

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.046

电液混合驱动器研制及应用

赵子杰,何青松,叶玉泽,仲启云,刘思远

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:为探索电液混合驱动器在柔性助动领域中的应用的可能性,研制一种以热塑性 Bopp 薄膜作为密封袋,以绝缘变压器油作为驱动液体,用碳涂料作为电极的新型电液混合驱动器。对 0.9 ml 液体含量驱动器开展峰值应变、比功率、峰值牵引力与峰值机械功测试。结果表明:驱动器的最大峰值比功率达到 12.5 W/kg,驱动器的最大峰值机械功可达 3.85 mJ。对仿关节力臂进行驱动实验表明:在空载、驱动电压为 10 kV 的条件下,关节在 69 mm 力臂处可达到的实际最大峰值角度为 2.06°。

关键词:电液混合驱动器;柔性助动;比功率;机械功;仿关节力臂

中图分类号:TH165 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2026)04-0241-06

Development and Application of Electro-hydraulic Hybrid Actuator

Zhao Zijie, He Qingsong, Ye Yuze, Zhong Qiyun, Liu Siyuan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:To explore the potential application of electro-hydraulic hybrid actuators in the field of flexible assistance, a novel electro-hydraulic hybrid actuator is developed, using thermoplastic Bopp film as the sealing bag, insulating transformer oil as the driving liquid, and carbon paint as the electrode. Peak strain, specific power, peak traction force and peak mechanical power tests are carried out on an actuator with a liquid content of 0.9 ml. The results show that the maximum peak specific power of the actuator reaches 12.5 W/kg, and the maximum peak mechanical work can reach 3.85 mJ. Driving experiments on a joint-like force arm indicate that under no-load conditions and a driving voltage of 10 kV, the actual maximum peak angle achievable by the joint at a force arm of 69 mm is 2.06°.

Keywords:electro-hydraulic hybrid actuator; flexible assistance; specific power; mechanical power; joint-like force arm

0 引言

柔性外骨骼研究的兴起促进了柔性驱动器的设计和发展。与刚性驱动器相比,柔性驱动器具有柔顺性高、轻薄便携、驱动自由度高,易与人体关节相适应等优点。柔性驱动器根据驱动源可分为流体驱动器、电驱动器和热驱动器。流体驱动器具有输出力大、响应速度快的优点,但不便携^[1]。热驱动器具有制造成本低、驱动应变大的优点,但响应速度慢^[2]。柔性电驱动器的主要代表是电活性聚合物材料(EAP),IPMC 作为离子型 EAP 材料的代表,具有柔顺性好、质量轻、生物

相容性好的优点,但制备成本高,响应速度慢,输出力小^[3-6]。DE 作为电子型 EAP 材料的代表,具有响应速度快、质量轻、驱动应变大的优点,但制备成本高、抗击穿能力弱^[7]。

相比上述驱动器,电液混合驱动器具有响应速度快、质量轻、驱动应变大等优点^[8-9],该驱动器由流体驱动器和介电弹性体组成,其通过高压静电将两片电极吸附,将驱动液体挤入密封袋的其他区域,且不需要刚性框架对驱动器进行预拉伸,因此驱动方式简单。柔性外壳结合驱动液体使驱动器具有柔性驱动的特点^[10-13]。目前在外骨骼领域中,柔性驱动器的应用尚处于起步阶段。

第一作者简介:赵子杰(1999—),男,河南洛阳人,硕士研究生,研究方向为智能驱动与先进装备、电液混合驱动器, z1084529345@163.com。

通信作者简介:何青松(1985—),男,江苏扬中人,博士生导师,研究员,博士,入选江苏省青年科技人才托举工程,南京航空航天大学长空学者。主要研究方向智能驱动及仿生机器人、微纳结构与无人系统、柔性传感与检测仪器。担任 Vebleo 协会 FELLOW、国际仿生工程学会青年委员会、中国复合材料学会智能复合材料专委会、中国力学学会流体控制工程专委会委员。中国机械工程学会、中国微米纳米技术协会高级会员。主持国家自然科学基金面上/青年项目、JWKJW173 基金、航空基金、产学研项目等十余项, heqingsong@nuaa.edu.cn。

