

文章编号: 0253-2328(2009)01-0033-06

# 基于改进模拟退火算法的建筑结构抗震优化设计

刘齐茂<sup>1,2</sup>, 燕柳斌<sup>2</sup>

(1. 广西工学院 土木建筑工程系, 广西 柳州 545006; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

**摘 要:**针对“大震不倒”的抗震设防目标,提出一种在强震作用下建筑结构的优化设计方法.依据“用相同的投资获最好的设计”的设计理念,建立以建筑结构最大的层间位移最小化作为优化目标,同时满足体积约束的优化数学模型.采用动力有限元分析模型和高效的显式动力分析方法对强烈地震波作用下的结构进行分析,获得最大的层间位移;采用改进的模拟退火算法求解优化数学模型,设计了一种产生可行解的状态发生器,由该状态发生器产生的新状态均满足所有的约束条件;在显式动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA 的基础上进行二次开发,实现了一个三维框架结构的抗震优化设计.数值算例表明,该方法能获得较高质量的解,具有现实的工程意义.

**关键词:**抗震设计;模拟退火算法;结构优化;动力响应优化;显式动力分析;空间框架

**分类号:**(中图)TU 311

**文献标志码:**A

在强震的作用下,建筑结构的动力响应一般进入弹塑性状态,对结构的响应分析必须采用弹塑性分析方法.可见,在强震作用下要对建筑结构进行优化设计,计算工作量是非常大的,因此,在整个优化设计过程中的任一个环节都要想办法节省计算时间,优化设计才可能取得成功.在强震作用下建筑结构的优化数学模型的目标函数和约束函数一般为设计变量的隐式函数,求解方法一般有数学规划法、准则法和智能优化算法.大多数的数学规划法都要计算目标函数和约束函数对设计变量的一阶和二阶导数,目前,用解析法计算结构塑性响应灵敏度是非常困难的,一般采用差商代替求导<sup>[1]</sup>,但差分法的计算量非常大,而且不够准确.准则法具有物理意义明确,方法简便,结构重分析次数少,收敛速度较快等优点.1968年,Zarghamee首次提出动力优化设计准则<sup>[2]</sup>,即当结构按某一阶固有模态振动时,若所有构件的应变能密度和动能密度之差与其质量密度的比值为—常数,则该结构为此固有模态下的最小重量设计.后来有许多学者在此基础上通过 Kuhn-Tucker 条件导出很多种动力优化准则法<sup>[3]</sup>,但这些方法只是适用结构的线弹性范围.智能优化算法是一类随机搜索优化设计方法,主要有遗传算法、模拟退火算法、神经网络优化算法等<sup>[4]</sup>,该类方法避免了计算设计灵敏度这一棘手问题,还可以找到全

局最优设计.在抗震设计研究领域,Nikos D. Lagaros 等<sup>[5]</sup>基于欧洲抗震设计规范,用遗传算法求解了满足应力和位移约束的三维框架结构的最轻设计,但该方法仍然存在计算量过大的问题,Nikos D. Lagaros 等在结论中提出,在将来的研究中应想办法提高算法的效率,如采用并行算法.模拟退火算法(简称 SA 算法)是算法在某一初温下,伴随温度参数的不断下降,结合概率的突跳特性在设计空间中随机寻找全局最优解.SA 算法是一种通用的优化算法,不仅适用于求解组合优化问题,同样适用于求解函数优化问题,并且在数学上已经严格证明了 SA 算法可以获得全局最优解.在结构静力学优化设计领域,国内许多学者开展了 SA 算法的应用研究<sup>[6-8]</sup>.

本文的主要工作是提出一种在强震作用下建筑结构的优化设计方法.建立了在强烈地震波的作用下,以建筑结构最大的层间位移最小化作为优化目标,同时满足体积约束的优化数学模型.采用改进的模拟退火算法求解优化数学模型.最后演示了一个三维框架结构的抗震优化设计,结果表明,该方法能获得较高质量的解.

