

# Study and Progress of Nonlinear Dynamics of Semi-Active Suspension System Vibration for Railway High-Speed Train

Zhigang Yan<sup>1</sup>, Yanying Zhao<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

<sup>2</sup>School of Aircraft Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang Jiangxi

Email: yzg@nchu.edu.cn, yanyingzhao@nchu.edu.cn

Received: Jul. 27<sup>th</sup>, 2018; accepted: Aug. 3<sup>rd</sup>, 2018; published: Aug. 10<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The speed of railway high speed train is constantly increasing, and the vibration of locomotives and vehicles is increased. In order to improve the stability and stationary, the active or semi-active suspension system is used to implement active or semi-active control. In semi-active suspension system, the active suspension system is replaced by a controlled damper instead. The secondary suspension system is a controlling damper, and the damper force can be adjusted timely and improve the dynamical behavior. In the present paper, the nonlinear dynamics of semi-active suspension vibrating system is summarized, including the semi-active control strategy and vibration absorber technique. The study and progress of nonlinear dynamics and semi-active control are reviewed and the prospect of semi-active suspension vibrating system is also discussed.

## Keywords

Railway High-Speed Train, Vibration, Nonlinear, Semi-Active Suspension System, Active Control, Time Delay

---

# 高速列车半主动悬挂系统振动的非线性动力学研究进展及展望

严志刚<sup>1</sup>, 赵艳影<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>南昌航空大学航空制造工程学院, 江西 南昌

<sup>2</sup>南昌航空大学飞行器工程学院, 江西 南昌

\*通讯作者。

## 摘要

列车的速度不断提高, 导致机车和车辆的振动加剧。要提高列车运行的稳定性和平稳性, 需要采用主动或半主动悬挂系统, 对运动进行主动或半主动控制。半主动悬挂系统用可控阻尼器代替主动悬挂系统中的主动力作动器, 二系阻尼器是一个可控阻尼器, 控制系统可以实时调节阻尼力, 从而改善悬挂系统动力学性能。本文主要对半主动悬挂系统控制策略和减振器技术的研究现状进行总结, 并对高速列车半主动悬挂系统振动有关非线性动力学方面的研究进行了展望。

## 关键词

高速列车, 振动, 非线性, 半主动悬挂系统, 主动控制, 时滞

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在中国铁路高速化的背景下, 列车运行速度不断提高。然而随着速度的提高, 机车和车辆的振动性能不断恶化。引起高速列车振动增加的主要原因有: 长波长轨道不平顺的影响; 车辆自身结构, 如列车载荷变化或车体轻量化的影响; 运营中空气动力作用的影响。现代车辆正朝着安全、舒适的方向发展, 因轨道不平顺导致的车体振动引起了学者们的关注。悬挂系统智能化解决了传统被动悬挂存在的舒适性和稳定性不能兼顾的问题, 并能适应变化的行驶工况和任意道路激励, 代表了悬挂系统的发展方向。由于全主动悬挂系统需要安装测量传感装置、作动器、控制装置及能量输入装置, 不可避免地提高了列车的成本。同时在有限的空间中安装作动器, 势必导致列车结构更加复杂。复杂的主动作动器和列车结构将导致可靠性降低和维修费用增加, 而且, 全主动悬挂系统无论采用何种形式的作动器, 都将大量消耗外界附加能量, 这是全主动悬挂的固有缺陷。半主动悬挂系统以可控阻尼器代替了主动悬挂中的主动力作动器, 系统通过可控阻尼元件产生连续可调的阻尼力以改善列车动力学性能。实验证明半主动悬挂在控制品质上接近全主动悬挂, 同时又无需复杂的控制结构和外加的动力源, 近年来得到了国内外的高度重视。高速列车半主动悬挂系统振动的主要研究有以下几个方面: 对高速列车半主动悬挂系统动力学性能的研究, 如稳定性、运行品质、稳态曲线通过等; 对高速列车半主动悬挂系统控制策略的研究; 对高速列车半主动悬挂系统减振器或阻尼器技术的研究。对高速列车半主动悬挂系统控制策略及减振器技术的研究过程中都或多或少的涉及到动力学行为的研究, 因此本文主要对半主动悬挂系统控制策略和减振器技术的研究进行总结和展望。

