

传动装置中磁流变液瞬态流动特性的数值计算

郑军, 曹兴进, 张光辉

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 400044, 重庆)

摘要: 为了了解在突加磁场情况下磁流变液在传动装置中的瞬态流动特性, 基于 Bingham 模型和纳维-斯托克斯方程, 利用有限差分法对传动装置中磁流变液的瞬态流动特性进行了数值计算. 结果表明: 工作间隙产生磁场后, 磁流变液剪应变率和角速度分布变化明显, 临界屈服面在主动转子的内表面形成, 随后其半径逐渐减小, 达到稳态后保持不变; 当传动装置的流变响应时间随外加磁场增大而缩短时, 滑差转速越大滞后时间越长; 在工作间隙产生磁场时, 主动转子传递转矩逐渐减小, 从动转子传递转矩逐渐增大, 最终两者趋于一致. 该结果为磁流变传动装置的设计和性能评估提供了理论依据.

关键词: 磁流变液; 传动装置; 瞬态流动; 数值计算

中图分类号: TH132 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)09-1053-05

Numerical Evaluation for Transient Flow Characteristics of Magneto-Rheological Fluid in the Transmission Device

Zheng Jun, Cao Xingjin, Zhang Guanghui

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To obtain the transient flow characteristics of magneto-rheological(MR) fluids in MR transmission device as external magnetic field is applied suddenly, based on Bingham model and Navier-Stokes equation, the transient flow characteristics of MR fluids in MR transmission device are theoretically analyzed and numerically evaluated. The results indicate that once the magnetic field appears in the working gap, the distributions of shear strain rate and angular velocity of MR fluids vary obviously, the critical yield surface forms on the inner face of the driving rotor at first, its radius decreases and then maintains a constant value up to the steady state. The rheological response time of MR transmission device gets shorter when the magnetic field is enhanced and longer as the slip speed increases. The torques of driving rotor and driven rotor are not equal initially, and tend to identical finally.

Keywords: magneto-rheological fluid; transmission device; transient flow; numerical evaluation

磁流变液(MRF)是一种在外加磁场作用下流变特性发生急剧变化的新型智能材料, 现已广泛应用于各种工程实际中^[1-3]. 磁流变传动装置^[4]是磁流变器件中常见的一种, 它引入磁流变液作为工作介质, 利用磁流变液的屈服剪切应力来实现动力传递.

Burgess 等人^[5]分析了黏塑性材料的非稳态剪切流动, Whittle 等人^[6]分析了电流变液在离合器中

的动态流动, He Jianmin 等人^[7]分析了磁流变液在圆筒间的黏塑性流动. 目前, 对磁流变液的流场分析大多基于稳态, 而磁流变液流场的瞬态变化对磁流变传动装置的动力学特性有较大影响. 本文考虑了工作间隙中磁场强度沿半径方向的变化, 利用数值计算的方法讨论了传动装置启动时磁流变液的瞬态流动特性, 为磁流变传动装置的设计和性能评估提

供了理论依据。

1 控制方程

图1为磁流变传动装置的结构简图。如图2所示,设磁流变传动装置的主、从动转子半径分别为 r_2 和 r_1 ,所对应的角速度分别为 ω_2 和 ω_1 ,忽略偏心和体积力,将磁流变液在传动装置中的流动看成不可压缩流体的轴对称剪切流动,选取圆柱坐标系, z 轴与轴线重合,由流体力学 Navier-Stokes 方程,可得到如下控制方程

$$\rho r \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + 2 \frac{\tau_{r\theta}}{r} \quad (1)$$

