

基于遗传算法的负刚度装置轨道方程优化

孙彤¹, 夏婉瑜¹, 郑勇², 孙丽¹, 李宏男^{1,3}

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 沈阳卫德科技集团有限公司, 辽宁 沈阳 110136; 3. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要 目的 对一种轨道式负刚度装置(NSD)的关键部件进行优化设计,研究其优化后控制效果. 方法 采用遗传算法对NSD的轨道母线方程进行优化设计.选取影响装置力学性能的两个关键参数进行优化;以舒适性和安全性为指标,设计了兼顾二者的优化目标函数.采用与适应性相关联的交叉和变异算子,既能保护种群中优良个体不被破坏,又能提高其收敛性.在智能隔振 Benchmark 模型中对其控制效果进行优化.结果 经优化得出最优幅值 $A = 0.4774\text{ m}$, $\omega = 2.4068$,并计算出位移减震率为24%,加速度减震率为1.6%.结论 遗传算法优化能够大幅提高NSD装置的控制效果,进一步降低结构在地震下的位移响应,确保结构的安全性.

关键词 遗传算法;负刚度装置;轨道母线方程;优化设计;Benchmark 模型

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Optimal Design of Rail Generatrix Equation of Negative Stiffness Device Using Genetic Algorithm

SUN Tong¹, XIA Wanyu¹, ZHENG Yong², SUN Li¹, LI Hongnan^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Shenyang Weide Technology Group Co. Ltd., Shenyang, China, 110136; 3. Department of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024)

Abstract: The key component of a track type negative stiffness device (NSD) is optimized and the response of the structure with NSD after optimization is studied. Genetic algorithm is used to optimize the curve function of NSD. Two key parameters affecting the mechanical properties of the device are selected to optimize, and an optimization objective function considering both comfort and safety is designed. The crossover and mutation operators associated with adaptability can not only protect the excellent individuals from being destroyed, but also improve their convergence. The control effect is optimized in the smart isolated benchmark building. After optimization, the optimal amplitude $A = 0.4774\text{ m}$, $\omega = 2.4068$. The displacement damping ratio is 24%, the acceleration damping rate is 1.6%. Genetic algorithm optimization can greatly improve the control

收稿日期:2020-02-28

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51808355);中国博士后科学基金面上项目(2019M651146)

作者简介:孙彤(1986—),男,博士,主要从事结构振动控制等方面研究.

effect of NSD device, further reduce the displacement response of the structure under earthquake, and ensure the safety of the structure.

Key words: genetic algorithms; negative stiffness device; rail generatrix equation; optimal design; Benchmark model

传统抗震设计主要通过结构的塑性变形消耗地震能量, 有效提高结构抗震性能的同时, 也会带来以诸如震后结构大位移、永久变形和结构功能受损等问题^[1-3]. 为解决以上问题, 负刚度控制作为新型的被动控制手段受到了广泛关注. 国内外学者提出了多种能够实现负刚度的装置^[4-6], 这些研究的重心主要放在介绍装置构造^[7-10]和定性的概念验证上^[11-15], 可以充分说明负刚度控制能够有效降低受控结构的加速度和位移响应.

然而, 目前对负刚度装置进一步的量化研究分析较少, 特别是针对负刚度装置的优化设计尚属空白. 基于此, 笔者提出一种新型轨道式负刚度装置, 采用遗传算法^[16-17]对其关键构件“轨道块”的设计参数进行优化设计, 并在智能隔振 Benchmark 模型^[18]中验证其控制效果. 研究表明, 经遗传算法优化后, 轨道式负刚度装置对 Benchmark 智能隔振模型的控制效果显著, 相对于 LQR 控制, 其峰值位移响应大幅度降低.

1 计算模型

1.1 装置力学模型

轨道式负刚度装置由预压缩弹簧、滚轮和轨道块构成(见图1).

