

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007180

基于磁流变原理的变刚度驱动方法研究*

李军强, 朱文正, 姜 与, 李铁军
(河北工业大学机械工程学院 天津 300401)

摘要:针对机器人关节变刚度驱动的功能需求,提出了一种基于磁流变原理的变刚度驱动方法,该方法利用旋转式磁流变阻尼器力矩可控且响应速度快的特点,结合伺服电机与旋转式磁流变阻尼器,构成变刚度驱动器。基于变刚度驱动器构型,分析了变刚度驱动原理。完成了用于变刚度驱动器的旋转式磁流变阻尼器的设计,获取了阻尼器的力矩值与磁动势值。基于变刚度驱动器构型和阻尼器力学特性,设计了变刚度控制流程,开发了控制程序。在此基础上,研制了旋转式磁流变阻尼器及其力学性能测试系统,获取了阻尼器的实际力学性能参数,阻尼最大力矩为 $18.1\text{ N}\cdot\text{m}$;建立了变刚度驱动器试验系统,完成了试验研究,分别设定刚度系数为 $5.0\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, $6.0\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, $7.0\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 时获得的实际刚度系数分别为 $5.1\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, $6.2\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, $7.1\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 。试验结果表明,所提出的方法可以较好的实现驱动器的刚度调节。

关键词: 机器人;变刚度驱动器;旋转式磁流变阻尼器;变刚度控制

中图分类号: TH139 TP242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.55 510.80

Research on variable stiffness drive method based on magnetorheological principle

Li Junqiang, Zhu Wenzheng, Jiang Yu, Li Tiejun

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Aiming at the variable stiffness drive function requirement of robot joint, a variable stiffness drive method based on magnetorheological principle is proposed. The method utilizes the characteristics that the rotary magnetorheological damper torque is controllable and the response speed is fast, and the rotary magnetorheological damper and servo motor are combined to form a variable stiffness driver. Based on the configuration of the variable stiffness driver, the principle of variable stiffness drive was analysed. The design of the rotary magnetorheological damper used for variable stiffness driver was completed, the torque value and the magnetomotive force value of the damper were obtained. Based on the configuration of the variable stiffness driver and the mechanical characteristics of the damper, the variable stiffness control process was designed and the control program was developed. On this basis, the test system of rotary magnetorheological damper and its mechanical performance was developed, the actual mechanical performance parameters of the damper were obtained, the maximum torque of damper was $18.1\text{ N}\cdot\text{m}$. The variable stiffness driver test system was established and the experiment research was completed, when the stiffness coefficient was set as $5.0\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, $6.0\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, $7.0\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ respectively, the actual stiffness coefficient obtained was $5.1\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, $6.2\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, $7.1\text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ corresponding. The experiment results show that the proposed method can realize the stiffness adjustment of the driver nicely.

Keywords: robot; variable stiffness driver; rotary magnetorheological damper; variable stiffness control

0 引 言

机器人技术的发展极大的拓宽了机器人的应用范

围。传统的机器人关节多采用刚性驱动器,关节驱动器在接收到控制器发出的运动指令后按照指令运动。而步行机器人、弹跳机器人、外骨骼机器人等,在其足部与外界接触时会对机器人关节产生冲击,对机器人本体和控

收稿日期:2020-11-29 Received Date: 2020-11-29

* 基金项目:国家自然科学基金(U1813222)、河北省自然科学基金(E2018202316)项目资助

制系统带来不利影响^[1]。相比刚性驱动器,变刚度驱动器不但可以提高机器人关节的柔顺性,从而缓冲机器人关节所受到的冲击,而且设置不同的刚度系数,能够增强机器人的环境适应能力^[2-3]。目前,有多种方式可实现机器人关节变刚度驱动,如:应用人工肌肉或形状记忆合金等作为驱动元件^[4-5],应用基于交互力信息的阻抗控制方法实现刚性关节变刚度控制^[6],采用变刚度部件的机械式变刚度驱动方法等^[7-11],以上3种方式各有优点,同时具有一定局限性。第一种方式存在出力较小,响应速度慢等问题。第二种方式由于传感器精度,稳定性和控制系统带宽的限制,没有得到广泛应用^[3]。第3种方式通常需要额外增加执行元件驱动调整机构运动,以改变变刚度驱动器中弹性部件的有效作用长度,实现变刚度。

