

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.10.025

基于模糊 PID 控制的磁流变减振控制器

李华琳, 陈勇, 黄琦, 李坚
(电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054)

摘要: 由于磁流变减振器的阻尼可控性具有非线性、回滞性和饱和特性, 使其控制器的开发相对复杂。依据磁流变减振控制器的控制原理和设计功能, 结合模糊 PID 控制算法, 提出采用三闭环磁流变减振控制系统的设计思想, 包括加速度环、电压环和电流环, 保证控制系统的精度和实时性。详细介绍磁流变减振控制器的硬件电路设计和 DSP 控制系统的软件设计, 并进行减振器的台架试验。试验结果表明, 该磁流变减振控制器是正确的和可行的。

关键词: 磁流变减振器; 模糊 PID; DSP; 三闭环控制系统

中图分类号: TP273⁺.4 **文献标识码:** A

Control of Magneto-Rheological Damper Based on Fuzzy PID Controller

Li Hualin, Chen Yong, Huang Qi, Li Jian
(School of Automation Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: As the controllable damping property of MR damper has nonlinearity, hysteresis and saturation peculiarities, the development of its controller becomes quite complex. According to the control principle and design function of the MR damper controller, a three-loop controller is proposed based on the fuzzy PID algorithm, which includes an acceleration loop, a voltage loop and a current loop. The controller can effectively ensure the MR system precision and real-time. The hardware design of the MR damping controller and the software design of the DSP control system are introduced in detail, and the bench test is also implemented. The experimental result proves that the design of MR controller is correct and feasible.

Keywords: MR damper; fuzzy-PID; DSP; three-loop control system

0 引言

由于传统的被动式悬架不能适应复杂的道路状况和不断变化的行驶工况, 因此开发一种能够根据路面激励和车辆运行状态的变化、实时调节其阻尼特性, 从而使车辆的操纵稳定性和乘坐舒适性达到最佳状态的智能减振器势在必行。

磁流变减振器作为一种新型的, 智能的减振系统, 其可调阻尼力大、功率消耗低、体积小、动态范围广, 已经成为国内外研究的热门课题。但由于磁流变减振器具有非线性、回滞性和饱和特性^[1-3], 而汽车的悬架又是一个复杂的多自由度振动的系统, 难以用精确的数学模型描述, 如采用常规的根据模型的线性控制方法, 难以达到良好的控制效果。目前, 针对非线性控制系统的控制策略主要有最优控制、模糊控制、滑模控制、神经网络控制等。与其它控制算法相比, 将模糊控制和 PID 控制相结合的模糊 PID 控制具有建模简单, 控制精度高、非线性适应性强, 动态性能好等优点^[4], 已经被越来越多应用到智能减振控制系统中。故采用模糊 PID 控制算法, 对磁流变减振控制器进行设计。

1 磁流变减振控制器的控制原理和功能。

通常, 磁流变减振控制系统的车体模型由簧载质量、非簧载质量、悬架、轮胎组成的 1/4 车辆模型^[5]。其中, 簧载质量由车身、车架及其上的负载总成所构成; 非簧载质量主要由车桥、悬架、轮胎的轴承等组成。磁流变减振控制系统主要由振动传感器、系统控制器、弹簧、MR 阻尼器本身及相关辅助电路和被控对象等构成, 磁流变减振系统的控制原理如图 1。

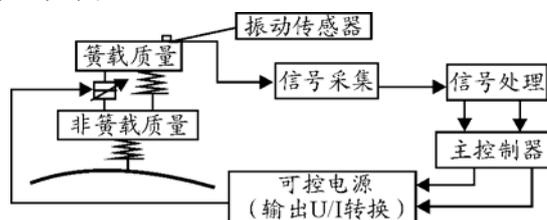


图 1 MR 减振器的控制原理框图

磁流变减振控制系统的控制原理是: 当被控对象(簧载质量)发生振动时, 由系统的振动传感器实时感测出被控对象的各种振动特性(如相对加速度、相对速度或相对位移), 经信号处理环节, 对所

收稿日期: 2010-05-05; 修回日期: 2010-05-11

基金项目: 四川省青年基金项目(09ZQ026-009); 四川省应用基础研究项目(2009JY0008)

