

基于 PSO 的钢管混凝土减震框架 小震作用下优化分析*

梁健伟¹, 任凤鸣²

(1. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广州大学工程抗震研究中心, 广东 广州 510006)

摘要: 基于粒子群算法, 以钢管混凝土框架的层间位移角及构件内力为约束条件、防屈曲支撑核心单元横截面积总和为目标函数, 采用 Matlab 编写了适用于钢管混凝土减震框架的优化算法, 并对钢管混凝土减震框架进行了优化分析。结果表明: 采用粒子群算法对钢管混凝土减震框架进行参数优化是可行的。粒子群算法参数少、收敛速度快, 是一种适用于钢管混凝土减震框架的新型优化方法。

关键词: 粒子群算法; 钢管混凝土框架; 防屈曲支撑; 参数优化

中图分类号: TV352 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2015)02-0475-05

0 引言

钢管混凝土结构因其竖向承载力高、塑性好、经济效益好等优点, 在高层建筑中的应用已越来越广泛(钟善桐, 2006)。现代建筑的高度越来越高, 结构也更加复杂, 对建筑结构在地震作用下的性能要求也越来越高。在钢管混凝土框架中设置耗能减震装置能有效地改善结构的抗震性能, 减小结构和构件的损伤, 为了进一步提高结构的抗震性能和耗能能力, 对钢管混凝土减震框架的参数进行优化是很有意义的。

目前智能优化算法是优化领域的一个研究热点, 已有学者采用智能优化方法对耗能减震结构的耗能装置参数优化或位置优化进行了研究。曲激婷和李宏男(2008)提出了针对黏弹性阻尼器优化设置的新型数学模型, 并采用遗传算法对黏弹性阻尼器进行了位置优化。Farhat 等(2009)采用遗传算法对设置防屈曲支撑的耗能减震结构分别进行单目标优化和多目标优化。熊仲明等(2011)采用循环优化法以及循环优化和遗传算法相结合的方法分别对耗能减震结构的耗能减震装置进行位置优化。目前的研究主要采用遗传算法对耗能减震结构进行优化, 但遗传算法在建立模

型时需要先确定遗传编码, 遗传操作也比较复杂。

粒子群算法(Particle Swam Optimization, 简称 PSO)是一种新型的智能优化算法, 由于其参数较少、优化效果好等特点而被应用于很多领域(苏海锋等, 2012; 江岳文等, 2007; 王森等, 2012)。目前 PSO 已经在土木工程中得到了应用(Perez, Behdinan, 2007; 陈秋莲等, 2007; 李晓龙等, 2009), 但在耗能减震结构中的应用主要针对阻尼器的优化(Leung, Zhang, 2009), 针对耗能减震结构性能优化的研究尚少。笔者基于 PSO 采用 Matlab 编写了钢管混凝土减震框架优化算法, 以钢管混凝土框架的层间位移角和结构构件的内力为约束条件、防屈曲支撑的总截面面积为目标函数, 通过算例对该优化算法在钢管混凝土减震框架中的应用进行了分析研究。

1 粒子群算法基本原理

粒子群算法的研究始于对大自然生物行为的分析(崔志华, 曾海潮, 2011), Kennedy 和 Eberhart(1995)最先提出了粒子群优化算法。在 PSO 中, 优化问题可能的解可视为算法中的粒子, 每个粒子都有各自的速度和位置。每个粒子根据其适应值, 确定粒子的个体最优位置以及群体最优

* 收稿日期: 2013-07-27.

