

介电弹性体致动器的结构设计及应用

彭冬雪, 刘茜*

(上海工程技术大学 纺织服装学院, 上海 201620)

摘要:介电弹性体作为一种新型的压电性高分子聚合物,当受到电场的激励时会产生变形,撤销电场后能够恢复原状,具有将电能直接转换为机械能的特点。通过将其设计成具有不同结构的致动器,能够提高变形能力,并且满足不同的应用需求。本文介绍了介电弹性体致动器的致动机理,阐明了它们是能够以直线方式产生运动的线性致动器,在此基础上可设计出不同结构的致动器,主要归纳了各种介电弹性体致动器,从它们的性能特征、加工技术和潜在应用等方面进行了讨论。

关键词:介电弹性体; 致动器; 结构设计; 电致变形

介电弹性体是一种在压电性智能材料中新型的高分子弹性聚合物,由于其在电场激励作用下,可以实现非常好的大致动变形,产生相当大的应力,还具备高效率和高稳定性等特点,使得介电弹性体材料在柔性致动器领域具有其它压电性智能材料不可比拟的优越性^[1,2]。与传统的电磁、压电、形状记忆合金等致动器相比,介电弹性体致动器结构简单,具有大变形、大驱动应力、质量轻、效率高等特点,并且能够将电能直接转换为机械能^[3]。

由于介电弹性体致动器具有可塑性、可控制性和柔软性等特点,介电弹性体致动器在包括电动机、扬声器、机器人、电子动力学或假肢致动器、可调光学装置、微机电系统和生物仿制品(人造皮肤或肌肉)等微型应用领域都取得了令人欣慰的成果^[4,5]。为了提高介电弹性体致动器的响应速度和电致变形效果,研究者们还设计出了许多不同结构形式的介电弹性体致动器,如领结形、菱形、锥形、螺旋形、堆叠形、折叠形、卷轴形等^[6]。

1 介电弹性体致动器的致动机理

介电弹性体致动器具有不同的结构设计形式,但它们基本的致动机理是一致的。在介电弹性体薄膜的上下表面涂覆柔性电极,施加电压时,介电弹性体在平面内膨胀而在厚度方向上减小。由于电介质内部发生改变从而产生的麦克斯韦应力(Maxwell stress)是介电弹性体变形的的主要原因^[7]。当电场施加到介电弹性体上时,上下两个电极上的异性电荷相互吸引,而每个电极上的同性电荷相互排斥。充电的程度取决于介电弹性体的介电性质,所产生的应力归因于电极上的自由电荷与由介电不均匀性引起的静电力之间的相互作用^[8,9]。致动机理如图1所示。在所有情况下,致动器的致动主要是利用介电弹性体的厚度变形,尽可能有效地将其转换为定向线性位移,如堆叠致动器,施加电压后单层介电弹性体厚度减小,导致致动器整体在轴向上的长度变小,从而产生收缩变形^[10]。在下文中,针对不同结构设计的介电弹性体致动器,从宏观上进行详细介绍。

2 介电弹性体致动器的结构设计

在20世纪90年代末和21世纪初,斯坦福研究院开发了许多具有不同结构的介电弹性体致动器。目前大多数研究者更侧重于能够以直线方式产生运动的线性致动器,这些设计中的许多都受到基于压电

10.14028/j.cnki.1003-3726.2020.02.003

收稿:2019-05-03;修回:2019-10-22;

作者简介:彭冬雪(1995-),女,硕士研究生,研究方向为智能纺织材料;

* 通讯联系人:刘茜(1978-),女,博士,副教授,研究方向为功能纺织品。E-mail: liuqianfangzhi@126.com.

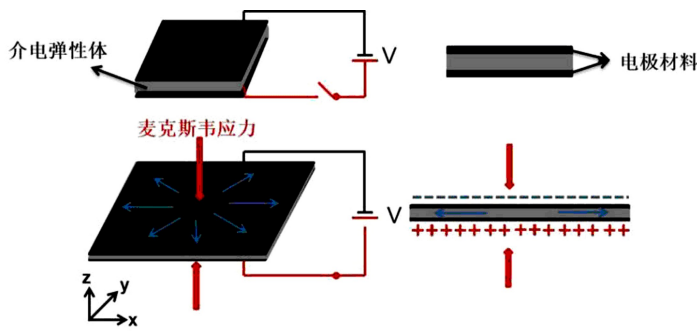


图 1 介电弹性体致动器的致动机理

Figure 1 Actuation mechanism of dielectric elastomer actuator

材料的现有致动器的启发^[11]。下文将讨论推拉式、领结形、菱形、堆栈、螺旋结构、折叠、卷轴、锥形、球壳形等介电弹性体致动器的性能特征、加工技术和潜在应用。

2.1 推拉式致动器

最简单的致动器结构设计就是推拉式,将预先经过拉伸的介电弹性体薄膜固定在一个刚性框架上,该框架具有两个独立的有源电极区域和一个非活性中间空间,示意图如图 2 所示,其中,(a)为推拉式介电弹性体致动器的俯视图,(b)为其侧视图。在施加电压时,随着膜的一侧被刺激,导致膜的扩张,使得另一个未被致动的部分收缩,在水平面中产生线性运动。

