

# 介电型电活性聚合物驱动转动关节控制技术研究\*

朱银龙<sup>1</sup> 张鑫焱<sup>1</sup> 王化明<sup>2</sup> 周宏平<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**摘要:** 介电型电活性聚合物(Dielectric electroactive polymer, DEAP)具有大应变、高效率、高能量密度等优点,在仿生机器人领域具有广泛的应用前景。基于生物关节驱动原理及圆柱形驱动器特点设计了单自由度转动关节。根据弹性大变理论建立驱动器 DEAP 膜的机电耦合模型,通过微分方程组的迭代求解可获得关节输入电压与输出角度之间的非线性关系,但计算工作量大。将小脑模型关节控制器 CMAC(Cerebellar model articulation controller)神经网络与 PD 控制器相结合实现输出角度与输入电压之间的非线性映射,避免了复杂计算过程。阶跃和正弦参考信号的跟踪控制试验验证了 CMAC 神经网络控制的可行性。

**关键词:** 介电型电活性聚合物 转动关节 跟踪控制 小脑模型关节控制器神经网络 PD 控制器

**中图分类号:** TP24; TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0333-06

## Research on Actuation Control of Dielectric Electroactive Polymer Rotary Joint

Zhu Yinlong<sup>1</sup> Zhang Xinyan<sup>1</sup> Wang Huaming<sup>2</sup> Zhou Hongping<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

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

**Abstract:** Dielectric electroactive polymers have wide application prospects in research field of biomimetic robots due to the advantages such as large strain, high efficiency, high energy density, etc. 1-DOF rotary joint was designed based on the actuation principle of bionic joint and the characteristic of cylinder actuator. The electromechanical coupling model of DEAP (Dielectric electroactive polymer) of actuator was constructed based on the large elastic deformation theory, then the nonlinear relationship between input voltage and output angle of joint could be obtained by solving the equations iteratively, but this process of computing was time-consuming. To avoid the complicated calculation, CMAC (Cerebellar model articulation controller) neural network and PD controller were combined to realize the nonlinear mapping between the output angle of joint and input voltage. Tracking control experiments were performed in tracking step and sinusoidal reference signals, which showed the feasibility of CMAC neural network control method, while reasons for long response time and phase difference were discussed in details.

**Key words:** Dielectric electroactive polymer Rotary joint Tracking control CMAC neural network PD controller

### 引言

仿生机器人是当前机器人与仿生学领域的研究

热点之一,目前多种关节驱动方式已应用于仿生机器人,如电机、智能材料驱动等<sup>[1]</sup>。传统的“电动机+传动机构”结构复杂、体积较大、功率质量比

收稿日期:2014-09-16 修回日期:2015-02-02

\* 国家自然科学基金资助项目(51305209)、江苏省自然科学基金资助项目(BK20130979、BK2011735)、中国博士后科学基金资助项目(2013M541678)、南京航空航天大学基本科研业务费资助项目(NS2014047)和江苏省高等学校大学生创新创业训练计划资助项目(201410298012Z)

作者简介:朱银龙,讲师,博士,主要从事电活性聚合物换能器和机器人控制研究,E-mail: zhuyinlong@nuaa.edu.cn

通讯作者:王化明,教授,主要从事仿生机器人研究,E-mail: hmwang@nuaa.edu.cn

小、能效低,且相对固定的形式限制了其在某些环境中的应用。形状记忆合金 SMA (Shape memory alloy) 驱动是由温度变化实现较大的宏观位移,但其效率比较低,响应速度慢。压电陶瓷响应快,输出力大,但变形小,需放大机构,功率质量比小<sup>[2]</sup>。

DEAP 是一种场激活型电活性聚合物,变形保持性能好且无能量损耗,仅在变形时消耗能量对外做功,与其他智能材料相比,它具有较好的综合性能<sup>[3-4]</sup>:大应变(380%)、高能量密度(3.4 J/g)、高效率(60%~90%)等,在应变、驱动力、能量密度、效率及速度等方面最接近自然肌肉<sup>[5]</sup>。目前 DEAP 驱动器结构形式有平面形、锥形、圆柱形、菱形、叠堆式等<sup>[6-8]</sup>。Lochmatter 等<sup>[9-10]</sup>研究了 DEAP 驱动的单自由度摆动关节,采用 2 个平面形驱动器推拉关节结构实现摆动,将多个关节串联得到大范围的摆动,但关节结构尺寸较大。Chuc 等<sup>[11]</sup>采用叠堆式驱动器实现手指关节的转动,但驱动器制作过程复杂。圆柱形驱动器由平面 DEAP 卷绕而成,结构紧凑,输出力较大,非常类似于生物肌肉束,可用于仿生关节驱动。

