

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.05.002

磁流变液柔顺关节的设计和运动学建模研究^{*}

田柳滨,蔡世波,鲍官军^{*},杨庆华
(浙江工业大学机械工程学院,浙江 杭州 310014)

摘要:针对传统刚性机器人关节在安全性和适应性方面明显不足等问题,基于磁流变技术提出了一种新型机器人柔顺关节原理,在传统的机器人关节刚性结构内部嵌入了磁流变传动机构,使其成为一种兼具刚性和柔性的关节结构。利用电磁仿真软件 Ansoft Maxwell 建立了磁流变液柔顺关节的仿真模型,进行了参数化设计。建立了柔顺关节可变刚度模型以及传递转角的运动学模型,并利用 Matlab 对理论模型进行了验证。仿真结果表明,关节输出转矩随着线圈电流的增大而近似线性增大;在相同时间内,当输入电流越大,转动角度越大,而且当工作时间增加后,转动角度的增幅增大。

关键词:磁流变液;柔顺关节;电磁仿真;运动学模型

中图分类号:TH39;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)05-0432-06

Design and kinematical modeling for magneto-rheological soft joints

TIAN Liu-bin, CAI Shi-bo, BAO Guan-jun, YANG Qing-hua

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

Abstract: Aiming at solving the problems of insufficient on security and adaptability for the traditional robot rigid joint, a new principle of robot soft joint based on magneto-rheological technology was proposed. The magneto-rheological transmission mechanism was embedded in the traditional joint, which combined rigidity with flexibility. The simulation model of the magneto-rheological fluid soft joint was established by Ansoft Maxwell software. Parametrization design was proceeded to optimize the mechanical scheme. The variable rigidity model of the proposed soft joint and the kinematic model for angle rotation were established. The theoretical model was verified by simulation with Matlab software. The results indicate that the angle approximately increases linearly as electric current increases and the angle increases faster when work time increases.

Key words: magneto-rheological fluid; soft joints; electromagnetic simulation; kinematic model

0 引言

实现机器人的柔顺性和安全性的本质是改变传统机器人的高刚度结构设计^[1]。在新型机器人结构中一般采用新型驱动、传动结构,使其刚度可变,因而刚度模型及其控制研究成为必须^[2]。由电机、减速机等纯机械部件构成的传统刚性机器人关节在安全性和适

应性方面明显不足。借助于智能材料和新型驱动技术的软体机器人一般具有充分的柔性、适应性、超冗余自由度或无限自由度,甚至可以任意改变自身形状和尺寸以适应环境和目标,以保证目标和环境的安全性,但是由于结构材质的柔软性,难以建立准确的数学模型和实施精准控制。

磁流变液是一种在磁场作用下能够快速可逆地由流动性良好的牛顿流体转变为高黏度低流动性的

收稿日期:2016-11-24

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

作者简介:田柳滨(1992-),男,浙江丽水人,硕士研究生,主要从事磁流变液柔顺关节方面的研究。E-mail:545880421@qq.com

通信联系人:鲍官军,男,副教授,硕士生导师。E-mail:GJBao@zjut.edu.cn

Bingham 弹塑性体的智能材料^[3],近年来研究人员开始尝试将其应用于机器人的设计和控制领域。例如适用于脑部受伤患者的基于磁流变液离合器的腿部空间运动牵引机器人^[4]、基于磁流变液离合器的手指康复机器人^[5]、基于紧凑磁流变液离合器的人机友好型驱动器^[6]、基于磁流变液的被动驱动器^[7]、基于磁流变液的触觉驱动器^[8]、基于磁流变液的4自由度外科手术触觉主手^[9-10]、基于磁流变液的腿部外骨骼^[11]、基于磁流变液的吸附爬行机器人^[12],等。上述研究将磁流变液作为离合器的控制介质,形成辅助装置与机器人协同工作。

