

基于制动控制器的磁流变制动器性能

宋万里^{1,2}, 王思元¹, 胡志超², 张萌²

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 农业部南京农业机械化研究所, 江苏 南京 210014)

摘 要: 本文主要对基于制动控制器的磁流变制动器性能进行探究. 对磁流变制动器进行结构设计和仿真优化, 得出制动器的最优结构, 并基于 Arduino 开发板与 L9349 功率驱动芯片设计了磁流变制动控制器. 为探究基于制动控制器的制动器制动性能, 分别进行了不同阶跃信号规律、正弦信号规律的制动力矩跟随实验和制动减速度实验. 实验结果得出制动器的响应时间约在 40 ms, 控制系统滞后时间约为 70 ms, 制动力矩在跟随过程中滞后时间约为 20 ms, 与液压制动系统相比具有较快的制动响应. 本研究对磁流变制动器的发展和应用奠定了基础.

关 键 词: 磁流变制动器; 结构优化; 控制器; 制动性能; 响应时间

中图分类号: U 463.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)03-0375-06

Performance of Magneto-Rheological Brake Based on Braking Controller

SONG Wan-li^{1,2}, WANG Si-yuan¹, HU Zhi-chao², ZHANG Meng²

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China.
Corresponding author: SONG Wan-li, E-mail: songwl@me.neu.edu.cn)

Abstract: The braking performance of MRB (magneto-rheological brake) based on braking controller was mainly explored in this paper. The main research contents included design and structural optimization to obtain the optimum MRB. In order to study its braking performance, the MRB controller was designed based on the Arduino board and the L9349 power driver IC. Deceleration experiment and braking torque following experiment with different step signals and sine signal were carried out for exploring braking performance. The results indicate that the MRB's response time is about 40 ms, the delay time is about 70 ms, and the lag braking time is about 20 ms in the following process that was faster than that of the hydraulic braking system. This study may has great significance with laying a foundation for the development and application of MRB.

Key words: magneto-rheological brake; structural optimization; controller; braking performance; response time

电动汽车的快速发展使得线控制动技术受到越来越多研究人员的重视. 随着人们对汽车制动系统要求逐渐提高^[1-3], 传统液压制动系统结构变得越发复杂, 而由于其自身的结构特点, 使得汽车在制动时始终存在制动延迟、脉动的特点. 近些年研究人员开发的轮毂制动技术使得汽车的制动效果显著改善^[4-5], 但其复杂的工艺结构以及较高的密封要求无疑会增加汽车制造成本, 且目前轮毂制动所能产生的制动力矩仍不能满足汽车所需. 磁流变制动器结构简单紧凑, 有着制动连续可控、响应迅速的特点^[6]. 本文主要基于结构较轻便的盘式磁流变制动器进行反应性能的相关

收稿日期: 2017-12-25
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775101); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N170304017, N130303002); 中国博士后科学基金面上项目(2017M610181, 2018M631800).
作者简介: 宋万里(1979-), 男, 辽宁锦州人, 东北大学副教授; 胡志超(1963-), 男, 陕西蓝田人, 农业部南京农业机械化研究所研究员.

研究^[7-8].

1 建立制动力矩数学模型

盘式磁流变制动器的工作原理如图 1 所示. 不需制动时,励磁线圈不施加电流,磁流变液呈牛顿流体状态,制动盘此时仅受可以忽略的黏性力矩;当汽车需要进行制动时,励磁线圈中通入电流,磁流变液中的磁性颗粒所形成的链状结构会与接触面产生一定的摩擦力,阻碍接触面运动,从而对制动盘产生剪切制动力矩.

