

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231026002

基于梯度投影法的高层建筑附加粘滞阻尼参数优化研究*

孙宝印¹, 曾祯睿¹, 孙天舒², 张喆³

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 海南大学土木建筑工程学院, 海南海口 570228;
3. 南通理工学院土木工程学院, 江苏 南通 226002)

摘要: 基于有限元时程分析方法是高层结构振动控制优化设计的主要手段之一, 但因其计算量大、耗时严重, 应用于实际工程具有一定的局限性。为了克服这一缺陷, 提出了一种高效的基于梯度投影法的粘滞阻尼器优化设计策略。考虑到地震动的不确定性, 该策略以多条地震动作用结构得到的最大均值层间位移角为目标函数, 限制总阻尼系数及各层阻尼系数上限值, 通过振型分解法得到结构的层间位移响应, 利用梯度投影法进行阻尼器参数优化。在8度多遇地震作用下, 分别采用振型分解法和有限元时程分析方法对6层剪切模型和15层平面框架结构进行粘滞阻尼器优化设计, 模拟结果表明: 两种方法得到的阻尼器优化参数基本一致。同时, 对6层剪切模型进行敏感性分析及约束条件的参数分析, 进一步验证了该优化策略的有效性。最后, 将振型分解法得到的优化方案应用于15层平面框架, 对无附加阻尼、三种工况优化前和优化后的结构进行弹塑性分析, 并选取一条典型地震动对三种工况优化前和优化后的结构进行耗能分析, 结果表明: 该方案在8度罕遇地震作用下仍可靠有效; 通过阻尼器参数优化, 可进一步降低结构最大层间位移角以及提高结构附加阻尼耗能占比。

关键词: 振动控制; 阻尼优化; 梯度投影法; 振型分解; 时程分析

中图分类号: TU973.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0446-12

Study on the Optimization of Additional Viscous Damping Parameters for High-rise Buildings Based on Gradient Projection Method

SUN Baoyin¹, ZENG Zhenrui¹, SUN Tianshu², ZHANG Zhe³

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China;
3. College of Civil Engineering, Nantong Institute of Technology, Nantong 226002, China)

Abstract: Time-history analysis based on finite element models is a primary method for vibration control optimization design of high-rise structures. However, its application in practical engineering is limited due to high computational costs and time-consuming processes. To address this, this study proposes an efficient viscous damper optimization design based on the gradient projection method. Con-

* 收稿日期: 2023-10-26; 修回日期: 2024-02-28

基金项目: 江苏省自然科学基金青年项目(BK20210371)、中央高校基本科研业务费专项资金(B230201040)、国家自然科学基金青年项目(52108133)资助

作者简介: 孙宝印(1989—), 男, 副教授, 博士。主要从事建筑结构非线性分析方面的研究。E-mail: sunbaoyin@hhu.edu.cn

通信作者: 张喆(1983—), 男, 教授, 博士。主要从事结构阻尼器设计与分析方面的研究。E-mail: 20239078@ntit.edu.cn

sidering the uncertainty of earthquake ground motions, the strategy used the maximum mean inter-story drift angle obtained from multiple ground motions as the objective function, with constraints on the total damping coefficient and the upper limits of damping coefficients for each story. The inter-story drift response was obtained via the modal decomposition method, and damper parameters were optimized using the gradient projection method. Under frequent earthquakes of 8-degree intensity, a 6-story shear model and a 15-story planar frame structure were analyzed using both the modal decomposition method and finite element time-history analysis for viscous damper optimization. The simulation results showed that the optimized damper parameters obtained from the two methods were nearly identical. Additionally, sensitivity analysis and parameter analysis of constraint conditions were conducted on the 6-story shear model to further validate the effectiveness of the optimization strategy. Finally, the optimized scheme obtained from the modal decomposition method was applied to the 15-story planar frame. Elastic-plastic analyses were conducted for three cases: the structure without additional damping, and the structures before and after optimization under three working conditions. A typical earthquake ground motion is selected for energy dissipation analysis of the structures before and after optimization under the three conditions. The results confirmed the strategy's reliability under rare earthquakes (8-degree intensity). The optimized damper parameters can significantly reduce the maximum inter-story drift angle and increase the proportion of energy dissipated by additional damping.

Keywords: vibration control; damping optimization; gradient projection method; modal decomposition; time-history analysis

0 引言

据震害调研,地震引起建筑物倒塌破坏,造成的人员伤亡和财产损失尤为严重,因此,有必要针对结构进行抗震设计,提高结构的抗震性能,降低地震造成的损伤破坏。传统的结构抗震设计,往往是通过增强结构自身的强度和刚度来抵抗外荷载,需要较高的经济成本。1972年,J.T. Yao^[1]提出结构振动控制的概念,通过添加控制装置,改变结构的动力特性,突破了传统的消极抗震设计。根据被控系统是否存在外部能量输入,结构振动控制分为:被动控制、主动控制、半主动控制和混合控制^[2]。结构被动控制因无须能量输入、成本较低且易于实现而广泛应用于实际工程。被动控制措施包括消能减震^[3-6]、调谐阻尼器^[7-8]以及基础隔震^[9-10]等。其中,常用的消能减震阻尼器有粘滞阻尼器^[3]、粘弹性阻尼器^[4]、摩擦阻尼器^[5]以及金属屈服阻尼器^[6]等;调谐阻尼器有调谐质量阻尼器^[7]和调谐液体阻尼器^[8]等;基础隔震包括叠层橡胶支座^[9]、带铅芯叠层橡胶支座^[9]和滑动摩擦隔震支座^[10]等。

粘滞阻尼器通过增加阻尼比来提高结构的阻尼耗能,以降低结构的动力响应,在实际工程中应用较为广泛^[11]。因此,针对粘滞阻尼器的优化设

计,有大批学者展开相关研究。例如:I. Takewaki^[12]研究了剪切结构总的附加阻尼系数固定时,优化粘滞阻尼器使结构一阶自振频率对应的传递函数幅值之和最小。H. Akehashi等^[13]研究了剪切结构在临界双脉冲地震波作用下的粘滞阻尼器优化问题。乔峰等^[14]提出了一种基于实模态空间解耦的极点配置算法,研究了钢框架结构附加粘滞阻尼器的优化设计问题。S. Moradpour等^[15]提出了一种基于位移的设计方法,采用分布式遗传算法,优化了钢框架的粘滞阻尼器的布设位置。E. Parciannello等^[16]研究了钢筋混凝土框架结构的附加粘滞阻尼器优化问题。P.T. Chan等^[17]采用了一种单元交换的优化方法,研究了钢筋混凝土框架结构中粘滞阻尼器的位置优化问题。阻尼器优化设计包括三要素,即目标函数、参数变量和约束条件。目标函数通常是对结构性能的要求,比如:各层最大层间位移之和^[13]、附加阻尼比^[18]等。常见的优化参数有阻尼系数^[15,19]、布设位置^[13,17,20]等。约束条件一般可分为输入和输出两类约束^[17],其中,输入约束有阻尼器的总成本^[13,20]、特定位置的阻尼限值^[15,20]等,输出约束可为结构的性能指标,比如:最大层间位移角^[21]、最大楼层加速度^[21]等。