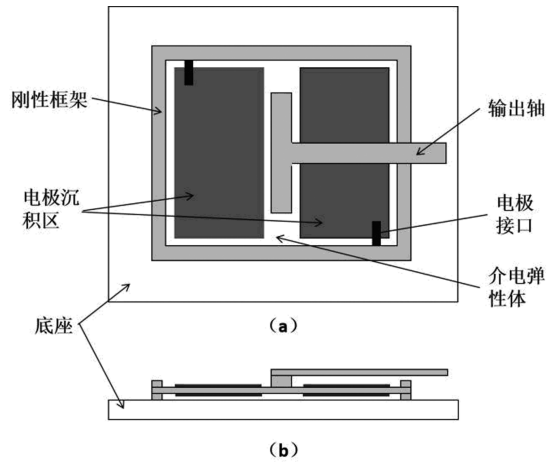


图 2 推拉式致动器示意图

Figure 2 Schematic diagram of push-pull actuator

Pelrine 等^[12]在文中写到这种推拉式致动器利用了介电弹性体致动时的面积膨胀,在达到 300 V 时的工作电压下,可以产生高达 20% 的线性应变。但是这种设计也存在一定问题,当预拉伸不均匀时,矩形电极区域可能不会均匀扩展,因此输出轴可以向上或向下移动,而不是仅沿水平方向线性移动。此外,在电致变形时由于介电弹性体的厚度有限,导致输出力不够大,不足以产生视觉上的较大位移变化。

2.2 领结形致动器

在领结形致动器设计中,已预拉伸的介电弹性体由领结形刚性框架支撑,领结的两个半部分与中间的柔性铰链相连接。在施加电场时,介电弹性体膜开始朝框架延伸,使得铰链向外打开,在横向上产生线性位移,如图 3 所示。

领结形致动器已被用来为六足行走机器人、扑翼机器人以及各种动画系统如眼睛、脸部、皮肤等提供驱动。Eckerle 等^[13]基于丙烯酸介电弹性体设计的领结形致动器,放置于六足行走机器人的胸部,像肌

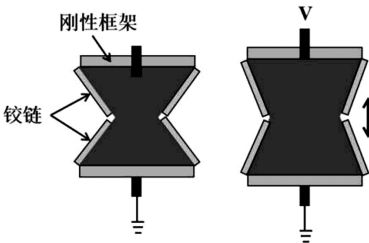


图 3 领结形致动器示意图

Figure 3 Schematic diagram of the bow tie actuator

肉一样控制机器人行走,使得机器人可以抬起脚并改变行走方向。丙烯酸介电弹性体的功率密度足以驱动该装置,但由于相对较重的框架(重量比范围为 80~90%(wt)),整个系统的潜在功率密度显著降低。因此,减轻领结形致动器的支撑框架重量是设计具有高总功率密度的仿生设备的关键点。

2.3 菱形致动器

与领结形致动器相反,菱形致动器的框架在顶部和底部顶点有两个铰链。菱形致动器的致动原理是采用四根刚性的杆件,刚性杆之间采用柔性铰链连接,拉伸弹性元件如橡皮筋或弹簧被安装在两刚性杆之间提供预载荷,通电前后菱形致动器的变化如图 4 所示。该结构为保证等长链接,一般使用菱形塑料框架,也有研究者使用非线性拉伸弹簧来提供收缩力并增强致动力。

