

基于织物/折纸复合材料的仿蠕虫管道软体机器人

蒋程, 裴泽光

(东华大学机械工程学院, 上海 201620)

摘要: 介绍了一种基于织物/折纸复合材料的仿蠕虫管道软体机器人的设计过程与性能测试, 其中 PVC 涂塑尼龙机织物与折纸结构分别用作机器人的皮肤和骨骼。机器人两端设有 Kresling 结构的锚定器, 锚定器表面附着有用于加强锚定作用的硅胶块; 机器人中段采用类似风箱结构的主体段连接, 以此实现其蠕动前进。研究了机器人的水平单向运动性能、水平双向运动性能、竖直爬行运动性能、拖拽重物性能、排障性能和耐变形性能。结果显示: 该机器人具有成本低、制备简单、自由度无限、可模块化设计等优点, 在管道检测与排障方面具有良好的应用潜力。

关键词: 织物; 软体机器人; 复合材料; 管道检测; 水平运动; 竖直运动; 结构

中图分类号: TS106.6

文献标志码: B

文章编号: 1001-2044(2021)06-0058-04

An in-pipe worm-like soft robot based on origami paper-fabric composites

JIANG Cheng, PEI Zeguang

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: An in-pipe worm-like soft robot with pneumatic actuators based on origami paper-fabric composites is introduced, in which fabric and paper are used as the robot's skin and skeleton, respectively. The two ends of the robot are anchors of Kresling pattern, while their surfaces are attached with silicone layers to enhance the anchoring. The middle section is assembled with an extensor of a bellow-like structure for implementing peristaltic locomotion. The unidirectional motion, bidirectional motion, vertical crawling motion, weight-dragging, obstacle removal and deformation resistance of the worm robot are experimentally tested. Experiments show that the robot has good application potential in pipeline detection due to its advantages of low cost, simple preparation, unlimited freedom and modular design.

Key words: origami; soft robot; composite material; pipe detection; horizontal motion; vertical motion; structure

油、汽、生活用水、工业用水的传输都离不开管道运输, 然而管道的检测一直都是难题。常见的管道检测机器人为刚性结构^[1-3], 具有负载能力与可靠性高、运动速度快、精度高等优点, 但也有着诸如控制复杂、环境适应能力差等缺点。因此, 软体机器人^[4-6]应运而生, 其所特有的软体结构使其能够进入形状复杂或尺寸狭小的空间, 很好地弥补了刚性机器人的不足。织物具有轻质、柔软、耐磨、无毒害、成本低等优点, 是制作软体机器人皮肤的优异材料。为此, 本文设计了一种基于织物/折纸^[7-8]复合材料的仿蠕虫管道软体机器人, 并测试其各项运动性能, 研究结果可为开发基于织物的软体机器人提供参考。

1 软体机器人的设计与制备

仿蠕虫管道软体机器人实物图见图 1。图中, 背景方格边长为 10 mm。

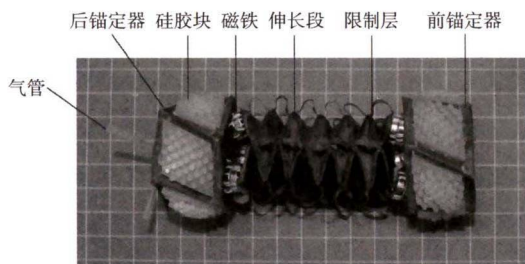


图 1 仿蠕虫管道软体机器人实物图

如图 1 所示, 仿蠕虫管道软体机器人由 3 个模块组成, 两端是提供锚定功能的锚定器, 中间是用于收缩和伸长的主体段。锚定器和主体段的制备都基于一种织物/折纸复合材料。织物为 PVC 涂塑尼龙机织物。将纸张与织物的 PVC 涂层用胶水粘贴在一起, 形成一种具有气密性能的柔性材料。折纸结构为软体机器人提供结构支撑和伸缩特性, 织物用于在机器人内部形成密闭的气腔。

将复合材料按照 Kresling 图案折出锚定器的侧面, 其两端用 PVC 涂塑尼龙机织物密封处理, 再在其各个侧面粘贴带有阶梯状硅胶刺的硅胶块, 制成锚定器。主体段的制备方式与锚定器类似, 将织物/折纸复合材料折叠成手风琴结构, 再在两端用 PVC 涂塑尼龙机织物密封处理。在主体段每个棱边添加限制层, 防

收稿日期: 2020-09-16

基金项目: 上海市自然科学基金(探索类)项目(18ZR1402200); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2232019G-05)

作者简介: 蒋程(1996—), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为织物基软体机器人技术。