随着材料科学的发展,许多先进功能材料在机器人领域得到应用,如磁流变液等。磁流变液具有磁敏流变特性,无外加磁场时,呈现牛顿流体特性,有外加磁场时,可由自由流动状态迅速转变为类固态,外加磁场消失时,磁流变液又恢复为自由流动状态,转化过程可在毫秒量级内完成。旋转式磁流变阻尼器以磁流变液为工作介质,因此具有力矩可控,响应迅速等优点,适合应用于机器人系统。

TOMORI 等^[12]研制了单盘片式旋转式磁流变阻尼器,阻尼器作为机器人关节离合器使用,实现了瞬时力与运动位置控制。王文东等^[13-14],蔡世波等^[15]等研制了多盘片结构的旋转式磁流变阻尼器,用以实现机器人关节的柔性驱动。ZHANG 等^[16]研制了单盘片式旋转式磁流变阻尼器用于蛇形机器人,其电机输出轴与阻尼器转子相连,在机器人关节被动运动时,控制阻尼器力矩,实现关节的刚度调节。

本文提出一种基于磁流变原理的机器人关节变刚度驱动方法。分析了变刚度驱动原理,研制了转子截面具有T形结构旋转式磁流变阻尼器,由伺服电机、减速器以及旋转式磁流变阻尼器构成变刚度驱动器,通过阻尼器和伺服电机的协调工作,实现驱动器的刚度调节。所提出的变刚度驱动方法,不使用弹性部件,仅改变驱动器控制程序中的刚度参数值即可实现刚度的调节,并且磁流变阻尼器响应迅速,因此具有调节速度快、无振动、结构简单等优点。

1 变刚度驱动原理

1.1 磁流变液

磁流变液属可控流体,通过施加外加磁场可以快速的改变磁流变液的流动状态,响应时间小于 10 ms,工程应用中,常用 Bingham 模型来描述磁场作用下磁流变液的流变特性^[17],如式(1)所示。

$$\begin{cases} \tau = \tau_y(\mathbf{H}) \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}) + \mu \dot{\gamma}, & \tau > \tau_y \\ \dot{\gamma} = 0, & \tau \leq \tau_y \end{cases} \quad (1)$$

式中: τ 是剪切应力; \mathbf{H} 是外加磁场强度; τ_y 是磁流变液的屈服应力; μ 是磁流变液粘性系数; $\dot{\gamma}$ 是磁流变液的切应变率。

工程应用中,磁流变液有多种工作模式,而旋转式磁流变阻尼器中的磁流变液常以剪切模式工作^[18],如图1所示。

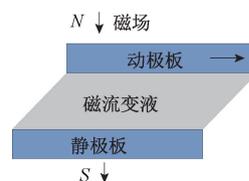


图1 剪切工作模型

Fig. 1 Shearing work model

由 Bingham 模型可知,剪切工作模式下,剪切应力与屈服应力的大小关系,决定了动基板与静极板的相对运动状态。剪切应力小于屈服应力时,动极板和静极板相对静止。剪切应力大于屈服应力时,动极板和静极板产生相对运动。因此,当阻尼器内磁流变液受的剪切应力小于其屈服应力时,阻尼器的转子与外壳不产生相对位移;当剪切应力大于其屈服应力时,阻尼器的转子与外壳产生相对位移,其力矩可由屈服应力和切应变率以及阻尼器的结构参数确定。磁流变液的屈服应力与磁场强度具有函数关系,因此控制励磁电流的大小可以改变阻尼器的力矩。

1.2 变刚度驱动器

根据旋转式磁流变阻尼器的力矩特性,提出了一种机器人关节变刚度驱动方法,该方法结合使用伺服电机与旋转式磁流变阻尼器构成变刚度驱动器,如图2所示。

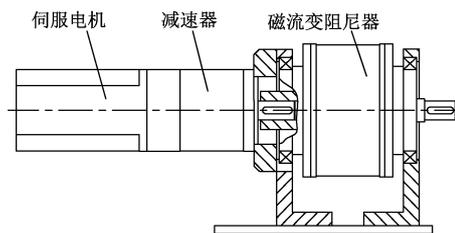


图2 变刚度驱动器

Fig. 2 Variable stiffness driver

伺服电机与减速器相连,减速器外壳与支架固定连接,输出端与旋转式磁流变阻尼器的外壳固定连接,阻尼器外壳两端通过轴承与支撑阻尼器的支架连接,阻尼器的输出轴驱动机器人关节旋转轴。

