

基于 K-L 分解的斜拉索-磁流变系统建模及减振控制研究

王 振, 张 刚*, 陈跃华, 冯志敏, 胡洋洋

(宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315832)

摘要: 针对斜拉索-磁流变阻尼器系统, 提出一种数据驱动的分布参数系统建模方法. 利用 K-L 时空分解方法得到表征系统空间结构的基函数, 将其与系统输出作内积求出表征系统状态幅值的时间序列, 根据时间序列和外载荷等数据信息, 利用递推最小二乘算法辨识时域 ARMAX 模型, 将空间基函数与时域 ARMAX 模型进行空间重构得到空间 ARMAX 模型, 最后对该时域 ARMAX 模型进行预测控制. 实验结果表明: 建立的分布参数系统模型计算量小、精度高, 可以满足实际工程要求; 采用的预测控制方法能够对斜拉索-磁流变阻尼器分布参数系统模型进行有效的减振控制.

关键词: K-L 时空分解; 递推最小二乘辨识; 分布参数系统; ARMAX 模型; 广义预测控制

中图分类号: O328

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 03-0091-08

我国是目前世界上拥有斜拉桥数量最多的国家. 斜拉桥拉索具有柔度大、阻尼小、质量小等特点, 使得拉索在环境荷载和支座移动等作用下, 容易产生不同类型的振动, 影响桥梁的安全运营及使用寿命^[1-4]. 为此, 国内外学者研究了斜拉索-阻尼器系统, 发现半主动控制在斜拉索减振控制中具有施工、维护成本低, 控制效果好等优势.

随着磁流变阻尼器 (Magnetorheological Damper, MRD) 在实际工程中的运用, 诸多学者研究了 MRD 在斜拉索半主动控制中的应用. 文献[5]基于理论计算和试验实测发现, 改进的 Bang-Bang 控制对拉索的减振效果优于最优的被动控制. 文献[6]采用限界 Hrovat 最优控制算法确定了磁流变阻尼器的半主动控制力. 文献[7]基于频域线性二次最优控制与 Hilbert-Huang 变换, 提出了斜拉索振动的频域自适应控制方法, 能够高效地利用磁流变阻尼器的动力特性, 并使其达到最佳的减振效果. 文献[8-9]考虑斜拉索-磁流变阻尼器非线性特点, 提出了随机最优半主动控制算法. 文献[10]在 Bang-Bang 控制基础上提出了随机最优半主动

控制策略. 文献[11-12]引入了神经网络的控制方法, 解决了传统控制方法中难以解决的诸如模型非线性、延时补偿等问题. 文献[13]提出了基于模糊逻辑的斜拉索-磁流变阻尼器的智能控制算法. 目前已成熟的控制方法大多是将分布参数系统近似为集中参数系统进行求解处理, 从而降低了模型的准确度; 而实际上斜拉索-阻尼器系统是典型的分布式参数系统, 应采用分布参数系统方法进行处理. 加上斜拉索系统的边界条件通常难以确定, 外部激励大小无法准确测得, 而且在使用过程中会出现疲劳、振动等问题, 使得内部阻尼、拉索单位质量发生改变, 给斜拉索-阻尼器的建模和控制研究带来了挑战. 为此, 寻找一种建模方法简单、计算量较小的斜拉索-磁流变阻尼器系统模型成为桥梁建设者关注的一个主要问题.

本文通过 K-L 分解方法研究了基于数据驱动的分布参数系统实时建模与减振控制^[14-16]. 通过搭建振动试验平台获取斜拉索振动数据, 进而建立了斜拉索-磁流变阻尼器的系统模型, 最后利用磁流变阻尼器对斜拉索进行预测控制.

收稿日期: 2019-12-04.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金 (51675286); 国家自然科学基金青年科学基金 (51505237); 宁波大学王宽诚幸福基金.

第一作者: 王振 (1992-), 男, 安徽阜阳人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 机械结构振动与机电控制. E-mail: 1787276043@qq.com

*通信作者: 张刚 (1976-), 男, 四川遂宁人, 博士/高级工程师, 主要研究方向: 船舶自动化与机电控制. E-mail: zhanggang@nbu.edu.cn

1 基于振动数据的减振系统建模

1.1 问题描述

以 Ivrien 参数的斜拉索和 MR 阻尼器组成的系统为研究对象, 其振动方程为^[17]:

$$\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} - \frac{\lambda^2}{\pi^2} \int_0^1 v(\xi,t) d\xi - \frac{1}{\pi^2} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = f(x,t) + F_D \delta(x - x_d), \quad (1)$$

式中: x 为拉索位置; t 为时间; $v(x,t)$ 表示拉索的振动位移; λ^2 为 Ivrien 参数; $f(x,t)$ 表示外部激励; F_D 为阻尼力; c 为拉索阻尼系数; x_d 为阻尼器安装位置点; $\delta(x)$ 为狄利克雷函数。

