

文章编号:1006-1355(2018)01-0109-05

基于模糊滑模 backstepping 的半主动空气悬架设计

孙丽颖, 王君莹

(辽宁工业大学 电气工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘要:为了研究半主动空气悬架系统对车辆行驶性能的影响,提出基于半主动空气悬架的模糊滑模 backstepping 控制。建立 1/4 二自由度半主动空气悬架动力学模型,用模糊逻辑系统逼近未知函数,解决了阻尼系数不易测的问题。该方法设计的控制器能够适应因车辆行驶状态或者环境发生改变而引起的系统参数在一定范围内的变化。仿真结果表明,与被动悬架相比,模糊滑模 backstepping 控制器对于提高半主动空气悬架系统减振效果更加明显。

关键词:振动与波;半主动空气悬架;backstepping;滑模;模糊

中图分类号:TP273

文献标识码:A

DOI 编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2018.01.021

Design of Semi-active Air Suspension Systems Based on Fuzzy Sliding Mode Back-stepping

SUN Li-ying, WANG Jun-ying

(School of Electrical Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning China)

Abstract : In order to study the influence of semi-active air suspension system on vehicle traveling performance, a fuzzy sliding mode back-stepping control is proposed. Firstly, a 2-DOF quarter-car model for the semi-active air suspension system analysis is established. Then, the fuzzy logic systems are employed to asymptotically approach the unknown function and the problem that damping coefficient is uneasy to measure is solved. The controller designed in this method can be adapted to the change of the system parameters caused by the change of the vehicle traveling state or the environment within a certain range. The results show that, compared with passive suspension, the proposed fuzzy sliding mode back-stepping controller is more effective in improving the vibration reduction effect of the semi-active air suspension systems.

Key words : vibration and wave; semi-active air suspension; back-stepping; sliding mode; fuzzy

悬架系统是维持车辆乘坐舒适性和操作安全性的最重要的部分之一,它能隔离路面冲击对车身的影响,从而保证车辆的行驶性能。一般来说,悬架分为三种:被动悬架、半主动悬架、主动悬架^[1]。由于被动悬架的参数一经确定是不可调节的,因此在改善悬架性能方面受到很大限制。主动悬架在被动悬架的基础上增加了动力源,从而使悬架的结构变得复杂、成本提高,不易普及。半主动悬架是一种可以调节刚度或者阻尼的无源主动悬架,结构简单、造价低廉,使其在实际中应用广泛。作为一种将空气弹

簧作为弹性元件的悬架系统,空气悬架的固有频率低、刚度可变、振动及噪声小等优点使其受到广泛的关注。由于空气悬架系统是一个复杂的非线性系统,悬架的刚度、阻尼系数等参数会随着车辆的载荷、车速、路况的变化而变化,因此如何设计出满足各种工况而且能使车辆的行驶平顺性、乘坐舒适性和操作安全性处于最佳状态附近很重要。近年来,在研究空气悬架问题上,使用较多的控制策略是 PID 控制^[2-3]、模糊控制^[4]、神经网络控制等^[5]。

自从 1991 年著名学者 Kokotovic 提出 backstepping 方法^[6]之后,它就引起了许多学者的极大关注,已经逐渐成为处理非线性问题的有效手段。文献[7]主要研究了带有约束的主动悬架系统。文献[8-10]采用自适应 backstepping 方法设计了控制器,使悬架的垂向振动有了明显改善。文献[11]采用 backstepping 方法设计了积分滑模控制器,用一个高增益状态观测器来估计系统中的不确定参

收稿日期:2017-07-04

基金项目:辽宁省教育厅重大科技平台资助项目(JP2016012)

作者简介:孙丽颖(1972-),女,辽宁省抚顺市人,教授,博士,主要研究方向为动力系统、汽车悬架控制。

通信作者:王君莹(1990-),女,河南省驻马店市人,硕士研究生,主要研究方向为汽车悬架控制。

Email: lgsunliying@163.com

数和干扰。文献[12]在 backstepping 控制的基础上加入滤波参数可调的非线性滤波器,有效提升了车辆舒适性和操纵稳定性。文献[13]应用自适应 backstepping 方法设计了一个的新型容错控制器,大幅度提高系统的稳定性能。

