

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.098



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



双目标优化与生成对抗网络结合的框架结构 阻尼器布置方案智能设计方法

潘毅^{a,b}, 陈齐^a, 王腾^a, 周祎^a

(西南交通大学 a. 土木工程学院; b. 抗震工程技术四川省重点实验室, 成都 610031)

摘要:为实现框架结构的阻尼器智能化布置,结合减震设计原理和智能算法,采用双目标优化算法和生成对抗网络算法分别进行阻尼器竖向和水平智能布置研究,并将该方法应用到两个框架结构减震设计工程案例中。在框架结构减震设计中,采用双目标优化算法进行阻尼器竖向布置,并与逐层逼近法、工程师设计和非减震设计进行对比,结果表明,采用该优化算法得到的阻尼器竖向布置方案能有效降低层间位移角和楼层加速度,提高结构的抗震性能。在确定各楼层的阻尼器数量后,利用训练好的生成对抗网络生成模型,可快速、自动地选择和确定各楼层阻尼器的平面安装位置,生成的平面布置与工程师设计的平面布置在相似性差异度综合评价指标上小于临界值0.1,说明两者相似度较高,且有利于提高原结构的抗扭能力。将双目标优化算法与生成对抗网络相结合,不仅能满足框架结构的减震性能目标,而且可实现阻尼器布置方案的智能设计,提升减震工程设计效率。

关键词:优化算法;生成对抗网络;框架结构;阻尼器布置;智能设计

中图分类号: TU375.4; TU352.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)01-0058-13

Intelligent design method of damper placement scheme for frame structure combining dual-objective optimization and generative adversarial network

PAN Yi^{a,b}, CHEN Qi^a, WANG Teng^a, ZHOU Yi^a

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Seismic Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: In order to achieve the intelligent placement of dampers in frame structures, the dual-objective optimization algorithm (DOOA) and generative adversarial network (GAN) algorithm are employed for the vertical and horizontal intelligent placement of dampers, respectively, based on the damping design principle and intelligent algorithm. Two seismic design engineering cases of frame structures are applied. In the seismic design of frame structures, dual-objective optimization is adopted for vertical damper placement. Compared with

收稿日期: 2023-06-11

基金项目: 四川省自然科学基金(2022NSFSC0423)

作者简介: 潘毅(1977), 男, 博士, 教授, 主要从事工程结构抗震与加固研究, E-mail: panyi@swjtu.edu.cn。

周祎(通信作者), 男, 博士, 副教授, E-mail: suzhouzhouyi@swjtu.edu.cn。

Received: 2023-06-11

Foundation item: Natural Science Foundation of Sichuan Province (No. 2022NSFSC0423)

Author brief: PAN Yi (1977-), PhD, professor, main research interests: seismic resistance and reinforcement of engineering structures, E-mail: panyi@swjtu.edu.cn.

ZHOU Yi (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: suzhouzhouyi@swjtu.edu.cn.

the layer-by-layer approximation method, engineer-designed optimized damper placement schemes, and non-damping design, the vertical arrangement scheme of dampers obtained by the improved optimization algorithm can effectively reduce inter-story drift angles and floor accelerations, and enhance the seismic performance of the original structure. After determining the number of dampers for each floor, the plane installation position of dampers on each floor can be quickly and automatically selected and determined by using the trained generative adversarial network generation model. The comprehensive evaluation index of similarity difference degree between the generated plane layout and the plane layout designed by the engineer is less than the critical value of 0.1, which indicates that the similarity between the two is high, and it is beneficial to improve the torsion resistance of the original structure. The combination of dual-objective optimization and generative adversarial network can meet the seismic performance objectives of frame structures, and enable to achieve of intelligent design of the damper placement scheme, and improve the efficiency of seismic design engineering.

Keywords: optimization algorithm; generative adversarial network; frame structure; damper placement; intelligent design

目前,结构减震设计大多采用被动控制技术^[1],且多采用耗能减震设计,即在结构的合理位置布置适宜数量的阻尼器来消耗地震能量,减小结构地震反应。适宜的阻尼器数量、位置是减震设计的关键。减震设计流程大致可分为阻尼器竖向布置和阻尼器平面布置。在阻尼器竖向布置方面,将阻尼器布置在合理楼层位置,能增强耗能效果、提高抗震能力^[2]。为实现减震性能和经济性的平衡,应将尽量少的阻尼器布置在最优的楼层位置,以最大限度发挥阻尼器的耗能减震性能并降低经济成本。但目前的减震设计布置方法既不能保证阻尼器布置是最优方案,又要进行繁琐的迭代,其效率有待提高^[3]。在阻尼器竖向布置方面,高效、合理地确定各楼层阻尼器数量是结构减震设计亟须解决的问题。在阻尼器平面布置方面,基于阻尼器竖向布置得到各楼层阻尼器的合理数量之后,需要为各楼层阻尼器选择合理的安装位置,确定阻尼器平面位置是一个迭代、调整和耗时耗力的过程。因此,在满足业主使用功能与阻尼器平面布置规则的前提下,快速确定阻尼器平面安装位置是结构减震设计亟须解决的问题。为解决上述问题,众多学者进行了阻尼器竖向布置优化方法和阻尼器平面布置优化方法的探索与研究。

在阻尼器竖向布置优化方面,因阻尼器布置与结构地震响应之间无明显、有规律的显式关系,故目前的阻尼器竖向优化布置大多采用随机搜索优化布置方法和遗传算法。例如,Agrawal等^[4]采用3种智能搜索算法,即序列、WOBI和ESPS,研究在不同类型目标函数下的阻尼器最优位置,结果表明,通过最小化的结构最大层间位移目标函数得到的阻尼器最佳位置取决于具体地震动,WOBI和ESPS在改善序列搜索最佳位置方面有效。李钢

等^[5]基于遗传算法,提出一种应用于耗能减震结构参数设计的新型优化数学模型,结果表明,新模型是一种有效的优化设计方法。李宏男等^[6]基于遗传算法,提出阻尼器新型优化数学模型,对比了位移型和速度型阻尼器优化布置的差异,发现高层建筑宜选用速度型阻尼器。燕乐纬等^[7]基于数字序列编码遗传算法,提出高层结构黏滞阻尼器优化布置方法,结果表明,该算法能加速种群进化,在高层结构阻尼器优化布置上有效。马宏伟等^[8]基于粗粒度并行遗传算法,提出通过Matlab-ABAQUS-Python的交互使用来优化被动控制结构中阻尼器位置的方法,结果表明,该算法能显著提高结构减震率。金波等^[9]基于改进的遗传算法,提出以替换杆件模态应变能百分比之和最大为适应度函数来优化大跨网架结构上的黏滞阻尼器数量和位置的方法,结果表明,该方法能明显改善结构受力状况,减震效果良好。王曙光等^[10]采用遗传算法进行多种不同类型阻尼器的同步优化布置,结果表明,该算法可以在较短时间内同时优化不同类型的阻尼器位置。陈丰收等^[11]采用多目标并行遗传算法进行减震结构的阻尼器布置数量和布置位置的多目标同步优化,结果表明,该算法收敛性强,阻尼器主要布置在结构中下部且中部较多。周玉娴等^[12]采用基因属性保留遗传算法进行阻尼器的双目标同步优化布置,结果表明,该方法可高效处理双目标阻尼器同步优化问题。尽管以上研究在阻尼器竖向优化布置方面已经很成熟,但是较少同时考虑阻尼器的竖向布置与平面布置,即在确定各楼层的阻尼器数量后,需要考虑在不妨碍业主使用功能需求且不增大刚度与质心差异、结构扭转效应的前提下,在各楼层平面上合理布置阻尼器。

在阻尼器平面优化布置方面,目前处于起步阶

段,相关研究较少。例如,Erdem Çerçevik等^[13]采用蝙蝠算法和蜻蜓算法进行黏性墙式阻尼器数量、阻尼器周边布置的优化,并以楼层加速度和层间位移角为约束条件,结果表明,该方法有利于改进结构响应、最小化经济成本。程卫红等^[14]通过模型算例针对墙式连接位移型阻尼器进行了平面布置分析,结果表明,阻尼器平面布置宜规则对称,且尽量布置在框架结构周边,从而减少不规则布置带来的附加扭转效应。目前针对阻尼器智能选择平面位置方面的研究较少,为实现和加速减震设计的智能化,有必要开展相关研究。

