

# 面向软体机器人的新型变刚度技术研究进展

刘晨<sup>1,2</sup>, 吴业辉<sup>1</sup>, 李博<sup>1\*</sup>, 董旭峰<sup>3</sup>, 陈花玲<sup>1,2\*</sup>, 陈贵敏<sup>1</sup>

1. 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西省智能机器人重点实验室, 西安 710049

2. 机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049

3. 大连理工大学材料工程学院, 大连 116000

**摘要** 软体机器人具有多样的运动自由度和良好的环境适应性, 而低刚度限制了其实际操作的承载能力。因此, 发展面向软体机器人的变刚度技术是当前研究的前沿热点问题。综述了近5年新型变刚度技术进展, 分析了其工作原理(静电吸附原理、层干扰原理、自锁折纸机理、电/磁流变原理和最小势能原理)、变刚度性能及实际应用。讨论了当前变刚度技术的挑战和未来的发展方向, 并探讨了新一代变刚度技术的潜在研究价值。

**关键词** 软体机器人; 变刚度; 折纸机构; 仿生设计; 介电弹性体

软体机器人是一种前沿的机器人技术, 它主要由柔软的功能材料构成, 比传统的刚性机器人大大增加了自由度, 可实现与环境的主/被动变形以及对人体的安全接触。然而由于其主体材料为柔性高分子聚合物, 软体机器人输出力有限, 难以完成在负载下的操作。例如, 面向医疗手术的软体机器

人在手术中需要提供机构刚度支撑完成手术切割、缝合等操作<sup>[1-4]</sup>; 此外, 各种柔软连续体机器人在运动中受到扰动后会产生额外振动, 导致其精度大大下降, 因此也需要一种与之适配的柔性变刚度技术<sup>[5-8]</sup>。

传统的变刚度技术在与柔性机器人集成时存

收稿日期: 2020-01-07; 修回日期: 2020-02-11

基金项目: 科技部重点研发计划项目(2019YFB1311600); 国家自然科学基金项目(91748124, 52075411); 陕西省重点研发专项(2020ZDL-GY06-11)

作者简介: 刘晨, 硕士研究生, 研究方向为软体机器人、智能材料与结构, 电子信箱: glchen@stu.xjtu.edu.cn; 李博(通信作者), 副教授, 研究方向为电活性聚合物、软体机器人及仿生制造, 电子信箱: liboxjtu@xjtu.edu.cn; 陈花玲(通信作者), 教授, 研究方向为智能材料与结构、软体机器人, 电子信箱: hlchen@xjtu.edu.cn

引用格式: 刘晨, 吴业辉, 李博, 等. 面向软体机器人的新型变刚度技术研究进展[J]. 科技导报, 2021, 39(17): 69-81; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.17.009

在不足,导致结构复杂,适应性和顺应性较差<sup>[9-12]</sup>。例如,低熔点合金和形状记忆合金变刚度效果明显,但其刚度变化不连续和响应速度慢的局限也很明显<sup>[13-16]</sup>。而气动变刚度技术虽然变刚度尺度较大,但是需要额外的气源设备,并不适用于轻量化、低噪声环境的使用需求等<sup>[17-20]</sup>。因此,迫切需要发展一种新型变刚度智能材料及结构技术,为软体机器人的功能完善提供支撑。在过去的5年里,研究人员继续开发和研究了新的可变刚度技术,并升级了现有的技术。

## 1 静电吸附变刚度技术

基于静电吸附的变刚度技术是利用边缘电场的极化效应产生电场力<sup>[21-27]</sup>,来增加电极层与被吸附层之间的压力,进而增大彼此之间的摩擦力,从而提高结构的整体刚度。刘晨等<sup>[27]</sup>基于静电附着原理设计了变刚度结构。其设计具有刚度调节灵敏、控制简单、结构柔性好等特点。静电附着变刚度结构的基本组成如图1<sup>[27]</sup>所示,包括电极层和中间夹层,电极层材料为导电碳与硅橡胶的混合物,绝缘材料为硅橡胶,中间夹层材料为金属箔。

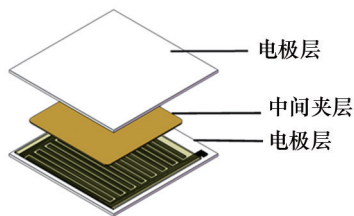


图1 静电吸附变刚度结构示意图

### 1.1 工作原理

静电吸附的基本原理是利用正负电极之间的边缘电场极化被吸附物体,电极层与被吸附物体表面在相对应位置产生相反的电荷,产生吸附力<sup>[21]</sup>。如图2<sup>[27]</sup>所示,电极层中正负电极交错排列,正极与负极之间形成电场,这些电场区域分为主电场和边缘电场。假想的主电场线只通过电极层内部,而边缘电场线则通过电极层周围的空间,这些边缘电场会极化被吸物体表面,并使其表面积聚与局部电极极性相反的电荷。电极层与被吸物体表面之间

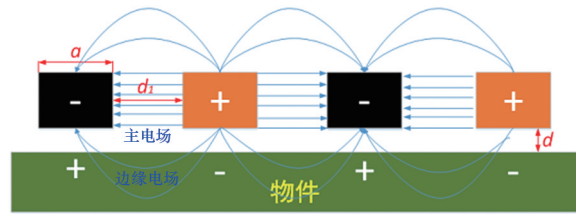


图2 静电吸附原理

出现电场,并产生电场力,从而实现电极层与物体的相互吸引。

变刚度结构的工作原理如图3<sup>[27]</sup>所示。当不施加电压时,电极层与中间层的配合不紧密,夹层材料内部的正电荷和负电荷随机分布(图3(a))。当外部张力 $F$ 作用于电极层两端时,电极层可自由变形。在这种情况下,结构的刚度较低。当电压作用于电极层时,每个电极层内交错排列的正负电极会产生边缘电场,极化中间层,中间夹层内部的电荷会有序排列,电极层与中间夹层直接产生电场力。当电极层与中间夹层接触,产生如图3(b)所示的静电附着力 $P$ 。在这种状态下,如果有一个外部张力 $F$ 施加在电极层的两端,由于 $P$ 的作用,电极层与中间夹层直接的摩擦力 $f$ 变大,限制了结构的变形,这相当于增加了结构的整体刚度<sup>[27]</sup>。

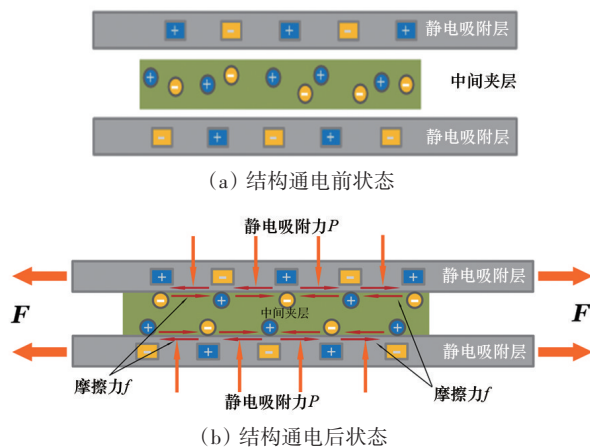


图3 柔性变刚度结构原理示意图

### 1.2 实验及分析

静电吸附变刚度结构的变刚度现象在沿面扩张变形时更为明显。实验设置如图4<sup>[27]</sup>所示。通过测量拉力与结构变形之间的关系,可以观察到不同电压下结构刚度的调整效果。

