

- study on performance of cement stabilized macadam with vibration mixing and two-cylinder continuous mixing[J]. AIP Conference Proceedings, 2018, 1995(1): 020006.
- [13] 施洲辉,甘先永,罗增杰. 振动搅拌技术对水泥稳定碎石强度性能的影响[J]. 公路与汽运, 2016(3): 109-112.
- SHI Zhou-hui, GAN Xian-yong, LUO Zeng-jie. Effect of vibration mixing technology on strength of cement stabilized macadam[J]. Highways and Automotive Applications, 2016(3): 109-112.
- [14] 卓吉. 西藏地区水泥稳定碎石质量控制研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- ZHUO Ji. Research on the quality control of cement stabilized macadam in Tibet area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [15] 张雪强. 水泥稳定碎石组成结构及强度形成机理分析[J]. 山西建筑, 2009, 35(19): 168-170.
- ZHANG Xue-qiang. Analysis on the composition structure and intensity formation mechanism of cement stabilized macadam[J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(19): 168-170.
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路路面基层施工技术细则: JTG/T F20-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Ministry of Transport of the PRC. Technical guidelines for construction of highway roadbases: JTG/T F20-2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程集料试验规程: JTG E42-2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- Ministry of Transport of the PRC. Test methods of aggregate for highway engineering: JTG E42-2005[S]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51-2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- Ministry of Transport of the PRC. Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering: JTG E51-2009[S]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [19] 赵利军, 蒋文志, 侯劲汝, 等. 搅拌方式对水泥稳定碎石混合料抗压强度的影响[J]. 中国公路学报, 2018, 31(1): 151-158.
- ZHAO Li-jun, JIANG Wen-zhi, HOU Jin-ru, et al. Influence of mixing methods on performance of compressive strength for cement stabilized macadam mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(1): 151-158.
- [20] 田见效, 陈栓发, 彭波. 超早强水泥稳定碎石路用性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003, 23(5): 24-27.
- TIAN Jian-xiao, CHEN Shuan-fa, PENG Bo. Pavement performance of ultra-early strength cement stabilized macadam[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2003, 23(5): 24-27.
- [21] 杨明, 程培峰. 掺玄武岩纤维水泥稳定碎石强度试验研究[J]. 中外公路, 2011, 31(5): 246-249.
- YANG Ming, CHENG Pei-feng. Experimental study on strength of cement stabilized macadam with basalt fiber[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(5): 246-249.
- [22] 刘贤萍, 王培铭, 陈红霞, 等. 原子力显微镜在水泥熟料单矿物早期水化产物研究中的应用[C]//中国硅酸盐学会 2003 年学术年会水泥基材料论文集. 北京: 中国硅酸盐学会, 2003.
- LIU Xian-ping, WANG Pei-ming, CHEN Hong-xia, et al. Application of atomic force microscope in the study of early hydration products of cement clinker single minerals[C]//Proceedings of the 2003 Annual Meeting of China Silicate Society on Cement-Based Materials. Beijing: China Silicate Society, 2003.

文章编号:1672-9331(2021)03-0016-08

基于虚拟仪器的桩基动力学模型参数识别系统

雷正保^{1,2}, 李梦尝¹

(长沙理工大学 大型结构碰撞实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为了快捷、准确地获取桩基横向动力学模型的参数,通过建立桩基激振理论模型,并求解得到桩基测点加速度响应的理论结果;利用激振方法,用加速度传感器获取桩基测点加速度响应的试验结果;通过计算桩基测点加速度响应理论结果和试验结果的动态时间弯曲(dynamic time warping, DTW)距离的均方根,将问题转换为目标函数的寻优问题;利用遗传算法进行桩基模型参数的寻优;为解决参数识别过程中复杂数据的运算问题,实现工程实用化,通过COM组件实现MATLAB与LabVIEW混合编程,开发出一套桩基模型参数智能识别系统软件。最后,通过算例说明本研究方法是有效的,且具有工程实践意义。

关键词: 虚拟仪器; 桩基模型; 参数识别; 混合编程; 遗传算法

中图分类号: TU473

文献标志码: A

Parameter identification system of pile foundation dynamic model based on virtual instrument

LEI Zheng-bao^{1,2}, LI Meng-chang¹

(Large Structural Impact Laboratory, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to obtain the parameters of lateral dynamic model of pile foundation quickly and accurately, the theoretical model of pile foundation excitation was established to get the theoretical results of acceleration response of pile foundation measuring points; the acceleration response test results of pile foundation measuring points were obtained using the excitation method by acceleration sensor; through calculating the root mean square of the dynamic time warping (DTW) distance of the theoretical and experimental results of acceleration response of pile foundation measuring points, the problem was transformed into an optimization problem of the objective function; genetic algorithm was used to optimize the parameters of the pile foundation model; in order to solve the operational problem of complex data in the process of parameter identification and realize the engineering practicality, the COM component was used to realize the mixed programming of MATLAB and LabVIEW, and a set of parameter intelligent identification system software of pile foundation model was developed. Finally, the effectiveness and engineering practical significance of the method was illustrated by an example.