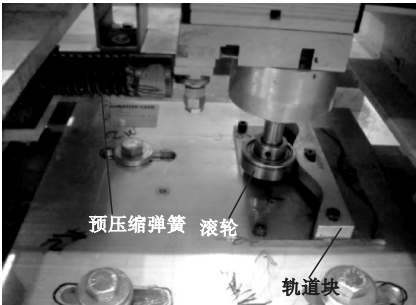


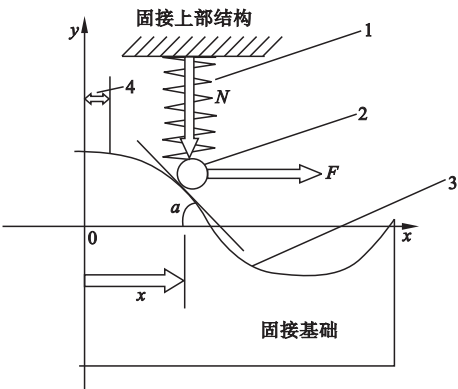
图1 轨道式负刚度装置
Fig.1 Negative stiffness device

预压缩弹簧与上部结构连接, 并将滚轮压向轨道块, 轨道块固接在基础上. 滚轮在轨道块上移动时, 会产生与结构位移方向一致的分力, 即 NSD 的负刚度力 F . 可以看出, 轨道曲面形状是影响 NSD 装置的力学性能的重要因素.

轨道式负刚度装置的受力模型如图2所示. 假设滚轮和轨道块均为刚体, 轨道曲面母线方程为 $f(x)$, 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

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

式中: k 为弹簧的刚度; ΔL 为弹簧的预压缩量; $f(x)$ 为轨道母线方程; x_0 为滚轮初始位置坐标; μ 为摩擦因数; N 为压力; α 为轨道倾斜角. 由力学模型可知, 通过改变轨道母线方程 $f(x)$ 可以改变 NSD 装置的力学性能.



1.预压缩弹簧; 2.滚轮; 3.轨道块; 4.水平段。

图2 轨道式负刚度装置受力模型

Fig.2 Mechanical modelling of the NSD

1.2 计算模型

考虑一栋 n 层受控楼房, 其在地震作用下的运动方程由式(2)给出:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + E_g(x_1) = -M\ddot{x}_g. \tag{2}$$

式中: M 、 C 、 K 分别代表结构质量、阻尼和刚度的 n 阶矩阵; x 为 $n \times 1$ 位移向量; x_1 为隔震层位移; $g(x_1)$ 为与位移相关的 NSD 控制力; E 为 $n \times 1$ 控制力作用位置向量; \ddot{x} 、 \dot{x} 分别为结构各层的加速度位移向量; \ddot{x}_g 为地震动加速度; I 为元素全部为 1 的 $n \times 1$ 列向量。

2 遗传算法优化设计

2.1 优化变量

由装置力学模型可知,影响 NSD 装置负刚度力的参数主要有:①弹簧刚度 k ;②预压缩弹簧的预压缩量 ΔL ;③轨道块的曲线方程 $f(x)$ 。其中前两项因素主要影响弹簧压力,优化空间不大。轨道曲线方程中的两个关键参数幅值 A 和频率 ω 分别对应轨道起伏程度和坡度,对装置的力-位移曲线起决定性作用。

式(1)中摩擦力分量 $F_f = -\operatorname{sgn}(\dot{x})\mu N \cos^2\alpha$,该装置材料为钢材,摩擦系数 μ 较小,且余弦平方进一步降低摩擦力取值,故摩擦力对 NSD 输出力影响相对较小。考虑算法优化效率,将忽略摩擦力影响。

原 NSD 装置^[11]母线方程为

$$f(x) = \begin{cases} 0.3 \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{3} \cdot (x + 0.05)\right], & x < -0.05; \\ 0.3, & -0.05 \leq x \leq 0.05; \\ 0.3 \cdot \cos\left[\frac{2\pi}{3} \cdot (x - 0.05)\right], & 0.05 < x. \end{cases} \quad (2)$$

