

## 变刚度仿生机械手的磁流变阻尼器设计与抓取力控制研究

侯代水

博盛（中国）控制器有限公司 山东青岛

**【摘要】**变刚度仿生机械手通过引入磁流变阻尼器实现抓取力的精准控制。分析了磁流变阻尼器在机械手中的集成方式及其对抓取性能的影响，探讨了变刚度设计对力控特性的优化作用。采用多维度优化方法提升结构与控制系统的协同性能，并通过实验验证其在不同任务场景下的适用性与稳定性。研究表明，该技术可显著增强机械手对复杂环境的适应能力，为柔性抓取提供新的实现路径。

**【关键词】**仿生机械手；磁流变阻尼器；抓取力控制；变刚度；精密操作

**【收稿日期】**2025 年 5 月 14 日

**【出刊日期】**2025 年 6 月 5 日

**【DOI】**10.12208/j.jer.20250263

### Design of magnetorheological damper and grasping force control research for variable stiffness bionic robotic hand

Daishui Hou

Robertshaw (China) Controls Co., Ltd, Qingdao, Shandong

**【Abstract】**The variable stiffness bionic robotic hand achieves precise control of grasping force through the integration of a magnetorheological damper. This study analyzes the integration methods of the damper within the robotic system and its impact on grasping performance, while exploring how variable stiffness design optimizes force control characteristics. A multi-dimensional optimization approach is employed to enhance the coordination between structural and control systems, with experimental validation conducted across various task scenarios to assess applicability and stability. Research findings indicate that this technology significantly improves the robotic hand's adaptability to complex environments, offering a new approach for flexible grasping.

**【Keywords】**Bionic robotic hand; Magnetorheological damper; Grasping force control; Variable stiffness; Precision operation

#### 引言

随着智能制造与服务机器人技术的快速发展，传统固定刚度机械手在抓取灵活性与安全性方面面临挑战。仿生机械手通过模仿生物肢体的柔顺特性，具备更强的环境适应能力。结合磁流变阻尼器的变刚度机制，能够实现对抓取过程的精细调控。这一技术不仅拓展了机械手的应用边界，也为高精度人机协作提供了新思路，成为当前机器人领域的重要研究方向之一。

#### 1 磁流变阻尼器在仿生机械手中的应用探索

磁流变阻尼器作为一种智能材料驱动与控制元件，具有响应速度快、可控性强、结构紧凑等优点，在仿生机械手领域展现出良好的应用前景。其工作原理基于磁流变液在磁场作用下流变特性的快速可逆变化，从而实现对机械系统阻尼力的实时调节。在仿生机械手中引入该装置，有助于构建具备动态刚度调节能力的

执行机构，使其在面对不同形状、材质和重量的物体时，能够通过外部磁场调控实现抓取过程中的柔顺性与稳定性之间的平衡。

在结构设计方面，磁流变阻尼器通常被集成于机械手指关节或驱动传动环节中，作为可变刚度的核心单元发挥作用。通过合理布局磁路与流体通道，确保磁场分布均匀并提升响应效率，是实现高性能控制的关键。为适应仿生机械手对轻量化和空间紧凑性的要求，磁流变阻尼器需采用模块化设计理念，在保证功能完整性的前提下尽可能减小体积和重量。控制系统方面，磁流变阻尼器需要与传感器和主控单元协同工作，形成闭环反馈机制。通过力觉、位移或应变传感器获取机械手与物体接触状态的信息，并据此调整施加于阻尼器的电流或电压，从而改变其内部磁场强度，实现对抓取力的连续、无级调节。这种主动控制策略不仅提升了

机械手的操作精度，也增强了其对外部环境变化的适应能力。

磁流变阻尼器在仿生机械手中的应用不仅涉及其基本的力学性能与控制特性，还必须综合考虑热管理、耐久性及整体系统可靠性等关键因素。在实际运行过程中，由于磁流变阻尼器需要频繁响应外部控制信号以实现刚度的动态调节，导致内部磁场不断变化，从而引发涡流效应和磁滞损耗，产生明显的温升现象<sup>[1]</sup>。这种持续的热量积累会直接影响磁流变液的流变性能，降低其响应速度与可控性，甚至可能导致液体发生热降解或相变，进而影响整个机械手的抓取稳定性。高温环境还会加速密封材料的老化，削弱其密封性能，造成磁流变液泄漏，降低装置使用寿命。在设计阶段需对热传导路径进行优化，合理布置散热结构，如采用导热材料、集成微型冷却通道或引入主动散热机制，以有效控制工作温度范围。