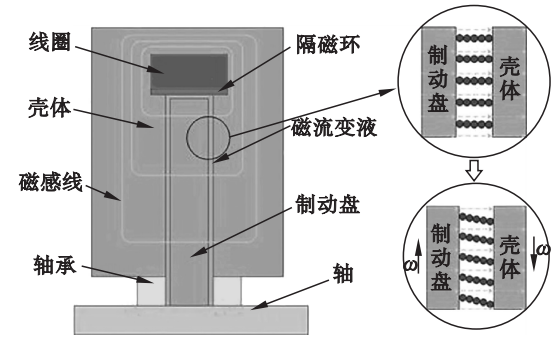


图 1 线圈外置型磁流变制动器原理图
Fig. 1 Schematic diagram of MRB with external coil

研究表明,磁流变液的理想特性可由 Bingham 塑性模型来加以描述^[9]. 根据该模型,磁流变液的剪切应力表示如下:

$$\tau = \tau_y + \eta \dot{\gamma} \tag{1}$$

式中: τ 为磁流变液的剪切应力; τ_y 为磁流变液的动态屈服应力; η 为磁流变液的黏度; $\dot{\gamma}$ 为磁流变液的剪切应变率.

磁流变液的动态屈服应力与磁场强度的函数近似如下:

$$\tau_y = kH_y^\beta \tag{2}$$

式中, k 与 β 为与磁流变液本身有关的定常数.

假设磁流变液是非流动状态,则其剪切应变率为

$$\dot{\gamma} = \frac{\omega r}{\delta} \tag{3}$$

式中: ω 为制动盘的转动角速度; δ 为制动器工作间隙的大小.

在制动盘上,取工作在半径 r 处宽度为 dr 圆环区域,其产生的转矩为

$$dT = 2\tau\pi r^2 dr \tag{4}$$

则制动力矩 T_1 为

$$T_1 = \int_{R_1}^{R_2} 2 \left(kH_y^\beta + \eta \frac{\omega r}{\delta} \right) \pi r^2 dr \tag{5}$$

由于制动盘制动时两端面产生制动力矩,因

此总的制动力矩 T 为

$$T = 2T_1 = 4 \int_{R_1}^{R_2} kH_y^\beta \pi r^2 dr + 4 \int_{R_1}^{R_2} \eta \frac{\omega}{\delta} \pi r^3 dr \tag{6}$$

2 制动器仿真优化

2.1 材料选择及结构参数的初始确定

根据现有加工及实验条件,对制动器各参数进行设定. 首先,工作间隙 δ 是影响制动力矩大小的重要因素^[10],工作间隙越大,制动器所产生的制动力矩越小,而较小的工作间隙虽然能产生较大的制动力矩,但对加工精度的要求更高,也增大了装配的难度,一般其取值范围为 0.25 ~ 2 mm,本文选取 δ 值为 0.5 mm.

由于实验室实验台的环境条件等对制动器的径向大小有一定的限制,因此需要根据实际情况确定制动器的径向尺寸,设定制动器最外径 $R_4 = 70$ mm,线圈宽度 $b = 20$ mm,制动盘的厚度 $h = 6$ mm,制动盘内径 $R_1 = 18$ mm,设定线圈外径 R_3 、制动盘外径 R_2 以及壳体厚度 l 为优化变量.

理论上,磁流变制动器的传动轴除需要足够的强度外,还要有较低的导磁率,从而使线圈产生的磁场更能集中穿过工作间隙的磁流变液,1Cr18Ni9Ti 合金钢是一种高强度的弱磁性材料,因此选其作为实验环境的传动轴;左右外壳、制动盘及外环均需具有较好导磁性能,因此选用 Q235 碳钢,制动器的励磁线圈不仅要满足低磁导率要求,还应具有良好导热性,铜的导热率为 384 W/(m·℃),因此采用漆包线最大外径为 0.96 mm、铜芯的直径为 0.9 mm 型号规格铜漆包线.

