

含间隙曲柄滑块系统动力响应的随机性分析

赵宽, 陈建军, 曹鸿钧, 云永琥

(西安电子科技大学 电子装备结构设计教育部重点实验室, 西安 710071)

摘要: 以含间隙的曲柄滑块系统为研究对象, 分析其在考虑铰间摩擦力及系统参数具有随机性时的动力响应问题。基于 Lagrange 方程建立了系统的动力学模型, 利用 BP 神经网络法给出了系统随机参数与动力响应之间的近似函数关系式。在此基础上, 利用矩法求解系统动力响应的数字特征, 获得统计意义下的解。通过算例, 考察了系统物理参数和几何参数的随机性对系统动力响应的影响, 并验证了所建模型和方法的合理性和可行性。研究结果表明, 系统参数的随机性不可忽略, 在参数变异系数相同的情况下, 间隙的随机性对系统动力响应的影响较大。

关键词: 铰间隙; 曲柄滑块系统; 神经网络; 动力响应

中图分类号: O313.7

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.11.023

Randomness analysis of dynamic responses of a slider-crank system with clearances

ZHAO Kuan, CHEN Jian-jun, CAO Hong-jun, YUN Yong-hu

(MOE Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Xi'an Univ. of Electronic Technology, Xi'an 710071, China)

Abstract: The dynamic responses of a slider-crank system with clearances considering friction forces and randomness of system parameters were analyzed. The system's dynamic model was set up based on Lagrange's equation, and the approximate function relationship between the system random parameters and its dynamic responses was derived by using the BP neural network. The numerical characteristics of the system dynamic responses were solved with the moment method, and the statistical results were obtained. The effects of the randomness of the system's physical parameters and geometric parameters on the system dynamic response were examined. In addition, the model and the method proposed here were verified with an example. The results illustrated that the randomness of the system parameters can't be ignored, and the randomness of the clearance has a greater effect on the dynamic responses of the system under the same coefficient variation of parameters.

Key words: joint clearance; slider-crank system; neural network; dynamic response

在机构多体系统中, 由于装配误差、摩擦磨损以及机构运动的需要, 运动副间隙是不可避免的, 这将导致机构的实际运动与理想运动之间出现偏差, 且在运动过程中运动副会因间隙的存在出现瞬间失去接触, 待再接触时将产生碰撞, 从而引起振动、产生噪音、加速磨损, 甚至会严重影响系统的动态性能, 降低系统的运动精度、稳定性、可靠性以及使用寿命^[1]。另一方面, 由于制造、装配、摩擦、冲击、温变等因素, 将使包含间隙在内的机构系统的几何参数和物理参数都具有一定的随机性, 综合考虑这些随机因素下的系统响应, 将使分析结果更接近工程实际, 同时也为含间隙系统的可靠性分析及优化设计奠定了基础。

目前, 国内外对关节间隙所带来的动力学现象以及优化、控制等方面开展了许多研究工作。文献[2]分别对含间隙铰和润滑铰的机构系统进行了动力学研究, 数值仿真表明接触碰撞力对含间隙铰系统的动力学特性有较大的影响, 而润滑铰和理想铰的性能十分接近。文献[3]分别对含间隙和润滑球铰的空间柔性多体系统进行动力学分析。文献[4]利用遗传算法对含间隙铰的曲柄滑块机构的传动角进行优化。文献[5]基于 Pyragas 方法对含间隙铰的曲柄滑块机构进行稳定性分析。但在以上文献的模型中是将所有参数和作用载荷均视为确定性量或参数, 而实际上在随机因素的作用下这些参数的取值可能呈现出某种程度的随机性。对含有间隙的精密机械系统, 参数的随机性对系统动力特性的影响是不容忽视的。文献[6-7]对无间隙的不确定参数弹性连杆机构的动力响应进行了分析。然而, 对于含有间隙和摩擦的随机参数多体系统

的动力学分析研究却鲜有报道。

本文基于以上研究成果,建立了含间隙和摩擦的曲柄滑块系统的动力学模型,同时综合考虑系统物理参数和几何参数的随机性,利用 BP 人工神经网络的函数逼近能力,建立起系统基本随机变量和系统动力响应间的映射关系,利用矩法获得了各响应量的均值和均方差随时间的变化规律,考察了系统各随机参数对系统动力响应的影响,并通过 Monte - Carlo (MC) 模拟法对计算结果进行验证,得出了一些有意义的结论。