为了建立更符合实际工程的模型, 依据实验数据进行建模控制, 为此搭建了斜拉索-磁流变阻尼器实验平台(图 1), 通过等间距不同位置安装的加速度传感器方式, 进行检测及数据采集。

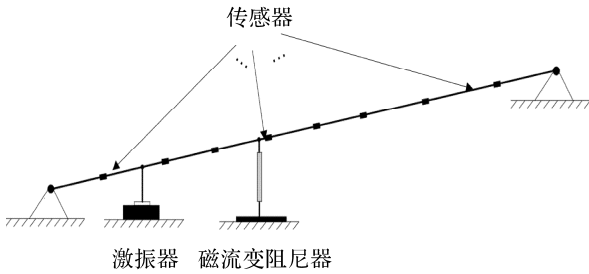


图1 斜拉索-磁流变阻尼器系统示意图

根据斜拉索-磁流变阻尼器试验平台获取的相关数据, 利用 K-L 分解方法对其进行处理^[18-19], 得到了表征系统空间结构的空间基函数 $\varphi(x)$ 。通过将 $\varphi(x)$ 与系统输出 $v(x,t)$ 作内积, 求出表征系统状态幅值的时间序列 $y(t)$; 然后通过采用改进的递推最小二乘算法对时间序列 $y(t)$ 以及外部激励 $f(x,t)$ 等相关数据进行系统辨识; 最终得到时域自回归滑动平均模型 (Auto-Regressive Moving Average Exogenous, ARMAX)。

为了能够实现重建动态分布参数系统模型 $\tilde{y}(x,t)$, 对辨识后的时域 ARMAX 模型 $\tilde{y}(t)$ 与空间基函数 $\varphi(x)$ 进行时空重构^[20]。基于拉索振动实验数据的时空分解建模和控制整体结构如图 2 所示。

1.2 斜拉索-磁流变阻尼器时空分解 ARMAX 建模

假定拉索系统的输出为 $y(x,t)$, 空间基函数为 $\{\varphi_i(x)\}_{i=1}^{\infty}$, 时间序列数据为 $\{y_i(t)\}_{i=1}^{\infty}$, 则输出

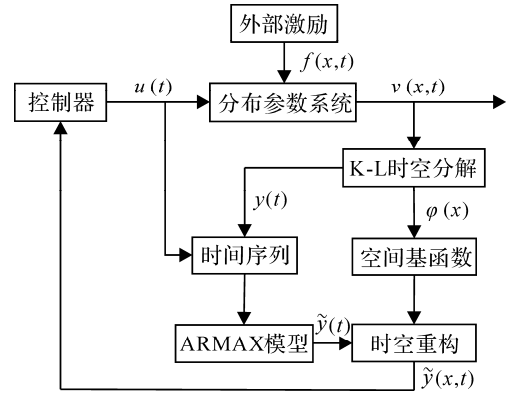


图2 时空分解建模和控制整体结构示意图

$y(x,t)$ 可展开为如下形式^[21]:

$$y(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(x) y_i(t), \quad (2)$$

式中: $t=1,2,\dots,L$ 表示输出在时间 L 个离散点进行采样; $x=1,2,\dots,N$ 表示空间 N 个位置点。

考虑到实际工程应用, 针对斜拉索不同阶次的振动模式问题, 一般将式(2)展开成有限项, 即:

$$y_n(x,t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) y_i(t), \quad (3)$$

式中: n 表示阶数; 空间基函数 $\varphi_i(x)$ 需满足单位正交特性, 即

$$(\varphi_i(x), \varphi_j(x)) = \int_{\Omega} \varphi_i(x) \varphi_j(x) dx = \begin{cases} 0, & i \neq j, \\ 1, & i = j. \end{cases} \quad (4)$$

为了求得系统的主导空间基函数, 考虑式(5)的目标优化问题:

$$\begin{cases} \min \langle \|y(x,t) - y_n(x,t)\|^2 \rangle, \\ \text{s.t. } (\varphi_i, \varphi_i) = 1, \varphi_i \in L^2(\Omega), \end{cases} \quad (5)$$

式中: $i=1,2,\dots,n$, $\langle f(x,t) \rangle = (1/L) \sum_{t=1}^L f(x,t)$ 表示平均值, $\|f(x)\| = (f(x), f(x))^{1/2}$ 表示范数。

针对式(5)优化问题, 可将其转化为积分方程求解:

$$\begin{cases} \int_{\Omega} P(x, \zeta) \varphi_i(\zeta) d\zeta = \lambda_i \varphi_i(x), \\ (\varphi_i, \varphi_i) = 1, i=1,2,\dots,n, \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\varphi_i(x)$ 是 i 阶特征方程; λ_i 为特征值; $P(x, \zeta) = \langle y(x,t), y(\zeta,t) \rangle$ 为空间上两点的相关函数。

