

文章编号: 1007-4708(2009)01-0094-08

基于遗传退火混合算法的弹性地基上 框架结构参数识别研究

周云*, 易伟建

(湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要: (GA), (SA), (GASA). GA, “ ”. SA, GASA, SA, g, η .

关键词: ; ; ; ;
中图分类号: TU317+.1 文献标识码: A

1 引言

工程实际中房屋桥梁结构的模态测试结果不同程度地受到地基的影响,但对于地基上结构的动力实验研究相对较少。Whitman^[1]对一个7层Chimes Tower进行了激振器激励实验。Wong^[2]对9层钢筋混凝土框架结构Millikan Library进行顶层激振实验。Trifunac^[3]等对加利福尼亚一栋七层混凝土框架结构(VN7SH)安置长期观测速度传感器记录到了12次地震记录,并进行了随机振动测试,用傅立叶谱分析了“表观结构转角”信息并得出系统频率随激励水平的非线性现象。Hans^[4]等对法国里昂5座待拆房屋进行了随机振动、稳态激励和冲击激励实验。Chassiakos和Masri^[5]对长滩公共安全大楼在Northridge地基后进行了加入剪力墙的加固,比较了加固期间多种工况的模态特性比较,具有重要的意义。Luco^[6]等对台湾花莲Lotung 1/4核电模型的强迫激振实验结果分别进行了结构的参数识别和地基参数识别。国内有

影响的主要有吕西林^[7]和黄义^[8]的研究。

遗传算法于70年代由密执安大学的John Holland提出,是模拟自然界生物进化机制发展起来随机全局搜索和优化方法,借鉴了达尔文进化论和孟德尔的遗传学说,被广泛应用到不同的优化问题中,是基于自然遗传和自然选择机理寻优方法。Friswell^[9]较早地利用遗传算法处理损伤诊断问题,结合特征值灵敏度方法进行局部损伤程度搜索。易伟建等^[10]为了让遗传算法更适用于结构工程损伤诊断领域,提出了多父体变量级杂交和变量微调等新改进策略,并运用于固端梁的损伤诊断。Levin等^[11]比较了模拟退火算法和遗传算法在模型修正中的应用,提出了一种不同的模拟退火算法用来寻找最有效的可能解。Hao等^[12]利用遗传算法的全局搜索性能结合实数编码技术对悬臂梁和框架结构通过不同模态信息的融合技术进行损伤诊断研究。Lu等^[13]利用实数编码的遗传算法结合灵敏度方法局部爬山,对框架结构进行了损伤诊断研究。

本文将利用考虑模拟基于退火技术与传统遗传算法相结合形成串行混合结构,对实验室条件下

收稿日期: 2007-03-01; 修改稿收到日期: 2007-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(50678064)资助项目。

作者简介: 周云*(1979), 男, 博士生

(E-mail: zhouyun05@gmail.com);

易伟建(1954), 男, 教授, 博士生导师。

的框架结构和地基的物理参数进行同步识别。

2 遗传退火混合算法

2.1 遗传算法的基本思想

遗传算法 GA (Genetic Algorithm) 与传统优化搜索方法不同, 它从搜索整个求解空间出发, 因此能获得整体的优化解。在 GA 项中染色体为所定义问题的参与解, 适应度是参与解的目标函数, 染色体的组合称为基因。大多数的 GA 始于随机基因群的 n 个染色体, 称为 x_1, x_2, \dots, x_n , 染色体的适应度函数 $f(x)$ 被称为评估。达尔文进化论中的复制、适者生存、交叉和变异思想被用来创造新的种群。主要分为以下步骤:

(1) 选择: 是从当前种群中选出优良的个体, 使它们有机会作为父代为下一代繁殖子孙。根据适应度函数把染色体复制到种群之中, 每个个体被计算适应度值, 较高适应度的染色体具有较高的生存概率, 体现了达尔文的“适者生存”的思想。

(2) 交叉: 是通过选择父体随机交换其中一部分基因染色体以产生两个新的后代, 新的后代组合了父辈个体的特性, 将群体内各个个体随机配成对, 体现了信息交换的思想。

(3) 变异: 指对于选中的个体以一定的概率随机改变串结构数据中的值, 以某一概率改变某一个或某一些基因座上的基因值为其他的等位基因, 为新个体的产生提供了机会。