## 1 在强震作用下结构的响应分析

在地震的作用下结构的响应分析方法有静力法、

振型分解反应谱法和时程分析法. 时程分析法把地震加速度时程直接输入, 对结构进行地震时程响应分析, 该方法可以考虑各种因素(如结构进入塑性范围), 使结构抗震计算分析结果更符合实际的震害现象. 时程分析法按积分格式可归纳为两类: 一类为隐式积分方法; 另一类为显式积分方法. 隐式方法大部分为无条件稳定, 如 Wilson- $\theta$  法、Newmark 法等; 而显式方法为条件稳定. 对于大型复杂介质波动问题(如地震动问题)的显式方法比隐式方法具有优势. 因为, ①隐式方法需要求解联立方程组, 而显式方法不需要; ②当介质进入非线性(如塑性)状态后, 刚度矩阵  $K(t)$  每一步都在改变, 显式方法不需要作矩阵的求逆运算, 只需要将修改的刚度矩阵  $K(t)$  对节点位移向量做乘法运算, 而隐式方法在每一步都需要进行矩阵的求逆运算.

1.1 显式中心差分法原理

中心差分法可以直接以显式的方法应用, 该方法假设: 质量矩阵  $M$  和阻尼矩阵  $C$  与时间无关, 且阻尼矩阵  $C$  只与质量矩阵  $M$  相关并为对角阵. 这种阻尼假设对数值的稳定性没有影响<sup>[9]</sup>. 故本文采用显式中心差分法求解在强震作用下结构的位移响应, 该方法在显式动力分析软件 LS-DYNA 中被采用.

对结构用有限元离散后, 得到初始振动方程

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -ME_u\ddot{x}_g, \tag{1}$$

初始条件为

$$\begin{cases} u(0) = w, \\ \dot{u}(0) = \dot{w}, \end{cases} \tag{2}$$

式中:  $u, \dot{u}, \ddot{u}$  为在整体坐标系下杆系的结点相对于地面的位移向量、速度向量和加速度向量;  $E_u$  为向量, 在结点线位移  $u$  方向上为 1, 其他方向上为 0;  $\ddot{x}_g$  为地面水平加速度时程. 记  $u_{i+1} = u(t + \Delta t)$ ,  $u_i = u(t)$ ,  $u_{i-1} = u(t - \Delta t)$ ,  $\Delta t$  为地面水平加速度时程记录的时间间隔. 差分法用位移的线性组合来近似表示速度和加速度

$$\begin{cases} \dot{u}_i = \frac{1}{2\Delta t}(u_{i+1} - u_{i-1}), \\ \ddot{u} = \frac{1}{\Delta t^2}(u_{i+1} - u_i + u_{i-1}). \end{cases} \tag{3}$$

令  $t$  时刻的位移、速度和加速度满足该时刻的运动方程, 即

$$M\ddot{u}_i + C\dot{u}_i + K(t)u_i = -ME_u\ddot{x}_g(t). \tag{4}$$

将(3)式代入(4)式, 整理后得

$$M^*u_{i+1} = F_i^*, \tag{5}$$

式中 (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$M^* = \frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{1}{2\Delta t}C, \tag{6}$$

$$F_i^* = -ME_u\ddot{x}_g(t) - \left[ K(t) - \frac{2}{\Delta t^2}M \right] u_i - \left[ \frac{1}{\Delta t^2}M - \frac{2}{\Delta t}C \right] u_{i-1}. \tag{7}$$

由(5)~(7)式可见, 如果已知  $t - \Delta t$  时刻的位移  $u_{i-1}$  和  $t$  时刻的位移  $u_i$ , 就可以求  $t + \Delta t$  时刻的位移  $u_{i+1}$ , 再由(3)式可求  $t$  时刻的速度  $\dot{u}_i$  和  $\ddot{u}_i$ . 即如果已知前两步位移  $u_{i-1}$  和  $u_i$ , 由(5)式求下一步位移  $u_{i+1}$ , 称为两步法. 在  $t = 0$  时刻, 存在起步问题, 即  $w$  已知, 但  $u_{-1}$  未知, 故不能求  $w$ . 可从  $w$  的泰勒级数展开式中解出

$$u_{-1} = w - \Delta t\dot{w} + \frac{1}{2}\Delta t^2\ddot{w}, \tag{8}$$

从而解决了显式中心差分法的起步问题.

