

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.002

磁流变调速起动控制模型建立与时间响应研究*

王道明¹ 侯友夫² 田祖织² 孟庆睿²

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009; 2. 中国矿业大学机电工程学院, 徐州 221116)

摘要: 为揭示磁流变调速起动过程中的时间响应特点及影响因素, 在分析磁流变调速起动控制系统工作原理的基础上, 建立输出转速控制数学模型, 并利用 Simulink 软件对调速起动的的时间响应进行仿真分析, 其后在不同初始条件下开展调速起动试验研究。研究表明: 磁流变调速起动响应时间随着励磁电流的减小和负载扭矩的增大而增加, 而与输入转速间近似成正比例关系; 试验时所测得不同因素的影响规律与仿真时基本一致, 验证了理论模型和仿真分析的正确性, 然而由于仿真时未考虑磁路响应和磁流变液流变响应, 响应时间的仿真值与实测值相比偏小。

关键词: 磁流变液 调速起动 速度控制模型 时间响应

中图分类号: TH137; TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)09-0008-06

引言

目前常用的调速方式主要有变频调速和液体黏性调速两种。其中, 变频调速应用较为广泛, 调速效果也得到普遍认可, 但其缺点在于对电网的二次谐波干扰以及由此引发的能耗过大等问题; 液体黏性调速通过改变摩擦副间油膜厚度来实现无级调速^[1], 具有高效节能、起动冲击小和可控性好等优点, 然而其发热严重、摩擦片寿命短、系统复杂且维护成本高。因此, 采用表观粘度变化范围大且响应迅速、过程可逆及易于控制的磁流变液来实现机械设备的调速控制具有十分重要的现实意义。

磁流变液是一种由软磁性颗粒、基载液和添加剂等组成的可控智能流体材料^[2-4]。在磁场作用下, 可在瞬间由自由流动状态转变为半固体状态; 一旦磁场撤除, 又能够迅速恢复到原先的流体状态。这种流变可逆的现象即为磁流变效应, 其本质在于软磁性颗粒在磁场作用下形成的链状或柱状结构阻碍了液体的自由流动, 使其表观粘度增加, 呈现可控剪切屈服应力^[5-6]。

磁流变调速起动控制利用磁流变液作为工作介质, 以控制磁场强度为调速手段, 具有调速平稳、控制能耗低以及调速范围宽等特点。当前研究工作主要集中于磁流变传动装置的设计及传动和响应性能等方面^[7-10], 而对于磁流变液在调速起动控制领域

的应用研究甚少。为此, 本文对磁流变调速起动控制模型与时间响应开展理论和试验研究, 建立调速起动控制数学模型, 并通过数值仿真和试验研究揭示磁流变调速起动的的时间响应特点及影响因素, 以为磁流变调速控制的实际应用提供理论参考和试验依据。

1 磁流变调速起动控制系统

图 1 为磁流变调速起动控制系统框图, 主要由动力装置、变频器、扭矩传感器、磁流变调速装置、工作机械、稳恒电源和控制器等组成。其中, 动力装置为系统提供动力, 并经扭矩传感器和磁流变调速装置后带动工作机械运转, 变频器调节动力装置输出转速, 扭矩传感器测量系统传递扭矩, 线圈励磁电流由稳恒电源提供, 并通过控制器来调节。

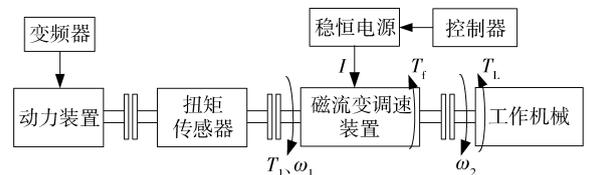


图 1 磁流变调速起动控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of MR speed regulating start control system

如图 1 所示, 磁流变调速装置的输入扭矩为 T_1 , 摩擦扭矩为 T_f , 其输入、出角速度分别为 ω_1 、 ω_2 , 工作机械的负载扭矩为 T_L , 则系统动力学方程为