有人证明简单遗传算法无法达到全局最优, 简单遗传中常常会出现有影响遗传算法正常工作的问题, 即“欺骗问题”, 以及遗传算法未成熟收敛问题, 即“早熟问题”, 因此需要对遗传算法进行改进以获得全局最优解。对于防止该类问题出现, 学者们提出了混合遗传算法的解决思路。本文将在 GA 算法的上融入模拟退火的思想。

2.2 模拟退火算法的基本思想

模拟退火算法 SA (Simulated Annealing Algorithm) 属于一种非线性反演, 思想来源于模拟液体冷却结晶时物理状态。模拟退火算法的思想是在某一初温下, 伴随温度参数的不断下降, 结合概率突跳特性在解空间中随机寻找目标函数的全局

最优解。模拟退火算法的提出有利于克服优化过程陷入局部最小、克服初值的依赖性。

模拟退火算法的思想是 Metropolis 提出的, 该算法保持“产生新解-判断-接收/舍弃”迭代过程, 对应固体在某一恒定温度下趋于热平衡的过程, 也即执行了一次 Metropolis 准则^[14]:

$$p = \begin{cases} 1 & (E(x_{new}) < E(x_{old})) \\ \exp\left[-\frac{E(x_{new}) - E(x_{old})}{T}\right] & (E(x_{new}) > E(x_{old})) \end{cases} \quad (1)$$

该式的含义为: 两者的能量分别为 E_i 和 E_j , 若 $E(x_{new}) < E(x_{old})$, 则接受新状态为当前状态; 否则, 若概率 $\exp\left[-\frac{E(x_{new}) - E(x_{old})}{T}\right]$ 大于 $[0, 1)$

区间内的随机数, 则仍旧接受新状态 j 为当前状态; 若不成立则保留状态 i 为当前状态。该过程多次重复, 经大量迁移后, 系统将趋于能量最低的平衡态, 各状态概率分布将趋于某种正则分布。开始时 T 值大, 可能接受较差的恶化解, 随着 T 值的减小, 只能接受较好的恶化解, 最后在 T 值趋于零时, 就不再接收任何恶化解, 这就使模拟退火算法可以从局部最优的“陷阱”中跳出。

2.3 遗传模拟退火混合算法

把 GA 与 SA 方法融合, 形成了 GASA 算法, 本文将 GA 和 SA 结合为串行结构如图 1 所示。SA 采用串行优化结构, 赋予搜索过程一种时变最终趋于零的概率突跳性, 避免局部极小并最终趋于全局最优, 缺乏冗余和历史搜索信息; GA 采用群体并行

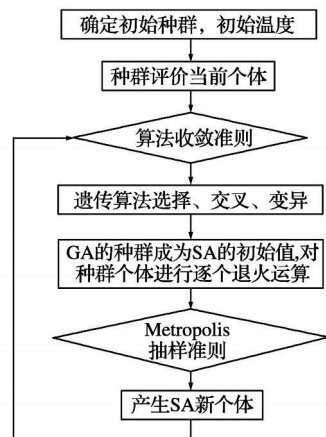


图 1 遗传模拟退火算法结构图

Fig. 1 Sketch of genetic simulated annealing algorithm

搜索, 通过概率意义下的基于“优胜劣汰”思想的群体遗传操作来实现优化。SA 和 GA 对参数具有很强的依赖性^[15], 两者结合, 使算法对参数的依赖程度降低并提高了全局搜索能力。

在串行结构中, SA 的初始解来自 GA 的一次进化结果, 而 SA 经过 Metropolis 抽样及退火过程后又成为 GA 进一步进化的初始种群。基于简单遗传算法的早熟问题, 有人证明其无法达到理论最优解, 高温下的 SA 操作有利于优化过程中状态的大范围迁移。变异和低温下的 SA 操作有利于优化过程中状态局部小范围趋化性移动^[15]。本文将基于 GASA 算法对弹性地基上框架结构进行参数识别研究。

3 弹性地基上框架结构模型实验

3.1 弹性地基上框架结构模态实验结果

本文研究对象为 1:3 的 4 层 1 跨 2 开间钢筋混凝土框架结构模型。框架结构的总体尺寸为 $L \times B \times H = 2.8 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} \times 4.333 \text{ m}$ 如图 2 所示。底层层高为 1.333 m, 2~4 层层高为 1 m。框架模型的基础为 $L \times B \times H = 0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 0.06 \text{ m}$ 的柱下独立板式埋置基础。柱尺寸为 $133 \text{ mm} \times 133 \text{ mm}$, 楼板厚度为 30 mm。框架模型的梁、柱、板的受力钢筋为 I 级, 设计混凝土强度为 C25。

