



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112487712 B

(45) 授权公告日 2024. 08. 23

(21) 申请号 202011341887.2

G06F 119/14 (2020.01)

(22) 申请日 2020.11.25

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 102855326 A, 2013.01.02

申请公布号 CN 112487712 A

CN 105631596 A, 2016.06.01

(43) 申请公布日 2021.03.12

审查员 夏冰洁

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 樊智勇 刘晓宇 刘天苹 赵颖

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理

事务所(普通合伙) 11390

专利代理师 焦海峰

(51) Int. Cl.

G06F 30/27 (2020.01)

G06F 113/14 (2020.01)

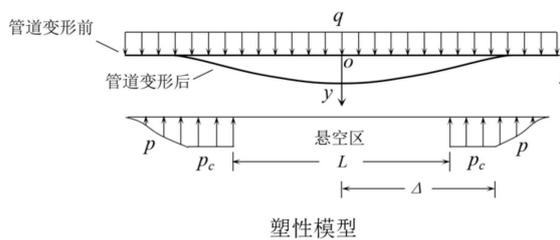
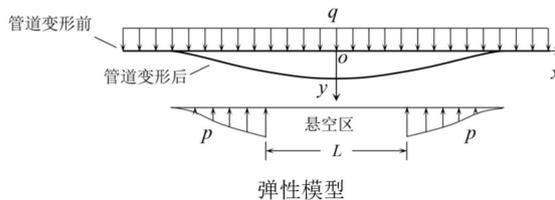
权利要求书6页 说明书10页 附图4页

(54) 发明名称

基于遗传算法与多维动态时间规整的埋地悬空管道工况参数智能辨识方法

(57) 摘要

本发明属于工程参数反分析技术领域,本发明提供了基于遗传算法与多维动态时间规整的埋地悬空管道工况参数智能辨识方法,(1)估计实际工况参数的取值范围;(2)将参数在其取值范围内进行离散,形成对应各离散值的多个模板工况,利用力学模型和遗传算法计算各模板工况下管道各横截面的轴向最大应变,形成模板数据库;(3)监测实际工况中管道各监测截面的轴向最大应变,形成监测应变时间序列;(4)利用多维动态时间规整算法,计算模板数据库和监测应变时间序列的相似度,通过比较相似度大小辨识实际工况参数。本发明能够充分利用时空监测信息,准确辨识悬空管道工况参数,避免现场测试耗费大量的人力物力。



1. 基于遗传算法与多维动态时间规整的埋地悬空管道工况参数智能辨识方法,其特征在于,包括如下步骤:

(1) 估计实际工况参数的取值范围,工况参数包括悬空中心位置 d' ,悬空宽度 L 的演变范围,管下地基土体抗力系数 k ;

其中,以监测点分布中心为坐标原点,以管道轴向为坐标轴 x' 时,悬空中心的坐标为 d' ,估计的悬空中心位置 d' 的取值范围为 $[d_{\min}, d_{\max}]$,悬空宽度 L 的演变范围无需估计,估计的管下地基土体抗力系数 k 的取值范围 $[k_1, k_M]$, M 为 k 的取值个数;

(2) 将参数在其取值范围内进行离散,形成对应各离散值的多个模板工况,利用力学模型和遗传算法计算各模板工况下管道各横截面的轴向最大应变,形成模板数据库;

(3) 监测实际工况中管道各监测截面的轴向最大应变,形成监测应变时间序列;

(4) 利用多维动态时间规整算法,计算模板数据库和监测应变时间序列的相似度,通过比较相似度大小辨识实际工况参数;

利用多维动态时间规整算法,计算模板数据库与监测应变时间序列之间的相似度,包括步骤:

设定移动时窗从每个模板工况离散点应变时间序列 Y_i 里以不断移动的方式取出序列片段,移动时窗表示为二维矩阵:

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{t1} & w_{t2} & \cdots & w_{tn} \end{bmatrix} \quad (26)$$

W 为 $t \times n$ 的矩阵,其中, t 为移动时窗所含悬空宽度变化次数,即时窗长度,其变化范围为 $[t_1, t_2]$; n 为移动时窗包含的离散点的个数,与监测截面的个数也即 X 的列数相等; w_{ij} 为从模板工况里所取的管道离散点的轴向最大应变;

设模板工况悬空中心在坐标轴 x' 的坐标为 d , d 的变化范围为 $[d_{\min}, d_{\max}]$;在 d 的取值不断变化时,根据坐标转换公式:

$$x = x' - d \quad (27)$$

计算各监测截面在模板工况坐标轴 x 中的坐标,将这些坐标与离散点的 x 坐标进行比较,获得与这些坐标最近的离散点;

开始时,首先计算 d_{\min} 对应的离散点,将移动时窗放在模板工况 Y_i 的这些离散点所在列的最左列位置,然后将移动时窗向下移动,每次移动一行,移动到最下方后,再将移动时窗放置到最上方,并向右移动一列,然后再按每次一行向下移动,移动到最下方,不断进行此过程,直至移动到 d_{\max} 对应的离散点所在列的最右列位置,再按每次一行移动到最下方;

移动时窗每到达一个位置,即得到一个二维矩阵 W ,下面对移动时窗当前位置的 W 与 X 进行动态时间规整,定义距离 d_{ij} 为欧拉距离,计算方式如下:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (w_{ik} - x_{jk})^2} \quad (28)$$

遍历 W 和 X 里的各元素,即可得到距离矩阵:

$$d = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1p} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{t1} & d_{t2} & \cdots & d_{tp} \end{bmatrix} \quad (29)$$

其中, t 为移动时窗所含悬空宽度变化次数, 即时窗长度, 其变化范围为 $[t_1, t_2]$, p 为监测的总时刻数;

对于矩阵 d , 以 d_{11} 为起点, 有多条路径到达终点 d_{tp} , 每条路径表示 W 和 X 的一个映射关系, 每条路径上各元素之和即为该路径计算的 W 和 X 之间的距离, 距离最小的路径为动态规整路径, 该最小距离为动态规整距离;

定义累计距离矩阵:

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1p} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{t1} & D_{t2} & \cdots & D_{tp} \end{bmatrix} \quad (30)$$

其中 D_{ij} 为 d_{11} 为到 d_{ij} 的最小累计距离, 计算公式为:

$$\begin{cases} D_{11} = d_{11}, & D_{1j} = d_{1j} + D_{1,j-1}, & D_{i1} = d_{i1} + D_{i-1,1} \\ D_{ij} = d_{ij} + \min(D_{i-1,j}, & D_{i,j-1}, & D_{i-1,j-1}) \\ D_{\min} = D_{tp} \end{cases} \quad (31)$$

到此可知, 当前 W 和 X 的最小累计距离为 D_{tp} , 该值越小, 则 W 和 X 的相似性越大, 故定义相似度为 D_{tp} 的倒数, 以 C 表示;

随着移动时窗在 Y_i 中移动, 可得相似度矩阵 C_i^t :

$$C_i^t = \begin{bmatrix} C_{11}^t & C_{12}^t & \cdots & C_{1,N-n+1}^t \\ C_{21}^t & C_{22}^t & \cdots & C_{2,N-n+1}^t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{P-t+1,1}^t & C_{P-t+1,2}^t & \cdots & C_{P-t+1,N-n+1}^t \end{bmatrix} \quad (32)$$

其中, P 为悬空宽度变化总次数, t 为移动时窗所含悬空宽度变化次数, 即时窗长度, 其变化范围为 $[t_1, t_2]$, N 为离散点的个数, n 为监测截面的个数;

