

真空驱动软体可折展致动器驱动特性研究

徐齐平 张柯航 张宏伟 鄂世举*

浙江师范大学工学院,金华,321004

摘要:为研究软体致动器驱动特性及其仿生应用,采用对称结构形式设计了一种基于 Kresling 折痕图案的软体可折展致动器,可实现快速驱动,只产生轴向收缩而不发生扭转(即单自由度直线运动),兼具收缩比大和负载能力强等特点。基于功平衡原理并结合几何学理论对该软体可折展致动器进行理论建模与实验研究,探究其变形特性。结果表明:理论与实验结果基本吻合,收缩比随真空压力的增大而增大;在同一真空压力下,负载越大,收缩比越小;在相同收缩比下,负载越大,致动器所需真空压力越大。进一步分析了不同参数对致动器驱动性能的影响,在不同参数调节范围内,致动器的壁厚越小、相对角越小、边长越大,其收缩比、承载能力等性能越好。基于上述结果,优化设计出一种串联软体可折展致动器,将其安装在仿生拟人腿上,能够实现屈伸、跑步、踢球、吸附等不同功能。

关键词:软体可折展致动器;驱动特性;收缩比;真空驱动;仿生

中图分类号:TP242

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.02.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Actuation Characteristics of Vacuum-driven Soft Deployable Actuators

XU Qiping ZHANG Kehang ZHANG Hongwei E Shiju*

College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang, 321004

Abstract: To study the actuation characteristics of soft actuators and their bionic applications, a soft foldable actuator was designed based on Kresling crease pattern by using a symmetrical structural form, which could achieve fast actuation, generate only axial contraction without torsion (single-degree-of-freedom linear motion), and had the features of large contraction ratio and strong load capacity. Based on the principle of work equilibrium and combined with the geometric theory, theoretical modeling and experimental research of the soft foldable actuators were carried out to explore its deformation characteristics. The results show that the theoretical and experimental results are basically in good agreement. The contraction ratio increases with the increase of vacuum pressure. Under the same vacuum pressure, the larger the load, the smaller the contraction ratio. At the same contraction ratio, the heavier the load, the greater the vacuum pressure required by the actuator. The influences of different parameters on the actuation performance of the actuators were further analyzed, within the adjustment range of different parameters, the smaller the wall thickness, the smaller the relative angle and the larger the side length of the actuators, the better its performance including the contraction ratio and the bearing capacity. Based on the above results, a tandem soft foldable actuators were optimally designed and was mounted on a bionic humanoid leg, which may realize different functions such as flexion and extension, running, kicking a ball, and adsorbing.

Key words: soft foldable actuator; actuation characteristics; contraction ratio; vacuum-driven; bionic

0 引言

折纸结构因具有良好的可控性、多样的机械编程性以及优良的可折展性等特点^[1-3]而广泛应用于航空航天^[4]、机器人^[5]、人工肌肉、智慧农业等领域^[6]。哈尔滨工业大学提出了一种可用于空间太阳能电站的大折展比三维可展开桁架机构,

并利用 ADAMS 软件验证了驱动方案的可行性^[7]。哈佛大学联合麻省理工学院将折纸结构与机械手结合,设计了一种像郁金香一样的机械手^[8]。同济大学国际建造节展示了折纸结构与房屋的设计作品^[9]。折纸结构可轻松实现二维平面到三维空间的快速转换^[10],这一特性使其在软体机器人变形运动等方面具有很高的应用价值。

在关于折纸结构的研究中,大量研究人员关注折纸结构与软体致动器之间的融合应用^[11]。MARTINEZ 等^[12]以折纸为模板制备了一种管状

收稿日期:2024-04-01

基金项目:国家自然科学基金(52075499);浙江省自然科学基金(LQ22A020003,LZ24E070001);国家留学基金管理委员会资助项目(202308330163)

折纸致动器,在正压驱动下能托起自身质量 120 倍的重物,但刚性结构限制了其柔韧性。LI 等^[13]受冷气体压力折叠思想的启发,提出了一种基于流体驱动的折纸人工肌肉,具有速度快、力量大、能量效率高等优点,但对于不封闭的折纸结构,流体驱动方式却不能发挥作用。宾夕法尼亚大学研制出一种磁活性弹性体,将其应用于折纸致动器中,通过将致动器置于特定磁场中,实现了二维平面到三维立方体的转换,但是磁驱动的磁场较难控制,限制了致动器的应用范围^[14]。KIM 等^[15]用电动机成功对 Sarrus 折纸结构进行驱动,并将此技术应用于无人机机械臂,而机械式驱动方式增加了整体结构的复杂程度和质量。LEE 等^[16]开发了具有折纸结构的真空驱动人工肌肉,能够实现较大的收缩比,可提起自身质量 250 倍的物体,但需要额外增加刚性加强件以保持整体结构的稳定性。ZHANG 等^[17]设计制作出真空驱动人工肌肉,可在 0.28 s 内快速收缩至最大收缩比,但却需要加入刚性圆环以保证在施加真空之后致动器不会径向贴合在一起。TAO 等^[18]借鉴 Kresling 折痕图案设计出 5 种折纸超材料结构,通过不同超材料结构的堆叠、镜像等组合设计,能够形成具有单稳态和双稳态构型的致动器,其仿真和实验研究结果基本一致,验证了 5 种折纸超材料结构的多稳态效应,然而机械外力的驱动方式使其应用受到制约。

在研究基于折纸结构开发的致动器时,研究人员一般会在折纸结构中添加刚性构件以保持整体结构的稳定性,但由此带来的问题是加入刚性构件不仅会导致致动器的环境适应性和灵巧性变差,而且整体结构变重、驱动效率降低。另外,如何设计折痕图案并结合不同的驱动方式,使其更好地应用于仿生软体机器人领域,也值得深入探究。