试验在湖南大学结构实验室试验土槽中进行。挖方土槽深度为 1.2 m, 填土深度为 1.10 m, 填土类型为粉质粘土, 按照每层 20 cm ~ 30 cm 分层夯实。环刀测试地基密度 1965.2 kg/m^3 , 含水率为

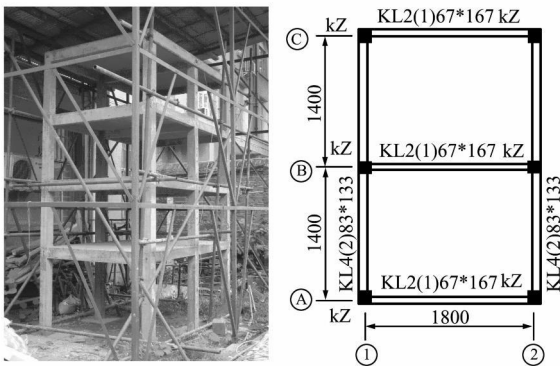


图2 地基上混凝土框架模型及平面图
Fig. 2 Ichnography and the model of frame structure on the elastic foundation

1

Tab.1 Dynamic characters index of foundation

| 地基指标 | 取值 |
|-----------------------------------|--------------------------|
| 瑞雷波波速 v_R | 145.54 m/s |
| 横波波速 $v_s = \xi_2 v_R$ | 156.88 m/s |
| 动剪模量 $G_d = \rho v_s^2$ | 4.837 e7N/m ² |
| 动弹模量 $E_d = 2(1 + \nu)\rho v_s^2$ | 1.258e8 kN/m |

18.85%。用承载板法选择 10 个点测试地基弹性模量为 48.1 MPa。利用 TSZ-30B 土工三轴压力实验系统, 测定 $\Phi 3.91 \text{ cm}$ 原状土试样在周围压力 σ_3 作用下总抗剪强度, 测定 $C = 55.8137 \text{ kPa}$, $\varphi = 8.519^\circ$ 。

地基动特性的测试采用瞬态脉冲激振方法。取地基阻尼比为 0.3, 地基动特性见表 1, 其中 $\xi_2 = (1 + \nu)/(0.87 + 1.12\nu)^{1.19}$ 。

为考虑每层框架浇注完毕地基对结构的影响, 随着每层混凝土浇注的完成进行了逐层测试。通过混凝土立方体试块抗压强度和回弹法测试强度综合评价, 得到混凝土立方体抗压强度平均值 f_{cu} , 再根据《混凝土结构设计规范》公式:

$$E_c = 100 / (2.2 + 34.7 / \bar{f}_{cu}) \quad (2)$$

计算混凝土的弹性模量见表 2。

2

Tab.2 Elastic modulus of the concrete

| 工况 | 第 1 层 | 第 2 层 | 第 3 层 | 第 4 层 |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| Case I | 2.526 | — | — | — |
| Case II | 2.979 | 2.161 | — | — |
| Case III | 3.020 | 2.881 | 2.132 | — |
| Case IV | 3.456 | 3.329 | 3.364 | 3.085 |

用脉冲锤击法对框架结构进行模态测试, 每一层框架浇注完成时进行一次实验, 相对应不同的上部结构、相同的下部结构进行了 4 种工况测试, 分别表示为 Case I, Case II, Case III 和 Case IV。模态测试结果如其后表 6 所示。

3.2 弹性地基上框架结构计算模型确定

本文利用 Paris^[17] 提出的矩形埋置板阻抗函数模型。该模型动力阻抗地基刚度和阻尼系数是频率 $a_0 = \omega B / V_s$ 的函数, 其值并非一常数。埋置矩形基础的动力刚度如下所示, 水平、摇摆及水平摇摆组合阻抗分别为

