

基于改进遗传算法的阻尼器位置与数量优化分析

金波[†], 李梓溢, 周旺, 唐丽莹, 姜早龙
(湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要:为实现大跨网架结构上黏滞阻尼器位置和数量的优化,以替换杆件模态应变能百分比之和取得最大值为目标函数,以结构节点位移、加速度和杆件应力的峰值为优化控制指标,采用 Matlab 编写并验证改进的遗传算法优化程序.基于优化结果,采用 ANSYS 对网架结构在多遇、罕遇地震作用下的震动控制效果进行数值模拟对比分析.结果表明,阻尼器优化布置方案减震效果良好,明显改善结构受力状况;以安全性及经济性为优化目标,得到最佳方案,总结出大跨网架中黏滞阻尼器的布置规律,对实际工程减震设计具有参考意义.

关键词:大跨网架结构;黏滞阻尼器;遗传算法;减震性能

中图分类号:TU393.3

文献标志码:A

Optimal Analysis on Location and Quantity of Dampers Based on Improved Genetic Algorithm

JIN Bo[†], LI Ziyi, ZHOU Wang, TANG Liying, JIANG Zaolong
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to optimize the location and quantity of viscous dampers on the large-span truss structure, the maximum value is obtained by summing the percentage of modal strain energy of replacement bars, and thus taken as the objective function. The peak values of node displacement, acceleration and element stress are regarded as the optimization control index. In addition, Matlab is adopted to verify an adaptive genetic algorithm optimization program. Based on the optimization result, the seismic control effect of the optimized truss structure under the frequent and rare seismic is compared through ANSYS analysis. The results show that the optimized scheme of damper has superior damping effect, which can obviously improve the stress situation of structure. Therefore, the best optimization scheme is obtained and the rules for optimal location of viscous dampers in large-span truss structures are summarized through taking safety and economy into account, which is of reference significance for the actual engineering damping design.

Key words: large-span truss structure; viscous dampers; genetic algorithm; damping behavior

* 收稿日期:2019-01-29

基金项目:湖南省交通厅科技项目(201525), Science and Technology Program of Communication Department of Hunan Province(201525)

作者简介:金波(1976—),男,湖北天门人,湖南大学副教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: Jinbo@hnu.edu.cn

黏滞阻尼器作为一种安装简单、性能稳定的消能减震装置被广泛运用于建筑领域. 国内外学者在黏滞阻尼器位置、参数和数量优化中取得了丰硕的研究成果,主要集中在多、高层建筑领域. Gürgöze 等^[1]基于能量准则的线性保守机械系统研究分析黏性阻尼器的最优位置; Ashour 等^[2]通过基本模态速度的指数对布置于结构速度较大处阻尼器进行研究; Furuya 等^[3]以 40 层的高层建筑为研究对象,分析在强风作用下的建筑各层阻尼器的合理布置问题; 翁大根等^[4]针对附加阻尼器的结构提出了实用设计方法,可用于黏滞阻尼式的减震设计中,进而满足不同条件下的减震控制目标和需求; Yan 等^[5-6]针对激励器以及阻尼器的数量和位置优化问题,提出了离散和连续优化的求解方法; 李寿英等^[7-8]采用数值计算方法,分析了阻尼器支架刚度与建筑减振效果之间的关系; 邹银生等^[9]针对中低层建筑,对阻尼器结构提出一种简化的分析法——pushover 法; Singh 等^[10]通过对比分析黏滞性阻尼器和黏弹性阻尼器在结构中的最佳利用,以期获得理想的减震性能.

与多、高层建筑相比,大跨网架空间结构复杂,构件数量众多,当设置 m 个阻尼器,允许设置阻尼器的位置共有 n 个时,布置情况共有 $n!/[m!(n-m)!]$ 种. 网架结构中可设置阻尼器的位置众多,因此需要考虑的情况就非常多.

遗传算法作为常用的寻优手段,被引入到大跨空间结构的阻尼器优化中,许多学者针对这一主题进行了研究. Bishop 等^[11]对被动黏滞阻尼器进行了研究,证明了遗传算法对空间桁架结构的适用性; 乌兰等^[12]编制了遗传算法,对偏心结构的阻尼器位置进行优化; 邢丽丽等^[13]将目标函数进行优化,分析了不同布置形式结构的抗震能力. 但传统遗传算法存在易陷入局部最优解和收敛困难等不足. 因此,要将遗传算法应用于黏滞阻尼器在大跨空间结构上的优化研究,需对现有的优化算法进行改进,以更高效、准确地获得最优的阻尼器数量与布置.

