

文章编号: 1001-1455(2002)04-0295-06

基于遗传算法的爆炸冲击荷载参数识别方法*

李守巨¹, 刘迎曦¹, 刘玉静², 何翔¹, 周圆¹

(1. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 吉林工学院基础科学系, 吉林 长春 130012)

摘要: 基于改进的遗传算法, 建立了根据测试系统动力响应观测数据反演爆炸冲击荷载参数的数值方法。遗传算法为解决反问题的不适应性提供了强有力的手段。数值模拟结果表明, 所提出的爆炸冲击荷载参数随机反演方法具有全局搜索能力, 并且具有良好的抗观测噪音能力。当测试系统的观测相对误差为 10% 时, 参数反演结果的误差小于 8%, 所建立的参数反演方法具有良好的鲁棒性。

关键词: 遗传算法; 参数识别; 爆炸冲击荷载; 全局优化

中图分类号: TD235.1; TB114.1 文献标识码: A

1 引言

爆炸冲击荷载参数是进行岩石爆破动力学计算的基础数据, 同时也是爆炸容器设计和动力强度估价的重要参数, 因而在爆炸力学领域具有重要的研究意义。但是由于爆炸冲击荷载的复杂性和瞬变特性, 直接测量相当困难。尽管有某些经验公式能够近似估算爆炸荷载^[1-4], 但估算值与实测结果不完全一致。例如文献[5]所使用的公式, 爆炸荷载峰值为实测值的 2~4 倍, 而压力作用时间则为实测值的 1/4~1/3。为了能够通过某种计算方法, 将爆炸冲击荷载作为输入, 测试系统响应作为输出, 然后通过使得系统响应的测试值与数学模型的理论输出值的最小化过程反演爆炸冲击荷载参数, 在本文中提出了一种新的爆炸冲击荷载参数测试反演方法。其基本思想是, 通过测量某些更容易间接测量的观测信息, 例如测试系统的动力响应, 采用数值方法反演爆炸冲击荷载参数。然而, 由于反问题的非线性特性, 使得参数反演的目标函数存在多个极值^[6-7]。用常规线性化方法求解往往陷入局部极值, 用传统的非线性参数反演方法(如 Monte Carlo 方法)求解又因计算量太大而难以实现。90 年代发展起来的遗传算法和模拟退火方法可以避免陷入局部极值, 又可以使人们承受计算工作量, 是一种较为现实的非线性参数反演方法, 在国内外的地球物理参数反演中已经引起高度重视, 并且取得一定的进展^[8-9]。在本文中提出了基于遗传算法的爆炸冲击荷载参数反演方法, 以解决反问题中普遍存在的解的不唯一性和不稳定性问题, 同时也建立了一种新的爆炸冲击荷载参数测试反演方法。

2 爆炸冲击荷载测试的力学模型

炸药爆炸后所产生的爆炸冲击波和爆炸气体将向外膨胀传播, 当与某种结构接触后便产生爆炸荷载。由段卓平等^[10]通过实验和数值模拟所得到的 5g 炸药容器侧壁压力时间曲线(见图 1)可以看出, 爆炸冲击荷载的形状可以近似表示为指数函数形式。顾文彬等^[11]的爆炸荷载试验观测的结果也证明了这一点, 还有其他大量的测试研究同时表明爆炸冲击荷载的形式为指数衰减。因此, 可以将爆炸荷载表示为

$$p(t) = p_0 e^{-\alpha t} \quad (1)$$

* 收稿日期: 2001-07-13; 修回日期: 2001-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(10072014); 工业装备结构分析国家重点实验室开放基金项目(GZ9908); 高校博士点基金项目

作者简介: 李守巨(1960—), 男, 硕士, 副教授。

式中： p_0 为爆炸荷载的峰值， α 为衰减指数。但其具体数值是未知的，与装药量的大小、距爆心的距离和炸药的性能等因素有关，也就是本文中所提出的需要反演确定的。