1.2 结构的有限元动力计算模型

对于对称结构, 建筑结构的振动模型一般可简化为层模型、杆系模型和杆系-层模型, 且为平面体系<sup>[10]</sup>. 为了准确地模拟结构在强烈地震作用下的响应过程, 本文采用空间有限元动力计算模型, 用 LS-DYNA 软件的显式动力分析三维梁单元 Beam161 将整个建筑结构离散. 图 1 中 6 层空间框架结构, 采用 63 个梁单元将结构离散, 结构的质量都集中在节点上, 形成的质量矩阵为对角矩阵. 将与地面连接的节点 1, 8, 15, 22, 29, 33 进行耦合, 使这些节点之间的距离保持不变, 并将它们定义为 1 个组元, 该组元在地面震动过程中任意时刻具有和地面一样的绝对位移、绝对速度和绝对加速度. 地震加速度记录可以从任一个方向或同时在多个方向直接作用在组元上.

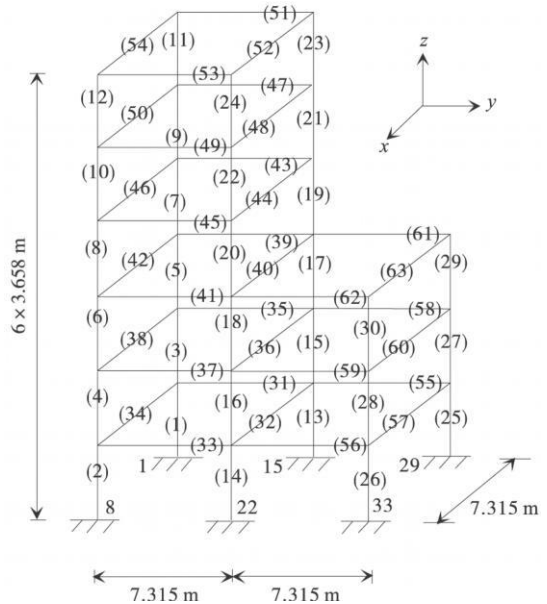


图 1 6 层空间框架的有限元动力计算模型

1.3 输入地震波及结构的恢复力模型的选择

在强烈地震的作用下, 可根据参考文献[11]所提供的选取原则和选取步骤来选用强震记录.

恢复力模型概括了结构或构件的刚度、强度、延性和吸能能力等力学特性,是结构弹塑性时程分析的重要依据.根据目前的试验研究成果,恢复力模型主要有:理想的弹塑性模型、考虑硬化的双线性模型、退化双线性模型及退化的三线性模型.在进行结构的弹塑性分析时应根据结构所使用的材料选择相应的恢复力模型.

1.4 层间位移及其最大值的计算

质量矩阵  $M$  为常量矩阵,瑞利阻尼矩阵  $C=\alpha M+\beta K(t)$ .为了应用显式方法,令  $\beta=0$ ,即阻尼矩阵  $C$  也为常量矩阵,在线弹性范围刚度矩阵  $K(t)$  与时间无关,进入塑性范围后刚度矩阵  $K(t)$  是变化的,每一步都要重新计算一次刚度矩阵.

时间步长  $\Delta t$  的选择,可按照中心差分法条件稳定的步长限制要求,即  $\Delta t<\Delta t_{cr}=T_N/\pi$ (其中  $T_N$  为结构系统的最小周期).LS-DYNA 软件采用显式中心差分法求解振动方程,数值实验表明只要满足步长限制条件,算法是非常稳定的.

