

介电型 EAP 驱动的转动关节研究

杨斌¹, 王化明^{1,2}, 吴孟¹

(1. 南京航空航天大学机电学院, 江苏南京 210016; 2. 机器人学国家重点实验室, 辽宁沈阳 110016)

摘要:基于介电型电活性聚合物(EAP)的优点,设计、实现了该材料驱动的转动关节。根据介电型 EAP 的变形原理设计、制作了圆柱形驱动器,其输出最大位移约为 11 mm,伸长应变达到 33.8%,并对输出力-位移特性进行测试。基于该型驱动器实现了转动关节,转角约为 $\pm 13^\circ$,堵转力矩为 19.6 mN·m,将转动关节应用于爬行机器人,并对试验结果进行分析。

关键词:介电型电活性聚合物;驱动器;转动关节;爬行机器人

中图分类号:TP24;TB34 **文献标识码:**A

Research on Dielectric EAP-driven Rotational Joint

YANG Bin¹, WANG Huaming^{1,2}, WU Meng¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. State Key Lab. of Robotics, Shenyang 110016, China)

Abstract: A rotational joint has been designed and fabricated by making use of the advantages of the dielectric electro-active polymer (EAP) material. On the basis of dielectric EAP's deformation theory, a cylindrical actuator has been designed and manufactured. The maximum displacement of 11 mm has been attained and the elongation strain of active area has been up to 33.8%. Also, the actuator's output force-displacement characteristics have also been tested. The rotational joint driven by this type of actuator can achieve the rotation angle of about $\pm 13^\circ$, and the torque of 19.6 mN·m. The rotational joint has been used to a crawling robot, and the experiment result has been analyzed.

Key words: dielectric electro-active polymer; actuators; rotational joint; crawling robot

0 引言

介电型电活性聚合物(EAP)作为电活性聚合物中的一种,由于性能与自然肌肉相似,又称为人工肌肉^[1]。采用介电型 EAP 驱动器作为机器人关节的驱动,较其他智能材料和传统驱动技术(如电机+传动机构等)具有可直接对外做功而不需要传动机构;能量转换效率高,达 60%~90%;体积小,动作平滑,能量质量比较大,能量密度约为 3.4 J/g;可产生较大位移等优点^[2]。目前已有的驱动器类型包括平面型、圆柱卷绕型、堆栈型和菱型等,其中卷绕型和堆栈型驱动器结构较紧凑,输出力较大,类似于生物肌肉束,在仿生机器人领域应用前景广。瑞士联邦材料测试与研究实验室(EMPA)G. Kovacs 等设计、实现的一种堆栈型驱动器^[3]。该驱动器有效长度为 70 mm,直径为 $\varnothing 14$ mm,空载状态下最大能获

得 30%的变形量。较其他类型驱动器相比,堆栈型驱动器的输出力与伸长应变率相对较大,但制作过程较繁琐,每个驱动器堆叠层数较多,要避免相邻层异性电极发生短路。其中卷绕型驱动器的制作过程相对简单,需增大输出力时可通过增加卷绕层数实现。圆柱形驱动器仅由一对正负电极组成,发生短路的可能性相对较小,可靠性高。

1 介电型 EAP 变形原理

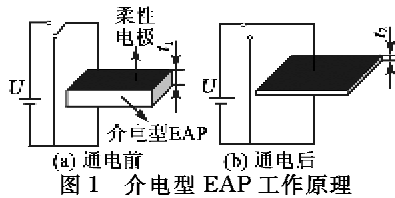
介电型 EAP 是一种可由电场驱动产生变形的电活性聚合物,可直接将输入的电能转化为机械能。介电型 EAP 的工作原理如图 1 所示。在 EAP 薄膜的两侧分别均匀地涂上柔性电极,对其施加一定电压。当 EAP 薄膜得电时(相当于将薄膜置于电场中),薄膜两侧的正负电荷相互吸引产生的静电力(即麦克斯维尔应力)引起 EAP 薄膜厚度方向的尺

