

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.11.007

用于柔顺关节的磁流变传动的设计与实验研究*

王鹏飞, 蔡世波*, 鲍官军, 胥芳
(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对人机交互中刚性机器人关节在碰撞中的冲击力会对人产生危害的问题,对磁流变液变刚度传动装置进行了设计、建模和实验分析,提出了一种基于多盘式磁流变液传动的柔性关节。首先建立了传动装置传递的转矩数学模型,利用 Matlab 对各影响参数进行了仿真分析;然后根据仿真结果设计了磁流变液传动结构,利用磁场有限元仿真软件 Ansoft Maxwell 对磁路进行了验证;最后,搭建了实验平台,对磁流变液传动装置输出转矩进行了实验测试。研究表明:磁流变液传动装置能有效传递扭矩,输出扭矩与输入磁场强度的线性度好、响应快,传动特性能满足对机器人关节的使用要求。

关键词:磁流变液;柔顺关节;多盘式;实验测试

中图分类号:TH132;TH122;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)11-1178-06

Design and experimental of MRF transmission for compliant joints

WANG Peng-fei, CAI Shi-bo, BAO Guan-jun, XU Fang

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the solving the security problem in human-computer interaction, the magnetorheological fluid variable stiffness transmission device was designed and analysed by experiment, a flexible joint based on multi-disc MRF transmission was proposed. First, the torque mathematical model of transmission was established, and the Matlab was used to simulate and analyze the influence parameters. Then the magnetorheological fluid transmission structure was designed according to the simulation results, and the magnetic circuit was verified by the magnetic field finite element simulation software Ansoft Maxwell. Finally, the experimental platform was built to test the output torque of the magnetorheological fluid transmission. The results indicate that the magnetorheological fluid transmission can effectively transmit torque, the linearity of output torque and input magnetic field intensity is good, and the response is fast. The transmission characteristics can meet the requirements of robot joints.

Key words: magneto-rheological fluid(MRF); soft joints; multi-disc; experimental test

0 引言

在人机交互过程中,安全性方面,机器人对人的伤害主要来源于碰撞,机器人载荷分为静载荷和动载荷两类^[1]。而为了实现人机交互的安全,一般通过设计新型机构,比如轻型机械臂 WAM 机械臂和控制^[2],以及轨迹规划等策略来实现。其中,包括了被动柔顺系统,柔顺关节及柔顺机器人系统的设计等。

磁流变液作为一种新型智能材料^[3],能迅速在固液之间转换,在外加磁场作用下,其粘度会发生变化。将其应用于柔顺关节传动中,可使得机器人关节得以柔顺化。磁流变液传动以变刚度传动形式嵌入关节中,可使得机器人关节柔顺化。因此,可以通过外加磁场对关节刚度进行主动控制^[4]。

在主动柔顺方向上,也可以设计多种新型柔顺关节。其中,包括串联弹性驱动器(series elastic actua-

收稿日期:2018-03-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605434);NSFC-浙江两化融合联合基金项目(U1509212)

作者简介:王鹏飞(1994-),男,浙江金华人,硕士研究生,主要从事磁流变液柔顺关节方面的研究。E-mail:707533194@qq.com

通信联系人:蔡世波,男,讲师。E-mail:ccc@zjut.edu.cn

tor, SEA)^[5]、变刚度驱动(variable stiffness actuation, VSA)^[6]、变刚度传动(variable stiffness transmission, VST)^[7]、串联离合驱动(series clutch actuator, SCA)^[8]等。磁流变液传动即属于其中的变刚度传动范畴。

目前,针对磁流变液的研究已经有了长足的进步^[9],逐渐将磁流变液作为介质,应用于各领域中。如 KEREM K^[10]将磁流变液应用于汽车制动器中;赵昌森^[11]将磁流变液应用于手指康复器中;王永强^[12]将磁流变液应用于超光滑抛光技术中。同时,许多研究人员也逐渐将磁流变液应用在机器人关节中。