Key words: virtual instrument; pile foundation model; parameter identification; mixed programming; genetic algorithm

收稿日期:2021-05-14

基金项目:湖南省重点领域研发计划项目(2019SK2174)

通讯作者:雷正保(1964—),男,教授,主要从事无损检测与虚拟仪器方面的研究。E-mail: l2663567674@163.com

桩基模型参数的准确确定是桩基工程设计、建设的关键。利用传统的室内试验、现场试验以及经验公式等方法可以确定桩基模型参数,但在使用这些传统方法的过程中会扰动土样的原状性,导致桩—土相互作用关系发生改变,使得获取的参数具有偏差。因此,无损检测研究逐渐变得重要。柳伟续等^[1]提出的改进子空间匹配追踪算法对公路护栏立柱导波进行检测,检测误差满足工程要求。何存富等^[2]对基于超声导波技术的护栏立柱埋深检测进行了研究,为护栏立柱的无损检测奠定了基础。随着反演理论在工程实际的成功应用,张军辉等^[3]应用 BP 神经网络及实数编码的多种群遗传算法对路面结构参数进行了反演。李跃军等^[4]针对路面模量反算,提出了自适应信息遗传算法,有效地提升了模量反算的效率。查旭东等^[5]根据动力半空间理论和 PFWD 实测数据,建立路基动力反算模型,提出了相应动力反算方法。郭健等^[6]将变异粒子群算法与径向基函数神经网络相结合,建立了变异粒子群神经网络耦合算法,实现了对桩基动测参数的辨识。

本研究结合遗传算法和参数反演理论对桩基动力学模型参数识别进行研究。首先,结合有限元法建立了桩基激振理论模型,求得桩基测点加速度响应理论结果,解决参数正演问题;然后,通过动态时间弯曲(dynamic time warping, DTW)距离将桩基测点加速度理论响应结果与测量结果联系起来,将参数识别问题转换为参数寻优问题;最后,将桩基激振有限元计算程序嵌入遗传算法中,并进行参数寻优,实现了桩基模型参数的无损检测。

LabVIEW 使用图形化编程语言——G 语言,具有简单快捷的开发环境^[7],拥有函数库和对外接口,并具有强大的界面开发和数据采集能力,被广泛用于各种测控系统的开发^[8]。本研究使用 MATLAB 和 LabVIEW 的混合编程方式,结合虚拟仪器技术,开发出了桩基模型参数识别系统,实现了桩基模型参数识别方法的工程实用化,解决了参数识别中大量数据的运算难题。

1 参数辨识原理

1.1 桩基激振理论模型

图 1 所示为桩基的理论模型。从图 1 可以看

出,通过激振方法,可以获得桩基测点的加速度响应试验结果和力锤施加给桩基的横向冲击载荷。在锤击载荷作用下,系统某一时刻的动力学平衡方程为:

$$\mathbf{M}\{\ddot{\mathbf{S}}\} + \mathbf{C}\{\dot{\mathbf{S}}\} + \mathbf{K}\{\mathbf{S}\} = \mathbf{F} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为梁单元总质量矩阵; $\mathbf{C}$ 为地基总阻尼矩阵; $\mathbf{K}$ 为梁单元总刚度矩阵; $\mathbf{F}$ 为桩基总受力矩阵; $\{\ddot{\mathbf{S}}\}$ 为结构加速度; $\{\dot{\mathbf{S}}\}$ 为结构速度; $\{\mathbf{S}\}$ 为结构位移。文献[9]给出了 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{F}$ 等的详细推导过程。

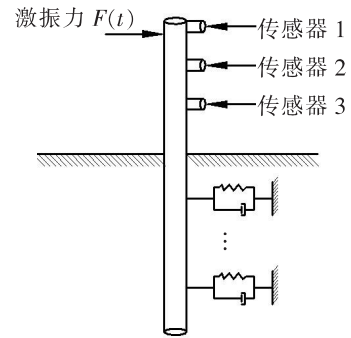


图 1 桩基理论模型

Fig. 1 Theoretical model of pile foundation

1.2 桩基激振理论模型求解及参数反演

在利用地基反力法对地基模型进行理论求解时,Winkler 地基梁模型把桩当作 Euler-Bernoulli 梁单元进行了分析^[10],Euler-Bernoulli 梁单元如图 2 所示。该地基梁模型采用有限单元分析法,将桩基模型划分为多个单元,根据相应的力平衡等条件求解各单元的受力和位移等信息。