所提出的变刚度方法由伺服电机和旋转式磁流变阻尼器协调工作实现变刚度,变刚度驱动器的原理如图3所示。

图3中, S_i 为阻尼器内工作区域面积, R_i 为工作区域

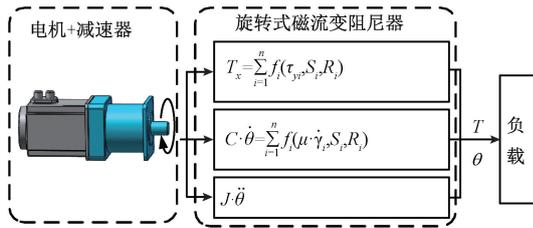


图 3 变刚度驱动原理

Fig. 3 Variable stiffness drive principle

对应的工作半径。

阻尼器输出轴作用于负载的力矩 T 可表示为:

$$T = T_x + C \cdot \dot{\theta} + J \cdot \ddot{\theta} \quad (2)$$

当关节转速较低时,转子转动惯量和磁流变液粘性产生的力矩较小,可忽略,这时阻尼器输出轴力矩可表示为:

$$T = T_x = \sum_{i=1}^n f_i(\tau_{yi}, S_i, R_i) \quad (3)$$

阻尼器内磁流变液的屈服应力为其磁场强度的函数,而阻尼器结构参数确定时,磁场强度是励磁电流的函数,如式(4)所示。

$$\begin{cases} \tau_y = f_r(\mathbf{H}) \\ \mathbf{H} = f_H(I) \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得阻尼器输出轴作用于负载的力矩为励磁电流的函数:

$$T = f_r(I) \quad (5)$$

工作中,实时检测阻尼器输出轴的角位移值,并根据角位移值实时调整励磁电流值,使得阻尼器力矩值与其转子角位移值成比例关系:

$$T = k \cdot \theta \quad (6)$$

则驱动器刚度可表示为:

$$k = \frac{T}{\theta} \quad (7)$$

这样,工作中可以为关节设置不同的刚度系数(k),实现变刚度驱动。

当变刚度驱动器被动转动时(模拟驱动器内弹性元件压缩过程),控制系统根据关节的转动角位移,输出相应大小的励磁电流,使阻尼器输出相应的阻力矩;当变刚度驱动器主动转动时(模拟驱动器内弹性元件回弹过程),阻尼器输出最大力矩,其作用相当于离合器处于闭合状态,这时机器人关节为刚性关节,伺服电机可使关节转轴无振动的运行至设定位置。

2 旋转式磁流变阻尼器

2.1 阻尼器设计

变刚度驱动器中阻尼器的最大力矩根据负载确定,并于减速器的最大力矩相匹配,本文中,阻尼器的最大力

矩值设定为 $15 \text{ N}\cdot\text{m}$,由于受到零件加工精度、装配精度、励磁绕组的制作与安装、磁流变液填充情况等因素的影响,磁流变阻尼器力矩的实际值通常小于理论计算值,因此设计磁流变阻尼器时,其理论力矩值设定为 $20 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

磁流变阻尼器的力矩取决于阻尼器定子与转子间工作面积、工作区域磁流变液的屈服应力及工作半径等多个因素。设计了一种具有 T 型截面的阻尼器转子,阻尼器构型如图 4 所示,此种结构不但增加了磁流变阻尼器工作面积,而且各工作面都具有较大的工作半径,整体结构紧凑。

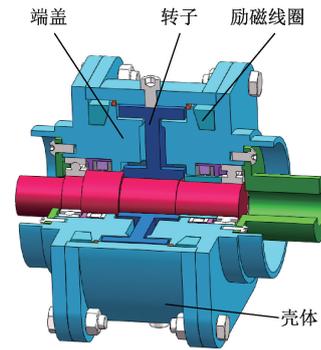


图 4 阻尼器构型

Fig. 4 Damper configuration

所设计的旋转式磁流变阻尼器,由以下几个主要部分组成:转子、磁流变液、励磁绕组以及外壳等。其中外壳由前后两个端盖和壳体组成,磁流变液填充于外壳与转子之间,励磁绕组设置于两个端盖内,当施加励磁电流时,阻尼器内的磁力线通过外壳、转子工作区域和磁流变液,形成一个闭合回路。改变励磁绕组电流的大小,可以控制磁流变液的屈服应力,从而改变阻尼器的力矩。

基于转子的构型,所设计的磁流变阻尼器具有 4 个工作区域,如图 5 所示。其中,(a)处称为工作区域 1,(b)处称为工作区域 2,(c)处称为工作区域 3,(d)处称为工作区域 4。