大跨网架结构通常刚度较小,阻尼比较低,在地震或其他动力荷载作用下会发生较大振动,易造成结构的损伤甚至倒塌. 本文以大跨网架结构为研究对象,运用改进自适应遗传算法,优化黏滞阻尼器位置与数量,对大跨网架结构位移、加速度与杆件应力等控制指标进行分析,为大跨网架结构的减震设计

提供参考.

1 减震思路及遗传算法改进

1.1 大跨网架结构阻尼器优化思路

在大跨空间结构中,为了既能有效控制结构震动,又不过多增加结构重量、保持结构几何形态不变,通常以替换杆件的方式设置阻尼器. 本文采用线性黏滞阻尼器,其减震的实质是通过增大附加阻尼来提高结构整体的阻尼,而附加阻尼又与所有替换单元的模态应变能百分比之和成线性关系^[14],所以阻尼器位置优化的思路即为最大化所有替换杆件单元的模态应变能百分比之和.

1.2 遗传算法的编码方式及初始种群确定

针对遗传算法中的计算效率降低、容易陷入局部最优、收敛困难等不足,本文从交叉策略入手,引入自适应调节机制,旨在解决迭代的早期收敛以及后期的稳定性问题. 将约束条件通过等式关系写入适应度函数,转化为无罚函数的无约束优化问题,从而提高寻优效率.

对于大跨网架结构,以 n 表示杆件总数, m 表示设置阻尼器的数目,阻尼器可以布置的位置为 n ,若第 j 个基因值为 1,表示将对应的单元替换为阻尼器;若为 0,表示该处不设置阻尼器,十分方便地采用二进制编码对阻尼器的位置进行编码,对应的码长为 n . 大跨网架中阻尼器设置方案众多,为保证初始群体的多样性,防止出现局部收敛,应设置尽可能较大的初始群体.

1.3 适应度函数

根据上述优化思路,阻尼器的位置优化实质上是使所替换杆件的模态应变能之和最大化,即在前 p 阶控制模态下,从模态应变能矩阵 $[\delta_{ij}]_{p \times n}$ 中寻求一个子矩阵 $[\delta_{ij}]_{p \times m}$,使得 $[\delta_{ij}]_{p \times m}$ 的最小行元素之和达到最大. 适应度函数表示为:

$$\max g(X) = \min \left(\sum_{j=1}^n \delta_{1j} x_j, \sum_{j=1}^n \delta_{2j} x_j, \dots, \sum_{j=1}^n \delta_{pj} x_j \right),$$

$$\sum_{j=1}^n x_j = m \quad (1)$$

式中: $\sum_{j=1}^n \delta_{pj} x_j$ 表示第 p 阶模态所有替换杆件的模态应变能之和; $x_j = 0$ 或 $1 (j = 1, 2, \dots, n)$.

1.4 改进的遗传操作、收敛准则及程序实现流程

1)选择. 采用轮盘赌,能较正确地反映个体适应度,使适应度高的保留,低的淘汰.

2)交叉. 采用改进的二进制单点交叉法,可以不用惩罚函数即可产生满足要求的个体,提高收敛速度和求解质量.

3)变异. 采用两基因座的基本变异算子,在基因码值为0和1的位置上随机选取两个基因座进行调换.

4)交叉和变异算子遗传算法信息交流的主要途径,取值不当会降低计算效率和精度. 自适应 P_c 和 P_m 的取值能根据适应度自动调整,当适应度值越接近最大适应度值时 P_c 和 P_m 就越小;当等于最大适应度值时, P_c 和 P_m 则等于零,以此来获取最佳 P_c 和 P_m 的取值. P_c 和 P_m 的计算表达式如下:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg} \\ P_{c1}, & f' < f_{avg} \end{cases} \quad (2)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}}, & f \geq f_{avg} \\ P_{m1}, & f < f_{avg} \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_{max} 表示种群中最大适应度值; f_{avg} 表示每代群体的平均适应度值; f' 表示要交叉的2个个体中较大的适应度值; f 表示变异个体的适应度值; P_{c1} 和 P_{c2} 、 P_{m1} 和 P_{m2} 分别表示给定的交叉、变异概率值.

当最优适应度值连续多代无变化,以最大停滞与最大进化代数作为收敛准则.

根据上述程序设计的步骤,大跨网架结构阻尼器优化的遗传算法求解流程如图1所示.