因此电液混合驱动器在外骨骼领域的研究具有重要意义。

本文基于麦克斯韦力与薄膜最大尺寸变形原理设计了一种电液混合驱动器,使用电晕和丝网印刷等工艺探究了一种制备电液混合驱动器的新工艺,分别对驱动器开展了峰值应变、比功率、峰值牵引力与峰值机械功分析。设计并搭建仿关节力臂应用测试平台,并在不同电压、负载条件下对关节进行驱动试验。

1 电液混合驱动器的设计与制备

1.1 材料

材料为厚度为 $22\mu\text{m}$ 的 Bopp 热封膜, JC-2110 低阻碳浆, 45 号变压器油, 厚度为 0.02mm 的铜箔, 厚度为 0.02mm 的单面铜胶带。Bopp 热封膜需要进行电晕处理后再使用; 碳浆、铜箔和单面铜

胶带可直接使用, 不需要做任何纯化处理。

1.2 驱动器的致动机制及制备

电液混合驱动器的单元结构如图 1(a) 所示, 在热塑性薄膜的外侧覆盖电极, 薄膜内侧密封包裹绝缘液体。驱动器单元驱动过程分析如图 1(b) 所示, 在对驱动器两侧电极施加电压时, 驱动器两侧电极带上正负电荷 (t_1 时刻); 驱动器边缘处的两侧电极间距较窄, 在极间电压相同的条件下, 极板间距越小, 静电力 (麦克斯韦力) 就越大, 所以电极先从边缘处开始贴合 (t_2 时刻), 贴合部分的电极宽度增加, 未贴合部分的电极宽度减小, 最后输出一定的收缩位移 Δx 。3 个驱动器单元串联带载驱动示意如图 1(c) 所示, 驱动器带载驱动输出一定的收缩位移 x 。本文所研究的电液混合驱动器为 3 个单元串联, 单元袋宽为 20mm , 单元袋长为 40mm , 单元电极宽度为 10mm 。

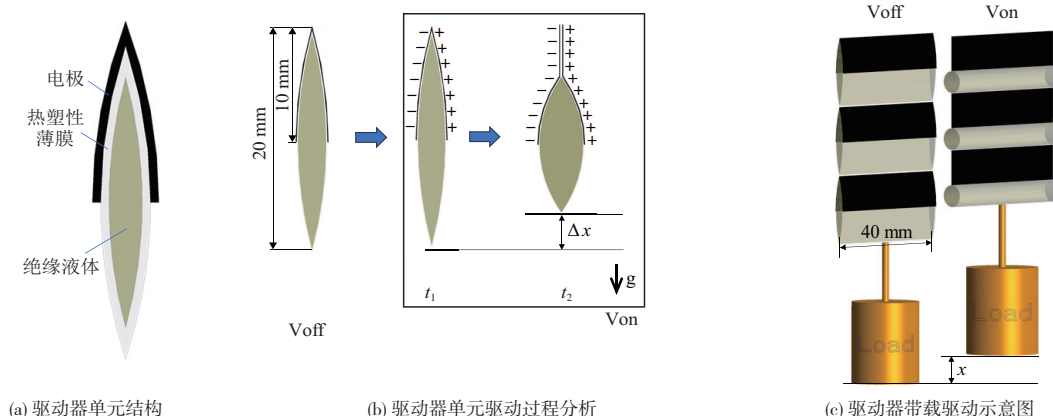


图 1 电液混合驱动器致动机理

驱动器的整体制备方案如下: 驱动器的主要制备原料有厚度为 $22\mu\text{m}$ 的 Bopp 膜、45 号变压器油、碳浆, 如图 2(a) 所示。先用电晕机对厚度为 $22\mu\text{m}$ 的 Bopp 膜进行电晕处理, 如图 2(b) 所示, 用固定形状的铜模具对电晕处理后的两层 Bopp 薄膜进行热压, 如图 2(c) 所示。驱动器的每个空腔的尺寸为 $20\text{mm} \times 40\text{mm}$, 热压痕迹的宽度为 1mm , 预留注射口宽度为 2mm 。然后用丝网印刷工艺在每个腔室的薄膜外侧印刷上对应的碳电极, 如图 2(d) 所示。从注射口注入绝缘液体 (45 号变压器油), 如图 2(e) 所示。用电烙铁热

封注射口, 热封温度设定为 $120^\circ\text{C} \sim 130^\circ\text{C}$, 以匹配 Bopp 薄膜的 130°C 热封温度, 要求选用头部直径为 1mm 的圆头烙铁头。采用宽度较窄、厚度为 0.02mm 的铜箔与厚度为 0.02mm 的铜胶带把相邻碳电极串联在一起, 如图 2(f) — 图 2(g) 所示。