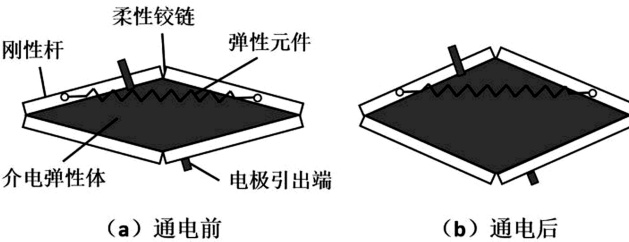


图 4 菱形致动器示意图

Figure 4 Schematic diagram of the diamond actuator

菱形致动器可以提供几乎恒定的驱动力,因此非常适用于许多触觉设备、移动机器人和其它设备。Plante 等^[14]研制了一种菱形结构的介电弹性体线性驱动器,该驱动器输出位移达到 22mm,介电弹性体应变超过 100%,可以提供几乎恒定的驱动力。他们还利用菱形驱动器成功地研制了弹跳机构,弹跳高度可达到 0.1m。Wang 等^[15]通过实验分析菱形驱动器位移输出性能和负载能力,得出驱动器输出位移取决于电压,负载在驱动器输出力范围内对输出位移影响不大,但会影响其运动速度。由于菱形驱动器的驱动能力较小,建议可将多层介电弹性体并联,来提高驱动器的输出力,且不会导致驱动器重量的明显增加。

在菱形致动器的基础上,研究者们还设计了一些灵活多变的框架,提出了六角形和跑道形线性致动器,其工作方式与菱形致动器相同,但也由于框架的连续性,这种结构在铰链处会使应力增加^[16]。其中六角形致动器已经被使用来驱动康复设备。

2.4 锥形致动器

在圆锥形线性致动器中,介电弹性体被内外圆形框架固定,内圆形框架上有一个偏置机构,目的是使介电弹性体薄膜拉伸形成圆锥形结构,图 5 为以弹簧作为偏置机构的示意图,其中固定支架与外圆形框架连接起支撑作用。在施加电刺激时,介电弹性体会扩展,锥体组件的内圆框架会以线性方式向下移动,并且弹簧变形实现负载平衡。

偏置机构有很多形式,如弹簧、双滑块、菱形四连杆、刚性撑杆等,能够预拉伸薄膜使整体致动器处于

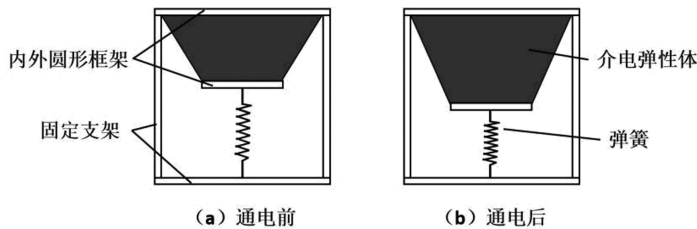


图 5 锥形致动器示意图(以弹簧作为偏置机构为例)

Figure 5 Schematic diagram of a tapered actuator (taking a spring as a biasing mechanism as an example)

平衡状态,并且可以在一定方向上引导移动^[17]。此外,各种偏置机构运行时会导致相应不同的平衡点和冲程,理解这种关系对于设计有效的锥形致动器至关重要,原则上,正向偏差产生的位移最小,负向偏差位移最高。除了偏置机构之外,设备的尺寸对于致动性能也很重要。Wang 等^[18]研究了与致动器性能有关的因素的重要性。这些因素包括介电弹性体致动器薄膜预应变比、驱动单元数量、内径和外径等。结果显示,外径对驱动的影响最大,通过增加更多的驱动单元,输出力可以提高。

在所有这些设计中,介电弹性体偏置致动器已经商品化。美国人工肌肉公司设计了一种具有双隔膜结构的锥形致动器^[19]。该装置由两个独立的介电弹性体薄膜组成,这些薄膜在中心相互连接,并且在边缘由间隔物分开,因此,这两个膜彼此作为偏置机构被拉伸。这种介电弹性体锥形致动器已经在许多应用中得到了探索,例如,具有高致动力,但较小行程的触觉反馈和离合器致动器;具有中等力度和行程的阀门和泵,力量较小但行程较大的定位器。朱银龙等提出将两个锥形致动器反向放置,利用一个致动器的弹性薄膜作为另一驱动器的预载,设计了一种具有传感功能的直线型致动器。该直线型致动器有望应用于医学上的精确给药、微型换能器等领域。

2.5 堆叠致动器

与上面讨论的致动器设计相反,堆叠的致动器是收缩的,它旨在利用介电弹性体厚度方向的负应变,这类似于天然肌肉的致动。在堆叠致动器中,多层适当电极化的介电弹性体以图 6 所示的方式进行堆叠。在麦克斯韦应力下,介电弹性体厚度减小并且在平面内膨胀,叠加的厚度变形导致致动器的整体收缩变形。然而,堆叠致动器在相邻层之间的处理和交互方面仍然存在一些限制,要降低激活所需的电场强度并获得高的电致变形并不容易,同时还要避免电击穿。

