

一种基于小生境遗传算法的迟滞非线性系统参数识别方法*

曾 威 于德介

(湖南大学机械与汽车工程学院,长沙 410082)

摘要 工程中存在着大量的具有迟滞非线性恢复力的结构与构件,但迟滞非线性系统既是非线性的,又是非解析的,造成其参数识别十分困难,阻碍了迟滞非线性模型在工程中的应用. 本文提出了一种基于小生境遗传算法的迟滞非线性系统参数识别方法,该方法在遗传算法中引入了新的参数——个体活动半径. 利用本算法对一木结构剪力墙的 BW 模型参数进行识别,识别结果误差较小,验证了算法的有效性.

关键词 迟滞非线性, 参数识别, 遗传算法, 小生境

工程中存在着大量的具有非线性滞回恢复力的结构与构件,如钢筋混凝土构件、钢结构构件、粘弹性阻尼材料;工程上常用的各种摩擦耗能器和阻尼器、机械构件的螺栓联接面和滑动结合面等. 尤为重要的是,在地震、强风等载荷作用下,工程结构往往会部分进入塑性状态,此时的工程结构即为迟滞非线性系统,其弹塑性动力响应分析须基于非线性滞回恢复力模型^[1]. 目前描述这些非线性系统的数学模型主要有双折线模型^[2]、三折线模型^[3]、圆膝模型^[4]、BW 模型^[5]和 BWBN^[6]模型等.

将迟滞非线性系统的数学模型用于工程实际,首先要解决模型的参数识别问题,虽然线性系统参数识别方法正趋于成熟^[7],非线性系统的参数识别也已有许多研究工作^[8],但由于迟滞非线性系统的恢复力与位移之间的关系不但是非线性的,而且还是非解析的,识别模型参数十分困难,仅有少数学者提出了一些识别方法. 如 Loh 和 Chung^[9]曾提出用三步法识别迟滞非线性系统模型参数;Yar 和 Hammond^[10]研究了基于时域最小二乘法的迟滞非线性模型参数识别问题;Lin 和 Zhang^[11]研究了基于 Kalman 滤波法的迟滞非线性模型参数识别问题等. 但这些方法存在对初值估计要求较高,算法复杂的缺点. 近年来遗传算法发展迅速,其优势在于不需要目标问题的梯度信息,且具有良好的鲁棒性和隐含并行性,目前已有将遗传算法用于迟滞非线性系

统的参数识别的研究,如:李伟和王轲^[12]等研究了简单十进制遗传算法用于迟滞非线性系统双线性模型的参数识别问题等. 但是简单遗传算法在实际应用中常常会因为遗传运算早期难以维持群体的多样性,导致群体早熟和收敛于局部最优解的问题^[13]. 小生境(Niche)为解决这一问题提供了较好的途径.

小生境是指特定环境下的一种生存环境. 生物在进化过程中,一般总是在一定地域范围内,与自己相同的物种生活在一起,共同繁衍生息. 不同地域的群落的进化发展水平可能不同,但在种群内部不乏优秀分子. 小生境思想能够较好地维持群体的多样性,避免单一个体垄断群体,借鉴这一概念建立的小生境遗传算法已在多峰函数优化问题中得到了成功的应用.

本文通过引入个体活动半径来构造变化的小生境,建立了基于小生境遗传算法的迟滞非线性系统参数识别方法. 通过识别一木结构剪力墙的 BW 模型参数,验证了该方法的可行性和有效性.

1 迟滞非线性系统的数学模型

图 1 是一个单自由度迟滞非线性系统模型,其动力学方程为

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + R[u(t), z(t); t] = F(t) \quad (1)$$

式中 m 是物体质量, u 是物体位移, c 是阻尼系数, R 是恢复力,包括线性恢复力和迟滞恢复力, z 是迟滞

2003-11-14 收到第一稿,2004-02-08 收到修改稿.

