

# 反馈增益下的高层建筑框架结构振动分散控制方法

张未南

(北京城建房地产开发有限公司, 北京 100081)

**摘要:** 高层建筑框架结构在长期使用过程中, 结构构件会累积损伤产生振动。为解决高层建筑框架结构产生无效的振动控制, 导致控制效率不足、稳定性较弱等问题。提出基于反馈增益与差分进化算法的高层建筑框架结构振动分散控制方法。基于反馈增益作用, 构建高层建筑框架结构模型, 通过计算高层建筑运动方程和子结构状态方程, 构建高层建筑框架结构的数学模型, 利用差分进化算法的初始化、变异、交叉、选择等操作, 对模型参数进行计算, 通过适应度函数, 完成对模型参数的更新, 计算模型分散控制的结果, 实现对高层建筑振动的分散控制。结果表明: 反馈增益作用下的高层建筑框架结构振动分散控制方法求解时间平均值为 25.02 s。该方法求解速度快, 控制效率高, 可有效实现高层建筑框架结构的振动分散控制, 提升高层建筑框架结构稳定性。

**关键词:** 反馈增益; 差分进化算法; 高层建筑; 建筑框架结构; 结构振动; 分散控制方法

**中图分类号:** TU973 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 01-0118-07

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.021

## Distributed Control Method for Vibration of High-rise Building Frame Structures under Feedback Gain

ZHANG Weinan

(Beijing Chengjian Real Estate Development Co., Ltd., Beijing 100081, China)

**Abstract:** During long-term service, structural components in high-rise building frame structures accumulate damage and generate vibrations. To address ineffective vibration control in these structures – which leads to insufficient control efficiency and weak stability – this study proposes a distributed vibration control method for high-rise building frame structures based on feedback gain and differential evolution algorithms. Based on feedback gain effects, a mathematical model of the high-rise building frame structure is constructed by calculating its motion equations and substructure state equations. Utilizing operations such as initialization, mutation, crossover, and selection from the differential evolution algorithm, model parameters are computed. Through an adaptability function, model parameters are updated to achieve distributed control of the high-rise building's vibrations. Results indicate that the vibration distributed control method for high-rise building frame structures under feedback gain achieves an average solution time of 25.02 seconds. This method offers rapid solution speed and high control efficiency, effectively realizing vibration distributed control for high-rise building frame structures and enhancing their stability.

**Key words:** feedback gain; differential evolution algorithm; high rise buildings; building frame structure; structural vibration; decentralized control method

## 0 引言

框架结构是高层建筑常用的结构形式之一<sup>[1]</sup>。高层建筑框架结构在长期的使用过程中,受到各种荷载(包括地震、风荷载、活荷载等)的作用<sup>[2-4]</sup>。结构构件会不断累积损伤,其在地震、风荷载作用下会产生振动。如果不进行有效的振动控制,载荷力可能会导致结构构件(如梁、柱、节点等)发生破坏<sup>[5-6]</sup>。传统的振动控制主要是通过增强结构的强度和刚度来抵抗地震力,但这种方法存在一定的局限性<sup>[7]</sup>。随着建筑物高度的增加,单纯依靠提高结构的强度和刚度来满足稳定性要求会导致结构自重增加、材料用量增大等问题<sup>[8]</sup>。因此,高层建筑物框架结构振动控制成为现在亟待解决的问题,不少研究学者针对建筑结构控制方法展开了研究。

李行等<sup>[9]</sup>采用静力和动力弹塑性时程分析方法,研究了建筑钢框架的损伤机理、层间变形和失效模式,从而对地震损伤进行控制;孙瀚鼎等<sup>[10]</sup>建立了附加 DNS-TLD 结构的力学模型分析减震控制机制。通过单层钢框架振动台对附加 DNS-TLD 的高层建筑钢筋混凝土框架结构进行地震作用下的动力时程分析,测试结构减震控制的有效性;樊长林等<sup>[11]</sup>提出基于神经模糊模型的近场地震结构振动半主动控制方法。基于神经模糊模型设计控制器实现建筑结构振动的半主动控制,并分析近场地震结构振动控制性能;刘占省等<sup>[12]</sup>先对预应力钢结构的相关数据进行采集,在数字孪生的驱动下,构建相应的钢结构安全控制模型,实现对预应力钢结构的智能控制;廖田龙等<sup>[13]</sup>结合最小控制合成(Mini-mum Control Synthesis, MCS)算法与重叠分散控制策略,建立了 MCS 算法在多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)系统的一般形式;梁仕等<sup>[14]</sup>分析了反馈系数对悬浮系统性能的影响规律,基于此得到了优化的预先补偿和全状态反馈控制框架,实验结果表明,该方法需要付出一定的控制成本和计算资源;李彬等<sup>[15]</sup>提出了中心支撑钢框架结构屈服机制控制方法。利用改进的遗传算法进行钢框架结构优化,进行钢框架结构屈服机制控制。

