

文章编号 :1000-582X(2007)11-0019-04

磁流变传动装置工作机理分析

郑 军,张光辉,曹兴进

(重庆大学 机械传动国家重点实验室 重庆 400030)

摘 要 磁流变传动装置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传递转矩。基于 Bingham 模型和磁性物理理论,对磁流变传动装置的工作机理进行了探讨,分析了磁流变液中磁性颗粒的链化模型,给出了磁流变传动装置传递转矩计算公式,并通过理论分析和实验验证对磁流变传动装置传动性能及其影响因素进行了讨论。研究表明,磁流变液的磁致屈服应力在转矩传递中起主导作用,磁流变传动装置能传递较大转矩,具有良好的恒转矩特性。

关键词 磁流变液; Bingham 模型; 链化模型; 粘滞阻力; 传递转矩

中图分类号 :TH132

文献标志码 :A

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。它在无外磁场作用下表现为流动良好的液体状态,施加外磁场后,其粘度在毫秒内可增加两个数量级以上,并呈现类似固体的力学性质,并且粘度的变化是连续、可逆的。由于磁流变液可逆、反应迅速和易于控制的特点,使其在汽车、建筑、医疗、健身器械等方面被广泛应用^[1-2]。

磁流变软启动传动装置引入磁流变液作为传递转矩的工作介质,利用磁流变液的屈服剪切应力来传递动力。在各种工业领域,尤其在缓冲启动、张力控制、频繁快速离合、无级变速、过载保护等使用工况下具有广泛的应用前景。

1 磁流变传动装置工作原理

磁流变传动装置主要采用剪切模式,其结构主要有圆筒式、圆盘式和圆柱式。磁流变传动装置圆柱式结构图如图 1 所示^[3-4]。

线圈不通电时,磁流变液呈现牛顿流体状态,主动转子和从动转子分离;当线圈通电后,磁流变液在磁场作用下成为类固态形式,在磁场方向形成磁链。当主动转子旋转时,靠磁链的磁拉力将转矩从主动转子传递到从动转子。磁流变传动装置所能传递的转矩由磁

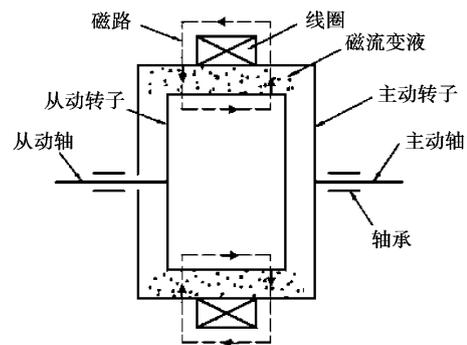


图 1 磁流变传动装置结构图

链的剪切强度决定,而磁链的剪切强度又随磁场强度的增加而增大,直到磁饱和为止。当励磁电流足够大时,主动转子和从动转子同步运行;当励磁电流减小在一定范围内变化时,主、从动转子不同步,呈滑差运行;当励磁电流进一步减小,主动转子已不能带动从动转子转动时,呈制动状态。如将从动转子固定,则装置变为磁流变制动器。

2 磁流变传动装置工作机理

2.1 磁流变液的流变特性

磁流变液在无外加磁场作用时表现为牛顿流体,在施加外磁场后,在很短的时间内(数毫秒)表现为

收稿日期 2007-07-15

基金项目 重庆大学研究创新性实验项目

作者简介 郑军(1980-)男,重庆大学博士研究生,主要从事新型材料传动及相关领域的研究,

(E-mail)zhengjun415@163.com。

Bingham 流体,其本构方程为^[5]

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \tau_0(B) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} & |\tau| &\geq \tau_0 \\ \dot{\gamma} &= 0 & |\tau| &< \tau_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 τ 为磁流变液的剪切应力, Pa; τ_B 为磁流变液的磁致屈服应力, Pa; η 为磁流变液的动力粘度, Pa·s; $\dot{\gamma}$ 为剪应变率 $\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} \text{ s}^{-1}$ 。

由磁流变液的本构方程可知,当 $\tau < \tau_0$ 时,磁流变液不发生屈服,当 $\tau \geq \tau_0$ 时,磁流变液屈服,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。

