

12-12-2019

Design of Nonsmooth and Inversed Control Algorithm for Nonlinear Structural Vibration Control

Jianhui Wang

1. School of Mechanical and Electric Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;;

Wang Qing

1. School of Mechanical and Electric Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;;

Kemao Ma

2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;;

Xiaofang Huang

3. Engineering Earthquake Resistance Research Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Design of Nonsmooth and Inversed Control Algorithm for Nonlinear Structural Vibration Control

Abstract

Abstract: Considering the vibration effects of seismic waves on building with nonlinear structures, a nonsmooth and inversed control algorithm is used to suppress the vibration. It overcomes the faults of ignoring nonlinear influence in traditional approximate linearization control method and suppresses the influence of seismic waves effectively. According to Lyapunov stable theory and finite-time stability theory, *the proposed control method to realize the stability of the nonlinear structural vibration is demonstrated. In the realization of the control method, the extended state observer is used to estimate the unknown disturbances.* The numerical simulation is conducted for an eight-story building influenced by the seismic waves, and the comparative analysis of simulated effect is carried out. The results show that the nonsmooth and inversed control algorithm has a good seismic performance.

Keywords

nonlinear building structure, nonsmooth control, inverse system, finite-time stability, ESO

Recommended Citation

Wang Jianhui, Wang Qing, Ma Kemao, Huang Xiaofang. Design of Nonsmooth and Inversed Control Algorithm for Nonlinear Structural Vibration Control[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(6): 1172-1178.

非线性建筑结构振动的非光滑逆控制方法设计

王建晖¹, 王清¹, 马克茂², 黄小芳³

(1. 广州大学 机械与电气工程学院, 广东 广州 510006; 2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;
3. 广州大学 工程抗震研究中心, 广东 广州 510405)

摘要: 针对地震波对非线性建筑结构振动性能影响, 运用非光滑逆控制方法进行抑制, 克服了传统的非线性结构近似线性化控制方法忽略非线性影响的缺点。根据 Lyapunov 稳定性理论和有限时间稳定性理论, 论证了所设计控制方法能够实现非线性建筑结构振动的有限时间稳定。在控制方法实现中, 应用扩张状态观测器进行未知干扰项的估计。以一幢受地震冲击的八层建筑为被控对象, 并对仿真效果进行对比分析。结果表明, 该非光滑逆控制方法具有良好的抗震性能。

关键词: 非线性建筑结构; 非光滑控制; 逆系统; 有限时间稳定; ESO

中图分类号: TP273,P315.9,TU311.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 06-1172-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0187

Design of Nonsmooth and Inversed Control Algorithm for Nonlinear Structural Vibration Control

Wang Jianhui¹, Wang Qing¹, Ma Kemao², Huang Xiaofang³

(1. School of Mechanical and Electric Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China; 3. Engineering Earthquake Resistance Research Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: Considering the vibration effects of seismic waves on building with nonlinear structures, a nonsmooth and inversed control algorithm is used to suppress the vibration. It overcomes the faults of ignoring nonlinear influence in traditional approximate linearization control method and suppresses the influence of seismic waves effectively. According to Lyapunov stable theory and finite-time stability theory, the proposed control method to realize the stability of the nonlinear structural vibration is demonstrated. In the realization of the control method, the extended state observer is used to estimate the unknown disturbances. The numerical simulation is conducted for an eight-story building influenced by the seismic waves, and the comparative analysis of simulated effect is carried out. The results show that the nonsmooth and inversed control algorithm has a good seismic performance.

Keywords: nonlinear building structure; nonsmooth control; inverse system; finite-time stability; ESO

引言

针对土木建筑结构在地震等动荷载的作用下

的振动问题, 国内外学者已提出多种有效结构振动控制算法, 如极点配置法、Linear Quadratic Regulator--LQR、瞬时最优控制方法、Linear Quadratic Iterative Learning Control--LQILC 等^[1-3]。但土木建筑结构有钢筋混凝土结构、钢结构等多种形式, 它们均有强烈的非线性特征, 而上述控制方法的结构抗震设计均采用线弹性模型, 只能验算小震阶段所受力, 而大震阶段验算结构应为非线性结



收稿日期: 2017-05-02 修回日期: 2017-07-12;
基金项目: 国家自然科学基金(51478132), 广州市属
高校科研项目(1201630173);
作者简介: 王建晖(1984-), 男, 湖南, 硕士, 实验
师, 研究方向为线性控制、非线性控制理论; 王清
(1963-), 女, 黑龙江, 博士, 副教授, 研究方向为
控制理论及其应用。