收稿日期:2011-06-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50975139);机器人学国家重点实验室科学基金资助项目(RLO200912);江苏省自然科学基金资助项目(BK2011735)

作者简介:杨斌(1987-),男,浙江台州人,硕士生,主要从事聚合物驱动器的研究。通信作者:王化明,E-mail:hmwang@nuaa.edu.cn。

寸由 t_1 变化为 t_2 。由于薄膜具有不可压缩性,从而
导致其面积增大。失电后,介电型 EAP 上的静电电压
力消失,薄膜恢复到初始状态。



通电后所产生的静电力为^[4]

$$p = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 (U/t)^2 \quad (1)$$

式中: ϵ_r 为介电型 EAP 相对介电常数; $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ 为真空介电常数; U 为所施加的电压; t 为介电型 EAP 的厚度。

2 圆柱形驱动器制造与测试

2.1 圆柱形驱动器制作

介电型 EAP 为美国 3M 公司生产的 VHB4910 丙烯酸薄膜(厚为 1 mm), 击穿电场 E 可达 200 MV/m^2 。驱动器的端帽与卷绕轴均采用有机玻璃制作, 柔性电极是由石墨和硅油等按一定比例混合并通过超声振荡制得, 电极引线由铝箔和铜丝制作。图 2 为圆柱形驱动器的卷绕过程与薄膜堆叠视图。制作过程包括^[6]:

1) 将 EAP 薄膜进行双向预拉伸, 采用矩形框取下以保持预拉伸状态。

2) 在薄膜相应位置均匀地涂上柔性电极。由于单层薄膜卷绕后正负电极接触发生短路, 所以采用两层薄膜三层电极的结构, 其中一层电极夹在两层薄膜中间, 并加入电极引线将正负电极分别引出。

3) 将压缩弹簧的两端固连在端帽上, 同时在端帽外侧加入定位销, 用于抑制驱动器卷绕过程中产生的周向转动与轴向滑动。转动卷绕轴, 将薄膜均匀地卷绕在弹簧与端盖上。

4) 剪去两侧端帽以外多余的薄膜材料, 并在端帽上加上卡箍以固定端

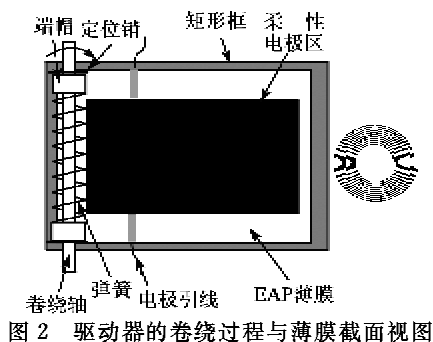


图 2 驱动器的卷绕过程与薄膜截面视图

帽上的薄膜, 防止其收缩而导致驱动器相关参数发生改变。

2.2 圆柱形驱动器性能测试

驱动器工作性能的主要影响因素有压缩弹簧的相关参数(弹簧中径 D 、簧丝直径 d)、薄膜预拉伸率 λ 、卷绕层数等。驱动器选用的压缩弹簧刚度为 0.0618 N/mm , $D=9 \text{ mm}$, $d=0.6 \text{ mm}$, 初始长度为 80 mm , 薄膜预拉伸率确定为 $350\% \times 500\%^{-2}$, 电极区域面积为 $28 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$, 卷绕圈数约为 4 圈, 有效薄膜层数为 8 层。图 3 为驱动器有效长度为 32.5 mm , 给驱动器加 4.4 kV 电压时产生 11 mm 的输出位移, 伸长应变能达到 33.8% 。