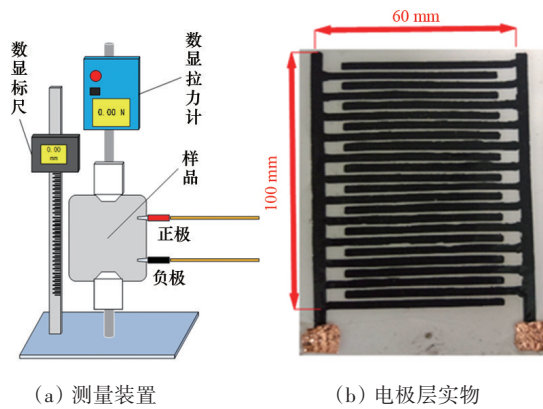


图4 刚度测量装置原理

图5<sup>[27]</sup>反映了测量不同中间夹层层数时结构刚度的变化情况,最大刚度可增至原来的约2倍。并且由图可知,随着夹层层数的增加,刚度的绝对变化量增大,但刚度的相对变化却在减小(刚度相对变化量是刚度变化量与原始刚度之比)。这是由于夹层数增加,对应的可调节刚度的层数增加,其刚度提升的最大值将会增加。但同时,层数增加也导致结构自身的原始刚度提高,静电吸附变刚度结构提高刚度的性能目前是有限的,所以相对刚度变化值会缩小。

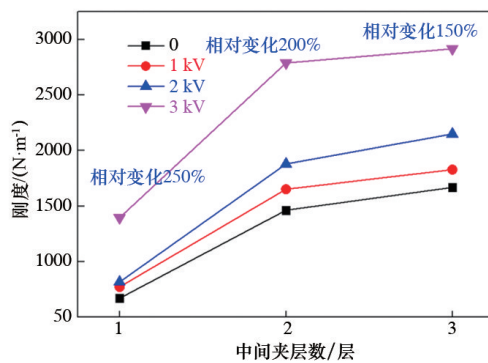
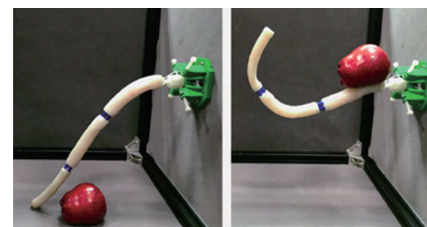


图5 静电吸附变刚度效果

由于整个结构是柔性的,这种基于静电吸附的变刚度技术非常适合于柔性机器人。同时,它也符合机器人简化控制和提高效率的需求,因为它只需要通过调整电压就可以实现对结构刚度的控制。然而,静电吸附中存在静电残留现象,断电后吸附力会保留一段时间。另外,由于工作电压在千伏级,绝缘材料的选择和研发也是难点<sup>[28-32]</sup>。因此,如何快速消除残余静电,开发高效的绝缘材料或降低其工作电压是其未来研究的重点。

## 2 静电层聚密变刚度技术

干扰式(jamming)的聚密变刚度,是通过外部载荷将离散的材料聚集在一起,实现结构刚度的变化。Cheng等<sup>[33-34]</sup>结合纤维干扰式变刚度原理和介电弹性体,开发了用于微创手术的可变刚度机器人手臂和用于无人机的柔性变形翼等软体机器人(图6<sup>[33-34]</sup>),变刚度技术使软机器人在人机交互时,既能保证和人接触时的使用安全,又可以通过改变自身的刚度完成一系列任务<sup>[33-34]</sup>。



(a) 变刚度柔性手术臂



(b) 变刚度柔性机翼蒙皮

图6 变刚度软体机器人

在此基础上,研究人员开发了基于静电场的静电层聚密(electrostatic layer jamming, ELJ)变刚度结构<sup>[35-37]</sup>,其基本构成主要由柔性电极层和绝缘层构成,并且正负电极层相邻排布,如图7<sup>[35]</sup>所示。

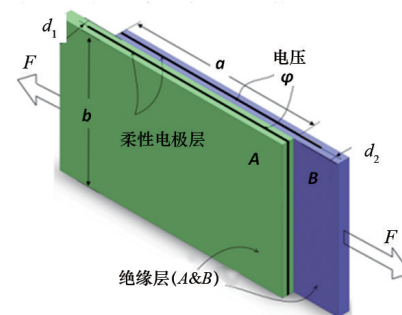


图7 电驱动层干扰变刚度结构示意图

### 2.1 工作原理

静电层干扰技术依靠电场力的作用,使得正负极板在电场作用下相互吸引,挤压材料层,从而增大层与层之间的摩擦力,实现结构刚度的增大。

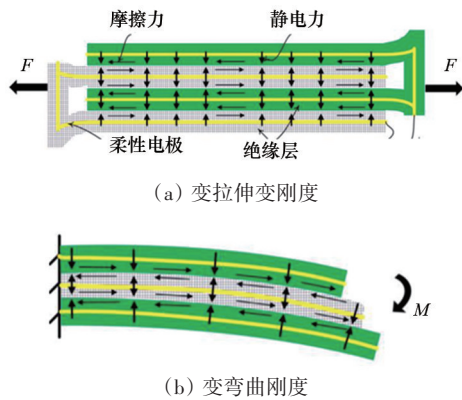


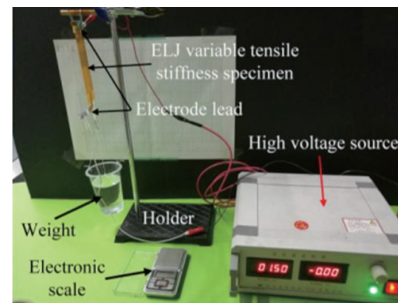
图8 ELJ的变刚度原理

与静电吸附变刚度原理不同,层干扰变刚度主要是通过正负电极层的相互吸引增大摩擦力,而前者是通过电极层吸引中间夹层达到增加摩擦力的效果。此设计可以实现变拉伸刚度和变弯曲刚度,如图8<sup>[35]</sup>所示,使用电压驱动,具有良好的可控性。