选取母线方程中幅值 A 和频率 ω 作为优化变量。轨道的初始位置设置了左右各 0.05 m 的水平段,结构位移在该范围内时,装置不产生负刚度力。这样,受控结构在位移较小时保持原有刚度,能够避免放大微小激励的扰动。水平段长度只需选取适当,达到设计目的即可。

综上所述,得到待优化方程为

$$f(x) = \begin{cases} A \cdot \cos[\omega \cdot (x + 0.05)], & x < -0.05; \\ A, & -0.05 \leq x \leq 0.05; \\ A \cdot \cos[\omega \cdot (x - 0.05)], & 0.05 < x. \end{cases} \quad (3)$$

2.2 编码

目前几种常用的编码技术有二进制编码、浮点编码和字符编码等,笔者采用二进制编码。

原轨道方程 $A = 0.3, \omega = \frac{2}{3}$,经试算确定

待优化参数的取值范围为

$$\begin{cases} 0 < A < 0.6, \\ 0 < \omega < 4. \end{cases}$$

幅值 A 二进制编码长度为 10,频率 ω 二进制编码长度为 10,将两端编码首尾相连,组成本次优化个体,其编码长度 20。

2.3 目标函数

安全性和舒适性是结构振动控制的两个关键指标,二者分别对应位移响应和加速度响应。结合负刚度控制的特点,设计如下目标函数^[14]:

$$Z = 0.5 \frac{a_{\max}}{a_0} + 0.5 \frac{x_{\max}}{x_0}. \quad (4)$$

式中: a_{\max} 和 a_0 分别为地震作用下优化后的 NSD 控制结构峰值加速度和初始 NSD 控制结构峰值加速度。同理 x_{\max} 和 x_0 分别为地震作用下优化后 NSD 和初始 NSD 控制结构的最大位移。目标函数 Z 由两项相加构成:第一项 $0.5a_{\max}/a_0$ 体现地震作用下负刚度系统对加速度的控制效果,从舒适度角度考虑;第二项 $0.5x_{\max}/x_0$ 反映了负刚度系统对结构位移控制效果,从安全角度考虑。均衡考虑 NSD 对加速度和位移的控制,系数均取 0.5,此时 NSD 在地震作用下发挥最佳抗震效果^[19]。

2.4 选择算子

选择操作是依照优胜劣汰的思想,根据个体的适应度评估结果,挑选适应性更好的

基因. 选择操作可以提高全局收敛性、计算效率和避免基因缺失. 考虑种群规模及收敛性需求,采用轮赌盘法作为选择算子:

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

(5)

式中: p_i 为第 i 个个体被选中的概率; f_i 为第 i 个个体的适应度.

2.5 交叉、变异算子

交叉在遗传算法获取新优良个体中起关键作用^[20-22]. 进行交叉运算之前需要对群体中的个体进行配对,常用的方式是随机配对,交叉算子的设计不但需要保持现有的优良基因还要能够产生较好的新个体. 笔者采用两点交叉,即两个点随机设置于父代基因编码中,交换基因首尾两段染色体.

变异是以较小的概率对个体基因的某个或某些位值进行改变,进而生成新个体. 变异本身是一种随机算法,其局部搜索能力能够加速个体向最优解进化,与选择和交叉算子结合后,能避免由选择和交叉运算而造成的某些信息丢失,产生更多优良的个体,保证遗传算法能够得到更优的结果.

交叉算子与变异算子相互配合,共同完成了对搜索空间的全局搜索和局部搜索,从而使得遗传算法能够以良好的搜索性能完成最优问题的寻优过程. 然而,随机性在加速局部收敛的同时,也可能对当前的优良个体造成破坏,不利于算法收敛. 为了保护优良个体、提高运算效率和收敛性,将交叉变异概率设置为个体适应度的函数,由式(6)、式(7)给出:

$$P_{ci}(i) = p_1 \left(1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \right)^2} \right).$$

(6)

$$P_{mi}(i) = p_2 \left(1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \right)^2} \right).$$

(7)

式中: $P_{ci}(i)$ 和 $P_{mi}(i)$ 分别为第 i 个个体交叉和变异的概率; p_1 和 p_2 分别为设定的交叉操

作和变异操作的概率; f_i 为第 i 个个体的适应度.