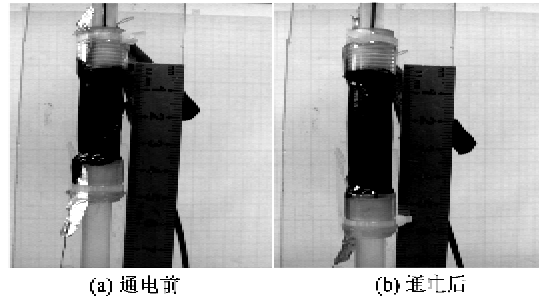


图 3 驱动器通断电输出位移图

从 $4.0 \sim 4.3 \text{ kV}$ 每隔 0.1 kV 测试一次驱动器的输出位移与输出力, 得到的驱动器输出力(F)-输出位移(s)曲线如图 4 所示, 其中 $F_t(s)$ 为驱动器推程输出推力, $F_h(s)$ 为驱动器回程输出拉力。随着电压的增加, s 也相应增加。电压越大, 驱动器的 $F_t(s)$ 越大, 而 $F_h(s)$ 基本重合。在相同电压下, $F_h(s)$ 均比 $F_t(s)$ 大, 说明该驱动器较适合工作在回程状态。当工作电压超过 4.3 kV 且通电一定时间后, 薄膜上出现明显的起皱现象, 若电压继续升高, 则会导致薄膜发生击穿失效。

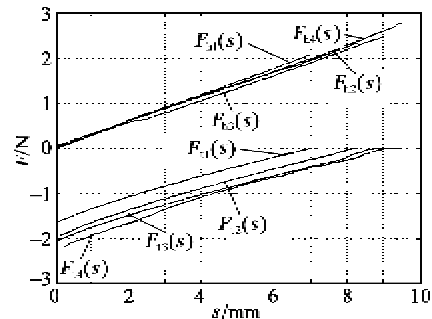


图 4 驱动器 $F-s$ 曲线

3 EAP 驱动的转动关节

3.1 关节转动原理

关节作为机器人的基础元件, 其性能在一定程度上决定了机器人的整体工作性能^[7]。采用介电型

EAP 驱动器作为关节的驱动,与传统的驱动方式(如电机+传动机构等)相比,具有结构简单,功率质量比大及工作无噪声等优点。

根据驱动器回程输出力大的特点,设计并制作了一种基于驱动器回程力工作的转动关节,如图 5 所示。在支撑轴左右对称各安装一只驱动器,驱动器上、下端分别与转动臂和底座柔性连接,通过调整两侧驱动器的预拉伸量使转动臂在两侧驱动器拉力作用下处于水平。当驱动器 1 得电时由于静电压力的作用使 F_1 减小且小于 F_2 ,则驱动器 2 收缩并拉动驱动器 1 使其长度伸长导致 F_1 增大。当 $F_1' = F_2'$ 时,关节达到新的平衡,此时转动臂转过一定角度。驱动器 1 失电时,关节恢复至初始状态。

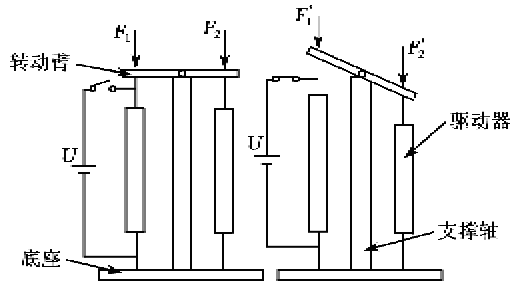


图 5 转动关节工作示意图

通过一系列驱动器薄膜拉伸倍率与其伸长量之间关系比的试验可得,当介电型 EAP 薄膜在 350%×500% 的拉伸倍率下其伸长率较大。根据转动关节中应用的要求,驱动器工作时处于受拉状态,因此要使驱动器仍工作在预拉伸倍率为 350%×500% 的状态下,需在 EAP 薄膜预拉伸过程中减小轴向的拉伸倍率。由于驱动器内部压缩弹簧的主要作用是径向支撑薄膜,所以需选取刚度较小的压缩弹簧来制作驱动器。

3.2 转动关节输出性能测试与分析

表 1 为驱动器制作参数。根据表 1 中的参数制作驱动器,在自由状态下,驱动器有效长度为 70 mm,并将其拉伸至 81.6 mm,此时薄膜预拉伸率约为 350%×500%。图 5 为单自由度转动关节通电前后的状态,其转角范围约为 ±13°。图 6 为该关节中驱动器分别拉伸 15~35 mm 时提供 3.5~4.3 kV 电压下输出的堵转力矩。

