

填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护、军工项目保密等内容，请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告，可另行附页或增加页数，A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔，亲笔签名或签字章，不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写，编号规则为：年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4位+流水号3位，共11位。

一、个人申报

(一) 基本情况【围绕《浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

1. 理论知识的深入掌握

在可仿形多变形目标软体界面及装置设计与仿形控制研究项目中，通过对相关基础理论的深入研究，我不仅了解了软体界面变形的基本原理，还掌握了软体致动器技术前沿动态和应用潜力。这为我后续的研究和实践奠定了坚实的理论基础。软体界面的工作原理主要是通过气体驱动、磁驱动、线驱动、记忆合金等方式对由柔性材料制成的软体界面进行驱动，使其具备仿形运动能力和刚度调节能力。通过阅读大量相关文献和参加学术会议，我对这一领域的最新发展有了全面的了解，并能将这些知识应用于实际项目中。

2. 实际设计和模拟仿真能力的提升

在软体致动器的设计过程中，我深入了解了折纸结构的特点和性质，基于折纸结构设计了一种具有变刚度能力和多运动模态的软体致动器，并通过多次模拟仿真优化了设计方案。这个过程极大地提升了我在柔性结构设计和仿真方面的技能，使我能够从理论到实践，全面把握系统设计的各个环节。例如，我在设计中使用了力学仿真软件，对折纸结构在准静态条件下变形时的应力、应变、能量进行分析，验证了结构方案的可行性并指导我进行结构优化。

2. 工程实践的经历(不少于200字)

作为余姚机器人研究院软体机器人课题组核心成员，主导完成了“可仿形多变形目标软体界面及装置设计与仿形控制研究”的工程化开发工作。针对模块化软体机器人在实际应用中存在形变幅度小、运动模式单一、刚度不足等问题，创新采用四重水弹折纸结构设计了一种模块化软体机器人，具有轻量化、可重构、多模态、变刚度等优势。提出了气压驱动与电机驱动方案，设计了驱动控制系统，在气压驱动与电机驱动的配合下，该机器人可以实现直线爬行运动、横向滑移运动以及多方向的弯曲运动，在地面的直线爬行速度为2.88 mm/s，单个运动周期内的位移距离为5.76

mm，可以实现空间探测、零件平面运输、物品空间操作、重物承载等功能需求。

通过参与国家自然科学基金项目“可仿形多变形目标软体界面及装置设计与仿形控制研究”，成功将四重水弹折纸结构用于软体机器人本体设计，相关成果发表于SCI三区期刊《Extreme Mechanics

Letters》(IF=4.8)，同时，基于四重水弹折纸结构创新设计了一种全向运动软体制动器模块，申请国家发明专利一项(实质性审查中)。这些实践表明，本人不仅能准确把握学科前沿动态，更能将理论知识与工程实践有机结合。

3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例(不少于1000字)

机器人作为科技创新的重要象征，是衡量一国科技水平和高端制造能力的重要标志之一。近年来，随着人工智能、材料科学、精密制造等领域的快速发展，机器人技术日趋成熟并在工业生产、医疗健康、家居服务和9981安全等领域展现出广泛的应用潜力。传统的刚性机器人因其固定的结构设计和运动模式能够高效、精准地完成重复性任务[1]。然而这类机器人受自身自由度限制，难以在复杂或非结构化环境中执行任务[2]，此外，对动态变化的适应能力弱这一不足也极大地限制了其应用范围。因此，如何提升机器人的通用性和环境适应性，成为当前研究的重要方向。模块化机器人因其灵活性和多功能性逐渐受到关注并成为机器人

