

气动软体机械臂的仿生结构与位置控制研究

罗喜庆

东莞保康电子科技有限公司 广东东莞

【摘要】气动软体机械臂以柔顺性和安全性为突出优势，在人机交互及复杂环境操作中展现出广阔应用潜力。本文围绕仿生结构与位置控制展开研究，从自然界软体肢体汲取灵感，建立符合生物学特征的气动驱动结构模型，实现机械臂在多自由度运动中的柔性伸展与抓取。针对气动驱动非线性与时滞问题，提出结合力学建模与反馈控制的策略，以提升位姿精度与动态响应性能。研究结果为软体机器人在医疗、服务及危险环境操作等领域的推广应用提供理论依据与技术支持。

【关键词】气动软体机械臂；仿生结构；位置控制；非线性建模

【收稿日期】2025 年 8 月 21 日 **【出刊日期】**2025 年 9 月 17 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20250205

Bionic structure design and position control of pneumatic soft robotic arm

Xiqing Luo

Healthcare Technology International Ltd, Dongguan, Guangdong

【Abstract】 Pneumatic soft robotic arms, distinguished by their flexibility and safety, demonstrate broad application potential in human-machine interaction and complex environment operations. This study focuses on bionic structure design and position control, drawing inspiration from natural biological limbs to establish a biomechanically compliant pneumatic drive structure model. The developed mechanism enables flexible extension and grasping during multi-degree-of-freedom movements. To address nonlinear dynamics and time delays in pneumatic drive systems, a strategy integrating mechanical modeling with feedback control is proposed to enhance pose accuracy and dynamic response performance. The research findings provide theoretical foundations and technical support for the application of soft robotics in medical services, service industries, and hazardous environment operations.

【Keywords】 Pneumatic soft robotic arm; Bionic structure; Position control; Nonlinear modeling

引言

气动软体机械臂因其轻量化与柔顺特性而成为近年来智能机器人领域的研究热点。与传统刚性机械臂相比，其驱动与结构更贴近生物肢体，在保证灵活性的同时兼具环境适应性。自然界中章鱼触腕、象鼻等灵活运动方式，为气动软体机械臂的结构设计提供了启发。在研究过程中，如何兼顾复杂形变与精准控制成为核心问题，特别是气动驱动的非线性与滞后效应，直接影响位置控制的稳定性与精度。探索仿生结构与控制方法的有机结合，有望推动软体机器人在医疗辅助手术与复杂作业环境中的应用突破。

1 气动软体机械臂研究背景与问题提出

气动软体机械臂的研究源于传统刚性机械臂在复杂环境和柔性作业中的局限性。刚性结构虽然在精密度和承载能力方面具有优势，但其笨重与刚硬的特性往往限制了在医疗、服务和危险作业中的应用。面对高风险或高接触场景时，过于刚性的执行单元容易对操作者或被操作对象造成损伤。软体机械臂因具备可压缩性和柔顺性，能够在与环境交互时实现力的缓冲与适应^[1]。这种特性契合了人机协作和柔性抓取的需求，也为机器人技术的应用领域开辟了新的方向。在这一背景下，气动驱动因其可实现柔和连续的动作，成为软体机械臂常见且有效的驱动方式，研究价值与应用潜力逐渐显现。

气动软体机械臂的推广仍面临显著难题。气动

驱动系统本身存在高度非线性和显著时滞,气体的压缩性与传输特性使得其动态响应难以精确预测,从而影响机械臂在复杂任务中的位置控制精度。不同于电机驱动的可控性,气动执行单元在实际操作中表现出受环境温度、气压和材料弹性等多因素干扰的特点。与此同时,软体机械臂的结构形变并非刚体运动,而是连续分布的多自由度大变形过程,这使得传统的刚体建模方法难以直接应用。复杂的力学行为和非线性效应,导致了其运动学与动力学模型难以简化,控制策略难以直接套用现有刚性机器人领域的成熟方法。这种问题成为制约气动软体机械臂发展的核心瓶颈。

