

党育,刘全明,贺一哲.基于粗粒度并行遗传算法的隔震层参数优化[J].地震工程学报,2023,45(6):1257-1263.DOI:10.20000/j.1000-0844.20211107002

DANG Yu,LIU Quanming,HE Yizhe.Parameter optimization of isolation layer based on coarse-grained parallel genetic algorithm[J].China Earthquake Engineering Journal,2023,45(6):1257-1263.DOI:10.20000/j.1000-0844.20211107002

# 基于粗粒度并行遗传算法的隔震层参数优化

党 育,刘全明,贺一哲

(兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**针对基于经典遗传算法的隔震层参数优化方法效率不高的问题,提出一种基于粗粒度并行遗传算法的隔震层参数优化方法。利用 Python 的多进程机制和 Python 与 ETABS 的交互,实现 CPU 各核同时调用 ETABS 并进行遗传操作,最后通过一个隔震工程的实例进行验证。结果表明:采用粗粒度并行遗传算法进行隔震层参数优化,与原设计结果相比,优化后的隔震结构性能更优;同时,用 10 核 CPU 计算,与经典遗传算法相比,该方法既能准确得出全局最优解,又可显著提高优化效率,加速比约为 6,可基本满足隔震工程设计的及时性需求,具有较好的工程应用价值。

**关键词:**粗粒度并行遗传算法;多进程;隔震层参数;优化

中图分类号: TU352.1

文献标志码:A

文章编号: 1000-0844(2023)06-1257-08

DOI:10.20000/j.1000-0844.20211107002

## Parameter optimization of isolation layer based on coarse-grained parallel genetic algorithm

DANG Yu, LIU Quanming, HE Yizhe

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** Given the low efficiency of the parameter optimization of the isolation layer based on a classical genetic algorithm, a parameter optimization method for the isolation layer based on a coarse-grained parallel genetic algorithm was proposed in this paper. Using the multiprocessing mechanism of Python and the interaction between Python and ETABS, each core of the CPU can simultaneously perform ETABS to implement dynamic time-history analysis of isolation and non-isolation structures and use the CPU multiprocessing to realize parallel genetic operation in genetic algorithms. According to the test results, compared with the original design results, the isolation structure optimized by a coarse-grained parallel genetic algorithm has a better performance. Meanwhile, compared with the classical genetic algorithm, the proposed method can not only accurately obtain globally optimal solutions but also substantially improve the optimization efficiency. The speedup ratio is approximately 6, which can meet the prompt demand for design in isolation engineering. Therefore, this method has a notable application potential.

收稿日期:2021-11-07

基金项目:国家自然科学基金(62166025,51668043);甘肃省重点研发计划(21YF5GA073)

第一作者简介:党 育(1976-),女,博士,教授,主要从事结构抗震和防灾减灾研究。E-mail:601363791@qq.com。

**Keywords:** coarse-grained parallel genetic algorithm; multiprocessing; parameters of isolation layer; optimization

## 0 引言

如何选择合理的隔震层参数和布置隔震支座是隔震结构设计中的关键问题。目前工程师通常采用试算法,该方法可保证设计满足要求,但无法保证设计为最优。针对此问题,国内外学者提出了各种优化方法进行隔震结构设计。Fallah等<sup>[1]</sup>采用非支配排序多目标遗传算法 NSGA-II 算法,将隔震结构简化为剪切型,优化得到滑移隔震结构的隔震层质量、摩擦系数和阻尼比;Fan等<sup>[2]</sup>将铅芯橡胶支座系统等效为线性,采用二次规划法得到隔震层的最优屈服后刚度和屈服力;Nigdeli等<sup>[3]</sup>采用和声搜索算法,在近场和远场地震下优化得到隔震层的刚度和阻尼比;叶昆等<sup>[4]</sup>将隔震结构简化为等效线性的两自由度结构,以水平向减震系数和隔震层最大位移的线性组合为目标函数,得到隔震层的最优屈服强度比;洪绍文等<sup>[5]</sup>以隔震结构的投入成本比最小作为目标函数,采用无导数信赖域算法优化得到隔震支座的铅芯和橡胶直径。以上研究均将隔震结构简化为剪切型模型,隔震层简化为用 2~3 个参数表达的线性或非线性模型。但由于对隔震结构的力学模型进行了较多简化,影响了隔震结构动力分析结果的准确性,且得到的结果也只是隔震层最优参数,与设计最终要求的具体隔震支座布置尚有差距。由此,Dang等<sup>[6]</sup>针对隔震结构建立了三维有限元模型,采用经典遗传算法结合整数规划法,分两阶段完成隔震层参数优化和隔震支座布置,既保证了隔震结构动力分析的准确性,也可直接优化得到隔震支座布置。但由于用经典遗传算法进行优化时,种群个体要依次进行时程分析,时程分析由单一 CPU 串行平台的结构动力分析软件(SAP2000、ETABS)完成,整个优化过程所需时间大致为每次时程分析时间的累加,导致优化的耗时较长,限制了该方法的使用。

