



气动软体机器人发展现状与趋势

管清华¹, 孙健¹, 刘彦菊², 冷劲松^{1*}

1. 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150008;

2. 哈尔滨工业大学航天科学与力学系, 哈尔滨 150008

* E-mail: lengjs@hit.edu.cn

收稿日期: 2020-04-03; 接受日期: 2020-07-13; 网络版发表日期: 2020-07-19

摘要 软体机器人由于其内在的高度的灵活性、良好的顺应性、出色的适应性和自然安全的可交互性, 在医疗、教育、服务、救援、探索、探测、可穿戴设备等领域越来越受到重视, 并显示出巨大的发展潜力. 气动软体机器人由于重量轻、效率高、无污染、环境适应性强等特点在软体机器人领域占据了重要地位. 同时, 气动软体机器人技术的发展与新材料、新设计和新工艺的应用密不可分. 本文首先从驱动器结构设计、制作工艺综述了气动软体机器人的研究现状与主要进展, 而后对软体机器人的多功能化、模块化以及仿生学设计趋势进行了分析和讨论. 并对气动软体机器人在系统可靠性、气源供给和运动控制方面研究面临的问题和挑战进行了相关分析和讨论, 最后对气动软体机器人的未来发展方向和意义进行了展望和总结.

关键词 软体机器人, 气动, 多功能化, 综述

1 引言

近几十年来, 随着社会经济的高速发展, 以及自动化控制、工业制造、机器人形态学等方面技术的不断进步, 机器人在人类社会中扮演着越来越重要的角色. 机器人的足迹已经从工农业生产、交通运输、航空航天等领域, 逐渐延伸到医疗、教育、服务、生活、娱乐等更贴近人类生活的新领域^[1,2].

然而, 机器人与人交互的复杂性和高频性也对机器人结构的灵活性、顺应性以及安全性提出了更高的要求. 传统刚性机器人虽然也可以实现复杂的运动, 但往往需要大量的刚性连接(rigid link)关节来实现多余度的运动控制. 通常此类刚性连接机器人被称之为冗余度(redundant)或者超冗余度(hyper-redundant)机器

人. 而为了防止任务过程中对脆弱的物品和人体的损伤, 机器人需要具有一定的柔顺性. 因此使用刚性驱动器(如电机)和刚性连接关节, 并利用大量姿态、力反馈、机器视觉等传感器或技术对输出力进行主动柔顺控制(compliant control)的机器人被应用于提高刚性机器人的柔顺性, 而这类机器人最开始也曾被称之为柔性机器人(soft robot)^[3].

同时基于材料变形, 并具有良好柔顺性和灵活性的连续体机器人概念(continuum robot)也被提出, Robinson和Davies在1999年的一篇综述中叙述了离散(discrete)、蛇形(serpentine)和连续体(continuum)机器人的区别, 并根据驱动方法和位置将连续体机器人分为内在驱动(如气动波纹管机械臂), 外在驱动(如绳拉驱动)以及混合驱动^[4]. 除此还有一些虽然基于刚性连

引用格式: 管清华, 孙健, 刘彦菊, 等. 气动软体机器人发展现状与趋势. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 897-934

Guan Q H, Sun J, Liu Y J, et al. Status of and trends in soft pneumatic robotics (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 897-934, doi: 10.1360/SST-2020-0143

接, 但是利用柔性驱动器或者被动柔性组件实现机器人柔顺性输出的设计^[5,6]。Trivedi等人则根据机器人自由度、驱动器数量以及材料的应变程度, 将机器人分为刚性(rigid)、离散超冗余度(discrete hyper-redundant)、硬/刚性连续体(hard continuum)、柔性(soft)机器人^[7]。不过Trivedi等人将通过SMA和张力绳驱动结构弹性变形实现各种运动的机器人^[8], 根据其较小的材料应变, 也归类至硬/刚性机器人(hard robot)^[7], 然而目前这两类机器人考虑其整体变形程度和刚度, 一般仍归类于“soft robot”^[9]。

而随着软材料、仿生学、仿真工具、制造技术的发展, “soft robot”的概念逐渐被用于强调主体以软材料为主, 其运动主要依靠结构本身的弹性变形实现的机器人, 以和传统的刚性机器人进行区别, 而中文一般称为“软机器人”或者“软体机器人”, 更加符合目前“soft robot”的定义。不过由于历史原因和中英互译问题(如soft robot可做柔性机器人亦可作软/软体机器人翻译), 柔性机器人在中文中仍有较多场景指通过柔顺控制(如工业多冗余度柔性机器人)、柔性驱动器或者组件实现柔顺性的刚性连接机器人^[10~12]。因此为了避免混淆, 在本文中约定广义上的柔性机器人除了软/软体机器人亦包括具有柔顺性输出的关节机器人, 而狭义上的柔性机器人则主要指通过自身结构弹性变形运动的软/软体机器人, 本文主要讨论狭义上的柔性机器人即软体机器人, 如图1所示。

软体机器人或者软机器人的出现和快速发展则为人机交互和复杂特种环境下传统机器人难以克服的安全性和灵活性等问题的解决展示了新的解决思路和美好的前景^[13]。软体机器人与刚性机器人相比, 最主要的区别在于制造软体机器人的材料以软材料为主, 其

运动依靠软体机器人本身的变形实现^[14], 因而具有内在的高度灵活性、良好顺应性、出色的适应性和自然安全的可交互性, 这也使得软体机器人在医疗^[15]、教育、服务、救援、探索、探测、可穿戴设备^[16~18]等领域越来越受到重视, 并显示出巨大的发展潜力。

软体机器人从驱动方式上主要可以分为绳拉驱动、气动或者液压驱动、智能材料驱动、化学反应驱动^[19]、生物混合驱动^[20]、磁场驱动^[21,22]等^[9,23~25], 而气动软体机器人则最早被应用于软体机器人的设计中^[2]。并且由于其具有重量轻、效率高、无污染、环境适应性强等特点, 以及由于可以无需铁磁或者电子元件驱动、没有活动部件、具有良好的柔韧性, 在强辐射^[26]、电磁干扰^[27]、粉尘以及外力碾压重击^[28]等恶劣条件下拥有较好的可靠性, 因而气动软体机器人一直受到研究者的广泛关注和研究, 并且在软体机器人的研究中占据重要地位。

软体机器人最为核心和基本的关键技术就是软体驱动器。最早的软体驱动器是由美国物理学家McKibben于20世纪50年代提出的气动人工肌肉(pneumatic artificial muscle, PAM), 并被应用于残疾人康复矫正装置^[29], 也称为McKibben型气动人工肌肉。传统的气动驱动器通常以气缸、气动导轨、气动夹具等形式广泛地应用于各种工业自动化生产线设备中。而相较于传统气动驱动器依靠具有良好气密性的刚性机械结构在压缩空气的作用下产生驱动力, 软体驱动器则依靠自身柔性腔体和约束结构在内部气压的作用下产生定向的位移和驱动力。值得注意的是, 虽然大多数气动软体驱动器被设计为利用压缩空气驱动, 但是往往它们也可以直接利用液压驱动。由于柔性腔体通常由较轻的柔性材料构成, 因此软体驱动器具有柔顺、轻质和低成本天然优势, 并且能够与现有的气动/液压控制系统具有良好的兼容性。这使得它在人机交互较为频繁的服务机器人^[30]、自动化生产^[31,32]、运动辅助装置^[16,17]、医疗康复设备^[33]以及变体飞行器^[34]等领域的应用越来越受到关注。

本文首先从气动软体机器人驱动器结构设计的角度对目前软体气动驱动器的设计原理、方法和思路方面进行介绍、分析和讨论, 并对气动软体机器人不同的制作方法及其特点进行介绍与讨论。之后对气动软体机器人的多功能化、模块化、以及仿生学设计趋势进行分析和讨论。而后本文对气动软体驱动器在系统

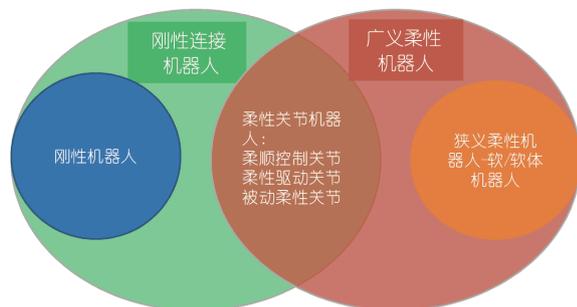


图1 (网络版彩图) 柔性机器人与软体机器人定义
Figure 1 (Color online) Broad and narrow definitions of soft robots.

可靠性、气源供给以及运动控制等方面所面临的问题和潜在解决方法进行相关讨论。最后对软体机器人的应用与未来发展进行展望与总结。

2 结构设计

气动软体驱动器的结构设计形式虽然多种多样不尽相同,但是其工作原理都基本类似。气动软体驱动器的工作原理,本质上是以气体为工作介质,弹性腔体在工作气压(正压或者负压)和结构约束的作用下在某一空间维度(如轴向、弯曲、扭转等)产生定向膨胀或收缩^[35]。弹性腔体可以是可拉伸性能较好的弹性材料,或者是不可伸展但可容易弯曲折叠的薄壳或者薄膜结构,如基于褶皱薄膜/折纸薄壳结构的软体气动驱动器^[36]。从运动形式上,气动软体驱动器则主要可以分为轴向收缩/伸长、弯曲/摆动、扭转/回转、螺旋/缠绕等。

约束结构形式决定了气动软体驱动器的运动形式和驱动性能。约束结构可以由纤维约束结构、弹性气室结构、波纹结构、折叠/褶皱结构等来实现。值得注意的是,在实际设计中驱动器的结构往往是多种结构形式融合设计的结果。因此,本文接下来将选取具有代表性的驱动器结构设计,从其主要约束形式的角度对不同结构形式驱动器的驱动原理、驱动性能、应用场景等进行相关分析和总结。

2.1 纤维约束气动软体驱动器

纤维约束气动软体驱动器最重要的特征是其弹性腔体由袖套式或者嵌入式纤维、织物或者其他的类纤维结构约束增强。这些约束结构一般具有各向异性的力学特性,因此当驱动器在气压增大时,经过设计的纤维结构便会约束弹性腔体产生各向异性膨胀变形,从而实现特定形式的变形运动。

2.1.1 编织式袖套约束结构

基于袖套式纤维约束结构的气动软体驱动器主要由可膨胀弹性内腔、袖套式编织约束结构以及连接结构等组成。根据袖套结构的不同约束形式,驱动器能够沿一定方向产生伸长、收缩、弯曲、缠绕、扭转、回转、摆动等多种运动。

通常编织结构与弹性腔体仅通过端部连接结构相

互固定,而其空间分布主要通过编织结构之间的相互约束保持,编织结构主要可分为梭织(woven)和针织(knit)两类。梭织是由经纬交织而成,有经纬两个方向,而针织是由线圈不断串套连结而成的,如图2所示。

梭织织物虽然由于纤维丝束的约束,在经纬方向基本没有延展性,但是通过经纬纤维角度错动,能够在某一非经纬方向产生收缩或伸展变形,并且同时会在与其垂直的方向产生相反的变形。利用这种约束性能够将弹性腔体的膨胀运动转化为驱动器的定向运动。McKibben型气动人工肌肉(PAM)作为最早提出并且较为典型的一种梭织型气动软体驱动器^[37,38],国内外对该类驱动器的理论和应用进行了大量深入的研究。如图3(b)所示,McKibben型气动人工肌肉内部的弹性软管作为柔性腔体在内部气压和外部编织结构几何约束的作用下产生径向膨胀,同时在轴向产生收缩力和位移。并且通过改变编织结构的编织角使纤维束与驱动器轴向夹角大于临界角 54.74° 时,由于编织结构径向几何约束增强,轴向约束减弱,驱动器在膨胀时产生轴向伸长运动,成为伸长型McKibben气动肌肉驱动器(如图3(a))。

研究者还基于McKibben型气动肌肉通过不断改进发展出了多种不同的气动人工肌肉驱动器,如弯曲、螺旋/缠绕、回转以及片状多轴驱动器等,如图3。哈尔滨工业大学冷劲松教授团队与美国马里兰大学Norman Werely教授合作通过对伸长型与收缩型气动人工肌肉驱动器的研究^[42],并在大象躯干象鼻肌纤维排列的启发下,通过引入额外的约束结构实现了一系列伸长型和收缩型的弯曲或螺旋气动人工肌肉^[39],如图3(c)~(h)。Kleinwachter和Geerk等人利用环形薄膜气腔和沿径向倾斜一定角度均匀分布的约束丝束,设计出了一种可以产生回转运动并输出扭矩的回转型气动肌肉驱动器^[40](图3(g))。Zhu等人^[41]将弹性管通过缝纫的方式嵌入两层柔软的织物中间,开发出了一种基于流体压力驱动的片状流体织物肌肉(fluidic fabric muscle sheets, FFMS),如图3(h)。

针织织物也可以通过线圈纱线的串动,实现类似梭织织物两个垂直方向上变形的耦合。除此之外,由于编织过程中的线圈结构,针织织物具有较大的延伸性与弹性,并且在针织经向和纬向具有各向异性的弹性力学性能。Ball等人^[43]提出了一种基于针织网套编织结构的气动人工肌肉,如图4(a),该气动肌肉利用纱

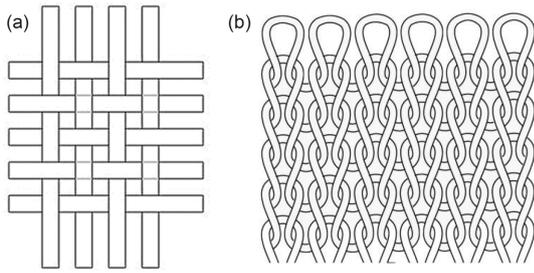


图2 织物结构. (a) 梭织织物, (b) 针织织物
Figure 2 Fabric structures. (a) Woven fabrics; (b) knitted fabrics.

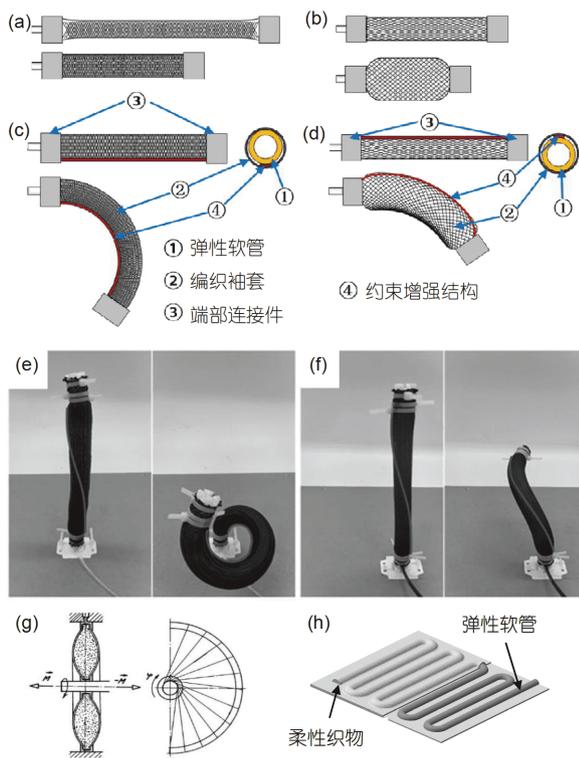


图3 (网络版彩图)梭织袖套结构气动驱动器. (a) 伸长型; (b) 收缩型; (c) 伸长弯曲型; (d) 收缩弯曲型; (e) 伸长螺旋型; (f) 收缩螺旋型^[39]; (g) 回转型^[40]; (h) 片状流体驱动器^[41]
Figure 3 (Color online) Pneumatic actuators based on woven sleeve structures. (a) Extensile; (b) contractile; (c) extensile bending; (d) contractile bending; (e) extensile helical; (f) contractile helical^[39]; (g) rotative^[40]; (h) fluidic fabric muscle sheets^[41].

线的相对串动, 在膨胀时产生径向膨胀和较大的收缩变形, 但是纱线之间的滑动摩擦会带来额外的能量损耗. Leonardo等人则利用针织织物的各向异性弹性, 以及梭织织物在经纬方向的基本不可拉伸特性, 开发了一种弯曲驱动器^[44](图4(b)).

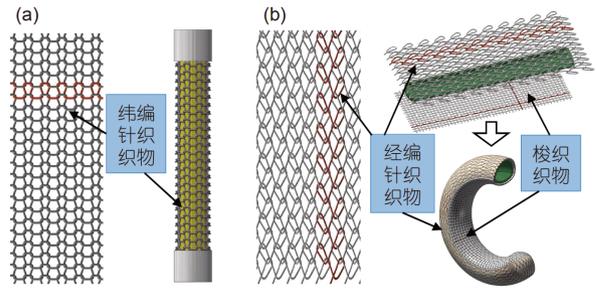


图4 (网络版彩图)针织袖套结构气动驱动器. (a) 纬编针织气动人工肌肉驱动器^[43]; (b) 基于经编针织和梭织织物的弯曲驱动器^[44]
Figure 4 (Color online) Pneumatic actuators based on knitted sleeve structures. (a) Pneumatic artificial muscle based on weft knitting^[43]; (b) bending actuator based on warp knitting and woven fabrics^[44].

2.1.2 嵌入式纤维增强结构

基于嵌入式纤维增强结构的气动软体驱动器与基于编织结构的驱动器不同, 嵌入式纤维增强结构可以使用多组或者一组纤维通过缠绕的方式进行排布, 并通过浇筑硅胶等柔性基体, 埋设在柔性气室壁中, 与驱动器成为一体, 结构更加紧凑. 并且其纤维结构通过嵌入柔性基体固定, 因而其纤维排布方式不受编织形式限制, 具有更高的灵活性. 根据纤维布设方式的不同, 驱动器能够实现扭转、伸长、收缩、弯曲、螺旋等运动.

当使用一组纤维沿一个方向缠绕时, 驱动器能够实现伸长或者扭转的运动, 但是伸长和扭转运动往往耦合在一起. 当嵌入的纤维缠绕升角等于或接近 0° 时, 驱动器充气膨胀时可以实现轴向伸长运动, 而当缠绕升角不为 0° 时, 驱动器可以实现轴向的扭转运动并伴随一定的伸长运动, 随着缠绕升角的增大驱动器的伸长运动减少, 而扭转运动随之增加. 并且在缠绕升角增加到一定值后扭转运动转而减少, 比如当纤维升角接近 90° 即沿轴向分布时, 驱动器几乎不产生扭转运动而主要产生轴向收缩运动^[45]. 在20世纪80年代, 日本 Toshiba公司开发了一款基于纤维增强结构的多气室微型柔性驱动器FMA (flexible micro-actuator)^[46], 如图5(a)所示. 驱动器能够通过不同的纤维升角, 实现伸长或者扭转运动, 并通过分别独立控制3个气室的内部压力实现弯曲或者扭曲变形. 浙江工业大学杨庆华等人^[47]也开发了一种类似的气动柔性驱动器FPA (flexible pneumatic actuator), 并应用于气动回转、弯曲和

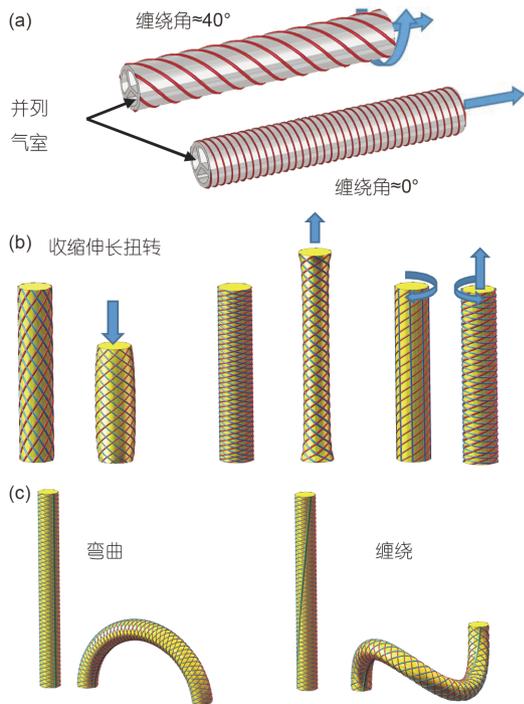


图5 (网络版彩图)嵌入式纤维缠绕增强气动驱动器。(a) 单组纤维缠绕增强多自由度微型气动驱动器^[46]; (b) 两组纤维缠绕增强气动驱动器^[50]; (c) 单束纤维非对称增强气动驱动器

Figure 5 (Color online) Pneumatic actuators reinforced with embedded winding fibers. (a) Multi-degree of freedom micro pneumatic actuators reinforced by single-group winding fibers ^[46]; (b) pneumatic actuators reinforced with two sets of winding fibers ^[50]; (c) pneumatic actuators reinforced asymmetrically with a single bundle of fiber.