假定 $\varphi_i(x)$ 可以用式(7)形式表示:

$$\varphi_i(x) = \sum_{t=1}^L \beta_{it} y(x,t), \quad (7)$$

将式(7)代入式(5), 可得式(8)方程:

$$\int_{\Omega} \frac{1}{L} \sum_{t=1}^L y(x, t) y(\zeta, t) \sum_{k=1}^L \beta_{ik} y(\zeta, k) d\zeta = \lambda_i \sum_{t=1}^L \beta_{it} y(x, t). \quad (8)$$

令 $M_{ik} = (1/L) \int_{\Omega} y(\zeta, t) y(\zeta, k) d\zeta$, 将式(8)转化为一个求解特征值和特征向量的问题:

$$M_{ik} \gamma_i = \lambda_i \beta_i, \quad (9)$$

式中: β_i 为第 i 个特征向量。

将式(9)求得特征向量代入式(7), 即可求得主导空间基函数。由于矩阵 M_{ik} 为对称半正定, 因此由式(9)求得特征值所构成的主导空间基函数 $\varphi_i(x)$ 是正交的, 对其进行标准化处理后, 即可获得主导空间基函数。

对于表征系统空间结构的基函数个数 n , 其数量越多, 所能反映的系统能量也越多, 同时也会使得低维模型的阶数增加。依据式(10), 当求得的前 n 个特征值占所有特征值之和的百分比大于 99.99% 时, 即可认为该组空间基函数已能反映出系统绝大部分的能量^[14]。

$$p = \sum_{i=1}^n \lambda_i / \sum_{i=1}^N \lambda_i, \quad (10)$$

式中: n 为确定的空间基函数个数; N 为所有空间基函数个数。

根据上述求解所确定的空间基函数, 可以解出相应的时间序列函数为:

$$y_i(t) = (\varphi_i(x), y(x, t)), \quad (11)$$

式中: $(f(x), g(x)) = \int f(x)g(x)dx$ 为内积的定义。

由于时域 ARMAX 模型^[22]能够根据过去和将来时刻的输入预测将来时刻的输出, 因此结合式(11), 其时域 ARMAX 模型可表示为:

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) + C(z^{-1})f(k), \quad (12)$$

式中: $u(k)$ 为阻尼力, $f(t)$ 为外部激励输入; $y(k)$ 为输出; 多项式 $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ 和 $C(z^{-1})$ 为:

$$\begin{cases} A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \cdots + a_{n_a} z^{-n_a}, \\ B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \cdots + b_{n_b} z^{-n_b}, \\ C(z^{-1}) = c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \cdots + c_{n_c} z^{-n_c}. \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)模型, 可简化成最小二乘格式:

$$y(k) = \mathbf{h}^T(k) \boldsymbol{\theta}, \quad (14)$$

式中: $\mathbf{h}^T(k)$ 为观测的数据向量, 可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{h}(k) = \begin{bmatrix} -y(k-1), \cdots, -y(k-n_a), u(k-1), \cdots \\ u(k-n_b), f(k-1), \cdots, f(k-n_c) \end{bmatrix}^T, \\ \boldsymbol{\theta} = [a_1, \cdots, a_{n_a}, b_1, \cdots, b_{n_b}, c_1, \cdots, c_{n_c}]^T. \end{cases}$$

利用式(15)改进的递推最小二乘算法对式(14) ARMAX 模型参数进行辨识, 即可以得到时域 ARMAX 模型:

$$\begin{cases} \tilde{\boldsymbol{\theta}}(k) = \tilde{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + K(k) [y(k) - \mathbf{h}^T(k) \tilde{\boldsymbol{\theta}}(k-1)], \\ P(k) = P(k-1) [I - K(k) \mathbf{h}^T(k)] (1/\mu), \\ K(k) = P(k-1) \mathbf{h}(k) [\mathbf{h}^T(k) P(k-1) \mathbf{h}(k) + \mu]^{-1}. \end{cases} \quad (15)$$

得到时域 ARMAX 模型后, 只需将模型与表征系统空间结构的基函数进行时空重构, 即可得到分布参数系统时空 ARMAX 模型的输出, 从而构成完整的时空 ARMAX 模型为:

$$\begin{cases} y(t) = \sum_{i=1}^{n_a} a_i y(t-i) + \sum_{j=1}^{n_b} b_j u(t-j) + \\ \quad \sum_{k=1}^{n_c} c_k f(t-k), \\ y(x, t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) y_i(t), \end{cases} \quad (16)$$

式中: n 为空间基函数个数; n_a 、 n_b 和 n_c 分别为待辨识参数个数。

2 斜拉索-磁流变系统 ARMAX 模型的预测控制

为了对斜拉索-磁流变阻尼器系统进行减振控制, 使系统能在闭环下取得良好的控制效果, 需要设计出与之相符的预测控制器^[23]。由于预测模型采用的是与空间信息无关的时域 ARMAX 模型, 因此可用广义预测控制算法进行设计。

