

文章编号: 1000-4750(2010)04-0141-08

运营桥梁结构间接系统辨识的模式搜索方法

*李炜明^{1,2}, 朱宏平^{1,2}, 丁烈云^{1,2}, 夏 勇^{1,2}

(1. 华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北, 武汉 430074; 2. 华中科技大学控制结构湖北省重点实验室, 湖北, 武汉 430074)

摘 要: 通过引入模式搜索的下降准则及其算法, 部分解决了环境激励下运营桥梁结构间接辨识中可能存在的局部极值与算法收敛的问题, 以及工程数据中可能存在的不可导、不连续的问题。引入了带收敛证明的广义模式搜索方法, 介绍了模式移动、网格尺寸、表决等概念, 通过构造算例来阐述了其搜索机理。对于运营结构的间接辨识, 提出了其响应数据可能不可导、甚至不连续, 或在一般算法中可能存在局部极值、算法不收敛的问题; 基于无导数下降准则的模式搜索, 能准确地通过车辆响应来对结构参数、车辆参数进行辨识; 通过比较不同噪声水平下算法的迭代过程中的目标函数值、搜索次数、网格尺寸与表决结果, 说明了其具备抗强噪声水平干扰的能力; 并指出了通过加入罚函数即可向含约束的类似问题推广。

关键词: 广义模式搜索; 无导数迭代; 模式移动; 运营桥梁结构; 间接辨识

中图分类号: TU311.3; O313 **文献标识码:** A

PATTERN SEARCH METHOD FOR INDIRECT IDENTIFICATION OF OPERATIONAL STRUCTURES

*LI Wei-ming^{1,2}, ZHU Hong-ping^{1,2}, DING Lie-yun^{1,2}, XIA Yong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Hubei Key Laboratory of Control Structure, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Pattern search method is proposed to identify the operational bridge parameters indirectly according to the vehicle responses, which could be applied to the problem of multi-local-extremism and discontinuous data. A preliminary discussion was performed on the Generalized Pattern Search method through a simple numerical example, and the basic concepts of the pattern move, mesh size, poll were represented. The search process with different noise levels was discussed on the function value, iterations, mesh size and poll results. It is concluded that the method could be use to identify the bridge parameters according to the vehicle responses, even in high noise level. The problems of the local extremums and the convergence could be avoided partially.

Key words: generalized pattern search; derivative free iteration; pattern move; operational bridge structure; indirect identification

2004 年 Yang 提出: 基于车辆的加速度响应, 经过傅里叶变换, 计算出桥的第一阶频率^[1], 并展开了一系列的后续研究^[2-3]。

2008 年, 文献[4]提出了基于车辆响应数据, 对

桥梁结构进行间接辨识的通用计算方法: 基于 Guass-Newton(或 Levenberg-Marquardt)方法可以将通常车辆运营桥梁结构视为一系统, 由车辆的位移、速度或加速度响应, 对桥的刚度、初始频率等

收稿日期: 2008-10-15; 修改日期: 2009-11-23

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50925828); 国家自然科学基金项目(50608036); 中国博士后基金项目(20090460953); 华中科技大学研究生科技创新基金项目(HF-05-15, HF-06-028)

作者简介: *李炜明(1976—), 男, 湖南人, 博士后, 从事结构振动分析及健康监测研究(E-mail: lwm.hust@gmail.com);

朱宏平(1965—), 男, 湖北人, 教授, 博士, 博导, 从事结构振动控制与健康监测研究(E-mail: hpzhu@mail.hust.edu.cn);

丁烈云(1955—), 男, 湖北人, 教授, 博士, 博导, 从事地铁安全监控研究(E-mail: dingly_wuhan@yahoo.com.cn);

夏 勇(1971—), 男, 湖北人, 教授, 博士, 从事结构振动分析及健康监测研究(E-mail: ceyxia@polyu.edu.hk).

参数进行辨识。

相对于基于桥梁结构响应对车、桥信息进行辨识的传统思路,基于车辆响应的结构参数的间接辨识是一个新问题;Yang的工作具有启发性,不过限于对初始频率的计算;文献[4]重点在于初步实现对运营结构的系统辨识,并提出具备通用性的理论框架和计算方法;在其进一步后续研究中,发现基于传统的计算方法,迭代过程中收敛性对数据有较高的依赖性,同时存在局部极值干扰的问题。而对于运营中的土木结构,必然会受到测试误差、随机激励(风、地震等)及运营状态的影响,其响应数据可能不可导甚至不连续的缺陷,或者在一般算法中可能存在难以收敛、多局部极值的问题。

因此,对于运营结构间接辨识这一新问题,有必要尝试新的方法。

广义模式搜索方法对数据不要求导数存在,甚至不要求连续,也不用计算或近似罚因子或拉格朗日算子,不强加任何充分下降的概念,仍可以得到算法的收敛性,并于2003年推广非线性约束情形的优化问题(参见1.1节),被广为关注。

本文引入了带收敛证明的广义模式搜索(Generalized Pattern Search, GPS)方法,通过算例介绍了其基本概念、搜索机理;部分地解决了环境激励下运营结构间接系统辨识的过程中,响应数据可能不可导或者不连续的问题,以及一般算法中可能存在的不收敛、局部极值问题;并通过不同噪声水平下辨识过程的比较,证明了本文方法较强的抗噪声干扰的能力。

