DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905471

用于坡路助行的主/被动力矩实现方法研究*

李军强,赵 蕾,秦成功,郭士杰
(河北工业大学机械工程学院 天津 300130)

摘 要:针对智能助行器坡路助行需求,提出了一种主/被动力矩实现方法。该方法利用磁流变制动器阻力矩可控的特点,结合磁流变制动器、蜗轮蜗杆减速器与直流电机,构成主/被动混合执行器。通过磁流变制动器与直流电机的协调工作,获得可控的主动力矩和被动力矩。设计了转子截面具有 T 形结构的磁流变制动器,应用有限元法对制动器内部的磁路进行分析,获取了制动器的力学性能参数。在此基础上,研制了主/被动混合执行器,并建立了其力学性能测试系统,完成了实验研究。实验结果表明,所提出的方法既能够提供可控的主动力矩,又能够提供可控的被动力矩。所研制的主/被动混合执行器,可以满足智能助行器坡路助行的功能要求。

关键词: 智能助行器;主/被动混合执行器;磁流变制动器;有限元分析
中图分类号: TP242 TH132 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.20

Study on the mothed of implementing active/passive torque for walking assistant on slopes

Li Junqiang, Zhao Lei, Qin Chenggong, Guo Shijie
(*School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China*)

Abstract: Aiming at the walking assistant demand of smart walker on slope, a method of implementing active/passive torque is proposed. The method utilizes the characteristic of controllable resistance torque of magnetorheological (MR) brake, combines the MR brake, worm gear reducer and DC motor to compose an active/passive hybrid actuator. Controllable active and passive torques are obtained through the coordination operation of the MR brake and DC motor. An MR brake with the rotor section of T-shape was designed, then finite element method was used to analyze the magnetic circuit inside the brake, and the mechanical performance parameters of the brake were obtained. On this basis, the active/passive hybrid actuator was developed, its mechanical performance test system was established and the experiment study was completed. The experiment results show that the proposed method can provide both controllable active torque and controllable passive torque, and the developed active/passive hybrid actuator can meet the functional requirements of walking assistant of the smart walker on slope.

Keywords: smart walker; active/passive hybrid actuator; MR brake; finite element analysis

0 引 言

近年来,人口老龄化问题日益显著,越来越多的老年人在日常生活中需要外界的辅助。安全独立的步行是提高老年人生活质量的重要因素[1-3]。自由独立的行走有利于老年人的身心健康,为了辅助老年人独立行走,研究人员研发了多种智能助行装置,如智能手杖、智能助行器以及外骨骼机器人等[4-8]。

根据执行元件类型,智能助行器可以分为两种,即主动式智能助行器和被动式智能助行器。主动式智能助行器应用伺服电机作为执行元件,需要人机接口感知人体的运动意图,并应用一定的控制策略实现助行功能。如 Sun 等[9]研制的全向助行器,应用伺服电机驱动 4 个全向轮,应用力传感器感知使用者前臂的压力信息,进而获得使用者的运动方向,应用渐近稳定控制器控制助行器

收稿日期:2019-08-13 Received Date:2019-08-13
*基金项目:国家重点研发计划(2016YFE0128700)、河北省自然科学基金(E2018202316)项目资助

按特定轨迹运动。Lee 等[10]研制的智能助行器则安装了 3 个全向轮,应用激光探测器信息实时估测使用者腿部和身体的位置,进而调整助行器跟随使用者运动。Ko 等[11]研制的助行器,应用力传感器感知使用者施加的力,应用倾角传感器测量倾斜角度,结合力信息和倾角信息,控制器控制伺服电机运动,为使用者提供辅助力。被动式智能助行器通常采用阻力矩可控的制动器作为执行元件,应用使用者提供的力来驱动助行器运动,助行器则提供导航、防摔倒等功能。如文献[12-13]研制的智能助行器,均采用了伺服制动器作为执行器元件,前者应用编码器信息计算助行器运行的距离和速度,后者则采用摄像机对人体的姿态进行检测。

日常生活环境中的小区、公园、菜市场、商场等处常修建有坡路,尽管坡路地段行程不长,但是对步行能力较弱的老年人来说,既费力又容易发生跌倒等危险。主动式智能助行器以伺服电机作为助行元件,可以提供上坡和下坡所需的辅助力,然而,这需要实时的信息处理与控制。被动式智能助行器不提供主动辅助力,因此,在下坡路助行时是安全的,但是由于采用了制动器作为执行元件,在上坡路行走时,无法提供辅助力。