利用丢番图 Dioaphantine 方程^[24], 并结合式(16)中的时域 ARMAX 模型, 可得到 j 步后的输出 $y(t+j)$ 的预测值:

$$\begin{aligned} \tilde{y}(k+j|k) &= F_j(z^{-1})y(k) + \\ &\quad E_j(z^{-1})B(z^{-1})\Delta u(k+j-1|k), \end{aligned} \quad (17)$$

式中: z^{-1} 为后退一个采样周期的相应量(后移算子), 其中:

$$E_j(z^{-1}) = e_{j0} + e_{j1}z^{-1} + \cdots + e_{j,j-1}z^{-(j-1)}, e_{j0} = 1,$$

$$F_j(z^{-1}) = f_{j0} + f_{j1}z^{-1} + \cdots + e_{j,n}z^{-n}.$$

为增强预测模型输出预测值的鲁棒性,在目标函数中考虑了现在时刻的控制对未来时刻的影响,即可将其代入式(18)的优化性能指标中进行最优控制律计算:

$$J(k) = E \left\{ \sum_{j=N_1}^{N_2} [y(k+j|k) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(k+j-1|k)]^2 \right\}, \quad (18)$$

式中: N_1 与 N_2 为优化时域的起始和终止值; N_u 为控制时域; $\lambda(j)$ 为大于零的控制加权系数.

综上,对系统进行柔化控制,控制目的不是使输出直接跟踪设定值,而是跟踪参考轨迹式(19):

$$w(k+j) = \alpha^j y(k) + (1-\alpha^j) y_r, \quad (19)$$

式中: $w(k)$ 、 $y(k)$ 和 y_r 分别表示参考轨迹、输出和设定值; α 为柔化系数,范围在 0~1 之间.

在目标函数中加入后一项,主要目的是压制过于剧烈的控制增量,以防止系统或者控制器超出限制量程范围而发生剧烈振荡.

利用极值必要条件求得上述优化问题的解:

$$\Delta \tilde{u}(k|k) = (\lambda I + G^T G)^{-1} G^T (w(k) - f), \quad (20)$$

即最优控制量为:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta \tilde{u}(k|k). \quad (21)$$

3 实验验证

3.1 实验平台的搭建及数据采集

在研究斜拉索-磁流变阻尼器系统模型时,针对实际工程应用中斜拉索边界情况,考虑数据驱动的建模方法,进行固-固边界条件下的控制系统建模及求解问题.图3为搭建的斜拉索振动试验平台,采用不锈钢 304 拉索作为试验对象,拉索左右两端的边界固定基座采用地脚螺栓固定在地面上.拉索预紧力用拉压传感器测得,并用东华 DH3820 型采集仪进行数据采集.外部激励采用信号发生器和信号放大器产生信号作用于激振器,激振器执行周期性载荷,而磁流变阻尼器提供阻尼力,拉索试验振动数据由江苏联能电子 CA-YD-181 型加速度传感器测量,用东华 DH5922 型采集仪进行数据采集.

实验时拉索的预紧力通过拉压力传感器和东华 DH3820 型采集仪监测,通过激振器作用于斜拉索产生外部风雨激励效果.在这一过程中先通过

信号发生器输出正弦信号,再经信号放大器放大后输入至激振器,从而使得拉索受到周期性的作用.利用拉索上有限个加速度传感器(均匀分布),采集拉索不同位置点的振动数据,经分析处理可得斜拉索的多组振动数据 $[x, t, v(x, t)]$. 实验原理如图4所示.

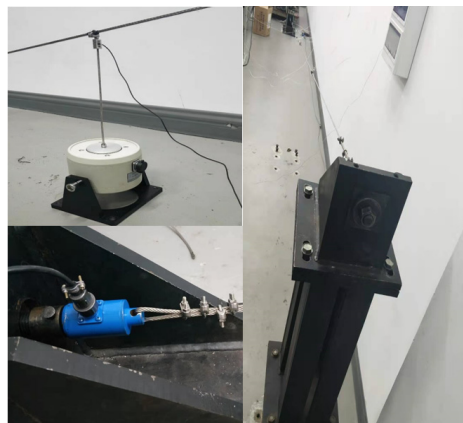


图3 斜拉索振动试验平台

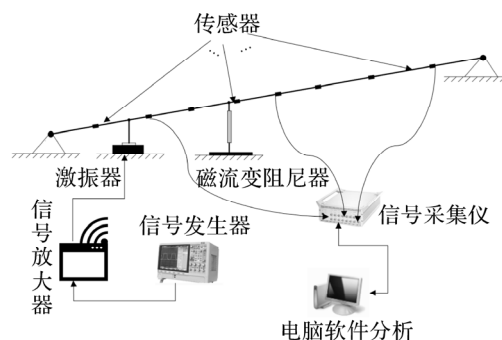


图4 实验原理示意图

用 Matlab 软件对获取的斜拉索加速度数据进行处理,结果见表1.振动位移响应如图5所示.