基金项目: 国家自然科学基金(51278130, 51108095)和亚热带建筑科学国家重点实验室开放课题(2012KB11)联合资助。

位置。在每次迭代中,每个粒子通过个体最优位置和群体最优位置来更新运动的方向和运动的速度,向最优解移动。对于一个 n 维问题,用 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ 表示粒子 i 的当前位置,用 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ 表示粒子 i 的当前速度,粒子所经历的最好位置为粒子的个体最优位置,表示为 $Pbest_i$,所有个体的最好位置为群体最优位置,表示为 $gbest$ 。在每次迭代中,每个粒子根据式(1)和式(2)来更新个体的速度和位置,式(3)为粒子的速度范围。

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_1r_1(Pbest_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2r_2(gbest(t) - x_{ij}(t)). \quad (1)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1). \quad (2)$$

$$v_{\min} < v_{ij} < v_{\max}. \quad (3)$$

其中: i 表示第 i 个粒子; j 表示粒子的第 j 维; t 表示迭代数; w 为惯性权重; c_1 、 c_2 为常数,称为学习因子; r_1 、 r_2 为区间 $[0,1]$ 内的随机数。

式(1)右边由3部分组成,第一部分为粒子的先前速度;第二部分为粒子的“认知”部分,表示了粒子自身的思考;第三部分为粒子的“社会”部分,表示了粒子之间的信息交流(Shi, Eberhart, 1998)。式(2)是粒子根据自身经验和社​​会经验来调整位置。式(3)是限制粒子的最大速度,防止粒子由于速度值太大而飞出搜索空间。

2 优化模型

钢管混凝土减震框架优化设计问题包括设计变量、约束条件和目标函数3个要素。本文以设置了防屈曲支撑的钢管混凝土框架为例进行分析研究。

2.1 设计变量

钢管混凝土减震框架的耗能性能与防屈曲支撑的性能密切相关。防屈曲支撑主要是通过核心单元为结构提供刚度和耗散地震能量,在防屈曲支撑长度一定的情况下,核心单元的横截面积是决定其初始刚度的重要因素,因此把核心单元的横截面积 x_i 作为优化变量,其中 i 表示第 i 层。

2.2 约束条件

对于耗能减震结构来说,在结构上设置耗能减震装置是为了消耗输入结构的能量,降低结构

的损伤,同时使结构的各项指标满足规范的要求,因此将结构的层间位移角和构件内力作为约束条件,要求钢管混凝土框架各层的层间位移角小于规范规定的层间位移角限值,且结构构件内力小于构件极限承载力。

$$\begin{cases} \theta_i \leq \theta_{\lim}, \\ F \leq F_{\lim}. \end{cases} \quad (4)$$

其中: i 表示第 i 层, θ_{\lim} 和 F_{\lim} 分别为层间位移角限值和内力限值。

由于PSO是无约束优化算法,因此需要把约束优化问题转化为无约束优化问题。在本文中,笔者采用“回飞技术”(fly-back mechanism)(黄志斌,2006)处理约束条件。在每次粒子更新位置后,有可能会飞出可行区域,对于飞出了可行区域的粒子,通过强制粒子返回原来的位置,使粒子在可行区域内搜索,这就是“回飞技术”的基本原理。

2.3 目标函数

钢管混凝土减震框架的优化目标是在结构满足《钢管混凝土结构技术规程》(CECS28—2012)要求的前提下,减震框架中防屈曲支撑总截面面积最小,目标函数为

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^n x_i. \quad (5)$$

式中, $f(x)$ 为所有防屈曲支撑的截面积之和, x_i 表示第 i 层防屈曲支撑的截面积, n 表示总层数。

2.4 钢管混凝土减震框架的优化设计流程

(1)建立钢管混凝土减震框架的有限元分析模型。本文的分析模型采用杆系模型,梁柱采用平面梁单元,防屈曲支撑采用桁架单元按单斜型铰接于钢管混凝土框架上;

(2)根据具体问题确定优化变量、约束条件以及目标函数,建立钢管混凝土减震框架的优化模型;

(3)运用PSO对钢管混凝土减震框架的耗能构件参数进行优化。

3 算例

3.1 结构参数

某五层三跨钢管混凝土框架,各跨跨度均为

8 m, 各层层高 4 m, 结构抗震设防烈度为Ⅶ度, 场地类别为Ⅱ类, 设计地震分组第二组, 竖向荷载为结构自重和均布荷载的组合值之和。根据底部剪力法计算多遇地震下结构每层承受的水平地震作用, 结构的每层荷载如图 1 所示, 钢管混凝土框架的相关参数如表 1 所示。初步假定在结构每层的中跨布置防屈曲支撑。