针对以上问题,本文提出了一种应用于智能助行器的主动和被动力矩的实现方法,基于这一方法,研制了主/被动混合执行器,其包括磁流变制动器、导电滑环、蜗轮蜗杆减速器以及直流电动机等部件。通过制动器与直流电机的协调工作,使得智能助行器能够提供上坡和下坡所需的主动和被动辅助力。

1　主/被动混合执行器

主/被动混合执行器包括如下几个主要部件:磁流变制动器,蜗轮蜗杆减速器、导电滑环和直流电机等,如图 1 所示。

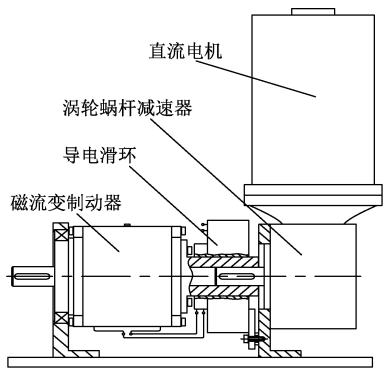


图 1　主/被动混合执行器结构

Fig.1　Structure of APHA

蜗轮蜗杆减速器的输入端与直流电机相连,输出端通过一个法兰与磁流变制动器的外壳相连,制动器轴与助行器驱动轮连接。磁流变制动器的屈服力矩与励磁电流有稳定的对应关系,并且转速对制动器力矩影响较小[14]。因此,当直流电机停止时,由于蜗轮蜗杆减速器的自锁功能,制动器外壳受到约束而相对静止,控制制动器的励磁电流,可在制动器轴上获得可控的被动力矩。当直流电机工作时,制动器外壳随减速器轴同向转动,使制动器外壳转速大于转子转速,控制制动器的励磁电流,则可在制动器轴上获得可控的主动力矩,主动力矩方向由直流电机旋转方向确定。

磁流变制动器的外壳转速由电机转速与涡轮蜗杆减速器的减速比决定,而制动器轴的转速由助行器运行速度(即人体步行速度)决定,为了获得可控的主动力矩,合理选择电机功率、减速比与驱动轮直径等参数,使得工作中制动器外壳转速大于转子转速。在制动器和蜗轮蜗杆减速器之间设置有导电滑环。导电滑环转子与法兰连接,定子固定于支架。制动器的导线与导电滑环转子连接,从而实现壳体的连续旋转供电。

本文方法,无论是主动力矩还是被动力矩,只需调整制动器励磁电流,即可改变主/被动力矩大小,实际应用中,无需感知人机交互力信息,实现简单,且经济性好。

智能助行器构型如图 2 所示。助行器的前轮由主/被动混合执行器通过链传动驱动,后部安装有两个脚轮。在上坡路行走时,直流电机与制动器协同工作,为使用者提供主动辅助力。在下坡路行走时,直流电机停止转动,由磁流变制动器提供被动辅助力。当在平坦的道路上行走时,不需要提供能量,此时智能助行器就像传统的助行器一样工作。

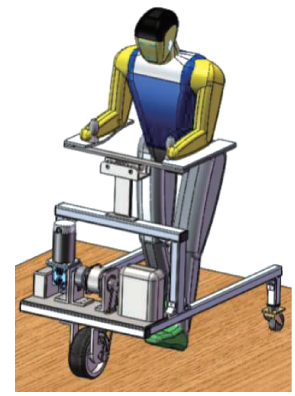
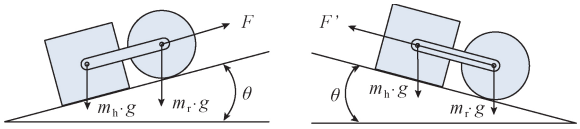


图 2　智能助行器构型

Fig.2　The structure of the smart walker

上坡和下坡辅助力大小,均由制动器阻力矩确定,因此磁流变制动器能够提供的最大阻力矩,应能满足智能助行器需求。不同的公共设施有不同的坡度,我国民用

建筑设计通则(GB 50352-2005)中规定了不同用途的坡路的坡度值,其中供轮椅使用的坡路坡度值较大,应小于1/8,即倾斜角度应小于 7.13°,因此,本文中坡路最大角度设定为 $\theta=8°$。上坡和下坡过程中受力分析如图 3 所示。