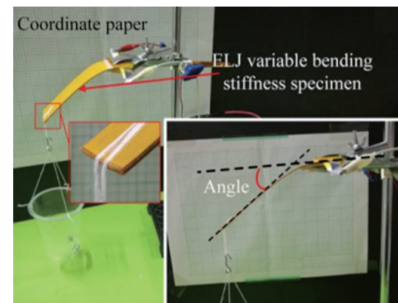
2.2 实验及分析

Wang等<sup>[35]</sup>测试了ELJ的拉伸刚度和弯曲刚度特性。测试设备如图9<sup>[35]</sup>所示。

测试结果表明,在电场作用下,拉伸刚度和弯



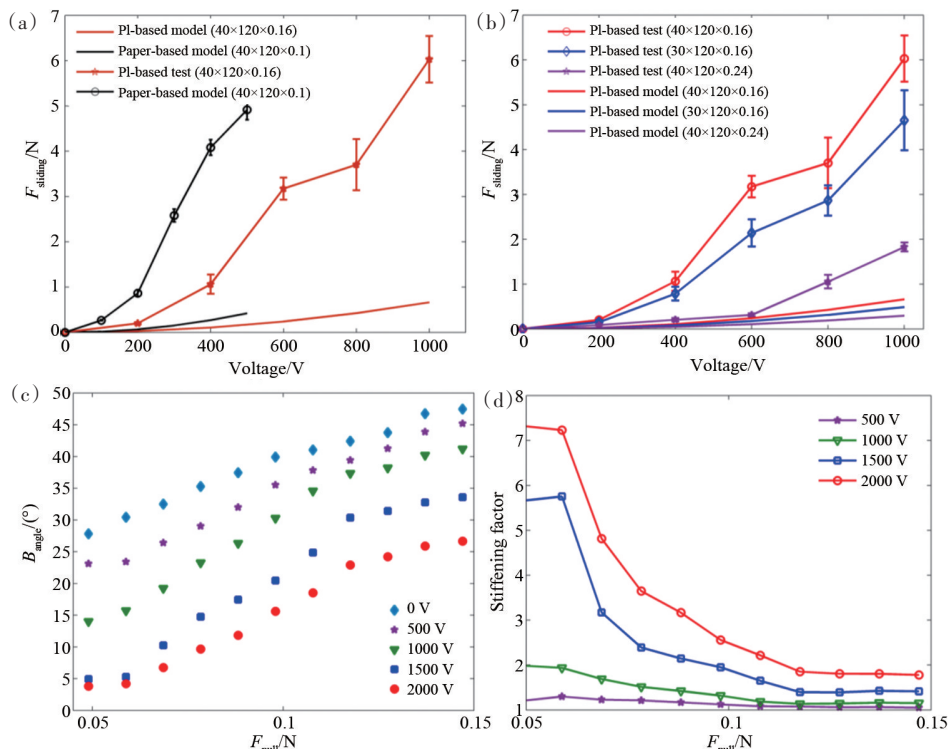
(a) 拉伸刚度测试



(b) 弯曲刚度测试

图9 ELJ变刚度测试

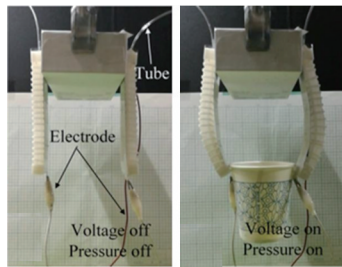
曲刚度均有较大提高,且刚度随电压的增大而增大(图10<sup>[35]</sup>)。



(a) 和(b) 为不同规格拉伸试样的实验数据;(c) 和(d) 为悬臂梁弯曲试件的试验数据和规定的刚度系数

图10 实验结果

图 11<sup>[33]</sup>展示了 ELJ 作为变刚度元件与柔性线执行器相结合的实际应用,柔性线驱动器带动抓手变形,当对 ELJ 施加电压时,抓手刚度提高,保持形状,从而抓起目标。



(a) 无电压 (b) 施加电压

图 11 ELJ 的变刚度应用

与气驱动层干扰技术相比,静电式的层干扰技术省去了复杂且笨重的气源设备,无论是在控制还是在轻量化程度方面都取得了一定提升<sup>[35-37]</sup>(表 1<sup>[35]</sup>)。

表 1 气动与静电层干扰结构性能比较

层干扰结构	驱动方式	刚度变化/倍	响应速度/ms
气动式	负压驱动	~6	100~1000
静电式	静电力驱动	~7	1~100

无论是静电吸附变刚度技术还是电驱动层聚密变刚度技术,都存在一定的技术限制。核心的制约问题在于千伏级的驱动电压接近绝缘层的击穿极限,容易产生电击穿问题。所以未来的改进思路之一是降低驱动电压并设法提高绝缘材料的耐压性。

### 3 PVC 凝胶变刚度技术

PVC 材料全称为聚氯乙烯 (polyvinyl chloride),是一种对电刺激有响应的电活性凝胶。Uddin 等<sup>[38]</sup>首先发现了 PVC 凝胶在电场作用下的弯曲变形,通过电镜观察发现,当直流电场作用于凝胶时,仅在阳极电极表面发生蠕变变形(图 12<sup>[38]</sup>),阴极表面没有发生这种现象;当直流电场关闭时,凝胶通过自身弹性迅速恢复到原来的形状。这种变形的原理是,由于在 PVC 凝胶表面和阳极电极之间的麦克斯韦力,PVC 内部的介电分子向阳极移动<sup>[39-42]</sup>,带动材料整体被阳极吸引。

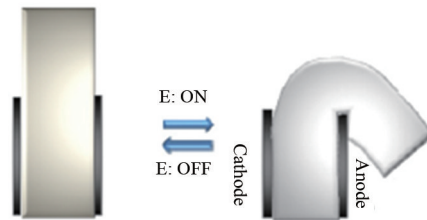


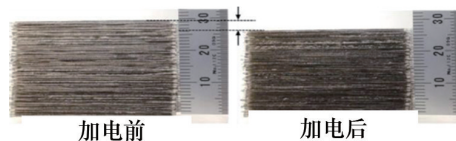
图 12 加电凝胶材料蠕变变形

#### 3.1 工作原理

PVC 凝胶 (PVC gel) 变刚度的工作原理为: PVC 凝胶结构为阴极极板-PVC 材料层-阳极金属网交替排布,并堆叠累加至一定厚度。加电后,阳极金属网吸引 PVC 材料至其网孔中(图 13(a)<sup>[42]</sup>),导致结构整体在厚度方向上发生挤压变形(图 13(b)<sup>[42]</sup>),达到结构刚度变化的效果。



(a) 加电前后 PVC 凝胶阳极附近的变化



(b) 加电前后 PVC 凝胶厚度方向的变形

图 13 PVC 凝胶工作原理<sup>[42]</sup>

堆叠而成的 PVC 凝胶(图 14<sup>[43]</sup>)厚度约为 2 cm。通电时,其在厚度方向发生压缩,驱动电压在几十到几百伏特。影响其工作性能的关键因素有阳极网孔大小及疏密程度与 PVC 材料模量的配合情况,PVC 材料层的配比(PVC 与己二酸二丁酯的配比),以及各层的厚度。

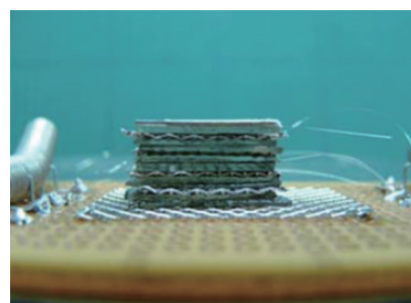


图 14 PVC 凝胶实物

### 3.2 实验效果及应用

利用测量 PVC 凝胶刚度的测试平台(图 15<sup>[44]</sup>), 给 PVC gel 施加不同的直流电压, 通过传感器采集其形变信息, 利用虎克定律可拟合不同电压下结构刚度的变化情况, 测出 PVC 凝胶的变刚度性能曲线(图 16<sup>[44]</sup>)。可以看出, 随着电压升高, 结构刚度增大, 电场强度增加至 1200 V/mm 时, 刚度增大到最初的 10 倍。由此说明, 此结构在厚度方向的刚度调节能力十分优良。