* 教育部留学回国人员科研基金资助项目.

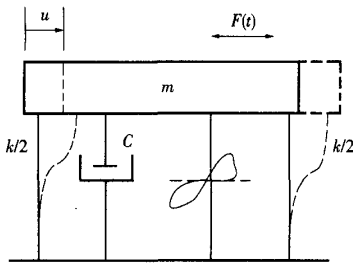


图1 单自由度迟滞非线性系统模型
Fig.1 Hysteretic SDF system

位移. 目前,描述迟滞恢复力的数学模型有多种,其中得到广泛认同的是 Bouc-Wen-Baber-Noori 模型(BWBN 模型),该模型计及了结构能量衰减(Degrading)和拢缩(Pinching),能够更广泛、更精确的描述迟滞非线性系统^[16]. BWBN 模型共有 13 个待识别参数,为便于研究,本文采用它的简化模型——BW 模型,在该模型中不考虑结构能量衰减和拢缩,其动力学方程^[16]

$$\begin{cases} \ddot{u} + 2\xi_0\omega_0\dot{u} + \alpha\omega_0^2u + (1-\alpha)\omega_0^2z = f(t) \\ \dot{z} = A\dot{u} - (\beta|u|^{n-1}z + \gamma u|z|^n) \end{cases} \quad (2)$$

式中 \ddot{u}, \dot{u}, u 分别表示加速度、速度和位移; ξ_0 为线性阻尼比; ω_0 为固有角频率; z 表示迟滞位移; $f(t)$ 为外界激励; $\alpha, A, \beta, \gamma, n$ 均为常数,也称作刚性系数(rigidity ratio), α 在 0 和 1 之间取值; A 反映迟滞现象的强度; β, γ, n 是迟滞曲线的形状参数,且 $\beta + \gamma < 0, \gamma - \beta < 0, \beta \geq 0$.

2 基于小生境遗传算法的参数识别方法

考察人类的进化发展过程发现,人类进化过程中小生境的形成是由其个体活动半径造成的. 人类进化早期个体活动范围小,具有不同进化特征的大量小规模群落形成了人类早期的多样性,而随着人类进化的不断发展,个体的活动范围也在不断扩大的,不同群落(或民族)的融合又进一步促进了人类的发展进化. 本文借鉴这一概念,在遗传算法中模拟这些进化过程,引入随遗传进行其数值逐渐增大的个体活动半径参数 L ,当个体间距离小于活动半径 L 时才进行遗传操作,以此控制个体的交配范围,形成小生境. 在进化前期 L 取较小的值,以保持群体的多样性,避免群体早熟,随着进化的进行 L 的数值逐渐增大,扩大了个体的活动范围,优良个体间能够有机会进行有用信息的交流,使个体向全局最优解方向发展. 下面以一个含有 M 个个体的群体

$P(t)$ 为例具体叙述之.

2.1 交叉操作

设 $X_i, X_j (0 < i, j \leq M, i \neq j)$ 是群体 $P(t)$ 中的两个个体, X_i, X_j 之间的距离 L_{ij} 用海明距离表示

$$L_{ij} = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n (X_{ik} - X_{jk})^2} \quad (3)$$

其中 n 表示个体的基因数.

当 $L_{ij} < L(t)$ 时,个体间以某一概率按如下方式进行交叉操作,该交叉概率计为 P_c

$$\begin{cases} X'_i{}^{t+1} = \alpha X'_i + (1-\alpha)X'_j \\ X'_j{}^{t+1} = \alpha X'_j + (1-\alpha)X'_i \end{cases} \quad (4)$$

本文取 $\alpha = E_i / (E_i + E_j)$, E_i, E_j 分别为 X_i, X_j 的适应度函数.

计算 X_i 的子代中与其距离小于活动半径 $L(t)$ 的个体的适应度,若其中的最优个体的适应度大于 X_i 的适应度,就用该子代个体代替 X_i ,否则保留 X_i . 若 X_i 未能找到交配对象,则保留 X_i 到下一代中.