鉴于上述研究工作的局限性,本文受 Kresling 折痕图案^[19-20]的启发,提出了一种可实现单自由度轴向收缩运动且具有类似人工肌肉驱动性能的软体可折展致动器,它由 3D 打印一体化成形制作,在施加真空压力后可实现快速驱动。同时,还研究了不同壁厚、相对角度、边长对致动器驱动性能的影响,通过优化设计得到具有最优参数的软体可折展致动器,可将其应用于仿生人体骨架的踢球、行走、跑步等运动模式,仿生人手的抓取操作,实现了不同的应用功能,可在软体仿生机器人、康复医疗机器人和智能农业机器人等领域发挥积极作用。

1 软体可折展致动器的设计制作

本文设计了一种可实现轴向收缩的软体可折展结构,如图 1 所示。其中, L 表示底面六边形的边长, H 表示单层结构的层高, t 表示壁厚, θ 表示相邻层六边形之间的相对角。考虑到单层软体可折展结构在收缩过程中会发生扭转变形,在此结构的基础上对其进行镜像和堆叠设计,得到四层软体可折展结构,如图 2 所示。在四层结构的顶部和底部添加六边形顶面和底面,形成软体可折展致动器构型,如图 3 所示。

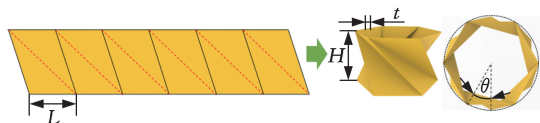


图 1 单层软体可折展结构

Fig.1 Single-layer soft foldable structure

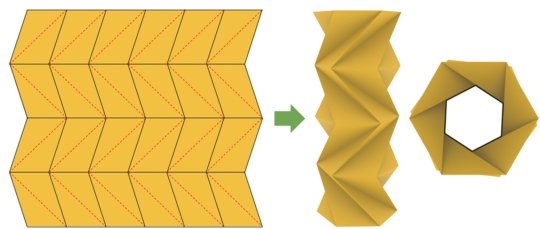


图 2 四层软体可折展结构

Fig.2 Four-layer soft foldable structure



图 3 真空驱动软体可折展致动器

Fig.3 Vacuum-driven soft deployable actuator

软体可折展致动器利用热塑性弹性体 (thermoplastic elastomer, TPE, 83A, eSUN) 作为基体材料,并且采用 3D 打印技术一体化快速制作,如图 4 所示。这种成形方式一方面可保证致动器的完整度和气密性,另一方面设计和制作过程简单快捷(通过三维绘图软件设计并进行切片,

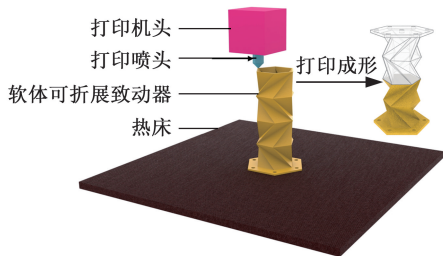


图 4 3D 打印过程

Fig.4 3D printing process

导入3D打印机中打印,即可获得致动器样机),避免了重复修改致动器结构参数的繁琐过程。

2 驱动过程分析

由于软体可折展结构的对称性设计,在真空负压作用下相邻两层可折展结构的侧壁之间发生接触挤压,整个结构的扭转变形相互抵消,不会产生彼此错位现象,故在致动器内部施加真空压力可使其实现单自由度轴向收缩变形运动。借助这一特性将致动器的顶部进行固定并使用气管连接真空泵,底部加装一个挂钩,通过真空泵对致动器施加真空压力,使其按照预设折痕收缩,进而提高负载,如图5所示。在施加真空压力时致动器快速收缩变形,收缩比可达56%。

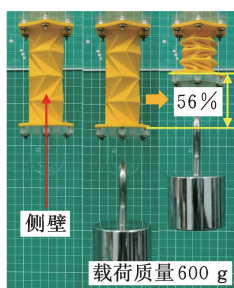


图5 软体可折展致动器提升重物

Fig.5 Soft deployable actuator lifts heavy load

在软体可折展致动器内部施加不同真空压力,致动器收缩程度不同。真空压力达到一定值后,侧壁之间发生接触挤压变形,且侧壁沿折痕重叠在一起,如图6所示。

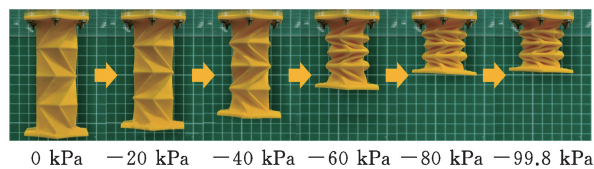


图6 真空驱动软体可折展致动器的变形收缩过程

Fig.6 The deformation contraction process of vacuum-driven soft deployable actuator