目前,提高计算效率的方法大致分为 3 种:采用更高性能的 CPU;采用图像处理器 GPU<sup>[7]</sup>;采用多个 CPU 的并行计算<sup>[8]</sup>。针对文献[6]的问题,经典遗传算法中的各种群个体需要分别进行时程分析,但实际上,各种群个体的时程分析计算具有天然的并行性,同时,随着微处理技术的迅速发展,多核 CPU 的计算机已普及,若在多核 CPU 上实现并行遗传算法,就无需提高计算机硬件(采用高性能计算机)或修改计算平台(采用基于 GPU 的有限元分析

软件)来提高隔震结构的优化效率。基于此,本文提出了基于粗粒度并行遗传算法的隔震层参数优化方法,即采用 Python-ETABS 交互使用的编程技术,用 Python 编写粗粒度并行遗传算法,多进程调用 ETABS 程序并进行遗传操作,实现基于粗粒度并行遗传算法的隔震层参数优化分析。最后,通过一个隔震工程的实例进行验证,证明本文提出的方法既可保证优化结果的准确性,又可提高计算效率。

## 1 隔震层参数优化的并行模型

对于隔震层参数优化问题,种群中的每个个体都要进行动力分析和遗传操作。由于动力分析需要调用 ETABS 完成,并行调用的 ETABS 数量越多,占用的计算资源就越大。为平衡计算效率和计算资源,研究选用了粗粒度并行模型,即将种群划分为多个子种群,各子种群独立并发,执行时程分析和遗传操作。

隔震层参数优化的粗粒度并行模型如图 1 所示。其中,多进程并行操作采用 Python 的 Multiprocessing 库<sup>[9]</sup>来实现,各进程之间无交互,充分利用 CPU 的多核计算资源,提高计算效率。由于整个优化过程需要遗传算法和结构动力分析相结合,遗传算法用 Python 编程完成,而动力时程分析由 ETABS 实现,故采用 ETABS 应用程序接口 ETABS API<sup>[10]</sup>完成 Python 与 ETABS 的相互调用。整个过程为:Python 编程生成各子种群,各子种群独立地用 ETABS API 中的函数来打开对应的隔震结构模型,定义质量源,设置荷载工况,设定节点约束,定义隔震支座参数,进行动力分析和输出结果;再将结果传递至 Python,完成子种群的遗传操作,生成新的子种群;再次进行子种群并行计算,从所有种群中挑选出最优个体并记录下来;重复以上过程,当最优个体达到迭代终止条件后,优化程序结束。

## 2 基于粗粒度并行遗传算法的隔震层参数优化

### 2.1 种群编码

隔震层参数优化时,隔震层的力学模型可简化为双线性模型,如图 2 所示。图中, $K_{eq}$ 为隔震层的水平等效刚度, $X_c$ 为隔震层的屈服位移, $X_m$ 为隔震层的极限位移。

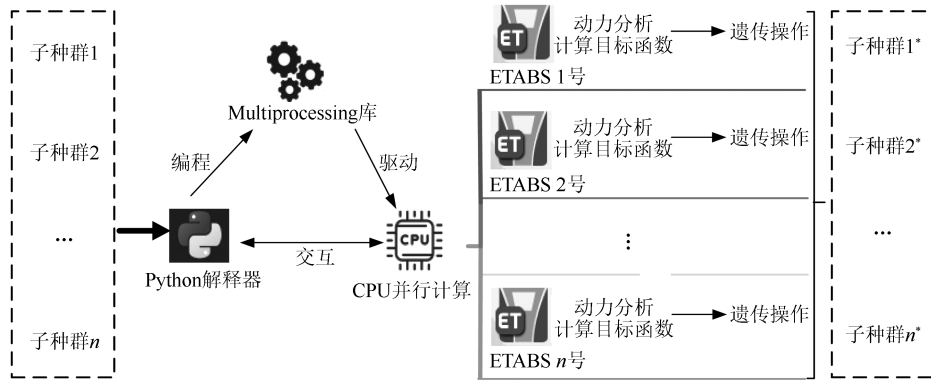


图 1 隔震层参数优化的粗粒度并行模型

Fig.1 Coarse-grained parallel model for parameter optimization of isolation layer