DEAP 具有较强的机电耦合特性,驱动器中 DEAP 的伸长应变取决于机电耦合模型的建立,主要有两种方法<sup>[12]</sup>:根据热力学能量守恒的观点利用变分原理推导电激励下的本构关系<sup>[13]</sup>;在连续介质力学框架内将整体柯西应力表示为机械应力与 Maxwell 应力的和<sup>[14]</sup>。然而依据机电耦合模型计算伸长应变过程复杂且耗时,只适合于驱动器静态力学特性分析,且 DEAP 有粘性力学特性,不利于关节控制。CMAC 神经网络结构简单、学习快、泛化能力强,在函数逼近、控制领域等应用广泛<sup>[15-16]</sup>,该网络与其他控制方法相结合已被用于机械手的控制<sup>[17-18]</sup>。为实现关节的输入激励电压与输出转角之间的非线性映射,避免复杂的计算过程,本文结合 CMAC 神经网络与 PD 控制器实现关节转动的跟踪控制。

## 1 DEAP 驱动关节

### 1.1 驱动器结构与建模

圆柱形驱动器结构剖面如图 1 所示,将 DEAP 薄膜预拉伸后两侧涂上柔性电极,卷绕在初始长度为  $l_0$  的弹簧上。在薄膜预应力的作用下,弹簧尺寸被压缩为  $l_p$ ,在 DEAP 两侧通电后驱动器尺寸伸长为  $l$ ,断电后恢复。为便于分析,将薄膜初始形状视为一厚壁圆筒,长为  $L$ ,内外径分别为  $A$ 、 $B$ 。初始坐标系用  $(R, \Theta, Z)$  表示,通电前后构型用  $(r, \theta, z)$  坐标系表示。通电前后,薄膜中张紧力与弹簧恢复力

始终保持平衡。通电前后 DEAP 薄膜圆筒内外径分别由  $A'$ 、 $B'$  变成  $a$ 、 $b$ ,由于弹簧变形时外径基本不变,可以认为  $A' = a$ ,驱动器输出位移为  $l - l_p$ 。

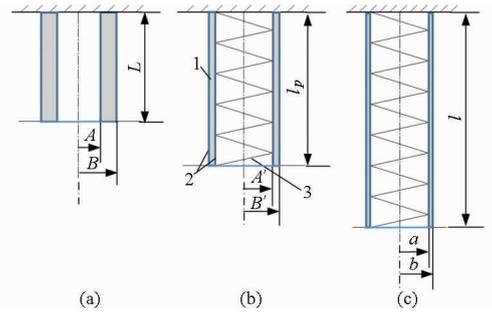


图 1 圆柱形驱动器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rolling actuator

(a) 初始形状 (b) 通电前形状 (c) 通电后形状  
1. DEAP 2. 柔性电极 3. 压缩弹簧

考察初始构型和通电后构型,驱动器轴向延伸率为  $\lambda_z = l/L$ ,假设 DEAP 薄膜为不可压缩弹性体,根据体积不变形得

$$R^2 - A^2 = \lambda_z (r^2 - a^2) \quad (1)$$

通电后圆筒外径为  $b = \sqrt{a^2 + \lambda_z^{-1}(B^2 - A^2)}$ ,则周向延伸率可以表示为  $\lambda_\theta(R) = r/R = \sqrt{a^2 + \lambda_z^{-1}(R^2 - A^2)}/R$ ,根据不可压缩假设得径向延伸率  $\lambda_r = 1/(\lambda_z \lambda_\theta)$ ,即

$$\lambda_r(R) = \frac{R}{\lambda_z \sqrt{a^2 + \lambda_z^{-1}(R^2 - A^2)}} \quad (2)$$

为方便分析,采用 neo-Hookean 模型来描述 DEAP 薄膜的非线性超弹性,并据此给出 DEAP 薄膜的机电耦合本构关系。施加电压  $U$  后,其周向应力  $\sigma_\theta$ 、径向应力  $\sigma_r$ 、轴向应力  $\sigma_z$  有关系<sup>[19]</sup>

$$\begin{cases} \sigma_\theta - \sigma_r = \mu(\lambda_\theta^2 - \lambda_r^2) - \varepsilon E_r^2 \\ \sigma_z - \sigma_r = \mu(\lambda_z^2 - \lambda_r^2) - \varepsilon E_r^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中  $E_r$ ——电场强度  $\mu$ ——材料参数  
 $\varepsilon$ ——介电常数