基于磁流变液传动,本文将提出基于多盘式结构磁流变液传动的柔顺关节,设计磁流变传动装置,分析传动装置中参数对传递转矩的影响,并进行实验测试。

1 转矩传递模型

Bingham 模型可以很好地表示出磁流变液的流变特性,因此在磁流变液中有广泛的应用^[13-14]。基于 Bingham 模型磁流变液在外加磁场下表现为 Bingham 流体,Bingham 流体为非牛顿流体,其在切应力作用下,当切应力达到某一个值之后,Bingham 流体才开始流动。而磁流变液作为一种黏度随磁场强度变化而发生变化的流体,因此,其应力值会随之发生改变^[15],即:

$$\begin{cases} \tau = \tau_0(H) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma}, \tau > \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0, \tau \leq \tau_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ —剪切应力,kPa; $\tau_0(H)$ —磁流变液剪切屈服应力,kPa; η —磁流变液动力粘度,Pa·s; $\dot{\gamma}$ —剪应变率。

由式(1)可知:当 $\tau < \tau_0(H)$ 时,剪切应变率和剪切应力都为0,磁流变液不发生屈服变化,主被动盘片间无转速差,剪切速率恒为0;当 $\tau \geq \tau_0(H)$ 时,磁流变液剪切应力随着 τ 的增大而增大,发生屈服现象。

磁流变液传动通过磁流变液的可控剪切应力来传递转矩的,因此,为了更好地传递转矩,磁场应尽量垂直穿过工作区域。

磁流变液传动的力矩由两部分组成,包括磁流变液本身的粘度和屈服应力,公式如下:

$$T = T_\eta + T_{MR} \quad (2)$$

式中: T_η —磁流变液本身粘度引起的转矩; T_{MR} —磁流变液屈服所传递的转矩。

当主从动盘间有相对转速时, T_η 为:

$$T_\eta = \frac{\pi \eta \Delta \omega}{2h} (R^4 - r^4) \quad (3)$$

式中: ω —主从动盘间的转速差; η —磁流变液的粘度; R, r —传动盘片接触面的内外半径; h —传动盘间的工作间隙。

该转矩为在没有外加磁场下,磁流变液的零场粘度所传递的转矩。而磁流变液性质所传递的转矩表达式如下:

$$T_{MR} = \frac{2\pi}{3} \tau_0(H) (R^3 - r^3) \quad (4)$$

式中: $\tau_0(H)$ —磁流变液在磁场作用下产生的剪切应力。

由此可得磁流变液所能达到的总力矩为:

$$T = T_\eta + T_{MR} = \frac{2}{3} \pi \tau_0(H) (R^3 - r^3) + \frac{\pi \eta \omega}{2h} (R^4 - r^4) \quad (5)$$

由式(5)可知:影响磁流变液离合器传递转矩大小的变量有圆盘内半径 R_1 ,外半径 R_2 ,磁流变液的屈服应力 τ_0 和盘间距 h 。

由转矩传递公式可知,在磁流变液饱和状态下,圆盘内外半径与最大转矩传递间的 Matlab 仿真关系如图 1 所示。

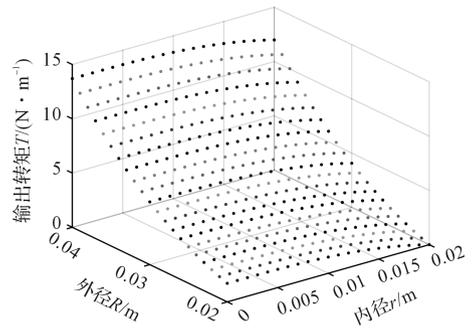


图 1 内外半径与最大转矩传递关系图

根据图 1 可以看出:传递最大转矩的大小随着外半径 R 的增大而迅速增大,随着内径的增大而减小,因此在设计中需要合理选择其内外径尺寸。

在不改变其他参数的情况下,盘间距对输出转矩的影响趋势图如图 2 所示。

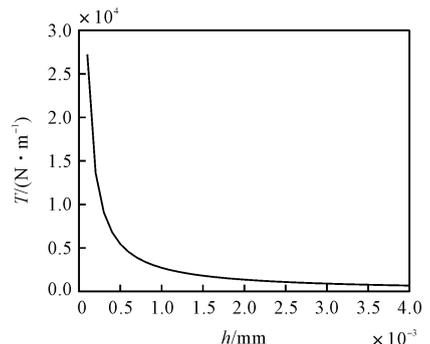


图 2 盘间距对输出转矩的影响趋势图

由图 2 可知:在间隙小于 1 mm 时,磁流变液传动转矩随着盘间距的增大迅速减小;在 1 mm ~ 2 mm 时,盘间距减小速率降低;当大于 2 mm 时,传递转矩几乎不随着工作间隙的增大而增大。工作间隙过小时,零

