

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.01.005

薄片式软体爬行机器人

张彬¹, 刘学婧¹, 苏倩¹, 陈琛¹, 黄修军¹, 王思清¹, 邢宇^{1,2*}

(西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710600;
2. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710000)

摘要:为了提高软体爬行机器人狭缝通过能力,课题组设计了一种薄片式软体爬行机器人。利用介电弹性体材料较高的能量密度、极快的响应速度、较低的制作成本及良好的变形能力使其作为驱动器,安装在驱动器两侧的压缩弹簧作为储能器,使驱动器能够输出推力的同时保持其轻薄的特性;并采用单向摩擦片作为机器人足部来推动机器人前进。实验测试的机器人长为100 mm,宽为65 mm,高为15 mm,质量为34.7 g,通过控制变量法分析了不同电压幅值、不同频率和不同剪切条数量对机器人爬行速度的影响,选取合适的信号输入。结果表明:试验机器人的最快爬行速度达到46.6 mm/s,最大载质量为60 g,最大爬行坡度为15°;该机器人能够在高度仅为17 mm的缝隙内爬行,运动性能良好。

关键词:爬行机器人;薄片式软体机器人;介电弹性体;柔性驱动器;单向摩擦片

中图分类号:TP242;TH145.4 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)01-0030-06

Thin-Sheet Soft Crawling Robot

ZHANG Bin¹, LIU Xuejing¹, SU Qian¹, CHEN Chen¹,
HUANG Xiujun¹, WANG Siqing¹, XING Yu^{1,2*}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China;

2. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to improve the slits passing ability of soft crawling robot, a thin-sheet soft crawling robot was designed. Using the dielectric elastomer materials with characteristics of high energy density, extremely fast response speed, low production cost and good deformability as the drive, the compression springs installed on both sides of the drive were used as energy storage, so that the thin and light characteristics of the drive can be maintained when outputting thrust. The unidirectional friction plate was used as the foot of the robot to propel the robot forward. The robot tested in the experiment has a length of 100 mm, a width of 65 mm, a height of 15 mm and a mass of 34.7 g. Through the control variable method, the influence of different voltage amplitude, different frequency and different number of hard fiber strips on the crawling speed of the robot was analyzed, and the appropriate signal input was selected. The results show that the maximum crawling speed of the robot is 46.6 mm/s, the maximum load is 60 g, and the maximum crawling slope is 15°. The designed robot can crawl in a slot of only 17 mm and have a good motor function.

Keywords: crawling robot; thin-sheet soft robot; dielectric elastomer; soft actuators; unidirectional friction plate

机器人的设计及优化一直以来是世界各国学者研究的重要领域之一,也是现代国民工业生产中实现全面自动化的助力因素。我们日常见到的多是刚性机器人,大多有着复杂的结构、较高的能耗及较差的适应

收稿日期:2022-07-24;修回日期:2022-11-14

基金项目:中国博士后科学基金(2020M683682XB);机械制造系统工程国家重点实验室开放课题(sklms2021014);特种车辆及其传动系统智能制造国家重点实验室开放课题(GZ2019KF011);陕西省高速公路施工机械重点实验室项目(300102251506);陕西省教育厅科研计划项目(22JK0404)。

第一作者简介:张彬(1997),男,河北衡水人,硕士研究生,主要研究方向为柔性材料及柔性驱动器。**通信作者:**邢宇(1985),男,陕西西安人,博士,讲师,主要研究方向为柔性材料数值模拟和机构动静力学仿真。E-mail:reevesxing@163.com

性。为弥补刚性机器人的不足提出了软体机器人的概念。软体机器人作为一类新型机器人,具有结构柔软度高、环境适应性好、亲和性强和功能多样等特点,它由完全软材料或部分软材料加工而成,自身可连续变形,与刚性机器人相比具有更高的柔顺性、安全性和适应性。其在复杂易碎品抓持和狭小空间作业等方面具有不可比拟的优势^[1],能够适应各种非结构化环境,与人类的交互也更安全^[2]。

