

基于遗传算法的负刚度装置优化布置

孙 彤¹, 李宏男^{*1,2}, Satish Nagarajaiah³

(1. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024;

2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

3. 莱斯大学 土木与环境工程系, 得克萨斯 休斯顿 77005)

摘要: 针对一种新型轨道式负刚度装置(negative stiffness device, NSD)提出了一种基于遗传算法的优化布置数学模型,该模型同时考虑 NSD 在加速度控制上的优势和位移控制上的劣势,设定 5 组加权系数组合,考察不同优化侧重下的控制效果.以某 10 层结构为算例,通过对比负刚度装置和传统阻尼器控制效果,得到最优加权系数组合;通过对比 5 组加权系数组合,得到负刚度装置优化布置基本原则.

关键词: 负刚度装置;遗传算法;优化布置;高层结构

中图分类号: TH212; TH213.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201701012

0 引言

负刚度控制是结构控制领域近年来比较热门的一种控制方式,国内外一些学者提出了不同的负刚度装置(negative stiffness device, NSD)^[1-5],结合黏滞型被动阻尼器的使用,其能够有效抑制弱化结构导致的位移增大,提供较好的控制效果.目前,采用负刚度装置布置在隔震层的控制方案较多^[6-8],其本质是隔震系统的改善,但这种布置仅对于低层和多层结构比较适用^[9].随着经济发展,高层、超高层结构已经随处可见,传统负刚度控制的局限性已十分明显.

本文针对新型轨道式 NSD 在高层结构控制中的布置提出一种优化目标函数,利用遗传算法根据不同组合加权系数的目标函数进行优化布置,研究不同组合加权系数对优化结果的影响,最后给出高层结构中负刚度装置的布置原则.

1 理论模型

1.1 轨道式 NSD 力学模型

轨道式 NSD 是位移型控制装置,结构如图 1 所示(照片为试验装置),预压缩弹簧将滚轮压在

轨道块上,轨道块的起伏会给滚轮一个垂直于弹簧方向的负刚度分力,其力学模型为

$$F = k \cdot [\Delta L + f(x) - f(x_0)] \cdot \frac{f'(x)}{1 + (f'(x))^2} - \text{sgn}(\dot{x}) \mu N \cos^2 \alpha \quad (1)$$

式中:第一项为负刚度力,与弹簧刚度、预压缩量、装置变形和轨道形状有关;第二项为摩擦力,方向由速度方向决定. k 为轨道式 NSD 中预压缩弹簧刚度, ΔL 为弹簧预压缩量, $f(x)$ 为轨道母线方程, $f'(x)$ 为 $f(x)$ 的导数, x_0 为滚轮在轨道块上的初始位置, μ 为摩擦因数, N 为弹簧弹力, $\dot{x}$ 为滚轮在 x 处速度, sgn 为符号函数, α 为滚轮和轨道块接触点处切线与 X 轴夹角.轨道式 NSD 力-位移曲线如图 2 所示,可以看出试验结果与数值模拟吻合较好,说明数学模型准确、有效.

NSD 的设置会降低结构刚度,导致结构位响应增大.研究表明^[5],20% 阻尼比的线性黏滞阻尼器能够有效控制这种影响.

1.2 结构计算模型

地震作用下 n 个自由度的受控结构运动方程为

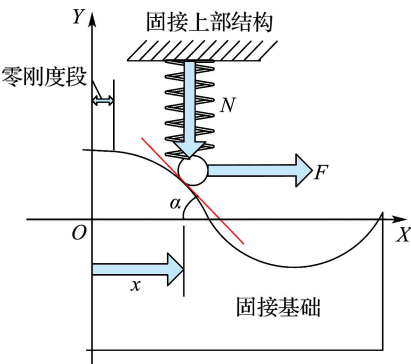
收稿日期: 2016-08-31; 修回日期: 2016-11-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51261120375).

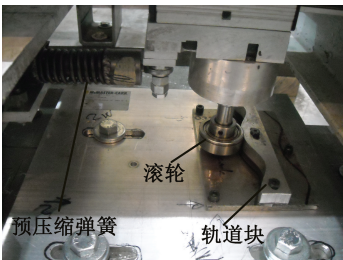
作者简介: 孙 彤(1986-),男,博士生, E-mail: suntong009@mail.dlut.edu.cn; 李宏男*(1957-),男,博士,长江学者奖励计划特聘教授,博士生导师, E-mail: hnli@dlut.edu.cn.