如图 2 所示，装在金属管内的炸药爆炸后，产生爆炸冲击波。如图 3 所示为单自由度弹簧-滑块系统，忽略测试系统的阻尼，滑块在爆炸冲击荷载的作用下必将产生振动，振动将围绕滑块的静平衡位置附近运动，其运动微分方程为

$$m\ddot{x} + kx = f(t) \quad (2)$$

式中： m 为滑块的质量， k 为弹簧的刚度， x 为位移， $f(t)$ 为爆炸冲击荷载。滑块的运动微分方程也可表示为

$$\frac{m\ddot{x}}{k} + x = F(t) \quad (3)$$

式中： $F(t) = Ap(t)/k$ ， A 为滑块的横截面积。滑块运动的初始条件为：初始速度为零，初始位移为零。则滑块-弹簧的动力响应^[12]为

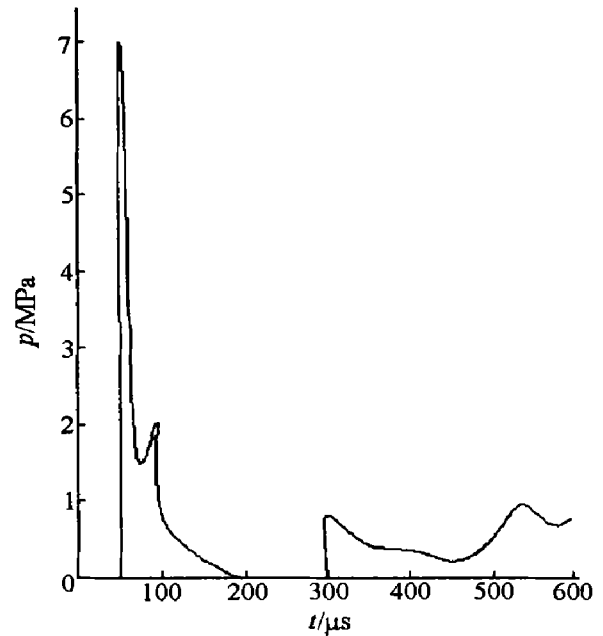


图 1 爆炸冲击荷载时间曲线
Fig. 1 Curve of explosion shock loading with time

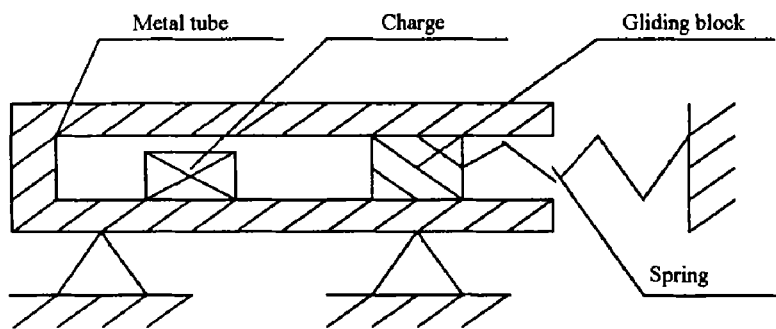


图 2 爆炸冲击荷载测试装置
Fig. 2 Testing equipment of explosion shock loading

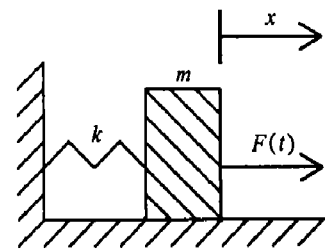


图 3 简化的力学模型
Fig. 3 Simplified mechanical model

$$x = F(t) \frac{(\alpha/\omega)\sin \omega t - \cos \omega t + e^{-\alpha t}}{1 + \alpha^2/\omega^2} \quad (4)$$

式中： $\omega = \sqrt{k/m}$ ，为测试系统的固有圆频率。当测试系统的弹簧刚度 k 和滑块的质量 m 确定后，则测试系统的固有圆频率随之确定。当爆炸冲击荷载的峰值 p_0 和衰减指数 α 均为已知时，测试系统的动力响应按式(4)计算，这便是测试系统动力响应分析的正演模型，也是进行爆炸冲击荷载参数反演的基础。图 4 为在某一爆炸荷载作用下，按式(4)计算所得到的测试系统的动力响应曲线。