3 理论建模分析

软体可折展致动器由4个单层软体可折展结构、上下底面组合而成,每个单层软体可折展结构对应的内腔体积相同。以单层软体可折展结构底面六边形外接圆圆心为原点,建立空间直角坐标系,如图7所示。其中, P 点为折痕 $B'C$ 的中点。由向量法关系可得四面体 $PBCC'$ 的体积 V_0 :

$$V_0 = L^2 H \sin \theta / 12 \quad (1)$$

根据几何关系可确定:单层软体可折展结构的内腔体积是其对应多面体的体积与12个相同的四面体体积之差,故其内腔体积 V_1 为

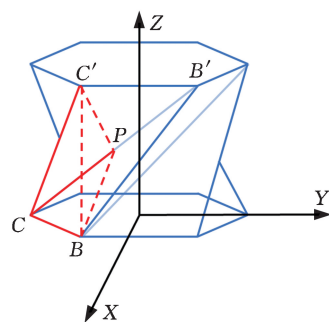


图7 单层软体可折展结构的几何模型

Fig.7 Geometric model of single-layer soft foldable structure

$$V_1 = V_m - 12V_0 \quad (2)$$

其中, V_m 为多面体的体积,高为 H 。 V_m 为

$$V_m = L^2 H \{1.5\sqrt{3} + (2\sin \theta - \sqrt{3})\sin \theta / [4(1 + \sin(\theta + \pi/6))\sin(\theta/2 + \pi/6)]\} \quad (3)$$

结合式(1)~式(3),则内腔体积 V_1 (详细推导过程见本文首页二维码中附录)为

$$V_1 = L^2 H \{1.5\sqrt{3} - \sin \theta + (2\sin \theta - \sqrt{3})\sin \theta / [4(1 + \sin(\theta + \pi/6))\sin(\theta/2 + \pi/6)]\} \quad (4)$$

由于软体可折展致动器与四层软体可折展结构的内腔体积相同,故可得该软体可折展致动器的体积 V :

$$V = 4L^2 H \{1.5\sqrt{3} - \sin \theta + (2\sin \theta - \sqrt{3})\sin \theta / [4(1 + \sin(\theta + \pi/6))\sin(\theta/2 + \pi/6)]\} \quad (5)$$

软体可折展致动器在真空压力作用下的变形收缩过程可视为一个准静态过程,基于功平衡,可得到致动器的输入功与气压差之间的关系:

$$dW_{in} = p dV \quad (6)$$

式中: p 为在致动器内腔施加的真空负压,可视为常量^[16]; dV 为致动器内腔的体积变化量。

假设真空压力完全转化为致动器的牵引力,并忽略软材料TPE本身的弹性,可得到致动器的输出功:

$$dW_{out} = F dH \quad (7)$$

式中: F 为软体可折展致动器的牵引力; dH 为致动器的收缩变化量。

根据功平衡原理,结合式(5)~式(7),可得牵引力 F :

$$F = p dV/dH = 4L^2 p \{1.5\sqrt{3} - \sin \theta + (2\sin \theta - \sqrt{3})\sin \theta / [4(1 + \sin(\theta + \pi/6))\sin(\theta/2 + \pi/6)]\} \quad (8)$$

4 实验研究与对比分析

基于上述理论建模,从软体可折展致动器的实验研究角度出发,对比分析理论与实验结果,探究致动器的最佳参数组合与驱动性能。首先针对具有基本参数的软体可折展致动器进行实验研究,然后分析不同参数对致动器驱动性能的影响,

获得一组具有最优参数的致动器,最后利用该致动器进行承载性能实验。

4.1 软体可折展致动器的收缩特性

致动器的基本参数见表 1。在最大真空压力 99.8 kPa 的驱动条件下,对致动器末端施加质量范围 0~1800 g 的载荷,测量轴向收缩位移并计算收缩比,实验数据如图 8 所示。结果表明:随着施加载荷的不断增大,其收缩比整体呈现下降趋势,最大承载载荷为 1800 g,说明它能够提起大于自身质量 130 倍的物体。然而,当施加载荷超过 1800 g 时,软体可折展致动器在轴向上产生的牵引力小于负载重力,其 Kresling 折纸结构由于真空压力作用在径向上收缩而产生贴合现象,从而导致软体致动器驱动失效,无法继续产生收缩变形运动。

表 1 软体可折展致动器的基本参数

Tab.1 The basic parameters of soft deployable actuator

壁厚 t /mm	0.7
相对角 θ /($^{\circ}$)	66
层高 H /mm	18
六边形边长 L /mm	15
质量 W /g	13.62

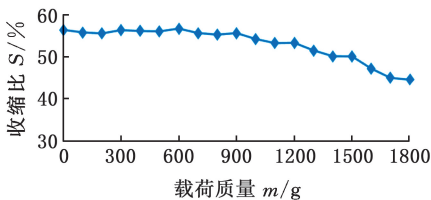


图 8 0~1800 g 载荷下软体可折展致动器的最大收缩比

Fig.8 Maximum contraction ratio of soft deployable actuator under loads of 0~1800 g

将致动器末端连接至测力计,研究不同收缩比下的牵引力。在真空压力 0~99.8 kPa 的条件下测量致动器在运动过程中产生的牵引力,得到不同收缩比 S 下产生的牵引力与真空压力之间的关系,如图 9 所示。结果表明:牵引力与真空压力基本成线性关系。

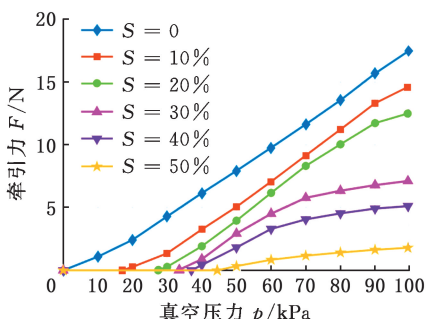


图 9 不同收缩比下牵引力与真空压力的关系

Fig.9 The relationship between traction force and vacuum pressure at different contraction ratios

根据同一真空压力下致动器对应的牵引力可得到牵引力和收缩比的关系,如图 10 所示,结果显示:在相同真空压力下,致动器的牵引力与收缩比近似成线性关系,真空压力越小,这种线性关系越明显。