表1 拉索的振动位移数据

拉索位置节点	时间节点					
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	...
x_1	0	0	0	0	0	...
x_2	0	0.056	0.055	0.055	0.054	...
x_3	0	0.120	0.120	0.120	0.119	...
x_4	0	0.178	0.180	0.181	0.182	...
x_5	0	0.203	0.206	0.208	0.210	...
x_6	0	0.179	0.182	0.183	0.184	...
x_7	0	0.122	0.123	0.123	0.122	...
x_8	0	0.058	0.057	0.057	0.056	...
...	...	...	...	...	...	...

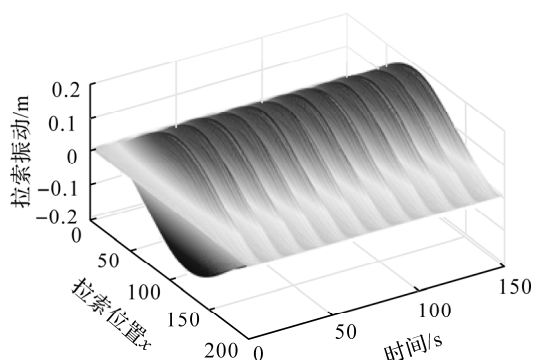


图5 拉索振动位移响应

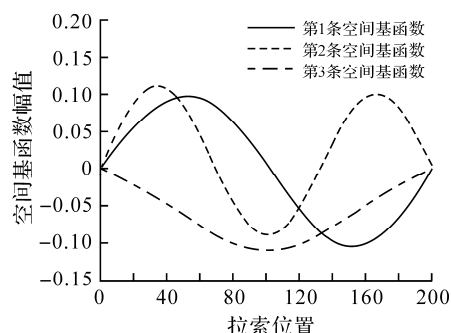
3.2 时空分解建模和动态空间重构

基于试验数据及时空分解理论,利用K-L分解方法可以得到表征系统空间结构的空间基函数。当 n 取不同值时,空间基函数的占比见表2。

表2 n 取不同值时空间基函数的占比

n	特征值占比/%	均方根误差
1	99.229	0.008 4
2	99.916	1.921×10^{-5}
3	99.997	3.569×10^{-15}

从表2可得:空间基函数条数 $n=1$ 或 $n=2$ 时,特征值占比未达到99.99%,时空分解下的均方根误差较大。当空间基函数条数 $n=3$ 时,特征值占比达到99.99%,时空分解下的均方根误差满足建模要求,且3条空间基函数已能够反映出拉索振动状态的绝大部分拉索振动空间结构,从而确定空间基函数 $\varphi(x)$ 为3条(图6)。

图6 K-L时空分解空间基函数($n=3$)

经时空K-L分解得到3条空间基函数 $\varphi(x)$,为了保证分布参数系统维数较低,取 $n=3$ 。根据式(11),空间基函数 $\varphi(x)$ 与拉索振动数据输出 $v(x,t)$ 作内积求出表征拉索状态幅值的时间序列数据 $y(t)$ 对应为3条,其数据曲线如图7所示。

从图7可知,第2条和第3条时间序列为特征

值占比值较大的2条空间基函数所对应的时间序列,且其位移幅值相对较大,控制占比较大的曲线可有效地降低拉索的幅值,达到减振效果,且这2条数据曲线规律明显,辨识得到的模型精度较高。

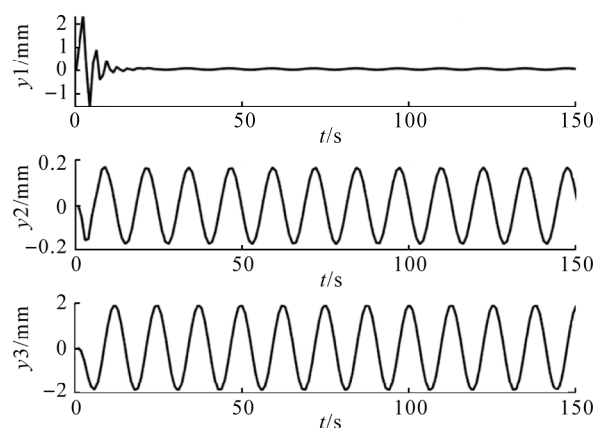


图7 3条时间序列数据曲线

将外部激励和阻尼力作为输入,时间序列作为拉索的位移振幅输出,采用时域ARMAX模型,利用递推最小二乘算法进行模型参数辨识,得到对应的参数结果曲线如图8和图9所示,其中 a_1 、 a_2 、 a_3 对应参数曲线变化。