其中仿生软体机器人通过模仿自然界生物的结构、动作,具有较强的环境适应性,在侦查、救援、检修和医疗等领域具有重要应用^[3];各种软体机器人功能和作用不同,一些软体机器人模仿自然生物的运动姿态能实现身体的高曲率弯曲和扭转,展现出对外界环境的适应性^[4-5]。例如:通过介质弹性体人造肌肉产生软体机器人身体的快速周期性变形,结合静电吸附足,可使软体机器人能够粘附在墙上的软壁攀爬机器人^[6];通过电磁驱动的一种可重构的软壁爬壁机器人^[7];以壁虎为启发的能够爬倾斜的平坦表面的软体

机器人等^[8]。

课题组设计了一种采用介电弹性体智能材料(dielectric elastomer,简称 DE)驱动的薄片式蠕动爬行机器人。薄片式爬行机器人可以在高度仅为 17 mm 的狭小缝隙中进行爬行,并携带微型摄像头进行探索,或携带超声波等探伤工具进行特殊工况的探伤(如进行管道探测或对于有较长缝隙的复杂零件进行深入探测或探伤)。课题组通过实验讨论电压频率、电压幅值及剪切条数量对机器人爬行速度的影响,得到了其最大爬行速度、最高承载能力和最大爬坡角度等主要技术参数。

1 软体爬行机器人的结构与原理

基于介电弹性体薄膜纯剪切形式下在外加电场的激励下能产生较大变形的特性,并利用弹簧进行储能,设计了一种薄片式蠕动爬行机器人,结构如图 1 所示。该软体机器人主要由 1 个 DE 驱动器和 2 个单向摩擦片组成。其中 DE 驱动器作为变形主体,单向摩擦片作为机器人的足部。

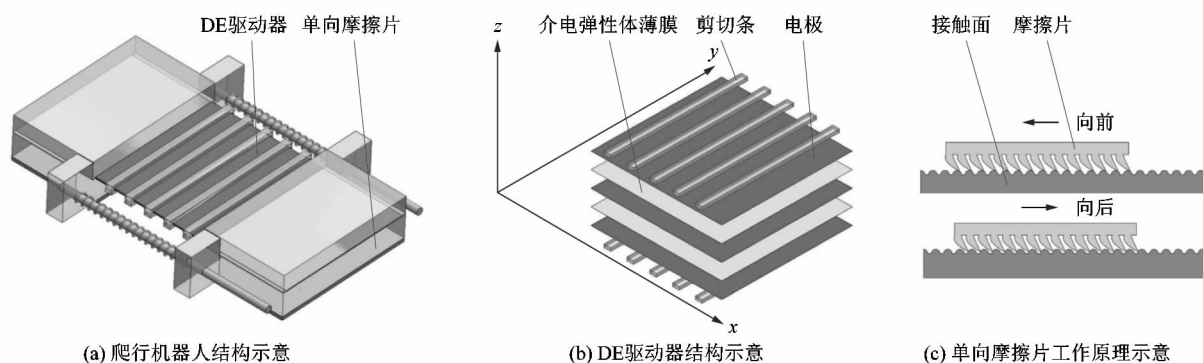


图 1 软体爬行机器人的结构与原理

Figure 1 Structure and principle of soft crawling robot

图 1 中 DE 驱动器由电极、DE 薄膜和多个剪切条组成。此处 DE 薄膜采用 3M 公司的 VHB4910 胶带,为提升 DE 薄膜的稳定性对其进行了等双轴 4 倍拉伸,为了提升其输出力且不增加驱动电压,采用了 2 片薄膜 3 片电极呈三明治结构进行叠层贴附。原则上,当 DE 薄膜的拉伸状态远小于极限拉伸时,通过束缚住 y 轴方向上的预拉伸,会使得 x 轴方向的驱动应变越大^[9-10],故采用多个剪切条平行等距地贴附于驱动器上、下表面,使得薄膜在 y 轴方向长度与剪切条长度