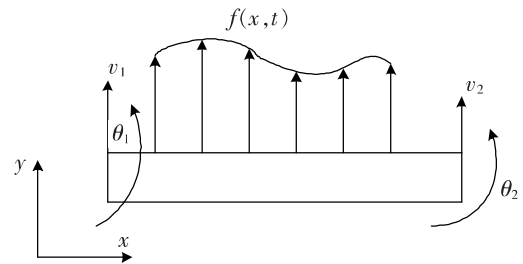


图 2 Euler-Bernoulli 梁单元

Fig. 2 Euler-Bernoulli beam element

根据最小势能原理对单元刚度矩阵进行求解,用节点位移函数表示梁单元的应变能,则弯曲梁的应变能为:

$$U = \frac{1}{2} \int_l EI \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (2)$$

式中: EI 为抗弯刚度。

$$v(x) = \mathbf{N}(x) \boldsymbol{\delta}_e \quad (3)$$

式中: $\mathbf{N}(x)$ 为平面梁单元的形函数; $\boldsymbol{\delta}_e$ 为节点位移向量。

$$\mathbf{B} = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4] = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2(N_1)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2(N_2)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2(N_3)}{\partial x^2} & \frac{\partial^2(N_4)}{\partial x^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{B}$ 为刚度形函数。

联立得梁单元应变能为:

$$U = \frac{1}{2} (EI) \int_l \boldsymbol{\delta}_e^T \mathbf{B}^T \mathbf{B} \boldsymbol{\delta}_e dx \quad (5)$$

用刚度的形式表示梁单元的应变能矩阵为:

$$U = \frac{1}{2} \boldsymbol{\delta}_e^T \mathbf{K} \boldsymbol{\delta}_e \quad (6)$$

则梁单元的刚度矩阵 $\mathbf{K}$ 为:

$$\mathbf{K} = (EI) \int_0^l \mathbf{B}^T \mathbf{B} dx \quad (7)$$

梁的质量矩阵 $\mathbf{M}$ 为:

$$\mathbf{M} = \int_0^l \mathbf{N}^T(x) \rho A \mathbf{N}(x) dx \quad (8)$$

式中: ρ 为材料密度; A 为梁单元的截面面积。

地基土的阻尼矩阵 $\mathbf{C}_e$ 为:

$$\mathbf{C}_e = c \int_0^l \mathbf{N}^T(x) \mathbf{N}(x) dx \quad (9)$$

式中: c 为地基土的阻尼系数。

桩基的非线性弹性性质可近似用非线性关系表示为^[11]:

$$q(z, y) = k z^m y^n \quad (10)$$

式中: k 为地基弹性系数; $q(z, y)$ 为桩基上作用在单位面积上的平均土反力; y 为横向位移。

地基土非线性弹力单元力向量为:

$$\mathbf{F}_{j,e} = \int_0^l b k [(j-h)l + x]^m y^n \mathbf{N}^T(x) dx \quad (11)$$

式中: h 为梁单元的编号; j 为梁单元的个数; l 为梁单元的长度; b 为桩基的宽度。

当在梁上作用集中载荷 $p_0(t)$ 时, 单元力向量为:

$$\mathbf{F}_{q,e} = \int_0^l p_0(t) \delta(x - x_0) \mathbf{N}(x) dx = p_0(t) \mathbf{N}(x_0) \quad (12)$$

式中: x_0 为单元集中载荷 $p_0(t)$ 的作用位置。

采用有限元方法对桩进行受迫振动分析。将上述公式通过矩阵组装后, 最终得到下式:

$$\mathbf{M}\{\ddot{\mathbf{S}}\} + \mathbf{C}\{\dot{\mathbf{S}}\} + \mathbf{K}\{\mathbf{S}\} = \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_q \quad (13)$$

式中: $\mathbf{F}_d$ 为地基弹性反力矩阵, 由 $\mathbf{F}_{j,e}$ 合成得到; $\mathbf{F}_q$ 为激振力矩阵, 由 $\mathbf{F}_{q,e}$ 合成得到。

式(13)中总阻尼矩阵 $\mathbf{C}$ 中的阻尼系数 c 以及地基弹性反力矩阵 $\mathbf{F}_d$ 中的 k, m, n 即为所需反演的 4 个参数。结合中心差分法对式(13)进行求解, 将动力分析的连续时间域 $0 \sim T$ 等分为 n 个时间段, 即 $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, t, t + \Delta t, \dots, T$, 则加速度和速度可近似表示为:

$$\dot{S}_i = \frac{S_{i+1} - S_{i-1}}{2\Delta t} \quad (14)$$

$$\ddot{S}_i = \frac{S_{i+1} - 2S_i + S_{i-1}}{\Delta t^2} \quad (15)$$

将式(14)~(15)代入方程 $\mathbf{M}\{\ddot{\mathbf{S}}\} + \mathbf{C}\{\dot{\mathbf{S}}\} + \mathbf{K}\{\mathbf{S}\} = \mathbf{F}$, 可得:

$$\left(\frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} + \frac{\mathbf{C}}{2\Delta t}\right) S_{i+1} = \mathbf{F}_i - \left(\mathbf{K} - \frac{2\mathbf{M}}{\Delta t^2}\right) S_i - \left(\frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} - \frac{\mathbf{C}}{2\Delta t}\right) S_{i-1} \quad (16)$$

