

面向人机交互的机器人变刚度柔性驱动器设计与分析

王文东, 孙铜森, 袁小庆, 李金哲, 明杏

(西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072)

摘要:针对传统的高刚性机器人已无法满足人机交互安全性和复杂环境自适应性的不足之处,利用磁流变液的磁流变效应,提出并设计了一种新型的用于机器人关节的变刚度柔性驱动器。详述了柔性关节驱动原理,设计了驱动器的结构并进行力学分析,同时利用磁场仿真软件 Maxwell 进行驱动器的磁场分析。最后对驱动器性能进行仿真分析和实验验证,对比分析结果表明该驱动器具有结构简单、易于控制、更宽的主动变刚度调节范围的特点,并且能够吸收振动或者冲击带来的能量,提高了机器人的关节输出能力。

关键词:机器人关节;柔性驱动器;磁流变液;变刚度

中图分类号:TP242

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2019)02-0242-07

在人机交互领域,当机器人需要与未知环境交互时,传统机器人的刚性传动存在很大的安全隐患。安全性是人机协作完成任务的重要保障。赵京等^[1]通过分析国内外人机交互研究现状,指出了机器人安全性的研究正向着刚柔混合一体化机构、准确快速的环境判断、良好的柔顺控制的方向发展。机械系统的安全性是通过机械设计和驱动控制系统来保证的。当人与机器人发生意外碰撞,控制系统失灵时,设计柔性机械臂,可通过降低动能和惯性来减小冲击力^[2]。但是不能一味地降低机器人关节刚度,否则会带来新的问题,比如机器人则会变得不稳定,无法达到期望的精度,动态性能变差。

生物学表明,人类的复杂运动通过骨骼肌肉系统完成,当面临突发碰撞和复杂工况时,骨骼肌肉系统能表现出很好的变刚度能力来保护人体。国内外学者针对变刚度柔性驱动器或柔性关节等已做了诸多研究,也取得了一定的成果。Furnémont 团队^[3]设计的 MACCEPA,通过调节弹性元件的预张力来调节刚度,但是改变刚度需要克服弹性元件偏转所引起的力,能量有损耗,并且引入的弹性元件会降低驱动器的带宽,所能实现的变刚度范围较小。如

Jafari 等^[4]设计的 ASAW-II 和 Mathijssen 等^[5]设计的自闭合串并联弹性驱动器 SPEA 等,虽然可实现大范围的变刚度能力,但是存在结构复杂、体积大等问题。武汉大学的孙建涛等^[6]利用杠杆机构设计了紧凑型变刚度驱动器 SVSA,结构紧凑,能实现大范围刚度能力,但是机械结构仍然较为复杂。

本文利用磁流变液的磁流变特性,以磁流变液作为传动介质,设计一种结构简单、易于控制的模块化变刚度关节柔性驱动器,在外接负载变化的情况下,实时地改变驱动器的输出刚度,即可有效解决上述问题。所设计柔性驱动器主要工作于磁流变液的剪切模式下。分析了磁流变液的工作间隙以及工作区域对驱动性能的影响,完成了驱动器性能的仿真,最后搭建实验平台验证驱动器的变刚度效果。

1 磁流变液柔性驱动器原理

本文的磁流变液驱动器是基于磁流变液的剪切模型设计的,剪切力矩与磁流变液的黏度有关。主动摩擦片和转轴固连在一起,当电机以转速 ω 工作时,带动转轴与主动摩擦片旋转。线圈未通电时,磁

流变液呈现出可以自由流动的牛顿流体特性,此时剪切力矩非常小,驱动器几乎处于不工作的状态,刚度很小。当线圈通电时,磁流变液组成中的磁性粒子部分在外加磁场的作用下产生了流变效应,其剪切屈服强度迅速增大,此时若转轴转动,主动摩擦片旋转时受到阻力,由此带动从动摩擦片和大隔圈,进而带动输出端外壳输出相应扭矩。随着电流的增加,液体的黏度随之增大,直至到达临界点表现出固体具有的特性,剪切力矩也随之增大。通过改变磁场的强度进而改变磁流变液流体状态,使磁流变液的剪切屈服应力强度发生变化,实现了变刚度功能。其中,由励磁线圈生成磁场,通过改变线圈的通电电流大小改变磁场的强度。