## 2. 高速列车半主动悬挂系统控制策略的研究

1974年 Karnopp 教授等[1]提出了天棚阻尼控制半主动悬挂控制方式, 由于天棚阻尼控制的阻尼力都是根据速度信号的相位进行快速切换的, 减振器处于高速开关工作状态, 对减振器的频率响应有较高的

要求, 在半主动控制中可能出现高频颤振现象, 有损于减振器的寿命和系统的可靠性。因此, 很多学者提出了天棚阻尼不同的改进形式, 称改进型天棚阻尼或扩展型天棚阻尼。1975年, Margolis等[2]提出 on-off 半主动控制策略, 基于降低悬挂质量的加速度和速度的目的, 当悬挂质量和非悬挂质量同向运动, 并且非悬挂质量的速度较大时, 控制关闭, 不产生阻尼力或者产生较小的力。而在其它情况下产生较大的阻尼力。连续可调式半主动控制悬挂系统要求减振器根据理想约束所需而产生天棚阻尼力, 当不需要阻尼力时, 减振器处于工作闲置状态, 但在应用中需要设定可产生的最大阻尼力的极限值。列车半主动控制减振器的基本控制原理是根据对各传感器的信号分析, 通过实施控制策略, 调节可变阻尼减振器的阻尼系数, 实现反馈控制。由于列车是一个非常复杂的系统, 其振动性能采用传统的经典控制方法难以奏效。根据国内外已经开展的技术研究和工程应用现状, 半主动悬挂控制主要采用以下几种方法。PID 控制由于其算法简单、直观、鲁棒性强和可靠性高, 在实际工业工程中得到了广泛应用。在实际半主动控制中, 一般把 PID 控制与模糊控制或者滑模控制相结合使用[3]。王骏等[4]将 PID 与 GPC 控制结合起来, 获得了一种能抑制超调又具有 PID 结构的预测控制算法, 具有良好的横向减振效果, 比被动悬挂的平稳性有明显提高。采用最优控制策略的主要有线性二次最优控制[5][6],  $H_\infty$ 最优控制[7], 统计最优控制等。由于悬挂系统是含有许多不确定因素的非线性、时变、高阶动力系统, 采用最优控制方法难以得到预定的性能要求, 所以在半主动悬挂系统中应用较少[8]。鲁棒控制在铁道车辆主动悬挂控制中的应用研究, 最早在欧美和日本等国。我国西南交通大学张汉全教授课题组开展了车辆主动悬挂的鲁棒控制研究[9][10]。文献[9]介绍了国外利用  $H_\infty$ 与  $\mu$ 方法研究车辆主动悬挂鲁棒控制的成果, 分别对铁道车辆主动悬挂的  $H_\infty$ 控制和磁悬浮列车主动悬挂的  $H_\infty$ 控制进展情况进行了详细综述。自适应控制方法是在系统运行过程中, 根据控制器的输出量和被控对象的输出量在线辨识系统模型, 对辨识出的模型采用线性最优控制理论设计最优调节算法。由于其能够处理小范围缓慢变系统问题, 对列车悬挂系统的非线性问题非常适用[11]。杨建伟等[12]采用自校正自适应控制方法进行控制前和控制后的试验对比研究。建立了包含车体横移和车体侧滚两个自由度的车辆模型, 通过半主动悬挂控制, 车辆模型在不同速度等级时车体的平稳性和加速度的最大值都得到了很大的提高。模糊控制的思想是用语言归纳控制规则作为控制策略, 运用语言变量和模糊集合理论形成控制算法。运用模糊控制策略可动态地确定车辆运行时的阻尼值, 通过 PWM 控制方式实现阻尼的调节[13]。丁建明等[14]构造了高速列车横向半主动悬挂系统的模糊控制结构, 通过抑制车体摇头振动来抑制车体横向振动。建立了如下表征列车悬挂系统横向振动特性的 17 自由度动力学模型。