本研究将建立柔顺关节可变刚度模型以及传递转角的运动模型,并用 Matlab 对理论模型进行验证。

1 磁流变液柔顺关节结构设计

基于磁流变技术,本研究提出一种新型机器人柔顺关节原理,如图1所示。

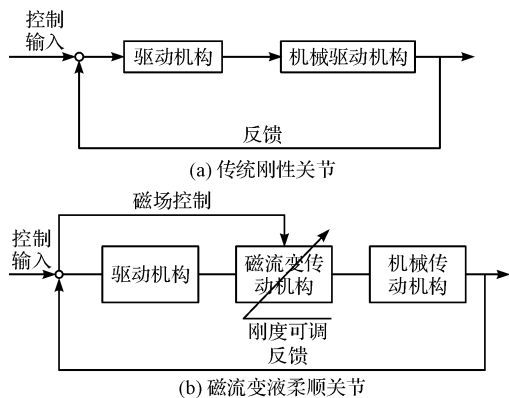


图1 基于磁流变技术的新型机器人柔顺关节原理

相对于传统的刚性关节,本研究在传统的机器人关节刚性结构内部嵌入磁流变传动机构,使其成为一种兼具刚性和柔性的关节结构,从而既能保持操作的精确性,又具有足够的柔顺性和安全性。

根据图1(b)所示的基于磁流变技术的新型机器人柔顺关节原理,本研究设计的机器人柔顺关节结构如图2所示。

该关节由驱动电机驱动可相对转动的两个相邻杆第*i*杆和第*i+1*杆。在第*i*杆内部设置磁流变驱动传动结构,并通过一对斜齿轮将运动和动力传递到第*i+1*杆。在磁流变驱动传动结构中,电机输出轴通过联轴器与磁流变离合器输入轴相连,主动盘和被动盘中间充满磁流变液,磁流变离合器输出轴上连接有驱动斜齿轮,驱动斜齿轮将动力通过被动斜齿轮传到第*i+1*杆转轴上。在由被动盘、主动盘

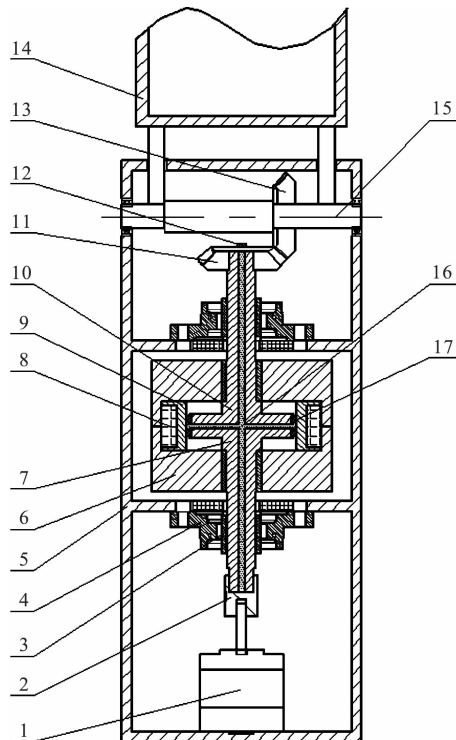


图2 基于磁流变液的机器人柔顺关节结构

1-步进电机;2-联轴器;3-轴承;4-轴座;5-第*i*杆;6-线圈支撑架;7-主动轴盘;8-线圈;9-隔磁环;10-被动轴盘;11-驱动斜齿轮;12-压注油杯;13-从动斜齿轮;14-第*i+1*杆;15-第*i+1*杆转轴;16-磁流变液;17-油封

和隔磁环所形成的封闭腔体内部,从被动轴中部管道充入磁流变液。当励磁线圈处于断电状态时,主动旋转机构与被动旋转机构之间的磁流变液处于自由流体状态,对旋转的阻力为流体摩擦阻力,非常小;当励磁线圈处于通电状态时,磁流变液发生相变,形成 Bingham 粘塑性流体,在主动旋转机构与被动旋转机构之间形成相对运动阻力,实现运动和动力的传递。其传递能力的大小随着磁场强度的变化而无级可调。最终通过垂直轴斜齿轮对将运动和动力传递到第*i+1*杆。