电场强度根据高斯定律,圆筒薄膜上的电场强度  $E_r$  为

$$E_r = \frac{D}{\varepsilon} = \frac{Q}{2\varepsilon\pi rL\lambda_z} \quad (4)$$

式中  $D$ ——电位移  $Q$ ——电荷量  
则薄膜两侧电压可以表示为

$$U = \int_a^b E_r dr = \frac{Q \ln(b/a)}{2\pi\varepsilon L \lambda_z} \quad (5)$$

由式(4)、(5)可得

$$E_r = \frac{U}{r \ln(b/a)} \quad (6)$$

分析圆筒薄膜微元的受力状况,可得周向、径向及轴向 3 个方向应力  $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_r$ 、 $\sigma_z$  的平衡方程

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (7)$$

驱动器薄膜内部轴向合力与弹簧恢复力平衡,可得方程

$$\int_a^b 2\pi r \sigma_z dr = k(l - l_0) \quad (8)$$

式中  $k$ ——弹簧弹性系数

解式(3)、(7)、(8)构成的微分代数方程组,结合边界条件  $\sigma_r(B) = 0$  可以得出圆柱形驱动器的初始平衡位置、通电后伸长量以及薄膜内部3个方向上的应力、延伸率、电场的分布情况。同时,还可以利用计算出的应力、延伸率和电场的分布情况对圆柱形驱动器薄膜材料的失效与电击穿进行预判。

## 1.2 转动关节工作原理

根据生物关节的主动肌——对抗肌驱动原理及圆柱形驱动器特点<sup>[20-21]</sup>,设计了一种DEAP驱动的单自由度转动关节,如图2所示。该关节由转动轮、两侧圆柱形驱动器、支撑轴等组成,其中驱动器均工作在受拉状态。初始状态时,两驱动器作用在转动轮上的拉伸力  $F_1$ 、 $F_2$  相互平衡。当驱动器1通电时,由于静电压力的作用,  $F_1$  减小,驱动器2收缩并拉动驱动器1伸长,导致  $F_1$  增大、 $F_2$  减小。当  $F_1'$  等于  $F_2'$  时,关节达到新的平衡,此时转动臂转过一定角度  $\alpha'$  (图2b)。驱动器1失电时,关节恢复至初始位置。驱动器2通电时,关节向右转动角度  $\alpha''$ ,如图2c所示。

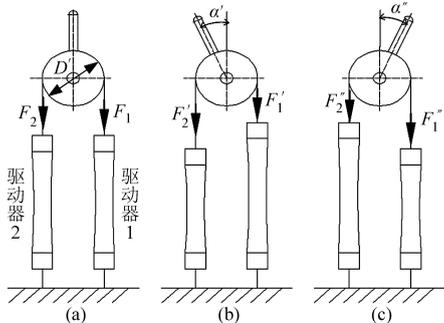


图2 转动关节工作原理图

Fig. 2 Working diagram of rotating joint

(a) 初始状态 (b) 左转 (c) 右转

设旋转关节两侧驱动器初始状态长度为  $l_{e0}$ ,驱动器1通电后伸长  $\Delta l$ ,驱动器2缩短  $\Delta l$ 。此时驱动器1、2的平衡关系表示为

$$\int_{a_1}^{b_1} 2\pi r \sigma_{z1} dr + k(l_{e0} + \Delta l - l_0) = \int_{a_2}^{b_2} 2\pi r \sigma_{z2} dr + k(l_{e0} - \Delta l - l_0) \quad (9)$$