除了上述三要素,优化算法也是粘滞阻尼器优化设计过程中不可或缺的环节。优化算法可分为

启发式^[22-23]、分析式^[21,24]和进化式^[25]。启发式算法有顺序搜索法^[22]、楼层剪切力比例分布^[23]等。分析式算法包括最优控制理论^[24]、梯度法^[21]等。进化式主要采用遗传算法^[25]，通过模拟自然进化过程搜索最优解。梯度法是优化设计中最常用的方法之一，但在处理有约束优化问题时稍显能力不足。于是，有学者引入拉格朗日乘子，构建拉格朗日函数，将有约束问题转化为无约束问题。然而，拉格朗日乘子为引入的未知量，采用不同的初始化方法对优化结果可能产生一定的影响。相比之下，梯度投影法无须引入拉格朗日乘子，在约束边界处对负梯度方向进行投影处理，修正搜索方向，可有效解决有约束优化问题。

在上述优化设计过程中，结构动力响应分析方法主要有振型分解法^[26]、频域法^[12,20]和时域法^[14,16]。有限元时程分析方法可以处理阻尼器和结构的非线性问题，是结构阻尼器优化设计中最常用的时域法之一。然而，基于有限元时程分析方法的高层建筑阻尼器优化设计效率极低。一方面，在阻尼器优化设计过程中，需要重复计算不同阻尼参数下的结构响应；另一方面，考虑到地震动的不确定性，需要选取多条地震波进行结构响应分析。

于是，本文提出一种高效的基于梯度投影法的粘滞阻尼器优化设计策略。为了考虑地震荷载的随机性，选取多条地震波，将所有地震动作用下的结构最大均值层间位移角作为目标函数，限制总的粘滞阻尼系数以及各层阻尼器阻尼上限值，优化各层阻尼器参数使得目标函数最小。在小震下采用振型分解法得到结构的层间位移响应，并基于梯度投影法得到阻尼器优化参数。进一步，通过有限元时程分析方法来验证振型分解法的准确性。最后，将小震下振型分解法得到的阻尼器优化设计参数应用于结构弹塑性分析，验证其在大震作用下的有效性。

1 基本理论

1.1 振型分解法

在地震作用下， n 自由度结构运动方程为：

$$M\ddot{\mathbf{u}} + C\dot{\mathbf{u}} + K\mathbf{u} = -M\mathbf{e}\ddot{u}_g \quad (1)$$

式中， M 、 C 及 K 分别为结构的质量、阻尼及刚度矩阵； \mathbf{u} 为结构位移列向量； \mathbf{e} 为影响列向量； \ddot{u}_g 为地面加速度标量。

通过振型分解，结构位移 \mathbf{u} 可表示为：

$$\mathbf{u} = \Phi \mathbf{q} = \sum_{i=1}^n \Phi_i q_i \quad (2)$$

式中， Φ 和 \mathbf{q} 分别为振型矩阵和振型坐标列向量； Φ_i 和 q_i 分别为第 i 阶振型的列向量和振型坐标。

将式(2)代入式(1)，并在式(1)等号两端左乘 Φ^T 得到：

$$\bar{M}\ddot{\mathbf{q}} + \bar{C}\dot{\mathbf{q}} + \bar{K}\mathbf{q} = -\bar{\mathbf{p}} \quad (3)$$

式中， $\bar{M} = \Phi^T M \Phi$ ； $\bar{C} = \Phi^T C \Phi$ ； $\bar{K} = \Phi^T K \Phi$ 和 $\bar{\mathbf{p}} = \Phi^T M \mathbf{e} \ddot{u}_g$ 。

采用Rayleigh阻尼，并根据质量矩阵 M 和刚度矩阵 K 的正交性，式(3)中第 i 行满足：

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -\gamma_i \ddot{u}_g \quad (4)$$

式中， $\omega_i = \sqrt{\bar{K}_i / \bar{M}_i}$ 、 $\zeta_i = \bar{C}_i / (2\bar{C}_i \omega_i)$ 和 $\gamma_i = \Phi_i^T M \mathbf{e} / \bar{M}_i$ 分别为第 i 振型的圆频率、阻尼比和振型参与系数； \bar{M}_i 、 \bar{C}_i 和 \bar{K}_i 分别是 \bar{M} 、 \bar{C} 和 \bar{K} 的第 i 个对角元素。根据Rayleigh阻尼， $\bar{C}_i = a_0 \bar{M}_i + a_1 \bar{K}_i$ ， a_0 和 a_1 分别是质量和刚度的阻尼系数。下文将通过逐步积分法计算振型坐标 q_i 。

1.2 附加阻尼比

为了简化说明，以文献[19]中的 N 层剪切模型为例，第 j 层附加阻尼器产生的结构附加外力为：

$$\mathbf{f}_{adj} = -c_j C_j \dot{\mathbf{u}} \quad (5)$$

式中， c_j 表示第 j 层粘滞阻尼器的阻尼系数； C_j 表示第 j 层附加阻尼器的位置矩阵。

底层和其他楼层的 C_j 分别表示为：

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, C_j = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ & 1 & -1 & \\ & -1 & 1 & \\ & & & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

后者非零行分别为第 $j-1$ 和第 j 行。

附加阻尼器后，结构的运动方程可改写成：

$$M\ddot{\mathbf{u}} + (C + C_{ad})\dot{\mathbf{u}} + K\mathbf{u} = -M\mathbf{e}\ddot{u}_g \quad (7)$$

式中， $C_{ad} = \sum_{j=1}^N c_j C_j$ 为结构附加阻尼矩阵。

假设式(7)中附加阻尼矩阵也满足正交性，即

$$\frac{\Phi_i^T C_{ad} \Phi_j}{\Phi_i^T M \Phi_j} = \begin{cases} 2\zeta_{adj} \omega_i & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (8)$$

则第 i 阶振型的附加阻尼比可表示为：

$$\zeta_{adj} = \frac{1}{2\omega_i} \sum_{j=1}^N \frac{c_j \Phi_i^T C_{adj} \Phi_i}{\Phi_i^T M \Phi_i} \quad (9)$$

进而，式(4)可以改写为：

$$\ddot{q}_i + 2(\zeta_i + \zeta_{adj}) \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -\gamma_i \ddot{u}_g \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可见,结构附加阻尼器之后,振型坐标 q_i 与 c 有关,即 $q_i = q_i(c)$ 。

2 阻尼器优化设计

2.1 优化问题

仍以上述 N 层剪切模型为例说明,根据振型分解法,第 k 层层间位移角可表示为:

$$\theta_k(c) = \frac{u_k - u_{k-1}}{h_k} = \sum_{i=1}^N \frac{\phi_{ki} - \phi_{(k-1)i}}{h_k} q_i(c) \quad (11)$$