在主、从动轴中开有液体通道,注液时,本研究将磁流变液离合器部分竖直放置,主动轴在上,从动轴在下,主动轴轴端的螺栓先不安装,由从动轴轴端的压注油杯向圆盘工作间隙注入磁流变液,直到磁流变液从主动轴轴端溢出时,用螺栓封堵液体通道端口。此时,磁流变液充满主、从动圆盘之间的工作间隙。主、从动圆盘和磁轭(线圈支撑架)的材料为电工纯铁(DT4),隔磁环材料选用磁导率很低的铝合金,线圈为 QY-2/220,磁流变液选用 Lord 公司的 MRF132DG,其 BH 曲线如图3所示。

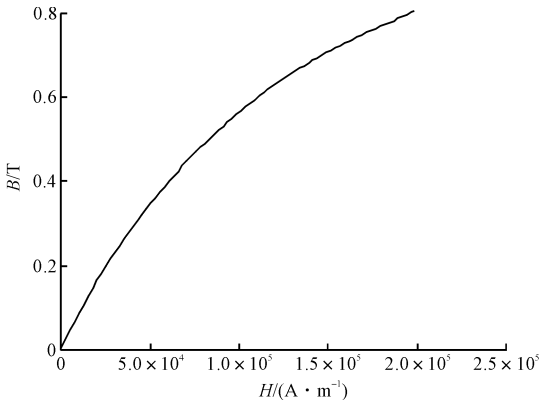


图3 磁流变液 BH 曲线(132DG)

在该方案中,线圈是绕制在隔磁环上,并由线圈支撑架构成磁轭。隔磁环内圈与主、从动圆盘及圆盘上的油封构成磁流变液工作区域。

2 传动装置磁路仿真及分析

本研究所提出的基于磁流变液的机器人柔顺关节,其传动装置在原理上与磁流变液离合器一致,所提

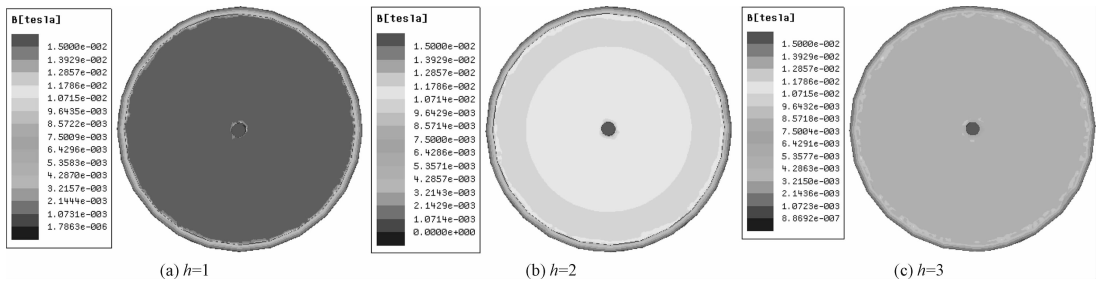


图4 安匝数为 300 的工作区域磁感应强度分布云图

从磁流变液盘的磁感应强度可以看出:当工作间隙(即工作磁流变液厚度)为 1 mm 时,整个盘面强度较为平均,约为 0.015 T;当工作间隙为 2 mm 时,圆盘中心处的磁感应强度明显高于外圈的磁感应强度,内圈约为 0.011 T,而外圈约为 0.01 T;当工作间隙为 3 mm 时,整个盘面磁感应强度也较为平均,约为 0.008 T。由图 4 可以看出,当工作间隙为 1 mm ~ 3 mm 时,随着间隙的增大,工作区域的磁感应强度是减小的。以加工精度以及能耗为设计参考,选择工作间隙为 2 mm。

