DOI: 10.3901/JME.2020.19.043

电活性双稳态机构及其在软体机器人中应用的研究进展*

李博^{1,2} 孙文杰³ 姜磊^{1,2} 马付雷⁴ 陈贵敏^{1,2}

- (1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049;
2. 西安交通大学陕西省智能机器人重点实验室 西安 710049;
3. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048;
4. 西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071)

摘要: 电活性双稳态机构兼具电活性材料的仿人工肌肉快速电致变形能力及双稳态机构在两个位置上精准定位的特性,是新一代具有主动响应能力的机械机构,在航空航天、医疗康复、生物仿生等机器人领域中具有重要的应用前景。综述梳理和分析近十五年内电活性双稳态机构的研究成果,按照运动方式可分成面内运动与离面运动,按照结构设计可分成一体化与非一体化。通过增加额外的机械机构,可将电活性双稳态扩展为三稳态,将静态驱动扩展为动态谐振驱动。基于电活性双稳态机构的软体机器人具有更精准的位移输出和更迅速的运动响应,可实现多物体的自适应抓取、仿生弹舌驱动,变刚度等功能,以及发展具有在陆地、水下和空中的运动的柔性软体机器人。目前的电活性双稳态机构在设计方法、控制机制、稳态状态调控、制造技术中存在诸多前沿问题,需要机械、力学、材料等多学科知识的交叉融合。

关键词: 介电体弹性体; 双稳态机构; 软体机器人

中图分类号: TH11

Research Progress of Electroactive Bistable Mechanism and Its Application in Soft Robots

LI Bo^{1,2} SUN Wenjie³ JIANG Lei^{1,2} MA Fulei⁴ CHEN Guimin^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;
2. Shaanxi Province Key Laboratory for Intelligent Robots, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;
3. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048;
4. School of Mechano-electronics Engineering, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract: The electroactive bistable mechanism (EBM) is capable of both the fast electro-induced deformation as artificial muscles in electroactive polymer and the precise positioning characteristics of the bistable mechanism at two positions. It is a new generation of mechanical mechanisms with active response capabilities. It has important application prospects in aerospace, medical rehabilitation, biomimetics and other robot fields. This research reviewed and analyzed the research status of EBM in the past 15 years. The EBM, can be classified as in-plane mode and out-of-planemode with respect to the motion direction, and according to the structure design, it can be classified as integrated and separated. By adding extra mechanisms, the bistable state can be extended to a tristable state, and the static actuation can be extended to a dynamic resonance actuation. Soft robot that built on an EBM has more accurate displacement output and quicker motion response. It can achieve the functions of adaptive grasping of multiple objects, biomimetic tongue, variable stiffness, as well as the locomotion in land, underwater and air. The current EBM have many cutting-edge problems in design methods,

* 科技部“智能机器人”重点研发专项(2019YFB1311600)、国家自然科学基金(52075411, 91748124, 11902248)、陕西省重点研发专项(2020ZDLGY06-11)和机械结构强度与振动国家重点实验室开放课题(SV2018-KF-08)资助项目。20200212收到初稿, 20200701收到修改稿

control strategy, stable state regulation, and manufacturing technology, which require the multidisciplinary knowledge such as machinery, mechanics, and materials.

Key words: dielectric elastomer; bistable mechanism; soft robots

0 前言

双稳态机构在其行程范围内存在两个势能极小的稳定平衡位置和一个势能极大的不稳定位置,机构可以可靠地停留在两个稳定平衡位置,且不需要持续的输入能量来维持,因此在机械开关、继电器、空间可展开机构等领域获得诸多应用^[1]。

传统的双稳态机构的往往需要额外的驱动装置实现在两个稳态之间的切换运动,机构结构虽然简单,但附属的电动机和气泵等驱动部件复杂,导致整个系统重量大、占据空间大。近年来,国内外的研究学者提出利用智能材料与双稳态机构结合的设计思路,实现机构与驱动的功能一体化,提高双稳态机构的响应智能性。瑞士苏黎世大学的研究人员利用了形状记忆材料制备了双稳态的屈曲梁,利用环境温度场的变化,促使梁产生双稳态的运动,并开发于一种无缆式水面运动机器人中^[2];韩国首尔国立大学设计一种簧片式软体机器人,采用形状记忆合金制作了驱动弹簧单元,借助双稳态跳转实现快速跳跃运动^[3]。由于形状记忆类材料依靠温度变