令:

$$\mathbf{M}^* = \frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} + \frac{\mathbf{C}}{2\Delta t} \quad (17)$$

$$\mathbf{P}^* = \mathbf{F}_i - \left(\mathbf{K} - \frac{2\mathbf{M}}{\Delta t^2}\right) S_i - \left(\frac{\mathbf{M}}{\Delta t^2} - \frac{\mathbf{C}}{2\Delta t}\right) S_{i-1} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{M}^*$ 为有效质量, $\mathbf{P}^*$ 为有效载荷。

由此得到:

$$S_{i+1} = \frac{\mathbf{P}^*}{\mathbf{M}^*} \quad (19)$$

若要根据 i 时刻和 $i-1$ 时刻的运动, 递推出 $i+1$ 时刻的运动, 需已知 S_0, S_{-1} 。为了确定 S_{-1} , 设初始条件为:

$$\begin{cases} S_0 = S(0) \\ \dot{S}_0 = \dot{S}(0) \end{cases} \quad (20)$$

将式(20)代入式(15)~(16), 可得:

$$\begin{cases} \dot{S}_0 = \frac{S_1 - S_{-1}}{2\Delta t} \\ \ddot{S}_0 = \frac{S_1 - S_0 + S_{-1}}{\Delta t^2} \end{cases} \quad (21)$$

整理得出 S_{-1} 为:

$$S_{-1} = S_0 - \Delta t \dot{S}_0 + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{S}_0 \quad (22)$$

由式(1)可得 $\ddot{S}_0$ 为:

$$\ddot{S}_0 = \frac{1}{\mathbf{M}}(\mathbf{F}_0 - \mathbf{C}\dot{S}_0 - \mathbf{K}S_0) \quad (23)$$

由此可得到 S_{-1} , 将其和初始条件代入式(16), 可得到不同时刻的加速度响应, 即由待求参数 k, m, n, c 便可求出相应桩基测点的加速度响应。这样就解决了激振力作用下桩基模型参数的正演问题。具体求解步骤如下:

1) 初始计算: ① 计算刚度矩阵 $\mathbf{K}$, 质量矩阵 $\mathbf{M}$, 阻尼矩阵 $\mathbf{C}$; ② 给定初始条件 $a_0, \dot{a}_0, \ddot{a}_0$; ③ 计算时间步长 Δt ; ④ 计算有效质量矩阵 $\hat{\mathbf{M}} = c_0 \mathbf{M} + c_1 \mathbf{C}$ 。

2) 对每一个时间步长计算: ① 时刻 t 的有效载荷; ② $t + \Delta t$ 时刻的位移; ③ 时刻 t 的加速度和速度。

2 基于遗传算法的桩基模型参数识别设计

假设现场测量的桩基测点的加速度响应值为 a'_i , 由上述桩基激振理论模型求解得到的测点加速度响应值为 a_i 。将桩基模型参数反演问题转换为数值模型优化求解问题, 并对加速度响应试验结果 a'_i 和理论结果 a_i 的吻合度进行评价, 吻合度越高, 说明桩基模型参数越符合实际。

遗传算法是一种最优解的搜索算法, 通过模拟生物进化过程中的选择、交叉、变异操作来搜索全局最优解^[12]。其中, 选择的含义为: 根据种群个体适应度, 采用轮盘赌的方式, 在 t 代群体 $X(t)$ 中选择优势个体, 并将其加入下一代群体 $X(t+1)$ 中; 交叉的含义为: 将群体 $X(t)$ 中的个体进行配对, 再以交叉概率交换每对个体之间的部分编码串; 变异的含义为: 以变异概率改变群体 $X(t)$ 中个体编码串上的基因值。

遗传算法具有高度非线性隐射、自适应等特点, 且对局部最优和全局最优问题的求解具有独特优势。本研究将桩基激振模型理论加速度求解程序嵌入遗传算法中, 并对上述优化问题进行求解, 具体步骤如下:

① 参数编码。遗传算法需先对待优化的参数

进行二进制编码。本研究需反演识别的参数有 k, m, n, c , 用 $l_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 位二进制对每个参数进行编码, 将 4 个参数编码为一个向量, 每个向量代表一个种群个体。个体的编码方式为:

$$\underbrace{b_1 b_2 \cdots b_{l_1}}_k \underbrace{b_1 b_2 \cdots b_{l_2}}_m \underbrace{b_1 b_2 \cdots b_{l_3}}_n \underbrace{b_1 b_2 \cdots b_{l_4}}_c$$