<http://www.china-simulation.com>

• 1172 •

构。目前对线性建筑结构的控制理论研究已较为成熟, 但对非线性建筑结构的控制研究较少。

现有非线性智能控制对非线性系统直接控制的算法一般较复杂, 在建筑结构控制中实际应用面临着不少困难。逆系统方法能将原非线性系统精确地等价于线性系统, 因此特别适用于复杂的非线性系统^[4-6]。因此本文采用了逆系统将非线性建筑结构被控对象精确线性化成近似线性系统。

另外, 在面对土木建筑结构在遇到地震波破坏时需要快速性稳定, 因此研究使土木建筑结构达到有限时间收敛的控制方法是迫在眉睫。

20 世纪 90 年代以来, 随着齐次性理论和齐次 Lyapunov 稳定性理论^[7-9]的提出和完善, 有限时间收敛的控制方法产生了一些研究成果, 如连续非光滑控制方法, 例如文献[10]应用非光滑控制方法完成了航天器姿态控制律设计、文献[11-12]研究了永磁同步电机的有限时间控制问题等, 但是没有在非线性土木建筑结构进行研究。

本文首先对土木建筑结构及其非线性环节进行数学建模, 然后根据多变量控制的逆系统方法和有限时间稳定性理论, 针对该结构的振动问题设计了非光滑逆控制算法, 给出系统的有限时间稳定性分析。在控制方法的实现中, 应用扩张状态观测器进行未知干扰项的估计。最后以一幢受 El Centro 地震冲击的八层建筑为被控对象进行数值仿真, 对比分析了非光滑控制、LQR 控制与无控制三种情况。实验结果验证了非光滑逆控制算法具有良好的抗震性能, 可用于强非线性结构的振动控制。

1 建筑结构的建模与分析

在水平地震波作用下, 一个 n 自由度的线性建筑结构的运动方程表示如下^[1]:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = B_g\ddot{x}_g + B_uU \quad (1)$$

式中: $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 是该建筑相对地面的结构位移向量, 其中 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为建筑第 i 层相对地面的结构位移; M, C, K 分别为该建筑的 $n \times n$ 维质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $B_g = -MI_g$ 为地

面地震加速度转换阵, 其中地震加速度位置向量 I_g 为元素全为 1 的 $n \times 1$ 的列向量; \ddot{x}_g 为地面地震加速度输入; B_u 为控制器 $n \times n$ 的位置矩阵; U 为 $n \times 1$ 的控制力输入向量。

在实际的物理剪切模型中, 层间是存在非线性的迟滞现象^[13]。因此非线性运动方程可表示如下^[13]

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + F_s(X) = B_g\ddot{x}_g + B_uU \quad (2)$$

式中: $F_s(X)$ 为待建模的迟滞恢复力环节。

在迟滞特性建模研究中, 已有许多迟滞模型提出, 例如 Preisach 模型^[14]、PI 模型^[15]、Bouc-Wen 模型^[16]等。Preisach 模型和 PI 模型是分别由多个不同算子叠加而成的迟滞模型, 算子的个数会影响模型的精度, 其权重函数需要大量的数据来辨识得到。而 Bouc-Wen 模型是由微分方程描述^[16], 其输入隐含于模型的微分方程表达式中, 其迟滞恢复力与相对位移变形量的光滑过渡关系也比较符合工程实际, 因此本文采用此模型, 第 i 层恢复力为 $\alpha_i k_i x_i + (1 - \alpha_i) k_i D_{y_i} v_i$, 其中 α_i 为第 i 层屈服后刚度和屈服前刚度的比值; k_i 为第 i 层弹性刚度; D_{y_i} 为第 i 层极限屈服位移, 一般定义为常数; v_i 为第 i 层变形中的迟滞无量纲分量, 由式(3)表示:

$$v_i = D_{y_i}^{-1} (A_i \dot{x}_i - \beta_i |\dot{x}_i| |v_i|^{n_i-1} v_i - \gamma_i \dot{x}_i |v_i|^{n_i}) \quad (3)$$

式中: $A_i, \beta_i, \gamma_i, n_i$ 是与迟滞现象有关的常数。

因此非线性建筑结构数学模型可再描述如下

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + K_e X + K_V V = B_g\ddot{x}_g + B_uU \quad (4)$$

其中

1) $V = [v_1, v_2, \dots, v_n]^T$ 为各层间迟滞向量;