2 结果与讨论

2.1 测试平台搭建

要检测驱动器驱动时的收缩位移变化, 需要用到位移传感器, 采用 LK-G80 高精度位移传感器检测驱动器的收缩位移变化。

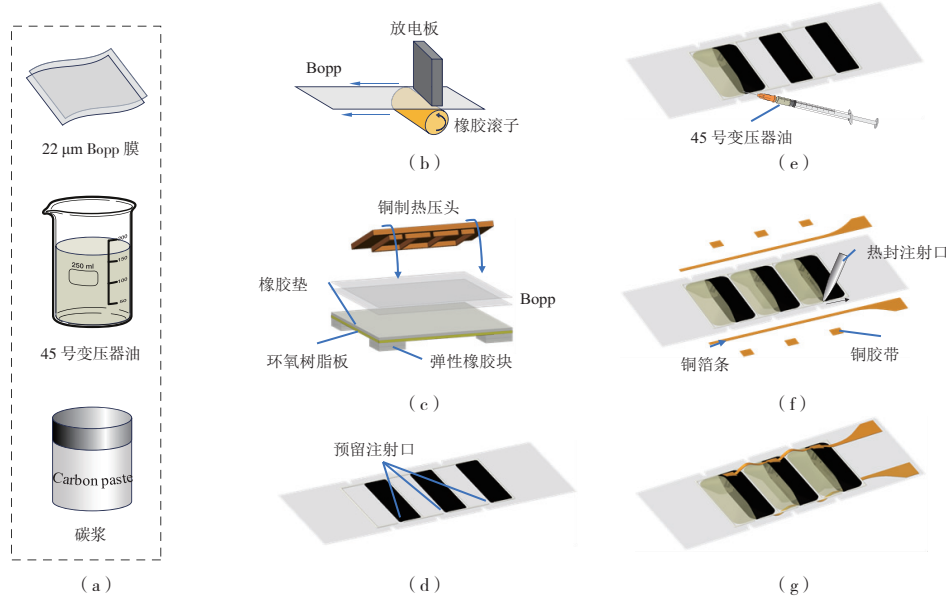


图2 电液混合驱动器的制备流程

位移测试平台如图3所示。驱动器上方被固定,下方负载连接器上用柔软的细棉线悬吊着负载。驱动器的下方激光位移传感器检测头放置在可调节高度的升降平台上,调节升降平台以保证被测物在传感器量程之内。在每个负载下方粘接一片小纸片,使激光对准纸片中间,以保证激光的漫反射。检测头接入传感器的控制器,将激光点的位置信息实时显示在数码显示屏上,控制器通过USB接口接入计算机,通过传感器自带的上位机软件读取和记录位置信息。

