

基于量子遗传支持向量机的流体惯容预测模型*

沈钰杰, 陈 龙, 刘雁玲, 杨晓峰, 张孝良, 汪若尘

(江苏大学汽车与交通工程学院 镇江, 212013)

摘要 为进一步研究惯容器的实现形式与力学性能特征, 研制了新型流体惯容器装置。首先, 在单通道伺服激振台架上进行力学性能测试, 分析其非线性因素及对力学输出的影响机理; 然后, 考虑采用基于统计理论的支持向量机方法建立流体惯容器的力学输出预测模型, 分别研究了不同激振频率、不同位移输入条件下的流体惯容器力学性能输出; 最后, 利用全局搜索能力较优的量子遗传算法优化径向基函数的方差与惩罚因子, 并将构建的预测模型与试验输出结果相对比。结果表明: 利用支持向量机构建的流体惯容器力学输出预测结果与试验吻合良好, 采用量子遗传算法优化的预测模型具有更高的预测精度, 其方差降幅最大可达到 61.36%, 说明构建的预测模型正确合理, 可为准确掌握流体惯容器动力学特性提供新思路。

关键词 流体惯容器; 量子遗传; 支持向量机; 预测模型

中图分类号 U463.33; TH86

引 言

传统机械隔振网络以“质量-弹簧-阻尼器”为基础。然而, 质量元件在应用中需以地心为参考系, 是单端点机械元件, 其隔振潜能及推广应用受到限制。针对上述缺陷, Smith^[1] 最早提出“惯质”概念, 并给出具有两个端点的惯容器实现装置, 其隔振潜力已在车辆悬架^[2-6]、火车悬架^[7-8]、建筑物隔振^[9]及机械隔振系统^[10-11]得到证实。目前常见的惯容器实现形式有滚珠丝杠式、齿轮齿条式^[12]、液压-泵式^[13]。文献^[14]建立了包含滚珠丝杠惯容器背隙、摩擦力及丝杠弹性效应的惯容器非线性模型, 讨论了非线性因素对悬架性能的影响。文献^[15]对液力式惯容器进行仿真测试, 研究了摩擦力及流动压力损失对惯容器力学性能的影响, 并开展了试验研究证明了理论模型的正确性。孙晓强等^[16]最早提出应用人工智能算法对滚珠丝杠式惯容器进行力学性能预测, 取得了较好效果。

Swift 等^[17]利用流体流经细长管径而产生的惯性效果, 设计了一种新型流体式惯容器, 然而, 由于受摩擦、压力损失及流体非线性因素的影响, 无法建立其准确的数学模型。为准确掌握流体惯容器的力学性能, 笔者研制了流体惯容器装置并开展了台架

试验, 在深入分析流体惯容器受非线性因素的影响基础之上, 为解决传统神经网络在小样本预测精度不够理想的难题, 将量子遗传算法与支持向量机相结合, 构建流体惯容器力学性能的智能预测模型, 并利用台架测试数据检验所建模型的预测精度。

1 流体惯容器的工作原理

1.1 流体惯容器的结构

理想惯容器的动力学模型可表示为

$$F = b(a_1 - a_2) \quad (1)$$

其中: F 为施加在惯容器两端点的一对力; a_1, a_2 为两端点的绝对加速度; b 为惯质系数, kg。

流体惯容器主要由机械式液压缸与细长的螺旋管组成, 其结构示意图如图 1 所示。

图 1 中, 当流体惯容器两端点受到一对力 F 的作用时, 活塞杆连同活塞推动液压缸筒左侧的流体进入细长螺旋管, 流经细长螺旋管的过程中, 流体的惯性效应为惯容器的实现提供了可能。可以看出, 与现有的惯容器实现方式相同, 流体惯容器利用细长的螺旋管实现将流体在液压缸内的平动转化为螺旋管中的旋转运动, 由此形成“液体飞轮”的作用效

* 国家自然科学基金资助项目(51405202); 中国博士后科学基金面上资助项目(2014M561591); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(KYLX15_1081)

