



机械科学与技术

Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering

ISSN 1003-8728, CN 61-1114/TH

《机械科学与技术》网络首发论文

题目：一种磁流变关节单足机器人设计与跳跃性能研究
作者：吕云飞，徐浩东，张良，孙帅帅，杨健
DOI：10.13433/j.cnki.1003-8728.20250015
网络首发日期：2025-03-12
引用格式：吕云飞，徐浩东，张良，孙帅帅，杨健. 一种磁流变关节单足机器人设计与跳跃性能研究[J/OL]. 机械科学与技术.
<https://doi.org/10.13433/j.cnki.1003-8728.20250015>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13433/j.cnki.1003-8728.20250015

一种磁流变关节单足机器人设计与跳跃性能研究

吕云飞¹, 徐浩东¹, 张良¹, 孙帅帅², 杨健^{1,*}

(1.安徽大学 电气工程与自动化学院, 合肥 230039;

2.中国科学技术大学 工程科学学院, 合肥 230022)

摘要: 针对现有足式机器人在跳跃过程中爆发不足、负载能耗高的问题, 本文设计了一种基于磁流变技术的驱动关节, 用来提高机器人系统的运动能力。在此基础上, 通过对新型关节的建模分析, 建立了可变刚度的并联弹性执行器单足模型, 进行了运动学、动力学分析, 设计了解耦运动控制方法, 并通过 COMSOL 进行磁场仿真以分析磁流变关节锁止力矩, 最后通过实验验证了单足机器人的跳跃性能。实验表明, 与传统电驱动关节模组相比, 电机起跳瞬时电流降低, 跳跃高度提升, 验证了本文方法的有效性。

关键词: 足式机器人; 磁流变; 变刚度; 运动控制

中图分类号: TP249

Design and Jumping Performance Investigation of a Unipedal Robot with Magnetorheological Joints

Yunfei Lü¹, Haodong Xu¹, Liang Zhang¹, Shuaishuai Sun², Jian Yang^{1,*}

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230039, China

(2. School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230022, China)

Abstract: To address the issues of insufficient burst power and high energy consumption during the jumping process of existing legged robots, a drive joint based on magnetorheological (MR) technology is designed to enhance the mobility of the robotic system. By modeling and analyzing the MR joint, a model for a unipedal robot with a variable-stiffness parallel elastic actuator is developed. Kinematic and dynamic analyses are performed, followed by decoupled motion control to evaluate the jumping performance of the unipedal robot. Magnetic field simulation is carried out by COMSOL to analyze the locking torque of the magnetorheological joint. Experimental results demonstrate that, compared to traditional joint modules, the proposed design leads to a reduction in the motor's instantaneous current at takeoff and an improvement in jump height, thereby validating the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Legged robot; Magnetorheological; Variable stiffness; Motion control

足式机器人因特殊的关节驱动方式拥有更高的运动机动性、灵活性。近年来出现了越来越多的拥有如行走、小跑、跳跃、攀爬等多种运动模式的足式机器人^[1], 这些机器人在不同运动周期的不同

运动模式下, 所需的能量与功率会出现较大差异^[2], 对关节驱动器的设计有极高的要求。高性能驱动关节作为足式机器人的核心动力来源, 其设计和控制方法的研究对于提高机器人运动性能有重要意义。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (NO.52105081 NO.62303002)

作者简介: 吕云飞, 硕士研究生, z22301105@stu.ahu.edu.cn;

***通信作者:** 杨健, 教授, 20152@ahu.edu.cn

足式机器人关节驱动方式通常分为液压驱动及电驱动两种，液压驱动系统功率密度大，负载能力强，但存在体积大、质量重的缺点，同时液压系统的非线性特性也使得控制系统的设计更为复杂^[3]。为了改善液压驱动的不足，不少学者也研制了采用力矩控制的电机驱动方案。美国麻省理工学院仿生机器人实验室 (Biomimetic Robot Lab) 研制了 Cheetah 系列足式机器人，运用特制力矩电机实现了多种步态的运动控制^[4]，该方案中电机通过行星减速机加电流环力矩反馈控制，实现了输出速度高、力/位响应通带宽的效果，但面对爆发跳跃与大负载时仍然会有一定的机械损耗与能量损耗。近年来，一些学者提出了弹性元件与电驱动器结合的方案，Verstraten 等通过行星减速机连接串联弹簧完成了跳跃动作^[5]，liu 等设计了可切换的并联弹性执行器以在线改变腿部刚度^[6]，Zhao 等通过设计一种串联弹性执行器和并联弹簧的踝关节增强了机器人的运动适用性、减小了着陆缓冲^[7]，Hussain 等通过使用电磁离合器来改变接入系统的弹簧数量实现可变刚度关节来提升机器人的运行稳定性和鲁棒性^[8]。