2.2 安匝数对磁路的影响

工作间隙为 2 mm 时,工作磁流变液处的磁感应

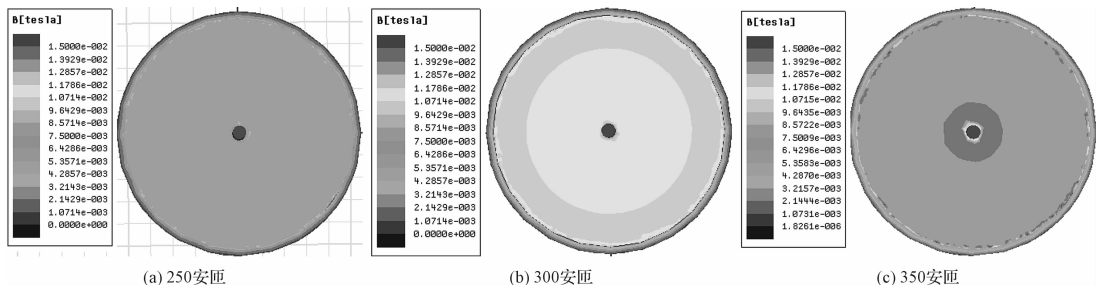


图5 间隙为 2 mm 的工作区域磁感应强度分布云图

出方案的主要研究目的在于将磁流变液柔顺关节应用于机器人关节设计,尤其是需要安全性、柔顺性的变刚度控制领域。通过电磁仿真来优化关节设计,使其在满足一定功能的前提下,结构紧凑、传递动力高效。根据前期对磁流变传动装置的研究,磁流变液工作间隙处的磁感应强度达到 0.005 T 时,传递转矩达到 0.02 Nm,将其定为设计目标。

本研究在电磁仿真软件 Ansoft Maxwell 中导入传动装置三维几何模型,设置环境为气球边界,定义各个部件材料参数,设置线圈内的激励电流。设置分析为 Magnetostatic 静态磁场分析,设置网格划分尺寸,进行求解计算。通过运用 Maxwell 的参数化设计功能,分别改变初始设计参数(工作间隙、安匝数),计算不同设计参数对工作区域内的磁感应强度的影响。

2.1 工作间隙对磁路的影响

安匝数为 300 时,工作磁流变液处的磁感应强度分布云图如图 4 所示。

强度分布云图如图 5 所示。从磁流变液盘的磁感应强度可以看出:当安匝数为 250 时,整个盘面强度较为平均,约为 0.008 T;当安匝数为 300 时,磁流变液盘内圈的磁感应强度要明显高于外圈,内圈约为 0.011 T,外圈约为 0.01 T;当安匝数为 350 时,圆盘中心区域的磁感应强度约为 0.014 T,外圈约为 0.013 T。由图 5 可以看出,当工作间隙一定时,工作区域的磁感应强度随安匝数的增大而增大。在 300 安匝情况下,输出力矩大约能达到 0.04 Nm,达到设计目标,故本研究选择安匝数为 300。

工作区域磁力线分布图如图6所示。

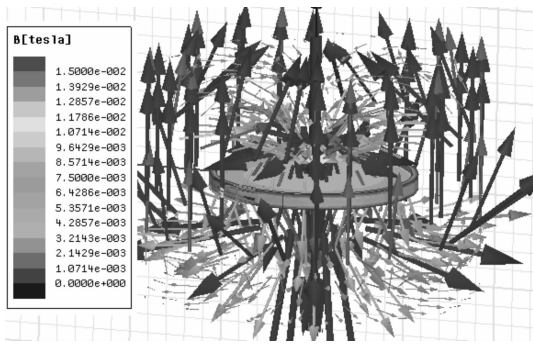


图6 工作区域磁力线分布图(300安匝,2mm)

由于平行于磁流变液剪切方向的磁场对磁流变效应的贡献较小,而垂直于磁流变液剪切方向的磁场对磁流变效应的贡献较大,在设计磁流变液传动装置时,应尽可能使磁场方向垂直于磁流变液剪切方向,以便充分利用磁流变效应传递力矩。磁力线大多垂直穿过磁流变液,说明磁路设计合理。

3 柔顺关节运动学建模

3.1 柔顺关节可变刚度模型

本研究所设计的机器人柔顺关节传动路线为:电机-主动轴-磁流变液-被动轴-驱动斜齿轮-从动斜齿轮。由于电机-主动轴、轴与齿轮对,均为刚性传动,且其刚度比磁流变液大若干数量级,可视为绝对刚性联接^[13],故在进行机器人柔顺关节的可变刚度建模过程中忽略这些因素。因此将机器人柔顺关节的刚度问题简化而得的结构模型如图7所示。

