

基于频域参数识别的混凝土泵车臂架减振实验*

黄毅, 刘建武, 胡勇, 范佳源

(长沙理工大学汽车与机械工程学院 长沙, 410114)

摘要 针对混凝土泵车臂架末端的振动问题,考虑实际施工过程中多关节臂架姿态多变导致臂架系统动态特性随之变化的特点,采用基于频域参数识别的主动控制策略进行泵车臂架振动控制的实验研究。以臂架末端振动作为反馈变量,优选提供主动控制力的作动油缸,建立混凝土泵车臂架系统主动控制的全局模型。采用双归一化方法进行臂架系统参数的频域在线识别,推导了最优控制变量表达式,并给出了显式收敛条件。基于美国国家仪器公司软硬件搭建了混凝土泵车臂架振动主动控制实验装置,对该算法的效果进行了实验验证。实验结果表明,采用该主动控制算法,臂架末端的振动加速度幅值衰减了约 59%,取得了较明显的减振实验效果,验证了该算法的可行性与实用性。

关键词 减振控制; 频域; 参数辨识; 双归一化方法; 臂架; 混凝土泵车

中图分类号 TH113.1

引言

随着混凝土泵车臂架的超长化与轻量化,臂架结构的柔性越来越大。在沿臂架布置的管道中混凝土的流动冲击激励作用下,臂架容易产生较大的振动,严重影响臂架的定位精度、结构寿命与施工安全^[1]。针对类似的简单臂架的振动控制,国内外学者进行了广泛的研究,主要采用主动控制方法^[2],如模态控制法^[3]、极点配置法^[4]和最优控制法^[5]等,在仿真与实验方面皆取得一定的振动控制效果。然而,上述算法都是基于臂架结构的精确模型来进行振动控制的,对建模精度有特定的要求,鲁棒性较差,限制了其在实际工程中的应用。考虑到臂架的姿态变化会导致动力系统动态特性的变化,故需考虑在线辨识系统动态特性参数的基础上进行振动控制。系统参数辨识的实现可分为时域辨识方法^[6]和频域辨识方法^[7]两种。时域辨识方法以滤波器的形式建立受控振动系统和控制器的数学模型,然后采用在线辨识技术确定受控系统模型参数,通过数字信号处理获取最优控制器的各项参数。利用时域辨识方法进行振动控制,可获得更快的更新速度,但存在待辨识参数较多的问题,且易受到信号波动的影响,因此需要增加用于参考的信号和与外部扰动信

号不相关的随机辨识信号。研究人员已将时域辨识方法应用于柔性结构的振动控制并取得了一定效果^[8]。频域辨识方法先将采集的振动信号进行傅里叶变换,对控制通道和外扰力响应进行频域参数辨识,优化控制律设计,进一步利用傅里叶逆变换把控制输出变量转换到时域。频域辨识方法待辨识的参数较少,不易受到信号波动的影响,不需要增加用于参考的信号和与外部扰动信号不相关的随机辨识信号,但缺点是更新速度相对缓慢。已有研究将频域辨识方法用于直升机系统的参数辨识,实现对直升机结构响应的有效控制^[9-10]。在众多的参数识别方法中,最小均方法由于计算有效,应用非常广泛。根据不同的应用特点,出现了许多改进方法。考虑到传统最小均方法受外界扰动易发散的缺点,采用双归一化最小均方法进行系统参数的在线识别具有更好的效果^[11]。

混凝土泵车臂架系统模态频域变化范围窄,且由于实际施工过程中臂架姿态变化缓慢,因此臂架系统的传递函数变化缓慢。在硬件计算能力有限的情况下,这为系统参数在线识别创造了条件。笔者以某工程机械公司 52 m 混凝土泵车臂架为研究对象,采用基于频域的双归一化最小均方法进行泵车臂架振动主动控制的实验研究。

* 国家自然科学基金资助项目(51875048);湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2418);中国博士后科学基金资助项目(2017M612548)

收稿日期:2020-02-15;修回日期:2020-09-08

1 臂架减振算法分析

本研究中的52 m混凝土泵车臂架主要结构如图1所示,分别包括转台、末端软管、第1臂节至第5臂节、第1臂节油缸至第5臂节油缸和附着在第1臂节至第5臂节上的混凝土输送管道。