当前，电驱动结合弹性驱动关节已有显著的发展，大多数弹性执行器依靠机械锁紧机构或制动器实现存储能量可控^[9,10,11]，但机械结构的灵活性低、复杂程度高等特点导致弹性单元能量利用效率低下。因此，利用弹性驱动单元实现动物肌肉储能并爆发跳跃，从而提高原有关节驱动电机性能，实现爆发跳跃仍具挑战。

针对上述问题，具有迅速响应特点的灵活锁紧机构是一种有效方案。磁流变液因其流变特性常用于各种关节结构中^[12,13,14]；磁流变液的流变特性是指在有外部磁场施加时，铁磁颗粒会快速地沿磁感线方向排列成链条状，使得磁流变液呈现出一种剪切应力增强的力学特性。这种力学特性的变化不仅发生在毫秒级，而且在撤去磁场后能够迅速可逆地返回到液态，使得磁流变液的力学性能和磁控特性可以便捷地通过外部磁场实时调节。

利用磁流变液的可控流变特性，本文设计了一种磁流变轴承作为动态锁紧机构的新型驱动关节，通过对磁场的控制，实现弹性单元与电驱动关节的灵活耦合。为了进一步验证该新型结构的优越性，本文建立了可变刚度的并联弹性执行器单足模型并进行运动控制分析，最后设计了单足跳跃运动测试平台，完成了实物验证并进行总结。

1 磁流变关节原理与结构

基于磁流变液的流变性受磁场影响的特点，本

文创新性地将磁流变液注入到深沟球轴承中，制作成了磁流变轴承^[15]。如图 1a 所示，当没有外部磁场时，磁流变液会均匀分布在轴承滚珠和滚道之间，起到润滑的作用；当在磁流变轴承外部施加磁场时，轴承内部的铁磁颗粒会在轴承滚珠与内外圈滚道接触处沿磁感线方向形成磁链如图 1b 所示，对轴承内外圈的相对转动形成阻碍作用，从而改变轴承的阻尼。且外界磁场强度越大形成的磁链的强度也就越大，相应的轴承的阻尼也就越大。

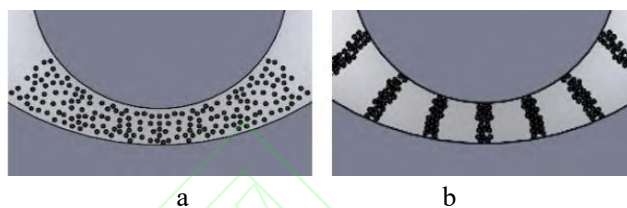


图 1 磁流变轴承阻尼原理

Fig.1 Damping principle of magneto rheological bearings

本文设计的磁流变关节如图 2 所示，装配在机器人腿部的膝关节外侧，膝关节处用于传动的轴通过键连接和紧定螺钉的形式实现与小腿以及轴套的定位。同样的，轴承内外圈与轴套以及凸缘法兰通过键连接、经紧定螺钉、轴肩以及卡簧的形式实现定位。线圈套在轴套上，线圈的一侧是磁流变轴承，另一侧是挡板，材质均为导磁材料，因此能够形成一个闭合磁回路。线圈挡板与凸缘法兰通过螺钉连接。大腿外侧通过螺钉与铝板连接，用于储能的扭簧放置在铝板与凸缘法兰之间，在铝板和凸缘法兰上均有挡块，用于对扭簧进行限位。当线圈通电时，在线圈周围会形成闭合磁回路，磁流变轴承会呈现大阻尼的状态，轴承会出现“锁死”现象。此时，通过上述传动结构，机器人大小腿之间的角度变化会相应的转换为扭簧两端的压缩角度，当机器人大小腿之间的角度减小时，扭簧压缩并储存能量；当大小腿反向转动即机器人跃起时，扭簧储存的能量得以释放，相应的机器人的跳跃高度就会提高。