本文将针对 1/4 二自由度半主动空气悬架系统,考虑阻尼系数的非线性不确定性问题,用模糊系统进行逼近,同时结合 backstepping 和滑模控制方法设计控制器,提高系统的收敛性能,尽量减小簧载质量垂向加速度、悬架动行程、轮胎动载荷。

1 模型建立

悬架系统模型的建立是分析和研究系统性能的基础。在研究车辆的操作稳定性和乘坐舒适度时,悬架通常被简化为一个复杂振动系统。悬架模型的建立大致有 3 种:整车模型、半车模型、1/4 车模型。本文选择建立 1/4 自由度模型,为了研究方便,做出以下假设^[14]:

- (1) 车身和车轮都是刚体,不会发生形变;
- (2) 把悬架系统看作是并联的线性弹簧和阻尼器,文中只考虑空气弹簧的刚度变化;
- (3) 车轮始终与地面接触且只有刚度没有阻尼力,并可简化为线性弹簧。

由牛顿第二定律可得到半主动空气悬架系统的运动微分方程

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + c(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + (k_0 + k_r)(z_1 - z_2) = 0 \\ m_2 \ddot{z}_2 - c(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - (k_0 + k_r)(z_1 - z_2) + kt(z_2 - q) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 m_1 为簧载质量; m_2 为非簧载质量; \ddot{z}_1 为簧载质量的垂向加速度; \ddot{z}_2 为非簧载质量的垂向加速度; \dot{z}_1 为簧载质量的垂向速度; \dot{z}_2 为非簧载质量的垂向速度; z_1 为簧载质量的垂向位移; z_2 为非簧载质量的垂向位移; q 为路面激励; c 为悬架阻尼系数; kt 为轮胎的等效刚度; k_0 为半主动空气悬架的基值刚度; k_r 为半主动空气悬架的可调刚度。

考虑到阻尼器的减振系数随着行程的伸张而变大,随着行程的压缩而变小,所以它不是一个固定的常值,因此将 $c(\dot{z}_1 - \dot{z}_2)$ 看成不确定函数,用 $f_2(\cdot)$ 表示。令 $u = k_r(z_1 - z_2)$ 当作系统的控制输入,下面进行坐标变换: $x_1 = z_1$, $x_2 = \dot{z}_1$, $x_3 = z_2$, $x_4 = \dot{z}_2$, 所以式(1)可变为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{m_1}[f_2(\cdot) + k_0(x_1 - x_3) + u] \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{m_2}[f_2(\cdot) + k_0(x_1 - x_3) - kt(x_3 - q) + u] \end{cases} \quad (2)$$

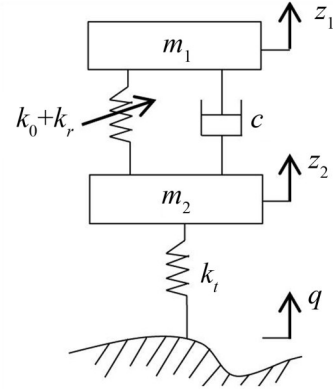


图 1 1/4 二自由度半主动空气悬架模型

本文用模糊逻辑系统来逼近未知函数 $f_2(\cdot)$, 通过间接模糊自适应 backstepping 方法构造 Lyapunov 函数, 通过设计控制量 u 在保证系统稳定的同时, 尽可能地提高悬架性能。模糊逻辑系统选取的一般形式为 $\hat{f}(\cdot) = \theta^T \xi(\cdot)$, 其中 $\theta^T \in R^n$ 是调节参数向量, $\xi(\cdot)$ 是模糊系统中的基函数, 对于一个给定的连续函数 $f(\cdot)$, 在有界闭区间 Ω 内, 存在一个理想的可调参数向量 θ^* , 使其对于任意的 $\varepsilon > 0$, 满足 $|f(\cdot) - \theta^{*T} \xi(\cdot)| < \varepsilon$, 其中

$$\theta^* = \arg \min_{\theta \in R^n} \left\{ \sup_{x \in \Omega} |f(x) - \theta^T \xi(x)| \right\} \quad (3)$$