(a) 上坡
(a) Up slope

(b)下坡
(b) Down slope

图 3 坡路受力分析

Fig.3 Force analysis for a slope road

图 3 中,F 上坡时所需辅助力,F'为下坡时所需辅助力,m_h 为人体质量,m_r 为智能助行器质量。上坡和下坡所需辅助力分别为:

$$F=-(m_h+m_r)\cdot g\cdot\sin(\theta) \tag{1}$$

$$F'=-(m_h+m_r)\cdot g\cdot\sin(\theta) \tag{2}$$

由式(1)和(2)可知,上坡和下坡所需辅助力相同,因此可用式(3)获得磁流变制动器应提供的最大阻力矩。

$$T_a=\frac{F\cdot R_w}{i} \tag{3}$$

式中:T_a 为磁流变制动器应提供的最大阻力矩;R_w 为助行器驱动轮半径;i 为磁流变制动器与驱动轮间的减速比。

设计计算时,m_h 取为 85 kg,根据坡路角度值、助行器质量与结构参数,计算得磁流变制动器应提供的最大阻力矩为 26.1 N·m。磁流变制动器阻力矩的实际值通常小于理论值,因此设计时制动器的阻力矩值设定为 30.0 N·m。

2 磁流变制动器

2.1 磁流变液

磁流变制动器是一种受控制动器,它通过改变制动器内部磁流变液的屈服应力来产生阻力矩。通过施加磁场可以快速地(ms 级)改变磁流变液的表观黏度。实际应用中通常应用 Bingham 模型来描述磁流变液的屈服特性[15],如式(4)所示。

$$\begin{cases}\tau=\tau_y(H)\operatorname{sgn}(\dot\gamma)+\mu(H)\dot\gamma, & \tau>\tau_y\\ \dot\gamma=0, & \tau\leqslant\tau_y\end{cases} \tag{4}$$

式中:τ 为剪切应力;$\dot\gamma$ 为剪切速率;τ_y 为磁流变液屈服应力;μ 为磁流变流体的塑性黏度;H 为磁场强度。

不同类型的磁流变液具有不同的特性。本文使用的是 Lord 公司的 140CG 型磁流变液。

2.2 磁流变制动器构型

本文设计的磁流变制动器由 4 个主要部分组成:磁流变液、磁流变密封装置、转子和外壳,其中外壳由端盖和壳体构成。磁力线通过外壳、磁流变液和转子,然后形成闭环。为了在不增加制动器尺寸的情况下获得更高的阻力矩,设计了截面具有 T 型结构的转子,如图 4 所示。

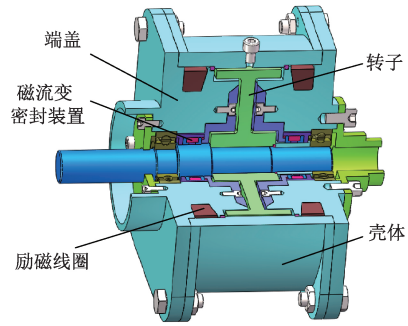


图 4 磁流变制动器构型

Fig.4 The structure of MR brake

磁回路中,转子既是磁芯,又用作力矩的传动元件。端盖安装在壳体的两端,端盖和壳体连接在一起以形成外壳。激励线圈放置在端盖中,这一布置方式,使得转子的多个表面成为有效区域,如图 5 所示,a 称为有效区域 1,b 称为有效区域 2,c 称为有效区域 3,d 称为有效区域 4。

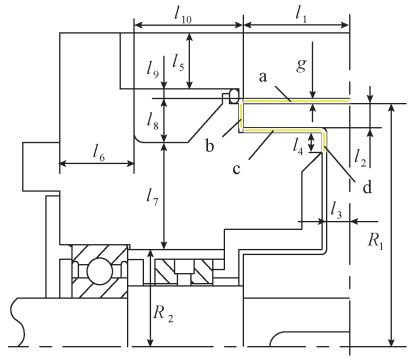


图 5 结构参数

Fig.5 Structural parameters

两个励磁线圈产生相反方向的磁场,因此磁路由两个平行磁路组成,磁路短,从而可有效减小制动器的体积和重量。磁流变密封装置设置于制动器轴的两侧[16]。在端盖和壳体之间设置有两个 O 型密封圈,磁流变液填充于外壳和转子之间的间隙内。

2.3 力矩计算

选用 DT4E 型磁性纯铁作为磁芯材料,为了获得合理的磁流变制动器结构参数值,磁流变液的屈服应力和磁芯材料的磁感应强度在磁流变制动器处于最大制动力

矩的条件下确定。然后由制造商提供的技术数据表获得磁流变液的磁场强度和磁感应强度,并由材料手册获得磁芯材料的磁场强度[17]。制动器各部分的结构参数如图 5 所示。

磁路中各部分的磁通量是相等的,根据磁路欧姆定律,可得式(5),同时应满足不等式(6)。

$$\begin{cases} \dfrac{S_1}{S_5} = \dfrac{B_t}{\sigma B_y} \\ S_1 = S_2 + S_3 + S_4 \\ S_5 = S_6 \end{cases} \tag{5}$$

