \operatorname{sgn} x_2 - \bar{C}_V x_2 + \bar{k}\bar{A} \sin(\tau - \varphi) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

有效观测值用矢量 $\mathbf{z}(\tau)$ 表示,这里 $\mathbf{z}(\tau)$ 又可表示为:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \tau) + \varepsilon \quad (4)$$

其中, ε 为观测噪音; $\mathbf{h}(\mathbf{x}, \tau)$ 为标量函数,因为这里只处理质量块位移响应,参数辨识问题又可表示为已知观测量 \mathbf{z} ,求状态矢量 \mathbf{x} 。

估计算法第一步建立一预测校正型的表达式:

$$\frac{d\hat{\mathbf{x}}}{d\tau} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}, \tau) - \mathbf{P} \mathbf{H}^T [\mathbf{z}(\tau) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}, \tau)] \quad (5)$$

该微分方程的解提供了 \mathbf{x} 的一个估计值 $\hat{\mathbf{x}}$; $\mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}, \tau)$ 和 $\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}, \tau)$ 由式(3)和(4)给出。残差 $\mathbf{z}(\tau) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}, \tau)$ 被三矩阵的乘积加权。三个矩阵分别为:协方差矩阵 \mathbf{P} ,维数 4×4 ,矩阵 \mathbf{H} , $\mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}, \tau)}{\partial \mathbf{x}} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$;加权矩阵 \mathbf{Q} ,起调整各观测量重要程度作用,在这里由于只有一个观测量,该矩阵退化为一标量,可认为等于1。

估计算法第二步是在每一递推步更新矩阵 \mathbf{P} ,通过解下面的微分方程(6)实现。

$$\frac{d\mathbf{P}}{d\tau} = \frac{\partial \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}, \tau)}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{P} + \mathbf{P} \frac{\partial \mathbf{f}^T(\hat{\mathbf{x}}, \tau)}{\partial \mathbf{x}} + 2\mathbf{P} \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \{ \mathbf{H}^T [\mathbf{z}(\tau) - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}, \tau)] \} \mathbf{P} \quad (6)$$

为了解微分方程(6),需要先计算 Jacobian 矩阵:

$$\frac{\partial \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}, \tau)}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\bar{k} & -\hat{x}_4 & -\operatorname{sgn} \hat{x}_2 & -\hat{x}_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

因此, \mathbf{P} 是状态估计量 $\hat{\mathbf{x}}$ 的函数。

4 辨识算法的数值模拟

辨识算法的数值模拟就是用数值方法来验证辨识算法的有效性。数值模拟的“实验数据”通过解给定初始条件($\mathbf{x}(0)$)和参量(\bar{F}, \bar{C}_V)值的微分方程(3)得到,即把解得的状态矢量 \mathbf{x} 的分量 x_1 作为含有噪音的观测量 z 。算法的实施在给定状态矢量估计初值 $\hat{\mathbf{x}}(0)$ 和协方差矩阵初值 $\mathbf{R}(0)$ 前提下,把观测量 z 的序列分步代入式(5)和(7),通过交替解这两个微分方程得到状态矢量的估计 $\hat{\mathbf{x}}$ 的序列。如果以上估计算法是正确的, $\hat{\mathbf{x}}$ 的分量 \hat{x}_3 和 \hat{x}_4 的序列将逐步逼近 \bar{F} 和 \bar{C}_V 。下面将以一算例来证明该估计算法的正确性。

取初始条件 $\mathbf{x}(0)=[0.0 \ 0.0 \ 1.0 \ 0.1]$ 参数 $x_3 = \bar{F} = 1.0, x_4 = \bar{C}_V = 0.1, k = 0.73, \bar{A} = 12.5$ 。把参数值代入式(3),利用给定的初始条件计算并采样,得到“实验数据”序列。 x_1 计算曲线如图 2 所示。 x_1 的采样值(采样周期为无量纲数 0.02)提供了观测量 $z(\tau)$ 。这里取状态矢量估计的初值为 $\hat{\mathbf{x}}(0)=[0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 把得到的 $z(\tau)$ 代入式(5)和(6),得到的状态矢量估计序列曲线,如图 3 所示。