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = G\omega$$

$$X = (y_{w1}, y_{w2}, y_{w3}, y_{w4}, \Psi_{w1}, \Psi_{w2}, \Psi_{w3}, \Psi_{w4}, y_{t1}, y_{t2}, \phi_1, \phi_2, \Psi_{t1}, \Psi_{t2}, y_c, \phi_c, \Psi_c)$$

其中:  $y_{w1}, y_{w2}, y_{w3}, y_{w4}$  分别为 4 个轮对的横移运动;  $\Psi_{w1}, \Psi_{w2}, \Psi_{w3}, \Psi_{w4}$  分别为 4 个轮对的摇头运动;  $y_{t1}, y_{t2}$  分别为 2 个转向架的横移运动;  $\phi_1, \phi_2$  分别为 2 个转向架的侧滚运动;  $\Psi_{t1}, \Psi_{t2}$  分别为 2 个转向架的摇头运动;  $y_c, \phi_c, \Psi_c$  分别为车体的横移、侧滚和摇头运动;  $M, C, K$  分别为整车质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $G$  为轨道输入分布矩阵;  $\omega$  为轨道方向和水平不平顺输入。采用模糊控制策略, 高速车体平稳性得到很大改善, 摇头振动幅值、横向振动幅值都得到了明显的抑制。

Yang 等[15]基于模糊理论的 PID 自适应控制方法对半主动悬挂系统的横向振动进行了研究, 结果显示车体和转向架的横向加速度得到了很好的控制, 并且提高了稳定性和舒适性。宋雨等[16]以车体前后两端横向振动加速度的均方根作为遗传算法优化性能指标, 采用遗传算法优化设计模糊半主动悬挂系统, 很好的抑制了车体横向振动的加速度。神经网络控制无需对实际的悬挂系统作线性化处理, 所控制的悬挂系统具有很强的适应能力, 一般将神经网络与其它控制方法相结合构成复合控制模式, 能够发挥实际应用价值[17]。丁问司等[18]采用非线性神经网络自适应控制方法较好地解决了列车横向振动问题, 仿真

和实测的结果表明横向平稳性指标有很大的改善。陈春俊等[19]开展了车辆主动、半主动悬挂预测控制系统的设计和试验研究,设计了一种改进的广义预测控制算法,并设计了列车横向半主动悬挂系统,有效改善了列车的横向振动。马新娜等[20]提出了根据控制效果实时修正磁流变阻尼器输入参数的自适应模糊控制策略,采用了 Bouc-Wen 立方修正模型,建立了基于磁流变阻尼器的 17 自由度高速机车横向半主动模型,与被动控制和简单模糊控制相比,自适应模糊控制策略能有效衰减机车横向振动,显著提高高速列车的平稳性和乘坐舒适性,在低频段的控制效果更明显。刘永强等[21]通过 ADAMS 和 MATLAB 联合仿真分析,对高速列车二系悬挂系统横向半主动减振器进行了分析,设计了开关控制器和改进型开关控制器,对比被动控制车体的横向加速度均方根值和车辆横向运行平稳性指标都有降低了很多。刘宏友等[22]研制了基于天棚控制原理的开关式横向半主动悬挂系统,确定了车辆过曲线时车体离心加速度的滤波频率范围,所研制的开关式半主动悬挂系统可以有效地维持和断开减振器所提供的阻尼力,提高了列车的运行平稳性。刘宏友等[23]又基于天棚阻尼控制原理设计了阻尼连续可调式半主动悬挂系统,半主动悬挂下的车体加速度均方根值和车辆运行平稳性指标都有大大的改善。所设计的半主动悬挂系统可以实时地根据车体横向振动所需阻尼力,切断和提供阻尼力,从而提高列车运行的平稳性。