领域的重要研究热点，其中，模块化刚性机器人在与不规则接触面互动时会由于刚性表面与接触面形状不匹配导致滑动、侧翻或结构损坏等问题，因此也限制了其在更多领域的应用。为克服模块化刚性机器人的固有缺点，近年来模块化软体机器人逐渐成为研究前沿。这类机器人利用柔性材料的可变形特性实现了连续的形态变化并其顺应性、高自由度而备受关注，在某些领域开始取代传统的刚性机器人。模块化软体机器人通过柔性驱动器（如气动驱动器、液压驱动器或人工肌肉）实现动作，其模块通常具有一致的几何设计，可根据任务需求快速重构形态。此外，这类机器人在单模块失效时，可由其他模块迅速替代，展现出极高的环境适应性和容错能力。然而，目前的模块化软体机器人在实际应用中仍存在诸多挑战。例如，硅胶气动驱动器因壁厚问题限制了运动范围，刚度不足且形变模式单一；人工肌肉驱动器虽然可以产生较大的输出力，但其最大伸缩比被限制在35%以内，在达到形变极限时输出力迅速衰减。除此之外，目前大多数模块化软体机器人缺乏刚度自主调节的能力或需借助额外的附加结构实现刚度变化，难以在不改变外部环境的情况下通过自身结构调整来适应任务需求。

折纸结构因其无穷的几何设计潜力和折叠变形方式逐渐成为新型机器人结构设计的热点。作为一种特殊的可编程材料设计方法，折纸结构能够通过其多稳态、负泊松比以及变刚度等特性，实现独特的力学性能。基于折纸原理设计的驱动器，利用折叠模式的变化实现复杂变形，具有轻量化、大变形、易加工以及良好力学性能的优势。与传统柔性驱动器相比，折纸结构驱动器不仅能够承受更大范围的形变，还能通过构型切换实现刚度调节，将折纸结构与模块化软体机器人结合，具有重要的科学研究价值和应用前景。

本项目创新采用四重水弹折纸结构设计了一种模块化软体机器人，具有轻量化、可重构、多模态、变刚度等优势。提出了气压驱动与电机驱动方案，设计了驱动控制系统，在气压驱动与电机驱动的配合下，该机器人可以实现直线爬行运动、横向滑移运动以及多方向的弯曲运动，在地面的直线爬行速度为2.88 mm/s，单个运动周期内的位移距离为5.76 mm，可以实现空间探测、零件平面运输、物品空间操作、重物承载等功能需求。

(二) 取得的业绩(代表作)【限填3项, 须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实, 并提供复印件一份】

1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利(含发明专利申请)、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/授权或申请时间等	刊物名称/专利授权或申请号等	本人排名/总人数	备注
Design and analysis of quadruple Waterbomb origami with multi-stability	权威期刊	2025年01月25日	Extreme Mechanics Letters	2/4	SCI期刊收录
一种基于折纸结构的混合驱动全向运动致动器	发明专利申请	2023年12月22日	申请号: 202311781123.9	2/4	
基于四重水弹折纸的模块化软体机器人设计	学位论文送审专家评审结果全优	2025年04月16日			

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况	
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 88 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1 年(要求1年及以上) 考核成绩： 84 分
本人承诺	
<p>个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！</p> <p style="text-align: right;">申报人签名：张海鹏</p>	

浙江大学研究生院
攻读硕士学位研究生成绩单

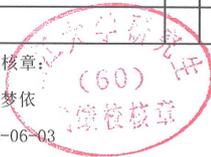
学号: 22260042	姓名: 张海鹏	性别: 男	学院: 工程师学院	专业: 机械	学制: 2.5年						
毕业时最低应获: 26.0学分		已获得: 28.0学分		入学年月: 2022-09	毕业年月:						
学位证书号:			毕业证书号:		授予学位:						
学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质	学习时间	课程名称	备注	学分	成绩	课程性质
2022-2023学年秋季学期	工程技术创新前沿		1.5	87	专业学位课	2022-2023学年秋冬学期	研究生英语		2.0	81	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期	工程伦理		2.0	96	公共学位课	2022-2023学年春季学期	自然辩证法概论		1.0	87	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期	研究生论文写作指导		1.0	92	专业学位课	2022-2023学年春季学期	研究生英语基础技能		1.0	80	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期	数据分析的概率统计基础		3.0	96	专业选修课	2022-2023学年春季学期	电子与通信工程领域前沿讲座		2.0	88	跨专业课
2022-2023学年秋冬学期	智能工业机器人及其应用		3.0	91	专业选修课	2022-2023学年春夏学期	高阶工程认知实践		3.0	81	专业学位课
2022-2023学年冬季学期	新时代中国特色社会主义思想理论与实践		2.0	89	公共学位课	2022-2023学年春夏学期	人工智能制造技术		3.0	86	专业学位课
2022-2023学年冬季学期	产业技术发展前沿		1.5	87	专业学位课		硕士生读书报告		2.0	通过	

