基于微分演化算法的系统识别

曹威巍，唐和生

（同济大学 结构工程与防灾研究所，上海 200092）

摘 要：微分演化算法(DE)是一种启发式算法，它对于解决复杂的优化问题有很好效果。它构成简单，使用方便，收敛速度快，求解有效，并且有很好的鲁棒性。本文把 DE 算法运用到了结构体系的参数估计中，可以描述为一个多维优化问题。本文在无噪声干扰和有噪声干扰的情况下，用所提出的方法来识别非线性结构体系，结果表明了此方法的有效性。

关键词：微分演化；优化算法；结构参数；系统识别

中图分类号：TU311.3；TP274^{+}.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1672-7037(2008)04-0287-03

作为一项突破性的计算技术，自从 Storn 和 Price 在 1995 年[1]引入了 DE 算法之后，DE 算法在解决复杂的优化问题上得到了很多关注。它和 EA 算法的结构相似，但是在新的后备算法中，由于它的贪婪选择性，又不同于传统的算法。DE 的另一个主要特点是用浮点语言来搜索的能力，取代了在许多传统进化算法（EA）中的二进制语言。DE 是一种混合算法，它结合了遗传算法（GA）的大范围概念和进化算法的自适应突变。这些特征和其他的因素结合在一起，使 DE 相比 EA 收敛的更快，鲁棒性更好。因为 DE 只有三到四种功能参数，伪代码也较简短，事实证明，DE 比 GA 效果要好很多。DE 除了方法比较简便之外，它的突变合重组也比较明显和有效，尤其是在重组自适应突变的时候要相对简单和有效，这是 DE 在演化方法中的一个优势。与 GA 相比，DE 具有以下特点：

（1）变异基于群体的差异，由于早期群体差异度通常较大，使得早期探索能力较强，而随着代数的增加，差异度变小，使得后期开发能力增加，这类似于一个退火过程；

（2）基于 CR 可控制个体参数的各维对交叉的参与程度，以及全局与局部搜索能力的平衡；

（3）替换是在父子个体之间以贪婪方式进行的，类似于排挤模型，有助于维持群体的多样性。

作为一种新颖的演化计算技术，DE 以其概念简单、易于执行及收敛迅速等特点得到了大量的关注以及应用。然而在结构工程领域，基于 DE 进行结构系统识别的工作鲜见有深入研究。本文采用 DE 方法进行了结构系统识别研究：结构系统的参数估计可表述为多维空间的优化问题，同时利用 DE 方法求解，给出了一些算例来验证该方法的有效性。

1 问题描述

结构系统识别问题可以视作一个优化问题，即最小化真实结构的实测反应数据与预测结构模拟数值反应数据的误差。不失一般性，考虑普通结构系统如下：

$$y(k) = f(u(k), \theta) \tag{1}$$

式中，$y \in R^{q}$ 表示系统输出，$u \in R^{p}$ 表示系统输入，$\theta = (\theta_1, \theta_2, \cdots \theta_n)$ 为需要估计的系统参数，k 为系统离散时间点，$k = 0,1,\cdots T$,T 为采样时间终点。

为了得到一个精确的系统识别过程，系统（1）必须对任意的输入激励都能精确地产生数据。因此，问题归结为最小化实测输出与备选系统输出之间的误差范数，如（2）式所示的均方误差函数：

$$F(\theta) = \frac{1}{T}\sum_{k=1}^{T}\left\| y(k) - \hat{y}(k) \right\|^2 \pm \tag{2}$$

式中，$\hat{y}(k) = f(u(k), \hat{\theta})$ 为预测模型的输出；$\|\bullet\|$ 为矢量的欧几里德范数。形式上，优化问题要求找到一个向量 $\theta \in R^{n}$ 以满足某种质量判据，即使得误差范数 $F(\bullet)$ 最小化。$F(\bullet)$ 通常被称为评价

收稿日期：2008-07-30

作者简介：曹威巍（1984-），女，上海人，硕士研究生，研究方向为结构健康监测，wwcme@hotmail.com。

基金项目：国家自然科学基金(50708076)。

函数或目标函数。在 DE 算法中，一般使得适应值函数来反映结果的好坏。因而识别问题可以解释成一个非线性优化问题：

$$\begin{aligned} &\min F(\theta),\theta=(\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_n) \\ \text{s.t.}\quad &\theta\in R^n \left|\theta_{\min,i}\le\theta_i\le\theta_{\max,j}\ \forall i=1,2,\cdots,n\right. \end{aligned} \tag{3}$$