3 数值模拟与结果分析

使用智能隔振 Benchmark 模型^[13]进行结构控制效果模拟,该结构为 8 层钢框架结构,自振周期为 3 s,阻尼比为 5%. 模型每层有两个水平平动自由度和一个扭转自由度. 1~8 层结构各自自由度的自振周期见表 1.

表 1 结构自振周期

Table 1 Periods of the structure			
楼层	南北向周期/s	东西向周期/s	扭转周期/s
1	0.78	0.89	0.66
2	0.27	0.28	0.21
3	0.15	0.15	0.12
4	0.11	0.11	0.08
5	0.08	0.08	0.07
6	0.07	0.07	0.06
7	0.06	0.06	0.06
8	0.05	0.06	0.05

图 3 为智能隔振楼房隔震层平面图,隔振支座及控制器的数量和位置如图所示.

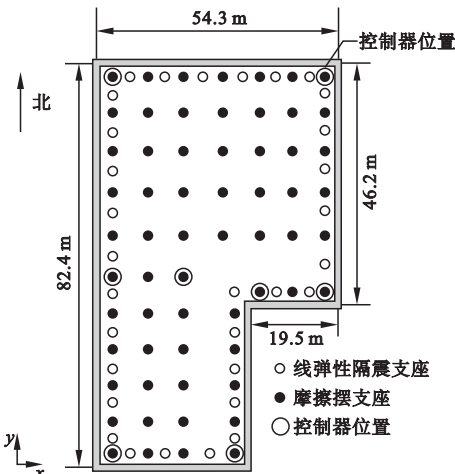


图 3 智能隔振楼房隔震层平面图

Fig.3 Plan of isolation layer of smart isolation building
将 Benchmark 模型时程分析计算出的结构峰值位移和峰值加速度作为目标函数关键参数,用以评价优化效果. 同时作为计算个体适应度的依据,适应度函数由式(8)给出:

$$f(i)=\frac{1}{x_{\max}}+\frac{1}{a_{\max}}.$$
(8)

式中: x_{\max} 和 a_{\max} 分别为结构位移和加速度峰值响应,取二者绝对值倒数之和作为适应度,兼顾了控制效果的安全性和舒适性.

NSD 双向布置,将 Benchmark 程序进行适当修改并将其嵌入到遗传算法主程序中.由于受控结构的非线性特性,选取最不利地震动记录作为地震激励^[20]:F4(El Centro,N69W,1979)峰值加速度设为 400 g,相当于

烈度为 8 度地区大震情况.

应用遗传算法,设定初始种群规模为 20,进化代数为 20,二进制长度为 20,代沟为 0.9,交叉操作概率为 0.7,变异操作概率为 0.1,选择算子采用轮盘赌法,交叉算子两点交叉方式,变异算子采用离散型,将 Benchmark 程序嵌入到遗传算法主程序中,对新型轨道式负刚度装置的轨道母线方程进行优化,优化结果见表 2.

表 2 优化参数及控制效果
Table 2 Parameters and results

轨道幅 值 A/m	频率 ω	优化前峰 值位移/m	优化前峰值加 速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	优化后峰 值位移/m	优化后峰值加 速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	位移减 震率/%	加速度减 震率/%
0.477 4	2.408 6	0.016 2	1.164 8	0.012 3	1.145 6	24	1.6

表中位移减震率定义为优化前后位移响应之差与优化前位移响应的比值,加速度减震率同理.其中,优化前响应值取自文献[11].可以看出,经过优化加速度控制效果略有提升,位移控制效果有较大提升.