表 1 驱动器制作参数

弹簧参数		薄膜参数	
材料	65Mn	预拉伸率	300%×500%
中径/mm	∅8	有效区域/mm	65×165
簧丝直径/mm	∅0.5	卷绕圈数	4 圈
初始长度/mm	120	有效层数	8 层
刚度/(N/mm)	0.02		

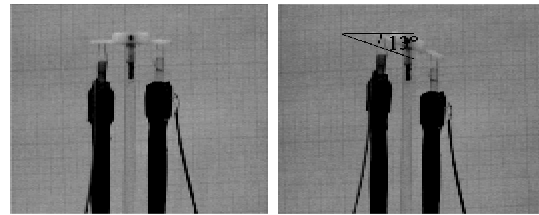


图 6 转动关节输出转动角度

图 7 为转动关节堵转力矩 (M)-电压 (U) 曲线。由图可知,在不同的拉伸长度下转动关节输出的堵转力矩不同。在 4.2 kV 电压下,转动关节工作在驱动器预拉伸长度为 15 mm 时, $M=13.7 \text{ mN} \cdot \text{m}$,当拉伸长度为 20 mm 时, $M=17.47 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 。继续增加驱动器的拉伸长度对 M 影响较小,当拉伸至 35 mm 时, $M=19.6 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 。此外,过度拉伸会导致介电型 EAP 膜过薄且不均匀拉伸程度加大,通电时 EAP 起皱较严重,易产生击穿失效。通过对测试结果进行分析,将驱动器的有效长度预拉伸 20~25 mm。

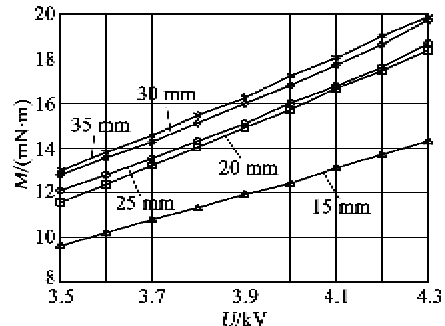


图 7 转动关节 $M-U$ 曲线

为了在关节的转动端获得 2 个自由度的转动,设计了一个万向节机构(见图 8)。在转动关节部位加入滚动轴承从而减小内部摩擦,驱动器按 90° 分布在摆动臂上。

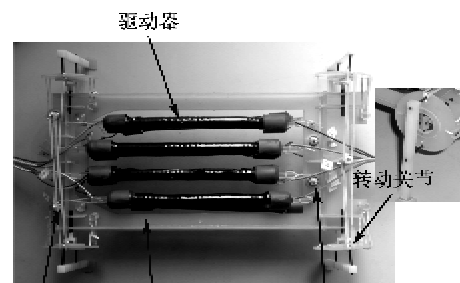


图 8 爬行机器人实物图

3.3 转动关节的应用

图 8 为采用以上关节设计的爬行机器人,由本体与 4 个二自由度转动关节组成。本体由厚度

2 mm的玻纤增强板粘接而成,刚度大,质量轻。为减少驱动器数量,关节的每个自由度采用一只驱动器,另一侧采用弹性元件代替驱动器。驱动器的一端与本体连接,另一端则通过滑轮转向 90° 与关节连接。控制4个关节运动的8个驱动器分上、下双层排列于车架中,每个关节能提供两自由度转动用于实现抬腿与前进动作,转动角度分别由相应驱动器的输入电压来控制。