在以往研究的基础上,设计了基于反馈增益和差分进化算法的高层建筑框架结构振动分散控制方法。在反馈增益的作用下,计算高层建筑运动方程

和子结构状态方程,构建相应的高层建筑框架结构模型。利用差分进化算法的变异、交叉操作,优化相应的模型控制参数,从而实现对高层建筑框架振动的分散控制。能够保证高层建筑的稳定性,保证其正常投入使用,对于相关行业的发展和进步有一定的指导价值。

## 1 高层建筑框架结构振动分散控制方法设计

### 1.1 基于反馈增益构建高层建筑框架结构模型

为了实现对高层建筑结构振动的分散控制,利用反馈增益构建相应的建筑模型,如图 1 所示。

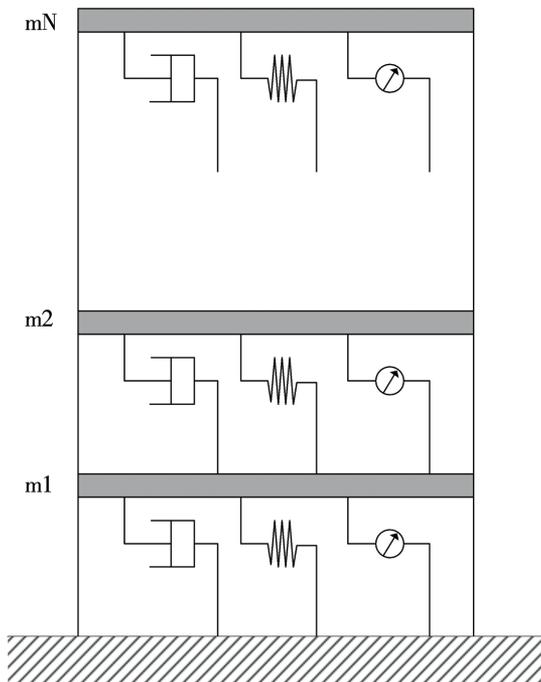


图 1 基于反馈增益的高层建筑框架结构模型  
Fig. 1 High rise building frame structure model based on feedback gain

在反馈增益的作用下,将高层建筑划分为具有多个自由度的线性建筑结构,考虑建筑物受到地面加速度的影响,因此,需要设定相应的运动方程。高层建筑框架结构的运动方程为:

$$\mathbf{M}q''(t) + \mathbf{C}q'(t) + \mathbf{K}q(t) = \mathbf{T}_u U(t) + \mathbf{E}w(t) \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{M}$  为建筑结构的质量矩阵;  $\mathbf{C}$  为建筑结构的自由度矩阵;  $\mathbf{K}$  为建筑结构的刚度矩阵;  $\mathbf{T}_u$  为建筑结构的控制力矩阵;  $\mathbf{E}$  为建筑结构的反馈增益矩阵;  $q''(t)$  为高层建筑结构各层相对于地面的高度向量;  $q'(t)$  为高层建筑结构各层相对于地面的速度向量;

## 研究与应用

$q(t)$  为高层建筑结构各层相对于地面的加速度向量;  $U(t)$  为高层建筑结构的控制向量;  $w(t)$  为建筑结构的反馈增益向量。对构建的高层建筑框架结构模型按照从上到下的顺序进行划分, 划分为多个子结构, 对每个子结构的状态进行计算, 公式为:

$$\psi'_i = A_i \psi_i + E w(t) + H_i u(t) + \sum_j D_{ij} \psi_j + \sum_{j'} N_{ij} w(t) \quad (2)$$

式中:  $\psi'_i$  为高层建筑子结构的状态向量;  $A_i$  为子结构的控制力矩阵;  $\psi_i$  为子结构的初始状态;  $H_i$  为子结构的位置矩阵;  $D_{ij}$ 、 $N_{ij}$  分别为子结构的影响系数矩阵;  $\psi_j$  为子结构的偶联向量。构建高层建筑框架结构的数学模型, 表示为:

$$x(t) = A_i \psi_i + E w(t) + \Delta \tau_i \quad (3)$$

式中:  $x(t)$  为高层建筑的数学模型;  $\Delta \tau_i$  为高层建筑结构在广义上的结构向量。至此, 基于反馈增益的高层建筑框架结构模型构建完成。