表 3 给出了 El Centro 波激励下,Benchmark 模型在只有隔振(Iso)、LQR 控制和 NSD 控制三种工况下,结构的顶层加速度响应^[11].可以看出,NSD 控制下的响应值比 LQR 控制降低了 36.2%.数据表明对比其他控制方法,负刚度装置在控制结构峰值加速度上有优势.

表 3 不同工况下结构加速度反应对比
Table 3 Peak acceleration under different cases

地震波	工况	顶层加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	减震率/%
	Iso	5.501	0
El Centro	LQR	6.322	-14.9
	NSD	4.033	26.7

通过优化,大幅降低了结构地震位移峰值,提高了结构安全性;在震后结构有更小的残余变形,可以确保经济性.加速度峰值优化效果不明显,一方面 NSD 原本的加速度控制效果优秀,再优化困难;另一方面 NSD 自身的加速度控制效果好,优化的意义不大,而且

相比于结构地震时舒适性,结构的安全性更为重要.

对经过优化的 NSD 控制效果进行研究,模拟持续时间为 30 s,响应时程曲线如图 4、图 5 所示,优化后峰值响应比优化前峰值响应降低了 24%.由图可知整体上优化前位移时程曲线(实线)包裹着优化后位移时程曲线(虚线),说明优化后控制效果得到了全面提高.

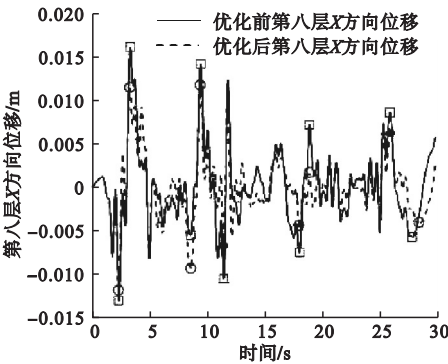


图 4 优化前后第八层 X 方向位移对比图
Fig. 4 X-displacements contrast diagram of eighth floor before and after optimizing

每隔 0.005 s 采集一次数据,每个参数一次模拟采集 6 000 个数据,为了更直观地体现本次优化效果,将 6 000 个数据按照时间先后均分成 10 组,在每组中取最大值,将

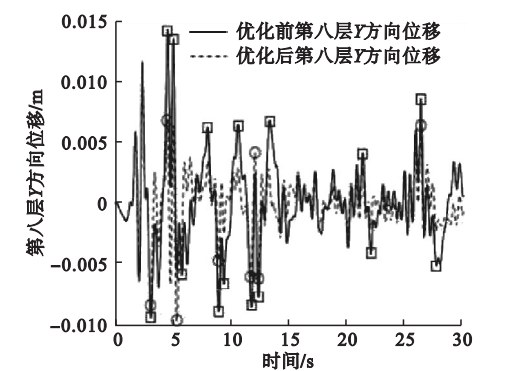


图5 优化前后第八层Y方向位移对比图

Fig. 5 Y-Displacements contrast diagram of eighth floor before and after optimizing

优化前后区间段最值列入表中加以对比,形成位移、加速度区间最值对比结果(见表4、表5).表中两个方向共20组对比数据中,仅有1组优化后区间最值大于优化前最值.经过优化,NSD在整个控制过程中的表现都得到提高.

表4 优化前后位移时程区间最值对比(X方向)

Table 4 Interval maximum values of X-direction displacement before and after optimization		
时间/s	优化前位移/m	优化后位移/m
0~3	0.013 1	0.012 0
3~6	0.016 2	0.011 5
6~9	0.005 6	0.009 5
9~12	0.014 2	0.012 2
12~15	0.006 0	0.005 7
15~18	0.006 3	0.004 0
18~21	0.007 6	0.004 9
21~24	0.004 0	0.003 0
24~27	0.008 6	0.006 8
27~30	0.005 8	0.004 2

研究表明,优化可以显著提高 NSD 在 Benchmark 智能隔振结构中的控制效果,表现为两方面:降低地震中结构位移峰值;普遍降低结构地震过程中发生的位移.