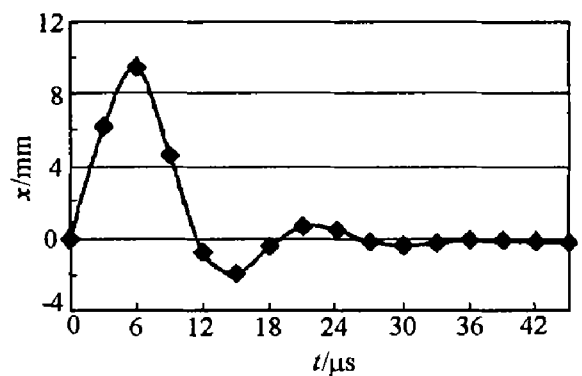


图 4 测试系统的动力响应
Fig. 4 Dynamic response of testing system

3 爆炸冲击荷载参数反演方法

由于爆炸冲击荷载的复杂性,使得爆炸冲击荷载参数反演问题具有多个极值。遗传算法是模拟生物的遗传和长期进化过程机理发展起来的一种搜索和优化算法。它模拟了生物界“生存竞争、优胜劣汰、适者生存”的机制,用逐次迭代法搜索寻优。实际中,在遗传算法中有两类运算:(1)遗传运算,包括交叉和变异;(2)进化运算,选择。交叉是最简单的遗传运算,它同时对两个染色体操作,组合二者的特性产生新的后代,遗传算法的性能很大程度上取决于采用的交叉运算的性能。变异是另一种基本运算,它在染色体上自发地产生随机的变化,变异可以提供初始种群中不包含的基因,或找回在选择过程中丢失的基因,为种群提供新的内容。选择也称复制或繁殖,是从父代种群中选择优质个体,淘汰部分个体,产生新种群的过程。选择不增加个体的数目,但优质个体得到复制,使种群的平均适应度得到提高。本文中遗传操作的具体执行过程如下。

(1) 选择。采用轮盘赌法,计算种群中个体 i 的选择概率

$$P_i = f_i / \sum f_i = f_i / f_{\text{sum}} \quad (5)$$

式中: f_i 为个体 i 的适应度, f_{sum} 为种群总的适应度, P_i 为个体 i 的选择概率。选择步骤^[8]如下:(1) 在第 t 代,设种群为 P_t ,分别计算 P_j 和 f_{sum} ;(2) 产生 $[0, 1]$ 的随机数 rand ,求 $s = \text{rand} \cdot f_{\text{sum}}$;(3) 求 $\sum f_i \geq s$ 中最小的 k ,则第 k 个个体被选中;(4) 进行 M 次(2)和(3)步骤操作,得到 M 个个体,称为第 $t = t + 1$ 代的种群。

(2) 交叉。采用一点交叉(保留 2 组最优的不交叉)方式。将一对父代个体的基因链,随机地在同一位置切断,部分交换重组,产生一对新个体,称为子代。

(3) 突然变异。按设定的变异概率,在种群中个体的基因座上,用其对立基因进行置换,得到新的个体。

基于遗传算法的参数反演过程主要步骤如下。

(1) 设定解空间 Π 与 GA 搜索空间 S ,选择 $\Pi \leftrightarrow S$ 之间转换,即编码和译码方式。设解空间一维参数 $x \in (x_{\min}, x_{\max})$,则编码(由 GA 搜索空间 S 转换为解空间 Π)公式为

$$x = x_{\min} + (x_{\max} - x_{\min}) \xi / (2^L - 1) \quad (6)$$

式中: x 为十进制数, L 为二进制位串长度, ξ 为 GA 搜索空间的参数, ξ 为正整数的十进制码。译码(由解空间 Π 转换为搜索空间 S)公式为

$$\xi = (x - x_{\min}) (2^L - 1) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (7)$$