式中, u_{k-1} 和 u_k 分别表示第 $k-1$ 和 k 层水平位移; $\phi_{(k-1)i}$ 和 ϕ_{ki} 分别表示第 i 阶振型第 $k-1$ 和 k 个分量, h_k 为第 k 层层高($k=1, \dots, N$)。

则结构最大层间位移角为:

$$MIDR = \max_{1 \leq k \leq N} |\theta_k| \quad (12)$$

考虑到地震动具有随机性,将多条地震动作用下得到的结构最大均值层间位移角作为目标函数,并限制总成本和各层阻尼器最大阻尼系数,优化各层阻尼器参数,使得目标函数最小。上述优化问题可表示为:

$$\begin{aligned} \min f(c) &= \max_{1 \leq k \leq N} \frac{\sum_{l=1}^m |\theta_k^l|}{m} \\ \text{s.t. } &0 \leq c_j \leq \bar{c}_j \\ &\sum_{j=1}^N c_j = C_w \end{aligned} \quad (13)$$

式中, m 表示选取的地震波条数; θ_k^l 为第 l 条地震波作用下第 k 层的层间位移角; \bar{c}_j 表示第 j 层最大附加阻尼系数; C_w 表示总的阻尼系数,该系数反应附加阻尼器的成本。

2.2 梯度投影法

针对上述有约束优化问题,本文采用梯度投影法进行优化求解。首先,将式(13)中约束条件改写为:

$$\begin{aligned} Ac &\geq b \\ E^T c &= C_w \end{aligned} \quad (14)$$

式中, A 和 b 分别为不等式约束的系数矩阵和列向量; E 为等式约束的列向量。

对于两个设计变量的优化问题(即 $N=2$),式(13)中约束条件围成的区域即为图1中黑色虚线段,此时, A 、 c 、 b 和 E 分别表示为:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, c = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} -\bar{c}_1 \\ -\bar{c}_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

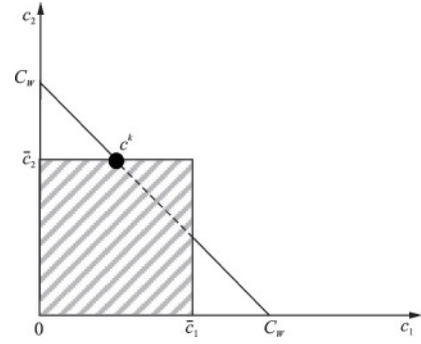


图1 设计变量的约束边界示意

Fig.1 Schematic diagram of constrained boundary for design variables

针对上述优化问题,第 k 次迭代满足:

$$c^{k+1} = c^k + \alpha_k d^k \quad (16)$$

式中, d^k 和 α_k 分别表示第 k 次迭代的搜索方向和步长。

当设计变量在约束边界以内,搜索方向即为负梯度方向;若位于边界处,则需要对搜索方向进行投影处理,以强制满足约束条件,详见下文。

2.3 计算流程

梯度投影法的算法流程如图2所示,具体计算步骤如下:

步骤一:令 $k=1$,初始化 c^k ;

步骤二:计算梯度 $\nabla f(c^k)$,将 A 和 b 分解成

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix},$$

使得 $A_1 c = b_1$ 和 $A_2 c > b_2$ 。例如:图1中 c^k 处,

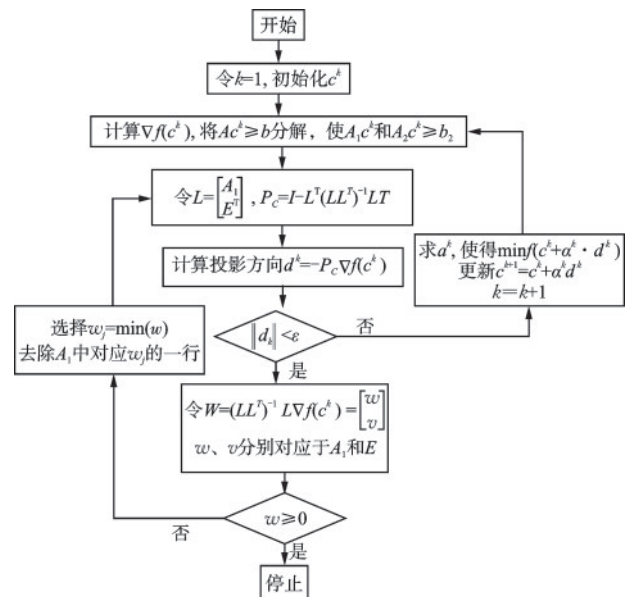


图2 梯度投影法分析流程

Fig.2 Analytical flow chart of the gradient projection method

A_1, b_1, A_2 和 b_2 分别表示为:

$$A_1 = [0 \quad -1], b_1 = \{-\bar{c}_2\},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, b_2 = \begin{bmatrix} -\bar{c}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

步骤三: 令 $L = \begin{bmatrix} A_1 \\ E^T \end{bmatrix}$, 则投影算子 $P_c = I -$

$L(LL^T)^{-1}L$ 。这里 L 矩阵表示在 c^k 处与边界约束有关的系数矩阵。

步骤四: 令搜索方向 $d^k = -P_c \nabla f(c^k)$, 若 $\|d^k\| < \epsilon$ (ϵ 为足够小的变量), 则进行下一步; 否则, 跳至步骤六;

步骤五: 令 $W = (LL^T)^{-1}L \nabla f(c^k) = \begin{bmatrix} w \\ v \end{bmatrix}$ 。

式中, w, v 分别对应于 A_1 和 E^T 。

如果 $w \geq 0$, 停止计算, 此时 c^k 为满足一阶最优性条件 $K-T^{[27]}$ 的解。若 w 含有负分量, 修正 A_1 , 选择其中一个负分量 (本文选取 $w_j = \min w$), 删掉该负分量在矩阵 A_1 中对应的行, 返回步骤三。

步骤六: 求解步长 α_k , 使得:

$$\min f(c^k + \alpha_k d^k)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq \alpha_k \leq \alpha_{\max}$$

$$\text{式中, } \alpha_{\max} \text{ 满足 } \alpha_{\max} \begin{cases} \min \left\{ \frac{\hat{b}_i}{\hat{d}_i} \hat{d}_i < 0 \right\} \\ \infty \end{cases} \hat{d} \geq 0 \text{。其中, } \hat{d} \geq 0$$

$$\hat{b} = b_2 - A_2 c^k, \hat{d} = A_2 d^k。$$

本文采用一维搜索的黄金分割法^[27]得到 α_k , 代入式(16)得到 c^{k+1} , 并令 $k=k+1$, 返回步骤二。

3 地震动的选取

根据《建筑抗震设计规范》^[28], 结构抗震设防烈度为 8 度、场地类型为 II 类以及设计分组为第一组, 从美国 PEER 地震记录数据库中选择 25 条天然地震波 (表 1)。将所有地震动峰值加速度 (PGA) 调至 70 Gal, 在阻尼比为 5% 时, 设计反应谱、所选地震动反应谱及地震动平均反应谱如图 3 所示。可见, 所选地震动平均反应谱与设计反应谱吻合较好。