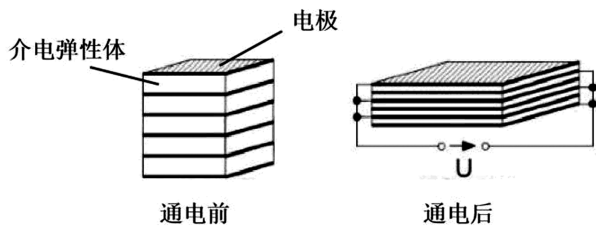


图 6 堆叠致动器示意图

Figure 6 Schematic diagram of the stacked actuator

在堆叠致动器端部若有两个刚性边界,当厚度减小从而伴随的面内膨胀会很明显,图 7 所示为堆叠致动器侧面图,中间的介电弹性体会横向隆起。目前研究者们已经研究出使用刚性电极可以消除这种不均匀的应变分布。Kaal 等^[20]将穿孔镍板电极用于堆叠致动器中,通过用完全闭合的镍层取代一些穿孔电极,进一步改善了横向膨胀现象。这项研究也表明了刚性电极能够帮助保持弹性体中的预应变。膨胀问题的另一个解决方案是在每个层的电极周围保持一些无效的边缘,但是这个被动区域可能会增加系统刚度,并限制最大可实现的驱动应变。

各种各样的介电弹性体材料已经用于制作堆叠致动器,包括丙烯酸弹性体、丙烯酸基互穿聚合物网

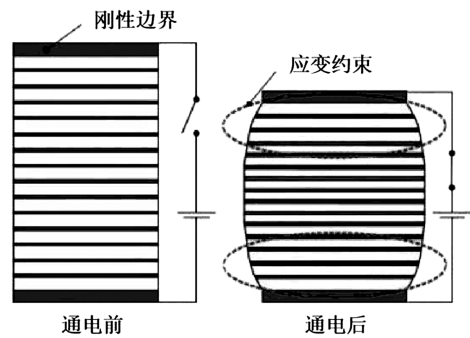


图 7 带刚性边界的堆叠致动器

Figure 7 Stacking actuator with rigid boundary

络、硅酮以及合成丙烯腈丁二烯橡胶。丙烯酸互穿聚合物网络未经预拉伸下可产生 46% 的大应变,能量密度高达 12.9J/kg,但是加工复杂并且难以实现批量生产^[21]。有机硅制作的堆叠致动器产生的应变量非常低。最近,研究者还提出了一种紫外线固化的聚氨酯丙烯酸酯,在致动器制造过程中不需要预拉伸,并且可以产生约 11% 的应变。

堆叠介电弹性体致动器有各种应用,例如触觉显示设备、人造肌肉、气动阀、主动悬架等。Matysek 等^[22]基于堆叠致动器设计了一种触觉显示器,用每层厚度为 50 μm 的聚二甲基硅氧烷制作,共有 20 层,在频率为 200Hz 且电压为 1300V 的正弦电场下,产生了 40 μm 的收缩,这种相对较小的应变在人类的敏感范围内,适用于微型机器。由堆叠线性致动器制成的触觉显示器最具挑战性的问题是放电时间过长引起的“串扰”。具有周期性切换的列线和行线的电极的布置对于产生分布式激励点是必需的,然而,由于较长的放电时间,来自前一周期的残余电荷干扰下一个激励周期,于是便产生了称为串扰的错误信息或噪声。研究者们还探索了触觉致动器的许多其它实际应用,如 MP3 播放器的振动触觉显示部位和蠕动泵。

2.6 螺旋致动器

将在螺旋平面上带有电极的介电弹性体窄条制成螺旋状,类似于弹簧,一旦激活,介电弹性体纵向收缩,通电前后致动器变化如图 8(a) 所示。通过改变螺旋角度 α 可以调节该致动器的总位移,参见图 8(b),显而易见,螺旋角越大,致动器的整体轴向应变就越高。与堆叠式致动器相比,螺旋致动器使用连续电极,原则上由于两个相邻电极之间的支撑而导致故障的可能性较低。目前螺旋结构致动器已被用于驱动机器人脸部的眼球。