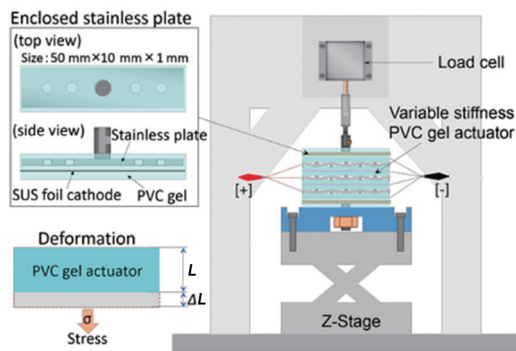


图 15 PVC 凝胶刚度测量装置

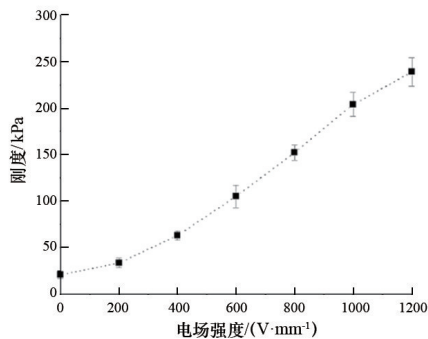
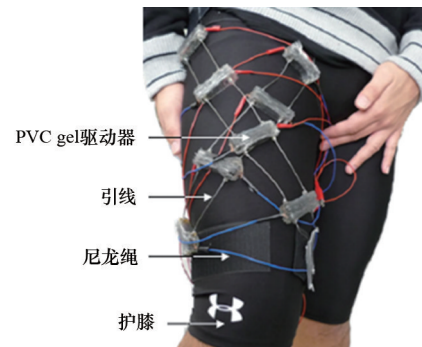


图 16 PVC 凝胶结构刚度变化情况

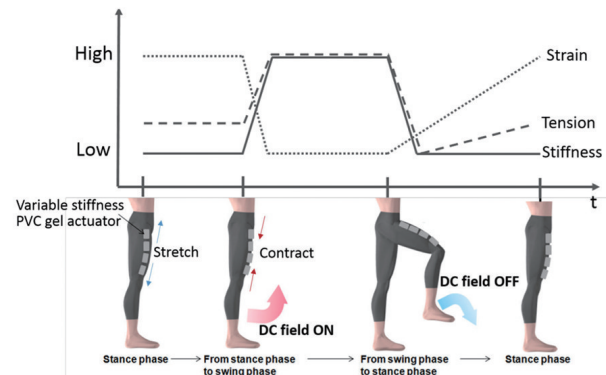
日本信州大学 Minoru Hashimoto 团队将 PVC 凝胶开发为助力行走的人工肌肉, 帮助老年人或行走有困难的人群<sup>[44]</sup>, 如图 17<sup>[45]</sup>所示。

这款人工肌肉的工作原理如图 17 所示: 当人行走时, 如果想上楼梯或者做抬腿动作, 电压驱使人工肌肉收缩, 并提高自身刚度, 辅助抬腿动作完成, 电压消失, 人工肌肉刚度降低, 完成落腿动作<sup>[45-46]</sup>。

实验显示 PVC 凝胶的变刚度效果良好, 并且其驱动电压最低可在几十伏特, 所以在可穿戴领域发展潜力巨大。然而, 由于其阳极金属网刚性较



(a) 助力装置结构



(b) 动作分解

图 17 PVC 凝胶假肢运动辅助装置

大, 在应用在一些比较柔软的结构中时会有限制<sup>[38-42]</sup>。未来研究方向主要集中在增大其工作频率范围以及研发新的阳极材料与结构, 以适应全柔性机器人的发展。

## 4 折纸变刚度技术

近年来, 折纸结构作为一种新的软体机器人驱动方式成为研究热点, 图 18<sup>[47]</sup>展示了一款折纸机器人, 具有多自由度运动的优势<sup>[47]</sup>。在完成各种驱动效果的同时, 人们还发现折纸结构具有一定的变刚度效果, 实现方式为折叠机构的自锁效应。

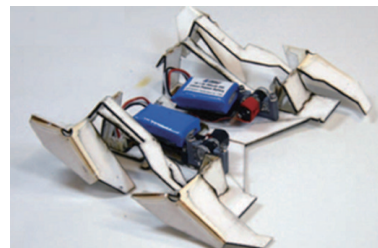


图 18 折纸机器人

首尔国立大学 Kim 等<sup>[48]</sup>利用串联的折纸单元设计出搭载在无人机上可自锁的机械臂,如图 19<sup>[48]</sup>所示,通过绳控制收缩,弹性绳实现自动伸展,磁铁和驱动线结合完成机械臂自锁和固定,可在所需方向上显著增加机械臂的刚度<sup>[48]</sup>。



图 19 可折叠机器人手臂使无人机能够执行其他方法无法执行的任务

Li 等<sup>[49]</sup>研究了一种具有可编程折纸机械超材料结构,如图 20<sup>[49]</sup>和图 21<sup>[49]</sup>所示,利用单共线单元 (single-collinear, SC) 这种典型的自锁折纸单元,通过串联具有相同折痕图案、不同分段刚度特性(由不同的折纸结构以及材料导致)的单元,整体机构产生分段线性刚度<sup>[49-51]</sup>。通过非可折叠折纸的锁定和重构达到刚度可编程性。

折纸变刚度技术是一种高效的变刚度技术,驱动方式多元化(磁场驱动、绳驱动、利用智能材料自驱动等),且效率较高,在满足大变形的同时亦可完成刚度调节效果。但由于不同使用场合下需要重新设计结构,并且其力学分析较为复杂,因此使用时需要通过机构学方法进行计算和设计。未来研究方向包括被动和主动的自锁折纸超材料,从机构学角度研究自锁过程中的运动自由度的变化,探索基于智能材料的折纸结构,例如 Hencky-type 结构<sup>[52]</sup>,并从能量的角度考虑自锁效果。