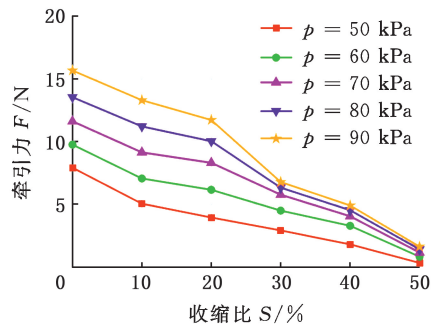


图 10 不同真空压力下牵引力与收缩比之间的关系

Fig.10 The relationship between traction force and contraction ratio at different vacuum pressures

在 0~95 kPa 的真空压力下,对致动器的承载性能和收缩比进行研究,其理论结果(T)和实验结果(E)如图 11 所示,图中虚线部分代表理论结果,加点实线部分代表实验结果。致动器收缩至最大收缩比的过程是其过渡区域。对于末端施加较小载荷的致动器,在相对较小的真空压力下,致动器可快速收缩至最大收缩比,过渡区域相对较小。但是对于末端施加较大载荷的致动器,其过渡区域明显变大。结果表明:随着施加载荷的增大,致动器达到最大收缩比所需要的真空压力增大;在同一真空压力下,致动器末端施加载荷越大,收缩比越小;同时也表明在相同收缩比情况下,致动器末端施加载荷越大,所需真空压力越大。

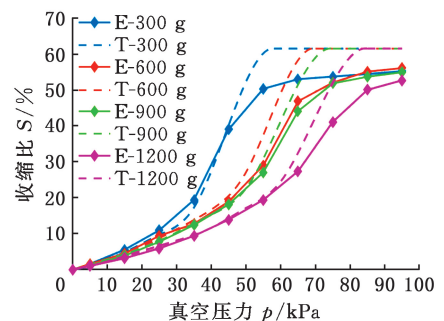


图 11 不同载荷质量下收缩比与真空压力之间的关系

Fig.11 The relationship between contraction ratio and vacuum pressure under different loads

软体可折展致动器在收缩过程中相邻侧壁会发生相互挤压变形,致动器在达到最大收缩比后其收缩量仍会小幅度增加,这是由软材料 TPE 的柔软特性所致。同时,也意味着在不知有效载荷的情况下,软体可折展致动器的变形无法被提前预测。

4.2 不同参数对软体可折展致动器的影响

壁厚是该致动器的一个重要参数,对致动器的收缩比和侧壁折痕处的反作用力有显著影响。该致动器通过 3D 打印技术一体化成形,可在打印时直接修改壁厚,在保持其余参数不变的情况下,设计并制作出壁厚为 0.6 mm 和 0.8 mm 的软体致动器,探究在 600 g 和 1200 g 有效载荷质量作用下不同壁厚对致动器收缩比的作用规律,结果如图 12 和图 13 所示。

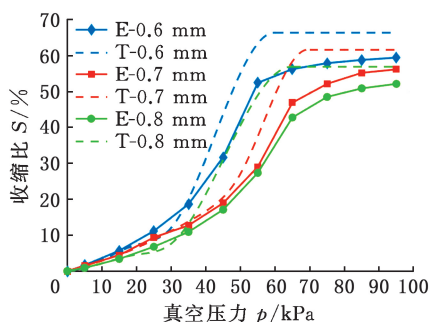


图 12 600 g 载荷质量作用下壁厚对收缩比的影响

Fig.12 The effect of wall thickness on contraction

ratio under 600 g load

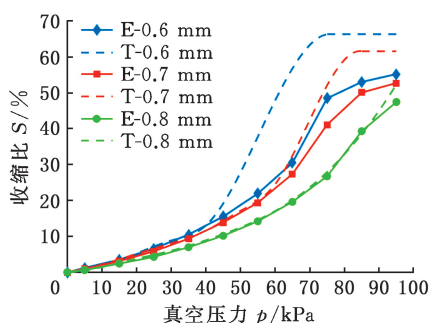


图 13 1200 g 载荷质量作用下壁厚对收缩比的影响

Fig.13 The effect of wall thickness on contraction

ratio under 1200 g load

壁厚的差异使得致动器的最大收缩比随之发生变化。在同一真空压力下,相较于壁厚 0.7 mm 的致动器,壁厚 0.6 mm 的致动器收缩比更大,而壁厚 0.8 mm 的致动器收缩比更小,并且有效负载增加到一定值后,壁厚 0.8 mm 的致动器无法达到最大收缩比。出现这一现象的原因有两个:①壁厚变小,致动器侧壁折痕处的反作用力减小,挤压得更紧,导致收缩比增大,而壁厚变大,致动器侧壁折痕处的反作用力加强,收缩比降低;②壁厚的大小影响了侧壁沿折痕方向的重叠度。研究表明:在致动器的有效真空负压范围内,壁厚越小,其收缩比越大,提起负载的能力越强,但要根据 TPE 软材料的特性,保证在壁厚尽量小的前提下致动器不被负载重力破坏。

与壁厚类似,相对角主要对致动器侧壁之间的挤压和重叠度产生作用,进而影响致动器的收

缩能力。同理,利用 3D 打印技术制作出相对角为 60° 和 72° 的致动器,其余参数保持不变,探究在 600 g 和 1200 g 有效载荷质量下不同相对角对致动器收缩比的影响,结果如图 14 和图 15 所示。