2 控制器的设计

由参考文献[15]可知, 选择合适的被控变量可以避免不稳定的零动态特性。下面采用 backstepping 方法对系统(2)设计控制器。

第一步: 首先, 定义误差变量

$$e_1 = x_1 - \bar{x}_3 \quad (4)$$

其中 x_1 是车身的垂向位移, \bar{x}_3 是经过滤波器的车轮垂向位移变量, 定义

$$\bar{x}_3 = \frac{b}{s+b} x_3 \quad (5)$$

b 是常数, 对于系统(2.1), 把 x_2 看作虚拟控制, 取镇定函数

$$x_{2d} = -c_1 e_1 - b(x_1 - x_3) \quad (6)$$

其中 c_1 是一个正常数, 则可得

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{\bar{x}}_3 = x_2 + b(x_1 - x_3) - b e_1 \quad (7)$$

定义误差变量 $e_2 = x_2 - x_{2d}$, 因此

$$\dot{e}_1 = -(b + c_1)e_1 + e_2 \quad (8)$$

取第一个子系统的 Lyapunov 函数为

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (9)$$

则

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1(e_2 - (b + c_1)e_1) = -(b + c_1)e_1^2 + e_1 e_2 \quad (10)$$

第二步: 在真实控制即将出现的时候, 定义滑模

面 $s = k_1 e_1 + e_2$, 其中, k_1 为待设计的常数。由于 $f_2(\cdot)$ 是未知函数, 需要用模糊逻辑系统去逼近 $f_2(\cdot)$, 定义 $\varepsilon = f_2(\cdot) - \theta^T \xi(\cdot)$, 其中 ε 为 $f_2(\cdot)$ 和理想模糊系统的差值, $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$, $\hat{\theta}$ 为 θ 的估计值, $\tilde{\theta}$ 为估计值与实际值之间的误差。选取系统的Lyapunov函数

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2\gamma}\tilde{\theta}^2 \quad (11)$$

$\gamma > 0$ 是待设计参数, 则

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = \dot{V}_1 + s\dot{s} - \frac{1}{2\gamma}\tilde{\theta}\dot{\tilde{\theta}} = & -(c_1 + k_1 + b)e_1^2 + s[e_1 + (k_1 + c_1)\dot{e}_1 - \\ & \frac{1}{m_1}(\varepsilon + \hat{\theta}^T \xi + k_0(x_1 - x_3) + u) + b(x_2 - x_4)] - \tilde{\theta}(\frac{1}{m_1}s\xi + \frac{1}{\gamma}\dot{\tilde{\theta}}) \end{aligned} \quad (12)$$

选取

$$\dot{\tilde{\theta}} = -\frac{\gamma}{m_1}s\xi \quad (13)$$

$$\begin{aligned} u = m_1[\beta s + e_1 + (k_1 + c_1)\dot{e}_1 + b(x_2 - x_4)] - \\ kd \operatorname{sgn}(s) - \hat{\theta}^T \xi - k_0(x_1 - x_3) \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $kd < \inf|\varepsilon|$, β 为待设计的常数, 把上式代入(12)中得

$$\dot{V}_2 = -(c_1 + k_1 + b)e_1^2 - \beta s^2 - \frac{1}{m_1}(\varepsilon - kd \operatorname{sgn}(s))s < 0 \quad (15)$$

因此误差系统可以表示为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -(b + c_1)e_1 + e_2 \\ \dot{e}_2 = -\frac{1}{m_1}\tilde{\theta}\xi + (k_1 b + k_1 c_1 - 1)e_1 \\ -k_1 e_2 - \beta s \end{cases} \quad (16)$$

因此系统式(2)在控制律式(14)和参数替换律式(13)的作用下, 误差系统式(16)在原点处是渐进稳定的。

3 仿真分析

为了验证控制器的有效性, 特采用 MATLAB/Simulink 软件进行仿真验证。定义模糊基函数

$$\xi_i(x) = \frac{\prod_{i=1}^2 F_i^l(x_i)}{\sum_{l=1}^5 [\prod_{i=1}^2 F_i^l(x_i)]} \quad (17)$$