式中  $a_1$ ——驱动器1薄膜内径

$a_2$ ——驱动器2薄膜内径

$b_1$ ——驱动器1薄膜外径

$b_2$ ——驱动器2薄膜外径

## 2 转动关节控制方法

### 2.1 转动关节输入输出关系

DEAP是一种超弹性材料,当输入不同激励电压,DEAP薄膜会产生不同的应变,导致驱动器产生不同的伸长量,对应不同的输出角度。

为实现关节输出角度的控制,需要建立输出角度与输入电压之间的关系。解式(3)、(7)、(8)、(9)构成的微分代数方程组,得到转动关节通电前后的驱动器平衡位置以及各层薄膜中的应力、应变分布情况,进而求出关节转动角度

$$\alpha = 2\Delta l/D' \quad (10)$$

式中  $D'$ ——转动半径

已知DEAP驱动器的初始拉伸量,可以据此建立关节输入电压与输出角度之间的关系,然而以上求解方法计算复杂,工作量大,不太适用于驱动器及转动关节的实时控制,且计算结果与采用的应变能方程形式关系较大。为了简化控制,考虑采用CMAC神经网络。

### 2.2 基于CMAC神经网络的控制方法

CMAC神经网络模仿人脑中小脑的结构和功能,最先应用于机械手控制<sup>[17]</sup>。由于是一种局部逼近网络,其局部权值修正性质使得它有较快的学习速度,非线性函数逼近精度高,对它进行在线的有导师学习就可以实现,可省去大量样本的准备工作 and 离线训练,适合于实时控制。

根据改进的CMAC控制方案<sup>[22-23]</sup>,可把PD控制器和CMAC神经网络结合一起学习系统的逆过程,而不是单独由CMAC神经网络来学习。关节控制方案如图3所示,每个控制周期可分为两步:

#### (1) 控制步

CMAC神经网络的输入向量为  $(\alpha_d(k+1), \alpha(k))$ ,其中:  $\alpha_d(k+1)$ 、 $\alpha(k)$  分别为关节期望角度与当前角度。PD控制器的输入为  $\alpha_d(k+1)$  与  $\alpha(k)$  之差。总控制信号为PD控制器输出  $u_p(k)$  和CMAC神经网络的输出  $u_c(k)$  之和。

#### (2) 权值修正步

由编码器获得关节当前角度  $\alpha(k)$ 。CMAC神经网络的输入向量为  $(\alpha(k+1), \alpha(k))$ ,PD控制器的输入是  $\alpha(k+1)$  与  $\alpha(k)$  的差。CMAC网络的权值修正公式为

$$\Delta w = \frac{\beta}{c} (u(k) - u'_c(k) - u'_p(k)) \quad (11)$$

式中  $\beta$ ——步长  $c$ ——泛化常数

权值修正后,进行下一控制步。其中控制步和权值修正步中的CMAC神经网络是同一网络。

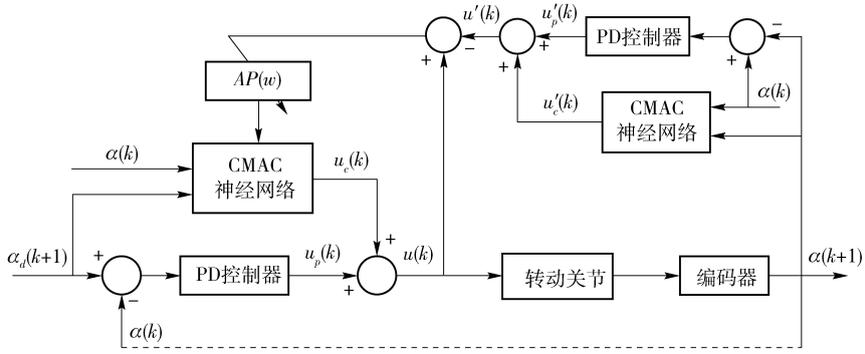


图3 转动关节控制方案框图

Fig. 3 Controlling schematic diagram of rotating joint

经过学习训练,CMAC网络与PD控制器的输出迭加后产生的电压控制转动关节,实现边学习边控制。与上述采用DEAP数值分析方法相比,复杂计算转变为简单的神经网络映射过程,保证了控制的实时性,且不依赖于DEAP模型的建立。

### 3 转动关节控制试验与分析

#### 3.1 转动关节原型

图4所示为试验用转动关节,其中由编码器获得关节的转动角度。转动轮通过轴承安装在支撑轴上,以减小摩擦力。为保证驱动器的卷绕质量,采用图5所示的半自动卷绕装置,在卷绕轴的两端采用两套齿轮齿条传动保证卷绕轴两端同步向前转动,使DEAP膜均匀地卷绕在弹簧和端盖上。驱动器两端套上热缩套管并加热使其收缩,防止端盖上的薄膜轴向收缩。弹簧刚度取为0.02 N/mm,初始长度为120 mm,弹簧外径为8.25 mm,电活性聚合物薄膜预拉伸率为300% × 500%,卷绕4圈。

