

含滞迟缓冲器的螺栓法兰连接结构稳态随机响应*

姜运哲¹ 曾岩^{1†} 赵振军² 李刚¹ 关振群¹ 周锦航¹ 罗超¹

(1. 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连理工大学工程力学系, 国际计算力学研究中心, 大连 116024)

(2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要 基于螺栓法兰连接结构简化动力学模型, 针对上部结构内包含滞迟缓冲机构的情况, 通过蒙特卡洛数值模拟研究了高斯白噪声纵向载荷作用下的结构随机响应特性. 在简化动力学模型中, 通过拉压不同刚度的非线性弹簧表征螺栓法兰连接, 上部缓冲机构用 Yar-Hammond 双线性滞迟系统描述, 以便于航天器对应舱段结构动力学响应的快速计算. 在数值模拟之前对此系统进行了无量纲化, 而后通过数值模拟分析了不同参数条件下的稳态响应概率密度函数, 讨论了结构稳态随机响应的演化规律.

关键词 双线性滞迟, 螺栓法兰连接结构, 稳态随机响应, 高斯白噪声, 蒙特卡洛模拟

DOI: 10.6052/1672-6553-2017-028

引言

螺栓法兰连接结构是由法兰和螺栓组成的可拆连接结构, 具有构造简单和可操作性好等特点, 因此, 在各种工程结构中被广泛应用. 比如, 航天器结构的级间分离面、石油化工设备中密闭管道连接部、风力发电机主轴结构及核反应堆冷却泵转子组件的轴向连接结构等^[1]. 有鉴于这类结构往往需要工作在各类动载荷环境中, 对该类结构的简化动力学建模及动力学响应分析一直是其研究的热点. 例如, 栾宇^[2]等引入轴向拉压不同刚度的螺栓法兰连接结构模型, 将整体结构简化为两自由度质量弹簧系统; 而后, 芦旭、关振群^[3]建立了含剪力销的螺栓法兰连接结构动力学简化模型, 在忽略摩擦等条件下, 分析其在纵向冲击下的动力学特征, 讨论了不同工况、不同剪力销倾角、不同装配间隙下螺栓最大拉力的变化趋势. 由于螺栓法兰连接结构的对界面存在接触和摩擦, 导致其成为结构阻尼、非线性、不确定性、甚至故障的主要来源. 因此, 对螺栓法兰连接结构在随机激励下的稳态响应的研究就显得至关重要.

通常的随机响应分析都是基于高斯白噪声的

随机动力学基础理论建立^[4], 而自上世纪中期, 由于航空、航天、土木、海洋等工程的需要, 随机振动作为一门学科应运而生^[5-8]. 另一方面, 动载荷作用下的许多物理系统都会出现滞迟现象^[9], 比如在结构动力学领域, 滞迟现象可被用来描述非保守系统行为. 在这种系统中, 回复力不仅仅由瞬时变形决定, 也与变形历史有关, 如果运动是往复的, 回复力和变形之间的关系曲线就是一个闭合的环, 环包围的区域代表着能量损耗^[10]. 在众多滞迟系统模型中, 双线性滞迟系统是最典型的一种, 它经常用于结构非线性的近似分析中, 因此在工程领域有着极其重要的位置^[11], 比如, Caughey^[12]开创性的工作揭示了双线性滞迟系统的特性, 其显著的非线性特性一直是非线性动力学研究领域的热点.

本文将根据芦旭^[13]等提出的螺栓法兰连接结构动力学模型进行改进. 增加上部滞迟结构, 对简化动力学模型在高斯白噪声激励作用下进行随机响应分析, 以便于航天器对应舱段结构动力学响应的快速计算.

1 简化动力学模型

本文研究的螺栓法兰连接结构如图 1 所示, 由

2017-03-28 收到第 1 稿, 2017-4-17 收到修改稿.