当 t 在 $[t_1, t_2]$ 变化时, 即可得相似度矩阵:

$$C_i = [C_i^{t_1} \quad C_i^{t_1+1} \quad \cdots \quad C_i^{t_2}] \quad (33)$$

对第 i 个模板工况的相似度矩阵, 比较矩阵中各相似度的大小, 求得该模板工况对应的最大相似度, 以及相应的悬空中心位置 d , 悬空宽度 L 演变范围;

对 M 个模板工况 S_1, S_2, \cdots, S_M , 进行上述相似度计算步骤, 得每个工况的最大相似度, 以及相应的悬空中心位置 d , 悬空宽度 L 演变范围;

比较每个模板工况的最大相似度, 得到所有模板工况下的模板数据库里与监测应变时间序列 X 最相似的序列片段, 则该序列片段对应的工况参数即为辨识出的与实际工况最接近的工况参数。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在於,所述步骤(2)中的形成模板数据库,包括:

(1) 将管下地基土体抗力系数 k 离散为 k_1, k_2, \dots, k_M ,对于各离散值,得到 M 个模板工况,分别记为 S_1, S_2, \dots, S_M ,其中, M 为模板工况个数;

(2) 模板数据库里的时间因素通过逐步增加的悬空宽度 L 来体现,对于各模板工况,按固定的增量步增大悬空宽度 L ,直至管道最大的轴向拉应力大于管道的屈服强度;对于此过程中的每一悬空宽度,利用力学模型和遗传算法计算管道各横截面的轴向最大应变,最终得到各模板工况所有悬空宽度下的管道各横截面的轴向最大应变,即形成模板数据库。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在於,所述步骤(2)中,按固定的增量步增大悬空宽度过程中,埋地悬空管道的力学模型将从弹性模型转变为塑性模型;弹性模型表示整个管道的管土之间均处于弹性相互作用;塑性模型表示其中一段管道和地基土之间处于弹性相互作用,另一段管道和地基土之间处于塑性相互作用;管土相互作用采用理想弹塑性本构关系,通过比较悬空边界处的管道挠度 ω_0 与管土相互作用弹塑性临界位移 ω_c 的大小来确定模型类别,若 $\omega_0 \leq \omega_c$,则是弹性模型,若 $\omega_0 > \omega_c$,则是塑性模型;

根据管道挠曲微分方程求得两种力学模型下管道各段的挠度通解表达式,结合管道的边连条件、临界条件和伸长量条件,得到相应的待求方程组,

两种力学模型关于悬空中心对称,取模型右半部分为研究对象,悬空段为第一段,塑性段为第二段(弹性模型没有此段),弹性段为第三段,

对于弹性模型,管道各段的挠曲微分方程、挠度通解和定解条件为:

当 $0 \leq x \leq L/2$ 时,管道第一段挠曲微分方程为:

$$EI \omega_1'''' - T \omega_1'' = q \quad (1)$$

挠度通解为:

$$\omega_1 = -\frac{q}{2T} x^2 + c_1 + c_2 x + c_3 e^{\alpha x} + c_4 e^{-\alpha x} \quad (2)$$

当 $L/2 \leq x \leq \infty$ 时,管道第三段挠曲微分方程为:

$$EI \omega_3'''' + k \omega_3 = q \quad (3)$$

挠度通解为:

$$\omega_3 = \frac{q}{k} + e^{\beta x} [c_5 \cos(\beta x) + c_6 \sin(\beta x)] + e^{-\beta x} [c_7 \cos(\beta x) + c_8 \sin(\beta x)] \quad (4)$$

管道的定解条件为:

边连条件:

$$\begin{cases} \omega_1'(0) = 0 \\ \omega_1'''(0) = 0 \end{cases} \begin{cases} \omega_3'(0) = 0 \\ \omega_3'''(0) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \omega_1(L/2) = \omega_3(L/2) \\ \omega_1'(L/2) = \omega_3'(L/2) \\ \omega_1''(L/2) = \omega_3''(L/2) \\ \omega_1'''(L/2) = \omega_3'''(L/2) \end{cases} \quad (6)$$

伸长量条件:

$$\frac{TL}{2EA} + \frac{T^2}{2fEA} = \int_0^{L/2} \sqrt{1+\omega_1'^2} dx + \int_{L/2}^{L/2+T/f} \sqrt{1+\omega_3'^2} dx - \frac{L}{2} - \frac{T}{f} \quad (7)$$

记作：

$$f(T) = \frac{\frac{TL}{2EA} + \frac{T^2}{2fEA}}{\int_0^{L/2} \sqrt{1+\omega_1'^2} dx + \int_{L/2}^{L/2+T/f} \sqrt{1+\omega_3'^2} dx - \frac{L}{2} - \frac{T}{f}} - 1 = 0 \quad (8)$$

对于塑性模型,管道各段的挠曲微分方程、挠度通解和定解条件为:

当 $0 \leq x \leq L/2$ 时,管道第一段挠曲微分方程为:

$$EI \omega_1'''' - T \omega_1'' = q \quad (9)$$

挠度通解为:

$$\omega_1 = -\frac{q}{2T} x^2 + c_1 + c_2 x + c_3 e^{\alpha x} + c_4 e^{-\alpha x} \quad (10)$$

当 $L/2 \leq x \leq \Delta$ 时,管道第二段挠曲微分方程为:

$$EI \omega_2'''' - T \omega_2'' = q - p_c \quad (11)$$

挠度通解为:

$$\omega_2 = -\frac{q-p_c}{2T} x^2 + c_5 + c_6 x + c_7 e^{\alpha x} + c_8 e^{-\alpha x} \quad (12)$$

当 $\Delta \leq x \leq \infty$ 时,管道第三段挠曲微分方程为:

$$EI \omega_3'''' + k \omega_3 = q \quad (13)$$

挠度通解为:

$$\omega_3 = \frac{q}{k} + e^{\beta x} [c_9 \cos(\beta x) + c_{10} \sin(\beta x)] + e^{-\beta x} [c_{11} \cos(\beta x) + c_{12} \sin(\beta x)] \quad (14)$$

管道的定解条件为:

边连条件:

$$\begin{cases} \omega_1'(0) = 0 \\ \omega_1'''(0) = 0 \end{cases} \begin{cases} \omega_3'(\infty) = 0 \\ \omega_3'''(\infty) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \omega_1(L/2) = \omega_2(L/2) \\ \omega_1'(L/2) = \omega_2'(L/2) \\ \omega_1''(L/2) = \omega_2''(L/2) \\ \omega_1'''(L/2) = \omega_2'''(L/2) \end{cases} \begin{cases} \omega_2(\Delta) = \omega_3(\Delta) \\ \omega_2'(\Delta) = \omega_3'(\Delta) \\ \omega_2''(\Delta) = \omega_3''(\Delta) \\ \omega_2'''(\Delta) = \omega_3'''(\Delta) \end{cases} \quad (16)$$

临界条件和伸长量条件:

$$\begin{cases} \omega_2(\Delta) = \omega_c = 0.015(H+D) \\ \frac{T\Delta}{EA} + \frac{T^2}{2fEA} = \int_0^{L/2} \sqrt{1+\omega_1'^2} dx + \int_{L/2}^{\Delta} \sqrt{1+\omega_2'^2} dx + \int_{\Delta}^{\Delta+T/f} \sqrt{1+\omega_3'^2} dx - \Delta - \frac{T}{f} \end{cases} \quad (17)$$

记作:

$$\begin{cases} g(\Delta) = \frac{\omega_2(\Delta)}{0.015(H+D)} - 1 = 0 \\ f(T, \Delta) = \frac{\frac{T\Delta}{EA} + \frac{T^2}{2fEA}}{\int_0^{L/2} \sqrt{1+\omega_1'^2} dx + \int_{L/2}^{\Delta} \sqrt{1+\omega_2'^2} dx + \int_{\Delta}^{\Delta+T/f} \sqrt{1+\omega_3'^2} dx - \Delta - \frac{T}{f}} - 1 = 0 \end{cases} \quad (18)$$

