“刚-柔”共融型仿生机器鱼

梁艺鸣^{1,2,3}, 曹许诺^{3,4}, 陈祥平^{3,4}, 张明琦^{3,4}, 张桢^{3,4}, 华强², 李铁风^{1,3,4*}

1. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027;

2. 之江实验室, 杭州 310000;

3. 浙江大学应用力学研究所, 杭州 310027;

4. 浙江省软体机器人与智能器件研究重点实验室, 杭州 310027

* E-mail: litiefeng@zju.edu.cn

收稿日期: 2018-06-12; 接受日期: 2018-10-26; 网络版发表日期: 2018-11-06

国家自然科学基金(批准号: 11572280, 11321202, 11432012, U1613202)、中国科协青年人才托举工程(编号: YESS20150004)和浙江省自然科学基金(编号: LR18A020001)资助项目

摘要 智能软材料以其高柔顺度、多功能、多物理场效应等优良行为得到了研究者们的关注. 作为一类典型的智能软材料, 介电高弹体(DE)具有电驱动大变形、快速响应、质轻价廉、生物亲和性好等优点, 具有广阔的应用前景. 该材料尤其适合作为人工肌肉应用到仿生机器人中, 实现其结构柔软与大变形驱动. 本文以蝠鲼为仿生原型, 基于材料的电压驱动控制大变形机制, 设计优化了一类介电高弹体薄膜面内驱动变形转化为扑动-波动混合型推进的驱动机构. 将该机构用于胸鳍驱动的机器鱼系统, 通过电子器件-刚性结构-柔性材料的融合集成, 成功设计了一种材料与结构“刚-柔”共融型仿生机器鱼, 并开展了相应的性能测试和功能集成. “刚-柔”共融型仿生机器鱼通过分别独立控制两个胸鳍机构, 可实现良好的机动性能; 并利用高分子材料特性, 可实现结构柔软与全透明化等优异的环境适应性能. 该研究结果和机构设计原理将有望为“刚-柔”共融型机器人和仿生机器人的研究与应用提供参考.

关键词 介电高弹体, 共融机器人, 仿生机器鱼

1 引言

机器人现已被广泛应用到智能制造、环境探测、康复服务等诸多领域^[1]. 作为人类进行环境探测的重要领域, 海洋是地球环境系统的重要组成部分, 也是一种有助于实现可持续发展的宝贵财富. 为了适应人类大规模开发、利用海洋资源的发展, 研究和开发应用于水下的机器人、潜航器以及各类水下机电装备成

为一种重要需求. 目前, 水下机器人或水下潜航器多以电磁马达或液压马达作为动力来源, 使用叶轮式、喷流回转式或螺旋桨推进器. 尽管这类推进器功率大、动力足、可靠性高, 但它们也同时存在着噪声大、结构复杂、机构笨重、可能破坏生物环境等缺陷. 近年来, 研究者开始对各种水生生物的泳动机理进行研究, 仿造水生生物的运动模式设计水下机器人, 实现高效率、长时间的水下作业, 如模仿鱼类尾鳍推进的Ro-

引用格式: 梁艺鸣, 曹许诺, 陈祥平, 等. “刚-柔”共融型仿生机器鱼. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 1295–1301

Liang Y M, Cao X N, Chen X P, et al. Bio-inspired rigid-soft coexisting robotic fish (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 1295–1301, doi: 10.1360/N092018-00193

boTuna^[2], Fish-G9^[3], 气压驱动机器鱼^[4]以及仿箱鲀机器鱼BoxyBot^[5], 机器蝠鲼^[6]等。另一方面, 为了解决电机作为动力源在结构柔顺性上的缺陷, 研究人员开始采用智能软材料驱动器来驱动水下软体机器人, 这类水下机器人往往具有无噪声、结构简单、柔顺度高、环境适应性好等优点^[7,8]。