针对以上不足,笔者基于双目标优化算法(Dual Objective Optimization Algorithm, DOOA)和生成对抗网络(Generative Adversarial Network, GAN),提出阻尼器竖向优化布置与智能选择阻尼器平面位置的方法。采用双目标优化算法进行阻尼器竖向布置,并与原结构、工程师设计、逐层逼近法进行对比分析;采用生成对抗网络进行阻尼器平面布置,并与工程师设计结果进行相似性差异度对比分析。通过工程案例的应用与分析,验证方法的有效性,为减震结构的智能化设计提供参考。

1 阻尼器竖向布置优化目标

1.1 减震结构运动方程

在地震作用下,未设置阻尼器的框架结构的运动方程为

$$M\ddot{\mathbf{u}}(t) + C_0\dot{\mathbf{u}}(t) + K_0\mathbf{u}(t) + \mathbf{P}(t) = -M\mathbf{I}\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

式中: M 、 C_0 、 K_0 分别为未布置阻尼器的框架结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ 、 $\dot{\mathbf{u}}(t)$ 、 $\mathbf{u}(t)$ 分别为框架结构的楼层加速度向量、速度向量和位移向量; $\mathbf{P}(t)$ 为阻尼器所提供的阻尼力矩阵; $\ddot{u}_g(t)$ 为地面加速度,即地震动加速度; \mathbf{I} 为单位列向量。

为兼容多种速度型阻尼器的力学模型,考虑3种常见的速度型阻尼器力学模型,包括线性模型、Kelvin模型和Maxwell模型,3种模型均假设阻尼指数为1。线性模型的阻尼力表达式为

$$\mathbf{P}(t) = C_d\dot{\mathbf{u}}(t) \quad (2)$$

式中: C_d 为阻尼器的阻尼矩阵; $\dot{\mathbf{u}}(t)$ 为第*i*层楼面相对基础的变形速度。将式(2)代入式(1),可得到布置线性阻尼器模型的框架结构运动方程。

$$M\ddot{\mathbf{u}}(t) + (C_0 + C_d)\dot{\mathbf{u}}(t) + K_0\mathbf{u}(t) = -M\mathbf{I}\ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

由式(3)可得出,线性阻尼器模型只改变了结构的阻尼矩阵。

Kelvin模型采用的是刚度与阻尼并联的形式,

如图1所示。在实际减震设计中,一般设置刚度 $K_d = 0$,以此来让阻尼装置在地震作用下运动起来,故Kelvin模型的阻尼力矩阵表达式为

$$\mathbf{P}(t) = K_d\mathbf{u}(t) + C_d\dot{\mathbf{u}}(t) = C_d\dot{\mathbf{u}}(t) \quad (4)$$

式中: K_d 为阻尼器的刚度矩阵; C_d 为框架结构的层间侧移刚度矩阵; $\mathbf{u}(t)$ 为楼面相对基础的变形向量。将式(4)代入式(1),可得到布置Maxwell阻尼器模型的框架结构运动方程同式(3)。

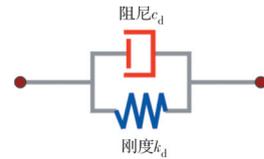


图1 Kelvin模型

Fig. 1 Kelvin model

Maxwell模型采用的是刚度与阻尼串联的形式,如图2所示。在实际减震设计中,一般设置刚度为阻尼系数的100~1 000倍,从而让阻尼装置消耗地震能量,故 $c_{di} \cdot \dot{p}_i(t)/k_{di}$ 项可忽略不计,Maxwell模型的单个阻尼器阻尼力表达式为

$$\begin{aligned} p(t) + \frac{c}{k} \dot{p}(t) &= c\dot{\Delta}(t) \\ p(t) &= c\dot{\Delta}(t) \\ \mathbf{P}(t) &= C_d\dot{\mathbf{u}}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $p(t)$ 为单个阻尼器提供的阻尼力; $\dot{\Delta}(t)$ 为单个阻尼器两端相对变形速度大小。将式(5)代入式(1),可得到布置Maxwell阻尼器模型的框架结构运动方程同式(3)。

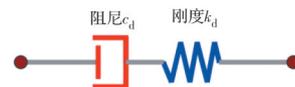


图2 Maxwell模型

Fig. 2 Maxwell model

综上所述,当阻尼指数为1时,3种阻尼器模型的结构运动方程在形式上统一,均为式(6)形式。

$$\begin{aligned} M\ddot{\mathbf{u}}(t) + C\dot{\mathbf{u}}(t) + K_0\mathbf{u}(t) &= -M\mathbf{I}\ddot{u}_g(t) \\ C &= C_0 + C_d \end{aligned} \quad (6)$$

1.2 减震结构响应求解

在布置阻尼器后,框架结构的阻尼体系变为非经典阻尼体系,即非对角矩阵,运动方程组无法解耦为*N*个独立的单自由度体系运动方程。为解决此类非经典阻尼解耦问题,采用复振型分解法进行方程组解耦,由线性定常动力体系的微分方程经变量代换得到减震结构体系的状态方程^[15]。具体表达式为

$$\dot{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{D} \cdot \mathbf{y}(t) + \mathbf{I} \cdot \mathbf{g}(t) \quad (7)$$

$$\text{式中: } \mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \mathbf{x}(t) \end{bmatrix}; \mathbf{I} = \begin{bmatrix} -\mathbf{E}_{N \times N} \\ \mathbf{0}_{N \times N} \end{bmatrix}_{2N \times N}; \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}_0 \\ \mathbf{E}_{N \times N} & \mathbf{0}_{N \times N} \end{bmatrix}_{2N \times 2N}; N \text{ 为框架结构的楼层数}$$

量; \mathbf{M} 为框架结构的质量矩阵; \mathbf{K}_0 为框架结构的刚度矩阵; \mathbf{C} 为减震结构的阻尼矩阵, 包含结构本身阻尼与阻尼器所提供的阻尼, 即 $\mathbf{C} = \mathbf{C}_0 + \mathbf{C}_d$; $\mathbf{E}_{N \times N}$ 为 N 阶单位向量。

因矩阵 \mathbf{D} 为非对称矩阵, 故应采用广义模态分析法进行解耦, 通过特征向量的正交性计算框架结构的地震响应。假设非对称矩阵 \mathbf{D} 的左、右特征向量与特征值分别为 $\theta_i, \varphi_i, \lambda_i$, 其中 $i = 1, 2 \dots 2N$ 。

由于振型的正交特性, 框架结构的任何响应均可采用振型的线性组合进行表示。例如, 采用右特征向量进行振型的线性组合, 如式(8)所示。

$$\mathbf{y}(t) = \boldsymbol{\varphi} \cdot \boldsymbol{\eta}(t) \quad (8)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi} = [\varphi_1, \varphi_2 \dots \varphi_i \dots \varphi_{2N}]$, $\boldsymbol{\eta}(t)$ 为单模态坐标向量。

将式(8)代入式(7)可得

$$\boldsymbol{\varphi} \cdot \dot{\boldsymbol{\eta}}(t) = \mathbf{D} \cdot \mathbf{y}(t) + \mathbf{I} \cdot \mathbf{g}(t) \quad (9)$$

式(9)两侧同时左乘 θ_i^T 进行解耦

$$\dot{\eta}_i(t) - \lambda_i \cdot \eta_i(t) = \theta_i^T \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{g}(t) \quad (10)$$

在确定的地震激励作用下, 减震结构单模态响应为

$$\eta_i(t) = \int_0^t e^{\lambda_i(t-\tau)} \cdot \theta_i^T \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{g}(\tau) d\tau \quad (11)$$

因此, 框架结构的楼层位移响应向量可表示为

$$\mathbf{x}(t) = \boldsymbol{\varphi}_{N+1 \sim 2N} \cdot \boldsymbol{\eta}(t)_{N+1 \sim 2N} \quad (12)$$

框架结构的楼层加速度响应向量可表示为

$$\ddot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K}_0 \end{bmatrix} \cdot \boldsymbol{\varphi} \cdot \boldsymbol{\eta}(t) - \mathbf{E}_{N \times N} \cdot \mathbf{g}(t) \quad (13)$$