作者简介: 李华琳(1984-), 男, 河南人, 硕士研究生, 从事自动化技术、检测技术领域研究。

获得的包含振动信息的传感器信号进行调理和分析，然后送入系统主控制器。主控制器根据所接收到的振动信息进行智能决策和分析，并立即产生相应的控制调节电压，系统将调节电压信号送入可控电源，最后送出一个驱动电流到磁流变减振器的励磁线圈上形成强磁场。磁流变液在这个外加磁场的作用下，按照磁流变液的流变特性改变其自身阻尼特性，对被控对象形成一个反方向的阻尼作用力，最终达到减振效果。

依据磁流变减振控制器的控制原理，磁流变减振控制器设计必须根据车身的振动情况，实时控制输出的电流，从而控制磁流变减振器的阻尼特性，达到实时（毫秒级）调整磁流变减振器的输出阻尼力，提高车身运行的平顺性。磁流变减振控制器要

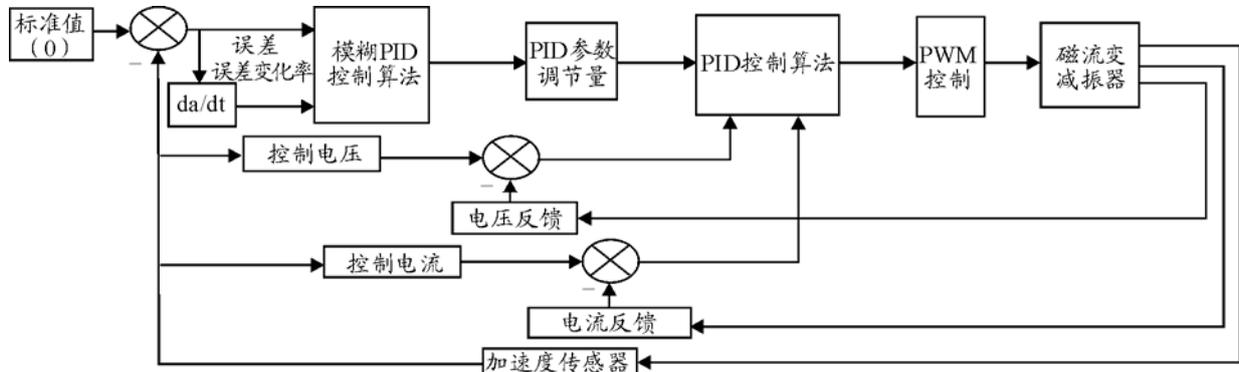


图 2 磁流变减振控制器设计原理

考虑到衡量车辆平顺性的主要指标是簧载质量加速度^[6]，为保证车辆的平顺性，取簧载质量加速度的标准值为零。依据磁流变减振控制器的控制原理建立磁流变减振器三闭环控制系统，外环为通过加速度传感器的信号与标准值的误差及其误差变化率，经模糊 PID 控制算法得到 PID 控制算法的调节参数^[7]。内环为磁流变减振器的电压环和电流环，通过加速度信号得磁流变减振器的标准控制电压和电流，与磁流变减振器的反馈电压和电流做差，并将误差送入 PID 控制算法模块。通过 PID 控制调节输出 PWM 信号，得磁流变减振器的控制电压和电流，从而达到实时、精确调节磁流变减振器阻尼力的目的，保证控制器输出的动态特性和实时可调性。

3 磁流变减振控制器的硬件设计

根据磁流变控制器控制原理和设计功能，结合控制器的设计思想，控制器的硬件电路设计主要包括电源模块、主控制器模块、信号调理模块、PWM 隔离驱动模块、电流驱动器模块和反馈保护模块。其硬件电路的设计框图如图 3。

实现的功能主要包括：

- 1) 实时检测车身的振动状态。采用加速度传感器，获得车身的振动状态及趋势；
- 2) 实时输出电流的大小。通过加速度传感器判断车身的振动状态，结合一定的控制算法，对 DSP 输出的 PWM 信号的占空比进行调整，进而调节控制器的输出电流；
- 3) 通过对磁流变减振控制器硬件和软件设置保护限制，防止控制器过流和过压，并防止磁流变液过饱和，影响磁流变减振器的响应速度。