2 磁流变液驱动器结构模型设计

在设计 MR 驱动器的主动传动装置时,为了提高驱动力矩,采用了多片传动装置(主动摩擦片数为 10、从动摩擦片数为 9),加上两侧的封闭端盖,剪切面积约为单盘式的 20 倍。主、从动摩擦片分别由主、从动隔环隔开,形成一定宽度的工作间隙,磁流变液被灌在工作间隙之中,并通过密封装置防止其泄露。本文中工作间隙选择为 0.75 mm,由仿真结果可知,能够满足驱动力矩要求。

图 1 为磁流变液驱动器的结构原理图。输入端包括输入轴、主动摩擦片和主动隔环,输入轴由电机带动,主动摩擦片和隔环通过花键与输入轴相连。输出端包括从动摩擦片、从动隔环、大隔圈和外壳,从动摩擦片和隔环通过花键与大隔圈固连在一起,外壳与大隔圈通过多个螺栓接合。磁流变液通过注入孔注入工作间隙之中。用于建立磁场的励磁线圈则放置在线圈骨架与外壳建立的空腔之中。

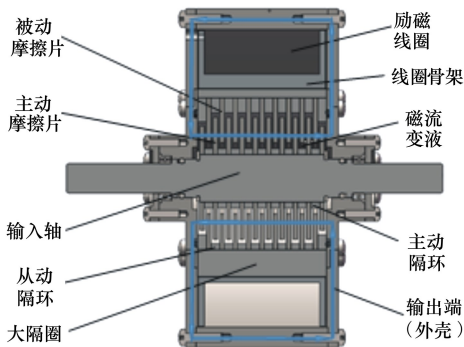


图 1 磁流变液驱动器结构原理图

MR 驱动器的磁路设计至关重要,磁感应线从左侧外壳、磁流变液、主、从动摩擦片、右侧外壳和外壳上端这些部分穿过,形成闭合回路。为形成所要求的磁路,外壳和摩擦片材料均选择导磁性较高的电工磁铁 DT4。其余部分如输入轴、隔环、大隔圈选择不导磁的奥氏体不锈钢。

3 磁流变液驱动器力学分析

为了表述驱动器的驱动力矩与电机的转速、电流大小、MRF (magnetorheological fluids) 的剪切强度等的关系,需要对本驱动器进行力学建模与分析。通过磁流变液的流变特性可知,当在外加磁场的作用下,剪切应力和磁场强度呈非线性关系,MR 流体的主要优点在于其高动态屈服应力。

驱动器的工作区域为主动摩擦片外径 R_2 和从动摩擦片外径 R_1 包围的圆盘环状区域。本文采用 Bingham 流体模型来表示磁流变液的本构关系^[7-8]。Bingham 模型是最流行的 MR 流体模型,表达式简单,易于使用,只需较少的参数,就能够足够精确地表示适中的剪切速率下的 MR 流体特性。

$$\begin{cases} \tau = \tau_0(B) \operatorname{sgn}(\gamma) + \eta\gamma & |\tau| > \tau_0 \\ \gamma = 0 & |\tau| \leq \tau_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\tau_0(B)$ 是磁流变液在外加磁场作用下产生的剪切屈服应力,跟磁场强度 H 有关; γ 为 MRF 的剪切应变率; η 为零场黏度,在本模型中假设它为定值。

r 为在 R_2 与 R_1 区域之间的任意磁流变液工作半径,转轴的转速为 ω ,假设磁流变液工作在理想情况下,则工作间隙处的剪应变率为

$$\gamma = \frac{r\Delta\omega}{h} \quad (2)$$

$\Delta\omega/h$ 是磁场方向的速度梯度,代入(1)式可得

$$\tau = \tau_0(B) \operatorname{sgn}(\gamma) + \eta r \frac{\Delta\omega}{h} \quad (3)$$