1.3 竖向布置优化目标函数

在布置阻尼器后, 一般需减小框架结构的楼层加速度峰值与层间位移角峰值, 故采用多目标优化方法, 优化目标函数为

$$\begin{cases} \min f_1(\ddot{u}, n_d) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \ddot{x}_i^2}{\sum_{i=1}^n \ddot{x}_{0i}^2}} \\ \min f_2(u/h, n_d) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i^2}{h_i^2}}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{0i}^2}{h_{0i}^2}\right)^2}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: \ddot{x}_i, \ddot{x}_0 分别为结构布置阻尼器和未布置阻尼器的楼层加速度; $x_i/h_i, x_{0i}/h_{0i}$ 分别为结构布置阻尼器和未布置阻尼器的层间位移角; n_d 为结构布置的阻尼器总数量。

$$S_j^2 = \sqrt{\left(\frac{\left| \frac{\sum_{i=1}^{n_1} x_{gi}/n_1 - \sum_{i=1}^{n_2} x_{ei}/n_2 \right|}{\sum_{i=1}^{n_2} x_{ei}/n_2} \right)^2 + \left(\frac{\left| \frac{\sum_{i=1}^{n_1} y_{gi}/n_1 - \sum_{i=1}^{n_2} y_{ei}/n_2 \right|}{\sum_{i=1}^{n_2} y_{ei}/n_2} \right)^2} / 2} \quad (17)$$

2 阻尼器平面布置评价指标

2.1 布置规则

基于框架结构的平面建筑图, 进行阻尼器的平面布置。在已确定框架结构阻尼器竖向布置的基础上, 对需要布置阻尼器的楼层进行智能化平面布置。依据《全国民用建筑工程设计技术措施——结构(结构体系)》规范附录 C.4, 阻尼器平面布置应符合表 1 所示的规则。

表 1 平面布置规则

Table 1 Rules of plane placement

类型	布置规则
经验	根据需要沿结构的两个主轴方向分别设置;
规则	阻尼器与框架柱之间保留一定距离; 消能减震结构不应由于消能部件的设置而产生附加扭转;
力学	尽量缩小质量中心和刚度中心的差异, 力求保持结构对称;
规则	宜设在层间变形较大的楼层位置, 以及尽量周边布置, 有利于提高整个结构的减震能力和抗扭能力。

2.2 评价指标

基于阻尼器平面布置规则, 以较优的目标设计为设计标准, 提出用于评价生成设计的相似性差异度综合评价指标 E , 以及两个子指标: 阻尼器质心差异度、阻尼器分散性差异度。质心差异度可以反映阻尼器质心与结构质量中心之间的差异程度, 该值越小则阻尼器布置越对称, 其附加扭转越小。分散性差异度可以反映阻尼器是否分散布置, 该值越小则结构抗扭转能力越强。将生成的平面布置与目标设计的平面布置进行逐楼层、逐柱跨对比, 通过式(15)~式(17)计算两者的相似性。 E 值越小, 说明生成设计与目标设计之间的差异越小, 相似程度越高。当相似性差异度综合评价指标 E 小于临界值 α 时, 则生成设计与目标设计相似性极高, 结构的抗扭能力较好。

$$E = \frac{\sum_{j=1}^n (S_j^1 + S_j^2)}{2n} \quad (15)$$

$$S_j^1 = \sqrt{\left(\frac{\left| |x_g| - |x_e| \right|}{0.5L} \right)^2 + \left(\frac{\left| |y_g| - |y_e| \right|}{0.5B} \right)^2} / 2 \quad (16)$$

式中: E 为生成设计的相似性综合评价指标; S_j^1 为生成设计与目标设计在阻尼器质心上的距离大小; S_j^2 为生成设计与目标设计在第 j 层楼的阻尼器分散程度上的差异大小; n 为框架结构楼层数量; x_g, y_g 分别为生成设计第 j 层楼 X 向、 Y 向阻尼器质心与结构质心 x_0, y_0 之间的距离; x_e, y_e 分别为目标设计第 j 层楼 X 向、 Y 向阻尼器质心与结构质心 x_0, y_0 之间的距离; L, B 分别为框架结构的长度与宽度; x_{gi}, x_{ei} 分别为生成设计、目标设计第 j 层楼第 i 个阻尼器与结构质量中心 x_0 之间的距离; y_{gi}, y_{ei} 分别为生成设计、目标设计第 j 层楼第 i 个阻尼器与建筑质量中心 y_0 之间的距离; n_1, n_2 分别为生成设计、目标设计的 X 向与 Y 向阻尼器数量之和。

需要说明的是,生成设计是基于提取的可布置阻尼器位置图像进行的图像生成,如图3所示,即需要对图纸做前处理工作。

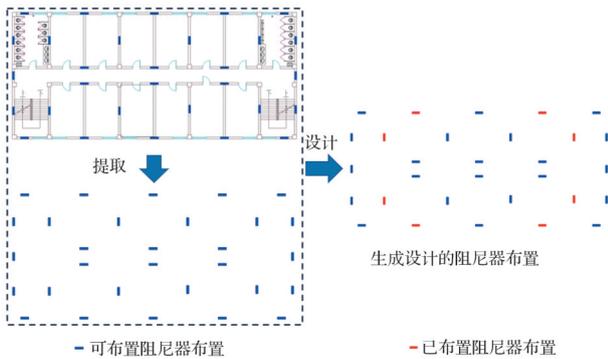


图3 生成设计图像

Fig. 3 The figure of generate design

3 阻尼器布置智能设计算法

3.1 阻尼器竖向智能布置

采用双目标优化算法来实现阻尼器的竖向布置。双目标优化算法是借鉴了麻雀搜索算法的优化思想,通过模拟麻雀搜索食物的行为来寻优,从而寻找最优解。在一个 D 维搜索空间内,存在 pop 只个体,第 i 只个体在搜索空间中的位置可表示为 $X_i = [x_{i1} \dots x_{ij} \dots x_{iD}]$, $i = 1, 2 \dots N$,其中 x_{ij} 为第 i 只个体在第 j 维空间的位置。基于双目标优化算法的阻尼器竖向布置流程图见图4,具体步骤如下。

Step1:初始化数据,种群规模 pop ,优化目标函数维数 D ,迭代次数 T ,初始值上下界 l_b, u_b 。

Step2:初始化种群,生成 pop 个 D 维向量 X_i ,维度对应楼层数量。

Step3:计算个体的目标函数值 f_1 和 f_2 ,选出优化目标函数 f_1 和 f_2 均相对较小时所对应的个体作为最优解。

Step4:循环执行step2、step3,迭代 T 次,每次迭

代后更新阻尼器竖向布置最优解。

Step5:当迭代次数 $t=T$,程序结束,输出最后一次迭代所得到的阻尼器竖向布置最优解。

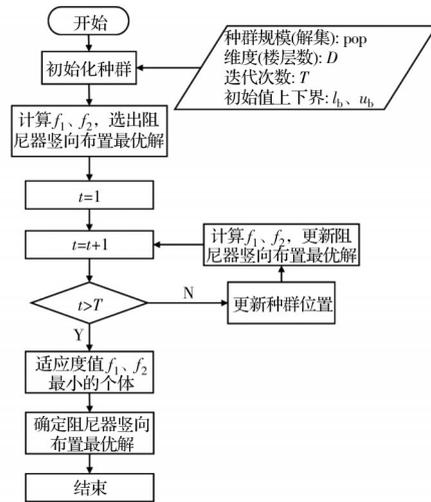


图4 阻尼器竖向智能布置流程图

Fig. 4 Flow chart of damper vertical intelligent placement

3.2 阻尼器平面智能布置

采用GAN来实现阻尼器的平面布置。GAN是自动化建筑设计中应用最广泛的框架之一^[16],是一种深度生成模型,该模型框架包含两个相互竞争的神经网络结构:判别器 D 和生成器 G 。生成器用来捕获数据分布并生成样本,而判别器用于将生成的样本与真实样本区分开来^[17],二者通过对抗学习提升各自的能力。生成对抗网络可通过对既有设计图像或文本的学习,掌握已有设计数据中的潜在设计规律,实现新设计图像的生成^[18]。基于GAN的阻尼器平面布置流程图见图5,算法具体步骤如下。