收稿日期: 2016-05-12; 修回日期: 2016-06-21

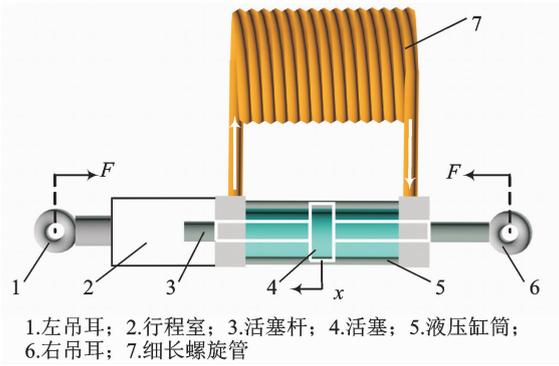


图1 流体惯容器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of fluid inerter

果。流体惯容器与现有的滚珠丝杠惯容器、齿轮齿条惯容器相同,均具有两个自由运动的端点,可作为独立的隔振元件融合设计于隔振系统结构中,其提供的惯性作用力可有效阻隔低频段振动的传递,具备有效的减振效果。

1.2 惯质系数的确定

理想状况下,假定液压缸装置密封良好,且油液不可压缩。液压缸内的有效截面积 S_1 为

$$S_1 = \pi(r_2^2 - r_1^2) \quad (2)$$

其中: r_1 为活塞杆半径; r_2 为液压缸内半径。

细长螺旋管的有效截面积 S_2 可表示为

$$S_2 = \pi r_3^2 \quad (3)$$

其中: r_3 为螺旋管半径。

因此,螺旋管中流体的质量 m 可表示为

$$m = \rho S_2 l \quad (4)$$

其中: l 为螺旋管长度; ρ 为流体密度。

当活塞移动位移 x 时,根据流体体积守恒原则,得到

$$\pi(r_2^2 - r_1^2)x = \frac{\theta}{2\pi} \pi r_3^2 \sqrt{h^2 + (2\pi r_4)^2} \quad (5)$$

其中: h 为螺旋管螺距; r_4 为细长螺旋管的螺旋半径; θ 为流体进入螺旋管中相应的转角。

流体在螺旋管中转动产生的转动惯量 J 为

$$J = m r_4^2 \quad (6)$$

根据能量守恒定理,可得

$$\frac{1}{2} b \dot{x}^2 = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (7)$$

由此可以确定惯质系数的表达式为

$$b = \frac{m}{1 + \left(\frac{h}{2\pi r_4}\right)^2} \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 \quad (8)$$

由式(8)可以看出,流体惯容器的惯质系数取决于螺旋管中的流体质量、螺旋管的螺距、螺旋半径与

截面积以及液压缸的有效截面积。因此,可以通过以上设计参数以获取符合工程需要的惯质系数数值。文中研制的流体惯容器结构参数如表1所示。

表1 流体惯容器结构参数

Tab. 1 Structure parameters of fluid inerter

名称	数值
活塞杆半径 r_1 / m	0.012
液压缸内半径 r_2 / m	0.028
螺旋管半径 r_3 / m	0.005
螺旋半径 r_4 / m	0.1
螺旋管螺距 h / m	0.012
螺旋管长度 l / m	8.99
螺旋管流体质量 m / kg	0.56

根据式(8)计算得到流体惯容器的惯质系数为 370 kg。

2 台架性能测试

2.1 试验方案

文中的流体惯容器力学性能试验在美国 INSTRON8800 单通道液压激振台上进行,试验中,流体惯容器的上端与激振台固定,下端与自由端激振头固定,具体布置方案如图2所示。



图2 台架测试

Fig. 2 Bench Test

在力学性能试验^[16]中,采用典型的正弦位移型信号作为激励输入,惯容器两端点的力作为响应输出。为避免输入振幅过大导致激振台超负荷,在高频时使用小振幅输入,具体试验方案为 0.1~1 Hz 的位移输入为 20 mm, 2~9 Hz 的位移输入为 10 mm, 10~15 Hz 的位移输入为 5 mm。试验中,通过激振头自带的力传感器信号可实时采集力信号并存储到控制台。