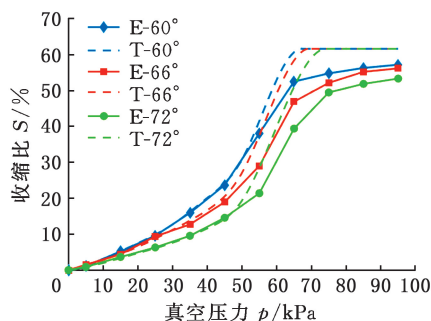


图 14 600 g 载荷质量作用下相对角对收缩比的影响

Fig.14 The effect of relative angle on contraction

ratio under 600 g load

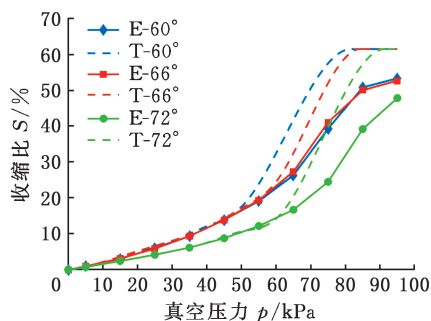


图 15 1200 g 载荷质量作用下相对角对收缩比的影响

Fig.15 The effect of relative angle on contraction

ratio under 1200 g load

针对同一载荷,在同一真空压力下,相对角为 72° 的致动器收缩比低于相对角为 60° 和 66° 的致动器的收缩比。这表明在相对角的许可范围内,其值越大,收缩比越小,在 600 g 载荷质量下,相对角为 60° 与 66° 的致动器之间的收缩比差异同样也证明了这一点。另外,在 1200 g 载荷质量下,相对角为 60° 和 66° 的致动器的收缩比均大于相对角为 72° 致动器的收缩比,这是由于两种致动器的相对角差别较小,在较高载荷作用下侧壁挤压作用影响小、重叠度基本相同,而相对角为 72° 的软体致动器的侧壁挤压产生的重叠度小于相对角为 60° 和 66° 的软体致动器的重叠度。因此,在设计致动器时,应当在恰当范围内选取较小的相对角。

该致动器的一个重要特性是:在同一真空压力下,致动器的牵引力随内腔体积的改变而改变。改变单层软体可折展结构上下六边形底面的边长,可改变六边形底面面积和致动器内腔体积。保证其余参数一致,设计制作六边形边长为 12 mm 和 18 mm 的致动器,针对有效载荷质量为 600 g 和 1200 g 的重物进行驱动实验,结果如图 16 和图 17 所示。

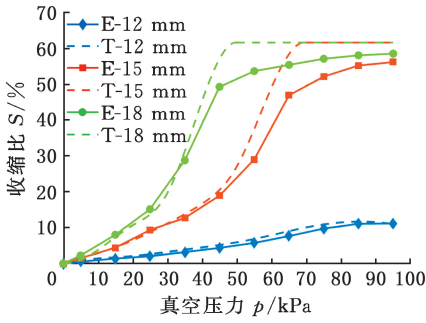


图 16 600 g 载荷质量作用下边长对收缩比的影响

Fig.16 The effect of edge length on contraction ratio under 600 g load

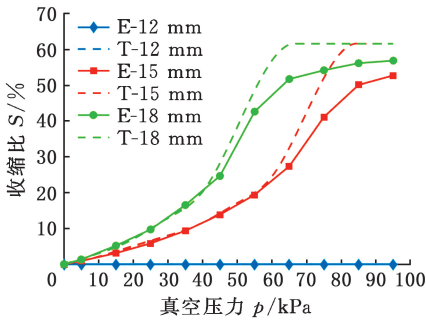


图 17 1200 g 载荷质量作用下边长对收缩比的影响

Fig.17 The effect of edge length on contraction ratio under 1200 g load

结果表明:与改变致动器的壁厚和相对角相比,六边形边长变化对致动器收缩比的影响更加显著。边长为 18 mm 的致动器过渡区域最小,能够在相对更小的真空压力下达到最大收缩比,且在较大载荷情况下,收缩性能受负载的影响小,但仍能保持稳定收缩比;而边长为 12 mm 的致动器无法达到最大收缩比,在 1200 g 载荷质量下甚至会发生径向贴合而导致驱动失效。由理论建模公式式(8)可知:致动器边长增大,牵引力会随之增大;相反,致动器边长减小,牵引力会减小。值得注意的是,六边形面积的改变会影响真空压力对致动器做功,这也反映到致动器的收缩比上。由此可知:设计致动器时,增大六边形的边长能够获得更好的驱动效果。

4.3 最优软体可折展致动器的驱动研究

根据 4.2 节研究结果,综合各参数对致动器驱动性能的影响,得到一组最优参数,见表 2。使用具有最优参数的致动器(最优致动器)进行负载提升实验,发现它在提升质量为 2000 g 的负载时收缩比可达 62%,如图 18 所示。通过最优致动器提升较轻负载(300 g)和较重负载(2000 g)的收缩变形实验可知:对于 300 g 和 2000 g 的负载,在 99.8 kPa 的真空压力下,最优致动器的收缩比仅仅相差 2%左右。在 20 kPa 的真空压力下,致

动器可轻松提起 300 g 负载的同时获得将近 50% 的收缩比;而在 90.8 kPa 的真空压力下,致动器可稳定提起 2000 g 负载且收缩比可达到 62%,如图 19 所示。这说明相较于具有基本参数的致动器,最优致动器可提升更重的负载,并且其收缩比上限更高,提升过程也更加稳定,即综合驱动性能更好。