由磁流变液的工作区域图可知,在任取一半径为 r 的微圆环,圆环处驱动力矩为

$$dT = r \times dF = r \times \tau \times dS = r \times \tau \times 2\pi r dr \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式得

$$dT = r \times \left(\tau_0(B) \operatorname{sgn}(\gamma) + \eta r \frac{\Delta\omega}{h} \right) \times 2\pi r dr = \left(2\pi r^2 \tau_0(B) \operatorname{sgn}(\gamma) + 2\pi r^3 \eta \frac{\Delta\omega}{h} \right) dr \quad (5)$$

故,单面摩擦片的驱动力矩为

$$T = \int_{R_1}^{R_2} \left(2\pi r^2 \tau_0(B) \operatorname{sgn}(\gamma) + 2\pi r^3 \eta \frac{\Delta\omega}{h} \right) dr = \frac{2}{3} \pi (R_2^3 - R_1^3) \times \tau_0(B) \operatorname{sgn}(\gamma) + \frac{\pi \eta \Delta\omega}{2h} \times (R_2^4 - R_1^4) \quad (6)$$

从(6)式可以看出,驱动力矩由两方面组成,一个为磁流变液在磁场作用下的磁流变效应产生的力矩 T_0 ,这部分力矩可以通过改变磁场的强度而控制;另一部分为磁流变液本身的黏性产生的力矩 T_γ ,与其参数相关,因此这部分力矩不可控。上述的驱动力矩仅为单面摩擦片产生的力矩,为了增大输出力矩,实际上整体结构上有 20 个工作面,因此整个驱动器的驱动力矩的值为 20 T。这种结构设计整体尺寸不大,却大大增大了输出力矩的值。

4 磁流变液驱动器磁场分析

4.1 磁路分析

为了更好地进行磁流变液变刚度驱动器的设计,对磁路进行优化分析与设计,反映磁回路中磁感应强度的分布,观察作用在磁流变液上磁感应强度。因此,本文采用 Ansoft Maxwell 对所设计柔性驱动器进行磁场仿真。获得励磁线圈工作在 3.0 A 时的仿真结果,如图 2 所示。

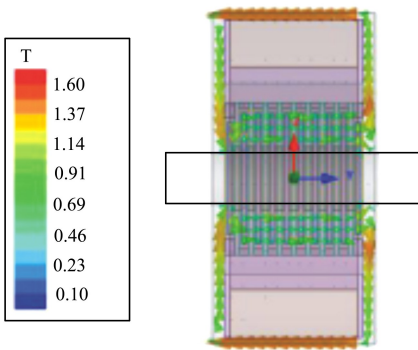


图 2 磁流变柔性驱动器磁场与磁感线分布

随着电流的增大,工作间隙处磁流变液上的磁感应强度有明显的增加。当电流为 3.0 A 时,磁流变液工作间隙处的磁感应强度约在 0.6~0.8 T 之间。磁路中最大的磁感应强度大约为 1.5 T,所以磁路中不存在磁饱和现象。根据磁感线的分布可知,磁感线全部垂直穿过磁流变液,符合磁路设计要求。

4.2 磁路磁阻

磁路是在安培环路定理和磁路欧姆定律的理论基础上设计的,由安培环路定理可得出磁场的强度与励磁电流大小的关系;通过磁路欧姆定律可以验证磁通量与磁通势的关系。

已知安培环路定律为

$$\oint_L H \cdot dl = \sum I \quad (7)$$

磁路欧姆定律为

$$\Phi = BS = \mu HS = \mu \frac{NI}{L} S = \frac{NI}{L/\mu S} \quad (8)$$

式中: Φ 为磁通,单位为 Wb; B 为磁感应强度,单位为 T; μ 为磁导率,单位为 H/m; L 为磁路等效长度,单位为 m; S 为磁路横截面积,单位为 m^2 。

令磁阻 R_m 为

$$R_m = \frac{L}{\mu S} \quad (9)$$

磁场强度 B 为

$$B = \frac{NI}{\pi(R_2^2 - R_1^2)R_m} \quad (10)$$

本文设计的磁流变液驱动器的励磁线圈通电后产生的磁路如图 3 中虚线所示的区域,分别经过左侧外壳、磁流变液、主动摩擦片、从动摩擦片、右侧外壳和外壳上端形成闭合回路。由于所选导磁材料的磁导率远远大于空气的磁导率,因此空气处的漏磁通非常小,在计算时不予考虑。