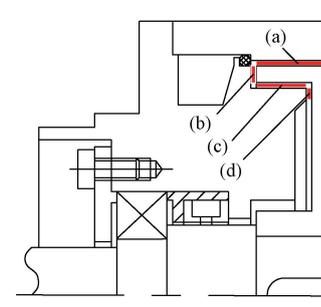


图 5 工作区域

Fig. 5 Working area

工作区域中的磁流变液,只有在屈服后才会产生流

动,在屈服之前磁流变液将保持凝固状态,且磁流变液为剪切工作模式,因此,阻尼器工作区域1、2、3、4处的力矩 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 及阻尼器理论计算力矩 T' 可应用式(8)计算。

$$\begin{cases} T_1 = \tau_1 \cdot S_1 \cdot R_1 \\ T_2 = \int_{r_1}^{r_2} \tau_2 \cdot 2\pi r^2 \cdot dr \\ T_3 = \tau_3 \cdot S_3 \cdot R_3 \\ T_4 = \int_{r_3}^{r_4} \tau_4 \cdot 2\pi r^2 \cdot dr \\ T' = 2 \cdot (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) \end{cases} \quad (8)$$

式中: τ_1 、 S_1 、 R_1 分别为工作区域1处的磁流变液屈服应力、工作面积、工作半径; τ_2 、 r_1 、 r_2 分别为工作区域2处的磁流变液屈服应力、圆环面内半径、圆环面外半径; τ_3 、 S_3 、 R_3 分别为工作区域3处的磁流变液屈服应力、工作面积、工作半径; τ_4 、 r_3 、 r_4 分别为工作区域4处的磁流变液屈服应力、圆环面内半径、圆环面外半径。

阻尼器屈服力矩与其多个结构参数有关,计算时,应用MATLAB建立计算模型,并考虑阻尼器轴向与径向尺寸,选取不同参数进行计算,获得能够满足初始设定理论力矩值的结构参数,然后应用式(9)计算阻尼器磁路磁动势值。

$$F = IN = \sum_{i=1}^6 H_i L_i \quad (9)$$

式中: N 是励磁绕组匝数; I 是励磁绕组的电流值; L 是阻尼器内部磁路的长度。

计算得: $F = 256 \text{ A} \cdot \text{N}$,依据线径与可承载电流的关系,考虑阻尼器内部励磁绕组的预留空间, $N = 64 \text{ N}$, $I = 4.0 \text{ A}$ 。

2.2 阻尼器电路响应时间

阻尼器中有两个励磁绕组,可视为两个电感,同时串联有一个功率电阻,其电路图如图6所示。

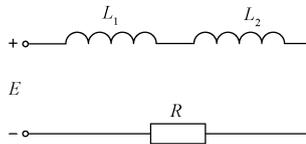


图6 阻尼器电路图

Fig. 6 Damper circuit diagram

阻尼器中的两个绕组为串联方式,每个电感的值可由式(10)计算。

$$L = \frac{k' \mu N^2 S}{l} \quad (10)$$

式中: l 为绕组长度; N 为绕组匝数; S 为绕组截面积; μ 为磁芯磁导率; k' 为长冈系数。解得:

$$L = 1.92 \times 10^{-5} \text{ H}$$

当通过绕组的直流电流变化时,绕组的自感作用会产生自感电动势,因此,当作用于电感的电压变化时,电路中的电流不会随着电压的变化而瞬时改变。电压改变时,电压变化值与电流变化时间可用式(11)获得。

$$E = 2L \times \frac{dI}{dt} + IR \quad (11)$$

由式(11)可得电压变化与电流变化值的对应关系为:

$$I_L = \frac{E}{R} (1 - e^{-\frac{t}{2LR}}) \quad (12)$$

当励磁电压 E 的变化量为 ΔE 时,由于电压变化而引起的电流变化为 ΔI ,且 $\Delta I(\infty) = E/R$,定义 $\Delta I = \Delta I(\infty) \times 98\%$ 时的时间 t_s 为调整时间。解得:

$$t_s = 5.78 \times 10^{-5} \text{ s}$$

由以上分析可知,所设计的阻尼器电路响应时间较短,阻尼器控制电压变化时,励磁绕组中的电流可迅速响应。励磁电流的变化使得阻尼器内的磁场随之改变,进而改变工作区域内磁流变液的屈服应力。