1 GPS 算法

1.1 基本原理

直接搜索法在1961年由Hooke和Jeeves提出,最初是为了描述优化最优解中的最优试验解^[5];随后被定义为任何一种不需计算导数或者近似导数而求解关于定义在实数域内的实值函数的无约束最优化问题;不过,其因缺乏收敛性的相关证明,应用一直受到很大的限制。

模式搜索是属于直接搜索法的一种,通常有4类经典的算法;其中,Torczon的方法尤为值得关注。

Torczon在1997年提出了基于直接搜索法特殊子集簇的模式搜索法,其子集簇具有共同的结构,并因此具备了统一的具有收敛性分析的框架;这

样,Torczon通过引入模式矩阵的概念,提出了广义模式搜索(Generalized Pattern Search, GPS)算法(本文以下简称为GPS),并证明了其关于无约束最优化问题的收敛性^[6]。

Torczon新的定义不强加任何充分下降的概念,不需像线搜索中的Amijo-Goldstein-Wolfe条件或信赖域中的柯西下降条件和最优下降条件。其实施的可能性在于由模式搜索算法产生的迭代位于一个具有一定大小的移动网格中,从而可以放松对步长接受标准的要求;同时,通过在步长形式上加强更强的条件来使其收敛;这样,GPS不需计算导数或近似导数信息,但可以得到类似于线搜索和信赖域全局策略的收敛效果。

1999年Lewis和Torczon结合正基的概念将GPS推广至盒式约束的情形^[7],并在2000年—2003年推广至有限个约束的情形,证明了其可以收敛到问题的稳定点^[8-10];同时,2003年Audet和Dennis考虑了目标函数局部谱希兹连续条件下允许用Clarke广义导数接受标准,并就此分析了GPS算法关于非线性约束情形的优化问题^[11]。

1.2 算法基础

Torczon引进了两个矩阵,基矩阵 \mathbf{B} 和生成矩阵 \mathbf{C}_k ,其中且是 $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 非奇异的, $\mathbf{C}_k \in \mathbb{Z}^{n \times p}$, $p > 2n$ 且 \mathbf{C}_k 有如下分块:

$$\mathbf{C}_k = [\mathbf{M}_k, -\mathbf{M}_k, \mathbf{L}_k] = [\mathbf{\Gamma}_k, \mathbf{\Gamma}_k] \quad (1)$$

其中: $\mathbf{M}_k \in \mathbb{M} \subset \mathbb{Z}^{n \times n}$, \mathbb{M} 是非奇异整数矩阵集合的一个有限子集, $\mathbf{L}_k \in \mathbb{Z}^{n \times (p-2n)}$ 且至少包含一个全为0的列,定义模式 $\mathbf{P}_k = \mathbf{B}\mathbf{C}_k$,按照 \mathbf{C}_k 的分块, \mathbf{P}_k 且有如下分块:

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{B}\mathbf{C}_k = [\mathbf{B}\mathbf{M}_k - \mathbf{B}\mathbf{M}_k, \mathbf{B}\mathbf{L}_k] = [\mathbf{B}\mathbf{\Gamma}_k, \mathbf{B}\mathbf{L}_k] \quad (2)$$

其中, $\mathbf{\Gamma}_k$ 称为中心模式。

模式确定后,先试探性移动,对于步长 $\Delta_k > 0$,定义试探步:

$$\mathbf{s}_k^i = \Delta_k \mathbf{B}\mathbf{c}_k^i$$

其中: \mathbf{c}_k^i 为 \mathbf{C}_k 的第 i 列,一般简记为 $\mathbf{c}_k^i \in \mathbf{C}_k$;这里 $x \in Y$ 表明 x 属于 Y 的所有列组成的集合。

在第 k 步迭代时,需满足条件:

$$1) \mathbf{s}_k \in \Delta_k \mathbf{P}_k = \Delta_k [\mathbf{B}\mathbf{\Gamma}_k, \mathbf{B}\mathbf{L}_k].$$

$$2) \text{若 } \min \{f(x_k + y), y \in \Delta_k \mathbf{B}\mathbf{\Gamma}_k\} < f(x_k), \text{ 则 } f(x_k + \mathbf{s}_k) < f(x_k), \text{ 记 } \mathbf{s}_k = \mathbf{s}_k^i, \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{s}_k.$$

因此:

1) 在迭代 k 处任何一个被接受的步长的方向由模式矩阵决定,长度由 Δ_k 决定。

2) s_k 是模式 ρ_k 的某一系列乘以步长 Δ_k 得到的, 条件表明, 只要前 $2n$ 个方向中的某一个方向能使目标函数值得到下降, 那么, s_k 也应该能使函数值得到下降。

也就是说, GPS 中合理的探测移动策略将是一个带有猜测性的策略, 需要预测由每一步长中能够使目标函数值简单下降的点, 然后再在这个步长上估计目标函数值。

因此, GPS 即使在要求简单下降的条件下, 也能够避免要求在迭代点处满足柯西下降条件、最优下降因子或 Armijo-Goldstein-Wolfe 条件; 而对于证明 $\lim_{k \rightarrow \infty} \|\nabla f(x_k)\| = 0$, 需再加强条件以及生成矩阵中的列向量是范数有界的。