2.2 制动器结构仿真优化

利用 ANSYS 有限元分析软件进行制动器结构优化. 仿真中,定义相关材料单元类型 PLANE13;边界条件定义为平行;施加的载荷类型为电流密度. 根据制动器结构及前文设置的参数值,设计变量的设置范围如下:

$$\left. \begin{aligned} 18.5 \text{ mm} < R_2 < 60 \text{ mm}; \\ R_2 + 8 \text{ mm} < R_3 < 65 \text{ mm}; \\ 0 < l < 15 \text{ mm}. \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

优化设计一般是使目标函数最小化,且目标函数值需为正值,而本文优化目标为 $\max T$,即实现制动力矩最大化,因此将目标函数变为 $-\max T$,同时需使目标函数值加上一个较大的正数以防止目标函数值最终出现负值. 优化方法选择一阶法. 最终确定 $l = 9$ mm, $R_2 = 46$ mm, $R_3 =$

60 mm. 整理优化结果得出制动器结构参数如表 1 所示.

表 1 制动器结构参数							
结构参数	R_1	R_2	R_3	R_4	l	h	b
数值	18.5	46	60	70	9	6	20

制动器的示意图如图 2 所示.

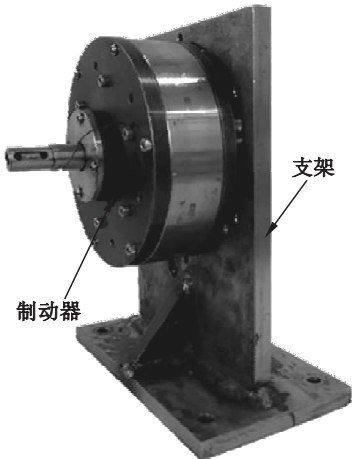


图 2 制动器示意图
Fig. 2 Schematic photo of the brake

为方便制动器进行相应实验,将制动器固定于支架上.

3 磁流变制动控制器设计

3.1 控制器硬件设计

本文使用如图 3 所示的 Arduino 开发板作为控制器的核心部件.

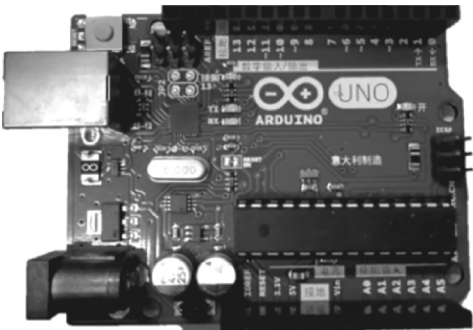


图 3 Arduino 实物图
Fig. 3 Physical map of Arduino

因磁流变制动器所需电流一般最大为 3 A, 因此需要对电流进行放大, 本文选用 L9349 型号功率驱动芯片, 该芯片最大负载电流为 5 A, 完全满足实验的需要. 芯片的工作电压为 4.5 ~ 32 V, 通过输入 PWM 控制信号, 就能方便地控制输出

端以控制磁流变制动器进行制动.

在电路中, 利用 Arduino 开发板的两个模拟信号端口 A0 与 A1 分别接收来自信号发生器模拟的速度信号和转矩转速传感器产生的转速信号; 利用数字信号输出端口 9 作为 PWM 信号的输出端口, 并将其与 L9349 的信号输入端口 2 相连; 将数字信号端口 10 与 L9349 芯片使能端相连, 通过控制端口 10 输出高低电平来控制功率驱动芯片工作与否; 将功率驱动芯片的工作电压引脚 V_s 通过导线与开关电源的正极相连, 将负极引脚 PGND 与开关电源的负极相连; 将芯片的输出引脚 2 与磁流变制动器的线圈一端连接, 并将制动器另一端的线圈与开关电源的正极相连; 将开发板的信号地引脚与芯片的信号地引脚相连.

3.2 控制器软件设计

在汽车 ABS 控制系统中, PID 控制是目前实际应用最为广泛的一种自动控制方式, 是按偏差的比例、积分和微分进行控制的, 其原理见图 4^[11].

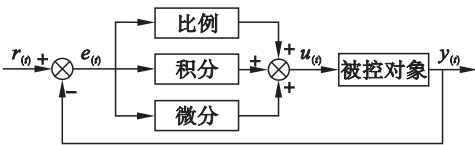


图 4 PID 算法控制原理
Fig. 4 PID algorithm control principle

Arduino 内部的 PID 库函数可免去 PID 控制编程, 直接调用即可.