2.2 结果分析

表 2 给出了流体惯容器的力学性能试验幅值 F_e 与理论幅值 F_i 对照结果。

表 2 力学性能测试结果
Tab. 2 Results of bench test

振幅/mm	f/Hz	F_i/N	F_e/N
20	0.1	2.9	443
	0.3	26.3	541
	0.5	73.0	655
10	3	1 313.3	1 815
	5	3 648.0	3 938
	8	9 339.0	9 550
	10	7 296.1	7 156
5	12	10 506.4	9 785
	15	16 416.2	14 217

图 3~5 给出了激振频率为 0.1, 5 与 10 Hz 时流体惯容器力学响应的时域图。

根据表 2 及图 3~5 可以看出,流体惯容器的力学性能输出呈现出强非线性的特点。在低频段,试验得到的幅值与理论幅值相差较大,这主要是由于流体惯容器在低频段受摩擦力影响显著,此处的摩擦力主要来源于液压缸内壁与活塞之间的滑动摩擦。然而,与机械式滚珠丝杠惯容器不同的是,在低频段输入激振频率为 0.1 Hz 时,流体惯容的力学输出并非单纯的近似方波^[18],而是呈现出正弦型曲线模式,说明此时除了摩擦力外,液压缸内的流体阻尼效应也起着重要作用。若阻尼效应为零,则输出力即为滑动摩擦力,其形状近似方波,而阻尼效应的存在使得原有的滑动摩擦力产生畸变而形成正弦型曲线,当阻尼效应逐渐增大,滑动摩擦力占据的比重越来越小,流体惯容器的输出力均为正弦型曲线。

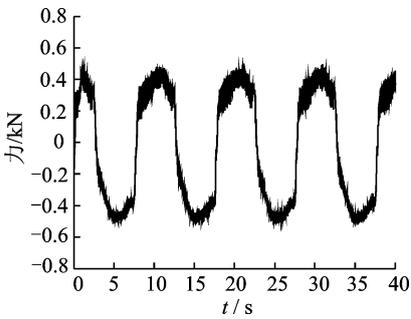


图 3 0.1 Hz 力学响应

Fig. 3 Force response under 0.1 Hz

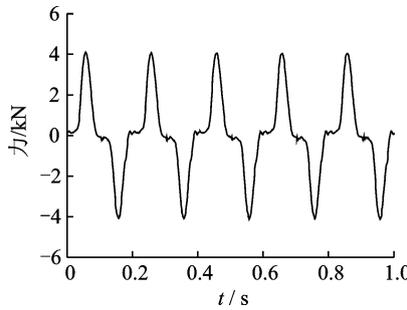


图 4 5 Hz 力学响应

Fig. 4 Force response under 5 Hz

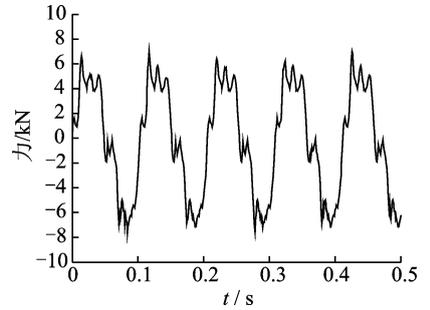


图 5 10 Hz 力学响应

Fig. 5 Force response under 10 Hz

随着激振频率的增加,试验得到的力学输出幅值与理论幅值较为接近,但通过图 4 及图 5 可以看出,流体惯容器的力学输出在周期性正弦曲线的基础上出现了许多非线性影响因素,包括油液的泄露、间隙及弹性效应等,主要集中在平衡位置(速度最大)与位移极限位置(振幅最大)处,其力学响应曲线均出现一定程度的波动。在平衡位置处,由于此时处于振动的速度最大处,流体的阻尼效应使得产生较大的阻尼力,同时油液的泄露与空隙会导致空程畸变^[19-20]的产生。而在极限位置处,由于此时振幅处于最大位置,加速度也处于最大位置处,流体惯容器的换向运动与间隙、弹性效应的影响,造成了力学输出曲线的波动。