件装配难度大,且磁流变液流动性差,安装误差引起的传递转矩误差大。工作间隙增大后,磁流变液的流动性提高,转矩的可控系数增大,但间隙过大会造成工作间隙处磁阻增大,磁场强度降低,所能传递的转矩下降^[16]。因此,选取磁流变液工作间隙为 1 mm ~ 3 mm 较为合适。

2 磁流变液传动装置设计

在传统刚性机器人上嵌入变刚度传动机构,可以实现关节的刚性和柔性并举。

柔顺关节样机如图 3 所示。

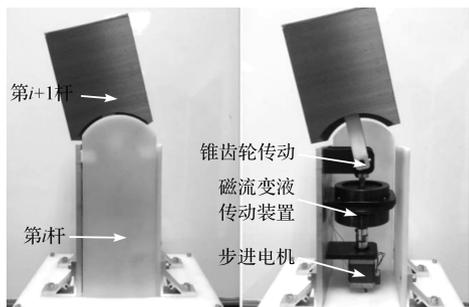


图 3 柔顺关节样机图

样机整体由两部分组成,第 i 杆和第 $i+1$ 杆,传动部分采用锥齿轮,在传统关节中嵌入磁流变液传动装置以实现柔顺性。

本文设计了一种磁流变液传动机构,如图 4 所示。

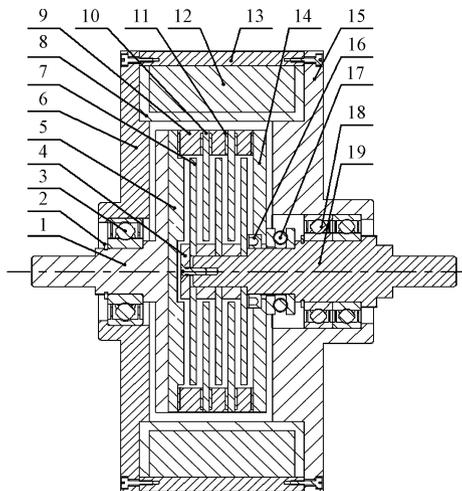


图 4 多盘式磁流变液传动机构

- 1 - 输入轴; 2 - 轴端挡圈; 3 - 轴承; 4 - 轴端挡圈; 5 - 主动片; 6 - 左端盖; 7 - 被动盘; 8 - 隔磁环; 9 - 挡圈; 10 - 主动片; 11 - 垫片; 12 - 线圈; 13 - 磁轭; 14 - 主动片; 15 - 右端盖; 16 - 油封; 17 - 向心轴承; 18 - 轴承; 19 - 输出轴

磁流变传动的应用场合主要是机器人关节,因此设计指标有:最大传递转矩是否合理、输出转矩与输入电流间关系、控制是否简单、响应速度。

磁流变液传动的工作模式采用剪切模式。线圈布置方式分为内置式和外置式两种,不同应用场合下,不同布置方式有不同的优、缺点。

线圈内置式的磁路磁阻小,穿过的零件少,相同励磁电流下,所能产生的磁场强度更大,传递的力矩更大,线圈内置式结构尺寸小,但零件间的安装以及加工精度要求更高,线圈布置受到一定的限制,线圈匝数上限低,因此传递最大扭矩小。由于线圈需要运动,对旋转角度有限制。

而外置式磁路则经过了更多的零件,相对磁阻较大。外置式的结构整体性更好,内部传动部分与外部供磁场部分可整体分离改变摩擦盘片数对整体的影响不大,内外之间互不影响,无额外实验器件之间的摩擦,盘片间的固定方式更加合理。由于挡圈和输出轴为铝制,轴上零件为钢制,使磁力线强制往工作区域穿过。