表 2 软体可折展致动器的最优参数

Tab.2 The optimal parameters of soft deployable actuator

壁厚 t /mm	0.6
相对角 θ /($^{\circ}$)	60
层高 H /mm	18
六边形边长 L /mm	18
质量 W /g	14.24

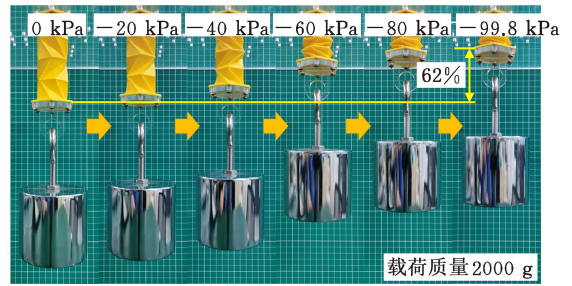


图 18 2000 g 载荷下最优致动器的收缩过程

Fig.18 Contraction process of the optimal actuator under 2000 g load

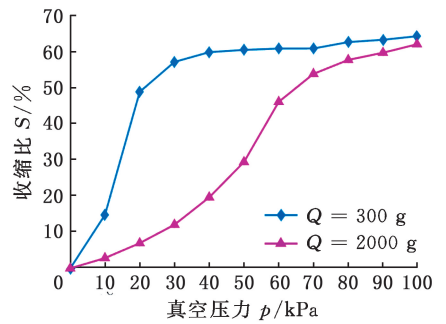


图 19 300 g 和 2000 g 载荷质量下最优致动器的收缩比

Fig.19 The contraction ratios of the optimal actuator under 300 g and 2000 g loads

5 软体可折展致动器的仿生应用

由于设计的软体可折展致动器具有收缩比大、易快速驱动变形等优势,故可广泛应用于仿生机器人和康复医疗机器人中。将两个同样的致动器粘接在一起,组合形成一个串联软体致动器,将其安装在仿生拟人腿上,通过对致动器施加真空压力,实现拟人腿的屈伸运动。如图 20 中(A)所示,在驱动过程中,串联致动器的有效收缩长度约 50 mm,而拟人腿的位移约 360 mm,是致动器长度变化的 7 倍多。同时,串联致动器可在 0.7 s 内完成拟人腿的屈伸运动,不仅可应用于举重运动,

而且能够完成更加灵巧的踢球运动。图 20 中 (B) 展示了串联致动器模拟人腿踢球过程, 可应用于辅助受伤足球运动员的康复训练。

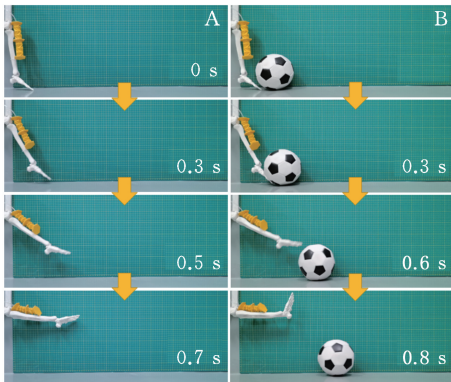


图 20 仿生拟人腿的屈伸和踢球过程

Fig.20 The process of flexion and extension, kicking a ball of a bionic anthropomorphic leg

利用 Arduino 单片机 (For-Arduino 改进版 UNO-R3)、继电器 (SRD-05VDC-SL-C) 和电磁阀 (Brangdy-2V025-08, DC24 V) 搭建控制系统。将致动器安装于各关节处, 通过调控气压和继电器中断时间实现致动器的运动控制, 以驱动仿生人体骨架实现行走和跑步运动, 如图 21 所示。改变加载到致动器内真空压力的频率, 仿生人体骨架的运动步态也会随之发生变化。借助这一实验, 可将致动器应用于仿生机器人的人工肌肉, 起到替代电机的作用, 或者应用于残疾人的复健过程, 减少残疾人在复健过程中的肢体损伤。

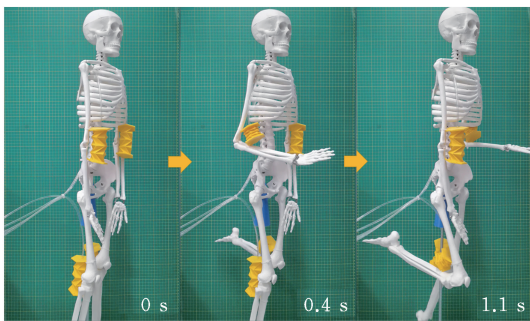


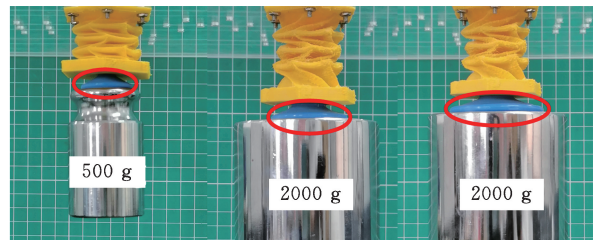
图 21 仿生人体骨架的行走和跑步过程

Fig.21 The process of walking and running of a bionic human skeleton

在进行仿生人体骨架的行走和跑步实验时, 构建了多气路系统以实现安装在不同腿部关节和肘部关节的致动器的驱动控制。模拟人体运动时肘部与腿部关节的协调方式, 将左肘和右腿关节处的致动器连接至同一个电磁阀上, 由继电器接收高低电平信号实现电磁阀通断, 利用 Arduino 单片机输出信号控制继电器和电磁阀, 进而控制左肘和右腿处的致动器同时进行抽气或放气。同理, 右肘和左腿关节处的致动器也可实现控制。