1 曲柄滑块系统运动的随机性分析

图 1 为曲柄滑块系统理想模型的示意图,曲柄 AB 和连杆 BC 的长度分别为 L_1 和 L_2 ,曲柄以角速度 ω 绕支点 A 匀速转动,则滑块的位移 x_c 可表为:

$$x_c = L_1 \cos(\omega t) + \sqrt{L_2^2 - [L_1 \sin(\omega t)]^2} \quad (1)$$

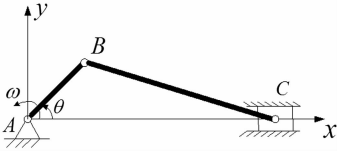


图 1 曲柄滑块系统

Fig. 1 Slider-crank system

设几何参数 L_1 和 L_2 为相互独立且服从正态分布的随机变量,对上式利用矩法^[8]可求得滑块 C 在任意时刻位移 x_c 的均值 μ_c 和均方差 σ_c 分别为:

$$\mu_c = \mu_{L_1} \cos(\omega t) + \mu_{L_2} \sqrt{\mu_{L_2}^2 - [\mu_{L_1} \sin(\omega t)]^2} \quad (2)$$

$$\sigma_c^2 = \left\{ \cos(\omega t) + \frac{\mu_{L_1} \sin^2(\omega t)}{\sqrt{\mu_{L_2}^2 - [\mu_{L_1} \sin(\omega t)]^2}} \right\} \sigma_{L_1}^2 + \left\{ \frac{\mu_{L_2}}{\mu_{L_2}^2 - [\mu_{L_1} \sin(\omega t)]^2} \right\} \sigma_{L_2}^2 \quad (3)$$

式中, μ_{L_1} 和 μ_{L_2} 分别为 L_1 和 L_2 的均值, σ_{L_1} 和 σ_{L_2} 分别为 L_1 和 L_2 的均方差。

将式(1)对时间求导,同理可求出滑块 C 的速度和加速度的均值和均方差。

2 含间隙曲柄滑块系统的动力学建模

2.1 间隙旋转铰模型

由于旋转铰间隙的存在,使得系统成为变拓扑结构系统,一种是不含约束的自由运动;另一种是具有单边约束的运动。目前处理铰间隙问题主要有三种模型,一是无质量刚性杆模型,该模型无法考虑接触时的冲击效应,难以描述运动副间的动力特性以及碰撞对系统动力学的影响;二是等效弹簧阻尼模型,该模型难以描述碰撞过程中能量转移的物理本质。为此,本文采用了第三种模型,将间隙铰视为两个弹性碰撞体,即

图 2 所示的旋转铰模型,设轴承和轴颈的半径分别为 r_B 和 r_J ,中心距为 r ,则间隙大小为:

$$r_c = r_B - r_J \quad (4)$$

轴承和轴颈接触点的法向穿透深度为:

$$\delta_{BJ} = r - r_c \quad (5)$$

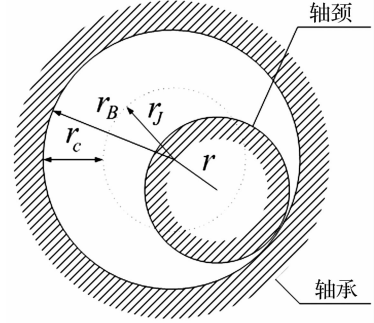


图 2 间隙旋转铰

Fig. 2 Revolute clearance joint

目前,对于描述铰间隙处碰撞接触过程中力与位移之间的关系,最常用的有 Hertz 接触力模型和 Lankarani 与 Nikravesh 提出的连续接触力模型,前者是一种纯弹性碰撞模型,不考虑碰撞过程中的能量损失,主要用于早期的碰撞问题;后者不仅考虑碰撞接触速度、构件的材料属性以及碰撞体的几何特性等因素,而且有利于系统动力学方程的稳定求解,因此得到了广泛的应用。故本文采用了后者,则轴承和轴颈法向接触力 F_n 可表为^[9]:

$$F_n = \begin{cases} K \delta_B^n \left(1 + 0.75(1 - c_e^2) \frac{\dot{\delta}_{BJ}}{\dot{\delta}_{BJ}^{(-)}} \right) & \delta_{BJ} \geq 0 \\ 0 & \delta_{BJ} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, c_e 为碰撞过程中的能量恢复系数; δ_{BJ} 为接触点的法向接触速度; $\dot{\delta}_{BJ}^{(-)}$ 为接触点的初始相对速度;根据 Hertz 理论,对于金属材料指数 n 取 1.5; K 为等效接触刚度,它与两接触体几何和物理特性之间的关系,已由 Goldsmith 通过两球体进行碰撞试验测得^[10]:

$$K = \frac{4}{3\pi(\sigma_B + \sigma_J)} \left[\frac{r_B r_J}{r_B + r_J} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

其中,材料参数 $\sigma_i = (1 - \nu_i^2)/E_i$, ($i = B, J$); ν_i 和 E_i 分别为材料的泊松比和弹性模量。

当两间隙物体接触后,由于切向摩擦力的作用会发生相对滑动或粘滞,进一步影响到整个间隙系统的运动和动力响应,因此有必要考虑摩擦力对系统动力响应的影响。对铰间隙碰撞接触处采用了 Ambrosio 提出的 Coulomb 摩擦模型,切向摩擦力的表达式为^[11]:

$$F_t = -c_d c_f F_n \frac{v_T}{|v_T|} \quad (8)$$

式中, c_d 为动态修正系数; c_f 为动摩擦因数; v_T 为相对

切向速度。

2.2 系统动力学模型

定义系统的广义坐标为 $q = [q_1^T \ q_2^T \ q_3^T \ q_4^T]^T$, 其中 $q_i = [R_i^T \ \theta_i]^T (i=1,2,3,4)$ 分别为固定支点、曲柄、连杆、滑块的重心在笛卡尔坐标系的广义坐标, $R_i = [R_{ix} \ R_{iy}]^T$ 为位置坐标向量, θ_i 为姿态角。由以上分析可得到接触碰撞约束方程, 将其替换 Lagrange 方程中的相应项, 利用 Lagrange 乘子法可建立系统的动力学方程为^[12]:

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, M 、 Φ_q 、 λ 分别为系统的广义质量阵、约束方程的雅克比阵、拉格朗日乘子; F 为系统的广义力阵, 其表达式为 $F = Q_F + Q_v + Q_c$, 其中, Q_F 为系统外部力和力矩在广义坐标 q 下的广义力阵、 Q_v 为与速度二次项相关的矩阵、 Q_c 为轴承和轴颈接触时产生的接触碰撞力及摩擦力在广义坐标 q 下的广义力阵; $\gamma = -(\Phi_q \dot{q})_q \dot{q} - \Phi_u - 2\Phi_{q_i} \dot{q}_i$ 。

该方程综合了旋转间隙铰脱离接触自由运动和接触碰撞两个阶段的运动模式, 有利于实现系统整个运动过程的动力学仿真。

3 含间隙曲柄滑块系统动力响应的随机性分析

方程(9)为确定性系统的分析模型。现考虑系统具有随机性的情况, 假设含间隙曲柄滑块系统中共有 m_0 个相互独立的服从正态分布的随机参数, 将这些随机参数代入式(9)中, 则系统模型成为含随机参数的不确定性模型。由于含间隙的曲柄滑块是一个变结构、含碰撞、非定常、且非线性很强的系统, 利用传统的算法难以对其进行随机性分析, 而神经网络法较多项式响应面法具有更高的稳定性和更好的精度^[13], 因此, 本文利用该方法获得系统随机参数和动力响应的近似函数关系式以及系统动力响应对各随机参数的灵敏度, 然后应用矩法对系统的动力响应进行随机性分析。