通过显式中心差分法求出地震过程中各时刻各节点相对于地面的位移向量  $u(t)$  后,将同一楼层上各节点的位移进行平均,获得在地震过程中各个时刻各楼层相对于地面(第 1 层)的位移  $U_{ij}(t)$ ,进一步即可算出在地震过程中各时刻的层间位移

$$U_{ij}(t)=|U_{1i}(t)-U_{1j}(t)|,$$
$$j=i+1; i=1,2,\dots,n; t=0,\Delta t,2\Delta t,\dots,m\Delta t,$$

(9)

式中: $n$  为楼层总数; $m\Delta t$  为地震持续的时间.在地震过程中,层间位移的最大值表示为

$$U_{\max}=\max\{U_{ij}(t)\},$$
$$j=i+1; i=1,2,\dots,n; t=0,\Delta t,2\Delta t,\dots,m\Delta t.$$

(10)

2 优化数学模型的建立

我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)提出“小震不坏、中震可修、大震不倒”的三水准抗震设防目标.本文针对第三水准“大震不倒”抗震的设防目标和依据“用相同的投资获最好的设计”的设计理念,寻求在强烈地震的作用下,使建筑物在地震作用的过程中最大的层间位移最小化,同时满足结构体积(重量)约束的最优设计,用数学表达为

$$\text{find } \mathbf{x}$$
$$\min U_{\max}(\mathbf{x})=\max\{U_{ij}(\mathbf{x},t)\}$$
$$\text{s.t. } V(\mathbf{x})\leqslant[V],$$
$$\mathbf{x}\leqslant\mathbf{x}\leqslant\bar{\mathbf{x}}.$$
$$j=i+1; i=1,2,\dots,n; t=0,\Delta t,2\Delta t,\dots,m\Delta t,$$

(11)

式中: $\mathbf{x}$  为设计变量向量; $\mathbf{x}$  为设计变量的下限; $\bar{\mathbf{x}}$  为

设计变量的上限; $V(\mathbf{x})$  为设计变量  $\mathbf{x}$  的体积; $[V]$  为结构的许可体积,相当于使用材料的上限; $U_{\max}(\mathbf{x})$  为建筑物在地震作用过程中最大的层间位移.

在优化设计过程中,优化数学模型比以往求结构最轻设计的数学模型<sup>[12-13]</sup>减少了结构重分析的次数.原因是,在强震的作用下,由于结构设计的灵敏度计算困难,通常采用不需要计算灵敏度的优化方法如复形法、进化算法等;该类算法通常通过随机的方法产生新设计,先检验新设计是否满足约束条件,再分析新设计的目标函数是否下降,然后决定是否更新设计的策略;在结构优化设计中,结构的体积(重量)是设计变量  $\mathbf{x}$  的显式函数,模型(11)式不需要进行结构分析就能获得可行的新的设计,能够减少结构重分析的次数,提高优化的效率.

3 用改进的模拟退火算法求解优化数学模型

SA 算法流程包括 3 函数 2 准则,即状态产生函数、状态接受函数、温度更新函数、内循环终止准则和外循环终止准则.对这些环节的设计进行改进可提高 SA 算法的优化性能,同时初始温度对 SA 算法影响也很大.

3.1 状态发生器

状态发生器(状态产生函数)的功能是由当前状态产生满足约束条件的新状态,产生的新状态应尽可能遍布全部的解空间.假设当前状态为  $\mathbf{x}^{(i)}$ ,新状态  $\mathbf{x}^{(i+1)}$  的产生方式为

$$\mathbf{x}_j^{(i+1)}=\mathbf{x}_j^{(i)}+\frac{\mathbf{x}_j-\mathbf{x}_j}{k}\times\text{GDIS}(0,1),$$
$$j=1,2,\dots,N,$$

(12)

式中:GDIS(0,1)为返回一个服从平均值为 0 且标准方差为 1 的正态分布的随机数的函数; $k\geqslant 1$  且为常数,表示扰动幅度的大小,本文取 1; $N$  为设计变量的数目.状态发生器流程如图 2 所示.