1.3 算法步骤

Torczon 提出的算法步骤如下:

步 0: 给定初始点 $x_0 \in R^n$, 初始步长 $\Delta_0 > 0$, 给定终止误差 $\varepsilon > 0$, 迭代步数 $k=0$ 。

步 1: 确定 s_k , 满足条件 1)、条件 2), 有 $\rho_k = f(x_k) - f(x_k + s_k)$ 。

步 2: 如果 $\rho_k > 0$, 那么 $x_{k+1} = x_k + s_k$; 否则 $x_{k+1} = x_k$ 。

步 3: 如果 $\Delta_k < \varepsilon$ 与 $\|s_k\| < \varepsilon$ 都满足, 则算法终止。

步 4: 更新 C_k , Δ_k , $k=k+1$, 转步 1。

其中, C_k 的更新应满足式(1); Δ_k 的更新规则为:

$$\begin{aligned} r \in Q, \theta = \tau^{w_0}, \lambda \in \Lambda = \{\tau^{w_1}, \dots, \tau^{w_L}\}, \tau > 1 \\ \{w_0, w_1, \dots, w_L\} \subset Z, |\Lambda| < +\infty, \\ w_0 < 0, w_1, \dots, w_L \geq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

如果 $\rho_k \leq 0$, 那么 $\Delta_{k+1} = \theta \Delta_k$; 否则 $\Delta_{k+1} = \lambda \Delta_k$ 。

由 θ, λ 的形式可知 $0 < \theta < 1, \lambda \geq 1$; 而 θ 是个分数, 因此必然为有理数。

也就是说, 迭代过程中, 如果当前网格中所有点的目标函数值都大于初始点的目标函数值 ($\rho_k \leq 0$), 则表决不成功, 在下次迭代中, 保持当前点不变; 并在下次迭代中, 将网格尺寸乘以缩减系数 θ (默认为 0.5), 即 $\Delta_{k+1} = \theta \Delta_k$ 。

如果将当前网格中某一点的目标函数值小于初始点的目标函数值 ($\rho_k \geq 0$), 则称为表决成功, 并将对应点取为下次迭代的目标函数值; 并在下次迭代中, 将网格尺寸乘以扩大系数 λ (默认为 2), 即 $\Delta_{k+1} = \lambda \Delta_k$ 。

如果所求优化问题包含约束条件, 通常可以采

用目标函数 $f(x)$ 和约束函数 $c(x)$ 所构成的罚函数方法来求解。

1.4 基本概念

1) 模式移动

模式搜索向量样本的集合, 用来确定迭代过程中搜索的点。GPS 算法在几何意义上是寻找具有较小函数值的“山谷”, 并力图使迭代产生的序列沿“山谷”走向逼近极值点; 从初始基点开始, 可以分为轴向移动和模式移动, 每次迭代中交替进行; 轴向移动沿 n 个坐标轴, 用来确定新的基点和最有利于函数值下降的方向, 用来揭示目标函数变化规律, 而模式移动沿相邻两个基点的连线方向, 试图顺着“山谷”提高函数优化的速率, 用来加速搜索。

2) 网格

模式搜索法的基本思想是利用一个与 $f(x)$ 无关的一个点的“模式”, 通过比较当前迭代点的函数值与模式的各个函数值的大小来决定下一次的迭代点; 在每一个迭代点处, 都在当前网上选择有限个点函数值进行估计, 试图找到一个能使目标函数值比当前解(此算法到目前为止发现的具有最小目标函数值的点)处的目标函数值小的网点; 如果发现改进的网点, 使用者会试图通过加大网格的大小来加速算法的进程。

3) 表决

如果在搜索步没有找到能够改进的网点, 就进行表决步搜索, 这个过程将围绕当前解 x_k 在其附近对函数值进行估计。如果表决步也没有发现改进的网点, 则称 x_k 为网格的局部最优解, 然后令 $x_{k+1} = x_k$, 更新网格大小的参数 Δ_k , 使网格加密。如果在上述两步中的任一过程中发现了改进的网格 $x_{k+1} \neq x_k$, 使得 $f(x_{k+1}) < f(x_k)$, 则网格大小的参数将增加或者不变。

对于表决的参数, 若 N 为目标函数独立变量的个数表决方式中若为正向基 NP1, 由 $N+1$ 个向量组成:

$$\begin{aligned} [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0], \\ [0 \ 1 \ 0 \ \dots \ 0], \\ [0 \ 0 \ 1 \ \dots \ 0], \\ [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 1], \\ [-1 \ -1 \ -1 \ \dots \ -1]. \end{aligned} \quad (4)$$

表决方式中缺省为正向基 $2N$, 由 $2N$ 个向量组成:

$$\begin{aligned}
& [1\ 0\ 0 \cdots 0], \\
& [0\ 1\ 0 \cdots 0], \\
& [0\ 0\ 1 \cdots 0], \\
& [0\ 0\ 0 \cdots 1], \\
& [-1\ 0\ 0 \cdots 0], \\
& [0\ -1\ 0 \cdots 0], \\
& [0\ 0\ -1 \cdots 0], \\
& [0\ 0\ 0 \cdots -1].
\end{aligned} \quad (5)$$