化产生相变实现驱动,导致在响应时间和往复运动效率上存在一定的局限。因此,研究基于新型智能材料的双稳态机构设计是一个有潜力的研究方向。

电活性聚合物是一种新的智能材料,能够在电压激励下在毫秒内产生大于100%的应变,且材料弹性模量低至kPa级别,因此被誉为是新型人工肌肉。根据此特点,研究人员开发得到多种多样的驱动器,并应用于形式多样的软体机器人设计,实现了垂直墙面攀爬^[4]、水中游动^[5]、地面爬行^[6]、空中扑翼^[7]等多种多样的运动模式,大大丰富了软体机器人的内涵^[8]。在机械设计方面,研究人员也尝试利用电活性聚合物的快速大变形与双稳态机构结合,得到材料与机构融合结构,实现电驱动下的多稳态跳转运动,为软体机器人的驱动设计提供新的思路。

图1中归纳了近十五年来,若干电活性双稳态机构的典型成果,不难看出其结构、形态各异,功能也是多种多样。本文将首先总结现有的电活性双稳态机构研究,然后按照设计方法和运动方式进行分类和比较,并介绍其在软体机器人设计中的应用,最后对现有研究存在的难点问题和未来的研究趋势进行展望。

图1 近15年来典型的电活性双稳态结构的研究成果

1 基于介电弹性体的电活性双稳态机构

电活性聚合物材料包括离子型和电场型两种,而电场型电活性聚合物材料是其中应用最多的一类,其典型代表是介电弹性体。本文中所涉及的电活性双稳态机构均是介电弹性体驱动的。

介电弹性体是一种高分子材料,当在厚度方向

施加电场后,其收到静电力的压缩,产生平面内的扩展变形,如图2所示。在早期研究中,研究人员发现介电弹性体的电致变形关系非常复杂,不仅存在着电压与位移的高度非线性关系,同时也在变形中也容易发生电击穿、力学破坏和褶皱失稳等问题,2008年起,哈佛大学锁志刚教授及其团队利用热力学理论,建立了充分考虑诸多非线性因素的自由能模型,可以准确预测介电弹性体材料的力电耦合中

的驱动性能, 并对其物理机制进行了解释和分析^[9]。该理论方法得到了学术界广泛认可, 并在该理论指导下, 国内外研究人员提出了多种介电弹性体驱动器的结构设计方法, 并实现了包括准线性到突跳式的多种驱动变形方法, 获得了对击穿电压的评估测量策略^[10], 形成面向不同构型及弹性体材料体系的设计准则, 如图 3 所示^[11-15]。

图 2 介电弹性体的电致驱动变形原理

图 3 各种介电弹性体的驱动器

尽管可以通过材料改性、尺寸设计和电极分布优化来提升介电弹性体的输出位移, 由于介电弹性体材料为高分子聚合物, 其输出力仍然十分有限, 因此研究人员考虑将它与其他机械机构结合, 提升输出性能(力学性能)。其中, 与双稳态机构的结合就是一个有效的解决方案, 并取得了一些研究成果, 这里将它们分为面内式和离面式分别进行介绍。

1.1 面内式电话性双稳态机构

早在 2002 年, 麻省理工学院的 DUBOWSKY 教授团队^[16-17]提出一种介电弹性体薄膜扩张驱动的屈曲梁结构, 实现了电话性双稳态机构, 并定义为二元驱动器, 将多个电话性双稳态进行组合, 即可得到一种多稳态的驱动平台^[18-19], 他们又提出利用薄膜扩张力驱动簧片弯曲实现电话性双稳态机构^[20], 如图 4 所示。随着对介电弹性体材料研究的深入, 研究人员在对薄膜力学行为分析中发现了采用纯剪切构型的驱动器能够实现线性度更高的驱动效果^[21-22]; 基于此发现, 浙江大学李铁风教授提出了

利用双纯剪切驱动的双稳态结构, 可以更精准地控制中心梁的屈曲变形^[23]。通过对屈曲梁结构进行修改, 可以实现从双稳态到多稳态的扩展, 见图 5 中的结果^[24]。

图 4 麻省理工学院 DUBOWSKY 团体设计的平面运动型电话性双稳态机构

图 5 基于纯剪切的平面运动型介电弹性体驱动器

1.2 离面式电话性双稳态机构

除了平面内的运动之外, 德国萨尔布吕肯大学 SEELECKE 教授团队采用了锥形介电弹性驱动器与弹簧的组合, 形成一种具有离面变形特征的电话性双稳态机构, 通过介电弹性体的变形快速释放弹簧中储存的弹性能, 并借助于弹簧的刚性可大幅度提高力的输出, 并建立了对应的控制模型^[25-36]。后期很多学者对这种锥形介电弹性驱动器结构进行改进, 与十字梁双稳态机构相结合^[37-38], 利用簧片加强锥形驱动器加强锥形驱动器输出力^[39-40]。得益于骨架的支撑, 介电弹性体的平面变形被转变成了空间运动, 实现了驱动器输出的变换, 见图 6^[41-46]。事实上, 考虑到纯软体的电话性材料在负载能力上存在一定的局限, 将软材料与刚性机构进行结合是软体机器人的研究思路之一。中科院深圳先进技术研究院的研究人员设计了刚-柔耦合的介电弹性体锥形驱动器, 在动态驱动中揭示了新的谐波、次谐波和超谐波的共振机制, 发现了动态谐振中双稳态