保持一致,束缚住已在 y 轴方向预拉伸过的薄膜,以得到较大的 x 轴方向的应变。经预拉伸过薄膜放松后,只能延 x 轴方向收缩,随着在 DE 驱动器上施加交变的电压,在弹簧及 DE 薄膜电学特性的作用下,驱动器延 x 轴方向进行伸缩运动。

具体制作方法如下:首先在拉伸装置上对 DE 薄膜进行拉伸,初始膜尺寸为边长为 80 mm 的正方形,拉伸后为边长为 320 mm 的正方形。其次采用刚性框架贴于膜上、下表面用来限制住膜的拉伸,并将框架和

框架内的薄膜从整张薄膜中裁剪下来,接着对框架内的薄膜进行电极的贴附并引出导线,按照 2 片薄膜 3 片电极呈三明治结构进行叠层贴附,并在此驱动器上下表面使用硅橡胶粘结剂贴附剪切条,用以约束住 y 轴方向的预拉伸,如图 1 所示,形成 DE 驱动器作为爬行机器人的主体。将 DE 驱动器安装在准备好的外壳上,并在两侧安装压缩弹簧,整体从刚性框架上取出。

由于 DE 驱动器的变形,使得双脚和基底之间产生了相同的摩擦,导致双脚对称运动,无法推动机器人前进。这里我们采用单向摩擦片(前进摩擦小,后退摩擦大)附着在机器人外壳底部作为其足的方式。

由于薄膜柔软的特性只能输出拉力,故在两侧引入弹簧,使弹簧处于压缩状态,弹簧的弹力与薄膜的弹力达到平衡。在加电的状态下薄膜竖直方向伸长释放弹簧储存的弹力,使得机构可以输出一个向前的推力,断电后薄膜靠自身的弹性回缩,此时产生一个拉力。在周期性电压激励下爬行机器人整体表现为伸缩运动。在通电时爬行机器人整体伸展时,前脚向前阻力小,使前脚向前;在断电时爬行机器人整体收缩后脚向前阻力小,使后脚向前完成一个爬行循环。

2 爬行机器人性能测试实验

因为不同的参数设置对机器人的爬行速度有很大影响,通过实验的方式进行了具体的分析。施加的电压由台式电源(Trek 10/10B-HS)提供,脉冲持续时间由波形发生器(Agilent 33220A)输入^[11];实验测试使用的压缩弹簧为线径 0.3 mm,外径 4 mm 的碳钢弹簧;摩擦片采用涤纶丝布片;外壳及剪切条均采用亚克力板切割而成;DE 膜厚度为 1 mm;电极是导电聚合物胶带,型号 EL8006。

实际采用的弹簧原长为 50 mm,压缩后的长度为 35 mm;摩擦片的尺寸为 40 mm × 25 mm;电极选用导电聚合物胶带(型号 EL8006),电极尺寸即有效驱动区域为 40 mm × 40 mm;剪切条的长、宽、高分别为 42, 2 和 1 mm;所组装的机器人整体尺寸为 100 mm × 65 mm × 15 mm;质量为 34.7 g,如图 2 所示。机器人爬行时足部的接触表面为离型纸粗糙面。

