

文章编号:1005—0523(2007)01—0097—04

磁流变气动变阻尼系统应用的实验研究

王一丁, 岳继光, 苏永清, 萧蕴诗

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要:磁流变液是一种智能材料,基于磁流变液阻尼器的气动伺服系统具有阻尼率高,可控性好等优点.基于自行搭建的实验平台,针对磁流变液气动伺服系统中所出现的非线性现象,可重复性低等固有问题,分析了问题及其产生的原因,提出了部分解决方案,并通过仿真或实验加以验证.

关键词:磁流变液;气动伺服系统;非线性
图分类号:TP271 **文献标识码:**A

1 引言

磁流变液(MFR)是美国科学家 Rabinow^[1]1948 年发明的一种智能材料^[1],其流变特性随着所加磁场在几个毫秒内发生变化.作为一种新型的智能材料,磁流变液已广泛应用于航天航空、电子、化工、能源、仪表、医疗、卫生等诸多领域.相对于气体媒介,这种材料具有可控性高、能耗低和安全性高等特点,便于实现精确控制气动伺服系统.其中,利用磁流变液制作的阻尼器具有装置简单、体积小、可实现连续变化、出力大、调节范围宽、温度适应性强、响应速度快、能耗低的特点,是一种理想的半主动控制减振器,可广泛用于各种机械振动系统.

2 系统基本结构、原理及模型

2.1 系统基本结构及原理

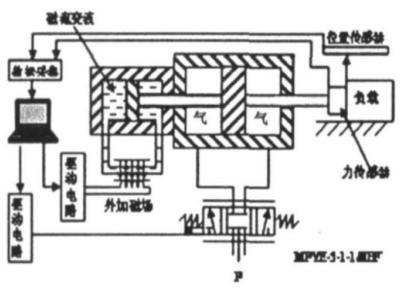


图 1 系统装置连接示意图

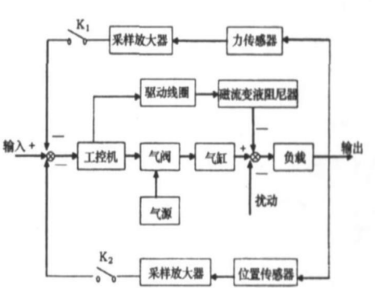


图 2 磁流变液气动伺服系统组成示意图

如图 1 所示,本实验系统由如下几个部分组成:气动配置装置、磁流变阻尼器、带数据采集卡的工业计算机、传感器、信号调理驱动电路.其中气动配置装置由气缸和气源组成,通过气源压力和比例阀的开口来控制气缸推进力;磁流变阻尼器是整个控制系统的激励者,通过控制线圈的工作电流来改变工作磁场,进而改变磁流变液的阻尼率;工业计算机是主要的控制硬件,处理数据并给出控制信号;传感器给控制器提供位移和力的信号;信号调理驱动电路作为传感器信号的滤波器和控制信

号的放大器.

在本实验系统中,磁流变液阻尼器与气缸同轴连接组成系统的被控对象,通过力传感器和位移传感器检测两路反馈信号,经信号调理驱动电路送至工控机,根据相应的控制策略得到输出的控制信号,通过调整线圈中的电流强度来改变磁场强度,在磁流变效应的作用下,达到控制系统等效阻尼的目的,如图 2 所示.

2.2 主要实验设备

1) 磁流变液阻尼器:采用美国 Lord 公司生产的 RD1005-3 型磁流变阻尼器.该型阻尼器只需要很小的电压就可获得较大的阻尼力,结构可靠、运行噪音小,且具有优良的快速响应性(仅左右).阻尼器主要由磁流变液体、缸体、具有节流孔的活塞、线圈、氮气蓄能器等部分组成.蓄能器的作用是缓冲活塞运动时活塞杆两端的液体体积差,同时还有减振的作用.当节流孔两侧线圈中的电流变化时,就可以改变阻尼器的阻尼.