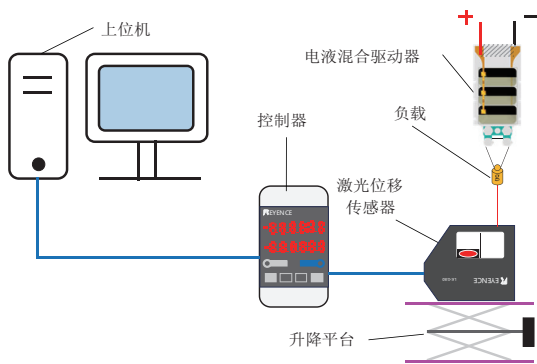


图3 电液混合驱动器位移测试平台

2.2 峰值应变与比功率测试分析

通过激光位移传感器测得驱动器驱动位移 x 随时间 t 变化的数据,再根据位移数据分析应变 ε 和比功率 S_p 随时间 t 变化的规律。

应变 ε 是位移 x 与驱动器总宽度 60 mm 之比;峰值应变 $\varepsilon_{\max}$ 为应变 ε 的最大值;速度 v 是驱

动位移 x 对时间的一次微分;加速度 a 是速度 v 对时间的一次微分,以下微分积分计算均在 Origin 中进行。计算过程如下

$$\varepsilon(t) = x(t)/60 \quad (1)$$

$$\varepsilon_{\max} = \max(\varepsilon(t)) \quad (2)$$

$$v(t) = \Delta x(t)/\Delta t \quad (3)$$

$$a(t) = \Delta v(t)/\Delta t \quad (4)$$

驱动器的整体受力分析如图4所示。

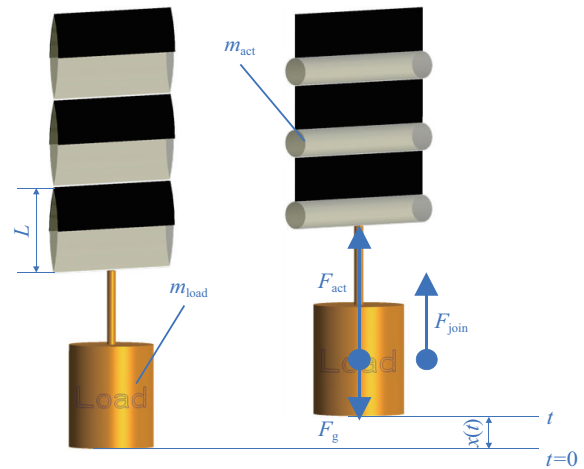


图4 驱动器整体受力分析

图中 m_{load} 表示负载(load)的质量; m_{act} 表示驱动器(actuator)的质量; F_{act} 表示驱动器对负载的牵引力; F_g 表示负载自身的重力; F_{join} 表示负载所受以上两个力的合力(join forces); $x(t)$ 表示 t 时刻的驱动位移。比功率的求导过程如下

$$F_{\text{join}}(t) = F_{\text{act}}(t) - F_g(t) = m_{\text{load}} \cdot a(t) \quad (5)$$

$$F_{\text{act}}(t) = F_{\text{join}}(t) + F_g(t) = m_{\text{load}} \cdot a(t) + m_{\text{load}} \cdot g = m_{\text{load}}(a(t) + g) \quad (6)$$

式中 g 表示重力加速度。通过分析天平测得驱动器的质量 m_{act} 为 4.93 g, 可以通过驱动器对负载的牵引力 F_{act} 和速度 v 推算出比功率 S_p

$$S_p(t) = \frac{P(t)}{m_{\text{act}}} = \frac{F_{\text{act}}(t) \cdot v(t)}{m_{\text{act}}} = \frac{m_{\text{load}}(a(t) + g)v(t)}{m_{\text{act}}} \quad (7)$$

通过分析微分计算出的速度 $v(t)$ 数据, 得到速度从零开始增加, 即驱动器开始收缩的时刻 t_s ; 以及速度最大值, 即驱动器达到收缩平衡的时刻 t_e 。可以推算出 t_s 到 t_e 的平均比功率 $S_{p,\text{avg}}$

$$S_{p,\text{avg}} = \frac{S_p(t)_{t_s-t_e}}{(t_e - t_s)} = \frac{\int_{t_s}^{t_e} S_p(t) d(t)}{(t_e - t_s)} \quad (8)$$

本文分别测试了 0.9 ml 液体含量驱动器在 20 g、50 g、100 g、150 g、200 g、250 g 负载, 驱动电压为 6 kV、8 kV、10 kV 条件下的驱动位移, 并对数据研究获得了峰值应变 ε_{max} 、峰值比功率 $S_{p,\text{max}}$ 和平均比功率 $S_{p,\text{avg}}$ 随负载的变化关系。测试结果如图 5 所示。

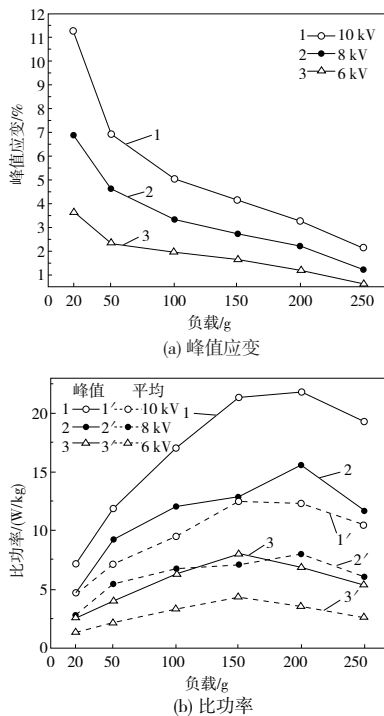


图 5 不同负载和电压下驱动器峰值应变和比功率测试

驱动器的峰值应变 ε_{max} 随着负载的增加而逐渐减小, 随着电压的增加而逐渐增大 (图 5(a)), 在 20 g 负载、10 kV 电压下, 驱动器的 ε_{max} 达到最大值 11.30%。在图 5(b) 中, 实线代表峰值比功

