

# 变刚度软体机械臂结构设计研究

冯 静

(梧州学院机械与资源工程学院 广西梧州 543002)

**摘 要:** 本文提出了一种刚度可变的软体机械臂结构设计方法, 该方法通过控制柔性相变材料的温度, 实现对软体机械臂的刚度控制, 使其能够适应各种复杂的工作环境, 刚度可变的软体机械臂具有广阔的应用前景。

**关键词:** 变刚度; 软体; 机械臂; 结构设计

## 0 引言

伴随着经济的飞速发展、科技的不断进步, 机器人在军事、医疗、工程以及生产生活等多个领域均得到了广泛的应用, 而作为机器人核心部件的机械臂, 也得到了国内外学者的广泛研究关注。相比常规刚性机械臂, 软体机械臂具有长径比大、自由度多、环境适应性好等优点, 尤其适合装配、检测工作空间非常有限的作业, 它能在复杂狭窄内腔环境下进行原位检测、原位作业, 如飞机制造中非结构箱体(翼盒、进/排气道等)制孔、焊接、喷胶等复杂操作任务; 航空发动机原位检测; 微创手术机器人等, 也能用在一些恶劣环境危险作业中<sup>[1]</sup>。然而, 对比刚性机械臂, 软体机械臂也存在一些缺点, 如刚度不足导致抓取力不够。软体机械臂需要调节刚度来调整抓取能力, 因此本次设计一种刚度可变的软体机械臂结构。

## 1 研究背景

连续体机器人是伴随人们对传统刚性连杆机器人自由度需求的增加而发展起来的一种仿生机器人。作为一种机器人类别出现在人们面前, 最早可追溯到 20 世纪 60 年代, 但其作为一个研究领域目前仍处于初级形成阶段。国内外研究者们正在继续探索连续体机器人结构的各种可能性, 以达到在机电设备中重现蛇、大象的鼻子和章鱼的触须等软体组织所展现出来的令人难以置信的移动、操纵和感知能力的目的<sup>[1-2]</sup>。在过去数十年里, 许多连续体机器人, 直径范围从几毫米到几十厘米, 如 da Vinci 微创手术机器人使用的连续体手术器械, 上海交通大学研制的连续体手术机器人, 和 UK-based OC Robotics 生产的 snake-arm robot 等, 已经被应用于医疗领域和工程领域, 并取得了富有成效和利润的应用。

然而, 在需要与人近距离接触或者接触其他脆弱物体的任务中, 连续体机器人其实并不是最理想的。虽然连续体机器人可以在其结构的任何一点弯曲去适应目标物体的外形, 但一般认为其弯转结构的截面是被假定为刚性的<sup>[3]</sup>。当他们操作物体或与环境发生交互时, 它们的刚性横截面将导致不必要的碰撞。在空间受限或者与环境交互密切的情况下, 特别是在生物医疗领域, 部署传统意义上的连续体机器人存在较高的安全风险, 可能会对被执行对象或交互环境造成意外损伤。

为了降低连续体机器人与环境交互过程中产生的安全风险, 可以通过增加传感器, 利用编程的方法即软件智能, 进行柔顺控制以达到人们所需要的安全性。还有一种方法, 那就是可以通过在机器人中引入与目标物体刚度相似的弹性模量材料, 利用材料和结构的内在柔顺性即硬件智能, 使机器人能够固有地适应与之交互的对象, 并在其环境中安全有效地运行<sup>[1-2]</sup>。与软件智能相比, 硬件结构层面上的智能, 除了能提高运动灵活性和降低发生不必要伤害的风险外, 在外型上也更容易被人们所接受, 特别是在医疗康复、微创手术和助老助残等领域<sup>[3]</sup>。

通常, 这些软体设备从生物学中汲取灵感, 通过模仿某些生物

组织特性, 比如模仿章鱼等生物的柔软性和柔韧性, 以达到改善人机界面的阻抗匹配, 实现某些与生物有机体相类似的机器人功能, 如软体机械臂。随着材料、致动器, 和柔性传感器技术的发展, 研究者们对在软体机器人中再现生物有机体功能提出了进一步的要求。图 1-a 和图 1-b 是 Festo 公司结合章鱼腿和大象鼻子研发出的仿生软体机器人, 它们清晰地展示了研究者对软体机器人未来发展的一种预期。软体机器人技术的基本原理是遵从性, 我们能获得与刚性机器人不同的环境交互方式, 但不幸的也正是由于软体机器人的顺应性, 与周围环境的接触和构象对软体机器人的移动性有很大的影响。除此之外, 重力作用、材料和驱动方式的非线性等都会对软体机器人的形状、位置精度和负载能力等产生影响。图 1-c 是特斯拉公司最新研发的蛇形智能软体充电手臂。