因此,正向基 NP1 运算速度快,因为每次迭代中搜索的点较少;如果目标函数存在多局部最小值,采用每次迭代中搜索点更多的正向基 $2N$ 的方法

2 运营结构系统辨识

桥梁结构及其上运营的车辆(车流)可以视为一相互作用的时变系统,其同时受到外激励(如风、地震等)的作用。与此相关的研究从 19 世纪开始,并在 20 世纪 70 年代已出现了相对成熟的著作^[12]。

如果从系统辨识的角度来看,运营结构的辨识可以分为对桥梁健康状态(如刚度),以及对运营车辆(流)监控信息的辨识(如车速)二类;从系统输入来看,可以分为传统的基于桥梁结构响应的输入信息的方法,以及新近对于基于车辆响应输入信息的方法上的尝试。参照本文已有基础^[4]中的阐述,在本文中,运营结构的系统辨识的典型问题,可以暂定义为从车辆的响应中辨识出结构的参数。

2.1 运营结构的简化模型

运营结构的间接辨识可以采用如图 1 所示的简化模型,其阐述重点在通过车上传感器的响应数据来获取系统的输入。

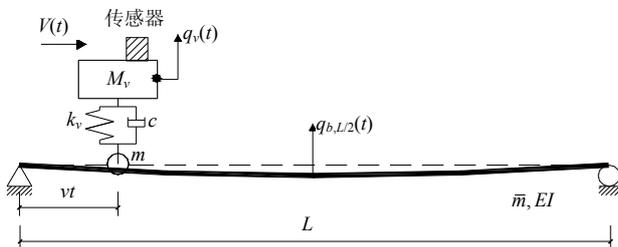


图 1 基于车辆响应的运营结构简化模型

Fig.1 Simplified model of operational bridge based on vehicle response

间接方法赋予了响应接受装置的机动性,并可以对不同结构的多次便捷使用;而且车载测试系统不需现场调试、标定。因此,具备机动、通用的优点,可以节省大量的人力、物力、时间资源,有重

大的理论、工程意义。

在运营结构系统间接辨识的初步阶段,前文^[4]重点在于理论的构建、算法的实现,本文重点对辨识过程中输入数据、算法可能存在的病态特征进行讨论。因此,本文计算模型、数据基于已有工作^[4,13],其中:简支梁 $L=25\text{m}$;弹性模量 $E=2.75 \times 10^{10}\text{N/m}^2$;截面惯性距 $I=0.12\text{m}^4$;截面横截面面积 $A=2.0\text{m}^2$;简支梁每米长质量 $m=4800\text{kg/m}$;小车质量为 $m_v=1200\text{kg}$;其弹簧刚度为: $k_v=5 \times 10^5\text{N/m}$;小车车速为 $v=10\text{m/s}$ 。

当车简化为移动力时,计算其一阶振型,并假设其外在阻尼为 0,桥的位移解为下式:

$$q_v = \frac{-2F}{m_b L (\Omega^2 - \omega_b^2)} \left(\sin \Omega t - \frac{\Omega}{\omega_b} \sin \omega_b t \right) \quad (6)$$

其中:

$$F = m_v g \quad (7)$$

$$\omega_b = \frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{m}} \quad (8)$$

$$\Omega = \frac{\pi v}{L} \quad (9)$$

将式(6)一式(9)代入对简化模型中的车辆振动方程如下:

$$\ddot{q}_v + \left[-\omega_v^2 \sin \frac{\pi v t}{L} \right] q_b + \omega_v^2 q_v = 0 \quad (10)$$

即可求得含桥梁响应的车辆位移响应,对其分别求一次导、二次导可以得到车辆竖向振动的速度、加速度响应。

若设:

$$\Delta = -2 \frac{m_v g L^3}{\pi^4 EI}, \quad \omega_v = \sqrt{\frac{k_v}{m_v}}, \quad S = \frac{\pi v}{L \omega_b}, \quad \mu = \frac{\omega_b}{\omega_v} \quad (11)$$

则车加速度响应可以表示为:

$$\begin{aligned}
\ddot{q}_v = & \frac{\Delta \omega_v^2}{2(1-S^2)} A_1 \cos \omega_v t + A_2 \cos \frac{2\pi v t}{L} + \\
& A_3 \cos \left(\omega_b - \frac{\pi v}{L} \right) t + A_4 \cos \left(\omega_b + \frac{\pi v}{L} \right) t
\end{aligned} \quad (12)$$

其中:

$$\begin{aligned}
A_1 = & 1 - \frac{1}{1-(2\mu S)^2} - \frac{S}{1-\mu^2(1-S)^2} + \frac{S}{1-\mu^2(1+S)^2}, \\
A_2 = & \frac{(2\mu S)^2}{1-(2\mu S)^2}, \quad A_3 = \frac{S\mu^2(1-S)^2}{1-\mu^2(1-S)^2}, \\
A_4 = & -\frac{S\mu^2(1+S)^2}{1-\mu^2(1+S)^2}.
\end{aligned} \quad (13)$$