图6和图7给出了优化前后X方向和Y方向加速度时程对比.可以看出在两个方向上二者都十分接近,峰值加速度减震率为1.6%,优化效果不明显.这是由于负刚度控

表5 优化前后位移时程区间最值对比(Y方向)

Table 5 Interval maximum values of Y-direction displacement before and after optimization

时间/s	优化前位移/m	优化后位移/m
0~3	0.011 6	0.011 6
3~6	0.014 3	0.009 7
6~9	0.009 0	0.004 8
9~12	0.008 6	0.006 2
12~15	0.007 8	0.006 3
15~18	0.002 6	0.002 6
18~21	0.003 7	0.002 6
21~24	0.004 2	0.002 8
24~27	0.008 6	0.006 4
27~30	0.005 2	0.002 3

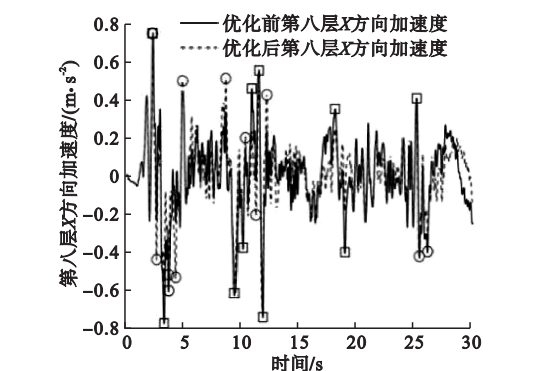


图6 优化前后第八层X方向加速度对比曲线

Fig. 6 X-accelerations contrast diagram of eighth floor before and after optimizing

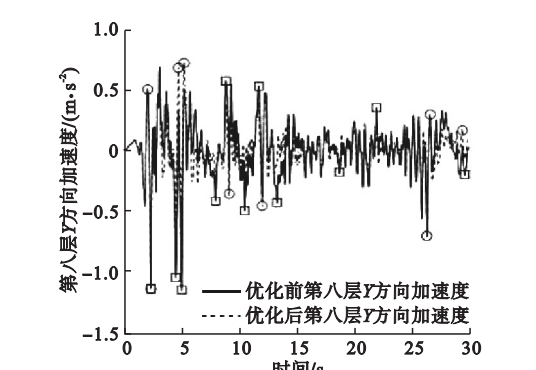


图7 优化前后第八层Y方向加速度对比曲线

Fig. 7 Y-accelerations contrast diagram of eighth floor before and after optimizing

制能够降低结构刚度,对于加速度控制有天然的优势,所以优化空间有限.

不同方向优化前后加速度时程区间最值对比结果见表 6 和表 7。由表可知,在 20 个区间最值对比组中,有 17 组优化后峰值小于优化前峰值。通过优化,整体上降低了地震过程中的加速度。

表 6 优化前后加速度时程区间最值对比(X 方向)

Table 6 Interval maximum values of X-direction acceleration before and after optimization

时间/s	优化前位移/m	优化后位移/m
0~3	0.747 0	0.744 9
3~6	0.776 8	0.628 9
6~9	0.333 9	0.509 5
9~12	0.745 2	0.715 9
12~15	0.238 7	0.426 7
15~18	0.269 3	0.213 6
18~21	0.408 4	0.256 4
21~24	0.271 8	0.247 9
24~27	0.433	0.427 2
27~30	0.265 4	0.195 6

表 7 优化前后加速度时程区间最值对比(Y 方向)

Table 7 Interval maximum values of Y-direction acceleration before and after optimization

时间/s	优化前位移/m	优化后位移/m
0~3	1.146 2	1.145 3
3~6	1.165 1	0.792 5
6~9	0.570 3	0.372 6
9~12	0.542 2	0.386 6
12~15	0.470 7	0.474 4
15~18	0.232 5	0.237 7
18~21	0.312 6	0.241 8
21~24	0.350 5	0.236 5
24~27	0.720 8	0.579 0
27~30	0.322 2	0.178 1