式中，$\theta_{\max}$ 和 $\theta_{\min}$ 为 n 个参数取值的上限和下限。

2　差分演化算法

DE 算法[2,3]是一种基于实数编码的演化算法，它们有相似的操作：交叉，变异和选择。在 DE 中，向量个数 NP 在起始是随机初始化的，通过突变，交叉和选择过程来寻找优化解。

优化工作是指 n 个参数可以用一 n 维向量代替。让 $S\in R^n$ 做为问题的搜索空间。所以，DE 算法利用 NP 个 n 维向量

$$x_i=(x_{i1},x_{i2},\cdots,x_{in})^T\in S, i=1,2,\cdots,NP \tag{4}$$

作为每一迭代的数量，称为算法的一个进化。

突变过程方程如下：

$$v_i^{(G+1)}=x_i^{(G)}+F_1(x_{best}^{(G)}-x_i^{(G)})+F(x_{r1}^{(G)}-x_{r2}^{(G)}) \tag{5}$$

交叉过程为：

$$u_{ij}^{(G+!)}=\begin{cases} v_{ij}^{(G+1)}, if\,(\mathrm{rand}(j)\le CR)\mathrm{or}(j=\mathrm{rand}n(i)) \\ x_{ij}^{(G)}, f\,(\mathrm{rand}(j)>CR)\mathrm{or}(j\ne\mathrm{rand}n(i)) \end{cases} \tag{6}$$

选择过程为：

$$x_i^{(G+!)}=\begin{cases} u_i^{(G+1)}, if\,(f(u_i^{(G+1)})<f(x_i^G)) \\ x_{ij}^{(G)}, \text{otherwise} \end{cases} \tag{7}$$

3　数值模拟

为了评估利用 DE 进行结构系统识别的有效性，本文对如图 1 所示的一个单自由度非线性滞后结构模型进行系统识别。

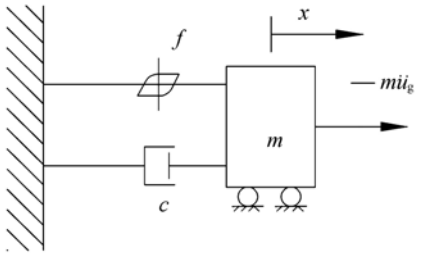


图 1　结构模型

结构动力学方程可写为如下形式：

$$m\ddot x+c\dot x+f(\dot x,x)=-m\ddot u_g \tag{8}$$

式中，x，$\dot x$和$\ddot x$分别为相对于地面的相对位移、相对速度和相对加速度；f为Bouc-Wen模型中的回复力，可表示为 $\dot f=k\dot u-\alpha|\dot u||f|^{n-1}f-\beta\dot u|f|^n$；结构的质量聚集在楼层平面。系统待识别参数为：

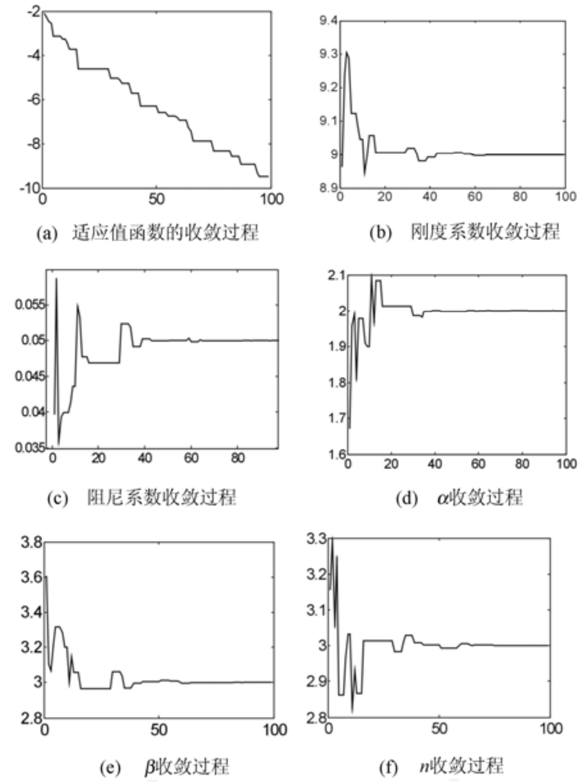
$$\theta=(k,c,\alpha,\beta,n) \tag{9}$$

考虑结构在Nigata地震波作用下的响应，适应值函数定义为真实结构与识别结构输出之间的误差范数，输出时间历程纪录14 s，采样间隔为0.01 s。参数为：m=18 kg，c=0.05 kN • s/m，k=9 kg • N/cm，α =2，β =3，n=3。分别针对模型有噪声和无噪声两种情况进行识别。