### 1.2 基于差分进化算法更新分散控制参数

利用差分进化算法计算分散控制参数。差分进化算法作为一种优化算法, 在实际应用中, 需要先对种群进行初始化, 再进行变异、交叉、选择操作, 通过计算适应度函数, 更新模型中的分散控制参数。差分进化算法的应用过程如下所示:

$$\begin{cases} x_{i,1} = x_{\min} + \text{rand}(0,1)(x_{\max} - x_{\min}) \\ v_i = x_{i,1} + F(x_{i,2} - x_{i,3}) \\ C = C_{\min} + (C_{\max} - C_{\min})kk_{\max}^{-1} \\ x_{i,k} = \begin{cases} u_{i,k} & f(u_{i,k}) \leq f(x_{i,k}) \\ x_{i,k} & f(u_{i,k}) > f(x_{i,k}) \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $x_{i,1}$  为初始化后的分散控制参数;  $x_{\min}$  为最小的分散控制参数值;  $x_{\max}$  为最大的分散控制参数值,  $v_i$  为参数的变异结果;  $F(\cdot)$  为变异因子;  $x_{i,2}$ 、 $x_{i,3}$  为不同的分散控制参数初始化后的数值;  $C$  为差分进化算法的交叉因子;  $C_{\min}$  为交叉因子的最小值;  $C_{\max}$  为交叉因子的最大值;  $k$  为缩放因子的平均值;  $k_{\max}$  为缩放因子的最大值;  $x_{i,k}$  为差分进化算法的选择操作;  $u_{i,k}$ 、 $x_{i,k}$  为不同适应度的分散参数;  $f(\cdot)$  为适应度函数。利用差分进化算法对构建的高层建筑结构模型中的分散参数更新, 从而更好地实现对高层建筑

结构的控制。适应度函数的计算公式为:

$$f(x_{i,k}) = \sum_{j=1}^4 w_1 \int_0^t |e_j(t)| dt + \sum_{q=1}^i w_2 \int_0^t |u_j(t)| dt \quad (5)$$

式中:  $w_1$ 、 $w_2$  分别为不同参数的权重系数;  $j$  为高层建筑结构所处位置的不同方向;  $q$  为分散控制参数的数量;  $e_j(t)$  为不同方向的控制参数;  $u_j(t)$  为构建模型中的控制参数。至此, 基于差分进化算法的分散控制参数更新完成。

### 1.3 对高层建筑结构振动的分散控制

对高层建筑结构振动进行分散控制。具体控制过程如图 2 所示。

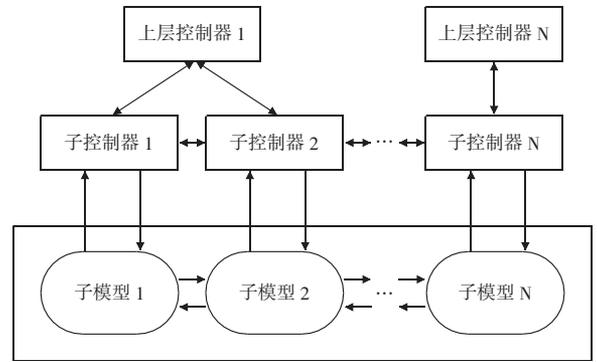


图 2 高层建筑结构振动分散控制过程  
Fig. 2 Dispersion control process of vibration in high rise building structures

在分散控制的过程中, 通过多个控制器之间的信息交换, 完成对高层建筑结构振动的分散控制。先利用上层控制器对子控制器下达指令, 再通过子控制器作用到不同的子模型中。同时, 不同的子控制器间可以进行信息交换, 从而使得整个高层建筑模型的信息交换充分, 实现对高层建筑的良好控制。分散控制的结果表示为:

$$f^k = \min \sum_{\alpha=1}^{N_A} f_{\alpha}^k(x_i^k) \quad (6)$$

式中:  $f^k$  为分散控制的结果;  $f_{\alpha}(\cdot)$  为控制优化的函数;  $N_A$  为高层建筑模型的参数个数;  $x_i^k$  为高层建筑模型的参数。至此, 基于反馈增益和差分进化算法的高层建筑框架结构振动分散控制方法的设计完成。

