

文章编号: 1000-5013(2011)04-0373-04

盘式磁流变液阻尼器的简化逆动态模型

陈国兵^{1,2}, 戴金桥², 丁言露³

(1. 江苏食品职业技术学院, 江苏 淮安 223003;
2. 东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096;
3. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对磁流变液阻尼器高度非线性特性导致的控制难问题,提出一种简化的逆动态模型.该模型可由速度反馈算法或力反馈算法实现,可以用来计算磁流变液的屈服应力或输入电流,使磁流变液阻尼器实时地产生一个阻尼力,并确保该阻尼力达到从各种优化算法中获得的目标控制力.在此基础上将盘式磁流变液阻尼器应用于力反馈系统中,并将简化逆动态模型用于反馈力控制.为了验证所提算法的有效性和正确性,建立一个力反馈实验系统并进行力跟踪实验,实验结果充分验证了所提方法的有效性.

关键词: 盘式阻尼器; 磁流变液; 简化逆动态模型; 力反馈系统

中图分类号: TH 703.62 **文献标志码:** A

磁流变液是一种液体智能材料,在磁场作用下其流变学特性发生剧烈变化.这种变化表现为以下 4 种特征:(1) 能够从牛顿流体状态转变为半固体状态;(2) 状态的转换速度极快,只有几到十几个毫秒;(3) 状态转换过程可逆,亦即施加磁场由液态转变了半固态,撤掉磁场时又能够由半固态转变为液态;(4) 状态转换过程中不吸收和释放大量能量.正是因为如此,磁流变液被动广泛地应用于各个领域,特别是需要进行力传递和控制的场合,如用于振动控制的阻尼器^[1]、力传递的制动器^[2-3]和离合器^[4-5]及表面抛光的磁流变液修形设备^[6]等.磁流变液阻尼器具有高度非线性特征,建立其逆动态模型非常困难.为此,一些研究者们利用神经网络开展对磁流变液阻尼器逆动态模型研究.Chang 等^[7]在一些位移、阻尼力和电压信号及优化阻尼力时间序列的基础上,采用递归神经网络建立了磁流变液阻尼器的逆动态模型;徐建忠等^[8]利用径向基函数神经网络为磁流变液阻尼器建立了逆动态模型,但是太过于复杂且很难实现;高梅等^[9]利用自适应神经模糊推理系统建立了磁流变液阻尼器的神经-模糊智能模型来模拟其逆向动特性模型,取得了较好的效果,但具有很大的局限性.为此,本文提出一种针对盘式磁流变液阻尼器简化逆动态模型的建立方法,利用该模型可以实时有效、精确地控制阻尼器的阻尼力.

1 磁流变液阻尼器的逆动态模型

1.1 阻尼器的阻尼力

在基于磁流变液阻尼器的力控制系统中,从各种控制算法中可获得阻尼器的优化目标阻尼力,而通过阻尼器的逆动态模型可计算出需要施加的电流及所产生的一个实际阻尼力.该实际阻尼力越接近目标阻尼力,说明逆动态模型越有效,阻尼器越能达到实时、精确控制力的目的.

图 1 为盘式阻尼器的结构示意图.图 1 中:转子与壳体内壁的间隙为 h ,充满磁流变液;转子与壳体内壁之间的磁流变液环形薄片内、外径分别为 r_i , r_o .施加电流产生磁场,磁流变液粘度变大,转子在

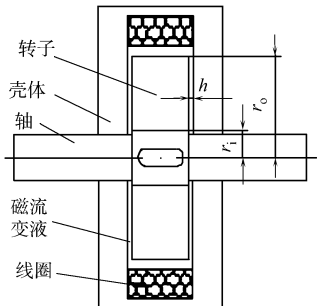


图 1 盘式磁流变液阻尼器结构
Fig. 1 Disc-shaped magnetorheological damper structure

壳体内受阻尼力矩作用. 该阻尼力矩可以表示为

$$T_o = T_M + T_{uc} = \frac{4}{3} \pi (r_o^3 - r_i^3) \tau_y + \left(\frac{2 \pi \eta \omega}{h} (r_o^4 - r_i^4) + T_f \right). \tag{1}$$

式(1)中: T_o 为阻尼器总的阻尼力矩, 是由磁场作用于磁流变液产生的屈服应力, 由它产生的为可控阻尼力矩为 T_M ; η 为磁流变液的动力粘度, 由它产生的粘滞阻尼力矩与摩擦力产生的摩擦力矩 T_f 一起构成不可控阻尼力矩 T_{uc} ; ω 为转子的转速.

