

基于仿生学的梭子蟹蟹钳收拢装置设计

李天兵¹, 郑雄胜¹, 冉行耀²

1. 浙江海洋大学海洋工程装备学院, 浙江舟山 316000

2. 舟山君耀科技发展有限公司, 浙江舟山 316000

摘要: 为解决梭子蟹捕捞后的抱团问题, 需将蟹钳进行单个捆绑, 而蟹钳收拢是实现蟹钳捆绑的关键环节。研究设计了一种基于仿生学的梭子蟹蟹钳收拢装置。该装置的设计灵感汲取自梭子蟹蟹钳的自然运动方式, 通过对蟹钳的生理结构进行细致分析, 深入理解其活动特点, 据此设计出一种蟹钳仿生收拢装置。实验结果表明, 该装置对 10 只不同体质量的梭子蟹进行收拢测试, 成功收拢了 8 只, 对体积为 133 mm³、体质量 130 g 以上的梭子蟹, 收拢效果较好。该装置为有效解决梭子蟹蟹钳捆绑问题提供了一个初步而有效的方案。

关键词: 梭子蟹; 蟹钳收拢装置; 仿生学; 捆绑

中图分类号: S 951

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of a bionics-based *Portunus* crab claw gathering device

LI Tianbing¹, ZHENG Xiongsheng¹, RAN Xingyao²

1. Ocean Engineering Equipment College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China

2. Zhoushan Junyao Technology Development Co., Ltd., Zhoushan 316000, China

Abstract: In order to solve the problem of holding pike crabs after fishing, the crab claw of pike crabs need to be tied up individually, and crab claw gathering is important for crab claw binding. In this study, a bionics-based crab claw gathering device for pike crabs was designed, which is inspired by the natural movement of *Portunus* crab claws. After a careful analysis of the physiological structure of crab claw, we understood the characteristics of their activities well, and then designed this bionics-based crab claw closing device. The device tested the pincer closing for 10 *Portunus* crabs of different body masses, and 8 individuals were successfully closed. For the crabs with size of 133 mm³ and body mass over 130 g, the effect is better. Thus, the device provides a preliminary and effective solution to effectively solve the problem of *Portunus* crab claw closing.

Keywords: *Portunus* crab; Crab pincer gathering device; Bionics; Binding

三疣梭子蟹 (*Portunus trituberculatus*) 是中国东海海域最主要的经济蟹类之一^[1], 其产量约占全球商业捕捞蟹类的 1/4^[2]。由于蟹钳(螯足)和蟹腿(步足)的特殊构造, 梭子蟹的加工和处理一直是个难题^[3]。梭子蟹的蟹钳非常尖锐, 如不加以控制, 会伤害同类或工作人员, 甚至会破坏包装材料^[4-5];

因此, 梭子蟹捕捞后通常需将蟹钳进行捆绑。目前蟹钳的捆绑主要依靠人工操作, 通过将蟹钳折叠并使用绳索或橡皮筋进行固定和捆绑^[6]。该过程的关键步骤是收拢蟹钳, 但手工折叠蟹钳存在效率低下等问题。在大规模梭子蟹养殖与销售过程中, 面对庞大的梭子蟹数量, 若完全依赖人工捆绑蟹钳, 将

收稿日期: 2023-12-27; 修回日期: 2024-06-18

基金项目: 浙江省科技厅尖兵领雁计划项目(2022C02001); 舟山市科技局重点计划项目(2021C21005)

作者简介: 李天兵(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业机械化。E-mail: ltb18364364790@163.com

通信作者: 郑雄胜(1972—), 男, 副教授, 硕士, 研究方向为涉海机械装备设计与仿真分析等。E-mail: zxs668998@163.com

会消耗巨大的人力和时间成本^[7-8]。鉴于此, 开发一种能高效地收拢梭子蟹蟹钳并迅速完成捆绑的自动化机械装置, 显得尤为迫切且重要。

我国正在加快推进农业机械化和智能化^[9], 而专用机械设计的核心在于利用机械自动化来替代传统的人工劳动^[10]。智能识别问题的一部分可以通过训练神经网络^[11]来实现, 但实际应用还需依赖于精密的机械结构。因此, 仿生机械设计, 即借鉴目标生物的生理特性来构建机械, 已彰显出巨大潜力。这种设计方法不仅能够赋予机械以自然界生物的精妙特性, 还为机械工程领域带来了创新和突破。谷可欣等^[12]研究了软体仿生机械手, 为处理软质生物提供了新方法, 该研究拓宽了软体动物操作的技术范围, 但其无法处理具有多样化和复杂形状的物体。一些研究者将仿生理论与机械设计相结合, 利用生物结构来设计仿生机械^[13-16], 但这类设计的制造成本较高, 且可能缺乏针对不同农业任务的通用性。Tawk 等^[17]设计并制造了一种全软体仿生机械手指, 该手指能够实现灵巧的抓取动作, 但其在实际产品生产和加工技术中的应用还需进一步验证。Chen 等^[18]以龙虾为灵感, 开发了一种具有柔性驱动和可调节扭矩输出的弯曲模块, 但在实际农业生产环境中, 其耐用性和实用性有待验证。Chen 等^[19]运用仿生学原理, 从自然界多趾动物的足部结构中获得灵感, 设计了四足机器人的足部结构, 但该设计似乎更适合特定的应用场景。熙鹏等^[20]和王文谦等^[21]对这些仿生机械的性能进行了测试与评估, 提出了相应的测试方法。但在农业生产多样化的条件下, 现有的性能测试还不足以全面覆盖所有潜在的应用环境。