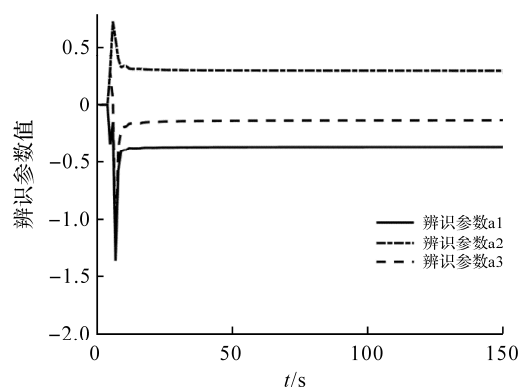


图8 第2条时间序列辨识参数曲线

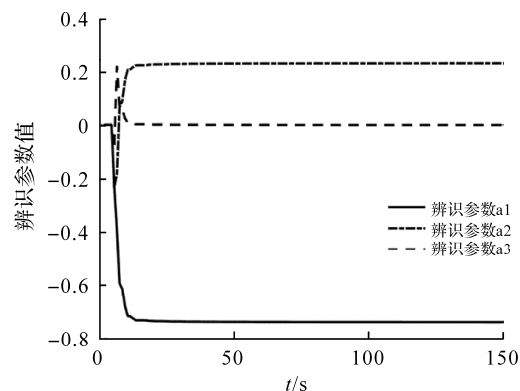


图9 第3条时间序列辨识参数曲线

根据时域 ARMAX 模型表达式和参数结果, 利用 Matlab 软件绘制模型输出曲线(图 10 和图 11), 比较建模前后的误差. 通过对比, 可得出 K-L 分解方法建模的精度较高.

依据试验数据, 并结合空间基函数与时域 ARMAX 模型进行空间重构后, 得到空间 ARMAX 模型输出如图 12 所示.

建模结果表明: 拉索整个时空分布上都表现出相对较小的建模误差, 且数据驱动的 K-L 时空分解的 ARMAX 建模方法可在误差较小的情况下对斜拉索-磁流变阻尼器分布参数系统进行建模.

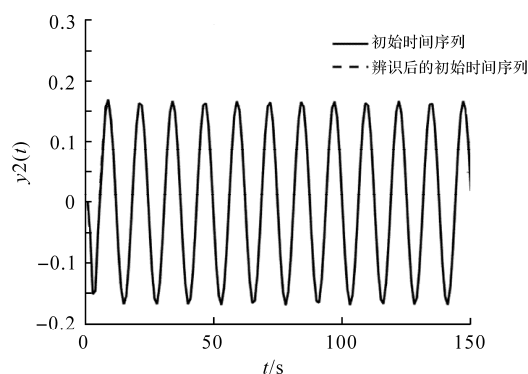


图 10 第 2 条时域 ARMAX 模型

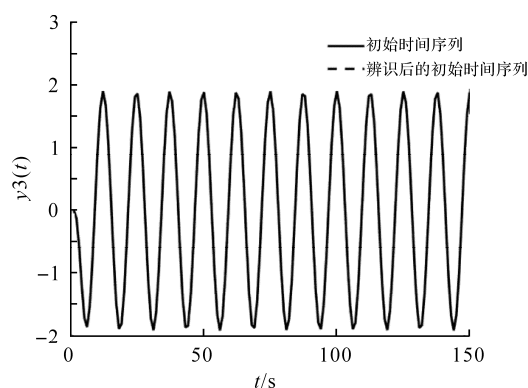


图 11 第 3 条时域 ARMAX 模型

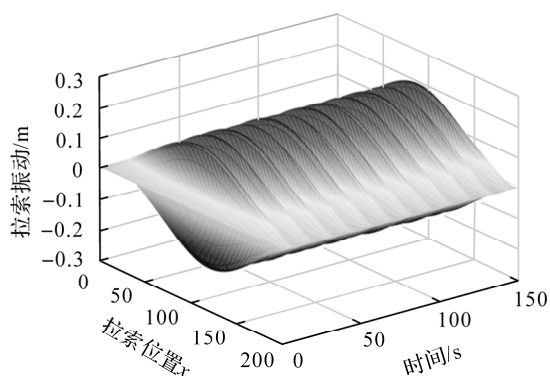


图 12 动态空间重构 ARMAX 模型输出

3.3 ARMAX 模型预测控制

在建立了时空分解的空间 ARMAX 模型后, 考虑斜拉索在外界环境复杂情况下会发生大幅振动, 因此需要设计控制器对斜拉索-磁流变阻尼器系统进行减振控制. 在预测控制中, 首先设置参数初始值, 选择预测时域和控制时域为 $N_2=6$ 和 $N_u=4$, 优化性能指标中控制量的权重系数和柔化系数, 分别设为 $\lambda=0.1$, $\alpha=0.5$. 通过仿真分析, 对占比值较大时域 ARMAX 模型 $y_2(t)$ 和 $y_3(t)$ 进行预测减振控制, 仿真结果如图 13 和图 14 所示.