## 2 算例测试

### 2.1 测试准备

实验中, 以某 30 层高层建筑作为实例, 构建相应的高层建筑框架结构模型, 并进行相关实验测试。相关参数见表 1。

表 1 某 30 层高层建筑模型参数  
Table 1 Parameters of a 30 layer high-rise building model

|         | 质量<br>/( $\times 10^5$ kg) | 速度<br>/( $\times 10^6$ m/s) | 阻尼<br>/( $\times 10^6$ N·s/m) | 加速度峰值<br>/( $\text{m/s}^2$ ) | 加速度峰值<br>持续时间/s | 采样步<br>长/s | 驱动装<br>置数量 |
|---------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------|------------|------------|
| 1-15 层  | 3.425                      | 3.424                       | 2.365                         | 3.0                          | 30              | 0.3        | 2          |
| 16-30 层 | 3.425                      | 3.424                       | 2.365                         | 2.0                          | 20              | 0.7        | 1          |

通过上述参数的设置, 计算出某高层建筑模型的适应度函数, 如图 3 所示。

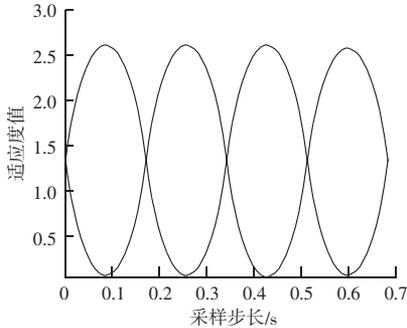


图 3 适应度函数  
Fig. 3 Fitness function

将适应度函数作为基础, 探究不同加速度、位移与方法控制力之间的关系, 如图 4 所示。

随着加速度和位移的不断增长, 控制力对其控制力逐渐增长。因此, 采用分散控制方法能够有效控制高层建筑的相对位移和加速度, 能够更好地保障

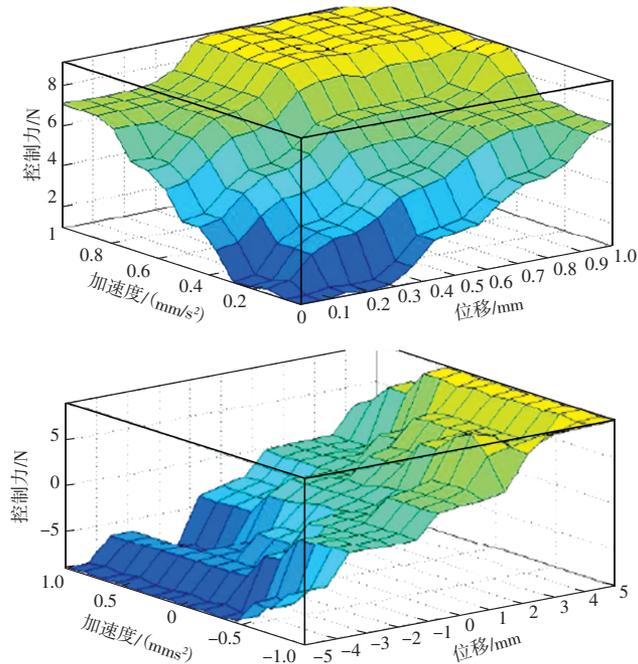


图 4 不同加速度、位移与控制力之间的关系  
Fig. 4 The relationship between different accelerations, displacements and control forces

高层建筑的稳定。设置对比实验, 基于反馈增益与差分进化算法的高层建筑框架结构振动分散控制方法为方法 1, 基于模糊控制与输入输出模型的高层建筑框架结构振动分散控制方法为方法 2, 基于在线补偿与参数不确定的高层建筑框架结构振动分散控制方法为方法 3。

## 2.2 测试结果讨论

为对比三种方法的性能, 以三种方法的分散控制求解时间为评价指标, 对比在不同时间断面上, 三种方法的求解速度。一共进行 30 次实验, 结果见表 2。

表 2 三种方法的分散控制求解时间  
Table 2 Distributed control solution time for three methods /s

| 实验次数 | 方法 1  | 方法 2   | 方法 3   |
|------|-------|--------|--------|
| 1    | 25.01 | 108.14 | 295.68 |
| 2    | 26.30 | 110.36 | 299.35 |
| 3    | 24.36 | 107.25 | 289.36 |
| 4    | 25.06 | 109.35 | 289.64 |
| 5    | 24.38 | 108.42 | 290.12 |
| 6    | 24.99 | 108.36 | 295.36 |
| 7    | 25.96 | 107.96 | 297.36 |
| 8    | 26.01 | 109.34 | 298.45 |
| 9    | 25.78 | 110.24 | 298.75 |
| 10   | 26.72 | 107.39 | 295.48 |
| 11   | 26.01 | 109.14 | 296.68 |
| 12   | 24.30 | 111.36 | 298.35 |
| 13   | 25.36 | 108.25 | 288.36 |
| 14   | 26.06 | 109.45 | 288.65 |
| 15   | 25.38 | 108.52 | 294.12 |
| 16   | 23.99 | 108.78 | 295.58 |
| 17   | 24.96 | 107.68 | 294.36 |
| 18   | 25.01 | 108.34 | 296.45 |
| 19   | 26.78 | 110.57 | 297.75 |
| 20   | 24.72 | 109.39 | 296.48 |
| 21   | 26.01 | 107.14 | 296.68 |
| 22   | 25.30 | 110.45 | 298.35 |
| 23   | 23.72 | 106.25 | 288.39 |
| 24   | 25.48 | 107.35 | 287.64 |
| 25   | 25.38 | 106.42 | 293.12 |
| 26   | 24.78 | 109.36 | 292.36 |
| 27   | 24.96 | 108.96 | 296.69 |
| 28   | 23.01 | 108.42 | 297.45 |
| 29   | 24.78 | 110.29 | 296.87 |
| 30   | 25.72 | 107.75 | 294.48 |

