文章编号: 1007 - 4252(2020) 03 - 0003 - 219

离子聚合物材料驱动的仿墨鱼喷射结构设计与研究

唐刚强[1],王延杰[*1.2],张磊[1],王嘉晖[1],王家乐[1],骆敏舟[1.2]
(1.河海大学 机电工程学院,江苏 常州 213022; 2.河海大学 江苏省特种机器人技术重点实验室,江苏 常州 213022)

摘要: 墨鱼是一种常见的海生鱼类,其在逃生时的快速运动机制具有良好的机动性,该机制通过柔软的外套膜快速收缩实现喷射推进。离子聚合物金属复合材料(IPMC) 是一种具有大变形的柔性驱动材料,被广泛应用于水下仿生机器人,可通过其柔性变形模拟墨鱼喷射运动中的外套膜收缩。因而本文基于墨鱼的喷射推进原理,采用 IPMC 作为驱动器,研制了一种仿墨鱼喷射装置,该装置可实现水下连续喷射推进。首先,设计了喷射装置的结构; 然后,通过仿真对一些结构参数进行了优化; 最后,制作了样机并对其进行了游动性能测试。经过测试,推进装置平均推进速度为1mm/s,瞬时推进速度为 10mm/s,推进力为 0.782mN,推进效率为 2.38%。该装置的研究为 IPMC 材料的水下驱动机制提供了一种新的思路。

关键词: 墨鱼; 仿生; 喷射推进; IPMC
中图分类号: TB333 **文献标志码:** A

Design and Research of Cuttlefish-like Jet Structure Actuated by Ionic Polymer Materials

TANG Gangqiang[1], WANG Yanjie[1,2], ZHANG Lei[1], WANG Jiahui[1], WANG Jiale[1], LUO Minzhou[1,2]
(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu, 213022; Jiangsu Key Laboratory of Special Robotics Technology, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China)

Abstract: Cuttlefish is a common marine fish with good maneuverability for fast-moving mechanism during escape. This mechanism achieves jet propulsion through rapid contraction of the soft mantle. Ionic polymer metal composite (IPMC) is a flexible driving material with large deformation that is widely used in underwater bionic robots.It can simulate the shrinkage of the mantle film in the jet movement of cuttlefish through its flexible deformation. Therefore, based on the principle of cuttlefish jet propulsion, an imitating cuttlefish injection device is developed by using IPMC as actuator, which can realize underwater con-

收稿日期: 2020-04-26; **修订日期:** 2020-06-02
基金项目: 国家自然科学基金项目(51975184) ,中央高校业务费项目(2019B21514) ,江苏省重点研发计划(BE2016055) ,江苏省特种机器人技术高校重点实验室开放基金项目资助(2017B21114) 和常州市基础研究计划项目资助(CJ20179050) .
作者简介: 唐刚强(1996-) ,男,江苏盐城人,在读硕士,主要研究方向: 先进仿生系统,柔性传感技术(E-mail: tgq125800@ 163.com)
通信作者: 王延杰(1985-) ,男,河北邢台人,博士,教授,主要研究方向: 智能材料与结构,机器人技术(E-mail: yjwang@ hhu.edu.cn)

tinuous jet propulsion. Firstly, the structure of the injection device was designed. Then, some structural parameters were optimized by simulation. Finally, the prototype was fabricated and tested for swimming performance. After swimming performance test, it is found that the average propulsion speed of the designed propulsion device is 1mm/s, the instantaneous propulsion speed is 10 mm/s, the propulsion force is 0.782mN, and the propulsion efficiency is 2.38%.The study of this device provides a new idea for the underwater driving mechanism of IPMC materials.