表 1 25 条所选地震动信息

Table 1 Information of 25 selected earthquake ground motions

序号	地震名称	震级	年份	记录台站	地震波分量	PGA/g
1	San Fernando	6.6	1971	Santa Felita Dam (Outlet)	FSD172	0.15
2	San Fernando	6.6	1971	Whittier Narrows Dam	WND143	0.08
3	Tabas_Iran	7.4	1978	Dayhook	DAY-L1	0.32
4	Tabas_Iran	7.4	1978	Ferdows	FER-L1	0.09
5	Imperial Valley-06	6.5	1979	El Centro Array #11	H-E11140	0.37
6	Imperial Valley-06	6.5	1979	El Centro Array #5	H-E05140	0.33
7	Superstition Hills-02	6.5	1987	El Centro Imp. Co. Cent	B-ICC000	0.36
8	Superstition Hills-02	6.5	1987	Imperial Valley Wildlife Liquefaction Array	B-IVW090	0.13
9	Loma Prieta	6.9	1989	Gilroy Array #3	G03000	0.54
10	Loma Prieta	6.9	1989	Salinas - John & Work	SJW160	0.09
11	Cape Mendocino	7.0	1992	Cape Mendocino	CPM000	1.49
12	Landers	7.3	1992	Lucerne	LCN260	0.65
13	Kocaeli_Turkey	7.5	1999	Arcelik	ARE000	0.16
14	Kocaeli_Turkey	7.5	1999	Duzce	DZC180	0.22
15	Chi-Chi_Taiwan	7.6	1999	TCU076	TCU076-E	0.28
16	Chi-Chi_Taiwan	7.6	1999	TCU089	TCU089-E	0.29
17	Duzce_Turkey	7.1	1999	Duzce	DZC180	0.28
18	Duzce_Turkey	7.1	1999	Sakarya	SKR090	0.02
19	Landers	7.3	1992	Big Bear Lake-Civic Center	BLC360	0.17
20	Iwate_Japan	6.9	2008	Mizusawaku Interior O ganecho	44B71NS	0.36
21	Iwate_Japan	6.9	2008	Kurihara City	48A61NS	0.40
22	El Mayor-Cucapah_Mexico	7.2	2010	CERRO PRIETO GEOTHERMAL	GEO000	0.24
23	El Mayor-Cucapah_Mexico	7.2	2010	RIITO	RII000	0.40
24	Darfield_New Zealand	7.0	2010	DSLCL	DSLCLN27W	0.26
25	Darfield_New Zealand	7.0	2010	LINC	LINCIN23E	0.43

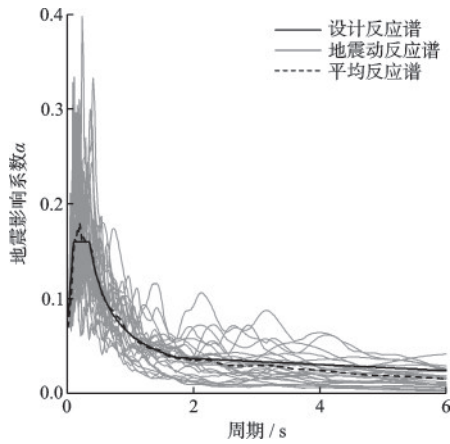


图3 设计反应谱和所选地震动反应谱

Fig.3 Design response spectrum and response spectrum of selected earthquake ground motions

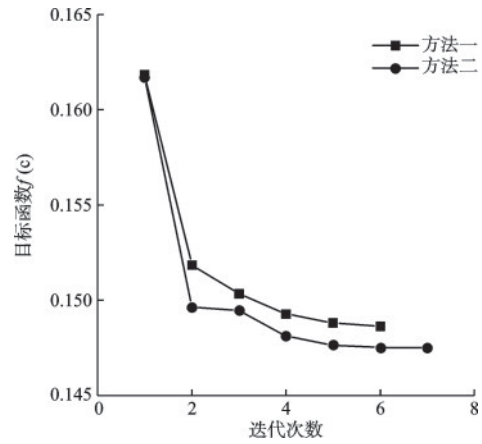


图4 不同方法得到的目标函数曲线

Fig.4 Objective function curves obtained under different methods

4 数值算例

4.1 6层剪切模型

4.1.1 结构参数

以文献[19]中的6层剪切模型为例,其前6阶无阻尼周期和振型参与质量系数见表2。假设总的阻尼系数 C_w 和各层附加阻尼系数上限 \bar{c}_j 分别为 1.20×10^6 和 $0.45 \times 10^6 \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。不作特别说明的话,下文所有分析中附加阻尼系数在优化前均沿楼层均匀分布。在8度多遇地震(即PGA为70 Gal)作用下,分别采用振型分解法(简称方法一)和有限元时程分析方法(简称方法二)进行结构响应计算,假设前两阶振型阻尼比为2%并计算得到Rayleigh阻尼系数 a_0 和 a_1 。目标函数及附加阻尼系数的迭代变化曲线分别如图4~5所示,优化前后结构均值层间位移角包络线如图6所示。附加阻尼系数优化结果见表3,优化前后附加阻尼比见表4。

通过上述分析结果可以看出:根据梯度投影法,分别采用振型分解法和有限元时程分析方法得

表2 前6阶周期和振型参与质量系数

Table 2 Natural periods and modal participating mass ratios for the first six orders

阶数	1	2	3	4	5	6
周期/s	1.00	0.34	0.21	0.16	0.14	0.12
振型参与质量系数/%	86.9	8.9	2.7	1.0	0.4	0.1

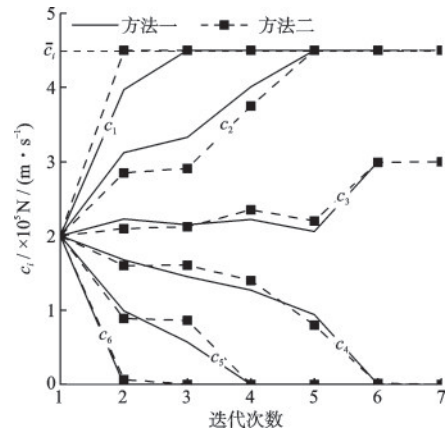


图5 不同方法得到的各层附加阻尼系数曲线

Fig.5 Curves of additional damping coefficients per floor obtained under different methods

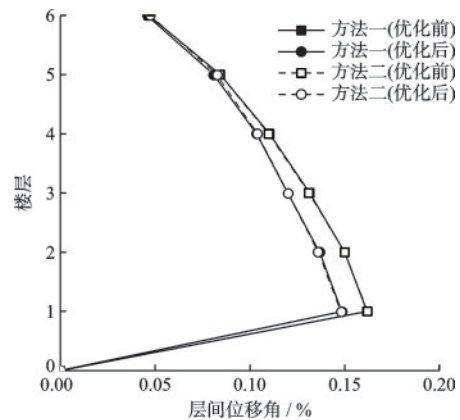


图6 不同方法得到的均值层间位移角包络线

Fig.6 Envelope curves of mean inter-story drift angles obtained under different methods