PID 的连续时间控制律可以表示为

$$u_{(t)} = K_p e_{(t)} + K_i \int e_{(t)} dt + K_d \frac{de_{(t)}}{dt} . \quad (8)$$

式中: $u_{(t)}$ 为控制器的输出; $e_{(t)}$ 为期望值与实际输入值的差值; K_p, K_i, K_d 分别为控制器的比例、积分、微分系数, 这 3 个系数的取值直接决定着控制系统的性能, 因此必须正确地设定 3 个系数使得控制系统的响应特性更迅速, 本文使用 PID 参数设定方法为 Ziegler – Nichols 方法, 其主要调整方式如下.

首先定义一个临界的 P 增益 (K_c). 确定 K_c 大小的方法如下:

- 1) 设置 K_i, K_d 为 0;
- 2) K_p 值增加直到系统以一个稳定的速率振荡, 即为 K_c , 一旦 K_c 被定义, 那么必须测量振荡的周期. 根据周期 P_c , 可以用表 2 计算 K_p, K_i, K_d 参数的数值.

表 2 PID 控制参数表
Table 2 PID control parameters

控制方式	K_p	K_i	K_d
PID 控制	$0.6K_C$	$0.5P_C$	$P_C/8$

首先需要找到临界的 P 增益,设置 K_i 与 K_d 为 0,只利用比例调节.设置中逐渐增加参数 P 的值,记录系统的响应.图 5 是 4 种典型的系统特点,图 5a 表示 P 值设定过低,需要继续调高;图 5b 表示 P 值仍然过低;图 5c 表示 P 值仍然过高,导致系统不稳定;图 5d 是合适的 P 值调节出的效果,这时系统出现稳定的振荡.这时 P 值即为 K_C 的值,系统振荡的周期即为参数 P_C ,则根据表 2 得出系统的 K_p, K_i, K_d 的数值.

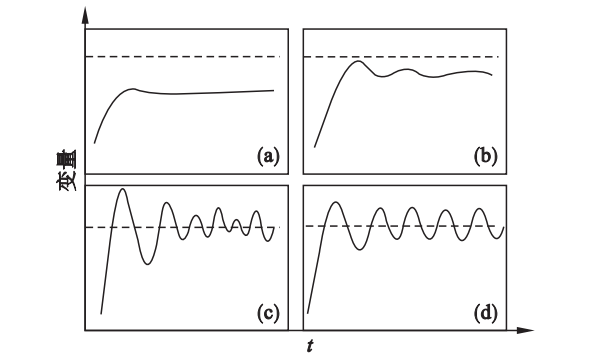


图 5 PID 参数调节方法

Fig. 5 PID parameter adjustment method

(a)—临界 P 增益过低; (b)—临界 P 增益较低;
(c)—临界 P 增益过高; (d)—临界 P 增益适合.

4 制动力矩控制实验结果与分析

4.1 实验流程

磁流变制动器线性可控的特点是其重要的优势之一,制动器的制动力矩与线圈中通入的电流的线性关系可极大地方便制动力矩的控制.

绘制制动力矩控制实验的流程图如图 6 所示.

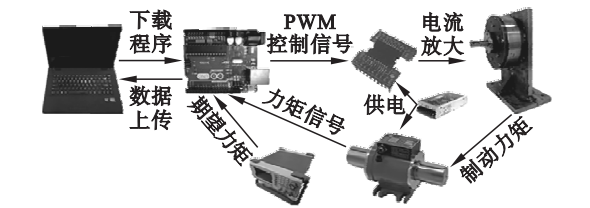


图 6 制动力矩控制实验流程图

Fig. 6 Experimental flow chart of braking torque controlling

4.2 阶跃信号制动力矩实验分析

磁流变制动器之所以有替代传统液压制动系统的潜力,不仅在于其仅仅依靠电流的改变即可实现制动力矩的改变即单一的控制参数,还在于其快速的响应速度.但磁流变制动器制动时也存在制动动作的响应延迟以及时间的滞后,为探索磁流变制动器的响应时间及滞后时间,本文将制动力矩期望值首先设置为阶跃信号规律.