3 变刚度控制方法

基于阻尼器的力学特性与变刚度驱动器构型,研究了变刚度控制方法,控制效果是模拟驱动器内安装有扭转弹簧,以减小被驱动关节运动过程中产生的冲击。变刚度控制系统结构如图7所示。

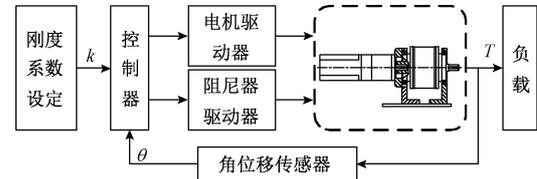


图7 变刚度控制系统结构

Fig. 7 Structure of the variable stiffness control system

采用工控机作为控制器,控制器通过运动控制卡发送运动控制指令至电机驱动器,电机驱动器驱动伺服电机运动。控制器通过数据采集卡采集角位移传感器的输出信息。采用有刷直流电机驱动器作为阻尼器驱动器,控制器发送控制指令至阻尼器驱动器,实现阻尼器力矩控制。

工作中,控制系统首先判断阻尼器的运动状态,当需要被动运动时,控制系统实时获取编码器信息和扭矩传感器信息,并根据关节角度控制阻尼器的输出力矩,模拟扭转弹簧压缩过程。阻尼器力矩(T)与编码器获取的角度值(θ)之间的关系如式(6)所示。设置不同的 k 值可以模拟具有不同刚度系数的扭簧的压缩过程。

阻尼器的控制电流与其力矩具有确定的对应关系,可表述为:

$$I = f(T) \quad (13)$$

式(13)中 I 和 T 的关系,在完成阻尼器力学性能测试后,通过数值拟合的方法获得。

当需要主动运动时,阻尼器输出最大力矩,然后由伺服电机带动负载按设置的参数运行至设定位置。

根据变刚度驱动器试验系统构型(图10),设计了变刚度控制流程。变刚度控制流程主要包括如下几个部分:负载开始下落、力矩与运动状态检测、变刚度驱动器控制、下落结束、运行至初始设定位置等。具体过程为:试验开始后,控制系统采集扭矩传感器信息和编码器信息,然后依据编码器信息计算角位移值(θ)和角速度值(ω)。然后,应用角位移值和角速度值判断试验系统是处于下落状态还是处于最低位置状态。如果处于下落状态,则控制系统依据式(6)计算阻尼器力矩值,依据式(13)计算对应电流值,然后控制系统输出控制量控制阻尼器力矩;如果处于最低位置状态,则控制系统输出控制量,使阻尼器提供最大力矩(相当于离合器处于闭合状态),并暂停 300 ms,然后控制伺服电机转动,带动试验系统运行至初始设定位置。伺服电机控制时,采用位置控制模式,应用 LabVIEW 开发检测与控制程序。

4 试验研究

4.1 阻尼器力学性能测试

应用理论计算的方法,获得了所设计的磁流变阻尼器的结构参数与磁动势值,在此基础上,研制了阻尼器及其力学性能测试系统,如图8所示。

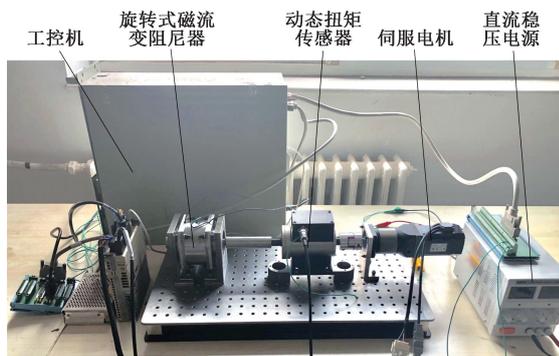


图8 阻尼器力学性能测试系统
Fig. 8 Damper mechanical performance test system

测试阻尼器力学性能时,将阻尼器外壳与测试系统底板固连,动态扭矩传感器的一端通过联轴器与阻尼器的输出轴相连,另一端通过联轴器与减速器的输出轴相连。应用直流稳压电源为阻尼器提供稳定且大小可调的电流。以工控机作为控制器,实现伺服电机的运动控制与动态扭矩传感器输出信息的采集,应用 LabVIEW 开发

了数据采集程序。

测试中,调节直流稳压电源,为阻尼器施加不同大小的励磁电流,测试结果如表1所示。

表1 阻尼器力学性能参数

Table 1 Damper mechanical performance parameters	
参数	参数值
电流/A	0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0
力矩/N·m	0.4 3.1 5.8 8.8 11.7 13.9 16.0 17.3 18.1