2) 控制器系统:本系统采用研华公司(ADVANTECH)的工控机作为控制器,同时采用了研华公司的数据采集和输出板卡,包括 PCL 812PG 数据采集卡及其配套通用螺线端子板 PCLD 880. PCL 812PG 数据采集卡能够提供五种最需要的测量和控制功能,包括:A/D 转换、D/A 转换、数字量输入、数字量输出及计数器/定时器功能.该卡提供 16 路 12 位模拟量输入、2 路 12 位模拟量输出、16 路数字量输入、16 路数字量输出和一个可编程计数器/定时器.此外,PCL 812PG 还提供了可编程的模拟量输入范围.其采样速率最快达 30 kHz,可编程而且连接方便.搭建好的实验平台如图 3 所示:

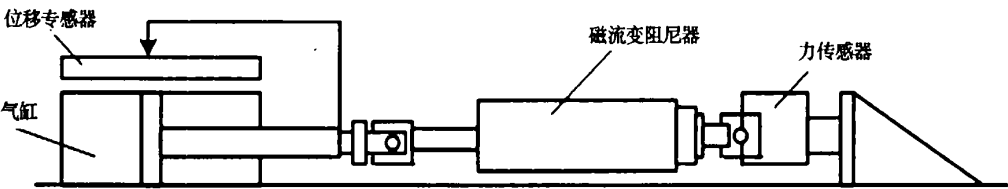


图 3 基于磁流变液阻尼器的气动伺服系统试验台示意图

2.3 数学模型分析及简化

目前国内已有人在研究气-液联控系统,并提出了相应的数学模型^[2].根据已有的气-液联控系统的模型,将系统气压的压力流量方程及压力微分方程等在零位附近线性化,进行拉氏变换并综合简化,可推得位移输出对输入的阀芯位移的传递函数^[2]:

$$y(s) = \frac{[kRT\eta_{q10}S_1(V_{20}s + kRTK_{qp20}) - kRT\eta_{q20}S_2(V_{10}s + kRTK_{qp10})]x_v(s)}{MV_{10}V_{10}V_{20}s^4 + [MkRT(V_{20}K_{qp10} + V_{10}K_{qp20}) + (b_L + \frac{s_3^2}{K_{hl}})V_{10}V_{20}]s^3 + [Mk^2R^2T^2K_{qp10}K_{qp20} + (b_L + \frac{S_3^2}{K_{hl}})kRT(V_{20}K_{qp10} + V_{10}K_{qp20}) + kp_{10}V_{20}S_1^2]s^2 + [(b_L + \frac{S_3^2}{K_{hl}})k^2P^2T^2K_{qp10}K_{qp20} + k^2RTp_{20}K_{qp10}S_2^2 + k^2RTK_{qp20}S_1^2]s}$$

本系统非常复杂,有几十个参数,其中很多都是时变参数.线性化之后,在系统的四阶模型中,仍有许多参数是时变的、不确定的.对这些参数进一步近似,得到一个比较简单的、容易施加控制策略的二阶传递函数:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s}$$

3 系统存在的问题及分析

1) 系统出现的问题
在对本系统进行研究的过程中,发现其存在一些问题,使得实际结果与理论结果有较大差距.主要有如下几点:
(1) 控制效果并不非常理想.用 PID 对系统进行控制,效果虽不是非常好,可得到的曲线跟理论值大致吻合.但是在采用先进控制算法之后,往往反而很难得到预期的效果,甚至有时得到的响应曲线与理论曲线相去甚远.
(2) 实验结果不稳定,可重复性差.可重复性差有以下两种情况出现.其一,在同一时段用同一组参数对同一个系统进行控制,理论上讲,得到的响应曲线应该是非常相似或是基本吻合的.在本系统中,在同一时段多次输入同一组参数,分别得

到多个响应曲线. 实验过程中, 经常出现这种情况: 多次输入同一组参数, 得到具有较大差别的多个响应曲线, 如图 4 所示. 其二, 在不同时段对该系统进行控制, 输入同一组参数, 得到的响应曲线也会发生较大变化. 比较常见的情况是: 在这一时刻输入某一组参数, 系统稳定得到一个响应曲线; 经过一定时间之后(时间间隔可大可小), 再次输入该组参数, 系统振荡或发散. 系统一旦进入不稳定状态, 软件部分的保护功能开始作用, 强制系统停止工作, 并停止采集数据. 基于此, 本文不再给出这一情况下的响应曲线对比图.