1.2 简化逆动态模型约束条件

磁流变液阻尼器具有被动约束和限制约束两个约束条件.

1.2.1 被动约束 在主动控制中, 力可以在力矩-转速图的 4 个象限中的任何一个象限里产生, 而被动控制中力只能在第 1 象限和第 3 象限中产生, 如图 2 所示. 盘式阻尼器阻尼力(以下用力矩表示)为耗散型的, 即有

$$T(t) = \begin{cases} T_{Object}(t), & T_{Object}(t)\omega(t) > 0 \\ 0, & T_{Object}(t)\omega(t) \leq 0. \end{cases} \tag{2}$$

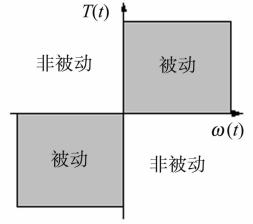


图 2 阻尼器的被动约束条件
Fig. 2 Damper passive constraints

式(2)中: $\omega(t)$ 是盘式磁流变液阻尼器的转子转速; $T_{Object}(t)$ 为已知的优化目标阻尼力矩. 从式(2)中可以看出, 当阻尼器实际阻尼力矩 T_{Actual} 在 t 时刻与转子转速方向一致时, 目标力矩 T_{Object} 可以与 T_{Actual} 比较, 即有

$$\text{sgn}[T_{Object}(t)] = \text{sgn}[T_{Actual}(t)]. \tag{3}$$

1.2.2 限制约束 除了被动约束外, 磁流变液阻尼器产生的力还受上限和下限值限制, 它取决于转子的转速. 即

$$|T_{min}(t)| \leq |T_{Object}(t)| \leq |T_{max}(t)|. \tag{4}$$

式(4)中: $T_{min}(t)$ 和 $T_{max}(t)$ 分别为 t 时刻阻尼力矩能够达到的最小值和最大值, 由转子转速 $\omega(t)$ 决定, 如图 3 所示. 如果目标阻尼力矩 T_{Object} 能够实现, 则意味着满足式(3)和式(4)两个约束条件, 可以利用简化逆动态模型求得最优输入电流并产生所需的阻尼力.

1.3 阻尼器的简化逆动态模型

1.3.1 转子转速反馈算法 如果目标阻尼力矩 T_{Object} 满足节 1.2 所述的约束条件, 那么最优屈服应力 $\tau_y(t)$ 可由以下方法求得, 即

$$T_\eta(t) = C_\eta \omega(t), \quad C_\eta = \frac{2 \pi \eta}{h} (r_o^4 - r_i^4), \tag{5}$$

$$T_M(t) = C_M \tau_y(t), \quad C_M = \frac{4}{3} \pi (r_o^3 - r_i^3). \tag{6}$$

式(5), (6)中: T_η 为磁流变液动力粘度产生的力矩. 因为阻尼器阻尼力矩的 3 个分量符号总是一致的, 所以目标阻尼力矩的幅值等于三分量幅值的和, 即 $T_{Object} = C_M \tau_y(t) + C_\eta |\omega(t)| + T_f$. 其中: T_f 机构摩擦产生的力矩. 经整理可得

$$\tau_y(t) = \frac{1}{C_M} [|T_{Object}| - C_\eta |\omega(t)| - T_f]. \tag{7}$$

上述的简化逆动态模型可以获得所需的 $\tau_y(t)$, 进而求得要施加的电流, 实现目标阻尼力矩 T_{Object} . 为了实现该模型, 需要一个额外的转速传感器, 代价较大而且安装困难. 下面研究更为适用的算法.

1.3.2 力反馈算法 虽然转子转速不适合于反馈, 但可以用实际测量的力矩 T_{Actual} 来近似, 等效的 T_{Actual} 等于 3 个阻尼力矩分量的和, 即有

$$|T_{Actual}| = C_M \tau_y(t - \Delta t) + C_\eta |\omega(t - \Delta t)| + T_f. \tag{8}$$

由于 $\omega(t)$ 变化的连续性, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\omega(t - \Delta t)$ 可以看作 $\omega(t)$ 的近似值. 经整理可得

$$|\omega(t)| \approx \frac{1}{C_\eta} [|T_{Actual}| - C_M \tau_y(t - \Delta t) - T_f]. \tag{9}$$

将式(9)代入目标阻尼力矩的幅值 T_{Object} 中, 可得阻尼器基于阻尼力矩的简化逆动态模型为

$$\tau_y(t) = \tau_y(t - \Delta t) + \frac{1}{C_M} [|T_{Object}| - |T_{Actual}|]. \tag{10}$$