根据测试数据,拟合所得阻尼器力矩和电流之间的关系如图9所示。

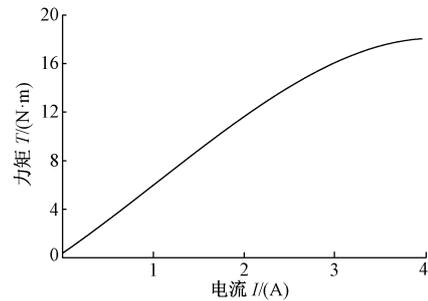


图9 力矩-电流关系

Fig. 9 Torque-current relationship

由图9可知,测试获得的阻尼器力矩随控制电流的增加而单调增大。控制电流为 4.0 A 时,阻尼器最大力矩为 18.1 N·m,大于阻尼器设计力矩 15 N·m,达到了要求。基于测试结果应用数值拟合的方法获得了阻尼器控制电流与力矩的关系表达式:

$$I = 0.0008 \cdot T^3 - 0.0167 \cdot T^2 + 0.2673 \cdot T - 0.1347 \quad (14)$$

实际应用中,电流值不应为负值。程序中设定:应用式(14)计算所得电流值 $I \leq 0$ 时,电流值取 $I = 0$ 。

4.2 变刚度驱动器性能试验

所设计的变刚度驱动器试验系统,如图10所示。变



图10 变刚度驱动器试验系统

Fig. 10 Variable stiffness driver test system

刚度驱动器通过链传动驱动上连杆与下连杆间的关节,链传动的传动比为2:1。小链轮与阻尼器轴固定连接,上连杆与阻尼器轴可相对转动,大链轮轴与上连杆能够相对转动,大链轮轴与扭矩传感器固定连接,扭矩传感器与下连杆固定连接。

工作时,下连杆与底座接触,变刚度驱动器及其连接装置由某一高度下落,产生作用于变刚度驱动器的力矩,同时控制系统控制变刚度驱动器工作,改变其输出轴的角位移变化过程,实现关节柔性控制与刚度调节。

试验系统简图如图11所示,上连杆(AB)和下连杆(BC)长度相等,编码器用以测量∠BAC的角位移值,扭矩传感器用以测量B点处的力矩 T_y 。

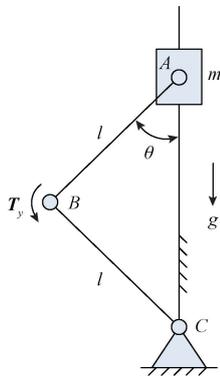


图11 试验系统简图

Fig. 11 Test system simplified diagram

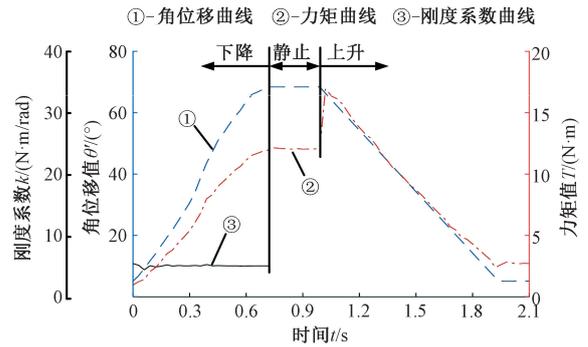
试验时,将变刚度驱动器提升至初始位置,然后开启控制程序,关节由初始位置开始下落,同时,控制系统检测关节的角位移值(θ),并计算角速度值,同时记录扭矩传感器输出值(T_y)。控制系统根据关节的运动状态实时调节阻尼器的力矩,实现关节刚度控制。

试验中,分别设置刚度系数为5.0 N·m/rad、6.0 N·m/rad和7.0 N·m/rad,应用式(6)、(14)获得阻尼器控制电流,获得试验数据后,应用式(15)计算实际刚度值。

$$\begin{cases} k = \frac{T}{\theta} \\ T = \frac{T_y}{2} \end{cases} \quad (15)$$