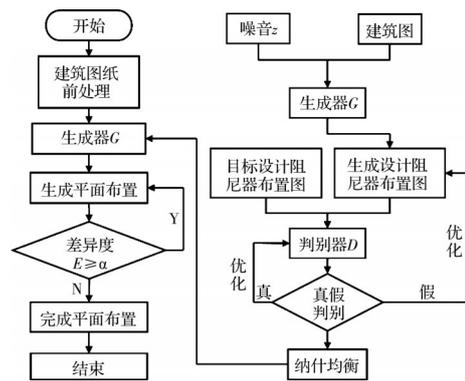


图5 阻尼器平面智能布置流程图

Fig. 5 Flow chart of damper plane intelligent placement

Step1:将用于训练、验证和测试的建筑平面图进行前处理,即用蓝色标出所有能布置阻尼器的位置,用红色标出已布置阻尼器的位置。

Step2:将建筑平面图的所有合理阻尼器布置用于训练生成器,在与判别器博弈过程中,不断学习阻尼器布置规律。当达到纳什均衡时,生成器训

练完成,可用于阻尼器平面布置。

Step3:将训练好的生成器用于生成与工程师设计相似的阻尼器平面布置,从而得到平面布置的生成设计。

Step4:采用相似性差异度综合评价 E 进行生成设计评价。若 $E \geq \alpha$, 返回到 step3 中重新进行训练和生成,重新评价,直至 $E < \alpha$ 。

4 阻尼器布置智能设计工程应用

为研究双目标优化算法和生成对抗网络的可行性和通用性,采用 2 个实际减震设计工程案例进行阻尼器布置设计,并开展性能分析、对比。基于阻尼器竖向布置双目标优化算法和阻尼器平面布置生成对抗网络算法,对地震动作用下的框架结构进行阻尼器竖向布置与平面布置,在竖向布置上与逐层逼近设计、工程师设计进行对比,在平面布置上与工程师平面设计进行对比,从而验证阻尼器布置方法的有效性。

4.1 工程案例一

4.1.1 结构模型

某 5 层钢筋混凝土框架结构教学楼,首层层高 4.9 m,标准层层高 4 m,总高 20.9 m;柱截面为 600 mm×600 mm,边主梁截面为 500 mm×800 mm,内主梁截面为 400 mm×800 mm,次梁均为 300 mm×600 mm,具体结构平面布置如图 6 所示,各楼层的质量和刚度见表 2。抗震设防烈度为 8 度 (0.2g),地震分组为第 2 组,场地类别为 II 类,设防类别为乙类。

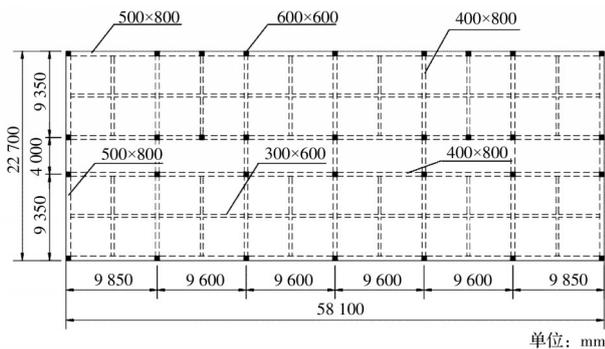


图 6 案例一框架结构平面布置

Fig. 6 Plane placement of frame structure of case one

按照工程师试算,案例一结构需安装 30 个黏滞阻尼器,具体阻尼器参数见表 3。优化并求解阻尼器合理位置,提高框架结构在地震动作用下的抗震性能,使其层间位移角和楼层加速度满足一定的减震目标,具体减震指标为:在 8 度罕遇地震作用下,层间位移角控制在 1/200 以下,楼层加速度控制在 5 m/s^2 以下。

表 2 某 5 层 RC 框架结构的质量和刚度

Table 2 The mass and stiffness of a five story reinforced concrete frame structure

楼层	质量/t	刚度/(10^6 kN/m)	
		X向	Y向
1	2 467.1	0.778 9	0.738 9
2	2 432.5	0.852 9	0.767 3
3	2 432.5	0.856 4	0.761 8
4	2 432.5	0.859 2	0.758 9
5	2 373.7	0.828 7	0.714 3

表 3 阻尼器参数

Table 3 Parameters of dampers

阻尼器类型	阻尼器数量		阻尼系数 $c_d/(10^6 \text{ N}\cdot\text{s/m})$	阻尼指数
	X向	Y向		
Kelvin模型	15	15	200	1

4.1.2 阻尼器竖向优化布置

依据场地特征周期 $T_{g1}=0.45 \text{ s}$ 、结构基本周期 $T_{a1}=1.25 \text{ s}$,选取与其周期相近的 3 条地震动:SAN FERNANDO(台站 110)波、COALINGA(台站 1624)波、NORTHRIDGE(台站 5366)波,分别记为 A 波、B 波、C 波,并将地震波的峰值加速度调整至 400 cm/s^2 。

在不同地震波作用下,双目标优化算法能保持目标函数值 f_1 、 f_2 变动幅度较小,且在同一方向上的阻尼器布置近似相同,反映了该算法对不同地震动的鲁棒性能较好。同一楼层依据出现次数较多的阻尼器数目、接近平均数和阻尼器总数量为 15 的原则,双目标优化算法在 X 向与 Y 向的最终阻尼器竖向布置如表 4 所示。相比于逐层逼近法,双目标优化算法的目标函数值与其几乎相同,侧面说明该算法在阻尼器竖向布置上的优化能力较好。相比于工程师设计,双目标优化算法的目标函数值 f_1 、 f_2 均小于工程师设计,说明该优化算法在阻尼器数量固定的前提下能辅助工程师进行竖向布置修正,充分发挥阻尼器的减震性能,减小各楼层的最大加速度与最大层间位移角。

与原结构相比,采用不同阻尼器竖向布置方法得到的结构最大层间位移角和最大楼层加速度均有所降低。对于最大层间位移角,双目标优化算法与逐层逼近法的竖向布置均能满足减震目标 1/200 的要求,而工程师设计不能满足减震目标,如图 7 所示。主要原因在于工程师设计的首层与顶层未布置阻尼器,导致其首层、顶层成为楼层薄弱处,层间位移角未能减小至减震目标。对于最大楼层加速度,双目标优化算法与逐层逼近法的最大楼层加速度均小于减震目标 5 m/s^2 ,但工程师设计未能达标,如图 8 所示。这是因为首层、顶层为薄弱层,导致首层与顶层的最大楼层加速度未减小,甚至增大。

表 4 案例一的阻尼器布置方案与目标函数值

Table 4 Damper layout schemes and objective function values of case one

方法	方向	地震波	各楼层的阻尼器布置数量					目标函数值 f		
			1层	2层	3层	4层	5层	f_1	f_2	
双目标 优化算法	X	SAN FERNANDO	4	4	4	2	1	0.488 8	0.128 2	
		COALINGA	4	4	3	2	2	0.581 1	0.136 7	
		NORTHRIDGE	4	4	3	3	1	0.526 9	0.089 4	
	X向最终布置			4	4	3	2	2		
	Y	SAN FERNANDO	4	4	3	2	2	0.524 1	0.127 1	
		COALINGA	5	4	2	2	2	0.612 0	0.146 9	
NORTHRIDGE		5	4	3	2	1	0.498 9	0.075 9		
Y向最终布置			4	4	3	2	2			
逐层 逼近法	X	SAN FERNANDO	5	4	3	2	1	0.489 1	0.125 4	
		COALINGA	5	4	3	2	1	0.588 5	0.129 5	
		NORTHRIDGE	5	4	3	2	1	0.527 9	0.086 1	
	X向最终布置			5	4	3	2	1		
	Y	SAN FERNANDO	5	4	3	2	1	0.527 0	0.121 5	
		COALINGA	5	4	3	2	1	0.624 5	0.136 2	
NORTHRIDGE		5	4	3	2	1	0.498 9	0.075 9		
Y向最终布置			5	4	3	2	1			
工程师 设计	X	SAN FERNANDO		5	5	5		0.864 1	0.442 0	
		COALINGA		5	5	5		0.775 3	0.473 1	
		NORTHRIDGE		5	5	5		0.750 7	0.407 5	
	Y	SAN FERNANDO		5	5	5		0.928 3	0.430 8	
		COALINGA		5	5	5		0.854 7	0.536 7	
		NORTHRIDGE		5	5	5		0.725 2	0.367 6	