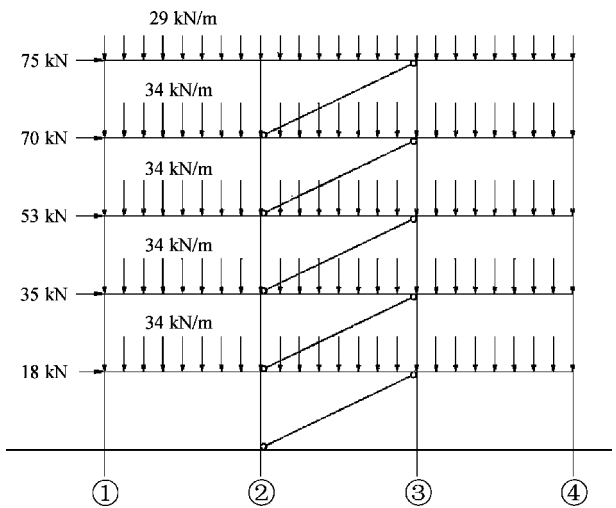


图 1 钢管混凝土减震框架荷载示意图

Fig. 1 Sketch map of the load of CFST frame with BRB

表 1 钢管混凝土框架结构参数

Tab. 1 Parameters of the CFST frame

层号	钢梁/mm	钢管混凝土柱		
		尺寸/mm	混凝土等级	钢材
1~5	400×200×8×13	450×6	C30	Q345

各防屈曲支撑的核心单元横截面积为优化变量, 防屈曲支撑的截面选择范围为 0~0.005 6 m²。

3.2 分析模型

本文中的钢管混凝土减震框架采用杆系模型, 梁、柱采用平面梁单元, 每个节点有 3 个自由度: 位移 u_x 、 u_y 和转角 θ 。

钢管混凝土柱的轴压刚度和抗弯刚度采用由叠加法得到的换算刚度 (钟善桐, 2006), 计算公式为

$$\begin{cases} (E_0A) = E_sA_s + E_cA_c, \\ (EI)_{sc} = E_sI_s + 0.8E_cI_c. \end{cases} \quad (6)$$

式中, E_s 、 E_c 分别为钢材的弹性模量和核心混凝土

的弹性模量, A_s 、 A_c 、 A 分别为外钢管面积、核心混凝土面积以及钢管混凝土柱截面积; I_s 、 I_c 分别为钢管的惯性矩和核心混凝土的惯性矩; (E_0A) 、 $(EI)_{sc}$ 分别为换算轴压刚度和换算抗弯刚度。

3.3 约束条件

根据《钢管混凝土结构技术规程》(CECS28—2012) 对框架结构弹性层间位移角的限制要求, 结构层间位移角约束限值为 1/300, 内力限值为弹性阶段抗弯承载力, 根据钟善桐 (2006) 提出的用弯矩—曲率关系曲线的弹性段的极值确定钢管混凝土柱的极限承载力为 93.136 kN·m。

3.4 优化结果

对于该算例, PSO 参数可选择为: $c_1 = 0.5$ 、 $c_2 = 0.5$; 惯性权重 w 由 0.9 线性递减至 0.4; 迭代次数为 200 次。为了对比 PSO 的优化结果的优劣性, 笔者采用群搜索算法 (Group Search Optimizer, 简称 GSO) 对同一模型进行优化, 所得出的防屈曲支撑核心单元截面优化结果如表 2 所示。

表 2 优化结果

Tab. 2 Results of optimization

楼层	防屈曲支撑核心单元横截面积/m ²	
	PSO	GSO
1	0.002 2	0.002 2
2	0.000 7	0.000 7
3	0.000 3	0.000 3
4	0	0.000 1
5	0	0

从表 2 可以看出, PSO 和 GSO 的优化结果中, 第 1~3 层设置的防屈曲支撑的核心单元横截面积相同。PSO 的优化结果中, 结构第 4~5 层不需要设置防屈曲支撑, 而 GSO 的优化结果中, 结构第 4 层也要设置防屈曲支撑。总的来说, PSO 的优化结果中防屈曲支撑核心单元的总横截面积更少。