在深入考虑梭子蟹生物力学特性^[22]的基础上, 本研究融合了现代机械设计的一些理念和方法。首先对机械机构进行三维建模; 然后利用 Ansys 软件进行全面的仿真分析, 包括应力、应变、形变和模态等^[23-25]; 最后根据仿真分析结果, 制作出实物样机, 并通过测试验证其稳定性和实用性。该装置的驱动采用舵机, 不仅保证了机械动作的协调性, 也实现了整体设计的轻量化。本研究完成了梭子蟹蟹钳收拢装置的初代设计, 为后续梭子蟹自动化设备的研究与开发提供了基础方案。

1 生理特性与结构设计

1.1 梭子蟹蟹钳生理特性分析

为便于数据采集, 本研究选用市售规格适中的梭子蟹。初步分析了梭子蟹蟹钳的生理特性, 如图 1 所示, 梭子蟹的蟹壳两端显著的尖刺, 对蟹钳的合拢构成了明显障碍。因此, 如何有效克服这些尖刺带来的影响, 是解决蟹钳合拢问题的关键。



图1 梭子蟹实拍图

Fig. 1 Real shot picture of *Portunus* crab

在研究梭子蟹蟹钳的运动特性时, 发现当以蟹钳的前端作为基准面时, 臂节的最大活动角度约为 23° 。这一较小的活动范围意味着臂节对蟹钳整体推动力的影响相对有限。然而, 当以蟹钳底部为基准面时, 臂节的活动角度为 $0^\circ\sim 90^\circ$, 活动范围显著扩大(图 2)。因此, 设计蟹钳收拢装置时应选择底部作为基准面, 以增强装置的抗干扰性能, 确保蟹钳能够稳定而有效地合拢。

如图 3-a 所示, 施加与力 F 方向一致的外力可以促使梭子蟹的臂节向前收拢。此外, 通过模拟人手的推拢动作, 图 3-b 展示了一种创新的推杆机构设计, 该设计能够复制人手的推拢功能。在这种特定形状的推杆作用下, 该机构能够高效地实现梭子蟹臂节的向前收拢。进一步的实验结果证实了在该范围内可以成功完成收拢动作, 如图 3-c 中的红框区域所示。

梭子蟹的背部有 3 个较小的凸起, 使其整体呈现山丘般的形态(图 4-a)。这一独特的背部结构为夹持装置的固定提供了支撑点, 也为其设计提供了重要的理论基础。

进一步的研究显示, 梭子蟹的连接部位与机械铰链在结构上具有相似性(图 4-b)。这些部位的设计使得蟹钳的活动特征与铰链机构极为相似, 使其

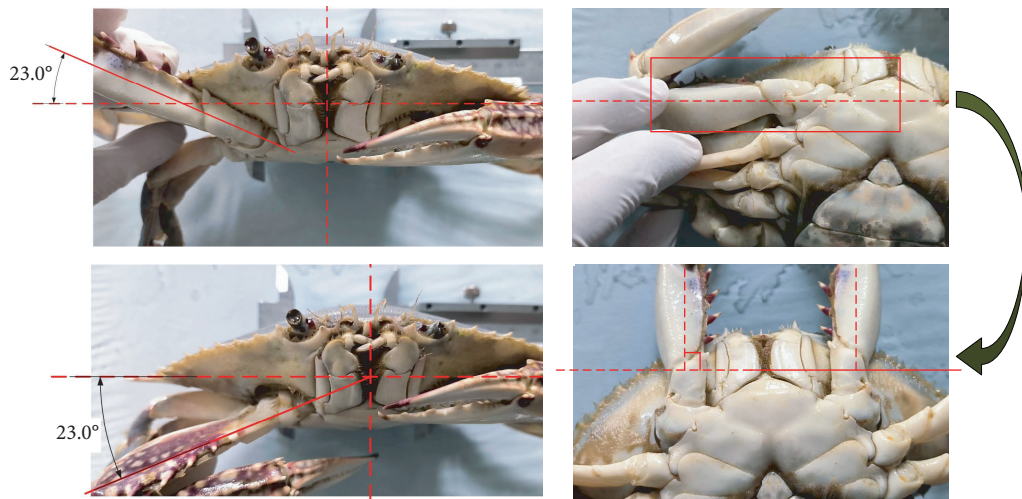
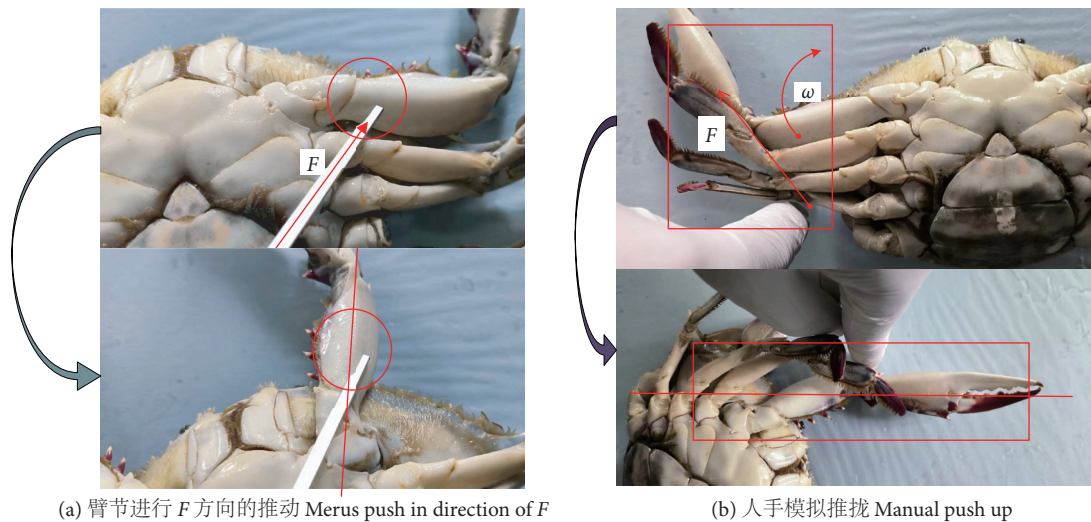