式中: ω 为磁流变液的角速度; $\tau_{r\theta}$ 为磁流变液的剪切应力; t 为时间变量; ρ 为磁流变液的密度。

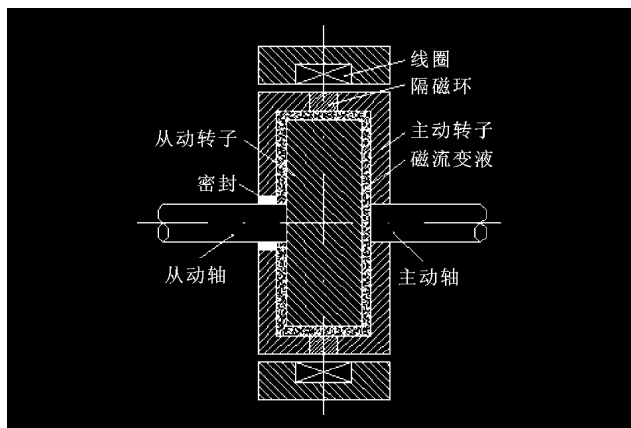


图1 磁流变传动装置结构图

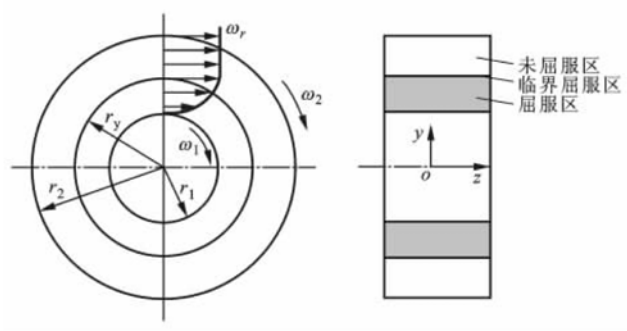


图2 工作间隙中磁流变液的示意图

2 数学模型

2.1 磁流变液本构方程

磁流变液是由微米级可磁化颗粒均匀分散在特定母液和添加剂中形成的特殊悬浮液。磁流变液在

无外加磁场作用时表现为牛顿流体,当施加外磁场后,在很短的时间内(数毫秒)表现为 Bingham 流体,其本构方程为^[8]

$$\left. \begin{aligned} \tau_{r\theta} &= \tau_0 \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta r \frac{\partial \omega}{\partial r} & |\tau_{r\theta}| \geq \tau_0 \\ \frac{\partial \omega}{\partial r} &= 0 & |\tau_{r\theta}| < \tau_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: τ_0 为磁流变液的磁致屈服应力; $\dot{\gamma}$ 为剪应变率; η 为磁流变液的动力黏度。

由式(2)和图2可知,当 $\tau_{r\theta} < \tau_0$ 时,磁流变液不发生屈服,当 $\tau_{r\theta} \geq \tau_0$ 时,磁流变液发生屈服,屈服区与未屈服区(也称刚性流动区)之间的交界面为临界屈服面。

实验中发现,当磁流变液中的磁性颗粒未达到完全饱和时, τ_0 可以写成 B 的幂函数形式^[9],即

$$\tau_0 = \alpha B^n \quad (3)$$

式中: α 为常数; n 为幂指数,通常是1~2之间的数值,并依赖于不同的液体材料; B 为磁感应强度。

在电磁线圈的作用下,传动装置的主、从动转子之间的工作间隙产生非均匀磁场,设通过工作间隙的磁通量为 Φ ,由磁路定理可知在 r 处的磁感应强度为

$$B_r = \Phi / 2\pi r L = \Phi'_L / 2\pi r \quad (4)$$

式中: L 为转子宽度; $\Phi'_L = \Phi / L$ 为单位宽度磁通量。由式(4)可知,工作间隙中各点的磁感应强度与半径成反比。将式(4)代入式(3)得

$$\tau_0 = \alpha B_r^n = m / r^n \quad (5)$$

$$m = \alpha \left(\frac{\Phi'_L}{2\pi} \right)^n$$

由于在传动装置中有 $\omega_2 \geq \omega_1$,故符号函数 $\operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) = 1$ 。将式(2)和式(5)代入式(1)后化简得到

$$\rho \frac{\partial \omega_r}{\partial t} = m \frac{2-n}{r^{n+2}} + \eta \left(\frac{3}{r} \frac{\partial \omega_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 \omega_r}{\partial r^2} \right) \quad (6)$$

2.2 初始条件和边界条件

本文主要讨论了磁流变传动装置启动过程中磁流变液的瞬态流动特性,在未施加磁场之前角速度的初始条件为

$$\omega(r, 0) = \omega_2 \frac{r_2^2(r^2 - r_1^2)}{r^2(r_2^2 - r_1^2)} \quad (7)$$

施加磁场之后的边界条件为

$$\omega(r, t) |_{r=r_1} = 0; \quad \omega(r, t) |_{r=r_2} = \omega_2 \quad (8)$$

在临界屈服面上的边界条件为

$$\left. \frac{\partial \omega(r, t)}{\partial r} \right|_{r=r_y} = 0 \quad (9)$$