到的优化结果基本一致。尽管计算方法的不同会引起目标函数的些许差异,但对优化后的附加阻尼系数分布影响较小。

表3 不同方法得到的附加阻尼系数

Table 3 Additional damping coefficients obtained under different methods

附加阻尼系数	$c_1/\times 10^5$ N/(m·s ⁻¹)	$c_2/\times 10^5$ N/(m·s ⁻¹)	$c_3/\times 10^5$ N/(m·s ⁻¹)	$c_4/\times 10^5$ N/(m·s ⁻¹)	$c_5/\times 10^5$ N/(m·s ⁻¹)	$c_6/\times 10^5$ N/(m·s ⁻¹)
方法一	4.5	4.5	3.0	0.0	0.0	0.0
方法二	4.5	4.5	3.0	0.0	0.0	0.0

表4 优化前后的前6阶振型附加阻尼比

Table 4 Additional modal damping ratio for the first six orders: pre- vs. post-optimization

附加阻尼比	ζ_{ad1}	ζ_{ad2}	ζ_{ad3}	ζ_{ad4}	ζ_{ad5}	ζ_{ad6}
优化前	0.029	0.086	0.137	0.181	0.214	0.234
优化后	0.047	0.067	0.132	0.158	0.221	0.175

4.1.2 各层附加阻尼系数敏感性分析

将任一层附加阻尼系数 c_j 从 2.0×10^5 N/(m·s⁻¹) 变化至 4.5×10^5 N/(m·s⁻¹), 其它层附加阻尼系数保持 2.0×10^5 N/(m·s⁻¹) 不变, 得目标函数的偏导曲线如图7所示。显然, 目标函数对前三层附加阻尼系数较为敏感, 尤其是第一层附加阻尼系数对目标函数的影响最大。随着各层附加阻尼系数增大, 目标

函数对附加阻尼系数的敏感性降低, 特别是第一层的降低幅度最大。通过目标函数对各层附加阻尼系数敏感性的分析, 进一步验证了图5和表3中的分析结果, 即增加前三层的附加阻尼系数可以有效控制结构的最大层间位移角。

4.1.3 附加阻尼系数上限及总成本参数分析

最后, 研究附加阻尼系数上限以及总的阻尼系数影响。首先, $C_w = 1.20 \times 10^6$ N/(m·s⁻¹) 保持不变, 改变各层附加阻尼系数上限值 \bar{c}_j , 分别取值为 1.20×10^6 、 0.80×10^6 、 0.45×10^6 、 0.35×10^6 、 0.25×10^6 、 0.21×10^6 N/(m·s⁻¹)。优化后, 附加阻尼系数见表5, 结构均值层间位移角包络线如图8所示, 以及前6阶振型附加阻尼比见表6。

保持各层附加阻尼系数上限值不变, 即 \bar{c}_j 为 0.45×10^6 N/(m·s⁻¹), 改变总阻尼系数 C_w 取值, 分别为 0.30×10^6 、 0.60×10^6 、 1.20×10^6 、 1.50×10^6 、 2.00×10^6 、 2.70×10^6 N/(m·s⁻¹)。优化后, 不同的总阻尼系数下, 各层附加阻尼系数见表7, 结构均值层间位移角包络线如图9所示, 前6阶振型附加阻尼比见表8。

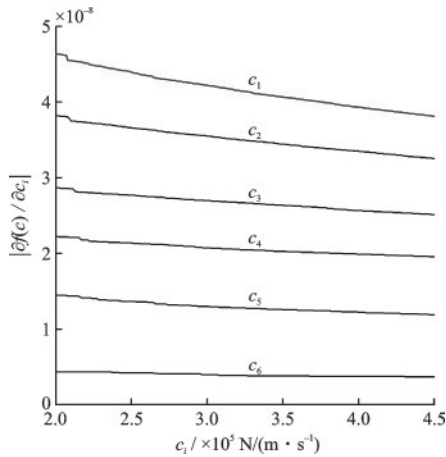


图7 目标函数对各层附加阻尼系数偏导

Fig.7 Partial derivatives of the objective function with respect to additional damping coefficients per floor

表5 不同上限值 \bar{c}_j 得到的附加阻尼系数

Table 5 Optimized additional damping coefficients under different upper limits \bar{c}_j

$\bar{c}_j/\times 10^5$ N/(m·s ⁻¹)	$c_1/\times 10^5$ N/(m·s ⁻¹)	$c_2/\times 10^5$ N/(m·s ⁻¹)	$c_3/\times 10^5$ N/(m·s ⁻¹)	$c_4/\times 10^5$ N/(m·s ⁻¹)	$c_5/\times 10^5$ N/(m·s ⁻¹)	$c_6/\times 10^5$ N/(m·s ⁻¹)
12.0	12.0	0	0	0	0	0
8.0	8.0	4.0	0	0	0	0
4.5	4.5	4.5	3.0	0	0	0
3.5	3.5	3.5	3.5	1.5	0	0
2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	0
2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	1.5

表 6 不同上限值 \bar{c}_j 得到的前 6 阶振型附加阻尼比

Table 6 Optimized additional modal damping ratio for the first six orders under different upper limits \bar{c}_j

$\bar{c}_j / \times 10^5 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	ζ_{ad1}	ζ_{ad2}	ζ_{ad3}	ζ_{ad4}	ζ_{ad5}	ζ_{ad6}
12.00	0.053	0.138	0.171	0.147	0.085	0.025
8.00	0.051	0.103	0.119	0.173	0.186	0.080
4.50	0.047	0.067	0.132	0.158	0.221	0.175
3.50	0.043	0.066	0.133	0.166	0.192	0.226
2.50	0.035	0.086	0.120	0.156	0.197	0.261
2.10	0.030	0.086	0.133	0.173	0.211	0.241

表 7 不同总阻尼系数 C_w 得到的附加阻尼系数

Table 7 Optimized additional damping coefficients under different total damping coefficients C_w

$C_w / \times 10^5$	$c_1 / \times 10^5$	$c_2 / \times 10^5$	$c_3 / \times 10^5$	$c_4 / \times 10^5$	$c_5 / \times 10^5$	$c_6 / \times 10^5$
$\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
3.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6.00	4.50	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00
12.00	4.50	4.50	3.00	0.00	0.00	0.00
15.00	4.50	4.50	4.50	1.50	0.00	0.00
20.00	4.50	4.50	4.50	4.50	2.00	0.00
25.00	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	2.50

表 8 不同 C_w 得到的前 6 阶振型附加阻尼比

Table 8 Optimized additional damping ratios for the first six orders under different total damping coefficients C_w