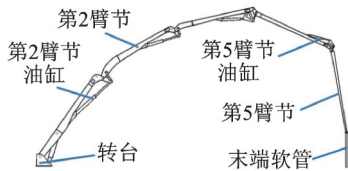


图1 臂架结构示意图

Fig.1 Structure diagram of boom system

混凝土泵车工作时,通过安装在底盘上的双供料油缸的往复交替运动将混凝土连续推送进混凝土输送管道,混凝土沿着附着在臂架上的输送管道流动到臂架末端,并通过软管引导混凝土浇筑。由于双供料油缸的往复推送,使得混凝土在输送管中周期性流动,是导致臂架产生较大振动的主要振源^[12],其控制框图如图2所示。臂架的外部扰动,即双供料油缸往复推送混凝土过程中传递到臂架上的力和力矩,引起臂架末端的振动响应为 z_0 ,作动器作用引起臂架振动响应为 y ,振动传感器测量得到的臂架末端振动响应为 z 。控制系统由测量得到的数据对控制通道频响矩阵和外扰响应幅值进行辨识,计算最优控制电压值,输出至液压阀以控制臂架作动油缸的往复运动。

控制量与臂架末端响应之间的关系可以在频域内表示为式(1)所示的臂架系统全局模型

$$z_n = z_{0n} + Tu_n \quad (1)$$

$$U_{n, 2i \times 2i(j+1)} = \begin{bmatrix} u_{n1c} & u_{n1s} & u_{n2c} & u_{n2s} & \cdots & u_{njc} & u_{njs} & 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ u_{n1s} & -u_{n1c} & u_{n2s} & -u_{n2c} & \cdots & u_{njs} & -u_{njc} & 0 & \cdots & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \vdots & 0 & u_{n1c} & u_{n1s} & u_{n2c} & u_{n2s} & \cdots & u_{njc} & u_{njs} & 0 & \cdots & \vdots & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & u_{n1s} & -u_{n1c} & u_{n2s} & -u_{n2c} & \cdots & -u_{njs} & -u_{njc} & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_{n, 2i(j+1) \times 1} = [T_{11c}, T_{11s}, \cdots, T_{1ic}, T_{1is}, \cdots, T_{jic}, T_{jis}, \cdots, z_{01c}, z_{01s}, \cdots, z_{0ic}, z_{0is}]^T \quad (5)$$

其中: Z, U 的余弦和正弦分量分别用下标 c 和 s 加以标识;频响函数 T 的实部和虚部分别用下标 c 和 s 加以标识。

采用双归一化最小均方法对无控时臂架末端的复响应幅值、控制通道频响矩阵进行辨识,相当于解决如下约束优化问题:考虑约束条件 $Z_n = U_n \hat{T}_n$,确

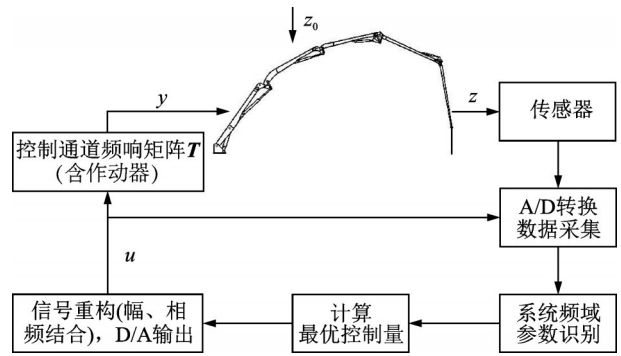


图2 臂架结构减振算法框图

Fig.2 Diagram of vibration reduction algorithm

其中: z_{0n} 为无控时臂架末端的复响应幅值; z_n 为受控时臂架末端的复响应幅值; u_n 为给作动器输入电压的复控制幅值; T 为控制通道频响矩阵。

控制量与响应量的时域形式信号是逐段地转换成频域形式,如双供料油缸每交替1次更新控制量1次,则取往复推送过程内的信号为1段,用下标 n 来标注第 n 段信号。

在臂架泵送作业过程中,其无控时臂架末端的复响应幅值 z_{0n} 与控制通道频响矩阵 T 在不同的时间段 n 内是变化的,因此需要在线辨识 z_{0n} 与 T 的值。