收稿日期: 2013-08-26 修回日期: 2013-10-03

* 国家自然科学基金资助项目(50975275, 51075386)、江苏省科技支撑计划资助项目(BE2013819)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(SZBF2011-B35)和江苏省研究生培养创新工程资助项目(CXZZ12_0926)

作者简介: 王道明, 讲师, 博士, 主要从事大功率磁流变液传动及调速控制技术研究, E-mail: wdm3102@126.com

$$T_1 = T_f + T_L + J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

式中 J ——输出端总转动惯量,它为磁流变调速装置输出端、输出端联轴器和工作机械输入端转动惯量之和, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

$d\omega/dt$ ——输出角加速度, rad/s^2

由式(1)可看出, $T_1 > T_f + T_L$ 时, $d\omega/dt > 0$, 系统输出端处于加速状态; $T_1 = T_f + T_L$ 时, $d\omega/dt = 0$, 系统输出端处于恒速状态; 当 $T_1 < T_f + T_L$ 时, $d\omega/dt < 0$, 系统输出端处于减速状态。

在已知输入角速度 ω_1 、摩擦扭矩 T_f 、负载扭矩 T_L 和系统输出端总转动惯量 J 的条件下, 仅需通过调节励磁电流 I 便可控制磁流变调速装置的输入扭矩 T_1 , 进而调控系统输出角加速度 $d\omega/dt$ 来达到调速起动的目的。

2 速度控制数学模型

在开展磁流变调速起动控制研究时, 有必要建立调速系统速度控制数学模型。磁流变调速起动采用半主动控制方式, 通过控制线圈励磁电流 I 来达到调节输出转速 ω_2 的目的, 因而, 速度控制数学模型即为 $I - \omega_2$ 关系模型, 其具体求解过程如图2所示。

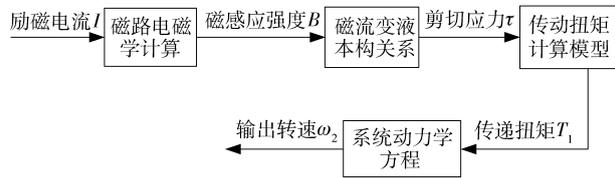


图2 速度控制模型求解过程框图

Fig. 2 Block diagram of solution procedure for speed control model

2.1 磁路电磁学计算

基于基尔霍夫第二定律, 可得磁感应强度 B 与励磁电流 I 间的关系式为

$$B = NI / \left(\sum R_m S \right) \quad (2)$$

式中 N ——励磁线圈匝数

$\sum R_m$ ——磁路总磁阻, H^{-1}

S ——磁流变液工作面积, mm^2

由式(2)可以看出, 在已知励磁线圈匝数 N 、磁路总磁阻 $\sum R_m$ 和磁流变液工作面积 S 的条件下, 磁感应强度 B 与励磁电流 I 间成正比例关系。

2.2 磁流变液本构关系

磁流变液的剪切应力与所施加的磁感应强度密切相关。在外加磁场作用下, 磁流变液表现为高粘

度、低流动性的 Bingham 流体特性, 根据 Bingham 粘塑性本构方程^[11-12], 可得磁流变液剪切应力为

$$\tau = \tau_m(B) \text{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} \quad (3)$$

式中 $\tau_m(B)$ ——磁致屈服应力, kPa

$\dot{\gamma}$ ——剪应变率, s^{-1}

η ——动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

当主、从动盘间存在滑差时, 圆盘间的磁流变液将受到剪切作用, 其剪应变率可表示为

$$\dot{\gamma} = \Delta\omega r / h \quad (4)$$

式中 $\Delta\omega$ ——主、从动盘角速度差, rad/s

r ——磁流变液工作半径, mm

h ——工作间隙厚度, 即主、从动盘间距, mm

当磁流变液中的磁性颗粒未达到完全饱和时, 其磁致屈服应力可表示为磁感应强度与磁流变液材料参数的函数^[13-15], 具体表达式为

$$\tau_m(B) = kB^a \quad (5)$$

式中 k, a ——磁流变液材料参数, 取决于磁流变液的材料性质, a 的数值在 1 和 2 之间

结合式(3)~(5)可得, 磁流变液剪切应力 τ 与磁感应强度 B 间的关系式为

$$\tau = kB^a \text{sgn}\left(\frac{\Delta\omega}{h}\right) + \frac{\eta r \Delta\omega}{h} \quad (6)$$