2) K_e 对应于 X 的 $n \times n$ 维刚度矩阵,

$$K_e(i, i-1) = -\alpha_i k_i, i = 2 \sim n,$$

$$K_e(i, i) = \alpha_i k_i + \alpha_{i+1} k_{i+1}, i = 1 \sim n,$$

$$K_e(i, i+1) = -\alpha_{i+1} k_{i+1}, i = 1 \sim n-1, \text{ 其余元素为 } 0;$$

3) K_V 对应于 V 的 $n \times n$ 维迟滞刚度矩阵,

$$K_V(i, i-1) = -(1 - \alpha_i) k_i D_{y_i}, i = 2 \sim n,$$

$$K_V(i, i) = (1 - \alpha_i) k_i D_{y_i} + (1 - \alpha_{i+1}) k_{i+1} D_{y_{i+1}}, i = 1 \sim n,$$

$$K_V(i, i+1) = -(1 - \alpha_{i+1}) k_{i+1} D_{y_{i+1}}, i = 1 \sim n-1, \text{ 其余元素为 } 0.$$

2 系统控制方法设计与稳定性分析

定义状态变量 $Z = [\bar{Z}_1, \bar{Z}_2, \bar{Z}_3]^T$, 其中 $\bar{Z}_1 = [\bar{z}_{11}, \bar{z}_{12}, \dots, \bar{z}_{1n}]^T = X$, $\bar{Z}_2 = [\bar{z}_{21}, \bar{z}_{22}, \dots, \bar{z}_{2n}]^T = \dot{X}$, $\bar{Z}_3 = [\bar{z}_{31}, \bar{z}_{32}, \dots, \bar{z}_{3n}]^T = V$, 则方程(4)的状态空间表达式为:

$$\dot{Z} = A(Z) + W\ddot{x}_g + BU \quad (5)$$

其中

$$A(Z) = \begin{bmatrix} \bar{Z}_2 \\ -M^{-1}(C\bar{Z}_2 + K_e\bar{Z}_1 + K_V\bar{Z}_3) \\ \bar{Z}_3 \end{bmatrix},$$

$$W = \begin{bmatrix} 0 \\ -I_g \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}B_u \\ 0 \end{bmatrix}.$$

利用逆系统方法^[5-6], 令系统输出变量 $Y=X$, 得

$$\begin{cases} \dot{Y} = \dot{X} \\ \ddot{Y} = M^{-1}[-K_e \quad -C \quad -K_V]Z - \\ I_g\ddot{x}_g + M^{-1}B_u U = h(Z, U) \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6), \ddot{Y} 显含 U , 记 $\bar{U} = \ddot{Y}$, 同将 \ddot{x}_g 视为建筑结构系统的外部扰动项。令控制量 U 为:

$$U = B_u^{-1}([K_e \quad C \quad K_V]Z + MI_g\ddot{x}_g + M\bar{U}) \quad (7)$$

将式(7)代入式(5), 得

$$\dot{Z} = A(Z) + W\ddot{x}_g + BB_u^{-1}([K_e \quad C \quad K_V]Z + MI_g\ddot{x}_g + M\bar{U}) \quad (8)$$

式(8)是原系统(式(5))的 2-阶逆系统的状态方程。系统方程为

$$\begin{cases} \dot{\bar{Z}}_1 = \dot{X} \\ \dot{\bar{Z}}_2 = \dot{X} = \bar{U} \end{cases} \quad (9)$$

该系统方程状态矩阵和控制输入矩阵分别为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I_{n \times n} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n \times n} \end{bmatrix}.$$

通过秩判据易知该系统(式(9))是能控的。因此, 可以通过设计控制量 \bar{U} 实现建筑非线性结构振动有效抑制。

根据式(9), 记 $\bar{U} = [\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_n]^T$, 组合后的系统可描述为如下 n 个子系统:

$$\begin{cases} \dot{\bar{z}}_{11} = \bar{z}_{21} \\ \dot{\bar{z}}_{21} = \bar{u}_1 \end{cases}, \quad \begin{cases} \dot{\bar{z}}_{12} = \bar{z}_{22} \\ \dot{\bar{z}}_{22} = \bar{u}_2 \end{cases}, \quad \dots, \quad \begin{cases} \dot{\bar{z}}_{1n} = \bar{z}_{2n} \\ \dot{\bar{z}}_{2n} = \bar{u}_n \end{cases}.$$

对任意第 i 个子系统采用如下非光滑控制方法

$$\bar{u}_i = -k_1 \cdot \text{sign}(\bar{z}_{1i}) \cdot |\bar{z}_{1i}|^{\alpha_1} - k_2 \cdot \text{sign}(\bar{z}_{2i}) \cdot |\bar{z}_{2i}|^{\alpha_2} \quad (10)$$

式中: $k_1 > 0$, $k_2 > 0$, $\alpha_1 = \frac{\alpha_2}{2 - \alpha_2}$, $0 < \alpha_2 < 1$,