特性, 可用于高效低能耗的机器人驱动^[47-48]。

图6 空间运动型电活性双稳态机构

为了最大程度发挥介电弹性体的主动超弹性变形能力, 国内外研究人员提出将柔性结构与软体材料一体化设计的思路。将介电弹性体拉伸后绑定在柔性边框上, 由于材料的高弹收缩特性, 柔性边框向一侧弯曲, 并在整体应变能极小的姿态上达到平衡态, 此时系统处于一个稳定状态。由于整体结构具有对称性, 在受到电压驱动时, 边框向另一侧弯曲, 在越过柔性边框无变形姿态后撤销电压, 整体就会停留在另一个稳定状态, 因此是一种高度集成的材料/结构一体化电活性双稳态机构^[49-50]。通过对结构尺寸, 介电弹性体种类, 电压加载方式进行综合设计, 可实现不同的双稳态的驱动运动特性, 典型的成果如图7所示。

图7 具有最小势能结构的电活性双稳态结构

哈尔滨工业大学威海校区的赵建文教授利用三层PET材料作为边框设计了一种马鞍形介电弹性体最小能量结构^[51-53], 类似的马鞍形结构也可通过多层介电弹性体加以实现^[50, 54]。上海交通大学张文明教授团队设计了一种非对称的电活性双稳态机构, 利用电活性材料在局部的驱动, 实现整体结构的弯曲刚度的调控, 丰富了双稳态的结构与功能^[55]。美国北卡罗莱纳州的研究人员借鉴上述一体化型电活性双稳态机构中局部驱动和整体驱动效果, 实现两种运动模式^[56-57]。

1.3 其他电活性多稳态机构

在电活性双稳态机构的研究基础上, 国内外的研究人员也在尝试实现更多稳态。如图8所示, 上海交通大学的研究人员在机构中增加若干对磁铁, 即在系统的应变能基础上引入了磁场势能, 通过二者的配合, 实现了电致跳转的磁-结构耦合的三稳态设计^[58]; 鉴于介电弹性体材料的动态特征, 也可以利用磁力耦下非线性的多阶共振, 实现协同变形下的动态双稳态, 获得动力学中分叉与混沌现象^[48]; 或者增加旋转机构, 获得其他自由度的运动模式, 并通过串并联的方法, 扩展稳态数目, 取得多方向的运动效果^[59-60]。这些研究工作丰富了电活性结构的驱动功能, 为其在软体机器人中的应用提供了技术基础。

图8 其他电活性的多稳态机构

2 电活性双稳态机构在软体机器人中的应用

软体机器人是一种主体由软材料制成的新型机电系统, 由于采用了大量的高分子聚合物、功能凝

胶和生物材料, 软体机器人具有良好的环境适应性与人体兼容性, 可进入到复杂环境中与环境共融^[61-65]。而电活性双稳态机构兼具了电活性材料柔性大变形, 又具有机构的精准位移输出功能, 可用作新一代软体机器人的关键驱动部件, 发挥重要的功能。

软体机器人的研究多由仿生启发而来, 双稳态结构也可从自然界找到设计灵感。如图 9 所示, 上海交通大学的研究人员以单子叶植物的形态变化为灵感来源, 设计了电活性聚合物驱动调控的双稳态结构, 借助双稳态结构实现了在两种构型下的自稳定, 并融合了结构刚度变化功能, 弥补现有软体机器人刚度变化不足的痛点、解决了操作中难以维持形态的问题^[66-67]。

图 9 基于电活性双稳态机构的仿生软体机器人

除刚度调控外, 在不同构型之间切换所表现出的运动力学特性也为设计者提供了新的研究思路。美国北卡罗来纳州和波士顿大学的研究人员以青蛙的弹舌动作为设计灵感, 以电活性材料为开关, 触发双稳态机构发生构型变化, 产生突发型的跳转运动, 响应时间约为 1.7 s ^[56]。

现有的软体机器人主要是气动或者流体驱动为主, 存在着驱动控制复杂、线缆多等问题, 采用电活性聚合物材料驱动可以消除这些问题, 是软体机器人极有潜力的发展方向, 特别是结合双稳态机构的机械特性, 可大大简化控制的复杂程度, 增大驱动过程中输出力和输出位移, 实现高速/快速的运动模式。将多个电活性双稳态机构组合, 通过预先植入的控制算法, 可实现更为复杂的运动形式。目前, 采用电活性双稳态机构的软体机器人已经涵盖

了陆地、水下、空中三种运动环境, 显示了其优越的性能, 典型的例子包括一种仿四足动物的奔跑机器人(速度达 6.10 身长/s)^[68]、仿人蛙泳的水下机器人(速度 76.7 mm/s 、 0.77 身长/s)^[69]、以及仿鸟类的扑翼机器人^[70]。