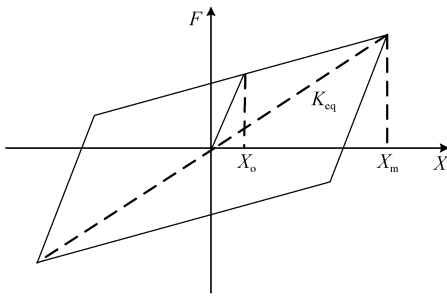


图 2 隔震层的力学模型

Fig.2 Mechanical model of isolation layer

隔震层的设计变量如式(1)所示:

$$\mathbf{X} = [K_{eq} \quad X_o \quad X_m]$$
 (1)

粗粒度并行遗传算法是将种群划分为多个子种群,因此,染色体种群表示如式(2)所示:

$$\mathbf{A} = [X_1, X_2, \dots, X_n] = [(K_{eq1}, X_{o1}, X_{m1}), (K_{eq2}, X_{o2}, X_{m2}), \dots, (K_{eqn}, X_{on}, X_{mn})]$$
 (2)

种群编码采用浮点数编码,原因是隔震层优化参数为连续实数域且范围较大,采用浮点式编码可降低编码长度,提高搜索速度。

### 2.2 适应度评估

适应度函数是根据目标函数确定的用于区分种群中个体优良程度的标准,是遗传算法进行自然选择的唯一依据。

在隔震层参数优化设计中,采用的目标函数如式(3)所示:

$$y = \min \left( \frac{\beta}{\beta_{max}} + \frac{u}{u_{max}} + \frac{\theta}{\theta_{max}} \right) \quad (3)$$

式中: $\beta$  为设防地震下隔震结构的水平向减震系数; $u$  为罕遇地震作用下隔震支座的水平最大位移; $\theta$  为罕遇地震作用下上部结构的最大层间位移角; $\beta_{max}$  为水平向减震系数限值,与非隔震结构相比,隔震工

程上部结构的水平地震作用减少量不宜超过 1/4,再考虑到支座性能偏差调整系数  $\psi = 0.8$ <sup>[12]</sup>,因此取  $\beta_{max} = 0.25 \times 0.8 = 0.2$ ;  $u_{max}$  为隔震支座的水平位移限值,依据《建筑抗震设计规范》<sup>[12]</sup> 的要求,  $u_{max} = \min(0.55D, 3t_r)$ ,其中,  $D$  为支座的有效直径,  $t_r$  为支座内部橡胶总厚度;  $\theta_{max}$  为上部结构的层间位移角限值,依据《建筑隔震设计标准》<sup>[13]</sup>,取  $\theta_{max} = 1/150$ 。  $y$  越小,则该染色体对应的隔震层参数就越接近最优值。

在遗传算法中,越是优良的个体适应度越大,这恰恰与目标函数相反,因此,必须将目标函数进行一定的转换,将其变为适应度函数的形式,本文采用的变换如式(4)所示:

$$fitness = -y \quad (4)$$

另外,在隔震层设计时,还需要满足以下约束条件<sup>[6]</sup>:

$$\begin{aligned} \beta &< \beta_{max} \\ u &\leq u_{max} \\ \theta &\leq \theta_{max} \\ 10 &\leq \frac{X_m}{X_o} \leq 30 \end{aligned} \quad (5)$$

在遗传算法中,以上约束条件是通过惩罚策略对个体的适应度进行修正来完成的,即个体不满足任意一个约束条件时,就将该个体对应的目标函数值扩大数倍,意味着该个体的适应度函数值将减小数倍,这样,该个体将在进化过程中被淘汰。

### 2.3 种群迁移

种群迁移使各子种群之间可传递优良个体,避免优化结果陷入局部最优。种群迁移主要解决种群的迁移规模、迁移策略和迁移拓扑三个问题<sup>[11]</sup>。本文采用单向环型迁移拓扑作为各子种群间传递优良个体的拓扑,迁移策略采用第  $i$  子种群的最优个体来代