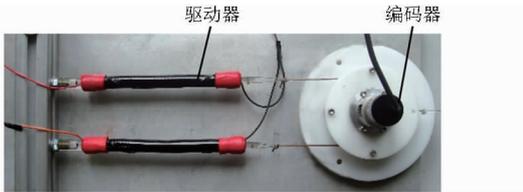


图4 转动关节控制试验装置

Fig.4 Controlling device of rotating joint

为获得转动关节的负载-角度曲线,采用图6a所示测试方法。由编码器确定关节角度零位,以砝码为负载,给下侧驱动器通电,该驱动器伸长,上侧驱动器缩短,带动负载相对初始零位转动一定角度。驱动器通电电压为3 600 V,负载特性如图6b所示。随着负载逐渐增大,关节转动角度越来越小。

#### 3.2 转动关节控制试验

试验装置由转动关节、采集卡、高压直流电源、控制计算机等组成。采集卡可产生0~5 V的输出

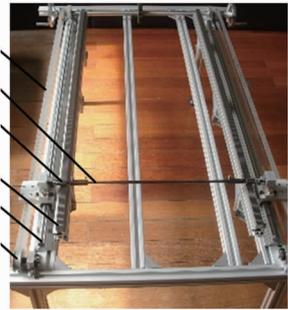


图5 圆柱形驱动器卷绕装置

Fig.5 Rolling device of cylindrical actuator

- 1. 同步带 2. 卷绕轴 3. 齿轮 4. 齿条 5. 滑轨 6. 带轮

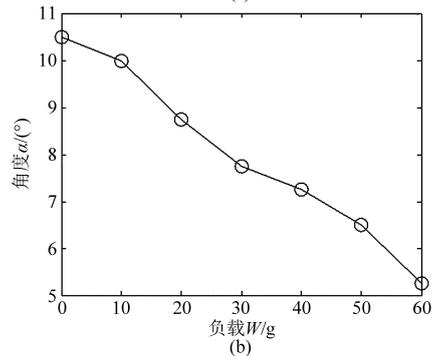
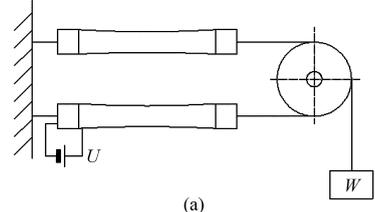


图6 关节的负载特性测试

Fig.6 Loading characteristic curve of joint

电压,控制高压直流电源产生0~10 kV的高压。采用1只高压电源模块,每个驱动器采用2只高压干簧继电器控制,如图7所示。微控制器通过驱动电路控制继电器1闭合时,给驱动器通电。当继电器1断开时,驱动器上的电荷通过内部泄漏需要很长时间,因此通过控制继电器2闭合使驱动器放电,驱动器快速复位,此时继电器1必须先断开,以免短路。

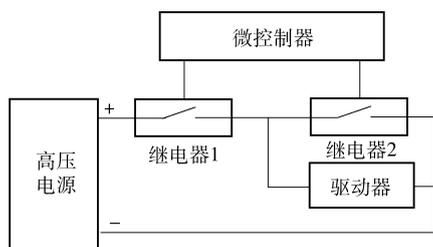


图 7 关节驱动器控制硬件框图

Fig. 7 Hardware block diagram of joint system

将驱动器关节输出转角与电压关系作为 PD 控制器比例与微分环节的调节参考,对  $K_p$ 、 $K_d$  两项参数进行整定,得到当  $K_p = 0.38$ 、 $K_d = 0.3$  时控制效果较好。采用的 CMAC 控制器参数为:泛化常数  $c = 80$ ,存储空间数目 160,学习步长  $\beta = 0.2$ 。

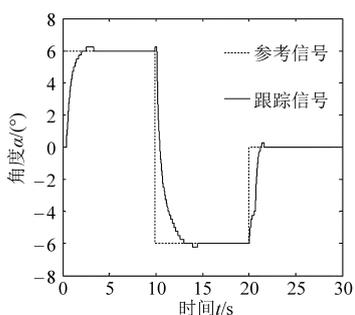


图 8 阶跃参考信号跟踪试验结果

Fig. 8 Tracking experiment of step signal

首先采用阶跃参考信号进行跟踪控制试验 (图 8),参考信号的表达式为

$$\alpha_r(t) = \begin{cases} 6^\circ & (0 \leq t < 20 \text{ s}) \\ -6^\circ & (20 \leq t < 40 \text{ s}) \\ 0^\circ & (t \geq 40 \text{ s}) \end{cases} \quad (12)$$