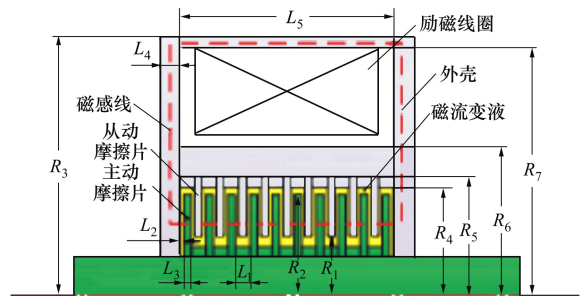


图 3 磁流变液驱动器磁路分布及磁阻计算简图

图中,主、从动隔环的厚度为 L_1 ,磁流变液间隙的厚度为 L_2 ,主、从动摩擦片的厚度为 L_3 ,壳体厚度为 L_4 ,最外层线圈外壳的厚度为 L_5 ;磁流变液的工作最小半径为 R_1 ,最大半径为 R_2 ,壳体外半径为 R_3 ,从动隔环的内半径为 R_4 ,从动摩擦片外半径为 R_5 ,大隔圈外半径为 R_6 ,壳体内半径为 R_7 ,从动摩擦片内半径为 R_8 。

将所给的结构参数分别代入磁阻计算公式中,

磁流变液的磁阻 R_{m1} 为

$$R_{m1} = \frac{L_2}{\pi(R_2^2 - R_1^2)\mu_1} \quad (11)$$

主动摩擦片的磁阻 R_{m2} 为

$$R_{m2} = \frac{L_3}{\pi(R_2^2 - R_1^2)\mu_2} \quad (12)$$

从动摩擦片的磁阻 R_{m3} 为

$$R_{m3} = \frac{L_3}{\pi(R_4^2 - R_8^2)\mu_2} \quad (13)$$

左右壳体的磁阻 R_{m4} 为

$$R_{m4} = \int_{R_1}^{R_3} \frac{dr}{2\pi r \mu_2 L_4} = \frac{\ln R_3 - \ln R_1}{2\pi \mu_2 L_4} \quad (14)$$

最外层线圈外壳的磁阻 R_{m5} 为

$$R_{m5} = \frac{L_5}{\pi(R_3^2 - R_7^2)\mu_2} \quad (15)$$

磁路的总磁阻 R_m 为

$$R_m = R_{m1} \times 20 + R_{m2} \times 10 + R_{m3} \times 9 + R_{m4} \times 2 + R_{m5} \quad (16)$$

式中: μ_1 为磁流变液的磁导率,值不定; μ_2 为所选的导磁材料——电工纯铁 DT4 的磁导率。 μ_1 远比 μ_2 小很多,查找资料可得 $\mu_2 \geq 0.0075 \text{ H/m}$ 。

5 磁流变液驱动器的性能仿真分析

5.1 MR 驱动器仿真

为得到不同励磁电流下柔性驱动器输出的最大扭矩值,分析变刚度效果,本文采用 Matlab/Simulink 对柔性驱动器进行建模与仿真。磁流变液选用 LORD 公司生产的 MRF-132DG,其本构关系经过 Matlab 拟合可得

$$\tau_0(B) = -79.44B^3 + 109.8B^2 + 17.77B \quad (17)$$

建立如图 4 所示的仿真模型。假设电机的角速度恒定,该模型以励磁电流 I 为输入,驱动力矩 T 为输出。其中(6)式的 $\Delta\omega$ 以柔性驱动器输入与输出为 1 r/s 的相对转动速度为准,故 $\Delta\omega = 2\pi$ 。 η 为磁流变液黏度,其剪切应力与剪应变率近似线性,所以取 η 为定值,计算可得 $\eta = 0.112 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