## 研究与应用

方法 1 的求解时间最短。在 30 次试验中, 方法 1 的求解时间平均为 25.02 s, 方法 2 的求解时间平均为 108.75 s, 方法 3 的求解时间平均为 295.45 s, 可见, 基于反馈增益与差分进化算法的高层建筑框架结构振动分散控制方法在实际应用效果较好, 求解时间较短, 求解速度快, 控制效率更高。

### 3 结论

基于反馈增益构建高层建筑结构模型, 通过对构建的模型进行分析和计算, 在差分进化算法的作用下对模型参数进行更新, 实现对高层建筑框架结构的分散控制。测试结果表明, 对高层建筑框架结构振动分散控制的时间平均值较低, 控制速度较快, 控制效率高, 能够更好地响应控制高层建筑结构的振动, 减少地震等自然灾害对高层建筑的伤害, 增加了高层建筑结构的稳定性。此外, 对于相关行业的发展和研究具有非常重要的意义。

### 参 考 文 献

[1] 杨志红, 郑文富, 何慧明, 等. 框架核心筒结构高层建筑的定向倒塌爆破拆除 [J]. 爆破器材, 2022, 51 (6): 60-64.

[2] 王森, 刘冠伟, 许璇, 等. 某复杂体型超高层建筑结构设计要点与分析 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (22): 26-31, 46.

[3] 闫锋, 花炳灿, 安东亚. 乌兹别克斯坦 9 度区某超高层建筑结构设计优化 [J]. 建筑结构, 2024, 54 (13): 51-56.

[4] 江韩, 赵学斐, 刘金龙, 等. 框架-核心筒超高层结构中框架斜柱的受力分析与相关设计 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (5): 99-106.

[5] 刘小换, 余尚, 刘彦辉. 高层框架剪力墙隔震结构剪力墙合理刚度研究 [J]. 工程抗震与加固改造, 2024, 46 (4): 95-101.

[6] 周建龙, 邱介尧, 包联进, 等. 扭转体型高层建筑结构受力性能分析 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (10): 89-95, 147.

[7] 戚毓恺, 吴嘉敏, 黄金山, 等. 基于部分观测识别非线性高层剪切框架结构参数与未知地震作用 [J]. 振动与冲击, 2022, 41 (24): 51-59.

[8] 马义全, 周传波, 蒋楠. 隧道爆破作用下邻近高层框架结构动力响应研究 [J]. 工程爆破, 2023, 29 (3): 85-94.

[9] 李行, 林旭川, 张令心, 等. 带可更换保险丝典型钢框架的地震损伤控制性能研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43 (6): 36-46.

[10] 孙瀚鼎, 何浩祥, 程扬, 等. 附加阻尼网的斜底式 TLD 减震控制理论与试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2024, 45 (4): 72-85.

[11] 樊长林, 项雪琦. 一种近场地震结构振动半主动控制方法 [J]. 太原理工大学学报, 2024, 55 (2): 348-355.

[12] 刘占省, 史国梁, 杜修力, 等. 数字孪生驱动的预应力钢结构安全智能控制方法 [J]. 天津大学学报 (自然科学与工程技术版), 2023, 56 (10): 1043-1053.

[13] 廖田龙, 涂建维, 周欣茹, 等. 基于最小控制合成算法的重叠分散控制研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45 (5): 88-94.

[14] 梁仕, 王志强, 李晓龙, 等. 基于预先补偿和全状态反馈控制的车-轨耦合振动抑制 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2023, 51 (3): 321-331.

[15] 李彬, 王湛, 范延静, 等. 基于屈服机制控制的中心支撑钢框架结构优化方法研究 [J]. 振动与冲击, 2023, 42 (15): 285-297.

E-mail: fmhzhly@163.com