得益于新材料的不断涌现, 将新一代智能材料与双稳态机构的结合也是一个创新思路。比如基于生物界中捕蝇草的结构^[71], 研究人员用了多种柔性材料进行层状复合, 获得了就有仿生拟态结构的马鞍形双稳态结构^[72-73]。利用材料在力, 热等多物理场的响应, 获得突跳式的快速运动^[74-77]。

3 展望与挑战

电活性双稳态机构融合了电活性材料的电驱动大变形与双稳态机构稳定精准定位的特性, 在驱动中缩短了激励时间, 延长驱动器寿命, 实现了各取所长, 优势互补, 是一种新型的具有主动响应特征的机械结构, 在软体机器人中具有广阔的应用前景, 有望提高软体机器人的变刚度、快速运动和环境自适应能力。经过十几年的发展, 电活性双稳态已经取得了长足的发展, 获得诸多代表性的研究成果, 但是在材料和机构/结构设计上依然存在很多需要解决的问题。

首先, 作为一种高分子材料, 介电弹性体材料具有显著的粘弹性。粘弹性会产生时间依赖的力与位移输出, 导致了机构在传动中具有时间延迟的问题, 特别在往复运动中尤为明显。这对双稳态结构的定位精度和驱动控制产生一定影响, 如何设计结构和加载方式以减弱变形中 DE 材料粘弹性的影响显得尤为重要^[78]。一方面可以通过材料改性进行研究, 另一方面可以加入前馈补偿技术进行矫正。并且在仿生机构中, 在两个状态之间切换时有时也需要较大的驱动力, 但现有的电活性双稳态机构的驱动力还不理想, 并且如何提高稳态保持力也极为关键。现有的解决方法主要集中在对薄膜的刚度的提升方面, 一是采用低温合金, 改变电极刚度改变结构刚度, 二是增加多层膜之间的摩擦力提高结构刚度, 如静电吸附^[79], 或者基于堵塞现象的刚度调节技术^[80-81]。

其次, 双稳态机构的变形运动存在着显著的非线性, 而在电驱动变形的条件下, 涉及到电-力-位移的多物理量的非线性耦合问题, 如何建立精准的性能表征是一个有待解决的理论难点, 也是面向机器人进行设计与驱控的前提。例如, 电活

性介电材料电致变形后形成马鞍面,这种非可展曲面就是一个建模分析的难点问题^[82-87],涉及多个微分几何方程;同时内部存在应力、电场、电荷、变形等分布不均匀问题,精准建模极为困难。

另外,某些电活性材料本身即具有物理的双稳态特性,可实现具有形状记忆特征的相变变形,即所谓的材料双稳态^[88-93],或者是薄膜应变的力学突跳双稳态^[94-98]。将材料双稳态与结构双稳态结合,势必能获得更丰富的驱动变形效果,但相关的设计方法和多稳态形成机制尚未阐明。

最后,电活性双稳态机构是软体材料与机械机构的有机结合,二者对应的制造工艺相差较大。软体材料多用注塑、挤出、铸塑、3D 打印等增材制造的方法实现^[99-101],而机构多采用切割、光刻等减材制造的方法。两类材料材料体系不同,力学性能差异显著,如何解决二者的匹配问题,实现性能的兼容集成也是一个有待研究的问题。

4 结 论

本文对一种新型的双稳态机构——电活性双稳态机构进行了概述。给出了电活性材料的电致变形原理,以及与双稳态机构的结合方式,分别介绍了面内、面外两类运动模式的电活性双稳态机构,以双稳态机构在不同构型间的切换为特征,分析其在软体机器人中应用进展,最后讨论了现有研究中存在的问题与挑战。

电活性双稳态机构将电主动响应机制引入传统的机构中,对机构学的功能拓展提供了新的思路,也为其在机器人中的应用提供了新的解决方案。鉴于相关研究开展时间较短,在设计、建模和制造方面依然有诸多待解决的问题,需要研究人员通过材料、力学、机械等多学科交叉进一步深入探索。

参 考 文 献

- [1] 勾燕洁,张守银,陈贵敏.一种全柔顺六稳态机构的设计[J].机械工程学报,2015,51(7):61-66.
GOU Yanjie, ZHANG Shouyin, CHEN Guimin. Design of a fully compliant six-stable state mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(7): 61-66.
- [2] CHEN T, BILAL O R, SHEA K, et al. Harnessing bistability for directional propulsion of soft, untethered robots[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 1: 201800386.