令 $\xi(x) = [\xi_1(x), \xi_2(x), \xi_3(x), \xi_4(x), \xi_5(x)]^T$, 从而可以得到模糊逻辑系统 $F(\cdot) = \hat{\theta}^T \xi(x)$

模糊隶属度函数为

$$\begin{aligned} F_1^1(x) &= \exp(-(x(i) - A_1(1))^2/4), \\ F_1^2(x) &= \exp(-(x(i) - A_1(2))^2/4), \\ F_1^3(x) &= \exp(-(x(i) - A_1(3))^2/4), \\ F_1^4(x) &= \exp(-(x(i) - A_1(4))^2/4), \\ F_1^5(x) &= \exp(-(x(i) - A_1(5))^2/4), \\ A_1 &= [-5, -2, 0, 2, 5]; \quad A_2 = [-2, -1, 0, 1, 2]; \end{aligned}$$

选取积分白噪声来模拟路面的随机干扰, 其数学模型为: $X_r = \int_0^t kw(t)dt$, 式中 X_r 是路面输入轮廓函数; $w(t)$ 是高斯分布的白噪声; $k = 2\pi n_0 \sqrt{G_{xr}(n_0)v}$; n_0 是空间参考频率, $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$; $G_{xr}(n_0)$ 是路面不平度系数, m^2/m^{-1} ; v 是车辆行驶速度, m/s 。国家 B 级路面, 不平度系数 $G_{xr}(n_0) = 64 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{m}^{-1}$ 。这里选取 50 km/h 的速度进行仿真, 路面输入情况如图 2 所示。

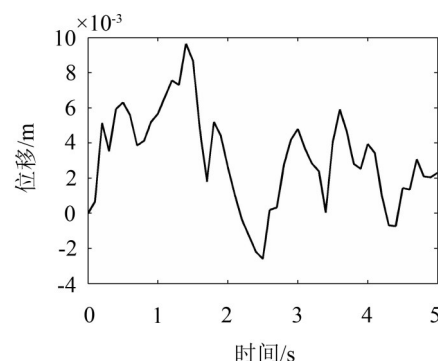


图2 路面随机输入

悬架系统的仿真参数的选取如表1所示。控制器的参数选取: $c_1 = 100$, $b = 1.5$, $k_1 = 100$, $\beta = 10$, $kd = 0.1$, $\gamma = 10$ 。

表1 悬架结构参数

名称	数值
簧载质量 m_1	330 kg
非簧载质量 m_2	25 kg
阻尼系数 c	1 000 N·s/m
空气弹簧起始刚度 k_0	13 000 N/m
轮胎刚度 kt	170 000 N/m

图3、图4、图5分别为簧载质量加速度、悬架动行程、轮胎动载荷的响应曲线, 其中实线表示模糊滑模backstepping控制方法的半主动空气悬架的响应曲线, 虚线表示被动悬架的响应曲线。

为了验证模糊逻辑系统的逼近的效果, 假设阻尼系数发生改变, $c = 1\,200 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}$, 其他参数不变, 车辆在随机路面激励下的响应曲线如图6、图7、图8所示。

从表2中可以看出, 本文所设计的控制器在随机路面上能有效地改善车辆的性能。与被动悬架相比, 采用了模糊滑模backstepping控制方法的悬架系统的簧载质量加速度和轮胎动载荷均方根值分别减少了70%、5%, 悬架的动行程为2 cm, 保持在安全范围内。当阻尼系数发生变化时, 模糊逻辑系统能有效逼近非线性函数, 解决了不确定性参数问题。