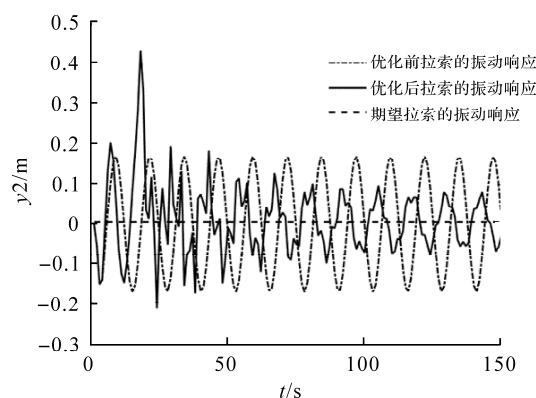


图 13 时域 ARMAX 模型 $y_2(t)$ 的闭环响应曲线

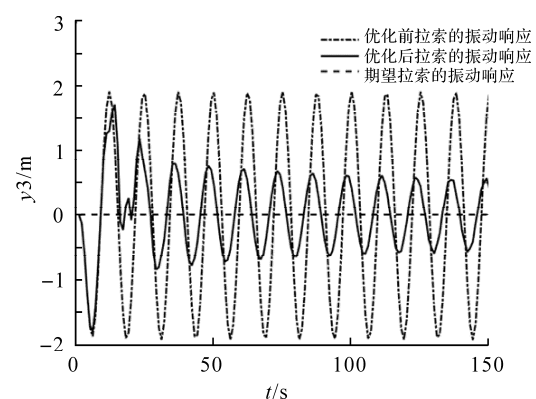


图 14 时域 ARMAX 模型 $y_3(t)$ 的闭环响应曲线

由图 13 中 3 条曲线可知, 时域下的 ARMAX 模型 $y_2(t)$, 优化前后的拉索振动位移幅值得到控制, 因位移幅值相对 $y_3(t)$ 较小, 减振控制的振幅下降不明显, 但整体控制效果较好. 由图 14 中幅值占比值较大的时域 ARMAX 模型 $y_3(t)$ 可知, 优化前后拉索的位移幅值得得到有效控制, 且位移幅值降低明显.

利用式(16)的动态空间重构, 可以得到如图 15 所示的优化后整个拉索在空间中的振动响应输出. 对比图 15 优化后的拉索振动响应输出与图 13 优化

前拉索的振动响应输出可知, 该控制方法可有效地控制整个拉索在时空中的振动响应输出的减振。

为了更清楚地观察拉索减振后的位移振动情况, 选择拉索中间位置为观测点, 拉索在 $L/2$ 处的振动位移如图 16 所示。对比优化前后拉索的振动位移可发现, 优化后拉索的振幅有明显的降低, 表明该控制算法对拉索减振控制有效。

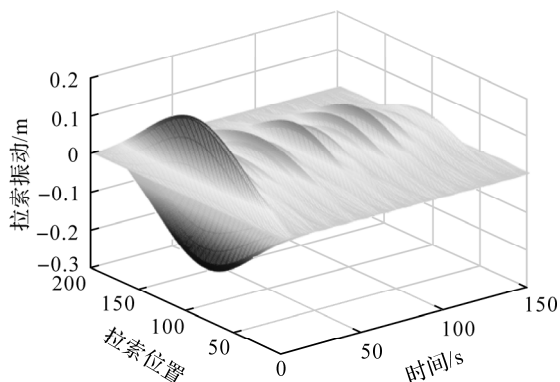


图 15 时空 ARMAX 模型优化后的输出

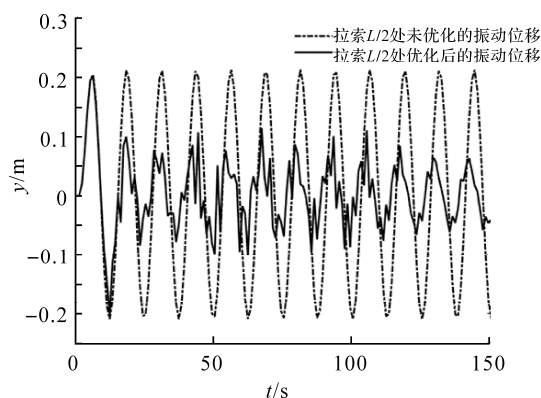


图 16 $L/2$ 观测处拉索优化前后的振动位移

4 结论

(1) 基于拉索振动试验数据, 利用 K-L 分解和改进的递推最小二乘算法得到表征系统空间结构的基函数和表征系统幅值变化的时域 ARMAX 模型, 进而建立了数据驱动下的空间 ARMAX 模型, 经过试验仿真, 验证了该方法的有效性, 可以为实际工程中斜拉索模型的建立提供解决方法。