Key words: Cuttlefish; Bionics; Jet propulsion; IPMC

0 引言

墨鱼是一种常见的海生软体生物，属于软体动物的头足类[1-2]。如图 1 所示，墨鱼的身体主要由头部、腕部、外套膜、喷嘴以及鳍部五个部位组成。墨鱼的运动非常灵活，一方面可以通过鳍部和腕部的波动实现转弯，低速游动等一系列运动；另一方面还可以通过喷嘴射流的反向推进力实现高速逃生动作，这种复合推进方式是墨鱼得以生存的一大重要优势。墨鱼的喷射推进过程主要由充水和喷水两个步骤组成，如图 2 所示，在充水阶段，墨鱼的喷嘴闭合，喷嘴与头部接合处的漏斗口打开，外套膜向外膨胀，喷腔内压力减小，完成充水动作。在喷射过程中，漏斗口闭合，喷嘴打开，外套膜向内收缩，喷腔的瞬间高压将腔内的液体通过喷嘴射出体外，射流的反向力推动墨鱼向身体的后方移动[3-4]。本文从墨鱼的喷射推进机制中获得启发，利用离子聚合物-金属复合材料(IPMC)作为驱动器设计一种用于水下推进的喷射装置。

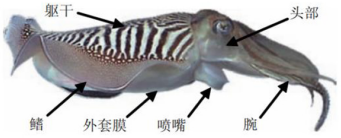


图 1 墨鱼结构示意图

Fig1 Structure of cuttlefish

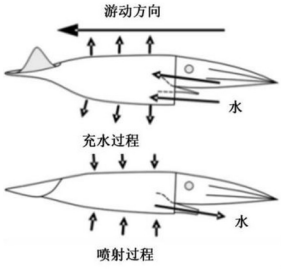


图 2 墨鱼喷射推进示意图

Fig2 Diagram of jet propulsion of cuttlefish

离子聚合物-金属复合材料(IPMC)[5-7]是电活性聚合物(EAP)材料[8-9]的典型代表，也是目前离子型 EAP[10]材料领域的一大研究热点，具有良好的驱动性能。表 1[11]列出了 IPMC 与其他软材料的各项性能对比，从表中可以看出，相比于压电陶瓷(PZT)[12]和形状记忆合金(SMA)[13-14]，IPMC 材料具有变形大，响应时间短，驱动电压小，耗能低的优点，因此被广泛应用于水下仿生机器人，微泵，电活性微导管，医疗设备等领域[15-18]。

表 1 IPMC 与其他智能材料性能对比

Table1 Performance comparison between IPMC and other intelligent materials

	IPMC	PZT	SMA
应变(%)	>10.0	0.1~0.3	<8.0
应力(MPa)	0.1~3.0	30~40	700
响应时长(s)	10^{-6}~1	10^{-6}~1	1~60
驱动电压(V)	1~10	50~800	—
密度(g/mL)	1~2.5	6~8	5~6
功耗量级	mW	W	W
断裂韧度	弹性	脆性	弹性

如图 3 所示，IPMC 材料由一片基体交换膜和附着在其上的两层金属电极组成，形成一种类“三明治”结构。制备 IPMC 所用的基体交换膜一般采用全氟磺酸(Nafion)膜，通过电镀、化学镀、物理气相沉积、电子溅射[19-20]等方法将电极附着在集体膜两侧，电极材料一般采用金，银，铂，钯，铜等单一金属电极以及钯-铂，铜-金，铂-银，钯-金等多金属复合电极两种形式[21-23]。本设计采用化学镀-电镀联合方法制备的 Pd-Au 型 IPMC 作为驱动材料。IPMC 的制动原理如图 4 所示，当在 IPMC 上下表面施加电压后，上下表面之间形成电场，在静电力作用下，可移动离子将发生定向迁移[24]。一方面，由于受到

聚合物的束缚，可移动阴离子不能发生迁移，而可移动阳离子迁移到阴极侧，导致了沿厚度方向离子浓度分布不均。另一方面，可移动阳离子在迁移过程中会对溶剂分子具有拖拽作用，溶剂分子随可移动阳离子一起迁移到阴极侧，导致沿厚度方向溶剂分子压力梯度分布不均。在这两方面作用下，IPMC 材料压力梯度高的一侧发生膨胀，另一侧收缩，从而导致材料的整体变形。