球关节^[48]以及气动柔性灵巧手中^[49]。

由于轴向运动和扭转运动耦合在一起为驱动器的运动控制造成一定的困难, 所以研究者通过两组纤维沿相反的方向缠绕从而得到纯轴向伸长或者收缩的纤维增强驱动器, 其工作机理与梭织袖套式驱动器类似。值得注意的是, 当两组相反方向的纤维升角不同时, 仍能够同时产生耦合的轴向和扭转运动, 如图5(b)。美国哈佛大学Connolly等人^[45]和密歇根大学的Bishop-Moser和Kota^[51]对两组不同角度纤维增强的软体驱动器变形行为和力学输出特性进行了相关的理论和实验研究。

除了轴向的伸缩和扭转运动之外, 当利用单束纤维或者类纤维结构对前文提到的两类驱动器通过非对称的单侧或者螺旋形式增强时, 则能够得到弯曲驱动器^[52,53]或者螺旋/缠绕驱动器, 如图5(c)。哈尔滨工业大学的阮健等研究者利用螺旋钢丝增强的弹性软管, 并

在一侧嵌入弹性薄金属片, 提出了一种柔性弯曲驱动器^[54]。而日本冈山大学的Noritsugu等人^[55]提出了一种由柔性的可伸缩的纤维增强弹性腔体和两侧两个铰接硬质肋板组成的摆动型驱动器。Bishop-Moser等人^[32]通过利用单根纤维对两组纤维缠绕增强的驱动器进行沿轴向单侧增强或者螺旋增强, 实现了弯曲和螺旋(扭曲)驱动器, 并对三组增强纤维的缠绕升角与驱动器性能之间的关系进行了深入研究。

除此之外, 结合织物的各向异性特点, 直接将织物与柔性基体复合形成由柔性复合材料作为柔性腔壁的方法, 能够使嵌入式纤维增强驱动器的制作过程更加方便和更易标准化, 同时也拓宽了其结构设计形式, 以满足更多的应用场景。比如, 德国Festo公司通过利用柔性纤维增强复合材料代替弹性软管和编织结构, 开发出了标准化的气动肌腱驱动器^[56]。该气动肌腱驱动器的柔性腔体为利用梭织纤维增强的柔性复合材料通过缠绕工艺制成的柔性软管(如图6(b)), 其收缩率虽然相对于编织型McKibben气动人工肌肉较小, 但更容易实现工业化和标准化生产, 因此取得了较为成功的商业化应用。上海交通大学谷国迎课题组也提出了一种基于软织物的气动执行器(SFPAs)的设计, 通过研究各种针织和梭织织物结构的力学特性, 设计了拇指外展式、手指弯曲式和手指伸展式三种结构, 并将SFPAs集成到一个带有便携式控制系统的柔性可穿戴辅助手套中^[57]。

2.1.3 特点与应用

纤维约束气动软体驱动器, 具有结构简单、输出比(输出力/重量)高、工作气压高的优点。由于在工作中纤维结构承受和传递主要载荷, 根据其纤维分布密度的不同, 其最大工作气压也不相同。

其中基于织物袖套的气动软体驱动器, 由于编织结构一般由强度和弹性模量较大的柔性线束以较高密度编织而成, 因此编织型气动人工肌肉能够承受较大的工作气压(300~800 kPa)^[42], 并产生较大的变形(-30%~200%), 并且具有结构和制作工艺简单的优点, 但是袖套型气动软体驱动器的编织结构内部, 以及袖套与弹性气囊之间的摩擦力使得驱动器存在着与织物材质、纤维间接触面积、驱动压力等多种因素相关的迟滞效应^[58,59], 这给驱动器的模拟预测和控制模型建立带来一定的困难。

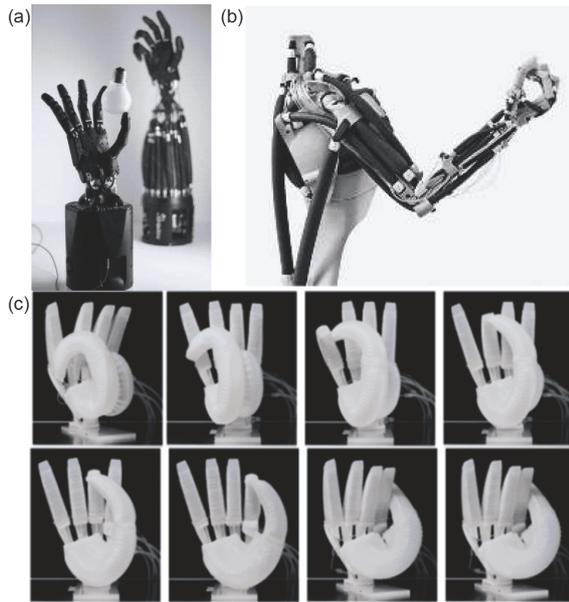


图6 (网络版彩图)纤维约束气动驱动器的应用。(a) 英国的Shadow公司基于McKibben型气动肌肉灵巧手^[63](©2013 Shadow Robot Company); (b) Festo公司基于气动肌腱驱动器的仿生手臂^[66](©Festo SE & Co. KG, all rights reserved); (c) 德国柏林大学纤维缠绕增强柔性气动灵巧手^[30]

Figure 6 (Color online) Applications of fiber-constrained pneumatic Actuator. (a) Dexterous-hand based on McKibben pneumatic muscle from Shadow Company [63] (©2013 Shadow Robot Company); (b) bionic arms based on pneumatic artificial muscles [66] from Festo (©Festo SE & Co. KG, all rights reserved); (c) dexterous hand based on winding-fiber-reinforced pneumatic actuators from the University of Berlin [30].

而嵌入式纤维增强型软体气动驱动器的纤维分布密度的差别较大,其最大工作气压在100~500 kPa的范围内,最大轴向变形范围为-30%~100%。同时嵌入式纤维增强驱动器由于没有袖套式驱动器的编织结构与弹性气囊之间摩擦作用的影响,阻滞效应得到了一定的改善,但与此同时由于纤维与弹性基体之间的约束,也会在一定程度上影响柔性腔壁的变形能力^[33,52,60]。对于嵌入式纤维增强驱动器,由于纤维结构可以与驱动器复合为一体,整体结构更加紧凑更易于小型化^[61]。直接通过缠绕等方式分布纤维,相对于织物增强或者织物袖套,其分布方式更加灵活多样^[30,50],驱动器性能稳定性更好、更易于标准化生产^[56],不过利用织物嵌入或者袖套结构增强,制作过程更加方便快捷,生产效率更高。

纤维约束柔性驱动器在实际应用中,为实现更为复杂的多自由度,往往采用多气室^[46]结构或者串联/并

联^[39,50,62]多个驱动器的方式,如美国McMahan研究团队^[62]提出的一种基于伸长型McKibben气动人工肌肉的多自由度柔性连续体机械臂OctArm。

纤维约束气动软体驱动器由于其承压能力较强所以能够输出较大的驱动力,适用于驱动功率较高,且需要具有一定柔顺性的场景,比如仿人手^[63,64]和手臂^[65,66]、仿生蝠鲼^[67]、仿生袋鼠^[68,69],如图6所示。除此之外纤维约束气动软体驱动器还被研究者广泛地应用于救援、管道、搜集机器人^[70-72],以及柔性抓取装置^[30]、柔性可穿戴运动辅助设备^[16]等领域。

由于纤维增强结构的变形往往具有特定的几何关系,因此其力学模型可以采用数学模型的方法^[58,73,74]。同时由于弹性气囊或者基体材料一般使用橡胶类材料所以多采用非线性弹性本构模型^[42,75,76]以取得较为精确的结果。根据弹性气腔的壁厚与驱动器尺寸的相对大小可以选择薄壁模型或者厚壁模型^[75,77]。除此之外,也可以利用有限元分析软件进行模拟分析以获得更为细节的信息^[58,78-80]。

2.2 弹性流体/气室驱动器

另一种常见的柔性气动驱动器其主要结构由弹性模量较低、伸展性能较好的弹性橡胶类材料构成气室,被称之为弹性气室驱动器,通常由0至250 kPa压力较低的气体或者液体驱动^[60]气室变形,因此也被称为弹性流体驱动器(fluidic elastomer actuators)。

其运动方式主要取决于驱动器弹性材料在空间上的非对称分布和材料弹性模量的非均匀分布形式,通过结构上的非对称性实现在气压作用下的定向膨胀。起约束作用的可以是驱动器自身的非对称几何结构,如驱动器腔壁一侧较薄一侧较厚,或者是在驱动器内部局部非对称分布的织物、纸张、塑料以及硬度更高的橡胶等。因此,此类驱动器的运动形式以弯曲形式居多。

2.2.1 结构原理

最简单的弹性流体驱动器为直通式的柱状弹性气室驱动器,通过多个并列或串联的弹性气室结构驱动器能够实现多自由度的运动。比如,麻省理工大学的Marchese等人^[81,82]提出了一种具有双向对称柱形弹性气室的弹性流体弯曲驱动单元,并基于该驱动单元开发出了二维柔性机械臂。当驱动单元一侧的驱动器充

气膨胀轴向伸长时, 驱动单元向另一侧进行弯曲运动. 哈佛大学Whitesides团队的Martinez等人^[83]基于类似的弹性气室结构, 利用3个沿中心轴线对称分布的弹性气室组成的驱动单元串联, 制作出了具有三维变形能力的软体触手, 如图7(a)所示. 北京航空航天大学文力与哈佛大学Katia Bertoldi团队合作在章鱼触手的启发下提出了一种锥形弹性气室软体驱动器^[84], 并与真空吸盘相结合, 可以灵活地抓取各种形状和材质的物体.

单纯的柱状气室结构在内部压力的作用下会有显著的径向膨胀变形^[83], 这限制了驱动器的最大工作压力和对外做功的效率. 因此肋状增强结构被引入弹性流体驱动器的设计中, 以限制其径向膨胀, 改善其驱动性能. 肋状结构最早由Correll等人^[87]引入到软体驱动器的设计中, 这种肋状结构流体弹性致动器具有多个截面为矩形且相互连通的弹性气室. 之后Onal和Rus^[88]通过将两个流体弹性驱动器组合成拮抗运动单元驱来提供双向弯曲运动. Miron等人^[85]设计了一种应用于核磁共振环境下手术的轴向伸长肋状结构气动驱动器, 如图7(b)所示.

除此之外, 哈佛大学的Whitesides研究团队的Mosadegh等人^[89]提出了一种由一系列轴向分布的独立弹性气室组成的柔性弯曲驱动器, 每个气室与中空的通道相连, 这种设计可以看作肋状弹性流体驱动器的演化版本. 当驱动器充气时各弹性气室发生膨胀, 在所有弹性气室的膨胀作用下, 驱动器向不可伸展的约束层一侧弯曲. 而上海交通大学谷国迎团队则通过斜状独立弹性气室结构实现了螺旋/缠绕变形的气动软体驱动器^[86], 如图7(c)所示.

2.2.2 特点与应用

虽然某些弹性流体驱动器通过纸张、纤维、织物等对驱动器进行了局部增强, 但仅限于提供约束作用, 与之前纤维增强或者编织袖套结构驱动器不同, 驱动器的载荷传递和气压承载主要还是依靠驱动器的弹性体部分. 而基于弹性气室的软体驱动器的驱动结构主要采用低硬度、高延伸率(600%~800%)的橡胶类材料^[60], 因此, 虽然其工作气压、承载能力以及驱动力相对较低, 但是结构柔顺性更好, 适合一些对驱动力要求不高、但对灵活性和柔顺性要求较高的场景, 比如可穿戴运动康复装置^[33]等.

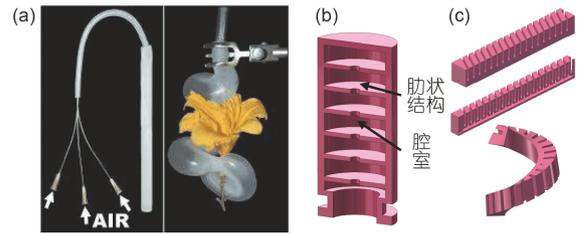


图7 (网络版彩图)弹性流体/气室驱动器. (a) 柱形弹性气室气动软体驱动器^[83]; (b) 用于核磁共振环境下的轴向伸长肋状结构驱动器^[85]; (c) 上海交通大学独立弹性气室螺旋/缠绕驱动器^[86]

Figure 7 (Color online) Elastic fluidic/chamber actuators. (a) Soft pneumatic actuator with cylindrical elastic chamber^[83]; (b) axially extensible actuator with ribs for NMR environments^[85]; (c) spiral/winding actuators with Independent Elastic chamber from Shanghai Jiao Tong University^[86].

同时由于构成驱动器材料的高延展性, 弹性流体驱动器一般对外力具有较好的抗毁损性. 例如, Whitesides团队设计的一种基于独立气室结构的软体四足机器人^[28], 其除了能够适应各种工作环境, 还具有良好的抗毁损能力外, 在经过汽车的碾压后, 仍能正常工作.

并且由于弹性流体驱动器的材料主要为柔性橡胶类材料, 因此能够通过浇筑一体化成型集成多个驱动器, 使结构更加紧凑, 并可通过组合使用多个驱动器实现更加复杂灵活的运动^[28,82,83]. 例如DSL实验室的Katzschmann等人^[90]基于上文提到的肋状结构弹性体驱动器设计开发了一体化的柔性仿生机器鱼的尾部.

2.3 波纹结构软体驱动器

一般柔性气动驱动器为了满足驱动器柔顺性和大变形的需求, 柔性腔体大多采用硬度较低、延伸性较好的类橡胶材料^[81,89-92], 但是类橡胶材料的低模量也导致了驱动器刚度较低、承载气压有限的问题. 通过材料改性或者添加增强相可以提高弹性体模量, 但与此同时也降低了材料的可延展性, 限制了驱动器的变形范围.

为了解决这一问题, 研究者进一步在驱动器的结构设计中引入了波纹结构. 波纹结构驱动器通常为具有波纹状结构的薄壳结构, 波纹状结构在沿波纹脊谷的平行方向上具有较大刚度的同时, 能够在波纹起伏的方向保持相当的柔性, 因此通过设计波纹结构的方向能够控制软体驱动器壳体在不同方向的刚度, 从而在内部气压作用下产生一定形式的定向膨胀.

2.3.1 结构原理

波纹管结构的波纹结构沿周向分布并沿轴向起伏, 这使得波纹管具有较高的径向刚度来限制驱动器径向变形的同时, 能够在轴向拥有良好的伸缩性能, 并且还具有很好的抗扭性能. 德国公司Festo利用波纹管状气动肌肉驱动器通过SLS选择性激光烧结技术制作出了一体化的象鼻状BHA (bionic handling assistant) 柔性仿生机械臂^[31,93], 该机械臂由多个具有多自由度的软体驱动单元组成, 如图8.

2015年康奈尔大学利用光固化3D打印技术使用弹性模量为5.2 MPa左右, 延伸率为45%左右的柔性光敏树脂制作了可弯曲的柔性驱动器^[91], 驱动器一侧为半个波纹管结构, 一侧为平面结构. 在内部气压作用下, 驱动器波纹结构一侧膨胀伸长, 从而使驱动器整体产生弯曲运动, 如图8(b)中 i 所示. 新加坡国立大学的Yap等人利用商业开源的FDM (fused deposition modeling)熔融沉积成型技术使用肖氏硬度85A的TPU柔性丝材, 直接一次性打印出了整个气动软体驱动器^[94]. 该驱动器能够通过气腔一侧的波纹状结构在内压作用下伸长, 实现向一侧弯曲的运动, 如图8(b)中 ii 所示. 北京航空航天大学文力研究团队利用基于柔性硅橡胶材料波纹状弯曲驱动器制作一个四指机器人抓手^[92], 手指长度为100 mm, 工作气压为70 kPa, 最大抓取力为11 N.

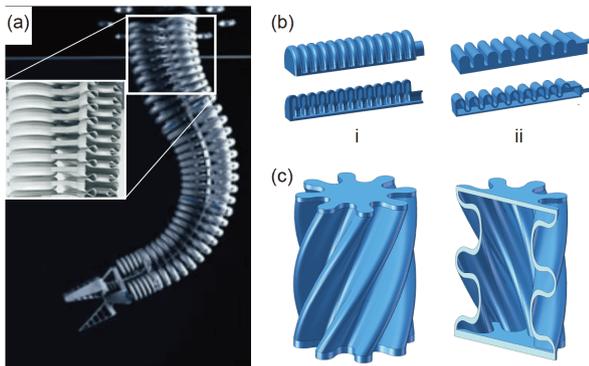


图8 (网络版彩图)波纹管结构驱动器. (a) 基于波纹管结构的气动仿象鼻柔性臂^[93] (©Festo SE & Co. KG, all rights reserved); (b) 基于波纹管结构的弯曲气动驱动器^[94]; (c) 基于螺旋状波纹结构的扭转气动驱动器^[95]

Figure 8 (Color online) Actuator based on corrugated structures. (a) Pneumatic flexible arm imitating elephant trunk based on bellow structure ^[93] (©Festo SE & Co. KG, all Rights Reserved); (b) bending pneumatic actuators based on corrugated structure ^[94]; (c) torsional pneumatic actuator based on spiral corrugated structure ^[95].

除了轴向和弯曲运动外, Scharff等人^[95]提出了一种基于螺旋状波纹结构的扭转驱动器(如图8(c)). 充气时, 螺旋型波纹结构径向膨胀并反向扭转. 高70 mm, 直径为50 mm的驱动器能够在60 kPa时产生45°的扭转角. 值得注意的是, 如果沿垂直路径扫描, 则能得到类似折叠收缩气动驱动器同样的收缩变形效果^[96].

2.3.2 特点与应用

波纹结构驱动器虽然与弹性流体驱动器具有一定的相似之处, 都是依靠驱动器本身的柔性材料传递载荷和承受气压, 但是波纹结构不仅能使变形集中于需要的维度, 并提高驱动效率, 还可以使驱动器柔性气室结构在承受较小的弹性应变的条件下, 也能够产生较大范围的变形运动.

这个特性极大地拓展了软体驱动器的可用材料范围, 具有较高弹性模量的材料也可以通过引入波纹结构设计出具有足够变形能力的驱动器. 相对高模量材料体系的引入也使得软体驱动器的制作工艺拥有更多的选择. 例如, 3D打印技术能够制作出气室结构更加复杂, 运动形式更加灵活的气动软体驱动器, 但是用于3D打印的柔性材料(如TPU、柔性光敏树脂等)的大变形能力相较于普通橡胶类材料较差^[91,94]. 若使用传统的弹性气室结构, 驱动器的变形运动范围则非常有限. 但是通过波纹结构设计的气动软体驱动器能够利用一般商业应用的柔性3D打印材料, 通过3D打印技术更加方便地制作出结构更加复杂、灵活度更高同时具有大变形运动能力的驱动器.

由于波纹驱动器采用弹性模量较高的材料, 所以能够传递更大的载荷, 具有更高的承载能力和驱动力^[97], 一般其驱动气压为0~400 kPa. 波纹结构驱动器的灵活性、良好的抗扭性能和较好承载能力使其更加适用于柔性连续体机械臂^[31,93], 以及较大载荷的抓取装置^[94]. 值得注意的是, 由于驱动器的波纹结构, 驱动器在承受负压时, 沿波纹脊谷的平行方向不易屈曲, 而沿波纹起伏的方向容易收缩. 所以大多亦可被负压驱动反向变形, 该特点能够进一步拓展波纹结构驱动器的运动和输出力范围^[98].

2.4 折叠/褶皱气动软体驱动器

气动柔性驱动器的能量来源于外界气压的做功, 因此, 驱动器柔性腔体的体积变化能力对驱动器的对

外做功能力具有关键影响. 折叠或者褶皱结构由于在膨胀展开或者收缩折叠时具有很高的形变率, 得到研究者的广泛关注, 并被引入到软体驱动器的设计中. 折叠/褶皱结构的展开或者收缩过程中材料的弹性变形范围相对较小, 因此驱动器柔性腔体的材料不仅可以使一般的橡胶类材料, 还可以选择弹性模量较高延伸性较差但是具有一定柔韧性的材料, 甚至不可伸展但易弯曲的薄膜材料. 因此, 折叠/褶皱型柔性气动驱动器大大拓宽了软体驱动器可用材料的范围和制作工艺的选择.

2.4.1 正压展开软体驱动器结构

正压驱动的折叠/褶皱气动软体驱动器的柔性气室通常能够按照一定的形式被折叠或者压缩. 而当驱动器内部气压增大时, 被折叠或者压缩的柔性气腔便能够在内部压力的作用下展开, 并产生一定形式的膨胀运动. 折叠/褶皱结构的设计形式极大程度上决定了驱动的运动形式、变形能力以及其他的驱动特性.

Li和Wang^[99]于2015年在植物细胞结构的启发下通过将多个Miura折纸沿着它们的折痕线组合得到了一个新的三维拓扑结构, 提出了流体折纸的概念(图9(a)). 这种流体折纸结构可以形成管状内腔并且在封闭两端后能够利用折纸结构折叠参数和内部流体体积变化之间的错综复杂的关系, 同时实现变形和刚度优化. 之后Sane等人^[100]通过3D打印制作出基于Miura折纸结构的柔性驱动器(图9(b)), 并对这种折纸结构的驱动性能与Miura折纸几何、面厚、材料刚度和端盖等设计因素之间的相关性进行了详细研究与分析.

韩国首尔国立大学的Kim等人^[101]则在鸚鵡鰻启发下结合Miura折纸结构提出了一种双模变形折纸驱动器. 研究者通过“层堆积浇筑法”利用水溶性模具和硅胶制作出折叠状态折纸结构驱动器. 通过结合折纸(折叠)变形和弹性气室两种变形模式, 这种双模变形驱动器能够实现极高的变形率(展开阶段800%, 最终合计1300%的伸长率).

气动软体驱动器的柔性腔体, 除了弹性材料以外还可以由不可伸展但易弯曲的柔性薄膜/壳结构组成. Immege和Kukolj^[102]于1986年设计了一种由绳网结构和不可延伸膜材料组成的多面体气囊轴向收缩驱动器. 由于膜材料的不可延伸性, 当驱动器充气时其总表面保持恒定, 与菱形网孔相连的叶状凸起结构发生径

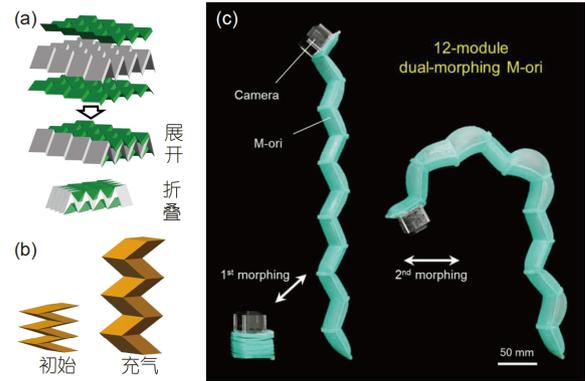


图9 (网络版彩图)正压驱动弹性折叠/褶皱驱动器. (a) Miura流体折纸^[99]; (b) 弹性Miura折纸结构驱动器^[100]; (c) 双模变形折纸驱动器^[101]

Figure 9 (Color online) Elastic folding/wrinkling actuators driven by positive pressure. (a) Fluidic origami structure [99]; (b) pneumatic actuator based on elastic Miura origami structure [100]; (c) soft actuator based on dual-morphing Miura origami structure [101].

向膨胀对绳网结构产生张力, 从而在轴向产生收缩力, 如图10(b). 其微型版的长度为1~6 cm并且不需要绳网结构. 标准版本尺寸为6~30 cm, 并在700 kPa的气压下能够产生4500 N至13600 N的收缩力和高达50%的最大收缩率. 2001年Daerden和Lefebvre^[103]利用伸展性较差的柔性薄膜材料(拉伸模量达到100 GPa以上)研制了折叠式气动肌肉(pleated PAM). 驱动器内部气压增大时, 纵向褶皱结构展开径向膨胀, 同时产生轴向收缩运动, 如图10(a). 相较于袖套型气动人工肌肉, 该驱动器没有气囊与袖套之间的摩擦损耗, 具有较高驱动效率, 并且具有较大的输出力(0~3500 N)和最大收缩率(40%)以及较小的起始工作气压. 美国密歇根州大学和意大利卡利亚里大学的研究者对此类驱动器的力学行为进行了深入的理论和应用研究^[80,104,105]. 然而由于其径向膨胀率较大, 难以实现紧凑的结构, 所以在应用上较为受限^[106].