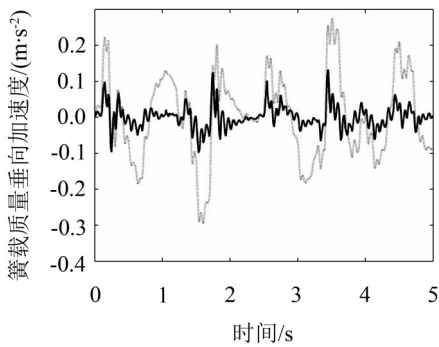


图3 簧载质量加速度

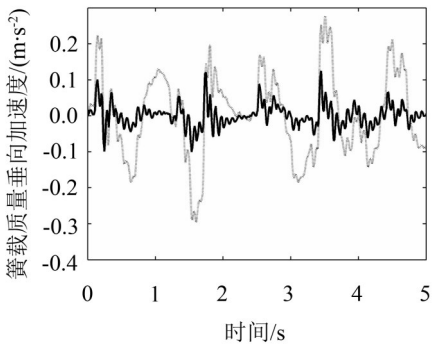


图6 参数改变后的簧载质量加速度

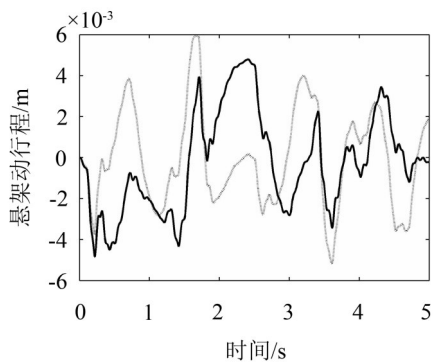


图4 悬架动行程

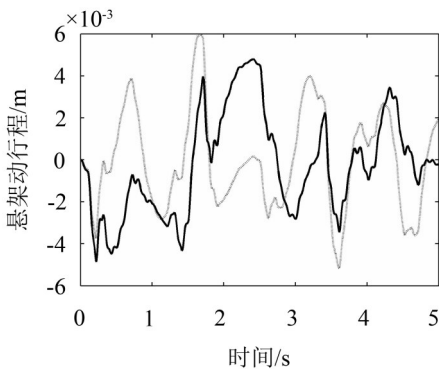


图7 参数改变后的悬架动行程

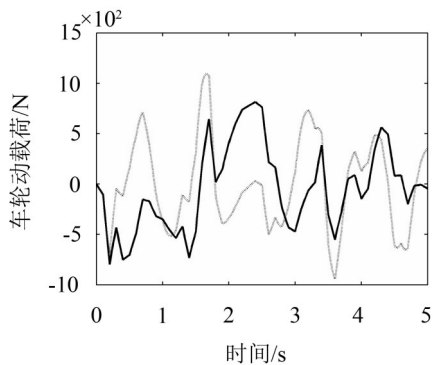


图5 车轮动载荷

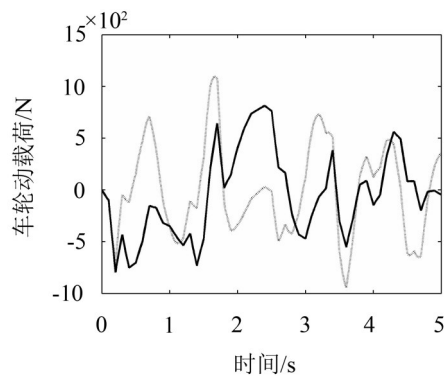


图8 参数改变后的车轮动载荷

4 结 语

本文以簧载质量加速度、悬架动行程、轮胎动载荷为评价指标,基于1/4二自由度半主动空气悬架动力学模型,考虑了阻尼系数的非线性不确定性,用模糊逻辑系统逼近非线性不确定函数,设计了模糊滑模 backstepping 控制器,并通过 MATLAB/

Simulink 软件进行了仿真验证。结果表明,与被动悬架相比,本文所设计的控制器能够有效改善车辆的乘坐舒适度和操作安全性,当不确定参数发生变化时,控制性能并没有变差,说明了本文设计的控制器的有效性。

表2 仿真结果性能指标对比

评价指标	$c=1\ 000\ \text{N}\cdot\text{s/m}$		$c=1\ 200\ \text{N}\cdot\text{s/m}$	
	模糊滑模 backstepping	被动悬架	模糊滑模 backstepping	被动悬架
簧载质量加速度	0.034 157	0.117 251	0.034 285	0.117 88
悬架动行程	0.002 412	0.002 352	0.002 44	0.002 338
轮胎动载荷	404.671 6	427.642 9	410.182 3	425.493 4