$i = 1, 2, \dots, n$ 。

根据式(9)和式(10), 选择第 i 个子系统的

Lyapunov 函数为

$$V_i(\bar{z}_{1i}, \bar{z}_{2i}) = \frac{k_1}{1 + \alpha_1} |\bar{z}_{1i}|^{1 + \alpha_1} + \frac{1}{2} \bar{z}_{2i}^2 \quad (11)$$

对式(11)求导可得

$$\dot{V}_i(\bar{z}_{1i}, \bar{z}_{2i}) = -k_2 |\bar{z}_{2i}|^{1 + \alpha_2} \quad (12)$$

根据不变性原理, 第 i 个子系统的最大不变集为 $(\bar{z}_{1i}, \bar{z}_{2i}) = (0, 0)$, 因此第 i 个子系统为全局渐近稳定的。在此基础上, 建立下述方程组

$$\begin{cases} \rho_1 + \eta = \rho_2 \\ \rho_2 + \eta = \rho_1 \cdot \alpha_1 = \rho_2 \cdot \alpha_2 \end{cases} \quad (13)$$

取 $\rho_1 = 2 - \alpha_2$, $\rho_2 = 1$ 时, $\eta = \alpha_2 - 1 < 0$ 。

令 $f(\bar{z}_{1i}, \bar{z}_{2i}) = [f_1, f_2]^T = [\dot{\bar{z}}_{1i}, \dot{\bar{z}}_{2i}]^T$, 则有:

$$f(\varepsilon^{\rho_1} \bar{z}_{1i}, \varepsilon^{\rho_2} \bar{z}_{2i}) = \begin{bmatrix} \varepsilon^{\rho_2} \bar{z}_{2i} \\ -k_1 \varepsilon^{\rho_1 \alpha_1} \text{sign}(\bar{z}_{1i}) |\bar{z}_{1i}|^{\alpha_1} - \\ k_2 \varepsilon^{\rho_2 \alpha_2} \text{sign}(\bar{z}_{2i}) |\bar{z}_{2i}|^{\alpha_2} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon^{\rho_1 + \eta} & 0 \\ 0 & \varepsilon^{\rho_2 + \eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{z}_{2i} \\ -k_1 \text{sign}(\bar{z}_{1i}) |\bar{z}_{1i}|^{\alpha_1} - \\ k_2 \text{sign}(\bar{z}_{2i}) |\bar{z}_{2i}|^{\alpha_2} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon^{\rho_1 + \eta} f_1(\bar{z}_{1i}, \bar{z}_{2i}) \\ \varepsilon^{\rho_2 + \eta} f_2(\bar{z}_{1i}, \bar{z}_{2i}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

即 $f(\bar{z}_{1i}, \bar{z}_{2i})$ 满足齐次性, 该子系统为齐次系统, 且有负齐次度。根据有限时间稳定性理论^[17], 第 i 个子系统为全局有限时间稳定。由于上述 n 个子系统是具有相同结构, 并且相互之间是独立。因此, 系统(公式(9))同理为全局有限时间稳定的。

由于在式(7)中包含了未知的 \ddot{x}_g 干扰项, 因此需要对该干扰项进行估计, 这里采用扩张状态观测器^[18]进行估计。令 $U = B_u^{-1}([K_e \quad C \quad K_V]Z + MI_g d + M\bar{U})$, 观测器的数学模型如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{Z}} = A(\hat{Z}) + Wd + \\ BB_u^{-1}([K_e \ C \ K_V]\hat{Z} + MI_g d + M\bar{U}) + \\ H_1(\varepsilon)(Z - \hat{Z}) \\ \dot{d} = H_2(\varepsilon)(Z - \hat{Z}) \end{cases} \quad (15)$$

式中: d 为扩张观测的变量; \hat{Z} 为观测器状态变量,

$$H_1(\varepsilon) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_1}{\varepsilon} I_g \\ \frac{\gamma_2}{\varepsilon^2} I_g \end{pmatrix}, \quad H_2(\varepsilon) = \begin{pmatrix} \frac{\gamma_3}{\varepsilon^3} I_g \end{pmatrix}, \quad \forall \varepsilon > 0, \quad \gamma_1, \gamma_2 \text{ 和 } \gamma_3 \text{ 为正实数并使得多项式 } s^3 + \gamma_1 s^2 + \gamma_2 s + \gamma_1 \text{ 满足 Hurwitz 条件.}$$

定义观测误差向量 $\chi = [\chi_1 \ \chi_2 \ \chi_3]^T$, 其中 $\chi_1 = (\bar{Z}_1 - \hat{Z}_1) / \varepsilon^2$, $\chi_2 = (\bar{Z}_2 - \hat{Z}_2) / \varepsilon$, $\chi_3 = (\ddot{x}_g - d) I_g$.