2.1 不同频率的电压信号对爬行速度的影响

采用不同频率的电压进行驱动会导致 DE 驱动器

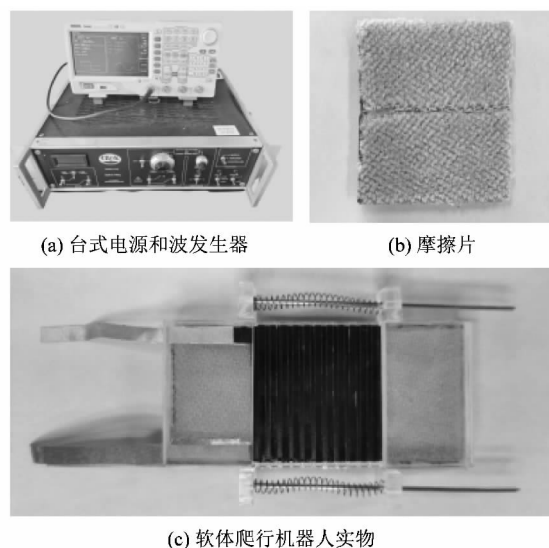


图 2 设备和实物

Figure 2 Equipment and physical objects

伸缩速率的变化,从而影响爬行机器人的运动速度。在加载交变电压下,较低频率时 DE 驱动器有着较大的变形,较高频率时 DE 驱动器由于快速充、放电会产生高频的震动,在此,测试采用的是幅值为 5 000 V 的正弦波,频率范围为 0.1 ~ 25.0 Hz,如图 3 所示。

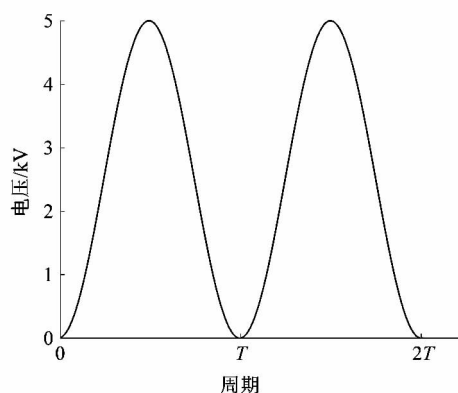


图 3 正弦波信号

Figure 3 Sine wave

剪切条数量为 3, 7 和 11 时软体爬行机器人在不同频率下速度的变化趋势如图 4 所示。从图中可知不同数量剪切条在不同频率时机器人的速度变化展现出一致性。爬行机器人的速度随频率的增加而增大,在频率达到 12.5 Hz 后速度趋于平稳。3 条速度曲线相比较,剪切条数量为 7 的爬行机器人的速度最优,在电压幅值 5 000 V、频率 25 Hz 的正弦波的驱动下最快速

度可达 4 mm/s。

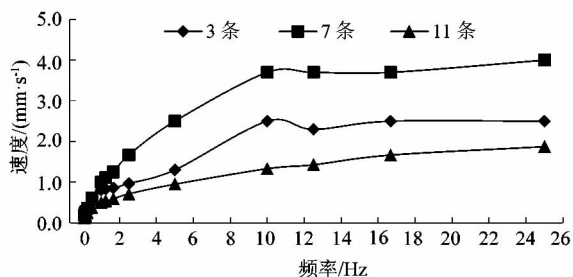


图4 软体爬行机器人在不同频率下的爬行速度

Figure 4 Crawling velocity of soft robot at different frequencies

在较低的频率下,DE 驱动器可以充分进行充电和放电,使得一个周期内 DE 驱动器的形变量较大,此时软体机器人的爬行主要靠驱动器的伸缩运动。而在较高的频率下,DE 驱动器已不能充分地进行充电和放电,一个周期内形变量较小但单位时间往复运动次数多,此时软体机器人的爬行除了 DE 驱动器的伸缩运动外还有 DE 驱动器震动的作用辅助前行。

由于所提出爬行机器人是靠单项摩擦片作为机器人的足部,故其运动速度和频率关系较大,频率越高其主体伸缩越快,反映到运动上就是爬行越快。当频率到达一定值后由于主体 DE 驱动器无法充分充、放电使其爬行速度达到一定阈值。继续增加频率会导致震动过大影响爬行机器人运动的稳定性。

2.2 不同数量的剪切条对爬行速度的影响

剪切条起着维持 DE 膜水平预拉伸的作用,剪切条数量太少不足以完全约束住 DE 膜的水平预拉伸,数量太多则会减少 DE 薄膜有效驱动面积。

测试时采用 5 000 V 的正弦波,机器人采用剪切条数量分别为 1,3,5,7,9,11 和 13,测试结果如图 5 所示。从图 5 可知频率为 0.1 Hz 时,剪切条数量的变化对速度的影响不大;在频率为 1.0,5.0 和 25.0 Hz 时随着剪切条数量的增加,机器人的运动速度呈现先增加后下降的趋势;在剪切条数相同时,随着频率的增加,机器人的运动速度随之增加;在不同频率时,剪切条数量为 7 和 9 的爬行机器人性能较好,有着较快的运动速度。