20世纪90年代, 日本科学家就研究出了压力诱导变形的软体机器人模块^[9,10], 然而受制于工业的发展和人们的认知, 该领域并未得到广泛关注和快速发展。2009年, 欧洲“OCTOPUS”软体机器人研究计划启动, 主要开发软体章鱼机器人原型, 研究其驱动、传感和控制方法^[11~13]。美国Whitesides研究组开发了一系列气动软体机器人^[14~18], 实现了爬行、抓取、跳跃等简单动作。此外, Lin等人开发了由形状记忆合金(Shape Memory Alloy, SMA)驱动的GoQBot机器人, 其能实现翻滚、爬行等运动模式^[19]。日本早稻田大学Nakamaru等人采用自震荡响应凝胶研发了仿生尺蠖^[20]; 浙江大学Li等人以蝠鲼为仿生原型, 利用介电高弹体(Dielectric Elastomer, DE)设计了高速游动的机器鱼^[7]。软体机器人展现出了不同于传统硬质机器人的鲜明特点和极大的应用前景。

智能软材料以其高柔顺度、多功能、多物理场效应等优良行为得到了研究者的关注。作为一类典型的智能软材料, 介电高弹体具有电驱动大变形、快速响应、质轻价廉、生物亲和性好等优点, 具有广泛的应用前景。该材料结构柔软、能量密度高, 尤其适合作为人工肌肉应用到仿生机器人中。研究者们已经使用介电高弹体设计驱动器, 实现了多样的功能, 如伸缩^[21~23]、弯曲^[24]、吸附^[25]、体积变化^[26~28]等。并将其作为动力源, 研发了诸如机器爬虫^[29]、机器鱼^[7,30]、机器水母^[31]等仿生器件。本文以蝠鲼为仿生原型, 设计优化了一种扑动机构。并通过电子器件-刚性结构-柔性材料的融合集成, 大幅提升了仿生推进机构的驱动幅度; 成功设计了一种材料与结构“刚-柔”共融型仿生机器鱼, 并开展了相应的性能测试和功能集成。

2 “刚-柔”共融型仿生机器鱼结构设计

Lindsey将鱼类的推进模式分为身体-尾鳍模式(Body and Caudal Fin, BCF)和中央鳍/对鳍模式(Median and/or Paired Fin, MPF)两类^[32]。采用BCF模式游动

的鱼类往往能获取更高的游速和更大的加速度, 而采用MPF游动的鱼类拥有更高的推进效率和更好的机动性。采用这两种游动方式的代表性动物分别有金枪鱼和蝠鲼。

蝠鲼(Mobula)是鲼科中最大的种类, 体长可达8 m, 体重可达1 t以上, 身体扁平, 有强大的胸鳍。其牙齿细小, 主要以浮游生物和小鱼为食, 经常在珊瑚礁附近巡游觅食。

蝠鲼没有鱼鳔, 不能像大多数鱼类一样悬浮在水中的任意深度, 所以常在海底静伏。其觅食时则在潜水区活动。蝠鲼不仅拥有高效的巡游性能, 其机动性也非常强, 可以快速灵活地实现原地转向。据实地观察, 失去尾鞭的蝠鲼同样能快速转弯, 由此可见, 一对胸鳍就能赋予其很强的机动性。图1所示为本研究组在上海海洋馆深水区拍摄的白点鹰鲼游动图。白点鹰鲼巡游时, 在半个扑动周期内, 胸鳍扑动幅值约为60°到70°。

常见的BCF鱼类在游动时, 通过尾鳍的摆动来实现涡的控制, 每摆动一个周期, 就能脱落一对涡, 即所谓的反卡门涡街。而蝠鲼的游动属于MPF推进模式, 其游动时通过胸鳍的主动扰动并与流体发生耦合作用获得水的作用力。由于其展弦比大, 胸鳍肌肉复杂, 游动时附近的流场呈现强烈的三维特征, 能在特定的方向诱导射流并获得推力、升力或调控姿态所需的力。

我们以蝠鲼为仿生原型, 基于材料的电压驱动控制大变形机制, 优化了一类介电高弹体薄膜面内驱动变形转化为结构弯折变形的驱动模块^[33,34]。该模块由预拉伸的介电薄膜和支撑框架粘合而成, 薄膜的预张力使框架弯折成一定角度, 而驱动电压使薄膜产生面内的扩张和厚度的减小, 支撑框架的弯折角变小。周期性的电压使整体结构展现为扑动的运动模式。进一步地, 我们在驱动模块上集成柔性蒙皮, 模块的上下扑动带动柔软蒙皮形成波动, 这种复合式的扑动-波动混合推进机构在获取足够的推进力的同时, 还能产生一定的升力以维持身体的平衡。