2.3 传递扭矩计算模型

磁流变调速装置的传递扭矩由磁流变液的剪切作用产生, 由式(6)可知, 它主要由磁致扭矩和粘性扭矩两部分组成。

假定磁感应强度沿磁流变液工作面半径方向均匀分布, 将式(5)沿工作面积分可得磁致扭矩的表达式为

$$T_m = \int_S \tau_m(B) r dS = \int_S kB^a r \text{sgn}(\Delta\omega r / h) dS \quad (7)$$

粘性扭矩可根据牛顿内摩擦定律求得

$$T_v = \int_S \eta \dot{\gamma} r dS = \int_S \frac{\eta r^2 \Delta\omega}{h} dS \quad (8)$$

则可得传递扭矩 T_1 的表达式为

$$T_1 = T_m + T_v = \int_S \left[kB^a r \text{sgn}\left(\frac{\Delta\omega}{h}\right) + \frac{\eta r^2 \Delta\omega}{h} \right] dS \quad (9)$$

2.4 系统动力学方程

根据式(1)中的系统动力学方程, 可得传递扭矩 T_1 与输出转速 ω_2 之间的关系式为

$$T_1 = T_f + T_L + J \dot{\omega}_2(t) \quad (10)$$

以多盘式磁流变传动为例, 联立式(2)、(9)、(10), 可得励磁电流 I 与输出转速 ω_2 关系式为

$$\frac{2kn\pi(r_2^3 - r_1^3)}{3} \left[\frac{NI}{\pi \sum R_m(r_2^2 - r_1^2)} \right]^a \operatorname{sgn}(\omega_1 - \omega_2(t)) + \left[\frac{\pi n \eta \omega_1 (r_2^4 - r_1^4)}{2h} - T_f \right] = \frac{\pi n \eta (r_2^4 - r_1^4)}{2h} \omega_2(t) + T_L + J \dot{\omega}_2(t) \quad (11)$$

式中 r_1, r_2 ——工作间隙内、外半径, mm

n ——工作间隙数目

对式(11)进一步化简, 令

$$\begin{cases} C_1 = \frac{2kn\pi(r_2^3 - r_1^3)}{3} \left[\frac{NI}{\pi \sum R_m(r_2^2 - r_1^2)} \right]^a \\ C_2 = \frac{\pi n \eta \omega_1 (r_2^4 - r_1^4)}{2h} - T_f \\ C_3 = \frac{\pi n \eta (r_2^4 - r_1^4)}{2h} \end{cases} \quad (12)$$

则式(11)可写成

$$C_1 I^a \operatorname{sgn}(\omega_1 - \omega_2(t)) + C_2 = C_3 \omega_2(t) + T_L + J \dot{\omega}_2(t) \quad (13)$$

对式(13)两边同时进行拉氏变换, 得

$$\frac{C_1 I^a \operatorname{sgn}(\omega_1 - \omega_2(s))}{s} + \frac{C_2}{s} = C_3 \omega_2(s) + \frac{T_L}{s} + J(s\omega_2(s) - \omega_2(0)) \quad (14)$$

将初始条件 $\omega_2(0) = 0$ 代入式(14)并整理得

$$\omega_2(s) = \frac{C_1 I^a \operatorname{sgn}(\omega_1 - \omega_2(s)) + C_2 - T_L}{Js^2 + C_3s} \quad (15)$$

3 时间响应仿真分析

3.1 仿真基本参数

在进行时间响应仿真分析时, 选取计算参数为:

$N = 2000$ 匝, $\sum R = 3.15 \times 10^5 \text{ H}^{-1}$, $r_1 = 50 \text{ mm}$, $r_2 = 100 \text{ mm}$, $h = 1 \text{ mm}$, $n = 15$, $k = 140 \text{ kPa/T}$, $a = 1.35$, $\eta = 1.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $T_f = 20 \text{ N}\cdot\text{m}$, $J = 0.15 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