$C_w / \times 10^5 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	ζ_{ad1}	ζ_{ad2}	ζ_{ad3}	ζ_{ad4}	ζ_{ad5}	ζ_{ad6}
3.00	0.013	0.035	0.043	0.037	0.021	0.006
6.00	0.026	0.056	0.066	0.083	0.081	0.033
12.00	0.047	0.067	0.132	0.158	0.221	0.175
15.00	0.054	0.081	0.170	0.203	0.246	0.276
20.00	0.062	0.134	0.202	0.279	0.309	0.431
25.00	0.065	0.181	0.271	0.352	0.436	0.512

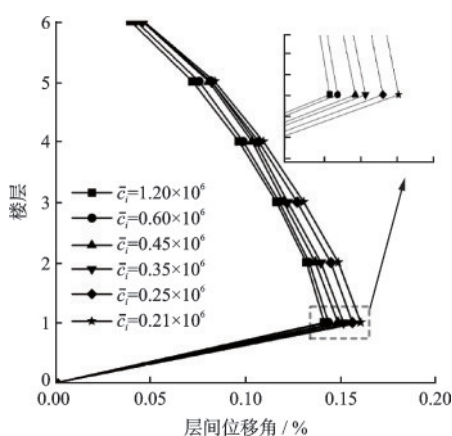


图 8 不同上限值 \bar{c}_j 得到的均值层间位移角包络线

Fig.8 Envelope curves of mean inter-story drift angles under different upper limits \bar{c}_j

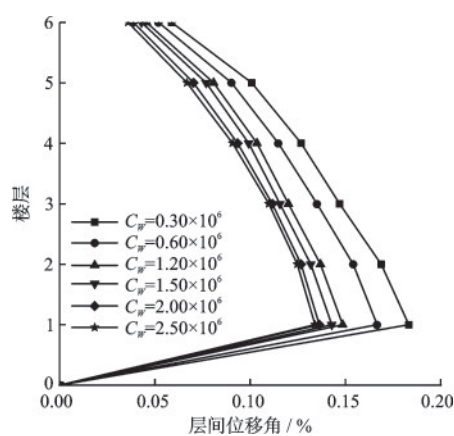


图 9 不同 C_w 得到的均值层间位移角包络线

Fig.9 Envelope curves of mean inter-story drift angles under different total damping coefficients C_w

在 8 度多遇地震下, 6 层纯剪切模型分析结果表明: 总阻尼系数 C_w 不变, 各层阻尼系数上限值 \bar{c}_j 越

小, 优化后的目标函数(即最大均值层间位移角)越大; \bar{c}_j 不变时, C_w 越大, 优化后的目标函数越小; 各

层附加阻尼的控制效果不同,优先增大第1层附加阻尼来减小层间位移角,待第1层附加阻尼达到上限值,可增加第2层附加阻尼,以此类推,再增加其它层附加阻尼。

4.2 15层平面钢框架模型

4.2.1 结构参数及有限元模型

选取文献[29-31]中的15层3跨平面钢框架为例,并在中间跨布置粘滞阻尼器,如图10所示。基于OpenSees建立该结构的有限元模型,假设每层质量均集中于楼层中心;梁柱截面尺寸及材料参数见表9,采用基于位移法的纤维梁单元模拟,材料采

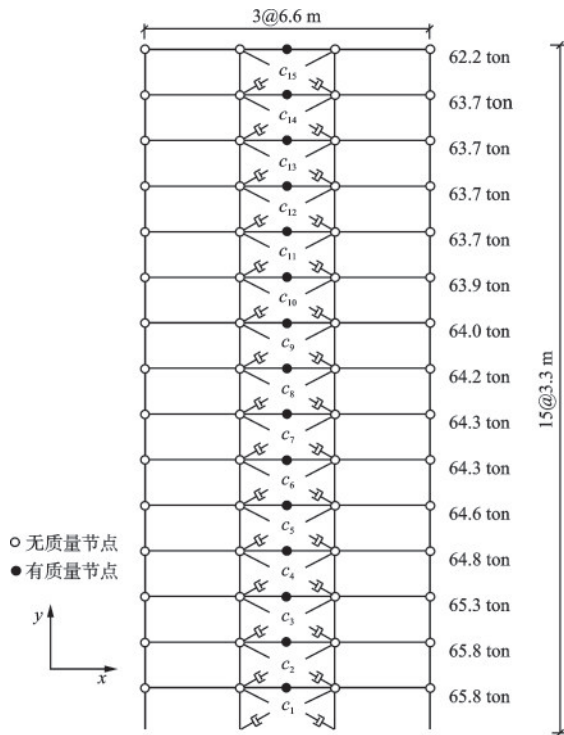


图10 15层平面钢框架及阻尼器布置

Fig.10 Schematic diagram of the 15-story planar steel frame and dampers placement

表9 15层平面钢框架构件截面尺寸及材料参数

Table9 Cross-sectional dimensions and material parameters of members in the 15-story planar steel frames

构件	截面尺寸/mm	材料参数/MPa
1~3层柱	H400 × 400 × 30 × 50	$E = 2 \times 10^5$, $f_y = 345$
4~5层柱	H400 × 400 × 25 × 40	
6~8层柱	H400 × 400 × 20 × 35	
9~10层柱	H400 × 400 × 20 × 32	
11~15层柱	H400 × 400 × 18 × 28	
1~15层梁	H500 × 300 × 12 × 25	$E = 2 \times 10^5$, $f_y = 235$

用Giuffre-Menegotto-Pinto模型(即OpenSees中的Steel02);粘滞阻尼器采用OpenSees中twoNodeLink单元模拟,材料为OpenSees中的Viscous本构模型;其他参数见文献[29-31]。

4.2.2 结构动力特性

该15层平面钢框架结构前6阶x方向的自振周期和振型参与质量系数见表10。

表10 前6阶周期及振型参与质量系数

Table 10 Natural periods and modal participating mass ratios for the first six orders

阶数	1	2	3	4	5	6
周期/s	1.87	0.62	0.36	0.25	0.19	0.15
振型参与质量系数/%	78.8	10.6	3.8	2.0	1.3	0.9

4.2.3 阻尼优化

采用与上一算例相同的地震动荷载输入、Rayleigh阻尼系数计算和分析方法,其中,方法一中取结构前6阶振型,振型参与质量系数之和为97.4%。在总阻尼系数 C_w 和各层阻尼系数上限 \bar{c}_i 分别取值为 3.00×10^6 、 $0.45 \times 10^6 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 的情况下,目标函数迭代变化曲线如图11所示和优化前后结构层间位移角包络线如图12所示。附加阻尼系数优化结果见表11,优化前后附加阻尼比见表12。

8度多遇地震作用下,15层平面钢框架的分析结果表明:振型分解法和有限元时程分析方法得到的附加阻尼器优化参数略有差异。但将两种方法得到的优化参数应用于有限元模型小震分析,最大均值层间位移角基本相同,分别为0.136 90%和0.136 88%,相差仅有0.01%。

