基于脉冲宽度调制与颤振控制的电控减振器动态响应研究

魏美玲　孙晓帮　顾彤彤　陆俊达

（辽宁工业大学，锦州 121000）

【摘要】为解决电控减振器受电磁阀静摩擦影响导致响应滞后的问题，结合脉冲宽度调制（PWM）与颤振控制原理建立了电控减振器的动态响应时间模型。通过搭建电控减振器电磁阀测试系统，研究了颤振信号的幅值和频率对电控减振器动态响应的影响，实现了PWM+颤振精确控制、电流与力的数据采集及动态响应时间计算。试验结果表明，适当的颤振幅值和频率能够有效提高电控减振器的动态响应性能，缩短响应时间，并存在使动态响应时间最短的最优参数组合。

关键词：电控减振器　动态响应　颤振控制　脉冲宽度调制

中图分类号：U463.33　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.20104/j.cnki.1674-6546.20250184

Dynamic Response Research of an Electronically Controlled Damper Based on Pulse Width Modulation and Dithering Control

Wei Meiling, Sun Xiaobang, Gu Tongtong, Lu Junda

(Liaoning University of Technology, Jinzhou 121000)

【Abstract】To address the issue of response hysteresis in electronically controlled dampers caused by the static friction of electromagnetic valves, a dynamic response time model of the electronically controlled damper is established by combining the principles of Pulse Width Modulation (PWM) and dithering control. Through the construction of an electromagnetic valve test system for electronically controlled dampers, the influence of the amplitude and frequency of the dithering signal on the dynamic response of the electronically controlled damper is investigated. The precise control of PWM+dithering, data acquisition of current and force, and automatic calculation of dynamic response time are realized. The experimental results show that appropriate dithering amplitude and frequency can effectively improve the dynamic response performance of the electronically controlled damper, shorten the response time, and there exists an optimal parameter combination that minimizes the dynamic response time.

Key words: Electronically controlled damper, Dynamic response, Dithering control, Pulse Width Modulation（PWM）

【引用格式】魏美玲，孙晓帮，顾彤彤，等. 基于脉冲宽度调制与颤振控制的电控减振器动态响应研究[J]. 汽车工程师，2026(3): 31-37

WEI M L, SUN X B, GU T T, et al. Dynamic Response Research of an Electronically Controlled Damper Based on Pulse Width Modulation and Dithering Control[J]. Automotive Engineer, 2026(3): 31-37.

1　前言

在车辆悬架系统中，电控减振器的动态响应特性对车辆操纵稳定性、乘坐舒适性和行驶安全性至关重要，其响应滞后会导致阻尼力控制失准，而快速精准的动态响应可提升轮胎接地特性与振动抑

制能力[1]。在电控减振器电磁阀中，静摩擦是导致动态响应滞后、阻尼力调节精度下降的主要原因，叠加小幅颤振信号可将静摩擦转换为动摩擦，提升响应速度与灵敏度[2]。

动态响应测试是揭示减振器非线性特性的重要手段，国外研究已将响应时间缩短至150 ms内，国内则聚焦于测试系统开发，但理论建模简化与测试精度不足仍制约相关技术突破。本文针对静摩擦引发的响应迟滞等问题，研究脉冲宽度调制（Pulse Width Modulation，PWM）与颤振控制对电控减振器动态响应性能的影响，通过搭建测试系统模拟实车振动工况，系统探究颤振信号幅值、频率对动态响应时间的影响，以期为电控减振器的精准控制与性能测试提供科学依据。

2 电控减振器控制原理

2.1 脉冲宽度调制控制

电控减振器的PWM控制依托车辆传感器实时采集的车身姿态、路面状况、行驶速度等动态数据，控制原理如图1所示：电子控制单元（Electronic Control Unit，ECU）依据预设控制算法计算当前工况所需的目标阻尼力，将其转化为不同占空比的PWM控制信号[3]；控制信号驱动减振器内部电磁阀周期性开闭，通过电磁力调节阀芯位移，改变油液流经阻尼孔的路径与截面积，从而改变油液流动阻力，进而改变阻尼力。