由于该案例为样机测试,同样励磁电流下外置式结构产生的磁场强度低,反而可以更方便地控制磁场强度大小,观察磁场对输出扭矩的影响。

磁流变液在主动与被动盘片之间的间隙处工作,因此在腔体内需要进行密封,该设计采用软硅胶将主动盘片与铝制挡圈之间采用螺栓压紧的方式密封,并在外部抹上密封胶。该设计中,为了尽量减少外界因素对磁流变液运动产生的干扰,防止动静态接触零件的刚性摩擦对磁流变液传动的影响。因此动密封只有一处,在此处采用油封密封。磁流变液从铝制挡圈 9 中注入,为防止注液困难,在 3 个铝制挡圈中均开有注液孔,并将其中某个注液孔以 90° 夹角装配,在铝制挡圈 9 上开孔,再用铜螺栓进行密封。图 5 中,动力由伺服电机从主动轴 1 中输入,主动轴 1 通过内六角螺栓与主动片 5 连接。主动片 5 通过铝制挡圈 6 间隔固定间距,通过主从动盘片间磁流变液传递扭矩,带动被动盘片的旋转。被动盘片也通过铝制挡圈保证间距,通过平键传递扭矩,最外面的一片被动片通过轴端挡圈进行轴向固定。该装置的密封在于挡圈与主动片之间和主动片与输出轴之间,故刚性摩擦少,对于磁流变液的传递性能实验可以达到较准确。挡圈与主动片采用了不同的材料,因此不能做成同一零件减少装配难度,该处密封采用了软硅胶垫片,并用长螺栓锁紧,并且采用了密封胶在外部缝隙处密封。轴与主动片 4 处采用了油封密封。实验证明,该密封方式可有效防止磁流变液泄露。主动片 4 与轴上部分采用了一个止推轴承,防止刚性摩擦,根据止推轴承的尺寸,整个轴的轴向间距都是固定的。输出轴上采用了双轴承布置,

有效提高了装置的对中性能。

结合分析模型仿真和结构设计,选取参数如表 1 所示。

表 1 线圈外置式参数

磁流变液传动参数	参数大小
工作面内径/mm	10
工作面外径/mm	30
工作间隙/mm	2
工作间隙数量	6
励磁电流	0~4 A 可调
磁流变液屈服应力/kPa	52.10
磁流变液最大剪切应力/kPa	73.27

3 关节的磁路分析

3.1 磁路计算

磁流变液传动的磁路简化图如图 5 所示。

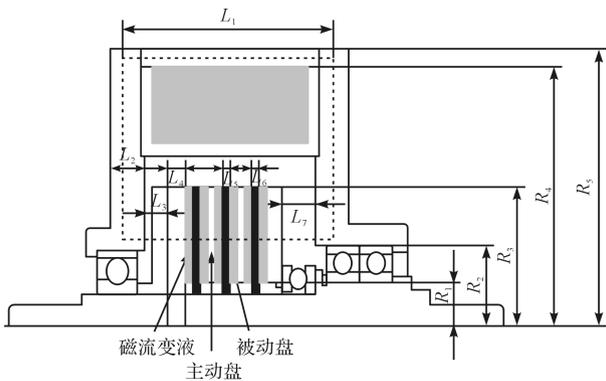


图 5 磁路简化图

L_1 - 外壳的有效磁路长度为; L_2 - 左右壳体的有效磁路长度; L_3 - 主动轴的有效磁路长度; L_4, L_5, L_6 - 主动片,被动片和磁流变液的工作间隙的有效磁路长度; L_7 - 路径中气隙的有效磁路长度; R_1 - 有效内径; R_2 - 有效内径; R_3 - 有效外径; R_4 - 有效内径; R_5 - 有效外径

其中,外壳体和左右壳体以及主动轴的材料均为 20# 钢,其磁导率为 μ_1 ,主被动传动片的材料为工业纯铁,其磁导率为 μ_2 ,磁流变液的磁导率为 μ_3 ,空气隙的磁导率为 μ_4 。