替第  $i+1$  子种群的最差个体,实现种群间的信息交流。迁移规模由迁移周期和迁移率来决定,考虑到隔震层参数优化问题的优化参数较少,为平衡优化的质量和优化效率,取迁移周期为 2 代,迁移率为 0.1。

## 2.4 遗传操作

遗传操作的多进程并行模型如图 3 所示。各种群被分配到不同的进程,遗传选择采用精英保留策略,每个进程根据适应度函数选择出种群中适应度最大的个体保留下来。为保证种群子代与父代个体数相等,从父代种群中随机选择出剩余个体,按照设定的交叉率和变异率确定是否进行交叉和变异操作:如果不交叉和变异,则子代与父代相同,否则产生新的子代,这样反复进行,直至达到终止条件。为保证种群个体的多样性,本文取交叉率为  $[0.7, 0.9]$  的随机数,变异率为  $[0.01, 0.05]$  的随机数。

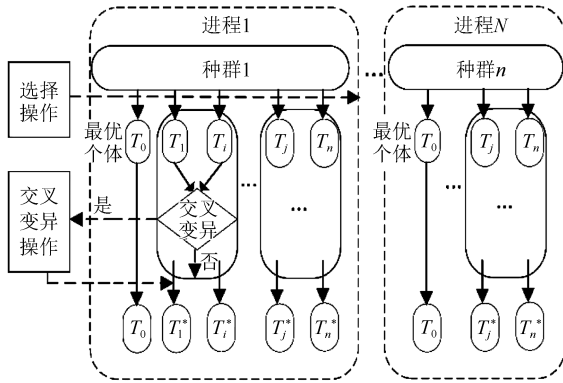


图 3 遗传操作并行模型

Fig.3 Parallel model of genetic operation

## 2.5 隔震层参数优化设计流程

基于粗粒度并行遗传算法的隔震层参数优化流程如图 4 所示,具体步骤为:

(1) 预估隔震支座,给出设计变量  $K_{eq}$ 、 $X_0$ 、 $X_m$  的取值范围;

(2) 给定粗粒度并行遗传算法的相关参数,包括子种群数量、染色体个数、交叉率、变异率、迁移周期、迁移率和最大迭代次数;

(3) 确定种群编码,生成初始种群;

(4) 并行计算出各种群个体的目标函数,评估个体的适应度;

(5) 判断迭代代数  $N$  是否为迁移周期的  $K$  倍,如果是,则执行迁移操作;

(6) 各子种群并行执行遗传操作,形成新的种群,计算新种群个体的目标函数值;

(7) 判断是否满足迭代终止条件:如果是,输出隔震层最优参数及对应的目标函数值;如果否,令  $N=N+1$ ,并转到步骤(5)。

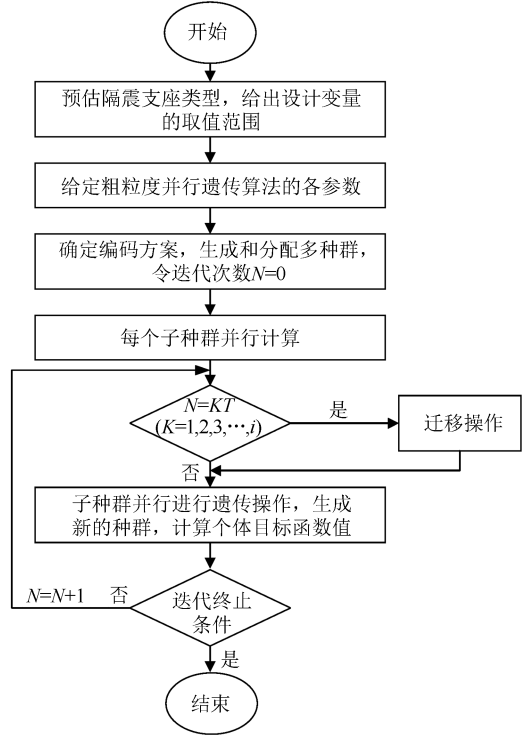


图 4 基于粗粒度并行遗传算法的隔震层参数优化计算流程

Fig.4 Optimization calculation process of isolation layer parameters based on coarse-grained parallel genetic algorithm

## 3 工程实例及优化分析

### 3.1 隔震工程概况

以某实际隔震工程为例进行分析,该工程为乙类建筑,地下 1 层,地上 4 层,建筑总高度为 19.0 m;设防烈度为 8 度( $0.3g$ ),场地类别为 II 类,设计地震分组为第三组。隔震层设置在地下室与上部结构之间,隔震结构的有限元模型如图 5 所示,隔震支座的原平面布置图如图 6 所示。