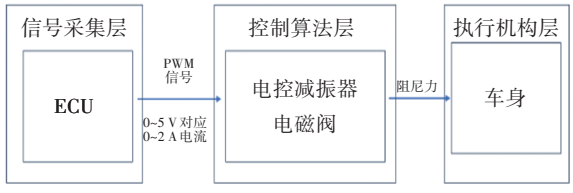


图1 电控减振器脉冲宽度调制控制原理

在这种控制方式下，由于缺乏对电磁阀静摩擦等非线性因素的有效处理，电控减振器的动态响应速度较慢，且阻尼力调节精度有限，难以满足复杂工况下对车辆操纵稳定性和舒适性的更高要求。

2.2 脉冲宽度调制+颤振控制

PWM+颤振控制方式在普通PWM控制的基础上通过改变占空比的方式叠加小幅颤振信号[4]。设PWM信号的周期为T、高电平时间为t_{on}，则占空比D和负载两端的平均电压V_{avg}分别为：

$$D=t_{on}/T \tag{1}$$

$$V_{avg}=DV_s \tag{2}$$

式中：V_s为电源电压。

根据欧姆定律可得平均电流为：

$$I_{avg}=\frac{V_{avg}}{R}=\frac{DV_s}{R} \tag{3}$$

式中：R为线圈电阻。

在图1控制原理的基础上，ECU生成小幅颤振电流信号，通常为100~250 Hz的正弦波信号，幅值为50~250 mA，其表达式为：

$$u_t=A_t\cdot\sin(2\pi f_t t) \tag{4}$$

式中：A_t、f_t分别为颤振电流信号的幅值和频率，t为时间。

因此，施加的颤振电流信号对电控减振器性能的影响主要取决于信号的幅值和频率。PWM+颤振控制方式与普通PWM控制方式的波形对比如图2所示。

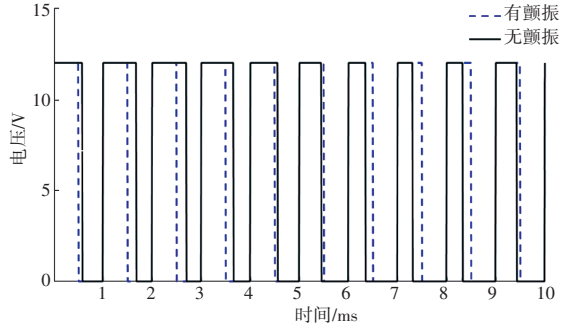


图2 PWM+颤振控制方式与普通PWM控制方式波形

3 电控减振器动态响应时间模型

在车辆行驶面临路面颠簸、加减速、转向等动态激励时，电控减振器需快速响应以抑制车身振动，其动态响应特性采用控制电流阶跃变化后阻尼力达到新稳定状态的时间间隔，即动态响应时间（t_1-t_0）衡量，如图3所示[5]。

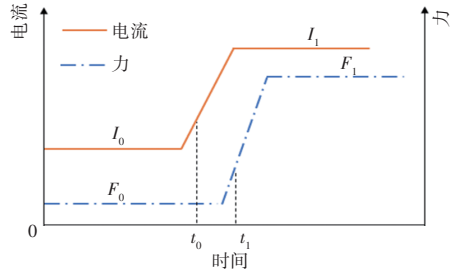


图3 电控减振器动态响应过程电流与力阶跃变化

动态响应时间反映了从控制电流发生变化的时刻，即电流信号达到(I_0+(I_1−I_0)×20%)的时刻（记为t_0）开始，到减振器实际产生的阻尼力达到新的稳定状态的时刻，即力信号达到(F_0+(F_1−F_0)×20%)的时刻（记为t_1）所经历的时长。其中，I_0、I_1分别为电流阶跃