* 国家重点基础研究发展计划(2014CB046506)、国家自然科学基金资助项目(11302035、11372061、11672052、11272074)和中央高校基本科研业务费专项资金资助

† 通讯作者 E-mail: zengyan@dlut.edu.cn

于螺栓法兰连接结构存在刚度非线性,即在弹性变形阶段,结构的拉压曲线在拉压状态改变处存在明显的拐点,呈现拉压刚度不同的双线性特性.因此采用拉压刚度不同的单轴双线性弹簧模拟该连接结构^[1]:

$$k_b^* = k_{b+}, \delta \geq 0; k_b^* = k_{b-}, \delta < 0 \quad (1)$$

其中, $\delta < 0$ 对应于弹簧压缩状态,否则处于弹簧拉伸状态.图1所示上部滞迟缓冲结构由双线性滞迟系统描述,其所包含的线性部分弹簧刚度为 k_r^* .在建立的系统中,假设系统连接区域满足小变形,内部摩擦效应采用线性阻尼描述,上部缓冲机构相对于底座无转动.

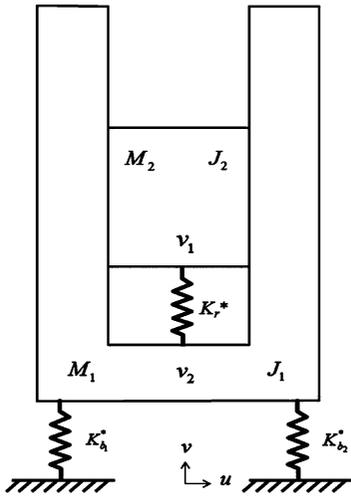


图1 含滞迟缓冲器的螺栓法兰连接结构

Fig.1 Bolt flanged connection structure with hysteretic buffer

螺栓法兰连接结构简化动力学方程^[10]:

$$\begin{bmatrix} M_1 \ddot{v}_1 \\ M_2 \ddot{v}_2 \\ J \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k'_{11} & -k_r^* & k'_{13} \\ -k_r^* & k_r^* & 0 \\ k'_{31} & 0 & k'_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_r^* v_r \\ -k_r^* v_r \\ 0 \end{bmatrix} = 0$$

$$\begin{aligned} k'_{11} &= k_{b1}^* + k_{b2}^* + k_r^*, \\ k'_{13} &= k'_{31} = b(k_{b2}^* - k_{b1}^*)/2, \\ k'_{33} &= b^2(k_{b1}^* + k_{b2}^*)/4, \\ J &= M_1 r_1^2 + M_2 r_2^2 + J_1 + J_2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, v_r 为上下两物块相对位置.增加线性阻尼项 c_1, c_2, c_3 ,使:

$$\zeta_j = c_j/m_j, j = 1, 2; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \zeta_3 &= c_3/J \\ \omega_{13}^2 &= k_{b1}^*/J, \\ \omega_{23}^2 &= k_{b2}^*/J \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \omega_{0j}^2 &= k_r^*/m_j, \\ \omega_{ij}^2 &= k_{bi}^*/m_j, \\ i, j &= 1, 2 \end{aligned} \quad (5)$$

系统动力学方程可写为如下形式:

$$\begin{cases} \ddot{v}_1 + \zeta_1 \dot{v}_1 + (\omega_{01}^2 + \omega_{11}^2 + \omega_{21}^2)v_1 - \omega_{01}^2 v_2 \\ \quad + \frac{b}{2}(\omega_{21}^2 - \omega_{11}^2)\theta + \omega_{01}^2 v_r = 0 \\ \ddot{v}_2 + \zeta_2 \dot{v}_2 + \omega_{02}^2(v_2 - v_1 - v_r) = 0 \\ \ddot{\theta} + \zeta_3 \dot{\theta} + \frac{b}{2}(\omega_{23}^2 - \omega_{13}^2)v_1 + \frac{b^2}{4}(\omega_{13}^2 + \omega_{23}^2)\theta = 0 \end{cases} \quad (6)$$

引入双线性滞迟力(滞迟环如图2):