3.1 BP 神经网络法

神经网络是一种具有较强的非线性映射能力以及自学习、自组织、自适应等优点的智能方法, 它可以根据给定的样本, 经过不断的学习和训练构造出从多维空间到另一多维空间的映射关系, 在理论上, 它可以逼近任何一个连续的非线性函数^[13]。在诸多类型的神经网络中, 误差逆传播算法的多层前向型网络即 BP 神经网络的应用最为广泛。为不失一般性, 本文采用图 3 所示的包含两个隐含层的 BP 网络, 其中 $x_i (i=1, 2, \dots, m_0)$ 为网络输入层的 m_0 个节点, 在系统动力响应的

随机性分析中, 与 m_0 个系统随机参数相对应, $w_{ij}^1, \theta_j (j=1, 2, \dots, m_0)$ 分别为输入层的第 i 个节点到第一隐层的第 j 个节点连接权值及阈值, $m_i (i=0, 1, 2, 3)$ 表示每一层中节点的个数。其他相邻层中符号的含义可以此类推; $y_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为网络输出节点的个数, 在系统动力响应的随机性分析中与系统响应量的个数相对应。

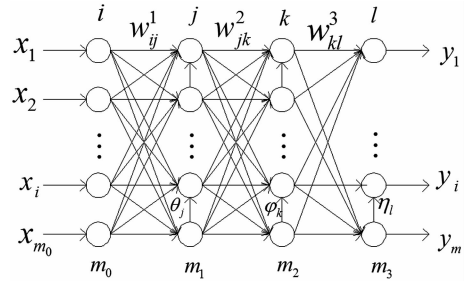


图3 含两个隐含层的BP网络结构模型

Fig. 3 BP network structural model with two hidden layers

相邻两层之间的节点是通过两者之间的权值和阈值来传递的, 通常网络的隐层节点选用可微的 Sigmoid 函数 $f(x) = 1/(1 + e^{-x})$ 作为传递函数, 输出层采用线性函数作为其传递函数, 假设同处一层的所有节点采用相同的传递函数, 则第一和第二隐层节点的输出 y_j^1 和 y_k^2 以及输出节点输出 y_i 表达式分别为:

$$y_j^1 = f_1 \left(\sum_{i=1}^{m_0} w_{ij}^1 x_i + \theta_j \right) \quad (10)$$

$$y_k^2 = f_2 \left(\sum_{j=1}^{m_1} w_{jk}^2 y_j^1 + \phi_k \right) \quad (11)$$

$$y_i = \sum_{k=1}^{m_2} w_{ki}^3 y_k^2 + \eta_l \quad (12)$$

式中 $f_i(\cdot) (i=1, 2)$ 为传递函数。

一般来说, 阈值并不是一个常数, 而是随着神经元的兴奋程度而变化的。为了简化公式, 在式(10)中可假设实际输入变量为 $x_1, x_2, \dots, x_{m_0-1}$, 再假设 $x_{m_0} = 1$, $w_{nj}^1 = \theta_j$, 这样, 阈值也可作为连接权来考虑, 则式(10)可简化为: $y_j^1 = f_1 \left(\sum_{i=1}^{m_0} w_{ij}^1 x_i \right)$ 。同理, 式(11)和式(12)也可作相应的简化。

3.2 系统动力响应的随机性分析

对于含间隙的曲柄滑块系统, 输入向量可以表示为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_{m_0}]^T$, 则第一隐层的接受向量为 $Z_1 = W_1^T X$, 其中, W_1^T 输入层到第一隐层的权值矩阵。由式(10)的简化式可知, 第一隐层的输出向量为 $Y_1 = [y_1^1, y_2^1, \dots, y_{m_1}^1]^T = [f_1(Z_1^1), f_1(Z_2^1), \dots, f_1(Z_{m_1}^1)]^T$ 。同理, 第二隐层和输出层的接受向量和输出向量为 $Z_i = W_i^T Y_{i-1}, Y_i = [y_1^i, y_2^i, \dots, y_{m_i}^i]^T (i=2, 3)$ 。由于 BP 神经网络经过学习和训练后, 可获得各层间的连接权值和