当参考信号由  $0^\circ$  到  $6^\circ$  时,此时误差较大,主要由 PD 控制器控制。经过一段时间训练后,误差减小,两者产生的控制量逐渐逼近参考信号所需要的电压,关节角度超调量小,此时可以认为网络已逼近了关节的逆模型,PD 控制器输出量很小,但响应时间较长,约为 3 s。当参考信号由  $6^\circ$  到  $-6^\circ$  时,经过一段时间学习后,关节转动角度稳定在参考信号附近,稳态误差在  $\pm 0.25^\circ$  内。

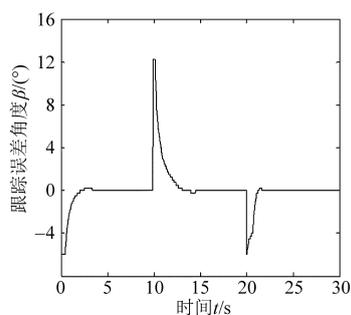


图 9 所示为参考信号为正弦信号的转动关节控制试验结果,其中参考信号表达式为

$$\alpha_r(t) = 6\sin\left(\frac{\pi}{20}t\right) \quad (13)$$

观察正弦参考信号控制效果可知,控制方法对转动角度输出的整体控制效果较好:控制初期,关节的角度跟踪误差较大,随着控制循环次数的不断增加,由于 CMAC 学习过程的不断进行,控制误差有逐步减小的趋势。然而,关节的转角输出滞后于输入参考信号,对关节转动角度曲线进行拟合,得到曲线表达式为  $\alpha'(T) = 6.058\sin(0.1604T - 0.277)$ ,该曲线与控制信号间相位差约为  $15.8^\circ$ ,跟踪误差

范围为  $(-2.823^\circ, 2.249^\circ)$ 。

### 3.3 试验分析

从试验可以看出,转动关节对阶跃参考信号的响应时间较长,与正弦参考信号间存在明显的相位差,主要是受驱动器的动态响应特性、高压电源的电压转换速率及充电时间等因素影响。

关节驱动器在通电后,DEAP 膜两表面正负电荷的吸引会产生静电压力作用在膜上,DEAP 在工作时处于一个三维受力状态,且 DEAP 是一种具有粘性行为的超弹性材料,因此关节的响应速度与 DEAP 驱动器的动态响应特性有很大关系,需要对圆柱形驱动器的动态响应特性进行深入研究。

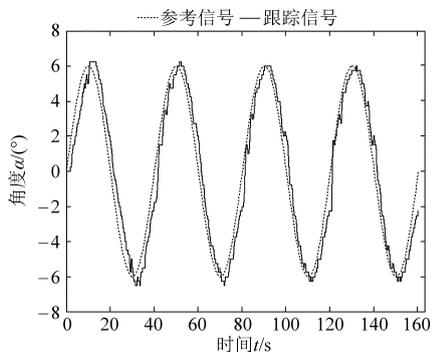
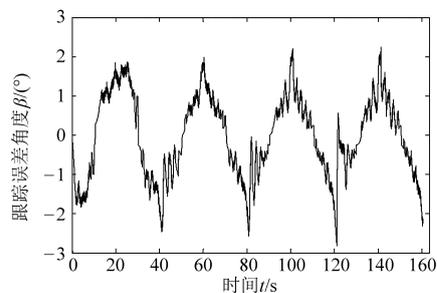


图 9 正弦参考信号跟踪试验结果

Fig. 9 Tracking experiment of sine signal



试验中采用电源为可外控的高压直流电源,外控电压  $0 \sim 5 \text{ V}$ ,电源输出电压为  $0 \sim 10 \text{ kV}$ 。高压直流电源的电压转换速率(相对高压放大器)较低,因此输出与输入控制信号间存在相位差。当输入控制信号  $V = 1.5 \sin(\pi t/20) + 1.5$  时,将输出电压信号进行拟合,输出与输入之间的相位差约为  $3.57^\circ$ 。

由于 DEAP 膜是一种绝缘材料,当其两侧涂上电极并通断电时,相当于给电容进行充放电,且所用直流稳压电源的最大输出电流限定为  $5 \text{ mA}$ ,因此也需要充放电时间才能使 DEAP 膜上的电压达到需要的电压。