### 3. 高速列车半主动悬挂系统阻尼器技术的研究

作为半主动控制实现的载体,阻尼器技术近年来成为研究热点。目前应用最多的有液压阻尼器,电流变阻尼器和磁流变阻尼器等[24]。丁问司等[25]介绍了两种高速开关阀控制的高速列车横向半主动液压减振器,通过节流孔过流面积的调整来实现减振器阻尼力的控制,这种液压减振器由于价格低、抗污染能力强、高频响等特点,适合于恶劣的工况下工作。之后,在文献[25]中又设计了一种新型结构的电液控制阀,具有反比例功能的电液控制阀能够更好地满足高速列车减振器的功能,设计样机经过试验能够满足阀的功能和技术指标。胡均平等[27]设计了一种通过电液比例换向阀改变阻尼力的油压减振器,所设计的半主动减振器可以实现阻尼力的无级调节。在比例控制失效的情况下,通过比例阀油路并联的阻尼孔和溢流阀共同作用实现别人都能够减振器的功能。然而,阻尼介质油始终制约着使用性能和使用寿命的发展,为此,越来越多的国家和地区都将研究投向电流变和磁流变阻尼器[28],其中磁流变阻尼器是近年来发展最为迅速的一种智能减振器。磁流变液是一种新型的智能材料,在外加磁场作用下,可在毫秒级时间内连续、可逆地从牛顿流体变为剪切屈服应力较高的粘塑性体。采用磁流变液制作的阻尼器具有结构简单、响应迅速、出力大和耗能小等特点。基于磁流变阻尼器的半主动悬挂系统可以根据轨道条件的不同随时调节阻尼力,达到与弹性元件的最佳匹配,以满足车辆平顺性和舒适性的要求,而且当控制电路部分失效时,磁流变阻尼器仍可以作为被动式阻尼器工作,具有 fail-safe 的特点,因此磁流变半主动悬挂系统有着良好的工程应用前景[29]。高国生等[30]建立了磁流变阻尼器的高速列车横向半主动悬挂系统模型,分析了半主动悬挂系统的稳定性。之后在文献[31]中,在对磁流变阻尼器的阻尼特性进行试验研究的基础上,提出了一种磁流变阻尼器数学模型,计算模型中的磁流变阻尼器阻尼力的表示形式如下:

$$F = c_0 \dot{x} + \alpha z$$

其中滞变位移有下式子确定:

$$\dot{z} = -\gamma \dot{x} z^2 - \beta x z^2 + A \dot{x} - \rho z$$

$\beta, \gamma, \rho$  和  $A$  是与滞后环形状有关的参数,  $c_0$  为粘滞系数,  $\alpha$  为滞变位移系数。对不同的磁流变液,参数  $c_0, \alpha, \beta, \gamma$  和  $A$  的取值是不同的。文章用优化方法确定了模型参数。

周洪涛等[32]在文献[31]的基础上研究了磁流变阻尼器的高速列车横向半主动悬挂系统的参数自适应模糊控制方法,研究证明该控制方法能明显减小高速列车横向振动的加速度,提高列车运行稳定性和



舒适性。但磁流变半主动悬挂系统作为一个控制系统, 控制时滞的存在是不可避免的。实际应用中, 二系半主动悬挂控制系统中会出现一系列时滞因素。车体及构架的测量信号从传感器至控制器的传输时滞, 由加速度信号经过积分运算得到速度信号的计算时滞, 计算天棚阻尼力控制规律引起的计算时滞, 控制量从控制计算机到可控阻尼器的传输时滞, 可控阻尼器接受信号到阻尼器开始有输出的反应时滞, 可控阻尼器输出阻尼力到有控制作用需要的时间。控制时滞对系统的稳定性有着重要的影响, 有必要对其进行深入的研究。廖英英等[33]利用多体动力学技术和联合仿真的方法, 对半主动开关控制和改进型开关控制中存在的时滞影响车辆动力学性能的问题进行了仿真分析, 结论表明时滞对车辆横向动力学性能的影响较大, 证实了时滞分析的必要性。杨明辉[34]对具有时滞环节的二系横向半主动悬挂机车仿真模型进行分析, 研究了时滞对各种动力学指标的影响, 说明时滞会恶化机车的动力学性能。西南交通大学的曾京教授等[35]对开关阻尼控制的铁道客车系统动力学性能进行了研究, 分析了半主动减振器的时滞对客车系统临界速度和随机响应的影响。刘宏友等[36]的研究表明, 系统时滞对半主动悬挂系统影响较大, 与开关半主动模式相比, 系统时滞对天棚半主动悬挂模式控制车体振动的效果影响较大。王月明[37]分析了悬挂控制系统的时滞对半主动悬挂系统和主动悬挂系统的不同影响。分析和仿真实验表明, 半主动悬挂控制系统的时滞不影响系统的稳定性, 但影响系统的响应性能。过大的系统时滞将使系统的响应加速度增大, 平稳性变差, 但不致使系统失稳。