对于弹性模型和塑性模型, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别表示管道第一、二、三段的挠度, $\omega_1', \omega_1'', \omega_1''', \omega_1''''$ 为第一段管道挠度的一阶、二阶、三阶、四阶导数, $\omega_2', \omega_2'', \omega_2''', \omega_2''''$ 为第二段管道挠度的一阶、二阶、三阶、四阶导数, $\omega_3', \omega_3'', \omega_3''', \omega_3''''$ 为第三段管道挠度的一阶、二阶、三阶、四阶导数; q 为上覆土体和管道自重的均布荷载, k 为管下地基土体抗力系数, p_c 为地基土体最大分布抗力, 大小为 $k \times 0.015(H+D)$, 其中管土相互作用弹塑性临界位移为 $\omega_c = 0.015(H+D)$, L 为悬空宽度, Δ 为塑性区半宽度, T 为管道轴力, f 为管道与土体之间的均布摩擦力, E 为管道弹性模量, H 为上覆土体厚度, D 为管道的外径, A 为管道横截面积, I 为管道横截面的惯性矩;

α, β 计算公式如下

$$\alpha = \sqrt{\frac{T}{EI}}, \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad (19)$$

另外, $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}, c_{11}, c_{12}$ 为待定常数;

将挠度通解代入边连条件、临界条件和伸长量条件, 即得到关于塑性区半宽度 Δ 、管道轴力 T 以及 $c_1 \sim c_{12}$ 的非线性方程组。

4. 根据权利要求3所述的方法, 其特征在于, 通过遗传算法求解所述力学模型的非线性方程组, 并最终得到模板数据库, 利用所定义的适应度, 对塑性区半宽度 Δ 和管道轴力 T 进行迭代计算, 每一次迭代计算, 得到一组方程的解, 并计算该解对应的适应度, 直至收敛至最终解, 包括步骤如下:

(a) 对于弹性模型, 随机初始化 T 对应的种群, 种群个体为 T_1, T_2, \dots, T_m ; 对于塑性模型, 随机初始化 Δ 和 T 对应的种群, 种群个体为 $(\Delta_1, T_1), (\Delta_2, T_2), \dots, (T_m, \Delta_m)$, 并将初始种群个体用二进制表示, 作为父代种群, m 为种群所含个体数量;

(b) 对于父代种群的每一个体, 计算方程的剩余未知数, 得到一组方程的解, 然后计算父代种群各个体的适应度, 对各个体进行选择、交叉和变异三步操作, 得到子代种群;

对于弹性模型, 适应度计算公式为:

$$F_{\text{适应度}} = \frac{1}{|f(T)|} \quad (20)$$

对于塑性模型, 适应度计算公式为:

$$F_{\text{适应度}} = \frac{1}{|f(T, \Delta)|} + \frac{1}{|g(\Delta)|} \quad (21)$$

(c) 对于子代种群的每一个体, 计算方程的剩余未知数, 得到一组方程的解, 然后计算子代种群各个体的适应度, 记录适应度最大的个体;

(d) 若 (c) 中最大适应度小于设定的阈值, 则以子代为父代, 重复 (a) ~ (c), 直至最大适

应度大于设定的阈值,记录此适应度对应的个体,将该个体转换为十进制后即为 Δ 和 T 的最优解,利用该最优解计算方程剩余未知数,得到最终方程的解,算法终止;

通过遗传算法求得方程组的未知数后,将各未知数的值代入管道的挠度通解表达式,根据挠度与横截面的最大轴向应变的关系:

$$\begin{cases} M = EI\omega'' \\ \sigma_{x,\max} = \frac{T}{A} + \frac{MD}{2I} \\ \varepsilon_{x,\max} = \sigma_{x,\max} / E \end{cases} \quad (22)$$

求得管道横截面的轴向最大应变通解表达式;

利用力学模型和遗传算法计算各模板工况下管道横截面的轴向最大应变表达式,取管道轴向离散点的轴向最大应变,形成模板数据库;在模板工况中,以悬空中心为坐标原点,以管道轴向为坐标轴 x ,将整个管道间隔相同距离,取 N 个管道横截面(离散点)的轴向最大应变,将其称作离散点应变时间序列,最终求得 M 个模板工况的离散点应变时间序列 Y ,具体表示为:

$$Y = [Y_1 \ Y_2 \ \cdots \ Y_M] \quad (23)$$

$$Y_i = \begin{bmatrix} y_{11}^i & y_{12}^i & \cdots & y_{1N}^i \\ y_{21}^i & y_{22}^i & \cdots & y_{2N}^i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{p1}^i & y_{p2}^i & \cdots & y_{pN}^i \end{bmatrix} \quad (24)$$

其中, Y_i 为第 i 个模板工况的离散点应变时间序列, y_{jk}^i 为第 i 个模板工况,在第 j 悬空宽度增量步的第 k 个离散点的轴向最大应变, p 为悬空宽度变化总次数, N 为离散点的个数。

5. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述步骤(3)中的实际工况中管道各监测截面的轴向最大应变,形成监测应变时间序列 X ,具体表示为:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{p1} & x_{p2} & \cdots & x_{pn} \end{bmatrix} \quad (25)$$

其中, p 为监测的总时刻数, n 为监测截面的个数, x_{ij} 为管道第 i 时刻的第 j 个监测截面的轴向最大应变。

基于遗传算法与多维动态时间规整的埋地悬空管道工况参数智能辨识方法

技术领域

[0001] 本发明属于工程参数反分析技术领域,具体涉及基于遗传算法与多维动态时间规整的埋地悬空管道工况参数智能辨识方法。

背景技术

[0002] 准确获取埋地悬空管道的工况参数是通过力学分析方法进行管道安全预警的重要基础。传统的通过现场试验测定工况参数的方式,效率低下,实用性较低。随着长输油气管道安全事故的频发,管道安全监测工作不断开展,从而积累了大量的监测信息,利用管道的监测信息辨识管道工况参数成为一种技术趋势。

[0003] 近些年,智能参数辨识方法得到了广泛的研究。这些辨识技术的区别主要体现在目标函数、是否采用及采用何种近似方法代替数值计算、参数优化算法等方面。在目标函数方面,主要包括误差平方和方法与概率方法;在计算方面,主要包括商业软件模拟计算和机器学习方法,主要使用到的机器学习方法有支持向量机和神经网络等;在优化算法方面,主要包括最速梯度下降、粒子群算法、模拟退火算法、遗传算法以及各种改进算法等。这些辨识技术在利用静态监测信息进行参数辨识方面取得了一定的进展,但不能充分利用连续的时间序列监测信息,参数辨识结果可靠性较低。

发明内容

[0004] 针对现有技术存在不能充分利用连续的时间序列监测信息,参数辨识结果可靠性较低的技术问题,本发明的目的在于提供基于遗传算法与多维动态时间规整的埋地悬空管道工况参数智能辨识方法,通过力学模型、遗传算法和多维动态时间规整算法这一方法体系获取实际工况参数,为埋地悬空管道的计算分析和安全预警提供基础。

[0005] 本发明采取的技术方案为:

[0006] 基于遗传算法与多维动态时间规整的埋地悬空管道工况参数智能辨识方法,包括如下步骤:

[0007] (1) 估计实际工况参数的取值范围;

[0008] (2) 将参数在其取值范围内进行离散,形成对应各离散值的多个模板工况,利用力学模型和遗传算法计算各模板工况下管道各横截面的轴向最大应变,形成模板数据库;

[0009] (3) 监测实际工况中管道各监测截面的轴向最大应变,形成监测应变时间序列;