式(12)中,通过定义复合参数来简练了表达形

式, 对通过傅里叶变换来求其频率, 并无影响; 不过, 其中参数失去物理意义, 使系统具体参数无法直接辨识^[1-3]。因此, 本文方法中, 基于前期工作,

将式(7)一式(9)、式(11)、式(13)回代入式(12), 采取非最简形式来构造目标函数^[4], 如下:

$$\ddot{q}_v = \frac{-2 \frac{m_v g L^3}{\pi^4 EI} \left(\sqrt{\frac{k_v}{m_v}} \right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{\pi v}{L} / \left(\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \right) \right)^2 \right)} \left\{ \cos \sqrt{\frac{k_v}{m_v}} t + \frac{\left(2 \frac{\sqrt{\frac{k_v}{m_v}}}{\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}}} \left(\frac{\pi v}{L} / \left(\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \right) \right) \right)^2 \cos \frac{2\pi v t}{L} - \cos \sqrt{\frac{k_v}{m_v}} t}{1 - \left(2 \frac{\sqrt{\frac{k_v}{m_v}}}{\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}}} \left(\frac{\pi v}{L} / \left(\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \right) \right) \right)^2} + \right. \\ \left. \frac{\left(\frac{\pi v}{L} / \left(\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \right) \right) \left(\frac{\sqrt{\frac{k_v}{m_v}}}{\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}}} \right)^2 \left(1 - \left(\frac{\pi v}{L} / \left(\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \right) \right) \right)^2 \cos \left(\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} - \frac{\pi v}{L} \right) t - \cos \sqrt{\frac{k_v}{m_v}} t}{1 - \left(\frac{\sqrt{\frac{k_v}{m_v}}}{\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}}} \right)^2 \left(1 - \left(\frac{\pi v}{L} / \left(\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \right) \right)^2 \right)} - \right. \\ \left. \frac{\left(\frac{\pi v}{L} / \left(\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \right) \right) \left(\frac{\sqrt{\frac{k_v}{m_v}}}{\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}}} \right)^2 \left(1 + \left(\frac{\pi v}{L} / \left(\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \right) \right) \right)^2 \cos \left(\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} + \frac{\pi v}{L} \right) t - \cos \sqrt{\frac{k_v}{m_v}} t}{1 - \left(\frac{\sqrt{\frac{k_v}{m_v}}}{\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}}} \right)^2 \left(1 + \left(\frac{\pi v}{L} / \left(\frac{\pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}}} \right) \right)^2 \right)} \right\} \quad (14)$$

文献[13]对运营结构的参数进行了分析, 本文仅选取其中影响显著的结构刚度作为辨识参数, 同时辅以车辆速度的辨识来作为本文方法完整性的补充。同时, 为了验证初值大小对辨识目标值的影响, 对结构刚度在较小区间进行辨识, 以验证其在数据较接近时的细部辨识能力, 对车辆速度在较大区间进行辨识, 以验证其在数据离散度较高时的收敛性。

2.2 桥梁参数辨识

当结构发生损伤时, 一般认为其刚度变化而质量不变。对于运营桥梁结构而言, 刚度是结构状态最为基本、也最为直接的指标。

若取刚度初值取 $4.000 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2$, 目标值为

$3.300 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2$, 辨识值为 $3.298 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2$, 误差为 0.061%。由此可以看出, 本文方法辨识精度较高; 同时, 注意到对于刚度的取值, 目标值接近初始值 (二者比值为 0.825), 辨识的结果说明了本文方法对较接近数据的有细节辨识的能力。

图 2、图 3 分别描述了搜索过程中网格尺寸、目标函数、迭代次数的变化, 表 1 描述了 42 次迭代中前 21 次以及第 42 次的迭代细节。

结合图 2、图 3 与表 1, 可以发现, 第 1 次—第 2 次迭代不成功, 在其下一次的迭代中缩小网格尺寸, 以缩小搜索范围; 第 3 次表决成功, 在其下一次的迭代中放大网格尺寸, 以加快搜索效率; 目标函数在迭代初期, 收敛较快。