说明: 1. 研究生课程按三种方法计分: 百分制, 两级制 (通过、不通过), 五级制 (优、良、中、及格、不及格)。
2. 备注中“*”表示重修课程。

学院成绩校核章:

成绩校核人: 张梦依

打印日期: 2025-06-03





Design and analysis of quadruple Waterbomb origami with multi-stability

Jituo Li^{a,b,c,*}, Haipeng Zhang^{c,d}, Juncai Long^{a,b,c}, Guodong Lu^{a,b,c}

^a State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China

^b Institute of Design Engineering, School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, China

^c Zhejiang University Robotics Institute, China

^d School of Engineer, Zhejiang University, China

ARTICLE INFO

Keywords:

Sixfold Waterbomb
Quadruple Waterbomb origami
Multistability
High stiffness
Truss model
Origami tube

ABSTRACT

In this paper, after investigating the folding behavior and bistable positions of the sixfold Waterbomb, we propose a novel origami structure, multi-stable quadruple Waterbomb origami (QWO), which is designed as a composition of four sixfold Waterbombs. QWO exhibits three stable configurations under axial symmetric conditions. By controlling the pushing inward and popping outward of the Waterbomb center, two alternative folding paths can be generated, which achieves easy folding and high-stiffness in the axial direction, respectively. When the structural symmetry is disrupted, QWO exhibits four stable configurations in axial bending. We develop a truss model of QWO, and the energy landscape derived from it confirms the tri-stable property under symmetric deformation along its axis. Moreover, the high stiffness of the third stable state of QWO is verified by physical compression experiments. A novel QWO tube is fabricated by connecting QWO units in series. Each QWO in the tube can be deformed independently, which avoids the problem of interlayer motion coupling that commonly occurs in existing Waterbomb origami tubes. Our QWO tube offers diverse spatial configurations and mechanical properties that can be potentially used in mimicking the deformation of strip-shaped soft organisms.

1. Introduction

By properly designing the folds, a piece of planar paper can be folded into complex and diverse origami structures. This approach achieves mechanical properties and forms of movement that are challenging for many traditional materials, offering new solutions to practical engineering problems. Such as the design of mechanical metamaterials [1–4], flexible robotic arms [5–7], soft actuators [8,9], micro-robots [10], and deployment structures [11].

Among all three-dimensional structures obtained from origami, origami tubes have received extensive attention. Typically, they consist of multilayer structures formed by serially connecting identical origami units, where each unit can be considered as a unit cell. This assembly enables origami tubes to achieve intricate spatial configurations and mechanical properties, which vary depending on the origami pattern employed. Common origami patterns include Miura, Kresling, Yoshimura, and Waterbomb. Miura pattern, a primary focus in rigid origami research, exhibits properties such as stiffness anisotropy and a negative Poisson's ratio [12]. It maintains a single degree of freedom during folding [13]. Kresling and Yoshimura patterns belong to non-rigid

origami, where panels deform during folding. Kresling pattern finds extensive application in origami tube designs [14–16], characterized by telescopic-torsion coupling and bi-stability. Recent research has also identified a third stable state with high stiffness [17,18]. Yoshimura origami originates from the axial buckling of thin cylinders. It experiences significant panel deformation during axial folding and is frequently used in origami tubes for energy absorption [19].