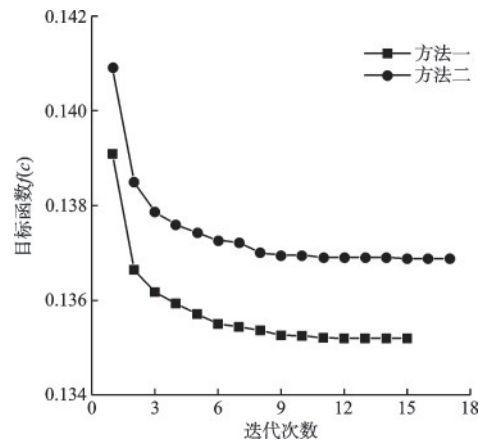


图11 不同方法得到的目标函数曲线

Fig.11 Objective function curves obtained under different methods

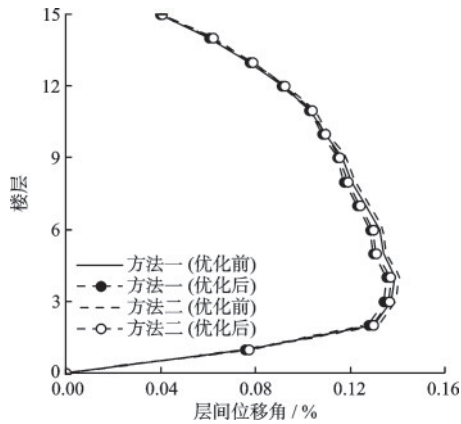


图 12 不同方法得到的最大均值层间位移角包络线
Fig.12 Envelope curves of maximum mean inter-story drift angle obtained under different methods

表 11 不同方法得到的附加阻尼系数

Table 11 Optimized additional damping coefficients obtained under different methods

附加阻尼系数/ $\times 10^5 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
方法一	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	2.92
方法二	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	2.69
附加阻尼系数/ $\times 10^5 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	c_8	c_9	c_{10}	c_{11}	$c_{12}\sim c_{15}$	
方法一	1.42	2.04	0.77	0.34	0	
方法二	0	3.75	0.97	0.09	0	

表 12 优化前后的前 6 阶振型附加阻尼比

Table 12 Additional damping ratio for the first six orders: pre- vs. post- optimization

附加阻尼比	ζ_{ad1}	ζ_{ad2}	ζ_{ad3}	ζ_{ad4}	ζ_{ad5}	ζ_{ad6}
优化前	0.009	0.026	0.042	0.056	0.067	0.077
优化后	0.013	0.020	0.036	0.047	0.059	0.067

4.3 15 层平面钢框架大震减振效果分析

4.3.1 最大层间位移角

在 8 度罕遇地震下,有限元模型的固有阻尼比

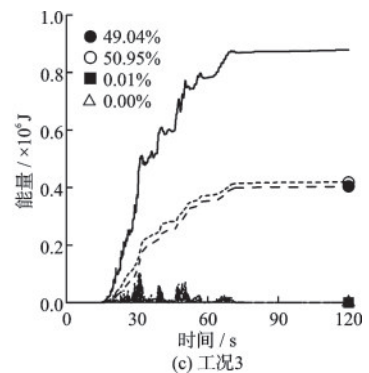
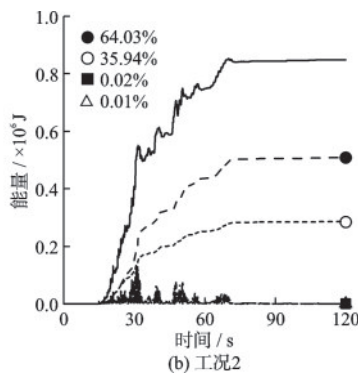
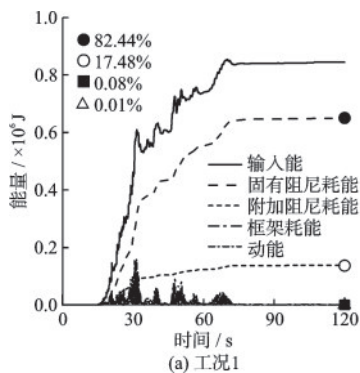


图 14 优化前能量分布

Fig.14 Energy distribution patterns (pre-optimization)

设为 5%,先进行重力分析,然后采用有限元时程分析方法分别对无附加阻尼、三种工况优化前和优化后的几种结构进行弹塑性分析。三种工况优化后的附加阻尼系数均采用方法一得到,其中,工况 1 到 3 中 C_w 分别为 3.00×10^6 、 9.00×10^6 、 $1.80 \times 10^7 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 各层阻尼系数上限值 \bar{c}_j 分别取 0.45×10^6 、 1.35×10^6 、 $2.70 \times 10^6 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ 。几种结构的均值层间位移角包络线如图 13 所示。由图 13 可知,最大均值层间位移角分别为 0.712%、0.677%、0.663%、0.626%、0.590%、0.569% 及 0.515%,附加粘滞阻尼器可有效控制结构的最大层间位移角。此外,通过阻尼器参数优化可进一步提高减振效果。

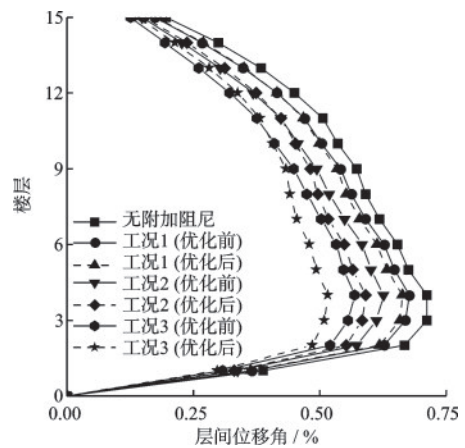


图 13 不同工况下结构的层间位移角包络线

Fig.13 Envelope curves of inter-story drift angle under different working conditions

4.3.2 优化前后耗能分布

选取分析结果与最大均值层间位移角相差最小的波,即表 1 中地震动序号为 20。三种工况优化前后的结构能量分布分别如图 14 和图 15 所示。经过附加阻尼优化,在 20 号地震动作用下,结构的附

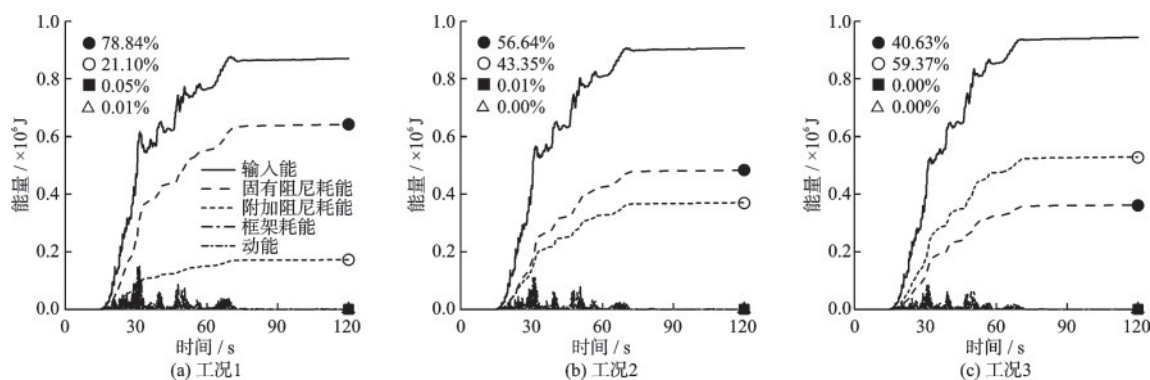


图 15 优化后能量分布

Fig.15 Energy distribution patterns (post-optimization)