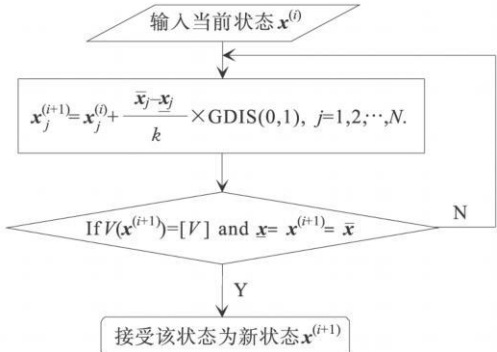


图 2 状态发生器流程图

3.2 状态接收函数

通过状态发生器产生新状态  $\mathbf{x}^{(i+1)}$  后,根据 Metropolis 接受准则判断是否接受新状态  $\mathbf{x}^{(i+1)}$  为



当前状态  $\mathbf{x}^{(i)}$ . 若  $U_{\max}(\mathbf{x}^{(i+1)}) \leq U_{\max}(\mathbf{x}^{(i)})$ , 接受新状态  $\mathbf{x}^{(i+1)}$  为当前状态  $\mathbf{x}^{(i)}$ . 若  $U_{\max}(\mathbf{x}^{(i+1)}) > U_{\max}(\mathbf{x}^{(i)})$ , 判断  $\exp\left[\frac{-(U_{\max}(\mathbf{x}^{(i+1)}) - U_{\max}(\mathbf{x}^{(i)}))}{t}\right] \geq \text{RAND}(0, 1)$  是否成立, 若成立, 接受新状态  $\mathbf{x}^{(i+1)}$  为当前状态  $\mathbf{x}^{(i)}$ ; 否则, 拒绝接受新状态  $\mathbf{x}^{(i+1)}$  为当前状态  $\mathbf{x}^{(i)}$ . 其中:  $t$  为当前温度值;  $\text{RAND}(0, 1)$  为在 0 和 1 之间产生一个服从均匀分布的随机数的函数.

3.3 初始温度的选择和温度更新函数

初始温度  $t_0$  越大, 获得高质量的解的概率越大, 但花费的计算时间将增加. 初始温度的确定通常采取折中考虑优化质量和优化效率的办法, 通过实验确定取值. 本文采用二分法确定初始温度, 即先给定算法收敛时间, 取一个较大的初始温度, 如果算法收敛时间大于给定算法收敛时间, 则将较大的初始温度作为二分法的上限; 如果算法收敛时间小于给定算法收敛时间, 则将较大的初始温度乘以 2 作为初始温度进行试算, 直到找到一个使收敛时间大于给定收敛时间的初始温度作为二分法的上限, 以初始温度 0 作为二分法的下限. 得到二分法的上下限后即可通过不断二分获得使算法收敛时间接近于给定算法收敛时间的初始温度. 在本文算例中通过二分法获得的初始温度为 1 000.

温度更新函数即温度下降方式的函数, 最常用的温度更新函数为

$$t_{k+1} = \lambda t_k,$$

(13)

式中  $0 < \lambda < 1$ , 本文取  $\lambda = 0.95$ .

3.4 内、外循环终止准则

内循环终止准则也称 Metropolis 抽样稳定准则, 用于决定在各温度下产生候选解的数目. 在函数优化问题中, 收敛的条件是要求在每个温度下产生候选解的数目趋向于无穷大, 才使 Metropolis 抽样稳定, 显然在实际设计算法时是做不到的. 但可采用这样的准则, 即抽样过程中, 在各温度下的当前解  $\mathbf{x}^{**}$  连续 Step1 步保持不变, 则认为 Metropolis 抽样稳定. 本文取 Step1 = 50.

外循环终止准则即算法终止准则, 用于决定算法何时结束. 通常采用的办法有: ①设置终止温度的阈值; ②设置外循环迭代次数; ③算法搜索到的最优解  $\mathbf{x}^*$  在连续 Step2 次退温过程中均不变, 则认为算法收敛. 为保证算法的收敛, 可同时采用以上 3 个方法, 本文采用第 3 种方法, 取 Step2 = 20.