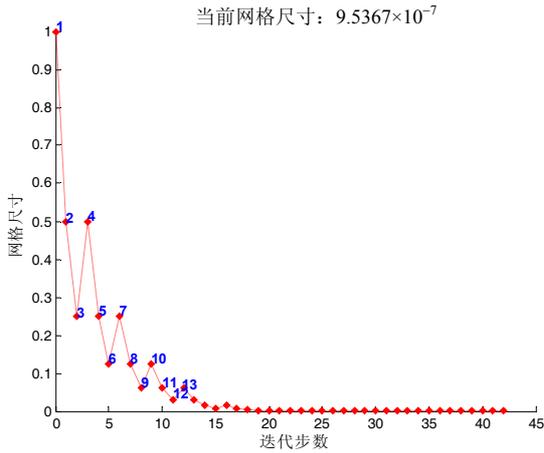


图2 运营结构桥梁刚度辨识的网格尺寸

Fig.2 Mesh sizes of the bridge stiffness identification

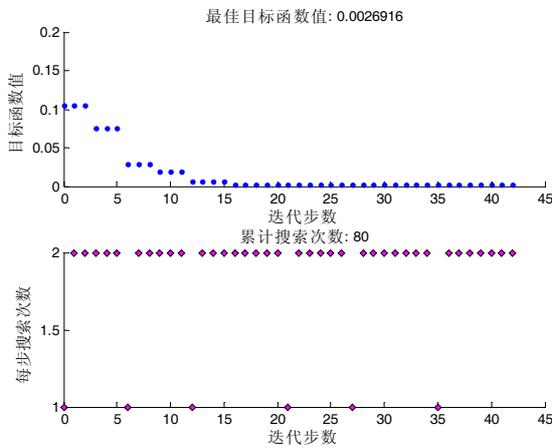


图3 运营结构桥梁刚度 PS 辨识的目标函数值与迭代次数

Fig.3 Best function values & evaluations of the bridge stiffness identification

表1 运营结构刚度辨识的部分迭代细节

Table 1 Iteration details of the bridge stiffness

迭代步数	目标函数值	网格大小	累计搜索次数	表决结果
0	0.1047	1.0000	1	/
1	0.1047	0.5000	3	重划网格
2	0.1047	0.2500	5	重划网格
3	0.0758	0.5000	7	表决成功
4	0.0758	0.2500	9	重划网格
5	0.0758	0.1250	11	重划网格
6	0.0286	0.2500	12	表决成功
7	0.0286	0.1250	14	重划网格
8	0.0286	0.0625	16	重划网格
9	0.0195	0.1250	18	表决成功
10	0.0195	0.0625	20	重划网格
11	0.0195	0.0313	22	重划网格
12	0.0062	0.0625	23	表决成功
13	0.0062	0.0313	25	重划网格
14	0.0062	0.0156	27	重划网格
15	0.0062	0.0078	29	重划网格
16	0.0027	0.0156	31	表决成功
17	0.0027	0.0078	33	重划网格
18	0.0027	0.0039	35	重划网格
19	0.0027	0.0020	37	重划网格
20	0.0027	0.0010	39	重划网格
21	0.0027	0.0020	40	表决成功
...
42	0.0027	9.537×10^{-7}	80	重划网格

值得注意的是，每两次表决成功之间的目标函数值是相等的，如迭代的1步-3步；而对于一个变量的模式搜索，每个迭代步中，搜索的次数为1或者2。

在刚度辨识的过程中，从第9步开始，目标函数值开始稳定在0.0195，以后各步通过网格尺寸的变化来逼近带辨识的刚度值，并在第42步时，其网格尺寸 9.537×10^{-7} 小于初始设置而停止迭代 ($\Delta_{42} < \epsilon$)。

2.3 车辆参数辨识

运营桥梁一般对车速存在限制，车速的增大会使结构的动力响应有增大的趋势^[13]；运营车辆的质量、速度是运营参数中对结构影响显著的2个参数，也是运营状态监测中，最常用的2个参数；其大小，往往能决定运营桥结构的健康状态、使用年限等，因此，工程中一般桥梁存在对车速、车载的限制。下文对车速进行了基于模式搜索的辨识，对于车辆质量的可以类似进行。

工程中，根据桥梁设计规范以及车辆运营速度，可以取50m/s(180km/h)为辨识初始值，辨识的目标值为10m/s，辨识值为10.013m/s，误差为0.130%。同时，注意到对于速度的取值，目标值远离初始值(二者比值为0.2)，辨识的结果说明了本文方法对离散度大数据的具备良好的收敛性。

图4、图5分别描述了搜索过程中网格尺寸、目标函数、迭代次数的变化；分析可参照图2、图3。同时，其迭代细节类似表1，从略。

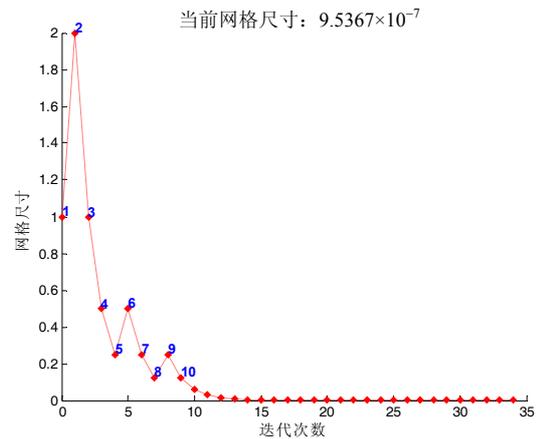
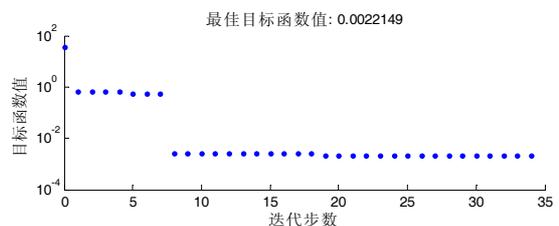