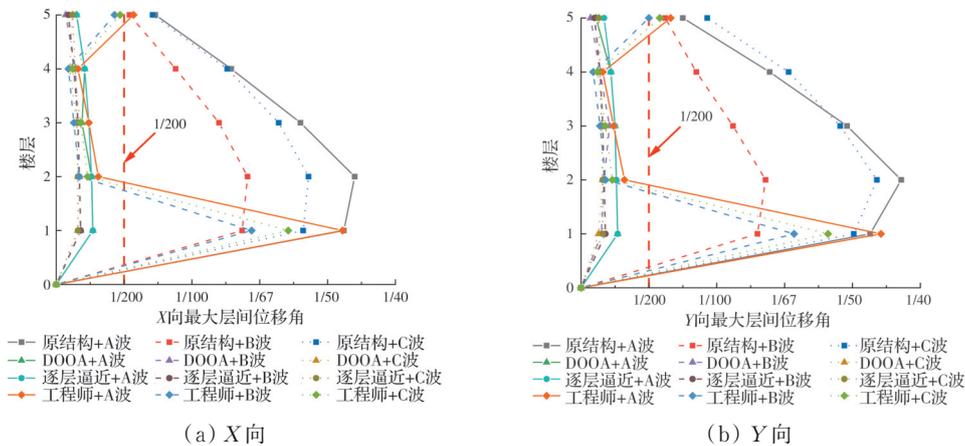


图 7 最大层间位移角包络图
Fig. 7 Envelope diagram of maximum inter-story displacement angle

4.1.3 阻尼器平面优化布置

在双目标优化算法确定的案例一阻尼器竖向布置的基础上,分别让训练好的生成对抗网络模型和工程师进行阻尼器平面布置,并以工程师设计的阻尼器平面布置为目标设计。案例一的目标设计与生成设计如图9、图10所示。

在该工程案例中,生成设计的相似性综合评价值为 $E_1=0.05$,各楼层的质心差异度和分散性差异

度见图10。由于相似性综合评价 E 比较接近 0,生成设计与工程师设计具有较高的相似度。

4.2 工程案例二

4.2.1 结构模型

某6层钢筋混凝土框架结构办公楼,首层层高 6 m,标准层层高 4 m,总高 26 m;柱截面为 650 mm×650 mm,边主梁截面为 600 mm×800 mm,内主梁截面为 400 mm×700 mm,次梁均为 300 mm×

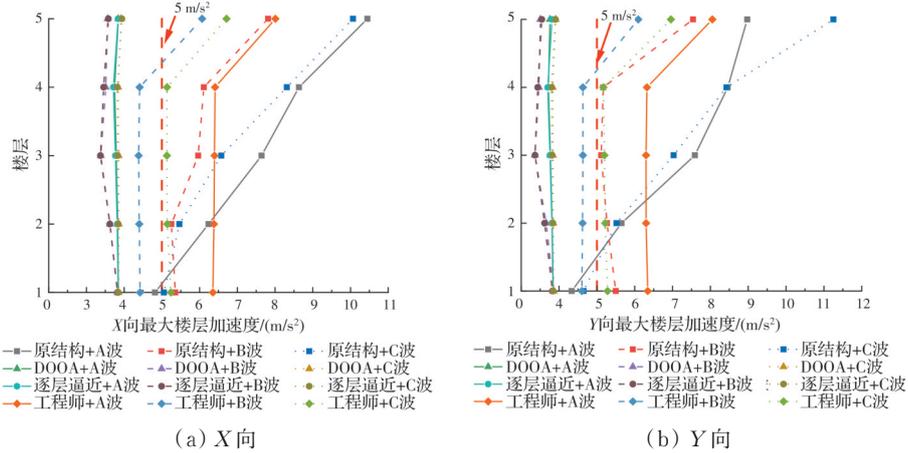


图 8 最大楼层加速度包络图
Fig. 8 Envelope diagram of maximum floor acceleration

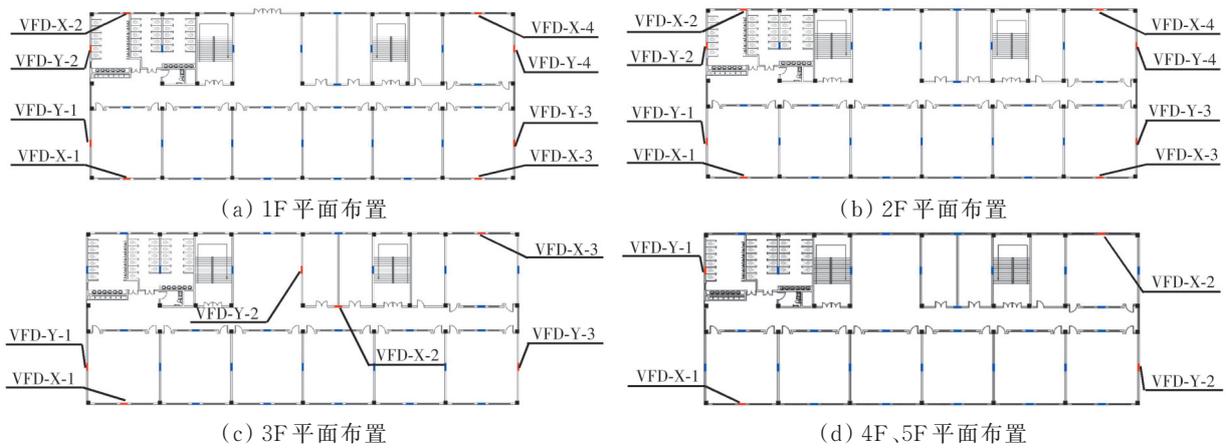


图 9 案例一目标设计

Fig. 9 Objective design of case one

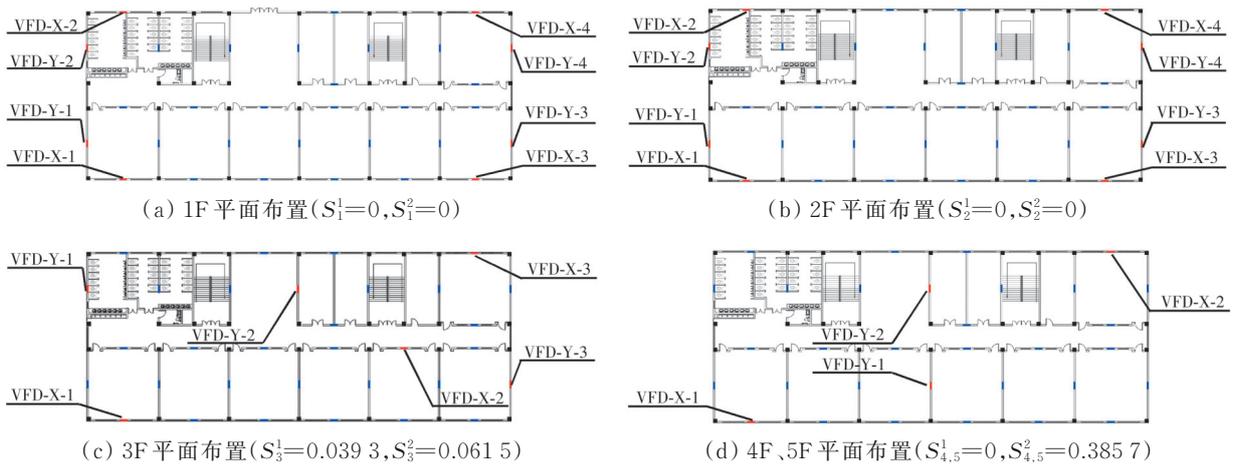


图 10 案例一生成设计

Fig. 10 Generative design of case one

600 mm,结构平面布置如图 11 所示,各楼层的质量和刚度见表 5。抗震设防烈度为 8 度(0.3g),地震分组为第 3 组,场地类别为 II 类,设防类别为乙类。

依据工程师试算,案例二需安装 48 个黏滞阻尼器,具体阻尼器参数见表 6。在工程师设计的基础

上,优化阻尼器布置位置,提升框架结构的抗震性能,使其层间位移角和楼层加速度满足一定的减震目标,具体减震指标为:在 8 度罕遇地震作用下,层间位移角控制在 1/200 以下,楼层加速度控制在 6 m/s² 以下。