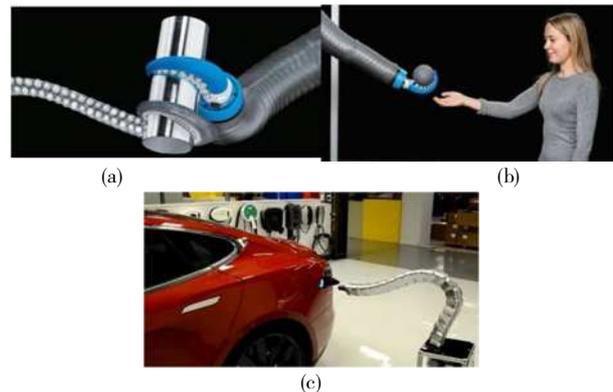


图 1 软体机器人

实际上, 当前软体机器人确实在精度和负载方面无法与传统刚性机器人相比, 在许多方面还达不到连续体机器人一样的水平。这使得软体连续体机器人无法像诺丁汉大学劳斯莱斯技术中心开发的连续体机器人系统一样可应用于飞机燃气涡轮发动机的原位维修, 也无法支持手术精度位置范围控制在 0.5 毫米至 1.5 毫米之间。我们希望软体机器人能在保持安全柔顺的同时提供满足任务需求的精度和负载能力, 以取代或者部分取代目前与人交互密切的设备。从当前软体机械臂结构形式上看, 大多采用多关节或气腔结构, 以拉绳或气动驱动, 其存在着连续变形能力不足、刚度不可控及空间位置覆盖不完全等问题。软体机械臂刚度不足会导致抓取力不够, 目前对变刚度软体机械臂结构的研究大多处在原型探索阶段。

## 2 结构设计

软体机械臂结构设计主要包括软体材料、驱动方式、柔性传感器、变刚度方式和建模控制方法等多方面的设计选择。市面上常见的软体机械臂材料通常有橡胶、形状记忆合金、离子聚合物金属复合材料、水凝胶等。

作为机械臂动力来源的驱动器, 市面上有多种方式可供选择,

如气动驱动、绳索驱动、磁驱动、电压驱动和形状记忆合金驱动等。由于气压驱动体积小、速度快，且成本较低，本次选用气压驱动方式。通过调节气压的大小，可以操控机械臂的任意伸缩弯曲。

软体机械臂建模主要包含运动学建模和动力学建模两个方面，建模方法常用的是分段常曲率方法和刚性梁理论。变刚度设计也有多种方式，如基于耦合结构变刚度、颗粒阻塞变刚度、基于材料相变变刚度等<sup>[4-5]</sup>。

### 3 变刚度设计

软体柔性机械臂有利于通过复杂狭小空间到达目标位置，但软体机械臂刚度不可变限制了执行精准任务的效果。刚度可变是软体机械臂结构设计的核心内容，本文主要对基于材料相变变刚度方式进行研究探讨。

以往的软体机械臂研究中较少利用相变材料作为躯干进行结构设计，本次通过纤维增强型致动器与低熔点聚己酸内酯材料相结合，设计一种刚度可变的软体机械臂。本次研究的变刚度软体机械臂材料是一种特殊材料，它可以在保持柔性的同时，通过控制温度去改变刚度，其刚度可以在一定范围内发生变化。这种材料通常由两种或两种以上的组分组成，具有形状记忆功能，能够在温度变化时发生相变，从而改变材料的刚度。

“肌肉性静水骨骼”是自然界中象鼻、舌头和软体触角等生物器官中的生理结构，具有快速伸长并朝任意方向弯曲的能力<sup>[1-2]</sup>。有学者基于“肌肉性静水骨骼”的驱动原理提出了一种纤维增强型致动器，该致动器通过改变纤维线的缠绕方式和数量，在通入流体压力后致动器可实现伸长和弯曲<sup>[4-5]</sup>。本次在纤维增强型致动器的基础上进行重新设计，提出一种基于低熔点聚己酸内酯材料的刚度可变纤维增强型致动器(图 2-d)。利用嵌入到软体机械臂致动模块内的电热丝和微流管道，控制低熔点聚己酸内酯材料的温度，利用材料杨氏模量的变化性能(图 3)，实现对软体机械臂刚度的控制<sup>[4-5]</sup>。