由于

$$\begin{cases} \varepsilon \dot{\chi}_1 = (\bar{Z}_1 - \hat{Z}_1) / \varepsilon = -\gamma_1 \chi_1 + \chi_2 \\ \varepsilon \dot{\chi}_2 = \varepsilon (\bar{Z}_2 - \hat{Z}_2) / \varepsilon = -\gamma_2 \chi_1 + \chi_3 \\ \varepsilon \dot{\chi}_3 = \varepsilon (d(\ddot{x}_g) / dt - \dot{d}) I_g = \\ -\gamma_3 \chi_1 + \varepsilon (d(\ddot{x}_g) / dt) I_g \end{cases} \quad (16)$$

则观测误差系统状态方程为

$$\varepsilon \dot{\chi} = \bar{A} \chi + \varepsilon \bar{B} (d(\ddot{x}_g) / dt) I_g \quad (17)$$

其中

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} -\gamma_1 I_{n \times n} & I_{n \times n} & 0 \\ -\gamma_2 I_{n \times n} & 0 & I_{n \times n} \\ -\gamma_3 I_{n \times n} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_{n \times n} \end{bmatrix}.$$

针对误差系统(17), 定义 Lyapunov 函数为 $V_0 = \varepsilon \chi^T P \chi$, 其中 P 为 Lyapunov 方程 $\bar{A}^T P + P \bar{A} + Q = 0$ 的解. 由于 γ_1 、 γ_2 和 γ_3 为正实数并使得多项式 $s^3 + \gamma_1 s^2 + \gamma_2 s + \gamma_1$ 满足 Hurwitz 条件, 则存在正定对称解 P , 得

$$\dot{V}_0 = \varepsilon \dot{\chi}^T P \chi + \varepsilon \chi^T P \dot{\chi} \leq -\lambda_{\min}(Q) \|\chi\|^2 + 2\varepsilon K \|P \bar{B}\| \|\chi\| \quad (18)$$

其中 $K \geq |d(\ddot{x}_g) / dt|$, $\lambda_{\min}(Q)$ 为 Q 的最小特征值.

当 $\|\chi\| \geq \frac{2\varepsilon K \|P \bar{B}\|}{\lambda_{\min}(Q)}$, 有 $\dot{V}_0 \leq 0$. 在实际情况

中, 当参数 ε 取得越小, 观测误差向量 χ 收敛速度越快, $\|\chi\|$ 量级上是 $O(\varepsilon)$ 的. 因此通过扩张状态观测器可实现对未知扰动项进行有效的前馈补偿, 即

可通过逆控制方法和非光滑控制方法(10)实现系统(公式(9))为全局有限时间稳定的系统.

3 数值仿真

为了验证上述控制方法的有效性, 以一幢受地震冲击的八层建筑为被控对象, 分别进行无控制、LQR 控制和非光滑控制 3 种方式的数值仿真. 建筑结构示意图如图 1 所示.

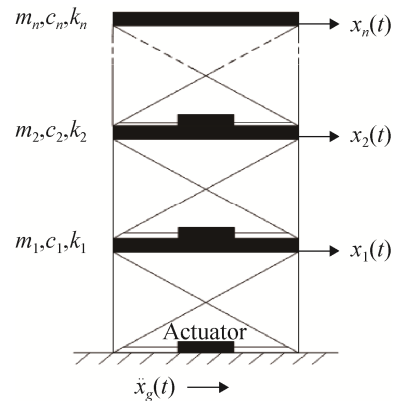


图 1 非线性建筑结构简易模型图

Fig. 1 Simple model diagram of nonlinear building structure

性能结构指标为^[13]:

各层质量为: $m_i=345.6$ (单位: t); 各层屈服前刚度分别为 $k_i=3.4 \times 10^5$, 3.26×10^5 , 2.85×10^5 , 2.69×10^5 , 2.43×10^5 , 2.07×10^5 , 1.69×10^5 , 1.37×10^5 (单位: kN/m); 屈服后刚度和屈服前弹性刚度比值为 $\alpha_i=0.1$; 各层阻尼系数 $c_i=490, 467, 410, 386, 348, 298, 243, 196$ (单位: kN·s/m); 各层屈服极限变形量 $D_{yi}=2.4, 2.3, 2.2, 2.1, 2.0, 1.9, 1.7, 1.5$ (单位: cm); 结构各层迟滞曲线形状参数 $A_i=1$, $\beta_i=0.5$, $n_i=95$, $\gamma_i=0.5$, 其中 $i=1, 2, \dots, 8$.