表 1 柱单元截面边长变量的定义

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net															
单元编号															
边长/mm	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11	x12	x13	x14	x15

3.5 改进的模拟退火算法流程

改进的模拟退火算法由改进的退火过程(外循环)和改进的抽样过程(内循环)两部分组成. 其算法流程如图 3 所示, 其中:  $\mathbf{x}^*$  为改进的退火过程的最优解;  $\mathbf{x}'$  为改进的退火过程的当前状态;  $t$  为退火温度;  $t_0$  为初始温度;  $\mathbf{x}^{(0)}$  为初始解;  $\mathbf{x}^{**}$  为改进的抽样过程的当前解;  $\mathbf{x}''$  为改进的抽样过程的当前状态;  $\mathbf{x}^{(n)}$  为新状态.

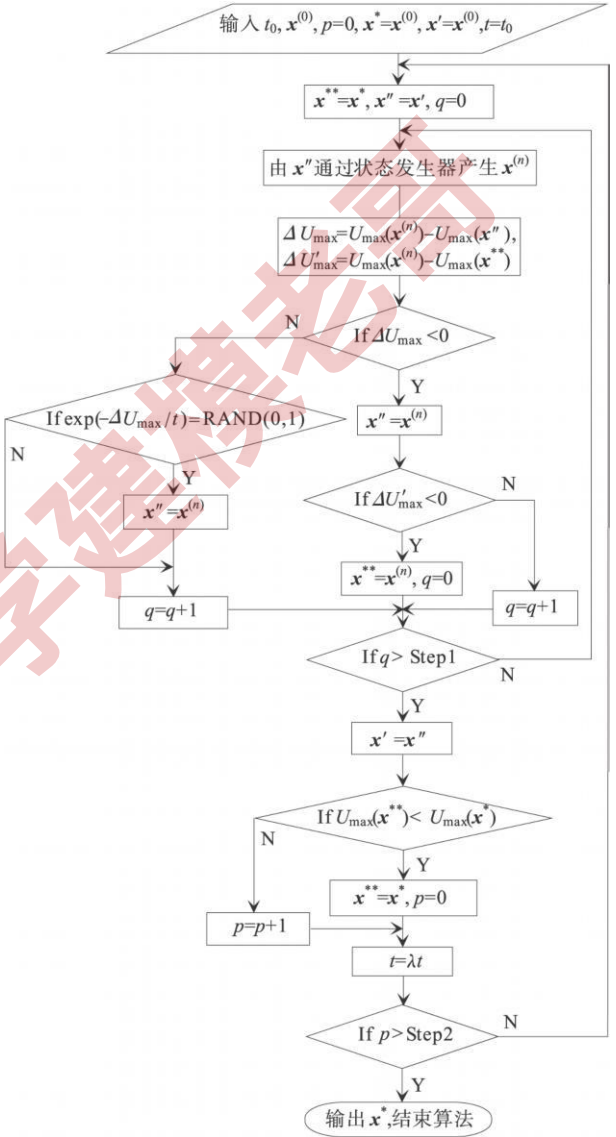


图 3 建筑结构抗震优化设计的改进模拟退火算法流程图

4 数值算例

求图 1 中 6 层空间混凝土框架, 在强震的作用下的抗震优化设计. 设计变量为梁和柱横截面尺寸. 柱的横截面为正方形, 不同柱单元的截面边长不同(表 1).

梁的横截面为矩形,定义所有的横梁单元的截面宽度为  $x_{16}$  和高度为  $x_{17}$ , 则  $\mathbf{x}=[x_1\ x_2\ \cdots\ x_{17}]^T$ , 其中,  $x_i \in [0.2, 0.5](\text{m})$ ,  $i=1, 2, \cdots, 17$ , 结构的许可体积  $[V]=70\text{ m}^3$ .

地震波沿  $y$  轴方向输入,采用 El Centro 强震记录(1940 年)<sup>[10]</sup>,其地面水平加速度峰值为  $0.349\text{ g}$ ,记录时长为  $7.98\text{ s}$ ,步长  $\Delta t=0.02\text{ s}$ .

材料的密度  $\rho=2\ 500\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量  $E=30\text{ GPa}$ ,泊松比  $\nu=0.2$ ,屈服应力  $\sigma_y=20\text{ MPa}$ ,瑞利阻尼系数  $\alpha=0.5, \beta=0$ .