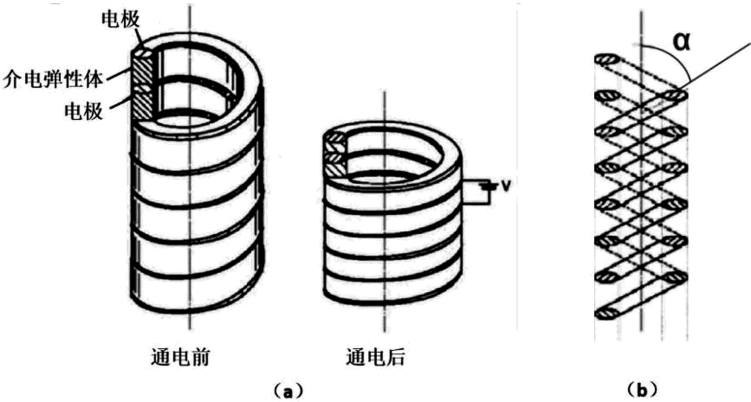


图 8 螺旋结构致动器示意图

Figure 8 Schematic diagram of the spiral structure actuator

Carpi 等^[23]提出了一种制作螺旋致动器的简便方法,如图 9 所示。在第一步中,从硅胶管(见图 9 中的(a)和(f))上切下螺旋“弹簧”(图 9(b)和(g)),然后用碳负载硅酮两个面(见图 9 中的(c)和(h))组成致动器的“骨架”。随后将该螺旋骨架与无电极螺旋组合,组装成最终的螺旋致动器(见图 9 中的(d-e)和(i))。Capri 等发现在 $4\sim 15\text{V}/\mu\text{m}$ 的电场下,收缩致动应变在 $0.5\%\sim 5\%$ 的范围内。

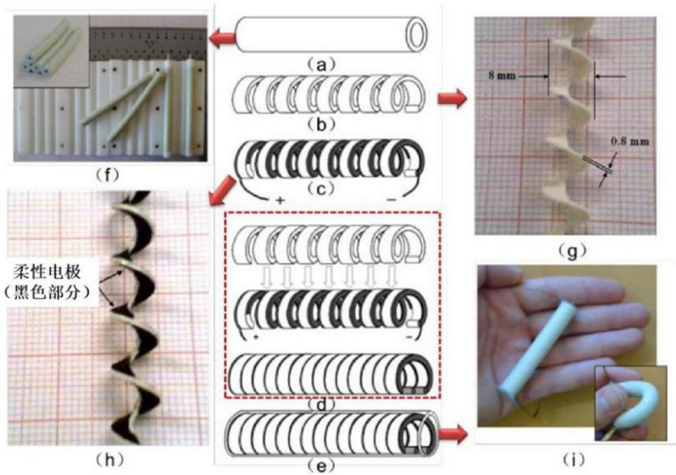


图 9 螺旋致动器制造过程。(f 和 a)介电弹性体管;(b 和 g)切割成螺旋状;(c)涂覆电极;
(d)将未涂覆电极的螺旋和涂覆电极的螺旋组装在一起以形成管状;(e 进而 i)组装完成。

Figure 9 The helical actuator fabrication process. (f and a) A D-EAP tube; (b and g) cutting tube into helical shape;
(c) application of electrodes; (d) assembling of a naked helix and a coated helix together to form a “tube”;
(e and i) final assembly.

2.7 折叠致动器

折叠致动器是由一个连续不断的长条,通过折叠得到的,施加电压时,介电弹性体厚度上的减小会导致致动器在轴向收缩,如图 10 所示。由于介电弹性体层与层之间是连续的,与螺旋致动器和堆叠致动器相比,加工过程简单,但在功能上等同于堆叠致动器。但由于折叠式致动器结构不对称,自由端总是比邻近的无效区域具有更大的变形。另外,折叠结构容易导致厚度不均匀。

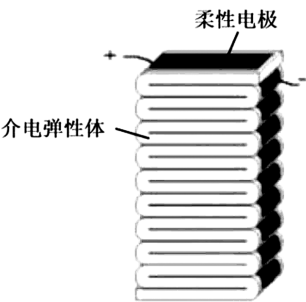


图 10 折叠致动器示意图
Figure 10 Schematic diagram of the folding actuator

Carpi 等^[24]使用两侧都涂覆电极的硅树脂条,制作的折叠式致动器在 $12\text{V}/\mu\text{m}$ 的电场下,能够产生高达 15% 的收缩应变。使用相同的制造技术,可以组装其它横截面形状的堆叠式致动器,例如,使用交替的圆形介电弹性体带,构建一个圆柱形折叠致动器。Carpi 等^[25]将折叠式致动器用于驱动 android 眼球以及可调节的手部康复夹板,发现由硅胶制作的折叠介电弹性体致动器在大约 6kV 时产生的力为 1N 。此外,折叠致动器也在其它应用中得到了探索,如人机界面、太空中的可展开臂架如太阳能电池、天