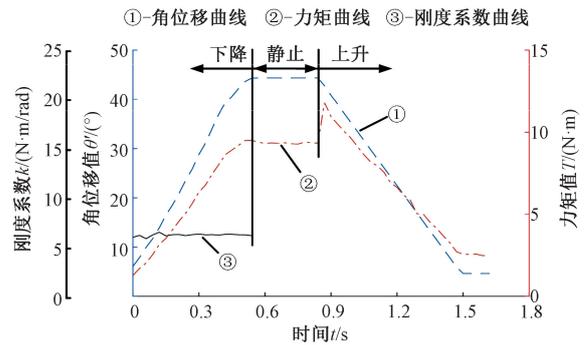
试验结果如图12所示。

图12中, θ' 为图11中∠BAC的角度值。由试验结果可知,设置不同的刚度系数时,下降过程中,角度值和力矩值随时间的变化均较为平缓,说明下降过程中缓冲效果较好;根据试验数据计算所得刚度系数曲线波动较小,实际刚度系数平均值分别为:5.1 N·m/rad,6.2 N·m/rad,



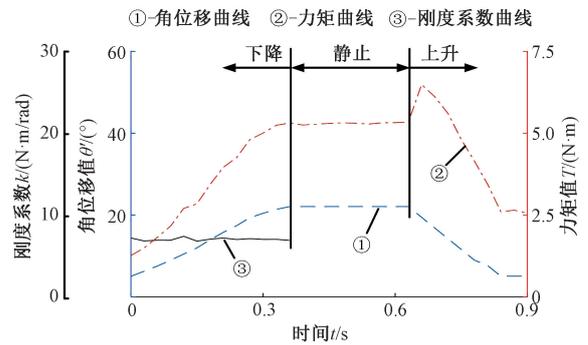
(a) $k=5.0 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 试验结果

(a) The test result for $k=5.0 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$



(b) $k=6.0 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 试验结果

(b) The test result for $k=6.0 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$



(c) $k=7.0 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 试验结果

(c) The test result for $k=7.0 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$

图12 变刚度驱动试验结果

Fig. 12 Variable stiffness drive test results

7.1 N·m/rad,与设定值差别较小。 k 值增大时,到达速度为0时的角度值变小,这一变化规律与使用机械扭簧一致。在关节复位过程中,关节能够按照设定的运动规律运行至设定位置。由角位移值变化曲线可知,下降过程中,角位移值单调增加,到最大值后无振动;静止过程中,角位移值无变化;上升过程中,角位移值单调减小,到设定位置后无振动。

所提出的方法,既能够设定不同的刚度系数模拟扭簧的储能过程,实现缓冲作用,又能够在复位过程中,实现刚性连接,使关节能够按照设定的参数运动至设定位置,无振动现象。

5 结 论

基于磁流变液的流变特性,提出了一种变刚度驱动方法,结合旋转式磁流变阻尼器和伺服电机研制了变刚度驱动器,可以为变刚度驱动器设置不同的刚度系数,提高关节的柔顺性。完成了应用于变刚度驱动器的旋转式磁流变阻尼器的设计,获得了阻尼器的磁动势值。完成了阻尼器电路响应时间计算,计算结果显示,阻尼器中励磁电流可以快速响应控制电压的变化。完成了阻尼器的力学性能测试,结果显示,所研制的阻尼器的力学性能达到了设计预期。设计了变刚度控制流程,开发了控制程序。搭建了变刚度驱动器试验系统,完成了试验研究。试验结果表明,通过设定不同的刚度系数,能够改变驱动器的刚度,在关节下降时,能够模拟扭簧储能过程,起到缓冲作用;上升时,变刚度驱动器能够按照设定的参数运行至设定位置,这一过程中不产生振动。所提出的变刚度驱动方法,既可使被驱动关节具有柔性,又可实现关节的刚性驱动而不产生振动,且控制方法简单。