[0010] (4) 利用多维动态时间规整算法,计算模板数据库和监测应变时间序列的相似度,通过比较相似度大小辨识实际工况参数。

[0011] 进一步的,所述步骤(1)中的工况参数包括悬空中心位置 d' ,悬空宽度 L 的演变范围,管下地基土体抗力系数 k ;

[0012] 其中,以监测点分布中心为坐标原点,以管道轴向为坐标轴 x' 时,悬空中心的坐标为 d' ,估计的悬空中心位置 d' 的取值范围为 $[d_{\min}, d_{\max}]$,悬空宽度 L 的演变范围无需估计,估

计的管下地基土体抗力系数 k 的取值范围 $[k_1, k_M]$ 。

[0013] 进一步的,所述步骤(2)中的形成模板数据库包括:

[0014] (1)将管下地基土体抗力系数 k 离散为 k_1, k_2, \dots, k_M ,对于各离散值,得到 M 个模板工况,分别记为 S_1, S_2, \dots, S_M ,其中, M 为模板工况个数;

[0015] (2)模板数据库里的时间因素通过逐步增加的悬空宽度 L 来体现,对于各模板工况,按固定的增量步增大悬空宽度 L ,直至管道最大的轴向拉应力大于管道的屈服强度;对于此过程中的每一悬空宽度,利用力学模型和遗传算法计算管道各横截面的轴向最大应变,最终得到各模板工况所有悬空宽度下的管道各横截面的轴向最大应变,即形成模板数据库。

[0016] 更进一步的,所述步骤(2)中的按固定的增量步增大悬空宽度过程中,埋地悬空管道的力学模型将从弹性模型转变为塑性模型。弹性模型表示整个管道的管土之间均处于弹性相互作用;塑性模型表示其中一段管道和地基土之间处于弹性相互作用,另一段管道和地基土之间处于塑性相互作用;管土相互作用采用理想弹塑性本构关系,通过比较悬空边界处的管道挠度 ω_0 与管土相互作用弹塑性临界位移 ω_c 的大小来确定模型类别,若 $\omega_0 \leq \omega_c$,则是弹性模型,若 $\omega_0 > \omega_c$,则是塑性模型。根据管道挠曲微分方程求得两种力学模型下管道各段的挠度通解表达式,结合管道的边连条件、临界条件和伸长量条件,得到相应的待求方程组。

[0017] 两种力学模型关于悬空中心对称,取模型右半部分为研究对象,悬空段为第一段,塑性段为第二段(弹性模型没有此段),弹性段为第三段。

[0018] 对于弹性模型,管道各段的挠曲微分方程、挠度通解和定解条件为:

[0019] 当 $0 \leq x \leq L/2$ 时,管道第一段挠曲微分方程为:

$$EI \omega_1'''' - T \omega_1'' = q \quad (1)$$

[0021] 挠度通解为:

$$\omega_1 = -\frac{q}{2T} x^2 + c_1 + c_2 x + c_3 e^{\alpha x} + c_4 e^{-\alpha x} \quad (2)$$

[0023] 当 $L/2 \leq x \leq \infty$ 时,管道第三段挠曲微分方程为:

$$EI \omega_3'''' + k \omega_3 = q \quad (3)$$

[0025] 挠度通解为:

$$\omega_3 = \frac{q}{k} + e^{\beta x} [c_5 \cos(\beta x) + c_6 \sin(\beta x)] + e^{-\beta x} [c_7 \cos(\beta x) + c_8 \sin(\beta x)] \quad (4)$$

[0027] 管道的定解条件为:

[0028] 边连条件:

$$\begin{cases} \omega_1'(0) = 0 \\ \omega_1'''(0) = 0 \end{cases} \begin{cases} \omega_3'(\infty) = 0 \\ \omega_3''(\infty) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$[0029] \begin{cases} \omega_1(L/2) = \omega_3(L/2) \\ \omega_1'(L/2) = \omega_3'(L/2) \\ \omega_1''(L/2) = \omega_3''(L/2) \\ \omega_1'''(L/2) = \omega_3'''(L/2) \end{cases} \quad (6)$$

[0030] 伸长量条件:

$$[0031] \quad \frac{TL}{2EA} + \frac{T^2}{2fEA} = \int_0^{L/2} \sqrt{1+\omega_1'^2} dx + \int_{L/2}^{L/2+T/f} \sqrt{1+\omega_3'^2} dx - \frac{L}{2} - \frac{T}{f} \quad (7)$$

[0032] 记作:

$$[0033] \quad f(T) = \frac{\frac{TL}{2EA} + \frac{T^2}{2fEA}}{\int_0^{L/2} \sqrt{1+\omega_1'^2} dx + \int_{L/2}^{L/2+T/f} \sqrt{1+\omega_3'^2} dx - \frac{L}{2} - \frac{T}{f}} - 1 = 0 \quad (8)$$

[0034] 对于塑性模型,管道各段的挠曲微分方程、挠度通解和定解条件为:

[0035] 当 $0 \leq x \leq L/2$ 时,管道第一段挠曲微分方程为:

$$[0036] \quad EI \omega_1'''' - T \omega_1'' = q \quad (9)$$

[0037] 挠度通解为:

$$[0038] \quad \omega_1 = -\frac{q}{2T} x^2 + c_1 + c_2 x + c_3 e^{\alpha x} + c_4 e^{-\alpha x} \quad (10)$$

[0039] 当 $L/2 \leq x \leq \Delta$ 时,管道第二段挠曲微分方程为:

$$[0040] \quad EI \omega_2'''' - T \omega_2'' = q - p_c \quad (11)$$

[0041] 挠度通解为:

$$[0042] \quad \omega_2 = -\frac{q-p_c}{2T} x^2 + c_5 + c_6 x + c_7 e^{\alpha x} + c_8 e^{-\alpha x} \quad (12)$$

[0043] 当 $\Delta \leq x \leq \infty$ 时,管道第三段挠曲微分方程为:

$$[0044] \quad EI \omega_3'''' + k \omega_3 = q \quad (13)$$

[0045] 挠度通解为:

$$[0046] \quad \omega_3 = \frac{q}{k} + e^{\beta x} [c_9 \cos(\beta x) + c_{10} \sin(\beta x)] + e^{-\beta x} [c_{11} \cos(\beta x) + c_{12} \sin(\beta x)] \quad (14)$$

[0047] 管道的定解条件为:

[0048] 边连条件:

$$\begin{cases} \omega_1'(0) = 0 \\ \omega_1'''(0) = 0 \end{cases} \begin{cases} \omega_3'(\infty) = 0 \\ \omega_3'''(\infty) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$[0049] \quad \begin{cases} \omega_1(L/2) = \omega_2(L/2) \\ \omega_1'(L/2) = \omega_2'(L/2) \\ \omega_1''(L/2) = \omega_2''(L/2) \\ \omega_1'''(L/2) = \omega_2'''(L/2) \end{cases} \begin{cases} \omega_2(\Delta) = \omega_3(\Delta) \\ \omega_2'(\Delta) = \omega_3'(\Delta) \\ \omega_2''(\Delta) = \omega_3''(\Delta) \\ \omega_2'''(\Delta) = \omega_3'''(\Delta) \end{cases} \quad (16)$$

[0050] 临界条件和伸长量条件:

$$[0051] \quad \begin{cases} \omega_2(\Delta) = \omega_c = 0.015(H+D) \\ \frac{T\Delta}{EA} + \frac{T^2}{2fEA} = \int_0^{L/2} \sqrt{1+\omega_1'^2} dx + \int_{L/2}^{\Delta} \sqrt{1+\omega_2'^2} dx + \int_{\Delta}^{\Delta+T/f} \sqrt{1+\omega_3'^2} dx - \Delta - \frac{T}{f} \end{cases} \quad (17)$$