线系统和摄像机等。

2.8 卷轴致动器

以上讨论的所有致动器结构,很难对介电弹性体施加和保持预拉伸,而卷轴致动器能够解决这个问题。卷轴致动器是由两层只涂覆了一侧柔性电极的介电弹性体上下叠加而成,再卷绕制成致动器,其中刚性电极分别放在介电弹性体的中间和覆有电极的一面,从而引出正负极,示意图如图 11 所示。两层介电弹性体是为了让致动器形成通路,并且可以保持施加的预拉伸。由于存在预拉伸引起的层间约束,卷轴致动器在结构上更加坚固,因为一层中的小缺陷或裂纹不会引起整个辊系的机械故障,并且机械击穿的可能性较低^[26]。介电弹性体卷轴致动器可以分为两种,一种具有核心轴,常见的也被称为弹簧辊致动器,另一种没有核心轴。

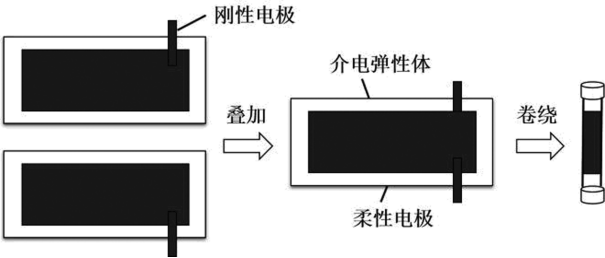


图 11 卷轴致动器制作示意图
Figure 11 Schematic diagram of the reel actuator

在弹簧辊结构中,将预拉伸过且涂覆电极的介电弹性体卷绕在压缩弹簧辊上。压缩弹簧不仅有助于纵向预拉伸介电弹性体,而且在启动时能增强应变,以及在关闭电源时有助于致动器回缩。

研究者们将弹簧辊致动器用于很多应用中并且得以实现。Pei 等^[27]组装了六个基于丙烯酸介电弹性体的弹簧辊致动器,作为步行机器人的六条腿,该机器人可以以高达 7cm/s 的速度行走。研究发现,在 1Hz 频率下,驱动位移为 10mm 时,就能实现机器人 20mm/s 的行走速度。Jung 等^[28]使用四个同心层的硅胶弹性体管,其中间电极和压缩弹簧位于中心,形成一个弹簧辊状致动器,随后将致动器用于机器人手指,模拟的人手指的弯曲大约在 15~30°范围。Zhang 等^[29]制作了一个基于卷状致动器的便携式力反馈手套原型,该装置重 38g,工作时产生的阻力高达 7.2N,最大位移为 5mm,最大纵向应变为 31%。由于力反馈装置与人体直接接触,因此由高工作电压引起的安全问题是进一步商业化的阻碍。

研究者们又利用图案化电极对一个自由度的弹簧辊致动器设计进行了修改,以进行选择性的刺激,从而实现多个自由度^[30]。二自由度的致动器是通过在介电弹性体的两侧以分段施加电极来制造的,叠加之后电极形成两个不同的部分^[31]。当其中一个段被激活时,该侧的介电弹性体受到麦克斯韦应力并延伸,由于不同的节段变形导致致动器弯曲。同样,如果电极分成四段图案,致动器将具有三个自由度。多自由度扩大了弹簧辊致动器的应用潜力。例如,通过用二自由度替代一自由度致动器,步行机器人就能在任何方向上移动。

为了增加能量密度,减小弹簧辊致动器的重量,研究者们将弹簧从芯部移除。此外,在没有弹簧的情况下,内层不会经受非常高的压缩力,因此内层的早期失效的机会减少。Kovacs 等^[32]提出了一种使用互穿聚合物网络的无核心轴卷轴致动器,其中互穿聚合物网络是指使用第二个弹性网络稳定预拉伸的介电弹性体,这种致动器是通过卷起互穿聚合物网络丙烯酸薄膜而无需芯或仅使用非常小的柔软弹性芯来组装的。如果没有笨重的弹簧,该致动器的横截面仅由活性弹性体层组成,并且加入互穿聚合物网络弹性体的总数是没有限制的。然而,实验中,IPN 丙烯酸卷材在 6kV 电压下的应变约为 10%,远小于弹簧卷轴致动器的最大应变(高达 35%)。Lau 等^[33]设计了一种无芯硅胶卷轴致动器,由碳纤维聚合物复合材料制成的外壳用于施加预拉伸并沿纵向放大行程。在此机构中,外壳的重量(总数的 24.3%)明显小于弹簧内芯(总数的 90%)。这种设计被成功地整合到机器昆虫的胸部机制中,模仿外骨骼肌肉组织,并驱