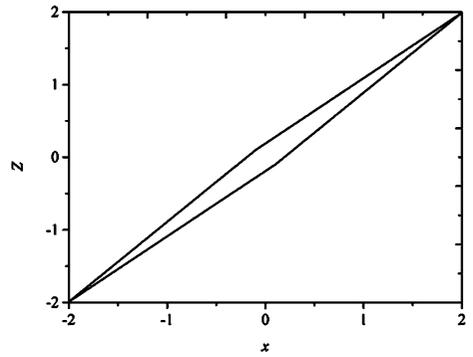


图2 双线性滞迟环

Fig.2 Loop of bilinear hysteresis

$$f(x, \dot{x}) = \alpha x + (1 - \alpha)Z(x, \dot{x}) \quad (7)$$

$$Z = \begin{cases} (A + \gamma)(x - x^*) - \beta Z \geq -\beta, \dot{x} < 0 \\ (A - \gamma)(x - x^*) - \beta Z < -\beta, \dot{x} < 0 \\ (A + \gamma)(x + x^*) + \beta Z < \beta, \dot{x} \geq 0 \\ (A - \gamma)(x + x^*) + \beta Z \geq \beta, \dot{x} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中,参数 A, γ, β 为滞迟系数, x^* 为 $Z = -\beta$ 时的相对位移坐标.将双线性滞迟力加入(2)式中得到运动方程:

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 + \zeta_1 \dot{x}_1 + \omega'_{11} x_1 - \omega_{01}^2 x_2 + \omega'_{13} \theta + \omega_{01}^2 x_r = 0 \\ \ddot{x}_2 + \zeta_2 \dot{x}_2 + \omega_{02}^2(x_2 - x_1 - x_r) + (1 - \omega_{02}^2)Z = \varepsilon \xi(t) \\ \ddot{\theta} + \zeta_3 \dot{\theta} + \omega'_{31} x_1 + \theta = 0 \\ \omega'_{11} = \omega_{01}^2 + \omega_{11}^2 + \omega_{21}^2, \omega'_{13} = b(\omega_{21}^2 - \omega_{11}^2)/2 \\ \omega'_{31} = b(\omega_{23}^2 - \omega_{13}^2)/2, \omega'_{33} = b^2(\omega_{13}^2 + \omega_{23}^2)/4 \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\xi(t)$ 为高斯白噪声随机激励, Z 为双线性滞迟力,设下端质量中心的纵向坐标为 r_1 ,上端质量中心相对于下部质心的最小纵向距离为 l_k ,则有:

$$x_r = r_1 + l_k, x_0 = x^* + \beta/(A + \gamma) \quad (10)$$

由此,可知该系统的势能函数为:

$$G(x) = \begin{cases} (A + \gamma)(\bar{x} + x_0)^2/2 & Z < \beta, \dot{x} \geq 0 \\ \frac{[(A - \gamma)(\bar{x} + x_0)^2 + \frac{2\beta\gamma}{A + \gamma}]^2}{2(A + \gamma)} & Z \geq \beta, \dot{x} \geq 0 \\ (A + \gamma)(\bar{x} - x_0)^2/2 & Z \geq -\beta, \dot{x} < 0 \\ \frac{[(A - \gamma)(\bar{x} - x_0)^2 - \frac{2\beta\gamma}{A + \gamma}]^2}{2(A + \gamma)} & Z < -\beta, \dot{x} < 0 \end{cases}$$

$$\bar{x} = x_2 - x_1 - x_r \quad (11)$$

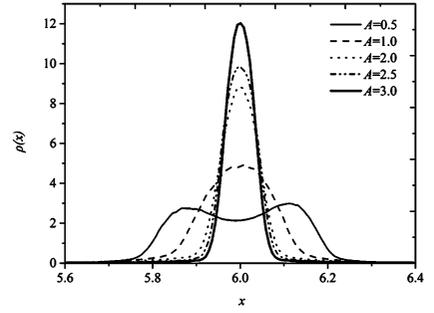
另外,由运动方程可知,缓冲器压缩到极限状态时上端质量块仍有下行速度;假定后续运动会产生碰撞,碰撞前后满足动量守恒和能量守恒。

2 随机响应分析

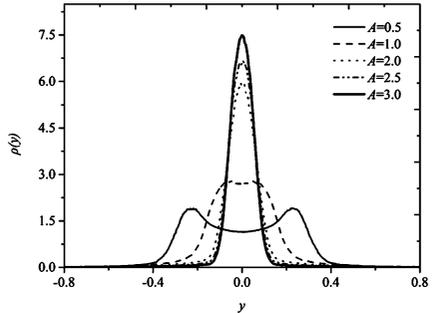
由于系统的响应特性与外界激励的参数取值之间有很大的关系,本节针对不同参数下的系统随机响应进行分析(取 $m_1 = 666.67\text{kg}$, $m_2 = 333.33\text{kg}$, $k_{b-} = 2 \times 10^7\text{N/m}$, $\zeta_1 = \zeta_2 = \zeta_3 = 1 \times 10^{-7}$, 稳态响应样本计算运行时长为 50000s , 时间步长为 0.0025s)。