哈佛大学的Martinez等人^[107]基于折纸工艺设计出了一种气动软体折纸驱动器, 该设计利用无拉伸性的材料(如纸张、织物、或者纤维等)增强硅胶基体. 通过不同的折纸形式, 驱动器充气时, 折纸结构能够由初始折叠状态膨胀展开从而实现伸长、弯曲、摆动等多种运动, 如图10(c). MIT多媒体实验室利用硅胶涂覆的纸张同样基于折纸结构开发了多种软体驱动器^[108]. 通过不同的折纸结构可以实现线性、摆动和扭转等运动, 并集成了电容式变形传感器, 可由计算机直接控制

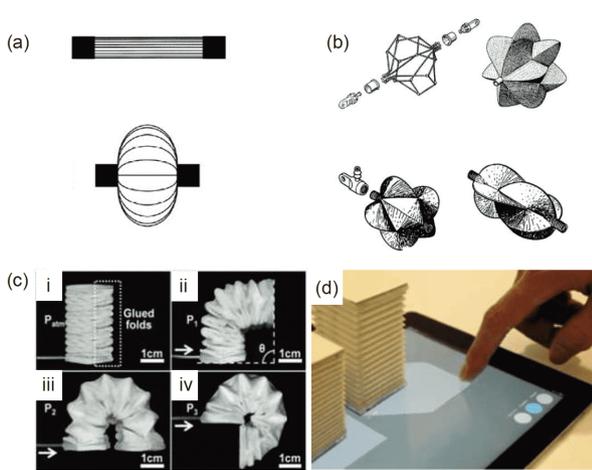


图 10 (网络版彩图)正压驱动薄膜、壳折叠/褶皱驱动器. (a) 折叠型气动肌肉^[103] (pleated PAM); (b) 钻石型褶皱驱动器^[102]; (c) 哈佛大学折纸气动软体驱动器^[107]; (d) MIT多媒体实验室气动折纸驱动器^[108] (© 2013 ACM)

Figure 10 (Color online) Folding/wrinkling actuators based on thin film/shell driven by positive pressure. (a) Pleated PAM [103]; (b) diamond-shaped folding actuator [102]; (c) origami soft pneumatic actuator from Harvard University [107]; (d) pneumatic origami actuator from Multi-Media Lab, MIT [108] (© 2013 ACM).

驱动器的变形, 如图10(d).

Belforte等人^[109]提出了一种蠕虫状的软体气动驱动器, 驱动器气腔由柔性多层复合材料粘贴而成. 多个气腔单元串联连接, 并通过橡胶绳系结构提供收缩预紧力, 当内部压力增大时便会使气腔膨胀, 折叠结构展开, 驱动器沿折叠方向伸展.

2.4.2 负压屈曲折叠软体驱动器结构

气动软体驱动器除了能够利用压缩空气, 通过柔性气室的定向膨胀对外做功, 还能够利用真空负压驱动. 真空负压驱动的软体驱动器通过结构设计能够在内外压差的作用下发生定向的屈曲性收缩折叠, 从而实现定向驱动的功能, 该过程可以看作一般膨胀式折叠/褶皱型气动驱动器驱动的逆过程. 真空负压驱动的气动驱动器能够通过较为简单的结构设计, 实现在驱动状态下复杂多样的折叠形式以及驱动形式. 真空负压驱动的柔性驱动器进一步拓展了柔性气动驱动器的设计方法和驱动形式.

哈佛大学怀斯学院(Wyss Institute)的Whitesides团队于2016年提出了一种利用结构屈曲驱动的新型线性气动软体驱动器, 如图11. 其原理是当弹性内腔抽真空

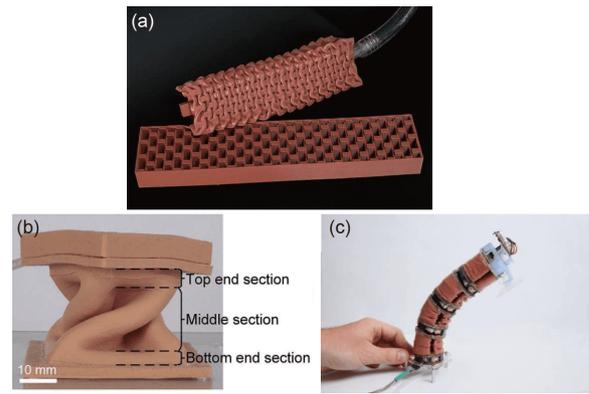


图 11 (网络版彩图)负压驱动弹性腔体折叠驱动器. (a) 哈佛大学真空负压线性屈曲气动肌肉^[97]; (b) 浙江大学软体真空扭转驱动器模块^[110]; (c) 洛桑联邦理工学院真空驱动柔性多自由度模块^[111]

Figure 11 (Color online) Elastic folding actuator driven by negative pressure. (a) Vacuum powered buckling pneumatic linear actuator from Harvard University [97]; (b) vacuum-powered soft pneumatic twisting actuator from Zhejiang University [110]; (c) vacuum-powered soft pneumatic actuator (V-SPA) from Lausanne Polytechnic Institute [111].

时, 经过特殊设计的软体驱动器外壁结构在外界与内腔压力差的作用下发生屈曲性收缩折叠, 并产生收缩力^[97]. 浙江大学焦中栋等人^[110]在折纸结构的启发下设计了一种可以由真空驱动的软体驱动器, 如图11(b). 驱动器腔体为通过截面的扭转拉伸形成的薄壳结构, 并由柔性硅橡胶浇筑而成. 驱动器在负压的作用下, 结构以类似折纸的折叠运动的形式屈曲, 实现了伸缩+扭转或者弯曲+扭转的复合运动.

瑞士洛桑联邦理工学院的Robertson和Paik^[111]将柔性泡沫作为“支架”, 通过在其表面涂覆气密硅橡胶涂层的开发了一种负压驱动的3自由度柔性气动驱动器模块. 当驱动器受负压驱动时, 能够沿轴向屈曲收缩, 每个驱动模块并联3个轴对称分布的驱动器, 当单独驱动其中一个驱动器时, 柔性模块向一侧弯曲, 如图11(b). 该模块能够即插即用并通过多种模式实现不同的功能.

真空负压驱动器往往需要利用腔体结构的屈曲, 但是结构的屈曲具有一定的不确定性因而需要特殊的设计才能实现预定的运动, 而“内骨骼”的引入则不仅从形式上丰富了真空驱动器的设计方法, 而且使驱动器的运动形式更加确定, 还提高了驱动器在其他方向上的抗弯刚度.

哈佛大学Wyss研究所和麻省理工学院计算机科

学与人工智能实验室(CSAIL)的研究人员提出了一种以折纸为灵感的真空折纸流体驱动器^[112], 如图12. 驱动器仅由可压缩的折纸骨架、柔性皮肤和流体介质组成. 驱动器可以通过骨架结构的编程设计来实现包括收缩、弯曲和扭转在内的多轴运动. 这种真空折纸流体驱动器可以收缩超过其初始长度的90%, 产生约600 kPa的应力, 并产生超过2 kW/kg的峰值功率密度. Deshpande等人^[113]基于折纸原理, 利用双层气腔开发了一种新型软双向气动驱动器. 该驱动器主要由外层乳胶外套、折纸层阻塞结构和内部可膨胀乳胶内腔三部分组成. 通过将多层堆叠的纸张折叠成允许大范围轴向伸缩的Yoshimura折纸结构, 当该结构被包裹在弹性乳胶层中并抽真空时, 驱动器轴向收缩并能够输出收缩力. 而折纸结构内部的乳胶内腔在正压驱动和折纸结构的约束下能够实现伸长运动并输出推力. 并且在外层柔性薄膜和内层柔性薄膜之间的真空作用下, 多层折纸结构能够形成阻塞效应提高驱动器的刚度和承载能力.

除了折纸结构的“内骨骼”之外, Lee和Rodrigue^[114]提出了一种利用金属框架作为“内骨骼”的新型线性折纸真空气动人工肌肉(origami-based vacuum pneumatic artificial muscles, OVO-PAM). 该驱动器由一个密封的折纸膜腔组成, 膜腔由均匀间隔的横向金属框架在内部支撑, 以限制其横向收缩, 当施加真空压力时, 驱动器线性收缩, 如图12(b). 真空状态下, 驱动器壁面上的

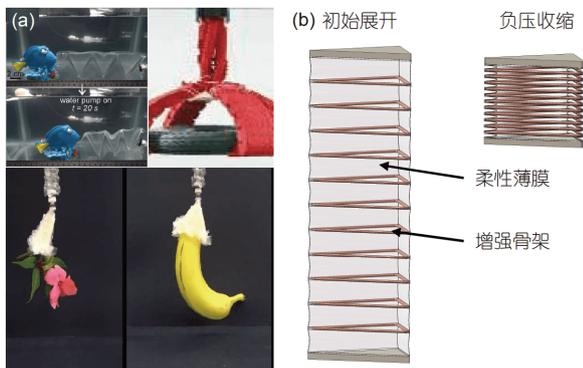


图12 (网络版彩图)内骨骼增强负压驱动薄膜腔体折叠驱动器. (a) 哈佛大学真空折纸流体驱动器^[112], 抓取重物与自适应抓取装置; (b) 金属框架“内骨骼”线性真空驱动器^[114]

Figure 12 (Color online) Endoskeleton enhanced thin-film folding actuator driven by negative pressure. (a) Fluid-driven origami-inspired artificial muscle from Harvard University^[112], capturing objects and adaptive grabbing; (b) origami-based vacuum pneumatic artificial muscles based on metal “endoskeleton”^[114].

张力和执行器底板上的垂直负压力都会提供较大的收缩力, 其最大收缩比为95%. 在-60 kPa时能够在400 N的载荷下(截面为150 mm边长的等腰三角形)得到87%的收缩比.

2.4.3 特点与应用

折叠或者褶皱结构的高变形率, 结合弹性材料自身的弹性变形, 能够实现较高的变形率. 但是由于弹性材料传递和承受载荷的能力与其弹性模量密切相关, 所以可以根据对承载能力和变形能力的不同要求, 选择不同弹性模量的材料, 例如, 水下探测^[101]、管道监测等对负载要求不高但需要较高灵活性的场景可选用弹性模量较低、延展性较好的材料, 对于柔性臂和抓取装置^[111]等要求一定负载能力的场景可以选择弹性模量稍高的材料.

而基于柔性薄膜/壳的折叠/褶皱气动驱动器, 虽然腔壁薄膜/壳结构的延展性有限, 但是能够通过折叠/褶皱结构的膨胀展开获得较大的体积变化率和变形率, 沿一定方向产生所需的运动. 并且相对于波纹结构和弹性气室, 以及弹性折叠/褶皱结构, 虽然材料拉伸模量更高, 但厚度更薄主要产生弯曲变形^[103], 在气室膨胀的过程中基于柔性薄膜/壳结构的驱动器由于弹性变形消耗的能量更少, 驱动效率更高, 同时驱动器的承压能力更强, 驱动力更大^[102,103,107], 可以应用于运动辅助^[105]、机械臂、行走机器人^[115]等对驱动力要求较高的场景中. 不过需要注意的是, 当基于柔性薄膜/壳的折叠或者褶皱结构的驱动器在变形中储存的应变能过少时, 往往自身回复力也较小, 因此在应用中通常需要施加外力回复或者组成拮抗的运动对以满足双向驱动或者多向驱动的要求^[38].

由于负压屈曲收缩的软体驱动器在驱动过程不产体积膨胀, 所以大大降低了对运动空间或者安装空间的要求, 使用起来更加灵活紧凑. 虽然负压驱动的形式限制了它的有效工作压力范围不会大于一个大气压力, 但是由于其屈曲收缩过程中的体积变化率较大, 并且弹性应变能较小, 因此也能产生较大的输出力和驱动功率, 甚至会大于一些正压驱动的驱动器. 这使得负压屈曲折叠驱动器能够被用于需要较大承载能力、并且结构紧凑的场景, 例如微型手术设备、可穿戴外骨骼以及深海操作臂等场景^[112].

值得注意的是, 由于折叠/褶皱结构不可避免地会

造成驱动器结构的应力集中问题, 而应力集中会严重影响驱动器的寿命. 因此, 需要选用合适的材料或者对结构进行优化来降低或者避免应力集中问题对此类驱动器的影响.

2.5 结构设计分析与讨论

以上根据气动驱动器的主要约束结构形式, 对其结构类型、特点以及相应的应用场景分别进行了相关介绍和分析.

其中可以发现, 驱动器的运动形式是驱动器设计中需要考虑的首要因素. 除了一般的轴向驱动的线性驱动器外, 弯曲/摆动驱动器也是一类最为常用的驱动器, 多用于软体机器人关节驱动. 弯曲运动的实现往往通过非对称的约束结构, 例如单侧纤维增强、非对称的壁厚、单侧波纹结构以及非对称的折纸结构等. 摆动运动与弯曲运动类似, 区别在于, 通过将驱动器两端以铰接的方式约束起来, 以实现绕固定轴摆动. 扭转驱动器的实现则需借助沿驱动器轴向中心对称分布的螺旋式增强结构实现, 例如一组螺旋增强纤维^[45,51]、螺旋波纹结构或者螺旋折纸(spring origami)结构^[108,110]. 螺旋或缠绕运动实际为弯曲运动和扭转的复合, 一般采用非对称的螺旋增强结构^[42]或者斜向分布的驱动单元^[86]来实现, 常用于软体机器人物体拾取、位置固定等.

除了运动方式以外, 气动软体驱动器的工作气压、变形率以及主体材料的弹性模量等对驱动性能都有显著的影响. 表1中对各类结构形式的驱动器的运动形式、主体材料弹性模量、工作气压、最大轴向变形率范围以及其驱动特性进行了相关归纳和总结.

从表1中可以看出, 对驱动力具有决定作用的最大工作气压与驱动器主体材料弹性模量密切相关. 主体材料弹性模量越大其最大工作气压越大, 例如基于纤维增强和柔性薄膜材料的驱动器的最大工作气压要远大于弹性气室驱动器. 同时我们也可以发现, 驱动器的变形率并非与材料的弹性模量简单相关, 而是更大程度上依赖于结构形式的设计. 这说明在设计时除了选择合适的材料, 更应根据不同结构形式特点, 选择合适的结构设计才能达到预期的设计效果.

值得注意的是, 很多驱动器的约束结构并非单一一种结构形式, 而是利用多种结构形式的融合, 达到优势互补和性能平衡的目的. 例如, Festo的Bionic-Motion-Robot柔性臂^[116]通过在原来基于波纹结构的柔性

机械臂^[93]结构基础上结合三维针织袖套结构, 在保证同样灵活性的同时将承载能力提高到了2.95 kg. 以及结合剪纸工艺和袖套结构的仿蛇鳞片结构的爬行机器人^[117](图13(a)), 和结合折纸工艺、袖套结构、弹性气室结构的抗扭矩双向弯曲驱动器^[118], 如图13(b)所示. 而通过将波纹结构与编织袖套气动人工肌肉相结合(图13(c)), 可将后者的轴向应变率从200%提高到350%^[119].

所以深入理解各种结构设计形式的原理和特点能够更好地帮助设计者根据需求将多种结构形式融合到设计中, 结合不同结构形式驱动器的优点, 达到按需设计、扬长避短的目的.

3 制作工艺

软体机器人由于使用的材料主要为柔性材料, 所以其加工方法也不同于一般的刚性机器人, 研究者对于软体机器人的制作方法进行了广泛的调查和研究^[15,120]. 气动软体机器人的制造方法主要包括机械加工、浇筑成型、增材制造以及二维平面加工(如二维平面粘接、光刻、软光刻等等)^[36], 并且不同结构设计形式的机器人或驱动器所采用的加工方式也不尽相同, 往往是以一种加工工艺为主, 多种制作方法相结合. 以下将对气动软体机器人或驱动器的主要制作方法进行介绍.

3.1 机械加工

一些气动软体机器人或者驱动器的制造能够利用

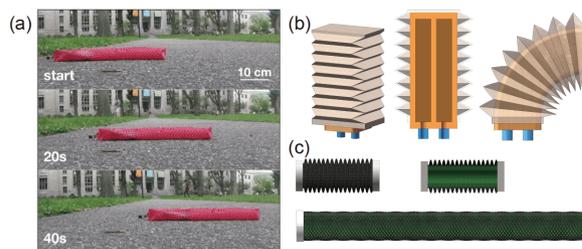


图13 (网络版彩图)多种结构形式融合的驱动器. (a) 剪纸袖套驱动器^[117]; (b) 折纸袖套驱动器^[118]; (c) 结合波纹结构的编织袖套气动人工肌肉

Figure 13 (Color online) Actuators in combination with multiple structural forms. (a) Kirigami sleeved actuator ^[117]; (b) origami sleeved actuator ^[118]; (c) pneumatic artificial muscles with braid bellow sleeves ^[119].

表 1 不同结构形式驱动器的特点与性能

Table 1 Characteristics and performance of actuators with different structures

结构形式	已实现的运动形式				驱动气压 (kPa)	轴向变形率	典型主体材料和弹性模量	优点	缺点
	伸长/收缩	扭转/回转	弯曲/摆动	螺旋/缠绕					
纤维约束结构	梭织	●	●	●	0~800	-30%~200%	结构简单, 力的传递效率较高 织物具有各向异性弹性 缠绕过程简单 可实现轴向和扭转运动的解耦 运动可设计性更强	基本没有弹性 串动摩擦损耗较大 扭转和轴向运动耦合 缠绕方式更加复杂 各种运动相互耦合关系更加复杂	不易实现小型化, 部件摩擦带来损耗和迟滞 需要机械组装, 或者缠绕等工艺, 自动化和一体化制造难度较大
	针织	●	●	●		-50%~0	PET纤维 (2~2.7 GPa); 凯夫拉纤维 (110~170 GPa), 乳胶、硅胶(1~1 MPa)	制作工艺简单, 成本低 承受气压能力较高 纤维分布方式更加灵活	
	单组纤维缠绕	●	●	●		-20%~34%			
	两组纤维缠绕	●	●	●	0~500	-30%~100%			
嵌入式	非对称增强	●	●	●	-	-			
弹性腔室驱动器	柱状腔室	●	●	●	-	-	结构简单, 制作方便, 易于小型化 外形连续, 外模结构简单易脱模 相比肋状结构变形范围更大	径向膨胀变形大, 承压能力相对较低 浇筑制造时需要复杂内模 需要复杂内模 弯曲变形时外侧材料应力较大, 浇筑制造时需要复杂内模和外模	承压能力和驱动力较低; 弹性变形量大, 驱动效率较低
	肋状结构	●	●	●	20~250	0~(>50%)	硅胶 (0.2~1 MPa)	减小了径向变形, 承压能力强 柔软性好, 结构可设计性强, 便于一体化集成设计	
	独立腔室	●	●	●	-	-			
波纹管结构	波纹管结构	●	●	●	-	-21%~16%	TPU (10~100 MPa); 热塑性弹性体 TPE (0.8~1.5 MPa); 光固化柔性树脂 (5.2 MPa)	结构简单, 可使用注塑等成熟工艺 薄壳结构, 可使用弹性模量较高的材料; 适合3D打印制造; 承压能力和驱动力相对弹性气室结构更强, 可利用真空负压反向驱动	驱动方式单一 单侧限制容易造成应力集中 两端变形限制容易造成应力集中 扭转与轴向运动相耦合
	单侧波纹结构	●	●	●	-95~400	-			
	垂直扫描 螺旋扫描	●	●	●	-	-13%~0			

(续表1)

结构形式	已实现的运动形式			驱动气压 (kPa)	轴向变形率	典型主体材料和弹性模量	优点	缺点
	伸长/收缩	扭转/回转	弯曲/摆动					
正压驱动 折叠结构	弹性折纸/折叠	□	□	0~100	0~700%	TPU、PEBA (10~100 MPa); 硅胶(0.2~10 MPa)	变形率较大 驱动压力范围大	驱动力相对较小
	柔性薄膜结构	●	●	0~700	-50%~250%	纸张(1~20 GPa, 柔性薄膜(100 GPa)	承压能力强, 驱动力大 能够通过结构的展开或者折叠, 实现较大的变形率	弹性回复力较小 结构需特殊设计以实现确定形式的屈曲
	柔性腔体屈曲	●	●	-	-45%~0	硅胶(0.04~10 MPa); 柔性薄膜: TPU和PVA (10~500 MPa); PVC和尼龙织物 (0.5~2 GPa); 刚性骨架: 尼龙、铝(1~70 GPa)	柔顺性较好 运动形式更加确定, 驱动力更大	驱动压力范围较小 刚性结构对于整体柔顺性有一定影响
	负压屈曲结构	●	●	-100~0	-90%~0	-	空间占用率低, 结构紧凑, 收缩变形体积比大	-
多种结构形式融合 (在此仅举例说明)	波纹管结构+三维针织袖套	●	●	0~300	-	-	承载力相比单纯的波纹结构大幅提高 赋予软体机器人仿生的爬行能力	-
	剪纸工艺+袖套结构	●	●	0~20	-25%	-	袖套结构提供了更高的工作压力, 折纸结构提供了更大抗扭矩性 能够根据需求, 结合不同结构形式驱动器的优点, 达到按需设计、扬长避短、优势互补的目的	多种结构形式融合结合多种制作工艺, 并需要设计合适的工艺流程
	折纸+袖套结构+弹性气室	●	●	0~50	-	-	提高伸长型气动肌肉变形量从200%提高至350%, 抗扭性能得到提高	-
波纹结构+编织袖套	●	●	0~600	350%	-	-	-	

商业化的材料,通过机械切割加工和组装来制造,例如 McKibben型气动人工肌肉.这种方法主要依靠连接件等机械结构进行组装和密封,其制作效率高、成本低,并且便于拆卸维修,但是比较耗费人工^[38,56],并且由于密封连接结构需要占据一定的空间和质量,机器人或驱动器的小型化和集成设计存在着一些困难.不过3D打印部件在机械组装类软体机器人或驱动器中的应用,实现了一定程度上的轻量化,降低了相应的人工成本^[39,121].

3.2 浇筑成型

由于硅橡胶等有机软材料在软体气动机器人中的广泛使用,各种铸模成型的方法被应用于软体机器人的制造工艺中.最常见是重力浇筑成型,其最小尺寸可以达到几百微米^[122].但是由于硅胶浇筑成型中微小气泡的存在会严重影响机器人的气密性和使用寿命,所以浇筑前的真空除泡过程^[123],以及真空注模成型^[124]和真空袋模制法被引入到机器人的制作中以提高成型质量.

为了提高软体机器人的驱动性能,经常需要对软体机器人的结构进行优化设计,但是过于复杂的外壁或者内腔结构为脱模过程带来了巨大的困难.单轴离心浇筑^[125]或者多轴旋转沉积成型方法的引入使得复杂外形和内腔的软体机器人制作成为可能,但是其壁厚难以精确控制,主要用于成型薄壳状结构.类似的还有浸涂成型,也可以应用于复杂或者微小薄壳结构的制作中^[126,127].虽然成型后的软体机器人结构可以利用自身柔韧性通过变形进行脱模,但是对于过于复杂的结构,脱模问题仍然是制造工艺中的难点.

为了解决复杂结构的成型问题,软体气动机器人的制造借鉴了传统铸造方法,引入了分体式模具^[81]、柔性芯模^[128](如泡沫芯模)等方法,以便于脱模.而可溶^[129,130]/熔性^[131,132]等可去除模具的使用则进一步提高了软体机器人铸模成型的复杂度和便利性,例如可以使用失蜡法制作具有复杂内部结构的软体机器人,如图14(a).