动一对翅膀。

弹簧辊和无芯卷轴致动器也存在一些缺陷。当卷绕时层间的预拉伸水平和厚度的不均匀,会导致内层的早期电击穿。为了解决这个问题,Hoffstadt 等^[34]提出了一种软聚合物卷轴致动器。该聚合物芯是柔软的,并且会随着来自介电弹性体外层的压力变大而变形,因此介电弹性体内层可避免承受更高的压力,但是聚合物芯的刚度和泊松比可能会影响致动器的致动性能。此外,弹簧辊和无芯卷轴致动器难以保持卷轴笔直,不易制作,特别是要施加均匀的预拉伸是困难的。丹佛斯公司目前已实现了工业卷绕制造过程的自动化。总之,介电弹性体卷轴致动器重量轻,结构紧固,功能强大,机械强度高,可用于各种应用。研究者们已经提出了许多基于介电弹性体卷轴致动器的设计原理,并且正继续朝着实际设计去努力。

2.9 充气式致动器

在对介电弹性体致动器的不断探索和研究中,最近有研究者设计了一种利用空气充气形成球形或半球形的致动器。在介电弹性体内外表面涂覆柔性电极,通过充气的方法使之预拉伸形成球形或半球形,所以称之为充气式介电弹性体致动器。在施加电压后,致动器在静电力的作用下沿径向膨胀,球壳壁变薄,如图 12 所示。

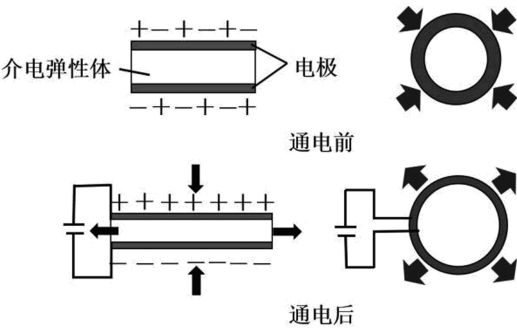


图 12 充气式球形致动器示意图
Figure 12 Schematic diagram of an inflatable spherical actuator

武峰^[35]设计了一种抛物面充气式可展开天线,在施加致动器结构的时候能有效提高反射面的动力性能。Hosoya 等^[36]是第一个制作近似球形的介电弹性体扬声器的,该扬声器由一个圆盘状的丙烯酸介电弹性体薄膜通过空气膨胀形成一个近似球体,使用时其表面积增加了 3033%。与其它结构形式制成的扬声器相比,这种球形结构可以在 0.5~16kHz 宽的高频范围内产生 0°~180°方位的声辐射模式,辐射范围增加了 1.5 倍。这种充气式的致动器能够用于一些特殊应用,但是也存在很大的限制,例如,在对介电弹性体进行预拉伸时,不能使薄膜均匀拉伸,且固定介电弹性体对它充气并使之不漏气是困难的,由于制作过程比其它类型的致动器困难,因此很少有研究充气式致动器。

3 结束语

介电弹性体致动器具有不同的结构设计,能够有效增强致动变形性能,在软机器人、触觉显示器、扬声器等微型领域有着广泛的应用。不同结构类型的致动器的致动机理都是相同的,但是它们在性能特征、制作方法和应用领域上存在限制。为了在不损失较大驱动应变的情况下,要保证致动器获得更长的寿命、更高的输出力和较低的驱动电压。此外,制作中需要刚性支撑件,由于它们体积大、刚性强,从而会导致整个致动器的笨重。目前用于介电弹性体的小型和软电子器件的需求量确实很大,设计和制造性能优良的致动器仍然是一个巨大的挑战,因此应进一步努力推动介电弹性体致动器的实际应用。

参考文献：

[1] Jung K M, Lee J H, Cho M S, Koo J C, Nam J D, Lee Y K, Choi H R. Smart Mater Struct, 2007, 16: 288~294.

[2] Wang N F, Cui C Y, Guo H, Chen B C, Zhang X M. Sci China Technol Sc, 2018, 10(61): 1512~1527.

[3] 钟林成, 王永泉, 陈花玲. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(10): 987~1004.

[4] Jia K, Lu T q, Wang T J. Sensor Actuat A-Phys, 2016, 239: 8~17.

[5] Ellison J C, Janes D W. J Polym Sci Pol Phys, 2017, 55(22): 1631~1632.

[6] Krishna B S. Highly anisotropic dielectric elastomer composites. North Carolina: North Carolina State University, 2013.

[7] Artemii G, Stephan R. Eur J Mech A-Solids, 2017, (65): 243~256.

[8] Zhao X, Suo Z. J Appl Phys, 2008, 104: 123530.