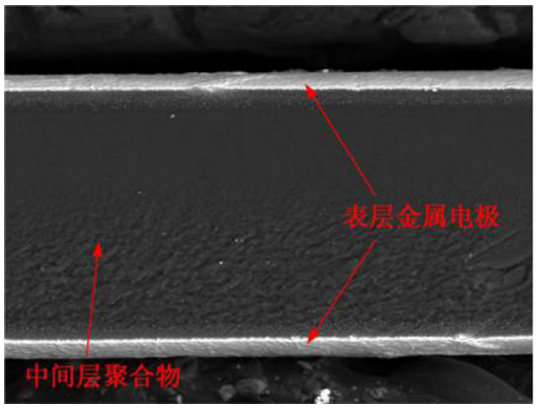


图 3　IPMC 电镜图

Fig 3 Electron micrograph of IPMC

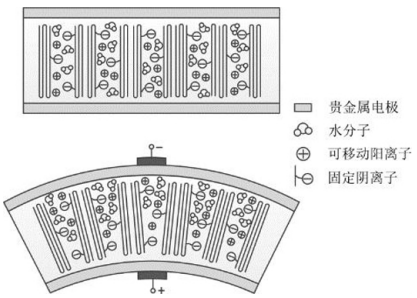


图 4 IPMC 驱动原理

Fig 4 Driving principle of IPMC

1　推进装置总体设计

根据墨鱼的喷射机制设计了如图 5 所示的喷射结构，该装置由端盖、喷嘴和驱动器三部分组成。装置的驱动采用外接电源，当在驱动器上下表面施加交流电压时，驱动器会上下振动，装置交替进行吸水和排水。

驱动器由两层 VHB 胶将两片作为电极的铜环固定在 IPMC 的上下表面，如图 6。起驱动作用的 IPMC 呈瓣状，中间有 8 条悬臂梁结构，上下表面施加电压后，每条悬臂梁上下运动，带动驱动器整体上下振动。

与之前多数学者的仿墨鱼喷射结构不同，本设计并未采用驱动器驱动外套膜进行排水，而是利用驱动器的变形运动直接进行排水。这是由于 IPMC 的驱动力较小，一般外套膜采用硅胶结构，若将 IPMC 铸入硅胶内部驱动外套膜会大大降低 IPMC 的驱动能力。

IPMC 设计成瓣状有利于驱动器的驱动，瓣状 IPMC 的 8 条悬臂梁处于一个整体，只需施加一个外接电源即可对全部 8 条悬臂梁进行驱动，且 8 条悬臂梁的运动状态严格保持一致。若采用条状 IPMC，需对每一条 IPMC 分别进行驱动，并保持运动状态一致。