- [3] JUNG S P, JUNG G P, KOH J S, et al. Fabrication of composite and sheet metal laminated bistable jumping mechanism[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2015, 7(2): 1.
- [4] GU G, ZOU J, ZHAO R, et al. Soft wall-climbing robots[J]. Science Robotics, 2018, 3(25): eaat2874.
- [5] LI T, LI G, LIANG Y, et al. Fast-moving soft electronic fish[J]. Science Advances, 2017, 3(4): e1602045.
- [6] TANG C, LI B, FANG H, et al. A speedy, amphibian, robotic cube: Resonance actuation by a dielectric elastomer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 270: 1-7.
- [7] CHEN Y, ZHAO H, MAO J, et al. Controlled flight of a microbot powered by soft artificial muscles[J]. Nature, 2019, 575(7782): 324-329.
- [8] GUPTA U, QIN L, WANG Y, et al. Soft robots based on dielectric elastomer actuators: A review[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(10): 103002.
- [9] 锁志刚. 介电高弹聚合物理论[J]. 力学进展, 2011, 41(6): 730-750.
SUO Zhigang. Theory of dielectric high elastic polymer[J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(6): 730-750.
- [10] LIU X, JIA S, LI B, et al. An electromechanical model for the estimation of breakdown voltage in stretchable dielectric elastomer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(5): 3099-3112.
- [11] CAO C, GAO X, CONN A T. A compliantly coupled dielectric elastomer actuator using magnetic repulsion[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(1).
- [12] WANG T, ZHANG J, HONG J, et al. Dielectric elastomer actuators for soft wave-handling systems[J]. 2016, 1: 10.1089/soro.2016.0036.
- [13] LU T S Z S Q, WANG T J. Bioinspired bicipital muscle with fiber-constrained dielectric elastomer actuator[J]. Extreme Mechanics Letters, 2016, 6: 75.
- [14] LIU L, ZHANG C, LUO M, et al. A biologically inspired artificial muscle based on fiber-reinforced and electropneumatic dielectric elastomers[J]. Smart Materials & Structures, 2017, 26(8): 1.
- [15] CHI Z, SUN W, CHEN H, et al. Electromechanical deformation of conical dielectric elastomer actuator with hydrogel electrodes[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(9): 094108.094101-094108.094106.
- [16] WINGERT A, LICHTER M, DUBOWSKY S, et al. Hyper-redundant robot manipulators actuated by

- optimized binary-dielectric polymers[M]. SPIE, 2002.
- [17] PLANTE J-S B, SANTER M, DUBOWSKY S, et al. Compliant bistable dielectric elastomer actuators for binary mechatronic systems[C]// ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2005: 121-126.
- [18] BAR-COHEN Y, PLANTE J-S, DEVITA L M, et al. A road to practical dielectric elastomer actuators based robotics and mechatronics : Discrete actuation[C]. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2007, 2007: 1.
- [19] LENARCIC J W P. Advances in robot kinematics: analysis and design[M]. Springer, 2008.
- [20] CHOUINARD P, PROULX S, LUCKING BIGUE 'J-P, et al. Design of an antagonistic bistable dielectric elastomer actuator using the Bergstrom-Boyce constitutive viscoelastic model[C/CD]//2009: 111-121.
- [21] KOLLOSCHE M, ZHU J, SUO Z, et al. Complex interplay of nonlinear processes in dielectric elastomers[J]. Physical Review E, 2012, 85(5): 051801.
- [22] LI B, CHEN H, ZHOU J. Modeling of the muscle-like actuation in soft dielectrics : Deformation mode and electromechanical stability[J]. Applied Physics A, 2013, 110(1): 59-63.
- [23] LI T, ZOU Z, MAO G, et al. Electromechanical bistable behavior of a novel dielectric elastomer actuator[J]. Journal of Applied Mechanics, 2013, 81(4): 041019.
- [24] DAVIDE G, CAMERON T, HELMUT F S. Dynamic performance of silicone dielectric elastomer actuators with bi-stable buckled beams[C]//Proc. SPIE, 2014: 1.
- [25] HODGINS M, YORK A, SEELECKE S. Modeling and experimental validation of a bi-stable out-of-plane DEAP actuator system[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(9): 1.
- [26] MICAH H, STEFAN S. Mechanical behavior of a bi-stable negative-rate bias spring system[C]//Proc. SPIE, 2010: 1.
- [27] MICAH H, STEFAN S. Experimental analysis of biasing elements for dielectric electro-active polymers[C]//Proc. SPIE, 2011: 1.
- [28] HODGINS M, YORK A, SEELECKE S. Modeling and experimental validation of a bi-stable out-of-plane DEAP actuator system[J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20(9): 094012.
- [29] HODGINS M, YORK A, SEELECKE S. Experimental comparison of bias elements for out-of-plane DEAP actuator system[J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(9): 094016.
- [30] RIZZELLO G, FERRANTE F, NASO D, et al. Robust interaction control of a dielectric elastomer actuator with variable stiffness[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(4): 1705-1716.
- [31] RIZZELLO G, NASO D, TURCHIANO B, et al. Robust position control of dielectric elastomer actuators based on LMI optimization[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(6): 1909-1921.
- [32] RIZZELLO G, NASO D, YORK A, et al. Closed loop control of dielectric elastomer actuators based on self-sensing displacement feedback[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(3): 035034.
- [33] RIZZELLO G, FERRANTE F, NASO D, et al. Interaction control of a dielectric elastomer membrane with variable stiffness[C]//2017 American Control Conference (ACC), 2017: 210-215.
- [34] LOEW P, RIZZELLO G, SEELECKE S. Permanent magnets as biasing mechanism for improving the performance of circular dielectric elastomer out-of-plane actuators[C]//Proc. SPIE, 2017: 1.
- [35] HAU S, RIZZELLO G, HODGINS M, et al. Design and control of a high-speed positioning system based on dielectric elastomer membrane actuators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(3): 1259-1267.
- [36] LINNEBACH P, SIMONE F, RIZZELLO G, et al. Development, manufacturing, and validation of a dielectric elastomer membrane actuator-driven contactor[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2018, 30(4): 636-648.
- [37] WANG N, CUI C, CHEN B, et al. Design and analysis of bistable dielectric elastomer actuator with buckling beam[C]// 2018 International Conference on Manipulation , Automation and Robotics at Small Scales (MARSS), 2018: 1-6.
- [38] WANG N, CUI C, CHEN B, et al. Design of translational and rotational bistable actuators based on dielectric elastomer[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2019, 11(4): 1.
- [39] JEAN-S BASTIEN P, LAUREN M D, STEVEN D. A road to practical dielectric elastomer actuators based robotics and mechatronics: Discrete actuation[C]//Proc. SPIE, 2007: .