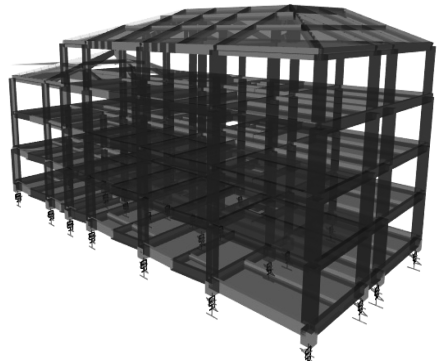


图 5 隔震结构的有限元模型

Fig.5 Finite element model of the isolation structure

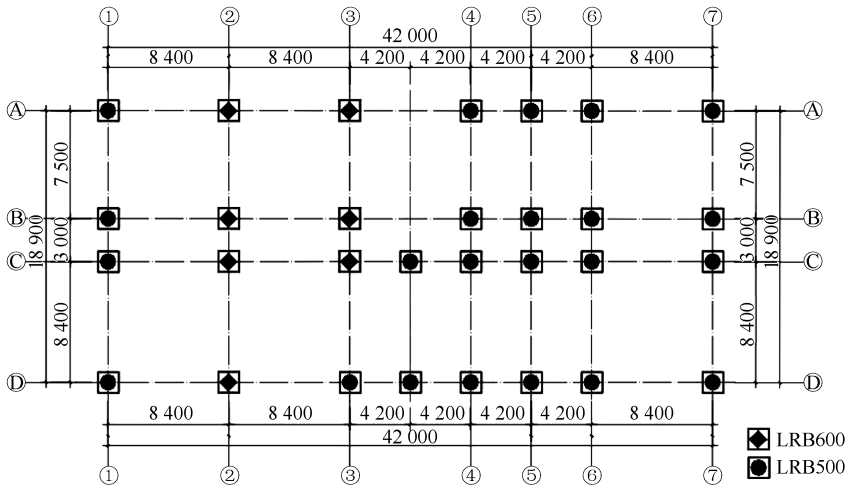


图 6 隔震支座原平面布置图(单位:mm)

Fig.6 Original plan layout of the isolation bearings (Unit:mm)

考虑到设计结果要与优化结果进行对比,因此优化时采用标准人工波<sup>[6]</sup>进行计算,得到上部结构的水平向减震系数为 0.32,且罕遇地震下各隔震支座的最大位移不超过 248 mm,小于支座容许位移 275 mm<sup>[12]</sup>;同时,罕遇地震下各隔震支座均受压。由此可见,原设计的隔震支座布置方案满足设计要求。

### 3.2 优化过程及结果

对该工程采用粗粒度并行遗传算法进行隔震层参数设计。

首先,根据隔震支座在重力荷载代表值下的竖向压应力限制要求,预估隔震支座直径范围为 400 ~ 700 mm,各直径的支座可以采用天然橡胶支座(LNR)和铅芯橡胶支座(LRB)两种类型。各隔震支座的力学性能如表 1 所列。

由表 1 可知,若所有支座均为 LNR400,隔震层参数最小,若所有支座均为 LRB700,隔震层参数最大,由此得到隔震层参数范围为: $K_{eq} \in [19.8, 58.49]$  kN/mm,  $X_o \in [0, 11.32]$  mm,  $X_m \in [68, 140]$  mm。

表 1 隔震支座的力学性能参数

Table 1 Mechanical performance parameters of isolation bearings

型号	橡胶层总厚度/mm	屈服力 /kN	屈服前刚度 / (kN/mm)	屈服后刚度 $\gamma=100\%$ / (kN/mm)	等效水平刚度 $\gamma=100\%$ / (kN/mm)	等效阻尼比 $\gamma=100\%$ / %
LRB400	68.6	27.0	6.810	0.680	1.040	25
LNR400	68.6	-	-	-	0.660	5
LRB500	100	50.7	7.730	0.773	1.281	23.6
LNR500	100	-	-	-	0.757	5
LRB600	120	90.2	9.290	0.929	1.683	27
LNR600	120	-	-	-	0.909	5
LRB700	140	122.7	10.84	1.084	1.964	26.2
LNR700	140	-	-	-	1.060	5