表 3 为无控框架的层间位移角和设置防屈曲支撑并经 PSO 优化后结构的层间位移角。从表中可见, 无控框架的第 2~3 层的层间位移角超出了《钢管混凝土结构技术规程》(CECS28—2012) 规定的弹性层间位移角限值 1/300 的要求。结构布置了防屈曲支撑并经过 PSO 优化后, 各层的层间位移角均满足弹性层间位移角限值 1/300 的要求。

从表 2~3 可知, 经 PSO 优化后, 结构第 4~5

层的防屈曲支撑面积为零，所以不用设置防屈曲支撑，仅需在第 1~3 层设置防屈曲支撑。虽然 PSO 优化结果的防屈曲支撑核心单元横截面积比 GSO 的优化结果少，但结构的层间位移角均满足规范要求。

表 4~5 分别为结构经 PSO 优化前后的柱弯矩值和柱底剪力值，其中柱为图 1 中轴 2 所对应的柱。从表 4~5 可知，整体而言，设置了防屈曲支撑后，结构柱的最大弯矩值和柱底剪力均得到了明显地减少。由于在第 1~3 层设置了防屈曲支撑，增加了这三层的抗侧刚度，因此结构的内力发生了重分布，第 4~5 层的柱底弯矩有所增大，这两层的柱底剪力减少较少，但均满足设计要求。

图 2 为 PSO 优化收敛过程。从图中可以得出，在程序优化计算前期，由于惯性权重 w 较大，算

法的全局搜索能力强，粒子迅速向最优解处移动，随着惯性权重 w 线性递减，算法后期的局部搜索能力增强，进行到 122 次迭代时，算法已经得到最终解 $0.003\ 2\ \text{m}^2$ ，整个优化过程用时 19 s。从优化的结果看，与无控结构相比，在设置的防屈曲支撑横截面积总和趋于最小的情况下，经过优化后结构的层间位移角有所降低，满足规范的相关要求。钢管混凝土框架柱的最大弯矩和柱底剪力也得到减少，因此 PSO 应用于钢管混凝土减震框架优化效果良好，是一种可应用于钢管混凝土减震框架优化的新型方法。

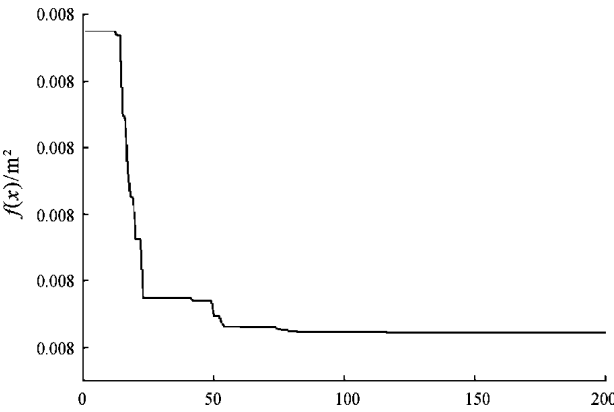


图 2 优化收敛过程

Fig. 2 Optimization convergence process

表 3 结构层间位移角

Tab. 3 Inter-story drift angles of the structure

层数	无控框架	有控框架
1	1/376	1/806
2	1/220	1/405
3	1/236	1/346
4	1/313	1/365
5	1/486	1/511

表 4 结构柱弯矩值

Tab. 4 Moment of the structural columns

层数	无控框架/ $\text{kN} \cdot \text{m}$		有控框架/ $\text{kN} \cdot \text{m}$	
	柱底	柱顶	柱底	柱顶
1	210	76	94	28
2	160	143	90	65
3	116	142	92	86
4	74	111	81	97
5	37	84	38	80