Waterbomb pattern belongs to rigid origami and includes both sixfold and eightfold forms, being recognized as a bistable structure [20]. Waterbomb origami tubes differ from the previously mentioned origami tubes in their structural form, as they are composed of sixfold Waterbomb inlays. These inlays are generally non-rigidly foldable [21], but can achieve rigid foldability with specific structural parameters [22, 23]. The structure of a commonly studied Waterbomb origami tube [24] is shown in Fig. 1(d), where m and n represent the number of layers and the number of Waterbomb units per layer. The layers are spaced apart by half a Waterbomb length. This structural form leads to unique folding behavior. On one hand, the vertices shared between layers have relative motions during the folding process, causing movements in the upper layer to affect the lower layer, resulting in interlayer motion coupling

* Corresponding author at: State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China.

E-mail address: jituo_li@zju.edu.cn (J. Li).

<https://doi.org/10.1016/j.eml.2025.102295>

Received 19 July 2024; Received in revised form 29 December 2024; Accepted 21 January 2025

Available online 23 January 2025

2352-4316/© 2025 Elsevier Ltd. All rights are reserved, including those for text and data mining, AI training, and similar technologies.



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117754554 A

(43) 申请公布日 2024. 03. 26

(21) 申请号 202311781123.9

(22) 申请日 2023.12.22

(71) 申请人 浙江大学

地址 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

(72) 发明人 李基拓 张海鹏 龙俊财 陆国栋

(74) 专利代理机构 杭州求是专利事务有限公司 33200

专利代理师 邱启旺

(51) Int. Cl.

B25J 9/14 (2006.01)

B25J 9/12 (2006.01)

B25J 18/02 (2006.01)

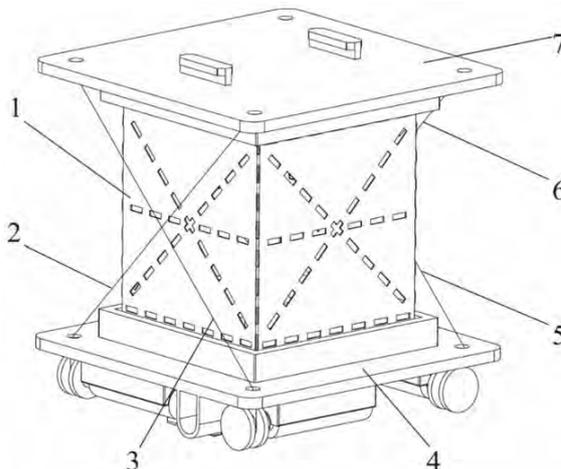
权利要求书1页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于折纸结构的混合驱动全向运动致动器

(57) 摘要

本发明提供了一种基于折纸结构的混合驱动全向运动致动器,致动器包括至少一个致动模块,致动模块包括基于折纸结构能够形变的柱状外壳、上盖板、下盖板。柱状外壳为基于Waterbomb折痕衍生的折纸结构,外壳内部形成容纳气体的腔室,腔室两端敞口,敞口处分别连接用于封堵敞口的上下盖板,下盖板处设置与腔室连通的通气孔,上下盖板间用交叉布置的驱动绳牵引,通过气体与线驱动的配合,所述柱状外壳可以产生收缩、弯曲、扭转变形,使得单个致动模块具备全向运动能力。本发明运动模式丰富,致动器包括的致动模块个数可以按照需求调整,易于模块化和重构,在软体机器人、类机器人手臂等领域具有较强的实用价值和应用前景。



C 查看状态查询

学位信息服务器, 需要提交学位论文后才能打印!