$$\bar{K}_{Hx}^d = K_{Hx}^s(G, B, \nu, L, e)(1.0 + ia_{0c}) \quad (3)$$

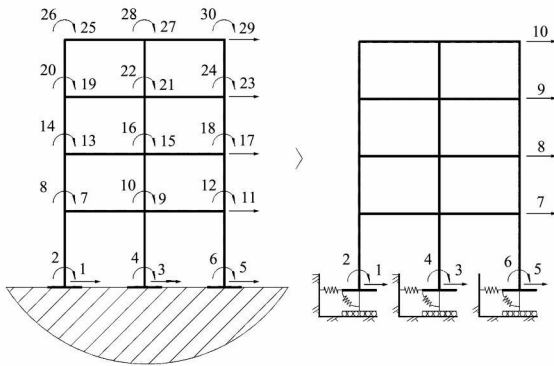


图3 地基上框架结构的计算模型

Fig. 3 Calculating model of the frame structure on foundation

$$\bar{K}_{Rx}^d = H_{Rx}^s (G, B, \nu, L, e, a_0) (k + ia_0c) \quad (4)$$

$$\bar{K}_{HR}^d = (e/B) \bar{K}_{Hx}^d / 3 \quad (5)$$

式中 K^s 为埋置基础的静刚度, ω 为振动圆频率, L 和 B 为矩形基础长边和短边边长的一半, V_s 为土中的剪切波速, k 和 c 分别是反应基础动刚度和阻尼的系数。阻抗刚度项为动剪切模量的函数, 在物理参数识别中以此为识别量。

经过对不同模型的试算, 弯剪层模型初步计算结果与测试结果最为接近, 本文利用弯剪层模型作为计算基线模型。用不考虑轴力作用的杆系有限元, 其单元刚度矩阵为 4×4 阶矩阵, 有 30 个自由度, 用静力缩聚的方法把结构缩聚成为 4 个平动自由度的框架模型。由于独立基础每个基底条件不完全相同, 底部基础的自由度保持不变, 则全结构共有 10 个自由度, 如图 3 所示。需要识别的参数为以下 7 个: 1 ~ 4 层弹性模量 E_1, E_2, E_3 和 E_4 , 图 3 基础从左至右 G_1, G_2 和 G_3 。质量矩阵使用堆聚质量矩阵, 每楼层的质量取梁和楼板的质量加上柱子一半的质量, 基础的质量由原始杆系模型堆聚质量加上地基板的质量。

4 基于 GASA 的物理参数识别

4.1 模型准则及 GASA 参数初选

待识别参数为四层弹性模量以及地基三个独立基础的动剪模量。首先确定其搜索范围:

$$E_1, E_2, E_3, E_4 \in [2e10, 5e10] \quad (6)$$

$$G_1, G_2, G_3 \in [2e7, 8e7] \quad (7)$$

其中目标函数的选取依据以下准则^[13], 基于频率的误差函数被定义为测量频率和预测频率相

3

Tab. 3 The weighting factor of different vibration shapes

| 权重 | W_{ϕ_1} | W_{ϕ_2} | W_{ϕ_3} | W_{ϕ_4} |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 取值 | 0.2553 | 0.3058 | 0.2267 | 0.2121 |

对误差的加权平方和:

$$J_\omega = \sum_{i=1}^{N_f} W_{\omega i} \left(\frac{\omega_{mi} - \omega_{li}}{\omega_{mi}} \right)^2 \quad (8)$$

模态振型误差被定义为

$$J_\phi = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_m} W_{\phi i} (\phi_{mi} - \phi_{li})^T (\phi_{mi} - \phi_{li}) \quad (9)$$

式中 ω_{mi} 和 ω_{li} 为第 i 阶段测量频率和理论计算频率, ϕ_{mi} 和 ϕ_{li} 为第 i 阶测量模态振型和理论模态振型, N_m 为选择模态的数量, $W_{\omega i}$ 和 $W_{\phi i}$ 为第 i 阶模态的加权因子。对于参数的取值, 可以利用多次振型测量值误差的倒数进行处理, 离散程度较大的特征值具有较小的值见表 3。各阶频率设置为相等的权数。对于频率和模态振型均为最小的优化准则定义如下:

$$J_{\omega\phi} = W_1 J_\omega + W_2 J_\phi \quad (10)$$

式中 W_1 和 W_2 为频率和振型组合参予因子。

在遗传算法部分中, 采用格雷编码方式 (Gray Code)。初始种群为 100, 进化代数为 100, 代沟为 0.9, 选择方式为随机遍历抽样准则, 采用洗牌交叉方式, 交叉概率为 0.7, 变异概率为 0.003。