[9] Li M, Hashimoto Y. Sens Actuators A, 2015, 233: 246~258.

[10] Haines C S, Lima M D, Li N, Spinks G M, Foroughi J, Madden J D W, Kim S H, Fang S L, Andrade M J, Goktepe F. Science, 2014, 343(6173): 868~872.

[11] Madden J D W, Vandesteeg N A, Anquetil P A. IEEE J Oceanic Eng, 2004, 29(3): 706~728.

[12] Pelrine R, Kornbluh R, Joseph J, Chiba S. Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, 1997: 238~243.

[13] Eckerle J, Stanford S, Marlow J, Schmidt R, Oh S, Low T, Shastri S V. Soft Robot, 2015: 269~280.

[14] Plante J S, Dubowsky S. Smart Structures and Materials 2006 Conference, 2006, 11.

[15] Zhang H Y, Wang M Y, Zhu J. Smart Mater Struct, 2016, 25(3): 025010.

[16] Bolzmacher C, Hafez M, Benali K M, Bernardoni P, Dubowsky S. ACS Macro Lett, 2014,23: 281~289.

[17] Conn A T, Pearson M J, Pipe A G, Welsby J, Rossiter J, Conference on Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), 2012, 10: 8340.

[18] Wang H, Zhu Y, Zhao D, Luan Y. Chin J Mech Eng-En, 2011, 24: 685.

[19] Bonwit N, Heim J, Rosenthal M, Duncheon C, Beavers A. Smart Mater Struct, 2006 Conference, 2006, 10.

[20] Kaal W, Herold S. Smart Mater Struct, 2013, 22: 104016.

[21] Chuc N H, Park J K, Thuy D V, Kim H S, Koo J C, Lee Y, Nam J D, Choi H R. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007: 771~776.

[22] Matysek M, Lotz P, Schlaak H F. Int J Polym Sci, 2018, 9: 72871~72875.

[23] Carpi F, Migliore A, Serra G, Rossi D D. Smart Mater Struct, 2005,14: 1210.

[24] Carpi F, Rossi D D. Smart Mater Struct, 2016, 6: 6168~6171.

[25] Carpi F, Rossi D D. Bioinspir Biomim, 2017, 2: S50.

[26] Pei Q, Pelrine R, Rosenthal M A, Stanford S, Prahlad H, Kornbluh R D. J Appl Polym Sci, 2004: 41~50.

[27] Pei Q, Pelrine R, Stanford S, Kornbluh R D, Rosenthal M S, Meijer K, Full R J. Polym Advan Thchnol, 2002: 246~253.

[28] Jung M Y, Chuc N H, Kim J W, Koo I M, Jung K M, Lee Y K, Nam J D, Choi H R, Koo J C. Chin J Polym Sci, 2016, 7: 61682~61684.

[29] Zhang R, Lochmattera P, Kunz A, Kovacs G. Smart Mater Struct, 2006: 1681~1688.

[30] Pei Q, Rosenthal M A, Pelrine R, Stanford S, Kornbluh R D, J Polym Sci Pol Phys, 2013: 281~290.

[31] Pei Q, Rosenthal M, Stanford S, Prahlad H, Pelrine R. Smart Mater Struct, 2014,13: 86.

[32] Kovacs G, Ha S M, Michel S, Pelrine R, Pei Q. Conference on Electroactive Polymer Actuators and Devices, 2018, 15.

[33] Lau G K, Lim H T, Teo J Y, Chin Y W. Smart Mater Struct, 2014, 23: 25021.

[34] Hoffstadt T, Graf C, Maas J. International Conference on Electroactive Polymer Actuators and Devices, 2013: 12.

[35] 武峰. 介电弹性体对充气式天线反射面受温度荷载后的形貌控制. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

[36] Hosoya N. Appl Acoust, 2019, 148: 238~245.

Structure Design and Application of Dielectric Elastomer Actuator

PENG Dong-xue, LIU Qian*

(School of Textiles and Fashion, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: As a new type of electroactive polymer, dielectric elastomer can be deformed when excited by an electric field, and can be restored to its original state when the electric field is cancelled. It has the characteristic of converting electrical energy directly into mechanical energy. By designing them as actuators with different configurations, it is possible to increase the deformability and meet different application requirements. In this paper, the actuation mechanism of dielectric elastomer actuators is introduced, and it is clarified that they are linear actuators capable of generating motion in a straight line manner. On this basis, actuators of different configurations can be designed. Dielectric elastomer actuators with different structure designs are summarized, and their performance characteristics, processing technology and potential applications are discussed.

Key words: Dielectric elastomer; Actuator; Structural design; Electro-deformation