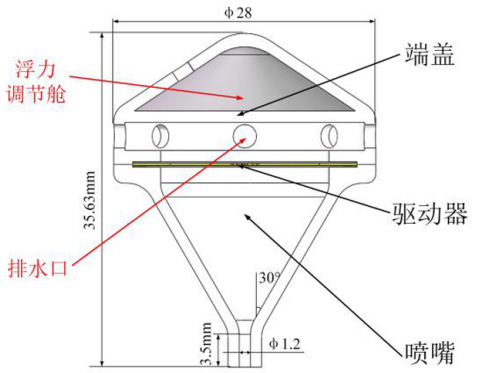


图 5　推进装置总体设计

Fig 5 General design of injection device

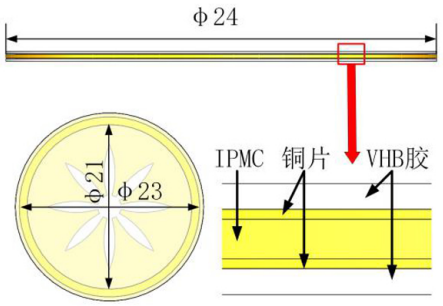
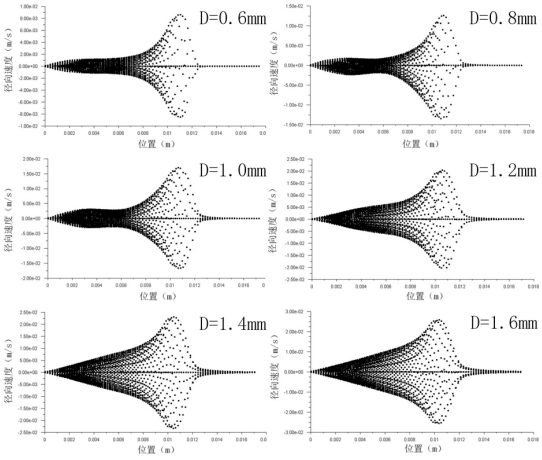


图 6　驱动器结构图

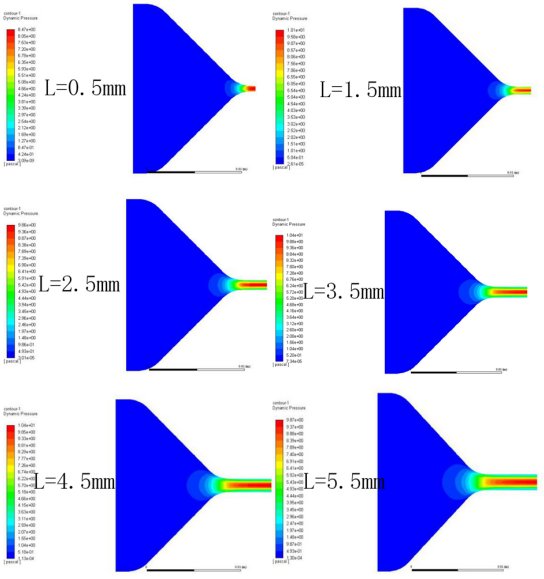
Fig 6 Structure of the actuator

端盖前端设计成锥状，可以降低运动的阻力。端盖上设有浮力调节舱和排水口，通过调节浮力调节舱内的水量可以调节装置整体的浮力，实现漂浮、悬浮、沉底三种状态。排水口的作用是当装置充水时，将驱动器向端盖内部运动带来的压力释放出去。

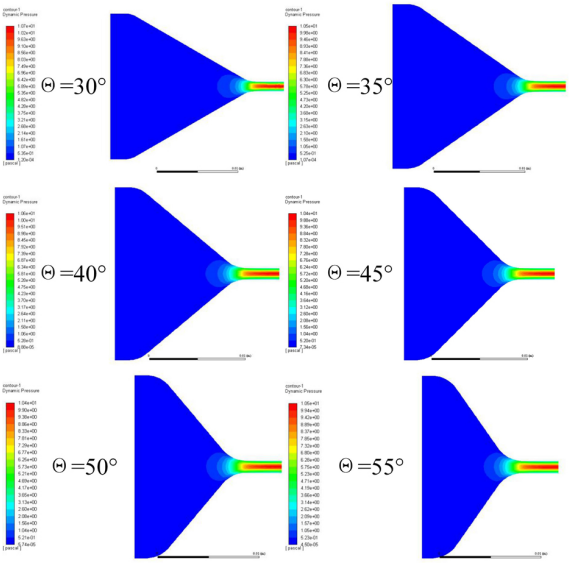
喷嘴主要起排水时形成稳定流束的作用，因此喷嘴内部的各参数直接影响喷嘴射流的稳定性与压力。射流从喷嘴内部流出时，内壁倾斜使射流具有径向力，倾斜角会影响流束的径向力大小；圆柱状喷道起整流作用，消除射流的径向力，喷道直径影响完成整流的距离，对不同直径应选择合适的喷道长度。利用 Fluent 对三个参数下喷嘴的内部流场进行仿真，首先确定不同喷道直径对应的整流长度，选择不同直径下的最有喷道长度，然后对不同长度及内壁倾斜角的内部流场进行仿真，确定最优参数。如图 7 所示是不同喷道直径，喷道长度以及不同内壁倾斜角对应的仿真图像，根据仿真结果，当喷道直径为 1.2mm，长度为 3.5mm，倾斜角为 30°时，射流的出口压力最大。