实验过程如下:由信号发生器产生阶跃规律的制动力矩信号—制动力矩期望值 T_E ,并将其通入 Arduino 开发板的模拟信号输入端口 A1;同时,将由转速转矩传感器测得的信号—制动力矩测量值 T_C 通入 Arduino 开发板模拟信号输入端口 A2;Arduino 开发板内部将 T_E, T_C 模拟信号转换为数字信号,并对二者进行比较,其差值为误差 e_s ,作为 PID 控制的输入,经过 PID 控制后输出具有适当的占空比 N 的 PWM 信号,将 PWM 信号输入功率驱动芯片的信号输入引脚 17,进而控制磁流变制动器,使其产生所需的制动力矩;由转速转矩传感器测量制动器产生的制动力矩,并将其输入 Arduino 开发板的模拟信号输入端口 A2,至此完成一个控制周期.

为进行制动力矩的相关实验,根据制动力矩流程图搭建实验平台,如图 7 所示.

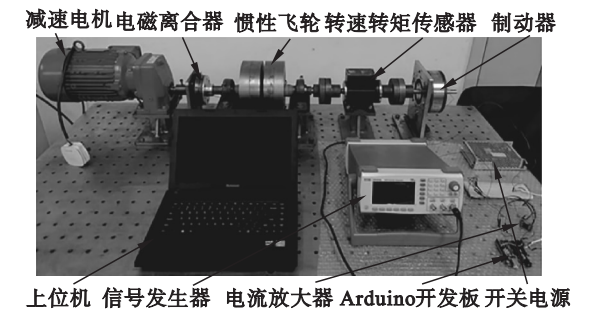


图 7 制动力矩控制实验
Fig. 7 Braking torque control test

实验台中,选择型号为 SK11E-90S/4 的减速电机,该电机的各个参数如表 3 所示.

表 3 减速电机参数
Table 3 Gear motor parameters

额定功率 kW	输出转速 $r \cdot \min^{-1}$	减速比	额定电压/V
1.1	601	2.3	220/380

惯性飞轮作为一种吸收和释放能量的机构,在实验中主要起到缓冲的作用,防止制动器突然制动对电机造成伤害;信号发生器负责产生具有阶跃规律的制动力矩期望值;笔记本电脑作为上

位机,可利用 Arduino 特有的编程器直接通过 USB 接口将程序代码下载到 Arduino 内部的微控制器中.上位机除利用 USB 数据线对 Arduino 进行程序传输外,还对开发板进行供电,免去了供电电源和烧录器的使用;此外 Arduino 开发板能在使用过程中对 PID 控制参数进行及时调整.

实验中,首先给减速电机供电,使其正常转动,便于进行制动力矩的产生;其次给开关电源供电使其对功率驱动芯片电源进行供电并将已写好的程序下载到开发板中,进行制动力矩控制实验;同时打开信号发生器,使其产生预先设定的制动力矩的期望值;最后将实验中产生的数据存储在,以便后续的处理及使用.

阶跃制动力矩实验结果如图 8 所示.实验中,设置了 3 种不同的阶跃制动力矩值,制动力矩分别为 4,6,8 N·m,从前部分实验结果得知,制动器的响应时间为 40 ms 左右;设定制动力矩首次达到最大值时对应的时间与响应时间的差值为制动器的滞后时间,由实验数据显示得制动器的滞后时间约为 70 ms.总体响应加滞后时间约 110 ms,与液压制动系统(200 ~ 800 ms)相比,极大地缩短了响应时间.