各零件的磁阻值分别为:

$$R_{m1} = \frac{L_1}{\pi\mu_1(R_5^2 - R_4^2)} \quad (6)$$

$$R_{m2} = \frac{\ln\left(\frac{R_5}{R_2}\right)}{2\pi\mu_1 \cdot L_2} \quad (7)$$

$$R_{m3} = \frac{L_3}{\pi\mu(R_3^2 - R_1^2)} \quad (8)$$

$$R_{m4} = \frac{L_4}{\pi\mu_2(R_3^2 - R_1^2)} \quad (9)$$

$$R_{m5} = \frac{L_5}{\pi\mu_2(R_3^2 - R_1^2)} \quad (10)$$

$$R_{m6} = \frac{L_6}{\pi\mu_3(R_3^2 - R_1^2)} \quad (11)$$

$$R_{m7} = \frac{L_7}{\pi\mu_4(R_3^2 - R_1^2)} \quad (12)$$

式中: L_4 —主动片长度总和; L_5 —被动片长度总和; L_6 —工作间隙长度总和; L_7 —空气隙长度总和。

磁路中总磁阻为各零件的磁阻之和,即:

$$R_m = R_{m1} + 2R_{m2} + R_{m3} + R_{m4} + R_{m5} + R_{m6} + R_{m7} \quad (13)$$

根据磁路欧姆定律,可得通过磁路中的磁通量为:

$$\varphi = \frac{NI}{R_m} \quad (14)$$

为达到合理的输出扭矩,本文选用 0.5 mm 漆包线,工作时,线圈常用为电流 0~2 A,瞬时电流最高只能上升到 4 A。

3.2 磁路仿真

磁流变液的导磁性能是由材料中的铁磁性颗粒提供的,因此其磁导率远低于工业纯铁等导磁材料。在传动设计时,应考虑其磁路合理性^[17]。否则会引起磁场从铁磁性材料中通过,导致工作面磁场强度低,传动转矩变小^[18]。

本次设计为多盘式传动,在轴向方向为圆柱形,对称截面,仿真截取其中一个截面,可以看到工作间隙的各个位置的磁场强度。

以 1 A 电流为例,选取一个截面,仿真结果如图 6 所示。

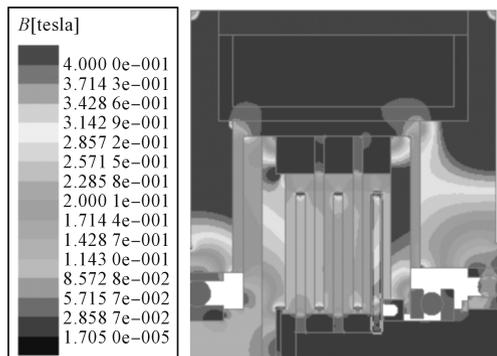


图 6 磁流变液传动机构截面磁场分布云图

根据计算,线圈采用了 1 000 匝。该磁场强度是在 1 000 安匝数下的仿真模拟。由图 6 可以看出:工作区间的磁场强度分布均匀,通过工作区域的积分求解,可以得到平均磁场强度为 0.16 T 左右,而工作间隙最大平均磁场强度在 4 A 电流下可达到大约 0.35 T 以上。

由此可以看出:该结构设计的磁场强度和磁场的分布均满足要求,线圈外置式结构可以更简单有效地

将磁场提供给工作区域,而且有更大的空间。

4 实验设计

本文制作了磁流变液传动样机,搭建了测试输出扭矩用实验台,如图 7 所示。

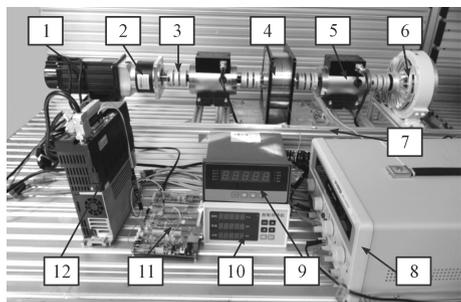


图 7 磁流变液传动实验台系统实物

- 1 - 伺服电机;2 - 减速机;3 - 联轴器;4 - 磁流变液传动装置;5 - 扭矩传感器;6 - 磁粉制动器;7 - 铝型材机架;
- 8 - 多路输出直流电源;9 - 扭矩单显表;10 - 扭矩三显表;
- 11 - 单片机;12 - 电机驱动器

试验台由伺服电机、减速机、扭矩传感器、磁流变液传动装置和磁粉制动器等组成。其中,磁粉制动器有制动输出轴和加载负载的作用。

4.1 转矩传递特性

由文献[19]可知:相对磁场对于输出转矩的影响,转速对传递转矩的影响很小,可以忽略不计。在主动轴转速为 300 r/min 时,输出转矩随磁场强度的变化曲线如图 8 所示。