在模拟退火算法部分中, 初始温度为 $T = 50^\circ\text{C}$, 以实数编码为基础, 对遗传算法产生的各染色体并行搜索, 状态产生函数的优化方案为 $x(k+1) = x(k) + \eta \cdot x(k) \cdot \xi$, 其中 η 为扰动幅度参数, η 的分布采用高斯分布机制, 其概率密度函数取为

$$f(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}\right), \quad -\infty < \xi < \infty \quad (11)$$

式中 σ 为方差, 基于高斯分布的邻域函数产生较小扰动的概率较大而产生大扰动的概率几乎为零。退温参数 $T = T_0 (0.95^{g-1})$, 其中 g 为退温代数。值得指出, 由于 GA 容易陷入局部最优, 因此利用模拟退火算法使其产生较大的扰动, 以此达到全局最优。由于本文运用的是遗传算法和模拟退火算法的串行结构, 它是以牺牲时效性为代价的。

4.2 SA 中参数的优选

在GASA 中对于GA 部分,其参数的选取已有大量的研究,有经验取值范围可供选取。而对于SA 部分,两个非常重要的参数关系到程序运行的速度以及最终解的收敛性。退温参数 g 的选取关系到退温过程的完全与否,在温度控制参数“充分小”时,才能体现出高质量的最终解,该值与程序耗时也有着密切的关系。本文选择迭代次数为降温停止准则,分别取为 20, 40 和 60。

另一参数为状态产生函数的优化方案方程中扰动幅度参数 η , 该值的选取太大则容易导致大幅度地摄动而导致随机搜索, 该值选取太小则容易起不到摄动的效果, 本文分别采用 0.05, 0.03 和 0.01。

本文以四层框架结构为例, 分别进行了三组计算, 当 g 值固定时, η 为 0.01 时收敛最快, 如图 4 所示。当 η 值固定时, g 值为 20 时收敛最快且时效最高, 如图 5 所示。因此在以下的分析之中, η 取为 0.01, g 值取为 20。

4.3 逐层物理参数识别

本节进行四种工况下的物理参数识别。进行该

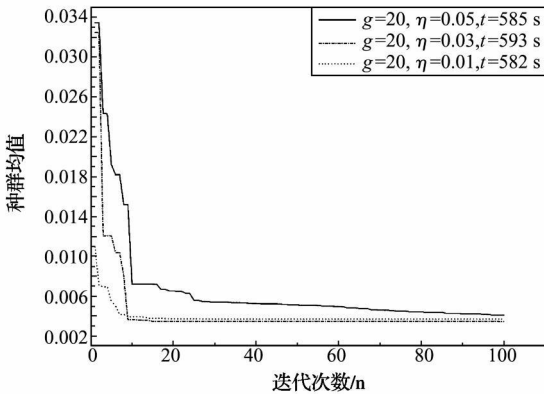


图 4 η 值变化下种群均值的变化曲线

Fig. 4 The average value of population with the varies of η

5 SM

Tab. 5 The physical parameter identified by SM

| 模量 | Case I | Case II | Case III | Case IV |
|-------|--------|---------|----------|---------|
| E_1 | 2 5415 | 3 0159 | 3 6519 | 3 9886 |
| E_2 | — | 3 4983 | 4 9146 | 4 6607 |
| E_3 | — | — | 2 6850 | 4 0833 |
| E_4 | — | — | — | 3 3983 |
| G_1 | 6 9608 | 7 5252 | 7 6464 | 7 7155 |
| G_2 | 6 9608 | 7 3175 | 7 5553 | 7 5553 |
| G_3 | 6 9608 | 7 5252 | 7 6160 | 7 6848 |

注: 弹性模量 $\times e10N/m^2$, 剪切模量 $\times e7N/m^2$ 。

4 GASA

Tab. 4 The physical parameter identified by GASA

| 模量 | Case I | Case II | Case III | Case IV |
|-------|--------|---------|----------|---------|
| E_1 | 2 7845 | 3 2685 | 3 7520 | 3 7994 |
| E_2 | — | 3 3956 | 3 6673 | 3 7984 |
| E_3 | — | — | 3 5835 | 3 7246 |
| E_4 | — | — | — | 3 6969 |
| G_1 | 4 8752 | 5 3358 | 6 1928 | 6 2752 |
| G_2 | 3 5271 | 5 3421 | 6 2921 | 6 9955 |
| G_3 | 4 8246 | 5 4245 | 6 4383 | 6 1712 |