2.2 磁流变液形成磁链的磁拉力

磁流变液一般由磁性颗粒、低粘性基液以及稳定剂和添加剂制成。在无磁场作用时,磁性颗粒随机分散在基液中,在施加外磁场后,磁性颗粒被磁化形成磁偶极子,磁偶极子之间相互作用,形成有序链状结构,而且极化链中相邻颗粒间的作用力随外加磁场的增强而增加,如图2所示。现用磁性物理理论来分析磁流变液的链化模型。

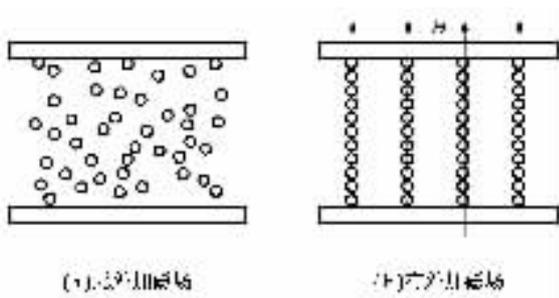


图2 磁流变液链化模型示意图

将磁化后的磁性颗粒看成“点磁荷”,根据磁库仑定律^[6],两个点磁极间的作用力为

$$f_m = K \frac{q_m^2}{R^2} \quad (2)$$

其中:

$$K = \frac{1}{(4\pi\mu_0)} \quad (3)$$

$$q_m = \frac{2}{(3\pi r^2 \chi H)} \quad (4)$$

式(2)-(4)中 q_m 为磁极强度, Wb; μ_0 为真空磁导率, H/m; r 为铁磁性颗粒半径, m; χ 为铁磁性颗粒磁化率; H 为外加磁场强度, H; R 为两相邻颗粒间的中心距离, $R = 2r + \Delta$, m; Δ 为铁磁性颗粒之间的间距, m。

将式(3)(4)带入(2)后有

$$f_m = \frac{1}{9R^2} \pi r^4 \mu_0 \chi^2 H^2 \quad (5)$$

单位面积内极化后形成稳定的磁链条数为

$$N = \frac{\frac{\varphi V}{4\pi r^3/3} / \frac{\delta}{R}}{S} = \frac{3\varphi R}{4\pi r^3} \quad (6)$$

式(6)中, V 为两极板间 MRF 的体积, m^3 ; φ 为 MRF 中铁磁性颗粒的体积百分数; S 为工作间隙表面积, $S = 2\pi R_\delta b$, m^2 ; b 为工作面宽度, m; R_δ 为工作间隙半径, $R_\delta = R_2 + \delta/2$, m; R_2 为从动转子半径, m; δ 为磁链链长亦即工作间隙厚度, m。

在剪切过程中,磁链被拉长,磁链与成链方向(磁场方向)形成夹角 α ,如图3所示。此时铁磁性颗粒中心之间的距离 $R' = (2r + \Delta) / \cos \alpha$,单根磁链的屈服力为

$$f'_m = f_m \sin \alpha = \frac{1}{9R^2} \pi r^4 \mu_0 \chi^2 H^2 \cos^2 \alpha \sin \alpha \quad (7)$$

单位面积 MRF 的屈服应力为

$$\tau_y(B) = N f'_m = \frac{1}{12R} \varphi r \mu_0 \chi^2 H^2 \cos^2 \alpha \sin \alpha \quad (8)$$

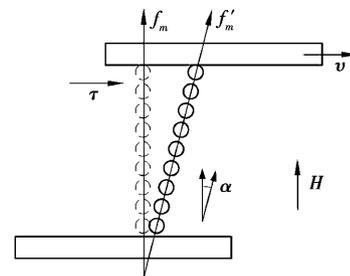


图3 磁链受力图

2.3 磁流变液的粘滞阻力

将磁流变液在传动装置中的流动看成不可压缩流体的二维轴对称剪切流动,由粘滞阻力产生的剪切应力为:

$$\tau_\eta = \eta \dot{\gamma} = \eta \frac{dv}{dy} \quad (9)$$

由于 $\delta \ll R_\delta$, 故将磁流变液在工作间隙中的流动速度沿径向看成线性分布,因此式(9)可简化为

$$\tau_\eta = \eta \frac{v_s}{\delta} \quad (10)$$

式中 v_s 为滑差线速度, m/s。

由式(10)可得到 τ_η 与滑差转速 n_s 的关系:

$$\tau_\eta = \eta \frac{\pi n_s R_\delta}{30\delta} \quad (11)$$

2.4 离心力的影响

磁流变传动装置在工作过程中,由于离心力的作用,使基液中的磁性颗粒受径向力不同。靠近主动转子内壁的磁性颗粒受力较大,靠近从动转子外壁的磁性颗粒则受力较小。无论是在同步运行状态或是滑差运行状态,由于离心力的作用,临界屈服面以及滑差趋