- 01 学位上报信息
- 02 科研成果
- 03 学位论文信息
- 04 资格预审
- 05 论文评阅

学号姓名	评阅时间	总体评价	评阅结果	备注 (隐藏)
***		A (优秀)	同意答辩	
***		A (优秀)	同意答辩	
***		A (优秀)	同意答辩	

分类号: TP242

单位代码: 10335

密 级: 非涉密论文

学 号: 22260042

浙江大学

硕士学位论文

(专业学位)



中文论文题目: 基于四重水弹折纸的模块化

软体机器人设计

英文论文题目: Design of Modular Soft Robot Based on

Quadruple Waterbomb Origami

申请人姓名: 张海鹏

校内导师: 李基拓 副教授

行业导师: 夏庆华 研究员

专业学位类别、领域: 机械工程

研究方向: 软体机器人

培养类型: 全日制非定向

所在学院: 工程师学院

论文提交日期 2025年4月

摘要

随着科技的不断发展，软体机器人的功能需求日益多样且日趋复杂。模块化软体机器人因其灵活性和多功能性成为研究热点，但现有设计仍面临形变幅度有限、运动模式单一、刚度不足等挑战。基于折纸结构的软体驱动器能够通过折叠实现复杂形变并具备优异的力学性能，为上述问题提供了一种可行的解决方案。**Kresling** 折纸和水弹折纸是目前常用的折纸结构，但由这两种图案构成的折纸管通常存在运动耦合问题。此外，现有水弹折纸管并未充分利用六折痕水弹的双稳态特性。

本文聚焦于六折痕水弹折纸，提出了一种新的多稳态折纸结构——四重水弹折纸，基于四重水弹折纸设计了一种新型模块化软体机器人，具有轻量化、可重构、多模态运动、变刚度等优势，主要研究工作如下：

(1) 建立六折痕水弹的运动学模型，准确预测其双稳态位置。研究了六折痕水弹的折叠行为，通过运动学建模得到六折痕水弹各顶点在空间中的位置坐标，基于势能分析预测了其双稳态位置，通过有限元仿真的方式验证了理论模型的正确性。

(2) 提出一种新型多稳态折纸结构——四重水弹折纸。基于六折痕水弹设计了四重水弹折纸，分析了四重水弹折纸的多种稳定构型和两条可自主选择的折叠路径。建立了四重水弹折纸的空间桁架等效模型并结合能量原理图解法分析其静力学特性。通过实验验证了四重水弹折纸的三稳态及高刚度特性，基于四重水弹折纸设计了一种新型折纸管，解决了当前水弹折纸管层间运动耦合的问题，具有比 **Kresling** 折纸管更加丰富的空间构型。

(3) 设计了具备可重构和多模态运动能力的模块化软体机器人。基于四重水弹折纸设计一种新型模块化软体机器人，依据驱动方案的不同将驱动器模块分为刚性模块、伸缩模块和扭转模块，其中刚性模块作为躯干、手臂结构；伸缩模块作为主要运动模块；扭转模块作为运动关节、末端执行器。通过模块间的相互配合，机器人可实现伸缩、弯曲、扭转等多种运动模态。依据可重构组合的不同设计了串联直线型和并联平面型两种模块化软体机器人，设计了机器人的气压驱动控制模块和电机驱动控制模块。

(4) 研制了串联直线型和并联平面型两种模块化软体机器人实物样机。结合蚯蚓和尺蠖的运动原理，基于串联直线型可重构组合设计了爬行机器人并对其进行了爬行实验，基于并联平面型可重构组合设计了承载实验，通过实验验证了模块化软体机器人

所具备的地面爬行、空间操作、搬运、承载能力。

关键词：六折痕水弹；四重水弹折纸；可重构组合设计；多模态运动；模块化软体机器人

目 录

致 谢	I
摘 要	II
ABSTRACT	IV
目 录	VI
1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 折纸结构研究现状	2
1.2.2 折纸驱动器研究现状	7
1.2.3 折纸机器人研究现状	10
1.2.4 模块化机器人研究现状	11
1.3 当前研究存在的问题	13
1.4 本文内容安排	14
2 六折痕水弹的折叠行为分析	16
2.1 六折痕水弹的几何特性	16
2.1.1 六折痕水弹的几何图案	16
2.1.2 六折痕水弹的折叠运动	16
2.1.3 基于六折痕水弹的折纸管结构	17
2.2 六折痕水弹的双稳态行为	18
2.2.1 六折痕水弹的运动学建模	18
2.2.2 六折痕水弹的势能分析	20
2.3 六折痕水弹的有限元仿真分析	24
2.3.1 PP 板材力学性能测试	24
2.3.2 六折痕水弹的折痕处理	26
2.3.3 有限元仿真设置	27
2.3.4 有限元仿真结果分析	28