[0052] 记作:

$$[0053] \quad \begin{cases} g(\Delta) = \frac{\omega_2(\Delta)}{0.015(H+D)} - 1 = 0 \\ f(T, \Delta) = \frac{\frac{T\Delta}{EA} + \frac{T^2}{2fEA}}{\int_0^{L/2} \sqrt{1+\omega_1'^2} dx + \int_{L/2}^{\Delta} \sqrt{1+\omega_2'^2} dx + \int_{\Delta}^{\Delta+T/f} \sqrt{1+\omega_3'^2} dx - \Delta - \frac{T}{f}} - 1 = 0 \end{cases} \quad (18)$$

[0054] 对于弹性模型和塑性模型, $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 分别表示管道第一、二、三段的挠度, $\omega_1', \omega_1'', \omega_1''', \omega_1''''$ 为第一段管道挠度的一阶、二阶、三阶、四阶导数, $\omega_2', \omega_2'', \omega_2''', \omega_2''''$ 为第二段管道挠度的一阶、二阶、三阶、四阶导数, $\omega_3', \omega_3'', \omega_3''', \omega_3''''$ 为第三段管道挠度的一阶、二阶、三阶、四阶导数。 q 为上覆土体和管道自重的均布荷载, k 为管下地基土体抗力系数, p_c 为地基土体最大分布抗力, 大小为 $k \times 0.015(H+D)$, 其中管土相互作用弹塑性临界位移为 $\omega_c = 0.015(H+D)$, L 为悬空宽度, Δ 为塑性区半宽度, T 为管道轴力, f 为管道与土体之间的均布摩擦力, E 为管道弹性模量, H 为上覆土体厚度, D 为管道的外径, A 为管道横截面积, I 为管道横截面的惯性矩;

[0055] α, β 计算公式如下:

$$[0056] \quad \alpha = \sqrt{\frac{T}{EI}}, \quad \beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \quad (19)$$

[0057] 另外, $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9, c_{10}, c_{11}, c_{12}$ 为待定常数。

[0058] 将挠度通解代入边连条件、临界条件和伸长量条件, 即可得到关于塑性区半宽度 Δ (弹性模型没有此未知数)、管道轴力 T 以及 $c_1 \sim c_{12}$ 的非线性方程组。

[0059] 更进一步的, 通过遗传算法求解所述力学模型的非线性方程组, 并最终得到模板数据库。利用所定义的适应度, 对塑性区半宽度 Δ (弹性模型没有此未知数) 和管道轴力 T 进行迭代计算, 每一次迭代计算, 得到一组方程的解, 并计算该解对应的适应度, 直至收敛至最终解, 包括步骤如下:

[0060] (a) 对于弹性模型, 随机初始化 T 对应的种群, 种群个体为 T_1, T_2, \dots, T_m ; 对于塑性模型, 随机初始化 Δ 和 T 对应的种群, 种群个体为 $(\Delta_1, T_1), (\Delta_2, T_2), \dots, (\Delta_m, T_m)$ 。并将初始种群个体用二进制表示, 作为父代种群, m 为种群所含个体数量;

[0061] (b) 对于父代种群的每一个体, 计算方程的剩余未知数, 得到一组方程的解, 然后计算父代种群各个体的适应度, 对各个体进行选择、交叉和变异三步操作, 得到子代种群;

[0062] 对于弹性模型, 适应度计算公式为:

$$[0063] \quad F_{\text{适应度}} = \frac{1}{|f(T)|} \quad (20)$$

[0064] 对于塑性模型, 适应度计算公式为:

$$[0065] \quad F_{\text{适应度}} = \frac{1}{|f(T, \Delta)|} + \frac{1}{|g(\Delta)|} \quad (21)$$

[0066] (c) 对于子代种群的每一个体, 计算方程的剩余未知数, 得到一组方程的解, 然后计算子代种群各个体的适应度, 记录适应度最大的个体;

[0067] (d) 若 (c) 中最大适应度小于设定的阈值, 则以子代为父代, 重复 (a) ~ (c), 直至最

大适应度大于设定的阈值,记录此适应度对应的个体,将该个体转换为十进制后即为 Δ (弹性模型没有此未知数)和T的最优解,利用该最优解计算方程剩余未知数,得到最终方程的解,算法终止。

[0068] 通过遗传算法求得方程组的未知数后,将各未知数的值代入管道的挠度通解表达式,根据挠度与横截面的最大轴向应变的关系:

$$[0069] \quad \begin{cases} M = EI\omega'' \\ \sigma_{x,\max} = \frac{T}{A} + \frac{MD}{2I} \\ \varepsilon_{x,\max} = \sigma_{x,\max} / E \end{cases} \quad (22)$$

[0070] 求得管道横截面的轴向最大应变通解表达式。

[0071] 利用力学模型和遗传算法计算各模板工况下管道横截面的轴向最大应变表达式,取管道轴向离散点的轴向最大应变,形成模板数据库。在模板工况中,以悬空中心为坐标原点,以管道轴向为坐标轴x,将整个管道间隔相同距离,取N个管道横截面(离散点)的轴向最大应变,将其称作离散点应变时间序列。最终求得M个模板工况的离散点应变时间序列Y,具体表示为

$$[0072] \quad Y = [Y_1 \ Y_2 \ \cdots \ Y_M] \quad (23)$$

$$[0073] \quad Y_i = \begin{bmatrix} y_{11}^i & y_{12}^i & \cdots & y_{1N}^i \\ y_{21}^i & y_{22}^i & \cdots & y_{2N}^i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{p1}^i & y_{p2}^i & \cdots & y_{pN}^i \end{bmatrix} \quad (24)$$

[0074] 其中, Y_i 为第i个模板工况的离散点应变时间序列, y_{jk}^i 为第i个模板工况,在第j悬空宽度增量步的第k个离散点的轴向最大应变,P为悬空宽度变化总次数,N为离散点的个数。

[0075] 进一步的,所述步骤(3)中的实际工况中管道各监测截面的轴向最大应变,形成监测应变时间序列X,具体表示为:

$$[0076] \quad X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{p1} & x_{p2} & \cdots & x_{pn} \end{bmatrix} \quad (25)$$

[0077] 其中,p为监测的总时刻数,n为监测截面的个数, x_{ij} 为管道第i时刻的第j个监测截面的轴向最大应变。

[0078] 进一步的,所述步骤(4)中利用多维动态时间规整算法,计算模板数据库和监测应变时间序列的相似度,包括步骤:

[0079] 设定移动时窗从每个模板工况离散点应变时间序列 Y_i 里以不断移动的方式取出序列片段,移动时窗表示为二维矩阵:

$$[0080] \quad W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{t1} & w_{t2} & \cdots & w_{tn} \end{bmatrix} \quad (26)$$

[0081] W 为 $t \times n$ 的矩阵,其中, t 为移动时窗所含悬空宽度变化次数,即时窗长度,其变化范围为 $[t_1, t_2]$; n 为移动时窗包含的离散点的个数,与监测截面的个数也即 X 的列数相等; w_{ij} 为从模板工况里所取的管道离散点的轴向最大应变;

[0082] 设模板工况悬空中心在坐标轴 x' 的坐标为 d , d 的变化范围为 $[d_{\min}, d_{\max}]$ 。在 d 的取值不断变化时,根据坐标转换公式:

$$[0083] \quad x = x' - d \quad (27)$$

[0084] 计算各监测截面在模板工况坐标轴 x 中的坐标,将这些坐标与离散点的 x 坐标进行比较,获得与这些坐标最近的离散点;