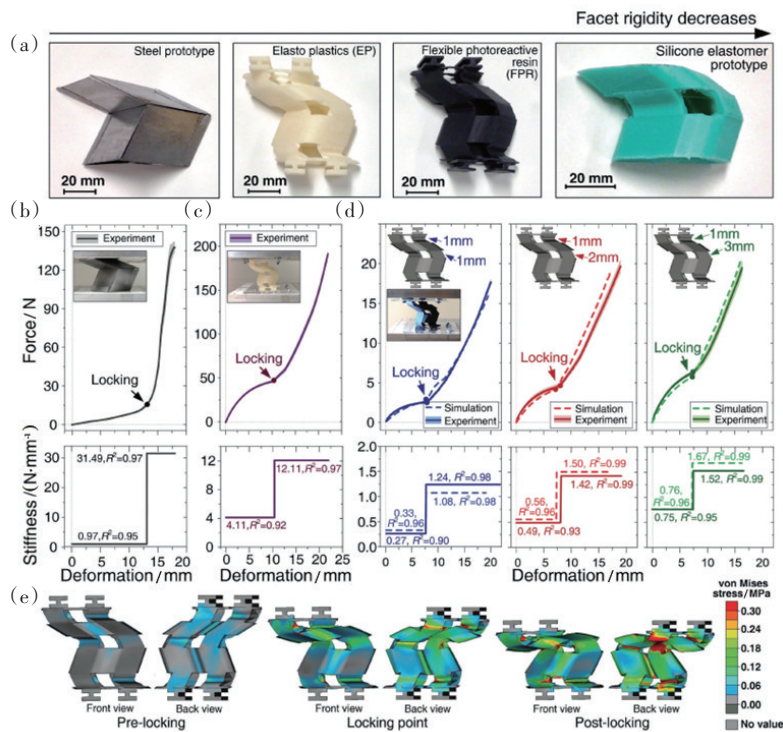


图 20 不同刚度特性的 SC 单元及其受压后的应力分布

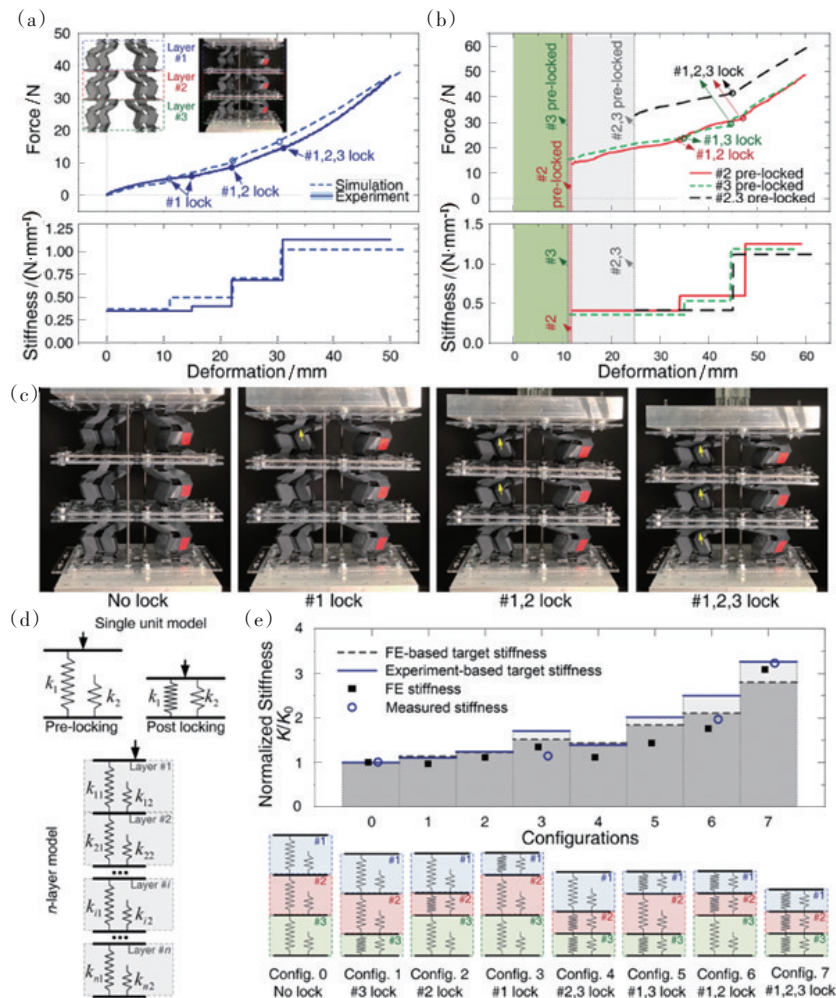


图21 各类串联后的SC单元及其变刚度效果

## 5 磁/电流变变刚度技术

磁流变弹性体(magnetorheological elastomers, MRE)和电流变弹性体(electrorheological elastomer, ER)是指可以通过外界磁场或者电场调节其自身刚度和阻尼参数的智能材料,具有响应迅速、刚度变化明显(调节刚度范围约为5~10倍)、可重复性好等优势<sup>[53-61]</sup>。

1995年,Shiga等<sup>[62]</sup>首先提出磁流变弹性体的概念。理论研究表明,磁流变弹性体变刚度、变阻尼性能的原因是软磁性颗粒在磁场作用下相互吸引,从而从无序排列变为有序排列。近几年来,利用MRE制成的变刚度支座在工程结构减隔震控制领域显示出广阔的前景,引起国内外学者的关注。

Behrooz等<sup>[63]</sup>制作了一款刚度及阻尼可调的支座(图22<sup>[63]</sup>),进行了器件性能测试及三层钢框架结构振动台试验,在不同的地震波下该装置均呈现良好的减震效果<sup>[63]</sup>。

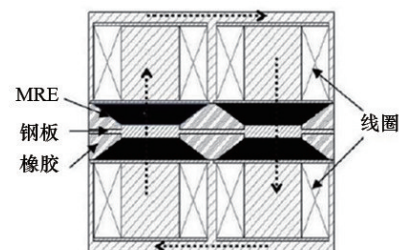


图22 变刚度MRE支座

然而,磁流变弹性体在实际应用中存在稳定性较差、响应较慢及磁路生热干扰等问题。除此之

外,为了保证磁流变弹性体外加磁场强度的要求,需为此配置外加磁线圈,这些线圈体积较大,会直接导致减震装置的体积庞大且结构复杂。因此,磁流变弹性体在减震装置中的应用具有局限性。与此对比,电流变弹性体所需要的外加电场更易于施加,这对于将电流变弹性体应用于结构装置中更为方便。同时,由于电流变弹性体需要的是外加电场而非磁场,因此不需要经过电磁转换的过程,这可缩短响应时间,且不会因涡流损耗导致的发热而产生额外能量损失。

近些年研究者对电流变弹性体的应用进行了探索,发现其在建筑结构等领域的减震降噪中具有广阔的应用前景。2015年,Lei<sup>[64]</sup>设计了一款自供电电流变弹性体减震器(图23<sup>[64]</sup>),并分析该减震器的耗能性能,结果同样印证了在施加电场下,电流变弹性体减震器的减震效果较无场强下更好。

2018年,Ma等<sup>[65]</sup>将电流变弹性体替代传统的橡胶材料用以制作可变刚度黏弹性阻尼器(图24<sup>[65]</sup>),并对该变刚度黏弹性阻尼器的性能及基于力位移滞回曲线建立的恢复力模型进行研究,通过试验证明了此类黏弹性阻尼器的刚度及耗能特性可通过电场实时控制<sup>[65]</sup>。