通信作者: 裴泽光。E-mail: zgpei@dhu.edu.cn。

止其过分膨胀而导致不能按照折叠结构收缩。

为了满足机器人的不同工作需求,对其进行了模块化设计,并在相邻两个模块的端面粘贴了磁极相反的磁铁,以实现各模块的连接。采用硅胶气管连接气源和电磁阀,使每个气腔都有一条独立的气动通道。

2 软体机器人的运动原理

软体机器人在一个周期内不同阶段的运动状态示意图见图2。

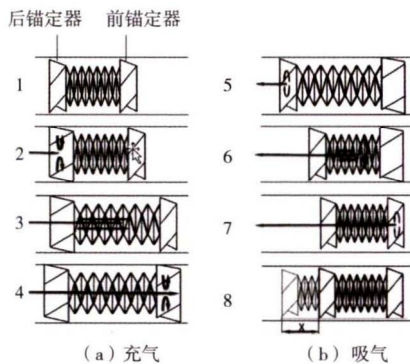


图2 软体机器人在一个周期内不同阶段的运动状态示意图

如图2所示,对锚定器充气使其膨胀产生锚定,对其吸气使其收缩而取消锚定,通过对主体段进行充、吸气实现其伸长和收缩。对各模块按照既定程序进行充、吸气来实现仿蠕虫管道软体机器人相应的状态切换,实现其在管道内前进运动。

3 软体机器人的性能测试

为满足仿蠕虫管道软体机器人的不同工作需求,本文进行了以下性能测试。测试中对3个模块的充、吸气压强分别设为40 kPa和-60 kPa。

3.1 水平单向运动性能

在水平放置的管道中,仿蠕虫管道软体机器人两端在5个运动周期内的位移变化图见图3。前端为前锚定器的前端面,后端为后锚定器的后端面。在每个运动周期内,前、后锚定器的充、吸气时间均为2 s,主体段的充、吸气时间分别为3 s和4 s。

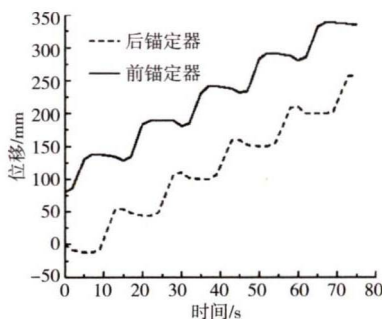


图3 软体机器人的水平单向运动位移

由图3可见,机器人两端的位移均呈逐步增大的趋势,且后锚定器相对前锚定器存在7 s的滞后。可以发现,机器人的两端在运动周期内均存在负位移现象。这是因为两个锚定器的收缩和伸长均是双向运动,因此前锚定器的收缩动作和后锚定器的伸长动作会分别导致前端和后端的负位移。类似地,前锚定器的伸长动作和后锚定器的收缩动作也会分别使前端和后端产生轻微的正位移。前、后锚定器在每个运动周期内的位移范围分别为48~54 mm和47~56 mm。前、后锚定器在5个运动周期内的位移差最大为7 mm、最小为1 mm。前、后锚定器的总位移分别为255 mm和257 mm,两者的平均速度分别为3.4 mm/s和3.43 mm/s,数值基本一致。

3.2 水平双向运动性能

在水平放置的管道中双向运动时,机器人两端在6个运动周期内的位移变化图见图4。其中正方向3个运动周期、负方向3个运动周期。在每个运动周期内,前、后锚定器的充、吸气时间均为2 s,主体段的充、吸气时间分别为3 s和4 s。

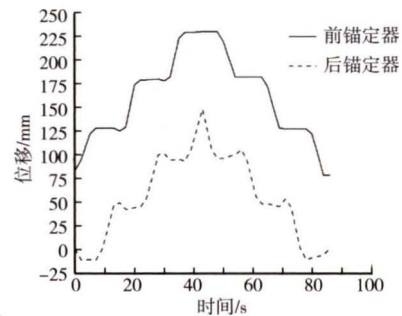


图4 软体机器人的水平双向运动位移

由图4可见,前、后端的位移均为先增大后减小,且基本对称。可以发现,与单向运动情况不同的是,前后端的位移在双向运动中除了有滞后现象外(滞后时间为7 s),转向阶段的位移变化也存在区别。这是因为,出于转向的需求,第3个运动周期内主体段在完成收缩后,不再执行第3个运动周期的最后一步即前锚定器的收缩动作,以及第4个运动周期的第一步即后锚定器的锚定动作,而是直接进行主体段的反向伸长动作。在转向过程中,后锚定器(转向变为前锚定器,下同)的位移因为主体段收缩后立即伸长而发生突变,而前锚定器(转向变为后锚定器,下同)的位移仅因为主体段的动作而发生略微的变化,基本保持不动。前锚定器端面和后锚定器端面在6个运动周期的双向运动的总位移为+1 mm和-5 mm,基本均回到