加阻尼耗能占比分别由 17.48%、35.94% 和 50.95% 提升至 21.10%、43.35% 和 59.37%。

5 结 论

本文提出了一种高效的基于梯度投影法的粘滞阻尼器优化设计方案。该方案以结构的最大均值层间位移角为目标函数,限制与成本有关的总阻尼系数以及各层阻尼系数上限值,采用梯度投影法进行附加阻尼参数优化。首先,在小震作用下,分别采用振型分解法和有限元时程分析方法对 6 层剪切模型和 15 层平面钢框架模型进行阻尼器优化设计,然后,将 15 层平面框架的优化设计方案应用于大震分析,得出的主要结论如下:

(1) 小震下,通过 6 层剪切模型和 15 层平面钢框架模型的数值模拟,得到振型分解法与有限元时程分析方法的优化设计方案基本一致。

(2) 由振型分解法得到的粘滞阻尼器的优化设计方案在结构大震分析中仍可靠有效。大震下,布设粘滞阻尼器可减小结构的最大层间位移角,具有明显的减振效果。此外,通过阻尼器参数优化,可进一步降低结构的最大层间位移角以及提高结构的附加阻尼耗能占比。

参考文献:

[1] Yao J T. Concept of structural control[J]. Journal of the Structural Division, 1972, 98(7): 1567-1574.
 [2] Chu S, Soong T T, Reinhorn A M. Active, hybrid, and semi-active structural control: A design and implementation handbook[M]. New York: Wiley, 2005.
 [3] Makris N, Constantinou M C, Reinhorn A M. Viscous dampers: testing, modeling and application in vibration

and seismic isolation[M]. Buffalo, NY, USA: National Center for Earthquake Engineering Research, 1990.
 [4] Mahmoodi P. Structural dampers [J]. Journal of the Structural Division, 1969, 95(8): 1661-72.
 [5] Pall A S, Marsh C, Fazio P. Friction joints for seismic control of large panel structures [J]. Journal of Prestressed Concrete Institute, 1980, 25(6): 38-61.
 [6] Kelly J M, Skinner R, Heine A. Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1972, 5(3): 63-88.
 [7] Mcnamara R J. Tuned mass dampers for buildings[J]. Journal of the Structural Division, 1977, 103(9): 1785-1798.
 [8] Fujino Y, Sun L, Pacheco B M, et al. Tuned liquid damper (TLD) for suppressing horizontal motion of structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(10): 2017-2030.
 [9] Kelly J M, Hodder S B. Experimental study of lead and elastomeric dampers for base isolation systems in laminated neoprene bearings [J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 1982, 15(2): 53-67.
 [10] Kelly J M, Beucke K E. A friction damped base isolation system with fail-safe characteristics[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1983, 11(1): 33-56.
 [11] De Domenico D, Ricciardi G, Takewaki I. Design strategies of viscous dampers for seismic protection of building structures: a review [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 118: 144-165.
 [12] Takewaki I. Optimal damper placement for minimum transfer functions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1997, 26(11): 1113-1124.
 [13] Akehashi H, Takewaki I. Optimal viscous damper

- placement for elastic-plastic MDOF structures under critical double impulse[J]. *Frontiers in Built Environment*, 2019, 5: 20.
- [14] 乔峰, 滕军, 幸厚冰. 基于极点配置算法的黏滞阻尼器优化设计[J]. *土木工程学报*, 2012(增2): 162-167.
Qiao F, Teng J, Xing H B. Optimal design of viscous dampers based on the pole assignment method[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012 (Sup2): 162-167. (in Chinese)
- [15] Moradpour S, Dehestani M. Optimal DDBD procedure for designing steel structures with nonlinear fluid viscous dampers[J]. *Structures*, 2019, 22: 154-174.
- [16] Parcianello E, Chisari C, Amadio C. Optimal design of nonlinear viscous dampers for frame structures[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 100: 257-260.
- [17] Chan P T, Ma Q T M. Optimising viscous damper placement in frame buildings with element exchange method for multiple seismic hazard levels[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2023, 27(12): 3536-3563.
- [18] 许伟志, 杜东升, 笠井和彦, 等. 黏滞阻尼器的优化布置及其在高层钢结构加固中的应用[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(8): 32-44.
Xu W Z, Du D S, Kasai Kazuhiko, et al. Optimization layout of viscous dampers and its application in retrofitting of a high-rise steel structure[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(8): 32-44. (in Chinese)
- [19] Aydin E, Öztürk B, Dutkiewicz M. Analysis of efficiency of passive dampers in multistorey buildings[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2019, 439: 17-28.
- [20] Akehashi H, Takewaki I. Frequency-domain optimal viscous damper placement using lower-bound transfer function and multimodal adaptability[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2022, 29(7): e2951.
- [21] Lavan O. Optimal design of viscous dampers and their supporting members for the seismic retrofitting of 3D irregular frame structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(11): 04015026.
- [22] Zhang R H, Soong T T. Seismic design of viscoelastic dampers for structural applications[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1992, 118(5): 1375-1392.
- [23] Pekcan G, Mander J B, Chen S S. Design and retrofit methodology for building structures with supplemental energy dissipating systems[M]. New York: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, 1999.
- [24] Gluck N, Reinhorn A M, Gluck J, et al. Design of supplemental dampers for control of structures[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1996, 122(12): 1394-1399.
- [25] Wongprasert N, Symans M D. Application of a genetic algorithm for optimal damper distribution within the nonlinear seismic benchmark building[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(4): 401-406.
- [26] Zhang R, Wu M, Pan C, et al. Design of MDOF structure with damping enhanced inerter systems[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2023, 21(3): 1685-1711.
- [27] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [28] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [29] Sun B, Zeng Z, Zhang Y, et al. An effective geometric nonlinear analysis approach of framed structures with local material nonlinearities based on the reduced-order Newton-Raphson method[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023, 172: 107991.
- [30] 孙宝印, 孙天舒, 申伟, 等. 高层结构地震弹塑性全过程分析的数值子结构并行计算方法[J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(2): 75-85.
Sun B Y, Sun T S, Shen W, et al. A parallel method of numerical substructure for seismic elastoplastic analysis of high-rise building structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(2): 75-85. (in Chinese)
- [31] 孙宝印, 张沛洲, 古泉, 等. 基于数值子结构方法的结构弹塑性分析[J]. *计算力学学报*, 2015, 32(4): 465-472.
Sun B Y, Zhang P Z, Gu Q, et al. Numerical substructure method for structural nonlinear analysis[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2015, 32(4): 465-472. (in Chinese)

(本文编辑: 张艺)