3 数值计算及结果分析

3.1 离散及迭代步骤

采用有限差分法对微分方程式(6)进行离散后,得到角速度的差分格式为

$$\omega_j^{k+1} = \omega_j^k + \frac{m}{\rho} \frac{2-n}{r_j^{n+2}} \Delta t + \frac{\eta}{\rho} \frac{3}{r_j} \frac{\omega_{j+1}^k - \omega_j^k}{\Delta r} \Delta t + \frac{\eta}{\rho} \frac{\omega_{j+1}^k - 2\omega_j^k + \omega_{j-1}^k}{(\Delta r)^2} \Delta t \quad (10)$$

式中: j 为网格数; k 为时间步数.运用上述差分格式进行迭代,具体迭代步骤如下:①根据式(7)的初始条件计算初始角速度分布;②根据式(10)计算下一时间步的角速度分布,当角速度满足式(9)所表示的屈服面边界条件时,这个时间即为临界屈服面形成的滞后时间;③检验是否到达计算终止时刻,若是则输出计算结果,否则转到②继续迭代.

3.2 计算结果及分析

选用国内某材料所的 MRF-J01 型磁流变液作为试样,按照式(3)对其 τ - B 关系曲线进行拟合后,得出相应参数的取值为 $\alpha=0.02$, $n=1.785$. 其他相关计算参数取 $r_1=0.080$ m, $r_2=0.0815$ m, $\omega_1=0$ rad/s, $\eta=0.2$ Pa·s, $\rho=4000$ kg/m³.

图3为不同时刻磁流变液的剪应变率分布,从图中可以看出,在工作间隙产生磁场前后,流场中磁流变液的剪应变率分布变化明显.这是因为在工作间隙产生磁场之前,磁流变液的流动为牛顿流体的黏性流动,产生磁场后,磁流变液产生磁致应力,变成了黏塑性流体,磁流变液由全部屈服转变成部分屈服.随着半径的增大,剪应变率逐渐减小,曲线上某些位置的剪应变率减小为0,说明流场出现了未屈服区域,而剪应变率刚刚减小到0的位置即为产生临界屈服面的位置.

从图4中可以看出,在工作间隙产生磁场之前,磁流变液角速度基本呈线性增加,当产生磁场后,磁流变液角速度分布变化较大,出现了未屈服区,并且未屈服区与主动转子相连.随着时间的增加,未屈服区逐渐扩大,流场中同一空间位置的角速度变化逐渐减小到0,此时达到了稳定状态.

当 $\Delta\omega$ 为 5 rad/s 时,从图5中可以看出,临界屈服面首先在主动转子内表面形成,形成后半径逐渐减小,达到稳态后保持不变.随着 Φ_L' 的减小, r_y 增大,当 Φ_L' 足够小时,在流场中不会有临界屈服面产生,流场中磁流变液全部屈服.随着 Φ_L' 的增大, r_y 减小,当 Φ_L' 大到一定程度时,临界屈服面消失,流