图2 梭子蟹臂节上下活动角度

Fig. 2 Up and down movement angles of *Portunus* crab's merus(a) 臂节进行 F 方向的推动 Merus push in direction of F

(b) 人手模拟推拢 Manual push up

(c) 臂节可推动范围 Pushable range of merus

图3 臂节舒展范围

Fig. 3 Extent of stretching of merus

能够执行复杂的抓取和夹持动作。通过对梭子蟹背部结构及其运动机制的分析可进一步优化夹持装置设计,提高其在实际应用中的性能。

1.2 收拢装置的结构原理及设计

梭子蟹蟹钳收拢装置包括蟹钳折叠机构和蟹腿整理机构。该装置利用仿生学原理,通过一系列机

械组件的协同工作,实现了臂节整理和掌节折叠,优化了梭子蟹蟹钳和蟹腿的管理效率。

1.2.1 梭子蟹专用夹具设计

针对梭子蟹背部的凸起,设计了一款专用夹具。如图5所示,这款夹具的下夹带有凹槽,用于夹住梭子蟹的背部,中间的卡扣具有调整功能,可



图4 蟹身体结构分析

Fig. 4 Analysis of crab body structure

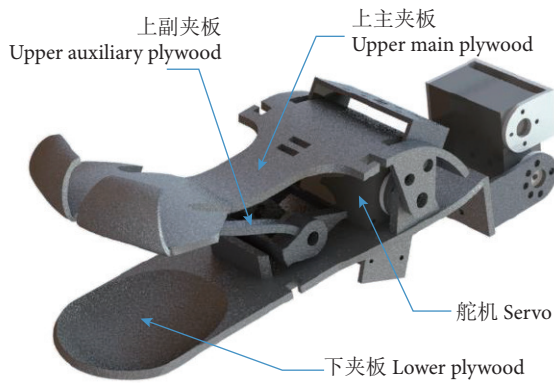


图5 仿形联动卡爪机构

Fig. 5 Profiling linkage jaw mechanism

根据蟹的大小进行调整, 确保其在固定过程中不移位。此外, 上下夹持器均经过平滑处理, 可防止在操作过程中对蟹造成损伤。

1.2.2 臂节收拢机构的设计

根据梭子蟹的生理特性, 模仿人手的收拢动作, 通过前推臂节来实现蟹钳的收拢。同时, 对不同推杆结构进行探讨, 确定了最适设计方案。

图 6-a 的结构类似于人体的手指关节, 因其构造简单、耗材较少, 制作成本较低, 但其与蟹腿和蟹钳的适配度也较低, 仍需要更多地调试和优化。图 6-b 的结构类似于人体手指中上关节的结构, 它能够紧密贴合蟹腿和蟹钳的形状, 实现较高的结构适配性, 但这种设计需要通过实验来评估不同坡度的夹持性能, 因此在实验和开发阶段的成本相对较高。图 6-c 的结构类似于人体手指中关节的结构, 同样可以实现较高的结构适配性, 但其复杂的制造工艺和较多的耗材导致其制作成本较高。此外, 该设计未能充分利用结构的作用面积, 可能需要额外的材料来弥补这一不足。图 6-d 的结构类

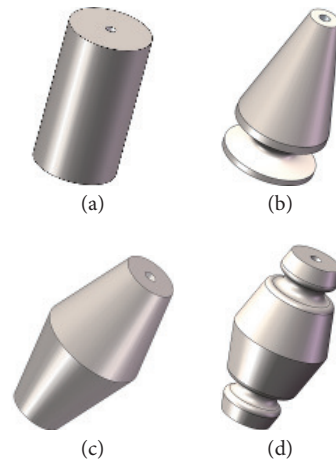


图6 不同推杆结构

Fig. 6 Different push rod structures

似于人体整根手指的整体结构, 性能最优, 但其复杂的设计、大量的耗材以及高精度制造工艺要求, 使其制作成本最高; 同时, 这种设计仅利用了结构的上部, 增加了材料的浪费。综合考虑各因素, 本研究选择图 6-b 的结构, 其三维建模如图 7 所示。

蟹钳收拢机构主要由推夹杆轮组槽口、夹子闭合器、主上夹板和仿形联动卡爪等组成(图 7)。其工作原理是通过齿轮的转动模拟人手的开合角度, 调整开合大小, 并通过电机带动螺杆, 从而驱动推夹杆轮组进行水平移动。推夹杆轮组的槽口设计用于嵌入蟹壳的突刺, 实现对蟹壳轮廓的仿形运动。当推夹杆轮移动至突刺的尖端时, 槽口捕获梭子蟹的蟹钳, 将其推至限位点, 再由闭合器推至梭子蟹胸前。随后, 主上夹板归位, 将整理好的蟹钳夹住。在此过程中, 仿形联动卡爪限制了蟹钳在竖直方向的摆动, 确保了操作的稳定性和准确性。