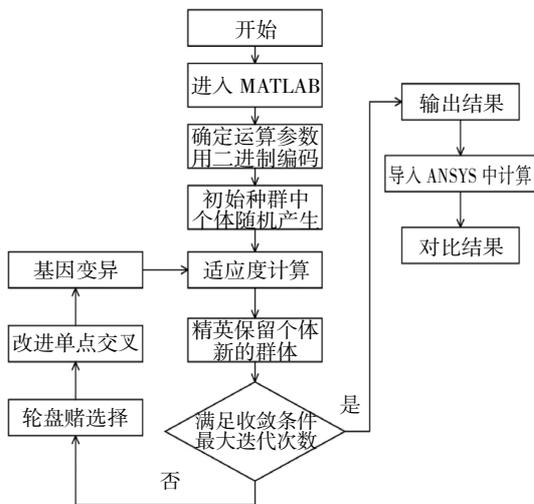


图1 遗传算法程序流程示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of genetic algorithms procedure

2 工程概况及计算模型

2.1 工程概况

以某体育场看台大跨网架结构为研究对象,建筑立面及平面图如图2所示. 该结构设计采用空间钢管网架结构,中部整个网架部分呈波浪型,中间顶部距离地面约13m,纵向长度为120m,最大跨度33m,横向宽度为9m,所有网架上下弦杆、腹杆均采用Q235空心钢管,其中弦杆截面92mm×4mm,腹杆截面86mm×3mm;钢柱采用Q345空心钢管,截面为800mm×16mm,每根钢柱距顶部2m处设有4根Q345钢拉杆,截面100mm×3mm,拉结中间桁架部分;屋面则采用氟碳纤膜材料.

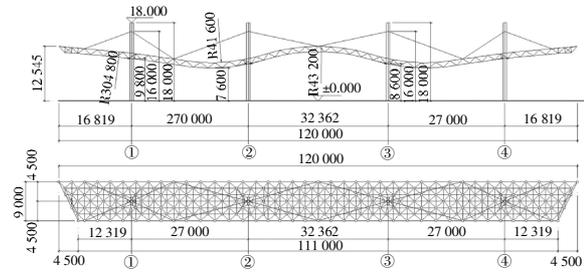


图2 网架结构立面及平面图(单位:mm)

Fig.2 Elevation and plane figure of truss structure(unit:mm)

2.2 计算模型

荷载取值结合实际的工程,屋面恒荷载取0.6kN/m²,活荷载取0.5kN/m²,基本雪压取0.4kN/m²,基本风压取0.35kN/m². 将屋面恒载+0.5雪荷载,即0.8kN/m²作为重力荷载代表值,采用 MASS21 单元模拟,施加在上弦杆件节点处. 钢材选择考虑包辛格效应的经典双线性随动强化模型(BKIN),网架中的弦杆、腹杆均采用 link180 单元,用来模拟杆件之间的铰接关系;4根立柱采用 beam188 单元,立柱下端点全部固接,杆件与立柱之间采用固接方式;黏滞阻尼器用 combin14 单元模拟,阻尼系数取2000kN·s/m.

采用有限元软件 ANSYS 对结构整体进行建模,中部网架一共945个单元,整个空间桁架模型如图3所示.

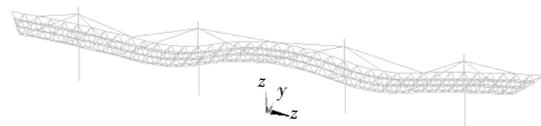


图3 有限元分析模型

Fig.3 Analysis model of finite element

3 多遇地震下的减震分析

3.1 计算参数

本工程所在地区地震设防烈度为 8 度,场地类别 II 类,设计基本加速度 $0.2g$,结构阻尼比取为 0.02 . 由于 El-centro 地震波加速度时程曲线的前 15 s 包含了整个时间历程上的最大值,且整体的波动较 15 s 后强烈,取前 15 s 进行计算,步长为 0.02 ,地震加速度时程峰值按多遇地震规定值调整到 70 cm/s^2 .

由 ANSYS 模态分析得知,该网架结构 1~6 阶的模态质量参与系数较大,将前 6 阶模态作为控制模态,计算对应的模态应变能矩阵. 首先将阻尼器个数取为 16 个,遗传算法参数设置:初始群体规模取 5 000,最优个体的保留数目取 16 个,交叉概率分别取 0.9 和 0.7 ,变异概率分别取 0.01 和 0.005 ,最大停滞代数与最大进化代数分别取 50 、 500 代.