[0085] 开始时,首先计算 d_{\min} 对应的离散点,将移动时窗放在模板工况 Y_i 的这些离散点所在列的最左列位置,然后将移动时窗向下移动,每次移动一行,移动到最下方后,再将移动时窗放置到最上方,并向右移动一列,然后再按每次一行向下移动,移动到最下方,不断进行此过程,直至移动到 d_{\max} 对应的离散点所在列的最右列位置,再按每次一行移动到最下方;

[0086] 移动时窗每到达一个位置,即得到一个二维矩阵 W ,下面对移动时窗当前位置的 W 与 X 进行动态时间规整,定义距离 d_{ij} 为欧拉距离,计算方式如下:

$$[0087] \quad d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (w_{ik} - x_{jk})^2} \quad (28)$$

[0088] 遍历 W 和 X 里的各元素,即可得到距离矩阵:

$$[0089] \quad d = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1p} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{t1} & d_{t2} & \cdots & d_{tp} \end{bmatrix} \quad (29)$$

[0090] 对于矩阵 d ,以 d_{11} 为起点,有多条路径可以到达终点 d_{tp} ,每条路径表示 W 和 X 的一个映射关系,每条路径上各元素之和即为该路径计算的 W 和 X 之间的距离,距离最小的路径为动态规整路径,该最小距离为动态规整距离;

[0091] 定义累计距离矩阵:

$$[0092] \quad D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & \cdots & D_{1p} \\ D_{21} & D_{22} & \cdots & D_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{t1} & D_{t2} & \cdots & D_{tp} \end{bmatrix} \quad (30)$$

[0093] 其中 D_{ij} 为 d_{11} 为到 d_{ij} 的最小累计距离,计算公式为:

$$[0094] \quad \begin{cases} D_{11} = d_{11}, & D_{1j} = d_{1j} + D_{1,j-1}, & D_{i1} = d_{i1} + D_{i-1,1} \\ D_{ij} = d_{ij} + \min(D_{i-1,j}, & D_{i,j-1}, & D_{i-1,j-1}) \\ D_{\min} = D_p \end{cases} \quad (31)$$

[0095] 到此可知,当前W和X的最小累计距离为 D_{tp} ,该值越小,则W和X的相似性越大,故定义相似度为 D_{tp} 的倒数,以C表示;

[0096] 随着移动时窗在 Y_i 中移动,可得相似度矩阵 C_i^t :

$$[0097] \quad C_i^t = \begin{bmatrix} C_{11}^t & C_{12}^t & \cdots & C_{1,N-n+1}^t \\ C_{21}^t & C_{22}^t & \cdots & C_{2,N-n+1}^t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{P-t+1,1}^t & C_{P-t+1,2}^t & \cdots & C_{P-t+1,N-n+1}^t \end{bmatrix} \quad (32)$$

[0098] 当t在 $[t_1, t_2]$ 变化时,即可得相似度矩阵:

$$[0099] \quad C_i = [C_i^{t_1} \quad C_i^{t_1+1} \quad \cdots \quad C_i^{t_2}] \quad (33)$$

[0100] 对第i个模板工况的相似度矩阵,比较矩阵中各相似度的大小,求得该模板工况对应的最大相似度,以及相应的悬空中心位置d,悬空宽度L演变范围;

[0101] 对M个模板工况 S_1, S_2, \dots, S_M ,进行上述相似度计算步骤,得每个工况的最大相似度,以及相应的悬空中心位置d,悬空宽度L演变范围;

[0102] 比较每个模板工况的最大相似度,得到所有模板工况下的模板数据库里与监测应变时间序列X最相似的序列片段,则该序列片段对应的工况参数即为辨识出的与实际工况最接近的工况参数。

[0103] 本发明的有益效果为:

[0104] 本发明采用遗传算法求解埋地悬空管道的力学模型,并生成模板数据库,采用多维动态时间规整算法,充分利用实际工况的时空监测信息,准确辨识实际工况参数,避免现场测试耗费大量的人力物力。

附图说明

[0105] 图1是本发明埋地悬空管道的模型概化图。

[0106] 图2是本发明管土作用本构关系示意图。

[0107] 图3是本发明力学模型选择流程图。

[0108] 图4是本发明遗传算法流程图。

[0109] 图5是本发明多维动态时间规整算法示意图。

[0110] 图6是本发明工况参数辨识模型图。

[0111] 图7是本发明相似度计算方式(时窗长度90)示意图。

具体实施方式

[0112] 为了说明本发明的有效性和具体的实施方式,下文以一个实施例进行详细阐述。必须指明,以下仅为本发明的一个实施例,不能理解为对本发明保护范围的限制,所属领域的技术人员所做出的所有与本发明相关的等同替代、明显变形形式等非本质性的改进和调

整,均落在本说明书的实质范围之内,理应受到本发明的保护。

[0113] 对于埋地悬空管道工程而言,需要识别的实际工况参数包括悬空中心位置 d' ,管道监测应变时间序列对应的悬空宽度 L 的演变范围,地基土体抗力系数 k 。具体识别流程如下:

[0114] (1) 估计实际工况参数的取值范围,在该取值范围内对参数进行离散,形成多个模板工况。本例对地基土体抗力系数 k 取9个离散值,形成9种模板工况。为了对辨识结果进行对比验证,同时也设定了实际工况参数。各工况参数如表1所示。

[0115] (2) 利用力学模型(包括弹性模型和塑性模型)和遗传算法计算各模板工况下管道横截面的轴向最大应变,形成模板数据库。对于每个模板工况,按0.2m增量步增加悬空宽度,直至管道发生破坏,计算每一步的管道横截面的轴向最大应变;在整个管道轴向均匀设置离散点,各模板工况离散点处横截面的轴向最大应变组成模板数据库。

[0116] (3) 获得监测应变时间序列。本实施例为说明辨识方法有效性,把力学模型(包括弹性模型和塑性模型)和遗传算法计算的实际工况下管道横截面的轴向最大应变作为监测应变时间序列。在实际工况中,同样按0.2m增量步增加悬空宽度,直至管道发生破坏;在管道上设置监测点,取100个增量步下所有监测点的应变组成监测应变时间序列。

[0117] (4) 计算相似度,辨识实际工况参数。采用多维动态时间规整算法,计算模板数据库与监测应变时间序列的相似度,相似度最大的模板工况参数即为辨识出的实际工况参数。

[0118] 力学模型(包括弹性模型和塑性模型)用来获得悬空管道横截面的轴向最大应变通解和相应的定解条件,遗传算法用来求解通解里的未知量,最终得到埋地悬空管道横截面的轴向最大应变的特解。按0.2m增量步增大悬空宽度过程中,埋地悬空管道的力学模型将从弹性模型转变为塑性模型。弹性模型表示整个管道的管土之间均处于弹性相互作用;塑性模型表示其中一段管道和地基土之间处于弹性相互作用,另一段管道和地基土之间处于塑性相互作用;管土相互作用采用理想弹塑性本构关系,通过比较悬空边界处的管道挠度 ω_0 与管土相互作用弹塑性临界位移 ω_c 的大小来确定模型类别,若 $\omega_0 \leq \omega_c$,则是弹性模型,若 $\omega_0 > \omega_c$,则是塑性模型。根据管道挠曲微分方程可以求得两种力学模型下管道各段的挠度通解表达式,结合管道的边连条件、临界条件和伸长量条件,可以得到相应的待求方程组,再利用遗传算法求解方程组,可以求得每一个悬空宽度下的管道的应变响应,即可得到最终的模板数据库和监测应变时间序列。