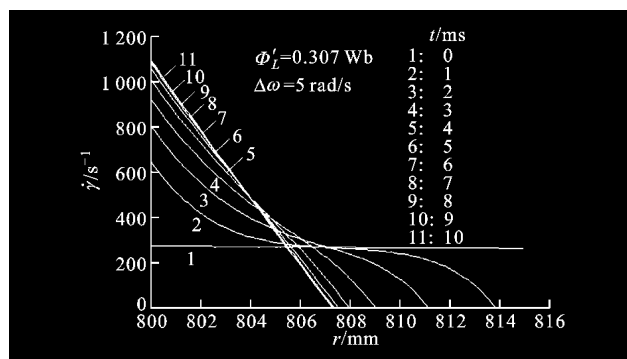


图3 剪应变率随时间的变化曲线

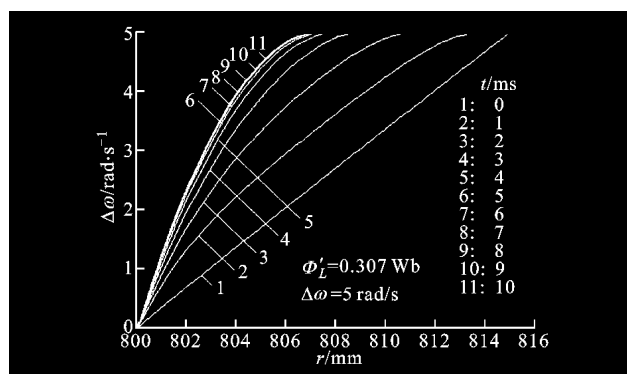


图4 角速度随时间的变化曲线

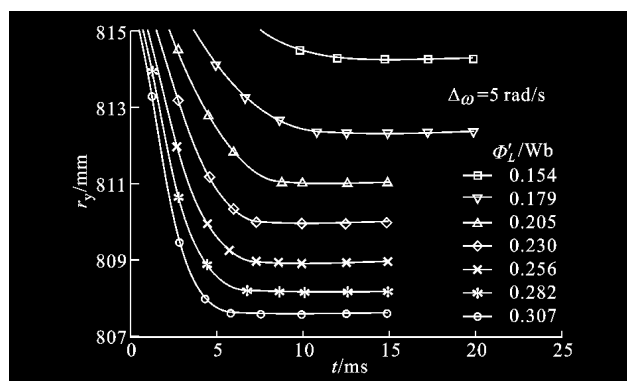


图5 不同 Φ_L' 下 r_y 随 t 的变化曲线

场中无磁流变液屈服,主、从动转子刚性连接,实现同步运转. r_y 随滑差转速的变化而变化,随着滑差转速的增加,造成磁流变液的剪切增强,从而扩大了剪切流动区域,使未屈服区域减小, r_y 增大.

从图5和图6中还可以看出,各条曲线的起点并不在时间的原点上,当工作间隙产生磁场后,临界屈服面并不马上形成,而是经过一段时间后才形成,这段时间为滞后时间 t_d . t_d 为毫秒量级,随着 Φ_L' 的增大或 $\Delta\omega$ 的减小而减小,使磁流变传动装置响应更为迅速.

通常把从施加磁场到产生稳定转矩所需要的时间定义为磁流变传动装置的响应时间,它包括材料

流变响应时间和电磁回路响应时间,而响应时间的快慢决定了磁流变传动装置的动态品质。流变响应时间 t_r 主要为在磁场作用下磁流变液中的磁性颗粒形成磁链并达到稳定剪切所消耗的时间^[10]。在图5和图6中,从工作间隙产生磁场到临界屈服面达到稳定所需要的时间即为流变响应时间。从图中可知,流变响应时间随 Φ'_L 增大而减小,随 $\Delta\omega$ 增大而增大,这是因为 Φ'_L 越大,磁流变液中磁性颗粒在磁场方向形成磁链越迅速,达到稳定剪切需要的时间越短。随着 $\Delta\omega$ 的增大,剪切速率增加会加剧对链状结构的破坏,使磁性颗粒处于一种更为混乱的状态,从而使磁流变液形成稳定的链状结构更为困难。从图中还可以看出,传动装置的流变响应时间很短,仅为几毫秒到十几毫秒。

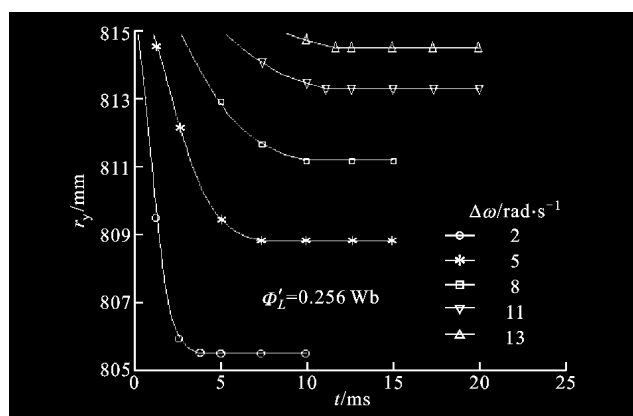


图6 不同 $\Delta\omega$ 下 r_y 随 t 的变化曲线

磁流变液流场的瞬态变化对传动装置传递的转矩也有影响,在屈服面形成之前,主、从动转子单位宽度所传递的转矩分别为

$$T'_{dv} = 2\pi r_2^2 \tau(r_2) \quad (10)$$

$$T'_{de} = 2\pi r_1^2 \tau(r_1) \quad (11)$$

当屈服面形成后,由于出现了未屈服区域,且未屈服区域与主动转子相连,因此主动转子单位宽度传递的转矩变为

$$T'_{dv} = 2\pi r_y^2 \tau(r_y) = 2\pi r_y^2 \tau_0 \quad (12)$$

从图7中可以看到在工作间隙产生磁场的初始时刻, T'_{dv} 和 T'_{de} 的大小不等,随后 T'_{dv} 逐渐减小, T'_{de} 逐渐增大,最终 T'_{dv} 和 T'_{de} 趋于相等,即随着时间的增加,传动装置传递的转矩逐渐增大,达到稳态后保持不变,这与 Park 等^[11] 所测得的实验结果也是相吻合的。