式中:$S_1 = 2\pi R_1 l_1$;$S_2 = \pi R_1^2 - \pi (R_1 - l_2)^2$;$S_3 = 2\pi (R_1 - l_2 - g)(l_1 - l_3 - g)$;$S_4 = \pi (R_1 - l_2 - g)^2 - \pi (R_1 - l_2 - g - l_4)^2$;$S_5 = \pi (R_1 + l_9 + g + l_5)^2 - \pi (R_1 + g + l_9)^2$;$S_6 = 2\pi (R_2 + l_7) l_6$;$B_t$ 为电磁纯铁的磁感应强度;B_y 为有效区域内磁流变液的磁感应强度;σ 为漏磁系数,初始设计时定为 1.1。

$$S_7 \geqslant S_6 \tag{6}$$

式中:$S_7 = \pi (R_2 + l_7)^2 - \pi R_2^2$。

制动器中的磁流变液的工作模式为剪切模式,因此,磁流变制动器的阻力矩可以根据磁流变液的 Bingham 模型和磁流变制动器的结构参数来计算。由于磁流变制动器的转速较低,因此忽略了磁流变流体的塑性黏度。在有效区域 1~4 中产生的阻力矩可以使用式(7)计算:

$$\begin{cases} T_1 = \tau_1 S_1 (R_1 + 0.5g) \\ T_2 = \int_{r_1}^{r_2} \tau_2 \cdot 2\pi r^2 \cdot \mathrm{d}r \\ T_3 = \tau_3 S_3 (R_1 - l_2 - 0.5g) \\ T_4 = \int_{r_3}^{r_4} \tau_4 \cdot 2\pi r^2 \cdot \mathrm{d}r \end{cases} \tag{7}$$

式中:τ_1、τ_2、τ_3、τ_4 为磁流变液的屈服应力;$r_1 = R_1 - l_2$;$r_2 = R_1$;$r_3 = R_1 - l_2 - g - l_4$;$r_4 = R_1 - l_2 - g$。

结合 4 个有效区域的力矩可以获得制动器的制动力矩:

$$T = 2 \cdot (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) \tag{8}$$

应用 MATLAB 建立制动器力矩的计算模型,获得满足力学性能需求的制动器结构参数。获得制动器结构参数后,应用式(9)可求得磁动势。

$$F = IN = \sum_{i=1}^{6} H_i L_i \tag{9}$$

式中:N 是线圈匝数;I 是线圈的当前值;L 是磁路的长度。

计算结果为 F=240 A·N,考虑磁流变制动器中线圈的安装空间,设定 N=60 N,则 I=4.0 A。

2.4　有限元力学性能分析

为了更精确地获得电流与制动力矩之间的关系,应用有限元法对制动器进行了力学性能分析。利用 ANSYS 建立了磁流变制动器的有限元模型,磁流变制动器结构为轴对称,因此其模型可以简化为二维模型,如图 6 所示。

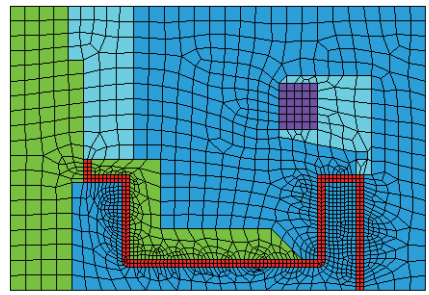


图 6　制动器有限元模型

Fig.6　The finite element model of the brake

设置边界条件、加载并求解后,在 ANSYS / EMAG 后处理器中获得磁感应强度分布,如图 7 所示。

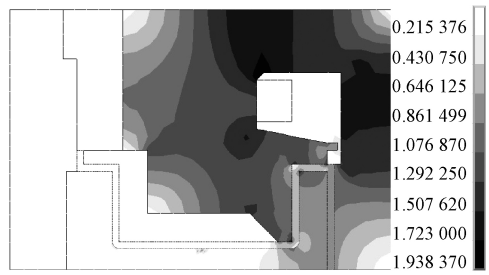


图 7　磁感应强度分布

Fig.7　Magnetic induction intensity distribution

为了准确获得有效区域中磁场强度分布,在制动器模型中设置了 5 个路径。路径 1~4 设置在有效区域的中心,路径 5 设置在端盖上,如图 8 所示。

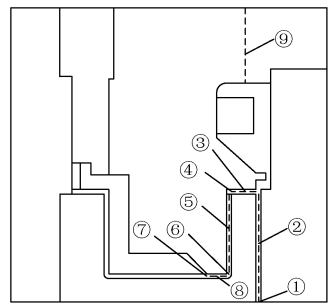
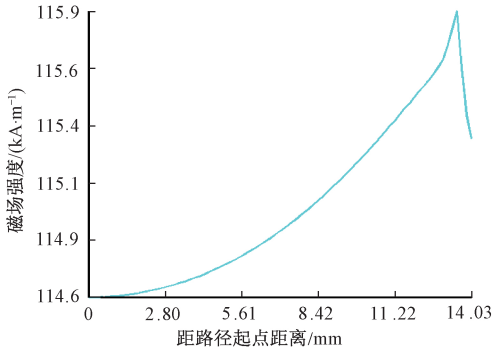