励磁电流与驱动力矩仿真结果如图 5 所示,输出力矩随着电流的增大而增大,并且呈非线性关系,具有变刚度能力。当电流为 1,2,3 A 时,输出力矩分别为 4.582,8.283,10.81 $\text{N}\cdot\text{m}$ 。驱动器的动态输出范围是衡量变刚度效果的方式之一,为总驱动力

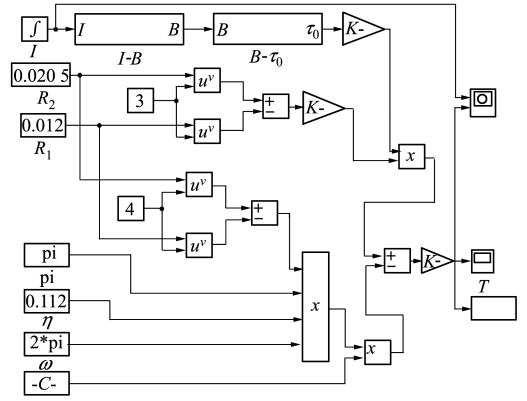


图 4 驱动器性能测试仿真模型

矩与不可控驱动力矩之比 $K = (T_0 + T_\gamma) : T_\gamma$ 。可以算出当电流达到 3 A 时,输出刚度范围为 0.004 594 ~ 10.91 $\text{N}\cdot\text{m}$,几乎是从 0 到最大输出力矩,输出带宽很大,能量损耗非常小。驱动力矩调控也非常简单,调节电流即可改变动态输出范围,控制更为方便,容易应对冲击力。

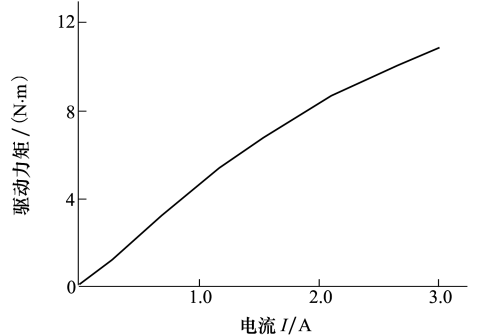


图 5 励磁电流-驱动力矩仿真结果

5.2 结构参数对驱动器性能影响分析

为研究驱动器工作间隙与工作区域半径这两项参数对驱动力矩的影响,首先改变磁流变液工作间隙,并进行仿真分析。取电流值为 3,2,1 A,工作间隙 0~3 mm,分析工作间隙的改变对磁流变液驱动器输出力矩的影响,如图 6 所示。不同电流下,随工作间隙增大,驱动力矩都减小,但是电流越大,

驱动力矩减小的趋势越小;当工作间隙在 0~0.75 mm 之间时,驱动力矩急剧减小;当工作间隙大于 0.75 mm 之后,驱动力矩减小的趋势慢慢变缓。当工作间隙大于 2.5 mm 后,驱动力矩改变非常微小。考虑到加工成本与装配的问题以及工作间隙过

小会导致磁流变液寿命降低的问题,本文在设计时选取工作间隙的值为 0.75 mm。

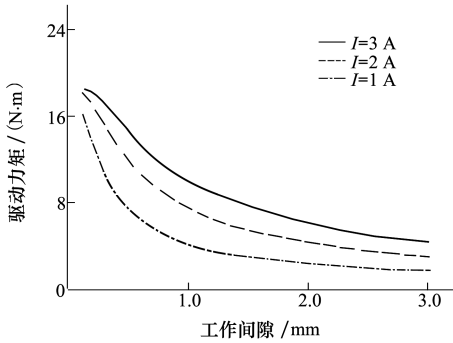


图 6 工作间隙-驱动力矩仿真结果

另外,以工作区域半径改变为输入对驱动器进行分析。驱动器工作区域半径初始值为 $R_2 = 20.5\text{ mm}$, $R_1 = 12\text{ mm}$ 。分别取 $R_2 = 25.5\text{ mm}$, $R_1 = 12\text{ mm}$ 和 $R_2 = 20.5\text{ mm}$, $R_1 = 5\text{ mm}$, 仿真结果如图 7 所示。增加 R_2 的值或者减小 R_1 的值都能使驱动力矩变大,但是由于增加工作区域的外半径 R_2 时,工作区域面积增加的更为明显。因此改变 R_2 的值对驱动力矩的性能影响更大。