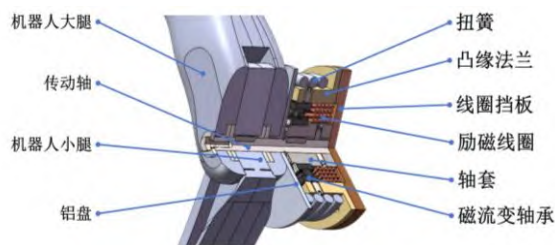


图 2 磁流变关节结构

Fig. 2 Structure of Magnetorheological joint



图3 磁流变关节实物零件图

Fig. 3 Physical component diagram of Magnetorheological joint

2 单足机器人跳跃运动控制

2.1 单足机器人运动学分析

单足机器人系统是一个复杂的非线性系统，为了实现精确控制需要进行简化分析。单足机器人使用电机作为主要驱动单元，弹性单元作为辅助动力源。其髌膝关节电机同轴排布，磁流变关节位于膝关节处，重量较轻。因此本文将机器人关节电机中心视为质心。在此情况下可以得到机器人简化连杆模型，然后通过运动学分析可以得到足端力与关节力矩直接的转换。最后为了实现精确的高度控制，本文在弹簧加载倒立摆模型的基础上建立了可变刚度并联弹性执行器单足模型^{[16][17]}，如图4所示。

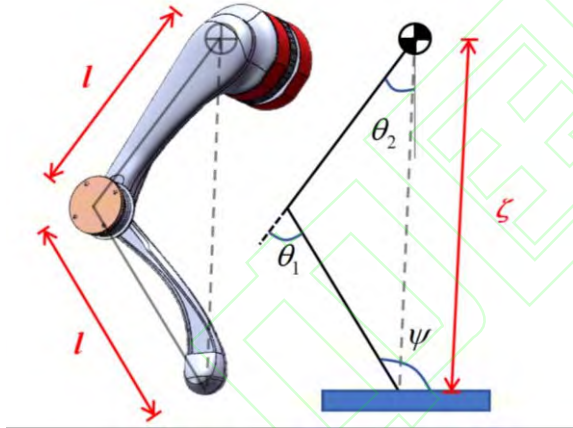


图4 磁流变关节单足机器人简化连杆模型

Fig. 4 Simplified model of monopod robot

根据图4所示几何关系可以得到具有磁流变关节的单足机器人运动学方程如式1所示。

$$\begin{cases} \zeta = 2l \cdot \cos\left(\frac{\theta_{1j}}{2}\right) \\ \psi = \frac{\pi}{2} + \frac{\theta_{1j}}{2} + \theta_{2j} \end{cases} \quad (1)$$

式中 ζ 为虚拟腿长，代表了从质心到足端的距离； l 为大腿与小腿长度； ψ 为虚拟腿与地面的夹角。

通过雅可比矩阵转置得到磁流变关节单足机器人的静力学方程如式2所示

$$\begin{bmatrix} F_z \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = J^{-T} \begin{bmatrix} \tau_{1j} \\ \tau_{2j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{-l \times \sin\left(\frac{\theta_{1j}}{2}\right)} & \frac{1}{2l \times \sin\left(\frac{\theta_{1j}}{2}\right)} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{1j} \\ \tau_{2j} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 单足机器人动力学分析

在该单足机器人足端触地的过程中，系统的动力学可以通过在足端与质心之间设定虚拟弹簧、阻尼来描述。响应的动力学方程如式3所示：

$$\begin{cases} \ddot{\zeta} = \zeta \dot{\psi}^2 - g \cdot \sin(\psi) - \frac{k_\zeta}{m} (\zeta - \zeta_0) - \frac{b_\zeta}{m} \dot{\zeta} \\ \ddot{\psi} = -\frac{2\dot{\zeta} \dot{\psi}}{\zeta} - \frac{g \cdot \cos(\psi)}{\zeta} \end{cases} \quad (3)$$

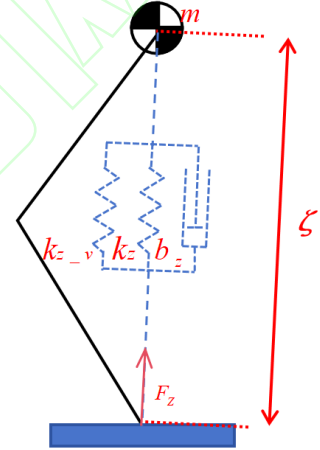


图5 可变刚度并联弹性执行器单足模型

Fig. 5 Single foot model of variable stiffness parallel elastic actuator

式中 k_ζ 为虚拟弹簧刚度； b_ζ 为虚拟阻尼代表

系统中损耗； ζ_0 为虚拟弹簧原长； g 为重力加速度。

对于垂直跳跃来说，由于该单足机器人被固定在垂直滑轨上，因此只需考虑一个自由度。即有

$$\psi = \pi/2, \dot{\psi} = 0, \ddot{\psi} = 0, \zeta = z, \dot{\zeta} = \dot{z}, \ddot{\zeta} = \ddot{z},$$