（a）不同喷嘴直径径向速度分布



（b）不同喷道长度压力云图



（c）不同倾斜角压力云图

图 7 喷嘴内部流场

Fig 7 Simulation of flow field in nozzle

2 材料选择与样机制作

2.1 IPMC 的制备与选型

IPMC 的制备主要分为五个步骤：预处理、浸泡-还原镀、电镀前处理、电镀以及电镀后处理。如图 8 所示，预处理通过超声清洗、盐酸煮洗以及去离子水煮洗去除 nafion 膜表面的油污以及内部杂质；浸泡还原镀通过浸泡氯化四氨合钯在将 nafion 膜中的氢离子交换为钯离子，再利用硼氢化钠将钯离子在 nafion 表面还原成钯电极；电镀是在钯电极上镀一层金电极，降低表面电阻，提高驱动性能；电镀后处理通过浸泡氢氧化钠溶液将氢离子置换为钠离子进一步提高 IPMC 的驱动性能。

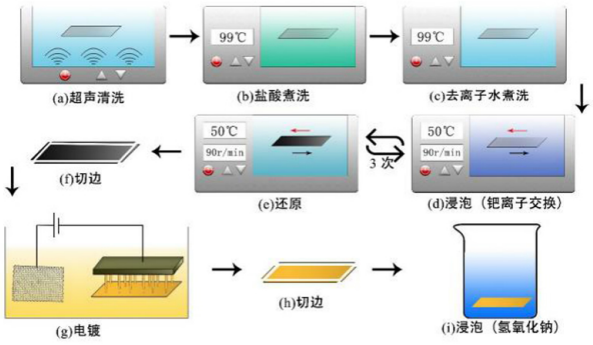


图 8 IPMC 制备流程

Fig 8 Preparation process of IPMC

图 9　力与位移测试平台

Fig 9 Force and displacement test platform

实验分别制备了厚度为 0.2mm 与 0.5mm 的 IPMC，通过如图 9 所示的力与位移测试平台对两种厚度的 IPMC 性能进行了测试。实验选用的样片如图 10 所示，样片长度为 22mm，宽度为 4mm。

测试结果如图 11 所示，结果表明当施加峰峰值为 5V 的交流信号时，0.2mm 厚的 IPMC 位移响应为 0.5mm 的两倍，输出力响应为 0.5mm 的 1/2。在本装置中，IPMC 的变形量决定了装置的排水量，即装置能否产生稳定的射流，因而选择 0.2mm 厚的 IPMC 进行驱动。

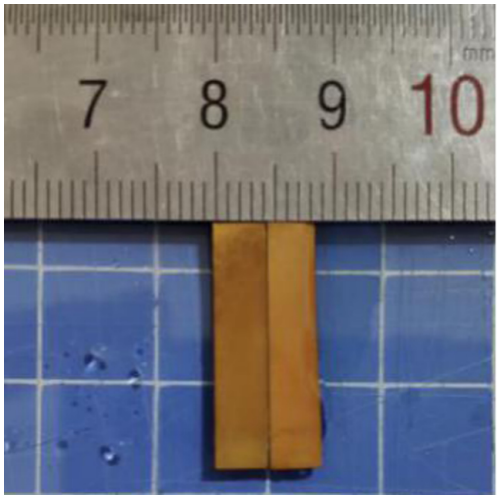
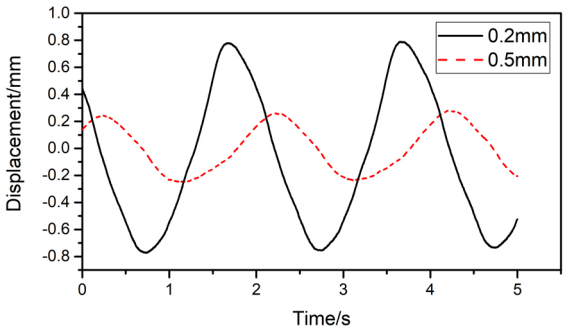