图 8　路径位置

Fig.8　The path position

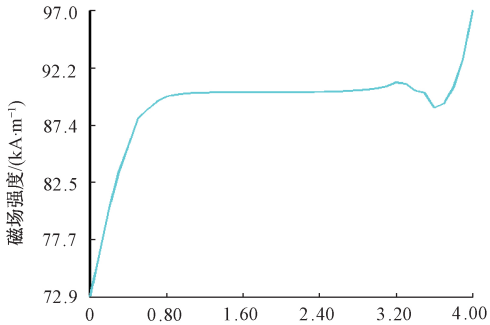
在图 8 中,①为路径 1 的起点位置,②为路径 1 位置,③为路径 2 位置,④为路径 2 的起点位置,⑤为路径 3 位置,⑥为路径 3 的起点位置,⑦为路径 4 的起点位置,⑧为路径 4 位置,⑨为路径 5 位置。

将求解所得数据映射到各路径,沿路径 1~4 的磁场强度分布如图 9 所示。



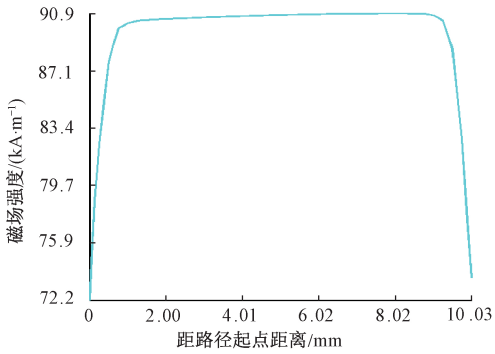
(a) 磁场强度沿路径1分布

(a) The magnetic field intensity distribution along path 1



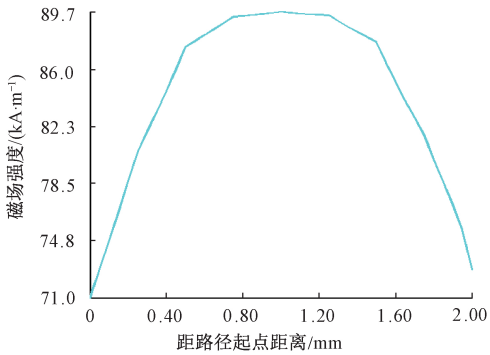
(b) 磁场强度沿路径2分布

(b) The magnetic field intensity distribution along path 2



(c) 磁场强度沿路径3分布

(c) The magnetic field intensity distribution along path 3



(d) 磁场强度沿路径4分布

(d) The magnetic field intensity distribution along path 4

图 9 磁场强度沿路径分布

Fig.9 The magnetic field intensity distribution along the paths

由图 9 可知,沿 4 条路径分布的磁场强度在较小的范围内变化。根据有限元分析的结果,可以通过磁流变液的屈服应力、有效面积和工作半径来计算制动器的制动力矩。

有效区域 1 中的制动力矩可表示为:

$$\begin{cases} H_1 = f(I) \\ \tau_1 = -0.001\,5H_1 + 0.576\,5H_1 + 0.812\,8 \\ T_1' = \tau_1 S_1 (R_1 + 0.5g) \end{cases} \tag{10}$$

式中:H_1 为沿路径 1 的磁场强度的平均值;τ_1 为磁流变流体的屈服应力;屈服应力 τ 和磁场强度 H 的关系由磁流变液的技术数据表中获得。

有效区域 2 中的制动力矩可表示为:

$$\begin{cases} H_2 = f(I) \\ \tau_2 = -0.001\,5H_2^2 + 0.576\,5H_2 + 0.812\,8 \\ T_2' = \int_{r_1}^{r_2} \tau_2 \cdot 2\pi r^2 \cdot \mathrm{d}r \end{cases} \tag{11}$$

式中:H_2 为有效区域 2 中磁场强度的平均值。

有效区域 3 中的制动力矩可表示为:

$$\begin{cases} H_3 = f(I) \\ \tau_3 = -0.001\,5H_3^2 + 0.576\,5H_3 + 0.812\,8 \\ T_3' = \tau_3 S_3 (R_1 - l_2 - 0.5g) \end{cases} \tag{12}$$