起始点。前锚定器端面的正向速度和反向速度分别为 3.42 mm/s 和 3.53 mm/s。后锚定器端面的正向速度和反向速度分别为 3.44 mm/s 和 3.53 mm/s。前、后锚定器端面的正、反向速度基本保持一致。

3.3 竖直运动性能

在竖直放置的管道中运动时,软体机器人两端在 5 个运动周期内的位移变化图见图 5。由于需要额外的锚定力来抵消机器人自身的重力,使其不向下滑落,所以需延长两个锚定器的充气时间。前、后锚定器的充气时间分别为 4 s 和 5 s,吸气时间分别为 3 s 和 4 s。主体段的充、吸气时间分别为 3 s 和 3.5 s。

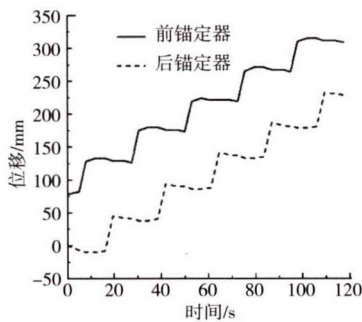


图5 软体机器人的竖直运动位移

从图 5 可以看出,两端的位移均逐步增大,且两者存在 11.5 s 的时间滞后。与水平运动不同的是,为保证机器人不从管道中滑落,需要保证在竖直爬行的每个时刻都至少有一个锚定器处于锚定状态。因此,竖直爬行的运动状态具体为:在 5 个运动周期开始之前,后锚定器需先进行充气以对整个机器人进行锚定,随后第 1 个运动周期开始;在运动周期中,主体段先充气伸长,推动前锚定器向上运动;随后,前锚定器充气锚定;继而,后锚定器吸气收缩取消锚定;主体段收缩,带动后锚定器向上运动;紧接着,后锚定器充气锚定;最后,前锚定器吸气取消锚定;如此循环 5 个运动周期。可以发现,在一个锚定器要取消锚定之前,必须先将另一个锚定器充气锚定住机器人。从图 5 也可以看出,机器人两端都会在另一个锚定器取消锚定时有轻微的负位移现象,原因在于取消某个锚定器时,会从两个锚定器锚定变为一个锚定器锚定,这势必会使得机器人在自身重力的作用下向下轻微滑落。前、后端在 5 个运动周期内的总位移分别为 236 mm 和 227 mm。与水平单向运动相比,两者的总位移都有少许减少。主要原因在于,在竖直爬行时,无论是主体段伸长时推动前锚定器向上运动还是主体段收缩时带动后锚定器向上运动,驱动力都要抵消锚定器的重力,使得主体段的

伸长量和收缩量减少。除此之外,锚定器每次取消锚定导致机器人有些许滑落也会使总位移减小。前、后端在 5 个运动周期的平均速度分别为 2.1 mm/s 和 2.02 mm/s,与水平单向运动相比,两者的平均速度有较大的下降。除了以上原因,锚定器需要比水平运动时具有更多的充、吸气时间也是重要原因。

3.4 重物拖拽性能

管道机器人经常有拖拽物资或设备的需求。为此,本文测量了在水平管道中仿蠕虫软体机器人后锚定器上挂有不同质量的砝码时,后端在 5 个运动周期内的总位移,在此基础上求得平均速度。在试验中,前、后锚定器的充、吸气时间均为 3 s,主体段的充、吸气时间分别为 3 s 和 2 s。试验结果见图 6。

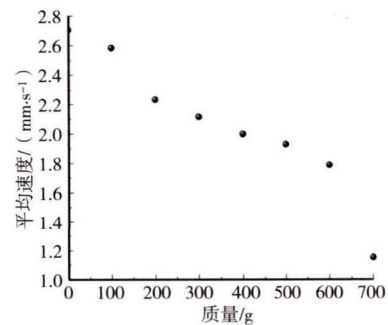


图6 软体机器人作水平运动时拖拽重物的平均速度

如图 6 所示,随着重物质量的增大,后端的平均速度也随之降低。当重物质量为 100 g 时,在个别周期内,主体段收缩时因需要带动重物一起向前而出现未完全收缩的现象。当重物质量为 200 g 时,该现象普遍出现在每个运动周期内,且随着重物质量的增大,主体段的收缩量越来越小。当重物质量达到 700 g 时,主体段很难再产生收缩,后端的平均速度骤降为 1.15 mm/s,仅为无负重时的 42.5%。尽管机器人在拖拽重物时的速度大幅降低,但其在自身质量只有 50 g 的情况下在拖拽 14 倍于自身质量的重物时平均运动速度仍然能达到 1.15 mm/s,这体现了软体机器人具有较强的重物拖拽能力。