该柔性驱动器结构包含加强筋、驱动层、支撑框架和柔性波动鳍四个部分, 如图2(a)所示。其中加强筋分为两部分, 中间未加强部分即为支撑框架的弯曲段; 中间为采用“介电薄膜-柔性电极-介电薄膜”三层夹心结构的驱动层, 我们使用VHB 4910(3M)作为介电材料, 碳膏作为柔性电极, 保证驱动过程中电极能够与

图 1 (网络版彩图)白点鹰鲼游动姿态, 半个扑动周期(约 1.5 s)

介电材料保持相符变形而不产生约束边界; 下层为支撑框架, 此处为了提高驱动材料的质量占比、降低结构质量, 我们使用柔性PET材料; 柔性波动鳍采用新月形的硬质前缘和相匹配的三角形硅胶薄膜贴合而成。制作时将预拉伸的驱动层固定后夹在支撑框架与加强筋之间紧密粘合, 其后在支撑框架外缘粘接柔性波动鳍。整个柔性驱动器长度为90 mm, 宽度达到148.6 mm, 具有较大的展弦比, 而驱动层驱动部分则为近似长轴60 mm、短轴22 mm的椭圆形。

结构成型后, 将驱动结构约束解除, 使驱动层能够

自由收缩, 此处我们假设加强筋覆盖部分为刚性, 不会产生变形, 则驱动层张力仅会带动支撑框架弯曲段产生接近 90° 的弯曲变形。但是弯曲后由于支撑框架约束, 驱动层会呈现马鞍状, 各点变形极为不均, 即在框架弯曲后, 驱动层展向拉伸减小, 减小幅度沿框架弦向从中间至两侧递减, 而弦向拉伸会因框架形状增大, 增大幅度随框架边缘切线斜率增大而增大, 则此时弦向靠近边缘处拉伸最为严重, 极易发生电击穿, 因此我们通过适当缩小电极图案弦向的尺寸使其变为近似椭圆形以达到提升失效电压的目的。

软体机器鱼系统如图2(b)所示, 由三个部分组成: 左右对称安装的一对柔性胸鳍驱动器, 中部的电源控制模块和沉浮装置, 尾部配重和头部配重。结构各处接缝均使用环氧树脂密封, 导线衔接处使用硅胶管密封。

机器鱼的自由度包括左右转向和上下浮沉。当一对胸鳍柔性驱动器受同频同幅值的电压驱动时, 机器鱼直线游动; 当胸鳍柔性驱动器一侧驱动或“差压”驱动时实现转向。上下浮沉则通过改变机器鱼的俯仰角实现, 由高压模块尾端加装的微型数字舵机控制一块配重块来实现对机器鱼重心的改变, 即通过重心与浮心之间产生的力矩实现机器鱼俯仰角度的改变, 进而配合胸鳍柔性驱动器的驱动力实现上浮或下沉。

3 “刚-柔”共融型仿生机器鱼性能测试

首先对胸鳍驱动器进行静态加载, 过程如图3所示。依据实验我们发现, 在驱动电压小于4 kV时, 驱动变形的角度随电压升高缓慢增加; 在电压高于4 kV低

图 2 (网络版彩图)仿生机器鱼结构示意图. (a) 柔性胸鳍单元组成; (b) 机器鱼组装集成图

图3 (网络版彩图)不同电压驱动下的柔性胸鳍机构的变形状态

于8 kV时变形角度随电压升高显著提高; 当驱动电压达到8 kV时, 变形角度可达 162° ; 超过8 kV后, 随着支撑框架弯曲段挠度接近直线, 驱动层所能提供的力矩迅速降低, 而驱动层和框架厚度产生的力矩会使变形明显, 因此, 该变化不明显, 变形角度最高达 169.9° . 该胸鳍驱动器能提供的最大扭矩约为 $12 \text{ mN}\cdot\text{m}$. 单位体积(1 cm^3)的驱动材料提供扭矩约为 $115 \text{ mN}\cdot\text{m}$. 为了提升驱动模块在实际应用中的可靠性, 我们在之后的游动性能测试中将驱动电压设置得略低一些.

机器鱼的驱动频率范围为 0.4 Hz ~ 2.0 Hz . 该范围取决于电源的工作能力, 超出该范围, 输出电压品质较差(充放电速度慢、电压幅值不稳定等). 通过测试, 我们发现在 1 Hz 左右频率的电压驱动下, 机器鱼能达到较高的游速.

机器鱼整体驱动效果分为直线游动, 转向和沉浮三个方面.