通过遗传算法程序优化计算,最优的 16 个个体出现在杆件号分别为 11、48、69、144、151、181、184、496、553、557、559、625、633、662、664、859 的位置,将其替换为黏滞阻尼器,如图 4 所示. 为了验证遗传算法优化程序的正确与否,将上述按照优化算法的布置方案与随机布置阻尼器的方案进行减震效果的比较. 随机布置方案杆件选取 16 根,分别为 26、61、119、162、284、335、400、423、540、551、613、665、705、802、845、883,如图 5 所示.

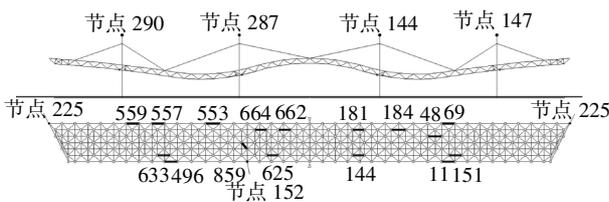


图 4 优化布置方案

Fig.4 Case of optimized placement

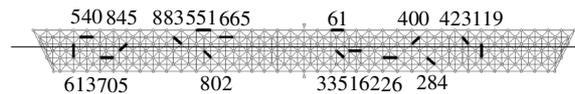


图 5 随机布置方案

Fig.5 Case of random placement

黏滞阻尼系数均保持 $2\ 000 \text{ kN}\cdot\text{s/m}$, 多遇地震下的减震效果对比结果如表 1 所示,相应的时程曲线如图 6 所示. 由于节点 x 向的位移峰值很小,不需考虑减震,故表中未列出.

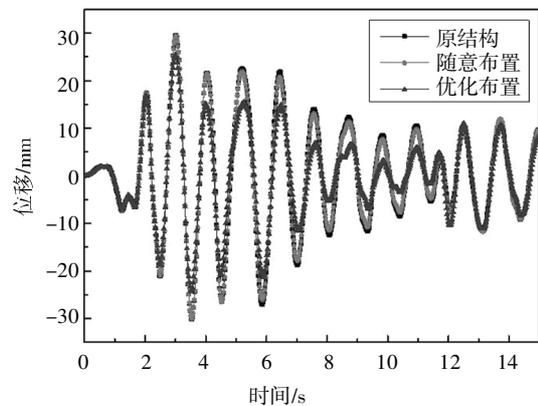
表 1 各布置方案结构响应峰值及减震系数

Tab.1 Peak values of seismic response and vibration reduction rate of structure under different placement

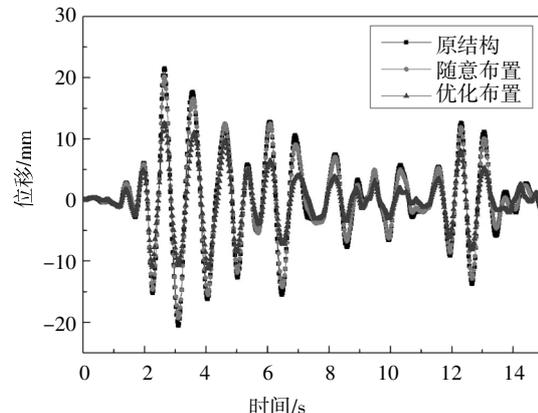
方案	y 向位移 峰值/mm	z 向位移 峰值/mm	y 向加速度 峰值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	z 向加速度 峰值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
原结构	节点 147 30.18	节点 225 21.55	节点 144 1.80	节点 82 3.25
随机布置	节点 147 30.09(0.3%)	节点 82 20.21(6.2%)	节点 144 1.78(1.1%)	节点 82 3.22(0.9%)
优化布置	节点 147 25.45(15.7%)	节点 152 17.40(19.3%)	节点 144 1.68(6.7%)	节点 82 2.81(13.5%)

注:括号中表示减震系数 β ,表 3、表 4 同.

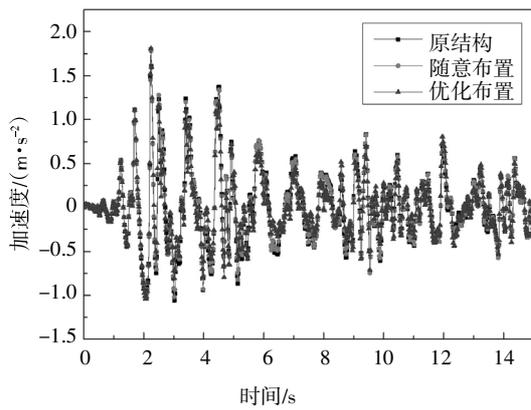
从表 1 和图 6 可以看出,随机替换的结构减震效果并不理想,位移最大减震系数只能达到 6.2% ,而加速度减震系数几乎为零. 通过遗传算法优化的阻尼器位置布置方案,位移的减震系数均大于 15% ,加速度的减震系数最大能达到 13.5% ,从时程曲线也可以看出优化布置方案明显减小了位移响应. 除了 y 向加速度减震系数与随机布置相差不大,其余项减震系数相差都在 10% 左右,减震效果明显优于随机布置,证明上述遗传算法程序优化结果的合理性及正确性.