注: 弹性模量 $\times e10N/m^2$, 剪切模量 $\times e7N/m^2$ 。

种条件下的测试和识别研究有利于了解混凝土的模量以及地基模量的变化, 对工程结构的长期监控有现实的意义, 该种情况下的研究很少有人涉及。

利用 GASA 方法进行识别分析。表 4 为利用 GASA 方法识别得到的随层数的增加而得到的框架各阶弹性模量和地基动剪切模量的值。从以上可以看出, 各层弹性模量随着层数的增加而增大, 这与弹性模量随着混凝土强度增加有关; 地基的动剪模量随着层数的增加而增加, 这与地基的动剪模量随着地基垂直的压力的增加而增大有关, 地基的三个动剪模量值基本接近, 与实际情况相符。

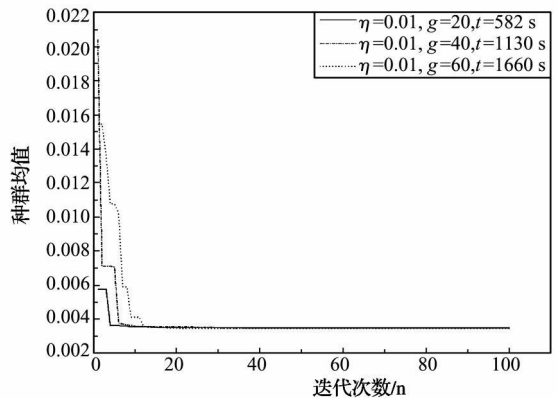


图 5 g 值变化下种群均值的变化曲线

Fig. 5 The average value of population with the varies of g

6

Tab. 6 The comparison of calculating and measuring modes

| 工况 | 阶数 | 测试/ Hz | GASA/ Hz | SM/ Hz | GASAMAC | SMMAC |
|----------|-----|--------|----------|--------|---------|-------|
| Case I | 1 阶 | 20 1 | 20 1 | 20 10 | 0 996 | 0 993 |
| | 1 阶 | 13 4 | 13 50 | 13 40 | 0 994 | 0 994 |
| Case II | 2 阶 | 51 2 | 50 91 | 51 19 | 0 998 | 0 997 |
| | 1 阶 | 9 86 | 10 41 | 10 66 | 0 992 | 0 993 |
| Case III | 2 阶 | 34 1 | 35 44 | 34 84 | 0 995 | 0 992 |
| | 3 阶 | 69 3 | 68 22 | 68 74 | 0 996 | 0 995 |
| Case IV | 1 阶 | 7 67 | 8 24 | 8 66 | 0 995 | 0 996 |
| | 2 阶 | 26 1 | 26 93 | 27 81 | 0 994 | 0 992 |
| | 3 阶 | 50 6 | 50 80 | 52 23 | 0 998 | 0 992 |
| | 4 阶 | 79 3 | 76 99 | 80 30 | 0 998 | 0 989 |