根据上述给定计算参数, 结合式(12)可得 $C_1 = 534.1 \text{ N}\cdot\text{m/A}$, $C_2 = 2.65\omega_1 - 20$, $C_3 = 2.65 \text{ N}\cdot\text{m/s}$ 。

将上述数据代入式(15)可得

$$\omega_2(s) = \frac{534.1 I^{1.35} \operatorname{sgn}(\omega_1 - \omega_2(s)) + 2.65\omega_1 - 20 - T_L}{0.15s^2 + 2.65s} \quad (16)$$

3.2 Simulink 仿真模型

结合式(16), 利用 Matlab/Simulink 软件建立输出转速时间响应的 Simulink 仿真模型如图 3 所示。在不同初始输入条件下对该模型进行数值仿真, 仿真中使用定步长的 Ode4 求解器(四阶 Runge-Kutta 法)进行求解, 求解步长为 0.001 s。

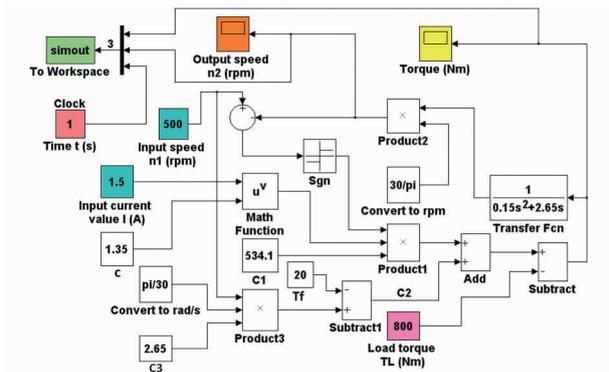


图 3 输出转速时间响应的 Simulink 仿真模型

Fig. 3 Simulink model for time response of output speed

3.3 结果与分析

图 4 所示为不同励磁电流下输出转速的时间响应曲线。图中, 系统输入转速为 500 r/min, 负载扭矩为 800 N·m, 励磁电流分别为 1.5、1.6、1.8、2.0、2.5、3.0 A。

图 4 中, 在调速初始阶段, 由于粘性扭矩作用较小, 输出端以近似恒加速度起动, 输出转速随时间呈近似线性上升, 当输出转速首次达到输入转速后, 由于系统惯性的作用, 其值将会高于输入转速, 此时输出端开始减速, 一旦输出转速低于输入转速, 输出端又处于加速状态, 该动态过程如此反复直至输出转速基本接近输入转速, 系统达到稳定状态, 调速起动过程结束; 同时, 对比不同励磁电流下的响应曲线发现, 励磁电流越大, 输出转速响应越快, 但调速阶段系统的振荡愈明显。

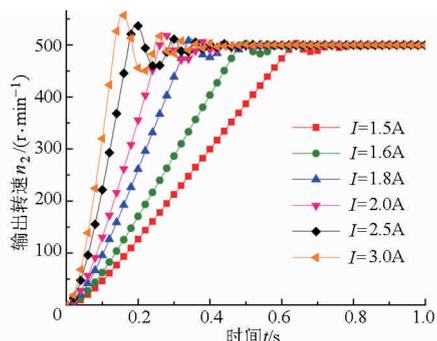


图 4 不同励磁电流下输出转速的时间响应曲线

Fig. 4 Time response curves of output speed under different excitation currents conditions

设置励磁电流为 2.0 A, 负载扭矩为 1000 N·m, 在输入转速分别为 200、400、600、800、1000 r/min 条件下, 得到不同输入转速下输出转速的时间响应曲线如图 5 所示。