- [40] TADAKUMA K, DEVITA L M, PLANTE J S, et al. The experimental study of a precision parallel manipulator with binary actuation: With application to MRI cancer treatment[C]//2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008: 2503-2508.
- [41] CHOUINARD P, PLANTE J. Bistable antagonistic dielectric elastomer actuators for binary robotics and mechatronics[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(5): 857-865.
- [42] PROULX S, LUCKING BIGUÉ J-P, CHOUINARD P, et al. Dielectric elastomer jet valve for magnetic resonance imaging-compatible robotics[J]. Journal of Medical Devices, 2013, 7(2): 1.
- [43] FOLLADOR M, CONN A T, MAZZOLAI B, et al. Active-elastic bistable minimum energy structures[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(14): 1.
- [44] HAU S, BRUCH D, RIZZELLO G, et al. Silicone based dielectric elastomer strip actuators coupled with nonlinear biasing elements for large actuation strains[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27(7): 1.
- [45] FOLLADOR M, CONN A T, ROSSITER J. Bistable minimum energy structures (BiMES) for binary robotics[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(6): 065037.
- [46] FOLLADOR M, CONN A T, MAZZOLAI B, et al. Active-elastic bistable minimum energy structures[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(14): 141903.
- [47] GAO X, CAO C, GUO J, et al. Elastic electroadhesion with rapid release by integrated resonant vibration[J]. Advanced Materials Technologies, 2019, 4(1): 1.
- [48] CAO C-J, HILL T L, CONN A T, et al. Nonlinear dynamics of a magnetically coupled dielectric elastomer actuator[J]. Physical Review Applied, 2019, 12(4): 1.
- [49] VATANJOU H, HOJJAT Y, KARAFI M. Nonlinear dynamic analysis of dielectric elastomer minimum energy structures[J]. Applied Physics A, 2019, 125(9): 583.
- [50] WANG Y, GUPTA U, PARULEKAR N, et al. A soft gripper of fast speed and low energy consumption[J]. Science China-Technological Sciences, 2019, 62(1): 31-38.
- [51] ZHAO J, WANG S, MCCOUL D, et al. Bistable dielectric elastomer minimum energy structures[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(7): 1.
- [52] WANG S, HUANG B, MCCOUL D, et al. A method to increase the dynamic deformation of a dielectric elastomer minimum energy structures rotary joint without increase of the voltage amplitude[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2019, 30(14): 2091-2098.
- [53] SHU W, ZHAOGANG H, MINGYU L, et al. DEMES rotary joint: theories and applications[C]//Proc. SPIE, 2017.
- [54] JIANG X, PEZZULLA M, SHAO H, et al. Snapping of bistable, prestressed cylindrical shells[J]. EPL (Europhysics Letters), 2018, 122(6): 64003.
- [55] LI W B, ZHANG W M, ZOU H X, et al. A novel variable stiffness mechanism for dielectric elastomer actuators[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(8): 1.
- [56] SHAO H, WEI S, JIANG X, et al. Bioinspired electrically activated soft bistable actuators[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(35): 1.
- [57] WEI S, SHAO H, GHOSH T K. Bioinspired bistable soft actuators[C]//Proc. SPIE, 2019: 1.
- [58] LI X Q, LI W B, ZHANG W M, et al. Magnetic force induced tristability for dielectric elastomer actuators[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(10): 1.
- [59] LIU Y, LIU B, YIN T, et al. Bistable rotating mechanism based on dielectric elastomer actuator[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(1): 1.
- [60] WANG N, CUI C, CHEN B, et al. Design of translational and rotational bistable actuators based on dielectric elastomer[J]. Journal of Mechanisms and Robotics-transactions of the ASME, 2019, 11(4): 1.
- [61] 曹玉君, 尚建忠, 梁科山, 等. 软体机器人研究现状综述[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 25-33.
- CAO Yujun, SHANG Jianzhong, LIANG Keshan, et al. A review of software robot research status[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 25-33.
- [62] 王田苗, 郝雨飞, 杨兴帮, 等. 软体机器人: 结构、驱动、传感与控制[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 1-13.
- WANG Tianmiao, HAO Yufei, YANG Xingbang, et al. Software robot: Structure, drive, sensing and control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 1-13.
- [63] 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[J]. 力学学报, 2016, 48(4): 756-766.
- LI Tiefeng, Li Guorui, Liang Yiming, et al. A review of the structural mechanism and driving materials of software robots[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechani, 2016, 48(4): 756-766.
- [64] 张进华, 王韬, 洪军, 等. 软体机械手研究综述[J]. 机