首先,研究了双线性滞迟缓冲器参数 A 对稳态响应概率密度函数的影响。设双线性滞迟力模型参数 $\gamma = 0.1, \beta = 0.1$, 高斯白噪声激励参数 $D = 0.03$, 拉压双线性弹簧的拉压刚度比 $k_+/k_- = 1/2$, 线性刚度 $k_r = 10^6\text{N/m}$ 。当参数 A 分别取值 $0.5, 1.0, 2.0, 2.5, 3.0$ 时,如图 3 所示,随着参数 A 的减小,系统上部质量块的位移和速度稳态概率密度函数峰值先减小,而后从单峰突变为双峰状态。

其次,针对了双线性滞迟缓冲器参数 γ 对稳态响应概率密度函数的影响,设双线性滞迟力模型参数 $A = 1.0, \beta = 0.1$, 高斯白噪声激励参数 $D = 0.03$, 拉压双线性弹簧的拉压刚度比 $k_+/k_- = 1/2$, 线性刚度 $k_r = 10^6\text{N/m}$ 。对双线性系统参数 γ 分别取值 $0.05, 0.1, 0.2$, 如图 4 所示,随着参数 γ 的增大,系统上部质量块的位移和速度稳态概率密度函数仍保持双峰状态,但峰值随之增大,方差则渐渐减小。而针对了双线性滞迟缓冲器参数 β 对稳态响应概率密度函数的影响,设双线性滞迟力模型参数 $A = 2.0, \gamma = 0.5$, 高斯白噪声激励参数 $D = 0.5$, 拉压双线性弹簧的拉压刚度比 $k_+/k_- = 1/2$, 双线性弹簧刚度 $k_r = 10^6\text{N/m}$ 。对双线性系统参数 β 分别取值 $0.03, 0.06, 0.1$, 如图 5 所示,随着参数 β 的增大,系统上部质量块的位移和速度稳态概率密度函数仍保持单峰状态,但峰值随之减小,方差则渐渐增大。



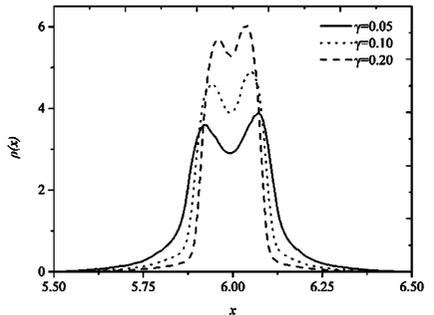
(a) 位移概率密度曲线
(a) Probability density curve of displacement



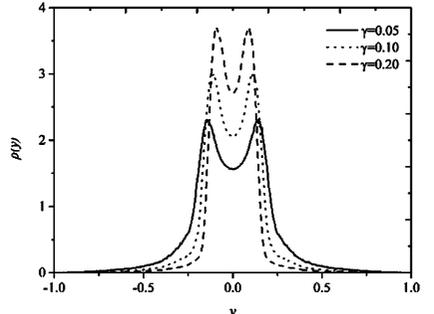
(b) 速度概率密度曲线
(b) Probability density curve of velocity

图 3 参数 A 取不同值时的稳态响应概率密度

Fig. 3 Probability density of stationary response for different values of parameter A



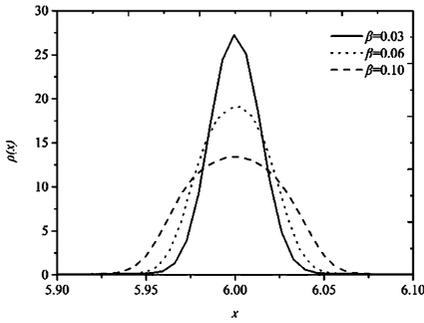
(a) 位移概率密度曲线
(a) Probability density curve of displacement