4 软体机器人环境适应能力测试

4.1 排障性能

管道机器人在应用时经常会遇到前方有障碍物的情况,因此排除障碍也是一项极为重要的性能。本文测试了机器人在水平管道中,在前锚定器前放置不同质量的砝码时,后端在 5 个运动周期内的总位移,再求得平均速度,见图 7。试验中 3 个模块的充、吸气时间

与3.4节中所述一致。

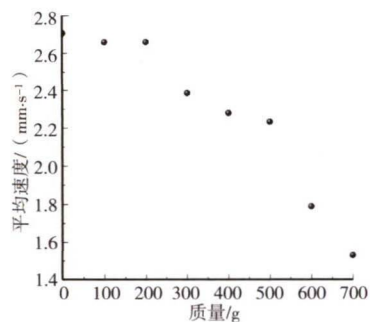
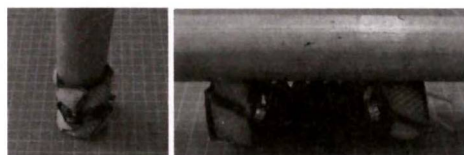


图7 软体机器人在水平运动时排除障碍的平均速度

如图7所示,当重物的质量分别为100 g和200 g时,速度并没有显著降低。当重物质量达到300 g时,个别运动周期中主体段伸长时,后锚定器存在些许后退现象,且随着重物质量增大,这种现象出现频率增高,同时伴随着主体段伸长量减小的情况。当重物质量达到600 g时,每个运动周期后锚定器都有很大幅度的后退。当重物质量进一步增加到700 g时,每个运动周期仅有少量推进量,平均速度为1.53 mm/s,仅为无障碍时平均速度的56.5%。但依然显示出软体机器人具有良好的排除障碍能力。

4.2 耐变形性能

管道作业的环境错综复杂,管道机器人经常会遭到一些障碍物的挤压。因此,本文对软体机器人的耐变形性能进行测试,见图8。



(a) 轴向变形 (b) 径向变形

图8 软体机器人的耐变形能力

图8(a)中将长度250 mm、直径35 mm的铝棒轴向放置在蠕虫机器人的端面,3个模块在铝棒的作用下收缩,其结构并未被破坏,且铝棒撤出后,蠕虫机器人仍然能完成作业。图8(b)中将同样的铝棒径向放

置在机器人上,两个锚定器有些许变形,主体段在其手风琴折纸结构的支撑下并没有变形,且铝棒撤出后,机器人仍然能完成作业。以上试验结果说明软体机器人具有较好的耐变形能力。

5 结语

本文设计了一种基于织物/折纸复合材料的仿蠕虫管道软体机器人。相比于常见的硅胶材料制成的软体机器人,织物皮肤的应用使得机器人获得更轻的质量、更高的伸长率、更可靠的伸缩和更快的响应速度。此外,随着智能纺织品的发展,织物皮肤也为后续在机器人表面添加柔性织物传感器提供了可能。机器人由3部分组成,两端是基于Kresling图案的锚定器,中间部分是类似风箱结构的主体段。试验结果表明,该软体机器人不论是在水平方向还是在竖直方向,均能以稳定的速度运动。此外,软体机器人在拖拽重物、排障能力及耐变形方面也展现出良好的性能。这表明仿蠕虫管道软体机器人在管道检测与排障方面有着良好的应用潜力。



参考文献:

- [1] 单彦霞,付冰双,李若松,等. 基于并联机构的双重驱动管道机器人设计与研究[J]. 机械设计,2020,37(6):17-23.
- [2] 刘清友,李雨佳,任涛,等. 主动螺旋驱动式管道机器人[J]. 机器人,2014,36(6):711-718.
- [3] 朱光召. 城市排水管道检测机器人研究与开发[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2017.
- [4] 董红兵. 一种充气式软体全向弯曲模块关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [5] 胡兵兵,金国庆. 一种仿虎甲幼虫的多驱动器软体机器人的设计与制造[J]. 机器人,2018,40(5):626-633.
- [6] 王江北,方晔阳,童歆,等. 多气囊仿生软体机器人设计及其运动特性分析[J]. 上海交通大学学报,2018,52(1):20-25.
- [7] 冯慧娟,杨名远,姚国强,等. 折纸机器人[J]. 中国科学:技术科学,2018,48(12):1259-1274.
- [8] CAGDAS D O,ROBEJT J W,DANIELA R. An origami-inspired approach to worm robots[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,2012,18:430-438.

欢迎订阅《合成纤维》杂志!

单月刊 邮发代号:4-238

编辑部电话:(021)55210011-458 电子邮件:hcxw@chinajournal.net.cn

地址:上海市平凉路988号 邮编:200082