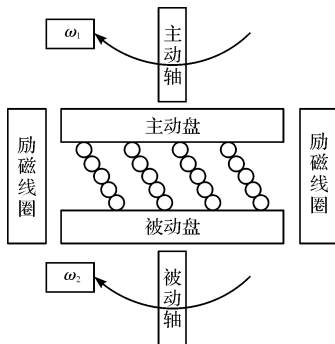


图7 机器人柔顺关节刚度模型

由图7示结构模型可知,机器人柔顺关节的可变刚度 K 与磁化颗粒链的弹性 k 和阻尼 c 、固液界面的摩擦 f 以及磁流变液内部剪切应力 τ 等因素紧密相关,即:

$$K = g(k, c, f, \tau) \quad (1)$$

式(1)为综合了磁流变液流体的宏观力学特性和

固液界面微观摩擦行为的数学模型。式中磁化颗粒链的弹性 k 和阻尼 c 可根据现有文献^[14]研究的磁流变传动宏观模型或弹簧阻尼模型得到,而固液界面微观摩擦行为可基于固液界面的预运动/微动模型,磁流变液内部剪切应力 τ 则由 Herschel-Bulkley 模型得到,如下式所示:

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (2)$$

式中: $\dot{\gamma}$ —剪切率, τ_0 —屈服应力, k —稠度系数, n —流动指数。

故本研究融合现有文献和上述研究基础,可得到上述兼顾宏观特性和微观行为的机器人柔顺关节可变刚度模型。

3.2 传递转角的运动学模型

磁流变液传动装置利用磁流变液可控制的剪切应力来传递转矩^[15]。为了更高效地传递力矩,磁场范围应尽量大,且靠近主、从动盘的最大外圆。圆盘式计算原理如图8所示。

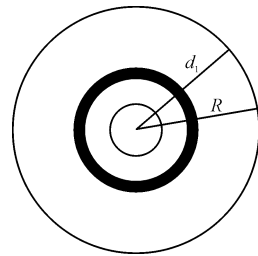


图8 圆盘式计算原理

磁场作用区域是半径为 R 的圆形区域。 ω_1 、 ω_2 分别为主、从动盘转速,转速差为:

$$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 \quad (3)$$

由于磁流变液传动过程中受诸多因素的影响,为了简化计算,在设计过程中考虑主要影响因素,本研究作出如下假设^[16]:

- (1) 假设磁流变液是不可压缩的;
- (2) 磁流变液的流动是稳态的;
- (3) 不计磁流变液本身的重力影响;
- (4) 忽略磁滞现象,认为其响应具有瞬时性;
- (5) 忽略由于加工和装配工艺带来的人为误差。

如图8所示,本研究在传动圆盘半径 r 处取一微圆环,圆环的宽为 dr ,则其面积表示为 $ds = 2\pi r dr$,那么该微圆环可提供的转矩 d_T 可表示如下式:

$$d_T = \tau 2\pi r^2 dr \quad (4)$$

假设输入端主动圆盘的转速为 ω_1 ,工作间隙的厚度为 h ,那么其剪应变率 $\dot{\gamma}$ 可表示为:

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta\omega \cdot r}{h} \quad (5)$$

将式(5)代入 Bingham 模型中,可以得到磁场作用下,磁流变液剪切屈服应力 τ 的表达式为:

$$\tau = \tau_0 + \frac{\eta r \Delta \omega}{h} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)可得微圆环 dr 内磁流变液产生的力矩为:

$$dT = 2\pi r^2 \left(\tau_0 + \frac{\eta r \Delta \omega}{h} \right) dr \quad (7)$$

对微圆环在整个圆盘上进行积分可得磁流变液所能达到的总力矩为:

$$T = \frac{2}{3} \pi \tau_B R^3 + \frac{\pi \eta \Delta \omega}{2h} R^4 \quad (8)$$