在研究过程中,如何在柔顺性与可控性之间找到平衡,成为学术界与工程实践亟需解决的关键课题。既要保证机械臂具备足够的柔性 with 适应性,又要确保其在执行任务时能够达到高精度的空间定位与路径跟踪。针对这一矛盾,研究者开始从仿生学角度出发,借鉴章鱼触腕、象鼻等自然界柔性肢体的结构特征,以期通过结构优化与驱动策略的创新化解问题^[2]。这种仿生思路不仅为气动软体机械臂提供了设计灵感,也为复杂运动的控制方法探索提供了新方向。因此,明确气动软体机械臂在结构和控制上的问题,并提出针对性的解决思路,已成为推动该领域研究与应用的重要前提。

2 仿生启发下的气动软体机械臂结构设计

仿生结构的设计理念为气动软体机械臂提供了重要的理论依据和工程方向。自然界中大量柔性肢体展现出高度的适应性与协调性,例如章鱼触腕能够完成复杂抓取与精准操作,象鼻能够兼顾力量与灵活度,这些都成为研究者进行仿生设计的重要参考。通过对生物形态的观察与建模,可以发现其运动不仅依赖单一关节,而是依靠连续柔性组织实现多自由度动作^[3]。这种特征为气动软体机械臂的结构优化提供了灵感,即利用腔体分布和材料弹性来模拟生物肢体的连续变形,使机械臂能够在弯曲、伸展、扭转等动作中保持高柔顺性和高适应性。

在实际设计中,气动软体机械臂的驱动单元多采用气腔阵列或纤维增强结构,通过充放气过程实现弯曲和伸展。气腔的几何形状与排列方式直接决定了运动模式,不同的腔体设计能够使机械臂在空间中展现不同轨迹和姿态。纤维材料的限制作用则保证了结构在变形过程中的稳定性,避免了不可控

的扩张和形变。为了实现更接近自然肢体的运动特性,设计过程中常引入有限元分析,对不同材料参数和腔体结构进行数值模拟,从而优化机械臂在受力状态下的形变效果。通过这种方法,能够有效提高运动的可预测性和控制精度,为后续控制策略的建立奠定坚实基础。

气动软体机械臂的仿生结构不仅关注形态模仿,更强调功能实现。设计中需要考虑驱动力分布、力学传递以及结构响应的协调关系,使机械臂能够在柔性 with 承载之间取得平衡。在医疗手术辅助、危险环境探测和精细操作等场景中,这种平衡尤为关键,因为既要保证与环境接触时的安全性,又要满足操作任务的稳定性和可靠性^[4]。通过对自然界柔性肢体的深入分析,并结合气动驱动的物理特性,研究者在结构设计中不断尝试材料创新与几何优化,从而推动气动软体机械臂逐步实现从实验室原型向实际应用的转变。

3 气动驱动非线性建模与位置控制方法

气动软体机械臂在驱动过程中表现出强烈的非线性和时滞特征,这与气体的可压缩性、管路的流动阻力以及腔体结构的弹性特性密切相关。不同于电机驱动系统的刚性与线性关系,气动驱动的动态过程往往受到多因素耦合影响,使得系统难以通过传统的线性建模方法准确描述^[5]。在气腔充放气过程中,压力变化与体积形变之间存在复杂的非线性关系,导致机械臂运动响应呈现迟滞和不确定性。为此,需要通过非线性建模手段对气动执行单元进行力学与流体学的联合描述,以揭示其内部状态与外部运动的耦合机理。常见方法包括基于热力学方程和流体力学方程建立的数学模型,以及结合有限元仿真对腔体形变与压力分布的动态响应进行验证。通过这种方式,能够为后续控制策略的制定提供理论基础。

在建模过程中,非线性和不确定性不可避免,因此引入自适应控制与模糊控制等方法成为解决问题的主要途径。自适应控制能够根据机械臂实时运行状态在线调整控制参数,补偿模型不精确带来的偏差,从而提升位置控制精度。模糊控制则通过模糊规则和模糊推理机制,将复杂的非线性关系转化为可操作的控制规则,尤其适用于气动驱动存在迟滞和时变特性的场景。近年来,数据驱动建模方法逐渐被应用到气动软体机械臂的研究中,通过实验数据训练神经网络或非线性回归模型,实现对机械