需要注意的是, 该多气路系统的信号控制仅在一个控制器上完成。

第 1 部分软体可折展致动器的设计制作表明它具有可塑性强和可重构性高的特点。依据这一特点, 在致动器底部设计一个合适尺寸的圆孔, 以过盈配合方式将不同尺寸的真空吸盘加装在致动器底部, 形成真空软体触手。通过向该触手内施加负压, 能够提起不同负载。该触手提升的负载随吸盘直径的增大而增大, 直径 43 mm 的触手可轻松提起 2000 g 的负载, 而直径 25 mm 的触手却只能提起 500 g 的负载, 如图 22 所示。



吸盘直径 25 mm 吸盘直径 33 mm 吸盘直径 43 mm

图 22 不同直径的真空软体触手提升不同负载

Fig.22 Vacuum soft tentacles of different diameters lift up different loads

6 结论与展望

1) 本文设计了一种具有 Kresling 折痕图案的软体可折展致动器, 它可产生较大的牵引力和较高的收缩比, 实现单自由度轴向收缩运动。与传统的刚性折纸致动器不同, 这种致动器由高强度和高韧性的 TPE 软材料通过 3D 打印一体化成形制作, 能够在收缩比高达 62% 的同时提起大于自身质量 140 倍的重物, 且软材料的柔软特性和折展结构的可折展性可保证该致动器在提升重物时不被损坏。

2) 软体可折展致动器的理论建模仿真和实验研究结果表明: 收缩比随真空压力的增大而增大; 在同一真空压力下, 负载越小, 收缩比越大。不同结构参数对致动器的驱动性能有明显影响, 在参数许可范围内, 壁厚越小、相对角越小、边长越大的致动器, 提升负载能力越强。

3) 利用串联软体可折展致动器可模拟人腿的屈伸、踢球、跑步运动, 还可与吸盘结合形成真空软体触手进行吸附抓取, 研究表明: 该软体致动器能够实现快速收缩变形和不同运动功能。另外, 构成致动器的软材料具有质量小、安全性高、人机交互性好及仿生性强等优良特性, 为致动器在仿生软体机器人、康复医疗和野外勘探等领域的应用奠定了基础。通过开发新型软材料或革新驱动方式, 未来可对软体致动器进行创新优化设计, 将

其应用于军事伪装侦察、海洋环境监测、太空垃圾清理、人体器官腔道修复等多样化场景中。

参考文献:

- [1] TURNER N, GOODWINE B, SEN M. A Review of Origami Applications in Mechanical Engineering [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016, 230(14):2345-2362.
- [2] 罗浚雄, 张萌, 侯浩宇, 等. 折纸机构及机器人应用研究[J]. 机器人技术与应用, 2021(5):27-32.
LUO Junxiong, ZHANG Meng, HOU Haoyu, et al. Research on Origami Mechanism and Robot Application [J]. Robot Technique and Application, 2021(5):27-32.
- [3] 方虹斌, 吴海平, 刘作林, 等. 折纸结构和折纸超材料动力学研究进展[J]. 力学学报, 2022, 54(1):1-38.
FANG Hongbin, WU Haiping, LIU Zuolin, et al. Advances in the Dynamics of Origami Structures and Origami Metamaterials[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(1):1-38.
- [4] LIU Zhiquan, QIU Hui, LI Xiao, et al. Review of Large Spacecraft Deployable Membrane Antenna Structures[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(6):1447-1459.
- [5] RUS D, TOLLEY M T. Design, Fabrication and Control of Origami Robots[J]. Nature Reviews Materials, 2018, 3:101-112.
- [6] SON H, PARK Y, NA Y, et al. 4D Multiscale Origami Soft Robots: a Review[J]. Polymers, 2022, 14(19):4235.
- [7] 肖洪, 成正爱, 郭宏伟, 等. 空间太阳能电站大折展比体展开桁架机构[J]. 机械工程学报, 2020, 56(13):128-137.
XIAO Hong, CHENG Zheng'ai, GUO Hongwei, et al. Large Folding Ratio 3D Deployable Truss Mechanism for Space Solar Power Station[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(13):128-137.
- [8] LI Shuguang, STAMPFLI J J, XU H J, et al. A Vacuum-driven Origami "Magic-ball" Soft Gripper [C] // 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Montreal, 2019: 7401-7408.
- [9] 李彦伯, 李梓铭. 材料·建构·体验——同济大学国际建造节评委会特别奖作品《显·隐》中的建筑学本体话语[J]. 当代建筑, 2020(10):124-127.
LI Yanbo, LI Ziming. Materials, Construction, Ex-
- perience; the Architectural Noumenon Discourses on the Jury Special Mentioned Prize "String Cubes" in Tongji International Construction Festival[J]. Contemporary Architecture, 2020(10):124-127.
- [10] LEANZA S, WU Shuai, SUN Xiaohao, et al. Active Materials for Functional Origami [J]. Advanced Materials, 2024, 36(9):2302066.
- [11] 胡楠, 陈花玲. 折纸结构驱动技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2020, 56(15):118-128.
HU Nan, CHEN Hualing. Progress in Actuating Technology of Origami Structure [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(15):118-128.
- [12] MARTINEZ R V, FISH C R, CHEN Xin, et al. Elastomeric Origami: Programmable Paper-elastomer Composites as Pneumatic Actuators [J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(7):1376-1384.
- [13] LI Shuguang, VOGT D M, RUS D, et al. Fluid-driven Origami-inspired Artificial Muscles [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(50):13132-13137.
- [14] AHMED S, LAUFF C, CRIVARO A, et al. Multi-field Responsive Origami Structures: Preliminary Modeling and Experiments [C] // ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Portland, 2013: DETC2013-12405.
- [15] KIM S J, LEE D Y, JUNG G P, et al. An Origami-inspired, Self-locking Robotic Arm that Can Be Folded Flat [J]. Science Robotics, 2018, 3(16): eaar2915.
- [16] LEE Jingyu, RODRIGUE H. Origami-based Vacuum Pneumatic Artificial Muscles with Large Contraction Ratios [J]. Soft Robotics, 2019, 6(1):109-117.
- [17] ZHANG Zhuang, FAN Weicheng, CHEN Genliang, et al. A 3D Printable Origami Vacuum Pneumatic Artificial Muscle with Fast and Powerful Motion [C] // 2021 IEEE 4th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). New Haven, 2021: 551-554.
- [18] TAO Ran, JI Longtao, LI Ying, et al. 4D Printed Origami Metamaterials with Tunable Compression Twist Behavior and Stress-strain Curves [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 201:108344.
- [19] LI Zhen, KIDAMBI N, WANG Liangmo, et al. Uncovering Rotational Multifunctionalities of Coupled Kresling Modular Structures [J]. Extreme Mechanics Letters, 2020, 39:100795.