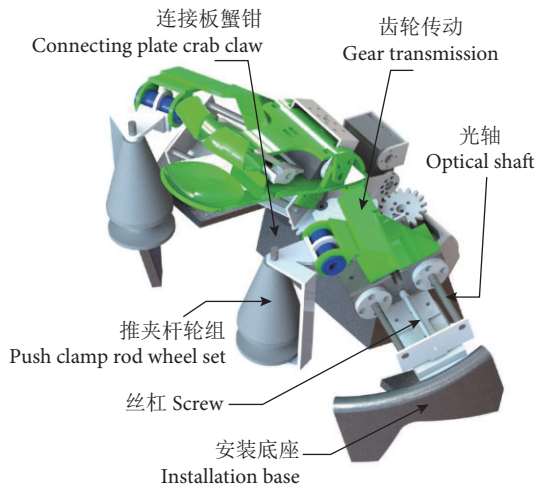


图7 蟹钳收拢机构

Fig. 7 Crab claw retract mechanism

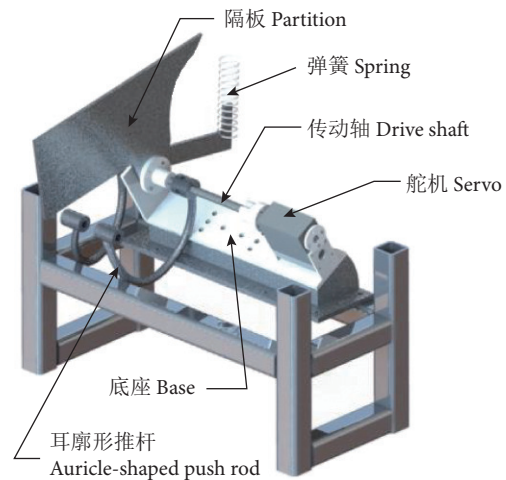


图8 蟹钳折叠机构

Fig. 8 Crab claw folding mechanism

1.2.3 蟹钳折叠机构

蟹钳折叠机构主要由舵机、传动轴、隔板、耳廓形推杆和底座组成(图8)。蟹钳整理完成后,通过舵机的驱动,耳廓形推杆执行曲线运动,实现蟹腿的折叠。在此过程中,隔板的作用至关重要,它能有效防止蟹钳之间的相互干扰,确保折叠动作的顺畅进行。这一设计充分利用了梭子蟹蟹腿的特性,实现了蟹腿的有效折叠和整理。

2 构件分析

为了全面理解和评估夹具、推夹杆轮和支撑杆在实际应用中的结构稳定性和性能,对这些关键部

件进行了 Ansys 有限元分析^[26]。

2.1 前置处理

按照 Ansys 软件的要求,对于 6061 铝合金材料属性进行定义:弯曲极限强度 228 MPa,弹性模量 E 约为 68.9 GPa,极限抗拉强度为 124 MPa,受拉屈服强度为 55.2 MPa^[27],泊松比为 0.330,疲劳强度为 62.1 MPa,密度为 $2\ 800\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由于梭子蟹的相关参量未知,参考规则组合或弹性强度叠加 (Voigt)、规则弹性 (Reuss)、Voigt 和 Reuss 近似的平均值 (Hill) 对碳酸钙的相关参量^[28]进行测定,密度选用 $2.71\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,碳酸钙材料属性见表 1。

表1 碳酸钙的相关参量

Table 1 Related parameters of calcium carbonate

平均方案 Average scheme	体积弹性模量 Bulk modulus/GPa	杨氏模量 Young's modulus/GPa	剪切模量 Shear modulus/GPa	泊松比 Poisson's ratio
规则组合或弹性强度叠加 Voigt	KV=78.778	EV=93.874	GV=36.067	VV=0.301 4
规则弹性 Reuss	KR=72.835	ER=75.853	GR=28.593	VR=0.326 43
Voigt 和 Reuss 近似的平均值 Hill	KH=75.807	EH=84.917	GH=32.33	VH=0.313 3

注: K (V、R、H) 为体积弹性模量; E (V、R、H) 为杨氏模量; G (V、R、H) 为剪切模量; V (V、R、H) 为泊松比。

Note: K (V, R, H) is the bulk modulus; E (V, R, H) is the Young's modulus; G (V, R, H) is the shear modulus; V (V, R, H) is the Poisson's ratio.

为使计算结果更加准确,根据实际几何参数和材料属性建立了夹具、推夹杆轮和支撑杆的有限元模型。在考虑装置实际工作环境和条件的基础上,为模型设定了合适的边界条件和加载方式。

2.2 专用夹具分析

在完成材料选择和网格划分后,需分析所施加的载荷。考虑到常见的梭子蟹体质量范围介于 150~500 g,故此夹具对梭子蟹的夹持力选择 100 N。

在对夹具进行有限元分析时,主要关注其在实际工作条件下可能承受的最大应力和变形情况。通过模拟分析,在预期的工作负荷下,夹具的应力和形变分布如图 9-a—9-c 所示。结果显示,夹具的最大形变为 0.000 616 m,应力为 72 463 ePa。根据冯米赛斯应力准则,可确定材料在此应力水平下不会失效^[29]。这一结果证明了在预期工作条件下,夹具的设计具有充分的安全性和可靠性。