直线游动如图4所示, 输入电压和频率分别设定为 6 kV 和 1 Hz , 得到对应机器鱼的游动轨迹, 此时机器鱼的游动速度可以达到 36 mm/s , 约等于 0.4 BL/s (体长/秒).

机器鱼的转向能力由单独驱动两侧胸鳍驱动器的“差压”范围决定. 如图5所示, 仅驱动单侧胸鳍驱动器实现转向, 在单侧驱动器加载 6 kV , 1 Hz 电压下, 机器鱼耗时 15.8 s 完成 180° 的转向, 转弯半径为 10.1 cm ; 在实验中如将交流电压设为 7.5 kV , 1 Hz , 机器鱼只需使用 9.3 s 即可完成 180° 的转向, 转弯半径为 8.5 cm .

沉浮实验中, 我们从电源模块引出一组低压PWM

图4 (网络版彩图)机器鱼进行直线游动

图5 (网络版彩图)机器鱼进行转向. (a) 6.0 kV , 1 Hz 电压驱动下机器鱼的转弯轨迹; (b) 7.5 kV , 1 Hz 电压驱动下机器鱼的转弯轨迹

信号控制一路微型数字舵机(PINGZHENG, 2.1 g), 并在数字舵机上加装了 3 g 的配重, 调节舵机转角即可控制配重块相对位置进而调节机器鱼整体的重心位置. 图6所示为机器鱼的三种基本状态, 鱼体与水平的夹角分别为 -29.7° , 0.1° 和 27.3° .

在这三种状态下配合胸鳍驱动器, 机器鱼能完成下潜、巡航、上浮三种运动. 我们在封闭的水缸中测试了机器鱼的基本性能(由于水缸的尺寸限制, 我们将机器鱼头尾的平衡组件去掉, 性能影响可忽略不计), 这里给定了幅值为 6.5 kV , 频率为 1 Hz 的电压信号. 图7(a)显示了在 36 cm 的行程(4倍体长)内, 机器鱼完成从水面下潜 7.7 cm 再上浮至水面的过程. 在这个过程中, 通过连续调节机器鱼重心逐步由前转后, 俯仰角逐步由负值转变为正值, 实现较为灵活的俯仰机动. 单独测试沉浮试验, 在下沉状态时, 如图7(b)所示, 机器鱼在 5.7 s 内即可完成从启动到下潜至水底整个过程, 平均每秒下潜 2.2 cm ; 在上浮状态时, 如图7(c)所示, 机器鱼在 7.4 s 内即可完成从启动到浮出水面的整个过程, 平均每秒上浮 1.7 cm ; 在巡航状态时, 如图7(d)所

图 6 (网络版彩图)在配重块调整下机器鱼的三种基本姿态. (a) 下潜姿态; (b) 巡航姿态; (c) 上浮姿态

图 7 (网络版彩图)(a) 机器鱼连续完成的下潜、上浮动作; (b) 机器鱼下潜状态; (c) 机器鱼上浮状态; (d) 机器鱼巡航状态

示, 机器鱼能将质心基本维持在一定的深度, 并能稳定地保持整体没入水下, 极大地避免了在浅水航行时的水波阻力. 机器鱼在巡航状态下的无外接电源续航时间约为40 min(240 mAh锂电池供电).

值得注意的是, 在这个过程中我们并未改变机器鱼的整体质量或者体积, 仅通过姿态的变化来调节柔性胸鳍推进力的方向, 实现其在水中的巡航或沉浮,

图 8 (网络版彩图)机器鱼良好的光学隐身特性. (a) 正视图; (b) 侧视图

可靠性得到了大幅提升. 由于没有采用鱼鳔, 机器鱼的工作深度在理论上仅受到机械结构承压能力的制约. 对比现有的研究, 无论是沉浮的效率还是适用范围, 都具有明显的优势.

此外, 如若使用全透明材料来设计该软体机器鱼, 即可实现外观高透明的机器鱼. 具体实施方式为: 将上述有色PET片材替换为全透明PET片材, 硅胶软翼替换为全透明PDMS薄膜, 碳膏电极替换为导电水凝胶^[35]. 水下的透明性效果如图8所示, 机器鱼能够在水下有良好的光学隐身性. 机器鱼躯体部分透明性极高, 只有高压电源部分有不透明的电子器件和锂电池.