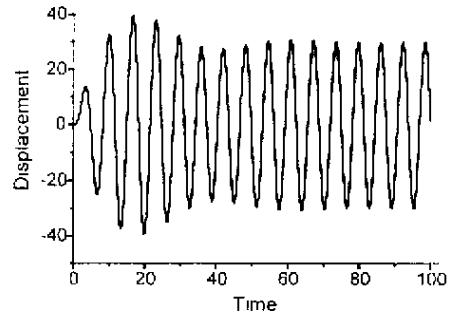


图 2 “观测值”序列曲线
Fig.2 Experimental data curve

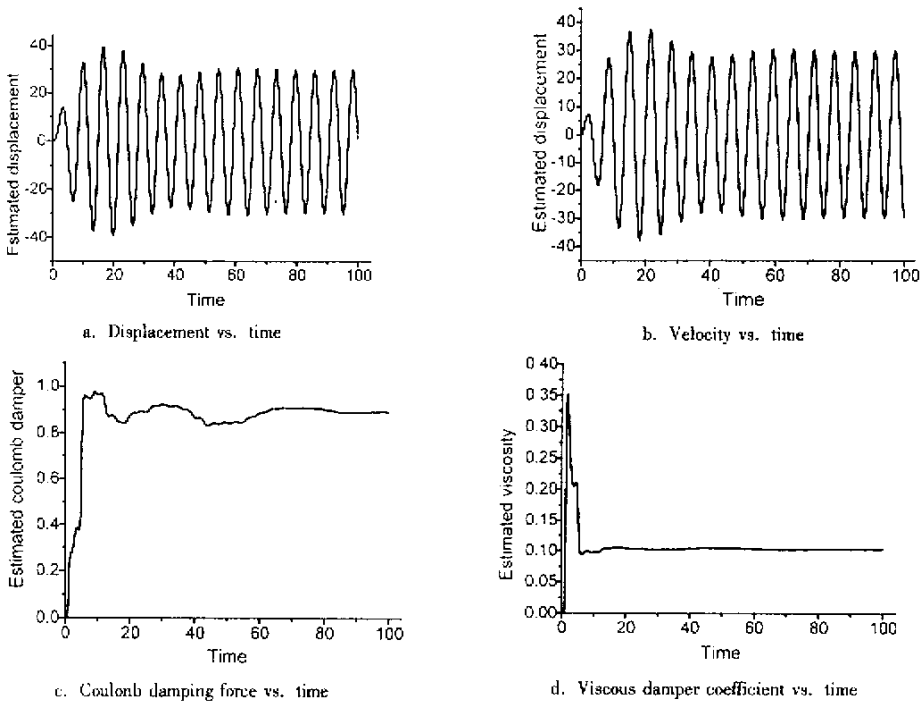


图 3 状态矢量估计值曲线

Fig.3 State vector curves

\hat{x}_1 和 \hat{x}_2 在经过 400 个采样点数据计算后,与 x_1 和 x_2 的相对误差小于 1% ;粘性阻尼系数 \hat{x}_4 经过 1000 个采样点数据的计算达到基本恒定,与 x_4 的相对误差为 2% ;库仑摩擦力的估计

\hat{x}_3 经过 3000 个采样数据计算基本恒定,与 x_3 的相对误差为 10%。结果证明,本文的算法具有较高的精确性和有效性。

5 结 论

在实际参数辨识中,把实验得到的观测采样值序列代替相应的序列,用该辨识算法可以得到基于粘塑性假设的较为准确的库仑摩擦力和粘性摩擦系数,完成含有磁流变体减振装置振动系统的实验建模。

参 考 文 献

- [1] Roger Stanway. *Transaction of the ASME Journal of Dynamic Systems , Measurement , and Control* , 1989 , **111** : 91
- [2] Gopalakrishna M. *AIAA Journal of Guidance , Control ,and Dynamics* , 1997 , **20** : 1125
- [3] Li Pang. *AIAA* , 1998 , **2040** : 2841
- [4] Ma Weizeng (马伟增). MS Thesis. Northwestern Polytechnical University (西北工业大学硕士学位论文), 2000

A Parameter Identifying Method for Magnetorheological (MR) Fluids Dampers *

Yu Xinhong ** , Mao Weizeng

(Northwestern Polytechnical University , Xi 'an 710072)

Abstract In order to speed up the commercial process of magnetorheologica(MR) dampers , it is necessary to set up the theoretical foundation of the design of MR dampers . In this thesis , we studied the mechanical property of MR fluids , the design roles of MR dampers and the experimental modeling of MR dampers . Based on a prototype MR dampers working in flow mode , an experimental modeling method for MR dampers is put forward . Employing a nonlinear sequential filter to identify the model parameter of viscous plastic model carries out the modeling method . We performed numerical simulation with eqs . (5) and (7) , present the simulation results in Fig.3 . The good agreement between the test data and results computed shows that the modeling method is correct .

Key words Magnetorheologica(MR) fluids , Vibration damping , Parameter identifying

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (59582003) .

** To whom correspondence should be addressed , Email : xhyu@nwpu.edu.cn