对群体中的全部个体进行以上操作,得到中间子代 $P'(t+1)$.

2.2 变异操作

对 $P'(t+1)$ 中个体的基因按概率进行变异,该变异概率计为 P_m ,当生成的子代与其父代间的距离小于活动半径,且子代个体的适应度大于父代个体,则接受子代,否则舍弃子代,将父代保留到下一代中.

若群体中某一个体经过 r 代遗传操作后仍未发生变化,则强行对其进行变异操作.

2.3 适应度函数

测取系统在激励序列 f_k 下的输出序列 u_k ,并假设 $\bar{\alpha}, \bar{A}, \bar{\beta}, \bar{\gamma}, \bar{n}$ 为系统模型参数 $\alpha, A, \beta, \gamma, n$ 的估计值,将 f_k 和 $\bar{\alpha}, \bar{A}, \bar{\beta}, \bar{\gamma}, \bar{n}$ 带入方程组(2),可计算得到对应的系统输出序列 \bar{u}_k ,由此可以构造误差函数

$$e = \sum [\bar{u}_k - u_k]^2 \quad (5)$$

显然 e 越小,待识别参数的估计值就越接近真值,这样将参数识别问题转化为函数优化问题. 但在实际中直接用(5)式作适应度函数,容易出现个别适应度大的个体在遗传早期过多复制的问题,因此对(5)式进行变换得到新的适应度函数如下

$$E = 1 / (1 + e) \quad (6)$$

通过(5)式到(6)式的转换,在算法运行的早期可以较大地缩小个体间适应度的差异,避免早熟. 随着迭代的进行,个体间适应度逐渐趋向平均适应度,适应度间差异的缩小比例也随之逐渐减小,可以加快收敛速度.

2.4 个体活动半径

设置初始活动半径 $L(1) = \frac{1}{2} \text{MAX}(\|X_i - X_j\|)$, 其中 $0 < i, j \leq n, i \neq j$ 各代活动半径按下式计算 $L(t) = L(1) \cdot e^{-(0.97)^{T_{\max}-t}}$, $t > 1$ (7) 式中 T_{\max} 表示设定的最大遗传代数.

3 迟滞非线性系统识别实例

模拟试验模型采用 Kawai 于 1997 年在日本建筑研究院 (Building Research Institute) 建立的剪力墙模型, 激励采用日本神户海洋气象站记录的 1995 年日本神户大地震南北方向地震波的部分数据 (图 2). 先用神户地震数据和模型参数真值计算出剪力

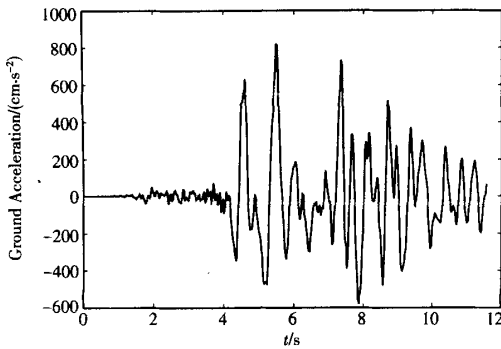


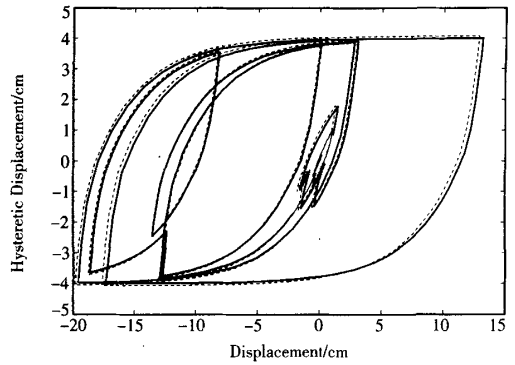
图 2 Kobe 地震激励数据
Fig. 2 The scaled north-south component of the ground acceleration of 1995 Kobe earthquake