[0119] 图1为埋地悬空管道的模型概化图。

[0120] 图2是力学模型里用到的管土作用本构关系。

[0121] 图3是力学模型选择流程图,用来判断管道的力学模型和计算管道的应变。

[0122] 图4是遗传算法流程图,用来求解力学模型的方程组,具体算法流程见本发明的发明内容。

[0123] 图5是多维动态时间规整算法示意图,用来计算模板数据库和监测应变时间序列的相似度,具体计算方法见本发明的发明内容。

[0124] 埋地管道采用X70管材,弹性模量 $E=210\text{GPa}$,外径 $D=1.016\text{m}$,壁厚 $t=0.0175\text{m}$,截面惯性矩 $I=6.84 \times 10^{-3}\text{m}^4$;管道埋深 $h=1.5\text{m}$,管道轴向自重 4.282kN/m ,管道右半部分长度为 100m ,上覆土体对管道的垂直作用力为 48kN/m ;管土作用本构弹塑性临界位移 $\omega_c =$

0.0377m。

[0125] 工况设计如表1所示,R为设定的实际工况, $S_1 \sim S_9$ 为模板工况,模板数据库和监测应变时间序列均通过力学模型和遗传算法计算得到。取实际工况的100个增量步,即悬空宽度从21.0m均匀增加至40.8m,地基土体抗力系数为 $3.2 \times 10^7 \text{N/m}^2$ 。

[0126] 表1

工况	悬空宽度的演变范围 L/m	地基土体抗力系数 $k/(10^7 \text{N/m}^2)$
R	21.0 ~ 40.8	3.2
S_1	1.0 ~ 41.4	1.0
S_2	1.0 ~ 41.4	1.5
S_3	1.0 ~ 41.2	2.0
S_4	1.0 ~ 41.2	2.5
S_5	1.0 ~ 41.2	3.0
S_6	1.0 ~ 41.2	3.5
S_7	1.0 ~ 41.2	4.0
S_8	1.0 ~ 42.4	4.5
S_9	1.0 ~ 44.4	5.0

[0127] 图6为工况参数辨识模型。实际工况中,在管道轴向设置11个监测点,建立以监测点分布中心为坐标原点的坐标系 $x'o'y'$,各监测点 x' 方向坐标为-20m,-16m,-12m,-8m,-4m,0m,4m,8m,12m,16m,20m,悬空中心 x' 方向坐标为 $d'=3.58\text{m}$ 。模板工况中,建立以悬空中心为坐标原点的坐标系 xoy ,在整个管道轴向均匀设置离散点,离散点间距为0.1m,离散点总数为1001个。悬空中心 o 在 $x'o'y'$ 坐标系下的坐标为 $d, d_{\min} = -10\text{m}, d_{\max} = 10\text{m}$ 。 xoy 与 $x'o'y'$ 水平方向的坐标转换:

[0129] $x = x' - d$

[0130] d 以0.1m增量从 d_{\min} 增大到 d_{\max} 过程中,根据坐标转换公式求得,取每个 d 时,与实际工况里11个监测点对应的模板工况里11个离散点 x 方向的坐标,并从模板数据库里取出这些离散点处的应变时间序列,采用多维动态时间规整算法计算该应变时间序列与监测应变时间序列之间的相似度。

[0131] 实际工况有100个增量步,每个增量步有11个监测点的应变,监测应变时间序列是 100×11 的二维矩阵 X ;每个模板工况有 n_i 个增量步,每个增量步有1001个离散点的应变,则每个模板工况的离散点应变时间序列是 $n_i \times 1001$ 的二维矩阵 Y_i ;对于某个 d ,从 Y_i 取出与11个监测点对应的11个离散点的应变时间序列,这11个离散点的应变时间序列是 $n_i \times 11$ 的二维矩阵。

[0132] 定义移动时窗用来在 d 取不同的值时,从离散点应变时间序列 Y_i 里以不断移动的

方式取出序列片段W。由于实际工况有100个增量步,故设定移动时窗的长度变化范围为 $[t_1, t_2] = [90, 110]$,移动时窗宽度为11,以二维矩阵W表示。图7为具体的相似度计算方式示意图,移动时窗长度为90,故W是 90×11 的二维矩阵,每次向前移动一步后,都将移动时窗里的序列片段W与监测点应变时间序列X进行多维动态时间规整,计算两者的相似度。

[0133] 在整个相似度计算过程中,以模板数据库为遍历范围,以移动时窗内序列片段W与监测点应变时间序列X之间的多维动态时间规整为计算单位,进行实际工况参数辨识。

[0134] 本例辨识结果如表2所示

[0135] 表2

工况	最大相似度	最佳窗口长度	悬空中心 $d/(m)$	悬空宽度演变范围 L/m	地基土体抗力系数 $k/(10^7 N/m^2)$
R	—	50	3.58	21.0 ~ 40.8	3.2
S ₁	6.8	91	3.5	19.2 ~ 37.2	1.0
S ₂	10.5	96	3.5	19.8 ~ 38.8	1.5
S ₃	19.8	98	3.5	20.4 ~ 39.8	2.0
S ₄	52.9	100	3.5	20.6 ~ 40.4	2.5
S ₅	224.7	100	3.6	21.0 ~ 40.8	3.0
S ₆	175.9	100	3.5	21.2 ~ 41.0	3.5
S ₇	53.6	100	3.6	21.4 ~ 41.2	4.0
S ₈	21.7	105	3.6	21.6 ~ 42.4	4.5
S ₉	12.7	110	3.6	22.6 ~ 44.4	5.0

[0136] 模板工况S₅与监测应变时间序列的相似度最大,为224.7,则本例的工况参数最终辨识结果为悬空中心位置为3.6m,管道监测应变时间序列对应的悬空宽度演变范围为21.0m~40.8m,地基土体抗力系数 $3.0 \times 10^7 N/m^2$ 。从辨识结果可知,相比其他工况,模板工况S₅辨识结果与设定的实际工况的参数最接近,表明本发明的有效性,从而可以将本发明应用到实际工程案例中。

[0137] 以上所述并非是对本发明的限制,应当指出:对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明实质范围的前提下,还可以做出若干变化、改型、添加或替换,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