阈值,再加上已知的传递函数,这样就给出系统随机参数与响应的近似函数表达式。参照图 3,利用 BP 神经网络得出系统动力响应的表达式为:

$$Y(X) = f_3 \{ W_3^T f_2 [W_2^T f_1 (W_1^T X)] \} \quad (13)$$

式中 $Y(X) = [y_1(X), y_2(X), \dots, y_{m_3}(X)]$ 。

由于系统动力响应的随机性分析中需要系统动力响应的导数,即系统动力响应对各随机参数的灵敏度,由复合函数的求导法则可得:

$$\frac{\partial y_l}{\partial x_i} = f'_3(Z_l^3) \sum_{k=1}^{m_2} W_{ki}^3 f'_2(Z_k^2) \sum_{j=1}^{m_1} W_{jk}^2 f'_1(Z_j^1) W_{ij}^1 \quad (14)$$

其中 $y_l (l=1, 2, \dots, m_3)$ 表示第 l 个系统动力响应,由矩法可得 y_l 的均值和均方差分别为:

$$\mu_{y_l} = y_l(\mu_X) \quad (15)$$

$$\sigma_{y_l}^2 = \sum_{i=1}^{m_0} \left[\frac{\partial y_{lX}(\mu_X)}{\partial x_i} \right]^2 \sigma_{x_i}^2 \quad (16)$$

综合以上分析过程,给出利用 BP 神经网络对含间隙和摩擦的曲柄滑块系统随机性分析的具体步骤如下:

- (1) 选取广义坐标,建立式(9)所示的系统动力学模型,具体建模和编程过程可参考文献[12]和[14];
- (2) 确定系统随机输入参数的分布类型,随机抽取 50 组输入参数,采用自适应 4 阶龙哥库塔算法求出与输入随机参数 X 相对应的系统动力响应 Y ;
- (3) 以数据 $\{X, Y\}$ 为学习训练样本,利用 Levenberg-Marquardt 法^[7]对图 3 所示的神经网络进行训练,得到系统动力响应的近似表达式,再由式(14)得到系统动力响应对各随机参数的灵敏度;
- (4) 利用式(15)和(16)求出系统动力响应的均值和均方差。

4 数值算例

考虑间隙和摩擦的随机参数曲柄滑块系统如图 4 所示,其中点 A、B 两处为理想铰,点 C 处为间隙铰。曲柄以转速 150 r/min 定轴旋转,滑块的质量为 0.14 kg,取轴承和轴颈碰撞过程中的能量恢复系数 c_e 为 0.95。现考虑系统中曲柄和连杆的两者的弹性模量 E 、长度 $L_i (i=1, 2)$ 、质量 $m_i (i=1, 2)$ 、转动惯量 $I_i (i=1, 2)$,以及轴承和轴颈的半径 r_b 和 r_j 、轴承和轴颈的滑动摩擦系数 c_f 等均为相互独立的正态分布随机参数,它们的均值见表 1。借助 Matlab 神经网络工具箱编程序,选

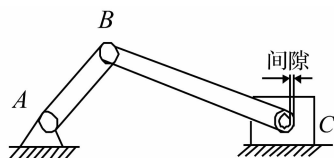


图 4 含间隙的曲柄滑块系统

Fig. 4 Slider-crank system with clearance

取步长为 10^{-6} s,针对无间隙和摩擦的理想模型及含间隙和摩擦的间隙模型两种情况,对一个周期内系统动力响应的随机性进行分析,并将计算结果以时间历程图的方式给出。

表 1 系统构件尺寸及物理参数的均值

Tab. 1 Means of system member sizes and physical parameters

E/GPa	207	$I_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.000 01
L_1/m	0.05	$I_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.000 25
L_2/m	0.12	r_b/m	0.01
m_1/kg	0.30	r_j/m	0.009 5
m_2/kg	0.21	c_f	0.01