式中:H_3 是有效区域 3 中磁场强度的平均值。

有效区域 4 中的制动力矩可表示为:

$$\begin{cases} H_4 = f(I) \\ \tau_4 = -0.001\,5H_4^2 + 0.576\,5H_4 + 0.812\,8 \\ T_4' = \int_{r_3}^{r_4} \tau_4 \cdot 2\pi r^2 \cdot \mathrm{d}r \end{cases} \tag{13}$$

式中:H_4为有效区域 4 中磁场强度的平均值。

磁流变制动器的制动力矩可以在 ANSYS 通用后处理器中应用式(14)计算。

$$T' = 2 \cdot (T_1' + T_2' + T_3' + T_4') \tag{14}$$

制动器的漏磁定义为磁力线没有通过有效区域,漏磁系数可通过式(15)计算。

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi} \tag{15}$$

式中:Φ_m 是通过路径 5 的磁通量;Φ 是通过路径 1 的磁通量。

在 ANSYS 中对磁流变制动模型的磁励磁线圈施加不同的励磁电流。不同励磁电流下,制动器模型的主要参数值如表 1 所示。

由仿真数据可知,当电流为 0 A 时,屈服力矩值为 0.60 N·m,屈服力矩随电流强度的增加而逐渐上升,增长率下降,电流与制动力矩之间的关系是非线性的。在电流为 4.0 A 时,磁流变制动器提供的最大制动力矩为 30.44 N·m,泄漏系数小于初始设计值。

表 1　模型参数值

Table 1　Model parameter values

I/A	T'/(N·m)	σ
0	0.60	–
0.5	6.35	1.04
1.0	11.64	1.04
1.5	16.45	1.04
2.0	20.76	1.04
2.5	24.46	1.04
3.0	27.27	1.05
3.5	29.19	1.05
4.0	30.44	1.05

3　实验与结果分析

3.1　实验系统建立

本文在完成了主被动混合执行器构型设计以及磁流变制动器的力学性能分析后,研制了主被动混合执行器,并建立了其力学性能测试系统,如图 10 所示。

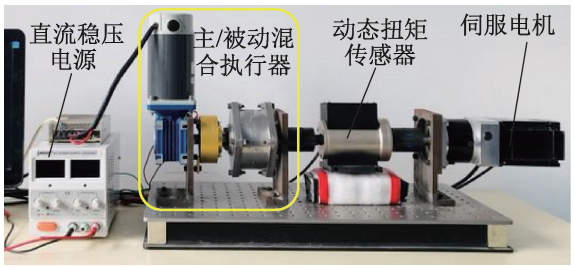


图 10　实验系统

Fig.10　Experiment system

应用 24 V 直流电源为主被动混合执行器中的直流电机供电,应用直流稳压电源为制动器供电。动态扭矩传感器的一端与主被动混合执行器的输出轴相连,另一端与伺服电机减速器的输出轴相连,均使用挠性联轴器连接。伺服电机由工控机与运动控制卡控制,扭矩传感器的输出信号由工控机与数据采集卡采集,应用 LABVIEW 软件开发了电机控制与数据采集程序。

3.2　被动力矩测试

该实验是模拟下坡路助行过程中,主/被动混合执行器的工作状态,并确定驱动电流与被动力矩的关系。实验中,直流电机不工作,由于蜗轮蜗杆减速器的自锁特性,制动器的壳体相对静止。伺服电机通过减速器驱动制动器轴转动,转速保持在 30 r/min(此时相应的助行器速度为 0.57 m/s)。施加到制动器的控制电流从 0 A 开始,以 0.5 A 间隔增加至 4.0 A。以手动方式调整直流稳压电源,实现电流变化,实验结果如图 11 所示。

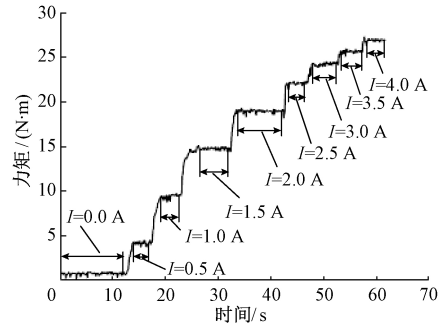


图 11　被动力矩测试结果

Fig.11　Passive torque test result

3.3　主动力矩测试

该实验用于模拟上坡道路上的主/被动混合执行器的工作状态,直流电机和磁流变制动器协调工作。直流电机的速度决定了助行器的最大速度,而磁流变制动器的力矩决定了助行器可以提供的最大辅助力。在实验中,直流电机通过涡轮蜗杆减速器以 40 r/min 的速度驱动制动器外壳转动。伺服电机带动制动轴以与外壳相同的方向旋转。伺服电机带动制动器轴以 30 r/min 转动。施加到制动器的电流以 0.5 A 的增幅从 0 A 增加到4.0 A。实验过程中,直流电机的转速随着负载的增加而减小,在制动器控制电流为 4.0 A 时,制动器外壳的转速仍大于 30 r/min。实验结果如图 12 所示。