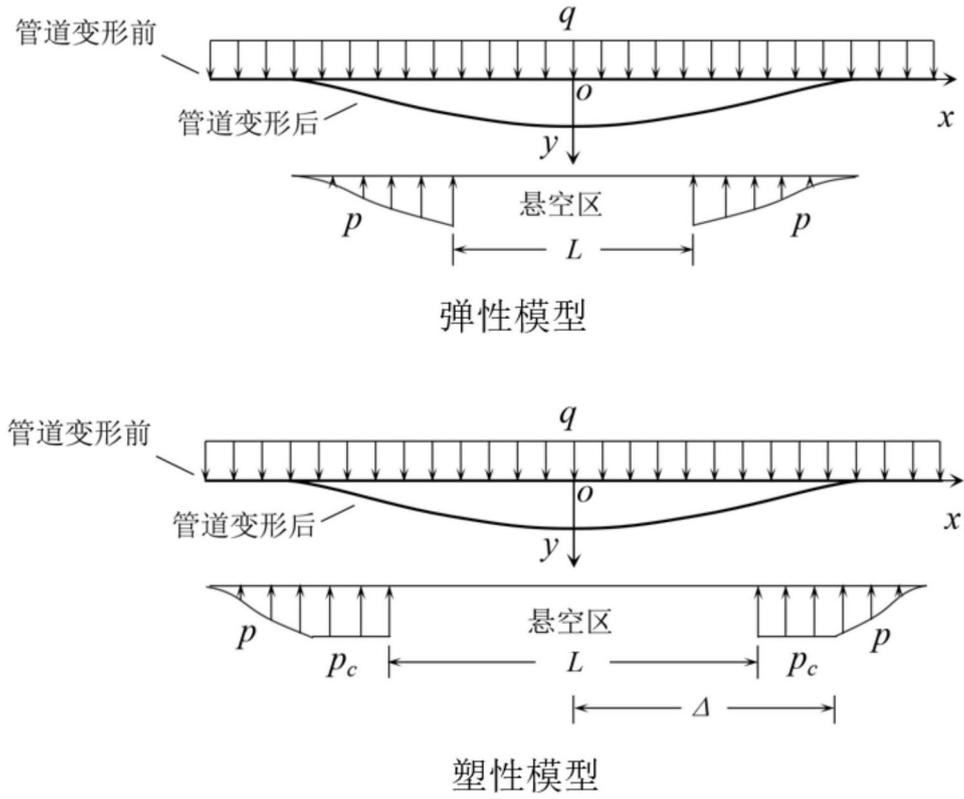


图1

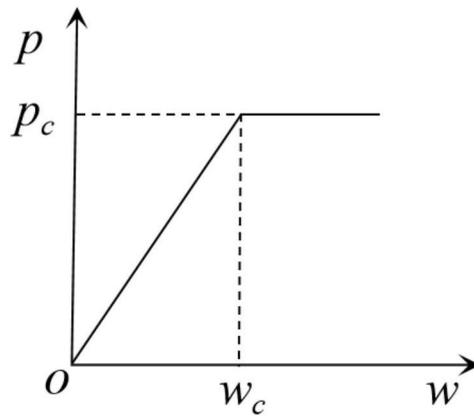


图2

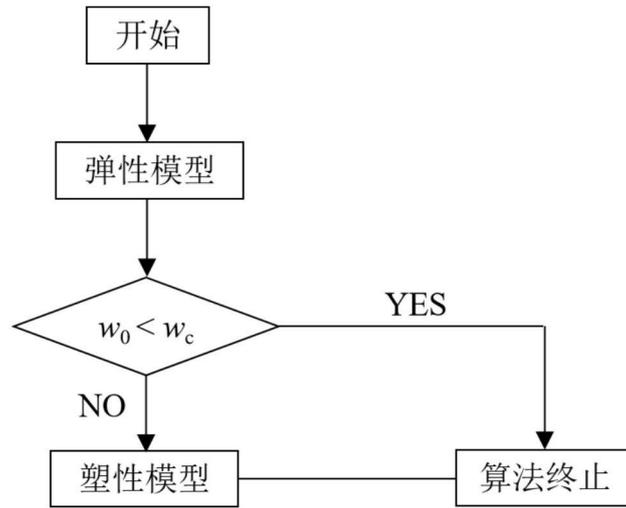


图3

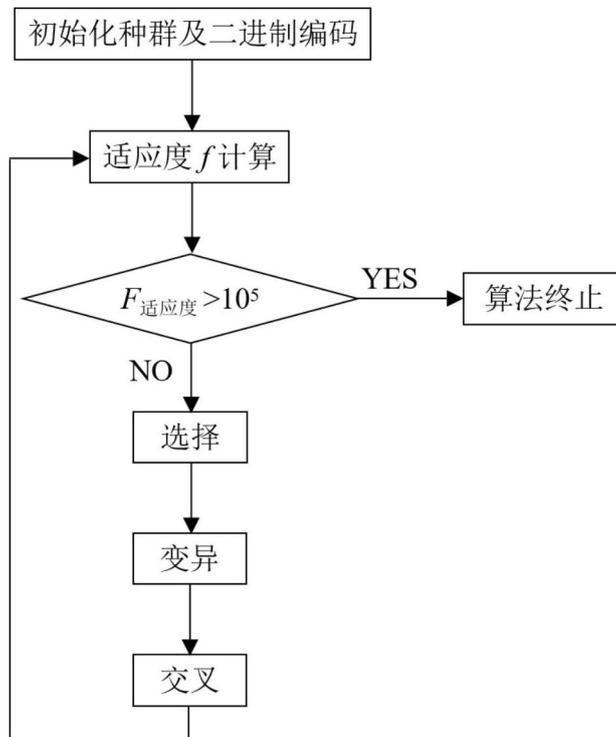


图4

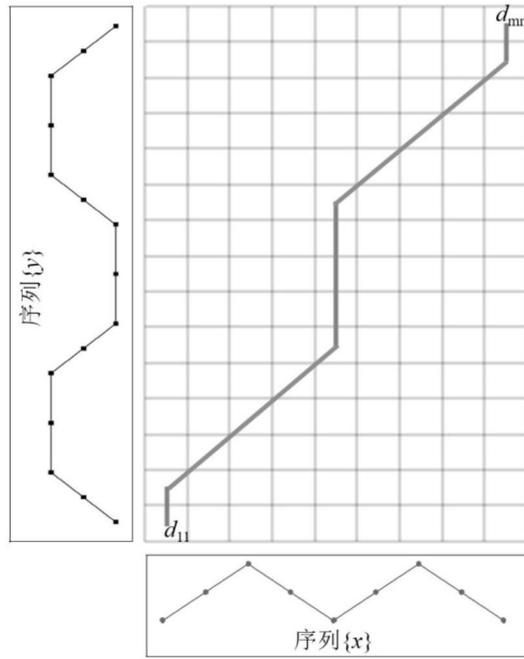


图5

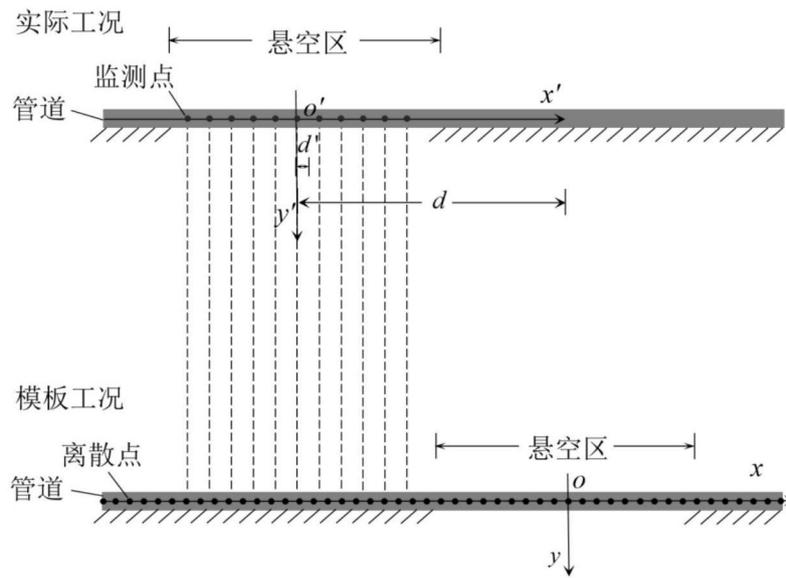


图6

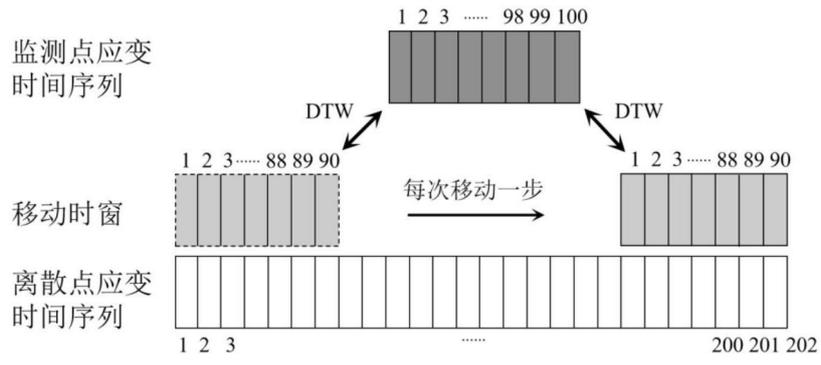


图7