4 结论

本文利用介电高弹体作为人工肌肉应用到仿生机器鱼中, 通过结构设计将介电高弹体薄膜面内驱动变形转化为扑动-波动混合型推进. 以蝠鲼为仿生原型, 将驱动机构用于胸鳍推进构建机器鱼系统; 通过电子器件-刚性结构-柔性材料的融合集成, 最终实现材料与结构“刚-柔”共融型仿生机器鱼. 通过分别独立控制两个胸鳍机构以及微型舵机调控重心的方法, 使“刚-柔”共融型仿生机器鱼具有良好的机动性能, 可很好实现快速前进、小半径转向动作. 本文所获得的机器鱼性能测试结果以及设计原理将为未来新型机器人的设计与应用提供指导与参考.

参考文献

- 1 熊有伦, 李文龙, 陈文斌, 等. 机器人学: 建模、控制与视觉. 武汉: 华中科技大学出版社, 2018

- 2 Techet A H, Hover F S, Triantafyllou M S. Separation and turbulence control in biomimetic flows. [Flow Turbulence Combust](#), 2003, 71: 105–118
- 3 Liu J, Hu H. Biological inspiration: From carangiform fish to multi-joint robotic fish. [J Bionic Eng](#), 2010, 7: 35–48
- 4 Marchese A D, Onal C D, Rus D. Autonomous soft robotic fish capable of escape maneuvers using fluidic elastomer actuators. *Soft Robot*, 2014, 1: 75–87
- 5 Lachat D, Crespi A, Ijspeert A J. Boxybot: A swimming and crawling fish robot controlled by a central pattern generator. In: The Proceedings of the First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. IEEE, 2006. 643–648
- 6 Xu Y, Zong G, Bi S, et al. Initial development of a flapping propelled unmanned underwater vehicle (UUV). In: 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. IEEE, 2007. 524–529
- 7 Li T, Li G, Liang Y, et al. Fast-moving soft electronic fish. [Sci Adv](#), 2017, 3: e1602045
- 8 Villanueva A, Smith C, Priya S. A biomimetic robotic jellyfish (Robojelly) actuated by shape memory alloy composite actuators. *Bioinspir Biomim*, 2011, 6: 036004
- 9 Suzumori K, Iikura S, Tanaka H. Applying a flexible microactuator to robotic mechanisms. *IEEE Contr Syst Mag*, 1992, 12: 21–27
- 10 Suzumori K, Iikura S, Tanaka H. Development of flexible microactuator and its applications to robotic mechanisms. In: 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1991. 1622–1627
- 11 Calisti M, Arienti A, Giannaccini M E, et al. Study and fabrication of bioinspired octopus arm mockups tested on a multipurpose platform. In: 2010 3rd IEEE RAS and EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. IEEE, 2010. 461–466
- 12 Margheri L, Laschi C, Mazzolai B. Soft robotic arm inspired by the octopus: I. From biological functions to artificial requirements. *Bioinspir Biomim*, 2012, 7: 025004
- 13 Mazzolai B, Margheri L, Cianchetti M, et al. Soft-robotic arm inspired by the octopus: II. From artificial requirements to innovative technological solutions. *Bioinspir Biomim*, 2012, 7: 025005
- 14 Shepherd R F, Ilievski F, Choi W, et al. Multigait soft robot. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 2011, 108: 20400–20403
- 15 Ilievski F, Mazzeo A D, Shepherd R F, et al. Soft robotics for chemists. [Angew Chem](#), 2011, 123: 1930–1935
- 16 Martinez R V, Branch J L, Fish C R, et al. Robotic tentacles with three-dimensional mobility based on flexible elastomers. [Adv Mater](#), 2013, 25: 205–212
- 17 Martinez R V, Glavan A C, Keplinger C, et al. Soft actuators and robots that are resistant to mechanical damage. [Adv Funct Mater](#), 2014, 24: 3003–3010
- 18 Bartlett N W, Tolley M T, Overvelde J T B, et al. A 3D-printed, functionally graded soft robot powered by combustion. [Science](#), 2015, 349: 161–165
- 19 Lin H T, Leisk G G, Trimmer B. GoQBot: A caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot. *Bioinspir Biomim*, 2011, 6: 026007
- 20 Nakamaru S, Maeda S, Hara Y, et al. Development of novel self-oscillating gel actuator for achievement of chemical robot. In: 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2009. 4319–4324
- 21 Kovacs G, Düring L, Michel S, et al. Stacked dielectric elastomer actuator for tensile force transmission. *Sensor Actuat A-Phys*, 2009, 155: 299–307
- 22 Teh Y S, Koh S J A. Giant continuously tunable actuation of a dielectric elastomer ring actuator. *Extreme Mechanics Letters*, 2016, 9: 5–203
- 23 Koh S J A, Keplinger C, Kaltseis R, et al. High-performance electromechanical transduction using laterally constrained dielectric elastomers part I: Actuation processes. *J Mech Phys Solids*, 2017, 105: 81–94
- 24 Wang H, Li L, Zhu Y, et al. Analysis and application of a rolled dielectric elastomer actuator with two degrees of freedom. *Smart Mater Struct*, 2016, 25: 125008
- 25 Shintake J, Rosset S, Schubert B, et al. Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators. [Adv Mater](#), 2016, 28: 231–238
- 26 Li T, Keplinger C, Baumgartner R, et al. Giant voltage-induced deformation in dielectric elastomers near the verge of snap-through instability. [J Mech Phys Solids](#), 2013, 61: 611–628
- 27 Lu T, An L, Li J, et al. Electro-mechanical coupling bifurcation and bulging propagation in a cylindrical dielectric elastomer tube. *J Mech Phys Solids*, 2015, 85: 160–175
- 28 Liu B, Chen F, Wang S, et al. Electromechanical control and stability analysis of a soft swim-bladder robot driven by dielectric elastomer. [J Appl Mech](#), 2017, 84: 091005