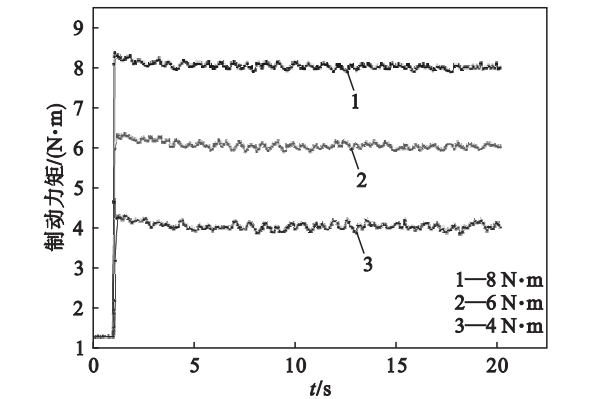


图 8 阶跃制动力矩测量值

Fig. 8 Measurement of step braking torque

4.3 正弦信号制动力矩实验分析

为体现磁流变制动器可实现连续可变的制动力矩控制效果,设定制动力矩期望值为正弦变化规律. Arduino 开发板理论最大采样周期为 10 kHz,设置制动力矩期望值的信号周期为 200 ms,即制动力矩的期望值的频率为 5 Hz,将期望值通入开发板的端口进行制动力矩跟随实验,实验结果如图 9 所示.

从正弦制动力矩实验图可知,控制器控制磁流变制动器产生的制动力矩相比制动力矩期望值延后 20 ms 左右.以上实验结果表明制动器响应

迅速,能够产生较好的跟随效果.

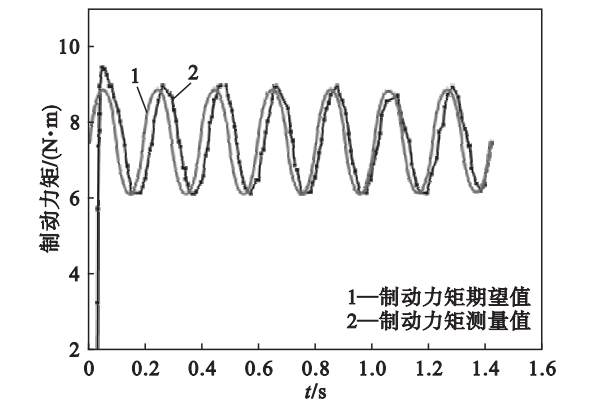


图 9 制动力矩跟随实验

Fig. 9 Test of braking torque following

4.4 制动减速度实验分析

制动减速度也是衡量制动器制动性能的关键因素,它的优劣直接影响到制动距离的长短,因此,对制动器做减速度实验.车载电流一般最大为 3 A,实验时用控制器给制动器施加 3 A 电流,产生的制动力矩稳定在 14 N·m,在电机启动之后断开电磁离合器开始制动减速度过程,得到转速与时间关系如图 10 所示.从图 10 中可以看出转速近似以恒定减速度减小,制动时间在 1 s 之内,说明制动器制动迅速,性能稳定.

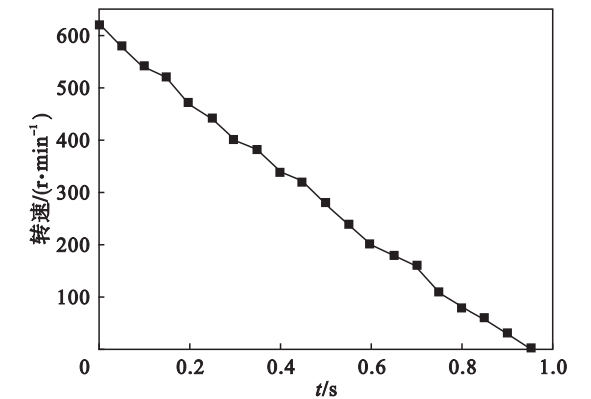


图 10 转速与时间关系

Fig. 10 Relationship between rotational speed and time

5 结 语

本文主要设计了一种盘式磁流变制动器,利用 ANSYS 对制动器的结构进行仿真,并进一步对制动器的结构进行优化,对比优化前后的制动力矩,体现了优化后的制动器的结构更加合理;加工磁流变制动器样机;利用 Arduino 开发板以及 L9349 芯片设计磁流变制动控制器,并进行了制动力矩控制相关实验,结果表明相比液压制动系

(下转第 385 页)