式中: τ_B —屈服应力。

由磁流变液的本构关系可以得到:

$$\tau_B = 64720(1 - e^{-1.63B}) \quad (9)$$

式中: B —磁流变液处的磁感应强度。

由下述公式可求得:

$$B = \frac{\mu NI}{L} \quad (10)$$

由于被动圆盘的转矩计算公式为:

$$T = J\alpha = J\dot{\omega}_2 = J\ddot{\theta} \quad (11)$$

故,令:

$$\Phi = \frac{2\pi\tau_B R^3}{3} + \frac{\pi\eta\omega_1 R^4}{2h} \quad (12)$$

$$K = \frac{\pi\eta R^4}{2h} \quad (13)$$

则式(13)变为:

$$J\ddot{\theta} = \Phi - K\theta \quad (14)$$

求解式(14)的微分方程通解为:

$$\theta = -\frac{J\Phi}{K} C_1 e^{-\frac{K}{J}t} + \frac{\Phi}{K}t + C_2 \quad (15)$$

式中: C_1, C_2 —常数。

添加边界条件:

$$\omega_1(0) = 0, \theta(0) = 0 \quad (16)$$

则式(15)化为:

$$\theta = \frac{J\Phi}{K^2} e^{-\frac{K}{J}t} + \frac{\Phi}{K}t - \frac{J\Phi}{K^2} = \Phi \left(\frac{J}{K^2} e^{-\frac{K}{J}t} + \frac{t}{K} - \frac{J}{K^2} \right) \quad (17)$$

式中: J —从动盘的转动惯量; μ —磁导率, $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb} \cdot (\text{m} \cdot \text{A})^{-1}$; R —圆盘半径; h —工作间隙; η —磁流变液的零场粘度, $\eta = 0.24 \text{ Pa} \cdot \text{s}$; α —从动盘角加速度; ω_2 —从动盘角速度; L —隔磁环的周长; θ —第 $i+1$ 杆转角; t —时间。

将式(8)以及相关参数输入 Matlab 中进行计算,不同工作电流下关节输出转矩分布如图 9 所示。

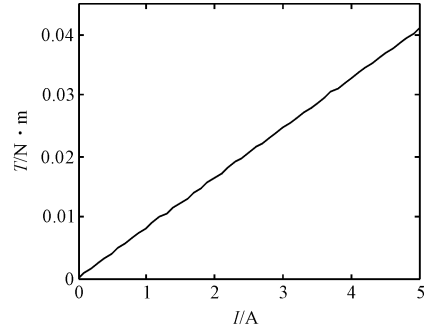


图 9 不同工作电流下关节输出转矩分布

仿真参数如下:

$$J = 3 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2;$$

$$R = 2.75 \times 10^{-2} \text{ m};$$

$$N = 300 \text{ 匝};$$

$$L = 0.21 \text{ m};$$

$$h = 2 \times 10^{-3} \text{ m}.$$

假定主动盘角速度 $\omega_1 = 21 \text{ rad/s}$ 。

从图 9 中可以看出,关节输出转矩随着励磁线圈电流的增大而近似线性增大。当电流从 0 增加到 5 A 的过程中,关节输出转矩从 0 增加到了 0.042 Nm,满足该设计需求。

将式(17)以及相关参数输入 Matlab 中,计算得到不同工作电流下关节输出转角随时间的分布,如图 10 所示。

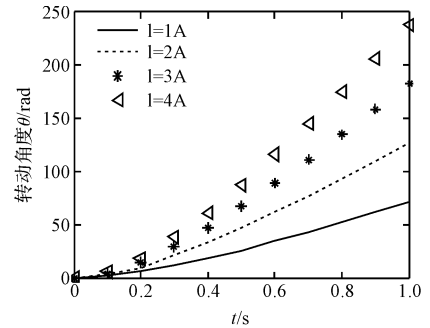


图 10 不同工作电流下关节转角随时间的分布

仿真参数同上,电流分别取 1 A, 2 A, 3 A 和 4 A。从图 10 可以看出,在相同时间内,当输入电流越大,转动角度越大。而且当工作时间增加后,转动角度的增幅增大。

由此可见,理论模型与仿真结果基本吻合。

4 结果与分析

(1) 本研究提出了一种新型的机器人柔顺关节原理,并建立了基于磁流变液的柔顺关节的三维模型;