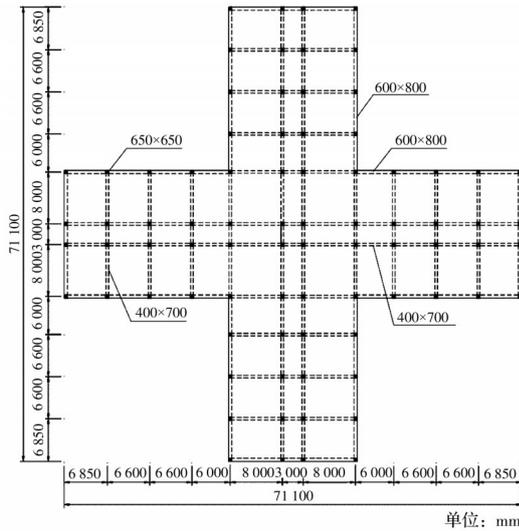


图 11 案例二框架结构平面布置

Fig.11 Plane placement of frame structure for case two

4.2.2 阻尼器竖向优化布置

根据案例二场地特征周期 $T_{g2}=0.5\text{ s}$ 与结构基本周期 $T_{a2}=1.27\text{ s}$, 选取出与其周期相近的 3 条地震动: SAN FERNANDO (台站 110) 波、SAN FERNANDO (台站 160) 波、NORTHRIDGE (台站 5366) 波, 分别记为 A 波、D 波、C 波, 并将各地震波的峰值加速度调整至 510 cm/s^2 。

案例二结构在 X 向与 Y 向的质量、刚度和平面布置完全相同, 故在各楼层两主轴方向上布置同等数量的阻尼器。同一楼层依据出现次数较多的阻尼器数目、接近平均数和阻尼器总数量为 24 的原

表 5 某 6 层 RC 框架结构的质量和刚度

Table 5 The mass and stiffness of a six story reinforced concrete frame structure

楼层	质量/t	刚度/($10^6\text{ kN}\cdot\text{m}$)	
		X 向	Y 向
1	5 215.1	1.488	1.488
2	4 870.4	2.377	2.377
3	4 870.4	2.422	2.422
4	4 870.4	2.379	2.379
5	4 870.4	2.260	2.260
6	4 698.0	1.981	1.981

表 6 阻尼器参数

Table 6 The parameters of dampers

阻尼器类型	阻尼器数量		阻尼系数 $c_d/(10^6\text{ N}\cdot\text{s/m})$	阻尼指数
	X 向	Y 向		
Kelvin 模型	24	24	200	1

则, 双目标优化算法在 X 向与 Y 向的最终阻尼器竖向布置如表 7 所示。在 3 条地震动作用下, 双目标优化算法的目标函数值与逐层逼近法、工程师设计非常接近, 但其 f_1 值均优于逐层逼近法, f_2 值均优于工程师设计, 再次说明该算法在阻尼器竖向布置上的有效性、合理性。而且, 布置的阻尼器集中于中下部楼层, 符合以往的阻尼器布置经验。

表 7 案例二的阻尼器布置方案和目标函数值

Table 7 Damper placement schemes and objective function values of case two

方法	地震波	各楼层的阻尼器布置数量(X=Y)						目标函数值 f_i	
		1层	2层	3层	4层	5层	6层	f_1	f_2
双目标优化算法	SAN FERNAND(110)	6	6	4	4	3	1	0.497 4	0.199 2
	SAN FERNAND(160)	6	5	4	5	2	2	0.613 1	0.187 5
	NORTHRIDGE	7	4	5	2	3	3	0.498 6	0.149 2
	X 向与 Y 向最终布置	6	5	4	4	3	2		
逐层逼近法	SAN FERNAND(110)	7	7	5	3	2	0	0.515 6	0.188 4
	SAN FERNAND(160)	6	7	5	3	2	1	0.621 6	0.230 9
	NORTHRIDGE	6	6	5	4	2	1	0.503 6	0.139 8
	X 向与 Y 向最终布置	6	6	5	3	2	2		
工程师设计	SAN FERNAND(110)	4	4	4	4	4	4	0.482 5	0.231 9
	SAN FERNAND(160)	4	4	4	4	4	4	0.592 5	0.212 6
	NORTHRIDGE	4	4	4	4	4	4	0.481 6	0.164 3

与原结构相比, 不同阻尼器布置方法的最大层间位移角和最大楼层加速度均有所降低。对于最大层间位移角, 双目标优化算法与逐层逼近法的竖向布置均能满足减震目标 1/200 的要求, 而在 A 波

作用下, 工程师设计的 1、2 层的层间位移角未能满足减震目标, 如图 12 所示。主要原因在于首层的楼层剪力较大和阻尼器数量不足, 导致首层的层间变形过大, 使其层间位移角未能满足减震目标。对于

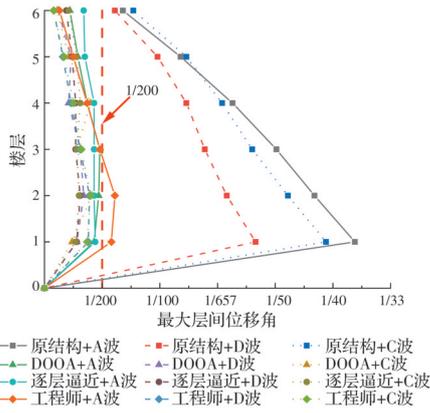


图 12 最大层间位移角包络图

Fig.12 Envelope diagram of maximum inter-story displacement angle

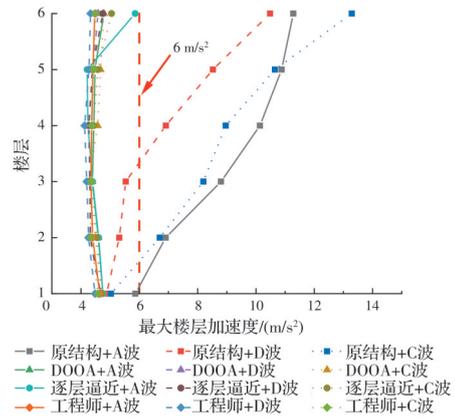


图 13 最大楼层加速度包络图

Fig.13 Envelope diagram of maximum floor acceleration

最大楼层加速度,双目标优化算法、逐层逼近法和工程师设计的最大楼层加速度均小于加速度减震目标 6 m/s^2 ,如图 13 所示。

4.2.3 阻尼器平面优化布置

在双目标优化算法确定的案例二阻尼器竖向

布置的基础上,分别让训练好的 GAN 模型和工程师进行阻尼器平面布置,并以工程师设计的阻尼器平面布置为目标设计。案例二的目标设计与生成设计如图 14、图 15 所示。

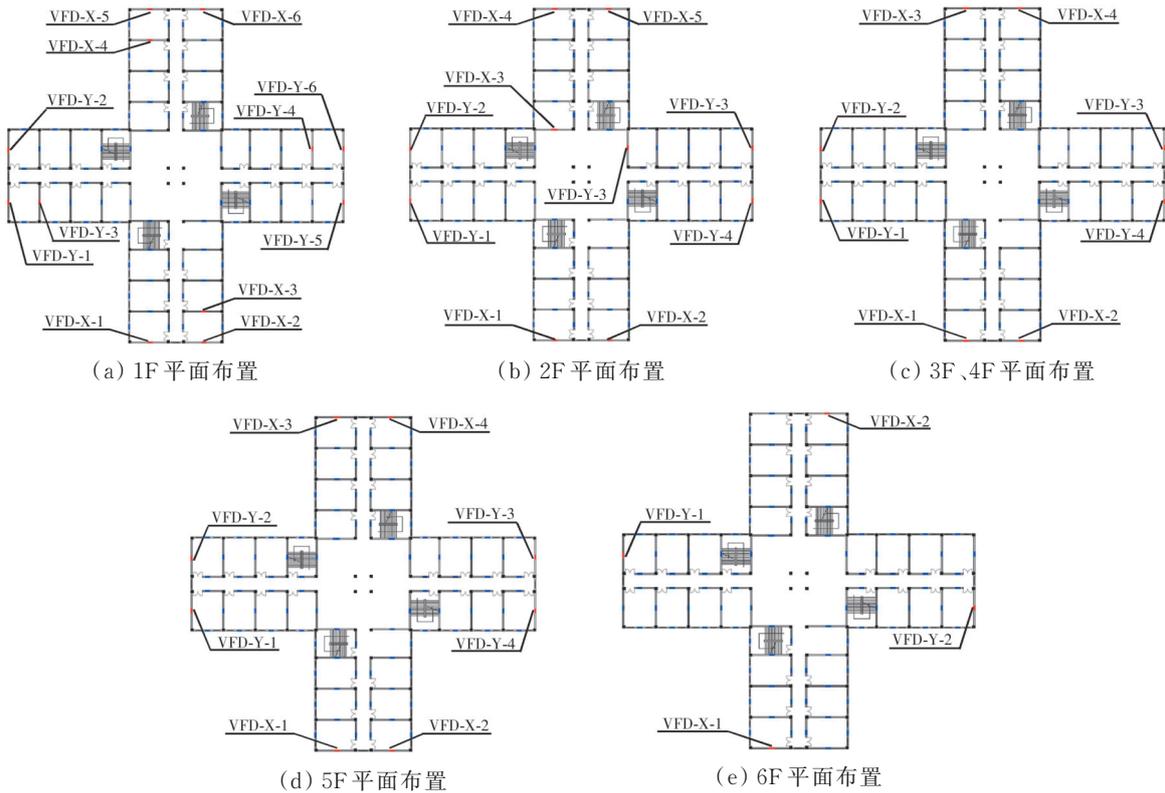


图 14 案例二目标设计

Fig.14 Objective design of case two

在该工程案例中,生成设计的综合相似性评价值为 $E=0.02$,各楼层的质心差异度和分散性差异度见图 15。由于相似性综合评价 E 非常接近 0,生成设计与工程师设计具有较高的相似度。虽然生成设计与目标设计的阻尼器平面位置不完全相同,