(2) 结合斜拉索所处的复杂环境, 采用与空间信息无关的时域 ARMAX 模型对拉索进行预测减振控制。同时, 采用广义预测控制算法对斜拉索进行减振控制研究发现, 预测控制算法可以对斜拉

索进行有效的减振控制, 能满足实际工程的需要。

参考文献:

- [1] 孙群涛. 斜拉索轴向激励作用下的面内参数振动[J]. 交通科学与工程, 2014, 30(3):45-51.
- [2] Matsumoto M, Shirato H, Yagi T, et al. Field observation of the full-scale wind-induced cable vibration[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1/2):13-26.
- [3] 徐彦青, 郭彤. 半主动控制下超长斜拉索的面外风振响应[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(1):146-151.
- [4] 刘宝龙. 斜拉桥拉索的振动控制研究及仿真分析[D]. 南昌: 华东交通大学, 2016.
- [5] 禹见达, 陈政清, 王修勇, 等. 改进的 Bang-Bang 控制算法的理论与试验研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(2): 60-63; 88; 221.
- [6] 李惠, 刘敏, 欧进萍, 等. 斜拉索磁流变智能阻尼控制系统分析与设计[J]. 中国公路学报, 2005, 18(4):37-41.
- [7] 陈昭晖, 陈宝春. 斜拉索-磁流变阻尼器系统的频域自适应控制[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 459-465.
- [8] Cheng H, Zhu W Q, Ying Z G. Stochastic optimal semi-active control of hysteretic systems by using a magneto-rheological damper[J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(3):711-718.
- [9] Ying Z G, Ni Y Q, Ko J M. A bounded stochastic optimal semi-active control[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 304(3/4/5):948-956.
- [10] Zhao M, Zhu W Q. Stochastic optimal semi-active control of stay cables by using magneto-rheological damper[J]. Journal of Vibration and Control, 2011, 17(13): 1921-1929.
- [11] 陈勇, 孙炳楠, 楼文娟, 等. 斜拉索振动的 ER-MR 阻尼器半主动神经网络控制[J]. 振动工程学报, 2003, 16(2):224-228.
- [12] Xu Z D, Shen Y P, Guo Y Q. Semi-active control of structures incorporated with magnetorheological dampers using neural networks[J]. Smart Materials and Structures, 2003, 12(1):80-87.
- [13] Xiao Z R. Semi-active control on stay cable vibration based on fuzzy logical theory[J]. Advanced Materials Research, 2010, 167:2815-2818.
- [14] 王梦灵. 基于 I/O 数据的空间分布系统建模与预测控制器设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [15] 艾岭. 分布参数系统模型预测控制研究及应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

- [16] 刘朋飞. 管式催化反应分布参数过程建模与控制仿真研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2015.
- [17] 邬喆华. 磁流变阻尼器对斜拉索振动控制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [18] 陈林. 基于 Haar 小波变换的大型立式淬火炉分布参数系统建模[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [19] 周璇. 大型立式淬火炉温度分布参数系统控制策略研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- [20] Qi C K, Li H X. A time/space separation-based Hammerstein modeling approach for nonlinear distributed parameter processes[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2009, 33(7):1247-1260.
- [21] Qi C K, Zhang H T, Li H X. A multi-channel spatio-temporal Hammerstein modeling approach for nonlinear distributed parameter processes[J]. *Journal of Process Control*, 2009, 19(1):85-99.
- [22] 李泽龙. 基于 ARMAX-LSTM 模型的高炉铁水质量预报研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [23] 符莎, 李平. 基于时变 ARX 模型的自适应预测函数控制[J]. *控制工程*, 2017, 24(4):756-760.
- [24] 华晨, 李柠, 李少远. 分布参数系统的时空 ARX 建模及预测控制[J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(12):1711-1716.

Modeling and vibration reduction control of stay cable-magnetorheological system based on K-L decomposition

WANG Zhen, ZHANG Gang^{*}, CHEN Yuehua, FENG Zhimin, HU Yangyang
(Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315832, China)

Abstract: A data-driven distributed parameter system modeling method is proposed to analyze the stay cable-magnetorheological damper system. The space basis function that characterizes the space structure of the system is obtained by using the KL spatio-temporal decomposition method, and the inner product of such function and the system output is calculated to obtain the time series representing the system state amplitude. Based on the time series and other data information like the external load, the time-domain ARMAX model is identified by recursive least squares algorithm. The spatial ARMAX model is established by the spatial reconstruction of the spatial basis function and the time-domain ARMAX model. Finally, the time-domain ARMAX model is studied for predictive control. The analysis of experimental results shows that the established distributed parameter system model exhibits less calculation and higher accuracy, which can meet the engineering requirement. The proposed predictive control method can effectively control the cable-MR damper distributed parameter system model for vibration reduction.

Key words: K-L decomposition; recursive least squares identification; distributed parameter system; ARMAX model; generalized predictive control

(责任编辑 史小丽)