为了应用双归一化最小均方法对无控时臂架末端的复响应幅值和控制通道频响矩阵进行辨识,全局模型式(1)转化为

$$Z_n = U_n T_n \quad (2)$$

对于有 i 个被控减振点、 j 个控制输入点的系统,有

$$Z_{n, 2i \times 1} = [z_{n1c}, z_{n1s}, z_{n2c}, z_{n2s}, \cdots, z_{nic}, z_{nis}]^T \quad (3)$$

定新的控制通道频响矩阵辨识量 \hat{T}_{n+1} ,满足增量 $\Delta \hat{T}_{n+1} \triangleq \hat{T}_{n+1} - \hat{T}_n$ 的欧式范数取极小值。采用如下目标函数

$$J_n = (\hat{T}_{n+1} - \hat{T}_n)^T (\hat{T}_{n+1} - \hat{T}_n) + \lambda (Z_n^T Z_n - Z_n^T U_n \hat{T}_{n+1}) \quad (6)$$

其中: λ 为拉格朗日因子。

令 $\partial J_n / \partial \hat{T}_{n+1} = 0$, 可得到使 J_n 取极小值的最优解

$$\hat{T}_{n+1} = \hat{T}_n + \mu''(U_n^T U_n + \delta I)^{-1} U_n^T (Z_n - U_n \hat{T}_n) \quad (7)$$

其中: 因子 $\mu'' > 0$, 其作用为控制辨识量的增量变化但不改变向量的方向; 因子 $\delta > 0$ 。

可知满足式(7)收敛条件的 μ'' 的取值范围为

$$0 < \mu'' < \frac{2}{1 + \delta / \max(\lambda')} \quad (8)$$

其中: $U_n^T U_n$ 的特征值为 λ' 。

同理, 考虑约束条件 $U_n = -(T_n^T W_z T_n + W_u + W_{\Delta u})^{-1} T_n^T W_z Z_{0n} + (T_n^T W_z T_n + W_u + W_{\Delta u})^{-1} W_{\Delta u} U_{n-1}$, 满足 $\Delta U_{n+1} \triangleq U_{n+1} - U_n$ 的欧式范数取极小值, 可以计算出控制电流 U_{n+1} 。其中: 对角权矩阵 W_z 限制响应幅值; 对角权矩阵 W_u 限制控制幅值; 对角权矩阵 $W_{\Delta u}$ 限制控制变化率。

$$U_{n+1} = \left[(1 - \bar{\mu}'') I + \bar{\mu}'' (T^T W_z T + W_u + W_{\Delta u})^{-1} W_{\Delta u} \right] U_n - \bar{\mu}'' (T^T W_z T + W_u + W_{\Delta u})^{-1} T^T W_z Z_{0n} \quad (9)$$

其中: 因子 $\bar{\mu}''$ 的作用与 μ'' 相同。

可知满足式(9)收敛条件的 $\bar{\mu}''$ 的取值范围为

$$0 < \bar{\mu}'' < \frac{2}{1 - \min(\bar{\lambda}'')} \quad (10)$$

其中: $\bar{\lambda}''$ 为矩阵 $(T^T W_z T + W_u + W_{\Delta u})^{-1} W_{\Delta u}$ 的特征值。

通过上述理论分析, 得出了进行臂架末端振动控制的作动油缸的最优控制变量表达式, 并给出了显式收敛条件。下面将基于 NI LabVIEW 软件平台和 CompactRIO 硬件平台进行上述算法的实验验证。

2 臂架减振实验分析

工作状态下的泵车臂架各臂节之间的夹角可根据目标施工位置任意调整, 理论上泵车姿态有无穷多种。但从实际工程应用中发现, 臂架伸展程度越大, 臂架末端振动越严重, 因此笔者以泵车臂架伸展程度较大的接近水平姿态进行研究。

综合考虑实际典型臂架施工姿态及柔性杆件作动器位置的抑振效果, 笔者采用第 2, 3 臂之间用以对臂架姿态进行变幅调整的臂架油缸作为振动作动器, 并取机械臂末端振动加速度作为反馈监测变量。采用前述基于频域参数识别的混凝土泵车臂架减振方法不依赖臂架系统的精确数学模型, 通过系统参数频域在线识别, 因此该方法可以推广至其他