(2) 本研究利用 MAXWELL 软件对模型进行了电

磁仿真。当工作间隙为 1 mm ~ 3 mm 时,随着间隙的增大,工作区域的磁感应强度是减小的;当工作间隙一定时,工作区域的磁感应强度随安匝数的增大而增大。综合考虑加工以及磁损耗等因素,得到优化参数为:工作间隙为 2 mm,安匝数为 300。在该参数下,传动装置工作间隙处磁感应强度达到 0.01 T,输出转矩达到 0.04 Nm,能达到设计目标:0.005 T 和 0.02 Nm;

(3)本研究得到了兼顾宏观特性和微观行为的机器人柔顺关节可变刚度模型,建立了传递转角的运动学模型,并利用 Matlab 进行了模型验证。关节输出转矩随电流增大而增大。另外,在相同时间内,当输入电流越大,转动角度越大。而且当工作时间增加后,转动角度的增幅增大。

5 结束语

本研究设计了一个基于磁流变液的柔顺关节结构模型,并用 Maxwell 对磁流变传动装置进行了电磁场仿真。结果表明,该磁流变传动装置磁路设计合理,磁场强度能达到设计要求。本研究还对柔顺关节进行了运动学建模,并用 Matlab 进行仿真验证。

上述研究可为样机制作及后续研究奠定一定的理论基础。

参考文献 (References):

- [1] RUS D, TOLLEY M T. Design, fabrication and control of soft robots[J]. *nature*,2015(521):467-475.
- [2] ST PAUL. Variable stiffness actuators moving the robots of tomorrow [EB/OL]. [2012-5-14]. [http://www. ce. utwente. nl/car/ICRA2012/workshop. html](http://www.ce.utwente.nl/car/ICRA2012/workshop.html)
- [3] ASHTIANI M, HASHEMABADI SH, GHAFFARI A. A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization[J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 2014(374):716-730.
- [4] KIKUCHI T, ODA K, FURUSHO J. Leg-robot for demonstration of spastic movements of brain-injured patients with compact magnetorheological fluid clutch[J]. *Advanced Robotics*,2010,24(5-6):671-686.
- [5] 王昌鹏,基于磁流变液的力反馈手指康复机器人设计

- [D]. 南京:东南大学机械工程学院,2014.
- [6] KIKUCHI T, OTSUKI K, FURUSHO J, et al. Hiroya development of a compact magnetorheological fluid clutch for human-friendly actuator[J]. *Advanced Robotics*,2010,25(10):1489-1502.
- [7] SHOKROLLAHI E, PRICE K, DRAKE JM, et al. Design and development of magnetorheological fluid-based passive actuator[C]. International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, New York:IEEE, 2015.
- [8] RYU S, KOO J H, YANG T H, et al. Design, simulation, and testing of a magnetorheological fluid-based haptic actuator for mobile applications[J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*,2014,26(13):75-89.
- [9] SONG B K, OH J S, CHOI S B. Design of a New 4-DOF haptic master featuring magnetorheological fluid[J]. *Advances in Mechanical Engineering*,2014(11):1-13.
- [10] CHOI S H, OH J S, LEE S R, et al. Torque tracking control of a haptic master featuring controllable magnetorheological fluid[C]. International Conference on Control, New York:IEEE,2014.
- [11] CHEN J, LIAO W H. Design and control of a magnetorheological actuator for leg exoskeleton[C]. IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics, New York:IEEE,2007.
- [12] WILTSIE N, LANZETTA M, IAGNEMMA K. A controllably adhesive climbing robot using magnetorheological fluid [C]. IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications, New York:IEEE,2012.
- [13] CARLSON J D, JOLLY M R. MR fluid, foam and elastomer devices[J]. *Mechatronics*,2000(10):555-569.
- [14] OLABI A G, GRUNWALD A. Design and application of magneto-rheological fluid[J]. *Materials and Design*,2007(28):2658-2664.
- [15] 郑军,曹兴进,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.
- [16] 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.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

田柳滨,蔡世波,鲍官军,等.磁流变液柔顺关节的设计和运动学建模研究[J]. *机电工程*,2017,34(5):432-437.

TIAN Liu-bin, CAI Shi-bo, BAO Guan-jun, et al. Design and kinematical modeling for magneto-rheological soft joints[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017,34(5):432-437.

《机电工程》杂志:[http://www. meem. com. cn](http://www.meem.com.cn)