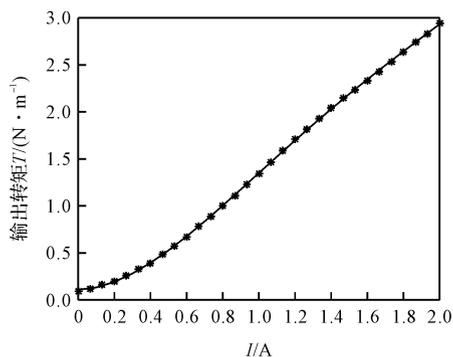


图 8 磁场对输出转矩的调节特性

由图 8 中可以看到:在电流增大的过程中,0 ~ 0.4 A 区间上输出转矩缓慢增大,是由于磁流变液的零场粘度产生的转矩相对整体转矩比例较大,在电流继续增大的过程中,可以看出曲线的线性度较好。图 7 中,屈服应力与扭矩传递关系呈线性,而屈服应力与传递电流大小密切相关,因此,励磁电流与输出转矩的关系从侧面印证了电流与剪切应力的关系。从实验结果可以看出:本文设计的磁流变液传动装置性能稳定,满

足用于柔顺关节的使用要求。

4.2 最大传递转矩测试

该实验中,将转速设定为 600 r/min,并将电流逐渐增大到最大值,测试所能达到传递扭矩的值。最大扭矩测试结果如图 9 所示。

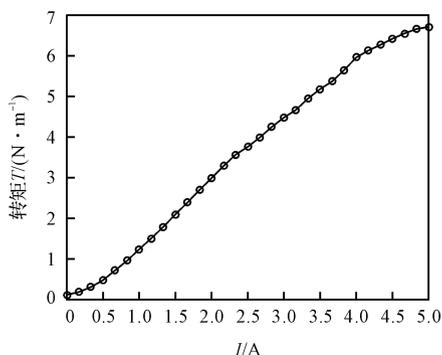


图 9 最大扭矩测试

图 9 中可以看出:电流在 0 ~ 4 A 不断变大的过程中,转矩是一直在增大的,当电流超过 4 A 之后,转矩增大的速率开始下降,说明磁流变液传动装置所能传递的转矩达到了所能产生的较大值。但是由于电流密度过大,以及磁流变液的剪切变稀,此时磁流变液传递装置发热严重,工作在高强度区。因此,笔者将 0 ~ 2 A 设定为正常工作区间,测试出的最大扭矩为极限值。在实验中,当电流为 4 A 时,测得输出扭矩为 5.96 N · m,而图 1 中最大传递转矩对比可以看出:在内径为 10 mm,外径外 30 mm 时,所传递的最大转矩为 5.56 N · m,实验基本达到了设计时预想的转矩大小,实验值比理论值稍大是由于存在不可避免的轴承和油封与输出轴间的摩擦导致,误差在允许范围内。

4.3 响应速度测试

响应速度是机器人关节一个非常重要的指标。保持输出轴稳定,输入端转速为 500 r/min,对磁流变液的励磁线圈加上分别加上 0.5 A、1 A、1.5 A、2 A 的阶跃电流,观测传递扭矩变化情况,测试结果如图 10 所示(其中扭矩传感器的采样频率为 5 次/s)。

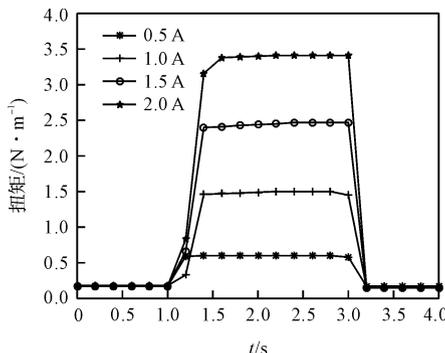


图 10 响应特性

从各条曲线间的距离中可以看出:该实验的起始和结束部分均不在0,是由于在无磁场状态下磁流变液具有零场粘度以及实验装置不可避免的摩擦力;传递扭矩在0.2 s~0.4 s之间可达到期望值,且传递扭矩稳定,以逐渐逼近最大值的方式加载扭矩,随着电流的增大,达到稳定转矩的时间略有增大。因此可以得出结论:扭矩加载无超调,无明显振荡,且响应速度快,该传动装置可控性强。