变化前、后的稳态值，F_0、F_1分别为电流阶跃变化前、后力信号的稳态均值。

电控减振器电磁阀阀芯运动过程中，摩擦力呈现典型的斯特里贝克（Stribeck）效应：当速度趋近于零时，摩擦力为最大静摩擦力F_s；随着速度提高，摩擦力骤降至动摩擦力F_c，并伴随黏性阻尼项Bv。其数学表达式为：

$$F_f(v)=F_c\cdot\operatorname{sgn}(v)+\left(F_s-F_c\right)\cdot e^{-\left(v/v_s\right)^2}+Bv \quad (5)$$

式中：v为电控减振器电磁阀阀芯的瞬时运动速度，v_s为斯特里贝克特征速度，B为黏性摩擦系数。

通过在阀芯上叠加微小速度波动可将阀芯状态维持在动摩擦区域，避免静摩擦导致的滞后[6]，速度波动幅值$v(t)=v_0+A_v\cdot\sin(2\pi f_t t)$，其中，$v_0$为阀芯的原始运动速度，$A_v$为速度波动幅值。此时，动态响应时间可近似为：

$$t_d\approx\frac{m\cdot\Delta v}{F_{em,avg}-F_c-B\cdot v_0} \quad (6)$$

式中：Δv为电流阶跃变化引起的速度变化量，m为电磁阀阀芯的质量，$F_{em,avg}$为平均电磁力。

该模型表明，颤振信号可通过降低有效摩擦力显著缩短响应时间t_d。

4　试验系统与流程

本文搭建电控减振器测试系统，验证颤振信号在缩短动态响应时间方面的效果，并探究颤振幅值和频率对电控减振器动态响应时间的影响规律。

4.1　试验系统搭建

本文搭建的电控减振器电磁阀测试系统如图4所示，主要包括控制柜和试验台，伺服机构位于机架后方，通过控制油缸改变升降横梁的位置以安装不同高度的电控减振器，通过夹紧与顶紧机构实现电控减振器的固定，该测试系统可对电控减振器进行激振测试[7]。

电控减振器电磁阀与颤振控制原理如图5所示，电控减振器电磁阀的颤振控制通过LabVIEW软件实现。软件生成的电流控制指令通过Modbus协议发送至EtherCAT网关，然后转换为以太网信号传输至高精度PAM-199比例阀控制器，该控制器可输出PWM信号，且能灵活调整颤振幅值与频率[5]。



图4　电控减振器性能试验台

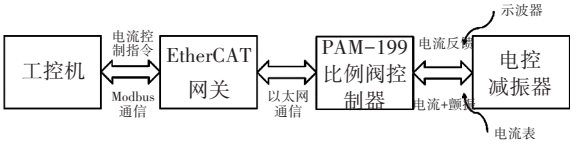


图5　电控减振器电磁阀PWM+颤振控制原理

比例阀控制器接收信号后，精确调节施加于电控减振器电磁阀的电流及叠加颤振信号，同时将电流反馈至工控机，增加示波器与电流表测量输出与电压波形，实现实时监控。此系统通过闭环控制优化电流控制精度，提高电控减振器的动态响应性能和测试系统的稳定性。

4.2　系统软件开发

基于LabVIEW平台开发系统软件，实现了对试验过程的自动化控制和数据采集。电控减振器的工作过程及数据采集程序如图6所示。通过伺服电机控制电控减振器匀速直线运动，使用NI采集卡采集力与电流输出波形，并进行滤波[8]。