$k_\zeta = k_z, b_\zeta = b_z$ 。所以模型可以继续被化简，最终一维动力学方程如式4、5所示：

$$\ddot{z} = -g - \frac{k_z}{m} (z - z_0) - \frac{b_z}{m} \dot{z} \quad (4)$$

对于其腾空阶段，有

$$\ddot{z} = -g \quad (5)$$

将 k_z 分为 k_{z_v} 与 k'_z ，其中 k_{z_v} 依然代表虚拟刚度值，而 k'_z 则代表了弹性单元在竖直方向上的等效刚度，通过磁流变关节是否锁死或更换关节弹簧实现刚度可变可控。

对于该机器人的触地阶段，支撑腿需提供垂直地面向上的力 F_z ，结合运动学映射关系，可得关节扭矩如下式 6、7 所示：

$$\tau_{1j} = -F_z l \cdot \sin\left(\frac{\theta_{1j}}{2}\right) \quad (6)$$

$$\tau_{2j} = 0 \quad (7)$$

根据简单的力学物理定律， F_z 如式 8 所示

$$F_z = -k_z(z - z_0) \quad (8)$$

2.3 磁流变关节单足机器人跳跃步态设计

足式机器人的一个跳跃运动周期通常有触地相和摆动相两个相位。触地相包括从足端触地压缩到蹬地伸长直至离开地面两阶段；摆动相为足端离地后到触地前的过程。基于运动学与动力学的理论推导，按照模型中质点高度将跳跃过程进一步划分为四个阶段如图 6 所示。下落阶段，忽略空气阻力与摩擦力，磁流变关节单足机器人从跳跃最高点自由落体至触地前一刻，此时系统并无外力做功，重力势能转为动能；下落阶段结束后进入触地压缩阶段，此时虚拟弹簧开始压缩，同时带动弹性元件转动实现蓄能，动能与重力势能转化为弹性势能，质心 z 方向速度逐渐减小至 0；之后进入触地伸长阶段，此时压缩至最低点的虚拟弹簧和弹性元件开始伸长，将弹性势能转化为动能与重力势能，质心 z 反方向速度逐渐增加，直至离地前一刻虚拟弹簧回到原长，此时势能全部转换为动能，单足机器人达到最大速度并进入摆动相前半段；上升阶段，该机器人依靠触地伸长阶段获得的速度继续向上运动直至跳跃最高点。

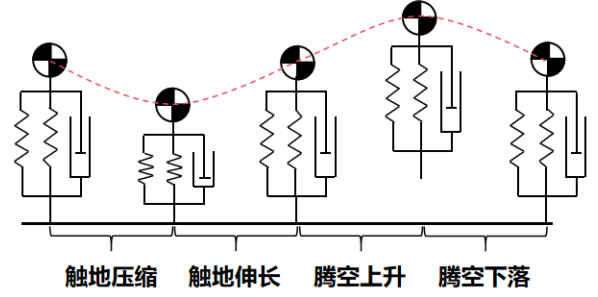


图 6 跳跃步态
Fig. 6 Hopping gait

整个过程中，虚拟弹簧与弹性元件在压缩或伸长中对质心做的功等于弹簧中势能的变化，即能量守恒。在实际的对称运动周期中，功是虚拟腿力乘以质心速度在触地相持续时间一半的积分，如式 9 所示

$$\begin{aligned} W &= \int_0^{\frac{t_{des}}{2}} k_z(z - z_0) \dot{z} dt \\ &= \int_0^{\frac{t_{des}}{2}} \left(k_{z_v} + k'_z \right) (z - z_0) \dot{z} dt = W_u + W' \end{aligned} \quad (9)$$