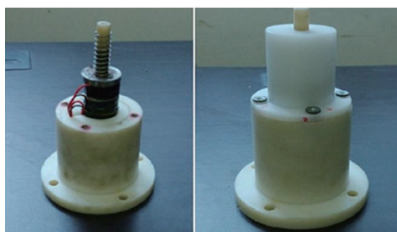


图23 自供电电流变弹性体减震器

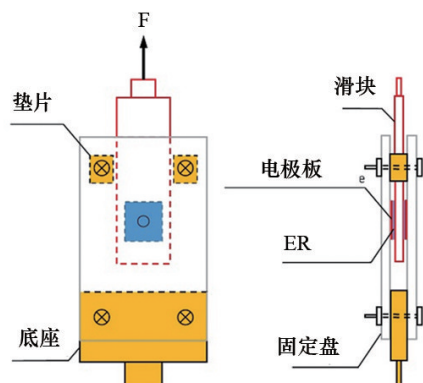


图24 基于ER弹性体的变刚度阻尼器结构图

20世纪80年代末期,Gandhi等<sup>[66]</sup>将电流变弹性体应用于柔性机器人的振动控制,提高了机器人末端执行器的工作精度,黄冉等<sup>[67]</sup>基于电流变技术开发了机器人振动控制的半闭环系统,得到了较好控制效果。将磁/电流变技术应用于软体机器人领域将能充分发挥其质量轻、变刚度明显的优势,是面向轻型、紧凑、高精度的软体机器人的发展方向之一。

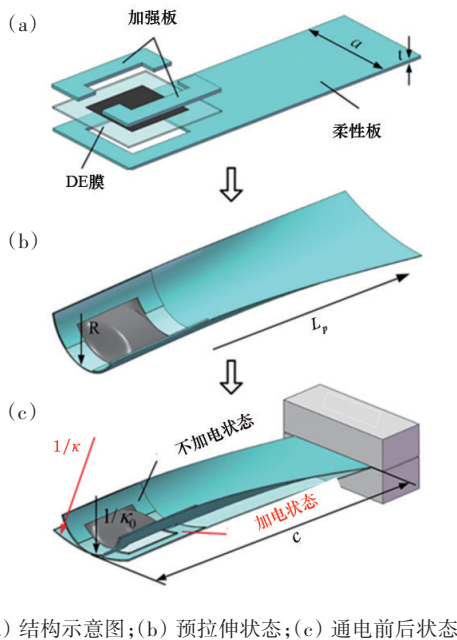
磁/电流变弹性体具有刚度调节效果显著、响应迅速等优点,但其制备工艺复杂,且成品率较低,一直以来未得到大范围推广。因此,改善制备工艺和提高产量将是此类智能材料发展的关键。

## 6 最小势能变刚度技术

Kofod等提出了介电弹性体最小能量结构(dielectric elastomer minimum energy structure, DEMES)概念<sup>[68-69]</sup>,如今最小能量结构已得到广泛的认可和研究。其基本工作原理是:将预拉伸介质弹性体膜与约束框架粘合,引导预拉伸膜释放,使整个结构处于最小势能状态。根据最小势能原理进行变刚度设计,可以用简单工艺制实现形状复杂结构的刚度调节。

Li等<sup>[70-71]</sup>以单子叶和带状弹簧为灵感,根据其横向曲率决定的弯曲刚度机理,设计了一种将介电弹性体的最小能量结构与柔性条相结合的变刚度介电弹性体致动器(variable stiffness dielectric elastomer actuator, VSDEA),如图25<sup>[70]</sup>所示。通过控制色带材料的横向曲率,可以实现刚度的变化。当外加电压为0~5.6 kV时,VSDEA的最大相对刚度变化为71.8%,临界荷载为75.6%;最大刚度为157.8 N/m,临界荷载为889.9 mN。即它的有效载荷是其重量的139倍。

Shintake等<sup>[72]</sup>以低熔点合金(low-melting-point alloy, LMPA)为基体,结合介电弹性体驱动器(dielectric elastomer actuator, DEA),制作成如图26<sup>[72]</sup>所示的变刚度驱动器,利用LMPA弹性模量随温度变化实现刚度的调节。实现方式为:当LMPA被施加电流时,电阻丝加热使合金的状态从高刚度变为



(a) 结构示意图; (b) 预拉伸状态; (c) 通电前后状态  
图 25 最小势能变刚度 VSDEA 结构

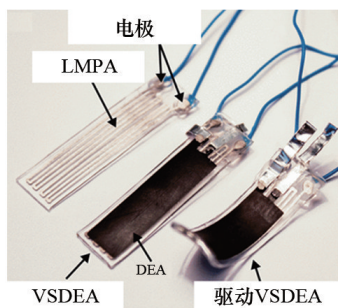


图 26 VSDEA 示意

低刚度。由于预先拉伸的 DEA 薄膜在结构变软后发生后收缩,导致整个结构弯曲变形。在保持 LMPA 柔性和对 DEA 施加电压的同时,DEA 的扩展又将使整个结构由完全状态变成最初的扁平状态。如果 LMPA 加热停止,其刚度会显著增加,此时再对 DEA 加电压也无法改变结构的形状。该结构的

刚度最高可变化约 90 倍。

最小势能原理多应用于柔性基板组合的结构,具有结构简单、制造方便、可以完成复杂形状切换等优点。它可以根据应用情况灵活变化,这对未来高适应性机器人的发展具有重要意义。然而,目前研究还处于实验室水平,其驱动输出和控制算法还有待改进。

## 7 结论

总结了近 5 年来出现的几种新型变刚度智能材料和结构。它们都具有以软材料为主的特点,通过不同的科学机制,实现不同效果的变刚度性能,具体性能比较如表 2 所示。静电吸附和静电层聚密结构具有良好的抗拉变刚度效应;PVC 凝胶结构和折纸结构具有良好的压缩变刚度效果;磁流变弹性体和电流变弹性体具有较大的刚度变化和快速响应特点;DEMES 元件应用灵活,易于制造,可以满足复杂变形变刚度的需要。同时,这些技术也有一定的局限性。高驱动电压、绝缘材料的选择困难是静电吸附和静电层干涉变刚度技术的瓶颈;工作频率范围小、基体柔韧性差是 PVC 凝胶变刚度材料的短板;复杂的设计和模型开发是发展折纸可变刚度技术的障碍;复杂的制备工艺和低的成品率对磁、电流变弹性材料的应用产生一定阻力;目前驱动输出性能一般和控制算法不成熟是开发最小势能变刚度结构的主要瓶颈。

新一代柔性变刚度技术对软机器人的进一步发展具有重要意义。通过融合生物机理、材料功能、结构设计、驱动机制等新兴多学科的前沿技术,可以发展多材料、跨尺度变刚度方法,不仅能

表 2 各变刚度技术性能比较

变刚度技术	驱动方式	刚度变化范围/倍	优势	不足
静电吸附	电压	~2	抗拉变刚度效果好	驱动电压高(kV)
静电聚密	电压	~7	抗拉变刚度效果好,可调范围大	驱动电压高(kV)
PVC凝胶	电压	~10	驱动电压低(V),压缩变刚度效果好	基体柔韧性差
折纸	磁场、绳、智能材料	3~5	可实现大变形,压缩变刚度效果好	模型开发复杂,计算繁琐
磁/电流变	磁场/电场	5~10	刚度变化明显,响应迅速	制备工艺难,成品率低
最小势能	智能材料	~2	应用灵活,适合大变形结构	驱动性能一般,控制算法不成熟