通过上述分析可知,流体惯容器的力学性能输出受摩擦力、间隙非线性、弹性效应等综合影响,仅从数学解析的角度无法准确获取流体惯容的力学性能输出,因此,拟运用在分类、模式识别等领域广为运用的支持向量机对流体惯容器的力学性能进行预测。

3 量子遗传支持向量机预测模型

支持向量机 (support vector machine, 简称 SVM) 是一种基于统计学习理论的机器学习方法,其突破了数据维数的限制,可实现样本误差与结构风险的双最小化,具有较强的泛化能力,因此被广泛应用在故障诊断^[21-22]与预测技术^[23-24]上。

首先,建立含有 n 个训练样本的训练样本集 $\{(\mathbf{x}_i, y_i), i=1, 2, \dots, n\}$, 其中: $\mathbf{x}_i (\mathbf{x}_i \in R^d)$ 为第 i 个训练样本的输入列向量; $y_i \in R^d$ 为对应的输出值。

对于非线性系统而言,可以通过选择核函数来代替点积运算,从而减小计算量。常见的核函数有线性、 d 阶多项式、径向基核函数与 Sigmoid 核函数。笔者选取泛化能力与模型预测正确率均较优的径向基核函数进行预测模型的构建,其表达式为

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \exp\left(-\frac{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (9)$$

由此可以得到最优分类函数的表达式为

$$f(\mathbf{x}) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^n a_i^* y_i K(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) + b^*\right) \quad (10)$$

模型的预测效果可以通过均方误差 E 与决定系数 R^2 来决断

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (11)$$

$$R^2 = \frac{\left(n \sum_{i=1}^n y_i \hat{y}_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n \hat{y}_i\right)^2}{\left(n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2\right) \left(n \sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \hat{y}_i\right)^2\right)} \quad (12)$$

其中: n 为测试集样本的个数; y_i 为第 i 个样本的真实值; \hat{y}_i 为第 i 个样本的预测值。

为减小训练误差并提升预测模型的准确性,对采集的样本数据进行归一化处理,并引入惩罚因子 C 。在模型的构建中,模型参数 g (径向基核函数中的方差)与惩罚因子 C 的选取对模型的预测性能有较大影响,因此考虑利用全局搜索能力较强的量子遗传算法对 C 与 g 进行优化求解。

量子遗传算法^[25-26] (quantum genetic algorithm, 简称 QGA) 将量子计算与遗传算法进行有效结合,采用量子比特作为信息的储存单元,并运用量子旋转门作为粒子的更新操作,具备比常规遗传算法更好的寻求效果。量子旋转门的调整操作为

$$\begin{bmatrix} \alpha'_i \\ \beta'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中: $(\alpha_i, \beta_i)^T$ 与 $(\alpha'_i, \beta'_i)^T$ 代表染色体第 i 个量子比特旋转门更新前后的概率幅; θ_i 为旋转角。

现结合流体惯容器力学性能试验工况构建基于量子遗传支持向量机的预测模型,但所构建的预测模型方法不局限于所采用的试验工况。在优化过程中,为确保算法的有效性,并能够快速收敛得到优化解,设定遗传算法的种群大小为 50,进化代数 100。惩罚因子 C 越大,所得的支持向量数越多,导致计算量增大,为简化计算,优化变量的取值范围均设置为 $[0, 10]$,利用训练样本进行训练,以均方误差 E 作为遗传优化的适应度函数,经过优化求解,得到惩罚因子 C 的取值为 0.4,核函数中的方差 g 取值为 0.6。

在样本的采集输入中,以流体惯容器自由端在时间序列中某时刻的位移输入、速度输入与加速度输入组成的列向量构成输入样本,以惯容器两端点的力信号作为输出向量。由于激励输入为正弦型位移输入,可通过位移型输入表达式推导得到速度输入与加速度输入的曲线表达式。为提高预测精度,每个工况采集 100 组数据点,在不同频率下对流体惯容器的力学性能进行预测输出。在 Matlab 环境下读取采集到的样本数据,利用 Svmpredict 函数进行仿真测试,并对输出的预测值进行对比。