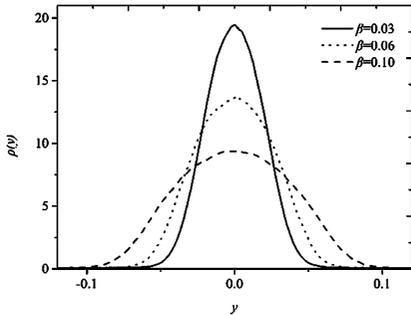
(b) 速度概率密度曲线
(b) Probability density curve of velocity

图 4 参数 γ 取不同值时的稳态响应概率密度

Fig. 4 Probability density of stationary response for different values of parameter γ



(a) 位移概率密度曲线
(a) Probability density curve of displacement



(b) 速度概率密度曲线
(b) Probability density curve of velocity

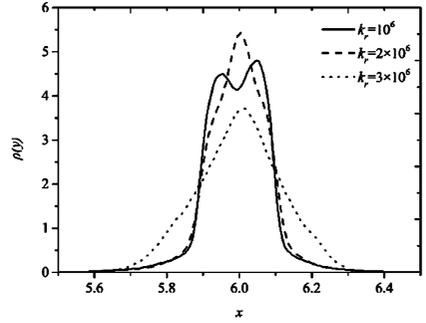
图5 参数 β 取不同值时的稳态响应概率密度

Fig.5 Probability density of stationary response for different values of parameter β

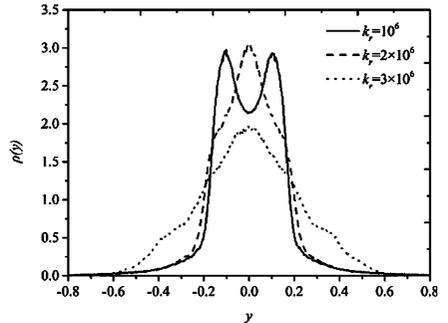
再次,研究了刚度系数 k_r 对稳态响应概率密度函数的影响. 设双线性滞迟力模型参数 $A = 1.0$, $\gamma = 0.1$, $\beta = 0.1$, 高斯白噪声激励参数 $D = 0.03$, 拉压双线性弹簧的拉压刚度比 $k_+/k_- = 1/2$. 对刚度 k_r 分别取值 10^6 N/m , $2 \times 10^6 \text{ N/m}$, $3 \times 10^6 \text{ N/m}$, 如图6所示,随着参数 k_r 的增大,系统上部质量块的位移和速度稳态概率密度函数由双峰变为单峰状态,接着单峰峰值随之减小,方差则渐渐增大.

接着,分析了拉压双线性弹簧的拉压刚度比 k_+/k_- 对稳态响应概率密度函数的影响. 设定双线性系统参数 $A = 1.0$, $\gamma = 0.1$, $\beta = 0.1$, 高斯白噪声激励参数 $D = 0.03$, 双线性弹簧刚度 $k_r = 10^6 \text{ N/m}$. 对拉压双线性弹簧的拉压刚度比 k_+/k_- 分别取值 $1/2$, $1/3$, $1/4$, 如图7所示,位移概率密度函数的变化体现在双峰的两个峰值大小改变上,随着拉压刚度比的减小,右侧峰值渐渐高于左侧的峰值;而速度概率密度函数的变化则截然不同,随着拉压刚度比的减小,双峰峰值同步减小,而当比值达到 $1/4$ 时,出现三峰状态.

最后,通过改变高斯白噪声的激励强度,研究了激励特性变化对稳态响应概率密度函数的影响.



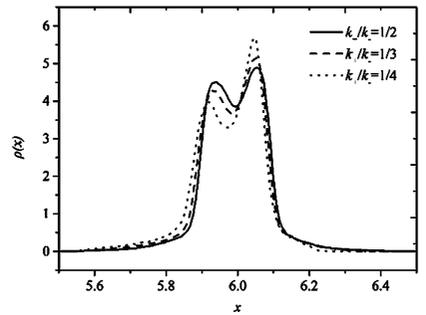
(a) 位移概率密度曲线
(a) Probability density curve of displacement