率 $S_{p,\text{max}}$, 点线代表平均比功率 $S_{p,\text{avg}}$ 。随着负载的增加, 驱动器的比功率呈现先增大后减小的趋势; 且随着电压的增加, 每个电压下的最大 $S_{p,\text{max}}$ 和最大 $S_{p,\text{avg}}$ 呈现向较大负载移动的趋势。在 200 g 负载、10 kV 电压下, 驱动器的 $S_{p,\text{max}}$ 达到最大值 21.8 W/kg; 在 150 g 负载、10 kV 电压下, 驱动器的 $S_{p,\text{avg}}$ 达到最大值 12.5 W/kg。

2.3 峰值牵引力与峰值机械功测试分析

根据驱动器牵引力 F_{act} 计算机械功 W_{cum} 。分析以上结果随时间 t 变化的规律。

根据式 (6) 计算驱动器牵引力 F_{act} , 峰值牵引力 $F_{\text{act,max}}$ 是牵引力 F_{act} 的最大值

$$F_{\text{act,max}} = \max(F_{\text{act}}(t)) \quad (9)$$

累积机械功 W_{cum} 的计算过程如下

$$W_{\text{cum}}(t) = \int_0^t F_{\text{act}}(t) d(x(t)) = \int_0^t F_{\text{act}}(t) v(t) d(t) \quad (10)$$

峰值机械功 $W_{\text{cum,max}}$ 为累积机械功 W_{cum} 的最大值

$$W_{\text{cum,max}} = \max(W_{\text{cum}}(t)) \quad (11)$$

下面测试并总结了 0.9 ml 液体含量驱动器在 20 g、50 g、100 g、150 g、200 g、250 g 负载, 驱动电压为 6 kV、8 kV、10 kV 条件下的峰值牵引力 $F_{\text{act,max}}$, 峰值机械功 $W_{\text{cum,max}}$ 随负载的变化关系。测试结果如图 6 所示。

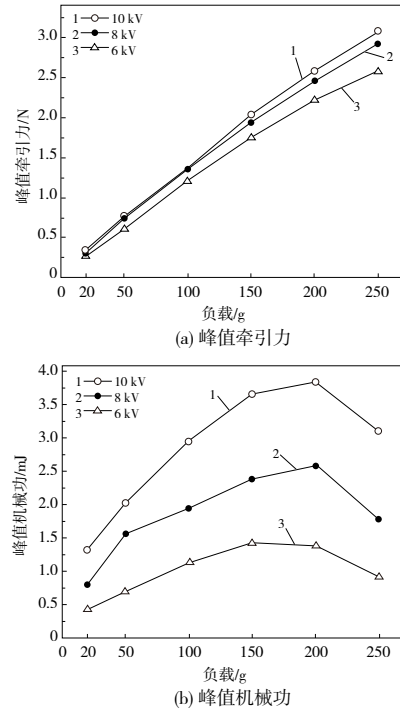


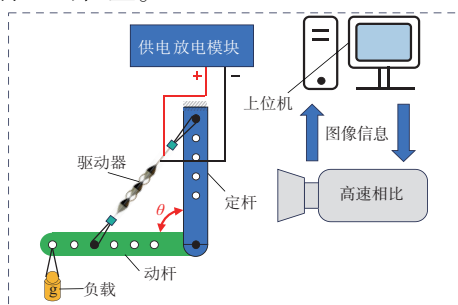
图 6 不同负载和电压下驱动器峰值牵引力与峰值机械功测试

随着负载的增加,峰值牵引力 $F_{act,max}$ 呈现线性增加的趋势;在同一负载下,电压越大, $F_{act,max}$ 越大;且不同电压下 $F_{act,max}$ 的差距随着负载的增加而逐渐增大,如图 6(a)。随着负载的增加,驱动器的峰值机械功 $W_{cum,max}$ 呈现先增加后减小的趋势;在同一负载下,电压越大, $W_{cum,max}$ 越大,如图 6(b) 所示。在 200 g 负载、10 kV 电压的条件下,驱动器的 $W_{cum,max}$ 达到最大值 3.85 mJ。