4 结果分析

为便于分析,文中采用在每个工况测试的 100 组数据点中,随机抽取 70 组样本数据作为支持向量机训练样本,另外 30 组数据作为测试数据。图 6~8 给出了激振频率为 0.5, 3, 10 Hz 下的流体惯容器预测输出。

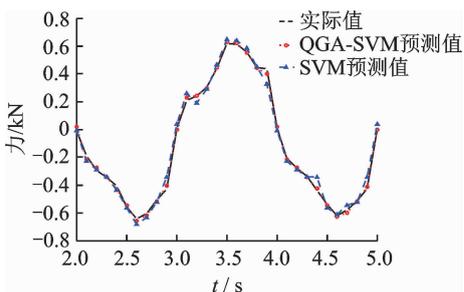


图 6 0.5 Hz 力学预测输出
Fig. 6 Predict force under 0.5 Hz

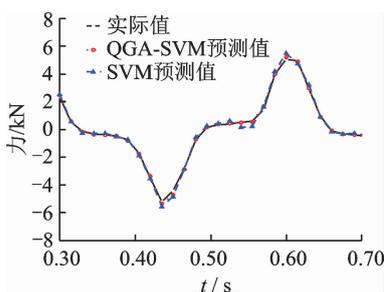


图 7 3 Hz 力学预测输出
Fig. 7 Predict force under 3 Hz

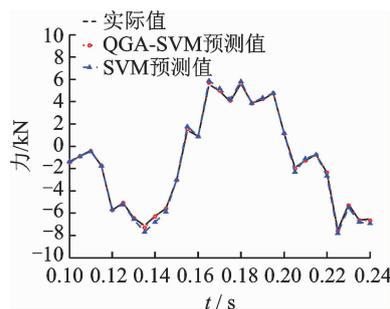


图 8 10 Hz 力学预测输出
Fig. 8 Predict force under 10 Hz

表 3 给出了 3 种频率下流体惯容器力学预测输出的均方误差 E 与决定系数 R^2 。

分析可知,激振频率在 0.5 Hz 下,采用量子遗传算法优化的 QGA-SVM 预测模型的决定系数由 97.04% 提升至 99.01%,均方误差由 0.004 852 降至 0.002 373,降幅达 51.09%;激振频率在 3 Hz

下,QGA-SVM 预测模型相较于 SVM 预测模型的决定系数由 97.61% 提升至 99.41%,均方误差由 0.002 945 降至 0.001 138,降幅达 61.36%;在激振频率为 10 Hz 情况下,相较于 SVM 预测模型,改进的 QGA-SVM 预测模型的决定系数由 97.35% 提升至 99.32%,均方误差由 0.003 779 降至 0.001 475,

表 3 预测输出参数
Tab. 3 Parameters of predict

f/Hz	预测输出	SVM	QGA-SVM
0.5	E	0.004 852	0.002 373
	R^2	97.04%	99.01%
3	E	0.002 945	0.001 138
	R^2	97.61%	99.41%
10	E	0.003 779	0.001 475
	R^2	97.35%	99.32%

降幅达 60.97%。综上所述可以看出,虽然 SVM 预测模型已具备较好的预测精度,但在工程应用中,能够准确实现目标输出的跟踪具有实际的工程应用价值,采用笔者提出的 QGA-SVM 预测模型具备更高的预测精度,更适应于工程应用。

5 结束语

流体惯容器作为一种新型的惯容器实现方式,其力学性能受摩擦力、流体寄生阻尼、装置弹性效应等因素的影响,呈现出复杂的非线性特征,通过力学性能试验可有效揭示非线性因素对流体惯容力学输出的影响机理。利用支持向量机对小样本数据进行训练,笔者构建的流体惯容器预测模型可对流体惯容器的力学性能输出进行准确预测。经由量子遗传算法优化后的支持向量机预测模型具备更高的预测精度,训练集的均方误差最高可下降 61.36%。采用智能算法对流体惯容器的力学性能进行预测,可有效掌握惯容器的力学性能输出与输入变量的对应关系,为准确建立惯容器的动力学模型提供新思路。在工程应用中,可有效构建流体惯容器输入与输出之间的对应关系,为工程隔振系统的精确建模提供新方法。

参 考 文 献

[1] Smith M C. Synthesis of mechanical networks: the inerter [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47 (10): 1648-1662.