够实现软体机器人结构刚度的变化,甚至有望发展负刚度的超材料,开辟软体机器人的新功能。

### 参考文献(References)

- [1] Rossiter J, Hauser H. Soft robotics—the next industrial revolution?[Industrial Activities][J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2016, 23(3): 17–20.
- [2] Li T, Li G, Liang Y, et al. Review of materials and structures in soft robotics[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4): 756–766.
- [3] Tse Z T H, Chen Y, Hovet S, et al. Soft robotics in medical applications[J]. Journal of Medical Robotics Research, 2018(8): 3–4.
- [4] Laschi C, Cianchetti M, Mazzolai B, et al. Soft robot arm inspired by the octopus[J]. Advanced Robotics, 2012, 26(7): 709–727.
- [5] 赵强, 岳永恒, 等. 仿生连续体机器人的研究现状和展望[J]. 机械设计, 2009, 26(8): 1–6.
- [6] Saragih R, Tarwidi D. Vibration reduction on single-link flexible manipulator using  $H_{\infty}$  control[J]. Journal of the Indonesian Mathematical Society, 2008, 14(2): 2008.
- [7] 谢世鹏, 倪风雷, 王海荣, 等. 连续体机器人形状检测方法综述[J]. 机械与电子, 2015(8): 70–73.
- [8] 赵志刚, 陈志刚. 柔性气动连续体机器人关节结构设计及运动学分析[J]. 机械科学与技术, 2015(2): 184–187.
- [9] 赵梦凡, 常博, 葛正浩, 等. 软体机器人制造工艺研究进展[J]. 微纳电子技术, 2018, 55(8): 606–612.
- [10] Stilli A, Grattarola L, Feldmann H, et al. Variable stiffness link (VSL): Toward inherently safe robotic manipulators[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway NJ: IEEE, 2017.
- [11] 姚建涛, 陈新博, 陈俊涛, 等. 轮足式仿生软体机器人设计与运动分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(5): 27–35.
- [12] 赵江波, 薛塔, 王军政. 液压足式机器人单腿变刚度控制弹跳研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(10): 65–69.
- [13] Hao Y F, Wang T M, Xi F, et al. A variable stiffness soft robotic gripper with low-melting-point alloy[C]//Control Conference. Piscataway NJ: IEEE, 2017: 6781–6786.
- [14] Hao Y F, Wang T M, Wen L. A programmable mechanical freedom and variable stiffness soft actuator with low melting point alloy[C]//International Conference on Intelligent Robotics and Applications. Cham: Springer, 2017: 151–161.
- [15] 王明义. 基于形状记忆合金的结构刚度控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [16] Alcaide J O, Pearson L, Rentschler M E. Design, modeling and control of a SMA-actuated biomimetic robot with novel functional skin[C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation. Piscataway NJ: IEEE, 2017: 4338–4345.
- [17] 刘延斌, 李志松, 底复龔. 基于气动人工肌肉变刚度并联减振系统模型及特性研究[J]. 液压与气动, 2013(11): 52–56.
- [18] Cates M E, Wittmer J P, Bouchaud J P, et al. Jamming, force chains, and fragile matter[J]. Physical Review Letters, 1998, 81(9): 1841–1844.
- [19] 徐晓亮, 王永泉, 温坤, 等. 基于纤维包覆式气动结构的柔性手术臂刚度调节性能研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(17): 46–52.
- [20] 张进华, 洪军, 王韬. 软体机器人关键技术研究[C]//中国机械工程学会机械自动化分会&中国自动化学会制造技术专委会学术工作进展报告. 北京: 中国机械工程学会, 2017: 99–100.
- [21] Persson B N J, Guo J L. Electro-adhesion for soft adhesive pads and robotics: Theory and numerical results[J]. Soft Matter, 2019, 15: 8032–8039.
- [22] 王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构、驱动、传感与控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 1–13.
- [23] 顾兴士. 气压调节变刚度柔性仿生机器鱼机理及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [24] 刘延斌, 李志松. 基于气动人工肌肉变刚度并联减振系统模型及特性研究[J]. 液压与气动, 2013(11): 52–56.
- [25] Li D L, Guo Y, Gao F. Structure design and positive kinematics analysis of medical pneumatic soft robot[C]//International Conference on Mechanical Design. Berlin: Springer, 2018: 1257–1271.
- [26] Fan J Z, Zhang W, Kong P C, et al. Design and dynamic model of a frog-inspired swimming robot powered by pneumatic muscles[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(5): 1–10.
- [27] 刘晨, 李卓远, 陈花玲. 一种新型柔性静电吸附变刚度结构[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(12): 23–29.
- [28] 杜姗姗, 孙国辛, 黄呈伟. 飞行吸附机器人的静电吸附单元优化设计研究[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(6): 156–159.
- [29] Keng H K, Kuppan C R M, Ponnambalam S G. Modeling and simulation of electrostatic adhesion for wall climbing robot[J]. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2011(12): 2031–2036.
- [30] Asano K, Hatakeyama F, Yatsuzuka K. Fundamental study of an electrostatic chuck for silicon wafer handling [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(3): 840–845.
- [31] Shintake J, Rosset S, Floreano D, et al. Versatile soft grippers with intrinsic electrostatic adhesion based on