5 结束语

本文设计了磁流变液传动装置,并经过了样机的实验测试,实验结果表明:转矩的磁场跟随大致呈线性,对输出转矩的控制简单;最大输出扭矩达到了 $6\text{ N}\cdot\text{m}$ 以上,额定输出扭矩在 $0\sim 3\text{ N}\cdot\text{m}$ 之间,响应时间在 $0.2\text{ s}\sim 0.4\text{ s}$ 之间,符合机器人关节的使用要求。

本文对柔顺关节的研究主要集中在磁流变液传动上,未对整个关节进行建模,后续研究中,将建立整个柔顺关节的模型,测试关节的输出力矩与转速,并对柔顺关节的控制方法进行研究。

参考文献 (References):

- [1] 熊根良,陈海初,梁发云,等. 物理性人-机器人交互研究与发展现状[J]. 光学精密工程,2013,21(2):356-370.
- [2] SAKLIBURY K, TOWNSEND W, EBERMAN B, et al. Preliminary design of a whole-arm manipulation system (WAMS) [C]. Proceedings of 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Philadelphia: IEEE,1988.
- [3] 张进秋,张 建,孔亚男,等. 磁流变液及其应用研究综述[J]. 装甲兵工程学院学报,2010,24(2):1-6.
- [4] 叶文娟. 磁流变液控智能传动机理与设计研究[D]. 南京:南京理工大学机械工程学院,2009.
- [5] 何福本,梁延德,孙捷夫,等. 基于SEA的机器人仿肌弹性驱动关节研究[J]. 中国机械工程,2014,25(7):900-

- 905.
- [6] PALLI G, MELCHIORRI C. Interaction force control of robots with variable stiffness actuation [C]. The 18 th IFAC World Congress, Milano: IEEE,2011.
- [7] TONIETTI G, SCHIAVI R, BOCCHI A. Design and control of variable stiffness actuator for safe and fast physical human/robot interaction [C]. Proceedings of 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona: IEEE,2005.
- [8] 盛卫锋,丁 锐,曹 毅. 基于串联离合驱动的安全机械手静力学分析[J]. 机械设计,2017,34(11):51-56.
- [9] 王鸿云,郑惠强,李泳鲜. 磁流变液的研究与应用[J]. 机械设计,2008(5):1-4,8.
- [10] KEREM K, EDWARD J P. Design considerations for an automotive magnetorheological brake [J]. **Mechatronics**, 2008,18(8):434-447.
- [11] 赵昌森. 基于磁流变液的力反馈手功能康复训练系统设计[D]. 南京:东南大学机械工程学院,2017.
- [12] 王永强. 大抛光模磁流变超光滑平面抛光技术研究 [D]. 长沙:湖南大学机械与运载工程学院,2016.
- [13] 孟维佳. 双平板式磁流变液离合器的研究设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2006.
- [14] 杨 凯,李继军,孟丽娜. 一种离合器助力缸的设计研究 [J]. 液压气动与密封,2018(1):50-51.
- [15] 刘新华. 磁流变液传动技术[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [16] OLABI A G, GRUNWALD A. Design and application of magneto-rheological fluid [J]. **Material and Design**, 2007(28):2658-2664
- [17] 李国发,韩明佐,单翠云,等. 磁流变力矩传动装置的有限元仿真及试验[J]. 吉林大学学报:工学版,2013,43(5):1284-1289.
- [18] 马良旭. 电动汽车磁流变液制动系统的研究与开发 [D]. 北京:清华大学机械工程学院,2016.
- [19] 田祖织. 磁流变液及其传动技术研究[D]. 江苏:中国矿业大学机电工程学院,2012.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

王鹏飞,蔡世波,鲍官军,等. 用于柔顺关节的磁流变传动的设计与实验研究[J]. 机电工程,2018,35(11):1178-1183.

WANG Peng-fei, CAI Shi-bo, BAO Guan-jun, et al. Design and experimental of MRF transmission for compliant joints [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018,35(11):1178-1183.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>