目标函数如式(6)所示:

$$y = \min \left( \frac{\frac{\beta}{0.2} + \frac{u}{205.8} + \frac{\theta}{150}}{3} \right) \quad (6)$$

约束条件如式(7)所示:

$$\begin{aligned} \beta &< 0.4 \\ u &\leq 205.8 \text{ mm} \\ \theta &\leq \frac{1}{150} \\ 10 &\leq \frac{X_m}{X_o} \leq 30 \end{aligned} \quad (7)$$

其中,由于初步选定的最小隔震支座直径为 400 mm,根据表 1 可知,直径为 400 mm 的隔震支座橡胶总厚度为 68.6 mm,则  $u_{max} = \min(400 \times 0.55, 3 \times 68.6)$  mm = 205.8 mm。

将以上模型采用粗粒度遗传算法进行优化,选定子种群数为 7,每个子种群的染色体个数为 10,总迭代次数为 30 代。计算机处理器为 Intel Xeon Gold 5115,共有 10 核,内存为 32 GB。时程分析时仍选用标准人工波,最终得到隔震层的最优参数为: $K_{eq} = 50.49$  kN/mm,  $X_o = 9.34$  mm,  $X_m = 122.75$  mm。

## (1) 优化方案与原设计方案比较

根据已得到的隔震层最优参数,按照文献[6]中的第二阶段优化方法,确定出隔震支座的最优布

置(图7)。该方案由26个LRB600和4个LRB400组成,优化方案与原设计方案的对比如表2~3所列。

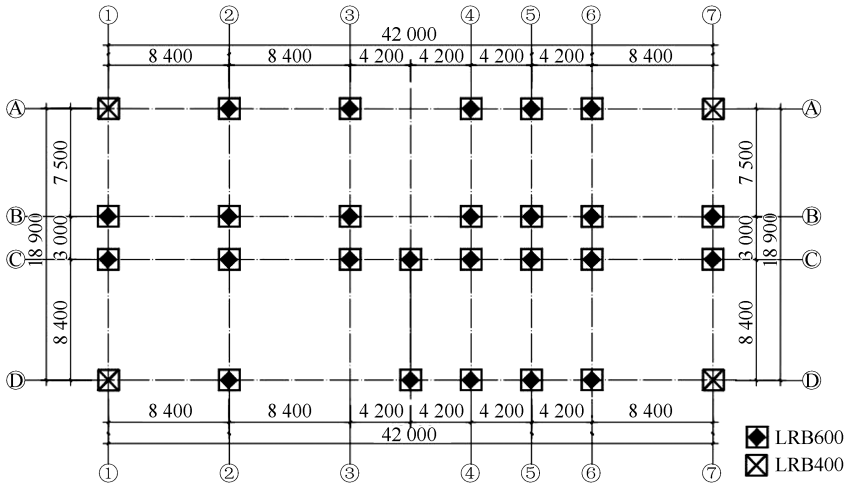


图7 优化后的隔震支座布置图(单位:mm)

Fig.7 Plan layout of the isolation bearings after optimization (Unit:mm)

表2 原设计方案与优化方案对比

Table 2 Comparison between the original design scheme and the optimization scheme

	原设计方案	优化方案	差值/%
水平向减震系数	0.32	0.30	6.3
支座最大位移/mm	248	210	14.7

表3 原设计方案与优化方案在罕遇地震下上部结构的层间位移角对比

Table 3 Comparison between story drift ratios of superstructure from the original and optimization schemes under rare earthquakes

楼层	原设计方案		优化方案	
	X向	Y向	X向	Y向
4	1/1 960	1/3 225	1/2 000	1/3 333
3	1/588	1/909	1/625	1/909
2	1/434	1/666	1/476	1/714
1	1/434	1/666	1/500	1/714

从表2可看出,与原设计方案相比,采用优化方案后,上部结构的水平向减震系数由0.32减小至0.30,减小幅度为6.3%;罕遇地震下各隔震支座的最大位移由248 mm减小至210 mm,减小幅度为14.7%。优化方案除满足设计要求外,还可同时减小上部结构的层剪力和隔震支座位移,减震效果优于原设计方案。

表3为优化方案与原设计方案上部结构在罕遇地震下的最大层间位移角比较。从表3可看出,无论优化方案还是原设计方案,顶层的层间位移角明显小于其他层,这是由于该结构的顶层质量较小,使