设系统受外部扰动信号 El Centro 地震波作用, 其加速度最大值 $a_{\max}=3.417 \text{ m/s}^2$, 其波形如图 2 所示.

令 $e_{n \times n}, n \in N^+$ 为 n 阶单位矩阵, 非光滑控制方法中参数取 $\alpha_1=0.43$, $\alpha_2=0.6$, $k_1=3$, $k_2=2$; 在 LQR 控制方法中, 根据实际测试选取最佳的状态

变量加权矩阵 $Q = 80 \times \begin{bmatrix} K_e & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix}$ 和控制量加权矩阵 $R = 10^{-6} \times e_{8 \times 8}$ 。获得非光滑控制、LQR 控制和无控制 3 种情况下楼层的位移、速度、加速度响应对比仿真曲线如图 3~5 所示, 相应控制力的仿真如图 6 所示。

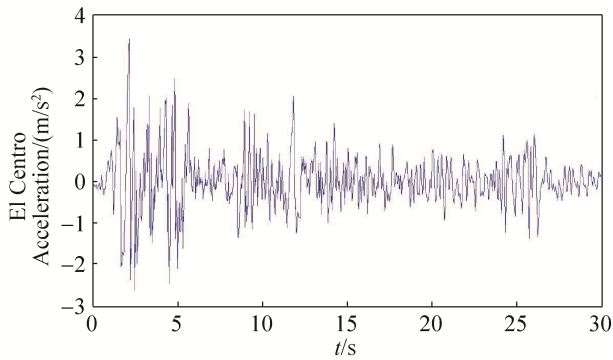


图 2 EI Centro 地震波示意图
Fig. 2 EI Centro earthquake diagram

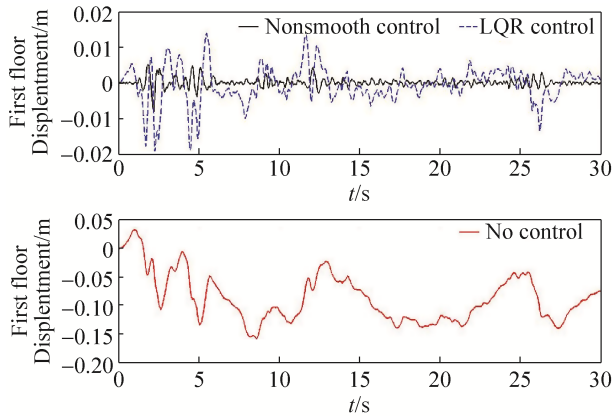


图 3 地震波作用下位移时程曲线图
Fig. 3 Duration traces of displacement under the action of seismic waves

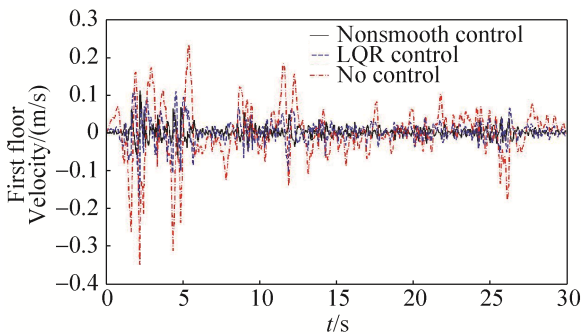


图 4 地震波作用下速度时程曲线图
Fig. 4 Duration traces of velocity under the action of seismic waves

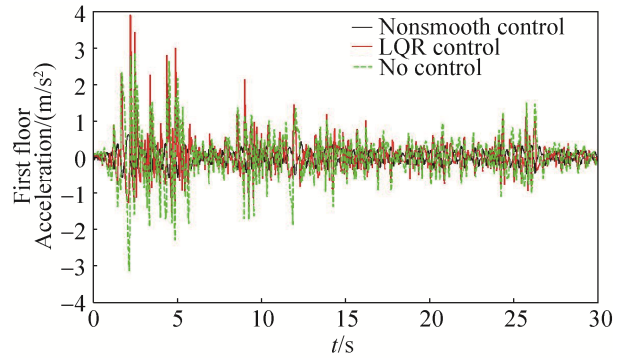


图 5 地震波作用下加速度响应图
Fig. 5 Duration traces of acceleration under the action of seismic waves