由图 5 可得, 不同输入转速条件下, 系统输出转速的响应趋势基本一致, 在调速起动阶段, 输出端起动加速度随输入转速的增加而略微变大, 这是由于

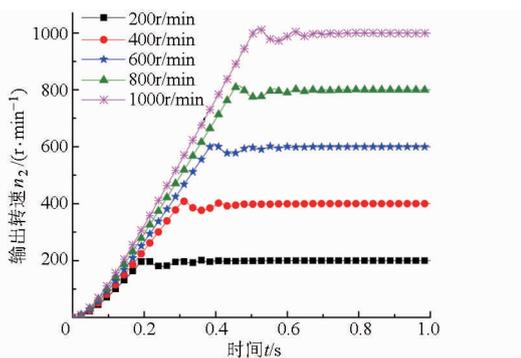


图5 不同输入转速下输出转速的时间响应曲线
Fig. 5 Time response curves of output speed with different input speeds

输入转速较高时粘性扭矩的作用相对较为明显,在励磁电流和负载扭矩恒定时,输出端所受总扭矩也略微加大。然而由于输入转速较大时,系统所需加速更长,因而随着输入转速的增加,系统输出转速的响应速度变慢,对应响应时间变长。

当调节线圈励磁电流为 2.0 A 时,输入转速为 800 r/min,负载扭矩为 400、600、800、1 000、1 200 N·m,

得到不同负载扭矩下输出转速的时间响应曲线如图 6 所示。从图中可以看出,在励磁电流和输入转速恒定的条件下,负载扭矩越大,系统输出端起动加速度越小,输出转速达到稳定状态所需时间越长,但是调速阶段系统输出转速的振荡略微减小,系统超调量降低。

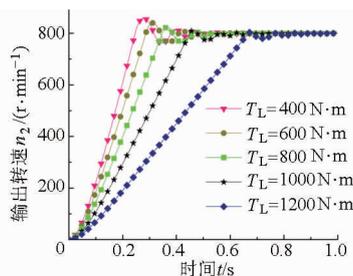


图6 不同负载扭矩下输出转速的时间响应曲线
Fig. 6 Time response curves of output speed under different load torques

为进一步对图 4~6 中的计算结果进行分析,根据仿真所得数据,绘制出不同初始条件下输出转速响应时间的变化情况如图 7 所示。

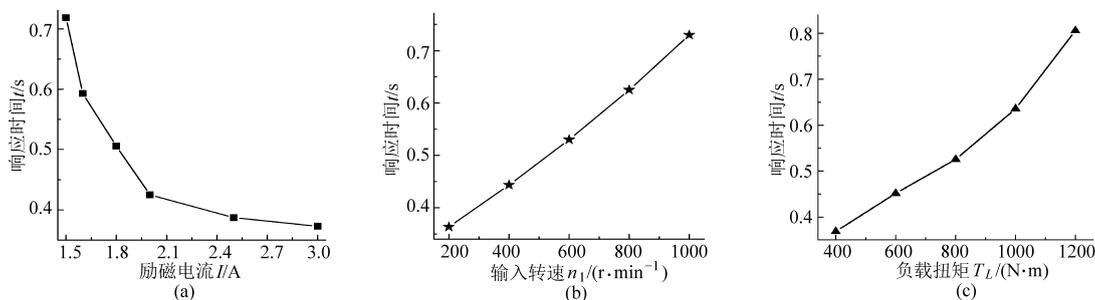


图7 不同初始条件下输出转速的响应时间
Fig. 7 Response time of output speed under various initial conditions
(a) 不同励磁电流 (b) 不同输入转速 (c) 不同负载扭矩

由图 7 可以看出,输出转速的响应时间随输入转速和负载扭矩的增加而增大,随励磁电流的增加而减小,且励磁电流越大,响应时间下降幅度越小,而负载扭矩越大,响应时间上升幅度越大,这是由于随着励磁电流的增大和负载扭矩的减小,输出端角加速度变大,降低了系统初始起动时间,但系统超调量随之增大,导致系统调整时间变长;而输入转速的变化只会对粘性扭转产生作用,并且粘性扭矩所占总扭矩的比例较小,对输出端加速度和系统超调量的影响很小,因此响应时间与输入转速间近似成正比关系。