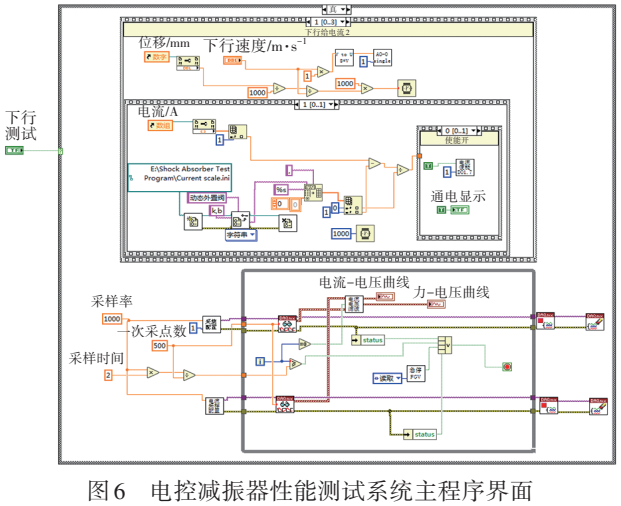


图6　电控减振器性能测试系统主程序界面

程序通过搭建通信链路，如图7所示，利用工控

机的LabVIEW可直接向比例阀控制器输出控制指令，精准实施电流控制；同时，系统具备电流反馈功能，可实时采集控制器反馈的电流信号，形成闭环控制。

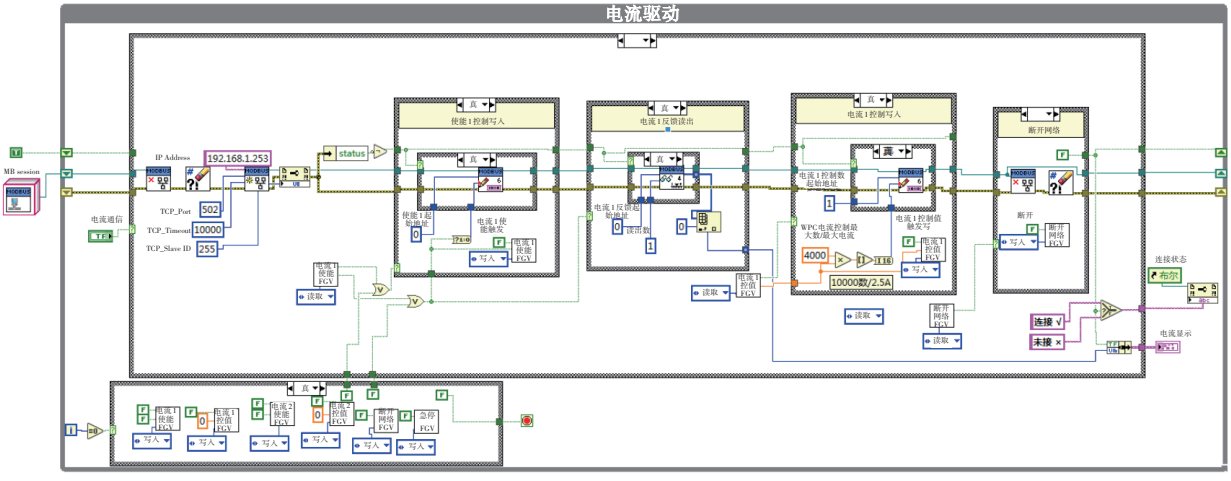


图7　比例阀控制器通信程序

动态响应时间运算程序框图如图8所示，根据前文所述动态响应时间试验方法，对滤波后的力与电流随时间变化曲线进行运算处理，计算得到t_0、t_1，进而获得动态响应时间。