墙 的 响 应, 再 将 神 户 地 震 数 据 和 计 算 出 的 响 应 数 据 作 为 已 知 条 件, 利 用 前 文 介 绍 的 识 别 算 法 进 行 参 数 识 别. 由 于 遗 传 算 法 的 初 始 群 体 是 随 机 产 生 的, 为 了 验 证 算 法 的 可 重 复 性, 分 别 进 行 了 3 次 识 别 运 算 (即 3 组 不 同 的 初 始 群 体, 分 别 进 行 识 别 运 算), 第 3 次 识 别 运 算 时 在 输 入 输 出 中 混 入 5% 的 白 噪 声 干 扰. 遗 传 算 法 采 用 的 参 数 为: $M = 400, P_c = 0.8, P_m = 0.05, T_{\max} = 5000, r = 3$. 模 型 结 构 参 数 真 值 及 识 别 结 果 见 表 1 和 图 3.

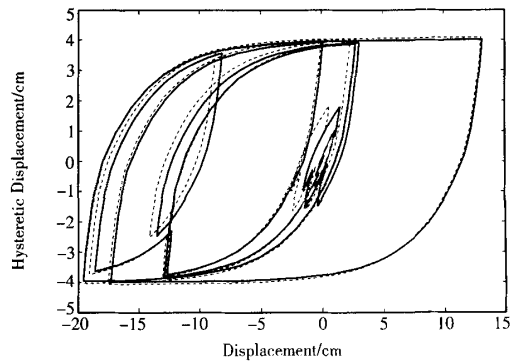
表 1 辨识结果

Table. 1 The identified parameters

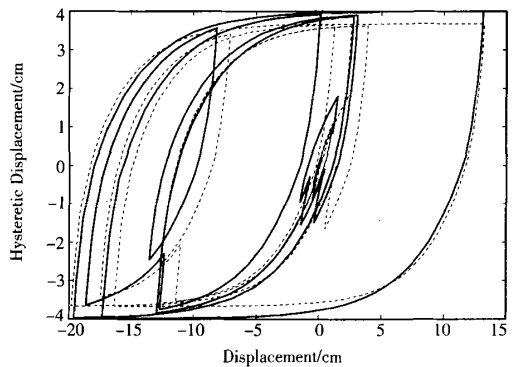
	Real Value	Result No. 1	Result No. 2	Result No. 3
α	0.001	0.001	0.001	0.001
A	1.0	1.0021	1.0017	1.0719
β	0.6	0.5922	0.5951	0.6532
γ	-0.35	-0.3481	-0.3512	-0.3713
n	1.0	1.0056	1.0106	1.0257



(a) Result No. 1



(b) Result No. 2



(c) Result No. 3

图 3 实际模型与估计模型的迟滞曲线比较
(图中虚线表示估计值, 实线表示真实值)

Fig. 3 Comparison of the actual loops and the estimated loops (solid line, loops of the actual data; dashed line, loops of the estimated data)

4 结论

1) 从识别结果可知, 本文提出的基于小生境遗传算法的迟滞非线性系统的参数识别方法, 对所研究的迟滞非线性系统具有较好的识别效果. 该方法算法简单, 不需要复杂的公式推导, 所需要的对象信

息少,不需要对象的梯度信息,对初值没有苛刻要求,且具有良好的鲁棒性和隐含并行性.在无噪声情况下,该算法具有很好的识别精度,但其抗噪能力有待进一步提高,同时算法在BWB模型参数识别上的应用还有待进一步研究.

2)由于引入“个体活动半径”这一参数,改善了遗传算法的性能,避免了早熟和识别结果落入局部最优解的问题,计算迅速、可靠,可重复性好,因此该算法在其它优化领域也具有广泛的应用前景.