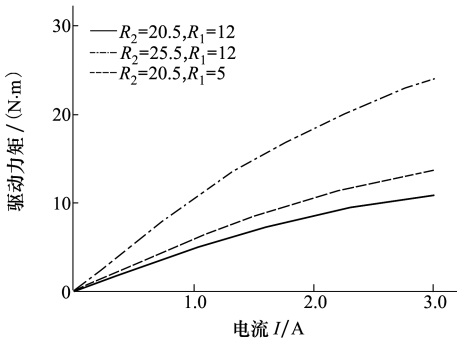


图 7 工作区域半径-驱动力矩仿真结果

6 样机与实验研究

为验证本文所设计的驱动器的性能和变刚度的有效性,需要对制作好的样机进行测试,搭建如图 8 所示的实验平台。由于实验需要测试柔性驱动器不同励磁电流下的最大输出扭矩,所以需要扭矩测量工具。本文使用 DG2-030AR 数字扭矩扳手作为柔性驱动器输出扭矩的测试工具。励磁线圈采用直流稳压电源供电,虽然稳压电源自带电流显示,但是其

精度较低,所以采用串联万用表的方式检测励磁线圈电流。

输出扭矩测试主要测试不同励磁电流下,柔性驱动器的输出能力。受实验条件影响,本文只测试了励磁电流以步长为 0.1 A 从 0.3~2.6 A 的情况下,柔性驱动器所对应的最大输出力矩。为了得到更为准确可靠的实验数据,在每个励磁电流的情况下,进行多次测量,最后计算平均值作为当前励磁电流柔性驱动器的最大输出扭矩。



a) 原理样机 b) 控制系统

图 8 实验测试平台

最大输出扭矩测量方法为:不断增加测试负载,读取输入端与输出端发生相对转动时的扭矩值即为最大输出扭矩。

将测试结果利用 Matlab 按照 3 次多项式拟合所测试的数据,然后绘制拟合曲线。与此同时,为了便于测试数据与仿真结果之间的对比,绘制了磁流变柔性驱动器励磁电流与输出扭矩之间的仿真与测试对比图,如图 9 所示。

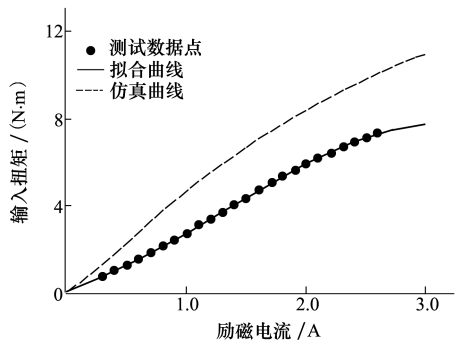


图 9 仿真与测试对比

测试数据拟合出来的曲线存在一个很小的扭矩值,并且拟合曲线与仿真结果之间存在一定的差距。分析造成上述问题的可能原因如下:

- 1) 数据测量时存在误差。由于使用力矩扳手

测量,在测量过程中无法保持绝对的匀速运动,施加力的方向有可能存在偏差。因此,这些操作都有可能导致数据测量存在波动。

2) 拟合曲线并不严格通过原点,分析是由于柔性驱动器存在初始阻力。因为磁流变液是存在零场黏度的,即使励磁电流为零,磁流变液依旧会产生阻力。加工与装配的误差也会导致初始阻力的产生。相对转动的零件之间存在摩擦,尤其是动密封处。

3) 柔性驱动器在加工与装配过程中存在一定的误差,导致磁流变液工作空间的间隙发生变化,磁流变液所受到的外加磁场不能达到仿真的效果。另外可能是磁流变液在封装的过程中未能保证磁流变液均匀分布在工作空间,以及柔性驱动器长时间未使用,导致内部磁流变液发生沉降。