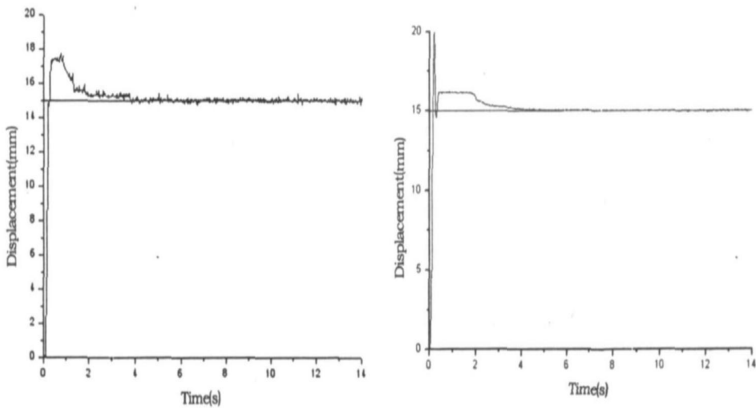


图 4 同一参数下得到的不同响应曲线

2) 问题分析

(1) 为了便于对实验台进行分析, 采用的是简化模型. 磁流变液阻尼器本身是个具有 14 个参数的高阶复杂模型, 加上气缸之后, 整个系统就更加复杂. 为便于控制, 简化系统模型, 将非线性系统近似为一个线性系统, 将高阶系统近似为一个二阶系统. 在建模的过程中, 抓住关键因素, 忽略次要因素, 这有利于分析和解决问题. 但是, 当系统控制效果与理论结果的偏差超过一定限度的时候, 就有必要考虑建模过程中忽略次要因素所引起的模型误差及其误差积累.

(2) 控制算法引起非线性. 在本课题的前期工作中, 针对基于磁流变液阻尼器的气动伺服系统的特点, 本实验室在控制策略方面已经做了很多有意义的尝试. 例如, 用常规 PID 对系统进行控制, 利用规则可调整的模糊整定 PID, 基于 Bang-Bang 和规则可调整的模糊整定 PID 的双模控制算法等等. 这些控制策略的研究, 有利于对系统进行更深入的工作. 特别是姜海涛^[3]等人提出的基于 Bang-Bang 和规则可调整的模糊整定 PID 的双模控制算法, 有效地解决了系统“平台”问题^[3].

另一方面, 作为一种以模糊数学为基础发展起来的非线性控制方式, 模糊控制对无法取得数学模型或数学模型相当粗糙的系统可以取得满意的控制效果, 而且具有控制器实现相对简单, 参数物理意义明确, 便于现场调试等优点. 但是在实现过程中, 模糊规则的提取和隶属度函数参数的确定是模糊推理系统设计中重要而且非常困难的问题. 通常从领域专家方面获取的模糊规则比较粗糙, 并且缺乏有效的方法来确定隶属度函数参数, 以减少输出误差或提高性能指标. 所以在模糊推理系统中, 模糊规则的建立和隶属度函数参数的确定是系统设计中的瓶颈问题^[4], 严重影响了其控制效果.

(3) 从实验台的角度来看, 系统非线性主要是由器件老化和模型误差所引起的. 主要从以下四个角度进行分析: 磁流变液阻尼器本身的模型误差、元器件老化等引起的非线性以及系统控制过程中的非线性. 具体分析如下:

①磁流变液阻尼器本身的模型误差. 目前人们对磁流变液的工作机理研究还不够透彻. 磁流变液本身具有的一些特性, 比如稳定性、沉淀性等等都会影响到它的流变特性进而影响到阻尼器模型的准确性. 同样的磁流变液, 随着工作时间的增加, 其稳定性会下降, 粘弹性亦会增强. 磁流变液的磁滞特性, 影响到整个系统, 形成间隙特性. 在现有实验条件下, 为了尽可能地避免磁流变液沉淀带来的不良后果, 当实验台停止工作达 2 个小时以上, 再次开机工作时, 先对系统进行“预热”, 目的是减小磁流变液的沉淀效果带来的不良影响. 经过大量实验发现, 实验前经过 10 到 15 分钟的预热之后, 系统性能有了明显改善.

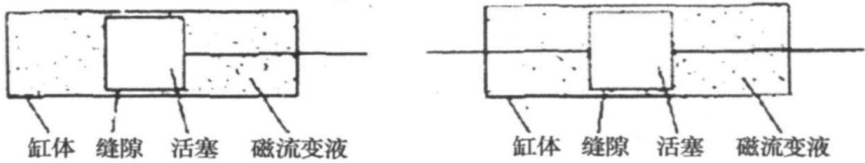


图 5 单出杆及双出杆 MRF 阻尼器比较图

另外一个重要的原因是磁流变液阻尼器具有单、双出杆之分, 如图 5 所示. 单出杆对活塞杆的抗扰度要求比较高, 否则同轴度的偏差容易引起活塞杆弯曲变形. 采用双出杆结构, 活塞杆的抗扰性比较强, 而且不会产生体积差, 可避免使用体积补偿

器^{[5][6]}. 为了保证机械结构引起的误差, 可以考虑使用双出杆结构. 但是双出杆结构在实际应用中安装复杂, 实用性较差. 因此本系统中仍采用单出杆结构的阻尼器.