式中 W_u 代表电机做功； W' 代表弹性单元做功； t_{des} 为触地时长。

即需要根据跳跃期望高度，得出离地前速度，设定合适的触地相跳跃轨迹实现定高控制。若忽略摩擦损耗， W 应等于离地前动能从而实现周期跳跃。最终，待确定参数只有跳跃轨迹。通过对本文中一维跳跃动力学方程求解，发现质心轨迹是时间相关的三角函数，而根据仿生学规律总结，给出质心关于时间的函数^[18]如式 10

$$z = z_0 - \Delta z \sin\left(\frac{\pi t}{t_{des}}\right) \quad (10)$$

所以最终的电机控制为轨迹跟踪控制，通过调整触地时长与虚拟弹簧压缩量 Δz 实现轨迹规划。采用此种方法，将弹性单元做功与电机做功解耦，在实际跳跃过程中，利用弹性单元的储能实现电机在触地上升过程中做功减小，进而实现电机瞬时电流的减小，以此验证弹性单元的储能效果与磁流变关节的灵活耦合功能。

3 磁流变关节磁场仿真与实验

3.1 磁流变关节建模分析

为了验证磁流变关节的锁死功能，实现与单足机器人的耦合，本文使用 COMSOL 软件对磁流变关节进行了建模与磁场仿真。采用铁粉质量分数为

86.3%的磁流变液作为填充。轴承扭矩研究已非常完善，文章^[19]中提到了轴承摩擦力的理论适用于磁流变轴承，如式 11 所示

$$T = 2 \left[\mu_B D_p \left(\frac{P_{ax}}{\sin(\theta)} \right) + K_0 f_0 D_p^3 \omega^{1/2} v^{2/3} \right] \quad (11)$$

其中 v 为轴承填充物的粘度； θ 为接触角； f_0 为润滑剂填充比； D_p 为球轨的节距直径； P_{ax} 为轴向预紧力； μ_B ， K_0 为经验参数。即施加在轴承外部的磁场改变磁流变液粘度从而改变轴承扭矩。

磁流变关节内部磁场如图 7 所示，通过控制仿真软件中励磁线圈电流产生磁场，磁场在传动轴、轴套、磁流变轴承、凸缘法兰、线圈挡板形成回路，且在磁流变轴承附近的磁场分布较为均匀。随着励磁线圈电流增大，轴承附近磁场增加如图 8 所示，且在 1.3A 时磁流变轴承处磁场较高，满足轴承力矩需求。

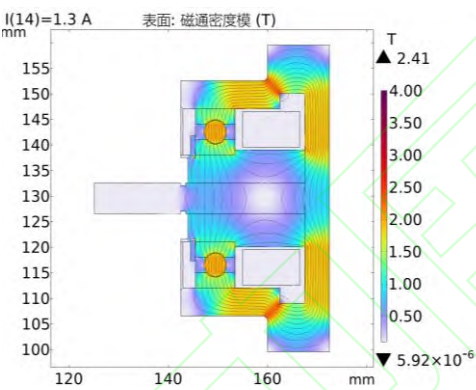


图 7 磁流变关节仿真结果
Fig. 7 Simulation results of magnetorheological joint

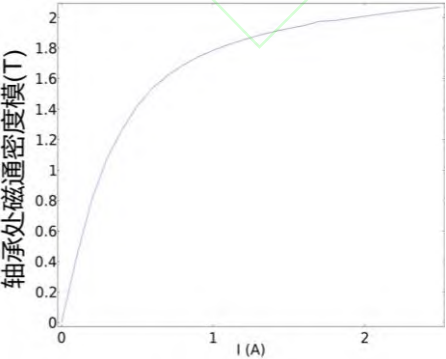


表 1 磁流变关节等效刚度分析

Tab. 1 Analysis of equivalent stiffness of Magnetorheological joint									
负载	扭簧线径 6.0mm			扭簧线径 6.5mm			扭簧线径 7.0mm		
	垂向压缩高度	高度差	等效刚度	垂向压缩高度	高度差	等效刚度	垂向压缩高度	高度差	等效刚度

图 8 磁流变轴承处磁场与线圈电流关系

Fig. 8 Magnetic field and current relationship
magnetorheological bearings

3.2 磁流变关节测试

为进行关节与跳跃功能的验证，搭建了具有磁流变关节的单足机器人实验平台如图 9 所示，该平台由一条单腿和垂直于地面的滑轨组成，单腿可以沿滑轨上下移动。在磁流变轴承锁紧后，在负载台上加载砝码测量该单足机器人质心高度变化量。考虑到扭簧存在屈服极限，因此在测量过程中需先确定能使单足机器人质心发生明显变化的负载重量，之后每次测量在此重量之上进行负载重量的增加，负载每次变化量为 0.5kg，每次测量均需要重新加载负载至载物台。确定磁流变关节机器人起始高度，观测压缩稳定后最终位置测得垂向压缩高度，取每次测量的差值计算等效刚度。最终采用多次测量结果进行拟合为最终测量结果，如表 1 所示。