此外,由于驱动器电极的涂抹仍是由手工完成,电极涂抹的好坏会影响 DEAP 膜的电压作用面积,对驱动器的动作速度也有影响。因此,要提高驱动器动作性能,将采用喷涂法涂敷电极。

## 4 结 论

(1) 基于生物关节的驱动原理,结合圆柱形驱动器的结构特点,构建了基于圆柱形驱动器的转动关节原型,分析了关节的工作原理。

(2) 对 DEAP 驱动器进行建模,分析了 DEAP 机电耦合模型、几何方程、平衡方程及边界条件,通过对方程组的迭代求解可得到输入电压与输出关节角度之间的关系,但计算复杂耗时。

(3) 采用 CMAC 神经网络与 PD 控制器复合控制的方法,实现关节输出角度与输入电压之间的非线性映射。对阶跃和正弦参考信号进行了跟踪试验,试验结果表明响应时间较长,跟踪信号与参与信号之间存在一定相位差,并对其主要原因进行了分析,有利于进一步研究提高关节控制效果。

## 参 考 文 献

- 1 Dotson Z S. Material selection for the actuator design for a biomimetic rolling robot conducive to miniaturization [D]. Rochester, NY: Rochester Institute of Technology, 2009.
- 2 Nguyen Q S, Heo S, Park H C, et al. Performance evaluation of an improved fish robot actuated by piezoceramic actuators[J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(3): 1-8.
- 3 Kornbluh R, Pelrine R, Prahlad H. Electroactive polymers: an emerging technology for MEMS MEMS/MOEMS components and their applications[C]//Siegfried W. Janson. Proceedings of SPIE MEMS/MOEMS Components and Their Applications, San Jose, CA: SPIE, 2004: 13-27.
- 4 Brochu P, Pei Q B. Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles [J]. Macromolecular Rapid Communications, 2010, 31(1):10-36.
- 5 Deepak T, Christopher D R, William M K, et al. Soft robotics: biological inspiration, state of the art, and future research[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2008, 5(3): 99-117.
- 6 Pelrine R, Kornbluh R, Pei Q, et al. Dielectric elastomer artificial muscle actuators; toward biomimetic motion[C]//Yoseph Bar-Cohen. Proceeding of SPIE Smart Structures and Materials, San Diego, CA: SPIE, 2002: 126-137.
- 7 Wang Huaming, Zhu Yinlong, Zhao Dongbiao, et al. Performance investigation of cone dielectric elastomer actuator using taguchi method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(4): 685-692.
- 8 Kovacs G, Lochmatter P, Wissler M. An arm wrestling robot driven by dielectric elastomer actuators[J]. Smart Materials and Structures, 2007, 16(2): S306-S317.
- 9 Lochmatter P, Kovacs G. Design and characterization of an actively deformable shell structure composed of interlinked active hinge segments driven by soft dielectric EAPs[J]. Sensors and Actuators A, 2008, 141(2): 588-597.
- 10 Jordi C, Michel S, Kovacs G, et al. Scaling of planar dielectric elastomer actuators in an agonist-antagonist configuration[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 161(1-2): 182-190.
- 11 Chuc N H, Park J K, Vuong N H L, et al. Multi-jointed robot finger driven by artificial muscle actuator[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2009: 587-593.
- 12 朱银龙,王化明,赵东标,等. 基于负刚度预载荷机构的锥形介电型 EAP 驱动器研究[J]. 航空学报, 2011, 32(9): 1746-1754. Zhu Yinlong, Wang Huaming, Zhao Dongbiao, et al. Research of conically-shaped dielectric electroactive polymer actuators based on negative stiffness preload mechanism[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(9): 1746-1754. (in Chinese)
- 13 Suo Z G, Zhao X H, Greene W H. A nonlinear field theory of deformable dielectrics[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2008, 56(2): 467-486.
- 14 Goulbourne N C, Mockensturm E M, Frecker M I. Electro-elastomers: large deformation analysis of sili-cone membranes[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(9): 2609-2626.
- 15 Albus J S. A new approach to manipulator control; the cerebellar model articulation controller[J]. ASME Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, 1975, 63(3): 220-227.
- 16 Yeh M F. Single-input CMAC control system[J]. Neurocomputing, 2007, 70(16-18): 2638-2644.