- 29 Cao J, Qin L, Liu J, et al. Untethered soft robot capable of stable locomotion using soft electrostatic actuators. *Extreme Mechanics Letters*, 2018, 21: 9–16
- 30 Shintake J, Caccuciolo V, Shea H, et al. Soft biomimetic fish robot made of dielectric elastomer actuators. *Soft robot*, 2018, 5: 466–474
- 31 Godaba H, Li J, Wang Y, et al. A soft jellyfish robot driven by a dielectric elastomer actuator. *IEEE Robot Autom Lett*, 2016, 1: 624–631
- 32 Lindsey C C. 1-Form, function, and locomotory habits in fish. *Fish Physiology*, 1978, 7: 1–100
- 33 Zhao J, Niu J, McCoul D, et al. Improvement on output torque of dielectric elastomer minimum energy structures. *Appl Phys Lett*, 2015, 107: 063505
- 34 Zhao J, Niu J, McCoul D, et al. Phenomena of nonlinear oscillation and special resonance of a dielectric elastomer minimum energy structure rotary joint. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 133504
- 35 Keplinger C, Sun J Y, Foo C C, et al. Stretchable, transparent, ionic conductors. *Science*, 2013, 341: 984–987

Bio-inspired rigid-soft coexisting robotic fish

LIANG YiMing^{1,2,3}, CAO XuNuo^{3,4}, CHEN XiangPing^{3,4}, ZHANG MingQi^{3,4}, ZHANG Zhen^{3,4}, HUA Qiang² & LI TieFeng^{1,3,4}

¹ The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

² Zhejiang Lab, Hangzhou 310000, China;

³ Institute of Applied Mechanics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

⁴ Key Laboratory of Soft Machines and Smart Devices of Zhejiang Province, Hangzhou 310027, China

Soft active materials have been widely studied due to their unique attributes of high compliance, various functions and multi physics coupling effects. As a typical soft active material, dielectric elastomer (DE) is promising in various applications, possessing the advantages of large voltage-induced actuation, fast response, lightweight, low cost and high biocompatibility. Utilizing the good performance of large actuation and high compliance, dielectric elastomer is an idea material to drive bio-inspired robot as the artificial muscle. This paper has designed a Manta Ray inspired robotic fish. Utilizing the large actuation of DE membrane, the robot achieves the coupling propulsion of flapping and undulatory motions. The electronics of power and control have been co-fabricated in the body of the robot. The robot achieves good mobility and high environmental adaptability based on its fully soft and transparent structure. The experimental results and design principle of this paper may guide the future design and application of “soft-rigid” co-existed robots and bio-inspired robots.

dielectric elastomer, tri-co robot, bio-inspired robotic fish

doi: [10.1360/N092018-00193](https://doi.org/10.1360/N092018-00193)