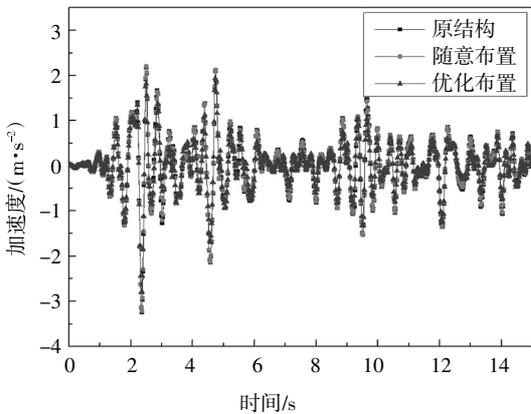
(a)147 号节点 y 向位移



(b)225 号节点 z 向位移



(c)144号节点y向加速度



(d)82号节点z向加速度

图6 结构响应时程对比曲线

Fig.6 The comparison of time-history curves of structure response

3.2 阻尼器位置减震优化布置

为得到最优阻尼器数量布置方案,只改变优化程序中阻尼器数量,得到杆件选取结果见表2,由于杆件号众多,这里只以编号形式表现。

将不同阻尼器个数的优化方案与原结构进行对比,阻尼系数保持不变,同样进行El-centro波三向作用下的地震响应分析,结果见表3、图7。

从表3、图7可以看出,在多遇地震中,通过优化布置的结构节点位移与加速度响应均有不同程度的减小,位移的减震系数范围为15.7%~53.0%,加速度的减震系数范围为6.7%~56.3%。经优化的阻尼器布置方案,当阻尼器的设置数量小于28个时,减震系数增长较快;但超过28个时,减震系数增长缓慢,甚至出现y向的位移和加速度峰值增加,这是由于替换阻尼器过多导致局部刚度降低。当阻尼器设置为28个时,结构的减震效果相对最好,位移减震系

数均大于48%,最高z向达到51.7%,y向位移峰值减小了14.62mm,z向位移峰值减小了11.14mm;加速度减震系数最高z向达到53.5%,y向能达到15.0%。从安全性、经济性方面考虑,当优化方案设置28个阻尼器时,对结构的位移、加速度峰值控制效果最为显著,因此选用此布置方案做进一步分析。

表2 阻尼器个数优化布置方案

Tab.2 The optimized placement case of different number of dampers

个数	杆件替换单元编号
16	11、48、69、144、151、181、184、496、553、557、559、625、633、662、664、859
20	9、11、69、144、146、151、182、188、357、496、502、533、553、626、633、646、663、665、670、839
24	11、48、69、73、144、151、164、181、184、188、318、496、553、557、622、625、627、630、633、646、663、667、670、839
28	11、15、48、69、73、144、151、164、181、184、188、318、338、487、496、553、557、622、625、627、630、633、646、663、667、670、839、859
32	9、11、69、73、143、145、150、152、164、180、182、184、327、338、377、496、500、514、533、554、559、625、627、631、633、646、663、670、820、843、859、968
36	11、15、48、67、69、143、145、151、169、181、183、188、338、377、486、495、497、513、515、532、554、557、560、617、625、627、633、662、664、670、708、809、820、848、859、945

表3 不同阻尼器个数的结构响应峰值及减震系数

Tab.3 Peak values of seismic response and vibration reduction rate of structure in different number of dampers

个数	y向位移峰值/mm	z向位移峰值/mm	y向加速度峰值/(m·s ⁻²)	z向加速度峰值/(m·s ⁻²)
原结构	30.18	21.55	1.80	3.25
16	25.45(15.7%)	17.40(19.3%)	1.68(6.7%)	2.81(13.5%)
20	21.90(27.4%)	16.22(24.7%)	1.60(11.1%)	2.62(19.4%)
24	18.72(38.0%)	13.73(36.3%)	1.58(12.2%)	1.96(39.7%)
28	15.56(48.4%)	10.41(51.7%)	1.53(15.0%)	1.51(53.5%)
32	15.13(49.9%)	10.27(52.3%)	1.54(14.4%)	1.45(55.4%)
36	15.32(49.2%)	10.12(53.0%)	1.55(13.9%)	1.42(56.3%)