- Hysteresis Compensation Method of MEMS Piezoelectric Vibratory Platforms [J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(17):2118-2124.
- [10] 胡斌梁, 陈国良. 压电陶瓷微夹钳迟滞环自适应逆控制研究[J]. *中国机械工程*, 2006, 17(8):798-801.
HU Binliang, CHEN Guoliang. Study on Adaptive Inverse Control of Hysteresis in Piezoelectric Microgripper [J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(8):798-801.
- [11] GU Guoying, ZHU Limin, SU Chunyi, et al. Modeling and Control of Piezo-actuated Nanopositioning Stages: a Survey [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 13(1):313-332.
- [12] XIA Yanjiang, HUPPE B S, FUKAMI T. An Approach to Enlarging the Maximum Bit in Piezoelectric Digital Actuator [J]. *Ferroelectrics*, 1994, 160(1):331-336.
- [13] XIAO Wenlei, HUAN Ji, LIU Guoxi, et al. A Digitally Linear Piezoelectric Bimorph Actuator in Open-loop Mode [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(12):123503.
- [14] 高强, 朱勇, 钱鹏飞, 等. 阵列压电叠堆驱动高速开关阀的设计与仿真分析[J]. *液压与气动*, 2023, 47(9):56-62.
GAO Qiang, ZHU Yong, QIAN Pengfei, et al. Design and Simulation Analysis of a High Speed-on/off Valve Actuated by Array Piezoelectric Stacks [J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2023, 47(9):56-62.
- [15] 崔玉国, 孙宝元, 董维杰, 等. 压电陶瓷执行器迟滞与非线性成因分析[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(3):270-275.
CUI Yuguo, SUN Baoyuan, DONG Weijie, et al. Causes for Hysteresis and Nonlinearity of Piezoelectric Ceramic Actuators [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(3):270-275.
- [16] QI Chenkun, GAO Feng, LI Hanxiong, et al. An Incremental Hammerstein-like Modeling Approach for the Decoupled Creep, Vibration and Hysteresis Dynamics of Piezoelectric Actuator [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2015, 82(4):2097-2118.
- [17] QIN Yanding, TIAN Yanling, ZHANG Dawei, et al. A Novel Direct Inverse Modeling Approach for Hysteresis Compensation of Piezoelectric Actuator in Feedforward Applications [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(3):981-989.
- [18] 赵天, 杨智春, 刘昊, 等. 压电陶瓷叠层作动器迟滞蠕变非线性自适应混合补偿控制方法[J]. *航空学报*, 2018, 39(12):222308.
ZHAO Tian, YANG Zhichun, LIU Hao, et al. Hysteresis and Creep Nonlinearities Modeling and Adaptive Hybrid Compensation Control of Piezoelectric Stack Actuators [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(12):222308.
- [19] TASHAKORI S, VAZIRI V, APHALE S S. A Comparative Quantification of Existing Creep Models for Piezoactuators [C] // *Recent Trends in Wave Mechanics and Vibrations*. Cham, 2023:419-426.

(编辑 陈勇)

作者简介:凌杰*,男,1990年生,副教授、博士。研究方向为精密驱动与控制。E-mail:meejling@nuaa.edu.cn。

本文引用格式:

凌杰,张允执,陈龙,等.数字压电叠堆执行器:原理、建模与控制[J].*中国机械工程*,2025,36(2):228-237.

LING Jie, ZHANG Yunzhi, CHEN Long, et al. Digital Piezoelectric Stack Actuators: Principle, Modeling and Control [J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(2):228-237.

(上接第 227 页)

[20] 喻莹,徐新卓,罗尧治.基于 Kresling 折纸构型的空间结构可控失稳模式研究[J].*工程力学*,2021,38(8):75-84.

YU Ying, XU Xinzhao, LUO Yaozhi. Programmable Instability of Spatial Structures Based on Kresling Origami [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(8):75-84.

(编辑 陈勇)

作者简介:徐齐平,男,1986年生,副教授。研究方向为软体致动器、软体机器人。E-mail:xuqiping@zjnu.edu.cn。鄂世举*(通信作者),男,1970年生,教授、博士研究生导师。研究方向为软体致动器、介电弹性体发电机、智能材料与机器人。E-mail:esx_2001@zjnu.edu.cn。

本文引用格式:

徐齐平,张柯航,张宏伟,等.真空驱动软体可伸展致动器驱动特性研究[J].*中国机械工程*,2025,36(2):220-227.

XU Qiping, ZHANG Kehang, ZHANG Hongwei, et al. Study on Actuation Characteristics of Vacuum-driven Soft Deployable Actuators [J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(2):220-227.