恢复力模型采用考虑硬化的双线性模型

$$\begin{cases} \sigma = E\varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_y, \\ \sigma = E\varepsilon_y + E_t(\varepsilon - \varepsilon_y), & \varepsilon > \varepsilon_y, \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\varepsilon_y$  为屈服应变;  $E_t$  为剪切模量,本文取  $0.2$ .

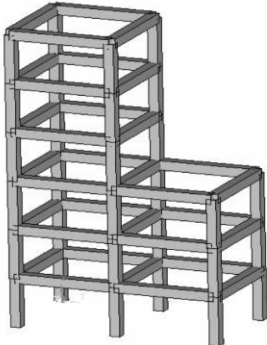


图 4 初始设计  $\mathbf{x}^{(0)}$  的三维结构图

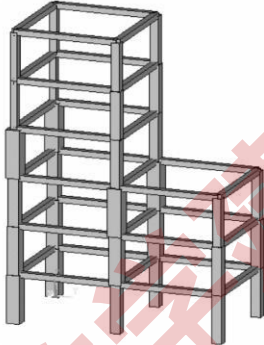


图 5 最优设计  $\mathbf{x}^*$  的三维结构图

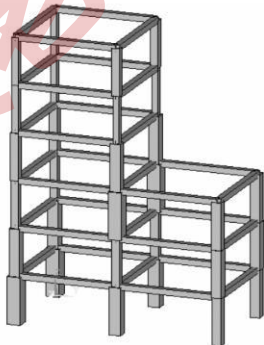


图 6 更优设计  $\bar{\mathbf{x}}^*$  的三维结构图

改进的模拟退火算法是建筑物有效的抗震优化设计方法,可避开灵敏度分析这一棘手问题,获得较高质量的解,具有现实的工程意义.但模拟退火算法一般无法获得真正意义上的最优解,主要原因是无法满足 Metropolis 抽样稳定条件,在函数优化问题中,要求在每个温度下产生的候选解数目趋向于无穷大,这在结构优化设计中显然是不允许的;同时,要指出的是改进的模拟退火算法的计算量也是非常大的,如何提高算法的效率也是值得研究的.

从优化的结果(图 5)与初始设计(图 4)的比较可看出,从抵抗水平地震作用的结构而言,柔性结构比刚性结构更具有优势,但对柔性结构的薄弱部位要注意加强.可见,通过对结构抗震优化设计可获得更好的设计,能够合理使用材料,用较低成本获得较好设计.

5 结论

本文的研究主要针对第三水准“大震不倒”的抗震设防目标,通过对强震作用下建筑结构层间位移响应的优化,使结构的整体变形最小,同时满足体积(重量)的约束,达到在相同成本约束的条件下使结构达到“大震尽可能不倒”的目标.

初始可行设计点  $\mathbf{x}_i^{(0)}=0.35, i=1, 2, \cdots, 17$ , 其三维结构如图 4 所示,体积为  $42.29\text{ m}^3$ , 在地震过程中最大的层间位移为  $0.236\text{ mm}$ . 经模拟退火算法优化收敛到最优设计  $\mathbf{x}^*$ , 其三维结构如图 5 所示.  $\mathbf{x}^*=[455, 427, 354, 484, 225, 239, 341, 415, 476, 313, 346, 285, 328, 330, 297, 216, 210]^T(\text{mm})$ , 体积为  $25.14\text{ m}^3$ , 在地震过程中最大的层间位移为  $0.097\text{ mm}$ . 可见,结构的体积下降了,但其抗震性能得到了很大的改善.

计算收敛后,在最优设计  $\mathbf{x}^*$  的基础上回温一次,经回温后获得更优的设计  $\bar{\mathbf{x}}^*$ , 其三维结构如图 6 所示.  $\bar{\mathbf{x}}^*=[478, 358, 258, 284, 222, 224, 400, 274, 455, 350, 212, 262, 323, 360, 327, 204, 223]^T(\text{mm})$ , 体积为  $22.60\text{ m}^3$ , 在地震过程中最大的层间位移为  $0.095\text{ mm}$ . 可见,结构的抗震性能得到了进一步的改善.