② 目标函数到适应度函数之间的模型变换。针对桩基测点, 用桩基测点加速度响应试验结果和理论结果的吻合度评价个体的适应度, 吻合度越高, 说明个体的适应度越强, 个体参数越接近真实的桩基参数。其中, 吻合度用桩基测点加速度响应试验结果 a'_i 和理论结果 a_i 的 DTW 距离来衡量。本研究采用桩基激振理论模型加速度响应值与试验值的 DTW 距离的均方根作为目标函数, 桩基模型参数作为设计变量。目标函数值越小, 说明桩基模型参数越符合实际。设有限元法计算序列为 $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$, 实测值序列为 $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$, 由此可构建矩阵 $\mathbf{D}$:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d(p_1, q_1) & \cdots & d(p_1, q_n) \\ \vdots & & \vdots \\ d(p_m, q_1) & \cdots & d(p_m, q_n) \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中: $d(p_i, q_j) = (p_i - q_j)^2$, p_i 为序列 P 中第 i 个特征值, q_j 为序列 Q 中第 j 个特征值。

定义 d_{tw} 为:

$$d_{tw}(i, j) = d(p_i, q_j) + \min(d_{tw}(i, j-1), d_{tw}(i-1, j), d_{tw}(i-1, j-1)) \quad (25)$$

因本研究的优化问题是求目标函数的最小值, d_{tw} 值越小, 试验结果 a'_i 和理论结果 a_i 的拟合度越高, 个体适应度越大。因此, 需对目标函数进行转换, 可采用如下适应度函数进行转换:

$$F = \frac{\max f - f}{\max f - \min f} \quad (26)$$

式中: f 为目标函数值; F 为适应度函数值。

在用遗传算法计算的后期, 当种群中个体的适应度差值较小, 并接近最佳适应度值时, $\max f - \min f$ 的值逐渐减小, 差别不大的个体适应度值的差异逐渐增大, 最优解的优势逐渐增大。

③ 确定遗传算子及算法运行参数, 包括种群规模 M 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 等。

④ 编码生成初始种群个体, 得到 M 组初始参数矢量。

⑤ 调用桩基激振理论模型计算程序, 求解桩基模型参数反演正问题, 得到桩基模型理论加速

度解;根据随机生成的 M 组初始参数矢量,求解桩基模型参数反演正问题,并重复 M 次,得到 M 组桩基模型加速度理论解;然后计算目标函数,并重复 M 次,得到对应的适应度函数。

⑥ 对参数识别结果进行评判,判断理论矢量与试验矢量是否吻合良好,是否满足收敛准则,即 M 个目标函数中最优的目标函数值是否小于规定值,若小于规定值,则最佳适应度对应的矢量解即为反问题的解。

⑦ 执行选择、交叉和编译操作,生成下一代种群个体,然后转至第⑤步^[13]。

桩基动力学模型参数反演识别流程见图 3。

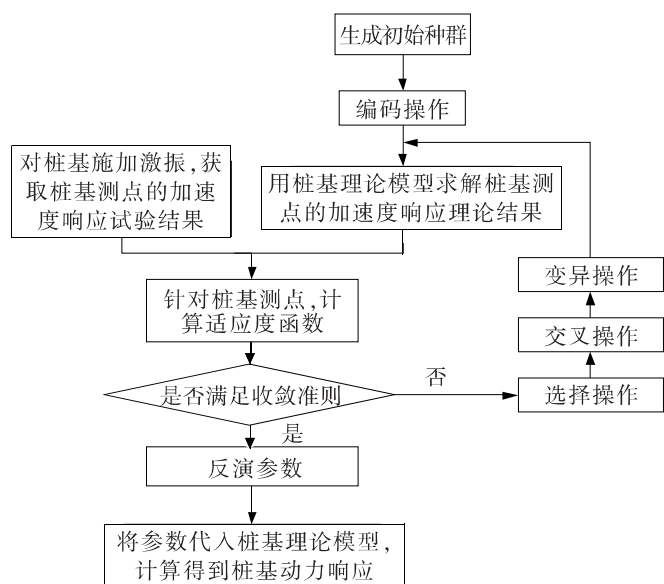


图 3 桩基动力学模型参数反演识别流程

Fig. 3 Process of parameter inversion identification of pile foundation dynamic model

3 系统结构和软件设计

3.1 系统结构

本研究的系统的总体组成如图 4 所示。采用力锤对目标桩基进行激振后,由传感器采集激振力信号及桩基模型的加速度响应信号,该信号经调理模块处理后由数据采集卡进行采集。为解决参数求解过程中复杂的数据运算问题,在软件处理阶段调用 MATLAB 参数反演算法程序对数据进行处理和分析,并得出最优参数。

为采集桩基激振后的动态响应,将加速度传感器与立柱相连,立柱的振动能量即可转换为响应电信号。本系统选用 LC0122 压电式加速度传

感器,该传感器内置微型 IC—集成电路放大器,能提高测试精度^[14]。激振锤选用朗斯公司 LC1302B 激振锤,该激振锤在 LC1302 激振锤的基础上集成了电荷放大器。采用国产 XY9004 数据采集卡对激振信号和加速度响应信号进行采集,采集到的信号供计算机软件在数据处理、分析时进行调用。