图4 运营结构车辆速度 PS 辨识的网格尺寸

Fig.4 Mesh sizes of the vehicle velocity identification



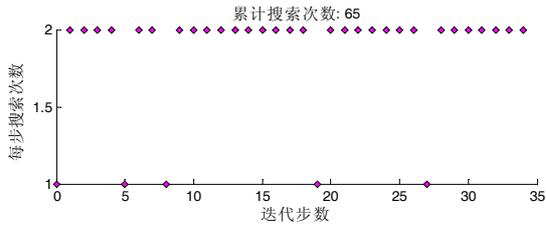


图5 运营结构车辆速度辨识的目标函数值与迭代次数
Fig.5 Best function values & evaluations of the vehicle velocity identification

2.4 噪声影响分析

运营结构中由于环境激励、仪器噪音、测试误差、路面不平顺等因素的存在，使工程响应数据中不可避免的含一定带宽(或几个带宽合成的)随机干扰，因此，有必要分析辨识方法抗噪音干扰的能力。

考虑到运营结构复杂的噪声背景，本节取较高的噪声水平 10%与 20%(白噪声)，对结构的刚度进行辨识。图6、图7分别为 10%、20%时网格尺寸的变化，表2、表3分别为 10%、20%时迭代的细节。

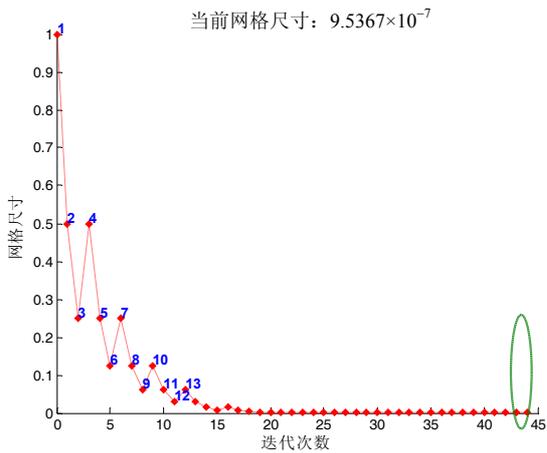


图6 噪声水平 10%下桥梁刚度辨识的网格尺寸
Fig.6 Mesh sizes of the bridge stiffness identification (10% noise)

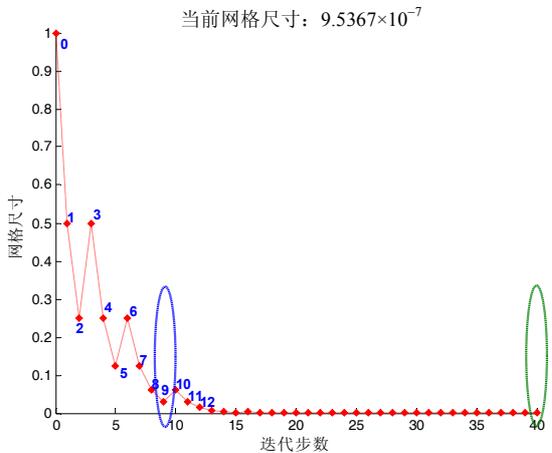


图7 噪声水平 20%下桥梁刚度辨识的网格尺寸
Fig.7 Mesh sizes of the bridge stiffness identification (20% noise)

表2 运营结构刚度辨识的部分迭代细节(10%噪声)

Table 2 Iteration details of the bridge stiffness (10% noise)

迭代步数	目标函数值	网格大小	累计搜索次数	表决结果
0	0.1165	1.0000	1	/
1	0.1165	0.5000	3	重划网格
2	0.1165	0.2500	5	重划网格
3	0.0914	0.5000	7	表决成功
4	0.0914	0.2500	9	重划网格
5	0.0914	0.1250	11	重划网格
6	0.0585	0.2500	12	表决成功
7	0.0585	0.1250	14	重划网格
8	0.0585	0.0625	16	重划网格
9	0.0546	0.1250	18	表决成功
10	0.0546	0.0625	20	重划网格
11	0.0546	0.0313	22	重划网格
12	0.0514	0.0625	23	表决成功
13	0.0514	0.0313	25	重划网格
14	0.0514	0.0156	27	重划网格
15	0.0514	0.0078	29	重划网格
16	0.0511	0.0156	31	表决成功
17	0.0511	0.0078	33	重划网格
18	0.0511	0.0039	35	重划网格
19	0.0511	0.0020	37	重划网格
20	0.0511	0.0010	39	重划网格
21	0.0511	0.0020	40	表决成功
...
44	0.0511	9.537×10^{-7}	83	重划网格

表3 运营结构刚度辨识的部分迭代细节(20%噪声)

Table 3 Iteration details of the bridge stiffness (20% noise)