[2] Smith M C, Wang F C. Performance benefits in passive vehicle suspensions employing inerters [J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 42 (4): 235-257.

[3] 杨晓峰,沈钰杰,陈龙,等. 基于动力吸振理论的车辆被动 ISD 悬架设计与性能研究 [J]. 汽车工程, 2014, 36(10): 1262-1266.
Yang Xiaofeng, Shen Yujie, Chen Long, et al. Design and performances analysis of vehicle ISD suspension based on dynamic vibration absorber theory [J]. Auto-

motive Engineering, 2014, 36 (10): 1262-1266. (in Chinese)

[4] 张孝良,陈龙,聂佳梅,等. 2 级串联型 ISD 悬架频响特性分析与试验 [J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2012, 33(3): 255-258.
Zhang Xiaoliang, Chen Long, Nie Jiamei, et al. Analysis and experiment of frequency response characteristics of two-stage series-connected ISD suspension [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2012, 33(3): 255-258. (in Chinese)

[5] 陈龙,杨晓峰,汪若尘,等. 基于二元件 ISD 结构隔振机理的车辆被动悬架设计与性能研究 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(6): 90-95.
Chen long, Yang Xiaofeng, Wang Ruochen, et al. Design and performance study of vehicle passive suspension based on two-element inerter-spring-damper structure vibration isolation mechanism [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(6): 90-95. (in Chinese)

[6] 张孝良,聂佳梅,陈龙,等. 基于惯容-弹簧-阻尼结构体系的被动天棚阻尼悬架系统 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 10-14.
Zhang Xiaoliang, Nie Jiamei, Chen Long, et al. Passive skyhook-damping suspension system based on inerter-spring-damper structural system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 10-14. (in Chinese)

[7] Wang Fucheng, Liao Minkai, Liao Bohuai, et al. The performance improvements of train suspension systems with mechanical networks [J]. Vehicle System Dynamics, 2009, 47 (7): 805-830.

[8] 张剑,沈钢. 惯容悬挂元件对铁路车辆垂向振动的影响 [J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(4): 11-15.
Zhang Jian, Shen Gang. Effects of inerter suspension components on vertical vibration of railway vehicles [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2014, 31(4): 11-15. (in Chinese)

[9] Wang Fucheng, Hong Minfeng, Chen Chengwei. Building suspension with inerters [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2010, 224 (8): 1605-1616.

[10] 刘彦. 基于惯容器的机械振动被动控制系统传递特性分析 [J]. 中国舰船研究, 2016, 11(1): 108-113.
Liu Yan. Analysis of the transmission characteristics of mechanical passive control systems with the inerter [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(1): 108-113. (in Chinese)

[11] 温华兵,咎浩,陈宁,等. 惯容器对隔振系统动态性能影响研究 [J]. 实验力学, 2015, 30(4): 483-490.
Wen Huabing, Zan Hao, Chen Ning, et al. Study of the impact of inertia container on the dynamic properties of vibration isolation system [J]. Journal of Experimen-