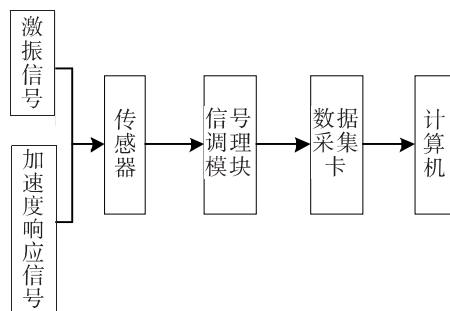


图 4 系统组成

Fig. 4 System composition

3.2 软件设计

图 5 所示为系统主要组成模块。从图 5 可以看出:系统主要包含 5 个模块,即数据采集、数据处理、动力学响应分析、参数识别、数据存储及可视化。其中,数据采集模块用来采集锤击试验过程中桩的动力响应信号和激振信号;数据处理模块可进行滤波及有效数据的提取等,处理后的数据可供动力学响应分析、参数识别等有需要的模块调用;动力学响应分析模块用来求解力锤激振下桩基横向动力学模型的受迫振动方程,获取并保存桩基动力学响应理论值,供参数识别等有需要的模块调用;参数识别模块用来调用 MATLAB 算法,并对数据进行处理,对模型参数进行求解;数据存储及可视化模块可将相应的数据进行存储,供后续的分析 and 可视化使用。

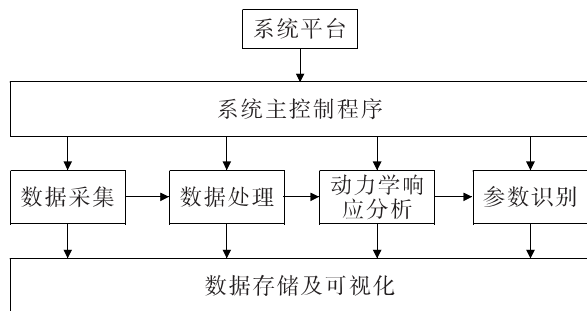


图 5 系统主要组成模块

Fig. 5 Main components of the system

3.2.1 数据处理

因桩基模型参数识别的求解算法涉及大量复杂的数据运算,虽然 LabVIEW 在软件界面开发和数据采集等方面功能强大,但 LabVIEW 对数量大且复杂的数据运算有些不足。MATLAB 拥有强大的数据运算能力,采用 LabVIEW 和 MATLAB 混合编程的方式可实现参数识别系统的开发。参数的识别算法由 MATLAB 实现,在 LabVIEW 中调用 MATLAB 算法程序,即可实现参数的识别。

3.2.2 混合编程

1) 创建 COM 组件。

① 在 MATLAB 中选择应用程序→Application compiler→新建→Library compiler project,设置生成的 COM 组件名称。

② 选择 Generic COM component,添加参数识别算法文件(后缀为 .m),导入函数必须为具有单个入口点的 MATLAB 函数,算法输出即为所需反演的参数 k, m, n, c 。

③ 选择打包路径,将 COM 组件打包并发布,完成后在目标路径下生成目标文件(后缀为 .dll),并自动注册到系统中^[15]。为使目标组件能在未安装 MATLAB 软件的电脑上运行,需同时发布 MCR(MATLAB component runtime),在打包前注意选择 Runtime included in package 选项。

在参数识别算法程序生成 COM 组件之后,LabVIEW 通过 ActiveX 控件对其进行调用,从而使 LabVIEW 程序变得简单,且程序功能更加强大,大大地提升了开发效率。

2) 使用 LabVIEW 调用 COM 组件进行参数识别。

① 选择函数选板→互联接口→ActiveX→打开自动化控件,打开 ActiveX 对象并获得对象的引用句柄,通过引用 COM 对象调用 COM 组件,在自动化引用句柄接口选择已生成的注册类型库中的目标文件。

② 选择互联接口→ActiveX→调节节点,将返回的目标——ActiveX 对象的自动化引用句柄与调节节点的引用端相连,然后选择 MATLAB 程序中的目标函数名。

③ 因调节节点输出的变量的数据类型为变体数据,为使 LabVIEW 能够对输入的数据进行显示和处理,需要使用 ActiveX→变体至数据转换控件进行数据转换^[16]。LabVIEW 的程序框图如图 6 所示。