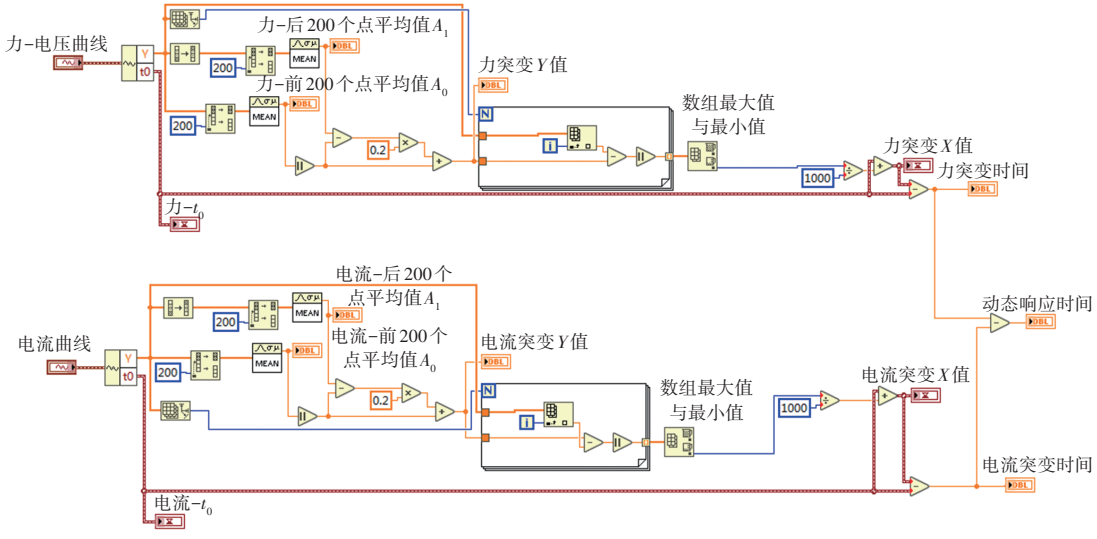


图8　动态响应时间程序框图

4.3　试验流程

通过模拟电控减振器活塞匀速拉伸过程中控制电流阶跃变化的工况，可得到阻尼力与电流随时间的变化曲线及响应时间。本文在电控减振器匀速运动状态下施加不同的阶跃电流，对比分析颤振幅值、频率参数变化时阻尼力达稳定状态的时间差异，验证PWM叠加颤振控制功能的有效性，并探究颤振关键参数对阻尼力响应特性的影响规律。试验过程如下：

a. 将被测电控减振器固定于测试台，连接程控电源与电磁线圈接线端；

b. 设定电控减振器按照0.05 m/s的速度匀速直线运动，试验行程为100 mm；

c. 分别设置颤振电流幅值为0、颤振频率为0和颤振电流幅值为50 mA、颤振频率为100 Hz两组颤振参数，在电控减振器运行中段触发0.5~1.0 A的电流阶跃变化，记录电流变化曲线和阻尼力变化曲线，验证颤振控制功能有效性；

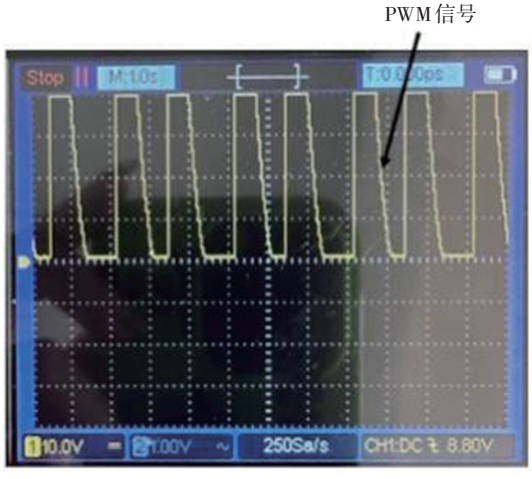
d. 设置颤振频率为100 Hz，分别设置颤振电流幅值为50 mA、100 mA、150 mA、200 mA、250 mA，在电控减振器运行中段分别触发0.5~1.0 A、0.5~1.5 A、0.5~2.0 A的电流阶跃变化，然后设置颤振电流幅值为100 mA，分别设置颤振频率为60 Hz、100 Hz、150 Hz、200 Hz、250 Hz，再次触发电流阶跃变化，记

录不同频率下阻尼力达稳定状态的时间；

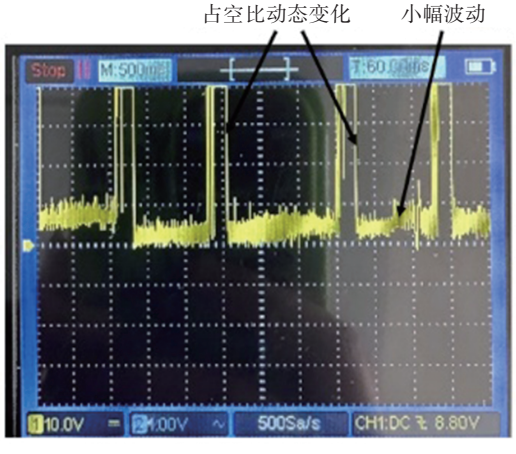
e. 计算各工况下电流阶跃变化时阻尼力达到稳定状态的时间，对比分析颤振幅值、频率参数变化对动态响应时间的影响规律。