- tal Mechanics, 2015, 30(4): 483-490. (in Chinese)
- [12] Papageorgiou C, Smith M C. Laboratory experimental testing of inerters [C]//Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference. Seville, Spain: IEEE, 2005: 3351-3356.
- [13] Wang Fucheng, Hong Minfeng, Lin Tzchain. Design and testing a hydraulic inerter [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 225 (1): 66-72.
- [14] Wang Fucheng, Su Weijun. Impact of inerter nonlinearities on vehicle suspension control[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(7): 575-595.
- [15] 陈龙,任皓,汪若尘,等. 液力式惯容器力学性能仿真与试验研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(12): 87-92. Chen Long, Ren Hao, Wang Ruochen, et al. Simulations and tests for mechanical properties of a hydraulic inerter [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33 (12): 87-92. (in Chinese)
- [16] 孙晓强,陈龙,汪若尘,等. 滚珠丝杠式惯容器试验及力学性能预测 [J]. 振动与冲击, 2014, 33(14): 61-65. Sun Xiaoqiang, Chen Long, Wang Ruocheng, et al. Experiment and mechanical properties prediction on ball-screw inerter [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(14): 61-65. (in Chinese)
- [17] Swift S J, Smith M C, Glover A R. Design and modelling of a fluid inerter [J]. International Journal of Control, 2013, 86(11): 2035-2051.
- [18] Wang Fucheng, Chan Hsiangan. Vehicle suspensions with a mechatronic network strut [J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(5): 811-830.
- [19] 舒红宇,罗霜,汪明明,等. 液力减振器空程冲击过程的流固耦合仿真与分析 [J]. 振动与冲击, 2015, 34 (21): 124-128. Shu Hongyu, Luo Shuang, Wang Mingming, et al. Fluid-structure interaction simulation and analysis for oil-loss-travel impact of hydraulic shock absorbers [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(21): 124-128. (in Chinese)
- [20] 刘建勇,顾亮. 双筒式液力减振器空程性畸变的理论分析 [J]. 机械设计与研究, 2009, 25(5): 23-25. Liu Jianyong, Gu Liang. Analysis on the oil loss travel distortion of dual-tube shock absorber [J]. Machine Design and Research, 2009, 25(5): 23-25. (in Chinese)
- [21] 薛延刚,牛广文,赵海英,等. 基于时间序列模糊贴近度特征与改进 SVM 模型的水电机组轴心轨迹智能诊断 [J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(12): 1054-1057. Xue Yangang, Niu Guangwen, Zhao Haiying, et al. Axis orbit automatic identification on time-series similarity mining for hydropower units [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(12): 1054-1057. (in Chinese)
- [22] 李学军,何能胜,何宽芳,等. 基于小波包近似熵和 SVM 的圆柱滚子轴承诊断 [J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(6): 1031-1036. Li Xuejun, He Nengsheng, He Kuanfang, et al. Cylindrical roller bearing diagnosis based on wavelet packet approximate entropy and support vector machines [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(6): 1031-1036. (in Chinese)
- [23] 崔守娟,张西良,徐云峰,等. 基于 LS-SVM 的螺旋定量加料预测及试验研究 [J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(12): 1099-1104. Cui Shoujuan, Zhang Xiliang, Xu Yunfeng, et al. Experimental research and prediction of screw dosing based on least squares support vector machine [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(12): 1099-1104. (in Chinese)
- [24] 朱成云,刘星桥,李慧,等. 工厂化水产养殖溶解氧预测模型优化 [J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 273-278. Zhu Chengyun, Liu Xingqiao, Li Hui, et al. Optimization of prediction model of dissolved oxygen in industrial aquaculture [J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2016, 47(1): 273-278. (in Chinese)
- [25] 夏俊,凌培亮,虞丽娟,等. 基于量子遗传算法的无线传感网络路由优化 [J]. 同济大学学报:自然科学版, 2015, 43(7): 1097-1103. Xia Jun, Lin Peiliang, Yu Lijuan, et al. Routing optimization on wireless sensor networks based on quantum genetic algorithm [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43(7): 1097-1103. (in Chinese)
- [26] 马晓丹,刘刚,周薇,等. 基于量子遗传模糊神经网络的苹果果实识别 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 227-232. Ma Xiaodan, Liu Gang, Zhou Wei, et al. Apple recognition based on fuzzy neural network and quantum genetic algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2013, 44(12): 227-232. (in Chinese)



第一作者简介: 沈钰杰,男,1990年10月生,博士、讲师。主要研究方向为车辆动态性能模拟与控制。曾发表《Improved design of dynamic vibration absorber by using the inerter and its application in vehicle suspension》(《Journal of Sound and Vibration》2016年第361卷)等论文。

E-mail:shenliang6018@163.com