得顶层剪力小于其他层,但该层与其余层的抗侧刚度差别不大。因此,结构顶层的层间位移角远小于其他层,但与原设计方案相比,优化方案的顶层层间位移角与第3层差别更小,说明优化方案的结构侧向变形更为均匀。此外,除3层Y向两方案相同外,优化方案各层的最大层间位移角均比原设计方案小,说明优化设计方案在罕遇地震下对上部结构的保护要优于原设计方案。

## (2) 与文献[6]方法的计算效率对比

用粗粒度并行遗传算法和文献[6]采用的经典遗传算法方法分别对以上隔震结构进行优化,设定两种方法的进化终止条件均为:连续7代中本代与上代的目标函数值之差的绝对值都小于0.01,且最大迭代次数不超过30次。记录两种方法达到优化终止条件时的目标函数最优值、进化代数和所需时间,并列于表4。由于遗传算法是一种随机算法,对于不同初始种群、不同变异率和交叉率,其计算过程各异,因此,为使文献[6]和粗粒度并行遗传算法的计算过程具有可比性,对同一优化问题分别计算了5次。

由表4可看出,5次优化分析中,采用经典遗传算法求得的最优目标函数值,有3次与全局最优解相同,有2次未求得全局最优解,并且每次优化需要迭代25代左右才终止;采用粗粒度并行遗传算法,5次均达到全局最优解,且每次优化仅需迭代18代左右就可终止。这说明采用粗粒度并行遗传算法比经

典最优算法更易促进最优解的出现,并提高全局收敛速度。同时,采用粗粒度并行遗传算法,每次优化所需时间都明显少于经典遗传算法,平均耗时分别

为 3.46 h 和 21.39 h,加速比大致为 6,说明粗粒度并行遗传算法不仅能准确求解隔震层最优参数,还可大大提高优化计算效率。

表 4 两种方法的计算耗时和最优解对比

Table 4 Comparison between calculation time and optimal solution of the two methods

第 <i>i</i> 次计算	经典遗传算法				粗粒度并行遗传算法			
	目标函数最优值	稳定代数	计算时间/h	平均计算时间/h	目标函数最优值	稳定代数	计算时间/h	平均计算时间/h
1	0.67	24	20.47		0.67	17	3.22	
2	0.72	24	20.24		0.67	16	3.05	
3	0.67	27	23.22	21.39	0.67	17	3.28	3.45
4	0.67	25	21.48		0.67	20	3.96	
5	0.72	25	21.37		0.67	19	3.74	

在 5 次计算中,分别选取两方法中目标函数最优值最小且计算耗时最少的结果进行比较,即取经典遗传算法第 1 次的计算结果和粗粒度并行遗传算法第 2 次的结果,绘制出进化次数和目标函数的关系曲线如图 8 所示。

(2) 用 10 核 CPU 计算,与经典遗传算法相比,基于粗粒度并行遗传算法的隔震层参数优化方法既能准确求解出全局最优解,又可显著提高优化效率,加速比约为 6,可基本满足隔震工程设计的及时性需求,具有较好的工程应用价值。

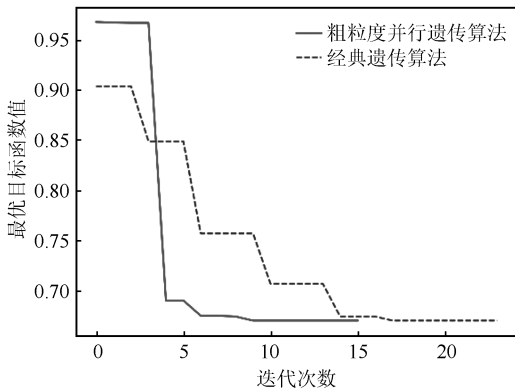


图 8 两种算法的进化曲线

Fig.8 Evolution curves of the two algorithms

从图 8 可看出,经典遗传算法直至第 15 代后才基本趋于稳定,整个进化曲线呈阶梯状下降,而粗粒度并行遗传算法运行至第 7 代后已基本趋于稳定,整个进化曲线呈断崖式下降,说明粗粒度遗传算法可快速收敛至最优解,优化效率更高。

### 4 结论

针对基于经典遗传算法的隔震层参数优化方法效率不高的问题,利用 Python 的多进程机制和 Python 与 ETABS 的交互,将粗粒度并行遗传算法应用于隔震层参数优化,并得到如下结论:

(1) 采用粗粒度并行遗传算法优化后的方案,除满足设计要求外,还可同时减小上部结构的层剪力和隔震支座位移,减震效果优于原设计方案,说明该方法可有效进行隔震层参数优化。

### 参考文献(References)

[1] FALLAH N, ZAMIRI G. Multi-objective optimal design of sliding base isolation using genetic algorithm[J].Scientia Iranica,2013,20(1):87-96.