除此之外,多步浇筑成型的方法^[28,33]不仅能使得复杂的结构被分为多个简单的结构,从而降低了模具的设计制作难度,还能够嵌入约束结构以及传感器等电子元件^[133],如图14(b).但是不同批次浇筑或者粘接^[88]、以及不同材料之间产生的界面会对机器人的

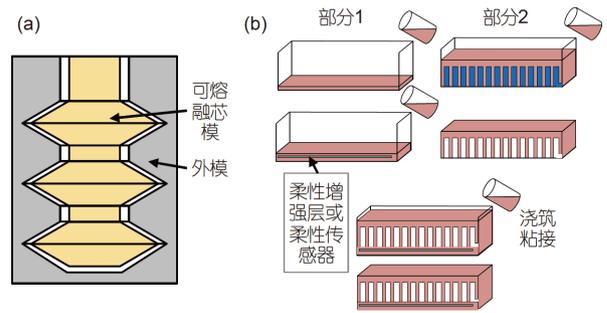


图14 (网络版彩图)浇筑成型方法. (a) 失蜡法模具制作波纹管结构^[132]; (b) 分步浇筑法制作弹性气室结构^[28]
Figure 14 (Color online) Casting molding fabrications. (a) Lost wax casting for bellow structures^[132]; (b) step-by-step casting method for elastic chamber structure^[28].

耐压强度和使用寿命产生一定影响.

浇筑成型方法适合于软体驱动器甚至软体机器人的一体化成型制造,以提高其紧凑性和集成度.由于弹性气室软体驱动器或机器人主要以硅胶等软材料为主所以比较适于这种制造方法^[60].但是对于较为复杂的结构,模具的设计、制作、浇筑以及脱模等过程都较为繁琐和复杂.

3.3 增材制造

近年来,随着增材制造或者3D打印技术的发展,在低成本3D打印机快速普及的推动下,以及3D打印材料多样化的作用下,3D打印技术以其快速、便捷、设计即产出的特点,逐渐吸引众多软体机器人研究者的目光并且取得了一系列的成果.

立体光刻技术(stereolithography, SLA)和数字光处理(digital light processing, DLP)技术,原理上都是利用光固化树脂对于光源不同波段的选择性吸收特性,但不同在于立体光刻技术利用的是激光束点到线、线到面的扫描方法,而数字光处理技术使用的则是基于液晶面板光掩膜的面光源,因此成型速度上要快一些.而连续液面生长成型(continuous liquid interface production, CLIP)技术^[134]则利用了丙烯酸酯的氧阻聚效应,省去了立体光刻和数字光处理每层固化后的剥离过程,进一步提高了打印速度.经过改性的柔性光敏树脂能够被应用于软体机器人的制作中^[135],实现机器人的自动化快速成型制造^[91,136].

选择性激光烧结(selective laser sintering)是利用激光束对粉末状材料进行局部熔融烧结.当每一层完成

后,材料托盘下降,添加新的材料后继续在其上烧结新的一层。而熔融沉积成型(fused deposition modeling, FDM)通过将热塑性塑料长丝加热到其熔点并逐层挤出、堆积该热塑性材料来制造三维形状的物体。选择性激光烧结技术由于光源和成型环境要求较高所以其成本较高,但其材料粉床本身能够作为打印复杂悬空结构的支撑结构;而熔融沉积成型技术虽然成本较低,也可以通过添加第二种可移除或溶解的支撑材料来打印悬空或者大跨度的结构(例如软体机器人的腔室结构),但是其打印表面质量相对较差。对于软体气动机器人,选择性激光烧结^[95]和熔融沉积成型两种技术^[94,137]都能够使用柔性聚氨酯材料等热塑性软材料进行打印,不过熔融沉积成型丝材则对硬度有一定要求,一般要求肖氏硬度在80A以上,否则送丝机构容易出现堵塞等问题。

喷墨3D打印技术(InkJet)利用类似于喷墨打印机的打印头通过喷射大量树脂液滴并逐层沉积为立体结构,例如PolyJet技术,该技术可以达到较好的精度和速度,并且可以使用类橡胶类树脂等材料制造软体机器人^[138,139]。直书写打印利用具有一定剪切稀化特性的黏性材料,通过螺杆或者气压挤出并逐层堆积形成三维结构^[26,140]。直书写打印在材料选择自由性上更高(可选材料包括光固化树脂、熔融性材料、单组分或多组分自固化材料等),对于研究人员更为友好,可以通过添加不同的填料来改变材料性能,例如在硅橡胶材料中添加短纤维、导电填料、磁颗粒等。

除此之外,3D打印技术还能够结合多材料特性,实现多材料3D打印技术。熔融沉积成型^[141]、喷墨打印^[142]、直书写打印(如微流道直书写多材打印^[143])、立体光刻^[144]等3D打印技术能够通过多个喷头配合工作^[145]或者更换打印材料实现多材料3D打印,如图15。通过多材料3D打印技术,软体机器人的制造能够更好地实现软硬结合的数字化结构设计和3D打印制造^[142]。例如,MIT的MacCurdy等人提出了一种利用3D打印机制作软体机器人的新技术。通过同时沉积光聚合物和非固化液体制造复杂的、预先填充的柔性液压系统,如图15(c)。这种新的打印技术使得复杂的液压驱动软体驱动器和机器人部件可以一次性自动制造出来。通过该技术能够一次性打印出线性波纹管驱动器、齿轮泵、软爪甚至一个六足机器人^[146]。并且通过多材料3D打印技术能够更好地引入智能材料,实现软体机器

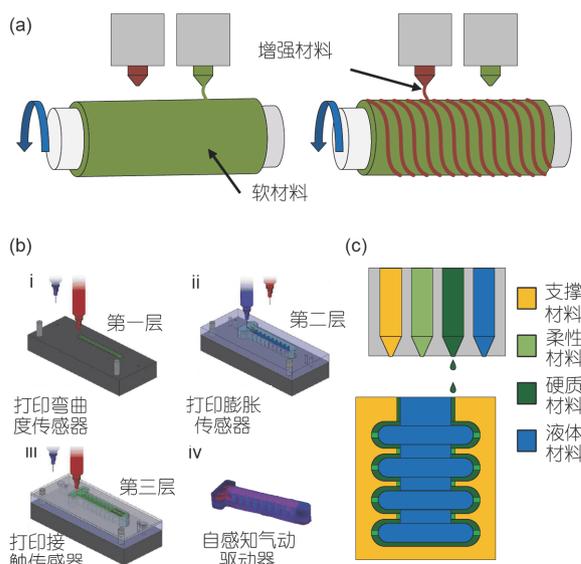


图15 (网络版彩图)多材料3D打印制作方法。(a)直写和熔融沉积成型多喷头打印纤维状增强气动软体驱动器^[145];(b)多材料直写打印自感知气动软体驱动器^[147];(c)麻省理工学院使用多材料打印技术一次性打印的柔性液压系统^[146]

Figure 15 (Color online) Manufacturing method of multi-material 3D printing. (a) Fabrication of fiber reinforced pneumatic soft actuator with multiple nozzles of direct writing and fused deposition molding [145]; (b) multi-material direct writing printing of self-sensing pneumatic soft actuator [147]; (c) soft hydraulic system built by one-time multi-material inkjet printing from MIT [146].

人的多功能化^[147,148],如图15(b)。

除此之外,哈佛大学的Valentine等人^[149]提出了一种混合3D打印,这种打印方式结合了直书写3D打印技术和电子元件的自动化拾取摆放,利用可拉伸的TPU绝缘基体、导电墨水以及电子元件,在同一平台上一一次性打印出了包含各种拉伸和触觉传感器的柔性可拉伸电子皮肤、穿戴设备^[150]以及软体机器人^[151]。这种混合3D打印方式将来也可以应用于气动软体机器人中以更好地集成传感和信号处理等功能。

随着3D打印技术和材料的不断发展、成熟和低成本化,其适用材料和结构设计范围将会更广泛,3D打印技术也将成为气动软体机器人制造与设计的一个重要发展趋势。

3.4 二维平面加工

除了通过机械加工组装、浇筑成型以及3D打印等三维的加工方式制作软体机器人外,还可以以二维的方式利用薄膜材料制造软体机器人或者驱动器,虽

然其制作方式是二维的,但是在充气/液变形时,驱动器或机器人仍可以实现多种面外变形.

3.4.1 二维平面粘接

比如通过胶粘粘接、热熔焊接、超声波焊接、激光熔融焊接等粘接方式^[152],将两层或多层硅胶材料薄膜或者热塑性薄膜以特定的图案粘接在一起,形成气囊,当充气时气囊展开便可以产生相对应的运动^[153~155].并且还可以通过改变不同层薄膜的材料特性,例如拉伸模量等实现非对称的结构,产生更为复杂的运动形式.这种制作方法具有成本低、速度快、制作尺寸受限性小等优点,但是由于二维制造的局限性,难以制作较为复杂的立体结构.

3.4.2 光刻

光刻在集成电路制造中被广泛使用,拥有极高的精度.所以研究者开发了利用光刻工艺的微型软体机器人制造方法.Gorissen等人^[156]使用牺牲蚀刻层制作两层PDMS之间的充气性间隙,而驱动器的外部几何形状则使用活性离子蚀刻工艺进行切割,从而可以制造出平面尺寸仅为几微米的结构.另一方面,Lu和Kim^[157]使用保形聚对二甲苯涂层在悬垂的硅梁之间制作出了充气气囊.

3.4.3 软光刻

由于光刻技术成本极高,而软光刻技术在光刻技术的基础上通过改进大大降低了批量生产的成本,可在实验室环境下使用,且保持了极高的精度^[158].软光刻是使“弹性压模和模具以及合适的光掩模来制造或复制微小结构”,而其“软”的特性,主要体现在其压膜或者模具使用的弹性体材料,例如PDMS.软光刻技术被应用于微型气动软体驱动器的制作中^[159~161],其尺寸可以达到几十微米左右^[61].

气动软体机器人的制作工艺多种多样,以上列举了具有代表性的主要制作工艺.每种制作工艺都有各自的应用特点和适应性.一般气动软体机器人的制作过程,往往需要根据结构设计的特征,选取并结合多种制作工艺.因此设计者需要深入了解各制作工艺的原理和特点,以及适合制造的结构特征,才能够设计出合适、高效的制作流程,制作出性能优异的气动软体机器人.

4 气动软体机器人发展趋势

4.1 多功能化设计

气动软体机器人最早便是基于仿生概念提出的,之后也有众多的研究成果是通过对自然界生物不断地学习研究取得的.随着材料、传感器、微电子以及仿生学的发展,气动软体机器人逐渐向着多功能化、智能化设计的方向不断发展,具有了更多自然生物的特性,例如自感知^[17,116,162]、自修复^[96]、变刚度、自发光、变色等^[13].这些智能化设计赋予了气动软体机器人类似于自然界生物的功能,从而对工作任务和环境具有更强的适应能力.

4.1.1 自感知

软体机器人只有在对自身和环境充分认知的基础上,才能够更好更高效地完成任任务,因此自感知是未来软体机器人必不可少的属性,软体机器人的自感知包括对自身状态(如变形、受力)和外界环境(触觉、视觉、温度等)的感知,而软体机器人传感器则要求传感器具有较好柔顺性和可拉伸性,传统的传感器已经难以满足.不过随着新材料、柔性电子、制造技术和设计方法的进步,近年来已经有很多关于柔性传感器的研究^[163~165],极大地推动了软体机器人技术的发展.这些传感器可以被大致分为以下几类:电阻、电容、电磁、压电、光学等,以下将从原理的角度对气动软体机器人的自传感技术进行介绍.

电阻式的柔性传感器是一类基于可导电或者压敏的软材料,通过测量传感器电阻变化感知相关环境信息的传感^[166,167].柔性可导电材料包括基于导电填料(如金属^[149]或者碳材料^[165]等纳米颗粒、线、或者片)的软复合材料^[168]、导电高分子材料^[169]、导电织物^[170]、导电凝胶^[171]或者导电液体(如液态金属^[172,173]、离子液体^[174~176])等.其中基于导电填料的软复合材料当被施加应力或者应变时,不仅其几何结构会发生变化,其电阻率也会发生变化,因此常被用作应变或应力传感器中的压敏材料^[177],如图16(a).纳米复合材料和导电高分子材料的力学和电学性能虽然可以调整,但需要材料合成方面的专业知识.而导电液体传感器虽然使用简单但是需要较高的封装工艺以避免泄露问题.另外导电液体传感器还需避免长期使用液体变质(如液态金属氧化,离子液体溶剂蒸发或者

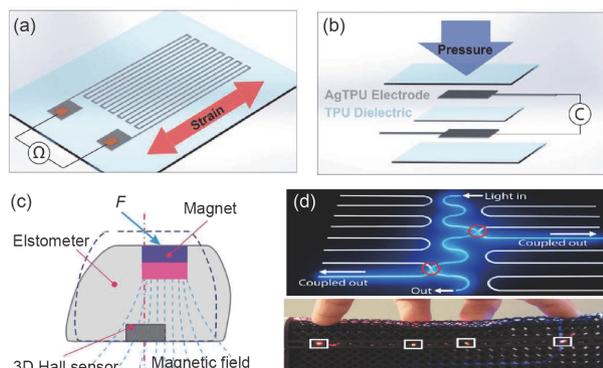


图 16 (网络版彩图)不同原理的柔性传感器. (a) 电阻式应变传感器^[149]; (b) 电容式压力传感器^[149]; (c) 电磁式霍尔触觉传感器^[163]; (d) 柔性光导纤维触觉传感器^[178]

Figure 16 (Color online) Flexible sensors based on different principles. (a) Resistive strain sensor [149]; (b) capacitive pressure sensor [149]; (c) hall magnetic tactile or deformation sensor [163]; (d) flexible optical fiber tactile sensor [178].

溶质电离)的问题。

柔性电容式传感器主要通过测量柔性电容器由于几何形状改变而引起的电容变化(图16(b)), 所以其电极材料一般需为柔性导电材料, 同样包括导电复合材料^[179]、导电织物^[180,181]、导电凝胶^[182]、导电液体等^[183]。电阻式和压阻式传感器虽然具有读取方式简单、抗干扰性强、设计形式灵活的优点, 但是大多数灵敏度较差, 具有较大的滞后、非线性、重复性差和较大的温度漂移等问题。而电容式传感器则具有线性度好、灵敏度高、动态范围大、响应速度快等优点, 但是其对工作环境(如油、灰尘、液体、水蒸气等)较为敏感, 并且对导体有邻近效应, 因此需要做好封装隔离与屏蔽, 此外可拉伸电容传感器对压力和应变都很敏感需要额外的解耦过程以得到需要的信息。

电磁式传感器包括磁场式传感器和电磁感应传感器。磁场式传感器主要由磁场源和磁场传感器(如霍尔传感器)以及柔性结构组成。当柔性结构发生变形或者受到外力时, 传感器相对于磁场源的位置发生变化致使磁场传感器处磁场强度或方向发生变化, 传感器便可以通过磁场的变化感知相关变形或者力的信息^[184,185], 如图16(c)。电磁感应传感器则主要是通过测量由电磁感应条件变化(如线圈几何参数^[186]、互感系数^[187]、涡流效应^[188]、磁阻系数^[189]等)引起的电磁感应特性变化对机器人的变形或者受力情况进行监测。

电磁式传感器虽然具有结构紧凑、成本低、可变形、灵敏度高、易于系统集成等优点, 但是其机理本质使其极易受到环境磁场和铁磁性物体的干扰, 并且其信号的调理解调相对于其他传感器也较为复杂。

光学柔性传感器主要通过检测由施加在光传输介质上的应变或压力引起的光变化(如光强、频率或相位等信息)来感知软体机器人的变形、位移、应变、压力或尺寸等信息^[178,190], 如图16(d)。其中利用检测光强方式的传感器一般具有光源(如发光二极管)、光强探测器(如光电管、摄像头甚至发光二极管本身)和柔性光导材料(如透明软材料^[191]或者无机光纤等)。其结构简单成本较低, 同时具有极佳的柔顺性和抗干扰性, 并且不需要在监测区域布置复杂的电路元件和线路, 但是光电转换元件自身刚性, 特别是光电管、摄像头之类的元件对机器人的柔顺性会造成一定影响。另一种方法, 可以利用布拉格衍射的原理, 在一根光纤纤维沿轴向的不同位置上制作多个布拉格光栅, 从而利用光电设备在纤维末端监测整个纤维长度上的应变和压力分布^[192]。例如Festo的BMR (bionic motion robot) 柔性臂通过在操作臂中心布置光学形状传感器^[116]来实时获取操作臂的形状和位移, 从而为柔性臂的运动控制提供有效信息。柔性布拉格光栅传感器在柔顺性、传感器密度和精度方面都具有很大优势, 但是昂贵且复杂的制作成本、有限的拉伸性能以及复杂的信号调理解调过程和设备使其在软体机器人的应用上存在着一些障碍。虽然可以通过优化光纤在柔性基体中的埋入方式(如正弦曲线等)以减低对软体机器人变形的影响^[193], 不过这也增加了信号处理和模型重建的复杂性。

4.1.2 自修复/自愈合

气动软体机器人虽然能够承受较大的变形, 但是如果压力过大或者被尖锐物刺/划造成腔体破裂泄露时, 便会丧失功能。因此如何提高气动软体机器人的抗损伤性显得尤为重要。而生物体在遭受损伤时则能够自行修复损伤, 恢复原有功能, 这启发了研究者对自修复/愈合软体气动机器人的研究^[194]。自修复/愈合软体气动机器人或者驱动器可以基于材料的物理特性实现(图17), 例如Shepherd等人^[195]于2013提出了一种聚芳纶纤维(Kevlar)增强硅胶弹性体的自愈合驱动器。该驱动器在内部有压力的情况下用针刺并保持其内部

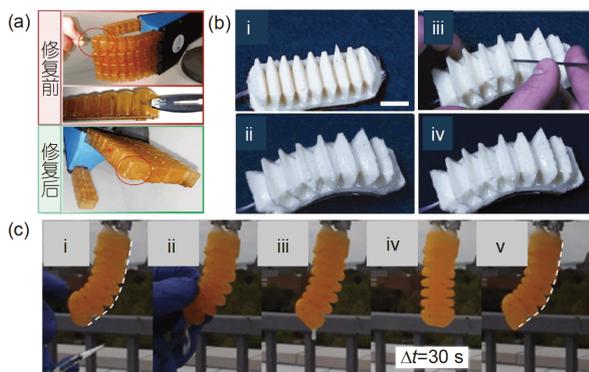


图 17 (网络版彩图)不同自修复/自愈合原理的气动软体驱动器. (a) 基于自修复高分子材料的自修复气动软体驱动器^[96]; (b) 凯夫拉短纤维增强硅胶基体的自愈合气动软体驱动器^[195]; (c) 内嵌光敏树脂的自修复软体驱动器^[198]

Figure 17 (Color online) Self-healing/sealing soft pneumatic actuators based on different principles. (a) Self-healing pneumatic soft robot based on self-healing polymers [96]; (b) self-sealing soft pneumatic actuator based on silicone matrix reinforced by short Kevlar fiber [195]; (c) self-healing soft actuator based on embedded uncured photosensitive resin [198].

压力,即使针被取下仍可以保持密闭.其自愈合特性源于凯夫拉纤维能够阻止裂纹的扩展^[196],以及硅胶具有回弹到初始形状并相互粘连的特性,如图17(b).

除此还可以基于材料分子层面的属性设计自修复特性^[197],例如Wallin等人利用3D打印技术在使用UV固化弹性体树脂打印驱动器时,将未固化液态树脂封装在弹性体中.当驱动器被刺穿时,通过紫外线刺激(如阳光直射),流出的多余树脂就能固化并将破损处重新封上^[198](图17(c)).而布鲁塞尔自由大学的Terryn等人^[96]利用双烯聚合物的热可逆共价网络开发了一种高分子自愈合材料,并利用“自愈折叠成型法”制作了三种自修复气动软体驱动器(软爪、软手和收缩式气动肌肉),被划破的驱动器外壁经过加热施加压力后能够恢复原有的气密性(图17(a)).此外,水凝胶基质中,微有机凝胶很强的疏水缔合作用和AlOOH纳米颗粒的表面羟基和PAM-co-PAA链上的羰基之间氢键重建也能够被用于气动软体驱动器的自修复中.并且在加热时,聚合物链的加速缠结和微有机凝胶包裹体的相变特性能够进一步促进愈合过程^[199].

Yu等人^[200]开发一种基于光聚合的自愈合弹性体的3D打印增材制造方法.该方法依赖于一种同时含有巯基和二硫基的分子结构的光敏弹性体油墨,前者在打印过程中能够促进硫醇-烯的光聚合,后者则在自愈

合过程中实现可逆的二硫化物复分解反应.利用投影微立体光刻系统,能够实现单、多材料三维复杂弹性体结构的快速增材制造.这些结构可以迅速愈合裂缝,并将其初始结构完整性和机械强度恢复到100%.通过这种3D打印方法制作的自修复软体驱动器,能够举起十倍于自身重量的重量,并在断裂后的韧性能恢复到90%以上.

4.1.3 变刚度

软体机器人内在的灵活性和柔顺性虽然使其能够更好地适应环境和任务,但当需要输出较大的力或者承受较大外界载荷或者干扰时,由于自身较低的结构刚度而产生难以预测或者控制的复杂变形,从而降低了承载输出的能力,提高了运动控制的难度.在自然界,象鼻、章鱼触手、动物舌头等生物组织不仅柔软灵活,并且能够具有不错的承载和输出能力,奥秘便在于它们的变刚度“静水骨骼”^[201].研究者通过模仿生物“静水骨骼”的变刚度特性来设计软体机器人^[202,203],使其不仅能够利用自身柔顺性实现与外界灵活安全的交互外,在必要时能通过提高自身结构刚度大幅提高力的传递水平,从而提高机器人的承载和输出能力,并为软体机器人的运动变形等控制带来便利.

目前,气动软体机器人的变刚度研究主要基于结构之间的相互作用或者材料本身的变刚度性质,如图18.基于结构之间相互作用的方法主要有拮抗机制、堵塞作用等^[202].主动式的拮抗作用由一对或者多个驱动器单元组成,其中一部分驱动器与另一部驱动器的驱动方向相反(例如轴向伸长与收缩或者相反方向的弯曲运动),对于气动软体机器人可以通过调节平衡位置 and 不同驱动器气压来调节形变或者刚度^[204].而半主动的拮抗作用则由主动的驱动器与被动的弹性或者刚性的约束结构组成^[205].基于McKibben驱动器的“静水骨骼”则可以视为半主动的拮抗机构,其变刚度是由充气膨胀的弹性气囊和限制膨胀的袖套结构形成的等容变刚度结构来实现的^[206,207],如图18(a).