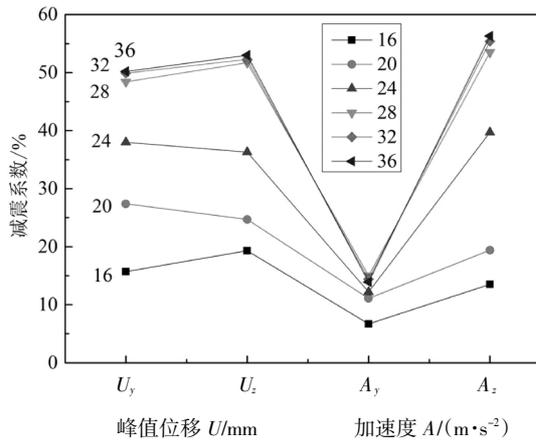


图 7 阻尼器数量对结构峰值响应的影响

Fig.7 The influence of the number of dampers on the peak response of the structure

4 罕遇地震下的减震分析

在多遇地震研究的基础上,选取阻尼器个数设置为 28 个的优化方案,并选用 El-centro、Kobe 波进一步分析结构在罕遇地震下的减震效果。

4.1 阻尼器布置规律

优化方案采用 28 个阻尼器时的位置布置如图 8 所示,黏滞阻尼器用粗线表示.统计得到,上弦杆 9 处,下弦杆 15 处,腹杆 4 处被替换为阻尼器.影响结构减震的阻尼器最优位置主要布置在上、下弦杆,以下弦杆居多,分布于左右对称跨跨中部区域和 4 根立柱周围,且均是位于外侧边缘的部位;腹杆替换数量较少,布置在中部两根立柱处。

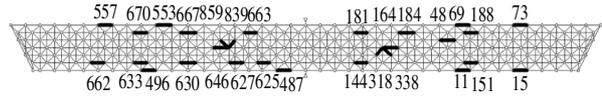


图 8 阻尼器位置布置示意图

Fig.8 Placement of dampers location

4.2 位移与加速度对比

El-centro 与 Kobe 地震波按罕遇地震规定值将加速度最大值调整为 400 cm/s²,进行三向输入,取前 15 s 进行计算,步长 0.02 s.分别对原结构及采用了 28 个阻尼器的优化布置结构(阻尼系数 2 000 kN·s/m)进行弹塑性时程分析,得到不同地震波下的位移、加速度及减震系数,见表 4。

表 4 罕遇地震下结构响应峰值及减震系数

Tab.4 Peak values of seismic response and vibration reduction rate under rare earthquakes

地震波	方案	x 向位移 峰值/mm	y 向位移 峰值/mm	z 向位移 峰值/mm	x 向加速度 峰值/(m·s ⁻²)	y 向加速度 峰值/(m·s ⁻²)	z 向加速度 峰值/(m·s ⁻²)
El-centro 波	原结构	51.71	172.27	123.01	7.46	10.30	18.55
	优化布置	26.74(48.3%)	89.37(48.1%)	60.53(50.8%)	5.82(22.0%)	8.98(12.8%)	8.64(53.4%)
Kobe 波	原结构	68.49	229.44	193.23	6.65	9.26	16.24
	优化布置	38.84(43.3%)	128.87(43.8%)	93.82(51.4%)	3.55(46.6%)	6.45(30.3%)	6.63(59.2%)

由表 4 可以看出,在 El-centro 波的作用下,由于结构仍然处于弹性阶段,在罕遇地震中呈现的减震效果跟多遇地震规律相近,位移减震系数平均大于 48%,加速度减震系数 z 向最高 53.4%,x 与 y 向相对较低.而对于 Kobe 波,结构由于外界激励而使部分杆件进入了塑性,z 向位移减震系数最高,达到 51.4%,x、y 向也分别达到了 40%以上;加速度方面,也是 z 向加速度减震系数最高,达到 59.2%,x 向 46.6%,y 向 30.3%,均超过 30%,整体减震效果良好.可以看出,罕遇地震中,优化布置结构对于不同的地