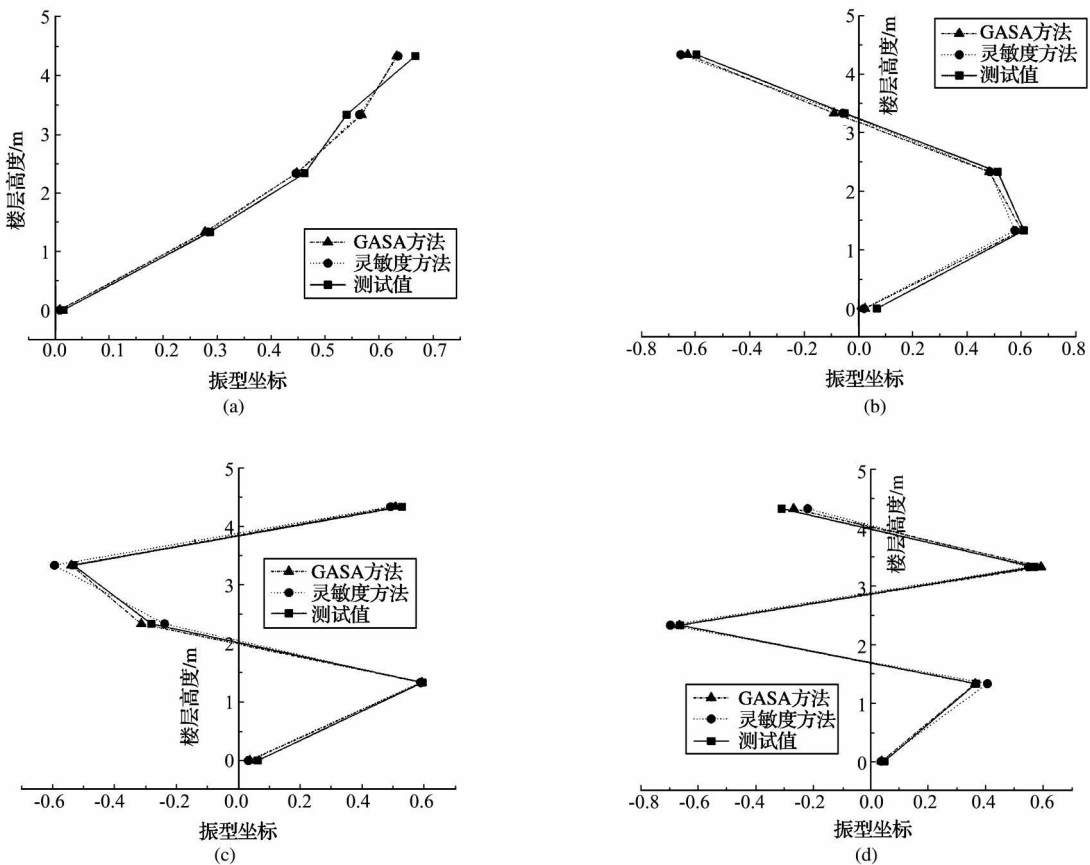


图6 测试振型值与两种识别方法计算值的比较(Case IV)

Fig. 6 Comparison of measured and calculated modal shapes

第一层浇注完毕时识别得到的动剪模量与场地试验得到的结果近似。混凝土弹性模量识别得到的弹性模量普遍比回弹法和立方块压力试验结果偏大,这可能与混凝土的动模量和静模量的差别有关;动模量的结果要高于静模量,因实验手段的限制,未能测试出混凝土动模量的测试结果。

为了与GASA方法对比,本文还利用了传统的灵敏度方法(SM)对该问题进行了计算,识别结果列入表5,灵敏度识别比GASA反演结果规律性要差。

表6列出的是利用SM方法和GASA方法反演得到的模量值计算四种工况下各阶频率,并得到了各阶模态与测试值比较的MAC值结果,图6则列出了工况四各阶模态测试结果与两种方法计算结果的比较。通过与SM方法的比较,GASA方法能成功识别弹性地基上结构的弹性模量和地基动剪切模量。由于具有较强的全局搜索能力,GASA计算得到的频率值和振型值更接近测试结果。

5 结论

本文基于GASA方法对弹性地基上独立基础的四层钢筋混凝土框架结构进行了随浇注层数逐层增加的物理参数识别研究。得到的主要结论如下:

(1) 传统的简单遗传算法具有全局搜索的特性,但容易出现“早熟问题”和“欺骗问题”。将模拟退火算法融合进入遗传算法之中,两种搜索机制巧妙地结合为混合遗传算法,大大提高了全局寻优能力。

(2) 对弹性地基上四层框架结构进行了随浇注层数的增加而增加的四种工况的模态实验,得到了四种工况下的模态参数值。

(3) 利用GASA算法计算时,在GASA中SA部分中的退温参数 g 和扰动幅度参数 η 对搜索效率及全局搜索能力具有重要的影响。

(4) 利用GASA算法对四种工况的模态实验

进行了参数识别研究,并与传统方法灵敏度方法进行了比较,GASA方法识别结果优于SM方法。随着层数的增加,结构的弹性模量和地基的动剪模量都随着增加。识别得到地基的第一层浇注完毕的动剪模量与场地实验值最接近,得到的弹性模量比回弹法结果偏大,与结构动模量和静模量的区别有关。

参考文献(References):