堵塞作用主要利用的是颗粒或者片层状物质在外界压力作用下颗粒之间或者片层之间的摩擦力显著增大,引起颗粒或者片层的流动或者柔性状态向固体或者刚性状态的转变,如图18(c).一般“堵塞”结构,由颗粒或者片层填充物、包覆薄膜以及真空源组成,真空源通过抽真空的方式在薄膜表面产生气压差,从而对

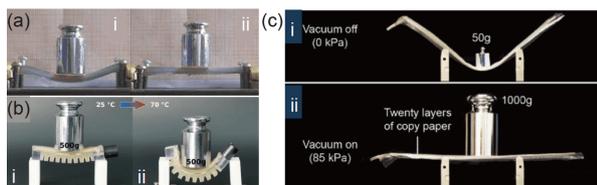


图 18 (网络版彩图)不同原理的变刚度设计. (a) 内嵌气动肌肉纤维的变刚度飞机蒙皮^[207]; (b) 内嵌形状记忆聚合物的变刚度手指^[139]; (c) 基于片层阻塞效应的变刚度结构^[208]

Figure 18 (Color online) Variable stiffness designs with different principles. (a) Variable stiffness aircraft skin embedded with pneumatic muscle fibers ^[207]; (b) variable stiffness robot fingers with embedded shape memory polymers ^[139]; (c) variable stiffness structure based on laminar jamming effect ^[208].

颗粒或者片层物施加压力改变其刚度^[208,209]. 外力的来源除了依靠抽真空外还可以通过更加直接的方式, 比如通过SMA合金丝对多层材料施加面外压力^[210].

除了依靠结构的相互作用改变结构刚度外, 还可以利用材料在特定刺激下的刚度变化直接实现变刚度功能, 例如在软体机器人中引入磁流变^[211,212]、电流变^[213]、形状记忆合金^[214,215]、形状记忆聚合物^[139,216~218]等变刚度智能材料(图18(b)), 或者低熔点蜡质^[219]、树脂^[220]或者金属材料^[221].

4.1.4 自发光

在深海中有许多生物如灯笼鱼、深海鲨鱼、星光鱼等能够通过自身生物反应发光来引诱猎物、迷惑或者逃脱捕食者、吸引配偶或者与同类交流信息等. 康奈尔大学的Larson等人^[182]提出了一种超弹性发光电容器(hyperelastic light-emitting capacitor, HLEC), 它可以在拉伸到>480%应变的橡胶薄膜中实现光信号发射和触摸传感. 这种发光电容器是由离子水凝胶电极和嵌入在硅胶弹性体介电基质中掺杂ZnS电致荧光粉的复合材料组成的, 在交流电场下, 通过本征异质结内的激励发光. 因此, 与电流驱动的LED需要光刻来形成P-N结不同, 这种材料系统可以使用简单的浇注成型方法制作. 该团队研究者将这种发光电容器作为电子皮肤嵌入到一个三腔室的气动软体爬行机器人中, 可以实现八种不同的照明状态(如图19(a)), 当软体机器人腔室壁厚度减小时, 嵌入的发光电容器皮肤的亮度也会随之增加, 并可通过监测电容器的电容值实现对电子皮肤表面压力的传感.

除了以上提到的, 还有一些其他的柔性自发光例

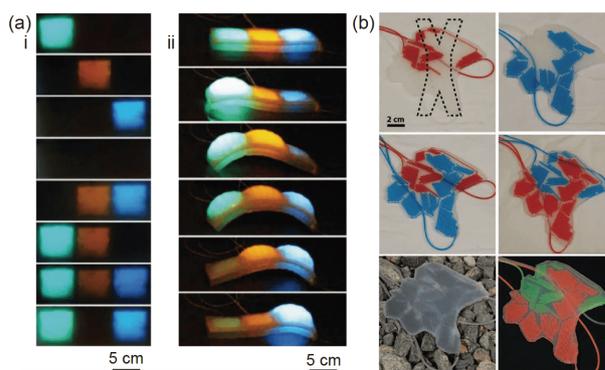


图 19 (网络版彩图)自发光和自变色软体机器人. (a) 自发光^[182]; (b) 自变色^[222]

Figure 19 (Color online) Spontaneous light and auto-chromic soft robots. (a) Spontaneous light ^[182]; (b) auto-coloration ^[222].

如电致发光^[223]、摩擦荧光^[224]等. 柔性发光研究在软体机器人上的应用将能够极大地丰富软体机器人与人类之间的交互方式, 推动软体机器人在更加广阔领域的应用, 如柔性交互式显示、可视化体感设备、广告传媒、新概念时装等.

4.1.5 自变色

变色龙能够通过改变皮肤颜色来伪装自己, 躲过天敌迷惑猎物. 哈佛大学的Morin等人^[222]将微流体通道网络与软体气动机器人相结合, 通过控制不同图案的微流体网络中的流体颜色和温度, 实现了软机器人的可见光与红外伪装/显示与运动的一体化集成(如图19(b)).

除了使用色素介质实现变色外, 生物自身绚丽多姿的结构色也给研究者带来了灵感. 通过模仿Morpho蝴蝶翅膀利用微观结构的多层薄膜干涉原理实现的结构色, 日本帝人公司等开发出具有多种结构色的Tex纤维^[225]. 而通过对蛋白石原理的研究, 结合智能材料, 研究者已经开发出人工可调谐的柔性光子晶体材料^[226]. 可以预见, 这些技术在软体机器人领域的应用将会成为软体机器人在主动伪装、环境自适应、信息交互等方面突破的关键技术.

经过近几十年的发展, 气动软体机器人从开始简单的运动功能逐渐发展出了自感知、自修复/自愈合、自发光和自变色等智能化的多功能设计. 这些进步离不开新材料、传感、微电子、制造技术以及仿生学等领域的发展, 特别是智能软材料与软体气动机器

人的有机结合为软体机器人注入了新的灵魂,使得软体气动机器人性能更加接近自然界生物,同时更加丰富的功能属性也大大拓展了软体机器人的应用场景,极大地推动了软体机器人应用障碍的解决。

4.2 模块化设计

虽然早期以及目前有很多的软体机器人采用整体设计制作的方式,驱动器与机器人之间存在唯一性,不具备可替换性。但是随着软机器人系统结构和功能的复杂化,模块化设计逐渐成为一种趋势。软体机器人通过模块化可以实现结构和子系统的可替换性、可重构性,从另一方面提高了其可修复性和鲁棒性,并且通过重构能够极大地提高软体机器人系统的任务适应性。而这些特性能够有效地降低设计和生产成本,促进软体机器人在应用领域的发展。

4.2.1 模块连接

模块间的连接是模块化机器人的关键技术,从系统功能上可以分为结构、传感、控制、能源连接,以及对于气动软体机器人的气动连接等。从连接形式上可以分为物理连接、无线连接以及软件协议虚拟连接等。本部分将对软体机器人相关的物理连接和无线连接方式做简要介绍和分析(如表2)。

物理连接从连接原理上有机械、磁吸、黏附、吸附等^[227]。机械连接在软体机器人模块中的应用十分广泛,从软体机器人结构连接中常用的螺纹^[184]、榫卯^[228]、插销^[229]、弹性卡扣等结构,到传感控制信号有线传输和电源供给等电子接口^[111],以及气动连接中

常用的快插接头等。机械连接具有较高可靠性和连接强度,但是拆卸相对较为复杂。因此,磁吸式连接被应用于软体机器人模块之间的结构^[230,231]和气动连接中^[232]。磁吸式连接包括永磁铁连接^[233]或者电磁铁连接^[234],前者为被动吸附,后者能够实现自主的吸附和分离,但是也需要额外的能源供给和控制。磁吸式连接具有对接、分离方便的优点,但是其连接可靠性和强度相对较差。

值得注意的是,软体机器人模块之间的连接相对于刚性模块机器人,在考虑连接可靠性的同时还需要考虑连接方式对机器人柔顺性的影响。机械连接和磁吸式连接大多使用刚性部件,因此对软体机器人的柔顺性具有一定的影响。所以一些柔性连接方式被提出并被应用于软体机器人来保证其柔顺性。

柔性机械连接、柔性材料黏附以及柔性静电吸附和真空吸附等一些新的连接方式被应用于软体机器人模块之间的结构连接。柔性机械连接利用柔性结构可承受较大弹性变形的特点,通过结构的过盈配合来实现柔性连接^[235],但是同时也牺牲了一部分的连接强度和可靠性。而柔性材料黏附可以通过黏性材料(如胶粘)、热熔材料(如热熔粘接^[236])以及微结构(如尼龙搭扣微结构勾连^[237])等实现。热熔黏附虽具有较好的连接强度和可靠性,但需要额外的加热过程才能重复分离黏附;而尼龙搭扣等微结构连接强度有限,并且需要在外力的帮助下才能分离。粘接是软体机器人中常用的一种组装方式^[238],但是普通粘结方法使用次数有限或者是一次性无法分离的。不过随着新材料技术的不断进步,最近研究者已经研制出一些主动可调控的可逆

表2 模块化机器人的连接方式

Table 2 Modular robot connections

系统功能	连接方式	物理连接							无线连接			
		刚性连接		柔性连接					电磁	光	声	
		机械连接	磁吸连接	柔性机械连接	热熔材料	微结构	主动可逆黏性材料和结构	静电吸附				真空吸附
结构	[111,184,228]	[230~234]	[138,235]	[236]	[237]	[239~241]	[242]	[243]				
通讯									[258]	[259]	[253~255]	[256,257]
传感	[111]								[248,249]			
控制	[111]											
能源	[111]								[250,251]			
气动	[111,184,229]	[232]	[138,235]									

注: ■为尚未应用于软体机器人设计但具有潜在应用的技术

黏附结构和材料^[239-241], 比如通过紫外或者可见光处理, 粘接材料可以在黏性和非黏性之间自由切换^[240].

基于柔性电极的静电吸附^[242]和柔性吸盘的真空吸附^[243], 也可以被应用于软体机器人模块的柔性连接中. 不过静电吸附提供连接力相对较低在 6.5 mN/cm^2 左右. 而柔性吸盘虽然能够提供较大的连接力, 但需要良好的气密性和相应的气动通道和控制. 这两种吸附方式都可以通过主动控制进行吸附和分离, 但是两种吸附方式都必须维持一定的电压或者真空负压才能保证一定的连接强度.

无线连接在原理上有电磁波、光学、声波等无线连接方式. 无线连接大多应用于软体机器人模块的通讯连接, 例如模块之间或与体外设备在传感、控制方面的信号传输. 无线连接能够大大简化机器人模块之间的连接结构, 减少或避免有线/物理连接带来的运动限制问题. 特别是对于大规模模块自组装机器人(如集群自组织机器人^[244]), 无线连接能够在模块聚集、组合和协作方面发挥不可替代的作用^[245].

最常见的是基于电磁波的无线连接方式, 其中短距无线传输技术, 如WiFi、蓝牙、ZigBee、Z-Wave、UWB蓝牙、3/4/5G等在机器人无线通讯中具有广泛应用^[246,247]. 通过无线通讯技术能够大大简化通讯线缆排布连接以及气动网络结构, 例如通过无线控制与模块集成的气阀, 能够无需线缆仅用一路供气通道就可以实现所有模块的气动控制^[248,249]. 除了无线通讯, 通过电磁波也能够进行机器人模块能量的无线传输^[250,251], 从而简化了能量有线传输和储存结构, 减少了相关约束和负载.

无线光学连接具有高带宽、高指向性以及电子系统干扰性小的优点, 例如基于红外光的Giga-IR、IrDA等技术^[252]. 虽然软体模块机器人还未有应用光学信号作为无线通讯模式的例子, 但是刚性模块机器人, 如CONRO^[253]和ATRON^[254]自重构模块机器人, 均使用了基于红外的无线通讯技术. 以及通过可见光进行协作通讯的模块化机器人, 如MNS (mergeable nervous system)机器人可以利用LED光模仿单细胞粘菌的生物化学信号, 根据任务属性协调不同的模块机器人合并成不同形态的组合机器人或者分裂成独立的机器人单元^[255]. 未来这也将是软体机器人的一个有趣的选择, 特别是蓝绿波长的光由于较低的衰减率可以用于水下通讯.

由于电磁波包括可见光在水中的衰减严重, 所以除了特殊波段的光线外, 在水环境中的无线通讯大多采用声波的方式, 不过声波通讯的传输带宽和速度比较受限制. 但对于低带宽的声波通讯, 已基本可以做到低功耗、紧凑的远距声波通讯装置设计. 例如美国MIT的DRL实验室(Distributed Robotics Laboratory)使用低功耗紧凑型的远距超声信号通讯模块^[256]在水下控制软体机器鱼集群^[257].

4.2.2 模块化方向

浙江大学张超等人^[227]根据模块任务适应性和自动化程度的不同, 将模块化软体机器人分为三类: 可组装、可重构、自重构机器人. 可组装机器人模块, 通过一定的连接方式能够组装成完整功能的机器人并且具有一定的可替换性^[260]. 而可重构机器人相对于可组装机器人各模块之间具有更强的通用性和兼容性, 并且模块的种类或者功能更多, 因此能够根据需求组合成其他形式, 具有多样性的任务适应能力^[138]. 而自重组机器人则相对于可重构机器人具有更强的自主性能够根据任务需求主动完成自身的重构^[231].

从机器人单个模块功能集成程度的角度可以发现, 软体机器人的模块化发展有两种趋势或者路线. 其一是提高每个模块的功能多样性和完整度, 使每个模块具有尽可能的通用性, 集成更多的功能角色(如驱动、传感、通讯、能源等), 形成功能上的冗余从而获得更高的重组灵活性和鲁棒性. 另一个思路是, 将复杂的系统功能进行分拆, 分散成基本的功能并且下放给各个不同的模块中, 根据需求选择不同的模块组合来实现目标需求, 从而充分利用各个模块的特性^[138]. 值得注意的是, 这两种路线在某种程度上类似于人体的干细胞与具有特异性的体细胞之间的关系, 并无孰优孰劣之分, 而是需要根据实际应用对系统可靠性、适应性或者经济性的需求, 综合评估并做出相应选择和调整.

除此之外, 从以上研究可以发现, 当机器人模块的功能集成度或者完整度越高, 模块的自主性越强, 例如集成了运动、通讯、气源、能源并能与其他模块自主连接脱离的软体机器人模块, 此时已经接近于集群机器人的定义. 因此集群机器人以及相关的群体智能、可重构神经网络^[255]等相关技术也将会是未来软体机器人模块化方面的重要研究内容^[246].

4.3 仿生学设计

机器人,特别是软体机器人与生物之间在结构、功能、控制以及任务属性上的共性使得仿生技术与软体机器人之间的关系一直密不可分.在软体机器人的概念还未被明确提出之前,有很大一部分仿生机器人的研究可以被看作早期的软体机器人,而软体机器人概念的提出和之后的发展也一直离不开仿生学的支持^[7].

自然界中具有柔软生物组织的各种生物便是软体机器人研究和设计的最好参考对象.通过仿生学研究而获得灵感的软体气动机器人研究更是不胜枚举.从章鱼灵活的触手^[62]到蛇类动物敏捷的身躯^[117];从鱼类流线型的外形^[90]到爬行动物协调的步态^[28];从动物的肌肉^[39]再到植物的触须^[261],自然界为人类提供了丰富的“格物致知”素材^[7,120].对自然界中软体结构的形态、原理以及功能的理解,不仅可以启发新的软体驱动器设计概念,还能够在软体驱动器/机器人控制和应用方面开启新的视角.

4.3.1 多角度仿生设计

软体机器人的仿生设计在很多情况下往往基于研究者的经验.本部分则将试图从软体机器人的原理仿生、功能仿生、结构仿生、运动行为仿生、智能仿生等多角度分析仿生学方法在软体机器人领域的应用,以期对研究者在软体机器人的仿生设计中提供参考.

原理仿生主要侧重研究生物某种功能的机理,并利用相同的机理进行重现.例如通过模仿蝴蝶翅膀结构色,日本帝人公司等基于相同的薄膜干涉原理合作开发出具有结构色的Morphotex纤维^[225],以及模仿动物肌肉“静水骨骼”等体积原理的变刚度气动人工肌肉^[202].

功能仿生则侧重于模仿生物在特定环境下的某种功能,并将其应用于相应的类似工作场景,而实现的方式不一定必须基于相同的原理.例如同样的变刚度功能,还可以利用原理与生物不同的变刚度材料来实现^[139].

结构仿生主要通过分析生物在适应特定环境和任务中发展出的特殊适应性结构,并将其应用于相应的人工设计中以适应类似的环境或者功能.例如软体机器人的主要概念,便是通过分析发现自然界中动物能

够通过柔软的身体组织驱动自身运动,并能够通过自身柔顺性或者主动变形适应复杂的环境或者任务,而从中得到启发的.以及仿人机器人,如仿人手抓取装置,通过分析人类手指结构特点,设计出能够根据不同的物体形状主动适应的可重构抓取装置^[30,262].值得注意的是,在结构仿生过程中,不能一味追求形似,而是需要具体分析理解生物结构与适应环境之间的本质关系,才能更好地将仿生结构应用于具体问题的解决上.

运动行为仿生则主要体现在对生物运动行为模式的模仿,例如对动物、植物、微生物的运动和其他生理行为的模仿.大多情况下仿生运动行为需要基于一定的仿生结构.例如基于软体驱动结构的仿蠕虫软体机器人^[72],模仿蛇类动物爬行方式的蛇形机器人^[263],模仿猎豹跳跃的四足机器人^[264],以及模仿植物触须的缠绕机器人^[265].植物的自生长能力赋予了藤蔓植物无限延伸的能力,斯坦福大学和加州大学圣巴巴拉分校Hawkes等人^[261]利用柔性薄壁气囊的翻转开发出模仿自然界藤蔓植物生长的自生长软体机器人.其能够连续生长出新的结构,并能够通过气压控制生长方向,拥有理论上无限的伸长比.

智能仿生主要指通过对生物神经活动或者刺激响应机制与其行为控制模式关系的研究与分析,将相关的思想和原理应用于机器人的信息和控制方面.软体机器人虽然具有与生物类似的柔顺性、适应性等优点,但是其控制难度却大大增加,而具有相同特点的生物系统则成为了软体机器人控制思想和方法的灵感来源.例如,利用导电液体受体和具有一定长度导电液体脉冲模仿生物神经冲动的传递来控制软体机器人的运动^[266],以及利用人工神经网络控制气动肌肉机械臂^[267],甚至基于多模块或者集群机器人的群体智能^[255]等.

目前大多数气动软体机器人的工作主要集中在结构仿生和运动行为仿生.随着多功能软体机器人的发展,关于功能仿生和原理仿生也逐渐取得一些成果.而目前智能仿生的工作,还主要集中于基于人工神经网络、机器学习控制、视觉识别等技术的运动控制、目标识别、路径规划等较为基础的领域,在自主行为、人工意识、群体智能等方面还比较初级.未来随着软体机器人在功能和原理仿生方面的不断发展,其特征属性也会更加接近自然生物,而基于更深层次的

智能仿生技术将成为软体机器人信息与控制方面的技术突破点。

5 问题与挑战

气动软体机器人经过近几十年的发展, 虽然已经取得了众多的研究成果与突破, 但是在一些方面, 特别是气动软体机器人的系统可靠性、气源供给和运动控制方面的问题一直制约着气动软体机器人的大规模应用。以下将对气动软体机器人系统可靠性、气源供给和运动控制法方面存在的问题与挑战进行讨论。

5.1 系统可靠性

气动软体机器人由于一般由软材料构成, 并由压缩空气驱动, 因而具有柔顺性好、重量轻、功率/重量比高、安全无污染的特点。但是也带来了一些系统可靠性方面的问题, 主要在于疲劳可靠性、抗毁损性(抗穿刺)、以及气动系统可靠性等方面。

5.1.1 疲劳可靠性

气动软体机器人, 由于需要依靠气压对外做功, 所以自身结构不可避免地要经受多次反复的大变形。这给气动软体驱动结构带来了疲劳损伤和性能下降的耐久问题。不过值得注意的是, 持久性问题并非广泛存在于所有气动软体驱动结构中, 而是与特定材料和制作工艺相关。例如Yap等人^[94]使用TPU材料通过3D打印制作的驱动器的寿命在250 kPa下为606次, 而在400 kPa下为82次。而Peele等人^[91]利用光固化柔性树脂通过立体光投影打印的驱动器, 其材料在最大应变25%的条件, 疲劳寿命仅有9次左右, 要远小于基于硅胶材料通过一次性浇筑工艺制造^[268](50千次(应变40%))和利用纤维约束结构(400 kPa, 4~20千次(轴向收缩25~30%), >120百万次(轴向收缩5%))^[269]的驱动器。这是由于Yap等人使用的TPU材料的弹性模量较大, 且驱动器为了适应3D打印制造, 具有一些尖角结构, 容易产生应力集中, 而Peele等人使用的光固化柔性树脂材料本身的拉伸断裂性和疲劳性能较差。并且3D打印由于工艺限制往往层间强度较差, 对驱动器性能影响较大。

为了提高气动驱动结构的耐久性, 可以采用纤维约束的方法帮助结构传递载荷, 降低材料负载, 同时

选用弹性模量较低且柔韧性较好的材料作为腔壁基体材料, 并在结构设计上应尽量避免材料的局部大应变和尖角结构。对于制作工艺, 应尽量避免材料界面分布在与主要承载方向垂直的方向, 例如改进多次浇筑的结构分布或者3D打印时的方向。对于3D打印技术, 可以通过匹配合适的3D打印材料和技术来提高气动结构的可靠性, 比如通过直写打印将未固化的硅胶材料沉积成型, 利用在打印中或者之后的长时间固化过程使打印界面具有更高的粘结强度^[140]。

5.1.2 抗毁损性(抗穿刺)

由于柔韧性气动软体机器人一般不易受到碾压重击的损害, 但是却难以抵抗穿刺破坏, 而穿刺破坏对于气动软体机器人具有致命威胁, 一旦破损其驱动性能会大幅下降甚至丧失。因此除了设计具有抗穿刺能力的材料和结构, 研究者还提出通过高分子自修复材料、自愈合的光固化材料和自愈合结构赋予气动软体机器人自修复/自愈合功能以提高其抗毁损能力和可靠性, 该部分内容在4.1.2部分已有详细介绍, 因此不再赘述。值得注意的是, 目前的自修复材料和自愈合光固化材料, 仍需要一定的外界辅助例如外力按压、光照等, 并且与硅胶等软材料相比在柔韧性、延伸率和强度等方面还有差距。而且愈合/修复后的驱动器承压性能会有一定的下降。

5.1.3 气动系统可靠性

气动软体机器人往往使用多个气动驱动器, 并通过相互连接的气动网络相连。普通气动网络在一个驱动器遭受破坏后往往会导致与之相连的整个气动系统失效。因此, 有必要建立相应的抗毁损结构和毁损管理系统。抗毁损结构除了以上提到的增加驱动结构的可靠性之外, 还可以通过模块化的方法提高气动软体机器人各部分的可替换性, 以及整体的冗余性和可修复性。同时可以结合相关的传感和气动控制建立起故障诊断、隔离、补偿/修复的流程机制。例如, 通过模块化并联分组的隔离机制保证部分驱动器失效后能够通过故障隔离, 同时调整控制策略达到相同的输出效果^[270]。