2.3 不同的电压幅值对爬行速度的影响

电压幅值的大小与 DE 驱动器的位移量有关,较

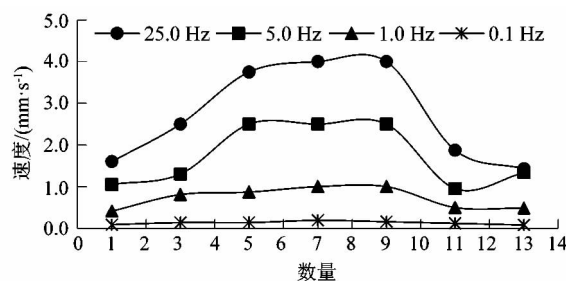


图5 不同剪切条的数量与软体机器人爬行速度的关系

Figure 5 Relationship between number of different acrylic thin strips and crawling speed of soft robots

高的电压幅值可以使驱动器产生更大的变形。根据上述测试选择 7 个剪切条的爬行机器人作为测试样品,驱动信号采用 25 Hz 正弦波。

如图 6 所示,软体机器人的爬行速度随电压幅值的升高而增加,在 6.0 ~ 7.5 kV 段曲线上升加快,说明运动速度提高,在 7.5 kV 时软体机器人的爬行速度可达 46.6 mm/s。

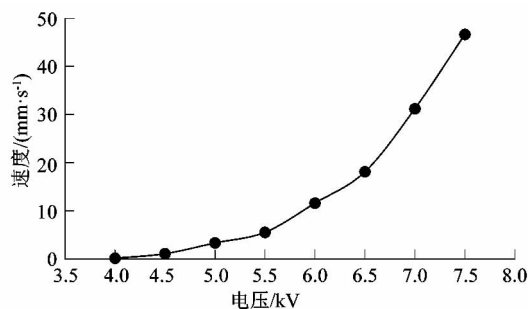


图6 不同电压幅值下软机器人的运动速度

Figure 6 Movement speed of soft robot under different voltage amplitudes

测试过程中发现,电压低于 4 000 V 时,DE 驱动器变形较小,不足以驱动软体机器人的爬行运动(电压幅值太小使驱动器变形较小,不足以克服向前的摩擦力);电压高于 7 500 V 时会导致软体机器人运动不平稳。

2.4 爬行机器人的负载能力和爬坡能力

在提升机器人的爬坡能力和负载能力方面,根据上述实验数据可知使用较高的电压幅值和较低的频率驱动效果更好。较高的电压幅值可以驱动 DE 执行器产生更大的变形,释放更大的弹簧力以产生更大的驱

动力。低频信号驱动可以有效避免振动,使执行器完全伸缩变形,从而产生更大的驱动力。试验采用电压为 7 500 V,频率为 1 Hz 的正弦波,对剪切条数量为 7 的爬行机器人进行了测试。最大载荷为 60 g、以 4.44 mm/s 的速度在平面爬行的测试如图 7 所示;在 15°坡面以 5 mm/s 的速度空载爬行的测试如图 8 所示;机器人表现出良好的承载能力和爬坡能力。爬行机器人的运动过程如图 9 所示。