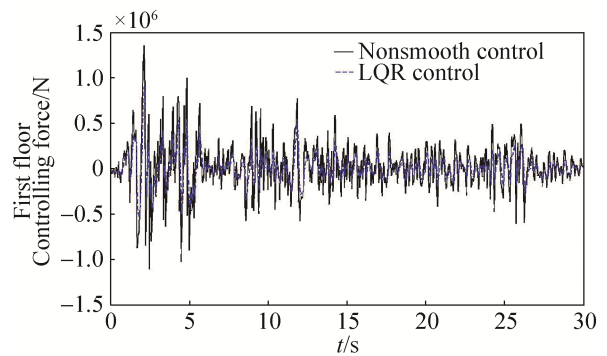


图 6 控制力时程曲线图
Fig. 6 Duration traces of control forces

从图 3~6 可知, 在存在迟滞非线性环节和地震波外部干扰项的情况下, 建筑首层结构在非光滑控制方法下, 能有效抑制结构的振动, 楼层在小范围内移动, 加速度也在比较小的范围内, 并且楼层自身的位移、速度和加速度都最终趋向于稳定。相比非光滑控制方法, LQR 控制方法虽然也可以很好的抑制首层结构的位移, 并且位移、速度和加速度都最终趋向稳定, 控制力也较小, 但是其楼层加速度由于存在非线性环节, 最大波动的数值比较大。

为了进一步对比分析非光滑控制方法和 LQR 控制方法的整体效果, 将上述仿真结果中各层最大位移 x_{\max} 和最大加速度 a_{\max} 进行统计, 结果如表 1 所示。

从表 1 可见, 当建筑结构在无控制情况中, 它的最大位移和最大加速度都是很大的, 而且各楼层

最大位移都分别超出了各自的屈服极限位移;当建筑结构在 LQR 控制方法中,各楼层的最大位移都有效的减少,并在各自楼层的屈服极限位移之内,但是各楼层的最大加速度都明显增大,由此可见 LQR 并未有效的抑制非线性环节带来的影响;当建筑结构在非光滑控制方法中,各楼层的最大位移和最大加速度都得到了有效的减少,最大位移比

LQR 控制方法有效减少了将近 60%,最大加速度比 LQR 控制方法有效减少了将近 84%,与此同时,位移、速度和加速度最后都趋向于小范围内振动。因此,相对于 LQR 控制方法和无控制情况,非光滑控制方法能更好地保护建筑结构在存在迟滞非线性环节时,免受地震的破坏。

表 1 各楼层仿真数据比较表
Tab. 1 Comparison between each layer's simulation data

Stoy number	Dy(m)	No Control		LQR Control $U_{\max}=1\ 377\ \text{kN}$		Nonsmooth Control $U_{\max}=975\ \text{kN}$	
		$x_{\max}/(\text{m/s})$	$a_{\max}/(\text{m/s}^2)$	$x_{\max}/(\text{m/s})$	$a_{\max}/(\text{m/s}^2)$	$x_{\max}/(\text{m/s})$	$a_{\max}/(\text{m/s}^2)$
1	0.024	0.159 4	3.143 1	0.019 3	3.903 6	0.008 1	0.625 5
2	0.023	0.270 5	3.417 8	0.019 8	3.878 2	0.008 3	0.629 9
3	0.022	0.385 7	3.406 3	0.020 0	3.868 9	0.008 3	0.629 9
4	0.021	0.499 5	3.413 1	0.020 1	3.865 4	0.008 3	0.629 9
5	0.02	0.598 5	3.417 1	0.020 1	3.863 4	0.008 3	0.629 9
6	0.019	0.684 0	3.417 5	0.020 1	3.862 2	0.008 3	0.629 9
7	0.017	0.752 5	3.417 2	0.020 1	3.861 5	0.008 3	0.629 9
8	0.015	0.794 5	3.417 0	0.020 1	3.861 1	0.008 3	0.629 9

4 结论

针对建筑结构非线性振动的抑制问题,利用逆系统方法和非光滑控制方法,应用扩张状态观测器进行未知干扰项的估计,使结构非线性振动控制系统能快速地实现有限时间稳定。为了验证上述控制方法的有效性,以一幢受地震冲击的八层建筑为被控对象,选择 El Centro 地震波为干扰输入,分别进行无控制、LQR 控制和非光滑控制三种方式的数值仿真,结果表明了该控制方法的有效性。本文在仿真中考虑了非线性环节对系统的影响,但未考虑参数不确定性。以本文为基础,分析参数不确定性对系统的鲁棒性和抗干扰性影响是有理论与应用意义的,值得进一步深入地研究。

参考文献:

- [1] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
Zhou Fulin. Seismic Control in Engineering Structures [M]. Beijing: Seismological Press, 1997.