- 械工程学报, 2017, 53(13): 19-28.
- ZHANG Jinhua, WANG Tao, HONG Jun, et al. A review of software manipulator research[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(13): 19-28.
- [65] 丁汉. 共融机器人的基础理论和关键技术[J]. 机器人产业, 2016(6): 12-17.
- DING Han. Basic theory and key technology of communicative robot[J]. Robot Industry, 2016(6): 12-17.
- [66] LI W B, ZHANG W M, ZOU H X, et al. Bioinspired variable stiffness dielectric elastomer actuators with large and tunable load capacity[J]. Soft Robotics, 2019, 6(5): 631-643.
- [67] LI W-B, ZHANG W-M, ZOU H-X, et al. A novel variable stiffness mechanism for dielectric elastomer actuators[J]. Smart Materials and Structures, 2017, 26(8): 085033.
- [68] ZHAO J, ZHANG J, MCCOUL D, et al. Soft and fast hopping-running robot with speed of six times its body length per second[J]. Soft Robotics, 2019, 6(6): 713-721.
- [69] WANG S, HUANG B, MCCOUL D, et al. A soft breaststroke-inspired swimming robot actuated by dielectric elastomers[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(4): 045006.
- [70] ZHAO J, NIU J, MCCOUL D, et al. A rotary joint for a flapping wing actuated by dielectric elastomers: Design and experiment[J]. Meccanica, 2015, 50(11): 2815-2824.
- [71] FORTERRE Y, SKOTHEIM J M, DUMAIS J, et al. How the Venus flytrap snaps[J]. Nature, 2005, 433(7024): 421-425.
- [72] KIM S W, KOH J S, CHO M, et al. Towards a bio-mimetic flytrap robot based on a snap-through mechanism[C]. 2010 3rd Ieee Ras and Embs International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2010: 534-539.
- [73] KIM S W, KOH J S, LEE J G, et al. Flytrap-inspired robot using structurally integrated actuation based on bistability and a developable surface[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2014, 9(3): 1.
- [74] HU N, BURGUENO R. Buckling-induced smart applications: Recent advances and trends[J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(6): 1.
- [75] LEE J-G, RYU J, LEE H, et al. Saddle-shaped, bistable morphing panel with shape memory alloy spring actuator[J]. Smart Materials and Structures, 2014, 23(7): 1.
- [76] ZHANG Z, CHEN D, WU H, et al. Non-contact magnetic driving bioinspired Venus flytrap robot based on bistable anti-symmetric CFRP structure[J]. Composite Structures, 2016, 135: 17-22.
- [77] ZHANG Z, LI Y, YU X, et al. Bistable morphing composite structures: A review[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 142: 74-97.
- [78] ZHANG J, WANG Y, MCCOUL D, et al. Viscoelastic creep elimination in dielectric elastomer actuation by preprogrammed voltage[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(21): 212904.
- [79] 刘晨, 李卓远, 陈花玲. 一种新型柔性静电吸附变刚度结构[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(12): 18-24.
- LIU Chen, Li Zhuoyuan, Chen Hualing. A new type of flexible electrostatic adsorption variable stiffness structure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(12): 18-24.
- [80] MAILMAN M, CHAKRABORTY B. A signature of a thermodynamic phase transition in jammed granular packings: growing correlations in force space[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2011, 2011(7): L07002.
- [81] GOODRICH C P, LIU A J, NAGEL S R. Contact nonlinearities and linear response in jammed particulate packings[J]. Physical Review E, 2014, 90(2): 022201.
- [82] ALEGRE P, ARSLAN K, CARRIAZO A, et al. Some special types of developable ruled surface[J]. Hacettepe Journal of Mathematics and Statistics, 2010, 39(3): 319-325.
- [83] CHEN Z, GUO Q, MAJIDI C, et al. Nonlinear geometric effects in mechanical bistable morphing structures[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(11): 1.
- [84] NELSON T G, ZIMMERMAN T K, MAGLEBY S P, et al. Developable mechanisms on developable surfaces[J]. Science Robotics, 2019, 4(27): 1.
- [85] 陈浪, 秦大同, 郑小光. 基于形状特征的自由曲面建模技术[J]. 机械工程学报, 2002, 38(11): 105-108.
- CHEN Lang, QIN Datong, ZHENG Xiaoguang. Free form surface modeling based on shape characteristics in reverse engineering[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(11): 105-108.
- [86] HAJIESMAILI E, KHARE E, CHORTOS A, et al. Voltage-controlled morphing of dielectric elastomer circular sheets into conical surfaces[J]. Extreme Mechanics Letters, 2019, 30: 1.
- [87] DUDUTA M, BERLINGER F C J, NAGPAL R, et al.