5 PWM+颤振控制功能验证结果

通过示波器测量无颤振控制和加入颤振控制时的输出波形，如图9所示：无颤振电流时，PWM波形稳定；引入颤振电流后，波形呈现出锯齿状的动态变化且小幅波动，表明颤振电流成功叠加于PWM信号，实现了PWM+颤振控制功能[9]。



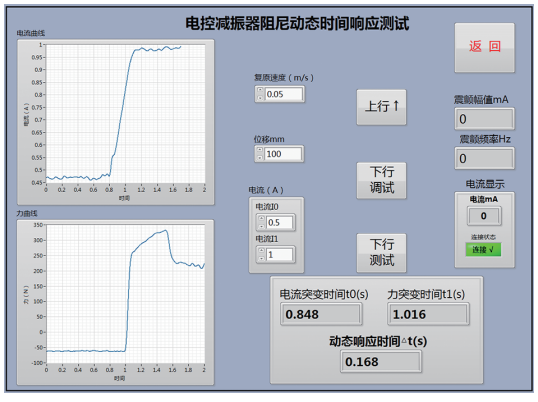
(a)无颤振控制



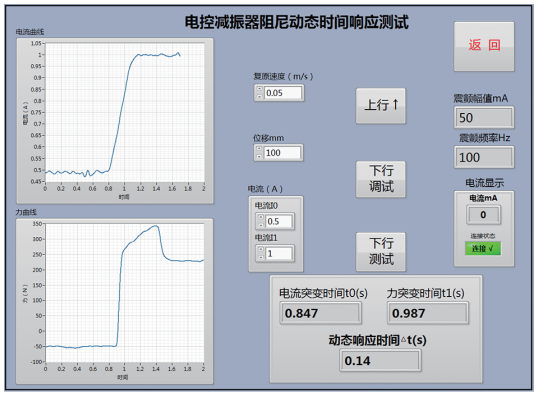
(b)有颤振控制

图9 示波器测量波形

0.5~1.0 A电流阶跃变化条件下无颤振控制与加入50 mA、100 Hz颤振电流时的输出结果如图10所示。由图10a可知，电流曲线呈现明显的阶跃变化特征，而力曲线的变化存在显著滞后，电流在第0.848 s时发生突变，但阻尼力直至约第1.016 s时才开始显著变化并逐渐趋于稳定，动态响应时间为0.168 s。由图10b可知，电流于第0.847 s突变，阻尼力对应稳定时间缩短至0.987 s，动态响应时间缩短至0.140 s，证明了叠加颤振可有效减小静摩擦导致的时间延迟。



(a)无颤振控制



(b)有颤振控制

图10 电控减振器电流与力曲线输出结果

6 颤振控制参数对电控减振器动态响应时间的影响分析

6.1 颤振幅值对动态响应时间的影响

颤振频率为100 Hz时，不同颤振电流幅值条件下的试验结果如表1所示。

表1 不同颤振电流幅值下各阶跃电流对应的动态响应时间

颤振电流幅值/mA	动态响应时间/s		
	0.5~1.0 A	0.5~1.5 A	0.5~2.0 A
50	0.162	0.205	0.218
100	0.145	0.190	0.202
150	0.138	0.182	0.195
200	0.143	0.188	0.201
250	0.156	0.197	0.210