从以上分析可以发现, 软体气动机器人系统可靠性问题主要是驱动器可靠性和气动系统可靠性问题, 驱动器可靠性主要是气动驱动器自身的持久性和抗穿

刺性。

气动驱动器的持久性, 主要原因在于选择的结构、材料和制作方法造成的应力集中和结构强度较低问题, 这些问题可以通过优化结构设计和选择合适的材料与工艺解决。同时开发推进与软体机器人匹配的制作方法, 特别是推动软材料和多材料3D打印技术的不断发展对解决气动软体机器人可靠性具有重要意义。而气动软体机器人的抗穿刺能力的提高, 除了提高材料的抗穿刺能力, 还离不开自修复/愈合材料和结构的发展。虽然目前已取得了一些进展, 但是相关自修复/愈合方法需要进一步提高材料柔韧性、强度等性能以及修复过程自动化程度以减少外界介入。

同时气动系统可靠性对提高整体系统可靠性也至关重要。通过模块化、冗余设计、并行隔离控制能够有效提高系统整体的抗毁损性。同时结合软体机器人的传感和控制系统以及自修复能力, 建立起故障诊断、隔离、修复、补偿的机制, 更是有望能够大幅提高软体机器人的系统可靠性。

5.2 气源供给

目前大多数气动软体机器人和柔性臂通常采用外接气源作为气源供给。然而这种方式虽然适用于对移动性要求不高的工作任务, 比如工厂生产线、物品分拣包装等, 但对于任务移动性较强的柔性气动机器人, 采用外接气源将会大大限制作业范围影响工作能力。目前研究者通过研究已经提出了多种移动气源供给的方案, 主要分为以下几种。

(1) 传统空气压缩机。由于体积大、重量高、工作时噪音振动较大, 虽然可以通过搭载在负载和移动能力较强的传统刚性机器人平台上获得一定的移动性^[62,271,272], 但是难以作为软体机器人特别是小型软体机器人的自携气源。

(2) 便携式储气装置。虽然具有噪音小、没有机械部件、重量相对较轻以及具有较好的经济性和可靠性的优点, 但是存在能量储存密度有限、续航能力差的问题, 可以作为短时性工作气源^[273]。

(3) 基于通过电池供能微机电系统的微型泵。它能够为机器人提供连续的压缩空气, 但是受重量和体积限制以及功率的影响, 目前微型气泵所能提供的工作压力和流量速度相对较小^[274], 因而限制了其驱动速度^[28,275]。

(4) 基于智能软材料的柔性泵^[276]。具有良好的柔顺性能够与气动软体机器人集成一体, 且不影响其结构的柔顺性和变形能力。但是其功率和提供气压都还比较有限, 需要进一步发展。

(5) 利用化学反应产生气体, 例如利用过氧化氢溶液在催化剂的作用下分解产生气体进行驱动^[19,277]。利用化学反应产生气体的方式能够使驱动气源结构简单化、微型化, 并能够使整个动力系统完全柔性化^[19]。如哈佛大学Wehner等人^[19]开发了一个全软仿生章鱼机器人Octobot。该机器人将自带的过氧化氢溶液分解产生的气体作为流体激励源, 从而摆脱外界电力或气源的供给, 但后续的反应后产物处理和续航性仍是问题。

(6) 利用燃料剧烈燃烧产生的瞬时高温高压气体进行驱动。Shepherd和Bartlett等人分别利用甲烷^[278]和丁烷^[142]与氧气爆燃产生的瞬时高温高压来驱动弹性气室软体机器人的跳跃运动。燃料的能量密度更高, 同时爆燃驱动提供更大的驱动力, 不过驱动的瞬时性使得这种方式更适合驱动短时间、高输出的动态运动, 而难以应用于稳定的连续运动。

(7) 除此之外, 利用工质液体的液-气相变的转换进行驱动。工质液体一般选用低沸点液体如水^[279]、乙醇^[280]和丙酮^[281]等, 通过加热使其发生液-气相变, 从而为机器人提供驱动压力。如果在机器人内部集成加热装置和低沸点工质液体, 则可以通过电驱动间接实现原位驱动而不需要原有的供气系统, 并且在简化机器人驱动系统的同时赋予其更高的柔顺性。但是由于驱动过程受加热的的时间和功率、环境温度条件以及冷却速度的影响较大, 该驱动方式在反应速度和运动控制方面仍面临一定的问题^[280]。

气源供给系统对于气动软体机器人的工作性能至关重要, 具体包括气源工作压力、相对重量和体积、能量转化效率、续航能力等^[274]。目前已知的成熟技术距离完全解决这些问题还有一定距离。不过可以通过“因材施教”、“开源节流”的方法提高和榨取相关技术潜力, 除了针对气动软体机器人的特定需求选用合适的气源方案和设计(如: 对于奔跑、跳跃等高功率动作, 可选择爆发性强的爆燃反应; 对于体积小、空间有限、时间短的驱动可以选择化学反应驱动)获得更好的驱动性能外, 还可以通过改进驱动器结构设计, 以提高工作效率和降低所需驱动气压。与此同时, 已有一

些新技术取得了一定突破, 例如智能软材料柔性泵技术有望为同时解决气源嵌入柔顺性和气源供给问题提供新的解决方法。

5.3 运动控制

驱动的运动控制系统主要分为控制反馈单元、执行单元以及处理单元。反馈单元一般为应变、压力、位移、速度等接触或者非接触型传感器等; 控制执行单元为气阀或者间歇工作的气泵等; 控制处理单元为具有一定逻辑功能的电子电路或者其他具有逻辑功能的元件。

气动软体机器人的基本运动控制中一种较为简单的方式是通过压力传感器的压力信号直接控制驱动器的压力, 从而控制机器人的运动; 另一种方式则是利用形变^[17,116,162]或者运动传感器^[52]来反馈机器人的运动或者形变信息^[271], 通过控制驱动器的进气和排气以驱动器的运动或者形变量为目标对机器人的运动进行控制。虽然通过直接控制压力来控制驱动器的运动简单易行, 但是对驱动器性能的掌握要求较高, 并且控制精度较低。而利用形变或者运动传感器直接对机器人的运动进行控制, 对于控制算法的要求较低, 并能够达到更加精确的控制效果。但是同时整个控制系统在结构上也更加复杂, 并且由于软体机器人的大变形运动, 普通传感器难以满足柔顺性和延伸性的要求。不过随着柔性传感器的不断发展, 柔性驱动结构在传感器上的选择也越来越多^[282], 在4.1.1部分有详细介绍, 在此不再赘述。

而作为一般软体机器人的控制执行单元(如气阀), 由于普通机械、电磁式气阀等控制元件重量较大, 大多数气动软体驱动结构选择外置式控制执行单元。通过将控制执行元件外置, 并通过供气系统连接的控制方式能够有效减轻驱动结构自重和系统复杂性, 但是也限制了软体机器人的运动。不过随着控制执行元件的轻量化和小型化程度逐渐提高(如微型电磁阀、以及微电流变阀^[160]、微流体阀^[161]), 以及智能材料与微加工技术的发展, 便携式/嵌入式的气动控制元件逐渐成为可能。同时这也简化了供气系统和控制系统的复杂性, 促进了气动软体机器人的模块化, 提高了系统的可靠性, 降低了控制的难度。例如, 利用与机器人集成在一起的分布式控制单元能够使原来多路独立的供气线路简化为一路共用的供气线路, 并实现模块化设

计^[271]。

软体机器人驱动结构的控制处理单元可以采用电子电路控制系统也可以采用其他具有逻辑功能的材料或者结构。基于电子电路的气动控制一般采用机械结构结合电子元件(如电子阀、伺服电机等)的调压阀、流量阀进行连续控制, 或者直接采用电磁气阀结合电子电路进行脉冲式步进控制。

不过最近研究者基于材料和结构的特性(如流体黏性、流体逻辑通道和结构双稳态等), 设计出了不依赖电子控制系统的逻辑控制系统。例如利用气流通过不同尺寸截面和长度的通道时, 产生的不同充气速率, 实现基于流体黏性的“时序逻辑”控制, 并应用于四足爬行机器人的步态控制中^[283]。以及前文提到的Octobot能够通过嵌入式微流控技术和自发化学反应, 通过相互耦合的微流体阀和通道, 实现了对自身变形运动的逻辑控制, 从而首次实现了完全由软材料构成的机器人^[19]。而基于双稳态结构通过赋予执行单元(如气阀结构)一定的逻辑功能, 也能够根据气动网络中的气压等信息自主反应从而实现一定的逻辑控制过程^[284,285]。基于材料和结构的逻辑控制有望能够实现控制处理和执行元件的结构功能一体化, 同时不影响其柔顺性。但值得注意的是, 目前这些基于材料或者结构的控制元件和方法能够实现的控制功能还比较有限, 且其任务适应性较差, 还有待进一步的改进和发展。

在控制算法上, 虽然可以通过对较为简单的软体机器人系统的非线性问题的研究建立一定的控制模型(例如基于模型预测的控制方法^[286]), 但是对于复杂程度较高的软体机器人系统往往面临巨大的困难。因此, 基于智能仿生的机器学习^[287]、神经网络^[287]等技术的控制方法被引入软体机器人控制的研究中, 并且有望在软体机器人控制方面取得较好的解决方案。

综合以上, 我们可以发现气动软体机器人运动控制的问题在于, 控制元件的微型化、柔性化、集成化和智能化以及气动控制的非线性问题和复杂运动的控制算法。

而智能软材料结合微加工技术, 能够大大缩小传感和控制元件, 并实现集成化, 同时保证整体结构的柔顺性, 因此发展基于智能软材料的传感器和气动控制元件(如基于温敏水凝胶的微型流体阀^[288]), 并结合柔性电子电路技术有望解决软体气动机器人控制元件

微型化、柔性化和集成化的问题。

针对于气动控制非线性和复杂运动控制问题, 可以通过仿生的角度来寻求解决办法。一方面通过控制元件硬件的仿生设计使其具有内在的逻辑功能, 如上文提到的具有逻辑功能的微流网络、气阀, 以及最近研究者提出的利用间隔导电液体模仿生物神经脉冲的软物质计算机^[266]等。生物的低级神经系统能够利用非条件反射/条件反射等低级神经活动, 将生物的行为模式化, 从而减少对高级神经活动的依赖, 降低高级神经系统的负担。而这些控制元件内在的仿生化逻辑功能, 能够像低级神经系统一样将复杂的运动控制模式化, 从而降低总体控制难度。而如4.3.1节中所述控制算法上的智能仿生则能够提供更加符合软体机器人仿生特征的运动控制方法和思想。

6 结论

气动软体机器人具有环保、轻质、结构简单、输出功率大的优点, 能够解决目前刚性机器人结构复杂、成本高、交互安全性低等局限性问题, 以及在强辐射、电磁场、多尘等恶劣环境下具有独特优势。这使得气动软体机器人逐渐成为研究热点, 并在医疗康复、服务娱乐、工农业生产等领域展现出巨大的应用前景。而新材料、新设计方法、新制造工艺的发展不断地促进气动软体机器人技术的进步与发展^[289], 其中多功能化、模块化以及仿生学设计成为气动软体机器人的主要趋势, 这些技术有望解决目前气动软体机器人在系统可靠性、气源供给以及运动控制方面存在的问题和挑战。

气动软体机器人的驱动器结构设计对其驱动性能具有决定性的影响, 同时气动软体机器人的结构设计只有通过合理的制造工艺设计才能够被有效实现。并且气动软体机器人的实现往往需要多种结构设计和制作工艺相结合来实现。因此深入了解驱动器各种结构设计的原理和特点, 以及各种制作工艺的原理和适用场景, 对气动软体机器人的设计和制作尤为重要。

随着新设计、新工艺以及新材料的发展, 气动软体机器人技术蓬勃发展取得众多成果, 也展现出多功能化、模块化以及仿生学设计的趋势。

其中仿生设计、新结构设计以及智能材料等新材料等在气动软体机器人中的应用使其功能愈发多样

化, 其特征属性也越来越接近自然生物, 同时也极大拓展了软体机器人的应用场景和潜力。而模块化通过提高兼容性、可重构性以及标准化程度, 使系统降低复杂性、提高可靠性之外, 还通过提高功能集成度和自动化水平, 向着自组织和集群机器人的方向发展, 为气动软体机器人未来的发展提供了更多的可能。而仿生学设计从最开始就一直伴随着气动软体机器人的结构和运动行为设计, 并且随着原理仿生和功能仿生的不断深入, 气动软体机器人的类生物特征逐渐凸显, 这反过来对气动软体机器人的控制方面提出了仿生学需求, 促进了智能仿生的不断前进和发展。在一定程度上气动软体机器人不仅能够提高机器人与人类之间的互动性, 还能够建立起自然生命与人工生命之间的联系^[290], 甚至能够帮助人工生命建立起自己的思维认知^[271], 为人类了解自然生命提供另一个角度。

虽然气动软体机器人的发展距今已经取得了不少令人兴奋的成果, 但是气动软体机器人技术在系统可靠性、气源供给以及运动控制等方面仍存在一些问题和挑战。研究者们在这些领域已经进行了很多尝试, 虽然距离完全解决这些问题尚有一些差距, 但是已经提出了一些极具希望的解决思路。除了前文提到的多功能化、模块化和仿生学设计在这些领域的应用展现出了极高的潜力和价值外, 值得特别注意的是, 智能材料在抗穿刺可靠性、柔性微型气源、柔性传感器、微型流体阀以及仿生神经控制等方面提供了极具新意的方案和思路, 有望解决软体机器人目前在系统可靠性、气源供给以及运动控制上面临的一些问题和挑战。

而基于目前已取得的成果, 在软体机器人领域, 气动软体机器人已率先在商业上取得了较为成功的应用, 国内外已有多家公司将气动柔性抓取装置、气动柔性康复手套等产品投入市场。相信未来气动软体机器人在系统可靠性、气源供给以及运动控制等方面取得进一步的突破后, 气动软体机器人在医疗手术^[15]、服务娱乐、救援探测^[261]、运动辅助设备^[16,258]、力反馈可穿戴设备、人工义肢等领域会取得更为广阔和更具价值的应用空间。

综上所述, 气动软体机器人目前已经取得了较为显著的成果, 虽然还有很多问题和挑战需要解决, 但是相信通过研究者的共同努力突破相关技术瓶颈, 气动软体机器人将展现出更加广阔的前景和更加重要的价值与意义。

参考文献

- 1 Wen L, Wang H S. Prospect of soft robot research: Structure, actuation and control (in Chinese). *Robot*, 2018, 40: 577 [文力, 王贺升. 软体机器人研究展望: 结构、驱动与控制. *机器人*, 2018, 40: 577]
- 2 Bao G J, Zhang Y Q, Xu Z G, et al. Review on pneumatic-driven structure for soft robot (in Chinese). *High Technol Lett (Chin Ed)*, 2019, 29: 467–479 [鲍官军, 张亚琪, 许宗贵, 等. 软体机器人气压驱动结构研究综述. *高技术通讯*, 2019, 29: 467–479]
- 3 Albu-Schaffer A, Eiberger O, Grebenstein M, et al. Soft robotics. *IEEE Robot Automat Mag*, 2008, 15: 20–30
- 4 Robinson G, Davies J B C. Continuum robots—A state of the art. In: 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1999. 2849–2854
- 5 Trimmer B A, Takesian A E, Sweet B M, et al. Caterpillar locomotion: A new model for soft-bodied climbing and burrowing robots. In: *Proceedings of 7th International Symposium on Technology and the Mine Problem*. California, 2006. B457–B467
- 6 Zhang D H, Zhao X G, Han J D, et al. Independent force and stiffness control for antagonistic joint driven by pneumatic artificial muscles (in Chinese). *Robot*, 2018, 40: 587–596 [张道辉, 赵新刚, 韩建达, 等. 气动人工肌肉拮抗关节的力与刚度独立控制. *机器人*, 2018, 40: 587–596]
- 7 Trivedi D, Rahn C D, Kier W M, et al. Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research. *Appl Biol BioMech*, 2008, 5: 99–117
- 8 Sugiyama Y, Hirai S. Crawling and jumping by a deformable robot. *Int J Robotics Res*, 2006, 25: 603–620
- 9 Li T F, Li G R, Liang Y M, et al. Review of materials and structures in soft robotics (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2016, 48: 756–766 [李铁风, 李国瑞, 梁艺鸣, 等. 软体机器人结构机理与驱动材料研究综述. *力学学报*, 2016, 48: 756–766]
- 10 Song Y, Li C G, Wu Z F, et al. Admittance control for flexible joint robot based on cascade system (in Chinese). *Mach Electron*, 2019, 12: 77–80 [宋勇, 李成刚, 吴泽枫, 等. 基于级联系统的柔性关节机器人导纳控制. *机械与电子*, 2019, 12: 77–80]
- 11 Zhang M, Fang L J, Sun F, et al. Design and decoupling control of variable-stiffness flexible robot joint (in Chinese). *Electr Mach Contr*, 2019, 23: 120–128 [张明, 房立金, 孙凤, 等. 变刚度柔性机器人关节的设计与解耦控制方法. *电机与控制学报*, 2019, 23: 120–128]
- 12 Shi Y L, Zhang X J, Zhang M L. Design and analysis of a active-passive variable stiffness flexible joint (in Chinese). *JME*, 2018, 54: 55–62 [史延雷, 张小俊, 张明路. 主-被动复合变刚度柔性关节设计与分析. *机械工程学报*, 2018, 54: 55–62]
- 13 Laschi C, Mazzolai B, Cianchetti M. Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities. *Sci Robot*, 2016, 1: h3690
- 14 Schmitt F, Piccin O, Barbé L, et al. Soft robots manufacturing: A review. *Front Robot AI*, 2018, 5: 84
- 15 Runciman M, Darzi A, Mylonas G P. Soft robotics in minimally invasive surgery. *Soft Robotics*, 2019, 6: 423–443
- 16 Wehner M, Quinlivan B, Aubin P M, et al. A lightweight soft exosuit for gait assistance. In: 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2013. 3362–3369
- 17 Rogers E, Polygerinos P, Walsh C, et al. Smart and connected actuated mobile and sensing suit to encourage motion in developmentally delayed infants I. *J Med Devices*, 2015, 9: 30914
- 18 Gifari M W, Naghibi H, Stramigioli S, et al. A review on recent advances in soft surgical robots for endoscopic applications. *Int J Med Robot Comp*, 2019, 15: e2010
- 19 Wehner M, Truby R L, Fitzgerald D J, et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots. *Nature*, 2016, 536: 451–455
- 20 Park S J, Gazzola M, Park K S, et al. Phototactic guidance of a tissue-engineered soft-robotic ray. *Science*, 2016, 353: 158–162
- 21 Kim Y, Yuk H, Zhao R, et al. Printing ferromagnetic domains for untethered fast-transforming soft materials. *Nature*, 2018, 558: 274–279
- 22 Kim Y, Parada G A, Liu S, et al. Ferromagnetic soft continuum robots. *Sci Robot*, 2019, 4: x7329
- 23 Cao Y J, Shang J Z, Liang K S, et al. Review of soft-bodied robots (in Chinese). *Chin J Mech Eng (Chin Ed)*, 2012, 48: 25–33 [曹玉君, 尚建忠, 梁科山, 等. 软体机器人研究现状综述. *机械工程学报*, 2012, 48: 25–33]
- 24 Wang T M, Hao Y F, Yang X B, et al. Soft robotics: Structure, actuation, sensing and control (in Chinese). *Chin J Mech Eng (Chin Ed)*, 2017, 53: 1–13 [王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构、驱动、传感与控制. *机械工程学报*, 2017, 53: 1–13]
- 25 Zhang Z Q, Zou J, Ding J N, et al. Research status of the soft robot driving (in Chinese). *Robot*, 2018, 40: 648–659 [张忠强, 邹娇, 丁建宁, 等. 软体机器人驱动研究现状. *机器人*, 2018, 40: 648–659]

- 26 Yirmibeşoğlu O D, Oshiro T T, Olson G, et al. Evaluation of 3d printed soft robots in radiation environments and comparison with molded counterparts. *Front Robot AI*, 2019, 6: 40
- 27 Yap H K, Kamaldin N, Lim J H, et al. A magnetic resonance compatible soft wearable robotic glove for hand rehabilitation and brain imaging. *IEEE Trans Neural Syst Rehabilitation Eng*, 2017, 6: 782–793
- 28 Tolley M T, Shepherd R F, Mosadegh B, et al. A resilient, untethered soft robot. *Soft Robotics*, 2014, 1: 213–223
- 29 Gaylord R H. Fluid actuated motor system and stroking device. US Patent, 2 844 126, 1958-7-22
- 30 Deimel R, Brock O. A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping. *Int J Robotics Res*, 2016, 35: 161–185
- 31 Mahl T, Hildebrandt A, Sawodny O. A variable curvature continuum kinematics for kinematic control of the bionic handling assistant. *IEEE Trans Robot*, 2014, 30: 935–949
- 32 Bishop-Moser J, Kota S. Towards snake-like soft robots: Design of fluidic fiber-reinforced elastomeric helical manipulators. In: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2013. 5021–5026
- 33 Polygerinos P, Lyne S, Wang Z, et al. Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation. In: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2013. 1512–1517
- 34 Feng N, Liu L, Liu Y, et al. A bio-inspired, active morphing skin for camber morphing structures. *Smart Mater Struct*, 2015, 24: 35023
- 35 Guan Q H. Research on a smart flexible bending pneumatic artificial muscle (in Chinese). Dissertation for the Master Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. 10–14 [管清华. 一种智能柔性弯曲气动人工肌肉驱动器的研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. 10–14]
- 36 Gorissen B, Reynaerts D, Konishi S, et al. Elastic inflatable actuators for soft robotic applications. *Adv Mater*, 2017, 29: 1604977
- 37 Baldwin H A. Realizable models of muscle function. In: Proceedings of the First Rock Biomechanics Symposium. New York: 1969. 139–148
- 38 Daerden F, Lefeber D. Pneumatic artificial muscles: Actuators for robotics and automation. *Eur J Mech Environ Eng*, 2002, 47: 11–21
- 39 Guan Q, Sun J, Liu Y, et al. Novel bending and helical extensile/contractile pneumatic artificial muscles inspired by elephant trunk. *Soft Robot*, 2020, doi: 10.1109/TRO.2014.2314777
- 40 Jens G, Hans K. Device with a pressurizable variable capacity chamber for transforming a fluid pressure into a motion. US Patent, 3 638 536, 1972-2-1
- 41 Zhu M, Do T N, Hawkes E, et al. Fluidic fabric muscle sheets for wearable and soft robotics. *Soft Robotics*, 2020, 7: 179–197
- 42 Pillsbury T E, Guan Q, Wereley N. Comparison of contractile and extensile pneumatic artificial muscles. In: 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). 2016. 94–99
- 43 Ball E J, Meller M A, Chipka J B, et al. Modeling and testing of a knitted-sleeve fluidic artificial muscle. *Smart Mater Struct*, 2016, 25: 115024
- 44 Leonardo C, Galloway K C, Siddharth S, et al. Exploiting textile mechanical anisotropy for fabric-based pneumatic actuators. *Soft Robot*, 2018, 5: 662–674
- 45 Connolly F, Polygerinos P, Walsh C J, et al. Mechanical programming of soft actuators by varying fiber angle. *Soft Robotics*, 2015, 2: 26–32
- 46 Suzumori K, Iikura S, Tanaka H. Flexible microactuator for miniature robots. In: Micro Electro Mechanical Systems, 1991, MEMS'91, Proceedings. An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robots. IEEE, 1991. 204–209
- 47 Yang Q, Zhang L, Bao G, et al. Research on novel flexible pneumatic actuator FPA. In: 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. IEEE, 2004. 385–389
- 48 Bao G, Zhang L, Yang Q, et al. Development of flexible pneumatic spherical joint. In: 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. IEEE, 2004. 381–384
- 49 Bao G J. Research on characteristics of pneumatic actuator FPA and its application in multi-fingered dexterous hand design (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2006. 110–115 [鲍官军. 气动柔性驱动器FPA的特性及其在多指灵巧手设计中的应用研究. 博士学位论文. 杭州: 浙江工业大学, 2006. 110–115]
- 50 Bishop-Moser J, Krishnan G, Kim C, et al. Design of soft robotic actuators using fluid-filled fiber-reinforced elastomeric enclosures in parallel combinations. In: 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2012. 4264–4269
- 51 Bishop-Moser J, Kota S. Design and modeling of generalized fiber-reinforced pneumatic soft actuators. *IEEE Trans Robot*, 2015, 31: 536–545
- 52 Polygerinos P, Wang Z, Overvelde J T B, et al. Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators. *IEEE Trans Robot*, 2015, 31: 778–789
- 53 Galloway K C, Polygerinos P, Walsh C J, et al. Mechanically programmable bend radius for fiber-reinforced soft actuators. In: 2013 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). IEEE, 2013. 1–6