- Electrically-latched compliant jumping mechanism based on a dielectric elastomer actuator[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, 28(9): 1.
- [88] YU Z, YUAN W, BROCHU P, et al. Large-strain, rigid-to-rigid deformation of bistable electroactive polymers[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(19): 1.
- [89] YUN S, NIU X, YU Z, et al. Compliant silver nanowire-polymer composite electrodes for bistable large strain actuation[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(10): 1321-1327.
- [90] NIU X, YANG X, BROCHU P, et al. Bistable large-strain actuation of interpenetrating polymer networks[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(48): 6513-6519.
- [91] REN Z, HU W, LIU C, et al. Phase-changing bistable electroactive polymer exhibiting sharp rigid-to-rubbery transition[J]. *Macromolecules*, 2016, 49(1): 134-140.
- [92] QIU Y, LU Z, PEI Q. Refreshable tactile display based on a bistable electroactive polymer and a stretchable serpentine joule heating electrode[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(29): 24807-24815.
- [93] ZIHANG P, YU Q, YE S, et al. Bistable electroactive polymers for refreshable tactile displays[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2019, 10966: 109662C (109667 pp.)-109662C (109667 pp.).
- [94] KEPLINGER C, LI T, BAUMGARTNER R, et al. Harnessing snap-through instability in soft dielectrics to achieve giant voltage-triggered deformation[J]. *Soft Matter*, 2012, 8(2): 285-288.
- [95] LI T, KEPLINGER C, BAUMGARTNER R, et al. Giant voltage-induced deformation in dielectric elastomers near the verge of snap-through instability[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2013, 61(2): 611-628.
- [96] KOLLOSCH M, ZHU J, SUO Z, et al. Complex interplay of nonlinear processes in dielectric elastomers[J]. *Physical Review E*, 2012, 85(5): 1.
- [97] ZHAO X, WANG Q. Harnessing large deformation and instabilities of soft dielectrics: Theory, experiment, and application[J]. *Applied Physics Reviews*, 2014, 1(2): 1.
- [98] BO L, SUO Z. Extension limit, polarization saturation, and snap-through instability of dielectric elastomers[J]. *International Journal of Smart & Nano Materials*, 2011, 2(2): 59-67.
- [99] JIANG Y, KORPAS L M, RANEY J R. Bifurcation-based embodied logic and autonomous actuation[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 1.
- [100] 陈花玲, 罗斌, 朱子才, 等. 4D 打印:智能材料与结构增材制造技术的研究进展[J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(2): 1-12.
- CHEN Hualing, LUO Bin, ZHU Zicai, et al. 4D printing: research progress of intelligent materials and structural additive manufacturing technology[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(2): 1-12.
- [101] 魏洪秋, 万雪, 刘彦菊, 等. 4D 打印形状记忆聚合物材料的研究现状与应用前景[J]. *中国科学: 技术科学*, 2018, 48(1674-7259): 2.
- WEI Hongqiu, WAN Xue, LIU Yanju, et al. Research status and application prospects of 4D printed shape memory polymer materials[J]. *Science in China: Technology Science*, 2018, 48(1674-7259): 2.
-
- 作者简介: 李博, 男, 1983年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为软体机器人设计与制造。
E-mail: liboxjtu@xjtu.edu.cn
- 孙文杰, 男, 1988年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为软物质力学与软体机器人。
E-mail: sunwenjie2017@xaut.edu.cn
- 陈贵敏(通信作者), 男, 1978年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为柔顺机构与多稳态机构。
E-mail: guimin.chen@xjtu.edu.cn