2.4 本章小结	30
3 基于六折痕水弹的四重水弹折纸设计与分析.....	32
3.1 四重水弹折纸设计	32
3.1.1 四重水弹折纸构型设计	32
3.1.2 四重水弹折纸折叠行为	34
3.2 四重水弹折纸的非刚性折叠	37
3.3 四重水弹折纸的静力学分析	39
3.3.1 空间桁架等效模型原理	39
3.3.2 四重水弹折纸的空间桁架等效模型	40
3.3.3 基于能量原理图解法的折叠行为分析	44
3.3.4 四重水弹折纸三稳态及高刚度特性的实验验证	48
3.4 四重水弹折纸管设计	49
3.5 本章小结	51
4 基于四重水弹折纸的软体机器人模块化设计.....	52
4.1 折纸结构驱动器模块的设计	52
4.1.1 驱动器模块的结构设计	52
4.1.2 驱动器模块的驱动方案设计	54
4.1.3 驱动器模块的运动能力验证	56
4.1.4 驱动器模块弯曲运动的绳长计算	58
4.2 多驱动器模块间的连接设计	61
4.3 模块化软体机器人的可重构组合设计	62
4.3.1 串联直线型可重构组合	62
4.3.2 并联平面型可重构组合	63
4.4 模块化软体机器人的控制系统设计	64
4.4.1 模块化软体机器人控制系统总体方案	64
4.4.2 气压驱动控制模块硬件设计	65
4.4.3 电机驱动控制模块硬件设计	66
4.4.4 模块化软体机器人运动控制策略	68
4.5 本章小结	71

5 模块化软体机器人的实验研究	72
5.1 串联直线型模块化软体机器人的爬行实验.....	72
5.1.1 爬行机器人的仿生运动原理.....	72
5.1.2 爬行机器人的地面爬行运动.....	73
5.1.3 爬行机器人的空间操作运动.....	78
5.2 并联平面型模块化软体机器人的承载实验.....	80
5.3 本章小结.....	82
6 总结与展望	84
6.1 总结.....	84
6.2 展望.....	85
参考文献	86
攻读硕士学位期间的科研成果	91

1 绪论

1.1 研究背景及意义

机器人作为科技创新的重要象征，是衡量一国科技水平和高端制造能力的重要标志之一。近年来，随着人工智能、材料科学、精密制造等领域的快速发展，机器人技术日趋成熟并在工业生产、医疗健康、家居服务和国防安全等领域展现出广泛的应用潜力。传统的刚性机器人因其固定的结构设计和运动模式能够高效、精准地完成重复性任务^[1]。然而这类机器人受自身自由度限制，难以在复杂或非结构化环境中执行任务^[2]，此外，对动态变化的适应能力弱这一不足也极大地限制了其应用范围。因此，如何提升机器人的通用性和环境适应性，成为当前研究的重要方向。模块化机器人因其灵活性和多功能性逐渐受到关注并成为机器人领域的重要研究热点，其中，模块化刚性机器人在与不规则接触面互动时会由于刚性表面与接触面形状不匹配导致滑动、侧翻或结构损坏等问题，因此也限制了其在更多领域的应用。