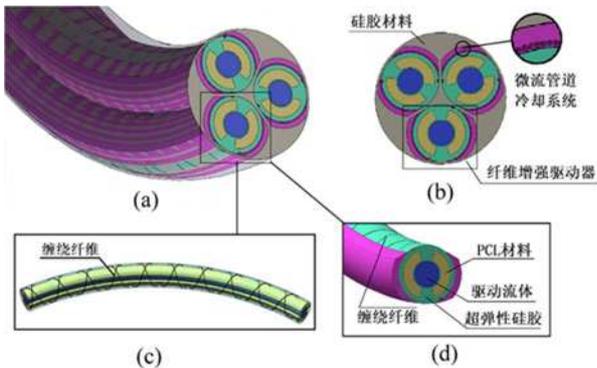
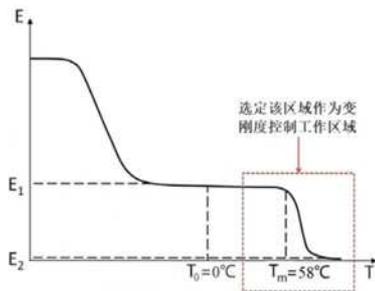


图 2 软体机械臂内部设计示意图  
(a) 软体机械臂致动模块结构图；(b) 软体机械臂横截面图；  
(c) 纤维增强型致动器全局图；(d) 纤维增强型致动器局部图

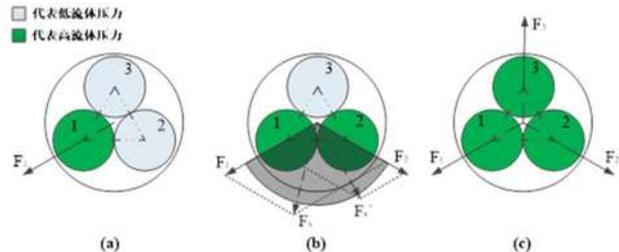


(T 代表温度，E 代表杨氏模量；Tm 代表熔点温度，E1 代表固态杨氏模量，E2 代表液态杨氏模量)  
图 3 聚己酸内酯材料温度特性图

利用上述所设计的刚度可变纤维增强型致动器，参考章鱼触手肌肉结构(图 4)，设计一种仿生并联致动模块，如图 2-a 和 2-b 所示。该模块内部由三个刚度可变纤维增强型致动器，通过协调控制各致动器内部流体压力的大小，实现不同方向的弯曲变形，致动方式如图 5 所示。最终通过串联的方式，把仿生并联致动模块串联起来组成软体柔性机械臂。



图 4 章鱼触手解剖示意图



(1, 2, 3 表示纤维增强型致动器编号)  
图 5 软体机械臂致动力分析图

### 4 结论

通过变刚度技术，软体机器人可以在处理刚性物体或进行高精度操作时具有高刚度，以提供更好的精确性和稳定性；而在处理柔软物体或需要与人类进行合作时具有低刚度，以实现更好的柔软性和适应性。这种能力使得软体机器人可以更好地适应不同的任务需求和各种复杂工作环境，因此变刚度软体机械臂具有广泛的应用前景。

### 参考文献：

[1]曹玉君,尚建忠,梁科山等.软体机器人研究现状综述[J].机械工程学报,2012,48(03):25-33.  
[2]闫继宏,石培沛,张新彬等.软体机械臂仿生机理、驱动及建模控制研究发展综述[J].机械工程学报,2018,54(15):1-14.  
[3]侯涛刚,王田苗,苏浩鸿等.软体机器人前沿技术及应用热点[J].科技导报,2017,35(18):20-28.  
[4]王封旭,邢志广,杨朋朋等.基于低熔点合金相变的变刚度软体机械臂稳态传热研究[J].中国机械工程,2021,32(07):793-798.  
[5]王封旭.基于低熔点合金的软体机械臂变刚度技术研究[D].哈尔滨工业大学,2021.

基金项目：广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2021KY0672)