势易出现在靠近从动转子外表面处,离心力造成转矩下降。但离心力所产生的附加转矩较小,在计算时可忽略不计。

2.5 传递转矩表达式

不考虑离心力的影响,磁流变传动装置所传递的转矩由两部分组成,一为磁链的磁拉力产生的转矩(即库仑力矩),另一为工作间隙中磁流变液流动的粘滞作用力产生的转矩(即粘滞力矩)。传递转矩表达式为:

$$T = T_B + T_\eta = \frac{1}{6R} \pi \varphi r \mu_0 \chi^2 H^2 \cos^2 \alpha \sin \alpha b R_\delta + \frac{1}{15\delta} \pi^2 \eta n_s R_\delta^3 b \quad (12)$$

3 传动性能影响因素分析及实验

图 4 为磁流变传动装置样机。采用的工作介质为重庆仪表材料所的磁流变液(MRF-J01),零场粘度 $\leq 1.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ($\dot{\gamma} = 81 \text{ s}^{-1}$, $20 \text{ }^\circ\text{C}$),密度 2.65 g/cm^3 ,使用温度 $-30 \sim 140 \text{ }^\circ\text{C}$ 。



图 4 磁流变传动装置样机

3.1 传递转矩特性

由式(12)和图 5 可知,磁流变传动装置所能传递的转矩 T 随着外加磁场强度 H 的增加而增大,但由于单位面积内的磁链数目 N 不能无限制地增加,故所传递的转矩 T 也有一定的上限值^[7]。当外加磁场增大到一定程度,所传递的转矩就基本保持恒定,即达到了磁饱和。

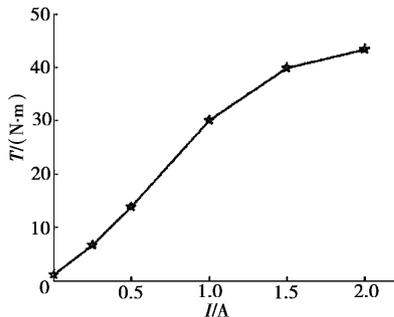


图 5 不同电流时的转矩特性

工作间隙 δ 是磁流变传动装置设计中的重要参

数。一般情况下, δ 增大,磁路中磁阻增大,在电磁激励不变即磁动势不变的情况下, H 减小,工作间隙中的 τ_B 减小,传动装置传递转矩的能力降低。从式(12)可以看出这种变化趋势。

3.2 恒转矩特性

磁流变传动装置在运转过程中表现出传递转矩基本不随滑差转速改变而改变的特性,称为恒转矩特性。在式(12)中,第一部分 T_B 的值占所传递转矩中的绝大部分,第二部分 T_η 中由于粘度值 η 很小,滑差速度的变化对整个转矩传递影响不大。图 6 为不同励磁电流下传递转矩与滑差转速的关系曲线,从中可以看出,只要励磁电流保持不变(即所产生的外加磁场不变),磁流变传动装置所传递的转矩就基本保持不变,磁流变装置具有恒转矩特性。

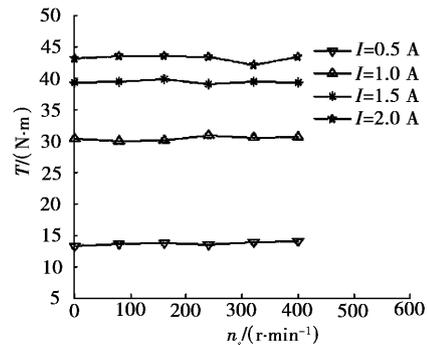


图 6 转矩与滑差转速的关系曲线

3.3 调速范围

因 $\Delta\omega = \omega_{in} - \omega_{out}$, 而 ω_{in} 为速度输入端,故传动装置主、从动转子转速差即为调速范围,将式(12)变形后有:

$$\Delta\omega = \frac{\delta}{2\eta R_\delta^2} \left[\frac{T}{\pi b R_\delta} - \frac{4r\mu_0\chi^2 H^2 \cos^2 \alpha \sin \alpha}{6R} \right] \quad (13)$$