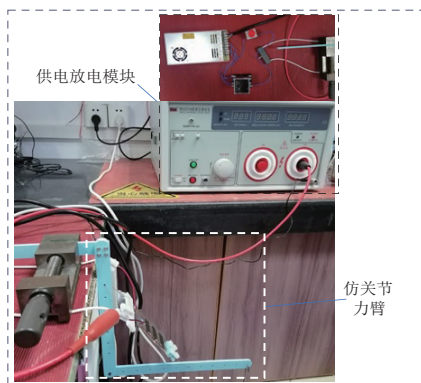
2.4 力臂模型应用测试

目前电液混合驱动器是一种新型柔性电驱动器,研究刚刚起步,大多处于设计和测试阶段。为了展现其在仿生人工肌肉领域的应用潜力,设计并制备了一个简易的二连杆仿关节结构,将驱动器连接在关节力臂处模拟骨骼肌,施加电压后驱动器收缩带动连杆上提,以模拟骨骼肌带动关节运动。

仿关节力臂应用总体方案设计如图 7(a) 所示,试验平台如图 7(b) 所示。两个连杆末端为铰链连接,其中一个杆固定在空间中作为定杆,另一个杆与定杆保持相对转动作为动杆。将驱动器链接在两个连杆之间,将负载挂在动杆的另一端。使用供电放电模块对驱动器进行驱动与充放电,连杆的运动被高速相机记录。将图像信息导入计算机并处理,得到两个连杆间的角度 θ 的变化。两个连杆上有若干通孔,以便调节驱动器在动杆和定杆上的位置。



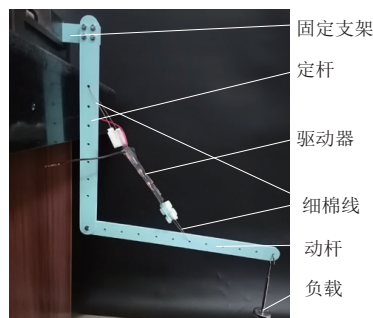
(a) 仿关节力臂应用总体方案



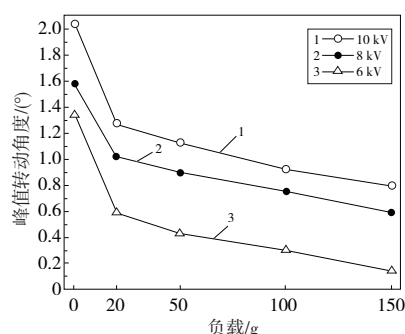
(b) 仿关节力臂试验平台

图 7 仿关节力臂应用总体方案与试验平台搭建

将增材制造好的固定支架、定杆、动杆和驱动器进行组装,仿关节力臂实物组装与测试分析如图 8 所示。



(a) 仿关节力臂实物组装图



(b) $H=69$ mm 处峰值转动角度

图 8 仿关节力臂实物组装与实际测试分析

下面测试了关节在 0 g、20 g、50 g、100 g、150 g 负载,驱动电压为 6 kV、8 kV、10 kV;驱动器在定杆的连接点到转轴的距离 L 为 184 mm;驱动器在动杆的力臂 H 为 69 mm 处的条件下,动杆所转动的峰值角度 $\Delta\theta$ 。在测试前,将动杆和定杆调节至垂直位置。

由图 8(b) 可知,随着电压的升高,动杆的峰值转动角度 $\Delta\theta$ 随之增加。随着负载的增加,动杆的峰值转动角度 $\Delta\theta$ 呈现出在 0~20 g 负载范围内迅速衰减,在 20~150 g 负载范围内缓慢衰减的趋势。在空载、驱动电压为 10 kV 的条件下,力臂为 H 时动杆所能达到的最大峰值转动角度 $\Delta\theta$ 为 2.06° 。

3 结语

本文制备并表征了一种具有制备成本低、结构简单、柔顺性高等特点的电液混合驱动器,并探索其在柔性助动领域的应用。用热塑性 Bopp 薄膜制备驱动器密封袋外壳,以绝缘液压油作为驱动液体,用碳涂料作为电极,制备成本低廉的电液混合驱动器。对 0.9 ml 液体含量的驱动器做峰值应变和比功率测试分析表明,在 20 g 负载、10 kV