1) 通过对抗震结构进行优化设计能获得抗震性能优良的设计,使材料的利用更加合理,用较低成本获得更好的设计.

2) 数值结果表明,对抵抗水平地震作用的结构而言,柔性结构比刚性结构更具有优势,但对柔性结构的薄弱部位要注意加强.

3) 结构动力响应优化设计中,结构重分析计算量是非常大的,常常让人望而怯步,但选用显式中心差分法可明显提高结构动力响应的分析效率,降低计算成本,建议选用.

4) 改进的模拟退火算法是建筑物有效的抗震优化设计方法,可避开灵敏度分析这一棘手问题,获得较高质量的解,具有现实的工程意义.

5) 本文的研究只是针对地震作用,在工程的实际应用中,还应同时考虑其他荷载(如重力、风载等)的作用,约束条件中还应增加强度、刚度及稳定性等约束,地震记录最好选用拟建场地实际的强震记录,并考虑从不同的方向输入地震波.

参考文献:

[1] BOGOMOLNI M, KIRSCH U, SHEINMAN I. Efficient

- design sensitivities of structure subjected to dynamic loading[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43, 5485-5500.
- [2] ZARGHAMEE M S. Optimum frequency of structures [J]. Journal AIAA, 1968, 6(6): 749-750.
- [3] 陈建军, 车建文, 崔明涛, 等. 结构动力优化设计述评与展望[J]. 力学进展, 2001, 31(2): 181-192.
- [4] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001: 17-33.
- [5] NIKOS D L, MICHALIS F, MANOLIS P. Structural optimization: A tool for evaluating seismic design procedures [J]. Engineering Structures, 2006, 28, 1623-1633.
- [6] 吴剑国, 赵莉萍, 王建华. 工程结构混合离散变量优化的模拟退火方法[J]. 工程力学, 1997, 14(3): 138-144.
- [7] 马海全, 温卫东. 含连续/离散变量结构优化中的神经网络与变尺度模拟退火方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2001, 33(3): 237-240.
- [8] 吴剑国, 赵丽萍. 工程结构优化的神经网络方法[J]. 计算力学学报, 1998, 15(1): 69-74.
- [9] 王进廷, 杜修力, 张楚汉. 瑞利阻尼介质有限元离散模型动力分析的数值稳定性[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(6): 18-24.
- [10] 包世华. 高层建筑结构计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 1991: 179-208.
- [11] 丁彦慧, 胡平, 张杰. 重大工程抗震设计中实际强震记录的选用研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(5): 103-106.
- [12] ZOU X K, CHAN C M. An optimal resizing technique for seismic drift design of concrete buildings subjected to response spectrum and time history loadings [J]. Computers and Structures, 2005, 83, 1689-1704.
- [13] KALISZKY S, L? G? J. Optimal design of elasto-plastic structures subjected to normal and extreme loads [J]. Computers and Structures, 2006, 84, 1770-1779.

## Seismic Optimal Design for Building Structures Using Simulated Annealing Algorithm

*Liu Qimao<sup>1,2</sup>, Yan Liubin<sup>2</sup>*

(1. Department of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** This paper presents an optimal design method for building structures subject to the severe earthquake loads to aim at the third level seismic fortification target, i.e., not collapse in the severe earthquake conditions. According to design concept, get the best design with same cost, the optimization mathematics model is established. The optimal objective is to minimize the maximal inter-storey drift of the building structures under the severe earthquake loads, and to satisfy the structural volume constraint. The optimization model is solved using the improved simulated annealing algorithm. The state producer is designed for producing feasible solution. The new state produced by the state producer can satisfy all the constraints. Therefore, the constraints are handled efficiently. The seismic optimal design of a spatial frame is demonstrated by second exploitation based on the explicit dynamic analysis soft, ANSYS/LS-DYNA. The results indicate the design method can obtain high quality seismic designs. Therefore, the optimal design method proposed in this paper can be used in the practical engineering.

**Key words:** seismic design; simulated annealing algorithm; structural optimization; dynamic response optimization; explicit dynamic analysis; spatial frame

(责任编辑、校对 张 刚)