扭簧刚度与线径成正比关系，扭簧刚度越大等效后的虚拟弹簧线性关系越强；在线圈断电后，系统刚度会瞬时消失导致垂向压缩高度达到最大值。考虑到每次的测量误差，本文对线径 6.0mm、6.5mm、7.0mm 的扭簧分别等效为 460N/m、612.5N/m、980N/m。



图 9 实验平台
Fig. 9 Experimental platform

线圈断电	\	\	\	\	\	\	\	\	\
3.0kg	53mm	\	\	15mm	\	\	10mm	\	\
3.5kg	63mm	10mm	490.7N/m	23mm	8mm	612.5N/m	15mm	5mm	980N/m
4.0kg	73mm	10mm	490.7N/m	30mm	7mm	700.7N/m	20mm	5mm	980N/m
4.5kg	85mm	12mm	408.8N/m	37mm	7mm	700.7N/m	25mm	5mm	980N/m
5.0kg	96mm	11mm	445.8N/m	46mm	9mm	544.5N/m	30mm	5mm	980N/m

4 磁流变关节单足机器人跳跃实验

为了验证弹性单元性能，在单足跳跃实验平台的基础上加入跳跃控制系统。控制系统主控制器型号为 STM32F767 开发板，用于计算关节控制命令同时收集关节电机的反馈消息,计算出的命令通过 RS485 发送给每个关节电机，整个系统控制频率为 1000Hz；关节电机选用 UnitreeGO-M8010 电机，电机采用高速 RS485 通讯，最大扭矩 23.7Nm，满足跳跃实验需求；实验借助 ATK-MS53 激光测距模块实现跳跃高度的实时监控，模块分辨率 1mm，测量距离 2m；采用了 ACS712 霍尔电流传感器监测电机母线电流；整个控制系统结构如图 10 所示。

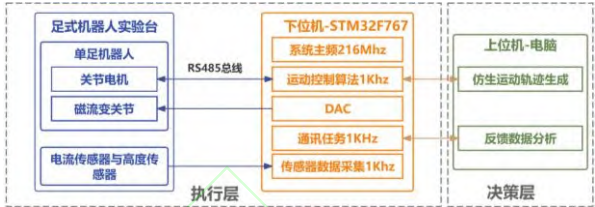


图 10 实验系统架构

Fig. 10 Experimental system architecture

针对磁流变关节的动态锁死和弹性单元的储能再利用功能，本文开展了磁流变关节足式机器人在关节锁死与转动状态切换的两种跳跃模式的实验，通过采集关节电机位置信息、与电机返回力矩来验证驱动关节的性能，图 11 为跳跃过程中的四个关键姿态。



图 11 磁流变关节机器人跳跃过程关键姿态

Fig. 11 Key pose during magneto rheological joint robot jumping process

在该机器人四个不同的运动阶段中，对比磁流变关节锁死与转动状态进行了多次实验，取 50 次跳跃实验数据平均值进行记录，实验结果如图 12 所示。在磁流变关节锁死的状态下，机器人下落阶段结束后，能量流入电机与储能单元；在机器人触地压缩阶段，驱动关节锁死导致电机输入额外能量进入弹性单元，相较于驱动关节转动电机扭矩增大，这符合驱动关节的弹性单元储能策略，排除机械损耗的部分，电机此时做功与弹簧形变储存的能量大小相符；之后进入触地伸长阶段，驱动关节锁死情况下弹性单元与电机共同做功使质心升高，电机扭矩相较磁流变关节转动情况下减小，瞬时电流减小。因此，磁流变驱动关节在锁死情况下与机器人关节

电机耦合良好，并且通过关节线圈的控制实现灵活的解耦。

在机器人的一个完整跳跃周期中需要跟踪上节中设计的运动轨迹，将运动轨迹方程写入主控板，并根据预期的跳跃频率与高度调节 t_{des} 与 Δz 两个

参数，随后确定关节电机参数 k_p 、 k_d 以保证轨迹跟踪效果。在此基础上，本文设计了三个刚度扭簧的对照实验：即电机使用相同的控制参数，对比关节锁死与转动工况下跳跃高度与瞬时扭矩；实验中关键参数如表 2 所示。