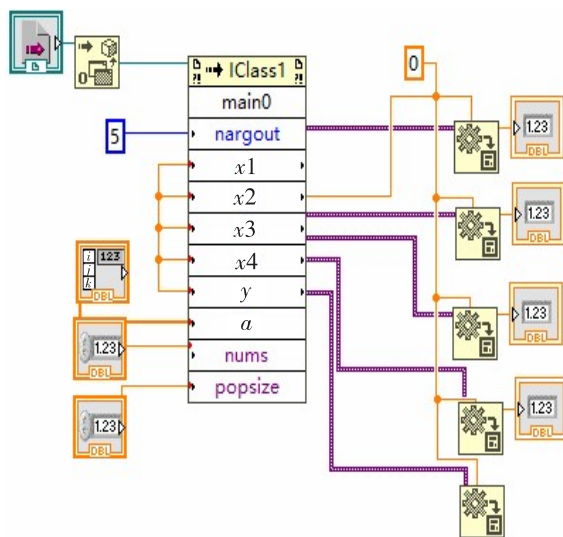


图 6 LabVIEW 程序框图

Fig. 6 LabVIEW program framework diagram

4 参数识别

因条件所限,用仿真数据代替测量数据作为系统软件的输入数据来验证系统的有效性。系统软件读取桩基测点的加速度响应结果,然后 LabVIEW 中的参数求解模块通过 COM 组件调用 MATLAB 参数反演算法得到桩基模型参数值,即 $c=8.076 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$, $k=7.997 \times 10^5 \text{ N}/\text{m}^3$, $m=0.5755$, $n=0.5624$,将反演得到的模型参数值,代入桩基激励理论模型,求解得到对应的反演加速度响应和位移响应结果,如图 7~8 所示。

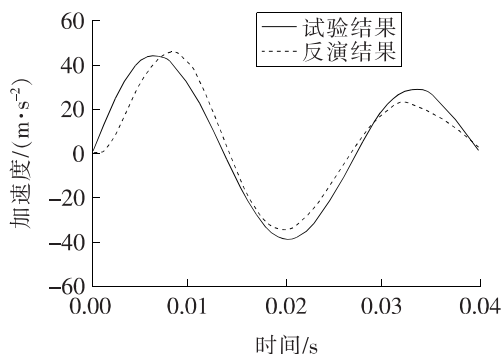


图 7 桩基测点加速度响应结果

Fig. 7 Acceleration response results of pile foundation measuring points

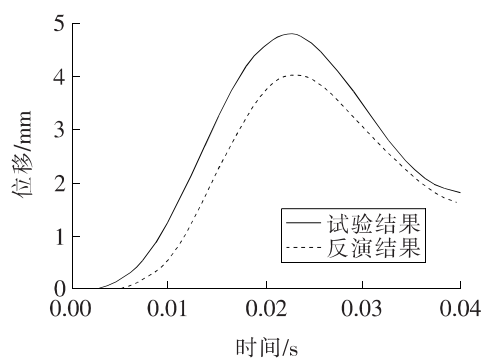


图8 桩基测点位移响应结果

Fig. 8 Displacement response results of pile foundation measuring points

从图7~8可以看出:加速度和位移的反演数据和测量数据具有良好的拟合度。通过计算反演数据和测量数据的皮尔逊相关系数可知:加速度和位移的皮尔逊相关系数分别为0.966 4, 0.983 3, 这表明反演曲线和测量曲线具有极强的相关性, 且峰值误差较小, 在合理范围内, 这就验证了本研究的系统的可行性。

5 结论

本研究将建立的桩基激振理论模型计算程序嵌入遗传算法中, 提出了桩基模型参数反演识别方法, 研制了桩基模型参数识别系统, 并得出如下结论:

1) 结合有限元法对桩基模型进行了研究, 建立了桩基激振理论模型, 得到了桩基测点加速度的理论响应结果。

2) 将桩基理论模型计算程序嵌入遗传算法中, 对桩基模型参数进行反演得到桩基模型参数, 反演结果和仿真结果具有较好的拟合度。

3) 基于COM组件能有效实现MATLAB和LabVIEW混合编程, 弥补了虚拟仪器开发过程中LabVIEW复杂数据运算能力不足的缺陷, 有效地提升了程序的执行效率和仪器的开发效率。

本研究研制了桩基模型参数反演识别系统, 使桩基模型参数的获取变得简单快捷, 满足了试验过程中桩基无损检测的需求, 对确定桩基模型参数的工程化应用具有一定的借鉴意义。但因条件所限, 本研究用仿真数据代替测量数据作为系统的输入数据, 在一定程度上影响了研究成果的准确性。下一步将创造条件开展试验研究, 以期