为克服模块化刚性机器人的固有缺点，近年来模块化软体机器人逐渐成为研究前沿。这类机器人利用柔性材料的可变形特性实现了连续的形态变化并其顺应性、高自由度而备受关注，在某些领域开始取代传统的刚性机器人^[3]。模块化软体机器人通过柔性驱动器（如气动驱动器、液压驱动器或人工肌肉）实现动作，其模块通常具有一致的几何设计，可根据任务需求快速重构形态。此外，这类机器人在单模块失效时，可由其他模块迅速替代，展现出极高的环境适应性和容错能力。然而，目前的模块化软体机器人在实际应用中仍存在诸多挑战。例如，硅胶气动驱动器因壁厚问题限制了运动范围，刚度不足且形变模式单一；人工肌肉驱动器虽然可以产生较大的输出力，但其最大伸缩比被限制在 35% 以内^[4]，在达到形变极限时输出力迅速衰减^[5]。除此之外，目前大多数模块化软体机器人缺乏刚度自主调节的能力或需借助额外的附加结构实现刚度变化，难以在不改变外部环境的情况下通过自身结构调整来适应任务需求。

折纸结构因其无穷的几何设计潜力和折叠变形方式逐渐成为新型机器人结构设计的热点。作为一种特殊的可编程材料设计方法，折纸结构能够通过其多稳态、负泊松比以及变刚度等特性，实现独特的力学性能。基于折纸原理设计的驱动器，利用折叠模式的变化实现复杂变形，具有轻量化、大变形、易加工以及良好力学性能的优势。与传统

柔性驱动器相比，折纸结构驱动器不仅能够承受更大范围的形变，还能通过构型切换实现刚度调节，将折纸结构与模块化软体机器人结合，具有重要的科学研究价值和应用前景。

基于此，本文在研究水弹折纸的基础上提出了一种新的多稳态折纸结构——四重水弹折纸，具有多样化的变形方式与力学特性。基于四重水弹折纸设计了一种模块化软体机器人，实现多种运动模态和结构可重构，能够在复杂和非结构化的环境中表现出优秀的适应性，具有重要的科学研究意义和工程价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 折纸结构研究现状

折纸结构起源于中国的折纸艺术并在日本得到长远发展。通过折痕巧妙的设计，平面纸张可以被折叠成复杂多样的三维结构，具备许多传统材料难以实现的力学性能，为解决实际工程应用问题提供了新的思路^[6-8]。例如，折纸结构在可展开航天结构^[9-11]、生物医学^[12-14]、机械超材料^[15, 16]等领域均发挥了重要作用。

每一个折纸结构都有其对应的折痕图案。折痕图案作为折纸设计的核心要素，描述了折纸模型的几何拓扑与变形路径。一个完整的折痕图案通常包含以下基本元素：折痕(包括山折痕和谷折痕)、顶点和折面。这些元素相互关联，共同决定了折纸结构的最终形态及其运动特性。折痕图案的设计在折纸力学和工程应用中至关重要，因为它直接影响结构的稳定性、多样性和可操作性。图 1-1 中展示了当前折纸研究中被研究者们广泛关注的折痕图案。

三浦 (Miura) 折纸

4 顶点折纸是最基础的刚性折纸结构，如图 1-1(a)所示。它由四块刚性折面通过四条相交于同一点的折痕相连接形成。每个折面都由两条相交的折痕界定，而折痕的交点即为顶点。此结构的一个典型代表是三浦折纸，如图 1-1(b)所示。三浦折纸以其独特的几何结构而著名，它自身不具备多稳态性质，但通过拓扑组合后形成的结构具有丰富稳态。

克莱姆森大学的 Sengupta 等人^[17]基于三浦折纸设计了一种具有三维各向异性、多稳态的机械超材料，如图 1-2(a)所示。该机械超材料由三浦折纸层叠组成，每一个结构单胞都具有双稳态特性，通过几何设计参数的分析实现了刚度的可编程。

6 总结与展望

6.1 总结

本文聚焦于六折痕水弹折纸的折叠行为及双稳态特性，在充分研究六折痕水弹和分析现有水弹折纸管不足的基础上提出了一种新型多稳态折纸结构——四重水弹折纸。基于四重水弹折纸设计了一种新型模块化软体机器人，通过实验验证了该模块化软体机器人的多模态运动以及变刚度承载能力。