由表1可以看出，响应时间随着颤振电流幅值的增大先缩短后延长。在较低的颤振电流幅值范围内(50~150 mA)，随着颤振电流幅值的增大，不同

阶跃电流下的动态响应时间均呈现下降趋势，这表明在此范围内，增大颤振电流幅值有助于提高减振器的响应速度。

当颤振电流幅值较小（50~100 mA）时，振动能量不足，阀芯难以持续克服静摩擦力，仍可能出现间歇性静止，导致响应滞后；随着颤振电流幅值增大（150~200 mA），振动能量足以维持阀芯的持续微动，动摩擦占比显著提升，电磁力与摩擦力的平衡速度加快，响应时间缩短。但当颤振电流幅值过大（>200 mA）时，过度振动会引发阀芯与阀座的非线性碰撞，或导致油液流动产生额外湍流阻力，同时，过大的电流波动会增加电磁线圈的热损耗，反而削弱控制精度，延长响应时间。因此，颤振电流幅值对响应时间的影响存在显著的区间特性。

6.2 颤振频率对动态响应时间的影响

颤振电流幅值为100 mA时，不同颤振频率条件下的试验结果如表2所示。

表2 不同颤振频率下各阶跃电流对应的动态响应时间

颤振频率/Hz	动态响应时间/s		
	0.5~1.0 A	0.5~1.5 A	0.5~2.0 A
60	0.158	0.198	0.215
100	0.145	0.190	0.202
150	0.140	0.185	0.196
200	0.137	0.181	0.192
250	0.142	0.187	0.199

由表2可知：当颤振频率过低（<100 Hz）时，颤振周期过长，阀芯在振动间隙可能重新静止并产生静摩擦，导致摩擦状态反复切换，响应滞后；随着颤振频率提高（100~200 Hz），振动周期缩短，阀芯始终处于动态平衡状态，动摩擦稳定发挥作用，电磁力可快速驱动阀芯调整阻尼孔开度，响应时间缩短。但当颤振频率过高（>200 Hz）时，阀芯因惯性作用难以实现高频振动，同时高频振动会加剧油液的黏性阻尼效应，导致能量耗散增加，阀芯运动滞后于控制信号，最终延长响应时间。

综上，在不同阶跃电流变化条件下，动态响应时间随着颤振频率的增大均呈现先缩短后延长的趋势，且阶跃电流会影响响应时间的整体水平。

7 结束语

本文通过分析PWM+颤振控制原理，建立电控减振器动态响应时间模型，并搭建测试系统，验证了PWM+颤振控制在缩短电控减振器动态响应时间方面的效果，探究了颤振控制参数对电控减振器动态响应时间的影响，并得出以下结论：

a. 适当的颤振电流幅值（150~200 mA）可通过抑制电磁阀静摩擦提高响应速度，但过高的颤振电流幅值可能引发非线性效应，导致性能递减；

b. 适当的颤振频率（100~200 Hz）可通过维持阀芯微幅振动有效缩短静摩擦滞后，但过高的颤振频率可能因能量损耗导致响应延迟；

c. 综合不同电流阶跃变化条件下电控减振器的动态响应特性，颤振幅值150~200 mA与颤振频率100~200 Hz的组合可使该电控减振器动态响应时间整体处于较优水平。

参 考 文 献

[1] 孙鑫, 孔苇光, 丁利. 车辆半主动减振器系统响应特性研究与测试[J]. 上海汽车, 2025(2): 51-54.
SUN X, KONG W G, DING L. Research and Testing on Response Characteristics of Vehicle Semi-Active Shock Absorber System[J]. Shanghai Auto, 2025(2): 51-54.

[2] 孙磊, 张光明, 侯锐. 电控阻尼减振器结构原理及发展趋势[J]. 重型汽车, 2022(4): 28-29.
SUN L, ZHANG G M, HOU R. Structural Principle and Development Trend of Electronically Controlled Damping Shock Absorber[J]. Heavy Duty Truck, 2022(4): 28-29.

[3] 龚国芹, 胡军科, 周创辉. 基于颤振效应的电液比例方向阀进油口压力波动分析[J]. 合肥工业大学学报（自然科学版）, 2013, 36(3): 279-284.
GONG G Q, HU J K, ZHOU C H. Pressure Fluctuation Analysis of Electro-Hydraulic Proportional Directional Valve Inlet Based on Flutter Effect[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2013, 36(3): 279-284.