表 2 实验关键参数

Tab. 2 Key parameters in the experiment

参数	符号	值
电机刚度	k_p	0.55
电机阻尼	k_d	0.01
跳跃周期	t_{des}	100
压缩量	Δz	0.18m
虚拟弹簧原长	z_0	0.36m
系统质量	m	2.6kg
大小腿长度	l	0.23m
重力加速度	g	9.8m/s ²

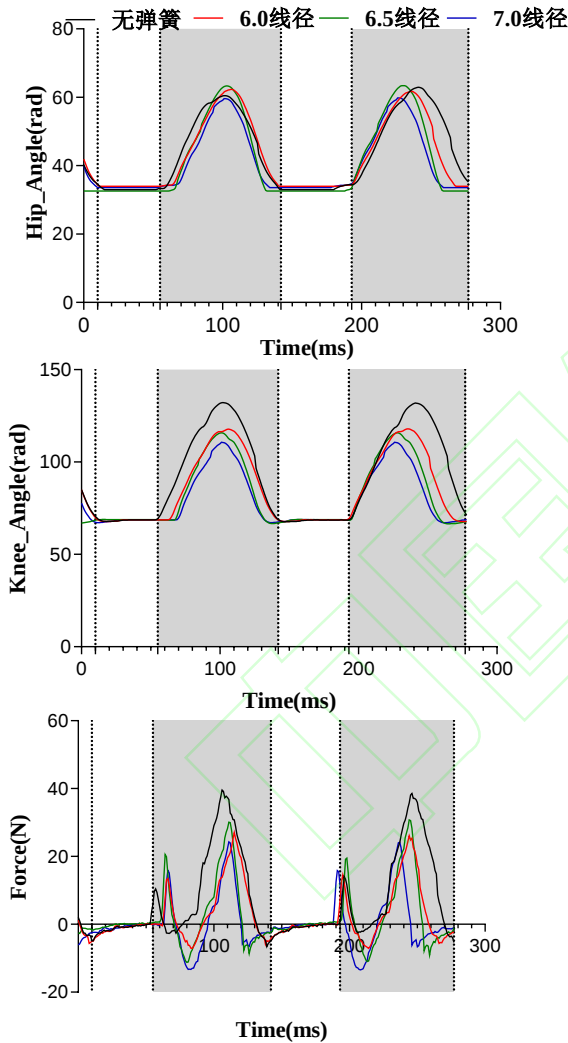


图 12 不同刚度下的跳跃位姿信息

Fig. 12 Jump pose information under different stiffness levels

如图 12 所示, 图中黑色曲线为传统电驱动关节工况, 以其作为对照组, 灰色阴影区域代表触地相, 无阴影代表腾空相。在磁流变驱动关节锁死的情况下, 电机最大扭矩显著下降, 跳跃同等高度纯电驱动工况下, 足端力最大约为 39.54N, 采用刚度 6.0、6.5、7.0 线径扭簧的磁流变关机足端力减小量分别为 23.8%、31.6%、38.5%, 图中足端力为文中式 3、

7、8 计算所得, 式中电机返回力矩经电流传感器校验后与电机电流成线性关系, 且足端力由膝关节电机扭矩输出组成, 由此可推导出电机瞬时最大电流等比例减小; 对比图中运动周期, 传统电驱动关机腾空相占比大, 在磁流变关节锁死后, 触地相周期缩短, 腾空相周期增加, 说明机器人滞空时长增加, 跳跃高度增加, 相比传统电驱动关节增加量最大约 10%。

实验结果表明, 磁流变关节在单足机器人跳跃过程中表现出电机驱动与弹性驱动的有效耦合, 实现了能量转移与分配, 并在机器人起跳过程中展现了良好的效果, 实现了高性能驱动关节的设计目标。

5 结论

本文使用了磁流变轴承作为动态锁死机构的新驱动关节, 通过 COMSOL 进行磁场仿真并进行实验验证了磁流变轴承作为锁死机构的承载能力和新驱动关节能量调节能力。

通过运动学、动力学以及仿生学的分析, 建立了具有磁流变关节的单足机器人运动控制系统。从系统能量在各驱动单元之间流转的角度分析了新驱动关节与单足机器人本体电驱动之间的能量转换关系, 随后结合仿生学, 在上层控制环节将二者解耦以实现精确的跳跃控制。