图 5、图 6 分别给出了理想模型和考虑间隙的确定性模型其滑块速度响应和加速度响应的时间历程图。图 7、图 9 给出了系统各参数的变异系数均取 0.01 时滑块速度均值和加速度均值在随机参数理想模型和含间隙模型中随时间变化的对比曲线。图 8、图 10 给出了系统各随机参数的变异系数均取 0.01 时滑块速度均方差和加速度均方差在随机参数理想模型和含间隙模型中随时间变化的对比曲线。从这些图中显见:① 在确定性理想模型中,滑块的速度和加速度响应是平滑的,而间隙模型中则有较大的波动,原因是在系统运动过程中,由于铰间间隙和摩擦的存在,使得轴承和轴颈间发生从不接触到接触碰撞、再到不接触连续循环状态,这与文献[5]的计算结果相近,说明计算结果的正确性;② 滑块速度和加速度的均值出现震荡现象,这是由系统参数的随机性使得间隙处接触碰撞的时间发生微小改变而引起的;③ 与不考虑间隙和摩擦的随机理想模型相比,含间隙模型中滑块速度和加速度的均方差偏大,这有可能造成整个系统的功能失效或破坏,因此有必要就各随机参数对系统动力响应的影响进行分析,从中找出关键参数以提高系统运动功能的可靠性。

为了考察各随机参数的分散性对系统动力响应的影响,表 2 列出了在 0.01 s 时刻所有随机参数的变异系数 v_{all} 均取 0 (确定性模型) 和 0.01,以及同种类随机参数的变异系数取 0.01,而其余为 0 时滑块位移、速度和加速度均值和均方差的计算结果,表中第 4 行为 Monte-Carlo (MC) 法模拟 1 000 次的结果。对表中结果分析可见:① 本文方法的结果与 MC 法模拟的结果两者吻合较好,表明该方法的可行性;② 与确定性模型相比,随机模型中参数的随机性对滑块位移和速度的影响不大,但对加速度的影响较大;③ 在诸随机参数中,弹性模量对系统动力响应随机性的影响最小,转动惯量次之,而间隙的影响最大。

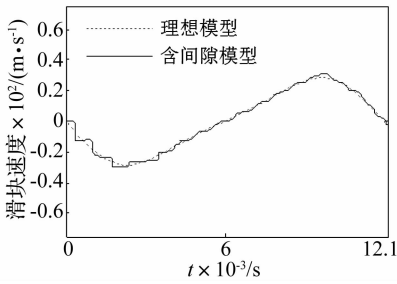


图5 滑块速度的响应时程
Fig. 5 The velocity response of the slider

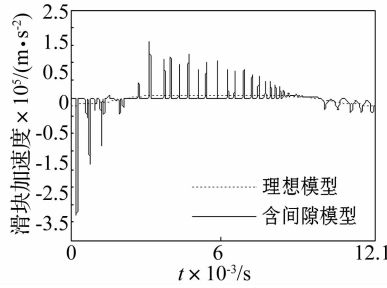


图6 滑块加速度的响应时程
Fig. 6 The acceleration response of the slider

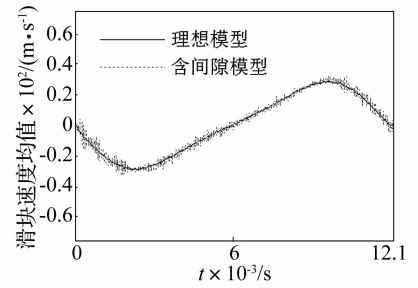


图7 滑块速度均值的时间历程图
Fig. 7 Means of velocity response of the slider

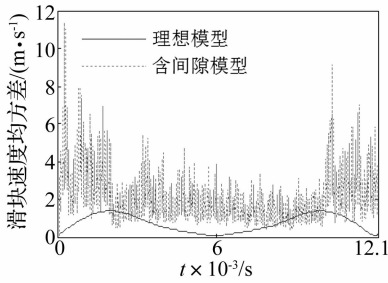


图8 滑块速度均方差的时间历程图
Fig. 8 Mean square deviation of velocity response of the slider

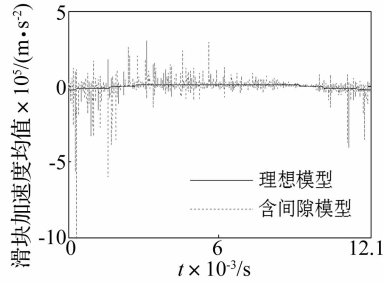


图9 滑块加速度速度均值的时间历程图
Fig. 9 Means of acceleration response of the slider

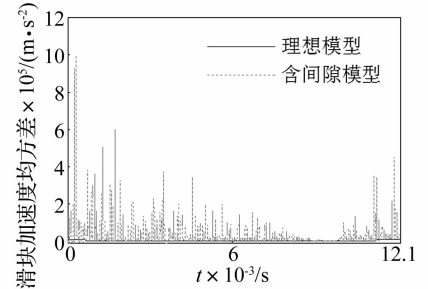


图10 滑块加速度均方差的时间历程图
Fig. 10 Mean square deviation of acceleration response of the slider