随着励磁电流的增加,本文所设计的磁流变柔性驱动器的输出能力也不断增加。由图 10 可知,当励磁电流为 3 A 时,柔性驱动器所能够输出的扭矩趋近于 $8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。由此可见,本文所设计的基于磁流变液的柔性驱动器完全具备变刚度效果,而根据柔性驱动器的结构尺寸来看, $8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的输出能力能够表明变刚度效果良好。

参考文献:

- [1] 赵京,张自强,郑强,等. 机器人安全性研究现状及发展趋势[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(7): 1347-1358
ZHAO Jing, ZHANG Ziqiang, ZHENG Qiang, et al. Research Status and Development Trend of Robot Safety[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(7): 1347-1358 (in Chinese)
- [2] WILSON A. Design and Development of a Magneto-Rheological Linear Clutch for Force Controlled Human Safe Robots[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2017
- [3] FURNÉMONT R, MATHIJSSSEN G, VAN DER HOEVEN T, et al. Torsion MACCEPA: a Novel Compact Compliant Actuator Designed Around the Drive Axis[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015: 232-237
- [4] JAFARI A, TSAGARAKIS N, CALDWELL D. Energy Efficient Actuators with Adjustable Stiffness: a Review on AWAS, AWAS-II and Compact VSA Changing Stiffness Based on Lever Mechanism[J]. Industrial Robot, 2015, 42(3): 242-251
- [5] MATHIJSSSEN G, LEFEBER D, VANDERBORGHT B. Variable Recruitment of Parallel Elastic Elements: Series-Parallel Elastic Actuators(SPEA) with Dephased Mutilated Gears[J]. IEEE/ASME Trans on Mechatronics, 2015, 20(2): 594-602
- [6] SUN J T, ZHANG Y, ZHANG C, et al. Mechanical Design of a Compact Serial Variable Stiffness Actuator(SVSA) Based on Lever Mechanism[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2017
- [7] KUMBHAR B K, PATIL S R, SAWANT S M. Synthesis and Characterization of Magneto-Rheological(MR) Fluids for MR Brake Application[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2015, 18(3): 432-438
- [8] KONG X, LI B, QUAN L, et al. Study on Dynamic Bingham-Polynomial Model of a MRF Damper[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(14): 179-186

7 结 论

1) 针对现有机器人关节存在的一些问题,利用磁流变液在变化磁场下的磁流变效应,设计了一种刚度可变可控的柔性关节。

2) 建立了磁流变液柔性驱动器的动力学模型,并采用 Maxwell 进行了柔顺关节的磁路仿真,验证表明磁路设计的合理性。

3) 通过 Simulink 和 Maxwell 对柔性关节进行了数学模型和电磁学模型的联合仿真,重点分析了磁流变液工作区域和间隙参数对驱动器性能的影响,在仿真结果的基础上得出了柔性关节结构的最优参数,并在最后搭建使用平台验证了柔性驱动器的性能。

结果表明,所设计的磁流变液柔顺关节通过磁流变液的流变效应解决了机器人关节的柔顺控制问题,实现了关节刚度的主动控制,柔性关节采用旋转驱动的方式,符合当下机器人关节常用的关节传动形式,并且能够吸收振动或者冲击带来的能量,在机器人人机交互领域拥有广阔的应用前景。

Design and Analysis of Variable Flexible Actuator for Human-Robot Interaction

WANG Wendong, SUN Tongsen, YUAN Xiaoqing, LI Jinzhe, MING Xing

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In view of the shortcomings of the traditional high-rigidity robots that can't ensure safety of human-robot interaction and the adaptability of complex environment, a variable stiffness flexible actuator is proposed for the robot joint based on the magnetorheological (MR) effect of MR Fluids. In this paper, the principle of flexible joint drive is detailed, and design the structure of the drive and perform mechanical analysis is designed. At the same time, the magnetic field analysis of the actuator is carried out by using the magnetic field simulation software Maxwell. Finally, the actuator is simulated and verified. Comparing the analysis of the results, the actuator has the characteristics of simple structure, easy control and wider active variable stiffness adjustment range, and can absorb the vibration or shock energy, and improve the robot joint output ability.

Keywords: robot joint; flexible actuator; MR fluids; variable stiffness