目标函数 Z 值随代数变化曲线如图 8 所示。从图中可以看出,在最初的几代中适应度有所起伏,是淘汰劣质基因的过程;在第十代到第十三代函数值稳定下降,是优秀基因脱颖而出的过程;第十四代后函数值趋于稳定,是收敛过程。

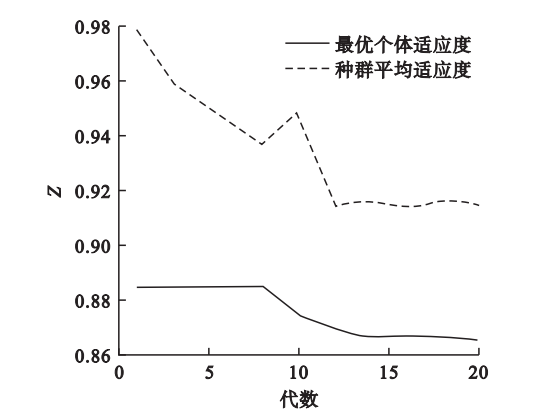


图 8 Z 随代数变化曲线

Fig. 8 Z changing with generation

4 结 论

(1) 经优化后得出最优幅值 $A=0.477\ 4\text{ m}$, $\omega=2.406\ 8$,并计算出位移减震率为 24%,加速度减震率为 1.6%。遗传算法优化可有效提高 NSD 控制系统位移减震效果。

(2)通过分析时程曲线与区间最值对比表可知,优化在减小峰值位移和加速度的同时可以整体上控制地震发生时间段内的位移与加速度。

参考文献

[1] 张鹏,李宏男,田利,等.输电塔-线体系振动控制研究进展[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(174):87-95.
(ZHANG Peng, LI Hongnan, TIAN Li. A review of vibration control techniques of the transmission tower-line system [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2018,34(174):87-95.)

[2] 祁皓,徐翔.高层隔震结构多阶振型减震机理与倾覆问题研究[J]. 振动工程学报,2013,26(4):487-492.
(QI Ai, XU Xiang. Research on multi-modal damping effect and overturning problem of high-rise isolated buildings [J]. Journal of vibration engineering, 2013, 26(4): 487-492.)

[3] 孙广俊,李爱群,张志强.基于等效层模型的静动力抗震分析及其在剪力墙减震设计中的应用[J]. 振动工程学报,2013,26(1):75-82.
(SUN Guangjun, LI Aiqun, ZHANG Zhiqiang. Static-dynamic earthquake analysis based on equivalent storey modal and its application in vibration reduction analysis of shear wall