电压下,驱动器的最大 $\varepsilon_{\max}$ 达到了 11.30%。在 150 g 负载、10 kV 电压下,驱动器的最大 $S_{p,\max}$ 达到 12.5 W/kg。对 0.9 ml 液体含量的驱动器做峰值牵引力和峰值机械功测试分析表明,在 200 g 负载、10 kV 电压的条件下,驱动器的 $W_{\text{cum},\max}$ 最大达到 3.85 mJ。对仿关节力臂进行驱动实验表明,在空载、驱动电压为 10 kV 的条件下,关节在力臂 H 为 69 mm 处可达到的实际最大峰值角度为 2.06° 。在未来的研究中,通过给驱动器串联变速机构、将多个驱动器并联等方法可以在一定程度上提高动杆的实际最大峰值转动角度,进一步推进电液混合驱动器应用。

参考文献:

- [1] Connolly F, Walsh C J, Bertoldi K. Automatic design of fiber-reinforced soft actuators for trajectory matching [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(1): 51-56.
- [2] Haines C S, Lima M D, Li N, et al. Artificial muscles from fishing line and sewing thread [J]. Science, 2014, 343(6173): 868-872.
- [3] Asaka K, Okuzaki H. Soft Actuators: Materials, Modeling, Applications, and Future Perspectives [M]. Singapore: Springer Singapore, 2019.
- [4] Chen Z, Shatara S, Tan X B. Modeling of biomimetic robotic fish propelled by an ionic polymer-metal composite caudal fin [J]. ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(3): 448-459.
- [5] Jo C, Pugal D, Oh I K, et al. Recent advances in ionic polymer-metal composite actuators and their modeling and applications [J]. Progress in Polymer Science, 2013, 38(7): 1037-1066.
- [6] Chu W S, Lee K T, Song S H, et al. Review of biomimetic underwater robots using smart actuators [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(7): 1281-1292.
- [7] Sun D C, Tong L Y. Modeling and analysis of curved beams with debonded piezoelectric sensor/actuator patches [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(8): 1755-1777.
- [8] Acome E, Mitchell S K, Morrissey T G, et al. Hydraulically amplified self-healing electrostatic actuators with muscle-like performance [J]. Science, 2018, 359(6371): 61-65.
- [9] Rothmund P, Kirkman S, Keplinger C. Dynamics of electrohydraulic soft actuators [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(28): 16207-16213.
- [10] Mitchell S K, Wang X R, Acome E, et al. An easy-to-implement toolkit to create versatile and high-performance HASEL actuators for untethered soft robots [J]. Advanced Science, 2019, 6(14): 1900178.
- [11] Yoder Z, Kellaris N, Chase-Markopoulou C, et al. Design of a high-speed prosthetic finger driven by peano-HASEL actuators [J]. Frontiers in Robotics and AI, 2020, 7: 586216.
- [12] Washington A, Su J, Kim K J. Actuation behavior of hydraulically amplified self-healing electrostatic (HASEL) actuator via dimensional analysis [J]. Actuators, 2023, 12(5): 208.
- [13] Hu Q L, Jiang C J, Xie Y, et al. Rigid electrodes enhance the strain and force output of Peano-HASEL actuators [J]. Applied Physics Letters, 2023, 123(25): 254103.

收稿日期: 2024-03-25

(上接第 240 页)

- [2] 郭江平, 陶兴安, 樊鹏飞. 电动汽车直流充电桩散热系统优化分析 [J]. 中国机械, 2022(27): 98-100.
- [3] 王军, 谷腾飞, 于庆瑞, 等. 电动汽车充电桩电源模块热仿真分析 [J]. 汽车实用技术, 2022, 47(11): 1-5.
- [4] 陈帅雨, 取立群, 柯志欣, 等. 液冷充电系统及液冷电缆的研究设计 [J]. 电线电缆, 2024, 67(3): 18-21.
- [5] 任金玲, 崔久德, 赵凯斌, 等. 一种大功率冷却型直流充电桩电缆的研制 [J]. 电线电缆, 2020, 63(3): 18-20, 24.
- [6] 陈熙, 陈慧敏, 程林, 等. 大电流液固冷却充电模块系

统设计 [J]. 中国粉体技术, 2022, 28(6): 78-90.

- [7] 李雪利. 新能源汽车充电桩热管理系统控制器研发 [D]. 天津: 天津工业大学, 2022.
- [8] 侯春光, 许玉婷, 韩颖, 等. 基于正交试验法的功率模块优化对直流充电桩散热影响研究 [J]. 电器与能效管理技术, 2019(8): 32-37, 77.
- [9] 李沛聪, 葛宁. 级环境下转/静干涉对涡轮转子叶片前缘气膜冷却的影响 [J]. 机械制造与自动化, 2026, 55(1): 265-270.

收稿日期: 2024-10-30