振动控制系统中有关时滞动力学的问题主要有时滞消除和时滞利用两方面的问题, 对时滞消除技术方面的理论研究成果较多。以上对高速列车半主动悬挂系统中时滞的处理大都是在假定系统中时滞量已知的前提下, 讨论其消除方法, 理论研究成果虽多, 但在实验方面的研究较少。Liu 等[38]对时滞反馈控制实验进行研究, 实现了对双倒立摆四个平衡位置的镇定。加拿大的 Campbell 等[39]也在实验中验证了通过时滞反馈控制可以镇定单摆的稳定。Ohta 和 Murakami [40]则通过对双摆控制中实施时滞补偿获得摆的稳定性。Chen 等[41]在对时滞问题处理方法上是直接通过时滞微分方程设计时滞控制律, 不但可以处理小时滞问题, 而且还能处理大时滞问题以及多时滞问题。在时滞利用技术研究方面, 则是忽略系统本身固有的时滞量, 人为的在控制系统中引入时滞量, 从而通过控制时滞量来提高系统的性能达到一定的控制效果。1992 年, 美国学者 Olgac [42]最早提出时滞减振技术。自 Olgac 教授等提出了时滞减振技术以来, 减振技术的研究得到了一定的进展。Olgac 教授领导的课题组经过十年的理论和实验研究, 取得了线性系统时滞减振技术研究方面的理论依据[43] [44] [45] [46] [46]和实验结果[48] [49] [50]。该方法的主要思想是针对主系统设计一个带有时滞反馈的时滞共振器, 该共振器是由质量、弹簧、阻尼器组成的一个带有反馈控制的吸振器结构。吸振器的振动控制方程如下:

$$m_a \ddot{x}_a(t) + c_a \dot{x}_a(t) + k_a x_a(t) + g x_a(t - \tau) = 0$$

其中  $m_a$  代表吸振器的质量,  $c_a$  代表吸振器的阻尼,  $k_a$  代表吸振器的刚度,  $g x_a(t - \tau)$  代表具有时滞的反馈控制项,  $g$  为反馈增益系数,  $\tau$  为时滞量。将该吸振器附加到主振动系统上, 组成一个两自由度的质量、弹簧、阻尼振动系统。主系统在外激励的作用下产生振动, 此时通过调节吸振器的反馈增益系数和时滞量, 使得吸振器产生共振, 将外激励的能量全部吸收, 从而保证主系统不产生振动, 因此该吸振器称之为时滞共振器。反馈增益系数和时滞量根据下式进行调节:

$$g_c = \pm \sqrt{(c_a \omega_c)^2 + (m_a \omega_c^2 - k_a)^2}$$

$$\tau_c = \frac{1}{\omega_c} \left\{ \tan^{-1} \left[ \frac{c_a \omega_c}{m_a \omega_c^2 - k_a} \right] + 2(l-1)\pi \right\}, \quad l = 1, 2, \dots$$

其中  $\omega_c$  为外激励频率,  $g_c$  和  $\tau_c$  为需要调节的反馈增益系数和阻尼系数。因为系统的振动微分方程是一个

时滞微分方程, 所以, 采用时滞反馈减振技术需要研究系统的稳定性, 确定系统能够稳定工作时的稳定性区间。

在非线性和时滞减振技术的研究方面, Zhao 等[51]考虑采用时滞和非线性因素的联合耦合作用来控制系统的振动, 取得了非线性振动系统时滞减振技术的理论结果[52] [53] [54] [55]。非线性和时滞的联合作用增大了减振频带的宽度, 反馈增益系数和时滞量都存在一定的调节区间, 通过调节反馈增益系数和时滞两个控制参数能够抑制主系统的振动。