[8] 赵海英, 邝钰, 吴忠强. 汽车主动悬架的自适应

- [1] YAGIZ N, HACIOGLU Y. Backstepping control of a vehicle with active suspensions[J]. **Control Engineering Practice**, 2008, 16(12):1457-1467.
- [2] M LI, Z LI, X SHEN, et al. Study on PID control for semi-active air suspension for riding comfort[C]. 2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems. Wuhan, IEEE, 2010: 47-50.
- [3] YANG N. Research on air suspension system based on pid control[C]. International Conference on Intelligent Human-machine systems and cybernetics. hangzhou, IEEE, 2013: 106-109.
- [4] 赵永胜, 刘志峰, 蔡力钢, 等. 基于模型参考的主动空气悬架模糊自适应滑模控制[J]. **机械科学与技术**, 2010, 29(1): 12-16.
- [5] 常盛, 王福明, CHANG Sheng, 等. 基于改进BP神经网络的空气悬架控制研究[J]. **制造业自动化**, 2013, 35(9): 119-122.
- [6] KANELAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P, MORSE A S. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems[J]. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 1991, 36(11): 1241-1253
- [7] SUN W, GAO H, KAYNAK O. Adaptive backstepping control for active suspension systems with hard constraints[J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 2013, 18(3):1072-1079.
- [8] 李海, 王福明, 常盛. 基于自适应滑模控制的主动悬架系统[J]. **制造业自动化**, 2013, 35(8): 113-117.
- [9] BASTURK H I. A backstepping approach for an active suspension system[C]. American Control Conference. Boston, IEEE, 2016:7579-7584.
- [10] YOSHIMURA T. Adaptive backstepping discrete-time control for a full-car active suspension[J]. **International Journal of Vehicle Autonomous Systems**, 2017, 13(3): 221.
- [11] RATH J J, VELUVOLU K C, DEFOORT M. Output feedback based sliding mode control of active suspension using backstepping[C]. International Conference on Control, Engineering & Information Technology. Tlemcen, IEEE, 2015: 1-6.
- [12] 周辰雨, 余强, 张凯. 基于滤波技术的非线性 Backstepping 主动悬架控制[J]. **长安大学学报(自然科学版)**, 2017, 37(2): 115-126.
- [13] LIU B, SAIF M, FAN H. Adaptive fault tolerant control of a half-car active suspension systems subject to random actuator failures[J]. **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, 2016, 21(6): 2847-2857.
- [14] 陈双. 基于电控空气悬架的轿车平顺性和操纵稳定性协调控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [15] LIN J S, KANELAKOPOULOS I. Nonlinear design of active suspensions[J]. **IEEE Control Systems**, 1997, 17(3): 45-59.

(上接第31页)

[4] 姚德源,王其政.统计能量分析原理及其应用[M].北京:

- [1] PANUSZKA R, WICIAK J, IWANIEC M. Experimental assessment of coupling loss factors of thin rectangular plates[J]. **Archives of Acoustics**, 2005, 30(4): 533-551.
- [2] EWING M S, DANDE H. Damping loss factor estimation for coupled plates using experimental transient statistical energy analysis[C]. 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Denver, United states, 2011: 1-7.
- [3] PEREIRA R, ARENAS J P, ZUMELZU E. Comparison of four test methods to measure damping properties of materials by using piezoelectric transducers[J]. **Materials and Design**, 2011, 32(4): 2423-2428.
- [4] 北京理工大学出版社, 1995.
- [5] LYON R H, DEJONG R G. Theory and application of statistical energy analysis (Second Edition)[M]. The MIT Press, Cambridge. 1995.
- [6] 郭书祥, 吕震宙. 区间运算和静力区间有限元[J]. **应用数学和力学**, 2001, 22(12): 1249-1254.
- [7] DEGRAUWE D, LOMBAERT G, DE ROECK G. Improving interval analysis in finite element calculations by means of affine arithmetic[J]. **Computers and Structures**, 2010, 88(3-4): 247-254.
- [8] 张红亮. 统计能量分析参数辨识及模型修正方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.