图 10　实验选用的 IPMC 样片

Fig 10 IPMC samples selected in the experiment

2.2　样机制作

喷嘴与端盖对材料的性能要求相似，要求材料质地坚硬，密度小，在水中运动阻力小。SOMOS8000 树脂材料是一种低粘度光敏聚合物，外观为白色不透明状，其粘度为 340cps，密度为 1.16g/cm^3，可制造



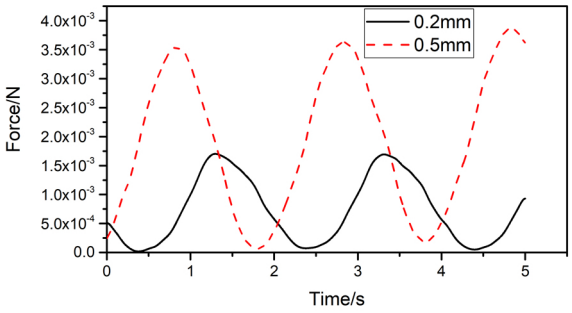


图 11　不同厚度 IPMC 的力与位移响应特性

Fig 11 Response characteristics of force and displacement of IPMC with different thickness

结实、精确和防水的部件，在航天，汽车和消费品工业等领域有着广泛的应用，满足推进装置的性能要求。因此喷嘴与端盖利用 SOMOS8000 树脂材料 3D 打印成型。

驱动器采用 0.2mm 厚的瓣状 IPMC，两面覆盖环状铜电极后采用型号为 3M9469PC 的 VHB 胶进行封装。推进装置的装配方式采用卡夫特强力 AB 胶进行交接，装配后的样机如图 12 所示。

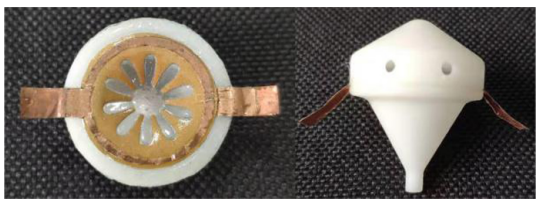


图 12　装配后的样机

Fig 12 Assembled prototype

3　推进性能测试

为了研究设计的推进设备的性能，搭建了如图 13 所示的速度测量平台。推进装置外接电源置于去离子水中，调节浮力调节舱中的水量使装置处于

悬浮状态，利用摄像机对样机的游动过程进行拍摄。

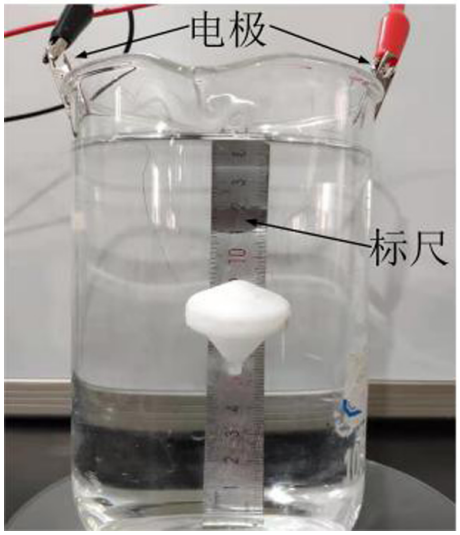
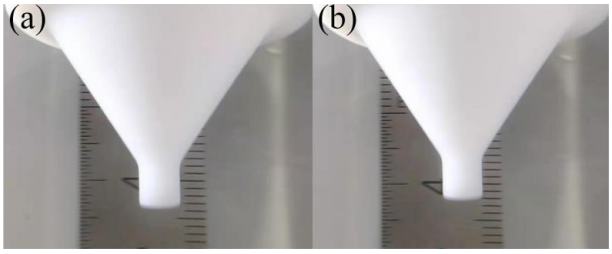