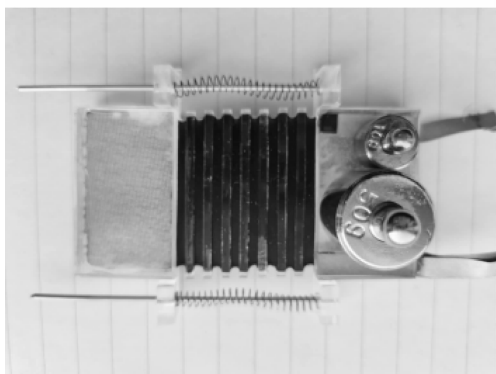


图 7 软机器人负载测试

Figure 7 Load test of soft robot

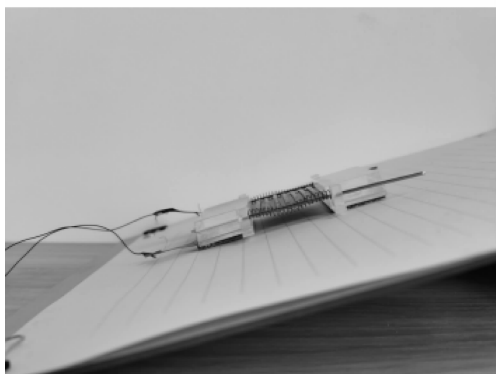


图 8 攀爬能力测试

Figure 8 Climbing ability testing

3 结论

课题组设计了一种基于介电弹性体智能材料驱动的薄片式软体爬行机器人,可以在高度仅为 17 mm 的狭小缝隙中进行爬行,文中介绍了软体爬行机器人的结构设计及工作原理,并以实验的方式测试了各个变量对软体爬行机器人性能的影响。

实验所得的数据表明:在提升机器人爬行速度方面,可通过选取更高频率的加载电压、更高的电压幅值

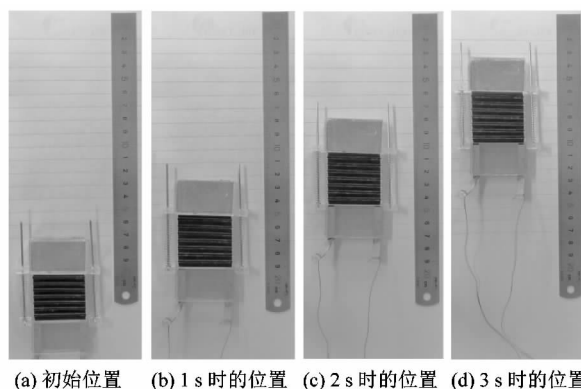


图 9 爬行机器人的运动过程

Figure 9 Movement process of crawling robot

以及合适数量的剪切条个数的方式来实现;在提升爬坡能力和负载能力方面,可通过降低电压频率和提升电压幅值来实现。总体而言,所提出的软体爬行机器人的运动与蠕虫的爬行运动相似,速度较为灵活,能够根据输入的电压波形来实现无级变速爬行,根据需求以不同的平稳速度进行爬行,针对需要快速移动的场合其最高速度可以达到 46.6 mm/s。针对有一定坡度的路况或需要负载的场合其能够做到在 15°的坡道上行进及能够承载 60 g 的质量稳定爬行。与同等体积下的同类软体机器人相比性能优异,足以负载起市面上常见的微型摄像头及探伤探头等工具,而且它的高度尺寸小,可以通过 17 mm 的狭窄缝隙,在一些过于狭小的空间等人工无法直接作业的环境,进行探测或探伤。

该研究结果局限于 2 层 DE 膜制成的爬行机器人,通过改变 DE 膜层数和弹簧刚度可以获得更快的爬行速度及更高承载能力的软体爬行机器人。

参考文献:

- [1] 梁威,唐术峰. 软体仿尺蠖机器人综述与研制[J]. 机械设计与研究, 2020, 36(5): 29-32.
- [2] ZHANG B Y, FAN Y W, YANG P H, et al. Worm-like soft robot for complicated tubular environments [J]. Soft Robotics, 2019, 6(3): 399-413.
- [3] 胡俊峰,林茂虎,王文慧. 微型仿尺蠖软体机器人的设计与实验[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(8): 106-109.
- [4] SHEPHERD R F, ILIEVSKI F, CHOI W, et al. Multigait soft robot [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(51): 20400-20403.

(下转第 41 页)