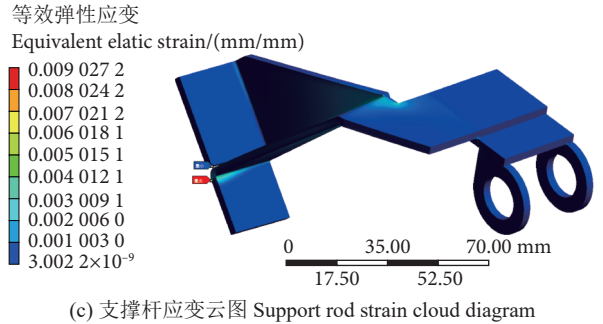
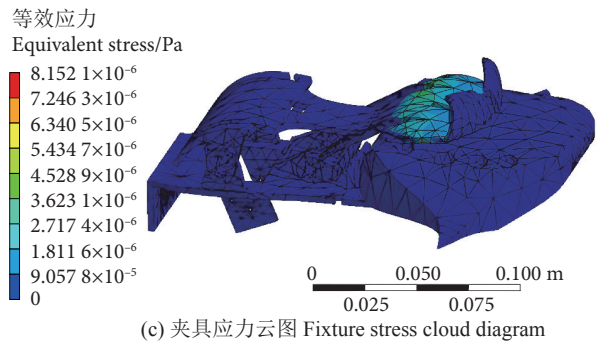
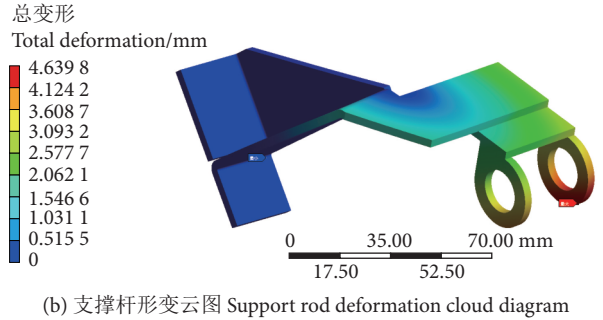
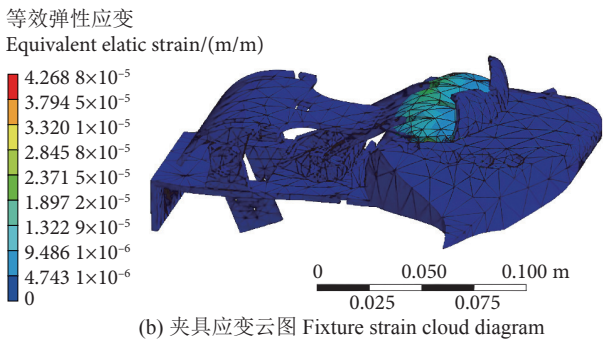
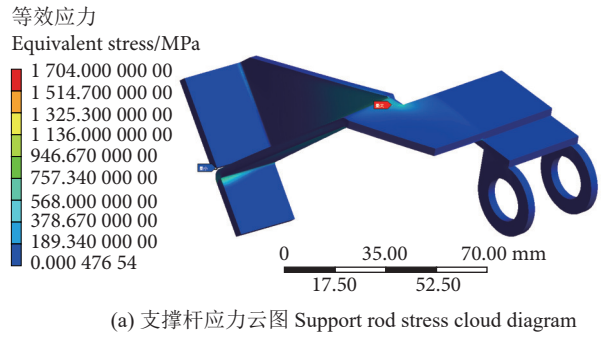
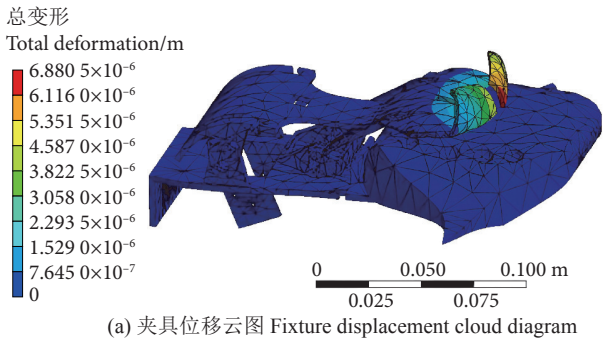


图9 夹具有限元分析

Fig. 9 Clamp finite element analysis

图10 支撑杆分析

Fig. 10 Support rod analysis

2.3 推夹杆轮组的支撑杆分析

有限元分析针对推夹杆轮组的支撑杆，主要关注其在承受较大弯曲应力和变形时的表现。在模拟中，对支撑杆的孔侧端施加了 500 N 的力。如图 10 所示，在预期的工作负荷下，支撑杆的应变和形变分布直观可见，形变为 0.008 02 m，应力为 1 514.7 MPa，对此支撑杆发生弯曲的上直角处所受的弯曲应力几乎无影响。根据冯米赛斯应力准则，该应力水平并未超过材料的失效阈值。这表明支撑杆即使在持续的运动中，也不大可能发生断裂或失稳现象，证明了推夹杆轮设计的可靠性。

2.4 推夹杆轮组整体装配模态分析

在进行模态分析^[30]时，将推杆轮的材料设置为树脂材料。一般情况下，应变能密度较高的区域，这些位置的刚度较小。为避免局部结构因刚度不足而发生断裂或变形，可在这些刚度较小的位置

进行加筋或加厚处理，以提升结构的整体刚性和强度。图 11 的模态分析结果显示，红色区域为该机构易发生损坏的部分。因此，为增强这些部位的抗损坏能力，应选用更高强度的材料。

由图 12 的模态分析结果可得出，夹具、支撑杆的设计均能满足实际应用需求，具有良好的性能。为进一步提升系统的整体性能，未来的工作将专注于对这些关键部件作进一步的测试和优化。

3 样机制作与验证

通过前述虚拟样机的描述以及关键零部件的有限元分析，对实物样机进行了初步搭建(图 13-a)。在硬件配置上，采用了高精度舵机和高性能传动轮组，以保证蟹钳和蟹腿的精确移动。此外，主体装置采用定制的高强度金属件，以确保其在应对强力的同时仍能稳定运行。测试流程如图 13-b 所示，完成样机制作后，对该机构进行了收拢效果测试。