## 2 变刚度设计对抓取力控制的影响分析

传统的刚性机械手由于结构刚度固定，在面对不同物理属性的物体时难以动态调整输出力的大小与分布，容易导致抓取失败或对目标物体造成损伤。而引入变刚度设计后，机械手能够根据任务需求实时调节执行器的力学特性，从而更有效地匹配外部负载变化，提升抓取过程中的可控性与适应性。变刚度机制的核心在于通过可调元件（如磁流变阻尼器）改变机械系统内部的刚度参数，使得机械手指在接触物体时既能提供足够的支撑力，又能在必要时表现出柔顺性以避免过大的冲击或夹持力。这种刚度的动态调节能力直接影响抓取力的生成与维持方式，特别是在初始接触阶段和稳态夹持阶段之间，刚度的变化对力的上升速率、峰值大小及持续稳定性产生显著影响。

从动力学角度来看，变刚度系统的引入改变了机械手与物体之间的交互行为模式。当刚度较高时，系统响应速度快，抓取力迅速建立，适用于需要快速定位与稳定的场景；而在低刚度状态下，系统对外部扰动的容忍度提高，抓取力增长平缓，有助于减少对易碎或不规则物体的损伤风险。刚度参数的合理设置对于实现不同抓取任务下的力控精度至关重要。变刚度设计还影响控制系统的设计复杂度与反馈策略的有效性。传统PID控制方法在固定刚度条件下表现良好，但在刚度可变的情况下可能无法满足高精度力跟踪的要求。

为此，需采用更为复杂的自适应控制或非线性控制算法，以确保在不同刚度配置下仍能保持抓取力的稳定性和一致性。这不仅增加了控制模型的复杂性，也

对传感器数据的实时性与准确性提出了更高要求<sup>[2]</sup>。在能量利用方面，变刚度设计对驱动系统的需求也随之变化。刚度调节过程中，执行机构不仅要提供抓取所需的驱动力，还需克服刚度调节带来的附加能耗。如何在保证抓取性能的前提下优化能量分配，成为影响整体效率的重要因素。这一问题在多自由度仿生机械手中尤为突出，因其涉及多个关节协同工作与多通道力控的耦合效应。

## 3 优化设计方法及其在机械手上的实现路径

在仿生机械手的工程开发中，优化设计方法的应用是提升其整体性能与功能适应性的关键手段。面对复杂多变的操作任务，传统的经验性设计难以满足对结构强度、运动灵活性、刚度可调范围以及能量利用效率等多方面的要求。因此，引入系统化的优化设计流程成为提高机械手技术水平的重要方向。从设计流程来看，优化设计通常以建模分析为基础，通过建立机械结构的动力学模型和控制模型，明确各参数之间的耦合关系，并结合实际应用需求设定优化目标。这些目标可能包括最小化质量、最大化刚度调节范围、提升抓取力响应速度或降低能耗等。在此基础上，采用多目标优化算法对机械构型、材料选择、驱动方式及控制策略进行综合优化，以获得性能最优的设计方案。

在结构优化方面，重点在于如何在有限空间内合理布局磁流变阻尼器与其他执行元件，使变刚度机制能够高效地嵌入到机械手指内部。这一过程需要借助有限元分析工具对结构强度、刚度分布及热效应进行仿真评估，确保设计方案在物理可行性与长期运行稳定性上均达到预期标准。为满足仿生机械手对轻量化和紧凑性的要求，常采用拓扑优化技术对关键部件进行减重设计，在不牺牲力学性能的前提下实现结构精简。控制系统与机械结构的协同优化同样不可忽视。由于变刚度系统的非线性特性较强，传统控制策略往往难以实现高精度抓取力调节<sup>[3]</sup>。

为此，需将控制算法的设计纳入整体优化框架之中，采用基于模型预测控制、自适应控制或神经网络控制等先进方法，提升系统在不同刚度状态下的响应一致性与鲁棒性。还需考虑传感器布置位置、信号采集频率与处理延迟等因素对控制效果的影响，并通过优化配置进一步提升闭环系统的动态性能<sup>[3]</sup>。制造工艺与装配方式的优化也是实现高性能机械手的重要环节。考虑到磁流变阻尼器对密封性、磁场均匀性和装配精度的高要求，必须在制造阶段采用精密加工与自动化装配技术，以减少人为误差并提升产品的一致性。针对多