- [2] 欧进萍. 结构振动控制—主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
Ou Jinping. Structural Vibration Control—active, Semi-active and Intelligent Control[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [3] 李雪峰, 汪斌. 斜拉桥地震响应线性二次型迭代学习控制(LQILC)研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(1): 174-182.
Li Xuefeng, Wang Bin. Research on Linear Quadratic Iterative Learning Control (LQILC) for Seismic Responses of Cable-stayed Bridge[J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2015, 35(1): 174-182.
- [4] 高为炳. 变结构控制理论[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990.
Gao Weibing. Foundation of Variable Structure Control Theory[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1990.
- [5] 李春文, 苗原, 冯元琨, 等. 非线性系统控制的逆系统方法(I)—单变量控制理论[J]. 控制与决策, 1997, 12(5): 529-535.
Li Chunwen, Miao Yuan, Feng Yuankun, et al. Inverse System Method for Nonlinear Systems Control (I)

- Single Variable Control Theory[J]. Control and Decision, 1997, 12(5): 529-535.
- [6] 李春文, 苗原, 冯元琨, 等. 非线性系统控制的逆系统方法(II): 多变量控制理论[J]. 控制与决策, 1997, 12(6): 625-630,642.
Li Chunwen, Miao Yuan, Feng Yuankun, et al. Inverse System Method for Nonlinear Systems Control (II): Multivariable Control Theory[J]. Control and Decision, 1997, 12(6): 625-630, 642.
- [7] Rosier L. Homogeneous Lyapunov Function for Homogeneous Continuous Vector Field[J]. Systems and Control Letters (S0167-6911), 1992, 19(6): 467-473.
- [8] Kawski M. Stabilizability and Nilpotent Approximations [C]//Proceedings of the 27th IEEE Conference on Decision and Control, Austin USA, 1988, 2: 1244-1248.
- [9] Hermes H. Homogeneous Coordinates and Continuous Asymptotically Stabilizing Feedback Controls[M]. Differential Equations: Stability and Control, 1991.
- [10] 马克茂. 航天器连续非光滑姿态控制律设计[J]. 宇航学报, 2012, 33(6): 713-719.
Ma Kemao. Design of Non-smooth Attitude Control Laws for Spacecraft[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(6): 713-719.
- [11] 刘慧贤, 丁世宏, 李世华, 等. 永磁同步电机位置伺服系统的有限时间控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(3): 424-430.
Liu Huixian, Ding Shihong, Li Shihua, et al. Finite-time Control of PMSM Position Servo System[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(3): 424-430.
- [12] 王建晖, 王清, 马克茂. 一种永磁同步电机非光滑控制器设计[J]. 计算机仿真, 2016, 33(3): 227-230+263.
Wang Jianhui, Wang Qing, Ma Kemao. Non-smooth Controller Design for Permanent Magnet Synchronous Motors[J]. Computer Simulation, 2016, 33(3): 227-230, 263.
- [13] Yang J N, Li Z, Vongchavalitkul S. Generalization of Optimal Control Theory: Linear and Nonlinear Control[J]. Journal of Engineering Mechanics (S0733-9399), 1994, 120(2): 266-283.
- [14] An K, Cai G. Discretization of Preisach Hysteresis Model[J]. Journal of Central South University (S2095-2899), 2015(22): 4724-4730.
- [15] Su C Y, Wang Q Q, Chen X K, et al. Adaptive Variable Structure Control of a Class of Nonlinear Systems with Unknown Prandtl-Ishlinskii Hysteresis[J]. IEEE Transactions on Automatic Control(S0018-9286), 2005, 12(50): 2069-2073.
- [16] 赵新龙, 李智, 苏春翌. 基于 Bouc-Wen 模型的迟滞非线性系统自适应控制[J]. 系统科学与数学, 2014, 34(12): 1496-1507.
Zhao Xinlong, LI Zhi, Su Chunyi. Adaptive Control for Nonlinear System with Hysteresis Based on Bouc-wen Model[J]. Journal of System Science and Mathematical Sciences, 2014, 34(12): 1496-1507.
- [17] Bhat S P, Bernstein D S. Finite-time Stability of Homogeneous Systems[C]//Proceedings of the American Control Conference. Albuquerque, New Mexico, USA, 1997: 2513-2514.
- [18] 马克茂, 贺风华, 姚郁. 目标机动加速度的估计与导引律实现[J]. 宇航学报, 2009, 30(6): 2213-2219.
Ma Kemao, He Fenghua, Yao Yu. Estimation of Target Maneuver Acceleration and Guidance Law Implementation in Homing Terminal Guidance[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(6): 2213-2219.