表2 不同随机参数对系统动力响应数字特征的影响

Tab. 2 Different random parameters impact on the numerical characteristics of system dynamic response

随机参数的 变异系数	滑块位移/m		滑块速度/(m·s ⁻¹)		滑块加速度/(m·s ⁻²)	
	均值	均方差 × 10 ⁻⁴	均值 × 10	均方差	均值 × 10 ³	均方差 × 10 ⁴
$v_{all} = 0$ 确定性模型	0.137 2	0	2.986 2	0	-2.137 7	0
$v_{all} = 0.01$	0.137 3	13.000	2.892 2	1.148 7	-7.518 8	1.788 4
$v_{MC} = 0.01$	0.137 2	15.000	2.876 8	1.179 3	-7.569 2	1.704 5
$v_{L_1} = v_{L_2} = 0.01$	0.136 9	2.200 0	2.905 3	0.215 6	1.735 8	0.969 3
$v_{m_1} = v_{m_2} = 0.01$	0.137 1	2.074 3	3.048 2	0.788 9	-5.399 4	1.045 7
$v_{I_1} = v_{I_2} = 0.01$	0.137 2	0.376 0	3.008 6	0.321 0	-2.507 3	0.121 3
$v_{f_c} = 0.01$	0.137 1	1.371 2	2.992 0	0.082 8	0.409 7	0.521 9
$v_E = 0.01$	0.137 2	0.169 0	2.986 9	0.023 1	-2.451 3	0.052 8
$v_c = 0.01$	0.136 9	3.999 8	2.945 9	0.661 9	-13.068	3.058 9

5 结论

文中在考虑铰间摩擦以及系统参数具有随机性的情况下,对含间隙的曲柄滑块系统其动力响应问题进行了分析。建立了系统的动力学模型,将BP神经网络法拓展应用于含间隙及摩擦的曲柄滑块系统的随机性分析中,通过算例验证了文中模型和方法的合理性和正确性,并得出以下结论:① 通过与MC法计算结果的对比表明,本文方法可行且具有一定的精度;② 系统参数的随机性将有可能增强系统间隙处的碰撞,使系

统动力响应的分散性增大;③ 系统参数的随机性对含间隙系统动力响应的的影响不容忽视,其中间隙的随机性对系统动力响应分散性的影响最大。故欲提高系统的动力学性能,应首先降低该参数的分散性。

参考文献

[1] Erkaya S, Uzman I. Experimental investigation of joint clearance effects on the dynamics of a slider crank mechanism [J]. Multibody System Dynamics, 2010, 24(1): 81-102.
[2] Flores P, Amrosio J, Claro J C P, et al. A study on dynamics of mechanical systems including joints with clearance and lubrication [J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(3): 247-261.

[3] TIAN Qiang, ZHANG Yun-qing, CHEN Li-ping, et al. Dynamics of spatial flexible multibody systems with clearance and lubricated spherical joints [J]. Computers and Structures, 2009, 87(13 - 14): 913 - 929.

[4] Erkaya S, Uzmay I. Optimization of transmission angle for slider-crank mechanism with joint clearance [J]. Struct Multidisc Optim, 2009, 37(5): 493 - 508.

[5] Olyaei A A, Ghazavi M R. Stabilizing slider-crank mechanism with clearance joints [J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 53: 17 - 29.

[6] 魏永祥, 陈建军, 马洪波, 等. 随机参数弹性连杆在平稳随机激励下的动力可靠性分析 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(2): 36 - 43.
WEI Yong-xiang, CHEN Jian-jun, MA Hong-bo, et al. Dynamic reliability analysis of elastic linkage mechanism with stochastic parameters under stationary random excitation [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(2): 36 - 43.