4 调速起动试验

在图 8 所示的磁流变调速起动试验台上进行调速起动试验,该试验台主要由电动机、变频器、转矩转速传感器、磁流变调速样机、负载装置、测速传感

器、稳恒电源以及数据采集控制系统和计算机等组成。负载装置为磁流变调速样机输出端提供恒定负载,由 PLC 控制的稳恒电源用以给线圈提供励磁电流,变频器用于调节电动机输出转速、转矩转速传感器用于测量系统传递扭矩和输入转速,输出端转速由测速传感器测得,所测信号均由数据采集控制系统采集后传输到计算机上用于后续处理。

保持负载扭矩为 800 N·m 不变,分别在不同输入转速和励磁电流条件下测试调速样机输出端转速随时间的变化情况,所得结果如图 9 所示。

图 9 中,在相同输入转速条件下,不同励磁电流 ($I = 1.0、1.5、2.0$ A) 时对应输出端转速的起动响应时间分别为 2.85、1.58、0.92 s,则可得调速起动时间随励磁电流的增加而减小;而在相同励磁电流作用下,当输入转速由 400 r/min 增大到 800 r/min 时,对应起动时间由 0.76 s 增加



图8 磁流变调速起动试验台

Fig. 8 Test-bed for MR speed regulating start

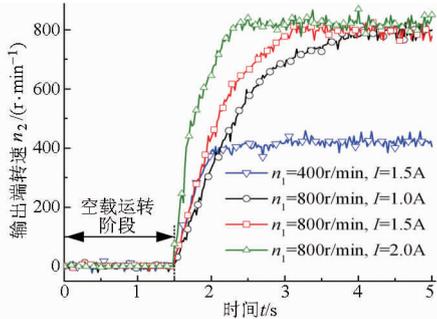


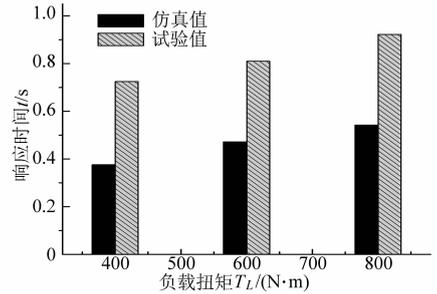
图9 不同输入转速及励磁电流时输出端转速的变化曲线

Fig. 9 Curves of the output speed under different input speeds and excitation currents

到 1.58 s, 由此可得, 随着输入转速的增大, 输出转速响应速度变慢。

当调定励磁电流 $I = 2.0 \text{ A}$ 时, 输入转速 $n_1 = 800 \text{ r/min}$, 在不同负载扭矩条件下, 得到输出转速响应时间的仿真值与试验值对比如图 10 所示。

由图 10 可知, 试验所得响应时间的变化规律与仿真时基本一致, 由此验证了理论模型和仿真分析的合理性; 然而, 试验时测得的调速起动时间比仿真

图10 输出转速响应时间的仿真值与试验值对比
Fig. 10 Comparison of response time of output speed between simulation values and experimental results

值长 0.36 s, 造成这种现象的主要原因是由于仿真时并未考虑调速样机的磁路响应时间和磁流变液自身的流变响应时间所致。

5 结论

(1) 在分析磁流变调速起动控制系统基本组成和控制原理的基础上, 结合磁路基本定律、磁流变液本构模型和系统动力学方程, 建立输出转速控制数学模型。

(2) 运用 Simulink 软件对调速起动的响应时间进行仿真分析, 结果表明: 调速起动响应时间随励磁电流的减小和负载扭矩的增大而增加, 而与输入转速间近似成正比例关系, 即响应时间随输入转速的增加呈线性上升。

(3) 在不同励磁电流和输入转速条件下开展调速起动试验, 验证了理论模型和仿真分析的合理性; 但试验值与仿真值相比偏大, 主要是由于仿真时忽略磁路响应时间和流变响应时间所致。