任意姿态。

基于频域参数识别的混凝土泵车臂架减振实验系统采用美国国家仪器公司软硬件进行搭建, 采用 LabVIEW 语言实现控制算法。硬件主要包括传感器、控制器和作动器。传感器包括 1 个 Dytran 7701 加速度传感器和 5 个 Hesmor 倾角传感器。其中: Dytran 7701 加速度传感器灵敏度为 980 mV/g, 安装于第 5 节臂架末端, 实时反馈臂架末端的垂向振动信号; Hesmor 倾角传感器安装于每节臂架的侧面, 实时反馈臂架姿态。控制器采用内置 500 MHz 主频微处理器的美国 NI CompactRIO 9014 嵌入式控制器, 用于反馈信号的采集与处理、控制信号的计算与输出, 并搭配 XNET, 9233, 9253 和 9401 模块, 安装于泵车侧面的主电控柜中。其中: XNET 高速控制器局域网 (controller area network, 简称 CAN) 模块用于采集泵送开闭、减振开闭等设备状态信号; 9233 加速度模块用于采集振动加速度信号; 9253 电流模块用于采集倾角传感器信号 (用以确定臂架姿态); 9401 数字输出模块用于输出脉冲宽度调制 (pulse width modulation, 简称 PWM) 形式的振动控制信号至电磁阀, 以实现臂架油缸 (作动器) 的控制。振动主动控制作动器的作动由第 2, 3 臂架之间的臂架油缸完成, 即通过控制电压驱动电磁阀的开闭与换向, 控制臂架油缸的往复伸缩运动, 从而实现对臂架施加拉压作用力。搭建好的臂架减振实验装置示意图如图 3 所示。

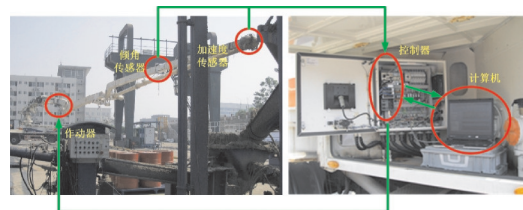


图3 臂架减振实验装置示意图

Fig.3 Experimental device of vibration depression of boom

实验时, 由混凝土泵送实验台提供循环的混凝土料, 通过连续泵送混凝土, 模拟实际工况时混凝土对臂架的激励, 以产生臂架振动。实验过程中泵车排量为 100%, 发动机转速为 1 850 r/min, 泵送频率为 0.34 Hz。当前水平姿态下, 臂架的前 2 阶弯曲模态频率分别为 0.34 和 1.43 Hz。先离线测得 0.34 Hz 频率下臂架系统的频响矩阵和无控响应, 以此作为辨识的初始值, 以加快控制开始阶段的收敛速度及防止过大的突然冲击。实验过程要经历时频、频时转换。采样得到的加速度响应为离散时域信号, 而

控制算法用频域值计算,给出的结果也是频域值,但输出到作动器的控制信号则要求是时域值。因此,对采样值进行离散傅里叶分析的开始时刻、控制量输出的开始时刻在相位上都要协调一致。泵送液压缸的交替信号为控制提供了现成的触发信号。

取参数 $W_z = \text{diag}(55.0, 45.0)$, $W_u = \text{diag}(0.15, 0.05)$, T_c, T_s, z_{0c} 和 z_{0s} 的辨识初始值均采用实验值, $\mu'' = \text{diag}(0.15, 0.16, 0.15, 0.16)$, 确定控制量的 μ'' , 控制与辨识结果如图 4~10 所示。图中共显示 90 个迭代周期, 控制从第 10 个迭代周期处开启。可知, 经过 15 个迭代周期后, 控制目标函数达到稳定状态; 经过 20 个迭代周期后, 控制电压幅值都达到稳定状态, 控制波动在较小范围内。通过采用该减振控制, 臂架末端振动加速度幅值从 1.77 m/s^2 减小到 0.74 m/s^2 以内, 衰减幅度达到 59%。从辨识效果上看, 经过 20 个迭代周期后, 辨识结果基本达到稳定状态, 但与“真实值”有一定差距, 其中在辨识参数 T_c 和 T_s 过程中波动较大, 而在辨识参数 z_{0c} 和 z_{0s} 过程中波动很小。由图 7~10 可见, 尽管识别的值与理论值有一定偏差, 但是基本均收敛, 且整体控制效果较好。从本质上讲, 识别出来的值是目标函数的最优解之一。