- structure [J]. Journal of vibration engineering, 2013, 26(1): 75–82.)
- [4] PASALA D, SARLIS A, NAGARAJAIA H, et al. Adaptive negative stiffness; new structure modification approach for seismic protection [J]. Journal of structure engineering, 2013, 139(7): 1112–1123.
- [5] SARLIS A A, PASALA D T R, CONSTANTINOU M C, et al. Negative stiffness device for seismic protection of structures; shake table testing of a seismically isolated structure [J]. Journal of structural engineering, 2016, 142(5): 1–13.
- [6] LE T D, AHN K K. Experimental investigation of a vibration isolation system using negative stiffness structure [J]. International journal of mechanical sciences, 2013, 70: 99–112.
- [7] SARLIS A A, PASALA D R, CONSTANTINOU M C, et al. Negative stiffness device for seismic protection of structures [J]. Journal of structural engineering, 2013, 139(7): 1124–1133.
- [8] NAGARAJAIAH S, PASALA D T R, REINHORN A, et al. Adaptive negative stiffness: a new structural modification approach for seismic protection [J]. Advanced materials research, 2013, 639–640: 54–66.
- [9] PASALA D T, SARLIS A A, REINHORN A M, et al. Simulated bilinear-elastic behavior in a SD of elastic structure using negative stiffness device; experimental and analytical study [J]. Journal of structural engineering, 2014, 140(2).
- [10] 孙彤, 李宏男. 采用轨道式负刚度装置的结构减震控制研究 [J]. 振动工程学报, 2017, 30(3): 449–456.
(SUN Tong, LI Hongnan. Study on structure vibration control using curve-based negative stiffness device [J]. Journal of vibration engineering, 2017, 30(3): 449–456.)
- [11] 杨巧荣, 冉茂来, 何福文, 等. 隔震结构基于阻尼负刚度装置的地震响应研究 [J]. 振动工程学报, 2018, 31(6): 16–25.
(YANG Qiaorong, RAN Maolai, HE Fuwen, et al. Study on seismic response of isolated structure based on damping negative stiffness device [J]. Journal of vibration engineering, 2018, 31(6): 16–25.)
- [12] LAI Z, NAGARAJAIAH S. Sparse structural system identification method for nonlinear dynamic systems with hysteresis/inelastic behavior [J]. Mechanical systems and signal processing, 2019, 117(15): 813–842.
- [13] WANG M, SUN F F, JIN H J. Performance evaluation of existing isolated buildings with supplemental passive pseudo-negative stiffness devices [J]. Engineering structures, 2018, 177: 30–46.
- [14] 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(2): 81–84.
(JI Han, XIONG Shishu, YUAN Yong. Influence analysis of the structural seismic reduction effect based on negative stiffness principle [J]. Journal of huazhong university of science and technology (natural science edition), 2010(2): 81–84.)
- [15] 龚微, 熊世树, 谭平, 等. 拟负刚度磁流变智能隔震系统振动台试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2019(12): 1–10.
(GONG Wei, XIONG Shishu, TAN Ping, et al. Shaking table test of smart isolation system with magneto-rheological damper employing pseudo-negative-stiffness control algorithm [J]. Journal of building structure, 2019(12): 1–10.)
- [16] 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2015.
(LEI Yingjie, ZHANG Shanwen. Functions and examples in Matlab GA toolbox [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2015.)
- [17] NAGARAJAIAH S, NARASIMHAN S. Smart base-isolated benchmark building. Part II: phase I sample controllers for linear isolation systems [J]. Structural control and health monitoring, 2006, 13(2/3): 589–604.
- [18] 孙彤, 李宏男. 基于遗传算法的负刚度装置优化布置 [J]. 大连理工大学学报, 2017, 57(1): 87–91.
(SUN Tong, LI Hongnan. Optimal placement of negative device using genetic algorithm [J]. Journal of Dalian university of technology, 2017, 57(1): 87–91.)
- [19] SUN T, LAI Z, NAGARAJAIAH S, et al. Negative stiffness device for seismic protection of smart base isolated benchmark building [J]. Structural control and health monitoring, 2017, 24(11): 1–10.
- [20] 曲哲, 叶列平, 潘鹏. 建筑结构弹塑性时程分析中地震动记录选取方法的比较研究 [J]. 土木工程学报, 2011(7): 18–29.
(QU Zhe, YE Lieping, PAN Peng. Comparative study on methods of selecting earthquake ground motions for nonlinear time history analyses of building structures [J]. China civil engineering journal, 2011(7): 18–29.)
- [21] ZHANG C W, WANG H. Swing control of suspended structures using the active inertia driver system; theoretical modeling and experimental verification [J]. Structural control and health monitoring, 2020, 27(6): 2543.
- [22] 孙丽, 苏中新, 张春巍, 等. 基于楔形腔结构的光纤位移传感器 [J]. 光电子·激光, 2017, 28(6): 573–578.
(SUN Li, SU Zhongxin, ZHANG Chunwei, et al. A fiber bragg grating displacement sensor based on wedge cavity structure [J]. Journal of optoelectronics laser, 2017, 28(6): 573–578.)
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)