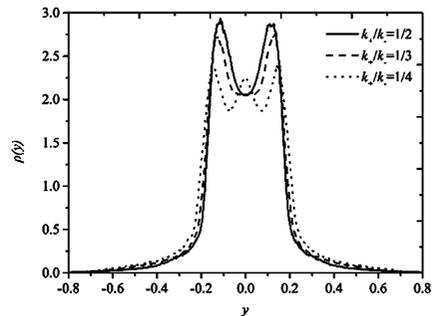
(b) 速度概率密度曲线
(b) Probability density curve of velocity

图6 参数 k_r 取不同值时的稳态响应概率密度

Fig.6 Probability density of stationary response for different values of parameter k_r



(a) 位移概率密度曲线
(a) Probability density curve of displacement



(b) 速度概率密度曲线
(b) Probability density curve of velocity

图7 拉压刚度比 k_+/k_- 取不同值时的稳态响应概率密度不同

Fig.7 Probability density of stationary response for different values of stiffness ratio k_+/k_-

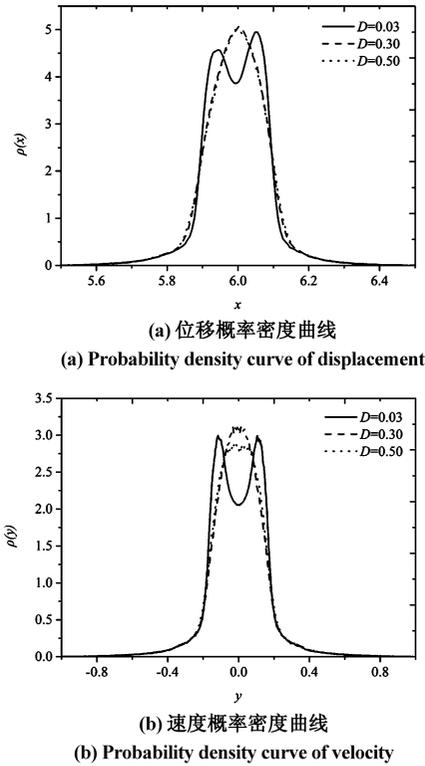


图8 激励强度 D 取不同值时的稳态响应概率密度

Fig.8 Probability density of stationary response for different values of excitation intensity D

设双线性系统参数 $A = 1.0$, $\gamma = 0.1$, $\beta = 0.1$, 双线性弹簧刚度 $k_r = 10^6 \text{ N/m}$, 拉压双线性弹簧的拉压刚度比 $k_+/k_- = 1/2$. 当激励强度参数 D 分别取值 0.03、0.3、0.5 时, 如图 8 所示, 随着激励强度增加, 位移和速度概率密度函数的形貌由双峰变为单峰.

3 结论

通过对高斯白噪声纵向激励作用下螺栓法兰连接结构的稳态随机响应进行仿真分析, 发现了如下随机动力学特性: 滞迟参数 A 、刚度参数 k_r 、拉压刚度比和激励强度的大小变化, 都会引起缓冲部件的纵向位移和速度概率密度函数形态发生突变; 这种变化体现在纵向位移和速度两种状态变量的稳态响应概率密度函数上, 其规律多数比较一致, 但是拉压刚度比变化的影响则不同.

参 考 文 献

1 栾宇. 航天器结构中螺栓法兰连接的动力学建模方法研究[博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2012

(Luan Y. Study on dynamic modeling of bolted flange connections in aerospace structures [PhD Thesis]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012 (in Chinese))