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = M\mathbf{I}\ddot{\mathbf{x}}_g + E\mathbf{u}_n + E\mathbf{u}_d \tag{2}$$

式中： M 、 C 和 K 分别为受控结构 $n \times n$ 维质量、阻尼和刚度矩阵； $\ddot{\mathbf{x}}$ 、 $\dot{\mathbf{x}}$ 和 $\mathbf{x}$ 分别为受控结构相对于地面的加速度、速度和位移反应向量； $\mathbf{I}$ 为单位列向量； $\ddot{\mathbf{x}}_g$ 为地震动加速度向量； $\mathbf{u}_n$ 、 $\mathbf{u}_d$ 分别为 r 维 NSD 控制力和阻尼器控制力向量； E 为 $n \times r$ 维 NSD 控制系统位置矩阵。



(a) 结构图



(b) 照片

图 1 轨道式 NSD 结构图与照片

Fig. 1 Diagram and photo of curve-based NSD

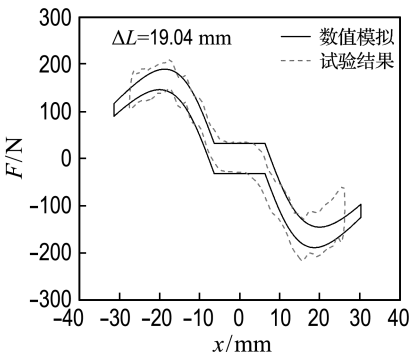


图 2 轨道式 NSD 力-位移曲线

Fig. 2 Force-displacement curve of curve-based NSD

2 基于遗传算法的优化设计

2.1 优化变量

选择表示 NSD 安装位置的矩阵 $P_{1 \times n}$ 作为优

化变量, n 代表结构层数, 未布置 NSD 的楼层用 0 表示, 布置 NSD 的用 1 表示. 阻尼器数量确定的问题中, 主要优化数字 1 的位置. 如一栋 5 层楼房, 在 1、3 层布置负刚度装置, 则位置矩阵

$$P = (1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0) \tag{3}$$

2.2 目标函数

针对负刚度装置降低结构刚度、增大位移反应的特点, 设计兼顾加速度反应和位移反应的目标函数如下:

$$Z = \alpha \frac{a_{\max}}{a_0} + \beta \frac{x_{\max}}{x_0} \tag{4}$$

式中: $a_{\max}$ 和 a_0 分别为有控结构和无控结构在地震作用下结构最大加速度; $x_{\max}$ 和 x_0 分别为有控结构和无控结构在地震作用下的最大位移响应. 优化过程以求解 Z 最小值为目的, 目标函数由两项相加构成: 第一项 $\alpha \frac{a_{\max}}{a_0}$ 体现地震作用下负刚度系统对加速度的控制效果, 从舒适性角度考量; 第二项 $\beta \frac{x_{\max}}{x_0}$ 反映了负刚度系统对结构位移的控制效果, 从安全性角度考量. α 和 β 作为加权系数, 用来调整优化方案的侧重倾向, 且令 $\alpha + \beta = 1$. 为了考察不同加权系数对优化结果的影响, 给定 5 组加权系数组合, 如表 1 所示.

表 1 加权系数组合

Tab. 1 Combination modes of weighting coefficients

组合	α	β
1	0.9	0.1
2	0.7	0.3
3	0.5	0.5
4	0.3	0.7
5	0.1	0.9

2.3 选择算子

选择算子的作用是筛选父代群体中哪些个体能够把自身基因传递到子代群体. 本文采用轮盘赌选择方法, n 个个体构成的种群中, 第 i 个个体适应函数值为 f_i , 其被选中的概率为

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \tag{5}$$

2.4 交叉算子

生物进化中基因会通过交配重组产生新的个

体,遗传算法中使用交叉算子来模拟这个过程. 本文采用两点交叉,即在父代基因编码中随机设置两个点,交换基因首尾两段染色体.