- 54 Ruan J, Xu Y M. Pneumatic flexible cylinder and bending, torsion joints. China Patent, CN87107075. 1988-04-13 [阮健, 许耀铭. 气动柔性气缸及弯曲、扭转关节. 中国专利, CN87107075. 1988-04-13]
- 55 Noritsugu T, Kubota M, Yoshimatsu S. Development of pneumatic rotary soft actuator made of silicone rubber. *J Robot Mechatron*, 2001, 13: 17–22
- 56 Hesse S. The fluidic muscle in application: 150 practical examples. Festo AG & Company, 2003: 1–143
- 57 Ge L, Chen F, Wang D, et al. Design, modeling, and evaluation of fabric-based pneumatic actuators for soft wearable assistive gloves. *Soft Robot*, 2020, doi: 10.1089/soro.2019.0105
- 58 Tondou B. Modelling of the mckibben artificial muscle: A review. *J Intelligent Material Syst Struct*, 2012, 23: 225–253
- 59 Tondou B, Lopez P. Modeling and control of mckibben artificial muscle robot actuators. *IEEE Control Systems*, 2000, 20: 15–38
- 60 Marchese A D, Katzschmann R K, Rus D. A recipe for soft fluidic elastomer robots. *Soft Robotics*, 2015, 2: 7–25
- 61 Sinatra N R, Ranzani T, Vlassak J J, et al. Nanofiber-reinforced soft fluidic micro-actuators. *J Micromech Microeng*, 2018, 28: 84002
- 62 McMahan W, Chitrakaran V, Csencsits M, et al. Field trials and testing of the octarm continuum manipulator. In: 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Florida: IEEE, 2006. 2336–2341
- 63 Tuffield P, Elias H. The shadow robot mimics human actions. *Industrial Robot*, 2003, 30: 56–60
- 64 Rothling F, Haschke R, Steil J J, et al. Platform portable anthropomorphic grasping with the bielefeld 20-dof shadow and 9-dof tum hand. In: 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2007. 2951–2956
- 65 Boblan I, Bannasch R, Schwenk H, et al. A human-like robot hand and arm with fluidic muscles: Biologically inspired construction and functionality. In: Iida F, Pfeifer R, Steels L, et al, eds. *Embodied Artificial Intelligence*. Berlin: Springer, 2004. 160–179
- 66 Festo A, Company. Airic's arm-robot arm with fluidic muscles. Festo AG & Company, 2007
- 67 Festo A, Company. Aqua ray-A remote-controlled fish. Festo AG & Company, 2008
- 68 Festo A, Company. Bionic kangaroo-recovering, storing and releasing energy based on a natural model. Festo AG & Company, 2014
- 69 Graichen K, Hentzelt S, Hildebrandt A, et al. Control design for a bionic kangaroo. *Control Eng Practice*, 2015, 42: 106–117
- 70 Wang X, Tian M, Chen J, et al. A rigid and soft combined robot that is designed to be used in confined spaces. In: Kim J, Karray F, Jo J, et al, eds. *Robot Intelligence Technology and Applications 4. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham, Switzerland: Springer, 2017. 461–468
- 71 Kurumaya S, Phillips B T, Becker K P, et al. A modular soft robotic wrist for underwater manipulation. *Soft Robotics*, 2018, 5: 399–409
- 72 Calderón A A, Ugalde J C, Zagal J C, et al. Design, fabrication and control of a multi-material-multi-actuator soft robot inspired by burrowing worms. In: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2016. 31–38
- 73 Schulte H F. The characteristic of the mckibben artificial muscle. In: Eberhart H D, Mitchell C L, Aitken G T, et al, eds. *The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics: A Report*. Washington D.C.: National Research Council, 1962. 94–115
- 74 Kang B, Kothera C S, Woods B K, et al. Dynamic modeling of mckibben pneumatic artificial muscles for antagonistic actuation. In: 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2009. 182–187
- 75 Wang G, Wereley N M, Pillsbury T. Non-linear quasi-static model of pneumatic artificial muscle actuators. *J Intelligent Material Syst Struct*, 2015, 26: 541–553
- 76 Sárosi J. New approximation algorithm for the force of fluidic muscles. In: 2012 7th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI). IEEE, 2012. 229–233
- 77 Ball E, Garcia E. Effects of bladder geometry in pneumatic artificial muscles. *J Med Devices*, 2016, 10: 41001
- 78 Antonelli M G, Beomonte Zobel P, Durante F, et al. Numerical modelling and experimental validation of a mckibben pneumatic muscle actuator. *J Intel Mat Syst Str*, 2017, 28: 2737–2748
- 79 Zang K, Ma Y, Sun N, et al. Study on finite element model of pneumatic artificial muscle. *Adv Mater Res*, 2012, 430-432: 383–386
- 80 Manuello Bertetto A, Ruggiu M. Characterization and modeling of air muscles. *Mech Res Commun*, 2004, 31: 185–194
- 81 Marchese A D, Katzschmann R K, Rus D. Whole arm planning for a soft and highly compliant 2d robotic manipulator. In: 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2014). IEEE, 2014. 554–560
- 82 Katzschmann R K, Marchese A D, Rus D. Autonomous object manipulation using a soft planar grasping manipulator. *Soft Robotics*, 2015, 2: 155–164
- 83 Martinez R V, Branch J L, Fish C R, et al. Robotic tentacles with three-dimensional mobility based on flexible elastomers. *Adv Mater*, 2013, 25:

205–212

- 84 Xie Z, Domel A G, An N, et al. Octopus arm-inspired tapered soft actuators with suckers for improved grasping. *Soft Robot*, 2020, doi: 10.1089/soro.2019.0082
- 85 Miron G, Girard A, Plante J S, et al. Design and manufacturing of embedded air-muscles for a magnetic resonance imaging compatible prostate cancer binary manipulator. *J Mech Des*, 2012, 135: 11003
- 86 Wang T, Ge L, Gu G. Programmable design of soft pneu-net actuators with oblique chambers can generate coupled bending and twisting motions. *Sensor Actuat A-Phys*, 2018, 271: 131–138
- 87 Correll N, önal Ç D, Liang H, et al. Soft autonomous materials—Using active elasticity and embedded distributed computation. In: Khatib O, Kumar V, Sukhatme G, eds. *Experimental Robotics*. Berlin: Springer, 2014. 227–240
- 88 Onal C D, Rus D. Autonomous undulatory serpentine locomotion utilizing body dynamics of a fluidic soft robot. *Bioinspir Biomim*, 2013, 8: 26003
- 89 Mosadegh B, Polygerinos P, Keplinger C, et al. Soft robotics: Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly. *Adv Funct Mater*, 2014, 24: 2109
- 90 Katschmann R K, Marchese A D, Rus D. Hydraulic autonomous soft robotic fish for 3d swimming. In: Hsieh M, Khatib O, Kumar V, eds. *Experimental Robotics*. Springer, 2016. 405–420
- 91 Peele B N, Wallin T J, Zhao H, et al. 3d printing antagonistic systems of artificial muscle using projection stereolithography. *Bioinspir Biomim*, 2015, 10: 55003
- 92 Hao Y, Gong Z, Xie Z, et al. Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length. In: 2016 35th Chinese Control Conference (CCC). Chengdu: IEEE, 2016. 6109–6114
- 93 Festo A, Company. Bionic handling assistant-safe human-machine interaction. Festo AG & Company, 2012
- 94 Yap H K, Ng H Y, Yeow C H. High-force soft printable pneumatics for soft robotic applications. *Soft Robotics*, 2016, 3: 144–158
- 95 Scharff R B, Doubrovski E L, Poelman W A, et al. Towards behavior design of a 3d-printed soft robotic hand. In: Laschi C, Rossiter J, Iida F, et al, eds. *Soft Robotics: Trends, Applications and Challenges*. Cham, Switzerland: Springer, 2017. 23–29
- 96 Terryn S, Brancart J, Lefeber D, et al. Self-healing soft pneumatic robots. *Sci Robot*, 2017, 2: n4268
- 97 Yang D, Verma M S, So J H, et al. Buckling pneumatic linear actuators inspired by muscle. *Adv Mater Technol*, 2016, 1: 1600055
- 98 Kalisky T, Wang Y, Shih B, et al. Differential pressure control of 3d printed soft fluidic actuators. In: 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2017. 6207–6213
- 99 Li S, Wang K W. Fluidic origami: A plant-inspired adaptive structure with shape morphing and stiffness tuning. *Smart Mater Struct*, 2015, 24: 105031
- 100 Sane H, Bhowad P, Li S. Actuation performance of fluidic origami cellular structure: A holistic investigation. *Smart Mater Struct*, 2018, 27: 115014
- 101 Kim W, Byun J, Kim J, et al. Bioinspired dual-morphing stretchable origami. *Sci Robot*, 2019, 4: eaay3493
- 102 Immege G, Kukulj M. Axially contractible actuator. US patent, 4 939 982, 1990
- 103 Daerden F, Lefeber D. The concept and design of pleated pneumatic artificial muscles. *Int J Fluid Power*, 2001, 2: 41–50
- 104 Minh T V, Tjahjowidodo T, Ramon H, et al. Cascade position control of a single pneumatic artificial muscle–mass system with hysteresis compensation. *Mechatronics*, 2010, 20: 402–414
- 105 Gordon K E, Sawicki G S, Ferris D P. Mechanical performance of artificial pneumatic muscles to power an ankle–foot orthosis. *J BioMech*, 2006, 39: 1832–1841
- 106 Daerden F. Conception and realization of pleated pneumatic artificial muscles and their use as compliant actuation elements. Dissertation for the Doctoral Degree. Brussel, Belgium: Vrije University, 1999. 94
- 107 Martinez R V, Fish C R, Chen X, et al. Elastomeric origami: Programmable paper-elastomer composites as pneumatic actuators. *Adv Funct Mater*, 2012, 22: 1376–1384
- 108 Yao L, Niiyama R, Ou J, et al. Pneu: Pneumatically actuated soft composite materials for shape changing interfaces. In: Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and Technology. 2013. 13–22
- 109 Belforte G, Eula G, Ivanov A, et al. Soft pneumatic actuators for rehabilitation. *Actuators*, 2014, 3: 84–106
- 110 Jiao Z, Ji C, Zou J, et al. Vacuum-powered soft pneumatic twisting actuators to empower new capabilities for soft robots. *Adv Mater Technol*,

- 2019, 4: 1800429
- 111 Robertson M A, Paik J. New soft robots really suck: Vacuum-powered systems empower diverse capabilities. *Sci Robot*, 2017, 2: n6357
- 112 Li S, Vogt D M, Rus D, et al. Fluid-driven origami-inspired artificial muscles. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017, 114: 13132–13137
- 113 Deshpande A R, Tse Z T H, Ren H. Origami-inspired bi-directional soft pneumatic actuator with integrated variable stiffness mechanism. In: 2017 18th International Conference on Advanced Robotics (ICAR). IEEE, 2017. 417–421
- 114 Lee J G, Rodrigue H. Origami-based vacuum pneumatic artificial muscles with large contraction ratios. *Soft Robotics*, 2019, 6: 109–117
- 115 Verrelst B, Ham R V, Vanderborght B, et al. The pneumatic biped “Lucy” actuated with pleated pneumatic artificial muscles. *Auton Robot*, 2005, 18: 201–213
- 116 Festo A, Company. Bionic motion robot-pneumatic lightweight robot with natural movement patterns. Festo AG & Company, 2016
- 117 Rafsanjani A, Zhang Y, Liu B, et al. Kirigami skins make a simple soft actuator crawl. *Sci Robot*, 2018, 3: r7555
- 118 Paez L, Agarwal G, Paik J. Design and analysis of a soft pneumatic actuator with origami shell reinforcement. *Soft Robotics*, 2016, 3: 109–119
- 119 Yukisawa T, Ishii Y, Nishikawa S, et al. Modeling of extensible pneumatic actuator with bellows (epab) for continuum arm. In: 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. IEEE, 2017. 2303–2308
- 120 Cho K J, Koh J S, Kim S, et al. Review of manufacturing processes for soft biomimetic robots. *Int J Precis Eng Manuf*, 2009, 10: 171–181
- 121 Yi J, Chen X, Song C, et al. Fiber-reinforced origamic robotic actuator. *Soft Robotics*, 2018, 5: 81–92
- 122 Milana E, Bellotti M, Gorissen B, et al. Precise bonding-free micromoulding of miniaturized elastic inflatable actuators. In: 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). Seoul: IEEE, 2019. 768–773
- 123 Yap H K, Goh J C H, Yeow R C H. Design and characterization of soft actuator for hand rehabilitation application. In: 6th European conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering. Springer, 2015. 367–370
- 124 Zhao L, Gupta S K. Design, manufacturing, and characterization of a pneumatically-actuated soft hand. In: 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference. Texas: ASME, 2018. V2T–V3T
- 125 Mazzeo A D, Hardt D E. Centrifugal casting of microfluidic components with pdms. *J Micro Nanomanuf*, 2013, 1: 21001
- 126 Gul J Z, Yang Y J, Su K Y, et al. Omni directional multimaterial soft cylindrical actuator and its application as a steerable catheter. *Soft Robotics*, 2017, 4: 224–240
- 127 Paek J, Cho I, Kim J. Microrobotic tentacles with spiral bending capability based on shape-engineered elastomeric microtubes. *Sci Rep*, 2015, 5: 10768
- 128 Galloway K C, Becker K P, Phillips B, et al. Soft robotic grippers for biological sampling on deep reefs. *Soft Robotics*, 2016, 3: 23–33
- 129 Koivikko A, Sariola V. Fabrication of soft devices with buried fluid channels by using sacrificial 3d printed molds. In: 2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). IEEE, 2019. 509–513
- 130 Rehman T, Faudzi A A, Nafea M, et al. Pdms-based dual-channel pneumatic microactuator using sacrificial molding fabrication technique. In: 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII). IEEE, 2019. 1788–1791
- 131 Schumacher C M, Loepfe M, Fuhrer R, et al. 3d printed lost-wax casted soft silicone monoblocks enable heart-inspired pumping by internal combustion. *RSC Adv*, 2014, 4: 16039–16042
- 132 Lawrence A B, Alspach A N, Bentivegna D C. Mechanical implementation of a variable-stiffness actuator for a softly strummed ukulele. In: 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2016. 376–382
- 133 Yirmibesoglu O D, Menguc Y. Hybrid soft sensor with embedded imus to measure motion. In: 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). Texas: IEEE, 2016. 798–804
- 134 Tumbleston J R, Shirvanyants D, Ermoshkin N, et al. Continuous liquid interface production of 3d objects. *Science*, 2015, 347: 1349–1352
- 135 Patel D K, Sakhaei A H, Layani M, et al. Highly stretchable and uv curable elastomers for digital light processing based 3d printing. *Adv Mater*, 2017, 29: 1606000
- 136 Ge L, Dong L, Wang D, et al. A digital light processing 3d printer for fast and high-precision fabrication of soft pneumatic actuators. *Sens Actuat A-Phys*, 2018, 273: 285–292
- 137 Anver H M, Mutlu R, Alici G. 3d printing of a thin-wall soft and monolithic gripper using fused filament fabrication. In: 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2017. 442–447
- 138 Lee J Y, Kim W B, Choi W Y, et al. Soft robotic blocks: Introducing sobl, a fast-build modularized design block. *IEEE Robot Automat Mag*,

- 2016, 23: 30–41
- 139 Zhang Y, Zhang N, Hingorani H, et al. Fast-response, stiffness-tunable soft actuator by hybrid multimaterial 3D printing. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1806698
- 140 Plott J, Shih A. The extrusion-based additive manufacturing of moisture-cured silicone elastomer with minimal void for pneumatic actuators. *Addit Manuf*, 2017, 17: 1–14
- 141 Espalin D, Alberto Ramirez J, Medina F, et al. Multi-material, multi-technology fdm: Exploring build process variations. *Rapid Prototyping J*, 2014, 20: 236–244
- 142 Bartlett N W, Tolley M T, Overvelde J T B, et al. A 3d-printed, functionally graded soft robot powered by combustion. *Science*, 2015, 349: 161–165
- 143 Skylar-Scott M A, Mueller J, Visser C W, et al. Voxellated soft matter via multimaterial multinozzle 3d printing. *Nature*, 2019, 575: 330–335
- 144 Choi J W, Kim H C, Wicker R. Multi-material stereolithography. *J Mater Processing Tech*, 2011, 211: 318–328
- 145 Byrne O, Coulter F, Glynn M, et al. Additive manufacture of composite soft pneumatic actuators. *Soft Robotics*, 2018, 5: 726–736
- 146 Maccurdy R, Katzschmann R, Kim Y, et al. Printable hydraulics: A method for fabricating robots by 3d co-printing solids and liquids. In: 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2016. 3878–3885
- 147 Truby R L, Wehner M, Grosskopf A K, et al. Soft somatosensitive actuators via embedded 3d printing. *Adv Mater*, 2018, 30: 1706383
- 148 Yang Y, Chen Y, Li Y, et al. Bioinspired robotic fingers based on pneumatic actuator and 3d printing of smart material. *Soft Robotics*, 2017, 4: 147–162
- 149 Valentine A D, Busbee T A, Boley J W, et al. Hybrid 3d printing of soft electronics. *Adv Mater*, 2017, 29: 798–804
- 150 Kim S, Jeong D, Oh J, et al. A novel all-in-one manufacturing process for a soft sensor system and its application to a soft sensing glove. In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2018. 7004–7009
- 151 Byun J, Lee Y, Yoon J, et al. Electronic skins for soft, compact, reversible assembly of wirelessly activated fully soft robots. *Sci Robot*, 2018, 3: s9020
- 152 Shah T. Polyurethane thin-film welding for medical device applications. *Medical Device Diagnostic Ind*, 2002, 24: 62–69
- 153 Niiyama R, Sun X, Yao L, et al. Sticky actuator: Free-form planar actuators for animated objects. In: Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction. New York: ACM, 2015. 77–84
- 154 Ou J, Skouras M, Vlavianos N, et al. Aeromorph-heat-sealing inflatable shape-change materials for interaction design. In: 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology. Tokyo: ACM, 2016. 121–132
- 155 Amiri A M, Caprio A, Alaie S, et al. Rapid manufacturing of thin soft pneumatic actuators and robots. *J Vis Exp*, 2019, 153: e60595
- 156 Gorissen B, Van Hoof C, Reynaerts D, et al. Su8 etch mask for patterning pdms and its application to flexible fluidic microactuators. *Microsyst Nanoeng*, 2016, 2: 16045
- 157 Lu Y, Kim C J. Micro-finger articulation by pneumatic parylene balloons. In: 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Boston: IEEE, 2003. 276–279
- 158 Xia Y, Whitesides G M. Soft lithography. *Annu Rev Mater Sci*, 1998, 28: 153–184
- 159 Russo S, Ranzani T, Walsh C J, et al. An additive millimeter-scale fabrication method for soft biocompatible actuators and sensors. *Adv Mater Technol*, 2017, 2: 1700135
- 160 Miyoshi T, Yoshida K, Kim J, et al. An mems-based multiple electro-rheological bending actuator system with an alternating pressure source. *Sens Actuat A-Phys*, 2016, 245: 68–75
- 161 Toh A, Wang Z F, Ng S H. Fabrication of embedded microvalve on pmma microfluidic devices through surface functionalization. In: 2008 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS. IEEE, 2008. 267–272
- 162 Park Y L, Wood R J. Smart pneumatic artificial muscle actuator with embedded microfluidic sensing. In: 2013 IEEE Sensor. Baltimore: IEEE, 2013. 1–4
- 163 Wang H, Totaro M, Beccai L. Toward perceptive soft robots: Progress and challenges. *Adv Sci*, 2018, 5: 1800541
- 164 Amjadi M, Kyung K U, Park I, et al. Stretchable, skin-mountable, and wearable strain sensors and their potential applications: A review. *Adv Funct Mater*, 2016, 26: 1678–1698
- 165 Shih B, Christianson C, Gillespie K, et al. Design considerations for 3d printed, soft, multimaterial resistive sensors for soft robotics. *Front Robot AI*, 2019, 6: 30