震波均能有效减小结构的位移与加速度幅值,控制效果较好。

4.3 结构杆件应力对比

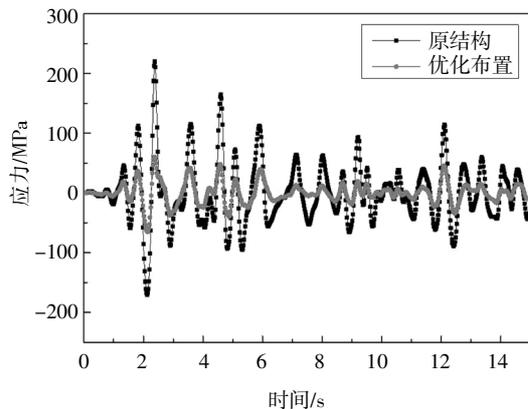
为了对比原结构和优化布置结构杆件的应力变化,分别提取不同地震波下杆件应力峰值,结果如表 5、图 9 所示。

从表 5 可以看出,罕遇地震下,对 El-centro 波优化布置结构中杆件应力减震系数达到 22.4%,峰值减小了 49.35 MPa;而对 Kobe 波杆件应力减震系数达到 31.6%,峰值减小了 85.88 MPa,使原结构中

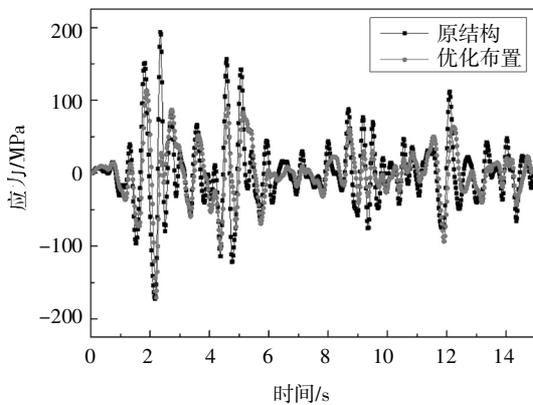
表 5 不同阻尼器个数的结构响应峰值及减震系数

Tab.5 Stress peak values of bar and vibration reduction rate under rare earthquakes

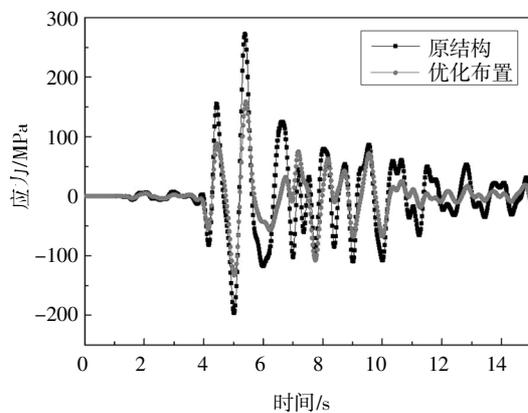
地震波	方案	应力峰值 /MPa	杆件编号	减震系数/%
El-centro 波	原结构	219.94	626	22.4
	优化布置	170.59	645	
Kobe 波	原结构	272.01	968	31.6
	优化布置	186.13	645	



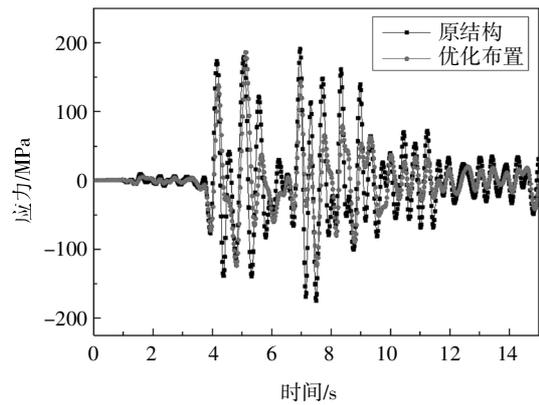
(a)El-centro 波 626 号杆件应力时程



(b)El-centro 波 645 号杆件应力时程



(c)Kobe 波 968 号杆件应力时程



(d)Kobe 波 645 号杆件应力时程

图 9 罕遇地震作用下杆件应力时程对比曲线

Fig.9 The comparison of time-history curves of bar stress under rare earthquake

应力达到屈服极限的杆件在优化布置结构中应力均减小至弹性范围内. 图 9 中也能看出, 不同地震波下优化布置结构均能有效降低杆件应力峰值, 起到很好的减震控制效果, 改善结构整体受力状态.

5 结论

基于优化结果, 采用 ANSYS 对网架结构在多遇、罕遇地震作用下的震动控制效果进行数值模拟对比分析, 结论如下:

1) 以替换杆件的模态应变能百分比之和最大化作为阻尼器位置优化目标, 采用改进的自适应遗传算法结合 Matlab 编写优化程序. 对比多遇地震下优化布置和随机布置方案下结构的响应峰值, 结果显示优化布置方案的减震效果明显优于随机布置方案, 验证了优化程序的合理性和正确性.