[4] 朱焱锋, 王健, 田凯文, 等. 变速器电磁阀颤振控制研究[J]. 上海汽车, 2012(10): 17-22.
ZHU Y F, WANG J, TIAN K W, et al. Research on Flutter Control of Transmission Solenoid Valve[J]. Shanghai Auto, 2012(10): 17-22.

[5] 张博强, 赵浩翰, 冯天培, 等. 电控悬架用可变阻尼减振器动态特性研究[J]. 机械设计与制造, 2021(6): 10-14.
ZGANG B Q, ZHAO H H, FENG T P, et al. Study on Dynamic Characteristics of Variable Damping Shock Absorber for Electronic Suspension[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(6): 10-14.

[6] 吴会刚, 刘昊, 徐鹏. 基于Karnopp摩擦模型的比例阀颤振响应研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(19): 152-156.

WU H G, LIU H, XU P. Response Characteristics of Proportional Valve under Dither Based on Karnopp Friction Model[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(19): 152-156.

[7] 陆玲亚，张美娟，王吉华，等. 自动变速器电磁阀性能试验台设计[J]. 机床与液压，2022，50(6)：114-119.
LU L Y, ZHANG M J, WANG J H, et al. Design of Automatic Transmission Solenoid Valve Performance Test Bed[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(6): 114-119.

[8] 谢培伟，孙晓帮，陆俊达. 电控减振器内置阀电磁力特性测试研究[J]. 机床与液压，2025，53(8)：156-160.
XIE P W, SUN X B, LU J D. Research on the Electromagnetic Characteristics Testing of Built-in Valve in Electronic Control Dampers[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2025, 53(8): 156-160.

[9] 苏振标，刘影. 浇封型防爆电磁阀PWM控制技术分析研究[J]. 电气防爆，2025(1)：17-19+23.
SU Z B, LIU Y. Analysis and Research on PWM Control Technology of Encapsulation "m" Solenoid Valve[J]. Electrical Explosion Protection, 2025(1): 17-19+23.

（责任编辑　王　一）
修改稿收到日期为2025年8月18日。

《汽车技术》征稿启事

《汽车技术》杂志是中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车前瞻与应用技术类月刊，为我国高质量科技期刊分级目录入选期刊、中国科学引文数据库（CSCD）来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊（A）、Scopus数据库收录期刊、俄罗斯《文摘杂志》（AJ）收录期刊、日本科学技术振兴机构数据库入选期刊、EBSCO学术数据库收录期刊、欧洲学术出版中心（EuroPub）数据库收录期刊。

《汽车技术》杂志以报道汽车整车及其零部件设计、研究、试验等方面的前瞻与应用技术为主，并兼有理论研究内容，是中国汽车行业核心学术和知识传播与共享的平台。

《汽车技术》将在国家提出的"创新、协调、绿色、开放、共享"发展理念的指引下，把握《节能与新能源汽车技术路线图》和"低碳化、信息化、智能化"的汽车技术主流发展趋势，努力在传统内燃机汽车高效动力系统、轻量化、低阻力领域，新能源汽车和互联智能汽车技术领域，大力吸收优质稿源，为广大科研和工程技术人员服务，为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

《汽车技术》欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员及相关人员不吝赐稿，反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将被优先选择刊登。

投稿要求：

1. 文章字数最好控制在6 000~8 000字范围之内；

2. 请按科技论文要求撰写文章摘要，摘要中文字数控制在180字左右；

3. 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献，且在文中应标注文献引用处；

4. 文章主要作者应提供其简介，包括出生年、性别、职称、学历、研究方向及技术成果等；

5. 来稿的保密审查工作由作者单位负责，确保署名无争议，文责自负；

6. 请勿一稿多投；

7. 本刊使用网站投稿，请先登陆网站注册成功后投稿，详细投稿要求见本刊网站中"下载中心"栏的"作者指南"，网址：http://qcjs.cbpt.cnki.net。

《汽车技术》编辑部