- 166 Gerboni G, Diodato A, Ciuti G, et al. Feedback control of soft robot actuators via commercial flex bend sensors. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2017, 22: 1881–1888
- 167 Gong X X, Fei G T, Fu W B, et al. Flexible strain sensor with high performance based on pani/pdms films. *Org Electron*, 2017, 47: 51–56
- 168 Chen D, Pei Q. Electronic muscles and skins: A review of soft sensors and actuators. *Chem Rev*, 2017, 117: 11239–11268
- 169 Tang X, Li K, Liu Y, et al. Coiled conductive polymer fiber used in soft manipulator as sensor. *IEEE Sens J*, 2018, 18: 6123–6129
- 170 Parzer P, Perteneder F, Probst K, et al. Resi: A highly flexible, pressure-sensitive, imperceptible textile interface based on resistive yarns. In: *The 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. Berlin: ACM, 2018. 745–756
- 171 Zhang S, Wang F, Peng H, et al. Flexible highly sensitive pressure sensor based on ionic liquid gel film. *ACS Omega*, 2018, 3: 3014–3021
- 172 Y-L Park, Bor-Rong Chen, Wood R J. Design and fabrication of soft artificial skin using embedded microchannels and liquid conductors. *IEEE Sens J*, 2012, 12: 2711–2718
- 173 Vogt D M, Park Y L, Wood R J. Design and characterization of a soft multi-axis force sensor using embedded microfluidic channels. *IEEE Sens J*, 2013, 13: 4056–4064
- 174 Choi D Y, Kim M H, Oh Y S, et al. Highly stretchable, hysteresis-free ionic liquid-based strain sensor for precise human motion monitoring. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9: 1770–1780
- 175 Chossat J B, Shin H S, Park Y L, et al. Soft tactile skin using an embedded ionic liquid and tomographic imaging. *J Mech Robotics*, 2015, 7: 21008
- 176 Muth J T, Vogt D M, Truby R L, et al. Embedded 3d printing of strain sensors within highly stretchable elastomers. *Adv Mater*, 2014, 26: 6307–6312
- 177 Kweon O Y, Lee S J, Oh J H. Wearable high-performance pressure sensors based on three-dimensional electrospun conductive nanofibers. *NPG Asia Mater*, 2018, 10: 540–551
- 178 Xu P A, Mishra A K, Bai H, et al. Optical lace for synthetic afferent neural networks. *Sci Robot*, 2019, 4: w6304
- 179 Cohen D J, Mitra D, Peterson K, et al. A highly elastic, capacitive strain gauge based on percolating nanotube networks. *Nano Lett*, 2012, 12: 1821–1825
- 180 Viry L, Levi A, Totaro M, et al. Flexible three-axial force sensor for soft and highly sensitive artificial touch. *Adv Mater*, 2014, 26: 2659–2664
- 181 Atalay A, Sanchez V, Atalay O, et al. Batch fabrication of customizable silicone-textile composite capacitive strain sensors for human motion tracking. *Adv Mater Technol*, 2017, 2: 1700136
- 182 Larson C, Peele B, Li S, et al. Highly stretchable electroluminescent skin for optical signaling and tactile sensing. *Science*, 2016, 351: 1071–1074
- 183 Frutiger A, Muth J T, Vogt D M, et al. Capacitive soft strain sensors via multicore-shell fiber printing. *Adv Mater*, 2015, 27: 2440–2446
- 184 Luo M, Skorina E H, Tao W, et al. Toward modular soft robotics: Proprioceptive curvature sensing and sliding-mode control of soft bidirectional bending modules. *Soft Robotics*, 2017, 4: 117–125
- 185 Boer G, Raske N, Wang H, et al. Design optimisation of a magnetic field based soft tactile sensor. *Sensors*, 2017, 17: 2539
- 186 Felt W, Chin K Y, Remy C D. Smart braid feedback for the closed-loop control of soft robotic systems. *Soft Robotics*, 2017, 4: 261–273
- 187 Felt W, Suen M, Remy C D. Sensing the motion of bellows through changes in mutual inductance. In: *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Daejeon: IEEE, 2016. 5252–5257
- 188 Wang H, Kow J, Raske N, et al. Robust and high-performance soft inductive tactile sensors based on the eddy-current effect. *Sens Actuat A-Phys*, 2018, 271: 44–52
- 189 Ren Y, Pan M, Chen D, et al. An electromagnetic/capacitive composite sensor for testing of thermal barrier coatings. *Sensors*, 2018, 18: 1630
- 190 Duncan R G, Froggatt M E, Kreger S T, et al. High-accuracy fiber-optic shape sensing. In: *The International Symposium On: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*. California: SPIE, 2007. 65301S
- 191 Zhao H, O'Brien K, Li S, et al. Optoelectronically innervated soft prosthetic hand via stretchable optical waveguides. *Sci Robot*, 2016, 1: i7529
- 192 Xu L, Ge J, Patel J H, et al. Dual-layer orthogonal fiber Bragg grating mesh based soft sensor for 3-dimensional shape sensing. *Opt Express*, 2017, 25: 24727–24734
- 193 Xu L, Liu N, Ge J, et al. Stretchable fiber-bragg-grating-based sensor. *Opt Lett*, 2018, 43: 2503–2506
- 194 Bilodeau R A, Kramer R K. Self-healing and damage resilience for soft robotics: A review. *Front Robot AI*, 2017, 4: 48
- 195 Shepherd R F, Stokes A A, Nunes R M D, et al. Soft machines that are resistant to puncture and that self seal. *Adv Mater*, 2013, 25: 6709–6713

- 196 Geethamma V G, Kalaprasad G, Groeninckx G, et al. Dynamic mechanical behavior of short coir fiber reinforced natural rubber composites. *Compos Part A-Appl Sci Manufacturing*, 2005, 36: 1499–1506
- 197 Zhang B, Zhang W, Zhang Z, et al. Self-healing four-dimensional printing with an ultraviolet curable double-network shape memory polymer system. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11: 10328–10336
- 198 Wallin T J, Pikul J H, Bodkhe S, et al. Click chemistry stereolithography for soft robots that self-heal. *J Mater Chem B*, 2017, 5: 6249–6255
- 199 Zhuo S, Zhao Z, Xie Z, et al. Complex multiphase organohydrogels with programmable mechanics toward adaptive soft-matter machines. *Sci Adv*, 2020, 6: x1464
- 200 Yu K, Xin A, Du H, et al. Additive manufacturing of self-healing elastomers. *Npg Asia Mater*, 2019, 11: 1–11
- 201 Kier W M, Smith K K. Tongues, tentacles and trunks: The biomechanics of movement in muscular-hydrostats. *Zoological J Linnean Soc*, 1985, 83: 307–324
- 202 Manti M, Cacucciolo V, Cianchetti M. Stiffening in soft robotics: A review of the state of the art. *IEEE Robot Automat Mag*, 2016, 23: 93–106
- 203 Yang Y, Li Y, Chen Y. Principles and methods for stiffness modulation in soft robot design and development. *Bio-des Manuf*, 2018, 1: 14–25
- 204 Correll N, önal Ç D, Liang H, et al. Soft autonomous materials—using active elasticity and embedded distributed computation. In: Khatib O, Kumar V, Sukhatme G, eds. *Experimental Robotics*. Berlin: Springer, 2014. 227–240
- 205 Chen Y, Sun J, Liu Y, et al. Experiment and analysis of fluidic flexible matrix composite (F^2 MC) tube. *J Intelligent Material Syst Struct*, 2012, 23: 279–290
- 206 Al-Fahaam H, Nefti-Meziani S, Theodoridis T, et al. The design and mathematical model of a novel variable stiffness extensor-contractor pneumatic artificial muscle. *Soft Robotics*, 2018, 5: 576–591
- 207 Chen Y, Yin W, Liu Y, et al. Structural design and analysis of morphing skin embedded with pneumatic muscle fibers. *Smart Mater Struct*, 2011, 20: 85033
- 208 Narang Y S, Vlassak J J, Howe R D. Mechanically versatile soft machines through laminar jamming. *Adv Funct Mater*, 2018, 28: 1707136
- 209 Lin Y, Zou J, Yang H. A vacuum-powered soft linear actuator strengthened by granular jamming. In: *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*. Springer, 2019. 531–543
- 210 Henke M, Gerlach G. A multi-layered variable stiffness device based on smart form closure actuators. *J Intelligent Material Syst Struct*, 2016, 27: 375–383
- 211 Nishida T, Okatani Y, Tadakuma K. Development of universal robot gripper using MR α fluid. *Int J Human Robot*, 2016, 13: 1650017
- 212 Jackson J A, Messner M C, Dudukovic N A, et al. Field responsive mechanical metamaterials. *Sci Adv*, 2018, 4: u6419
- 213 Monkman G J. Compliant robotic devices, and electroadhesion. *Robotica*, 1992, 10: 183–185
- 214 Cianchetti M, Calisti M, Margheri L, et al. Bioinspired locomotion and grasping in water: The soft eight-arm octopus robot. *Bioinspir Biomim*, 2015, 10: 35003
- 215 Fei Y, Wang J, Pang W. A novel fabric-based versatile and stiffness-tunable soft gripper integrating soft pneumatic fingers and wrist. *Soft Robotics*, 2019, 6: 1–20
- 216 Santos J, Skorina E H, Salerno M, et al. Single chamber multiple degree-of-freedom soft pneumatic actuator enabled by adjustable stiffness layers. *Smart Mater Struct*, 2019, 28: 35012
- 217 Chen S, Chen Y, Zhang Z, et al. Experiment and analysis of morphing skin embedded with shape memory polymer composite tube. *J Intelligent Material Syst Struct*, 2014, 25: 2052–2059
- 218 Chen Y, Sun J, Liu Y, et al. Variable stiffness property study on shape memory polymer composite tube. *Smart Mater Struct*, 2012, 21: 94021
- 219 Cheng N G, Gopinath A, Wang L, et al. Thermally tunable, self-healing composites for soft robotic applications. *Macromol Mater Eng*, 2014, 299: 1279–1284
- 220 McEvoy M A, Correll N. Thermoplastic variable stiffness composites with embedded, networked sensing, actuation, and control. *J Composite Mater*, 2015, 49: 1799–1808
- 221 Schubert B E, Floreano D. Variable stiffness material based on rigid low-melting-point-alloy microstructures embedded in soft poly (dimethylsiloxane) (PDMS). *RSC Adv*, 2013, 3: 24671–24679
- 222 Morin S A, Shepherd R F, Kwok S W, et al. Camouflage and display for soft machines. *Science*, 2012, 337: 828–832
- 223 Zhou Y, Zhao C, Wang J, et al. Stretchable high-permittivity nanocomposites for epidermal alternating-current electroluminescent displays. *ACS Mater Lett*, 2019, 1: 511–518

- 224 Chen Y, Wei X, Li H, et al. Stretchable hybrid bilayered luminescent composite based on the combination of strain-induced and triboelectrification-induced electroluminescence. *ACS Omega*, 2019, 4: 20470–20475
- 225 Yoshimura M. Structurally colored fiber “Morphotex”. *Kobunshi*, 2003, 52: 826–828
- 226 Wang Y, Cui H, Zhao Q, et al. Chameleon-inspired structural-color actuators. *Matter*, 2019, 1: 626–638
- 227 Zhang C, Zhu P, Lin Y, et al. A review of modular soft robotics: Modular units, connection mechanisms, and applications. *Adv Intell Syst*, 2019, 2: 1900166
- 228 Meng C, Xu W, Li H, et al. A new design of cellular soft continuum manipulator based on beehive-inspired modular structure. *Int J Adv Robot Syst*, 2017, 14: 256010254
- 229 D Pasquier C, Chen T, Tibbits S, et al. Design and computational modeling of a 3d printed pneumatic toolkit for soft robotics. *Soft Robotics*, 2019, 6: 657–663
- 230 Andrea V, Yi-Sheng L, Ricardo-Franco M G, et al. Soft modular robotic cubes: Toward replicating morphogenetic movements of the embryo. *Plos One*, 2017, 12: e169179
- 231 Zou J, Lin Y, Ji C, et al. A reconfigurable omnidirectional soft robot based on caterpillar locomotion. *Soft Robotics*, 2018, 5: 164–174
- 232 Tawk C, in het Panhuis M, Spinks G M, et al. Bioinspired 3d printable soft vacuum actuators for locomotion robots, grippers and artificial muscles. *Soft Robotics*, 2018, 5: 685–694
- 233 Sui X, Cai H, Bie D, et al. Automatic generation of locomotion patterns for soft modular reconfigurable robots. *Appl Sci*, 2019, 10: 294
- 234 Song K, Kim S, Cha Y. Soft electromagnetic actuator for assembly robots. *Smart Mater Struct*, 2020, 29: 67001
- 235 Kopic C, Gohlke K. Inflatibits: A modular soft robotic construction kit for children. In: *The TEI'16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*. Netherlands: ACM, 2016. 723–728
- 236 Wang L, Iida F. Physical connection and disconnection control based on hot melt adhesives. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2013, 18: 1397–1409
- 237 Polygerinos P, Wang Z, Galloway K C, et al. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation. *Robotics Autonomous Syst*, 2015, 73: 135–143
- 238 Nemiroski A, Shevchenko Y Y, Stokes A A, et al. Arthrobits. *Soft Robot*, 2017, 4: 183–190
- 239 Kizilkan E, Strueben J, Staubitz A, et al. Bioinspired photocontrollable microstructured transport device. *Sci Robot*, 2017, 2: k9454
- 240 Zhou Y, Chen M, Ban Q, et al. Light-switchable polymer adhesive based on photoinduced reversible solid-to-liquid transitions. *ACS Macro Lett*, 2019, 8: 968–972
- 241 Ye Z, Lum G Z, Song S, et al. Phase change of gallium enables highly reversible and switchable adhesion. *Adv Mater*, 2016, 28: 5088–5092
- 242 Germann J, Dommer M, Pericet-Camara R, et al. Active connection mechanism for soft modular robots. *Adv Robotics*, 2012, 26: 785–798
- 243 Jiao Z, Zhang C, Wang W, et al. Advanced artificial muscle for flexible material based reconfigurable soft robots. *Adv Sci*, 2019, 6: 1901371
- 244 Rubenstein M, Cornejo A, Nagpal R. Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm. *Science*, 2014, 345: 795–799
- 245 Wei H, Chen Y, Tan J, et al. Sambot: A self-assembly modular robot system. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2011, 16: 745–757
- 246 Yang G, Bellingham J, Dupont P E, et al. The grand challenges of science robotics. *Sci Robot*, 2018, 3: r7650
- 247 Hassan M. A review of wireless technology usage for mobile robot controller. In: *The International Conference on System Engineering and Modeling*. Singapore: IACSIT Press, 2012. 7–12
- 248 Zhang Y, Liu Y, Sui X, et al. A mechatronics-embedded pneumatic soft modular robot powered via single air tube. *Appl Sci*, 2019, 9: 2260
- 249 Gerboni G, Ranzani T, Diodato A, et al. Modular soft mechatronic manipulator for minimally invasive surgery (mis): Overall architecture and development of a fully integrated soft module. *Meccanica*, 2015, 50: 2865–2878
- 250 Cabrera M D P O, Trifonov R S, Castells G A, et al. Wireless communication and power transfer in modular robots. In: *IEEE/RSJ IROS: Workshop on Reconfigurable Modular Robotics: Challenges of Mechatronic and Bio-Chemo-Hybrid Systems*. California: IEEE, 2011. 1–6
- 251 McKenzie R M, Sayed M E, Nemitz M P, et al. Linbots: Soft modular robots utilizing voice coils. *Soft Robotics*, 2018, 6: 195–205
- 252 Borah D K, Boucouvalas A C, Davis C C, et al. A review of communication-oriented optical wireless systems. *Eurasip J Wirel Comm*, 2012, 2012: 1–28
- 253 Shen W M, Salemi B, Will P. Hormone-inspired adaptive communication and distributed control for conro self-reconfigurable robots. *IEEE Trans Robot Automat*, 2002, 18: 700–712
- 254 Jorgensen M W, Ostergaard E H, Lund H H. Modular atron: Modules for a self-reconfigurable robot. In: *2004 IEEE/RSJ International*

- Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2004. 2068–2073
- 255 Mathews N, Christensen A L, O'Grady R, et al. Mergeable nervous systems for robots. *Nat Commun*, 2017, 8: 439
- 256 Delpreto J J, Katzschmann R K, Maccurdy R, et al. A compact acoustic communication module for remote control underwater. In: The 10th International Conference on Underwater Networks & Systems. Virginia: ACM, 2015. 1–7
- 257 Katzschmann R K, Delpreto J, Maccurdy R, et al. Exploration of underwater life with an acoustically controlled soft robotic fish. *Sci Robot*, 2018, 3: r3449
- 258 Wang J, Fei Y, Chen W. Integration, sensing, and control of a modular soft-rigid pneumatic lower limb exoskeleton. *Soft Robotics*, 2020, 7: 140–154
- 259 Kimber J, Ji Z, Petridou A, et al. Low-cost wireless modular soft tensegrity robots. In: IEEE International Conference on Soft Robotics. Seoul: IEEE, 2019. 88–93
- 260 Phillips B T, Becker K P, Kurumaya S, et al. A dexterous, glove-based teleoperable low-power soft robotic arm for delicate deep-sea biological exploration. *Sci Rep-Uk*, 2018, 8: 1–9
- 261 Hawkes E W, Blumenschein L H, Greer J D, et al. A soft robot that navigates its environment through growth. *Sci Robot*, 2017, 2: n3028
- 262 Mishra A K, Del Dottore E, Sadeghi A, et al. Simba: Tendon-driven modular continuum arm with soft reconfigurable gripper. *Front Robot AI*, 2017, 4: 4
- 263 Onal C D, Rus D. Autonomous undulatory serpentine locomotion utilizing body dynamics of a fluidic soft robot. *Bioinspir Biomim*, 2013, 8: 26003
- 264 Tang Y, Chi Y, Sun J, et al. Leveraging elastic instabilities for amplified performance: Spine-inspired high-speed and high-force soft robots. *Sci Adv*, 2020, 6: eaaz6912
- 265 Must I, Sinibaldi E, Mazzolai B. A variable-stiffness tendril-like soft robot based on reversible osmotic actuation. *Nat Commun*, 2019, 10: 344
- 266 Garrad M, Soter G, Conn A T, et al. A soft matter computer for soft robots. *Sci Robot*, 2019, 4: w6060
- 267 Robinson R M, Kothera C S, Sanner R M, et al. Nonlinear control of robotic manipulators driven by pneumatic artificial muscles. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2016, 21: 55–68
- 268 Miron G, Plante J S. Design principles for improved fatigue life of high-strain pneumatic artificial muscles. *Soft Robot*, 2016 3: 177–185
- 269 Gentry M, Wereley N. Fatigue testing of pneumatic artificial muscle actuators. In: 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Florida: AIAA, 2010. 186
- 270 Robertson M A, Sadeghi H, Florez J M, et al. Soft pneumatic actuator fascicles for high force and reliability. *Soft Robotics*, 2016, 4: 23–32
- 271 Rus D, Tolley M T. Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, 2015, 521: 467–475
- 272 Stokes A A, Shepherd R F, Morin S A, et al. A hybrid combining hard and soft robots. *Soft Robotics*, 2014, 1: 70–74
- 273 Fan J, Wang S, Yu Q, et al. Swimming performance of the frog-inspired soft robot. *Soft Robot*, 2020, doi: 10.1089/soro.2019.0094
- 274 Wehner M, Tolley M T, Mengüç Y, et al. Pneumatic energy sources for autonomous and wearable soft robotics. *Soft Robotics*, 2014, 1: 263–274
- 275 Chen H Y, Diteesawat R S, Haynes A, et al. Rubic: An untethered soft robot with discrete path following. *Front Robot AI*, 2019, 6: 52
- 276 Cacucciolo V, Shintake J, Kuwajima Y, et al. Stretchable pumps for soft machines. *Nature*, 2019, 572: 516–519
- 277 Onal C D, Chen X, Whitesides G M, et al. Soft mobile robots with on-board chemical pressure generation. In: Christensen H, Khatib O, eds. *Robotics Research, Tracts in Advanced Robotics*. Switzerland: Springer, 2017. 525–540
- 278 Shepherd R F, Stokes A A, Freake J, et al. Using explosions to power a soft robot. *Angew Chem Int Ed*, 2013, 52: 2892–2896
- 279 Zhou Z, Li Q, Chen L, et al. A large-deformation phase transition electrothermal actuator based on carbon nanotube–elastomer composites. *J Mater Chem B*, 2016, 4: 1228–1234
- 280 Miriyev A, Stack K, Lipson H. Soft material for soft actuators. *Nat Commun*, 2017, 8: 596
- 281 Altmüller R, Schwödauer R, Kaltseis R, et al. Large area expansion of a soft dielectric membrane triggered by a liquid gaseous phase change. *Appl Phys A-Mater*, 2011, 105: 1–3
- 282 Li S, Zhao H, Shepherd R F. Flexible and stretchable sensors for fluidic elastomer actuated soft robots. *MRS Bull*, 2017, 42: 138–142
- 283 Vasios N, Gross A J, Soifer S, et al. Harnessing viscous flow to simplify the actuation of fluidic soft robots. *Soft Robot*, 2019, 7: 1–9
- 284 Napp N, Araki B, Tolley M T, et al. Simple passive valves for addressable pneumatic actuation. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2014. 1440–1445
- 285 Rothmund P, Ainla A, Belding L, et al. A soft, bistable valve for autonomous control of soft actuators. *Sci Robot*, 2018, 3: r7986

- 286 Bruder D, Gillespie B, Remy C D, et al. Modeling and control of soft robots using the koopman operator and model predictive control. 2019, arXiv: [1902.02827v2](https://arxiv.org/abs/1902.02827v2)
- 287 Thuruthel T G, Shih B, Laschi C, et al. Soft robot perception using embedded soft sensors and recurrent neural networks. *Sci Robot*, 2019, 4: v1488
- 288 D'Eramo L, Chollet B, Leman M, et al. Microfluidic actuators based on temperature-responsive hydrogels. *Microsyst Nanoeng*, 2018, 4: 17069
- 289 Laschi C, Cianchetti M. Soft robotics: New perspectives for robot bodyware and control. *Front Bioeng Biotechnol*, 2014, 2: 3
- 290 Pfeifer R, Bongard J. How the body shapes the way we think: A new view of intelligence. Cambridge: MIT press, 2006. 353–371

Status of and trends in soft pneumatic robotics

GUAN QingHua¹, SUN Jian¹, LIU YanJu² & LENG JinSong¹

¹ *Center for Composite Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150008, China;*

² *Department of Astronautical Science and Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150008, China*

Soft robots are receiving increasing attention and have great potential in the fields of health care, education, service, rescue, exploration, detection, and wearable devices owing to their inherent high flexibility, good compliance, excellent adaptability, and safe interactivity. Soft pneumatic robots are a well-known type of soft robot with characteristics such as light weight, high performance, pollution-free operation, and strong environmental adaptability. In recent decades, the development of soft pneumatic robots is closely related to the application of new materials, novel designs, and new manufacturing processes. In this study, the literature review and main advances in soft pneumatic robots' design and fabrication technology are reviewed. In addition, the trends of multifunctionalization, modularization, and the bionic design of soft pneumatic robots are analyzed and discussed. Furthermore, the problems and challenges associated with soft pneumatic robots' system reliability, air supply, and motion control are analyzed. Finally, the future development outlook and significance of soft pneumatic robots are summarized.

soft robot, pneumatic, multi-functionalization, review

doi: [10.1360/SST-2020-0143](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0143)