图 13 速度测量平台

Fig 13 Speed measuring platform

通过信号发生器给喷射装置施加驱动电压，首先施加峰峰值为 5V，频率为 1Hz 的正弦波信号，此时喷射装置无动作，这是由于，正弦信号的对称性为 50%，喷射装置排水时长与充水时长一致，不能瞬间进行排水，射流压力不足。当对称性调整至 90% 时，喷射装置产生明显运动动作，根据图 14 的位置图，推进装置一个周期向前推进距离为 1mm，平均推进速度为 1mm/s，结合输入信号的对称型，计算得瞬时推进速度为 10mm/s。



(a) 周期初始位置 (b) 周期结束位置

图 14 一周期内样机始末位置

Fig14 Beginning and end position of prototype in one cycle

在实验得出喷射装置推进速度的基础上，可通过理论计算其推进力与推进速度。本装置的喷射推进是一种不稳定的脉冲喷射游动模式，喷射推力值是单位时间内排出的水量的动量变化[25]。准稳定流的推进力 F 计算公式为：

$$F = \frac{\rho_w v_w v_j}{t} \tag{1}$$

式中 ρ_w 为液体密度，v_w 为随时间 t 排出的水的体积，v_j 为随时间 t 排出的水的平均速度。其中

$$v_j = \frac{v_w}{\pi r^2 t} \tag{2}$$

式中 r 为喷嘴半径。

推进效率 η 的计算公式为：

$$\eta = \frac{2uv_j}{u^2 + v_j^2} \tag{3}$$

式中 u 为喷射装置的喷射推进速度。

就本设计而言，液体密度 ρ_w 为 1000kg/m^3，排水体积 v_w 为 47mm^3，喷嘴半径为 0.6mm，装置喷射推进速度 u 为 10mm/s。

基于以上公式及数据，计算得推进力 F = 0.782mN，推进效率 η = 2.38%。

4 结论

本文利用离子聚合物金属复合材料 IPMC 作为驱动器，设计了一种仿墨鱼喷射推进结构，该结构可以实现水下喷射推进。经过性能测试得出装置得平均速度为 1mm/s，瞬时速度为 10mm/s，推进力 F=0.782mN，推进效率 η=2.38%，通过提高驱动频率可进一步提高其驱动速度。在未来的工作中将主要围绕如何通过改善 IPMC 制备工艺提高其驱动力，如何进一步提高能量使用效率，如何插入微控制元件提升装置的自主游动能力等方面展开。

参考文献：

[1] 董正之. 中国动物志软体动物门头足纲 [M]. 北京: 科学出版社，1988: 21-22.

[2] Sellars C, Bowers J, Sittaramane V, et al. Development of a Behavioral Assay using Fluidic Devices to Study Learning and Memory in Cuttlefish Larvae [C]//APS Meeting Abstracts. 2019.

[3] 王振龙，杭观荣，王扬威，等. 乌贼游动机理及其在仿生水下机器人上的应用 [J]. 机械工程学报，2008，(6): 1-9.

[4] Wang Y, Wang Z, Li J. Initial design of a biomimetic cuttlefish robot actuated by SMA wires [C]//2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. IEEE, 2011, 2: 425-428

[5] Punning A, Kruusmaa M, Aabloo A. A self-sensing ion conducting polymer metal composite (IPMC) actuator [J].

Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 136(2): 656-664.