本文还搭建了单足跳跃测试平台并设计了跳跃步态, 跳跃实验结果表明, 磁流变关节与电驱动关节耦合效果良好, 相较于传统的电驱动方案, 使用新型关节作为储能单元的混合驱动方案使机器人获得了更好的跳跃性能, 并且电机瞬时电流有显著下降, 这对用于机器狗的小型扁平状关节电机的设计具有重要意义。

[参考文献]

- [1] Hwangbo J, Lee J, Dosovitskiy A, *et al.* Learning agile and dynamic motor skills for legged robots. *Science Robotics*. 2019,4(26):eaau5872.
- [2] GAO W, YOUNG C, NICHOLSON J, *et al.* Fast, versatile, and open-loop stable running behaviors with proprioceptive-only sensing using model-based optimization[C]. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA).2020:483-489.
- [3] 谭民,王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报,2013,39(07):963-972
Tan M, Wang S. Research Progress on Robotics[J]. *Acta Automatica Sinica*,2014,39(7):963-72.(in Chinese)
- [4] Seok S, Wang A, Chuah MY, *et al.* Design Principles for

- Energy-Efficient Legged Locomotion and Implementation on the MIT Cheetah Robot[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2015,20(3):1117-29.
- [5] Verstraten T, Furnemont R, Beckerle P, *et al.* A Hopping Robot Driven by a Series Elastic Dual-Motor Actuator[J]. IEEE Robotics and Automation Letters. 2019,4(3):2310-6
- [6] Liu X, Rossi A, Poulakakis I. A Switchable Parallel Elastic Actuator and its Application to Leg Design for Running Robots[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2018,23(6):2681-92.
- [7] Zhao S, Liang W, Wang K, *et al.* A Multiaxial Bionic Ankle Based on Series Elastic Actuation With a Parallel Spring[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2024,71(7):7495-507.
- [8] Hussain I, Albalasie A, Awad MI, *et al.* Design and Control of a Discrete Variable Stiffness Actuator With Instant Stiffness Switch for Safe Human-Robot Interaction. IEEE Access. 2021,9:118215-118231.
- [9] Bolívar Nieto EA, Rezazadeh S, Gregg RD. Minimizing Energy Consumption and Peak Power of Series Elastic Actuators: A Convex Optimization Framework for Elastic Element Design[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2019,24(3):1334-1345.
- [10] Zhang T, Huang H. Design and Control of a Series Elastic Actuator With Clutch for Hip Exoskeleton for Precise Assistive Magnitude and Timing Control and Improved Mechanical Safety[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2019,24(5):2215-26.
- [11] Chen W, Zhang B, Tan X, *et al.* Hip - Knee - Ankle Rehabilitation Exoskeleton With Compliant Actuators: From Human - Robot Interaction Control to Clinical Evaluation. IEEE Transactions on Robotics. 2025,41:269-288.
- [12] Kavlicoglu NC, Kavlicoglu BM, Liu Y, *et al.* Response time and performance of a high-torque magnetorheological fluid limited slip differential clutch[J]. Smart Materials and Structures. 2007,16(1):149-59.
- [13] Sun SS, Yang J, Du HP, *et al.* Overcoming the conflict requirement between high-speed stability and curving trafficability of the train using an innovative magnetorheological elastomer rubber joint. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2018,29(2):214-22.
- [14] Yin XC, Yan JC, Wen S, *et al.* Magnetorheological Fluid-Filled Origami Joints With Variable Stiffness Characteristics[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2023,28(3):1546-57.
- [15] Lampaert SGE, van Ostayen RAJ. Experimental results on a hydrostatic bearing lubricated with a magnetorheological fluid. Current Applied Physics[J]. 2019,19(12):1441-8.
- [16] Sato R, Hiasa S, Wang L, *et al.* Vertical Jumping by a Legged Robot With Upper and Lower Leg Bi-Articular Muscle - Tendon Complexes[J]. IEEE Robotics and Automation Letters. 2021,6(4):7572-7579.
- [17] Zhang JZ, Li M, Cao JD, *et al.* Research on Bionic Jumping and Soft Landing of Single Leg System in Quadruped Robot[J]. Journal of Bionic Engineering. 2023,20(5):2088-2107.
- [18] Ben A, Bruce M, John S, *et al.* Running over unknown rough terrain with a one-legged planar robot[J]. Bioinspiration & Biomimetics. 2011,6(2).
- [19] Glassow F. Despin bearing technology and applications for communications satellites[C]//3rd Communications Satellite Systems Conference. 1970: 459.