但阻尼器质心与分散性相同,导致其实际减震效果完全相同,例如该案例的 5F、6F。

4.3 双目标优化算法效率分析

阻尼器智能布置在竖向布置上耗时占比最大,对算法效率影响最大,故只针对双目标优化算法进

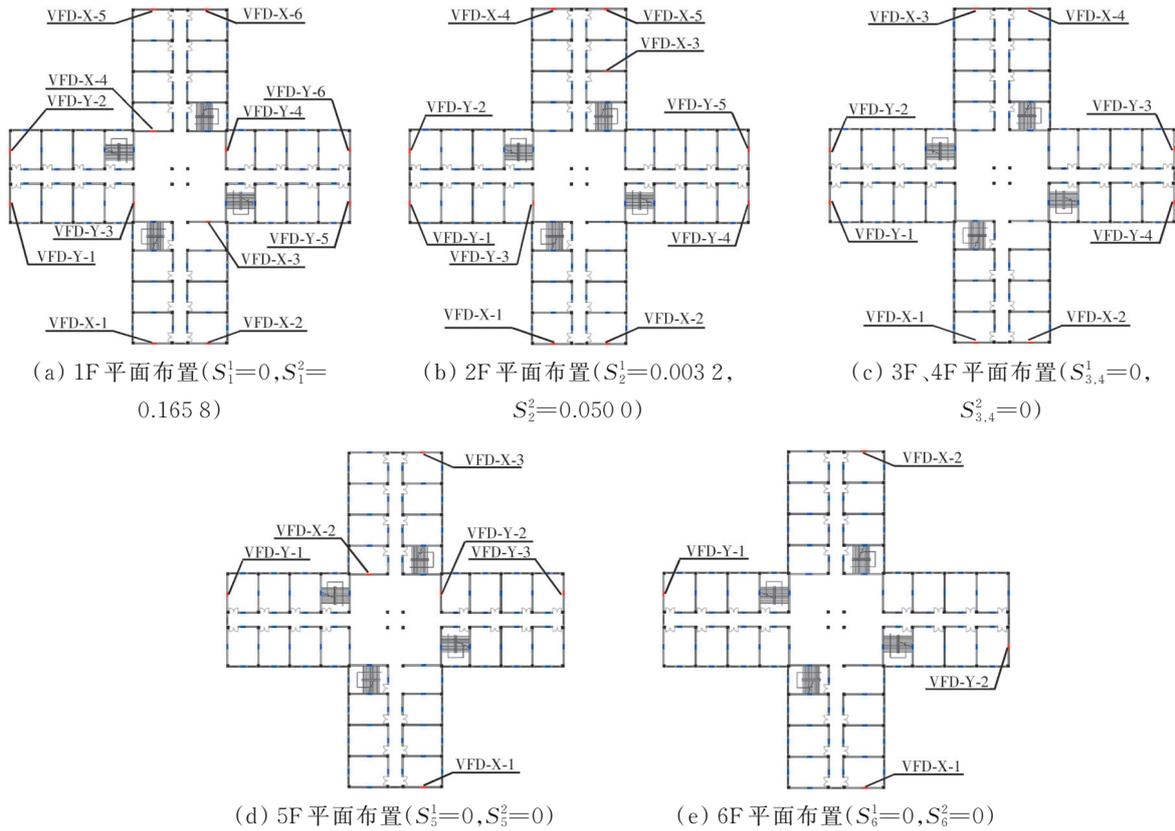


图 15 案例二生成设计

Fig.15 Generative design of case two

行效率分析。

在EI Centro地震波作用下,以案例二的标准层平面布置、阻尼器参数为依据,开展2、4、6、8、10和12层框架结构的双目标优化算法效率分析,并与逐层逼近法、工程师设计进行对比。采用双目标优化算法、逐层逼近法和工程师设计对框架结构分别进行5次设计,取其所用平均时间,其统计结果如表8所示。

表 8 计算时间

Table8 The time of calculation

楼层数量	阻尼器总数量	计算时间/min		
		双目标优化算法	逐层逼近法	工程师设计
2	8	8	30	20
4	16	10	60	45
6	24	14	90	68
8	32	19	120	80
10	40	24	150	98
12	48	32	180	150

由表8可知,双目标优化算法在阻尼器竖向布置上所用时间随楼层数量与阻尼器数量增大而增长,且远小于逐层逼近法与工程师设计。双目标优化算法计算时间较短,分析原因主要有两点:1)算法内嵌入了楼层地震响应有限元程序,可快速计算

最大楼层加速度、最大层间位移角,避免了调用有限元软件计算速度慢的问题;2)调整双目标优化算法的种群数量为5,迭代次数为100,既能保证优化结果较好,又能极大降低优化计算所用时间。而逐层逼近法计算时间最长,主要原因在于需要工程师使用有限元软件迭代计算并确定每个阻尼器所在楼层,直至布置完所有阻尼器。工程师设计所用时间位于两者之间,是由于工程师可以利用积累的减震设计经验减少迭代次数,从而较快地完成阻尼器竖向布置。

4.4 平面布置评价指标临界值 α

目前,尚未明确平面评价指标 E 的临界值,即:当 E 小于某个临界值时,生成设计与目标设计相似度较高,平面布置可靠,结构力学性能较好。因此,以抗扭力学性能的优劣来搜寻平面布置评价指标临界值 α 。针对阻尼器平面布置的相似性综合评价指标 E 的临界值,以工程案例二为试算模型,基于工程师设计的阻尼器竖向布置,开展12种不同平面布置的扭转力学分析。值得说明的是,虽然工程案例采用的黏滞阻尼器在理论上不提供刚度,但在实际工程中存在一定的刚度,会对结构的扭转产生影响。经过试算得到不同平面布置方式下的框架结构扭转周期比和考虑偶然偏心作用下的 X 、 Y 方向最大位

移比,以及相似性综合评价 E 值,如表 9 所示。其中,考虑偶然偏心的位移比采用规范反应谱方法进行计算,偶然偏心取 $0.05^{[19]}$ 。已知工程师设计的扭转周期比为 0.7859 ,最大扭转位移比均值为 1.173 。

将 12 种平面布置方式的分析结果绘制在图 16 中,可以看出:当相似性差异度综合评价 $E < \alpha = 0.1$

时,可保证生成设计与工程师设计的扭转周期比差异在 10% 以内,最大扭转位移比差异在 5% 以内,且扭转周期比、扭转位移比分别满足规范要求的 0.9 、 1.6 。案例一、案例二的相似性差异度综合指标 E 均小于 0.1 ,间接说明生成对抗网络生成的平面布置满足结构抗扭力学性能要求。

表 9 结构扭转周期比、位移比和 E 值

Table 9 The torsion period ratio, displacement ratio and E value of the structure