[7] 拓耀飞, 陈建军, 陈永琴, 等. 基于神经网络的弹性连杆机构动力响应分析 [J]. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(5): 711 - 715.
TUO Yao-fei, CHEN Jian-jun, CHEN Yong-qin, et al. Dynamic analysis of the elastic linkage mechanism based on the artificial neural network [J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(5): 711 - 715.

[8] 陈建军. 机械与结构系统的可靠性 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995.

[9] Lankarani H M, Nikravesh P E. A contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multibody systems [J]. Journal Mechanical Design, 1990, 112(3): 369 - 376.

[10] Dubowsky S, Freudenstein F. Dynamic analysis of mechanical systems with clearances, part 1: formation of dynamic model [J]. Journal of Engineering for Industry, 1971, 93(1): 305 - 309.

[11] Flores P. Dynamic analysis of mechanical systems with imperfect kinematic joint [D]. University of Minho, Guimaraes, Portugal, 2005.

[12] Flores P, Ambrosio J. On the contact detection for contact-impact analysis in multibody systems [J]. Multibody System Dynamics, 2010, 24(1): 103 - 122.

[13] 段巍, 王璋奇. 利用响应面方法的汽轮机叶片振动可靠性分析 [J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(1): 84 - 90.
DUAN Wei, WANG Zhang-qi. Vibration reliability of turbine blade based on response surface method [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(1): 84 - 90.

[14] Nikravesh P E. Computer aided analysis of mechanical systems [M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.

(上接第 118 页)

[5] 聂利英, 李建中, 胡世德, 等. 任意荷载作用下液体粘滞阻尼器在桥梁工程中减震作用探讨 [J]. 计算力学学报, 2007, 24(2): 197 - 202.
NIE Li-ying, LI Jian-zhong, HU Shi-de, et al. Investigation of decreasing vibration effects of fluid viscous damper in bridge engineering under random loads [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2007, 24(2): 197 - 202.

[6] 邹银生, 陈敏, 冯承辉. 粘滞阻尼器消能减震结构的简化设计 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2005, 32(6): 1 - 5.
ZOU Yin-sheng, CHEN Min, FENG Cheng-hui. Simplified design method for energy dissipation systems using viscous dampers [J]. Journal of Hunan University (Natural

Sciences), 2005, 32(6): 1 - 5.

[7] 薛素铎, 王雪生, 曹资. 基于新抗震规范的地震动随机模型参数研究 [J]. 土木工程学报, 2003, 36(5): 5 - 10.
XUE Su-duo, WANG Xue-sheng, CAO Zi. Parameters study on seismic random model based on the new seismic code [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(5): 5 - 10.

[8] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 270 - 277.

[9] 欧进萍, 王光远. 结构随机振动 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998: 295 - 312.

[10] 李桂青, 曹宏, 李秋胜, 等. 结构动力可靠性理论及其应用 [M]. 北京: 地震出版社, 1993: 305 - 315.

(上接第 129 页)

[12] Tan Q H, Han L H, Yu H X. Fire performance of concrete filled steel tubular (CFST) column to RC beam joints [J]. Fire Safety Journal, 2012, 51: 68 - 84.

[13] Han L H, Wang W H, Yu H X. Experimental behaviour of reinforced concrete (RC) beam to concrete-filled steel tubular (CFST) column frames subjected to ISO-834 standard fire [J]. Engineering Structures, 2010, 32 (10): 3130 - 3144.

[14] Han L H, Wang W H, Yu H X. Analytical behaviour of RC beam to CFST column frames subjected to fire [J]. Engineering Structures, 2012, 36: 394 - 410.

[15] 王景玄, 张鹏鹏, 王文达. 考虑火灾全过程的钢管混凝土组合框架力学性能初步研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(1): 84 - 88.

WANG Jing-xuan, ZHANG Peng-peng, WANG Wen-da. Preliminary research on mechanical behavior of composite frame with CFST columns after exposure to overall stage of fire [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(1): 84 - 88.

[16] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[17] 王景玄. 考虑火灾全过程的钢管混凝土组合框架力学性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.

[18] GB50016 - 2006. 建筑设计防火规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.

[19] 李国强, 韩林海, 楼国彪, 等. 钢结构及钢 - 混凝土组合结构抗火设计 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.