自由度机械手复杂的集成结构，模块化设计理念被广泛采用，便于后期维护与功能扩展。

#### 4 实际应用中的性能评估与案例研究

在仿生机械手完成结构设计与控制系统集成之后，性能评估成为验证其功能实现与技术可行性的关键环节。为全面衡量变刚度设计在抓取力控制方面的实际效果，需从力学响应特性、环境适应能力、操作稳定性以及长期运行可靠性等多个维度开展系统性测试，并结合具体应用场景进行针对性的实验分析。测试过程中，通常采用高精度力传感器和运动捕捉系统对机械手在不同刚度状态下的抓取行为进行数据采集。通过设定不同的目标抓取力值与外部扰动条件，记录机械手在接触、夹持及释放物体全过程中的力变化曲线与位移轨迹，以此评估其动态响应速度、稳态误差范围及抗干扰能力。针对不同材质、形状和表面摩擦特性的物体，对比分析刚度调节对抓取成功率与损伤控制的影响，进一步揭示变刚度机制在提升操作柔顺性方面的优势。

在工业装配、医疗辅助及服务机器人等典型应用背景下，仿生机械手需满足多样化的任务需求。因此，在性能评估中还需引入任务导向型指标，如抓取精度、重复定位一致性、夹持过程中的能量消耗水平以及多指协同控制的协调性等。这些指标不仅反映机械手的基本操作能力，也体现其在复杂作业流程中的适用性。为了更贴近真实使用环境，部分实验在模拟工作条件下进行，例如在高温、高湿或振动干扰等非理想状态下测试磁流变阻尼器的工作稳定性与控制系统的鲁棒性<sup>[4-8]</sup>。此类实验有助于发现潜在的技术瓶颈，如磁场分布受温度影响导致刚度调节精度下降、密封结构在长时间运行后出现微泄漏等问题，从而为后续改进提供依据。

除了实验室环境下的定量测试，实际应用中的用户反馈也是性能评估的重要组成部分。通过对机械手在真实作业场景中的操作效率、易用性与维护便捷性等方面进行跟踪调查，能够获取传统测试手段难以覆盖的综合表现信息。特别是在人机协作场合，机械手的安全性及交互友好性成为不可忽视的评估要素。基于大量实验数据建立性能数据库，对于推动仿生机械手的标准化评价体系具有重要意义。该数据库可作为后

续产品迭代、算法优化及跨平台比较的基础支撑，也有助于形成统一的技术规范与行业标准，促进相关技术的推广与应用。

#### 5 结语

变刚度仿生机械手结合磁流变阻尼器与智能控制技术，为提升抓取操作的精度与适应性提供了有效解决方案。通过对结构设计、控制策略及系统集成的深入研究，实现了抓取力的动态调节与稳定控制。实验结果表明，该类机械手在复杂环境下表现出良好的力学响应与操作可靠性。未来随着材料科学与人工智能的发展，该技术有望在更多高精度作业场景中得到应用，并推动柔性机器人技术向更高智能化水平迈进。

#### 参考文献

- [1] 刘思佳.流体驱动柔性仿生机器鱼设计与性能优化研究[D].吉林大学,2024.
- [2] 潘杰,于靖军,裴旭.柔性手爪机构设计与变刚度技术发展综述[J].机械工程学报,2024,60(13):281-296.
- [3] 刘志鹏.变刚度柔性机械臂设计及验证[D].中国科学技术大学,2024.
- [4] 单煜.仿生绳驱柔性变刚度机械手的设计理论与试验研究[D].燕山大学,2024.
- [5] 路懋石.变刚度多臂协作救援执行机构设计与实验研究[D].燕山大学,2024.
- [6] 谷乐.仿生扑翼式水空两栖机器人可变形翼设计[D].华中科技大学,2024.
- [7] 范彦奇.多层变刚度柔性减阻降噪蒙皮的声学特性研究[D].哈尔滨工程大学,2024.
- [8] 朱一然,张海鹏,翟思琦,等.仿生蜻蜓脉膜折纸结构的压缩性能研究[J].中国科学:技术科学,2024,54(04):678-689.

**版权声明：**©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