对称性	序号	1 阶周期 T_1	扭转周期 T_i	扭转周期比 T_i/T_1	与工程师设计的扭转周期比差异/%	最大扭转位移比			与工程师设计的最大扭转位移比均值差异/%	相似性综合评价 E
						X 向	Y 向	均值		
对称	1	1.185 0	0.931 3	0.785 9	0	1.173	1.173	1.173 0	0	0
	2	1.201 9	1.032 1	0.858 7	9.26	1.205	1.205	1.205 0	2.73	0.080 9
	3	1.201 1	1.161 2	0.966 8	23.02	1.258	1.257	1.257 5	7.20	0.316 2
	4	1.188 5	1.159 2	0.975 3	24.11	1.264	1.263	1.263 5	7.72	0.072 3
	5	1.189 7	1.154 3	0.970 2	23.45	1.264	1.263	1.263 5	7.72	0.230 4
非对称	6	1.200 5	0.971 2	0.809 0	2.94	1.190	1.212	1.201 0	2.39	0.176 1
	7	1.212 3	1.014 7	0.837 0	6.50	1.450	1.442	1.446 0	23.27	0.249 0
	8	1.237 0	1.001 1	0.809 3	2.98	1.539	1.531	1.535 0	30.86	0.316 2
	9	1.226 0	1.007 5	0.821 8	4.57	1.560	1.422	1.491 0	27.11	0.287 1
	10	1.189 8	1.158 4	0.973 6	23.88	1.267	1.263	1.265 0	7.84	0.150 9
	11	1.189 9	1.157 0	0.972 4	23.72	1.269	1.268	1.268 5	8.14	0.197 2
	12	1.189 4	1.157 0	0.972 8	23.78	1.265	1.264	1.264 5	7.80	0.302 7

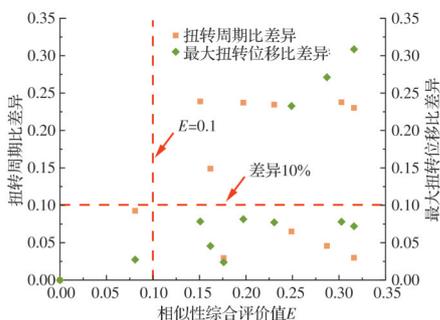


图 16 力学性能与评价指标相关性

Fig.16 The correlation between mechanical properties and evaluation indexes

5 结论

基于双目标优化算法和生成对抗网络算法进行阻尼器竖向和平面布置的智能设计,并进行了工程应用,得到以下结论。

1) 基于结构地震响应公式与双目标优化算法进行阻尼器竖向智能布置。在推导出线性黏滞阻尼减震结构弹性阶段地震响应公式后,采用双目标优化算法求解优化目标函数值 f_1 、 f_2 最小时的各楼层阻尼器数量,可实现线性黏滞阻尼器的竖向智能布置。

2) 基于生成对抗网络进行阻尼器水平智能布置。在完成阻尼器竖向布置后,即在确定各楼层阻

尼器数量后,采用生成对抗网络算法,对其生成器进行训练,利用生成器完成阻尼器平面智能布置,可实现线性黏滞阻尼器的平面智能布置。

3) 对两个框架结构减震设计案例进行双目标优化算法与生成对抗网络的工程应用。通过在竖向布置上同逐层逼近法、工程师设计进行对比,在平面布置上同工程师平面布置进行对比,可知:双目标优化算法生成的阻尼器竖向布置方案满足减震目标、生成对抗网络算法生成的阻尼器平面布置方案均与工程师的布置方案基本一致,直接说明了所提智能设计方法在阻尼器布置上的有效性。

参考文献

[1] SOONG T T, DARGUSH G F. 结构工程中的被动消能系统[M]. 董平,译. 北京:科学出版社,2005.
SOONG T T, DARGUSH G F. Passive energy dissipation systems in structural engineering [M]. Translated by DONG P. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)

[2] 高剑,王忠凯,潘毅,等. 罕遇地震下石化钢结构减震的关键影响因素[J]. 土木建筑与环境工程,2016,38(1):92-99.
GAO J, WANG Z K, PAN Y, et al. Influence factors of vibration reduction in petrochemical steel structure under rare earthquake [J]. Journal of Civil, Architectural

- &. Environmental Engineering, 2016, 38(1): 92-99. (in Chinese)
- [3] 潘毅, 陈侠辉, 赵俊贤, 等. 基于剪力比的黏弹性阻尼腋撑-RC框架结构设计方法[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(Sup1): 79-86.
PAN Y, CHEN X H, ZHAO J X, et al. Seismic design method of RC frame structure with knee brace of viscoelastic damper based on shear ratio [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(Sup1): 79-86. (in Chinese)
- [4] AGRAWAL A K, YANG J N. Optimal placement of passive dampers on seismic and wind-excited buildings using combinatorial optimization [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1999, 10(12): 997-1014.
- [5] 李钢, 李宏男. 位移型耗能减震结构优化设计[J]. 振动与冲击, 2007, 26(4): 65-68, 170.
LI G, LI H N. Optimal design of displacement-based energy dissipative devices [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(4): 65-68, 170. (in Chinese)
- [6] 李宏男, 曲激婷. 基于遗传算法的位移型与速度型阻尼器位置优化比较研究[J]. 计算力学学报, 2010, 27(2): 252-257.
LI H N, QU J T. Comparison of optimal placement of displacement-based and velocity-based dampers using genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(2): 252-257. (in Chinese)
- [7] 燕乐纬, 陈洋洋, 周云. 基于数字序列编码遗传算法的高层结构黏滞阻尼器优化布置[J]. 振动与冲击, 2015, 34(3): 101-107.
YAN L W, CHEN Y Y, ZHOU Y. Optimal positioning of viscous dampers in tall buildings based on digital sequence coding genetic algorithm [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(3): 101-107. (in Chinese)
- [8] 马宏伟, 陈丰收. 基于粗粒度并行遗传算法的阻尼器优化布置[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(11): 104-112.
MA H W, CHEN F S. Optimal arrangement of dampers based on coarse-grained parallel genetic algorithm [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(11): 104-112. (in Chinese)
- [9] 金波, 李梓溢, 周旺, 等. 基于改进遗传算法的阻尼器位置与数量优化分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11): 114-121.
JIN B, LI Z Y, ZHOU W, et al. Optimal analysis on location and quantity of dampers based on improved genetic algorithm [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(11): 114-121. (in Chinese)
- [10] 王曙光, 杨焯, 杜东升. 减震结构不同类型阻尼器同步优化方法[J]. 振动工程学报, 2020, 33(6): 1141-1149.
WANG S G, YANG Y, DU D S. Synchronization optimization of different types of dampers for energy dissipation structure [J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(6): 1141-1149. (in Chinese)
- [11] 陈丰收, 吕述晖, 李安琪. 基于多目标并行遗传算法的阻尼器优化布置[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(5): 65-72.
CHEN F S, LYU S H, LI A Q. An optimal arrangement of dampers based on multi-objective parallel genetic algorithm [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(5): 65-72. (in Chinese)
- [12] 周玉娴, 王曙光. 框架结构线性黏滞阻尼器双目标同步优化布置研究[J]. 振动工程学报, 2023, 36(1): 44-51.
ZHOU Y X, WANG S G. Study on double-objective synchronous optimal layout of linear viscous dampers in frame structures [J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(1): 44-51. (in Chinese)
- [13] ERDEM ÇERÇEVİK A, AVŞAR Ö, DILSİZ A. Optimal placement of viscous wall dampers in RC moment resisting frames using metaheuristic search methods [J]. Engineering Structures, 2021, 249: 113108.
- [14] 程卫红, 巫振弘, 陈灏恺. 墙式连接位移型阻尼器在框架结构中的布置原则及连接设计要点[J]. 建筑结构, 2021, 51(Sup1): 935-939.
CHENG W H, WU Z H, CHEN H K. Analysis of the layout principles and connection design points of wall-mounted displacement-type damper in frame structure [J]. Building Structure, 2021, 51(Sup1): 935-939. (in Chinese)
- [15] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2022.
LIU J B, DU X L. Structural dynamics [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2022. (in Chinese)
- [16] LIAO W J, LU X Z, HUANG Y L, et al. Automated structural design of shear wall residential buildings using generative adversarial networks [J]. Automation in Construction, 2021, 132: 103931.
- [17] FU B C, GAO Y Q, WANG W. Dual generative adversarial networks for automated component layout design of steel frame-brace structures [J]. Automation in Construction, 2023, 146: 104661.
- [18] 廖文杰, 陆新征, 黄羽立, 等. 剪力墙结构智能化生成式设计方法: 从数据驱动到物理增强[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1): 82-92.
LIAO W J, LU X Z, HUANG Y L, et al. Intelligent generative structural design methods for shear wall buildings: From data-driven to physics-enhanced [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(1): 82-92. (in Chinese)
- [19] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)