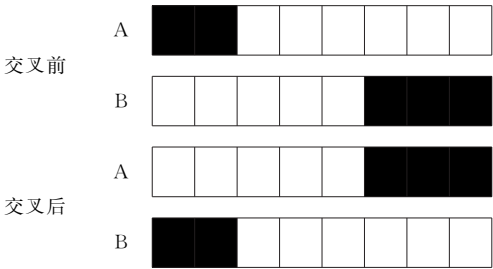


图 3 交叉算子示意图

Fig. 3 Diagram of crossover operator

3 数值分析

3.1 工程概况

某 10 层钢筋混凝土结构,自振周期为 1.1 s, 阻尼为 5%. 结构各层质量和刚度如表 2 所示. 地震动荷载选取 3 条最不利实际地震加速度记录^[10]: F4 (El Centro, N69W, 1979)、F5 (Taft, N21E, 1952)和 N2(Gengma, SOOE, 1988). 峰值加速度均设为 40 m/s²,相当于烈度为 8 度地区大震情况. 不失一般性,选择负刚度比在 30%~40%^[11],负刚度装置出力峰值为 14 kN,其对应位移为 15 mm. 作为对比,使用阻尼系数为 60 kN·s/m 的阻尼器对结构进行均布控制^[12].

表 2 框架结构参数

Tab. 2 Parameters of the frame structure

楼层	质量/kg	刚度/(kN·m ⁻¹)
1	5 000	2 373
2~9	4 500	2 862
10	4 000	2 862

3.2 结果分析

应用遗传算法优化过程中,种群初始规模设为 30,变异概率为 0.2,进化代数 为 50 代. 优化布置结果如表 3 所示,1 代表布置轨道式 NSD,0 代表未布置. 组合 1~5 的目标函数值依次为 0.299 6、0.378 9、0.422 3、0.482 3、0.488 3. 可以看出,随着优化加权系数变化,阻尼器布置有相对稳定的趋势:加速度优化权重越大,阻尼器布置的

楼层越靠下;位移优化权重越大,阻尼器布置的楼层越靠上.

表 3 优化布置结果

Tab. 3 Optimal placement results

楼层	优化结果				
	组合 1	组合 2	组合 3	组合 4	组合 5
1	1	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0
3	1	1	1	0	0
4	1	1	1	1	0
5	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1
7	0	0	1	1	1
8	0	0	1	1	0
9	0	0	0	0	1
10	0	0	0	0	0

5 种优化方案下,各层层间位移峰值与传统阻尼器控制下结构响应对比如图 4 所示. 组合 1 和组合 2 在结构中下部的层间位移高于传统阻尼器的控制结果,组合 3/4/5 在结构上部的层间位移大于传统阻尼器,不难看出,层间位移增大的楼层与负刚度装置的布置楼层一致,符合负刚度装置会弱化结构导致层间位移增大的规律^[13]. 如图 5 所示,结构加速度反应包络图随 α 降低而向右扩张,采用相近的加权系数组合会得到相近的优化结果,表明目标函数设计合理,能够有效调节优化侧重点.

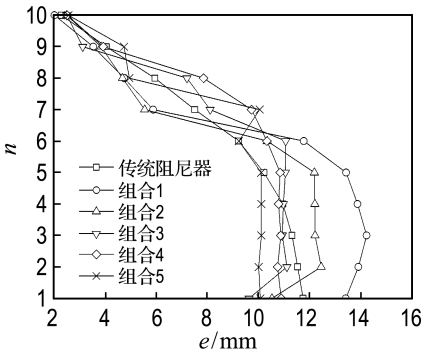


图 4 各层层间位移峰值

Fig. 4 Peak story drift of each floor

受控结构在各种控制方案下反应峰值和减震率如表 4 所示,当 $\alpha>\beta$ 时,结构加速度反应峰值

得到极大控制,代价是层间位移反应峰值比采用传统阻尼器控制时更大;当 $\alpha\leq\beta$ 时,结构位移反应峰值比采用传统阻尼器时更小,尤其是组合 3 和组合 4 的优化结果,结构加速度反应峰值和位移反应峰值相较传统阻尼器均有较大程度降低.可见,负刚度装置增大结构位移反应的问题能够通过优化布置有效解决.

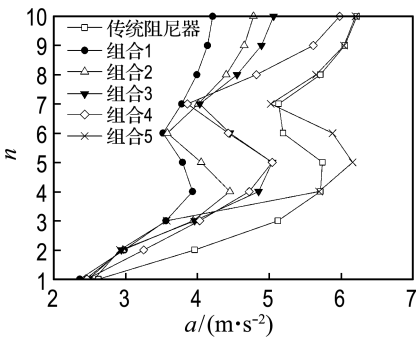


图 5 各层加速度峰值

Fig. 5 Peak acceleration of each floor

表 4 受控结构减震效果

Tab. 4 Seismic response reduction of the controlled structure

组合	加速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	加速度 减震率/%	位移/ mm	位移 减震率/%
无控	17.32	—	20.13	—
阻尼器	6.22	64.1	11.75	41.6
1	4.21	75.7	14.23	29.3
2	4.78	72.4	12.46	38.1
3	5.06	70.8	11.12	44.8
4	5.98	65.5	10.89	45.9
5	6.20	64.2	10.12	49.7