臂运动与驱动输入之间关系的拟合。这种方法能够有效弥补传统解析模型难以覆盖的复杂非线性区域,为控制精度的提升提供了新的解决思路。

在位置控制方法上,闭环控制策略被广泛应用。通过传感器实时获取机械臂的位置、姿态与压力信息,反馈到控制系统中进行修正,保证预期轨迹与实际运动的一致性。针对软体机械臂连续变形的特性,研究者提出基于分布式传感的控制方式,在机械臂内部布置柔性传感器以获取全局形态信息,进而实现更精准的位姿估计。同时,模型预测控制逐渐成为有效的手段,通过对未来一段时间的系统响应进行预测并优化控制输入,能够显著提高系统在复杂环境下的稳定性和动态响应性能^[6]。气动驱动的非线性建模与位置控制研究不仅是解决运动不确定性的核心问题,也是推动气动软体机械臂走向实用化的关键环节。

4 仿生结构与控制策略的实验验证与效果分析

在仿生结构与控制策略的研究中,实验验证是检验理论模型与设计方案有效性的关键环节。通过搭建气动软体机械臂实验平台,可以直观评估结构设计对运动性能的影响。基于仿生学思路构建的气腔阵列结构在不同驱动压力下表现出稳定的弯曲与伸展轨迹,实验数据表明结构参数对运动幅度和响应速度有显著影响。通过高速摄像与三维运动捕捉系统记录机械臂的动态形态变化,可以对比理论模型与实际运动的偏差,从而对建模假设进行修正^[7]。实验结果证明,仿生结构在柔顺性和灵活性方面展现出良好特性,为实现复杂运动提供了坚实基础。

在控制策略的验证过程中,采用闭环反馈控制与模型预测控制的组合方式对机械臂进行多工况测试。实验设置不同的轨迹跟踪任务和抓取操作,传感器实时采集压力和位移数据并反馈至控制系统,调整气腔驱动输入。结果显示,非线性建模结合自适应控制能够显著降低位置误差,在动态响应和稳定性方面均优于传统的开环控制方法。同时,模糊控制在处理复杂非线性时表现出较好的鲁棒性,能够在环境扰动和外部负载变化的情况下保持稳定的运动轨迹。通过对比不同控制方法的实验结果,可以验证提出的控制策略在提升精度和动态性能上的有效性。

实验效果分析不仅局限于运动轨迹,还涉及能耗、响应速度和环境适应性等综合指标。结果表明,仿生结构的柔性特性有效降低了操作过程中的冲击

力,提高了与环境接触时的安全性^[8]。控制策略在自由度运动中展现出较高的协调性,使机械臂能够完成抓取、搬运等复杂任务。通过实验对比发现,优化后的结构与控制方法在重复性操作中保持了较高的精确度和稳定性,能够适应多种应用场景的需求。这些实验结果充分证明了仿生结构与控制策略的合理性,也为气动软体机械臂在医疗、服务和危险环境作业中的推广应用提供了实践支撑。

5 结语

气动软体机械臂的研究在仿生结构与位置控制方法的结合下展现出显著优势。仿生学理念赋予其柔顺与灵活的特性,非线性建模与先进控制策略的应用有效提升了运动精度与稳定性。实验验证表明,优化后的结构与控制方法能够适应复杂环境并完成多样化操作任务,具有良好的可行性与应用潜力。这一研究为软体机器人在医疗辅助、服务操作及危险环境作业等领域的推广奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 刘湘衡,何忠祥. 基于多阶滑模观测器的永磁推进电机无位置传感器控制[J].船电技术,2025,45(08):77-80.
- [2] 赵德旭,赵佰亭. 基于协同双反馈 ESO 的永磁同步电机无位置传感器控制[J/OL].重庆工商大学学报(自然科学版),1-13[2025-08-19].
- [3] 蒋振宇,王海涛,李新兆. 基于参数化设计的蝶翅微纳结构仿生设计及应用[J].包装工程,2025,46(14):277-284+295.
- [4] 张禹,张政,赵文川,等. 气动软体机械臂的视觉定位运动控制[J].液压与气动,2025,49(07):116-124.
- [5] 杨威. 微纳结构仿生抗滑材料在路面表层施工中的应用[J].中国水运,2025,(14):120-122.
- [6] 王晓帆,刘伟志,邱腾飞,等. 高速动车组永磁牵引电机无位置传感器控制[J/OL].电力电子技术,1-8[2025-08-19].
- [7] 张坤霖.气动仿生软体机械臂的设计、建模与实验[D].沈阳工业大学,2024.
- [8] 沈逸.一种仿静水骨骼气动软体机械臂设计与控制研究[D].华中科技大学,2024.

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/>



OPEN ACCESS