待识别参数的搜索空间取为0.7~1.5倍的真实值，DE参数设置如下：个体数＝50，最大演化代数＝100（终止条件）。在输出信号分别为无噪声和包含5 %，10 %水平的零均值高斯噪声三种情况下进行识别，运算后取平均值作为最终识别结果列于表1。此外，无噪声时的目标函数及部分参数的典型收敛过程如图2。有噪声情况时的目标函数及部分参数的典型收敛过程如图3。

表1　无噪声和有噪声干扰下的识别结果

参数	真实值	无噪声	5 %噪声	10 %噪声
k	9	8.999 9	9.067	9.096
c	0.05	0.049 999 6	0.048 91	0.046 9
α	2	1.999 84	2.030 3	2.057
β	3	2.999 8	3.107 8	3.148
n	3	3.000 4	2.899 4	2.849

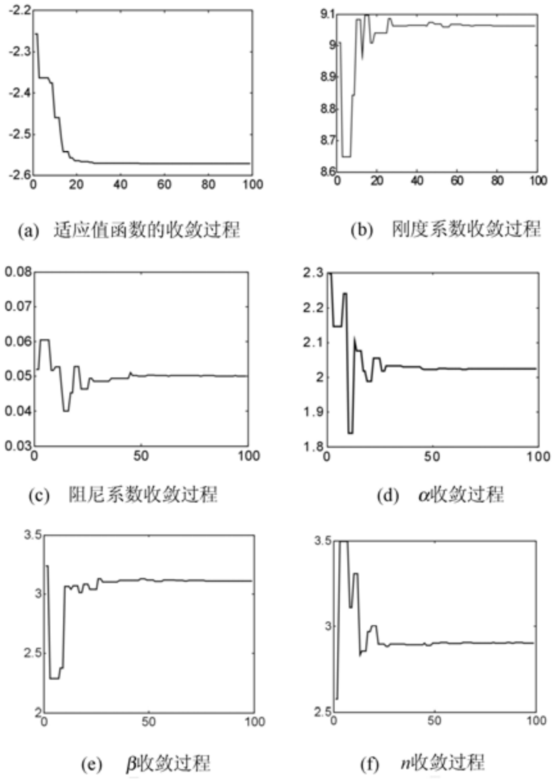


(a) 适应值函数的收敛过程　(b) 刚度系数收敛过程

(c) 阻尼系数收敛过程　(d) α收敛过程

(e) β收敛过程　(f) n收敛过程

图 2　无噪声时的一个典型识别过程



(a) 适应值函数的收敛过程　(b) 刚度系数收敛过程

(c) 阻尼系数收敛过程　(d) α收敛过程

(e) β收敛过程　(f) n收敛过程

图 3　在 5 %噪声干扰下的一个典型识别过程

4　结语

本文讨论了系统识别方法中的微分演化方法（DE）。DE 算法相对于 PSO 算法，原始的 GA 算法和一些改进的 GA 算法等，DE 执行起来更简单，控制变量少，使用更方便，DE 方法是结构系统参数估计的一个很有前途的工具。如本文数值研究中所表示的，甚至当结构的在无噪声和有噪声干扰的情况下，DE 算法仍有很好的鲁棒性，能收敛到精确结果。

参 考 文 献

[1] Storn R, Price K. Differential Evolution-A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359

[2] Storn R, Price K. Minimizing the Real Functions of the ICEC'96 Contest by Differential Evolution[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Piscataway，NJ，USA: IEEE, 1996: 842-844.

[3] Price K，Storn R. Differential Evolution; Numerical Optimization Made Easy[J]. Dr. Dobb’s Journal 1997, 22: 18-24.

[4] Yang J，Pan S. Least-Squares Estimation with Unknown Excitations for Damage Identification of Structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2007, 133(1): 12-21.

[5] Zhang J，Sato T，Iai S. Support Vector Regression for Online Health Monitoring of Large-scale Structural Damage Identification[J]. Structural Safety, 2006, 28(4): 392-406.

[6] Sato T, Qi K. Adaptive H+∞ Filter: Its Application to Structural Identification[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(11): 1233-1240.

Structural System Identification Based on Differential Evolution Algorithm

CAO Wei-wei, TANG He-sheng

(Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;)

Abstract: Differential evolution (DE) is a heuristic method that has yielded promising results for solving complex optimization problems. The potentialities of DE are its simple structure，easy use，convergence property，quality of solution，and robustness. This paper utilizes a DE strategy to parameters estimation of structural systems，which could be formulated as an optimization problem. Simulation results for identifying the parameters of non-linear structural systems under conditions including noise polluted signals，are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: differential evolution; optimization; system identification; parameters estimation