- [1] WHITMAN R V, PROTONOTARIOS N J, NELSON F M. Case study of dynamic soil-structure interaction[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE)*, 1973, **99**(SM11): 997-1009.
- [2] WONG H L, TRIFUNAC M D. A comparison of soil-structure interaction calculations with results of full-scale forced vibration tests[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1988, **7**(1): 22-31.
- [3] TRIFUNAC M D, IVANOVIS S S, TODOROVSKA M I. Apparent periods of a building. I: Fourier analysis[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2001, **127**(5): 517-526.
- [4] HANS S, BOUTIN C, IBRAIM E. In situ experiments and seismic analysis of existing buildings. Part I: Experimental investigations[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2005, **34**(12): 1513-1529.
- [5] CHASSIAKOS A G, MASRIS F, NAYERI R D, et al. Use of vibration monitoring data to track structural changes in a retrofitted building[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2005.
- [6] LUCO E, BARROS F C. Identification of structural and soil properties from vibration tests of the Hualien containment model[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2005, **34**(1): 21-48.
- [7] 陈跃庆,吕西林,李培振.分层土-基础-高层框架结构相互作用体系振动台模型试验研究[J].地震工程与工程振动, 2001, **21**(3): 104-112. (CHEN Yue-qing, LU Xi-lin, LI Pei-zhen. Shaking table testing for layered soil-foundation-structure interaction system [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2001, **21**(3): 104-112. (in Chinese))
- [8] 刘增荣,黄义,尹冠生.一种新的地基参数确定方法[J].西安公路交通大学学报, 2000, **20**(3): 25-28. (LIU Zeng-rong, HUANG Yi, YIN Guan-shen. A new conforming method for foundation parameter [J]. *Journal of Xi'an Highway University*, 2000, **20**(3): 25-28. (in Chinese))
- [9] FRISWELL M I, PENNY J E T, GARVEY S D. A combined genetic and eigensensitivity algorithm for the location of damage in structures[J]. *Computers and Structures*, 1998, **69**: 547-556.
- [10] 易伟建,刘霞.基于遗传算法的结构损伤诊断研究[J].工程力学, 2001, **18**(2): 64-71. YI Wei-jian, LIU Xia. Damage diagnosis of structures by genetic algorithm[J]. *Engineering Mechanics*, 2001, **18**(2): 64-71. (in Chinese))
- [11] LEVIN R I, LIEVEN N A J. Dynamic finite element model updating using simulated annealing and genetic algorithms[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1998, **12**(1): 91-120.
- [12] HAO H, XIA Y. Vibration-based damage detection of structures by genetic algorithm[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2002, **16**(3): 222-229.
- [13] LU Y, TU Z G. Dynamic model updating using a combined genetic-eigensensitivity algorithm and application in seismic response prediction[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2005, **34**: 1149-1170.
- [14] 康立山,谢云,尤矢勇,等.非数值并行算法-模拟退火算法[M].北京:科学出版社,1997. (KANG Li-shan, XIE Yue, YOU Shi-yong. *Non Numerical Parallel Algorithm-Simulated Annealing Algorithm* [M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese))
- [15] 王凌.智能优化算法及其应用[M].北京:清华大学出版社,2001. (WANG Ling. *Intelligent Optimization Algorithms with Applications* [M]. Beijing: Tsinghua Press, 2001. (in Chinese))
- [16] 王杰贤.动力地基与基础[M].北京:科学出版社,2001. (WANG Jie-xian. *Dynamic Foundation and Footing* [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))

nese))

dynamic stiffness of rigid foundations[J]. *Soil Dynamic*

[17] PAIS A, KAUSEL E. Approximate formulas for dy-

and Earthquake Engineering, 1988, 7(4): 213-227.

Parameter identification of the frame structure on elastic foundation based on the genetic annealing hybrid algorithm

ZHOU Yun^{*}, YI Wei-jian

(School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In this paper the simple genetic algorithm is improved by syncretizing the ideology of annealing algorithm and the genetic annealing algorithm. GA adopts population parallel search, it based on the idea of 'fitness is survival' to come into optimization. SA adopts serial structure, the process is endowed with time-variety probability abrupt jumping character, the local limit is prevented and the global optimization is achieved. and the globe searching ability is developed by combining the two methods. The modal test is done on the frame structure on elastic foundation in the laboratory with increasing of the storey, four cases of modal frequencies and vibration shapes are obtained. Firstly the annealing parameter is selected by optimization, the annealing parameter g and disturbance parameter η have important influences on the searching efficiency and global searching ability. Then the four cases of concrete elastic modulus and foundation dynamic shear modulus are identified, and the result is compared with sensitivity-based method, the regulation of the physical parameter increasing with the storey is obtained, the identified elastic modulus of the concrete is generally larger than by resilience technique and concrete cube compression testing, it may has the relation with the difference of the dynamic modulus and static modulus. The method and its application have important realistic significance to structure's health monitoring.

Key words: genetic algorithm; annealing algorithm; frame structure; soil-structure interaction; physical parameter identification