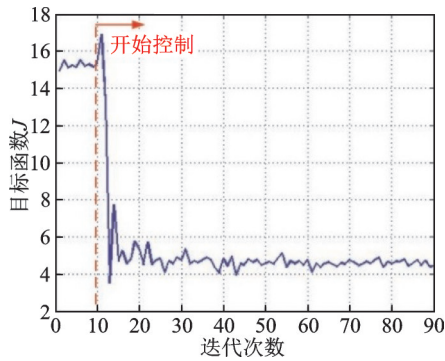


图 4 目标函数曲线

Fig.4 Curve of objective function

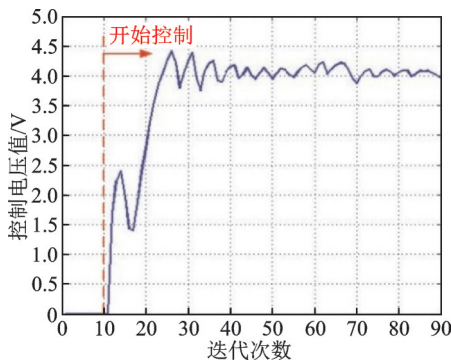


图 5 控制电压曲线

Fig.5 Curve of control voltage

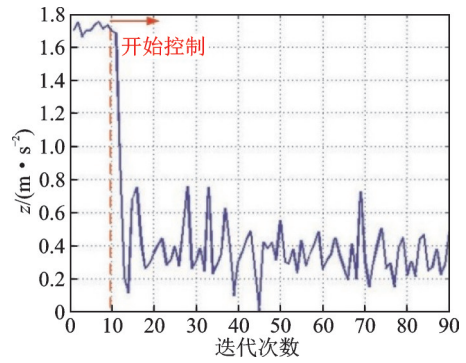


图 6 末端加速度幅值

Fig.6 Amplitude of acceleration of the tip

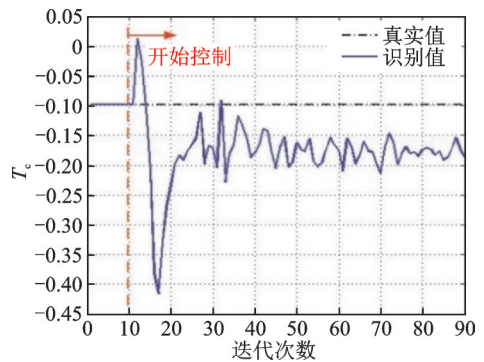


图 7 T_c 的真实值与识别值

Fig.7 The target and identified value of T_c

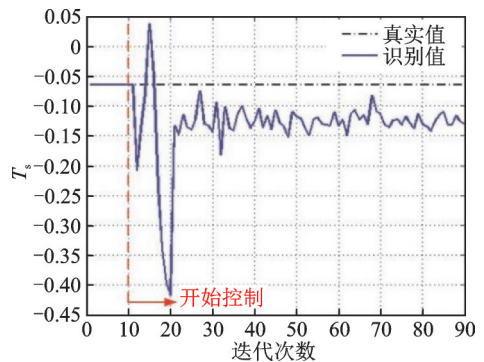


图 8 T_s 的真实值与识别值

Fig.8 The target and identified value of T_s

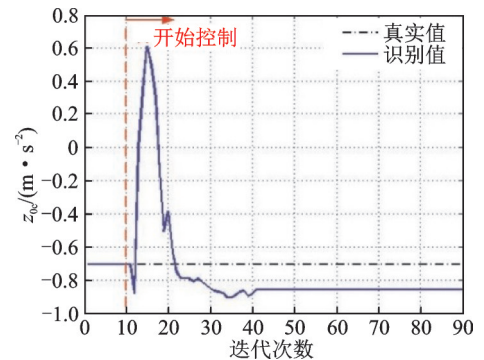
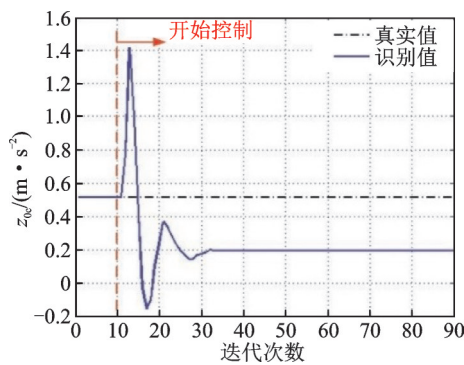