4 结 论

- (1)高层结构中负刚度装置应布置在结构中下部,且应连续布置.
- (2)组合加权系数相等,即目标函数为 $Z=0.5\frac{a_{\max}}{a_0}+0.5\frac{x_{\max}}{x_0}$ 时,优化结果对加速度和层间位移反应控制都优于传统阻尼器减震,能够兼顾控制的安全性与舒适性.
- (3)除了应用于隔震结构控制,负刚度装置也可以有效控制高层结构的地震反应,通过优化布

置可以在保证控制效果的前提下克服其增加位移反应的缺点.

参考文献:

[1] PASALA D, SARLIS A, NAGARAJAIAH S, *et al.* Adaptive negative stiffness: new structural modification approach for seismic protection [J]. **Journal of Structural Engineering**, 2013, **139**(7): 1112-1123.

[2] IEMURA H, PRADONO M H. Advances in the development of pseudo-negative-stiffness dampers for seismic response control [J]. **Structural Control & Health Monitoring**, 2009, **16**(7/8):784-799.

[3] IEMURA H, IGARASHI A, PRADONO M H, *et al.* Negative stiffness friction damping for seismically isolated structures [J]. **Structural Control & Health Monitoring**, 2006, **13**(2/3):775-791.

[4] 段玉新. 磁致伸缩负刚度阻尼器设计研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.

DUAN Yuxin. The research on the design of the magnetostrictive negative stiffness damper [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2011. (in Chinese)

[5] SARLIS A A, PASALA D T, CONSTANTINOU M C, *et al.* Negative stiffness device for seismic protection of structures [J]. **Journal of Structural Engineering**, 2013, **139**(7):1124-1133.

[6] IEMURA H, PRADONO M H. Application of pseudo-negative stiffness control to the benchmark cable-stayed bridge [J]. **Structural Control & Health Monitoring**, 2003, **10**(3/4):187-203.

[7] ATTARY N, SYMANS M, NAGARAJAIAH S, *et al.* Experimental shake table testing of an adaptive passive negative stiffness device within a highway bridge model [J]. **Earthquake Spectra**, 2015, **31**(4):2163-2194.

[8] VITI S, CIMELLARO G P, REINHORN A M. Retrofit of a hospital through strength reduction and enhanced damping [J]. **Smart Structures and Systems**, 2006, **2**(4):339-355.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

[10] 谢礼立,翟长海. 最不利设计地震动研究[J]. 地震学报, 2003, **25**(3):250-261.

XIE Lili, ZHAI Changhai. Study on the severest real ground motion for seismic design and analysis [J]. **Acta Seismologica Sinica**, 2003, **25**(3):250-261. (in Chinese)

[11] 纪 晗,熊世树,袁 涌. 基于负刚度原理的结构隔震效果分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, **38**(2):76-79.

JI Han, XIONG Shishu, YUAN Yong. Analyzing vibration isolation effect of structures using negative stiffness principle [J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)**, 2010, **38**(2):76-79. (in Chinese)

[12] 付 杰. 负刚度磁流变阻尼器减震系统的理论与实验研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2014.

FU Jie. Theoretical and experimental studies on vibration control system of negative stiffness magnetorheological damper [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)

[13] PASALA D T R, SALLIS A A, REINHORN A M, *et al*. Apparent weakening in SDOF yielding structures using a negative stiffness device: Experimental and analytical study [J]. **Journal of Structural Engineering**, 2015, **141**(4):04014130.

Optimal placement of negative stiffness device using genetic algorithm

SUN Tong¹, LI Hongnan^{*1,2}, Satish Nagarajaiah³

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;
3. Department of Civil and Environmental Engineering, Rice University, Houston 77005, USA)

Abstract: A mathematic model of optimal placement for a new type of curve-based negative stiffness device (NSD) is put forward based on genetic algorithm (GA). This model gives consideration to both the advantage of NSD in acceleration control and the disadvantage in displacement control. Five combination modes of weighting coefficients are given to investigate the control effects in different optimization strategies. A 10-story structure is used numerically as an example. Optimum combination of weighting coefficients is found by comparing the control effect of NSD and traditional damper. Basic principles of the optimal placement of NSD are presented by comparing five combination modes of weighting coefficients.

Key words: negative stiffness device; genetic algorithm; optimal placement; high-rise structure