4 结 论

本文利用 Bingham 模型和 N-S 方程,采用数值

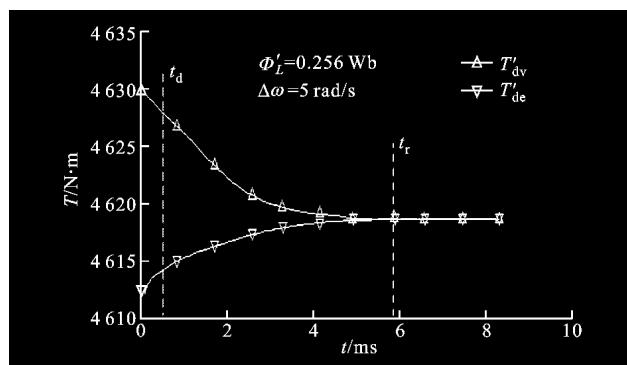


图7 主、从动转子传递转矩随时间的变化曲线

方法分析了传动装置启动时刻磁流变液的瞬态流动特性,并得出以下结论。

(1)当工作间隙产生磁场后,传动装置中磁流变液角速度分布和剪应变率分布变化明显,经过一段滞后时间,流场中出现了未屈服区域,未屈服区域的大小主要取决于施加磁场的强弱及滑差转速的大小。临界屈服面首先在主动转子内表面形成,然后逐渐靠近从动转子直至达到稳态。

(2)在工作间隙产生磁场的初始时刻,主、从动转子传递的转矩大小不等,随后主动转子传递的转矩逐渐减小,从动转子传递的转矩逐渐增大,两者最终趋于一致。

(3)从工作间隙产生磁场到临界屈服面的出现,存在一个滞后时间,外加磁场越强滞后时间越短,滑差转速越大滞后时间越长。因此,传动装置的流变响应时间随着外加磁场的增大而减小,随着滑差转速的增大而增大。

参考文献:

- [1] Jolly M R, Bender J W, Carlson D J. Properties and applications of commercial magnetorheological fluids [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2000, 10(11):5-13.
- [2] Wang Jianxiao, Meng Guang. Magnetorheological fluid devices and their applications in mechanical engineering[J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23(1):50-56.
- [3] Osama A, Craic A R. Magnetorheological fluid: materials, characterization, and devices[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1996, 7(2):123-130.
- [4] Zheng Jun, Cao Xingjin, Zhang Guanghui. Research on I-T relationship of MRF soft-starting transmission device[J]. Journal of Engineering Design, 2005, 12(5):284-287.

- [5] Burgess S L, Wilson S D R. Unsteady shear flow of a viscoplastic material [J]. *Non-Newton Fluid Mech*, 1997, 72(1): 87-100.
- [6] Whittle M, Atkin R J, Bullough W A. Fluid dynamic limitations on the performance of an electrorheological clutch [J]. *Non-Newton Fluid Mech*, 1995, 57(1): 61-81.
- [7] He Jianmin, Huang Jin, Zhong Yinhui. Viscoplastic flow of the MR fluid between two cylinders[J]. *Function Material*, 2006, 6(37): 992-993.
- [8] Lee U, Doh Y K, Nahmkeon H. Design analysis and experimental evaluation of an MR fluid clutch[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1999, 10(9):701-707.
- [9] Ginder J M, Davis L C. Shear stresses in magnetorheological fluids: role of magnetic saturation[J]. *Appl Phys Lett*, 1994, 65(26):3410-3418.
- [10] Ly H V, Reitich F, Jolly M R, et al. Simulations of particle dynamics in magnetorheological fluids [J]. *Journal of Computational Physics*, 1999, 155(1):160-177.
- [11] Park Y, Jung B. Force-feedback device using magnetorheological fluid: MR clutch[C]// *Actuator 2000, 7th Int Conf on New Actuators*. Bremen, Germany: Division Messe Bremen, 2000: 456-459.

(编辑 管咏梅)