得到更好的研究成果。

〔参考文献〕

- [1] 柳伟续, 李晓霞, 唐志峰, 等. 基于 ISMP 的高速公路护栏立柱导波检测[J]. 计算机工程, 2015, 41(2): 282-286.
LIU Wei-xu, LI Xiao-xia, TANG Zhi-feng, et al. Guided wave detection on expressway guardrail post based on ISMP[J]. Computer Engineering, 2015, 41(2): 282-286.
- [2] 何存富, 王学浦, 王秀彦, 等. 基于导波技术的高速公路护栏立柱埋深检测[J]. 中国公路学报, 2008, 21(6): 37-42.
HE Cun-fu, WANG Xue-pu, WANG Xiu-yan, et al. Inspection of expressway guardrail post length partly embedded in soil based on ultrasonic guided wave technology[J]. China Journal of Highway & Transport, 2008, 21(6): 37-42.
- [3] 张军辉, 范海山, 张石平, 等. 考虑层间接触状态的路面动力响应解析解及参数反演[J]. 中国公路学报, 2021, 34(5): 11-23.
ZHANG Jun-hui, FAN Hai-shan, ZHANG Shi-ping, et al. Analytical solution for dynamic response and parameter inversion of pavement structure considering the condition of interlayer contact[J]. China Journal of Highway & Transport, 2021, 34(5): 11-23.
- [4] 李跃军, 李亮, 吴亚中. 基于自适应信息遗传算法的路面模量反算研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(7): 51-59.
LI Yue-jun, LI Liang, WU Ya-zhong. Adaptive informational genetic algorithm based back-calculation of pavement modulus [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(7): 51-59.
- [5] 查旭东, 袁盛杰, 肖秋明. 冲击荷载作用下的路基动力反算[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2014, 11(4): 1-7.
ZHA Xu-dong, YUAN Sheng-Jie, XIAO Qiu-ming. Subgrade dynamic backcalculation under impact loading[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2014, 11(4): 1-7.
- [6] 郭健, 王元汉, 苗雨. 基于 MPSO 的 RBF 耦合算法的桩基动测参数辨识[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1 205-1 209.
GUO Jian, WANG Yuan-han, MIAO Yu. RBF neural

- network coupling algorithm based on MPSO for parameter identification of piles in dynamic testing[J]. *Rock & Soil Mechanics*, 2008, 29(5): 1 205-1 209.
- [7] 李冀明,刘超. 基于虚拟仪器的微力监测系统的设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2019(5): 81-84.
- LI Ji-ming, LIU Chao. Design of micro-force monitoring system based on virtual instrument[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019(5): 81-84.
- [8] 罗仁和,曹晓燕,余志强,等. 基于 LabVIEW 的车体静强度试验台测控系统[J]. *工程设计学报*, 2019, 26(2): 206-214.
- LUO Ren-he, CAO Xiao-yan, YU Zhi-qiang, et al. Measurement and control system for car body static strength test bench based on LabVIEW[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2019, 26(2): 206-214.
- [9] 徐斌,高跃飞,余龙. MATLAB 有限元结构动力学分析与工程应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2009.
- XU Bin, GAO Yue-fei, YU Long. Structural dynamics analysis and engineering application of MATLAB finite element [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [10] BASU D, SALGADO R. Analysis of laterally loaded piles with rectangular cross sections embedded in layered soil[J]. *International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics*, 2010, 32(7): 721-744.
- [11] 崔新壮. 横向载荷作用下桩土相互作用机理及护栏立柱承载力研究[D]. 北京:中国科学院力学研究所, 2004.
- CUI Xin-zhuang. Study on pile-soil interaction mechanism and bearing capacity of guardrail posts under lateral loads[D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [12] 曹现刚,史春蕾. 基于遗传算法的电涡流传感器线性度优化[J]. *仪表技术与传感器*, 2015(10): 7-9.
- CAO Xian-gang, SHI Chun-lei. Linearity optimization of eddy current sensor using genetic algorithm[J]. *Instrument Technique & Sensor*, 2015(10): 7-9.
- [13] 易达,陈胜宏,葛修润. 岩体初始应力场的遗传算法与有限元联合反演法[J]. *岩土力学*, 2004, 25(7): 1 077-1 080.
- YI Da, CHEN Sheng-hong, GE Xiu-run. A methodology combining genetic algorithm and finite element method for back analysis of initial stress field of rock masses[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(7): 1 077-1 080.
- [14] 毛征宇,张陆续,黄之初,等. 基于虚拟仪器技术的辊履支承测试系统研究[J]. *仪器仪表学报*, 2007, 28(7): 1 265-1 268.
- MAO Zheng-yu, ZHANG Lu-xu, HUANG Zhi-chu, et al. Study of rolling-shoe bearing test system based on virtual instrument[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, 28(7): 1 265-1 268.
- [15] RUI W, JIE Z Z, YANG Z C, et al. Mixed programming with LabVIEW & MATLAB and its application in explosion field test[J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2016, 7(1): 13-17.
- [16] 裴锋,汪翠英. 利用 COM 技术的 LabVIEW 与 MATLAB 的无缝集成[J]. *仪器仪表用户*, 2005, 12(2): 97-98.
- PEI Feng, WANG Cui-ying. Seamless integration between LabVIEW and MATLAB based on COM technology[J]. *Electronics Instrumentation Customer*, 2005, 12(2): 97-98.