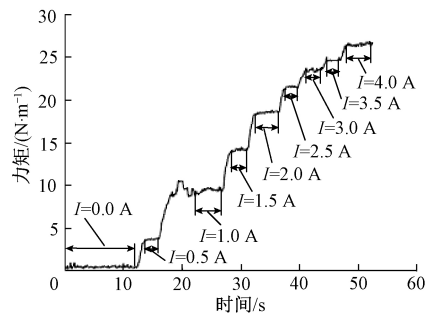


图 12　主动力矩测试结果

Fig.12　Active torque test result

3.4　实验结果分析

由实验数据计算获得施加不同控制电流时的平均被动力矩和平均主动力矩,力矩和电流之间的关系如图 13 所示。

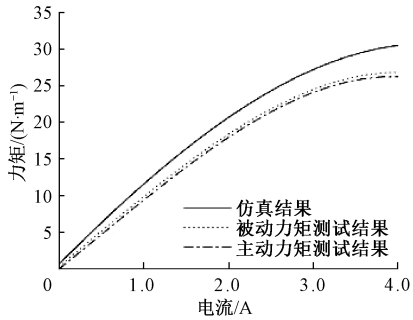


图 13 力矩-电流关系

Fig.13 Relationship of torque vs. current

由图 13 可知,主/被动混合执行器的被动力矩值与主动力矩值随控制电流变化的趋势与制动器仿真结果近似;相同控制电流下,被动力矩值与主动力矩值相近。

当主/被动混合助执行器提供被动力矩时,只有磁流变制动器工作,被动力矩随着控制电流的变化而变化。实验结果表明,助行器提供的被动力矩随励磁电流的增加而单调增加,力矩与励磁电流的关系呈非线性,增长率逐渐降低。该结果与模拟分析一致。与模拟结果相比,实验力矩小于模拟力矩值,但是力矩随电流的变化趋势相同。有多种因素会影响磁流变制动器性能和设计效果,如制动器零件的加工精度,绕组的紧密度,磁性材料的理想值与实际值之间的误差等。

当主/被动混合助执行器输出主动力矩时,伺服电机驱动制动器轴旋转,直流电机通过蜗轮减速器带动制动器外壳转动,制动器转子与外壳转向相同,但是,制动器转子转速小于外壳转速,制动器外壳与转子之间的相对运动产生了主动力矩,主动力矩大小由制动器的励磁电流决定。因此,主动力矩随电流的变化趋势与被动力矩随电流变化趋势相同,并且最大主动力矩值与最大被动力矩值接近。

由实验结果可知,当电流为 0 A 时,被动力矩为 0.7 N·m,这表示在平路上行走时,使用者受到的阻力较小。当电流为 4.0 A 时,被动力矩和主动力矩分别为 26.9 N·m 和26.5 N·m。实验结果表明,本文的主/被动力矩实现方法,能够提供被动力矩和主动力矩,所研制的主/被动混合执行器能够满足智能助行器的需求。

4 结 论

本文提出了一种用于智能助行器的主/被动力矩实现方法,研制了主被动混合执行器。执行器主要由磁流变制动器和带蜗轮减速器的直流电机组成。直流电机的旋转轴通过减速器与制动器壳体连接。制动器的轴作为主被动混合执行器的输出轴。可以通过不同的工作模式提供主动力矩或被动力矩,满足智能助行器坡路助行的需求。

根据助行器的力矩要求,完成了应用于主/被动混合执行器的磁流变制动器的设计。根据制动器的结构,完成了制动器的磁路计算,确定了制动器的主要结构参数。在此基础上,应用有限元法分析了制动器的力学性能,得到了力矩与电流的关系。仿真结果表明,磁流变制动器提供的最大力矩可以满足主被动混合执行器的要求。

本文研制了主被动混合执行器,建立了主被动混合执行器的实验系统,完成了实验研究。得到了被动力矩和电流之间的关系,以及主动力矩和电流之间的关系。实验结果表明,主动力矩与电流之间的关系以及被动力矩与电流的关系是相似的。主被动混合助行器能够提供可控的主动和被动力矩,其力矩特性可以满足智能助行器坡路助行需求。本文的主/被动力矩实现方法,既可应用于智能助行器,也可应用于其他既需要主动力矩又需要被动力矩的场合。

参考文献

[1] HIRVENSALO M, RANTANEN T, HEIKKINEN E, et al. Mobility difficulties and physical activity as predictors of mortality and loss of independence in the community-living older population[J]. Journal of the American Geriatrics Society, 2000,48(5):493-498.