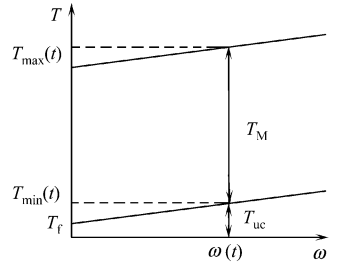


图 3 阻尼器可实现力限值
Fig. 3 Damper can realize force limits

2 基于盘式阻尼器力反馈实验系统建立

为了验证盘式磁流变液阻尼器简化逆动态模型的有效性和正确性,设计并加工一个磁流变液阻尼器原型,并应用该阻尼器原型建立了一个简单的力反馈实验系统,如图 4 所示. 该系统包括主端和从端,主端的机构部分由支架、磁流变液阻尼器、角度及力矩传感器、主臂组成,阻尼器的壳体固定于一端支架上,主臂、传感器固定于轴并通过轴承固定于另一端支架,主端控制器部分包括计算机、数据采集与控制器、直流可调电流源;从端机构部分由支架、电机、力传感器、从臂组成,电机固定于一端支架上,通过轴带动从臂转动,从端控制器部分由计算机、数据采集与控制器组成.

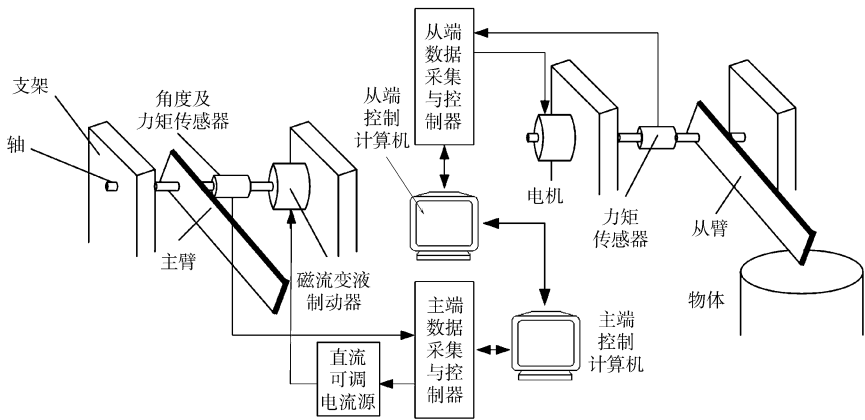


图 4 力反馈实验系统图
Fig. 4 Force feedback experiment system

当操纵主臂转动时,角度传感器将主臂的转动角度采集到主端控制器并传输到从端控制器,控制电机的转动,从而控制从臂的转动;当从臂接触到物体时,从端的力传感器将从臂受力信息通过从端控制器传回主端控制器,主端控制器利用简化逆动态模型计算出电流,并控制电流源输出该电流,磁流变液阻尼器动作,从而产生一个阻尼力. 该阻尼力与从臂所受力相等或相近,即将从臂受力反馈到主臂上来. 结合模型和实验系统中可以看出,从臂受力即为优化目标阻尼力矩,主端力矩传感器实测的力矩为实际力矩,其他参数可以由阻尼器结构参数、磁流变液参数等获取. 因此,将这些参数代入模型,即可直接验证基于力反馈算法的简化逆动态模型的正确性和有效性.

3 力跟踪实验

在建立的实验系统基础上,进行力跟踪实验. 力跟踪实验不但可以有效地验证盘式磁流变液阻尼器简化逆动态模型的正确性和有效性,还可以应用于机器人的力觉临场感,即可以实现对机器人带力觉的控制. 另外,力跟踪实验也可以有效地验证阻尼器简化逆动态模型具有很大的力控制适用范围. 分别进行粘滞性物体的压力释放力和刚体碰撞力的跟踪实验,结果如图 5 所示.