表 5 结构柱剪力值

Tab. 5 Shear of the structural columns

层数	无控框架/ kN	有控框架/ kN
1	72	31
2	76	39
3	64	45
4	46	45
5	30	30

4 结论

笔者采用 PSO 对一个五层三跨的钢管混凝土减震框架在小震作用下进行优化，得出以下结论：

(1) 从算例的优化过程来看，本算例在算法运算的前期就迅速向最优解收敛，该算法收敛速度快。

(2) 通过对 PSO 与 GSO 的优化结果进行对比，在防屈曲支撑核心单元的横截面积总和趋于最小的情况下，经过 PSO 优化后结构的层间位移角、钢管混凝土框架柱最大弯矩和柱底剪力均明显降低，PSO 应用于钢管混凝土减震框架优化效果良好。

(3) 将 PSO 应用于钢管混凝土减震框架的优化设计是可行的。

如何改进粒子群算法，进一步提高该算法的收敛速度和稳定性，使算法应用于钢管混凝土减震框架的优化效果更好，有待今后继续研究。

参考文献:

- 陈秋莲,李陶深,吴恒,等. 2007. 基于粒子群算法协同优化基坑支护问题[J]. 计算机应用,27(7):1780-1782.
- 崔志华,曾建潮. 2011. 微粒群优化算法[M]. 北京:科学出版社.
- 黄志斌. 2006. 启发式粒子群优化算法及其在结构优化设计中的应用[D]. 广东:广东工业大学.
- 江岳文,陈冲,温步瀛. 2007. 基于随机模拟粒子群算法的含风电场电力系统经济调度[J]. 电工电能新技术,26(3):37-41.
- 李晓龙,王复明,李晓楠. 2009. 岩土工程弹塑性反分析的改进粒子群算法[J]. 采矿与安全工程学报,26(1):50-54.
- 曲激婷,李宏男. 2008. 粘弹性阻尼器在结构减震控制中的位置优化研究[J]. 振动与冲击,27(6):87-91.
- 苏海锋,张建华,梁志瑞,等. 2012. 基于改进均值聚类随机粒子群算法的变电站 LCC 规划[J]. 电工技术学报,27(4):209-215.
- 王森,武新宇,程春田,等. 2012. 自适应混合粒子群算法在梯级水电站群优化调度中的应用[J]. 水力发电学报,31(1):38-44.
- 熊仲明,王佳,郭瑜. 2011. 基于耗能减震结构耗能装置的优化设置的研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),43(2):166-171.
- 钟善桐. 2006. 钢管混凝土统一理论—研究与应用[M]. 北京:清华大学出版社.
- Farhat F., Nakamura S., Takahashi K. 2009. Application of genetic algorithm to optimization of buckling restrained braces for seismic upgrading of existing structures[J]. Computers and Structures, 87(1-2):110-119.
- Kennedy J., Eberhart R. 1995. Particle Swarm Optimization[C]. Perth: Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, 1942-1948.
- Leung A. Y. T., Zhang H. J. 2009. Particle swarm optimization of tuned mass dampers[J]. Engineering Structures, 31(3):715-728.
- Perez R. E., Behdinan K. 2007. Particle swarm approach for structural design optimization[J]. Computers and structures, 85(19):1579-1588.
- Shi Y. H., Eberhart R. 1998. A modified particle swarm optimizer[C]. Alaska:1998 IEEE World Congress on Computational Intelligence, 69-73.
- CECS28—2012, 钢管混凝土结构技术规程[S].

Optimization Analysis on the Concrete Filled Steel Tubular Frame with Dissipation Frame under Small Earthquake based on PSO

LIANG Jian-wei¹, REN Feng-ming²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

(2. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract

Basing on particle swarm optimization (PSO), we took the inter-story drift angle of concrete filled steel tube frame and the internal force of the member as the constraints, and the minimum of the total cross-section of all buckling-restrained braced (BRB) core unit as the objective function. Then we compiled the optimization program which was suitable for the concrete filled steel tubular (CFST) frame with dissipation devices, and took the optimization analysis on the parameters of it. The analysis results show that it's feasible to optimize the parameters of CFST frame with dissipation devices by PSO method. The parameters used in PSO method are few, and the convergence speed of it is quickly, so it is a new and good optimization method for the CFST frame with energy dissipation devices.

Key words: particle swarm optimization; CFST frame; buckling-restrained brace; parameters optimization