[2] GILL T, BAKER D, GOTTSCHALK M, et al. A prehabilitation program for the prevention of functional decline: effect on higher-level physical function1[J]. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 2004, 85(7):1043-1049.

[3] 邱石,杜义浩,王浩,等. 基于 sEMG 的下肢运动解析方法研究[J]. 仪器仪表学报,2018,39(2):30-37.
QIU SH, DU Y H, WANG H, et al. Research on lower limb kinematic analysis method based on sEMG[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(2): 30-37.

[4] WAKITA K, HUANG J, DI P, et al. Human-walking-intention-based motion control of an omnidirectional-type cane robot [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013,18(1):285-296.

[5] NAZEMZADEH P, MORO F, FONTANELLI D, et al. Indoor positioning of a robotic walking assistant for large public environments [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64 (11): 2965-2976.

[6] 王亚宾,张小栋,穆小奇,等. 用于助老伴行机器人的老年人摔倒预测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(7):1-7.
WANG Y B, ZHANG X D, MU X Q, et al. Research on

the prediction method of elderly fall-down for elderly-assistant and walking-assistant robot [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2018, 32(7): 1-7.

[7] WANG S Q, WANG L T, MEIJNEKE C, et al. Design and control of the MINDWALKER exoskeleton[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2015, 23(2): 277-286.

[8] 明东,蒋晟龙,王忠鹏,等.基于人机信息交互的助行外骨骼机器人技术进展[J].自动化学报,2017,43(7):1089-1100.
MING D, JIANG SH L, WANG ZH P, et al. Review of walk assistant exoskeleton technology: human-machine interaction[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(7): 1089-1100.

[9] SUN P, WANG S Y. Improvement model for omnidirectional rehabilitative training walker and tracking control [C]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2014: 1359-1364.

[10] LEE G, OHNUMA T, CHONG N Y, et al. Walking intent-based movement control for JAIST active robotic walker[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2014, 44(5): 665-672.

[11] KO C H, YOUNG K Y, HUANG Y C, et al. Active and passive control of walk-assist robot for outdoor guidance[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(3): 1211-1220.

[12] KIKUCHI T, TANAKA T, TANIDA S, et al. Basic study on gait rehabilitation system with intelligently controllable walker (i-Walker) [C]. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2010: 277-282.

[13] TAGHVAEI S, HIRATA Y, KOSUGE K. Vision-based human state estimation to control an intelligent passive walker [C]. IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2010: 146-151.

[14] 李军强,臧希喆,赵杰. 旋转式磁流变阻尼器优化设计与力学性能试验[J]. 机械工程学报,2010,46(5):177-182.
LI J Q, ZANG X ZH, ZHAO J. Optimization design and mechanical performance test of rotary magnetorheological damper[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(5): 177-182.

[15] 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.

[16] 王娟,李军强,杨冬,等. 旋转式磁流变阻尼器及其驱动器研究[J].机械设计与研究,2016,32(6):32-35.
WANG J, LI J Q, YANG D, et al. Research on rotary magnetorheological brake and the brake driver [J]. Machine Design and Research, 2016, 32(6): 32-35.

[17] 干勇,田志凌,董瀚,等. 中国材料工程大典.第 2 卷[M]. 北京: 化学工业出版社,2006.
GAN Y, TIAN ZH L, DONG H, et al. China materials engineering. Volume 2 [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

作者简介

李军强(通信作者),分别在 2002 年和 2005 年于河北工业大学获得学士学位和硕士学位,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、康复机器人技术。
E-mail:lijunqiang@ hebut.edu.cn

Li Junqiang (Corresponding author) received his B. Sc. degree and M. Sc. degree both from Hebei University of Technology in 2002 and 2005, respectively, received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2010. Now, he is an associate professor in Hebei University of Technology. His main research interests include walking assistant robotics and rehabilitation robotics.

赵蕾,2016 年于浙江工业大学获得学士学位,现为河北工业大学硕士研究生,主要研究方向为助行机器人技术。
E-mail:714323575@ qq.com

Zhao Lei received her B. Sc. degree from Zhejiang University of Technology in 2016. Now, she is a M. Sc. candidate in Hebei University of Technology. Her main research interests include walking assistant robotics.