参 考 文 献

- 1 阎盛海. 建筑结构抗震分析. 北京:中国建材工业出版社, 1999(Yan Shenghai. Structure antide-tonation analysis of the building. Beijing: Chinese Publishing House of Building Materials Industry,1999(in Chinese))
- 2 Caughey TK. Random Excitation of A System With Bilinear Hysteresis. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1960,27:649~625
- 3 Takeda T, Nielson NN. Reinforced Concrete Response To Simulated Earthquakes. *ASCE Journal of The Structural Engineering Division*, 1970,96:2557~2573
- 4 Takemiya H, Lutes LD. Stationary Random Vibration of Hysteretic Systems. *ASCE Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1977,103:673~687
- 5 Baber TT, Wen YK. Random Vibration of Hysteretic Degrading Systems. *ASCE Journal of The Engineering Mechanics*, 1981,107:1069~1087
- 6 Baber TT, Noori MN. Modeling general Hysteresis Behavior And Random Vibration Application. *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*, 1986,108:411~420
- 7 Imai H, Yun CB, Maruyama O, Shinozuka M. Fundamentals of System Identification In Structural Dynamics. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 1989,4: 162~173
- 8 Giannakis GB, Serpedin E. A Bibliography on Nonlinear System Identification. *Signal Processing*, 2001, 81:533~580
- 9 Loh CH, Chung ST. A Three-Stage Identification Approach for Hysteretic Systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1993, 22: 129~150
- 10 Yar M, Hammond JK. Parameter Estimation for Hysteretic Systems. *Journal of Sound and Vibration*, 1987,117:161~172
- 11 Lin JS, Zhang Y. Nonlinear Structural Identification Using Extended Kalman filter. *Computers and Structures*,1994, 52:757~746
- 12 李伟,王柯,朱德懋.基于遗传算法的非线性迟滞系统参数识别. *振动与冲击*,2000,19(1):8~11(Li Wei, Wang Ke, Zhu Demao. A Parameter Identification Method Based on Genetic Algorithm for Hysteretic Nonlinear System. *Journal of Vibration and Shock*,2000,19(1):8~11(in Chinese))
- 13 周明,孙树栋.遗传化算法原理及应用.北京:国防工业出版社,1999(Zhou Ming, Sun ShuDong, et al. Genetic Algorithms Theory and Applications. Beijing: National Defense Industry Publishing House,1999(in Chinese))
- 14 玄光男[日],程润伟.遗传算法与工程设计.北京:科学出版社,2000(Xuan Guangnan (Japanese), Cheng Runwei. Genetic Algorithms and Engineering Design. Beijing: Science Publishing House,2000(in Chinese))
- 15 Zhang Haochuan. Parameter Identification and Sensitivity Analysis of the Differential Model of Hysteresis [Doctor thesis]. University of California, Berkeley, America, 2001
- 16 Greg C Foliente. Stochastic Dynamic Response of Wood Structural System[Doctor thesis]. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1993
- 17 Yar M, Hammond JK. Parameter Estimation for Hysteretic Systems. *Journal of Sound and Vibration*, 1987,117:161~172

A PARAMETER IDENTIFICATION METHOD BASED ON A NICHE GENETIC ALGORITHM FOR HYSTERETIC NONLINEAR SYSTEM*

Zeng Wei Yu Dejie

(College of Mechanical and Automotive Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract Hysteresis is a phenomenon common to a broad spectrum of physical systems. However, due to its non-linearity and non-analysis, the parameter identification of hysteretic nonlinear system is very difficult, which damages its effectiveness in engineering. This paper proposed a new parameter identification method based on niche genetic algorithm, which employed a new parameter named Radius, and a wood shear wall described by the BW model was simulated using this method. The simulation results were compared with the real values, and it showed a great promise of the present algorithm in engineering.

Key words hysteretic nonlinear, parameter identification, genetic algorithm, niche