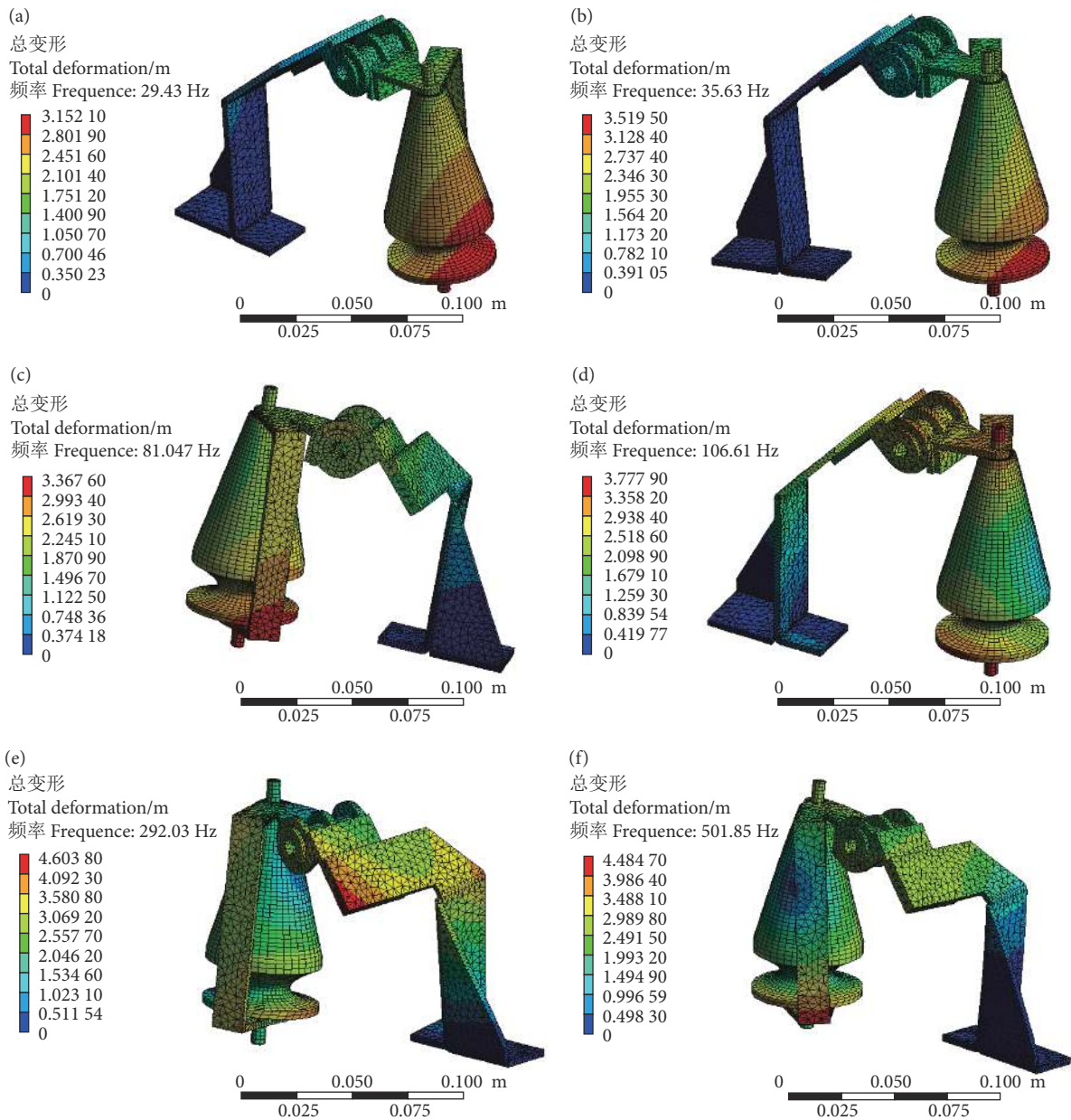


图11 六阶模态分析

Fig. 11 Sixth-order modal analysis

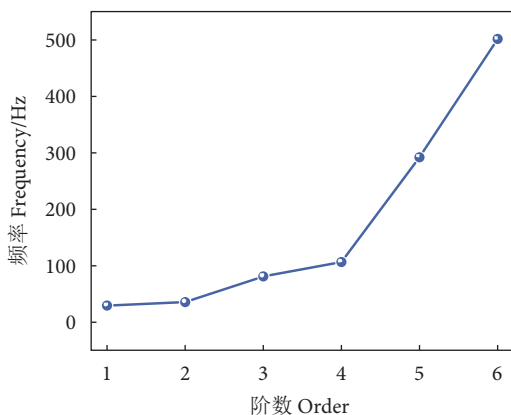


图12 模态分析结果图

Fig. 12 Modal analysis result plot

以图 14-a 的收拢效果为判断依据，达到此效果的为收拢成功；图 14-b 为收拢失败，收拢装置未靠拢，夹具近 90° 倾斜。

对 10 只不同体质量的梭子蟹进行收拢实验。结果显示，10 只梭子蟹中有 8 只达到了较好的收拢效果，对于规格较小且体质量相对同体积梭子蟹质量较大的，收拢效果未达到预定目标 (表 2)。人工收拢蟹钳的时间因熟练程度不同而有差异，一般需要 3~5 s，本机械装置蟹钳收拢时间为 5~6 s，与人工收拢的时间相差不大，且可无间断作业，因此，本研究装置可替代人工操作，自动完成蟹钳的收拢任务。

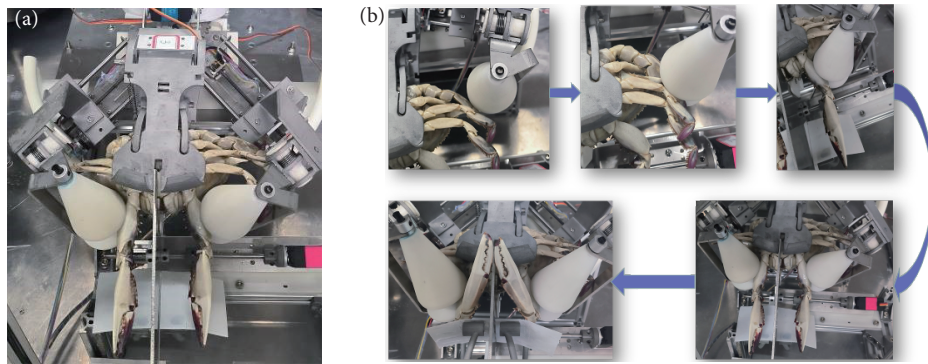


图13 蟹钳折叠整体装置 (a) 与工作流程 (b)