- multifunctional polymer actuators[J]. *Advanced Material*, 2016, 28(2): 231.
- [32] 王黎明, 胡青春. 基于静电吸附原理的双履带爬壁机器人设计[J]. *机械设计*, 2012, 29(4): 22-25.
- [33] Cheng Y, Liu L, Li B, et al. Design, manufacturing and performance study of flexible drive and stiffness adjustable structure/function integration for minimally invasive surgical operation arm[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(17): 53-61.
- [34] Li B, Cai Y, Jiang L, et al. A flexible morphing wing by soft wing skin actuation utilizing dielectric elastomer: Experiments and electro-aerodynamic model[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 29(1): 015031.
- [35] Wang T, Zhang J H, Li Y, et al. Electrostatic layer jamming variable stiffness for soft robotics[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(2): 424-433.
- [36] Narang Y, Degirmenci A, Vlassak J J, et al. Transforming the dynamic response of robotic structures and systems through laminar jamming[J]. *IEEE Robotics & Automation Letters*, 2017, 3(2): 688-695.
- [37] Ou J, Yao L, Tauber D, et al. Jamsheets: Thin interfaces with tunable stiffness enabled by layer jamming[C]//*Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*. Munich: ACM Press, 2014: 65-72.
- [38] Uddin M Z, Watanabe M, Shirai H, et al. Effects of plasticizers on novel electromechanical actuations with different poly (vinyl chloride) gels[J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2003, 41(18): 2119-2127.
- [39] Li B, Chang L F, Wang Y J. Modelling of dielectric gel using multi-physics coupling theory[M]//*Soft Actuators*. Tokyo: Springer, 2019: 561-580.
- [40] Li B, Chang L F, Asaka K, et al. A multi-physical model of actuation response in dielectric gels[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(12): 125032.
- [41] Hirai T, Kobayashi S, Hirai M, et al. Bending induced by creeping of plasticized poly (vinyl chloride) gel[C]//*Smart Structures and Materials 2004: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*. Bellingham WA: International Society for Optics and Photonics, 2004, 5385: 433-441.
- [42] Maeda Y, Li Y, Yasuda K, et al. Development of variable stiffness gel spats for walking assistance[C]//*Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on*. Piscataway NJ: IEEE, 2013: 5404-5409.
- [43] Li Y, Hashimoto M. Design and prototyping of a novel lightweight walking assist wear using PVC gel soft actuators[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2016, 239: 26-44.
- [44] Li Y, Maeda Y, Hashimoto M. Lightweight, soft variable stiffness gel spats for walking assistance[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2015, 12(12): 175.
- [45] Shin E J, Park W H, Kim S Y. Fabrication of a high-performance bending actuator made with a PVC gel[J]. *Applied Sciences*, 8(8): 1284-1291.
- [46] Shibagaki M, Matsuki T, Hashimoto M. Application of a contraction type PVC gel actuator to brakes[C]//*2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*. Piscataway NJ: IEEE, 2010: 39-44.
- [47] Felton S, Tolley M, Demaine E, et al. A method for building self-folding machines[J]. *Science*, 2014, 345(6197): 644-646.
- [48] Kim S J, Lee D Y, Jung G P, et al. An origami-inspired, self-locking robotic arm that can be folded flat[J]. *Science Robotics*, 2018, 3(16): eaar2915.
- [49] Li S Y, Fang H B, Sadeghi S, et al. Architected origami materials: How folding creates sophisticated mechanical properties[J]. *Advanced Material*, 2019, 31: 1805282.
- [50] Fang H B, Li S Y, Wang K. W. Self-locking degree-4 vertex origami structures[J]. *Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 2016, 472(2195): 20160682.
- [51] Fouhey D F, Gupta A, Hebert M. Unfolding an indoor origami world[C]//*European Conference on Computer Vision*. Berlin: Springer International Publishing, 2014: 687-702.
- [52] Wang Z J, Jing L Q, Yao K, et al. Origami-based reconfigurable metamaterials for tunable chirality[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(27): 1700412.
- [53] Kalina K A, Brummund J, Metsch P, et al. Microscale modeling and simulation of magnetorheological elastomers[J]. 2017, 17(1): 27-30.
- [54] Takemura K, Yokota S, Edamura K. Development and control of a micro artificial muscle cell using electroconjugate fluid[J]. *Sensors & Actuators A: Physical*, 2007, 133(2): 493-499.
- [55] Schiava N D, Le M Q, Galineau J, al. Influence of plasticizers on the electromechanical behavior of a P(VDF-TrFE-CTFE) terpolymer: Toward a high performance of electrostrictive blends[J]. *Journal of Polymer Science B: Polymer Physics*, 2017, 55(4): 355-369.
- [56] Yao J R, Sun Y Y, Wang Y, et al. Magnet-induced aligning magnetorheological elastomer based on ultra-soft matrix[J]. *Composites Science & Technology*, 2018, 162: 170-179.
- [57] Malaeke H, Moeenfarid H, Ghasemi A H, et al. Vibration suppression of MR sandwich beams based on fuzzy logic [C]//*Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*. Cham: Springer, 2017: 227-

- 238.
- [58] Bai J F, Fu J, Lai J J, et al. Time-delay analysis of a magnetorheological elastomer actuator for semi-active control[C]//2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Piscataway NJ: IEEE, 2017: 366-370.
- [59] Song W Z, Zhou H, Zhao Y Q, et al. Study of variable stiffness dynamic vibration absorber based on magnetorheological elastomer[J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(11): 64-68.
- [60] 高玲香, 赵晓鹏. 淀粉/明胶/甘油含水电流变胶体的电场响应行为[J]. *功能材料*, 2014, 35(4): 426-428.
- [61] Tu F Q, Liu X S, Mao Y, et al. Recent progress and application of electrorheological fluids[J]. *Materials Review*, 2014, 28(11): 66-68.
- [62] Shiga T, Okada A, Kurauchi T. Magneto-viscoelastic behavior of composite gels[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1995, 58(4): 787-792.
- [63] Behrooz M, Wang X, Gordaninejad F. Control of structures featuring a new MRE isolator system[C]//Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2012. Bellingham WA: International Society for Optics and Photonics, 2012, 8341: 83411I.
- [64] Lei X H. Design and experimental research of self-supplied electrorheological elastomer shock absorber[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.
- [65] Ma N, Zhang ZQ, Dong X F, et al. Dynamic viscoelasticity and phenomenological model of electrorheological elastomers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, 134(41): 45407.
- [66] Gandhi, M. V, Thompson, B. S, Choi, S. B, et al. Electro-rheological-fluid-based articulating robotic systems [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1989, 111(3):328-336.
- [67] 黄冉, 周前祥, 王一豪. 基于电流变液的机械臂控制系统设计与仿真[J]. *机械设计与制造*, 2012(12): 10-12.
- [68] Kofod G, Paajanen M, Bauer S. Self-organized minimum-energy structures for dielectric elastomer actuators [J]. *Applied Physics A*, 2006(85): 141-143.
- [69] Kofod G, Wirges W, Paajanen M, et al. Energy minimization for self-organized structure formation and actuation [J]. *Applied Physics Letters*, 2007(90): 081916.
- [70] Li W B, Zhang W M, Zou H X, et al. A novel variable stiffness mechanism for dielectric elastomer actuators[J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(8): 085033.
- [71] Li W B, Zhang W M, Zou H X, et al. Bioinspired variable stiffness dielectric elastomer actuators with large and tunable load capacity[J]. *Soft Robotics*, 2019, 6(5): 631-643.
- [72] Shintake J, Schubert B, Rosset S, et al. Variable stiffness actuator for soft robotics using dielectric elastomer and low-melting-point alloy[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1097-1102.

## Research progress on novel variable stiffness technologies for soft robot

LIU Chen<sup>1,2</sup>, WU Yehui, LI Bo<sup>1\*</sup>, DONG Xufeng<sup>3</sup>, CHEN Hualing<sup>1,2\*</sup>, CHEN Guimin<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Robots, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China
2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China
3. School of Materials Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China

**Abstract** Soft robot is a new kind of robot with various freedom of movement and good environmental adaptability. However, low stiffness of the soft robot limits its practical carrying capacity. Therefore, it is meaningful to develop variable stiffness technology for soft robot. This paper summarizes the new variable stiffness technology in recent 5 years, introduces and analyzes its working principles including electrostatic adsorption principle, layer interference principle, self-locking origami mechanism, electrical/magnetorheological principle and minimum potential energy principle, variable stiffness performance and practical application. This paper also discusses the challenges for the current variable stiffness technology and the future development direction, and summarizes the potential research value of the new generation of variable stiffness technology.

**Keywords** soft robots; variable stiffness; origami; biomimetics; dielectric elastomer ●



(责任编辑 王志敏)