2 磁流变减振控制器的设计思想

基于磁流变减振控制器的控制原理和功能，磁流变减振控制器的设计原理如图 2。

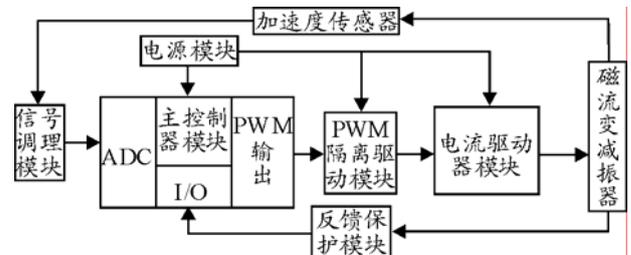


图 3 磁流变减振器硬件设计框图

- 1) 主控制器模块选用 TMS320F2812 主控制器，其主要功能是对加速度传感器的信号进行采样和数字滤波处理，并通过被控对象的反馈信号，经模糊 PID 控制算法，输出相应的 PWM 控制信号，从而实时控制磁流变减振器中的励磁电流，改变其阻尼特性；
- 2) 电源模块作为硬件电路设计的核心，其稳定性和可靠性对于整个电路设计都至关重要。考虑到普通的汽车电源的电压一般是 12 V，但汽车电源的电压经常在 9~16 V 之间波动^[8]，因此，必须考虑汽车电源电压的不稳定性问题，必须对汽车电源电压进行转换，以保证汽车电源电压的变化不会危害控制器电路的安全和控制性能。电源模块的设计包括主控制器电源，

隔离电源和电流驱动器电源; 3) 信号采集调理模块的主要功能是通过加速度传感器车身的振动信息进行数据采集和变换, 为控制模型建立和控制策略实施提供依据。因此, 对于加速度信号的采集调理模块的设计主要包括信号的滤波、放大和电压变换, 保证信号的完整性; 4) PWM 隔离驱动模块设计主要是从 TMS320F2812 输出的 PWM 控制信号经光耦隔离输出得到正负输出的 PWM 控制信号, 同时, 为了提高 PWM 信号的驱动能力, 采用经典的三极管推挽驱动电路。保证 MOS 管驱动信号的重要性和可靠性, 防止误开通和关段, 同时也保护了 DSP 芯片; 5) 可控电流驱动器模块功能主要是调节磁流变减振器的电流, 从而获得连续可调的控制电流, 电流驱动器采用了 BUCK 式电路, 利用控制器输出的 PWM 信号, 经功率放大后驱动功率开关管 (如 MOS 管、IGBT 管), 通过调节 PWM 信号的占空比达到输出不同的电压或电流的目的; 6) 反馈保护模块的主要功能是实时监测磁流变减振器的抗旨电压和电流, 同时保证控制系统的安全运行。

4 磁流变减振控制器的软件设计

控制系统的软件开发环境基于 DSP 的软件开发平台 CCS3.3, 通过 DSP2812 仿真器进行程序的在线调整和烧写。整个控制系统的软件设计包括系统自检、系统初始化、AD 采样、模糊 PID 控制算法 PWM 控制输出和故障监测 6 个部分。采用 TMS320F2812 的 C 语言设计, 整个系统的软件设计流程如图 4。

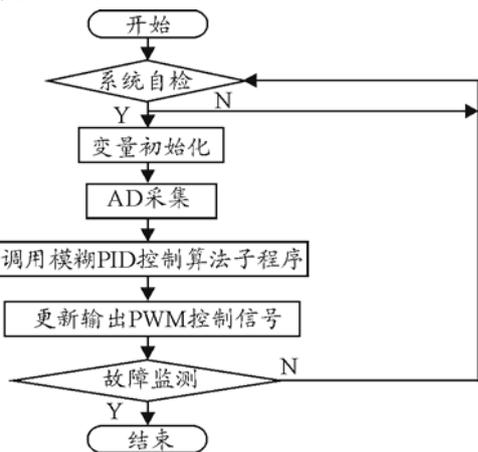


图 4 控制程序流程图

5 实验结果及分析

基于 DTS 减振器的实验平台, 在不同的振动速度下, 施加 0~2 A 的电流, 记录试验结果, 利用最小二乘法对实验数据进行拟合, 选取 $v=0.13$ m/s 时, 绘出电流与可调阻尼力之间的关系, 如图 5。