2) 阻尼器设置个数仅在一定范围内有利于减震. 这是由于替换杆件虽然会增加结构的附加阻尼, 但同时降低结构的局部刚度, 某些响应甚至较未设置阻尼器结构更大. 选择合适的阻尼器数量无论从安全还是经济方面考虑, 都十分必要.

3) 通过改进遗传算法优化的阻尼器优化布置方案能有效降低网架结构在多遇、罕遇地震下构件各向响应峰值, 震动控制效果良好. 罕遇地震时, 能有效减小结构杆件的应力幅值, 使结构各个构件处于弹性状态, 改善受力状态, 降低构件发生强度破坏的概率.

4)从黏滞阻尼器布置规律,替换的杆件主要分布在网架立柱附近的弦杆和腹杆处,弦杆均是位于远离立柱的外侧边缘,而腹杆靠近中部立柱。

参考文献

- [1] GÜRGÖZE M, MÜLLER P C. Optimal positioning of dampers in multi-body systems [J]. *Journal of Sound & Vibration*, 1992, 158(3):517—530.
- [2] ASHOUR S A, HANSON R D. Effect of added dampers on the seismic response of multi-story buildings [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1994, 19(3):389—402.
- [3] FURUYA O, HAMAZAKI H, FUJITA S. Proper placement of energy absorbing devices for reduction of wind-induced vibration caused in high-rise buildings [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 1998, 74:931—942.
- [4] 翁大根,张超,吕西林,等.附加黏滞阻尼器减震结构实用设计方法研究[J].*振动与冲击*,2012,31(21):80—88.
WENG D G,ZHANG C,LÜ X L,*et al.* Practical design procedure for a energy-dissipated structure with viscous dampers [J]. *Journal of Vibration and Shock*,2012,31(21):80—88.(In Chinese)
- [5] YAN Y J,YAM L H. Optimal design of number and locations of actuators in active vibration control of a space truss [J]. *Smart Materials & Structures*,2002,11(4):496—503.
- [6] MILMAN M H,CHU C C. Optimization methods for passive damper placement and tuning [J]. *Journal of Guidance,Control, and Dynamics*,1994,17(4):848—856.
- [7] 李寿英,王世峰,陈政清.阻尼器支架刚度对悬索桥吊索减振效果影响的数值研究[J].*湖南大学学报(自然科学版)*,2017,44(1):9—15.
LI S Y,WANG S F,CHEN Z Q. Numerical investigation on influence of damper support stiffness on damping effect of suspension bridge hangers [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*,2017,44(1):9—15.(In Chinese)
- [8] QU J,LI H. Optimal placement of passive energy dissipation devices by genetic algorithms [J]. *Mathematical Problems in Engineering*,2012(3):295—308.
- [9] 邹银生,陈敏,冯承辉.黏滞阻尼器消能减震结构的简化设计[J].*湖南大学学报(自然科学版)*,2005,32(6):1—5.
ZOU Y S,CHEN M,FENG C H. Simplified design method for energy dissipation systems using viscous dampers [J].*Journal of Hunan University (Natural Sciences)*,2005,32(6):1—5.(In Chinese)
- [10] SINGH M P,MORESCHI L M. Optimal placement of dampers for passive response control [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*,2010,31(4):955—976.
- [11] BISHOP J A,STRIZ A G. On using genetic algorithms for optimum damper placement in space trusses [J]. *Structural & Multidisciplinary Optimization*,2004,28(2/3):136—145.
- [12] 乌兰,李爱群,沈顺高.基于遗传算法的偏心结构黏滞阻尼器优化布置研究[J].*工程抗震与加固改造*,2014,36(2):1—7.
WU L,LI A Q,SHEN S G. Optimal distribution of viscous damper for eccentric structure by genetic algorithm [J].*Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*,2014,36(2):1—7.(In Chinese)
- [13] 邢丽丽,周颖.黏滞阻尼器型伸臂桁架的最优布置形式研究[J].*地震工程与工程振动*,2016,36(1):68—76.
XING L L,ZHOU Y. The study of optimal arrangement form of outrigger trusses with viscous dampers [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*,2016,36(1):68—76.(In Chinese)
- [14] 朱礼敏,钱基宏,张维嶽.大跨空间结构中黏滞阻尼器的位置优化研究[J].*土木工程学报*,2010,43(10):22—29.
ZHU L M,QIAN J H,ZHANG W Y. Optimal location of viscous dampers in large-span space structures [J]. *China Civil Engineering Journal*,2010,43(10):22—29.(In Chinese)