#### 4. 结论及展望

高速列车半主动悬挂系统振动控制及其阻尼控制的研究目前还存在很多问题。对线性系统的理论和实验研究较多, 对非线性系统的研究较少。对新型可控阻尼器, 如磁流变阻尼器等及其控制系统的研究还不成熟。各种因素引起的时滞对振动系统的振动特性及其稳定性的影响的研究还没有引起足够重视, 时滞利用技术还有待进一步开发。下面, 就高速列车半主动悬挂系统的振动在非线性动力学领域的研究前景进行展望。

高速列车半主动悬挂系统是一个典型的非线性、多自由度振动系统, 采用解析法从理论上分析其非线性动力学行为是可行的。目前的一些近似分析方法可以求得振动系统的近似解析解, 但是这些方法的适用范围非常有限。当高速列车半主动悬挂系统中耦合进了时滞参数, 其系统的振动微分方程就是时滞微分方程, 而时滞系统是一个无限维的动力系统, 对于这类高维系统的系统稳定性、分岔分析、复杂动力学行为及其产生的机理分析等具有相当的挑战性。因此, 探讨新的理论分析方法, 不仅能够从根本上解决高速列车半主动悬挂系统非线性动力学行为产生的机理, 更能推动非线性动力学的发展。

智能控制是高速列车半主动悬挂系统未来发展的方向, 传统的半主动阻尼器尽管也存在例如可靠性高的优点, 但是大多不能实现阻尼力快速连续调节, 磁流变阻尼器能够在毫秒内实现无级调节, 实现实时控制。一方面, 磁流变液动态特性比较复杂, 阻尼呈现强非线性; 另一方面对控制系统中时滞问题的研究仍然停留在时滞消除的方向。在控制系统中引入时滞量, 将时滞量作为控制系统的参数变量来分析, 研究非线性和时滞的耦合动力系统, 探索非线性和时滞联合作用的控制效果是非常有前景的方向。

#### 基金项目

国家自然科学基金项目(11372125), 江西省自然科学基金项目(20161BAB101005), 航空科学基金项目(2017ZA56001)。

#### 参考文献

- [1] Karnopp, D.C., Croby, M.J. and Harwood, R.A. (1974) Vibration Control Using Semi-Active Force Generators. *Journal of Engineering for Industry*, **96**, 619-626. <https://doi.org/10.1115/1.3438373>
- [2] Margolis, D.L., Tyle, J.L. and Hrovat, D. (1997) Heave Mode Dynamics of a Tracked Air Cushion Vehicle with Semi-Active Airbag Secondary Suspension. *ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, **119**, 399-407. <https://doi.org/10.1115/1.3426956>
- [3] 中村哲也, 斋藤司, 佐佐木君章, 梶谷泰史. 新型半主动悬挂系统装车试验结果分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2003, 26(6): 51-52.
- [4] 王骏, 卿金伟, 李海滨. PID-GPC 算法在高速列车横向半主动悬挂控制系统中的应用[J]. 西南科技大学学报, 2010, 25(4): 68-72.
- [5] 曾志华, 章一鸣. 车辆主动悬挂的最优控制研究[J]. 振动工程学报, 1992, 5(1): 25-29.
- [6] 董仲美, 王自力, 蒋海波. 基于最优控制的半主动悬挂机车非线性稳定性分析[J]. 内燃机车, 2007(3): 13-16.
- [7] 张汉全, 周斌. 车辆主动悬挂的  $H_\infty$  最优控制[J]. 铁道机车车辆, 1996(2): 43-60.