[6] Shen Q, Stalbaum T, Minaian N, et al. A robotic multiple-shape-memory ionic polymer - metal composite (IPMC) actuator: modeling approach [J]. Smart Materials and Structures, 2018, 28(1): 015009.

[7] MohdIsa W H, Hunt A, HosseinNia S H. Active Sensing Methods of Ionic Polymer Metal Composite (IPMC): Comparative Study in Frequency Domain [C]//2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). IEEE, 2019: 546-551.

[8] De Gennes P G. Soft matter [J]. Reviews of modern physics, 1992, 64(3): 645.

[9] Ruegg R, Williams C, Araki N. Developing EAP Materials: Transforming Learning Through In-House Textbooks [M]// Teaching English for Academic Purposes (EAP) in Japan. Springer, Singapore, 2018: 167-182.

[10] Low K H, Yang J, Pattathil A P, et al. Initial prototype design and investigation of an undulating body by SMA [C]//2006 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. IEEE, 2006: 472-477.

[11] BARCOHEN Y, XUEA T, SHAHINPOOR M, et al. Low-mass muscle actuators using electroactive polymers [C]// International Society for Optical Engineering, Smart Structures and Materials Symposium: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD). 1998, San Diego, CA, USA: SPIE, 1998, 3324(32): 1-6.

[12] Panda P K, Sahoo B, Ramakrishna J, et al. Recent Studies on Vibrational Energy Harvesting of PZT Materials [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(10): 21512-21516.

[13] Zheng W J, Gao Y, Fan X X, et al. Physically Linked PVA/P(AAm-co-SMA) Hydrogels: Tough, Fast Recovery, Antifatigue, and Self-Healing Soft Materials [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2018, 303(7): 1800104.

[14] Izadi M R, Ghafoori E, Shahverdi M, et al. Development of an iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) strengthening system for steel plates [J]. Engineering Structures, 2018, 174: 433-446.

[15] KRISHEN K. Space applications for ionic polymermetal composite sensors, actuators, and artificial muscles [J]. Acta Astronautica, 2009, 64(11-12): 1160-1166.

[16] Colozza A, Shahinpoor M, Jenkins P, et al. Solid state aircraft concept overview [C]//Proceedings. 2004 NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware, 2004. IEEE, 2004: 318-324.

[17] Shahinpoor M, Kim K J. Ionic polymer-metal composites: IV. industrial and medical applications [J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14: 197-214.

[18] YEOM S W, OH I K. A biomimetic jellyfish robot based on ionic polymer metal composite actuators [J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18: 1-10.

[19] MILLET P, PINERI M, DURAND R. New solid polymer electrolyte composites for water electrolysis [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1989, 19: 162-166.

[20] SIRIPONG M, FREDHOLM S, NGUYEN Q A, et al. A cost-effective fabrication method for ionic polymer-metal composites [C]//Proc. MRS Fall Meeting, 2005, Boston: MRS, 2006, 889(W04-03): 1-6.

[21] BENNETT M D, LEO D J. Manufacture and characterization of ionic polymer transducers employingnon-precious metal electrodes [J]. Smart Materials and Structures, 2003, 12: 424-436.

[22] KIM S M, KIM K J. Palladium buffer-layered high performance ionic polymer-metal Composites [J]. Smart Materials and Structures, 2008, 17(3): 1-6.

[23] DU F P, TANG C Y. Fabrication of an ionic polymer-carbon nanotube composite for a new configurative actuator [J]. Journal of Composite Materials, 2011, 45(20): 2055-2060.

[24] Wang Y, Chen H. Aided manufacturing techniques and applications in optics and manipulation for ionic polymer-metal composites as soft sensors and actuators [J]. J Polym Eng, 2015, 35(7): 611.

[25] Bartol I K, Patterson M R, Mann R. Swimming mechanics and behavior of the shallow-water brief squid Lolliguncula brevis [J]. Journal of Experimental Biology, 2001, 204(21): 3655-3682.