迭代步数	目标函数值	网格大小	累计搜索次数	表决结果
0	0.1392	1.0000	1	/
1	0.1392	0.5000	3	重划网格
2	0.1392	0.2500	5	重划网格
3	0.1285	0.5000	7	表决成功
4	0.1285	0.2500	9	重划网格
5	0.1285	0.1250	11	重划网格
6	0.1011	0.2500	12	表决成功
7	0.1011	0.1250	14	重划网格
8	0.1011	0.0625	16	重划网格
9	0.1011	0.0313	18	重划网格
10	0.0987	0.0625	20	表决成功
11	0.0987	0.0313	22	重划网格
12	0.0987	0.0156	24	重划网格
13	0.0987	0.0078	26	重划网格
14	0.0987	0.0039	28	重划网格
15	0.0987	0.0020	30	重划网格
16	0.0987	0.0039	31	表决成功
17	0.0987	0.0020	33	重划网格
18	0.0987	0.0010	35	重划网格
19	0.0987	0.0020	37	表决成功
20	0.0987	0.0010	39	重划网格
21	0.0987	0.0005	41	重划网格
...
40	0.0987	9.537×10^{-7}	76	重划网格

从辨识结果来看, 10%噪声时辨识值为 $3.298 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2$, 误差 0.06%; 20%噪声时辨识值为 $3.334 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2$, 误差 1.03%, 而 2.2 节中噪声水平下辨识误差为 0.06%; 因此, 10%以下的噪声水平, 对本文辨识精度影响不大, 20%的噪声水平下, 辨识误差相对显著增大, 但仍在较小的范围内。因此, 本文方法对辨识数据具备较好的抗噪声能力。

从辨识过程来看, 图 4、图 6、图 7 比较, 迭代步数分别为 42、44、40, 分别在图 6、图 7 中虚线椭圆标出; 前 8 步迭代表决的结果每步相同, 因此前 8 次网格大小依次相同。各迭代步中, 目标函数的计算值存在差异; 噪声水平下, 第 9 步表决成功, 而 20%噪声水平下, 第 9 步表决成功, 缩小网格, 图 7 中蓝色虚线椭圆标出; 在 21 步时, 0%、10%与 20%累计搜索次数开始不同。

对照表 1、表 2、表 3 以及图 4, 总的来说, 0%、10%与 20%噪声水平下, 模式搜索的细节, 差别不显著。

3 结论

对于运营结构间接辨识这一新问题, 本文引入了模式搜索的新方法, 并有如下结论:

(1) 模式搜索方法能准确对运营桥梁的结构参数、车辆参数进行辨识; 并因其基于无导数优化的特点, 可以部分解决工程辨识中, 普通算法可能存在的不收敛、局部极值的问题, 响应数据可能存在的不可导、不连续的问题, 可作为提高运营结构的工程辨识能力的有益探索。

(2) 通过对初始值与目标值较为接近的结构刚度的辨识, 说明了本文方法具备数据细节辨识的能力; 通过对初始值与目标值偏离较大的车辆速度的辨识, 说明了本文方法对离散数据具备较好的收敛能力。

(3) 通过不同噪声水平下, 辨识过程中网格尺寸、搜索次数、搜索结果的比较, 表明本文方法具备强抗噪声干扰的能力。

(4) 本文方法加入罚函数后, 即可向含约束条件的优化问题推广。

(5) 本文方法理论框架完整, 辨识视角颇具探索性, 在方法上可拓展性强, 在应用上可复制性好。

参考文献:

- [1] Yang Y B, Lin C W, Yau J D. Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 272(3): 471—493.
- [2] Yang Y B, Lin C W. Vehicle bridge interaction dynamics and potential applications [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 282(1-2): 205—226.
- [3] Yang Y B, Lin C W. Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27(13): 1865—1878.
- [4] 李炜明, 朱宏平, 夏勇. 基于车辆响应的桥梁结构参数的统计区间估计[J]. *工程力学*, 2008, 25(增刊 II): 254—258.
Li Weiming, Zhu Hongping, Xia Yong. Statistical interval estimation on bridge parameters based on noised vehicle response [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(Sup.II): 254—258. (in Chinese)
- [5] Hooke R, Jeeves T A. Direct search solution of numerical and statistical problems [J]. *Journal Associate Computer Machine*, 1961, 8(2): 212—229.
- [6] Torczon V. On the convergence of pattern search algorithms [J]. *SIAM Journal on Optimization*, 1997, 7(1): 1—25.
- [7] Lewis R M, Torczon V. Pattern search algorithms for bound constrained minimization [J]. *SIAM Journal on Optimization*, 1999, 9(4): 1082—1099.
- [8] Lewis R M, Torczon V. Pattern search methods for linearly constrained minimization [J]. *SIAM Journal on Optimization*, 2000, 10(3): 917—941.
- [9] Lewis R M, Torczon V. A globally convergent augmented Lagrangian pattern search algorithm for optimization with general constraints and simple bounds [J]. *SIAM Journal on Optimization*, 2002, 12(4): 1075—1089.
- [10] Kolda T G, Lewis R M, Torczon V. Optimization by direct search: A new perspective on some classical and modern methods [J]. *SIAM Review*, 2003, 45(3): 385—482.
- [11] Audet C, Dennis J E. Analysis of generalized pattern searches [J]. *SIAM Journal on Optimization*, 2003, 13(3): 889—903.
- [12] Fryba L. *Vibration of solids and structures under moving loads* [M]. Groningen: Noordhoff International Publishing, 1972.
- [13] Li W M, Zhu H P, Xia Y. Parameters analysis on vehicle bridge interaction in a 3D contour projection method [C]. 12th International Conferences on Computing in Civil and Building Engineering. Beijing, China, 2008.