Fig. 13 Integral device (a) and workflow (b) for crab claw folding



图14 蟹钳收拢效果

Fig. 14 Gathering effect of crab claw

表2 梭子蟹蟹钳收拢实验结果

Table 2 Experimental results on gathering effect of crab claw

编号 No.	体积 Volume/mm ³	体质量 Body mass/g	收拢效果 Gathering effect
1	270	327.5	双钳基本符合
2	221	266.8	双钳基本符合
3	104	143.1	双钳基本符合
4	135	172.0	双钳基本符合
5	123	133.7	双钳基本符合
6	123	149.5	双钳基本符合
7	123	147.1	双钳基本符合
8	123	140.9	双钳基本符合
9	123	158.2	双钳不符合
10	80	105.3	双钳不符合

为进一步提高推夹杆轮组的鲁棒性, 在虚拟样机的基础上对其连接部分进行了优化, 增加了回弹弹簧 (图 15-a), 有助于确保机构可稳定运行。同时, 对蟹钳折叠机构部分进行了调整, 如图 15-b 红色框所示部分采用了柔性材料。这一调整旨在避免纯刚性零件对蟹造成损伤, 通过柔性零件

来执行承托和推叠动作, 以最大程度地保持其完整性。

此外, 还对推夹杆轮与蟹臂的贴合程度进行了研究。该形状与蟹臂的贴合度高, 对收拢起到了实际的推动作用 (图 16)。

根据上述一系列测试和分析, 发现该装置达到了初步的设计目标, 为梭子蟹蟹钳收拢装置的制造提供了一个可行的方案。由于本研究仅对 10 只不同规格的梭子蟹进行测试验证, 为获得更好的性能并拓展其应用范围, 有必要对样机作进一步的优化与改进, 如多种不同规格、夹持位置、蟹钳原始状态等, 这些因素都可能对收拢效果产生影响; 此外, 还需对夹具、推夹杆轮和支撑杆的设计进行优化, 以提升整体装置的工作效率和耐用性。

4 结论

通过对梭子蟹的生理特性分析和研究, 介绍了一款基于仿生学梭子蟹蟹钳收拢装置的设计与制作过程。实验结果显示, 该装置能够对梭子蟹的蟹钳和蟹腿进行有效地整理和折叠, 操作过程稳定, 具有良好的实用性。关键部件的有限元分析进一步验证了设计的安全性、可靠性和鲁棒性。通过模态分析, 深入理解装配体的动态行为, 这为后续的设计

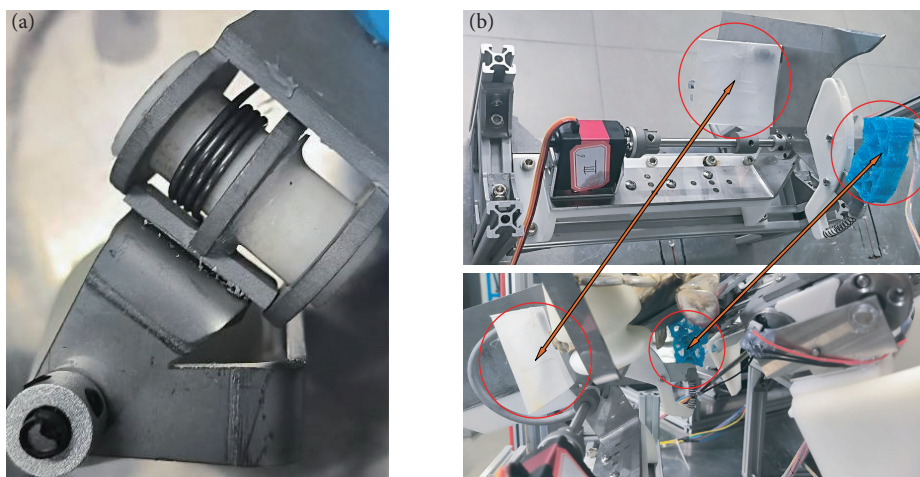


图15 收拢装置的改进

Fig. 15 Improvement of gathering device

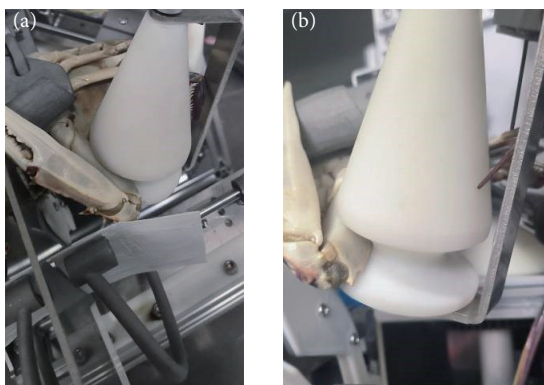


图16 推夹杆轮 (a) 与臂节贴合 (b) 情况

Fig. 16 Fit of pusher lever wheel (a) to merus (b)

改进提供了科学依据。对 10 只梭子蟹进行了收拢效果的实验验证, 成功收拢了 8 只, 收拢时间约为 5~6 s。然而, 对于体积为 133 mm³、体质量低于 130 g 的梭子蟹, 夹具出现了异常情况。未来的研究中, 将通过采用更高功率的舵机或其他类型的电机来优化驱动部分。

本研究为梭子蟹蟹钳收拢装置的设计和制造提供了一个有效框架, 可为蟹钳和蟹腿的整理与折叠机制提供参考, 也为相关领域的研究开拓了新的视角和方向。

参考文献:

- [1] XU G Q, ZHU W B, XU L X. Gillnet selectivity for swimming crab *Portunus trituberculatus* in the East China Sea[J]. *Fish Sci*, 2021, 87(1): 31-38.
- [2] WANG Y B, GAO L, CHEN Y X. Assessment of *Portunus trituberculatus* (Miers, 1876) stock in the northern East China Sea[J]. *Ind J Fish*, 2018, 65(4): 28-35.
- [3] PATEK S N, DUDEK D M, ROSARIO M V. From bouncy legs to

poisoned arrows: elastic movements in invertebrates[J]. *J Exp Biol*, 2011, 214(12): 1973-1980.