- [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(8): 167–173. (in Chinese)
- 7 Ivano I, Dino A, Arianna M, et al. Modeling and experimental validation of a piezoelectric micropump with novel no-moving-part valves[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 133(1): 128–140.
  - 8 Foster F K, Bardell R L, Blanchard A P, et al. Micropumps with fixed valves: US,5876187[P]. 1999–03–02.
  - 9 Xia Qixiao, Zhang Jianhui, Lei Hong, et al. Analysis on flow field of the valve-less piezoelectric pump with two inlets and one outlet and a rotating unsymmetrical slope element[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 25(3): 474–483.
  - 10 胡笑奇, 张建辉, 黄毅, 等. 仿尾鳍式变截面摆动振子无阀压电叠堆泵的结构设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1334–1343.  
Hu Xiaochi, Zhang Jianhui, Huang Yi, et al. Structure design of caudal-fin-type piezoelectric-stack pump with variable cross-section oscillating vibrator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(6): 1334–1343. (in Chinese)
  - 11 Singhal V, Garimella S, Murthy J. Low Reynolds number flow through nozzle-diffuser elements in valveless micropumps[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 113(2): 226–235.
  - 12 何秀华, 张睿, 杨嵩, 等. V型无阀压电泵的流场分析[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(10): 218–221.  
He Xiuhua, Zhang Rui, Zhang Song, et al. Analysis of the flow field of the valveless piezoelectric pump with V-shape tubes [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(10): 218–221. (in Chinese)
  - 13 张建辉, 路计庄, 夏齐霄, 等. 细胞或高分子输送用“Y”形流管无阀压电泵的工作原理及流量特性[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(9): 92–99.  
Zhang Jianhui, Lu Jizhuang, Xia Qixiao, et al. Working principle and characteristics of valve-less piezoelectric pump with Y-shape tubes for transporting cells and macromolecule[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(9): 92–99. (in Chinese)
  - 14 纪晶, 张建辉, 季瑞南, 等. 半球缺纵向排列对半球缺阻流体无阀泵的影响[J]. *振动、测试与诊断*, 2014, 34(6): 1072–1079.  
Ji Jing, Zhang Jianhui, Ji Ruinan, et al. Effect of hemisphere-segments longitudinal arrangement on valve-less piezoelectric pump [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2014, 34(6): 1072–1079. (in Chinese)
  - 15 纪晶, 张建辉, 陈道根, 等. 无阀压电泵半球缺阻流体横向排列流阻干扰特性研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9): 340–346.  
Ji Jing, Zhang Jianhui, Chen Daogen, et al. Research on flow resistance interference property of hemisphere-segment arranging in transverse for valve-less piezoelectric pump with hemisphere-segment [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 340–346. (in Chinese)
  - 16 纪晶, 胡彩旗. 无阀压电泵流阻测试装置研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 322–327.  
Ji Jing, Hu Caiqi. Flow resistance testing device of valve-less piezoelectric pump [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 322–327. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 338 页)

- 17 Miller W T, Glanz F H, Kraft L G. Application of a general learning algorithm to the control of robotic manipulators [J]. *International Journal of Robot and Resource*, 1987, 6(2): 84–98.
- 18 Li Y M, Leong S H. Kinematics control of redundant manipulators using a CMAC neural network combined with a genetic algorithm [J]. *Robotica*, 2004, 22(6): 611–621.
- 19 Zhao X, Hong W, Suo Z. Electromechanical hysteresis and coexistent states in dielectric elastomers [J]. *Physical Review B*, 2007, 76(13): 134113.
- 20 Martinez-Villalpando E C, Herr H. Agonist-antagonist active knee prosthesis: a preliminary study in level-ground walking [J]. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 2009, 46(3): 361–374.
- 21 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(6): 754–758.  
Wu Meng, Wang Huaming, Zhu Yinlong, et al. Experiments and analysis of cylindrical dielectric elastomer actuators [J]. *Robot*, 2010, 32(6): 754–758. (in Chinese)
- 22 Lin C C, Chen F C. Improved CMAC neural network control scheme [J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(2): 157–158.
- 23 李慧, 刘星桥, 李景. 异步电动机调速系统自适应辨识的 CMAC-ADRC 算法 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 358–365.  
Li Hui, Liu Xingqiao, Li Jing. CMAC-ADRC algorithm based on adaptive parameter identification for asynchronous motor speed control system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 358–365. (in Chinese)