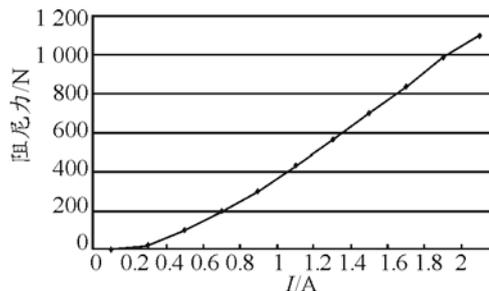
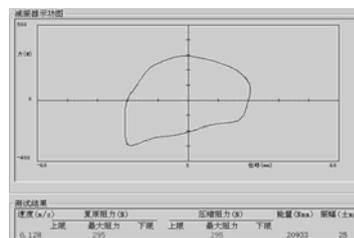


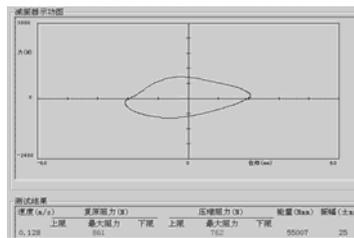
图 5 速度 0.13 m/s 时电流与可调阻尼力关系

从图 5 中励磁电流与可调阻尼力的关系曲线可看出: 在速度为 0.13 m/s, 随着励磁电流不断增大, 可调阻尼力不断增大, 电流 2 A 的情况下, 其可调阻尼力为 1 100 N, 同时也表明磁流变减振器没有达到饱和, 磁流变减振器的可调阻尼力还可以继续增大, 其可调阻尼力的大小完全能够满足车辆减振的需求。在一定速度, 施加不同励磁电流进行测试, 利用最小二乘法对实验数据进行拟合, 得到不同励磁电流下可调阻尼力 F 与电流 I 的关系曲线, 从而为磁流变减振控制器控制策略提供一定试验依据。

在 0.13 m/s 的速度下, 分别在不加电流的被动式控制和加入磁流变减振控制器控制进行试验, 减振器的示功图如图 6。



(a) 0.13 m/s 速度下被动式控制下的示功图



(b) 0.13 m/s 速度下控制器控制下的示功图

图 6 减振器平台实验示功图

通过加入磁流变减振控制器进行试验, 观察和分析试验的示功图, 发现在振动台的简谐振动过程中, 电流的变化在 2 A 左右, 控制器工作正常。示功图所包围的面积表示减振器削减车辆振动的能力, 可以看到: 加入控制器后, 示功图所包围的面积增加, 最大拉伸和复原阻尼力增大, 表示磁流变减振器起到了主动消减振动的能力, 同时, 示功图比较圆润、饱满, 说明磁流变减振器能发挥了较好耗能减振作用。

6 结论

实验结果证明，该控制器的设计是正确的和可行的。下一步，必须在保证减振器性能稳定性和可靠性达到要求的基础上，对减振器的控制性能及规律进行详细、细致的仿真和实验分析，总结其控制规律，并针对不同的路谱分析减振器的控制性能，使之更加接近于实际的路况控制。

参考文献：

[1] Kamath G M, Wereley N M, Jolly, MR. Characterization of Semi-Active Magnetorheological Lag Mode Dampers[C]. SPIE Conference on Smart Structures and Integrated Systems, San Diego CA, March 1998: 3329-3337.
 [2] Spencer B F, Dyke S J, Sain M K, et al. Phenomenological model for Magnetorheological Dampers[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123 (3): 230-238.