参考文献

- Xie F, Hou Y. Oil film hydrodynamic load capacity of hydro-viscous drive with variable viscosity[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2011, 63(3): 210-215.
- 王道明, 孟庆睿, 侯友夫, 等. 传动装置磁流变液瞬态温度场研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 287-292.
Wang Daoming, Meng Qingrui, Hou Youfu, et al. Transient temperature field of magneto-rheological fluid in transmission device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 287-292. (in Chinese)
- Wang D H, Liao W H. Magnetorheological fluid dampers: a review of parametric modelling[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(2): 023001.
- 董小闵, 余森, 廖昌荣, 等. 冲击载荷下磁流变变刚度变阻尼缓冲系统减振控制[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 20-24.
Dong Xiaomin, Yu Miao, Liao Changrong, et al. Absorbing control of magneto-rheological variable stiffness and damping system under impact load[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 20-24. (in Chinese)
- Mazlan S A, Ekrem N B, Olabi A G. An investigation of the behaviour of magnetorheological fluids in compression mode[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1): 780-785.
- McKee M J. Effects of temperature on performance of compressible magnetorheological fluid dampers[D]. Reno: University of Nevada, 2010.
- Lee U, Kim D, Hur N, et al. Design analysis and experimental evaluation of an MR fluid clutch[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1999, 10(9): 701-707.
- Kavlicoglu N C, Kavlicoglu B M, Liu Y, et al. Response time and performance of a high-torque magneto-rheological fluid limited slip differential clutch[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(1): 149-159.

- 9 Tian Z, Hou Y. Modeling a magneto-rheological soft starter for use with belt conveyors[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(3): 385–389.
- 10 梁锡昌, 蒋建东. 磁流变无级调速技术的研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(9): 146–149.
Liang Xichang, Jiang Jiandong. Research on magnetorheological continuously variable transmission technology [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 146–149. (in Chinese)
- 11 Carlson D J, Jolly M R. MR Fluid foam and elastomer device [J]. Mechatronics, 2000, 10(4): 555–569.
- 12 Li W H, Du H. Design and experimental evaluation of a magnetorheological brake[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(7): 508–515.
- 13 Ginder J M, Davis L C. Shear stresses in magnetorheological fluids: role of magnetic saturation[J]. Applied Physics Letters, 1994, 65(26): 3410–3412.
- 14 郑军, 曹兴进, 张光辉. 传动装置中磁流变液瞬态流动特性的数值计算[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(9): 1053–1057.
Zheng Jun, Cao Xingjin, Zhang Guanghui. Numerical evaluation for transient flow characteristics of magneto-rheological fluid in the transmission device[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2007, 41(9): 1053–1057. (in Chinese)
- 15 Wang D, Hou Y. Design and experimental evaluation of a multidisk magnetorheological fluid actuator[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2013, 24(5): 640–650.

Control Model and Time Response of Magnetorheological Speed Regulating Start Technology

Wang Daoming¹ Hou Youfu² Tian Zuzhi² Meng Qingrui²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

2. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: With the aim to reveal the characteristics and influence factors of time response for the magnetorheological (MR) speed regulating start process, the basic component and working principle of the MR speed regulating start control system were analyzed at first. Then, the mathematical control model of output speed was established in combination with the basic laws of magnetic circuit, constitutive model of MR fluids as well as systematic dynamics equations. Moreover, time response of MR speed regulating start under various excitation currents, input speed and load torques was simulated and analyzed by using the Matlab/Simulink software. And subsequently, several speed regulating start experiments were carried out under different initial conditions. Both the simulation and experimental results concerning the response time of the output speed are presented and discussed in detail. Research results indicate that the response time of MR speed regulating start increases with the decrease of the excitation current and the increase of the load torque, while it exhibits an approximate proportional relationship with the input speed; the influence laws of various factors on time response are basically the same between experiments and simulations, which in return proves the validity of theoretical model and simulation analysis. However, simulation values are relatively smaller for about 0.36 s in comparison with experimental results for not considering the magnetic response of the circuit and the rheological response of the MR fluids. Research results may serve to provide a theoretical reference and experimental basis for the development and practical application of the MR speed control technology.

Key words: Magnetorheological fluid Speed regulating start Speed control model Time response