- [4] 蒲炜佳, 董世鹏, 张东旭, 等. 三疣梭子蟹池塘综合养殖系统浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *中国水产科学*, 2022, 29(4): 549-561.
- [5] 刘磊, 王春琳, 母昌考, 等. 野生、养殖和“科甬 1 号”群体三疣梭子蟹营养和风味品质比较分析[J]. *食品科学*, 2017, 38(20): 55-62.
- [6] 徐善良, 张薇, 严小军, 等. 野生与养殖三疣梭子蟹营养品质分析及比较[J]. *动物营养学报*, 2009, 21(5): 695-702.
- [7] HAMASAKI K, FUKUNAGA K, KITADA S. Batch fecundity of the swimming crab *Portunus trituberculatus* (Decapoda: Brachyura)[J]. *Aquaculture*, 2006, 253: 359-365.
- [8] SCHMIDT M, HAZERLI D, RICHTER S. Kinematics and morphology: a comparison of 3D-patterns in the fifth pereopod of swimming and non-swimming crab species (Malacostraca, Decapoda, Brachyura)[J]. *J Morphol*, 2020, 281(12): 1547-1566.
- [9] 杜岳峰, 傅生辉, 毛恩荣, 等. 农业机械智能化设计技术发展现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(9): 1-17.
- [10] 梁喜佳, 张洪伟. 浅析机械设计制造及其自动化特点与优势及发展趋势[J]. *科技创新与应用*, 2016(6): 126.
- [11] 魏天琪, 郑雄胜, 李天兵, 等. 基于多组卷积神经网络的梭子蟹性别识别研究[J]. *南方水产科学*, 2024, 20(1): 89-98.
- [12] 谷可欣, 李红, 李坤阳, 等. 软体仿生机械手柔性触觉感知技术研究进展[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(8): 13-27.
- [13] 曾钧生. 融合水下滑翔的两栖仿生机械蟹总体结构设计和游动仿真分析[D]. 深圳: 深圳大学, 2020: 9-23.
- [14] 杜昕, 秦玉芳, 吕琳, 等. 农业机械设计中的仿生设计运用研究[J]. *当代农机*, 2023(2): 48, 50.
- [15] TANG S, ZHU Y, YUAN S. Bionics-inspired structure boosts drag and noise reduction of rotating machinery[J]. *J Bionic Engin*, 2023, 20(6): 2797-2813.
- [16] BABITSKY L F, SOBOLEVSKY I V, KUKLIN V A. Bionic modeling of the working bodies of machines for surface tillage[C]. IOP

- Conference Series: Earth Environ Sci, 2020, 488(1): 012041. DOI:10.1088/1755-1315/488/1/012041.
- [17] TAWK C, ZHOU H, SARIYILDIZ E, et al. Design, modeling, and control of a 3D printed monolithic soft robotic finger with embedded pneumatic sensing chambers[J]. *IEEE-ASME T Mech*, 2020, 26(2): 876-887.
- [18] CHEN Y H, CHUNG H, CHEN B, et al. A lobster-inspired bending module for compliant robotic applications[J]. *Bioinspir Biomim*, 2020, 15(5): 056009.
- [19] CHEN G M, QIAO L, WANG B C, et al. Bionic design of multi-toe quadruped robot for planetary surface exploration[J]. *Machines*, 2022, 10(10): 827.
- [20] 熙鹏, 丛茜, 叶绍波, 等. 真空吸盘的仿生设计与吸附性能分析[J/OL]. *吉林大学学报(工学版)*: 1-10 [2023-12-21]. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230200>.
- [21] 王文谦, 马鹏磊, 李广浩, 等. 仿生机器鱼步态控制及闭环运动控制方法综述[J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(1): 29-45.
- [22] GUO Z, PAN Y, WEE L B, et al. Design and control of a novel compliant differential shape memory alloy actuator[J]. *Sensor Actuat A-Phys*, 2015, 225: 71-80.
- [23] CHIMAKURTHI S K, REUSS S, TOOLEY M, et al. ANSYS Workbench System Coupling: a state-of-the-art computational framework for analyzing multiphysics problems[J]. *Eng Comput*, 2018, 34: 385-411.
- [24] 张乐, 苗虹, 何启源, 等. 基于 ANSYS 的汽轮发电机定子绕组端部模态分析[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2020, 34(9): 252-258.
- [25] 张磊, 孟文俊, 张汉中, 等. 基于有限元方法的输送带模态分析研究[J]. *煤矿机械*, 2021, 42(4): 91-94.
- [26] FARHAN M, KARUPPANAN S, PATIL S S. Frictional contact stress analysis of spur gear by using finite element method[J]. *Appl Mech Mater*, 2015, 772: 159-163.
- [27] SU L H, LU C, DENG G Y, et al. Microstructure and mechanical properties of AA5005/AA6061 laminated composite processed by accumulative roll bonding[J]. *Metall Mater Trans B*, 2014, 45: 515-522.
- [28] GAILLAC R, PULLUMBI P, COUDERT F X. ELATE: an open-source online application for analysis and visualization of elastic tensors[J]. *J Phys-Condens Mat*, 2016, 28(27): 275201.
- [29] VÖLKERINK O, KOSMANN J, SCHOLLERER M J, et al. Strength prediction of adhesively bonded single lap joints with the eXtended Finite Element Method[J]. *J Adhesion*, 2019, 95(5/6/7): 474-494.
- [30] KRANJC T, SLAVIČ J, BOLTEŽAR M. A comparison of strain and classic experimental modal analysis[J]. *J Vib Control*, 2016, 22(2): 371-381.