- [8] 陈春俊. 高速列车横向主动、半主动悬挂控制研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [9] 张汉全, 戴焕云, 周斌, 杨名利.  $H_{\infty}$ 与 $\mu$ 鲁棒控制在车辆主动悬挂中的应用[J]. 铁道学报, 1997, 15(5): 121-128.
- [10] 戴焕云. 车辆主动悬挂的鲁棒控制研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 1999.
- [11] 方敏, 王峻, 陈无畏. 汽车半主动悬架的自适应LQG控制[J]. 汽车工程, 1997, 19(4): 200-205.
- [12] 杨建伟, 黄强, 李伟. 铁道车辆横向半主动悬挂试验系统[J]. 铁道车辆, 2006, 44(12): 4-6.
- [13] 丁问司, 曹诗军. 基于模糊控制的高速列车半主动减振器研究[J]. 液压与气动, 2008, 12: 14-16.
- [14] 丁建明, 陈春俊, 林建辉, 陈哲明, 刘海泉. 高速列车横向半主动悬挂系统模糊控制[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(2): 74-78.
- [15] Yang, Z.Q., Zhang, J.M., Chen, Z.C. and Zhang, B.A. (2011) Semi-Active Control of High-Speed Trains Based on Fuzzy PID Control. *Procedia Engineering*, 15, 521-525. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.099>
- [16] 宋雨, 陈卫东, 张锦. 高速列车半主动悬挂系统遗传优化模糊控制[J]. 噪声与振动控制, 2012, 32(6): 158-164.
- [17] 王月明, 曾京. 车辆横向半主动悬挂的神经网络自适应控制[J]. 铁道学报, 2002, 24(4): 34-37.
- [18] 丁问司, 卜继玲. 基于非线性神经网络的列车半主动悬挂系统[J]. 华南理工大学学报, 2005, 33(12): 75-77.
- [19] 陈春俊, 吴学杰, 张卫华. 列车横向主动悬挂广义预测控制研究[J]. 昆明理工大学学报, 2005, 30(4A): 5-48.
- [20] 马新娜, 杨绍普, 邸书灵. 基于磁流变阻尼器的高速机车横向半主动振动控制研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(7): 126-130.
- [21] 刘永强, 杨绍普, 廖英英, 马新娜. 基于MR阻尼器的高速动车组悬挂系统半主动控制仿真[J]. 振动与冲击, 2010, 29(12): 97-101.
- [22] 刘宏友, 李莉, 王勇. 高速列车开关式横向半主动悬挂系统的理论与实践[J]. 铁道车辆, 2012, 50(1): 1-4.
- [23] 刘宏友, 曾京, 李莉, 丁问司. 高速列车二系横向阻尼连续可调式半主动悬挂系统的研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(4): 69-74.
- [24] 潘双夏, 杨礼康, 冯培恩. 高速列车及其减振系统的发展趋势[J]. 中国机械工程, 2002, 13(24): 2157-2160.
- [25] 丁问司, 刘少军, 卜继玲. 高速开关阀控制的高速列车横向半主动减振器[J]. 机床与液压, 2003(3): 50-51.
- [26] 丁问司. 高速列车半主动减振器电液控制阀研制[J]. 机床与液压, 2005(11): 56-60.
- [27] 胡均平, 钟定清. 高速列车可调阻尼油压减振器的研究[J]. 液压与气动, 2006(6): 71-73.
- [28] 朱春生. 提速和高速列车用油压减振器综述[J]. 机车车辆工艺, 2002(1): 5-8.
- [29] 杨弘. 高速列车减振降噪技术研究[J]. 铁道车辆, 2006, 44(2): 9-14.
- [30] 高国生, 杨绍普, 陈恩利, 马冰玉. 高速机车悬架系统磁流变阻尼器试验建模与半主动控制[J]. 机械工程学报, 2004, 40(10): 87-91.
- [31] 高国生, 杨绍普, 郭京波. 基于磁流变阻尼器的机车横向悬挂半主动控制研究[J]. 功能材料, 2006, 37(5): 802-804.
- [32] 周洪涛, 杨绍普, 朱红霞. 基于模糊控制的高速机车横向半主动控制研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(9): 145-149.
- [33] 廖英英, 刘永强, 刘金喜, 杨绍普. 时滞对高速铁道车辆悬挂系统半主动控制的影响[J]. 北京交通大学学报, 2011, 35(1): 113-118.
- [34] 杨明辉. 半主动悬挂机车横向动力学性能研究[D]: [研究生学位论文]. 成都市: 西南交通大学, 2005.
- [35] 曾京, 戴焕云, 邬平波. 基于开关阻尼控制的铁道客车系统的动力学性能研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(6): 27-31.
- [36] 刘宏友, 李亨利, 李莉, 武立国, 虞大联. 半主动悬挂系统动力学性能仿真分析[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(2): 61-66.
- [37] 王月明. 高速客车半主动悬挂控制技术[D]: [研究生学位论文]. 成都市: 西南交通大学, 2002.
- [38] Liu, B. and Hu, H.Y. (2010) Group Delay Induced Instabilities and Hopf Bifurcations of a Controlled Double Pendulum. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 45, 442-452. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2010.01.001>
- [39] Compbell, S.A., Crawford, S. and Morris, K. (2008) Friction and the Inverted Pendulum Stabilization Problem. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 130, Article ID: 054502. <https://doi.org/10.1115/1.2957631>
- [40] Ohta, T. and Murakami, T. (2009) A Stabilization Control of Bilateral System with Time Delay by Vibration In-