(2) 确定目标函数与适应度函数之间的变换模型。对于求目标函数极大值问题,适应度函数 f_i 与目标函数 J_i 相同

$$f_i = J_i \quad (8)$$

对于参数反演问题是求极小值问题,适应度函数 f_i 与目标函数 J_i 的关系为

$$f_i = C_{\max} - J_i \quad (9)$$

$$J_i = (\mathbf{U}_c - \mathbf{U}_m)^T \mathbf{W} (\mathbf{U}_c - \mathbf{U}_m) \quad (10)$$

式中: C_{\max} 为充分大的正数,随迭代过程而变化; \mathbf{U}_c 、 \mathbf{U}_m 分别为计算测试系统响应矢量和观测测试系统响应矢量; \mathbf{W} 为权矩阵, $\mathbf{W} = \mathbf{C}^{-1}$, \mathbf{C}^{-1} 为观测误差的协方差矩阵的逆矩阵^[13]。如果观测数据是互不相关的,那么权矩阵为对角矩阵,主元为 σ^{-2} ,其中 σ 为观测标准差。

(3) 确定 GA 算子及其有关运算次数。包括:种群规模 M ,交叉概率 P_c ,变异概率 P_m ,二进制位串长度 L 和收敛准则 ϵ 。本文中采用的收敛准则为

$$\min J_i \leq \epsilon \quad (11)$$

式中: ϵ 为事先给定的充分小的正数,其大小与观测仪器的精度或分辨率有关。

(4) 在 GA 空间随机产生初始种群,译码至问题空间。

(5) 将反演得到的爆炸冲击荷载参数中间解代入到式(4)中,解振动响应正问题,求适应度函数:最大适应度 f_{\max} , 平均适应度 f_{av} 。

(6) 执行收敛准则。对反演结果进行评价,如果满足收敛准则,与适应度 f_{\max} 相对应的解即为所求问题的解,计算结束;否则,转至下步。

(7) 在 GA 空间,进行 GA 操作,即选择、交叉和变异。生成下一代种群,译码至问题空间。然后转至第(5)步。

4 数值算例

假设供爆破测试试验金属筒直径300mm,弹簧刚度 $k = 160\text{GN/m}$, 滑块质量 $m = 1\text{kg}$; 忽略滑块振动时摩擦阻尼和空气阻尼的影响,由结构动力学理论可知,滑块-弹簧测试系统振动频率 $f = 63.694\text{kHz}$ 。因为未进行实际测试工作,为了检验本文中所提出数值方法的有效性,采用数值模拟方法模拟一组观测数据,然后据此数据进行参数反演。

按照文献[14]所提供的爆炸冲击荷载数据(如图5所示的理论值),首先假设作用在滑块上的爆炸冲击荷载峰值 $p_0 = 38\text{GPa}$, 衰减指数 $\alpha = 1.35 \times 10^5 \text{s}^{-1}$, 然后将此代入到式(4)中,得到一组滑块-弹簧测试系统动力响应数据,再将此组动力响应数据

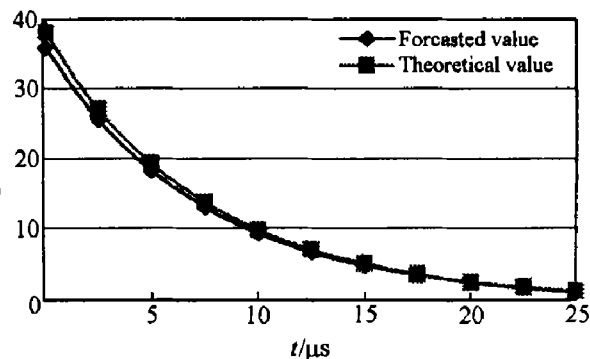


图5 爆炸冲击荷载预报值与理论值的对比
Fig.5 Comparison of estimated values of explosion loading with theoretical values

表1 爆炸冲击荷载参数识别结果

Table 1 Estimated parameters of explosion shock loading

$\hat{\delta}_n / (\%)$	$\alpha_{th} / \text{s}^{-1}$	$\alpha_{inv} / \text{s}^{-1}$	$\hat{\delta}_0 / (\%)$	p_{0th} / GPa	p_{0inv} / GPa	$\hat{\delta}_0 / (\%)$
0	135000	134543	0.3	38.00	37.91	0.2
5	135000	134120	0.6	38.00	35.83	5.7
10	135000	135389	0.2	38.00	35.15	7.5