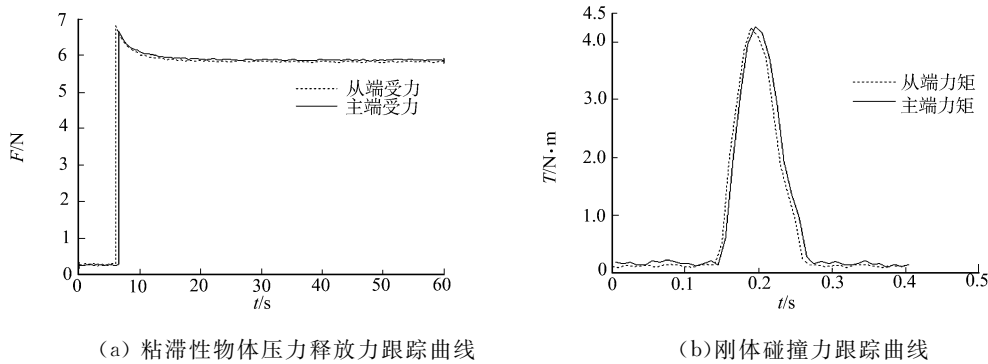


图 5 力跟踪实验结果
Fig. 5 Experimental results of force tracking

黏弹性物体受冲击力作用后并不能够保持力不变,而是有一个释放过程,释放速度由快变慢,最终

达到力平衡. 从图 5 可以看出,不论是对黏弹性物体压力释放的力跟踪还是硬物碰撞过程的力跟踪,磁流变液阻尼器都能较好的完成.图 5 中的主、从臂受力在时间轴上有偏移,是它们的主、从端信号传输过程存在时延.从图 5 还可以看出:磁流变液阻尼器能够实现动态的力跟踪;力跟踪误差很小,基本上可以忽略不计;能够跟踪的力范围较大.因此,盘式磁流变液阻尼器简化逆动态模型可以有效性地克服其高度非线性造成控制难的缺点,实现阻尼力的大范围精确控制.

4 结 束 语

针对磁流变液阻尼器高度非线性导致的控制难度大和其他控制方法适用性较弱的问题,提出一种盘式阻尼器的简化逆动态模型.该模型可由速度反馈算法或力反馈算法实现,相对于速度反馈算法,力反馈算法因需要配置的简单和容易实现而适用性更强.为了验证所提算法的有效性和正确性,建立了一个力反馈实验系统并进行了力跟踪实验,结果表明在简化逆动态模型的控制下,磁流变液阻尼器能够输出精确、实时、大范围的阻尼力,满足各种工程应用需求.盘式磁流变液阻尼器简化逆动态模型的提出,为实现其阻尼力控制提供了一个新思路,也为直动式和回旋式磁流变液阻尼器的控制提供参考.

参 考 文 献:

[1] 杜成斌,石平才,于国军,等.带有磁流变阻尼器的结构振动实时控制试验[J].河海大学学报:自然科学版,2009,37(3):308-312.

[2] 王忠,朱洪俊,杨玉民,等.磁流变制动器原理及动力学分析[J].液压与气动,2005(7):66-68.

[3] 李志华,林阳,朱丰友,等.圆筒式磁流变制动器结构与磁路耦合的优化设计[J].工程设计学报,2009,16(4):261-265.

[4] 麻建坐,贺建民,黄金,等.圆筒式磁流变离合器传动特性分析[J].重庆工学院学报:自然科学版,2009,23(3):34-42.

[5] 赵计平,邹继文.盘式磁流变液离合器的设计与分析[J].西南师范大学学报:自然科学版,2008,33(2):136-138.

[6] 石峰,戴一帆,彭小强,等.高精度光学表面磁流变修形[J].光学精密工程,2009,17(8):1859-1864.

[7] CHANG Chih-chen,ZHOU Li. Neural network emulation of inverse dynamics for a magnetorheological damper[J]. J Struct Engrg,2002,128(2):231-239.

[8] 徐健忠,王洪飞.基于神经网络的磁流变阻尼器逆控制研究[J].机电工程,2009,26(3):87-89.

[9] 高梅,王长征. ANFIS 技术实现磁流变阻尼器的逆向建模及其应用[J].振动与冲击,2008,27(3):140-142.

Simplified Inverse Dynamic Model for
Disc-Shaped MR Fluid Damper

CHEN Guo-bing^{1,2}, DAI Jin-qiao², DING Yan-lu³

(1. Jiangsu Food Science College, Huaian 223002, China;

2. Department of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Aiming at the difficult control of magnetorheological fluid damper because of its highly nonlinear characteristics, a simplified inverse dynamic model is proposed. This simplification model can be used to calculate the yield stress of magnetorheological fluid or input current, makes the magnetic fluid damper produc a damping force in real time and ensure. On the basis of this the disc-shaped MR fluid damper will be used in force feedback system, and the simplified the inverse dynamic model is applied to the feedback force control. Finally, an experimental system was established and the results of which have verified the effectiveness of the proposed method.

Keywords: disc-shaped damper; magnetorheological fluid; simplified inverse dynamic model; force feedback system