②气源引起的问题. 本实验台采用的是 *FESTO* 气源及各类阀驱动气缸仿真外部载荷, 采用 *JUN-AIR COMPRESSOR* 6-25 的气泵, 其最大气压为 16 bar, 稳态工作压力为 bar, 储气容积为 25 Liter. 实验过程中, 如果气泵连续工作时间过长, 其实际气压会低于设定值. 气压不足往往会引起系统振荡. 为了避免实验过程中气压不足带来的非线性误差, 一种比较简单的方法是等气泵的气压饱和时才开始实验, 连续实验时间不过长.

③节流阀模型误差. 根据系统已有模型可知, 磁流变效应在外特性上相似于具有节流阀的液压缸系统. 但是, 磁流变液压缸从线圈电流到其产生的磁场, 再到产生的磁流变效应对应的节流阀开口的关系比较复杂, 简化后模型所产生的误差在所难免.

④系统固有非线性. 本控制系统当中最主要的非线性因素是由于静摩擦力的存在, 使得系统具有死区特性. 另外系统启动时, 由于不可避免的空行程也是系统具有明显的间隙特性.

大量的实验表明, 死区特性和间隙特性在系统启动时比较突出, 如图 6 所示. 为了减小空行程带来的间隙特性, 在实验过程中对系统设置复位功能, 每一次实验开始前, 将系统复位, 使得阻尼器的活塞杆和气缸运动杆回到起始位置. 实验证明, 这一措施的效果非常明显.

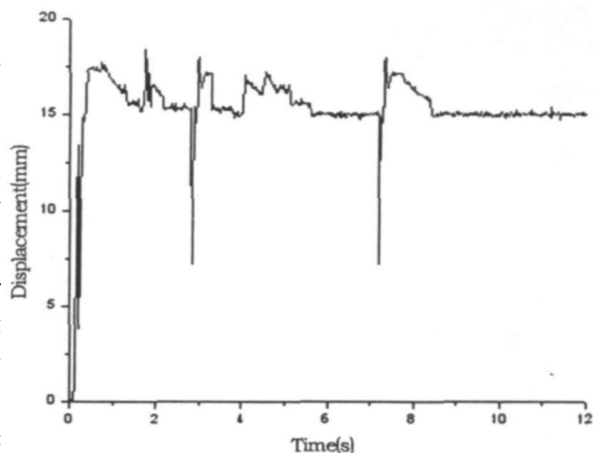


图 6 摩擦特性下系统的典型响应曲线

4 小结

相对于气体介质, 磁流变液有很明显的优势, 便于实现气动伺服系统的精确控制. 但是由于材料的自身特性, 基于磁流变液的控制系統也存在实验结果不稳定, 可重复性差等问题. 本文针对系统特点, 从控制算法以及试验平台等角度分析了引发问题的原因, 提出了解决问题的方案并进行了试验或仿真验证. 今后的工作除了对实验平台进行设备的优化之外, 控制算法的研究是工作的重点.

参考文献:

- [1] Rabinow J. The Magnetic Fluid Clutch[J]. AIEE Trans. 1948, (67): 1308—1315.
- [2] 许宏. 气液联控位置伺服系统理论分析及其控制策略的研究[D]. 哈尔滨工业大学博士论文, 2001, 3.
- [3] Su Yongqing, Yue Jiguang, Jiang Haitao, Peng Rui. Research on Control Character of Pneumatic Servo System with MR[C]. The Ninth International Conference on Electrorheological (ER) Fluids and Magneto-rheological (MR) Suspensions.
- [4] 韩璞, 周世梁, 刘玉燕, 王东风. 基于环路成形和自适应神经模糊推理系统的模糊控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2004, (5): 30—35.
- [5] <http://www.rheonetic.com>
- [6] 邹继斌, 陆永平. 磁性流体密封原理与设计[M]. 北京: 国防工业出版社.

Research on Experiment of Pneumatic System Based on MRF

WANG Yi-ding, YUE Ji-guang, SU Yong-qing, XIAO Yun-shi

(Process Control Lab, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Magnetorheological fluid (MR) is an intelligent material. Pneumatic servo system with MR damper has higher damping ratio, and it's easier to control the system precisely. Based on the experiment equipment, this paper analyses the inherent shortcomings of the MRF system, such as nonlinearity and the unrepeatable result. Some of the solutions, verified by simulation or experiment are also provided in this paper.

Key words: MR fluid; pneumatic servo system; nonlinearity