- 2 栾宇, 刘松, 关振群, 等. 小变形下螺栓法兰连接结构的静刚度非线性特性. 强度与环境, 2011, 38(3): 29 ~ 35 (Luan Y, Liu S, Guan Z Q, et al. The nonlinear character of static stiffness in the structure with bolted flanged connection under small deformation. *Structure & Environment Engineering*, 2011, 38(3): 29 ~ 35 (in Chinese))
- 3 芦旭, 张宇航, 陈岩, 等. 含剪力销(锥)螺栓法兰连接结构弯剪扭耦合振动研究. 振动与冲击, 2017, 36(2): 139 ~ 146 (Lu X, Zhang Y H, Chen Y, et al. Coupled vibration of bolted flange connections containing shear pins (cone). *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(2): 139 ~ 146 (in Chinese))
- 4 曾岩. 非高斯随机激励下非线性系统的随机平均法[博士学位论文]. 浙江: 浙江大学, 2010 (Zeng Y. Stochastic Averaging Methods for Nonlinear Systems subject to Non-Gaussian Random Excitation [PhD Thesis]. Zhejiang University, 2010 (in Chinese))
- 5 黄志龙. 几类非线性随机系统动力学与控制研究[博士学位论文]. 浙江: 浙江大学, 2005 (Huang Z L. Dynamics and Control of Some Classes of Non - Linear Stochastic Systems [PhD Thesis]. Zhejiang University, 2005 (in Chinese))
- 6 宦荣华, 马云双, 郝琪, 朱位秋. 随机激励的非线性 Markov 跳变系统的稳态响应. 动力学与控制学报, 2016, 14(2): 165 ~ 169 (Huan R H, Ma Y S, Hao Q, Zhu W Q. Stationary response of stochastically excited nonlinear Markovian jump system. *Journal of Dynamics and Control*, 2016, 14(2): 165 ~ 169 (in Chinese))
- 7 胡荣春, 应祖光, 朱位秋. 不确定拟哈密顿系统的随机最优控制. 动力学与控制学报, 2017, 15(1): 93 ~ 96 (Hu R C, Ying Z G, Zhu W Q. Stochastic optimal control of uncertain quasi - Hamiltonian systems. *Journal of Dynamics and Control*, 2017, 15(1): 93 ~ 96 (in Chinese))
- 8 朱晨烜, 柳扬, 丁云飞. 随机部分可积拟哈密顿系统的概率密度追踪控制. 动力学与控制学报, 2017, 15(2): 143 ~ 150 (Zhu C X, Liu Y, Ding Y F. Tracking control for stationary probability density of stochastic partial integrable system. *Journal of Dynamics and Control*, 2017, 15(2): 143 ~ 150 (in Chinese))

- 9 Yar M, Hammond J K. Modeling and response of bilinear hysteretic systems. *Journal of Engineering Mechanics*, 1987,113(7):1000 ~ 1013
- 10 Cai G Q, Lin Y K. On randomly excited hysteretic structures. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1990, 57(2):175 ~ 178
- 11 Iwan W D, Lutes L D. Response of the bilinear hysteretic system to stationary random excitation. *ASME Journal of the Acoustical Society of America*, 1968,43(3):545 ~ 552
- 12 Caughey T K. Random excitation of a system with bilinear hysteresis. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1960,27(4):649 ~ 652
- 13 芦旭,王平,王建男,等. 含剪力销(锥)螺栓法兰连接结构非线性特性. *计算力学学报*, 2015,32(4):503 ~ 511 (Lu X, Wang P, Wang J N, et al. Nonlinear behaviour of bolted flange connections containing shear pin (CONE). *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2015,32(4):503 ~ 511 (in Chinese))

STATIONARY RANDOM RESPONSE OF A BOLTED FLANGE CONNECTION STRUCTURE WITH HYSTERETIC BUFFER*

Jiang Yunzhe¹ Zeng Yan^{1†} Zhao Zhenjun² Li Gang¹ Guan Zhenqun¹ Zhou Jinhang¹ Luo Chao¹

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, International Research Center for Computational Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

(2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract Based on the simplified dynamic model of a bolted flange connection structure with hysteretic buffer, stationary random response of the structure under the longitudinal load of Gaussian white noise is studied through Monte Carlo simulation. In the simplified model, nonlinear springs with different stiffness of compression and tension are used to simulate the bolted flange connections, and the buffer in the upper part of the structure is modeled as a Yar-Hammond type bilinear hysteretic system. In this case, the rapid calculation of dynamical response for the corresponding cabin of spacecraft structure can be completed by using such simplified model. After nondimensionalization of the equation of motion, probability densities of stationary response are obtained through numerical simulation to reveal the evolution of stationary random response for different values of parameters.

Key words bilinear hysteresis, bolted flange connection structure, stationary random response, Gaussian white noise, Monte Carlo simulation

Received 28 March 2017, revised 17 April 2017.

* The project supported by National Key Basic Research Program of China (2014CB046506), National Natural Science Foundation of China (11302035, 11372061, 11672052, 11272074) and Fundamental Research Funds for the Central Universities.

† Corresponding author E-mail: zengyan@dlut.edu.cn