本文完成的工作如下：

(1) **建立了六折痕水弹的运动学模型，实现了双稳态行为的准确建模与验证。**为充分研究六折痕水弹的折叠特性，本文对其双稳态折叠行为及折痕变化规律进行了深入分析，建立了六折痕水弹的运动学模型并得到了各顶点在空间中的位置坐标。基于势能分析预测了其双稳态位置，并通过有限元仿真验证了理论模型的正确性，结果表明该模型对顶点坐标的预测误差在 3.5% 以内，具有较高精度。

(2) **提出了四重水弹这一新型多稳态折纸结构，解决了当前折纸图案类型单一与运动耦合的问题，实现了多路径折叠行为与更强的承载能力。**本文通过组合六折痕水弹的不同稳态构型，设计了具有两种显著不同折叠行为的四重水弹折纸结构，对应两条可自主选择的折叠路径。在对称与非对称运动下，该结构存在多达 9 个稳定状态。建立了四重水弹折纸的空间桁架等效模型并基于能量原理图解法分析其静力学特征。实验验证了四重水弹折纸在竖直方向上的三稳态以及变刚度特性，其中在非完全折叠状态下具有高刚度，负载能力约为自重的 4500 倍，高于 Kresling 折纸的 1250 倍。基于四重水弹折纸设计了一种新型折纸管结构，解决了当前水弹折纸管层间运动耦合的问题，在具备承载能力的同时具有比 Kresling 折纸管更为丰富的空间构型。

(3) **设计了基于四重水弹折纸的模块化软体机器人，解决了现有软体机器人运动模态单一与承载能力不足的问题，具备可重构和多模态运动能力。**本文基于四重水弹折纸设计了新型模块化软体机器人，依据驱动方式不同开发了刚性模块、伸缩模块和扭转模块，其中刚性模块负责承载，可作为躯干、手臂结构；伸缩模块无法扭转，可作为主要运动模块；扭转模块运动模式最丰富，可作为运动关节、末端执行器。通过多模块间的组合与协同，实现了机器人在伸缩、弯曲、扭转等多种模态下的运动能力。根据

模块重构方式，设计了串联直线型和并联平面型两种模块化机器人。

(4) 研制了模块化软体机器人实物原型，实现了可行性验证及多场景功能拓展。本文制作了串联直线型与并联平面型两种模块化软体机器人的实物。结合蚯蚓和尺蠖的运动原理，设计了由三个伸缩模块串联构成的爬行机器人，可实现直线爬行、横向滑移和多方向弯曲运动。基于该爬行机器人设计了多种应用场景的实物实验，实现了空间探测、零件平面运输和物品空间操作等功能需求。此外，结合四重水弹折纸的三稳态与变刚度特性开发了基于并联平面型机器人的重物承载平台，实现了物品的空间搬运与承载功能。

6.2 展望

本文提出的四重水弹折纸具备多稳态、变刚度等优异的力学特性，基于四重水弹折纸设计的模块化软体机器人具有轻量化、可重构、多模态运动、变刚度等优势，但当前研究工作仍存在不足之处，未来可在以下方面做进一步研究：

(1) 在对四重水弹折纸的静力学分析中，本文目前采用的空间桁架等效模型较为简单，将非刚性折纸折叠过程中面板复杂的变形等效成杆件长度的收缩，存在固有误差，该误差将影响稳定态位置预测的准确性，后续可探索更精确的建模方法，例如将面板简化为板单元、折痕等效为旋转弹簧的建模策略以及使用厚板折纸的建模方法。

(2) 本文中基于四重水弹折纸设计的模块化软体机器人尽管已经具备了完整的驱动方案和系统，但并未检测和控制机器人在驱动作用下的末端姿态，后续可尝试建立机器人的运动学模型并进行闭环控制。

(3) 本文关于模块化软体机器人的应用示例是在实验室环境下设计的，真实环境会更加苛刻，存在更多的干扰，此外，当前机器人的爬行速度仍具有很大的提升空间，后续可结合实际应用工况进一步优化爬行腹足结构，提升爬行速度和环境适应性，拓展潜在应用场景。