参考文献

- [1] 李哲,高君.单足机器人垂直跳跃落地碰撞冲击力分析[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(7):27-32.
LI ZH, GAO J. Analysis of landing impact force of the one-legged robot vertical hopping[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(7):27-32.
- [2] 付乐,武睿,赵杰.协作机器人安全规范:ISO/TS 15066的演变与启示[J].机器人,2017,39(4):532-540.
FU L, WU R, ZHAO J. The evolution and enlightenment of safety specification of cooperative robots: ISO/TS 15066[J]. Robot, 2017,39(4):532-540.
- [3] 毕树生,刘畅,周晓东,等.可调刚度致动器结构研究综述[J].机械工程学报,2018,54(13):34-46.
BI SH SH, LIU CH, ZHOU X D, et al. Variable stiffness actuators: A review of the structural research[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(13):34-46.
- [4] YAMAMOTO Y, MATSUNAGA N, OKAJIMA H. Robust variable stiffness control of McKibben type pneumatic artificial muscle arm by using multiple model error compensators [C]. 2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems, 2017: 957-962.
- [5] LIAO T CH, ZION T H T, REN H L. Variable stiffness actuators embedded with soft-bodied polycaprolactone and shape memory alloy wires [C]. 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2019:108-113.
- [6] LIU L, LEONHARDT S, NGO C, et al. Impedance-controlled variable stiffness actuator for lower limb robot applications [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 17(2):991-1004.
- [7] 房立金,张明,孙凤,等.绳索驱动式变刚度关节柔顺控制与力补偿方法研究[J].仪器仪表学报,2019,40(12):237-244.
FANG L J, ZHANG M, SUN F, et al. Study on compliant control and torque compensation method of wire-driven variable stiffness joint[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12):237-244.
- [8] ZHANG T, TRAN M, HUANG H. Design and experimental verification of hip exoskeleton with balance capacities for walking assistance [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(1):274-285.
- [9] 张明,房立金,孙凤,等.永磁变刚度柔性关节的力学分析与控制器设计[J].机械工程学报,2019,55(5):89-96.
ZHANG M, FANG L J, SUN F, et al. Mechanical analysis and controller design of the permanent magnetic variable stiffness flexible joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(5): 89-96.
- [10] PETIT F, FRIEDL W, HOPNER H, et al. Analysis and synthesis of the bidirectional antagonistic variable stiffness mechanism [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(2):684-695.
- [11] 李满宏,马艳悦,张明路,等.基于凸轮机构的变刚度仿生柔性关节设计与分析[J].仪器仪表学报,2019,40(2):213-222.
LI M H, MA Y Y, ZHANG M L, et al. Design and analysis of variable stiffness bionic flexible joint based on cam mechanism [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2):213-222.
- [12] TOMORI H, NAGAI S, MAJIMA T, et al. Variable impedance control with an artificial muscle manipulator using instantaneous force and MR brake[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems, 2013:5396-5403.
- [13] 王文东,孙铜森,袁小庆,等.面向人机交互的机器人变刚度柔性驱动器设计与分析[J].西北工业大学学报,2019,37(2):39-45.
WANG W D, SUN T S, YUAN X Q, et al. Design and analysis of variable flexible actuator for human-robot interaction [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(2):39-45.
- [14] WANG W D, LI H H, XIAO M H, et al. Design method and experiment of robot joint flexible drive based on magnetorheological fluid [C]. 2020 5th International

Conference on Automation, Control and Robotics Engineering, 2020:140-144.

- [15] 蔡世波, 韦威, WAN W W, 等. 基于磁流变液传动的柔顺关节研究:设计,仿真和实验(英文)[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1):200-210.
CAI SH B, WEI W, WAN W W, et al. Study on the compliant joint based on magnetorheological fluid transmission: Design, simulation and experiments (English)[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1):200-210.
- [16] ZHANG D, YUAN H, CAO Z C. Environmental adaptive control of a snake-like robot with variable stiffness actuators[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(3):745-751.
- [17] 黄苗玉, 王恩荣, 闵富红. 磁流变车辆悬架系统的混沌振动分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(24):128-134.
HUANG M Y, WANG EN R, MIN F H. Chaotic vibration analysis of vehicle suspension system with magneto-rheological damper[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(24): 128-134.
- [18] FITRIAN I, MAZLAN S A, HAIRI Z. A design and modelling review of rotary magnetorheological damper[J]. Materials and Design, 2013, 51: 575-591.

作者简介



李军强 (通信作者), 2002 年于河北工业大学获得学士学位, 2005 年于河北工业大学获得硕士学位, 2010 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为河北工业大学副教授, 主要研究方向为助行机器人技术, 人机协作技术。

E-mail: lijunqiang@hebut.edu.cn

Li Junqiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2002 and M. Sc. degree in 2005 both from Hebei University of Technology, received his Ph. D. degree in 2010 from Harbin Institute of Technology. Now, he is an associate professor in Hebei University of Technology. His main research interest includes walking assist robotics and human-robot collaboration technology.



朱文正, 2017 年于中原工学院获得学士学位, 现为河北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为变刚度驱动技术。

E-mail: 894043227@qq.com

Zhu Wenzheng received his B. Sc. degree in 2016 from Zhongyuan University of Technology. Now, he is a master candidate in Hebei University of Technology. His main research interest includes variable stiffness drive technology.