- dex-Application to Inverted Pendulum Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **56**, 1595-1603. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2009991>
- [41] Chen, L.X., Cai, G.P. and Pan, J. (2009) Experimental Study of Delayed Feedback Control for a Flexible Plate. *Journal of Sound and Vibration*, **322**, 629-651. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.11.045>
- [42] Olgac, N., McFarland, D.M. and Holm-Hansen, B.T. (1992) Position Feedback-Induced Resonance: The Delayed Resonator. *ASME Winter Annual Meeting*, **38**, 113-119.
- [43] Olgac, N. and Holm-Hansen, B.T. (1994) A Novel Active Vibration Absorption Technique: Delayed Resonator. *Journal of Sound and Vibration*, **176**, 93-104. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1994.1360>
- [44] Renzulli, M.E., Roy, R.G. and Olgac, N. (1999) Robust Control of Delayed Resonator Vibration Absorber. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **7**, 683-691. <https://doi.org/10.1109/87.799669>
- [45] Jalili, N. and Olgac, N. (1999) Multiple Delayed Resonator Vibration Absorbers for Multi-Degree-of-Freedom Mechanical Structures. *Journal of Sound and Vibration*, **223**, 567-585. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.2105>
- [46] Olgac, N. and Huang, C. (2000) A New Method for Multiple Frequency Vibration Absorption. *Proceedings of the American Control Conference*, Chicago, 2097-2101. <https://doi.org/10.1109/ACC.2000.879571>
- [47] Hosek, M., Elmali, H. and Olgac, N. (1997) A Tunable Torsional Vibration Absorber: The Centrifugal Delayed Resonator. *Journal of Sound and Vibration*, **205**, 151-165. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1997.0996>
- [48] Filipovic, D. and Olgac, N. (1997) Delayed Resonator with Speed Feedback Including Dual Frequency-Theory and Experiments. *Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control*, San Diego, 2535-2540. <https://doi.org/10.1109/CDC.1997.657704>
- [49] Olgac, N. and Jalili, N. (1998) Modal Analysis of Flexible Beams with Delayed Resonator Vibration Absorber: Theory and Experiments. *Journal of Sound and Vibration*, **218**, 307-331. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.1842>
- [50] Cavdaroglu, M.E. and Olgac, N. (2008) Robust Control of Cart-Pendulum Dynamics against Uncertain Multiple Time Delays. *Proceedings of the American Control Conference*, Seattle, 11-13 June 2008, 2178-2183. <https://doi.org/10.1109/ACC.2008.4586815>
- [51] Zhao, Y.Y. and Xu, J. (2007) Effects of Delayed Feedback Control on Nonlinear Vibration Absorber System. *Journal of Sound and Vibration*, **308**, 212-230. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2007.07.041>
- [52] 赵艳影, 徐鉴. 时滞非线性动力吸振器的减振机理[J]. 力学学报, 2008, 40(1): 98-106.
- [53] 赵艳影, 徐鉴, 严志刚. 时滞对非线性饱和控制减振频带漂移的影响[J]. 力学学报, 2010, 42(4): 747-757.
- [54] 赵艳影, 李昌爱. 时滞反馈控制扭转振动系统的振动[J]. 物理学报, 2011, 60(11): 114305.
- [55] Zhao, Y.Y. and Xu, J. (2012) Using the Delayed Feedback Control and Saturation Control to Suppress the Vibration of the Dynamical System. *Nonlinear Dynamics*, **67**, 735-753. <https://doi.org/10.1007/s11071-011-0023-5>

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0530, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ojav@hanspub.org](mailto:ojav@hanspub.org)