图 9 z_{0c} 的真实值与识别值

Fig.9 The target and identified value of z_{0c}

图10 z_{0s} 的真实值与识别值Fig.10 The target and identified value of z_{0s}

3 结束语

针对混凝土泵车臂架末端在某些工况下振动过大的问题,结合实际工况中臂架系统模态频域参数变化缓慢的特点,采用了一种双归一化最小均方法的控制方法来抑制混凝土泵车臂架末端的持续强迫振动。对算法的收敛性进行了理论推导,得出显式收敛条件。通过双归一化最小均方法对无控时混凝土泵车臂架末端的外扰复响应幅值及控制通道频响矩阵进行辨识,并计算最优控制量。搭建了混凝土泵车臂架振动主动控制实验系统,开展了混凝土流动冲击作用下的混凝土泵车臂架强迫振动实验研究,取得实际工况下柔性臂架振动加速度幅值衰减59%的振动控制效果,通过实验验证了上述控制算法的有效性。由于该主动控制算法不依赖精确的臂架模型,因而在实现混凝土泵车臂架结构响应的主动控制方面具有很好的实用性与参考价值。

参 考 文 献

- [1] CAZZULANI G, GHIELMETTI C, GIBERTI H, et al. Overview on the truck mounted concrete boom pump: a dynamic numerical model for active control logic definition[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1): 4232-4237.
- [2] ADDISON A, ANDREA V, DAVIDE C. Active vibration damping in hydraulic construction machinery [J]. Procedia Engineering, 2017, 176: 514-528.
- [3] 李建涛, 邓华, 姜圣, 等. 基于模态参数辨识的泵车臂架系统振动控制研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(7): 99-104.
LI Jiantao, DENG Hua, JIANG Sheng, et al. Vibration control of a pump truck boom system based on modal parametric identification[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(7): 99-104. (in Chinese)
- [4] 黄毅, 吴斌兴, 王佳茜. 混凝土泵车臂架振动响应的主动控制实验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2):

91-94.

- HUANG Yi, WU Binxing, WANG Jiaqian. Test for active control of boom vibration of a concrete[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 91-94. (in Chinese)
- [5] QIU Z C, LI C, ZHANG X M. Experimental study on active vibration control for a kind of two-link flexible manipulator [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 118(1): 623-644.
- [6] ALEXEY A B, ROMEO O, ALEXEY A B. Parameter identification of linear discrete-time systems with guaranteed transient performance [J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 51(15): 1038-1043.
- [7] TANG W, SHI Z K, LI H C. Frequency-domain GTLS identification combined with time-frequency filtering for flight flutter modal parameter identification [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19(1): 44-51.
- [8] JIANG E, QIAN C, LIU H. Design of the H1 robust control for the piezoelectric actuator based on chaos optimization algorithm [J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 47(3): 238-246.
- [9] 赵灿峰, 顾仲权. 直升机结构响应频域自适应控制的试验研究[J]. 振动工程学报, 2010, 23(1): 12-18.
ZHAO Canfeng, GU Zhongquan. Experimental research of frequency active control of structural response for helicopter [J]. Journal of Vibration Engineering, 2010, 23(1): 12-18. (in Chinese)
- [10] 赵灿峰. 直升机结构响应主动控制频域法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [11] MUHAMMAD S A. Comments on "two-stage fractional least mean square identification algorithm for parameter estimation of CARMA systems" [J]. Signal Processing, 2015, 117: 279-280.
- [12] 黄毅, 鄂加强, 郭岗, 等. 变姿态柔性机械臂横向振动主动控制理论与实验[J]. 天津大学学报, 2016, 49(7): 716-720.
HUANG Yi, E Jiaqiang, GUO Gang, et al. Theoretical and experimental study on active control of transverse vibration of flexible manipulator in time-varying postures [J]. Journal of Tianjin University, 2016, 49(7): 716-720. (in Chinese)



第一作者简介: 黄毅, 男, 1978年3月生, 博士、教授。主要研究方向为工程机械动力学及控制。曾发表《超长柔性臂架回转振动主动控制研究》(《振动与冲击》2017年第35卷第6期)等论文。
E-mail: tjhuangyi110usa@gmail.com