随机加上均值 μ 为 0、标准差 σ 已知的正态分布的“噪音”,模拟实际观测数据。表1给出了5%~10%观测噪音时的爆炸冲击荷载参数反演结果,表中 $\hat{\delta}_n$ 为观测相对误差, α_{th} 、 p_{0th} 为理论值, α_{inv} 、 p_{0inv} 为反演值, $\hat{\delta}_0$ 、 $\hat{\delta}_0$ 为相应的反演相对误差。图5给出了爆炸冲击荷载参数反演后,爆炸冲击荷载预报值与理论值的对比;图6给出了爆炸冲击荷载参数反演迭代过程。

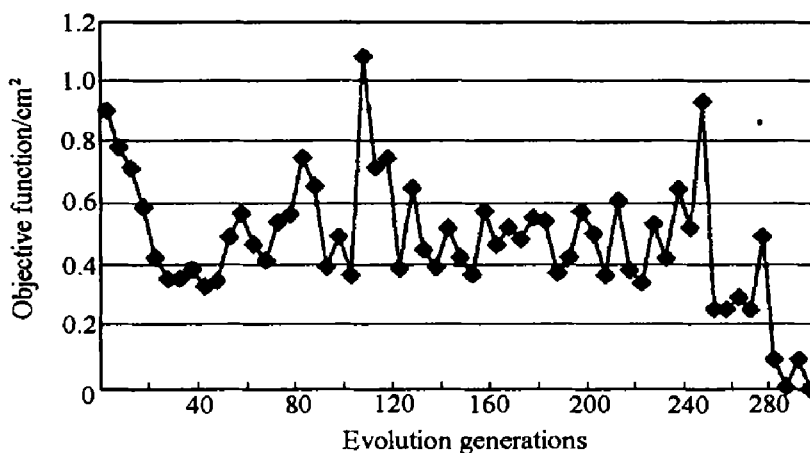


图6 爆炸冲击荷载参数反演进化过程

Fig.6 Evolution process of parameters inversion of explosion shock loading

5 结 论

遗传算法为解决全局优化问题提供了一种新的搜索策略,并且具有良好的鲁棒性。由于在爆炸冲击荷载参数反演优化迭代过程中,无须计算目标函数的灵敏度和梯度矩阵以及 Hessian 矩阵,因此有效地避免了求解反问题时经常遇到的解的不稳定问题^[15];同时由于遗传算法具有全局搜索能力,解决了局部极小与全局极小矛盾问题,也就是解决了反问题中解的不唯一性问题。

参考文献:

- [1] 亨利·奇. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国, 译. 北京: 科学出版社, 1987:37-39.
Henrich J. Explosion Dynamics and its Use[M]. XIONG Jian-guo, translated. Beijing: Science Press, 1987:37-39.
- [2] 奥尔古德. 受弯构件在静力的和爆炸荷载作用下设计[M]. 北京: 科学出版社, 1977:78-82.
Allgood J R. Design of Members in Bending under Action of Static and Explosion Loadings[M]. Beijing: Science Press, 1977:78-82.
- [3] 李翼琪, 马素贞. 爆炸力学[M]. 北京: 科学出版社, 1992:37-39.
LI Yi-qi, MA Su-zhen. Explosion Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1992:37-39.
- [4] 赵斌. 试论炮孔壁初始压力[J]. 工程爆破, 1997, 3(1):14-17.
ZHAO Bin. Computation of Initial Pressures at Bore-hole[J]. Engineering Blasting, 1997, 3(1): 14-17.
- [5] 赵士达. 爆炸容器[J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(1):85-95.
ZHAO Shi-da. Blast Chamber[J]. Explosion and Shock Waves, 1989, 9(1):85-95.
- [6] 邓建辉, 丰定祥, 葛修润. 多介质边坡弹性模量位移反分析模型与优化算法[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3):22-27.
DENG Jian-hui, FENG Ding-xiang, GE Xiu-run. Model for Back Analysis of Elastic Moduli from Measured Displacements in Cut Slopes and its Optimization Method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(3):22-27.
- [7] 李守巨, 刘迎曦, 王登刚. 基于遗传算法的岩体初始应力场反演[J]. 煤炭学报, 2001, 26(1):13-18.
LI Shou-ju, LIU Ying-xi, WANG Deng-gang. Inversion Procedure of Initial Stress Fields in Rock Masses Based on Genetic Algorithm[J]. J of China Coal Society, 2001, 26(1):13-18.
- [8] Nath S K. Velocity Inversion in Cross-hole Seismic Tomography by Counter-propagation Neural Networks, Genetic Algorithm and Evolution Programming Techniques[J]. Geophys J Int, 1999, 138(1):108-124.
- [9] Sambridge M. Geophysical Inversion with a Neighbourhood Algorithm - I : Searching a Parameter Space [J]. Geophys J Int, 1999, 138(2):479-494.
- [10] 段卓平, 恽寿榕. 密闭爆炸容器实验研究及数值模拟[J]. 中国安全科学学报, 1994, 4(3):1-8.
DUAN Zhuo-ping, YUN Shou-rong. The Experimental Study and Numeric Simulating of Explosion Containment Chamber[J]. China Safety Science Journal, 1994, 4(3):1-8.
- [11] 顾文彬, 孔劲松, 吴腾芳. 环状分布装药容器中爆炸荷载研究[J]. 爆破器材, 1999, 28(5):19-22.
GU Wen-bing, KONG Jin-song, WU Teng-fang. Study of the Loop-charge Explosion Load in a Vessel[J]. Explosive Materials, 1999, 28(5):19-22.
- [12] Cyril M. Shock and Vibration Handbook *Vol. 1 [M]. New York : McGraw-Hill Book Company, Inc, 1961:236-238.
- [13] Wang L J. Inversion of Magnetometer Array Data by Thin-sheet Modeling[J]. Geophys J Int, 1999, 137(1):128-138.
- [14] 王肖钧, 刘文韬, 张刚明, 等. 爆炸载荷下钢板层裂的二维数值计算[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(2):97-102.
WANG Xiao-jun, LIU Weng-tao, ZHANG Gang-min, et al. 2D Numerical Simulation of Spallation in a Steel Plate due to Explosive Loading[J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(2):97-102.
- [15] 李守巨, 刘迎曦, 王登刚. 岩石和混凝土材料参数反演的修正高斯-牛顿算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 20(1):93-96.
LI Shou-Ju, LIU Ying-xi, WANG Deng-gang. Material Parameter Identification of Rock and Concrete with Modified Gauss-Newton Algorithm[J]. Chinese J of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(1):93-96.

Parameter Identification Procedures of Explosion Shock Loading Based on Genetic Algorithm

LI Shou-ju¹, LIU Ying-xi¹, LIU Yu-jing², HE Xiang¹, ZHOU Yuan-pai¹

(1. *State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment,*

Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. *Basic Science Department, Jilin Institute of Technology, Changchun 130012, Jilin, China*)

Abstract: Based on genetic algorithm, a numerical computation procedure is presented to identify the parameters of the explosion shock loading. The genetic algorithm provided a powerful method for solving ill-posedness of inverse problem. The numerical simulation results show that the proposed inversion algorithm is able to get global minimization, and to prevent the measurement noises. The maximum relative error of inversion results is less than 8% when the measurement error of testing system is 10%. The proposed inversion algorithm is robust.

Key words: genetic algorithm; parameter inversion; explosion shock loading; global optimization

《爆炸与冲击》变更刊期启事

为了适应我国爆炸力学学科的迅速发展,及时反映学科发展、前沿动态,缩短本刊论文的发表周期,经编委会讨论通过,经各有关部门批准,本刊从2003年起由季刊改为双月刊。

欢迎爆炸力学及有关学科的研究人员踊跃投稿。

爆炸与冲击编辑部

2002年10月