通过通电试验可得,爬行机器人上的转动关节转动角度约为 7° ,与关节测试角度相比存在一定差距。主要是由于弹性元件与驱动器的拉伸力特性不匹配导致的。设通电前、后驱动器的拉力分别为 F_m, F'_m, k 为驱动器的刚度系数, Δx 为弹性元件的变形量。根据胡克定律可得:

$$F_m - F'_m = k\Delta x \quad (2)$$

假设弹性元件的刚度系数大于 k ,则其 Δx 将相应减小,此时驱动器的伸长应变无法充分利用。由于转动关节的转动角度较小,使机器人动作受到影响。因此,弹性元件的选择需根据驱动器的刚度值来确定。此外,在保证机器人本体刚度的前提下需对其进行减重以减小质量对关节转动角度的影响。

4 结束语

1) 实现了一种圆柱形驱动器,输出最大位移约为11 mm,伸长应变达到33.8%。通过测试发现该类驱动器的回程力相对于推程力而言具有较大的输出力。

2) 设计、实现了一种介电型EAP驱动的转动关节。该转动关节输出最大堵转力矩约为19.6 mN·m,转动角度为 $\pm 13^\circ$ 。

3) 通过对转动关节在爬行机器人的应用过程

中发现,若要使转动关节的运动效率得到充分提高,必须选用刚度与驱动器相匹配的弹性元件来为驱动器提供预拉伸力。

参考文献:

- [1] KORNBLUH R, PELRINE R, PEI Qibing, et al. Ultrahigh strain response of field-actuated elastomeric polymers[J]. Smart Structures and Materials, 2000, 3987:51-64.
- [2] GOULBOURNE N, SNYDER A, FRECKER M, et al. Modeling of a dielectric elastomer diaphragm for a prosthetic blood pump[J]. Smart Structures and Materials, 2003, 5051:319-331.
- [3] KOVACS G, DURING L, MICHEL S, et al. Stacked dielectric elastomer actuator for tensile force transmission[J]. Sensors and Actuators, 2009, A155:299-307.
- [4] PELRINE R E, KORNBLUH R D, JOSEPH J P. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation[J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 1998, 64(1):77-85.
- [5] Kofod G, KORNBLUH R, PELRINE R, et al. Actuation response of polyacrylate dielectric elastomers[J]. Intell Mater Syst Struct, 2003, 14:787-793.
- [6] 吴孟, 王化明, 朱银龙, 等. 圆柱形介电弹性体驱动器的试验与分析[J]. 机器人, 2010, 32(4):754-758. WU Meng, WANG Huaming, ZHU Yinlong, et al. Experiments and analysis of cylindrical dielectric elastomer actuators[J]. Robot, 2010, 32(4):754-758.
- [7] 王光建, 梁锡昌, 蒋建东. 机器人关节的发展现状与趋势[J]. 机械传动, 2004, 28(4):1-5. WANG Guangjian, LIANG Xichang, JIANG Jiandong. The present state and developing tendency of robot joint[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2004, 28(4):1-5.

(上接第540页)

参考文献:

- [1] 赵建伟, 孙徐仁, 田蔚. 低频压电陶瓷驱动器驱动电源研制[J]. 压电与声光, 2002, 24(2):107-110. ZHAO Jianwei, SUN Xuren, TIAN Shi. Development of a low-frequency driving power for piezoelectric ceramic actuators[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2002, 24(2):107-110.
- [2] 陈凯, 袁哲俊. 微机控制压电陶瓷微位移器驱动电源的设计与研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1989(5):60-64. CHEN Kai, YUAN Zhejun. Design and investigation of a microcomputer controlled power supply for piezoelec-

tric microdisplacement actuators[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1985(5):60-64.

- [3] 尹德芹, 颜国正, 颜德田. 压电陶瓷动态应用的新型驱动电源研究[J]. 压电与声光, 2000, 22(2):86-89. YIN Deqin, YAN Guozheng, YAN Detian. A new driving power for dynamic application of piezoelectric ceramics[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2000, 22(2):86-89.
- [4] 张治君, 徐明龙, 冯勃. 双向变步长大位移压电作动器[J]. 应用力学学报, 2010, 27(1):108-112. ZHANG Zhijun, XU Minglong, FENG Bo. A round-trip piezoelectric actuator with variable step and large displacement[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(1):108-112.