[2] FAN J A, LONG X H, ZHANG Y P. Optimum design of lead-rubber bearing system with uncertainty parameters[J].Structural Engineering and Mechanics,2015,56(6):959-982.

[3] NIGDELI S M, BEKDAŞ G, ALHAN C. Optimization of seismic isolation systems via harmony search[J].Engineering Optimization,2014,46(11):1553-1569.

[4] 叶昆, 骆江成, 朱宏平. 面向多级性能设防目标的铅芯橡胶隔震支座基础隔震结构优化设计及分析[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10):37-45.

YE Kun, LUO Jiangcheng, ZHU Hongping. Optimum seismic design and analysis of LRB base-isolated building structures catering to multi-level performance fortification criteria [J]. Journal of Building Structures,2018,39(10):37-45.

[5] 洪绍文, 王子琦. 基于成本—效益指标的隔震支座参数优化[J]. 华南地震, 2018, 38(4):67-73.

HONG Shaowen, WANG Ziqi. Optimization of isolation bearing parameters based on cost-effectiveness index[J].South China Journal of Seismology,2018,38(4):67-73.

[6] DANG Y, ZHAO G X, TIAN H T, et al. Two-stage optimization method for the bearing layout of isolated structure[J].Advances in Civil Engineering,2021,2021:1-10.

[7] 解琳琳, 韩博, 许镇, 等. 基于 OpenSees 的大型结构分析 GPU 高性能计算方法[J]. 土木建筑工程信息技术, 2014, 6(5):22-25.

- modeling of nonlinear seismic behavior of concrete structures [J].Journal of Structural Engineering,2005,131(6):946-955.
- [19] 韩林海.钢管混凝土结构:理论与实践[M].北京:科学出版社,2016.
- HAN Linhai.Concrete filled steel tubular structures[M].Beijing:Science Press,2016.
- [20] GUO L H,GAO S,FU F,et al.Experimental study and numerical analysis of progressive collapse resistance of composite frames[J].Journal of Constructional Steel Research,2013,89:236-251.
- [21] 李国强,李六连,陆勇.平面钢框架瞬时冲击去柱抗连续性倒塌试验研究[J].振动与冲击,2017,36(11):48-56,64.
- LI Guoqiang,LI Liulian,LU Yong.Tests for progressive collapse of planar steel frames under a column sudden removal [J].Journal of Vibration and Shock,2017,36(11):48-56,64.

(本文编辑:任 栋)

\*\*\*\*\*  
(上接第 1263 页)

- XIE Linlin,HAN Bo,XU Zhen,et al.GPU powered high-performance computing method for the analysis of large-scale structures based on OpenSees[J].Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture,2014,6(5):22-25.
- [8] 徐铭阳,贾明明,吕大刚.基于 CPU 并行计算的概率地震需求分析与地震易损性分析[J].土木工程学报,2020,53(增刊 2):190-197.
- XU Mingyang,JIA Mingming,LÜ Dagang.Probabilistic seismic demand analysis and seismic fragility analysis based on CPU parallel computing[J].China Civil Engineering Journal,2020,53(Suppl02):190-197.
- [9] GIANCARLO ZACCONE.Python 并行编程手册[M].张龙,宋秉金,译.北京:电子工业出版社,2018.
- GIANCARLO ZACCONE.Python parallel programming cookbook[M].ZHANG Long,SONG Bingjin,tra.Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2018.
- [10] 杨勇.ETABS 结构设计实例详解[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- YANG Yong.Detailed explanation of ETABS structural design example [M].Beijing:China Architecture & Building Press,2015.
- [11] VLADISLAV S,VACLAV O.Parallel genetic algorithms' implementation using a scalable concurrent operation in Python [J].Sensors,2022,22(6):2389.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局.建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China,General Administration of Quality Supervision,Inspection and Quarantine of the People's Republic of China.Code for seismic design of buildings:GB 50011—2010[S].Beijing:China Architecture & Building Press,2010.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑隔震设计标准:GB/T 51408—2021[S].北京:中国计划出版社,2021.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.Standard for seismic isolation design of buildings:GB/T 51408—2021[S].Beijing:China Planning Press,2021.

(本文编辑:赵乘程)