从式(13)可以看出, $\Delta\omega$ 随 δ 和 T 增大而增大,随 η 和 R_δ 增大而减小。故欲提高磁流变传动装置的调速范围可增大工作间隙 δ ,减小工作面半径 R_δ 并选用粘度 η 较大的磁流变液。

3.4 可控系数

传动装置传递转矩表达式(12)中库仑力矩是传递转矩中主要可调部分,粘滞力矩为不可调部分。库仑力矩与粘滞力矩之比为可控系数^[8],其值为

$$\beta = \frac{T_B}{T_\eta} = \frac{5\delta H^2}{2\pi R \eta n_s R_\delta^2} \varphi r \mu_0 \chi^2 \cos^2 \alpha \sin \alpha \quad (14)$$

从式(14)可以看出,可控系数 β 随 δ 和 H 增大而增大,随 η 、 R_δ 和 n_s 增大而减小。欲增大磁流变传动装置的可控系数可增大工作间隙 δ ,增加工作间隙磁场强度 H ,减小工作面半径 R_δ 并选用粘度 η 较小的磁流变液。

3.5 动态品质

磁流变传动装置的一个突出优点就是动态性能好,而机械结构对发挥 MRF 响应速度关系很大,从动转子的转动惯量是决定装置动态性能的一个重要参数。

圆柱形从动转子的转动惯量为 $J = \pi \rho b R_2^4 / 2$, 可以用从动转子单位转动惯量所传递的力矩 $\frac{T}{J}$ 来描述磁流变传动装置的动力学品质。设单位转动惯量传递的转矩为 T_J , 则有

$$T_J = \frac{R_2 + \delta/2}{3R_0R_2^4} \varphi \eta \mu_0 \chi^2 H^2 \cos^2 \alpha \sin \alpha + \frac{\chi (R_2 + \delta/2)^2}{15\delta\rho R_2^4} \pi \eta n_s \quad (15)$$

式(15)表示影响传动装置动态性能的主要因素是外加的磁场强度,动态品质随外加磁场的增大而提高。欲提高装置的动态品质还可以通过增大工作间隙厚度 δ , 减小从动转子半径 R_2 和选用粘度 η 较大的磁流变液来达到。

4 结论

利用 Bingham 模型和磁性物理理论对磁流变传动装置的工作机理进行了理论分析和实验验证,得出以下结论:

1) 在外加磁场作用下,磁流变液中的磁性颗粒沿磁场方向形成磁链,靠磁链的磁拉力来传递转矩,磁链的屈服应力随外加磁场的增强而增大;

2) 磁流变液的磁致屈服应力在转矩传递中起主

导作用,磁流变液的粘滞阻力和离心力对传递转矩的影响较小;

3) 经分析和实验可知磁流变传动装置能传递较大转矩,有良好的恒转矩特性,并可通过选择合理的设计参数和磁流变液来提高调速范围、可控性和动态品质。

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] 汪建晓, 孟光. 磁流变液装置及其在机械工程中的应用 [J]. 机械强度, 2001, 23(1): 50-56.
- [3] 曹兴进, 郑军. 磁流变软启动传动装置: 中国, 200410081536. 7 [P]. 2004-12-16.
- [4] 曹兴进, 郑军, 张光辉. 磁流变软启动传动装置的 I-T 关系研究 [J]. 工程设计学报, 2005, 12(5): 284-287.
- [5] USOB LEE, 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.
- [6] 梁灿彬, 秦光戎, 梁竹健. 电磁学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1980: 476-482.
- [7] 司鹤. 磁流变体的力学机理研究 [D]. 重庆: 重庆大学光电工程学院, 2003.
- [8] 赵晓昱, 吴伟蔚. 回转式磁流变制动器的设计原理 [J]. 上海工程技术大学学报, 2005, 19(1): 28-31.

Analysis on the Working Principle of MRF Transmission Device

ZHENG Jun, ZHANG Guang-hui, CAO Xing-jin

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, P R China)

Abstract: Based on the Bingham model and the magnetic physics theory, the working principle of the MR transmission device (MRTD) was studied, the chain model in magnetorheological fluid (MRF) was analyzed, the influence of viscous resistance and centrifugal force for the transmission torque was given, and some properties as well as influencing factors of MRTD were discussed by means of theoretical analysis and experiments. The study results show that a big torque can be transmitted and the MRTD has a good constant-torque characteristic.

Key words: magnetorheological fluid; Bingham model; chain model; viscous resistance; transmission torque

(编辑 李胜春)