(上接第 78 页)

3.2 调平误差补偿分析

为了分析调平误差对测角的影响，假设 $\nu=30''$ ， $A\nu=\pi/4$ ， A 的范围为 $(0,2\pi)$ ， E 的范围为 $(-\pi/6,\pi/6)$ ，根据式 (8) 的修正公式，影响曲线如图 6。

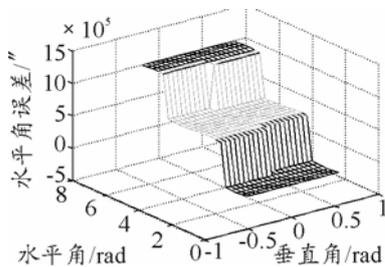


图 6 调平误差对水平角的影响

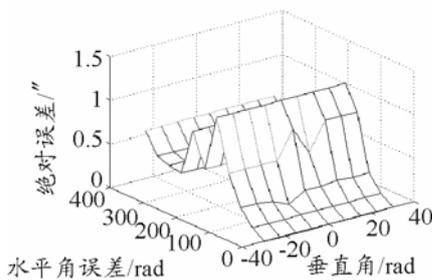


图 7 修正后水平角误差绝对值

由图 6 知，竖直角在 $\pm 30^\circ$ 的影响相对较小的，但随着角度增加影响也会急剧变大，水平角的影响是明显的，必须对测角的结果进行修正。利用 J2 经纬仪进行实验过程，经纬仪的度盘误差、横轴误差等可以通过对径符合读数等方法进行消除，但调平误差却不能消除，水平角经修正后的误差如图 7，

[3] Pang L, Kamoth G M, Wereley N M. Dynamic characterization and analysis of magnetorheological damper behavior[C]. In: Davis L P, Proc. Of SPIE. Int. Soc. Opt Eng. Washington: SPIE, 1998, 3327: 284-302.
 [4] 欧进萍, 关新春. 磁流变耗能器及其性能[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(3): 74-81.
 [5] 翁建生, 胡海岩, 张庙康. 磁流变阻尼器的实验建模[J]. 振动工程学报, 2000, 13(4): 616-620.
 [6] 廖昌荣, 余淼, 陈伟民, 等. 汽车磁流变减振器设计原理及实验研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(16): 1391-1394.
 [7] Li Hua-lin, Chen Yong, Huang Qi, Li Jian. FUZZY PID CONTROL FOR LANDING GEAR BASED ON MAGNETO-RHEOLOGICAL (MR) DAMPER[C]. The 2009 International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis International Proceeding. 2009, 10(23): 22-25.
 [8] 苏楚奇, 窦传威, 邓亚东, 等. 汽车 42V 电源及其驱动系统的应用分析[J]. 武汉大学学报, 2006, 39(4): 91-94.

从结果可知：由经纬仪调平误差引起的水平角误差最大值 $1.172 0''$ ，最小值为 $3.505 4e-006''$ ，说明推导的数学模型是可靠的，仍然存在的误差由实验过程中引入的随机误差，表明此种补偿方法测量水平角已经达到经纬仪对高精度的要求。

4 结论

结果表明，误差补偿可以更好地提高经纬仪调平对心的精度，修正后对心误差 $\leq 0.04 \text{ mm}$ ，调平误差对水平测角影响 $\leq 0.5''$ ，并减小了操作人员的主观因素产生的误差，缩短了设备展开和测量时间，很好地满足了机动作战对方位角快速测量的要求。

参考文献：

[1] 于成浩, 柯明, 赵振唐. 论测量仪器的精密整平及对中技术[J]. 测绘科学, 2006, 31(6): 87-88.
 [2] 柯金朴. 空间三维坐标转换原理及实现[J]. 江西测绘, 2008, 12(5): 71-74.
 [3] 周俊. 电子经纬仪的误差修正和模型仿真[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
 [4] 须鼎头. 电子测量仪器原理及应用技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 2008.
 [5] Motion Control Sensor Corporation, SANG1000 Dual Axis Tilt-sensor Datasheet. <http://www.xrsensor.com>
 [6] Sony Corporation, ICX098AK Progressive Scan CCD Image Sensor Datasheet. <http://www.sony.co.jp>.
 [7] Beijing Weinaguangke Instrument Co. Ltd. WN202WA 300×300 Motorized Positioning Systems Datasheet. <http://www.bjwn.cn>.
 [8] 樊超, 易红伟, 陈浩锋, 等. 基于光学相关的亚像原像移测量方法研究[J]. 激光与红外, 2007, 37(2): 181-184.
 [9] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.